

薛晓舟 编

粒子物理初步

本

粒子物理初步

薛晓舟编

29528

粒子物理初步

薛晓舟 编

责任编辑 马文翰

河南科学技术出版社出版

河南省虞城县印刷厂印刷

河南省新华书店发行

787×1092毫米32开本 7.125印张 138千字

1983年9月第1版 1983年9月第1次印刷

印数：1—4,000册

统一书号13245·17 定价0.68元

内 容 提 要

本书共分六章：第一章介绍了粒子物理学的概貌；第二章介绍了研究基本粒子的实验方法；第三章讨论了基本粒子的各种性质；第四章给出了量子场论的基本概念；第五章叙述了强子结构方面的问题；第六章展望了物质结构的统一和相互作用的统一中的一些动向。本书概念清楚，立论准确，可供物理学爱好者、自学青年、中学物理教师阅读或进修使用。

写在前面

粒子物理学是基本粒子物理学的简称，它的任务是研究基本粒子的内部结构及其相互作用、相互转化的规律。粒子物理学是在本世纪五十年代初期逐渐发展成为一门独立学科的。它是人们长期以来探讨物质微观结构的自然继续，是原子物理学、原子核物理学的深入发展，是当今物理学基础研究的主要前沿阵地。目前粒子物理学还没有达到成熟的地步，不少问题有待于人们去探索和解决。在粒子物理学领域中将要取得的突破性进展，不仅会给物理学的基本概念和基本思想带来深刻的变化，而且对于在生产实践中利用新能源方面，也将展示出一幅令人鼓舞的广阔前景；同时由于粒子物理学对于物质基本结构、真空的物理性质、夸克禁闭及粒子运动规律的对称性、解析性等的研究，必将大大丰富辩证唯物主义哲学的内容，有力地促进唯物论和辩证法的发展。

本书主要内容共有六章：第一章介绍了粒子物理学的面貌；第二章介绍了研究基本粒子的实验方法；第三章讨论了基本粒子的各种性质；第四章给出了量子场论的基本概念；第五章叙述了强子结构方面的问题；第六章展望了物质结构

14286/10

的统一和相互作用的统一研究中的一些动向。

本书主要是为具有高中文化程度的自学青年、大专低年级学生以及中学物理教师和科技人员等而编写的一本较浅显易懂的入门读物。因此在内容上侧重于物理概念方面的叙述，避免艰深的数学推导，竭力采取简单的数学方法，以便读者学习。

感谢华东师范大学胡瑶光教授在百忙中审阅了全稿，提出许多宝贵意见。感谢研究生张新民同志在炎热的暑假仔细地校正了原稿中的数据 and 公式。

编 者

1982年8月

目 录

第一章	粒子物理学概貌	(1)
§1-1	粒子的种类	(1)
§1-2	粒子的相互作用	(6)
§1-3	强子结构	(9)
§1-4	基本粒子研究的重要意义	(12)
第二章	基本粒子研究的实验工具	(16)
§2-1	高能加速器	(17)
§2-2	宇宙线	(41)
§2-3	高能探测器	(46)
§2-4	高能实验物理学新成果的应用	(62)
第三章	基本粒子的主要实验事实	(66)
§3-1	基本粒子的性质	(66)
§3-2	基本粒子的守恒定律	(82)
§3-3	共振粒子	(98)
§3-4	强子八重态对称性	(104)
第四章	量子场论的基本概念	(108)
§4-1	电磁场的量子化	(109)

§4—2	电子场的量子化	(113)
§4—3	电磁相互作用与虚光子.....	(121)
§4—4	量子电动力学	(127)
§4—5	弱相互作用理论	(138)
§4—6	温伯格—萨拉姆弱电统一规范模型	(143)
§4—7	核力强相互作用	(158)
第五章	强子结构	(171)
§5—1	强子具有内部结构的实验事实	(172)
§5—2	强子结构的夸克模型	(177)
§5—3	部分子模型	(193)
§5—4	量子色动力学	(198)
第六章	物质结构的统一和相互作用的统一	(212)
§6—1	轻子和夸克	(212)
§6—2	四种基本作用	(217)

第一章

粒子物理学概貌

基本粒子物理学，通常简称为粒子物理学。它是在本世纪五十年代初期，逐渐发展成为一门独立的学科。粒子物理学的任务，就是研究基本粒子的内部结构及其相互作用的规律性。由于大多数基本粒子只有在高能量碰撞的条件下才能产生和观测到，所以粒子物理学又称为高能物理学。在这一章中，我们分四个问题来简短地说明一下粒子物理学概貌。

§1-1 粒子的种类

什么叫做基本粒子？为了回答这个问题，就必须从人们认识物质微观结构的发展过程来加以说明。在粒子物理学建立以前，人们认识物质微观结构的历史，经历了原子结构和原子核结构两个阶段，也就是说，由原子阶层深入到原子核阶层。

我们知道，通常物质是由原子组成的，但原子并不是没有内部结构的。1897年，汤姆孙在研究阴极射线中发现了电

子的存在；后来人们精确地测定了电子的质量 m_e 和电量 Q_e ：

$$\begin{aligned} m_e &= 9.1 \times 10^{-28} \text{克} = 0.5110034 \text{兆电子伏}, \\ Q_e &= -4.8 \times 10^{-10} \text{静电单位}. \end{aligned} \quad (1-1)$$

两电子的自旋 S_e 为：

$$S_e = \frac{1}{2} \hbar.$$

式中，一兆电子伏 $= 1.60324 \times 10^{-6}$ 尔格， \hbar 是普朗克常量。其值为：

$$\begin{aligned} \hbar &= 1.054588 \times 10^{-27} \text{尔格} \cdot \text{秒} \\ &= 6.582173 \times 10^{-22} \text{兆电子伏} \cdot \text{秒}. \end{aligned}$$

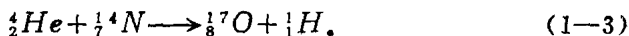
1911年，卢瑟福发现 α 粒子穿透薄金属箔时产生大角度散射，从而肯定了原子核的存在，这就得到了原子是由电子和原子核构成的概念。

对于光来说，1905年，爱因斯坦提出了光是由一份一份光子组成的观点。光子能量为：

$$\varepsilon = \hbar \omega. \quad (1-2)$$

式中 ω 是光的圆频率，它等于 $2\pi\nu$ ，而 ν 是光的频率。根据光子的概念，爱因斯坦成功地解释了光电效应。由于光波实际上就是电磁场的波动，这就肯定了电磁场是由光子组成的。

那么原子核是不是也具有内部结构呢？1919年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮核，发现下列核反应：



式中 ${}_1^1\text{H}$ 是氢原子核，称为质子，用符号 p 来代表。经过精

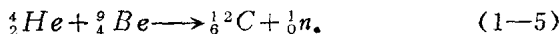
测定，质子的质量 m_p 和电量 Q_p 分别为：

$$\begin{aligned} m_p &= 1.67252 \times 10^{-24} \text{克} = 938.2796 \text{兆电子伏} \\ &\sim 1836 m_e, \\ Q_p &= +4.8 \times 10^{-10} \text{静电单位}. \end{aligned} \quad (1-4)$$

而自旋 S_p 为：

$$S_p = \frac{1}{2} \hbar.$$

这说明质子是原子核的组成成分。1932年，查德威克用 α 粒子轰击铍核，发现下列核反应：



式中 ${}^1_0\text{n}$ 不带电量，称为中子，用符号 n 来代表。经过精确测定，中子的质量 m_n 和电量 Q_n 分别为：

$$\begin{aligned} m_n &= 1.67472 \times 10^{-24} \text{克} = 939.5731 \text{兆电子伏} \\ &> m_p, \\ Q_n &= 0. \end{aligned} \quad (1-6)$$

而自旋 S_n 为：

$$S_n = \frac{1}{2} \hbar.$$

值得指出的是：中子为一种不稳定的粒子，其平均寿命为：

$$\tau = (0.918 \pm 0.014) \times 10^3 \text{秒}. \quad (1-7)$$

这说明中子也是原子核的组成成分。质子和中子都是构成原子核的粒子，人们统称之为核子。接着海森伯、伊凡宁柯提出了原子核是由质子和中子构成的模型。

这样到1932年，人们对物质微观结构的认识，已经经历

了两个阶段。其结论是：所有物质都是由电子、质子、中子和光子组成的。当时不少人认为这些粒子是构成物质原始的、简单的成分，是不能再分的，因此把它们称为基本粒子。

“基本”一词来源于英文elementary，意即始原、简单。当然，今天我们已经知道：质子、中子同样是具有内部结构的。正如费米的明智见解一样，“基本”这个术语，与其说表征粒子的性质，倒不如说是表征我们对于这些粒子的知识水平。

在四十年代末期，发现了一类所谓的奇异粒子，如 K 介子、 Λ 超子、 Σ 超子、 Ξ 超子等。在五十年代末到六十年代初，由于高能加速器的建成以及探测技术的迅速发展，除了发现两类中微子 ν_e 及 ν_μ 外，还发现有200多种平均寿命只有 10^{-23} 秒左右的基本粒子，如 $\Delta(1232)$ 、 $\Lambda(1520)$ ，等等。括号中的数字是粒子静止质量的兆电子伏数，这些粒子称为共振粒子。1974年以来，人们又发现了质量为质子质量三倍多，而寿命却比通常介子长约 10^3 倍的新介子 $J/\psi(3100)$ 和 $\psi(3685)$ ，还发现了其它一些重介子如 $D^{\pm}(1870)$ 、 $r(9460)$ 等。这些被称为新粒子的发现，为探讨基本粒子的内部结构提供了丰富的实验材料。此外，重轻子 $\tau^{\pm}(1784)$ 也是近年来的重大发现之一，它为研究轻子的结构和建立正确的弱电统一理论提供了新的线索。

现今，实验上发现的基本粒子已经有三百多种。根据它们的性质不同，可概括为：

普通粒子：光子(γ)、电子(e)、正电子、(e^+)、 μ 子(μ^+ 、 μ^-)、中微子、(ν_e 、 ν_μ)、反中微子($\bar{\nu}_e$ 、 $\bar{\nu}_\mu$)、重轻子

(τ^+ , τ^-)、 π 介子(π^+ , π^- , π^0)、质子(p)、反质子(\bar{p})、中子(n)、反中子(\bar{n})等。这里的“-”表示反粒子的意思,例如 \bar{p} 是质子的反粒子,称为反质子。

奇异粒子: K 介子(K^+ , K^- , K^0 , \bar{K}^0)、 Λ 超子(Λ^0)、 Σ 超子(Σ^+ , Σ^- , Σ^0)、 Ξ^- 超子(Ξ^- , Ξ^0)、 Ω 超子(Ω^-)等。

共振粒子: $\rho(770)$ 、 $\omega(783)$ 、 $\eta'(958)$ 、 $\delta(980)$ 、 $K^*(892)$ 、 $f(1270)$ 、 $K^*(1430)$ 、 $N(1470)$ 、 $\Lambda(1232)$ 、 $\Lambda(1520)$ 、 $\Sigma(1385)$ 、 $\Xi(1530)$ 等。

新粒子: $J/\psi(3100)$ 、 $\psi(3685)$ 、 $D^{\pm}(1870)$ 、 $D^*(2010)$ 、 $F(2030)$ 、 $F^*(2140)$ 、 $\Lambda_c^{\pm}(2260)$ 、 $\Sigma_c(2930)$ 、 $T(9460)$ 等。

普通粒子和奇异粒子在历史上根据静止质量大小,把它们分为四类:

(1) 光子: 质量为零。

(2) 轻子: 质量比较小的有:

$$e^+, e^-, \mu^+, \mu^-, \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu.$$

(3) 介子: 质量介于轻子和质子之间的有:

$$\pi^+, \pi^-, \pi^0, K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0.$$

(4) 重子: 质量 \geq 质子质量的有:

$$p, \bar{p}, n, \bar{n}, \Lambda^0, \Sigma^0, \bar{\Sigma}^0, \Sigma^+, \bar{\Sigma}^+, \Sigma^-, \bar{\Sigma}^-, \Xi^0, \bar{\Xi}^0, \Xi^-, \bar{\Xi}^-, \Omega^-, \bar{\Omega}^-.$$

在重子中,质量超过中子质量的粒子,称为超子。值得指出:如果把重轻子、共振粒子、新粒子也考虑在内,轻子、介子、重子这些名称,就应作新的理解,虽然在历史上,它们是由粒子质量的大小来命名的。

§1-2 粒子的相互作用

任何一种基本粒子都不是孤立的，粒子与粒子间存在着多种多样的联系，这些联系具体地表现为各种相互作用。

粒子间的相互作用，目前主要有三种：

1. 电磁相互作用

这是一切带电粒子或具有磁矩粒子间的相互作用。这种作用人们研究得比较透彻。绝大多数基本粒子都带有电荷，不过有的带正电荷，有的带负电荷。有些基本粒子虽然不带电，但是却有磁性，能够激发磁场，它们也参与电磁相互作用。电磁作用是一种长程力，它是以电磁场为媒介来传递的。电磁场是由光子组成的，光子就是一种基本粒子，因此电磁作用实质上是通过带电粒子间的光子交换而实现的。

反映粒子电磁相互作用规律性的理论是量子电动力学(QED)。

2. 弱相互作用

原子核的 β 衰变即放射电子，实质上就是中子衰变为质子、电子及电子反中微子的过程：



这种过程是由一种相互作用而引起的。由于这种作用比电磁

作用弱得多，故称弱相互作用。弱作用是一种短程力，实际上除光子、胶子外，所有基本粒子都参与这种相互作用。寿命在 10^{-10} 秒以上的不稳定粒子的衰变，即属于这类相互作用。例如：

$$\begin{aligned}
 \mu^\pm &\longrightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}, \\
 \pi^\pm &\longrightarrow \mu^\pm + \nu, \\
 K^\pm &\longrightarrow \mu^\pm + \nu, \quad \pi^\pm + \pi^0, \\
 K &\longrightarrow \pi^+ + \pi^-, \\
 \Lambda^0 &\longrightarrow p + \pi^-, \\
 \Xi^- &\longrightarrow \Lambda + \pi^-, \\
 \Sigma^\pm &\longrightarrow n + \pi^\pm.
 \end{aligned}
 \tag{1-9}$$

反映弱相互作用或弱作用与电磁作用统一的规律性理论的是量子味动力学(QFD)。

3. 强相互作用

这类作用只存在于重子和介子之间。例如 π 介子和质子的散射：

$$\pi^+ + p \longrightarrow \pi^+ + p.
 \tag{1-10}$$

因为它比电磁作用强得多，所以称为强相互作用。核子间的相互作用、超子和介子的产生以及重子和介子的激发态衰变，都属于这一类型。强相互作用也是一种短程力。

反映强相互作用规律性的理论，目前最有希望的是量子色动力学(QCD)。

强、弱、电三种相互作用的区别，可以从多方面表现出

来:

(1) 三种相互作用强弱的相对强度不同

若取表示电磁作用强度的量为 $\frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ 。式中 e 是电子的电量, \hbar 是普朗克常量, c 是真空中光的速度。那么强作用为 $1 \sim 15$, 弱作用为 10^{-10} 。于是强作用、电磁作用和弱作用, 三者强弱之比约为 $1:10^{-2}:10^{-10}$ 。

(2) 三种相互作用所引起的粒子反应和转化过程的迅速程度不同

强作用过程进行的时间约为 10^{-23} 秒, 这是核作用及 K 介子或超子产生的作用时间, 约为快速粒子穿过一个粒子的时间。电磁作用过程约为 $10^{-19} \sim 10^{-12}$ 秒, 弱作用约为 $10^{-10} \sim 10^{-8}$ 秒, 这是基态 K 介子或超子的平均寿命。

(3) 三种相互作用的力程长短不同

电磁作用的作用距离为 ∞ , 系长程力。强作用的作用距离约为 10^{-13} 厘米。弱作用的作用距离 $< 10^{-15}$ 厘米。强作用和弱作用都系短程力。

实际上基本粒子间除去上述三种作用外, 还存在着引力作用。由于引力作用的数量级为 10^{-40} , 比弱作用还小 30 个数量级, 所以在基本粒子领域中, 通常是可以忽略不计的。

目前讨论强、弱、电三种相互作用统一的理论, 称为大统一理论(GUT)。

把粒子间相互作用的种类弄清楚之后, 我们可以根据它们所参与的相互作用, 把现今所发现的粒子重新加以分类:

①光子是只参与电磁作用的粒子。

②轻子不参与强作用，但参与弱作用的粒子，均称为轻子。

注意：这里不是按质量大小来确定的，尽管式中有些粒子质量是较小的，但是对于 τ 轻子，其质量为 1784Mev ，显然已比质子质量大得多。正因为如此， τ 轻子又称重轻子。

③强子是参与强作用的粒子。在已发现的基本粒子中，除去光子和轻子以外的所有粒子都是强子。在强子中，自旋为整数的粒子称为介子；自旋为半整数的粒子称为重子。这就是说，强子中包括介子和重子。

根据介子和重子的这个定义，显然介子的质量可以比质子的质量大。例如 J/ψ 粒子，其质量为 3095Mev ；但由于其自旋为1，所以它是介子，而不是重子。

值得指出的是：目前人们所说的轻子、介子和重子，已经不是按照质量大小来分的，而是依据参与的相互作用而命名的。当然这些名称的由来，在历史上则是按照质量大小而加以命名的。

现在我们把一些稳定的基本粒子列表于下。所谓稳定的，就是指不是通过强作用而衰变的粒子。

§1-3 强子结构

实验的事实已经揭示出：强子是有内部结构的。目前描述强子结构的图象，有所谓夸克模型或层子模型。夸克模型