

前 言

本书是根据过去五年我在英国肯特大学为物理系三年级学生开课的讲义写成的。书中我尝试用大学生所熟悉的语言描述了亚原子物理的新近进展。为了使只要熟悉初等量子力学，狭义相对论及具备一些核物理知识的读者都能阅读本书，我略去了涉及量子电动力学和量子场论的内容，并将数学细节缩减至最低限度，书中虽然提到Dirac方程，但并不要求读者具备这方面的知识。

总的说来，本书描述了基本粒子及其相互作用的对称性质。并特别强调了在过去十年中被证明是非常成功的同位旋和 $\pm$ 正对称，还讨论了手征对称性，流代数，CP破坏及弱作用和电磁作用的统一理论。我认为这些是在新近的发展中最有趣和最具有普遍意义的。书中没有提及强作用的动力学理论，有兴趣的读者可参考别的书籍。

在每一章的末尾我列出了一些辅助读物，这些目录并不完备，我只希望通过它们能加深读者对书中内容的理解。

(下略)

Lewis Ryder

目 录

粒子和共振态

1	引 言	(1)
1.1	最轻的基本粒子	(1)
1.2	单位和运动学	(2)
1.3	截面和相互作用	(4)
1.4	相互作用和衰变时间	(10)
1.5	粒子的分类	(12)
1.6	电荷守恒, 重子数和轻子数	(13)
1.7	反粒子	(15)
2	对称性和守恒定律	(17)
2.1	经典物理学中的对称性	(17)
2.2	量子物理学中的对称性	(21)
2.3	规范变换和其它对称性	(24)
2.4	带电 π 介子的自旋	(25)
2.5	中性 π 介子的自旋	(26)
2.6	空间反演和宇称	(27)
2.7	强作用和电磁作用中的宇称守恒	(31)
2.8	光子的宇称	(33)
2.9	带电 π 介子的宇称	(34)

2.10	中性 π 介子的宇称	(34)
2.11	时间反演	(35)
2.12	强作用和电磁作用中的时间反演不 变性	(36)
2.13	电荷共轭	(38)
2.14	强作用和电磁作用中的 C 守恒	(39)
2.15	谈谈自然定律和边界条件	(40)
2.16	对称性和群	(41)
3	同位旋	(46)
3.1	引言——一条假设	(46)
3.2	假设的证据	(47)
3.3	核力的电荷对称	(48)
3.4	核力的电荷无关性	(51)
3.5	核子和同位旋	(53)
3.6	同位旋变换	(54)
3.7	强作用中的同位旋守恒	(58)
3.8	电荷无关性对于 π 介子的意义	(59)
3.9	π 介子和同位旋	(61)
3.10	π 介子的提升和降低算符	(63)
3.11	同位旋的组成	(65)
3.12	广义 Pauli 不相容原理: 氦核	(66)
3.13	强相互作用中同位旋守恒的验证	(69)
3.14	G 宇称	(71)
3.15	小结	(72)
	附录	(73)

4	奇 异 性	(80)
4.1	奇异粒子的发现	(80)
4.2	导致引进奇异性量子数之谜	(83)
4.3	奇异粒子的同位旋 和 Gell-Mann — 西岛关系	(85)
4.4	K介子的宇称	(90)
4.5	Σ 的宇称	(91)
4.6	Ξ 的宇称	(91)
5	弱作用和电磁作用中的同位旋和奇异数选 择定则	(93)
5.1	引言: 轻子和非轻子弱作用	(93)
5.2	奇异数守恒的半轻子弱作用	(95)
5.3	奇异数改变的半轻子弱作用	(97)
5.4	非轻子弱作用	(100)
5.5	电磁相互作用	(102)
6	核子的电磁结构	(105)
6.1	电子和核子的差别	(105)
6.2	描述结构的形状因子	(109)
6.3	质子和中子形状因子	(113)
6.4	非弹性电子—质子散射	(118)
6.5	涉及类时光子的实验	(122)
7	共振态	(127)
7.1	一个例子: $\Delta(1236)$	(127)

7.2	Σ (1385)	(131)
7.3	Λ (1405)	(132)
7.4	Ξ (1530)	(132)
7.5	Ω (1672)	(133)
7.6	ρ 介子	(133)
7.7	ω 介子	(134)
7.8	φ 介子	(137)
7.9	η 介子	(138)
7.10	K^* 介子	(139)
7.11	不存在的态	(140)
7.12	共振态是合成的吗?	(140)
8	弱相互作用和宇称破坏	(146)
8.1	$\theta-\tau$ 难题	(146)
8.2	宇称破坏的直接观察	(150)
8.3	β 衰变中的宇称破坏	(152)
8.4	宇称破坏和中微子	(154)
8.5	中微子的螺旋性	(157)
8.6	$\pi-\mu-e$ 衰变序列	(158)
8.7	Λ 非轻子衰变	(159)
8.8	β 衰变中的 C P 守恒	(162)
9	K 介子衰变和 C P 破坏	(164)
9.1	C P T 定理	(165)
9.2	中性 K 介子的 Gell-Mann—Pais 理论	(167)

9.3	K介子干涉量度学和 $K_1 - K_2$ 质量差	(171)
9.4	作为 $ \Delta S = 1$ 选择定则的证据的 $K_1 - K_2$ 质量差	(174)
9.5	K衰变中CP不变性的结果	(175)
9.6	$K_1^0 \rightarrow 2\pi$ 衰变中的 $\Delta I = \frac{1}{2}$ 定则	(177)
9.7	CP破坏的发现	(178)
9.8	CP疑难的分析	(179)
9.9	实验结果	(183)
9.10	超弱理论	(184)
9.11	K衰变中的T和CPT	(186)
9.12	再谈K介子干涉量度学	(187)
9.13	CP破坏和时间箭头	(189)
10	守恒矢量流理论和么正对称	(191)
10.1	引言—对比同位旋更强的对称性的需要	(191)
10.2	中子衰变和 μ 子衰变	(192)
10.3	守恒矢量流理论	(197)
10.4	对CVC及走向么正对称性的步骤的概述	(202)
10.5	么旋超多重态：八重法	(205)
10.6	么旋超多重态：十重法和一重法	(208)
10.7	么正对称性的意义	(210)

11	么正对称和夸克模型	(214)
11.1	同位旋和奇异性的结合	(214)
11.2	建立同位旋多重态	(216)
11.3	建立 SU_3 多重态	(217)
11.4	夸克模型	(220)
11.5	质量公式	(224)
11.6	电磁质量差的质量公式	(231)
11.7	夸克模型的意义—夸克存在吗?	(232)
11.8	对基本性的注释	(233)
12	Cabibbo 理论, 手征对称性和流代数	(236)
12.1	Cabibbo 的普遍性理论	(237)
12.2	Cabibbo 理论的解释	(240)
12.3	部分守恒轴矢流理论	(241)
12.4	手征对称性	(246)
12.5	流代数	(248)
13	弱作用与电磁作用的统一理论, 粲	(254)
13.1	弱作用与电磁作用的统一理论	(255)
13.2	粲	(262)
13.3	整体对称和局域对称, Higgs 机制	(265)
13.4	对新的窄共振的一点评述	(269)
13.5	结论	(271)

第 一 章

引 言

1.1 最轻的基本粒子

最为人们所熟知的基本粒子是在对原子的早期研究中所发现的电子 e^- ，质子 p 和中子 n 。自从发现了光电效应，人们又知道了作为电磁辐射量子的光子 γ 。对中子 β 衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ （衰变中发射出一个反中微子）的研究，推证出中微子 ν 的存在。中微子和光子一样，静质量为零。在1933年，这些粒子以及正电子 e^+ 和反中微子 $\bar{\nu}$ ，被认为是全部的基本粒子。

1935年，汤川秀树预言了一种称为介子的新粒子，并假定核力是靠它而发生作用的。Anderson和Neddermeyer同时为宇宙线中的介子提出了实验证据。但是，1947年更进一步的工作揭示出它们并不具有汤川的介子应该具有的性质。基本粒子物理学的这个第一次危机由Powell在同一年发现所解决了，他在照相乳胶中发现两类介子，一种是汤川介子(π)，还有一种更轻的介子，现在称为 μ 子。Anderson和Neddermeyer所发现的是后者。这两种介子具有完全不同的性质。

设想读者对这些粒子有一定程度的了解，以此为起点，本章对它们作进一步的讨论，书后的表中列出了这些粒子的性质。

1.2 单位和运动学

由于习惯的原因，基本粒子物理学中的能量以MeV（兆电子伏）来量度。 $1\text{MeV} = 10^6\text{eV} = 1.602 \times 10^{-6}\text{尔格} = 1.602 \times 10^{-13}\text{焦耳}$ 。由于宇宙线和加速器中粒子的运动速度极高，在计算动量和质量时必须运用下面这个人所共知的相对论关系：

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

其中E是能量，P是动量，m是粒子的静质量，而c是光速。因为c出现得非常频繁，我们通常令 $c = 1$ ，而把能量，动量，质量都用MeV来计值。（或者严格地说，能量用MeV，动量用MeV/c，质量用MeV/c²。）这样质子的质量就是

$$m_p = 938.21 \pm 0.01 \text{MeV}/c^2$$

它表明 $m_p c^2 = 938.21 \pm 0.01 \text{MeV}$ 。由于加速器能量已经变得更高，另一个能量单位

$$1\text{GeV} (\text{千兆电子伏}) = 1\text{BeV} = 10^3 \text{MeV}$$

已经使用起来了。

为了解相对论运动学的应用，让我们从 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 的衰变中计算 π^+ 的质量。 ν_μ 的下标强调这个中微子是伴随 μ 子产生的。我们假定

$$m_\mu = 105.65 \text{MeV}/c^2, m_{\nu_\mu} = 0$$

其中第一个是准确的，而第二个则不一定可靠。

根据(1)式，能量和动量并不是互不相关的。如果我们约定用一个虚的第四坐标，把它们写为4矢量， $p = (P,$

$iE)$ (或者 (p_x, p_y, p_z, iE)), (1)式给出(以 $c=1$)

$$p^2 - E^2 = -m^2$$

或

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - E^2 = -m^2 \quad (1-2)$$

计算时必须选择一个参照系。在本例中我们选择 π^+ 在其中静止的这样一个系。这样它的能量-动量就是

$$P_\pi = (0, 0, 0, i m_\pi)$$

如果 μ 子沿正 z 轴运动, 中微子就会沿负 z 轴运动, 于是

$$P_\mu = (0, 0, p, i E_\mu)$$

$$P_\nu = (0, 0, p_\nu, i E_\nu)$$

由能量-动量守恒得到

$$P_\pi = P_\mu + P_\nu$$

即

$$m_\pi = E_\mu + E_\nu$$

$$P_\mu + P_\nu = 0; \quad P_\mu = -P_\nu = P, \quad (1-3)$$

若采用 $m_\nu = 0$, 则由(2)式得出

$$E_\mu = \sqrt{m_\mu^2 + p^2}, \quad E_\nu = P, \quad (1-4)$$

将(4)代回(3)则得

$$m_\pi = \sqrt{m_\mu^2 + p^2} + P$$

通过 μ^+ 在磁场中的偏转, 由实验得出

$$P = 29.80 \pm 0.04 \text{ MeV}/c$$

所以最后得到 π^+ 的质量

$$\begin{aligned} m_{\pi^+} &= \sqrt{(105.65)^2 + (29.80)^2} + 29.80 \\ &= 139.58 \pm 0.05 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

计算中我们假定 $m_\nu = 0$ 。原则上可以将这一算出的 m_π

+) 原文误为 $m_\mu = \dots$ 。——译者

值与别的实验中算得的值进行比较，从而检验这一假设。但不幸在这个实验中 m_τ 值对 $m_{\nu\mu}$ 非常不灵敏：甚至 $m_{\nu\mu} = 2\text{MeV}$ 时， m_π 才仅变化 0.07MeV ，刚好超过实验误差。 ν_μ 质量的实验上限为 1.6MeV 。

练习：考虑反应 $\pi^- + p \rightarrow n + \gamma$ 。假定 π 介子是从绕 p 的 s 态 Bohr 轨道所俘获的（因此具有可忽略不计的动能），证明释放的中子的动能（= 总能量 - 静质量能量）是 8.872MeV 。

1.3 截面与相互作用

通过对粒子间相互作用截面的研究，取得了大量的知识。截面采用面积单位（1 靶， $b = 10^{-24}\text{cm}^2$ ），并且根据量子力学的法则，与发生作用的概率有关。我们考虑三种典型过程。

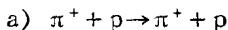
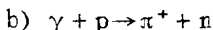
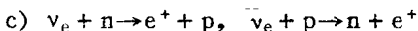


图 1 显示这种反应的截面。曲线的峰值约为 200mb ，而且对于较大的 π 介子动能， σ 一直拖长到几十个 mb 。



这一反应称为介子的光生。截面峰值为 $\sim 200\mu\text{b}$ 。它比 (a) 的截面小 $100 \sim 1000$ 倍。这是典型的牵涉到 γ 的反应。



这类反应由图 3 表示。截面为 $\sim 10^{-14}\text{b}$ ，约为 (a) 截面的 10^{-12} 倍。这是典型的涉及中微子的反应。（ ν_e 的下标表示中微子是出现在有 e 或 e^+ 参与的反应中的。关于粒子与反粒子的约定下面再说明。）

对这些各不相同的，具有代表性的反应截面的解释是：

自然界存在着三种不同类型的相互作用，称为强作用、电磁作用和弱作用，分别以(a)、(b)和(c)中的截面为其特征。当然，电磁作用的概念不是新的，Coulomb在十八世纪首先发现了这一现象。其它两种相互作用是二十世纪的发现。对于这三种相互作用，存在着下面的规律：

所有涉及 γ 的反应是电磁相互作用。

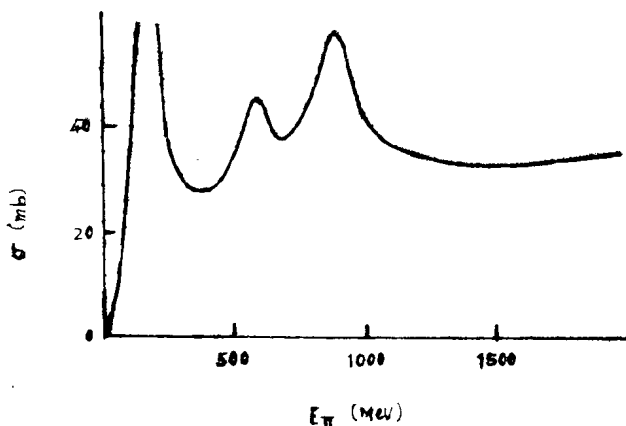


图1.1 $\pi^+ + p$ 散射的总截面

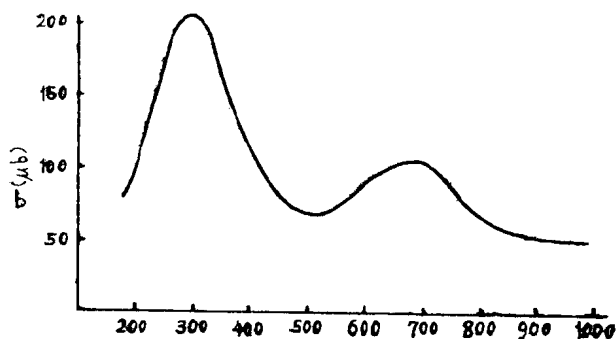


图1.2 $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$ 的截面 γ 的实验室能量 (MeV)

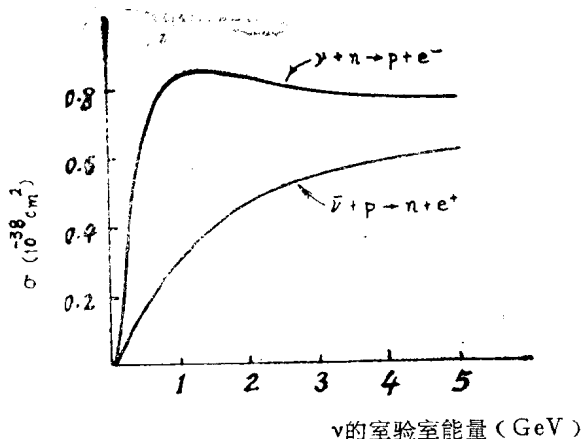


图1.3 $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ 和 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 的理论截面

所有涉及 ν 的反应是弱相互作用。

所有涉及 e 的反应可能是电磁作用，也可能是弱作用。

所有涉及 μ 的反应可能是电磁作用，也可能是弱作用。

一般说来，所有其它粒子可以有全部三种类型的相互作用，例如上面(a)、(b)和(c)中都涉及到质子，但是，实验室中观察到的反应绝大多数都是强相互作用。这是因为强作用是最占优势的。

自然界还存在着第四种作用，即引力相互作用。这是Newton在十七世纪发现的，也是我们在日常生活中所意识到的唯一的一种相互作用。它极弱——只有弱作用强度的 10^{26} 分之一。

表1列出四种基本相互作用的比较。相对强度只是(a)，(b)，(c)中三种典型截面的粗略比率。对这些相互作用（除引力作用之外）的研究在基本粒子物理学中有着根本的重要

性，也是本书的主要内容。现在让我们对每一种相互作用都作一个简略的介绍。

表 1.1

相 互 作 用	强 度	媒 介	作 用 范 围
强	1	?	$\sim 10^{-13} \text{cm}$
电 磁	10^{-2}	γ	∞
弱	10^{-12}	- (或 W)	0 (或 $\hbar/m_W c$)
引 力	10^{-37}	引力子	∞

电磁相互作用

这种作用是人们了解得最充分的，因此也是最容易讨论的。按电磁作用的定义，它涉及到光子，光子可能是实粒子，也可能是虚粒子，涉及实 γ 的例子就是反应(b)，涉及到虚 γ 粒子的例子是弹性 e^-p 散射

$$e^- + p \rightarrow e^- + p.$$

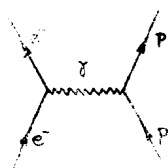


图1.4 以光子交换为媒介的电子-质子散射。

用经典物理学的语言，我们说这些粒子的相互作用是由于电子“感觉到”质子的电磁场，因而影响了它的运动。然而按照量子场论，电磁场本身量子化了，成为象粒子一样的光子。于是，我们就说电子和质子交换了一个光子。图4形象地描绘了这一过程。因为发射和吸收的时间极

短，根据测不准原理不能检测到这个光子，所以它是虚粒子。令光子具有能量 E ，那么在短于 $\tau \sim \hbar/E$ 的时间间隔内它不能被测出，在这一时间间隔，它经过的距离是 $c\tau \sim c\hbar/E$ ，这就是力程。光子所带的能量越高（动量也越大），力程就越

短。

粒子所能够具有的最小能量就是它的静质量，光子的静质量为零。这样，力程就是无穷大。正因为如此电磁力是比較容易发现的。两个带电体，无论隔着多大的距离，总是以Coulomb力相互作用着。

由电磁作用引起的其它反应的例子如下：

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma$$

$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$$

最后一例类似于电子—质子散射。

强相互作用

因为这种作用把核子束缚在一起，核物理学家们把它称为核相互作用。它显然是很强的(因为原子核很稳定)，作用范围也很小(因为相邻原子的原子核并不互相“感觉到”)。汤川秀树设想在原子核内的p和n之间，与电磁作用类似，也应该交换某种粒子来提供强力，如图5所示。如果被交换的粒

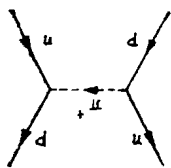


图1.5 以 π 介子交换为媒介的质子和中子间的强相互作用。

子(现在称为 π 介子)的质量是 m_π ，则力程就是 $\hbar/m_\pi c$ 。假如它是 $\sim 10^{-13}$ cm，那么 $m_\pi \sim 180 \text{ MeV}$ 。如前所述，在经过一段时间的迷惘和混乱之后， π 介子找到了，而且确是原子核内质子和中子之间，即在低能情况下时的强力所主要依靠的。

不过，和电磁作用中的光子不同， π 介子不是强作用的普遍媒介。例如， π 介子本身之间的强作用不可能是交换 π

介子而引起的，必然是交换了另外某种东西。此外，用 π 介子交换也不能很好地描述高能质子—质子和质子—中子散射，这里也需要其它某种东西。

事实上，迄今为止强作用的媒介还是未知的。一种可能是交换了被称为“Regge极点”的物体。对所有的自旋值（包括非物理的值）都定义了这种东西。如果自旋成为物理的，Regge极点就对应于一个真实粒子。

弱相互作用

弱作用的经典模型由Fermi提出，他认为这种作用是没有作用范围的点相互作用。图6描写了 β 衰变

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

到目前为止对Fermi理论提出疑问还没有实验依据，但它有一些理论上的问题。如果这种作用不是点作用，而是由“中间玻色子”的交换来完成，那么问题就不那么严重了。图7

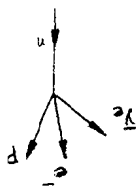


图1.6 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 的 Fermi弱作用。

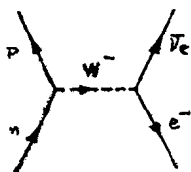


图1.7 以中间玻色子为媒介的中子衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 。

表示玻色子W怎样引起 β 衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 。如果W存在，它能够以各种不同方式衰变，例如

$$W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e$$

$$W^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}$$

$$W^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0$$

人们进行了许多实验，在如 $\nu_e + p \rightarrow p + e^- + W^+$ 的反应中寻找中间玻色子。然而，或许 W 并不存在，或许它太重了，目前的加速器能量还不足以使它产生，寻找 W 的工作没有成功。假定 W 存在，这些实验可以用来为它的质量定出一个下限

$$m_w > 2\text{GeV} \quad (1-5)$$

引力相互作用

所有的粒子，甚至光子，都受到引力作用。假定自然界是和谐一致的，那么引力场也必然要量子化，在引力相互作用中就要交换其量子，即引力子。由于引力的作用范围为无穷，引力子的静质量必然为零，并以光速运动。引力的量子理论很难建立，因为Einstein的经典理论是非线性的（引力能本身受引力作用）。

最近，Weber声称他探测到了来自银河系中心的引力波。如果他被证明是正确的，那么就存在着虽然渺茫，但却令人鼓舞的希望：或许在遥远的未来会观测到单个的引力子。

引力与其它几种力相比太微弱了，因此在基本粒子的研究中没有考虑它的存在。我们以后也不再有机会提到它。

物理学家们相信，这四种基本的相互作用最终将统一为一个普遍的结构，但任何人也不认为这个划时代的进展就在眼前。

1.4 相互作用和衰变时间

以上讨论的基本粒子的三种相互作用不但是二体作用，