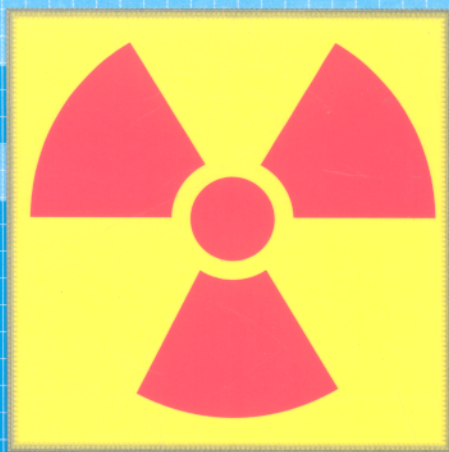


AN TOÀN BỨC XẠ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG





1956 - 2006

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI
50 NĂM XÂY DỰNG VÀ PHÁT TRIỂN
PHÙNG VĂN DUÂN

AN TOÀN BỨC XẠ
BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT
HÀ NỘI

LỜI NÓI ĐẦU

Cùng với sự phát triển của khoa học và kỹ thuật, các nguồn bức xạ ion hoá được sử dụng ngày càng nhiều trong hàng loạt lĩnh vực như: công nghiệp, nông nghiệp, sinh học, xây dựng, thăm dò và khai thác tài nguyên, y tế, khảo cổ, bảo tồn di vật, cảnh giới, bảo mật, tạo vật liệu mới, xử lý nâng cao chất lượng sản phẩm, bảo vệ môi trường .v.v. Việc sử dụng các nguồn bức xạ ion hoá ngày càng trở nên phổ biến hơn và thường xuyên hơn.

Ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với cơ thể sống và đối với môi trường có ý nghĩa tích cực hay tiêu cực, ở mức không đáng kể hay đáng kể, đều phụ thuộc vào nhiều yếu tố, mà những yếu tố chủ quan – trong đó có nhận thức và thái độ của chúng ta – luôn luôn có ý nghĩa rất quan trọng.

Cơ thể con người không đủ nhạy để cảm nhận tức thời được hết tác động của các loại bức xạ ion hoá. Song, những hiểu biết về liều lượng học bức xạ có thể bổ sung cho chúng ta thêm một “giác quan” mới để xác định chúng. Vì vậy các phương pháp xác định liều lượng bức xạ và bảo vệ an toàn bức xạ phải được áp dụng ở bất kỳ nơi nào có sử dụng nguồn bức xạ ion hoá. Bất kỳ người nào làm việc với các nguồn bức xạ ion hoá, đều phải nắm vững những kiến thức cơ bản về an toàn bức xạ và những nguyên tắc làm việc với chúng để bảo vệ mình, bảo vệ những người xung quanh và bảo vệ môi trường. Sự vi phạm các nguyên tắc làm việc với nguồn bức xạ ion hoá có thể dẫn tới những hậu quả nghiêm trọng hoặc những bệnh tật đôi khi vô phương cứu chữa. Việc thực hiện nghiêm ngặt các nguyên tắc về bảo vệ an toàn bức xạ cho phép chúng ta làm việc lâu dài và an toàn với mọi nguồn bức xạ ion hoá khác nhau.

Ở Việt Nam, bức xạ ion hoá đã bắt đầu được sử dụng từ những năm

1923–1924 để chữa bệnh u bướu. Ngày nay bức xạ iôn hoá đang được sử dụng rộng rãi không những trong y tế mà cả trong nhiều lĩnh vực kinh tế, đời sống và môi trường. Chỉ tính riêng trong lĩnh vực công nghiệp, ở nước ta hiện nay đã có hàng nghìn nguồn bức xạ iôn hoá đang ngày đêm hoạt động phục vụ sản xuất. Bởi vậy, việc tăng cường hiểu biết về an toàn bức xạ bảo vệ môi trường để áp dụng vào thực tế đang ngày càng trở nên cấp bách hơn. Trong khi đó tài liệu tiếng Việt về những vấn đề thuộc hai lĩnh vực lớn nhưng liên quan với nhau rất chặt chẽ là *xác định liều lượng bức xạ* và *bảo vệ an toàn bức xạ* hầu như còn rất hiếm hoi kể cả trong lĩnh vực đào tạo, cũng như trong ứng dụng thực tế.

Cuốn sách "*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*" ra mắt bạn đọc trong hoàn cảnh này, nhằm đáp ứng nhu cầu thực tế cấp thiết ở nước ta. Sách được biên soạn dựa trên cơ sở các bài giảng của tác giả trong nhiều năm về *xác định liều lượng bức xạ* và *bảo vệ an toàn bức xạ* dành cho sinh viên chuyên ngành Kỹ thuật Hạt nhân và Vật lý Môi trường tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Phần thực hành bao gồm nhiều bài tập và thí nghiệm về xác định liều lượng và bảo vệ an toàn bức xạ sẽ được trình bày trong một tài liệu riêng.

Tác giả hy vọng rằng cuốn sách "*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*" sẽ giúp bạn đọc có một cách nhìn nhận đầy đủ hơn đối với việc sử dụng các loại nguồn bức xạ iôn hoá. Cách nhìn đó là: *không sợ hãi, nhưng cũng không chủ quan và không được khinh thường khi tiếp xúc với nguồn bức xạ iôn hoá; cũng giống như chúng ta "dùng lửa, nhưng không sợ lửa và không đùa với lửa!"*. Tác giả cũng hy vọng rằng cuốn sách sẽ trang bị cho bạn đọc những điều cần biết để tự bảo vệ mình, bảo vệ mọi người xung quanh và bảo vệ môi trường, góp phần đẩy mạnh ứng dụng năng lượng nguyên tử vào mục đích hoà bình ở nước ta.

Cuốn "*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*" là một tài liệu cần thiết cho sinh viên đại học, cao học và nghiên cứu sinh thuộc các chuyên ngành về Vật lý Hạt nhân, Kỹ thuật Hạt nhân và Vật lý Môi trường. Tài liệu này còn có thể phục vụ đắc lực cho những bạn đọc làm công tác nghiên cứu, ứng dụng hoặc quản lý ở cơ sở sản xuất, cơ sở nghiên cứu khoa học kỹ thuật, hoặc cơ sở y tế – những nơi có liên quan tới các loại nguồn bức xạ iôn hoá (như: nguồn đồng vị phóng

xạ, máy phát tia X, máy gia tốc hoặc lò phản ứng hạt nhân). Cuốn sách đồng thời còn có thể là cẩm nang bổ ích cho những người làm công tác quản lý về môi trường và về an toàn bức xạ.

Nếu bạn đọc mới làm quen với lĩnh vực an toàn bức xạ bảo vệ môi trường, thì mời bạn bắt đầu đọc từ Phụ lục 8 để sách này phục vụ bạn được hiệu quả nhất.

Nếu bạn đọc tìm thấy trong sách này một điều bổ ích cho mình, thì tác giả cho rằng cuốn sách nhỏ này đã hoàn thành nhiệm vụ của nó vì đã đáp ứng được một phần quan tâm của bạn đọc trong nỗ lực tăng cường an toàn bức xạ, bảo vệ môi trường ở nước ta.

Ưu tiên hàng đầu của tác giả khi thể hiện nội dung của cuốn sách này là: cố gắng làm cho nó dễ hiểu, dễ nhớ, dễ sử dụng, để bạn đọc đỡ tốn thời gian nhất, đặc biệt là đối với những bạn đọc đang hàng ngày bận rộn trong công việc quản lý hoặc công việc chuyên môn. Cũng bởi vậy, tất cả những chỉ số cần thiết trong các công thức đều được ghi đầy đủ bằng tiếng Việt, thứ nguyên của các đại lượng trong các công thức ứng dụng ở chương 6 đều được ghi rõ.

Nhân dịp xuất bản sách “*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*”, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc Giáo Sư Alêxandr Mikhailovich Liusko (Trường Đại học Tổng hợp Quốc gia Belarus, Minsk) là người đã khai tâm cho tác giả về lĩnh vực an toàn bức xạ bảo vệ môi trường, đồng thời tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn đặc biệt sâu sắc Giáo sư Lê Băng Sương (Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, cựu Chủ nhiệm Bộ môn Vật lý và Kỹ thuật Hạt nhân liên tục 27 năm từ 1969 đến 1995) là người luôn cổ vũ tác giả chú tâm vào lĩnh vực này.

Tác giả đặc biệt cảm ơn Giáo Sư Trần Đức Thiệp và Giáo Sư Nguyễn Văn Đỗ là hai người bạn đồng nghiệp lâu năm đã dành thời gian đọc kỹ bản thảo cuốn sách này và có những ý kiến tâm đắc.

Đối với tác giả, sách “*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*” là món quà mừng mẹ tròn một trăm tuổi – người đã suốt đời chăm chút, động viên tác giả không ngừng học tập vươn lên trong lĩnh vực chuyên môn.

Tác giả cảm ơn bạn đọc đã dành một phần thời gian quý báu của mình để tìm hiểu cuốn sách “*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*” và mong được cùng tham gia giải quyết những vấn đề chuyên môn cụ thể thuộc lĩnh vực này đang gây khó khăn trong công việc thực tế của bạn đọc.

Do điều kiện hiểu biết có hạn, tài liệu tham khảo thiếu thốn, ở nước ta lại chưa có từ điển tiếng Việt trong các lĩnh vực kỹ thuật hạt nhân và an toàn bức xạ, chắc chắn rằng tài liệu này còn mắc phải không ít khiếm khuyết. Vì vậy tác giả rất mong nhận được nhiều góp ý xây dựng của bạn đọc. Mọi góp ý xây dựng của bạn đọc sẽ được tác giả đón nhận với lòng biết ơn chân thành.

Phùng Văn Duân

Bộ môn Kỹ thuật Hạt nhân và Vật lý Môi trường

Viện Vật lý Kỹ thuật

Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

E-mail: pvduan@mail.hut.edu.vn

MỤC LỤC

	<i>Trang</i>
Lời nói đầu	3
Mục lục	7
Chương 1. Các khái niệm và đại lượng cơ bản trong bảo vệ an toàn bức xạ	10
1.1. Biến đổi năng lượng của bức xạ trong môi trường	11
1.2. Số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của môi trường	19
1.3. Cường độ bức xạ	23
1.4. Liều lượng bức xạ và đơn vị đo	26
1.5. Tương quan giữa suất liều bức xạ, cường độ bức xạ và hệ số truyền năng lượng	41
1.6. Quy luật làm yếu suất liều bức xạ	44
Chương 2. Bức xạ iôn hoá và cơ thể sống	48
2.0. Bức xạ iôn hoá với vấn đề môi trường	49
2.1. Bức xạ iôn hoá trong môi trường	50
2.2. Đường trao đổi chất phóng xạ từ môi trường vào cơ thể sống	68
2.3. Ảnh hưởng sinh học của bức xạ iôn hoá	70
2.4. Một số tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ	78
Chương 3. Xác định liều lượng bức xạ lượng tử	89
3.1. Phương pháp iôn hoá	91
3.2. Phương pháp nhũ tương ảnh	124
3.3. Các phương pháp phát quang	138
3.4. Phương pháp bán dẫn	172
3.5. Phương pháp hoá học	180
3.6. Phương pháp nhiệt	188
3.7. Xác định liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao	196

Chương 4. Xác định liều lượng bức xạ nơtron	207
4.1. Một số đặc điểm	
trong xác định liều lượng và bảo vệ an toàn bức xạ nơtron	209
4.2. Đo suất liều nơtron nhanh bằng buồng iôn hoá	227
4.3. Đo suất liều nơtron nhanh bằng ống đếm tỷ lệ	242
4.4. Đo liều nơtron nhanh bằng phương pháp kích hoạt	251
4.5. Đo liều nơtron bằng phương pháp đếm vết	269
4.6. Phương pháp nhũ tương ảnh	280
4.7. Phương pháp nhấp nháy	289
4.8. Sử dụng hiệu ứng làm chậm để đo liều nơtron	290
4.9. Phương pháp hoá học	292
4.10. Đo liều nơtron bằng dụng cụ đo liều gamma cá nhân	294
4.11. Đánh giá liều nơtron do sự cố hoặc tai nạn hạt nhân	296
Chương 5. Xác định liều lượng bức xạ các hạt có điện tích	309
5.1. Suất liều gây bởi chùm electron	310
5.2. Liều gây bởi nguồn điểm phóng xạ beta	313
5.3. Xác định liều beta bằng thực nghiệm	316
5.4. Liều gây bởi đồng vị phóng xạ xâm nhập vào cơ thể	325
Chương 6. Tính toán và thiết kế trong bảo vệ an toàn bức xạ	335
6.1. Bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử	337
6.2. Bảo vệ an toàn bức xạ nơtron	380
6.3. Vùng bảo vệ an toàn bức xạ	417
6.4. Một số quy định khi làm việc với nguồn phóng xạ hở	420
6.5. Những điều cần chú ý khi làm việc với nguồn bức xạ mạnh	423
6.6. Yêu cầu chung đối với môi cơ sở bức xạ	425
Thay lời kết luận	426
Tài liệu tham khảo	428
Phụ lục 1. Một số đại lượng và đơn vị dùng trong an toàn bức xạ	432
Phụ lục 2. Các loại nguồn bức xạ iôn hoá	435
Phụ lục 3. Các bảng tính sẵn bề dày làm yếu bức xạ gamma	
trong một số vật liệu bảo vệ thường dùng	441

Phụ lục 4. Gợi ý tóm tắt các chương	454
PL - 4.1. Gợi ý tóm tắt chương 1	454
PL - 4.2. Gợi ý tóm tắt chương 2	455
PL - 4.3. Gợi ý tóm tắt chương 3	456
PL - 4.4. Gợi ý tóm tắt chương 4	459
PL - 4.5. Gợi ý tóm tắt chương 5	461
PL - 4.6. Gợi ý tóm tắt chương 6	462
Phụ lục 5. Thành phần hoá học của một số chất và hợp chất	466
Phụ lục 6. Dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức xạ ion hoá	467
Phụ lục 7. Về quan hệ giữa các đại lượng	
dùng trong bảo vệ an toàn bức xạ	469
Phụ lục 8. Gợi ý cho bạn đọc mới làm quen	
với lĩnh vực an toàn bức xạ bảo vệ môi trường	474

CHƯƠNG 1

CÁC KHÁI NIỆM VÀ ĐẠI LƯỢNG CƠ BẢN TRONG BẢO VỆ AN TOÀN BỨC XẠ

Chương 1 giới thiệu các khái niệm và đại lượng cơ bản được sử dụng trong lĩnh vực an toàn bức xạ bảo vệ môi trường. Nắm vững nội dung chương này sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho việc tìm hiểu các chương tiếp theo.

Nội dung của chương 1 được trình bày theo dàn ý sau đây:

- 1.1. Biến đổi năng lượng của bức xạ trong môi trường (tr. 11)
 - 1.1.1. Hệ số truyền năng lượng của bức xạ lượng tử trong môi trường (11)
 - 1.1.2. Ý nghĩa vật lý của hệ số truyền năng lượng (16)
 - 1.1.3. Trạng thái cân bằng điện tử (17)
- 1.2. Số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của môi trường (19)
 - 1.2.1. Định nghĩa (19)
 - 1.2.2. Ý nghĩa vật lý (19)
 - 1.2.3. Xác định số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của hợp chất (20)
- 1.3. Cường độ bức xạ (23)
 - 1.3.1. Định nghĩa cường độ bức xạ (23)
 - 1.3.2. Quy luật giảm cường độ bức xạ (23)
- 1.4. Liều lượng bức xạ và đơn vị đo (26)
 - 1.4.1. Liều hấp thụ bức xạ (26)
 - 1.4.2. Khái niệm KERMA (27)
 - 1.4.3. Liều chiếu bức xạ lượng tử (28)
 - 1.4.4. Hiệu suất sinh học tương đối của bức xạ (31)

- 1.4.5. Trọng số của bức xạ iôn hoá (32)
- 1.4.6. Liều tương đương (35)
- 1.4.7. Liều hiệu dụng (36)
- 1.4.8. Liều hiệu dụng tập thể (37)
- 1.4.9. Các khái niệm về liều bị nhiễm (38)
- 1.4.10. Trọng số của các cơ quan hoặc tổ chức trong cơ thể (39)
- 1.4.11. Đối chiếu các đơn vị đo của liều và suất liều bức xạ (41)
- 1.5. Tương quan giữa suất liều, cường độ bức xạ và hệ số truyền năng lượng (41)
- 1.6. Quy luật làm yếu suất liều bức xạ (44)

1.1. BIẾN ĐỔI NĂNG LƯỢNG CỦA BỨC XẠ TRONG MÔI TRƯỜNG

1.1.1. Hệ số truyền năng lượng của bức xạ lượng tử trong môi trường

Khi bức xạ lượng tử tương tác với môi trường, có thể xảy ra ba hiệu ứng là hấp thụ quang điện, tán xạ Compton, và, tạo cặp electron-pôzitron. Tuy nhiên, trong các vùng năng lượng mà chúng ta quan tâm, thường chỉ có hai trong số ba hiệu ứng này có thể xảy ra đồng thời; đó là:

- Hiệu ứng hấp thụ quang điện và tán xạ Compton: thường có thể xảy ra đồng thời trong vùng năng lượng thấp;
- Hiệu ứng tán xạ Compton và tạo cặp electron-pôzitron: thường có thể xảy ra đồng thời trong vùng năng lượng tương đối cao;
- Trong vùng năng lượng chuyển tiếp giữa hai vùng vừa nêu trên: thường chỉ xảy ra hiệu ứng tán xạ Compton.

Trong quá trình hấp thụ quang điện: một phần năng lượng của lượng tử được biến đổi thành động năng của êlectrôn quang-điện, phần còn lại được biến đổi thành năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp (tức là của bức xạ Roentgen đặc trưng). Do đó, *hệ số hấp thụ quang điện* τ được thể hiện ở dạng tổng của hai thành phần như sau:

$$\tau = \tau_k + \tau_s \quad (1.1-1)$$

trong đó τ_k – hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành động năng của các êlectrôn; τ_s – hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp.

Trong phần lớn các trường hợp quan trọng của lĩnh vực đo liều lượng bức xạ lượng tử, có thể coi rằng toàn bộ năng lượng E_γ của lượng tử ban đầu trong quá trình hấp thụ quang điện được biến đổi thành động năng của các êlectrôn, nghĩa là có thể coi rằng:

$$\tau \cong \tau_k \quad (1.1-2)$$

Trong quá trình tán xạ Compton: một phần năng lượng của lượng tử ban đầu được biến đổi thành động năng của các êlectrôn lùi, phần còn lại – được biến đổi thành năng lượng của lượng tử tán xạ. Do đó, *hệ số tán xạ Compton* σ được thể hiện ở dạng tổng của hai thành phần như sau:

$$\sigma = \sigma_k + \sigma_s \quad (1.1-3)$$

trong đó σ_k – hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành động năng của các êlectrôn lùi; σ_s – hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành năng lượng của lượng tử thứ cấp.

Trong quá trình tạo cặp êlectrôn-pôzitron: toàn bộ năng lượng E_γ của lượng tử ban đầu bị hấp thụ để tạo nên hai hạt êlectrôn và pôzitron với tổng động năng E_{2e} bằng:

$$E_{2e} = E_\gamma - 2m_e c^2 = E_\gamma - 1,022 \text{ MeV}.$$

Hạt pôzitron vừa được sinh ra lại chuyển động trong môi trường và tương tác với môi trường đó, nên động năng của nó bị giảm dần cho tới khi có giá trị bằng năng lượng của chuyển động nhiệt; tiếp đó, nó sẽ tham gia vào hiệu ứng huỷ pôzitron bằng cách tái hợp với một êlectrôn tự do, làm sinh ra hai lượng tử chuyển động ngược chiều nhau và có năng lượng như nhau bằng $m_e c^2 = 0,511$ MeV. Do vậy, *hệ số tạo cặp* κ được thể hiện ở dạng tổng của hai thành phần như sau:

$$\kappa = \kappa_k + \kappa_s \quad (1.1-4)$$

trong đó κ_k – hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành động năng của các êlectrôn và pôzitron; κ_s – hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành năng lượng của các lượng tử thứ cấp.

Như vậy, trong các quá trình tương tác vừa nêu trên một phần năng lượng của lượng tử ban đầu được truyền cho môi trường ở dạng động năng của êlectrôn và pôzitron, còn một phần năng lượng của lượng tử này được biến đổi thành năng lượng của lượng tử thứ cấp. Do đó chùm bức xạ lượng tử sẽ bị làm yếu đi khi nó xuyên vào lớp vật chất. Sự làm yếu chùm bức xạ lượng tử được đặc trưng bằng *hệ số làm yếu* μ có giá trị bằng tổng của hệ số hấp thụ quang điện, hệ số tán xạ Compton và hệ số tạo cặp:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa = \mu_k + \mu_s \quad (1.1-5)$$

$$\text{trong đó} \quad \mu_k = \tau_k + \sigma_k + \kappa_k \quad (1.1-6)$$

$$\mu_s = \tau_s + \sigma_s + \kappa_s \quad (1.1-7)$$

Ở đây, μ được gọi là *hệ số làm yếu dài* (tức là hệ số làm yếu tính theo một đơn vị đường đi của lượng tử trong lớp vật chất); hệ số μ_s đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của bức xạ lượng tử ban đầu thành năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp; hệ số μ_k đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của bức xạ lượng tử ban đầu thành động năng của các êlectrôn và pôzitron trong quá trình tương tác của bức xạ lượng tử với môi trường. Động năng này chính là năng lượng mà

lượng tử ban đầu truyền cho môi trường. Do vậy, hệ số μ_k được gọi là *hệ số truyền năng lượng* của bức xạ. (Đôi khi nó còn được gọi là hệ số biến đổi điện tử hoặc hệ số hấp thụ thực).

Bên cạnh khái niệm hệ số làm yếu dài, người ta còn sử dụng một số khái niệm khác như: hệ số làm yếu khối, hệ số làm yếu tính theo một nguyên tử, hệ số làm yếu tính theo một điện tử. Cũng tương tự như vậy, bên cạnh khái niệm hệ số truyền năng lượng của bức xạ, người ta còn sử dụng một số khái niệm khác như: hệ số truyền năng lượng khối, hệ số truyền năng lượng tính theo một nguyên tử hoặc hệ số truyền năng lượng tính theo một điện tử. Để thống nhất sử dụng về sau, dưới đây sẽ lần lượt giới thiệu ngắn gọn về các hệ số này.

Hệ số làm yếu khối (ký hiệu là μ_m) – đó là hệ số làm yếu bức xạ tính theo một đơn vị khối lượng của vật chất môi trường; nó liên hệ với hệ số làm yếu dài và mật độ ρ của môi trường theo biểu thức sau đây:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.1-8)$$

Hệ số làm yếu tính theo một nguyên tử (μ_a) hoặc *tính theo một điện tử* (μ_e) của vật chất môi trường:

$$\mu = \mu_m \rho = \frac{N_{avo}}{A} \mu_a \rho = \frac{N_{avo}}{A} Z \mu_e \rho \quad (1.1-9)$$

trong đó $N_{avo} = (6,02252 \pm 0,00028) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ – số Avôgadrô; Z – nguyên tử số hiệu dụng của vật chất môi trường; A – nguyên tử gam của vật chất môi trường.

Hệ số truyền năng lượng khối (ký hiệu là μ_{km}) liên hệ với hệ số truyền năng lượng và mật độ môi trường theo biểu thức:

$$\mu_{km} = \frac{\mu_k}{\rho} \quad (1.1-10)$$

Hệ số truyền năng lượng tính theo một nguyên tử (μ_{ka}) hoặc *tính theo một điện tử* (μ_{ke}) của vật chất môi trường:

$$\mu_k = \mu_{km} \rho = \frac{N_{avo}}{A} \mu_{ka} \rho = \frac{N_{avo}}{A} Z \mu_{ke} \rho \quad (1.1-11)$$

Các biểu thức (1.1-6, -10 và -11) cho thấy rằng: khi môi trường làm yếu bức xạ chỉ gồm những nguyên tử của cùng một nguyên tố i nào đó, thì có biểu thức sau đây cho hệ số truyền năng lượng khối:

$$\begin{aligned} \mu_{km,i} &= \tau_{km,i} + \sigma_{km,i} + \kappa_{km,i} = Z_i \cdot (N_{avo}/A_i) \cdot (\tau_{ke,i} + \sigma_{ke,i} + \kappa_{ke,i}) = \\ &= \frac{N_{avo}}{A_i} Z_i [b Z_i^{n_1} E_\gamma^{-n_2} + \sigma_{ke,i}(E_\gamma) + Z_i k(E_\gamma)] \end{aligned} \quad (1.1-12)$$

trong đó b – hệ số không phụ thuộc vào số thứ tự nguyên tố Z và năng lượng E_γ của lượng tử; các số mũ n_1 và n_2 có giá trị như sau:

$$\begin{array}{ll} \text{còn} & n_1 \approx (3+4); \\ & n_2 \approx 1 \quad \text{khi } E_\gamma \gg m_e c^2; \\ & n_2 = 7/2 \quad \text{khi } E_\gamma \ll m_e c^2. \end{array}$$

Nếu môi trường được tạo thành từ nhiều loại nguyên tố Z_i khác nhau với hàm lượng tương đối bằng p_i tương ứng, thì sẽ có biểu thức sau đây cho hệ số truyền năng lượng khối của bức xạ trong môi trường này:

$$\mu_{km} = \sum_{(i)} \mu_{km,i} p_i \quad (1.1-13)$$

trong đó:

$$\sum_{(i)} p_i = 1$$

còn $\mu_{km,i}$ – hệ số truyền năng lượng khối của bức xạ trong môi trường chỉ gồm có một nguyên tố i , nó được xác định theo công thức (1.1-12).

Trên đây chúng ta đã xây dựng khái niệm về hệ số truyền năng lượng dựa trên cơ sở các hệ số đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử trong các quá trình tương tác hấp thụ quang điện, tán xạ Compton và tạo cặp. Cũng có thể xây dựng khái niệm này theo một cách khác như sau.

Giả sử, các lượng tử hoặc các hạt ban đầu tới xuyên thẳng góc vào lớp vật chất, và, năng lượng tổng cộng của chúng có giá trị bằng E . Khi xuyên qua lớp vật chất có bề dày là dl , chúng giải phóng các hạt có điện tích, và, động năng tổng cộng của tất cả các hạt có điện tích này có giá trị bằng dE_k . Do đó, tổng động năng của tất cả các hạt có điện tích được giải phóng khi các phân tử bức xạ tới xuyên qua được một lớp vật chất có bề dày là 1 đơn vị sẽ có giá trị bằng dE_k/dl . Vì vậy tỷ số giữa giá trị dE_k/dl và năng lượng tổng cộng E của tất cả các phân tử bức xạ tới xuyên qua lớp vật chất môi trường chính là hệ số truyền năng lượng của bức xạ trong môi trường đó:

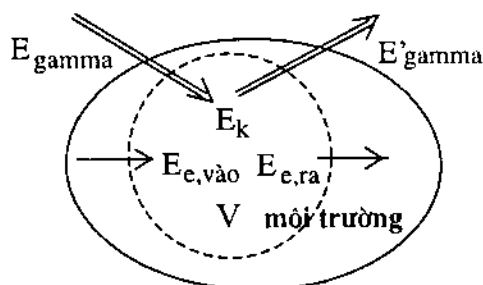
$$\mu_k = \frac{1}{E} \frac{dE_k}{dl} \quad (1.1-14)$$

Áp dụng các biểu thức liên hệ (1.1-10 và -11), trong đó μ_k được tính theo (1.1-14), ta thu được các giá trị tương ứng của hệ số truyền năng lượng khối μ_{km} , hệ số truyền năng lượng tính theo một nguyên tử (μ_{ka}) hoặc tính theo một điện tử (μ_{ke}) của vật chất môi trường. Tuy nhiên, theo cách làm này, thì bước khó khăn tiếp theo là phải xác định được mối liên hệ giữa hai đại lượng E và dE_k/dl với các đại lượng khác đặc trưng cho môi trường và cho các quá trình tương tác có liên quan.

1.1.2. Ý nghĩa vật lý của hệ số truyền năng lượng

Giả sử có một môi trường vật chất đang bị chiếu xạ. Xét thể tích V của vật chất trong môi trường đó (xem hình H1.1-1). Một phần năng lượng bức xạ được biến đổi thành động năng (có giá trị bằng E_k) của các hạt có điện tích được sinh ra ở ngay bên trong thể tích V . Một phần động năng (có giá trị bằng $E_{e,vào}$) của các hạt có điện tích được tải từ bên ngoài vào bên trong thể tích V . Đồng thời, một phần động năng (có giá trị bằng $E_{e,ra}$) của các hạt có điện tích lại được tải từ bên trong thể tích V ra khỏi thể tích này. Do đó, năng lượng bức xạ bị hấp thụ bởi khối vật chất trong thể tích V sẽ có giá trị ΔE bằng:

$$\Delta E = E_k + E_{e,vào} - E_{e,ra} \quad (1.1-15)$$



Hình H1.1-1. Sơ đồ minh họa cân bằng năng lượng trong thể tích V của môi trường vật chất đang bị chiếu xạ lượng tử.

Như vậy, năng lượng E_k mà bức xạ truyền trực tiếp cho khối vật chất trong thể tích V có thể chỉ là một phần của năng lượng bức xạ bị hấp thụ bởi khối vật chất đó. Song, chỉ có phần năng lượng E_k này mới được đặc trưng bởi hệ số truyền năng lượng μ_k .

Nếu hai môi trường thoả mãn hai điều kiện sau đây:

- Có hệ số truyền năng lượng khối bằng nhau ($\mu_{k,1} = \mu_{k,2}$).
- Bị chiếu xạ trong những điều kiện hoàn toàn như nhau,

thì năng lượng bức xạ được biến đổi thành động năng của các hạt có điện tích trong một đơn vị khối lượng của hai môi trường đó sẽ có giá trị như nhau $E_{k,1} = E_{k,2}$.

Tuy nhiên, điều này không có nghĩa là năng lượng bức xạ bị hấp thụ cũng nhất thiết phải bằng nhau. Năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong hai môi trường này sẽ chỉ có giá trị bằng nhau trong trường hợp đảm bảo có trạng thái cân bằng điện tử.

1.1.3. Trạng thái cân bằng điện tử

Trạng thái cân bằng điện tử là trạng thái tương tác của bức xạ với môi trường mà năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong một thể tích nào đó của môi

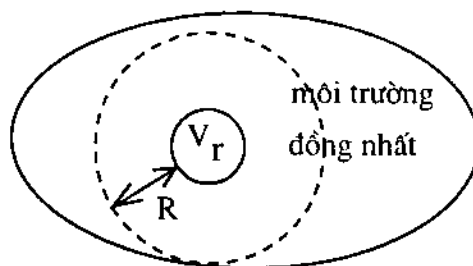
trường bằng tổng động năng của tất cả các hạt có điện tích được sinh ra do tương tác của bức xạ với khối vật chất ở ngay trong thể tích đó:

$$\Delta E = E_k \quad (1.1-16)$$

Nói cách khác, trong trạng thái cân bằng điện tử thì có tương quan sau:

$$E_{e,vào} = E_{e,ra} \quad (1.1-17)$$

tức là tổng động năng của các hạt có điện tích đi vào một thể tích bằng tổng động năng của các hạt có điện tích đi ra khỏi thể tích đó.



Hình H1.1-2. Môi trường đồng nhất gồm thể tích nhỏ V_r và lớp vật chất bao quanh với bề dày không nhỏ hơn quãng chạy R của êlectrôn nhanh nhất được giải phóng do tương tác của bức xạ với môi trường.

Muốn đảm bảo có trạng thái cân bằng điện tử tại một thể tích nhỏ V_r trong một môi trường bất kỳ đồng nhất về hợp phần nguyên tử và mật độ, thì cần phải thoả mãn hai điều kiện sau đây:

- 1) Thể tích V_r được bao bọc bởi một lớp vật chất có bề dày không nhỏ hơn bề dài quãng chạy cực đại R của các êlectrôn nhanh nhất được giải phóng trong môi trường đó (xem hình H1.1-2);
- 2) Cường độ và phổ năng lượng của bức xạ không thay đổi và như nhau tại mọi điểm bất kỳ trong không gian V_{r+R} của môi trường. (Không gian V_{r+R} bao trùm thể tích V_r cùng toàn bộ lớp vật chất có bề dày bằng R bao quanh nó).

Giả sử, r là kích thước dài của khối vật chất có trong thể tích V_r . Trong thực tế, nếu $r \ll R$ thì cường độ bức xạ gamma trong vùng năng lượng trung bình ($E_\gamma \leq 10 \text{ MeV}$) không thay đổi đáng kể trong lớp vật chất với bề dày R bao quanh thể tích V

Đối với cơ thể người, trạng thái cân bằng điện tử được thiết lập ở ngay từ độ sâu vài milimét dưới da.

1.2. SỐ THỨ TỰ NGUYÊN TỐ HIỆU DỤNG

1.2.1. Định nghĩa

Sự truyền năng lượng của bức xạ lượng tử cho môi trường chỉ phụ thuộc vào ba yếu tố là: năng lượng của lượng tử, mật độ môi trường, và, số thứ tự nguyên tố của môi trường (xem các công thức (1.1-11 và -12)). Trong khi đó, cơ thể sống là môi trường vật chất phức tạp được tạo thành từ rất nhiều nguyên tố; không những thế, các phản ứng với bức xạ trong dụng cụ đo liều lượng cũng thường là những chất hoặc những hỗn hợp phức tạp. Vì vậy, trong lĩnh vực đo liều lượng bức xạ lượng tử, người ta thường sử dụng khái niệm số thứ tự nguyên tố hiệu dụng.

Số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của một hợp chất phức tạp được coi là số thứ tự nguyên tố của một chất đơn giản nào đó mà hệ số truyền năng lượng bức xạ tính theo một điện tử của nó có giá trị như của hợp chất phức tạp.

1.2.2. Ý nghĩa vật lý

Các công thức (1.1-11 và -12) đã cho thấy rằng hệ số truyền năng lượng bức xạ tính theo một điện tử của môi trường (μ_{ke}) chỉ phụ thuộc vào hai yếu tố là năng lượng của lượng tử và số thứ tự nguyên tố hiệu dụng (Z_{hd}) của môi trường.

Vì vậy, nếu hai môi trường (ký hiệu là 1 và 2) thoả mãn hai điều kiện sau:

- a) Có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng bằng nhau $Z_{hd,1} = Z_{hd,2}$,
- b) Bị chiếu xạ trong những điều kiện hoàn toàn như nhau,

thì hệ số truyền năng lượng bức xạ tính theo một điện tử của chúng có giá trị bằng nhau $\mu_{ke,1} = \mu_{ke,2}$. Kết quả là:

- 1) Năng lượng bức xạ biến đổi thành động năng của các hạt có điện tích tính theo một điện tử của các môi trường này cũng sẽ có giá trị bằng nhau $E_{k1,1e} = E_{k2,1e}$;
- 2) Trong điều kiện có trạng thái cân bằng điện tử, năng lượng bức xạ bị hấp thụ tính theo một điện tử của các môi trường này cũng sẽ có giá trị bằng nhau $\Delta E_{1,1e} = \Delta E_{2,1e}$.

Như vậy, nếu tạo được những hỗn hợp hoặc những chất phức tạp có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng bằng số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của các tổ chức trong cơ thể, đồng thời đảm bảo được các điều kiện có trạng thái cân bằng điện tử, thì dùng các dụng cụ đo liều lượng bức xạ và hình nộm cơ thể làm từ hỗn hợp đó chúng ta có thể xác định được liều lượng bức xạ lượng tử tại vị trí bất kỳ trong cơ thể.

1.2.3. Xác định số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của hợp chất

Giả sử có một hợp chất (phức tạp) được tạo thành từ nhiều nguyên tố; trong đó mỗi nguyên tố i có số thứ tự nguyên tố là Z_i , nguyên tử gam A_i và hàm lượng tương đối p_i . Nếu số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của hợp chất đó là Z_{hd} , thì theo định nghĩa về số thứ tự nguyên tố hiệu dụng, ta có biểu thức liên hệ sau:

$$\mu_{ke}(Z_{hd}) = \mu_{ke}(Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots) \quad (1.2-1)$$

Mặt khác, từ biểu thức (1.1-11) ta thấy rằng đối với một hợp chất bất kỳ đều có biểu thức liên hệ sau đây giữa hệ số truyền năng lượng khối với hệ số truyền năng lượng tính theo một điện tử và số điện tử n_0 có trong 1g vật chất của

môi trường:

$$\mu_{ke} = \frac{\mu_{km}}{n_0} \quad (1.2-2)$$

Đối với một chất đơn giản, thì giá trị n_0 được xác định như sau:

$$n_0 = Z \frac{N_{avo}}{A} \quad (1.2-3)$$

Đối với một chất phức tạp, thì:

$$n_0 = \sum_{(i)} p_i Z_i \frac{N_{avo}}{A_i} \quad (1.2-4)$$

Trong biểu thức (1.2-2), nếu thừa số μ_{km} được thế bằng biểu thức (1.1-12) cho một chất đơn giản có nguyên tử số là Z_{hd} , hoặc bằng biểu thức (1.1-13) cho một chất phức tạp, thì ta sẽ thu được tương quan sau đây:

$$C \frac{Z_{hd}^{n_1}}{E_\gamma^{n_2}} + \sigma_{ke}(E_\gamma) + Z_{hd} k(E_\gamma) = \frac{1}{n_0} \sum_{(i)} p_i Z_i \frac{N_{avo}}{A_i} \cdot [C \frac{Z_i^{n_1}}{E_\gamma^{n_2}} + \sigma_{ke}(E_\gamma) + Z_i k(E_\gamma)] \quad (1.2-5)$$

So sánh các số hạng tương ứng ở hai vế của biểu thức (1.2-5), ta xác định được số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của chất phức tạp trong từng hiệu ứng tương tác của bức xạ lượng tử với môi trường.

Đối với hiệu ứng hấp thụ quang điện, thì số thứ tự nguyên tố hiệu dụng $Z_{hd,qd}$ của chất phức tạp được xác định như sau:

$$Z_{hd,qd} = (\sum_{(i)} \alpha_i Z_i^{n_1})^{-n_1} \quad (1.2-6)$$

trong đó:

$$\alpha_i = \frac{1}{n_0} p_i Z_i \frac{N_{avo}}{A_i} \quad (1.2-7)$$

Đối với hiệu ứng tạo cặp, thì số thứ tự nguyên tố hiệu dụng $Z_{hd,lc}$ của chất phức tạp được xác định như sau:

$$Z_{hd,tc} = \sum_{(i)} \alpha_i Z_i \quad (1.2-8)$$

Trong hiệu ứng tán xạ Compton, thì các chất có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng như nhau (vì hệ số truyền năng lượng tính theo một điện tử của môi trường trong quá trình này chỉ phụ thuộc vào năng lượng E_γ của lượng tử).

Bảng B.1.2-1. Số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của một số môi trường

stt	Chất hoặc tổ chức cơ thể	Mật độ, g/cm ³	Số thứ tự nguyên tố hiệu dụng	
			$Z_{hd,qd}$	$Z_{hd,tc}$
1	Không khí	$1,293 \cdot 10^{-3}$	7,64	7,36
2	H ₂ O	1,0	7,42	6,60
3	Cơ bắp	1,0	7,42	6,60
4	Mỡ dưới da	0,91	5,92	5,20
5	Xương	1,85	13,8	10,0

Chú thích: $Z_{hd,qd}$ – số thứ tự nguyên tố hiệu dụng trong hiệu ứng hấp thụ quang điện; $Z_{hd,tc}$ – số thứ tự nguyên tố hiệu dụng trong hiệu ứng tạo cặp êlectrôn-pôzitron.

Các tổ chức cơ thể sống hầu như chỉ chứa toàn những nguyên tố nhẹ và trung bình. Do đó, ứng với một giá trị năng lượng E_γ nhất định, thường chỉ có hai trong số ba hiệu ứng tương tác chủ yếu nêu trên có thể xảy ra đồng thời. Khi hiệu ứng hấp thụ quang điện và tán xạ Compton xảy ra đồng thời, phải tính số thứ tự nguyên tố hiệu dụng theo công thức (1.2-6) như trong trường hợp hấp thụ quang điện. Nếu hiệu ứng tạo cặp và tán xạ Compton xảy ra đồng thời, phải tính số thứ tự nguyên tố hiệu dụng theo công thức (1.2-8) như đối với trường hợp tạo cặp êlectrôn-pôzitron.

Bảng B.1.2-1 cho thấy các giá trị của số thứ tự nguyên tố hiệu dụng đối với hiệu ứng hấp thụ quang điện và tạo cặp trong một số môi trường.

Chất có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng bằng số thứ tự nguyên tố hiệu dụng

của tổ chức cơ thể thì được gọi là chất tương đương tổ chức cơ thể. Chất có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng bằng số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của không khí thì được gọi là chất tương đương không khí.

1.3. CƯỜNG ĐỘ BỨC XẠ

1.3.1. Định nghĩa cường độ bức xạ

Trong trường hợp bức xạ có định hướng, người ta thường sử dụng khái niệm cường độ bức xạ sau đây. *Cường độ bức xạ ở lân cận của một điểm O là năng lượng mà bức xạ truyền trong 1 đơn vị thời gian qua mặt phẳng nằm vuông góc với phương truyền của bức xạ và có diện tích bằng 1 đơn vị ở lân cận điểm đó.*

Cường độ bức xạ I được xác định theo biểu thức tổng quát như sau:

$$I = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \Phi(E) dE = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} I(E) dE \quad (1.3-1)$$

ở đây

$$I(E) = E \Phi(E) \quad (1.3-2)$$

trong đó $E_{\min}$ và $E_{\max}$ – giá trị năng lượng nhỏ nhất và lớn nhất của lượng tử (hoặc hạt) của bức xạ đang được xét tới; $\Phi(E)dE$ – số lượng tử hoặc hạt có năng lượng trong khoảng từ E đến $E+dE$ bay tới xuyên vuông góc với diện tích phẳng $S=1$ đơn vị ở lân cận điểm O trong 1 đơn vị thời gian. Đại lượng $\Phi(E)$ còn được gọi là mật độ thông lượng vi phân của bức xạ đang được xét tới.

1.3.2. Quy luật giảm cường độ bức xạ

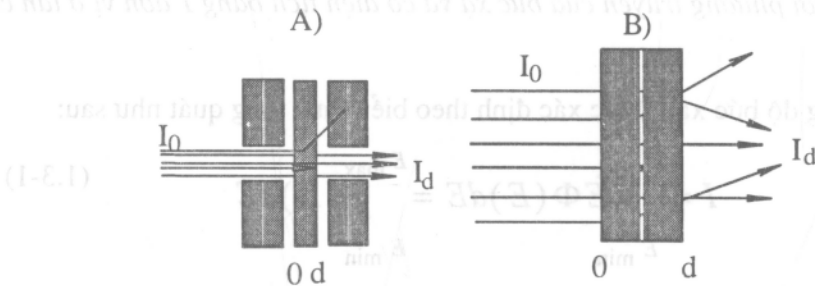
Tương tác của bức xạ với vật chất làm giảm năng lượng của lượng tử

(hoặc hạt) và làm giảm mật độ thông lượng của bức xạ; do đó làm giảm cường độ bức xạ.

Trong trường hợp bức xạ tới là một chùm hẹp song song và đơn năng, mỗi sự kiện tương tác (dù là hấp thụ hay tán xạ) đều loại khỏi chùm bức xạ ban đầu một lượng tử (hoặc hạt). (Xem hình H1.3-1.A). Vì vậy cường độ bức xạ sẽ bị giảm theo qui luật hàm số mũ như sau:

$$I_d = I_0 e^{-\mu_1 d} \quad (1.3-3)$$

trong đó I_0 và I_d – cường độ bức xạ khi lớp chắn có bề dày tương ứng bằng 0 và d ; còn μ_1 – hệ số làm yếu cường độ bức xạ tính theo một đơn vị bề dày của lớp chắn.



Hình H1.3-1. Sự làm yếu cường độ bức xạ trong môi trường.

A)- Trường hợp bức xạ tới là chùm hẹp song song và lớp tường chắn mỏng; B)- Trường hợp bức xạ tới là chùm rộng và (hoặc) lớp tường chắn không mỏng.

Trong trường hợp bề dày $d > 1/\mu_1$ và/hoặc bức xạ tới là một chùm rộng (như trên hình H1.3-1.B), thì bức xạ bị làm yếu theo quy luật như sau:

$$I_d = B I_0 e^{-\mu_1 d} = I_0 e^{-\mu_{1,hd} d} \quad (1.3-4)$$

với B – hệ số tích lũy cường độ bức xạ, có giá trị >1 và phụ thuộc một cách phức tạp vào nhiều yếu tố (như d , E , bản chất của môi trường, điều kiện hình học .v.v.); $\mu_{l,hd}$ – giá trị hiệu dụng của hệ số làm yếu cường độ bức xạ. *Hệ số làm yếu hiệu dụng cường độ bức xạ không đơn năng* là hệ số làm yếu một bức xạ đơn năng nào đó mà cường độ của nó bị giảm đi cùng một số lần như của bức xạ không đơn năng trong mọi điều kiện làm yếu như nhau.

Xét trường hợp nguồn bức xạ là nguồn điểm đơn năng, đẳng hướng và được đặt trong môi trường là không khí. Giả sử $I_{0,R}$ và $I_{0,R+x}$ là giá trị cường độ bức xạ tại điểm cách nguồn một khoảng tương ứng bằng R và $R+x$ trong không khí. Vì cường độ bức xạ gây bởi nguồn điểm tại (lân cận) một điểm M nào đó trong không khí tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách từ điểm M tới nguồn, nên giữa các đại lượng $I_{0,R}$ và $I_{0,R+x}$ có tương quan sau đây:

$$I_{0,R+x} = I_{0,R} \left(\frac{R}{R+x} \right)^2 \quad (1.3-5)$$

Hệ số $R^2/(R+x)^2$ xuất hiện trong tương quan trên vì trong trường hợp này chùm bức xạ là không song song.

Nếu ở khoảng cách R , dựng một lớp tường chắn với bề dày $d < 1/\mu$, thì cường độ bức xạ tại điểm $R+x$ sẽ được xác định theo công thức sau:

$$I_{R+x} = B I_{0,R+x} e^{-\mu_l d} = B I_{0,R} \left(\frac{R}{R+x} \right)^2 e^{-\mu_l d} \quad (1.3-6)$$

Trong biểu thức này, hệ số tích lũy cường độ bức xạ có giá trị $B \geq 1$. Khi lớp tường chắn có kích thước nhỏ và được coi là mỏng, thì giá trị $B=1$.

Trong rất nhiều trường hợp thực tế, trường bức xạ không thể coi là định hướng được. *Trong trường hợp tổng quát*, cường độ bức xạ được định nghĩa như sau: *Cường độ bức xạ tại lân cận một điểm O là năng lượng bức xạ lọt vào thể tích của khối cầu có tâm đặt tại O và có tiết diện bằng 1 cm^2 trong một đơn vị thời gian.*

1.4. LIỀU LƯỢNG BỨC XẠ VÀ ĐƠN VỊ ĐO

1.4.1. Liều hấp thụ bức xạ

Liều hấp thụ bức xạ là năng lượng bức xạ được hấp thụ trong một đơn vị khối lượng của chất bị chiếu xạ.

Theo định nghĩa về liều hấp thụ bức xạ, vấn đề cần quan tâm không phải là nguồn bức xạ gây nên liều này nằm ở bên ngoài hay bên trong của khối chất bị chiếu xạ, và, người ta cũng không quan tâm tới bản chất của bức xạ là các hạt có điện tích hay là neutron hoặc lượng tử. Vấn đề duy nhất cần quan tâm khi xác định liều hấp thụ là: có bao nhiêu năng lượng bức xạ đã, đang hoặc sẽ được hấp thụ trong một đơn vị khối lượng của khối chất bị chiếu xạ.

Liều hấp thụ (D) ở lân cận của một điểm nào đó trong khối vật chất bị chiếu xạ được xác định theo biểu thức sau đây:

$$D = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (1.4-1)$$

trong đó ΔE – năng lượng bức xạ được hấp thụ trong thể tích ở lân cận điểm đang được xét tới mà ở đó có chứa khối lượng vật chất bằng Δm .

Trong hệ đo lường tiêu chuẩn (SI) hiện nay, liều hấp thụ bức xạ có đơn vị đo là joule trên kilôgam, ký hiệu là J/kg.

1 joule trên kilôgam (1 J/kg) là liều hấp thụ bức xạ mà khối lượng 1 kg của chất bị chiếu xạ hấp thụ được năng lượng bằng 1 J của bức xạ ion hoá loại bất kỳ. Đơn vị 1 J/kg được gọi là 1 gray (ký hiệu là Gy); như vậy 1 Gy = 1 J/kg.

Bên cạnh đơn vị đo chính thống là gray, ngày nay đơn vị đo ngoại hệ là rad vẫn còn được sử dụng rất rộng rãi trong lĩnh vực đo liều hấp thụ bức xạ.

1 Rad là liều hấp thụ bức xạ mà khối lượng 1 gam của chất bị chiếu xạ hấp thụ được năng lượng bằng 100 erg của bức xạ ion hoá loại bất kỳ.

Giữa hai đơn vị Rad và Gy có các biểu thức liên hệ sau đây:

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ Rad} &= 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Gy} \\ 1 \text{ Gy} &= 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 100 \text{ Rad} \end{aligned} \right\} \quad (1.4-2)$$

Liều bức xạ tính theo một đơn vị thời gian chiếu xạ được gọi là suất liều bức xạ.

Nếu suất liều thay đổi theo thời gian, thì giữa liều bức xạ và suất liều bức xạ (P) có các biểu thức liên hệ sau đây:

$$P(t) = \frac{dD}{dt} \quad \text{và} \quad D = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} P(t) dt \quad (1.4-3)$$

Trong trường hợp suất liều không thay đổi theo thời gian, thì có biểu thức liên hệ như sau:

$$D = P \cdot \Delta t \quad (1.4-3.a)$$

Trong các biểu thức (1.4-3 và -3.a) trên đây t_0 – thời điểm bắt đầu chiếu xạ; Δt – khoảng thời gian chiếu xạ.

Suất liều hấp thụ bức xạ có các đơn vị đo là oát trên kilôgam (W/kg), gray trên giây (Gy/s) và rad trên giây (Rad/s).

1.4.2. Khái niệm KERMA

“KERMA” là cụm ký tự được ghép bởi 5 chữ cái của cụm từ tiếng Anh “Kinetic Energy Released in Matter”, được hiểu là *động năng được giải phóng trong một đơn vị khối lượng của chất do tương tác với bức xạ ion hoá gián tiếp* (như các lượng tử hoặc nơtron). Ngày nay cụm ký tự KERMA đã trở nên quen thuộc và được các nước sử dụng như một khái niệm.

Kerma có thứ nguyên giống như thứ nguyên của đơn vị đo liều hấp thụ. Trong hệ đơn vị tiêu chuẩn (SI), đơn vị đo của kerma là joule trên kilôgam

(J/kg) và cũng được gọi là gray (Gy) như đối với liều hấp thụ.

Tuy nhiên cần phân biệt rõ sự khác nhau cơ bản giữa hai khái niệm *kerma* và *liều hấp thụ*. Trong khi liều hấp thụ bức xạ là *năng lượng của bức xạ ion hoá loại bất kỳ được hấp thụ* trong một đơn vị khối lượng của chất bị chiếu xạ, thì *kerma* chỉ là *động năng được giải phóng bởi bức xạ ion hoá gián tiếp* trong một đơn vị khối lượng của chất bị chiếu xạ và một phần của động năng này có thể được truyền ra bên ngoài rồi bị hấp thụ ở bên ngoài giới hạn của đơn vị khối lượng đó.

Đối với bức xạ lượng tử, khi các điều kiện đảm bảo trạng thái cân bằng diện tử được thoả mãn, thì hai đại lượng *kerma* (ta ký hiệu là K) và *liều hấp thụ* D có giá trị bằng nhau $K = D$.

Trong trường hợp bức xạ lượng tử đơn năng, giữa các đại lượng cường độ bức xạ $I(E)$, *kerma* $K(E)$ và hệ số truyền năng lượng khối $\mu_{km}(E)$ có biểu thức liên hệ như sau:

$$\frac{dK(E)}{dt} = \mu_{km}(E)I(E) \quad (1.4-4)$$

ở đây cường độ bức xạ $I(E)$ được xác định theo công thức (1.3-2). Vế trái của biểu thức (1.4-4) chính là động năng được giải phóng trong một đơn vị thời gian trong một đơn vị khối lượng chất bị chiếu xạ, hay còn gọi là *suất kerma*. *Suất kerma có thứ nguyên giống như của đơn vị đo suất liều hấp thụ*.

Trong trường hợp bức xạ lượng tử không đơn năng, suất *kerma* có giá trị bằng tích phân của biểu thức (1.4-4) lấy theo toàn phổ năng lượng của lượng tử.

Đối với bức xạ *notrôn*, *kerma* và suất *kerma* cũng được xác định theo cách tương tự như vừa nêu trên.

1.4.3. Liều chiếu bức xạ lượng tử

Đối với bức xạ lượng tử, bên cạnh khái niệm *liều hấp thụ bức xạ*, người ta còn sử dụng khái niệm *liều chiếu xạ*, hay còn gọi là *liều rơi bức xạ*.

Liều chiếu xạ **thể hiện** năng lượng của bức xạ lượng tử đã được biến đổi thành động năng của các hạt có điện tích sinh ra trong một đơn vị khối lượng của chất mẫu. Chất mẫu thường được chọn là không khí ở điều kiện tiêu chuẩn (tức là ở nhiệt độ 0°C và áp suất 760 mm Hg).

Trong hệ đo lường tiêu chuẩn hiện nay (SI), liều chiếu bức xạ lượng tử có đơn vị đo là culông trên kilôgam (ký hiệu là C/kg).

1 C/kg là liều chiếu bức xạ lượng tử mà các hạt có điện tích được tạo thành trong 1 kg không khí khô của khí quyển có điện tích tổng cộng mỗi dấu là 1 C.

Trong thực tế người ta vẫn còn sử dụng rộng rãi đơn vị roentgen (ký hiệu là R). 1 R là liều chiếu bức xạ lượng tử mà các hạt có điện tích được tạo thành trong 1 cm^3 không khí khô ở điều kiện tiêu chuẩn có điện tích tổng cộng mỗi dấu bằng 1 đơn vị tĩnh điện CGSE (tức là bằng $3,33 \cdot 10^{-10}\text{ C}$).

Hệ số chuyển đổi giữa hai đơn vị roentgen (R) và culông trên kilôgam (C/kg) như sau:

$$1\text{ R} = 2,5797 \cdot 10^{-4}\text{ C/kg} \quad (1.4-5)$$

$$1\text{ C/kg} = 3,88 \cdot 10^3\text{ R} \quad (1.4-5a)$$

Như vậy, về bản chất, liều chiếu xạ được biểu diễn bằng đơn vị đo điện tích. Các kỹ thuật đo điện tích đã được con người biết tới và sử dụng thành thạo từ lâu, nên có thể dễ dàng đo được hiệu ứng iôn hoá trong không khí. Nhờ vậy, liều chiếu xạ là một đại lượng vật lý rất thuận tiện cho việc đo đạc trong thực tế.

Liều chiếu xạ 1R làm sinh ra các hạt có điện tích tổng cộng mỗi dấu là 1CGSE, tức là $2,08 \cdot 10^9$ cặp iôn trong mỗi cm^3 không khí. Lấy giá trị năng lượng trung bình cần tiêu hao để tạo 1 cặp iôn trong không khí $w=34\text{ eV}$, ta tìm được tổng động năng của tất cả các điện tử ban đầu đã được bức xạ truyền cho để làm sinh ra $2,08 \cdot 10^9$ cặp iôn này là $0,114\text{ erg/cm}^3$. Trong trường hợp các điều kiện cân bằng điện tử được bảo đảm, giá trị năng lượng này đúng bằng năng lượng bức xạ đã được hấp thụ trong 1 cm^3 không khí. Như vậy, khi liều chiếu xạ có

giá trị là 1R và trong điều kiện có cân bằng điện tử, thì năng lượng bức xạ lượng tử bị hấp thụ trong 1g không khí có giá trị sau đây:

$$\eta = \frac{0,114 \left[\frac{\text{erg/cm}^3}{\text{R}} \right]}{1,293 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{g/cm}^3}{\text{g/cm}^3} \right]} = 88 \left[\frac{\text{erg/g}}{\text{R}} \right] = 0,88 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{J/kg}}{\text{R}} \right] = 0,88 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{Gy}}{\text{R}} \right] \quad (1.4-6)$$

Giá trị này được gọi là *tương đương năng lượng của liều chiếu xạ bằng 1R*. Nó không phụ thuộc vào phổ năng lượng bức xạ khi các lượng tử gamma và roentgen có năng lượng E_γ không lớn quá 3 MeV (vì chỉ trong vùng năng lượng này mới có thể coi năng lượng trung bình tạo cặp ion trong không khí là không đổi và bằng 34 eV).

Trong hệ đơn vị SI, tính tới các biểu thức liên hệ đơn vị (1.4-5 và -5a) và (1.4-6), thì có giá trị sau đây cho tương đương năng lượng của liều chiếu xạ bằng 1C/kg:

$$\bullet = 0,88 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\text{Gy}}{\text{R}} \right] = 0,88 \cdot 10^{-2} \cdot 3,88 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{Gy}}{\text{C/kg}} \right] = 34,144 \left[\frac{\text{Gy}}{\text{C/kg}} \right] \quad (1.4-6 \text{ a})$$

Giả sử các điều kiện đảm bảo có trạng thái cân bằng điện tử ở lân cận điểm M nào đó luôn được thoả mãn, cho dù môi trường ở đó là không khí hay là khối chất với số thứ tự nguyên tố (hiệu dụng) bằng Z. Tại đây, liều chiếu xạ trong không khí có giá trị bằng $D_{\text{chiếu xạ}}$ và liều hấp thụ trong môi trường Z có giá trị bằng D. Khi đó, giữa liều chiếu xạ và liều hấp thụ có biểu thức liên hệ như sau:

$$D = \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k, \text{không khí}}} \eta D_{\text{chiếu xạ}} \quad (1.4-7)$$

ở đây $\mu_{k, \text{không khí}}$ và $\mu_{k,Z}$ - hệ số truyền năng lượng bức xạ trong không khí và trong môi trường Z tương ứng.

Giữa liều chiếu xạ và suất liều chiếu xạ có các biểu thức liên hệ tương tự như (1.4-3) và (1.4-3a). Suất liều chiếu xạ có đơn vị đo là ampe trên kilôgam

(A/kg) hoặc roentgen trên giây (R/s). Hệ số chuyển đổi giữa hai đơn vị R/s và A/kg như sau:

$$1 \text{ R/s} = 2,5797 \cdot 10^{-4} \text{ A/kg} \quad (1.4-5b)$$

$$1 \text{ A/kg} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ R/s} \quad (1.4-5c)$$

Như vậy, trong trường hợp các điều kiện cân bằng điện tử được bảo đảm, thì có các giá trị sau đây cho suất liều chiếu xạ và suất liều hấp thụ trong không khí:

$$\text{– Ứng với } P_{\text{chiếu xạ}} = 1 \text{ R/s, thì } P_{\text{hấp thụ, không khí}} = 0,88 \cdot 10^{-2} \text{ Gy/s;} \quad (1.4-5d)$$

$$\text{– Ứng với } P_{\text{chiếu xạ}} = 1 \text{ A/kg, thì } P_{\text{hấp thụ, không khí}} = 34,144 \text{ Gy/s} \quad (1.4-5e)$$

1.4.4. Hiệu suất sinh học tương đối của bức xạ

Liều hấp thụ không đặc trưng toàn diện cho ảnh hưởng của các loại bức xạ đối với môi trường bị chiếu xạ. Vì thế người ta sử dụng khái niệm hiệu suất sinh học tương đối của bức xạ.

Hiệu suất sinh học tương đối của bức xạ được định nghĩa như tỷ số ($D_{\text{chuẩn, hiệu ứng sinh học}} / D_{\text{x, hiệu ứng sinh học}}$), trong đó $D_{\text{chuẩn, hiệu ứng sinh học}}$ – liều hấp thụ bức xạ chuẩn gây nên một hiệu ứng sinh học nhất định, còn $D_{\text{x, hiệu ứng sinh học}}$ – liều hấp thụ bức xạ đang được xét tới cũng gây nên một hiệu ứng y hệt như vậy.

Theo định nghĩa này, ta thấy hiệu suất sinh học tương đối phụ thuộc một cách phức tạp vào nhiều yếu tố như: loại bức xạ, năng lượng của lượng tử hoặc hạt của trường bức xạ, loại hiệu ứng sinh học cụ thể, những đặc điểm cá biệt của cơ thể, chế độ chiếu xạ .v.v.; trong đó có những điểm khó xác định được (cụ thể như: những đặc điểm cá biệt của cơ thể). Do vậy, để tính toán bảo vệ an toàn bức xạ, người ta lại phải đưa ra khái niệm *trọng số của bức xạ* hoặc *hệ số phẩm chất của bức xạ*.

1.4.5. Trọng số của bức xạ ion hoá

Trên cơ sở nhiều số liệu thực nghiệm về hiệu suất sinh học tương đối của bức xạ, người ta đưa ra các giá trị có tính chất quy ước về hiệu suất sinh học tương đối của các loại bức xạ ion hoá khác nhau. Giá trị quy ước này được gọi là trọng số của bức xạ.

Trọng số của bức xạ được sử dụng nhằm mục đích kiểm tra mức độ nguy hiểm về bức xạ trong điều kiện bị chiếu xạ thường xuyên. Trọng số của bức xạ (Q_{TS}) là một đại lượng không có thứ nguyên. Nó giúp ta so sánh được ảnh hưởng nguy hiểm của các loại bức xạ khác nhau. Bảng B1.4-1 cho thấy trọng số (Q_{TS}) của một số loại bức xạ ion hoá.

Bảng B1.4-1. Trọng số (Q_{TS}) của một số loại bức xạ ion hoá

stt	Loại bức xạ và năng lượng	Q_{TS}
1	Bức xạ gamma và Roentgen	1
2	Bức xạ beta	1
3	Chùm electron	1
4	Prôtôn với động năng $> 2 \text{ MeV}$ (không phải hạt nhân lùi)	5
5	Hạt alpha, mảnh vỡ hạt nhân, hạt nhân nặng	20
6	Notrôn với động năng $E_n < 10 \text{ keV}$	5
7	Notrôn với động năng $E_n \sim 10 \text{ keV} \div 100 \text{ keV}$	10
8	Notrôn với động năng $E_n \sim 100 \text{ keV} \div 2 \text{ MeV}$	20
9	Notrôn với động năng $E_n \sim > 2 \text{ MeV} \div 20 \text{ MeV}$	10
10	Notrôn với động năng $E_n > 20 \text{ MeV}$	5

Bên cạnh trọng số của bức xạ (Q_{TS}), đôi khi người ta còn dùng một hệ số nữa gọi là hệ số phẩm chất của bức xạ (Q_{PC}). (Thuật ngữ tương đương trong tiếng Anh của “trọng số của bức xạ” là “radiation weighting factor”, và, của “hệ số phẩm chất của bức xạ” là “radiation quality factor”).

Hệ số phẩm chất của bức xạ được dùng như giá trị gần đúng của trọng số Q_{TS} khi bức xạ không được nêu trong bảng B1.4-1. Hệ số phẩm chất của bức xạ phụ thuộc vào độ truyền năng lượng cục bộ của bức xạ. (Thuật ngữ bằng tiếng Anh là “Linear Energy Transmission (LET)”, tạm dịch là “Độ truyền năng lượng cục bộ” cho sát nghĩa). Độ truyền năng lượng cục bộ của bức xạ có ý nghĩa là năng lượng bức xạ được truyền cho một môi trường tính trên quãng đường dài bằng một đơn vị dọc theo quỹ đạo của hạt có điện tích, mà hạt này được sinh ra do tương tác của bức xạ với môi trường đó. Độ truyền năng lượng cục bộ (L) của bức xạ được định nghĩa theo tỷ số sau đây:

$$L = \frac{\overline{\Delta E}}{\Delta l} \quad (1.4-8)$$

Trong đó $\langle \Delta E \rangle$ – năng lượng trung bình được truyền cục bộ cho môi trường bởi hạt thứ cấp có điện tích có động năng bằng E khi nó đi được quãng đường dài bằng Δl trong môi trường và năng lượng $\langle \Delta E \rangle$ này được hấp thụ ở ngay tại khu vực đó. Ở đây, năng lượng truyền cục bộ thường được hiểu là năng lượng tối đa mà hạt thứ cấp có điện tích có thể bị mất do bị hấp thụ trong vùng thể tích bao quanh quỹ đạo chuyển động của hạt đó (hoặc còn được hiểu là năng lượng mà hạt thứ cấp có điện tích có thể bị mất trong vùng thể tích có bán kính nhất định nào đó bao quanh quỹ đạo chuyển động của hạt). Với cách hiểu như vậy về “năng lượng truyền cục bộ”, người ta còn sử dụng đại lượng L_C tức là độ truyền năng lượng cục bộ được tính cho trường hợp hạt thứ cấp có điện tích có năng lượng không lớn hơn giá trị giới hạn C. Nếu năng lượng giới hạn C được coi là lớn vô cùng, thì người ta dùng ký hiệu L_∞ hoặc đơn giản là L.

(Nếu so sánh với “độ mất năng lượng” hoặc “năng suất hãm” ($-dE/dx$), thì “độ truyền năng lượng cục bộ” có ba điểm khác như sau: a)- *Có tính chất cục bộ*; b)- *Có giá trị giới hạn được quy ước về năng lượng được truyền cục bộ hoặc bán kính bao quanh quỹ đạo chuyển động của hạt*; c)- *Nó là năng lượng được hấp thụ cục bộ*, do vậy nó có giá trị nhỏ hơn năng suất hãm).

Bảng B1.4-2 cho thấy giá trị của độ truyền năng lượng cục bộ (L) trong

môi trường nước và hệ số phẩm chất (Q_{PC}) của một số loại bức xạ ion hoá.

Bảng B1.4-2. Giá trị của độ truyền năng lượng cục bộ (L) trong môi trường nước và hệ số phẩm chất (Q_{PC}) của một số loại bức xạ

$L,$ $keV/10^{-6}m \text{ trong } H_2O$	3,5	7	23	53	175
Q_{PC}	1	2	5	10	20

Đối với các loại bức xạ và các giá trị năng lượng mà không được liệt kê trong bảng B1.4-1, thì hệ số phẩm chất tương ứng của nó được coi là bằng hệ số phẩm chất trung bình $\langle Q_{PC}(L) \rangle$ tại độ sâu 10 mm ở bên trong quả cầu chuẩn của Cơ quan Quốc tế về Đơn vị đo lường Bức xạ và được xác định như sau:

$$\bar{Q}_{PC} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q_{PC}(L) D_L dL \quad (1.4-9)$$

trong đó D – liều hấp thụ; D_L – phân bố liều hấp thụ D theo độ truyền năng lượng cục bộ L ; $Q_{PC}(L)$ – hệ số phẩm chất phụ thuộc vào độ truyền năng lượng cục bộ L ở trong môi trường H_2O . Giá trị $Q_{PC}(L)$ được xác định theo tương quan sau đây:

$$Q_{PC}(L) = \begin{cases} 1 & \text{khi } L \leq 10 \cdot keV \cdot \mu m^{-1} \\ 0,32L - 2,2 & \text{khi } 10 < L < 100 \cdot keV \cdot \mu m^{-1} \\ \frac{300}{\sqrt{L}} & \text{khi } L \geq 100 \cdot keV \cdot \mu m^{-1} \end{cases} \quad (1.4-10)$$

Đối với bức xạ neutron, nếu cần phải tính trọng số như một hàm liên tục (thí dụ, khi bức xạ neutron có phổ phức tạp), thì có thể sử dụng biểu thức gần đúng sau đây:

$$Q_{TS,n} = 5 + 17 \cdot e^{-\frac{X^2}{6}} \quad (1.4-11)$$

$$\text{với } X = \ln(2E) \quad (1.4-12)$$

trong đó E – động năng của nơtron, tính bằng đơn vị MeV.

Đối với nơtron, prôtôn và các loại hạt khác có điện tích bằng $1e$ và khối lượng $A > 1$ đơn vị khối lượng nguyên tử (amu), nhưng không biết rõ năng lượng (và do đó không biết rõ giá trị của độ truyền năng lượng cục bộ), thì coi là chúng có trọng số $Q_{TS} = 10$.

Đối với hạt alpha và các hạt có điện tích $> 1e$, nhưng không biết giá trị cụ thể của điện tích và động năng của chúng bằng bao nhiêu, thì coi là chúng có trọng số $Q_{TS} = 20$.

1.4.6. Liều tương đương

Liều tương đương ($H_{c,i}$) gây bởi bức xạ ion hoá thuộc loại i nào đó tại một cơ quan hoặc tổ chức (c) trong cơ thể của một người được định nghĩa là tích số giữa liều hấp thụ với trọng số của bức xạ:

$$H_{c,i} = D_{c,i} \cdot Q_{TS,i} \cdot K \quad (1.4-13)$$

ở đây: $D_{c,i}$ – liều hấp thụ gây bởi bức xạ ion hoá loại i trong cơ quan hoặc tổ chức c của cơ thể; $Q_{TS,i}$ – trọng số của bức xạ ion hoá loại i ; K – hệ số tính tới ảnh hưởng của những điều kiện cụ thể khi chiếu xạ (thí dụ: suất liều, phân bố liều theo thời gian, phân bố liều theo không gian .v.v.). Nếu những điều kiện đó không được nhắc tới một cách đặc biệt, thì coi hệ số này có giá trị $K = 1$.

Nếu bức xạ ban đầu gồm những thành phần i khác nhau, hoặc nó tạo nên những loại sản phẩm i khác nhau khi tương tác với môi trường, thì liều tương đương được xác định theo công thức sau đây:

$$H_c = \sum_{(i)} H_{c,i} = \sum_{(i)} D_{c,i} Q_{TS,i} K_i \quad (1.4-14)$$

Trong hệ đo lường tiêu chuẩn (SI) hiện nay, liều tương đương $H_{c,i}$ cũng có đơn vị đo là joule trên kilôgam, ký hiệu là J/kg; nhưng trong trường hợp này

$$\text{với} \quad X = \ln(2E) \quad (1.4-12)$$

trong đó E – động năng của nơtron, tính bằng đơn vị MeV.

Đối với nơtron, prôtôn và các loại hạt khác có điện tích bằng $1e$ và khối lượng $A > 1$ đơn vị khối lượng nguyên tử (amu), nhưng không biết rõ năng lượng (và do đó không biết rõ giá trị của độ truyền năng lượng cục bộ), thì coi là chúng có trọng số $Q_{TS} = 10$.

Đối với hạt alpha và các hạt có điện tích $> 1e$, nhưng không biết giá trị cụ thể của điện tích và động năng của chúng bằng bao nhiêu, thì coi là chúng có trọng số $Q_{TS} = 20$.

1.4.6. Liều tương đương

Liều tương đương ($H_{c,i}$) gây bởi bức xạ iôn hoá thuộc loại i nào đó tại một cơ quan hoặc tổ chức (c) trong cơ thể của một người được định nghĩa là tích số giữa liều hấp thụ với trọng số của bức xạ:

$$H_{c,i} = D_{c,i} \cdot Q_{TS,i} \cdot K \quad (1.4-13)$$

ở đây: $D_{c,i}$ – liều hấp thụ gây bởi bức xạ iôn hoá loại i trong cơ quan hoặc tổ chức c của cơ thể; $Q_{TS,i}$ – trọng số của bức xạ iôn hoá loại i ; K – hệ số tính tới ảnh hưởng của những điều kiện cụ thể khi chiếu xạ (thí dụ: suất liều, phân bố liều theo thời gian, phân bố liều theo không gian .v.v.). Nếu những điều kiện đó không được nhắc tới một cách đặc biệt, thì coi hệ số này có giá trị $K = 1$.

Nếu bức xạ ban đầu gồm những thành phần i khác nhau, hoặc nó tạo nên những loại sản phẩm i khác nhau khi tương tác với môi trường, thì liều tương đương được xác định theo công thức sau đây:

$$H_c = \sum_{(i)} H_{c,i} = \sum_{(i)} D_{c,i} Q_{TS,i} K_i \quad (1.4-14)$$

Trong hệ đo lường tiêu chuẩn (SI) hiện nay, *liều tương đương $H_{c,i}$ cũng có đơn vị đo là joule trên kilôgam, ký hiệu là J/kg; nhưng trong trường hợp này*

đơn vị 1 J/kg được gọi là 1 sievert (ký hiệu là Sv, đọc là sivớt). Như vậy, đơn vị $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$.

(Chú ý phân biệt hai đại lượng cùng chung một ký hiệu là 1 J/kg : nếu đó là liều hấp thụ thì được gọi là 1 gray; còn nếu đó là liều tương đương thì gọi là 1 sievert).

Bên cạnh đơn vị đo chính thống là sievert, ngày nay đơn vị đo ngoại hệ của liều tương đương là Rem vẫn còn được sử dụng rất rộng rãi. Giữa hai đơn vị Rem và sievert có các biểu thức liên hệ sau đây:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Rem} &= 100 \text{ erg/g} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ J/kg} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv} \\ 1 \text{ Sv} &= 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ Rem} \end{aligned} \quad (1.4-15)$$

Liều tương đương tính trên một đơn vị thời gian chiếu xạ gọi là suất liều tương đương. Suất liều tương đương có các đơn vị đo là sievert trên giây (Sv/s) và Rem trên giây (Rem/s).

1.4.7. Liều hiệu dụng

Liều hiệu dụng (ký hiệu là H_{hd}) mà bức xạ gây nên đối với cơ thể của một người được định nghĩa theo công thức sau đây:

$$H_{hd} = \sum_{(c)} \omega_c H_c \quad (1.4-16)$$

trong đó H_c – liều tương đương trong cơ quan hoặc tổ chức c của cơ thể; ω_c – trọng số của cơ quan hoặc tổ chức c (được trình bày chi tiết hơn ở mục 1.4.10).

Trong trường hợp bức xạ chỉ gồm có một thành phần i duy nhất, thì từ các công thức (1.4-14 và -16) sẽ có biểu thức sau đây cho liều hiệu dụng:

$$H_{hd} = H_{hd,i} = \sum_{(c)} \omega_c H_{c,i} = \sum_{(c)} \omega_c D_{c,i} Q_{TS,i} K_i \quad (1.4-17)$$

Nếu trường bức xạ gồm có nhiều thành phần, thì có biểu thức sau đây cho liều hiệu dụng:

$$H_{hd} = \sum_{(i)} H_{hd,i} = \sum_{(c)} \sum_{(i)} \omega_c H_{c,i} = \sum_{(c)} \omega_c \sum_{(i)} D_{c,i} Q_{TS,i} K_i \quad (1.4-18)$$

Liều hiệu dụng có đơn vị đo như của liều tương đương. Cũng tương tự như vậy, suất liều hiệu dụng có đơn vị đo như của suất liều tương đương.

Cần nhắc lại một lần nữa sự khác biệt giữa liều tương đương và liều hiệu dụng. Liều tương đương chỉ liên quan tới một cơ quan hoặc tổ chức nào đó trong cơ thể của một người. Liều hiệu dụng tính tới mức độ ảnh hưởng của tất cả các cơ quan hoặc tổ chức trong cơ thể của một người.

1.4.8. Liều hiệu dụng tập thể

Liều hiệu dụng tập thể là tổng liều hiệu dụng mà một nhóm dân cư phải gánh chịu; nó có giá trị bằng tích của số người bị chiếu bởi một nguồn bức xạ và liều hiệu dụng trung bình tính theo đầu người của nhóm dân cư đó.

Giả sử một nhóm dân cư “lớn” được hợp thành từ nhiều nhóm “nhỏ” j . Mỗi nhóm nhỏ dân cư có N_j người. Tổng số người của toàn nhóm dân cư lớn được hợp thành từ số người là N_j của từng nhóm j . Liều hiệu dụng tập thể S của toàn nhóm “lớn” được tính theo công thức sau đây:

$$S = \sum_{(j)} S_j = \sum_{(j)} N_j H_{hd,j} \quad (1.4-19)$$

trong đó S_j – liều hiệu dụng tập thể của nhóm nhỏ dân cư j ; $H_{hd,j}$ – liều hiệu dụng trung bình tính theo đầu người của nhóm nhỏ j .

Liều hiệu dụng tập thể được tính bằng đơn vị [người.Sv]. (Thuật ngữ tương đương trong tiếng Anh là man-sievert, ký hiệu là man.Sv).

1.4.9. Các khái niệm về liều bị nhiễm

Liều hấp thụ bị nhiễm được xác định theo công thức sau đây:

$$D(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{D}(t) dt \quad (1.4-20)$$

trong đó t_0 – thời điểm cơ thể bắt đầu bị nhiễm chất phóng xạ (tức là khi chất phóng xạ lọt vào bên trong cơ thể); τ – khoảng thời gian kể từ khi chất phóng xạ lọt vào cơ thể tới thời điểm cần xác định liều hấp thụ bị nhiễm $D(\tau)$; còn hàm số dưới dấu tích phân ở vế phải của biểu thức là $\dot{D}(t) \equiv dD(t)/dt \equiv P(t)$ – suất liều hấp thụ tại thời điểm t do bị nhiễm xạ. Khi khoảng thời gian τ không được chỉ rõ thì nó sẽ được coi là bằng 50 năm đối với người lớn và bằng 70 năm đối với trẻ em.

Liều tương đương bị nhiễm trong một cơ quan hoặc tổ chức cơ thể được xác định theo công thức sau đây:

$$H_c(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} H_c(t) dt \quad (1.4-21)$$

trong đó τ – khoảng thời gian kể từ khi chất phóng xạ lọt vào cơ thể tới thời điểm cần xác định liều tương đương bị nhiễm $H_c(\tau)$; còn $\dot{H}_c(t) \equiv dH_c(t)/dt$ – suất liều tương đương tại cơ quan hoặc tổ chức c trong cơ thể ở thời điểm t do bị nhiễm xạ; các giá trị t_0 và τ – có ý nghĩa và được xác định như vừa nêu ở trường hợp trên. Khi xác định liều tương đương bị nhiễm do nghề nghiệp, thì lấy giá trị $\tau=50$ năm.

Liều hiệu dụng bị nhiễm được xác định theo công thức sau đây:

$$H_{hd}(\tau) = \sum_{(c)} \omega_c H_c(\tau) \quad (1.4-22)$$

với $H_c(\tau)$ – liều tương đương bị nhiễm trong cơ quan hoặc tổ chức c của cơ thể.

Liều hiệu dụng tập thể bị nhiễm $S_k(\tau)$ gây bởi một sự cố k, một giải pháp k, hoặc một phần hữu hạn k của một công việc thực tế nào đó được xác định theo công thức sau đây:

$$S_k(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} S_k(t) dt \quad (1.4-23)$$

trong đó t_0 – thời điểm xảy ra một sự cố cụ thể k nào đó, hay một giải pháp k, hoặc một phần hữu hạn k nào đó của một công việc thực tế; hàm số dưới dấu tích phân ở vế phải của biểu thức là $S_k(t) \equiv dS_k(t)/dt$ – suất liều hiệu dụng tập thể tại thời điểm t do bị nhiễm xạ; τ – khoảng thời gian mà sự cố k, hoặc giải pháp k, hay phần k của công việc vừa nêu trên có thể làm tăng giá trị của liều hiệu dụng tập thể bị nhiễm. Trong trường hợp tổng quát, khoảng thời gian này có thể kéo dài tới vô hạn $\tau = \infty$.

(Chú ý: Thuật ngữ tương đương của “liều xxxx bị nhiễm” trong tiếng Anh là “committed xxxx dose”).

1.4.10. Trọng số của các cơ quan hoặc tổ chức trong cơ thể

Trong bảo vệ an toàn bức xạ, người ta sử dụng khái niệm trọng số của các cơ quan hoặc tổ chức cơ thể (ω_c) để tính tới độ nhạy cảm khác nhau của các cơ quan hoặc tổ chức cơ thể khác nhau đối với các hiệu ứng ngẫu nhiên gây bởi bức xạ khi toàn bộ cơ thể bị chiếu xạ đồng đều.

Trọng số ω_c được định nghĩa như tỷ số giữa mức nguy hiểm ngẫu nhiên của cơ quan hay tổ chức cơ thể c và mức nguy hiểm của cả cơ thể khi bị chiếu xạ đồng đều:

$$\omega_c = \frac{R_c}{\sum_{(c)} R_c} \quad (1.4-24)$$

$$\sum_{(c)} \omega_c = 1 \quad (1.4-25)$$

với R_c – mức nguy hiểm ngẫu nhiên đối với cơ quan hoặc tổ chức c của cơ thể.

Bảng B1.4-3. Trọng số ω_c của các cơ quan hoặc tổ chức cơ thể

stt	Cơ quan hoặc tổ chức cơ thể	Trọng số
1.	Tuyến sinh dục	0,20
2.	Tủy đỏ trong xương	0,12
3.	Ruột kết	0,12
4.	Phổi	0,12
5.	Dạ dày	0,12
6.	Bàng quang	0,05
7.	Tuyến sữa (Vú)	0,05
8.	Gan	0,05
9.	Thực quản	0,05
10.	Tuyến giáp trạng	0,05
11.	Da	0,01
12.	Lớp bề mặt của xương	0,01
13.	Toàn bộ phần còn lại	0,05

Trọng số ω_c xác định đóng góp của cơ quan hay tổ chức cơ thể c vào mức nguy hiểm của hậu quả xảy ra khi toàn cơ thể bị chiếu xạ đồng đều.

Bảng B1.4-3 cho thấy trọng số của các cơ quan hoặc tổ chức cơ thể.

Trong trường hợp toàn cơ thể bị chiếu xạ đồng đều, liều tương đương được xác định theo biểu thức (1.4-14) với hệ số $K_c=1$; vì vậy liều tương đương trong mọi cơ quan và mọi tổ chức cơ thể đều có giá trị như nhau và bằng $H_c=H_{ct}$. Do đó trong trường hợp này liều (tương đương) hiệu dụng sẽ có giá trị bằng $H_{hd}=H_c=H_{ct}$ (xem các biểu thức (1.4-16 và -25)).

1.4.11. Đối chiếu các đơn vị đo của liều và suất liều bức xạ

Chúng ta nhớ lại một lần nữa rằng liều bức xạ tính theo một đơn vị thời gian chiếu xạ thì được gọi là suất liều bức xạ. Tương ứng với liều chiếu xạ, liều hấp thụ bức xạ, liều tương đương .v.v. là các đại lượng suất liều chiếu xạ, suất liều hấp thụ bức xạ, suất liều tương đương .v.v. Bảng B1.4-4 cho thấy đơn vị đo của các đại lượng chủ yếu trong bảo vệ an toàn bức xạ. Trên cơ sở bảng B1.4-4, có thể dễ dàng so sánh, đối chiếu và tìm được các đơn vị dẫn suất khác trong hệ đo lường tiêu chuẩn hiện nay hoặc đơn vị thông dụng khác.

Bảng B1.4-4. Đơn vị đo của liều và suất liều

Phạm trù	Liều		Suất liều	
	Đơn vị SI	Đơn vị ngoại hệ	Đơn vị SI	Đơn vị ngoại hệ
Chiếu xạ	1 C/kg	1R=2,5797.10 ⁻⁴ C/kg	1 A/kg	1 R/s; 1R/h
Hấp thụ bức xạ	Gy [≡ gray]; 1Gy= 1J/kg	1Rad=100 erg/g; 1Rad=1.10 ⁻² Gy	1Gy/s = =1W/kg	1Rad/s = =1.10 ⁻² Gy/s
Tương đương	Sv [≡sievert]; 1Sv=1J/kg	1Rem=1.10 ⁻² Sv	1 Sv/s; Sv/h	1Rem/s = =1.10 ⁻² Sv/s

1.5. TƯƠNG QUAN GIỮA SUẤT LIỀU, CƯỜNG ĐỘ BỨC XẠ VÀ HỆ SỐ TRUYỀN NĂNG LƯỢNG

Xét trường hợp bức xạ gamma đơn năng và lượng tử có năng lượng bằng E_γ . Giả sử ở lân cận điểm X, cường độ bức xạ có giá trị không thay đổi và bằng $I_x(E_\gamma)$, hệ số truyền năng lượng khối có giá trị bằng $\mu_{km}(E_\gamma)$. Khi đó, theo biểu thức (1.4-4), thì năng lượng bức xạ biến đổi thành động năng của các hạt có điện tích được sinh ra trong một đơn vị thời gian trong một đơn vị khối lượng

vật chất ở lân cận điểm X sẽ được xác định theo biểu thức sau:

$$\frac{dW_x}{dm_x} = \frac{dW_x(E_\gamma)}{dm_x} = \mu_{km}(E_\gamma)I_x(E_\gamma) \quad (1.5-1)$$

với dm_x – khối lượng vật chất ở lân cận điểm X.

Trong trường hợp bức xạ không đơn năng, thì có tương quan sau đây:

$$\frac{dW_x}{dm_x} = \int_0^{E_{\gamma \max}} \frac{dW_x(E_\gamma)}{dm_x} dE_\gamma = \int_0^{E_{\gamma \max}} \mu_{km}(E_\gamma)I_x(E_\gamma) dE_\gamma = \mu_{km,hd} \cdot I_x \quad (1.5-2)$$

với $\mu_{km,hd}$ – hệ số truyền năng lượng khối hiệu dụng tính cho toàn phổ bức xạ gamma cụ thể được xét tới.

Nếu môi trường vật chất ở lân cận điểm X là không khí ở điều kiện tiêu chuẩn, thì các biểu thức (1.5-1 và -2) xác định suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ, X}}$ tại đó:

$$\frac{dW_x}{dm_x} = aP_{\text{chiếu xạ, X}} = \mu_{km,hd, \text{không khí}} \cdot I_x \quad (1.5-3)$$

trong đó a – hệ số tỷ lệ tính tới thứ nguyên của các đại lượng như: suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ}}$, hệ số truyền năng lượng khối μ_{km} và cường độ bức xạ I .

Đối với môi trường không khí, hệ số truyền năng lượng khối $\mu_{km,hd, \text{không khí}}$ ít thay đổi trong phạm vi một dải phổ năng lượng khá rộng. (Giá trị $\mu_{km,hd, \text{không khí}}$ chỉ thay đổi ~10% trong vùng năng lượng E_γ từ khoảng 0,15 MeV đến 2MeV). Vì vậy, trong thực tế có thể coi suất liều chiếu xạ tỷ lệ tuyến tính với cường độ bức xạ:

$$P_{\text{chiếu xạ, X}} \cong \text{const. } I_x \quad (1.5-4)$$

Trong trường hợp các điều kiện đảm bảo trạng thái cân bằng điện từ được thoả mãn, thì năng lượng bức xạ biến đổi thành động năng của các hạt có điện tích được sinh ra trong một đơn vị thời gian, trong một đơn vị khối lượng vật

chất ở lân cận điểm X, và suất liều hấp thụ bức xạ tại đó sẽ có giá trị như nhau:

$$\frac{dW_x}{dm_x} = P_{Z,x} \quad (1.5-5)$$

với $P_{Z,x}$ – suất liều hấp thụ bức xạ ở lân cận điểm X trong môi trường vật chất bất kỳ (Z). Do vậy, có tương quan sau đây nếu phổ bức xạ gamma là đơn năng:

$$P_{Z,x} = \mu_{km}(E_\gamma) \cdot I_x(E_\gamma) \quad (1.5-6)$$

Còn trong trường hợp phổ bức xạ gamma không đơn năng thì có tương quan sau đây:

$$P_{Z,x} = \mu_{km,hd,Z} \cdot I_x \quad (1.5-7)$$

Như vậy, các biểu thức từ (1.5-1) đến (1.5-7) cho thấy rằng suất liều bức xạ tỷ lệ thuận với hệ số truyền năng lượng và cường độ bức xạ, bất kể bản chất của môi trường bị chiếu xạ là gì.

Xét trường hợp điều kiện cân bằng điện tử được thoả mãn, và, suất liều hấp thụ ở lân cận điểm X trong không khí là $P_{\text{không khí},x}$. Từ biểu thức (1.5-3) sẽ có biểu thức liên hệ sau đây:

$$P_{\text{không khí},x} = a P_{\text{chiếu xạ},x} \quad (1.5-3a)$$

Bây giờ đem đặt vào vị trí X đó một vật liệu có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng bằng Z. Giả sử việc này không gây ảnh hưởng (nhiều loạn) đáng kể tới trường bức xạ. Do đó phổ bức xạ và cường độ bức xạ ở lân cận điểm X sẽ không thay đổi so với khi còn chưa đặt vật liệu Z vào. Vì vậy trạng thái cân bằng điện tử vẫn được bảo đảm. So sánh các biểu thức (1.5-7) cho môi trường là không khí và môi trường là vật liệu Z tương ứng, rồi thế $P_{\text{không khí},x}$ theo biểu thức (1.5-3a), sẽ được tương quan sau đây giữa suất liều hấp thụ bức xạ trong môi trường Z bất kỳ và suất liều chiếu xạ trong không khí:

$$P_{Z,x} = \frac{\mu_{km,hd,Z}}{\mu_{km,hd,\text{không khí}}} \cdot a \cdot P_{\text{chiếu xạ},x} \quad (1.5-8)$$

Giữa liều hấp thụ bức xạ ở lân cận điểm X trong môi trường bất kỳ ($D_{Z,x}$)

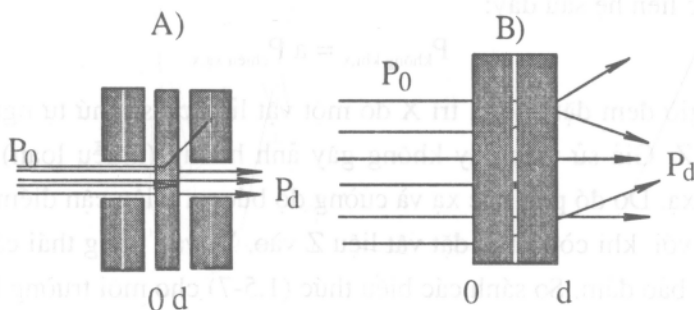
và liều chiếu xạ ở lân cận điểm đó ($D_{\text{rối,x}}$) cũng có biểu thức liên hệ tương tự:

$$D_{Z,x} = \frac{\mu_{\text{km,hd,Z}}}{\mu_{\text{km,hd,không khí}}} \cdot a \cdot D_{\text{chiếu xạ,x}} \quad (1.5-9)$$

Hai biểu thức (1.5-8 và -9) cho phép xác định suất liều hấp thụ và liều hấp thụ trong một môi trường bất kỳ khi biết suất liều chiếu xạ hoặc liều chiếu xạ đối với một phổ năng lượng bức xạ lượng tử nhất định trong điều kiện có trạng thái cân bằng điện tử.

1.6. QUY LUẬT LÀM YẾU SUẤT LIỀU BỨC XẠ

Các biểu thức từ (1.5-1) đến (1.5-7) đã cho thấy rằng suất liều bức xạ tỷ lệ với cường độ bức xạ. Do vậy quy luật làm yếu suất liều bức xạ (hoặc liều bức xạ) cũng có dạng tương tự như đối với cường độ bức xạ.



Hình H1.6-1. Sự làm yếu suất liều bức xạ trong môi trường.
A)- Trường hợp bức xạ tới là chùm hẹp song song và lớp tường chắn mỏng; B)- Trường hợp bức xạ tới là chùm rộng và/hoặc lớp tường chắn không mỏng.

Đối với một chùm hẹp và song song của bức xạ gamma đơn năng, cũng tương tự như đối với cường độ bức xạ (xem biểu thức (1.3-3)), suất liều bức xạ

giảm theo quy luật hàm số mũ:

$$P_d = P_0 e^{-\mu_p d} \quad (1.6-1)$$

trong đó P_0 và P_d – suất liều bức xạ khi lớp chắn có bề dày tương ứng bằng 0 và d (xem hình H1.6-1.A); μ_p – hệ số làm yếu suất liều bức xạ tính theo một đơn vị bề dày của lớp chắn.

Trong trường hợp bức xạ tới là một chùm rộng và/hoặc lớp chắn có bề dày $d > 1/\mu_p$ (như minh hoạ trên hình H1.6-1.B), thì suất liều bức xạ bị làm yếu theo quy luật sau đây:

$$P_d = B_p P_0 e^{-\mu_p d} = P_0 e^{-\mu_{p,hd} d} \quad (1.6-2)$$

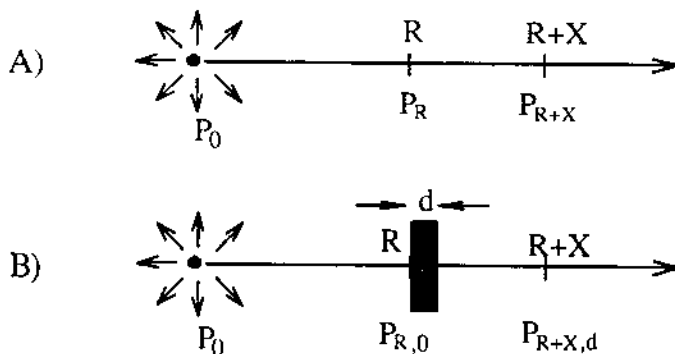
với B_p – hệ số tích lũy suất liều, có giá trị $B_p > 1$ và phụ thuộc một cách phức tạp vào nhiều yếu tố (như E_γ , kích thước của lớp tường chắn, bản chất của môi trường, vị trí của điểm đo so với các vật thể và vật liệu trong môi trường ở xung quanh .v.v.); $\mu_{p,hd}$ – giá trị hiệu dụng của hệ số làm yếu suất liều bức xạ. *Hệ số làm yếu hiệu dụng suất liều bức xạ không đơn năng là hệ số làm yếu một bức xạ đơn năng nào đó mà suất liều của nó bị giảm đi cùng một số lần như của bức xạ không đơn năng trong mọi điều kiện làm yếu như nhau.*

Xét trường hợp nguồn bức xạ là nguồn điểm đơn năng, đẳng hướng và được đặt trong môi trường là không khí, đồng thời coi ảnh hưởng của tán xạ gây bởi các vật ở xung quanh là không đáng kể. Giả sử P_R và P_{R+x} là giá trị suất liều bức xạ tại điểm cách nguồn một khoảng tương ứng bằng R và $R+x$ trong không khí. Trong trường hợp giữa nguồn và các điểm đo không có lớp tường nào chắn ở giữa (xem hình H1.6-2.A), thì suất liều bức xạ (gây bởi nguồn điểm) tại một điểm nào đó trong không khí sẽ tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách từ điểm đó tới nguồn. Vì vậy giữa các đại lượng P_R và P_{R+x} có tương quan sau đây:

$$P_R = P_{0,R} \quad \text{và} \quad P_{R+x} = P_{0,R+x} \quad (1.6-3.a)$$

$$P_{0,R+x} = P_{0,R} \left(\frac{R}{R+x} \right)^2 \quad (1.6-3)$$

Tỷ số $R^2/(R+x)^2$ xuất hiện trong tương quan trên vì trong trường hợp này chùm bức xạ là không song song.



Hình H1.6-2. Sự làm yếu suất liều gây bởi nguồn điểm đẳng hướng trong môi trường không khí; A) - Trường hợp không có tường chắn bảo vệ giữa nguồn và điểm đo; B) - Trường hợp có tường chắn bảo vệ. Ký hiệu: P_0 – suất liều tại vị trí đặt nguồn bức xạ; P_R và P_{R+x} – giá trị suất liều bức xạ tại điểm cách nguồn một khoảng tương ứng bằng R và $R+x$ trong không khí khi không có tường chắn; $P_{R+x,d}$ – suất liều bức xạ tại điểm $R+X$ khi có lớp tường chắn với bề dày bằng d đặt tại R .

Nếu tại khoảng cách R có lớp tường chắn mỏng với bề dày $d < 1/\mu_p$ (hình H1.6-2.B) và các kích thước khác của tường chắn được coi là nhỏ (để có thể bỏ qua ảnh hưởng của tán xạ), thì suất liều bức xạ tại điểm $R+x$ sẽ được xác định theo công thức sau:

$$P_{d,R+x} = P_{0,R+x} \cdot e^{-\mu_p d} = P_{0,R} \left(\frac{R}{R+x} \right)^2 \cdot e^{-\mu_p d} \quad (1.6-4)$$

với: d – bề dày lớp chắn (hay tường bảo vệ); R – khoảng cách từ nguồn tới lớp

tường chắn; còn $R+x$ – khoảng cách từ nguồn tới vị trí cần xác định suất liều; $P_{0,R}$ và $P_{0,R+x}$ – suất liều tại vị trí cách nguồn một khoảng tương ứng bằng R và $R+x$ khi không có lớp tường chắn; $P_{d,R+x}$ – suất liều tại vị trí cách nguồn một khoảng $R+x$ khi có lớp tường chắn với bề dày là d .

Nếu tường chắn là không mỏng và các kích thước của nó không được coi là nhỏ, thì cần phải tính tới ảnh hưởng của tán xạ gây bởi chính tường chắn đó (ngay cả khi nguồn bức xạ là nguồn điểm đơn năng, đẳng hướng và được đặt trong môi trường là không khí, đồng thời ảnh hưởng của tán xạ gây bởi các vật khác ở xung quanh là không đáng kể). Trong trường hợp này, suất liều bức xạ tại điểm $R+x$ sẽ được xác định theo công thức sau:

$$P_{d,R+x} = B_p \cdot P_{0,R+x} \cdot e^{-\mu_p d} = B_p \cdot P_{0,R} \left(\frac{R}{R+x} \right)^2 \cdot e^{-\mu_p d} \quad (1.6-5.a)$$

hoặc theo biểu thức sau đây nếu sử dụng giá trị hiệu dụng của hệ số làm yếu suất liều:

$$P_{d,R+x} = B_p \cdot P_{0,R+x} \cdot e^{-\mu_p d} = P_{0,R} \left(\frac{R}{R+x} \right)^2 \cdot e^{-\mu_{p,hd} \cdot d} \quad (1.6-5.b)$$

với B_p – hệ số tích lũy suất liều và $\mu_{p,hd}$ – giá trị hiệu dụng của hệ số làm yếu suất liều bức xạ như đã nêu trong công thức (1.6-2).

Trong trường hợp bức xạ không đơn năng, thì hệ số làm yếu suất liều có mặt trong các biểu thức từ (1.6-1) tới (1.6-5.b) cần được thay thế bằng giá trị hiệu dụng của nó tính cho toàn phổ năng lượng của bức xạ. *Hệ số làm yếu hiệu dụng suất liều bức xạ không đơn năng là hệ số làm yếu một bức xạ đơn năng mà suất liều của nó bị giảm đi cùng một số lần như của suất liều bức xạ không đơn năng trong những điều kiện hoàn toàn như nhau.*

Nói chung, *hệ số làm yếu hiệu dụng suất liều và hệ số làm yếu hiệu dụng cường độ bức xạ có thể có giá trị không bằng nhau. Hai đại lượng này có giá trị bằng nhau khi chùm bức xạ là hẹp và đơn năng.*

CHƯƠNG 2

BỨC XẠ IÔN HOÁ VÀ CƠ THỂ SỐNG

Chương 2 giới thiệu về ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với cơ thể sống, sau đó trình bày một số khuyến cáo quan trọng của Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế về an toàn bức xạ để vận dụng vào thực tế.

Nội dung chương 2 được trình bày theo dàn ý sau đây:

- 2.0. Bức xạ ion hoá với vấn đề môi trường (tr. 49)
- 2.1. Bức xạ ion hoá trong môi trường (50)
 - 2.1.1. Bức xạ ion hoá trong môi trường tự nhiên (50)
 - 2.1.2. Môi trường với các vụ sử dụng và thử vũ khí hạt nhân (53)
 - 2.1.3. Môi trường với việc sản xuất điện hạt nhân (55)
 - 2.1.4. Môi trường và các tai nạn hạt nhân (59)
 - 2.1.5. Về hiện trạng bức xạ môi trường ở Việt nam (63)
- 2.2. Đường trao đổi chất phóng xạ từ môi trường tới cơ thể sống (68)
- 2.3. Ảnh hưởng sinh học của bức xạ ion hoá (70)
- 2.4. Một số tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ (78)
 - 2.4.1. Vận dụng tiêu chuẩn (78)
 - 2.4.2. Chiếu xạ nghề nghiệp (80)
 - 2.4.3. Chiếu xạ dân thường (82)
 - 2.4.4. Đối chiếu các giới hạn về liều trong hoạt động thực tế (84)
 - 2.4.5. Kiểm tra sự tuân thủ các giới hạn về liều (84)
 - 2.4.6. Thông lượng và mật độ thông lượng tối đa cho phép (86)

2.0. BỨC XẠ IÔN HOÁ VỚI VẤN ĐỀ MÔI TRƯỜNG

Môi trường - đó là nhà ta ở, là nơi ta làm việc, là nẻo đường dẫn ta tới mọi nơi, là không khí ta hít thở, là đồ ăn thức uống ta dùng... Không một ai có thể tồn tại ở ngoài môi trường. Và thậm chí, ngay bản thân mỗi chúng ta cũng chỉ là một phần tử vô cùng nhỏ nhoi của môi trường. Vì vậy vấn đề môi trường phải là mối quan tâm chung của tất cả mọi người. Bảo vệ môi trường là vấn đề phải được đặt ra trước mỗi tác động của con người đối với thiên nhiên.

Chúng ta đang sống và làm việc trong một môi trường khổng lồ ngập tràn bức xạ ion hoá nói chung và bức xạ hạt nhân nói riêng với nhiều thành phần khác nhau như: bức xạ từ vũ trụ; bức xạ của các đồng vị phóng xạ có trong lòng đất, trong không khí, trong đồ ăn thức uống hàng ngày, trong vật liệu xây dựng; bức xạ của các đồng vị phóng xạ có ở ngay trong cơ thể của mỗi người; và, bức xạ của các nguồn phóng xạ do chính bàn tay con người tạo nên.

Ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với cơ thể sống rất phức tạp, nhưng tất cả đều bắt đầu bằng một quá trình vật lý thuần túy. Đó là quá trình hấp thụ năng lượng của bức xạ. Quá trình này chỉ xảy ra trong khoảnh khắc ($10^{-12} \div 10^{-16}$ s), nhưng có thể để lại trong cơ thể sống những mầm mống của các biến đổi sinh học sâu sắc. Mức độ tác động của bức xạ đối với cơ thể phụ thuộc vào liều lượng bức xạ được hấp thụ, loại bức xạ, điều kiện chiếu xạ, đặc điểm riêng của cơ thể bị chiếu xạ, và, điều kiện tồn tại của cơ thể sau khi bị chiếu xạ.

Bức xạ ion hoá tác động lên cơ thể con người và môi trường theo đủ mọi cung bậc khác nhau:

- Từ mức hoàn toàn không tạo nên một biến đổi có lợi nào cho con người, tới mức tạo nên những biến đổi quan trọng rất lợi cho sức khoẻ và có ích cho cuộc sống của con người.
- Từ mức hoàn toàn không gây nên một biến đổi bất lợi nào cho cơ thể, tới mức gây tử vong cho cơ thể, hoặc thậm chí có thể gây tử vong và

tổn thương nặng nề cho rất nhiều cá thể trong khoảng thời gian có khi kéo dài tới hàng chục năm.

- Từ mức hoàn toàn không tạo nên một biến đổi có lợi nào cho môi trường, tới mức tạo nên những biến đổi quan trọng rất lợi cho việc xử lý chất thải, xử lý vật liệu hoặc loài sinh học để bảo vệ môi trường.
- Từ mức hoàn toàn không gây nên một biến đổi bất lợi nào cho môi trường, tới mức có thể gây nên những hậu quả nghiêm trọng khôn lường cho cả một vùng sinh thái rộng lớn có khi bao trùm cả mấy châu lục trong khoảng thời gian không ngắn.

Ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với cơ thể sống và đối với môi trường có ý nghĩa tích cực hay tiêu cực, ở mức này hay mức khác, đều phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố, mà những yếu tố chủ quan – trong đó có nhận thức và thái độ của chúng ta – luôn luôn có ý nghĩa vô cùng quan trọng.

2.1. BỨC XẠ ION HOÁ TRONG MÔI TRƯỜNG

2.1.1. Bức xạ ion hoá trong môi trường tự nhiên

Môi trường (kể cả những nơi chưa từng bị con người tác động bao giờ) luôn chứa đựng một số thành phần của bức xạ ion hoá.

Các nguồn bức xạ ion hoá trong môi trường tự nhiên (môi trường chưa bị ảnh hưởng do hoạt động hạt nhân của con người) có thể có nguồn gốc khác nhau như: tia vũ trụ, hạt nhân phóng xạ có nguồn gốc từ vũ trụ, hạt nhân phóng xạ có nguồn gốc ở trái đất. Các nguồn bức xạ này làm cho cơ thể bị chiếu xạ từ bên ngoài vào hoặc từ bên trong ra (khi chúng lọt vào được cơ thể qua đường hô hấp hoặc tiêu hoá).

Trong số các đồng vị phóng xạ có nguồn gốc ở trái đất, đáng kể nhất là

đồng vị ^{40}K , các đồng vị thuộc dãy ^{238}U và dãy ^{232}Th . Đồng vị ^{40}K phát bức xạ bêta và gamma, có chu kỳ rã nửa rất dài (1,25 tỉ năm), chiếm 0,0118% hàm lượng của nguyên tố kali trong tự nhiên. (Kali có hàm lượng rất cao trong vỏ trái đất (là 2,35%) và trong thạch quyển (là 2,60%)). ^{40}K và các đồng vị phóng xạ có nguồn gốc vũ trụ gây nên những liều bức xạ trung bình tương đối ổn định và đồng đều cho mọi người trên trái đất. Liều bức xạ gây bởi các thành phần khác có thể thay đổi rất mạnh tùy thuộc vào vị trí và độ cao địa lý của khu vực, vào điều kiện sống và làm việc của con người, đặc biệt là vào vật liệu xây dựng, vào thiết kế và độ thoáng khí của nhà ở. Nồng độ của khí radon và thoron cùng các sản phẩm phân rã của chúng (thuộc các dãy ^{238}U và ^{232}Th) trong không khí có ý nghĩa quyết định đối với liều bức xạ bên trong khi chúng lọt vào cơ thể qua đường hô hấp.

Bảng B.2.1-1. Độ phóng xạ của các đồng vị phóng xạ tự nhiên tính trung bình trong 1 kg đất đá của lớp vỏ trái đất

Đồng vị	Độ phóng xạ, 10^{-6} Ci/kg đất đá		Đồng vị	Độ phóng xạ, 10^{-6} Ci/kg đất đá
^{40}K	$2,7 \cdot 10^{-2}$		$^{147}\text{Sm} + ^{152}\text{Sm}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$
^{87}Rb	$6,9 \cdot 10^{-3}$		^{176}Lu	$2,4 \cdot 10^{-6}$
^{232}Th	$1,1 \cdot 10^{-3}$		^{138}La	$4,2 \cdot 10^{-7}$
^{238}U	$1,0 \cdot 10^{-3}$		^{124}Sn	$9,8 \cdot 10^{-10}$
^{235}U	$4,6 \cdot 10^{-5}$		^{187}Re	$3,0 \cdot 10^{-10}$
^{150}Nd	$8,9 \cdot 10^{-5}$		^{130}Te	$7,1 \cdot 10^{-18}$

Bảng B.2.1-1 cho thấy độ phóng xạ trung bình của các đồng vị phóng xạ tự nhiên trong 1 kg đất đá của vỏ trái đất. Xét về độ phóng xạ trong phân rã phóng xạ tự nhiên, hiện nay chỉ có bốn thành phần đóng vai trò chủ yếu; đó là: ^{40}K , ^{87}Rb , ^{232}Th cùng các sản phẩm phân rã của nó, và, ^{238}U cùng các sản phẩm phân rã của nó. Tuy nhiên, xét về mật năng lượng toả ra do phân rã phóng xạ, thì hiện nay chỉ có K, U và Th là đóng vai trò quan trọng nhất.

Bảng B.2.1-2 và B.2.1-3 cho thấy liều bức xạ hàng năm gây bởi các thành phần bức xạ ion hoá của môi trường đối với cơ thể con người ở những vùng bình

thường. Liều tương đương hiệu dụng gây bởi nền bức xạ ion hoá đối với mỗi cư dân trên trái đất được đánh giá là 2,4 mSv; trong đó 1/3 là liều chiếu từ bên ngoài cơ thể và 2/3 là liều chiếu từ bên trong mà chủ yếu do hít thở không khí có Radon cùng các đồng vị con sống ngắn của nó.

Bảng B.2.1-2. Liều bức xạ hàng năm gây bởi bức xạ ion hoá trong môi trường tự nhiên (ở những vùng bình thường)

Liều hiệu dụng hàng năm, 10^{-6} Sv			
Nguồn bức xạ	Chiếu ngoài	Chiếu trong	Tổng cộng
Tia vũ trụ	380	----	380
Hạt nhân có nguồn gốc vũ trụ	----	12	12
Hạt nhân có nguồn gốc ở trái đất:			
• ^{40}K	130	170	300
• Dây ^{238}U :			1400
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$	140	1	
^{226}Ra		4	
$^{222}\text{Ra} \rightarrow ^{214}\text{Po}$		1200	
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$		50	
• Dây ^{232}Th	190	80	270
Tổng cộng (làm tròn số):	840	1520	2400

Bảng B.2.1-3. Liều bức xạ hàng năm gây bởi các thành phần bức xạ ion hoá trong tự nhiên

Bức xạ ion hoá trong tự nhiên	Liều hiệu dụng hàng năm, mSv	
	trung bình	tính năng cao
Tia vũ trụ	0,39	2,0
Bức xạ gamma có nguồn gốc từ trái đất	0,46	4,3
Hạt nhân phóng xạ có trong cơ thể (trừ radon)	0,23	0,6
Radon và các sản phẩm phân rã của nó	1,30	10
Tổng cộng (làm tròn số):	2,40	—

2.1.2. Môi trường với các vụ sử dụng và thử vũ khí hạt nhân

Từ năm 1945 đến 1980 đã liên tiếp xảy ra các vụ sử dụng và thử vũ khí hạt nhân trong không khí. Theo đánh giá, tổng hiệu suất phân hạch của các vụ nổ hạt nhân này lên tới 155 Mt (mà 1mégaton = 1 triệu tấn thuốc nổ TNT). Trong khi đó, chỉ cần một vụ nổ hạt nhân với hiệu suất phân hạch là 1 Mt đã đủ để tạo nên và tung vào môi trường một lượng lớn đồng vị phóng xạ như ^{131}I (4200 PBq), ^{90}Sr (3,9 PBq) và ^{137}Cs (5,9 PBq).

Bảng B.2.1-4. Độ phóng xạ tổng cộng của một số đồng vị phóng xạ chủ yếu được tạo nên và tung vào môi trường do hoạt động hạt nhân của con người

Hoạt động hoặc sự kiện	Độ phóng xạ, PBq (*)			Tổng cộng, PBq
	^{90}Sr	^{131}I	^{137}Cs	
Thử vũ khí hạt nhân trên không	600	650 000	910	1 810 600
Sản xuất điện hạt nhân	5,8(**)	0,048	40	?
Tai nạn Chernobyl	8,1	1 670	85	1 850
Tai nạn Windscale	?	0,74	0,022	11
Tai nạn Kyshtym	4,0	?	0,027	74
Tai nạn ThreeMile Island	?	0,00055	?	?

Ghi chú: (*) – 1PBq (đọc là 1 pêta becoren) = 1.10^{15} Bq.

(**) – Thải vào nước sông từ các nhà máy tái chế nhiên liệu.

Như vậy, lượng chất phóng xạ được tạo nên và tung vào môi trường do hậu quả của các vụ sử dụng và thử vũ khí hạt nhân trong không khí đã lên tới con số rất lớn. Những số liệu này được nêu trong bảng B.2.1-4.

Công suất của vụ nổ hạt nhân trong không khí không những ảnh hưởng tới lượng chất phóng xạ được tung vào môi trường mà còn ảnh hưởng tới phân bố chất phóng xạ trong môi trường. Đối với những vụ nổ hạt nhân công suất nhỏ, các chất phóng xạ chỉ được cuốn lên tới tầng đối lưu rồi sau đó lại rơi

xuống trái đất trong vòng vài ngày hoặc vài tuần. Những vụ nổ hạt nhân công suất lớn cuốn phần lớn chất phóng xạ lên tầng bình lưu. Các chất phóng xạ này được “lưu lại” ở tầng bình lưu trong một thời gian trung bình khoảng từ 1÷5 năm, tùy thuộc vào vĩ độ và độ cao mà chúng được cuốn lên; sau đó chúng lại dần dần được rơi trở lại trái đất.

Các loại bụi phóng xạ nói trên gây nên những liều chiếu trong và chiếu ngoài đối với cơ thể người. Liều này là hậu quả của rất nhiều đồng vị phóng xạ khác nhau có trong bụi phóng xạ rơi trả lại trái đất. Những phần đóng góp lớn nhất vào liều này (theo thứ tự ít dần) là do các đồng vị ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{144}Ce và ^3H . Các đồng vị ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{131}I và ^{144}Ce có chu kỳ rã nửa ngắn chỉ từ 8 ngày tới 1 năm, do đó chỉ có các đồng vị ^{14}C , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H là vẫn còn tiếp tục làm tăng thêm liều đối với mỗi người.

Bảng B2.1-5. Liều hiệu dụng tập thể gây bởi lượng đồng vị phóng xạ được thải vào môi trường bằng 1 PBq

Nguồn gây ô nhiễm môi trường	Liều hiệu dụng tập thể, người.Sv/PBq		
	^{90}Sr	^{131}I	^{137}Cs
Thử vũ khí hạt nhân trên không	700	0,3	2 000
Sản xuất điện hạt nhân	12 (*)	500	80
Tai nạn Chernobyl	?	20	5 000
Tai nạn Windscale	?	1 000	14 000

Ghi chú: (*) –Thải vào các dòng sông chảy ra biển.

Liều hiệu dụng tập thể gây bởi các vụ nổ hạt nhân trong không khí được đánh giá ở mức 3.10^7 Sv.người. Bảng B2.1-5 cho thấy các thành phần liều hiệu dụng tập thể gây bởi một số đồng vị phóng xạ đã được nêu trong bảng B2.1-4. Từ khoảng những năm cuối 1950 đầu 1960 đến nay, các cuộc thử vũ khí hạt nhân trong không khí dần dần được thay thế bằng những cuộc thử ở ngầm trong lòng đất. Tính tới nay đã có khoảng 1400 vụ thử ngầm trong lòng đất với tổng liều hiệu dụng tập thể được đánh giá là 200 người.Sv.

2.1.3. Môi trường với việc sản xuất điện hạt nhân

Một quy trình đầy đủ của việc sản xuất điện hạt nhân bao gồm rất nhiều công đoạn phức tạp: từ khai thác mỏ quặng phóng xạ, tới tuyển quặng, làm giàu quặng, chế tạo nhiên liệu, “đốt” nhiên liệu bằng phản ứng hạt nhân (trong lò phản ứng) để thu nhiệt của phản ứng rồi biến đổi thành điện năng, tái chế nhiên liệu, và, cuối cùng là xử lý các chất thải phóng xạ trước khi đưa chúng vào môi trường. (Chỉ có một vài nước có khả năng thực hiện được tất cả các công đoạn nêu trên. Ở những nước trình độ kỹ thuật còn thấp hoặc tiềm lực kinh tế và quốc phòng chưa cao thường chỉ thực hiện được một - vài công đoạn mà thôi).

Trong suốt cả thời kỳ hoạt động bình thường của tất cả các lò phản ứng hạt nhân trên thế giới và các bộ phận liên quan tới chu trình nhiên liệu hạt nhân, lượng chất phóng xạ thải vào môi trường (cụ thể là vào không khí và các dòng nước chảy) là rất nhỏ so với thải phóng xạ do thử vũ khí hạt nhân (xem bảng B2.1-4). Trong đó, phần lớn lượng chất thải phóng xạ được tạo ra không phải là trong quá trình vận hành lò phản ứng hạt nhân, mà là trong chu trình nhiên liệu hạt nhân (sản xuất nhiên liệu và tái chế nhiên liệu).

Trong các khâu đầu tiên của chu trình nhiên liệu (là khai thác mỏ quặng phóng xạ và tuyển quặng), các chất thải phóng xạ chủ yếu là ^{222}Rn và ^{230}Th . Đồng vị ^{222}Rn (là sản phẩm phân rã alpha của đồng vị ^{226}Ra) đặc biệt nguy hại vì nó là nguồn phóng xạ alpha và chu kỳ rã nửa ngắn chỉ có 3,8 ngày. Tính tới năm 1989, liều tập thể gây bởi ^{222}Rn do khai thác mỏ và tuyển quặng được đánh giá là $2,7 \times 10^3$ người.Sv, và do các đồng vị thải bỏ hoang là 277×10^3 người.Sv.

Tái chế là khâu cuối cùng trong chu trình nhiên liệu hạt nhân. Hiện nay chỉ có mấy nhà máy tái chế nhiên liệu hoạt động ở Pháp, Nhật và Anh. Phần lớn chất thải của các nhà máy này đều được thải vào các dòng chảy đổ ra biển. Liều hiệu dụng tập thể do chúng gây nên cho dân cư trong khu vực lân cận được đánh giá là $4,6 \times 10^3$ người.Sv, trong đó 90% là do hai đồng vị ^{137}Cs và ^{106}Ru có trong dòng chảy; còn ảnh hưởng lâu dài trên qui mô toàn cầu bởi đồng vị ^{14}C do chúng thải ra được đánh giá ở mức 123×10^3 người.Sv trong một vạn năm.

Bảng B2.1-6. Đánh giá thành phần liều hiệu dụng tập thể lâu dài gây bởi các nguồn phóng xạ nhân tạo

Hoạt động, Sự kiện	Đồng vị phóng xạ chủ yếu	Liều hiệu dụng tập thể	
		(người.Sv)	(tương đối)
Thử vũ khí hạt nhân trên không	^{14}C , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{95}Zr	30 000 000 (*)	1 (*)
Tai nạn Chernobyl	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I	600 000	0,020
Sản xuất điện hạt nhân:			
– Chu trình nhiên liệu	^{14}C , ^{222}Rn	400 000	0,0133
– Vận hành lò phản ứng	^{14}C	2 000	$7 \cdot 10^{-5}$
Sản xuất và sử dụng đồng vị phóng xạ	^{14}C	80 000	0,0026
Sản xuất vũ khí hạt nhân	^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{95}Zr	60 000	0,0020
Tai nạn Kyshtym	^{144}Ce , ^{90}Sr , ^{95}Zr	2 500	$8,3 \cdot 10^{-5}$
Các vệ tinh trở về khí quyển trái đất	^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{137}Cs	2 100	$7 \cdot 10^{-5}$
Tai nạn Windscale	^{131}I , ^{210}Po , ^{137}Cs	2 000	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Các tai nạn hạt nhân khác	^{137}Cs , ^{133}Xe , ^{60}Co , ^{192}Ir	300	$1 \cdot 10^{-5}$
Thử vũ khí hạt nhân ngầm dưới đất	^{131}I	200	$6,7 \cdot 10^{-6}$

Ghi chú: (*) – 86% của liều này là do đồng vị ^{14}C .

Như vậy các chất thải phóng xạ chủ yếu của chu trình nhiên liệu hạt nhân hiện nay gây nên liều hiệu dụng tập thể cỡ 285×10^3 người.Sv; trong số này liều gây bởi các đồng vị thải do khai thác và tuyển quặng chiếm tới 97,4%, còn do các yếu tố khác - chỉ chiếm không quá 2,6%. Trong khi đó hoạt động của lò phản ứng của tất cả các nhà máy điện hạt nhân trên thế giới từ năm 1956 đến đầu năm 1990 chỉ gây nên liều hiệu dụng tập thể ở mức $3,7 \times 10^3$ người.Sv, mà

trên 50% giá trị này là do ảnh hưởng lâu dài của đồng vị ^{14}C .

Bảng B.2.1-7. Liều nhiễm xạ tập thể của dân chúng do sản xuất điện hạt nhân (chuẩn hoá trên một đơn vị năng lượng điện được sản xuất, thể hiện bằng %)

<i>Nguồn bức xạ</i>	<i>Số phần trăm, chuẩn hoá trên một đơn vị năng lượng điện được sản xuất</i>
<i>Thành phần có tính chất địa phương và khu vực</i>	
Khai thác mỏ, sàng và tuyển quặng	0,7%
Sản xuất nhiên liệu hạt nhân	không
Vận hành lò phản ứng hạt nhân	0,6%
Tái chế nhiên liệu hạt nhân	0,1%
Vận chuyển	0,05%
<i>Thành phần có tính chất tổng thể (bao gồm cả chôn giữ chất thải rắn)</i>	
Khai thác mỏ, sàng và tuyển quặng (thải trong một vận năm)	74,0%
Vận hành lò phản ứng hạt nhân	0,25%
Khuếch tán hạt nhân phóng xạ trên toàn cầu (chủ yếu do tái chế và chôn giữ thải rắn)	24,3%
<i>Tổng cộng (làm tròn số):</i>	<i>100,0%</i>

Lượng chất thải phóng xạ của các nhà máy điện hạt nhân phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: loại lò phản ứng hạt nhân, các hệ thống xử lý chất thải phóng xạ, các hoạt động bảo dưỡng thiết bị v.v. Tuy nhiên, theo đánh giá định kỳ (5 năm một lần) của Hội đồng Khoa học của Liên Hiệp Quốc về ảnh hưởng của bức xạ hạt nhân (United Nations Scientific Committee on the effect of Atomic Radiation, viết tắt là UNSCEAR), thì lượng thải phóng xạ quy chuẩn (tức là độ phóng xạ tính trên một đơn vị điện năng được sản xuất) giảm dần theo thời gian.

Điều này phản ánh những tiến bộ cả về chất lượng của nhiên liệu hạt nhân cũng như về hiệu suất và các chỉ tiêu của lò phản ứng hạt nhân trong vận hành.

Bảng B2.1-6 so sánh ảnh hưởng ô nhiễm môi trường lâu dài của việc sản xuất điện hạt nhân và các nguồn khác. Bảng này cho thấy đánh giá thành phần liều hiệu dụng tập thể lâu dài gây bởi các nguồn phóng xạ nhân tạo. Để tiện so sánh, ở cột cuối của bảng cho giá trị liều tính theo đơn vị tương đối.

Bảng B.2.1-8. Liều nhiễm xạ tập thể của loài người do 50 năm vận hành nhà máy điện hạt nhân và do các sự kiện xảy ra từ năm 1945 đến 1992 (%)

<i>Nguồn bức xạ hạt nhân</i>	<i>Cơ sở để tính nhiễm xạ</i>	<i>Số phần trăm, %</i>
Các nguồn bức xạ tự nhiên	Mức như hiện nay cho 50 năm	76,58
Chiếu xạ trong y tế:	Mức như hiện nay cho 50 năm	
– Khám bệnh		10,68
– Chữa bệnh		8,83
Thử vũ khí hạt nhân trên không	Từ trước tới nay. Đã kết thúc.	3,53
Điện hạt nhân	Vận hành cho tới nay: 0,04% Như hiện nay cho 50 năm: 0,20%	0,24
	<i>Tổng cộng :</i>	
Các tai nạn nghiêm trọng	Đã xảy ra cho tới nay	0,07
Chiếu xạ nghề nghiệp:	Mức như hiện nay cho 50 năm	
– Y tế	0,005	
– Điện hạt nhân	0,010	
– Công nghiệp	0,003	
– Quốc phòng	0,001	
– Khai thác mỏ khác Uran	0,050	
	<i>Tổng cộng :</i>	
		0,07
<i>Tổng cộng:</i>		100,0 %

Như vậy, có thể đánh giá tổng liều hiệu dụng tập thể gây bởi tất cả các công đoạn sản xuất điện hạt nhân đối với dân cư trong vùng và trong khu vực phụ cận trong hơn ba chục năm qua (kể từ năm 1956) ở mức 286×10^3 người.Sv và chỉ có chưa tới 0,7% giá trị này là gây bởi hoạt động bình thường của lò phản ứng hạt nhân. Còn thành phần tổng liều hiệu dụng tập thể lâu dài được đánh giá là 400×10^3 người.Sv do ^{222}Rn và ^{14}C thoát ra từ chu trình nhiên liệu, và $2,0 \times 10^3$ người.Sv do ^{14}C được sinh ra trong quá trình vận hành của lò phản ứng.

Bảng B.2.1-7 cho thấy liều nhiễm xạ tập thể của dân chúng do sản xuất điện hạt nhân (tính trên một đơn vị năng lượng điện được sản xuất và thể hiện bằng %). Bảng B.2.1-8 cho thấy liều nhiễm xạ tập thể của loài người (– trên toàn trái đất) do 50 năm vận hành các nhà máy điện hạt nhân hoặc do các sự kiện xảy ra từ năm 1945 đến 1992 (thể hiện bằng %).

2.1.4. Môi trường và các tai nạn hạt nhân

Có rất nhiều nguyên nhân khác nhau có thể dẫn tới hậu quả là các đồng vị phóng xạ nhân tạo bị thải vào môi trường. Có những tai nạn hạt nhân chỉ gây nhiễm bẩn phóng xạ trong một phạm vi hẹp và chỉ làm một số ít người bị chiếu xạ. Cũng có những tai nạn hạt nhân dẫn tới hậu quả trầm trọng trong phạm vi lãnh thổ rộng lớn và làm cho một bộ phận đông đảo dân cư bị chiếu xạ. Dưới đây nêu những ảnh hưởng tới môi trường do một số tai nạn hạt nhân điển hình gây ra.

2.1.4.1. Tai nạn Chernobyl

Tai nạn xảy ra ngày 26-4-1986 trên lò phản ứng của nhà máy điện hạt nhân ở Chernobyl (thuộc Ucraina, Liên Xô cũ) là một thảm họa khủng khiếp nhất trong lịch sử ứng dụng năng lượng hạt nhân vào mục đích hoà bình. Tai nạn này đã hủy hoại lò phản ứng và trong vòng chục ngày đã thải vào môi trường một lượng đồng vị phóng xạ lớn khoảng $1,2 \cdot 10^4$ PBq, trong đó khoảng

$(6\div7)\times 10^3\text{PBq}$ là các khí trơ, khoảng $(3\div4)\%$ của số nhiên liệu hạt nhân đang được sử dụng ở trong lò phản ứng tại thời điểm xảy ra tai nạn đã lọt ra khỏi vỏ lò và cùng với khoảng 100% các khí trơ và $(20\div60)\%$ các đồng vị phóng xạ dễ bay hơi khác đã bị ném tung vào môi trường. Đồng vị phóng xạ ^{134}Cs ($\sim 50\text{PBq}$) cùng với các đồng vị được nêu trong bảng B2.1-6 là những đồng vị phóng xạ chủ yếu đã bị thải vào môi trường (chiếm tới $\sim(50\div60)\%$ lượng ^{131}I và $\sim(20\div40)\%$ lượng của hai đồng vị Cs có trong lò). Các bảng B2.1-5 và B2.1-6 cho thấy ảnh hưởng của các thành phần liều trong tai nạn này.

Theo đánh giá của Hội thảo Quốc tế “Mười năm sau thảm hoạ Chernobyl: Tổng kết hậu quả” (ngày 8-12 tháng 4-1996) do Ủy ban Châu Âu cùng Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế và Tổ chức Y tế Thế giới phối hợp tổ chức, thì tai nạn Chernobyl đã dẫn đến những hậu quả như sau:

- 116 nghìn người di tản.
- Độ phóng xạ của ^{137}Cs vượt quá mức 185 kBq/m^2 chiếm một vùng lãnh thổ rộng của Belarus ($16,5$ nghìn km^2), của Nga ($4,6$ nghìn km^2) và của Ucraina ($8,1$ nghìn km^2).
- Để khắc phục hậu quả tai nạn, đã huy động tới $0,6\div0,8$ triệu lượt người.
- Riêng ở Liên bang Nga, năm 1991, vùng lãnh thổ có đất bị nhiễm bản ^{137}Cs cao hơn 40 KBq/m^2 chiếm diện tích hơn 57 nghìn km^2 với $2,5$ triệu cư dân. Bụi phóng xạ tuy rơi xuống lãnh thổ Liên Xô cũ là chủ yếu, nhưng nó đã gây nhiễm xạ một vùng lãnh thổ Châu Âu rộng lớn nằm cách Chernobyl trong vòng bán kính khoảng 2 nghìn km . Riêng đối với vùng lân cận Chernobyl nằm cách lò phản ứng trong vòng 10 km , liều bức xạ cao tới mức gây tử vong trong một số hệ sinh thái nhạy phóng xạ ở địa phương trong thời gian vài tuần đầu sau khi xảy ra tai nạn, đặc biệt là đối với các cây thuộc loài tùng bách và loài động vật nhỏ có vú. Đến mùa thu 1986, suất liều ở đây đã giảm xuống 100 lần. Tới năm 1989 liều bức xạ ở vùng này đã bắt đầu đạt lại mức bức

xạ nền của môi trường tự nhiên. Không phát hiện thấy những ảnh hưởng nghiêm trọng kéo dài trong các loài hoặc trong các hệ sinh thái. Về khả năng ảnh hưởng di truyền lâu dài và mức độ quan trọng của chúng vẫn còn phải nghiên cứu.

- Đối với con người, mức độ ảnh hưởng phụ thuộc nhiều vào điều kiện bị chiếu xạ. Có hai nguyên nhân chủ yếu để con người bị chiếu xạ: một là bắn phóng xạ trên bề mặt (gây chiếu xạ từ bên ngoài), hai là không khí và đồ ăn thức uống bị nhiễm xạ (gây chiếu xạ từ bên trong cơ thể). Trong vài tuần đầu sau khi xảy ra tai nạn, đồng vị ^{131}I có ảnh hưởng sinh học lớn nhất. Từ năm 1987, phần lớn liều bức xạ là do hai đồng vị ^{134}Cs và ^{137}Cs gây nên (xem các bảng từ B2.1-4 đến B2.1-7).
- Tới năm 1996, ở một số địa phương đã không còn một sản phẩm lương thực nào do các nông trường tập thể sản xuất mà vượt quá mức phóng xạ theo qui định của Tổ chức Y tế thế giới (WHO) và Tổ chức Nông Lương thế giới (FAO) (trừ một số sản phẩm của các nông trang cá thể). Tuy nhiên, ở một số địa phương khác mức phóng xạ vẫn cao hơn nền bức xạ tự nhiên và do đó một số thực phẩm vẫn cho thấy mức Cs vượt quá qui định của WHO và FAO.

2.1.4.2. Tai nạn Kyshtym

Tai nạn xảy ra ngày 29-9-1957 ở vùng nam Uran của Liên Xô cũ. Các muối nitrat và axetat khô bị nổ trong một thùng chứa chất thải có phóng xạ cao.

Nguyên nhân của vụ nổ hoá chất dẫn đến tai nạn Kyshtym là do hệ thống làm mát bị hỏng đã làm cho các muối dễ nổ chứa trong thùng bị nóng lên. Vụ nổ đã tung vào môi trường khoảng 74 PBq sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân, trong đó ^{144}Ce và ^{95}Zr chiếm 91%. Phần lớn bụi phóng xạ rơi xuống một vùng rộng 300kmx50km. Bảng B2.1-4 và B2.1-6 cho thấy lượng chất thải của một số đồng vị phóng xạ và liều bức xạ là hậu quả của tai nạn này.

2.1.4.3. Tai nạn Windscale

Tai nạn xảy ra ngày 10-10-1957 trong một nhà máy chế tạo nhiên liệu ở Sellafield (thuộc nước Anh) làm cho lò grafit bị cháy và thải vào môi trường một số đồng vị phóng xạ như ^{131}I (0,74 PBq), ^{137}Cs (0,022 PBq), ^{106}Ru (0,003 PBq), ^{133}Xe (1,2 PBq) và ^{210}Po (0,0088 PBq). Ảnh hưởng nghiêm trọng nhất là đồng cỏ chăn nuôi bị nhiễm bẩn ^{131}I . Quyết định cấm sữa được thi hành kịp thời đã làm giảm đáng kể thành phần liều chiếu trong theo đường trao đổi chất phóng xạ Cỏ→Bò→Sữa→Người. Bảng B2.1-6 cho thấy liều hiệu dụng tập thể gây bởi tai nạn này; trong đó 37% là do ^{131}I , 37% do ^{210}Po và 15% do ^{137}Cs .

Ngoài những tai nạn kể trên, còn có một số tai nạn xảy ra do máy bay chở vũ khí hạt nhân bị hỏng như tai nạn ở Palomares (Tây Ban Nha, năm 1966) và ở Thule (Greenland, năm 1968) làm môi trường bị ô nhiễm bởi ^{239}Pu và ^{240}Pu (trong phạm vi hẹp) .v.v.

2.1.4.4. Nhận xét chung

Như vậy, tổng lượng thải phóng xạ do các vụ tai nạn hạt nhân gây ra chỉ bằng cỡ 0,1% so với tổng lượng thải phóng xạ bị ném vào môi trường từ năm 1945 tới nay do các vụ thử và sử dụng vũ khí hạt nhân (xem cột cuối của bảng B.2.1-4).

Tuy vậy các vụ tai nạn hạt nhân thường làm cho các chất thải phóng xạ chỉ cuốn lên được tới tầng đối lưu nên thải phóng xạ thường chỉ lan được trong một phạm vi không rộng lắm. Do đó mật độ rơi lắng có thể rất lớn và có thể gây nên những ảnh hưởng không nhỏ đối với môi trường (xem bảng B.2.1-5 và B.2.1-6). Đó chính là một trong những lý do khiến chúng ta phải quan tâm nhiều tới ảnh hưởng của các vụ tai nạn hạt nhân.

Theo kết luận của Hội đồng khoa học của Liên Hiệp Quốc về ảnh hưởng của bức xạ hạt nhân, thì việc vận hành bình thường của tất cả các cơ sở hạt nhân phục vụ cho mục đích hoà bình chỉ có đóng góp không đáng kể vào tổng liều bức xạ (toàn cầu). Theo đó, liều tổng cộng gây bởi toàn bộ các hoạt động hạt

nhân vì mục đích hoà bình gộp lại cũng chỉ tương đương có vài ngày bị chiếu xạ bởi các nguồn bức xạ trong tự nhiên. Bảng B.2.1-9 cho thấy liều hiệu dụng tập thể gây bởi các nguồn bức xạ nhân tạo, được biểu diễn bằng những khoảng thời gian tương đương với liều gây bởi các nguồn bức xạ trong môi trường tự nhiên.

Bảng B.2.1-9. Liều hiệu dụng tập thể gây bởi các nguồn bức xạ nhân tạo, biểu diễn bằng những khoảng thời gian tương đương với liều gây bởi các nguồn bức xạ tự nhiên trong môi trường

<i>Nguồn bức xạ</i>	<i>Cơ sở để so sánh</i>	<i>Khoảng thời gian tương đương với liều gây bởi các nguồn bức xạ tự nhiên</i>
Các nguồn bức xạ tự nhiên trong môi trường	Tính trung bình trên toàn thế giới	Một năm
Thử vũ khí hạt nhân	Từ trước tới nay (đã kết thúc)	2,3 năm
Chiếu xạ y tế	Một năm vận hành ở mức hiện nay	90 ngày
Tai nạn nghiêm trọng	Các sự kiện cho tới nay	20 ngày
Điện hạt nhân (vận hành bình thường)	Tổng cộng từ trước tới nay	10 ngày
	Một năm vận hành ở mức hiện nay	1 ngày
Chiếu xạ nghề nghiệp	Một năm vận hành ở mức hiện nay	8 giờ

2.1.5. Về hiện trạng bức xạ môi trường ở Việt Nam

Các nguồn bức xạ iôn hoá bắt đầu được sử dụng ở Việt Nam từ năm 1923, trước tiên là để chữa bệnh ung thư ở Viện Radium Đông Dương (nay là Bệnh viện K – còn gọi là Viện Ung thư Trung ương; tại phố Quán Sứ, Hà Nội).

Theo giấy xác nhận do cụ bà Marry Curie ký ngày 25 tháng 6 năm 1923, sáu nguồn phóng xạ Ra hình kim được gửi sang Viện Radium Đông Dương (Hà Nội, Việt Nam) năm

1923 có kích thước như sau:

Kích thước của nguồn	Số 1	Số 2	Số 3	Số 4	Số 5	Số 6
Bề dài, mm	26	25,95	25,85	25,95	25,85	25,85
Đường kính, mm	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Khối lượng Ra, mg	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
Khối lượng của nguồn, g	0,8062	0,8020	0,8000	0,7990	0,8026	0,7887

Trong suốt tám chục năm qua, ngành y tế vẫn liên tục sử dụng và sử dụng ngày càng nhiều đồng vị phóng xạ để chữa bệnh u bướu và chẩn đoán một số bệnh. Từ năm 1958, các phương pháp hạt nhân bắt đầu được sử dụng không những trong y tế mà cả trong một số lĩnh vực khác, trước hết là để phục vụ việc thăm dò khoáng sản ở miền Bắc (dùng nguồn đồng vị phóng xạ nhập vào từ Liên Xô cũ). Năm 1963 lò phản ứng hạt nhân đầu tiên với công suất 250 kW ở Đà Lạt được khánh thành và bắt đầu đi vào hoạt động. Tại Viện Vật lý (Nghĩa Đô, Hà Nội) đã đưa vào sử dụng máy phát nơtron 14 MeV năm 1974 và máy gia tốc electron Microtron MT-17 năm 1982. Sau khi đất nước thống nhất, năm 1976 ngành hạt nhân nước ta được chính thức tập hợp lại với sự ra đời của Viện Nghiên cứu Năng lượng Nguyên tử Quốc gia. Bước vào năm 2001, tại Bệnh viện K – lần đầu tiên ở nước ta – bắt đầu sử dụng chùm lượng tử phát ra từ máy gia tốc electron để chữa bệnh u bướu.

Kể từ khi các nguồn bức xạ iôn hoá bắt đầu được sử dụng ở Việt Nam tới nay, số nguồn bức xạ iôn hoá được đưa vào ứng dụng đã tăng lên rất nhiều. Phạm vi ứng dụng bức xạ iôn hoá ở nước ta đã được mở rộng hơn rất nhiều so với trước đây. Ngày nay các nguồn bức xạ iôn hoá không chỉ được dùng để chữa trị ung thư như lúc ban đầu, mà còn được dùng rộng rãi trong y tế, trong kiểm tra không phá huỷ mẫu, trong công nghiệp giấy, xi măng, trong thăm dò tài nguyên thiên nhiên (như: quặng mỏ, dầu khí, nước ngầm), trong bảo quản và chế biến nhiều loại sản phẩm, trong phân tích thành phần đồng vị và thành phần nguyên tử của nhiều loại mẫu vật .v.v. Trong lĩnh vực công nghiệp, có nhà máy sử dụng tới ngót một trăm nguồn phóng xạ. Gần đây ở nước ta cũng đã bắt đầu tự sản xuất được một số nguồn đồng vị phóng xạ.

Các nguồn bức xạ ion hoá ở nước ta phân bố rải rác khắp cả nước, do nhiều ngành, nhiều cơ sở quản lý. Cụ thể như sau.

– *Trong ngành y tế:* Nhiều cơ sở dùng nguồn bức xạ ion hoá để khám và chữa bệnh ung thư. Khoảng 2000÷3000 máy phát Rontghen ở các bệnh viện cấp trung ương, cấp tỉnh, cấp huyện và ở không ít cơ sở y tế tư nhân. Hàng chục đơn vị y học hạt nhân ở các bệnh viện từ trung ương đến địa phương đang sử dụng nhiều loại nguồn phóng xạ hử để khám và chữa bệnh. Hiện nay có một số máy gia tốc được sử dụng để phục vụ các mục đích này.

– *Trong các lĩnh vực công nghiệp và tìm kiếm tài nguyên:* Nhiều loại nguồn phóng xạ (gamma và nơtrôn) được sử dụng để thăm dò và tìm kiếm tài nguyên thiên nhiên (như: than, quặng, dầu, khí, nước ngầm ...), kiểm tra không phá huỷ mẫu, và, để tự động hoá một số khâu trong dây chuyền sản xuất...

– *Trong ngành xây dựng và giao thông vận tải:* Nhiều nguồn phóng xạ được sử dụng trong các nhà máy sản xuất xi măng hoặc trong kiểm tra khuyết tật các dầm, cột trụ và tường bê tông.v.v.

– *Trong ngành nông nghiệp và chế biến thực phẩm:* Nhiều nguồn phóng xạ được sử dụng trong các công đoạn sản xuất ở các nhà máy bia, nước giải khát, đồ hộp, xử lý bức xạ nhằm tăng cường chất lượng và bảo quản thực phẩm...

– *Trong ngành Hải quan:* Có nhiều phương tiện sử dụng bức xạ ion hoá để kiểm tra an ninh và hàng hoá ở các cửa khẩu của nước ta.

– *Tại các trường đại học và viện nghiên cứu:* Lò phản ứng hạt nhân, máy phát nơtrôn, máy gia tốc, nguồn phóng xạ các loại được sử dụng để phục vụ nghiên cứu, đào tạo, sản xuất (bảo quản thực phẩm, khử trùng dụng cụ y tế, sản xuất đồng vị phóng xạ, gây đột biến di truyền tạo giống mới...).

– *Nhiều doanh nghiệp:* dùng nguồn phóng xạ và máy phát Rontghen để kiểm định vàng bạc, đá quý; hoặc khai thác sa khoáng tạo nên các sản phẩm và vật liệu phế thải có chứa chất phóng xạ, v.v.

Như vậy đủ thấy rằng: ở nước ta các loại nguồn bức xạ iôn hoá đã và đang được ứng dụng khá rộng rãi và phổ biến trong nhiều lĩnh vực từ nghiên cứu, sản xuất đến đời sống hàng ngày. Một số chất thải phóng xạ đã bắt đầu xuất hiện cùng với sự hoạt động của lò phản ứng hạt nhân, với việc khám và chữa bệnh bằng phóng xạ, với việc cất giữ những nguồn phóng xạ không còn đủ mạnh để sử dụng do đã trải qua nhiều chu kỳ rã nửa kể từ khi được sản xuất, với việc khai thác sa khoáng.v.v. Ngày nay kỹ thuật hạt nhân được ứng dụng trong hàng loạt lĩnh vực ở nước ta. Cụ thể như trong các lĩnh vực sau đây:

1. Kiểm tra không phá huỷ mẫu;
2. Thăm dò và khai thác tài nguyên trong lòng đất (như: quặng phóng xạ, dầu khí, than đá, nước ngầm .v.v.);
3. Khám và chữa bệnh;
4. Phân tích thành phần nguyên tố hoặc thành phần đồng vị của nhiều loại vật liệu;
5. Diệt nấm, mốc, diệt khuẩn hoặc diệt trùng đối với nhiều loại thực phẩm, thuốc nam, hoặc nhiều loại sản phẩm hay dụng cụ y tế nhằm kéo dài thời hạn sử dụng chúng với chất lượng cao;
6. Sản xuất đồng vị phóng xạ phục vụ cho lĩnh vực y học hạt nhân và địa chất thuỷ văn, hoặc để nghiên cứu sa bồi ở lòng sông, cửa sông hay cảng biển;
7. Tự động hoá một số khâu trong qui trình sản xuất;
8. Nghiên cứu và tạo sản phẩm có đặc tính di truyền mong muốn như năng suất cao, chất lượng tốt, chịu được một số điều kiện khắc nghiệt .v.v. trong trồng trọt;
9. Nghiên cứu ảnh hưởng của chất dinh dưỡng hoặc chế độ chăm sóc đối với sự phát triển và chất lượng của cây trồng và vật nuôi;
10. Xác định tuổi của các mẫu vật cổ;
11. Cảnh báo, bảo vệ một số đối tượng đặc biệt;
12. Kiểm soát và bảo vệ môi trường .v.v.

Ở các nước càng phát triển, kỹ thuật hạt nhân được ứng dụng càng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kinh tế, văn hoá, đời sống và môi trường. Danh mục trên tuy chưa nêu hết, song cũng đủ để cho thấy sự phong phú cũng như vai trò quan trọng của việc ứng dụng kỹ thuật hạt nhân ở nước ta hiện nay và trong tương lai.

Về mặt tự nhiên, nước ta có đặc điểm địa lý phức tạp, các nguồn nước khoáng và các mỏ sa khoáng phân bố rải rác ở nhiều nơi. Các nguồn nước khoáng và sa khoáng này đồng thời còn là những nguồn bức xạ hạt nhân tự nhiên. Một số khảo sát về liều lượng bức xạ trong môi trường cho thấy rằng không thể không chú ý tới ảnh hưởng của chúng, nhất là vì quy trình khai thác những nguồn khoáng này thường có liên quan tới môi trường và nguồn nước sinh hoạt.

Một số khu vực ở nước ta có mỏ quặng phóng xạ nên có nền bức xạ tương đối cao. Việc khai thác mỏ quặng phóng xạ ở nước ta mới chỉ ở mức độ thủ công cỡ nhỏ. Tuy nhiên vấn đề bức xạ môi trường sẽ nổi lên thành vấn đề quan trọng hàng đầu ở những nơi này một khi việc khai thác quặng phóng xạ được đẩy mạnh và mở rộng.

Cũng không thể quên rằng trong ba bốn chục năm qua chúng ta đã liên tục là nạn nhân của các vụ nổ vũ khí hạt nhân, nhất là của những vụ nổ ở trên không. Các vụ nổ vũ khí hạt nhân ở trên không cuốn bụi phóng xạ lên tầng đối lưu để bụi theo gió bay đi các nơi rồi rơi xuống đất trong một thời gian ngắn. Không những thế, các vụ thử này còn cuốn bụi phóng xạ lên tận tầng bình lưu để chúng ở lại đó một thời gian dài (tới vài năm) rồi mới rơi xuống nhiều nơi trên trái đất. Nước ta không nằm ngoài danh sách các địa chỉ này.

Ngoài ra, các vụ hoạt động của núi lửa ở vành đai Thái Bình Dương cũng có thể làm một lượng không nhỏ chất phóng xạ bị cuốn từ trong lòng trái đất lên không trung rồi một phần theo gió bay tới và rơi xuống Việt Nam.

Trong mấy chục năm qua ở nước ta chưa có đủ điều kiện để kiểm tra, theo dõi một cách thường xuyên và liên tục nên chưa thể đánh giá được mức độ

của tất cả những ảnh hưởng này. Hiện nay điều kiện nhân lực và trang thiết bị để kiểm tra bức xạ môi trường ở nước ta hãy còn rất hạn chế.

Việc đảm bảo an toàn bức xạ và bảo vệ môi trường được thực hiện đến mức nào phụ thuộc rất nhiều vào sự hiểu biết và ý thức của từng người, đặc biệt là của những người có trách nhiệm ở từng cơ sở.

2.2. ĐƯỜNG TRAO ĐỔI CHẤT PHÓNG XẠ TỪ MÔI TRƯỜNG TỚI CƠ THỂ SỐNG

Từ mục 2.1 vừa xét trên đây, ta thấy rõ là những hoạt động hạt nhân của con người có thể dẫn tới sự thải chất phóng xạ vào môi trường dưới nhiều dạng: thải rắn, thải lỏng, thải khí và son khí, thải ở dạng bụi.

Thải phóng xạ ở dạng khí và son khí theo đường hô hấp lọt vào cơ thể và gây nên liều chiếu trong. Nguy hại nhất là khi các khí và son khí này bị phân rã alpha. Một phần khí phóng xạ có thể được thực vật hấp thụ trong quá trình trao đổi khí trực tiếp với môi trường, một phần có thể bị hoà tan trong nước rồi được rễ cây hút lên, hoặc được các loài thủy sản hấp thụ. Như vậy, cuối cùng một phần khí thải phóng xạ cũng có thể xâm nhập vào cơ thể con người qua đường tiêu hoá và gây nên liều chiếu trong.

Thải lỏng có thể hoà vào môi trường nước hoặc thấm vào đất trồng trọt, tiếp đó, theo hệ sinh thái đi vào các loại lương thực, thực phẩm rồi theo đường tiêu hoá gây nên liều chiếu trong.

Thải ở dạng bụi theo nước mưa rơi xuống hoặc rơi lãng dần xuống làm nhiễm bẩn bề mặt. Nó có thể trực tiếp gây nên liều chiếu ngoài. Nó cũng có thể thấm vào đất rồi theo dòng nước ngầm dịch chuyển (di cư) dần, khi gặp môi trường dễ hòa tan, nó sẽ hòa tan rồi sau đó có thể gây nên liều chiếu trong giống như các chất thải phóng xạ ở dạng lỏng.

Thải phóng xạ ở dạng rắn có thể gây liều chiếu ngoài. Tuy nhiên khi nằm trong vùng có đủ điều kiện cho nó hoà tan, nó sẽ bị hoà tan dần, tạo nên thải phóng xạ lỏng để rồi cuối cùng cũng có thể gây nên liều chiếu trong.

Một phần chất thải phóng xạ, sau khi lọt vào cơ thể sống, có thể thoát ra môi trường rồi sau đó một khoảng thời gian nào đó lại có thể lọt vào cơ thể theo đường thích hợp.

Bảng B.2.2-1. Đường trao đổi iốt (bền) từ môi trường vào cơ thể người

<i>Môi trường</i>	<i>Nguồn hấp thụ vào cơ thể</i>	<i>Lượng iốt bền được hấp thụ hàng ngày, (10^{-6} g/ ngày)</i>
1. Không khí trên mặt đất (Land atmosphere)	Hô hấp (*), lắng đọng trên lá thực vật.	19
2. Vùng nước nông trên biển. (Ocean mixed layer)	Cá nước mặn.	17
2. Vùng sát mặt đất. (Surface soil region)	Rễ cây hút lên, cá nước ngọt, nước uống.	190
4. Vùng nước nông gần bề mặt. (Shallow subsurface region)	Cá nước ngọt, nước uống.	1,7
5. Vùng nước sâu (Deep subsurface region)	Cá nước ngọt, nước uống.	0,03
<i>Tổng cộng lượng iốt hấp thụ vào cơ thể (người chuẩn)</i> $\approx 230.10^{-6}$ g/ngày.		

Ghi chú: () – Lượng hấp thụ qua đường hô hấp nhỏ hơn 1%.*

Bảng B.2.2-1 minh họa đường trao đổi iốt từ môi trường vào cơ thể sống.

Sự am hiểu đường trao đổi chất phóng xạ từ môi trường tới cơ thể sống giúp ta nhanh chóng tìm được biện pháp ứng phó đúng đắn, hoặc tìm được cách lựa chọn tốt nhất. Nhờ vậy có thể làm giảm đáng kể thành phần này hoặc thành

phần khác của liều bức xạ, làm giảm bớt hậu quả ô nhiễm môi trường. (Có thể lấy trường hợp tai nạn Windscale làm một ví dụ).

2.3. ẢNH HƯỞNG SINH HỌC CỦA BỨC XẠ IÔN HOÁ

Ảnh hưởng của bức xạ iôn hoá đối với cơ thể sống rất phức tạp, nhưng tất cả đều bắt đầu bằng một quá trình vật lý thuần túy. Đó là quá trình hấp thụ năng lượng của bức xạ. Quá trình này tạo nên những phần tử bị kích thích cao hoặc có điện tích. Chúng có hoạt tính hoá học rất cao nên tham gia vào phản ứng hoá học với các chất khác một cách nhanh chóng và mạnh mẽ. Do đó, quá trình hấp thụ năng lượng bức xạ tuy chỉ xảy ra trong khoảng khắc cỡ 10^{-12} – 10^{-16} giây, nhưng có thể để lại trong cơ thể những mầm mống của các biến đổi sinh học sâu sắc.

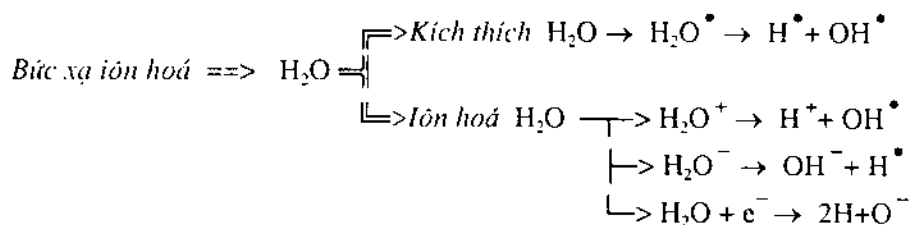
Bảng B.2.3-1. Thành phần hoá học của các tổ chức mềm trong cơ thể người

<i>Thành phần nguyên tố</i>	<i>Hàm lượng, %</i>	<i>Mật độ nguyên tử, 10^{22} cm^{-3}</i>
H	10,0	6,02
C	18,0	0,90
N	3,0	0,13
O	65,0	2,45
P	1,0	0,019
Ca	1,5	0,023
Các nguyên tố khác	<1,5	0,02

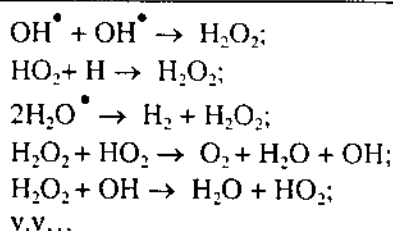
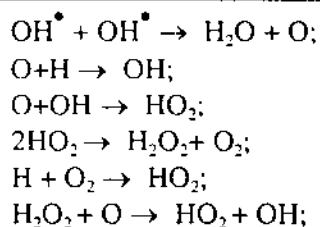
Quá trình hấp thụ năng lượng bức xạ phụ thuộc nhiều vào thành phần hoá học của cơ thể. Nói chung, mỗi cơ quan trong cơ thể sống đều có thành phần hoá học phức tạp và khác nhau. Các tổ chức mềm trong cơ thể có vai trò đặc biệt quan trọng đối với ảnh hưởng của bức xạ iôn hoá. Thành phần hoá học của

các tổ chức mềm trong cơ thể người có những chỉ số trung bình như được nêu trong bảng B.2.3-1. Trong các tổ chức mềm, bốn nguyên tố H, C, N và O chiếm tới 96% khối lượng, chiếm hơn 99% số nguyên tử. Đặc biệt, riêng H chiếm hơn 60% số nguyên tử của tổ chức mềm. Hai nguyên tố H và O có hàm lượng và mật độ nguyên tử rất lớn vì H₂O chiếm tới 2/3 khối lượng cơ thể sống. Cũng do vậy, phần lớn năng lượng bức xạ được hấp thụ trong cơ thể là bởi các phân tử nước.

Hình H2.3-1. Sơ đồ các phản ứng hoá bức xạ đầu tiên xảy ra trong dung dịch nước



Đồng thời và tiếp sau đó xảy ra các phản ứng dưới đây:



Gốc (nhóm) tự do + phân tử hữu cơ $\rightarrow$ thay đổi cấu trúc phân tử v.v.

Sau khi cơ thể hấp thụ năng lượng của bức xạ ion hoá, phân tử nước bị kích thích hoặc ion hoá rồi dẫn tới những phản ứng hoá bức xạ có ý nghĩa quan trọng đặc biệt, làm sinh ra các gốc tự do H^{*}, OH^{*} và các nhóm HO₂, H₂O₂ v.v. Chúng có hoạt tính hoá học rất cao, nên làm xảy ra hàng loạt phản ứng hoá học tiếp theo. Sơ đồ xảy ra các phản ứng này được thể hiện trên hình H.2.3-1. (Xem thêm mục 3.5.1.1 về các phản ứng hoá bức xạ xảy ra trong dung dịch nước).

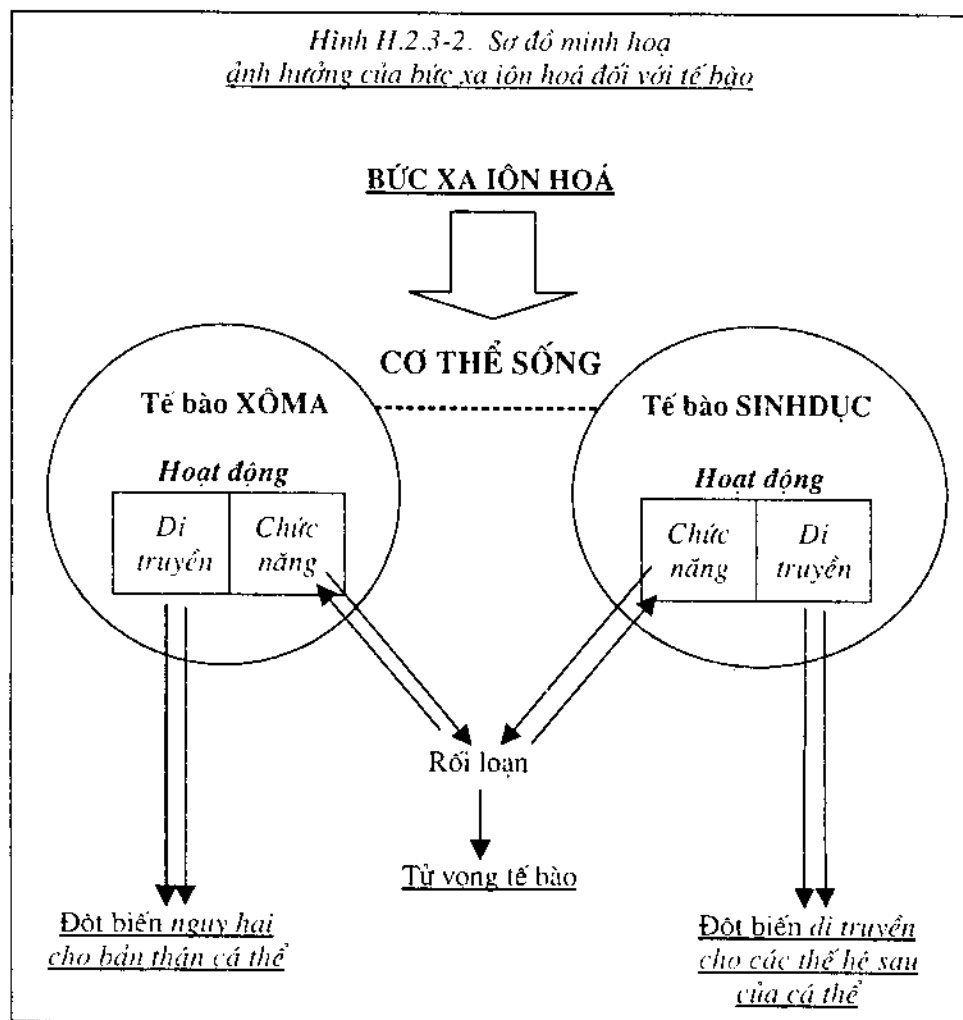
Vì các nhóm và gốc tự do vừa được sinh ra là những phân tử có hoạt tính hoá học rất cao, nên "quãng chạy" của chúng ở trong tế bào là rất ngắn, thường chỉ ngắn cỡ $(2,5 \div 3,0) \times 10^{-9}$ m và hầu hết chúng lập tức tham gia vào phản ứng hoá học với những phân tử hữu cơ (như: protein, enzym, ADN, ARN .v.v.) ở cách chúng không quá một bề dài quãng chạy của chúng. Chỉ có rất ít trong số các nhóm và gốc tự do này có thể "sống sót" được sau thời điểm chiếu xạ để tiếp tục gây nên những thay đổi trong quá trình trao đổi chất.

Số lượng và đặc tính của các sản phẩm của những phản ứng hoá học xảy ra tiếp sau quá trình tạo thành các nhóm và gốc tự do vừa nêu trên không những chỉ phụ thuộc vào bản chất của bức xạ iôn hoá, mà còn phụ thuộc vào cả một loạt yếu tố như: mức độ bão hoà oxy, nhiệt độ và thành phần của dung dịch nước ở khu vực bị chiếu xạ.

Nồng độ oxy trong dung dịch tăng từ 0% đến $(30 \div 40)\%$ sẽ làm hiệu ứng sinh học của bức xạ iôn hoá yếu (gồm lượng tử gamma và electron) tăng lên ba lần. Trong khi đó, hiệu ứng sinh học của bức xạ iôn hoá mạnh (như các hạt alpha, proton...) lại không phụ thuộc vào nồng độ oxy. Trong nhiều trường hợp, việc nâng cao nồng độ oxy và nâng cao nhiệt độ của cơ thể sau khi đã ngừng chiếu xạ được nhiều giờ hoặc thậm chí nhiều ngày cũng vẫn làm tăng hiệu ứng sinh học của bức xạ.

Trên đây vừa mô tả ảnh hưởng gián tiếp của bức xạ đối với những phân tử hữu cơ quan trọng thông qua các phản ứng hoá bức xạ xảy ra trên phân tử nước. Bức xạ cũng có thể tác động trực tiếp lên các phân tử hữu cơ quan trọng khi các hạt hoặc lượng tử của bức xạ tương tác trực tiếp với các phân tử này. Bức xạ có khả năng iôn hoá càng mạnh thì tác động trực tiếp của nó càng lớn. Riêng đối với bức xạ nơtron, tác động trực tiếp của nó có thể là: đẩy một hạt nhân nguyên tử nào đó ra khỏi vị trí bình thường của nó trong phân tử (nhờ cơ chế va chạm đàn hồi), hoặc, thay đổi điện tích của hạt nhân nguyên tử làm nguyên tử này biến thành nguyên tử của một nguyên tố khác trong phân tử (nhờ cơ chế phản ứng hạt nhân).

Hình H.2.3-2. Sơ đồ minh họa
ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với tế bào



Tác động của bức xạ (dù trực tiếp hay gián tiếp) đều dẫn tới kết quả là làm thay đổi hoạt tính sinh học của các phân tử hữu cơ quan trọng. Hậu quả là có thể làm rối loạn hoạt động của tế bào.

Cơ thể có rất nhiều loại tế bào, nhưng tựu chung, có thể chia chúng thành hai nhóm lớn là tế bào xôma và tế bào sinh dục. Tế bào xôma là tế bào chỉ ảnh hưởng đến sự sống của bản thân cá thể; còn tế bào sinh dục lại có thể ảnh hưởng

tới cả nhiều thế hệ con cháu của cá thể. Sự rối loạn hoạt động của tế bào có thể xuất hiện dưới hai dạng là: a- Rối loạn hoạt động sống của bản thân tế bào đó; và, b- Thay đổi đặc tính di truyền của tế bào.

Bức xạ iôn hoá có thể làm cho mỗi loại tế bào (bất kể là tế bào xôma hay tế bào sinh dục) bị rối loạn ở cả hai dạng vừa nêu trên. Những biến đổi của tế bào sẽ được giảm nhẹ hoặc tăng thêm phụ thuộc rất nhiều vào liều lượng bức xạ đã bị hấp thụ và vào điều kiện tồn tại của tế bào sau khi bị chiếu xạ.

Sơ đồ trên hình II.2.3-2 minh hoạ ảnh hưởng của bức xạ iôn hoá đối với cơ thể sống thông qua sự rối loạn hoạt động của các tế bào xôma và tế bào sinh dục.

Khi bức xạ gây tác động nhẹ lên tế bào, chỉ có hoạt động chức năng của tế bào có thể bị rối loạn. Nếu tế bào bị tác động mạnh, sự rối loạn hoạt động chức năng của nó có thể tăng dần rồi dẫn tới tử vong của tế bào. Nếu các cấu trúc đảm bảo cho hoạt động di truyền của tế bào bị thương tổn thì có thể xảy ra những đột biến di truyền. Nếu đây là tế bào xôma thì những đột biến này có thể sẽ di truyền từ thế hệ tế bào bị tổn thương ban đầu sang các thế hệ tế bào tiếp theo, có thể sẽ gây nguy hại cho bản thân cá thể chủ của những tế bào đó. Còn đối với các tế bào sinh dục thì những đột biến này có thể sẽ được di truyền cho các thế hệ con cháu của cá thể.

Ở trên vừa nêu ảnh hưởng của bức xạ đối với từng tế bào. Nếu hoạt động của nhiều tế bào trong cùng một tổ chức cơ thể bị rối loạn đồng thời thì hoạt động của cả tổ chức đó sẽ bị rối loạn. Sự rối loạn hoạt động của một tổ chức hay một cơ quan nào đó trong cơ thể bị gây nên bởi tác động của bức xạ được gọi là tổn thương do bức xạ. Phản ứng của cơ thể đối với những tổn thương do bức xạ gọi là bệnh do bức xạ (hoặc bệnh phóng xạ như một số người vẫn quen gọi). Bệnh do bức xạ thể hiện ở hai dạng: cấp tính hoặc mãn tính.

Bệnh cấp tính do bức xạ: Xảy ra trong trường hợp bị chiếu xạ liều cao trong khoảng thời gian ngắn. Nếu bị bệnh nặng, người bệnh có thể chết trong vòng nửa tháng kể từ khi bị chiếu xạ. Nếu bệnh không nặng thì sức khoẻ có thể

được hồi phục dần dần sau khoảng một tháng kể từ khi bị chiếu xạ. Thông thường cơ thể có thể không hồi phục được hoàn toàn; nhiều bệnh đã mắc từ trước nay được dịp lại có thể tái phát hoặc bị trầm trọng hơn.

Bệnh mãn tính do bức xạ: Xảy ra trong trường hợp bị chiếu xạ thường xuyên với những liều thấp hơn mức liều tối đa cho phép. Bệnh có thể phát triển trên toàn cơ thể hoặc chỉ ở một vùng nào đó của cơ thể.

Bức xạ ion hoá cũng có thể dẫn tới những hậu quả xa sau một thời gian dài bị chiếu xạ quá liều cho phép. Những hậu quả đó có thể là: giảm tuổi thọ, ung thư ác tính, tăng bạch cầu, đục nhân mắt .v.v. hoặc những đột biến có thể di truyền cho các thế hệ sau của cá thể.

Hình H.2.3-3. cho thấy sơ đồ minh hoạ quá trình diễn biến do ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với cơ thể.

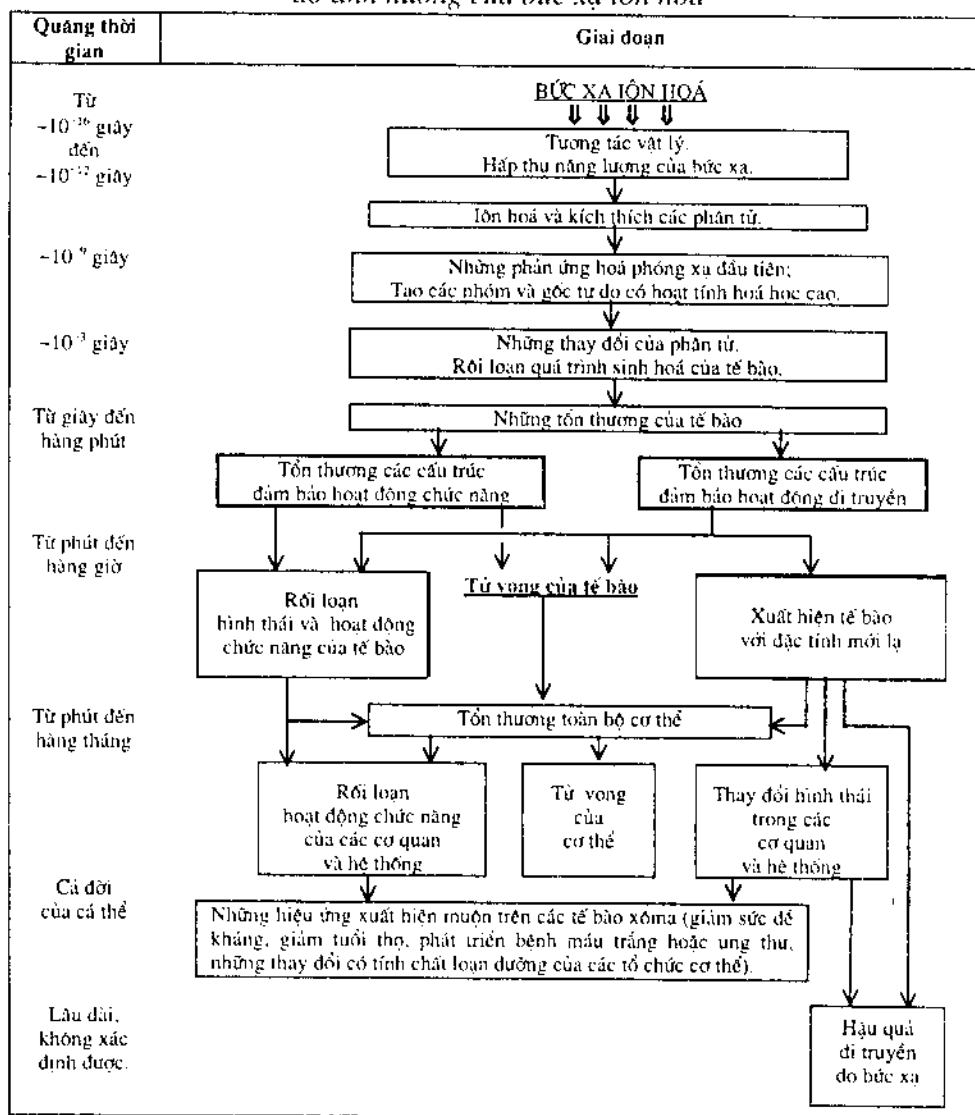
Mức độ tác động của bức xạ đối với cơ thể phụ thuộc rất nhiều vào liều lượng bức xạ được hấp thụ, vào loại bức xạ, điều kiện chiếu xạ, đặc điểm riêng của cơ thể bị chiếu xạ, và, vào điều kiện môi trường mà cơ thể tồn tại sau khi bị chiếu xạ. Cũng cần nói thêm rằng ngày nay người ta đã tìm được nhiều hợp chất hoá học có tác dụng làm giảm ảnh hưởng của bức xạ ion hoá đối với cơ thể.

Các cơ thể sinh vật có độ nhạy khác nhau đối với tác động của bức xạ ion hoá. Trong số động vật có xương sống thì loài có vú là có độ nhạy bức xạ cao nhất. Ngay trong cùng một loài, những cá thể khác nhau lại có độ nhạy bức xạ khác nhau. Cơ thể càng non trẻ thì độ nhạy bức xạ càng cao. Bởi vậy, đối với con người thì trẻ em có độ nhạy bức xạ cao nhất. Người lớn, từ độ tuổi 25 trở lên, ít nhạy với bức xạ hơn.

Khi toàn thân bị chiếu xạ thì ảnh hưởng sinh học của bức xạ phụ thuộc vào liều hấp thụ bức xạ trong một lần chiếu xạ như nêu trong bảng B.2.3-2. Xem kỹ bảng này, ta thấy rõ rằng không phải liều bức xạ nào cũng có thể gây nên những ảnh hưởng xấu cho cơ thể con người. Thêm vào đó, ảnh hưởng sinh học của bức xạ còn phụ thuộc mạnh vào các điều kiện chiếu xạ và trạng thái của cơ thể trong khi và sau khi bị chiếu xạ. Song, nếu chiếu xạ vượt quá những giới

hạn nhất định thì chắc chắn sẽ dẫn tới những hậu quả không mong muốn.

Hình H.2.3-3. Sơ đồ minh hoạ quá trình diễn biến do ảnh hưởng của bức xạ ion hoá



Bảng B.2.3-2. Ảnh hưởng sinh học gây bởi một lần chiếu xạ toàn bộ cơ thể

<i>Liều hấp thụ trong một lần bị chiếu xạ, Rad (*)</i>	<i>Hiệu ứng sinh học</i>
0÷25	Không phát hiện thấy các rối loạn.
25÷50	Có thể có những biến đổi trong máu.
50÷100	Có những thay đổi trong máu. Khả năng lao động bị rối loạn.
100÷200	Trạng thái cơ thể không bình thường. Có thể mất khả năng lao động.
200÷400	Mất khả năng lao động. Có thể bị chết.
400÷500	Khoảng 50% số người bị nạn sẽ chết.
> 600	Khoảng 100% số người bị nạn sẽ chết.
~ 10 ⁴ ÷10 ⁵	Chết ngay trong khi đang bị chiếu xạ.

Ghi chú: (*) – Rad là đơn vị đo liều hấp thụ bức xạ (xem mục 1.4.1). Để dễ hình dung, có thể liên hệ với trường hợp chụp “X-quang” ở bệnh viện. Muốn có được một tấm phim chụp ở vùng phổi hoặc dạ dày, người ta thường phải chịu một liều hấp thụ trung bình cỡ chừng 0,5 Rad.

Trong mục 2.4. được trình bày dưới đây, chúng ta sẽ thấy rõ hơn mức liều bức xạ tối đa mà một người có thể chịu đựng được trong trường hợp bình thường sao cho trong suốt 50 năm lao động mà không bị tổn hại gì và cũng không gây ảnh hưởng bất lợi gì cho các thế hệ đời sau.

Tuy nhiên, cần nhấn mạnh một lần nữa rằng không bao giờ được khinh thường hoặc coi nhẹ việc bảo vệ an toàn bức xạ. Bất kỳ bao giờ và ở đâu, mỗi khi làm việc có tiếp xúc với nguồn bức xạ iôn hoá, mỗi chúng ta đều phải tuân thủ mọi quy định về bảo vệ an toàn bức xạ một cách nghiêm ngặt nhất và tự giác nhất.

2.4. MỘT SỐ TIÊU CHUẨN CƠ BẢN VỀ AN TOÀN BỨC XẠ

2.4.1. Vận dụng tiêu chuẩn

Trong bảo vệ an toàn bức xạ, xã hội được chia thành hai nhóm người như sau:

- *Nhóm thứ nhất* chỉ gồm những người chuyên làm việc có tiếp xúc với các nguồn bức xạ hạt nhân. Để cho gọn, từ đây về sau ta gọi những người thuộc nhóm này là *nhân viên chuyên nghiệp*.
- *Nhóm thứ hai* bao gồm tất cả những ai không thuộc nhóm nhân viên chuyên nghiệp. Để cho gọn, từ đây về sau ta gọi những người thuộc nhóm thứ hai này là *dân thường (hoặc dân chúng)*.

Đặc biệt, người dưới 16 tuổi không được phép làm những việc có tiếp xúc với nguồn bức xạ.

Một tiêu chuẩn quan trọng hàng đầu về an toàn bức xạ là các giới hạn về liều bức xạ đối với hai nhóm người vừa nêu trên.

Các giới hạn về liều bức xạ nêu trong tiêu chuẩn này bao gồm tất cả mọi thành phần liều mà một người phải chịu đựng, trừ hai thành phần là: a- Liều gây bởi chiếu xạ y tế (theo chỉ định của bác sỹ khi khám hoặc chữa bệnh); b- Liều gây bởi các nguồn bức xạ tự nhiên trong môi trường (còn gọi là nền bức xạ tự nhiên).

Các giới hạn về liều bức xạ này không áp dụng cho việc kiểm tra liều chiếu xạ tiềm tàng.

Các giới hạn về liều bức xạ áp dụng cho tổng các liều bức xạ liên quan và được xác định như sau:

$$H_{\text{hd, tổng}} = H_{\text{hd, 1}} + H_{\text{hd, 2}} \quad (2.4-1)$$

với $H_{hd, tổng}$ – tổng liều hiệu dụng. Tổng liều này bao gồm hai thành phần là:

- 1) $H_{hd,1}$ – Liều hiệu dụng gây bởi chiếu xạ từ bên ngoài trong một khoảng thời gian được định rõ;
- 2) $H_{hd,2}$ – Liều hiệu dụng bị nhiễm gây bởi chất phóng xạ xâm nhập vào cơ thể trong cùng thời kỳ đó. (Thời kỳ để tính liều bị nhiễm thường là 50 năm đối với người lớn và 70 năm đối với trẻ em).

Sự tuân thủ đòi hỏi về an toàn bức xạ có thể được xác định thông qua sự tuân thủ điều kiện sau đây: *Tương đương liều cá nhân do chiếu xạ từ bên ngoài trong suốt cả năm cộng với tổng các liều bị nhiễm do chất phóng xạ xâm nhập vào cơ thể trong suốt năm đó là thấp hơn so với giới hạn liều có liên quan.*

Trong mục này sẽ giới thiệu một số tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ của quốc tế theo khuyến cáo của Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế, cụ thể là những tiêu chuẩn liên quan đến các trường hợp chiếu xạ nghề nghiệp, chiếu xạ đối với dân chúng và chiếu xạ y tế. Các tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ này (International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety series No.115, IAEA, Vienna, 1996; thường được gọi tắt là BSS) đã được 6 tổ chức quốc tế có trách nhiệm và có uy tín lớn thông qua là: Cơ quan Năng lượng Nguyên tử Quốc tế (IAEA, ngày 12-10-1994), Tổ chức Nông Lương Quốc tế (FAO, 14-11-1994), Tổ chức Lao động Quốc tế (ILO, 17-11-1994), Tổ chức Y tế Thế giới (WHO, 27-1-1995), Cơ quan Năng lượng Nguyên tử của Tổ chức Hợp tác và Phát triển Kinh tế (OECD/NEA, 2-5-1995) và Tổ chức Y tế Pan của Mỹ (Pan American Health Organization – PAHO, 28-9-1994).

Mục đích của các tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ là để ngăn ngừa những hiệu ứng tất định và hạn chế những hiệu ứng ngẫu nhiên gây bởi bức xạ.

Đối với mọi công việc thực tế bất kỳ, thì mục đích là phải đòi hỏi sao cho đạt được việc bảo vệ những người bị chiếu xạ và đảm bảo an toàn đối với các nguồn chiếu xạ. Như vậy có thể hạn chế được rủi ro cho người bị chiếu xạ (bất

kể là người đó bị chiếu xạ ở đâu và khi nào) bằng cách giữ cho liều bức xạ thấp hơn các giới hạn liều tương ứng. Như vậy cũng sẽ giữ được các nguồn chiếu xạ an toàn bằng cách:

- a). Buộc xác định liều dự kiến sẽ phải được cung cấp cũng như các liều bức xạ do chiếu xạ tiềm tàng có thể xảy ra nhưng không chắc chắn xảy ra;
- b). Giữ cho các liều bức xạ mà người ta phải chịu đựng, cũng như khả năng gây liều bức xạ và số người bị chiếu xạ đạt thấp nhất một cách hợp lý trong những điều kiện thông thường (phổ biến);
- c). Đáp ứng một loạt đòi hỏi về các mặt hành chính, kỹ thuật và quản lý nhằm đảm bảo sự an toàn đối với nguồn chiếu xạ này.

Trong trường hợp đòi hỏi phải can thiệp, thì mục tiêu phải đạt được là:

- a). Giữ sao cho liều bức xạ cá nhân (trong hoàn cảnh không lường trước được) có giá trị thấp hơn so với ngưỡng của các hiệu ứng tất định;
- b). Giữ cho tất cả các liều dự kiến bị chặn lại bằng can thiệp phải đạt mức thấp nhất một cách hợp lý trong điều kiện thông thường (phổ biến).

2.4.2. Chiếu xạ nghề nghiệp

2.4.2.1. Giới hạn về liều bức xạ đối với nhân viên chuyên nghiệp

- A. Chiếu xạ nghề nghiệp đối với mọi nhân viên chuyên nghiệp bất kỳ đều phải được kiểm soát để *không vượt quá* những giới hạn về liều bức xạ nêu trong bảng B.2.4-1.
- B. Đối với những *người học việc* tuổi từ 16 đến 18 (đang tập sự, đang được huấn luyện để làm công việc tiếp xúc với nguồn phóng xạ) và đối với sinh viên tuổi từ 16 đến 18 cần sử dụng nguồn bức xạ trong

quá trình học tập - nghiên cứu, thì *chiếu xạ nghề nghiệp phải được kiểm soát* sao cho không vượt quá các giới hạn về liều nêu trong bảng B.2.4-2.

Bảng B.2.4-1. Giới hạn về liều đối với nhân viên chuyên nghiệp

===== Không được vượt quá: =====

- Liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong năm năm liên tiếp là 20 mSv;
- Liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ là 50 mSv;
- Liều tương đương đối với thủy tinh thể của mắt là 150 mSv trong một năm;
- Liều tương đương đối với tứ chi (bàn chân, bàn tay) hoặc da là 500 mSv trong một năm.

Bảng B.2.4-2. Giới hạn về liều đối với người đang học (tuổi từ 16 đến 18)

===== Không được vượt quá: =====

- Liều hiệu dụng là 6 mSv trong một năm;
- Liều tương đương đối với thủy tinh thể là 50 mSv trong một năm;
- Liều tương đương đối với tứ chi (bàn chân, bàn tay) hoặc da là 150 mSv trong một năm.
- *Người dưới 18 tuổi thì không được phép làm việc trong vùng kiểm soát. Nếu người này đang trong quá trình được huấn luyện để sau này làm việc trong vùng kiểm soát, thì người đó phải được giám sát chặt chẽ liên tục khi có mặt trong vùng kiểm soát.*

2.4.2.2. Hoàn cảnh đặc biệt

Trong những hoàn cảnh đặc biệt, có thể chấp nhận một sự thay đổi tạm thời các giới hạn về liều bức xạ như được nêu trong bảng B.2.4-3.

2.4.3. Chiếu xạ dân thường

2.4.3.1. Giới hạn về liều đối với dân thường

Đối với các thành viên của những nhóm dân thường có bị ảnh hưởng bởi công việc bức xạ, thì liều trung bình không được vượt quá những giới hạn nêu trong bảng B.2.4-4.

Bảng B.2.4-3. Những thay đổi tạm thời về giới hạn liều

===== trong hoàn cảnh đặc biệt : =====

- Khoảng thời gian lấy giá trị trung bình của liều bức xạ có thể kéo dài tới mười năm liên tiếp và được quy định bởi cơ quan quản lý, và, liều hiệu dụng đối với mọi nhân viên không được vượt quá 20 mSv tính trung bình trong toàn khoảng thời gian này, đồng thời, liều hiệu dụng không được vượt quá 50 mSv trong một năm riêng lẻ bất kỳ;
- Thay đổi tạm thời này về giới hạn liều được quy định bởi cơ quan quản lý, nhưng giới hạn liều không được vượt quá 50 mSv trong một năm riêng lẻ bất kỳ, và, thay đổi tạm thời về khoảng thời gian là không được vượt quá năm năm.
- *Riêng đối với phụ nữ có thai:* Sự phát hiện mang thai không được coi là lý do để đuổi việc người mang thai. Tuy nhiên, bên sử dụng người được phát hiện là mang thai cần tạo điều kiện làm việc thích hợp về mặt chiếu xạ để bảo đảm rằng phôi thai và bào thai được bảo vệ an toàn như yêu cầu đối với dân chúng thông thường.

Bảng B.2.4-4. Giới hạn về liều đối với dân thường

===== Không được vượt quá: =====

- Liều hiệu dụng trong một năm là 1 mSv;
- Trong trường hợp đặc biệt, liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ có thể đạt tới 5 mSv với điều kiện là liều tính trung bình cho năm năm liên tiếp không vượt quá 1 mSv trong một năm;
- Liều tương đương đối với thuỷ tinh thể là 15 mSv trong một năm;
- Liều tương đương đối với da là 50 mSv trong một năm.

2.4.3.2. Giới hạn về liều đối với người chăm sóc người bệnh

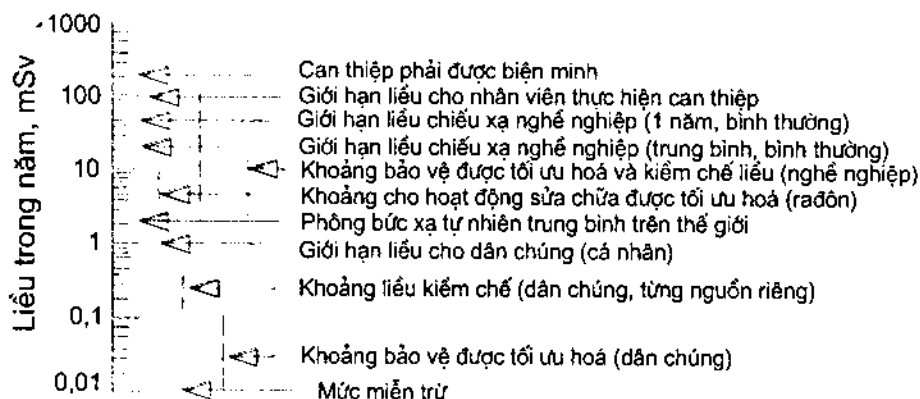
Một số người tới chăm sóc hoặc thăm hỏi người bệnh mà không thuộc trách nhiệm nghề nghiệp của họ (tức là không thuộc chức trách của nhân viên chuyên nghiệp trong khi thực hiện nhiệm vụ chuyên môn theo quy định). Họ có thể bị chiếu xạ trong khi làm việc đó. Đối với họ, không thể áp dụng những giới hạn về liều cho dân thường như vừa nêu ở mục trên, song cũng có những giới hạn được quy định riêng. Những giới hạn đó được nêu trong bảng B.2.4-5.

**Bảng B.2.4-5.b. Giới hạn về liều
đối với những người chăm sóc hoặc thăm hỏi người bệnh**

- Liều hiệu dụng đối với một người bất kỳ tới thăm hoặc chăm sóc người bệnh phải được hạn chế sao cho liều mà người này phải chịu sẽ không vượt quá 5 mSv trong suốt cả thời kỳ khám hoặc chữa cho người bệnh.
- Nếu có trẻ em tới thăm người bệnh mà chất phóng xạ đã được đưa vào cơ thể người này, thì phải hạn chế sao cho liều bức xạ đối với những trẻ em này là nhỏ hơn 1 mSv.

2.4.4. Đối chiếu các giới hạn về liều trong hoạt động thực tế

Các mục 2.4.2 và 2.4.3 đã cho thấy rằng: có nhiều giới hạn về liều tương ứng cho các đối tượng khác nhau. Hình H.2.4-1 đối chiếu các giới hạn về liều trong thực tế, đồng thời cho thấy những đòi hỏi về giá trị tuyệt đối và hướng dẫn thực hành.



Hình H.2.4-1. Những đòi hỏi về giá trị tuyệt đối và hướng dẫn thực hành với các giới hạn về liều.

2.4.5. Kiểm tra sự tuân thủ các giới hạn về liều

Sự tuân thủ những đòi hỏi về liều để áp dụng các giới hạn về liều cần được xác định theo một trong những phương pháp sau đây:

- Phương pháp 1: So sánh tổng liều hiệu dụng với giới hạn liều tương ứng;
- Phương pháp 2: Thoả mãn điều kiện về tỷ số giữa các thành phần của tổng liều hiệu dụng với các thành phần tương ứng của giới hạn liều;
- Phương pháp 3: Bằng những cách khác được chấp nhận.

Dưới đây trình bày phương pháp kiểm tra thứ nhất và thứ hai.

2.4.5.1. Phương pháp thứ nhất

Để kiểm tra sự tuân thủ các giới hạn về liều theo phương pháp thứ nhất, phải so sánh tổng liều hiệu dụng với giới hạn liều tương ứng, trong đó tổng liều hiệu dụng (của cá nhân) được tính theo công thức sau đây:

$$H_{hd,tổng} = H_{hd,l} + \sum_j e(g)_{j, \text{ ăn uống}} I_{j, \text{ ăn uống}} + \sum_j e(g)_{j, \text{ hít thở}} I_{j, \text{ hít thở}} \quad (2.4-2)$$

ở đây $H_{hd,tổng}$ – tổng liều hiệu dụng (của cá nhân); $H_{hd,l}$ – liều hiệu dụng gây bởi chiếu xạ từ bên ngoài trong khoảng thời gian là suốt cả năm (xem đối chiếu công thức 2.4-1); $e(g)_{j, \text{ ăn uống}}$ và $e(g)_{j, \text{ hít thở}}$ – liều hiệu dụng bị nhiễm tính trên một đơn vị độ phóng xạ của các hạt nhân phóng xạ loại j xâm nhập vào cơ thể qua đường ăn uống hoặc hít thở tương ứng đối với người thuộc nhóm tuổi g ; còn $I_{j, \text{ ăn uống}}$ và $I_{j, \text{ hít thở}}$ – lượng hạt nhân phóng xạ loại j xâm nhập vào cơ thể qua đường ăn uống hoặc hít thở trong suốt cả năm đó.

2.4.5.2. Phương pháp thứ hai

Để kiểm tra sự tuân thủ các giới hạn về liều theo phương pháp thứ hai, phải thoả mãn điều kiện sau đây:

$$\frac{H_{hd,l}}{GL} + \sum_j \frac{I_{j, \text{ ăn uống}}}{I_{j, \text{ ăn uống}, L}} + \sum_j \frac{I_{j, \text{ hít thở}}}{I_{j, \text{ hít thở}, L}} \leq 1 \quad (2.4-3)$$

trong đó GL – giới hạn liều liên quan của liều hiệu dụng $H_{hd,l}$ gây bởi chiếu xạ từ bên ngoài trong khoảng thời gian là suốt cả năm; $I_{j, \text{ ăn uống}, L}$ và $I_{j, \text{ hít thở}, L}$ – giới hạn lượng hạt nhân phóng xạ loại j xâm nhập vào cơ thể qua đường ăn uống hoặc hít thở trong một năm.

Các giá trị $e(g)_{j, \text{ ăn uống}}$ và $e(g)_{j, \text{ hít thở}}$ có trong công thức (2.4-2) được cho

trong “Tiêu chuẩn an toàn bức xạ cơ bản của quốc tế” (xem tài liệu [27]: bảng II-III đối với chiếu xạ nghề nghiệp (từ trang 100 đến 156), bảng II-VI (từ trang 166 đến 201) và II-VII (từ trang 202 đến 269) đối với chiếu xạ dân chúng). Riêng đối với $e(g)_{\text{hít thở}}$ – liều hiệu dụng bị nhiễm tính trên một đơn vị độ phóng xạ của các hạt nhân phóng xạ loại j xâm nhập vào cơ thể qua đường hít thở, trong bảng II-III còn cho cả hai giá trị của đại lượng này ứng với trường hợp khi hạt bụi và son khí bị hít vào có đường kính là nhỏ hơn $1\mu\text{m}$ hoặc nhỏ hơn $5\mu\text{m}$.

Còn các giá trị $I_{J,L}$ có trong công thức (2.4-3), thì có thể tính được theo tương quan sau đây:

$$I_{J,L} = \frac{GL}{e_j} \quad (2.4-4)$$

với GL – giới hạn liều liên quan hàng năm của liều hiệu dụng; còn e_j – giá trị liều tương ứng tính trên một đơn vị độ phóng xạ của các hạt nhân phóng xạ loại j xâm nhập vào cơ thể qua đường ăn uống hoặc hít thở, được cho trong các bảng II-III, II-VI và II-VII của BSS như vừa nêu trên.

2.4.6. Thông lượng và mật độ thông lượng tối đa cho phép

Trong thực tế, việc xác định liều và suất liều bức xạ thường khó khăn hơn nhiều so với việc xác định thông lượng và mật độ thông lượng bức xạ. Vì vậy, để tiện cho việc ứng dụng trong thực tế, bảng B.2.4-6 giới thiệu các giá trị thông lượng và mật độ thông lượng tối đa cho phép tương ứng với giá trị liều và suất liều tối đa cho phép đối với nhân viên bức xạ chuyên nghiệp. Trong bảng này sử dụng các đại lượng sau đây:

- Φ [hạt/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)] hoặc [hạt/ cm^2] – mật độ thông lượng tối đa cho phép;
- I [MeV/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)] – cường độ bức xạ gamma;
- P [$\mu\text{Sv/h}$] – suất liều tương đương;
- F_{limSv} – mật độ thông lượng tích phân của bức xạ hạt (thứ nguyên là

hạt/cm²) hoặc cường độ tích phân của bức xạ gamma (thứ nguyên là MeV/cm²) được tính tương ứng với liều tương đương bằng 1mSv trên bề mặt của tổ chức cơ thể.

Ba đại lượng Φ , I và P được tính tương ứng với liều tối đa cho phép là 1mSv trong 1 tuần làm việc 36 giờ (tính rằng mỗi năm làm việc 50 tuần).

Bảng B.2.4-6. Thông lượng và mật độ thông lượng tối đa cho phép trên bề mặt của tổ chức cơ thể.

Loại bức xạ	Năng lượng của hạt hoặc của lượng tử	P[μ Sv/h]; I[MeV/(cm ² .s)]; Φ [hạt/(cm ² .s)]		Thông lượng tích phân F_{1mSv} tương ứng với liều 1mSv trên bề mặt của tổ chức cơ thể
		Thời gian làm việc $t=36$ giờ/tuần	Thời gian làm việc t giờ/tuần	
Bức xạ lượng tử	$\leq 3\text{MeV}$ $3 \div 10^4 \text{ MeV}$	28 μ Sv/h 2000 MeV/(cm ² .s)	1mSv/t[h] 72000/t[h], MeV/(cm ² .s)	----- $2,6 \cdot 10^8 \text{ MeV/cm}^2$
Bức xạ beta hoặc chùm electron	$\leq 10\text{MeV}$	20 hạt/(cm ² .s)	720/t[h], hạt/(cm ² .s)	$2,6 \cdot 10^6 \text{ hạt/cm}^2$
Nơtron nhiệt	0,025 eV	750 n/(cm ² .s)	27000/t[h], n/(cm ² .s)	$9,6 \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2$
Nơtron chậm	0.1 eV	550 n/(cm ² .s)	20000/t[h], n/(cm ² .s)	$7,1 \cdot 10^7 \text{ n/cm}^2$

Neutron năng lượng trung gian	5 keV	630 n/(cm ² .s)	23000/t[h], n/(cm ² .s)	8,2.10 ⁷ n/cm ²
	20 keV	310 n/(cm ² .s)	11000/t[h], n/(cm ² .s)	4,0.10 ⁷ n/cm ²
	0,1 MeV	90 n/(cm ² .s)	3200/t[h], n/(cm ² .s)	1,2.10 ⁷ n/cm ²
	0,5 MeV	33 n/(cm ² .s)	1200/t[h], n/(cm ² .s)	4,3.10 ⁶ n/cm ²
Neutron nhanh	1÷5 MeV	20 n/(cm ² .s)	720/t[h], n/(cm ² .s)	2,6.10 ⁶ n/cm ²
	10 MeV	19 n/(cm ² .s)	680/t[h], n/(cm ² .s)	2,4.10 ⁶ n/cm ²
	15÷20MeV	11 n/(cm ² .s)	400/t[h], n/(cm ² .s)	1,5.10 ⁶ n/cm ²
Neutron rất nhanh	50 MeV	7,8 n/(cm ² .s)	280/t[h], n/(cm ² .s)	1,0.10 ⁶ n/cm ²
	100 MeV	7,0 n/(cm ² .s)	250/t[h], n/(cm ² .s)	9,0.10 ⁵ n/cm ²
Neutron cực nhanh	300 MeV	3,8 n/(cm ² .s)	137/t[h], n/(cm ² .s)	4,9.10 ⁵ n/cm ²
	600 MeV	2,0 n/(cm ² .s)	72/t[h], n/(cm ² .s)	2,6.10 ⁵ n/cm ²
	1000 MeV	1,2 n/(cm ² .s)	43/t[h], n/(cm ² .s)	1,6.10 ⁵ n/cm ²

CHƯƠNG 3

XÁC ĐỊNH LIỀU LƯỢNG BỨC XẠ LƯỢNG TỬ

Chương 3 giới thiệu các biện pháp kỹ thuật phục vụ cho việc xác định liều lượng bức xạ lượng tử. Phần nội dung chủ yếu của chương này liên quan tới bức xạ lượng tử có năng lượng không cao. Phần liên quan tới bức xạ lượng tử có năng lượng cao được giới thiệu ở cuối chương.

Nội dung chương 3 được trình bày theo dàn ý sau đây:

- 3.1. Phương pháp iôn hoá : (tr. 91)
 - 3.1.1. Cơ sở vật lý của phương pháp iôn hoá (91)
 - 3.1.2. Một số quy luật cơ bản của buồng iôn hoá (93)
 - 3.1.3. Lý thuyết Bragg-Gray (98)
 - 3.1.4. Buồng iôn hoá nhỏ thành dây (103)
 - 3.1.4.1. Tương quan giữa dòng điện và suất liều (103)
 - 3.1.4.2. Sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ (106)
 - 3.1.4.3. Ảnh hưởng của bề dây và vật liệu thành buồng (112)
 - 3.1.5. Buồng tụ điện (113)
 - 3.1.5.1. Tương quan giữa liều chiếu xạ và độ thay đổi chênh lệch điện thế (113)
 - 3.1.5.2. Hiệu suất thu hồi điện tích (116)
 - 3.1.5.3. Bút đo liều bằng buồng iôn hoá kiểu tụ điện (119)
 - 3.1.5.4. Đo liều bằng buồng iôn hoá kiểu bút đo tĩnh điện (120)
 - 3.1.6. Ống đếm khí (122)
- 3.2. Phương pháp nhũ tương ảnh (124)
 - 3.2.1. Cấu tạo của phim ảnh (124)

- 3.2.2. Cơ sở của phương pháp đo liều lượng bức xạ bằng nhũ tương ảnh
- 3.2.3. Các đặc trưng của dụng cụ đo liều chiếu xạ bằng phim (127)
- 3.2.4. Sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng (131)
- 3.2.5. Làm giảm sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng (134)
- 3.2.6. Kiểm tra liều chiếu xạ cá nhân bằng phim ảnh (137)
- 3.3. Các phương pháp phát quang (138)
 - 3.3.1. Cơ sở vật lý (138)
 - 3.3.2. Phương pháp nhấp nháy (140)
 - 3.3.2.1. Nguyên tắc hoạt động của máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò nhấp nháy (140)
 - 3.3.2.2. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò nhấp nháy làm việc ở chế độ dòng (141)
 - 3.3.2.3. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò nhấp nháy làm việc ở chế độ đếm (148)
 - 3.3.3. Phương pháp huỳnh quang (149)
 - 3.3.3.1. Nguyên tắc hoạt động của máy đo liều lượng bức xạ bằng huỳnh quang (149)
 - 3.3.3.2. Máy đo liều lượng bức xạ sử dụng *quang huỳnh quang* (152)
 - 3.3.3.3. Máy đo liều lượng bức xạ sử dụng *nhiệt huỳnh quang* (162)
- 3.4. Phương pháp bán dẫn (172)
 - 3.4.1. Nhận xét chung (172)
 - 3.4.2. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò bán dẫn ở chế độ đếm (175)
 - 3.4.3. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò bán dẫn ở chế độ dòng (178)
- 3.5. Phương pháp hoá học (180)
 - 3.5.1. Đo liều lượng bức xạ bằng các dung dịch nước (Đôzimét hoá học lỏng) (181)
 - 3.5.1.1. Nguyên tắc hoạt động (181)
 - 3.5.1.2. Đo liều bức xạ bằng dung dịch Sulfat sắt (183)
 - 3.5.1.3. Đo liều bức xạ bằng dung dịch muối Seri (186)
 - 3.5.2. Đo liều bức xạ trên cơ sở các hiệu ứng hoá học khác (187)

3.6. Phương pháp nhiệt (188)**3.6.1. Tác dụng nhiệt của bức xạ ion hoá (188)****3.6.2. Nhiệt lượng kế đơn (191)****3.7. Xác định liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao (196)****3.7.1. Đặc điểm đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao (196)****3.7.2. Phương pháp đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao (203)****3.7.2.1. Đo cường độ bức xạ bằng buồng thành dày (203)****3.7.2.2. Đo cường độ bức xạ lượng tử
bằng phương pháp hấp thụ hoàn toàn (205)**

3.1. PHƯƠNG PHÁP IÔN HOÁ

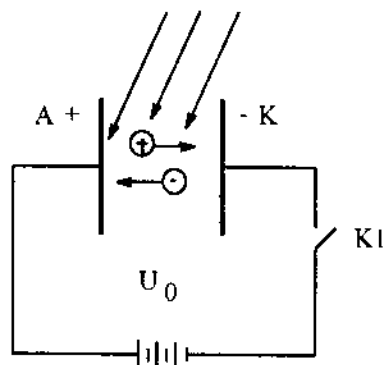
3.1.1. Cơ sở vật lý của phương pháp ion hoá

Lượng tử tương tác với vật chất có thể dẫn tới hiệu ứng ion hoá. Khi đó trong phân nhay với tương tác của bức xạ sẽ xuất hiện các phần tử có điện tích là electron tự do và các ion. Nếu phân nhay được đặt trong một điện trường, thì chúng sẽ chuyển động định hướng về phía điện cực trái dấu, do đó tạo nên tín hiệu điện. Bằng cách xử lý và đo đạc các tín hiệu điện quen thuộc này, có thể xác định được liều lượng bức xạ.

Giả sử, phân nhay với tương tác của bức xạ lượng tử là một chất khí nằm trong điện trường tạo bởi hai điện cực trái dấu là A (anôt, điện cực dương) và K (katôt, điện cực âm). Để dễ hình dung, hình H3.1-1 minh hoạ trường hợp đơn giản nhất – khi các điện cực A và K là hai bản mặt song song cách nhau một khoảng bằng d , làm thành một buồng ion hoá phẳng.

Giả sử, hai điện cực của buồng ion có độ chênh lệch điện thế là U , còn

phần chất khí được giới hạn bởi bề mặt của hai điện cực này có thể tích là V . Khi đặt buồng ion hoá vào trong trường bức xạ lượng tử thì trong mỗi giây sẽ có q cặp êlectron–ion được tạo thành trong một đơn vị thể tích của buồng.



Hình H3.1-1. Sơ đồ nguyên tắc của một buồng ion hoá.

Ký hiệu: A – anốt (điện cực dương); K – katốt (điện cực âm); U_0 – độ chênh lệch điện thế được cung cấp bởi nguồn nuôi một chiều; K1 – khoá đóng ngắt mạch

Nếu tất cả các phần tử có điện tích vừa được tạo thành đều chuyển động về tới các điện cực tương ứng thì dòng điện trong mạch nối hai điện cực sẽ đạt giá trị bão hoà bằng

$$I_0 = qeV \quad (3.1-1)$$

Trong thực tế, dòng điện đo được I có giá trị phụ thuộc vào hệ số thu hồi điện tích về các điện cực. Hệ số này (f) có giá trị $0 \leq f \leq 1$. Do đó:

$$I = I_0 f = qeVf \leq I_0 \quad (3.1-1a)$$

Giá trị q liên hệ với suất liều hấp thụ bức xạ lượng tử trong chất khí (P_0) theo biểu thức sau đây:

$$q = aP_0 \frac{\rho_0}{\omega} \quad (3.1-2)$$

trong đó a – hệ số tính tới thứ nguyên của suất liều và các đại lượng khác trong biểu thức; ρ_0 – khối lượng riêng (mật độ) của chất khí; ω – giá trị năng lượng trung bình tạo cặp ion trong chất khí.

Do đó có tương quan giữa dòng điện bão hoà với suất liều hấp thụ, thể tích làm việc, năng lượng trung bình tạo cặp ion và mật độ chất khí của buồng

iôn hoá như sau:

$$I_0 = qeV = aP_0 \frac{\rho_0}{\omega} eV = bVP_0 \quad (3.1-3)$$

với e – điện tích của mỗi phân tử; $b = \text{const}$.

Lấy tích phân hai vế của biểu thức (3.1-3) theo thời gian kể từ thời điểm bắt đầu tới thời điểm kết thúc mọi tương tác của bức xạ với buồng iôn hoá, ta sẽ thu được tương quan sau đây giữa liều hấp thụ bức xạ D_0 và lượng điện tích tổng cộng Q_0 được tạo thành trong buồng iôn hoá trong khoảng thời gian này:

$$Q_0 = aD_0 \frac{\rho_0}{\omega} eV = bVD_0 \quad (3.1-4)$$

Các tương quan (3.1-3 và -4) cho thấy rằng:

Buồng iôn hoá có dòng điện bão hoà tỷ lệ thuận với suất liều hấp thụ, còn lượng điện tích tổng cộng được tạo thành thì tỷ lệ thuận với liều hấp thụ bức xạ.

Trong trường hợp chất khí của buồng iôn hoá là không khí, và, điều kiện cân bằng điện tử được bảo đảm, thì hai đại lượng P_0 và D_0 trong các biểu thức trên có thể được hiểu là suất liều chiếu và liều chiếu bức xạ lượng tử, còn hệ số a có giá trị bằng tương đương năng lượng của chúng. (Thí dụ, khi $P_0 = 1 \text{ R/s}$ thì $a = 88 \text{ erg/g} = 88 \times 6.10^{11} \text{ eV/g}$).

3.1.2. Một số quy luật cơ bản của buồng iôn hoá

Các hạt có điện tích được tạo thành trong buồng iôn hoá tham gia đồng thời vào ba quá trình sau đây:

- Chuyển động dưới tác dụng của điện trường;
- Tái hợp với phân tử có điện tích trái dấu;
- Khuếch tán trong thể tích khí.

Trong điều kiện áp suất cỡ như áp suất khí quyển bình thường, thì sự mất mát điện tích do khuếch tán của các iôn chỉ đáng kể khi độ chênh lệch điện thế

U giữa hai điện cực nhỏ cỡ một vài vôn, còn mất mát do khuếch tán của êlectron cũng chỉ cỡ vài phần trăm ngay cả khi $U \sim 100$ V. Vì thế khi áp suất khí không cao, thì có thể bỏ qua ảnh hưởng của quá trình khuếch tán đối với hoạt động của buồng ion hoá.

Quá trình tái hợp của các phần tử có điện tích trái dấu cũng làm mất mát điện tích. Xác suất tái hợp phụ thuộc vào những yếu tố như mật độ các phần tử có điện tích trái dấu và khoảng thời gian mà chúng ở trong vùng ảnh hưởng của nhau. Do đó, xác suất tái hợp phụ thuộc một cách phức tạp vào suất liều hấp thụ, cường độ điện trường, độ linh động của các phần tử, vào bản chất của chất khí và áp suất khí trong buồng ion hoá.

Trong thực tế không phải bao giờ cũng dễ dàng đạt được chế độ bão hoà. Do vậy, tỷ số giữa dòng điện đo được và dòng điện bão hoà thường có giá trị $f=I/I_0 < 1$.

Tỷ số $f = I/I_0$ được gọi là hiệu suất thu hồi điện tích. Nó liên hệ với các đại lượng khác theo biểu thức sau đây:

$$f = \frac{I}{I_0} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{2}{3}\xi^2}} \quad (3.1-5)$$

với

$$\xi = \frac{d^2 \sqrt{q}}{U} \left(\frac{\alpha}{k_1 k_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1-6)$$

trong đó α – hệ số tái hợp của các phần tử có điện tích trái dấu; k_1 và k_2 – độ linh động của các ion và êlectron trong chất khí làm việc; d – khoảng cách giữa hai điện cực; U – chênh lệch điện thế của hai điện cực. Đối với không khí ở điều kiện tiêu chuẩn, giá trị $[\alpha/(k_1 k_2)]^{1/2} = 19,4$.

Các công thức (3.1-5 và -6) cho thấy rằng: đại lượng ξ có giá trị càng nhỏ thì hiệu suất thu hồi điện tích f có giá trị càng lớn. Muốn tăng giá trị f thì cần phải kết hợp thực hiện các biện pháp sau đây:

- 1) Chọn chất khí làm việc thích hợp để đảm bảo độ linh động cao cho các phân tử có điện tích;
- 2) Giảm khoảng cách giữa hai điện cực;
- 3) Tăng độ chênh lệch điện thế giữa hai điện cực của buồng;
- 4) Giảm số cặp ion được tạo thành trong một đơn vị thể tích trong một đơn vị thời gian;
- 5) Tạo điều kiện để giảm hệ số tái hợp ion.

Các công thức (3.1-5 và -6) chứng tỏ rằng: muốn cho hiệu suất thu hồi điện tích có được giá trị không đổi $f=\text{const}$, thì phải thoả mãn điều kiện sau đây:

$$\frac{d^2 \sqrt[2]{q}}{U} = \text{const} \quad (3.1-7)$$

Vì $q \sim P_0$ nên điều kiện này còn được viết ở dạng sau:

$$\frac{d^2 \sqrt[2]{P_0}}{U} = \text{const} \quad (3.1-7a)$$

Như vậy, muốn có hiệu suất thu hồi điện tích đạt giá trị không đổi $f=\text{const}$, thì phải thay đổi độ chênh lệch điện thế U một số lần bằng k_U sao cho:

$$k_U = k_d^2 \cdot k_{P_0}^{1/2} \quad (3.1-8)$$

với k_X – độ thay đổi của đại lượng X (X có giá trị bằng X_i và X_j tại hai thời điểm i và j nào đó):

$$k_X = \frac{X_i}{X_j} \quad (3.1-9)$$

Điều kiện (3.1-8) còn nhắc nhở rằng nếu suất liều thay đổi trong một dải rộng thì cần chia dải giá trị đó thành nhiều dải hẹp hơn, đồng thời điều chỉnh chênh lệch điện thế U theo biểu thức này để đạt được giá trị $f=\text{const}$.

Hai biểu thức (3.1-5 và -6) ở trên là đối với buồng ion hoá phẳng. Đối với

các buồng ion hoá có dạng hình học khác như hình trụ hoặc hình cầu, thì vẫn có thể áp dụng hai biểu thức này nếu thay đại lượng d bằng khoảng cách tương đương (d_{td}) giữa các điện cực của buồng.

Khoảng cách tương đương được xác định theo điều kiện sau đây.

Các buồng ion hoá hình dạng khác nhau nhưng có khoảng cách tương đương như nhau thì chúng phải có tỷ số [điện dung C của buồng]/ [thể tích làm việc V của buồng] như nhau.

Đối với buồng ion hoá phẳng: thể tích làm việc bằng $V = d S_{\text{hiệu dụng}}$, điện dung có giá trị bằng $C = \epsilon S / (4\pi d)$ trong hệ đơn vị CGSE hoặc $C = \epsilon \epsilon_0 S / d$ trong hệ đơn vị tiêu chuẩn hiện nay (SI). Trong không khí, hệ số $\epsilon_{\text{không khí}} = 1$. Do đó

$$C/V = 1 / (4\pi d_{td}^2) \quad \text{trong hệ CGSE} \quad (3.1-10)$$

$$C/V = \epsilon_0 / d_{td}^2 \quad \text{trong hệ SI} \quad (3.1-10a)$$

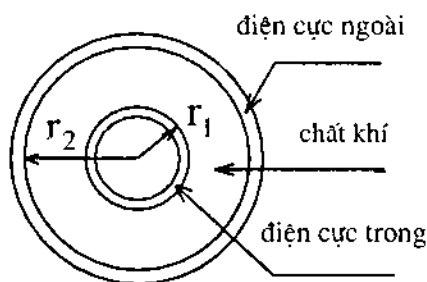
Trên cơ sở các biểu thức (3.1-10 và -10a), xác định được “khoảng cách tương đương” d_{td} của buồng ion hoá phẳng.

Cũng tương tự như vậy, đối với các buồng ion hoá hình trụ và hình cầu, khoảng cách tương đương d_{td} giữa các điện cực của buồng được xác định theo các biểu thức sau đây:

$$d_{td}(h.trụ) = (r_2 - r_1) \cdot \sqrt{\frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2}} \quad (3.1-11)$$

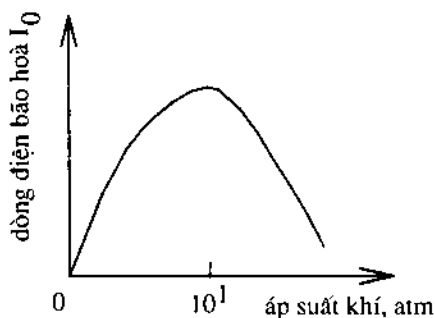
$$d_{td}(h.cầu) = (r_2 - r_1) \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{r_2}{r_1} + 1 + \frac{r_1}{r_2} \right)} \quad (3.1-12)$$

trong đó r_1 – bán kính ngoài của điện cực trong; r_2 – bán kính trong của điện cực ngoài của buồng ion hoá (xem hình H3.1-2).



Hình H3.1-2. Mặt cắt buồng ion hoá dạng hình trụ và hình cầu.
 Ký hiệu: r_1 – bán kính ngoài của điện cực trong; r_2 – bán kính trong của điện cực ngoài.

Như vậy, cho dù buồng ion hoá có dạng hình học khác nhau, các công thức (3.1-5 và -6) vẫn cho thấy sự phụ thuộc phức tạp của dòng điện thực tế (không bão hoà) vào suất liều. Tuy nhiên, hai công thức này còn chưa cho thấy sự phụ thuộc của dòng điện vào áp suất khí làm việc.



Hình H3.1-3. Sự phụ thuộc của dòng điện bão hoà vào áp suất khí trong buồng ion hoá.

Nếu giữ nguyên khoảng cách giữa hai điện cực và chênh lệch điện thế U của chúng, trong khi buồng được đặt trong trường bức xạ mà tăng dần áp suất

khí (p), thì sẽ xảy ra hiện tượng như sau. Ban đầu, khi áp suất khí tăng lên, thì dòng bão hoà cũng tăng lên theo một cách tỷ lệ. Đó là vì số cặp iôn q được tạo thành trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích khí tăng lên nhanh hơn so với sự mất mát điện tích do quá trình tái hợp. Khi áp suất khí đạt tới hàng chục atmôtphe thì dòng bão hoà giảm nhanh $I_0 \sim 1/p$ bởi lúc này quá trình tái hợp cạnh tranh ngày càng mạnh và trở nên chiếm ưu thế (xem hình H3.1-3).

Trong trường hợp áp suất khí còn chưa quá lớn (vài atmôtphe), nếu khoảng cách d được cố định và dòng điện bão hoà có giá trị không đổi, thì chênh lệch điện thế bão hoà có giá trị tăng lên tỷ lệ với căn bậc hai của áp suất khí:

$$U_0 (d=\text{const}; I_0=\text{const}) \sim p^{1/2} \quad (3.1-13)$$

Nói cách khác, tương quan này cho thấy rằng nếu muốn dòng bão hoà có giá trị không đổi, mà áp suất khí tăng lên (hoặc giảm xuống) k_p lần trong khi các điều kiện khác được giữ cố định, thì phải tăng (hoặc giảm tương ứng) chênh lệch điện thế bão hoà đi một số lần bằng

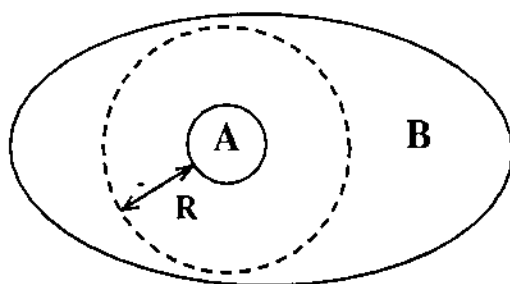
$$k_{U_0} (I_0=\text{const}; \text{các điều kiện khác cố định}) = k_p^{1/2} \quad (3.1-14)$$

Cũng tương tự như vậy đối với dòng điện I và chênh lệch điện thế U khi thay đổi áp suất khí làm việc trong buồng iôn hoá.

3.1.3. Lý thuyết Bragg–Gray

Trong thực tế thường cần đo liều hấp thụ bức xạ trong các môi trường khác không khí (và các chất khí nói chung). Vậy, liệu có thể sử dụng hiệu ứng iôn hoá của bức xạ trong không khí (hoặc chất khí nói chung) để xác định liều hấp thụ bức xạ trong các môi trường khác được không? Lý thuyết Bragg–Gray được trình bày dưới đây cho câu trả lời khẳng định về vấn đề này. (Lý thuyết này lần đầu tiên được Bragg nêu ra năm 1912; sau đó được Gray phát triển thêm trong những năm 1936-1949. Lý thuyết Bragg-Gray chiếm vị trí rất quan trọng trong lĩnh vực xác định liều lượng bức xạ).

Lý thuyết Bragg-Gray cho thấy mối liên hệ mật thiết giữa hiệu ứng ion hoá trong chất khí và năng lượng bức xạ được hấp thụ trong môi trường bao quanh hốc khí. Nội dung cơ bản của lý thuyết này như sau.



Hình H3.1-4. Hệ thống gồm hốc khí (A) và môi trường chất rắn bao quanh (B). R – quãng chạy của êlectrôn nhanh nhất trong chất rắn B.

Xét một hệ thống A+B gồm một hốc khí A nằm bên trong một môi trường rắn B (như được thể hiện trên hình H3.1-4). Quá trình ion hoá của chất khí trong hốc A được gây nên bởi các êlectrôn được giải phóng cả trong hốc khí cũng như trong môi trường chất rắn B. Giả thiết rằng:

- Kích thước của hốc khí rất nhỏ so với quãng chạy trong chất khí đó của các êlectrôn được giải phóng do tương tác của bức xạ;
- Bề dày của lớp chất rắn B giữa hốc khí A và không gian bao quanh hệ thống A+B phải bằng hoặc lớn hơn bề dài quãng chạy của các êlectrôn nhanh nhất trong chất rắn B;
- Cường độ bức xạ lượng tử sơ cấp có giá trị như nhau tại mọi điểm bất kỳ trong hệ A+B.

Đây là ba điều kiện của lý thuyết Bragg-Gray. Điều kiện a cho thấy:

Chỉ có một số rất ít các êlectrôn kết thúc quãng chạy của mình ở bên trong hốc khí A. Không những thế, chúng chỉ mất một phần rất nhỏ động năng của mình khi chạy qua hốc A. Do đó hiệu ứng ion hoá gây

bởi các êlectrôn được giải phóng trong chính hốc khí là nhỏ không đáng kể và có thể bỏ qua so với hiệu ứng iôn hoá của các êlectrôn được giải phóng trong lớp chất rắn B bao quanh hốc A. Vì vậy, trong trường hợp này, sự có mặt của hốc khí kích thước nhỏ không làm ảnh hưởng đến phân bố theo năng lượng và phân bố theo không gian của các êlectrôn. Nói cách khác, phổ năng lượng và thông lượng êlectrôn qua bề mặt giới hạn giữa hốc khí A với môi trường rắn B có giá trị giống hệt như trong trường hợp toàn hệ chỉ gồm có chất rắn B mà không có hốc khí A.

Điều kiện b cho thấy:

Trong bất kỳ thể tích nhỏ nào ở xung quanh hốc khí A năng lượng bức xạ bị hấp thụ luôn có giá trị bằng tổng động năng của tất cả các êlectrôn vừa được giải phóng trong thể tích đó. Nói cách khác, điều này có nghĩa là có trạng thái cân bằng điện tử ở xung quang hốc khí.

Điều kiện c đảm bảo:

Có thông lượng êlectrôn đồng nhất xung quanh hốc khí A. Nghĩa là, mật độ thông lượng $\Phi(E_e)dE_e$ của các êlectrôn với động năng trong khoảng $[E_e, E_e+dE_e]$ có giá trị như nhau tại mọi điểm trong hốc A và trong lớp chất rắn ở gần A (nơi có sự cân bằng điện tử). Nếu bề dày của lớp chất rắn lớn hơn rất nhiều so với quãng chạy R của điện tử nhanh nhất thì mật độ thông lượng $\Phi(E_e)dE_e$ sẽ có giá trị như nhau tại mọi điểm trong vùng chất rắn với bề dày bằng R bao quanh hốc khí A và cả trong vùng hốc khí đó.

Khi êlectrôn chuyển động và tương tác với môi trường, nó mất dần năng lượng do “bị môi trường hãm lại”. Năng suất hãm của môi trường vật chất Z bất kỳ có giá trị $S_Z(E_e)$ bằng độ mất năng lượng trung bình tính trên một đơn vị quãng đường của các êlectrôn với động năng E_e , tức là:

$$S_Z(E_e) = - \frac{dE_e}{dx} \quad (3.1-15)$$

Năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị

thể tích của chất Z sẽ có giá trị bằng:

$$\Delta E_Z = \int_{(E_e)} \Phi(E_e) S_Z(E_e) dE_e \quad (3.1-16)$$

Tích phân trong biểu thức (3.1-16) lấy theo toàn bộ phổ năng lượng của các êlectrôn).

Mặt khác, năng suất hãm của chất khí đối với các êlectrôn có động năng E_e còn có tương quan sau đây:

$$S_{\text{khí}}(E_e) = \omega q(E_e) \quad (3.1-17)$$

trong đó ω – năng lượng trung bình tạo cặp ion trong chất khí; $q(E_e)$ – số cặp ion trung bình được tạo thành khi êlectrôn với động năng E_e đi qua quãng đường dài một đơn vị trong chất khí.

Từ hai biểu thức (3.1-16 và -17) ta có tương quan sau đây:

$$\Delta E_Z = \int_{(E_e)} \Phi(E_e) \frac{S_Z(E_e)}{S_{\text{khí}}(E_e)} \omega q(E_e) dE_e \quad (3.1-18)$$

Ký hiệu giá trị trung bình của tỷ số các năng suất hãm của chất rắn Z đối với chất khí là:

$$S_{\text{khí}}^Z \equiv \frac{S_Z(E_e)}{S_{\text{khí}}(E_e)} \quad (3.1-19)$$

và coi giá trị năng lượng trung bình tạo cặp ion ω không phụ thuộc vào động năng của êlectrôn, ta có biểu thức sau đây:

$$\Delta E_Z = \omega S_{\text{khí}}^Z \int_{(E_e)} \Phi(E_e) q(E_e) dE_e \quad (3.1-20)$$

Vì tổng số cặp ion được tạo thành bởi tất cả các êlectrôn với năng lượng E_e bất kỳ trong toàn dải phổ động năng của chúng trong một đơn vị thể tích khí

trong mỗi đơn vị thời gian có giá trị q bằng tích phân ở vế phải của biểu thức (3.1-20):

$$q = \int_{(E_e)} \Phi(E_e) q(E_e) dE_e \quad (3.1-21)$$

nên có tương quan sau đây:

$$\Delta E_Z = q \omega S_{\text{khí}}^Z \quad (3.1-22)$$

Công thức (3.1-22) được gọi là **công thức Bragg-Gray**. Nó xác định năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích của chất Z bao quanh hốc khí, mà hệ này thoả mãn 3 điều kiện Bragg-Gray. Năng lượng đó có giá trị bằng tích của 3 thừa số là: 1)- Số cặp ion (q) được tạo thành trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích khí; 2)- Năng lượng trung bình tạo cặp ion trong chất khí (ω); và 3)- Giá trị trung bình của tỷ số giữa độ mất năng lượng do hiệu ứng ion hoá trong chất rắn Z và trong chất khí.

Trong các công thức (3.1-20 và -22) ta đã coi gần đúng rằng đại lượng $S_{\text{khí}}^Z$ không phụ thuộc vào năng lượng của êlectrôn; nhưng chính xác hơn thì:

$$S_{\text{khí}}^Z = \frac{1}{q} \int_{(E_e)} \Phi(E_e) \frac{S_Z(E_e)}{S_{\text{khí}}(E_e)} q(E_e) dE_e \quad (3.1-19a)$$

Do đó, muốn tìm được giá trị chính xác hơn của $S_{\text{khí}}^Z$ thì cần biết phổ năng lượng của êlectrôn.

Khi rút ra công thức (3.1-22) ta không hề quan tâm tới thành phần cụ thể của chất khí và chất rắn trong hệ A+B. Vì vậy, *công thức Bragg-Gray đúng đối với mọi chất khí bất kỳ trong hốc A và mọi chất rắn bất kỳ B, chỉ cần hệ A+B đồng thời thoả mãn được cả ba điều kiện a, b và c (đã nêu ở đầu mục này).*

Sự việc trở nên đơn giản hơn nếu chất khí A và chất rắn B có hợp phần nguyên tử như nhau. Trong trường hợp này, định lý Fano sẽ được thực hiện. Fano đã cho thấy rằng: *khí môi trường có hợp phần nguyên tử như nhau (không đối) mà bị chiếu bởi một chùm bức xạ gamma đồng nhất thì thông lượng bức xạ*

thứ cấp (gồm các *électron* và *positron*) cũng sẽ đồng nhất, không phụ thuộc vào mật độ của môi trường và vào sự thay đổi của mật độ môi trường từ điểm này sang điểm khác.

Như vậy, trong trường hợp chất khí và chất rắn có cùng hợp phần nguyên tử, trên cơ sở của định lý Fano, công thức Bragg–Gray đúng đối với hốc khí có kích thước bất kỳ; nghĩa là, khi này điều kiện a trở nên không cần thiết.

Tóm lại, công thức Bragg–Gray cho thấy mối liên hệ giữa hiệu ứng ion hoá trong chất khí và năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong môi trường chất rắn bao quanh hốc khí. Nó cho phép xác định năng lượng bị hấp thụ của các loại bức xạ khác nhau nếu biết hiệu ứng ion hoá trong hốc khí (cụ thể là hai đại lượng ω và q), và, đại lượng S^Z_{kh} .

Trên cơ sở công thức Bragg–Gray, có thể chế tạo được những dụng cụ đơn giản nhưng rất hiệu nghiệm để đo liều lượng bức xạ ion hoá.

3.1.4. Buồng ion hoá nhỏ thành dày

Buồng ion hoá nhỏ thành dày là loại buồng ion hoá có thể tích làm việc nhỏ với lớp thành dày bao quanh. Nguyên tắc hoạt động của buồng ion hoá nhỏ thành dày dựa trên cơ sở công thức Bragg–Gray.

Thành buồng thường là một điện cực. Buồng ion hoá được gọi là đồng nhất nếu thành buồng và chất khí có hợp phần nguyên tử như nhau.

Dưới đây nêu những quy luật cơ bản của buồng ion hoá nhỏ thành dày có chất khí làm việc là không khí.

3.1.4.1. Tương quan giữa dòng điện và suất liều

Buồng ion hoá nhỏ thành dày thoả mãn ba điều kiện của lý thuyết Bragg–Gray; do vậy, nó bảo đảm có trạng thái cân bằng điện tử. Giả sử việc đặt buồng ion hoá nhỏ thành dày vào vị trí cần đo mà không làm ảnh hưởng tới

trường bức xạ, cụ thể là không làm thay đổi cường độ bức xạ. Vì vậy có tương quan giữa năng lượng bị hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích của thành buồng hoặc của không khí ở điều kiện tiêu chuẩn với cường độ bức xạ I như sau:

$$\Delta E_Z = \mu_{k,Z} I \quad (3.1-23)$$

$$\Delta E_{\text{không khí}} = \mu_{k,\text{không khí}} I \quad (3.1-24)$$

trong đó $\mu_{k,Z}$ và $\mu_{k,\text{không khí}}$ – hệ số truyền năng lượng tương ứng của thành buồng và của không khí. Từ hai biểu thức (3.1-23 và -24) ta có:

$$\Delta E_Z = \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,\text{không khí}}} \cdot \Delta E_{\text{không khí}} \quad (3.1-25)$$

Thế vào vế trái của biểu thức (3.1-25) giá trị ΔE_Z tính theo công thức Bragg–Gray (3.1-22) mà trong đó số cặp ion q được xác định theo công thức (3.1-1), ta được tương quan sau đây:

$$\Delta E_Z = q \omega S_{\text{khí}}^Z = \frac{I_0}{eV} \omega S_{\text{khí}}^Z \quad (3.1-26)$$

Mặt khác, từ tương quan giữa năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong không khí và suất liều hấp thụ bức xạ trong không khí:

$$\Delta E_{\text{không khí}} = a P_{\text{không khí}} \quad (3.1-24a)$$

và kết hợp với các biểu thức (3.1-25 và -26), thì được các tương quan sau đây:

$$I_0 = a \frac{eV}{\omega} \frac{1}{S_{\text{khí}}^Z} \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,\text{không khí}}} \cdot P_{\text{không khí}} \quad (3.1-27)$$

$$\frac{I_0}{P_{\text{không khí}}} = a \frac{eV}{\omega} \frac{1}{S_{\text{khí}}^Z} \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,\text{không khí}}} \quad (3.1-28)$$

Tương tự như vậy, từ biểu thức (3.1-26) ta có:

$$I_0 = \frac{eV}{\omega S_{khí}^Z} \cdot \Delta E_Z = \frac{eV}{\omega S_{khí}^Z} \cdot a_1 P_Z \quad (3.1-29)$$

$$\frac{I_0}{P_Z} = a_1 \frac{eV}{\omega S_{khí}^Z} \quad (3.1-30)$$

Tương quan (3.1-28) và (3.1-30) được gọi là *độ nhạy của buồng ion hoá*.

Độ nhạy của đầu dò (hoặc của hệ đo) đối với một đại lượng cần xác định nào đó là tỷ số giữa độ lớn của tín hiệu ra của đầu dò (hoặc của hệ đo) và giá trị của đại lượng cần xác định đó. (Thí dụ, đại lượng cần xác định có thể là: suất liều bức xạ, liều bức xạ, mật độ thông lượng hoặc thông lượng bức xạ.v.v.; tín hiệu ra có thể là: dòng điện, tốc độ đếm xung, chênh lệch điện thế.v.v.).

Các công thức (3.1-27..-30) cho thấy tương quan giữa dòng điện sinh ra trong buồng ion hoá và suất liều. Tuy nhiên, trong thực tế chỉ sử dụng được buồng ion hoá nhỏ thành dày để đo suất liều nếu độ nhạy của buồng không phụ thuộc hoặc ít phụ thuộc vào năng lượng của lượng tử.

Tỷ số $S_{khí}^Z$ hầu như không phụ thuộc vào năng lượng của lượng tử gamma. Do đó sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng của lượng tử gamma hầu như được quyết định hoàn toàn bởi tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,không\ khí}$.

Nếu vật liệu của thành buồng có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng $Z_{hiệu\ dụng}$ bằng của không khí thì nó được gọi là vật liệu tương đương không khí. Trong trường hợp này:

$$\frac{1}{S_{khí}^Z} = \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,không\ khí}} = 1 \quad (3.1-31)$$

Do vậy biểu thức (3.1-28) trở nên rất đơn giản là:

$$\frac{I_0}{P_{không\ khí}} = a \frac{eV}{\omega} \quad (3.1-32)$$

Nghĩa là, *độ nhạy của buồng ion hoá nhỏ thành dày không phụ thuộc vào*

năng lượng của lượng tử nếu thành buồng là tương đương không khí.

Như ở đầu mục nhỏ này đã nêu, buồng ion hoá nhỏ thành dày bảo đảm có trạng thái cân bằng điện tử. Vì vậy suất liều chiếu xạ của nó có tương đương năng lượng bằng suất liều hấp thụ trong vùng không khí làm việc của buồng.

Nếu buồng ion hoá tương đương không khí có thể tích làm việc là $V[\text{cm}^3]$, áp suất khí là $p[\text{mmHg}]$, phép đo được tiến hành ở nhiệt độ $t^\circ\text{C}$ với suất liều chiếu xạ là $P_{\text{chiếu xạ}}[\text{R/s}]$ và dòng điện bão hoà là $I_0[\text{A}]$, thì từ các biểu thức (3.1-32) và (1.4-6), sẽ thu được các tương quan sau đây giữa những đại lượng vừa nêu:

$$I_0[\text{A}] = 3,3 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{P}{760} \cdot VP_{\text{chiếu xạ}} \quad (3.1-33)$$

$$P_{\text{chiếu xạ}}[\text{R/s}] = 3,0 \cdot 10^9 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right) \cdot \frac{760}{p} \cdot \frac{I_0}{V} \quad (3.1-34)$$

Từ hai công thức này có thể thấy như sau: vì áp suất và thể tích khí làm việc trong buồng ion hoá nhỏ thành dày thường không lớn, nên dòng điện có giá trị rất nhỏ, độ nhạy rất thấp. Thí dụ, ứng với suất liều tối đa cho phép là $0,6 \cdot 10^{-6} \text{R/s}$, buồng ion hoá nhỏ thành dày có $V=1 \text{ cm}^3$ ở áp suất khí quyển chỉ cho dòng điện bão hoà cỡ 10^{-16}A ; việc đo những dòng điện yếu như vậy rất khó khăn, phức tạp. Bởi vậy buồng ion hoá nhỏ thành dày thường được sử dụng trong trường hợp suất liều tương đối lớn (thí dụ: để xác định liều và suất liều khi dùng nguồn phóng xạ ^{60}Co hoặc máy gia tốc trong điều trị khối u).

3.1.4.2. Sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ

a. Trường hợp thành buồng ion hoá không làm yếu bức xạ

Xét trường hợp bức xạ lượng tử hầu như không bị làm yếu trong thành buồng ion hoá. Khi này sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ được quyết định hoàn toàn bởi tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$.

Có thể tạm chia toàn dải năng lượng E_γ của bức xạ lượng tử thành ba vùng như sau:

- Vùng năng lượng thấp (còn gọi là vùng năng lượng “mềm”): có các hiệu ứng hấp thụ quang điện và tán xạ Compton xảy ra đồng thời;
- Vùng năng lượng trung bình: chỉ có hiệu ứng tán xạ Compton xảy ra;
- Vùng năng lượng tương đối cao (“cứng”) của bức xạ gamma: có các hiệu ứng tán xạ Compton và tạo cặp e^-e^+ xảy ra đồng thời.

Sau đây xét sự thay đổi của tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ theo năng lượng E_γ trong từng vùng năng lượng vừa nêu trên.

• Trong vùng năng lượng “mềm”:

Trong vùng năng lượng “mềm”, có thể viết tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ dưới dạng sau đây:

$$\frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,\text{không khí}}} = \frac{\tau_{k,Z} + \sigma_{k,Z}}{\tau_{k,\text{không khí}} + \sigma_{k,\text{không khí}}} \quad (3.1-35)$$

Nếu thể hiện các hệ số truyền năng lượng $\tau_{k,i}$ và $\sigma_{k,i}$ ở dạng tích của hai thừa số, trong đó thừa số thứ nhất chỉ phụ thuộc vào số thứ tự nguyên tố hiệu dụng Z_i , còn thừa số thứ hai chỉ phụ thuộc vào năng lượng E_γ , thì ta có:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{k,Z} &= b(Z) \cdot \varphi(E_\gamma) \\ \tau_{k,\text{không khí}} &= b(Z_{\text{không khí}}) \cdot \varphi(E_\gamma) \\ \sigma_{k,Z} &= \sigma_{k,\text{không khí}} = f(E) \end{aligned} \right\} \quad (3.1-36)$$

Thế các biểu thức (3.1-36) vào (3.1-35), thì thu được tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ ở dạng sau đây:

$$\frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,\text{không khí}}} = \frac{b(Z) \cdot \varphi(E_\gamma) + f(E_\gamma)}{b(Z_{\text{không khí}}) \cdot \varphi(E_\gamma) + f(E_\gamma)} \quad (3.1-37)$$

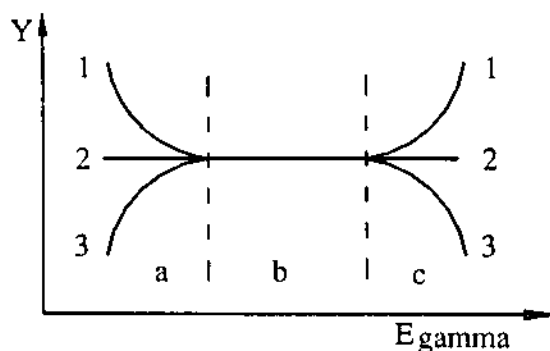
Trong tương quan (3.1-37), tử số và mẫu số chỉ khác nhau ở một điểm duy nhất là sự phụ thuộc của thừa số b vào số thứ tự nguyên tố hiệu dụng Z_i của thành buồng và không khí. Tỷ số (3.1-37) có giá trị khác nhau ứng với ba trường hợp như sau:

1. Khi $Z_{\text{thành buồng}} > Z_{\text{không khí}}$: Tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ giảm xuống khi E_γ tăng;
2. Khi $Z_{\text{thành buồng}} = Z_{\text{không khí}}$: Tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ không phụ thuộc E_γ ;
3. Khi $Z_{\text{thành buồng}} < Z_{\text{không khí}}$: Tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ tăng lên khi E_γ tăng.

• Trong vùng năng lượng “cứng”:

Trong vùng năng lượng “cứng”, cũng xét tương tự như trên, ta thấy:

1. Khi $Z_{\text{thành buồng}} > Z_{\text{không khí}}$: Tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ tăng lên khi E_γ tăng;
2. Khi $Z_{\text{thành buồng}} = Z_{\text{không khí}}$: Tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ không phụ thuộc E_γ ;
3. Khi $Z_{\text{thành buồng}} < Z_{\text{không khí}}$: Tỷ số $\mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ giảm xuống khi E_γ tăng.



Hình H3.1-5. Sự phụ thuộc vào năng lượng E_{gamma} của tỷ số $Y = \mu_{k,z}/\mu_{k,\text{không khí}}$ của buồng iôn hoá nhỏ thành dày. Ký hiệu: a – vùng năng lượng chỉ xảy ra hấp thụ quang điện và tán xạ Compton; b – vùng năng lượng chỉ xảy ra tán xạ Compton; c – vùng năng lượng chỉ xảy ra hiệu ứng tạo cặp êlectrôn–pôstrôn; 1 – trường hợp $Z > Z_{\text{không khí}}$; 2 – trường hợp $Z = Z_{\text{không khí}}$; 3 – trường hợp $Z < Z_{\text{không khí}}$.

• **Trong vùng năng lượng trung bình:**

Trong vùng năng lượng trung bình chỉ xảy ra hiệu ứng tán xạ Compton; tương quan (3.1-37) cho giá trị bằng 1, nghĩa là tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,không\ khí}$ không phụ thuộc năng lượng E_γ .

Như vậy, sự phụ thuộc của tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,không\ khí}$ vào năng lượng E_γ của lượng tử tới tương tác với buồng ion hoá có thể được minh hoạ như trên hình H3.1-5. Tỷ số $\mu_{k,Z}/\mu_{k,không\ khí}$ quyết định sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của độ nhạy của bất kỳ đầu dò nào được dùng để đo liều lượng bức xạ lượng tử. Đường đặc trưng này có những dạng khác nhau tùy thuộc vào số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của đầu dò và vùng năng lượng của bức xạ. Để dễ nhớ, có thể hình dung đường đặc trưng này có dạng giống như đường lòng chảo ngửa khi $Z > Z_{không\ khí}$, như đường lòng chảo úp khi $Z < Z_{không\ khí}$, còn khi $Z = Z_{không\ khí}$ thì nó như một đường nằm ngang trùng với đáy của hai đường lòng chảo vừa nêu trên.

b. Trường hợp thành buồng ion hoá làm yếu bức xạ

Trong thực tế, bao giờ bức xạ cũng bị làm yếu trong thành buồng ion hoá. Thêm vào đó, bề dày của thành buồng có thể lớn hơn quãng chạy của electron nhanh nhất. Vì vậy, nếu tính tới sự làm yếu bức xạ trong thành buồng, thì có thể thu được tương quan sau đây cho độ nhạy của buồng ion hoá nhỏ thành dày:

$$\frac{I_0}{P_{không\ khí}} = a^* \cdot \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k,không\ khí}} \frac{1 - \exp(-\mu_Z R_Z)}{\mu_Z R_Z} \exp[-\mu_Z (d - R_Z)] = a^* y_1 y_2 y_3 \quad (3.1-38)$$

ở đây: a^* – hệ số có giá trị không phụ thuộc vào năng lượng E_γ ; μ_Z – hệ số làm yếu dài đối với bức xạ trong thành buồng; d – bề dày của thành buồng; R_Z – quãng chạy của electron nhanh nhất trong thành buồng (tức là bề dày có ích của thành buồng); $d - R_Z$ – bề dày của lớp thành buồng chỉ làm yếu bức xạ. Như vậy, trong trường hợp này, độ nhạy phụ thuộc vào năng lượng thông qua ba thừa số y_1 , y_2 và y_3 sau đây:

$$y_1 = \frac{\mu_{k,Z}}{\mu_{k, \text{không khí}}} \quad (3.1-39)$$

$$y_2 = \frac{1 - e^{-\mu_z R_z}}{\mu_z R_z} \quad (3.1-40)$$

$$y_3 = e^{-\mu_z(d-R_z)} \quad (3.1-41)$$

Sự phụ thuộc vào năng lượng của tỷ số $y_1 = \mu_{k,Z}/\mu_{k, \text{không khí}}$ vừa được xét trong mục a ở trên. Ảnh hưởng của lớp bề dày có ích được thể hiện qua thừa số y_2 . Ảnh hưởng của lớp bề dày làm yếu bức xạ được thể hiện qua thừa số y_3 .

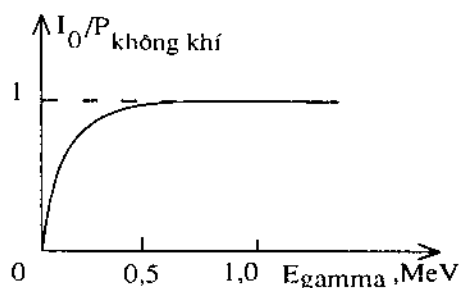
Xét ảnh hưởng của $y_2(E_\gamma)$. Trong vùng năng lượng E_γ của hiệu ứng tán xạ Compton, tích $\mu_z R_z$ ít thay đổi theo năng lượng nên thừa số y_2 cũng ít thay đổi. Trong vùng năng lượng “mềm”, khi E_γ tăng lên thì thừa số y_2 sẽ giảm xuống. Tính toán cho thấy, khi $Z < 15$ thì giá trị của thừa số $y_2 \approx 1$ đối với các lượng tử có năng lượng E_γ nhỏ hơn hoặc gần bằng 1,5 MeV. (Thí dụ, đối với nhôm, $Z_{Al}=13$, khi $E_\gamma=2\text{MeV}$, thừa số này có giá trị bằng 0,975).

Xét ảnh hưởng của $y_3(E_\gamma)$. Khi E_γ tăng thì quãng chạy R_z cũng tăng, làm giảm bề dày $d-R_z$. Khi năng lượng có giá trị $E_\gamma \sim 1\text{MeV}$ thì $y_3 \approx 1$. Khi giảm E_γ thì thừa số y_3 giảm nhanh. Trong vùng năng lượng “mềm” ($E_\gamma \leq 50 \text{ keV}$), hệ số y_3 đóng vai trò chủ yếu trong đặc trưng phụ thuộc năng lượng của độ nhạy.

Như vậy, do bức xạ bị làm yếu trong thành buồng, nên độ nhạy giảm nhanh khi giảm năng lượng E_γ của bức xạ ‘mềm’.

Hình H3.1-6 minh hoạ đường đặc trưng phụ thuộc năng lượng E_γ của buồng ion hoá nhỏ thành dày tương đương không khí.

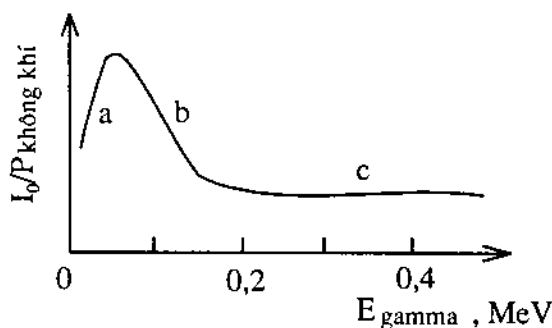
Kết hợp xem xét vùng năng lượng thấp trên hai hình H3.1-5 và H3.1-6, ta có thể nhận xét về sự phụ thuộc vào số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của thành buồng như sau:



Hình H3.1-6. Đường đặc trưng phụ thuộc năng lượng E_γ của buồng ion hoá nhỏ thành dày tương đương không khí.

- Nếu $Z_{\text{thành buồng}} < Z_{\text{không khí}}$, thì thừa số y_1 có đóng góp cùng chiều với $y_2 y_3$, do đó làm tăng thêm sự phụ thuộc của độ nhạy $I_0/P_{\text{không khí}}$ vào năng lượng E_γ .
- Nếu $Z_{\text{thành buồng}} > Z_{\text{không khí}}$, thì thừa số y_1 có đóng góp ngược chiều với $y_2 y_3$, do đó làm giảm bớt sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng trong vùng bức xạ 'mềm'.

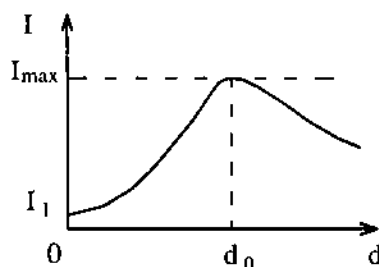
Hình H3.1-7 cho thấy đường đặc trưng của buồng ion hoá nhỏ có thành dày 1g/cm^2 bằng nhôm. Trên hình này, ở vùng a: thừa số y_3 có vai trò quyết định; ở vùng b: thừa số y_1 có vai trò quyết định; ở vùng c: ảnh hưởng của ba thừa số y_1 , y_2 và y_3 bù trừ lẫn nhau.



Hình H3.1-7. Dạng đường đặc trưng của buồng ion hoá nhỏ có thành dày 1g/cm^2 bằng nhôm.

3.1.4.3. Ảnh hưởng của bề dày và vật liệu thành buồng

Dòng điện trong buồng ion hoá nói chung phụ thuộc vào bề dày d của thành buồng. Sự phụ thuộc này được thể hiện thông qua các thừa số y_2 và y_3 như đã nêu trong các biểu thức (3.1-40 và -41). Ứng với một giá trị năng lượng E_γ nhất định, thì sự phụ thuộc $I(d)$ này có dạng như trên hình H3.1-8.



Hình H3.1-8. Sự phụ thuộc của dòng điện I vào bề dày d của thành buồng ion hoá.

Khi bề dày $d=0$, dòng điện có giá trị $I=I_1$ rất nhỏ tạo bởi những electron được sinh ra trong thể tích khí. Khi tăng dần bề dày d , hiệu ứng ion hoá tăng dần bởi các electron được giải phóng từ thành buồng; do vậy dòng điện I cũng tăng lên. Khi bề dày đạt giá trị bằng quãng chạy của các electron nhanh nhất trong vật liệu thành buồng $d_0=R_z$ thì điều kiện cân bằng điện tử được thoả mãn, dòng điện đạt giá trị cực đại $I_{\max}$. Buồng ion hoá nhỏ thành dày phải có thành dày $d \geq d_0$. Nếu năng lượng E_γ đủ lớn, dòng điện có thể có giá trị $I \approx I_{\max}$ trong một khoảng bề dày nhất định khi $d > d_0$. Nhưng nếu tiếp tục tăng bề dày thành buồng, thì dòng điện sẽ giảm xuống do bức xạ bị làm yếu trong thành buồng.

Các công thức (3.1-38 đến -41) cho thấy độ nhạy còn phụ thuộc vào vật liệu thành buồng thông qua hệ số truyền năng lượng $\mu_{k,z}$ ở tử số của y_1 (biểu thức 3.1-39). Hệ số $\mu_{k,z}$ có giá trị khác nhau trong các quá trình tương tác khác nhau của bức xạ lượng tử với vật liệu thành buồng. Khi sử dụng vật liệu có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng Z cao hơn để làm thành buồng, hệ số $\mu_{k,z}$ có giá trị

không đổi trong quá trình tán xạ Compton, nhưng tăng lên tỷ lệ với Z^2 trong quá trình tạo cặp, và, tăng rất mạnh tỷ lệ với Z^5 trong quá trình hấp thụ quang điện. Thừa số y_1 cũng có sự phụ thuộc tương tự như vậy vào Z của vật liệu.

Trên đây, để cho dễ hiểu, chúng ta đã xét sự phụ thuộc của độ nhạy của buồng ion hoá nhỏ thành dày vào hai yếu tố tách biệt nhau là vật liệu thành buồng và năng lượng của lượng tử. Tuy nhiên, cần chú ý rằng hệ số làm yếu bức xạ μ_z và hệ số truyền năng lượng $\mu_{k,z}$ có mặt trong các biểu thức (3.1-38...-41) đồng thời phụ thuộc vào vật liệu thành buồng và năng lượng của lượng tử; trong thực tế, các yếu tố này luôn gắn chặt với nhau.

3.1.5. Buồng tụ điện

Buồng tụ điện là một loại buồng ion hoá hoạt động trên nguyên tắc làm giảm độ chênh lệch điện thế giữa hai điện cực của nó.

3.1.5.1. Tương quan giữa liều chiếu xạ và độ thay đổi chênh lệch điện thế

Giả sử, buồng tụ điện có điện dung là C , có chênh lệch điện thế ban đầu (được nạp sẵn) là U_0 , và, được đặt trong trường bức xạ lượng tử. Các hạt có điện tích được tạo thành trong thể tích khí làm việc của buồng sẽ chuyển động về các điện cực tương ứng làm giảm dần chênh lệch điện thế U của buồng. Độ giảm chênh lệch điện thế của buồng phụ thuộc vào liều chiếu xạ.

Từ hai biểu thức (3.1-1a và -5), ta có biểu thức cho lượng điện tích được thu về các điện cực trong khoảng thời gian dt như sau:

$$dQ = eqVf(U)dt \quad (3.1-42)$$

trong đó $f(U)$ – hiệu suất thu hồi điện tích về các điện cực của buồng tụ điện. Kết quả là dẫn tới độ giảm chênh lệch điện thế của buồng:

$$-dU = -\frac{dQ}{C} = -\frac{eqV}{C} \cdot f(U)dt \quad (3.1-43)$$

Nếu buồng tụ điện bị chiếu xạ trong một khoảng thời gian là T , thì độ thay đổi chênh lệch điện thế sẽ có giá trị bằng:

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_0 - U(T) = \\ &= - \int_0^T \frac{eqV}{C} f(U) dt\end{aligned}\quad (3.1-44)$$

Trong suốt quá trình buồng chịu tác động của bức xạ, độ chênh lệch điện thế giảm dần; do đó hiệu suất thu hồi điện tích cũng giảm dần theo thời gian (xem các công thức (3.1-5 và -6)). Đây là điểm đặc trưng của các buồng tụ điện.

Trong trường hợp có thể bỏ qua hiệu ứng tái hợp ion, thì $f(U) \approx 1$, và do đó từ (3.1-43 và -44) sẽ thu được biểu thức sau đây:

$$\Delta U = \frac{Q}{C} = \frac{eqTV}{C}\quad (3.1-45)$$

ở đây qT – số cặp ion trung bình được tạo thành trong mỗi đơn vị thể tích khí làm việc do bị chiếu xạ trong khoảng thời gian bằng T . Xuất phát từ tương quan (3.1-4) là lượng điện tích tổng cộng mỗi dấu được tạo thành trong buồng ion hoá tỷ lệ thuận với liều hấp thụ bức xạ; do đó qT cũng tỷ lệ với liều chiếu xạ $D_{\text{chiếu xạ}}$ trong khoảng thời gian T :

$$eqT = aD_{\text{chiếu xạ}}\quad (3.1-46)$$

với $a = \text{const}$ phụ thuộc vào thứ nguyên của các đại lượng khác có trong công thức (3.1-46).

Thế giá trị qT theo biểu thức (3.1-46) vào (3.1-45), sẽ thu được tương quan giữa liều chiếu xạ và độ thay đổi chênh lệch điện thế của buồng ion hoá tụ điện trong trường hợp lý tưởng (tức là khi toàn bộ các hạt có điện tích sinh ra trong thể tích khí làm việc đều được thu về các điện cực tương ứng, $f(U) = 1$):

$$\Delta U = \frac{aV}{C} \cdot D_{\text{chiếu xạ}}\quad (3.1-47)$$

Để đánh giá độ nhạy của buồng tụ điện, giả sử buồng có chất khí là không khí ở điều kiện tiêu chuẩn, với thể tích làm việc $V=1\text{cm}^3$ và điện dung $C \approx 1 \cdot 10^{-11}\text{F}$. Đặt buồng tụ điện này vào trường bức xạ trong một ngày với liều chiếu $D_{\text{chiếu xạ}}=17\text{mR}$ (là mức liều tối đa cho phép trong một ngày đối với nhân viên chuyên làm việc với bức xạ hạt nhân). Vì liều chiếu xạ 1R tạo ra trong 1cm^3 không khí $2,08 \cdot 10^9$ cặp ion, lại biết điện tích của ion và của điện tử có giá trị tuyệt đối bằng nhau $e=1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$, nên trong biểu thức (3.1-47) hệ số có giá trị bằng $a=2,08 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\text{C/R} \approx 3,3 \cdot 10^{-10}\text{C/R}$. Tính cho trường hợp lý tưởng khi $f=1$, công thức (3.1-47) cho độ thay đổi chênh lệch điện thế $\Delta U \approx 0,5\text{V}$. Trong khi đó một buồng ion hoá nhỏ thành dây với các đặc trưng tương tự chỉ cho dòng điện bão hoà cỡ 10^{-16}A .

So sánh hai trường hợp vừa nêu, thì thấy, rõ ràng là *buồng tụ điện có độ nhạy rất cao so với buồng ion hoá nhỏ thành dây*. Thêm vào đó, việc đo chênh lệch điện thế lại dễ dàng và đơn giản hơn nhiều so với việc đo những dòng điện rất yếu. Chính nhờ có những ưu điểm như vậy nên buồng tụ điện thường được sử dụng rộng rãi trong việc kiểm tra liều bức xạ cá nhân.

Độ thay đổi chênh lệch điện thế do bị chiếu xạ có thể được đo bằng một máy riêng hoặc bằng một điện kế đặc biệt gắn ngay trong buồng tụ điện.

Trong thực tế, vì hiệu suất thu hồi điện tích $f(U)$ thay đổi theo U , nên tương quan (3.1-47) phải được thay thế bằng tương quan sau đây:

$$-\int_{U_T}^{U_0} \frac{dU}{f(U)} = a \frac{V}{C} D_{\text{chiếu xạ}} \quad (3.1-48)$$

với U_0 – chênh lệch điện thế giữa hai điện cực ở thời điểm ban đầu $t=0$; U_T – chênh lệch điện thế giữa hai điện cực ở thời điểm $t=T$;

Từ đó có biểu thức liên hệ sau đây giữa độ thay đổi chênh lệch điện thế đo được trong thực tế U_0-U_T và liều chiếu xạ $D_{\text{chiếu xạ}}$:

$$\frac{U_0 - U_T}{\bar{f}} = a \frac{V}{C} D_{\text{chiếu xạ}} \quad (3.1-49)$$

Biểu thức (3.1-48) cho thấy rằng muốn lập được mối quan hệ giữa giá trị của độ thay đổi chênh lệch điện thế giữa hai điện cực của buồng ion hoá tụ điện với liều chiếu xạ, thì nhất thiết phải biết giá trị của hiệu suất thu hồi ion.

3.1.5.2. Hiệu suất thu hồi điện tích

Trong đo đạc thực tế, có thể sử dụng giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích được xác định theo công thức sau đây:

$$\bar{f} = \frac{U_0 - U_T}{\Delta U} \quad (3.1-50)$$

trong đó $U_0 - U_T$ – độ thay đổi chênh lệch điện thế đo được trong thực tế; ΔU – độ thay đổi chênh lệch điện thế trong trường hợp lý tưởng (3.1-47) (khi $f=1$).

Vì về mặt của hai biểu thức (3.1-47 và -48) có giá trị như nhau, nên có biểu thức sau đây:

$$\Delta U = \int_{U_T}^{U_0} \frac{dU}{f(U)} \quad (3.1-51)$$

Thế giá trị của ΔU theo (3.1-51) vào (3.1-50), ta được:

$$\bar{f} = (U_0 - U_T) \cdot \left(\int_{U_T}^{U_0} \frac{dU}{f(U)} \right)^{-1} \quad (3.1-50a)$$

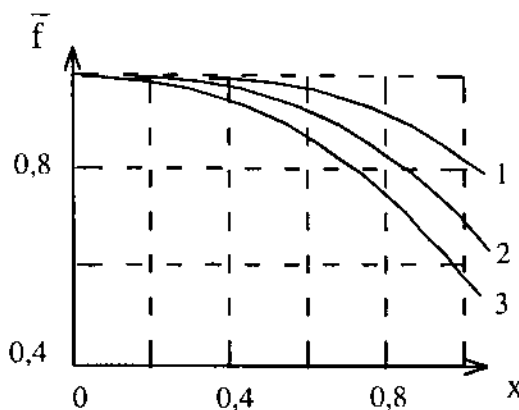
Biểu thức (3.1-50a) cho thấy, muốn xác định giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích, cần phải biết rõ dạng hàm phụ thuộc $f(U)$. Dạng hàm này không những chỉ phụ thuộc vào một loạt yếu tố như đã nêu trong các biểu thức (3.1-5 và -6) ở mục 3.1.2 (khi ta xem xét một số quy luật cơ bản của buồng ion hoá), mà còn phụ thuộc rất mạnh vào chế độ chiếu xạ. Dưới đây trình bày những đặc điểm của sự phụ thuộc này.

a. Chiếu xạ liên tục:

Trong điều kiện chiếu xạ liên tục, muốn xác định giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích, ta phải sử dụng các biểu thức (3.1-5 và -6) ở mục 3.1.2 và các biểu thức (3.1-10.-12) cho khoảng cách tương đương giữa hai điện cực của buồng iôn hoá. Từ các công thức vừa nêu và công thức (3.1-50a) có thể thu được giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích ở dạng hàm số sau đây:

$$\bar{f} = F\left(\frac{U_T}{U_0}, \xi_0\right) \quad (3.1-52)$$

trong đó đại lượng ξ_0 được tính theo công thức (3.1-6) khi $U_T = U_0$. Bằng cách vẽ sẵn một loạt đường phụ thuộc (3.1-52) theo đối số ξ_0 ứng với mỗi giá trị khác nhau của tỷ số U_T / U_0 (xem minh hoạ trên hình H3.1-9), có thể nhanh chóng tìm được giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích để tính liều bức xạ theo biểu thức liên hệ (3.1-49).



Hình H3.1-9. Sự phụ thuộc của giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích $\langle f \rangle = F(U_T / U_0, \xi_0)$ vào đối số $x \equiv \xi_0$ và tỷ số U_T / U_0 của buồng iôn hoá. Trên đồ thị, đường cong số 1 ứng với trường hợp khi tỷ số $U_T / U_0 = 1$; đường cong số 2 – khi $U_T / U_0 = 0,5$; đường cong số 3 – khi $U_T / U_0 = 0,2$.

b. Chiếu xạ theo chế độ xung:

Nếu buồng iôn hoá được chiếu xạ chế độ xung với tần số là ν xung trong mỗi đơn vị thời gian, và, mỗi xung đều làm độ chênh lệch điện thế của buồng thay đổi không đáng kể, thì trong trường hợp này hiệu suất thu hồi điện tích sẽ có dạng hàm số như sau:

$$f(U) = \frac{\ln(1+\eta)}{\eta} \quad (3.1-53)$$

trong đó hệ số η được xác định theo công thức sau đây:

$$\eta = \frac{\alpha d_{\text{hiệu dụng}}^2 \bar{q}}{(k_1 + k_2) U \nu} \quad (3.1-54)$$

với $\langle q \rangle$ là số cặp iôn trung bình được sinh ra trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích khí làm việc của buồng iôn hoá; các đại lượng khác có ý nghĩa như trong biểu thức (3.1-6) (tức là α – hệ số tái hợp của các phân tử có điện tích trái dấu; k_1 và k_2 – độ linh động của các iôn và êlectrôn trong chất khí làm việc; $d_{\text{hiệu dụng}}$ – khoảng cách hiệu dụng giữa hai điện cực).

Từ các công thức (3.1-50a) và (3.1-53, -54), có thể thu được giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích ở dạng hàm số sau đây:

$$\bar{f} = \Phi\left(\frac{U_T}{U_0}, \eta_0\right) \quad (3.1-55)$$

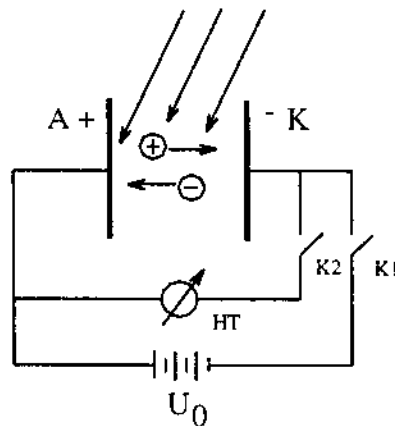
trong đó đại lượng η_0 được tính theo công thức (3.1-54) khi $U_T = U_0$. Tiếp đó, cũng làm tương tự như đối với trường hợp chiếu xạ liên tục, ta vẽ sẵn một loạt đường phụ thuộc (3.1-55) theo đối số η_0 ứng với mỗi giá trị khác nhau của tỷ số U_T / U_0 , có thể nhanh chóng tìm được giá trị trung bình của hiệu suất thu hồi điện tích để tính liều bức xạ theo biểu thức liên hệ (3.1-49).

Việc tính toán sẽ phức tạp hơn nếu mỗi xung làm thay đổi đáng kể độ chênh lệch điện thế giữa hai điện cực của buồng. Tuy nhiên, các đánh giá định lượng cho thấy rằng trong mỗi xung bức xạ, hiệu suất f ít phụ thuộc vào độ thay đổi chênh lệch điện thế trong thời gian thu hồi các điện tích được sinh ra bởi

chính xung bức xạ đó. Nguyên nhân là vì phần lớn các ion đã tái hợp ở ngay thời điểm vừa được sinh ra, khi chênh lệch điện thế chưa thay đổi đáng kể. Chính nguyên nhân này lại làm cho hiệu suất thu hồi điện tích trong trường hợp chiếu xạ ở chế độ xung trở nên có giá trị nhỏ hơn so với trong trường hợp chiếu xạ liên tục ở cùng một cường độ bức xạ trung bình.

3.1.5.3. Bút đo liều bằng buồng ion hoá kiểu tụ điện

Các biểu thức từ (3.1-44) đến (3.1-49) cho mối liên hệ giữa độ chênh lệch điện thế và liều chiếu xạ. Đo được độ chênh lệch điện thế này, thì xác định được liều chiếu xạ. Dùng buồng ion hoá kiểu tụ điện có thể đo được độ chênh lệch điện thế đó.



Hình H3.1-10. Sơ đồ nguyên tắc mô tả hoạt động của một buồng ion hoá kiểu tụ điện. Ký hiệu: A – anôt (điện cực dương); K – katôt (điện cực âm); U_0 - điện áp ban đầu được cung cấp bởi nguồn nuôi một chiều; K1 - khoá đóng ngắt mạch; HT - bộ phận hiển thị kết quả; K1 và K2 - các khoá đóng ngắt mạch.

Hình H3.1-10 cho thấy sơ đồ nguyên tắc mô tả hoạt động của một buồng ion hoá kiểu tụ điện. Ban đầu các điện cực của buồng tụ được nạp một lượng điện tích Q_0 tương ứng với độ chênh lệch điện thế giữa hai cực bằng U_0 (bằng

cách đóng khoá K1). Khoá K1 chỉ đóng mạch có một lần – đó là khi nạp điện tích cho các điện cực của buồng ion hoá. Khi cả hai khoá K1 và K2 đều ở trạng thái ngắt, thì buồng ion hoá được đưa vào trong trường bức xạ cần quan tâm. Khoá K2 cũng chỉ đóng mạch có một lần – đó là khi nối hai điện cực của buồng tụ với bộ chỉ thị để đo độ chênh lệch điện thế (ΔU) đồng thời đọc giá trị liều D.

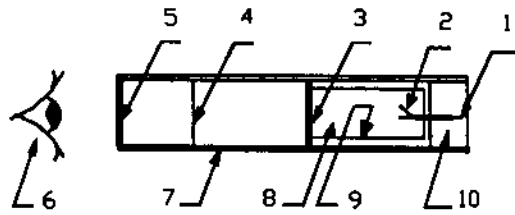
Trong thực tế, dụng cụ đo liều bằng buồng ion hoá kiểu tụ điện thường được làm ở dạng bút hình trụ. Thông thường, bút gồm hai phần có thể tháo rời nhau; mỗi phần là một buồng tụ độc lập, một buồng ứng với dải đo liều thấp, còn buồng kia có dải đo liều cao hơn. Trong mỗi buồng tụ, mặt trong của thành buồng là điện cực âm, còn điện cực dương nằm trùng với trục của hình trụ.

Ưu điểm của bút đo liều bằng buồng ion hoá kiểu tụ điện là có dải đo liều rộng hơn so với loại bút đo liều bằng buồng ion hoá kiểu điện kế tĩnh điện (được trình bày dưới đây).

Nhược điểm của loại bút đo liều kiểu này là có thể bị ảnh hưởng bởi một số điều kiện môi trường (cụ thể là độ ẩm, bụi, hoặc bị nhiễm điện hưởng ứng... – tương tự như đối với loại bút đo kiểu điện kế tĩnh điện). Một nhược điểm lớn của bút đo liều kiểu buồng tụ là chỉ đọc kết quả đo liều được một lần duy nhất. (Đó là vì ngay sau khi đóng mạch bằng khoá K2, điện cực mất toàn bộ điện tích Q. Muốn tiếp tục đo liều bằng bút này, phải đóng khoá K1 để nạp lại điện tích Q_0 cho buồng).

3.1.5.4. Đo liều bằng buồng ion hoá kiểu bút đo tĩnh điện

Các công thức (3.1-42 và -43) cho thấy mối liên hệ trực tiếp giữa việc xác định liều lượng bức xạ bằng cách đo độ chênh lệch điện thế và bằng cách đo độ giảm lượng điện tích trên hai bản cực của buồng ion hoá. Dụng cụ đo liều trên cơ sở đo độ chênh lệch điện thế vừa được trình bày ở mục 3.1.5.3 gọi là buồng tụ điện. Đo liều theo cách thứ hai dựa trên cơ sở đo lượng điện tích, nên dụng cụ đo được gọi là buồng ion hoá kiểu đo tĩnh điện; nó thường được làm ở dạng “bút” đo.



Hình H3.1-11. Sơ đồ cấu tạo bút đo liều bức xạ gamma và Roentgen bằng buồng ion hoá kiểu bút đo tĩnh điện.

Loại bút đo liều kiểu “bút đo tĩnh điện” có cấu tạo đơn giản như được minh họa trên hình H3.1-11. Bút đo này gồm một ống trụ nhỏ (7) bên trong chứa buồng ion hoá (8) với điện cực dương (1), còn điện cực âm là bề mặt trong của vỏ buồng (9), ngoài ra còn có hệ hai thấu kính hội tụ (3 và 5) với một tấm vật liệu trong suốt (4) mà trên mặt có in một thước đo liều (gồm một đường nằm ngang dài và nhiều vạch ngắn vuông góc với nó, có in rõ số đo và đơn vị đo). Thấu kính (3) giới hạn thể tích khí làm việc (8) của buồng ion hoá. Đặc điểm cấu tạo quan trọng nhất của bút đo loại này là nó có một sợi thạch anh (2) rất mảnh được phủ bằng một lớp kim loại; một đầu sợi thạch anh được gắn với điện cực dương (1). Nhờ lực đẩy tĩnh điện, đầu tự do của sợi thạch anh có thể bị đẩy ra xa vị trí của điện cực dương. Nhờ có hệ thấu kính, nên vị trí của đầu tự do của sợi thạch anh này được nhìn thấy rõ trên màn thước đo (4).

Sau khi nạp đủ điện tích Q_0 cho buồng, nắp bảo vệ (10) được đậy lại để tránh hiện tượng giảm điện tích do các điều kiện ngoại lai (như độ ẩm không khí, bụi...). Khi này cả nhánh chính của điện cực dương và sợi thạch anh được tích điện cùng dấu nhiều nhất. Bằng cách hướng đầu bút có điện cực dương (1) về phía có ánh sáng, đồng thời đặt mắt nhìn vào vị trí (6) để quan sát, ta sẽ thấy đầu tự do của sợi thạch anh bị đẩy ra ở vị trí cách điện cực dương một khoảng xa nhất. Trên thước đo (4), vị trí này ứng với giá trị liều $D = 0$ đơn vị. Khi lượng điện tích còn lại giảm xuống, lực đẩy tĩnh điện yếu dần; do đó khoảng cách thu hẹp dần tương ứng với các giá trị liều tăng dần.

Loại bút đo liều này được dùng làm dụng cụ kiểm tra liều cá nhân đối với bức xạ gamma và Roentgen trong dải liều thường không quá 200 mR hoặc 2mSv, tùy thuộc bản chất và bề dày của vật liệu thành buồng (9) cũng như bản chất và kích thước của vùng khí làm việc.

Ưu điểm của bút đo liều bằng buồng ion hoá kiểu bút đo tĩnh điện là có thể kiểm tra liều nhiều lần một cách dễ dàng vào bất kỳ thời điểm nào.

Nhược điểm của nó là có thể bị ảnh hưởng bởi các điều kiện xung quanh làm giảm điện tích Q của điện cực (do không khí ẩm, bụi; hoặc do bị nhiễm điện hưởng ứng...); va đập hoặc rung mạnh có thể làm gãy sợi thạch anh mảnh làm hỏng dụng cụ đo.

3.1.6. Ống đếm khí

Ống đếm khí là một trong số những đầu dò bức xạ gamma nhạy nhất. Vì vậy dưới đây trình bày khả năng sử dụng ống đếm khí để xác định liều lượng bức xạ.

Giả sử, trong mỗi đơn vị thời gian, có N_γ lượng tử gamma bay tới ống đếm; năng lượng trung bình của mỗi lượng tử bằng $\langle E_\gamma \rangle$; và, những lượng tử này được ống đếm ghi nhận với hiệu suất bằng ϵ . Khi đó, số xung điện được tạo thành ở đầu ra của ống đếm và được ghi nhận trong mỗi đơn vị thời gian sẽ có giá trị bằng:

$$n = \epsilon N_\gamma \quad (3.1-56)$$

Đại lượng n thường còn được gọi là “tốc độ đếm xung” của ống đếm khí.

Mặt khác, suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ}}$ liên hệ với số lượng tử gamma bay tới ống đếm N_γ theo biểu thức sau đây:

$$aP_{\text{chiếu xạ}} = \mu_{\text{km, không khí}} I = \mu_{\text{km, không khí}} N_\gamma \overline{E_\gamma} \quad (3.1-57)$$

trong đó $\mu_{\text{km, không khí}}$ – hệ số truyền năng lượng khối trong không khí; I – cường độ bức xạ; a – hệ số tính tới thứ nguyên của các đại lượng có trong công thức

(3.1-57). Do đó, có biểu thức sau đây cho độ nhạy của ống đếm khí đối với suất liều chiếu xạ:

$$\frac{n}{P_{\text{chiếu xạ}}} = \frac{a\varepsilon}{\mu_{\text{km, không khí}} \cdot E_{\gamma}} \quad (3.1-58)$$

Độ nhạy này càng ít phụ thuộc vào năng lượng E_{γ} thì việc sử dụng ống đếm khí để xác định suất liều chiếu xạ càng tốt. Trong biểu thức (3.1-58), cả ba đại lượng là $\mu_{\text{km, không khí}}$, $\langle E_{\gamma} \rangle$ và ε đều phụ thuộc năng lượng E_{γ} . Trong vùng năng lượng E_{γ} cỡ từ 0,15 MeV đến 2 MeV, có thể coi hệ số $\mu_{\text{km, không khí}} = \text{const}$ với sai số khoảng $\pm 10\%$. Hiệu suất ghi nhận ε phụ thuộc vào năng lượng một cách phức tạp, khó tính chính xác, nên thường được xác định từ thực nghiệm cho các loại ống đếm khí có katốt được làm bằng những vật liệu khác nhau. *Nhìn chung, độ nhạy của ống đếm khí đối với suất liều chiếu xạ phụ thuộc mạnh vào năng lượng của lượng tử.*

Xét một trường hợp cụ thể cho loại ống đếm khí có katốt làm bằng nhôm. Trong trường hợp này, ở vùng năng lượng E_{γ} cỡ từ 0,4 MeV đến 1,8 MeV, tỷ số $\varepsilon/E_{\gamma} \approx \text{const}$, nên có thể coi độ nhạy $n/P_{\text{chiếu xạ}} = \text{const}$. Vì vậy có thể dùng ống đếm khí với katốt bằng nhôm để đo suất liều chiếu xạ trong khoảng năng lượng vừa nêu. Các ống đếm có katốt làm bằng vật liệu khác có thể sử dụng được trong những vùng năng lượng khác.

Có thể làm giảm ('san bằng') sự phụ thuộc vào năng lượng E_{γ} của độ nhạy $n/P_{\text{chiếu xạ}}$ để mở rộng vùng năng lượng có thể sử dụng ống đếm bằng cách làm katốt từ nhiều lớp vật liệu khác nhau, hoặc dùng những lớp chắn phụ bằng các vật liệu khác nhau bọc bên ngoài katốt. Bằng cách này, các ống đếm khí có kích thước nhỏ và thành katốt mỏng với các lớp chắn phụ được dùng làm dụng cụ xác định liều bức xạ ở thể tích rất nhỏ tại lân cận của điểm cần quan tâm; chúng có độ nhạy ổn định trong vùng năng lượng khá rộng.

So với buồng iôn hoá, các ống đếm khí có độ nhạy cao hơn rất nhiều. Thí dụ, ứng với suất liều tối đa cho phép trong một ngày của người chuyên làm việc với nguồn bức xạ là 0,6 $\mu\text{R/s}$, thì một buồng iôn hoá nhỏ thành dày với thể tích

khí làm việc 1 cm^3 cho dòng điện bão hoà là $I_0 \sim 10^{-16} \text{ A}$; trong khi đó, một ống đếm khí với diện tích mặt cắt 1 cm^2 và hiệu suất ghi nhận lượng tử chỉ nhỏ bằng $\varepsilon = 0,3\%$ đã cho khoảng 200 xung/min trong vùng năng lượng $E_\gamma \sim 1 \text{ MeV}$.

Nhờ có những ưu điểm như: kích thước nhỏ, khối lượng nhỏ, độ nhạy cao, việc ghi nhận xung điện đơn giản, lại do được suất liều, nên ống đếm khí được sử dụng rộng rãi trong nhiều loại dụng cụ đo liều lượng bức xạ.

3.2. PHƯƠNG PHÁP NHŨ TƯƠNG ẢNH

Có nhiều phản ứng hoá học xảy ra dưới tác dụng của bức xạ ion hoá. Nhiều phản ứng đã được ứng dụng để đo liều bức xạ trong dải liều cao. Đặc biệt, có một loại phản ứng hoá học cho phép làm dụng cụ đo liều chiếu xạ ở dải liều thấp và được ứng dụng rất rộng rãi để kiểm tra liều cá nhân. Đó là phương pháp đo liều bằng nhũ tương ảnh. Phương pháp nhũ tương ảnh là một trong số hai phương pháp đầu tiên được sử dụng để đo liều lượng bức xạ ion hoá. Ngày nay nó vẫn còn là một trong số những phương pháp được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực kiểm tra liều bức xạ cá nhân. Phương pháp nhũ tương ảnh cũng thường được gọi là phương pháp phim ảnh.

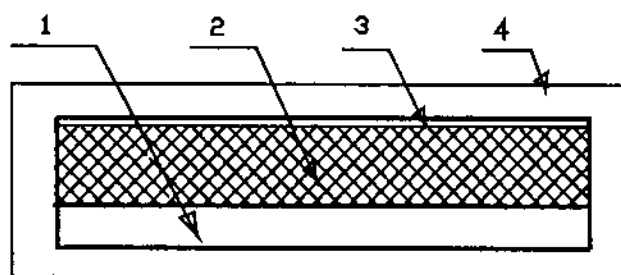
Trong lĩnh vực đo liều lượng bức xạ, cụm từ “*dụng cụ đo liều lượng bức xạ*” có thuật ngữ tương đương trong tiếng Anh được sử dụng rộng rãi ở rất nhiều nước là “*dosimeter*” (tạm phiên âm là *đôzimet*). Vì vậy, để cho gọn, ở những chỗ thích hợp trong sách này, thuật ngữ “*đôzimet*” sẽ được sử dụng với ý nghĩa tương đương là *dụng cụ đo liều lượng bức xạ*. Trong chương này, cụm từ “*dụng cụ dùng phim để đo liều lượng bức xạ*” sẽ được gọi tắt là “*đôzimet phim*”.

3.2.1. Cấu tạo của phim

Một phim đơn giản có cấu tạo gồm bốn lớp như được thể hiện trên hình H3.2-1. Trên bề mặt của lớp đế trong suốt (ký hiệu là 1) người ta phủ một lớp

chất gọi là nhũ tương ảnh (2) có chứa các hạt tinh thể AgBr. Tiếp đó, bề mặt của lớp nhũ tương ảnh lại được phủ bằng một lớp keo trong suốt (3) để bảo vệ. Cuối cùng, toàn bộ hệ thống (gồm lớp đế, lớp nhũ tương ảnh và lớp bảo vệ) được đặt vào trong một vỏ bọc chống ánh sáng và chống ẩm (4). Một hệ đơn giản như vậy cũng đã có thể dùng làm “đôzimet phim” – tức là để đo liều lượng bức xạ.

Để tăng độ nhạy của phim, người ta phủ nhũ tương ảnh lên cả hai mặt của lớp đế. Trong trường hợp này, phim sẽ gồm có một lớp đế, hai lớp nhũ tương ảnh cùng lớp keo bảo vệ; tất cả được đặt trong vỏ bọc (4).



Hình H.3.2-1. Cấu tạo của phim ảnh loại đơn giản. Ký hiệu: 1 – lớp đế; 2 – lớp nhũ tương ảnh; 3 – lớp keo trong suốt; 4 – vỏ bọc chống ánh sáng và chống ẩm.

Lớp đế có thể được làm bằng senluloit hoặc thủy tinh. Lớp nhũ tương ảnh thường có bề dày cỡ 0,03 mm. Lớp keo bảo vệ – thường dày cỡ 0,001mm. Hạt nhũ tương ảnh có thể có những kích thước khác nhau tùy thuộc yêu cầu về độ nhạy và một số đặc trưng khác của phim, nhưng thường cỡ khoảng $10^{-1}\mu\text{m}$.

Bảng B3.2-1. Hàm lượng riêng của các nguyên tố trong nhũ tương ảnh

Nguyên tố	$_{47}\text{Ag}$	$_{35}\text{Br}$	$_6\text{C}$	$_8\text{O}$	$_7\text{N}$	$_1\text{H}$	$_{53}\text{J}$	$_{16}\text{S}$
Hàm lượng riêng, g/cm ³	1,83	1,36	0,28	0,28	0,087	0,05	0,005	0,002

Trong nhũ tương ảnh có ba nhóm nguyên tố chủ yếu. Các nhóm đó thường là: 1) AgBr; 2) C,O,N,H; 3) tạp chất (như S, J, v.v...). Hàm lượng riêng của các nguyên tố này trong nhũ tương thường có giá trị như được nêu trong bảng B3.2-1.

3.2.2. Cơ sở của phương pháp

đo liều lượng bức xạ bằng nhũ tương ảnh

Bức xạ ion hoá tương tác với phim ảnh, thì gây hiệu ứng ion hoá, làm sinh ra các êlectrôn tự do trong lớp nhũ tương ảnh và trong các lớp vật liệu bao quanh nhũ tương. Các êlectrôn này tới tương tác với tinh thể AgBr, tham gia vào phản ứng "khử" một số ion bạc Ag^+ trong các hạt tinh thể AgBr để chúng trở thành nguyên tử bạc:

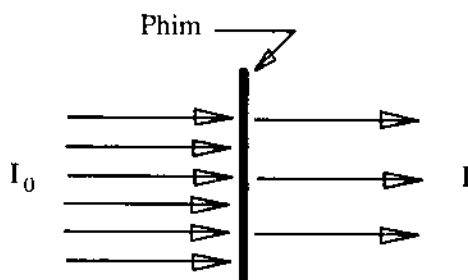


Nếu số nguyên tử bạc này đạt tới khoảng $10^1 + 10^2$ và nằm ở gần bề mặt tinh thể AgBr thì chúng sẽ tạo thành một tâm ảnh ẩn.

Muốn làm cho các tâm ảnh ẩn đó hiện rõ, thì sau khi phim đã được chiếu xạ rồi, còn phải thực hiện một khâu xử lý hoá học gọi là hiện ảnh. Trong thời gian xử lý hoá học để hiện ảnh, các tâm ảnh ẩn sẽ kích thích quá trình khử ion bạc Ag^+ từ những tinh thể AgBr ở xung quanh do tác dụng của các ion âm trong dung dịch hiện ảnh. Nhờ vậy, số nguyên tử Ag được tạo thành ở lân cận tâm ảnh ẩn tăng lên gấp $10^{10} + 10^{12}$ lần, làm xuất hiện vết đen (nhìn thấy được bằng mắt thường) ở khu vực đã xảy ra tương tác trong lớp nhũ tương của phim.

Tiếp theo sau quá trình hiện ảnh là quá trình xử lý hoá học để định hình – tức là làm cho hình ảnh đã hiện trên phim thì không thay đổi thêm được nữa. Trước khi bắt đầu quá trình định hình, trong lớp nhũ tương ảnh vẫn còn lại những tinh thể AgBr mà trong đó ion Ag^+ chưa bị khử thành nguyên tử Ag. Trong quá trình định hình, những tinh thể AgBr này sẽ bị dung dịch định hình làm hoà tan và đẩy ra khỏi lớp nhũ tương ảnh. Khi những tinh thể AgBr này bị hoà tan và đẩy hết ra khỏi lớp nhũ tương ảnh, thì phim được định hình tốt và

không còn nhạy với bức xạ ion hoá nữa.



Hình H3.2-2. Sơ đồ đo mật độ quang học (còn gọi là độ đen) của phim. Ký hiệu I_0 – cường độ chùm ánh sáng đi tới phim; I – cường độ chùm ánh sáng ló ra khỏi phim.

Như vậy, sau khi đã qua đủ cả hai khâu xử lý là hiện hình và định hình, thì phim ảnh sẽ có một độ đen nhất định. Độ đen này còn được gọi là mật độ quang học của phim. Nó được định nghĩa theo biểu thức sau đây.

$$S = \lg \frac{I_0}{I} \quad (3.2-2)$$

trong đó S – mật độ quang học của phim; I_0 – cường độ chùm ánh sáng đi tới phim; I – cường độ chùm ánh sáng ló ra khỏi phim (xem hình H3.2-2). Mật độ quang học S có giá trị nằm trong khoảng từ 0 (không) tới vô cùng. Tuy nhiên, trong thực tế đo liều lượng bức xạ, S thường có giá trị trong khoảng $[0;3]$ phụ thuộc vào liều chiếu xạ. Chính nhờ có mối liên hệ giữa mật độ quang học S với liều chiếu xạ, nên nhũ tương ảnh (phim) được sử dụng để xác định liều chiếu xạ. Dưới đây xem xét một cách chi tiết mối liên hệ đó cùng các đặc trưng khác của phim.

3.2.3. Các đặc trưng của dụng cụ đo liều chiếu xạ bằng phim

Mối liên hệ giữa mật độ quang học S và liều chiếu xạ (D) có thể được biểu diễn gần đúng như sau:

$$S = c_1 \cdot b \cdot n_0 \cdot [1 - \exp(-c_2 \cdot b \cdot D)] \quad (3.2-3)$$

$$n = n_0 \cdot [1 - \exp(-c_2 \cdot b \cdot D)] \quad (3.2-4)$$

trong đó c_1 và c_2 – các hệ số tỷ lệ; b – tiết diện của các hạt tinh thể AgBr (hoặc AgCl); n_0 – số hạt tinh thể ban đầu có trên 1cm^2 nhũ tương ảnh khi phim chưa bị chiếu xạ; còn n – số hạt tinh thể có trên 1cm^2 nhũ tương ảnh sau khi phim đã bị chiếu xạ.

Khi liều chiếu xạ D đủ nhỏ, tức là khi thoả mãn điều kiện sau đây:

$$c_2 \cdot b \cdot D \ll 1 \quad (3.2-5)$$

thì sẽ có tương quan sau:

$$S \approx c_3 \cdot b^2 \cdot n_0 \cdot D \quad (3.2-6)$$

với hệ số tỷ lệ $c_3 = \text{const.}$

Nghĩa là, mật độ quang học S của phim tỷ lệ thuận với ba đại lượng là liều chiếu xạ (D), số hạt tinh thể ban đầu có trên 1cm^2 của lớp nhũ tương ảnh khi phim chưa bị chiếu xạ (n_0), và, bình phương tiết diện của hạt tinh thể (b^2).

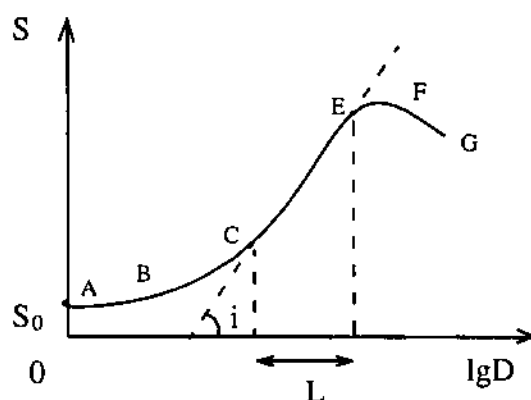
Trong thực tế, sự phụ thuộc $S=f(D)$ chỉ phù hợp với biểu thức (3.2-6) trong một khoảng giá trị nhất định của liều chiếu xạ.

Cần bổ sung thêm rằng: ngay cả khi chưa bị chiếu xạ, phim vẫn có một *mật độ quang học ban đầu* $S_0 \neq 0$. Giá trị S_0 này được gọi là *màng mờ* của phim và thường nằm trong khoảng $0,1 \div 0,3$. Điều kiện môi trường có thể làm thay đổi giá trị này. Nhiệt độ và độ ẩm tương đối của môi trường càng cao thì màng mờ S_0 càng lớn. Ngoài ra, áp suất không khí, sự cọ sát của nhũ tương hoặc một số hoá chất có lẫn trong không khí cũng làm ảnh hưởng tới giá trị S_0 .

Đặc trưng về độ nhạy của phim thường được biểu diễn bằng đồ thị $S=f(\lg D)$. Dạng đường đặc trưng này được thể hiện trên hình H3.2-3. Có thể chia đường đặc trưng nhạy thành 5 vùng như sau:

- 1) Từ A đến B: vùng ì của phim;

- 2) Từ B đến C: vùng chiếu xạ quá ít;
- 3) Từ C đến E: vùng tỷ lệ tuyến tính;
- 4) Từ E đến F: vùng chiếu xạ nhiều;
- 5) Từ F đến G: vùng “chiếu xạ quá mức”. Trong vùng này, liều chiếu xạ D càng lớn thì mật độ quang học S càng giảm. (Hiện tượng này có thể được giải thích bởi ảnh hưởng của các nguyên tử Br sinh ra trong quá trình phân huỷ AgBr. Sau khi được giải phóng khỏi phân tử, các nguyên tử Br dịch chuyển tới bề mặt của tinh thể và tạo nên một lớp màng ngăn cách bao quanh tâm ảnh ẩn, làm giảm tác dụng của quá trình hiện ảnh; do đó làm số hạt nhũ tương được hiện hình giảm xuống. Có thể làm giảm bớt ảnh hưởng này của lớp màng ngăn cách nếu tăng thời gian hiện ảnh. Khi liều chiếu xạ D nhỏ thì nồng độ nguyên tử Br trên bề mặt tinh thể là không đáng kể nên không làm ảnh hưởng tới quá trình hiện).



Hình H3.2-3. Đường đặc trưng nhạy $S=f(\lg D)$ của phim. Ký hiệu: S – mật độ quang học của phim; D – liều chiếu xạ; L – độ rộng của nhũ tương.

Mật độ quang học S chỉ tỷ lệ tuyến tính với $\log_{10}$ của liều chiếu xạ D trong vùng “chiếu xạ tốt”. Vì thế vùng này thuận lợi cho việc xác định liều chiếu xạ.

Nhũ tương ảnh còn được đặc trưng bằng một đại lượng gọi là *độ rộng* của nhũ tương. Nó được định nghĩa theo công thức sau đây:

$$L = \lg D_E - \lg D_C \quad (3.2-7)$$

Ở đây: D_C – liều chiếu xạ ứng với điểm bắt đầu của đoạn tuyến tính trên đồ thị (tức là điểm C); D_E – liều chiếu xạ ứng với điểm cuối của đoạn tuyến tính trên đồ thị (tức là điểm E).

Trên hình H3.2-3, góc i được hợp thành bởi đường thẳng kéo dài của đoạn tuyến tính CE với trục ngang $\lg D$. Góc này có giá trị càng lớn, thì độ tương phản của nhũ tương càng lớn; chỉ cần thay đổi chút ít giá trị của liều D cũng làm thay đổi đáng kể giá trị của S . Vì vậy, hệ số góc của đoạn tuyến tính này (tức là giá trị của hàm số tgi) được gọi là *độ tương phản của nhũ tương*. Hạt tinh thể có tiết diện càng lớn, và, số hạt tinh thể ban đầu có trên 1 cm^2 bề mặt của lớp nhũ tương ảnh khi phim chưa bị chiếu xạ (n_0) càng nhiều, thì nhũ tương có độ tương phản càng cao (xem biểu thức (3.2-6)).

Trên cơ sở đường đặc trưng nhạy $S=f(\lg D)$, ta biết được *độ nhạy* S/D của phim. Độ nhạy S/D thường được đo bằng đơn vị $[R^{-1}]$ và được xác định bởi liều chiếu xạ $D_{S=1,0}$ sao cho mật độ quang học gây bởi liều này đạt giá trị $S=1,0$.

Độ nhạy, độ rộng và độ tương phản là các đại lượng đặc trưng của mỗi loại phim.

Muốn sử dụng một loại phim nào đó để đo liều rất thấp, có thể dùng những dung dịch hoá học đặc biệt để làm tăng mật độ quang học của phim sau khi nó đã qua xử lý hiện hình. Nhờ những dung dịch này, mật độ quang học của phim sẽ tăng lên và tỷ lệ với giá trị ban đầu.

Để đo những liều rất thấp, còn có thể dùng chất nhấp nháy kèm theo phim. Thí dụ: dùng chất nhấp nháy NaI(Tl) có thể làm tăng độ nhạy lên khoảng $10^3 \div 10^4$ lần.

Muốn đo liều cao, cũng có thể dùng các dung dịch hoá học đặc biệt khác để làm giảm mật độ quang học của phim sau khi nó đã qua xử lý hiện hình. Nhờ

những dung dịch này, mật độ quang học của phim sẽ giảm xuống và tỷ lệ với giá trị ban đầu.

3.2.4. Sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng

Bức xạ lượng tử tác dụng lên các lớp vật liệu của đôzimet phim, làm cho hàng loạt êlectrôn được giải phóng. Nhiều êlectrôn trong số này có thể tương tác với các hạt nhũ tương nên chúng bị mất một phần hoặc toàn bộ năng lượng của mình trong lớp nhũ tương đó.

Như vậy, tác dụng của bức xạ lên phim được quyết định bởi năng lượng của các êlectrôn bị hấp thụ trong nhũ tương. Cũng chính vì lẽ này, có thể coi đôzimet phim như một buồng iôn hoá nhỏ thành dày. (Xem lại mục 3.1.4. về “Buồng iôn hoá nhỏ thành dày”). Để so sánh, ở đây có thể coi lớp nhũ tương ảnh tương tự như hốc khí của buồng iôn hoá nhỏ thành dày; còn các lớp vật chất bao quanh nhũ tương ảnh thì được coi tương tự như lớp thành của buồng iôn hoá đó. Kết quả tương tác của bức xạ trong buồng iôn hoá nhỏ thành dày được đánh giá thông qua hiệu ứng iôn hoá trong hốc khí; còn trong đôzimet phim – thông qua mật độ quang học.

Giả sử, R – bề dày của thành buồng, có giá trị bằng quãng chạy của êlectrôn nhanh nhất; d – bề dày của lớp nhũ tương ảnh. Trong thực tế kiểm tra liều chiếu xạ cá nhân, thường cần các loại phim có độ nhạy cao. Để đáp ứng đòi hỏi này, lớp nhũ tương cần có bề dày d tương đối lớn. Nếu $d > R$, thì mật độ quang học được quyết định chủ yếu bởi các êlectrôn sinh ra ngay trong lớp nhũ tương; do đó có thể bỏ qua đóng góp của những êlectrôn sinh ra trong các lớp vật chất bao quanh nhũ tương. Ngược lại, nếu $d \ll R$, thì hiệu ứng gây bởi các êlectrôn sinh ra trong nhũ tương lại là không đáng kể so với của các êlectrôn sinh ra trong các lớp vật chất bao quanh nhũ tương đó.

Xét trường hợp quan trọng nhất trong kiểm tra liều chiếu xạ bằng đôzimet phim – khi lớp nhũ tương có bề dày lớn $d \gg R$. Trong trường hợp này, có thể coi lớp nhũ tương ảnh là một buồng iôn hoá nhỏ thành dày đồng nhất. Do đó nó

thoả mãn ba điều kiện Bragg–Gray. (Xem lại mục 3.1.3 về lý thuyết Bragg–Gray). Vì vậy, công thức Bragg–Gray (3.1-22) áp dụng cho năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị khối lượng của nhũ tương sẽ được viết như sau:

$$\Delta E_Z = q \omega S_Z^Z = q \omega \quad (3.2-8)$$

Các đại lượng trong biểu thức (3.2-8) có ý nghĩa hoàn toàn như trong các biểu thức (3.1-17) và (3.1-22).

Mặt khác, xuất phát từ ý nghĩa vật lý của hệ số truyền năng lượng (xem chương 1, mục 1.1.2), trong điều kiện cân bằng điện tử thì có biểu thức sau đây:

$$\Delta E_Z = \frac{\mu_{km,Z}}{\mu_{km,không\ khí}} \cdot \Delta E_{không\ khí} \quad (3.2-9)$$

trong đó:

$$\Delta E_{không\ khí} = a_1 \cdot P \quad (3.2-10)$$

với P – suất liều chiếu xạ; a_1 – hệ số tỷ lệ.

Từ các biểu thức (3.2-8) đến (3.2-10), thu được tương quan sau đây:

$$q \omega = \frac{\mu_{km,Z}}{\mu_{km,không\ khí}} \cdot a_1 P \quad (3.2-11)$$

Vì mật độ quang học (S) của phim tỷ lệ với tổng số cặp ion (q) được tạo thành trong một đơn vị thể tích của nhũ tương trong mỗi đơn vị thời gian, nên từ biểu thức (3.2-11) sẽ có biểu thức cho độ nhạy của dosimet phim trong trường hợp $d \gg R$ như sau:

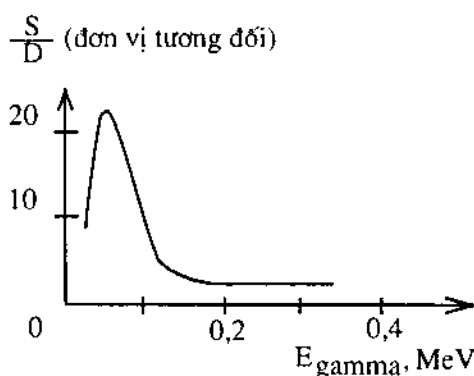
$$\frac{S}{D} = a_2 \cdot \frac{\mu_{km,Z}}{\mu_{km,không\ khí}} \quad (3.2-12)$$

Trong trường hợp khi lớp nhũ tương và thành buồng có bề dày cỡ như nhau $d \sim R$, thì biểu thức cho độ nhạy của dosimet phim sẽ có dạng như sau:

$$\frac{S}{D} = \frac{a_2 d \cdot \frac{\mu_{km,Z}}{\mu_{km,không\ khí}} + a_3 R \cdot \frac{\mu_{km,thành}}{\mu_{km,không\ khí}}}{d+R} \quad (3.2-13)$$

Trong các biểu thức (3.2-12 và -13), các hệ số tỷ lệ $a_2 = \text{const}$ và $a_3 = \text{const}$ đều không phụ thuộc vào năng lượng bức xạ E_γ ; còn $\mu_{km,Z}$, $\mu_{km,thành}$ và $\mu_{km,không\ khí}$ – tương ứng là các hệ số truyền năng lượng khối trong nhũ tương, trong thành buồng và trong môi trường không khí.

Nhũ tương ảnh không phải là môi trường tương đương không khí vì nó có thành phần chủ yếu là AgBr và có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng $Z_{hd, nhũ\ tương} \sim 40$ – lớn gấp 5–6 lần so với của không khí là $Z_{hd, không\ khí} \approx 7,5$ (xem chương 1, bảng B1.2-1). Do đó, ở vùng năng lượng thấp của bức xạ lượng tử, hiệu ứng hấp thụ quang điện xảy ra trong nhũ tương ảnh mạnh hơn rất nhiều so với trong không khí. Vì vậy tỷ số $\mu_{km,Z}/\mu_{km,không\ khí}$ và độ nhạy S/D là hàm số phụ thuộc năng lượng E_γ .



Hình H3.2-4. Dạng đường đặc trưng về độ nhạy của dōzimet phim phụ thuộc vào năng lượng của lượng tử gamma.

Hình H3.2-4 cho thấy dạng đường đặc trưng $S/D=f(E_\gamma)$. Trong vùng năng lượng thấp, độ nhạy phụ thuộc rất mạnh vào năng lượng của lượng tử E_γ . Khi lượng tử có năng lượng $E_\gamma \sim (40-50)\text{keV}$, độ nhạy có thể cao hơn hàng chục lần

so với khi $E_\gamma > 0,3 \text{ MeV}$ (là khi tán xạ Compton chiếm ưu thế). Khi năng lượng E_γ giảm dần từ cỡ $0,3 \text{ MeV}$, thì độ nhạy S/D tăng dần; tới vùng $E_\gamma \sim (40-50) \text{ KeV}$ thì độ nhạy tăng vọt. Nếu tiếp tục giảm E_γ xuống thấp hơn $(30-40) \text{ KeV}$, thì độ nhạy lại giảm mạnh. Nguyên nhân của hiện tượng giảm độ nhạy ở đây là vì trong vùng năng lượng rất thấp như thế này đã bắt đầu xuất hiện lớp “cửa sổ chết” của đôzimet do nhiều lượng tử đã bị hấp thụ ở ngay trong lớp cửa sổ đó và nhiều electron sinh ra không lọt vào được lớp nhũ tương ảnh.

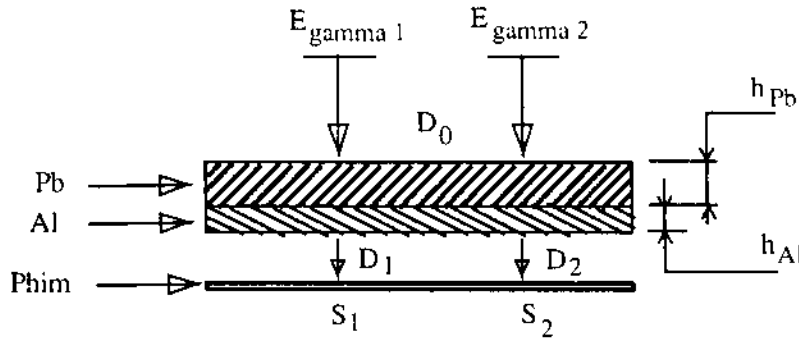
3.2.5. Làm giảm sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng

Sự phụ thuộc mạnh vào năng lượng của độ nhạy hạn chế khả năng sử dụng các đôzimet phim đơn giản ở trong vùng năng lượng thấp $E_\gamma < 0,3 \text{ MeV}$. Có thể làm giảm bớt hoặc san bằng sự phụ thuộc vào năng lượng này để mở rộng phạm vi sử dụng của đôzimet phim trong vùng năng lượng thấp bằng cách dùng thêm những “bộ lọc san bằng”.

Mục đích sử dụng bộ lọc san bằng là nhằm đạt được mật độ quang học như nhau ($S_1=S_2$) khi đôzimet phim bị chiếu xạ với liều lượng như nhau ($D_1=D_2$) nhưng bởi hai nguồn bức xạ có năng lượng khác nhau ($E_{\gamma 1} \neq E_{\gamma 2}$). Như vậy, bộ lọc san bằng có nhiệm vụ làm yếu bức xạ ở vùng năng lượng thấp – nơi mà hiệu ứng hấp thụ quang diện trong nhũ tương ảnh chiếm ưu thế.

Bức xạ lượng tử năng lượng thấp có thể bị làm yếu đáng kể bằng một lớp vật liệu mỏng nhưng có số thứ tự nguyên tố lớn Z_1 (thí dụ như chì); còn bức xạ Roentgen và electron phát ra từ lớp vật liệu mỏng này có thể dễ dàng bị hấp thụ bởi một lớp vật liệu nhẹ (thí dụ như nhôm) đặt giữa phim và lớp vật liệu Z_1 (chì). Bằng cách chọn bề dày thích hợp cho hai lớp vật liệu này, có thể tạo được bộ lọc san bằng ứng với hai nguồn bức xạ đơn năng $E_{\gamma 1} \neq E_{\gamma 2}$.

Hình H3.2-5 minh hoạ sơ đồ nguyên tắc của bộ lọc san bằng của đôzimet phim trong vùng năng lượng thấp. Giả sử, bộ lọc san bằng được làm từ lớp chì có bề dày là h_{Pb} và lớp nhôm có bề dày là h_{Al} . Gọi liều chiếu xạ gây bởi hai chùm bức xạ đơn năng $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$ ở mặt ngoài của lớp chì là D_0 ; liều chiếu xạ



Hình H3.2-5. Sơ đồ nguyên tắc của bộ lọc san bằng của đôzimet phim trong vùng năng lượng thấp, dùng hai vật liệu chì và nhôm. Ký hiệu: Pb – lớp vật liệu là chì; Al – lớp vật liệu là nhôm; phim – hệ gồm các lớp đế, nhũ tương ảnh, keo bảo vệ, vỏ chống ẩm và chống ánh sáng; h_{Pb} và h_{Al} – bề dày của các lớp Pb và Al tương ứng; $E_{\gamma i}$ – năng lượng của chùm bức xạ lượng tử i ; D_0 – liều chiếu xạ ở mặt ngoài của bộ lọc san bằng; D_i – liều chiếu xạ gây bởi chùm i ở bề mặt giữa bộ lọc và phim; S_i – mật độ quang học tương ứng với liều bức xạ D gây bởi chùm i .

giữa lớp nhôm và nhũ tương là D_1 và D_2 tương ứng với chùm bức xạ $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$; Hai chùm bức xạ này làm cho phim có mật độ quang học tương ứng là S_1 và S_2 .

Trong trường hợp lớp nhũ tương có bề dày d lớn hơn so với của thành buồng ion hoá nhỏ thành dày (R), thì từ biểu thức (3.2-12) sẽ thu được các biểu thức sau đây cho mật độ quang học S_1 và S_2 :

$$S_1 = a \cdot \frac{\mu_{km,Z,1}}{\mu_{km,không\ khí,1}} \cdot D_1 \quad (3.2-14.a)$$

$$S_2 = a \cdot \frac{\mu_{km,Z,2}}{\mu_{km,không\ khí,2}} \cdot D_2 \quad (3.2-14.b)$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\mu_{km,Z,1}}{\mu_{km,Z,2}} \cdot \frac{\mu_{km,không\ khí,2}}{\mu_{km,không\ khí,1}} \cdot \frac{D_1}{D_2} \quad (3.2-15)$$

với hệ số tỷ lệ $a = \text{const}$; chỉ số 1 và 2 – tương ứng với hai chùm bức xạ có năng lượng bằng $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$.

Mặt khác, từ quy luật làm yếu liều hoặc suất liều bức xạ (xem mục 1.6), lại có hai biểu thức sau đây:

$$D_1 = D_0 \cdot \exp[-(\mu_{Pb,1} \cdot h_{Pb} + \mu_{Al,1} \cdot h_{Al})] \quad (3.2-16.a)$$

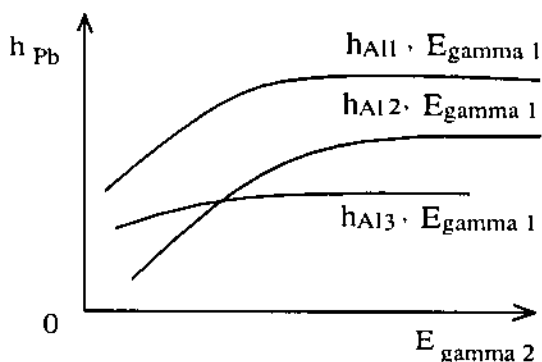
$$D_2 = D_0 \cdot \exp[-(\mu_{Pb,2} \cdot h_{Pb} + \mu_{Al,2} \cdot h_{Al})] \quad (3.2-16.b)$$

trong đó $\mu_{Pb,1}$, $\mu_{Al,1}$, $\mu_{Pb,2}$ và $\mu_{Al,2}$ là các hệ số làm yếu liều bức xạ tương ứng với các năng lượng $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$ trong chì và nhôm.

Thay giá trị D_1 , D_2 từ biểu thức (3.2-16.a và -16.b) vào biểu thức (3.2-15), đồng thời thoả mãn điều kiện san bằng là $S_1/S_2 = 1$, thì thu được tương quan sau đây:

$$1 = \frac{\mu_{km,Z,1}}{\mu_{km,Z,2}} \cdot \frac{\mu_{km,khôngkhí,2}}{\mu_{km,khôngkhí,1}} \cdot e^{(\mu_{Pb,2} - \mu_{Pb,1}) \cdot h_{Pb} + (\mu_{Al,2} - \mu_{Al,1}) \cdot h_{Al}} \quad (3.2-17)$$

Tiếp đó, lấy cố định giá trị $E_{\gamma 1}$ và h_{Al} , từ biểu thức (3.2-17), sẽ tìm được bề dày thích hợp h_{Pb} ứng với các năng lượng $E_{\gamma 2}$ khác nhau. Trên cơ sở đó, dựng được đồ thị $h_{Pb} = f(E_{\gamma 2})$ khi bề dày h_{Al} có các giá trị khác nhau. Hình H3.2-6



Hình H3.2-6. Chọn bề dày lớp chì trong bộ lọc san bằng của dozimet phim phụ thuộc vào năng lượng bức xạ $E_{\gamma 2}$.

minh hoạ một ví dụ về cách chọn bề dày lớp chì đối với các năng lượng $E_{\gamma 2}$ khác nhau cho ba trường hợp khi năng lượng $E_{\gamma 1}$ được cố định, còn lớp nhôm lại có bề dày khác nhau là h_{Al1} , h_{Al2} , và h_{Al3} .

Thực tế cho thấy, bộ lọc san bằng làm từ chì và nhôm cho kết quả tốt nhất khi $h_{Pb} = (0,75 \pm 0,8) \text{ mm}$ và $h_{Al} = 0,5 \text{ mm}$. Dùng bộ lọc này có thể đo được liều chiếu xạ với sai số không vượt quá 20% khi năng lượng $E_{\gamma} > 100 \text{ keV}$.

Một vài loại chất nhấp nháy hữu cơ cũng có thể dùng làm bộ lọc san bằng được. Trong trường hợp này, phim được đặt giữa hai lớp chất nhấp nháy đó. Nhờ có chất nhấp nháy, mật độ quang học của phim được tăng lên $k^*(E_{\gamma})$ lần; vì vậy độ nhạy cũng được “khuếch đại” lên $k^*(E_{\gamma})$ lần:

$$\left(\frac{S}{D}\right)_{\text{có bộ lọc nhấp nháy}} = k^*(E_{\gamma}) \cdot \left(\frac{S}{D}\right)_{\text{không có bộ lọc nhấp nháy}} \quad (3.2-18)$$

Sự phụ thuộc vào năng lượng của hệ số khuếch đại $k^*(E_{\gamma})$ và độ nhạy của phim không có bộ lọc $(S/D)_{\text{không có bộ lọc nhấp nháy}}$ bù trừ lẫn nhau. Nhờ vậy phim có kèm bộ lọc bằng chất nhấp nháy thích hợp, thì ít phụ thuộc vào năng lượng hơn so với khi phim không có bộ lọc bằng chất nhấp nháy kèm theo.

3.2.6. Kiểm tra liều chiếu xạ cá nhân bằng phim ảnh

Phương pháp đo liều bằng phim ảnh có ưu điểm rất lớn là rẻ tiền, đơn giản, gọn nhẹ và lưu giữ phim được lâu tới vài chục năm. Vì vậy dozimet phim được sử dụng rất rộng rãi để kiểm tra liều chiếu xạ cá nhân.

Muốn sử dụng dozimet phim để kiểm tra liều chiếu xạ cá nhân, cần dùng một nguồn bức xạ chuẩn (có phổ năng lượng càng giống phổ thực tế thì càng tốt) để chiếu xạ đồng thời các phim đặt cách nguồn những khoảng khác nhau trong một phòng đủ rộng (sao cho ảnh hưởng của bức xạ tán xạ là không đáng kể). Sau đó xử lý phim ảnh bằng các phương pháp hoá học, rồi dựng đồ thị chuẩn $S=f(\lg D)$. Tiếp đó, đem so sánh mật độ quang học S_x của phim cần kiểm

tra với đồ thị chuẩn, có thể dễ dàng xác định được liều chiếu xạ D_x tương ứng với giá trị S_x .

Phương pháp sử dụng nhũ tương ảnh để xác định liều chiếu xạ có nhược điểm là độ nhạy (tỷ số S/D) của nó phụ thuộc mạnh vào năng lượng bức xạ, nhất là trong vùng năng lượng thấp $E_\gamma < 50 \text{ keV}$.

Chú ý: độ nhạy của phim có thể thay đổi theo nhiệt độ. Nếu trong khi bị chiếu xạ mà phim được đặt sát cơ thể (37°C), thì mật độ quang học của nó có thể tăng lên vài phần trăm so với bình thường. Vì vậy, phim chuẩn và phim cần kiểm tra thường được giữ trong những điều kiện nhiệt độ như nhau và xử lý đồng thời trong cùng dung dịch có nhiệt độ cố định.

Nhũ tương ảnh được sử dụng để xác định không chỉ riêng liều chiếu xạ lượng tử, mà cả liều bức xạ beta và bức xạ nơtron (xem các chương 4 và 5).

3.3. CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÁT QUANG

3.3.1. Cơ sở vật lý

Bức xạ ion hoá tương tác với một số vật liệu, có thể làm cho chúng trở nên có khả năng phát quang. Tiếp sau giai đoạn hấp thụ năng lượng của bức xạ, trong một số loại vật liệu có thể xảy ra những quá trình đặc biệt làm cho các nguyên tử hoặc phân tử của vật liệu bị kích thích và giải phóng phần năng lượng bức xạ vừa hấp thụ được bằng cách phát photon. Có thể tạm xếp những vật liệu này theo hai nhóm như sau:

Nhóm 1:

Gồm những vật liệu có khả năng phát photon tức thời ngay trong khi bức xạ còn đang tương tác với chúng mà không cần bất kỳ một sự kích thích phụ nào;

Nhóm 2:

Gồm những vật liệu chỉ có thể phát photon khi chúng được kích thích

bổ sung theo một cách thích hợp nhất định ở những thời điểm muộn hơn (sau khi chúng đã được chiếu xạ).

Phương pháp đo liều lượng bức xạ dựa trên cơ sở hiện tượng phát photon của nhóm vật liệu thứ nhất được gọi tắt là *phương pháp nhấp nháy*.

Phương pháp đo liều lượng bức xạ dựa trên cơ sở hiện tượng phát photon của nhóm vật liệu thứ hai được gọi tắt là *phương pháp huỳnh quang* (hoặc *phương pháp dịch quang*).

Mỗi loại vật liệu (dù thuộc nhóm 1 hay 2) đều có một giá trị đặc trưng là năng lượng trung bình mà bức xạ phải tiêu hao để tạo ra được một photon.

Số photon được phát ra tức thời $n_{\text{photon}}(t)$ tỷ lệ thuận với năng lượng bức xạ ion hoá đã được hấp thụ trong vật liệu (ΔE) ở ngay tại thời điểm t đó. (Nói chính xác hơn, là ở thời điểm t^* trước đó chỉ cỡ từ vài chục đến vài trăm nanô giây). Như vậy, số photon này tỷ lệ thuận với suất liều hấp thụ bức xạ (P). Do đó có tương quan sau đây:

$$n_{\text{photon}}(t) = k_1 \cdot \Delta E(t^*) = k_1 \cdot P(t^*) \cong k_1 \cdot P(t) \quad (3.3-1)$$

ở đây

$$t = t^* + \delta \cong t^*, \quad \text{với } \delta \sim (10^{-7} \div 10^{-8})\text{s}.$$

Nếu ứng dụng hiện tượng phát photon tức thời của vật liệu ngay trong khi nó đang bị chiếu xạ, thì có thể chế tạo được dụng cụ đo suất liều hấp thụ.

Số photon được phát ra trễ hơn (tức là ở dạng huỳnh quang) tỷ lệ thuận với năng lượng bức xạ ion hoá đã được hấp thụ trong vật liệu trước đó một khoảng thời gian (có thể dài tới vài ngày hoặc hàng tuần). Như vậy, số photon được vật liệu phát ra ở dạng huỳnh quang tỷ lệ thuận với liều hấp thụ D :

$$N_{\text{photon}} = k_2 \cdot \Delta E = k_2 \cdot D \quad (3.3-2)$$

Trong hai biểu thức (3.3-1 và -2), thì k_1 và k_2 – các hệ số tỷ lệ, tính tới thứ nguyên của các đại lượng có trong biểu thức.

Nếu ứng dụng hiện tượng phát photon khi vật liệu được kích thích bổ sung bằng một tác nhân thích hợp sau khi vật liệu đã bị chiếu xạ, thì có thể chế tạo được các dụng cụ đo liều hấp thụ.

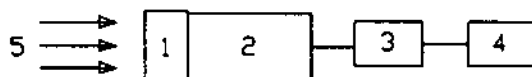
Dưới đây lần lượt trình bày cách đo liều lượng bức xạ ion hoá bằng phương pháp nhấp nháy và phương pháp huỳnh quang.

3.3.2. Phương pháp nhấp nháy

3.3.2.1. Nguyên tắc hoạt động

của máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò nhấp nháy

Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò nhấp nháy sẽ được gọi tắt là *đôzimet nhấp nháy*. Nó có sơ đồ khối như được thể hiện trên hình H3.3-1. Một đôzimet nhấp nháy bao giờ cũng gồm có những khối chức năng như chất nhấp nháy (ký hiệu là 1 trên hình H3.3-1), ống nhân quang điện (2), tiền khuếch đại và khuếch đại tín hiệu (3), xử lý tín hiệu và hiển thị kết quả (4). Kết quả đo liều có thể được hiển thị ở dạng số hoặc ở dạng tương tự (bảng kim đồng hồ đo).



Hình H3.3-1. Sơ đồ khối của hệ đo suất liều hấp thụ bằng phương pháp nhấp nháy. Ký hiệu: 1 – chất nhấp nháy; 2 – ống nhân quang điện; 3 – tiền khuếch đại và khuếch đại tín hiệu; 4 – xử lý tín hiệu và hiển thị kết quả; 5 – chùm bức xạ ion hoá.

Nguyên tắc hoạt động của đôzimet nhấp nháy như sau.

Khi bức xạ tương tác với chất nhấp nháy, một phần năng lượng của bức xạ bị hấp thụ và làm sinh ra những điện tử thứ cấp. Những điện tử này gây ion hoá và kích thích các phân tử của chất nhấp nháy, làm chúng phát photon tức thời. Đến lượt mình, những photon này lại tới tương tác với quang katốt của ống nhân quang điện, gây nên hiệu ứng hấp thụ quang điện, làm bắn ra khỏi bề mặt

của quang katốt những điện tử quang điện. Những điện tử quang điện này bay theo điện trường tới đập vào đinốt thứ nhất làm bắn ra một số điện tử nhiều hơn so với ban đầu. Đến lượt mình, các điện tử vừa được bắn ra lại bay theo điện trường tới đập vào đinốt tiếp theo làm bắn ra một số điện tử nhiều hơn nữa. Quá trình cứ thế tiếp diễn. Cuối cùng, khi các điện tử bay tới anốt thì số lượng của chúng đã được nhân lên gấp hàng triệu lần ($10^5 \div 10^8$) so với số điện tử quang điện ban đầu, làm xuất hiện dòng điện tương đối lớn trong mạch anốt của ống nhân quang điện.

Mỗi điện tử thứ cấp bị hấp thụ trong chất nhấp nháy có thể gây nên một xung điện trong mạch anốt của ống nhân quang điện. Mặt khác, tổng năng lượng của các điện tử thứ cấp này chính bằng năng lượng của bức xạ vừa bị hấp thụ trong chất nhấp nháy. Vì vậy có thể xác định suất liều bức xạ bằng cách đo dòng điện trung bình trong mạch anốt hoặc đếm số xung điện ghi nhận được trong một đơn vị thời gian. Tương ứng với cách đo thứ nhất, ta có đôzimet nhấp nháy làm việc ở chế độ dòng; còn với cách đo thứ hai – ta có đôzimet nhấp nháy làm việc ở chế độ đếm. Dưới đây giới thiệu đôzimet nhấp nháy làm việc ở hai chế độ này.

3.3.2.2. Máy đo liều lượng bức xạ

dùng đầu dò nhấp nháy làm việc ở chế độ dòng

a. Tương quan giữa dòng điện anốt và suất liều

Giả sử, tổng động năng của tất cả các điện tử thứ cấp bị hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian tại một thời điểm t nào đó trong chất nhấp nháy là ΔE_c ; tổng năng lượng của các photon được phát ra trong chất nhấp nháy là $W = \eta \cdot \Delta E_c$ (với η – hệ số tỷ lệ, được gọi là *hiệu suất biến đổi nhấp nháy*). Nếu năng lượng trung bình của photon là $\langle h\nu \rangle$, thì số photon được phát ra sẽ là $n_{\text{photon}} = W / \langle h\nu \rangle$. Gọi g là xác suất để mỗi photon được phát ra trong chất nhấp nháy sẽ làm bắn ra một điện tử quang điện từ quang katốt; và, M – hệ số nhân của ống nhân quang điện.

Dòng điện anốt i_A được xác định theo biểu thức sau đây:

$$i_A = n_{\text{photon}} \cdot g \cdot M \cdot e = \frac{\eta \Delta E_e}{h\nu} \cdot g \cdot M \cdot e \quad (3.3-3)$$

trong đó e – điện tích của điện tử.

Giữa năng lượng bức xạ được hấp thụ trong phần nhạy là chất nhấp nháy của đôzimet (ΔE_e) và cường độ chùm bức xạ tới chất nhấp nháy (I_0) có tương quan sau đây:

$$\Delta E_e = S \cdot \int_0^h \mu_{kz} \cdot J_0 \cdot e^{-\mu_z x} dx \quad (3.3-4)$$

trong đó: S và h – tiết diện hiệu dụng và bề dày hiệu dụng của phần nhạy là chất nhấp nháy; μ_{kz} – hệ số truyền năng lượng (dài) của bức xạ lượng tử trong chất nhấp nháy; μ_z – hệ số làm yếu (dài) đối với bức xạ lượng tử trong chất nhấp nháy. Các hệ số μ_{kz} và μ_z phụ thuộc vào năng lượng E_γ của lượng tử.

Nếu phần nhạy nhấp nháy có bề dày khá lớn, làm thay đổi đáng kể phổ năng lượng của bức xạ, thì các hệ số μ_{kz} và μ_z trong biểu thức (3.3-4) còn phụ thuộc cả vào bề dày h của phần nhạy nhấp nháy.

Trong trường hợp ngược lại – khi bề dày h làm phổ năng lượng của bức xạ thay đổi không đáng kể, thì có thể coi các hệ số μ_{kz} và μ_z là không phụ thuộc vào bề dày h . Do đó trong trường hợp này có biểu thức sau đây:

$$\Delta E_e = S \cdot J_0 \cdot \mu_{kz} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z h}}{\mu_z} \quad (3.3-5)$$

Mặt khác, giữa cường độ bức xạ và suất liều chiếu xạ trong không khí $P_{\text{chiếu xạ}, 0}$ tại vị trí ứng với bề dày $h = 0$ có tương quan sau đây (xem các biểu thức từ (1.5-3 tới -7):

$$I_0 = \frac{a P_{\text{chiếu xạ}, 0}}{\mu_{\text{km}, \text{không khí}}} \quad (3.3-6)$$

ở đây $\mu_{\text{km}, \text{không khí}}$ – hệ số truyền năng lượng khối của bức xạ trong không khí; a –

hệ số tính tới thứ nguyên của các đại lượng. Nếu các đại lượng có thứ nguyên như sau: I_0 [erg/(cm².s)], $P_{\text{chiếu xạ}, 0}$ [R/s], và hệ số $\mu_{\text{km, không khí}}$ [cm²/g], thì hệ số a trong tương quan (3.3-6) có giá trị $a = 88 \text{ erg/(g.R)}$. Nếu thứ nguyên của I_0 là [MeV/(cm².s)], còn của $P_{\text{chiếu xạ}, 0}$ và $\mu_{\text{km, không khí}}$ – vẫn như vừa nêu trên, thì có hệ số $a = 5,5.10^{13} \text{ eV/(g.R)} = 5,5.10^7 \text{ MeV/(g.R)}$.

Thay các giá trị ΔE_c và I_0 từ biểu thức (3.3-5 và -6) vào biểu thức (3.3-3), thì được tương quan sau đây cho độ nhảy của đôzimet nhấp nháy ở chế độ dòng – tức là tỷ số giữa dòng điện anot i_A và suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ}, 0}$:

$$\frac{i_A}{P_{\text{chiếu xạ}, 0}} = a.e. \frac{MV \rho_Z g \eta}{h\nu} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_Z h}}{\mu_Z h} \cdot \frac{\mu_{\text{km}, Z}}{\mu_{\text{km, không khí}}} \quad (3.3-7)$$

với $V = Sh$ – thể tích của phần nhấp nháy; ρ_Z – mật độ của chất nhấp nháy.

b. Sự phụ thuộc vào năng lượng của độ nhảy

Trong biểu thức (3.3-7), chỉ có các hệ số η , μ_Z , $\mu_{\text{km}, Z}$, $\mu_{\text{km, không khí}}$ là phụ thuộc vào năng lượng E_γ của lượng tử, nên có thể viết lại biểu thức này như sau:

$$\frac{i_A}{P_{\text{chiếu xạ}, 0}} = \text{const} \cdot \eta \cdot \frac{1 - e^{-\mu_Z h}}{\mu_Z h} \cdot \frac{\mu_{\text{km}, Z}}{\mu_{\text{km, không khí}}} \quad (3.3-8)$$

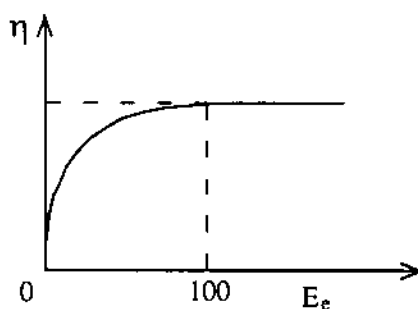
Biểu thức (3.3-8) cho thấy sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của độ nhảy của đôzimet nhấp nháy ở chế độ dòng.

Trước hết, về sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của thừa số cuối cùng trong công thức (3.3-8), tức là của tỷ số $\mu_{\text{km}, Z}/\mu_{\text{km, không khí}}$. Những đặc điểm của sự phụ thuộc này đã được xem xét kỹ khi phân tích biểu thức (3.1-37) trong mục 3.1.4.2, đồng thời cũng đã được thể hiện rõ ràng trên hình H3.1-5; do đó không cần thiết phải nhắc lại ở đây nữa.

Về sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của thừa số $[1 - \exp(-\mu_Z h)]/(\mu_Z h)$ trong công thức (3.3-8), thì dễ thấy ngay rằng: khi năng lượng E_γ tăng lên, thì

hệ số làm yếu μ_z giảm xuống, do đó thừa số này sẽ có giá trị tăng dần.

Hiệu suất biến đổi nhấp nháy η của các chất nhấp nháy vô cơ và hữu cơ phụ thuộc một cách khác nhau vào năng lượng bức xạ lượng tử. Đối với các chất nhấp nháy vô cơ, thực tế có thể coi hiệu suất η là không thay đổi khi các điện tử thứ cấp có động năng $E_e > 1$ keV. Đối với các chất nhấp nháy hữu cơ, thì hiệu suất η phụ thuộc vào năng lượng mạnh hơn; η có giá trị tăng dần khi E_e tăng lên rồi đạt giá trị bão hoà $\eta = \text{const}$ khi $E_e > 100$ keV (xem hình H3.3-2). Như vậy, trong vùng năng lượng thấp, hiệu suất biến đổi nhấp nháy của chất nhấp nháy hữu cơ thay đổi cùng chiều với thừa số $[1 - \exp(-\mu_z h)]/(\mu_z h)$. Điều này càng làm mạnh thêm sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ.



Hình H3.3-2. Hiệu suất biến đổi nhấp nháy η của chất nhấp nháy hữu cơ phụ thuộc vào năng lượng bức xạ. Ký hiệu: E_e – năng lượng của điện tử thứ cấp được giải phóng do tương tác của bức xạ lượng tử với chất nhấp nháy.

Các chất nhấp nháy hữu cơ lại có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng $Z_{\text{hd}} \sim (5,7-5,8)$, nhỏ hơn so với của không khí $Z_{\text{hd, không khí}} \approx 7,5$. Điều này làm cho sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của tỷ số $\mu_{\text{km},Z}/\mu_{\text{km, không khí}}$ có dạng giống như một đường lõng chảo úp (xem đường số 3 trên hình H3.1-5, mục 3.1.4.2).

Như vậy, các dozimet nhấp nháy hữu cơ có độ nhạy phụ thuộc vào năng lượng E_γ vì cả ba nguyên nhân sau đây:

- 1). Bức xạ bị làm yếu trong chất nhấp nháy
(thể hiện ở thừa số $[1 - \exp(-\mu_z h)]/(\mu_z h)$);
- 2). Sự thay đổi của hiệu suất biến đổi nhấp nháy η ;
- 3). $Z_{hd, \text{ nhấp nháy hữu cơ}} < Z_{hd, \text{ không khí}}$ (thể hiện ở tỷ số $\mu_{km,z}/\mu_{km, \text{ không khí}}$).

Ba nguyên nhân này không bù trừ lẫn nhau, do vậy càng làm mạnh thêm sự phụ thuộc $i_A/P_0 = f(E_\gamma)$, làm độ nhạy thay đổi hàng chục phần trăm trong vùng năng lượng $E_\gamma < 200 \text{ keV}$.

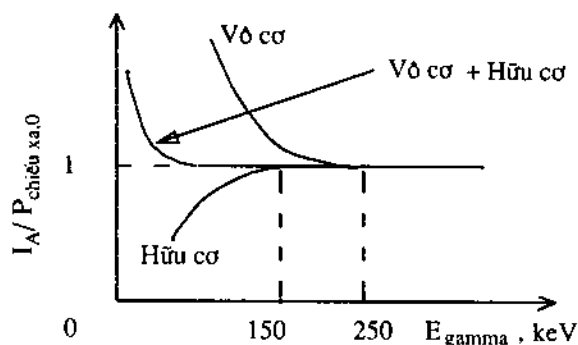
Đối với các chất nhấp nháy vô cơ, thì có thể coi hiệu suất biến đổi nhấp nháy η là không thay đổi trong toàn dải năng lượng $E_\gamma \leq 3 \text{ MeV}$. Bởi vậy, trong trường hợp này, sự phụ thuộc vào năng lượng của độ nhạy được quyết định bởi hai nguyên nhân là:

- 1). Bức xạ bị làm yếu trong chất nhấp nháy (thể hiện ở thừa số $[1 - \exp(-\mu_z h)]/(\mu_z h)$);
- 2). $Z_{hd, \text{ nhấp nháy vô cơ}} \gg Z_{hd, \text{ không khí}}$ (thể hiện ở tỷ số $\mu_{km,z}/\mu_{km, \text{ không khí}}$).

Số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của chất nhấp nháy vô cơ lớn hơn rất nhiều so với của không khí (thí dụ, $Z_{NaI(Tl)} = 50 \gg Z_{hd, \text{ không khí}} \approx 7,5$). Vì thế, tỷ số $\mu_{km,z}/\mu_{km, \text{ không khí}}$ tăng nhanh khi E_γ giảm. Điều này làm bù trừ phần nào ảnh hưởng của sự làm yếu bức xạ trong chất nhấp nháy. Tuy nhiên, vì $Z_{hd, \text{ nhấp nháy vô cơ}} \gg Z_{hd, \text{ không khí}}$, nên thực tế là sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của độ nhạy được quyết định bởi tỷ số $\mu_{km,z}/\mu_{km, \text{ không khí}}$ và nó có dạng giống như một đường lồi chảo ngược (xem đường số 1 trên hình H3.1-5, mục 3.1.4.2).

Sự phụ thuộc này của đôzimet nhấp nháy vô cơ là mạnh hơn so với của đôzimet nhấp nháy hữu cơ. Vì thế, trong khi đôzimet nhấp nháy hữu cơ có thể sử dụng được trong vùng năng lượng $E_\gamma \geq 150 \text{ keV}$, thì đôzimet nhấp nháy vô cơ lại chỉ có thể sử dụng được trong vùng năng lượng $E_\gamma \geq 250 \text{ keV}$ (xem hình H3.3-3).

Để mở rộng vùng sử dụng của dozimet nhấp nháy, có thể làm giảm sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng E_γ bằng cách làm đầu nhạy gồm hai phần như sau. Phần chính của đầu nhạy được làm bằng chất nhấp nháy hữu cơ, còn phần phụ – là một lớp mỏng làm từ chất nhấp nháy vô cơ. Phần nhấp nháy hữu cơ được đặt liền sát với quang katốt của ống nhân quang điện; còn lớp nhấp nháy vô cơ mỏng được đặt phủ lên mặt ngoài cùng của phần nhấp nháy hữu cơ. Lớp chất nhấp nháy vô cơ phải đủ mỏng để nó chỉ hấp thụ một phần không đáng kể bức xạ có năng lượng E_γ lớn. Trong vùng năng lượng E_γ thấp, độ nhạy cao của phần nhấp nháy vô cơ có tác dụng bù trừ với độ nhạy thấp của phần nhấp nháy hữu cơ. Nhờ vậy, trong thực tế người ta đã đạt được độ nhạy có giá trị ổn định ngay từ khi năng lượng E_γ lớn hơn khoảng 30 keV (với sai lệch chỉ cỡ 15% trong dải năng lượng từ 30÷3000keV).



Hình H3.3-3. Vùng sử dụng của các loại máy đo liều lượng bức xạ sử dụng đầu dò nhấp nháy. (Độ nhạy $i_A/P_{\text{chiếu xạ},0}$ được thể hiện trong thang đơn vị tương đối).

c. Khả năng sử dụng máy đo liều lượng bức xạ trên cơ sở đầu dò nhấp nháy ở chế độ dòng

Hiệu suất biến đổi nhấp nháy η có giá trị bằng tỷ số giữa năng lượng trung bình của photon ($\langle hv \rangle$) và năng lượng trung bình của bức xạ cần tiêu hao để làm phát ra được một photon (ω ; chất nhấp nháy tốt có $\omega \sim 15\div 60$ eV):

$$\eta = \frac{\overline{h\nu}}{\omega} \quad (3.3-9)$$

$$\omega = \frac{\Delta E_e}{n_{\text{phôtôn}}} \quad (3.3-10)$$

Nếu đem thế (3.3-9) vào biểu thức (3.3-7) về độ nhạy của dozimet nhấp nháy ở chế độ dòng; đồng thời tính rằng: liều chiếu xạ 1R tương ứng với năng lượng bị hấp thụ trong không khí ở điều kiện tiêu chuẩn là $5,5 \cdot 10^{13} \text{ eV/g}$, và, điện tích của điện tử $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, thì được biểu thức sau đây cho dòng điện i_A ở mạch anốt của ống nhân quang điện:

$$i_A = 8,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{MV \rho_Z g}{\omega} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_Z h}}{\mu_Z h} \cdot \frac{\mu_{km,Z}}{\mu_{km, \text{không khí}}} \cdot P_{\text{chiếu xạ,0}} \quad (3.3-11)$$

trong đó đơn vị đo của các đại lượng là: $i_A [\text{A}]$; $V [\text{cm}^3]$; $\omega [\text{eV}]$; $P_{\text{chiếu xạ,0}} [\text{R/s}]$.

Giả sử, xác suất để mỗi photon được phát ra trong chất nhấp nháy sẽ làm bắn ra một điện tử quang điện từ katốt của ống nhân quang điện là $g = 1/40$; lấy $\omega \approx 50 \text{ eV}$; $M = 10^6$; coi thể tích của phần nhạy nhấp nháy $V = 1 \text{ cm}^3$. Trong điều kiện chất nhấp nháy là tương đương không khí (tức là, tỷ số $\mu_{km,Z}/\mu_{km, \text{không khí}} = 1$) và lớp chất nhấp nháy là đủ mỏng ($\mu_Z h \ll 1$), thì dòng anốt i_A có giá trị bằng:

$$i_A [\text{A}] = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{chiếu xạ,0}} [\text{R/s}] \quad (3.3-12)$$

Dòng điện anốt nhỏ nhất có thể đo được trong điều kiện bình thường là $i_A \sim (10^{-8} \div 10^{-7}) \text{ A}$; trong điều kiện thuận lợi có thể đạt tới $i_A \sim 10^{-10} \text{ A}$. Tương ứng với chúng, có thể đo được suất liều chiếu xạ thấp tới $P_{\text{chiếu xạ,0}} \sim (10^{-8} \div 10^{-6}) \text{ R/s}$. Giá trị này nhỏ hơn từ $10^1 \div 10^3$ lần so với suất liều chiếu xạ thấp nhất có thể đo được bằng buồng ion hoá thể tích $V = 1 \text{ cm}^3$ ở điều kiện áp suất bình thường. Điều này có nghĩa là: dozimet nhấp nháy ở chế độ dòng nhạy hơn từ $10^1 \div 10^3$ lần so với buồng ion hoá có cùng thể tích ở điều kiện tiêu chuẩn.

Giới hạn trên của suất liều chiếu xạ đo được bằng dozimet nhấp nháy

($P_{\text{chiếu xạ, 0, max}}$) thường bị hạn chế bởi dòng anốt $i_A \sim 10^{-6}$ A. (Vì khi $i_A > 10^{-6}$ A thì ống nhân quang điện có thể làm việc không ổn định). Muốn tăng giới hạn này, thì phải giảm hiệu suất của chất nhấp nháy và hệ số nhân M của ống nhân quang điện.

3.3.2.3. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò nhấp nháy làm việc ở chế độ đếm

Mỗi điện tử thứ cấp bị hấp thụ trong chất nhấp nháy có thể gây nên một xung điện trong mạch anốt của ống nhân quang điện. Nếu phản xạ nhấp nháy có kích thước lớn hơn quãng chạy của điện tử, thì hầu như mỗi điện tử thứ cấp được sinh bởi tương tác của bức xạ lượng tử có thể tạo nên một xung điện trong mạch anốt. Do vậy, tốc độ đếm xung (n) tỷ lệ với số điện tử thứ cấp (N_e) sinh ra trong một đơn vị thời gian trong phản xạ nhấp nháy:

$$n = k \cdot N_e \quad (3.3-13)$$

ở đây k – hệ số tỷ lệ.

Giữa số điện tử thứ cấp N_e và cường độ bức xạ tới chất nhấp nháy (I_0) có mối liên hệ như sau:

$$N_e = \frac{I_0 S}{E_\gamma} \cdot (1 - e^{-\mu_z h}) \quad (3.3-14)$$

trong đó S và h – tiết diện hiệu dụng và bề dày hiệu dụng của đầu nhấp nháy; $\langle E_\gamma \rangle$ – năng lượng trung bình của lượng tử trong phổ bức xạ.

Mặt khác, cường độ bức xạ (I_0) và suất liều chiếu xạ ($P_{\text{chiếu xạ, 0}}$) lại liên hệ với nhau qua biểu thức (3.3-6). Do đó, thế các giá trị I_0 và N_e từ (3.3-6 và -14) vào (3.3-13), thì được tương quan sau đây giữa tốc độ đếm xung và suất liều chiếu xạ:

$$\frac{n}{P_{\text{chiếu xạ, 0}}} = a \cdot k \cdot \frac{S}{\mu_{\text{km, không khí}} \cdot E_\gamma} \cdot (1 - e^{-\mu_z h}) \quad (3.3-15)$$

Trong dải năng lượng $E_\gamma \sim (0,15 \div 2)$ MeV có thể coi $\mu_{\text{km, không khí}} = \text{const}$ với sai số khoảng $\pm 10\%$. Do đó độ nhạy phụ thuộc vào năng lượng theo biểu thức

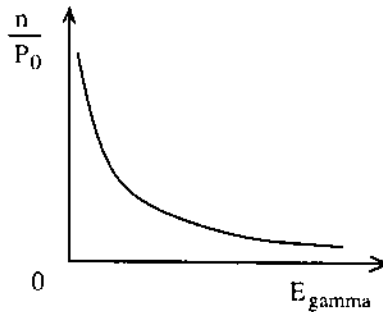
sau đây:

$$\frac{n}{P_{\text{chiếu xạ}, 0}} = \text{const.} \frac{1 - e^{-\mu_z h}}{E_\gamma} \quad (3.3-16)$$

Khi tăng năng lượng E_γ , thì hệ số μ_z giảm, nên tử số $[1 - \exp(-\mu_z h)]$ giảm theo; làm cho độ nhạy càng giảm mạnh hơn. Như vậy, khi tăng E_γ , đường đặc trưng $n/P_{\text{chiếu xạ}, 0} = f(E_\gamma)$ giảm liên tục và không có đoạn nằm ngang (xem hình H3.3-4). Điều này hạn chế việc sử dụng đôzimet nhấp nháy ở chế độ đếm.

So với các ống đếm khí, đôzimet nhấp nháy ở chế độ đếm có độ nhạy cao hơn vài lần, nhưng lại phụ thuộc vào năng lượng mạnh hơn.

Nói chung, các phần nhạy bức xạ bằng chất nhấp nháy đều có độ nhạy cao, nhưng lại có nhược điểm là kích thước khá lớn và thành phần hoá học khác xa so với thành phần hoá học của các tổ chức trong cơ thể con người. Do vậy khó dùng đôzimet nhấp nháy để xác định suất liều tương đương.



Hình H3.3-4. Sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của độ nhạy của loại máy đo liều lượng bức xạ dùng chất nhấp nháy làm việc ở chế độ đếm.

3.3.3. Phương pháp huỳnh quang

3.3.3.1. Nguyên tắc hoạt động

của máy đo liều lượng bức xạ bằng huỳnh quang

Mặc dù hiện tượng huỳnh quang đã được biết tới và nghiên cứu từ lâu, nhưng mãi đến năm 1949 nó mới bắt đầu được nghiên cứu sử dụng để đo liều

lượng bức xạ. Các phương pháp sử dụng huỳnh quang để đo liều lượng bức xạ ión hoá dựa trên hai hiện tượng chủ yếu sau đây:

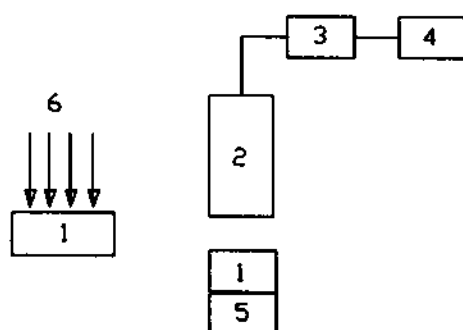
- 1). Vật liệu hấp thụ năng lượng của bức xạ, rồi phát huỳnh quang khi được kích thích bổ sung bằng cách nung nóng. (Hiện tượng này được gọi là *nhiệt huỳnh quang*).
- 2). Vật liệu hấp thụ năng lượng của bức xạ, rồi phát huỳnh quang khi được kích thích bổ sung bằng cách chiếu sáng. (Hiện tượng này được gọi là *quang huỳnh quang*).

Bức xạ ión hoá tương tác với các vật liệu này làm sinh ra những phần tử dẫn điện (như điện tử và lỗ trống). Tiếp đó, các phần tử dẫn điện bị tập trung vào những tâm đặc biệt (hay nói cách khác là chúng bị bắt vào các bẫy). Nhờ vậy, các vật liệu này tích trữ được năng lượng bức xạ mà chúng đã hấp thụ. Sau đó, nếu vật liệu được kích thích bổ sung bằng một tác nhân thích hợp nhất định, thì chúng có thể giải phóng phần năng lượng đã tích trữ được bằng cách phát photon. Cường độ huỳnh quang phát ra phụ thuộc vào năng lượng bức xạ mà vật liệu đã hấp thụ được trước đó.

Dụng cụ xác định liều hấp thụ theo phương pháp thứ nhất sẽ được gọi tắt là *đôzimet nhiệt huỳnh quang*; còn theo phương pháp thứ hai – được gọi tắt là *đôzimet quang huỳnh quang*.

Hình H3.3-5 cho thấy sơ đồ khối của một hệ đo liều hấp thụ bằng phương pháp nhiệt huỳnh quang; còn hình H3.3-6 – sơ đồ khối của hệ đo liều hấp thụ bằng phương pháp quang huỳnh quang. Tương tự như đôzimet nhấp nháy, các hệ đo liều hấp thụ bằng phương pháp huỳnh quang cũng bao gồm các khối chức năng như ống nhân quang điện (2), bộ khuếch đại tín hiệu (3), bộ xử lý và hiển thị kết quả đo (4). Tuy nhiên, ở đây vật liệu phát huỳnh quang (1) được đặt thế vào chỗ của phần nhấp nháy nhấp nháy. Ngoài ra, để đo được liều hấp thụ, các đôzimét huỳnh quang còn cần tới khối tạo kích thích bổ sung (5 – là nguồn nhiệt hoặc nguồn sáng thích hợp).

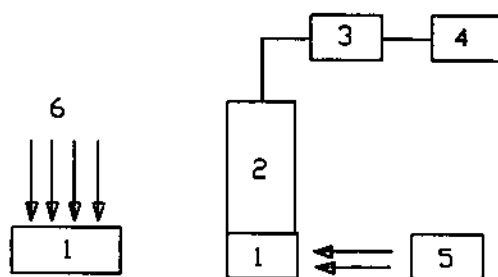
Hai sơ đồ H3.3-5 và H3.3-6 hầu như hoàn toàn giống nhau, trừ hai điều



Hình H3.3-5. Sơ đồ khối của đôzimet nhiệt huỳnh quang.

Ký hiệu: 1- vật liệu phát huỳnh quang; 2 - ống nhân quang điện; 3 - bộ khuếch đại tín hiệu điện; 4 - bộ xử lý và hiển thị kết quả đo; 5 - khối tạo kích thích bổ sung (là nguồn nhiệt để nung nóng vật liệu); 6 - bức xạ tới vật liệu.

là: khối tạo kích thích bổ sung (5) có bản chất khác nhau và khối vật liệu phát huỳnh quang (1) được đặt ở những vị trí khác nhau. Trong trường hợp kích thích bổ sung bằng nhiệt, thì khối vật liệu (1) phải được đặt sát nguồn kích thích (5) và cách xa ống nhân quang điện (2). Ngược lại, trong trường hợp kích thích bổ sung bằng ánh sáng, thì khối vật liệu (1) phải được đặt sát ống nhân quang điện.



Hình H3.3-6. Sơ đồ khối của đôzimet quang huỳnh quang. Ký hiệu: 5 - khối tạo kích thích bổ sung (là nguồn phát ánh sáng có phổ thích hợp); các ký hiệu khác - như trong hình H3.3-5.

Các phương pháp xác định liều hấp thụ bằng cách sử dụng vật liệu phát huỳnh quang được ứng dụng rộng rãi trong việc kiểm tra liều cá nhân. Các

phương pháp này có những ưu điểm nổi bật như:

- Khối vật liệu phát huỳnh quang được chế tạo gọn nhẹ ở dạng thích hợp (như: đĩa nhỏ như cúc áo, hoặc sợi dây nhỏ, hoặc nhẫn đeo tay...) thuận tiện cho sử dụng;
- Sự phong phú và đa dạng của các vật liệu phát huỳnh quang cho phép tạo nên những đầu nhạy tương đương với các tổ chức trong cơ thể và có độ nhạy chọn lọc đối với các loại bức xạ khác nhau;
- Dải liều đo được rất rộng: từ khoảng 10^{-6} đến khoảng 10^7 Gy;
- Có khả năng lưu giữ và bảo vệ thông tin được lâu, không bị ảnh hưởng bởi suất liều chiếu xạ cao tới $\sim 10^9$ Gy/s;
- Ngoài ra, chúng còn có độ chính xác cao hơn so với các dụng cụ đo liều cá nhân bằng buồng iôn hoá .v.v.

Nhờ có những ưu điểm quan trọng như vậy, nên các đôzimet huỳnh quang đã cạnh tranh rất hiệu quả với những phương pháp truyền thống như phương pháp iôn hoá và nhũ tương ảnh trong nhiều lĩnh vực (thí dụ: trong kiểm tra liều lượng cá nhân, xác định liều lượng trong y học hạt nhân, nghiên cứu sinh thái học bức xạ .v.v.). Tuy nhiên, hệ máy đo huỳnh quang có nhược điểm quan trọng là cấu tạo phức tạp và đắt tiền.

Dưới đây lần lượt trình bày về đôzimet nhiệt huỳnh quang và đôzimet quang huỳnh quang.

3.3.3.2. Máy đo liều lượng bức xạ sử dụng hiệu ứng quang huỳnh quang

a. Cơ sở vật lý

Vật liệu dùng làm chất phát huỳnh quang trong đôzimet thường là các chất điện môi rắn có đặc tính trong suốt đối với một khoảng rộng của phổ quang học. Thí dụ, đó có thể là hợp chất của các nguyên tố kim loại kiềm và halôgen

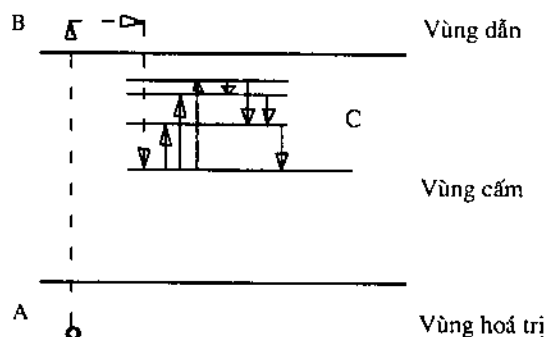
(như NaCl, LiF .v.v.) có thành phần đơn giản và có cấu trúc tinh thể ...

Một tinh thể lý tưởng được tạo thành từ các ion kiềm (dương) và các ion halôgen (âm) nối tiếp nhau và phân bố đều đặn trong toàn bộ tinh thể. Nhưng trong thực tế, cấu trúc tinh thể vẫn thường có khuyết tật. Một dạng khuyết tật trong tinh thể kiềm-halôgen là sự thiếu hụt các ion âm hoặc dương ở nút mạng, tạo thành những nút khuyết ion trong tinh thể. Một dạng khuyết tật khác có thể là ion bị lệch khỏi vị trí bình thường của chúng và bị giữ lại ở vị trí trung gian giữa các nút mạng của tinh thể. Trong trường hợp này, ion cũng để lại những nút khuyết tương ứng.

Bình thường, khuyết tật xuất hiện trong tinh thể một cách ngẫu nhiên. Nhưng khi tinh thể bị tác động bởi bức xạ ion hoá, thì những khuyết tật như vậy trở nên có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Thí dụ:

- a). Nếu ion âm halôgen bị khuyết trong nút mạng tinh thể, thì sẽ làm xuất hiện một khu vực có thừa điện tích dương – tức là tạo nên “bẫy bắt” điện tử vừa được giải phóng ở gần đó do tương tác của bức xạ ion hoá với tinh thể.
- b). Nếu ion âm lệch khỏi vị trí bình thường, thì sẽ làm xuất hiện một khu vực có thừa điện tích âm ở vị trí trung gian giữa các nút mạng – tức là tạo nên “bẫy bắt” các phân tử mang điện dương. Khi bức xạ ion hoá tương tác với tinh thể và giải phóng điện tử, thì lỗ trống (phân tử mang điện dương) được tạo thành có thể chuyển động trong giới hạn tinh thể. Khi đến gần vị trí trung gian của ion âm đó, thì lỗ trống có thể bị “bắt vào bẫy” do tác dụng của lực Culông.
- c). Nếu ion dương bị khuyết hoặc bị lệch khỏi vị trí bình thường, thì cũng sẽ dẫn tới những hiện tượng tương tự như vừa nêu trong hai trường hợp a và b.

Trên đây vừa nêu các trường hợp khi trong tinh thể đã có sẵn khuyết tật. Song, cần nhớ rằng chính tương tác của bức xạ ion hoá với tinh thể cũng có thể tạo nên những khuyết tật tương tự như vậy.



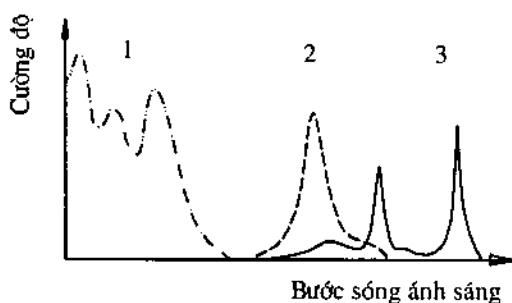
Hình H3.3-7. Khuyết tật trong tinh thể và các mức năng lượng. Ký hiệu: A, B, C – các mức năng lượng tương ứng trong vùng hoá trị, vùng dẫn và vùng cấm.

Có thể hình dung khuyết tật (– “bẫy”) với những phần tử dẫn điện bị bắt giữ (– điện tử hoặc lỗ trống) như là một hệ gồm các mức năng lượng không bị cấm và tách rời nhau. (Hình H3.3-7 minh hoạ bẫy như một hệ gồm các mức C nằm trong vùng cấm). Giữa các mức năng lượng này có thể thực hiện được những bước chuyển tương ứng với sự hấp thụ hoặc giải phóng các lượng tử năng lượng. Những hệ như vậy được gọi là các tâm.

Các tâm này làm ảnh hưởng đến một số tính chất quang học của tinh thể. Thí dụ, nếu tâm được tạo thành từ điện tử bị bắt giữ bởi nút khuyết iôn halôgen, thì nó có khả năng hấp thụ một phần nhìn thấy của phổ ánh sáng và làm thay đổi màu sắc tinh thể; do đó tâm loại này được gọi là tâm nhuộm màu (– tâm F). Các tâm với lỗ trống bị bắt giữ (– tâm H) thì được tạo thành khi tinh thể bị chiếu xạ ở nhiệt độ rất thấp; chúng có khả năng hấp thụ một phần phổ ánh sáng ở gần miền tử ngoại. Khi hấp thụ photon có bước sóng thích hợp, các tâm chuyển từ trạng thái cơ bản của chúng lên trạng thái kích thích; rồi sau đó lại trở về trạng thái cơ bản này bằng cách không phát quang hoặc có phát huỳnh quang, hoặc kết hợp cả hai cách.

Nếu tâm F bền vững được tạo thành bởi bức xạ iôn hoá, thì sau đó nó có thể trở thành tâm phát quang khi được kích thích bằng photon có bước sóng

thích hợp. Liều hấp thụ bức xạ càng cao, thì số tâm F được tạo thành càng nhiều. Nhờ có những tâm F bền vững mới được tạo thành, tinh thể trở nên có khả năng phát huỳnh quang khi được hấp thụ bổ sung một phần phổ ánh sáng mà trước khi bị chiếu xạ nó không có khả năng hấp thụ. Hiện tượng vừa nêu được gọi là hiện tượng quang huỳnh quang do bức xạ ion hoá.



Hình H3.3-8. Phổ hấp thụ và phổ huỳnh quang của tinh thể trước và sau khi bị chiếu xạ. Ký hiệu: 1 – phổ hấp thụ ánh sáng của tinh thể khi chưa bị chiếu xạ; 2 – phổ hấp thụ bởi các tâm F bền vững tạo thành do tác dụng của bức xạ; 3 – phổ huỳnh quang mà tinh thể phát ra trong khi bị kích thích bởi phổ (2) sau khi tinh thể đã bị chiếu xạ.

Hình H3.3-8 minh họa các phổ hấp thụ và phổ huỳnh quang của tinh thể trước và sau khi bị chiếu xạ. Khi tinh thể chưa bị chiếu xạ, thì nó chỉ hấp thụ được một phần nhất định của phổ ánh sáng (1). Sau khi bị chiếu xạ, nó hấp thụ được thêm một phần khác của phổ ánh sáng (2). Như vậy, sau khi bị chiếu xạ, phổ hấp thụ ánh sáng của tinh thể sẽ là tổng của hai phổ (1) và (2). Nếu dùng phần phổ ánh sáng (2) này như một tác nhân kích thích tinh thể sau khi nó đã bị chiếu xạ, thì tinh thể sẽ phát huỳnh quang với dạng phổ (3) có bước sóng dịch về phía giá trị lớn hơn so với bước sóng của phổ (2).

Cường độ quang huỳnh quang do tinh thể phát ra tỷ lệ với số tâm F bền vững được tạo thành trong tinh thể; mà số tâm này lại tỷ lệ với liều hấp thụ bức xạ. Vì vậy, bằng cách đo cường độ huỳnh quang này, có thể xác định được liều hấp thụ bức xạ. Giữa cường độ quang huỳnh quang $\Phi_{\text{huỳnh quang}}$ và liều hấp thụ D

có tương quan sau đây:

$$\Phi_{\text{huỳnh quang}} = a_1 \cdot \Phi_{\text{kích thích}} \cdot D \quad (3.3-17)$$

với a_1 – hệ số tỷ lệ tính tới thứ nguyên của các đại lượng có mặt trong biểu thức;
 $\Phi_{\text{kích thích}}$ – cường độ chùm tia sáng kích thích huỳnh quang.

Trong phép đo thực tế, bên cạnh huỳnh quang, còn có cả một phần ánh sáng kích thích có thể lọt tới tương tác với quang katốt của ống nhân quang điện, gây nên một nền nhiễu nào đó:

$$\Phi_{\text{nền do kích thích}} = a_2 \cdot \Phi_{\text{kích thích}} \quad (3.3-18)$$

trong đó a_2 – hệ số tỷ lệ. Tỷ số cường độ huỳnh quang trên cường độ nền nhiễu (gây bởi ánh sáng kích thích) có giá trị càng lớn trong khi liều D càng nhỏ, thì hệ đo càng tốt.

$$\Phi_{\text{huỳnh quang}} / \Phi_{\text{nền do kích thích}} = (a_1/a_2)D \quad (3.3-19)$$

Biểu thức (3.3-19) cho thấy: muốn nâng cao chất lượng của hệ đo, thì phải tăng a_1 , đồng thời giảm a_2 . Có thể tăng a_1 nếu thu nhận với hiệu suất tối đa các photon thuộc phổ huỳnh quang. (Cụ thể là bằng cách đặt vật liệu phát huỳnh quang sát quang katốt của ống nhân quang điện, hoặc tốt hơn nữa là sử dụng hệ quang học thích hợp để thu nhận hết các photon thuộc phổ huỳnh quang được phát ra trong góc khối $\Omega=4\pi$). Còn giá trị a_2 – có thể giảm bằng cách tạo chùm ánh sáng kích thích sao cho nó là chùm hẹp, song song và đơn năng, đi tới vật liệu theo phương vuông góc với trục đối xứng của ống nhân quang điện.

Tương ứng với cường độ của huỳnh quang $\Phi_{\text{huỳnh quang}}$ và của $\Phi_{\text{nền do kích thích}}$ ở mạch Anốt sẽ xuất hiện các thành phần j sau đây của dòng điện anốt:

$$i_{A,j} = n_{\text{photon},j} \cdot g_j \cdot M \cdot e \quad (3.3-20)$$

trong đó e – điện tích của điện tử; M – hệ số nhân của ống nhân quang điện;
 g_j – xác suất để mỗi photon với năng lượng $h\nu_j$ đạt tới quang katốt thì làm bắn

ra từ đó một điện tử quang điện; $n_{\text{photon},j}$ – số photon của huỳnh quang hoặc của nền đạt tới quang katốt, nó liên hệ với cường độ Φ_j theo biểu thức sau đây:

$$n_{\text{photon},j} = \frac{b_j \Phi_j}{h\nu_j} \quad (3.3-21)$$

trong đó b_j – hệ số tỷ lệ. Trong trường hợp huỳnh quang hoặc nền là không đơn năng, thì $n_{\text{photon},j}$ có giá trị bằng tích phân theo toàn phổ j của biểu thức (3.3-21).

Do khuyết tật tự nhiên của tinh thể, trong phần nhạy luôn có sẵn một số tâm phát quang trước khi vật liệu được chiếu xạ. Chúng gây nên một thành phần của dòng anot, gọi là nền nhiễu do khuyết tật ($i_{A, \text{nền do khuyết tật}}$); nó có giá trị tương ứng với một liều bức xạ nền nào đó ($D_{\text{nền do khuyết tật}}$) khi vật liệu được kích thích bổ sung.

Ngoài ba thành phần vừa nêu trên đây, dòng anot còn có một thành phần thứ tư được gọi là “dòng tối” ($i_{\text{tối}}$). Dòng tối là đặc trưng riêng của mỗi ống nhân quang điện; nó tồn tại ngay cả khi không có một photon nào tương tác với quang katốt. Dòng tối có giá trị $i_{\text{tối}}$ càng nhỏ, thì ống nhân quang điện có chất lượng càng cao.

Như vậy, giữa dòng điện anot đo được trong thực tế i_A và liều hấp thụ D có tương quan sau đây:

$$i_A = i_{A, \text{hấp thụ}} + i_{A, \text{nền do khuyết tật}} + i_{A, \text{nền do kích thích}} + i_{\text{tối}} =$$

$$i_A = Me\Phi_{\text{kích thích}} \cdot \left\{ (D + D_{\text{nền, khuyết tật}}) \cdot \left(\frac{cg}{h\nu} \right)_{\text{huỳnh quang}} + \left(\frac{cg}{h\nu} \right)_{\text{nền, kích thích}} \right\} + i_{\text{tối}} \quad (3.3-22)$$

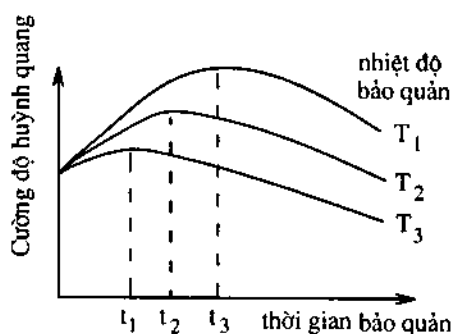
trong đó c – hệ số tỷ lệ.

Thành phần dòng anot $i_{A, \text{hấp thụ}}$ gây bởi huỳnh quang tương ứng với liều hấp thụ D phụ thuộc vào độ ổn định của hàng loạt yếu tố như M , $\Phi_{\text{kích thích}}$, g_j , $h\nu_j$ và $i_{\text{tối}}$. Thăng giáng của các yếu tố này càng nhỏ thì hệ đo càng tốt, và, do đó cho phép xác định liều hấp thụ càng nhỏ.

b. Cơ chế quang huỳnh quang do bức xạ

Cơ chế quang huỳnh quang do bức xạ có thể được giải thích dựa trên cơ sở lý thuyết vùng.

Khuyết tật trong cấu trúc tinh thể tạo nên một “bẫy” với các mức năng lượng C nằm trong vùng cấm (xem hình H3.3-7). Năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong tinh thể làm chuyển điện tử từ vùng hoá trị A lên vùng dẫn B. Sau đó điện tử bị bắt vào bẫy và chuyển xuống các mức C. Sau khi bắt điện tử, bẫy C biến thành tâm F với một vài mức năng lượng cho phép ở trong vùng cấm. Khi bị kích thích bổ sung bằng nguồn sáng có phổ là một phần thích hợp của phổ (2), điện tử chuyển lên một trong số các mức kích thích của tâm F. Sau một thời gian trao đổi nhiệt rất nhanh, điện tử nhảy xuống mức kích thích thấp hơn hoặc thấp nhất, rồi chuyển về trạng thái cơ bản của tâm F bằng cách phát photon.



Hình H3.3-9. Sự phụ thuộc của cường độ quang huỳnh quang vào thời gian và nhiệt độ bảo quản của đôzimet thủy tinh photphat. Ký hiệu: T_i – nhiệt độ bảo quản; t_i – thời gian bảo quản; $T_1 < T_2 < T_3$; $t_1 < t_2 < t_3$.

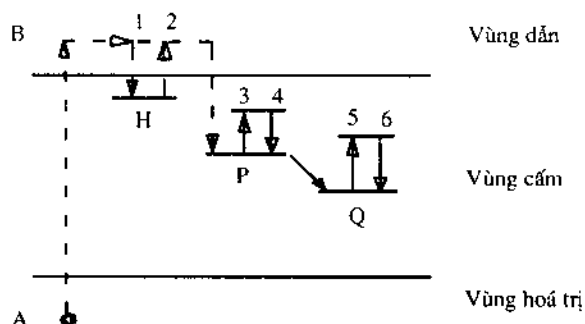
Trong thực tế không thể tạo được đôzimet trên cơ sở những khuyết tật có sẵn trong các tinh thể kiềm-halôgen tinh khiết. (Vì hiệu suất và khả năng tái lập của các tâm F trong tinh thể sạch không thể thoả mãn được các yêu cầu của đôzimet. Ngoài ra, các tâm F chỉ có hiệu quả ở nhiệt độ rất thấp nên không thể

phát huỳnh quang ở nhiệt độ bình thường và tâm F bị phá huỷ ngay trong quá trình đo). Thực tế cho thấy, nếu thêm vào tinh thể kiềm-halôgen một ít chất chứa ion thích hợp, thí dụ như ion bạc Ag^+ , thì đặc tính huỳnh quang của tinh thể sẽ được cải thiện tốt hơn rất nhiều.

Bên cạnh những tinh thể kiềm-halôgen, các loại thủy tinh photphat được hoạt hoá bởi bạc cũng có những đặc tính quang huỳnh quang tương đối tốt. Mặc dù các đôzimet huỳnh quang bằng thủy tinh photphat được sử dụng rộng rãi, nhưng đến nay vẫn chưa nghiên cứu hết bản chất của các tâm và các quá trình làm thủy tinh phát huỳnh quang.

Thực tế cho thấy rằng cường độ huỳnh quang của đôzimet thủy tinh photphat phụ thuộc phức tạp vào thời gian và nhiệt độ bảo quản đôzimet sau khi chiếu xạ. Hình H3.3-9 minh hoạ sự phụ thuộc này. Nhiệt độ bảo quản (T) càng cao và nồng độ của hoạt tố Ag càng lớn, thì thời gian bảo quản đôzimet (t) để đạt tới cường độ quang huỳnh quang cực đại càng ngắn kể từ thời điểm ngừng chiếu xạ. Hiện tượng này được giải thích như sau.

Trong thủy tinh chưa được chiếu xạ, thì hợp chất của hoạt tố bạc tạo nên những tâm H và P với các mức năng lượng cục bộ – như được minh hoạ trên hình H3.3-10. Bức xạ ion hoá có tác dụng làm chuyển các điện tử từ vùng hoá trị A lên vùng dẫn B. Một số trong những điện tử này lập tức bị bắt vào các bẫy P, rồi trực tiếp hình thành nên những tâm mới (Q). Một số điện tử từ vùng dẫn B ban đầu bị bắt vào bẫy H; sau đó nhờ năng lượng chuyển động nhiệt lại có thể được đưa từ H trở về vùng dẫn B; tiếp đó từ B bị bắt vào bẫy P, rồi làm xuất hiện thêm những tâm Q mới. Như vậy, các tâm Q không những được hình thành trong khi thủy tinh đang bị chiếu xạ, mà còn tiếp tục được hình thành sau khi đã ngừng chiếu xạ thủy tinh. Sau khi ngừng chiếu xạ, nhờ quá trình chuyển động nhiệt của các điện tử từ bẫy H lên vùng dẫn, nên các tâm Q vẫn tiếp tục được tạo thêm. Đây là nguyên nhân làm cho cường độ quang huỳnh quang tiếp tục tăng lên trong thời gian đầu của quá trình bảo quản đôzimet thủy tinh photphat. Sau đó cường độ huỳnh quang giảm xuống do sự tái hợp của các điện tử nằm ở mức kích thích của tâm Q với các lỗ trống ở trong vùng hoá trị.



Hình H3.3-10. Cơ chế tạo tâm phát huỳnh quang (Q) trong thuỷ tinh photphat.

Các bước chuyển từ 1 đến 4 vẫn xảy ra ngay cả khi thuỷ tinh chưa bị chiếu xạ. Các bước chuyển 3 và 4 giữa các mức năng lượng của bẫy P tương ứng với quá trình hấp thụ và phát quang của thuỷ tinh ban đầu. Còn bước chuyển 5 và 6 giữa các mức năng lượng của bẫy Q – tương ứng với quá trình hấp thụ và phát quang của thuỷ tinh đã được chiếu xạ.

Các tâm Q được tạo thành theo cách trên sẽ không bị phá huỷ trong quá trình đo huỳnh quang. Chúng chỉ bị kích thích do tác dụng của photon có bước sóng phù hợp, sau đó phát huỳnh quang để trở về trạng thái cơ bản của chính tâm Q đó. Vì vậy dùng phương pháp quang huỳnh quang có thể đo huỳnh quang được rất nhiều lần để xác định liều bức xạ mà thuỷ tinh đã hấp thụ.

c. Đặc điểm ứng dụng dozimet quang huỳnh quang

Đozimet quang huỳnh quang được sử dụng trong lĩnh vực kiểm tra liều cá nhân. Đầu nhạy của nó có thể là những vật liệu vô cơ được hoạt hoá bởi bạc. Tuy nhiên, chế tạo đầu nhạy từ các tinh thể vô cơ thường rất khó khăn, nên người ta thường dùng các đầu nhạy làm từ thuỷ tinh photphat được hoạt hoá bởi bạc. Thực tế cho thấy, có thể thay đổi thành phần thuỷ tinh trong phạm vi rộng mà không làm ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính quang huỳnh quang của nó. Để tăng độ bền bề mặt của đầu nhạy đối với ảnh hưởng của không khí, người ta

thường dùng các loại thủy tinh có chứa một số muối photphat như $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$, $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$, KPO_3 , NaPO_3 và LiPO_3 với chất phụ gia là B_2O_3 hoặc SiO_2 . Dưới đây là một số đặc tính của đôzimet quang huỳnh quang bằng thủy tinh.

- *Nền nhiễu* (còn gọi là *phông*) của bản thân phần nhạy là do các tâm phát quang có sẵn trước khi vật liệu được chiếu xạ. Ngày nay, nhờ sử dụng các nguyên liệu tinh khiết và công nghệ đặc biệt, đã giảm được nền nhiễu huỳnh quang loại này xuống tương đương với liều chiếu xạ không quá 0,3 R.

- *Độ nhạy* của đôzimet phụ thuộc vào nồng độ hoạt tố bạc và bản chất của các thành phần khác. (Thí dụ, thay thành phần LiPO_3 bằng $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$ có thể làm cho độ nhạy tăng lên khoảng 20 lần). Khi hoạt tố bạc có nồng độ cỡ $(1\div2)\%$, thì cường độ quang huỳnh quang mạnh nhất, song thời gian để nó đạt cực đại (kể từ thời điểm ngừng chiếu xạ) lại lâu. Do đó trong thực tế thường sử dụng thủy tinh với nồng độ bạc cỡ $(2,5\div4,5)\%$.

Vì cường độ huỳnh quang phụ thuộc vào thời gian tích lũy kể từ khi ngừng chiếu xạ, nên để thuận tiện, người ta thường xác định độ nhạy theo cường độ cực đại. Đôzimet càng tốt nếu cường độ huỳnh quang đạt cực đại càng nhanh và giảm sau cực đại càng chậm. Thông thường, trước khi đo liều hấp thụ, thủy tinh được nung nóng ở nhiệt độ cỡ $\sim(100\div150)^\circ\text{C}$ trong khoảng thời gian chừng 15÷20 phút để kích thích quá trình đạt cực đại của cường độ huỳnh quang. Các loại đôzimet thủy tinh được sử dụng thường có cường độ huỳnh quang ổn định tới $\sim \pm 10\%$ trong vài năm kể từ vài ba giờ sau thời điểm ngừng chiếu xạ.

- *Dải đo liều*: Cường độ huỳnh quang tỷ lệ với liều chiếu xạ trong khoảng $\sim 2,5 \cdot (10^{-4} \div 10^{-1})$ C/kg; dải liều này tương ứng với $\sim (1\div10^3)$ R. Khi liều tăng cao hơn nữa, thì một phần phổ hấp thụ và phổ huỳnh quang của tâm F sẽ chồng lên nhau – tức là một phần huỳnh quang vừa được phát ra lại bị hấp thụ ngay. Do vậy, cường độ huỳnh quang dần dần tăng không tỷ lệ với liều chiếu xạ, và tiếp đó sẽ giảm xuống sau khi đạt cực đại (ở vùng $D_{\text{chiếu xạ}} \sim 2,5$ C/kg). Nếu liều tiếp tục tăng quá cao, thì đôzimet thủy tinh thường bị nhuộm màu. Nó trở nên

có màu vàng sáng khi $D_{\text{chiếu xạ}} \sim 2,5 \text{ C/kg}$ (tức là $\sim 10^4 \text{ R}$), màu nâu vàng – khi $D_{\text{chiếu xạ}} \sim 2,5 \times 10^1 \text{ C/kg}$ (tức là $\sim 10^5 \text{ R}$), màu nâu tối – khi $D_{\text{chiếu xạ}} \sim 2,5 \times 10^2 \text{ C/kg}$ (tức là $\sim 10^6 \text{ R}$), hoặc màu đen – khi $D_{\text{chiếu xạ}} \sim 2,5 \times 10^3 \text{ C/kg}$ (tức là $\sim 10^7 \text{ R}$).

- *Sự phụ thuộc vào năng lượng của lượng tử* là khá mạnh vì trong thủy tinh có chứa các nguyên tố nặng hơn nhiều so với trong không khí, cụ thể như $_{15}\text{P}$, $_{47}\text{Ag}$. Sử dụng các bộ lọc san bằng (làm từ kim loại), có thể thu được độ nhạy ổn định tới $\sim \pm 20\%$ trong khoảng năng lượng của lượng tử E_γ cỡ từ 40keV đến 3MeV. Để tránh sự phụ thuộc vào góc tới của bức xạ gamma, bộ lọc thường được làm ở dạng hình cầu.

- *Ảnh hưởng của ánh sáng* phụ thuộc vào bước sóng của photon. Các tia hồng ngoại làm huỳnh quang đạt cực đại nhanh hơn và giảm mạnh hơn sau cực đại. Các tia tử ngoại làm các tâm quang huỳnh quang bị phá huỷ rất chậm, ít gây ảnh hưởng đến kết quả đo. Chùm tia sáng mặt trời chiếu lâu có thể làm cường độ huỳnh quang giảm đáng kể. Tuy nhiên, ảnh hưởng của ánh sáng tán xạ ban ngày là không đáng kể.

3.3.3.3. Máy đo liều lượng bức xạ sử dụng hiệu ứng nhiệt huỳnh quang

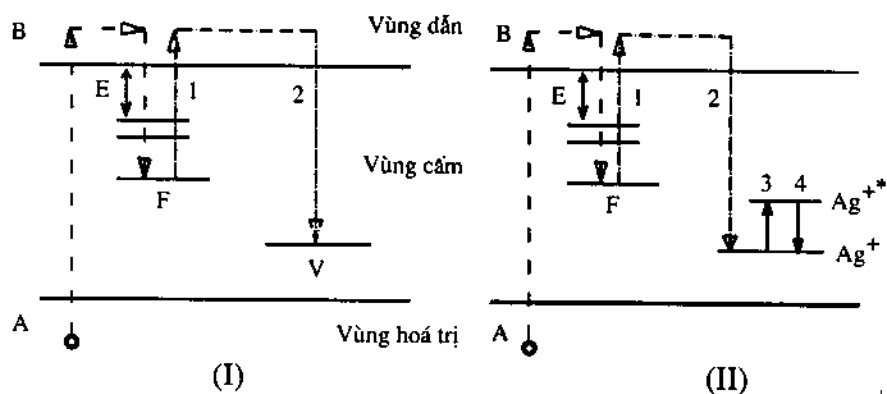
a. Cơ chế nhiệt huỳnh quang do bức xạ

Hiện tượng nhiệt huỳnh quang do bức xạ xảy ra nhờ có những khuyết tật trong cấu trúc tinh thể tương tự như trong các chất quang huỳnh quang. Tác nhân kích thích bổ sung trong hiện tượng quang huỳnh quang là những phân thích hợp nhất định trong phổ ánh sáng; còn trong hiện tượng nhiệt huỳnh quang thì đó là năng lượng nhiệt. Cơ chế nhiệt huỳnh quang do bức xạ có thể giải thích được trên cơ sở sau đây.

Trước hết, xét tinh thể tinh khiết và có sẵn khuyết tật trong cấu trúc. Những khuyết tật này hình thành nên những vùng thiếu hoặc thừa điện tích (âm hoặc dương). Dưới tác dụng của bức xạ ion hoá, các phân tử dẫn điện (là điện tử

hoặc lỗ trống) vừa được giải phóng ở gần đó trong tinh thể sẽ bị bắt vào các bẫy và tạo thành các tâm. Thí dụ, điện tử bị bắt vào bẫy làm xuất hiện tâm F; còn lỗ trống bị bắt vào bẫy làm xuất hiện tâm V (hình H3.3-11-I). Sau đó, khi được kích thích bổ sung bằng năng lượng nhiệt, thì điện tử thực hiện được bước chuyển (1) từ tâm F lên vùng dẫn B. Khi chuyển động tự do trong tinh thể, điện tử này lại có khả năng thực hiện được bước chuyển (2) – tái hợp với một lỗ trống mà trước đó đã bị bắt vào tâm V, làm phát ra photon.

Nếu tâm F nằm gần vùng dẫn (tức là khoảng cách E từ tâm F tới vùng dẫn là nhỏ) thì bước chuyển (1) có thể được thực hiện khi tinh thể hấp thụ các tia hồng ngoại (như trong cơ chế quang huỳnh quang do bức xạ), hoặc thậm chí chỉ nhờ chuyển động nhiệt bình thường của các điện tử. Nếu tâm F nằm sâu trong vùng cấm (tức E là lớn), thì bước chuyển (1) chỉ thực hiện được khi tinh thể được nung nóng tới một nhiệt độ thích hợp nhất định.

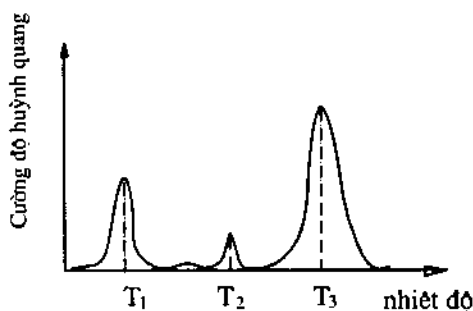


Hình H3.3-11. Cơ chế nhiệt huỳnh quang do bức xạ gây nên ở tinh thể tinh khiết (I) và ở tinh thể được hoạt hoá bởi bạc (II).

Đặc điểm của cơ chế này là các tâm bị phá huỷ ngay trong quá trình đo, không phụ thuộc vào phương pháp kích thích bổ sung (là nung nóng, hay dùng tia hồng ngoại, hoặc do chuyển động nhiệt bình thường). Như vậy, nhiệt huỳnh quang là quá trình phát huỳnh quang kèm theo sự phá huỷ các tâm phát quang đã được tạo thành nhờ tác dụng của bức xạ ion hoá.

Bây giờ, xét trường hợp tinh thể được hoạt hoá bởi một nguyên tố nào đó, thí dụ bởi bạc. Cũng tương tự như đối với trường hợp vừa xét ở trên, do tác dụng của bức xạ iôn hoá, trong tinh thể sẽ xuất hiện các tâm F do điện tử bị bắt vào bẫy. Điều khác biệt ở đây liên quan tới hành vi của lỗ trống. Trong trường hợp tinh thể được hoạt hoá bởi nguyên tố bạc, thì các lỗ trống được sinh ra trong tinh thể liên kết với các iôn bạc Ag^+ để tạo thành các tâm mới (như được thể hiện trên hình H3.3-11.II). Khi được kích thích bổ sung, điện tử thực hiện bước chuyển (1) từ tâm F lên vùng dẫn B. Sau đó nó có khả năng thực hiện bước chuyển (2) – tái hợp với một lỗ trống, làm cho iôn bạc bị kích thích (3). Iôn bạc bị kích thích này nhanh chóng trở về trạng thái cơ bản bằng cách phát photon (4). Số tâm F mới được tạo thành càng nhiều, thì số photon được phát ra cũng càng nhiều, cường độ huỳnh quang sẽ càng mạnh.

Thực nghiệm cho thấy phổ huỳnh quang phụ thuộc vào bản chất của hoạt tố. Hoạt tố bạc (Ag^+) cho phổ nhiệt huỳnh quang trong miền tử ngoại – xanh da trời; mangan (Mn^{2+}) cho phổ nhiệt huỳnh quang trong miền da cam – lá mạ.



Hình H3.3-12. Cường độ nhiệt huỳnh quang phụ thuộc nhiệt độ (T) hoặc thời gian nung nóng tinh thể ($T=\beta t$).

Tinh thể phát huỳnh quang khi nó được nung nóng đến những nhiệt độ nhất định, tùy thuộc vào độ sâu E của tâm F trong vùng cấm. Hình H3.3-12 minh hoạ dạng đường đặc trưng nhiệt huỳnh quang. Trục nằm ngang là nhiệt độ nung nóng T (hoặc thời gian nung nóng; $T=\beta t$ với β – tốc độ nung nóng tinh thể). Trục thẳng đứng là cường độ nhiệt huỳnh quang $\Phi_{\text{huỳnh quang}}$.

Một chất có thể vừa có đặc tính quang huỳnh quang, lại vừa có đặc tính nhiệt huỳnh quang.

Sơ với quá trình quang huỳnh quang thì quá trình nhiệt huỳnh quang có hai đặc điểm như sau:

- 1). Phổ huỳnh quang là đặc trưng của các ion hoạt tử được đưa vào tinh thể ban đầu (thí dụ như của Ag^+ hoặc Mg^{2+} , v.v.).
- 2). Các tâm nhuộm F được tạo thành do tác dụng của bức xạ ion hoá bị phá huỷ ngay trong quá trình đo. Do vậy, chỉ sau một lần đo duy nhất, thì đôzimet nhiệt huỳnh quang bị mất hết thông tin về liều lượng bức xạ mà nó đã thu nhận được trước khi đo.

b. Ảnh hưởng của suất liều và thời gian chiếu xạ tới độ nhạy

Sự phụ thuộc của độ nhạy vào suất liều và thời gian chiếu xạ đối với đôzimet nhiệt huỳnh quang được quyết định bởi số bẫy (số khuyết tật) trong vật liệu phát quang và vào độ sâu E của các bẫy này.

Giả sử trong vật liệu phát quang có N bẫy bắt điện tử ở cùng độ sâu E. Tại thời điểm t kể từ khi bắt đầu chiếu xạ, số bẫy được lấp đầy điện tử là n, và, số bẫy còn trống (chưa bắt được điện tử) là N-n.

Bắt điện tử vào bẫy là một quá trình thống kê. Vì vậy, số bẫy bắt được điện tử trong một đơn vị thời gian tỷ lệ với số bẫy còn trống và suất liều P. Mặt khác, do chuyển động nhiệt, mỗi điện tử có thể chuyển ra khỏi bẫy để lên vùng dẫn với một xác suất ϕ nào đó. Số bẫy trở thành trống do chuyển động nhiệt của điện tử tại thời điểm t là n ϕ .

Số bẫy bắt được điện tử (được lấp đầy) trong một đơn vị thời gian được xác định từ phương trình sau đây:

$$\frac{dn}{dt} = aP(N-n) - n\phi \quad (3.3-23)$$

với a – xác suất để điện tử bị bắt vào bẫy khi liều có giá trị bằng một đơn vị.

Lấy tích phân theo thời gian phương trình (3.3-23) và coi $n=0$ khi $t=0$, thì thu được biểu thức xác định độ nhảy của đôzimet nhiệt huỳnh quang như sau:

$$\frac{n}{D} = \frac{aN}{(\varphi + aP)t} \left[1 - e^{-(\varphi + aP)t} \right] \quad (3.3-24.a)$$

hoặc

$$\frac{n}{D} = \frac{aN}{\left(\frac{\varphi}{P} + a\right)D} \left[1 - e^{-\left(\frac{\varphi}{P} + a\right)D} \right] \quad (3.3-24.b)$$

Hai biểu thức (3.3-24.a và -24.b) cho thấy sự phụ thuộc của độ nhảy vào thời gian chiếu xạ t , suất liều P và liều chiếu xạ D . Trong trường hợp suất liều không lớn và không thay đổi theo thời gian $P=const$, nếu thời gian chiếu xạ t đủ ngắn, thì có thể coi là độ nhảy có giá trị ổn định:

$$\frac{n}{D} \cong aN = const \quad (3.3-24.c)$$

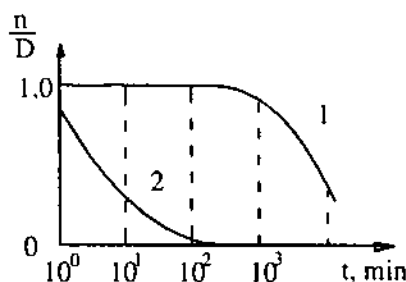
khi $(\varphi + aP)t \ll 1 \quad (3.3-24.d)$

Trong trường hợp này, số bẫy bắt được điện tử rất ít so với tổng số bẫy ($n \ll N$), và, các bẫy nằm sâu trong vùng cấm (tức là bẫy có E lớn), nên xác suất để điện tử thoát ra khỏi bẫy là không đáng kể ($\varphi \approx 0$). Đây là trường hợp quan trọng nhất và thuận lợi nhất để xác định liều lượng bức xạ.

Nếu suất liều $P=const$ mà thời gian chiếu xạ lại quá lâu (hoặc khi P quá lớn) tới mức điều kiện (3.3-24.d) không còn được thoả mãn, thì độ nhảy sẽ giảm dần khi tăng thời gian chiếu xạ. Nếu trong những trường hợp này mà chiếu xạ quá lâu thì độ nhảy sẽ giảm tỷ lệ nghịch với thời gian:

$$\frac{n}{D} = \frac{aN}{(\varphi + aP)t} = \frac{aN}{\left(\frac{\varphi}{P} + a\right)D} \quad (3.3-24.e)$$

khi $(\varphi + aP).t \gg 1 \quad (3.3-24.f)$



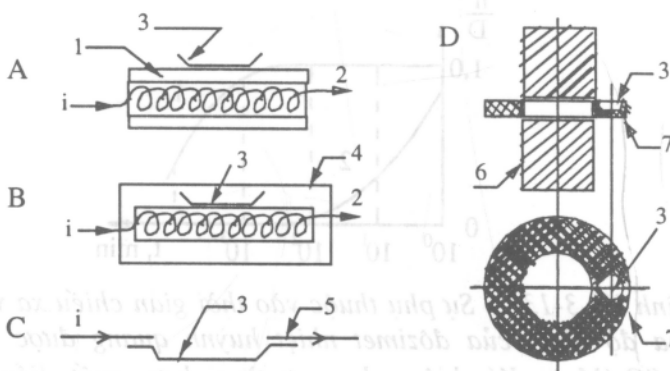
Hình H3.3-13. Sự phụ thuộc vào thời gian chiếu xạ và suất liều của độ nhạy của đôzimet nhiệt huỳnh quang được chế tạo từ $\text{CaSO}_4(\text{Mn})$. Ký hiệu: 1 – trường hợp suất liều chiếu xạ $P=0,2\text{ mR/min}$; 2 – trường hợp suất liều chiếu xạ $P= 8050\text{ R/min}$. Độ nhạy được thể hiện trong thang đơn vị tương đối.

Hình H3.3-13 cho thấy sự phụ thuộc vào thời gian chiếu xạ và suất liều chiếu xạ của độ nhạy của đôzimet nhiệt huỳnh quang được chế tạo từ $\text{CaSO}_4(\text{Mn})$. Trường hợp 1 – khi suất liều chiếu xạ nhỏ ($P=0,2\text{ mR/min}$), thì độ nhạy có giá trị ổn định trong suốt hơn 100 phút chiếu xạ đầu tiên phù hợp với biểu thức (3.3-24.c) nêu trên, sau đó mới giảm dần. Trường hợp 2 – khi suất liều chiếu xạ rất lớn ($P=8050\text{ R/min}$), thì độ nhạy giảm nhanh khi tăng thời gian chiếu xạ (phù hợp với biểu thức (3.3-24.e) nêu trên).

c. Đặc điểm cấu tạo của đôzimet nhiệt huỳnh quang

Đối với đôzimet nhiệt huỳnh quang, nguồn nhiệt để nung nóng thường được gắn liền với đầu nhạy của đôzimet. Vật liệu phát huỳnh quang có thể được nung nóng bằng sóng siêu âm, sóng siêu cao tần, hoặc bằng cách truyền nhiệt trực tiếp. Trong thực tế thường sử dụng phương pháp truyền nhiệt trực tiếp.

Bộ phận nung nóng có thể được thiết kế theo nhiều kiểu khác nhau. Loại thiết kế đơn giản nhất có cấu tạo như trên hình H3.3-14-A. Trong đó vật dẫn nhiệt có dạng ống trụ rỗng (1). Dây dẫn điện (2) được đặt trong phần rỗng của ống trụ này. Mặt ngoài của ống trụ có gắn đĩa (3) để chứa vật liệu nhiệt huỳnh quang.



Hình H3.3-14. Một số kiểu thiết kế bộ phận nung nóng mẫu đo nhiệt huỳnh quang. Ký hiệu: 1 – vật liệu truyền nhiệt; 2 – dây dẫn điện; 3 – đĩa đựng vật liệu nhiệt huỳnh quang; 4 – buồng chân không bằng thủy tinh; 5 – công tắc tiếp xúc bằng kim loại; 6 – lõi của biến áp; 7 – vành khuyên (bằng đồng)

Thực nghiệm cho thấy rằng nếu nung nóng vật liệu nhiệt huỳnh quang trong môi trường chân không hoặc khí trơ, thì có thể giảm được phosphorescence một cách đáng kể. Vì vậy người ta đã thiết kế bộ phận nung nóng như ở hình H3.3-14-B. Bên trong buồng chân không (hoặc chứa khí trơ) bằng thủy tinh (4), người ta đặt dây dẫn điện (2) và đĩa (3) chứa vật liệu nhiệt huỳnh quang. Để có độ nhạy cao, trong thiết kế này người ta có thể dùng ngay dây dẫn điện (2) để thay thế cho đĩa (3) bằng cách phủ trực tiếp vật liệu nhiệt huỳnh quang lên bề mặt của dây dẫn điện (2). Đòzimet nhiệt huỳnh quang với kiểu thiết kế này cho độ nhạy cao nhất hiện nay.

Phương pháp nung nóng như ở hình H3.3-14-C cũng được sử dụng rộng rãi. Trong đó đĩa (3) được làm bằng hợp kim có điện trở rất lớn và được đặt tiếp xúc với công tắc điện (5) bằng kim loại. Đĩa (3) được nung nóng bởi dòng điện có cường độ cỡ 100A. Phương pháp nung nóng này cho phép sử dụng các vật liệu nhiệt huỳnh quang ở mọi dạng khác nhau (như đơn tinh thể mỏng, bột, tấm mỏng, viên .v.v. được gắn chặt với đế của đĩa).

Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là: sự dao động của điện trở tiếp xúc giữa đĩa và dây dẫn điện gây ảnh hưởng nhiều tới tốc độ nung nóng (vì $R_{\text{tiếp xúc}}$ xấp xỉ cỡ $R_{\text{đĩa}}$). Bởi vậy người ta rất coi trọng việc sử dụng những thiết kế bộ phận nung nóng mà trong đó loại trừ được công tắc tiếp xúc điện với đĩa kim loại, và, chỉ sử dụng phương pháp nung nóng cảm ứng. Một kiểu thiết kế sử dụng phương pháp nung nóng cảm ứng được giới thiệu trên hình H3.3-14-D. Trong trường hợp này, đĩa bằng thép (3) được gắn chặt với vành khuyên bằng đồng (7). Vành khuyên đồng này được đặt vào khe hở không khí của lõi biến áp (6). Khi biến áp làm việc, trong vành khuyên đồng (7) sẽ xuất hiện dòng điện cảm ứng nung nóng đĩa thép (3).

d. Đặc điểm ứng dụng của đôzimet nhiệt huỳnh quang

Giữa liều hấp thụ D và dòng điện anốt i_A đo được trong thực tế khi nung nóng phần nhạy của đôzimet nhiệt huỳnh quang, có biểu thức liên hệ sau đây:

$$i_A = i_{A,\text{hấp thụ}} + i_{A,\text{nền do khuyết tật}} + i_{\text{tối}} =$$

$$i_A = (D + D_{\text{nền, khuyết tật}}) \cdot Me\Phi_{\text{huỳnh quang}}(T) \cdot \left(\frac{cg}{hv} \right)_{\text{huỳnh quang}} + i_{\text{tối}} \quad (3.3-25)$$

Chỉ có hai điểm khác biệt giữa biểu thức này với biểu thức (3.3-22) cho đôzimet quang huỳnh quang. Điểm khác biệt thứ nhất là ở đây không có thành phần nền nhiễu gây bởi nguồn kích thích bổ sung $i_{A,\text{nền do kích thích}}$ như trong (3.3-22). Điểm khác biệt thứ hai là cường độ nhiệt huỳnh quang ở đây $\Phi_{\text{huỳnh quang}}(T)$ là hàm phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ nung nóng mẫu đo (T).

Có thể sử dụng một chất nhiệt huỳnh quang để làm đôzimet nhiệt huỳnh quang, nếu chất này thoả mãn những yêu cầu cơ bản sau đây:

- 1). Chỉ nhạy với bức xạ ion hoá;
- 2). Có hiệu suất phát quang cao;
- 3). Cường độ nhiệt huỳnh quang tỷ lệ tuyến tính với liều lượng bức xạ

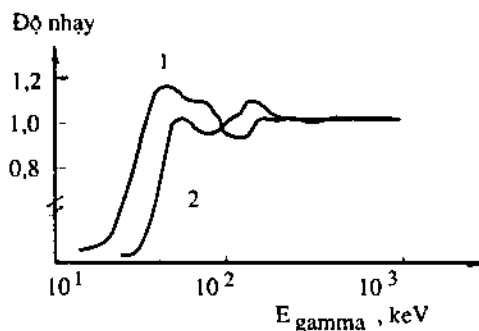
trong một dải liều đủ rộng;

- 4). Cường độ nhiệt huỳnh quang không giảm trong một dải nhiệt độ đủ rộng (tức là có các bẫy nằm sâu trong vùng cấm);
- 5). Độ nhạy ít phụ thuộc vào suất liều và năng lượng của bức xạ ion hoá;
- 6). Có phổ huỳnh quang thích hợp và thuận tiện cho việc đo đạc (phổ này phải có phần chung với phổ nhạy của quang katốt của ống nhân quang điện);
- 7). Không đắt tiền và có thể sản xuất hàng loạt.

Dưới đây giới thiệu một số chất nhiệt huỳnh quang thông dụng và có nhiều triển vọng nhất hiện nay.

• **CaF₂:**

Có thể sử dụng ngay CaF₂ trong tự nhiên, song những đặc trưng cơ bản của các mẫu đo loại này thường có giá trị khác nhau. Đường đặc trưng nhiệt huỳnh quang của CaF₂ có 3 cực đại chính ở nhiệt độ $(70 \pm 100)^{\circ}\text{C}$, $(150 \pm 190)^{\circ}\text{C}$,



Hình H3.3-15. Sự phụ thuộc vào năng lượng bức xạ lượng tử của độ nhạy của đôzimet nhiệt huỳnh quang là tinh thể CaF₂ tổng hợp và được hoạt hoá bởi Mn. Ký hiệu: 1 – trường hợp dùng dụng bộ lọc bằng Pb dày 0,5 mm với 10% diện tích là lỗ thủng; 2 – trường hợp dùng dụng bộ lọc bằng 0,45 mm Pb + 0,16 mm Sn. Độ nhạy được thể hiện trong thang đơn vị tương đối.

(250÷300)⁰C. Đôzimet loại này có chỉ số đo tỷ lệ tuyến tính với liều trong dải liều từ $(10^{-3} \div 5.10^3)$ R với độ chính xác tới $\pm 2\%$. Đôzimet từ bột tinh thể CaF_2 tổng hợp và được hoạt hoá bởi Mn được sử dụng rộng rãi. Đường đặc trưng nhiệt huỳnh quang của nó không phụ thuộc vào phương pháp nung nóng và chỉ có một cực đại ở nhiệt độ $T \sim 260$ ⁰C, với bước sóng $\lambda \sim 500$ nm. Tinh thể này có các bẫy nằm sâu trong vùng cấm nên huỳnh quang giảm ít. Năng lượng nó đã hấp thụ được chỉ bị mất không quá 10% trong 16 giờ đầu kể từ thời điểm ngừng chiếu xạ, sau đó chỉ giảm mất cỡ 1%/ngày. Độ nhạy không phụ thuộc vào suất liều trong vùng $P < 7000$ R/min. Sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ có thể điều chỉnh được dễ dàng bằng cách sử dụng bộ lọc san bằng (như được minh hoạ trên hình H3.3-15).

- **LiF:**

Đôzimet làm từ LiF có đặc trưng nhiệt huỳnh quang khác nhau phụ thuộc vào phương pháp chế tạo và phương pháp nung nóng. Phổ huỳnh quang của nó nằm trong vùng (380÷550)nm với cực đại ở gần 400nm. Nó có độ nhạy cao và ít phụ thuộc vào năng lượng bức xạ. Nó có chỉ số đo tỷ lệ tuyến tính với liều bức xạ trong dải liều $(10^{-3} \div 10^3)$ Rad. Cường độ nhiệt huỳnh quang giảm ít – khoảng 5% trong 48 giờ đầu ở nhiệt độ 50 ⁰C kể từ khi ngừng chiếu xạ; do đó có thể sử dụng được ở môi trường nhiệt độ khoảng từ 0÷60 ⁰C.

Đôzimet LiF có thể làm ở dạng bột tinh thể với hạt có kích thước nhỏ (0,05÷0,2) mm. Các tinh thể LiF có độ bền hoá học cao trong không khí và nước. Do đó không đòi hỏi những điều kiện bảo vệ đặc biệt.

Các đôzimet nhiệt huỳnh quang làm từ CaF_2 , $\text{CaF}_2(\text{Mn})$ và LiF thuộc loại đôzimet cá nhân có độ nhạy vào hàng cao nhất hiện nay.

- **Các chất nhiệt huỳnh quang khác:**

Ngoài CaF_2 và LiF người ta còn nghiên cứu sử dụng nhiều loại chất nhiệt huỳnh quang khác như $\text{CaSO}_4(\text{Mn})$, $\text{CaSO}_4(\text{Sn})$, v.v. và các loại thủy tinh photphat–nhôm và borat liti.

(Thuỷ tinh photphat–nhôm có thành phần là $R_xO.P_2O_5 - Al_2O_3.3P_2O_5$, trong đó R_xO có thể là ôxit của Mg, Sr, Li và Si với nồng độ hoạt tố Mn $\sim 0,1\%$ khối lượng. Còn borat liti có thành phần là $Li_2O.2B_2O_3(Mn \sim 0,1\%)$, có thể coi là chất tương đương tổ chức cơ thể).

Chất nhiệt huỳnh quang $CaSO_4(Mn)$ có thể cho phép tạo ra đôzimet với độ nhạy rất cao. Tuy nhiên cường độ nhiệt huỳnh quang của nó giảm đáng kể nên gây nhiều trở ngại cho việc xác định liều ở nhiệt độ bình thường trong khoảng thời gian lâu quá 3 giờ. Thuỷ tinh photphat–nhôm là thể đồng nhất, do vậy nó có những ưu điểm nhất định so với các loại chất nhiệt huỳnh quang ở dạng bột tinh thể. Các loại đôzimet thuỷ tinh nhôm–photphat cũng đã được sử dụng để kiểm tra liều lượng cá nhân trong trường hợp có tai nạn hạt nhân.

3.4. PHƯƠNG PHÁP DÙNG ĐẦU DÒ BÁN DẪN

3.4.1. Nhận xét chung

Ngày nay đầu dò bằng chất bán dẫn được sử dụng rộng rãi để ghi nhận các loại bức xạ ion hoá khác nhau. Đầu dò bán dẫn có nguyên tắc hoạt động tương tự như của buồng ion hoá. Trong một chừng mực nhất định, có thể coi đầu dò bán dẫn là một “buồng ion hoá đặc”. Tuy nhiên, so với “buồng ion hoá khí”, thì đầu dò bán dẫn có những đặc điểm riêng của mình. Những đặc điểm này quyết định ưu điểm và nhược điểm của đôzimet bán dẫn. Vì vậy, trước khi tìm hiểu về đôzimet bán dẫn, cần nắm vững các đặc điểm đó.

Đầu dò bán dẫn có những đặc điểm cơ bản sau đây:

- 1). Bức xạ ion hoá tương tác với vật liệu bán dẫn sẽ làm xuất hiện các điện tử tự do trong vùng dẫn và các lỗ trống trong vùng hoá trị. Bề rộng vùng cấm ϵ_g thường không vượt quá 2–3 eV, nên năng lượng trung bình tạo cặp điện tử–lỗ trống cũng có giá trị cỡ ϵ_g , nhỏ hơn một bậc so với năng lượng trung bình tạo cặp điện tử–ion trong buồng ion hoá. (Giá trị này của chất

khí là $\omega_{\text{khí}} \sim 30 \text{ eV}$). Do vậy, nếu đầu dò bán dẫn và buồng ion hoá cùng hấp thụ một năng lượng bức xạ như nhau, thì số cặp phân tử dẫn điện được tạo thành trong phần nhạy của đầu dò bán dẫn sẽ nhiều hơn một bậc so với của buồng ion hoá.

Mặt khác, so với buồng ion hoá bình thường, mật độ vật chất trong đầu dò bán dẫn lớn hơn cỡ ba bậc.

Vì vậy, so với buồng ion hoá bình thường có cùng thể tích được đặt trong trường bức xạ như nhau, thì đầu dò bán dẫn hấp thụ được năng lượng bức xạ nhiều hơn cỡ 10^3 lần và tạo được số cặp phân tử dẫn điện nhiều hơn cỡ 10^4 lần. Đặc điểm này quyết định ưu điểm hơn hẳn của đôzimet bán dẫn là: có độ nhạy cao ngay cả khi thể tích nhỏ, cho phép chế tạo đôzimet để xác định phân bố liều bức xạ trong mô hình cơ thể.

- 2). Trong vật liệu bán dẫn, các điện tử có độ linh động cỡ $1300 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$, còn của các lỗ trống – cỡ $500 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$; tức là lớn hơn 2–3 bậc so với của các ion trong buồng ion hoá (– cỡ $1 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$ trong không khí). Nhờ vậy, đầu dò bán dẫn có thời gian thu điện tích τ nhỏ; và do đó, có độ phân giải theo thời gian cao khi làm việc ở chế độ đếm.

Mặt khác, thời gian thu điện tích nhỏ nên xác suất tái hợp của các phân tử dẫn điện trái dấu trong đầu dò bán dẫn giảm xuống và là không đáng kể so với trong buồng ion hoá. Vì thế, trong những điều kiện như nhau, thì dòng điện ion hoá trong đầu dò bán dẫn có giá trị lớn hơn vài bậc; hoặc để đạt được cùng một giá trị dòng điện ion hoá, thì đầu dò bán dẫn cần diện áp nuôi nhỏ hơn rất nhiều so với của buồng ion hoá. Đây cũng là một ưu điểm quan trọng của đôzimet bán dẫn.

- 3). Vùng cấm có bề rộng nhỏ, nên trong điều kiện nhiệt độ bình thường các điện tử có thể chuyển từ vùng hoá trị lên vùng dẫn được (chỉ nhờ năng lượng chuyển động nhiệt), do đó làm xuất hiện những tín hiệu nhiễu. Các đôzimet bán dẫn có nền nhiễu khá cao, lại phụ thuộc vào nhiệt độ; do đó gây nhiều khó khăn cho việc sử dụng trong thực tế.

Nếu đầu dò bán dẫn có điện trở là R và điện áp nuôi là U , thì dòng điện nền (sinh ra khi đầu dò không bị chiếu xạ) có giá trị $i_{\text{nền}}$ bằng:

$$i_{\text{nền}} = \frac{U}{R} \quad (3.4-1)$$

Nếu đôzimet làm việc ở chế độ đếm, thì số xung nền $N_{\text{nền}}$ xuất hiện trong khoảng thời gian thu hồi điện tích (τ) do dòng điện nền sẽ có giá trị bằng độ lệch chuẩn của số cặp phân tử dẫn điện trong thời gian thu hồi điện tích:

$$N_{\text{nền}} = \sqrt{n_e} = \sqrt{\frac{i_{\text{nền}} \cdot \tau}{e}} \quad (3.4-2)$$

với e – điện tích của điện tử; n_e – số cặp phân tử dẫn điện có trong thời gian thu hồi điện tích.

Do đó tỷ số giữa số tín hiệu có ích trên số tín hiệu nền có giá trị bằng:

$$\frac{\text{Tín hiệu có ích}}{\text{Nền}} = N \cdot \sqrt{\frac{eR}{U\tau}} \quad (3.4-3)$$

trong đó N – số đếm có ích; τ – thời gian thu điện tích.

Như vậy, nền càng thấp thì đôzimet càng nhạy. Do đó nếu đầu dò bán dẫn có điện áp nuôi U càng thấp và điện trở R càng lớn thì đôzimet bán dẫn càng nhạy.

Các đầu dò bán dẫn có điện trở lớn thường được chế tạo từ các tinh thể bán dẫn với bước chuyển tiếp p-n, n-p, hoặc p-i-p là vùng nhạy của đầu dò. Có thể chế tạo đầu dò bán dẫn với vùng nhạy là lớp chuyển tiếp p-i-p khá lớn, nhưng công nghệ phức tạp, giá thành cao. Đầu dò bán dẫn loại hàng rào mặt có công nghệ chế tạo đơn giản, dễ dàng, đặc trưng ít bị thay đổi; nhưng lại có bề dày lớp chuyển tiếp quá mỏng ($\sim 10^1 \mu\text{m}$) nên hiệu suất ghi nhận bức xạ không cao.

Bề dày của lớp chuyển tiếp (h) tỷ lệ với tích của điện áp nuôi (U) và

mật độ ρ của vật liệu ($h \sim \rho U$). Do đó, để tăng bề dày của lớp chuyển tiếp h , người ta phải tăng điện áp nuôi U . Như vậy, phải chọn điện áp nuôi thích hợp để dung hoà hai yêu cầu về giảm mức nền và tăng thể tích nhạy (tăng bề dày lớp chuyển tiếp).

- 4). Các đôzimét bán dẫn có số thứ tự nguyên tố hiệu dụng lớn hơn rất nhiều so với không khí và các tổ chức cơ thể. Do đó chúng có độ nhạy phụ thuộc mạnh vào năng lượng bức xạ.

Tóm lại, đầu dò bán dẫn có những ưu điểm lớn như độ nhạy cao ngay cả khi thể tích nhỏ, điện áp nuôi thấp. Nhưng đồng thời chúng lại có những hạn chế như: nền nhiễu cao, thể tích nhạy nhỏ và không xác định được chính xác. Vì vậy trong thực tế hiện nay, các đôzimét bán dẫn vẫn chưa được sử dụng rộng rãi bằng một số loại đôzimét khác.

Các phần dưới đây giới thiệu đôzimét bán dẫn trong hai chế độ làm việc khác nhau – đôzimét bán dẫn ở chế độ đếm và đôzimét bán dẫn ở chế độ dòng.

3.4.2. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò bán dẫn ở chế độ đếm

So với các buồng iôn hoá làm việc ở chế độ xung, thì đầu dò bán dẫn làm việc ở chế độ đếm có hai điểm khác cơ bản. Hai điểm đó là:

- 1). Đầu dò bán dẫn có nền riêng khá cao; còn buồng iôn hoá thì thường không có. (Vì đối với đầu dò bán dẫn, thăng giáng của số phân tử dẫn điện tự do có sẵn trong vùng nhạy thường là khá lớn).
- 2). Trong buồng iôn hoá, các phân tử dẫn điện chỉ được sinh ra trong thể tích nhạy. Đối với đầu dò bán dẫn, phần nhạy chỉ giới hạn trong một vùng thể tích rất nhỏ, các phân tử dẫn điện được tạo thành cả ở trong và ngoài thể tích nhạy.

Các phân tử dẫn điện được sinh ra ở giáp vùng nhạy trong khoảng bề dày

cỡ độ dài khuếch tán L đều có khả năng lọt vào vùng nhảy và tham gia vào việc tạo xung điện cùng với những phân tử dẫn điện được sinh ra ở ngay trong vùng nhảy. Thời gian khuếch tán của các phân tử dẫn điện trong chất bán dẫn thường cỡ vài mili giây (ms). Nếu hằng số thời gian của hệ đo có giá trị tối ưu (thường cỡ từ $(0,1 \div 1)\mu s$) – nhỏ hơn rất nhiều so với thời gian khuếch tán, thì tỷ số *Tín hiệu có ích trên Tín hiệu nền* sẽ có giá trị lớn và các xung điện sẽ được tạo nên hầu như hoàn toàn bởi những điện tử và lỗ trống được sinh ra trong vùng nhảy.

Biên độ xung tỷ lệ với năng lượng hấp thụ được của mỗi lượng tử:

$$V_i = \alpha_i(E_\gamma)\Delta E_i \quad (3.4-4)$$

trong đó V_i – biên độ xung; ΔE_i – năng lượng bị hấp thụ của một lượng tử; $\alpha_i(E_\gamma)$ – hệ số tỷ lệ, phụ thuộc mạnh và phức tạp vào năng lượng E_γ của lượng tử.

Giả sử, hiệu suất ghi nhận bức xạ của đầu dò là $\varepsilon(E_\gamma)$ và trong một đơn vị thời gian có n_γ lượng tử tương tác với phần nhảy, làm xuất hiện n xung điện. Khi đó có các tương quan sau đây:

$$\sum_{i=1}^n V_i = \varepsilon(E_\gamma) \sum_{j=1}^{n_\gamma} \alpha_j(E_\gamma) \Delta E_j \quad (3.4-5)$$

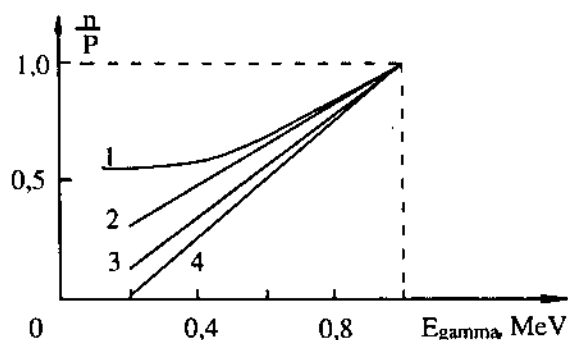
$$n\bar{V} = k(E_\gamma)P \quad (3.4-6)$$

và có biểu thức sau đây cho độ nhảy:

$$\frac{n}{P} = \frac{k(E)}{\bar{V}} \quad (3.4-7)$$

ở đây n – tốc độ đếm xung; P – suất liều bức xạ; $\bar{V}$ – biên độ trung bình của các xung điện; $k(E_\gamma)$ – hệ số tỷ lệ phụ thuộc mạnh và phức tạp vào năng lượng E_γ của lượng tử.

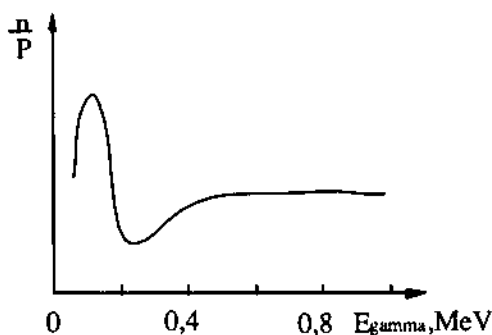
Do các xung nhiễu cũng có những biên độ nhất định nào đó, nên tín hiệu chỉ được ghi nhận với *tỷ số Tín hiệu có ích trên Nền* cao nếu sử dụng bộ phân liệt tích phân. Các biểu thức (3.4-6 và -7) cho thấy rằng: nếu ngưỡng phân liệt



Hình H3.4-1. Sự phụ thuộc vào năng lượng bức xạ gamma của độ nhạy của đôzimét bán dẫn làm từ Si với bước chuyển tiếp n-p. Độ nhạy được biểu diễn ở thang đơn vị tương đối. Ký hiệu: 1 – trường hợp khi ngưỡng phân liệt bằng $V_{ngưỡng}=115$ keV; 2 – khi $V_{ngưỡng}=150$ keV; 3 – khi $V_{ngưỡng}=200$ keV; 4 – khi $V_{ngưỡng}=300$ keV.

được đặt càng cao, thì độ nhạy của đôzimét càng giảm (vì những tín hiệu có ích với biên độ nhỏ dưới ngưỡng đã loại bỏ, không được ghi nhận).

Hình H3.4-1 minh họa sự phụ thuộc vào năng lượng của độ nhạy khi ngưỡng phân liệt có giá trị khác nhau đối với một đôzimét bán dẫn làm từ Si với bước chuyển tiếp n-p. Trên hình H3.4-2 là dạng đường đặc trưng phụ thuộc năng lượng E_γ của đôzimét làm từ Si loại p với bước chuyển tiếp khuếch tán.

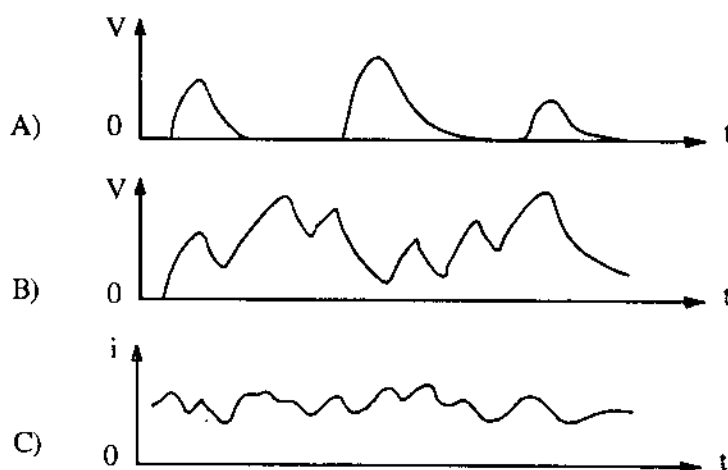


Hình H3.4-2. Dạng đường đặc trưng phụ thuộc vào năng lượng bức xạ gamma của đôzimét bán dẫn làm từ Si loại p với bước chuyển tiếp khuếch tán. Độ nhạy được biểu diễn ở thang tương đối.

Nói chung, *đôzimet bán dẫn ở chế độ đếm có độ nhạy tương đối cao* (thí dụ, có thể đạt tốc độ đếm cỡ 60 xung/min khi suất liều chiếu xạ $P=1.10^{-7}$ R/s), nhưng đặc trưng phụ thuộc vào năng lượng bức xạ E_γ của độ nhạy lại chưa tốt.

3.4.3. Máy đo liều lượng bức xạ dùng đầu dò bán dẫn ở chế độ dòng

Khi mật độ dòng lượng tử của bức xạ tới quá lớn, các xung điện được tạo thành có thể chồng lấn lên nhau, khó ghi nhận được từng xung tách biệt; do đó *đôzimet* làm việc ở chế độ đếm sẽ mắc phải sai số lớn (xem minh hoạ ở hình H3.4-3). Trong trường hợp này người ta dùng *đôzimet bán dẫn* làm việc ở chế độ dòng bằng cách đo dòng điện trung bình $\bar{i}$ ở lối ra của đầu dò. Dòng điện trung bình là tổng các xung điện xuất hiện do tương tác của bức xạ. Thăng giáng của dòng i phụ thuộc vào biên độ của các xung riêng biệt, tức là phụ thuộc vào năng lượng bị hấp thụ của từng lượng tử được ghi nhận.



Hình H3.4-3. Ứng dụng đo liều lượng bức xạ lượng tử bằng *đôzimet bán dẫn*. A – Trường hợp bức xạ tới có mật độ dòng lượng tử thấp và *đôzimet bán dẫn* làm việc ở chế độ đếm; B – bức xạ tới có mật độ dòng lượng tử lớn và *đôzimet bán dẫn* ở chế độ đếm; C – bức xạ tới có mật độ dòng lượng tử lớn và *đôzimet bán dẫn* ở chế độ dòng.

Dưới đây cho thấy mối liên hệ giữa dòng điện i và suất liều bức xạ P .

Trong thực tế, điện trở R của toàn bộ đầu dò bán dẫn hầu như tập trung hoàn toàn ở vùng chuyển tiếp. Vì vậy, nếu đầu dò được nuôi bởi điện áp U , thì có thể coi là điện áp U được phân bố hoàn toàn ở trên vùng chuyển tiếp đó; còn phần điện áp phân bố trên các vùng n và p của đầu dò thì có thể coi là bằng 0. Do hiện tượng khuếch tán, các phần tử dẫn điện phụ trong lớp p (là các điện tử) và trong lớp n (là các lỗ trống) có thể lọt vào vùng chuyển tiếp rồi chuyển động theo điện trường về các cực tương ứng của đầu dò và tạo nên dòng điện rò ngay cả khi đầu dò không bị chiếu xạ.

Giả sử, mật độ dòng điện rò có giá trị là J_0 ; coi dòng rò bề mặt là không đáng kể khi điện áp U thấp. Giữa các đại lượng J_0 , U và nhiệt độ $T(^{\circ}K)$ của đầu dò bán dẫn có biểu thức liên hệ sau đây:

$$j_0 = j_s \cdot (e^{\frac{eU}{kT}} - 1) \quad (3.4-8)$$

trong đó k – hằng số Boltzman; j_s – hằng số phụ thuộc vào một loạt yếu tố như: hệ số khuếch tán D_n của điện tử và D_p của lỗ trống, mật độ n_p của các phần tử dẫn điện phụ trong lớp p và p_n lớp n , và, độ dài khuếch tán của các phần tử này là L_n và L_p . Giữa j_s và các đại lượng vừa nêu trên có biểu thức liên hệ sau đây:

$$j_s = e \cdot \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \quad (3.4-9)$$

Mật độ dòng điện gây bởi bức xạ lượng tử j_γ gồm ba thành phần như sau:

$$j_\gamma = j_p + j_n + j_h \quad (3.4-10)$$

trong đó j_p – thành phần mật độ dòng điện gây bởi các phần tử dẫn điện sinh ra trong vùng p ; j_n – gây bởi các phần tử dẫn điện sinh ra trong vùng n ; j_h – gây bởi các phần tử dẫn điện sinh ra trong vùng chuyển tiếp. Các thành phần này tỷ lệ với suất liều P và bề dài khuếch tán tương ứng; nên (3.4 -10) có dạng sau đây:

$$j_\gamma = aP(L_p + L_n + h) \quad (3.4-11)$$

trong đó a – hệ số tỷ lệ.

Khi các phân tử dẫn điện có thời gian sống đủ dài, thì bề rộng chuyển tiếp h là không đáng kể so với bề dài khuếch tán L_n trong vùng n . Đối với các đầu dò bán dẫn hàng rào mặt, thì lớp p rất mỏng và $L_p \ll L_n$. Nếu bỏ qua giá trị h và L_p trong biểu thức (3.4-11), thì có biểu thức sau đây cho mật độ dòng điện gây bởi bức xạ lượng tử:

$$j_Y = aPL_n \quad (3.4-12)$$

Do đó mật độ dòng điện ở lối ra của đầu dò bán dẫn đang bị chiếu xạ có giá trị j bằng:

$$j = j_0 + j_Y \quad (3.4-13)$$

trong đó j_Y – mật độ dòng điện gây bởi bức xạ, được tính theo biểu thức (3.4-12); j_0 – mật độ dòng điện rò, xác định theo biểu thức (3.4-8). Khi điện áp nuôi $U=0$, mật độ dòng rò $j_0 \cong 0$, nên mật độ dòng điện ở lối ra j của đầu dò tỷ lệ tuyến tính với suất liều bức xạ:

$$j = j_Y = aPL_n \quad (3.4-14)$$

Vì dòng điện i ở lối ra của đầu dò bán dẫn tỷ lệ với mật độ dòng điện j ở lối ra của đầu dò, nên tương quan (3.4-14) cho thấy rằng: nếu đo được dòng điện i ở lối ra của đầu dò bán dẫn, thì có thể xác định được suất liều bức xạ P tại vị trí đặt đầu dò đó.

3.5. PHƯƠNG PHÁP HOÁ HỌC

Bức xạ ion hoá có thể gây nên những biến đổi hoá học bền vững trong vật chất. Những biến đổi hoá học này có thể xảy ra không những trong dung dịch nước, mà cả trong nhiều hệ hoá học rắn hoặc lỏng khác. Có thể xác định được những biến đổi đó một cách trực tiếp theo sự thay đổi màu sắc của chất, hoặc gián tiếp – bằng các phương pháp phân tích vật lý và hoá học. Dựa trên cơ sở này, có thể chế tạo được các loại dozimet hoá học.

3.5.1. Đo liều lượng bức xạ bằng các dung dịch nước (Đôzimet hoá học lỏng)

3.5.1.1. Nguyên tắc hoạt động

Thông thường, các đôzimet hoá học lỏng là dung dịch mà trong đó chất dung môi là nước. (Những dung dịch kiểu này được gọi là dung dịch nước). *Đôzimet dung dịch nước không dựa vào tương tác trực tiếp của bức xạ lên chất hoà tan, mà dựa trên cơ sở các phản ứng hoá học xảy ra trong dung môi nước.* (Xem sơ đồ các phản ứng hoá bức xạ đầu tiên ở hình H2.3-1, chương 2).

Dưới tác dụng của bức xạ lượng tử, phân tử nước bị phân huỷ thành ion H_2O^+ và điện tử tự do:



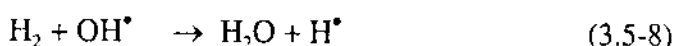
Điện tử vừa được giải phóng lại có thể bị chiếm ngay bởi phân tử trung hoà khác của nước:



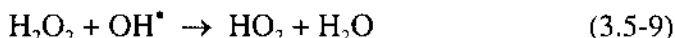
Các ion phân tử H_2O^- và H_2O^+ không bền vững, nên chúng vừa được tạo thành thì lại bị phân huỷ ngay và sinh ra $\text{OH}^\bullet$ và $\text{H}^\bullet$ là các gốc có hoạt tính hoá học rất cao:



Các gốc vừa được sinh ra có thể tham gia nhiều phản ứng hoá học. Thí dụ:



Mặt khác, perôxit hydrô H_2O_2 có hoạt tính rất cao, nên vừa được sinh ra lại có thể tham gia ngay vào phản ứng hoá học với gốc $\text{OH}^\bullet$:



Trong trường hợp có oxy ở dạng tự do, có thể xảy ra các phản ứng như:



Kết quả là bức xạ ion hoá làm sinh ra trong dung dịch nước các gốc $\text{H}^\bullet$, $\text{OH}^\bullet$ và H_2O_2 , HO_2 . Nhờ có hiện tượng khuếch tán, những gốc này dần dần được phân bố đều trong dung dịch. Do có hoạt tính hoá học cao, các sản phẩm này có thể tham gia vào những phản ứng hoá học với chất được hoà tan trong dung dịch, tạo nên những biến đổi hoá học bền vững. *Năng lượng bức xạ bị hấp thụ càng nhiều, thì số biến đổi hoá học bền vững càng nhiều.*

Số những biến đổi hoá học đặc trưng được tạo thành khi năng lượng bức xạ bị hấp thụ có giá trị bằng 100 eV, thì được gọi là hiệu suất của phản ứng hoá bức xạ.

Nếu hiệu suất của phản ứng hoá bức xạ (G) của một hệ hoá học không phụ thuộc vào tốc độ hấp thụ năng lượng và tổng năng lượng bị hấp thụ, thì có thể sử dụng hệ hoá học đó để xác định liều lượng hấp thụ bức xạ.

Giữa nồng độ C của sản phẩm đặc trưng mới được tạo thành do tác dụng của bức xạ và liều hấp thụ bức xạ D có tương quan sau đây:

$$C = a_1 \rho G D \quad (3.5-12)$$

Do đó

$$D = a \frac{C}{\rho G} \quad (3.5-13)$$

ở đây a_1 và a – hệ số tỷ lệ; ρ – mật độ của dung dịch. Nếu các đại lượng trong hai biểu thức này có đơn vị đo tương ứng là $C[\text{mol/l}]$, $D[\text{Rad}]$, $\rho[\text{g/cm}^3]$, thì biểu thức (3.5-13) được viết lại như sau:

$$D_{[\text{Rad}]} = 9,649 \cdot 10^8 \cdot \frac{C_{[\text{mol/l}]}}{\rho_{[\text{g/cm}^3]} G_{[\frac{\text{J}}{100\text{eV}]}} \quad (3.5-13.a)$$

Chú ý: có 3 loại đơn vị đo nồng độ phân tử gam; đó là: [mol/l], [M] và [N]. Chúng được định nghĩa như sau: 1[mol/l] = (1 phân tử gam)/(1 lít dung dịch); trong khi đó: 1M = (1 mol)/(1000 g dung dịch) $\equiv$ (1 phân tử gam)/(1000g dung dịch); còn 1N = (1mol)/(1000 g dung môi) $\equiv$ (1 phân tử gam)/(1000g dung môi). [Mol] là đơn vị đo phân tử gam; 1 Mol = $6,0248 \cdot 10^{23}$ phân tử. Dung dịch được tạo thành từ dung môi và các chất được hoà tan trong dung môi.

Đôzimet dung dịch nước có thể được sử dụng để xác định liều hấp thụ trong tổ chức cơ thể nếu số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của nó chênh lệch không quá 1% so với số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của cơ thể hoặc của nước (xem lại bảng B.1.2-1 về số thứ tự nguyên tố hiệu dụng của một số môi trường).

3.5.1.2. Đo liều bức xạ bằng dung dịch sulfat sắt

Đôzimet sulfat sắt thường được làm từ một số thành phần hoá học như nêu trong các bảng B3.5-1 hoặc B3.5-2.

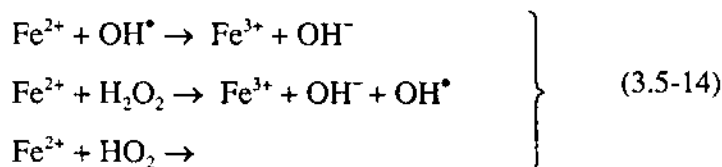
Bảng B3.5-1. Những thành phần tạo nên đôzimet sulfat sắt chuẩn

stt	Chất	Lượng	Tổng cộng
1	FeSO ₄ .7H ₂ O	2g	5 lít dung dịch bão hoà oxy
2	NaCl	0,3g	
3	H ₂ SO ₄ đậm đặc	110 cm ³	
4	Nước cất	Thêm đủ để được 5 lít dung dịch bão hoà oxy	

Bảng B3.5-2. Những thành phần tạo nên đôzimet sulfat sắt Fricke (với mật độ $\rho = 1,024 \text{ g/cm}^3$ ở nhiệt độ 25°C)

stt	Chất	Nồng độ
1	Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ hoặc FeSO ₄	0,001 M
2	NaCl	0,001 M
3	H ₂ SO ₄	0,4 M
4	Nước cất	Vừa đủ để thu được các nồng độ nêu trên

Các thành phần nêu trong bảng B3.5-1 hoặc bảng B3.5-2 đều tạo nên dung dịch mà trong đó luôn sẵn có những ion sắt hoá trị hai Fe^{2+} do hiện tượng điện ly. Dưới tác dụng của bức xạ ion hoá, một số ion sắt hoá trị hai Fe^{2+} bị oxy hoá trở thành ion sắt hoá trị ba Fe^{3+} theo các phản ứng sau đây:



Các ion sắt hoá trị ba Fe^{3+} chính là sản phẩm đặc trưng mới được tạo thành của hệ hoá học do tác dụng của bức xạ ion hoá. Số ion này phản ánh năng lượng bức xạ đã bị hấp thụ trong hệ, và, làm thay đổi mật độ quang học của dung dịch.

Sau khi bị chiếu xạ, dung dịch có đỉnh hấp thụ trong phổ phản ánh sáng nhìn thấy với cực đại ở bước sóng $\lambda = 305 \text{ nm}$.

Giữa nồng độ của ion sắt hoá trị ba Fe^{3+} trong dung dịch và mật độ quang học của dung dịch có tương quan sau đây:

$$S - S_0 = \lg \left(\frac{I_0 \cdot I^*}{I \cdot I_0^*} \right) = \varepsilon C d \quad (3.5-15)$$

trong đó S_0 và S – mật độ quang học của dung dịch trước và sau khi dung dịch bị chiếu xạ; I_0 và I_0^* – cường độ chùm ánh sáng đạt tới lớp dung dịch trước và sau khi bị chiếu xạ; I và I^* – cường độ chùm ánh sáng ló ra khỏi lớp dung dịch trước và sau khi bị chiếu xạ; d – bề dày của lớp dung dịch [cm]; C – nồng độ phân tử gam của ion sắt hoá trị ba Fe^{3+} trong dung dịch [mole/lít dung dịch]; ε – hệ số phân tử gam đặc trưng cho sự làm yếu chùm ánh sáng trong dung dịch, phụ thuộc vào nhiệt độ của dung dịch. Đối với đôzimet dung dịch sulfat sắt chuẩn ở nhiệt độ 24°C , thì hệ số đặc trưng này có giá trị $\varepsilon = 2174 \text{ lít}/(\text{mol.cm})$; còn đối với đôzimet Fricke ở nhiệt độ 25°C thì giá trị $\varepsilon = (2205 \pm 3) \text{ lít}/(\text{mol.cm})$.

Nếu trong hai lần đo S_0 và S đều sử dụng chùm ánh sáng tới có cường độ như nhau $I_0 = I_0^*$, thì biểu thức (3.5-15) sẽ có dạng như sau:

$$S - S_0 = \lg \frac{I^*}{I} = \varepsilon C d \quad (3.5-16)$$

Đối với đôzimet dung dịch sulfat sắt có thành phần như được nêu trong các bảng B3.5-1 và -2, hiệu suất của phản ứng hoá bức xạ có giá trị bằng $G_{[1/100\text{eV}]} = (15,6 \pm 0,5)$ trong điều kiện dung dịch đã bão hoà oxy và suất liều không vượt quá 10^5 Rad/s. Đôzimet dung dịch sulfat sắt có hiệu suất ít thay đổi $G = 15,7 \pm 0,6$ trong một dải rộng năng lượng của lượng tử $E_\gamma \sim 0,5 \div 30$ MeV, hoặc khi bức xạ hãm có phổ trải rộng tới $E_{\gamma\text{max}} \sim 30$ MeV.

Các biểu thức (3.5-13 và -16) cho thấy một cách rõ ràng rằng liều hấp thụ bức xạ tỷ lệ với độ thay đổi mật độ quang học của dung dịch:

$$D = k \cdot (S - S_0) = k \cdot \lg \frac{I^*}{I} \quad (3.5-17)$$

Trong vùng nhiệt độ của dung dịch từ $(18 \div 30)^\circ\text{C}$, có thể xác định liều hấp thụ bức xạ theo công thức sau đây:

$$D_{[\text{Rad}]} = 4,277 \cdot 10^4 \cdot \frac{S - S_0}{G_{[1/100\text{eV}]}} \quad (3.5-18)$$

Vì thành phần chủ yếu của dung dịch là nước, nên nguyên tử số hiệu dụng của nó xấp xỉ bằng của nước và của tổ chức cơ bắp.

Đôzimet sulfat sắt với những thành phần nêu (trong bảng B3.5-1 và -2) thì hầu như không phụ thuộc vào năng lượng E_γ của bức xạ trong vùng E_γ từ $(0,1 - 2)$ MeV. Chúng được dùng để đo liều hấp thụ trong dải liều $(2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4)$ Rad khi suất liều không vượt quá $1 \cdot 10^5$ Rad/s.

Các bảng B3.5-1 và B3.5-2 cho thấy hàm lượng sắt trong các dung dịch này là rất nhỏ. Như vậy có nghĩa là tạp chất trong dung dịch có thể dẫn tới sai số đáng kể. Do đó khi pha chế dung dịch để làm đôzimet sulfat sắt, cần chú ý

sử dụng các muối và axit có độ sạch hoá học, hoặc ít nhất là độ sạch phân tích. Đôzimet sulfat sắt rất nhạy với các tạp chất hữu cơ. Chất lượng của nước cất cũng ảnh hưởng đến chất lượng của dung dịch. Nên sử dụng nước đã qua hai – ba lần trung cất thì tốt hơn.

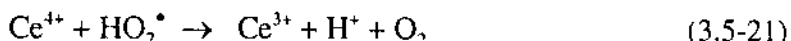
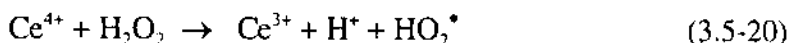
Dung dịch trở thành bão hoà oxy sau vài giờ tiếp xúc với không khí ở nhiệt độ trong phòng. Dung dịch đem đi chiếu xạ cần được chứa trong bình làm bằng thạch anh hay teflon, hoặc bằng các loại thủy tinh bền vững hoá học (những loại bình chứa khác có thể làm cho kết quả bị thay đổi hoặc không ổn định).

Nếu thêm vào dung dịch một ít muối sulfat đồng CuSO_4 hoặc một số chất khác (thí dụ: axit benzoic), thì cũng có thể tạo được đôzimet sulfat sắt với độ nhạy tốt hơn.

3.5.1.3. Đo liều bức xạ bằng dung dịch muối seri

Đôzimet seri thường được dùng ở dạng dung dịch muối seri $\text{Ce}(\text{SO}_3)_2$ với nồng độ trong khoảng (0,001–0,5)M trong dung dịch axit H_2SO_4 nồng độ 0,4M (dùng nước cất ba lần).

Dưới tác dụng của bức xạ iôn hoá, các iôn seri hoá trị bốn Ce^{4+} bị khử thành iôn seri hoá trị ba Ce^{3+} theo các phản ứng sau đây:



Các iôn seri hoá trị ba Ce^{3+} làm xuất hiện đỉnh hấp thụ ánh sáng với cực đại ở bước sóng $\lambda = 320\text{nm}$. Hệ số phân tử gam đặc trưng sự làm yếu chùm sáng trong dung dịch này có giá trị bằng $\epsilon_{320\text{nm}} = (5565 \pm 15)$ lít/(mol.cm) ở nhiệt độ (15–25) $^{\circ}\text{C}$.

Đôzimet có hiệu suất $G_{[1/100\text{eV}]} = 2,54$ không phụ thuộc vào nồng độ iôn

seri hoá trị bốn Ce^{4+} trong vùng $(3,2.10^{-5}-3,2.10^{-2})$ mol/lít.

Đôzimet seri không nhạy đối với ôxy và kém nhạy hơn so với đôzimet sulfat sắt. Nó đo được liều hấp thụ trong dải liều (10^5-10^7) Rad.

Các loại đôzimet sulfat sắt và seri vừa nêu trên đây có nhược điểm chung là chúng bị ôxy hoá khử ở nhiệt độ bình thường trong không khí ngay cả khi chúng không bị chiếu xạ. Vì vậy, chúng chỉ được pha chế ngay trước khi sử dụng vài giờ.

3.5.2. Đo liều bức xạ trên cơ sở các hiệu ứng hoá học khác

Người ta phát hiện thấy nhiều loại hoá chất khác nhau có khả năng thay đổi màu sắc bởi các phản ứng ôxy hoá khử xảy ra với các gốc $OH^\bullet$ hoặc $H^\bullet$ sinh ra do tác dụng của bức xạ ion hoá. Thí dụ, dung dịch nước của metylen ban đầu có màu xanh da trời sẽ mất màu dần trong quá trình bị chiếu xạ. Nếu hai gốc $H^\bullet$ và $OH^\bullet$ tái hợp với nhau theo phản ứng (3.5-7) để tạo thành nước với xác suất lớn, thì sẽ làm giảm đáng kể số các gốc đó trong dung dịch; do đó làm giảm hiệu suất của những phản ứng dẫn tới sự thay đổi màu sắc. Muốn tăng hiệu suất của phản ứng, người ta phải tìm cách giảm xác suất tái hợp của các gốc $H^\bullet$ và $OH^\bullet$. Có thể đạt được mục đích này bằng cách cho thêm vào dung dịch một hoá chất có khả năng bắt gốc $H^\bullet$ mạnh (như ôxy), hoặc thêm chất có khả năng bắt gốc $OH^\bullet$ mạnh (như hydroquinol, glucôza, glixêrin .v.v.). Bằng cách cho hoặc không cho dung dịch tiếp xúc với ôxy phân tử O_2 , hoặc cho thêm vào dung dịch một lượng nhất định chất này hoặc chất khác, thì có thể thu được phản ứng thuận nghịch hoặc không thuận nghịch dưới tác dụng của bức xạ.

Ngày nay người ta đã đưa vào sử dụng một cách hiệu quả các màng pôlivinil clorua $(CH_2=CHCl)_n$ có chứa chất nhuộm màu. Dưới tác dụng của bức xạ ion hoá, pôlivinil clorua bị phân huỷ sinh ra khí clohydric HCl. Khí này tác dụng lên chất nhuộm màu, làm thay đổi màu sắc của màng. Màng thường rất mỏng (chỉ cỡ 10^{-2} mm) nên không làm ảnh hưởng đến trường bức xạ và không

phụ thuộc vào góc tới của bức xạ; có khả năng đo liều cao từ $5.10^5 \div 10^7$ R.

Nhiều loại chất hữu cơ khác ở thể rắn hoặc thể đông đặc cũng có khả năng thay đổi màu sắc hoặc mật độ quang học một cách tỷ lệ với liều bức xạ.

Các loại thuỷ tinh photphat được hoạt hoá bởi bạc cũng được sử dụng để đo liều lượng bức xạ như đã trình bày trong mục về phương pháp huỳnh quang.

Ngoài các hoá chất ở thể lỏng, rắn, hoặc đông đặc, một số loại khí cũng có thể được sử dụng làm dozimet. Một trong những loại dozimet khí này được làm bằng khí N_2O đựng trong bình thạch anh kín mỏng. Dưới tác dụng của bức xạ lượng tử hoặc beta, khí N_2O phân huỷ thành N_2 , O_2 và NO_2 theo một tỷ lệ nhất định:

$$N_2 : O_2 : NO_2 = 1 : 0,14 : 0,48.$$

Để xác định hiệu suất tạo các khí N_2 và O_2 , người ta đập vỡ bình thạch anh trong chân không ở nhiệt độ nitơ lỏng. Khi đó, khí NO_2 mới được tạo thành và N_2O còn lại sẽ ngưng tụ trên thành buồng chân không. Khối lượng N_2 và O_2 mới sinh ra sẽ được xác định bằng các phương pháp hoá học thông thường. Khối lượng sản phẩm đặc trưng mới được tạo thành tỷ lệ với liều bức xạ trong một vùng nhất định nào đó; hệ số tỷ lệ phụ thuộc rất mạnh vào áp suất khí.

3.6. PHƯƠNG PHÁP NHIỆT

3.6.1. Tác dụng nhiệt của bức xạ ion hoá

Giả sử hai điều kiện sau đây được thoả mãn:

- 1). Có một vật thể hoàn toàn cách nhiệt với môi trường xung quanh và được đặt trong một trường bức xạ ion hoá;
- 2). Bức xạ ion hoá không gây nên những biến đổi không thuận nghịch trong vật thể đó (thí dụ: không gây phản ứng hoá học không thuận nghịch, hoặc không làm phát bức xạ thứ cấp, không gây biến đổi về

cấu trúc .v.v.).

Trong những điều kiện như vậy, thì cuối cùng toàn bộ năng lượng bức xạ đã bị hấp thụ trong vật thể sẽ biến thành năng lượng nhiệt với giá trị bằng ΔQ [joule] làm cho nhiệt độ của vật thể tăng lên ΔT độ. Giữa nhiệt lượng ΔQ và độ thay đổi nhiệt độ ΔT có biểu thức liên hệ sau đây:

$$\Delta Q = c_m \cdot m \cdot \Delta T \quad (3.6-1)$$

với m [g] – khối lượng của vật thể; c_m [J.(grad.g)⁻¹] – nhiệt dung của vật thể.

Giả sử, vật thể cách nhiệt có dạng hình trụ với bề dày h và diện tích đáy S ; chùm bức xạ ion hoá có cường độ I_0 tới vuông góc với mặt đáy của khối trụ. Năng lượng bức xạ ΔE_z mà khối trụ hấp thụ được trong một đơn vị thời gian là:

$$\Delta E_z = \mu_{kz} \cdot I_0 \cdot S \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z h}}{\mu_z} \quad (3.6-2)$$

ở đây μ_{kz} – hệ số truyền năng lượng dài; μ_z – hệ số làm yếu (dài) bức xạ trong vật thể.

Mặt khác, cường độ bức xạ I_0 và suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ}, 0}$ lại liên hệ với nhau qua biểu thức (3.3-6); liều chiếu xạ $1R$ lại tương ứng với năng lượng bị hấp thụ trong 1g không khí ở điều kiện tiêu chuẩn (0°C, 760 mm Hg) là $8,8 \cdot 10^{-6}$ J/g. Do đó, năng lượng bức xạ ΔE_z [J/s] mà vật thể hấp thụ được trong khoảng thời gian dt [s] rất ngắn sẽ được xác định theo biểu thức sau đây:

$$\Delta E_z \cdot dt = 8,8 \cdot 10^{-6} \cdot S \cdot \frac{\mu_{kz}}{\mu_{km, \text{không khí}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z h}}{\mu_z} \cdot P_{\text{chiếu xạ}, 0} \cdot dt \quad (3.6-3)$$

Nếu trong vật thể không xảy ra những biến đổi thuận nghịch, thì toàn bộ năng lượng bức xạ mà vật thể đã hấp thụ được sẽ chuyển hoá thành năng lượng nhiệt. Do vậy, nếu lấy tích phân hai vế của biểu thức (3.6-3) theo toàn bộ quãng thời gian mà vật thể đã bị chiếu xạ, thì thu được giá trị nhiệt lượng ΔQ . Tiếp đó,

đem thay giá trị ΔQ này vào biểu thức (3.6-1), thì thu được tương quan giữa độ thay đổi nhiệt độ ΔT và liều chiếu xạ $D_{\text{chiếu xạ, 0}}$ như sau:

$$\frac{\Delta T}{D_{\text{chiếu xạ, 0}}} = 8,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\mu_{\text{km,Z}}}{c_m \cdot \mu_{\text{km,không khí}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_Z h}}{\mu_Z h} \quad (3.6-4)$$

Chú ý: khối lượng của vật thể có giá trị $m = S \cdot h \cdot \rho_Z$; ở đây ρ_Z – mật độ của vật thể [g/cm³]. Trong các biểu thức trên, các đại lượng có đơn vị đo như sau: ΔE_Z [J/s]; S [cm²]; h [cm]; ΔT [°C]; $P_{\text{chiếu xạ, 0}}$ [R/s]; $D_{\text{chiếu xạ, 0}}$ [R]; c_m [J/(grad.g)].

Biểu thức (3.6-4) cho thấy rằng độ thay đổi nhiệt độ ΔT của vật thể tỷ lệ với liều chiếu xạ $D_{\text{chiếu xạ, 0}}$. Đây chính là cơ sở vật lý của việc sử dụng phương pháp nhiệt để đo liều chiếu xạ. Biểu thức này xác định độ nhạy cực đại của phương pháp nhiệt khi bỏ qua ảnh hưởng của tán xạ nhiều lần.

Ta hãy đánh giá mức độ bị nung nóng bởi bức xạ lượng tử của một vật tương đương tổ chức cơ thể khi giá trị $\mu_Z h \ll 1$. Trong trường hợp này, với sai số cỡ 10%, có thể coi tỷ số $\mu_{\text{km,Z}} / \mu_{\text{km, không khí}} = 1$; nhiệt dung $c_m = 4,2$ J/(grad.g); do đó từ biểu thức (3.6-4) ta thu được biểu thức gần đúng sau đây cho tương quan giữa ΔT và $D_{\text{chiếu xạ, 0}}$:

$$\Delta T [^{\circ}\text{C}] \approx 2 \cdot 10^{-6} \cdot D_{\text{chiếu xạ, 0}} [\text{R}] \quad (3.6-5)$$

Như vậy, nếu đặt một vật tương đương tổ chức cơ thể, sao cho nó cách nhiệt với môi trường xung quanh và chịu một liều chiếu xạ $D_{\text{chiếu xạ, 0}} = 500$ R, thì nhiệt độ của vật sẽ chỉ tăng lên có 10^{-3} °C mà thôi. Điều này cũng chứng tỏ rằng ảnh hưởng về nhiệt của bức xạ không quyết định tác dụng sinh học của nó.

Việc phải đo những thay đổi rất nhỏ như vậy về nhiệt độ cùng những khó khăn thực nghiệm khác đã hạn chế sử dụng phương pháp nhiệt chỉ trong điều kiện phòng thí nghiệm và chủ yếu là để nghiên cứu.

Song, mặt khác, cần nhấn mạnh rằng phương pháp nhiệt là phương pháp đo trực tiếp duy nhất trong lĩnh vực đo liều lượng bức xạ. Trong khi những

phương pháp khác chỉ đo những hiệu ứng gián tiếp (như: hiệu ứng iôn hoá, hoặc, sản phẩm của phản ứng hoá học .v.v.), thì phương pháp nhiệt cho phép đo trực tiếp được năng lượng bức xạ đã bị hấp thụ trong vật thể.

Phương pháp nhiệt được dùng để đo và hiệu chỉnh những hằng số cơ bản của các phương pháp đo liều lượng bức xạ khác (như: năng lượng trung bình tạo cặp iôn, hiệu suất phản ứng hoá bức xạ .v.v.). *Một lĩnh vực ứng dụng quan trọng của phương pháp nhiệt là đo trực tiếp cường độ bức xạ iôn hoá.*

Phương pháp nhiệt được thực hiện bằng cách đặt vật hấp thụ bức xạ vào trong một nhiệt lượng kế. Các nhiệt lượng kế có cấu tạo khác nhau, tuy nhiên, có thể chia chúng thành hai loại theo nguyên tắc hoạt động là: nhiệt lượng kế đơn và nhiệt lượng kế vi phân (kép). Nhiệt lượng kế chỉ có một vật hấp thụ duy nhất, thì được gọi là nhiệt lượng kế đơn. Nhiệt lượng kế vi phân được tạo thành từ hai nhiệt lượng kế đơn; trong đó nhiệt lượng kế đơn thứ nhất được dùng để đo liều hấp thụ, còn cái thứ hai – dùng để kiểm soát và bù trừ hiệu ứng tán xạ nhiệt, làm tăng thêm độ chính xác của phép đo. Do vậy, dưới đây chỉ trình bày nguyên tắc hoạt động của nhiệt lượng kế đơn.

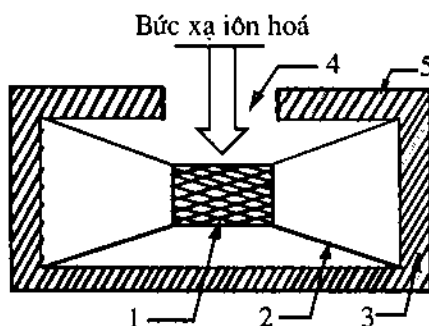
3.6.2. Nhiệt lượng kế đơn

Một nhiệt lượng kế đơn có nguyên tắc cấu tạo như được minh hoạ trên hình H3.6-1. Vật thể hấp thụ bức xạ (1) được treo bởi các dây (2) ở bên trong của máy điều nhiệt (3). Bức xạ iôn hoá đi qua cửa sổ (4) và bị hấp thụ trong vật thể (1), làm nó bị nóng lên. Thông thường, người ta đo chênh lệch nhiệt độ của vật hấp thụ (1) và vỏ (5). (Một nhiệt lượng kế có thể có tới vài lớp vỏ với những chế độ nhiệt khác nhau được định trước).

Muốn tăng độ nhạy của dozimet, nhất thiết phải giảm sự truyền nhiệt từ vật hấp thụ sang môi trường xung quanh xuống mức thấp nhất. Do vậy, phải tìm mọi cách làm giảm cả ba quá trình truyền nhiệt là: phát xạ, đối lưu và dẫn nhiệt.

Sự truyền nhiệt do phát xạ phụ thuộc vào vật liệu và nhiệt độ của vật, vào đặc tính và diện tích bề mặt của nó. Để giảm hao phí nhiệt do phát xạ, người ta

thường mạ bạc các bề mặt và đặt nhiều lá chắn mỏng giữa vật hấp thụ và vỏ của nhiệt lượng kế.



Hình H3.6-1. Nguyên tắc cấu tạo của nhiệt lượng kế đơn.
Ký hiệu: 1 – vật hấp thụ năng lượng của bức xạ; 2 – dây treo; 3 – máy điều nhiệt; 4 – cửa sổ; 5 – vỏ bọc.

Để giảm hao phí nhiệt do hiện tượng đối lưu, phải giảm áp suất khí ở trong buồng của nhiệt lượng kế. Nếu trong buồng này có chân không đủ cao, thì có thể bỏ qua phần nhiệt lượng bị hao phí do đối lưu.

Phần hao phí nhiệt lượng đáng kể nhất là do hiện tượng dẫn nhiệt. Hao phí này chủ yếu là do các dây (2) giữ vật hấp thụ (1), và, một phần là do các dây nối vật (1) với hệ đo. Để giảm hao phí nhiệt do dẫn nhiệt, phải làm các dây treo (2) bằng những vật liệu dẫn nhiệt kém (thí dụ: sợi nylon), còn các dây nối – thì dùng càng ít càng tốt, càng ngắn càng tốt. Khối lượng vật liệu dùng để làm các loại dây này thì càng ít càng tốt.

Trong trường hợp tổng quát, hao phí nhiệt lượng do truyền nhiệt trong một đơn vị thời gian tuân theo quy luật sau đây:

$$-\frac{dQ}{dt} = kS(T - T_{\text{môi trường}}) \quad (3.6-6)$$

trong đó: k – hệ số truyền nhiệt (có giá trị không đổi nếu nhiệt độ thay đổi ít);

S – diện tích bề mặt của vật hấp thụ (1); T – nhiệt độ của vật hấp thụ (1); $T_{\text{môi trường}}$ – nhiệt độ môi trường xung quanh. Dấu trừ ở vế trái của phương trình này cho thấy rằng đây là nhiệt lượng bị hao phí, mất mát (Q giảm theo thời gian, nên $dQ/dt < 0$, trong khi vế phải là năng lượng chỉ có giá trị dương).

Nếu toàn bộ năng lượng bức xạ đã bị hấp thụ được chuyển hết thành nhiệt, thì phương trình cân bằng nhiệt của nhiệt lượng kế đơn sẽ có dạng sau:

$$\Delta E_Z dt = c_m m dT + kS(T - T_{\text{môi trường}})dt \quad (3.6-7)$$

Trong phương trình (3.6-7), vế trái là năng lượng bức xạ mà vật hấp thụ được trong khoảng thời gian dài bằng dt ; số hạng thứ nhất ở vế phải thể hiện giá trị năng lượng bức xạ được chuyển thành nhiệt làm tăng nhiệt độ của vật; còn số hạng thứ hai ở vế phải – thể hiện giá trị năng lượng bức xạ được chuyển thành nhiệt nhưng bị hao phí, làm tăng nhiệt độ của môi trường xung quanh vật đó.

Nhiệt lượng kế có thể làm việc ở chế độ đẳng nhiệt hoặc đoạn nhiệt.

Nếu *nhiệt lượng kế làm việc ở chế độ đẳng nhiệt*, thì nhiệt độ của vỏ (5) được giữ cố định $T_{\text{môi trường}} = \text{const}$ trong suốt thời gian làm việc. Trong chế độ làm việc đẳng nhiệt, thì sự truyền nhiệt giữa vật (1) với vỏ (5) xảy ra liên tục và đáng kể.

Nếu *nhiệt lượng kế làm việc ở chế độ đoạn nhiệt*, thì nhiệt độ của vỏ (5) được điều chỉnh sao cho nó luôn bằng nhiệt độ của vật hấp thụ ($T_{\text{môi trường}} = T$). Trong chế độ đoạn nhiệt, vì $T_{\text{môi trường}} = T$, nên sự truyền nhiệt giữa vật (1) và vỏ (5) là không đáng kể.

Dưới đây lần lượt xét nhiệt lượng kế ở hai chế độ làm việc nêu trên.

a. Nhiệt lượng kế ở chế độ đẳng nhiệt

Trong trường hợp nhiệt lượng kế làm việc ở chế độ đẳng nhiệt, thì phương trình (3.6-7) cho kết quả như sau:

$$e^{-\frac{kS\Delta t}{c_m m}} = \frac{\Delta E_Z - kS(T - T_{\text{môi trường}})}{\Delta E_Z - kS(T_0 - T_{\text{môi trường}})} \quad (3.6-8)$$

trong đó: $\Delta t = t - t_0$

và T – nhiệt độ của vật thể (1) ở thời điểm t sau quãng thời gian bị chiếu xạ dài bằng Δt ; T_0 – nhiệt độ của vật thể ở thời điểm bắt đầu bị chiếu xạ (khi $t=t_0$).

Thông thường thì nhiệt độ của vật ở thời điểm bắt đầu chiếu xạ có giá trị bằng nhiệt độ của môi trường (tức là bằng nhiệt độ của vỏ bọc) $T_0 = T_{\text{môi trường}}$. Trong trường hợp này, từ biểu thức (3.6-8), thu được biểu thức liên hệ sau đây:

$$\Delta T \equiv T - T_0 = \frac{\Delta E_Z}{kS} \cdot (1 - e^{-\frac{kS\Delta t}{c_m m}}) \quad (3.6-9)$$

Biểu thức (3.6-9) cho thấy như sau. Nếu thời gian chiếu xạ đủ dài, sao cho $kS\Delta t/(c_m m) \gg 1$, thì nhiệt độ T của vật hấp thụ sẽ đạt tới giá trị cân bằng và không thay đổi nữa:

$$\Delta T_{\text{cân bằng}} = \frac{\Delta E_Z}{kS} = \frac{P_Z m}{kS} \quad (3.6-10)$$

Ngược lại, nếu thời gian chiếu xạ đủ ngắn, sao cho $kS\Delta t/(c_m m) \ll 1$, thì nhiệt độ T của vật hấp thụ sẽ tăng một cách tỷ lệ tuyến tính với quãng thời gian mà vật đó bị chiếu xạ:

$$\Delta T = \frac{\Delta t \cdot \Delta E_Z}{c_m m} = \frac{\Delta t \cdot P_Z}{c_m} \quad (3.6-11)$$

Vì suất liều hấp thụ $P_Z = \Delta E_Z/m$ nên cả hai biểu thức (3.6-10 và -11) đều được sử dụng để xác định liều và suất liều hấp thụ bức xạ trong các trường hợp tương ứng.

b. Nhiệt lượng kế ở chế độ đoạn nhiệt

Đối với nhiệt lượng kế ở chế độ đoạn nhiệt, thì phương trình (3.6-7) trở nên rất đơn giản (vì số hạng thứ hai ở vế phải của nó luôn có giá trị bằng 0):

$$\Delta E_z dt = c_m m dT \quad (3.6-12)$$

Do vậy, lấy tích phân theo thời gian biểu thức (3.6-12), thì thấy: độ thay đổi nhiệt độ của vật thể (1) là tỷ lệ tuyến tính với quãng thời gian Δt mà vật đó bị chiếu xạ:

$$\Delta T = \frac{\Delta t \cdot \overline{\Delta E_z}}{c_m m} = \frac{\Delta t \cdot \overline{P}}{c_m} \quad (3.6-13)$$

Các biểu thức (3.6-10, -11 và -13) cho thấy độ tăng nhiệt độ phụ thuộc vào suất liều hấp thụ của nhiệt lượng kể ở các chế độ làm việc đẳng nhiệt hoặc đoạn nhiệt.

Sự tăng nhiệt độ của vật thể do hấp thụ năng lượng bức xạ có thể dẫn đến sự tăng thể tích của vật đó. Giữa độ gia tăng của nhiệt độ và của thể tích có mối liên hệ như sau:

$$\Delta V = \beta V \cdot \Delta T \quad (3.6-14)$$

trong đó β – hệ số giãn nở thể tích của vật liệu cấu tạo nên vật thể.

Mặt khác, độ thay đổi nhiệt độ ΔT và nhiệt lượng ΔQ liên hệ với nhau không chỉ qua biểu thức (3.6-1), mà còn thông qua cả biểu thức sau đây:

$$\Delta Q = c_v \cdot V \cdot \Delta T \quad (3.6-15)$$

trong đó V – thể tích của vật, [cm^3]; c_v – nhiệt dung của vật thể, [$\text{J}/(\text{grad} \cdot \text{cm}^3)$].

Thế giá trị V thu được từ biểu thức (3.6-15) vào (3.6-14), thì được tương quan giữa nhiệt lượng và độ thay đổi thể tích như sau:

$$\Delta V = (\beta/c_v) \cdot \Delta Q \quad (3.6-16)$$

Như vậy, độ tăng thể tích của vật tỷ lệ tuyến tính với nhiệt lượng đã được chuyển hoá từ năng lượng bức xạ mà vật hấp thụ được.

Các biểu thức từ (3.6-7) đến (3.6-16) cho thấy mối liên hệ giữa liều lượng bức xạ với độ gia tăng nhiệt độ hoặc độ gia tăng thể tích của vật hấp thụ năng lượng bức xạ trong nhiệt lượng kế đơn. Nhờ vậy, bằng cách đo độ tăng nhiệt độ

ΔT hoặc độ tăng thể tích ΔV của vật, thì có thể xác định được liều lượng bức xạ. Tuy nhiên, các giá trị ΔT và ΔV thường là rất nhỏ, nên những phép đo này rất tinh tế, khó thực hiện, khó áp dụng được một cách rộng rãi.

3.7. XÁC ĐỊNH LIỀU LƯỢNG BỨC XẠ LƯỢNG TỬ NĂNG LƯỢNG CAO

Bức xạ gamma của các nguồn đồng vị phóng xạ thường có năng lượng E_γ không vượt quá vài ba MeV. Trong thực tế, lượng tử còn được phát ra với năng lượng cao tới hàng chục, hàng trăm, thậm chí hàng nghìn MeV từ các máy gia tốc (khi hạt có điện tích được gia tốc đến năng lượng cao rồi bị hãm lại). Các mục trên đã trình bày những phương pháp đo liều lượng bức xạ lượng tử với năng lượng E_γ không vượt quá vài MeV. Mục này trình bày các nguyên tắc đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao.

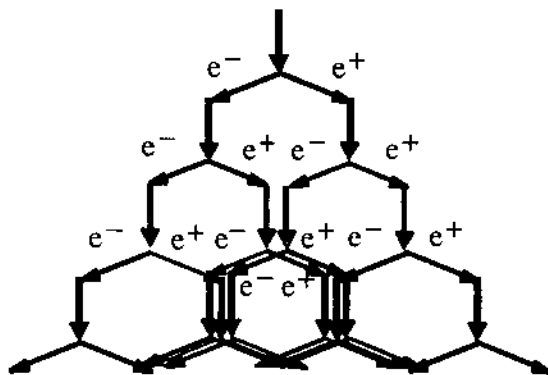
3.7.1. Đặc điểm đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao

Tương tác của lượng tử năng lượng cao có những đặc điểm khác so với của các lượng tử có năng lượng $E_\gamma \leq 3$ MeV. Chính những đặc điểm đó quyết định nguyên tắc đo liều lượng của bức xạ lượng tử năng lượng cao. Những đặc điểm đó là như sau.

a. Đặc điểm thứ nhất

Hiệu ứng tương tác cơ bản của bức xạ lượng tử năng lượng cao với vật chất là hiệu ứng tạo cặp êlectrôn – pôzitron. Các êlectrôn và pôzitron vừa được sinh ra có động năng rất cao, nên chúng mất phần lớn năng lượng do phát ra các lượng tử khi bị hãm trong quá trình chuyển động qua môi trường. Đến lượt mình, các lượng tử của bức xạ hãm vẫn có năng lượng cao, nên lại tham gia vào hiệu ứng tạo cặp $e^- - e^+$. Tiếp đó, các êlectrôn và pôzitron vừa được tạo thành lại

bị hãm chậm dần trong môi trường do phát ra các lượng tử; bức xạ hãm này lại tham gia vào hiệu ứng tạo cặp e^-e^+ .v.v. Các vòng lặp này cứ như vậy tiếp diễn, tạo nên những “thác” bức xạ (như được thể hiện trên hình H3.7-1). Càng về sau, năng lượng của các lượng tử và các hạt có điện tích (e^+ và e^-) càng giảm so với trước. Điều này lại là nguyên nhân làm cho các “thác” bức xạ bị tắt lụi dần. Khi năng lượng của lượng tử chỉ còn cỡ vài MeV, thì quá trình tạo cặp sẽ dần dần bị cạnh tranh và được thay thế bởi các quá trình tương tác khác là tán xạ Compton và hấp thụ quang điện. Còn đối với các hạt có điện tích – khi động năng của chúng không lớn, thì hiệu ứng phát lượng tử trong quá trình hãm sẽ dần dần bị cạnh tranh và được thay thế bởi hiệu ứng ion hoá; có nghĩa là phần năng lượng của chúng bị tiêu hao do ion hoá sẽ tăng dần.



Hình H3.7-1. Quá trình tạo “thác” bức xạ do tương tác của lượng tử năng lượng cao với vật chất. Ký hiệu: mũi tên đậm nét – lượng tử năng lượng cao; mũi tên mảnh nét – êlectrôn hoặc pôzitron; e^- – êlectrôn; e^+ – pôzitron.

Từ sơ đồ trên hình H3.7-1 có thể thấy rằng: lớp vật chất mà lượng tử đi qua lúc ban đầu càng dày, thì quá trình tạo thác bức xạ xảy ra càng mạnh. Bề dày tối thiểu để tạo thác được quyết định bởi năng lượng của lượng tử và bản chất của vật chất trong môi trường.

Trong quá trình tương tác của bức xạ lượng tử năng lượng cao, bên cạnh

hiệu ứng tạo cặp êlectrôn – pôzitron, còn xảy ra hiệu ứng huỷ pôzitron khi mỗi pôzitron đang chuyển động với tốc độ rất nhỏ (chuyển động nhiệt) kết hợp với một êlectrôn của môi trường, làm sinh ra hai lượng tử gamma với năng lượng $E_\gamma = 0,511 \text{ MeV}$ chuyển động ngược chiều nhau.

b. Đặc điểm thứ hai

Cũng tương tự như đối với bức xạ gamma năng lượng thấp, có thể xét tới sự biến đổi năng lượng của bức xạ lượng tử năng lượng cao thành động năng của các hạt có điện tích và năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp. Tuy nhiên, trong trường hợp này, các hạt có điện tích được truyền cho một động năng rất lớn, nên một phần lớn động năng của chúng lại biến đổi thành năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp (dưới dạng bức xạ hãm). Do đó, trong thực tế, thì:

Năng lượng của lượng tử năng lượng cao bị hấp thụ trong môi trường là nhỏ hơn so với năng lượng mà lượng tử này truyền cho các hạt có điện tích.

Như vậy, đối với bức xạ lượng tử năng lượng cao, thì hệ số truyền năng lượng không quyết định năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong môi trường. (Đối với bức xạ gamma thì bức tranh hoàn toàn ngược lại. Bởi lẽ, đối với bức xạ gamma thì động năng của các hạt có điện tích là không cao, nên động năng này được hấp thụ hoàn toàn trong một thể tích nhỏ của môi trường; do vậy nên hệ số truyền năng lượng quyết định hoàn toàn năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong môi trường đó).

Đối với bức xạ gamma (năng lượng thấp!), giữa hệ số làm yếu μ và hệ số truyền năng lượng μ_k có mối liên hệ đã được thể hiện bằng tương quan (1.1-5):

$$\mu = \mu_k + \mu_s \quad (1.1-5)$$

trong đó: hệ số μ_s đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp; hệ số μ_k đặc trưng cho sự biến đổi năng lượng của lượng tử ban đầu thành động năng của các êlectrôn và pôzitron trong quá trình tương tác của bức xạ lượng tử với môi trường.

Đối với bức xạ lượng tử năng lượng cao, tương tự như vậy, có thể coi hệ số làm yếu là tổng của hai thành phần như sau:

$$\mu = \mu_{k0} + \mu_{s0} \quad (3.7-1)$$

Tuy nhiên, các hệ số thành phần trong biểu thức (1.1-5) (trường hợp bức xạ gamma) và các hệ số thành phần trong biểu thức (3.7-1) cho bức xạ lượng tử năng lượng cao lại có ý nghĩa khác nhau.

Điểm khác nhau thứ nhất trong ý nghĩa của chúng là như sau. Hệ số μ_k quyết định phần năng lượng của lượng tử gamma trực tiếp biến thành năng lượng của lượng tử thứ cấp trong những lần tương tác của lượng tử gamma ban đầu với môi trường. Trong khi đó, hệ số μ_{k0} lại đặc trưng phần năng lượng của lượng tử năng lượng cao bị biến đổi thành năng lượng của bức xạ lượng tử thứ cấp trong quá trình hãm các hạt có điện tích được giải phóng do tương tác của các lượng tử năng lượng cao với môi trường.

Điểm khác nhau thứ hai trong ý nghĩa của chúng là như sau. Trong khi μ_k là hệ số truyền năng lượng, thì μ_{k0} không còn là hệ số truyền năng lượng nữa mà là hệ số hấp thụ năng lượng bức xạ. *Một cách hình thức, nếu áp dụng biểu thức (1.1-5) cho trường hợp bức xạ lượng tử năng lượng cao, thì giữa μ_{k0} và μ_k có mối liên hệ sau đây:*

$$\mu_{k0} = \beta \mu_k \quad (3.7-2)$$

trong đó β – hệ số xác định phần năng lượng của các hạt có điện tích (e^+ và e^-) bị hấp thụ trực tiếp do chúng ion hoá các phân tử của môi trường; hệ số này có giá trị $\beta < 1$. Như vậy, *trong trường hợp bức xạ lượng tử năng lượng cao thì hệ số truyền năng lượng μ_k tỷ lệ với hệ số tạo cặp e^-e^+ .*

Khi năng lượng của bức xạ lượng tử giảm dần tới vùng năng lượng của bức xạ gamma thông thường (tức là tới vùng $E_\gamma \leq 3 \text{ MeV}$), thì hệ số β có giá trị tăng dần và đạt tới $\beta=1$, do vậy nên giá trị của hệ số μ_{k0} tăng dần và đạt tới bằng giá trị của μ_k .

Xuất phát từ tương quan (3.7-2), mối liên hệ giữa suất liều bức xạ và cường độ bức xạ sẽ được biểu diễn như sau:

$$P = \mu_{k0,m} \cdot I = \beta \mu_{k,m} \cdot I \quad (3.7-3)$$

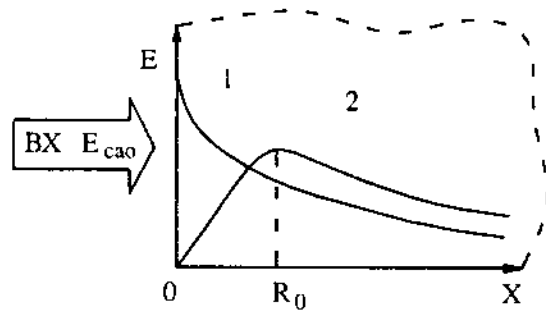
Hệ số β có giá trị phụ thuộc vào năng lượng của lượng tử và bản chất của vật chất trong môi trường. Do đó, hệ số μ_{k0} phụ thuộc vào năng lượng (của lượng tử) phức tạp hơn nhiều so với sự phụ thuộc tương ứng của hệ số μ_k . Chính vì vậy nên việc đo liều lượng bức xạ bằng đơn vị Roentgen cũng phức tạp hơn nhiều.

c. Đặc điểm thứ ba

Hai đặc điểm tương tác với môi trường như vừa nêu trên đây của bức xạ lượng tử năng lượng cao dẫn tới một số hiệu chỉnh về khái niệm cân bằng điện tử. Trước đây, khi xét bức xạ lượng tử năng lượng không cao, thì trạng thái cân bằng điện tử vẫn được hiểu là trạng thái mà năng lượng bức xạ biến đổi thành động năng của các điện tử trong khối lượng Δm của chất có giá trị đúng bằng năng lượng bị hấp thụ trong chính khối lượng đó; và, để thoả mãn điều kiện này, thì chỉ cần đảm bảo sao cho khối lượng Δm đó được bao bọc bởi một lớp vật chất có bề dày ít nhất là bằng hoặc lớn hơn quãng chạy của những điện tử nhanh nhất (ở trong lớp chất đó). *Đối với bức xạ lượng tử năng lượng cao, việc đảm bảo điều kiện cân bằng điện tử phức tạp hơn rất nhiều so với trong trường hợp bức xạ lượng tử năng lượng không cao.*

Giả sử, có một chùm song song bức xạ lượng tử năng lượng cao đi tới vuông góc với bề mặt của lớp tường chắn. Càng đi sâu vào lớp tường chắn, thì năng lượng mà bức xạ lượng tử truyền cho các hạt có điện tích trong một đơn vị khối lượng của môi trường sẽ càng giảm xuống (như được minh hoạ bằng đường cong số 1 trên hình H3.7-2). Trong khi đó, năng lượng mà các hạt có điện tích trao lại cho một đơn vị khối lượng của môi trường rồi bị hấp thụ mất trong đó sẽ tăng dần theo chiều sâu, rồi đạt tới giá trị cực đại tại độ sâu ứng với *bề dày của lớp hấp thụ X bằng quãng chạy cực đại R_0 của các hạt có điện tích*

(đường cong số 2 trên hình H3.7-2), và sau đó nếu tiếp tục đi theo chiều sâu – khi $X > R_0$ thì năng lượng này sẽ giảm dần (do bức xạ lượng tử năng lượng cao bị làm yếu dần trong lớp tường chắn). Kể từ khi độ sâu $X \geq R_0$, thì đường cong 2 nằm ở bên trên đường cong 1; lý do là vì vật chất trong mỗi lớp thể tích nhỏ bất kỳ ở độ sâu X_1 của tường chắn hấp thụ cả năng lượng của các hạt có điện tích đã được sinh ra trong các lớp thể tích ở độ sâu $X_2 < X_1$ với cường độ bức xạ lớn hơn (tức là $I_2 > I_1$).



Hình H3.7-2. Phân bố theo độ sâu của năng lượng mà bức xạ lượng tử năng lượng cao truyền cho các lớp vật chất của tường chắn, hoặc bị hấp thụ trong đó. Ký hiệu: mũi tên với dòng chữ “BXE_{cao}” – chùm song song của bức xạ lượng tử năng lượng cao đi tới vuông góc với bề mặt của tường chắn; X – độ sâu của lớp tường chắn; E – năng lượng bức xạ truyền cho lớp vật chất môi trường hoặc bị hấp thụ trong đó; R_0 – quãng chạy cực đại R_0 của các hạt có điện tích trong môi trường; 1 – phân bố theo độ sâu của năng lượng mà bức xạ lượng tử truyền cho các hạt có điện tích trong một đơn vị khối lượng của môi trường; 2 – phân bố theo độ sâu của năng lượng mà các hạt có điện tích trao lại cho một đơn vị khối lượng của môi trường rồi bị hấp thụ mất trong đó.

Trong vùng bức xạ năng lượng không cao, hai đường 1 và 2 sẽ trùng nhau kể từ độ sâu $X \geq R_0$. Lý do là vì sự làm yếu bức xạ gamma trở nên không đáng

kể và có thể bỏ qua khi tường chắn có bề dày lớn hơn R_0 (tương đương với điều kiện $\mu R_0 \ll 1$). Trong trường hợp này, khi E_γ tăng lên thì hệ số μ giảm xuống, nhưng quãng chạy R_0 lại tăng lên; do đó điều kiện $\mu R_0 \ll 1$ được đảm bảo trong một khoảng năng lượng khá rộng.

Đối với bức xạ lượng tử có năng lượng bất kỳ nói chung, thì trạng thái cân bằng được đảm bảo khi lớp tường chắn có bề dày bằng quãng chạy R_0 , nếu thoả mãn điều kiện $\mu R_0 \ll 1$.

Trong vùng bức xạ năng lượng cao, khi lượng tử có năng lượng tăng lên, thì hệ số μ cũng tăng lên; do đó tích μR_0 tăng nhanh, làm cho điều kiện $\mu R_0 \ll 1$ nhanh chóng không được thoả mãn, nên không thể bỏ qua sự làm yếu bức xạ trong lớp tường chắn có bề dày bằng R_0 . Thí dụ: khi đi qua lớp tường chắn với bề dày R_0 , thì bức xạ lượng tử với năng lượng $E_\gamma = 100$ MeV bị làm yếu mất 30%, trong khi đó bức xạ gamma của nguồn ^{60}Co (có năng lượng $E_{\gamma,1} = 1,17$ MeV và $E_{\gamma,2} = 1,33$ MeV) thì chỉ bị làm yếu đi có 1% mà thôi.

Đối với bức xạ lượng tử năng lượng cao, trạng thái cân bằng điện tử chỉ xảy ra ở một độ sâu nhất định $X_0 < R_0$. Trạng thái này được gọi là trạng thái cân bằng tuyệt đối.

Khi $X_0 > R_0$, hai đường cong 1 và 2 có một đoạn song song với nhau. Điều này có nghĩa là năng lượng hấp thụ được tỷ lệ với năng lượng bức xạ truyền cho các hạt có diện tích (mặc dù hai giá trị này không bằng nhau). Sự tỷ lệ của hai đại lượng này ứng với trạng thái cân bằng tương đối.

(Trong vùng năng lượng không cao, hai trạng thái cân bằng tương đối và cân bằng tuyệt đối là trùng với nhau).

Hiện nay mới chỉ đo chính xác được năng lượng trung bình tạo cặp ion đối với các loại bức xạ lượng tử có năng lượng không quá vài chục MeV. Các phương pháp ion hoá được dùng để đo cường độ bức xạ lượng tử năng lượng cao khá chính xác. Tuy nhiên các phương pháp đo liều trực tiếp còn chưa được nghiên cứu kỹ.

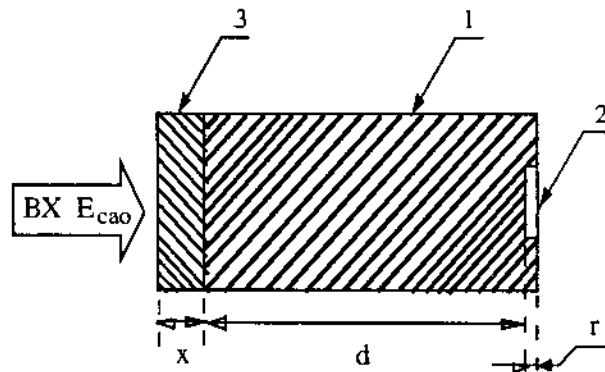
3.7.2. Các phương pháp đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao

3.7.2.1. Đo cường độ bức xạ bằng buồng thành dày

Buồng thành dày được dùng để đo cường độ bức xạ lượng tử có năng lượng cao tới hàng trăm MeV. Hình H3.7-3 minh hoạ cấu tạo của buồng thành dày. Phần chủ yếu của buồng là một khối dày (1). Ở phía đáy sau của khối này có một hốc khí (2) với kích thước r rất nhỏ so với quãng chạy R_0 của các điện tử được giải phóng trong chất khí. Lớp vật liệu với bề dày là d kể từ mặt đáy trước của khối (1) tới hốc khí ở phía đáy sau của khối này được gọi là thành của buồng. Bề dày của thành buồng có giá trị lớn hơn hoặc bằng quãng chạy của điện tử trong vật liệu của thành buồng ($d \geq R_0$). Ở phía trước của khối dày (1) có thể đặt thêm một lớp chắn phụ (3) làm từ vật liệu khác để làm giảm sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ.

Cường độ dòng điện bão hoà trong hốc khí (2) phản ánh cường độ bức xạ lượng tử tới tương tác với buồng thành dày.

Giả sử, có hai chùm bức xạ lượng tử đơn năng $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$ với cường độ bức



Hình H3.7-3. Sơ đồ khối của buồng thành dày.

Ký hiệu: 1 – khối vật liệu dày (làm thành buồng); 2 – hốc khí kích thước nhỏ; 3 – lớp chắn phụ.

xạ là I_1 và I_2 tương ứng. Dưới đây sẽ xét dòng điện gây bởi chuyển động của các hạt có điện tích trong chất khí trong hai trường hợp: khi buồng có lớp chắn phụ (3) và khi không có lớp chắn phụ này.

Khi không có lớp chắn phụ thì tương quan giữa cường độ bức xạ I_1 và I_2 với dòng điện $i_{1,0}$ và $i_{2,0}$ được xác định như sau:

$$i_{1,0} = aS_1 I_1 \quad (3.7-4.a)$$

$$i_{2,0} = aS_2 I_2 \quad (3.7-4.b)$$

trong đó $a = \text{const}$; S_1 và S_2 – độ nhạy của buồng, quyết định phần năng lượng bức xạ bị tiêu hao do ion hoá các nguyên tử, phân tử của vật liệu thành buồng trong khoảng bề dày bằng R_0 ở phía trước hốc khí; chỉ số 1 và 2 – ứng với các cường độ bức xạ I_1 và I_2 .

Khi có lớp chắn phụ với bề dày là x , thì dòng điện i_1 và i_2 được xác định như sau:

$$i_1 = i_{1,0} e^{-\mu_1 x} \quad (3.7-5.a)$$

$$i_2 = i_{2,0} e^{-\mu_2 x} \quad (3.7-5.b)$$

trong đó $i_{1,0}$ và $i_{2,0}$ được xác định theo các biểu thức (3.7-4.a và .b); μ_1 và μ_2 – hệ số làm yếu các chùm bức xạ lượng tử đơn năng $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$ tương ứng.

Độ nhạy sẽ không phụ thuộc vào năng lượng bức xạ nếu điều kiện $I_1 = I_2$ kéo theo điều kiện $i_1 = i_2$. Nghĩa là: nếu hai chùm bức xạ đơn năng $E_{\gamma 1}$ và $E_{\gamma 2}$ có cường độ như nhau mà dòng điện phát sinh trong hốc khí của buồng thành dày cũng có giá trị như nhau, thì độ nhạy của buồng thành dày đó sẽ không phụ thuộc vào năng lượng bức xạ. Bằng cách chia hai biểu thức (3.7-5.a và .b) cho nhau, rồi kết hợp điều kiện này với các biểu thức (3.7-4.a và .b) sẽ tìm được *bề dày x_0 cần thiết của lớp chắn phụ để buồng ion hoá thành dày có độ nhạy không phụ thuộc vào năng lượng của bức xạ lượng tử năng lượng cao*:

$$x_0 = \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \ln \frac{S_1}{S_2} \quad (3.7-6)$$

trong đó các hệ số μ_1 , μ_2 và S_1 , S_2 đều phụ thuộc vào năng lượng của lượng tử.

Bằng cách lập đường phụ thuộc $x_0 = f(E_\gamma)$ trong một khoảng năng lượng nhất định, sẽ tìm được bề dày x_0 tối ưu cho khoảng năng lượng đó.

3.7.2.2. Đo cường độ bức xạ lượng tử bằng phương pháp hấp thụ hoàn toàn

Giả sử chùm bức xạ lượng tử đi tới theo phương vuông góc với bề mặt (phẳng) của một vật hấp thụ được coi là vô cùng dày. Khi xuyên qua một vật vô cùng dày, lượng tử sẽ bị hấp thụ hoàn toàn. Năng lượng của bức xạ lượng tử bị hấp thụ hoàn toàn trong mỗi đơn vị thời gian, tính trên một đơn vị diện tích bề mặt vừa nêu của vật, có giá trị đúng bằng cường độ của chùm bức xạ.

Giả sử có hai điều kiện giả thiết sau đây được thoả mãn:

- Ở độ sâu x của vật, có một hốc khí với bề dày h rất nhỏ so với quãng chạy R_0 của các hạt có điện tích (e^+ và e^-) trong chất khí đó;
- Phần năng lượng bức xạ bị tiêu hao bởi gây ra các phản ứng hạt nhân và bởi làm thay đổi cấu trúc hoá-lý của vật liệu là không đáng kể so với phần năng lượng bức xạ bị tiêu hao do iôn hoá và kích thích các phân tử của môi trường.

Khi đó, theo tương quan Bragg-Gray (3.1-22), thì năng lượng $d(\Delta E)$ của bức xạ lượng tử bị hấp thụ trong lớp vật liệu với bề dày bằng dx bao quanh hốc khí nằm ở độ sâu x sẽ được xác định như sau:

$$d(\Delta E) = q(x) \cdot \omega \left(\frac{S_z}{S_{khí}} \right) dx \quad (3.7-7)$$

trong đó $q(x)$ – số cặp iôn được tạo thành trong một đơn vị thời gian trong hốc

khí có bề dày một đơn vị và nằm ở độ sâu x ; ω – năng lượng trung bình cần tiêu hao để tạo được một cặp ion trong chất khí; $S_Z/S_{khí}$ – tỷ số mất năng lượng do hiệu ứng ion hoá trong chất hấp thụ và trong chất khí (trong hốc khí).

Nếu dịch chuyển hốc khí theo chiều dày của vật hấp thụ, và, đo dòng điện ion hoá bão hoà trong chất khí đó, có thể xác định được năng lượng bức xạ bị hấp thụ hoàn toàn trong vật hấp thụ:

$$\Delta E = \frac{\omega}{e} \cdot \left(\frac{S_Z}{S_{khí}} \right) \cdot \int_0^{\infty} i(x) dx \quad (3.7-8)$$

trong đó e – điện tích của các hạt có điện tích trong chất khí; $i(x)$ – dòng điện bão hoà trong hốc khí nằm ở độ sâu x trong vật hấp thụ vô cùng dày.

Nếu chùm bức xạ lượng tử có tiết diện là S_γ , thì cường độ của nó sẽ là:

$$I = \frac{\Delta E}{S_\gamma} \quad (3.7-9)$$

trong đó ΔE – năng lượng bức xạ bị hấp thụ hoàn toàn trong vật hấp thụ, được xác định theo biểu thức (3.7-8).

Các biểu thức (3.7-8 và -9) là cơ sở vật lý của dụng cụ đo cường độ bức xạ lượng tử năng lượng cao. Dụng cụ này là một buồng ion hoá phẳng, được tạo thành từ nhiều khoảng khí bị ngăn cách với nhau bởi những lớp chất hấp thụ. Bề dày của các khoảng khí và những lớp hấp thụ ngăn cách chúng được lựa chọn thích hợp, sao cho tổng các dòng điện ion hoá của tất cả các khoảng khí tỷ lệ với tích phân ở vế phải trong biểu thức (3.7-8), và do đó tỷ lệ với cường độ bức xạ I .

Dụng cụ kiểu này cho phép đo được cường độ bức xạ lượng tử với năng lượng của lượng tử tới khoảng 100 MeV.

CHƯƠNG 4

XÁC ĐỊNH LIỀU LƯỢNG BỨC XẠ NƠTRÔN

Chương 4 giới thiệu tất cả những phương pháp chủ yếu được sử dụng trong lĩnh vực xác định liều lượng bức xạ nơtrôn. Xác định liều lượng bức xạ nơtrôn là một vấn đề rất phức tạp. Sự phức tạp này bắt nguồn từ tính đa dạng và phong phú trong tương tác của nơtrôn với vật chất, cũng như do sự phức tạp của các ảnh hưởng sinh học của chúng đối với cơ thể người. Mục 4.1 giới thiệu những đặc điểm cần chú ý trong xác định liều lượng và bảo vệ an toàn bức xạ nơtrôn. Các mục từ 4.2 đến 4.11 giới thiệu những biện pháp kỹ thuật được sử dụng để xác định và đánh giá liều lượng bức xạ nơtrôn. *Nội dung của chương 4 được trình bày theo dàn ý sau đây:*

- 4.1. Một số đặc điểm trong xác định liều lượng và bảo vệ an toàn bức xạ nơtrôn
 - 4.1.1. Biến đổi năng lượng của nơtrôn trong môi trường (tr. 209)
 - 4.1.2. Liều hấp thụ nơtrôn nhiệt trong cơ thể ($E_n < 0,5$ eV) (212)
 - 4.1.3. Suất liều hấp thụ nơtrôn nhanh ($0,5$ MeV $< E_n < 10$ MeV) (215)
 - 4.1.4. Tác dụng sinh học của nơtrôn năng lượng trung gian và vai trò của các va chạm hạt nhân (218)
 - 4.1.5. Sự phụ thuộc của liều hấp thụ vào năng lượng nơtrôn (224)
- 4.2. Đo suất liều nơtrôn nhanh bằng buồng iôn hoá (227)
 - 4.2.1. Buồng iôn hoá có thành bằng khí (228)
 - 4.2.2. Buồng iôn hoá nhỏ thành dày (232)
 - 4.2.2.1. Khả năng thực tế thoả mãn ba điều kiện Bragg-Gray (232)
 - 4.2.2.2. Buồng iôn hoá không đồng nhất (236)
 - 4.2.2.3. Buồng iôn hoá đồng nhất (237)
 - 4.2.3. Nhận xét (241)
- 4.3. Đo suất liều nơtrôn nhanh bằng ống đếm tỷ lệ (242)

- 4.3.1. Nguyên tắc của phương pháp đo (242)
- 4.3.2. Đo suất liều neutron nhanh trong trường hỗn hợp n-gamma (246)
- 4.4. Đo liều neutron nhanh bằng phương pháp kích hoạt (251)
 - 4.4.1. Nguyên tắc đo liều neutron bằng phương pháp kích hoạt (251)
 - 4.4.2. Xác định liều neutron nhiệt (254)
 - 4.4.3. Xác định liều neutron năng lượng trung gian (257)
 - 4.4.4. Xác định liều neutron nhanh (262)
 - 4.4.5. Xác định liều neutron phổ phức tạp (266)
 - 4.4.6. Nhận xét (266)
- 4.5. Đo liều neutron bằng phương pháp đếm vết (269)
 - 4.5.1. Giới thiệu chung (269)
 - 4.5.2. Nguyên tắc đo liều neutron bằng phương pháp đếm vết (270)
 - 4.5.3. Về vật liệu ghi vết và hiện vết (276)
 - 4.5.4. Nhận xét (279)
- 4.6. Phương pháp nhũ tương ảnh (280)
 - 4.6.1. Đo liều neutron năng lượng trung gian và neutron nhanh (280)
 - 4.6.2. Đo liều neutron nhiệt (282)
 - 4.6.2.1. Dùng phim gamma kết hợp với màn tăng cường pha bo (282)
 - 4.6.2.2. Dùng phim gamma với màn cộng hưởng bằng cadmi (285)
 - 4.6.3. Đo liều bức xạ hỗn hợp n-gamma (286)
- 4.7. Phương pháp nhấp nháy (289)
- 4.8. Sử dụng hiệu ứng làm chậm để đo liều neutron (290)
- 4.9. Phương pháp hoá học (292)
- 4.10. Xác định liều neutron bằng dụng cụ đo liều gamma cá nhân (294)
- 4.11. Đánh giá liều neutron do sự cố hoặc tai nạn hạt nhân (296)
 - 4.11.1. Đánh giá liều theo độ phóng xạ cảm ứng của một số đồng vị trong cơ thể (298)
 - 4.11.1.1. Đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu (299)
 - 4.11.1.2. Đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{32}P trong lông và tóc (302)
 - 4.11.2. Đánh giá liều neutron theo độ phóng xạ cảm ứng của đồ vật mang theo (305)

4.1. MỘT SỐ ĐẶC ĐIỂM

XÁC ĐỊNH LIỀU LƯỢNG BỨC XẠ NƠTRÔN

4.1.1. Biến đổi năng lượng của nơtrôn trong môi trường

Mọi quá trình tương tác của nơtrôn đều được quyết định bởi thành phần nguyên tử của môi trường và động năng của nơtrôn. Trong thực tế nơtrôn có thể được phân chia theo nhiều nhóm năng lượng khác nhau, tùy thuộc lĩnh vực nghiên cứu hoặc đặc điểm tương tác của nơtrôn với các loại đối tượng cụ thể. Ranh giới giữa các nhóm chỉ có tính chất quy ước để tiện sử dụng hoặc nghiên cứu. Để tiện sử dụng cho các mục đích sinh học và y học phóng xạ, có thể dùng bảng phân loại nơtrôn theo năng lượng như sau:

<u>Stt</u>	<u>Nhóm nơtrôn</u>	<u>Năng lượng nơtrôn</u>
1.	Nơtrôn nhiệt	: $< 0,5 \text{ eV}$
2.	Nơtrôn năng lượng trung gian	: $0,5 \text{ eV} \div 0,5 \text{ MeV}$
3.	Nơtrôn nhanh	: $\sim (0,5 \div 10) \text{ MeV}$
4.	Nơtrôn rất nhanh	: $> 10 \text{ MeV}$

Ở đây chủ yếu sẽ xét tới các nơtrôn có năng lượng $E_n \leq 10 \text{ MeV}$.

Sự biến đổi năng lượng của nơtrôn diễn ra trong mỗi sự kiện tương tác của nó với hạt nhân nguyên tử của môi trường. Khi đi qua môi trường, nơtrôn có thể tham gia vào các loại tương tác như: tán xạ đàn hồi, tán xạ không đàn hồi, phản ứng (n, γ) , phản ứng tạo các hạt có điện tích, phản ứng phân chia hạt nhân. Xác suất xảy ra các quá trình này phụ thuộc vào động năng của nơtrôn và loại hạt nhân đồng vị tham gia tương tác.

Trong quá trình tán xạ đàn hồi, nơtrôn đổi hướng chuyển động và một phần động năng của nó được biến đổi thành động năng của hạt nhân trong khi tổng động năng của toàn hệ “nơtrôn + hạt nhân” vẫn giữ nguyên không thay đổi. Còn trong quá trình tán xạ không đàn hồi thì nhất thiết có một phần động

năng của neutron bị tiêu hao để kích thích hạt nhân tương tác với nó, ngoài ra một phần động năng của neutron còn có thể bị tiêu hao để biến đổi thành động năng của hạt nhân này. Như vậy, tán xạ không đàn hồi chỉ xảy ra khi động năng của neutron bằng hoặc lớn hơn mức năng lượng kích thích của hạt nhân; quá trình này chỉ có ý nghĩa thực tế đối với các neutron nhanh. Trong khi đó tán xạ đàn hồi có thể xảy ra với neutron năng lượng bất kỳ. Do vậy tán xạ đàn hồi là quá trình hiệu nghiệm nhất để làm chậm neutron tới năng lượng chuyển động nhiệt.

Trong mỗi sự kiện tán xạ đàn hồi, hạt nhân được neutron truyền cho một động năng có giá trị E_A bằng:

$$E_A = \alpha E_{n0} \cos^2 \varphi \quad (4.1-1)$$

$$\alpha = \frac{4m_n M_A}{(m_n + M_A)^2} \cong \frac{4A}{(1+A)^2} \quad (4.1-2)$$

với E_{n0} – động năng của neutron trước khi xảy ra sự kiện tán xạ; m_n – khối lượng của neutron; M_A – khối lượng của hạt nhân; φ – góc bay ra của hạt nhân so với hướng chuyển động ban đầu của neutron trong hệ tọa độ Phòng Thí Nghiệm; A – số khối của hạt nhân. Trong biểu thức (4.1-2) đã coi tỷ số $M_A/m_n=A$ (với sai số khoảng (0,5÷1)%).

Tính trung bình, trong mỗi sự kiện tán xạ đàn hồi thì động năng của neutron bị giảm mất một lượng bằng:

$$\Delta E_1 = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) E_{n0} \quad (4.1-3)$$

Động năng lớn nhất mà hạt nhân có thể thu được từ một sự kiện va chạm đàn hồi với neutron có giá trị bằng:

$$E_{A,max} = \alpha E_{n0} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_{n0} \quad (4.1-4)$$

Đối với neutron có động năng không lớn quá 5-7 Mev, thì tán xạ đàn hồi có tính đối xứng cầu trong hệ tọa độ Tâm Khối lượng. Do đó xác suất tạo hạt nhân lùi với động năng E_A trong khoảng (0; $E_{A,max}$) là bằng nhau, và động năng

trung bình của các hạt nhân lù thu được trong mỗi sự kiện tán xạ sẽ có giá trị bằng:

$$\overline{E_A} = \frac{E_{A,max}}{2} = \frac{2A}{(A+1)^2} \cdot E_{n0} = \delta \cdot E_{n0} \quad (4.1-5)$$

Hạt nhân càng nhẹ thì phần động năng mà nó thu được trong mỗi sự kiện tán xạ đàn hồi của nơtron sẽ càng lớn. Bảng B4.1-1 cho thấy giá trị δ đối với một số loại hạt nhân.

Bảng B4.1-1. Phần động năng mà hạt nhân thu được (δ) trong mỗi sự kiện tán xạ đàn hồi của nơtron

Loại hạt nhân	^1H	^{12}C	^{14}N	^{16}O
Số khối A	1	12	14	16
$\delta = 2A/(A+1)^2$	0,500	0,142	0,125	0,111

Một chùm nơtron ban đầu là đơn năng, sau quá trình va chạm đàn hồi với các hạt nhân của môi trường, sẽ trở nên có phân bố năng lượng liên tục và phần lớn nơtron sẽ ở trong vùng có động năng thấp. Trong phân bố này có một giá trị năng lượng trung bình $\overline{E}$ mà số nơtron có động năng $E_n > \overline{E}$ bằng số nơtron có động năng $E_n < \overline{E}$. Giá trị $\overline{E}$ được xác định theo biểu thức sau đây:

$$\overline{E} = E_{n0} \cdot e^{k\gamma} \quad (4.1-6)$$

$$\gamma = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1} \quad (4.1-7)$$

trong đó k – số sự kiện va chạm đàn hồi.

Bên cạnh các quá trình tán xạ đàn hồi, còn có một loại tương tác nữa của nơtron có thể xảy ra trên hầu hết các loại hạt nhân. Đó là phản ứng (n, γ) . Phản ứng (n, γ) là loại tương tác đặc trưng của các nơtron nhiệt, trong đó hạt nhân bắt nơtron nhiệt và phát lượng tử gamma kèm theo. Lượng tử gamma được phát ra thường có năng lượng cỡ từ vài trăm keV tới vài MeV.

Phản ứng tạo hạt có điện tích (p hoặc α) thường xảy ra với xác suất lớn khi neutron nhanh tương tác với các hạt nhân nhẹ; còn đối với neutron chậm thì xác suất này thường là nhỏ, trừ 4 trường hợp đặc biệt là các phản ứng sau đây: ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$; ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$; ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ và ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$.

Cần chú ý rằng trong các phản ứng (n, γ) và các phản ứng tạo hạt có điện tích như (n,p) và (n, α), thì toàn bộ động năng của neutron bị biến đổi thành năng lượng của bức xạ thứ cấp. Còn trong các quá trình tán xạ (dù là đàn hồi hoặc không đàn hồi), thì chỉ có một phần động năng của neutron bị biến đổi thành năng lượng của bức xạ thứ cấp mà thôi.

Các hạt có điện tích và các hạt nhân lùn (vừa được tạo thành do tương tác của neutron) dễ dàng bị môi trường hấp thụ. Trong khi đó, các lượng tử sinh ra bởi phản ứng (n, γ) thì có thể xuyên ra khỏi môi trường mà không bị làm yếu đáng kể. Các neutron tán xạ cũng có thể đi ra khỏi môi trường trong khi vẫn còn chưa mất hết năng lượng ban đầu.

Như vậy, cũng tương tự như đối với bức xạ gamma, trong tương tác của neutron với vật chất có thể phân biệt năng lượng bị hấp thụ của neutron và năng lượng biến đổi thành năng lượng bức xạ thứ cấp. Năng lượng bị hấp thụ của neutron là phần năng lượng của bức xạ thứ cấp thực tế đã tiêu hao để ion hoá và kích thích các phân tử và nguyên tử của môi trường.

4.1.2. Liều hấp thụ neutron nhiệt trong cơ thể ($E_n < 0,5 \text{ eV}$)

Hiệu ứng sinh học của neutron nhiệt chủ yếu được gây bởi quá trình hấp thụ neutron nhiệt trong các phản ứng ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ và ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$. Bảng B4.1-2 cho thấy một số đặc trưng của hai phản ứng này.

Ngoài hai phản ứng này, khi tương tác với cơ thể, neutron nhiệt còn có thể tham gia vào một số phản ứng khác nữa. Những phản ứng này làm tăng thêm liều hấp thụ neutron nhiệt, nhất là ở những tổ chức cơ thể mà các đồng vị đó tập trung với nồng độ cao (như ${}^{31}\text{P}$ ở trong xương). Tuy nhiên, vai trò của các phản

ứng này là không đáng kể đối với tác dụng sinh học của nơtron nhiệt trong các tổ chức cơ thể. Vì vậy dưới đây chỉ trình bày ảnh hưởng của hai phản ứng chủ yếu là $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ và $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$.

Bảng B4.1-2. Một số đặc trưng của hai phản ứng quan trọng gây bởi nơtron nhiệt trong cơ thể

<i>Phản ứng gây bởi nơtron nhiệt</i>	<i>Tiết diện của phản ứng, barn</i>	<i>Năng lượng của sản phẩm phản ứng, MeV (và xác suất tạo sản phẩm trong phản ứng, %)</i>
$^1\text{H}(n_{\text{nhiệt}},\gamma)^2\text{H}$	0,3326	E_γ : 2,23 (100%)
$^{14}\text{N}(n_{\text{nhiệt}},p)^{14}\text{C}$	1,83	E_p : 0,6(100%). Hạt nhân lồi ^{14}C có động năng bằng 40keV.

a. Phản ứng $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$

Phản ứng $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ có tiết diện bằng 0,332 barn và làm phát ra lượng tử với năng lượng $E_\gamma = 2,23$ MeV. Các lượng tử này tương tác với cơ thể, gây nên một thành phần đáng kể trong liều hấp thụ bức xạ của cơ thể. Thành phần này được phân bố theo chiều sâu của tổ chức cơ thể tùy thuộc vào phân bố không gian của nơtron nhiệt và đặc điểm tương tác của bức xạ gamma với tổ chức cơ thể. Việc tính toán để xác định phân bố của thành phần liều gây bởi bức xạ gamma là rất phức tạp vì có quá trình tán xạ nhiều lần. Do vậy trong thực tế người ta thường xác định phân bố này bằng các mô hình thực nghiệm.

b. Phản ứng $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$

Phản ứng $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ xảy ra với tiết diện bằng 1,83 barn, tạo nên prôtôn có động năng $E_p = 0,6$ MeV và hạt nhân lồi ^{14}C có động năng bằng 40 keV. Hạt nhân lồi ^{14}C , là hạt nhân phân rã beta, phát ra hạt beta có động năng cực đại $E_{\beta,\text{max}} = 156$ keV (động năng trung bình ~ 50 keV) với chu kỳ rã nửa $T_{1/2} = 5730$

năm. Do chu kỳ rã nửa của hạt nhân ^{14}C rất lớn như vậy, nên có thể bỏ qua vai trò của quá trình phân rã beta của nó khi xét ảnh hưởng của quá trình này đối với tác dụng sinh học của neutron nhiệt trong phản ứng $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$. Hiện nay vai trò sinh học của hạt nhân lồi ^{14}C còn chưa được xác định rõ, tuy nhiên trọng số bức xạ của nó không nhỏ – $Q_{\text{TS}} > 10$.

Prôtôn được sinh ra bởi phản ứng nêu trên có quãng chạy trong tổ chức cơ thể sống R_p cỡ 15μ (micrômét). Do prôtôn có quãng chạy rất ngắn như vậy, nên có thể coi toàn bộ năng lượng giải phóng bởi phản ứng $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ là được hấp thụ tập trung ở ngay lân cận của điểm mà neutron nhiệt bị hấp thụ. Bởi vậy phân bố liều được quyết định bởi phân bố không gian của mật độ neutron nhiệt. Mặt khác, prôtôn được sinh ra trong phản ứng này có giá trị trung bình của độ truyền năng lượng cục bộ $\langle L \rangle$ cỡ $65 \text{ keV}/\mu$, nên nó có hệ số phẩm chất $Q \sim 10$ (xem bảng B1.4-2) – nghĩa là hiệu suất sinh học của nó rất lớn. Do đó các prôtôn sinh bởi phản ứng này có vai trò quan trọng đối với tác dụng sinh học của neutron nhiệt.

c. Đánh giá suất liều neutron nhiệt

Giả sử có một dòng neutron nhiệt tới thẳng góc với bề mặt của tổ chức sinh học và mật độ thông lượng neutron nhiệt là $\Phi [n/(cm^2.s)]$.

Có thể đánh giá thành phần suất liều gây bởi mỗi sản phẩm của các phản ứng $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ và $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ theo công thức sau đây:

$$P_{x,Y} [\text{Sv/s}] = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi \cdot (n_Y/\rho) \cdot \sigma_Y \cdot \Delta E_x \cdot Q_x \quad (4.1-8)$$

trong đó Y – hạt nhân bia trong phản ứng gây bởi neutron nhiệt được xét; x – hạt (hoặc lượng tử) được sinh ra trong phản ứng đó; n_Y – số hạt nhân bia có trong một đơn vị thể tích của tổ chức cơ thể (cm^{-3}); ρ – mật độ vật chất trong tổ chức cơ thể (gcm^{-3}); σ_Y – tiết diện của phản ứng $Y(n,x)$ được xét tới [cm^2]; $\Delta E_x [\text{MeV}]$ – năng lượng bị hấp thụ của sản phẩm x trong tổ chức cơ thể; Q_x – trọng số của bức xạ mà các phân tử của nó là sản phẩm x; $P_{x,Y} [\text{Sv/s}]$ – suất liều tương đương gây bởi sản phẩm x của phản ứng gây bởi neutron nhiệt trên hạt

nhân Y; $1,6 \cdot 10^{-10}$ – hệ số chuyển đổi từ thứ nguyên [MeV/g] sang thành thứ nguyên [Sv].

Trên cơ sở biểu thức (4.1-8) và bảng B.2.3-1, có thể đánh giá các thành phần suất liều như sau:

$$P_{\gamma, H} [\text{Sv/s}] = (2,5 \pm 4,0) \cdot 10^{-12} \cdot \Phi [n/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (4.1-9)$$

$$P_{p, N} [\text{Sv/s}] \approx 2,5 \cdot 10^{-12} \cdot \Phi [n/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (4.1-10)$$

$$P_{C-14, N} [\text{Sv/s}] \approx (\Delta E_{C-14} \cdot Q_{C-14}) / (\Delta E_p \cdot Q_p) \cdot P_{p, N} [\text{Sv/s}] \quad (4.1-11)$$

Do đó có thể đánh giá suất liều gây bởi hai phản ứng chủ yếu là $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ và $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ của nơtron nhiệt trong cơ thể theo công thức sau đây:

$$P = P_{\gamma, H} [\text{Sv/s}] + P_{p, N} [\text{Sv/s}] + P_{C-14, N} [\text{Sv/s}] \approx (6 \pm 9) \cdot 10^{-12} \cdot \Phi [n/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \quad (4.1-12)$$

4.1.3. Suất liều hấp thụ nơtron nhanh ($0,5 \text{ MeV} < E_n < 10 \text{ MeV}$)

Như trong mục 4.1.1 đã trình bày rõ, quá trình quan trọng nhất quyết định sự hấp thụ năng lượng của nơtron nhanh trong tổ chức cơ thể là quá trình tán xạ đàn hồi. Trong thực tế, khoảng 95% năng lượng của nơtron nhanh bị hấp thụ trong tổ chức cơ thể là do tán xạ đàn hồi. Hầu như toàn bộ năng lượng này là bị hấp thụ do tán xạ đàn hồi của nơtron nhanh trên các hạt nhân nguyên tử H, C, N và O. Các hạt nhân C, N và O có đóng góp cỡ như nhau vào hấp thụ năng lượng nơtron nhanh. Đóng góp tổng cộng của cả ba loại hạt nhân lõi C, N, O chỉ chiếm cỡ 10% toàn bộ năng lượng bị hấp thụ của nơtron nhanh; còn phần đóng góp của nơtron đã bị nhiệt hoá thì thường chỉ chiếm khoảng 5–10%.

Riêng hydro: chiếm tới 60% tổng số nguyên tử trong tổ chức cơ thể mềm, mà prôtôn lõi lại có động năng lớn gấp 3 - 4 lần so với của các hạt nhân lõi là C, N, O (xem bảng B4.1-1), và, có tiết diện tán xạ lớn hơn so với của ba loại hạt nhân này. Vì vậy đóng góp của các prôtôn lõi chiếm tới khoảng 80% toàn bộ năng lượng bị hấp thụ của nơtron nhanh. Điều này đôi khi cho phép bỏ qua ảnh

hường của mọi nguyên tố khác có trong tổ chức mềm và chỉ kể tới thành phần chủ yếu là đóng góp của các hạt nhân hydro khi tính liều hấp thụ neutron nhanh.

Có thể tính suất liều hấp thụ P gây bởi neutron nhanh do tán xạ trên các hạt nhân loại i ở lân cận một điểm nào đó trong tổ chức mềm của cơ thể theo biểu sau đây:

$$P_{[Gy/s]} = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{\Phi}{\rho} \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \overline{E_i} = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \overline{E_i} \quad (4.1-13)$$

với Φ [$n/(cm^2 \cdot s)$] – mật độ thông lượng neutron; n_i – số hạt nhân loại i trong $1cm^3$ tổ chức mềm của cơ thể; σ_i – tiết diện tán xạ trên hạt nhân loại i ; $\overline{E_i}$ [MeV] – động năng trung bình của hạt nhân lùi loại i ; hạt nhân loại i – có thể là H, C, N hoặc O; còn mật độ vật chất trong tổ chức mềm của cơ thể $\rho = 1[g/cm^3]$.

Nếu trong mật độ thông lượng neutron nhanh Φ không kể tới thành phần gây bởi tán xạ nhiều lần của neutron trong thể tích bị chiếu xạ, thì giá trị thu được từ biểu thức (4.1-13) đôi khi còn được gọi là suất liều hấp thụ do va chạm đầu tiên. Suất liều hấp thụ do va chạm đầu tiên là suất liều gây bởi một chùm hẹp song song của neutron nhanh.

Nếu một chùm hẹp song song neutron nhanh chiếu xạ một thể tích nằm ở độ sâu $x[cm]$, thì suất liều hấp thụ do va chạm đầu tiên có phân bố theo độ sâu như sau:

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\frac{x}{l}} \quad (4.1-14)$$

trong đó $l[cm]$ – quãng chạy tự do của neutron trong tổ chức mềm bị chiếu xạ bởi chùm hẹp song song neutron với động năng E_n . Trong khoảng E_n từ 0,1 MeV tới 50 MeV, quãng chạy tự do của neutron được xác định theo biểu thức sau đây:

$$l[cm] = 2,8 \sqrt{E_n [MeV]} \quad (4.1-15)$$

Suất liều hấp thụ trên bề mặt $P_0[Gy/s]$ có thể tính theo biểu thức (4.1-13) cho bốn loại hạt nhân là H, C, N và O. Do đóng góp của ba loại hạt nhân C, N

và O chỉ chiếm cỡ 10% năng lượng của neutron nhanh bị hấp thụ, nên trong biểu thức (4.1-13) có thể coi như sau:

$$\sum_{(i)} n_i \sigma_i \overline{E_i} \approx a \overline{E_p} \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \quad (4.1-16)$$

với hệ số $a \approx 1$; $\overline{E_p}$ – động năng trung bình của proton nhân lùi.

Mặt khác, theo định nghĩa, quãng chạy tự do của neutron là:

$$l = \frac{1}{\sum_{(i)} n_i \sigma_i} \quad (4.1-17)$$

Do vậy tương quan (4.1-16) được viết lại như sau:

$$\sum_{(i)} n_i \sigma_i \overline{E_i} \approx \frac{a \overline{E_p}}{l} = \frac{a E_n}{2l} \quad (4.1-18)$$

Thế các biểu thức (4.1-15 và -18) vào (4.1-13) và coi $a=1$, thì đánh giá được suất liều hấp thụ trên bề mặt P_0 [Gy] như sau:

$$P_0 [\text{Gy/s}] = 0,28 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi [n/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})] \sqrt{E_n [\text{MeV}]} \quad (4.1-19)$$

Biểu thức này đánh giá suất liều hấp thụ do va chạm đầu tiên. Nó cho các giá trị phù hợp với biểu thức (4.1-13) chính xác tới 20% đối với neutron có động năng E_n trong khoảng từ 0,5MeV tới 5MeV.

Việc tính liều hấp thụ neutron nhanh sẽ trở nên phức tạp nếu kể tới hiệu ứng tán xạ nhiều lần (– trường hợp bị chiếu xạ bởi chùm neutron rộng). Trong trường hợp chùm rộng, có thể đánh giá suất liều hấp thụ $P_{x,rộng}$ theo biểu thức tương tự như (4.1-14) cho trường hợp chùm hẹp P_x :

$$P_{x,rộng} = P_{0,rộng} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \quad (4.1-20)$$

$$P_{0,rộng} = B \cdot P_0 \quad (4.1-21)$$

Quãng chạy tự do của neutron trong chùm rộng (L) và trong chùm hẹp (l) có biểu thức liên hệ như sau:

$$L = 1,44,1 \quad (4.1-22)$$

Trong biểu thức (4.1-21), B – hệ số tích lũy, phụ thuộc vào động năng E_n của neutron, độ sâu x và dạng hình học của vật bị chiếu xạ. Tuy nhiên, đối với neutron có động năng E_n trong khoảng từ 0,5MeV tới 15MeV, thì có thể xác định hệ số tích lũy theo biểu thức sau đây:

$$B(x) = 2,37.(1 - 0,365.e^{-\frac{x}{3}}) \quad (4.1-23)$$

Từ các biểu thức (4.1-19) đến (4.1-23), có biểu thức sau đây cho suất liều hấp thụ neutron nhanh trường hợp bị chiếu xạ bởi chùm rộng:

$$P_{x, \text{rộng}} = 2,37.(1 - 0,365.e^{-\frac{x}{3}}).P_0.e^{-\frac{x}{1,44,1}} \quad (4.1-24)$$

Trong một môi trường có kích thước nhất định, một phần neutron nhanh có thể bị làm chậm tới năng lượng chuyển động nhiệt. Do vậy, suất liều tổng cộng gây bởi neutron nhanh có thể là tổng của hai thành phần:

$$P_{\text{neutron nhanh}} = P_{\text{làm chậm}} + P_{\text{nhiệt}} \quad (4.1-25)$$

với $P_{\text{làm chậm}}$ – suất liều hấp thụ gây bởi quá trình làm chậm neutron nhanh tới năng lượng chuyển động nhiệt; $P_{\text{nhiệt}}$ – suất liều hấp thụ gây bởi các phản ứng hạt nhân (n, γ) và (n, p) xảy ra do hấp thụ neutron nhiệt. Tuy nhiên, đóng góp của thành phần $P_{\text{nhiệt}}$ là không lớn và giảm xuống nếu tăng động năng ban đầu của neutron. Thí dụ, nếu động năng ban đầu của neutron là 1MeV, thì phần đóng góp của $P_{\text{nhiệt}}$ chỉ chiếm cỡ 11% trong toàn bộ suất liều hấp thụ gây bởi neutron nhanh. Tuy nhiên, ở đây mới chỉ nói về suất liều hấp thụ. Khi xét tới suất liều tương đương gây bởi neutron thì phải hiểu kỹ càng về tác dụng sinh học của các sản phẩm sinh ra do tương tác của neutron với các tổ chức cơ thể.

4.1.4. Tác dụng sinh học của neutron năng lượng trung gian và vai trò của các va chạm hạt nhân

Liều tương đương trong gian lò phản ứng hạt nhân được quyết định chủ yếu là do đóng góp của neutron năng lượng trung gian. Do vậy việc tìm hiểu tác

dụng sinh học của loại notrôn này có một ý nghĩa thực tế quan trọng.

Tác dụng sinh học của notrôn năng lượng trung gian cho đến nay vẫn còn là vấn đề được nghiên cứu chưa đầy đủ. Điều này chủ yếu liên quan đến những khó khăn, phức tạp về mặt kỹ thuật trong hai việc sau đây:

- 1). Tạo nguồn notrôn năng lượng trung gian sạch (không pha lẫn notrôn nhanh) đủ mạnh để sử dụng trong thí nghiệm sinh học;
- 2). Ghi phổ và đo liều notrôn trong vùng năng lượng $0,5 \text{ eV} \div 0,5 \text{ MeV}$.

Biến đổi năng lượng của notrôn năng lượng trung gian trong tổ chức cơ thể xảy ra không những chỉ thông qua các quá trình ion hoá và kích thích nguyên tử lên những mức năng lượng điện tử cao hơn (còn gọi là va chạm điện tử không đàn hồi), mà một phần còn do cả những va chạm hạt nhân đàn hồi.

Các mục trên đã cho thấy rằng tán xạ đàn hồi của notrôn làm sinh ra những hạt nhân lùi. Đến lượt mình, hạt nhân lùi lại có thể tạo nên một số hạt thứ cấp khác có điện tích ($z \neq 0$). Các hạt có điện tích này sẽ bị mất động năng chủ yếu là do va chạm không đàn hồi trong tương tác với điện tử của nguyên tử nếu hạt có điện tích chuyển động với tốc độ (v_z) lớn hơn tốc độ của điện tử trên quỹ đạo Bor trong nguyên tử (v_0):

$$v_z > v_0 = e^2 / h = 2,183.10^8 \text{ cm/s} \quad (4.1-26)$$

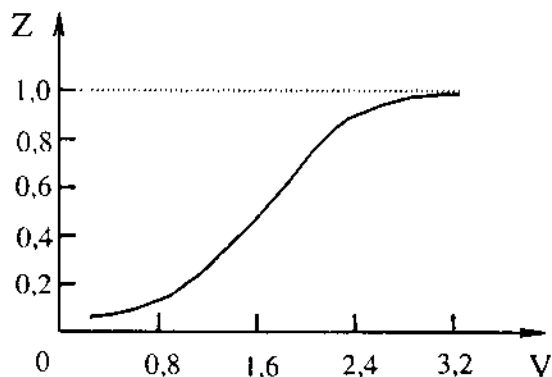
Tốc độ chuyển động $v_z = v_0$ tương ứng với động năng của các hạt prôtôn lùi là $E(^1\text{H}) \approx 25 \text{ keV}$; đối với các hạt nhân lùi ^{12}C , ^{14}N và ^{16}O thì có các giá trị tương ứng sau đây: $E(^{12}\text{C}) \sim 300 \text{ keV}$, $E(^{14}\text{N}) \sim 350 \text{ keV}$ và $E(^{16}\text{O}) \sim 400 \text{ keV}$.

Trong trường hợp va chạm không đàn hồi, hạt có điện tích tương tác với điện tử và trực tiếp làm ion hoá hoặc kích thích nguyên tử hoặc phân tử.

Khi hạt chuyển động với tốc độ cỡ tốc độ trên quỹ đạo Bor của điện tử trong nguyên tử ($v_z \sim v_0$), thì quá trình trao đổi điện tích giữa hạt với các nguyên tử hoặc/và phân tử của môi trường sẽ xảy ra rất mạnh. Trong quá trình trao đổi điện tích này, hạt liên tục chiếm một hoặc thậm chí vài điện tử của các nguyên tử, phân tử môi trường; rồi sau đó lại có thể mất những điện tử này. Do vậy, hạt

sẽ có điện tích trung bình nhỏ hơn so với z . Tốc độ chuyển động v_z càng giảm, thì điện tích trung bình của hạt cũng càng giảm.

Hình H4.1-1 minh họa sự phụ thuộc của điện tích trung bình (z) của prôtôn vào tốc độ chuyển động của nó trong môi trường. Trên hình này tốc độ chuyển động của prôtôn được thể hiện bằng tỷ số $v = v_z/v_0$. Đường phụ thuộc này cho thấy rằng ngay từ khi hạt chuyển động với tốc độ $v_z \sim 3v_0$ ($\sim 6.10^8$ cm/s, tương ứng với động năng của prôtôn $E_p \sim 100$ keV), thì quá trình trao đổi điện tích đã trở nên đáng kể.



Hình H4.1-1. Sự phụ thuộc của điện tích trung bình (z) của prôtôn vào tốc độ chuyển động của nó trong môi trường. Ký hiệu: $v = v_z/v_0$; trong đó v_z – tốc độ chuyển động của prôtôn; v_0 – tốc độ chuyển động của điện tử trên quỹ đạo Bor ($2,183.10^8$ cm/s).

Sự giảm điện tích hiệu dụng của hạt do quá trình trao đổi điện tích khi hạt chuyển động chậm (với tốc độ $v_z < v_0$) làm giảm dần vai trò của quá trình ion hoá và kích thích nguyên tử, phân tử (tức là quá trình va chạm không đàn hồi). Do vậy nên độ mất năng lượng riêng của hạt (còn gọi là năng suất hãm của môi trường) cũng giảm theo.

Ngược lại, khi hạt chuyển động chậm với với tốc độ $v_z < v_0$, thì tiết diện của quá trình tương tác đàn hồi giữa các trường Culông của hạt có điện tích z và hạt nhân nguyên tử của môi trường (còn gọi là quá trình va chạm hạt nhân) sẽ trở nên đáng kể. Trong quá trình va chạm hạt nhân này không xảy ra sự ion hoá

trực tiếp, mà động năng của hạt tới được biến đổi thành động năng của hạt nhân bia; do đó làm cho hạt nhân bia (hoặc cả nguyên tử) bị lệch ra khỏi vị trí cũ của mình trong cấu trúc phân tử của chất. Đến lượt mình, các hạt nhân vừa bị bắn ra khỏi vị trí cũ này lại có thể tham gia vào những va chạm hạt nhân tiếp theo, làm cho nhiều hạt nhân hoặc nguyên tử khác bị lệch ra khỏi vị trí của chúng. Cứ thế, quá trình va chạm hạt nhân làm xuất hiện rất nhiều hạt nhân hoặc nguyên tử bị lệch khỏi vị trí của mình trong cấu trúc phân tử của chất, dẫn tới những tổn thương sâu sắc không thể hồi phục được của các cao phân tử. Những tổn thương sinh học kiểu này khác hẳn về bản chất và nặng nề hơn nhiều so với các tổn thương gây bởi quá trình iôn hoá và kích thích nguyên tử, phân tử (tức là do va chạm điện tử không đàn hồi). Như vậy, hiệu suất sinh học trong trường hợp va chạm hạt nhân là lớn hơn so với trường hợp va chạm điện tử không đàn hồi.

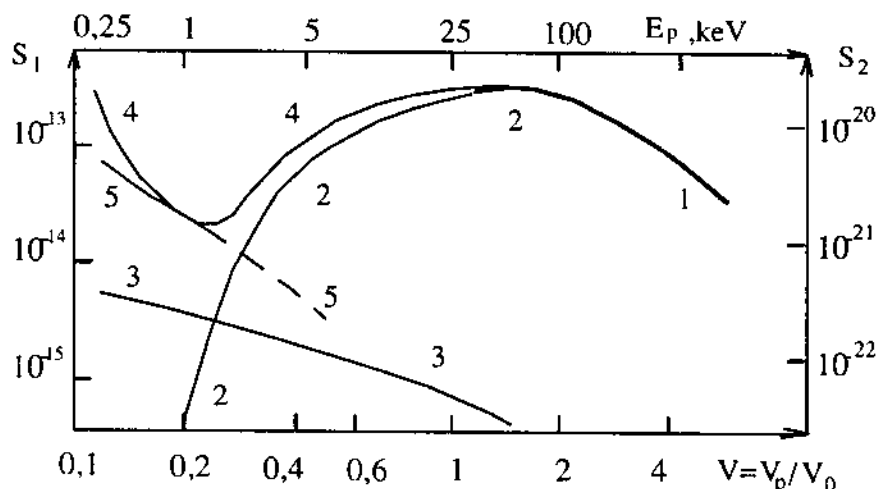
Trong vùng năng lượng thấp, vai trò của va chạm hạt nhân tăng lên và trở thành chủ yếu khi động năng của hạt nhân lùi giảm xuống nhỏ hơn những giá trị xác định; cụ thể là: $E_p < 1,5 \div 2$ keV đối với prôtôn; $E_C < 100$ keV đối với hạt nhân lùi là C; $E_N < 110$ keV đối với hạt nhân lùi là N; $E_O < 250$ keV đối với hạt nhân lùi là O.

Nostrôn năng lượng trung gian tương tác với cơ thể, sẽ làm xuất hiện những hạt thứ cấp có động năng trong vùng đang được xét tới; trong đó chủ yếu là các prôtôn lùi. Do đó nostrôn năng lượng trung gian có tác dụng sinh học quan trọng, rất cần được chú ý khi tính toán liều tương đương (ngay cả khi liều hấp thụ là không lớn!).

Đồng thời cần nhớ rằng các hạt thứ cấp với động năng trong vùng đang được xét tới cũng có thể là chính các hạt nhân lùi (nhất là các hạt nhân C, N, O), hoặc là sản phẩm của các hạt nhân lùi bị làm chậm, mà các hạt nhân lùi này xuất hiện là do tương tác của nostrôn nhanh với tổ chức cơ thể. Điều này cho phép hiểu rằng: hiệu suất sinh học của nostrôn nhanh có thể lớn hơn nhiều so với trường hợp chỉ tính đến tác dụng iôn hoá của chúng.

Về hiệu suất sinh học của các va chạm hạt nhân đàn hồi – người ta còn chưa biết gì cho tới tận những năm 1963-1964. Năm 1965 nghiên cứu của Jung

(ở Viện Sinh học Phóng xạ, Karlsruhe, CHLB Đức) được công bố về hiệu ứng sinh học khi chiếu xạ men ribonucleaza bằng proton chậm có động năng từ vài phần chục keV đến vài chục keV. Thí nghiệm cho thấy tiết diện làm mất hoạt tính của men này phụ thuộc một cách phức tạp vào động năng của proton.



Hình H4.1-2. Minh họa tiết diện làm mất hoạt tính của men ribonucleaza và tiết diện mất năng lượng của proton do va chạm điện tử không đàn hồi và va chạm hạt nhân đàn hồi. Ký hiệu: E_p – động năng của proton [keV]; v_p – tốc độ của proton trong môi trường; v_0 – tốc độ của điện tử trên quỹ đạo Bor; S_1 [cm²] – tiết diện làm mất hoạt tính của men ribonucleaza; S_2 [MeV.cm²] = $(-dE/dx)/n$ [cm⁻³] là tiết diện mất năng lượng của proton (tính theo một nguyên tử của môi trường). Trên đồ thị: đường 1-2 và 3-3 – tiết diện mất năng lượng của proton tính theo một nguyên tử môi trường S_2 ; đường 2-2-2 – tiết diện làm mất hoạt tính men ribonucleaza do quá trình va chạm điện tử (không đàn hồi) của proton; đường 4-4 – kết quả thực nghiệm của tiết diện làm mất hoạt tính men ribonucleaza; đường 5-5 – tiết diện làm mất hoạt tính men ribonucleaza chỉ do va chạm hạt nhân (đàn hồi).

Hình H4.1-2. minh họa kết quả của thí nghiệm này, cho thấy các đường phụ thuộc vào động năng proton của tiết diện làm mất hoạt tính của men

ribonucleaza và tiết diện mất năng lượng của prôtôn do va chạm điện tử không đàn hồi và va chạm hạt nhân đàn hồi. Trên hình này, E_p - động năng của prôtôn [keV]; $V=v_p/v_0$; trong đó v_p - tốc độ của prôtôn trong môi trường; v_0 - tốc độ của điện tử trên quỹ đạo Bor; $S_1[\text{cm}^2]$ - tiết diện làm mất hoạt tính của men ribonucleaza; $S_2[\text{MeV.cm}^2] = (-dE/dx)/n[\text{cm}^{-3}]$ là tiết diện mất năng lượng của prôtôn (tính theo một nguyên tử môi trường); tiết diện mất năng lượng của prôtôn tính theo một nguyên tử môi trường S_2 được thể hiện bằng đường 1-2 (trường hợp do va chạm điện tử không đàn hồi), và bằng đường 3-3 (trường hợp do va chạm hạt nhân đàn hồi); đường 2-2-2 - tiết diện làm mất hoạt tính men Ribô Nucleaza do quá trình va chạm điện tử (không đàn hồi) của prôtôn; đường 4-4 - kết quả thực nghiệm của tiết diện làm mất hoạt tính men ribonucleaza.

Các đường 2-2-2 và 4-4 được làm trùng nhau tại một điểm ứng với năng lượng $E_p=60\text{keV}$ để tiện so sánh. Nếu tác dụng sinh học của prôtôn chậm được quyết định hoàn toàn bởi quá trình iôn hoá, thì hai đường này phải có dạng giống nhau, và phải trùng nhau hoàn toàn. Song, trên đồ thị thấy rõ: bắt đầu từ động năng $E_p<2,5\text{keV}$ thì hai đường này trở nên khác nhau rõ rệt, và từ $E_p<1,5\text{keV}$ thì tiết diện làm mất hoạt tính S_1 tăng lên rất mạnh. Như vậy, lấy đường 4-4 trừ đi đường 2-2-2, thu được đường 5-5 chính là tiết diện làm mất hoạt tính men ribonucleaza chỉ do va chạm hạt nhân (đàn hồi).

Vai trò của va chạm hạt nhân đàn hồi có thể đặc biệt cao khi các tổ chức hoặc cơ quan nằm gần bề mặt cơ thể bị chiếu xạ bởi nơtrôn năng lượng trung gian. Thí dụ, đối với nơtrôn có động năng 20keV , liều gây bởi các prôtôn lùi chuyển động chậm chiếm tới 30% toàn bộ liều ở độ sâu 2 cm (tương ứng với vị trí của tinh hoàn hoặc thủy tinh thể).

Những điều vừa nêu trên đây cho thấy rằng cần đặc biệt chú ý tới tác dụng sinh học của tất cả các nhóm nơtrôn, bất kể đó là nơtrôn nhanh, nơtrôn năng lượng trung gian hay là nơtrôn nhiệt. (Ngay cả nơtrôn nhiệt cũng có thể làm xuất hiện prôtôn với động năng ban đầu $E_p=0,6\text{ MeV}$ sinh ra trong phản ứng $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ với tiết diện bằng 1,76 barn. Sau một số lần tương tác, prôtôn sẽ bị làm chậm tới động năng $E_p < 1,5 \pm 2\text{ keV}$. Mặt khác, phản ứng này còn làm

xuất hiện hạt nhân lùi ^{14}C có động năng ban đầu bằng $E_C = 40 \text{ keV}$. Trong vùng động năng thấp như vậy, tác dụng sinh học của quá trình va chạm hạt nhân gây bởi các proton bị làm chậm và hạt nhân lùi ^{14}C sẽ tăng lên và trở thành chủ đạo).

4.1.5. Sự phụ thuộc của liều hấp thụ vào năng lượng neutron

Do đặc điểm tương tác của neutron với vật chất, liều hấp thụ gây bởi neutron trong cơ thể có phân bố không đồng đều. *Phân bố liều phụ thuộc mạnh vào năng lượng neutron, vào phân bố của các nguyên tố trong tổ chức cơ thể và vào hình dạng, kích thước của cơ thể.*

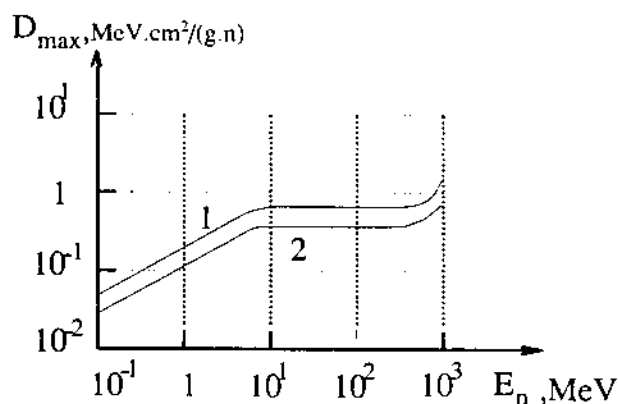
Do quá trình tán xạ nhiều lần và hiệu ứng tích lũy các neutron năng lượng thấp, nên liều hấp thụ có thể đạt giá trị cực đại $D_{\max}$ ở một độ sâu nào đó. Khi tăng hoặc giảm động năng của neutron tới, thì giá trị cực đại của liều $D_{\max}$ cũng sẽ tăng lên hoặc giảm xuống theo. Đối với neutron có động năng E_n trong khoảng từ 20 keV đến 7 MeV, thì có biểu thức gần đúng sau đây cho tương quan giữa giá trị cực đại này và năng lượng của neutron tới $D_{\max}(E_n)$:

$$D_{\max} [\text{Gy}/(\text{n.cm}^{-2})] \approx 2,9 \cdot 10^{-11} \cdot E_n^{0,43} [\text{MeV}] \quad (4.1-27)$$

Hình H4.1-3 minh họa sự phụ thuộc (4.1-27) đối với các chùm neutron rộng và hẹp.

Khi thay đổi năng lượng neutron tới, thì độ sâu $X_{\max}$ mà tại đó liều hấp thụ đạt giá trị cực đại ($D_{\max}$) sẽ hay đổi phức tạp hơn và phụ thuộc vào vai trò của các hạt thứ cấp sinh ra do tương tác của neutron với môi trường.

Ban đầu, khi năng lượng của neutron thấp, thì liều hấp thụ chủ yếu là được tạo bởi sản phẩm của các phản ứng hấp thụ neutron nhiệt $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ và $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$; do đó năng lượng E_n tăng, thì độ sâu $X_{\max}$ cũng tăng theo. *Khi neutron có năng lượng tương đối lớn, thì thành phần liều hấp thụ gây bởi neutron nhiệt sẽ giảm xuống dần, còn thành phần liều hấp thụ gây bởi các hạt nhân lùi do va chạm đàn hồi thì tăng lên dần và tiến tới trở thành chủ yếu. Vì vậy, khi tăng năng lượng của neutron tới, thì độ sâu $X_{\max}$ mà tại đó liều hấp thụ đạt giá trị*



Hình H4.1-3. Sự phụ thuộc $D_{\max}(E_n)$ của giá trị cực đại của liều hấp thụ vào năng lượng của neutron tới đối với các chùm neutron rộng (1) và hẹp (2). Chuyển đổi từ thứ nguyên [MeV/g] sang thành thứ nguyên [Gy] như sau: $1 \text{ MeV/g} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Gy}$.

cực đại sẽ tiến gần tới bề mặt cơ thể. Bảng B4.1-3 cho thấy độ sâu $X_{\max}$ đối với một số giá trị năng lượng của neutron tới.

Bảng B4.1-3. Độ sâu $X_{\max}$ mà tại đó liều hấp thụ đạt giá trị cực đại $D_{\max}$ đối với một số giá trị năng lượng E_n của neutron tới

E_n , MeV	$X_{\max}$, cm	$D_{\max}$, Gy/(n.cm ²)
Nhiệt	0,3	$D_{\text{nhiệt}}$
$1 \cdot 10^{-4}$	4	$2 \times D_{\text{nhiệt}}$
$5 \cdot 10^{-3}$	4	$\sim 5,5 \cdot 10^{-12}$
$2 \cdot 10^{-2}$	4	$\sim 5,5 \cdot 10^{-12}$
$4 \cdot 10^{-2}$	4	----
0,1	0	$\sim 1,0 \cdot 10^{-11}$
0,5	0	$\sim 2,2 \cdot 10^{-11}$
10	0	----
>10	$\sim 3 \cdot 10^{-3} \cdot E_n^{1,75}$	----

Do liều hấp thụ phân bố không đều theo chiều sâu, nên khi đo đạc hoặc tính toán xác định liều cần chỉ rõ vị trí mà liều đạt được một giá trị nào đó. Mặt

khác, cũng vì lý do này nên nhiều khi cần biết giá trị trung bình của liều. Có thể xác định giá trị trung bình của liều theo biểu thức sau đây:

$$\overline{D} = \frac{1}{h} \int_0^h D(x) dx \quad (4.1-28)$$

trong đó $D(x)$ – liều hấp thụ ở độ sâu x trong cơ thể; h – bề dày của cơ thể.

Liều hấp thụ trong một tổ chức sinh học c là tổng của các thành phần liều hấp thụ gây bởi mỗi loại sản phẩm thứ cấp i sinh ra do tương tác của neutron với vật chất:

$$D_c = \sum_{(i)} D_{c,i} = D_{c, \text{hạt nhân lùi}} + D_{c,p} + D_{c, \text{gamma}} \quad (4.1-29)$$

ở đây $D_{c, \text{hạt nhân lùi}}$ – liều hấp thụ gây bởi các hạt nhân lùi; $D_{c,p}$ và $D_{c, \text{gamma}}$ – liều hấp thụ gây bởi prôtôn và các lượng tử gamma sinh ra trong các phản ứng hấp thụ neutron nhiệt.

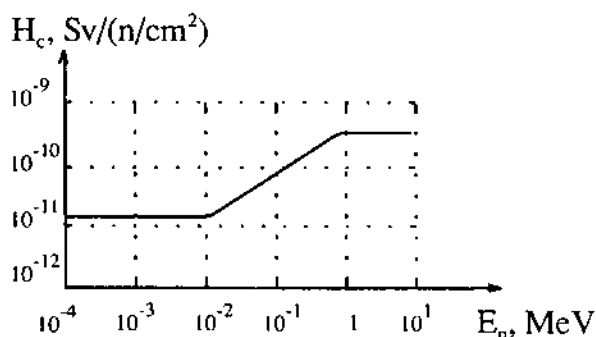
Mỗi loại hạt thứ cấp có tác dụng sinh học khác nhau, nên việc xác định liều tương đương có ý nghĩa rất quan trọng. Bức xạ neutron tương tác với một tổ chức c nào đó trong cơ thể tạo nên nhiều loại sản phẩm i khác nhau. Bởi vậy, theo công thức định nghĩa chung (1.4-14), thì liều tương đương H_c gây bởi neutron trong tổ chức c được xác định như sau:

$$H_{c,i} = \sum_{(i)} D_{c,i} Q_{TS,i} K_i \quad (1.4-14)$$

với $Q_{TS,i}$ – trọng số của loại sản phẩm i ; thông thường coi $K_i = 1$; $D_{c,i}$ – các thành phần liều hấp thụ như trong biểu thức (4.1-29); ngoài ra nếu tính tới vai trò sinh học của các quá trình va chạm hạt nhân đàn hồi, thì ở đây còn phải thêm vào một số hạng tương ứng cho prôtôn và các hạt nhân lùi khi chúng chuyển động với tốc độ rất chậm (như vừa nêu trong mục 4.1.4 ở trên).

Do mỗi loại sản phẩm có trọng số rất khác nhau, nên sự phụ thuộc vào năng lượng neutron của liều tương đương khác hẳn so với của liều hấp thụ. Hình H4.1-4 minh họa sự phụ thuộc của liều tương đương $H_c(E_n)$ vào năng lượng E_n

của nơtron (chưa kể đóng góp của va chạm hạt nhân đàn hồi).



Hình H4.1-4. Sự phụ thuộc vào năng lượng nơtron của liều tương đương trong tổ chức cơ thể.

4.2. ĐO SUẤT LIỀU NƠTRÔN NHANH BẰNG BUỒNG IÔN HOÁ

Buồng iôn hoá là một loại dụng cụ ghi nhận bức xạ hạt nhân dựa trên hiện tượng iôn hoá nguyên tử của môi trường khi nó tương tác với bức xạ. Buồng iôn hoá loại đơn giản nhất gồm có một điện cực dương và một điện cực âm với một hiệu điện thế thích hợp và chúng được đặt cách nhau một khoảng trong chất khí làm việc ở một áp suất thích hợp. Tùy thuộc mục đích sử dụng, các điện cực có thể là những mặt cầu đồng tâm, hoặc những ống trụ đồng trục, hoặc chỉ đơn giản là những bản mặt phẳng song song.

Dùng buồng iôn hoá để đo liều hấp thụ nơtron nhanh là một phương pháp đơn giản, cho phép phân biệt được các thành phần của liều hấp thụ trong vùng bức xạ hỗn hợp. Phương pháp này dựa trên cơ sở sau đây: tới 95% liều hấp thụ nơtron nhanh trong tổ chức cơ thể là được tạo bởi các hạt nhân lùi – những hạt có khả năng iôn hoá, được sinh ra trong quá trình tán xạ nơtron trên các hạt nhân nguyên tử môi trường.

Dưới đây giới thiệu một số loại buồng ion hoá có thể sử dụng để đo liều bức xạ neutron.

4.2.1. Buồng ion hoá có thành bằng khí

Có hai thành phần chính đóng góp vào hiệu ứng ion hoá trong buồng ion hoá. Thành phần thứ nhất là đóng góp của các hạt thứ cấp bay ra từ thành buồng vào vùng khí làm việc của buồng. Phần đóng góp này còn được gọi là “*hiệu ứng thành*”. Thành phần thứ hai là đóng góp của các hạt thứ cấp được sinh ra ngay trong vùng khí làm việc. Phần đóng góp này còn được gọi là “*hiệu ứng khí*”.

Muốn dùng buồng ion hoá để đo liều hấp thụ neutron thì phải đánh giá được hoặc bỏ qua được “hiệu ứng thành”. Có thể bỏ qua hiệu ứng thành nếu buồng ion hoá có kích thước đủ lớn, sao cho các hạt thứ cấp bay ra từ thành buồng không thể đạt tới vùng lân cận của những điểm đang được quan tâm ở trong vùng khí làm việc của buồng. Nói cách khác, trong cùng điều kiện áp suất và chất khí làm việc, thì khoảng cách từ thành buồng tới mặt biên của vùng khí làm việc phải có giá trị lớn hơn quãng chạy của các hạt thứ cấp bay ra từ thành buồng. Buồng ion hoá loại này được gọi là “buồng ion hoá có thành làm bằng khí”, hoặc gọi tắt là “buồng ion hoá thành khí”.

Có thể tạm chia “buồng ion hoá thành khí” làm hai loại. Loại thứ nhất có kích thước vùng khí làm việc lớn hơn rất nhiều so với quãng chạy của các hạt thứ cấp sinh ra trong vùng khí. Loại thứ hai có kích thước vùng khí làm việc nhỏ hơn so với quãng chạy của các hạt thứ cấp sinh ra trong vùng khí. Dưới đây lần lượt xét các trường hợp này.

4.2.1.1. Trường hợp 1

‘Buồng ion hoá thành khí’ có áp suất và kích thước vùng khí làm việc đủ lớn để có thể coi là quãng chạy của các hạt thứ cấp sinh ra trong vùng khí làm việc của buồng đều nằm gọn trong thể tích khí đó (tức là chúng đều bị hấp thụ hoàn toàn trong thể tích khí làm việc).

Giả sử trong điều kiện áp suất khí bằng p , thì đoạn đường trung bình của hạt thứ cấp loại i trong vùng khí làm việc là r_i và quãng chạy của chúng là R_i . Trong trường hợp này: tỷ số giữa r_i và R_i có giá trị bằng $(g_i)_p = (r_i/R_i)_p \geq 1$.

Năng lượng ΔE_i mà các hạt nhân lùi sinh ra do va chạm đầu tiên của neutron nhanh truyền cho một đơn vị thể tích khí trong mỗi giây bằng:

$$\Delta E_i = \Phi \cdot M_{T,p} \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \overline{E_i} \quad (4.2-1)$$

với Φ [$n/(cm^2.s)$] – mật độ thông lượng neutron nhanh đơn năng E ở lân cận điểm đang được quan tâm; $M_{T,p}$ – số phân tử khí có trong $1cm^3$ khí trong buồng ở nhiệt độ T và áp suất p ; n_i – số hạt nhân loại i có trong một phân tử khí; σ_i – tiết diện tán xạ đàn hồi của neutron nhanh trên hạt nhân loại i ; $\overline{E_i}$ – động năng trung bình của hạt nhân lùi loại i thu được trong mỗi sự kiện tán xạ đàn hồi của neutron nhanh (xem biểu thức (4.1-5)).

Nếu $M_{T,760}$ là số phân tử khí có trong $1cm^3$ khí của buồng ở nhiệt độ T và áp suất $p = 760$ mmHg, thì có tương quan sau đây:

$$M_{T,p} = M_{T,760} \cdot \frac{p}{760} \quad (4.2-2)$$

Giả sử, năng lượng tạo cặp ion trong chất khí của buồng tính trung bình cho tất cả các loại hạt nhân lùi có giá trị bằng ω ; số cặp ion được tạo thành do hấp thụ các hạt nhân lùi trong 1 giây trong 1 đơn vị thể tích khí có giá trị bằng q_i . Khi đó, đối với buồng ion hoá thành khí sẽ có tương quan sau đây:

$$\Delta E_i = q_i \cdot \omega \quad (4.2-3)$$

Từ các biểu thức (4.2-1 đến -3), thu được biểu thức sau:

$$q_i = \frac{M_{T,760}}{\omega} \cdot \frac{p}{760} \cdot \Phi \cdot E \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \frac{2A_i}{(1+A_i)^2} \quad (4.2-4)$$

Biểu thức (4.2-4) cho thấy rằng trong trường hợp buồng ion hoá thành khí có áp suất và kích thước vùng khí làm việc đủ lớn, thì hiệu ứng ion hoá do va

chạm đầu tiên (q_1) tỷ lệ tuyến tính với mật độ thông lượng neutron (Φ), năng lượng neutron (E) và áp suất khí (p).

4.2.1.2. Trường hợp 2

'Buồng iôn hoá thành khí' có áp suất và kích thước vùng khí làm việc chưa đủ lớn nên khi các hạt thứ cấp sinh ra trong vùng khí làm việc thì chỉ có một phần quãng chạy của chúng nằm trong thể tích khí làm việc của buồng.

Trong trường hợp này, tỷ số giữa r_i và R_i có giá trị bằng $(g_i)_p = (r_i/R_i)_p < 1$. Do đó chỉ có một phần động năng của hạt thứ cấp bị hấp thụ trong thể tích khí làm việc. Nếu hạt thứ cấp loại i có động năng trung bình bằng $\overline{E_i}$, thì trong trường hợp này năng lượng mà thể tích khí làm việc hấp thụ được từ hạt thứ cấp sẽ có giá trị $(E_i)_p < \overline{E_i}$ và bằng:

$$(E_i)_p \approx \overline{E_i} \cdot (g_i)_p = \overline{E_i} \cdot \left(\frac{r_i}{R_i} \right)_{760} \cdot \frac{p}{760} \quad (4.2-5)$$

Vì vậy, năng lượng ΔE_1 mà các hạt nhân lùi sinh ra do va chạm đầu tiên của neutron nhanh truyền cho một đơn vị thể tích khí làm việc trong mỗi giây, cũng tương tự như biểu thức (4.2-1), nhưng trong trường hợp thứ hai này sẽ có giá trị nhỏ hơn, cụ thể là bằng:

$$\Delta E_1 = \Phi \cdot M_{T,p} \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \cdot (E_i)_p \quad (4.2-6)$$

Cũng như trong trường hợp thứ nhất, trên cơ sở các biểu thức (4.2-6) và (4.2-2, -3), thu được tương quan giữa hiệu ứng iôn hoá do va chạm đầu tiên (q_1) với các đặc trưng của bức xạ neutron (Φ , E) và áp suất khí (p) trong buồng iôn hoá thành khí nhỏ như sau:

$$q_1 = \frac{M_{T,760}}{\omega} \cdot \left(\frac{p}{760} \right)^2 \cdot \Phi \cdot E \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \frac{2A_i}{(1+A_i)^2} \cdot \left(\frac{r_i}{R_i} \right)_{760} \quad (4.2-7)$$

Biểu thức (4.2-7) cho thấy rằng trong trường hợp buồng ion hoá thành khí có áp suất và kích thước vùng khí làm việc không đủ lớn, thì hiệu ứng ion hoá do va chạm đầu tiên (q_1) vẫn tỷ lệ tuyến tính với mật độ thông lượng và năng lượng nơtron (ΦE), nhưng lại tỷ lệ với bình phương của áp suất khí.

4.2.1.3. Trường hợp tổng quát:

Từ các biểu thức (4.2-4) cho trường hợp thứ nhất và biểu thức (4.2-7) cho trường hợp thứ hai, thu được biểu thức cho hiệu ứng ion hoá do va chạm đầu tiên của nơtron trong buồng ion hoá có thành bằng khí nói chung. Biểu thức cho trường hợp tổng quát này có dạng như sau:

$$q_1 = \frac{M_{T,760}}{\omega} \cdot \left(\frac{p}{760} \right)^Y \cdot \Phi \cdot E \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_i \frac{2A_i}{(1+A_i)^2} \cdot \left(\frac{r_i}{R_i} \right)_{760}^{Y-1} \quad (4.2-8)$$

$Y=1$ cho trường hợp 1 (khi buồng có áp suất và kích thước vùng khí làm việc đủ lớn);

$Y=2$ cho trường hợp 2 (khi buồng có áp suất và kích thước vùng khí làm việc không đủ lớn).

Các biểu thức (4.2-4), (4.2-7) và (4.2-8) trên đây mới chỉ tính đến hiệu ứng gây bởi va chạm đầu tiên của nơtron nhanh. Trong thực tế, nơtron (với động năng ban đầu là E) có thể tán xạ nhiều lần trong thể tích khí làm việc; mỗi lần va chạm thứ k làm xuất hiện q_k cặp ion tương ứng. Số cặp ion tổng cộng được tạo thành do hấp thụ các hạt nhân lùi trong 1 giây trong 1 đơn vị thể tích khí bởi tất cả các lần va chạm của nơtron nhanh sẽ có giá trị bằng:

$$q = \sum_{(k)} q_k = \frac{M_{T,760}}{\omega} \cdot \left(\frac{p}{760} \right)^Y \cdot \sum_{(k)} \Phi_k \cdot E_k \cdot \sum_{(i)} n_i \sigma_{i,k} \frac{2A_i}{(1+A_i)^2} \cdot \left(\frac{r_{i,k}}{R_{i,k}} \right)_{760}^{Y-1} \quad (4.2-9)$$

Giá trị q_k liên hệ với suất liều hấp thụ bức xạ trong chất khí (P_k) theo biểu thức sau đây (xem biểu thức tương tự (3.1-2) khi xác định liều lượng bức xạ gamma bằng buồng ion hoá):

$$P = \sum_{(k)} P_k = \sum_{(k)} a \frac{q_k \omega}{\rho_0} \quad (4.2-10)$$

trong đó a – hệ số tính tới thứ nguyên của suất liều và các đại lượng khác trong biểu thức; ρ_0 – khối lượng riêng (mật độ) của chất khí. Nếu các đại lượng trong biểu thức (4.2-10) có đơn vị như sau: $P[\text{Gy/s}]$, $q_k[\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}]$, $\omega[\text{eV}]$, $\rho_0[\text{g.cm}^{-3}]$, thì hệ số chuyển đổi đơn vị có giá trị là $a=1,6 \cdot 10^{-16}[\text{Gy} \cdot (\text{eV/g})^{-1}]$.

Nếu chất khí làm việc trong buồng có hợp phần nguyên tử giống như của một tổ chức sinh học, thì độ ion hoá q là thước đo suất liều hấp thụ neutron trong tổ chức sinh học đó.

Một hỗn hợp khí có hợp phần nguyên tử gần giống so với của tổ chức mềm trong cơ thể có thể gồm các thành phần (tính theo áp suất riêng) như sau:

$$64,4\% \text{ CH}_4 + 32,5\% \text{ CO}_2 + 3,1\% \text{ N}_2.$$

Tuy nhiên, buồng ion hoá thành khí có kích thước đủ lớn để có thể bỏ qua được hiệu ứng thành, thì lại không cho phép xác định vị trí mà liều được đo. Vì vậy trong thực tế thường sử dụng những buồng ion hoá nhỏ có thành dày mà thoả mãn các điều kiện Bragg-Gray.

4.2.2. Buồng ion hoá nhỏ thành dày

4.2.2.1. Khả năng thực tế thoả mãn ba điều kiện Bragg-Gray

Trong thực tế thường cần đo liều hấp thụ bức xạ trong các môi trường không phải là không khí (và các chất khí nói chung). Nhưng mặt khác, việc này lại có thể được thực hiện bằng cách sử dụng hiệu ứng ion hoá của bức xạ ở ngay trong không khí (hoặc chất khí nói chung) để xác định liều hấp thụ bức xạ trong các môi trường khác. Lý thuyết Bragg-Gray (đã được giới thiệu ở mục 3.1.3

trong chương xác định liều lượng bức xạ lượng tử) cho thấy mối liên hệ mật thiết giữa hiệu ứng ion hoá trong chất khí và năng lượng bức xạ được hấp thụ trong môi trường bao quanh hốc khí.

Ta hãy nhớ lại ba điều kiện cơ bản của lý thuyết Bragg–Gray – còn gọi là ba điều kiện Bragg–Gray như sau:

- 1). Kích thước của hốc khí rất nhỏ so với quãng chạy trong chất khí đó của các hạt gây ion hoá mà những hạt này được giải phóng do tương tác của bức xạ, sao cho hầu hết các hạt này đều bay qua được hốc khí mà không dừng lại ở đó. (Khi này, độ ion hoá gây bởi các hạt được sinh ra trong hốc khí là không đáng kể so với độ ion hoá tổng cộng).
- 2). Hốc khí được bao bọc bởi lớp thành là chất rắn có bề dày bằng hoặc lớn hơn quãng chạy của các hạt ion hoá nhanh nhất trong vật liệu thành để đạt được trạng thái cân bằng của các hạt ion hoá;
- 3). Cường độ bức xạ có giá trị như nhau tại mọi điểm bất kỳ trong hệ “hốc khí + lớp thành bao quanh nó”.

Nếu buồng ion hoá nhỏ thành dày thoả mãn đồng thời cả ba điều kiện Bragg – Gray như vừa nêu trên, thì có thể sử dụng *công thức Bragg–Gray* để xác định năng lượng bức xạ hấp thụ được trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích của thành buồng (ΔE_Z):

$$\Delta E_Z = \sum_{(i)} \Delta E_{Z,i} = \sum_{(i)} q_i \omega_i \cdot (S_{khí}^Z)_i \quad (4.2-11)$$

với q_i – số cặp ion được tạo thành trong một đơn vị thể tích khí do tương tác của các hạt ion hoá loại i ; ω_i – năng lượng trung bình tạo cặp ion trong chất khí; còn giá trị trung bình của tỷ số giữa năng suất hãm của chất rắn Z và năng suất hãm của chất khí đối với hạt ion hoá loại i thì được xác định theo công thức sau đây:

$$(S_{khí}^Z)_i \equiv \frac{\overline{S_{Z,i}}}{S_{khí,i}} \quad (4.2-12)$$

Hai công thức (4.2-11 và -12) có dạng chung cho cả bức xạ lượng tử và bức xạ neutron. Trong trường hợp bức xạ lượng tử, thì hạt ion hoá là điện tử. Trong trường hợp bức xạ neutron, thì hạt ion hoá là các hạt nhân lùi và prôtôn.

Đối đây xét khả năng đáp ứng ba điều kiện Bragg – Gray của buồng ion hoá nhỏ thành dày để đo liều bức xạ neutron nhanh.

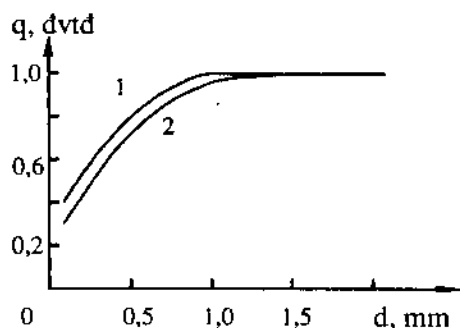
Điều kiện 3) được thoả mãn trong phần lớn các trường hợp, nhất là khi buồng ở xa nguồn bức xạ. Nếu phép đo đòi hỏi phải đặt buồng ở gần nguồn bức xạ, thì có thể thêm vào hệ số hiệu chỉnh.

Điều kiện 2) cũng có thể thoả mãn được một cách dễ dàng. Thí dụ, đối với neutron có động năng $E_n=10$ MeV, thì prôtôn lùi với năng lượng cực đại ($E_p=E_n=10$ MeV) cũng chỉ có quãng chạy cỡ bằng 1,5mm trong môi trường được tạo thành từ những nguyên tố nhẹ với mật độ $\rho \approx 1\text{g/cm}^3$. Thành buồng ion hoá với bề dày như vậy vừa đảm bảo trạng thái cân bằng hạt ion hoá, lại vừa không làm giảm đáng kể bức xạ neutron ban đầu. Hình H4.2-1 minh hoạ sự phụ thuộc của độ ion hoá vào bề dày của thành buồng làm bằng pôliêtilen đối với bức xạ neutron có động năng $E_n=20$ MeV (đường cong 1) và bức xạ gamma của nguồn ^{137}Cs có năng lượng $E_\gamma=0,661$ MeV (đường cong 2) để tiện so sánh. Ta thấy trạng thái cân bằng các prôtôn lùi đã đạt được ngay từ khi thành pôliêtilen có bề dày $d \sim 1\text{mm}$.

Điều kiện 1) trong trường hợp bức xạ neutron là rất khắc nghiệt so với trong trường hợp bức xạ lượng tử. Nguyên nhân là do các prôtôn và hạt nhân lùi khác (được sinh bởi tán xạ của neutron nhanh) có quãng chạy rất ngắn.

Đối với hạt nặng có điện tích Z_i , khối lượng M_i và có động năng nhỏ hơn một nửa giá trị năng lượng nghỉ của nó $E_i < M_i c^2/2$ (cụ thể, đối với prôtôn là $E_p < 500\text{MeV}$, và còn lớn hơn nữa đối với các hạt nhân lùi khác), thì có thể xác định quãng chạy của nó theo biểu thức gần đúng sau đây:

$$R_i = \frac{0,51}{(M_i c^2)^{0,75} \cdot Z_i^2} \cdot E_i^{1,75} = k_i \cdot E_i^{1,75} \quad (4.2-13)$$



Hình H4.2-1. Sự phụ thuộc của độ ion hoá (q) vào bề dày của thành buồng ion hoá nhỏ làm bằng pôliêtilen (d) đối với bức xạ nơtron có động năng $E_n = 20$ MeV (đường cong 1) và bức xạ gamma của nguồn ^{137}Cs có năng lượng $E_\gamma = 0,661$ MeV (đường cong 2).

Trong biểu thức (4.2-13), đơn vị đo của quãng chạy là g/cm^2 và của năng lượng là MeV; k_i – hệ số phụ thuộc khối lượng và diện tích của hạt nặng. Giá trị của hệ số này được nêu trong bảng B4.2-1.

Bảng B4.2-1. Giá trị của hệ số k_i trong công thức (4.2-13) xác định quãng chạy của hạt nặng có diện tích

Loại hạt nặng gây ion hoá	k_i
Prôtôn	$3,22 \cdot 10^{-3}$
Hạt nhân ^2H	$1,91 \cdot 10^{-3}$
Hạt alpha ^4He	$2,82 \cdot 10^{-4}$
Hạt nhân ^{12}C	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Hạt nhân ^{14}N	$1,17 \cdot 10^{-5}$
Hạt nhân ^{16}O	$0,82 \cdot 10^{-5}$

Thí dụ, prôtôn lùi với năng lượng $E_p = 1 \text{ MeV}$ có quãng chạy $R_p \approx 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ tương đương cỡ 2,5 cm không khí ở điều kiện bình thường.

Vì vậy, trong nhiều trường hợp thực tế, việc chế tạo buồng ion hoá có kích thước hốc khí nhỏ (để hiệu ứng khí được coi là không đáng kể so với hiệu ứng ion hoá của thành buồng) là rất khó khăn và phức tạp.

Khó khăn này được khắc phục bằng cách dùng buồng ion hoá đồng nhất. Buồng ion hoá đồng nhất là loại buồng ion hoá có thành buồng làm từ loại vật liệu có hợp phần nguyên tử giống như của chất khí. Vì vậy, trong buồng đồng nhất thì học khí có thể có kích thước bất kỳ. Buồng đồng nhất đòi hỏi có những hỗn hợp khí thích hợp ở áp suất nhất định. Tuy nhiên, vật liệu làm thành buồng ion hoá đồng nhất thường có độ thấm thấu khí khá lớn, nên trong khi sử dụng phải thường xuyên nạp lại khí, gây phiền phức cho việc sử dụng trong thực tế.

4.2.2.2. Buồng ion hoá không đồng nhất thoả mãn ba điều kiện Bragg- Gray

Trong thực tế sử dụng, buồng ion hoá chứa không khí là đơn giản và thuận tiện nhất vì không đòi hỏi phải bảo đảm độ kín cao và không đòi hỏi thành buồng phải có độ thấm thấu nhỏ để giữ khí. Dưới đây xét đặc điểm của loại buồng này trong trường bức xạ hỗn hợp neutron – gamma (vì các nguồn bức xạ neutron thường bao giờ cũng có bức xạ gamma kèm theo).

Có thể viết lại biểu thức (4.2-11) cho hai thành phần là năng lượng bức xạ neutron và năng lượng bức xạ gamma được hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích của thành buồng ở dạng sau đây:

$$(\Delta E_Z)_n = \sum_{(i)} q_i \omega_i \cdot (S_{khi}^Z)_i = q_n \cdot \overline{\omega_n} \cdot \overline{(S_{khi}^Z)_n} \quad (4.2-11-b)$$

$$(\Delta E_Z)_\gamma = q_\gamma \cdot \overline{\omega_\gamma} \cdot \overline{(S_{khi}^Z)_\gamma} \quad (4.2-11-c)$$

Do đó, độ ion hoá tổng cộng trong một đơn vị thể tích khí, gây bởi các điện tử và các loại hạt nhân lùi bay ra từ thành buồng, mà ta có thể đo được trong thực tế là:

$$q = q_n + q_\gamma = \frac{(\Delta E_Z)_n}{\overline{\omega_n} \cdot \overline{(S_{khi}^Z)_n}} + \frac{(\Delta E_Z)_\gamma}{\overline{\omega_\gamma} \cdot \overline{(S_{khi}^Z)_\gamma}} \quad (4.2-14)$$

Mặt khác, năng lượng tổng cộng của trường bức xạ hỗn hợp bị hấp thụ trong một đơn vị thể tích thành buồng bằng:

$$\Delta E_{n+\gamma} = \Delta E_n + \Delta E_\gamma \quad (4.2-15)$$

Hai biểu thức (4.2-14 và -15) cho thấy rằng trong trường hợp tổng quát, nếu không biết phần đóng góp riêng của các thành phần bức xạ gamma và nơtron, thì không thể xác định năng lượng bức xạ bị hấp thụ ($\Delta E_{n+\gamma}$) theo độ ion hoá đo được (q) bởi một buồng ion hoá. Có thể khắc phục khó khăn này bằng cách sử dụng buồng ion hoá như sau:

- 1). Buồng ion hoá đồng nhất – loại buồng ion hoá mà vật liệu thành và chất khí có hợp phần nguyên tử như nhau hoặc rất gần nhau; hoặc
- 2). Tổ hợp hai buồng ion hoá, mà một trong số hai buồng đó rất nhạy với bức xạ nơtron và hầu như không nhạy với bức xạ gamma, còn buồng thứ hai thì ngược lại – rất nhạy với bức xạ gamma và hầu như không nhạy với bức xạ nơtron.

4.2.2.3. Buồng ion hoá đồng nhất

thoả mãn ba điều kiện Bragg- Gray

Loại buồng ion hoá đồng nhất có ý nghĩa quan trọng nhất trong ứng dụng thực tế là buồng ion hoá đồng nhất mà tương đương tổ chức cơ thể.

Trong buồng ion hoá đồng nhất tương đương tổ chức cơ thể, thường sử dụng hỗn hợp khí (đã nêu trong mục 4.2.1.3) với ba thành phần tính theo áp suất riêng như sau:

64,4% CH₄;

32,5% CO₂;

3,1% N₂.

Thành buồng loại này thường được làm từ loại chất dẻo tương đương tổ chức cơ thể lại có khả năng dẫn điện, với hợp phần nguyên tử tính theo phần trăm khối lượng như sau:

Hydrô:	10,1%
Nitơ:	3,5%
Cacbon với các vết ôxy:	86,4%

Trong buồng đồng nhất thì chất khí và vật liệu thành có hợp phần nguyên tử giống nhau. Do đó có tương quan sau đây cho tỷ số giữa năng suất hãm của chất rắn Z và năng suất hãm của chất khí đối với các hạt ion hoá loại i:

$$\frac{S_{Z,i}}{S_{khí,i}} = \frac{S_{e,Z,i} \cdot n_{e,Z,i} \cdot \rho_Z}{S_{e,khí,i} \cdot n_{e,khí,i} \cdot \rho_{khí}} = \frac{\rho_Z}{\rho_{khí}} \quad (4.2-16)$$

Trong biểu thức (4.2-16), thì $S_{e,Z,i}$ và $S_{e,khí,i}$ – năng suất hãm tính theo một điện tử trong vật liệu thành buồng hoặc chất khí; $n_{e,Z}$ và $n_{e,khí}$ – số điện tử có trong 1 cm³ của vật liệu thành hoặc khí; ρ_Z và $\rho_{khí}$ – khối lượng riêng của vật liệu thành hoặc khí.

Tỷ số (4.2-16) là đúng cho các loại hạt ion hoá khác nhau. Do đó có tương quan sau đây cho các thành phần bức xạ neutron và gamma:

$$\left(\frac{S_Z}{S_{khí}} \right)_n = \left(\frac{S_Z}{S_{khí}} \right)_\gamma = \frac{\rho_Z}{\rho_{khí}} \quad (4.2-17)$$

Các biểu thức (4.2-12; -14 và -17) cho thấy rằng độ ion hoá tổng cộng (q) đo được bằng buồng ion hoá đồng nhất tương đương tổ chức cơ thể và thoả mãn ba điều kiện Bragg – Gray thì phụ thuộc vào năng lượng bị hấp thụ trong trường bức xạ hỗn hợp neutron+gamma theo tương quan sau đây:

$$q = q_n + q_\gamma = \frac{\rho_{khí}}{\rho_Z} \cdot \left(\frac{(\Delta E_Z)_n}{\omega_n} + \frac{(\Delta E_Z)_\gamma}{\omega_\gamma} \right) \quad (4.2-18)$$

Đối với neutron nhanh thì có thể coi rằng năng lượng trung bình tạo cặp ion $\omega_n = \omega_\gamma = \omega$ với sai số cỡ vài phần trăm.

Mặt khác, có biểu thức sau đây cho suất liều hấp thụ bức xạ hỗn hợp

neutron+gamma trong thành buồng:

$$P_{n+\gamma} = \frac{b}{\rho_Z} \cdot ((\Delta E_Z)_n + (\Delta E_Z)_\gamma) \quad (4.2-19)$$

ở đây b – hệ số có tính tới thứ nguyên của các đại lượng trong biểu thức.

Vì vậy giữa độ ion hoá q và suất liều hấp thụ $P_{n+\gamma}$ có biểu thức liên hệ sau:

$$q = \frac{\rho_{khi}}{b\omega} \cdot P_{n+\gamma} \quad (4.2-20)$$

Tương quan này cho thấy rằng: nếu đo độ ion hoá q (hoặc, cũng như vậy – đo dòng điện ion hoá theo các tương quan (3.1-1 và 3.1-1a)) bằng buồng ion hoá đồng nhất tương đương tổ chức cơ thể và thoả mãn ba điều kiện Bragg–Gray, thì xác định được liều hấp thụ gây bởi bức xạ hỗn hợp gồm hai thành phần là neutron và gamma trong môi trường tương đương tổ chức cơ thể.

Trong thực tế đo liều lượng bức xạ, điều quan trọng là phải xác định được liều tương đương. Khó khăn chủ yếu trong việc này là bởi trọng số của các thành phần bức xạ neutron và gamma có giá trị khác nhau. Nếu tính cận kẽ hơn nữa, thì còn phải kể tới sự khác nhau về trọng số $Q_{TS,i,n}$ của cả các loại sản phẩm i sinh ra do tương tác của neutron nhanh (kể cả hạt nhân lùi xuất hiện do tán xạ neutron đàn hồi). Trong trường hợp như vậy, thì sẽ có biểu thức sau đây cho suất liều tương đương ($\dot{H}_{n+\gamma}$) gây bởi các thành phần bức xạ neutron và gamma:

$$\dot{H}_{n+\gamma} = \frac{c}{\rho_Z} \cdot \left((\Delta E_Z)_\gamma + \sum_i (\Delta E_Z)_{i,n} Q_{TS,i,n} \right) \quad (4.2-21)$$

ở đây c – hệ số tính tới thứ nguyên của suất liều tương đương và các đại lượng khác trong biểu thức.

Biểu thức (4.2-21) cho thấy rằng: nếu không biết phần đóng góp riêng của thành phần gamma và của các loại sản phẩm i gây bởi neutron, thì việc sử dụng buồng ion hoá đồng nhất tương đương tổ chức cơ thể và thoả mãn ba điều kiện Bragg–Gray cũng vẫn chưa cho phép xác định được suất liều tương đương.

Khó khăn này được khắc phục một phần bằng cách dùng hệ đầu dò vi phân để tách riêng hai thành phần liều hấp thụ gây bởi bức xạ gamma và neutron. Một hệ đầu dò vi phân đơn giản được tạo thành từ hai buồng ion hoá đồng nhất; trong đó buồng thứ nhất nhạy với bức xạ gamma mà rất ít nhạy với neutron, còn buồng thứ hai thì tương đương với tổ chức cơ thể. Cách xác định suất liều tương đương và các thành phần của nó bằng hệ đầu dò vi phân đơn giản này dựa trên cơ sở như sau:

$$\dot{H}_{n+\gamma} \approx P_{\gamma} + P_n Q_{TS,n} \quad (4.2-21a)$$

ở đây $Q_{TS,n}$ – trọng số của thành phần bức xạ neutron.

Giả sử dòng điện ion hoá đo được bằng buồng 1 là I_1 , còn bằng buồng 2 là I_2 . Khi đó giữa hai dòng điện này với suất liều hấp thụ gây bởi bức xạ gamma (P_{γ}) và suất liều hấp thụ gây bởi bức xạ neutron (P_n) sẽ có tương quan sau đây:

$$I_1 = a_1 \cdot P_{\gamma} + b_1 \cdot P_n \quad (4.2-22)$$

$$I_2 = a_2 \cdot P_{\gamma} + b_2 \cdot P_n \quad (4.2-23)$$

trong đó a_j và b_j – các hệ số tỷ lệ có giá trị được xác định khi chuẩn hai buồng ion hoá trong các trường bức xạ gamma và neutron riêng biệt. Bốn hệ số này có ý nghĩa vật lý là độ nhạy của từng buồng ion hoá đối với bức xạ gamma (a_j) và bức xạ neutron (b_j) riêng biệt. Muốn hệ đầu dò vi phân có giá trị sử dụng thực tế, thì các hệ số a_j và b_j phải có giá trị ổn định trong vùng giá trị đủ rộng của năng lượng E_{γ} , E_n và suất liều hấp thụ P_{γ} , P_n .

Trên cơ sở biểu thức (4.2-21a) và hệ phương trình (4.2-22 và -23), thu được biểu thức sau đây cho suất liều tương đương:

$$\dot{H}_{n+\gamma} \approx P_{\gamma} + P_n Q_{TS,n} = \frac{I_2 b_1 - I_1 b_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2} + \frac{a_2 I_1 - a_1 I_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2} Q_{TS,n} \quad (4.2-24)$$

Trong trường hợp lý tưởng, khi buồng 1 hoàn toàn không nhạy với tương tác của neutron nhanh (tức là khi $b_1=0$), thì biểu thức (4.2-24) sẽ có dạng đơn

giản như sau:

$$\dot{H}_{n+\gamma} \approx P_{\gamma} + P_n Q_{TS,n} = \frac{I_1}{a_1} + \frac{a_1 I_2 - a_2 I_1}{a_1 b_2} \cdot Q_{TS,n} \quad (4.2-25)$$

4.2.3. Nhận xét

Hiện nay buồng iôn hoá vẫn là một trong số những dụng cụ quan trọng nhất được sử dụng trong thực tế để làm chuẩn và đo liều bức xạ nơtron nhanh. Một trong những khó khăn chủ yếu của phương pháp buồng iôn hoá dùng trong đo liều bức xạ nơtron là phải thoả mãn được hai yêu cầu sau đây:

- a). Đảm bảo sự tương đương với tổ chức cơ thể;*
- b). Đảm bảo độ đồng nhất cao.*

Sự tương đương với tổ chức cơ thể đòi hỏi các vật liệu được sử dụng để làm buồng iôn hoá phải có hợp phần nguyên tử càng giống so với của tổ chức cơ thể thì càng tốt. Tuy nhiên, cần phải nói ngay rằng hợp phần nguyên tử của chính các tổ chức của các cơ quan khác nhau trong cùng một cơ thể sống cũng có thể khác nhau rõ rệt (thí dụ, tổ chức cơ bắp và xương). Trong trường hợp chung, người ta thường lấy tổ chức mềm làm cơ sở. Trong những trường hợp đặc biệt – cần phải đảm bảo sự tương đương về hợp phần nguyên tử của buồng và của các loại tổ chức khác.

Sự đồng nhất của buồng đòi hỏi vật liệu thành buồng và chất khí phải có hợp phần nguyên tử như nhau. Độ đồng nhất của buồng phụ thuộc vào tương quan giữa hiệu ứng khí và hiệu ứng thành. (Tiện đây nhắc lại rằng hiệu ứng khí là đóng góp của các hạt thứ cấp sinh ra do tương tác của nơtron với chất khí làm việc vào độ iôn hoá tổng cộng; còn hiệu ứng thành là đóng góp của các hạt thứ cấp sinh ra do tương tác của nơtron với thành buồng vào độ iôn hoá tổng cộng). *Hiệu ứng khí càng lớn, thì độ đồng nhất của buồng càng phải cao. Ngược lại, nếu hiệu ứng khí là không đáng kể, thì buồng có thể chứa loại khí làm việc bất kỳ. Tiêu chuẩn cơ bản để đánh giá hiệu ứng khí là tỷ số giữa kích thước của vùng khí và quãng chạy của các hạt thứ cấp trong khí đó. Trong trường hợp bức*

xạ neutron, phần lớn các hạt thứ cấp đều có quãng chạy rất ngắn. Do vậy cần đặc biệt thận trọng khi đánh giá hiệu ứng khí.

Việc sử dụng buồng ion hoá để đo liều neutron có những hạn chế do không xác định chính xác được năng lượng trung bình tạo cặp ion đối với các hạt nặng có điện tích nhưng năng lượng thấp. Nghiên cứu cho thấy rằng trong vùng phổ neutron năng lượng thấp, thì năng lượng trung bình tạo cặp ion có giá trị ω tăng lên. Do vậy, việc chỉ sử dụng một giá trị ω cho toàn phổ khi có nhiều neutron năng lượng thấp có thể dẫn đến sai số lớn.

Về nguyên tắc, đòi hỏi về thiết kế chế tạo buồng ion hoá để đo liều neutron nhanh là không khác so với trong thiết kế chế tạo buồng ion hoá để đo liều bức xạ lượng tử. (Đó là những đòi hỏi về: lựa chọn vật liệu cách điện, giảm hiệu ứng tái hợp ion, tăng hiệu suất thu điện tích về điện cực, các phương pháp đo điện tích và dòng điện có giá trị rất nhỏ .v.v.).

Dùng buồng ion hoá đồng nhất thành dây, với đường kính $\sim 3 \div 10$ cm có thể đo được suất liều trong khoảng $\sim (10^{-5} \div 10^2)$ Gyl/h.

4.3. ĐO SUẤT LIỀU NƠTRÔN NHANH BẰNG ỐNG ĐẾM TỶ LỆ

4.3.1. Nguyên tắc của phương pháp đo

Các ống đếm tỷ lệ có hệ số khuếch đại ổn định bao giờ cũng cho xung ra có biên độ tỷ lệ tuyến tính với năng lượng của phân tử bức xạ bị hấp thụ trong vùng nhạy của ống đếm. Do vậy, có thể dùng ống đếm tỷ lệ để đo liều lượng bức xạ. Trong thực tế đo liều lượng bức xạ neutron nhanh, người ta dùng ống đếm tỷ lệ có vật liệu thành và chất khí tương đương với tổ chức cơ thể. Những ống đếm loại này cho phép áp dụng công thức Bragg–Gray mà không hạn chế kích thước vùng khí của ống đếm.

Trong ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể, độ iôn hoá được gây bởi các hạt thứ cấp sinh ra cả trong thành ống và trong vùng khí.

Dưới đây xét mối liên hệ giữa liều hấp thụ notrôn nhanh với độ iôn hoá và biên độ xung ra của ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể.

Giả sử:

- Thể tích khí trong vùng nhạy của ống đếm có giá trị bằng V ;
- Trong mỗi đơn vị thời gian có N hạt thứ cấp xuất hiện trong vùng nhạy của ống đếm (tức là được tạo thành trong đó hoặc lọt vào đó);
- Mỗi hạt thứ cấp i xuất hiện trong vùng nhạy của ống đếm sẽ tạo nên q_i cặp iôn;
- Năng lượng trung bình để tạo cặp iôn bởi hạt thứ cấp i có giá trị bằng ω_i .

Theo công thức Bragg-Gray (xem công thức (3.1-22) và (4.2-11)), thì năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong mỗi đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích của thành ống đếm có giá trị bằng:

$$(\Delta E_Z)_n = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N q_i \omega_i \cdot (S_{khí}^Z)_i \quad (4.3-1)$$

Đối với một hệ đồng nhất, như đã xét trong mục 4.2.2.3., thì tỷ số $(S_{khí}^Z)_i$ giữa năng suất hãm của chất rắn Z và năng suất hãm của chất khí đối với hạt iôn hoá i là được xác định theo công thức (4.2-16) và có giá trị bằng tỷ số $\rho_Z/\rho_{khí}$ giữa khối lượng riêng của vật liệu thành với khối lượng riêng của chất khí trong ống đếm.

Trên cơ sở các biểu thức (4.3-1), (4.2-16) và (4.2-19), thu được biểu thức sau đây cho suất liều hấp thụ notrôn nhanh P_n trong ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể:

$$P_n = \frac{b}{\rho_Z} \cdot (\Delta E_Z)_n = \frac{b}{V \rho_{khí}} \cdot \sum_{i=1}^N q_i \omega_i \quad (4.3-2)$$

ở đây, cũng như trong biểu thức (4.2-19), b – hệ số tính tới thứ nguyên của suất liều và các đại lượng khác trong biểu thức.

Mặt khác, mỗi hạt thứ cấp i xuất hiện trong vùng nhạy của ống đếm tỷ lệ sẽ làm xuất hiện ở mạch ra của ống đếm một xung điện với biên độ U_i được xác định theo biểu thức sau đây:

$$U_i = akq_i \quad (4.3-3)$$

trong đó: a – hệ số tính tới thứ nguyên của các đại lượng có mặt trong biểu thức; k – hệ số khuếch đại khí của ống đếm tỷ lệ.

Thế giá trị q_i từ biểu thức (4.3-3) vào biểu thức (4.3-2), thu được biểu thức liên hệ sau đây của suất liều hấp thụ nơtron nhanh P_n với biên độ xung ra của ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể:

$$P_n = \frac{b}{V \rho_{khí}} \cdot \frac{1}{ak} \cdot \sum_{i=1}^N U_i \omega_i \quad (4.3-4)$$

Nếu coi năng lượng trung bình tạo cặp ion của tất cả các loại hạt thứ cấp là như nhau $\omega_i = \omega$, thì biểu thức liên hệ (4.3-4) sẽ có dạng đơn giản như sau:

$$P_n = \frac{b}{V \rho_{khí}} \cdot \frac{\omega}{ak} \cdot \sum_{i=1}^N U_i \quad (4.3-5)$$

Phân tích các biểu thức (4.3-5) và (4.3-2), ta thấy năng lượng bức xạ nơtron nhanh bị hấp thụ trong toàn bộ vùng nhạy của ống đếm tỷ lệ có giá trị được xác định theo biểu thức sau đây:

$$(\Delta E_{khí})_n \cdot V = \frac{\omega}{ak} \cdot \sum_{i=1}^N U_i \quad (4.3-6)$$

Giá trị này tỷ lệ với diện tích S dưới đường cong của phổ biên độ xung ra của ống đếm (tính cho một đơn vị thời gian đo). Do đó, có thể viết lại biểu thức (4.3-5) như sau:

$$P_n = \frac{h}{V \rho_{khí}} \cdot s_0 S \quad (4.3-7)$$

Trong biểu thức (4.3-7), hệ số s_0 có ý nghĩa vật lý là giá trị năng lượng bị hấp thụ trong toàn bộ vùng nhạy của ống đếm trong một đơn vị thời gian, ứng với một đơn vị diện tích dưới đường cong của phổ biên độ xung ra.

Như vậy, biểu thức (4.3-7) cho thấy rằng: nếu đo phổ biên độ xung ra của ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể và xác định diện tích dưới đường cong của phổ này, thì có thể xác định được suất liều hấp thụ nơtron nhanh P_n bằng ống đếm đó.

Trong thực tế, để đo liều hấp thụ nơtron, thì cần phải xác định được giá trị s_0 của hệ đo cụ thể. Muốn vậy, người ta thường phải chuẩn ống đếm tỷ lệ theo bức xạ alpha của một nguồn phóng xạ alpha được đặt trong vùng khí của ống đếm. Nguồn alpha này phải có sơ đồ phân rã và độ phóng xạ xác định. Giả sử, nguồn chuẩn có độ phóng xạ bằng A [Bq], phát ra các nhóm hạt α , có năng lượng là $E_{\alpha i}$ với cường độ tương đối là m_i . Gọi k_i là phân tương đối của số hạt α_i bay lọt tới vùng nhạy của ống đếm tỷ lệ; còn m_i – phần năng lượng của các hạt alpha thuộc nhóm i được hấp thụ trong vùng nhạy. Nếu vậy, trong mỗi đơn vị thời gian, năng lượng bức xạ alpha bị hấp thụ trong vùng nhạy của ống đếm tỷ lệ sẽ có giá trị được xác định theo biểu thức sau đây:

$$\Delta E_{\alpha} = A \sum_{(i)} E_{\alpha i} m_i k_i \quad (4.3-8)$$

Toàn bộ giá trị năng lượng này tương ứng với diện tích chuẩn $S_{ch, \alpha}$ dưới đường cong của phổ biên độ xung ra đo được bằng ống đếm tỷ lệ. Do đó hệ số s_0 trong biểu thức (4.3-7) sẽ có giá trị được chuẩn theo hệ đo và được xác định như sau:

$$s_0 = \frac{A \sum_{(i)} E_{\alpha i} m_i k_i}{S_{ch, \alpha}} \quad (4.3-9)$$

Sau khi đã chuẩn được giá trị của hệ số s_0 như vừa nêu trên, có thể dùng ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể để xác định liều hấp thụ nơtron nhanh

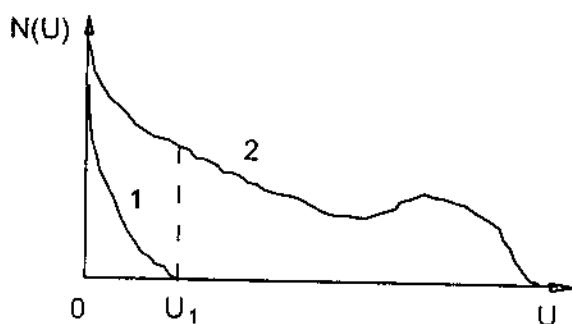
trên cơ sở tương quan (4.3-7) giữa suất liều và phổ biên độ xung của ống đếm.

4.3.2. Đo suất liều neutron nhanh trong trường bức xạ hỗn hợp n-gamma

Khi ống đếm tỷ lệ nằm trong trường bức xạ hỗn hợp n-gamma, thì cả hai thành phần bức xạ neutron và gamma đều tạo nên những xung ra tương ứng với chúng. Xung ra ứng với tương tác của neutron thì được tạo bởi các hạt nhân lùi (chủ yếu là proton). Trong khi đó, xung ra ứng với tương tác của lượng tử gamma thì được tạo bởi các điện tử. Vì điện tử có mật độ ion hoá nhỏ hơn rất nhiều so với của proton, nên lượng tử cho xung ra có biên độ nhỏ hơn so với biên độ xung ra của neutron ($U_{i,n} < U_{j,n}$). Do đó, nếu dùng “bộ phân liệt” (thuật ngữ tương đương trong tiếng Anh là “discriminator”) chỉ cho phép xung ra khi xung tới có biên độ lớn hơn một giá trị đã đặt trước gọi là ngưỡng dưới, mà ngưỡng dưới bằng biên độ xung gây bởi lượng tử gamma, thì có thể loại trừ được ảnh hưởng của nền nhiễu gây bởi bức xạ gamma khi đo liều neutron nhanh trong trường bức xạ hỗn hợp n-gamma. Tuy nhiên, bằng cách cắt ngưỡng như thế này, ta không chỉ loại bỏ các xung nhiễu gây bởi bức xạ gamma, mà còn đồng thời cắt mất cả một phần phổ gồm những xung gây bởi neutron nhưng có biên độ nhỏ dưới ngưỡng ($U < U_1$, xem hình H4.3-1). Phần phổ biên độ xung gây bởi neutron mà bị cắt mất này thường được gọi là phần mất dưới ngưỡng.

Phần mất dưới ngưỡng có thể dẫn tới sai số cỡ hàng chục phần trăm khi xác định liều neutron nhanh trong trường bức xạ hỗn hợp n-gamma bằng cách này. Thí dụ, để đo suất liều neutron nhanh gây bởi nguồn Po- α -Be với giá trị $P_n = 1 \text{ mRad/h}$ khi nền nhiễu gây bởi nguồn gamma ^{60}Co có giá trị bằng $P_\gamma = 1 \text{ Rad/h}$, thì phải đặt ngưỡng phân liệt ở mức $U_1 \sim 0,2 \text{ MeV}$. Do có phần mất dưới ngưỡng, nên khoảng 10% năng lượng neutron bị hấp thụ mà không được ghi nhận.

Vậy, phần mất dưới ngưỡng phụ thuộc vào những yếu tố gì, và nó được đánh giá như thế nào?



Hình H4.3-1. Phổ biên độ xung ra gây bởi bức xạ neutron (2) và gamma (1), đo được bằng ống đếm tỷ lệ. U – biên độ xung điện ở mạch ra của ống đếm tỷ lệ; $N(U)$ – số xung có biên độ bằng U ; U_1 – ngưỡng dưới của bộ phân liệt.

Có hai khả năng tạo nên phần mất dưới ngưỡng; đó là:

1. Các prôtôn lùi (sinh ra do tán xạ đàn hồi của neutron nhanh) có thể có động năng từ 0 tới cực đại. Những prôtôn với động năng nhỏ có thể tạo nên xung ra có biên độ thấp dưới ngưỡng phân liệt.
2. Prôtôn với động năng bất kỳ có thể tạo xung ra có biên độ thấp dưới ngưỡng nếu nó có quãng đường chuyển động quá ngắn trong vùng nhạy của ống đếm và mất phần lớn năng lượng ở ngoài vùng nhạy.

Thực tế thì mất dưới ngưỡng chủ yếu là do nguyên nhân thứ nhất. Trong trường hợp này, có thể đánh giá phần mất dưới ngưỡng như sau.

Khi xét biến đổi năng lượng của neutron trong môi trường, ta đã biết hạt nhân lùi có động năng được xác định theo công thức (4.1-1). Theo công thức này, prôtôn lùi thu được động năng có giá trị bằng:

$$E = E_0 \cdot \cos^2 \varphi \quad (4.3-10)$$

với E_0 – động năng của neutron trước khi xảy ra sự kiện tán xạ; φ – góc bay ra của prôtôn so với hướng chuyển động ban đầu của neutron trong hệ tọa độ Phòng Thí Nghiệm.

Giả sử $f(E)dE$ – xác suất để prôtôn lùi có năng lượng trong khoảng từ E tới $E+dE$; còn $f(\varphi)d\varphi$ – xác suất để prôtôn lùi bay ra dưới góc từ φ tới $\varphi+d\varphi$. Hai xác suất này có giá trị bằng nhau, nhưng vì khi góc bay φ tăng lên, thì động năng E của prôtôn lại giảm xuống, nên:

$$f(\varphi)d\varphi = -f(E)dE$$

hoặc, viết theo cách khác:

$$f(\varphi) = -f(E)\frac{dE}{d\varphi} \quad (4.3-11)$$

Từ biểu thức (4.3-10), tìm được tương quan sau đây:

$$\frac{dE}{d\varphi} = -2E_0 \cos\varphi \cdot \sin\varphi \quad (4.3-12)$$

Trên cơ sở biểu thức (4.3-11 và -12), thu được biểu thức sau đây cho $f(\varphi)$:

$$f(\varphi) = 2 \sin\varphi \cdot \cos\varphi \quad (4.3-13)$$

Xác suất để prôtôn bay ra trong giới hạn góc từ 0 đến φ có giá trị $F_1(<\varphi)$ được xác định theo biểu thức sau đây:

$$F_1(<\varphi) = \int_0^{\varphi} f(\varphi)d\varphi = \sin^2\varphi \quad (4.3-14)$$

Còn xác suất để prôtôn bay ra dưới góc lớn hơn φ , thì có giá trị $F_2(>\varphi)$ được xác định như sau:

$$F_2(>\varphi) = 1 - F_1(<\varphi) = \cos^2\varphi \quad (4.3-15)$$

Giả sử, ngưỡng phân liệt U_1 tương ứng với năng lượng ngưỡng E_{ng} và bằng động năng của prôtôn lùi bay ra dưới góc φ_1 :

$$E_{ng} = E_0 \cos^2\varphi_1 \quad (4.3-16)$$

Trong số N_p prôtôn lùi được tạo thành, thì số prôtôn có góc bay ra $\varphi > \varphi_1$ (và do đó thu được động năng có giá trị từ 0 tới E_{ng}) được xác định theo biểu thức (4.3-15) và bằng:

$$N_p F_2(>\varphi_1) = N_p \cos^2\varphi_1 \quad (4.3-17)$$

Mặt khác, do tán xạ đàn hồi của notrôn trên hạt nhân hydro là đẳng hướng, nên các prôtôn lùi có thể nhận được động năng có giá trị từ 0 đến E_0 với xác suất như nhau $f(E)=1/E_0$. Do đó xác suất để prôtôn có năng lượng trong khoảng từ 0 tới E_{ng} là E_{ng}/E_0 . Điều này cho phép viết tiếp biểu thức (4.3-17) xác định số prôtôn lùi có động năng trong khoảng từ 0 tới E_{ng} như sau:

$$N_p F_2(>\varphi_1) = N_p \cos^2 \varphi_1 = N_p \cdot E_{ng} / E_0 \quad (4.3-17a)$$

Động năng trung bình của mỗi prôtôn này có giá trị bằng:

$$\overline{E_p} = \frac{E_{ng}}{2} \quad (4.3-18)$$

Năng lượng bức xạ notrôn mà ống đếm đã hấp thụ nhưng không được ghi nhận do mất dưới ngưỡng bằng:

$$(\Delta E)_{n,0} = N_p \cdot \frac{E_{ng}}{E_0} \cdot \frac{E_{ng}}{2} = N_p \cdot \frac{E_{ng}^2}{2E_0} \quad (4.3-19)$$

Trong khi đó, toàn bộ năng lượng bức xạ notrôn bị hấp thụ trong ống đếm có giá trị bằng:

$$(\Delta E)_n = N_p \cdot \frac{E_0}{2} \quad (4.3-20)$$

Sai số tương đối do mất dưới ngưỡng được đánh giá bằng cách chia giá trị của biểu thức (4.3-19) cho giá trị của biểu thức (4.3-20). Nó có giá trị bằng:

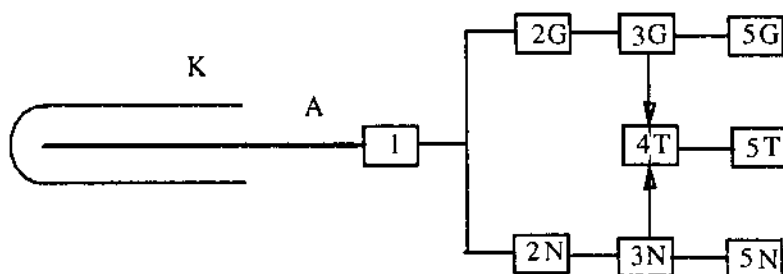
$$\delta = \left(\frac{E_{ng}}{E_0} \right)^2 \quad (4.3-21)$$

Biểu thức (4.3-21) cho thấy: ngưỡng phân liệt U_1 (và tương ứng với nó là năng lượng ngưỡng E_{ng}) càng thấp so với năng lượng E_0 của notrôn tới, thì sai số do mất dưới ngưỡng càng nhỏ. Song, điều này chỉ đúng và áp dụng được khi ảnh hưởng của bức xạ gamma là nhỏ không đáng kể.

Trong trường hợp bức xạ gamma mạnh, vài xung gây bởi bức xạ gamma có thể chồng chập lên nhau, tạo thành một xung có biên độ lớn tới mức có thể bị ghi nhận (nhầm) là một xung gây bởi notrôn. Do đó, muốn loại trừ ảnh hưởng

của bức xạ gamma trong trường hợp này, phải nâng cao ngưỡng phân liệt. Mà điều này thì lại làm tăng sai số do mất dưới ngưỡng. Mâu thuẫn này luôn tồn tại và chỉ có thể giải quyết được trên cơ sở nhân nhượng hợp lý trong những điều kiện đo cụ thể.

Khi ngưỡng phân liệt có giá trị lớn, cần phải tính tới cả phần mất dưới ngưỡng gây bởi nguyên nhân thứ 2 – do một số prôtôn lùì có quãng đường chuyển động trong vùng nhảy quá ngắn.



Hình 4.3-2. Xác định suất liều bức xạ hỗn hợp n-gamma bằng ống đếm tỷ lệ, dùng hai kênh để ghi nhận đóng góp riêng của từng thành phần bức xạ gamma và neutron. Ký hiệu: K và A – katốt và anốt của ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể; G – kênh đo gamma; N – kênh đo neutron; T – đo tổng; 1 – tiền khuếch đại và khuếch đại tín hiệu; 2 – bộ chọn tín hiệu của mỗi kênh; 3 – bộ biến đổi và xử lý tín hiệu; 4 – bộ cộng số xung chuẩn từ 2 kênh; 5 – hiển thị kết quả đo.

Sai số đo liều neutron trong trường bức xạ hỗn hợp n-gamma có thể giảm xuống nhiều bằng cách không cất ngưỡng, mà dùng hai kênh để ghi nhận các xung gây bởi riêng thành phần bức xạ gamma và riêng thành phần bức xạ neutron (như được thể hiện trên hình H4.3-2). Trong từng kênh, biên độ của mỗi xung ban đầu được biến đổi thành độ dài xung và cho ra một số lượng xung chuẩn (về dạng) tỷ lệ với biên độ của xung ban đầu đó. Tổng số xung chuẩn của từng kênh ghi nhận được trong một đơn vị thời gian cho ta giá trị tỷ lệ với suất liều hấp thụ gây bởi thành phần bức xạ tương ứng. Nếu thành phần bức xạ neutron có trọng số $Q_{TS,n} = k$, và, trong kênh ghi nhận xung tạo bởi thành phần

bức xạ neutron, mà tổng số xung chuẩn được tạo thành lớn gấp k lần suất liều hấp thụ neutron, thì tổng số xung chuẩn của kênh này có giá trị đúng bằng suất liều tương đương của thành phần bức xạ neutron. Trong trường hợp này, tổng số xung chuẩn của cả hai kênh cho ta giá trị suất liều tương đương toàn phần của bức xạ hỗn hợp n -gamma.

4.4. ĐO LIỀU NƠTRÔN NHANH BẰNG PHƯƠNG PHÁP KÍCH HOẠT

Do tương tác với neutron, hạt nhân của nhiều đồng vị bền bị "kích hoạt" – tức là bị biến đổi thành hạt nhân của đồng vị phóng xạ. Bằng cách đo độ phóng xạ cảm ứng thu được do kích hoạt, có thể xác định được thông lượng neutron tại vị trí cần đo trong trường bức xạ. Nhờ vậy xác định được liều bức xạ neutron tại đó. Cách đo này được gọi là đo liều bức xạ neutron bằng phương pháp kích hoạt.

4.4.1. Nguyên tắc đo liều neutron bằng phương pháp kích hoạt

Giả sử cần xác định liều neutron tại vị trí r cho trước nào đó. Để đơn giản, ta hãy xét trường hợp khi trường neutron tại đây không thay đổi theo thời gian. Khi đó tại vị trí này mật độ thông lượng neutron có giá trị (mà ta chưa biết) là:

$$\Phi(r,t,E) = \int_{(E)} \varphi(r,t,E) dE \equiv \int_{(E)} \varphi(E) dE \quad (4.4-1)$$

với $\Phi(r,t,E)$ – mật độ thông lượng neutron [$\text{n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$] có động năng lớn hơn hoặc bằng E [MeV] ở thời điểm t tại vị trí r ; $\varphi(E) \equiv \varphi(r,t,E)$ – mật độ thông lượng neutron [$\text{n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$] có năng lượng trong khoảng từ E [MeV] đến $E+dE$ [MeV] ở thời điểm t tại vị trí r .

Giả sử, một đầu dò kích hoạt dạng lá có diện tích $S[\text{cm}^2]$, đủ mỏng, được đặt vào vị trí cần xác định liều neutron mà không làm nhiễu loạn trường neutron

tại đó. Số hạt nhân đồng vị bền cùng loại được chứa trong lá đầu dò này tính cho mỗi đơn vị diện tích 1cm^2 là $n[\text{cm}^{-2}]$, nó có giá trị đủ lớn để có thể coi được là không thay đổi trong suốt quá trình kích hoạt. Nếu vậy, thì số hạt nhân phóng xạ cảm ứng tích lũy được trong khoảng thời gian từ thời điểm t đến $t+dt$ là:

$$\frac{dN}{dt} = n.S. \int_{(E)} \varphi(E)\sigma(E)dE - \lambda N \quad (4.4-2)$$

trong đó: N – số hạt nhân phóng xạ được tạo thành trong đầu dò nhưng chưa phân rã ở thời điểm đang kích hoạt là t ; $\sigma(E)$ – tiết diện của phản ứng kích hoạt hạt nhân bia bởi neutron có năng lượng bằng E ; λ – hằng số phân rã của hạt nhân phóng xạ mới tạo thành.

Số hạt nhân phóng xạ được tạo thành trong đầu dò ngay trong quá trình đang kích hoạt ở thời điểm t là:

$$N(t) = \frac{(1-e^{-\lambda t})}{\lambda} nS \int_{(E)} \varphi(E)\sigma(E)dE \quad (4.4-3)$$

Do đó, độ phóng xạ cảm ứng $A(t)$ của đầu dò thu được ở thời điểm t trong khi đang kích hoạt là:

$$A(t) = \lambda N(t) = (1-e^{-\lambda t}) nS \int_{(E)} \varphi(E)\sigma(E)dE \quad (4.4-4)$$

Giả sử, đầu dò đã được kích hoạt trong khoảng thời gian dài bằng t_0 ; liền sau đó được đưa ra khỏi trường bức xạ neutron. Kể từ đó, độ phóng xạ của đầu dò sẽ giảm theo quy luật hàm mũ. Vì vậy, độ phóng xạ cảm ứng của đầu dò tại thời điểm t_1 kể từ khi ngừng kích hoạt được xác định theo công thức sau đây:

$$A(t_0, t_1) = A(t_0)e^{-\lambda t_1} = (1-e^{-\lambda t_0})e^{-\lambda t_1} nS \int_{(E)} \varphi(E)\sigma(E)dE \quad (4.4-5)$$

Như vậy, có thể xác định được mật độ thông lượng neutron $\varphi(E) \equiv \varphi(r, t, E)$ nếu xác định được độ phóng xạ cảm ứng A và biết các đại lượng liên quan khác có trong biểu thức (4.4-5).

Mặt khác, giả sử, mỗi nơtron với năng lượng bằng E khi lọt vào cơ thể thì gây nên một suất liều tương đương có giá trị bằng $k(E)$. Khi đó, tại vị trí r trong cơ thể, *liều tương đương* gây bởi toàn phổ nơtron Φ (được định nghĩa theo công thức (4.4-1)) trong khoảng thời gian chiếu xạ t_0 sẽ có giá trị bằng:

$$H(t_0) = t_0 \int (E) k(E) \varphi(E) dE \quad (4.4-6)$$

trong đó $k(E)$ – hệ số tỷ lệ, có ý nghĩa vật lý là suất liều tương đương gây bởi 1 nơtron với năng lượng bằng E . Trong trường hợp tổng quát, khi trường nơtron thay đổi theo thời gian, thì biểu thức (4.4-6) được viết lại như sau:

$$H(t_0) = \int_0^{t_0} dt \int (E) k(E) \varphi(t, E) dE \quad (4.4-6.a)$$

Như vậy, xác định được mật độ thông lượng nơtron thông qua độ phóng xạ cảm ứng của đầu dò kích hoạt, có thể xác định được liều tương đương gây bởi nơtron theo công thức (4.4-6 hoặc -6.a). Tuy nhiên, các biểu thức (4.4-5 và -6, -6.a) cho thấy rằng việc tính liều tương đương đòi hỏi phải biết phân bố theo năng lượng của bức xạ nơtron và tiết diện kích hoạt của đầu dò.

Tiết diện kích hoạt của đầu dò có giá trị khác nhau, phụ thuộc vào năng lượng của nơtron. Trong thực tế đo liều nơtron, thường phải làm việc với ba nhóm nơtron là: nơtron nhanh, nơtron năng lượng trung gian (tạo thành do nơtron nhanh bị làm chậm), và, nơtron nhiệt. Mỗi nhóm nơtron này đều có đặc trưng riêng về phổ năng lượng, cũng như về phản ứng kích hoạt và tiết diện của phản ứng kích hoạt đó. Trên cùng một loại hạt nhân (của đầu dò), các nhóm nơtron này có thể gây nên những phản ứng kích hoạt khác nhau, và do đó, có thể tạo thành những hạt nhân phóng xạ khác nhau (với các hằng số phân rã khác nhau là $\lambda_{\text{nhiệt}} \neq \lambda_{\text{trung gian}} \neq \lambda_{\text{nhanh}}$).

Dưới đây chúng ta xét tương quan giữa liều nơtron và độ phóng xạ cảm ứng của đầu dò kích hoạt đối với từng nhóm nơtron.

4.4.2. Xác định liều neutron nhiệt bằng phương pháp kích hoạt

Neutron có năng lượng không quá 0,5 eV thường được gọi là neutron nhiệt. Nhóm neutron này tuân theo phân bố Mácxoen về tốc độ chuyển động và có năng lượng bằng 0,025 eV với xác suất lớn nhất.

Trong trường neutron phức tạp, có thể tách neutron nhiệt bằng lớp chắn làm từ cadmi. (Nguyên tố Cd có tiết diện hấp thụ neutron nhiệt rất lớn, cỡ 2.10^4 barn). Lớp chắn bằng Cd dày cỡ từ 0,5mm ÷ 1 mm hấp thụ hầu hết các neutron có năng lượng dưới 0,5 eV. Nếu đầu dò được bao bọc trong lớp vỏ Cd như vậy trong suốt thời gian kích hoạt, thì có thể coi độ phóng xạ cảm ứng A_{Cd} của nó là được gây bởi các neutron có năng lượng trên 0,5 eV (còn gọi là “neutron trên nhiệt”).

Giả sử có hai đầu dò kích hoạt với mọi đặc trưng giống hệt nhau. Một đầu dò được bọc trong lớp vỏ bằng Cd; còn đầu dò kia thì không có vỏ bọc Cd. Cả hai đầu dò này đều được kích hoạt trong những điều kiện hoàn toàn như nhau. Gọi A_0 là độ phóng xạ cảm ứng của đầu dò không được bọc trong lớp Cd; còn A_{Cd} – độ phóng xạ cảm ứng của đầu dò được bọc trong lớp Cd. Khi đó, độ phóng xạ cảm ứng gây bởi riêng neutron nhiệt $A_{nhiệt}$ được xác định như sau:

$$A_{nhiệt} = A_0 - A_{Cd} \quad (4.4-7)$$

Đối với neutron nhiệt, có thể coi tiết diện kích hoạt có giá trị không đổi và bằng tiết diện kích hoạt σ_0 của neutron năng lượng 0,025 eV. Do vậy, tích phân trong biểu thức (4.4-5) sẽ có giá trị như sau:

$$\int_{(E_{nhiệt})} \varphi(E) \sigma(E) dE = \sigma_0 \Phi_{nhiệt} \quad (4.4-8)$$

với $\Phi_{nhiệt}$ – mật độ thông lượng neutron nhiệt tính trung bình theo thời gian [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$] tại vị trí đặt đầu dò.

Trên cơ sở các biểu thức (4.4-5 và -7, -8), thu được các tương quan sau:

$$A_{nhiệt}(t_0, t_1) = A_0 - A_{Cd} = nS\sigma_0\Phi_{nhiệt}(1 - e^{-\lambda_{nhiệt}t_0})e^{-\lambda_{nhiệt}t_1} \quad (4.4-9)$$

$$\Phi_{nhiệt} = \frac{A_0 - A_{Cd}}{nS\sigma_0 \left(1 - e^{-\lambda_{nhiệt} t_{0,0}}\right) e^{-\lambda_{nhiệt} t_{1,0}}} \quad (4.4-10.a)$$

Trong trường hợp tổng quát, hai đầu dò không được bọc trong vỏ Cd và được bọc trong vỏ Cd có thể có một số đặc trưng khác nhau (như: khối lượng, thời gian kích hoạt, thời gian chờ đợi trước khi đo, thời gian đo). Vì vậy không thể áp dụng các công thức (4.4-7, -9 và -10.a) được. Áp dụng công thức (4.4-5) cho hai đầu dò trong trường hợp tổng quát sẽ được các tương quan sau đây:

$$A_{Cd} = (nS)_{Cd} \cdot \int_{E_{Cd}}^{E_{max}} \varphi(E) \sigma(E) dE \cdot (1 - e^{-\lambda_{nhiệt} t_{0,Cd}}) e^{-\lambda_{nhiệt} t_{1,Cd}} \quad (4.4-5.a)$$

$$A_0 = (nS)_0 \left(\sigma_0 \Phi_{nhiệt} + \int_{E_{Cd}}^{E_{max}} \varphi(E) \sigma(E) dE \right) (1 - e^{-\lambda_{nhiệt} t_{0,0}}) e^{-\lambda_{nhiệt} t_{1,0}} \quad (4.4-5.b)$$

trong đó chỉ số "Cd" và "0" – cho biết rằng đại lượng thuộc trường hợp mẫu được bọc trong vỏ Cd hoặc không có vỏ bọc này; $t_{0,Cd}$ và $t_{1,Cd}$ – có ý nghĩa tương tự như trong công thức (4.4-5) cho trường hợp mẫu được bọc trong vỏ Cd; còn $t_{0,0}$ và $t_{1,0}$ – cho trường hợp mẫu không có vỏ bọc Cd; E_{Cd} – ngưỡng năng lượng cadmi ($=0,4$ eV); E_{max} – năng lượng cao nhất của phổ nơtron.

Do vậy có biểu thức xác định mật độ thông lượng nơtron cho trường hợp tổng quát như sau:

$$\Phi_{nhiệt} = \frac{1}{\sigma_0} \left[\frac{A_0}{(nS)_0 \left(1 - e^{-\lambda_{nhiệt} t_{0,0}}\right) e^{-\lambda_{nhiệt} t_{1,0}}} - \frac{A_{Cd}}{(nS)_{Cd} \left(1 - e^{-\lambda_{nhiệt} t_{0,Cd}}\right) e^{-\lambda_{nhiệt} t_{1,Cd}}} \right] \quad (4.4-10)$$

Mặt khác, như đã trình bày trong mục 4.1.2, liều hấp thụ neutron nhiệt chủ yếu được tạo bởi các phản ứng $H^1(n,\gamma)H^2$ và $N^{14}(n,p)C^{14}$ với tiết diện có thể coi là không đổi. Vì vậy, biểu thức (4.4-6) xác định liều tương đương gây bởi neutron nhiệt (khi cơ thể bị chiếu xạ trong khoảng thời gian t_0) có dạng như sau:

$$H_{\text{nhiệt}}(t_0) = t_0 \cdot k_{\text{nhiệt}} \cdot \Phi_{\text{nhiệt}} \quad (4.4-11)$$

Thế giá trị $\Phi_{\text{nhiệt}}$ từ biểu thức (4.4-10) vào biểu thức (4.4-11), thì được biểu thức để xác định liều tương đương gây bởi neutron nhiệt bằng phương pháp kích hoạt như sau:

$$H_{\text{nhiệt}} = k_{\text{nhiệt}} \cdot \frac{t_0}{\sigma_0} \cdot \left[\frac{A_0}{(nS)_0 (1 - e^{-\lambda_{\text{nhiệt}} t_{0,0}}) e^{-\lambda_{\text{nhiệt}} t_{1,0}}} - \frac{A_{Cd}}{(nS)_{Cd} (1 - e^{-\lambda_{\text{nhiệt}} t_{0,Cd}}) e^{-\lambda_{\text{nhiệt}} t_{1,Cd}}} \right] \quad (4.4-12)$$

Bảng B4.4-1. Đặc trưng của một số đầu dò kích hoạt thường dùng đối với nhóm neutron nhiệt

Đồng vị ban đầu					Đồng vị phóng xạ được tạo thành			
Ký hiệu của đồng vị	Độ phổ biến trong tự nhiên, %	Tiết diện kích hoạt bởi neutron nhiệt, σ_0 , barn	Tích phân cộng hưởng, barn	Năng lượng của đỉnh cộng hưởng, eV	Ký hiệu của đồng vị	Chu kỳ rã nửa	Năng lượng cực đại của hạt beta, MeV	Năng lượng của lượng tử (và cường độ của vạch phổ) MeV (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
^{23}Na	100	0,513 $\pm 0,005$	0,311	--	^{24}Na	14,96 h	1,393	1,369 (100%); 2,754 (99,9%)
^{55}Mn	100	13,2 $\pm 0,2$	14,0 $\pm 0,3$	337	^{56}Mn	2,579 h	2,848	0,847 (98,9%) 1,811 (27,2%) 2,113 (14,3%)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(6)
⁵⁹ Co	100	37,18	74±2	--	⁶⁰ Co	5,271 năm	0,318	1,173 (100%); 1,333 (100%)
¹¹⁵ In	95,71	205 gồm 73±8 (m ₁) 54,4min : 88±8 (m ₂) 2,16 s; 44±2(g) 14,1 s	3300 gồm 2650 (m ₁ + m ₂) và 650 (g)	1,45	^{116m} In	54,41 min	1,01	0,417 (27,7%) 0,819 (11,5%) 1,097 (56,2%) 1,294 (84,4%) 1,507 (10,0%) 2,112 (15,5%)
¹⁹⁷ Au	100	98,65 ±9	1550 ± 28	4,9	¹⁹⁸ Au	2,695 ngày	0,961	0,412 (95,6%) 0,676 (0,80%) 1,088 (0,16%) 0,0708 (2,2%)

Hệ số $k_{\text{nhiệt}}$ trong hai biểu thức (4.4-11 và -12) đã được đánh giá theo biểu thức (4.1-12) và có giá trị bằng:

$$k_{\text{nhiệt}} \approx (6 \div 9) \cdot 10^{-12} \text{ Sv} \cdot (\text{n/cm}^2)^{-1} \quad (4.4-13)$$

Đặc trưng của một số đầu dò kích hoạt thường dùng đối với nhóm nơtron nhiệt được nêu trong bảng B4.4-1.

4.4.3. Xác định liều nơtron năng lượng trung gian bằng phương pháp kích hoạt

Nơtron năng lượng trung gian được tạo thành do quá trình làm chậm nơtron nhanh *thường có phổ năng lượng* $\varphi(E)$ tương ứng với sự thay đổi năng lượng của nơtron theo quy luật hàm $1/E$:

$$\varphi(E) = \frac{a}{E} \quad (4.4-14)$$

ở đây hệ số tỷ lệ $a = \text{const}$ có tính tới thứ nguyên của năng lượng nơtron $[E]$ và

mật độ thông lượng $[\varphi]$ của chúng.

Trong trường hợp này, tích phân trong biểu thức (4.4-5) có dạng như sau:

$$\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) \sigma(E) dE = \int_{E_1}^{E_2} \frac{a}{E} \sigma(E) dE = a \int_{E_{Cd}}^{E_2} \frac{\sigma(E)}{E} dE = aI \quad (4.4-15)$$

$$I = \int_{E_{Cd}}^{E_2} \frac{\sigma(E)}{E} dE \quad (4.4-16)$$

trong đó E_1 và E_2 – giới hạn dưới và giới hạn trên của phổ neutron năng lượng trung gian; I – tích phân cộng hưởng.

Do tiết diện kích hoạt trong vùng neutron năng lượng trung gian có thể có những đỉnh cộng hưởng, nên đầu dò kích hoạt dùng để đo thông lượng neutron trung gian còn được gọi là đầu dò cộng hưởng. Tích phân cộng hưởng đặc trưng cho độ kích hoạt tổng cộng của các neutron có năng lượng cao hơn ngưỡng cadmi E_{Cd} .

Trên cơ sở các biểu thức (4.4-5), (4.4-15 và -16), thu được tương quan sau đây cho độ phóng xạ cảm ứng của đầu dò kích hoạt bởi neutron năng lượng trung gian tại thời điểm t_1 kể từ khi ngừng kích hoạt:

$$A_{trung\ gian}(t_0, t_1) = nSaI(1 - e^{-\lambda_{trung\ gian}t_0})e^{-\lambda_{trung\ gian}t_1} \quad (4.4-17)$$

với t_0 – khoảng thời gian kích hoạt.

Mặt khác, đối với neutron trung gian có phổ năng lượng tuân theo quy luật $1/E$, thì có thể viết biểu thức xác định liều (4.4-6) dưới dạng sau đây:

$$H_{trung\ gian}(t_0) = t_0 \int_{E_{Cd}}^{E_2} k(E) \frac{a}{E} dE = t_0 a \int_{E_{Cd}}^{E_2} \frac{k(E)}{E} dE = t_0 a a_1 \quad (4.4-18)$$

$$a_1 = \int_{E_{Cd}}^{E_2} \frac{k(E)}{E} dE \quad (4.4-19)$$

Thế giá trị của hệ số tỷ lệ a được xác định từ biểu thức (4.4-17) vào biểu thức (4.4-18), sẽ được tương quan giữa liều tương đương gây bởi nơtron năng lượng trung gian và độ phóng xạ cảm ứng của dầu dò cộng hưởng:

$$H_{\text{trung gian}} = a_1 \cdot \frac{A_{\text{trung gian}}(t_0, t_1)}{nSI} \cdot \frac{t_0}{(1 - e^{-\lambda_{\text{trung gian}} t_0}) e^{-\lambda_{\text{trung gian}} t_1}} \quad (4.4-20)$$

Có thể chế tạo các dầu dò cộng hưởng từ cùng một vật liệu như dầu dò kích hoạt để ghi nhận nơtron nhiệt. Dầu dò cộng hưởng thường được làm từ những vật liệu mà tích phân cộng hưởng có giá trị lớn và vị trí các đỉnh cộng hưởng nằm trong vùng năng lượng thấp.

Nếu đỉnh cộng hưởng lớn rơi vào vùng năng lượng thấp, thì nó quyết định giá trị của tích phân cộng hưởng, còn đóng góp của phần tiết diện tỷ lệ nghịch với tốc độ nơtron ($\sim 1/v$) thì có thể coi là rất nhỏ. Trong trường hợp này, nếu không biết chính xác các giá trị năng lượng giới hạn E_{Cd} và E_2 của phổ nơtron năng lượng trung gian, thì cũng không ảnh hưởng đáng kể đến giá trị của tích phân cộng hưởng.

Nếu đỉnh cộng hưởng nằm trong vùng năng lượng khá cao, thì giá trị tích phân cộng hưởng chủ yếu được quyết định bởi phần tiết diện tỷ lệ nghịch với tốc độ nơtron ($\sim 1/v$). Do đó, trong trường hợp này, thì đòi hỏi phải biết chính xác giới hạn dưới của phổ nơtron.

Để đánh giá vai trò của thành phần tiết diện tỷ lệ nghịch với tốc độ nơtron ($\sim 1/v$) đối với tích phân cộng hưởng, có thể coi tiết diện của phản ứng kích hoạt được hợp bởi hai thành phần $\sigma(E) = \sigma_1 + \sigma_2$, trong đó $\sigma_1 = \sigma_0 \cdot v_0/v$ (với σ_0 và v_0 là tiết diện kích hoạt và tốc độ của nơtron nhiệt năng lượng 0,025 eV), còn σ_2 thì được xác định bởi cộng hưởng. Sử dụng biểu thức xác định tích phân cộng

hường (4.4-16) đối với thành phần tiết diện $\sigma_1 \sim 1/v$, thu được giá trị sau đây cho thành phần tích phân cộng hưởng được xác định bởi tiết diện σ_1 này:

$$\int_{0,4\text{eV}}^{\infty} \sigma_0 \frac{v_0}{v} \frac{dE}{E} = \int_{0,4\text{eV}}^{\infty} \sigma_0 \left(\frac{0,025}{E} \right)^2 \frac{dE}{E} = \frac{\sigma_0}{2} \quad (4.4-21)$$

Nếu đem so sánh giá trị của tích phân cộng hưởng I với giá trị thu được theo biểu thức (4.4-21) do đóng góp của thành phần tiết diện $\sigma_1 \sim 1/v$, mà thấy tích phân cộng hưởng có giá trị $I \gg \sigma_0/2$, thì điều này có nghĩa là tích phân cộng hưởng I chủ yếu được quyết định bởi đỉnh cộng hưởng. Ngược lại, nếu thấy tích phân cộng hưởng có giá trị $I \approx \sigma_0/2$, thì điều này có nghĩa là tích phân cộng hưởng I chủ yếu được quyết định bởi thành phần tiết diện tỷ lệ nghịch với tốc độ của neutron.

Bảng B4.4-1 (cột 4 và 5) và bảng B4.4-2 cho thấy giá trị tích phân cộng hưởng và vị trí cộng hưởng của một số vật liệu làm đầu dò kích hoạt. Trong bảng B4.4-2, các đầu dò được xếp theo thứ tự tăng dần của năng lượng cộng hưởng. Các lá vàng và lá indi là những vật liệu làm đầu dò cộng hưởng tốt.

Bảng B4.4-2. Đặc trưng của một số đầu dò cộng hưởng thường dùng đối với nhóm neutron năng lượng trung gian

Đồng vị ban đầu					Đồng vị phóng xạ được tạo thành			
Ký hiệu của đồng vị	Độ phổ biến trong tự nhiên, %	Tiết diện kích hoạt bởi neutron nhiệt, σ_0 , barn	Tích phân cộng hưởng, barn	Năng lượng của đỉnh cộng hưởng, eV	Ký hiệu của đồng vị	Chu kỳ rã nửa	Năng lượng cực đại của hạt Beta, MeV	Năng lượng của lượng tử (và cường độ của vạch phổ) MeV (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
^{176}Lu	2,59	2090 ± 70	1087 ± 40	0,142	^{177}Lu	6,71 ngày	0,498	0,113 (6,4%) 0,208 (11,0%)

Bảng B4.4-2 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
^{115}In	95,71	73±8 (m_1) 54,4min; 88±8 (m_2) 2,16 s; 44±2(g) 14,1 s	2650 (m_1 + m_2) và 650 (g)	1,45	^{116m}In	54,41 min	1,01	0,417 (27,7%) 0,819 (11,5%) 1,097 (56,2%) 1,294 (84,4%) 1,507 (10,0%) 2,112 (15,5%)
^{181}Ta	99,988	20,4 ±0,3	660 ± 23	4,28	^{182}Ta	114,4 ngày	0,524	0,0677 (41,2%) 0,100 (14,1%) 0,121 (34,9%) 1,189 (16,2%) 1,221 (27,0%) 1,231 (11,4%)
^{197}Au	100	98,65 ± 0,09	1550 ±28	4,9	^{198}Au	2,695 ngày	0,961	0,412 (95,6%) 0,676 (0,80%) 1,088 (0,16%) 0,0708 (2,2%)
^{109}Ag	48,161	91	1400 ± 48 trong đó $m =$ 72,3 ± 0,4	5,20	^{110}Ag ^{110m}Ag ^{110m}Ag	24,6 s (86,3 barn) 249,8 ngày (4,7 barn)	2,893 (94,9 %) 0,53 (30,5 %)	0,685 (4,5%) ----- 0,658 (94,0%) 0,707 (16,3%) 0,764 (22,1%) 0,885 (72,2%) 0,937 (34,1%) 1,384 (24,1%) 1,505 (13,0%)
^{238}U	99,274	2,75	277	6,70	^{239}U	23,45 min	1,264	0,0435 (4,1%) 0,0747 (48,1%)
^{186}W	28,43	37 ± 2	485 ± 15	18,8	^{187}W	23,72 h	1,33	0,133 0,480 0,690
^{232}Th	100	7,26± 0,07	85± 3	24	^{233}Th	22,3 min	1,244	0,0865 (2,7%) 0,459 (1,4%)
^{59}Co	100	37,18	74±2	132	^{60}Co	5,27 năm	0,318	1,173 (100%); 1,333 (100%)

Bảng B4.4-2 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
^{58}Fe	0,282	$1,31 \pm 0,05$	$1,2 \pm 0,2$	230	^{59}Fe	44,50 ngày	0,465	$1,099 (56,5\%)$ $1,292 (43,2\%)$
^{55}Mn	100	$13,2 \pm 0,2$	$14,0 \pm 0,3$	337	^{56}Mn	2,579 h	2,848	$0,847 (98,9\%)$ $1,811 (27,2\%)$ $2,113 (14,3\%)$
^{98}Mo	24,13	$0,131 \pm 0,002$	$6,9 \pm 0,3$	480	^{99}Mo	65,94 h	1,215	$0,739 (12,1\%)$ $0,778 (4,3\%)$
^{63}Cu	69,17	$4,28 \pm 0,20$	$4,97 \pm 0,08$	580	^{64}Cu	12,70 h	$\beta^+ 0,65 (17,4\%)$	$0,511 (\beta^+)$
^{239}Pu		$269,3 \pm 0,22$ (n.f)= 752 ± 3	220 ± 20 (n.f)= 301 ± 10	1000	^{140}Ba	12,75 h		$0,030 (14,1\%)$ $0,163 (6,2\%)$ $0,305 (4,3\%)$ $0,537 (24,4\%)$
^{23}Na	100	$0,513 \pm 0,005$	0,311	1710	^{24}Na	14,96 h	1,393	$1,369 (100\%);$ $2,754 (99,9\%)$
^{45}Sc	100	$26,3 \pm 0,2;$ trong đó $9,8 \pm 0,1$ (m=18,7 s)	$12,0 \pm 0,5$	5000	^{46}Sc	83,79 ngày	0,357	$0,889 (100\%)$ $1,121 (100\%)$

4.4.4. Xác định liều neutron nhanh bằng phương pháp kích hoạt

Đối với neutron nhanh, việc xác định chính xác tiết diện kích hoạt là rất khó khăn, nên người ta thường dùng các đầu dò có ngưỡng. Đầu dò ngưỡng được đặc trưng bởi tiết diện kích hoạt có giá trị lớn và có thể coi là ít thay đổi khi neutron có năng lượng cao hơn ngưỡng.

Giả sử đầu dò kích hoạt i có ngưỡng năng lượng là E_i , tiết diện kích hoạt là σ_i và diện tích bằng S_i . Để đơn giản, giả sử, các đầu dò ngưỡng được đánh số, sao cho $E_i < E_{i+1}$. Khi đó, đối với mỗi đầu dò i , tích phân trong biểu thức (4.4-5) có thể được viết như sau:

$$\int_{E_i}^{\infty} \varphi(E) \sigma_i(E) dE = \sigma_i \Phi[E_i, \infty] \quad (4.4-22)$$

với $\Phi[E_i, \infty]$ – mật độ thông lượng nơtron có năng lượng trong khoảng $[E_i, \infty]$.

Độ phóng xạ cảm ứng $A_{i, \text{nhanch}}$ của đầu dò ngưỡng số i được kích hoạt bởi các nơtron nhanh với năng lượng trong khoảng $[E_i, \infty]$ được xác định theo biểu thức sau đây:

$$A_{i, \text{nhanch}}(t_{0,i}, t_{1,i}) = n_i S_i \sigma_i \Phi[E_i, \infty] \cdot [\bullet]_i \quad (4.4-23)$$

trong đó ký hiệu

$$[\bullet]_i \equiv (1 - e^{-\lambda_{i, \text{nhanch}} t_{0,i}}) \cdot e^{-\lambda_{i, \text{nhanch}} t_{1,i}} \quad (4.4-23.a)$$

với n_i – số hạt nhân đồng vị bền loại i tính trung bình cho mỗi đơn vị diện tích 1 cm^2 của đầu dò kích hoạt loại i .

Bằng cách sử dụng đồng thời từng cặp đầu dò (i và $i+1$), với các giá trị độ phóng xạ cảm ứng $A_{i, \text{nhanch}}$ và $A_{i+1, \text{nhanch}}$ đã được xác định theo biểu thức (4.4-23), có thể đánh giá được *mật độ thông lượng nơtron* trong vùng năng lượng từ ngưỡng E_i (của đầu dò i) tới ngưỡng E_{i+1} (của đầu dò $i+1$) như sau:

$$\begin{aligned} \Phi[E_i, E_{i+1}] &= \Phi[E_i, \infty] - \Phi[E_{i+1}, \infty] = \\ &= \frac{A_{i, \text{nhanch}}(t_{0,i}, t_{1,i})}{n_i S_i \sigma_i [\bullet]_i} - \frac{A_{i+1, \text{nhanch}}(t_{0,i+1}, t_{1,i+1})}{n_{i+1} S_{i+1} \sigma_{i+1} [\bullet]_{i+1}} \end{aligned} \quad (4.4-24)$$

Mặt khác, đối với nơtron nhanh, có thể viết biểu thức xác định liều tương đương (4.4-6) dưới dạng sau đây:

$$\begin{aligned} H_{\text{nhanch}}(t_0) &= t_0 \int_{E_1}^{E_2} k(E) \varphi(E) dE = t_0 \int_{0,5 \text{ MeV}}^{\infty} k(E) \varphi(E) dE = \\ &= t_0 \Phi_{\text{nhanch}}[0,5 \text{ MeV}; \infty] \int_{0,5 \text{ MeV}}^{\infty} k(E) f(E) dE = \\ &= t_0 \Phi_{\text{nhanch}}[0,5 \text{ MeV}; \infty] a_2 \end{aligned} \quad (4.4-25)$$

trong đó:

$$a_2 = \int_{0,5\text{MeV}}^{\infty} k(E)f(E)dE \quad (4.4-26)$$

Trong hai biểu thức (4.4-25 và -26), thì $f(E)$ – hàm phân bố của phổ neutron nhanh, thoả mãn điều kiện chuẩn hoá sau đây:

$$\int_{0,5\text{MeV}}^{\infty} f(E)dE = 1 \quad (4.4-27)$$

Hệ số $k(E)$ trong biểu thức (4.4-25 và -26) có ý nghĩa là suất liều tương đương gây bởi mật độ thông lượng neutron nhanh bằng một đơn vị $\Phi_{\text{nhanh}}(E)=1\text{n}/(\text{cm}^2\text{s})$. Có thể đánh giá được $k(E)$ bằng cách chia hai vế của các biểu thức (4.1-19 và -24) cho $\Phi_{\text{nhanh}}(E)$ rồi đem suất liều hấp thụ gây bởi một đơn vị mật độ thông lượng neutron nhanh vừa thu được nhân với trọng số $Q_{TS}(E)$ của bức xạ neutron năng lượng E . Cụ thể, có thể đánh giá suất liều tương đương trên bề mặt cơ thể gây bởi va chạm đầu tiên của chùm hẹp neutron nhanh theo biểu thức sau đây:

$$k(E) = 0,28 \cdot 10^{-10} \cdot \sqrt{E_n [\text{MeV}]} \cdot Q_{TS}(E) \quad (4.4-28.a)$$

Tương tự như vậy, trong trường hợp cơ thể bị chiếu xạ bởi chùm rộng neutron nhanh, có thể đánh giá suất liều tương đương tại độ sâu $X[\text{cm}]$ dưới da theo biểu thức sau đây:

$$k(E) = 6,64 \cdot 10^{-11} \cdot (1 - 0,365 \cdot e^{-X/3}) \cdot e^{-X/(1,44l)} \cdot \frac{E^{1/2}}{[\text{MeV}]} \cdot Q_{TS}(E) \quad (4.4-28.b)$$

Trong đó: bề dài suy biến $L[\text{cm}] = 1,44 \cdot l[\text{cm}]$ và $l[\text{cm}] = 2,8 \cdot E^{1/2}_{[\text{MeV}]}$ – quãng chạy tự do trong tổ chức cơ thể của neutron với động năng E trong khoảng $0,1 \div 50 \text{ MeV}$.

Trong cả hai biểu thức (4.4-28.a và -28.b) trên đây, suất liều tương đương gây bởi một đơn vị mật độ thông lượng neutron nhanh đều có thứ nguyên là $k[(\text{Sv/s}) \cdot (\text{n}/\text{cm}^2\text{s})^{-1}]$.

Các biểu thức (4.4-23 và -25) cho thấy: nếu lựa chọn được đầu dò thích hợp có ngưỡng $E_i \approx 0,5 \text{ MeV}$, thì có thể đánh giá được liều nơtron nhanh theo công thức sau đây:

$$H_{\text{nhanh}}(t_0) = t_0 a_2 \Phi_{\text{nhanh}}[0,5 \text{ MeV}; \infty] = a_2 \cdot \frac{A_{i,\text{nhanh}}(t_0, t_1)}{n_i S_i \sigma_i} \cdot \frac{t_0}{\left(1 - e^{-\lambda_{i,\text{nhanh}} t_0}\right) e^{-\lambda_{i,\text{nhanh}} t_1}} \quad (4.4-29)$$

Bảng B4.4-3. Một số đặc trưng cơ bản của các đầu dò có ngưỡng thường dùng

Phản ứng hạt nhân có ngưỡng	Độ phổ biến trong tự nhiên của đồng vị là bia của phản ứng, %	Ngưỡng hiệu dụng của phản ứng, MeV	Tiết diện hiệu dụng của phản ứng, barn	Động năng của hạt được tạo thành, MeV	Chu kỳ rã nửa của hạt nhân phóng xạ (là sản phẩm của phản ứng).
$^{237}\text{Np}(n,f)^{140}\text{Ba}$	--	0,75	1,7	--	12,75 ngày
$^{238}\text{U}(n,f)^{140}\text{Ba}$	99,28	1,5	0,6	--	12,75 ngày
$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$	100	2,5	0,75	1,5	2,622 h
$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$	95	2,5	0,25	1,7	14,26 ngày
$^{107}\text{Ag}(n,2n)^{106}\text{Ag}$	51	9,6	--	2	24,5 min
$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	100	11	1,3	0,87	13,11 ngày
$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	69	12	0,9	2,91	9,74 min
$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	68,07	13	1,1	0,83	35,60 h
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	98,93	22	0,2	0,99	20,39 min

Trong thực tế, có nhiều loại đầu dò ngưỡng thường được sử dụng như: ^{237}Np , ^{238}U , ^{31}P , ^{31}S .v.v. Bảng B4.4-3 cho thấy một số đặc trưng cơ bản của

các đầu dò ngưỡng thường dùng. (Trong bảng này, các phản ứng được xếp theo thứ tự tăng dần của ngưỡng phản ứng).

4.4.5. Xác định liều neutron phổ phức tạp bằng phương pháp kích hoạt

Để xác định liều gây bởi bức xạ neutron có phổ phức tạp bằng phương pháp kích hoạt, có thể phối hợp sử dụng đồng thời ba loại đầu dò kích hoạt là:

- Đầu dò ngưỡng;
- Đầu dò cộng hưởng không bọc cadmi;
- Đầu dò cộng hưởng có bọc cadmi. (Hai đầu dò cộng hưởng này phải được làm từ cùng một loại vật liệu).

Suất liều tương đương gây bởi neutron toàn phổ được đánh giá bằng tổng của ba thành phần theo độ phóng xạ cảm ứng của các đầu dò kích hoạt như sau:

$$H = H_{\text{nhiệt}} + H_{\text{trung gian}} + H_{\text{nhanh}} \quad (4.4-30)$$

trong đó, $H_{\text{nhiệt}}$ – liều tương đương gây bởi thành phần neutron nhiệt (được xác định theo các biểu thức (4.4-12 và -13)); $H_{\text{trung gian}}$ – liều tương đương gây bởi thành phần neutron năng lượng trung gian (được xác định theo các biểu thức từ (4.4-17 tới -20)); H_{nhanh} – liều tương đương gây bởi thành phần neutron nhanh (được xác định theo các biểu thức từ (4.4-26 tới -29)). Trong các biểu thức này, hệ số $k(E)$ được xác định từ trước; còn các hệ số a_1 và a_2 – thì có thể tính được khi đã biết $k(E)$ và phổ năng lượng của neutron.

4.4.6. Nhận xét

Phương pháp kích hoạt được sử dụng rộng rãi để đo thông lượng và liều neutron. Những ưu điểm của phương pháp này là:

- a). Không nhạy với bức xạ gamma;
- b). Cho phép tách riêng các quá trình kích hoạt và đo đạc;

- c). Chịu được nhiệt độ cao;
- d). Cấu tạo đơn giản;
- e). Kích thước rất nhỏ;
- f). Rẻ tiền.

Phương pháp kích hoạt rất tiện lợi cho việc đánh giá liều trong các tai nạn hạt nhân – khi cơ thể bị chiếu bức xạ nơtron với thông lượng rất lớn trong một khoảng thời gian ngắn.

Tai nạn hạt nhân liên quan trực tiếp đến nguồn bức xạ nơtron thường xảy ra trong một khoảng thời gian ngắn. Do đó trong các biểu thức (4.4-10, -12, -17, -20, -29) có thể thoả mãn điều kiện $\lambda_0 t_0 \ll 1$ và thực hiện phép thế sau đây:

$$\frac{t_0}{(1 - e^{-\lambda_x t_0})} \approx \frac{t_0}{\lambda_x t_0} = \frac{1}{\lambda_x} \quad (4.4-31)$$

với λ_x – là $\lambda_{\text{nhiệt}}$ hay $\lambda_{\text{trung gian}}$ hoặc λ_{nhanh} tương ứng trong các biểu thức (4.4-10, -12, -17, -20, -29). Trên cơ sở biểu thức (4.4-31) và các biểu thức vừa nêu, có thể đánh giá được liều lượng gây bởi ba thành phần bức xạ nơtron trong trường hợp xảy ra sự cố hoặc tai nạn hạt nhân như sau.

Mật độ thông lượng nơtron nhiệt $F_{\text{nhiệt, tai nạn}}$ và *liều tương đương* $H_{\text{nhiệt, tai nạn}}$ gây bởi thành phần nơtron nhiệt được đánh giá theo hai biểu thức sau đây:

$$F_{\text{nhiệt, tai nạn}} [\text{n.cm}^{-2}] = t_0 [\text{s}] \cdot \Phi_{\text{nhiệt}} [\text{n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}] \approx$$

$$\approx \frac{1}{\sigma_0 \lambda_{\text{nhiệt}}} \left[\frac{A_0}{(nS)_0 e^{-\lambda_{\text{nhiệt}} t_{1,0}}} - \frac{A_{Cd}}{(nS)_{Cd} e^{-\lambda_{\text{nhiệt}} t_{1,Cd}}} \right] \quad (4.4-32)$$

$$H_{\text{nhiệt, tai nạn}} = k_{\text{nhiệt}} \cdot F_{\text{nhiệt, tai nạn}} \quad (4.4-33)$$

Ký hiệu trong bốn biểu thức (4.4-32, -33) và (4.4-10, -12) là như nhau.

Đối với thành phần nơtron năng lượng trung gian có phổ năng lượng tuân

theo quy luật $1/E$, thì mật độ thông lượng $F_{\text{trung gian, tai nạn}}$ được đánh giá trên cơ sở các biểu thức (4.4-1, -14, -17 và -31) như sau:

$$F_{\text{trung gian, tai nạn}} [n.cm^{-2}] = \frac{A_{\text{trung gian}}(t_1)}{nSI} \cdot \frac{1}{\lambda_{\text{trung gian}} e^{-\lambda_{\text{trung gian}} t_1}} \cdot \frac{E_2}{E_{Cd}} \int \frac{dE}{E} \quad (4.4-34)$$

Liều tương đương gây bởi thành phần neutron năng lượng trung gian được đánh giá như sau:

$$H_{\text{trung gian, tai nạn}} = a_1 \cdot \frac{A_{\text{trung gian}}(t_1)}{nSI} \cdot \frac{1}{\lambda_{\text{trung gian}} e^{-\lambda_{\text{trung gian}} t_1}} \quad (4.4-35)$$

Ký hiệu trong bốn biểu thức (4.4-17, -20, -34 và -35) là như nhau.

Đối với thành phần neutron nhanh, thì mật độ thông lượng $F_{\text{nhanh, tai nạn}}$ và liều tương đương $H_{\text{nhanh, tai nạn}}$ được đánh giá như sau:

$$\begin{aligned} F_{\text{nhanh, tai nạn}} [n.cm^{-2}] &= t_0 \Phi_{\text{nhanh}} [E_i; \infty] = \\ &= \frac{A_{i, \text{nhanh}}(t_1)}{n_i S_i \sigma_i} \cdot \frac{1}{\lambda_{i, \text{nhanh}} e^{-\lambda_{i, \text{nhanh}} t_1}} \end{aligned} \quad (4.4-36)$$

$$H_{\text{nhanh, tai nạn}} = a_2 \cdot F_{\text{nhanh, tai nạn}} [n.cm^{-2}] \quad (4.4-37)$$

Các ký hiệu trong ba biểu thức (4.4-29, 36, -37) là hoàn toàn như nhau.

Tổng của ba thành phần liều được tính theo ba biểu thức (4.4-33, -35 và -37) cho ta một đánh giá định lượng về liều tương đương gây bởi bức xạ neutron trong trường hợp xảy ra sự cố hoặc tai nạn hạt nhân.

Độ chính xác của phương pháp kích hoạt càng cao, nếu độ phóng xạ cảm ứng đo được càng lớn. Ngược lại, nếu độ phóng xạ cảm ứng đo được càng nhỏ, thì độ chính xác của phương pháp kích hoạt càng kém.

Phương pháp kích hoạt thường chỉ được sử dụng để đo các liều cao.

Bên cạnh những ưu điểm cơ bản kể trên, thì phương pháp kích hoạt để đo liều neutron còn mắc phải hạn chế là: nó đòi hỏi phải biết trước phổ năng lượng của neutron và hệ số $k(E)$ để tính các hệ số a_1 và a_2 (xem các biểu thức (4.4-6, -19, -26). Riêng đối với hệ số a_1 , liên quan đến tác dụng sinh học của bức xạ neutron năng lượng trung gian, nên cần chú ý tới ảnh hưởng sinh học của quá trình va chạm hạt nhân đàn hồi (như đã giới thiệu trong mục 4.1.4).

4.5. ĐO LIỀU NEUTRON BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐẾM VẾT

4.5.1. Giới thiệu chung

Bức xạ neutron tương tác với một số loại vật liệu có thể gây phản ứng làm sinh ra các hạt nặng có điện tích. Nếu các hạt nặng có điện tích mà có độ truyền năng lượng cục bộ (LET, xem chương 1, mục 1.4.5) đủ lớn và chuyển động trong một số môi trường đặc biệt là các chất rắn cách điện, thì có thể tạo nên khuyết tật dọc theo quỹ đạo của nó. (Hạt nặng có điện tích như mảnh vỡ hạt nhân có độ truyền năng lượng cục bộ rất lớn, có thể tạo khuyết tật khi hạt chuyển động trong hầu hết các vật rắn). Tại những vùng khuyết tật này, chất cách điện trở nên có độ hoà tan và hoạt tính hoá học cao hơn hẳn so với ở những nơi không có khuyết tật. Do đó, nếu sau khi bị chiếu bức xạ neutron, vật rắn cách điện lại được xử lý bằng một dung môi thích hợp, thì vùng khuyết tật sẽ trở thành vết có đường kính tăng lên rất nhiều so với kích thước ban đầu. Nhờ vậy, có thể quan sát và đếm được các vết khuyết tật đó bằng kính hiển vi quang học

bình thường (trong khi khuyết tật ban đầu chỉ có đường kính cỡ $50\text{\AA}^0 (\approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ m})$ nên chỉ quan sát được bằng kính hiển vi điện tử).

Nếu một hệ gồm lớp vật liệu rắn thích hợp có những đặc điểm như vừa nêu trên, thì có thể sử dụng được để xác định thông lượng neutron và liều bức xạ neutron. Nói chung, một đầu dò vết được cấu tạo từ hai phần chính là:

- a). Chất chứa đồng vị thích hợp để tạo hạt nặng có điện tích khi tương tác với neutron;
- b). Lớp vật liệu rắn để ghi vết tạo bởi chuyển động của hạt nặng có điện tích. (Vật liệu này thường có điện trở riêng cỡ $2 \cdot 10^3 \Omega \text{cm}$).

Nếu sử dụng vật liệu sẵn có trong tự nhiên để làm đầu dò vết, thì đồng vị thích hợp đã phải có sẵn trong vật liệu này (thí dụ: trong mica tự nhiên luôn chứa sẵn uran tự nhiên). Trong các trường hợp khác, thì chất chứa đồng vị thích hợp được làm thành một lớp mỏng phủ lên trên bề mặt lớp vật liệu ghi vết.

4.5.2. Nguyên tắc đo liều neutron bằng phương pháp đếm vết

Phương pháp đo liều neutron bằng cách đếm vết dựa trên nguyên tắc sau đây. Giả sử, một đầu dò vết đủ mỏng, có diện tích bằng 1cm^2 được đặt vào trường bức xạ neutron trong một khoảng thời gian bằng t_0 , rồi được xử lý bằng dung môi thích hợp. Có thể xác định số vết đếm được trên đầu dò vết này theo biểu thức sau:

$$n = \varepsilon \xi N \int_0^{t_0} \Phi(t) dt \int_{E_1}^{E_2} \sum_i \alpha_i \sigma_i(E) \varphi(E) dE \quad (4.5-1)$$

với N – tổng số hạt nhân của các đồng vị tham gia phản ứng tạo hạt nặng có điện tích (thí dụ: mảnh vỡ hạt nhân) có trong lớp bề dày hiệu dụng diện tích 1cm^2 của đầu dò; α_i – thành phần tương đối của số hạt nhân đồng vị loại i ; $\sigma_i(E)$ – tiết diện phản ứng vừa nêu của đồng vị i gây bởi neutron năng lượng E ; $\varphi(E)$ – hàm phân bố neutron theo năng lượng, thoả mãn điều kiện chuẩn hoá sau:

$$\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) dE = 1 \quad (4.5-2)$$

với E_1, E_2 – các giới hạn về năng lượng của phổ neutron; $\Phi(t)$ – mật độ thông lượng của các neutron có năng lượng trong vùng $[E_1, E_2]$ tại thời điểm t ; ξ – tỷ số giữa số hạt nặng có điện tích bay vào đầu dò và tổng số hạt nặng có điện tích được sinh ra bởi phản ứng vừa nêu.

Tỷ số ξ đạt giá trị cực đại khi lớp phủ (bằng các đồng vị có phản ứng tạo hạt nặng có điện tích) có bề dày lớn hơn quãng chạy của các hạt này trong lớp phủ đó.

Đối với phản ứng phân chia hạt nhân, mảnh vỡ hạt nhân có phổ năng lượng và phân bố góc như nhau đối với mọi đồng vị tham gia phản ứng. Do vậy, có thể coi là tỷ số ξ có giá trị như nhau đối với mọi vật liệu phủ đầu dò.

Trong biểu thức (4.5-1), hiệu suất đếm vết của đầu dò được ký hiệu là ε và được định nghĩa là tỷ số của số vết đếm được bởi đầu dò trên số vết được tạo thành trong đầu dò:

$$\varepsilon = (\text{Số vết đếm được bởi đầu dò}) / (\text{Số vết được tạo thành trong đầu dò})$$

Hiệu suất đếm vết của đầu dò phụ thuộc vào bản chất và bề dày của lớp vật liệu phủ của đầu dò (tức là của bộ phận tạo hạt nặng có điện tích) và chế độ xử lý bộ phận ghi vết của đầu dò (cụ thể là các yếu tố như thời gian xử lý, loại dung dịch, nồng độ dung dịch, nhiệt độ dung dịch khi xử lý). Cần nhắc lại rằng vết khuyết tật chỉ được tạo thành khi hạt nặng có độ truyền năng lượng cục bộ đủ lớn. Điều này được đặc biệt chú ý nếu lớp phủ của đầu dò tương tác với neutron mà tạo ra hạt nặng có điện tích không phải là mảnh vỡ hạt nhân.

Giả sử, lớp vật liệu phủ của đầu dò được tạo thành từ m loại đồng vị gây phản ứng phân chia hạt nhân. Khi đó, đối với neutron có năng lượng trong khoảng $[E_1, E_2]$, thì tiết diện phản ứng phân chia hạt nhân của vật liệu làm đầu dò sẽ có giá trị hiệu dụng (trung bình) bằng:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \sum_{i=1}^m \alpha_i \sigma_{fi}(E) \varphi(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) dE} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \sum_{i=1}^m \alpha_i \sigma_{fi}(E) \varphi(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \varphi(E) dE} \quad (4.5-3)$$

Còn thông lượng Φ_{1-2} của các neutron có năng lượng trong khoảng $[E_1, E_2]$ và đạt tới đầu dò trong toàn bộ khoảng thời gian chiếu xạ t_0 , thì có giá trị bằng:

$$\Phi_{1-2} = \int_0^{t_0} \Phi(t) dt \quad (4.5-4)$$

Trên cơ sở các biểu thức từ (4.5-1) tới (4.5-4), thu được tương quan sau:

$$n = \varepsilon \xi \cdot N \cdot \Phi_{1-2} \cdot \bar{\sigma}_f \quad (4.5-5)$$

$$F \equiv \frac{n}{\Phi_{1-2} \bar{\sigma}_f} = \varepsilon \xi N \quad (4.5-6)$$

Tỷ số F được gọi là độ nhảy của đầu dò vết, tính theo một neutron và một đơn vị tiết diện hiệu dụng. Ba đại lượng ε , ξ và N đều có giá trị không thay đổi trong thời gian chiếu xạ. Do đó, độ nhảy F cũng có giá trị không thay đổi trong quá trình chiếu xạ. Kết quả tính toán và thực nghiệm của nhiều tác giả cho thấy rằng, trong trường hợp lớp phủ của đầu dò có bề dày bằng hoặc lớn hơn quãng chạy của mảnh vỡ hạt nhân trong lớp đó, thì có thể coi $F=1,2 \cdot 10^{-5}$ vết/(neutron.barn) với sai số khoảng vài phần trăm.

Do đó, có thể xác định thông lượng Φ_{1-2} của neutron bằng đầu dò vết theo biểu thức sau đây:

$$\Phi_{1-2} = \frac{n}{F \bar{\sigma}_f} \quad (4.5-7)$$

Mặt khác, liều tương đương (gây bởi chiếu xạ neutron năng lượng E trong vùng $[E_1, E_2]$ trong khoảng thời gian t_0) liên hệ với thông lượng Φ_{1-2} như sau:

$$H = k \cdot \Phi_{1-2} \quad (4.5-8)$$

với k – hệ số có giá trị bằng liều tương đương ứng với thông lượng nơtron một đơn vị $\Phi_{1-2} = 1 \text{ n/cm}^2$.

Độ nhạy của phương pháp đo liều nơtron bằng đầu dò vết có giá trị được tính theo công thức định nghĩa sau đây:

$$\frac{n}{H} = F \frac{\bar{\sigma} f}{k} \quad (4.5-9)$$

Trong công thức (4.5-9), các đại lượng tiết diện phản ứng phân chia hạt nhân σ_f và hệ số k đều phụ thuộc mạnh vào năng lượng nơtron, do đó, nói chung, độ nhạy của phương pháp đếm vết dùng trong đo liều cũng phụ thuộc mạnh vào năng lượng của nơtron. Vì lý do này, nên trong thực tế, để đo liều nơtron năng lượng khác nhau, thì cần phải biết phổ năng lượng nơtron; hoặc phải sử dụng phối hợp vài đầu dò với các ngưỡng phản ứng phân chia hạt nhân có giá trị khác nhau để có thể xác định được phổ năng lượng nơtron.

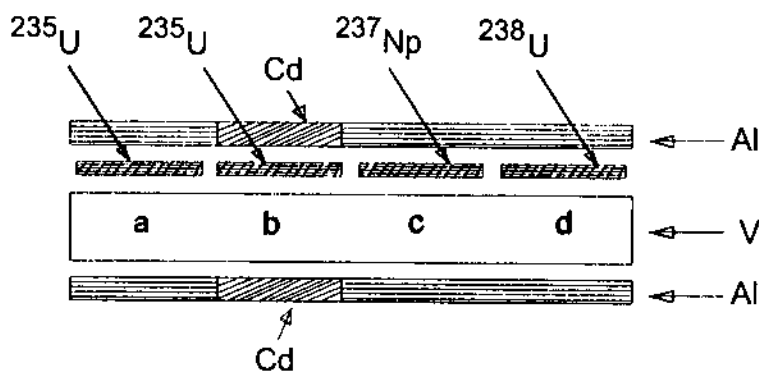
Trong số các đồng vị có khả năng tham gia phản ứng phân chia hạt nhân do tác dụng của nơtron, thì những đồng vị có vai trò quan trọng nhất trong đo liều bằng phương pháp đếm vết là:

- ^{237}Np (có ngưỡng hiệu dụng của phản ứng $E_{ng} \approx 0,75 \text{ MeV}$);
- ^{232}Th (có ngưỡng phản ứng $E_{ng} \approx 2 \text{ MeV}$);
- Uran tự nhiên và các đồng vị ^{235}U và ^{238}U của nó. (Phản ứng phân chia hạt nhân xảy ra trên ^{235}U chủ yếu là do tác dụng của nơtron nhiệt và nơtron năng lượng trung gian. Còn đối với ^{238}U , thì phản ứng có ngưỡng hiệu dụng $E_{ng} \approx 1,5 \text{ MeV}$. Có thể dùng ngay uran tự nhiên thay cho ^{238}U , vì trong uran tự nhiên có tới 99,28% là ^{238}U và chỉ có 0,72% là ^{235}U).

Để minh họa, xét mô hình cụ thể của một hệ đo liều nơtron sử dụng ba đồng vị gây phản ứng phân chia hạt nhân với các ngưỡng phản ứng khác nhau

là: ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}U . Hệ đo liều neutron loại này là tập hợp của bốn đầu dò, trong đó 3 đầu dò không có bọc cadmi và 1 đầu dò có bọc cadmi. Nguyên tắc cấu tạo của hệ đầu dò đo liều neutron này được thể hiện trên hình H4.5-1. Mỗi lớp đồng vị gây phản ứng phân chia hạt nhân dày cỡ 10^1 micrômét, được đặt cho tiếp xúc với lá chất dẻo (V), làm cho bề mặt của lá chất dẻo này bị chia thành 4 vùng tương ứng với 4 đầu dò vết. Vùng *a* ghi các vết của mảnh vỡ hạt nhân sinh ra trong phản ứng $^{235}\text{U}(n, f)$ gây bởi neutron nhiệt ($E_{n,a} < 0,5$ eV) và neutron năng lượng trung gian. Vùng *b* ghi các vết của mảnh vỡ hạt nhân sinh ra trong phản ứng $^{235}\text{U}(n_{\text{trung gian}}, f)$ gây bởi neutron năng lượng trung gian (vì đầu dò ^{235}U này được lớp Cadmi che chắn 2 mặt bên, nên loại trừ được ảnh hưởng của các neutron nhiệt). Vùng *c* ghi các vết của mảnh vỡ hạt nhân sinh ra trong phản ứng $^{237}\text{Np}(n_{\text{nhanh}}, f)$ gây bởi neutron có năng lượng $E_{n,c} > 0,75$ MeV. Còn vùng *d* ghi các vết của mảnh vỡ hạt nhân sinh ra trong phản ứng $^{238}\text{U}(n_{\text{nhanh}}, f)$ gây bởi neutron có năng lượng $E_{n,d} > 1,5$ MeV.

Bằng cách sử dụng từng cặp vùng (*a* và *b*), (*b* và *c*), (*c* và *d*), (*d* và *a*), ta xác định được thông lượng neutron trong các vùng năng lượng sau đây:



Hình H4.5-1. Sơ đồ nguyên tắc cấu tạo của hệ đầu dò đo liều neutron bằng phương pháp đếm vết với bốn đầu dò làm từ ba đồng vị là ^{235}U , ^{237}Np và ^{238}U . Ký hiệu: Al – lá nhôm; Cd – lá cadmi; V – vật liệu để ghi vết tạo thành dọc theo quỹ đạo chuyển động của các mảnh vỡ hạt nhân.

- a). $E_{n,a} < 0,5 \text{ eV}$;
- b). $E_{n,b} \sim (0,5 \text{ eV} - 0,75 \text{ MeV})$;
- c). $E_{n,c} \sim (0,75 - 1,5) \text{ MeV}$;
- d). $E_{n,d} \geq 1,5 \text{ MeV}$.

Sau khi xác định được thông lượng nơtrôn, có thể xác định được cả liều nơtrôn theo số vết n_a , n_b , n_c và n_d đếm được trên 1 cm^2 trong các vùng tương ứng từ a tới d .

Thông lượng nơtrôn trong các vùng được xác định như sau:

$$\Phi_a \equiv \Phi_{<0,5\text{eV}} = \frac{n_a - n_b}{F \cdot \bar{\sigma}_{(^{235}\text{U}); <0,5\text{eV}}} \quad (4.5-10)$$

$$\Phi_b \equiv \Phi_{E_b} = \frac{n_b - y_1 n_c}{F \bar{\sigma}_{(^{235}\text{U} + \text{Cd}); E_b}} \quad (4.5-11)$$

$$\Phi_d \equiv \Phi_{E_d} = \frac{n_d - y_2 n_a}{F \bar{\sigma}_{(^{238}\text{U}); E_d}} \quad (4.5-12)$$

$$\Phi_c \equiv \Phi_{E_c} = \frac{n_c}{F \bar{\sigma}_{(^{237}\text{Np}); E_c}} - \frac{n_d - y_2 n_a}{F \bar{\sigma}_{(^{238}\text{U}); E_d}} \quad (4.5-13)$$

Trong biểu thức (4.5-11), hệ số y_1 có giá trị được xác định như sau:

$$y_1 = \frac{\bar{\sigma}_{(^{235}\text{U} + \text{Cd}); E > E_{ng(^{237}\text{Np})}}}{\bar{\sigma}_{(^{237}\text{Np}); E > E_{ng(^{237}\text{Np})}}} \quad (4.5-14)$$

trong đó $E_{ng(^{237}\text{Np})}$ – năng lượng ngưỡng của phản ứng $^{237}\text{Np}(n_{\text{nhân}}, f)$.

Còn trong biểu thức (4.5-12), hệ số y_2 có giá trị bằng tỷ lệ hạt nhân ^{235}U

lẫn trong uran tự nhiên hay trong ^{238}U .

Liều tương đương được tính theo công thức (4.5-8), trong đó Φ_{1-2} – thông lượng neutron trong mỗi vùng xác định theo các công thức (từ 4.5-10 tới -14); còn k – hệ số có giá trị bằng liều tương đương gây bởi bức xạ neutron trong mỗi vùng năng lượng tương ứng và có thông lượng bằng một đơn vị (1 n/cm^2).

Đối với uran, hiện tượng phân chia hạt nhân có thể xảy ra một cách tự phát (mà không cần tới một tác nhân nào); vì vậy có thể tạo nên một số vết ngay cả khi không có tác động của bức xạ neutron. Do đó các hệ đo liều neutron bằng đầu dò vết bao giờ cũng có ngưỡng dưới.

Bảng B4.5-1 cho thấy liều tối thiểu và liều tối đa đối với các nhóm neutron đo được bằng đầu dò vết làm từ lớp mica với bề dày khối 2mg/cm^2 .

Bảng B4.5-1. Liều tối thiểu và liều tối đa đối với các nhóm neutron đo được bằng đầu dò vết làm từ mica dày 2mg/cm^2

<i>Bức xạ neutron</i>	<i>Liều tối thiểu</i>	<i>Liều tối đa</i>
<i>Nhóm neutron nhiệt</i>	$2 \cdot 10^{-5} \text{ Sv}$	$1 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}$
<i>Nhóm neutron năng lượng trung gian</i>	$1 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$	$5 \cdot 10^{-1} \text{ Sv}$
<i>Nhóm neutron nhanh</i>	$2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$	$5 \cdot 10^{-1} \text{ Sv}$

4.5.3. Về vật liệu ghi vết và hiện vết

Hiệu ứng tạo vết trong vật rắn do chuyển động của hạt nặng có điện tích được phát hiện lần đầu tiên vào năm 1958 trên lớp vật liệu làm từ LiF. Các nghiên cứu sau đó cho thấy rằng hạt nặng có điện tích tạo nên vết trong hầu hết những vật liệu có điện trở riêng cỡ $\geq 2 \cdot 10^3 \Omega\text{cm}$. Những vật liệu này có thể là: các loại thủy tinh, các chất dẻo hữu cơ, một số loại khoáng gốc silicat (thí dụ: mica tự nhiên, mica nhân tạo).

Một trong số những vật liệu ghi vết nhạy nhất là nitroxenlulôza (có công thức phân tử là $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{ONO}_2)_3]\text{X}$). Lớp vật liệu này có thể ghi nhận vết của tất

cả những hạt nặng có điện tích mà có độ truyền năng lượng cục bộ $L \geq 1,2$ MeV/(mg.cm⁻²). Các loại vật liệu khác thường đòi hỏi hạt phải có độ truyền năng lượng cục bộ lớn hơn rất nhiều. (Thí dụ, các loại thủy tinh phosphat chỉ ghi nhận được vết của các mảnh vỡ hạt nhân, mà không thể ghi nhận được vết của hạt α và các hạt nhân nhẹ khác).

Trong một số vật liệu, vết tạo bởi các hạt α lại dễ dàng phân biệt được so với vết của các mảnh vỡ hạt nhân. Điều này có ý nghĩa thực tế quan trọng khi áp dụng phương pháp đếm vết để đo liều nơtron.

Trên đây vừa giới thiệu về các vật liệu ghi vết. Tuy nhiên, thông thường thì vết chỉ được phát hiện sau khi vật liệu đã được xử lý bằng dung môi tẩm thực thích hợp. Chất tẩm thực có thể là một hợp chất hoá học bất kỳ nếu nó “ăn” vật liệu với một tốc độ đủ nhanh. Đó có thể là các chất vô cơ, hoặc hữu cơ, là các axit hoặc kiềm.

Trong quá trình tẩm thực, vật liệu bị “ăn”, làm cho kích thước của vùng khuyết tật (đã xuất hiện do chuyển động của hạt nặng có điện tích) tăng dần theo cả chiều rộng cũng như chiều sâu trong lớp vật liệu, tạo nên vết có dạng hình chóp nón.

Động học của quá trình tẩm thực này phụ thuộc vào một loạt yếu tố; cụ thể như: các tính chất vật lý và hoá học của vật liệu ghi vết, thành phần hoá học của dung dịch, nồng độ dung dịch, nhiệt độ của dung dịch khi xử lý. Tỷ lệ của tốc độ tẩm thực theo chiều rộng so với tốc độ tẩm thực theo chiều sâu có ý nghĩa quyết định trong việc tạo nên hình dạng cuối cùng của vết. Nếu tốc độ tẩm thực theo chiều rộng là quá lớn so với tốc độ tẩm thực theo chiều sâu, thì vết sẽ bị mở rộng theo bề mặt của lớp vật liệu rất nhanh; do đó có thể dẫn tới sự tạo thành chóp nón vừa rộng lại vừa nông, gây khó khăn cho việc đếm vết. Trong trường hợp này, nhiều vết có thể là hồ rất rộng lại rất nông, tới mức không thể phân biệt được với các vùng lân cận, nên làm giảm số vết được tạo thành trong vật liệu. Trong trường hợp tốc độ tẩm thực theo chiều rộng là quá nhỏ so với tốc độ tẩm thực theo chiều sâu, thì vết sẽ được mở rộng theo bề mặt của lớp vật liệu rất chậm; do đó nếu thời gian tẩm thực không đủ lâu, thì vết có

thể sẽ không đếm được. Cả hai trường hợp vừa nêu trên đây đều làm thay đổi giá trị của hiệu suất đếm vết ϵ của đầu dò.

Vì vậy, đối với một loại vật liệu nhất định được dùng để ghi vết và đối với một chất tẩm thực nhất định, thì việc điều chỉnh chế độ tẩm thực để đạt được tỷ lệ mong muốn giữa tốc độ tẩm thực theo chiều rộng so với tốc độ tẩm thực theo chiều sâu là có ý nghĩa thực tế rất quan trọng. Việc này được thực hiện bằng cách kết hợp điều chỉnh ba yếu tố sau đây:

- Nồng độ của dung dịch tẩm thực;
- Nhiệt độ của dung dịch tẩm thực;
- Khoảng thời gian tẩm thực.

Bằng cách thay đổi chế độ tẩm thực, có thể thay đổi được dải đo liều, tăng hoặc giảm liều tối đa đo được. Thí dụ, nếu tẩm thực mica bằng dung dịch HF nồng độ 40% trong thời gian ngắn (~1 giờ) ở nhiệt độ 20°C, thì liều tối đa đối với neutron nhanh và trung gian có thể tăng lên 100 lần so với trước (và đạt tới 50 Sv). Những chất tẩm thực phổ biến nhất là hydroxit kali (KOH), hydroxit natri (NaOH), axit floríc (HF).

Bảng B4.5-2. Thông lượng tối đa đối với các nhóm neutron đo được bằng đầu dò vết làm từ mica tự nhiên

Bức xạ neutron	Thông lượng tối đa, n/cm^2
Nhóm neutron nhiệt	5.10^{19}
Nhóm neutron năng lượng trung gian	1.10^{20}
Nhóm neutron nhanh	2.10^{20}

Việc lựa chọn chất ghi vết cũng như chất tẩm thực và chế độ tẩm thực được quyết định bởi những yếu tố như: dải đo liều cần đạt được, phương pháp đếm vết, mức độ bền vững của chất ghi vết đối với chất tẩm thực, vân vân.

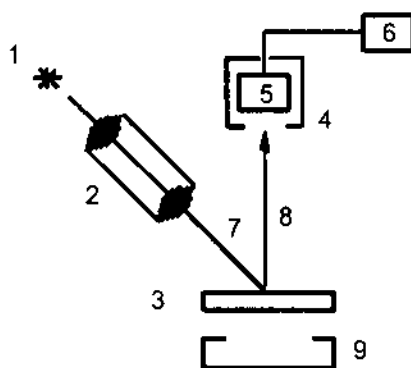
Mica tự nhiên thường chứa tới khoảng 10^{-7} % uran. Vì thế, có thể dùng ngay mica tự nhiên để làm đầu dò vết. Bảng B4.5-2 cho thấy thông lượng tối đa

của các nhóm neutron có thể đo được bằng đầu dò vết làm từ mica tự nhiên.

4.5.4. Nhận xét

Dùng đầu dò vết để đo liều neutron có những ưu điểm cơ bản sau đây:

- Cho phép tách riêng các quá trình chiếu xạ và đo kết quả;
- Có khả năng lưu giữ thông tin cần thiết được rất lâu trong những điều kiện khắc nghiệt về nhiệt độ và áp suất (thí dụ: hàng triệu năm đối với mica tự nhiên);
- Không đòi hỏi những dụng cụ phức tạp và đắt tiền, mà chỉ cần đến kính hiển vi quang học và một vài loại hoá chất bình thường;
- Bảo quản và sử dụng đơn giản.



Hình H4.5-2. Sơ đồ nguyên lý đo độ mờ của tấm thủy tinh.

Ký hiệu: 1 – nguồn ánh sáng; 2 – hệ thấu kính quang học; 3 – tấm thủy tinh; 4 – buồng tối có cửa sổ; 5 – đầu nhạy của bộ phận ghi ánh sáng tán xạ; 6 – bộ phận xử lý tín hiệu và hiển thị kết quả; 7 – chùm tia sáng từ nguồn tới mặt thủy tinh; 8 – chùm tia sáng tán xạ từ mặt thủy tinh; 9 – bộ phận hấp thụ ánh sáng đi qua tấm thủy tinh.

Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm rất lớn như vừa nêu trên, các đầu dò vết còn mắc phải một nhược điểm quan trọng là: việc đếm vết là vất vả, chóng

mặt mờ, dễ nhầm lẫn, nên có sai số lớn. Nhược điểm này có thể khắc phục được bằng phương pháp đơn giản là xác định thông lượng nơtron theo cường độ ánh sáng tán xạ từ mặt mờ của tấm thuỷ tinh đã được dùng để ghi vết (xem hình H4.5-2). Thực tế cho thấy, mặt thuỷ tinh tiếp xúc với lớp đồng vị tạo mảnh vỡ hạt nhân trở nên mờ đi sau khi được xử lý trong dung dịch HF. Độ mờ của tấm thuỷ tinh phụ thuộc vào số vết lõm lõm trên bề mặt thuỷ tinh, do đó phụ thuộc vào thông lượng nơtron. Hình H4.5-3 cho thấy dạng đường phụ thuộc vào thông lượng nơtron của độ mờ của thuỷ tinh. Bằng cách lựa chọn các điều kiện xử lý tối ưu, một số tác giả đã xác định được thông lượng $\Phi_n \sim (7.10^5 \div 5.10^{11}) \text{ n/cm}^2$ mà chỉ mất có vài giây lao động nhẹ nhàng. (Trong khi đó, phương pháp đếm vết bằng kính hiển vi quang học chỉ cho phép xác định được thông lượng nơtron $\Phi_n \sim (3.10^4 \div 2.10^8) \text{ n/cm}^2$). Nhờ vậy, có thể được sử dụng phương pháp cải tiến này trong đo liều cá nhân và trong một số phòng thí nghiệm vật lý.

4.6. PHƯƠNG PHÁP NHŨ TƯƠNG ẢNH

4.6.1. Đo liều nơtron năng lượng trung gian và nơtron nhanh bằng nhũ tương ảnh hạt nhân

Tương tác của bức xạ nơtron với nhũ tương ảnh cũng làm cho mật độ quang học của phim tăng lên, hay nói cách khác – làm cho phim trở nên có độ đen lớn hơn. Tuy nhiên, độ đen của phim có được do tác dụng của bức xạ nơtron lại có giá trị thấp hơn từ hàng chục đến hàng trăm lần so với tác dụng của bức xạ gamma với cùng một liều lượng. Vì vậy, để đo liều lượng bức xạ nơtron nhanh, người ta phải dùng các loại nhũ tương ảnh hạt nhân nhạy với tương tác của các prôtôn lùi sinh ra do tán xạ đàn hồi của nơtron trên hạt nhân hydro có nhiều trong thành phần của nhũ tương ảnh và môi trường xung quanh. Khi chuyển động trong lớp nhũ tương ảnh, các prôtôn lùi tạo nên vết dọc theo quỹ đạo chuyển động của chúng. Sau khi phim được xử lý hoá học để hiện hình và định hình, thì có thể dùng kính hiển vi quang học để quan sát và đếm được

những vết này.

Vết được tạo thành mà càng lệch nhiều so với phương pháp tuyến của lớp nhũ tương, thì càng dễ phát hiện. Vết có phương song song với pháp tuyến, thì khó được phát hiện hơn cả. (Trong trường hợp này, độ dài cực đại của vết cũng không thể lớn hơn bề dày của lớp nhũ tương). Đối với các loại nhũ tương ảnh dày, thì chỉ đếm được những vết tạo bởi notrôn năng lượng $E_n > 0,25 \text{ MeV}$ và có bề dài ít nhất là gấp ba lần kích thước của hạt nhũ tương.

Trong nhũ tương ảnh có chứa các hạt nhân ^{14}N . Nếu trong trường bức xạ notrôn có cả notrôn nhiệt, thì có thể xảy ra phản ứng $^{14}\text{N}(n_{\text{nhiệt}}, p)^{14}\text{C}$ sinh ra prôtôn với động năng $E_p = 0,62 \text{ MeV}$. Vì vậy, trong trường hợp này, nếu muốn ghi nhận riêng notrôn nhanh, thì phải loại trừ được những vết tạo bởi prôtôn có năng lượng $E_p \leq 0,62 \text{ MeV}$. Song, vì prôtôn lùi (sinh ra do tán xạ đàn hồi của notrôn) có thể bay ra dưới những góc khác nhau với năng lượng từ $E_p = 0$ đến E_n , nên điều này dẫn đến sai số lớn. (Nếu loại bỏ những vết tạo bởi prôtôn với động năng $E_p \leq 0,62 \text{ MeV}$, thì số vết không được đếm trong trường hợp notrôn có năng lượng $E_n = 1 \text{ MeV}$ sẽ là 50%, còn khi $E_n = 2 \text{ MeV}$ – sẽ là 10%, và khi $E_n = 5 \text{ MeV}$ – sẽ là ~3%).

Phương pháp nhũ tương ảnh chỉ dùng để đo liều notrôn được, nếu số vết được tạo thành tỷ lệ với liều notrôn mà không phụ thuộc vào năng lượng của notrôn. Song, tiết diện tán xạ notrôn, và do đó – số vết được tạo thành phụ thuộc vào năng lượng notrôn, nên chỉ bằng cách đếm vết đơn giản thì không thể xác định được liều tương đương gây bởi notrôn (trừ khi nhũ tương bị chiếu bởi bức xạ notrôn có phổ năng lượng đã biết và có nhũ tương chuẩn cũng bị chiếu bởi bức xạ notrôn có cùng phổ năng lượng với liều lượng đã biết). Vì vậy, muốn đo liều tương đương của notrôn bằng phương pháp nhũ tương ảnh, thì phải lần lượt bọc lớp nhũ tương ảnh trong những lớp chất chứa hydro (như xenlulôza) và các lớp nhôm có độ dày mỏng thích hợp khác nhau. Bằng cách này, người ta xác định được liều tương đương trong vùng năng lượng notrôn E_n từ 0,5 MeV tới 14 MeV theo công thức sau đây:

$$H = a.N \quad (4.6-1)$$

với N – số vết đếm được; hệ số $a=\text{const}$ tính tới thứ nguyên của các đại lượng H và N trong công thức.

Sai số của phương pháp đo liều neutron nhanh bằng nhũ tương ảnh hạt nhân được quyết định bởi sự phụ thuộc của độ nhạy nhũ tương vào năng lượng neutron, và của hàm lượng hydro chứa trong nhũ tương vào độ ẩm. Vì vậy, sai số xác định liều nói chung là lớn, thậm chí có thể đạt tới 200%.

Đối với neutron năng lượng trung gian, nhũ tương ảnh hạt nhân ít được sử dụng để đo liều vì rất khó phân biệt theo độ dài các vết của proton lùi và các vết gây bởi neutron nhiệt tham gia phản ứng $^{14}\text{N}(n_{\text{nhiệt}},p)^{14}\text{C}$.

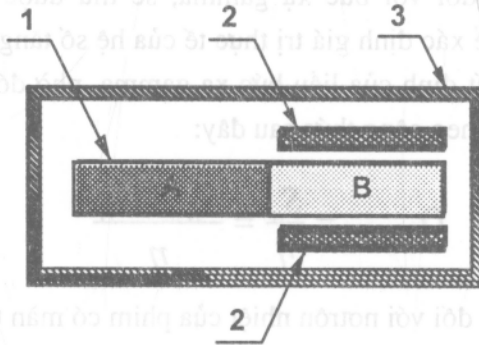
4.6.2. Đo liều neutron nhiệt bằng nhũ tương ảnh gamma

Đối với neutron nhiệt, có thể tăng độ nhạy của nhũ tương bằng cách thêm vào thành phần của nhũ tương các chất Li hoặc B để xác định liều bằng cách đếm vết. Song, đơn giản hơn, có thể xác định liều neutron nhiệt bằng cách sử dụng ngay phim thường dùng để đo liều bức xạ gamma kết hợp với màn tăng cường có pha thêm bor, hoặc màn cộng hưởng bằng cadmi. Dưới đây lần lượt xét hai trường hợp này.

4.6.2.1. Dùng phim gamma kết hợp với màn tăng cường pha bo

Bản thân phim vẫn thường dùng để đo liều bức xạ gamma (gọi tắt cho gọn là phim gamma) thì không nhạy với neutron nhiệt. Nhưng nếu dùng phim này kết hợp cùng với màn tăng cường huỳnh quang dày cỡ 0,5 mm làm từ chất nhấp nháy $\text{ZnS}(\text{Ag})$ có pha thêm nguyên tố bo (B), thì độ nhạy của phim đối với neutron nhiệt được cải thiện rất nhiều. Đó là vì phản ứng hấp thụ neutron nhiệt của hạt nhân bo $^{10}\text{B}(n_{\text{nhiệt}},\alpha)^7\text{Li}$ sinh ra hạt α có động năng 1,9 MeV cùng với hạt nhân ^7Li có động năng 0,6 MeV làm cho các tinh thể nhấp nháy $\text{ZnS}(\text{Ag})$ phát ra photon tới tác dụng lên nhũ tương ảnh.

Hệ dùng phim gamma kết hợp với màn tăng cường ZnS(Ag) có pha thêm nguyên tố bo để xác định liều nơtron nhiệt có cấu tạo như được thể hiện trên hình H4.6-1. Phim (1) được đặt trong bao có bộ lọc (3) làm giảm sự phụ thuộc của độ nhạy vào năng lượng bức xạ gamma. Một phần của phim (A) không có màn tăng cường; phần còn lại của phim (B) – có màn tăng cường pha bo (2).



Hình H4.6-1. Sơ đồ cấu tạo của một hệ dùng phim gamma kết hợp với màn tăng cường pha bo để xác định liều nơtron nhiệt. Ký hiệu: 1 – loại phim vẫn thường dùng đo liều bức xạ gamma; 2 – Màn tăng cường ZnS(Ag) pha bo; 3 – bộ lọc bù trừ đo liều bức xạ gamma; A – vùng phim không nằm dưới màn tăng cường; B – vùng phim nằm dưới màn tăng cường pha bo.

Giả sử, do tác dụng của riêng bức xạ gamma, phim có mật độ quang học là $S_{A,\text{gamma}}$ và $S_{B,\text{gamma}}$ tương ứng với phần không có màn tăng cường (A) và có màn tăng cường (B). Trong trường hợp này, đối với bức xạ gamma, thì màn tăng cường pha bo có hệ số tăng cường (G) được xác định theo biểu thức sau đây:

$$G = \frac{S_{B,\text{gamma}}}{S_{A,\text{gamma}}} \quad (4.6-2)$$

Dưới tác dụng của bức xạ hỗn hợp n- γ , các phần A và B của phim sẽ có mật độ quang học là S_A và S_B tương ứng. Vì tác dụng của nơtron lên phần phim không có màn tăng cường thực tế là không đáng kể, nên có thể coi $S_A = S_{A,\text{gamma}}$. Do đó, mật độ quang học gây bởi bức xạ gamma đối với phần phim nằm dưới

màn tăng cường có giá trị bằng $S_{B,\text{gamma}} = GS_{A,\text{gamma}} = GS_A$, còn mật độ quang học gây bởi neutron nhiệt đối với phần phim nằm dưới màn tăng cường sẽ bằng:

$$S_n = S_B - S_{B,\text{gamma}} = S_B - GS_A \quad (4.6-3)$$

Vì vậy, bằng cách xây dựng các đường cong chuẩn $f_1 = S_{A,\text{gamma}}(D_{\text{gamma}})$ và $f_2 = S_{n,\text{gamma}}(D_{\text{gamma}})$ đối với bức xạ gamma, sẽ thu được đường cong chuẩn $f=f_2/f_1 = G(D_{\text{gamma}})$ để xác định giá trị thực tế của hệ số tăng cường G tương ứng với giá trị D_{gamma} nhất định của liều bức xạ gamma, nhờ đó đánh giá được liều hấp thụ neutron nhiệt theo công thức sau đây:

$$D_{n,\text{nhiệt}} = \frac{S_n}{\eta} = \frac{S_B - GS_A}{\eta} \quad (4.6-4)$$

trong đó η – độ nhạy đối với neutron nhiệt của phim có màn tăng cường pha bo.

Tuy nhiên, công thức (4.6-4) chỉ đúng khi mật độ quang học S_A và S_B có giá trị nằm trong vùng tuyến tính của các đường cong chuẩn $f_1 = S_{A,\text{gamma}}(D_{\text{gamma}})$ và $f_2 = S_{B,\text{gamma}}(D_{\text{gamma}})$. Trong trường hợp hai giá trị S_A và S_B nằm ngoài vùng tuyến tính của các đường cong chuẩn này, thì việc xác định các liều hấp thụ D_{gamma} và $D_{n,\text{nhiệt}}$ sẽ có sai số lớn do hiện tượng rọi non và rọi già (xem lại đường đặc trưng liều – mật độ quang học trong đo liều bức xạ lượng tử bằng phương pháp phim ảnh, mục 3.2.3.).

Bằng phương pháp sử dụng phim ảnh đo liều bức xạ gamma kết hợp với màn tăng cường pha bor, ta xác định được liều tương đương của bức xạ hỗn hợp gamma–neutron nhiệt theo công thức sau đây:

$$H = K_{n,\text{nhiệt}} \cdot D_{n,\text{nhiệt}} + 1 \cdot D_{\text{gamma}} \quad (4.6-5)$$

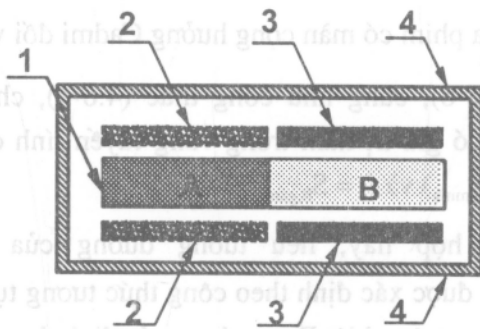
với $K_{n,\text{nhiệt}}$ – hệ số phẩm chất của neutron nhiệt.

Phương pháp này có độ nhạy cao, cho phép đo được liều neutron nhiệt trong khoảng từ $2 \cdot 10^{-2}$ mSv đến 3 mSv với sai số vài chục phần trăm.

4.6.2.2. Dùng phim gamma cùng với màn cộng hưởng bằng cadmi

Nguyên tố cadmi có tiết diện hấp thụ nơtron nhiệt rất lớn (bằng $2,528 \cdot 10^3$ barn), chủ yếu là do đóng góp của đồng vị ^{113}Cd (chiếm 12,22% hàm lượng cadmi trong tự nhiên). Phản ứng $^{113}\text{Cd}(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)$ có tiết diện bằng $2,06 \cdot 10^4$ barn và làm phát ra lượng tử gamma với năng lượng 0,55MeV. Do đó, có thể sử dụng loại phim vẫn thường dùng trong đo liều bức xạ gamma kết hợp với màn cộng hưởng bằng cadmi để đo liều nơtron nhiệt.

Phương pháp này cũng tương tự như phương pháp dùng phim gamma kết hợp với màn tăng cường pha bor vừa trình bày ở mục trên.



Hình H4.6-2. Sơ đồ cấu tạo của một hệ dùng phim gamma kết hợp với màn cộng hưởng để xác định liều nơtron nhiệt. Ký hiệu: 1 – loại phim vẫn thường dùng đo liều bức xạ gamma; 2 – lớp chắn bằng thiếc Sn; 3 – lớp chắn bằng cadmi Cd; 4 – lớp chắn bằng chì Pb; A – vùng phim nằm dưới lớp chắn bằng thiếc; B – vùng phim nằm dưới màn cộng hưởng cadmi.

Hệ dùng phim gamma kết hợp với màn cộng hưởng để xác định liều nơtron nhiệt có cấu tạo như được thể hiện trên hình H4.6-2. Phim gamma (1) được chia thành hai phần, trong đó phần phim thứ nhất (A) được bọc trong một lớp chắn bằng thiếc Sn (2), còn phần phim thứ hai (B) thì được bọc trong một lớp chắn bằng cadmi (3, gọi là màn cộng hưởng). Hai loại lớp chắn này có bề dày khối như nhau. Tất cả được đặt trong một lớp vỏ bọc bằng chì Pb (4). Các

lớp chắn Pb+Cd và Pb+Sn tạo thành các bộ lọc bù trừ đối với bức xạ gamma. Trong thực tế, tiết diện phản ứng ($n_{\text{nhiệt}}, \text{gamma}$) của thiếc thì rất nhỏ (chỉ bằng cỡ phần nghìn so với của cadmi), nên có thể bỏ qua; còn ảnh hưởng của các lớp Cd và Sn đối với bức xạ gamma có thể coi là gần như nhau (vì số thứ tự nguyên tố của chúng xấp xỉ bằng nhau: $Z_{\text{Cd}}=48 \approx Z_{\text{Sn}}=50$). Vì vậy, có thể xác định liều neutron nhiệt theo biểu thức tương tự như (4.6-4) trong trường hợp dùng màn tăng cường pha bor nhưng với hệ số $G=1$. Nghĩa là, trong trường hợp dùng phim gamma kết hợp với màn cộng hưởng cadmi, thì có thể xác định liều neutron nhiệt theo biểu thức sau đây:

$$D_{n, \text{nhiệt}} = \frac{S_n}{\eta_{\text{Cd}}} = \frac{S_B - S_A}{\eta_{\text{Cd}}} \quad (4.6-6)$$

với η_{Cd} – độ nhạy của phim có màn cộng hưởng Cadmi đối với neutron nhiệt.

Công thức (4.6-6), cũng như công thức (4.6-4), chỉ đúng khi mật độ quang học S_A và S_B có giá trị nằm trong vùng tuyến tính của các đường cong chuẩn $f_3 = S_{\Lambda, \text{gamma}}(D_{\text{gamma}})$ và $f_4 = S_{B, \text{gamma}}(D_{\text{gamma}})$.

Trong trường hợp này, liều tương đương của bức xạ hỗn hợp gamma–neutron nhiệt được xác định theo công thức tương tự như (4.6-5), nhưng trong đó liều hấp thụ neutron nhiệt $D_{n, \text{nhiệt}}$ được xác định theo công thức (4.6-6).

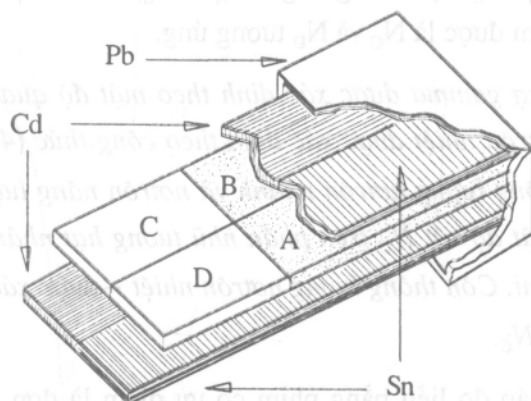
4.6.3. Đo liều bức xạ hỗn hợp n–gamma bằng phương pháp nhũ tương ảnh

Trên đây vừa trình bày các phương pháp sử dụng phim gamma kết hợp với màn tăng cường pha bor, hoặc với màn cộng hưởng bằng cadmi để xác định liều gây bởi neutron nhiệt, và, phương pháp sử dụng nhũ tương ảnh hạt nhân để đo liều neutron năng lượng trung gian và neutron nhanh.

Trường bức xạ neutron–gamma hỗn hợp thường gồm nhiều thành phần từ neutron nhiệt tới neutron nhanh và thành phần bức xạ gamma. Vậy làm thế nào để có thể xác định được liều của từng thành phần bức xạ riêng rẽ? Thực tế cho

thấy, có thể xác định được ba thành phần liều gây bởi bức xạ hỗn hợp n-gamma (cụ thể là: liều gây bởi thành phần notrôn nhiệt; liều gây bởi thành phần notrôn năng lượng trung gian và notrôn nhanh; liều gây bởi thành phần bức xạ gamma) bằng cách kết hợp sử dụng đồng thời cả bốn loại vật liệu sau đây:

- Loại phim vẫn thường dùng trong đo liều bức xạ gamma;
- Nhũ tương ảnh hạt nhân;
- Màn cộng hưởng cadmi;
- Lớp màn lọc bằng thiếc.



Hình H4.6-3. Sơ đồ cấu tạo của dụng cụ đo liều bức xạ hỗn hợp n-gamma bằng phương pháp nhũ tương ảnh. Ký hiệu: Pb – Lớp vỏ bọc bằng chì; Sn – lớp chắn bằng thiếc; Cd – lớp chắn bằng cadmi; A và B – hai nửa của tấm phim thuộc loại vẫn thường dùng để đo liều bức xạ gamma; C và D – hai nửa của tấm phim làm từ nhũ tương ảnh hạt nhân.

Hình H4.6-3 minh họa nguyên tắc cấu tạo của loại dụng cụ đo liều bức xạ hỗn hợp n-gamma theo phương pháp nhũ tương ảnh này. Có thể hình dung cấu tạo của dụng cụ đo liều loại này như sau. Ngoài cùng là một lớp vỏ bọc kín làm bằng chì (Pb). Bên trong vỏ bọc này có hai tấm lót như nhau và được sắp xếp giống hệt nhau; mỗi tấm được làm từ hai nửa; một nửa làm bằng cadmi (Cd), còn nửa kia làm bằng thiếc (Sn). Nằm giữa hai tấm lót đó là một lớp phim ảnh

gồm hai nửa khác nhau: một nửa là phim gamma thông thường, còn nửa phim kia có chứa nhũ tương hạt nhân. Hai tấm lót và lớp phim được sắp xếp sao cho mỗi nửa phim đều có hai phần: một phần nằm giữa hai tấm cadmi và một phần nằm giữa hai tấm thiếc. Trên hình H4.6-3 ký hiệu A là phần phim gamma nằm giữa hai tấm thiếc, B là phần phim gamma nằm giữa hai tấm cadmi, C là phần phim chứa nhũ tương hạt nhân nằm giữa hai tấm cadmi, còn D là phần phim chứa nhũ tương hạt nhân nằm giữa hai tấm thiếc.

Giả sử sau khi đặt dụng cụ đo liều này vào trường bức xạ hỗn hợp n-gamma, rồi xử lý hiện hình và định hình hai nửa phim, thì các phần phim A, và B có mật độ quang học tương ứng là S_A và S_B ; còn các phần phim C và D, thì có mật độ vết đếm được là N_C và N_D tương ứng.

Liều bức xạ gamma được xác định theo mật độ quang học S_A của phần phim A. Liều neutron nhiệt được xác định theo công thức (4.6-6) trên cơ sở của hiệu $S_B - S_A$. Thông lượng neutron nhanh và neutron năng lượng trung gian được xác định theo mật độ vết N_C trên phần nhũ tương hạt nhân nằm giữa hai màn cộng hưởng cadmi. Còn thông lượng neutron nhiệt – được xác định theo hiệu các mật độ vết $N_D - N_C$.

Phương pháp đo liều bằng phim có ưu điểm là đơn giản và rẻ tiền, nên vẫn thường được sử dụng rộng rãi để kiểm tra liều bức xạ cá nhân. Dụng cụ đo liều bằng phim thường được thiết kế để có tính vạn năng; cụ thể là: đo liều trong vùng năng lượng rộng; kiểm tra được liều của nhiều loại bức xạ; đáp ứng được một số nhiệm vụ trong đo liều lượng bức xạ. Để đảm bảo tính vạn năng của dụng cụ đo liều loại này, người ta dùng các bộ lọc có bề dày và vật liệu khác nhau, các loại nhũ tương ảnh khác nhau.

Nếu dụng cụ đo liều có cấu tạo tương tự như trên hình H4.6-3 cộng thêm một phần phim gamma thông thường mà không bị chắn bởi lớp vật liệu nào ngoại trừ một lớp giấy đen chống ánh sáng lọt vào, thì cho phép đo được cả liều bức xạ hỗn hợp neutron-gamma-beta.

Trong các dụng cụ đo liều cá nhân bằng phim ảnh, người ta thường còn

dành chỗ để có thể đặt thêm một số đầu dò kích hoạt. Các đầu dò này cho phép đánh giá liều trong trường hợp xảy ra sự cố hoặc tai nạn hạt nhân.

4.7. PHƯƠNG PHÁP NHẮP NHÁY

Phương pháp nhấp nháy ít được dùng để đo liều neutron nhanh vì nó có một nhược điểm cơ bản rất khó khắc phục là độ nhạy của nó đối với neutron rất thấp so với độ nhạy đối với bức xạ gamma. Sở dĩ như vậy là vì: muốn đo liều neutron nhanh bằng phương pháp nhấp nháy, thì phải dựa vào tán xạ đàn hồi của neutron; do đó phải sử dụng các chất nhấp nháy hữu cơ (là những chất chứa nhiều hydro). Song, chất nhấp nháy hữu cơ lại có độ nhạy đối với các điện tử được giải phóng bởi bức xạ gamma cao hơn so với độ nhạy của nó đối với các proton lùi xuất hiện trong tán xạ đàn hồi của neutron. Do vậy, rất khó đặt ngưỡng để loại bỏ những xung tạo bởi bức xạ gamma mà có biên độ xấp xỉ bằng hoặc thậm chí cao hơn cả biên độ xung gây bởi neutron. Thí dụ, đối với chất nhấp nháy antrasen, khi năng lượng $E_\gamma = E_n = 1\text{MeV}$, thì tỷ số giữa các dòng điện sinh bởi 1 neutron và 1 lượng tử gamma (còn gọi là tỷ số giữa hai độ nhạy tương ứng) chỉ có giá trị bằng $i_{1n}/i_{1\gamma} = 0,7$.

Phương pháp nhấp nháy ở chế độ đếm có độ nhạy đối với neutron nhanh cao hơn so với bức xạ gamma. Song, sự phụ thuộc vào năng lượng neutron của độ nhạy của hệ đo liều nhấp nháy lại khác rất nhiều so với của các tổ chức cơ thể.

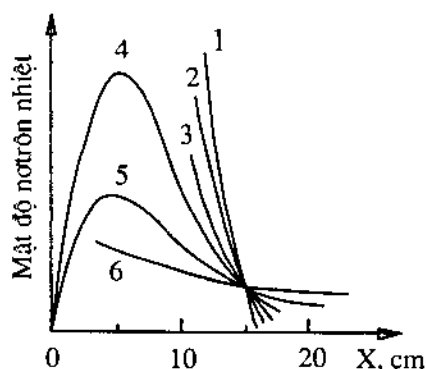
Để đo liều neutron nhanh, người ta thường lấy một lượng nhỏ chất nhấp nháy vô cơ thuộc loại ít nhạy với bức xạ gamma (thí dụ như $\text{ZnS}(\text{Ag})$) trộn đều trong chất hữu cơ thuộc loại không phát nhấp nháy (như polystirôl hoặc thủy tinh hữu cơ hay plegsiglas). Các proton lùi và điện tử sinh ra trong phần hữu cơ không nhấp nháy sẽ mất một phần năng lượng của mình trong chất nhấp nháy vô cơ và do đó làm phát ra photon.

Bằng cách trộn thêm vào chất nhấp nháy ít nhạy với bức xạ gamma (như

ZnS(Ag)) những chất (như bo) hoặc những đồng vị kích hoạt thích hợp, cũng có thể đo được liều neutron thấp với độ nhạy tương đối cao (xem lại mục 4.4. về phương pháp kích hoạt).

4.8. SỬ DỤNG HIỆU ỨNG LÀM CHẬM ĐỂ ĐO LIỀU NƠTRÔN

Nếu cho một chùm neutron chiếu thẳng góc với bề mặt của một khối paraffin, sao cho liều trên bề mặt của khối này là 0,01 Gy, thì người ta thấy rằng ở độ sâu khoảng 15 cm kể từ bề mặt paraffin, mật độ neutron nhiệt có giá trị không đổi và hầu như không phụ thuộc vào năng lượng của neutron tới (xem hình H4.8-1). Điều này cho phép thiết kế các dụng cụ đo liều neutron dựa trên hiệu ứng làm chậm neutron trong môi trường chứa nhiều hydro. Về nguyên tắc, dụng cụ đo liều neutron loại này gồm hai bộ phận cơ bản là khối chất làm chậm và đầu dò neutron nhiệt.



Hình H4.8-1. Phân bố neutron nhiệt theo độ sâu kể từ bề mặt của khối paraffin. Ký hiệu: 1 – neutron tới có năng lượng $E_n=25$ keV; 2 – $E_n=50$ keV; 3 – $E_n=220$ keV; 4 – $E_n=820$ keV; 5 – $E_n=2,9$ MeV; 6 – $E_n=5$ MeV.

Để làm đầu dò trong trường hợp này, có thể sử dụng các đầu dò notrôn nhiệt loại bất kỳ, mà không cần phải thoả mãn một điều kiện đặc biệt nào (thí dụ như: ống đếm bor, đầu dò nhấp nháy, đầu dò kích hoạt, nhũ tương ảnh .v.v.).

Môi trường làm chậm thường được dùng là paraffin, plastic hoặc pôliêtilen. Dạng hình học và kích thước của khối làm chậm được chọn sao cho tồn tại một vùng mà trong đó mật độ notrôn nhiệt tỷ lệ với liều tương đương trên bề mặt của notrôn tới. Đầu dò notrôn nhiệt được đặt vào chính giữa vùng này.

Thông thường, khối chất làm chậm được làm ở dạng cầu và đầu dò notrôn nhiệt được đặt vào tâm của khối cầu đó. Dụng cụ đo liều loại này đáp ứng được việc đo liều tương đương của notrôn trong một khoảng năng lượng rộng, bao trùm cả vùng phổ phân chia hạt nhân của notrôn.

Trong thực tế, hiệu ứng làm chậm còn được sử dụng để thiết kế hai loại dụng cụ đo liều notrôn khác nữa. Hai loại này có dạng như sau:

1. Khối chất làm chậm hình cầu, trong đó có vài đầu dò notrôn nhiệt được đặt ở những vị trí khác nhau thích hợp; hoặc
2. Khối chất làm chậm là một hệ gồm nhiều vỏ cầu đồng tâm có đường kính khác nhau ghép lại và có chung một đầu dò notrôn nhiệt được đặt ở vùng tâm cầu.

Như vậy, xét về thực chất, thì loại dụng cụ đo liều notrôn đã trình bày ở đầu của mục này là một trường hợp đặc biệt của hệ gồm nhiều vỏ cầu đồng tâm.

Nếu coi mỗi đầu dò notrôn nhiệt i cùng với khối chất làm chậm dạng hình cầu bao quanh nó, hoặc mỗi vỏ cầu i cùng với đầu dò notrôn nhiệt ở tâm của nó là một hệ con i , thì có thể xác định liều tương đương theo công thức sau đây:

$$H = a \sum_{(i)} k_i N_i \quad (4.8-1)$$

Đối với thông lượng notrôn, có công thức tương tự như trên:

$$\Phi = a^* \sum_{(i)} k_i^* N_i \quad (4.8-2)$$

Trong hai công thức này, thì a và a^* – các hệ số phụ thuộc thứ nguyên của các đại lượng có mặt trong hai công thức; còn k_i và k_i^* – các hệ số tỷ lệ, tìm được từ các đường cong chuẩn dụng cụ đo liều; N_i – tín hiệu thu được của hệ con i (có thể là số xung hay cường độ dòng điện hoặc mật độ quang học của phim .v.v.).

Thực tế cho thấy *chỉ cần dùng 3 đầu dò neutron nhiệt hoặc hệ gồm 3 vỏ cầu đường kính khác nhau cũng có thể xác định được liều tương đương trong vùng năng lượng neutron rất rộng: từ 0,025 eV tới khoảng 50 MeV.*

4.9. PHƯƠNG PHÁP HOÁ HỌC

Phương pháp hoá học thường được sử dụng để xác định các liều bức xạ trong dải liều cao.

Để xác định liều lượng neutron nhiệt, có thể dùng các dung dịch thích hợp có hiệu suất phản ứng hoá học cao dưới tác dụng của bức xạ neutron. Thí dụ, đối với dung dịch chứa muối của B hoặc của Li, các hạt có khả năng ion hoá được sinh ra trong phản ứng hấp thụ neutron nhiệt $B^{10}(n_{\text{nhiệt}}, \alpha)Li^7$ hoặc $Li^6(n_{\text{nhiệt}}, \alpha)He^3$ sẽ kích thích và làm xảy ra các phản ứng hoá học trong dung dịch. Nồng độ (C) của sản phẩm của phản ứng hoá học tỷ lệ với thông lượng neutron nhiệt ($\Phi_{\text{nhiệt}}$). Do đó, xác định được nồng độ C của sản phẩm, thì ta cũng xác định được thông lượng neutron nhiệt $\Phi_{\text{nhiệt}}$.

Xét trường hợp chung khi bức xạ gamma (cùng tồn tại trong trường bức xạ) tác dụng lên dung dịch cũng tạo nên sản phẩm cùng loại với sản phẩm gây bởi neutron nhiệt. Ta ký hiệu nồng độ của sản phẩm gây bởi riêng bức xạ gamma là C_{gamma} . Khi đó có tương quan sau đây giữa nồng độ C của sản phẩm trong dung dịch và thông lượng neutron nhiệt:

$$C = kn\sigma\Phi_{\text{nhiệt}}EGAf_1(C_i, P_n) + C_{\text{gamma}}(C_i, P_{\text{gamma}}) \quad (4.9-1)$$

Trong đó

$$C_{\text{gamma}} = C_{0, \text{gamma}} f_2(C_i, P_{\text{gamma}}) \quad (4.9-2)$$

ở đây, k – hệ số tỷ lệ, tính tới thứ nguyên của các đại lượng có mặt trong biểu thức; n – số nguyên tử B hoặc Li có trong 1cm^3 dung dịch; σ – tiết diện của phản ứng hạt nhân gây bởi neutron nhiệt; E – tổng động năng của các hạt sinh ra trong mỗi lần xảy ra phản ứng ($n_{\text{nhiệt}}, \alpha$) của B hoặc Li; G – hiệu suất của phản ứng hoá bức xạ gây bởi neutron nhiệt (có giá trị bằng số sản phẩm (biến đổi) đặc trưng tạo thành do hấp thụ 100 eV năng lượng của bức xạ neutron nhiệt); A – phân tử gam của sản phẩm được tạo thành; $C_{0, \text{gamma}}$ – nồng độ sản phẩm gây bởi riêng bức xạ gamma trong dung dịch không có nguyên tố hấp thụ neutron nhiệt (tức là khi $C_i=0$).

Trong trường hợp tổng quát, hai thành phần ở vế phải của tương quan (4.9-1) còn phụ thuộc vào nồng độ của chất hấp thụ neutron nhiệt trong dung dịch (C_i); và, khi suất liều bức xạ lớn, thì chúng còn phụ thuộc cả vào suất liều bức xạ neutron (P_n) và suất liều bức xạ gamma (P_{gamma}) tương ứng. Các hệ số $f_1(C_i, P_n)$ và $f_2(C_i, P_{\text{gamma}})$ thể hiện những sự phụ thuộc này. Có thể coi $f_1 = f_2 = 1$ khi nồng độ C_i chưa cao và các suất liều bức xạ còn chưa lớn.

Bằng cách đo nồng độ sản phẩm tạo thành trong dung dịch có pha B hoặc Li, và đo nồng độ sản phẩm này trong dung dịch không có nguyên tố hấp thụ neutron nhiệt, có thể xác định được thông lượng neutron nhiệt theo công thức sau:

$$\Phi_{\text{nhiệt}} = \frac{C - C_{\text{gamma}}}{kn\sigma EGA} \quad (4.9-3)$$

trong đó C_{gamma} được xác định theo biểu thức (4.9-2).

Liều lượng neutron nhanh và neutron năng lượng trung gian được xác định bằng cách sử dụng những dung dịch nước thích hợp. Nhờ sự phụ thuộc vào mật độ iôn hoá một cách tuyến tính của hiệu suất của phản ứng hoá bức xạ gây bởi neutron, có thể dùng hai loại dung dịch nước có hiệu suất khác nhau $G_1 \neq G_2$ để xác định riêng liều gây bởi bức xạ gamma, và, liều gây bởi các proton lùi và

hạt nhân lùi sinh ra do tán xạ đàn hồi của neutron nhanh và neutron trung gian. Ta ký hiệu hai dung dịch này là đôzimet 1 và đôzimet 2. Khi đó có hai biểu thức sau đây (tương tự như (4.9-1)):

$$C_1 = a_1 \Phi G_1 + b_1 C_{0, \text{gamma}} \quad (4.9-4)$$

$$C_2 = a_2 \Phi G_2 + b_2 C_{0, \text{gamma}} \quad (4.9-5)$$

với a_1, a_2 và b_1, b_2 – các hệ số tỷ lệ có giá trị được xác định trong khi chuẩn các đôzimet số 1 và 2.

Giải hệ gồm hai phương trình (4.9-4) và (4.9-5), ta tìm được thông lượng neutron nhanh và neutron trung gian Φ và nồng độ $C_{0, \text{gamma}}$, nhờ đó xác định được cả liều gây bởi thành phần bức xạ gamma kèm theo.

Chú ý: trong trường hợp tổng quát, các hệ số a_i và b_i của hai biểu thức (4.9-4 và -5) có thể phụ thuộc vào một số yếu tố như: suất liều, năng lượng của neutron hoặc của lượng tử tới tương tác với dung dịch, nồng độ của một vài thành phần đặc biệt có trong dung dịch, nhiệt độ của dung dịch .v.v.

4.10. XÁC ĐỊNH LIỀU NOTRÔN BẰNG DỤNG CỤ ĐO LIỀU GAMMA CÁ NHÂN

Dụng cụ đo liều bức xạ gamma cá nhân thường có vỏ bọc làm bằng chất dẻo tổng hợp và/hoặc bằng nhôm. Nếu nó có vỏ bọc bằng nhôm, thì khi ở trong trường bức xạ neutron, vỏ nhôm sẽ bị kích hoạt bởi những phản ứng làm sinh ra lượng tử gamma và các hạt nặng có điện tích như sau:

- 1). $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ do tác dụng của neutron nhiệt (phát lượng tử với năng lượng $E_{\text{gamma}} = 1,779 \text{ MeV}$);
- 2). $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ khi $E_n \geq 4,4 \text{ MeV}$ (phát các lượng tử với năng lượng $E_{\text{gamma}} = 0,844 \text{ MeV}$ và $1,014 \text{ MeV}$);

- 3). $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ khi $E_n \geq 7,2 \text{ MeV}$ (phát các lượng tử với năng lượng $E_{\text{gamma}} = 1,369 \text{ MeV}$ và $2,754 \text{ MeV}$).

Nếu dụng cụ đo liều này hoạt động trên cơ sở buồng ion hoá, thì thành buồng ion hoá của nó cũng có thể cho thêm các prôtôn lùi.

Cả bốn loại sản phẩm vừa nêu có thể giúp ta đánh giá được liều lượng bức xạ neutron bằng dụng cụ đo liều lượng bức xạ gamma thường dùng.

Giả sử, có hai dụng cụ đo liều cá nhân thuộc hai loại là x và y khác nhau.

Xét trường hợp đơn giản nhất, khi độ ion hoá gây bởi bức xạ gamma và bởi prôtôn lùi trong hai dụng cụ đo liều cá nhân này có thể coi được là bằng nhau. Trong trường hợp này, thì độ chênh lệch chỉ số của hai dụng cụ đó chính là liều tạo bởi bức xạ gamma được sinh ra do tác dụng kích hoạt của neutron. Nhờ vậy, có thể đánh giá được liều neutron nhanh.

Trong trường hợp tổng quát, có thể lập hệ gồm hai phương trình tương tự như (4.9-4) và (4.9-5) vừa nêu ở cuối mục 4.9 (ở trên):

$$C_x = a_x \Phi G_x + b_x D_{\text{gamma}} \quad (4.10-1)$$

$$C_y = a_y \Phi G_y + b_y D_{\text{gamma}} \quad (4.10-2)$$

ở đây: C_x, C_y – Chỉ số của hai dụng cụ đo liều cá nhân thuộc hai loại x và y; a_x, a_y và b_x, b_y – các hệ số tỷ lệ (có giá trị đã được xác định trong quá trình chuẩn dụng cụ); D_{gamma} – liều gây bởi bức xạ gamma; Φ – thông lượng neutron; G_x, G_y – liều gây bởi một neutron trong dụng cụ loại x và loại y tương ứng. Trong trường hợp tổng quát, thì G_x và G_y là tổng của các đóng góp $G_{x,j}$, và $G_{y,j}$ gây bởi những hiệu ứng j khác nhau như phản ứng (n,gamma), các phản ứng kích hoạt, tán xạ đàn hồi của neutron .v.v. trên các vật liệu của dụng cụ đo liều. Đại lượng G_x và G_y phụ thuộc vào năng lượng neutron; do vậy các chỉ số C_x và C_y cũng phụ thuộc vào năng lượng neutron.

Nếu đóng góp của các phản ứng kích hoạt là đáng kể, thì các đại lượng $G_{x,j=\text{kích hoạt}}$ và $G_{y,j=\text{kích hoạt}}$ phụ thuộc vào quãng thời gian mà dụng cụ đo liều nằm

trong trường bức xạ neutron và thời điểm đọc các chỉ số C_x , C_y ; do đó cần hiệu chỉnh các đại lượng này theo thời gian nếu muốn nâng cao độ tin cậy của các đánh giá về Φ và D_{gamma} .

Giải hệ gồm hai phương trình vừa nêu trên đây, có thể đánh giá được cả hai thành phần liều bức xạ là D_{gamma} và Φ .

Dụng cụ đo liều cá nhân trên cơ sở huỳnh quang và có màn Cadmi cũng có thể sử dụng để đo liều bức xạ neutron – gamma hỗn hợp.

4.11. ĐÁNH GIÁ LIỀU LƯỢNG NƠTRÔN DO SỰ CỐ HOẶC TAI NẠN HẠT NHÂN

Thông thường thì các dụng cụ đo liều cá nhân chỉ tính tới những điều kiện làm việc bình thường. Trong khi đó các sự cố hoặc tai nạn lại xảy ra hoàn toàn bất ngờ, hiếm khi theo một kịch bản đã có sẵn. Vậy trong trường hợp sự cố hoặc tai nạn thì có thể dựa vào những phương tiện nào để xác định liều lượng bức xạ neutron? Câu trả lời là: Để xác định liều lượng bức xạ neutron trong trường hợp sự cố hoặc tai nạn hạt nhân, thì cần phải dựa vào hai loại yếu tố sau đây:

- 1) Những đồng vị thích hợp sẵn có trong cơ thể con người – đó là đồng vị của một loạt nguyên tố như natri, clo, photpho, lưu huỳnh.v.v.;
- 2) Những đồng vị thích hợp có trong các đồ vật mà người ta đem theo bên mình khi xảy ra sự cố hoặc tai nạn.

Các hạt nhân của nhiều đồng vị có trong cơ thể và trong các đồ vật có thể tham gia vào một số phản ứng hạt nhân, tạo nên những đồng vị phóng xạ có chu kỳ rã nửa thích hợp cho việc đánh giá liều gây bởi sự cố hoặc tai nạn. Đây là cơ sở cho phép sử dụng phản ứng kích hoạt các đồng vị sẵn có trong cơ thể hoặc trong các đồ vật để đánh giá liều neutron trong sự cố hoặc tai nạn hạt nhân.

Tuy nhiên, khi áp dụng phương pháp kích hoạt để đánh giá liều lượng bức xạ nơtron bằng cách dùng các đồng vị có trong cơ thể, cần nhận rõ một số sự khác biệt so với khi dùng các đầu dò ở dạng mẫu lá mỏng.

Khác biệt thứ nhất: Nếu dùng hai đầu dò ở dạng lá mỏng, mà một đầu dò được bọc trong lớp vỏ bằng Cd, còn đầu dò thứ hai không có vỏ bọc Cd, thì có thể phân biệt được ảnh hưởng của hai nhóm nơtron nhiệt và trên nhiệt. Song, không thể áp dụng được cách làm này đối với cơ thể người trong khi xảy ra sự cố hoặc tai nạn.

Khác biệt thứ hai: Đánh giá liều lượng nơtron phụ thuộc đáng kể vào hướng của cơ thể người bị nạn so với nguồn bức xạ nơtron. Điều này rất cần được tính tới khi xem xét kết quả đo đặc độ phóng xạ cảm ứng.

Khác biệt thứ ba: Trong cơ thể người, có đồng vị bia được định vị tương đối tốt (thí dụ: các đồng vị của Si thường có nhiều trong chất sừng), nhưng cũng có đồng vị được phân bố tương đối đồng đều (thí dụ: các đồng vị của Na và P). Đồng vị bia có phân bố đồng đều sẽ cho đánh giá liều lượng nơtron tính trung bình trong cơ thể. Đồng vị được phân bố ở những vị trí cố định trên cơ thể sẽ cho đánh giá về liều lượng nơtron ở những vị trí tương ứng.

Khác biệt thứ tư: Đầu dò ở dạng lá mỏng có hai đặc trưng mà các mẫu lấy từ cơ thể không có (đó là: diện tích của bia $S[\text{cm}^2]$ và số hạt nhân bia tính cho một đơn vị diện tích $n[\text{n.cm}^{-2}]$); ngược lại, mẫu lấy từ cơ thể cũng có những đặc trưng khác (là nồng độ và thể tích hoặc khối lượng của mẫu). Do đó tích số nS trong các biểu thức từ (4.4-32) tới (4.4-37) (xem mục 4.4.6) phải được thay thế bằng *tổng số hạt nhân bia có trong mẫu*, tức là bằng tích số $n_V V$ hoặc $n_M M$ (với V và M là thể tích hoặc khối lượng của mẫu được lấy từ cơ thể, còn n_V và n_M là số hạt nhân bia có trong một đơn vị thể tích hoặc một đơn vị khối lượng của mẫu lấy từ cơ thể).

Trong mục 4.4.6. đã trình bày về đánh giá liều bức xạ nơtron trong trường hợp có xảy ra sự cố hoặc tai nạn hạt nhân. Dưới đây giới thiệu cách sử dụng hai loại yếu tố vừa nêu trên để đánh giá liều trong trường hợp này.

4.11.1. Đánh giá liều theo độ phóng xạ cảm ứng của một số đồng vị trong cơ thể

Cơ thể người chứa nhiều nguyên tố có thể tham gia vào các phản ứng gây bởi neutron, cụ thể như lưu huỳnh, natri, clo, photpho .v.v. Bảng B4.11-1 cho thấy hàm lượng và phân bố của một số nguyên tố trong cơ thể người chuẩn, cũng như những phản ứng gây bởi neutron mà chúng có thể tham gia.

Bảng B4.11-1. Một số nguyên tố trong cơ thể và phản ứng kích hoạt bởi neutron

Nguyên tố	Phân bố trong cơ thể (người chuẩn 70kg)	Phản ứng neutron	Sản phẩm của phản ứng
Na	Phân bố tương đối đồng đều trong cơ thể (cỡ 1-3 mg/g); có nhiều trong xương (cỡ 5mg/g), trong nước tiểu.	$^{23}\text{Na}_{(100\%)} (n_{\text{nhiệt}}, \gamma)$ $\sigma = 0,530 \text{ barn}$	^{24}Na : $T_{1/2} = 14,96\text{h}$; Chu kỳ thải nửa = 11-13 ngày; $E_{\beta\text{max}} = 1,394 \text{ MeV}$ (99,9%); $E_{\gamma} = 1,369\text{MeV}$ (100%) và 2,754 MeV (99,9%).
Cl	Có nhiều trong các tổ chức như: da và phổi (cỡ 2,5mg/g), thận (cỡ 2 mg/g), xương (cỡ 1,5 mg/g), có trong nước tiểu.	$^{37}\text{Cl}_{(24,22\%)} (n_{\text{nhiệt}}, \gamma)$ $\sigma = 0,433\text{barn}$	^{38}Cl : $T_{1/2} = 37,24 \text{ min}$; $E_{\beta\text{max}} = 1,106\text{MeV}$ (31,9%); 2,749MeV (10,5%); 4,916MeV (57,6%); $E_{\gamma} = 1,643 \text{ MeV}$ (31,9%) và 2,167 MeV (42,4%).
S	Có nhiều trong chất sừng như móng chân, móng tay, lông, tóc (cỡ 45-50 mg/g).	$^{32}\text{S}_{(94,93\%)} (n, p) ^{32}\text{P}$ $E_{n, \text{ngưỡng}} = 0,954\text{MeV}$; $\langle \sigma \rangle = 66\text{mbarn}$	^{32}P : $T_{1/2} = 14,26 \text{ ngày}$; $E_{\beta\text{max}} = 1,711 \text{ MeV}$ (100%); Không phát lượng tử gamma.
P	Phân bố tương đối đồng đều trong cơ thể (cỡ 1-1,5 mg/g); trong não và gan (cỡ 3mg/g), trong xương (cỡ 80 mg/g); trong lông và tóc (cỡ 0,1÷0,2) mg/g.	$^{31}\text{P}_{(100\%)} (n_{\text{nhiệt}}, \gamma) ^{32}\text{P}$ $\sigma = 0,172 \text{ mbarn}$ $^{31}\text{P}_{(100\%)} (n, p) ^{31}\text{Si}$ $E_{n, \text{ngưỡng}} = 0,716 \text{ MeV}$; $\langle \sigma \rangle = 30\text{mbarn}$	^{31}Si : $T_{1/2} = 2,622 \text{ h}$; $E_{\beta\text{max}} = 1,490\text{MeV}$ (99,9%); $E_{\gamma} = 1,266\text{MeV}$ (0,070%).

Bảng B4.11-1 (tiếp theo)

K	Có nhiều trong các tổ chức cơ bắp.	$^{41}\text{K}_{(6,73\%)} (n,p)^{42}\text{K}$ $\sigma=1,46\text{barn}$	^{42}K : $T_{1/2} = 12,36\text{h}$; $E_{\beta\text{max}}=2,0\text{MeV}(17,6\%)$ và $3,525\text{MeV}(81,9\%)$; $E_{\gamma} = 0,313\text{MeV}(0,34\%)$ và $1,525\text{MeV}(18,1\%)$.
---	------------------------------------	---	---

4.11.1.1. Đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu người bị nạn

Natri có một vị trí quan trọng đối với việc đánh giá liều nơtron gây nên trong cơ thể khi có tai nạn hoặc sự cố, bởi lẽ natri có trong tất cả các tổ chức của cơ thể. Cụ thể, natri có hàm lượng cỡ từ 1÷3 mg/g trong các tổ chức cơ thể. Hàm lượng natri trong máu và huyết thanh ít phụ thuộc vào tuổi tác, giới tính và chủng tộc của người.

Theo hệ tuần hoàn, natri nhanh chóng được hoà trộn và phân bố đồng đều khắp cơ thể. ^{24}Na là sản phẩm của phản ứng kích hoạt gây bởi nơtron nhiệt $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$, phát ra các lượng tử gamma có năng lượng là $E_{\gamma 1} = 1,369\text{ MeV}$ (100%) và $E_{\gamma 2} = 2,754\text{ MeV}$ (99,9%) rất thuận tiện cho việc đo đạc. Thêm vào đó, chu kỳ rã nửa của nó $T_{1/2}=15$ giờ lại rất ngắn so với chu kỳ thải nửa (sinh học) là 11-13 ngày, nên có thể coi rằng quá trình thải sinh học không làm ảnh hưởng tới kết quả đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu. Do vậy, đánh giá liều nơtron theo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu người cho kết quả đáng tin cậy.

Phương pháp đánh giá liều lượng nơtron theo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na còn dựa trên một cơ sở quan trọng nữa; đó là: cơ thể người là một vật hấp thụ nơtron khá tốt trong một dải năng lượng tương đối rộng của nơtron. (Nếu coi cơ thể như một “ống đếm nơtron”, thì “ống đếm” loại này có hiệu suất ghi nhận nơtron hầu như không thay đổi trong dải phổ năng lượng của chùm nơtron tới mà chúng ta thường quan tâm. Những ống đếm có đặc điểm này thường được gọi là “ống đếm toàn sóng” đối với nơtron). Nhờ vậy, theo độ kích hoạt của natri, có thể đánh giá được thông lượng nơtron nhanh và nơtron năng lượng trung gian đã đi vào cơ thể.

Để làm ví dụ, dưới đây nêu cách đánh giá của một số tác giả về liều lượng gây bởi neutron trong trường hợp tai nạn.

Có thể sử dụng tương quan sau đây để đánh giá thông lượng neutron F theo độ phóng xạ A_1 của ^{24}Na trong một mili lít máu ngay sau khi vừa được kích hoạt bởi neutron:

$$F_{\text{tai nạn}} [n.cm^{-2}] = k_1 \cdot \frac{A[Bq]}{V[ml]} = k_1 \cdot A_1 [\frac{Bq}{ml}] \quad (4.11-1)$$

ở đây k_1 -- hệ số tỷ lệ có tính tới thứ nguyên của hai đại lượng F và A_1 trong biểu thức (4.11-1); $V[ml]$ -- thể tích của mẫu máu; $A[Bq]$ -- độ phóng xạ của mẫu máu; $A_1[Bq/ml]$ -- độ phóng xạ của 1ml máu. Để đánh giá hệ số k_1 , ta có thể coi mỗi neutron tới tương tác với cơ thể đều bị nhiệt hoá hoàn toàn rồi tham gia phản ứng kích hoạt $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ với tiết diện $\sigma_0 = 0,53$ barn. Do đó có thể coi hai biểu thức (4.4-32) và (4.11-1) là hoàn toàn tương đương với nhau, chỉ có điều là tổng số hạt nhân bia nS trong (4.4-32) giờ đây cần được thay thế bằng $n_v V$ (với V -- thể tích của mẫu máu, còn n_v -- số hạt nhân ^{23}Na trong một đơn vị thể tích máu. Coi hàm lượng của NaCl ở trong máu là 0,3%; đối chiếu về phải của 2 biểu thức vừa nêu, có thể đánh giá được giá trị $k_1 \approx 3.10^9$. (Tuy nhiên, cần chú ý rằng trong khi xảy ra tai nạn hoặc sự cố, nếu người bị nạn hướng ngực hoặc lưng về phía nguồn neutron (thí dụ, về phía vùng hoạt của lò phản ứng), thì hệ số k có giá trị lớn gấp khoảng 1,5 lần so với khi người bị nạn hướng bên sườn của mình về phía nguồn neutron). Do đó, nếu không biết hướng của cơ thể trong khi xảy ra sự cố hoặc tai nạn, thì có thể tạm đánh giá $k_1 \approx 4,5.10^9$.

Mặt khác, liều hấp thụ neutron trong tổ chức cơ thể có giá trị gần bằng tổng của hai thành phần là: do làm chậm neutron và do phản ứng bắt neutron nhiệt kèm phát lượng tử gamma trong tổ chức mềm bởi hạt nhân hydro $^1\text{H}(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)$. Thành phần thứ nhất có giá trị gần bằng tổng động năng được giải phóng trong một đơn vị khối lượng của tổ chức cơ thể do tương tác với bức xạ neutron (gọi tắt là KERMA, xem mục 1.4.2., chương 1). Có thể đánh giá KERMA theo biểu thức sau đây:

$$\text{KERMA} = k_2 \cdot A_1 \quad (4.11-2)$$

Hệ số tỷ lệ k_2 có tính tới thứ nguyên của các đại lượng trong biểu thức (4.11-2). Nó có ý nghĩa vật lý là năng lượng trung bình mà cơ thể được bức xạ neutron truyền cho khi gây nên độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na ở trong máu có giá trị $A_1 = 1$ đơn vị.

Tuỳ thuộc vào phổ năng lượng của bức xạ neutron, giá trị của hệ số k_2 có thể chênh lệch nhau tới vài ba lần.

Đối với hai trường hợp vừa nêu, khi biết rõ vị trí của phổ neutron nằm trong vùng năng lượng nào, thì sai số gây bởi ảnh hưởng của phổ chỉ khoảng (20-30)%; trong khi sai số do không xác định được hướng của người bị nạn có thể làm giá trị thu được chênh lệch tới 2-3 lần so với giá trị thực. Độ chênh lệch này có thể giảm xuống khoảng 1,5 lần nếu biết hướng của người khi bị nạn.

Có thể giảm bớt sai số bằng cách sử dụng thêm một số thông tin khác về người bị nạn và về phổ neutron, thí dụ như trong tương quan dưới đây:

$$A_2 = k_3 \cdot Fq \cdot \left(\frac{M_{\text{chuẩn}}}{M_x} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (k_4 \cdot f_{\text{nhiệt}} + k_5 f_{\text{trung gian + nhanh}}) \quad (4.11-3)$$

Trong tương quan này: A_2 – độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu; F – thông lượng neutron; M_x – khối lượng của người bị nạn; $M_{\text{chuẩn}}$ – khối lượng của người chuẩn (=70 kg); $f_{\text{nhiệt}}$ – tỷ lệ thông lượng neutron nhiệt trên tổng thông lượng neutron (đi vào cơ thể); $f_{\text{trung gian + nhanh}}$ – tỷ lệ thông lượng neutron nhanh và neutron năng lượng trung gian trên tổng thông lượng neutron; q – hệ số tính tới hướng người quay về phía nguồn neutron khi bị nạn, nó có giá trị như sau:

$$q = \frac{0,7}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 0,5 \cdot \cos^2 \alpha}} \quad (4.11-4)$$

Nếu coi mặt cắt vuông góc với cột sống của cơ thể người là có dạng như một hình elip, thì α là góc hợp bởi trục ngắn của mặt cắt hình elip này và hướng của neutron tới. Hệ số có giá trị $q=1$ khi góc $\alpha=0$ (tức là khi người bị nạn hướng ngực hoặc lưng về phía nguồn neutron), và $q=0,7$ khi $\alpha=90^\circ$ (tức là khi người bị nạn hướng bên sườn về phía nguồn neutron).

Trong biểu thức (4.11-3) các hệ số k_3 , k_4 và k_5 có thể có giá trị $k_3=1,75 \cdot 10^{-14}$, $k_4 = 0,19$, $k_5 = 0,27$ nếu các đại lượng có thứ nguyên như sau: $F[n/cm^2]$, $M[kg]$ và $A_2[\mu Ci(^{24}Na)/mg(^{23}Na \text{ trong máu})]$.

Liều hấp thụ neutron trong tổ chức cơ thể có giá trị gần bằng tổng của hai đại lượng là KERMA và $D_{H(n,\gamma)}$ – liều hấp thụ trong tổ chức cơ thể gây bởi bức xạ gamma được phát ra trong các phản ứng bắt neutron của các hạt nhân hydro trong tổ chức cơ thể. Việc đánh giá liều hấp thụ neutron trong tổ chức cơ thể trong trường hợp này dẫn tới việc tính liều $D_{H(n,\gamma)}$ theo thông lượng F hoặc theo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu. Trong mục 4.1.2. đã giới thiệu cách tính liều gây bởi neutron nhiệt trong cơ thể khi biết rõ mật độ thông lượng neutron nhiệt $\Phi[n/(cm^2.s)]$. Trong trường hợp tai nạn hoặc sự cố, có thể sử dụng biểu thức gần đúng sau đây:

$$D_{H(n,\gamma)} [Sv] = 3 \cdot 10^{-12} \cdot F[n/cm^2] \quad (4.11-5)$$

Trong đó thông lượng neutron F được đánh giá từ các biểu thức (4.11-1 hoặc -3). Tuy nhiên, cũng nên thấy rõ là sai số trong đánh giá liều $D_{H(n,\gamma)}$ không làm ảnh hưởng đáng kể tới liều hấp thụ neutron trong tổ chức cơ thể, bởi vì liều gây bởi các hạt có điện tích là sản phẩm của phản ứng neutron thường lớn hơn rất nhiều so với $D_{H(n,\gamma)}$ (xem các mục 4.1.2 và 4.1.3).

Khi đánh giá liều neutron thông qua việc đo độ phóng xạ của ^{24}Na , thì cần phải tính tới ảnh hưởng của các đồng vị phóng xạ khác được tạo thành do kích hoạt, nhất là nếu đo ngay trong những phút đầu tiên sau khi xảy ra tai nạn/sự cố mà không sử dụng các phương pháp đo phổ (Xem bảng B4.11-1).

4.11.1.2. Đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{32}P trong lông và tóc của người bị nạn

Natri không phải là đồng vị duy nhất được kích hoạt trong cơ thể. Các đồng vị khác như ^{37}Cl , ^{18}O , ^{26}Mg , ^{31}P và ^{41}K cũng được kích hoạt mạnh. Ở thời điểm khi cơ thể bị chiếu xạ neutron, các đồng vị ^{24}Na và ^{38}Cl cho đóng góp tổng

cộng tới 70% độ phóng xạ của cơ thể, và sau 10 phút – tới 90%. Sau khi ngừng chiếu xạ khoảng hơn 3 giờ thì độ phóng xạ chủ yếu là do đóng góp của ^{24}Na ; còn sau nhiều ngày thì chủ yếu là do đóng góp của ^{32}P .

Các hạt nhân phóng xạ ^{32}P được tạo thành trong cơ thể do hai phản ứng kích hoạt bởi notrôn:

- a). Phản ứng $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$: xảy ra khi notrôn có động năng cao hơn ngưỡng $E_{\text{ngưỡng}} = 0,954 \text{ MeV}$; có tiết diện trung bình $\bar{\sigma} = 66 \text{ mbarn}$;
- b). Phản ứng $^{31}\text{P}(n_{\text{nhiệt}},\gamma)^{32}\text{P}$: xảy ra với notrôn nhiệt; tiết diện phản ứng bằng $\sigma = 0,172 \text{ mbarn}$.

Trong lông và tóc, lưu huỳnh có hàm lượng gần bằng 50mg/g (tức là gần bằng 5%), mà không phụ thuộc vào một loạt đặc điểm như: mẫu gì, mọc rậm hay thưa, mọc ở vị trí nào, không phụ thuộc vào tuổi tác và giới tính của người. Trong khi đó, photpho có hàm lượng thấp, chỉ bằng $(0,155 \pm 0,042) \text{ mg/g}$. Do vậy, nếu thành phần notrôn nhiệt trong phổ notrôn không nhiều, thì có thể không cần tính tới đóng góp của phản ứng $^{31}\text{P}(n_{\text{nhiệt}},\gamma)^{32}\text{P}$ khi đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{32}P trong lông và tóc của người bị nạn.

Phản ứng có ngưỡng $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ cho phép đánh giá liều notrôn nhanh. Trong trường hợp biết rõ phổ năng lượng notrôn, thì phản ứng này còn cho phép đánh giá được liều gây bởi notrôn của toàn phổ.

Với hàm lượng lưu huỳnh trong lông và tóc $\sim 5\%$, có thể đánh giá mật độ thông lượng F của các notrôn với năng lượng $E_n > E_{\text{ngưỡng}}$ theo biểu thức sau đây:

$$F_{E_n > E_{\text{ngưỡng}}} [\text{n/cm}^2] = k_6 \cdot A_3 [\text{Bq/g}] \quad (4.11-6)$$

với $A_3 [\text{Bq/g}]$ – độ phóng xạ cảm ứng của ^{32}P trong lông và tóc của người bị tai nạn. Hệ số tỷ lệ k_6 có tính tới thứ nguyên của các đại lượng trong biểu thức (4.11-6). Có thể đánh giá hệ số k_6 bằng cách đối chiếu về phải của hai biểu thức tương đương là (4.11-6) và (4.4-36).

Để đánh giá nhanh liều notrôn với năng lượng $E_n > E_{\text{ngưỡng}}$, có thể sử dụng

biểu thức sau đây:

$$D_{E_n > E_{ngưỡng}} [\text{Rad}] = k_7 \cdot \langle E_n \rangle \cdot F_{E_n > E_{ngưỡng}} \quad (4.11-7)$$

Trong biểu thức này: hệ số tỷ lệ k_7 có tính tới thứ nguyên của các đại lượng; $\langle E_n \rangle$ – động năng trung bình của neutron.

Vì đồng vị phóng xạ ^{32}P có chu kỳ rã nửa dài tới 14,26 ngày, nên có thể thực hiện nhiều phép đo kiểm tra trong vòng nhiều ngày (thậm chí vài tuần) sau khi xảy ra tai nạn. Bằng cách so sánh độ phóng xạ cảm ứng của ^{32}P trong lông và tóc lấy từ những vị trí khác nhau trên cơ thể người bị nạn, có thể xác định được hướng của cơ thể trong khi xảy ra tai nạn, nhờ vậy thu được thông tin bổ sung cho các số liệu xác định hàm lượng ^{24}Na trong máu.

Phương pháp đánh giá liều neutron trên cơ sở đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{32}P trong lông và tóc như vừa nêu trên còn có ưu điểm là không tốn kém, có thể sử dụng thiết bị đơn giản. Dưới đây giới thiệu một số cách thực hiện.

Cách thứ nhất:

Lông và tóc, sau khi được lấy từ những vị trí khác nhau, được đo độ phóng xạ của ^{32}P ngay để xác định hướng của người khi lâm nạn. Tiếp đó, chúng được rửa kỹ bằng nước cất và ethanol để làm sạch bụi bặm và chất nhờn, nhằm giảm sai số xác định khối lượng của mẫu, đồng thời giảm ảnh hưởng của đồng vị phóng xạ ^{31}Si (có chu kỳ rã nửa $T_{1/2}=2,6\text{h}$) là sản phẩm của các phản ứng kích hoạt $^{30}\text{Si}(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)$ và $^{31}\text{P}(n, p)$. (Đồng vị ^{30}Si chiếm 3,08% hàm lượng của nguyên tố Si, và có tiết diện phản ứng $\sigma_{(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)} = 0,108 \text{ barn}$; còn phản ứng $^{31}\text{P}(n, p)$ thì có ngưỡng $E_{n \text{ ngưỡng}} = 0,716 \text{ MeV}$ và tiết diện trung bình $\langle \sigma \rangle = 30 \text{ mbarn}$). Sau khi đo kiểm tra trên hệ đo phổ gamma, mà không thấy có bức xạ gamma, thì các mẫu được xếp vào đĩa nhôm, rồi được nén chặt, trước khi được đưa vào buồng đo Beta của đầu dò nhấp nháy plastic.

Cách thứ hai:

Tách nguyên tố photpho (có chứa cả đồng vị ^{32}P) bằng cách cho lắng đọng trong dung dịch thích hợp. Bằng cách này, với 1g lông và/hoặc tóc, có thể

đánh giá được liều nơtron có năng lượng trên ngưỡng $D_{En>ngưỡng} \sim 4$ Rad trong thời gian khoảng 6h.

4.11.2. Đánh giá liều nơtron theo độ phóng xạ cảm ứng của đồ vật mang theo

Khi xảy ra tai nạn hoặc sự cố hạt nhân, những đồ vật mà người bị nạn mang theo cũng có thể cung cấp thêm thông tin có giá trị về liều lượng nơtron. Trong một chừng mực nhất định, các đồ vật đó đều bị kích hoạt (kể cả quần áo, dây thắt lưng, giấy dép, tài liệu, chìa khoá, vòng, nhẫn, kính, đồng hồ, các đồng tiền bằng kim loại .v.v.). Sự phong phú đa dạng của các đồ vật cả về chủng loại, hình dáng và thành phần vật liệu của chúng không cho phép ta lập ngay được các hệ số chuyển đổi từ số xung đếm được sang liều lượng nơtron. Trường hợp ngoại lệ là những đồng tiền bằng kim loại; chúng thường được đem theo người, thường có thành phần ổn định và thường chứa các nguyên tố như nhôm, đồng, mangan, niken... Bảng B4.11-2 cho thấy đặc trưng của một số phản ứng kích hoạt bởi nơtron xảy ra trên đồng vị của một số nguyên tố thường gặp trong các vật được mang theo người khi xảy ra tai nạn hạt nhân.

Bài toán dẫn tới việc đánh giá các thành phần thông lượng nơtron, cụ thể là: thông lượng nơtron nhiệt (F_1), thông lượng nơtron trung gian (F_2) và thông lượng nơtron nhanh (F_3), bằng cách sử dụng những phản ứng kích hoạt đặc trưng khác nhau xảy ra trong các đồ vật mà người bị nạn mang theo.

Giả sử, khi bị chiếu xạ nơtron, trong số các đồ vật mang theo đã xảy ra ít nhất là ba phản ứng kích hoạt gây bởi ba thành phần bức xạ khác nhau là nơtron nhiệt, nơtron trung gian và nơtron nhanh. Trong trường hợp tổng quát, mỗi phản ứng kích hoạt đều có thể được gây bởi cả ba thành phần nơtron. Trong trường hợp này, nếu cho hệ đo ghi nhận số xung N_i gây bởi sản phẩm phóng xạ của mỗi phản ứng i (có trong một hoặc vài đồ vật mang theo), thì lập được hệ phương trình bậc nhất như sau:

$$N_i = \varepsilon_{i1}F_1 + \varepsilon_{i2}F_2 + \varepsilon_{i3}F_3 \quad (4.11-8)$$

$$N_2 = \varepsilon_{21}F_1 + \varepsilon_{22}F_2 + \varepsilon_{23}F_3 \quad (4.11-9)$$

$$N_3 = \varepsilon_{31}F_1 + \varepsilon_{32}F_2 + \varepsilon_{33}F_3 \quad (4.11-10)$$

ở đây: N_i – số xung gây bởi độ phóng xạ cảm ứng của sản phẩm phản ứng i (có trong một đồ vật mang theo nào đó); ε_{i1} , ε_{i2} và ε_{i3} – xác suất để hệ đo ghi nhận được xung tạo thành do sản phẩm phóng xạ của phản ứng i gây bởi các nhóm neutron nhiệt (1), trung gian (2), và neutron nhanh (3).

Trong trường hợp chỉ tìm được hai phản ứng kích hoạt thích hợp để ghi nhận bức xạ, thì ở vế phải của mỗi phương trình sẽ chỉ có hai số hạng và cần giải hệ phương trình sau đây:

$$N_1 = \varepsilon_{11}F_1 + \varepsilon_{12}F_2 \quad (4.11-11)$$

$$N_2 = \varepsilon_{21}F_1 + \varepsilon_{22}F_2 \quad (4.11-12)$$

Giải các hệ phương trình bậc nhất vừa nêu trên, sẽ tìm được các thành phần F_i của thông lượng neutron. Nhờ vậy đánh giá được liều neutron D_i gây bởi neutron thuộc nhóm i theo tương quan sau đây:

$$D_i = a_i F_i \quad (4.11-13)$$

Trong đó, a_i – hệ số tỷ lệ, tính tới thứ nguyên của các đại lượng liều và thông lượng. Việc xác định giá trị của hệ số a phụ thuộc vào một số yếu tố như: phổ năng lượng của neutron, hướng của cơ thể so với nguồn phát neutron khi xảy ra tai nạn hoặc sự cố, vị trí đồ vật được mang theo trên cơ thể khi xảy ra tai nạn hoặc sự cố.

Như vậy, để đánh giá liều lượng neutron do sự cố hoặc tai nạn, nếu kết hợp được càng nhiều phương pháp và càng nhiều thông tin thì kết quả thu được có độ tin cậy càng cao.

Bảng B4.11-2. Một số nguyên tố thường gặp trong đồ vật mang theo người bị nạn và phản ứng kích hoạt bởi nơtron

Nguyên tố	Phản ứng kích hoạt bởi nơtron	Sản phẩm của phản ứng
(1)	(2)	(3)
Al	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ $E_{\text{ngưỡng}}=3,26\text{MeV}$; tiết diện trung bình: $\langle\sigma\rangle=0,61\text{ mbarn}$	^{24}Na : như trong bảng B4.11-1.
	$^{27}\text{Al}(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)^{28}\text{Al}$ ^{27}Al (100%) $\sigma_0 = 0,231\text{ barn}$	^{28}Al : $T_{1/2} = 2,241\text{ min}$ $E_{\beta^-, \text{max}} = 2,863\text{ MeV}$ (100%); $E_{\gamma} = 1,779\text{ MeV}$ (100%).
Mn	$^{55}\text{Mn}(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)^{56}\text{Mn}$; ^{55}Mn (100%) $\sigma_0 = 13,2\text{ barn}$	^{56}Mn : $T_{1/2} = 2,58\text{h}$; $E_{\beta^{\text{max}}} = 0,326\text{MeV}$ (1,2%), 0,736MeV (14,6%), 1,038MeV (27,9%), 2,848MeV (56,3%); $E_{\gamma} = 0,847\text{MeV}$ (98,9%), 1,811MeV (27,2%), 2,113MeV (14,3%), 2,523MeV (0,99%) .v.v.
Cu	$^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$ ^{65}Cu (30,83%); $E_{\text{ngưỡng}}=10,1\text{MeV}$; $\langle\sigma\rangle=0,31\text{ mbarn}$	^{64}Cu : $T_{1/2}=12,7\text{h}$; $E_{\beta^+, \text{max}} = 0,653\text{ MeV}$ (17,4%); $E_{\beta^-, \text{max}} = 0,579\text{ MeV}$ (39,0%); và 1,346 MeV (0,47%); $E_{\gamma} = 0,511\text{ MeV}$ (β^+).
	$^{63}\text{Cu}(n_{\text{nhiệt}}, \gamma)^{64}\text{Cu}$ ^{63}Cu (69,17%); $\sigma_0 = 4,50\text{ barn}$	
	$^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$; ^{63}Cu (69,17%); $E_{\text{ngưỡng}}=10,9\text{ MeV}$; $\langle\sigma\rangle=0,073\text{mbarn}$	^{62}Cu : $T_{1/2}=9,8\text{min}$; $E_{\beta^+, \text{max}}=2,927\text{ MeV}$ (97,2%); $E_{\gamma} = 0,876\text{ MeV}$ (0,15%); 1,173MeV (0,34%).

Bảng B4.11-2 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)
Ni	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co};$ ^{58}Ni (68,0%); $Q=0,399\text{MeV};$ $\langle\sigma\rangle=100\text{ mbarn}$	$^{58}\text{Co}: T_{1/2}=70,86\text{ ngày};$ $E_{\beta^+, \max}=0,475\text{ MeV (14,9\%)};$ $E_{\gamma}=0,811\text{MeV(99,5\%)};$ $0,864\text{MeV(0,68\%)},$ $1,675\text{MeV(0,52\%)},$ $0,511\text{ MeV }(\beta^+).$
	$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni};$ $E_{\text{ngưỡng}}=12,0\text{ MeV};$ $\langle\sigma\rangle=0,004\text{mbarn}$	$^{57}\text{Ni}: T_{1/2}=35,6\text{ h};$ $E_{\beta^+, \max}=0,737\text{MeV(7,0\%)},$ $0,864\text{MeV(35,3\%)};$ $E_{\gamma}=0,127\text{MeV(16,7\%)},$ $1,378\text{MeV(81,7\%)},$ $1,758\text{MeV(5,8\%)},$ $1,920\text{MeV(12,3\%)},$ $0,511\text{MeV}(\beta^+).$
Au	$^{197}\text{Au}(n_{\text{nhiệt}},\gamma)^{198}\text{Au};$ ^{197}Au (100%); $\sigma_0=98,65\text{ barn}.$	$^{198}\text{Au}: T_{1/2}=2,695\text{ ngày};$ $E_{\beta^-, \max}=0,285\text{ MeV (0,99\%)},$ $0,961\text{ MeV (99,0\%)};$ $E_{\gamma}=0,412\text{ MeV (95,6\%)},$ $0,676\text{ MeV (0,80\%)},$ $1,088\text{ MeV (0,16\%)};$ $0,0708\text{ MeV (2,2\% = Hg-K}\alpha).$

CHƯƠNG 5

XÁC ĐỊNH LIỀU LƯỢNG BỨC XẠ CÁC HẠT CÓ ĐIỆN TÍCH

Các nguồn bức xạ beta và chùm electron được sử dụng ngày càng nhiều trong nghiên cứu, cũng như sản xuất và y tế. Bên cạnh đó, các nguồn phóng xạ alpha đang tồn tại trong cả môi trường sống cũng như môi trường làm việc (đặc biệt là ở những vùng liên quan tới khai thác mỏ và sử dụng than đá). Do vậy, việc nắm được cách xác định liều lượng bức xạ gây bởi các hạt có điện tích đang trở thành một nhu cầu thực tế ở nước ta.

Các hạt có điện tích có thể gây nên liều chiếu từ bên ngoài cơ thể hoặc từ bên trong cơ thể. Cách xác định liều lượng của bức xạ beta và chùm electron chiếu từ bên ngoài cơ thể được trình bày trong các mục từ 5.1. đến 5.3. Một số vấn đề liên quan tới liều lượng bức xạ gây bởi các đồng vị phóng xạ sau khi chúng xâm nhập vào bên trong cơ thể được giới thiệu trong mục 5.4.

Nội dung của chương 5 được trình bày theo dàn ý sau đây:

- 5.1. Suất liều gây bởi chùm electron (tr. 310)
- 5.2. Liều gây bởi nguồn điểm phóng xạ beta (313)
- 5.3. Xác định liều beta bằng thực nghiệm (316)
 - 5.3.1. Phương pháp sử dụng buồng ion hoá ngoại suy (317)
 - 5.3.2. Phương pháp sử dụng phim ảnh (321)
- 5.4. Liều gây bởi đồng vị phóng xạ xâm nhập vào cơ thể (325)
 - 5.4.1. Liều gây bởi đồng vị phóng xạ xâm nhập vào cơ thể (325)
 - 5.4.2. Một số giá trị giới hạn đối với sự xâm nhập của đồng vị phóng xạ vào cơ thể (331)

5.1. SUẤT LIỀU GÂY BỞI CHÙM ÊLÊCTRÔN

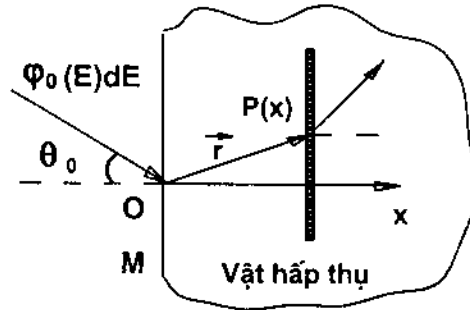
Điểm khác biệt quan trọng nhất của bức xạ beta và chùm êlectrôn so với bức xạ lượng tử và notrôn là ở chỗ: bức xạ beta và chùm êlectrôn gồm những hạt có điện tích. Trong khi bức xạ lượng tử và notrôn có khả năng xuyên vào rất sâu trong khối vật chất, thì khả năng này của bức xạ beta và chùm êlectrôn lại rất kém vì quãng chạy của chúng trong vật liệu rất ngắn. Điều này dẫn tới nhiều khó khăn, phức tạp trong việc xác định liều lượng của các hạt có điện tích nói chung, và, của bức xạ beta và chùm êlectrôn nói riêng.

Do vậy, để xác định liều lượng của bức xạ beta và chùm êlectrôn, thì trong tính toán, người ta thường phải sử dụng các phương pháp bán thực nghiệm; còn trong thực nghiệm, thì người ta phải đặc biệt chú ý tới bề dày của “cửa sổ vào” đầu dò, cũng như kích thước của đầu dò.

Một trong những phương pháp bán thực nghiệm được sử dụng để tính suất liều gây bởi chùm êlectrôn là dựa trên việc xây dựng một hàm số thể hiện được sự làm yếu suất liều trong một dải rộng của năng lượng êlectrôn. Hàm làm yếu đồng thời phải tính tới ảnh hưởng của hiệu ứng tán xạ ngược của chùm êlectrôn.

Giả sử, chùm êlectrôn bay tới bề mặt phẳng (M) của vật hấp thụ; phương tới của chùm và pháp tuyến của mặt phẳng M hợp thành một góc θ_0 (xem hình H5.1-1). Trước khi đập vào mặt phẳng M, mật độ thông lượng của chùm hạt có phân bố theo năng lượng là $\phi_0(E)dE$ trong khoảng từ E đến E+dE.

Càng vào sâu trong vật hấp thụ, phân bố góc và phân bố năng lượng của chùm hạt thay đổi càng nhiều so với ban đầu. Tuy nhiên, kết quả phân tích các số liệu thực nghiệm cho thấy rằng, nếu biểu diễn bề dày của vật hấp thụ theo đơn vị tương đối so với bề dài quãng chạy của êlectrôn, thì hàm làm yếu suất liều phụ thuộc vào phân bố góc của chùm bức xạ tới ban đầu, và, ít phụ thuộc vào năng lượng. Kết quả phân tích số liệu thực nghiệm còn cho thấy ảnh hưởng đáng kể của hiệu ứng tán xạ ngược của chùm êlectrôn đối với suất liều.



Hình H 5.1-1. Chùm electron tới tương tác với vật hấp thụ.

Ta hãy xét một lớp vô cùng mỏng nằm ở độ sâu x trong một vật hấp thụ được coi là dày vô cùng. Giả sử, $f_p(x, E, \theta_0)$ – hàm làm yếu suất liều gây bởi chùm electron hướng tới mặt phẳng M dưới góc θ_0 . Khi đó, suất liều tại lớp ở độ sâu x trong vật hấp thụ sẽ được xác định như sau:

$$P(x) = \int_{(E)} [1 + \Delta(E)] \varphi_0(E) \left(-\frac{dE}{dx} \right) f_p(x, E, \theta_0) dE \quad (5.1-1)$$

trong đó $(-dE/dx)$ – giá trị năng lượng trung bình bị mất trên một đơn vị độ dài đường đi của hạt trong môi trường (còn gọi là năng suất hãm của môi trường); $\Delta(E)$ – độ tăng tương đối của suất liều do tán xạ ngược của chùm electron (còn gọi là hệ số liều của tán xạ ngược).

$$\Delta(E) = \frac{P_h - P_0}{P_0} \quad (5.1-2)$$

với P_h – suất liều trong lớp mỏng ở bề mặt của vật hấp thụ (với h – bề dày của lớp); còn P_0 – suất liều trong lớp mỏng “biệt lập” của vật hấp thụ (hình dung để có thể coi là không có ảnh hưởng gây bởi hiệu ứng tán xạ ngược của chùm electron).

Giá trị hệ số liều của tán xạ ngược $\Delta(E)$ được xác định từ thực nghiệm. Cách làm như sau.

“Hệ số liều của tán xạ ngược” $\Delta(E)$ có liên quan với “hệ số năng lượng

của tán xạ ngược" $p(E)$. Hệ số năng lượng của tán xạ ngược được định nghĩa là độ tăng tương đối của năng lượng bức xạ ở ngay trước vật hấp thụ do đóng góp của tán xạ ngược của chùm êlectrôn. Nó có công thức định nghĩa như sau:

$$p(E) = \frac{\int_{(E)} \varphi_{\text{tán xạ}}(E) dE}{\int_{(E)} \varphi_0(E) dE} \quad (5.1-3)$$

trong đó $\varphi_{\text{tán xạ}}(E)$ – phân bố năng lượng của các êlectrôn tán xạ ngược ở ngay phía trước lớp hấp thụ.

Tổng năng lượng bị hấp thụ trong vật mẫu dày vô cùng, tính trên một đơn vị diện tích của mặt phẳng M, thì bằng tích phân của suất liều theo toàn bộ bề dày của vật đó. Mặt khác, năng lượng mà vật mẫu hấp thụ được lại có giá trị bằng tổng động năng của tất cả các êlectrôn đã xuyên qua bề mặt M vào trong mẫu trừ đi tổng động năng của tất cả các êlectrôn đã tán xạ ngược ra bên ngoài mẫu qua bề mặt M. Do vậy, đối với một chùm êlectrôn đơn năng (E_0) thì có đẳng thức sau đây:

$$(1-p)E_0\Phi_0 = \int_0^\infty P(x)dx = P(0) \cdot \int_0^\infty f_p(x)dx \quad (5.1-4)$$

trong đó $P(0)$ – suất liều tại bề mặt M của vật hấp thụ (tức là khi $x=0$).

Theo định nghĩa, thì hàm làm yếu có giá trị bằng một đơn vị (=lớn nhất) tại bề mặt của vật hấp thụ, tức là $f_p(x=0)=1$. Do đó, theo biểu thức (5.1-1) đối với chùm êlectrôn đơn năng, thì suất liều trên bề mặt $P(0)$ có giá trị bằng:

$$P(0) = [1 + \Delta(E_0)] \cdot \Phi_0 \cdot \left(-\frac{dE}{dx}(E_0) \right) \quad (5.1-5)$$

Từ hai biểu thức (5.1-4 và -5), tìm được biểu thức liên hệ sau đây giữa hai hệ số Δ và p của tán xạ ngược:

$$\frac{(1-p)E_0}{\int_0^\infty f_p(x)dx} = (1+\Delta) \cdot \left(-\frac{dE}{dx}(E_0) \right) \quad (5.1-6)$$

Sau khi xác định bằng thực nghiệm được giá trị của hệ số p , thì theo giá trị này sẽ xác định được hệ số suất liều của tán xạ ngược Δ .

Cuối cùng, muốn tính được suất liều theo phương pháp này, thì cần phải biết trước hoặc xác định xác được phân bố của chùm êlectrôn tới theo góc và theo động năng của êlectrôn.

Các kết quả tính toán theo phương pháp bán thực nghiệm không phải bao giờ cũng cho phù hợp, nhiều khi chỉ sử dụng được để đánh giá suất liều.

5.2. LIỀU GÂY BỞI NGUỒN ĐIỂM PHÓNG XẠ BÊTA

Các hàm số tin cậy nhất thể hiện liều gây bởi nguồn điểm phóng xạ bêta thường được rút ra từ kết quả phân tích số liệu thực nghiệm. Các hàm này thường phụ thuộc vào dạng phổ năng lượng của bức xạ bêta và những đặc trưng của môi trường hấp thụ. Dưới đây giới thiệu hai biểu thức tính liều gây bởi nguồn điểm phóng xạ bêta tại một điểm nằm trong cùng môi trường và cách nguồn một khoảng bằng r .

Biểu thức đơn giản nhất để tính liều $D(r)$ gây bởi nguồn điểm phóng xạ bêta có dạng tương tự như đối với nguồn điểm bức xạ gamma; nghĩa là biểu thức này phải thể hiện được hai đặc điểm sau đây:

- Liều $D(r)$ tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách (r) kể từ nguồn tới điểm cần xác định liều;
- Liều $D(r)$ giảm dần theo hàm mũ cơ số e , với số mũ là $-\mu r$; trong đó μ – hệ số làm yếu suất liều.

Do vậy, biểu thức đơn giản nhất để tính liều $D(r)$ gây bởi nguồn điểm phóng xạ bêta có dạng như sau:

$$D(r) = \frac{ae^{-\mu r}}{r^2} \quad (5.2-1)$$

trong đó a – hệ số tỷ lệ, tính tới thứ nguyên của các đại lượng r và D .

Biểu thức này rất đơn giản, tuy nhiên, chỉ áp dụng được cho một số ít phổ beta và trong một phạm vi khoảng cách r nhất định.

Một biểu thức vạn năng hơn có dạng như sau:

$$D(r) = \frac{k_{\beta}}{(\mu r)^2} \cdot \left\{ c \left[1 - \frac{\mu r}{c} \cdot e^{1 - \frac{\mu r}{c}} \right] + \mu r e^{1 - \mu r} \right\} \quad (5.2-2)$$

với điều kiện:
$$\left[1 - \frac{\mu r}{c} \cdot e^{1 - \frac{\mu r}{c}} \right] \equiv 0.$$

khi khoảng cách $r \geq c/\mu$ (trong đó c – hệ số không có thứ nguyên).

Biểu thức (5.2-2) thu được từ kết quả phân tích nhiều số liệu thực nghiệm. Đó là một biểu thức thực nghiệm tính liều gây bởi nguồn điểm beta, có thể áp dụng được trong nhiều trường hợp quan trọng. Các hệ số c và μ phụ thuộc vào các giá trị năng lượng cực đại và năng lượng trung bình của phổ beta, và, vào các đặc trưng của môi trường hấp thụ.

Hệ số tỷ lệ k_{β} được xác định từ điều kiện sau đây: toàn bộ năng lượng hấp thụ được trong một vật dày vô cùng, tính cho một phân rã, thì phải bằng động năng trung bình của hạt beta tính cho một phân rã $\langle E_{\beta} \rangle$. Do vậy, nếu liều $D(r)$ tính cho một phân rã có đơn vị đo là Rad, và năng lượng trung bình của hạt beta tính cho một phân rã $\langle E_{\beta} \rangle$ có đơn vị đo là MeV, thì giữa hai đại lượng này có tương quan sau đây:

$$\int_0^{\infty} D(r) \rho 4\pi r^2 dr = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot \overline{E_{\beta}} \quad (5.2-3)$$

với ρ – mật độ của môi trường hấp thụ, có đơn vị đo là $[g/cm^3]$; r – khoảng cách kể từ nguồn phóng xạ beta, có đơn vị đo là $[cm]$.

Vế trái của biểu thức (5.2-3) chính là năng lượng bức xạ beta được hấp

thụ trong khối vật chất dạng cầu với bán kính lớn vô cùng có tâm đặt tại điểm cách nguồn một khoảng bằng r . (Vì vật dày vô cùng, nên có thể coi nó là có dạng cầu. Điều này làm cho việc lấy tích phân trở thành đơn giản, mà không hề làm sai lệch kết quả tính toán).

Trong thực tế, có thể coi vật hấp thụ là dày vô cùng nếu nó có bề dày lớn hơn so với quãng chạy cực đại $R_{\max}$ của electron nhanh nhất ở trong môi trường đó. Do vậy, với sai số không quá 1,5%, có thể viết lại biểu thức (5.2-3) như sau:

$$\int_0^{R_{\max}} D(r) \rho 4\pi r^2 dr = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot \overline{E_\beta} \quad (5.2-3.a)$$

Làm phép thế $D(r)$ từ biểu thức (5.2-2) vào (5.2-3.a), rồi lấy tích phân, thì thu được giá trị của hệ số k_β .

Trong thực tế, để tính liều gây bởi nguồn điểm beta, có thể áp dụng biểu thức (5.2-2) với giá trị của các hệ số như sau:

$$k_\beta = 1,28 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\mu^3 \cdot \overline{E_\beta}}{\rho [3c^2 - (c^2 - 1) \cdot e]} \quad (5.2-4)$$

trong đó hệ số k_β (cũng như $D(r)$) – được tính bằng đơn vị [Rad/(phân rã)]; động năng trung bình $\langle E_\beta \rangle$ – bằng [MeV/(phân rã)]; ρ – bằng [g/cm³]; hệ số μ – bằng [cm⁻¹]. Các giá trị μ và c phụ thuộc vào năng lượng bức xạ, dạng phổ và loại vật liệu hấp thụ.

Nếu môi trường hấp thụ là không khí, thì các hệ số μ và c có giá trị được xác định như sau:

$$\mu [cm^{-1}] = \frac{16,0 \cdot \rho}{(E_0 - 0,036)^{1,40}} \left(2 - \frac{\overline{E_\beta}}{\overline{E_\beta}^*} \right) \quad (5.2-5a)$$

$$c = 3,11 \cdot e^{-0,55 \cdot E_{\beta \max}} \quad (5.2-5b)$$

Nếu môi trường hấp thụ là tổ chức mềm trong cơ thể, thì các hệ số μ và c có giá trị được xác định như sau:

$$\mu[\text{cm}^{-1}] = \frac{18,2 \cdot \rho}{(E_0 - 0,036)^{1,37}} \left(2 - \frac{\overline{E_\beta}}{\overline{E_\beta}^*} \right) \quad (5.2-6a)$$

$$\left. \begin{array}{ll} c = 2 & \text{khi } 0,17 \text{ MeV} < E_{\beta \max} < 0,5 \text{ MeV;} \\ c = 1,5 & \text{khi } 0,5 \text{ MeV} \leq E_{\beta \max} < 1,5 \text{ MeV;} \\ c = 1 & \text{khi } 1,5 \text{ MeV} \leq E_{\beta \max} < 3 \text{ MeV.} \end{array} \right\} (5.2-6b)$$

Trong hai biểu thức trên đây, thì $\langle E_\beta \rangle^*$ – năng lượng trung bình của phổ giả thiết là được phép. Đối với các phổ được phép, thì tỷ số $\langle E_\beta \rangle / \langle E_\beta \rangle^* = 1$.

Các biểu thức từ (5.2-2 đến -6) chỉ đúng đối với các phổ beta đơn giản.

Xét trường hợp nguồn beta có phổ phức tạp là tập hợp của N phổ đơn giản i , và số phân rã (tính cho cùng một khoảng thời gian chiếu xạ T) ứng với mỗi phổ đơn giản i là A_i . Trong trường hợp này, thì phải tính liều toàn phần $D(r)$ gây bởi nguồn với phổ phức tạp trong cùng khoảng thời gian chiếu xạ T như sau:

$$D_{\text{toàn phần}}(r) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot D_i(r) \quad (5.2-7)$$

Trong đó, các thành phần liều (tính cho một phân rã) của từng phổ đơn giản $D_i(r)$ được tính theo biểu thức (5.2-2) với các hệ số k_β , μ và c như đã nêu trong các biểu thức (5.2-4 đến -6).

Trên cơ sở các biểu thức tính liều gây bởi nguồn điểm, có thể tìm được liều gây bởi các nguồn phóng xạ beta có dạng hình học phức tạp.

5.3. XÁC ĐỊNH LIỀU BÊTA BẰNG THỰC NGHIỆM

Về nguyên tắc, có thể sử dụng tất cả các phương pháp đo liều bức xạ lượng tử để đo liều bức xạ beta và chùm electron. Song, nhất thiết phải tính tới một điểm khác biệt quan trọng giữa các loại bức xạ này; đó là, trong khi bức xạ

lượng tử có khả năng xuyên vào rất sâu trong khối vật chất, thì khả năng này của bức xạ beta và chùm electron lại rất kém vì quãng chạy của chúng trong vật liệu rất ngắn.

Do vậy, để xác định liều của bức xạ beta và chùm electron bằng thực nghiệm, thì *phải đặc biệt chú ý tới hai yếu tố*; đó là:

- a). *Bề dày của “cửa sổ vào” đầu dò; và*
- b). *Kích thước của đầu dò.*

Dưới đây giới thiệu một số phương pháp thực nghiệm để xác định liều bức xạ beta và chùm electron bằng cách sử dụng đầu dò bằng khí và phim ảnh.

5.3.1. Phương pháp sử dụng buồng ion hoá ngoại suy

Về nguyên tắc, thì lý thuyết Bragg–Gray (xem chương 3, mục 3.1.3) cũng phải được áp dụng cho các buồng ion hoá đo liều bức xạ beta, nếu vùng khí làm việc có kích thước rất nhỏ so với quãng chạy của electron trong đó. Tuy nhiên, do hạt beta có quãng chạy rất ngắn, nên các điều kiện Bragg–Gray có thể bị vi phạm đáng kể.

Thông thường, các buồng ion hoá có khoảng cách cố định giữa hai điện cực anốt và katốt. *Buồng ion hoá ngoại suy là buồng ion hoá mà trong đó có thể thay đổi khoảng cách h từ anốt đến katốt để thu được giá trị ngoại suy của cường độ dòng điện ion hoá:*

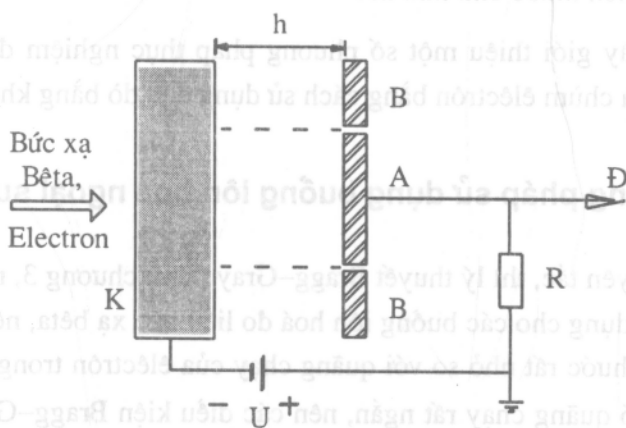
$$I_{ngoại\ suy} = \left(\frac{dI}{dh} \right)_{h=0} \quad (5.3-1)$$

Giá trị ngoại suy của cường độ dòng điện ion hoá là giá trị cường độ dòng điện ion hoá bão hoà tính cho một đơn vị của khoảng cách h giữa anốt–katốt khi h tiến tới bằng 0 đơn vị. Bằng cách xác định giá trị $I_{ngoại\ suy}$, có thể loại trừ được ảnh hưởng của khối khí nằm giữa anốt–katốt của buồng ion hoá.

Dưới đây xét buồng ion hoá ngoại suy đơn giản nhất và do đó được sử dụng nhiều nhất là buồng ion hoá có hai điện cực anốt và katốt là những bản

mặt phẳng song song với nhau.

Hình H5.3-1 minh hoạ một buồng ion hoá phẳng với katốt (K), anốt (A) và điện cực bảo vệ (B). Điện cực B có tác dụng bảo vệ cho điện trường giữa anốt và katốt không bị nhiễu loạn (tức là giữ cho các đường sức điện trường vẫn tiếp tục song song với nhau ngay cả ở vùng biên của anốt), đồng thời cho phép xác định chính xác thể tích khí làm việc giữa anốt và katốt.



Hình H5.3-1. Sơ đồ buồng ion hoá ngoại suy.

Ký hiệu: K – katốt; A – anốt; B – điện cực bảo vệ; R – điện trở tải; Đ – đầu ra để nối với dụng cụ đo.

Xét trường hợp bức xạ beta hoặc chùm êlectrôn từ nguồn tới thẳng góc và xuyên vào lớp vật liệu thành buồng đồng thời là katốt của buồng ion hoá ngoại suy. Giả sử, tổng số cặp ion được tạo thành trong một đơn vị thời gian trong một đơn vị thể tích khí làm việc ở sát bề mặt katốt là q . Khi đó, hiệu ứng ion hoá trong thể tích khí làm việc ở sát bề mặt katốt của buồng ion hoá ngoại suy gồm có hai thành phần như sau:

$$q = q_1 + q_2 \quad (5.3-2)$$

trong đó q_1 – thành phần gây bởi các êlectrôn được giải phóng do tương tác của bức xạ beta với khối vật liệu của katốt, rồi thoát ra khỏi katốt và bay vào vùng

khí làm việc; q_2 – thành phần gây bởi các êlectrôn được giải phóng do tương tác trực tiếp của bức xạ beta với chất khí trong thể tích làm việc.

Giả sử, các điều kiện Bragg–Gray đều được thoả mãn. Khi đó, theo công thức Bragg–Gray (chương 3, mục 3.1.3), năng lượng hấp thụ được trong một đơn vị thời gian trong lớp vật liệu Z (với bề dày $d=1$ đơn vị) của katốt mà được giới hạn bởi một đơn vị diện tích trên bề mặt katốt ở sát vùng khí làm việc sẽ có giá trị bằng:

$$\Delta E_Z = q_1 \omega S_{khí}^Z = (q - q_2) \cdot \omega S_{khí}^Z \quad (5.3-3)$$

Trong đó ω – giá trị năng lượng trung bình tạo cặp ion trong chất khí làm việc; $S_{khí}^Z$ – giá trị trung bình của tỷ số các năng suất hãm êlectrôn của chất rắn Z đối với của chất khí trong buồng iôn hoá.

Trong thực tế, ta không thể đo tách riêng hai thành phần q_1 và q_2 được. Song, khi khoảng cách anốt–katốt của buồng iôn hoá ngoại suy tiến tới bằng 0 ($h \rightarrow 0$), thì thành phần thứ hai của hiệu ứng iôn hoá trong chất khí sẽ có giá trị $q_2 \rightarrow 0$; do vậy, hiệu ứng iôn hoá trong chất khí sẽ đạt tới giá trị $q \rightarrow q_1$. Giá trị q_1 được xác định theo giá trị của cường độ dòng điện ngoại suy như sau:

$$q_1 = \left(\frac{dq}{dh} \right)_{h=0} \equiv \frac{1}{e} \left(\frac{di}{dh} \right)_{h=0} = \frac{1}{e S_A} \left(\frac{dI}{dh} \right)_{h=0} = \frac{I_{ngoại\ suy}}{e S_A} \quad (5.3-4)$$

với e – giá trị điện tích của một điện tử (hoặc iôn); i – cường độ dòng điện gây bởi phần vật liệu katốt có diện tích bằng một đơn vị nằm đối diện với anốt; S_A – tổng diện tích bề mặt của phần katốt nằm đối diện với anốt.

Mặt khác, trong thực tế, khi cho giảm khoảng cách anốt–katốt của buồng iôn hoá ngoại suy $h \rightarrow 0$, thì điều kiện Bragg–Gray đầu tiên (là “hỗc khí có kích thước rất nhỏ so với quãng chạy trong chất khí đó của các êlectrôn được giải phóng do tương tác của bức xạ”) từ chỗ bị vi phạm đáng kể cũng dần dần trở nên được thoả mãn.

Đem thế giá trị q_1 theo biểu thức (5.3-4) vào biểu thức (5.3-3), thì được

tương quan sau đây:

$$\Delta E_Z = \omega \frac{I_{\text{ngoại suy}}}{e \cdot S_A} \cdot S_{\text{khí}}^Z \quad (5.3-5)$$

Đem chia cả hai vế của biểu thức (5.3-5) cho khối lượng riêng của vật liệu katốt ρ_Z , thì được biểu thức xác định suất liều hấp thụ bức xạ beta P_Z trong lớp vật liệu nằm sát bề mặt katốt ở phía đối diện với anốt của buồng iôn hoá ngoại suy:

$$P_Z = a \cdot \frac{\Delta E_Z}{\rho_Z} = a \cdot \omega \frac{I_{\text{ngoại suy}}}{e \cdot \rho_Z \cdot S_A} \cdot S_{\text{khí}}^Z \quad (5.3-6)$$

trong đó a – hệ số tỷ lệ có tính tới thứ nguyên của tất cả các đại lượng có mặt trong biểu thức này. Nếu các đại lượng có thứ nguyên như sau: suất liều P_Z [Rad/s], ω [eV], khối lượng riêng ρ_Z [g/cm³], S_A [cm²], và $I_{\text{ngoại suy}}$ [A], thì biểu thức trên được viết lại như sau:

$$P_Z = 10^5 \cdot \omega \cdot \frac{S_{\text{khí}}^Z}{\rho_Z S_A} \cdot I_{\text{ngoại suy}} \quad (5.3-7)$$

Để loại trừ ảnh hưởng của nhiệt độ (t) và áp suất khí (p) tới giá trị đo được của cường độ dòng điện ngoại suy, biểu thức (5.3-7) được hiệu chỉnh như sau:

$$P_Z = 10^5 \cdot \omega \cdot \frac{S_{\text{khí}}^Z}{\rho_Z S_A} \cdot I_{\text{ngoại suy}} \cdot \frac{760}{p} \cdot \frac{273+t}{273} \quad (5.3-7a)$$

Trong biểu thức (5.3-7a), nhiệt độ t được đo bằng đơn vị [°C], còn áp suất khí p – bằng đơn vị [mmHg].

Các biểu thức từ (5.3-3 đến -7a) thu được khi cho lớp vật liệu thành buồng đồng thời là katốt có bề dày bằng một đơn vị.

Nếu đo cường độ dòng điện ngoại suy $I_{\text{ngoại suy}}$ ứng với những bề dày d khác nhau của katốt, thì có thể xác định được phân bố suất liều hấp thụ beta $P_Z(x)$ theo bề sâu của lớp vật liệu katốt.

5.3.2. Phương pháp sử dụng phim ảnh

Giả sử chùm hạt beta tới thẳng góc với bề mặt của phim. Thông thường mỗi lớp nhũ tương ảnh có bề dày khoảng 6 mg/cm^2 , còn lớp đế bằng selluloid dày khoảng 25 mg/cm^2 . Các hạt beta với động năng $E_\beta \leq 60 \text{ keV}$ thường kết thúc quãng chạy của chúng trong lớp nhũ tương ảnh (nằm ở mặt trước của đôzimet phim). Nếu động năng $60 \text{ keV} \leq E_\beta \leq 200 \text{ keV}$, thì các hạt beta thường kết thúc quãng chạy của chúng trong lớp đế. Trong trường hợp phim gồm hai lớp nhũ tương ảnh (phủ hai bề mặt của lớp đế), thì các hạt beta phải có động năng cỡ $E_\beta \geq 250 \text{ keV}$ mới đi qua được cả hai lớp nhũ tương ảnh của phim. Nếu tính cả bề dày của lớp vỏ chống sáng và chống ẩm (là “lớp chết”) của đôzimet mà chùm hạt phải xuyên qua để vào tới được “lớp nhạy”, thì các ngưỡng năng lượng vừa nêu trên còn phải có giá trị cao hơn nữa. Vì vậy, độ nhạy của đôzimet phim phụ thuộc mạnh vào động năng của chùm hạt beta. Không những thế, độ nhạy còn phụ thuộc cả vào góc tới của chùm hạt.

Trong trường hợp sử dụng phim ảnh để đo liều lượng bức xạ beta, người ta thường phân biệt hai loại độ nhạy của đôzimet phim; đó là: độ nhạy theo mật độ dòng hạt và độ nhạy theo liều bức xạ.

Đối với một lớp nhũ tương mỏng, trong trường hợp chùm hạt beta được định hướng tới vuông góc với bề mặt phim, thì độ nhạy theo mật độ dòng hạt có biểu thức liên hệ với bề dày nhũ tương như sau:

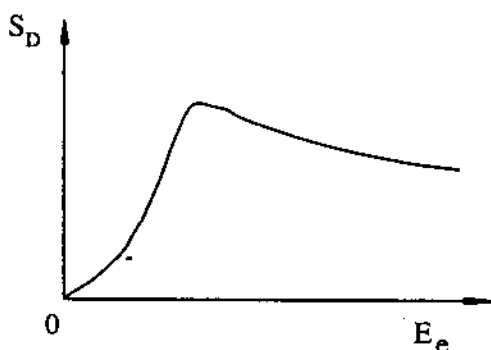
$$\left(\frac{S}{\Phi} \right)_{\text{định hướng}} = ah \quad (5.3-8)$$

với S – mật độ quang học của phim; Φ – mật độ dòng hạt beta; h – bề dày của lớp nhũ tương; a – hệ số tỷ lệ, tính tới thứ nguyên của các đại lượng khác có trong biểu thức.

Trong trường hợp các hạt beta đi tới phim không có định hướng mà dưới những góc khuếch tán, thì độ nhạy theo mật độ dòng hạt có biểu thức liên hệ với bề dày nhũ tương như sau:

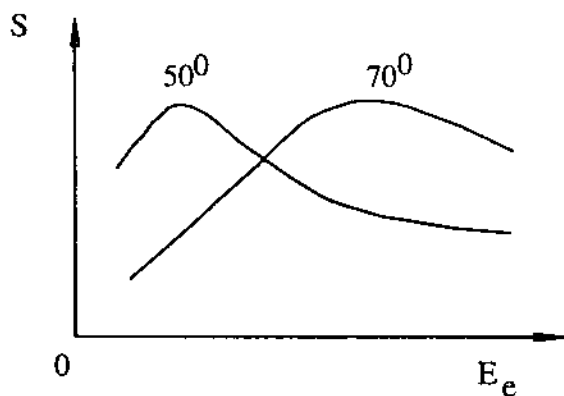
$$\left(\frac{S}{\Phi}\right)_{\text{Khuếch tán}} = 2ah \quad (5.3-9)$$

Như vậy, trong trường hợp các hạt beta tới phim dưới những góc khuếch tán, thì dozimet có độ nhạy theo mật độ dòng hạt lớn gấp hai lần so với khi chùm hạt beta tới thẳng góc với phim.



Hình H5.3-2. Sự phụ thuộc của mật độ quang học (S_D) vào động năng của chùm hạt beta (E_e).

Còn sự phụ thuộc của độ nhạy theo liều hấp thụ, thì như sau. Mật độ quang học của phim tỷ lệ với liều hấp thụ bức xạ. Liều hấp thụ bức xạ trong lớp nhũ tương lại tỷ lệ với tích số của mật độ dòng hạt (j) và quãng đường trung bình d_1 của mỗi hạt trong lớp nhũ tương này. Nếu hạt đi tới lớp nhũ tương dưới góc tới là θ , thì mật độ dòng hạt $j \sim 1/\cos\theta$, và quãng đường trung bình $d_1 \sim \cos\theta$. Do vậy, nếu xét dưới góc độ lý thuyết, thì mật độ quang học của phim không phụ thuộc vào góc tới θ của chùm hạt. Tuy nhiên, trong thực tế, sự có mặt của lớp vỏ chống sáng của dozimet dẫn đến sự làm giảm động năng của các hạt beta tới nhũ tương, làm tăng số hạt có động năng thấp. Do vậy làm cho mật độ quang học phụ thuộc vào góc tới θ của hạt. Hình H5.3-2 và H5.3-3 cho thấy sự phụ thuộc của mật độ quang học vào động năng và góc tới của hạt beta. Trong thực tế, ít khi trường bức xạ chỉ có một thành phần duy nhất là bức xạ beta, mà thường là trường bức xạ hỗn hợp gồm hai thành phần bức xạ là beta và gamma, hoặc gồm ba thành phần bức xạ là beta, gamma và neutron. Việc sử



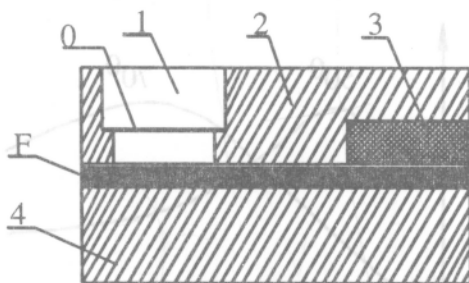
Hình H5.3-3. Sự phụ thuộc của mật độ quang học (S) vào động năng (E_e) và góc tới của chùm hạt beta ($\theta_1=50^\circ$, $\theta_2=70^\circ$).

dụng đôzimet phim để xác định liều lượng của hai thành phần bức xạ gamma và neutron đã được trình bày ở chương 3 (xem mục 3.2) và chương 4 (xem mục 4.6). Xét trường hợp đơn giản, khi trường bức xạ hỗn hợp gồm hai thành phần là beta và gamma. Nếu muốn xác định liều lượng của riêng thành phần bức xạ beta trong trường hợp này, thì ở lớp vỏ trước của đôzimet (hướng về phía nguồn bức xạ) phải có một cửa sổ ngăn cách phim với không khí bên ngoài bằng một lớp màng rất mỏng; sao cho bức xạ beta bị làm yếu không đáng kể khi đi qua lớp màng này (xem hình H5.3-4). Gọi S_1 – mật độ quang học của vùng phim nằm liền sau lớp màng mỏng của cửa sổ (1); còn S_2 – của vùng phim được ngăn cách với môi trường không khí bên ngoài chỉ bởi lớp vỏ thông thường của đôzimet (2); S_3 – của vùng phim nằm sau bộ lọc san bằng (3; thí dụ là Pb). Nếu vậy, sẽ có các tương quan dưới đây cho mật độ quang học S_1 , S_2 và S_3 .

Các mật độ quang học S_2 và S_3 cho phép xác định liều gamma D_γ (nếu chúng nằm trong vùng chiếu xạ không quá mức của đường đặc trưng $S(\log D_\gamma)$):

$$S_2 = S_{2\gamma} = f_2(D_\gamma) \quad (5.3-10)$$

$$S_3 = S_{3\gamma} = f_3(D_\gamma) \quad (5.3-11)$$



Hình H5.3-4. Sơ đồ của một dozimet phim xác định liều beta trong trường bức xạ hỗn hợp beta-gamma. Ký hiệu: F – phim; 0 – màng mỏng; 1 – cửa sổ; 2 và 4 – lớp vỏ thông thường của dozimet; 3 – bộ lọc san bằng để đo liều gamma.

Mật độ quang học S_1 gồm hai thành phần là S_β và $S_{1\gamma}$ sau đây:

$$S_1 = S_\beta + S_{1\gamma} \quad (5.3-12)$$

Trong các biểu thức (5.3-10, -11 và -12), thì thành phần $S_{1\gamma}$, $S_{2\gamma}$ và $S_{3\gamma}$ là mật độ quang học gây bởi bức xạ gamma. Có thể coi ảnh hưởng của bức xạ gamma đối với hai vùng phim nằm ngay dưới hai vùng 1 và 2 của dozimet là như nhau (lớp vỏ của dozimet thường là mỏng và được làm từ vật liệu nhẹ). Do vậy, có các tương quan sau đây:

$$S_{1\gamma} \approx S_{2\gamma} = S_2 \quad (5.3-13)$$

$$S_\beta = S_1 - S_{1\gamma} \approx S_1 - S_2 = f_1(D_\beta) \quad (5.3-14)$$

Xây dựng đường đồ thị chuẩn $S_\beta = f_1(D_\beta)$, thì xác định được liều bức xạ beta nếu các giá trị mật độ quang học S_1 và S_2 đều chưa thuộc vùng bị rọi già. Tiện đây, vẫn cần nhắc lại một lần nữa rằng: trong trường hợp xác định liều lượng bức xạ beta, thì độ nhạy của dozimet phim nói chung phụ thuộc một cách phức tạp vào góc tới và động năng của các hạt beta.

(Tuy nhiên, riêng đối với mật độ quang học ứng với thông lượng tối đa cho phép, thì các khảo sát về sự phụ thuộc của độ nhạy vào góc tới của hạt beta

cho thấy rằng với sai số cỡ 30% có thể coi đại lượng này là không phụ thuộc vào động năng của các electron mặc dù chúng rơi vào lớp nhũ tương dưới góc bất kỳ).

5.4. LIỀU GÂY BỞI ĐỒNG VỊ PHÓNG XẠ XÂM NHẬP VÀO CƠ THỂ

5.4.1. Liều gây bởi đồng vị phóng xạ xâm nhập vào cơ thể

Một nguồn đồng vị phóng xạ có thể xâm nhập vào bên trong cơ thể được hay không, phụ thuộc vào dạng vật chất mà nó tồn tại (thí dụ: bột, rắn, lỏng, khí) và vào bình chứa của nó. Nguồn đồng vị phóng xạ nằm trong bình chứa là lớp vỏ bảo vệ kín và vững chắc tới mức không còn khả năng để nó thoát ra ngoài (trừ khi người sử dụng cố ý áp dụng những biện pháp kỹ thuật thích hợp), thì được gọi là nguồn kín. Bởi vậy, nguồn phóng xạ kín không tự xâm nhập được vào bên trong cơ thể và do đó chỉ có thể gây nên liều chiếu xạ từ bên ngoài cơ thể.

Khác với nguồn phóng xạ kín, nguồn phóng xạ hở là nguồn phóng xạ có thể tồn tại ở ngay trong dạng tự nhiên của nó (thí dụ: khí radon thoát ra từ bên trong viên xi than, hoặc có trong thành phần không khí ở hầm mỏ), hoặc tuy nằm trong bình chứa nhưng vẫn có khả năng thoát ra khỏi bình chứa đó (do bình chứa bị đổ, vỡ, rò rỉ...). Bởi vậy, nguồn phóng xạ hở có khả năng xâm nhập vào bên trong cơ thể và do đó có thể gây nên liều chiếu xạ từ bên trong cơ thể.

Đồng vị phóng xạ có thể xâm nhập vào bên trong cơ thể theo ba đường là: đường hô hấp (qua mũi), đường tiêu hoá (qua miệng), và, qua da hoặc qua vết thương trên da. Một khi chất phóng xạ xâm nhập được vào bên trong cơ thể, thì nó liên tục gây nên liều chiếu xạ từ bên trong cho tới khi nó phân rã hết hoặc được bài tiết ra khỏi cơ thể.

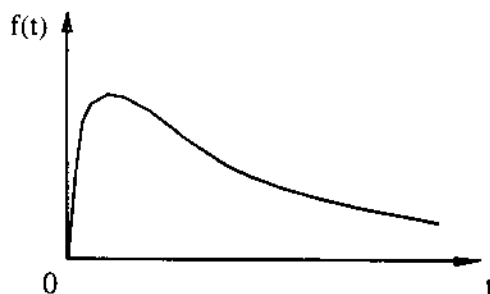
Khi môi trường không khí bị “ô nhiễm phóng xạ”, thì một lượng đồng vị phóng xạ nhất định nào đó sẽ lọt vào được cơ quan hô hấp. Nếu đồ ăn thức uống bị nhiễm bản phóng xạ, thì một lượng đồng vị phóng xạ nhất định nào đó sẽ lọt vào được cơ quan tiêu hoá. Trong trường hợp da bị nhiễm bản phóng xạ, thì một lượng đồng vị phóng xạ nhất định nào đó sẽ lọt vào được các tổ chức nằm sâu dưới lớp biểu bì. Tiếp đó, trong quá trình trao đổi chất, một phần nhất định của những lượng phóng xạ này lại xâm nhập được vào đường máu; rồi theo hệ thống tuần hoàn nó được phân bố trong các bộ phận khác nhau của cơ thể với những tỷ lệ khác nhau. Sau đó lượng đồng vị phóng xạ trong từng bộ phận sẽ giảm dần do hai quá trình xảy ra đồng thời trong cơ thể là phân rã phóng xạ và thải sinh học (do trao đổi chất).

Như vậy, có thể hình dung đường phụ thuộc vào thời gian của lượng đồng vị phóng xạ có trong một bộ phận cơ thể tựa như đường dốc lên xuống qua một đỉnh đối. Lượng đồng vị phóng xạ có trong bộ phận này thoát dần tăng lên do được máu tưới vào, rồi đạt giá trị cực đại trong một khoảng thời gian nào đó, sau đó giảm xuống dần theo thời gian. Tùy thuộc vào quá trình trao đổi chất và chu kỳ rã nửa của đồng vị phóng xạ, hai phần “dốc lên” và “dốc xuống” của “đường dốc” nói trên có thể dài ngắn khác nhau.

Một cách tổng quát, có thể biểu diễn sự phụ thuộc thời gian của số hạt nhân đồng vị phóng xạ có trong một bộ phận nào đó của cơ thể như sau:

$$f(t) = n(t).g(t) \quad (5.4-1)$$

Trong đó, hàm $n(t)$ thể hiện ảnh hưởng của các quá trình *nạp thêm* đồng vị phóng xạ vào một bộ phận trong cơ thể, còn hàm $g(t)$ thể hiện ảnh hưởng của các quá trình làm *giảm bớt* số hạt nhân phóng xạ có trong bộ phận đó. Quá trình nạp thêm đồng vị phóng xạ vào một bộ phận trong cơ thể thường xảy ra trong một thời gian ngắn, trong khi đó quá trình làm giảm bớt số hạt nhân phóng xạ lại thường diễn ra chậm hơn nhiều. Do vậy, đường đặc trưng $f(t)$ có nhánh thuận tăng lên rất nhanh nhưng rất ngắn ở đoạn ban đầu, còn nhánh nghịch thì giảm chậm dần và kéo dài ở đoạn cuối (như thể hiện trên hình H5.4-1).



Hình H5.4-1. Sự phụ thuộc thời gian của số hạt nhân đồng vị phóng xạ có trong một bộ phận nào đó của cơ thể.

Lượng phóng xạ xâm nhập vào cơ thể và phân bố trong các tổ chức cơ thể nhiều hay ít, nhanh hay chậm, rồi được lưu lại ở đó trong bao lâu – phụ thuộc vào một loạt yếu tố, như: dạng vật lý và hoá học của chất mang đồng vị phóng xạ đó, bản chất của nó, chu kỳ rã nửa của đồng vị phóng xạ và nồng độ cũng như lượng tuyệt đối của nó trong môi trường bao bọc quanh cơ thể, cùng với những điều kiện sinh lý của cơ thể nói chung cũng như hoạt động chức năng của các cơ quan hoặc tổ chức cơ thể được xét tới .v.v.

Nếu hiện tượng phân rã phóng xạ của đồng vị được đặc trưng bằng một hằng số phân rã phóng xạ $\lambda_{\text{phân rã}}$, thì hiện tượng thải sinh học làm cho đồng vị đó được đưa ra khỏi một bộ phận nhất định của cơ thể cũng có thể được đặc trưng bằng một hằng số thải sinh học $\lambda_{\text{thải sinh học}}$. Cả hai quá trình phân rã phóng xạ và thải sinh học đều làm giảm số hạt nhân phóng xạ có trong bộ phận đang được xét tới của cơ thể. Do vậy, quá trình làm giảm số hạt nhân phóng xạ có trong bộ phận đang được xét tới này có thể được đặc trưng bởi một hằng số làm giảm hiệu dụng $\lambda_{\text{hiệu dụng}}$ hoặc bởi chu kỳ giảm nửa hiệu dụng $T_{1/2, \text{hiệu dụng}}$ như sau:

$$\lambda_{\text{hiệu dụng}} = \lambda_{\text{phân rã}} + \lambda_{\text{thải sinh học}} \quad (5.4-2)$$

$$\frac{1}{T_{1/2, \text{hiệu dụng}}} = \frac{1}{T_{1/2, \text{phân rã}}} + \frac{1}{T_{1/2, \text{thải sinh học}}} \quad (5.4-3)$$

trong đó

$$T_{1/2, i} = \frac{0.693}{\lambda_i} \quad (5.4-4)$$

Vì vậy, có thể mô tả sự phụ thuộc thời gian của quá trình làm giảm số hạt nhân phóng xạ có trong bộ phận đang được xét tới này bằng tương quan sau:

$$g(t) = e^{-\lambda_{\text{hiệu dụng}} \cdot t} \quad (5.4-5)$$

Trong khi sự làm giảm số hạt nhân phóng xạ có trong một bộ phận cơ thể được mô tả bằng một hàm số đường như tương đối đơn giản, thì vấn đề lại rất phức tạp đối với quá trình nạp đồng vị từ môi trường bên ngoài cơ thể vào một bộ phận trong cơ thể. Vì vậy, *việc tính toán liều chiếu trong gây bởi hạt có điện tích sinh ra do phân rã của các hạt nhân đồng vị phóng xạ sau khi chúng xâm nhập vào cơ thể là rất phức tạp, đòi hỏi phải dựa trên mô hình hoạt động trao đổi chất của cơ thể được lập riêng cho từng đường xâm nhập của đồng vị*. Việc này, đến lượt mình, lại đòi hỏi phải sử dụng những số liệu chuẩn về giải phẫu, về cân bằng nước và cân bằng không khí (xem các bảng B5.4-1a, -1b và -1c). Tuy nhiên, những số liệu này cũng chỉ là chuẩn mực có tính chất quy ước. Trong thực tế, người ở những khu vực khác nhau, hoặc thậm chí ở cùng một khu vực cũng có những số liệu rất khác nhau về giải phẫu, về cân bằng nước và cân bằng không khí. (Thí dụ: các số liệu về cân bằng nước và cân bằng không khí của người ở xứ nóng hoặc trong mùa nắng nóng là khác hẳn so với của người ở xứ lạnh hoặc trong mùa mưa, mùa lạnh). Vì vậy, kết quả tính toán chỉ có ý nghĩa ở mức đánh giá liều chiếu trong. Số người được đánh giá liều chiếu trong càng đông và bộ số liệu về giải phẫu cũng như về cân bằng nước và cân bằng không khí càng sát với số liệu cùng loại của cộng đồng, thì kết quả trung bình càng gần với giá trị liều trong thực tế.

*Bảng B5.4-1a. Một số đặc trưng của người chuẩn
(nam giới trưởng thành)*

Cơ quan hoặc tổ chức cơ thể	Khối lượng, kg	
	Châu Âu	Châu Á
Toàn thân	70	57,7
Xương	10	8,4
Cơ bắp	28	25
Da	2,5	2,4
Mỡ	13,3	?
Máu	5,5	?
Tim	0,320	0,303
Gan	1,800	1,429
Phổi	1,000	0,967
Thận	0,310	0,268
Bàng quang	0,045	0,040
Dạ dày	0,150	0,140
Ruột non	0,640	0,590
Ruột già trên	0,210	0,180
Ruột già dưới	0,160	0,150
Lá lách	0,180	0,142
Tuyến giáp trạng	0,020	0,019

Giả sử, trong biểu thức (5.4-1), hàm $f(t)$ được tính (chuẩn hoá) cho 1 hạt nhân phóng xạ đã bắt đầu xâm nhập vào được bên trong cơ thể rồi (tức là đã lọt qua mặt biên ngăn cách môi trường bên ngoài với bên trong cơ thể). Trong trường hợp này, thì *liều hấp thụ bức xạ* $D_i(\tau)$ gây bởi một đồng vị phóng xạ trong khoảng thời gian dài bằng τ và được tính chuẩn hoá cho một hạt nhân phóng xạ kể từ thời điểm bắt đầu bị nhiễm xạ (tức là thời điểm đồng vị phóng xạ bắt đầu xâm nhập vào cơ thể, ký hiệu là t_0) được tính như sau:

Bảng B5.4-1b. Cân bằng về nước của người chuẩn
(châu Âu, nam giới trưởng thành)

Lượng nước được hấp thụ (lít/ngày)		Lượng nước được thải ra (lít/ngày)	
Từ đồ ăn	0,7	Nước tiểu	1,4
Từ đồ uống	1,95	Mồ hôi	0,65
Quá trình ôxy hoá	0,35	Qua phân	0,1
----	----	Không cảm thấy	0,85
<i>Tổng cộng</i>	<i>3,0</i>	<i>Tổng cộng</i>	<i>3,0</i>

Bảng B5.4-1c. Cân bằng về không khí của người chuẩn
(châu Âu, nam giới trưởng thành)

Dung tích sống (tối thiểu) của phổi: 4,3 lít	
– Lượng không khí hít vào trong 8 giờ làm việc	9,6 m ³
– Lượng không khí hít vào trong 16 giờ không làm việc	13,2 m ³
<i>Tổng cộng</i>	<i>≈ 23 m³</i>

$$D_1(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda_{\text{phân rã}} \cdot f(t) \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2}{m} dt \quad (5.4-6)$$

trong đó m – khối lượng của bộ phận cơ thể đang được xét tới; ΔE_1 – năng lượng của hạt có điện tích sinh ra trong phân rã phóng xạ của hạt nhân và bị hấp thụ trong phạm vi khối lượng m của bộ phận này (đối với hạt beta năng lượng thấp, hoặc hạt alpha, thì có thể coi giá trị ΔE_1 bằng động năng ban đầu của hạt); còn ΔE_2 – năng lượng của lượng tử hoặc của hạt không có điện tích được sinh ra trong cùng một phân rã phóng xạ của hạt nhân đó và bị hấp thụ trong phạm vi khối lượng m của bộ phận này.

Cần chú ý rằng biểu thức (5.4-6) mới chỉ tính tới ảnh hưởng của riêng một loại hạt nhân phóng xạ ban đầu xâm nhập vào cơ thể. Trong thực tế, nhiều hạt nhân phóng xạ còn có một loạt hạt nhân con cháu cũng là những hạt nhân phóng xạ. Trong trường hợp như vậy, khi tính liều chiếu trong gây bởi đồng vị phóng xạ xâm nhập vào cơ thể, phải lấy tổng đóng góp của tất cả các hạt nhân phóng xạ (i):

$$D_{1,\Sigma}(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \sum_{(i)} \lambda_{i, \text{phân rã}} f_i(t) \frac{\Delta E_{i1} + \Delta E_{i2}}{m} dt \quad (5.4-7)$$

So sánh các biểu thức (5.4-6 và -7) với biểu thức (1.4-20) (chương 1, mục 1.4.9), thì thấy rõ rằng $D_1(\tau)$ chính là liều hấp thụ bị nhiễm gây bởi một hạt nhân phóng xạ khi đồng vị phóng xạ xâm nhập vào được một bộ phận nào đó của cơ thể. Trên cơ sở liều hấp thụ bị nhiễm này, có thể tính được liều tương đương bị nhiễm theo biểu thức (1.4-21), rồi liều hiệu dụng bị nhiễm theo biểu thức (1.4-22); hoặc trong trường hợp xảy ra tai nạn hay sự cố, thì tính được cả liều hiệu dụng tập thể bị nhiễm theo biểu thức (1.4-23).

5.4.2. Một số giá trị giới hạn

đối với sự xâm nhập của đồng vị phóng xạ vào cơ thể

Trong thực tế đồng vị phóng xạ Radon và các con cháu của nó có thể tồn tại ngay cả trong không khí của nhà ở hoặc trong hầm lò. Hàm lượng của chúng trong không khí thường khá cao ở những vùng liên quan tới việc khai thác mỏ (đặc biệt là mỏ phóng xạ) và sử dụng than đá (kể cả xỉ than). Các khí phóng xạ như radon và thoron còn có mặt trong một số loại nước ngầm và nước khoáng. Do đó, khả năng để các đồng vị phóng xạ xâm nhập vào cơ thể là không nhỏ.

Bảng B5.4-2 và B5.4-3 cho thấy các giá trị liên quan tới sự xâm nhập vào cơ thể của đồng vị phóng xạ Radon và Thoron cùng con cháu của chúng.

Bảng B5.4-2. Một số giá trị giới hạn (cao nhất được phép) liên quan tới sự xâm nhập vào cơ thể và liều bức xạ gây bởi các hạt nhân phóng xạ là con cháu của radon và thoron

Dại lượng	Đơn vị đo	Giá trị tính cho con cháu của radon ^(a)	Giá trị tính cho con cháu của thoron ^(b)
Giới hạn trung bình hàng năm tính trong 5 năm liên tiếp:			
Giới hạn tiềm tàng tiếp nhận năng lượng của hạt alpha vào cơ thể	J (joule)	0,017	0,051
Giới hạn tiềm tàng bị chiếu xạ bởi năng lượng của hạt alpha	J . h . m ⁻³ ^(c)	0,014	0,042
	WLM ^(c,d)	4,0	12
Giới hạn cao nhất trong một năm riêng lẻ bất kỳ:			
Giới hạn tiềm tàng tiếp nhận năng lượng của hạt alpha vào cơ thể	J	0,042	0,127
Giới hạn tiềm tàng bị chiếu xạ bởi năng lượng của hạt alpha	J . h . m ⁻³	0,035	0,105
	WLM	10,0	30
Ghi chú:			
(a) – Con cháu của radon: các nhân phóng xạ sống ngắn là sản phẩm phân rã của ²²² Rn như: ²¹⁸ Po (RaA), ²¹⁴ Pb (RaB), ²¹⁴ Bi (RaC) và ²¹⁴ Po (RaC').			
(b) – Thoron là tên quen gọi của đồng vị phóng xạ ²²⁰ Rn. Con cháu của thoron tức là các nhân phóng xạ sống ngắn là sản phẩm phân rã của ²²⁰ Rn như: ²¹⁶ Po (ThA), ²¹² Pb (ThB), ²¹² Bi (ThC), ²¹² Po (ThC') và ²⁰⁸ Tl (ThC'').			
(c) – Các hệ số chuyển đổi được cho trong bảng B5.4-3.			
(d) – WLM (Working Level Month): tạm dịch là “Tháng ở Mức Làm việc”. WLM là đơn vị liều lượng bức xạ đối với các con cháu của radon hoặc các con cháu của thoron. 1WLM là 3,54 mJ.h.m ⁻³ hoặc là 170 WL.h, trong đó 1WL (1 Working Level) là tổ hợp bất kỳ của các con cháu của radon hoặc các con cháu của thoron trong một lít không khí sao cho tổng động năng của tất cả các hạt alpha được phát ra bằng 1.3.10 ⁵ MeV. Trong hệ đơn vị quốc tế SI, thì 1WL tương đương với 2,1. 10 ⁻⁵ J.m ⁻³ .			

Bảng B5.4-3. Chuyển đổi các đơn vị đã nêu trong bảng B5.4-2 đối với radon và các hạt nhân phóng xạ là con cháu của radon

Giá trị của đại lượng Y được chuyển từ đơn vị đo thứ nhất sang đơn vị đo thứ hai theo công thức chuyển đổi như sau:

$$Y[\text{đơn vị đo thứ nhất}] = C.Y[\text{đơn vị đo thứ hai}]$$

Đại lượng (Y)	Đơn vị đo thứ nhất	Hệ số chuyển đổi (C)	Đơn vị đo thứ hai	
Liều bức xạ gây bởi con cháu của radon	WLM ^(a)	3,54	mJ.h.m ⁻³	
Liều bức xạ gây bởi con cháu của radon hoặc liều bức xạ gây bởi radon (với hệ số cân bằng là 0,4)	Bq.h.m ⁻³	2,22.10 ⁻⁶	mJ.h.m ⁻³	
		6,28.10 ⁻⁷	WLM	
Liều bức xạ hàng năm gây bởi con cháu của radon tính cho một đơn vị nồng độ của radon ^(b)	– ở nhà:	Bq.m ⁻³	1,56.10 ⁻²	mJ.h.m ⁻³
	– ở nhà:		4,40.10 ⁻³	WLM
	– ở nơi làm việc:		4,45.10 ⁻³	mJ.h.m ⁻³
	– ở nơi làm việc:		1,26.10 ⁻³	WLM
Liều tương đương tính cho một đơn vị liều gây bởi con cháu của radon	– ở nhà:	mJ.h.m ⁻³	1,1	mSv
	– ở nhà:	WLM	4	
	– ở nơi làm việc:	mJ.h.m ⁻³	1,4	
	– ở nơi làm việc:	WLM	5	
Nồng độ của con cháu của radon hoặc nồng độ của radon	– với hệ số cân bằng F = 0,4:	Bq.m ⁻³	1,07.10 ⁻⁴	WL
	– trường hợp tổng quát:		2,67.10 ⁻⁴	

Ghi chú:

(a) – Xem lại ghi chú (d) trong bảng B5.4-2.

(b) – Một năm 365 ngày gồm có 8760 giờ. Tính làm tròn là mỗi năm có 7000 giờ ở trong nhà và 2000 giờ ở nơi làm việc. Hệ số cân bằng là $F = 0,4$.

Trong tài liệu “Những tiêu chuẩn quốc tế cơ bản về an toàn bức xạ”

(Safety series No.115, IAEA, Vienna, 1996), bảng số II-III (từ trang 100 đến 156) cho thấy giá trị liều hiệu dụng bị nhiễm qua đường hô hấp và đường tiêu hoá đối với nhân viên bức xạ chuyên nghiệp (tính riêng cho từng đồng vị phóng xạ từ ^3H tới ^{258}Md); còn bảng số II-VI (từ trang 166 đến 201) và bảng số II-VII (từ trang 202 đến 269) thì cho các giá trị liều hiệu dụng bị nhiễm qua đường tiêu hoá và đường hô hấp đối với chiếu xạ dân chúng ở các độ tuổi khác nhau.

CHƯƠNG 6

TÍNH TOÁN VÀ THIẾT KẾ TRONG BẢO VỆ AN TOÀN BỨC XẠ

Toàn bộ chương 6 được dành cho vấn đề tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn các loại nguồn bức xạ ion hoá được sử dụng nhiều ở nước ta hiện nay và trong tương lai gần. Chương này cung cấp những kiến thức cần thiết để đi sâu vào lĩnh vực bảo vệ an toàn bức xạ ion hoá, đồng thời là hướng dẫn tương đối cụ thể để áp dụng vào thực tế ở nước ta. Hai mục 6.1 và 6.2 giới thiệu những nội dung liên quan tới tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử và notrôn. Từ mục 6.3 đến 6.6 trình bày ngắn gọn những quy định và yêu cầu cụ thể mà các cơ sở bức xạ phải thực hiện.

Nội dung của chương 6 được trình bày theo dàn ý sau đây:

- 6.1. Bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử (tr. 337)
 - 6.1.1. Một số đại lượng thường gặp trong bảo vệ an toàn (337)
 - 6.1.1.1. Hoạt độ phóng xạ (337)
 - 6.1.1.2. Tương đương – gamma của nguồn phóng xạ (338)
 - 6.1.1.3. Hằng số – gamma năng lượng và hằng số – gamma ion hoá của nguồn phóng xạ (339)
 - 6.1.1.4. Suất liều gây bởi nguồn điểm bức xạ gamma (347)
 - 6.1.2. Các phương pháp tính và thiết kế bảo vệ an toàn đối với bức xạ gamma (349)
 - 6.1.2.1. Nguyên tắc quan trọng nhất trong bảo vệ an toàn bức xạ (349)
 - 6.1.2.2. Ba nguyên tắc bảo vệ an toàn:

- Nguồn yếu + Cách xa + Thời gian ngắn (350)
- 6.1.2.3. Tính bề dày lớp bảo vệ theo số lần làm yếu (358)
- 6.1.2.4. Tính bảo vệ bức xạ lượng tử có phổ phức tạp
(Phương pháp vạch cạnh tranh) (367)
- 6.1.2.5. Tính bảo vệ gần đúng theo các lớp làm giảm một nửa (371)
- 6.1.2.6. Bảo vệ an toàn đối với bức xạ Roentgen sơ cấp (376)
- 6.2. Bảo vệ an toàn bức xạ nơtron (380)
 - 6.2.1. Tính phân bố nơtron trong không gian
theo phương pháp độ dài lữ biến (381)
 - 6.2.2. Tính bảo vệ theo phương pháp tiết diện loại (386)
 - 6.2.2.1. Tiết diện loại nơtron trong môi trường không đồng nhất (388)
 - 6.2.2.2. Tiết diện loại nơtron trong môi trường đồng nhất (399)
 - 6.2.2.3. Sử dụng tiết diện loại nơtron
để tính lớp bảo vệ là vật liệu không chứa hydro (401)
 - 6.2.3. Thành phần liều nơtron trong vật liệu bảo vệ (402)
 - 6.2.4. Hệ số tích lũy liều của các nơtron dưới ngưỡng (408)
 - 6.2.5. Tính và thiết kế bảo vệ đối với nguồn nơtron loại (α, n) (411)
 - 6.2.5.1. Nguồn được đặt trong môi trường không khí (412)
 - 6.2.5.2. Nguồn trong môi trường bảo vệ là chất làm chậm (414)
- 6.3. Vùng bảo vệ an toàn bức xạ (417)
 - 6.3.1. Vùng kiểm soát (417)
 - 6.3.2. Vùng giám sát (420)
- 6.4. Một số quy định khi làm việc với nguồn phóng xạ hờ (420)
- 6.5. Những điều cần chú ý khi làm việc với nguồn bức xạ mạnh (423)
- 6.6. Yêu cầu chung đối với mỗi cơ sở bức xạ (425)

6.1. BẢO VỆ AN TOÀN BỨC XẠ LƯỢNG TỬ

6.1.1. Một số đại lượng thường gặp trong bảo vệ an toàn

Trong tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử, ngoài những đại lượng cơ bản đã được giới thiệu ở chương 1 như “cường độ bức xạ” và “suất liều bức xạ”, để biểu diễn độ mạnh yếu của một nguồn đồng vị phóng xạ, người ta còn sử dụng những đại lượng khác như *hoạt độ phóng xạ* (A), *tương đương-gamma* (M), *hằng số-gamma ion hoá* (K_γ) và *hằng số-gamma năng lượng* (I_γ). Mục này giới thiệu ngắn gọn về các đại lượng đó.

6.1.1.1. Hoạt độ phóng xạ

Hoạt độ phóng xạ là số biến đổi hạt nhân xảy ra ngẫu nhiên trong một đơn vị thời gian trong một lượng vật chất xác định của nguồn phóng xạ.

Để cho gọn, cụm từ “*hoạt độ phóng xạ*” của một nguồn phóng xạ còn được gọi là “*độ phóng xạ*”; và, sự kiện “*biến đổi hạt nhân một cách ngẫu nhiên*” còn được gọi là “*phân rã phóng xạ*”.

Như vậy, theo định nghĩa, thì độ phóng xạ (A) được xác định theo biểu thức sau đây:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (6.1-1)$$

với N – số hạt nhân phóng xạ có trong lượng vật chất của nguồn tại thời điểm t .

Trong hệ đơn vị SI, độ phóng xạ có đơn vị đo là becquerel (đọc là bec-cơ-ren) ký hiệu là Bq. 1 becquerel là độ phóng xạ của một nguồn mà cứ mỗi giây thì có 1 phân rã phóng xạ xảy ra trong lượng vật chất của nguồn đó; tức là $1\text{Bq}=1(\text{phân rã})/\text{s}$.

Bên cạnh đơn vị chính thống là Bq như vừa nêu trên, cho đến nay vẫn còn

sử dụng rộng rãi một đơn vị ngoại hệ là currie (ký hiệu là Ci). 1 Ci là độ phóng xạ của một nguồn, mà trong lượng vật chất của nguồn đó xảy ra $3,7 \cdot 10^{10}$ phân rã trong mỗi giây, tức là $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} (\text{phân rã})/\text{s} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

6.1.1.2. Tương đương – gamma của nguồn phóng xạ

Để so sánh các nguồn phóng xạ gamma với nhau theo khả năng iôn hoá của chúng, thì còn có thể sử dụng một đại lượng gọi là *tương đương – gamma của nguồn*. Các nguồn phóng xạ gamma mà gây nên một suất liều chiếu xạ như nhau trong những điều kiện đo đạc giống hệt nhau, thì có cùng một tương đương – gamma. Đại lượng này thường được đo bằng đơn vị ngoại hệ là miligam–tương đương–radi, viết tắt là mg–td–Ra. Tuy đơn vị mg–td–Ra không phải là một đơn vị chuẩn, nhưng nó được sử dụng rộng rãi trong thực tế.

Người ta thường coi rằng nguồn điểm phóng xạ của nguyên tố Ra chứa 1 mg Ra ở trạng thái cân bằng với các hạt nhân sản phẩm con chủ yếu của phân rã mà có bộ lọc dày 0,5mm bằng platin (Pt), thì gây nên suất liều chiếu xạ bằng 8,4 R/h tại một điểm ở cách nguồn một khoảng bằng 1cm. Giá trị này được gọi là hằng số – gamma iôn hoá của radi $K_{\gamma, \text{Ra}}(0,5\text{mmPt})$.

Trong khi đó, hằng số – gamma iôn hoá của radi trong trạng thái cân bằng với các hạt nhân sản phẩm con chủ yếu của phân rã, nhưng không có bộ lọc, thì gây nên suất liều chiếu xạ bằng 9,36 R/(h.mCi); còn khi nó có bộ lọc dày 1mm bằng Pt – thì suất liều chiếu xạ bằng 7,7 R/(h.mCi).

Tương đương – gamma (M) của một nguồn đồng vị liên hệ với độ phóng xạ (A) và hằng số – gamma iôn hoá (K_{γ}) của nguồn đó thông qua biểu thức sau:

$$M_{[\text{mg-td-Ra}]} = \frac{A_{[\text{mCi}]} \cdot K_{\gamma} \left[\frac{R}{\text{h.mCi}} \right]}{K_{\gamma, \text{Ra}(0,5\text{mmPt})} \left[\frac{R}{\text{h.mgRa}} \right]} = \frac{A_{[\text{mCi}]} \cdot K_{\gamma} \left[\frac{R}{\text{h.mCi}} \right]}{8,4 \left[\frac{R}{\text{h.mgRa}} \right]} \quad (6.1-2)$$

Trong biểu thức (6.1-2), các đại lượng có thứ nguyên như sau: tương đương – gamma $M[\text{mg}-\text{td}-\text{Ra}]$; độ phóng xạ $A [\text{mCi}]$; hằng số –gamma ion hoá $K_\gamma [R/(\text{h.mCi})]$. Hằng số – gamma ion hoá được xét tới kỹ hơn trong mục dưới đây.

6.1.1.3. Hằng số – gamma năng lượng và hằng số – gamma ion hoá của nguồn phóng xạ

Trong trường hợp tổng quát, hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) I_γ và hằng số – gamma ion hoá (toàn phần) K_γ của một nguồn phóng xạ được định nghĩa như sau.

Giả sử một nguồn phóng xạ gamma với độ phóng xạ bằng 1 đơn vị, là một nguồn điểm đẳng hướng, không có bộ lọc. Khi đó, tại một điểm cách nguồn 1 cm, thì:

- Cường độ bức xạ tính cho 1 đơn vị độ phóng xạ được gọi là *hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) của nguồn phóng xạ đó*;
- Suất liều chiếu xạ tính cho 1 đơn vị độ phóng xạ được gọi là *hằng số – gamma ion hoá (toàn phần) của nguồn phóng xạ đó*.

Thứ nguyên của hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) $[I_\gamma]$ và của hằng số – gamma ion hoá (toàn phần) $[K_\gamma]$ được xác định như sau:

$$[I_\gamma] = \frac{\text{Thứ nguyên của cường độ bức xạ}}{\text{Thứ nguyên của độ phóng xạ}} \quad (6.1-3)$$

$$[K_\gamma] = \frac{\text{Thứ nguyên của suất liều chiếu xạ}}{\text{Thứ nguyên của độ phóng xạ}} \quad (6.1-4)$$

Xuất phát từ khái niệm về cường độ bức xạ (xem chương 1, mục 1.3), ta thấy rằng: *hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) của một nguồn điểm*

phóng xạ gamma đẳng hướng I_γ chính là tổng năng lượng của các lượng tử thuộc tất cả các vạch năng lượng do nguồn có độ phóng xạ bằng một đơn vị phát ra trong một đơn vị thời gian mà truyền qua diện tích 1cm^2 của mặt cầu có bán kính $r_0 = 1\text{cm}$ và có tâm trùng với điểm đặt nguồn.

Chú ý: nếu độ phóng xạ của nguồn được tính theo đơn vị không phải là becqueren [Bq], thì phải nhân giá trị I_γ vừa nêu trên đây với một số S bằng số phân rã xảy ra trong một giây tương ứng với một đơn vị độ phóng xạ đang được sử dụng. Thí dụ: nếu độ phóng xạ của nguồn được biểu diễn là $A_1[\text{Bq}]$, thì $S=1$; nhưng nếu độ phóng xạ của nguồn được biểu diễn là $A_1[\text{mCi}]$, thì $S=3,7 \cdot 10^7$. Do vậy có biểu thức sau đây cho hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) của một nguồn phóng xạ gamma:

$$I_\gamma = \frac{S \cdot \sum_{i=1}^m E_{0i} \cdot n_i}{4\pi r_0^2 A_1} = \sum_{i=1}^m I_{\gamma i}^* \cdot n_i = \sum_{i=1}^m I_{\gamma i} \quad (6.1-3.a)$$

Trong biểu thức này: $4\pi r_0^2$ – diện tích mặt cầu bán kính $r_0 = 1\text{cm}$ có tâm trùng với điểm đặt nguồn phóng xạ đang được xét tới; A_1 – độ phóng xạ của nguồn; m – số vạch trong phổ năng lượng của các lượng tử gamma do nguồn phát ra; $E_{0i}[\text{MeV}]$ – năng lượng của lượng tử gamma thuộc vạch i trong phổ năng lượng của nguồn; $n_i[\%]$ – hiệu suất phát lượng tử gamma thuộc vạch i trong mỗi phân rã của hạt nhân đồng vị của nguồn; $I_{\gamma i}^*$ – các hằng số – gamma vi phân, tính cho một lượng tử được phát ra trong mỗi phân rã (tức là khi $n_i = 100\%$); $I_{\gamma i}$ – các hằng số – gamma vi phân, tính đúng theo hiệu suất phát lượng tử n_i của mỗi vạch i trong phổ năng lượng gamma của đồng vị; $I_{\gamma i}^*$ và $I_{\gamma i}$ phải có cùng thứ nguyên với I_γ ở vế trái.

Nếu cường độ bức xạ được thể hiện bằng đơn vị $[\text{MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$, độ phóng xạ bằng $A_1[\text{mCi}]$, thì giá trị của hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) I_γ của một nguồn phóng xạ được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
 I_{\gamma} \left[\frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mCi}} \right] &= \frac{3,7 \cdot 10^7 \cdot \sum_{i=1}^m E_{0_i} \cdot n_i}{4\pi r_0^2 A_1} = \frac{2,94 \cdot 10^6}{A_1} \cdot \sum_{i=1}^m E_{0_i} \cdot n_i = \\
 &= \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i}^{\bullet} \cdot n_i = \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i}
 \end{aligned}
 \tag{6.1-3b}$$

Nếu cường độ bức xạ được thể hiện bằng đơn vị $[J/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$, độ phóng xạ bằng $A_1 [\text{Bq}]$, thì hằng số – gamma năng lượng (toàn phần) $I_{\gamma} [J/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Bq})]$ của một nguồn phóng xạ có giá trị như sau:

$$\begin{aligned}
 I_{\gamma} \left[\frac{\text{J}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Bq}} \right] &= \frac{1,602 \cdot 10^{-13} \cdot \sum_{i=1}^m E_{0_i} \cdot n_i}{4\pi r_0^2 A_1} = \frac{1,275 \cdot 10^{-14}}{A_1} \cdot \sum_{i=1}^m E_{0_i} \cdot n_i = \\
 &= \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i}^{\bullet} \cdot n_i = \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i}
 \end{aligned}
 \tag{6.1-3c}$$

Trong các biểu thức (6.1-3b và -3c), thì: $3,7 \cdot 10^7$ – số phân rã trong một giây, tương ứng với độ phóng xạ $A_1 = 1 \text{ mCi}$; $1,602 \cdot 10^{-13}$ – hệ số chuyển đổi từ đơn vị $[\text{MeV}]$ sang thành $[\text{J}]$.

Trên cơ sở tương quan (1.5-3) giữa suất liều chiếu xạ với cường độ bức xạ và hệ số truyền năng lượng khối (xem chương 1, mục 1.5.), ta có tương quan sau đây giữa hằng số – gamma năng lượng và hằng số – gamma iôn hoá của một nguồn phóng xạ gamma:

$$K_{\gamma} = \sum_{i=1}^m K_{\gamma_i} = \sum_{i=1}^m K_{\gamma_i}^{\bullet} \cdot n_i = a \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i}^{\bullet} \cdot \mu_{\text{kmf}} n_i = a \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i} \cdot \mu_{\text{km}}
 \tag{6.1-4.a}$$

với K_{γ_i} – các hằng số – gamma vi phân, được tính theo đúng hiệu suất phát

lượng tử n_i của mỗi vạch i trong phổ năng lượng gamma của đồng vị; $K_{\gamma i}^*$ – các hằng số – gamma và phân, được tính cho một lượng tử được phát ra trong mỗi phân rã (tức là khi $n_i = 100\%$); $K_{\gamma i}^*$ và $K_{\gamma i}$ phải có cùng thứ nguyên với K_{γ} ở vế trái; a – hệ số tỷ lệ tính tới thứ nguyên của các đại lượng trong biểu thức; μ_{kmi} [cm^2/g] – hệ số truyền năng lượng khối trong không khí của lượng tử gamma thuộc vạch i trong phổ của nguồn (còn gọi là hệ số hấp thụ thực, hoặc hệ số biến đổi điện tử).

Đối chiếu tương quan (6.1-4.a) này với các biểu thức (6.1-3a, -3b và -3c), thì được các biểu thức tương ứng cho hằng số – gamma ion hoá. Cụ thể như sau:

Nếu suất liều chiếu xạ được thể hiện bằng đơn vị $[R/h]$, độ phóng xạ bằng $A_1[\text{mCi}]$, thì giá trị của hằng số – gamma ion hoá (toàn phần) K_{γ} của một nguồn phóng xạ được xác định như sau:

$$\begin{aligned} K_{\gamma} \left[\frac{R}{h \cdot \text{mCi}} \right] &= \frac{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{88} \cdot \frac{3,7 \cdot 10^7 \cdot \sum_{i=1}^m E_{0i} \cdot n_i \cdot \mu_{kmi}}{4\pi r_0^2 A_1} = \\ &= \frac{192,8}{A_1} \cdot \sum_{i=1}^m E_{0i} \cdot n_i \cdot \mu_{kmi} \end{aligned} \quad (6.1-4b)$$

Nếu suất liều chiếu xạ được thể hiện bằng đơn vị $[C/(\text{kg} \cdot h)]$, độ phóng xạ bằng $A_1[\text{Bq}]$, thì hằng số – gamma ion hoá (toàn phần) $K_{\gamma}[C/(\text{kg} \cdot h \cdot \text{Bq})]$ của một nguồn phóng xạ có giá trị như sau:

$$\begin{aligned} K_{\gamma} \left[\frac{C}{\text{kg} \cdot h \cdot \text{Bq}} \right] &= \frac{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{88} \cdot \frac{2,5797 \cdot 10^{-4} \cdot \sum_{i=1}^m E_{0i} \cdot n_i \cdot \mu_{kmi}}{4\pi r_0^2 A_1} = \\ &= \frac{1,344 \cdot 10^{-9}}{A_1} \cdot \sum_{i=1}^m E_{0i} \cdot n_i \cdot \mu_{kmi} \end{aligned} \quad (6.1-4c)$$

Trong các biểu thức (6.1-4b và -4c), thì: $1,6.10^{-6}$ – hệ số chuyển đổi từ đơn vị [MeV] sang thành [erg]; 3600 – số giây trong một giờ; 88 [erg/(g.R)] – tương đương năng lượng của một Roentgen; $1R = 2,5797.10^{-4}$ C/kg; các đại lượng khác – như trong các biểu thức (6.1-3b và -3c).

Chú ý: Trong tất cả các biểu thức từ (6.1-3a) đến (6.1-3c) và từ (6.1-4a) đến (6.1-4c), thì năng lượng của lượng tử luôn được biểu diễn theo cùng một đơn vị: $E_{\gamma i}$ [MeV].

Nếu nguồn phóng xạ có phát pôzitrôn, thì mỗi sự kiện huỷ pôzitrôn làm phát ra hai lượng tử với năng lượng như nhau và bằng 0,511 MeV. Đóng góp này cần được tính tới trong các biểu thức từ (6.1-3a) đến (6.1-4c) nêu trên. Trong trường hợp này sẽ có thêm vạch năng lượng $E_{0, i=huỷ\ pôzitrôn} = 0,511\text{MeV}$ với hiệu suất $n_i = 2.n_{\beta+}$, ở đây $n_{\beta+}$ – hiệu suất phát pôzitrôn trong mỗi phân rã của nguồn.

Bảng B6.1-1 cho các giá trị hằng số – gamma ion hoá vi phân ($K_{\gamma i}^*$) và hằng số – gamma năng lượng vi phân ($I_{\gamma i}^*$) phụ thuộc vào năng lượng $E_{\gamma i}$ của lượng tử.

Trên cơ sở các giá trị hằng số – gamma ion hoá vi phân ($K_{\gamma i}^*$) và hằng số – gamma năng lượng vi phân ($I_{\gamma i}^*$) phụ thuộc vào năng lượng $E_{\gamma i}$ của lượng tử cho trong bảng B6.1-1, có thể tính được giá trị của các hằng số – gamma của một đồng vị hoặc một nguồn phóng xạ. Bảng B6.1-2 cho thấy hằng số – gamma ion hoá vi phân ($K_{\gamma i}$) và hằng số – gamma năng lượng vi phân ($I_{\gamma i}$) cùng giá trị toàn phần của các hằng số – gamma và những đặc trưng khác của một số đồng vị phóng xạ. Những giá trị này thường được cho trong các bảng tra cứu về tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ. Trong các cột (4, 5 và 6) của bảng B6.1-2, thì giá trị riêng (n_i) hoặc vi phân ($K_{\gamma i}$ và $I_{\gamma i}$) được ghi ở phần bên trái của cột, còn giá trị toàn phần (K_{γ} và I_{γ}) hoặc tổng Σn_i – ở phần bên phải của cột.

Bảng B6.1-1. Sự phụ thuộc vào năng lượng E_γ của các hằng số – gamma vì phân I_γ^* và K_γ^* (Chú ý: tính cho một lượng tử)

E_γ , MeV	I_γ^* , MeV/(cm ² .s.mCi)	K_γ^* , R/(h.mCi)
0,03	0,0884	0,85
0,04	0,118	0,50
0,05	0,147	0,37
0,06	0,177	0,34
0,08	0,236	0,37
0,1	0,294	0,45
0,15	0,442	0,73
0,2	0,589	1,04
0,3	0,884	1,67
0,4	1,178	2,29
0,5	1,472	2,89
0,6	1,767	3,44
0,7	2,062	3,95
0,8	2,356	4,48
1,0	2,94	5,42
1,25	3,681	6,49
1,5	4,418	7,44
2,0	5,890	9,22
3,0	8,835	12,3
4,0	11,78	15,0
5,0	14,72	17,5
6,0	17,67	20,0
8,0	23,56	23,3
10,0	29,45	27,9

Bảng B6.1-2. Các đặc trưng của một số đồng vị phóng xạ gamma

Đồng vị	Chu kỳ rã nửa ($T_{1/2}$) và kiểu phân rã	Năng lượng của lượng từ E_{0i} , MeV	Hiệu suất phát gamma trong một phân rã n_i , % và $\sum_{i=1}^m n_i$, %	Hằng số – gamma vi phân và toàn phần		Tương đương – gamma của 1 mCi của đồng vị, mg–td–Ra
				$K_{\gamma i}$ và K_{γ} , $\frac{R}{h.mCi}$	$I_{\gamma i}$ và I_{γ} , $\frac{MeV}{cm^2.s.mCi}$	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
^{22}Na	2,609 năm • β^+	1,275 0,511	99,9 180 279,9	6,58 5,31 11,89	3,75 2,71 6,46	1,42
^{24}Na	14,96 h • β^-	3,85 2,754 1,369	9.10^{-2} 99,9 100 200	0,01 11,60 6,94 18,55	0,01 8,10 4,03 12,14	2,20
^{60}Co	5,27 năm • β^-	1,333 1,173	100 100 200	6,82 6,11 12,93	3,92 3,42 7,34	1,54
^{131}I	8,021 ngày • β^-	0,723 0,637 0,364 0,284 0,0802	1,8 7,2 81,7 6,1 2,6 99,4	0,122 0,327 1,62 0,078 0,003 2,15	0,064 0,169 0,839 0,042 0,0017 1,12	0,26
$^{137}Cs +$ ^{137m}Ba	30,04 năm • β^-	0,662 0,0322 0,0364	85,1 5,6 (Ba– $K\alpha$) 1,3 (Ba– $K\beta$) 92,0	3,198 0,002 0,001 3,20	1,65 0,001 0,0005 1,65	0,38

Đối với những đồng vị phóng xạ mà hạt nhân con của phân rã của nó là hạt nhân không bền, thì trong biểu thức của hằng số γ cần phải tính tới đóng góp của tất cả các hạt nhân sản phẩm trong chuỗi phân rã của hạt nhân mẹ ban đầu. Giả sử trong chuỗi phân rã của nhân mẹ có s loại nhân con, và, tất cả các nhân con trong chuỗi phân rã này được đánh số thứ tự lần lượt từ $j = 1$ tới $j = s$. Khi đó hằng số γ ion hoá tính cho 1 đơn vị độ phóng xạ (thí dụ: 1 mCi) của nhân mẹ được xác định như sau:

$$K_{\gamma} = K_{\gamma, me} + \sum_{j=1}^s K_{\gamma, con=j} \cdot \eta_{con=j} \quad (6.1-5)$$

với $K_{\gamma, me}$ và $K_{\gamma, con=j}$ – hằng số γ ion hoá của nguồn gây bởi bức xạ gamma của riêng nhân mẹ, và, của riêng từng nhân con j ; hệ số $\eta_{con=j}$ có giá trị bằng tỷ số giữa độ phóng xạ của riêng nhân con thứ j (ký hiệu là $A_{con=j}$) với độ phóng xạ của nhân mẹ (ký hiệu là A_{me}):

$$\eta_{con=j} = \frac{A_{con=j}}{A_{me}} \quad (6.1-6)$$

Vì độ phóng xạ của nhân mẹ là 1 đơn vị, nên số đơn vị của độ phóng xạ tổng cộng của nhân mẹ và tất cả các nhân con trong chuỗi phân rã sẽ là:

$$1 + \sum_{j=1}^s \eta_{con=j}$$

Do vậy, nếu gọi $K_{\gamma, \Sigma}$ là hằng số γ ion hoá được tính cho 1 đơn vị của độ phóng xạ tổng cộng của nhân mẹ và tất cả các nhân con, thì nó được xác định như sau:

$$K_{\gamma, \Sigma} = \frac{K_{\gamma}}{1 + \sum_{j=1}^s \eta_{con=j}} < K_{\gamma} \quad (6.1-7)$$

với K_{γ} – hằng số γ ion hoá của nguồn, xác định theo biểu thức (6.1-5).

Chú ý: phần lớn các nguồn phóng xạ được sử dụng trong thực tế đều là nguồn kín, tức là chúng được đặt nằm bên trong lớp vỏ bảo vệ; do vậy bức xạ bị

làm yếu khi đi qua lớp chắn đó. Hiệu ứng này chưa được tính tới trong các biểu thức từ (6.1-3 đến 6.1-7). Để tính tới hiệu ứng này, thì cần hiệu chỉnh các hằng số – gamma của nguồn như sau:

$$K_{\gamma}(d, Z) = \sum_{i=1}^m K_{\gamma_i} \cdot e^{-\mu_{i,p}d} \cdot B_p(E_{0_i}, \mu_{i,p}d, Z) \quad (6.1-8)$$

$$I_{\gamma}(d, Z) = \sum_{i=1}^m I_{\gamma_i} \cdot e^{-\mu_{i,l}d} \cdot B_l(E_{0_i}, \mu_{i,l}d, Z) \quad (6.1-9)$$

Trong hai biểu thức này, K_{γ_i} và I_{γ_i} – các hằng số – gamma vi phân được xác định theo các biểu thức (6.1-3 và -4); d [cm] – bề dày của lớp vỏ chắn làm từ vật liệu có số thứ tự nguyên tố là Z ; $\mu_{i,p}$ và $\mu_{i,l}$ [1/cm] – hệ số làm yếu suất liều và cường độ của chùm hẹp bức xạ trong lớp chắn Z ; B_p – hệ số tích lũy liều; B_l – hệ số tích lũy năng lượng (xem thêm mục 1.6 ở chương 1). Nếu lớp chắn là đủ mỏng, thì có thể coi là $B_p = B_l$ với sai số $\approx 5\%$.

6.1.1.4. Suất liều gây bởi nguồn điểm bức xạ gamma

Biết suất liều tại điểm $M(r)$ gây bởi một nguồn điểm bức xạ đặt tại điểm $S(x, y, z)$, thì có thể tính được suất liều và liều tại điểm $M(r)$ gây bởi một nguồn bức xạ thực tế có kích thước xác định nào đó. Do vậy, dưới đây chỉ trình bày về suất liều gây bởi một nguồn điểm bức xạ.

Trong thực tế, nguồn có thể được coi là nguồn điểm nếu khoảng cách r từ nguồn tới vị trí cần xác định suất liều (hoặc liều) là rất lớn so với kích thước lớn nhất của nguồn ($d_{\max}$); tức là thoả mãn điều kiện: $r/d_{\max} \gg 1$. Điều kiện này có thể được coi là thoả mãn nếu tỷ số $r/d_{\max}$ đạt giá trị ít nhất là cỡ từ 5÷10.

Xuất phát từ định nghĩa hằng số-gamma iôn hoá K_{γ} và từ sự phụ thuộc của suất liều tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách r , thì có biểu thức liên hệ sau đây giữa hằng số-gamma iôn hoá K_{γ} (thí dụ, với thứ nguyên là $[R/(h.mCi)]$) và suất liều chiếu xạ gamma $P_{\text{chiếu xạ}, 0}(r)$ (thí dụ, với thứ nguyên là $[R/h]$) gây bởi một nguồn phóng xạ điểm đẳng hướng không có bộ lọc với độ

phóng xạ bằng A (thí dụ, với thứ nguyên là [mCi]) tại vị trí cách nguồn một khoảng bằng $r\text{ [cm]} \geq r_0 = 1\text{cm}$:

$$P_{\text{chiếu xạ},0}(r)\left[\frac{R}{h}\right] = A_{[mCi]} \cdot K_{\gamma\left[\frac{R}{h \cdot mCi}\right]} \cdot \left(\frac{r_0[\text{cm}]}{r[\text{cm}]}\right)^2 \quad (6.1-10)$$

Nếu độ mạnh của nguồn phóng xạ được biểu diễn bằng tương đương-gamma, thì trên cơ sở các biểu thức (6.1-2 và -10), sẽ có tương quan sau đây giữa suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ},0}(r)\text{ [R/h]}$ và tương đương-gamma $M[\text{mg-tđ-Ra}]$ của một nguồn điểm phóng xạ gamma:

$$P_{\text{chiếu xạ},0}(r)\left[\frac{R}{h}\right] = A_{[mCi]} \cdot K_{\gamma\left[\frac{R}{h \cdot mCi}\right]} \cdot \left(\frac{r_0[\text{cm}]}{r[\text{cm}]}\right)^2 = 8,4\left[\frac{R}{h \cdot \text{mgRa}}\right] \cdot M_{[\text{mg-tđ-Ra}]} \cdot \left(\frac{r_0[\text{cm}]}{r[\text{cm}]}\right)^2 \quad (6.1-11)$$

Trong các biểu thức (6.1-10 và -11), cần chú ý rằng khoảng cách r phải được biểu diễn bằng đơn vị [cm].

Khi nêu định nghĩa và công thức của các hằng số-gamma của một nguồn phóng xạ (6.1-3a và -4a) hoặc (6.1-8 và -9), thì nguồn phóng xạ này đã được ngầm coi là biệt lập, không có các vật tán xạ ở xung quanh. Vì vậy, các biểu thức (6.1-10 và -11) chỉ cho giá trị đúng nếu ảnh hưởng của tán xạ là rất nhỏ tới mức có thể bỏ qua được.

Nếu nguồn nằm trong vỏ bảo vệ, thì các hằng số-gamma trong các biểu thức (6.1-10 và -11) phải được tính theo các biểu thức (6.1-8 và -9).

Trong điều kiện cân bằng điện tử, khi cơ thể bị chiếu xạ với liều bằng 1R, thì năng lượng bức xạ gamma bị hấp thụ trong 1 gam tổ chức cơ thể khi chỉ xảy ra hiệu ứng hấp thụ quang điện là $\Delta E_{\text{qd}} = 90\text{erg}/(\text{g.R})$; còn khi chỉ xảy ra hiệu ứng tán xạ Compton – là $\Delta E_{\text{Compton}} = 99\text{ erg}/(\text{g.R})$; khi chỉ xảy ra hiệu ứng tạo cặp – là $\Delta E_{\text{tạo cặp}} = 88\text{ erg}/(\text{g.R})$; trung bình của 3 giá trị này là $\Delta E \approx 93\text{erg}/(\text{g.R})$. Với sai số ~10% có thể coi năng lượng bức xạ bị hấp thụ trong mỗi gam của tổ chức cơ thể là bằng $\Delta E = 93\text{ erg}$; tức là liều hấp thụ trong tổ chức cơ thể

$D=0,93\text{Rad}$ khi $D_{\text{chiếu xạ}}=1\text{R}$. Trong thực tế, trạng thái cân bằng điện từ được đảm bảo ở ngay từ độ sâu vài milimét trong tổ chức cơ thể. Vì vậy, trong tính toán bảo vệ an toàn, thường coi rằng khi $D_{\text{chiếu xạ}}=1\text{R}$, thì liều hấp thụ trong tổ chức cơ thể $D \approx 1\text{Rad}$; nghĩa là:

$$P(r)_{[\text{Rad/h}]} \approx 1_{[\text{Rad/R}]} \cdot P_{\text{chiếu xạ}}(r)_{[\text{R/h}]} \quad (6.1-12)$$

$$D(r)_{[\text{Rad}]} \approx 1_{\left[\frac{\text{Rad}}{\text{R}}\right]} \cdot P_{\text{chiếu xạ}, 0}(r)_{[\text{R}]} \cdot \Delta t_{[\text{h}]} \quad (6.1-13)$$

Trong đó: $1_{[\text{Rad/R}]}$ – giá trị gần đúng của hệ số chuyển đổi từ liều chiếu xạ sang liều hấp thụ tương ứng với liều chiếu xạ là 1R ; Δt – khoảng thời gian chiếu xạ; còn suất liều chiếu xạ $P_{\text{chiếu xạ}}(r)_{[\text{R/h}]}$ thì được thế từ biểu thức (6.1-10 hoặc -11).

6.1.2. Các phương pháp tính và thiết kế bảo vệ an toàn đối với bức xạ gamma

6.1.2.1. Nguyên tắc quan trọng nhất trong bảo vệ an toàn bức xạ

Nguyên tắc quan trọng nhất trong tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ là đồng thời đảm bảo sao cho liều lượng bức xạ mà cơ thể phải chịu đựng là:

- Không vượt quá giới hạn cho phép;*
- Thấp nhất mà có thể đạt được một cách hợp lý.*

(Yêu cầu đảm bảo sao cho liều lượng bức xạ mà cơ thể phải chịu đựng là “thấp nhất mà có thể đạt được một cách hợp lý” thường được gọi tắt là nguyên tắc ALARA. ALARA là tập hợp các chữ cái đầu tiên của cụm từ trong tiếng Anh: As Low As Reasonably Achievable).

Mọi tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ chỉ được coi là đạt yêu cầu nếu đồng thời thoả mãn được cả hai yêu cầu nêu trên của nguyên tắc này.

6.1.2.2. Ba nguyên tắc bảo vệ an toàn:

Nguồn yếu + Cách xa + Thời gian ngắn

Các công thức từ (6.1-10 đến -13) cho thấy rằng liều bức xạ mà cơ thể hấp thụ phụ thuộc trước hết vào độ mạnh của nguồn, vào khoảng cách từ nguồn tới vị trí của người làm việc, và vào thời gian chiếu xạ. Do vậy, bằng cách lựa chọn giá trị thích hợp của các đại lượng này, có thể đáp ứng được điều kiện cho phép làm việc với nguồn phóng xạ.

Các biểu thức (6.1-10 và -11) cho thấy rằng: nguồn bức xạ càng yếu thì suất liều càng nhỏ. Do vậy nguyên tắc đầu tiên trong bảo vệ an toàn bức xạ là *đảm bảo sao cho nguồn bức xạ được sử dụng là nguồn yếu nhất mà có thể đạt được một cách hợp lý*. Ở đây “*hợp lý*” được hiểu là nguồn bức xạ phải đáp ứng mọi yêu cầu (về kỹ thuật, về chất lượng sản phẩm, năng suất lao động, hiệu quả kinh tế-xã hội .v.v.) của công việc; và, “*có thể đạt được*” thì được hiểu là phụ thuộc vào những điều kiện cụ thể về phương tiện cũng như khả năng kỹ thuật và tài chính để giải quyết vấn đề mà cơ sở sử dụng nguồn bức xạ đặt ra.

Hai biểu thức (6.1-10 và -11) còn cho thấy rằng: khoảng cách từ vị trí đặt nguồn tới vị trí của người làm việc càng lớn thì suất liều bức xạ càng nhỏ. Do vậy, nguyên tắc thứ hai trong bảo vệ an toàn bức xạ là *đảm bảo sao cho người làm việc ở vị trí cách xa nguồn nhất mà có thể đạt được một cách hợp lý*.

Biểu thức (6.1-13) cho thấy rằng: liều hấp thụ mà cơ thể phải chịu đựng là tỷ lệ thuận với khoảng thời gian bị chiếu xạ. Do vậy, nguyên tắc thứ ba trong bảo vệ an toàn bức xạ là *đảm bảo sao cho người lao động bị chiếu xạ trong khoảng thời gian ngắn nhất mà có thể đạt được một cách hợp lý*.

Trong số 3 nguyên tắc bảo vệ là đảm bảo *nguồn yếu, cách xa, thời gian ngắn*, thì có thể vận dụng riêng rẽ hoặc kết hợp với nhau sao cho vừa phù hợp với hoàn cảnh thực tế lại vừa đáp ứng được những đòi hỏi của nguyên tắc quan trọng nhất đã nêu ở mục 6.1.2.

Trên cơ sở các biểu thức từ (6.1-10 đến -13), có thể tổng hợp vai trò của

ba nguyên tắc này bằng tương quan sau đây giữa số lần làm yếu (hoặc làm tăng) của các đại lượng là liều hấp thụ (D), độ phóng xạ (A), khoảng cách (r) và thời gian chiếu xạ (Δt):

$$k_D = \frac{k_A \cdot k_{\Delta t}}{k_r^2} \quad (6.1-14)$$

Theo định nghĩa, suất liều bức xạ chính là liều bức xạ tính trên một đơn vị thời gian. Do vậy, có thể áp dụng biểu thức (6.1-14) cho độ thay đổi của suất liều bằng cách cho $k_{\Delta t}=1$ và thay k_D bằng k_P , tức là:

$$k_P = \frac{k_A}{k_r^2} \quad (6.1-14a)$$

trong đó các hệ số hiệu chỉnh k_Y được xác định như sau:

$$k_Y = \frac{Y_2}{Y_1} \quad (6.1-15)$$

Trong biểu thức (6.1-15), chỉ số 1 – tương ứng với trường hợp trước khi thay đổi đại lượng Y, còn chỉ số 2 – sau khi đã thay đổi đại lượng Y. Ở đây, đại lượng Y có thể là liều D, hoặc suất liều P, hoặc độ phóng xạ A (hay độ mạnh yếu của nguồn nói chung), hoặc khoảng cách r từ vị trí đặt nguồn bức xạ tới vị trí có người làm việc đang được quan tâm, hoặc là khoảng thời gian chiếu xạ Δt .

♣ *Dưới đây giới thiệu một số vấn đề và cách giải quyết để minh họa.*

♦ Vấn đề 1:

Sau khi nhận rõ những lợi ích to lớn mà việc ứng dụng kỹ thuật hạt nhân có thể đem lại, cơ sở X quyết định sử dụng nguồn đồng vị phóng xạ ^{60}Co trong quy trình sản xuất của mình. Theo yêu cầu kỹ thuật của quy trình sản xuất này, thì nguồn cần có độ phóng xạ ít nhất là 1Ci. Từ vị trí đặt nguồn tới vị trí có người làm việc thường xuyên gần nhất là 5m. Giám đốc kỹ thuật của cơ sở X đề nghị chuyên gia về an toàn bức xạ giúp đỡ để có được đánh giá đúng về mức độ đảm bảo an toàn bức xạ cho nhân viên làm việc 8 giờ mỗi ngày tại vị trí này.

Giải quyết vấn đề 1:

Trước hết, cần xác định rõ: nhân viên được nhắc tới ở đây là thuộc phạm trù nào? Cụ thể: Đó là nhân viên bức xạ (tức là người làm việc chuyên nghiệp với nguồn bức xạ iôn hoá), hay là dân thường (người không có trách nhiệm làm việc với các nguồn bức xạ iôn hoá)? Đây là câu hỏi có tính chất nguyên tắc, phải được trả lời rõ ràng ngay từ đầu nếu trong phần đặt vấn đề chưa được chỉ rõ.

Sau đây sẽ chỉ nêu một số cách giải quyết vấn đề đối với nhân viên bức xạ. (Tiếp đó, mời bạn nêu các phương án giải quyết cho phạm trù dân thường).

Theo biểu thức (6.1-10), thì liều chiếu xạ tại vị trí làm việc cách nguồn 5m có giá trị bằng:

$$P_{\text{chiếu xạ}, 0}(r=500\text{cm})_{\left[\frac{R}{h}\right]} = 1000_{[mCi]} \cdot 12,93_{\left[\frac{R}{h \cdot mCi}\right]} \cdot \left(\frac{1_{[cm]}}{500_{[cm]}}\right)^2 = 0,05172 \cdot \frac{R}{h}$$

Do vậy, theo biểu thức (6.1-13), thì liều hấp thụ bức xạ mà nhân viên có thể phải chịu đựng nếu làm việc tại vị trí này 8 giờ mỗi ngày là:

$$D(r=500\text{cm})_{[Rad]} \approx 1_{\left[\frac{Rad}{R}\right]} \cdot 0,05172_{\left[\frac{R}{h}\right]} \cdot 8_{[h]} = 0,41376 \text{ Rad}$$

Vì 1Rad = 0,01Gy, nên liều hấp thụ tại vị trí này mỗi ngày là:

$$D(r=500\text{cm})_{[Gy]} \approx 0,41376_{[Rad]} \cdot 0,01_{[Gy/Rad]} = 0,0041376\text{Gy} = 4,1376\text{mGy}.$$

Nguồn phóng xạ ^{60}Co phát ra bức xạ gamma có trọng số $Q_{TS}=1$. Do đó, nếu coi sự suy giảm liều theo độ sâu dưới da là không đáng kể, thì theo biểu thức (1.4-13) (chương 1, mục 1.4.6), liều tương đương mà mỗi cơ quan hoặc tổ chức cơ thể của nhân viên phải chịu đựng trong mỗi ngày làm việc là:

$$H_c = D_c \cdot Q_{TS} \approx D_{(r=500\text{cm})} \cdot Q_{TS} = 4,1376_{[mGy]} \cdot 1 = 4,1376 \text{ mSv}.$$

Theo biểu thức (1.4-16) (chương 1, mục 1.4.7) và biểu thức (1.4-25) (chương 1, mục 1.4.10), thì liều hiệu dụng (H_{hd}) mà bức xạ gây nên trong mỗi ngày làm việc của nhân viên tại vị trí đang được quan tâm có giá trị gần bằng (nhỏ hơn):

$$H_{hd} = \sum_{(c)} \omega_c H_c \approx D_{(r=500cm)} Q_{TS} \cdot 1 = 4,1376_{[mGy]} \cdot 1 = 4,1376 mSv$$

Theo tiêu chuẩn cơ bản của quốc tế về an toàn bức xạ (xem bảng B2.3-1, mục 2.3, chương 2), thì đối với nhân viên chuyên nghiệp, giới hạn (không được vượt quá!) về liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp là $H_{hd,5n} = 20 mSv$; còn về liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ là $H_{hd,1n} = 50 mSv$.

Liều thực tế trong mỗi ngày làm việc đã ở mức ($\approx 4,1 mSv / 50 mSv =$) 8% liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ, và, ở mức ($\approx 4,1 mSv / 20 mSv =$) 20% liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong năm năm liên tiếp.

Như vậy, điều kiện làm việc hiện tại ở vị trí đang được xét tới là vi phạm nghiêm trọng các tiêu chuẩn về an toàn bức xạ.

Muốn đưa nguồn bức xạ này vào ứng dụng trong sản xuất ở cơ sở X, thì nhất thiết phải tìm kiếm những biện pháp đảm bảo an toàn bức xạ cho nhân viên. Có thể đề xuất các giải pháp như sau:

- Tăng khoảng cách từ vị trí đặt nguồn bức xạ tới vị trí có người làm việc đang được xét tới;
- Giảm thời gian làm việc của nhân viên tại vị trí đang được xét tới;
- Đồng thời thực hiện cả hai biện pháp (a và b) nếu việc áp dụng riêng rẽ mỗi trong số hai biện pháp này chưa đáp ứng được yêu cầu về an toàn bức xạ;
- Nếu đã thực hiện đồng thời cả hai biện pháp (a và b) mà điều kiện làm việc vẫn chưa đạt mức an toàn, thì sẽ tiếp tục tìm kiếm giải pháp bảo vệ bổ sung.

♦ Vấn đề 2:

Sau khi nghiên cứu cách giải quyết vấn đề 1 của chuyên gia, giám đốc kỹ thuật của cơ sở X xem xét thấy có thể lùi vị trí có người thường xuyên làm việc ra cách nguồn xa nhất là thêm 2m nữa (tức là khoảng cách lớn nhất từ vị trí đặt nguồn tới nơi làm việc sẽ là 7m). Do thị trường đang có nhu cầu rất cao về mặt hàng của cơ sở X, nên ông ta lập tức cho thực hiện ngay biện pháp này, rồi cho sử dụng luôn nguồn bức xạ để tranh thủ thời gian sản xuất. Sau đó một thời gian cơ sở X mới báo cáo với cấp quản lý có thẩm quyền về an toàn bức xạ. Là chuyên gia về an toàn bức xạ, bạn sẽ giải quyết vấn đề này như thế nào?

Giải quyết vấn đề 2:

Trước hết, cần khẳng định rằng cơ sở X đã vi phạm nguyên tắc quản lý nhà nước về an toàn bức xạ khi đưa nguồn vào sử dụng mà chưa được cấp quản lý có thẩm quyền về an toàn bức xạ cho phép. Do vậy cơ sở này cùng những người có trách nhiệm liên quan sẽ phải bị xử lý theo luật định.

Vị trí có người làm việc thường xuyên được dịch từ điểm cách nguồn 5m ra xa thêm 2m nữa. Theo biểu thức (1.6-3), thì suất liều chiếu xạ tại vị trí làm việc cách nguồn 7m sẽ giảm xuống và có giá trị bằng:

$$P_{\text{chiếu xạ},0,(r_2=500+200\text{cm})} = P_{\text{chiếu xạ},0,(r_1=500\text{cm})} \cdot \left(\frac{500_{\text{cm}}}{500_{\text{cm}} + 200_{\text{cm}}} \right)^2 = 0,510 \cdot P_{\text{chiếu xạ},0,(r_1=500\text{cm})}$$

Liều hiệu dụng mà công nhân phải chịu đựng trong mỗi ngày làm việc tại vị trí làm việc mới này cũng giảm xuống theo cùng tỷ lệ với suất liều; do đó có giá trị bằng:

$$H_{\text{hd}} \approx 0,510 \cdot 4,1376 \text{ mSv} = 2,110 \text{ mSv}.$$

Kết quả này cũng có thể thu được trên cơ sở các biểu thức (6.1-14 và -15); vì theo đó:

$$H_{hd,2} = H_{hd,1} \cdot k_{H_{hd}} = H_{hd,1} \cdot \frac{k_A \cdot k_{\Delta}}{k_r^2} = H_{hd,1} \cdot \frac{1 \times 1}{\left(\frac{500_{cm} + 200_{cm}}{500_{cm}} \right)^2} = 0,510 \cdot H_{hd,1}$$

Trong đó $H_{hd,1}$ và $H_{hd,2}$ – giá trị liều hiệu dụng ở các vị trí tương ứng với khoảng cách $r_1 = 5m$ và $r_2 = 7m$.

Như vậy, liều thực tế trong mỗi ngày làm việc tại vị trí mới đã ở mức ($\approx 2/50 =$) 4% liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ, và, ở mức ($\approx 2/20 =$) 10% liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp. Tuy nhiên, rõ ràng là mức liều thực tế vẫn còn quá cao so với giới hạn cho phép. Muốn để nhân viên làm việc ở vị trí này, thì phải có biện pháp giảm liều xuống dưới giới hạn cho phép, cụ thể là thực hiện các giải pháp b), c) và d) đã nêu trong mục giải quyết vấn đề 1.

♦ Vấn đề 3:

Sau khi nghiên cứu cách giải quyết vấn đề 1 của chuyên gia, giám đốc kỹ thuật của cơ sở X xem xét thấy điều kiện diện tích (của cơ sở đã được xây lắp theo thiết kế cũ) buộc cơ sở phải giữ nguyên khoảng cách từ vị trí đặt nguồn tới vị trí có người thường xuyên làm việc là $r=5m$. Mặt khác, cơ sở lại có dư sức lao động, mà công lao động tính theo giờ là không cao so với lợi nhuận thu được. Sau khi xem xét kỹ lưỡng các khía cạnh kinh tế, cơ sở thấy rằng có thể giảm tối đa là 1/2 số giờ làm của mỗi ca sản xuất đồng thời tăng số ca làm việc trong mỗi ngày lên gấp 2 lần để bù lại. Bằng cách này cơ sở có thể thực hiện được giải pháp b) mà chuyên gia đã đề xuất. Giám đốc kỹ thuật của cơ sở X đề nghị bạn xem xét giúp để đánh giá được mức độ an toàn nếu thực hiện giải pháp giảm thời gian làm việc gần nguồn bức xạ như vừa nêu trên.

Giải quyết vấn đề 3:

Các biểu thức (6.1-13 và -14) cho thấy rằng trong điều kiện suất liều không thay đổi theo thời gian (tức là khi tỷ số $k_A/k_r^2 = 1$), nếu thời gian

chiếu xạ tăng lên hoặc giảm xuống bao nhiêu lần, thì liều bức xạ cũng sẽ thay đổi theo cùng chiều đúng bấy nhiêu lần. Trong trường hợp cụ thể vừa nêu trên, thời gian mà người công nhân bị chiếu xạ – cũng chính là thời gian làm việc của mỗi ca sản xuất – giảm xuống 2 lần (tức là $k_{\Delta t} = 1/2$). Do đó liều hiệu dụng mà người công nhân phải chịu đựng trong mỗi ngày làm việc cũng giảm xuống 2 lần, và, đạt giá trị bằng

$$H_{hd} = 4,1376 \text{ mSv}/2 = 2,0688 \text{ mSv}$$

Mức độ không an toàn ở đây cũng tương tự như đã nêu trong đánh giá khi giải quyết vấn đề 2. Tuy nhiên, muốn đảm bảo điều kiện làm việc an toàn cho nhân viên trong trường hợp này, thì do không thể tăng thêm khoảng cách từ nguồn tới người được nữa, nên phải thực hiện biện pháp d) đã nêu trong mục giải quyết vấn đề 1. Cách thức thực hiện biện pháp này được trình bày trong các mục từ 6.1.2.3. tới 6.1.2.5.

♦ Vấn đề 4:

Một cơ sở kinh tế thấy rõ vai trò to lớn của các phương pháp hạt nhân nên từ lâu đã áp dụng chúng trong một dây chuyền sản xuất. Trước đây, đối với những người làm việc tại vị trí gần nguồn bức xạ nhất, thì liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp ở mức 25 mSv. Nay, do nhu cầu tăng công suất của dây chuyền, cần phải tăng độ phóng xạ của nguồn cùng loại lên 15 lần so với trước đây. Trong khi đó, chỉ có thể tăng khoảng cách lên 2 lần, hoặc cùng lắm là 3 lần; còn thời gian chiếu xạ thì không thể giảm quá 3 lần. Nếu làm việc trong điều kiện dự kiến như vừa nêu trên, thì liệu có thể đảm bảo được mức độ an toàn bức xạ đối với nhân viên chuyên nghiệp hay không? Nếu không, thì biện pháp giải quyết là gì?

Giải quyết vấn đề 4:

a). Trường hợp có thể tăng khoảng cách được 3 lần:

Trên cơ sở các biểu thức (6.1-14 và -15), thu được số lần thay đổi của liều hấp thụ – và do đó cũng là của liều hiệu dụng – bằng:

$$k_{H_{hd}} = k_D = \frac{k_A \cdot k_{At}}{k_r^2} \quad (6.1-16)$$

Áp dụng cho trường hợp cụ thể đang được xét, thì được

$$k_{H_{hd}} = \frac{15 \cdot \frac{1}{3}}{3^2} = \frac{5}{9} = 0,5555$$

Nếu trước đây liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp ở mức 25 mSv, thì sau khi thay đổi các điều kiện theo đúng như dự kiến nêu trên, liều hiệu dụng sẽ giảm xuống thành:

$$H_{hd,2} = 0,5555 \cdot H_{hd,1} = 0,5555 \cdot 25 \text{ mSv} = 13,889 \text{ mSv}.$$

Giá trị liều hiệu dụng này $H_{hd,2} = 13,889 \text{ mSv}$ thoả mãn được đòi hỏi của tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ của quốc tế là không vượt quá liều hiệu dụng cho phép hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp là 20 mSv.

Như vậy, sau khi tăng khoảng cách lên 3 lần và kết hợp thực hiện các thay đổi khác đúng như dự kiến, thì vị trí làm việc mà ta quan tâm được coi là an toàn. Do đó, có thể cho phép nhân viên làm việc ở vị trí cách nguồn từ 3m trở ra xa hơn nữa, mà không nhất thiết phải làm bảo vệ bổ sung cũng được.

b). Trường hợp chỉ tăng khoảng cách được 2 lần:

Trên cơ sở các biểu thức (6.1-16), thu được số lần thay đổi của liều hấp thụ – và do đó cũng là của liều hiệu dụng – bằng:

$$k_{H_{hd}} = \frac{15 \cdot \frac{1}{3}}{2^2} = \frac{5}{4} = 1,25$$

Nếu trước đây liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp ở mức 25 mSv, thì sau khi các điều kiện thay đổi theo đúng như dự kiến nêu trên, liều hiệu dụng sẽ tăng lên thành:

$$H_{hd,2} = 1,25 \cdot H_{hd,1} = 1,25 \cdot 25 \text{ mSv} = 31,25 \text{ mSv}.$$

Như vậy, nếu lấy tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ của quốc tế làm chuẩn mực, thì cả trước và sau khi thay đổi điều kiện làm việc, liều hiệu dụng – tuy có thấp hơn so với liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ ($H_{hd,1n} = 50 \text{ mSv}$) – nhưng đều cao hơn giới hạn cho phép về liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp ($H_{hd,5n} = 20 \text{ mSv}$). Do đó, cần có biện pháp bảo vệ bổ sung để giảm liều, đảm bảo điều kiện an toàn cho nhân viên làm việc gần nguồn.

Trong trường hợp này, tổng hợp của cả ba nguyên tắc bảo vệ là nguồn yếu + cách xa + thời gian ngắn đều đã được khai thác hết khả năng thực tế. Do vậy, cần phải thực hiện biện pháp d) đã nêu trong mục *giải quyết vấn đề 1*. Cách thức thực hiện biện pháp này được trình bày trong các mục từ 6.1.2.3. tới 6.1.2.5.

♣ **Bốn vấn đề và cách giải quyết minh họa trên đây cho thấy:**

Bằng cách vận dụng 3 nguyên tắc là đảm bảo *nguồn yếu + cách xa + thời gian ngắn*, thì có thể đạt được tiêu chuẩn cơ bản về an toàn bức xạ trong một số trường hợp mà không cần tới biện pháp bảo vệ bổ sung nào. Song, trong nhiều trường hợp, do hoàn cảnh thực tế, việc kết hợp vận dụng 3 nguyên tắc này vẫn còn là chưa đủ, đòi hỏi phải thực hiện các biện pháp bảo vệ bổ sung. Những biện pháp bảo vệ đó được trình bày trong các mục dưới đây.

6.1.2.3. Tính bề dày lớp bảo vệ theo số lần làm yếu

Cần nhớ rằng: *Chỉ sau khi đã khai thác hết khả năng thực tế để vận dụng ba nguyên tắc bảo vệ an toàn là nguồn yếu + cách xa + thời gian ngắn, mà liều lượng bức xạ vẫn còn lớn hơn mức cho phép, thì mới sử dụng tới biện pháp làm tường chắn để bảo vệ.*

Theo biểu thức (1.6-2), thì một lớp tường chắn có thể làm yếu suất liều

gây bởi một chùm bức xạ định hướng theo quy luật sau đây:

$$P_d = B_p P_0 e^{-\mu_p d} = P_0 e^{-\mu_{p,hd} d} \quad (1.6-2)$$

trong đó B_p – hệ số tích lũy suất liều; μ_p và $\mu_{p,hd}$ – hệ số làm yếu và hệ số làm yếu hiệu dụng về suất liều bức xạ; d – bề dày của lớp tường chắn. Nếu chùm bức xạ này được gây bởi một nguồn đồng vị phóng xạ, thì suất liều P_0 có thể được xác định từ các biểu thức (6.1-10 đến -12).

Số lần làm yếu suất liều (k_p) bởi tường bảo vệ này được xác định theo tỷ số sau đây:

$$k_p = \frac{P_0}{P_d} = \frac{e^{\mu_p d}}{B_p} = e^{\mu_{p,hd} d} \quad (6.1-17)$$

Số lần làm yếu bức xạ phụ thuộc vào năng lượng E_γ của lượng tử, số thứ tự nguyên tố của vật liệu làm tường chắn, và, bề dày lớp chắn.

Nếu biết 3 thông số sau đây: năng lượng E_γ của lượng tử, vật liệu làm tường chắn, số lần làm yếu k_x cần đạt được, thì từ biểu thức (6.1-17) có thể tìm được bề dày cần thiết của lớp tường chắn như sau:

$$d = \frac{\ln k_x}{\mu_{x,hd}} \quad (6.1-18)$$

Trong một số tài liệu tra cứu người ta đã tính sẵn các giá trị bề dày d ứng với số lần làm yếu k_x đối với các vật liệu bảo vệ thường dùng và một số giá trị E_γ . **Các bảng từ B6.1-3 đến B6.1-8 (trong Phụ lục 3) tính sẵn bề dày cần thiết của tường bảo vệ làm bằng những vật liệu bảo vệ thường dùng như: nước, bê tông, sắt, chì, vonfram và uran đối với bức xạ gamma có E_γ trong khoảng từ 0,1 MeV tới 10 MeV.**

Dưới đây nêu một số thí dụ để minh họa.

♦ Vấn đề 5:

Để hoàn thành việc lắp ráp dây chuyền sản xuất của cơ sở XX, người ta dự kiến phải làm việc trong 6 phút bên cạnh một nguồn điểm phóng xạ ^{60}Co có độ phóng xạ $A = 7,0 \cdot 10^{12}$ Bq. Khoảng cách từ nguồn phóng xạ tới vị trí người làm việc này là $r = 0,8\text{m}$. Hãy xác định bề dày cần thiết của lớp tường bằng chì chắn giữa nguồn và người. Trong khi thiết kế, lấy hệ số an toàn (dự trữ) bằng 2.

Giải quyết vấn đề 5:

Theo bảng B6.1-2, thì nguồn phóng xạ ^{60}Co có hằng số-gamma ion hoá $K_\gamma = 12,93 \text{ R}/(\text{h} \cdot \text{mCi})$. Khi chưa có tường chắn, thì suất liều chiếu xạ tại vị trí cần làm việc có giá trị xác định theo biểu thức (6.1-10) và bằng:

$$\begin{aligned} P_{\text{chiếu xạ},0}(r) \left[\frac{\text{R}}{\text{h}} \right] &= A_{[\text{mCi}]} \cdot K_{\gamma \left[\frac{\text{R}}{\text{h} \cdot \text{mCi}} \right]} \cdot \left(\frac{1_{[\text{cm}]}}{r_{[\text{cm}]}} \right)^2 = \\ &= \frac{7,0 \cdot 10^{12} [\text{Bq}]}{3,7 \cdot 10^7 [\text{Bq/mCi}]} \cdot 12,93 \left[\frac{\text{R}}{\text{h} \cdot \text{mCi}} \right] = 3,822 \left[\frac{\text{R}}{\text{h}} \right] \end{aligned}$$

Liều hấp thụ được xác định theo biểu thức (6.1-13) và có giá trị bằng:

$$\begin{aligned} D_{(r=800\text{cm})} [\text{Rad}] &\approx 1 \left[\frac{\text{Rad}}{\text{R}} \right] \cdot P_{\text{chiếu xạ},0}(r) \left[\frac{\text{R}}{\text{h}} \right] \cdot \Delta t_{[\text{h}]} = \\ &= 1 \left[\frac{\text{Rad}}{\text{R}} \right] \cdot 3,822 \left[\frac{\text{R}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{6_{[\text{min}]}}{60_{[\text{min/h}]}} = 0,3822 [\text{Rad}] \end{aligned}$$

Lý luận tương tự như trong khi giải quyết vấn đề 1, thì thu được giá trị gần đúng của liều hiệu dụng (H_{hd}) mà bức xạ gây nên trong thời gian làm việc của nhân viên tại vị trí đang được quan tâm ở cơ sở XX là:

$$H_{\text{hd}} = \sum_{(c)} \omega_c H_c \approx D_{(r=800\text{cm})} \cdot Q \cdot 1 = 3,822_{[\text{mGy}]} \cdot 1 \cdot 1 = 3,822 \text{ mSv}$$

Giá trị liều hiệu dụng này ở mức $3,822\text{mSv}/50\text{mSv} \approx 8\%$ liều hiệu dụng trong một năm riêng lẻ bất kỳ, và, ở mức $3,822/20 \approx 19\%$ liều hiệu dụng hàng năm tính trung bình trong 5 năm liên tiếp.

Nếu coi rằng một nhân viên bức xạ chuyên nghiệp làm việc khoảng 300 ngày mỗi năm, thì liều hiệu dụng tính trung bình cho mỗi ngày trong một năm riêng lẻ bất kỳ có giá trị không được vượt quá $50\text{mSv}/300\text{ngày} = 166\mu\text{Sv}/\text{ngày}$.

Nếu coi việc làm đang được xét tới ở cơ XX là công việc thường ngày của nhân viên bức xạ chuyên nghiệp trong riêng năm đó (còn trong các năm tiếp theo thì thao tác được giảm bớt), thì liều hiệu dụng $3,822\text{mSv}/\text{ngày} \gg 166\mu\text{Sv}/\text{ngày}$. Do vậy, số lần làm yếu bức xạ cần thiết là bằng:

$$k_{\text{Hhd, at}=1} = 3,822\text{mSv} / 166\mu\text{Sv} = 23,02 \approx 25 \text{ lần.}$$

Do yêu cầu lấy hệ số an toàn (dự trữ) bằng 2 trong khi thiết kế, nên số lần làm yếu bức xạ cần phải đạt được trong thực tế sẽ là:

$$k_{\text{Hhd, at}=2} = 23 \times 2 \approx 25 \times 2 = 50 \text{ lần.}$$

Theo bảng tính sẵn B6.1-6 (xem phụ lục 3), để đạt được số lần làm yếu bằng 50 đối với bức xạ của nguồn ^{60}Co có năng lượng trung bình $\langle E_\gamma \rangle = 1,25\text{MeV}$, thì tường bảo vệ bằng chì cần phải có bề dày $d = 7,2 \text{ cm}$.

Liều hiệu dụng thực tế của nhân viên làm việc 6 phút mỗi ngày sau bức tường bảo vệ đó là $3,822\text{mSv} / k_{\text{Hhd, at}=2} = 3,822\text{mSv}/50 = 76,44\mu\text{Sv}/\text{ngày}$. Liều này chỉ cao hơn có 15% so với mức liều hiệu dụng hàng ngày tính trung bình trong 5 năm liên tiếp. Sự chênh lệch này có thể điều chỉnh được bằng cách giảm bớt 15% số ngày làm việc trong năm đó, hoặc giảm bớt liều hiệu dụng trong 4 năm tiếp theo.

♦ Vấn đề 6:

Có 3 phòng liền nhau được đánh số theo thứ tự là F1, F2 và F3. Phòng F2 nằm ở giữa hai phòng F1 và F3. Trong phòng F2, có một nguồn phóng xạ ^{60}Co được đặt trong bình bảo vệ bằng chì. Tuy nhiên, tại điểm M_1 và M_3 trong các phòng F1 và F3, máy đo suất liều chiếu xạ vẫn cho giá trị bằng $1\mu\text{R/s}$. Người lãnh đạo cơ sở bức xạ này không biết là như vậy đã an toàn hay chưa. Nếu là chưa – thì cần làm thêm lớp tường bảo vệ bằng bê tông dày bao nhiêu để đảm bảo điều kiện an toàn bức xạ cho người làm việc 6 tiếng mỗi ngày trong các phòng F1 và F3?

Giải quyết vấn đề 6:

Trong trường hợp điều kiện cân bằng điện tử được bảo đảm, theo biểu thức (1.4-5d) liên hệ các giá trị tương ứng giữa suất liều chiếu xạ và suất liều hấp thụ trong không khí (chương 1, mục 1.4.3), thì ở lân cận của các điểm M_1 và M_3 có suất liều hấp thụ trong tổ chức cơ thể gần bằng:

$$P \approx 1 \cdot 10^{-2} \frac{[(\text{Gy/s})/(\text{R/s})]}{1} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \frac{[\text{R/s}]}{1} = 1 \cdot 10^{-8} \frac{[\text{Gy/s}]}{1} = 0,036 \frac{[\text{mGy/h}]}{1}$$

Do đó, liều hiệu dụng trong 6 giờ làm việc mỗi ngày ở lân cận các điểm M_1 và M_3 sẽ bằng:

$$H_{\text{hd, 1 ngày}} \approx 0,036 \frac{[\text{mGy/h}]}{1} \cdot 6 \frac{[\text{h/ngày}]}{1} = 0,216 \frac{[\text{mSv/ngày}]}{1}$$

Hiện tại, liều hiệu dụng trong một năm làm việc bằng:

$$H_{\text{hd}} \approx 300 \frac{[\text{ngày}]}{1} \times H_{\text{hd, 1 ngày}} \approx 300 \times 0,216 \frac{[\text{mSv}]}{1} = 64,8 \text{ mSv}.$$

Giá trị này vượt quá mức tối đa cho phép đối với nhân viên bức xạ chuyên nghiệp xét theo cả hai mặt là:

- Liều hiệu dụng tính cho một năm riêng lẻ bất kỳ (có giá trị bằng $H_{\text{hd, 1n}} = 50 \text{ mSv}$);
- Liều hiệu dụng tính trung bình trong 5 năm liên tục (bằng $H_{\text{hd, 5n}} = 20 \text{ mSv}$).

Như vậy, rõ ràng điều kiện làm việc hiện tại trong các phòng F1 và F3 là

chưa an toàn. Muốn đảm bảo điều kiện làm việc an toàn cho nhân viên, thì cần phải làm thêm tường bảo vệ bổ sung chắn giữa người và nguồn.

Tường bảo vệ bổ sung này phải đồng thời thoả mãn được hai yêu cầu sau đây về số lần làm yếu bức xạ:

$$\left. \begin{aligned} k &\geq k_{1n}; & k &\geq k_{5n} \\ k_{1n} &= \frac{H_{hd}}{H_{hd,1n}} = \frac{H_{hd}}{50_{[mSv]}} \\ k_{5n} &= \frac{H_{hd}}{H_{hd,5n}} = \frac{H_{hd}}{20_{[mSv]}} \end{aligned} \right\} \quad (6.1-19)$$

trong đó k_{1n} và k_{5n} – số lần làm yếu bức xạ tương ứng với đòi hỏi về mức liều hiệu dụng tối đa cho phép là $H_{hd,1n}$ hoặc $H_{hd,5n}$.

Từ đó rút ra rằng, số lần làm yếu mà tường bảo vệ bổ sung cần đảm bảo được ít nhất cũng phải bằng giá trị lớn nhất trong số k_{1n} và k_{5n} . Trong trường hợp cụ thể trên đây, $k_{1n}=1,3 < k_{5n}=3,24 \approx 3,3$. Do vậy, tường bảo vệ bổ sung phải có số lần làm yếu bằng $k \geq k_{5n} \approx 3,3$ lần.

Theo yêu cầu, tường bảo vệ bổ sung được làm bằng bê tông. Giả sử bê tông này có khối lượng riêng $\rho=2,3 \text{ g/cm}^3$. Tra bảng B6.1-4 (phụ lục 3), thì thấy: đối với năng lượng $E_\gamma=1,25 \text{ MeV}$ (tương ứng với năng lượng trung bình của nguồn ^{60}Co), lớp bê tông dày 13,3cm cho số lần làm yếu bức xạ là $k_{13,3 \text{ cm}}=2$; còn lớp bê tông dày 24,6cm thì cho $k_{24,6 \text{ cm}}=5$. Muốn tìm bề dày bê tông ứng với số lần làm yếu $k=3,3$ trên cơ sở bảng B6.1-4, có thể sử dụng gần đúng bậc nhất bằng cách coi sự phụ thuộc $k(d)$ từ giá trị d_1 đến giá trị d_2 gần nhất ($d_1 < d_2$) là tuyến tính; rồi làm như sau.

• Trường hợp k_d có giá trị gần k_{d_1} hơn:

$$d = d_1 + \Delta d = d_1 + \Delta k \cdot \frac{d_2 - d_1}{k_{d_2} - k_{d_1}} \quad (6.1-20)$$

$$\Delta k = k_d - k_{d_1} \quad (6.1-21)$$

• Trường hợp k_d có giá trị gần k_{d_2} hơn:

$$d = d_2 - \Delta c' = d_2 - \Delta k \cdot \frac{d_2 - d_1}{k_{d_2} - k_{d_1}} \quad (6.1-20a)$$

$$\Delta k = k_{d_2} - k_d \quad (6.1-21a)$$

• Trường hợp $k_d \approx 0,5 \cdot (k_{d_1} + k_{d_2})$: Có thể áp dụng một trong hai trường hợp vừa nêu trên, hoặc lấy trung bình của hai kết quả đã tính cho hai trường hợp đó.

Áp dụng vào trường hợp cụ thể của vấn đề 6, thì xác định bề dày lớp tường bê tông (d cm) với số lần làm yếu bức xạ là $k=3,3$ như sau:

$$d_{[cm]} = 13,3_{[cm]} + \frac{1,3 \cdot (24,6_{[cm]} - 13,3_{[cm]})}{5 - 2} \approx 13,3_{[cm]} + 4,9_{[cm]} = 18,2_{[cm]}$$

Theo nguyên tắc quan trọng nhất trong tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ, thì tường bổ sung này phải đảm bảo sao cho liều lượng hiệu dụng không vượt quá giới hạn cho phép, và đồng thời còn phải là thấp nhất một cách hợp lý mà có thể đạt được. Vì vậy, nếu điều kiện thực tế (về tài chính và kỹ thuật) cho phép, thì nên làm tường dày hơn nữa để giảm liều xuống thấp hơn.

♦ Vấn đề 7:

Cơ sở bức xạ X muốn đưa một nguồn phóng xạ ^{137}Cs mới được trang bị vào sử dụng trong dây chuyền sản xuất. Theo lý lịch của nguồn phóng xạ này, thì suất liều ở cách nguồn 1m hiện nay có giá trị bằng 75mSv/h. Tại vị trí cần làm tường bảo vệ, có một bức tường làm bằng bê tông được xây dựng từ trước với bề dày là 26,1 cm và khối lượng riêng là 2,3 g/cm³, nay vẫn còn chắc chắn và tiếp tục sử dụng được.

Hãy xác định bề dày lớp bê tông cần xây thêm để bảo vệ nguồn phóng xạ ^{137}Cs này, sao cho suất liều ở cách nguồn 5m không vượt quá $40 \mu\text{Sv}$ trong mỗi ngày làm việc 6 giờ.

Giải quyết vấn đề 7:

Từ hai biểu thức (6.1-14a và -15), tính được suất liều ở vị trí cách nguồn 5m khi chưa có tường bảo vệ bằng:

$$P_{r_2=5m} = P_{r_1=1m} \cdot \frac{k_A}{k_r^2} = 75_{[\text{mSv/h}]} \cdot \frac{1}{\left(\frac{5}{1}\right)^2} = 3 \frac{\text{mSv}}{h} = 18 \frac{\text{mSv}}{6h}$$

Muốn suất liều tại vị trí này không vượt quá $P_{\text{max, cho phép}} = 40 \mu\text{Sv}/(6h)$ (mỗi ngày làm việc 6 giờ), thì cần làm yếu suất liều một số lần bằng:

$$k_P = \frac{P_{r_2=5m}}{P_{\text{max, cho phép}}} = \frac{18000 [\mu\text{Sv}]}{40 [\mu\text{Sv}]} = 450$$

Theo bảng B6.1-4 tính sẵn (phụ lục 3), thì thấy: tường bê tông tương ứng với $k_{P,1} = 200$ lần phải có bề dày bằng $d_1 = 49,5 \text{ cm}$, còn với $k_{P,2} = 500$ lần – phải có bề dày bằng $d_2 = 56,2 \text{ cm}$. Áp dụng các biểu thức (6.1-20a và -21a), thì được:

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_{d_2} - k_{d_1} = 500 - 450 = 50 \\ d &= d_2 - \Delta d = d_2 - \Delta k \cdot \frac{d_2 - d_1}{k_{d_2} - k_{d_1}} = \\ &= 56,2_{[\text{cm}]} - 50 \cdot \frac{56,2_{[\text{cm}]} - 49,5_{[\text{cm}]}}{500 - 200} = 56,2_{[\text{cm}]} - 1,1_{[\text{cm}]} = 55,1_{[\text{cm}]} \end{aligned}$$

Như vậy, tường bê tông tương ứng với số lần làm yếu suất liều $k_P = 450$ lần phải có bề dày bằng $d = 55,1 \text{ cm}$. Để đảm bảo an toàn, phải xây bổ sung thêm lớp tường bê tông có bề dày bằng: $d - d_0 = 55,1 \text{ cm} - 26,1 \text{ cm} = 29 \text{ cm}$.

♣ Trong thực tế:

Nhiều khi phải giải quyết những vấn đề thuộc loại sau đây:

Ứng với một số điều kiện cho trước (A , t , r , $H_{hd,1n}$ và $H_{hd,5n}$), người ta đã làm tường bảo vệ với bề dày d_0 cm. Sau đó, một hoặc vài trong số các điều kiện làm việc bị thay đổi. Do vậy phải thay đổi bề dày của tường bảo vệ để đảm bảo an toàn bức xạ phù hợp với các điều kiện làm việc mới. Bài toán thuộc loại này thường được giải quyết theo trình tự sau đây.

- 1). Xác định số lần làm yếu bổ sung cần thiết do có sự thay đổi các điều kiện làm việc.

Sự thay đổi của từng điều kiện riêng rẽ có đóng góp như sau:

- a. Nếu độ phóng xạ thay đổi k_A lần, thì hệ số làm yếu bức xạ cũng sẽ thay đổi theo cùng chiều và có giá trị bằng $k_X = k_A$; trong đó đại lượng X có thể là H_{hd} hay D hoặc P , hoặc $P_{chiếu xạ}$;
- b. Nếu thời gian làm việc thay đổi $k_{\Delta t}$ lần, thì hệ số làm yếu bức xạ cũng sẽ thay đổi theo cùng chiều và có giá trị bằng $k_X = k_{\Delta t}$;
- c. Nếu khoảng cách từ nguồn bức xạ tới vị trí người làm việc thay đổi k_r lần, thì hệ số làm yếu bức xạ sẽ có giá trị bằng $k_X = 1/k_r^2$;
- d. Nếu mức tối đa cho phép của đại lượng X (thí dụ: $H_{hd,1n}$ hoặc $H_{hd,5n}$) thay đổi một số lần bằng $k_{X, \max \text{ cho phép}}$, thì hệ số làm yếu bức xạ sẽ có giá trị bằng $k_X = 1/k_{X, \max \text{ cho phép}}$;
- e. Thông thường thì hệ số an toàn (tính dự phòng) được coi là bằng 1. Nếu hệ số an toàn thay đổi một số lần bằng $k_{an \text{ toàn}}$, thì hệ số làm yếu bức xạ cũng sẽ thay đổi theo cùng chiều và có giá trị bằng $k_X = k_{an \text{ toàn}}$.

Do vậy, sau khi thay đổi các điều kiện làm việc như vừa nêu trên, thì số lần làm yếu bức xạ cần phải đảm bảo là k_2 được xác định từ tỷ số dưới đây:

$$k_{21} \equiv \frac{k_2}{k_1} = \frac{k_A \cdot k_{\Delta t} \cdot k_{\text{an toàn}}}{k_r^2 \cdot k_{X,\max} \text{ cho phép}} \quad (6.1-22)$$

Trong đó số lần làm yếu bức xạ do thay đổi đại lượng Y là k_Y được xác định theo biểu thức (6.1-15); còn k_1 – số lần làm yếu bức xạ trước khi thay đổi các điều kiện làm việc.

- 2). Xác định số lần làm yếu bức xạ k_1 tương ứng với bề dày d_1 của tường bảo vệ ban đầu (trước khi thay đổi các điều kiện làm việc) bằng cách sử dụng các bảng tính sẵn;
- 3). Xác định số lần làm yếu bức xạ k_2 tương ứng với các điều kiện làm việc mới:

$$k_2 = k_{21} \cdot k_1 \quad (6.1-23)$$

- 4). Xác định bề dày d_2 của tường bảo vệ tương ứng với số lần làm yếu bức xạ k_2 (sử dụng các bảng tính sẵn);
- 5). Xác định bề dày Δd cần thay đổi (bổ sung hoặc có thể giảm bớt) của tường bảo vệ để đảm bảo làm việc an toàn trong điều kiện mới:

$$\Delta d = d_2 - d_1 \quad (6.1-24)$$

6.1.2.4. Tính bảo vệ bức xạ lượng tử có phổ phức tạp (Phương pháp vạch cạnh tranh)

Trong các mục trên mới chỉ xét tới trường hợp bảo vệ an toàn đối với bức xạ gamma đơn năng. Trong trường hợp phổ năng lượng của bức xạ lượng tử không phải là đơn năng, mà là phức tạp, thì phải sử dụng phương pháp “vạch cạnh tranh” để tính và thiết kế bảo vệ. Muốn sử dụng phương pháp này, thì phải biết phân bố liều $D(E_{\gamma 0})$ theo năng lượng của bức xạ – tức là phải biết phần đóng góp của các lượng tử thuộc mỗi nhóm hoặc mỗi vạch năng lượng trong liều lượng bức xạ gây bởi toàn phổ năng lượng của bức xạ, hoặc trong tương đương-gamma toàn phần của nguồn bức xạ.

Nội dung của phương pháp vách cạnh tranh như sau:

Giả sử, phổ bức xạ gồm các vạch (hoặc các nhóm) có năng lượng (hiệu dụng) là $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots$ gây nên suất liều tương ứng là $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots$ tại một vị trí M nào đó. Để bảo đảm an toàn cho người làm việc tại vị trí M này, các vạch bức xạ đó cần phải được làm yếu đi một số lần tương ứng là $k_1, k_2, \dots, k_i, \dots$. Nếu hình dung mỗi vạch này là được tạo bởi một nguồn bức xạ tách biệt; thì đòi hỏi phải có một lớp tường bảo vệ với bề dày bằng d_i tương ứng để làm yếu bức xạ của nó đi k_i lần. Vạch năng lượng đòi hỏi lớp tường bảo vệ dày nhất thì được gọi là vạch chính; bề dày của lớp tường này được ký hiệu là $d_{\text{vạch chính}}$. Vạch năng lượng đòi hỏi lớp tường bảo vệ dày thứ nhì, thì được gọi là vạch cạnh tranh; bề dày của lớp tường này được ký hiệu là $d_{\text{cạnh tranh}}$.

Sau khi phân bức xạ thuộc vạch chính đã đi qua lớp tường bảo vệ với bề dày là $d_{\text{vạch chính}}$, mà muốn nó bị tiếp tục làm yếu đi 2 lần nữa (hay nói cách khác – bị làm giảm đi một nửa nữa), thì tiếp sau lớp tường với bề dày $d_{\text{vạch chính}}$ cần có thêm lớp tường bảo vệ với “bề dày làm giảm đi một nửa” nữa (ký hiệu là $\Delta_{1/2 \text{ vạch chính}}$). Cũng tương tự như vậy, đối với vạch cạnh tranh – cần có thêm lớp tường với “bề dày làm giảm đi một nửa” nữa (ký hiệu là $\Delta_{1/2 \text{ cạnh tranh}}$). Trong số 2 giá trị $\Delta_{1/2 \text{ vạch chính}}$ và $\Delta_{1/2 \text{ cạnh tranh}}$, thì giá trị lớn nhất được ký hiệu là $\Delta_{1/2}$.

Khi đó, bề dày cần thiết (d) của tường bảo vệ tính cho toàn phổ năng lượng của bức xạ được xác định như sau:

$$d = \begin{cases} d_{\text{vạch chính}} & \text{khi } d_{\text{vạch chính}} - d_{\text{cạnh tranh}} > \Delta_{1/2} \\ d_{\text{cạnh tranh}} + \Delta_{1/2} & \text{khi } d_{\text{vạch chính}} - d_{\text{cạnh tranh}} \leq \Delta_{1/2} \end{cases} \quad (6.1-25)$$

Vai trò của vạch chính và vạch cạnh tranh là không cố định, mà có thể thay đổi giữa tất cả các vạch, tùy thuộc vào số lần cần phải làm yếu bức xạ của toàn nguồn (nếu phổ năng lượng của nguồn là không thay đổi).

- ♣ **Cách sử dụng phương pháp vách cạnh tranh được minh họa qua một số ví dụ cụ thể dưới đây.**

♦ Vấn đề 8:

Giả sử, một nguồn điểm bức xạ lượng tử gây nên suất liều là 2,8 mSv/h tại vị trí M. Bảng B.vd-8A dưới đây cho thấy phân bố suất liều theo năng lượng của bức xạ. Cần làm tường bảo vệ bằng bê tông dày bao nhiêu để đảm bảo an toàn bức xạ cho nhân viên làm việc thường xuyên mỗi ngày 6 giờ tại vị trí M? Người phụ trách cơ sở bức xạ này đề nghị bạn thiết kế tường bảo vệ với hệ số an toàn bằng 1,5.

Bảng B.vd-8A. Phân bố suất liều theo năng lượng của bức xạ gamma

E_i, MeV	$n_i (\%)$	Chú thích
0,1	19,0	E_i – năng lượng hiệu dụng của nhóm (hoặc “vạch”);
0,5	5,0	
0,7	63,0	
1,5	3,0	n_i – đóng góp của “vạch” năng lượng i trong suất liều bức xạ gây bởi toàn phổ bức xạ của nguồn.
2,2	10,0	
Cộng=	100%	

Giải quyết vấn đề 8:

Nếu coi rằng một nhân viên bức xạ chuyên nghiệp làm việc khoảng 300 ngày mỗi năm, thì liều hiệu dụng trong mỗi ngày tính trung bình trong 5 năm liên tiếp là không được vượt quá $20\text{mSv}/300\text{ngày} = 66,7 \mu\text{Sv}/\text{ngày}$.

Tại vị trí M, khi chưa có tường bảo vệ mà suất liều đã là 2,8 mSv/h, nên số lần làm yếu bức xạ cần thiết để đảm bảo an toàn cho nhân viên làm việc thường xuyên mỗi ngày 6 giờ là:

$$k = \frac{P_M}{P_{\text{max cho phép}}} \cdot k_{\text{an toàn}} = \frac{2,8_{[\text{mSv/h}]} \cdot 6_{[\text{h/ngày}]}}{66,7 \cdot 10^{-3}_{[\text{mSv/ngày}]}} \cdot 1,5 \cong 378 \quad (6.1-26)$$

Số lần làm yếu riêng phần tính cho mỗi “vạch” i được xác định như sau:

$$K_i = k \cdot n_i \quad (6.1-27)$$

Sử dụng bảng tính sẵn B6.1-4 (phụ lục 3), sau đó áp dụng các biểu thức (6.1-20, -21, -20a và -21a như trong khi giải quyết vấn đề 6), thì tìm được bề dày bê tông d_i tương ứng để làm yếu vạch i đi K_i lần. Kết quả này được nêu trong bảng B.vd-8B. Bảng này cho thấy: vạch có năng lượng $E_\gamma=2,2\text{MeV}$ đòi hỏi lớp tường bảo vệ dày nhất (bằng 56,47cm), nên nó là “vạch chính”; còn vạch có năng lượng $E_\gamma=0,7\text{MeV}$ đòi hỏi lớp tường bê tông bảo vệ dày thứ nhì (bằng 51,37cm), do vậy nó là “vạch cạnh tranh”.

Bảng B.vd-8B. Bề dày bê tông (d_i) cần thiết để làm yếu vạch i đi K_i lần

$E_\gamma, \text{ MeV}$ (1)	$n_i (\%)$ (2)	$K_i=k.n_i$ (3)	$d_i, \text{ cm bê tông}$ (4)	Ghi chú (5)
0,1	19,0	71,82	11,3	Vạch cạnh tranh
0,5	5,0	18,9	29,45	
0,7	63,0	238,14	51,37	
1,5	3,0	11,34	11,14	
2,2	10,0	37,8	56,47	
Tổng = 100%				Vạch chính

Lại sử dụng bảng tính sẵn B6.1-4 (và các biểu thức (6.1-20, -21, -20a và -21a) nếu cần), thì tìm được lớp làm giảm một nửa của vạch chính và vạch cạnh tranh ở bề dày tương ứng của chúng:

$$\Delta_{1/2, i} = d_{K_i^*} - d_{K_i} \quad (6.1-28)$$

với

$$K_i^* = 2.K_i \quad (6.1-29)$$

Trong trường hợp cụ thể đang được xét tới, thì:

$$d_{\text{vạch chính}, 2K_i} = d_{\text{vạch chính}, 75,6} = 65,04 \text{ cm};$$

$$d_{\text{cạnh tranh}, 2K_i} = d_{\text{cạnh tranh}, 476,28} = 56,77 \text{ cm}.$$

$$\text{Do đó: } \Delta_{1/2 \text{ vạch chính}} = (65,04 - 56,47) \text{ cm} = 8,57 \text{ cm};$$

$$\Delta_{1/2 \text{ cạnh tranh}} = (56,77 - 51,37) \text{ cm} = 5,40 \text{ cm}.$$

Vì $\Delta_{1/2 \text{ cạnh tranh}} < \Delta_{1/2 \text{ vạch chính}}$, nên $\Delta_{1/2} = \Delta_{1/2 \text{ vạch chính}} = 8,57 \text{ cm}.$

Cuối cùng, vì $d_{\text{vạch chính}} - d_{\text{cạnh tranh}} = (56,47 - 51,37)\text{cm} = 5,1\text{ cm} < \Delta_{1/2}$, nên theo biểu thức (6.1-25), tường bảo vệ bằng bê tông phải có bề dày bằng:

$$d = d_{\text{cạnh tranh}} + \Delta_{1/2} = 51,37\text{cm} + 8,57\text{ cm} = 59,94\text{ cm} \approx 60\text{ cm}.$$

♦ **Vấn đề 9:**

Sau khi được biết kết quả giải quyết vấn đề 8 vừa nêu trên, cơ sở bức xạ đã xem xét lại khả năng bố trí sử dụng mặt bằng tại hiện trường, đồng thời cân nhắc trên cơ sở kết hợp với đòi hỏi giảm liều bức xạ xuống mức thấp nhất một cách hợp lý mà lại có thể chấp nhận được về mặt kinh tế. Cuối cùng, cơ sở bức xạ đề nghị bạn giúp giải quyết lại vấn đề 8 nhưng với hệ số an toàn bằng 3 (tức là tăng gấp đôi so với trước đây).

♦ **Vấn đề 10:**

Bạn hãy giải quyết vấn đề 8 trong trường hợp có sự thay đổi đồng thời của 2 điều kiện sau đây: *liều hiệu dụng trong mỗi ngày là tính trung bình trong 1 năm riêng lẻ bất kỳ nên không được vượt quá $50\text{mSv}/300\text{ngày} = 166,7\mu\text{Sv}/\text{ngày}$; và, lấy hệ số an toàn $k_{\text{an toàn}} = 1,0$ trong khi thiết kế.*

(Khi giải quyết vấn đề, hãy chú ý sự thay đổi vai trò của các vạch trong phổ năng lượng của bức xạ).

6.1.2.5. Tính bảo vệ gần đúng theo các lớp làm giảm một nửa

Trong trường hợp cần tính nhanh bề dày của tường bảo vệ bức xạ lượng tử, thì có thể sử dụng phương pháp tính gần đúng bề dày bảo vệ theo lớp làm giảm một nửa. Nội dung của phương pháp này như sau.

Tường bảo vệ với bề dày d bằng 1 lớp làm giảm một nửa ($d = 1 \cdot \Delta_{1/2}$) có tác dụng làm yếu bức xạ đi 2 lần so với trước đó, tức là nó đảm bảo số lần làm yếu bức xạ $k_{\Delta_{1/2}}$ bằng:

$$k_{\Delta_{1/2}} = \frac{k_2}{k_1} = 2 \quad (6.1-30)$$

Trong đó k_1 và k_2 – số lần làm yếu bức xạ trước và sau khi có lớp bảo vệ làm giảm một nửa ($d=1.\Delta_{1/2}$).

Nếu tường bảo vệ dày gấp n lần lớp làm giảm một nửa – tức là nó có bề dày bằng:

$$d = n.\Delta_{1/2} \quad (6.1-31)$$

thì nó đảm bảo số lần làm yếu bức xạ bằng:

$$k \geq 2^n \quad (6.1-32)$$

Bảng B6.1-9 cho thấy tương quan giữa số lớp làm giảm một nửa (n) và số lần làm yếu bức xạ bởi tường bảo vệ (k).

Bảng B6.1-9. Tương quan giữa số lớp làm giảm một nửa (n) và số lần làm yếu bức xạ bởi tường bảo vệ (k)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
							≈ 125	≈ 250	≈ 500	≈ 1000

Tường bảo vệ dày gấp 10 lần lớp làm giảm một nửa ($d=10.\Delta_{1/2}$), thì đảm bảo sẽ làm yếu bức xạ đi $k_{(n=10)}=2^{10} \approx 1000$ lần.

Nếu đòi hỏi phải làm yếu bức xạ một số lần bằng

$$k = m.1000 \approx 2^x . 2^{10} = 2^{x+10} = 2^n \quad (6.1-33)$$

thì số lớp làm giảm một nửa cần phải đảm bảo là:

$$n \approx x + 10 \quad (6.1-34)$$

Do đó tường bảo vệ cần có bề dày bằng:

$$d \approx n.\Delta_{1/2} \approx (x + 10).\Delta_{1/2} \quad (6.1-35)$$

Thí dụ, nếu cần số lần làm yếu $k=4000=2^2 \cdot 2^{10}$ lần, thì $n=2+10=12$; do đó tường cần có bề dày bằng $d \approx 12 \cdot \Delta_{1/2}$.

Như vậy, nếu biết số lần cần làm yếu bức xạ k và lớp làm giảm một nửa $\Delta_{1/2}$ bằng một loại vật liệu bảo vệ chọn trước đối với bức xạ lượng tử có năng lượng E_γ xác định, thì đánh giá được bề dày d cần thiết của tường bảo vệ.

**Bảng B6.1-10. Bề dày lớp làm giảm một nửa (cm)
của một số vật liệu bảo vệ phụ thuộc năng lượng bức xạ lượng tử (MeV)**

Vật liệu bảo vệ	Năng lượng của lượng tử E_γ									
	0,5 MeV		0,6 MeV		0,8 MeV		1,0 MeV		1,25 MeV	
	chùm hẹp	chùm rộng	chùm hẹp	chùm rộng	chùm hẹp	chùm rộng	chùm hẹp	chùm rộng	chùm hẹp	chùm rộng
Nước	7,2	11,0	7,7	11,0	8,8	12,0	9,8	12,0	11,0	14,0
Bê tông	3,4	4,7	3,7	5,0	4,2	5,8	4,6	6,4	5,2	7,3
Sắt	1,05	1,5	1,15	1,7	1,3	2,0	1,5	2,1	1,7	2,4
Chì	0,4	0,5	0,55	0,6	0,70	0,85	0,95	1,0	1,1	1,1

Bảng B6.1-10 cho thấy bề dày lớp làm giảm một nửa của một số vật liệu bảo vệ thường dùng đối với bức xạ lượng tử trong các vùng năng lượng được ứng dụng rộng rãi nhất trong thực tế hiện nay. Trong bảng B6.1-10, bề dày lớp làm giảm một nửa có giá trị $\Delta_{1/2}$ thu được trên cơ sở sử dụng các bảng tính sẵn từ B6.1-3 đến B6.1-6 (phụ lục 3), kết hợp với biểu thức định nghĩa (6.1-30). Khi áp dụng biểu thức (6.1-30), đối với trường hợp chùm rộng bức xạ, thì lấy $k_2=10$ và $k_1=5$; còn trong trường hợp chùm hẹp bức xạ, thì lấy k_1 và k_2 lớn hơn.

Bảng B6.1-11 cho bề dày lớp làm giảm một nửa của một số vật liệu bảo vệ đối với lượng tử năng lượng thấp.

Bảng B6.1-12 cho các giá trị gần đúng của bề dày lớp làm giảm một nửa và bề dày lớp làm giảm mười lần đối với bức xạ Roentgen sơ cấp.

Bảng B6.1-11. Bề dày lớp làm giảm một nửa (cm)
của một số vật liệu bảo vệ đối với lượng tử năng lượng thấp (keV)

Vật liệu bảo vệ	Năng lượng của lượng tử E_γ , keV				
	20 keV	27,4 keV	140 keV	364 keV	551 keV
Nước	0,95	1,597	4,530	6,245	7,220
Nhôm	0,0747	0,174	1,796	2,646	3,094
Chì	0,0007	0,0015	0,0256	0,2190	0,4021

Bảng B6.1-12. Bề dày (gần đúng) của các lớp
làm giảm một nửa và làm giảm mười lần
đối với bức xạ Roentgen sơ cấp, cm

Vật liệu bảo vệ	Bề dày lớp bảo vệ (tính với hệ số an toàn bằng 2)	Hiệu điện thế giữa anốt và katốt của ống phát Roentgen, kV				
		100 kV	150 kV	200 kV	250 kV	300 kV
Bê tông (2,35 g/cm ³)	Làm giảm một nửa	1,5	2,3	2,8	2,9	3,1
	Làm giảm mười lần	5,1	7,6	9,1	9,7	10,2
Chì	Làm giảm một nửa	0,02	0,03	0,05	0,09	0,17
	Làm giảm mười lần	0,07	0,1	0,17	0,30	0,56

Với những giá trị năng lượng không được nêu trong các bảng từ B6.1-10 đến B6.1-12, nhưng nằm trong dải năng lượng mà các bảng đó phủ kín, thì có thể tính gần đúng bề dày lớp làm giảm một nửa $\Delta_{1/2}(E)$ bằng cách coi bề dày $\Delta_{1/2}$ là hàm phụ thuộc tuyến tính vào năng lượng E trong khoảng $E_1 < E < E_2$. Tương tự như đã làm khi giải quyết vấn đề 6, ở đây cũng có 3 trường hợp:

- Trường hợp E có giá trị gần E_1 hơn:

$$\Delta_{1/2}(E) = \Delta_{1/2}(E_1) + \Delta E \cdot \frac{\Delta_{1/2}(E_2) - \Delta_{1/2}(E_1)}{E_2 - E_1} \quad (6.1-36.a)$$

$$\Delta E = E - E_1 \quad (6.1-37.a)$$

- Trường hợp E có giá trị gần E_2 hơn:

$$\Delta_{1/2}(E) = \Delta_{1/2}(E_2) - \Delta E \cdot \frac{\Delta_{1/2}(E_2) - \Delta_{1/2}(E_1)}{E_2 - E_1} \quad (6.1-36.b)$$

$$\Delta E = E_2 - E \quad (6.1-37.b)$$

- Trường hợp $E \approx 0,5.(E_1 + E_2)$: Có thể áp dụng một trong hai trường hợp vừa nêu trên, hoặc lấy trung bình của cả hai kết quả đó.

Chú ý: Phương pháp tính gần đúng bề dày bảo vệ theo lớp làm giảm một nửa hoặc theo lớp làm giảm mười lần có ưu điểm là cho kết quả nhanh. Tuy nhiên, bề dày bảo vệ tính được theo cách này thì lớn hơn so với kết quả của các phương pháp sử dụng trực tiếp các bảng tính sẵn (như đã giới thiệu trong các mục 6.1.2.3 và 6.1.2.4 ở trên). Số lần làm yếu cần thiết càng lớn, thì sự chênh lệch này càng đáng kể; do đó sự đảm bảo hiệu quả kinh tế thấp.

♦ Vấn đề 11:

Cần tính gần đúng và thiết kế nhanh một tường bảo vệ bằng vật liệu thích hợp để làm giảm suất liều bức xạ gây bởi nguồn ^{60}Co xuống $1,25.10^8$ lần trong hai trường hợp sau đây:

- Diện tích mặt bằng được sử dụng không bị hạn chế. (Gợi ý: có thể làm tường bảo vệ dày, dùng vật liệu làm yếu bức xạ không mạnh nhưng rẻ tiền).
- Diện tích mặt bằng eo hẹp. (Gợi ý: nên làm tường bảo vệ mỏng, cần dùng vật liệu làm yếu bức xạ mạnh; có thể là đắt tiền hơn so với ở trường hợp a.).

♦ Vấn đề 12:

Ngày 23 tháng 10 năm 2015, công trường XXX đang tập nập, làm việc khẩn trương. Người ta phải gấp rút tiến hành kiểm tra khuyết tật của một số mối hàn quan trọng bằng bức xạ gamma, trong khi đó dụng cụ đo liều lượng bức xạ tại công trường lại vừa bị hỏng chưa kịp sửa chữa thay thế.

Biết rằng trong lý lịch của nguồn phóng xạ đang được sử dụng có ghi rõ: “Nguồn phóng xạ ^{60}Co được sản xuất ngày 01 tháng 7 năm 2009 với độ phóng xạ $A_0 = 3,7 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$ ”.

Giám đốc kỹ thuật của công trường đề nghị bạn thiết kế bảo vệ, sao cho nhóm nhân viên kiểm tra không phá huỷ mẫu trên công trường có thể làm việc an toàn trong 6 giờ mỗi ngày. Khi thiết kế, lấy hệ số an toàn bằng 2.

6.1.2.6. Bảo vệ an toàn đối với bức xạ Roentgen sơ cấp

Hiện nay, ở nước ta các máy phát Roentgen đang được sử dụng rộng rãi, cả trong các cơ sở y tế cũng như trong nhiều lĩnh vực kinh tế và trong các phòng thí nghiệm nghiên cứu. Vì vậy, việc tính toán để thiết kế bảo vệ an toàn đối với bức xạ Roentgen sơ cấp đang là một đòi hỏi thực tế cần thiết.

Bảng B6.1-13 cho thấy bề dày cần thiết của lớp tường bằng chì hoặc bằng bê tông (có mật độ là $\rho_0 = 2,35 \text{ g/cm}^3$) để làm giảm suất liều gây bởi bức xạ Roentgen sơ cấp xuống tới giá trị cho phép.

Cũng có thể sử dụng bảng B6.1-13 để tính bề dày tường bảo vệ khi tường được làm bằng gạch hoặc bê tông nhưng có mật độ $\rho_x \neq \rho_0$. Trong trường hợp này, tường bảo vệ làm bằng vật liệu không chuẩn phải có bề dày khối $d_x[\text{g/cm}^2] = d_x[\text{cm}] \cdot \rho_x[\text{g/cm}^3]$ đúng bằng bề dày khối của tường bảo vệ làm bằng vật liệu chuẩn $d_0[\text{g/cm}^2] = d_0[\text{cm}] \cdot \rho_0[\text{g/cm}^3]$ nếu ta muốn chúng làm yếu bức xạ như nhau. Như vậy, phải thoả mãn yêu cầu sao cho:

Bảng B6.1-13. (Phần I). Bề dày lớp bảo vệ bằng chì (mm) và bê tông (cm; với $\rho=2,35 \text{ g/cm}^3$) phụ thuộc vào hiệu điện thế $U_{\max}(\text{kV})$ và hệ số F

Hệ số F	Hiệu điện thế $U_{\max}$											
	75 kV	100 kV	125 kV	150 kV	175 kV	200 kV	250 kV	300 kV				
	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông
0,001	---	---	0,5	---	1	---	1,5	---	2	---	---	---
0,002	---	0,5	0,5	---	1,25	---	2	---	3	---	---	---
0,003	0,5	0,5	0,75	---	1,5	---	2,5	---	4	---	---	---
0,005	0,5	0,75	1	---	1,75	---	3	---	4,5	---	---	---
0,01	0,75	1	1,25	10	2	17	3,5	20	6	26	---	---
0,02	1	1	1,5	14	2	17	4	20	7,2	29	---	---
0,03	1	1,25	1,5	14	2,5	21	4,5	22	8,3	31	---	---
0,05	1,25	1,5	1,75	15	3	24	5	27	10	34	---	---
0,1	1,25	1,5	1,75	16	3,5	27	5,75	30	11,5	37	---	---
0,2	1,5	1,75	2	16	3	25	6,5	34	13	40	---	---
0,3	1,5	2	2,25	18	4	31	7	35	13,5	41	---	---

$$d_x[\text{cm}] \cdot \rho_x[\text{g/cm}^3] = d_0[\text{cm}] \cdot \rho_0[\text{g/cm}^3] \quad (6.1-38)$$

Trong trường hợp này, bề dày bảo vệ cần thiết được xác định bằng cách lấy giá trị $d_0[\text{cm}]$ thu được theo bảng B6.1-13 tính cho bê tông có $\rho = \rho_0$, rồi nhân với tỷ số $\rho_0/\rho_x = 2,35/\rho_x[\text{g/cm}^3]$:

$$d_x[\text{cm}] = d_0[\text{cm}] \cdot \frac{\rho_0[\text{g/cm}^3]}{\rho_x[\text{g/cm}^3]} \quad (6.1-39)$$

Bảng B6.1-13. (Phần 2). Bề dày lớp bảo vệ bằng chì (mm) và bê tông (cm; với $\rho=2,35 \text{ g/cm}^3$) phụ thuộc vào hiệu điện thế U_{max} (kV) và hệ số F

Hệ số F	Hiệu điện thế U_{max}														
	75 kV	100 kV		125 kV		150 kV		175 kV		200 kV		250 kV		300 kV	
	Chì	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông	Chì	Bê tông
0,3	1,5	2	16	2,25	18	2,75	23	3,25	27	4	31	7	35	13,5	41
0,5	1,75	2,25	17	2,5	20	3	25	3,5	28	4,5	32	7,5	37	14,5	43
1	2	2,5	18	2,75	22	3,25	27	3,75	30	5	35	8,5	40	16,5	46
2	2,25	2,75	21	3	24	3,5	29	4,25	33	5,5	38	9,5	43	18	49
3	2,5	2,75	----	3,25	----	4	----	4,5	----	5,75	----	10	----	19	----
5	2,75	3	22	3,5	30	4,25	34	5	36	6	40	10,5	46	20	52
10	2,75	3,25	24	3,75	32	4,5	36	5,25	39	6,5	43	11,5	49	21,5	56
20	3	3,5	25	4	34	4,75	40	5,75	43	7	46	12	52	23,5	60
30	3	3,5	----	4,25	----	5	----	6	----	7,5	----	13	----	24,5	----
50	3,25	3,75	27	4,5	36	5,25	42	6,5	45	7,75	48	13,5	57	25,5	62
100	3,5	4	30	4,75	38	5,5	43	6,75	47	8,25	50	14	58	27	65

Khi xác định bề dày của tường bảo vệ theo bảng B6.1-13 này, cần sử dụng hệ số F được tính theo biểu thức sau đây:

$$F = \frac{I_{[mA]} \cdot t_{x,[h/tuần]} \cdot D_{\text{max cho phép}}}{R_{[m]}^2 \cdot T_{\text{qu},[h/tuần]} \cdot D_x} \quad (6.1-40)$$

với: I [mA] – cường độ dòng điện trong ống phát Roentgen; t_x [h/tuần] – số giờ chiếu xạ thực tế trong một tuần; T_{qu} [h/tuần] – số giờ chiếu xạ trong một tuần theo quy ước; R [m] – khoảng cách từ ống phát Roentgen tới đối tượng cần bảo

vệ; $D_{\max}$ cho phép – liều chiếu xạ tối đa cho phép trong một tuần đối với người thuộc phạm trù cần được bảo vệ; D_x – liều thực tế cần đảm bảo để tạo điều kiện an toàn cho người thuộc phạm trù được bảo vệ này.

Mỗi ống phát Roentgen đều có những đặc trưng kỹ thuật nhất định, trong đó bao gồm giá trị danh định về hiệu điện thế của ống phát và giá trị danh định về cường độ dòng điện chạy trong mạch anốt của ống phát. Khi tính hệ số F theo biểu thức (6.1-40) để xác định bề dày của tường bảo vệ, cần sử dụng hai giá trị danh định vừa nêu trên của từng ống phát Roentgen cụ thể.

Khi tính toán thiết kế bề dày tường bảo vệ, nên lấy hệ số dự trữ an toàn với giá trị bằng 2, tức là nên tính bề dày tăng thêm lên một lớp bằng lớp làm giảm một nửa (xem bảng B6.1-12).

Bức xạ hãm của ống Roentgen có phổ liên tục và giá trị năng lượng cực đại được quyết định bởi chênh lệch điện thế giữa anốt và katốt của ống. Do vậy, trong trường hợp tổng quát và kinh tế nhất thì nên dùng phương pháp vạch cạnh tranh để tính bề dày tường bảo vệ bức xạ Roentgen sơ cấp (xem mục 6.1.2.4).

Chú ý: Để giảm giá thành của lớp bảo vệ và sử dụng không gian được hiệu quả, thì khi tính toán thiết kế bảo vệ cho các thiết bị phát Roentgen, cần tính cả tác dụng bảo vệ của các lớp tường, trần, sàn và cửa che chắn hiện có.

♦ Vấn đề 13:

Tại một cơ sở X, người ta sử dụng máy phát Roentgen với hiệu điện thế $U_{\max} = 150 \text{ kV}$ và dòng điện $I = 10 \text{ mA}$. Tính trung bình, mỗi tuần máy làm việc tới 36 giờ. Phòng đặt máy không rộng. Cách bố trí thích hợp nhất là để Anốt của ống phát Roentgen được đặt hướng về phía tường và cách tường này một khoảng bằng $R = 2 \text{ m}$. Tường dày 10cm, được xây bằng gạch thông thường với mật độ $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$. Người phụ trách cơ sở này đề nghị bạn cho biết: Người ngồi làm việc ở sát phía sau tường này có an toàn hay không? Nếu không thì phải làm tường bảo vệ bổ sung như thế nào?

Chú ý khi giải quyết vấn đề:

Trước tiên phải tìm lời đáp cho câu hỏi có tính nguyên tắc là: *Người cần được bảo vệ trong trường hợp đang xem xét là thuộc phạm trù nhân viên bức xạ hay dân thường?* Sau đó mới tư vấn cho người phụ trách cơ sở sử dụng bức xạ.

6.2. BẢO VỆ AN TOÀN ĐỐI VỚI BỨC XẠ NƠTRÔN

Tương tác của nơtrôn với vật chất có thể làm sinh ra bức xạ thứ cấp là các hạt có điện tích hoặc/và lượng tử có năng lượng khá cao. Ngay trong môi trường bảo vệ đơn giản và thường dùng (có giá thành thấp) là nước hoặc paraffin, thì nơtrôn sau khi bị làm chậm tới năng lượng chuyển động nhiệt có thể tham gia vào phản ứng ${}^1\text{H}(n,\gamma)$ với tiết diện $\sigma = 0,335$ barn làm phát ra lượng tử gamma có năng lượng $E_\gamma = 2,23$ MeV. Nơtrôn trong vùng năng lượng $E_n = 0 \div 9$ MeV khi tham gia vào phản ứng $\text{Al}(n,\gamma)$ có thể giải phóng các lượng tử có năng lượng $E_{\gamma,\text{max}}$ đạt tới 7,7 MeV; còn trong phản ứng $\text{Fe}(n,\gamma)$ thì $E_{\gamma,\text{max}} \approx 10$ MeV... Do đó trong tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn đối với các nguồn bức xạ nơtrôn, phải chú ý tới việc bảo vệ an toàn tất cả các loại bức xạ thứ cấp được sinh bởi tương tác của nơtrôn với môi trường. Như vậy, tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn đối với các nguồn bức xạ nơtrôn là phức tạp hơn nhiều so với việc tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn đối với các nguồn bức xạ lượng tử. Mục 6.1 đã giới thiệu những phương pháp tính toán và thiết kế thường dùng đối với các nguồn bức xạ lượng tử. Vì vậy, trong mục 6.2 chỉ giới thiệu các phương pháp tính toán bảo vệ bức xạ nơtrôn sơ cấp.

Điều kiện bảo vệ thực tế có thể liên quan tới những yếu tố như: các thành phần liều bức xạ gamma và bức xạ nơtrôn riêng rẽ là bao nhiêu, vị trí đặt nguồn, kích thước của không gian được sử dụng để bảo vệ an toàn bức xạ, khối lượng của hệ thống bảo vệ, thời hạn sử dụng hệ thống bảo vệ (dài hạn hay tạm thời),

khoảng cách từ nguồn tới vị trí có người gần nhất và thời gian có người ở vị trí đó; những người này là nhân viên bức xạ chuyên nghiệp hay là dân thường, phương tiện vật chất và khả năng tài chính hiện có để thực hiện phương án bảo vệ .v.v. Còn mục đích tính toán và thiết kế bảo vệ có thể là để phục vụ vận chuyển nguồn (bằng đường thủy, đường bộ hay đường hàng không?); để phục vụ sản xuất lâu dài, khám hay chữa bệnh, hoặc phục vụ đào tạo hay nghiên cứu. Khi áp dụng, cần xem xét, tổng hợp đầy đủ các điều kiện thực tế cụ thể để thoả mãn những đòi hỏi cơ bản và đạt được những mục tiêu đã đặt ra mà sử dụng được các nguồn lực hiện có một cách hiệu quả nhất, với kinh phí ít nhất một cách hợp lý.

6.2.1. Tính phân bố nơtron trong không gian theo phương pháp độ dài luỹ biến

Việc phân tích kết quả tính toán và thực nghiệm về sự làm yếu mật độ thông lượng nơtron trong môi trường cho thấy rằng: sau khi đã loại trừ sự phụ thuộc vào các yếu tố hình học, thì có thể biểu diễn sự làm yếu mật độ thông lượng nơtron bằng hàm số ở dạng sau đây:

$$\Phi(r) = ae^{-\frac{r}{L}} \quad (6.2-1)$$

Trong biểu thức này, $\Phi(r)$ – mật độ thông lượng nơtron tại điểm cách nguồn phát nơtron một khoảng bằng r ; L – độ dài luỹ biến của mật độ thông lượng nơtron; a – hệ số.

Độ dài luỹ biến của mật độ thông lượng nơtron là bề dày của lớp bảo vệ làm cho mật độ thông lượng nơtron giảm đi một số lần bằng $e = 2,71828\dots$

Trong trường hợp tổng quát, độ dài luỹ biến phụ thuộc vào những yếu tố như: năng lượng ban đầu của nơtron (E_n), bề dày bảo vệ, hình học và cách bố trí sắp xếp các lớp bảo vệ, năng lượng của nơtron được ghi nhận .v.v.

Đối với nơtron được giải phóng trong phản ứng phân chia hạt nhân mà có

động năng $E_n > (2 \div 3) \text{MeV}$, thì biểu thức (6.2-1) được áp dụng với độ chính xác cao khi khoảng cách r từ nguồn đến đầu dò có giá trị trong khoảng $2\lambda \leq r \leq (15 \div 20)\lambda$, với λ – bước dài quang chạy tự do của nơtron trong môi trường.

Trong phần lớn các trường hợp, độ dài lũy biến chỉ không phụ thuộc vào bề dày bảo vệ trong một phạm vi nhất định của khoảng cách r . Do đó *độ dài lũy biến chỉ được xác định cho từng khoảng bề dày bảo vệ Δr_i nhất định*, mà sự làm yếu mật độ thông lượng nơtron được mô tả bằng biểu thức (6.2-1) với giá trị $L = L_i$ nhất định và không thay đổi trong giới hạn của khoảng Δr_i đó. Vì vậy, sự làm yếu nơtron trong các trường hợp này sẽ được biểu diễn như sau:

$$\Phi(r) = a e^{-\sum_{(i)} \frac{\Delta r_i}{L_i}} \quad (6.2-2)$$

$$r = \sum_{(i)} \Delta r_i$$

Biểu thức (6.2-2) khác (6.2-1) ở ba điểm sau đây.

Một là, bề dày của toàn bộ lớp bảo vệ lấp đầy khoảng cách r từ nguồn phát nơtron tới đầu dò trong trường hợp này được chia thành nhiều khoảng liên tiếp, tương ứng với các lớp bảo vệ mỏng hơn, mỗi lớp có bề dày bằng Δr_i .

Hai là, nếu như trong biểu thức (6.2-1) chỉ sử dụng có một giá trị độ dài lũy biến L duy nhất và tương ứng với toàn bộ bề dày bảo vệ bằng khoảng cách r từ nguồn phát nơtron tới đầu dò, thì trong biểu thức (6.2-2) mỗi lớp bảo vệ với bề dày bằng Δr_i tương ứng với một giá trị độ dài lũy biến nhất định của nó là L_i .

Ba là, nếu như trong biểu thức (6.2-1) ở số mũ chỉ có một thừa số thể hiện tỷ số “*bề dày bảo vệ trên độ dài lũy biến mật độ thông lượng nơtron*” tương ứng với toàn bộ bề dày bảo vệ r , thì trong biểu thức (6.2-2) số mũ này là tổng của nhiều thừa số với cùng ý nghĩa, nhưng trong đó mỗi thừa số thứ i chỉ tương ứng với lớp bảo vệ thứ i có bề dày bằng Δr_i .

Độ dài lũy biến mật độ thông lượng nơtron trong một số môi trường được

cho trong các bảng B6.2-1 và B6.2-2a.

Bảng B6.2-1. Độ dài lủy biến mật độ thông lượng neutron với động năng E_n (của lò phản ứng hạt nhân) trong một số môi trường, g/cm ²														
Môi trường	Bề dày của lớp bảo vệ, g/cm ²	Độ dài lủy biến mật độ thông lượng neutron động năng E_n [MeV], g/cm ²												
		D_n ($E_n > 0,33$ MeV)	0,7 - 1,5 MeV	1,5 - 2,5 MeV	2 - 10 MeV	> 2 MeV	2,5 - 4 MeV	3 - 10 MeV	> 3 MeV	4 - 10 MeV	5 - 10 MeV	> 5 MeV	7 - 10 MeV	> 7 MeV
Nước	10-30	T:8,1	6,7	6,8	7,6	T:8,1	7,3	8,1	7,7	8,9	9,6	T:9,2	10,1	T:11,1
	30-60	T:8,9	8,1	8,55	9,1	T:9,3	8,55	9,3	9,3	10,0	10,4	10,0	11,2	T:11,2
	60-100	T:9,3	9,65	9,75	10,6	T:10,7	9,8	10,6	T:10,7	11,1	11,3	11,1	12,6	T:12,1
	0-100	T:10	8,1	8,3	9,0		8,55	9,3		10,0	10,4		11,3	
Graphit	0-50		17,0	17,5	18,9		16,1	20,9		23,0	23,0		20,0	
	50-100		18,4	19,7	20,0		18,7	21,7	24	23,4	24		21,7	
	100-150	21,1*	21,2	21,7	23,0	21,7	21,7	22,4	26,6	24,0	25,4		23,4	27,1
	150-220	26,8*	24,6	26,0	26,4	24,3	25,4	26,4	26,3	26,4	27,8		25,6	
Polyetylen	0-220	T:24	20,4	21,2	22,0		20,5	22,9		24,2	25,0		22,7	
	0-28		5,20	5,33	5,78		5,70	6,20	T:6,9	6,57	6,70	T:7,15	7,35	T:8,4
	28-55		6,07	6,15	6,67		6,44	6,95	T:7,6	7,22	7,45	T:8,2	7,86	T:8,9
	55-83		6,85	6,85	7,63		6,89	7,81	T:8,1	7,90	8,08	T:8,75	8,36	T:9,9
Berili (Be)	0-83		6,07	6,16	6,70		6,34	7,00		7,22	7,45		7,86	
	0-16		11,3	11,5	13,1		12,0	13,6		13,6	13,3		13,3	
Bê tông	0-100		25,0	25,5	25,5		25,0	25,7		26,7	27,4		27,5	
	100-200		25,5	26,7	26,4		25,5	26,9		27,6	28,6		28,6	
	200-340		26,5	27,6	27,2		26,4	27,9		28,2	29,2		29,6	

Chú thích: * - Trường hợp môi trường bảo vệ là graphit với bề dày Δr , bảng 100-150 và 150-220 g/cm², thì độ dài lủy biến hiệu hấp thụ neutron trên ngưỡng được tính với năng lượng ngưỡng $E_{ng}=0,5$ MeV.

Bảng B6.2-2a. Độ dài lũy biến mật độ thông lượng neutron động năng E_n của nguồn đồng vị điểm đẳng hướng trong một số môi trường, g/cm²

Môi trường	Năng lượng neutron, E_n [MeV]	Bề dày của lớp bảo vệ, g/cm ²	Độ dài lũy biến mật độ thông lượng neutron động năng E_n [MeV], g/cm ²			
			Neutron nhiệt và chậm	D_n ($E_n > 0,33$ MeV)	$E_n > 2$ MeV	$E_n > 3$ MeV
Nước	2	60		<u>T: 4.5</u>		
	4	90		<u>T: 6.2</u>		
	6	120		<u>T: 9.3</u>		
	8	120		<u>T: 11.2</u>		
	10	120		<u>T: 12.6</u>		
	14	120		<u>T: 14.2</u>		
	14-15	125	<u>14.2</u>	<u>T: 14.5</u>		
	Po- α -B	120		<u>T: 6.3 (*)</u>		
	Po- α -Be	120		<u>T: 10.3 (*)</u>		
	Ra- α -Be	120		<u>T: 9.8 (*)</u>		
	Pu- α -Be	120		<u>T: 10.5 (*)</u>		
Graphit	4,0	118			<u>19</u>	
	14,1	80-110				<u>38,0</u>
	14,9	185			<u>32,9</u>	
Berili	3	35			<u>13,8</u>	
	15	70 - 85			<u>18,9</u>	
Pôlyetylen	4,0	60			<u>5,05</u>	
	14,9	69			<u>12,8</u>	
Thuỷ tinh hữu cơ (C ₅ H ₈ O ₂)	4,0	70			<u>7,32</u>	
	14,9	85			<u>17,7</u>	
Nhôm	4,0	135			<u>38,1</u>	
	14,9	135			<u>42,6</u>	
Chì	4,0	565			<u>169</u>	
	14,9	620			<u>173</u>	

Ghi chú: (*) – Kết quả tính đối với liều neutron toàn phần trong môi trường nước vô hạn.

Trong các bảng B6.2-1 và B6.2-2a, giá trị thu được khi đo đạc thực nghiệm hoặc tính toán được thực hiện cho môi trường vô hạn thì được gạch dưới, giá trị thực nghiệm của độ dài lữ biến được in bình thường, giá trị thu được do tính toán thì có chữ "T:" ở liền trước.

Độ dài lữ biến mật độ thông lượng nơtron của lò phản ứng hạt nhân trong một số môi trường được cho trong bảng B6.2-1. (Trong bảng này, riêng đối với độ dài lữ biến liệu hấp thụ nơtron trên ngưỡng ở trong môi trường bảo vệ là graphit với bề dày các lớp Δr_i bằng $100 \div 150$ và $150 \div 220$ g/cm², thì ngưỡng có giá trị là $E_{ng}=0,5\text{MeV}$). Độ dài lữ biến mật độ thông lượng nơtron của nguồn đồng vị điểm đẳng hướng trong một số môi trường được cho trong bảng B6.2-2a. Trong bảng này, riêng đối với độ dài lữ biến liệu nơtron nhanh D_n ($E_{ng} > 0,33$ MeV) của các nguồn nơtron đồng vị (Po- α -B, Po- α -Be, Ra- α -Be và Pu- α -Be) trong môi trường nước vô hạn, thì được tính cho liệu nơtron toàn phần.

*Bảng B6.2-2b. Độ dài lữ biến liệu nơtron
của một số nguồn đồng vị trong môi trường nước*

<i>Nguồn nơtron đồng vị</i>	<i>Độ dài lữ biến liệu nơtron L, cm</i>	<i>Nguồn nơtron đồng vị</i>	<i>Độ dài lữ biến liệu nơtron L, cm</i>
Po- α -B	6,3	Po- α -Be	10,3
Ra- α -Be	9,8	Pu- α -Be	10,5

Ghi chú:

- 1). Độ dài lữ biến liệu nơtron là bề dày L của lớp bảo vệ làm cho liệu nơtron D_n giảm đi e lần tại điểm cách nguồn phát nơtron một khoảng bằng r:

$$D_n(r) = ae^{-\frac{r}{L}}$$

với a – hệ số.

- 2). Trong trường hợp tính lớp bảo vệ bằng paraffin, cần nhớ rằng độ dài lữ biến liệu nơtron trong môi trường nước ($L_{\text{nước}}$) và trong paraffin (L_{paraffin}) có giá trị khác nhau. Thí dụ, đối với nguồn Po- α -B, thì tỷ số $L_{\text{nước}}/L_{\text{paraffin}} = 1,2$; còn đối với nguồn Po- α -Be, thì tỷ số $L_{\text{nước}}/L_{\text{paraffin}} = 1,16$.

Bảng B6.2-2b cho thấy độ dài lũy biến *liều* nơtrôn của một số nguồn nơtrôn đồng vị trong môi trường nước.

Nói chung, đoạn đầu của đường cong làm yếu bức xạ nơtrôn – khi khoảng cách kể từ nguồn tới điểm cần quan tâm nằm trong vùng $r \sim (2 \div 3)L$ – có thể khác hàm mũ. Tính tới sự khác biệt đó, người ta có thể đưa thêm vào biểu thức (6.2-1 hoặc -2) một hệ số f . Trong trường hợp này, đối với một nguồn điểm nơtrôn đẳng hướng đơn năng chẳng hạn, biểu thức (6.2-1) sẽ được thay thế bằng biểu thức sau đây:

$$\Phi(r) = \frac{S_0 f}{4\pi r^2} e^{-\frac{r}{L}} \quad (6.2-1a)$$

trong đó S_0 – công suất của nguồn nơtrôn [n/s].

Giá trị của hệ số f đối với thông lượng nơtrôn có động năng $E_n > E_{ng} = 1,5$ MeV trong một số môi trường được cho trong bảng B6.2-3.

Bảng B6.2-3. Giá trị của hệ số f đối với thông lượng nơtrôn có động năng $E_n > E_{ng} = 1,5$ MeV trong một số môi trường

Môi trường	Động năng của nơtrôn E_n						
	2 MeV	4 MeV	6 MeV	8 MeV	10 MeV	14 MeV	14,9 MeV
Nhôm		3,5					2,5
Nước		5,4	4,6	4,2	3,3	2,9	3,0
Hydrô	3,5	3,5	3,5	2,8	2,8	2,8	
Graphit		1,4					1,3
Thuỷ tinh hữu cơ		2,1					2,1
Pôlyetylen		2,4					2,5
Chì		4,0					2,9

6.2.2. Tính bảo vệ theo phương pháp tiết diện loại

Việc tính toán chính xác các tường bảo vệ nơtrôn nhanh dày lại gồm nhiều lớp là khá phức tạp. Để việc tính toán bảo vệ được đơn giản, người ta đưa

ra phương pháp tiết diện loại. Phương pháp này cho phép tính bảo vệ trong nhiều trường hợp khác nhau, mà chỉ cần dựa trên kết quả thực nghiệm với một lớp bảo vệ.

Phương pháp tiết diện loại được sử dụng rộng rãi để tính suất liều nơtron nhanh trong các môi trường chứa hydro. Đây là một trong số những phương pháp đơn giản nhất và có hiệu quả hơn cả để giải quyết phần lớn các bài toán liên quan đến sự truyền nơtron qua lớp bảo vệ.

Trong phương pháp tiết diện loại, tất cả các quá trình tương tác của nơtron với hạt nhân của các nguyên tố nặng (trừ tán xạ dưới góc nhỏ) trong môi trường chứa hydro mà có kích thước (khối lượng) đủ lớn, thì đều được coi như quá trình hấp thụ nơtron – tức là, coi mỗi sự kiện tương tác đều loại bớt một nơtron ra khỏi chùm bức xạ ban đầu. Điều này đồng nghĩa với việc coi “tiết diện loại nơtron ra khỏi chùm bức xạ ban đầu” ($\Sigma_{\text{loại}}$) xấp xỉ bằng tiết diện tương tác hiệu dụng toàn phần ($\Sigma_{\text{toàn phần}}$). Để cho ngắn gọn, dưới đây cụm từ “tiết diện loại nơtron ra khỏi chùm bức xạ ban đầu” sẽ được gọi tắt là “tiết diện loại”.

Phương pháp tiết diện loại dựa trên cơ sở sau đây.

Trong phần lớn các môi trường chứa hydro mà thoả mãn một số điều kiện nhất định, thì sự làm giảm suất liều nơtron nhanh bởi lớp vật liệu nặng (với bề dày là d) được đưa thêm vào môi trường bảo vệ có thể được biểu diễn bằng một hàm mũ đơn giản dạng $\exp(-\Sigma_{\text{loại}} d)$.

Để đánh giá tiết diện loại nơtron có động năng bằng E , có thể sử dụng công thức gần đúng sau đây:

$$\Sigma_{\text{loại}}(E) = \Sigma_{\text{toàn phần}}(E) - 2\pi \int_0^{\pi} \Sigma_s(E, \theta) \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (6.2-3)$$

trong đó $\Sigma_{\text{toàn phần}}(E)$ – tiết diện toàn phần; $\Sigma_s(E, \theta)$ – tiết diện tán xạ đàn hồi vi phân của nơtron động năng E dưới góc θ .

Nói chung, tiết diện loại phụ thuộc vào năng lượng của nơtron và các điều kiện thực nghiệm như cách đưa thành phần nặng vào môi trường chứa hydro, dạng hình học và phân bố góc của bức xạ nơtron từ nguồn phát ra .v.v.

Tuỳ theo cách đưa thành phần nặng vào môi trường bảo vệ (tường bảo vệ), có thể phân biệt hai trường hợp sau đây:

- Tiết diện loại nơtron trong môi trường không đồng nhất (– khi lớp vật liệu nặng được đưa vào trong môi trường chứa hydro, sao cho nó nằm ở gần sát nguồn nơtron);
- Tiết diện loại nơtron trong môi trường đồng nhất (– khi thành phần nặng phân bố đều trong môi trường chứa hydro).

Hai mục 6.2.2.1 và 6.2.2.2 dưới đây sẽ lần lượt trình bày từng trường hợp vừa nêu trên cho môi trường chứa hydro. Mục 6.2.2.3 giới thiệu khả năng sử dụng tiết diện loại để tính bảo vệ khi môi trường không chứa hydro.

6.2.2.1. Tiết diện loại nơtron trong môi trường không đồng nhất

Giả sử, có một môi trường không đồng nhất được hợp bởi hai thành phần là: a)- Lớp vật liệu nặng có bề dày bằng d ; và b)- Môi trường chứa hydro (thí dụ, nước). Nguồn phát nơtron (S) nằm sát lớp vật liệu nặng, còn đầu dò nơtron được đặt trong môi trường chứa hydro và cách nguồn một khoảng bằng r (như được thể hiện trên hình H6.2-1), sao cho lớp chất chứa hydro có bề dày bằng $r-d$ không nhỏ hơn giá trị $R_{\min}$ nào đó ($r-d \geq R_{\min}$).

$R_{\min}$ là bề dày tối thiểu của lớp chất chứa hydro, mà khi tăng thêm bề dày $r-d$ của lớp chất này thì tiết diện loại trở nên có giá trị $\Sigma_{\text{loại}}$ hầu như không thay đổi. Giá trị $\Sigma_{\text{loại}}$ này phụ thuộc vào chất chứa hydro; còn giá trị $R_{\min}$ thì đặc trưng cho khối lượng tối thiểu của môi trường chứa hydro, sao cho ảnh hưởng nhiễu loạn gây bởi lớp vật liệu nặng là không đáng kể. Bề dày tối thiểu $R_{\min}$ phụ thuộc vào những yếu tố như: động năng ban đầu của nơtron do nguồn phát ra (E), loại vật liệu nặng, năng lượng ngưỡng hiệu dụng của đầu dò nơtron

($E_{\text{ngưỡng}}$). Khi tăng động năng E và giảm ngưỡng $E_{\text{ngưỡng}}$, thì bề dày tối thiểu R_{min} sẽ tăng lên. Trong trường hợp ngược lại, thì bề dày tối thiểu R_{min} sẽ giảm xuống.

Bảng B6.2-4. Bề dày tối thiểu của lớp chất chứa hydro (R_{min}) và năng lượng ngưỡng của đầu dò neutron ($E_{\text{ngưỡng}}$) trong trường hợp neutron có động năng ban đầu $E=15 \text{ MeV}$

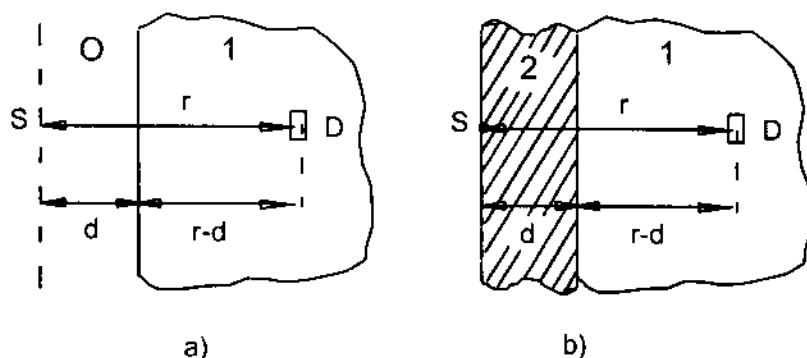
<i>Loại đầu dò neutron</i>	<i>$E_{\text{ngưỡng}}$, MeV</i>	<i>R_{min}, cm</i>
- Ống đếm tỷ lệ chứa khí BF_3	0	65
- Buồng ion hoá sử dụng phản ứng phân chia hạt nhân ^{232}Th	1,1	15÷20
- Đầu dò sử dụng phản ứng hạt nhân $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	11,7	5

Bảng B6.2-4 cho thấy sự phụ thuộc của bề dày tối thiểu R_{min} của chất chứa hydro (là nước) vào năng lượng ngưỡng của đầu dò neutron trong trường hợp neutron có động năng ban đầu $E=15 \text{ MeV}$.

Để làm đơn giản việc tính toán suất liều neutron gây nên tại vị trí đặt đầu dò (D), có thể tạm hình dung như sau. Ban đầu, trước khi đưa lớp vật liệu nặng vào “tường bảo vệ”, thì phần không gian từ nguồn S tới môi trường chứa hydro là một “khoảng trống” (O) có bề dày bằng d (hình H6.2-1a). Sau đó, lớp vật liệu nặng được đưa vào để lấp đầy “khoảng trống” này (hình H6.2-1b). Toàn bộ phần vật chất lấp đầy vùng từ nguồn tới vị trí D tạo thành “tường bảo vệ”.

Như vậy, ban đầu, khi chưa đưa lớp vật liệu nặng vào “tường bảo vệ”, thì suất liều neutron tại vị trí D có giá trị bằng $P_H(r-d)$ – chính là suất liều neutron trong môi trường chứa hydro khi giữa nguồn S và môi trường này có một “khoảng trống” O với bề dày bằng d . Việc đưa lớp vật liệu nặng vào lấp đầy khoảng trống này sẽ làm cho suất liều tại vị trí D bị yếu đi (giảm xuống) với hệ số bằng y .

Hệ số làm yếu y phụ thuộc vào những yếu tố như: phổ năng lượng của neutron do nguồn phát ra, kích thước hình học và bản chất vật lý của lớp vật liệu



Hình H6.2-1. Môi trường không đồng nhất làm yếu bức xạ neutron.
 Ký hiệu: a) – hình dung tường bảo vệ khi chứa có lớp vật liệu nặng; b) – tường bảo vệ trong môi trường không đồng nhất; S – nguồn phát neutron; D – vị trí đặt đầu dò neutron; O – khoảng trống; 1 – môi trường chứa hydro; 2 – lớp vật liệu nặng.

nặng. Xét về vật liệu, thì lớp vật liệu nặng có thể là: a)- chỉ gồm một lớp đơn nguyên tố (tức là được làm từ một nguyên tố nặng); b)- gồm nhiều lớp đơn nguyên tố có bản chất vật lý khác nhau; c)- lớp vật liệu nặng có thành phần hoá học phức tạp. Xét dưới góc độ phổ năng lượng của neutron, thì neutron do nguồn phát ra có thể là: a)- đơn năng; hoặc b)- có phổ năng lượng bất kỳ.

Dưới đây lần lượt xét 4 trường hợp sau:

- 1). Nguồn phát neutron đơn năng và lớp vật liệu nặng là đơn nguyên tố.
- 2). Nguồn phát neutron đơn năng và lớp vật liệu nặng có thành phần hoá học phức tạp.
- 3). Nguồn phát neutron có phổ năng lượng bất kỳ.
- 4). Neutron là sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân.

Trường hợp 1:

Notrôn do nguồn phát ra là đơn năng, còn lớp vật liệu nặng là đơn nguyên tố

• Nếu tường bảo vệ notrôn là lớp vật liệu nặng chỉ gồm có một lớp đơn nguyên tố thì có thể biểu diễn hệ số làm yếu suất liều (y) bằng cách sử dụng tiết diện loại như sau:

$$y = e^{-\Sigma_{\text{loại}} d} \quad (6.2-4)$$

với d – bề dày của lớp vật liệu nặng [cm]; $\Sigma_{\text{loại}}$ – tiết diện loại notrôn bởi vật liệu nặng [cm^{-1}].

Kết quả là: có thể xác định suất liều notrôn $P(r,d)$ tại vị trí đặt đầu dò trong môi trường không đồng nhất như sau:

$$P_{(r,d)} = P_{H,(r-d)} \cdot y = P_{H,(r-d)} \cdot e^{-\Sigma_{\text{loại}} d} \quad (6.2-5)$$

Biểu thức (6.2-5) cho thấy: có thể xác định tiết diện loại bằng thực nghiệm nếu đo được suất liều notrôn $P(r,d)$ và $P_H(r-d)$ theo các sơ đồ trên hình H6.2-1 khi thoả mãn điều kiện $r-d \geq R_{\min}$. Trong trường hợp này, có biểu thức cho tiết diện loại như sau:

$$\Sigma_{\text{loại}} = \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{P_{H,(r-d)}}{P_{(r,d)}} \quad (6.2-6)$$

Trong thực nghiệm, việc đo suất liều notrôn ở những vị trí cách xa nguồn thường gặp nhiều trở ngại do dụng cụ đo suất liều có độ nhạy thấp. Tuy nhiên, có thể xác định được các suất liều notrôn nhanh $P(r,d)$ và $P_H(r-d)$ thông qua việc đo mật độ thông lượng notrôn nhiệt $\Phi(r,d)$ và $\Phi_H(r-d)$; đó là vì với một độ chính xác tương đối cao, có thể coi rằng: hai đường biểu diễn sự phụ thuộc vào khoảng cách nguồn–đầu dò d của mật độ thông lượng notrôn nhiệt và của suất liều notrôn nhanh là song song với nhau, đặc biệt là ở những khoảng cách xa nguồn. Trong trường hợp này, có thể xác định tiết diện loại theo biểu thức sau đây:

$$\Sigma_{\text{loại}} = \frac{1}{d} \ln \frac{\Phi_{H,(r-d)}}{\Phi_{(r,d)}} \quad (6.2-7)$$

Thực nghiệm với nơtron đơn năng và các nơtron sinh ra trong phản ứng phân chia hạt nhân cho thấy: tiết diện loại không phụ thuộc vào bề dày của lớp vật liệu nặng, ít nhất là trong phạm vi bề dày d không lớn quá tám lần quãng chạy tự do λ của nơtron ($d \leq 8\lambda$).

• Nếu tường bảo vệ nơtron là lớp vật liệu nặng gồm nhiều tấm đơn nguyên tố có bản chất vật lý khác nhau, thì dù chúng được sắp xếp theo mọi cách khác nhau, nhưng quy luật làm yếu suất liều nơtron đều có thể biểu diễn được ở dạng sau đây:

$$P_{(r, \sum_{(i)} d_i)} = P_{H, (r - \sum_{(i)} d_i)} \cdot \prod_{(i)} y_i = P_{H, (r - \sum_{(i)} d_i)} \cdot e^{-\sum_{(i)} \Sigma_{\text{loại}, i} \cdot d_i} \quad (6.2-8)$$

trong đó d_i và $\Sigma_{\text{loại}, i}$ – bề dày và tiết diện loại tương ứng của mỗi tấm vật liệu i .

Biểu thức (6.2-8) (dùng khi tường bảo vệ có nhiều lớp vật liệu nặng đơn nguyên tố với bản chất vật lý khác nhau) và biểu thức (6.2-5) (dùng khi tường bảo vệ chỉ có một lớp vật liệu đơn nguyên tố duy nhất) có hai điểm khác nhau:

- Hệ số làm yếu suất liều (y) trong biểu thức (6.2-5) chỉ gồm có một thành phần duy nhất đặc trưng cho sự làm yếu suất liều bởi lớp vật liệu nặng được làm từ một nguyên tố duy nhất. Còn trong biểu thức (6.2-8), thì nó là tích của nhiều hệ số y_i , mà mỗi hệ số y_i đặc trưng cho sự làm yếu suất liều bởi riêng tấm (lớp) vật liệu nặng được làm từ một nguyên tố i . Do vậy, số mũ trong (6.2-5) có giá trị là $\Sigma_{\text{loại}} d$, còn trong (6.2-8) thì bằng tổng của nhiều số hạng $\Sigma_{\text{loại}, i} \cdot d_i$ đặc trưng cho mỗi tấm (lớp) vật liệu nặng i .
- Một thông số quan trọng quyết định suất liều nơtron trong môi trường chứa hydro là bề dày của lớp chất này kể từ phía nguồn tới vị trí đặt đầu dò nơtron. Trong biểu thức (6.2-5), bề dày này là $r-d$;

còn trong (6.2-8) thì nó bằng hiệu giữa khoảng cách r từ nguồn tới vị trí D và tổng bề dày d_i của tất cả các lớp vật liệu nặng gộp lại.

Trường hợp 2: *Notrôn do nguồn phát ra là đơn năng, còn lớp vật liệu nặng có thành phần hoá học phức tạp*

Trong trường hợp này, tiết diện loại của vật liệu được tính như sau:

$$\Sigma_{\text{loại}} [\text{cm}^{-1}] = \rho \cdot \sum_{(j)} \theta_j \cdot \Sigma_{\text{loại},j} \quad (6.2-9)$$

với ρ [g/cm^3] – mật độ của lớp vật liệu nặng; θ_j – hàm lượng của nguyên tố j trong vật liệu nặng ($\theta_j = m_j / \rho$, trong đó m_j – khối lượng tính bằng gam của nguyên tố j có trong 1cm^3 của lớp vật liệu nặng); $\Sigma_{\text{loại},j}$ [cm^2/g] – tiết diện loại của nguyên tố j trong vật liệu nặng. Trong biểu thức (6.2-9), tổng được lấy cho tất cả các nguyên tố j có trong thành phần của lớp vật liệu nặng.

Trong trường hợp tương đối tổng quát – khi lớp vật liệu nặng gồm có nhiều lớp i với những thành phần hoá học phức tạp khác nhau, thì sự làm yếu suất liều notrôn cũng có thể biểu diễn được ở dạng (6.2-8), nhưng trong đó tiết diện loại của từng lớp i cần được lấy theo biểu thức (6.2-9). Cụ thể như sau:

$$\begin{aligned} P_{(r, \sum d_i)}^{(i)} &= P_{H, (r - \sum d_i)}^{(i)} \cdot e^{-\sum_{(i)} \Sigma_{\text{loại},i} d_i} = \\ &= P_{H, (r - \sum d_i)}^{(i)} \cdot e^{-\sum_{(i)} d_i \cdot \rho_i \cdot \sum_{(j)} \theta_j \cdot \Sigma_{\text{loại},j}} \end{aligned} \quad (6.2-10)$$

Các biểu thức từ (6.2-4) đến (6.2-10) để tính suất liều theo tiết diện loại như vừa nêu trên chỉ áp dụng được trong trường hợp notrôn do nguồn phát ra là đơn năng hoặc có phổ năng lượng nhất định.

Trường hợp 3: *Nguồn phát notrôn có phổ năng lượng bất kỳ*

Trong trường hợp này, suất liều notrôn tại vị trí đặt đầu dò D (ở trong môi trường chứa hydro, đồng thời nằm sau lớp vật liệu nặng) được xác định bằng

cách lấy tích phân theo toàn phổ năng lượng của neutron đối với các biểu thức tính suất liều như (6.2-5), (6.2-8) và (6.2-10) vừa nêu trên.

Thí dụ, khi vật liệu nặng chỉ là một lớp đơn nguyên tố, thì cần lấy tích phân về phải của biểu thức (6.2-5) theo toàn phổ năng lượng của neutron:

$$\begin{aligned} P_{(r,d)} &= \int_{(E_0)} F_{(E_0)} \cdot P_{H,(r-d),E_0} \cdot Y_{(E_0)} dE_0 = \\ &= \int_{(E_0)} F_{(E_0)} \cdot P_{H,(r-d),E_0} \cdot e^{-\Sigma_{\text{loại}}(E_0)d} dE_0 \end{aligned} \quad (6.2-11)$$

trong đó $F(E_0)$ – phân bố theo năng lượng E_0 của neutron do nguồn phát ra.

Tiết diện loại hiệu dụng $\Sigma_{\text{loại,hđ}}$ đối với bức xạ neutron có phổ năng lượng phức tạp được xác định từ biểu thức sau đây:

$$e^{-\Sigma_{\text{loại,hđ}}d} = \frac{\int_{(E_0)} F_{(E_0)} \cdot P_{H,(r-d),E_0} \cdot e^{-\Sigma_{\text{loại}}(E_0)d} dE_0}{\int_{(E_0)} F_{(E_0)} \cdot P_{H,(r-d),E_0} dE_0} \quad (6.2-12)$$

Trong trường hợp tương đối tổng quát – khi vật liệu nặng gồm có nhiều lớp i với những thành phần hoá học phức tạp khác nhau, mà neutron do nguồn phát ra lại không đơn năng, thì thay vì biểu thức (6.2-10), sẽ có biểu thức sau:

$$\begin{aligned} P_{(r,\sum_{(i)} d_i)} &= \int_{(E_0)} F(E_0) \cdot P_{H,(r-\sum_{(i)} d_i),E_0} \cdot e^{-\sum_{(i)} \Sigma_{\text{loại},i}(E_0) \cdot d_i} dE_0 = \\ &= \int_{(E_0)} F(E_0) \cdot P_{H,(r-\sum_{(i)} d_i),E_0} \cdot e^{-\sum_{(i)} d_i \cdot \rho_i \cdot \left\{ \sum_{(j)} \theta_j \cdot \Sigma_{\text{loại},j}(E_0) \right\}_i} dE_0 \end{aligned} \quad (6.2-13)$$

Trường hợp 4: | *Neutron là sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân*

• Trong trường hợp này, tiết diện loại phụ thuộc vào nguyên tử lượng A của nguyên tố. Sự phụ thuộc này có thể được viết dưới dạng sau đây:

$$\Sigma_{\text{loại}} = m \rho A^{-n} \quad (6.2-14)$$

trong đó $\Sigma_{\text{loại}}$ có thứ nguyên là $[\text{cm}^{-1}]$, còn mật độ của lớp vật liệu nặng $\rho[\text{g/cm}^3]$; m và n – các hệ số. Thí dụ:

$$\Sigma_{\text{loại}} = 0,21 \cdot \rho \cdot A^{-0,58} \quad (6.2-15.a)$$

hoặc:

$$\Sigma_{\text{loại}} = 0,085 \cdot \rho \cdot A^{-1/3} \quad (6.2-15.b)$$

Tiết diện loại nơtron của một số vật liệu trong môi trường không đồng nhất được cho trong ba bảng từ B6.2-5 đến B6.2-7.

Bảng B6.2-5. Tiết diện loại vi mô của một số nguyên tố đối với nơtron, barn

Nguyên tố	Nguyên tử lượng A	Năng lượng nơtron, MeV								
		Nơtron từ phản ứng phân chia hạt nhân	0,5	1	2,9 +0,1	3	4,0	6,7	14,9	15,0
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
H	1,008	1,00±0,05								
D	2	0,88±0,10								
Li	6,94	1,01±0,04								
Be	9,01	1,07±0,06				2,31 ± 0,18				1,04 ± 0,05
B	10,82	0,97±0,10			1,38± 0,13					0,82± 0,6
C	12,01	0,81±0,05	3,16 ± 0,25	2,08 ± 0,25	1,58 ± 0,02		1,06 ± 0,05	0,82 ± 0,02	0,50 ± 0,02	0,92 ± 0,02
O	16,06	0,99±0,10	3,2	3,4		0,48 ± 0,19				0,70 ± 0,06

Bảng B6.2-5 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Na	22,99	1,77±0,12	2,5	2,5						
Al	26,98	1,31±0,05			1,68 ± 0,07					1,24 ± 0,11
Mn	54,94	1,84; 1,79	3							
Fe	55,85	1,98±0,08	2,36 ± 0,47	1,04 ± 0,11	1,96 ± 0,04		2,0 ± 0,08	2,28 ± 0,01	1,62 ± 0,06	1,58 ± 0,05
Ni	58,69	1,89±0,10	4,3	2,0	1,90 ± 0,03					1,59 ± 0,07
Cu	63,54	2,04±0,11			2,34					1,84 ± 0,10
Zr	91,22	2,36±0,12				2,77 ± 0,08				1,90 ± 0,12
W	183,92	2,51±0,55				4,79 ± 0,50				3,63 ± 0,40
Pb	207,21	3,53±0,30	1,22 ± 0,78	2,87 ± 0,63	3,72 ± 0,13		3,43 ± 0,15	3,76 ± 0,15	2,94 ± 0,15	3,39 ± 0,18
Bi	209,00	3,49±0,35				3,78 ± 0,83				3,35 ± 0,20
U	238,07	3,6±0,4								

Bảng B6.2-6. Tiết diện loại vi mô của một số chất đối với chùm nơtron chuẩn trực là sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân

Nguyên tố	Mẫu chất	Tiết diện loại, barn
(1)	(2)	(3)
Li	LiH	$1,34 \pm 0,04$
	Li	$1,57 \pm 0,03$
Be	Be	$1,40 \pm 0,04$
B	B ₄ C	$1,21 \pm 0,02$
C	Graphit	Từ $1,0 \pm 0,03$ tới $1,20 \pm 0,02$
F	Teflon	$1,50 \pm 0,05$
Na	NaCl	$1,60 \pm 0,2$
Al	Al	$1,61 \pm 0,03$
(1)	(2)	(3)
S	S	$1,83 \pm 0,13$
Cl	CCl ₄	$1,91 \pm 0,08$
Ti	Ti	$2,20 \pm 0,07$
	TiH	1,87
Fe	Fe	$2,26 \pm 0,04$
Ni	Ni	$2,32 \pm 0,04$
Cu	Cu	$2,45 \pm 0,05$
Cd	Cd	$2,85 \pm 0,07$
W	W	$3,87 \pm 0,11$
Pb	Pb	$4,00 \pm 0,07$
Bi	Bi	$3,95 \pm 0,08$

Bảng B6.2-7. Tiết diện loại của một số hợp chất hoá học đối với nơtron là sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân

Hợp chất	Mật độ, g/cm^3	Tiết diện loại, cm^{-1}
(1)	(2)	(3)
Hỗn hợp nhôm+bor $\text{Al} : \text{B}_4\text{C} = 1:1$	2,6	0,11
B_4C (carbit bor)	2,54 (2,5)	0,151 (0,12)
Borat	3,02	0,088
Bê tông (khối)	2,4	0,080
Nước (H_2O)	1,0	0,097
Nước nặng (D_2O)	1,10	0,0913
Gazolin C_8H_{18}	0,639	0,095
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	2,3	0,10
LiH (hydrit liti)	0,82	0,083
TiH (hydrit titan)	3,92	0,187
LiF (fitorit Liti)		$2,43 \pm 0,34$ barn
Thạch cao	2,16	0,136
Hỗn hợp nước+sắt ($\text{H}_2\text{O} + 60\%$ vún thép tính theo thể tích)	5,12	0,164
Dầu hoả	0,9	0,125
Dầu mỏ	0,82 (0,876)	0,114 (0,107)
Gạch thông thường	2,21	0,071
Dầu mazut đã được làm sạch	0,93	0,101
Mỡ CH_2		$2,84 \pm 0,11$ barn
Hỗn hợp đồng+bor $\text{Cu} : \text{B}_4\text{C} = 6,6:1$	8,0	0,18

Bảng B6.2-7 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)
Cát	2,20	0,082
SiO ₂ (ôxit silic)	2,32	0,076
Al ₂ O ₃ (ôxit nhôm)	4,0	0,132
B ₂ O ₃ (ôxit bor)		4,30 ± 0,41 barn
BeO (ôxit berili)	3,0	0,15
Fe ₂ O ₃ (ôxit sắt)	5,12	0,134
MgO (ôxit magiê)	3,65	0,120
Na ₂ O (ôxit natri)	2,27	0,075
Paraphin	0,952	0,109
Pôliêtilen (CH ₂) _n	0,93 (0,92)	0,124 (0,130)
Pôliêtilen pha bor	1,01	0,130
Cao su (C ₅ H ₈) _n	0,92	0,098
Hỗn hợp chì+bor Pb:B ₂ C = 25:1	10	0,12
Thép (1% cacbon)	7,83	0,163
Thép pha bor (1,57% B)	7,75	0,166
Ván thép	4,42	0,130
Thép (ở dạng tấm, lá)	7,8	0,208
Bê tông cốt thép (86% là thép)	5,34	0,153
C ₂ Fe ₃ Cl (fluoroten)		6,60 ± 0,8 barn
Ximăng đất sét	1,79	0,111
Ximăng Portland	1,98	0,075

6.2.2.2. Tiết diện loại nơtron trong môi trường đồng nhất

Giả sử có một môi trường đồng nhất chứa hydro và các nguyên tố nặng khác. Nếu trong môi trường này, hydro có nồng độ từ (0,5 ÷ 1,0)% khối lượng

trở lên, thì quy luật làm giảm suất liều neutron của môi trường này có thể viết được dưới dạng sau đây:

$$P(r) = P_H(r) \cdot e^{-\sum_{(j)} (\sigma_{\text{loại},j} \cdot \frac{N_0}{A_j} \cdot \rho_j \cdot r)} \quad (6.2-16)$$

Trong đó: $P(r)$ – suất liều neutron tại điểm nằm trong môi trường đồng nhất và cách nguồn một khoảng bằng r ; $P_H(r)$ – suất liều neutron tại điểm cách nguồn một khoảng bằng r trong môi trường chỉ chứa toàn hydro và có mật độ thể tích tương đương với mật độ thể tích của môi trường đồng nhất; σ_j – tiết diện loại vi mô của nguyên tố j ; A_j và ρ_j nguyên tử lượng và mật độ thể tích của nguyên tố j trong môi trường; N_0 – số Avôgadrô.

Trong trường hợp bức xạ neutron do nguồn phát ra có phổ năng lượng phức tạp $F(E_0)$, thì tiết diện loại hiệu dụng có thể được xác định theo biểu thức sau:

$$e^{-\Sigma_{\text{loại},\text{hd}} \cdot r} = \frac{\int_{(E_0)} F(E_0) \cdot P_{H,(r,E_0)} \cdot e^{-\Sigma_{\text{loại}}(E_0) \cdot r} dE_0}{\int_{(E_0)} F(E_0) \cdot P_{H,(r,E_0)} dE_0} \quad (6.2-17)$$

Bảng B6.2-8. Tiết diện loại vi mô của một số môi trường đồng nhất đối với neutron

Vật liệu Môi trường	$\sigma_{\text{loại}}$ barn		Vật liệu Môi trường	$\sigma_{\text{loại}}$ barn
Be	0,9		O	$0,92 \pm 0,05$
C	$0,72 \pm 0,05$ $0,7 \pm 0,8$		Li	0,9 $1,36^{(*)}$
H	$1,00 \pm 0,05$		Ti	$1,87^{(*)}$
Ghi chú: $(*)$ – Thực nghiệm được tiến hành với chùm neutron chuẩn trực.				

Bảng B6.2-8 cho thấy tiết diện loại nơtron của một số môi trường đồng nhất. Có thể sử dụng các giá trị tiết diện loại vì mô này để tính suất liều nơtron trong môi trường không đồng nhất. *Thực nghiệm cho thấy: trong các môi trường đồng nhất và không đồng nhất mà có các thành phần nặng như nhau, thì tiết diện loại thường có giá trị chênh lệch nhau không quá (5÷10)%. Sự chênh lệch này có thể được giải thích như sau. Trong môi trường đồng nhất, một số hạt nhân nguyên tử nặng nằm ở gần ngay đầu dò nơtron, nên có thể xảy ra va chạm (tương tác) với nơtron, mà không loại trừ được nơtron đó.*

6.2.2.3. Sử dụng tiết diện loại nơtron để tính lớp bảo vệ là vật liệu không chứa hydro

Đối với nơtron là sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân, thì trong môi trường không chứa hydro, độ dài quỹ đạo xác định được bằng thực nghiệm với đầu dò có ngưỡng hiệu dụng $E_{\text{ngưỡng, hd}} \sim 3 \text{ MeV}$ có giá trị hầu như trùng với độ dài quỹ đạo tính được trên cơ sở sử dụng tiết diện loại nơtron của môi trường không đồng nhất. Điều này đúng không những đối với các môi trường đơn giản (chỉ gồm một nguyên tố), mà còn đúng cả cho các môi trường có thành phần hoá học phức tạp.

Bảng B6.2-9 so sánh tiết diện loại và tiết diện tính được theo độ dài quỹ đạo biến (trong đó, độ dài quỹ đạo đo được trong môi trường không đồng nhất bằng đầu dò với ngưỡng $E_{\text{ngưỡng, hd}} \sim 3 \text{ MeV}$ trong môi trường không chứa hydro).

Như vậy, có thể sử dụng tiết diện loại để tính hoặc mô tả sự làm yếu thông lượng nơtron với năng lượng $E \geq 3 \text{ MeV}$ là sản phẩm của phản ứng phân chia hạt nhân trong môi trường không chứa hydro.

Phương pháp tiết diện loại có thể ứng dụng được cả cho những trường hợp bảo vệ khi môi trường làm chậm không phải là chất chứa hydro, mà là các chất nhẹ khác (thí dụ, là carbit bor B_4C hoặc nhôm .v.v.).

*Bảng B6.2-9. Tiết diện loại và tiết diện tính được theo độ dài lủy biến.
(Độ dài lủy biến đo được trong môi trường không đồng nhất
bằng đầu dò với ngưỡng ~3MeV trong môi trường không chứa hydro)*

<i>Vật liệu môi trường</i>	<i>Tiết diện loại nơtron, barn</i>	<i>Tiết diện tính được theo độ dài lủy biến, barn</i>
Be	$1,07 \pm 0,06$	1,02
B	$0,97 \pm 0,10$	1,12
C	$0,81 \pm 0,05$	0,89
O	$0,99 \pm 0,10$	0,7
Fe	$2,00 \pm 0,06$	1,81
Ni	$1,89 \pm 0,10$	1,90
Bê tông photphat sắt ($\rho=4,83 \text{ g/cm}^3$)	$0,129 \pm 0,003$ cm^{-1}	$0,131 \text{ cm}^{-1}$
Bê tông magnetit-limonhit ($\rho=3,4 \text{ g/cm}^3$)	$0,110 \pm 0,006$ cm^{-1}	$0,110 \text{ cm}^{-1}$
Bê tông limonhit sắt ($\rho=4,2 \text{ g/cm}^3$)	$0,121 \pm 0,005$ cm^{-1}	$0,126 \text{ cm}^{-1}$

6.2.3. Thành phần liều nơtron trong vật liệu bảo vệ

Xác định bằng thực nghiệm phân bố liều nơtron theo năng lượng trong toàn dải từ nơtron nhiệt đến nơtron nhanh là một việc làm rất khó khăn và phức tạp. Trong thực tế, thường đo được mật độ thông lượng hoặc suất liều của các nhóm nơtron nhiệt và nơtron nhanh một cách riêng biệt. Xác định bằng thực nghiệm mật độ thông lượng hoặc phổ, hay suất liều của nhóm nơtron năng lượng trung gian thường gặp khó khăn nhiều nhất. Do đó, *trong thực tế thường phải dựa trên những số liệu thực nghiệm về mật độ thông lượng hoặc phân bố liều của nơtron thuộc một nhóm năng lượng nào đó để đánh giá hiệu suất của lớp tường bảo vệ đối với nơtron trong toàn phổ năng lượng.*

Nếu biết trước phân bố neutrôn theo năng lượng và không gian $\Phi(E,r)$, đồng thời biết hệ số chuyển đổi từ mật độ thông lượng sang thành suất liều tương đương $C(E)$, thì có thể xác định được các đặc trưng về liều neutrôn. (Hệ số chuyển đổi $C(E)$ có giá trị bằng suất liều tương đương gây bởi một neutrôn với động năng là E).

Cụ thể, tại điểm cách nguồn một khoảng bằng r , suất liều tương đương gây bởi neutrôn thuộc nhóm i với năng lượng E trong khoảng $E_{i, \min} \leq E \leq E_{i, \max}$ được xác định thông qua hai đại lượng $\Phi(E,r)$ và $C(E)$ như sau:

$$P_i(r) = \int_{E_{i, \min}}^{E_{i, \max}} \Phi(r, E) \cdot C(E) dE \quad (6.2-18)$$

Trong đó $E_{i, \min}$ và $E_{i, \max}$ – các giá trị tương ứng của ngưỡng năng lượng dưới và ngưỡng năng lượng trên của nhóm neutrôn i .

Suất liều tổng cộng gây bởi neutrôn thuộc tất cả các nhóm năng lượng trong toàn phổ được xác định như sau:

$$P(r) = \int_0^{\infty} \Phi(r, E) \cdot C(E) dE = \sum_{i=1}^m P_i(r) \quad (6.2-19)$$

với m – số nhóm năng lượng trong toàn phổ.

Phần đóng góp (hay nói cách khác là tỷ trọng) của nhóm neutrôn i trong suất liều tổng cộng được xác định theo biểu thức sau đây:

$$\eta_i(r) = \frac{P_i(r)}{P(r)} \quad (6.2-20)$$

Bảng B6.2-10. Kết quả tính toán về phân đóng góp η_i (%) của các nhóm neutron khác nhau trong một số môi trường									
Vật liệu	Mật độ, ρ g/cm ³	Năng lượng neutron của nguồn	Bề dày bảo vệ, cm	Đóng góp vào suất liều tổng cộng của các nhóm neutron với năng lượng ngưỡng E_{ng} khác nhau, η_i (%)					
				Neutron nhiệt ($E < 1\text{eV}$)	$E_{ng} = 0,5\text{ MeV}$	$E_{ng} = 1,0\text{ MeV}$	$E_{ng} = 1,5\text{ MeV}$	$E_{ng} = 2,0\text{ MeV}$	Hệ số tích lũy liều của các neutron dưới ngưỡng $k_D(r, \langle E_{ng} \rangle = 2\text{ MeV})$
Nước	1,0	Phân chia hạt nhân	30-120	6,5	7,5	16	33	38	1,82
		$E_0 = 2\text{ MeV}$							
		$E_0 = 4\text{ MeV}$							
		$E_0 = 6\text{ MeV}$							
		$E_0 = 8\text{ MeV}$							
		$E_0 = 10\text{ MeV}$							
Carbon (C)	1,67	$E_0 = 12\text{ MeV}$	30-120	2,7	4	10	15	18	1,27
		Po - α - Be,							
		Ra - α - Be,							
		Po - α - Be							
		Phân chia hạt nhân							
		60 g/cm ²							
Berili (Be)	2,3	Phân chia hạt nhân	50	20	29	50	62	93	2,38
		60 g/cm ²							
Bê tông	2,3	Phân chia hạt nhân	50	20	29	50	62	93	-
Sắt (Fe)	7,8	Phân chia hạt nhân	>90	-	93	93	93	93	-

Trong những môi trường mà neutron có khả năng xuyên thấu mạnh nhất là neutron nhanh (như môi trường nước, pôliêtilen, bê tông .v.v.), khi khoảng cách kể từ nguồn lớn hơn 2÷3 lần độ dài lủy biến của neutron nhanh $r > (2÷3)L$, thì phân bố suất liều neutron được xác lập là cân bằng, ít phụ thuộc vào khoảng cách r . Trong thực tế, tại những khoảng cách lớn như vậy, có thể coi thành phần liều gây bởi neutron là không thay đổi. Do đó có thể xác định được suất liều neutron của toàn phổ năng lượng, mà chỉ cần biết suất liều gây bởi neutron thuộc một nhóm năng lượng i nào đó:

$$P(r) = \frac{P_i(r)}{\eta_i(r)} \quad (6.2-21)$$

Bảng B6.2-10 cho thấy kết quả tính toán về phần đóng góp η_i của các nhóm neutron i khác nhau trong một số môi trường. Hầu hết kết quả trong bảng này là thu được từ các tính toán cho lớp bảo vệ có bề dày trong khoảng $(30÷120)$ g/cm³. Trên cơ sở bảng số liệu này, có thể nêu đặc điểm phân bố liều neutron theo năng lượng trong một số môi trường như sau.

a). Trong môi trường nước (H₂O)

Khi lớp nước có bề dày kể từ nguồn là $r > (1÷2)L$ của neutron nhanh, thì phân bố suất liều theo năng lượng hầu như không thay đổi theo khoảng cách. Đối với năng lượng ngưỡng E_{ng} bất kỳ của neutron trung gian và neutron nhanh, thì phần đóng góp của neutron nhiệt và neutron với động năng $E < 100\text{eV}$ đều nhỏ hơn so với của neutron trung gian và neutron nhanh. (Phần đóng góp này giảm dần khi tăng dần động năng ban đầu của neutron. Nó có giá trị bằng 16% khi động năng ban đầu của neutron là $E=2\text{MeV}$; và, bằng 3% khi $E=14\text{MeV}$). Trong khi đó, phân bố liều giữa neutron nhanh và neutron trung gian thay đổi mạnh khi thay đổi năng lượng ngưỡng E_{ng} .

b). Trong môi trường cacbon (C)

Phân bố suất liều theo năng lượng trong môi trường cacbon là không có phổ cân bằng khi bề dày bảo vệ $r > (1÷2)L$ của neutron nhanh. Do đó,

phân bố suất liều theo năng lượng thay đổi theo bề dày bảo vệ r . Tuy nhiên, khi bề dày bảo vệ trong môi trường cacbon $r \geq (50+60)\text{g/cm}^2$, các neutron sản phẩm phản ứng phân chia hạt nhân gây nên suất liều tổng cộng hầu như hoàn toàn được xác định bởi neutron nhiệt.

c). Trong môi trường sắt (Fe)

Khi lớp sắt có bề dày kể từ nguồn là $r > 90\text{ cm}$, suất liều tổng cộng được xác định hầu như hoàn toàn bởi các neutron năng lượng trung gian.

d). Trong môi trường berili (Be)

Trong môi trường berili, đóng góp của neutron nhiệt và neutron có động năng ban đầu bằng $E < 100\text{eV}$ là không đáng kể. Suất liều tổng cộng được xác định hầu như hoàn toàn bởi các neutron năng lượng trung gian và neutron nhanh. Đóng góp của neutron năng lượng trung gian có giá trị tăng dần khi tăng dần năng lượng ngưỡng E_{ng} . Cụ thể, khi E_{ng} của neutron tăng dần từ $0,5\text{MeV}$ đến $2,0\text{MeV}$, thì đóng góp này tăng từ khoảng 4% đến 57%; trong khi đó, đóng góp của nhóm neutron nhanh lại giảm từ 96% xuống tới 42% đối với các trường hợp tương ứng.

e). Trong môi trường bê tông

Trong môi trường bê tông, thì suất liều tổng cộng được xác định bởi neutron thuộc cả ba nhóm năng lượng: nhiệt, trung gian và nhanh. Đồng thời, phân bố suất liều cũng thay đổi khi thay đổi năng lượng ngưỡng giữa hai nhóm trung gian và nhanh.

Bảng B6.2-11 cho thấy: a)- kết quả tính toán về đóng góp của các nhóm neutron năng lượng khác nhau vào suất liều toàn phần ($\eta_i, \%$); b)- hệ số tích lũy liều neutron dưới ngưỡng. Các giá trị trong bảng B6.2-11 thu được cho một số môi trường mà trong đó nguồn neutron được tạo bởi phản ứng phân chia hạt nhân, đồng thời phổ năng lượng của neutron là phổ dừng và cân bằng.

Bảng B6.2-11. Đóng góp của các nhóm neutron năng lượng khác nhau vào suất liều toàn phần (η , %) và hệ số tích lũy liều neutron dưới ngưỡng $k_0(r, < E_n = 2 \text{ MeV})$ đối với một số môi trường mà trong đó nguồn neutron được tạo bởi phản ứng phân chia hạt nhân, đồng thời phổ năng lượng của neutron là phổ dẹt và cân bằng.

Vật liệu môi trường	Mật độ, g/cm ³	Đóng góp η_i (%) của các nhóm neutron năng lượng khác nhau					Hệ số tích lũy liều neutron dưới ngưỡng $k_p(r, < E_n = 2 \text{ MeV})$	
		Neutron nhiệt 0,3eV đến < 60keV	Neutron chậm: 0,3eV đến < 60keV	N.trung gian: ≥60keV đến < 0,74 MeV	Neutron nhanh		Kết quả tính toán	Kết quả thực nghiệm
					≥ 0,74 MeV đến < 2 MeV	≥ 2 MeV đến < 10 MeV		
Nước	1,0	12,1	3,2	14,2	19,8	50,7	1,98	2,0 ± 0,3
Polyethylene	0,92	9,2	3,2	14,0	20,4	53,2	1,92	2,0 ± 0,3
Polyethylene + B (1) Bor (1)	---	0,3	3,23	15,8	22,3	58,3	1,71	1,7 ± 0,3
Graphit + B (2)	---	6E-5 ♦	2,8	46,7	29,5	21,0	4,76	---
Hydrit Titan TiH	3,25	1,7	5,1	23,8	30,1	39,3	2,32	2,3 ± 0,35
Hydrit Zirconium ZrH	---	---	---	---	---	---	2,65	2,6 ± 0,3
Hỗn hợp sắt+nước (50% Fe)	---	2,7	6,7	28,4	33,6	28,4	3,52	---
Bê tông thường	---	---	---	---	---	---	3,0	---
H ₂ O=10% kh.lượng	---	---	---	---	---	---	2,35	---

Chú thích:

(1) – Bơ tự nhiên chiếm 2,5% khối lượng;
(2) – Bơ chiếm 8% khối lượng;
♦ – Ký hiệu 6E-5 = 6 · 10⁻⁵

Chú thích: (1) – Bơ tự nhiên chiếm 2,5% khối lượng;

(2) – Bơ chiếm 8% khối lượng;

♦ – Ký hiệu $6\text{E}-5 \equiv 6 \cdot 10^{-5}$.

Như vậy, việc phân tích phân bố suất liều theo năng lượng nơtron cho thấy như sau:

- 1). Khi tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn đối với bức xạ nơtron (sơ cấp), cần kể tới đóng góp vào suất liều tổng cộng của nơtron thuộc mọi nhóm năng lượng. Trong các môi trường bảo vệ khác nhau, phần đóng góp của cùng một nhóm nơtron có thể khác nhau rất đáng kể.
- 2). Khi thay đổi năng lượng ngưỡng của hai nhóm nơtron nhanh và trung gian, phân bố suất liều giữa hai nhóm này có thể thay đổi đáng kể. Điều này cần được chú ý khi so sánh các kết quả thu được bằng đo đạc thực nghiệm và bằng tính toán.
- 3). Trong đo đạc thực tế, phần đóng góp của nơtron năng lượng thấp vào suất liều tổng cộng có thể lớn hơn so với kết quả tính toán nêu trong các bảng B6.2-10 và B6.2-11 (do có nơtron tán xạ từ các vật xung quanh như tường và trần nhà .v.v.).

6.2.4. Hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng

Giả sử $P(r)$ là suất liều gây bởi trường bức xạ nơtron tại điểm r . Tại đây, các nơtron có năng lượng trên ngưỡng E_{ng} gây nên suất liều $P(r, E > E_{ng})$; còn các nơtron có năng lượng dưới ngưỡng E_{ng} thì gây nên suất liều $P(r, E < E_{ng})$.

Tỷ số giữa suất liều gây bởi các nơtron thuộc toàn phổ năng lượng và suất liều gây bởi các nơtron có năng lượng trên ngưỡng ($E > E_{ng}$) được gọi là hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng, dưới đây ký hiệu là $k_D(r, E < E_{ng})$:

$$\begin{aligned} k_D(r, E < E_{ng}) &= \frac{P(r)}{P(r, E > E_{ng})} = \frac{P(r, E > E_{ng}) + P(r, E < E_{ng})}{P(r, E > E_{ng})} = \\ &= 1 + \frac{P(r, E < E_{ng})}{P(r, E > E_{ng})} \end{aligned} \quad (6.2-22)$$

Tại vùng vật liệu bảo vệ có phân bố liều (theo năng lượng neutron) đã được xác lập là cân bằng, thì hệ số tích lũy liều neutron dưới ngưỡng cũng có giá trị không đổi. Do đó, khi biết suất liều gây bởi các neutron có năng lượng trên ngưỡng, thì có thể sử dụng hệ số tích lũy liều neutron dưới ngưỡng $k_D(r, E < E_{ng})$ để xác định suất liều tổng cộng theo công thức sau đây:

$$P(r) = P(r, E > E_{ng}) \cdot k_D(r, E < E_{ng}) \quad (6.2-23)$$

Hoặc, khi biết suất liều gây bởi neutron có năng lượng dưới ngưỡng, thì từ biểu thức (6.2-22) tìm được biểu thức để xác định suất liều tổng cộng như sau:

$$P(r) = P(r, E < E_{ng}) \cdot \frac{k_D(r, E < E_{ng})}{k_D(r, E < E_{ng}) - 1} \quad (6.2-24)$$

Trong thực tế đo liều neutron, việc xác định liều neutron nhiệt và liều neutron nhanh là tương đối dễ dàng hơn. Vì vậy, việc đánh giá suất liều tổng cộng theo biểu thức (6.2-23) khi biết suất liều neutron nhanh, và, theo biểu thức (6.2-24) khi biết suất liều neutron nhiệt là tương đối thuận lợi.

Trong trường hợp neutron dưới ngưỡng (có năng lượng $E < E_{ng}$) là thuộc vùng phổ neutron năng lượng trung gian, thì cũng có thể áp dụng biểu thức (6.2-22) để tính hệ số tích lũy liều neutron năng lượng trung gian. Khi đó, hai biểu thức (6.2-23 và -24) cũng có thể được sử dụng để xác định suất liều tổng cộng của neutron năng lượng trung gian và neutron nhanh.

Để đánh giá hệ số tích lũy liều neutron dưới ngưỡng, có thể áp dụng những khuyến cáo dưới đây:

- 1). Trong những môi trường đồng nhất chứa kim loại và hydro, khi thành phần kim loại chiếm thể tích $V_{kl} \leq 0,8V$ (với V – thể tích của hỗn hợp), thì trong vùng phổ cân bằng (hay nói cách khác là trong vùng phổ dừng), hệ số tích lũy liều của các neutron dưới ngưỡng có thể được xác định theo biểu thức sau đây:

$$k_D(r, E < E_{ng} = 2MeV) = k_{DH}(r, E < E_{ng} = 2MeV) \cdot (1 - V_{kl})^{-m} \quad (6.2-25)$$

Trong biểu thức này: $k_{DH}(r, E < E_{ng} = 2 \text{ MeV})$ – hệ số tích lũy liều của các nơtron dưới ngưỡng $E_{ng} = 2 \text{ MeV}$ trong thành phần chứa Hydro của vật liệu bảo vệ (xem cột cuối các bảng B6.2-10 và -11); số mũ $m = 1,0$ đối với hỗn hợp sắt – nước (hoặc sắt – polyethylene); $m = 0,53$ đối với hỗn hợp chì – nước (hoặc chì – polyethylene).

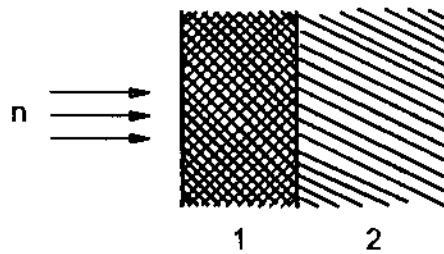
- 2). Đối với những môi trường nặng (như sắt, chì, titan .v.v.), phổ không đạt trạng thái dừng; hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng tăng lên khi tăng khoảng cách r , và, phụ thuộc vào phân bố liều của bức xạ nơtron tới (hay nói cách khác – phụ thuộc vào hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng $k_D(r=0, E < E_{ng})$ khi $r=0 \text{ cm}$. Trong trường hợp này, có thể tính giá trị của hệ số $k_D(r, E < E_{ng})$ theo biểu thức sau đây:

$$k_D(r, E < E_{ng} = 2 \text{ MeV}) = 1 + k_D(r=0 \text{ cm}, E < E_{ng} = 2 \text{ MeV}) \cdot e^{br} \quad (6.2-26)$$

Hệ số b trong biểu thức (6.2-26) có giá trị khác nhau trong những môi trường bảo vệ khác nhau:

$$b = \begin{cases} 0,102 \text{ cm}^{-1} & \text{trong Fe} \\ 0,072 \text{ cm}^{-1} & \text{trong Pb} \\ 0,056 \text{ cm}^{-1} & \text{trong Ti} \\ 0,061 \text{ cm}^{-1} & \text{trong W} \\ 0,068 \text{ cm}^{-1} & \text{trong Mo} \end{cases}$$

- 3). Đối với môi trường bảo vệ gồm 2 lớp vật liệu nặng nhẹ khác nhau (xem hình H6.2-2), khi lớp thứ hai ở cách xa nguồn hơn và được làm bằng vật liệu nhẹ với bề dày lớn gấp 4–5 lần độ dài lũy biến của nơtron trong vật liệu này (tức là $d_2 \geq (4 \div 5)L$), thì hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng $k_D(r=d_1+d_2, E < E_{ng})$ có giá trị đặc trưng của vật liệu nhẹ và hầu như không thay đổi khi tăng thêm bề dày của nó.



Hình H6.2-2. Môi trường bảo vệ nơtrôn gồm hai lớp vật liệu khác nhau. Ký hiệu: n – nguồn nơtrôn; 1 – lớp vật liệu nặng (bề dày d_1); 2 – lớp vật liệu nhẹ (bề dày d_2).

6.2.5. Tính và thiết kế bảo vệ đối với nguồn nơtrôn loại (α, n)

Một nguồn đồng vị phát nơtrôn trên cơ sở phản ứng (α, n) thường được đặc trưng bởi ba đại lượng là:

- Tổng số nơtrôn được nguồn phát ra trong một giây, hay còn gọi là suất lượng nơtrôn của nguồn, dưới đây ký hiệu là $S[n/s]$;
- Phân bố theo năng lượng của nơtrôn do nguồn phát ra, dưới đây ký hiệu là $F(E_0)$, với E_0 – động năng ban đầu của nơtrôn có giá trị trong khoảng từ $0 \div E_{\max}$;
- Hoạt độ phóng xạ của nguồn.

Bảng B6.2-12 nêu đặc trưng cơ bản của một số nguồn nơtrôn loại (α, n) thường được sử dụng trong thực tế.

Nguồn nơtrôn (α, n) thường đồng thời là nguồn bức xạ gamma mạnh. Vì vậy, khi tính toán thiết kế bảo vệ nguồn nơtrôn (α, n) phải đảm bảo an toàn đối với cả hai loại bức xạ nơtrôn và gamma. Trong mục 6.1 đã trình bày về tính toán thiết kế bảo vệ an toàn đối với các nguồn bức xạ gamma. Dưới đây chỉ giới thiệu về tính toán thiết kế bảo vệ an toàn đối với bức xạ nơtrôn của nguồn (α, n) .

Bảng B6.2-12. Các đặc trưng cơ bản của một số nguồn neutron loại (α, n)

Nguồn neutron	Chu kỳ rã nửa	Suất lượng neutron khi nguồn có độ phóng xạ $= 1 \text{ Ci},$ $10^6 \text{ n(Ci.s)}^{-1}$	Số lượng tử gamma được phát ra tính trung bình cho 1 neutron của nguồn	Năng lượng trung bình của phổ neutron, MeV	Năng lượng cao nhất của phổ neutron, MeV
$^{210}\text{Po}-\alpha\text{-B}$	138,4 ngày	0,9	-----	2,7	5,0
$^{210}\text{Po}-\alpha\text{-Be}$	138,4 ngày	1÷3	$\sim (1+2)$	4,3	10,9
$^{226}\text{Ra}-\alpha\text{-Be} \blacklozenge$	1622 năm	18	$\sim 10^4$	3,63	13,2
$^{226}\text{Ra}-\alpha\text{-B} \blacklozenge$	1622 năm	6,8	$\sim 2,5 \cdot 10^4$	-----	-----
$^{239}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$	24110 năm	1,7	$\sim (1+2)$	4,5	10,7
$^{241}\text{Am}-\alpha\text{-Be}$	432 năm	2,5		$\approx 4,5$	$\approx 10,5$
$^{252}\text{Cf}-\alpha\text{-Be}$	2,64 năm	$2,5 \cdot 10^6$ $\text{n}(\mu\text{g.s})^{-1}$		≈ 3	≈ 13
Chú thích: $\blacklozenge$ – Ra ở trạng thái cân bằng với các đồng vị con chủ yếu của phân rã.					

Hai trường hợp điển hình trong thực tế sử dụng nguồn (α, n) là:

- Nguồn được đặt trong không khí và chỉ có không khí là lớp ngăn cách giữa nguồn với người làm việc;
- Nguồn được đặt trong môi trường làm chậm đồng thời là lớp bảo vệ ngăn cách giữa nguồn với người làm việc.

Dưới đây trình bày tính toán thiết kế bảo vệ an toàn đối với neutron của nguồn (α, n) , áp dụng cho hai trường hợp điển hình vừa nêu trên.

6.2.5.1. Nguồn được đặt trong môi trường không khí

Trước hết, xét trường hợp nguồn (α, n) được đặt trong môi trường không khí mà hoàn toàn không có một lớp bảo vệ nào. Trong trường hợp này, có thể tính bảo vệ bức xạ neutron của nguồn (α, n) bằng cách đơn giản nhất – dựa trên

cơ sở ba nguyên tắc bảo vệ an toàn là: nguồn yếu + cách xa + thời gian ngắn (tương tự như đối với các nguồn bức xạ gamma, xem mục 6.1.2.2), đồng thời kết hợp với giá trị thông lượng tích phân tương ứng với liều 1mSv trên bề mặt của tổ chức cơ thể (xem bảng B.2.4-6, chương 2, mục 2.4.6).

Liều tương đương gây bởi nơtron trên bề mặt của tổ chức cơ thể sẽ không vượt quá 1mSv nếu thoả mãn điều kiện sau đây:

$$\frac{S_{[n/s]} \cdot t_{[h]} \cdot 3600_{[s/h]}}{4\pi R_{[cm]}^2} \leq 2,6 \cdot 10^6 \left[\frac{n}{cm^2} \right] \quad (6.2-27a)$$

hoặc
$$\frac{S_{[n/s]} \cdot t_{[h]}}{4\pi R_{[cm]}^2} \leq 720 \quad (6.2-27b)$$

Trong hai biểu thức này: $R_{[cm]}$ – khoảng cách hoàn toàn không có tường bảo vệ (tức là khoảng cách trong môi trường không khí), tính từ nguồn điểm đẳng hướng (α, n) tới vị trí người làm việc; $t_{[h]}$ – số giờ làm việc. Khi lập các tương quan này, ta đã coi rằng nơtron do nguồn phát ra có động năng trung bình nằm trong khoảng từ 1÷5 MeV.

Từ biểu thức (6.2-27a), có thể sơ bộ đánh giá liều tương đương gây bởi nơtron trên bề mặt của tổ chức cơ thể tại điểm cách nguồn một khoảng trong không khí bằng $R_{[cm]}$ như sau:

$$H_{n[mSv]} \approx \frac{S_{[n/s]} \cdot t_{[h]} \cdot 3600_{[s/h]}}{4\pi R_{[cm]}^2 \cdot 2,6 \cdot 10^6} = \frac{S_{[n/s]} \cdot t_{[h]}}{R_{[cm]}^2} \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} \quad (6.2-28a)$$

Trên cơ sở biểu thức này, xác định được *khoảng cách bảo vệ R cần thiết để bảo đảm an toàn về nơtron*:

$$R_{[cm]} = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 10^{-4} \cdot S_{[n/s]} \cdot t_{[h]}}{H_{n[mSv]}}} \quad (6.2-28b)$$

trong đó $H_n[mSv]$ – giới hạn liều tương đương trên bề mặt cơ thể cần được đảm bảo để không được vượt quá khi làm việc trong t giờ bên cạnh nguồn $S[n/s]$.

Chú ý: Trong các biểu thức (6.2-27 và -28) mới chỉ tính tới ảnh hưởng của neutron sơ cấp, mà chưa tính tới phần đóng góp gây bởi bức xạ gamma của bản thân nguồn đồng vị (α, n).

♦ Vấn đề 14:

Tại cơ sở Y, người ta sử dụng một nguồn Ra- α -Be có suất lượng neutron $S=1.10^7$ n/s. Giám đốc kỹ thuật của cơ sở này đề nghị bạn cho biết: Nếu không làm tường che chắn nguồn, thì cần giữ khoảng cách tối thiểu từ nguồn tới vị trí có người làm việc thường xuyên là bao nhiêu để có thể đảm bảo điều kiện làm việc an toàn về neutron cho từng phạm trù sau đây:

- Đối với nhân viên bức xạ (chuyên nghiệp)?
- Đối với người làm việc không phải là nhân viên bức xạ?

6.2.5.2. Nguồn được đặt trong môi trường bảo vệ là chất làm chậm

Dưới đây xét trường hợp nguồn đồng vị (α, n) được đặt trong chất làm chậm (thí dụ: nước hoặc parafin). Lớp vật chất với bề dày bằng d tính từ bề mặt chất làm chậm tới vị trí đặt nguồn (α, n) đồng thời làm thành một lớp bảo vệ đối với bức xạ neutron. Vì nguồn neutron nằm trong môi trường chất đặc, nên hiện tượng tán xạ neutron xảy ra đáng kể, làm động năng của neutron giảm từ giá trị ban đầu là E_0 xuống bằng E , và do đó, làm phân bố theo năng lượng của neutron tại một điểm bất kỳ bị thay đổi (so với phân bố ban đầu $F(E_0)$ – khi môi trường bao quanh nguồn neutron chỉ là không khí bình thường).

Xét trường hợp đơn giản nhất: môi trường làm chậm có dạng đối xứng cầu, còn nguồn (α, n) thì được đặt ở tâm của quả cầu. Khi này, mật độ thông lượng neutron có động năng bằng E tại một vị trí cân quan tâm nào đó ở trên bề mặt tiếp giáp không khí (là mặt ngoài) của lớp bảo vệ, ký hiệu là $\Phi[d, E, F(E_0)]$ (với thứ nguyên là $[n/(cm^2.s)]$) được xác định như sau:

$$\Phi[d, E, F(E_0)] = \frac{1}{4\pi d^2} \cdot \int_0^{E_{\max}} \Sigma(d, E_0 \rightarrow E) F(E_0) dE_0 \quad (6.2-29)$$

$$\int_0^{E_{\max}} F(E_0) dE_0 = S_{[n/s]} \quad (6.2-30)$$

Trong đó: $d[\text{cm}]$ – bề dày của lớp bảo vệ (cũng là bán kính của khối cầu);
 $\Sigma(d, E_0 \rightarrow E)$ – xác suất tán xạ neutron bên trong môi trường làm chậm để neutron với động năng ban đầu E_0 trở thành có động năng bằng E tại vị trí cần quan tâm ở bề mặt tiếp giáp không khí của lớp bảo vệ.

Trên cơ sở mật độ thông lượng neutron $\Phi[d, E, F(E_0)]$ mới được xác lập, có thể xác định được suất liều tương đương $P_0[d, F(E_0)]$ gây bởi neutron tại vị trí cần quan tâm ở bề mặt tiếp giáp không khí của lớp bảo vệ như sau:

$$P_0[d, F(E_0)] = \int_{(E)} \Phi[d, E, F(E_0)] C(E) dE \quad (6.2-31)$$

Trong biểu thức (6.2-31), hệ số chuyển đổi $C(E)$ chính là suất liều tương đương gây bởi một neutron có động năng bằng E .

Một cách gần đúng (thô), có thể sơ bộ đánh giá suất liều tương đương gây bởi neutron $P_0[d, F(E_0)]$ bằng cách kết hợp sử dụng bảng B.2.4-6 (chương 2, mục 2.4.6) và chia phổ neutron thành tổng của một số nhóm năng lượng E_i như sau:

$$P_0[d, F(E_0)] \approx \sum_{(i)} \Phi(d, E_i) \cdot \Delta E_i C(E_i) \quad (6.2-32)$$

Trong đó, tích số $\Phi(d, E_i) \Delta E_i$ có giá trị bằng tổng mật độ thông lượng neutron của nhóm i (với thứ nguyên là $[n/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$). Cũng có thể đánh giá tích số này bằng cách sử dụng độ dài lũy biến mật độ thông lượng neutron của nguồn đồng vị điểm đẳng hướng trong một số môi trường (thí dụ: bảng B6.2-2a, mục 6.2.1). Còn hệ số chuyển đổi $C(E_i)$ thì được lấy trên cơ sở sử dụng giá trị thông lượng tích phân $F_{1\text{mSv}}$ tương ứng với liều 1mSv gây bởi một neutron thuộc nhóm năng lượng này (xem cột cuối bảng B.2.4-6):

$$C(E_i)_{[mSv/(n/cm^2)]} = \frac{1}{F_{1mSv}(E_i)} \quad (6.2-33)$$

Trong trường hợp sử dụng các biểu thức gần đúng (6.2-32 và -33), thì suất liều tương đương gây bởi neutron $P_0[d,F(E_0)]$ được đánh giá tại vị trí cần quan tâm ở bề mặt tiếp giáp không khí của lớp bảo vệ sẽ có thứ nguyên là $[mSv/s]$.

Chú ý:

Sau khi đã tính thiết kế bảo vệ đối với bức xạ neutron của nguồn (α,n) như vừa trình bày trong hai mục trên (6.2.5.1 và 6.2.5.2), nếu điều kiện đảm bảo an toàn đối với neutron vẫn chưa được thoả mãn, thì cần sử dụng tiếp các tường bảo vệ như đã được trình bày trong các mục từ 6.2.1 tới 6.2.4. Tuy nhiên, nói chung, các nguồn neutron (α,n) thường chỉ có công suất cỡ từ 10^4 – 10^8 n/s; nên việc bảo vệ đối với bức xạ neutron của chúng không phải là phức tạp. Các nguồn (α,n) thường đồng thời là nguồn bức xạ gamma mạnh. Không những thế, nếu nguồn neutron được bảo vệ bổ sung bằng lớp vật liệu có chứa nguyên tố nhẹ, thì phải tính tới sự xuất hiện một số vạch phổ gamma. Thí dụ, vạch $E_\gamma = 2,3$ MeV do phản ứng bắt neutron nhiệt của các hạt nhân 1H , hoặc vạch $E_\gamma = 0,48$ MeV xuất hiện bởi đồng vị sản phẩm của phản ứng $^{10}B(n_{\text{nhiệt}},\alpha)^7Li$ nếu lớp bảo vệ là paraffin có pha nguyên tố bo .v.v. Do vậy cần chú ý tới việc bảo vệ an toàn bức xạ gamma khi tính toán thiết kế bảo vệ cho nguồn neutron.

♦ Vấn đề 15:

Vì lý do kinh tế, cơ sở Y (đã nhắc tới ở vấn đề 14, cuối mục 6.2.5.1.) thấy phải tiết kiệm diện tích sử dụng. Do vậy cần sử dụng tường bảo vệ cho nguồn neutron Ra- α -Be này. Giám đốc kỹ thuật của cơ sở Y đề nghị bạn thiết kế bảo vệ nguồn neutron vừa nêu trên (suất lượng $S=1.10^7$ n/s) để đảm bảo an toàn cho người làm việc thuộc phạm trù dân thường.

Chú ý: Khi giải quyết vấn đề, bạn có thể hình dung tường bảo vệ gồm 2 lớp hình khối trụ đồng trục lồng vào nhau. Nguồn được đặt ở giữa của khối trụ trong. Khối này làm bằng paraffin, đảm bảo hầu hết neutron bị nhiệt hoá hoàn

toàn. Khối trụ ngoài cùng làm bằng parafin pha Bor, đảm bảo hấp thụ hầu hết các neutron đã bị nhiệt hoá. Do vậy có thể tạm coi toàn bộ nguồn neutron cùng khối bảo vệ như một nguồn điểm đẳng hướng của bức xạ gamma. Trước khi giải quyết vấn đề này, bạn nên bắt đầu bằng những việc sau đây: 1)- Tìm hiểu các vấn đề về làm chậm và nhiệt hoá neutron; 2)- Tìm hiểu về phản ứng xảy ra giữa neutron nhiệt với hạt nhân của các đồng vị của Bo; 3)- Tính số lượng tử gamma được phát ra trong mỗi giây bởi toàn bộ hệ thống bảo vệ.

♦ Vấn đề 16:

Thấy cơ sở Y dùng nguồn neutron đạt hiệu quả kinh tế cao, nên cơ sở Y2 cũng muốn làm theo. Có người khuyên cơ sở Y2 không dùng nguồn Ra- α -Be, mà nên dùng nguồn Pu- α -Be có cùng công suất $S=1.10^7$ n/s. Vì vậy cơ sở Y2 đề nghị bạn *phân tích* (so sánh với trường hợp của cơ sở Y) và *giải quyết vấn đề để đảm bảo an toàn bức xạ cho người làm việc thuộc phạm trù dân thường*.

(Chú ý: Trước khi giải quyết vấn đề này, bạn nên bắt đầu bằng những việc như: 1)- Xem lại bảng B6.2-12 về các đặc trưng cơ bản của một số nguồn neutron loại (α, n); 2)- Xem cách giải quyết các vấn đề 14 và 15).

6.3. VÙNG BẢO VỆ AN TOÀN BỨC XẠ

Để việc quản lý đảm bảo an toàn bức xạ được chặt chẽ, thuận tiện và có hiệu quả, người ta thường phải phân loại vùng không gian tùy theo mức độ nguy hiểm của các nguồn bức xạ. Trong thực tế, thường phân biệt hai vùng không gian là *vùng kiểm soát* và *vùng giám sát*. (Thuật ngữ tiếng Anh tương đương của “Vùng Kiểm soát” là “Control Area”, còn của “Vùng Giám sát” là “Supervised Area”).

6.3.1. Vùng kiểm soát

Vùng kiểm soát là vùng mà tại đó *đòi hỏi phải có những biện pháp bảo vệ đặc biệt, hoặc phải có những biện pháp dự phòng về an toàn, nhằm đáp ứng*

hai yêu cầu sau đây:

- a) Kiểm soát sự chiếu xạ ở mức thông thường, hoặc, ngăn chặn sự lan rộng nhiễm xạ trong những điều kiện làm việc bình thường;
- b) Ngăn chặn hoặc hạn chế phạm vi chiếu xạ tiềm tàng.

Khi xác định ranh giới của vùng kiểm soát phải tính tới những yếu tố như:

- a) Mức độ nghiêm trọng của chiếu xạ thông thường;
- b) Khả năng có thể xảy ra và mức độ nghiêm trọng của chiếu xạ tiềm tàng;
- c) Bản chất và phạm vi của các thủ tục (hoặc biện pháp) bảo vệ;
- d) Bản chất và phạm vi của các thủ tục (hoặc biện pháp) an toàn.

Cơ sở sử dụng bức xạ và cơ quan cấp phép phải thực hiện những yêu cầu sau đây đối với vùng kiểm soát:

- 1) Ranh giới của vùng kiểm soát phải được vạch rõ bằng những phương tiện vật lý (thí dụ: tường ngăn, rào chắn, cửa ra vào có bảo vệ), hoặc bằng những phương tiện thích hợp khác nếu trong thực tế không thể sử dụng được các phương tiện vật lý.
- 2) Nơi có nguồn bức xạ đang hoạt động, hoặc đã được tăng cường một cách không thường xuyên, hoặc đã được dịch chuyển từ chỗ này đến chỗ khác, thì phải thực hiện hai việc sau đây: a)- Vạch rõ ranh giới thích hợp của vùng kiểm soát bằng những phương tiện thích hợp trong điều kiện thông thường; b)- Ghi rõ thời gian chiếu xạ.
- 3) Đặt dấu hiệu cảnh báo (rằng có nguồn bức xạ đang hoạt động) theo khuyến cáo của Tổ chức Tiêu chuẩn Quốc tế và có những nội quy, hướng dẫn thích hợp tại các lối vào và các khu vực thích hợp ở bên trong vùng kiểm soát. Dấu hiệu cảnh báo phải được đặt ở những vị trí dễ nhận biết nhất. (Tổ chức Tiêu chuẩn Quốc tế có tên tiếng Anh là International Organization for Standardization, viết tắt là ISO. Tổ chức này đã công bố khuyến cáo về dấu hiệu bức xạ iôn hoá cơ bản "Basic Ionizing

Radiation Symbol", ISO 361, ISO, Geneva, 1975. *Dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức xạ ion hoá* được nêu rõ trong phụ lục 6).

- 4) Thiết lập các biện pháp bảo vệ – an toàn chuyên nghiệp, bao gồm cả những quy tắc và thủ tục có tính chất nội bộ thích hợp.
- 5) Hạn chế quyền được vào vùng kiểm soát bằng những thủ tục hành chính (như cấp giấy cho phép vào làm việc), bằng các rào cản vật lý (như: hàng rào, thanh chắn đường, các lớp cửa, các loại khoá, hoặc khoá liên động). Mức độ hạn chế tương ứng với mức độ nghiêm trọng và khả năng có thể xảy ra chiếu xạ. (Cần thiết phải nhắc lại rằng: người dưới 18 tuổi không được phép làm việc trong vùng kiểm soát. Nếu người này đang trong quá trình được huấn luyện để sau này làm việc trong vùng kiểm soát, thì người đó phải được giám sát chặt chẽ liên tục khi có mặt trong vùng kiểm soát).
- 6) Tại lối vào vùng kiểm soát, phải cung cấp những phương tiện bảo vệ thích hợp như: a)- Quần áo và thiết bị bảo hộ; b)- Thiết bị đo liều lượng bức xạ; c)- Nơi giữ quần áo cá nhân.
- 7) Tại lối ra khỏi vùng kiểm soát, phải đảm bảo những phương tiện thích hợp như: a)- Thiết bị kiểm soát nhiễm bắn phóng xạ trên da và quần áo, giày; b)- Thiết bị kiểm soát nhiễm bắn phóng xạ trên các vật thể hoặc vật liệu đang được đem ra khỏi vùng kiểm soát; c)- Phương tiện để tắm hoặc rửa; d)- Nơi chứa các quần áo và thiết bị bảo hộ đã bị nhiễm bắn phóng xạ.
- 8) Đặt bản hướng dẫn hành động trong trường hợp khẩn cấp, nêu rõ những việc phải làm khi đang xảy ra sự cố (như tình trạng nguy kịch, cháy, nhiễm xạ cá nhân nghiêm trọng).
- 9) Có các cửa thoát hiểm và lối đi thoát hiểm thích hợp.
- 10) Định kỳ xem xét lại các điều kiện để xác định sự cần thiết phải duyệt lại (để bổ sung hoặc sửa đổi) các biện pháp bảo vệ và biện pháp dự phòng về an toàn, hoặc các ranh giới của vùng kiểm soát.

6.3.2. Vùng giám sát

Vùng giám sát là vùng mà ở đó các điều kiện chiếu xạ nghề nghiệp cần phải được xem xét và theo dõi liên tục, mặc dù chưa cần tới những biện pháp bảo vệ đặc biệt cũng như các biện pháp dự phòng về an toàn.

Cơ sở sử dụng bức xạ và cơ quan cấp phép phải tính tới bản chất và mức độ của mỗi nguy hiểm về bức xạ ở trong vùng giám sát. Dựa trên cơ sở đó để thực hiện những yêu cầu sau đây đối với vùng giám sát:

- 1) Ranh giới của vùng giám sát phải được vạch rõ bằng những phương tiện thích hợp (tương tự như đối với vùng kiểm soát).
- 2) Chỉ rõ các dấu hiệu đã được quy định ở những cửa vào thích hợp của vùng giám sát.
- 3) Định kỳ xem xét lại các điều kiện để xác định sự cần thiết phải áp dụng các biện pháp bảo vệ và biện pháp dự phòng về an toàn, hoặc thay đổi ranh giới của vùng giám sát.

6.4. MỘT SỐ QUY ĐỊNH KHI LÀM VIỆC VỚI NGUỒN PHÓNG XẠ HỮU

Khi làm việc với nguồn phóng xạ hữu, không những phải tuân theo những nguyên tắc chung về bảo đảm an toàn bức xạ, mà còn cần phải thực hiện một số quy định khác nữa. Dưới đây nêu một số quy định cơ bản khi làm việc với các nguồn phóng xạ hữu:

- 1) Nguồn phóng xạ phải được đặt trong ít nhất là hai lớp ngăn cách. (Thí dụ: nguồn phóng xạ được chứa trong lọ (I), lọ (I) được đặt trên khay chứa (II), khay (II) này lại được đặt trong chậu (III) của tủ hút khí IV).
- 2) Phải thực hiện đúng các thủ tục về quần áo bảo hộ lao động, rửa tay

khi ra khỏi vùng quy định, có phương tiện kiểm soát nhiễm bắn phóng xạ. Nếu mức nhiễm bắn phóng xạ là thấp, thì có thể chỉ cần tới áo choàng thông thường trong phòng thí nghiệm với găng tay và túi nhựa mỏng bao bọc giày là đủ. Nếu mức nhiễm bắn phóng xạ là đáng kể, thì thường phải cần tới bộ trang phục bảo hộ kín hoàn toàn và mặt nạ có bộ lọc khí (kèm cả bình cung cấp dưỡng khí nếu cần).

- 3) Phải đảm bảo phương tiện để nhanh chóng tẩy xạ khi bị nhiễm bắn phóng xạ.
- 4) Trong vùng kiểm soát và vùng hạn chế thì phải thực hiện nghiêm ngặt những quy định như:
 - Không được ăn, uống, hút.
 - Không được sử dụng những dụng cụ đòi hỏi thao tác bằng miệng (thí dụ: ống hút hoặc thổi bằng miệng).
 - Bất kỳ vết thương ngoài da nào cũng đều phải được bao bọc kỹ bằng vải chống thấm nước trước khi vào vùng làm việc có nguồn hờ. Phải báo cáo về vết thương ngoài da với người có trách nhiệm để chữa ngay.
 - Chỉ dùng các loại giấy lau sử dụng một lần (kể cả để lau mặt); dùng một lần xong thì phải bỏ ngay vào nơi quy định.
- 5) Khi thiết kế khu vực làm việc với nguồn phóng xạ hờ, cần đáp ứng những yêu cầu sau đây:
 - Phải đảm bảo hoạt động thường xuyên của các phương tiện hút khí và thông khí.
 - Phải có tủ kính kín chuyên dụng nối liền với hệ thống hút và lọc khí để thao tác với nguồn hờ.
 - Hệ thống quạt hút phải có các bộ lọc đảm bảo không còn các hạt có phóng xạ khi thải khí vào môi trường.

- Nếu chất phóng xạ tồn tại ở dạng khí hoặc lỏng, thì phải thực hiện những biện pháp kỹ thuật một cách cẩn trọng để đảm bảo giảm nồng độ chất phóng xạ xuống đạt mức cho phép hoặc thấp hơn nữa trước khi thải vào môi trường.
- Có nơi gom giữ và bảo quản tất cả các chất thải phóng xạ lỏng và rắn trước khi đem xử lý thải.
- Các bề mặt phải được đảm bảo sao cho nhẵn bóng, không gầy, không nứt nẻ. Các bề mặt phải được làm bằng những vật liệu có tính trơ về mặt hoá học, không có lỗ rỗng, không hấp thụ, không hấp phụ, đẩy nước và không thấm nước. Phải đảm bảo các bề mặt dễ tẩy xạ, dễ thay thế. Các bề mặt tường, trần và sàn cũng phải thoả mãn những yêu cầu vừa nêu trên đối với các bề mặt nói chung. Mặt tường từ độ cao thích hợp xuống tới sàn và mặt sàn phải được lót bằng lớp vật liệu thích hợp đảm bảo dễ đánh dính với nhau, dễ làm sạch, dễ tẩy xạ, dễ thay thế.
- Góc tạo bởi các mặt tường với nhau, mặt tường với sàn nhà, mặt tường với trần nhà đều phải được lượn vòm, để làm sạch.
- Tại lối ra khỏi khu vực làm việc với nguồn phóng xạ hở, phải đảm bảo những phương tiện thích hợp như: a) Có thiết bị để kiểm soát nhiễm bẩn phóng xạ trên da và các vật dụng khác (như: giày, trang phục bảo hộ lao động, các vật thể được đem ra khỏi vùng kiểm soát); b)- Có nơi gom giữ các đồ vật đã bị nhiễm bẩn phóng xạ; d)- Có phương tiện để tắm, rửa, lau, tẩy khô thích hợp trước khi ra khỏi khu vực có khả năng bị nhiễm bẩn bởi nguồn phóng xạ hở.

6.5. NHỮNG ĐIỀU CẦN CHÚ Ý KHI LÀM VIỆC VỚI NGUỒN BỨC XẠ MẠNH

Khi làm việc với nguồn bức xạ iôn hoá mạnh như nguồn đồng vị phóng xạ mạnh, máy gia tốc, lò phản ứng hạt nhân, thì: đồng thời với việc thực hiện những đòi hỏi và quy định đã nêu trong các mục từ 6.1 đến 6.4 ở trên đây, còn phải đảm bảo thực hiện một số đòi hỏi bổ sung.

Những đòi hỏi bổ sung, những điều cần phải chú ý khi làm việc với nguồn bức xạ iôn hoá mạnh cụ thể là như sau:

1). Về mặt thiết kế:

- a - Tường bảo vệ đủ dày, đảm bảo an toàn cho những người làm việc ở các phòng liên sát (xung quanh, bên trên, bên dưới) phòng chiếu xạ.
- b - Hệ thống quạt hút và thông khí luôn làm việc đúng công suất quy định.
- c - Không bao giờ để chùm tia bức xạ hướng thẳng về phía cửa ra vào, hay lối đi hoặc nơi đông người.
- d - Làm lối đi gãy khúc (thí dụ, ngoặt 90^0 tạo thành đường xoáy chôn ốc) từ vị trí chiếu xạ tới cửa ra vào của phòng chiếu xạ để giảm đáng kể ảnh hưởng của tán xạ.
- e - Kích thước phòng chiếu xạ phải đủ lớn cả về bề dài, bề rộng và bề cao để giảm ảnh hưởng của tán xạ.
- f - Có khoá liên động thường trực ở trạng thái làm việc để đảm bảo an toàn (để phòng sai sót trong khi thực hiện quy trình thao tác).
- g - Có hai loại tín hiệu bằng âm thanh và ánh sáng không phụ thuộc vào nhau nhưng đồng thời làm việc để cảnh báo nguy hiểm mỗi

khi cửa phòng chiếu xạ còn ở trạng thái chưa được đóng tới mức an toàn, và để báo hiệu an toàn mỗi khi cửa phòng chiếu xạ đang ở trạng thái được đóng đạt mức an toàn.

- h - Có tín hiệu ánh sáng đỏ nhấp nháy liên tục trên cửa phòng chiếu xạ khi nguồn bức xạ ở các trạng thái làm việc hoặc chưa an toàn.

2). Về mặt bảo hộ lao động:

- a - Luôn luôn mặc, đội, đi và đeo đầy đủ trang phục bảo hộ lao động theo đúng quy định.
- b - Luôn mang dụng cụ đo liều cá nhân đúng quy định trên trang phục bảo hộ lao động.
- c - Luôn cầm theo dụng cụ đo liều xách tay ở trạng thái làm việc theo đúng quy định mỗi khi đi vào phòng chiếu xạ.

3). Vào/ra phòng chiếu xạ:

- a - Chỉ được đem vào phòng chiếu xạ những thiết bị và dụng cụ không thể thiếu được cho mỗi lần làm việc.
- b - Trước khi đóng cửa phòng chiếu xạ, phải đem theo tất cả những thiết bị và dụng cụ mà vị trí quy định của chúng không phải là ở đó, hoặc chúng không cần thiết cho công việc liền ngay sau đó.

4). Để phòng có phản ứng kích hoạt xảy ra:

- a - Cần xem xét các biện pháp bảo vệ bổ sung đối với phóng xạ của các sản phẩm kích hoạt.
- b - Cần đợi một khoảng thời gian đủ dài để độ phóng xạ cảm ứng giảm xuống tới mức an toàn trước khi mở cửa vào phòng vừa được chiếu xạ bởi nguồn bức xạ iôn hoá mạnh.
- c - Vệ sinh thường xuyên, đảm bảo các mặt sàn, tường, trần và mọi thiết bị, vật dụng luôn sạch sẽ, không bị bụi, bẩn.

6.6. YÊU CẦU CHUNG ĐỐI VỚI MỖI CƠ SỞ BỨC XẠ

Ngoài việc đáp ứng những yêu cầu cụ thể vừa nêu trong các mục trên, *mỗi cơ sở sử dụng bức xạ ion hoá còn phải thực hiện những đòi hỏi chung sau đây:*

- 1) Phải có người chịu trách nhiệm chính về an toàn bức xạ. Người này phải thường xuyên kiểm tra mọi mặt về an toàn bức xạ và những mặt liên quan tới an toàn bức xạ để có biện pháp hữu hiệu đảm bảo an toàn bức xạ tại cơ sở bức xạ của đơn vị mình.
- 2) Việc đảm bảo an toàn chống cháy, nổ, để phòng ngập lụt, để phòng phản ứng hoá học, khí độc .v.v. đều phải được xem xét gắn liền với đảm bảo an toàn bức xạ.
- 3) Phải có biện pháp bảo vệ và quản lý thích hợp để luôn kiểm soát được vị trí và trạng thái của mọi nguồn phóng xạ của đơn vị mình.
- 4) Khi phát hiện tai nạn hay sự cố hoặc nghi vấn bất thường có liên quan tới nguồn bức xạ ion hoá, thì mỗi người *phải lập tức báo cáo* cho những người có trách nhiệm về quản lý theo đúng trách nhiệm của mình.
- 5) Trong trường hợp xảy ra sự cố hoặc tai nạn do bức xạ ion hoá thì phải làm những việc sau đây:
 - Lập tức báo cáo trung thực để có các biện pháp xử lý đúng và kịp thời;
 - Lập tức đưa người bị nạn đi cấp cứu;
 - Nếu khẩn cấp và trầm trọng thì phải lập tức báo cáo với các cơ quan có trách nhiệm để yêu cầu hỗ trợ quốc tế kịp thời.

THAY LỜI KẾT LUẬN

Sách “*An toàn bức xạ bảo vệ môi trường*” được biên soạn nhằm phục vụ đông đảo bạn đọc quan tâm tìm hiểu những vấn đề thuộc hai lĩnh vực lớn nhưng liên quan với nhau rất chặt chẽ là *xác định liều lượng bức xạ* và *bảo vệ an toàn bức xạ* trong môi trường làm việc cũng như môi trường sống nói chung.

So với khi đọc trang đầu tiên của cuốn sách, giờ đây, sau khi tìm hiểu xong tài liệu này, bạn đã có thể hình dung rõ ràng hơn nhiều về một loạt vấn đề; cụ thể như:

- Bức xạ iôn hoá có ảnh hưởng như thế nào đối với cơ thể sống? Các tiêu chuẩn quốc tế cơ bản về an toàn bức xạ là những gì? Và, áp dụng cho đối tượng nào thì bằng bao nhiêu?
- Có những phương pháp và phương tiện kỹ thuật nào được sử dụng để xác định liều lượng bức xạ iôn hoá? Chúng dựa trên cơ sở nào? Nguyên tắc hoạt động của chúng ra sao? Có thể dùng chúng để xác định liều hoặc suất liều hay cường độ của loại bức xạ iôn hoá nào? Dải liều lượng mà chúng có thể đo được là từ bao nhiêu đến bao nhiêu?
- Muốn sử dụng một cách an toàn nguồn bức xạ iôn hoá trong các lĩnh vực kinh tế, đời sống và môi trường, thì cần có những biện pháp bảo vệ thích hợp. Những nguyên tắc cơ bản trong bảo vệ an toàn bức xạ là gì?
- Phải tính toán và thiết kế để bảo vệ an toàn như thế nào khi làm việc với các nguồn bức xạ lượng tử?

- Phải tính toán và thiết kế để bảo vệ an toàn như thế nào khi làm việc với nguồn bức xạ notrôn?
- Phải thực hiện những yêu cầu gì đối với vùng kiểm soát và vùng giám sát?
- Phải đặc biệt chú ý thực hiện những yêu cầu gì khi làm việc với nguồn phóng xạ hở?
- Phải thực hiện những yêu cầu gì khi làm việc với nguồn bức xạ iôn hoá mạnh?
- Những yêu cầu chung nhất mà mỗi cơ sở sử dụng bức xạ iôn hoá phải thực hiện là gì? .v.v.

Tác giả chúc bạn đọc đạt nhiều kết quả tương xứng với tầm nhìn mới trong hoạt động chuyên môn của mình, góp phần *đẩy mạnh ứng dụng năng lượng nguyên tử vì mục đích hoà bình ở nước ta một cách an toàn!*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Phùng Văn Duân*. Các bài giảng về xác định liều lượng và bảo vệ an toàn bức xạ dành cho sinh viên chuyên ngành Kỹ thuật Hạt nhân và Vật lý Môi trường thuộc ngành Vật lý Kỹ thuật của Trường Đại học Bách khoa Hà Nội và cho lớp cán bộ các sở Khoa học Công nghệ và Môi trường.
2. *Ivanov V.I.* Kurs dozimetrii. Moskva, Atomizdat, 1970.
3. *M.I. Shal'nov*. Tkanevaya doza neitronov. Moskva, Atomizdat, 1960.
4. *B.M. Isaev, Yu.I. Bregadze*. Neitrony v radiobiologicheskome eksperimente. Moskva, izdatel'stvo "Nauka", 1967.
5. *H.J.M. Bowen and D. Gibbons*. Radioactivation analysis. Moskva, Atomizdat, 1968.
6. *V.M. Pasechnik*. Dozimetriya neitronov srednikh energii (0,01÷10 MeV). Kiev, izdatel'stvo "Naukova Dumka", 1972.
7. *Kimel L.P., Mashkovich V.P.* Zashita ot ioniziruyushikh izlucheni (spravochnik). Moskva, Atomizdat, 1972.
8. *Gusev N.G., Kimel L.P., Kovalev E.E. et al.* Zashita ot ioniziruyushikh izlucheni. Moskva, Atomizdat, 1972.
9. *Frank M., Shtolsz V.* Tverdotelnaya dozimetriya ioniziruyushhego izlucheniya. Moskva, Atomizdat, 1973.
10. *D. Sing, R.C. Bhatt and U. Madhvanath*. A simple dosimetry for nuclear accidents. International journal of Applied Radiation and Isotopes, 1977, Vol. 28, pp.513-519. Pergamon Press Printed in Great Britain.
11. *Kraitov S.N.* Radiation Accident Dosimetry. Ed. By I.B. Keirim-Markus. Moskva, Atomizdat, 1979.

12. *R.C.Bhatt*. Personnel neutron dosimetry in criticality accidents – a new approach. Nuclear instruments and methods, 164 (1979) 395–404. North-Holland publishing Co.
13. *V.I.Ivanov, V.P.Mashkovich, E.M.Szenter*. Mezjdunarodnaya sistema edinisz (SI) v atomnoi nauke i tekhnike. Moskva, Energoatomizdat, 1981.
14. *Samuel Glasstone and Alexander Sesonske*. Nuclear Reactor Engineering, third Ed., Publ. By Van Nostrand reinhold Company, New York, 1981.
15. Advances in dosimetry for fast neutrons and heavy charged particles for therapy applications. IAEA, Vienna, 1982.
16. *Shtolsz V., Bernkhardt P*. Dozimetriya ioniziruyushego izlucheniya. Riga, 'zinatne', 1982.
17. Osnovnye normy bezopasnosti pri radiazjionnoi zashite – izdanie 1982 goda. Seriya izdaniy po bezopasnosti N.9. IAEA, Vienna, 1984.
18. *H.L. Adair, S.Raman, B.L. Broadhead and R.L. Walker*. Section VII: Materials for neutron dosimetry: Availability and use of radiometric neutron monitor materials for characterizing nuclear reactor environments. Nuclear instruments and methods in Physics Research, A236 (1985) 591–599.
19. *Abramov A.I., Kazanskii Yu.A., Matusevich E.S*. Osnovy eksperimentalnykh metodov Yadernoi Fiziki. Moskva, Energoatomizdat, 1985.
20. *Herman Cember*. Introduction to Health Physics (second edition – revised and enlarged). Pergamon Press. New York, Oxford ... Tokyo, Toronto. 1989.
21. *Abel J. González*. Global level of radiation exposure: Latest international findings. The 1993 UNSCEAR report reconfirms that peaceful nuclear activities account for a small fraction of total exposures. IAEA BULLETIN, 4/1993. p.49-51.

22. *Joseph J. Kehayias, Hong Zhuang, Lisa Dowling, Ruimei Ma, Robert Moore.* Choice of detectors for in vivo elemental analysis by counting natural and neutron-induced gamma rays for medical applications. Nuclear instruments and methods in Physics Research, A353 (1994) 444–447.
23. International Conference 8-12 April 1996 Co-sponsored by the European Commission (EC), International Atomic Energy Agency (IAEA) and the World Health Organization (WHO) "One Decade After Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident". Summing of the Conference Results. 96-02659, IAEA/PI/DSE, July 1996.
24. *Rudolf K. Bock, Angela Vasilescu.* The Particle Detector BriefBook. Springer-Verlag Berlin heidelberg, 1998.
25. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRU 57. Issued by International Commission on Radiation Units and Measurements: 1 August 1998.
26. *Alan Martin and Samuael A. Harbison.* An introduction to radiation protection. Third edition 1986; Reprinted 1999 in London by Arnold, a member of the Holder Headline Group; co-published in New York by Oxford University Press Inc.
27. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety series No. 115. Jointly sponsored by FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, WHO. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.
28. Assessment of occupational exposure due to external sources of radiation. (Jointly sponsored by the IAEA and the International Labour Office). IAEA Safety standards series, safety guide No. RS-G-1.3. IAEA, Vienna, 1999.
29. *P.P. Denly and B. Heaton.* Physics for diagnostic radiology (2nd edition). Published in association with the Institute of Physics and Engineering in

- Medicine. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1999.
30. *Glenn F. Knoll*. Radiation detection and measurement (3rd edition). John Wiley & Sons, Inc. New York /Chichester /Weinheim /Brisbane /Toronto / Singapore. 2000.
 31. *A.V. Ignatyuk, Yu.P.Popov, V.I.Plyaskin*. Thermal cross sections and resonance integrals. (In: Low energy Neutron Physics, subvolume A, part 1. Edited by H.Schopper. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000 (printed in Germany).
 32. *John R. Lamarsh, Anthony J. Baratta*. Introduction to Nuclear Engineering (third edition). Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458. 2001.
 33. Technical reports series No.403. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes. Supplement to Technical reports series No.318. IAEA, Vienna,2001.

PHỤ LỤC 1

MỘT SỐ ĐẠI LƯỢNG VÀ ĐƠN VỊ THƯỜNG DÙNG TRONG AN TOÀN BỨC XẠ

Trong bảng dưới đây sử dụng những ký hiệu như sau:

- ♣ – Đơn vị đo thuộc hệ đơn vị đo lường tiêu chuẩn của quốc tế hiện nay (SI);
- ♦ – Đơn vị đo không thuộc hệ đo lường tiêu chuẩn hiện nay, nhưng thuận tiện nên vẫn còn được sử dụng trong thực tế;
- ⇔ – Chuyển đổi đơn vị.

Đại lượng			Đơn vị đo	
	Tên đại lượng	Ký hiệu	Tên đơn vị	Ký hiệu
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Năng lượng (Năng lượng của lượng tử, động năng của hạt, năng lượng nói chung)	E	♣ Joule [giul]	J
			♦ erg [erg]	erg
			♦ Electron volt [êlêctrôn vôn]	eV
			⇔ 1 joule = 1,00 N. m 1 erg = 1,00. 10 ⁻⁷ J 1eV = 1,60219.10 ⁻¹⁹ J 1MeV=1.10 ³ keV=1.10 ⁶ eV	
2	Độ phóng xạ (Hoạt độ phóng xạ)	A	♣ Becquerel [béccorel]	Bq
			♦ Curie [quyri]	Ci
			⇔ 1Bq=1phân rã hạt nhân xảy ra trong 1giây; 1 Ci = 3,7.10 ¹⁰ Bq	

Bảng Phụ lục 1 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3	Liều hấp thụ bức xạ (áp dụng cho bức xạ ion hoá loại bất kỳ)	D	♣ Gray [gray] ♦ Rad [rad] $\Leftrightarrow 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg};$ $1 \text{ Rad} = 1,00. 10^{-2} \text{ Gy};$ $1 \text{ Rad} = 1. 10^2 \text{ erg/g}$	Gy Rad
4	Liều chiếu xạ (chỉ áp dụng cho bức xạ lượng tử)	$D_{\text{chiếu xạ}}$	♣ Culông trên kilôgam ♦ Roentgen [rontghen] $\Leftrightarrow 1 \text{ R} = 2,5797. 10^{-4} \text{ C/kg}$ $1 \text{ C/kg} = 3,88. 10^3 \text{ R}$	C/Kg R
5	Liều tương đương và liều hiệu dụng (chỉ dùng trong bảo vệ an toàn bức xạ)	H	♣ Sivert [sivört] ♦ Rem [rem] $\Leftrightarrow 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg};$ $1 \text{ Rem} = 1,00. 10^{-2} \text{ Sv}$	Sv Rem
6	Liều hiệu dụng tập thể (chỉ dùng trong bảo vệ an toàn bức xạ)	S	♣ Người x sivert	Người x sivert
7	Điện tích	q	♣ Culông ♦ Đơn vị tĩnh điện CGSE ♦ êlectrôn $\Leftrightarrow 1 \text{ CGSE} = 3,33(3). 10^{-10} \text{ C};$ $ e = 1,602. 10^{-19} \text{ C} =$ $= 4,803. 10^{-10} \text{ CGSE}$ $1 \text{ CGSE} = 2,08. 10^9. e $	C CGSE e
8	Tiết diện phản ứng hạt nhân	σ	♦ barn $\Leftrightarrow 1 \text{ barn} = 1. 10^{-24} \text{ cm}^2$	barn
9	Bề dài, bề dày	d	♣ mét	m
		d_m	♦ gam trên cm^2	g/cm^2
			$\Leftrightarrow d_m[\text{g/cm}^2] = d[\text{cm}]. \rho[\text{g/cm}^3]$	

Bảng Phụ lục 1 (tiếp theo)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
10	Nhiệt độ	T hoặc t	♣ Kelvin	K
			♣ Độ Celsi	$^{\circ}\text{C}$
			$\Leftrightarrow T[\text{K}] = 273,15 + t[^{\circ}\text{C}]$	
11	Áp suất khí	p	♣ Pa [Pascal]	Pa
			♦ Atmospher [atmôtphe]	atm
			♦ Bar [bar]	bar
			♦ mmHg [milimét Hg]	mmHg
			♦ psia	psia
			$\Leftrightarrow 1 \text{ Pa} = 1,00 \text{ N/m}^2$ $1 \text{ atm kt} = 10 \text{ kG/m}^2$ $1 \text{ atm kt} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kG/cm}^2$ $1 \text{ atm kt} = 0,98066 \text{ bar}$ $1 \text{ atm kt} = 0,96784 \text{ atm vl}$ $1 \text{ atm vl} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ $1 \text{ atm vl} = 14,696 \text{ psia}$ $1 \text{ atm vl} = 1,013 \text{ bar}$ $1 \text{ bar} = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ $1 \text{ bar} = 0,98692 \text{ atm vl}$ $1 \text{ bar} = 14,5 \text{ psia} = 750 \text{ torr}$ $1 \text{ mmHg } (0^{\circ}\text{C}) = 1 \text{ torr}$ $1 \text{ torr} = 1,333 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ $1 \text{ torr} = 1,33 \text{ mbar}$ $1 \text{ torr} = 1,934 \cdot 10^{-2} \text{ psia}$	
			<u>Chú thích:</u> kt $\equiv$ kỹ thuật; vl $\equiv$ vật lý.	

PHỤ LỤC 2

CÁC LOẠI NGUỒN BỨC XẠ IÔN HOÁ

Bức xạ iôn hoá là tên gọi chung của các loại bức xạ có khả năng gây nên hiện tượng iôn hoá các phân tử, nguyên tử của môi trường khi tương tác với nó. Các loại bức xạ iôn hoá chủ yếu gồm có:

1. Các loại bức xạ hạt nhân nguyên tử và bức xạ Roentgen đặc trưng của nguyên tử;
2. Các loại chùm hạt có điện tích (thí dụ: chùm êlectrôn, chùm prôtôn, hoặc chùm iôn);
3. Bức xạ gây bởi chuyển động với sự thay đổi gia tốc của hạt có điện tích (thí dụ: bức xạ hãm từ các ống phát tia X, bức xạ synchrôtrôn);
4. Chùm phôtôn (thí dụ: tia cực tím....).

Trong danh sách nêu trên, thì ba loại bức xạ iôn hoá đầu tiên đòi hỏi phải được bảo vệ an toàn nghiêm ngặt hơn cả. Trong cuốn sách này, chúng ta dành quan tâm chủ yếu cho ba loại bức xạ đó.

Bức xạ hạt nhân là trường hợp riêng của bức xạ iôn hoá. Trong tự nhiên có bốn loại nguồn bức xạ hạt nhân; đó là các nguồn *bức xạ alpha, beta, gamma* và *neutron*.

Khi tương tác với môi trường, *bức xạ iôn hoá* làm sinh ra các iôn có điện tích không cùng dấu. Bức xạ iôn hoá thường được chia thành hai loại là: *bức xạ iôn hoá trực tiếp* và *bức xạ iôn hoá gián tiếp*. *Bức xạ iôn hoá trực tiếp* là loại bức xạ được tạo thành từ các hạt mang điện có động năng đủ lớn để có thể gây nên hiệu ứng iôn hoá khi chúng tương tác với môi trường. Bức xạ iôn hoá trực tiếp có thể được tạo thành từ các hạt prôtôn, êlectrôn, hạt alpha, hoặc các mảnh

vỡ của hạt nhân nguyên tử .v.v. *Bức xạ ion hoá gián tiếp* là loại bức xạ gồm những thành phần không có điện tích nhưng khi tương tác với môi trường, thì chúng có thể làm sinh ra bức xạ ion hoá trực tiếp. Bức xạ ion hoá gián tiếp có thể được tạo thành từ các hạt notrôn, các lượng tử gamma, các photon (của chùm tia tím, cực tím .v.v.).

Bức xạ ion hoá có thể chỉ gồm có một thành phần duy nhất (thí dụ: chỉ gồm có các electron hoặc chỉ gồm có các lượng tử gamma), hoặc, cũng có thể được tạo thành từ nhiều thành phần khác nhau (thí dụ: đồng thời bao gồm cả các electron và các lượng tử + .v.v.). Nguồn bức xạ ion hoá chỉ gồm một thành phần X thường được gọi là "*nguồn bức xạ X*" hoặc gọi tắt là "*nguồn X*" (thí dụ: nguồn bức xạ gamma hoặc nguồn gamma; nguồn bức xạ alpha hoặc nguồn alpha, nguồn bức xạ notrôn hoặc nguồn notrôn...). Dưới đây giới thiệu khái quát về một số loại nguồn bức xạ ion hoá.

1. Nguồn bức xạ alpha

Khi hạt nhân của các nguyên tử heli được phát ra do phản ứng hạt nhân hoặc do phân rã của các hạt nhân nguyên tử khác, thì chúng được gọi là các hạt alpha (ký hiệu là α). Nguồn bức xạ alpha là nguồn *phát ra các hạt alpha*. Các hạt alpha có sức đâm xuyên rất kém. Chỉ cần lớp không khí dày không quá 10 cm hoặc một vài tờ giấy bình thường cũng đủ làm cho chúng bị hấp thụ hoàn toàn. Tuy nhiên, nếu chúng lọt vào phổi, thì có thể gây nên tác hại lớn cho cơ thể.

2. Nguồn bức xạ beta và chùm hạt có điện tích

Nguồn bức xạ beta là nguồn *phát ra các hạt electron hoặc pôzitron* do phân rã của hạt nhân nguyên tử. Những electron và pôzitron được phát ra theo kiểu này, thì được gọi là các hạt beta (ký hiệu chung là β , còn chi tiết hơn nữa là β^- hoặc β^+ tương ứng với điện tích của chúng; electron có điện tích bằng $-1e$; pôzitron có điện tích bằng $+1e$, còn các đặc trưng khác thì hoàn toàn giống như của electron). Hạt beta do các đồng vị phát ra thường có động năng không quá

(3÷4) MeV. Do đó có thể hoàn toàn chặn đứng chúng nhờ một lớp bảo vệ bằng không khí dày 17m, hoặc bằng 2 cm nước, hay 9mm nhôm, hoặc 3,3 mm sắt...

Chùm *êlêctrôn* năng lượng cao tới hàng chục MeV, hàng trăm MeV hoặc hàng nghìn MeV có thể được tạo thành và phát ra từ các máy gia tốc *êlêctrôn*. Ngày nay các loại nguồn phát chùm *êlêctrôn* năng lượng cao được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp và y tế.

Các hạt *bêta* hoặc chùm *êlêctrôn*, trong khi xuyên qua một lớp vật chất nào đó, có thể bị giảm tốc độ chuyển động (nghĩa là bị "hãm lại" do tương tác với môi trường) đồng thời phát ra các lượng tử. Tập hợp các lượng tử này được gọi là "*bức xạ hãm*". Phổ *bức xạ hãm* có giá trị năng lượng lớn nhất bằng động năng ban đầu của hạt có điện tích. Máy phát Ronghen hay còn gọi là "máy phát tia X" hoặc "máy X-quang" mà chúng ta thường thấy trong các bệnh viện hoặc ở một số cơ sở công nghiệp cũng chính là loại máy tạo ra "*bức xạ hãm*" và "*bức xạ Ronghen đặc trưng*" của nguyên tố làm bia anốt. Về bản chất, "*bức xạ hãm*" và "*bức xạ Ronghen đặc trưng*" là loại *bức xạ lượng tử* giống như *bức xạ gamma* được trình bày ở mục 3 dưới đây. Trong tự nhiên, hầu hết các đồng vị phóng xạ *bêta* đồng thời phát ra lượng tử *gamma*.

Bức xạ lượng tử do chùm hạt *êlêctrôn* phát ra khi bị hãm lại trong lớp vật chất thì thường được gọi là *bức xạ hãm* (nguyên văn trong tiếng Đức là *Bremstrahlung*). Các lượng tử này còn được một số nhà Vật lý và Y-Vật lý gọi là "Photon"; một số hãng chế tạo máy gia tốc còn gọi chúng là "tia X".

Trong một số loại máy gia tốc, *êlêctrôn* hoặc các loại hạt có điện tích khác (như *prôtôn*, hay các ion có khối lượng nặng hơn) không chuyển động thẳng, mà chuyển động theo quỹ đạo tròn hoặc xoáy. Khi đó hướng vectơ vận tốc của chúng thay đổi theo thời gian. Do vậy chúng phát lượng tử trong quá trình được gia tốc. *Bức xạ* kiểu này thường được gọi là *bức xạ synchrotron*.

3. Nguồn *bức xạ gamma*. *Bức xạ lượng tử*

Nguồn *bức xạ gamma* là nguồn phát ra các lượng tử *gamma* trong quá

trình biến đổi của hạt nhân nguyên tử. Lượng tử gamma (ký hiệu là γ) có cùng bản chất vật lý như photon, nhưng có năng lượng cao hơn rất nhiều.

Trong sách này chúng tôi sử dụng các thuật ngữ “bức xạ hãm”, “bức xạ Ronghen”, “bức xạ gamma” và “bức xạ synchrôtron” khi muốn nhấn mạnh sự khác nhau về nguồn gốc của lượng tử được phát ra; thuật ngữ “bức xạ lượng tử” được sử dụng trong trường hợp chung, khi không cần phân biệt sự khác nhau này. Một số nhà vật lý sử dụng thuật ngữ “photon” để chỉ các lượng tử được phát ra trong quá trình biến đổi hạt nhân nguyên tử và để chỉ lượng tử của bức xạ hãm. Tuy nhiên, trong sách này, để tránh sự nhầm lẫn giữa các loại bức xạ iôn hoá, chúng tôi chỉ dùng thuật ngữ “photon” để chỉ các lượng tử của ánh sáng (như đã nêu ở ngay phần mở đầu của phụ lục này).

Lượng tử là phần tử vật chất có hai đặc trưng nổi bật là: không có khối lượng, và, không có điện tích. Do vậy, nó có khả năng “đâm xuyên vật chất” rất mạnh. Lượng tử có năng lượng càng cao thì sức đâm xuyên của nó càng mạnh. Lượng tử gamma do các nguồn đồng vị phát ra thường có năng lượng không quá (3÷ 4) MeV. Lượng tử có năng lượng cao nhất của bức xạ hãm gây bởi các nguồn beta cũng thường không lớn hơn giá trị này, còn đối với các máy phát Ronghen - nó thường có giá trị nhỏ hơn hàng chục hoặc thậm chí hàng trăm lần. Trong khi đó, lượng tử có năng lượng cao nhất của bức xạ hãm gây bởi chùm electron phát ra từ máy gia tốc có thể đạt tới hàng trăm hoặc thậm chí hàng nghìn MeV.

Phần lớn các nguồn đồng vị phóng xạ beta đồng thời là nguồn gamma.

4. Các loại nguồn bức xạ nơtron

Notrôn và prôtôn là những thành phần cấu tạo nên hạt nhân nguyên tử. Notrôn lại là hạt có điện tích bằng 0. Do vậy, nó có đặc điểm tương tác với vật chất rất phức tạp, và nói chung, sức đâm xuyên của nó cũng rất mạnh. Nhiều cơ chế tương tác của notrôn với vật chất dẫn tới sự phát lượng tử gamma. Trong hầu hết các trường hợp, nguồn notrôn đồng thời còn là nguồn gamma mạnh.

Trong tự nhiên rất hiếm có đồng vị phát ra nơtron do phân rã của hạt nhân nguyên tử. Người ta thường chế tạo nguồn phát nơtron theo mấy cách như sau.

Cách thứ nhất để tạo nguồn nơtron là sử dụng máy gia tốc tạo chùm hạt có điện tích chuyển động với vận tốc rất lớn rồi cho chúng bắn vào bia làm từ một nguyên tố có hạt nhân đồng vị thích hợp để gây phản ứng phát nơtron. Trong trường hợp này công suất của nguồn nơtron được điều khiển tức thời, có thể giảm xuống bằng không ngay khi máy bị ngắt điện áp nuôi. (Máy gia tốc cũng được sử dụng rộng rãi để tạo nên các nguồn alpha, beta và gamma).

Cách thứ hai để tạo nguồn nơtron là dùng nguồn đồng vị phóng xạ alpha thích hợp tiếp xúc với bia làm từ nguyên tố nhẹ (như Be hay B) để gây phản ứng hạt nhân (α, n), hoặc cho nguồn đồng vị phóng xạ gamma có năng lượng thích hợp tiếp xúc với bia làm từ Be hoặc nước nặng (D_2O) để gây phản ứng hạt nhân (γ, n). Theo cách này, thông thường cả hệ thống gồm bia và đồng vị phóng xạ đều được đặt gọn trong bình chứa rất chắc chắn, công suất của nguồn chỉ giảm dần theo qui luật hàm mũ phụ thuộc vào tỉ số giữa chu kì rã nửa của đồng vị phóng xạ và thời gian (tính từ thời điểm đóng kín bình bảo vệ tới thời điểm bất kỳ sau đó). Như vậy, kể từ khi nguồn nơtron loại này được đóng kín trong bình chứa thì không ai có thể điều khiển được công suất của nguồn nữa.

Tuy nhiên, theo cách thứ nhất và thứ hai thường chỉ tạo được những nguồn nơtron có công suất không lớn.

Cách thứ ba để tạo nguồn nơtron là sử dụng các phản ứng phân chia hạt nhân. (Phản ứng phân chia hạt nhân vẫn được một số người quen gọi là phản ứng phân hạch. Từ Hán Việt “hạch” có ý nghĩa tương ứng với từ thuần Việt là “hạt”. Trong sách này chúng tôi cố gắng sử dụng các từ thuần Việt được nhiều nhất trong phạm vi có thể được). Có thể thực hiện được quá trình phân chia hạt nhân trong một thể tích hữu hạn có đủ những yếu tố gây phản ứng hạt nhân loại này bằng một trong số ba biện pháp sau đây:

- a) Sử dụng riêng các lò phản ứng hạt nhân; hoặc
- b) Sử dụng máy gia tốc kết hợp với lò phản ứng hạt nhân; hoặc

c) Kích thích hoạt động của vùng hoạt của vũ khí hạt nhân.

Lò phản ứng hạt nhân là nơi sản sinh ra nơtrôn với công suất rất lớn và có phổ năng lượng trải rộng từ vùng năng lượng nhiệt ($\sim 0,025$ eV) tới gần hai chục MeV. Tại đây, ứng với mỗi sự kiện phân chia hạt nhân, có tới 99% số nơtrôn được phát ra trong khoảng khắc cỡ vài chục phần triệu giây. Trong lò phản ứng hạt nhân, song song với quá trình tạo nơtrôn, còn xảy ra những quá trình làm phát ra các lượng tử gamma với phổ năng lượng trải rộng tới trên chục MeV. Quá trình phân chia hạt nhân còn tạo nên rất nhiều đồng vị phóng xạ với đủ kiểu phân rã: alpha, beta, gamma. Tuy nhiên, xét từ góc độ an toàn bức xạ thông thường, đối với khu vực lò phản ứng hạt nhân, thì chỉ có bức xạ nơtrôn và bức xạ lượng tử (ở đây gồm bức xạ gamma và bức xạ hãm) mới là mục tiêu chính cần bảo vệ. Xét dưới góc độ an toàn hạt nhân, thì bức xạ nơtrôn là mục tiêu chính cần bảo vệ.

Để bảo vệ an toàn đối với bức xạ nơtrôn, người ta phải nhanh chóng làm giảm động năng của nơtrôn. (Quá trình này được gọi là *làm chậm nơtrôn*. Có nhiều loại vật liệu được sử dụng để làm chậm nơtrôn, tùy thuộc vào loại nguồn phát nơtrôn). Tiếp đó cần làm giảm số nơtrôn và số lượng tử được giải phóng do tương tác của nơtrôn với vật chất .v.v.

PHỤ LỤC 3

CÁC BẢNG TÍNH SẴN BỀ DÀY LÀM YẾU BỨC XẠ GAMMA TRONG MỘT SỐ VẬT LIỆU BẢO VỆ THƯỜNG DÙNG

Phụ lục này gồm một số bảng tính sẵn bề dày làm yếu bức xạ gamma trong một số vật liệu bảo vệ thường dùng như nước, bê tông, sắt, chì, vonfram và uran đối với bức xạ gamma có năng lượng trong khoảng từ 0,1MeV tới 10MeV. Các bảng tính sẵn trong phụ lục này chính là các bảng số liệu từ B6.1-3 đến B6.1-8 đã được đề cập tới trong chương 6, mục 6.1.2.3. Chúng được sử dụng trong tính toán và thiết kế bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử.

Trong các bảng này, cột thứ nhất cho thấy *số lần làm yếu bức xạ k_x* . Để cho gọn, các giá trị $k_x \geq 100$ được thể hiện dưới dạng $mE_n \equiv m \cdot 10^n$ (thí dụ: $1E2 \equiv 1 \cdot 10^2$, $5E2 \equiv 5 \cdot 10^2$.v.v.).

Biết những điều kiện như năng lượng của lượng tử, vật liệu làm tường bảo vệ và số lần làm yếu (k_x) cần đạt được, thì có thể tìm được bề dày cần thiết của lớp tường bảo vệ.

Bảng B6.1-3. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng nước, cm ($\rho=1\text{g/cm}^3$)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0.1	0.142	0.2	0.279	0.3	0.4	0.412	0.5	0.6	0.661	0.7	0.8	0.9
1.5	19	21	23	23	23	22	21.9	21	21	20.4	20	20	20
2	21	24	27	28	28	28	28	28	27	27	27	27	28
5	25	30	37	42	43	45	45	46	47	47	47	48	49
8	27	33	41	47	49	52	52	54	54	54	54	56	57
10	30	36	45	50	51	54	54	57	57	57	58	60	61
20	33	40	50	50	60	64	64	68	69	70	71	72	74
30	37	44	54	63	65	70	70	73	75	76	77	79	81
40	38	46	57	66	69	74	74	77	80	81	82	84	87
50	39	48	60	69	71	77	77	80	83	84	85	88	90
60	40	49	62	71	74	79	79	83	86	87	88	91	93
80	45	53	65	74	77	83	83	87	90	92	93	96	99
1E2	46	55	67	77	80	86	86	89	93	95	96	100	103
2E2	48	58	73	84	87	94	95	99	103	105	107	111	115
5E2	52	65	83	94	97	104	105	110	115	118	120	124	129
1E3	58	71	89	102	105	113	114	119	125	129	131	136	141
2E3	63	76	95	108	112	120	121	128	134	138	140	146	152
5E3	68	82	102	117	121	131	132	140	146	150	153	160	165
1E 4	74	89	109	125	129	139	140	148	155	159	162	169	177
2E 4	80	94	114	131	135	147	148	157	165	169	172	180	187
5E 4	82	98	121	139	144	157	158	168	177	182	185	193	201
1E 5	88	104	126	145	150	164	165	176	185	190	194	203	211
2E 5	90	108	133	152	157	172	173	184	194	199	203	213	221
5E5	97	115	140	160	166	182	181	195	205	212	216	226	236
1E 6	102	120	146	166	172	189	191	203	213	220	224	234	245
2E 6	110	128	153	173	179	195	197	211	221	228	232	242	252
5E 6	120	136	160	181	187	205	205	221	234	242	247	258	270
1E 7	129	145	167	173	193	212	214	229	242	250	256	269	280

Bảng B6.1-3. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng nước, cm ($\rho=1\text{g/cm}^3$)

(Phần tiếp theo)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV													
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	
1,5	20	20	19	19	19	20	20	20,7	21	22	23	25	25	
2	28	28	28	28	29	30	31	33,0	34	35	39	41	41	
5	49	50	52	54	56	59	61	65	67	71	83	89	93	
8	57	58	62	66	68	72	74	79	81	89	105	113	120	
10	61	62	66	70	74	78	80	85	88	97	115	124	131	
20	74	76	82	87	91	96	99	107	111	125	144	159	170	
30	81	83	89	94	100	105	109	118	122	139	162	178	190	
40	87	89	95	101	106	112	116	126	131	149	173	192	204	
50	90	93	99	106	112	118	122	133	138	156	184	204	217	
60	93	96	102	109	116	123	127	139	144	162	191	213	226	
80	99	102	110	116	123	130	134	147	153	171	204	225	240	
1E2	103	105	114	120	128	134	139	153	159	180	211	235	251	
2E2	115	118	127	135	143	152	157	172	179	204	242	268	285	
5E2	129	133	145	155	164	173	180	199	207	236	278	310	330	
1E3	141	145	157	168	178	188	195	216	225	257	305	343	366	
2E3	152	156	170	182	193	204	212	235	245	280	330	372	398	
5E3	165	171	185	199	212	224	234	259	271	308	368	413	443	
1E 4	177	183	198	213	227	241	251	278	290	330	393	444	477	
2E 4	187	194	211	227	243	258	270	298	311	354	420	475	511	
5E 4	201	208	227	244	261	277	290	320	334	383	457	516	556	
1E 5	211	220	240	259	276	294	306	339	353	404	484	547	590	
2E 5	221	231	252	272	290	308	322	356	372	426	511	578	622	
5E5	236	246	268	289	310	329	343	389	397	454	543	616	665	
1E 6	245	254	279	302	324	345	360	396	417	478	571	649	701	
2E 6	252	262	287	310	334	357	373	412	435	498	597	677	733	
5E 6	270	281	308	333	357	379	397	440	462	528	633	719	778	
1E 7	280	292	318	345	370	393	411	458	480	549	659	748	810	

Bảng B6.1-4. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng bê tông, cm ($\rho=2,3 \text{ g/cm}^3$)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,1	0,142	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,661	0,7	0,8	0,9
1,5	2,6	3,5	4,7	6,0	6,3	7,5	7,6	8,2	8,2	8,2	8,2	8,3	8,3
2	4,7	5,9	7,6	9,4	9,9	11,3	11,4	12,3	12,4	12,4	12,4	12,6	12,7
5	5,6	7,9	11,0	14,6	15,5	18,8	19,1	21,1	21,8	22,1	22,3	22,6	23,0
8	7,0	9,5	12,9	16,8	17,8	22,0	22,3	24,6	25,6	26,1	26,4	27,2	27,9
10	8,2	10,9	14,6	18,6	19,7	23,7	23,9	25,8	26,8	27,3	27,6	28,4	29,1
20	8,2	11,2	15,3	20,1	21,4	25,8	26,3	29,9	31,9	32,9	33,6	35,5	36,2
30	8,5	11,8	16,4	21,5	22,8	27,7	28,3	32,9	34,8	35,8	36,4	37,8	39,2
40	8,5	12,3	17,6	22,8	24,2	29,6	30,1	34,0	36,2	37,2	37,9	39,6	41,3
50	9,9	13,2	18,8	23,8	25,1	30,8	31,3	35,0	37,6	38,8	39,4	41,2	42,8
60	11,0	14,8	20,0	24,8	26,1	31,7	32,3	36,4	38,5	39,7	40,5	42,5	44,1
80	11,5	15,2	20,4	26,2	27,7	33,6	34,2	38,7	41,1	42,3	43,0	44,8	46,5
1E2	11,5	15,9	21,1	27,3	28,9	35,2	35,8	39,9	43,0	44,4	45,3	47,2	48,8
2E2	12,7	17,1	23,5	30,5	32,4	39,2	39,8	44,6	47,9	49,5	50,5	52,6	54,6
5E2	13,8	18,3	24,6	33,0	35,2	43,9	44,7	50,5	54,5	56,2	57,3	58,8	62,5
1E3	15,5	20,8	28,2	36,9	39,2	48,1	48,9	55,2	59,2	61,1	62,5	65,3	67,8
2E3	17,6	23,0	30,5	39,8	42,3	52,4	53,3	59,9	64,1	66,1	67,4	70,4	73,2
5E3	18,8	24,8	33,1	43,0	45,6	56,4	57,6	65,7	70,0	72,4	74,0	77,0	80,2
1E 4	18,8	25,7	35,2	45,7	48,5	60,3	61,4	69,3	74,7	77,4	79,1	82,9	86,2
2E 4	21,1	28,4	38,4	49,1	51,9	63,4	64,5	72,8	78,2	81,2	83,1	87,3	91,1
5E 4	23,3	31,3	42,3	53,4	56,4	68,6	69,7	78,1	83,4	86,6	88,7	93,4	97,9
1E 5	30,5	38,9	50,5	61,6	64,6	75,1	76,0	82,8	88,3	91,5	93,5	98,1	102,5
2E 5	38,3	46,0	56,7	67,9	69,8	79,4	80,3	86,9	92,4	95,8	97,7	102,8	108,0
5E5	44,8	51,8	61,5	71,7	73,7	83,7	84,6	91,6	98,1	101,6	103,9	109,5	114,8
1E 6	49,3	56,5	66,4	77,0	79,8	89,8	90,7	97,4	103,7	107,0	109,2	114,1	119,5
2E 6	57,6	64,1	73,1	82,1	84,5	93,3	94,2	101,0	107,4	111,2	113,6	119,7	125,6
5E 6	59,4	67,9	79,7	88,3	91,6	100,6	101,5	108,0	114,1	117,8	120,2	126,0	127,6
1E 7	64,0	72,8	84,9	93,4	95,7	104,7	105,4	110,3	117,4	121,2	123,6	130,0	136,2

Bảng B6.1-4. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng bê tông, cm ($\rho=2,3 \text{ g/cm}^3$)
(Phần tiếp theo)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
1,5	8,3	8,5	8,6	8,7	8,7	8,8	8,9	9,2	9,4	10,0	11,7	11,7	11,7
2	12,7	12,9	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	15,0	15,3	16,4	18,8	18,8	18,8
5	23,0	23,5	24,6	25,8	27,0	28,2	29,4	31,8	32,9	35,2	38,7	39,3	39,9
8	27,9	28,8	30,5	32,2	33,8	35,2	36,4	38,8	39,9	43,2	48,1	48,7	49,3
10	29,1	29,9	31,9	34,0	35,9	37,7	39,0	42,0	43,4	47,5	51,6	52,8	54,0
20	36,2	37,0	39,9	42,5	44,8	47,0	48,6	52,3	54,0	58,7	64,6	65,7	69,3
30	39,2	40,5	43,7	46,5	49,3	51,6	53,5	57,9	59,9	65,7	71,6	72,8	78,1
40	41,3	42,8	45,3	49,8	52,8	55,2	57,3	61,9	64,0	69,8	77,5	79,2	84,5
50	42,8	44,6	48,5	52,1	55,2	58,1	60,1	64,8	66,9	72,8	81,6	83,9	89,8
60	44,1	45,8	50,1	54,0	57,5	60,5	62,7	67,6	69,8	74,0	85,1	88,0	93,9
80	46,5	48,1	52,4	56,4	59,9	63,4	65,7	71,4	74,0	81,0	90,4	93,9	100,4
1E2	48,8	50,5	54,5	58,3	62,2	65,7	68,6	74,7	77,5	84,5	95,1	98,0	105,1
2E2	54,6	56,4	60,8	65,3	69,7	74,0	77,2	84,6	88,6	95,7	108,0	112,1	120,9
5E2	62,5	64,6	69,8	74,8	79,8	84,5	88,5	97,1	101,0	110,4	124,4	129,7	139,7
1E3	67,8	70,4	76,1	81,7	87,6	92,7	97,0	106,6	110,9	120,9	137,9	143,2	155,0
2E3	73,2	75,7	82,2	88,5	94,6	100,4	104,0	115,6	120,9	132,1	150,3	156,1	168,5
5E3	80,2	82,8	90,2	97,4	104,2	110,9	115,5	127,3	132,7	146,8	166,7	173,8	186,7
1E 4	86,2	89,2	97,2	105	111,5	118,6	124,7	137,4	143,2	156,7	179,0	187,8	201,3
2E 4	91,1	94,5	103	111	118,6	126,2	131,7	146,1	152,6	167,3	190,8	201,9	216,0
5E 4	97,9	102	112	120	128,4	136,2	142,0	159,1	164,9	181,4	206,6	218,4	233,6
1E 5	102,5	107	117	127	135,7	144,4	150,7	166,6	173,8	191,4	218,4	231,3	248,9
2E 5	108,0	113	125	136	145,1	153,8	160,2	171,9	177,3	201,9	231,3	245,4	263,0
5E5	114,8	120	134	143	152,6	162,0	169,2	187,6	196,0	214,8	247,1	261,8	281,2
1E 6	119,5	124	140	150	160,6	171,4	178,6	193,0	205,4	225,4	260,6	274,7	295,8
2E 6	125,6	132	148	158	169,2	179,6	187,2	205,4	213,7	237,1	272,4	287,6	308,8
5E 6	127,6	134	155	166	178,0	189,0	197,8	218,4	227,8	250,1	287,6	302,9	327,5
1E 7	136,2	142	160	171	183,6	194,9	203,4	225,8	236,0	259,4	299,4	314,6	340,5

Bảng B6.1-5. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng sắt, cm ($\rho=7,89 \text{ g/cm}^3$)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,1	0,142	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,661	0,7	0,8	0,9
1,5	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,4	1,6	1,7	1,8	1,85	2,0	2,05
2	0,7	0,9	1,2	1,6	1,7	2,2	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
5	1,4	1,9	2,5	3,2	3,4	4,1	4,2	4,8	5,1	5,3	5,5	5,7	6,1
8	1,7	2,3	3,1	4,0	4,2	5,1	5,2	5,8	6,3	6,5	6,7	7,1	7,5
10	1,9	2,5	3,5	4,4	4,6	5,6	5,7	6,3	6,8	7,1	7,3	7,7	8,1
20	2,3	3,1	4,3	5,4	5,7	6,8	6,9	7,7	8,3	8,6	8,8	9,4	9,8
30	2,4	3,3	4,5	5,8	6,2	7,5	7,6	8,5	9,2	9,6	9,8	10,4	10,9
40	2,5	3,5	4,8	6,2	6,6	8,0	8,1	9,1	9,8	10,2	10,5	11,1	11,7
50	2,9	3,9	5,2	6,7	7,1	8,4	8,5	9,5	10,3	10,7	11,0	11,6	12,2
60	3,1	4,1	5,6	7,1	7,5	8,8	8,9	9,8	10,7	11,1	11,4	12,1	12,7
80	3,2	4,3	5,9	7,3	7,7	9,2	9,3	10,4	11,2	11,7	12,0	12,7	13,4
1E2	3,4	4,5	6,1	7,7	8,1	9,6	9,7	10,8	11,7	12,2	12,5	13,2	13,9
2E2	4,2	5,4	7,0	8,7	9,1	10,7	10,9	12,0	13,1	13,6	14,0	14,8	15,6
5E2	4,4	5,8	7,7	9,6	10,1	12,0	12,2	13,7	14,9	15,6	16,0	17,0	17,9
1E3	4,5	6,1	8,2	10,4	11,0	13,2	13,4	15,0	16,3	17,0	17,5	18,6	19,6
2E3	4,9	6,6	9,0	10,7	11,1	14,4	14,6	16,2	17,7	18,5	19,0	20,2	21,2
5E3	5,6	7,5	10,1	11,9	13,4	15,8	16,0	17,7	19,3	20,1	20,7	22,0	23,2
1E 4	6,8	8,8	11,5	13,0	14,7	17,1	17,3	19,0	20,7	21,6	22,3	23,6	24,9
2E 4	8,0	10,1	12,9	15,3	16,0	18,3	18,5	20,2	21,9	22,8	23,4	24,8	26,3
5E 4	8,6	10,8	13,8	16,3	17,0	19,6	19,9	21,8	23,6	24,6	25,2	26,9	28,4
1E 5	10,0	12,4	14,8	17,7	18,2	20,8	21,1	23,0	24,9	26,0	26,7	28,4	30,0
2E 5	11,3	13,2	15,9	18,6	19,3	21,8	22,1	24,1	26,1	27,3	28,1	29,9	31,6
5E5	12,0	14,1	16,9	19,7	20,4	23,2	23,5	25,6	27,8	29,1	29,9	31,8	33,6
1E 6	12,8	14,5	17,9	20,6	21,4	24,2	24,5	26,7	28,9	30,2	31,2	33,3	35,2
2E 6	13,5	15,8	18,0	21,4	22,1	25,0	25,3	27,7	30,3	31,8	32,7	34,8	36,8
5E 6	14,5	16,8	19,4	22,4	23,2	26,5	26,8	29,3	32,2	33,7	34,6	36,7	38,8
1E 7	15,0	17,2	20,3	23,5	24,3	27,6	27,9	30,5	33,2	34,8	35,8	38,1	40,2

Bảng B6.1-5. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng sắt, cm ($\rho=7,85 \text{ g/cm}^3$)
(Phần tiếp theo)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV													
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	
1,5	2,05	2,1	2,15	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,4	2,0	
2	3,2	3,3	3,45	3,6	3,8	3,9	4,1	4,3	4,4	4,5	4,6	4,0	3,4	
5	6,1	6,4	6,9	7,4	7,8	8,1	8,3	8,7	8,9	9,4	9,6	9,0	8,0	
8	7,5	7,8	8,5	9,1	9,6	10,1	10,3	10,9	11,2	11,6	12,1	11,2	10,4	
10	8,1	8,5	9,3	10,0	10,6	11,0	11,4	11,9	12,2	12,6	13,2	12,4	11,4	
20	9,8	10,3	11,3	12,2	13,0	13,6	14,1	14,9	15,3	15,9	16,6	16,0	15,0	
30	10,9	11,4	12,6	13,6	14,4	15,1	15,6	16,6	17,0	17,7	18,8	18,0	17,0	
40	11,7	12,2	13,3	14,4	15,3	16,1	16,6	17,6	18,2	19,1	20,4	19,4	18,4	
50	12,2	12,7	13,9	15,1	16,1	16,9	17,5	18,6	19,1	20,0	21,5	20,6	19,6	
60	12,7	13,2	14,5	15,7	16,7	17,6	18,2	19,4	19,9	21,0	22,4	21,4	20,6	
80	13,4	14,0	15,5	16,3	17,8	18,7	19,4	20,6	21,2	22,2	24,0	23,0	22,0	
1E2	13,9	14,5	16,1	17,3	18,5	19,5	20,2	21,5	22,1	23,3	25,0	24,0	23,1	
2E2	15,6	16,3	18,0	19,6	20,8	22,0	22,8	24,3	25,0	26,6	28,4	27,4	26,6	
5E2	17,9	18,7	20,6	22,3	23,7	25,0	25,9	27,9	28,8	30,6	32,7	32,0	31,2	
1E3	19,6	20,5	22,6	24,4	26,1	27,5	28,6	30,7	31,7	33,7	36,0	35,4	34,6	
2E3	21,2	22,2	24,5	26,5	28,3	30,0	31,2	33,5	34,6	36,8	39,2	38,7	37,9	
5E3	23,2	24,3	27,0	29,4	31,4	33,3	34,3	36,9	38,2	40,7	43,2	43,0	42,2	
1E 4	24,9	26,0	28,8	31,3	33,6	35,5	36,9	39,6	40,9	43,7	46,5	46,3	45,2	
2E 4	26,3	27,6	30,6	33,2	35,6	37,8	39,2	42,0	43,4	46,5	50,8	49,6	48,6	
5E 4	28,4	29,9	33,3	35,9	38,4	40,8	42,3	45,7	47,2	50,4	55,0	54,0	53,0	
1E 5	30,0	31,5	34,9	38,0	40,7	43,2	44,7	48,3	50,0	53,4	58,3	57,2	56,1	
2E 5	31,6	33,3	36,8	40,1	43,0	45,4	47,1	50,9	52,6	56,4	61,8	60,8	59,8	
5E5	33,6	35,4	39,1	42,5	45,5	48,3	49,9	54,5	56,1	60,2	66,0	65,0	64,0	
1E 6	35,2	37,0	41,1	44,7	47,8	50,6	52,3	56,8	58,8	63,3	69,0	68,3	67,0	
2E 6	26,8	38,7	42,9	46,6	49,9	52,8	54,7	59,1	61,4	66,2	72,3	71,2	70,3	
5E 6	38,8	40,9	45,5	49,4	52,7	55,7	57,7	62,6	64,9	70,3	76,5	75,5	74,8	
1E 7	40,2	42,4	47,1	51,3	54,8	57,9	60,1	65,1	67,5	73,1	79,4	78,8	78,0	

Bảng B6.1-6. Bề dày của tường bảo vệ bằng chì, cm ($\rho=11,34 \text{ g/cm}^3$)

Số lần làm yếu K_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,1	0,142	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,661	0,7	0,8	0,9
1,5	0,05	0,07	0,1	0,14	0,15	0,2	0,2	0,2	0,3	0,36	0,4	0,6	0,7
2	0,1	0,14	0,2	0,28	0,3	0,4	0,41	0,5	0,7	0,76	0,8	1,0	1,15
5	0,2	0,30	0,4	0,56	0,6	0,9	0,92	1,1	1,5	1,74	1,9	2,2	2,5
8	0,2	0,3	0,5	0,64	0,8	1,1	1,15	1,5	1,95	2,20	2,35	2,85	3,2
10	0,3	0,4	0,55	0,8	0,9	1,3	1,34	1,6	2,1	2,4	2,6	3,05	3,5
20	0,3	0,4	0,6	1,0	1,1	1,5	1,6	2,0	2,6	3,0	3,25	3,85	4,4
30	0,35	0,5	0,7	1,0	1,15	1,7	1,8	2,3	3,0	3,4	3,65	4,3	4,95
40	0,4	0,6	0,8	1,20	1,3	1,8	1,9	2,4	3,1	3,5	3,8	4,5	5,2
50	0,4	0,6	0,85	1,28	1,4	1,95	2,0	2,6	3,25	3,7	3,95	4,6	5,3
60	0,45	0,6	0,9	1,3	1,45	2,05	2,1	2,7	3,45	3,9	4,2	4,95	5,6
80	0,45	0,7	1,0	1,4	1,55	2,15	2,2	2,8	3,7	4,2	4,5	5,3	6,0
1E2	0,5	0,7	1,0	1,5	1,6	2,3	2,4	3,0	3,85	4,4	4,7	5,5	6,3
2E2	0,6	0,8	1,25	1,8	1,9	2,6	2,7	3,4	4,4	4,9	5,3	6,3	7,2
5E2	0,65	1,0	1,4	2,0	2,2	3,1	3,2	4,0	5,1	5,7	6,1	7,2	8,2
1E3	0,7	1,0	1,5	2,2	2,4	3,3	3,4	4,4	5,7	6,5	6,95	8,1	9,2
2E3	0,85	1,2	1,7	2,5	2,7	3,8	3,9	5,0	6,3	7,1	7,6	8,8	10,0
5E3	0,9	1,3	1,9	2,8	3,0	4,2	4,4	5,5	7,0	7,9	8,5	9,9	11,2
1E 4	1,05	1,5	2,1	3,0	3,3	4,55	4,7	5,9	7,5	8,5	9,1	10,6	12,0
2E 4	1,1	1,6	2,2	3,2	3,5	4,85	5,0	6,3	8,0	9,0	9,7	11,3	12,8
5E 4	1,15	1,65	2,35	3,4	3,7	5,2	5,4	6,9	8,7	9,8	10,5	12,3	14,0
1E 5	1,15	1,7	2,4	3,5	3,8	5,4	5,6	7,2	9,2	10,4	11,1	13,0	14,8
2E 5	1,3	1,85	2,6	3,8	4,1	5,7	5,9	7,6	9,6	10,8	11,6	13,6	15,5
5E5	1,4	2,0	2,8	4,1	4,4	6,1	6,3	8,2	10,2	11,5	12,3	14,4	16,5
1E 6	1,45	2,1	3,0	4,3	4,7	6,5	6,8	8,7	10,9	12,2	13,1	15,3	17,5
2E 6	1,55	2,2	3,2	4,6	5,0	7,0	7,2	9,1	11,5	13,0	14,0	16,3	18,5
5E 6	1,65	2,3	3,3	4,9	5,3	7,3	7,6	9,6	12,1	13,7	14,7	17,2	19,5
1E 7	1,7	2,4	3,4	5,0	5,4	7,6	7,9	10,1	12,6	14,2	15,2	17,8	20,3

Bảng B6.1-6. Bề dày của tường bảo vệ bằng chì, cm ($\rho=11,34 \text{ g/cm}^3$)

(Phần tiếp theo)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
1,5	0,7	0,85	0,95	1,1	1,2	1,27	1,27	1,27	1,3	1,2	1,0	0,9	0,9
2	1,15	1,3	1,5	1,7	1,85	2,0	2,0	2,07	2,1	2,0	1,6	1,5	1,35
5	2,5	2,8	3,4	3,8	4,1	4,3	4,4	4,54	4,6	4,5	3,8	3,3	3,0
8	3,2	3,5	4,2	4,8	5,25	5,5	5,7	5,8	5,9	5,8	5,0	4,3	3,8
10	3,5	3,8	4,5	5,1	5,6	5,9	6,1	6,4	6,5	6,4	5,5	4,9	4,2
20	4,4	4,9	5,8	6,6	7,2	7,6	7,8	8,2	8,3	8,2	7,1	6,3	5,6
30	4,95	5,5	6,5	7,3	8,0	8,5	8,8	9,1	9,3	9,2	8,0	7,2	6,3
40	5,2	5,8	6,85	7,8	8,6	9,1	9,4	9,8	10,0	9,9	8,7	7,8	6,8
50	5,3	6,0	7,2	8,2	9,0	9,6	10,0	10,4	10,6	10,5	9,2	8,3	7,3
60	5,6	6,3	7,5	8,6	9,5	10,1	10,4	10,8	11,0	10,9	9,7	8,7	7,7
80	6,0	6,7	8,0	9,2	10,1	10,7	11,1	11,5	11,7	11,6	10,4	9,4	8,2
1E2	6,3	7,0	8,45	9,65	10,6	11,3	11,7	12,0	12,2	12,1	10,9	9,9	8,7
2E2	7,2	8,0	9,65	11,1	12,2	12,9	13,4	13,8	14,0	13,8	12,6	11,4	10,2
5E2	8,2	9,2	11,3	12,9	14,2	15,0	15,4	15,9	16,3	16,1	14,9	13,3	11,9
1E3	9,2	10,2	12,3	14,1	15,5	16,5	17,0	17,7	18,0	17,8	16,5	15,1	13,3
2E3	10,0	11,1	13,5	15,4	16,8	17,9	18,5	19,3	19,7	19,5	18,1	16,6	14,8
5E3	11,2	12,4	14,9	17,0	18,6	19,8	20,5	21,5	21,7	21,7	20,3	18,5	16,6
1E 4	12,0	13,3	16,1	18,3	20,1	21,3	21,2	23,1	23,5	23,4	22,0	20,1	18,0
2E 4	12,8	14,2	17,2	19,5	21,4	22,7	23,5	24,6	25,1	25,0	23,6	21,7	19,5
5E 4	14,0	15,6	18,8	21,4	23,3	24,7	25,5	26,7	27,3	27,2	25,8	23,7	21,5
1E 5	14,8	16,5	20,1	22,7	24,7	26,2	27,0	28,3	28,9	28,9	27,5	25,3	22,9
2E 5	15,5	17,4	21,3	24,1	26,1	27,6	28,5	29,9	30,5	30,5	29,2	26,9	24,3
5E5	16,5	18,5	22,3	25,4	27,8	29,5	30,4	32,0	32,7	32,7	31,4	28,9	26,3
1E 6	17,5	19,5	23,5	26,8	29,2	31,0	32,0	33,6	34,3	34,4	33,0	30,4	27,7
2E 6	18,5	20,4	24,4	27,8	30,5	32,4	33,5	35,2	36,0	36,1	34,6	32,0	29,2
5E 6	19,5	21,6	26,2	29,7	32,3	34,3	35,5	37,2	38,1	38,3	36,8	34,0	31,1
1E 7	20,3	22,5	27,5	31,2	33,9	35,8	37,0	38,9	39,7	39,9	38,4	35,5	32,5

Bảng B6.1-7. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng vonfram, cm ($\rho=19,3\text{g/cm}^3$)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,1	0,142	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,661	0,7	0,8	0,9
1,5	0,04	0,06	0,08	0,13	0,15	0,25	0,25	0,28	0,38	0,42	0,43	0,49	0,61
2	0,07	0,10	0,14	0,23	0,25	0,30	0,31	0,36	0,43	0,51	0,56	0,7	0,8
5	0,15	0,20	0,18	0,35	0,40	0,56	0,58	0,76	0,92	0,99	1,1	1,3	1,6
10	0,21	0,27	0,38	0,55	0,60	1,0	1,01	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	2,1
20	0,27	0,36	0,49	0,69	0,75	1,1	1,14	1,4	1,7	1,9	2,0	2,3	2,7
30	0,30	0,41	0,56	0,81	0,88	1,2	1,25	1,6	1,9	2,1	2,3	2,6	3,0
40	0,31	0,42	0,60	0,88	0,95	1,3	1,35	1,7	2,0	2,2	2,4	2,8	3,2
50	0,33	0,46	0,65	0,93	1,0	1,4	1,45	1,8	2,2	2,4	2,6	3,0	3,4
60	0,34	0,48	0,68	1,01	1,1	1,5	1,55	1,9	2,3	2,6	2,8	3,1	3,6
80	0,36	0,51	0,72	1,10	1,2	1,6	1,65	2,0	2,4	2,7	2,9	3,3	3,8
1E2	0,38	0,53	0,75	1,18	1,3	1,7	1,75	2,1	2,5	2,8	3,0	3,5	4,0
2E2	0,42	0,60	0,85	1,28	1,4	1,8	1,87	2,4	2,9	3,2	3,4	3,9	4,5
5E2	0,48	0,70	1,0	1,47	1,6	2,1	2,2	2,7	3,3	3,7	4,0	4,6	5,2
1E3	0,52	0,76	1,1	1,65	1,8	2,4	2,5	3,0	3,7	4,1	4,4	5,4	5,8
2E3	0,56	0,83	1,2	1,75	1,9	2,6	2,7	3,3	4,0	4,5	4,8	5,6	6,3
5E3	0,62	0,91	1,3	1,9	2,1	2,9	3,0	3,8	4,5	5,0	5,4	6,2	7,1
1E 4	0,66	0,97	1,4	2,1	2,3	3,2	3,3	4,0	4,9	5,5	5,8	6,7	7,6
2E 4	0,72	1,05	1,5	2,2	2,4	3,4	3,5	4,3	5,2	5,8	6,2	7,2	8,2
5E 4	0,76	1,12	1,6	2,4	2,6	3,6	3,7	4,7	5,7	6,4	6,8	7,8	8,9
1E 5	0,83	1,19	1,7	2,5	2,7	3,9	4,0	5,0	6,1	6,8	7,2	8,3	9,5
2E 5	0,88	1,31	1,9	2,7	2,9	4,1	4,2	5,3	6,5	7,2	7,7	8,8	10,0
5E5	0,94	1,38	2,0	2,9	3,1	4,4	4,6	5,7	7,0	7,7	8,2	9,5	10,8
1E 6	0,98	1,45	2,1	3,1	3,3	4,7	4,9	6,0	7,3	8,1	8,7	9,9	11,3
2E 6	1,00	1,50	2,2	3,2	3,5	4,9	5,1	6,2	7,6	8,4	9,0	10,4	11,8
5E 6	1,10	1,60	2,3	3,3	3,6	5,2	5,4	6,7	8,1	8,9	9,4	11,0	12,5
1E 7	1,2	1,75	2,5	3,6	3,9	5,5	5,7	7,0	8,4	9,4	10,0	11,5	13,1

Bảng B6.1-7. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng vonfram, cm ($\rho=19,3\text{g/cm}^3$)
(Phần tiếp theo)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
1,5	0,61	0,7	0,8	0,95	0,95	1,00	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	0,5	0,5
2	0,8	0,93	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,0	0,9	0,85
5	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	2,9	2,4	2,1	2,0
10	2,1	2,4	3,0	3,5	3,7	3,8	3,9	4,2	4,3	4,1	3,4	3,1	2,9
20	2,7	3,0	3,7	4,4	4,6	4,7	4,9	5,2	5,4	5,2	4,4	4,0	3,7
30	3,0	3,4	4,2	4,9	5,2	5,3	5,5	5,9	6,1	6,0	5,0	4,6	4,2
40	3,2	3,7	4,5	5,2	5,5	5,7	5,8	6,3	6,6	6,5	5,4	5,0	4,6
50	3,4	3,9	4,7	5,5	5,9	6,0	6,2	6,7	6,9	6,9	5,8	5,3	4,9
60	3,6	4,0	4,9	5,7	6,2	6,3	6,4	6,9	7,2	7,2	6,1	5,5	5,1
80	3,8	4,3	5,2	6,1	6,5	6,7	6,9	7,4	7,7	7,6	6,5	6,0	5,4
1E2	4,0	4,5	5,6	6,4	6,8	7,0	7,2	7,8	8,1	8,0	6,8	6,3	5,7
2E2	4,5	5,1	6,2	7,2	7,7	8,0	8,1	8,9	9,2	9,2	7,8	7,2	6,6
5E2	5,2	5,9	7,2	8,3	8,9	9,2	9,5	10,3	10,7	10,6	9,1	8,5	7,8
1E3	5,8	6,5	7,9	9,1	9,8	10,2	10,4	11,4	11,8	11,9	10,2	9,4	8,7
2E3	6,3	7,2	8,7	9,9	10,7	11,1	11,4	12,4	12,9	13,0	11,1	10,3	9,6
5E3	7,1	8,0	9,7	11,0	12,0	12,4	12,7	13,9	14,4	14,6	12,5	11,6	10,8
1E 4	7,6	8,5	10,4	11,8	12,9	13,4	13,7	14,9	15,5	15,7	13,5	12,5	11,7
2E 4	8,2	9,3	11,1	12,6	13,7	14,3	14,7	16,0	16,6	16,7	14,4	13,4	12,5
5E 4	8,9	10,1	12,1	13,7	14,9	15,6	16,0	17,4	18,1	18,3	15,8	14,7	13,7
1E 5	9,5	10,7	12,9	14,5	15,8	16,6	17,0	18,5	19,2	19,5	16,8	15,6	14,6
2E 5	10,0	11,4	13,6	15,3	16,8	17,5	17,9	19,5	20,3	20,6	17,8	16,6	15,5
5E5	10,8	12,2	14,6	16,4	18,0	18,7	19,2	21,0	21,8	22,1	19,1	17,8	16,7
1E 6	11,3	12,8	15,3	17,3	18,9	19,7	20,2	22,1	23,0	23,4	20,2	18,8	17,1
2E 6	11,8	13,4	16,0	18,0	19,8	20,6	21,2	23,2	24,1	24,4	21,2	19,7	18,5
5E 6	12,5	14,2	17,0	19,1	21,0	21,9	22,5	24,6	25,6	25,9	22,3	20,8	19,5
1E 7	13,1	14,9	17,7	19,9	21,9	22,8	23,4	25,7	26,7	27,0	23,5	21,8	20,5

Bảng B6.1-8. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng uran, cm ($\rho = 18,7 \text{ g/cm}^3$)

Số lần làm yếu k_x	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,1	0,142	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,661	0,7	0,8	0,9
1,5	0,02	0,024	0,03	0,046	0,05	0,08	0,085	0,12	0,18	0,21	0,23	0,30	0,35
2	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,15	0,16	0,22	0,30	0,37	0,42	0,52	0,57
5	0,05	0,06	0,08	0,13	0,15	0,35	0,37	0,52	0,70	0,88	1,0	1,2	1,3
10	0,07	0,08	0,10	0,23	0,26	0,50	0,53	0,75	1,0	1,18	1,3	1,6	1,8
20	0,08	0,10	0,13	0,29	0,33	0,63	0,67	0,98	1,3	1,54	1,7	2,0	2,3
30	0,09	0,11	0,15	0,32	0,37	0,72	0,77	1,1	1,5	1,74	1,9	2,3	2,5
40	0,10	0,12	0,16	0,35	0,40	0,78	0,84	1,2	1,6	1,84	2,0	2,5	2,7
50	0,10	0,13	0,17	0,37	0,43	0,82	0,88	1,3	1,7	2,0	2,2	2,6	2,9
60	0,11	0,14	0,18	0,39	0,45	0,85	0,90	1,3	1,8	2,1	2,3	2,7	3,0
80	0,12	0,15	0,19	0,42	0,48	0,90	0,96	1,4	1,9	2,2	2,4	2,9	3,2
1E2	0,13	0,16	0,20	0,46	0,50	0,95	1,02	1,5	2,0	2,3	2,5	3,0	3,3
2E2	0,14	0,17	0,22	0,50	0,57	1,1	1,2	1,7	2,3	2,7	3,0	3,4	3,8
5E2	0,15	0,19	0,25	0,58	0,67	1,3	1,4	2,0	2,7	3,1	3,4	4,0	4,4
1E3	0,16	0,22	0,30	0,65	0,75	1,4	1,5	2,2	3,0	3,4	3,7	4,4	4,8
2E3	0,17	0,24	0,33	0,72	0,82	1,5	1,6	2,4	3,3	3,8	4,1	4,8	5,3
5E3	0,18	0,26	0,37	0,81	0,93	1,7	1,8	2,6	3,7	4,2	4,6	5,3	5,9
1E 4	0,19	0,28	0,40	0,87	1,0	1,9	2,0	2,8	4,0	4,5	4,9	5,7	6,4
2E 4	0,20	0,29	0,44	0,96	1,1	2,0	2,1	3,0	4,3	4,9	5,3	6,1	6,7
5E 4	0,21	0,31	0,47	1,05	1,2	2,2	2,3	3,1	4,7	5,4	5,8	6,7	7,5
1E 5	0,22	0,34	0,50	1,13	1,3	2,3	2,4	3,5	5,0	5,7	6,2	7,1	8,0
2E 5	0,23	0,36	0,54	1,22	1,4	2,4	2,6	3,7	5,3	6,0	6,5	7,5	8,5
5E5	0,24	0,38	0,57	1,23	1,4	2,6	2,8	4,0	5,7	6,5	7,0	8,1	9,1
1E 6	0,25	0,40	0,60	1,3	1,5	2,8	3,0	4,2	6,0	6,8	7,4	8,5	9,6
2E 6	0,26	0,42	0,64	1,4	1,6	3,0	3,2	4,4	6,3	7,3	8,0	8,9	10,0
5E 6	0,27	0,44	0,67	1,5	1,7	3,1	3,3	4,7	6,7	7,7	8,3	9,5	10,6
1E 7	0,28	0,46	0,70	1,6	1,8	3,3	3,5	4,9	7,0	8,6	8,7	9,9	11,1

Bảng B6.1-8. Bề dày của tường bảo vệ làm bằng uran, cm ($\rho = 18,7 \text{ g/cm}^3$)
(Phần tiếp theo)

Số lần làm yếu K_0	Năng lượng của lượng tử gamma, MeV												
	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,2	2,75	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
1,5	0,35	0,4	0,47	0,53	0,6	0,67	0,08	0,69	0,7	0,69	0,6	0,5	0,45
2	0,57	0,67	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	0,85	0,8
5	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	2,6	2,5	2,2	2,0	1,8
10	1,8	2,0	2,4	2,7	3,0	3,3	3,4	3,5	3,6	3,5	3,1	2,8	2,6
20	2,3	2,5	3,0	3,4	3,8	4,2	4,4	4,6	4,7	4,6	4,1	3,7	3,5
30	2,5	2,8	3,4	3,9	4,3	4,7	4,9	5,1	5,2	5,1	4,6	4,2	3,9
40	2,7	3,0	3,7	4,1	4,6	5,1	5,3	5,6	5,7	5,6	5,0	4,5	4,2
50	2,9	3,2	3,9	4,4	4,9	5,4	5,6	5,9	6,0	5,9	5,3	4,8	4,5
60	3,0	3,3	4,0	4,5	5,1	5,6	5,8	6,1	6,2	6,1	5,5	5,0	4,7
80	3,2	3,5	4,3	4,8	5,4	6,0	6,2	6,5	6,6	6,5	5,9	5,4	5,0
1E2	3,3	3,7	4,5	5,1	5,7	6,3	6,5	6,8	7,0	6,9	6,5	5,7	5,3
2E2	3,8	4,2	5,1	5,9	6,5	7,1	7,4	7,8	8,0	7,9	7,2	6,5	6,2
5E2	4,4	4,9	5,9	6,7	7,5	8,2	8,6	9,0	9,2	9,1	8,3	7,7	7,4
1E3	4,8	5,4	6,5	7,4	8,3	9,0	9,4	9,9	10,1	10,0	9,3	8,6	8,1
2E3	5,3	5,9	7,1	8,1	9,0	9,8	10,3	11,3	11,8	11,7	10,2	9,5	9,0
5E3	5,9	6,6	7,9	9,0	10,0	10,9	11,4	12,0	12,3	12,2	11,5	10,7	10,1
1E 4	6,4	7,1	8,5	9,8	10,8	11,8	12,3	13,0	13,3	13,2	12,4	11,6	11,0
2E 4	6,9	7,6	9,1	10,5	11,6	12,6	13,2	14,0	14,3	14,4	13,4	12,5	11,9
5E 4	7,5	8,3	10,0	11,4	12,6	13,7	14,3	15,1	15,5	15,4	14,6	13,7	13,0
1E 5	8,0	8,8	10,5	12,1	13,4	14,5	15,1	16,1	16,5	16,4	15,6	14,6	13,9
2E 5	8,5	9,3	11,2	12,8	14,1	15,4	16,0	17,0	17,5	17,4	16,5	15,5	14,8
5E5	9,1	10,0	12,0	13,7	15,1	16,5	17,1	18,2	18,7	18,6	17,8	16,7	15,9
1E 6	9,6	10,5	12,6	14,4	15,9	17,4	18,0	19,1	19,6	19,5	18,7	17,6	16,8
2E 6	10,0	11,0	13,2	15,1	16,7	18,2	18,9	20,1	20,6	20,5	19,7	18,5	17,6
5E 6	10,6	11,7	14,0	16,0	17,7	19,3	20,0	21,2	21,8	21,7	20,9	19,7	18,8
1E 7	11,1	12,2	14,6	16,7	18,5	20,1	20,9	22,2	22,8	22,7	21,9	20,6	19,6

PHỤ LỤC 4

GỢI Ý TÓM TẮT CÁC CHƯƠNG

PL – 4.1. GỢI Ý TÓM TẮT CHƯƠNG 1

Trong chương 1, chúng ta đã làm quen với một loạt khái niệm cơ bản, thường gặp và cần thiết để tìm hiểu các chương tiếp theo. *Những câu hỏi sau đây là gợi ý để tóm tắt chương 1:*

- 1) Hệ số truyền năng lượng của bức xạ lượng tử đặc trưng cho sự biến đổi cái gì? ý nghĩa vật lý của nó là gì? Giữa nó và hệ số làm yếu bức xạ có mối liên hệ như thế nào?
- 2) Trạng thái cân bằng điện tử là gì? Muốn đảm bảo trạng thái cân bằng điện tử trong một môi trường bất kỳ đồng nhất về hợp phần nguyên tử và mật độ, thì phải thoả mãn những điều kiện gì? Đối với cơ thể người thì trạng thái này được đảm bảo từ độ sâu dưới da là bao nhiêu?
- 3) Cường độ bức xạ là gì? Nó bị làm yếu như thế nào khi đi qua một lớp vật chất?
- 4) Liều lượng bức xạ được thể hiện bằng những đại lượng nào? Chúng được đo bằng những đơn vị gì?
- 5) Các đại lượng thể hiện liều lượng bức xạ khác nhau ở những điểm nào?
- 6) Những đại lượng nào thể hiện liều lượng bức xạ tính cho một đơn vị thời gian chiếu xạ?
- 7) Trọng số của bức xạ ión hoá là gì? Trọng số của các cơ quan hoặc tổ chức cơ thể là gì? Hai khái niệm này được sử dụng để làm gì?

- 8) Giữa suất liều, cường độ bức xạ và hệ số truyền năng lượng có mối liên hệ với nhau như thế nào?
- 9) Suất liều bức xạ bị làm yếu theo những quy luật như thế nào?
- 10) Giả sử các dụng cụ xác định liều lượng bức xạ hoạt động hoàn toàn chính xác và cho kết quả như sau: liều chiếu xạ có giá trị là D_1 , liều hấp thụ bức xạ có giá trị là D_2 và liều tương đương có giá trị là D_3 . Xét về mặt nguyên tắc, thì giá trị nào sẽ là đúng vĩnh viễn, còn giá trị nào chỉ là đúng tạm thời và sau này có thể phải thay đổi; tại sao?

PL – 4.2. GỢI Ý TÓM TẮT CHƯƠNG 2

Chương 2 trình bày những vấn đề về bức xạ ion hoá trong môi trường, ảnh hưởng của bức xạ với cơ thể sống, và cuối cùng là những giới hạn được quy định về liều lượng bức xạ mà một người chuyên làm việc với nguồn bức xạ ion hoá hoặc một người dân thường (không có nhiệm vụ làm việc với nguồn bức xạ ion hoá) không được vượt quá. *Những câu hỏi sau đây là gợi ý để tóm tắt chương 2:*

- 1) Có nơi nào trong môi trường sống của chúng ta là hoàn toàn không có bức xạ ion hoá? Bức xạ ion hoá tác động lên cơ thể con người và môi trường theo những cung bậc như thế nào? Đối với bức xạ ion hoá, chúng ta nên có thái độ như thế nào thì đúng?
- 2) Nền bức xạ ion hoá trong môi trường là bằng bao nhiêu? Nó gồm những thành phần nào?
- 3) Việc so sánh liều nhiễm xạ tập thể của loài người do 50 năm vận hành nhà máy điện hạt nhân và do các sự kiện xảy ra trong cùng khoảng thời gian dẫn tới nhận xét gì? Tai nạn hạt nhân nhắc nhở điều gì?
- 4) Chất phóng xạ xâm nhập vào cơ thể qua những con đường nào? Bức xạ ion hoá có ảnh hưởng sinh học như thế nào?

- 5) Xét về mặt bảo vệ an toàn bức xạ, thì xã hội được chia thành 2 nhóm người như thế nào? Giới hạn về liều bức xạ mà người thuộc mỗi nhóm này không được vượt quá là bao nhiêu? Người dưới bao nhiêu tuổi thì không được tiếp xúc với nguồn bức xạ ion hoá trong công việc của mình?
- 6) Trong hoàn cảnh đặc biệt, có thể áp dụng những thay đổi tạm thời đối với giới hạn về liều cho nhân viên chuyên nghiệp như thế nào?
- 7) Kiểm tra sự tuân thủ giới hạn về liều như thế nào? Biết thông lượng và mật độ thông lượng bức xạ có thể giúp ích gì cho việc đánh giá (hoặc xác định) liều lượng bức xạ?

PL – 4.3. GỢI Ý TÓM TẮT CHƯƠNG 3

Chương 3 có vị trí rất quan trọng trong nội dung của cuốn sách. Chương này giới thiệu tất cả những phương pháp chủ yếu được sử dụng trong xác định liều lượng bức xạ lượng tử. *Những câu hỏi sau đây là gợi ý để tóm tắt chương 3:*

1. Xác định liều lượng bức xạ ion hoá để làm gì? Căn cứ vào đâu để xác định liều lượng bức xạ ion hoá?
2. Cơ sở vật lý của phương pháp ion hoá trong xác định liều lượng bức xạ là gì?
3. Lý thuyết Bragg–Gray có vai trò rất quan trọng trong xác định liều lượng bức xạ. Công thức Bragg–Gray được viết như thế nào? Nó cho thấy mối liên hệ giữa hiệu ứng ion hoá trong chất khí và đại lượng nào? Muốn công thức Bragg–Gray cho kết quả đúng thì phải thoả mãn ba điều kiện gì? Ý nghĩa của công thức Bragg–Gray là gì?
4. Buồng ion hoá nhỏ thành dây có những đặc điểm gì nếu xét dưới góc độ cấu tạo và nguyên tắc hoạt động? Loại buồng ion hoá này thường được sử dụng để đo suất liều lớn hay nhỏ? Vì sao? Khi chế tạo buồng ion hoá nhỏ thành dây thì cần chú ý những điều gì nếu xét dưới góc độ năng

lượng của lượng tử, vật liệu và bề dày của thành buồng?

5. Nguyên tắc hoạt động của buồng tụ điện có gì khác so với của buồng ion hoá nhỏ thành dày? Buồng tụ điện có hai ưu điểm so với buồng ion hoá nhỏ thành dày. Hai ưu điểm đó là gì? Buồng tụ điện được dùng để đo liều chiếu xạ cá nhân hay *suất liều hấp thụ*? Hai loại buồng tụ điện được sử dụng phổ biến là gì?
6. Ống đếm bằng khí có được sử dụng để xác định liều lượng bức xạ hay không? Vì sao? Nếu có, thì những ưu điểm và hạn chế của nó so với của buồng ion hoá là gì?
7. Nhũ tương ảnh là một phương pháp kinh điển trong xác định liều cá nhân. Cơ sở của phương pháp phim ảnh là gì? Đường đặc trưng của dụng cụ đo liều bằng phim cho thấy mật độ quang học (còn gọi là độ đen) của phim phụ thuộc vào liều chiếu xạ có dạng như thế nào? Muốn giảm sự phụ thuộc của độ nhạy của phim vào năng lượng của lượng tử thì phải làm gì và làm như thế nào?
8. Cơ sở vật lý của các phương pháp phát quang là gì? Cơ sở này mách bảo có thể sử dụng những hiện tượng nào phát quang nào để xác định liều lượng bức xạ? Nếu muốn chế tạo máy đo suất liều bức xạ thì cần sử dụng loại hiện tượng nào? Nếu muốn chế tạo máy đo liều bức xạ thì cần sử dụng những loại hiện tượng nào?
9. Về nguyên tắc, một máy đo liều lượng bức xạ bằng dầu dò nhấp nháy (gọi tắt là đôzimet nhấp nháy) gồm những khối (bộ phận) có chức năng gì? Nó có thể hoạt động ở chế độ đo dòng điện hay ở chế độ đếm xung điện? Vì sao? Có thể dùng đôzimet nhấp nháy ở chế độ dòng để đo liều hay suất liều? Vì sao? Muốn mở rộng vùng năng lượng của lượng tử mà máy đo tốt, thì phải chế tạo phần nhạy gồm hai lớp chất nhấp nháy như thế nào? Có thể dùng đôzimet nhấp nháy ở chế độ đếm để đo liều hay suất liều? Vì sao? So với buồng ion hoá, thì đôzimet nhấp nháy có những ưu điểm và hạn chế gì? So với ống đếm khí, thì đôzimet nhấp nháy có những ưu điểm và hạn chế gì?

10. Nguyên tắc hoạt động của máy đo liều lượng bức xạ bằng huỳnh quang (gọi tắt là đôzimet huỳnh quang) là gì? Đôzimet nhiệt huỳnh quang và đôzimet quang huỳnh quang có sơ đồ nguyên tắc giống nhau ở những điểm nào và khác nhau ở những điểm nào?
11. Dòng điện anốt đo được trong thực tế của một đôzimet quang huỳnh quang và của một đôzimet nhiệt huỳnh quang gồm có những thành phần nào? Có những gì giống nhau và có những gì khác nhau khi so sánh các thành phần của dòng anốt của hai loại đôzimet huỳnh quang này? Có thể đo kiểm tra liều được bao nhiêu lần đối với mỗi lần chiếu xạ của đôzimet nhiệt huỳnh quang? Vì sao hiện nay đôzimet nhiệt huỳnh quang được sử dụng rộng rãi để kiểm tra liều bức xạ cá nhân?
12. So với các buồng iôn hoá làm việc ở chế độ xung, thì đầu dò bán dẫn làm việc ở chế độ đếm có hai điểm khác cơ bản là gì? Nếu nói rằng đôzimet bán dẫn ở chế độ đếm có độ nhạy tương đối cao, nhưng phụ thuộc phức tạp vào năng lượng bức xạ lượng tử, thì là đúng hay sai, tại sao? Vì sao trong thực tế hiện nay, các đôzimet bán dẫn vẫn chưa được sử dụng rộng rãi bằng một số loại đôzimet khác?
13. Nguyên tắc hoạt động của các đôzimet hoá học lỏng (tức là của các dung dịch nước) là gì? Muốn sử dụng một hệ hoá học nào đó để xác định liều lượng hấp thụ bức xạ, thì hiệu suất của phản ứng hoá bức xạ của hệ này phải thoả mãn hai yêu cầu gì? Các đôzimet hoá học được dùng để đo liều cao hay để đo suất liều thấp?
14. Nói “Phương pháp nhiệt là phương pháp đo trực tiếp duy nhất trong lĩnh vực đo liều lượng bức xạ” là đúng hay sai, vì sao? Cơ sở vật lý của phương pháp này là gì? Những điều gì hạn chế khả năng ứng dụng rộng rãi phương pháp này? Nó thường được dùng để làm gì?
15. Nguồn phát lượng tử năng lượng cao là gì? Đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng cao có những đặc điểm gì khác so với khi đo liều lượng bức xạ lượng tử năng lượng không cao? Buồng thành dày được dùng để đo cường độ bức xạ lượng tử có năng lượng cao tới hàng trăm MeV thì

có những đặc điểm gì khác so với buồng ion hoá nhỏ thành dày được dùng để đo liều lượng bức xạ lượng tử chỉ có năng lượng tới vài MeV? Muốn dùng buồng ion hoá để đo cường độ bức xạ lượng tử với năng lượng của lượng tử tới khoảng 100 MeV thì phải làm như thế nào?

PL – 4.4. GỢI Ý TÓM TẮT CHƯƠNG 4

Chương 4 (cùng với chương 3) có vị trí rất quan trọng trong nội dung của cuốn sách. Chương này giới thiệu tất cả những phương pháp chủ yếu được sử dụng trong lĩnh vực xác định và đánh giá liều lượng bức xạ neutron. *Những câu hỏi sau đây là gợi ý để tóm tắt chương 4:*

1. Mỗi thành phần liều sau đây đóng góp bằng bao nhiêu phần trăm của tổng liều hấp thụ gây bởi neutron nhanh: a)- Neutron đã bị nhiệt hoá? b)- Các hạt nhân lõi C, N, O? c)- Các proton lõi? Tại sao cần đặc biệt chú ý tới tác dụng sinh học của tất cả các nhóm neutron, bất kể đó là neutron nhanh, neutron năng lượng trung gian hay là neutron nhiệt? Vì sao khi tăng năng lượng của neutron tới, thì độ sâu $X_{\max}$ mà tại đó liều hấp thụ đạt giá trị cực đại lại tiến gần tới bề mặt cơ thể?
2. Phương pháp dùng buồng ion hoá để xác định liều và suất liều hấp thụ neutron dựa trên cơ sở nào? Cần chú ý những đặc điểm gì khi sử dụng buồng ion hoá có thành bằng khí? Có thể dùng hệ gồm hai buồng ion hoá để xác định liều neutron được hay không, tại sao? Việc dùng buồng ion hoá nhỏ thành dày và áp dụng lý thuyết Bragg-Gray trong thực tế xác định liều neutron có gì cần chú ý?
3. Nếu đo phổ biến độ xung ra của ống đếm tỷ lệ tương đương tổ chức cơ thể và xác định diện tích S dưới đường cong của phổ này, thì diện tích này có tỷ lệ thuận với suất liều hấp thụ neutron nhanh hay không? Trong thực tế, để đo liều hấp thụ neutron bằng ống đếm tỷ lệ, thì phải chuẩn ống đếm này như thế nào? Làm thế nào để giảm sai số khi đo liều

notrôn nhanh bằng ống đếm tỷ lệ trong trường bức xạ hỗn hợp notrôn+gamma?

4. Nguyên tắc đo liều notrôn bằng phương pháp kích hoạt là gì? Có thể viết biểu thức xác định liều tương đương gây bởi notrôn nhiệt ở dạng tổng quát như thế nào? Tại sao đầu dò cộng hưởng để đo liều notrôn năng lượng trung gian thường được làm từ những vật liệu mà tích phân cộng hưởng có giá trị lớn và vị trí các đỉnh cộng hưởng nằm trong vùng năng lượng thấp? Có phải các lá vàng và lá indi là những vật liệu làm đầu dò cộng hưởng tốt hay không, tại sao? Thường gặp khó khăn gì khi dùng phương pháp kích hoạt đầu dò ngưỡng để xác định liều notrôn nhanh? Phối hợp sử dụng đồng thời ba loại đầu dò kích hoạt như thế nào để xác định được liều gây bởi bức xạ notrôn có phổ phức tạp? Phương pháp kích hoạt có thể giúp ích như thế nào cho việc đánh giá liều notrôn khi xảy ra sự cố hoặc tai nạn hạt nhân?
5. Nguyên tắc đo liều notrôn bằng phương pháp đếm vết là gì? Phải xử lý đầu dò như thế nào để phát hiện được “vết”? Số lượng vết đã hiện trên đầu dò cho biết liều hay suất liều hay thông lượng notrôn? Liều có thể tự động hoá quá trình đếm vết được không? Dùng nhũ tương ảnh hạt nhân để đo liều notrôn năng lượng trung gian và notrôn nhanh bằng cách đo mật độ quang học của phim hay bằng cách đếm vết, nếu bằng cách đếm vết thì có phải là vết được tạo thành trên cơ sở các phản ứng (n, γ) hay không?
6. Có thể xác định liều notrôn nhiệt bằng phương pháp phim ảnh kết hợp với màn tăng cường pha bor (B) như thế nào? Dùng phim gamma kết hợp với màn cộng hưởng bằng cadmi để xác định liều notrôn nhiệt như thế nào? Có thể dùng phim gamma để xác định liều gây bởi bức xạ hỗn hợp notrôn+gamma như thế nào? Phương pháp nhũ tương ảnh được dùng để đo suất liều cao hay để đo liều chiếu xạ cá nhân?
7. Dùng phương pháp nhấp nháy để xác định liều lượng bức xạ notrôn thì có những ưu điểm và hạn chế gì?

8. Sử dụng hiệu ứng làm chậm để đo liều neutron như thế nào? Có mấy cách bố trí đầu dò neutron?
9. Phương pháp hoá học thường được dùng để đo liều neutron trong dải liều cao hay thấp? Đo liều neutron nhiệt bằng phương pháp hoá học như thế nào? Liều neutron nhanh và neutron năng lượng trung gian được xác định bằng cách sử dụng các dung dịch nước như thế nào?
10. Liệu có thể dùng các dụng cụ đo liều bức xạ gamma cá nhân để đo liều neutron được hay không? Nếu được, thì làm như thế nào?
11. Điều gì cho phép sử dụng các đồng vị sẵn có trong cơ thể hoặc trong các đồ vật để đánh giá liều neutron gây bởi sự cố hoặc tai nạn hạt nhân? Nếu đánh giá liều neutron do tai nạn bằng cách đo độ phóng xạ cảm ứng của ^{24}Na trong máu hoặc của ^{32}P trong lông và tóc của người bị nạn thì làm như thế nào? Có điều gì cần chú ý nếu làm như vậy? Độ phóng xạ cảm ứng của các đồ vật mà người bị nạn đem theo có thể giúp ích gì cho việc đánh giá liều neutron do tai nạn hoặc sự cố hạt nhân?

PL – 4.5. GỢI Ý TÓM TẮT CHƯƠNG 5

Các nguồn phát chùm hạt có điện tích bắt đầu được sử dụng nhiều ở nước ta, nhất là trong y tế. *Những câu hỏi sau đây là gợi ý để tóm tắt chương 5:*

1. Trong việc tính suất liều gây bởi chùm electron thường gặp những khó khăn và hạn chế gì?
2. Tính liều gây bởi một nguồn điểm phóng xạ beta như thế nào?
3. Phải đặc biệt chú ý những yếu tố gì khi xác định liều của bức xạ beta và chùm electron bằng thực nghiệm?
4. Cường độ dòng điện của buồng ion hoá ngoại suy có liên hệ như thế nào với suất liều hấp thụ bức xạ beta (hoặc chùm electron)?
5. Có thể dùng phương pháp nhũ tương ảnh để xác định liều lượng bức xạ

bêta hoặc chùm electron được hay không? Nếu được, thì làm như thế nào? Phương pháp này có những hạn chế gì?

6. Có thể hình dung như thế nào về sự phụ thuộc vào thời gian của lượng đồng vị phóng xạ có trong một bộ phận cơ thể do xâm nhập từ bên ngoài vào? Các kết quả tính toán hiện nay cho ta biết *giá trị chính xác* của liều chiếu trong hay chỉ có ý nghĩa là *mức đánh giá* liều chiếu trong; tại sao?
7. Có thể tính *liều hấp thụ bức xạ* gây bởi một đồng vị phóng xạ trong khoảng thời gian dài bằng τ và *được tính chuẩn hoá cho một hạt nhân phóng xạ* kể từ thời điểm đồng vị phóng xạ bắt đầu xâm nhập vào cơ thể như thế nào? Ý nghĩa của tính toán này là gì?

PL – 4.6. GỢI Ý TÓM TẮT CHƯƠNG 6

Cùng với hai chương 3 và 4, chương 6 có vị trí đặc biệt quan trọng trong sách này. Nội dung chương 6 rất cần thiết để đi sâu vào lĩnh vực bảo vệ an toàn bức xạ iôn hoá. Những vấn đề và cách giải quyết vấn đề được đề cập tới trong chương này là những hướng dẫn tương đối cụ thể để áp dụng vào thực tế ở nước ta. *Những câu hỏi sau đây là gợi ý để tóm tắt chương 6:*

1. Hoạt độ phóng xạ là gì? Đại lượng này có những đơn vị đo liên hệ với nhau như thế nào? Hằng số – gamma năng lượng và hằng số-gamma iôn hoá của nguồn phóng xạ là gì, giữa chúng và cường độ bức xạ hoặc suất liều bức xạ có mối liên hệ như thế nào? Có thể tính suất liều gây bởi một nguồn điểm bức xạ gamma đẳng hướng như thế nào?
2. Nguyên tắc quan trọng nhất trong bảo vệ an toàn bức xạ là gì? Ba nguyên tắc bảo vệ an toàn bao gồm các yếu tố *Nguồn yếu + Cách xa + Thời gian ngắn* cụ thể là như thế nào? Các nguyên tắc này chỉ được áp dụng đối với nguồn bức xạ lượng tử hay đối với tất cả các loại nguồn

bức xạ iôn hoá khác đang được quan tâm (là nguồn nơtron và nguồn phát các hạt có điện tích)?

3. Muốn tính bề dày lớp bảo vệ theo số lần làm yếu để thiết kế tường bảo vệ an toàn bức xạ gamma đảm bảo yêu cầu thì phải biết những điều kiện gì và phải làm những gì, làm như thế nào?
4. Trong thực tế, nhiều khi phải giải quyết những vấn đề thuộc loại sau đây. Ứng với một số điều kiện cho trước (A , t , r , $H_{hd,1n}$ và $H_{hd,5n}$), người ta đã làm tường bảo vệ với bề dày d_0 cm; sau đó *một hoặc vài trong số các điều kiện làm việc bị thay đổi. Do vậy phải thay đổi bề dày của tường bảo vệ để đảm bảo an toàn bức xạ phù hợp với các điều kiện làm việc mới*. Bài toán thuộc loại này thường được giải quyết theo trình tự như thế nào?
5. Phương pháp vạch cạnh tranh trong thiết kế tường bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử được sử dụng cho trường hợp bức xạ đơn năng hay bức xạ có phổ phức tạp? Nội dung chủ yếu của việc tính tường bảo vệ theo phương pháp vạch cạnh tranh là gì? Điều gì cần chú ý khi sử dụng phương pháp này?
6. Tính bảo vệ an toàn bức xạ lượng tử theo các lớp làm giảm một nửa (hoặc giảm mười lần) như thế nào? Có phải phương pháp này cho kết quả kinh tế nhất hay không? Nên áp dụng phương pháp này trong trường hợp nào?
7. Có người nói: “Khi tính toán thiết kế bảo vệ an toàn để làm việc với nguồn bức xạ Roentgen sơ cấp, thì chỉ cần biết liều chiếu xạ cho phép và liều thực tế là đủ”. Nói vậy là đúng hay sai, tại sao? Tính và thiết kế bảo vệ an toàn đối với bức xạ Roentgen sơ cấp như thế nào?
8. Khi tính toán thiết kế bảo vệ an toàn nguồn phát nơtron, thì cần chú ý những điều gì, tại sao?
9. Nội dung chủ yếu của phương pháp tính phân bố nơtron trong không gian theo độ dài lũy biến là gì? Độ dài lũy biến phụ thuộc vào những

yếu tố nào? Độ dài quỹ biến mật độ thông lượng neutron và độ dài quỹ biến liều neutron có khác nhau không?

10. Tiết diện loại neutron là gì? Cơ sở vật lý của phương pháp tiết diện loại là gì? Tiết diện loại neutron phụ thuộc vào những yếu tố gì?
11. Có thể áp dụng phương pháp tiết diện loại neutron cho môi trường không đồng nhất. Trong trường hợp này các thành phần là vật liệu nặng, môi trường nhẹ chứa hydro và dầu dò neutron được bố trí như thế nào so với vị trí của nguồn neutron? Môi trường nhẹ chứa hydro phải có bề dày lớn hơn hay nhỏ hơn một giá trị xác định? Bề dày này đặc trưng cho cái gì và phụ thuộc vào những yếu tố nào? Có thể xác định tiết diện loại neutron thông qua việc đo mật độ thông lượng neutron nhiệt tại vị trí đặt dầu dò như thế nào? Suất liều neutron nhanh được xác định như thế nào trong các trường hợp cụ thể sau đây:

a)- Lớp vật liệu nặng là đơn nguyên tố;

b)- Thành phần vật liệu nặng gồm nhiều lớp, trong đó mỗi lớp được chế tạo từ một đơn nguyên tố khác nhau;

c)- Trường hợp tổng quát: Vật liệu nặng gồm nhiều lớp, các lớp có những thành phần hoá học phức tạp khác nhau.

Trong ba trường hợp vừa nêu trên, cần chú ý điều gì khi nguồn phát neutron đơn năng và khi neutron có phổ năng lượng bất kỳ?

12. Trong trường hợp môi trường là đồng nhất, thì tiết diện loại neutron được xác định như thế nào?
13. Trong trường hợp nào có thể xác định được suất liều neutron của toàn phổ năng lượng, mà chỉ cần biết suất liều gây bởi neutron thuộc một nhóm năng lượng nào đó? Biết thành phần liều neutron trong vật liệu bảo vệ để làm gì? Việc phân tích phân bố suất liều theo năng lượng neutron cho thấy cần chú ý những điều gì?

14. Hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng được định nghĩa là tỷ số gì? Nếu biết hệ số tích lũy liều nơtron dưới ngưỡng thì có thể xác định được suất liều nơtron như thế nào? Có thể áp dụng những khuyến cáo nào để đánh giá hệ số tích lũy liều của các nơtron dưới ngưỡng?
15. Tính thiết kế bảo vệ an toàn đối với nơtron của nguồn (α, n) như thế nào trong hai trường hợp sau đây: a)- Nguồn nơtron đặt trong không khí? b)- Nguồn nơtron đặt trong môi trường là chất làm chậm? Khi tính bảo vệ nơtron thì có cần chú ý bảo vệ bức xạ lượng tử hay không?
16. Có những yêu cầu gì cần phải thực hiện đối với vùng kiểm soát? Và đối với vùng giám sát?
17. Khi làm việc với nguồn phóng xạ hỏ, không những phải tuân theo những nguyên tắc chung về bảo đảm an toàn bức xạ, mà còn cần phải thực hiện những quy định gì?
18. Khi làm việc với nguồn bức xạ iôn hoá mạnh như nguồn đồng vị phóng xạ mạnh, máy gia tốc, lò phản ứng hạt nhân, thì: đồng thời với việc thực hiện những đòi hỏi và quy định chung, còn phải đảm bảo thực hiện những đòi hỏi bổ sung gì nữa?
19. Ngoài những yêu cầu được nêu trong phần trả lời các câu hỏi 16-18, thì những đòi hỏi chung khác mà mỗi cơ sở sử dụng bức xạ iôn hoá còn phải thực hiện là gì?

PHỤ LỤC 5

THÀNH PHẦN HOÁ HỌC CỦA MỘT SỐ CHẤT VÀ HỢP CHẤT

STT	Tên chất hoặc hợp chất	Công thức hoá học
1.	Nước	H_2O
2.	Khí cacbonic	CO_2
3.	Êtilen	C_2H_4
4.	Poliêtilen	C_nH_{2n}
5.	Axêtilen	C_2H_2
6.	Ni lông	$(C_6H_{11}NO)_n$
7.	Bakelit	$(C_7H_5O)_n$
8.	Vật liệu tương đương tổ chức cơ thể	$(C_5H_{40}NO_{18})_n$
9.	Paraphin (là hỗn hợp của một số cacbua hydrô no C_nH_{2n+2} , trong đó n có giá trị từ 19 đến 35).	

Thành phần nguyên tố trong tổ chức cơ thể (tính theo khối lượng):

Nguyên tố	"Tổ chức mềm"	"Người chuẩn"
H	10%	10%
C	18%	12%
N	3%	4%
O	65%	73%
Tổng nguyên tố khác	4%	1%

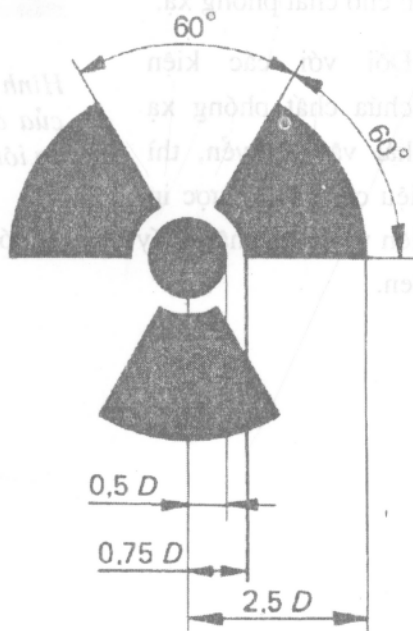
PHỤ LỤC 6

DẤU HIỆU CẢNH BÁO NGUY HIỂM VỀ BỨC XẠ IÔN HOÁ

Dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức xạ iôn hoá đã được Tổ chức Tiêu chuẩn Quốc tế thông qua từ năm 1975 (tiêu chuẩn quốc tế ISO 361-1975, ISO, Geneve, 1975).

Các hình H.P6-1 và H.P6-2 cho thấy dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức xạ iôn hoá.

Dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức xạ iôn hoá là một hình tròn màu đỏ với ba cánh hoa màu đỏ, đồng tâm, giống nhau, cách đều nhau, xoè ra ba hướng, và, được vẽ trên một nền phẳng màu vàng. Các cánh hoa được mở rộng dần khi đi từ tâm hình tròn ra ngoài. Nếu vẽ kéo dài hai đường thẳng là hai cạnh bên của mỗi cánh, thì chúng gặp nhau tại tâm hình tròn và tạo thành một góc 60° . Hình tròn màu đỏ ở tâm được ngăn cách với ba

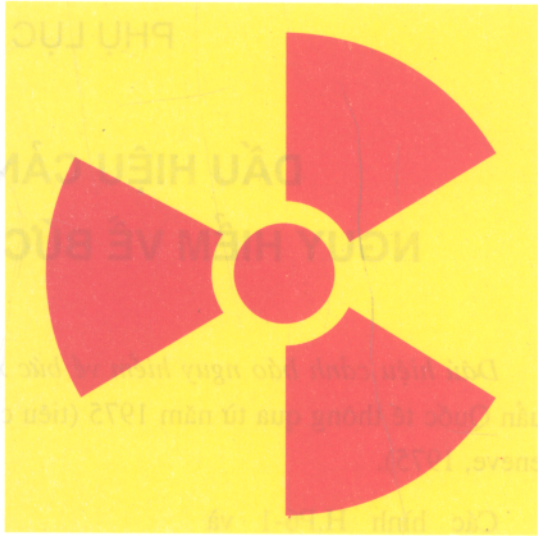


Hình H.P6-1. Hình dạng và kích thước chuẩn của dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức xạ iôn hoá. Ký hiệu: D – đường kính của hình tròn ở vùng giữa của dấu hiệu.

cánh hoa bởi một vành tròn
hẹp màu vàng. Đường biên
ngoài cùng của các cánh
hoa cùng nằm trên một
đường tròn đồng tâm với
hình tròn.

Dấu hiệu này được
sử dụng để cảnh báo nguy
hiểm ở nơi làm việc có bức
xạ iôn hóa, cũng như ở nơi
cất giữ, bảo quản hoặc
chuyên chở chất phóng xạ.

Đối với các kiện
hàng chứa chất phóng xạ
cần phải vận chuyển, thì
dấu hiệu cảnh báo được in
ngay lên vị trí dễ nhận thấy nhất; ở đó màu đỏ của hoa có thể được thay bằng
màu đen.

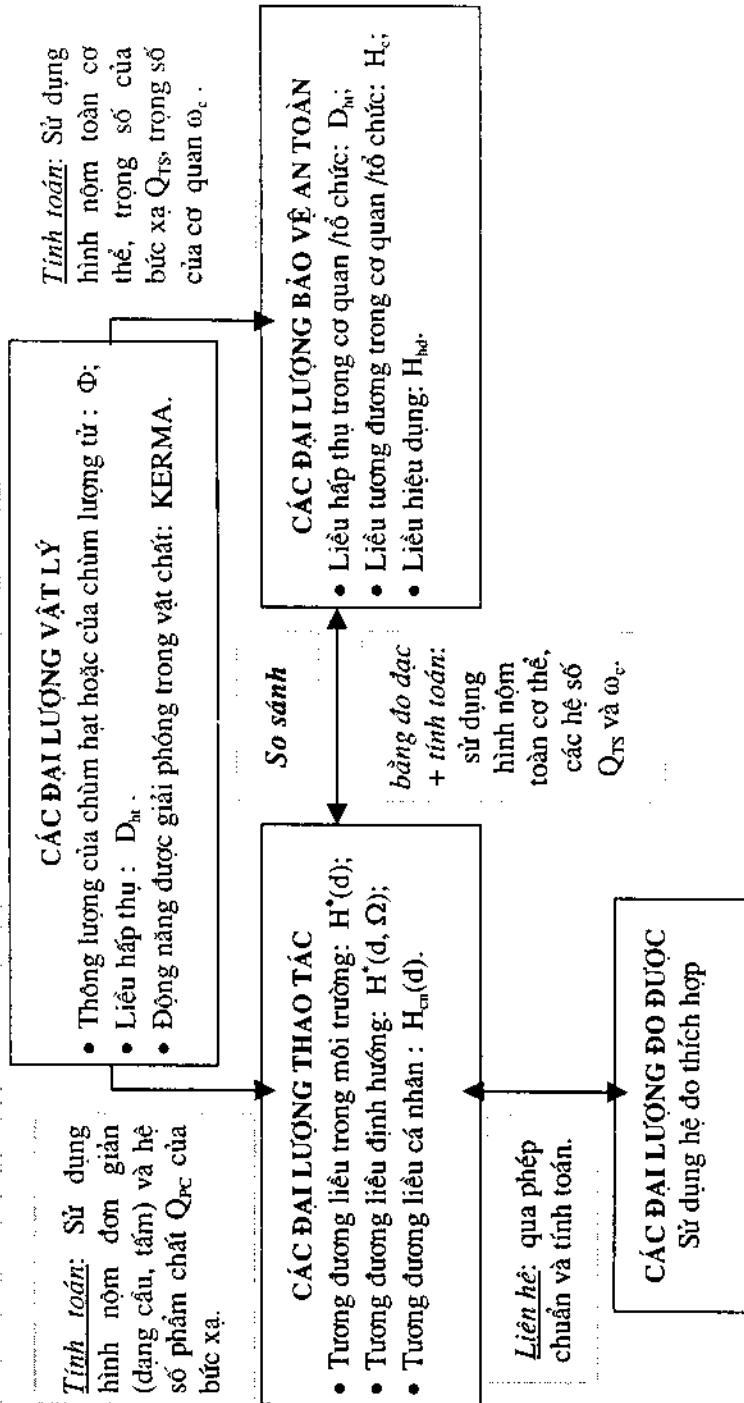


Hình H.P6-2. Hình dạng và màu sắc chuẩn
của dấu hiệu cảnh báo nguy hiểm về bức
xạ iôn hoá.

PHỤ LỤC 7

QUAN HỆ GIỮA CÁC ĐẠI LƯỢNG TRONG BẢO VỆ AN TOÀN BỨC XẠ

QUAN HỆ GIỮA CÁC ĐẠI LƯỢNG TRONG BẢO VỆ AN TOÀN BỨC XẠ



Chương 1 đã nêu rõ các đại lượng vật lý về liều lượng bức xạ iôn hoá (như: thông lượng, động năng được bức xạ iôn hoá gián tiếp giải phóng trong vật chất, liều hấp thụ .v.v.). Trên cơ sở các đại lượng vật lý này, bằng cách tính toán (sử dụng trọng số của bức xạ Q_{TS} , trọng số của từng cơ quan hoặc tổ chức trong cơ thể w_t , và, hình nộm toàn cơ thể), người ta thu được các đại lượng đặc trưng trong bảo vệ an toàn bức xạ iôn hoá (như: liều hấp thụ trong cơ quan hoặc tổ chức của cơ thể, liều tương đương trong cơ quan hoặc tổ chức của cơ thể, liều hiệu dụng .v.v.).

Trong thực tế tính toán bảo vệ an toàn bức xạ, người ta còn phân biệt sử dụng một số “đại lượng thao tác” (như: tương đương liều trong môi trường, tương đương liều định hướng, tương đương liều cá nhân .v.v.). Các đại lượng thao tác này thu được từ các đại lượng vật lý trên cơ sở tính toán bằng cách sử dụng hệ số phẩm chất của bức xạ Q_{PC} và hình nộm đơn giản (ở dạng khối cầu hoặc thanh, tấm).

Như vậy, từ một đại lượng vật lý ban đầu, nếu trong tính toán có sử dụng hình nộm người chuẩn và những giá trị quy ước về mức độ nguy hiểm của bức xạ cho từng cơ quan trong cơ thể, cũng như cho toàn bộ cơ thể, thì sẽ thu được các đại lượng đặc trưng trong bảo vệ an toàn bức xạ iôn hoá. Cũng từ đại lượng vật lý đó, nếu trong tính toán lại sử dụng hình nộm đơn giản (thí dụ: một khối cầu làm bằng vật liệu tương đương tổ chức cơ thể) và hệ số phẩm chất của bức xạ Q_{PC} (chứ không phải giá trị quy ước cho người chuẩn), thì sẽ thu được các đại lượng thao tác.

Thuật ngữ “tương đương liều” được Ủy ban Quốc tế về Đơn vị và Đo lường Bức xạ (ICRU) dùng khi định nghĩa các đại lượng thao tác (1971). Sau này nó được Ủy ban Quốc tế về Bảo vệ an toàn Bức xạ về Sinh học (International commission on radiological protection, ICRP) thay thế bằng thuật ngữ “liều tương đương” (1977).

Dưới đây giới thiệu một số đại lượng thao tác.

1. Đại lượng thao tác trong kiểm soát môi trường:

- *Tương đương liều trong môi trường $H^*(d)$* tại một điểm nào đó trong trường bức xạ là tương đương liều được gây bởi trường này trong quả cầu chuẩn của ICRU ở độ sâu d mm nằm trên bán kính cầu phía đối diện với nguồn bức xạ. Đối với bức xạ có khả năng đâm xuyên mạnh, khuyến cáo lấy độ sâu $d=10$ mm.
- *Tương đương liều định hướng $H^*(d, \Omega)$* tại một điểm nào đó trong trường bức xạ là tương đương liều được gây bởi trường này trong quả cầu chuẩn của ICRU ở độ sâu d mm nằm trên bán kính cầu có định hướng là Ω . Đối với bức xạ có khả năng đâm xuyên yếu, khuyến cáo lấy độ sâu $d=0,07$ mm.

2. Đại lượng thao tác trong kiểm soát cá nhân:

- *Tương đương liều cá nhân $H_{cn}(d)$* là tương đương liều trong tổ chức cơ thể mềm tại điểm nằm ở độ sâu d mm dưới da. Khuyến cáo: lấy độ sâu $d=10$ mm đối với bức xạ có khả năng đâm xuyên mạnh và lấy $d=0,07$ mm đối với bức xạ có khả năng đâm xuyên yếu. Trong một số trường hợp đặc biệt cần sử dụng các độ sâu khác, thí dụ, $d=3$ mm đối với thủy tinh thể của mắt.

$H_{cn}(10)$ được sử dụng để tránh cả đánh giá cao cũng như đánh giá thấp về liều tương đương.

Các tế bào nhạy cảm của da được coi là nằm ở độ sâu từ 0,05 mm đến 0,1 mm dưới bề mặt của da; do vậy $H_{cn}(0,07)$ được sử dụng để đánh giá liều tương đương ở da. $H_{cn}(0,07)$ cũng được sử dụng để kiểm soát trong trường hợp liều ở da là đại lượng có ý nghĩa quyết định.

Chú ý:

Việc chuẩn các dụng cụ đo liều được thực hiện trong những điều kiện đơn giản thông thường, sử dụng hình nộm thích hợp. Đại lượng $H_{cn}(d)$ có thể được sử dụng để định rõ tương đương liều tại một điểm trong hình nộm tượng trưng cho cơ thể. Nếu dụng cụ này đo chính xác $H_{cn}(d)$ tại một điểm trong hình nộm như vậy, thì có thể coi là nó đo $H_{cn}(d)$ đạt yêu cầu chính xác trong cơ thể của bất kỳ người nào.

Cần nhấn mạnh một lần nữa rằng tương đương liều trong môi trường là đại lượng thích hợp để đánh giá các dụng cụ hoặc hệ đo liều lượng bức xạ dùng trong khảo sát hoặc kiểm soát môi trường. Trong khi đó, tương đương liều cá nhân là đại lượng thích hợp để đánh giá hoạt động của đầu dò hoặc hệ đo liều lượng bức xạ trên cơ thể người.

Hình nộm thích hợp để kiểm soát liều lượng bức xạ môi trường tại vị trí làm việc là quả cầu chuẩn của Cơ quan Quốc tế về Đơn vị đo lường Bức xạ (ICRU sphere).

Quả cầu chuẩn của ICRU có đường kính bằng 30 cm, khối lượng riêng bằng 1 g/cm^3 , được làm bằng vật liệu tương đương tổ chức mềm của cơ thể và có thành phần nguyên tố (tính theo phần trăm khối lượng) như sau: 76,2% ôxy, 11,1% carbon, 10,1% hydro và 2,6% nitơ.

PHỤ LỤC 8

GỢI Ý BẠN ĐỌC MỚI LÀM QUEN VỚI LĨNH VỰC AN TOÀN BỨC XẠ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG

Với mong muốn giúp bạn đọc nhanh chóng nắm vững những nội dung cần quan tâm, tác giả xin được gợi ý cách sử dụng tài liệu này như sau:

- a). Nếu bạn đọc chưa quen biết nhiều với lĩnh vực Vật lý – Kỹ thuật Hạt nhân, hoặc nếu bạn đọc là sinh viên thuộc những chuyên ngành khác liên quan tới các lĩnh vực an toàn bức xạ và bảo vệ môi trường, thì mời bạn bắt đầu đọc từ phụ lục 1 để nắm vững những đại lượng và đơn vị thường dùng trong các lĩnh vực này, tiếp đó bạn đọc phụ lục 2 để hiểu rõ hơn về các loại nguồn bức xạ iôn hoá; rồi sau đó bạn mới đọc các phần khác trong sách.
- b). Nếu bạn đọc quan tâm chủ yếu tới những vấn đề kỹ thuật thuộc lĩnh vực xác định liều lượng bức xạ iôn hoá và chưa có đủ thời gian để tìm hiểu về lĩnh vực bảo vệ an toàn bức xạ, thì mời bạn đọc chương 1 và tiếp đó từ chương 3 tới hết chương 5.
- c). Nếu bạn đọc quan tâm chủ yếu tới lĩnh vực bảo vệ an toàn bức xạ mà chưa có đủ thời gian để quan tâm tới những vấn đề kỹ thuật về xác định liều lượng bức xạ iôn hoá, thì mời bạn đọc theo trình tự như sau: chương 1 (bắt đầu từ mục 1.3), chương 2 và chương 6. Phụ lục 3 gồm các bảng tính sẵn phục vụ cho việc áp dụng một phần kiến thức trình bày trong mục 6.1 của chương 6.
- d). Nếu bạn đọc quan tâm tới cả hai lĩnh vực là xác định liều lượng bức xạ và bảo vệ an toàn bức xạ, đồng thời muốn tìm hiểu chúng một

cách toàn diện hơn, thì mời bạn bắt đầu đọc từ phụ lục 1, phụ lục 2, sau đó bạn lần lượt đọc từ chương 1 đến cuối sách.

- e). Nếu bạn đọc đang trong giai đoạn học tập, muốn hiểu kỹ và nắm chắc những vấn đề được trình bày trong sách này, thì mời bạn dành thêm một ít thời gian để đọc phụ lục 4 bao gồm những gợi ý để tóm tắt các chương.

Trong sách này, chương 6 liên quan trực tiếp tới những biện pháp kỹ thuật trong bảo vệ an toàn bức xạ iôn hoá. Vì vậy, trong chương này tác giả đề cập tới nhiều vấn đề cần giải quyết trong thực tế. Một số vấn đề được nêu cùng với cách giải quyết cụ thể; còn việc giải quyết một số vấn đề khác thì được nhường lại cho bạn đọc. Nếu bạn đọc thường xuyên làm việc với nguồn bức xạ iôn hoá, hoặc đang trong quá trình học tập và tích lũy kiến thức để áp dụng vào thực tế, thì mời bạn dành chút ít thời gian cho những vấn đề đó.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI

**AN TOÀN BỨC XẠ
BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG**

Tác giả: PHÙNG VĂN DUÂN

Chịu trách nhiệm xuất bản: PGS. TS. TÔ ĐĂNG HẢI

Biên tập và sửa bài: ThS. NGUYỄN HUY TIẾN

NGỌC LINH

Trình bày bìa:

HƯƠNG LAN

NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

70 Trần Hưng Đạo - Hà Nội

In 700 cuốn, khổ 16 × 24 cm, tại Xưởng in NXB Văn hoá Dân tộc

Quyết định xuất bản số: 409/2006/CXB/40-33/KHKT-10/8/2006

In xong và nộp lưu chiểu Quý III năm 2006.

*** Giáo trình “An toàn bức xạ bảo vệ môi trường” được viết trên cơ sở các bài giảng cho sinh viên Vật lý Kỹ thuật, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội và kinh nghiệm nghiên cứu và giảng dạy nhiều năm của tác giả trong lĩnh vực an toàn bức xạ.**

*** Có thể nói giáo trình “An toàn bức xạ bảo vệ môi trường” là sách được viết đầy đủ và chi tiết nhất trong lĩnh vực này ở nước ta từ trước đến nay.**

GS.TS. Trần Đức Thiệp

*** Nội dung giáo trình được trình bày rõ ràng, dễ hiểu, bố cục hợp lý, giúp người đọc tiếp cận được vấn đề một cách hệ thống.**

*** Giáo trình “An toàn bức xạ bảo vệ môi trường” thực sự là một tài liệu quý, giúp ích cho những ai học tập, giảng dạy, nghiên cứu và hoạt động thực tiễn trong lĩnh vực an toàn bức xạ bảo vệ môi trường ở nước ta.**

GS. TS. Nguyễn Văn Đố

206276



Giá: 75.000 đ