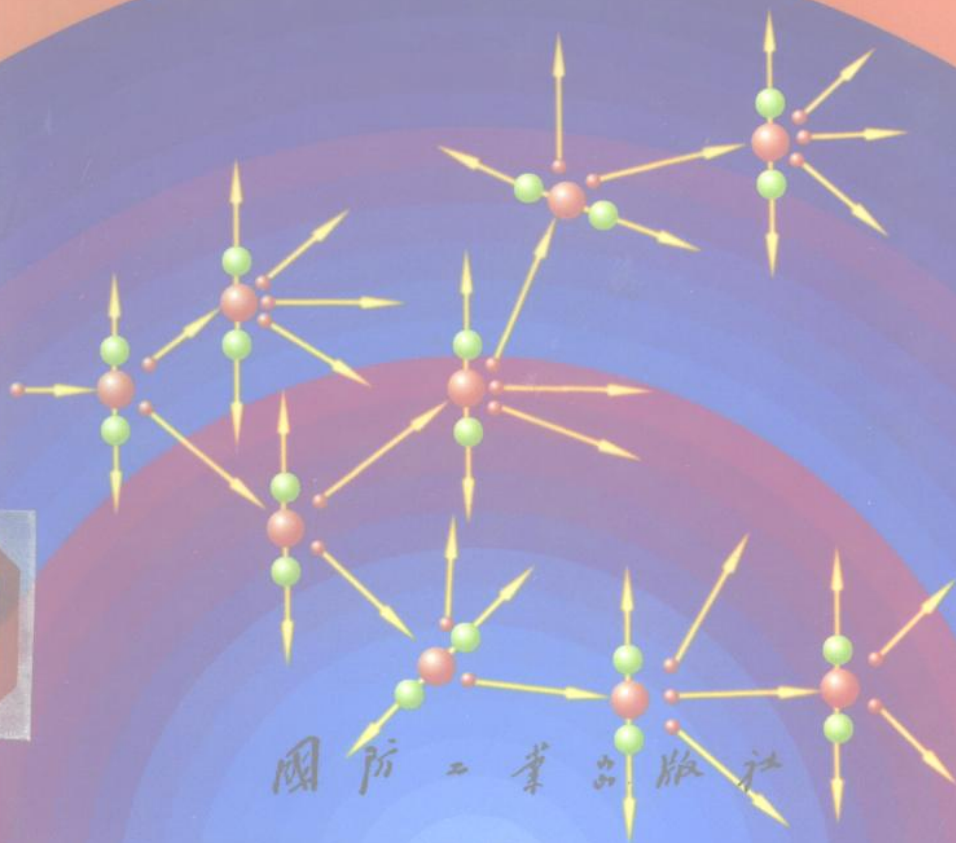


核反应堆中子 倍增理论基础

王子义 编著

Elements Of Nuclear Reactor Neutron
Multiplication Theory



核反应堆中子倍增理论基础

Elements of Nuclear Reactor Neutron Multiplication Theory

王子义 编著

索长安 主审

童舜坤 审校

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆中子倍增理论基础/王子义编著. —北京:国防工业出版社, 1999.4

ISBN 7-118-01978-X

I. 核… II. 王… III. 反应堆-中子扩散-理论 IV. TL3
25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 29735 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8¼ 209 千字

1999 年 4 月第 1 版 1999 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:18.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	
	陈芳允	曾铎	
秘书长	崔士义		
委员	于景元	王小谟	尤子平
(以姓氏笔划为序)	冯允成	刘仁	朱森元
	朵英贤	宋家树	杨星豪
	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果
	张均武	张涵信	陈火旺
	范学虹	柯有安	侯正明
	莫梧生	崔尔杰	

前 言

本书是根据核工业总公司教育培训部 1992 年 10 月对《核反应堆中子倍增理论基础》一书的要求编著的,是按照国防科技图书基金评审委员会 1996 年 8 月评审意见修改定稿的。

本书以压水堆为对象,介绍核反应堆内中子倍增的基本理论,共分六章。第一章简明扼要地介绍中子倍增理论所需要的核物理知识。第二章介绍核反应堆内中子倍增的物理过程。第三章介绍核反应堆的临界理论,由于篇幅所限,只讨论了反应堆临界概念和均匀裸堆的临界计算。第四章建立考虑缓发中子在内的中子倍增公式。第五、六章讨论中子倍增公式中的主要参数 K (反应堆增殖系数)的变化和控制。其中第五章分析了温度效应、中毒效应、反应堆燃耗等;第六章介绍了反应性的控制方法。

核反应堆内的中子与核燃料的链式反应,中子密度是个离散的倍增过程,核裂变产生的中子有瞬发中子和缓发中子。这个物理过程应当有个精确的公式描述。本书第四章介绍的考虑缓发中子在内的中子倍增公式正是按照核链式反应的图像建立起来的,正确描述了核链式反应过程中子倍增的实际。这是本书的核心内容,是编著者多年研究的成果,这一成果,对核反应堆理论研究具有重要意义和实际应用价值。曾获 1995 年度国家科技进步三等奖。

本书可作为高等院校核反应堆工程专业的参考书,也可供有关专业工程技术人员和研究人员参考,特别适合从事研究反应堆动力学的学者参考。

在本书核心内容的研究、评审和出版申报过程中,曾得到戴传曾、彭士禄、赵仁恺、陈佳洱、王乃彦、吕敏、姚树人、郑志鹏、刘耀

阳、张永德、肖振喜、傅龙舟等著名专家、学者的指导、支持和帮助。本书主审索长安和审校童舜坤二位先生对本书核心内容的研究和全书稿的审查、审校工作极为认真,并提出了许多宝贵意见。第四章的数据计算是朱隆新高工和张大发教授完成的。编著者在此一并表示衷心感谢。

本书涉及到核反应堆物理各方面,其核心内容是近几年研究的新成果,由于编著者水平与时间有限,书中难免有不妥、不完善、甚至有错误之处,请读者批评指正。

编 著 者

目 录

第一章 原子核物理基础	(1)
第一节 原子核的基本性质	(1)
第二节 原子核的结合能	(7)
第三节 核衰变	(15)
第四节 核反应	(20)
第五节 中子核反应	(25)
第六节 核裂变反应	(43)
第二章 核反应堆内的中子倍增过程	(62)
第一节 核链式反应及反应堆类型简介	(62)
第二节 中子的慢化	(64)
第三节 中子的扩散	(80)
第四节 中子在倍增系统内的扩散	(98)
第五节 四因子和不泄漏概率及热中子 反应堆内的中子循环.....	(104)
第三章 核反应堆临界理论简介.....	(118)
第一节 反应堆的临界概念.....	(118)
第二节 均匀裸堆的临界计算.....	(120)
第四章 考虑缓发中子在内的中子倍增公式.....	(142)
第一节 建立“公式”的必要性.....	(142)
第二节 考虑缓发中子在内的中子倍增公式.....	(148)
第三节 考虑缓发中子在内的中子倍增公式 的相关内容简介.....	(170)
第五章 核反应堆内的增殖因数的变化.....	(180)
第一节 反应性及其变化的原因.....	(180)

第二节	温度效应·····	(181)
第三节	中毒效应·····	(194)
第四节	反应堆的燃耗·····	(208)
第六章	反应性的控制 ·····	(223)
第一节	反应性控制的任务·····	(223)
第二节	反应性控制的基本原理和方法·····	(226)
第三节	控制棒设计要求和控制棒材料 的特性及控制棒价值·····	(230)
附 录	·····	(235)
附录 A	国际单位制(SI)·····	(235)
附录 B	元素和某些分子的截面·····	(237)
附录 C	贝塞尔函数·····	(243)

Contents

Chapter 1	Elements of Nuclear Physics	1
Section 1	Basic Properties of Atomic Nucleus	1
Section 2	Binding Energies of Atomic Nucleus	7
Section 3	Nuclear Decay	15
Section 4	Reactions of Nucleus	20
Section 5	Reactions of Neutrons	25
Section 6	Nuclear Fission Reaction	43
Chapter 2	Neutron Multiplication Process in Nuclear Reactor	62
Section 1	Summary of Fission Chain Reaction and Reactor Types	62
Section 2	Slowing Down of Neutrons	64
Section 3	Diffusion of Neutrons	80
Section 4	Diffusion of Neutrons in Multiplication System	98
Section 5	Four Factor and Non-leakage Probability and Circular of Neutron in the Thermal Reactor	104
Chapter 3	Critical Basic Theory of Nuclear Reactor	118
Section 1	Critical Concept of Reactors	118
Section 2	Critical Calculation of Bare Homogeneous Thermal Reactor	120
Chapter 4	Formula of Neutron Multiplication with Delayed neutrons	142
Section 1	Necessity of Establishing Formulas	142

Section 2	Formula of Neutron Multiplication with Delayed Neutrons	148
Section 3	Summary of the Related Contents of Formula of Neutron Multiplication with Delayed Neutrons	170
Chapter 5	Change of Multiplication Factors in Nuclear Reactor	180
Section 1	Reactivity As well As Reasons for the Change	180
Section 2	Effects of Temperature on Reactivity	181
Section 3	Effects of Poisoning	194
Section 4	Fuel Consumption of Nuclear Reactor	208
Chapter 6	Reactivity Control	223
Section 1	Task of Reactivity Control	223
Section 2	Basic Elements and Methods of Reactivity Control	226
Section 3	Design Requirements for Control Rod and Its Value	230
Appendix		235
Appendix A	System International d' Unites (International System of units)	235
Appendix B	Elements and Some Molecular Cross Section	237
Appendix C	Bessel Functions	243

第一章 原子核物理基础

本章对原子核物理的描述,主要是用作中子倍增理论的基础。因此,在此描述的核物理基础内容尽量简明、扼要。

第一节 原子核的基本性质

原子核的基本性质,通常是指原子核作为整体所具有的静态性质,这些性质和原子核的结构及其变化有密切关系。本节只讨论与本书重点内容有关的原子核性质。

一、原子核的组成

原子核是由质子和中子组成的。质子和中子统称为核子。质子带正电,用 p 表示;中子不带电,用 n 表示。

质子所带的电荷等于基本电荷,即电子电荷的绝对值为

$$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$$

质子的质量为 $m_p = 1.6726485 \times 10^{-27} \text{kg}$

$$m_p = 1.007277 \text{ 原子质量单位}$$

中子的质量为 $m_n = 1.6749543 \times 10^{-27} \text{kg}$

$$m_n = 1.008665 \text{ 原子质量单位}$$

按国际规定,原子量以 ^{12}C 的质量精确等于 12 原子质量单位为标准,即规定 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 为 1 原子质量单位(u)。

自由质子是稳定的,在自然界中有大量自由质子存在。而自由中子则不稳定,它可以衰变成质子及负电子 β^- 并放出一个反中微子 $\bar{\nu}$

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$$

这个过程的半衰期为 12min。所以自然界见不到自由中子。

核反应堆内核裂变放出的中子,从产生到被吸收或被泄漏堆外的平均寿命,对热中子反应堆大约为 10^{-3} s 量级,对快中子核反应堆则只有 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ s 量级。比自由中子的半衰期短得多,因此,在反应堆理论中讨论中子慢化、扩散、吸收或增殖等所有过程时,可以不考虑中子的衰变问题。

一般核内质子数用 Z 表示, Z 又称核电荷数,也是该元素的原子序数;核内中子数用 N 表示,质量数用 A 表示, $A = Z + N$,就是核内的核子总数。

具有 A 个核子、 Z 个质子的原子核,常用 ${}_Z^AX$ 来表示,其中 X 为元素的符号。

质子数相同,而中子数不同, A 也不相同的核,这些核构成的元素,其化学性质基本上相同,在周期表中占同一个位置,称为同位素。例如,在天然铀中有三种同位素,它们原子百分比,即丰度见表 1.1。

表 1.1 天然铀的同位素成分

质 量 数	原子百分比	同位素质量/u
234	0.0055	234.0410
235	0.720	235.0439
238	99.274	238.0508

二、原子核的质量

核外电子的结合能很小,是可以忽略不计的。在这个情况下,原子核的质量等于该元素的原子质量减去该原子的外层电子的质量,即

$$m = m_A - Zm_e \quad (1.1)$$

式中 m_A ——原子的质量;

m_e ——电子的质量;

Z ——电子数；

m ——原子核质量。

$$m_A = \text{原子的原子量} \times \text{原子质量单位}$$

实验表明,电子的质量为

$$m_e = 9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_e = 5.4858 \times 10^{-4} \text{ 原子质量单位}$$

由 m_p 、 m_n 和 m_e 的数值可以看出,核外电子的质量比核的质量小得多,对于核变化的过程,变化前后核的电子数目不变。因此,在实际的计算过程中,不必计算原子核的质量,只需利用原子的质量即可。更值得指出的是任何元素的原子质量,以 u 为单位时都接近于某一整数,这个整数就是质量数 A 。在近似计算中,可采用近似公式

$$m \approx m_A \approx A(u)$$

三、原子核的半径

可以近似认为原子核是一个半径为 R 的球, R 与质量数 A 满足如下关系

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (\text{m}) \quad (1.2)$$

式中, r_0 为一常数,实验证明

$$r_0 = 1.25 \times 10^{-15} \sim 1.37 \times 10^{-15} \quad (\text{m})$$

上述式(1.2),对于很轻的核不适用,对除了很轻的核之外,计算精度够用了。

原子的半径约为 10^{-10} m 量级,这说明原子核的半径比原子的半径小 5 个数量级左右。

由核半径式(1.2),可求出球形核的体积 V

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (\text{m}^3) \quad (1.3)$$

由式(1.3)说明,球形核的体积 V 与质量数 A 成正比,原子核的质量也近似地与质量数成正比。由此可以得到一个非常重要

的结论:在一切原子核中,核物质的密度是一个常数。由此使人们想到由核子组成的原子核和由分子组成的液滴非常相似。因此,物理学家提出了原子核液滴模型。认为原子核类似于一个具有极大密度(约 10^{17}kg/m^3)的不可压缩的液滴。

四、原子核的能级

原子核可具有激发的各种能量,或者说它具有能级。在核反应过程中,常见有 γ 射线发生,而且 γ 射线常有一种或几种确定的能量。 γ 射线的产生,表示在核反应过程中,原子核可处于若干激发态,当它从较高的激发态回到较低的激发态或基态时,才有 γ 射线的发生。这说明核确实存在能级。原子核的能级接近基态的能级间隔比较大,离开基态越远,则能级之间的间隔越小。如图 1.1

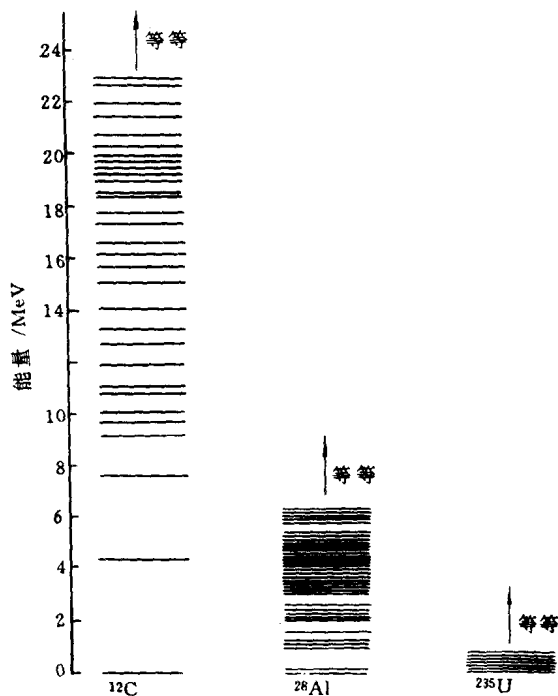


图 1.1 ^{12}C 、 ^{28}Al 、 ^{235}U 的能级图

给出 ^{12}C 、 ^{28}Al 、 ^{235}U 的能级。

这三种核分别为轻核、中等核和重核的典型。可以看出,在每一种能级情况下,能级的密度随激发能的增加而增加。某个激发能的能级密度也随核的质量数增加而增加。一般说来,随着质量数的增加,能级变得越来越密,但是幻核对这一规律则是例外,它们的激发态与较轻的核很相似。图1.2所示的 ^{209}Bi 核的能级就说明了这一点。这种能级图与其他重核的能级图没有多少共同之处。

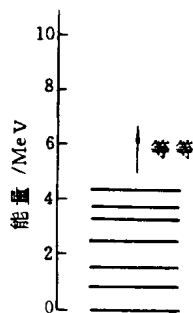


图 1.2 ^{209}Bi 的能级图(在 3MeV 的附近可能有几个附加能级)

具有 2, 6, 8, 14, 20, 28, 50, 82 以及 126 个中子或质子的核称为幻核,这种核特别稳定。相应的核子数称为幻数。幻核的存在对核工程有实际意义。例如,中子数为幻数的核吸收中子本领差,因此为了在必须减少中子吸收的地方就用这种材料。如锆(其丰度最大的同位素有 50 个中子)已广泛地用于核反应堆的结构材料。

原子核能级的情况与原子能级的情况不同。一个核子一旦被激发到激发能级,那么要使第二个核子作同样的或另一种跃迁所需要的能量,往往比第一个核子激发到更高能级所需要的能量要小,因此,核的激发与原子的激发态的区别在于:原子核较高的激发态通常是由几个核子同时激发,而不是由一个核子的连续激发而形成的。由于这个原因,原子核的激发态可以出现在单个核子的结合能以上,而这种情况在原子结构中是很难遇到的。因此核的能级可以出现在 10MeV 处,而要把一个核子从此核内移出仅需 8MeV,这是因为 10MeV 的激发能分配在几个核子上的缘故。

核内结合得最松的核子的结合能,称为虚能。这是把一个核子从核内移出所需要的最小能量。核在虚能以上的激发态称为虚态或虚能级,在虚能级以下的激发态称为束缚态或束缚能级。显