

粒子物理学 100 年的发现

郁忠强

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)



粒子物理学的发展始于 1897 年电子的发现,到 1995 年顶夸克的发现经历了 100 年.在这 100 年中,随着不断地发现新粒子和新现象,粒子物理学从孕育、诞生、成长到成熟,形成了一门崭新的物理学前沿学科.粒子物理学中新粒子和新现象的发现过程和其他科学发现一样,典型的过程是:实验迹象或预言(非直接证据)→第一个直接证据(发现)→证实→确认.通常科学发现都是始于某些实验现象,当人们在解释某些实验现象时遇到困难,出现矛盾或困惑,这就激发人们去作研究和思考,进而获得一些有用的实验证据或有启发性的实验迹象,常常称为非直接证据.同时有可能在理论上作出某种预言.这些只是科学发现过程中的第一步.经过进一步深入的实验研究,反复论证,最终得到实验上第一个直接证据,这就是科学上的新发现.然后为别的实验所证实,最后在科学上得到确认.当然,具体到每一个发现,不一定经历所有的步骤.在有的科学发现中,在获得第一个实验证据前也许没有出现过任何理论和实验上的前兆.

粒子物理学发展的开始阶段,实际上人们对原子的存在还有着广泛的怀疑.对普朗克和爱因斯坦的量子论不甚了解.那时候,物理学的重要部分是探索和理解原子和原子核,特别是它们的量子特性.大约经过了 50 年,粒子物理学才明确被定义为物理学的分支.后 50 年由于实验技术和实验方法的不断改进,特别是高能粒子加速器能量的迅速提高,给粒子物理学的一系列新发现提供了基础.粒子物理学标准模型的提出直到实验上的精确验证是一个漫长而艰苦的过程,它充分揭示了科学发展的曲折性.粒子物理学发展的道路并不平坦,沿着这条路,有着辉煌的洞悉、卓绝的见识、精密而庞大的实验设备和精湛的实验技巧,同时也伴随

着疑惑、谬误、保守的教条和错误的实验.人们在认识自然界的基本结构和相互作用力的过程中,伴随着每一个新的发现都有一个十分有趣的故事.

上一世纪,从卡文迪什、库仑、富兰克林到法拉第、麦克斯韦和赫兹,从早期对电现象和磁现象的观察到完整的电磁理论的确立也经历了 100 年.无论从科学发展的过程,还是那些脍炙人口的科学发现的故事,都是可以 and 粒子物理学的 100 年相比拟的.

一、粒子物理学的诞生

第一个被发现的基本粒子是电子.汤姆逊在 1897 年完成了关于阴极射线的实验,成功地确定了电子的荷质比(参见本刊 1(1997)2).随后,很快分别确定了电子的电荷和质量.汤姆逊在发现电子后提出了原子的模型,他认为正电荷均匀分布在原子中,而带负电荷的电子在原子中它的平衡位置附近作振荡,从而发出辐射.用这个模型,汤姆逊计算出了原子的半径大约为 10^{-8} cm.

贝克勒尔、玛丽·居里和卢瑟福等人开始的对放射现象的发现和研 究很快知道了 β 射线是电子, α 射线是氦核(参见本刊 1(1996)2).1914 年实验上证明了 γ 射线是电磁辐射.1900 年普朗克提出量子化假设后,爱因斯坦很快就提出了光量子的学说.

下一个重大进展是卢瑟福在 1911 年完成的 α 粒子在金箔上的散射.实验结果无法用汤姆逊的原子模型解释.卢瑟福提出了新的原子模型,他认为原子中的正电荷应集中在一个很小的范围,即原子的有核模型.事实上,根据当时的实验数据就可以估算出,核的直径小于 10^{-12} cm.以后,玻尔提出了原子的量子理论,成功地解释了氢原子的光谱.随着量子力学的发展,逐渐完成了原子系统的量子理论.

原子半径约为 10^{-10} 厘米·
原子核的半径约为 10^{-14} 厘米·

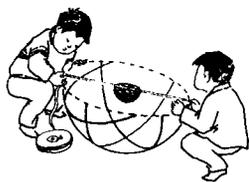


图1 原子及核的大小

从 20 年代开始,物理学家开始探索 and 了解原子核.在那个年代,大多数人相信原子核是由质子和电子组成的.量子力学的发展对核模型提出了严重的质疑.例如,对核自旋的解释,对统计的解释.1931 年查德威克发现中子后,关于原子核的研究得到了迅速的发展.当时,物理学家们普遍认识到原子是由电子、质子和中子组成的.但是仍然存在着许多疑问.例如,将质子和中子维持在原子核内的强作用力有什么性质?为什么 β 衰变中电子谱是连续的?狄拉克理论中预言的反粒子是否存在?这些疑问吸引着众多的物理学家.很有趣的是每一个疑问的解开都是和新粒子的发现联系在一起的.1932 年安德逊在宇宙线实验中发现了正电子,但是当时很多人不相信它就是电子的反粒子.为了解释 β 衰变的连续谱,泡利提出了一个大胆的假设,他认为存在一种新的难于探测到的中性粒子——中微子(参见本刊 6(1994)5).1933—1934 年费米在中微子假设的基础上发展了 β 衰变的弱相互作用理论.尽管中微子的直接实验观察在 1956 年才实现,但费米的弱作用理论很快得到了广泛的承认(参见本刊 1(1995)5).日本物理学家汤川在研究强相互作用的理论时提出了一个新的假设,他认为存在一种新粒子,称为 π 介子,是强相互作用的传递子.汤川预言 π 介子的质量大约在 100MeV.1937 年在宇宙线中发现了一种质量约为 100MeV 的新粒子,立即被人们解释为汤川粒子.经过 10 年后,物理学家才确认这个新粒子通过物质时不是强相互作用,而是弱作用.显然这个粒子不是人们寻找的 π 介子,该粒子被

称为 μ 介子. μ 介子的发现在粒子物理学上是一个十分重要的进展.它的性质十分类似于电子,只是质量比电子重,这在当时是一个十分令人困惑的粒子.后来才清楚 μ 子是代表了基本粒子新的一代,它是最早被发现的一个.

带电的 π 介子是在 1947 年宇宙线实验中被发现的.后来在加速器实验中不仅发现了带电的 π 介子,也发现了中性的 π^0 .高能加速器的建造和 π 介子的发现标志了粒子物理学的诞生,开始了粒子物理学的迅速发展.

二、标准模型的建立和验证

宇宙线中发现 π 介子后,相继又发现了 K^+ 、 π^0 、 Λ^0 、 K^0 、……等新粒子.但宇宙线实验毕竟有局限性,宇宙线的流强很弱,特别是能量越高,流强越小.高能加速器 Cosmotron 和 Bevatron 投入运行后,很快发展了研究共振态粒子的实验方法,并发现了新的共振态粒子.越来越多的新粒子像雨后春笋般地被发现,包括许多重子 Δ 、 Σ^+ 、 Ξ^- 、 Σ^0 、 Ξ^0 ……,还有反质子 \bar{p} 、反中子 \bar{n} 和许多反重子.同时也发现了许多介子,如 ρ 、 ω 、 η 、 K^* 、 ϕ 、 f 、 a_2 和 η' 等等.总数达一二百种.面对如此大量的新粒子,物理学家们既惊奇又迷惑.他们首先想到的是仿照门捷列夫周期表对元素的分类那样对众多的新粒子进行分类.盖尔曼首先将奇异数和同位旋结合起来,在一个 SU(3)群的框架下,对粒子进行了分类,称为八重法.这是夸克模型的先驱.在这个基础上,盖尔曼和兹韦格在 1964 年提出了夸克模型.他们假定了所有的介子和重子都是由三种夸克, u、d 和 s, 复合组成. s 夸克带有奇异量子数,有 s 夸克组份的粒子,如 K 介子,就是奇异粒子.夸克模型很好地解释了八重法分类.对于八重法是否正确存在一个判定性实验,它预言了一个新粒子 Ω^- 的存在.它是由三个奇异夸克组成的重子,表示为(s s s).1964 年在实验上发现了 Ω^- ,它的性质和预言符合得很好.

1956 年考万和莱因斯实现了中微子的实验验证.1957 年有人提出了两种中微子的理论,一种是电子中微子 ν_e ,另一种是 μ 中微子 ν_μ .

1963年莱德曼、希瓦茨和斯坦勃格在加速器上利用从 π 和K衰变出来的中微子束证实了 μ 中微子 ν_μ 的存在,而且它不同于电子中微子 ν_e 。这样,我们就知道了四种轻子: e 和 ν_e , μ 和 ν_μ 。有些物理学家提出假如 e 和 ν_e 是第一代轻子, μ 和 ν_μ 是第二代轻子,那么夸克也许也有两代。 d 和 u 夸克为第一代夸克, s 夸克属于第二代夸克。自然的推论是存在另一个带 $2/3$ 电荷的新的更重的夸克,称为粲夸克(Charm),简称为 c 夸克。

50年代, τ - θ 之谜曾一度吸引了不少物理学家的兴趣。李政道、杨振宁提出了在弱作用过程中宇称可能不守恒的假设,很快被吴健雄等人的实验所证实。许多人认为,尽管宇称可以不守恒,但宇称和电荷共轭相结合的对称性仍然有效。1964年克劳宁在K介子的衰变实验中发现了PC联合反演下的不对称性。这引起了许多物理学家的兴趣,开始寻找PC破坏的根源。但经过多年的研究,进展甚微(参见本刊1(1994)13和5(1995)2),主要的原因是K衰变系统中PC破坏的比例太小。

60年代,温伯格和萨拉姆分别发展了将弱相互作用和电磁相互作用统一的理论。预言了弱作用的传递子 W^\pm 和 Z^0 粒子,同时要求存在一个新的希格斯玻色子。那时,夸克理论还没有被完全接受,因为在实验上还没有被观察到。

为了寻找夸克的实验证据,有人建议仿照卢瑟福 α 散射的实验,作电子和核子的深度非弹性散射的实验。当斯坦福直线加速器中心(SLAC)的1英里长的电子直线加速器建成后,泰勒等人在其上完成了电子和核子的深度非弹性散射的实验研究。数据分析结果表明,核子中确实存在着类点结构的实验证据。

70年代早期出现了一个关于强作用的理论——量子色动力学。其中假定了一种新的无质量的新粒子——胶子(gluon),作为强力的传递者。胶子和夸克一样是带色的,它们不能作为自由粒子存在。直到70年代末,在德国汉堡的电子同步加速器中心(DESY)建成了一台新的正负电子对撞机PETRA,在它上面运行的四个探测器几乎同时发现了胶子存在的实验证

据。

基于对弱电统一理论和强相互作用理论的研究和实验的进展,1974年前后逐渐形成了一个解释基本粒子结构和相互作用的理论模型——粒子物理的标准模型。

1974年11月丁肇中教授领导的实验组在BNL的质子同步加速器上的实验和里克特领导的实验组在SLAC的正负电子对撞机SPEAR上的实验同时宣布发现了一个质量为 3.1GeV 的新粒子。这个新粒子奇特的性质吸引了大量的理论物理学家和实验物理学家,经过一段时间紧张的研究,确认该粒子不能用已知的三种夸克(u, d, s)解释,只能是 c 夸克和它的反粒子 \bar{c} 的结合态($c\bar{c}$),命名为 J/ψ 粒子。

两年后,哥德哈勃等人发现了 D^0 介子($u\bar{c}$ 态),进一步证实了 c 夸克的存在。对 J/ψ 粒子家族和D介子的详细实验研究,特别是D介子的弱衰变研究发现 c 夸克的明显特征是 c 夸克衰变到 s 夸克。从而确认了关于夸克的代的概念。第一代夸克是(u, d),第二代夸克是(c, s)。

1976年佩尔等人在研究D介子时发现了一个新的带电轻子 τ (参见本刊1(1994)33)。 τ 轻子的质量和D粒子的质量相近。和30年代发现的 μ 介子和 π 介子的情况十分相似。 τ 轻子的性质类似于电子和 μ 子,只是质量比电子和 μ 子大得多。很自然地,物理学家们将 τ 轻子看作是新的第三代轻子。很自然的推论是存在着相对应的第三代夸克,这就激励着人们在实验上去寻找第三代夸克存在的证据。很快,1977年莱德曼等人在费米实验室发现了一个新粒子, Υ 粒子,它是由第5种夸克 b 夸克,和它的反夸克 \bar{b} 组成的结合态。

70年代一系列的实验发现证实并发展了粒子物理的标准模型,虽然弱电统一理论在1979年就获得了诺贝尔奖,但还有许多疑问没有解决,例如: W^\pm 和 Z^0 玻色子还没有发现,第三代的另一个夸克, t 夸克也没有被实验证实,希格斯粒子是否存在尚不知道。这些都需要新的更高能量的加速器和规模更大的实验设备。

棒球中的物理学

申兵辉 祁 锋

(中国农业大学应用物理系 北京 100094)



在棒球运动风靡全球的今天,物理学工作者当然不会满足于能够解释为什么天空是蓝色的以及为什么星星会闪烁等诸如此类的现象.与乒乓球和网球的情形类似,空气动力学原理在棒球中起着重要的作用.然而,棒球是由一块块的皮革缝合而成,既不能看成是理想的光滑球体,也不可作为极端粗糙的球体来对待.专业棒球手的球棒是木制的,业余棒球手允许使用铝制球棒,但不管哪种球棒,都不是严格的具有简单力学特性的刚性柱体.因此,从物理学的角度来认识棒球运动并不是一件容易的事.不过,依靠一些模型化的近似处理,我们仍然能够运用物理学原理对棒球运动作些解释.

范德梅尔发展了反质子的冷却技术,使得 CERN 很快建成了 270GeV 质子和 270GeV 反质子的对撞机 $\overline{\text{pp}}$. 鲁比亚领导的 UA1 实验组于 1983 年先后发现了 W^+ 、 W^- 和 Z^0 粒子(参见本刊 1(1994)5 和 2(1995)5). 随后对它的质量和特性作了更精密的测量,测量结果再一次证明了粒子物理的标准模型的正确性.

对 t 夸克的寻找不那么简单,经历了一个十分艰苦而漫长的过程(参见本刊 5(1995)12). 为了寻找 t 夸克,从 1978 年开始,世界各地先后建造了几台能量不同的高能加速器,20 余台规模不同的探测设备,数千名物理学家和工程技术人员通过广泛的国际合作,对物质结构进行大规模的深入探索.终于在 1995 年,美国费米实验室的 CDF 和 DO 实验组在质子-质子对撞机 Tevatron 上证实了 t 夸克的存在.而 t 夸克的质量竟高达 $\sim 176\text{GeV}$ (几乎和金原子一样重),这是人们没有预料到的.

到目前为止,对希格斯粒子的实验寻找都没有成功.人们期望建造能量更高的加速器,美国超导超级对撞机(SSC)流产后,人们把希

一、棒球在空气中的运动

作用于棒球上的空气阻力与其自身的重力有相同的量级,我们估计作用于截面为 A 的球上的空气阻力与球速的平方成正比,与截面积及空气的密度成正比,可表示如下:

$$F_d = C_d A \rho v^2 / 2$$

这里, C_d 是一个无量纲的比例系数,与雷诺数有关,通常由实验确定.一般此系数小于 1.

这是一个很不错的模型,对于乒乓球和棒球,实验测得的空气阻力确实与 v^2 成正比.当运行速度小于 27m/s 时,测得 $C_d \approx 0.5$,职业棒球手击出的球速度可达 54m/s ,这时 $C_d \approx$

望寄托在 CERN 的 LHC 上. LHC 将是一台 10TeV 质子和 10TeV 质子的对撞机,按目前的计划,该机器将于 2005 年建成并投入运行(参见本刊 4(1993)15).

粒子物理学 100 年的发展史,是一系列新粒子和新现象的发现史.粒子物理学从孕育、诞生、成长,已经发展成了一门物理学的前沿学科.粒子物理的标准模型建立以后得到了越来越多的实验验证.到目前为止,还没有发现任何和标准模型相抵触的实验事实.诚然,粒子物理学依然存在许多疑惑,例如,t 夸克为什么比其他夸克重得多?为什么夸克和胶子始终被禁闭在强子中?希格斯粒子是不是真正存在?夸克和轻子是不是还有第四代、第五代、...?随着实验上获得越来越精密的数据,标准模型还能不能符合得很好?这些问题将有待于下一世纪的粒子物理学的发展.

理论上对标准模型的扩展,如超对称理论、大统一理论、弦理论、夸克和轻子的次结构等至今还没有在实验上找到确凿的证据.这些将是下一个 100 年的故事了.