

粒子世界概要

An Outline of the Particle World

高崇寿

(北京大学物理系, 教授 北京 100871)

一、粒子及其运动特点

人类在探索自然的奥秘时的一个重要方面是研究物质世界的微小结构。本世纪初以来已经逐步弄清楚了:物质是由原子组成,原子的直径大约是一百亿分之一米;原子中心有一个带正电的原子核,在原子核的周围有带负电的电子运动;原子核很重,原子核外的电子的总质量只占原子质量的万分之二到万分之六;原子核的直径大约是一百万亿分之一米,而一个电子的直径则小于一百亿亿分之一米。如果把原子放大到一个足球场那样大,原子核就像一粒小米那么大,而电子就比最细的土粉还要细。由此可见,原子内部的结构情况是很稀松的,物质粒子所占的空间只是原子所占空间的很小的一部分。原子核是由质子和中子组成,质子带一个单位正电荷,中子不带电。质子的质量大约是电子的 1836.15 倍,中子的质量比质子略重,大约是电子的 1838.67 倍。光也是由许多称为光子的小颗粒组成。电子、质子、光子、中子就是最早发现的粒子。当时认为这些粒子就是物质结构的最小单元,因此把这些粒子以及以后发现的和这些粒子属于同一层次的粒子统称为基本粒子。1932 年 J. 查德威克发现中子 n 。1932 年 C. D. 安德森发现正电子 e^+ 。1956 年 C. L. 科恩和 F. 莱因斯发现反中微子,这样电子、正电子、质子、中子、光子、中微子、反中微子就是初期认识的一批基本粒子。

六十年代以来,实验上陆续发现大量的新的基本粒子,实验和理论的研究显示有些基本粒子仍然观察不到它们占据的空间大小,仍然可以把它们看做是“点”粒子,但是质子、中子等可以直接参与强相互作用的粒子空间分布有一定的大小,肯定有内部结构,它们是由更深层次的粒子所组成。因此国际上就把基本粒子中的“基本”两字去掉,统称为粒子。“基本粒子”这个名称已经成为历史的陈迹。

粒子的运动有它的特有的特点,描写粒子运动的理论必须充分反映这些特点。第一,粒子是微观客体,运动是微观尺度的运动。描写微观尺度运动的特征量是普朗克常数 h ,描写微观粒子运动的规律是量子力学。第二,粒子是做高速运动的,粒子速度的变化常可以和真空光速相比拟。描写高速运动的特征量是真空光速 c ,描写粒子高速运动的规律是狭义相对论。如果粒子的运动特点只有这两个,自然可以推论出粒子物理的基本规律应该是相对论性量子力学。但是粒子的运动还有第三个重要的不可忽视的特点,在粒子的运动过程中,粒子的数目是可变的,粒子可以被产生和湮没。换言之,观察到的粒子系统的自由度数是可变的。只有具有无穷多自由度的系统在运动中才能自然容纳或显现出有限多自由度的变化。而物理学中研究的“场”就是这样的具有无穷多自由度的系统,因为“场”是充满全空间的客体,全空间有无穷多的点,每个点对应至少一个自由度。描写场的运动规律的理论是场论,因此描写粒子运动基本规律的理论是相对论性量子场论。

正因为粒子运动的这些特点,在描写粒子的运动规律时,必不可免地经常遇到 h 和 c 的各种幂次。针对这种情况,高能物理学中常采用一种特殊的单位制,称为自然单位制。自然单位制中规定约化普朗克常数(即普朗克常数 h 被 2π 除)、真空光速 c 、玻耳兹曼常数 k 都等于 1。这样在描写粒子的运动规律时,这些常数就自动地不再出现,所有的公式都大大地简化了。在自然单位制中,只剩下一个独立的量纲,通常取能量做基本的量纲。物理量的量纲分析大大地简化了,许多物理量具有相同的量纲。例如:能量、动量、质量、温度、频率、波数的量纲相同;长度、寿命、磁矩的量纲相同,是能量量纲的倒数;速度、角动量、电荷都成为无量纲量。

质子的质量是 $m = 1.6726231 \times 10^{-24}$ 克,也可以通过能量的单位兆电子伏给出为 $m = 938.27231$ 兆电子伏。温度可以用能量的单位来描写,这时的

换算关系为 1 电子伏=11 604. 448K。太阳表面的温度约为 6 000K,这是地面上罕见的高温,但是它还不到 1 电子伏,从粒子物理世界来看是极低的温度。太阳中心的温度约为 20 000 000K,这是地面上只有在核爆炸时才能达到的极高温,它还不到 2 千电子伏,从粒子物理世界的尺度标准来看仍然是相当低的温度。

二、表征粒子特征的物理量

各种粒子的千差万别反映在粒子的运动和相互作用性质的不同,通过反映粒子特征的许多种物理量表现出来,其中重要的有以下几种:

1. 质量

所有的粒子都有确定的质量。粒子运动的速度可以很快,按相对论给出,粒子的质量是速度的函数,随速度的增加而增加。如果粒子的静止质量不为零,当速度增加到真空光速时,粒子的质量将趋于无穷大。粒子物理中所说的粒子质量都是指粒子的静止质量。粒子的质量分布在一个很大的范围内,已发现的具有静止质量的粒子中最轻的是电子,其质量为 $m=0.51099906$ 兆电子伏。已发现的粒子中绝大多数的质量在电子的 200 倍到 30000 倍的范围内,最重的粒子是 Z 粒子,其质量为 $m=91.173$ 吉电子伏,约为电子的 178400 倍。光子、中微子和反中微子是永远以真空光速运动的粒子,它们的质量都为零。

2. 寿命和宽度

现已发现的数百种粒子中,除了光子、电子、正电子、质子、反质子、三种中微子和三种反中微子等十一种稳定的外,都是不稳定的,它们产生后经过一段时间就自动“衰变”成其它较轻的粒子。不稳定粒子的平均存在时间称为平均寿命,简称寿命。稳定粒子的寿命是无穷大,中子的寿命是 889. 1 秒,不稳定粒子的寿命也分布在一个很大的范围内,Z 粒子的寿命最短,其值为 $\tau=2.65\times10^{-25}$ 秒。

粒子的微观本性决定了,不稳定粒子的质量实际不是确定的值,而是分布在某确定值的附近有一定的分布宽度 Γ ,该确定值就是粒子的“质量”。不稳定粒子的宽度和寿命有密切的联系,它们的乘积等于 1,即 $\tau\Gamma=1$ 。这个重要的性质决定,不稳定粒子的寿命既可以直接测定,也可以通过测量质量分布宽度而间接确定。已发现的粒子中,Z 粒子的寿命最短,宽度也最大,其值为 $\Gamma=2.65$ 吉电子伏。

3. 电荷

质子带有电荷 $e=1.60217733\times10^{-19}C$ 。所有已发现的粒子所带电荷都是质子电荷的简单整数倍,这个性质称为电荷的“量子化”。实验上对电荷的量子化进行了精确的检验,结果给出测量精确到

10^{-21} 时仍然没有观测到和整数的差别。已发现的粒子中具有的最大电荷是质子电荷的二倍。

4. 自旋

所有的粒子都有确定的自转性质,称为粒子的自旋。粒子自旋角动量可以用一个自旋量子数 J 来定量描写,亦即角动量大小的平方等于 $J(J+1)$ 乘以约化普朗克常数的平方,J 的值可以是 0,0. 5,1,1. 5,2,2. 5,...,即取自然数或自然数加二分之一。电子、质子、中子、中微子的自旋都是 0. 5,光子、W 粒子、Z 粒子的自旋为 1, π 介子的自旋为零。现在已经发现的粒子中具有的最自旋量子数为 5. 5。

5. 重子数

电子是最轻的带一个单位负电的稳定粒子,质子则是带一个单位正电的稳定粒子。电子的稳定性可以用电荷守恒来解释。正电子发现后,就提出了一个问题:为什么质子不能衰变为一个正电子和一个光子。质子的稳定性可以用存在一个新的守恒量,重子数来解释:质子的重子数为 1,但光子和正电子的重子数为零,质子是重子数为 1 的最轻的粒子。

三、相互作用

粒子之间存在相互作用,粒子间的相互作用是通过交换媒介粒子来实现。不同的相互作用的区别在于媒介粒子的不同以及粒子放出和吸收媒介粒子的能力(用相互作用耦合常数描写)不同。粒子间相互作用随距离的减弱行为用相互作用力程描写,力程的物理意义是相互作用的有效作用范围,相互作用力程的数值正比于媒介粒子质量的倒数。

现在已经发现的粒子之间的相互作用有四种。一种是电磁相互作用,其媒介粒子是光子。一种是引力相互作用,其媒介粒子是引力子。这两种媒介粒子的静止质量都是零,决定了这两种相互作用都是长程作用,即力程等于无穷大的相互作用。再一种相互作用是弱相互作用,其媒介粒子是带正电荷和带负电荷的 W 粒子和不带电的 Z 粒子,这三种粒子都有很重的静止质量,弱相互作用是力程很短的短程力,其力程约为一百亿亿分之二点四米。再一种是强相互作用,其媒介粒子是介子和胶子,其力程约为 1.4×10^{-15} 米。这四种相互作用的媒介粒子中,介子的自旋可以是 0 或 1,引力子的自旋是 2,其它的媒介粒子自旋都是 1。

四种相互作用的强度有很大的差别。如果有两个质子相距约为 2×10^{-15} 米的距离,其间的四种相互作用的有效耦合常数见表 1。

表 1

强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
0.15	0.0073	6.3×10^{-10}	5.9×10^{-39}

四、粒子和反粒子

1928年狄喇克提出了一个相对论性电子运动的量子力学方程。根据这个方程预言的氢原子能级的精细结构,与实验完全符合;导出了电子的自旋量子数为二分之一,也与实验符合;导出电子磁矩与自旋关系中的 g 因子为2,也与实验完全符合。这些成果表明这个理论正确地描写了电子的运动规律。这个理论预言,对应于电子,还应存在正电子。正电子的质量和自旋都和电子相同,但带的是单位正电荷,正电子被称为电子的反粒子。

1932年安德森发现了正电子,证实了狄喇克理论的预言。1956年发现反质子,即质量和自旋和质子相同但带单位负电荷,重子数为 -1 的粒子。现在知道,一切粒子都有相应的反粒子,反粒子的质量和自旋与粒子相同,但带的电荷、重子数等都和粒子符号相反。有些粒子的反粒子就是它们自己,这种粒子称为纯中性粒子,纯中性粒子的自旋量子数都是整数。光子就是一种纯中性粒子。

五、粒子的分类

现在已经发现的粒子按它们参与相互作用的性质分为以下几类:

1. 规范玻色子

各种相互作用的媒介粒子。

已经发现的规范玻色子有四种,即光子、带正电荷和带负电荷的 W 粒子以及不带电的 Z 粒子。

2. 轻子

不直接参与强相互作用的粒子。

已经发现的带电轻子有三种,即电子、 μ 子、 τ 子,它们都带一个单位的负电荷,还有三种不带电的中性轻子,即三种中微子,它们的质量可能都是零。这六种粒子和它们的反粒子(通常称为反轻子)共12种轻子,它们的自旋都是0.5。

实验上发现 μ 子后,人们发现电子和 μ 子的相互作用性质完全相同,它们之间的唯一的差异在于质量不同, μ 子的质量是电子的206倍。它们运动行为的差异都可以归结为来自于质量的不同。为什么相互作用性质完全相同的电子和 μ 子质量差206倍,这就成为一个重大的理论疑难问题,称为 $e-\mu$ 疑难。这个疑难问题一直没有解决,又发现了 τ 子,它的相互作用性质和电子以及 μ 子完全相同,然而它的质量又是 μ 子的17.5倍,过去的 $e-\mu$ 疑难又发展成为 $e-\mu-\tau$ 普适性问题。

3. 强子

直接参与强相互作用的粒子,它们又分为两类。

介子:自旋为整数,重子数为零的强子。

重子:自旋为整数加0.5,重子数为 $+1$ 或 -1 的强子。

现在已经发现的介子共150种,重子数为 $+1$ 的132种重子和它们的反粒子(重子数为 -1 ,通常称为反重子)共264种。现在已经发现的粒子总数为430种,其中绝大多数是强子。

六、强子结构的夸克模型

六十年代初期,实验上发现了大量的新强子。在对大量强子及其运动性质分析的基础上,1964年盖尔-曼和兹韦克相互独立地提出了强子的结构模型,即夸克模型。夸克模型认为所有的强子都是由更深层次的粒子—夸克和反夸克组成,夸克有三种,称为三“味”,即“上夸克”、“下夸克”、“奇异夸克”。夸克的重子数为 $1/3$,上夸克带有正 $2/3$ 单位的电荷,下夸克和奇异夸克都带有负三分之一单位的电荷。重子由三个夸克组成,反重子由三个反夸克组成,介子由一对正反夸克所组成。夸克模型可以很好解释当时已发现的所有的强子及其运动性质,并给出许多预言。夸克模型从已经发现的九个极不稳定的,质量在1230兆电子伏到1535兆电子伏范围内,平均寿命只有 10^{-23} 秒的重子出发,预言应该存在一个由三个奇异夸克组成的 Ω 重子。理论预言 Ω 重子带一个单位的负电荷,其质量约为 $m=1678$ 兆电子伏,平均寿命约为一百亿分之一秒,从粒子物理世界的标准来说是相当稳定的粒子。理论还预言 Ω 重子衰变时的主要衰变方式为有三种:一种是衰变为一个 Λ 重子和一个带负电荷的 K 介子;另一种是衰变为一个中性的 Ξ 重子和一个带负电荷的 π 介子;再一种是衰变为一个带负电荷的 Ξ 重子和一个带中性的 π 介子。在实验上检验具有这些性质的 Ω 重子是否确实存在就成为对强子结构的夸克模型理论的一个判定性检验。

1964年美国布鲁克海文国家实验室的粒子物理实验中发现了一个带一个单位的负电荷的重子,其质量为 $m=1672.43$ 兆电子伏,平均寿命为 0.822 乘一十亿分之一秒,这种重子衰变时的主要衰变方式果然是理论所预言的那三种。这样强子结构的夸克模型理论得到了判定性检验。

夸克和反夸克通过交换胶子而结合成强子,夸克和反夸克的可以放出或吸收胶子的能力来自于它们具有色荷。夸克可以具有的色荷有三种,即每味夸克和反夸克又都分别各有三“色”。夸克放出和吸收胶子时其所带色荷可以改变,也可以不改变,这反映为胶子有 $3 \times 3 - 1 = 8$ 种,带有八种复合色。强子结构的夸克模型还进一步给出,除了重子和介子外,还可能有两个或三个胶子组成的强子,称为

“胶球”；还可能由两个夸克和两个反夸克组成的强子，称为“四夸克态”；还可能由一对正反夸克和一个胶子组成的强子，称为“混杂子”。现在实验已发现的 150 种介子中，有两种是胶球的有希望的候选者，有一种有可能是四夸克态。

1974 年发现了第四味夸克，称为“粲夸克”。1977 年发现了第五味夸克，称为“底夸克”。理论上预言还应存在第六味夸克，称为“顶夸克”，实验上到现在还没有发现。从实验上去寻找顶夸克是当前粒子物理实验研究的中心课题之一。

七、夸克层次粒子的分类

在已发现的四百多种粒子中，规范玻色子和轻子还没有被观察到有内部结构，还可以看作是“点”粒子。强子是由夸克和胶子所组成的复合粒子，强子和规范玻色子以及轻子不属于同一层次。现在还没有观察到夸克和胶子有内部结构，它们也还可以看作是“点”粒子，是属于和规范玻色子以及轻子同一层次的粒子。

现有对粒子物理世界的认识的基础上，可以对现在认识的“点”粒子进行分类，即在夸克层次对粒进行分类。粒子可以分成三类：

(1)规范玻色子：四种相互作用的媒介粒子，性质见表 2。

表 2				
	强作用	电磁作用	弱作用	引力作用
粒子	胶子	光子	W、Z 粒子	引力子
自旋	1	1	1	2
个数	8	1	3	1

共 13 种。实验上没有观察到自由状态下的胶子，但胶子在粒子相互作用过程中的存在已经有充分的实验验证。由于引力相互作用太弱，现在还没有引力子存在的直接实验证据。

(2)费米子：自旋量子数为 $J=0.5$ ，包括轻子和夸克

按照电弱统一理论，自然界的费米子是成组地存在的。一组费米子称为—“代”费米子，其中包括一个中微子，一个带电轻子，两味夸克，其中一个带

2/3 单位电荷，一个带负 1/3 单位电荷。现在已知自然界至少存在三代费米子，它们的性质见表 3。

表 3				
粒子类型	轻子		夸克	
电 荷	0	-1	2/3	-1/3
重子数	0	0	1/3	1/3
色状态数	1	1	3	3
第一代	中微子 ν_e	电子 e	上夸克 u	下夸克 d
第二代	中微子 ν_μ	μ 子	粲夸克 c	奇异夸克 s
第三代	中微子 ν_τ	τ 子	顶夸克 t	底夸克 b

这样由于夸克有三种色状态，每一代费米子包含有八个粒子，三代共有 24 种费米子，再加上它们的反粒子，共有 48 个费米子。当然，实验上现在还没有发现顶夸克和顶反夸克。

(3)黑格斯粒子：自旋量子数为零的粒子
按照电弱统一理论，电磁相互作用和弱相互作用本来是统一的电弱相互作用，具有较高的对称性，所有的费米子都没有质量。但是在能量较底的范围，这对称性自发地破缺了，统一的电弱相互作用分解成为性质极不相同的电磁相互作用和弱相互作用，同时除了中微子外，所有的费米子都获得了质量。电弱相互作用的对称性自发破缺的实现要求自然界存在自旋量子数为零的粒子，称为黑格斯粒子。电弱统一理论要求自然界至少存在一个中性的黑格斯粒子。理论对于这个中性黑格斯粒子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，但对它的质量却完全没有给出预言。现在实验上还没有发现这种黑格斯粒子，从实验上去寻找黑格斯粒子是当前粒子物理实验研究的中心课题之一。

按照现在对粒子物理世界结构规律的认识，深入到夸克层次，粒子物理世界是由 62 种粒子构成，其中有 54 种的存在是实验上已经确立的了，还有八种现在实验上还没有观察到其存在的证据。

(责任编辑 孙立明)

(上接第 31 页)

用。这些钢铁企业的总体工艺技术和装备水平远远落后于世界水平。今后这些企业的技术改造不能再搞低水平重复，而应尽量采用世界先进技术。特别是要结合我国国情，在消化引进技术的基础上，把开发适合我国特点的铸轧一体化技术放到战略位

置上来，使铸轧一体化技术不仅装备于电炉钢厂，而且装备于高炉—转炉钢铁厂。从而使我国钢铁工业的总体技术水平在今后若干年内跨上一个新台阶。

(责任编辑 王宏章)