

NGÔ QUANG HUY

VẬT LÝ

LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN



NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

NGÔ QUANG HUY

VẬT LÝ
LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

In lần thứ 2

NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

NHÀ XUẤT BẢN ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

16 Hàng Chuối - Hai Bà Trưng - Hà Nội

Điện thoại: (04) 9715012; (04) 7685236. Fax: (04) 9714899

E-mail: nxb@vnu.edu.vn

★ ★ ★

Chịu trách nhiệm xuất bản:

Giám đốc: PHÙNG QUỐC BẢO

Tổng biên tập: PHẠM THÀNH HÙNG

Chịu trách nhiệm nội dung:

Hội đồng nghiệm thu giáo trình

Trường ĐHKHTN – Đại học Quốc gia Hà Nội

Người nhận xét: PGS. TS. PHẠM QUỐC HÙNG

TS. HÀ VĂN THÔNG

Biên tập nội dung: NGỌC QUYÊN

Trình bày bìa: NGỌC ANH

VẬT LÝ LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

Mã số: 1K-02062-02404

In 500 cuốn, khổ 14,5 x 20,5 tại Nhà in Đại học Quốc gia Hà Nội

Số xuất bản: 89/113/XB-QLXB, ngày 10/2/2004.

Số trích ngang: 302 KH/XB

In xong và nộp lưu chiểu quý IV năm 2004.

MỤC LỤC

Lời nói đầu	7
Chương 1. TƯƠNG TÁC CỦA NƠTRÔN VỚI VẬT CHẤT VÀ NGUYÊN TẮC CẤU TẠO Lò PHẢN ỨNG	9
1.1. Nơtrôn	9
1.2. Tán xạ và hấp thụ nơtrôn	12
1.3. Phản ứng phân hạch hạt nhân	17
1.4. Phản ứng dây chuyền và nguyên tắc làm việc của lò phản ứng hạt nhân	28
1.5. Phân loại các lò phản ứng hạt nhân	32
Chương 2. LÀM CHẬM VÀ KHUẾCH TÁN NƠTRÔN	37
2.1. Cơ chế làm chậm nơtrôn	37
2.2. Phổ năng lượng của nơtrôn làm chậm	42
2.3. Khuếch tán nơtrôn	47
2.4. Phương trình khuếch tán nơtrôn	55
2.5. Phân bố không gian của các nơtrôn làm chậm	59
2.6. Độ dài khuếch tán	63
2.7. Sự phản xạ nơtrôn	66
2.8. Phương trình khuếch tán với một nhóm nơtrôn	67
2.9. Phương trình khuếch tán với hai nhóm nơtrôn	74
2.10. Phương trình vận chuyển nơtrôn	80
Chương 3. TRẠNG THÁI TỐI HẠN CỦA Lò PHẢN ỨNG	96
3.1. Hệ số nhân hiệu dụng	96
3.2. Công thức 4 thừa số	97

3.3. Kích thước tới hạn của vùng hoạt lò phản ứng	115
3.4. Công suất của lò và sự phát nhiệt của lò	120
3.5. Lò phản ứng với vành phản xạ trong khuôn khổ lý thuyết một nhóm nơtron	125
3.6. Lò phản ứng với vành phản xạ trong khuôn khổ lý thuyết 2 nhóm nơtron	130
Chương 4. ĐỘNG HỌC Lò PHẢN ỨNG	138
4.1. Độ phản ứng	138
4.2. Vai trò của nơtron tức thời và nơtron trễ trong phản ứng dây chuyền	140
4.3. Phương trình động học lò phản ứng	144
4.4. Nghiệm phương trình động học với một nhóm nơtron trễ.....	150
4.5. Động học lò khi thay đổi tuyến tính độ phản ứng	158
4.6. Động học lò phản ứng dưới tới hạn và quá trình tiến tới trạng thái tới hạn	162
Chương 5. SỰ THAY ĐỔI ĐỘ PHẢN ỨNG TRONG QUÁ TRÌNH LÀM VIỆC CỦA Lò	170
5.1. Sự nhiễm độc xenôn	170
5.2. Nhiễm độc samari	180
5.3. Sự cháy nhiên liệu và sự tạo xỉ lò phản ứng	184
5.4. Sự thay đổi thành phần của nhiên liệu	190
5.5. Hiệu ứng nhiệt độ của độ phản ứng	195
5.6. Hiệu ứng công suất của độ phản ứng	204
5.7. Độ hiệu dụng của các thanh điều khiển	205
Chương 6. XÁC ĐỊNH THỰC NGHIỆM CÁC THÔNG SỐ VẬT LÝ Lò	215
6.1. Các phương pháp ghi đo nơtron	215
6.2. Xác định tuổi nơtron	218

6.3. Xác định độ dài khuếch tán của nơtron nhiệt	219
6.4. Xác định Laplacien vật liệu	222
6.5. Xác định thời gian sống của các nơtron tức thời	223
6.6. Xác định thời gian bán rã của các nhóm nơtron trễ	228
6.7. Xác định khối lượng nhiên liệu tới hạn của vùng hoạt	229
6.8. Chuẩn độ các thanh điều khiển	232
6.9. Xác định các hệ số nhiệt độ và công suất của độ phản ứng	236
6.10. Xác định độ nhiễm độc xenôn	238
Chương 7. Lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt	241
7.1. Cấu trúc của lò phản ứng	241
7.2. Cấu trúc vùng hoạt	243
7.3. Hệ thống nước tải nhiệt	247
7.4. Hệ thống điều khiển lò phản ứng	248
7.5. Các thông số của lò phản ứng	251
Tài liệu tham khảo	254

LỜI NÓI ĐẦU

Vật lý lò phản ứng hạt nhân là một bộ phận đặc biệt của vật lý hạt nhân, nghiên cứu phản ứng phân hạch hạt nhân dây chuyền trong lò phản ứng. Các lò phản ứng rất đa dạng, phụ thuộc vào chức năng của chúng như lò phản ứng năng lượng hay lò phản ứng nghiên cứu, phụ thuộc vào năng lượng nơtron phân hạch nhiên liệu như lò phản ứng nơtron nhiệt, lò phản ứng nơtron trung gian, lò phản ứng nơtron nhanh v.v. Vì vậy vật lý lò phản ứng bao gồm một phạm vi rất rộng các vấn đề. Chúng ta chỉ tập trung khảo sát các quá trình cơ bản đối với lò phản ứng nơtron nhiệt, là loại lò hay gặp hiện nay, trong đó có lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Tuy nhiên các vấn đề được xét ở đây cũng đề cập những nguyên tắc cơ bản của lò phản ứng nói chung.

Quyển sách này dựa trên giáo trình do tác giả giảng dạy cho các khóa bậc đại học và bậc cao học về vật lý hạt nhân. Những vấn đề nêu trong quyển sách được chọn lựa vừa cơ bản vừa thực tiễn theo kinh nghiệm của tác giả qua các năm tham gia vận hành lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt. Mục đích của quyển sách là cung cấp cho bạn đọc những kiến thức cơ bản về các quá trình vật lý xảy ra trong lò phản ứng hạt nhân và các nguyên tắc cấu tạo của nó. Quyển sách gồm bảy chương. Trong chương 1 nêu tóm tắt các quá trình tương tác của nơtron với vật chất, trong đó nhấn mạnh cơ chế phản ứng phân hạch hạt nhân dây chuyền, là phản ứng chính xảy ra trong lò phản ứng hạt nhân. Chương 2 trình bày các quá trình vật lý cơ bản trong lò phản ứng là sự làm chậm và khuếch tán nơtron. Chương 3 xác định các thông số vật liệu và hình học của

vùng hoạt để lò phản ứng đạt trạng thái tới hạn. Chương 4 miêu tả động học của lò phản ứng, là sự thay đổi công suất lò theo thời gian khi đưa vào vùng hoạt của lò một độ phản ứng nào đó. Chương 5 trình bày sự thay đổi thành phần đồng vị của nhiên liệu trong quá trình làm việc của lò và hiệu ứng nhiễm độc, hiệu ứng nhiệt độ, hiệu ứng công suất v.v. Chương 6 trình bày một số phương pháp thực nghiệm xác định các thông số vật lý lò. Và cuối cùng, chương 7 cung cấp thông tin về lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, là lò phản ứng nghiên cứu của Việt Nam hiện nay, để bạn đọc tham khảo như một ví dụ nhằm minh họa cho nguyên tắc cấu tạo lò phản ứng nêu ở các chương trên.

Tác giả xin chân thành cảm ơn trường Đại học Khoa học Tự nhiên thuộc Đại học Quốc gia Hà Nội, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội đã tạo điều kiện để tác giả có thể hoàn thành và xuất bản quyển sách này. Tác giả xin cảm ơn các bạn đồng nghiệp tại Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam, Viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt, Trung tâm Hạt nhân TP Hồ Chí Minh, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên Hà Nội và Trường Đại học Khoa học Tự nhiên TP Hồ Chí Minh đã có những ý kiến đóng góp có giá trị về nội dung quyển sách. Đặc biệt tác giả xin cảm ơn TS Nguyễn Phước Lân, TS Hà Văn Thông và TS Đỗ Quang Bình đã đọc kỹ và hiệu chỉnh các sai sót trong bản thảo. Tác giả xin cảm ơn CN Đào Văn Hoàng đã rất tận tình và chu đáo trong việc hình thành quyển sách này.

Tác giả

Chương 1

TƯƠNG TÁC CỦA NƠTRON VỚI VẬT CHẤT VÀ NGUYÊN TẮC CẤU TẠO Lò PHẢN ỨNG

1.1. NƠTRÔN

Hạt nhân nguyên tử do các prôtôn và nơtrôn tạo nên. Số prôtôn và nơtrôn trong hạt nhân được ký hiệu là Z và N . Tổng số $A = Z + N$ là số khối lượng, gần bằng khối lượng hạt nhân, biểu thị trong đơn vị khối lượng nguyên tử $1,660 \times 10^{-27} \text{kg}$.

Prôtôn là hạt mang điện tích dương đơn vị bằng $+1,6 \times 10^{-19} \text{C}$, và có khối lượng bằng $1,6726 \times 10^{-27} \text{kg}$ hay $938,279 \text{ MeV}$. Nơtrôn không có điện tích, khối lượng của nó bằng $1,675 \times 10^{-27} \text{kg}$ hay $989,573 \text{ MeV}$, tức là lớn hơn khối lượng prôtôn.

Prôtôn là hạt cơ bản bên còn nơtrôn chỉ bên trong hạt nhân bền vững. Quá trình phân rã của nơtrôn trong hạt nhân bền vững bị cấm về mặt năng lượng vì khi phân rã cần thắng năng lượng liên kết của nơtrôn trong hạt nhân. Trong vật lý lò phản ứng, các nơtrôn được xét ở trạng thái tự do. Ở trạng thái tự do, nơtrôn phân rã với thời gian bán rã 11,7 phút theo sơ đồ phân rã β như sau:



trong đó e^{-} là electron còn $\bar{\nu}$ là phản nơtrinô. Tuy nhiên sự không bền của nơtrôn tự do không đóng vai trò quan trọng khi nghiên cứu các quá trình vật lý trong lò phản ứng. Đó là do thời gian tương tác

của nơtrôn với vật chất trong lò phản ứng rất bé so với thời gian sống của nơtrôn.

Các nơtrôn được sinh ra trong lò phản ứng với năng lượng từ 0 MeV đến 10 MeV. Tính chất tương tác của nơtrôn với vật chất khác nhau trong các miền năng lượng khác nhau. Vì vậy người ta chia toàn dải năng lượng từ 0 – 10 MeV thành 3 miền năng lượng và các nơtrôn cũng được chia thành 3 loại theo 3 miền năng lượng đó. Các nơtrôn nhiệt có năng lượng E trong miền $0 < E \leq 0,1$ eV. Các nơtrôn trung gian có năng lượng E trong miền $0,1 \text{ eV} < E \leq 100 \text{ KeV}$. Các nơtrôn nhanh có năng lượng E trong miền $100 \text{ KeV} < E \leq 10 \text{ MeV}$. Các lò phản ứng hạt nhân cũng được phân loại theo các miền năng lượng của nơtrôn (lò phản ứng nơtrôn nhiệt, lò phản ứng nơtrôn trung gian và lò phản ứng nơtrôn nhanh), trong đó phần lớn các nơtrôn trong miền năng lượng tương ứng được hấp thụ và gây phân hạch nhiên liệu hạt nhân.

Đặc điểm của các nơtrôn nhiệt: Các nơtrôn nhiệt chuyển động trong trạng thái cân bằng nhiệt với các phân tử môi trường. Mật độ nơtrôn nhiệt phụ thuộc vào năng lượng nơtrôn theo quy luật Maxwell-Boltzmann :

$$n(E) = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{E}{kT}} \frac{1}{kT} e^{-\frac{E}{kT}} \quad (1.2)$$

trong đó, $N = \int_0^{\infty} n(E)dE$; $k = 8,61 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ là hằng số Boltzmann

và T là nhiệt độ môi trường. Do năng lượng E và vận tốc v của nơtrôn liên hệ với nhau theo biểu thức $E = \frac{mv^2}{2}$, trong đó m là khối lượng nơtrôn, nên biểu thức (1.2) có thể viết lại dưới dạng như sau: