

● 高等学校教材

# 原子核物理学导论

● 第二版

● 褚圣麟 编著



● 高等教育出版社

085563

高等学校教材



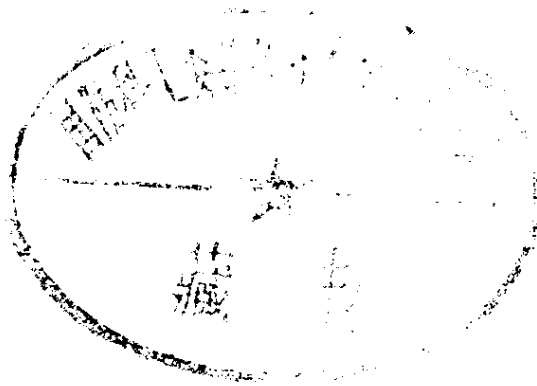
科工委学院802 2 0028599 6

# 原子核物理学导论

(第二版)

GFB466

褚圣麟 编著



高等教育出版社

此书是作者根据数年来授课的讲义修改补充而成的，初版于1965年。这次再版，作者根据这一学科的发展和教学上的需要，作了修改和增补。粒子物理一章，只保留初版的一小部分内容，大部分重写了；第三章增加了新发展的粒子探测器和实验方法；第四章增加了粒子对撞加速器原理，并举例介绍了几处质子和电子对撞机的具体情况；其他各章亦按照学科的发展作了补充。全书内容包括原子核物理学的几个主要方面和原子能的利用，以及粒子物理的题材。书中着重叙述这些方面的基本知识和物理规律，也扼要地介绍了实验方法和某些理论。

此书可以作为高等学校原子核物理学课程的教学用书。

本书责任编辑 李松岩

高等学校教材

## 原子核物理学导论

(第二版)

褚圣麟 编著

\*

高等教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
北京印刷一厂印装

\*

开本850×1168 1/32 印张12.5 字数 302 000  
1987年10月第2版 1987年10月第1次印刷  
印数00 000—3 690

ISBN 7-04-000034-2/O·18

书号13010·01433 定价2.50元

## 第一版序

此书由作者授课的讲义整理而成。作为一册原子核物理学的导论，书的内容比较广泛。书中着重叙述这范围内的基本知识和物理规律，并扼要地介绍实验方法；此外，也作了一些简单的理论阐述。内容的选择和编排是从初次接触这方面材料的读者的角度考虑的。作为教学用书，也注意了学生的准备知识。

为了使这书稍能适应不同的需要，有些论述比较详细或属于专门一些的部分都标有星号(\*)；这些可供有些读者进一步阅读和参考，初次阅读可以越过。

书中难免有错误和不妥之处，敬恳读者多提意见。

历年任课，印发讲义，同事和同学反映的意见有益于书稿的编写；许祖华同志曾阅读书稿，作了一些评注，对整理有助；作者一并表示谢意。

作者

1964年12月

## 第二版前言

此书初版以来，经过了二十余年，涉及的学科领域已有很大进展。现在再版，按照学科的发展和教学上的需要，作了修改和增补。

原子核物理学和粒子物理学，在实验工作和理论探讨上关系密切，是一同发展起来的，近年都有很大的进展。在大学本科的课程中，一般不一定把原子核物理和粒子物理分别设课。所以本书在三、四两章把原子核和粒子物理有关的实验原理、方法和设备，一并作了介绍。此次再版，第三章增加了新发展的粒子探测器和实验方法，第四章增加了粒子对撞加速器原理，并举例介绍了几处质子和电子对撞机的具体情况。

本书再版的第十三章“粒子物理”保留了初版这一章的部份内容，增加了近年的发展，作更有系统的介绍，大部份重写。

其他各章亦按照学科的发展，作了补充。希望本书再版中的修改和增补能适合教学上的需要。仍盼读者多提宝贵意见为感。

作者

1986年11月

# 目 录

第一版序 .....	i
第二版前言 .....	ii
<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第二章 原子核的基本性质</b> .....	5
2.1 原子核及其电荷、质量和成分 .....	5
2.2 原子核的大小 .....	7
2.3 原子核的角动量 .....	9
2.4 原子核的磁矩 .....	11
2.5 原子核的电四极矩 .....	15
2.6 原子核的统计性 .....	17
2.7 原子核的宇称 .....	18
*2.8 原子核的质子-中子结构的论证 .....	20
2.9 原子核的结合能 .....	23
<b>第三章 粒子观测器</b> .....	27
3.1 电离室、正比计数器和盖革-弥勒计数器 .....	27
3.2 闪烁计数器、契伦科夫计数器、晶体计数器 .....	34
3.3 定标电路和符合电路 .....	36
3.4 云室、汽泡室、发光室 .....	37
3.5 火花室 .....	42
3.6 丝室 .....	43
3.7 核乳胶 .....	46
<b>第四章 带电粒子加速器原理</b> .....	50
4.1 静电加速器 .....	50

4.2	直线加速器 .....	52
4.3	回旋加速器和同步回旋加速器 .....	55
4.4	电子感应加速器和电子同步加速器 .....	61
4.5	质子同步稳相加速器 .....	65
4.6	储存环对撞机 .....	68
<b>第五章</b>	<b>放射性衰变</b> .....	<b>79</b>
5.1	放射性衰变及其规律 .....	79
5.2	放射系 .....	87
5.3	$\alpha$ 衰变 .....	92
5.4	$\alpha$ 射线的能谱和原子核的能级 .....	98
5.5	$\beta$ 衰变和 $\beta$ 射线的能谱 .....	101
5.6	中微子 .....	105
5.7	正电子的发射和K俘获 .....	107
*5.8	$\beta$ 衰变的理论和实验验证 .....	110
5.9	复杂的 $\beta$ 能谱和原子核的能级 .....	118
5.10	$\gamma$ 射线和内变换 .....	119
5.11	同质异能素 .....	123
*5.12	从 $\beta$ 和 $\gamma$ 衰变的实验推断核能级的性质 .....	125
5.13	穆斯堡尔效应 .....	126
<b>第六章</b>	<b>射线同实物的相互作用</b> .....	<b>128</b>
6.1	带电重粒子同实物的相互作用 .....	128
6.2	快速电子同实物的相互作用 .....	132
6.3	$\gamma$ 射线同实物的相互作用 .....	137
*6.4	放射性的应用 .....	146
6.5	放射性强度的单位 .....	149
*6.6	辐射剂量和防护 .....	149
<b>第七章</b>	<b>原子核反应</b> .....	<b>153</b>
7.1	对原子核的轰击 .....	153
7.2	原子核反应中的守恒定律 .....	155

7.3	原子核反应的能量 .....	157
7.4	反应截面 .....	162
7.5	原子核反应机制 .....	164
7.6	复核的形成, 核共振和连续区理论 .....	167
7.7	原子核反应的光学模型 .....	175
7.8	各式核反应和人工放射物的产生 .....	176
7.9	高能粒子的核反应 .....	180
*7.10	超铀元素 .....	181
7.11	从原子核反应研究原子核能级 .....	185
<b>第八章</b>	<b>原子核结构模型 .....</b>	<b>191</b>
8.1	费米气体模型 .....	191
8.2	液滴模型 .....	193
*8.3	$\alpha$ 粒子模型 .....	202
8.4	壳层模型 .....	203
8.5	集体运动模型 .....	211
8.6	结语 .....	218
<b>第九章</b>	<b>核力 .....</b>	<b>219</b>
9.1	核力的主要性质 .....	219
9.2	氘核 .....	222
*9.3	散射实验和核力的性质 .....	227
9.4	核力的介子论 .....	235
<b>第十章</b>	<b>中子物理 .....</b>	<b>240</b>
10.1	中子的发现及其性质 .....	240
10.2	中子源和中子探测器 .....	241
*10.3	中子的吸收和散射 .....	246
*10.4	中子的减速过程 .....	251
*10.5	中子的相干散射 .....	254



<b>第十一章 原子核的裂变和原子能的利用</b> .....	258
11.1 原子核的裂变现象 .....	258
11.2 裂变的理论 .....	261
11.3 链式反应和原子反应堆 .....	267
11.4 链式裂变反应的利用 .....	275
<b>第十二章 原子核的聚变和原子能利用的展望</b> .....	278
12.1 原子核的聚变, 丰富的原子能源 .....	278
12.2 聚变反应成为原子能源的基本条件和高温等离子体的研究 .....	280
*12.3 受控热核反应的几种实验方法 .....	290
<b>第十三章 粒子物理</b> .....	298
13.1 粒子和粒子的相互作用 .....	298
13.2 粒子的观测 .....	306
13.3 粒子相互作用和有关规律 .....	341
13.4 共振态 .....	349
13.5 粲性粒子的发现 .....	354
13.6 强子结构模型学说的发展 .....	355
13.7 关于电磁相互作用 .....	365
13.8 弱相互作用 .....	370
<b>常用物理常数</b> .....	379
<b>参考书籍</b> .....	381
<b>外国人名对照表</b> .....	383
<b>索引</b> .....	386

# 第一章 绪 论

原子核是原子的中心体。原子核物理学是研究这个中心体的特性、结构和变动的一门科学。粒子的研究与原子核问题有密切关系。本书也包含关于这方面的讨论。

原子核物理学到现在还只有八十多年的历史,但是发展得很迅速。目前在这个科学领域内,一方面基本物理问题正在深入地进行研究,另一方面原子能和放射性元素的应用也发展到对国民经济和国防事业有巨大影响的规模。原子能事业涉及科学和技术问题颇广,现在已经是若干科学部门的协作事业。

现在把原子核物理的发展作一简略的回顾。在十九世纪的最后三十年,生产的发展超过以前任何时期。工业技术提高很多。那时期冶金工业有了发展,内燃机和蒸汽轮机被采用,电力的使用也很快推广开来,交通运输也有了很方便的工具。在此情形下,生产实践中不断地涌现出新的科学问题,而生产技术的发展也提供了科学研究的条件。十九世纪末年,物理学有飞跃的发展,涌现出一系列的新发现。在这样的时代背景下,贝克勒于1896年发现了铀的放射现象。这是第一次观察到原子核现象。从此原子核物理逐步发展起来。

不久,发现了钍的化合物也有放射性。1898年,P. M. 居里和M. 居里从铀的矿石中发现了具有放射性的钋和镭。原子核物理学初期是在放射性的研究上发展的,放射性现象很快就在医疗工作上获得了应用。在这方面的研究中,证明了原子核的存在(卢瑟福, 1911),导致原子核反应的发现(卢瑟福1919)。在这时期,又发现了宇宙线(赫斯等),并继续进行研究。在起初三十多年中,原子核物理的实验方法和技术逐步得到发展。初期用荧光屏、验

电器、电离室和静电计等进行观察，后来，重要工具如云室（威耳孙，1912）和盖革、弥勒计数器（1928）等都先后创造出来。1930年前后，几种加速器也开始发展起来。

1930年以后，原子核物理的研究进展得很快。在初期，全世界只有几个地方从事放射性等问题的研究，1930年以后进行原子核和宇宙线问题研究的单位就象雨后春笋，增加得很快，从事这方面工作的人数也急剧增长。1932年是原子核物理学发展的一个里程碑。在这一年，中子被发现（查德维克，约里奥-居里夫妇）。这个发现使人们对原子核结构开始有了正确的认识，也是以后重要研究和发展的开端。这一年第一次观察到用人工加速粒子所产生的原子核反应（柯克饶夫特和华尔顿），而且第一座回旋加速器成功地运转（劳仑斯）；从此有不少单位建立了加速器，进行原子核反应的实验，得到很多收获。同年，正电子也在宇宙线中被发现（安德生）。1934年人工放射性被发现（约里奥-居里夫妇）。放射性元素在医疗、工农业和科学研究上的应用逐步推广开来。放射性元素的制造与研究对原子核物理的发展起了重要的推动作用。在这时期，关于原子核的理论也得到了发展。1935年介子论初次发表（汤川秀树）。1936年在宇宙线的观测中发现了 $\mu$ 子（安德生和内德梅厄）。

1939年初，发现了原子核裂变现象（哈恩与史特拉斯曼）。不久，科学家认识到这现象可能被利用为巨大的动力源。1942年原子反应堆第一次试验成功（费米等）。有些国家看到原子能事业的重要性，先后以国家的力量组织大规模的研究。原子武器先后被几个国家所掌握。原子能在生产事业的应用也发展起来。1954年第一次把原子能用于发电。许多反应堆的建立使放射性元素可以大量生产，并在各项工作中得到更广泛的利用。1950年以后，人们又从事受控制热核反应的研究，这是原子能的另一来源。所需要的原料，在自然界中大量存在。如果能利用，原子能的应用的

前景更为美好。关于原子核的基本问题的研究，实验和理论工作在这数十年中都有很多进展。

在五十年代以来高能物理方面在宇宙线和高能加速器的工作有很大的开展。1947年发现了 $\pi$ 介子（拉德斯，欧恰里尼和鲍威尔）。1950年前后发现了K介子和超子，在亚核粒子的研究上展开了新的一页。自从1945年提出同步稳相加速器原理后（维克斯列尔和麦克米伦各自提出），不少单位建立了高能加速器。目前能够把质子加速到几百GeV的数量级。在少数高能对撞机中，达到的粒子能量又加一倍。这是在人力控制所能获得的高能量粒子，更高能量粒子的研究仍在宇宙线中进行。

以上是原子核物理发展的梗概。现在这个科学部门的研究分下列几个方面进行着：（1）原子核的结构、核力的性质等物理问题。这些问题主要通过核反应、核能谱等实验和理论工作进行研究。（2）亚核粒子的性质和相互作用问题。这些通过宇宙线和高能加速器进行研究。（3）关于原子能的发生和应用的科学、技术问题。这方面的工作已经发展成生产事业了。第一、二方面的工作涉及物质的基本问题，这些问题的研究为更好地了解自然和掌握自然，从而为更多地利用自然开辟了道路。第一方面的工作也与第三方面有密切关系。

原子能的利用是开辟一个巨大的动力源的问题。直到现在，大的动力源主要是水力、煤和石油。煤和石油终究会用完的，而且原子能还有煤和石油所不能及的优点，例如具有巨大的功率而原料的消耗却很少。所以这个动力源的开辟，必然会在很大程度上提高社会生产力。放射性同位素的应用，对工农业生产和医疗及科学研究上有很大的推进。总之，原子核物理与国民经济和国防事业有密切关系。

有关原子核的科学技术是多方面协作的共同事业。原子能原料的制备就需要地质、探矿、采矿、冶炼、化学、化工、金属学

等学科的知识与技术。原子堆中需要耐高温和耐辐射的金属与非金属材料。控制电路与测量仪器是复杂的电子电路。这里也要用到半导体器件和磁性材料。热核反应目前也就是等离子体中放电问题。加速器的制造与运转涉及磁场的设计、电子学、高频电路、气体放电等方面的知识。原子核基本性质的研究有多处要用光谱学和波谱学。宇宙线的研究需要高空大气和地磁场的知识，同时它也把一些资料供给高空研究。宇宙线的起源问题同天体演化论有关系。放射性元素除了应用于生产外，在其他科学部门，例如生物、化学、地质、考古等学科的研究上都有重要的应用。总之，原子核的研究同好些科学部门有互相协助推动的作用，原子能事业是许多有关科学部门的共同事业，需要各科学部门的大协作。

我们看到，仍在迅速发展中的原子核物理学既深入研究物质的基本问题，又在生产事业和国防上有划时代的应用，而且同其他学科又有广泛的联系；它是起着巨大作用的一个科学分支。

## 第二章 原子核的基本性质

作为讨论原子核物理具体问题的开始，我们先简单地述说原子核的一些基本性质。这里所说的基本性质是指原子核作为整体所具有的性质，一般不涉及原子核内部结构的变化问题。通过学习本章，使我们对原子核整体先有一个轮廓性的认识。

原子核是原子结构中的重要部分，它的基本性质同原子的性质有密切关系；在许多原子和分子的现象中显示出原子核的影响，例如原子光谱的超精细结构和分子光谱的转动结构都同原子核的情况有关。本章所讨论的原子核的一些基本性质，主要是从原子和分子的研究中可以推断出来的，但有些也还需要从原子核的直接研究，并与原子或分子中的推断互相参证才能得到准确的结论。这在以后各章中还要讨论。

### 2.1 原子核及其电荷、质量和成分

原子核的电荷 原子核是原子的中心体。它的重要特征之一是它所带的电量。原子核带的电是正电，是基本电荷 $e(1.6 \times 10^{-19}$  库仑)的整数倍。这个倍数与元素周期表中的原子序数 $Z$ 是一致的。这个数值可以由不同的实验测得。例如在卢瑟福的 $\alpha$ 粒子散射实验中可以测定 $Z$ ；按伦琴射线谱的莫塞莱定律可以排列元素的次序，从而也可知道数值 $Z$ 。自然界中最高原子序数的元素是铀，它的原子序数是92，这就是说铀在元素周期表中是第92位，它的原子核带有92倍基本电荷的正电荷。还有人工制造出来一些元素，它们的 $Z$ 值超过了铀的 $Z$ 值，最高的已经达到109了。

原子核的质量 原子核的另一重要特征是它的质量。对于原子核的描述或进行有关的计算，经常用到中性原子的质量的数值。

原子总质量是等于原子核的质量加核外电子的全部质量，再减去相当于电子全部结合能的一个数值，这数值比较小，有时可以忽略不计。所以由中性原子的总质量可以算出原子核的质量。以后谈到的原子质量都指中性原子的质量。

原子的质量可以用质谱仪精密地测定，也可以间接推算，通常用原子质量单位表示。原子质量单位是这样定义的：一个原子质量单位等于一个处于基态的 $^{12}\text{C}$ （上角“12”表示质量数，见下文）中性原子的静止质量的 $1/12$ ，用符号 $u$ 表示。这样， $1u = 1.6605655 \times 10^{-27}$  千克。兹举几个按 $u$ 表示的原子质量数值的例子：

氢	1.007823
氦	4.002604
碳	12.000000
氧	15.994930
铀	238.04944

从这些例子可以看出，各种原子质量的数值，都很接近整数。

在原子核物理中，有一种标记原子核的方法。例如氢核、氦核和氧核分别由 $^1_1\text{H}$ ， $^4_2\text{He}$ ， $^{16}_8\text{O}$ 表示。左上角的数值代表质量，是质量单位倍数最接近的整数，这个数称为质量数 $A$ ，例如氢的质量数是1，氦的质量数是4。上述符号左下角的数字是原子序数 $Z$ ，也就是原子核的电量。因此这个符号表达了原子核的两个特征，电量与质量。

**同位素** 同一种元素的原子可以有不同的质量，也就是 $Z$ 相同而 $A$ 不同，例如 $^{16}_8\text{O}$ ， $^{17}_8\text{O}$ ， $^{18}_8\text{O}$ ，又如 $^{20}_{10}\text{Ne}$ ， $^{22}_{10}\text{Ne}$ 。一种元素中不同质量的成分称为同位素。自然界中的氧有三种同位素，如上面所列。但三者含量不同， $^{16}\text{O}$ 占99.76%， $^{17}\text{O}$ 占0.04%， $^{18}\text{O}$ 占0.20%。

各元素的同位素统称核素，例如 $^{12}_6\text{C}$ ， $^{13}_6\text{C}$ ， $^{16}_8\text{O}$ ， $^{17}_8\text{O}$ ， $^{14}_7\text{N}$ 是不同的核素。

**同量异位素** 有些不同元素（因而不同 $Z$ ）的原子有相同的质量数。这些原子彼此称为同量异位素，例如 ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ 和 ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ 。

原子的质量差不多是 $1.66 \times 10^{-27}$ 千克的整倍数，而原子核外电子每一个的质量只有 $9.1 \times 10^{-31}$ 千克，可见原子的质量的绝大部分是原子核的质量。

**原子核的成分** 原子核是由质子和中子两种粒子构成的。质子是氢核，具有 $(1.007276470 \pm 0.000000011) u$ 的质量和一個单位的正电荷。中子是具有 $(1.008665012 \pm 0.000000037) u$ 质量的中性粒子。由于这两种粒子的质量以原子质量单位表达都几乎是1，所以原子核的质量数 $A$ 也代表构成这原子核的质子和中子两种粒子的总数。代表原子核电量的 $Z$ 也代表核内的质子数。因此 $N = A - Z$ 是核内的中子数。质子和中子统称为核子。

## 2.2 原子核的大小

早年卢瑟福在 $\alpha$ 粒子散射的实验中，证明了原子有一个核，它的半径小于 $10^{-11}$ 米。到现在已经有许多方法来测定原子核的大小。测量的结果，显示各种原子核的半径 $R$ 与原子质量数有如下关系

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad (2.2-1)$$

$r_0$ 是常数，这个数值早年测得为 $1.4 \times 10^{-15}$ 米到 $1.5 \times 10^{-15}$ 米之间，后来较精密的测量得到 $1.20 \times 10^{-15}$ 米。

测量原子核半径的方法可分为下列三类：

(1) **同核力有关的方法** 在核力范围内，有中子散射、质子散射、或其他如 $\alpha$ 粒子散射等实验。研究这些粒子被原子核散射的情况，可以计算原子核的半径。用散射方法曾获得

$$r_0 = 1.45 \times 10^{-15} \text{ 米.}$$

从不同的考虑也获得

$$r_0 = 1.24 \times 10^{-15} \text{ 米.}$$

从 $\alpha$ 衰变可以算出 $r_0 = 1.5 \times 10^{-15}$ 米，这就不很准确了。



(2) 关于原子核库仑能的方法 这类方法是由原子核结合能中质子的库仑能来计算原子核的大小. 起初由此推得  $r_0 = 1.45 \times 10^{-15}$  米. 后来算出的数值为  $r_0 = 1.28 \times 10^{-15}$  米.

(3) 电的方法 这是关于原子核中电荷分布的问题. 电的规律是比较了解得清楚的, 而且用来探测原子核的物体是电子和  $\mu$  子, 它们对原子核的作用比较单纯, 所以问题的解决比较有把握, 获得的结果应该说是比较准确的. 在这范围内有  $\mu$  原子所发伦琴射线的测量, 从而获得  $r_0 = 1.20 \times 10^{-15}$  米. 霍夫施答特等用高能电子在原子核上散射的方法进行的测量是比较精密的. 所用电子能量在100兆电子伏以上, 有高到900兆电子伏的, 得到的  $r_0$  值对不同的原子核稍有出入, 在  $1.20 \times 10^{-15}$  米到  $1.30 \times 10^{-15}$  米之间, 较重原子核的数值较小. 对  $^{197}\text{Au}$  的测量, 曾获得

$$r_0 = 1.180 \times 10^{-15} \text{ 米.}$$

在电子散射的方法中,  $r_0$  具有这样的意义:  $R = r_0 A^{1/3}$  代表原子核折合成均匀密度的球体的半径. 根据散射实验的推断, 原子核的密度在靠近表面一层是逐渐降低的.

以上提到的各种方法的结果具有相同的数量级, 数值也很接近, 较准确的测量的结果倾向于较小的数值.

由原子核的大小可以计算原子核平均密度. 如果  $M$  是原子核的质量,  $V = \frac{4}{3} \pi R^3$  为原子核的体积, 那么密度就可算出如下:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A} = \frac{3}{4 \pi r_0^3 \frac{A}{M}} = \frac{3}{4 \pi r_0^3 N}, \quad (2.2-2)$$

式中  $N = \frac{A}{M}$  是阿伏伽德罗常数. 对于各种原子核,  $r_0$  也是常数,

足见各种原子核的密度是相同的. 这一点具有重要的意义, 以后