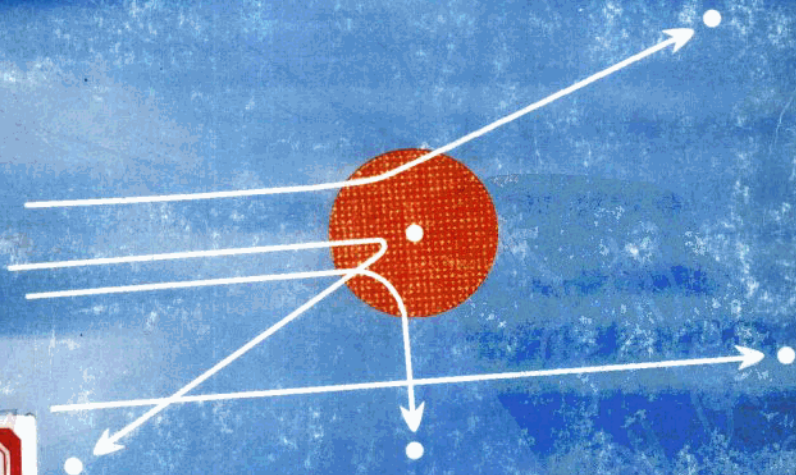


柳继锋 编著

Particle physics

粒子物理



.2



GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS

广西师范大学出版社

粒子物理

柳继锋 编著

广西师范大学出版社

· 桂林 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

粒子物理 / 柳继锋编著. -- 桂林: 广西师范大学出版社, 2002. 7

ISBN 7-5633-3624-9

I. 粒… II. 柳… III. 基本粒子—物理学—高等学校—教材 IV. O572.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 050080 号

广西师范大学出版社出版发行

{ 桂林市育才路 15 号 邮政编码: 541004 }
{ 网址: <http://www.bbtpress.com.cn> }

出版人: 萧启明

全国新华书店经销

广西师范大学出版社印刷厂印刷

(广西桂林市临桂县金山路 168 号 邮政编码: 541100)

开本: 890 mm × 1 240 mm 1/32

印张: 4.75 字数: 142 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

印数: 0 001 ~ 2 000 定价: 7.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

内容提要

粒子物理又称高能物理,是当前物理学的前沿学科之一.它是研究物质的深层次的微观结构和基本相互作用及运动规律的学科.

本书是学习粒子物理的入门书.全书共分四章,从基本粒子发展史出发,提出当前对基本粒子的看法;粒子运动的守恒量 and 对称性;粒子间基本相互作用;强子结构的夸克模型.书后还配有思考与练习.

本书易读易懂,又能引导读者进入深层次的分析,了解新粒子、新知识、新成果;在论述上采用定性、半定量方法,避开繁琐的数学推导,易教易学;同时注重发现新规律过程中的经验教训,有利于科学素质和创新思维的训练和培养.

本书可作为普通高校和师范院校的物理学专业和相关专业学生的教科书,也可供相关专业研究生用的教材,对于粒子物理有兴趣的教师和读者也是一本有益的参考书.

前 言

物质世界是一个多种多样、千变万化的世界，千百年来为了认识它，改造它，人类一直对它进行着无尽的探索。

人类对物质世界的认识，早期的来源之一就是物质结构的探索。随着探索的深入，人们对物质结构的认识也在不断深入。从远古时期，我国的“五行”学说、古希腊的“原子”学说，到19世纪初，人们认为92种元素是组成物质的基本单元。19世纪末20世纪初，物理学基本上完成了它对宏观世界的描写，开始向物质结构的更深层次进军。人们用放射性和粒子碰撞的方法，发现了质子、中子等粒子。20世纪50年代，类似于质子、中子的“基本粒子”大量地涌现出来，逐渐超过了化学元素的数目，于是诞生了一门研究这些“基本粒子”结构的学科，这就是今天的粒子物理学。

粒子物理学是一门研究物质的微观结构、基本相互作用和运动规律的新兴的、前沿的学科，它的研究目的是寻找物质的基本结构和支配这些物质的规律。近40年来，粒子物理学作为一门新兴的学科已经得到了迅速的发展，人们对物质微观结构、基本相互作用和运动规律的认识逐步深入，并进入一个新的层次。多年来，粒子物理学始终处于物理学的前沿，实验和理论内容十分丰富，成为物理学的重要组成部分。近一个世纪以来，许多著名科学家在这个领域做了深入、艰辛的研究，获得了一个又一个的杰出成果。粒子物理学是人类科学的前沿，许多新思想在那里迸发，许多物质世界的新规律在那里被发掘，相应地，许多诺贝尔物理学奖也在这一领域找到了它应有的主人。

那么，什么是基本粒子？基本粒子具有什么特征和结构？以及粒子

间的基本相互作用、粒子运动的守恒量和粒子物理学的发展等问题,本书将用通俗易懂的语言、避开烦琐的数学推导,向读者进行介绍.书末还附有思考与练习,以利于读者学后思考和练习.

本书是从作者近年来授课和讲座的讲稿中整理出来的,当然也包含了多年来研究的科研成果.梁伟红、谭华玲两位同志参加了本书的整理工作;西南师范大学的殷传宗教授、广西师范大学的杨永桐教授对此书做了认真的审查;广西大学的吕国雄教授提出了很好的修改意见;陈海璇、刘敏两位研究生参加了书稿的校对工作;广西师范大学出版社的唐丹宁副编审在编辑中也花了很多心血.在此向他们表示诚挚的谢意!

同时也向参考文献中的作者表示真诚的感谢,是他们的资料使此书的编写得以完成.

由于作者学识有限,难免有不足之处,请读者们批评指正.

目 录

第一章 什么是基本粒子	1
第一节 历史上对基本粒子的看法	1
一、远古时期的物质要素	1
二、19 世纪的物质元素	2
三、近代的基本粒子	2
第二节 现代的基本粒子	4
第三节 基本粒子的种类和相互转化	8
一、基本粒子的产生	9
二、基本粒子的分类	10
三、基本粒子的相互转化	13
四、奇异粒子	14
第四节 反粒子	17
一、反粒子的理论预言	17
二、正电子的发现	22
三、其他反粒子	23
第五节 暗物质	25
一、暗物质的具体形态	26
二、寻找暗物质	27
三、暗物质中的新粒子	27
第二章 对称性及守恒量	29
第一节 力学量随时间的变化和对称变换	29

一、力学量随时间的变化	29
二、对称变换	30
三、对称变换群	30
第二节 空间、时间的平移不变性和动量、能量守恒	31
一、空间平移对称性和动量守恒定律	31
二、时间平移对称性和能量守恒定律	33
第三节 转动对称性和角动量守恒定律	34
第四节 空间反射不变性和宇称守恒	35
一、反射算符 \hat{P}	35
二、空间反射不变性和宇称守恒	36
三、算符的分类及标量、矢量的分类	36
四、弱作用下宇称不守恒	37
第五节 全同粒子交换对称性	37
一、交换不变性	37
二、交换对称性及守恒量	38
第六节 时间反演及其他对称性	38
一、时间反演的讨论	38
二、时间反演不变性的守恒量问题	41
三、其他对称性和守恒律	41
第七节 对称性和简并微扰	45
一、能级简并与对称性	45
二、对称性与微扰	46
第八节 超对称性和对称性的破缺	47
一、超对称性的对称原理	47
二、对称性的破缺及其动力学分析	48
第三章 基本粒子的相互作用	51
第一节 基本粒子相互作用的一般特性	51
第二节 强相互作用	54

一、核力的性质	55
二、核力的唯象理论	57
三、核力介子交换理论	59
四、散射振幅与相互作用势	63
第三节 电磁相互作用	64
一、原子核的电磁形状因子	65
二、核子的内部结构描述	67
三、部分子模型	69
四、EMC 效应	74
五、正负电子对撞	76
第四节 弱相互作用	79
一、弱相互作用的基本性质	80
二、弱相互作用强度的唯象理论	85
三、弱相互作用中宇称不守恒	93
第五节 基本相互作用的统一	94
一、弱电统一理论	95
二、大统一理论(GUT 理论)	98
第四章 强子结构的夸克模型	102
第一节 坂田模型	102
第二节 强子八重态	105
第三节 夸克模型	107
第四节 粲夸克的发现	108
第五节 重子和介子的夸克构成	111
第六节 夸克的“色”	113
第七节 夸克间的相互作用	114
一、强相互作用	114
二、电磁相互作用	115
三、弱相互作用	115
四、强子喷注	117

第八节 夸克和轻子.....	117
第九节 自由夸克的寻找.....	120
第十节 亚夸克模型.....	123
思考与练习	126
参考文献	128
附录	129
I. 群论简介	129
II. 狄拉克方程的解	136

第一章 什么是基本粒子

我们生活在地球上,面对着五彩缤纷、变幻莫测的世界,仰视太空,满天星斗;俯视大地,声光热电。当我们思考着宇宙的时候,第一个问题往往是世界是由什么构成的,是什么力量维系着这个巨大而复杂的世界。这个问题和人类历史一样古老,是科学上一个探索不尽的主题。

对于这个问题的回答,粗略地说,世界是由基本粒子组成的,它们之间是靠相互作用聚集在一起的。

那么究竟什么是基本粒子呢?这是一个历史的、相对的概念。人类关于基本粒子的认识是一个曲折的过程。在不同的历史时期,由于人类认识能力的不同,对基本粒子的看法也不同。下面就历史上对物质元素的认识和近代对基本粒子的看法进行分析,从而回答什么是基本粒子。

第一节 历史上对基本粒子的看法

人们对物质结构的认识是由表及里逐步深入的。人们常常想知道:多种多样、千变万化的物质世界是如何构成的?有没有一些最小的基本单元构成丰富多彩的各种物质呢?这些基本单元又是什么呢?随着人类认识能力的提高,对这些问题的回答也不相同。

一、远古时期的物质要素

我国古代夏朝(前 2000),人们经过对自然界的长期观察,提出了所谓金、木、水、火、土的“五行”学说,认为这是组成物质世界的五种要素。在欧洲,古希腊的恩培多克勒(Empedocles)约在公元前 430 年,就认为大地是由水、火、土和空气等元素组成的。公元前 4 世纪,被马克思

称赞为希腊人中第一个百科全书式的学者德谟克利特(Democritus)认为宇宙间的万物是由大小不同、质量不等、“不可分割”的大量微粒组成的,他把这种微粒称为“原子”,原子的希腊文原意是不可分割的意思,这个“原子”学说虽然缺乏科学根据,但是它是古代朴素的原子说,是微观结构观点的萌芽。

二、19 世纪的物质元素

18 世纪后半期,随着化学的长足进步,人们从化学的观点出发来研究世界的构成,19 世纪初,玻意耳(Boyle)和拉瓦锡(Lavoisier)等人第一次建立了科学的元素概念,道尔顿(J. Dalton)认为,每一种元素都代表一种特定的原子,不同的元素,性质是不同的,他认为原子是物质结构不可分割的基元,1869 年,俄国化学家门捷列夫(Mendeleeff)分析了当时已发现的 63 种元素的化学性质,排列出元素周期表,并预言了当时尚未发现的几种元素,后来人们在实验中陆续发现了这些元素,从 63 种元素增加到 92 种元素,也就是说当时就有了 92 种物质的最小单元(原子),这 92 种原子是否就是最基本的呢?它们是否有结构呢?是否还有更小的基本单元呢?

三、近代的基本粒子

19 世纪末到 20 世纪初,人们发现了一系列新的现象:阴极射线,光电效应,放射性,X 射线,里德伯的光谱线规律等,1897 年,汤姆生(J. J. Thomson)完成了他的著名实验:利用带电粒子在电磁场中偏转的方法,测定了阴极射线的电荷和质量的比值 e/m ,从而发现了电子,1900 年普朗克(M. Planck)研究热辐射理论,提出了光的量子化假说,1905 年,爱因斯坦(A. Einstein)通过光电效应实验发现了光子,从理论和实验上都证明了电荷和光是量子化的,确认了自然界中存在有电子和光子,1911 年,英国科学家卢瑟福(L. Rutherford)发现 α 粒子穿过物质薄层被散射时,存在着大角度散射的现象,说明了原子中的正电荷集中在中心一个很小的区域,形成一个原子核,这就是说每一个原子都是由电子和原子核构成的,从而破除了原子是“物质最终单元”的观点。

原子核是否具有结构?它是由什么组成的?1919年,卢瑟福用放射性元素的 α 粒子去轰击靶核,人类第一次实现了对原子核的人工核反应,从氦核中打出了质子.这说明了原子核并不是组成物质的基本单元,它还是复合系统.如果原子核只是由 Z 个质子组成的,那么,它如何克服静电斥力,而保持自己的稳定性呢?1932年,英国物理学家查德威克(J. Chadwick)在人工核反应实验中发现了中子.同年,苏联物理学家伊凡宁柯(Ivanenko)提出了原子核是由数目几乎相等的质子和中子(统称为核子)组成的.原子核内核子间的强相互作用抵消了质子间的库仑斥力,从而使一些原子核保持相对稳定.当时在研究原子和原子核结构的过程中,发现了电子、光子、质子和中子是“基本”的粒子.人们开始了对物质的微观世界的研究.

原子核是由带正电的质子和不带电的中子组成的,那么, β 衰变中放出的带负电的电子是从哪里来的呢?这是由于大部分原子核是不稳定的,原子核内的质子和中子是可以互相转化的.在 β 衰变中,一个中子转化为一个质子,同时放出一个电子.而对中子质量所做的更为精确的测量表明,中子比质子大约重 1.3 MeV . β 衰变实验给出了令人吃惊的结果:末态粒子能量之和少于初态能量.为了保持这一衰变中能量守恒定律仍然成立,1931年,泡利(W. Pauli)提出了中微子的假设:原子核的 β 衰变,是原子核内中子和质子之间的转化,同时放出电子(或正电子)及中微子(或反中微子).根据这一假设, β 衰变的反应式为

$${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} + \bar{\nu} \quad (1-1-1)$$

中微子和反中微子是中性的穿透力极强的粒子,即使将千万个地球排在一起,它也可以毫不费力地穿透过去.为什么它有这样强的穿透力呢?这是因为它和物质的作用非常微弱,它在穿越千万个地球时竟没有与其他任何一个原子发生过作用或碰撞.正是由于这个原因, β 衰变中放射出的反中微子是极难检测到的.直到1956年,美国的洛斯阿拉莫斯实验室的雷乃斯和考万利用高功率反应堆产生的中微子源进行实验时才证实了中微子的存在.这样在基本粒子的成员中又增加了一名新的尖兵——中微子.

1930年,28岁的英国年轻人狄拉克(P. A. M. Dirac)在相对论量子力学的研究中预言了反粒子的存在.1932年,27岁的美国人安德森(C. D. Anderson)利用云室研究宇宙射线时发现了带正电荷的电子——正电子,第一次证实了狄拉克的理论.正电子的发现为基本粒子的探索又打开了一个新的领域.果然在1955年,张伯仑(O. Chamberlain)等人在高能加速器实验室里发现了反质子,1956年又发现了反中子.1960年,我国物理学家王淦昌教授领导的实验小组,在联合原子核研究所的10 GeV的质子同步稳相加速器上做实验时,发现了反西格马负超子 Σ^- .到了20世纪60年代,人们几乎把基本粒子的反粒子都找到了.

1935年,日本物理学家汤川秀树(H. Yukawa)为了解释核力的短程性,假设核子之间能够交换介子.1936年,安德森等人在宇宙射线中确实发现了质量为206倍电子质量的粒子,叫 μ 介子,人们长时间误认为它是传递强作用的粒子.直到1947年,英国物理学家鲍威尔(C. F. Powell)在宇宙射线中发现了强作用的真正传递者是质量为273倍电子质量的粒子,称之为 π 介子.而 μ 介子实际上是传递弱作用的轻子,故现在已将它开除出介子范围,改称为 μ 子.

1947年,罗彻斯特(G. D. Rochester)等人在宇宙射线中意外地发现了 K^0 介子和 Λ 超子(质量比核子还重的粒子称为超子),随后又发现了 Σ^+ (西格玛)超子和 Ξ (克希)超子.此外,人们又陆续发现了大批寿命更短($\approx 10^{-22}$ s)的共振态粒子,约有200多种.到20世纪60年代,基本粒子的数目达到300多种.

第二节 现代的基本粒子

20世纪60年代基本粒子的成员增加到如此之多!这使人们认识到基本粒子并不基本,它们一定还有更基本的结构,这样就推动了人们开始向物质更深的层次进军.

质子和中子也不是最基本的,它们也有内部结构,由更基本的粒子

组成。1964年,美国物理学家盖尔曼(M. Gellmann)和茨威格(G. Zweig)提出了强子由夸克组成的模型。我国理论工作者也在1966年提出了类似的层子(夸克)模型。夸克模型的基本图像是这样的:

(1) 强子都可以由三种夸克组成。这三种夸克是:上夸克 u ,下夸克 d ,奇异夸克 s ,它们的电荷分别为 $\frac{2}{3}e$ 、 $-\frac{1}{3}e$ 、 $-\frac{1}{3}e$,而自旋都是 $\frac{1}{2}$ 。

(2) 介子由一个夸克和一个反夸克组成。

(3) 一个重子由三个夸克组成,而一个反重子则由三个反夸克组成。

根据夸克模型的基本图像可以方便地把介子和重子都分为一个个的家族。如果把夸克的量子数加起来,就可以得到相应粒子的各种性质。

夸克是自旋为 $\frac{1}{2}$ 的费米子,当三个夸克形成束缚态时,可能有两种自旋状态。除了构成自旋为 $\frac{1}{2}$ 的重子外,还能构成自旋为 $\frac{3}{2}$ 的重子。自旋为 $\frac{3}{2}$ 的重子应当有10个,但在当时的实验室里,只发现了9个,而由三个奇异夸克(sss)构成的 Ω^- 粒子根本不知在哪里。盖尔曼预言了 Ω^- 粒子的存在,以及它的基本性质。不久在实验中果然找到了这样一个粒子。它成了盖尔曼获得诺贝尔奖的基石,夸克模型获得了很大的成功。

1974年,美籍华人丁肇中教授领导的研究小组宣布发现了一个新粒子,命名为 J 粒子。第二天,美国斯坦福大学的利希特(B. Richter)教授又宣布发现了一个新粒子,取名为 ψ 粒子。杂志社编辑部发现这两个新粒子是一样的,只好将这新粒子称为 J/ψ 粒子。这个粒子很重(3.1 GeV,约为质子质量的3倍),但又很稳定,利用原有的夸克模型很难描写这个粒子的行为。这说明必须存在另一个新的夸克,叫做粲夸克 c 。 J/ψ 粒子就是由粲夸克 c 和反粲夸克 \bar{c} 组成的。1977年莱德曼(L. M. Lederman)又发现了一个新粒子 γ ,它是由一个新夸克——底夸克 b 和反底夸克 \bar{b} 组成的。有了底应该有顶,所以理论上应该有一个顶夸克 t ,这个顶夸克直到1995年才发现。到目前为止,夸克已有6种,一般称为

六种味道不同的夸克(u, d, s, c, b, t)。

夸克还带有不同的“色荷”。“色荷”是夸克所具有的一种特性。这里的“色”不是日常生活中熟悉的颜色。带有电荷的物体之间有电磁相互作用,带有“色荷”的夸克之间有强相互作用。“色荷”有三种,也借用“红”、“黄”、“蓝”来区分。每一类夸克都存在三种“色”。

那么,现代的基本粒子究竟指的是什么呢?我们认为现代的基本粒子应有如下三个家族:

(1) 夸克家族。世界上数以百计的强子都是由夸克组成的。夸克也可以分为三代,每一代是两种。第一代是 u、d 夸克;第二代是 c、s 夸克;第三代是 t、b 夸克。这 6 种夸克分别有三色,称六味三色。这样,夸克有 $6 \times 3 = 18$ 种,加上它们的反夸克共有 36 种,这是现代基本粒子队伍中的第一个大家族。表 1-1 列出了 u、d、s、c、b、t 这 6 种夸克的性质。

(2) 媒介子家族。媒介子是传递相互作用的粒子,也称为规范粒子。光子 γ 传递电磁相互作用,中间玻色子 W^+ 、 W^- 、 Z^0 传递弱相互作用,胶子(8 种)传递强相互作用(夸克之间是通过交换胶子而相互吸引的)。许多迹象表明,胶子是存在的(依据它的存在而进行的计算都与实验一致),但没有发现过自由的胶子。以上三类媒介子共有 12 种。此外,理论上认为应存在传递引力相互作用的引力子,但在实验上尚未发现。表 1-2 列出了规范粒子的主要性质。

(3) 轻子家族。轻子只参与弱作用,不参与强作用。已发现的轻子有 6 种:电子, μ 子, τ 轻子,电子型中微子 ν_e 、 μ 子型中微子 ν_μ 、 τ 轻子型中微子 ν_τ 。电子、 μ 子、 τ 轻子各带一个电子电荷,三种类型的中微子都不带电。电子、 μ 子、 τ 轻子的质量之比为 $1 : 207 : 3\,492$,它们的质量相差很大。轻子是基本粒子,到目前为止还没有找到它们有内部结构的证据。现在认为轻子可以分为三代,每一代有两种。第一代是电子(e)和电子型中微子(ν_e),第二代是 μ 子和 μ 子型中微子(ν_μ),第三代是 τ 轻子和 τ 轻子型中微子(ν_τ)。轻子连同反轻子共有 12 种。表 1-3 给出了轻子族的性质。

表 1-1 夸克及其性质

名称	符号	自旋	电荷	同位旋 (I, I_3)	重子数	奇异数	粲数	底数	顶数
上夸克	u	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
下夸克	d	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
奇异夸克	s	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	0	$\frac{1}{3}$	1	0	0	0
粲夸克	c	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}e$	0	$\frac{1}{3}$	0	1	0	0
底夸克	b	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	0	$\frac{1}{3}$	0	0	1	0
顶夸克	t	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}e$	0	$\frac{1}{3}$	0	0	0	1

表 1-2 规范粒子及其性质

名称	符号	传递的 相互作用	质量	自旋	电荷	寿命
光子	γ	电磁	0	1	0	∞
弱中间 玻色子	W^+ Z^0	弱	81.8 GeV 92.6 GeV	1	$\pm e$ 0	<6.5 GeV <4.6 GeV
胶子	G(g)	强	(0)	(1)	(0)	(∞)
引力子		引力	(0)	(2)	(0)	—

表 1-3 轻子族及其性质

名称	符号	质量/MeV	寿命/s	自旋	电荷
电子	e	0.511	∞	$\frac{1}{2}$	$-e$
电子型中微子	ν_e	<45 eV	∞	$\frac{1}{2}$	0
μ 子	μ	105.659	2.197×10^{-6}	$\frac{1}{2}$	$-e$
μ 子型中微子	ν_μ	<0.25	∞	$\frac{1}{2}$	0
τ 轻子	τ	1784.2	3.3×10^{-13}	$\frac{1}{2}$	$-e$
τ 轻子型中微子	ν_τ	<70	—	$\frac{1}{2}$	0