

实验核物理学

第一卷

原子核物理学

[俄] K. H. 穆辛 著



原子能出版社

实验核物理学

第一卷

原子核物理导论

王淦昌 著

科学出版社

实验核物理学

第一卷

原子核物理学

[俄]K. H. 穆辛著

沈志通 殷雄 译
张法通 汲长松

贾致泽 周德邻 审校

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

实验核物理学 第一卷:原子核物理学/沈志通等译.

北京:原子能出版社,1996.12

ISBN 7-5022-1425-9/0571

I. 实… II. 沈… III. ①原子核-物理实验②核物理学

N. 0571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17782 号

内 容 简 介

本书是作者在莫斯科工程物理学院多年讲授核物理课程的基础上写成的,分为两卷。第一卷为《原子核物理学》,主要讨论核物理学中的一些基本问题:稳定核性质、核模型、 α 和 β 衰变、 γ 辐射、粒子和辐射与物质的相互作用、中子物理学和裂变物理学基础以及核反应。第二卷为《基本粒子物理学》,主要讨论基本粒子及其相互作用的性质。研究 NN 相互作用:核力、 μ 核理论;核子结构;轻子、 π 介子、奇异粒子、 Λ 粒子、 Σ 粒子和共振态的性质;反粒子物理学;粒子系统学;量子色动力学基础和弱电相互作用物理学。

本书内容全面,着重概念阐述,可供从事核专业的科研、生产和工程技术人员阅读,了解实验核物理的基础知识;亦可作为高等学校的学生和研究生的参考书。

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, ТОМ I

Физика атомного ядра

К. Н. Мухин

实验核物理学 第一卷

原子核物理学

沈志通 殷雄 等译

©原子能出版社,1996

原子能出版社出版发行

责任编辑:赵守林

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:787×1092mm 1/16 印张 24.25 字数 602 千字

1996 年 12 月北京第 1 版 1996 年 12 月北京第 1 次印刷

印数 1—800

定价:38.00 元

中文版前言

俄罗斯 K. H. 穆辛著《实验核物理学》被广泛用作前苏联高校核物理学教材。1963 年出版了俄文第一版。其俄文第三版曾于 1974 年获前苏联国家奖金。本书是根据 1983 年俄文第四版翻译成的。鉴于懂英文的读者居多,本书中的公式角标、人名注释等都采用了英文。

正如在俄文第四版前言中所述:“作者着重描述核物理学的基本实验,并根据自然规律的对称性阐明了这些实验,同时,也作了一些简单的理论解释。但是,这不能代替严格的理论核物理教程。”

然而,作者认为,结合实验进行基本理论概念的分析,有助于深刻理解被研究现象的物理意义。此外,这种表述方法使本书适于自学。

李国政参加了第一卷的部分翻译工作。陈进贵对书稿进行了审阅并提出宝贵意见,在此表示感谢。

译者

1996 年 9 月

目 录

绪论

第一部分 原子核和放射性辐射的性质

第一章 稳定核和核力的性质

1.1 原子核的质量数 A 和电荷数 Z	10
1.2 原子核和核子的质量	11
1.2.1 质量和能量, 测量单位	11
1.2.2 核质量的测量方法	13
1.2.3 中子质量	17
1.3 相对于全部核子的结合能, 原子核的稳定性	18
1.3.1 比结合能 ϵ , 能量面	19
1.3.2 β 稳定核和核力的性质	20
1.3.3 结合能的其它形式, 一个核子的分离能	25
1.3.4 核子稳定核和核力的性质	26
1.4 原子核的半径	31
1.4.1 从寿命估计 α 放射性核的半径	31
1.4.2 半经验公式的分析, 镜像核的 β 衰变	31
1.4.3 快中子被原子核散射的研究	32
1.4.4 μ 原子发射 X 射线的研究	33
1.4.5 快电子在原子核上散射的测量	34
1.4.6 结果比较	34
1.5 核子与原子核的自旋和磁矩	34
1.5.1 历史背景	34
1.5.2 超精细结构研究	36
1.5.3 用外场测定原子核的自旋和磁矩的方法	38
1.5.4 中子磁矩的测定	43
1.5.5 自旋和磁矩的测定结果, 施密特单核子模型	45
1.6 宇称, 宇称守恒定律	50
1.7 电四极矩	54
1.8 同位旋	58
1.9 本章要点	64

第二章 原子核模型

2.1 液滴模型	66
2.1.1 核的结合能和质量的魏茨泽克(Weizsäcker)半经验公式	67
2.1.2 液滴模型的应用范围	69
2.1.3 假设的超密原子核	71
2.2 独立粒子模型	73

2.2.1 液滴模型的缺陷	73
2.2.2 费米气体模型	73
2.3 壳模型	75
2.3.1 壳模型的实验基础	75
2.3.2 壳模型的建立	76
2.3.3 壳模型的实验结果及其适用性	80
2.3.4 壳模型的缺陷	81
2.4 综合模型	82
2.4.1 非球形势阱中的单粒子态	83
2.4.2 转动态	84
2.4.3 振动能级	85
2.4.4 核内所有核子的振动,巨共振	85
2.4.5 综合模型的适用范围	88
2.5 超流核模型	89
2.6 本章要点	90
第三章 原子核的放射性转变	
3.1 放射性转变的发现和基本规律	93
3.1.1 半衰期	93
3.1.2 放射性衰变规律	94
3.2 α 衰变	97
3.2.1 α 衰变的基本实验结果	97
3.2.2 α 衰变的能量考虑,守恒定律的作用	99
3.2.3 α 衰变机理,隧道效应	104
3.2.4 离心势垒的作用	108
3.2.5 α 衰变理论的基本原则	109
3.2.6 宇称禁戒 α 跃迁	112
3.3 β 衰变	115
3.3.1 β 衰变的三种类型, β 放射性核的性质	115
3.3.2 β 谱的性质和中微子假说	117
3.3.3 中微子存在的实验验证	119
3.3.4 中微子质量	121
3.3.5 β 衰变理论的概念	122
3.3.6 β 衰变中的宇称不守恒和 C 不变性的破坏	130
3.3.7 β 衰变理论的修正	133
3.3.8 中子的 β 衰变,(V-A)型弱相互作用理论	134
3.3.9 同位旋选择定则	138
3.4 核的 γ 辐射	138
3.4.1 γ 跃迁概率与选择定则	140
3.4.2 电子的内转换	142
3.4.3 核的同质异能性	143

3.4.4 穆斯堡尔效应	146
3.4.5 γ 跃迁中宇称的破坏	156
3.5 新型放射性	158
3.5.1 质子放射性	158
3.5.2 双质子放射性	160
3.5.3 中子放射性	161
3.5.4 碳放射性	162
3.6 本章要点	163
第四章 粒子和辐射与物质的相互作用	
4.1 带电粒子、中子、 γ 量子与物质相互作用的一般描述	166
4.2 带电粒子碰撞引起的电离损失	167
4.2.1 玻尔比电离公式, 相对论性效应与密度效应	167
4.2.2 电离损失与介质的关系	170
4.2.3 射程与能量的关系	171
4.3 狄喇克单极子	172
4.4 粒子的弹性散射	174
4.4.1 动量散射图	174
4.4.2 卢瑟福公式	177
4.4.3 莫特公式(基本思想)	179
4.4.4 δ 电子	181
4.4.5 多次散射	182
4.5 电子的辐射损失	184
4.6 同步辐射	186
4.7 契伦科夫辐射	188
4.8 穿越辐射	192
4.9 中子与物质的相互作用	194
4.10 γ 射线与物质的相互作用	195
4.10.1 光电效应	195
4.10.2 γ 射线的散射	198
4.10.3 正负电子对的产生	202
4.10.4 γ 射线与物质相互作用的一般性质	203
4.11 本章要点	204
第二部分 原子核的相互作用	
第五章 核反应的一般规律	
5.1 核反应分类	209
5.2 电荷和重子数守恒定律	210
5.3 能量和动量守恒定律	210
5.3.1 反应能	210
5.3.2 核反应能图, 吸热反应的阈能	211
5.3.3 核反应动量图	214

5.4 角动量守恒定律	215
5.4.1 总论	215
5.4.2 轨道角动量的作用	216
5.5 宇称守恒定律	218
5.6 同位旋守恒定律	219
5.7 本章要点	220
第六章 中子与核的相互作用	
6.1 中子的性质及其产生方法	221
6.2 中子与核相互作用的类型	222
6.2.1 中子的辐射俘获	222
6.2.2 生成质子的反应	222
6.2.3 生成 α 粒子的反应	223
6.2.4 裂变反应	223
6.2.5 两个或更多核子生成的反应	223
6.2.6 中子的非弹性散射	223
6.2.7 中子的弹性散射	224
6.3 研究中子与物质相互作用的基本实验	224
6.3.1 中子的慢化	225
6.3.2 热中子	229
6.3.3 共振中子	230
6.3.4 慢化理论的基本原理	232
6.3.5 热中子的扩散	235
6.4 核反应的玻尔理论	238
6.4.1 复合核	238
6.4.2 复合核能级	239
6.4.3 复合核能量分布的色散性质	241
6.4.4 核反应的截面,布赖特-维格纳公式	242
6.5 中子谱学	246
6.5.1 机械单色器法	247
6.5.2 机械选择器法	248
6.5.3 脉冲加速器法	250
6.5.4 慢中子的晶体衍射或晶体单色器法	251
6.5.5 测量结果	252
6.6 快中子散射	254
6.7 关于核相互作用的光学模型	258
6.8 超冷中子	259
6.8.1 折射率	260
6.8.2 超冷中子的产生及其性质	261
6.8.3 超冷中子的应用	263
6.9 本章要点	265

第七章 原子核裂变

7.1 裂变的发现及其基本性质	267
7.2 关于核裂变的最初实验	268
7.2.1 裂变碎片动能的测量	268
7.2.2 碎片径迹的观察	269
7.2.3 碎片 β 放射性的记录	270
7.2.4 裂变中子的探测	270
7.3 裂变的基本理论	270
7.3.1 裂变能	270
7.3.2 裂变机制	272
7.4 裂变能的利用	275
7.4.1 一次裂变中发射的次级中子的平均数 ν	277
7.4.2 缓发中子	278
7.4.3 裂变截面和链式核反应的实现	279
7.4.4 天然核反应堆	283
7.5 裂变物理中一些补充的问题	284
7.5.1 裂变碎片的性质	284
7.5.2 裂变中子的形成机制和发射时间	286
7.5.3 裂变中子谱	287
7.5.4 裂变中瞬发 γ 量子的发射	289
7.5.5 快粒子裂变及其性质,裂变的不对称性	289
7.5.6 自发裂变,形状同质异能素	291
7.5.7 缓发裂变	295
7.5.8 ν 值的精确数据	296
7.5.9 ν 与裂变碎片质量及动能的关系	298
7.5.10 裂变中的宇称破坏,裂变碎片逃逸的不对称性	298
7.5.11 裂变能量的分布	300
7.6 现代原子动力工程的基本趋势	300
7.7 本章要点	304

第八章 形成超铀元素的核反应

8.1 镎,第一个超铀元素及其研究方法	306
8.2 钚,性质和应用	307
8.3 $Z > 94$ 的超铀元素	308
8.3.1 镅和锔	308
8.3.2 镨和铀	309
8.3.3 镱和镥	309
8.3.4 钷	310
8.3.5 镱,第102号元素	310
8.3.6 镱,第103号元素	313
8.3.7 镱,第104号元素	313

8.3.8 $Z=105-107$ 和 109 的元素	314
8.4 关于超铀元素的一般论述	315
8.5 本章要点	318
第九章 带电轻粒子引起的核反应	
9.1 带电粒子与物质相互作用的某些特点	320
9.1.1 带电粒子与核的库仑相互作用	320
9.1.2 离心势垒的作用	321
9.1.3 带电粒子的电离损失,核反应产额	322
9.2 α 粒子引起的反应	323
9.2.1 (α, p) 反应	324
9.2.2 (α, n) 反应	325
9.3 质子引起的反应	326
9.3.1 质子引起反应的类型	326
9.3.2 质子与锂的反应	328
9.3.3 ${}^6_6\text{C}(p, n){}^4_7\text{N}$ 反应和复合核形成的证据	330
9.3.4 $p+{}^{63}_{29}\text{Cu}$ 和 $\alpha+{}^{60}_{28}\text{Ni}$ 反应中复合核 ${}^{64}_{30}\text{Zn}$ 的形成和衰变	330
9.4 本章要点	331
第十章 直接相互作用反应	
10.1 直接相互作用过程的一般性质	333
10.2 氘核对核的部分穿透过程	334
10.3 $T_d \gg B_c$ 时氘核的削裂反应	337
10.4 $T_d \geq B_c$ 时氘核的削裂反应,巴特勒(Butler)的分析	338
10.5 多核子转移反应,集团	341
10.6 本章要点	342
第十一章 重离子核反应	
11.1 用重离子开展工作的技术	344
11.1.1 $T, \Delta T$ 法和它的应用	345
11.1.2 核的鉴别及其寿命测定的其它方法	345
11.2 重离子反应述评	346
11.3 $T_{\text{ion}} < B_c$ 时重离子与核的相互作用	347
11.3.1 大角动量时的转动谱	347
11.3.2 双核准原子	349
11.4 $T_{\text{ion}} \geq B_c$ 时重离子与核的相互作用	349
11.4.1 离子的弹性散射	350
11.4.2 转移反应	350
11.4.3 全融合反应	350
11.5 相对论性能量的重离子与核的相互作用	351
11.5.1 相对论性离子物理中的问题	351
11.5.2 最初的结果,累积效应	352
11.5.3 反常核	353

11.6 本章要点	354
第十二章 γ 量子引起的核反应	
12.1 γ 量子引起的最简单的核反应	355
12.2 γ 量子引起的质子的直接发射	355
12.3 巨电偶极子共振	356
12.4 本章要点	359
第十三章 热核反应	
13.1 轻核自持聚变的可能性	361
13.2 太阳和氢弹中的热核反应	362
13.3 受控热核聚变问题	365
13.4 本章要点	369
附录	
I 基本公式	369
II 基本常数和单位	371

绪 论

研究原子核结构、性质和转变的核物理学是最现代的分支学科之一。甚至到 19 世纪末,原子核也还未被发现。所以那时人们认为原子是组成物质最小的不可分的粒子。1895 年阴极射线和 X 射线以及 1896 年天然放射性的发现说明,所有元素的原子结构均具有某些共性。例如,所有元素都含有在一定条件下发射出来的电子,最重的一些元素则具有 α 、 β 和 γ 放射性。

根据英国物理学家汤姆逊于 1904 年提出的第一个原子模型,原子是一个半径为 10^{-8}cm 的带正电的球体,其电子散布在其中。这个模型似乎多少还令人满意。但 1909 年发现,这个模型与 α 粒子被金属薄膜散射的实验结果相矛盾。这些实验观察到,除了对应于 α 粒子与汤姆逊原子的库仑相互作用的小角度散射外,还有一些大于 90 度角的大角度散射。汤姆逊模型完全不适于解释这种散射。

1911 年卢瑟福提出了一个新的原子模型。根据这个模型,原子是由一个半径非常小(约 10^{-12}cm)的带正电的居于中心位置的原子核和分布在距它很远的核外空间(约 10^{-8}cm)的电子组成。由于电子的质量很小,原子的全部质量实际上集中在原子核里。

原子的核式结构模型极好地解释了 α 散射实验的结果,而且是在探索和认识物质结构方面的一次巨大的飞跃。可以认为,创立原子的核式结构模型之年便是核物理学诞生之时。但是,这种核式结构模型有很大的缺点。问题在于,原子是一个长寿命的稳定系统,任何一个自认为正确描述原子结构的模型,其本身必须是稳定的。例如,汤姆逊模型的稳定性就是由电子之间的相互排斥力和带正电球体对它们的吸引力相平衡来确保的。原子的核式模型在结构上使人联想起太阳系的稳定性。众所周知,万有引力和离心力的平衡确保太阳系的稳定性。如果我们假设电子是以这样的距离和速度绕原子核旋转的,致使其离心力和原子核对其产生的库仑吸引力相平衡并阻止电子落到原子核里,那么,在原子的核模型里就会发生上述类似情形。但是,这个结论是不对的。因为根据电动力学定律,任何被加速的电荷(包括电子)围绕原子核做匀速圆周运动,必定以辐射方式损失能量。因而,系统能量必然减少,而且电子将逐渐接近原子核,直到落在上面。电子围绕原子核旋转的频率将不断变化,而且原子辐射频率也同样变化。显而易见,原子的核式模型与原子的稳定性和原子能谱的不连续性这两个最重要的结果相矛盾。

为了克服这些困难,丹麦物理学家 N. 玻尔于 1913 年提出了一个新理论,即原子过程的量子论。玻尔假定,原子中存在稳定的电子轨道,其角动量为定值,是普朗克常数($h=1.05\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$)的整数倍:

$$m_e v r = n \hbar$$

式中 m_e 为电子质量, v 为电子速度, r 为轨道半径, n 为整数。

每一个轨道与原子核的距离都是一定的($r_n = n^2 \hbar^2 / Z m_e e^2$, Z 为原子核电荷)并以一定的原子能量状态来表示其特征: $E_n = -(Z^2 e^4 m_e / 2 \hbar^2) \times (1/n^2)$ 。半径最小的轨道相应于最低能量,称为 K 轨道。其后依次称为 L 、 M ……轨道。当电子在这些轨道上运动时,原子处于稳定状态。原子辐射或吸收总是由于电子从一个轨道向另一个轨道的跃迁而引起。其辐射频率和参与跃迁的两个状态的能量之差一一相应:

$$\Delta E = h\nu$$

式中 $h = 2\pi\hbar$ 。

在基于这些假设的简单计算的帮助下,玻尔便可以从理论上获得光谱规律和里得伯常数
值。

后来,玻尔理论又得以改进和完善:考虑了原子核是围绕着公共质心做运动;以处在十分
确定的平面里的椭圆轨道取代圆形轨道。所有这些都有助于更好地理解原子光谱,特别是可以
解释正常塞曼效应。

玻尔在提出著名的假设后,他迈出了非常有胆略的一步,抛弃了占主导地位的经典概念,
从而正确地描述了原子的内部过程。然而,玻尔理论本身仍然留有一定困难。例如,不清楚为
什么描述原子过程必须放弃经典概念。

这些困难只是在1926年海森堡和薛定谔提出全新的方法来描述微观现象时才得以克服。
这个方法称为量子力学。根据量子力学理论,由于一个粒子的位置和速度不能同时确定的基本
事实,电子和其它粒子的轨道是不能精确测定的。

旧的原子模型被新的模型所代替。根据这个新模型,原子中电子位置是不能准确测定的。
但波函数即波动方程的解则给出电子位置的概率。量子力学不仅证实了玻尔理论的全部结果,
而且也解释了为什么处于稳定态的原子不辐射能量。它还能计算出谱线的强度。此外,量子力
学解释了电子衍射,从经典物理学观点来看,这是完全不可理解的现象。

随后,量子力学也用来解释原子核过程。例如,伽莫夫及其合作者于1928年研究出关于 α
衰变的量子力学理论。

1919年有两项重要发现。阿斯顿研制出质谱仪,原子质量得以精确测定。这就导致了同位
素的发现。卢瑟福继续其 α 粒子散射实验,他发现了氮原子核破裂,并同时放出带正电的粒子,
其电荷为 $+e$,其质量等于氢的最轻同位素质量($1836.1m_e$)。用快速 α 粒子轰击其它材料来重
复这项实验,几乎在所有情况下构成这些材料的原子核均释放氢原子核。于是便证明,原子核
含有最简单的氢核,称为质子(p)。

质子的发现导致了一个比较简单模型的建立,按照这个模型,原子核由质子和电子组成。
假设原子核含 A 个质子和 $(A-Z)$ 个电子,同时, Z 个电子在距原子核约 10^{-8}cm 处围绕它旋转。
这个模型为元素的原子质量正比于质量数 A 而核电荷正比于原子序数 Z 这一事实提供了一个
自然的解释。然而,原子核里含有电子的假定造成了难以克服的理论困难:根据这个模型,原
子核的性质就不可能与组成它们的粒子性质有关。

众所周知,除了电荷与质量外,还可以用其它性质来描述基本粒子的特征,例如,固有角动
量(自旋),它以 $\hbar$ 为单位,以及磁矩等。

由于基本粒子如电子具有固有角动量和磁矩,就可以把它们描述为围绕其轴旋转的带电
陀螺。所不同的是,经典陀螺可具有任意角动量值,而电子自旋只能有一个值,即 $\hbar/2$ 。电子磁
矩也只有一个值。 $M_B = e\hbar/2m_e C = 9.27 \times 10^{-24} \text{A} \cdot \text{m}^2 (9.27 \times 10^{-21} \text{erg/G})$,称为玻尔磁子。电
子磁矩为负值,就是说,其方向与自旋方向相反。

1925年人们为了解释原子辐射的精细结构而引入电子自旋的概念。后来,为了解释光谱
的超精细结构,又假设原子核具有自旋和磁矩。超精细劈裂非常小,所以,原子核的磁矩应比电
子磁矩小约3个数量级。

后来的测量发现,最简单的原子核即质子的自旋为 $\hbar/2$,其正磁矩为 $2.79 \mu_B [\mu_B = e\hbar/2m_p C$
 $= M_B/1836 = 5.05 \times 10^{-27} \text{A} \cdot \text{m}^2 (5.05 \times 10^{-24} \text{erg/G})]$,约为电子磁矩的 $1/650$ 。其它原子核磁
矩的测量表明,其绝对值接近质子磁矩,而与电子磁矩差别比较大。这是反对电子-质子模型的
重要论据。原子核的自旋值也说明,这种模型是不正确的。例如,按照这个模型,氦核应该由两

个质子和一个电子组成,它只能有半整数自旋($\hbar/2$ 或 $3\hbar/2$)。但是,氘核自旋的实验值是 $\hbar$ 。基于这个以及另外一些论据,原子核内显然是无电子的。然而,原子核不可能只由质子组成,否则, A 总是要等于 Z 的。所以,必定存在某些新粒子,与质子共同组成原子核。不久便发现了这种粒子。

1930 年,波特(Bothe)和贝克尔(Becker)在继续进行卢瑟福的实验时发现,某些轻元素(Be, Li)被 α 粒子轰击时所放出的不是质子,而是很不容易被铅吸收的一种辐射。1932 年, I. 约里奥-居里和 F. 约里奥-居里证实,这种新的辐射从轻元素里打出反冲核。人们很自然地会认为,这种辐射就是高能 γ 量子。但是,为了把在铅内的吸收和产生反冲核这两个实验结果关联起来,就必须规定 γ 量子所具有的能量和动量高于用 α 粒子轰击轻核所得到的相应数值。

1932 年,恰德维克克服了这些困难,他利用能量和动量守恒定律分析了氮的生成以及这种新的辐射产生氢反冲核的实验结果。恰德维克得出了结论,这种新的辐射是具有近似等于质子质量的中性粒子束流,称为中子 n^* 。中子质量的精确值是根据产生和吸收中子的核反应能量平衡测定出来的, $m_n = 1838.6m_e$ 。这样,中子比质子重 $2.5m_e$,比质子和电子质量之和重 $1.5m_e$ 。根据著名的质能关系, M 千克质量相应的能量为 Mc^2 焦耳, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光速。静止的粒子具有最小能量,称为静止能量。因为中子静止能量大于质子和电子静止能量之和,因此,从能量观点来说,中子衰变为质子和电子是可能的。1950 年,苏联物理学家斯皮瓦克(Spivak)和索斯洛夫斯基(Sosrovskii)、加拿大物理学家罗布森(Robson)和美国物理学家斯尼尔(Snell)观察到了这种衰变。

因此,中子是一种不稳定的基本粒子的一个实例。目前估计,其半衰期约 10 min。自旋和磁矩测量发现,同质子和电子一样,中子自旋为 $\hbar/2$,而磁矩为负值,比电子磁矩约小 3 个数量级($\mu_n = -1.91 \mu_B$)。

发现中子后不久,加朋(Gapon)和伊万宁柯(Ivanenko)及德国物理学家海森伯提出了关于原子核由质子和中子组成的假说。这个模型完全消除了质子-电子模型所涉及到的困难,并得到了普遍承认。

根据这个模型,所有原子核均含有两种基本粒子,或者说两种核子,即质子和中子。(目前已知存在的原子核约 2000 多种,其中包括人工获得的)。不同原子核的区别在于组成它们的质子和中子数目不同。 β 稳定核所含质子和中子数的比例是相当确定的。

例如,轻原子核(${}^4_2\text{He}$, ${}^3_3\text{Li}$, ${}^9_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$ 和 ${}^{14}_7\text{N}$ 等)的质子数 Z 和中子数 $(A-Z)$ 相等或近似相等。重原子核(${}^{208}_{82}\text{Pb}$, ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$)所含中子数约为质子数的 1.5 倍。

重核内的中子过剩,可用质子之间的库仑排斥作用来解释。对于 β 稳定核, Z 和 A 的关系可用下列经验公式描述:

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

人们发现,不符合这一关系式的原子核具有 β 放射性;丰中子原子核发射电子,而丰质子原子核发射正电子,即带正电荷的电子。1928 年,狄刺克根据对电子的相对论性量子力学方程的分析,预言存在正电子。1932 年安德逊(Anderson)用放置在磁场里的威尔逊云室研究宇宙射线时探测到了正电子。1934 年 I. 约里奥-居里和 F. 约里奥-居里在实验室条件下首先探测到

* 卢瑟福预言了中子(和氘核)的存在。他认为,除了只含一个质子而无电子的原子核(氢核只含一个质子)外,必定存在含有一个质子和一个电子的原子核(即中子),以及含有两个质子和一个电子的原子核(即氘核)。

正电子,当他们用 α 粒子轰击轻核时,发现了人工正电子放射性。同年不久,费米用中子轰击原子核时发现了人工电子放射性。

1931年泡利预言还存在另一种粒子,叫做中微子 ν 。这是一种中性粒子,其自旋为 $\hbar/2$,质量比电子质量小得多(或者说,0质量)。从 β 衰变过程中的能量关系来考虑,就必然存在这种粒子。中微子必定与电子或正电子一起放出来,以确保在这一过程中能量和角动量守恒。出于同样原因,中子衰变也伴随中微子辐射(更准确地说,是反中微子 $\bar{\nu}$),因此,可用下列形式表示:

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

由于其性质特殊($x=0, m=0, \mu \approx 0$),中微子非常难以探测。因此,在很长时间里,科学家们仅仅占有该粒子存在的间接证据。直到1953年,瑞尼斯(Reines)和柯万(Cowan)才安排了直接探测中微子的实验。

1938年,阿瓦雷兹发现了一种非常有趣的放射性,这就是所谓的 e 俘获,即原子核从其原子的电子壳层(通常是K层)。里俘获电子的过程。同 β 衰变一样, e 俘获伴随着中微子的辐射。

实际上,稳定的和放射性的原子核数目非常大,而且,随着已知元素的新同位素的发现和新元素的合成,其数目还在继续增长。例如,1976年在苏联合成了元素 $Z=107$,1982年在联邦德国合成了元素 $Z=109$ 。人们正在继续努力获得原子序数 Z 更高的元素。

中子的发现及其与物质相互作用的研究使核物理学获得了一项最重大的成就。1938年哈恩(Hahn)和斯特劳曼(Strassmann)发现,当用中子轰击铀时,其原子核分裂成质量近于相等的两部分(裂变碎片)。后来还发现,裂变伴随着次级中子的发射和大量能量的释放。这些次级中子原则上可继续使新的铀原子核发生裂变,继而放出更多的中子,以此继续下去。这就引起了链式反应的可能性,并且伴随着巨大能量的释放。

1942年12月,在意大利物理学家费米的指导下,第一座反应堆在美国启动。四年后,苏联也独立地获得了这一成就;1946年12月25日,欧亚地区第一座反应堆在莫斯科启动。

目前,在许多国家里,原子能广泛用于国民经济。今后要解决的课题是利用蕴藏在像氢、氘和氚等轻核内的而不是重核内的更巨大的能量。从能量观点分析,重核裂变过程是有利的。与重核不同,对轻核的结构说来,则是聚合过程或聚变更有利。这一过程伴随着热核能量的释放。轻核聚变反应的研究已经取得了完全肯定的结果:那就是在氢弹爆炸时瞬时释放热核能量。

轻核受控聚变反应提出的更加复杂的难题至今尚未解决。然而,对这一课题广泛的实验和理论研究及其进展现状给人们以希望。本世纪末或至迟下世纪初,这一难题将得以解决。

30年代初产生了一个核物理学的一个非常重要分支。此时,范德格喇夫发明了静电产生器。劳伦斯设计了回旋加速器,同时考克饶夫特(Cockroft)和瓦尔顿(Walton)设计了级联加速管。1932年,考克饶夫特和瓦尔顿首次观察到锂核在加速的核子(质子)的轰击下发生裂变。这就为物理学家们提供了用以转变原子核的强有力工具。加速器技术继续进步,导致产生加速的电子、 μ 核、 α 粒子,甚至更重元素的离子,如氮、氧、氟、钛和铬等。

1944年,苏联科学家维克斯勒(Veksler)和1945年美国物理学家麦克米伦(McMillan)分别独立发现的相位稳定性使得加速能量大大提高。最初,能量达到几百兆电子伏的质子加速器在苏联和其它国家建成。后来,加速能量提高到几千兆电子伏。1957年杜布纳联合核子研究所建成了10BeV质子加速器,瑞士和美国分别于1959年底和1960年安装了30BeV加速器。

1967年10月在苏联谢尔普霍夫附近一台能量为76BeV的质子加速器启动。1972年在美国巴达维亚建成了200BeV的加速器,改进后,这台加速器能量增加到400 BeV,后来达到

500BeV。1976年在瑞士建成一台能量为400BeV的相类似的加速器。在加速其它粒子方面,也取得了显著进步。1970年,为了把由氘至氮离子的加速能量提高到5BeV/核子,对杜布纳加速器做了改进。1974年在美国伯克利建造的Bevalac加速器已能把氧离子加速到2BeV/核子而铁离子到1.8BeV/核子。在几个国家里(其中包括苏联),相继建成了能量为6BeV或更高的电子加速器(美国斯坦福加速器的能量为21BeV)。

以电子-电子和电子-正电子碰撞束为原理的加速器也建造成功。1971年,在瑞士建成了一台 $2 \times 31\text{BeV}$ 的加速器,其两束质子可进行对头碰撞。在美国布鲁克海文建造了一台加速器,其能量已达到 $1 \times 400\text{BeV}$ 。1981年在瑞士的欧洲核子研究中心建造了 $2 \times 270\text{BeV}$ 质子-反质子碰撞束加速器。后来,能量提高到 $2 \times 450\text{BeV}$ 。

在加速质子的技术发展的同时,从加速器里引出质子并利用其在次级过程中获得新粒子的各种方法也发展起来了。现在,这些方法正用于获得快中子、反质子、反氦核、 π 介子、 k 介子、 γ 光子、 μ 子、中微子和其它粒子。

加速器技术领域里的进步使科学家们得以着手解决核物理学中最复杂的课题,即核力问题。由中子和质子组成的稳定核的存在说明,质子之间除了库仑排斥力之外,在任何一对核子之间,必定存在着很强的核吸引力。

研究一个核子被另一个核子散射可获得两核子相互作用的信息。以各种能量的质子和中子进行了这类实验。用中能质子和中子进行的散射实验表明,核力范围非常小,约为 10^{-13}cm 。实验还表明,核力依赖于粒子的自旋,在相同条件下,($n-p$)、($p-p$)和($n-n$)的相互作用力是相等的(即核力的电荷无关原理)。

核力的一些很重要的性质是从能量大于 100MeV 的高能($n-p$)和($p-p$)散射角分布和能量分布的分析中得到的。特别是对($n-p$)相互作用中中子散射角分布的分析表明,朝前散射的质子数目太大,如不就其相互作用机制作出补充的假设,而仅用能量和角动量守恒定律是解释不了的。然而,假设中子和质子在相互作用过程中交换电荷,便可解释这一实验结果。相互作用过程中快中子从质子里“获取”电荷变为质子,并继续朝前运动(在相互作用期间其运动方向稍有偏转之后),这就是与通常的核相互作用同时发生的电荷交换相互作用。

可以很自然地假设,电荷交换涉及到由一个核子向另一个核子交换某些粒子,即核场量子。这种假设是1934年苏联物理学家塔姆为解释核力性质而提出的。然而,他还指出,当时已知的轻粒子即电子和中微子不能作为核力场量子。

1935年,日本物理学家汤川发展了塔姆的思想,他指出,假设相互作用过程中核子之间交换质量为 $(200 \sim 300)m_e$ 的中性或带电粒子,便可解释核力的短程特性和其它性质。要使这些粒子能够作为核量子或核力的载体,它们必须具有参加核强相互作用的活跃性,就是说,这些核量子在核子-核子碰撞中必须大量产生并被原子核强烈吸收。

μ 子是在1938年研究宇宙射线成分时发现的,其质量为 $207m_e$,寿命约 $2 \times 10^{-6}\text{s}$ 。研究其性质发现,它是一种不积极参加核作用的粒子,因此,它不可能是核量子。 μ 子不积极加强相互作用而且寿命又短,致使预言在宇宙射线中一定存在一种更重的粒子,即 π 介子。1947年,鲍威尔(Powell)确实发现了这种粒子。分析 π 介子的性质得知,其存在形式有 π^+ 、 π^- 和 π^0 介子,质量为 $273m_e$,自旋为0,寿命约 10^{-8}s^* 。人们发现,它们非常强烈地与物质发生相互作用。因此,在加速器里大量地产生 π 介子是可能的。并且,人们研究了它们在不同能量下同原子核

* π^0 介子寿命约 10^{-8}s ,其质量约等于 $264m_e$ 。