

基本粒子

物理学是研究自然界的物质结构,大到宇宙的结构,小到最微小的粒子的结构,以及物质运动的最普遍最基本的规律的自然科学。自伽利略-牛顿时代(17世纪中叶)以来,特别是19世纪中叶以来,物理学已有了长足的发展。今天的物理学已揭示了自然界的许多奇特的奥秘,在各方面提供了许多有趣又有用的知识。我们将在本书的适当地方向同学们介绍一些这样的知识。作为本书的开篇,下面就来简要介绍现代物理学在物质的基本结构——粒子——的研究中所取得的认识。

粒子的发现与特征

物质是由一些基本微粒组成的,这种思想可以远溯到古代希腊。当时德谟克利特(公元前460—前370年)就认为物质都是由“原子”(古希腊语本意是“不可分”)组成的。中国古代也有认为自然界是由金木水火土5种元素组成的说法。但是物质是由原子组成的这一概念成为科学认识是迟至19世纪才确定的,当时认识到原子是化学反应所涉及的物质的最小基本单元。1897年,汤姆逊发现了电子(e),它带有负电,电量与一个氢离子所带的电量相等。它的质量大约是氢原子质量的 $1/1800$,它存在于各种物质的原子中,这是人类发现的第一个更为基本的粒子。其后1911年卢瑟福通过实验证实原子是由电子和原子核组成的。1932年又确认了原子核是由带正电的质子(p ,即氢原子核)和不带电的中子(n ,它和质子的质量差不多相等)组成的。这种中子和质子也成了“基本粒子”。1932年还发现了正电子(e^+),其质量和电子相同但带有等量的正电荷。由于很难说它是由电子、质子或中子构成的,于是正电子也加入了“基本粒子”的行列。之后,人们制造了大能量的加速器来加速电子或质子,企图用这些高能量的粒子作为炮弹轰开中子或质子来了解其内部结构,从而确认它们是否是“真正的基本粒子”。但是,令人惊奇的是在高能粒子轰击下,中子或质子不但不破碎成更小的碎片,而且在剧烈的碰撞过程中还产生了许

多新的粒子,有些粒子的质量比质子的质量还要大,因而情况显得更为复杂。后来通过类似的实验(以及从宇宙射线中)又发现了几百种不同的粒子。它们的质量不同、性质互异,且能相互转化,这就很难说哪种粒子更基本。所以现在就把“基本”二字取消,统称它们为粒子。本部分的题目仍用“基本粒子”,只具有习惯上的意义。

在粒子的研究中,发现描述粒子特征所需的物理量随着人们对粒子性质的认识逐步深入而增多。常见的这种物理量可以举出以下几个。

1. 质量

粒子的质量是指它静止时的质量,在粒子物理学中常用 MeV/c^2 作质量的单位。 MeV 是能量的单位, $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$ 。由爱因斯坦质能公式 $E = mc^2$ (见本书 6.9 节)可以求得, $1 \text{ MeV}/c^2$ 的质量为

$$1.602 \times 10^{-13} / (3 \times 10^8)^2 = 1.78 \times 10^{-30} \text{ (kg)}$$

2. 电荷

有的粒子带正电,有的带负电,有的不带电。带电粒子所带电荷都是量子化的,即电荷的数值都是元电荷 e (即一个质子的电荷)的整数倍。因而粒子的电荷就用元电荷 e 的倍数来度量,而

$$1 e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

3. 自旋

每个粒子都有自旋运动,好像永不停息地旋转着的陀螺那样。它们的自旋角动量(简称自旋)(见本书 5.4 节)也是量子化的,通常用 $\hbar$ 的倍数来度量,而

$$1 \hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

有的粒子的自旋是 $\hbar$ 的整数倍或零,有的则是 $\hbar$ 的半整数倍(如 $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ 倍)。

4. 寿命

在已发现的数百种粒子中,除电子、质子和中微子以外,实验确认它们都是不稳定的。它们都要在或长或短的时间内衰变为其他粒子。粒子在衰变前平均存在的时间叫做粒子的寿命。例如一个自由中子的寿命约 12 min ,有的粒子的寿命为 10^{-10} s 或 10^{-14} s ,很多粒子的寿命仅为 10^{-23} s ,甚至 10^{-25} s 。

对各种粒子的研究比较发现,它们都是配成对的。配成对的粒子称为正、反粒子。正、反粒子的一部分性质完全相同,另一部分性质完全相反。例如,电子和正电子就是一对正、反粒子,它们的质量和自旋完全相同,但它们的电荷和磁矩完全相反。又例如,中子和反中子也是一对正、反粒子,它们的质量、自旋、寿命完全相同,但它们的磁矩完全相反。有些正、反粒子的所有性质完全相同,因此就是同一种粒子。光子和 π^0 介子就是两种这

样的粒子。

A.2 粒子分类

粒子间的相互作用,按现代粒子理论的标准模型划分,有 4 种基本的形式,即万有引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力(见本书 2.3 节)。按现代理论,各种相互作用都分别由不同的粒子作为传递的媒介。光子是传递电磁作用的媒介,中间玻色子是传递强相互作用的媒介,胶子是传递强相互作用的媒介,引力子是传递引力的媒介。

现在还只能假定,它是由一种“引力子”作为媒介的。由于这些粒子都是现代标准模型的“规范理论”中预言的粒子,所以这些粒子统称为规范粒子。由于胶子共有 8 种,连同引力子、光子、3 种中间玻色子,规范粒子总共有 13 种。它们的已被实验证实的特征物理量如表 A.1 所示。

表 A.1 规范粒子

粒子种类	自旋 J	质量 (MeV/c^2)	电荷 $/e$
引力子	2	0	0

从表 A.2 中可以看出 τ 子的质量约是电子质量的 3500 倍,差不多是质子质量的两倍。它实际上一点也不轻。这 6 种“轻子”都有自己的反粒子,所以实际上有 12 种轻子。

实验上已发现的成百种粒子绝大部分是强子。强子又可按其自旋的不同分为两大类:一类自旋为半整数,统称为**重子**;另一类自旋为整数或零,统称为**介子**。最早发现的重子是质子,最早发现的介子是 π 介子。 π 介子的质量是电子质量的 270 倍,是质子质量的 $1/7$,介于二者之间。后来实验上又发现了许多介子,其质量大于质子的质量甚至是质子质量的 10 倍以上。例如,丁肇中发现的 J/ψ 粒子的质量就是质子质量的 3 倍多。这样,早年提出的名词“重子”、“轻子”和“介子”等已经不合适,但由于习惯,仍然一直沿用到今天。表 A.3 列出了一些强子的特征物理量。

表 A.3 一些强子

重子				介子			
粒子种类	自旋/ $\hbar$	质量/ (MeV/c^2)	电荷/ e	粒子种类	自旋/ $\hbar$	质量/ (MeV/c^2)	电荷/ e
p	1/2	939	1	π^+	0	140	1
n	1/2	939	0	π^0	0	140	0
Λ^0	3/2	1520	0	π^-	0	140	-1
N	5/2	1680	1	K^+	0	496	1
Δ^{++}	3/2	1700	2	ω	3	1670	0
Σ^+	3/2	1670	1	h	4	2030	0
Δ^0	3/2	1700	0	J/ψ	1	3100	0
Ω^-	3/2	1672	-1	χ	2	3555	0

A.6

粒子的转化与守恒定律

研究各种粒子的行为时,发现的另一个重要事实是:没有一种粒子是不生不灭、永恒不变的,在一定的条件下都能产生和消灭,都能**相互转化**,毫无例外。例如,电子遇上正电子,就会双双消失而转化为光子。反过来高能光子在原子核的电场中又能转化为一对电子和正电子(图 A.1)。在缺中子同位素中,质子会转化为中子而放出一个正电子和一个中微子。质子遇上反质子就会相互消灭而转化为许多介子。 π 介子和原子核相互碰撞,只要能量足够高,就能转化为一对质子和反质子。前面所提到的粒子衰变也是一种粒子转化的方式。因此,产生和消灭是粒子相互作用过程中非常普遍的现象。

实验证明,在粒子的产生和消灭的各种反应过程中,有一些物理量是保持不变的。这

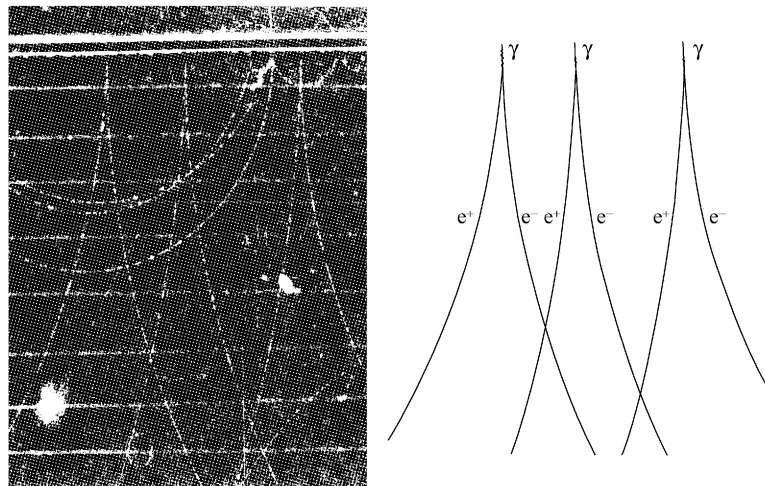


图 A.1 X 光的光子由上方入射,经过铅板后,产生
电子-正电子对的径迹照片与分析图

些守恒量有能量、动量、角动量、电荷,还有轻子数、重子数、同位旋、奇异数、宇称等。例如,对于中子衰变为质子的 β 衰变反应

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

所涉及的粒子,中子 n 和反中微子 $\bar{\nu}_e$ 的电荷都是零,质子 p 的电荷为 1,电子 e 的电荷为 -1 ,显然衰变前后电荷(的代数和)是守恒的。此反应中 n 和 p 的重子数都是 1,轻子数都是 0;而 e 和 $\bar{\nu}_e$ 的重子数都是 0,前者的轻子数为 1,后者的轻子数为 -1 ;也很容易看出这一衰变前后的重子数和轻子数也都是守恒的。同位旋、奇异数和宇称等的概念比较抽象,此处不作介绍。但可以指出,它们有的只在强相互作用引起的反应(这种反应一般较快)中才守恒,而在弱相互作用或电磁相互作用引起的反应(这种反应一般较慢)中不一定守恒。它们不是绝对的守恒量。

A.4 夸克

强子种类这样多,很难想象它们都是“基本的”,它们很可能都有内部结构。前面已讲过,利用高能粒子撞击质子使之破碎的方法考查质子的结构是不成功的,但有些精确的实验还是给出了一些质子结构的信息。1955 年,霍夫斯塔特曾用高能电子束测出了质子和中子的电荷和磁矩分布,这就显示了它们有内部结构。1968 年,在斯坦福直线加速器实验室中用能量很大的电子轰击质子时,发现有时电子发生大角度的散射,这显示质子中有某些硬核的存在。这正像当年卢瑟福在实验中发现原子核的结构一样,显示质子或其他

强子似乎都由一些更小的颗粒组成。

在用实验探求质子的内部结构的同时,物理学家已经尝试提出了强子由一些更基本的粒子组成的模型。这些理论中最成功的是1964年盖尔曼和茨威格提出的,他们认为所有的强子都由更小的称为“夸克”(在中国有人叫做“层子”)的粒子所组成。将强子按其性质分类,发现强子形成一组一组的多重态,就像化学元素可以按照周期表形成一族一族一样。从这种规律性质可以推断:现在实验上发现的强子都是由6种夸克以及相应的反夸克组成的。它们分别叫做上夸克u、下夸克d、粲夸克c、奇异夸克s、顶夸克t、底夸克b,它们的特征物理量如表A.4所示。值得注意的是它们的自旋都是 $1/2$,而电荷量是元电荷 e 的 $-1/3$ 或 $2/3$ 。

表 A.4 夸克

夸克种类	自旋/ $\hbar$	质量/(MeV/ c^2)	电荷/ e
d	$1/2$	9	$-1/3$
u	$1/2$	5	$2/3$
s	$1/2$	1.75×10^2	$-1/3$
c	$1/2$	1.25×10^3	$2/3$
b	$1/2$	4.50×10^3	$-1/3$
t	$1/2$	约 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$	$2/3$

在强子中,重子都由3个夸克组成,而介子则由1个夸克和1个反夸克组成。例如,质子由2个u夸克和1个d夸克组成,中子由2个d夸克和1个u夸克组成, Σ^+ 粒子由2个u夸克和1个奇异夸克组成;而 π^+ 介子由1个u夸克和1个反d夸克组成, K^+ 介子由1个u夸克和1个反s夸克组成, J/ψ 粒子由正、反粲夸克(c, $\bar{c}$)组成,等等。

用能量很大的粒子轰击电子或其他轻子的实验尚未发现轻子有任何内部结构。例如在一些实验中曾用能量非常大的粒子束探测电子,这些粒子曾接近到离电子中心 10^{-18} m以内,也未发现电子有任何内部结构。

关于夸克的大小,现有实验证明它们和轻子一样,其半径估计都小于 10^{-20} m。我们知道核或强子的大小比原子或分子的小5个数量级,即为 10^{-15} m。因此,夸克或轻子的大小比强子的还要小5个数量级。

A.5 色

自从夸克模型提出后,人们就曾用各种实验方法,特别是利用它们具有分数电荷的特征来寻找单个夸克,但至今这类实验都没有成功,好像夸克是被永久囚禁在强子中似的

(因此之故,表 A.4 给出的夸克的质量都是根据强子的质量值用理论估计的处于束缚状态的夸克的质量值)。这说明在强子内部,夸克之间存在着非常强的相互吸引力,这种相互作用力叫做“色”力。

对于强子内部夸克状态的研究,使理论物理学家必须设想每一种夸克都可能具有 3 种不同的状态。由于原色有红、绿、蓝 3 种,所以将“色”字借用过来,说每种夸克都可以有 3 种“色”而被称为红夸克、绿夸克、蓝夸克。“色”这种性质也是隐藏在强子内部的,所有强子都是“无色”的,因而必须认为每个强子都是由 3 种颜色的夸克等量地组成的。例如组成质子的 3 个夸克中,就有 1 个是红的,1 个是绿的,1 个是蓝的。色在夸克的相互作用理论中起着十分重要的作用。夸克之间的吸引力随着它们之间的距离的增大而增大,距离增大到强子的大小时,这吸引力就非常之大,以致不能把 2 个夸克分开。这就是目前对夸克囚禁现象的解释。这种相互作用力就是色力,即两个有色粒子之间的作用力。它是强相互作用力的基本形式。如果说万有引力起源于质量,电磁力起源于电荷,那么强相互作用力就起源于色。理论指出,色力是由被称为胶子的粒子作为媒介传递的。

按以上的说法,由于 6 种夸克都有反粒子,还由于它们都可以有 3 种色,这样就共有 36 种不同状态的夸克。

除了夸克外,按照现在粒子理论的标准模型,为了实现电弱相互作用在低于 250 GeV 的能量范围内分解为电磁相互作用和弱相互作用,自然界还应存在一种自旋为零的特殊粒子,称为希格斯粒子。理论对于它的所有的相互作用性质和运动行为都有精确的描绘和预言,但对它的质量却没有给出任何预言。现在还未在实验中发现这种粒子。从已有的实验结果分析,希格斯粒子的质量应大于 $58.4 \text{ GeV}/c^2$ 。从实验上去寻找希格斯粒子是当前粒子物理实验研究的中心课题之一。

综上所述,规范粒子共有 13 种,轻子共有 12 种,夸克共有 36 种,再加希格斯粒子就共有 62 种。按照现在对粒子世界结构规律的认识,根据标准模型,物质世界就是由这 62 种粒子构成的。这些粒子现在还谈不上内部结构,可以称之为“基本粒子”了(图 A.2)。

这些粒子真是构成物质世界的基本砖块吗?

在约 20 年前,为了建立统一 4 种基本自然力的理论,特别是量子引力理论,物理学家提出一种弦理论。它的基本概念或假设是,各种基本粒子并不是无限小的没有内部结构的点粒子,而是一个个非常小的环或小段。这些环或小段就叫弦。它们的大小和“普朗克长度” 10^{-35} m 可以相比(图 A.2)。这一长度被认为是自然界的最小可能长度,它们也就是最基本的点粒子了。这些弦不仅可以到处运动,而且可以以不同方式(包括不同的形状、频率和能量)振动。这种振动又是量子化的,即只允许某些不同的振动方式存在。根据弦理论,每一种振动方式都相应于一种“基本粒子”,如电子是一种振动方式,d 夸克是另一种振动方式。除了振动方式的不同以外,各种基本粒子都是一样,即都是一样的弦。

一种振动方式的弦是光子,它能说明电磁使用。一种振动方式的弦是引力子,它能说明引力作用。类似地这一理论也说明了强作用和弱作用。4种作用都是同样的弦的不同表现,因而弦理论就做到了4种基本的自然力的统一而成一种“终极理论”。

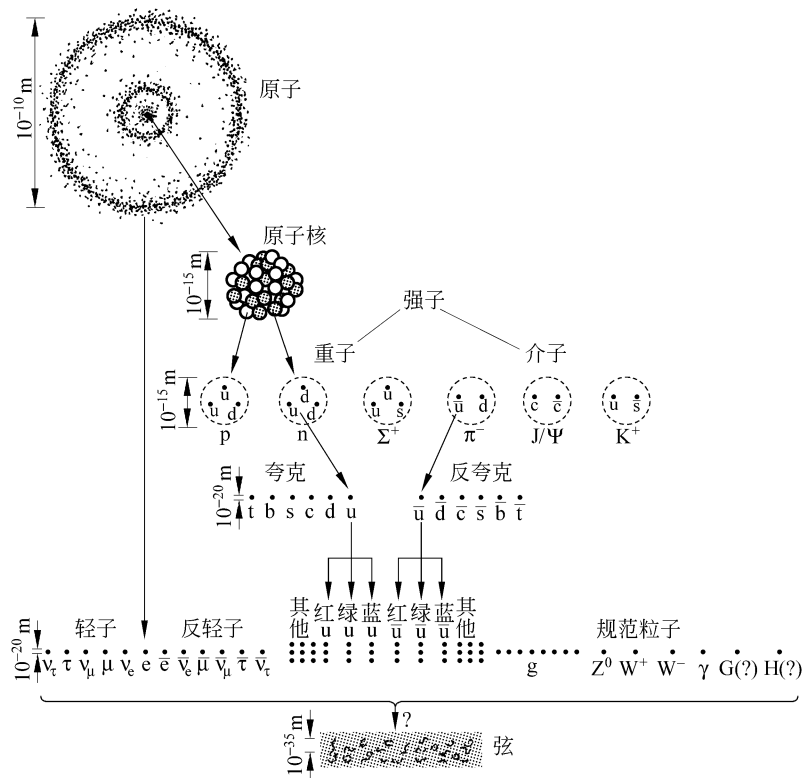


图 A.2 基本粒子示意图

弦理论令人吃惊的一个特点是它必须用 11 维时空(其中 1 维是时间)加以描述。对于我们熟悉的 3 维空间之外的 7 维,弦理论认为它们在我们的 3 维空间中的各点都极度“弯曲”而使自己的线度小于 10^{-35} m,因而我们感觉不出来(想想一床 2 维的大毛巾被,在远处是看不出它上面各处的细小线环所代表的另一维的)。弦理论的另一特点是和弦的不同振动方式相应的各种粒子,其能量都可和“普朗克能量” 10^{19} GeV 相比或更高。和目前实验上能探测出来的最小距离 10^{-18} m 以及人造加速器能达到的最大能量 10^3 GeV 相比,弦理论给出上述距离和能量,在可预见的未来是没有希望用实验探测出来或可能达到的。因此,弦理论目前还是处在一个可以自由设计的理论上的婴儿阶段。要能真正(?)说明客观实体的基本结构并证实 4 种自然力的“超统一”,还有一段很长的路要走。

第

1

篇

力学

力学是一门古老的学问,其渊源在西方可追溯到公元前 4 世纪古希腊学者柏拉图认为圆运动是天体的最完美的运动和亚里士多德关于力产生运动的说教,在中国可以追溯到公元前 5 世纪《墨经》中关于杠杆原理的论述。但力学(以及整个物理学)成为一门科学理论应该说是从 17 世纪伽利略论述惯性运动开始,继而牛顿提出了后来以他的名字命名的三个运动定律。现在以牛顿定律为基础的力学理论叫牛顿力学或经典力学。它曾经被尊为完美普遍的理论而兴盛了约 300 年。在 20 世纪初虽然发现了它的局限性,在高速领域为相对论所取代,在微观领域为量子力学所取代,但在一般的技术领域,包括机械制造、土木建筑,甚至航空航天技术中,经典力学仍保持着充沛的活力而处于基础理论的地位。它的这种实用性是我们要学习经典力学的一个重要原因。

由于经典力学是最早形成的物理理论,后来的许多理论,包括相对论和量子力学的形成都受到它的影响。后者的许多概念和思想都是经典力学概念和思想的发展或改造。经典力学在一定意义上是整个物理学的基础,这是我们要学习经典力学的另一个重要原因。

本篇要讲述的内容包括质点力学和刚体力学基础。着重阐明动量、角动量和能量诸概念及相应的守恒定律。狭义相对论的时空观已是当今物理学的基础概念,它和牛顿力学联系紧密,可以归入经典力学的范畴。本篇第 6 章介绍狭义相对论的基本概念和原理。

量子力学是一门全新的理论,不可能归入经典力学,也就不包括在本篇内。尽管如此,在本篇适当的地方,还是插入了一些量子力学概念以便和经典概念加以比较。

经典力学一向被认为是决定论的。但是,在 20 世纪 60 年代,由于电子计算机的应用,发现了经典力学问题实际上大部分虽是决定论的,但是是不可预测的。为了使同学们了解经典力学的这一新发展,本篇 2.6 节“混沌”中简单介绍了这方面的基本知识。

本篇所采用的牛顿力学基本知识系统图

