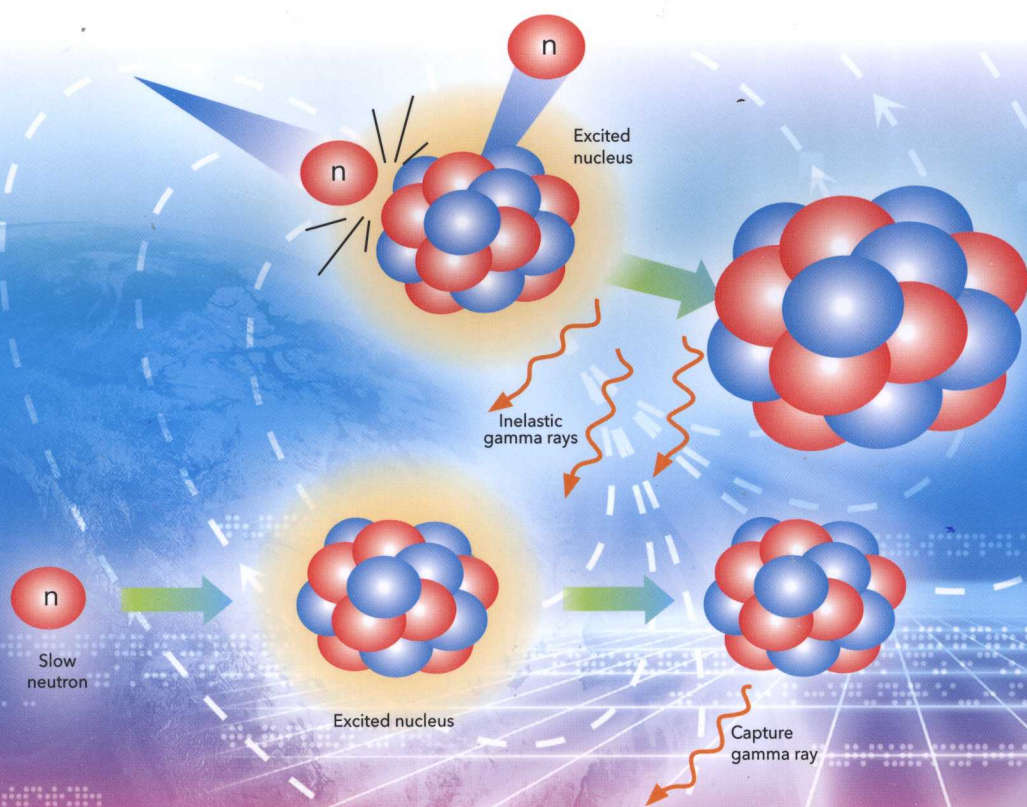




石油高等院校特色规划教材

# 核地球物理基础

张 锋 编著



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色规划教材

# 核地球物理基础

张 锋 编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书阐述了原子核物理的基本知识和理论,在此基础上系统介绍了伽马射线、中子与地层物质的相互作用以及核测井中物理参数与地质参数的关系,并对核磁共振原理及应用、核辐射防护知识和核物理实验方法作了简要介绍。

本书可作为勘查技术与工程专业的原子核物理课程的教材,并可供研究石油核测井的科研人员和相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

核地球物理基础/张锋编著.

北京:石油工业出版社,2015.8

(石油高等院校特色规划教材)

ISBN 978-7-5183-0773-9

I. 核…

II. 张…

III. 核技术应用-地球物理学-高等学校-教材

IV. P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 141802 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:<http://www.petropub.com>

编辑部:(010)64251362 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京晨旭印刷厂

---

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.5

字数:305 千字

---

定价:28.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

原子核物理学是 20 世纪初形成的一门学科,随着近代物理学的发展及社会对核技术应用的需要而发展起来,为天体演化、遗传工程、人类社会和物质结构研究提供不同的方法和信息,推动社会进入原子能时代。

当今,核物理理论、仪器、方法技术等在勘探地球物理领域得到发展,形成了核地球物理学,这是一门应用原子核物理的理论、方法和技术研究地面和地下放射性探测,并通过与射线作用来评价介质性质的科学。核地球物理学已经在地质、水文、工程、工业、农业、医学和环境科学等方面得到了广泛应用。

核物理中的伽马放射性、中子和核磁共振现象等三大发现以及核射线探测技术的进步,是核地球物理学的基础。 $\gamma$  射线勘探、井筒伽马测井、中子测井和核磁共振测井等技术的发展是核地球物理学应用的重要方面。在石油等资源勘探过程中利用核地球物理技术来划分岩性、确定孔隙度、监测油气水界面和确定剩余油气饱和度。利用天然辐射场和人工辐射场的测量在环境监测、放射性勘探等领域也得到了飞速发展。只有通过对核地球物理知识的充分认识,才能提出新的核地球物理勘查方法,研制新的装备,推动其在工业中的应用和发展。

本书着重阐述了原子核基本性质、放射性衰变、原子核反应和射线与物质的相互作用,在此基础上,以伽马放射性、中子和核磁共振现象及核射线探测作为核地球物理学的基础,详细介绍了  $\gamma$  射线勘探、中子测井和核磁共振测井中地层物理场属性参数与地质参数关系,简要介绍了相应划分岩性,确定孔隙度和剩余油气饱和度等的测量方法。

本书由九章组成,前三章介绍原子核基本性质、放射性衰变和原子核反应,第四章至第七章介绍射线和物质的相互作用,并对资源勘查中的天然辐射场测量和人工辐射场测量进行了介绍,最后两章简要介绍了核辐射防护知识和核物理实验方法。本书可作为勘查技术与工程专业原子核物理课程的教材,并可供石油核测井研究的科研人员和其他相关专业的师生参考使用。

本书经中国石油大学(华东)黄隆基教授和长江大学刘瑞林教授审阅。在编写过程中还参考了国内外一些专家的论著,在此一并表示感谢!

由于笔者学术水平有限,本书尚有许多不足之处,欢迎广大读者提出批评和修改意见。

编著者

2015 年 1 月于中国石油大学(华东)

# 目 录

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第一章 原子核的基本性质 .....            | (1)   |
| 第一节 原子核的组成 .....              | (1)   |
| 第二节 原子核的质量、电荷和半径 .....        | (3)   |
| 第三节 原子核的结合能和半经验公式 .....       | (5)   |
| 第四节 原子核的自旋 .....              | (14)  |
| 第五节 原子核的磁矩 .....              | (15)  |
| 习题 .....                      | (18)  |
| 第二章 放射性衰变及放射性测量的统计性 .....     | (19)  |
| 第一节 放射性及放射性衰变 .....           | (19)  |
| 第二节 放射性测量的统计性 .....           | (23)  |
| 第三节 原子核的级联衰变规律 .....          | (27)  |
| 第四节 原子核的 $\alpha$ 衰变 .....    | (32)  |
| 第五节 原子核的 $\beta$ 衰变和中微子 ..... | (36)  |
| 第六节 伽马跃迁和内转换 .....            | (41)  |
| 习题 .....                      | (45)  |
| 第三章 原子核反应 .....               | (47)  |
| 第一节 核反应概述 .....               | (47)  |
| 第二节 核反应能和 $Q$ 方程 .....        | (50)  |
| 第三节 核反应截面和产额 .....            | (55)  |
| 习题 .....                      | (57)  |
| 第四章 射线和物质的相互作用 .....          | (59)  |
| 第一节 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 ..... | (59)  |
| 第二节 $\gamma$ 射线的探测 .....      | (64)  |
| 第三节 中子与原子核的相互作用 .....         | (72)  |
| 第四节 中子的探测 .....               | (78)  |
| 习题 .....                      | (80)  |
| 第五章 资源勘查中的天然放射性测量 .....       | (81)  |
| 第一节 岩石的自然伽马放射性 .....          | (81)  |
| 第二节 自然伽马辐射场的分布特征 .....        | (86)  |
| 第三节 自然伽马能谱解析方法 .....          | (93)  |
| 第四节 天然放射性测量及矿产、油气勘查 .....     | (96)  |
| 习题 .....                      | (105) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>第六章 资源勘查中的人工激发辐射场测量</b>         | (106) |
| 第一节 $\gamma$ 射线与地层物质的相互作用          | (106) |
| 第二节 地层密度测井和岩性密度测井                  | (110) |
| 第三节 中子与地层物质的相互作用                   | (115) |
| 第四节 中子注量和 $\gamma$ 射线的空间、时间分布及扩散理论 | (122) |
| 第五节 中子测井                           | (133) |
| 第六节 中子活化分析                         | (141) |
| 习题                                 | (144) |
| <b>第七章 核磁共振原理及应用</b>               | (146) |
| 第一节 核磁共振现象                         | (146) |
| 第二节 核磁共振测井理论                       | (149) |
| 第三节 核磁共振测井及应用                      | (154) |
| 习题                                 | (158) |
| <b>第八章 核辐射防护知识</b>                 | (159) |
| 第一节 辐射量及单位                         | (159) |
| 第二节 辐射对人体的危害及防护标准                  | (166) |
| 第三节 射线防护                           | (169) |
| 习题                                 | (173) |
| <b>第九章 核物理实验方法</b>                 | (174) |
| 第一节 $\gamma$ 射线强度和能谱的测量            | (174) |
| 第二节 中子的测量                          | (179) |
| 习题                                 | (182) |
| <b>参考文献</b>                        | (183) |
| <b>附录 I 金格函数辅助计算</b>               | (185) |
| <b>附录 II 部分核素数据</b>                | (187) |

# 第一章 原子核的基本性质

原子和原子核的许多特性仅仅取决于原子或原子核本身,例如物质的许多化学及物理性质、光谱特性等基本上仅与原子有关,即主要取决于核外电子的运动规律,而放射性的现象则主要归因于原子核。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,包括原子核的电荷、质量、半径、自旋、磁矩、电四极矩、宇称和统计性质等,这些性质的来源和核的内部结构及其运动变化密切相关。原子核的基本性质是对核物理现象了解的基础。

## 第一节 原子核的组成

### 一、原子的核式结构

1909年卢瑟福的学生盖革和马斯顿在用 $\alpha$ 粒子轰击原子的实验中,发现有些 $\alpha$ 粒子穿过金属箔后不是沿直线前进,而是大角度散射,大约有八千分之一的概率被反射回来。通过严谨的理论推论之后,卢瑟福于1911年提出了原子的“核式结构模型”,认为原子中存在一个带正电的核心,称为原子核,它的大小是 $10^{-12}\text{cm}$ 的数量级,只有原子大小的万分之一,但其质量却占整个原子质量的99.9%以上,核外电子在核的库仑场中运动。为了验证散射理论,盖革和马斯顿继续进行系统的实验研究,并充分肯定了这一理论的正确性。

### 二、质子和中子的发现

氢原子仅有一个壳层电子,可以用气体放电法将其剥离,从而得到 $^1\text{H}$ 原子核,称为质子,用符号P表示,即“Proton”。

1919年,卢瑟福用 $\alpha$ 粒子轰击 $^{14}\text{N}$ 原子核,获得了 $^{17}\text{O}$ 和质子。由此可以看出,卢瑟福的散射方法在近代物理中起着重要作用,是研究物质微观结构的重要方法之一。

1930年,德国物理学家博恩等人利用钋发射的 $\alpha$ 粒子轰击铍等轻元素,发现一种穿透能力很强的中性射线能够穿过铅板被计数管记录下来,他们断言是 $\gamma$ 射线。因为人们在当时知道 $\alpha$ 、 $\beta$ 是带电粒子,只有 $\gamma$ 射线是中性的。

当时约里奥·居里夫妇也利用 $\alpha$ 粒子去轰击铍靶,然后再用所放出的那种穿透性很强的射线去轰击石蜡,结果从石蜡中飞出了反冲质子,最大能量为5.7MeV,当时他们也把这种射线看成是 $\gamma$ 射线。

1932年查德威克同样利用 $\alpha$ 粒子轰击铍靶,获得未知辐射,改用 $^{14}\text{N}$ 核作为反冲核代替石蜡中的氢核,测得反冲氮核的动能最大为1.2MeV。

如果利用 $\gamma$ 射线轰击 $^{14}\text{N}$ 核,要得到1.2MeV的反冲能,则 $\gamma$ 射线能量应为89MeV,而轰击石蜡时得到5.7MeV的反冲质子,需要 $\gamma$ 射线能量为55MeV,两者相差太大,显然这不是实验误差所产生的。



因此查德威克大胆预言,这种中性射线不是  $\gamma$  射线,而正是卢瑟福预言的不带电的粒子,称为中子。1932 年 2 月 17 日,查德威克宣布发现了中子。中子的发现是核物理史上的一个重要转折点,是 20 世纪物理学发展中一个极重要的事件,与核反应诱发人工放射性、发明带电粒子加速技术并列为 20 世纪 30 年代原子核发展中的三个里程碑;中子为核结构和核反应的研究开辟了崭新的道路。1935 年查德威克荣获了诺贝尔物理学奖。

启示:这个实验方法也是同位素中子源的原理,在放射性测井中,同位素中子源是一个很重要的产生源粒子的放射源。

中子发现不久,伊凡宁科和海森堡很快提出原子核是由质子和中子组成的假说,得到了一系列实验上的支持。中子(neutron)和质子统称为核子(nucleon)。

任何一个原子核都可用符号 ${}^A_Z\text{X}_N$ 来表示,其中  $N$  为核内中子数; $Z$  为核内质子数; $A$  为核内的核子数,又称质量数。

### 三、同位素和核素

对同一元素,由于核内中子数不同,可以包含多种原子,如自然界天然存在的 U 元素包含了 ${}^{238}\text{U}$ , ${}^{235}\text{U}$  和微量的 ${}^{234}\text{U}$  等原子,它们由不同的原子核组成,共同点是原子核中的质子数以及核外电子数相同。为了描述这种情况,将具有相同质子数但质量数(即核子数)不同的核所对应的原子称为某元素的同位素。如 ${}^1\text{H}$ , ${}^2\text{H}$ , ${}^3\text{H}$  是氢的三种同位素。

核素是指核内具有一定数目的中子和质子以及某特定能态的一种原子核或原子,例如: ${}^4_2\text{He}$ , ${}^{14}_7\text{N}$ , ${}^{16}_8\text{O}$ ,...等就是不同的核素,实际上只要简写为 ${}^A\text{X}$ ,就可以表示一个特定的核素,即 ${}^4\text{He}$ , ${}^{14}\text{N}$ , ${}^{16}\text{O}$ , ${}^3\text{He}$ , ${}^{17}\text{O}$ ,...。有的原子核含有相同的质子数和中子数,但核所处的能态不同,如 ${}^{60}\text{Co}$  和 ${}^{60\text{m}}\text{Co}$ ,它们也是两种不同的核素。

核素和元素有很大的不同,核素是基于原子核的层面上考虑问题,关注原子核的组成、稳定性、核力、核结构及原子核的其他属性,包括大小、自旋、宇称、电四极矩等物理量的研究;而元素则关注原子量、核外轨道电子的能态及其跃迁所决定的光谱特征,还有元素的物理、化学特性等。

核素又分为稳定核素和放射性核素,不能自发发生变化的核素就是稳定核素,如 ${}^1\text{H}$ , ${}^2\text{H}$ , ${}^{12}\text{C}$  等。原子核能自发发生变化的核素就是放射性核素,例如 ${}^3\text{H}$ , ${}^{14}\text{C}$ , ${}^{40}\text{K}$  等。迄今为止,实验上发现的核素共有 2000 多种,其中天然存在的大约为 332 种,其余皆为人工制造,天然存在的核素中有 270 多个是稳定核素,60 多个是寿命很长的天然放射性核素。自 1934 年以来,人类已人工制备出 2000 多个放射性核素。

近几年我国新核素研究取得重大进展,原子能研究院合成鉴别了 ${}^{90}\text{Ru}$ ;上海原子核研究所生成和鉴别了 ${}^{202}\text{Pt}$ ;兰州近代物理所合成了近 20 种新核素,如 ${}^{185}\text{Hf}$ , ${}^{259}\text{Db}$  等,利用重离子加速器提供的 ${}^{22}\text{Ne}$  束流轰击 ${}^{241}\text{Am}$  靶,生成 ${}^{259}\text{Db}$ 。

同中子素是中子数相同、质子数不同的核素,如 ${}^1\text{H}$ , ${}^3\text{He}$  等。同量异位素是质量数相同、质

子数不同的核素,如<sup>40</sup>Ar, <sup>40</sup>K, <sup>40</sup>Ca 等。半衰期较长的激发态原子核称为基态原子核的同核异能素,质子数和中子数相同,只是能量状态不同,这种元素的原子核一般处于较高能态,如<sup>87m</sup>Sr 为<sup>87</sup>Sr 的同核异能素,半衰期为 2.81h。

某种核素在其天然同位素混合物中所占的原子核数目的百分比称为该核素的丰度。如 <sup>1</sup>H 的丰度为 99.985%, <sup>2</sup>H 的丰度为 0.015%; <sup>12</sup>C 的丰度为 98.89%, <sup>13</sup>C 的丰度为 1.11%; <sup>238</sup>U 的丰度为 99.275%, <sup>235</sup>U 的丰度为 0.72%。

一种元素的核物理性质是由该元素中包含的所有核素的核物理性质及其丰度决定的。

第二节 原子核的质量、电荷和半径

一、原子核的电荷

原子核所带的电量等于核外电子总电量,核电荷  $q = +Ze$ 。

核电荷数  $Z$  的测量方法有  $\alpha$  散射法和 X 射线法。

从 1920 年起,查德威克采用  $\alpha$  散射法对一些元素的核电荷数进行了直接测定,测得的几个结果见表 1-1。

表 1-1  $\alpha$  散射法测定的核电荷数

| 元素 | 原子序数 | 实验测量值 |
|----|------|-------|
| 铜  | 29   | 29.30 |
| 银  | 47   | 46.30 |
| 铂  | 78   | 77.40 |

$\alpha$  散射法的缺点是需要将样品制成很薄的靶子,测量  $Z$  值往往不准确。

1913 年,莫塞莱发现元素所放出的特征 X 射线的频率  $\nu$  与原子序数  $Z$  有下列关系:

$$\sqrt{\nu} = AZ - B \tag{1-1}$$

利用这种方法发现了锝(<sup>43</sup>Tc)、钷(<sup>61</sup>Pm)、砹(<sup>85</sup>At)和钫(<sup>87</sup>Fr)。

除  $Z=43, 61, 93$  外,从  $Z=1$  到  $Z=94$  的元素在自然界中存在,以后用人工方法获得了  $Z=95$  到  $Z=112$  的元素,但  $Z>103$  的元素的寿命都不足 1h,有的只有几毫秒。

二、原子核的质量

质子数为  $Z$ 、核子数为  $A$  的原子核质量用  $m(Z,A)$  表示,是与它相对应的原子质量  $M(Z,A)$  与核外电子质量之差加上核外电子结合能对应的质量,它们的关系为:

$$M(Z,A) = m(Z,A) + Zm_0 - B_e/c^2 \tag{1-2}$$

式中,  $m_0$  为电子的静止质量;  $B_e$  为原子核外所有轨道电子结合能的总和。由此原子核质量可表示为:

$$m(Z,A) = M(Z,A) - Zm_0 + B_e/c^2 \tag{1-3}$$

由于核的质量不便于直接测量,通常通过测定出原子质量(离子质量)来推知核的质量,其实一般不常推知核的质量,因为对于核的变化过程,变化前后的电子数目不变,电子质量可以自动互消。

一个 $^{12}\text{C}$ 原子的质量为 $1.992678 \times 10^{-26}\text{kg}$ ,较重的 $^{238}\text{U}$ 原子的质量为 $3.9521 \times 10^{-25}\text{kg}$ ,通常采用原子质量单位 $u$ ( $1u$ 等于 $^{12}\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ ),即:

$$1u = 1.6605387 \times 10^{-27}\text{kg}$$

测量原子质量的常用设备是质谱仪,首先通过电离让所测原子变成离子,然后让被测离子通过加速电极,经过电场的加速获得动能为 $qV$ ,质量为 $M$ 的离子通过加速电极后所具有的速度 $v$ 满足下列关系:

$$\frac{1}{2}Mv^2 = qV \quad (1-4)$$

被加速的离子进入磁场后发生偏转,满足:

$$qvB = Mv^2/R \quad (1-5)$$

最后得到

$$M = \frac{qB^2R^2}{2v} \quad (1-6)$$

式中, $R$ 为离子作圆周运动的半径。显然,根据实验测得 $q, B, R$ 和 $V$ 的数值后就可以得到离子的质量 $M$ 。

原子的质量都接近于一个整数,此整数称为原子核的质量数,用 $A$ 表示,等于核子数。

### 三、原子核的半径

实验表明,原子核是接近球形的,因此常用核半径来表示原子核的大小,核半径通常为 $10^{-13}\text{cm} \sim 10^{-12}\text{cm}$ 数量级的,无法直接测量,而是通过原子核与其他粒子相互作用间接测得它的大小。根据这种相互作用的不同,一般有两种定义。

#### 1. 核力作用半径

由 $\alpha$ 粒子散射实验发现:在 $\alpha$ 粒子能量足够高的情况下,它与原子核的作用不仅有库仑斥力作用,当距离很近时,还有很强的吸力作用,这种作用力叫做核力。核力有一作用半径,在半径之外的核力为零,这种定义的核半径就是核力作用半径。

实验上通过中子、质子或其他原子核与核的作用所测得的核半径就是核力作用半径。实验表明,核半径与质量数 $A$ 有关,近似关系为:

$$R \approx r_0 A^{1/3} \quad (1-7)$$

其中 $r_0 = (1.4 \sim 1.5) \times 10^{-13}\text{cm} = 1.4 \sim 1.5\text{fm}$ 。

#### 2. 电荷分布半径

核内电荷的分布半径就是质子的分布半径。

测量电荷分布半径比较准确的方法是利用高能电子在原子核上的散射,电子与原子核的作用实际上就是电子与质子的作用。由于高能电子获得比较容易,与质子的库仑作用明了,且电磁作用比核子间强作用小得多,电子进入核内不容易改变核内核子的运动状态。

用这种方法测得的核半径是：

$$R \approx 1.1 \times A^{1/3} \text{ fm} \quad (1-8)$$

图 1-1 所示为某些核的电荷分布情况,  $\rho$  为电荷密度,  $r$  为离原子核中心的距离, 由此可见, 在原子核中央部分电荷密度是一常量, 在边界处逐渐下降,  $t$  称为边界厚度。

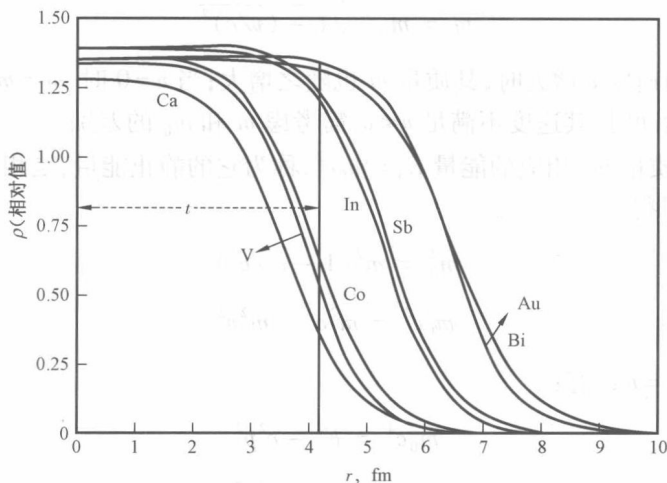


图 1-1 某些核的电荷分布

近来研究者对核物质分布半径产生兴趣。实验证明, 对于具有较大中质比的原子核, 中子分布半径要略大于质子分布半径, 即存在所谓“中子皮”, 厚度一般为 0.2 fm; 对于中质比很大的不稳定核, 如  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ , 其中质比分别为 2, 3 和 2.7, 其中  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{Be}$  的中子皮厚度达到 0.9 fm, 甚至出现中子晕,  ${}^{11}\text{Li}$  是人们研究最多的中子晕核, 晕厚度 1.7 fm。

由上面的讨论可知, 核的电荷分布半径要比核力作用半径小一些, 但是核半径都近似正比于  $A^{1/3}$ 。有了半径, 则可以得到原子核的体积为:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \approx \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (1-9)$$

显然原子核的体积正比于核内核子数  $A$ , 也就是说每个核子占有的体积为一常数, 即各种核素的核子密度(单位体积内的核子数)  $n$  大致相同, 即:

$$n = \frac{A}{V} = \frac{A}{(4/3) \pi r_0^3 A} = \frac{3}{4 \pi r_0^3} \approx 10^{38} (\text{cm}^{-3}) \quad (1-10)$$

### 第三节 原子核的结合能和半经验公式

#### 一、能量和质量的相互关系

##### 1. 质能关系

能量和质量都是物质的属性, 根据相对论原理, 具有质量为  $m$  的物体, 其相应的能量  $E$  和质量的关系为:

$$E = mc^2 \quad (1-11)$$

此式即为质能关系式,其中  $E$  是物质的总能量,  $c$  为光在真空中的传播速度。

一个物体的质量与它的运动状态有关,根据相对论,静止质量为  $m_0$  的物体以速度数值  $v$  运动时,其质量  $m$  为:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (1-12)$$

显然,当粒子的速度  $v$  增大时,其质量  $m$  也随之增大;当  $v=0$  时,  $m=m_0$ , 即物体的静止质量;讨论微观粒子运动时,其速度不满足  $v \ll c$ , 需考虑  $m$  和  $m_0$  的差别。

与物体的静止质量  $m_0$  相应的能量  $E_0 = m_0 c^2$ , 称为它的静止能量,是相对论的重要推论。

由式(1-12)可得:

$$m_0^2 = m^2 (1 - v^2/c^2)$$

即

$$m_0^2 c^2 = m^2 c^2 - m^2 v^2$$

由于  $E = mc^2$ ,  $p = mv$ , 有:

$$m_0^2 c^4 = E^2 - c^2 p^2$$

即

$$E^2 = m_0^2 c^4 + c^2 p^2 \quad (1-13)$$

这就是运动粒子的总能量  $E$  与动量  $p$  和静止质量  $m_0$  之间的关系式,显然有:

$$E = E_0 + E_R = m_0 c^2 + E_R \quad (1-14)$$

即

$$E_R = E - m_0 c^2 \quad (1-15)$$

对于经典粒子,  $v \ll c$ , 则有:

$$E_R = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left[ \left( 1 + \frac{c^2 p^2}{m_0^2 c^4} \right)^{1/2} - 1 \right] \approx \frac{p^2}{2m_0}$$

对于光子,有  $m_0 = 0$ , 则  $E_R = E = cp$ , 光子质量  $m = E/c^2$ 。对于高速电子,其能量很高,  $E \gg m_0 c^2$ , 则

$$E_R \approx E \approx cp$$

## 2. 基本粒子的静止能量

根据质能定律:  $E = mc^2$ ,  $m = E/c^2$ 。则质量为 1g 的物体对应的能量为:

$$E = mc^2 = 10^{-3} \text{kg} \times (2.99792458 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 8.98755179 \times 10^{13} \text{(J)}$$

质量为 1u 的物体对应能量为:

$$\begin{aligned} E = mc^2 &= 1.6605387 \times 10^{-27} \text{kg} \times (2.99792458 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \\ &= 1.492418 \times 10^{-10} \text{(J)} \end{aligned}$$

而  $1\text{eV} = 1.60217646 \times 10^{-19} \text{J}$ , 则可以推算出单位之间的换算关系为:

$$1\text{u} = 931.494 \text{MeV}/c^2$$

电子、质子、中子、 $\alpha$  粒子相应的静止质量和能量关系为：

$$m_e = 0.511\text{MeV}/c^2$$

$$m_p = 938.272\text{MeV}/c^2$$

$$m_n = 939.565\text{MeV}/c^2$$

$$m_\alpha = 3727.379\text{MeV}/c^2$$

表 1-2 所示为一些粒子的静止质量和相应能量的数值。

表 1-2 一些粒子的静止质量和相应能量的数值

| 粒子          | 静止质量 $m_0, \text{u}$ | 能量 $m_0 c^2, \text{MeV}$ |
|-------------|----------------------|--------------------------|
| 电子 e        | 0.00054858           | 0.51100                  |
| 质子 p        | 1.007276             | 938.272                  |
| 中子 n        | 1.008665             | 939.565                  |
| 氘核 D        | 2.013553             | 1875.613                 |
| 氚核 T        | 3.015501             | 2808.921                 |
| 氦核 $\alpha$ | 4.001506             | 3727.379                 |

### 3. 质量和能量的变化关系

对质能公式两边取差分得到

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (1-16)$$

式(1-16)表明能量的变化与质量的变化相联系,体系有质量的变化就一定有能量的变化,这表明物质的这两个属性密切相关。

## 二、质量亏损(1+1 $\neq$ 2)

原子核既然是由质子和中子组成,那么原子核的质量似乎应该等于核内质子和中子质量之和,但是实验发现,原子核的质量总是小于组成它的核子的质量和。

以  $\alpha$  粒子为例,其质量为 4.001506u,组成  $\alpha$  粒子的 2 个质子和 2 个中子的质量和为:

$$2m_p + 2m_n = 2 \times 1.007825\text{u} + 2 \times 1.008665\text{u} = 4.03298\text{u}$$

显然  $\alpha$  粒子的质量小于组成  $\alpha$  粒子的质子和中子质量和。

同样, $^2\text{H}$  核由一个质子和一个中子组成,则核子质量和与原子核 $^2\text{H}$  的质量之差有:

$$\Delta m = m_p + m_n - m_d = 1.007825\text{u} + 1.008665\text{u} - 2.014102\text{u} = 0.002388\text{u}$$

对应的能量为:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0.002388 \times 931.494\text{MeV} = 2.2244(\text{MeV})$$

可见一个中子和一个质子组成氘核时,会放出一部分能量(2.2244MeV)。

我们把组成某一原子核的核子质量之和与该原子核质量差称为原子核的质量亏损,即:

$$\Delta m(Z, A) = Zm(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m(Z, A) \quad (1-17)$$

其实一个体系的质量要比其组分的个别质量小,分子的质量并不等于原子质量之和,原子的质量也不等于原子核质量与电子质量之和;任何两个物体结合在一起都会释放出一部分能量。

由于具体计算时电子结合能之差对结果影响很小,通常用核素的原子质量来表示:

$$\Delta M(Z,A) = ZM(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - M(Z,A) \tag{1 - 18}$$

所以原子核<sup>4</sup>He 的质量亏损为:

$$\Delta m(2,4) = 0.030276\text{u}$$

<sup>16</sup>O 核的质量亏损为:

$$\begin{aligned} \Delta M(8,16) &= 8M(^1\text{H}) + 8m_n - M(8,16) = 8 \times 1.007825\text{u} + 8 \times 1.008665\text{u} - 15.994915\text{u} \\ &= 0.206867429\text{u} \end{aligned}$$

在核数据表中,常给出核素的质量过剩。核素的质量过剩定义为核素的原子质量(以 u 为单位)与质量数之差,即等于  $\Delta(Z,A) \equiv [M(Z,A) - Au]c^2$ 。利用  $\Delta(Z,A)$  求取核素的原子质量(以 u 为单位)为:

$$M(Z,A) = A + \frac{\Delta(Z,A)}{931.494} \tag{1 - 19}$$

例如,<sup>4</sup>He 的质量过剩为:

$$\Delta(2,4) \equiv [M(2,4) - 4u]c^2 = [4.002603\text{u} - 4u]c^2 = 0.002603\text{uc}^2 = 2.4247(\text{MeV})$$

表 1-3 给出一些核素的原子质量,应用起来比较方便。另外应注意表 1-2 和表 1-3 的区别,不要将原子核的质量和核素的原子质量混淆。

表 1-3 给出一些核素的原子质量

| 符号 | Z | A | M,u      | $\Delta m, \text{MeV}$ |
|----|---|---|----------|------------------------|
| n  | 0 | 1 | 1.008665 | 8.071                  |
| H  | 1 | 1 | 1.007825 | 7.289                  |
|    | 1 | 2 | 2.014102 | 13.136                 |
|    | 1 | 3 | 3.016049 | 14.950                 |
| He | 2 | 3 | 3.016029 | 14.931                 |
|    | 2 | 4 | 4.002603 | 2.425                  |

### 三、原子核的结合能和比结合能

由上面的计算可以看出,所有的核素都存在质量亏损,且  $\Delta m > 0$ ,说明自由核子结合成原子核时要放出能量;反之,要把原子核打破变成自由核子,要给予能量,以克服核子之间的强吸引力。

#### 1. 核的结合能

自由核子结合成原子核时所放出的能量称为核的结合能  $B(Z,A)$ 。

根据质能关系,原子核的结合能和质量亏损之间存在的关系式为:

$$B(Z,A) = \Delta m(Z,A)c^2 = [Zm(^1\text{H}) + (A-Z)m_n - m(Z,A)]c^2 \quad (1-20)$$

如果由核素的原子质量来计算原子核的结合能,则有:

$$B(Z,A) = [ZM(^1\text{H}) + (A-Z)m_n - M(Z,A)]c^2 \quad (1-21)$$

也可以用质量过剩来表示成:

$$B(Z,A) = Z\Delta(^1\text{H}) + (A-Z)\Delta(n) - \Delta(Z,A) \quad (1-22)$$

例如, $^{14}\text{N}$ 核的结合能为:

$$B(^{14}\text{N}) = [7 \times 1.007825\text{u} + 7 \times 1.008665\text{u} - 14.003242\text{u}]c^2 = 104.5(\text{MeV})$$

表明7个质子和7个中子结合成一个 $^{14}\text{N}$ 核,要放出104.5MeV的能量。

也可以利用质量过剩的公式来进行计算,有 $^{14}\text{N}$ 核的结合能为:

$$B(^{14}\text{N}) = 7 \times 7.286 + 7 \times 8.071 - 2.863 = 104.636(\text{MeV})$$

## 2. 比结合能

通过计算可以发现,不同的核素 $B(Z,A)$ 相差很大,但一般规律是 $A$ 大, $B(Z,A)$ 也大,因此用每个核子的平均结合能来表征核的结合特性。

原子核的结合能除以总核子数,称为平均结合能,也称比结合能,用 $\varepsilon$ 表示,单位为MeV/Nu,有:

$$\varepsilon = B/A \quad (1-23)$$

比结合能表示若把原子核拆成自由的核子时平均对每个核子所要做的功,或者说它表示核子结合成原子核时平均一个核子所释放出的能量。

原子核的比结合能 $\varepsilon$ 的大小可以表征原子核结合松紧的程度, $\varepsilon$ 越大的原子核结合得越紧, $\varepsilon$ 越小的原子核结合得越松。如氘核 $^2\text{H}$ 的比结合能 $\varepsilon$ 最小,只有1.112MeV/Nu; $^{238}\text{U}$ 核的结合能 $B$ 很大,但比结合能 $\varepsilon$ 并不大;结合最紧的是 $^{56}\text{Fe}$ ,它的比结合能是8.79MeV/Nu,在自然界广泛存在。

表1-4 一些核素的结合能和比结合能

| 核素                | 结合能 $B, \text{MeV}$ | 比结合能 $\varepsilon$ |
|-------------------|---------------------|--------------------|
| $^2\text{H}$      | 2.224               | 1.112              |
| $^3\text{He}$     | 7.718               | 2.573              |
| $^4\text{He}$     | 28.30               | 7.07               |
| $^6\text{Li}$     | 31.99               | 5.33               |
| $^7\text{Li}$     | 39.24               | 5.61               |
| $^{12}\text{C}$   | 92.16               | 7.68               |
| $^{14}\text{N}$   | 104.66              | 7.48               |
| $^{16}\text{O}$   | 127.61              | 7.98               |
| $^{40}\text{Ca}$  | 342.05              | 8.55               |
| $^{56}\text{Fe}$  | 492.3               | 8.79               |
| $^{208}\text{Pb}$ | 1636.4              | 7.87               |
| $^{235}\text{U}$  | 1783.8              | 7.59               |
| $^{238}\text{U}$  | 1801.6              | 7.57               |

### 3. 比结合能曲线

对于稳定的核素,以比结合能为纵坐标,核素质量数  $A$  为横坐标制成的曲线叫比结合能曲线(图 1-2)。

规律:(1)  $A$  小于 30 时,曲线的趋势是上升的,但有明显的起伏,峰的位置都在  $A$  为 4 的整数倍的地方,并且  $Z$  和  $N$  相等,均为偶数,如  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$  和  $^{24}\text{Mg}$  等,这些核的质子数和中子数都为偶数,称为偶—偶核;比结合能为极小的核素,  $Z$  和  $N$  也相等,但均为奇数,称为奇—奇核。因此,偶—偶核比奇—奇核稳定,表明轻核可能存在  $\alpha$  粒子的集团结构。在英国的探测物质结构的 NSF 上,通过核碰撞过程研究,证实一些轻核中确实形成  $\alpha$  团,如  $^7\text{Li} = \alpha + ^3\text{H}$ ,  $^6\text{Li} = \alpha + ^2\text{H}$ 。

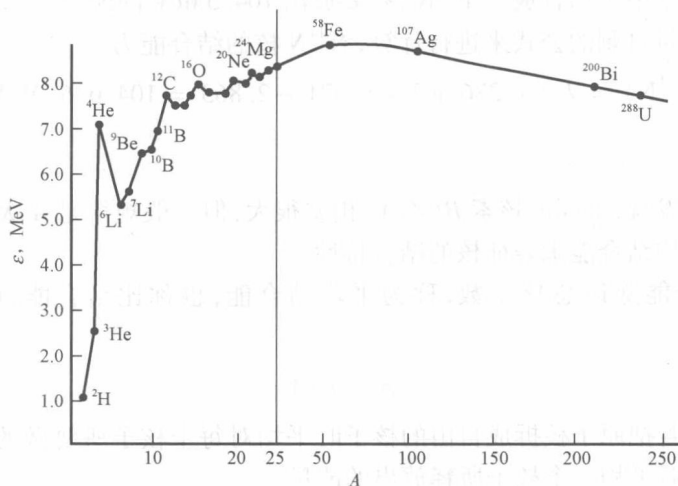


图 1-2 比结合能曲线

(2) 质量数  $A$  大于 30 时,原子核的比结合能最高,而且几乎接近于一个常数 ( $\varepsilon \approx 8.6\text{MeV/Nu}$ ),即  $B \propto A$ ,表明原子核的结合能粗略地与核子数成正比。

(3) 重核 ( $A$  大于 200) 的比结合能比中等核的低。

总之,比结合能曲线的一般趋势是中间高、两边低,即重核、轻核  $\varepsilon$  低,结合松,而中重核  $\varepsilon$  高,结合紧密。

当结合能小的核变成结合能大的核,即当结合比较松的核变成结合紧的核,就会释放出能量。因此有两个途径可以获得能量:一是重核裂变,即一个重核分裂成两个中等质量的核;一是轻核聚变,即两个轻核发生聚变反应,聚合成一个较重的核。人们依靠重核裂变的原理制成了原子反应堆和原子弹,依靠轻核聚变的道理制成了氢弹。

当一个重核发生裂变反应,分裂成两个中等质量的核时,由于核的比结合能由  $7.6\text{MeV}$  增大到  $8.5\text{MeV}$ ,核中的每个核子平均放出约  $1\text{MeV}$  能量。例如:



$f_1, f_2$  表示两个中等质量的裂变碎片核素,这是利用裂变能的重要反应之一,是原子弹和裂变反应堆能够释放出巨大能量的原理。

当两个轻核发生聚变反应,聚合成一个较重的核时,核的比结合能增加更多,核中的核子放出更大的能量。例如:



这个反应是获得聚变能的重要反应之一。

**例 1-1** 试由质量亏损计算 ${}^{56}\text{Fe}$ 中每个核子的比结合能。

**解:**由原子核的结合能公式

$$B = [ZM({}^1\text{H}) + (A - Z)m_n - M(Z, A)]c^2$$

可以得到

$$\begin{aligned} B &= [26 \times 1.007825 + 30 \times 1.008665 - 55.93494]uc^2 \\ &= 492.277(\text{MeV}) \end{aligned}$$

因此, ${}^{56}\text{Fe}$ 每个核子的比结合能为:

$$\varepsilon = B/A = 492.277/56 = 8.79(\text{MeV/Nu})$$

#### 四、最后一个核子的结合能

原子核最后一个核子的结合能表示一个自由核子与核的其余部分结合成原子核时所释放出的能量,也就是从核中分离出一个核子所需要的分离能。显然,质子和中子作为最后一个核子的结合能是不等的。

原子核最后一个核子的结合能的大小,反映了这种原子核相对邻近的那些原子核的稳定程度。

显然,最后一个质子结合能定义为(是核素 ${}_Z^AX_N$ 中第 $Z$ 个质子的结合能):

$$\begin{aligned} S_p(Z, A) &= [M(Z - 1, A - 1) + M({}^1\text{H}) - M(Z, A)]c^2 \\ &= \Delta(Z - 1, A - 1) + \Delta({}^1\text{H}) - \Delta(Z, A) \end{aligned} \quad (1-24)$$

或

$$S_p(Z, A) = B(Z, A) - B(Z - 1, A - 1) \quad (1-25)$$

同样,核素最后一个中子的结合能定义为:

$$\begin{aligned} S_n(Z, A) &= [M(Z, A - 1) + M(n) - M(Z, A)]c^2 \\ &= \Delta(Z, A - 1) + \Delta(n) - \Delta(Z, A) \end{aligned} \quad (1-26)$$

或

$$S_n(Z, A) = B(Z, A) - B(Z, A - 1) \quad (1-27)$$

**例 1-2** 试计算 $S_n({}^{16}\text{O})$ ,  $S_n({}^{17}\text{O})$ ,  $S_p({}^{16}\text{O})$ ,  $S_p({}^{17}\text{F})$ 。

**解:**  $S_n({}^{16}\text{O}) = B(8, 16) - B(8, 15) = 127.61 - 111.95 = 15.66(\text{MeV})$

$$S_n({}^{17}\text{O}) = B(8, 17) - B(8, 16) = 131.76 - 127.61 = 4.15(\text{MeV})$$

$$S_p({}^{16}\text{O}) = B(8, 16) - B(7, 15) = 127.61 - 115.49 = 12.12(\text{MeV})$$

$$S_p({}^{17}\text{F}) = B(9, 17) - B(8, 16) = 128.22 - 127.61 = 0.61(\text{MeV})$$

显然,最后一个核子结合能对不同核素可以差别很大, ${}^{16}\text{O}$ 和邻近的 ${}^{17}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{F}$ 原子核相