

陆 埏 罗辽复 著

从电子到夸克 ——粒子物理



物 理 学 基 础 知 识 丛 书

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书通俗地阐述了有关基本粒子的基础知识,包括光子、轻子、强子的性质,以及各种电磁作用、弱作用和强作用过程。对强子结构、对称性、新粒子等问题亦作了较多讨论。还介绍了基本粒子的发展史和中外有关科学家的贡献。

本书可供具有中等以上文化程度的学生、科技干部阅读。

物理学基础知识丛书

从电子到夸克

——粒子物理

陆 埏 罗辽复 著

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1992 年 12 月第二次印刷 印张: 5 1/4

印数: 4 001—8 000 字数: 97 000

ISBN 7-03-003296-9/O · 596

定价: 2.50 元

《物理学基础知识丛书》第二届编委会

主 编: 马大猷

副主编: [美] 吴家玮 汪 容

编 委: 王殖东 陆 埏 冯 端 杜东生
陈佳圭 赵凯华 赵静安 俞文海
潘桢镛 张元仲 姜淑华

本书责任编辑: 汪 容

丛 书 序

1978年8月,中国物理学会在庐山召开年会,不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用,建议中国物理学会与科学出版社合作,编辑出版一套《物理学基础知识丛书》,有计划有系统地普及物理学的基础知识和物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此,中国物理学会理事会进行了认真讨论,积极热情地支持了这一建议,于是,就在风景绮丽的庐山,在中国物理学会和科学出版社的共同主持下,正式成立了本丛书的编委会,讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划,正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律,物质的结构及其相互作用,它是许多科学技术的基础。从本世纪开始,物理学经历了极其深刻的革命,从宏观发展到微观,从低速发展到高速,由此诞生了量子物理学和相对论,并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来,物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就。不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用,使人类掌握了新的能源;半导体科学技术的发展,导致了计算技术和自动控制系统的革命;激光的出现焕发了经典光学的青春;凝聚态物理学的发展,使人们不断创造出许多性

能大大提高的材料……因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动，深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、**陆学善**等同志的热情赞助和关怀。香港科技大学校长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意

《物理学基础知识丛书》编委会

目 录

第一章 建造物质大厦的砖石.....	1
分子·原子·粒子	1
人类发现的第一个基本粒子——电子	2
人类发现的第二个基本粒子——光子	5
又是波、又是粒子	7
放射性现象	9
原子模型	10
角动量也是量子化的	14
不相容原理	16
原子核是基本粒子吗?	17
建造物质大厦的砖石	21
第二章 粒子物理学的降生.....	23
有负质量粒子吗?	23
粒子世界的半边天	25
β 蜕变的能量失窃案	31
中微子的归案	34
理论预言了 π 介子	37
寻找 π 介子	38
神秘的 μ 子	39
π 介子真的找到了	42

$\nu_\mu \approx \nu_\tau$	45
粒子物理学成为一门独立的学科	46
世界上总共只有四种力	47
粒子有四大类	49
粒子过程的形象化表示——费曼图	51
第三章 一批不速之客——奇异粒子	55
一批不速之客	55
不速之客的标记——奇异数	57
奇中奇——中性 K 介子	61
第四章 镜子里的世界	65
对称与守恒	65
镜像与宇称	67
弱作用中宇称守恒吗?	71
吴健雄的实验	73
空间真的左右不对称吗?	75
反粒子才是粒子在镜子里的像	77
左旋中微子	79
CP 仍有点不守恒	81
时间反演也有点不对称	82
有磁荷吗?	83
第五章 短命粒子——共振子	85
这么短的寿命怎么测量?	85
最早观测到的共振子	86
共振子的大量涌现	88
共振子的电磁蜕变	92
第六章 到粒子内部去	94

强子结构的最初探索	94
坂田模型	95
八重态与十重态	96
粒子中的“冥王星”	99
夸克——一个奇怪的名字	102
强子由夸克组成	105
层子有“色”又有“味”	108
色是强作用的根源	110
从层子角度看粒子过程	112
再做“油滴”实验	114
卢瑟福实验的翻版	115
喷注——一部分子的影子	118
通力合作	120
第七章 J/ψ 揭开了新的序幕	122
J/ψ 的轰动	122
J/ψ 究竟是什么粒子?	125
两类实验	128
粲“原子”	131
带粲数的强子	132
“美”和“真”	135
轻子家族也添了新成员	137
轻子和层子的三个世代	139
第八章 走向统一	140
统一理论的历史回顾	140
四种作用的比较	141
杨-米尔斯场与希格斯场	143

究竟有没有传递弱作用的粒子?	144
弱作用和电磁作用的统一	145
胶子也是规范粒子	149
弱·电·强大统一	150
粒子世界的未知海洋还在前面	154

第一章 建造物质大厦的砖石

分子·原子·粒子

我们日常所见的任何东西，总是由更小的东西组成的。一幢高楼大厦由砖、石、水泥等建筑材料构成；一架电视机由电阻、电容、晶体管等电子元件组装而成；一本书由一页一页纸装订而成……。但是，砖、石、纸、电阻……，这些仍然是由更小的东西构成的。现在大家都已知道，各种物质都是由分子构成的。分子是表征物质特性的最小单元。说得更确切些，分子是各种物质保持其化学性质的基本单元。以水为例，一桶水、一杯水或者一滴水，它们都具有完全相同的化学性质。一滴水还可以继续再分割，一直分割到水分子，仍然可以保持水的基本化学性质不变。

当然，水分子还可以继续再分割。事实上，一个水分子是由两个氢原子和一个氧原子组成的，化学上通常记为 H_2O ，H表示氢元素或氢原子，O表示氧元素或氧原子。但是，无论氢原子或者氧原子或者它们的混合物，都不再具有任何水的化学性质。

世界万物均由分子构成，分子又由原子构成。每一种原子对应一种化学元素。比如，氢原子对应氢元素，氧原子对应

氧元素等。现在,包括人工制造的不稳定元素在内,人们已经知道有一百多种元素了。这些元素都由相应的原子组成。原子是化学元素的最小单元。这些在百余年前已为人们所知道,不过那时原子、分子在人们的脑海里还只有一个模糊的概念,更不用说原子本身又是由什么东西构成的了。

“基本粒子”。按其原意是构成世界万物的不能再分割的最小单元。这其实只是一种历史概念。随着认识的不断深化,这种概念本身也在演变。当初,“原子”这个概念,也是指构成世界万物的最终单元。但是,时至今日,已没有人再认为原子不能再分割了。“最小单元”这个概念就不得不转移到下一个层次去。“基本粒子”一词也就应运而生。当然,本书所用“基本粒子”一词,并非说它永远不能再分割,而只是指直到现在还未被进一步分割的物质单元,尽管已有种种迹象表明它仍然有其更深的结构。为了叙述的方便,“基本粒子”更常被简称为“粒子”。

人类发现的第一个基本粒子——电子

上世纪末(1897年),汤姆逊(J. J. Thomson)发现了电子,这是人类认识的第一个基本粒子。

汤姆逊发现电子的时候,人们已经知道存在着基本的电荷单位。早在六年以前,斯东尼(G. J. Stoney)甚至已经起了“电子”这个名字,用来代表基本的电荷单元。但是,那时人们并不清楚这种基本电荷的实体究竟是什么。当时斯东尼曾

声称：每一个原子至少必须包含两个电子，一个为正，一个为负，因为原子本身是电中性的。实际上，当时人们知道的荷电实体还只是正离子和负离子。

汤姆逊是在研究阴极射线时发现电子的。早在 1876 年，戈德斯坦 (E. Goldstein) 在研究真空放电时就曾发现有一种射线从真空管内的负极上射出来，并且称之为阴极射线。克鲁克斯 (W. Crookes) 进一步研究了磁场对阴极射线的影响，发现它会受到磁场的偏转，因而证明了阴极射线是一种带电粒子束。但是，这些究竟是什么样的带电粒子呢？要确切地回答这个问题，就必须实地测量一下这种阴极射线粒子的质量。

著名的汤姆逊实验的思想十分简单，可用图 1.1 来说明。图中 F 为真空管， A 为阴极， B 为阳极，阳极上有准直孔，阴极射线从阴极发出，加速射向阳极，通过准直孔飞向荧光屏 E ，在其上打出光点来。在汤姆逊的实验中，他首先把真空管放置在磁场（磁场垂直于图面）中，使阴极射线受到磁场的偏转后打上荧光屏。显然，粒子电荷愈大，偏转也愈大；而其质量愈大，则偏转就愈小。如果射线粒子的速度已知，就可以根据

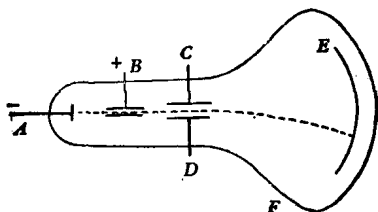


图 1.1

光点偏离平衡位置的大小确定它的电荷与质量之比 (e/m)。至于射线粒子的速度，汤姆逊是这样测定的：他在 C 、 D 上再加以电压，使 C 、 D 两平板间产生电场。带电粒子在电场中运动也要受到偏转。调节电压大小，使电偏转与磁偏转相抵销，屏上光点就保持在平衡位置上。利用电偏转与磁偏转对于粒子速度的不同依赖关系，就可以测定粒子的速度。

汤姆逊测定的阴极射线荷质比 (e/m) 较之在电解过程中测定的离子荷质比要大数千倍。难道阴极射线粒子的电荷为离子电荷的数千倍，而且此倍数固定不变？这是难以设想的。唯一的自然解释是阴极射线由一种质量比离子轻数千倍的带负电粒子组成。这就是汤姆逊所发现的电子。根据近年来的精确测定，电子的电荷 ($-e$) 和质量 (m_e) 分别为

$$\begin{aligned} e &= 4.803242(14) \times 10^{-10} \text{ 静电单位} \\ &= 1.6021892(46) \times 10^{-19} \text{ 库仑,} \\ m_e &= 9.109534(47) \times 10^{-28} \text{ 克,} \end{aligned}$$

括号中的数字是末两位的误差。

一个重大的发现往往看起来容易，做起来难。汤姆逊的发现也不例外。实际上，在汤姆逊本人的早期实验中就没有观察到阴极射线受电场的偏转。主要的困难在于真空技术不发达，管中真空度还不够高，阴极射线粒子在其行程上受到了管内残存气体多次碰撞的干扰。只有在克服了真空技术上的困难以后，才成功地发现了电子。

人类发现的第二个基本粒子——光子

光,人类无时无刻不在与之打交道。人们天天看到它,从它取得信息,并且高度评价它的作用。所谓“百闻不如一见”,说的就是从光取得的信息较之从声取得的信息更胜百倍。但是,人类对于光的本性的认识却经历了漫长的岁月。

约三百年前,牛顿根据光总是直线传播的事实,曾断言光是由高速运动的微粒组成的。这就是著名的微粒说。稍后,惠更斯提出了与牛顿学说相对立的波动说,认为光是一种波动。

这两种学说之间争论了一百多年。按照波动说,光线应当会呈现干涉和衍射现象;按照微粒说,则不会有这些现象。要判定究竟波动说对,还是微粒说对,关键在于是否能观察到这些现象。1801年,英国的杨(T. Young)果真观察到了光的干涉现象。1818年,法国的菲涅耳又进而观察到了光的衍射现象。从而宣告了波动说的胜利,微粒说的失败。

整个十九世纪是光的波动说兴旺发达的时期。波动说全盛的最高潮就是麦克斯韦电磁理论的建立。这个理论指出,光实质上是一种电磁波。作为一种波动,光应当用波长 λ 和频率 ν 来标志,它们与光速 c 之间有如下关系

$$\nu\lambda = c = 2.99792458 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒。} \quad (1.1)$$

通过光谱学的发展,人们对各种光的波长作了十分精密的测量。早在1893年,迈克耳孙(A. A. Michelson)就曾十

分精确地测量过镉 (Cd) 原子光谱中红谱线的波长, 其值为

$$\lambda_{\text{Cd}} = \frac{1}{1,553,164} \text{ 米。}$$

光谱线波长的精确测量曾经作为发现新元素的有力工具起过十分巨大的作用。

随着电子的被发现, 人们注意到, 当用紫外线照射金属时, 金属表面上会飞出一些电子来, 这就是所谓光电效应。从对飞出电子的能量 E_e 所做的测量, 发现增强紫外线的强度不会改变飞出电子的能量; 而增大光(紫外线)的频率, 却可以显著增大电子的能量。这个现象用光的波动学说是完全无法解释的。1905 年, 爱因斯坦利用五年前普朗克提出的量子概念, 得出了光的“新微粒论”, 认为光是由微粒(即光子)组成的, 每个光子的能量为

$$E = h\nu, \quad (1.2)$$

其中 h 为普朗克常数,

$$h = 2\pi\hbar,$$

$$\hbar = 1.0545887(57) \times 10^{-34} \text{ 焦耳} \cdot \text{秒}。$$

认为光电效应是金属内一个电子吸收一个光子后飞离金属表面的过程。这个学说十分简洁, 它完满地解释了波动说所无法解释的事实: 影响飞出电子能量的是照射光的频率而不是它的强度。光电效应清晰地显示了光的粒子性。光子作为一种粒子, 是人类发现的第二个基本粒子。

如果光子是一种真正的粒子, 那么它不仅具有能量, 还应具有动量。爱因斯坦根据相对论的要求, 证明光子的动量值

p 与波长 λ 有如下关系

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (1.3)$$

动量是一个矢量，指向光的传播方向。一个光子与一个静止的电子相碰撞，碰撞后电子将获得动量，因而光子将不仅改变方向，还将改变动量值，从而改变波长。1923年开始，康普顿(A. H. Compton)和吴有训用X射线(一种波长很短的光)照射各种物质，测量从物质上散射出来的X射线的波长。他们果真发现散射后X射线的波长变长了，并且不同方向散射出来的X射线的波长也不同。测量结果与用光子概念计算出来的完全一致。这个现象称为康普顿-吴有训效应，或者简称为康普顿效应。这个效应的发现进一步确证了光子概念的正确性。

又是波、又是粒子

光子概念的提出并不意味着牛顿微粒说的简单复活，也不意味着惠更斯波动说的彻底破产。看一看(1.2)和(1.3)两式就可以明白，光子实际上是粒子和波动两种概念相结合的产物。一方面，它看起来象粒子，具有一份一份的能量和动量，公式左边的 E 和 p 就是表示粒子特性的能量和动量；另一方面，它看起来又象波动，具有频率和波长，公式右边的 ν 和 λ 就是表示波动特性的频率和波长。这种既象粒子又象波动的特性，物理学中叫做二象性。

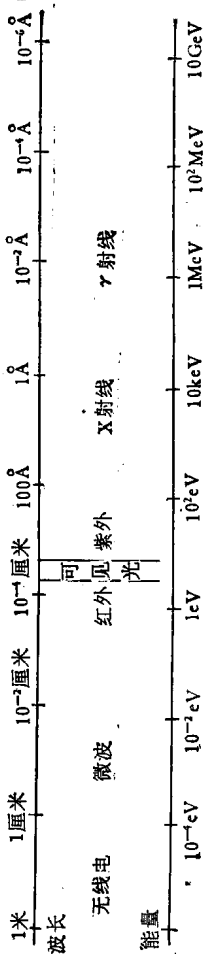


图 1.2

实际上,这种二象性不仅光子有,而且一切粒子也均有。可以说,对于任何粒子,均有相应的波动性,称为德布洛意波,(1.2)和(1.3)也同样成立。不过,对于静质量不为 0 的粒子,比如电子,质量会随着运动速度而变,按照相对论

$$m_v = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.4)$$

m_v 是速度为 v 时的质量。通常所说的粒子质量指其静止时的质量,即 m ,而粒子动量 p 和能量 E 分别为

$$p = m_v v$$

和

$$E = m_v c^2. \quad (1.5)$$

(1.5) 就是著名的爱因斯坦质能关系式。这时动量与能量间的关系为

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (1.6)$$

光子是电磁波(电磁辐射)的量子,可以有各种波长(各种能量),从波长很长(即能量很低)的无线电波,直到波长很短(即能量很高)的 X 射线、 γ 射线,如图 1.2 所示。图 1.2 中, eV 表示“电子伏”,是一种能量单位,即一