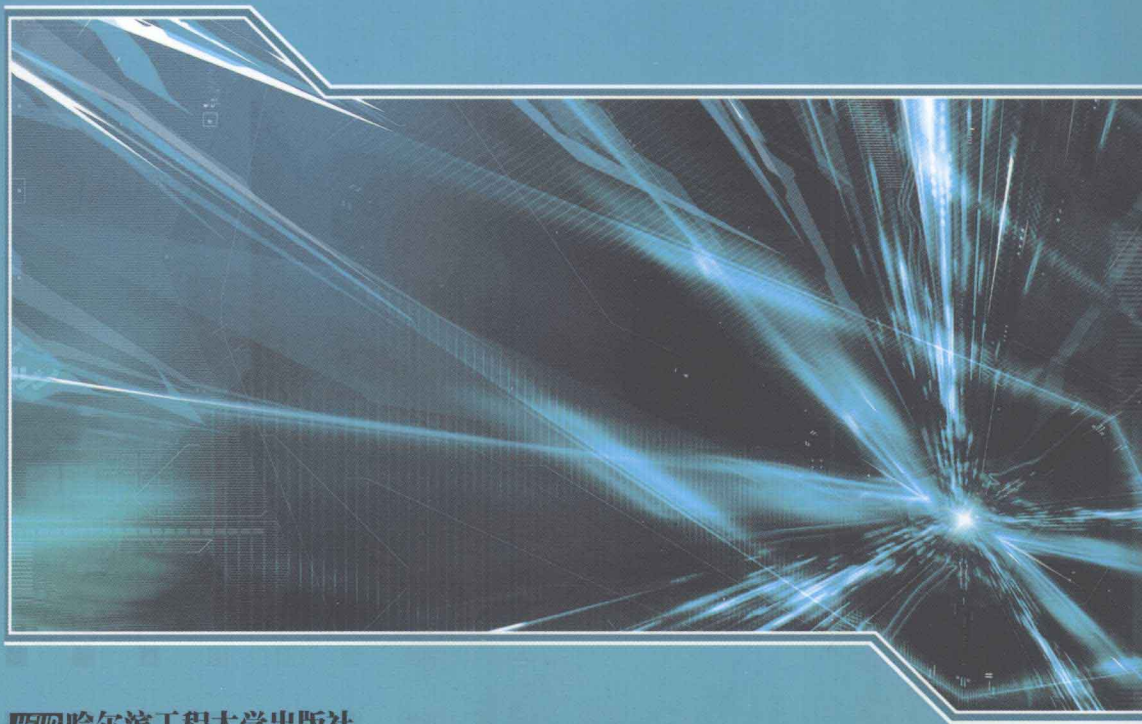




国防特色教材·核科学与技术

# 核辐射物理及探测学

陈伯显 张 智 编著



**HEUP** 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

# 核辐射物理及探测学

陈伯显 张 智 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

## 内容简介

本书由核辐射物理和辐射探测学两部分组成,构成了从辐射产生、辐射性质到辐射探测的完整体系。辐射物理部分包含了对原子核的基本性质、原子核的稳定性、核过程(包括核衰变、核反应和核裂变)发生的条件和概率、辐射与物质相互作用机制等问题的论述。辐射探测学则重点讨论探测器输出信号形成的物理过程、探测器输出回路与其工作状态的关系、统计涨落对探测器性能的影响等基本概念和共性的问题。两部分前后呼应、相互联系,有利于读者加深对辐射及其探测本质的了解,形成较为完整的概念。

本书可作为高等学校核科学与工程有关专业的教材,也可供从事核技术应用、核能科学与工程、核材料与循环及辐射防护工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

核辐射物理及探测学/陈伯显,张智编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社,2011.8

ISBN 978-7-5661-0187-7

I. ①核… II. ①陈…②张… III. ①辐射-核物理学-教材②辐射探测-教材 IV. ①O571②TL81

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第150859号

## 核辐射物理及探测学

陈伯显 张智 编著

责任编辑 张盈盈

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:30.5 字数:647千字

2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-5661-0187-7 定价:53.00元

# 前 言

本书是国防科技工业局组织出版的“十一五”国防特色规划教材之一。“核辐射物理及探测学”是清华大学工程物理系一门必修的专业基础课,课程面向工科一级学科“核科学与技术”,内容涵盖了核辐射物理和辐射探测学两部分,构成了从辐射产生、辐射性质到辐射探测的完整体系。通过学习本课程,学生可对核辐射物理及辐射探测学等能有明确、深入的了解,为进一步学习打下良好的基础。

核辐射物理包含原子核的基本性质,各种辐射的产生、特点,辐射与物质相互作用等内容。书中突出了对核过程(包括核衰变、核反应和核裂变)发生的条件和概率的论述,以期对辐射产生的本质、辐射产生的各种过程和辐射与物质相互作用的机制等问题有比较深入的讨论。同时,加强了对衰变纲图等核数据手册应用工程能力的训练,通过对核衰变纲图深入的讨论,也有助于加深对原子核的自旋、宇称等概念的理解,进一步奠定较好的物理基础。辐射探测学重点放在了论述探测器输出信号形成的物理过程、探测器输出回路与其工作状态的关系、统计涨落对探测器性能的影响等基本概念和共性问题。这些问题揭示了辐射探测本质和内在的联系,深入理解和掌握这些基本概念,就能在发展迅速的、多样化的辐射探测领域内,具有一定的举一反三的能力,能够及时、准确地掌握和应用一些新型的辐射探测器或进行新型辐射探测器的研究工作。

“核辐射物理及探测学”是一门新的重组课程,其相关课程在20世纪50年代末就已在清华大学工程物理系开设,成为核科学与技术学科最核心和基本的课程。基于长期的教学和科研实践经验的积累,在教学体系、内容、方法等各方面沉积了许多精华。知名学者齐卉荃、陈泽民、叶立润等曾讲授过相关课程,尤其安继刚院士在20世纪70年代和90年代两度在工程物理系讲授相关课程,在1992年应聘为工程物理系兼职教授期间开设了“致电离辐射探测学”课程,并编写了相应的教材。他的研究在探测器输出回路及输出信号的分析、串级型随机变量在辐射统计学中的引入等方面,对辐射探测学的发展起到了重要的促进作用。在本书的论述中包含了这些内容,在这里对安继刚院士表示感谢!

本书共13章,第1~5章和第10~13章由陈伯显编写,第6~9章的编写和修订工作由张智、陈伯显合作完成,并由张智对全书进行了校对和补充。本课程组的另两位主讲教师邓景康教授和杨祎罡副教授的教学实践无疑对本教材具有重

要的影响和参考价值。本书经中国科学院高能物理研究所李金研究员和清华大学物理系朱胜江教授审阅。同时,作者在编写过程中参考了国内外一些专家的论著,在此一并表示感谢!

由于时间较为仓促及学术水平的限制,本书尚有许多不足之处,请予谅解,并欢迎广大读者提出批评和修改意见。

编著者

2011年2月于清华大学

# 目 录

<b>第 1 章 原子核的基本性质</b> .....	1
1.1 原子核的组成、质量和半径.....	1
1.2 原子核稳定性的实验规律 .....	6
1.3 原子核的结合能 .....	9
1.4 核力及核势垒.....	17
1.5 原子核的矩(自旋、磁矩和电四极矩) .....	22
1.6 原子核的统计性质.....	28
1.7 原子核的宇称.....	29
1.8 原子核的能态和核的壳层模型.....	33
思考题 .....	38
习题 .....	38
<b>第 2 章 原子核的放射性</b> .....	40
2.1 放射性衰变的基本规律.....	41
2.2 递次衰变规律.....	45
2.3 放射系.....	52
2.4 放射规律的一些应用.....	56
思考题 .....	60
习题 .....	61
<b>第 3 章 原子核的衰变</b> .....	63
3.1 $\alpha$ 衰变.....	63
3.2 $\beta$ 衰变.....	70
3.3 $\gamma$ 跃迁 .....	87
思考题.....	100
习题.....	100
<b>第 4 章 原子核反应</b> .....	102
4.1 核反应的概况 .....	102
4.2 核反应能和 $Q$ 方程 .....	107

4.3	核反应截面和产额 .....	114
4.4	反应机制及核反应模型 .....	118
	思考题 .....	127
	习题 .....	127
<b>第5章</b>	<b>核裂变和核聚变及核能的利用 .....</b>	<b>129</b>
5.1	原子核的裂变反应 .....	129
5.2	原子核的聚变反应 .....	143
	思考题 .....	149
	习题 .....	149
<b>第6章</b>	<b>辐射与物质的相互作用 .....</b>	<b>150</b>
6.1	辐射与物质相互作用概述 .....	150
6.2	重带电粒子与物质的相互作用 .....	154
6.3	快电子与物质的相互作用 .....	165
6.4	$\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....	171
	思考题 .....	185
	习题 .....	185
<b>第7章</b>	<b>辐射探测中的统计学 .....</b>	<b>187</b>
7.1	核衰变和放射性计数的统计分布 .....	187
7.2	放射性测量的统计误差 .....	196
7.3	带电粒子在介质中电离过程的统计涨落 .....	202
7.4	辐射粒子与信号的时间分布 .....	204
	思考题 .....	206
	习题 .....	207
<b>第8章</b>	<b>气体探测器 .....</b>	<b>208</b>
8.1	气体中离子与电子的运动规律 .....	209
8.2	电离室 .....	214
8.3	正比计数器 .....	235
8.4	G-M计数管 .....	253
8.5	气体探测器的新发展 .....	266
	思考题 .....	267
	习题 .....	268

<b>第 9 章 闪烁探测器</b> .....	270
9.1 闪烁探测器的基本工作原理 .....	270
9.2 闪烁体 .....	271
9.3 光电转换及倍增器件 .....	289
9.4 闪烁探测器的输出信号 .....	302
9.5 闪烁 $\gamma$ 谱学及闪烁探测器的主要性能 .....	308
思考题.....	318
习题.....	319
<b>第 10 章 半导体探测器</b> .....	320
10.1 半导体探测器概述.....	320
10.2 PN 结的形成及特点 .....	328
10.3 PN 结半导体探测器 .....	334
10.4 高纯锗探测器.....	345
10.5 PIN 结半导体探测器 .....	353
10.6 半导体 $\gamma$ 射线谱仪的应用.....	355
10.7 其他半导体探测器.....	358
思考题.....	366
习题.....	366
<b>第 11 章 电离辐射的其他探测器</b> .....	368
11.1 切仑科夫探测器.....	368
11.2 热释光探测器.....	373
11.3 核乳胶.....	375
11.4 气体径迹探测器.....	377
<b>第 12 章 核辐射测量方法</b> .....	382
12.1 放射性样品活度测量.....	382
12.2 符合方法.....	393
12.3 带电粒子能量与能谱的测量.....	401
12.4 $\gamma$ 射线能量的测定和 $\gamma$ 谱的解析.....	407
12.5 低水平活度样品测量的一般问题.....	417
12.6 辐射成像原理.....	424
思考题.....	428
习题.....	429



---

---

<b>第 13 章 中子及中子探测</b> .....	430
13.1 中子的分类和性质 .....	430
13.2 中子源 .....	431
13.3 中子与物质相互作用 .....	436
13.4 中子探测方法和常用探测器 .....	444
13.5 中子注量率和中子能谱的测量 .....	452
思考题 .....	457
习题 .....	457
<b>附录</b> .....	459
附录 I 核素的性质表 .....	459
附录 II 化学元素周期表 .....	473
附录 III 常用物理常量 .....	474
附录 IV 常用材料密度 .....	476
附录 V 粒子性质表 .....	477
附录 VI 本征硅和锗的基本性质 .....	478
<b>参考文献</b> .....	479

# 第1章 原子核的基本性质

1911年,卢瑟福(E. Rutherford)根据 $\alpha$ 粒子的散射实验提出了原子的核式模型的假设,即原子是由原子核和核外电子所组成。从此以后,原子就被分成两部分来处理:核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容,而原子核则成为另一门新的学科,成为原子核物理学的主要研究对象。原子和原子核是物质结构的互相关联又完全不同的两个层次。

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,基本上仅与原子相关,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。但两者之间又互相关联,原子核的性质必然对原子的性质产生一定的影响,所以,原子核的许多特性正是通过对原子或分子现象的观察来确定的,例如,通过分析原子光谱的超精细结构来研究原子核的自旋、磁矩和电四极矩等。

目前人们对原子核已经有了相当的了解,由此而发展、形成了核科学与技术,并已为人类社会的进步和发展作出了重大贡献。但是,人类对原子核的了解仍存在许多谜团,核物理学仍是基础物理研究的一个重要组成部分。

原子核的一般性质通常指原子核作为整体所具有的静态性质,本章将着重讨论原子核的组成、电荷、质量、半径、稳定性、自旋、磁矩、宇称和统计性质等基本性质,这些性质与原子核的结构及其变化有关。通过本章的讨论,可以使我们对原子核的静态性质有基本的了解,而且为以后各章的讨论准备必要的知识。

## 1.1 原子核的组成、质量和半径

人们认识原子核是从观察物质的放射性开始的。1896年,贝可勒尔(A. H. Becquerel)发现了铀的放射性,他发现用黑纸包得很好的铀盐仍可以使照相底片感光,该现象表明铀盐可以放射出能透过黑纸的射线,这是人类第一次在实验室里观察到的原子核现象。通常人们把这一重大发现看成是核科学的开端。随后,1897年,居里夫妇(P. & M. Curie)发现了放射性元素钋和镭;1903年,卢瑟福证实了 $\alpha$ 射线是正电荷的氦原子, $\beta$ 射线是电子,进而在1911年提出了原子的核式模型。1932年,查德威克(J. Chadwick)发现了中子,海森堡(W. Heisenberg)立刻提出了原子核由质子和中子组成的假设。

### 1.1.1 原子核的组成及其表示

在发现中子之前,人们知道的“基本”粒子只有两种:质子和电子。因此,把原子核假定是由质子和电子组成的想法就非常自然。以氦原子核为例,其质量近似为质子的4倍,电荷为两倍单位正电荷。假如它由质子和电子所组成,那么它必须包含4个质子和2个电子。质子作

为质量的承担者,电子起了补偿电荷的作用。这个假定与氦核的质量和电荷状态是不矛盾的,但在解释另外的一些物理特征时就遇到了不可克服的困难。

如已知氦核的直径大小约为  $d = 5 \text{ fm}$ , 假如核内存在电子, 那么电子相应的德布罗意波长  $\lambda$  不能大于  $10 \text{ fm}$  ( $\lambda/2 = d$ ), 于是, 相应的电子动量  $p$  为

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda c} \geq \frac{1 \ 240 \text{ fm} \cdot \text{MeV}}{10 \text{ fm} \cdot c} = \frac{124}{c} \text{ MeV} \quad (1.1)$$

式中,  $h$  为普朗克常数;  $c$  为光速。利用相对论方程有

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 \quad (1.2)$$

式中,  $m_0c^2$  为电子的静止能量;  $E$  为电子的总能量(或称动能量)。

由(1.1)式,  $pc = 124 \text{ MeV} \gg m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ , 因此

$$E \approx pc = 124 \text{ MeV}$$

可是, 没有任何实验迹象能表明原子核内存在如此高能量的电子。

另外, 原子核由质子和电子组成的假设也无法解释原子核的自旋及统计性, 这将在 1.5 和 1.6 节中讨论。

在查德威克发现中子之后, 海森堡很快就提出原子核由质子和中子组成的假说, 这样, 上述困难就不再存在了。原子核由质子和中子组成的假设已被一系列的实验所证实。

中子和质子的质量相差甚微, 它们的质量分别为

$$m_n = 1.008 \ 664 \ 92 \text{ u}$$

$$m_p = 1.007 \ 276 \ 47 \text{ u}$$

这里,  $\text{u}$  为原子质量单位。1960 年国际上规定把  $^{12}\text{C}$  原子质量的  $1/12$  定义为原子质量单位, 用  $\text{u}$  表示, 即

$$1 \text{ u} = 1.660 \ 538 \ 73 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.660 \ 538 \ 73 \times 10^{-24} \text{ g} = 931.494 \ 013 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$$

中子为中性粒子, 质子为带有单位正电荷的粒子。中子和质子除有微小质量差以及电荷的差异外, 其余性质十分相似。

在化学中, 我们可以仅用元素符号表示某种元素, 因为化学只关注影响元素化学性质的原子电荷数。在提出原子核由中子和质子组成之后, 仅由元素符号表示并不能完全确定原子核的组成, 因此需要用符号  ${}_Z^AX_N$  来表示某个原子核。其中  $X$  为元素符号, 左下标  $Z$  表示质子数, 也就是核的电荷数; 右下标  $N$  表示核内中子数; 左上标  $A$  为核内的核子数, 又称质量数,  $A = N + Z$ , 例如  ${}_2^4\text{He}_2$ ,  ${}_8^{16}\text{O}_8$ ,  ${}_{92}^{238}\text{U}_{146}$  等。由于元素符号  $X$  与质子数  $Z$  有确定的对应关系, 且  $A = N + Z$ , 所以在表示一个核素时,  $Z$  和  $N$  通常可以省略, 只要简写为  ${}^AX$  就能完全表示出原子核内的质子数和中子数了, 例如  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{238}\text{U}$  等。

下面, 我们先介绍表示原子核的一些常用术语。

### 1. 同位素 (Isotopes) 和同位素丰度 (Abundance)

对同一元素, 由于核内中子数可以不同, 因此可能包含多种原子。例如, 自然界天然存在的  $\text{U}$  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,具有基本相同的化学性质,但核中的中子数有差别,引起原子核性质有很大不同。

为了描述这种情况,我们把具有相同质子数,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。同位是指该元素的各种原子在元素周期表中处于同一个位置,它们具有基本相同的化学性质。例如,氢同位素有三种原子: $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,分别取名为氢、氘、氚。某些元素,例如锰、铍、氟、铝等,在天然条件下,只存在一种原子,则称它们为单一原子而不能说是只有一种同位素。

某元素中各同位素天然含量的原子数百分比称为同位素丰度。例如自然界存在的氢只有 $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,它们的同位素丰度分别为99.985%和0.015%。 $^3\text{H}$ 虽然构成氢的同位素,但它不是天然存在的,是一种宇生放射性,从而不构成氢同位素丰度。再如, $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ 的同位素丰度分别为0.0054%, 0.7204%, 99.2742%。本书附录I中的核素性质表中给出了各种同位素的丰度可供使用。

## 2. 核素(Nuclide)

核素是指在其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, $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ 就是不同的核素。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,例如 $^{60}\text{Co}$ 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,例如关注原子核的组成及其稳定性(即放射性),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等。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以及元素的物理、化学特性等。

## 3. 同中异荷素(Isotones)

中子数 $N$ 相同而质子数 $Z$ 不同的核素互称为同中子异荷素(简称同中异荷素)。例如 $^{30}_{14}\text{Si}$ ,  $^{31}_{15}\text{P}$ ,  $^{32}_{16}\text{S}$ ,  $^{33}_{17}\text{Cl}$ 和 $^{34}_{18}\text{Ar}$ 等就互为同中子异荷素,而 $^8_3\text{Li}$ 的同中子异荷素有 $^9_4\text{Be}$ ,  $^{10}_5\text{B}$ 和 $^{11}_6\text{C}$ 等。

## 4. 同量异位素(Isobars)

质量数 $A$ 相同而电荷数 $Z$ 不同的核素互称为同量异位素。例如 $^{90}_{38}\text{Sr}$ 和 $^{90}_{39}\text{Y}$ 就是同量异位素, $^{64}_{29}\text{Cu}$ 的同量异位素有 $^{64}_{28}\text{Ni}$ ,  $^{64}_{30}\text{Zn}$ 和 $^{64}_{31}\text{Ga}$ 等。

## 5. 同质异能素(Isomers)

半衰期较长的激发态原子核称为基态原子核的同质异能素或同核异能素。它们的 $A$ 和 $Z$ 均相同,只是能量状态不同。一般在元素符号左上角的质量数 $A$ 后加上字母 $m$ 表示(也有的书上将 $m$ 标在元素符号的右上角)。这种核素的原子核一般处于较高能态,例如 $^{87\text{m}}_{38}\text{Sr}$ 为 $^{87}_{38}\text{Sr}$ 的同质异能素,半衰期为2.81小时。同质异能素所处的能态,又称同质异能态,它与一般的激发态在本质上并无区别,只是寿命较长而已。

## 6. 偶偶核(e-e核)、奇奇核(o-o核)及奇 $A$ 核

原子核的质子数 $Z$ 和中子数 $N$ 都是偶数的核称为偶偶核,如 $^4_2\text{He}$ ,  $^{46}_{20}\text{Ca}$ 等。 $Z$ 和 $N$ 都是

奇数的核称为奇奇核,例如, ${}^6_3\text{Li}_3$ , ${}^{32}_{15}\text{P}_{17}$ 等。以上两种核的核子数  $A$  都是偶数。 $A$  是奇数的原子核称为奇  $A$  核,它又可分为两类: $Z$  偶  $N$  奇的核称为偶奇(e-o)核,如 ${}^{13}_6\text{C}_7$ 等;而  $Z$  奇  $N$  偶的核称为奇偶核(o-e),如 ${}^{35}_{17}\text{Cl}_{18}$ 等。

### 7. 镜像核(Mirror Nuclei)

两个质量数  $A$  相同的原子核,如果一个核的质子数等于另一个核的中子数,那么这两个原子核称为一对镜像核。例如 ${}^7_3\text{Li}_4$ 和 ${}^7_4\text{Be}_3$ 是一对镜像核, ${}^{15}_8\text{O}_7$ 的镜像核是 ${}^{15}_7\text{N}_8$ ,而质子数和中子数相等的核没有镜像核。

#### 1.1.2 原子核的质量

质子数为  $Z$ 、核子数为  $A$  的原子核的质量用  $m(Z, A)$  表示,与它相对应的原子质量表示为  $M(Z, A)$ ,它们的关系为

$$M(Z, A) = m(Z, A) + Z \cdot m_0 - B_e/c^2 \quad (1.3)$$

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,即  $B_e = \sum n_i B_i$ ,  $i = K, L, M, \dots$ ,  $n_i$  和  $B_i$  分别代表第  $i$  层电子的个数和结合能。由此,原子核质量可表示为

$$m(Z, A) = M(Z, A) - Z \cdot m_0 + B_e/c^2 \quad (1.4)$$

由于原子核的质量不便于直接测量,所以通常是通过测量原子质量并利用(1.4)式来推得原子核质量的。在实际应用中,一般数据手册上给出的也是原子质量,所以(1.4)式常会用到。后面我们讨论核蜕变,例如核衰变、核反应等过程时,是否要考虑核外电子的结合能  $B_e$ 。要视具体情况而定,在以后的各种核过程讨论中一般都会作必要的说明。

原子质量可以采用质谱仪测定,确切地说,实质上是测定离子质量。质谱仪的基本工作原理为:首先使原子电离,离子在电场中加速并获得一定能量,接着在磁场中偏转,由偏转的曲率半径可以得到离子的荷质比,当电荷确定后即可计算出离子的质量  $M$ 。

表 1.1 给出了一些原子质量的测量值。由表可见,采用原子质量单位  $u$  时,原子质量均接近于一个整数,此整数就是原子核的质量数,即核子数  $A$ 。

表 1.1 一些原子的质量

原子名称	原子质量/ $u$	原子名称	原子质量/ $u$
${}^1\text{H}$	1.007 825	${}^7\text{Li}$	7.016 004
${}^2\text{H}$	2.014 102	${}^{12}\text{C}$	12.000 000
${}^3\text{H}$	3.016 049	${}^{16}\text{O}$	15.994 915
${}^4\text{He}$	4.002 603	${}^{235}\text{U}$	235.043 930
${}^6\text{Li}$	6.015 123	${}^{238}\text{U}$	238.050 788

### 1.1.3 原子核的大小

一个原子的线度约为  $10^{-10}$  m, 根据卢瑟福用  $\alpha$  粒子轰击原子的实验得知原子核的线度远小于原子的线度。若想象原子核近似于球形, 则有原子核半径的概念。原子核的半径很小, 只能通过各种间接的方法进行测量。根据所用方法的不同, 测出的原子核半径的意义也不相同, 有核力半径和电荷分布半径之分。

在历史上, 最早研究原子核大小的是卢瑟福和查德威克, 方法就是卢瑟福散射。卢瑟福散射是通过库仑力发生的弹性散射, 如图 1.1 所示。质量为  $m$ 、电荷为  $ze$  的入射粒子以速度  $v_0$  入射, 与电荷为  $Ze$  的靶核发生弹性碰撞。如果两个粒子之间的相互作用力与作用距离平方成反比(不论是吸引力还是排斥力), 为了满足角动量守恒, 在质心坐标系的轨迹均呈双曲线。由于靶核质量远大于入射粒子, 实验室系的情况与质心系相差甚小(坐标系的讨论见第 4 章), 入射粒子运动轨迹仍呈双曲线, 并可以认为靶核固定不动。再加上散射过程中动能和势能之和保持恒定, 这时散射角  $\theta$  与粒子入射方向到原子核的最短距离  $b$  将有如下关系<sup>①</sup>

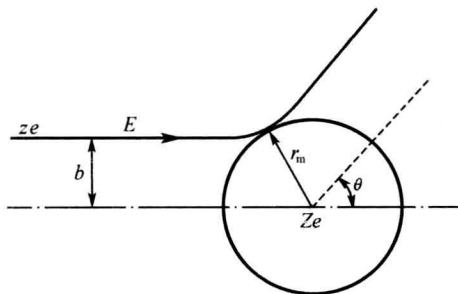


图 1.1 用带电粒子与核散射确定核半径

$$b = \frac{a}{2} \cdot \cot \frac{\theta}{2} \quad \text{其中 } a = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 E} \quad (1.5)$$

这就是著名的库仑散射公式。式中,  $b$  称为碰撞参数 (Impact parameter);  $E$  为入射粒子动能,  $E = mv_0^2/2$ ;  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数。

当入射粒子为  $\alpha$  粒子时,  $z=2$ , 得到

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{Eb} \quad (1.6)$$

可见,  $\theta$  随  $E, b$  的减小而增大, 变化范围为  $0 \sim 180^\circ$ , 因此  $\alpha$  粒子有大角度散射。

实验表明, 大多数的原子核可以近似看成球形, 通常用核半径  $R$  来表征核的大小。由碰撞前后能量守恒和角动量守恒, 有

$$\begin{cases} \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 r_m} \\ mv_0 b = mvr_m \end{cases}$$

式中,  $r_m$  为粒子与核最近情况下的距离;  $v$  为粒子此时的速度;  $v_0$  为粒子的初始速度。求解此方程并利用(1.5)式, 可得

<sup>①</sup> 参考书目[10]第一章 §3。本书中电学单位采用国际单位制(SI)。

$$r_m = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{zZe^2}{mv_0^2} \left( 1 + \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right) \quad (1.7)$$

由  $\theta$  即可确定  $r_m$ , 当  $\theta = 180^\circ$  时,  $r_m$  达到最小  $r_{\min}$ 。例如实验测出 Au 的  $r_{\min} \approx 3.2 \times 10^{-12}$  cm, Ag 的  $r_{\min} \approx 2.0 \times 10^{-12}$  cm。可以想象, 核半径  $R$  (电荷分布半径) 一定不会大于  $r_{\min}$ , 即  $R \leq r_{\min}$ 。测出  $r_{\min}$ , 就可大致确定出核半径。对于一般原子核, 卢瑟福散射实验确定的核半径  $R$  大约在  $10^{-12} \sim 10^{-13}$  cm 的范围。

随测量技术的发展与完善, 陆续有了一些更精确的测量方法。如用中子衍射截面测量原子核的大小(核力半径); 用高能电子散射测量原子核的大小及电荷形状因子(电荷分布半径), 等等。

总结以上的实验结果, 原子核半径  $R$  与  $A^{1/3}$  成正比, 可表示为

$$R = r_0 \cdot A^{1/3} \quad (1.8)$$

其中  $r_0$  的最新数据为  $1.20 \pm 0.30$  fm(电荷半径)和  $1.40 \pm 0.10$  fm(核力半径)。

有了半径, 则可得到原子核的体积为

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \approx \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (1.9)$$

由(1.9)式可知, 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, 或者说各种核的核子密度(单位体积内的核子数)  $n$  大致相同, 即

$$n = \frac{A}{V} = \frac{A}{(4/3) \times \pi R^3} = \frac{3}{4\pi r_0^3} \approx 10^{38} \text{ cm}^{-3} \quad (1.10)$$

由于核子(质子和中子)质量是一定的, (1.10)式还意味着核物质密度近似为常数。这一结论以及  $V \propto A$  正是核的液滴模型和核力饱和性的依据。

## 1.2 原子核稳定性的实验规律

原子核的稳定性取决于核的组成, 例如其与核的质量数、核内质子数和中子数的比例都有着密切的关系。根据原子核的稳定性, 可以把核素分为稳定的核素和放射性核素。

像化学和原子物理学中把元素按原子序数  $Z$  排成元素周期表一样, 也可以把核素排在一张核素图上。核素图是  $N-Z$  的两维图, 如图 1.2 所示。图 1.2 以  $N$  为横坐标、 $Z$  为纵坐标(也可以反过来), 然后让每一核素对号入座, 使图中每一格代表一个特定的核素。深色格中为稳定核素, 格中百分数为同位素丰度; 其余核素为放射性核素, 格中  $\alpha, \beta^-, \beta^+$  等表示该核素的衰变方式, 箭头指向为衰变后的子核, 时间表示半衰期。

现代的核素图通常用不同颜色表示不同的衰变方式, 图中既包括了天然存在的 332 个核素(其中 270 多个是稳定核素), 也包括了 1934 年以来人工制造的 2 000 多个放射性核素。观察核素图, 对于原子核的稳定性, 可总结得到下面的一些规律。

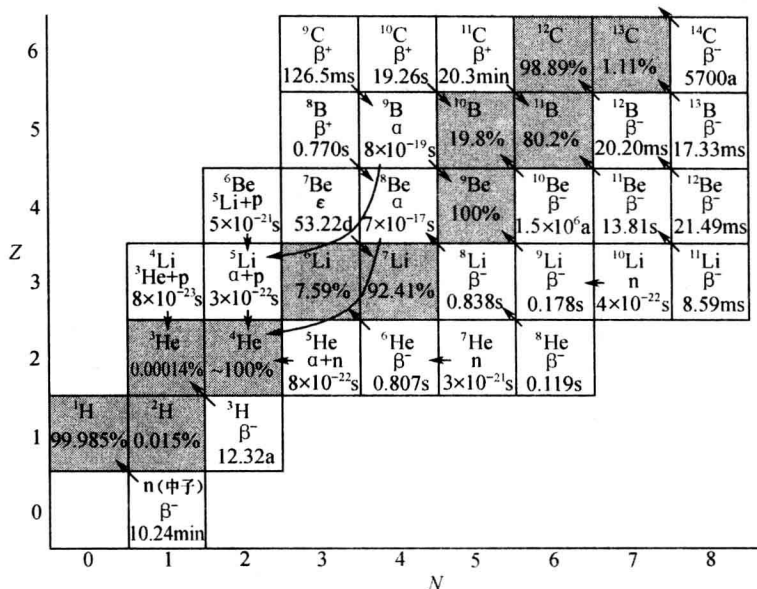


图 1.2 核素图(部分)

### 1.2.1 $\beta$ 稳定线

为了从核素图中得到更多的有关核稳定性的认识,有人绘制了 $\beta$ 稳定核素分布图,如图1.3所示,图中横坐标为质子数 $Z$ ,纵坐标为中子数 $N$ 。在图1.3中,在同一垂直线上(即 $Z$ 相同)的所有核素是同位素;在同一水平线上(即 $N$ 相同)的所有核素是同中子异荷素;在 $N$ 和 $Z$ 轴上截距相等的直线上(即 $A$ 相等)的所有核素是同量异位素。

由图1.3可以发现,稳定核素几乎全落在一条光滑曲线上或紧靠曲线的两侧,我们把这条曲线称为 $\beta$ 稳定线。由图可见,对于轻核, $\beta$ 稳定线与直线 $N=Z$ 相重合;当 $N, Z$ 增大到一定数值之后, $\beta$ 稳定线逐渐向 $N>Z$ 的方向偏离。在 $Z$ 小于20时,核素的 $N$ 与 $Z$ 之比约为1, $Z$ 为中等数值时, $N/Z$ 约为1.4, $Z$ 等于90左右时, $N/Z$ 约为1.6。

相对于稳定线而言,中子数过多或偏少的核素都是不稳定的。位于稳定线上方的核素为丰中子核素,中质比 $N/Z$ 比较大,易发生 $\beta^-$ 衰变。 $\beta^-$ 衰变对应核内中子蜕变成质子的过程,从而使 $N/Z$ 下降,向 $\beta$ 稳定线靠拢。位于稳定线下方的核素为缺中子核素, $N/Z$ 比较小,易发生 $\beta^+$ 衰变。

$\beta$ 稳定线可用下列经验公式表示:

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.015 5A^{2/3}} \quad (1.11)$$



原子核内的核子结合得非常紧密,这是因为有强大的吸引力——核力,它存在于中子与质子、质子与质子、中子与中子之间。而质子与质子之间还存在库仑斥力,它起着破坏结合的作用。

在轻核区库仑作用影响不大, $N = Z$ 的核素比较稳定,这可以由泡利原理解释。由于中子和质子都是费米子(关于费米子的概念,将在 1.6 节中介绍),每个能态不能同时放置两个以上的中子(或质子)。 $N \neq Z$ 时,多的中子(或质子)就可能处于较高能态,使原子核的稳定性变差。

可是,当质子数  $Z$  增大到一定数值时,情况就起了变化。由于库仑力是长程力,它能作用于核内的所有质子,相互作用能正比于  $Z^2$ ;而核力是短程力,只作用于相邻的核子,相互作用能正比于  $A$ 。随着  $Z$  的增加,库仑作用的影响增长得比核力快,为使原子核保持稳定,必须靠中子数的较大增长来增加核力相互作用能,因此,随着  $Z(A)$  的增长,稳定核素的中子数比质子数越来越多,越来越大的偏离  $Z = N$  直线。不过,当  $Z$  大到一定程度,例如,超过铅( $Z = 82$ )和铋( $Z = 83$ )时,稳定核素不存在了。当  $Z$  再大到一定程度,连长寿命放射性核素也不复存在,这样,稳定核素在目前的已知核素区慢慢就终止了。

### 1.2.2 核子数的奇偶性

原子核的稳定性还与核内质子和中子数的奇偶性有关,奇数以 o(odd)表示,偶数以 e(even)表示。自然界中存在的稳定核素共 270 多种,若包括半衰期  $10^9$  年以上的核素则为 285 种,其中,偶偶(e-e)核 167 种;偶奇(e-o)核 56 种;奇偶(o-e)核 53 种;奇奇(o-o)核 9 种。

由稳定核素核内质子数和中子数的奇偶性可以看出,偶偶核最稳定,稳定核素最多;其次是奇偶核和偶奇核;而奇奇核最不稳定,稳定核素最少,只有 9 种(含半衰期  $10^9$  年以上的)。这表明核内质子和中子分别有成对相处的趋势。

另外,当原子核的中子数或质子数为 2, 8, 20, 28, 50, 82 和中子数为 126 时,原子核特别稳定。我们把上述数目称为“幻数”,幻数现象将在 1.8 节中进一步讨论。

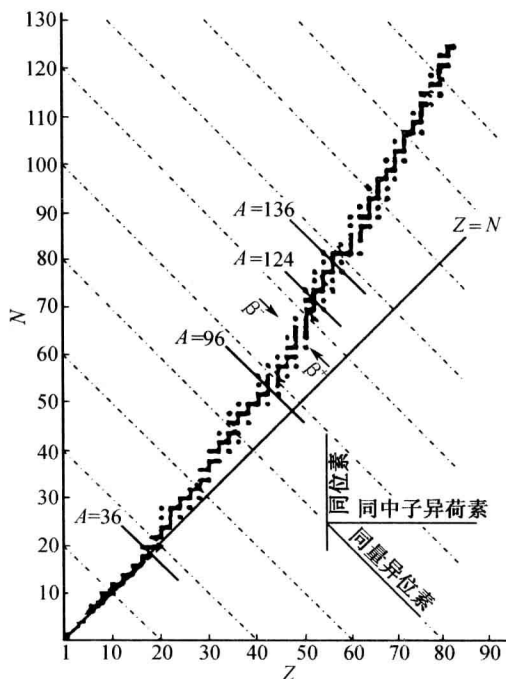


图 1.3  $\beta$  稳定核素分布图