

实验核物理学

第二卷

基本粒子物理学

[俄] K. H. 穆辛 著

原子能出版社

实验核物理学

第 二 卷

基本粒子物理学

[俄] K. H. 穆 辛 著

杜 祥 琬
李 国 政 译

万 国 彦

贾 致 泽
周 德 邻 审校

原子能出版社

图字:01-95-638号

图书在版编目(CIP)数据

实验核物理学 第二卷:基本粒子物理学/杜祥琬等译.

北京:原子能出版社,1996.12

ISBN 7-5022-1426-7

I. 实… I. 杜… II. ①原子核-物理实验②基本粒子-物理学 N. ①O571②O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17783 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 N-N 相互作用:核力、核理论;核子结构;轻子、 π 介子、奇异粒子、粲粒子、美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 элементарных частиц

К. Н. Мухин

实验核物理学 第二卷

基本粒子物理学

杜祥琬 等译

©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:16 字数:396千字

1996年12月第1版 1996年12月北京第1次印刷

印数:1—800

定 价:27.00 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。本书根据 1983 年的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。

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

1995 年 1 月

目 录

第一部分 核子和反核子物理学,核力问题

第一章 低能核子-核子相互作用与核力	(3)
1.1 引言	(3)
1.2 核力的介子理论概念,费因曼(Feynman)图	(4)
1.3 (N-N)相互作用势的唯象选择,氘核基础理论	(9)
1.3.1 束缚态存在的条件	(10)
1.3.2 氘核的波函数和半径	(14)
1.3.3 氘核激发态的缺乏	(16)
1.4 散射理论的概念	(16)
1.4.1 截面和相位	(17)
1.4.2 散射长度	(19)
1.5 低能($T < 20\text{MeV}$)核子-核子相互作用	(22)
1.5.1 低能(n-p)散射与核力程	(23)
1.5.2 低能(n-p)散射的进一步分析,核力的自旋相倚	(24)
1.5.3 中子被正氢和仲氢散射	(25)
1.5.4 张量力和自旋轨道力	(27)
1.5.5 低能(p-p)散射	(28)
1.5.6 (n-n)散射	(31)
1.5.7 核力的同位旋不变性原理	(31)
1.5.8 广义泡利原理	(35)
1.5.9 同位旋的数学描述	(36)
1.6 本章要点	(38)
第二章 高能和超高能核子-核子相互作用	(40)
2.1 高能($T_N > 100\text{MeV}$)核子-核子相互作用	(40)
2.1.1 快质子和快中子的产生与探测	(40)
2.1.2 高能(p-p)和(n-p)散射实验结果的一般特点,极短距离内的强相互作用	(43)
2.1.3 (n-p)散射截面的角度相关,交换力,饱和作用	(45)
2.1.4 (p-p)散射截面的角度相关,小距离处的排斥	(47)
2.1.5 (p-p)散射的相分析,散射引起的极化	(48)
2.1.6 (n-p)散射的相分析, $T=0$ 时(n-p)散射的角度相关	(51)
2.1.7 高能中子-中子散射	(53)
2.1.8 (p-p)和(n-p)散射截面与能量的依赖关系,高能核相互作用的同位旋不变性,截面 $(\sigma_{NN})_{T=1}$ 和 $(\sigma_{NN})_{T=0}$ 的特殊性	(53)
2.2 超高能($T > 10^3\text{MeV}$)核子间的相互作用	(55)
2.2.1 薄膜靶和喷射靶	(55)

2.2.2 对撞粒子束	(56)
2.2.3 超高能(N-N)散射研究结果	(57)
2.2.4 关于核力特性的结束语	(59)
2.3 本章要点	(60)
第三章 核子结构	
3.1 最初的实验	(61)
3.2 核形状因子	(63)
3.3 核子形状因子	(65)
3.3.1 核子半径,核子芯问题	(65)
3.3.2 芯概念的舍弃,矢量主导模型	(67)
3.3.3 $q^2 > 175 \text{fm}^{-2}$ 的(e-N)弹性散射,标度定律	(68)
3.3.4 (e-N)非弹性散射,部分子模型	(69)
3.4 本章要点	(70)
第四章 反核子和反原子核	
4.1 电荷共轭原理,反核子的基本特性	(71)
4.2 反质子	(73)
4.3 反中子	(75)
4.4 反核子与物质的相互作用	(77)
4.5 反原子核	(78)
4.6 本章要点	(80)

第二部分 粒子和共振态

引言	(83)
1. 基本粒子发现史	(83)
2. 宇宙射线物理学	(86)
第五章 轻子	
5.1 电子和正电子	(88)
5.2 电子磁矩	(89)
5.3 正电子素,C 宇称	(92)
5.4 电子中微子和反中微子	(93)
5.4.1 ν_e 和 $\bar{\nu}_e$ 的性质,轻子荷	(93)
5.4.2 双 β 衰变	(95)
5.4.3 研究 ν_e 和 $\bar{\nu}_e$ 与核子直接相互作用的实验	(97)
5.4.4 纵向极化中微子理论的概念及其与 CP 宇称守恒定律的关系	(100)
5.4.5 太阳中微子问题,中微子振荡假说	(103)
5.5 μ 子	(104)
5.5.1 μ 子的发现, μ 子质量	(104)
5.5.2 μ 子的寿命和衰变模式	(106)
5.5.3 μ 子的弱相互作用	(108)
5.5.4 在(μ -e)衰变中 P 宇称破坏	(108)

5.5.5 μ 子的自旋和磁矩, μ 子和电子的相似性	(109)
5.6 μ 子中微子和反中微子	(112)
5.6.1 二种类型中微子 ν_e 和 ν_μ 存在的假说	(112)
5.6.2 ν_e 和 ν_μ 差别的实验证据	(113)
5.6.3 轻子荷概念的概括, 电子和 μ 子轻子荷	(115)
5.6.4 ν_μ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 的质量和螺旋性	(117)
5.6.5 “DUMAND”工程(深海 μ 子和中微子探测计划)	(117)
5.7 μ 子与物质的相互作用	(118)
5.7.1 氢的 μ 原子和 μ 分子, μ 催化作用	(118)
5.7.2 较重元素的 μ 原子	(122)
5.7.3 μ 核子原子	(123)
5.7.4 μ 子素	(124)
5.8 τ 轻子和 τ 中微子	(124)
5.9 本章要点	(125)
第六章 π 介子	
6.1 带电 π 介子的性质	(127)
6.1.1 照相乳胶方法	(127)
6.1.2 $\pi^\pm$ 介子的发现	(128)
6.1.3 $\pi^\pm$ 介子的寿命和衰变纲图	(130)
6.1.4 $\pi^\pm$ 介子的人工形成, 产生阈和质量	(131)
6.1.5 π 介子的自旋和宇称	(133)
6.1.6 π 介子的核活性	(134)
6.2 中性 π 介子性质	(135)
6.2.1 探测 π^0 介子的最初实验	(135)
6.2.2 π^0 介子的质量	(138)
6.2.3 π^0 介子的寿命	(140)
6.2.4 π^0 介子的 C 宇称	(141)
6.2.5 π 介子同位旋三重态	(142)
6.3 π 介子的相互作用	(143)
6.3.1 π 介子的产生和散射过程	(143)
6.3.2 同位旋纯态的分离	(144)
6.3.3 $(\pi-N)$ 散射的相分析, 阿根特(Argand)图, 布雷特-魏格纳共振公式	(147)
6.3.4 π 介子的 G 宇称	(149)
6.3.5 π 介子-核子和 π 介子- π 介子共振	(150)
6.3.6 $(\pi-\pi)$ 相互作用	(154)
6.3.7 $(\pi-\pi)$ 散射的相分析	(156)
6.3.8 π 介子-核相互作用	(156)
6.4 本章要点	(159)
第七章 奇异粒子	
7.1 K 介子	(161)

7.1.1 乳胶室和气泡室	(161)
7.1.2 K 介子的发现	(162)
7.1.3 (θ - τ) 问题	(164)
7.1.4 K 衰变中 P 宇称的破坏	(165)
7.2 超子	(166)
7.3 K 介子和超子的分类	(168)
7.3.1 K 介子和超子的奇异特性	(168)
7.3.2 奇异粒子的同位旋不变性	(169)
7.3.3 粒子按奇异荷分类	(170)
7.3.4 奇异荷守恒定律	(172)
7.4 反超子	(175)
7.5 奇异粒子与核的相互作用,核子与介子,超核的性质	(178)
7.6 中性 K 介子的性质	(183)
7.6.1 K_1^0 和 K_2^0 介子,联合宇称守恒定律	(183)
7.6.2 中性 K 介子的再生	(186)
7.6.3 各中性 K 介子的质量差	(187)
7.6.4 在 K_2^0 衰变中联合宇称的破坏, K_S^0 和 K_L^0 介子	(188)
7.7 本章要点	(192)
第八章 强相互作用的么正对称性	
8.1 基本粒子的相互联系和相互转换	(194)
8.2 强子的分类	(195)
8.3 关于么正对称性的假说和强子分类	(197)
8.4 $SU(3)$ 对称	(199)
8.5 本章要点	(201)
第九章 夸克与胶子,量子色动力学	
9.1 三夸克模型	(203)
9.1.1 色和味	(203)
9.1.2 夸克的不可观测性	(206)
9.1.3 量子色动力学的思想,胶子	(207)
9.2 '四夸克模型	(208)
9.2.1 第四种夸克存在的假说,粲荷	(208)
9.2.2 c 夸克的发现, ψ 粒子, 粲素	(209)
9.2.3 粲介子和粲重子	(213)
9.3 T (宇普西隆)介子和第五种夸克,第六种夸克存在的问题	(215)
9.4 胶子存在的实验证据	(218)
9.5 本章要点	(220)
第十章 弱相互作用物理中另外一些问题	
10.1 弱相互作用的普适理论	(222)
10.1.1 关于普适弱相互作用的假说, W 玻色子	(222)
10.1.2 普适的四费米子相互作用理论中的一些问题	(223)

10.1.3	卡比玻(Cabibbo)图象,中性弱流的发现	(224)
10.1.4	粲粒子和美粒子理论的广义化	(226)
10.2	弱相互作用和电磁相互作用统一理论	(227)
10.2.1	弱相互作用普适理论的不可重正性	(227)
10.2.2	定域规范对称性和补偿场	(228)
10.2.3	规范对称的自发破坏,萨拉姆-温伯格理论	(228)
10.2.4	$W^\pm$ 和 Z^0 玻色子的发现	(229)
10.2.5	大统一理论,质子衰变	(232)
10.3	本章要点	(232)
附录		
I	基本公式	(234)
I	基本常数和单位	(235)
II	克莱布希-戈登(Clebsch-Gordon)系数	(237)
IV	稳定和准稳定粒子表	(238)

第一部分 核子和反核子 物理学,核力问题

第一章 低能核子-核子相互作用与核力

1.1 引言

核物理的主要课题之一就是揭示核力的本质。核力不同于所有已知的其它类型的力。它不可能源于电性质,因为它既作用于荷电粒子之间,也作用于中性粒子之间(例如,在氦核中的质子和中子之间)。它也不可能是磁力的,因为核子磁矩间的相互作用是极其微弱的。核力亦不可能是弱相互作用力和引力,因为这两种力太弱了。这样,引起核相互作用的力不同于所有已知的力,它被称为核力。

后面将要指出,核力的基本特征是强子相互作用的典型情况。强子相互作用就是强相互作用粒子之间的作用。除核子外,强子还包括 π 介子、K 介子、超子和其它粒子。这更广泛的一类相互作用(核子力只是它的特殊情况)称为强相互作用。按照现代的概念,强相互作用是构成强子的夸克之间更大和真正强的相互作用的一种特殊显示(如象分子力是电子和原子核之间强得多的电磁力的显示一样)。

这种广义概念上的强相互作用的特性将在讲述强子的章节中叙述。真正强相互作用的概念将放在描述夸克模型的章节中。在本章中,我们将研究狭义上的强相互作用,即核子之间的核相互作用,或核力。

让我们先回忆一下,在第一卷中所确定的核子相互作用的主要特性。

1. 核力是一种吸引力,由质子和中子组成稳定核这一事实可见。

2. 卢瑟福的 α 粒子对原子核的散射实验表明,一直到约 10^{-12}cm 的距离,实验的结果都可以用如下假设加以解释,即 α 粒子与原子核的相互作用是纯库仑型的相互作用,它意味着核力是短程作用力。总之,其作用范围小于 10^{-12}cm 。可以估算原子核中受核力束缚的核子的平均距离:

$$\delta \approx (V/A)^{1/3} \approx (4\pi R^3/3A)^{1/3} \approx 2 \times 10^{-13}\text{cm} \quad (1.1.1)$$

3. 核相互作用是自然界中最强的相互作用*,远强于任何其它类型的相互作用,包括电磁相互作用,后者是其余相互作用中最强的。这点的根据是存在稳定核,它们包含电荷同性的质子。对照 ${}^4\text{He}$ 核中每个核子的结合能($\epsilon \approx 7\text{MeV}$)与该原子核中两个质子之间库仑相斥的能量

$$V_c = \frac{e^2}{\delta} = \frac{(4.8 \times 10^{-10})^2}{2 \times 10^{-13} \times 1.6 \times 10^{-6}} \approx 1\text{MeV} \quad (1.1.2)$$

可做出两种力的定量比较。

4. 对于元素周期表中绝大多数原子核,它们的每个核子的结合能是个常量,这指出核力具有饱和性。

5. 存在最简单的原子核—氘,由一个质子和一个中子组成,自旋方向同向,不存在由反向平行自旋的核子构成的类似的原子核,说明核力是依赖于自旋的。这一点也可由自旋的补偿效应得到证明,由于这一效应而产生了偶偶核、奇奇核和奇数核的各种稳定能级。

* 如前所说,我们在这一章中并不研究夸克之间真正的强相互作用。

6. 氘核中存在电四极矩,它说明核力是非中心的,是张量型的。也就是说,核力依赖于核子自旋的相互排列和氘核的“轴”。

7. 自旋-轨道相互作用的存在(这一点是在分析核壳模型时揭示的)表明在原子核内运动的核子是受一种依赖于核子速度(更准确地讲,依赖于它的动量)的力的支配。也许,当研究两个核子之间的相互作用时,这种自旋-轨道力也应该给予考虑。

8. 某些轻原子核能级结构的相似性,导致核力的电荷无关假设(同位旋守恒)。

为了解释这些及其它(将在以后指出)的核力特性,需要一个核力理论。但是,鉴于核相互作用极其复杂的本质,这样的理论迄今还没有发展到完善的形式。目前,我们只能讲一些解决这一问题的可能的方法。

与原子本身的研究相比,原子核研究是个复杂得多的课题。除了与核相互作用的规律不清楚,这一事实有关的基本困难之外,还存在一个由强相互作用粒子组成的量子力学系统的理论计算方法的困难。在复杂核内核子的相互作用并非正好等于一对对核子相互作用的总和。把这些困难放置一边(借助各种核模型在不同的情况下它们可以加以克服)让我们来研究两个核子之间的核相互作用。

原则上,有两种方法可以用来建立核子之间核相互作用理论。

1. 把核力归因于一个介子场。

2. 唯象地选择相互作用势,使其满足实验结果。

在下面的章节中我们将研究这两种方法(第一个方法在 1.2 节,第二个方法在 1.3~1.7 节)。

1.2 核力的介子理论概念,费因曼(Feynman)图

核力的介子理论是在与量子电动力学相类比中建立的。众所周知,在量子电动力学中,电磁场是与和它相联系的粒子(光子)一齐来研究的。场似由光子组成,光子就是此场的量子。场的能量就等于量子的能量之和。光子在电磁辐射(例如光)的发射(吸收)过程中产生(湮没),电荷是光子的源。由于两个电荷之间的相互作用,一个电荷发射出光子,而另一个电荷把它吸收。这样的方法使有可能研究与具有固有辐射场的辐射体系的相互作用有关的新现象。例如,它解释了电子和 μ 介子的反常磁矩(见 5.2 和 5.5.5 节);氢原子精细结构中能级的兰姆移位及其它许多精细效应。

量子电动力学的基本思想,即相互作用的量子本质,可以推广到包括核相互作用在内的其它相互作用。这一思想首先由塔姆(I. Tamm)于 1934 年提出。塔姆的思想为核相互作用的这种性质的交换本质提供了清晰的图象(见 2.1.3 节)。这可以从假定质子和中子在相互作用中交换电荷来解释。同时,这导致其饱和性。看来假定交换机制在核相互作用的时刻包含着从一个核子到另一个核子转移某种轻的粒子(可以是电子或中微子)是完全自然的。而后,塔姆又证明,这些粒子不可能是核场的量子,因为它不能同时解释短程核力和高结合能。那时还不知道其它轻的粒子。

塔姆的思想,后来由日本物理学家汤川秀树加以发展。他假设(1935 年),起核的量子作用的粒子是某种荷电的或中性的不稳定粒子,即那时还未被实验发现的介子*,而且假设其具有

* 术语“介子”强调这种粒子的质量是介于电子和质子的质量之间[“meso”(希腊文)意为中间体,媒介物]。发现重介子之后,此术语已失去了它原来的意义,但仍保留于所有带零重子荷的强相互作用粒子(强子)。

质量 $m \approx (200 \sim 300)m_e$ 。

汤川的论证可以形象地介绍如下。根据量子力学,存在测不准关系式

$$\Delta E \Delta t \approx \hbar \quad (1.2.1)$$

据此,在 Δt 时间内,一个孤立的系统可以改变的能量数值为 ΔE (在 Δt 的短时间内“违背能量守恒定律”) 假若 Δt 很小,则 ΔE 可能很大,令 $\Delta E = mc^2$, 我们可假设,可能由于能量 $\Delta E = \hbar / \Delta t$ 的原故而在核子之间核子的近旁生成一个虚介子,其质量 $m = \Delta E / c^2 = \hbar / c^2 \Delta t$, 持续时间 Δt 。

不象平常的粒子,它可以在空间和时间上自由地运动;虚粒子仅仅存在于一个短时间 Δt 内,在这一段时间里,它们应和核子分开一个不超过 a 的距离 ($a = c\Delta t$)。经过 Δt 后,这个虚粒子再次被一个核子俘获*, 这样,可以假设,核子被虚介子去所包围,这些虚介子不断地生成和湮没,这个介子云(介子包层)的半径 a 由下式给出:

$$a = ch / \Delta E = \hbar / mc \quad (1.2.2)$$

虚介子不仅可以被它“自己”的核子吸收,也可被其它的核子吸收,若其碰巧处于后者的介子云中。正是由于这种虚介子从一个核子向另一个核子的转移,才有了核相互作用。

让 a 等于核力作用范围,则很容易定量估计出核相互作用时间 τ_{nuc} 和虚介子的质量 m , 假定此值为 $2 \times 10^{-13} \text{cm}$ (最新的估计此值为 $1.4 \times 10^{-13} \text{cm}$), 汤川得到

$$\begin{aligned} \tau_{nuc} &= \Delta t = a/c = 0.7 \times 10^{-23} \text{s} \\ \Delta E &\approx \hbar / \Delta t \approx 100 \text{MeV}, m \approx 200m_e \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

这就是核量子或汤川介子怎样被预言的。

假若汤川介子确实存在,也只有在它们生成于自由状态而非虚粒子时才能被探测到。也就是把它们从产生的地方分开到超过核力作用范围的距离。只有服从能量守恒定律,这样的过程才是可能的。因此,介子产生,要求碰撞的核子具有巨大的动能,其中一部分动能转变成所产生的介子的静止能量。

核量子的发现是一个有趣的和富于教益的发展过程。最早认为是核量子的 μ 介子 (μ 子) 于 1938 年在宇宙射线中测到,其质量 $m = 207m_e$ 。但很快发现, μ 介子不参与强核相互作用 (见 5.5 中 μ 介子的详细性质)。其后,在 1947 至 1950 年期间, π 介子先在宇宙射线中,后在加速器上被探测到。属于介子类的 π 介子 (π^+ , π^- 和 π^0) 是强相互作用粒子,它的重子荷 $B = 0$, 质量 $m_\pi \approx 270m_e$, 同位旋 $T = 1$, 自旋 $S = 0$, 负的固有宇称 $P = -1$ 。

$\pi^\pm$ 介子的寿命为 $\tau \approx 2.6 \times 10^{-8} \text{s}$, 它们按以下方式衰变

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.2.4)$$

π^0 介子的寿命 $\tau \approx 0.8 \times 10^{-16} \text{s}$, 它衰变如下:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (1.2.5)$$

(π 介子的详细特性见第六章)。

起核量子作用的正是 π 介子(可能与某些其它强子一起)。很容易看出对于 $m = 270m_e$ ($\Delta E \approx 140 \text{MeV}$)

$$\Delta t \approx \hbar / \Delta E \approx 0.5 \times 10^{-23} \text{s} \quad a = \hbar / mc = 1.4 \times 10^{-13} \text{cm} \quad (1.2.6)$$

π 介子的发现激励了专门的、考虑到 π 介子和核子的特性的介子理论的发展。在本书中,

* 按照虚粒子的其他解释,能量(动量)守恒定律不被破坏,而是这种粒子具有非物理的质量,即它的质量不满足关系式

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

(这些粒子处于质量面之外)

我们不可能涉及到这些理论的细节,我们将仅限于介绍与量子电动力学相类比的方法所获得的粗糙的半定量的介子理论概念。

如上所述,按照量子电动力学,电磁相互作用机制包含着光子从一个电荷到另一电荷的转移。自由运动的光子的运动方程式可写成下面的形式:

$$E^2 = p^2 c^2 \quad (1.2.7)$$

为了得到对单位电荷势场的方程式,需要进行代换:

$$E \rightarrow -\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} \quad p \rightarrow \frac{\hbar}{i} \nabla \quad (1.2.8)$$

对净空间的势,方程式将采取下面的形式

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (1.2.9)$$

考虑到相互作用,我们得到

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 4\pi\rho_e \quad (1.2.10)$$

式中 ρ 是电荷密度。

对于时间无关的情况, $\partial\varphi/\partial t = 0$, 方程式(1.2.10)的解为函数

$$\varphi \propto \rho_e/r \quad (1.2.11)$$

这就是作用于单位电荷的势的表达式(类似于电场强度)。为了获得相互作用能 V , 应该将势乘以电荷

$$V = q\varphi_e \propto \rho_e^2/r \quad (1.2.12)$$

从(1.2.11)和(1.2.12)式(这些式子显然和静电学中的相应表达式相符)可导出,电磁相互作用具有无限远的作用范围。

我们前面已经指出,按照介子理论,相互作用通过 π 介子进行传递,它是一个质量不等于零的粒子($m \neq 0$)。质量不等于零的自由运动的粒子的方程式写成以下形式

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (1.2.13)$$

通过(1.2.8)的代换,净空间中核子的介子势场方程式取如下形式

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \varphi = 0 \quad (1.2.14)$$

考虑到相互作用,我们得到

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \varphi = 4\pi g_N \quad (1.2.15)$$

式中 g 是核子的介子荷密度(此式称为克莱因-戈登-福克方程式)。

对于时间无关的情况($\partial\varphi/\partial t = 0$) 此式的解具有以下形式

$$\varphi = -g_N \frac{e^{-r/\lambda}}{r} \quad (1.2.16)$$

式中 $\lambda = \hbar/mc$ 。

函数 φ 描述了包围核子的介子场。这个很快衰减的函数被称为汤川势。

介子的康普顿波长 $\lambda = \hbar/mc$ 可以作为函数 φ 衰减速率的量度(也就是介子云“半径”的量度),对于 $m_\pi = 273m_e$, 我们得到

$$\lambda_\pi^{\text{Com}} = 1.4 \times 10^{-13} \text{cm} \quad (1.2.17)$$

显然,数值 λ_π^{Com} 与前面引入的核力作用范围 a 是相一致的:

$$\alpha = c\Delta t = \frac{c\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{m_\pi c} = \lambda_\pi^{\text{Com}} \quad (1.2.18)$$

类比(1.2.12)式,将势(1.2.16)乘以第二个核子的介子荷 g_N ,便得到核子与介子场相互作用能量

$$V = g_N \varphi = -g_N^2 \frac{e^{-r/\lambda}}{r} \quad (1.2.19)$$

从(1.2.19)我们得到 g_N 的量纲:

$$[g_N] = g^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.2.20)$$

它与电荷的量纲相同。式(1.2.19)前的负号表明核相互作用是相吸的。

介子荷的数值可从与实验相比较中得到(见 1.5.5)。

目前,存在着各种形式的介子理论。但它们都有一个固有的困难,使得介子理论一般提供不了定量的结果。我们将借助理论物理使用的图示方法,即费因曼图,来说明这一困难。

这一方法是美国物理学家费因曼发展的,用以简化电磁现象的定量计算。其后,这一方法又应用于弱相互作用和强相互作用的定性描述。

费因曼于 1949 年证明,在丝毫不损害精度的条件下,量子电动力学中复杂而繁琐的计算方法可以用图示法代替而丝毫不损失精度。按照这个方法,任何电磁过程均用一图形表示,然后对此图用标准步骤以比较简单的方法进行数学分析。

按照费因曼的方法,两电荷 e_1 和 e_2 之间的相互作用(例如,一个电子被另一电子散射)可以用如图 1.1 所示的在 (x, t) 坐标平面上的图来表示。这里,外面的折线表示带电粒子在相互作用前及作用后的世界线,根据轻子守恒定律和电荷守恒定律,外面的线在任何地方都不会中断,它们开始于 $-\infty$,结束于 $+\infty$;线段对 t 轴的斜率可以表示电子的动量^{*};里面的波状线表示一个虚光子。而相互作用本身用外线和内线的交点来表示(图的顶点)。

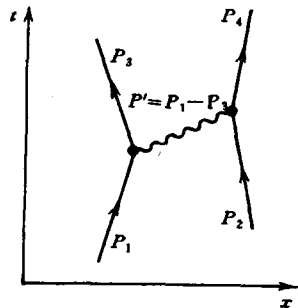


图 1.1

图的每一元素都定义一个明确的(通常是矩阵)数学因子,例如外线的开始部分(顶点以下)用具有四动量的电子湮没算符 P_1 和 P_2 表征;而外线的终了部分(顶点以上)用具有四动量的电子产生算符 P_3 和 P_4 表征。顶点对应于电荷 e (在无量纲形式, $e/\sqrt{\hbar c} = \sqrt{\alpha}$)。它给出了相互作用的尺度(强度)概念,等等。为了获得定量的结果,这些因子沿着箭头方向在图中“移动”,并从右到左被记下来,在一般情况下(见下文)就完成了虚粒子动量的积分。

图 1.1 仅显示了在单光子近似下描写电荷相互作用的二阶(两个顶点)图中的一幅。所谓单光子近似,即在相互作用中仅包含一个光子的交换。为了获得在这种近似下的正确结果,我们必须考虑此阶的所有可能的图(例如,显然可由图 1.1 用互换 P_3 和 P_4 的办法得到另一个费因曼图),并将给定阶的所有图的贡献相加。由于这里所研究的每一个图都有两个顶点,而每一

* 通常费因曼图仅示出 t 轴的方向(就我们讨论的情况而言这个方向向上)和粒子相对于此轴的运动方向(在 5.2 节中将证明,反粒子可以用一世界线来描述,它始于 $+\infty$,而结束于 $-\infty$,也就是从将来到过去),结构的其余部分是任意的(例如线对 t 轴的斜率就是任意的)。眼下,(当我们只考虑粒子的时候)没有必要划任何箭头。

个顶点用因子 $\sqrt{\alpha}$ 表征,则求和(在相互作用振幅的意义上)的结果成正比例 $\alpha \propto e^2$ (相互作用的强度成正比例 $\alpha^2 \propto e^4$)。

如上所述,此法假定电磁相互作用只涉及一个光子的交换。有时,这种单光子近似的准确度已经足够。但应该牢记,电磁相互作用的真正性质要比这种近似描述复杂得多。带电粒子不仅可能交换一个光子,甚至可能交换 2,3...,几个光子。因而,与现代实验的潜在可能性相比,在许多情况下,单光子近似还不够准确。对于这些情况,除了低阶图外(此处为二阶图),还应考虑高价图(四阶,六阶,...),对于高阶图的附加贡献的考虑被称为辐射校正。

图 1.2 显示了 $(e-e)$ 散射四阶图的两个例子。这些图的外线具有相同四动量值,也就是说,描写了上面提到的二阶图所描写的相同的相互作用过程(具有相同的初始和终了结果),但在这种情况下,相互作用是通过交换两个光子引起的(双光子交换)。容易看出,费因曼图的阶数的增加导致虚粒子四动量值的不确定性。单光子过程的虚粒子的动量被守恒定律唯一确定(见图 1.1)。不同于此,由图 1.2 可以看出,在双光子图中,虚粒子四个动量 P'_1, P'_2, P'_3 或 P'_4 中的一个可以任意选择,而丝毫不破坏守恒定律。从图中“复制”下来的数学表达式应对任意

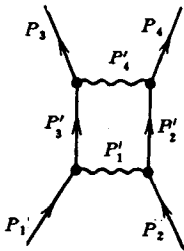


图 1.2

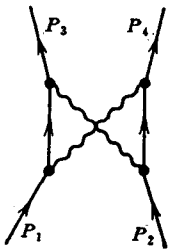


图 1.3

选择的动量积分。

由于任一四阶图都有四个顶点,所有四阶图对相互作用振幅的总贡献将成正比例 $\alpha^2 \propto e^4$ (它们对相互作用强度的贡献成正比例 $\alpha^4 \propto e^8$),类似地,六阶图(两个这样的图见图 1.3)对振幅和强度的贡献将正比于 α^3 和 α^6 。这样,相互作用振幅的准确表达式就是一个 α 幂数增加的无穷级数。考虑到 α 值很小 ($\alpha = 1/137$),这个级数的项值下降很快,而级数是收敛的。这将使在计算精细效应时得到准确的定量结果(见 5.2 和 5.5.5)*

费因曼图的方法也可以用来描述强核子相互作用(虽然描述也许仅仅是定性的)。按前述方法画出图,此时外面的折线表示相互作用的核子,而图中的虚线代表虚 π 介子。和前面一样,外线产生于 $-\infty$,而终止于 $+\infty$,无任何中断(重子荷守恒定律)。和前面一样,顶点描述相互作用过程,而相互作用的强度用核子的介子荷 g_N 而不是用电荷 e 来表征。

注意以下这点是非常重要的:与精细结构常数 $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ 相类比,可从 g_N 值得到无量纲量 $f = g_N^2/\hbar c$,它的数量级是 1,也就是 $g_N \approx 10$ 。 f 的值可通过与实验进行比较而估计出。(例如,通过与原子核中每个核子的结合能的比较,或与 $(N-N)$ 散射数据比较)。这意味着

* 应注意,尽管 α 值不大,由于在对虚粒子动量的积分过程中,出现发散,随着 n 的增加,给定阶数 n 的图的数目增加,辐射校正的考虑变得极为复杂。