

高等教育试用教材

核反应堆运行物理

张法邦 主编
李植华 主审

原子能出版社

高等教育试用教材

核反应堆运行物理

张法邦 主编 李植华 主审

张法邦
吴清泉 编著 童舜坤 审校

原子能出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆运行物理/张法邦主编;张法邦,吴清泉编著. - 北京:原子能出版社,2000,9
ISBN 7-5022-2187-5

I. 核… II. ①张… ②吴… III. 反应堆运行-反应堆物理学-高等学校-教材 IV. TL32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 38014 号

内 容 简 介

本书介绍核反应堆运行物理的基本概念、基本理论和分析方法。全书分八章,包括原子核物理基础、中子的扩散与慢化、核反应堆临界理论、反应堆内反应性的变化、反应性控制、反应堆中子动态学、反应性引入及反应性事故分析、反应堆物理测量简介等。

本书是高等院校核动力管理工程专业的教材,也可供有关专业的工程技术人员和研究人员参考。

本书由全国高校核科学与工程类专业教材与教学指导委员会核反应堆与动力工程专业组于 1994 年 4 月由李植华主持召开的审稿会审定作为高等教育试用教材。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:孔 玥

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092 mm 1/16 印张:18.625 字数:463 千字

2000 年 8 月北京第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000

定价:24.00 元

前 言

本书是根据中国核工业总公司教育培训部于一九九一年十一月召开的反应堆工程专业教材会议审定的《核反应堆运行物理》编写大纲编写的。

本书着重介绍核反应堆运行物理的基本概念、基本理论和基本的分析方法。本书在编写过程中,努力贯彻理论联系实际和遵循由浅入深、循序渐进的原则;在内容选择上既考虑系统性又贯彻少而精的原则;既尽量避免复杂的公式推导,又尽可能运用简便的近似估算方法。

本书共分八章。第一章介绍与核反应堆运行物理有关的原子核物理基础知识;第二、三章介绍中子在堆内的运动规律以及反应堆临界的基本知识和理论;第四章介绍温度、中毒、燃耗效应;第五章讨论反应性控制的原理、方法;第六章以点堆中子动态方程为基础,不考虑温度、中毒效应、反应性以不同方式引入时,反应堆物理的动态特性;第七章介绍考虑温度效应时,反应堆的动态特性以及反应性事故分析;第八章介绍核反应堆物理参数测量的原理和方法。带*号部分属于参考内容,可根据具体情况选用,或作为课外阅读参考材料。

学习本书必须学过高等普通物理、高等微积分学以及数理方程、线性代数。它与核动力装置、反应堆热工和安全分析、反应堆控制工程等专业课程相衔接,讲授需要80~100学时。

本书由张法邦主编,其中四、五、六、七章由张法邦编写;一、二、三、八章由吴清泉编写。全书由童舜坤审校,他对全书进行了仔细的审校,并提出了许多宝贵的意见。此外,李植华、许汉铭、焦增庚、柴芳荣、吴宏春等同志对本书也提出了许多有益的意见;清华大学李植华主审全书并参加了本书的定稿工作。在此我们一并表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限,经验不足,书中难免存在缺点和错误,恳切地希望读者指正。

编 者

1994.1

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	5
第三节 核衰变与核反应	11
第四节 中子核反应	17
第五节 核裂变反应	35
第二章 中子的扩散与慢化	54
第一节 链式反应与反应堆临界概念	54
第二节 中子的扩散	58
第三节 中子的慢化	73
第三章 核反应堆临界理论	87
第一节 均匀裸堆的临界条件	87
第二节 均匀裸堆的中子通量密度分布	97
第三节 带反射层的均匀反应堆	105
第四节 非均匀反应堆	118
第五节 堆内中子通量密度分布的不均匀系数与中子通量密度的展平	129
第四章 核反应堆内反应性的变化	135
第一节 反应性及其变化因素	135
第二节 温度效应	137
第三节 中毒效应	146
第四节 燃耗	162
第五章 反应性控制	170
第一节 反应性控制的任务	170
第二节 反应性控制的基本原理与方法	171
第三节 控制棒控制	173
第四节 可燃毒物控制	187
第六章 反应堆中子动态学	191
第一节 中子动态学基础	191
第二节 点堆动态学方程	194
第三节 倒时方程	197
第四节 反应性阶跃变化时点堆动态方程的解	200
第五节 线性反应性输入时点堆动态方程的解	213
第六节 反应堆的逆动态分析方法	222
第七章 反应性引入及反应性事故	227
第一节 反应性引入机理	227
第二节 超缓发临界瞬变	228
第三节 超瞬发临界瞬变	231

第四节	反应堆启动事故	240
第五节	其他反应性事故	243
第八章	反应堆物理测量简介	247
第一节	反应堆临界的测定	247
第二节	中子通量密度分布的测量	251
第三节	控制棒刻度	257
第四节	反应性系数和反应性效应的测量	264
第五节	反应堆物理启动	267
 附录		
附录 A	国际单位制(SI)	274
附录 B	核常数表	276
附录 C	一些有用的数字公式	282
附录 D	一些特殊函数的性质	284
附录 E	拉氏变换及其基本性质	287
附录 F	$\rho \sim T_0$ 表	289
附录 G	典型核动力反应堆数据	290

第一章 原子核物理基础

核反应堆投入运行后,堆内大量中子与核燃料、慢化剂、结构材料、控制材料及毒物等发生各种类型的相互作用,同时不断地释放出核能。因此,在讨论核反应堆内发生的各种物理过程之前,有必要对有关的核物理基础知识作一介绍,重点是中子与物质相互作用的规律以及核反应堆热功率的计算。

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,这些性质和原子核结构及其变化有密切关系。本节只对与本课程有关的内容加以讨论,其他性质从略。最后介绍核密度的计算,供以后各章节采用。

一、原子核的组成

原子核由质子和中子所组成。质子和中子统称为核子。质子(用 p 表示)带正电。中子(用 n 表示)不带电。因此,核子有两种状态:带电态,就是质子;不带电态,就是中子。

质子就是氢核,它所带的电荷等于基本电荷,即电子电荷的绝对值:

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

实验表明,质子和中子的质量分别为

$$m_p = 1.6726485 \times 10^{-27} \text{kg}$$

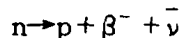
$$= 938.2796 \text{MeV} \cdot \text{C}^{-2}$$

$$m_n = 1.6749543 \times 10^{-27} \text{kg}$$

$$= 939.5731 \text{MeV} \cdot \text{C}^{-2}$$

自由的质子是稳定的,自然界中质子可以长期存在,在星际空间存在着很多自由质子。

中子是不稳定的,除非将它束缚在原子核内。自由中子将衰变为质子及负电子 β^- ,并放出一个反中微子 $\bar{\nu}$;



发生这一过程的平均时间约为 918 s,所以自然界中见不到自由中子。在反应堆内燃料核裂变所放出的中子,从产生到被吸收或泄漏出堆外的平均寿命,对热中子反应堆大约为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ s 量级,对快中子反应堆则只有 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ s 量级。可见,中子的不稳定性在反应堆理论中并不重要。在讨论中子扩散、慢化、吸收或增殖等所有过程中,可以不考虑中子的衰变问题。

微观粒子都具有二重性,有时表现为单个粒子,有时又表现为波。质量为 m 、速度为 v ,动能为 E 的粒子,在非相对论情况下,其波长由下式给出:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \quad (1.1)$$

式中 h 为普朗克常数,其值为

$$\begin{aligned}
 h &= 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\
 &= 4.135701 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}
 \end{aligned}$$

根据式(1.1),中子的波长为

$$\lambda = \frac{2.86 \times 10^{-11}}{\sqrt{E}} \text{ m} \quad (1.2)$$

其中, E 是以 eV 为单位的中子能量。从上式可以知道,中子波长随能量增加而变短。例如 $E = 0.0235 \text{ eV}$, $\lambda \approx 1.8 \times 10^{-10} \text{ m}$; $E = 2 \text{ MeV}$, $\lambda \approx 2.0 \times 10^{-14} \text{ m}$ 。以后我们会看到,中子的能量不同,它与原子核相互作用的几率和方式也不同。

现在通常把波长除以 2π 叫做粒子的折合波长,用 λ' 表示。中子的折合波长为

$$\lambda' = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{4.55 \times 10^{-12}}{\sqrt{E}} \text{ m} \quad (1.3)$$

具有相同质子数 Z 和中子数 N 的一类原子核,称为一种核素。核素用符号 ${}^A_Z\text{X}$ 或 ${}^A\text{X}$ 表示。其中 X 是元素符号, Z 叫做电荷数,也就是该元素的原子序数。 $A = Z + N$ 叫做质量数,也就是核素的核子总数。

质子数相同、中子数不同的核素称为同位素。例如 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 和 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 就是铀的两种同位素,它们在天然铀中所占原子百分比(称为丰度)分别为 0.714% 和 99.27%。

二、原子核的质量

当忽略核外电子的结合能时,原子核的质量等于该元素的原子的质量减去该原子的外层电子的质量,即

$$m = m_A - Zm_e \quad (1.4)$$

其中, m_A 为原子的质量, m_e 为电子的质量, Z 为电荷数。

$m_A =$ 原子的原子量 \times 原子质量单位

电子的质量是很微小的,实验表明

$$\begin{aligned}
 m_e &= 9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg} \\
 &= 0.5110034 \text{ MeV} \cdot \text{C}^{-2}
 \end{aligned}$$

在 1960 年以前,原子质量单位采用的是氧单位,记作 amu(atomic mass unit 的缩写)。1amu 定义为 ${}^{16}\text{O}$ 原子质量的 1/16。从 1960 年 1 月 1 日起,国际物理学会议规定,原子质量单位采用碳单位,记作 u(unit 的缩写)。1u 定义为 ${}^{12}\text{C}$ 原子质量的 1/12。碳单位和氧单位的换算关系如下:

$$\begin{aligned}
 1\text{u} &= 1.000318\text{amu} \\
 &= 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg} \\
 &= 931.5016 \text{ MeV} \cdot \text{C}^{-2}
 \end{aligned}$$

当用 u 作单位时,质子、中子和电子的质量分别为

$$m_p = 1.007276\text{u}$$

$$m_n = 1.008665\text{u}$$

$$m_e = 5.4858 \times 10^{-4}\text{u}$$

由于核外电子的质量远较核的质量小得多,同时对于核的变化过程,变化前后核的电子数目不变,电子质量可以自动相消。因此在实际计算中,不必推算原子核的质量,只需利用原子

的质量即可。更进一步,任何元素的原子质量,以 u 作单位时都接近于某一整数,这个整数就是质量数 A 。所以在近似计算中,可用近似公式:

$$m \approx m_A \approx Au$$

三、核的大小与液滴模型

根据核内电荷分布的实验,可以推知稳定的原子核的形状一般为近似椭球形,椭球长短轴之比一般不大于 $5/4$,所以也可以把它近似地看做球形。若把原子核近似看作一个半径为 R 的球, R 为质量数 A 满足如下关系:

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1.5)$$

式中 r_0 为一常数。通过快中子在原子核上的散射实验或者由原子核 α 衰变的能量与寿期的实验,可知 $r_0 \approx (1.1 \sim 1.5) \times 10^{-15} \text{m}$ 。

按照式(1.5)算出的原子核的半径虽然不十分严格,但对许多计算来说,精度已足够了。必须指出,对于很轻的核,式(1.5)不适用。因为原子的半径约为 10^{-10}m 量级,这表明原子核的线度要比原子小 5 个量级左右。

根据式(1.5)可以计算球形核的体积 V

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (1.6)$$

式(1.6)表明,球形核的体积 V 与质量数 A 成正比。因为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。这使人们感到由核子组成的原子核和由分子组成的液滴非常类似。因此,物理学家提出了原子核的液滴模型。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。液滴模型只是把核作为一个整体来考虑,忽略了核内各核子个别运动的特点。利用液滴模型,可以解释有关原子核的一些现象。例如核反应以及核反应能量问题,因此在原子核物理中有其重要应用。

四、核的能级与壳层模型

在核反应过程中,常见有 γ 射线发生,这种 γ 射线常有一种或几种确定的能量。这种 γ 射线的发生,表示在核反应过程中,原子核常可处于若干激发态,当它从较高的激发态回到较低的激发态或基态时,才有 γ 射线发生。

原子核可具有激发态的各种能量,我们也说它具有能级。从核反应的研究知道,原子核的能级接近基态的间隔比较大,离开基态越远则能级之间的间隔越小。图 1.1 给出了 ^{12}C , ^{28}Al , ^{235}U 的能级图,这三种核分别是轻核、中等核和重核的典型。可以看出,在每种情况下,能级密度随激发能的增加而增加。同时,某处的激发能的能级密度也随核的质量而增加。

实验发现,原子核的许多性质都显示出周期性的变化。例如,凡质子数或中子数是下列数目之一时,这些原子核都特别稳定,这些数目是 2、8、14、20、28、50、82、126,称为幻数。相应的原子核称为幻核。从而使人们想到原子核中,也与原子外的电子壳层相似,存在着壳层结构,这种原子核模型称为壳层模型。幻数就是为填满原子核内核子壳层(或支壳层)所必须的中子或质子数,这与原子结构中电子填满电子壳层十分相象。在壳层模型中,着重考虑核中各个核子个体的运动,把每个核子近似地看作处于由所有其它核子所形成的静态平均势场中,所以又称单粒子模型。这种模型不仅说明核的稳定性的周期变化情况,可以通过理论计算直接得出

正确的幻数,还可以解释核的一系列性质,如核磁矩、核自旋等等。

虽然一般说来,随着质量数的增加,能级变得越来越密,但是幻核却例外,它的能级与轻核的极为相似。如图 1.1 的²⁰⁹Bi 所示。

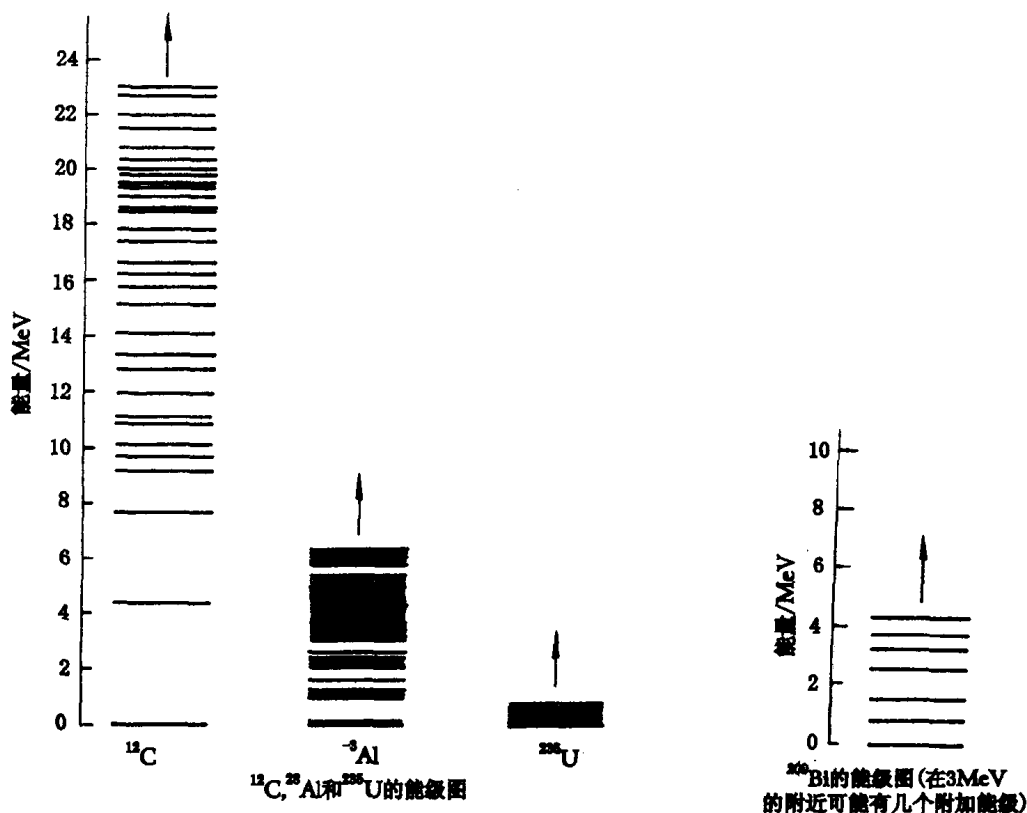


图 1.1 能级图

五、核密度及其计算

定义:单位体积内的原子核数目叫核密度,用符号 N 表示。在国际单位制(简称 SI 制)中,其单位为 m^{-3} 。注意区别:核密度与核物质的密度这两个截然不同的概念,切勿混淆。

因为每个原子中只有一个原子核,所以核密度的计算可以归结为原子密度(单位体积内的原子数目)的计算。下面分三种情况介绍核密度(原子密度)的计算方法。

1. 单质核密度的计算

物质的分子仅由同种原子组成时,这种物质叫做单质,设原子的原子量为 A ,则 A 克这种原子叫做一个“摩尔原子”。任何物质每摩尔原子中均含有相同的原子数目 N_A , N_A 叫阿伏伽德罗常数,其值为:

$$N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

因此,每一克这种原子中含有的原子数目为 N_A/A ,每千克中含有原子 $10^3 N_A/A$ 个。设该物质的密度为 ρ (kg/m^3),则 $10^3 \rho N_A/A$ 就是每立方米内含有的原子数目,于是得核密度的计算公式如下:

$$N = 10^3 \rho N_A/A \text{ m}^{-3} \quad (1.7)$$

2. 化合物核密度的计算

物质的分子若由不同种原子组成时,这种物质叫做化合物。在化合物的分子中,每种元素的原子都有确定的数目。设化合物的分子量为 M ,则 M 克这种化合物分子叫做一个“摩尔分子”,其中含有 N_A 个分子。设化合物的密度为 $\rho(\text{kg/m}^3)$,每个化合物分子中第 i 种原子的数目为 ν_i ,则第 i 种原子核的密度可如下计算:

$$N = 10^3 \rho N_A \nu_i / M \quad \text{m}^{-3} \quad (1.8)$$

3. 混合物核密度的计算

两种或多种物质混合在一起所形成的物质,叫做混合物。设混合物由 n 种原子组成,其平均密度为 $\bar{\rho}(\text{kg/m}^3)$,第 i 种原子的原子量为 A_i ,通常给定混合物的组成有两种方式,分别介绍如下:

(1) 已知重量百分比

设第 i 种原子的重量百分比为 γ_i ,则它的质量密度为 $\bar{\rho}\gamma_i(\text{kg/m}^3)$,于是第 i 种原子核的密度如下计算:

$$N = 10^3 \bar{\rho} N_A \gamma_i / A_i \quad \text{m}^{-3} \quad (1.9)$$

(2) 已知原子百分比

设第 i 种原子的原子百分比为 ω_i ,则混合物的平均原子量为 $\bar{A} = \sum_{i=1}^n \omega_i A_i$ 于是第 i 种原子核的密度如下计算:

$$N = 10^3 \bar{\rho} \omega_i N_A / \bar{A} \quad \text{m}^{-3} \quad (1.10)$$

以上两公式可广泛用于元素中含有同位素的情况。由式(1.9)和(1.10)还可导出,两种组成百分比的相互转换公式如下:

$$\gamma_i = \omega_i A_i \left(\sum_{i=1}^n \omega_i A_i \right)^{-1} \quad (1.11)$$

$$\omega_i = \frac{\gamma_i}{A_i} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{A_i} \right)^{-1} \quad (1.12)$$

第二节 原子核的结合能

原子核的结合能是开发利用核能的源泉,比结合能则是衡量原子核稳定性程度的标志。本节将对原子核的结合能、比结合能、裂变能与聚变能以及核力等有关问题分别加以讨论。最后介绍结合能的半经验公式供选学之用。

一、质量亏损与结合能

所有原子核的质量都略小于组成它的各单个核子的质量之总和,这种质量的差异称为“质量亏损”。以 m 表示原子核的质量, Δm 表示质量亏损,则有

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \quad (1.13)$$

现在将式(1.13)作如下变换:

$$\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - (m + Zm_e)$$

因为 $m_p + m_e$ 略等于中性氢原子的质量 m_H , $m + Zm_e$ 近似等于所讨论的中性原子的质

量 m_A , 所以上式可改写如下:

$$\Delta m \approx Zm_H + (A - Z)m_n - m_A \quad (1.14)$$

由于电子结合能的差异, 式(1.13)与(1.14)不完全等同, 但在大多数情况下, 这一点并不重要。

原子核的结合能定义为: 由单独的核子结合成原子核时所释放出来的能量; 或者, 将原子核分裂为组成它的单独的核子时所必须供给的能量。结合能用符号 E_B (binding energy) 表示。

根据狭义相对论著名的质能关系式(质量-能量关系定律):

$$E = mc^2 \quad (1.15)$$

式中, E 为物体的总能量, c 为真空中的光速:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

(1.15)式说明了质量和能量是不可分割的, 深刻地反映着物质及其运动的不可分割性。同时, 物体的能量若有任何改变 ΔE , 则将引起物体质量的改变 Δm , 而且

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1.16)$$

对一个体系来说, 式(1.16)仍然成立。体系有质量的变化就一定有能量的变化, 反之亦然, 其联系由式(1.16)给出。对于孤立体系, 总能量守恒, 也必然地有总质量守恒。

下面推算一些常用单位间的换算关系:

对应于 1g 质量的能量是

$$\begin{aligned} E &= 10^{-3} \times (2.99792458 \times 10^8)^2 \\ &= 8.98755179 \times 10^{13} \text{ J} \end{aligned}$$

对应于 1u 质量的能量是

$$\begin{aligned} E &= 1.6605655 \times 10^{-27} \times (2.99792458 \times 10^8)^2 \\ &= 1.4924418 \times 10^{-10} \text{ J} \end{aligned}$$

在原子核物理学中, 常用电子伏特(eV)及其十进倍数作为能量单位。1eV 是一个电子在真空中通过 1V 电位差所获得的动能。

$$1\text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1\text{KeV} = 1.6021892 \times 10^{-16} \text{ J}$$

$$1\text{MeV} = 1.6021892 \times 10^{-13} \text{ J}$$

对应于 1u 质量的能量以 MeV 表示是

$$\begin{aligned} E &= \frac{1.4924418 \times 10^{-10}}{1.6021892 \times 10^{-13}} \\ &= 931.5016 \text{ MeV} \end{aligned}$$

通常将上述关系表为下式:

$$1\text{u} = 931.5016 \text{ MeV}/c^2$$

现在回到关于结合能的讨论上。将 A 个单独的核子结合成原子核时, 产生“质量亏损” Δm , 必然有能量的释放 $\Delta E = E_B$ 。由式(1.16)得:

$$E_B = \Delta mc^2 \quad (1.17)$$

式中, Δm 按式(1.13)或(1.14)计算。按我国法定计算单位, Δm 以 kg 为单位, E_B 以 J 为单

位。而在实际应用中, Δm 通常以 u 为单位, E_B 则以 MeV 或 $\mu J(10^{-12}$ 焦耳) 为单位。现将式 (1.17) 分别改写如下:

$$E_B(\text{J}) \approx 8.988 \times 10^{16} \times \Delta m \text{ kg} \quad (1.17A)$$

$$E_B(\text{MeV}) \approx 931.5 \times \Delta m u \quad (1.17B)$$

$$E_B(\mu\text{J}) \approx 149.2 \times \Delta m u \quad (1.17C)$$

二、比结合能

不同核素的结合能差别是很大的。一般地说, 核子数 A 大的原子核结合能 E_B 也大。

原子核的结合能与核子数之比, 叫做“比结合能”, 也就是每个核子的平均结合能, 用符号 E_B/A 表示它, 简记为 ϵ

$$\epsilon = E_B/A \quad (1.18)$$

ϵ 的 SI 制单位为 J, 而其常用单位为 MeV。比结合能表示了, 若把原子核拆成自由核子, 平均对于每个核子所要做的功。因此, 比结合能 ϵ 的大小可用以标志原子核结合的松紧的程度, ϵ 越大的原子核结合得越紧, 因而也就比较稳定; ϵ 较小的原子核结合得较松, 因而也就比较容易分裂。

表 1.1 列举了一些原子核的结合能与比结合能的数值。根据实验和计算结果, 将不同原子核的比结合能与对应的核子数用一曲线表示出来, 如图 1.2 所示, 称为比结合能曲线。

表 1.1 一些核素的结构能与比结合能

核素	E_B/MeV	ϵ/MeV	核素	E_B/MeV	ϵ/MeV
${}^2_1\text{H}$	2.22	1.11	${}^{16}_8\text{O}$	127.62	7.98
${}^3_2\text{He}$	7.72	2.57	${}^{19}_9\text{F}$	147.80	7.78
${}^4_2\text{He}$	28.30	7.07	${}^{20}_{10}\text{Ne}$	160.65	8.03
${}^6_3\text{Li}$	31.99	5.33	${}^{23}_{11}\text{Na}$	186.57	8.11
${}^7_3\text{Li}$	39.24	5.61	${}^{24}_{12}\text{Mg}$	198.26	8.26
${}^8_4\text{Be}$	58.17	6.46	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	342.06	8.55
${}^{10}_5\text{B}$	64.75	6.48	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	492.28	8.79
${}^{11}_5\text{B}$	76.21	6.93	${}^{16}_8\text{O}$	127.62	7.98
${}^2_1\text{H}$	2.22	1.11	${}^{63}_{29}\text{Cu}$	551.40	8.75
${}^{12}_6\text{C}$	92.16	7.68	${}^{107}_{47}\text{Ag}$	915.30	8.55
${}^{13}_6\text{C}$	97.11	7.47	${}^{120}_{50}\text{Sn}$	1020.57	8.50
${}^{14}_7\text{N}$	104.66	7.48	${}^{235}_{92}\text{U}$	1783.92	7.50
${}^{15}_7\text{N}$	115.49	7.70	${}^{238}_{92}\text{U}$	1801.68	7.57

由图表可知, 只有轻核和重核的比结合能较小。轻核的比结合能出现了周期性的涨落, 在 ${}^3_2\text{He}$, ${}^8_4\text{Be}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$ 处达到一些极大值。在 $A \approx 60$ 以前, 比结合能随 A 增加而增加; 在 $A \approx 60$ 以后, 比结合能随 A 增加而平滑地下降。因为中等核比结合能较大, 所以这些核最稳定。比结合能曲线的这一特性, 为如何利用核能作了重要的启示。(注意图中 $A=25$ 处标尺的改变)

三、裂变能与聚变能

关于核能的利用问题, 当然最好是把自由状态的质子和中子结合成中等质量的核, 这样放出的结合能最多。但是, 中子不能以自由状态存在, 要获得中子, 须消耗大量的能量。因而, 从

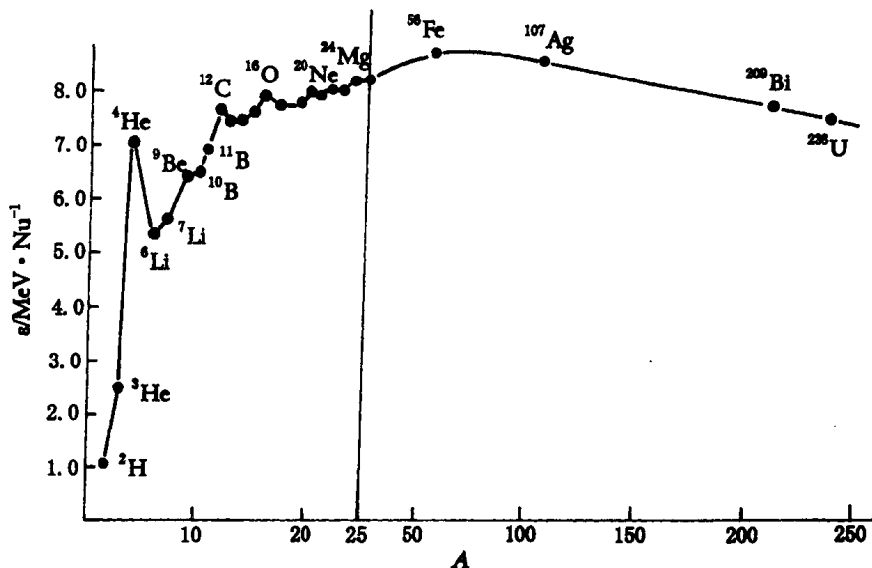


图 1.2 比结合能曲线

自然界中存在的原子核来考虑,利用原子核的结合能,唯有使重核分裂或使轻核聚变。一般把 $A < 25$ 的核称为轻核, $25 \leq A \leq 150$ 的核称为中等核, $A > 150$ 的核称为重核。

重核的裂变:以一个铀核 $^{235}_{92}\text{U}$ 分裂成两个中等质量的核为例。因为 $^{235}_{92}\text{U}$ 核的比结合能为 7.59MeV ,而 $A = 117$ 和 118 的中等质量核的比结合能约为 8.51MeV 。因此要将 $^{235}_{92}\text{U}$ 核分成 92 个质子和 143 个中子需要能量 $7.59 \times 235 \approx 1784\text{MeV}$;而组成两个 $A = 117$ 和 118 的中等质量核时,可放出 $8.51 \times 235 \approx 2000\text{MeV}$ 的结合能。所以 $^{235}_{92}\text{U}$ 核分裂成两个质量大致相等的中等核时,可以净放出 $2000 - 1784 = 216\text{MeV}$ 的结合能。这个过程称为核裂变,它是原子弹和核反应堆中能量的来源。但实际上 $^{235}_{92}\text{U}$ 自发裂变的几率极小,为使有大量裂变反应发生,必须先给 $^{235}_{92}\text{U}$ 提供一定的能量以构成一定的裂变条件,例如用中子轰击就可以达到这个目的,这种裂变称为诱发裂变。

轻核的聚变:以两个氘核 ^2_1H 聚合成一个氦核 ^4_2He 为例。因为 ^2_1H 核的比结合能为 1.11MeV , ^4_2He 核的比结合能为 7.07MeV 。因此将两个氘核分离为两个质子和两个中子,需要能量 $1.11 \times 4 = 4.44\text{MeV}$;而聚合成一个氦核时,可放出 $7.07 \times 4 = 28.28\text{MeV}$ 的结合能。所以将两个氘核聚合成一个氦核时,可以放出 $28.28 - 4.44 = 23.84\text{MeV}$ 的结合能。这个过程称为核聚变,它使氢弹释放巨大的能量,也是今后总有一天会实现的热核动力的能源。当然,要实现这类聚变反应,必须先对系统提供一定的能量。例如提高系统的温度使其高达几百万度以上,以增加轻核的动能使之产生聚变反应,这就是热核反应。氢弹要以普通原子弹引爆就是这个道理。

比较以上两例可以看出:对于裂变能平均每个核子释放的能量约为 $216/235 \approx 0.9\text{MeV}$;而对聚变能平均每个核子释放的能量约为 $23.84/4 \approx 6\text{MeV}$ 。所以同样重量的物质参与反应时,聚变反应放出的能量要比裂变反应的大得多。这正是受控热核反应特别令人关注的一个重要原因。现在人们已经知道,在宇宙中能量的主要来源就是原子核的聚变,太阳和宇宙中的

其他大量恒星,能长时间地发热发光,都是由于轻核聚变的结果。

四、核力

原子核结合得如此稳固,是什么力将核子联系在一起呢?

在原子核中,质子与质子间存在着静电斥力,这种力不可能维持原子核的稳定性。除此之外,核子间还有万有引力,但是这种力非常小,也不能使核子形成稳定系统。因此在核子之间一定存在着一种引力,通常把这种引力称为“核力”。关于核力的详细情况,现在还不十分清楚,但从已知的事实,明确了核力具有以下特性。

1. 核力的近程性

从 α 散射实验中发现,当 α 粒子和核的距离小到 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{m}$ 时,服从库仑定律。当 α 粒子能量很大而更接近核时,就发现 α 粒子受到远比由库仑定律算得的斥力为大的一种引力——核力。在质子被质子的散射中,也同样表现出核力的作用。由此可知,核子间只有在极短距离时,才有核力的作用。核力是一种近程的作用力,它的作用距离的数量级为 10^{-15}m 。当核子间距离接近时,核力比库仑力增加得更为迅速;但在距离增大时,核力就急剧减小为零。

2. 核力的饱和性

原子核的比结合能大致相等,即原子核的结合能近似地与核子数 A 成正比。从这一事实可以推断:核中每个核子只与它最邻近的有限数目的几个核子发生相互作用,而不与核内所有的其他核子都发生相互作用,就是说核力具有饱和性。因为,如果每个核子与核内所有核子都有相互作用。那么,原子核的结合能应该与核子数的平方有关,但事实并非如此。

核力的这种性质与化学力的饱和性很相似,例如,以水分子(H-O-H)来说,氧原子的二个价键都已被氢原子所饱和,再也没有另外的氢原子能够结合上去,这就是说价力已经饱和了。

3. 核力与电荷无关性

不管核子带电与否,它们的结合能都相等。由此可见,质子和中子在核中的稳定性是一样的,也就是说,质子与质子、中子与中子、中子与质子之间的核力是大致相等的,这表明核力与核子是否带电无关,这就是核力与电荷无关性。用中子流通过含氢物质来进行中子与质子的散射实验(n-p 散射)或用高速质子流在氢气中进行质子与质子的散射实验(p-p 散射)时,发现这种核子间的引力都约略相等,这对核力与电荷无关性更提供了直接的验证。

关于核力的本质,理论认为:核力是一种交换力,核力是核子间通过 π 介子的交换而相互作用的。介子的核力理论虽能定性地说一些事实,但这种理论还很不完善,还有待进一步的研究和发展。

* 五、结合能的半经验公式

根据原子核的液滴模型,可以推得原子核结合能的半经验公式,它应该包括下列各项:

1. 体积能:作为液滴的原子核,具有体积 V 。原子核的体积能 E_1 是结合能的主要项,它与原子核体积 V 成正比。根据式(1.6),球形核的体积 $V \propto A$,所以体积能与组成原子核的核子数 A 成正比

$$E_1 = a_1 A \quad (1.19)$$

式中 a_1 为比例常数。

2. 表面能:由于原子核表面的核子只与它内部的邻近核子有相互作用,所以这部分核子的结合能就要比内部核子的小一些。因此,在核的总结合能公式中,必须加上一项与表面积有

关的修正项,称为表面能 E_2 。与液体的表面能相似, E_2 应与表面积成正比,因为 E_2 使总结合能减少,所以符号应与 E_1 的相反。利用式(1.5)可得:

$$E_2 = -\sigma \cdot 4\pi R^2 = -a_2 A^{2/3} \quad (1.20)$$

式中 a_2 为另一常数, $a_2 = 4\pi r_0^2 \sigma$, σ 为表面张力系数。

3. 库仑能:因为核内质子间的库仑斥力使结合能减少,因此在核的总结合能公式中还要加上与库仑斥力有关的修正项,称为库仑能 E_3 。实验数据表明,核内的质子近似均匀地分布在球体内。对于半径为 R 的球形核,当 Z 个质子均匀分布在球体内时,根据静电学的计算,该电荷体系的静电势能为 $\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R}$,利用式(1.5),可得库仑能为:

$$E_3 = -\frac{3}{5} \frac{Z^2 e^2}{R} = -a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad (1.21)$$

式中 a_3 是另一比例常数, $a_3 = \frac{3}{5} e^2 r_0^{-1}$ 。

4. 对称能:从稳定核素的研究知道,原子核内的中子和质子有对称相处的趋势。稳定的轻核都是中子数和质子数相等的, $N=Z$,如 ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{16}_8\text{O}$ 等。当中子数和质子数不等时,也就是中子、质子非对称相处时,结合能要降低。因此,总结合能公式中还要附加一项非对称能 E_4 ,习惯上也称为对称能。对称能依赖于 N/Z ,并且与 A 有关。当 $N=Z$,即 $A=N+Z=2Z$ 时,对称能取最大值“零”。对于给定的组成,对称能可以写成

$$E_4 = -a_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} \quad (1.22)$$

其中 a_4 也是一个常数。

5. 奇偶能:从稳定核素的奇偶分类还知道,在原子核的组成中,有中子、质子各自成对相处的趋势。凡核内含有偶数质子和偶数中子的核素(称为偶偶核)为最稳定,奇偶核和偶奇核(统称为奇 A 核)都不及偶偶核稳定,而最不稳定的则是奇奇核。所以在总结合能公式中还要加上一项与 Z, N 的奇偶性有关的修正项,称为奇偶能 E_5 。

$$E_5 = a_5 \delta / A^{3/4} \quad (1.23)$$

式中 a_5 是又一个常数, δ 是如下确定的符号函数:

$$\delta = \begin{cases} +1 & \text{偶偶核} \\ 0 & \text{奇 } A \text{ 核} \\ -1 & \text{奇奇核} \end{cases} \quad (1.24)$$

综上所述,结合能的半经验公式可写为

$$E_B = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} + \frac{a_5 \delta}{A^{3/4}} \quad (1.25)$$

式中这些常数不能单由理论计算得到,必须与实验结果比较才能决定,所以此公式叫做半经验公式。经拟合得到的各常数值分别为

$$a_1 = 14.0 \text{ MeV}, \quad a_2 = 13.1 \text{ MeV}, \quad a_3 = 0.584 \text{ MeV}, \\ a_4 = 19.4 \text{ MeV}, \quad a_5 = 34.0 \text{ MeV}$$

联立(1.14)、(1.17)和(1.25)式,还可以得到计算原子质量 m_A 的半经验公式:

$$m_A = Zm_H + (A-Z)m_n - \frac{E_B}{c^2} \quad (1.26)$$

以上两式经计算检验,与实验结果符合甚好,且物理意义明确,因而有其使用价值。

第三节 核衰变与核反应

一种核转变为另一种新核共有两种途径:(1)核衰变;(2)核反应;这两种物理过程在核反应堆内是大量发生的,因而是核反应堆理论研究的基本问题。本节将对这两种核过程所遵循的基本规律加以讨论。

一、放射性衰变

在迄今发现的 109 种元素的约 2000 种核素中,只有 274 种稳定核素,其余都是不稳定的。不稳定核素会进行自发衰变,称为放射性核素。其中,自然界存在的称为天然放射性核素;由核反应产生的称为人工放射性核素。

在稳定核素中,中子数 N 和质子数 Z 的相对比例,有着严格的限制。对轻核来说,这个关系是 $N=Z$ 。当 Z 增大时则要求 N 略大于 Z ,这是因为,当核内质子数增加时,核内质子间的库仑斥力也随着增加,于是核子间结合松弛,从而使核不稳定。所以对于重核,中子数 N 必须大于质子数 Z ,才能使核稳定。在放射性核素中,中子过多而超过稳定。

在放射核素中,中子过多而超过稳定比例的核,要进行 β^- 衰变;中子少小于稳定比例的核,则发生 β^+ 衰变或以电子俘获的形成衰变。原子核内中子过剩或短缺得越多,核离最稳定的核素愈远,该核变为另一种核的速度就愈快,它的寿命也就愈短。此外实验发现,很重的核都是放射性的,几乎都发生 α 衰变或进行自发裂变。

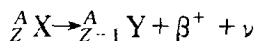
放射性核素的衰变,大致可分为放射性衰变(放出 β^\pm , α 或 γ 射线)和蜕变(激发态的核放出核子而衰变)两类,现分别讨论如下:

β^- 衰变:母核发射负电子 ${}_{-1}^0\text{e}$,通常叫它 β^- 粒子,同时伴有反中微子 $\bar{\nu}$ 的发射。衰变后的子核 Z 增加 1,而 A 不变。这时核内有一个中子转化为一个质子。其衰变方程表示如下:



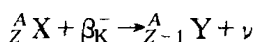
例如 ${}^4_2\text{Be} \rightarrow {}^4_3\text{B} + \beta^- + \bar{\nu}$

β^+ 衰变:母核发射正电子 ${}_{+1}^0\text{e}$ 通常叫它 β^+ 粒子,同时伴有中微子 ν 的发射。衰变后的子核 Z 减少 1,而 A 不变。这时核内有一个质子转化为一个中子。其衰变方程表示如下:



例如 ${}^3_7\text{N} \rightarrow {}^3_6\text{C} + \beta^+ + \nu$

电子俘获:有些“缺少”中子的核,也可能把核外的轨道电子吸收到核内以代替 β^- 衰变,这种过程称为电子俘获。因为最接近原子核的轨道电子是 K 层电子,所以原子核俘获 K 层电子的几率最大,这种过程称为 K 俘获。这时核内即有一个质子转化为一个中子,同时放出一个中微子。K 电子层中的空位,即由其他较外层的电子来填充,于是便有 X 射线发射出来。K 俘获可用方程表示为:



例如 ${}^{64}_{29}\text{Cu} + \beta^-_{\text{K}} \rightarrow {}^{64}_{28}\text{Ni} + \nu$

α 衰变:母核发射氦原子核 ${}^4_2\text{He}$,通常叫它 α 粒子。衰变后的子核 Z 减少 2, A 减少 4, α 衰变可用方程表示为: