

亚原子物理 百年回眸



童国梁

近日读到奥斯丁 (Austin) 的德克萨斯大学物理和天文系教授斯蒂芬·温伯格 (Steven Weinberg) 于 2011 年 4 月在美国物理学会“亚原子物理 100 年”会议开幕式讲演, 深受感动, 欣然命笔, 梳理百年来粒子物理发展的轨迹, 集成此文, 以缅怀先贤, 鼓励后人。因涉及内容颇丰, 故本文的选材只能是纲领性的。文中提到的每一位科学家都对粒子物理的发展作出了重要贡献, 故不必区分各位科学家是否是诺奖得主。物理学是一门以实验为基础的科学, 粒子物理学也不例外, 本文的选择也遵循了这个精神。粒子物理数据的更新日新月异, 文中所引数据只能保证在特定时期内准确。

一、卢瑟福 α 粒子散射实验 ——亚原子物理的开端

1. 原子具有核式结构

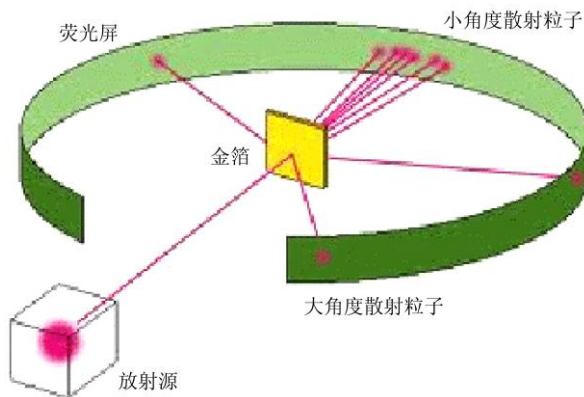


卢瑟福 (1871~1937)

1911 年 3 月 7 日, 卢瑟福 (Ernest Rutherford) 在英国曼彻斯特 (Manchester) 文学和哲学学会的一次会议上宣布发现了原子核。从此人类对物质结构的探索深入到原子内部, 开启了亚原子物理时代。

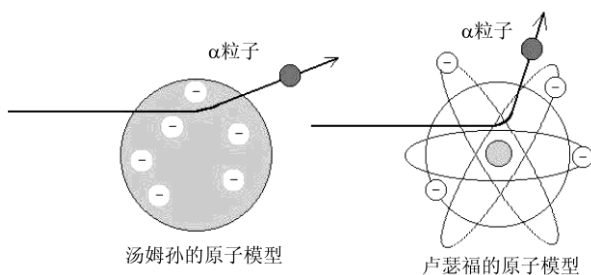
美国物理学会把卢瑟福宣布发现原子核这一时刻作为基本粒子物理世纪的开端。这样的选择是很有道理的。虽然也有人把亚原子物理划分为原子物理、原子核物理和粒子物理三部分, 但三者并不平行、独立, 而是一脉相承, 前面两部分也可看成最后那部分的前奏, 从这个意义上说, 卢瑟福散射实验也就开启了基本粒子物理世纪。

1907 年汤姆孙 (J. J. Thomson) 测出了阴极射线粒子的电荷和质量的比值 e/m , 即荷质比, 发现了电子。那时, 人们想象原子就像一个布丁, 而电子就像葡萄干那样均匀地黏合在正电荷背景上。这就是汤姆孙原子模型。卢瑟福设计了 α 粒子散射实验, 即用能量较高的 α 粒子去碰撞原子, 使与原子发生相互作用并引起可以观察到的散射现象。 α 粒子是带 2 倍正的元电荷的粒子。盖革 (Hans Geiger) 和马斯登 (Ernest Marsden) 在卢瑟福的指导下利用来自镭辐射衰变的 α 粒子作为入射粒子, 打到金属薄箔靶上。 α 粒子通过金属薄箔发生偏转的现象是由于高能 α 粒子深入到金属箔中的原子内部后与其中的正电荷或负电荷相互作用所引起的。由于 α 粒子的质量比电子的质量大很多倍 (现在知道大 3600 多倍), 电子作用于 α 粒子上的力不能显著改变 α 粒子的运动方向。所以 α 粒子的散射可以看作是由于受到原子内部的正电荷的斥力所产生的。 α 粒子散射情况与原子内正电荷的分布情况有关, 故研究 α 粒子的散射情况就可以探索原子内正电荷的分布情况。



卢瑟福 α 粒子散射实验示意图

实验中他们观测不同方向散射出来的 α 粒子的数目,求得微分散射截面 $\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ 。他们的实验发现, α 粒子受金属薄箔散射时,绝大多数是小角散射,但约有1/8000的 α 粒子散射偏转大于 90° 。如果汤姆孙模型是正确的话,那么 α 粒子散射只能有小角度散射,就不能解释大角度散射的实验事实。这一重要发现使卢瑟福相信原子的绝大部分的质量和正电荷都集中在很小体积的原子核中。他认为,任何原子中的全部正电荷和绝大部分质量(99.9%以上)都集中在原子的中央区域,形成一个很小的原子核(半径约为 10^{-14}m),电子分布在核外半径约为 10^{-10}m 的范围内,在核的周围运动。原子的大小实际上就是电子的运动范围的尺度。这就是卢瑟福原子模型,也称原子的核式模型。根据这个模型建立的 α 粒子散射理论跟实验结果符合很好。



α 粒子在两种不同设想的原子中(模型)的散射

2. 卢瑟福散射实验为粒子物理提供了一个常用的研究范式

正如有的评论所说,卢瑟福实验是利用简单的实验装置,独特的构思,巧妙的方法,探索了微观世界的奥秘。

散射方法在研究原子内部质量分布和电荷分布是很适宜的。因为快速运动的带电粒子通过物质时与物质中原子相互作用,而相互作用的情况不仅与作用力的性质有关,而且也与原子的结构和质量分布及电荷分布有关。散射实验使我们能根据散射情况估计在原子所占空间中的质量分布情况和电荷分布情况。当时能够用在散射实验中来“轰击”粒子的只有电子及 α 粒子。由于电子质量轻,能量低,通过金属箔时就极易被散射,不易得出明晰的结论。而具有单一能量、质量较重的 α 粒子就是理想的“炮弹”了。其实散射实验不仅用来研究原子结构,也已成为粒子物理实验的一种范式,广泛地用在研究原子核结构、质子结构、电子结构以及相互作用力之中。例如20世纪60年代后期到70年代,粒子物理进行了大量利用高能电子去碰撞核子的实验,这就是风行一时的高能电子深度非弹性散射实验。这些散射实验得到了极其重要的实验结果:质子内部的质量和电荷并不是均匀分布的,而存在有部分子(后来部分子被认定就是夸克)。这个结果就成了夸克模型最重要的实验证据之一。现在的一些大型加速器,除了用来寻找新粒子外,也用来做一批最基本的实验,其中就包括电子、质子和其他粒子的弹性和非弹性散射实验。

二、原子光谱研究

——开启了量子理论的发展历程

1. 氢原子光谱线

卢瑟福的原子模型首次正确地解决了原子内部的结构问题。但随即也就产生了一些新的问题,例如核外电子究竟处于什么状态?如果电子是静止的,就应该被核吸引而进入核内;如果电子绕核运动,根据经典理论,它会由于有加速运动而产生辐射使能量损失,以致轨道半径越来越小,即形成电子向着原子核作螺旋形运动,在极短的时间内将掉进核内。这样,原子的稳定性就没法解释。这些问题的回答则来自原子的光谱研究上。19世纪人们虽还不知原子的结构,但已经知道各种原子或分子发的光是不一样的,通常原子发射的是线光谱,分子发射的是带光谱。人们逐步地总结出一些原子光谱的规律,首先是氢原子光谱的规律。人们在氢原子光谱图中看到有3个谱线系列,一个谱线系列在可见光和近紫外区,为巴尔末(J. J. Balmer)系;一个谱线在紫外,称赖曼(T. Lyman)系;第三个谱

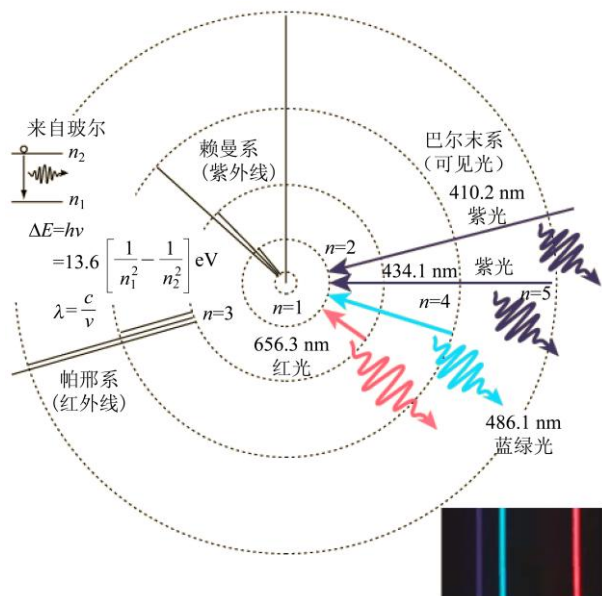
系在红外，叫帕邢（F. Paschen）系。后来研究发现，氢原子的每一条谱线都等于两个光谱项之差，氢光谱是各种光谱项差的综合。但当时许多物理学家都没有想到这个结果有什么深奥的物理意义，也没有人去注意它。直到 1913 年，玻尔从他的学生那里知道了这个公式后，结合原子的核式模型和量子论观点最终完成了他的氢原子理论。

2. 玻尔的量论

玻尔曾在卢瑟福实验室做过 4 年访问学者，凭着丰富的想象力和对科学的直觉理解能力，敏感地意识到不能完全用经典理论处理微观问题，以此来解决卢瑟福核式模型的困难。玻尔提出了自己的原子模型——玻尔原子模型。他在经典理论上，加入了一些量子化假设：电子绕原子核作圆周运动时，只能处在一些分立的稳定轨道上，而且具有稳定的能量，通常不产生辐射；当电子从一个定态轨道（用整数 n 标记该定态）跃迁到另一个定态轨道（用整数 m 标记该定态）时，会以电磁辐射形式放出（或吸收）能量： $h\nu = E_n - E_m$ ，玻尔用量子论能量 $h\nu$ 来表示辐射能量，并用到氢光谱的谱线上（这里 h 为普朗克常数）；电子的轨道角动量也是量子化的。对于氢原子光谱公式

$$h\nu = hcR_H \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right]$$

（式中 R_H 为里德伯（Rydberg）常数），玻尔也给出了正确的解释：赖曼系是 $n_1 = 1, n_2 = 2, 3, 4, \dots$ ，



氢原子光谱

也就是所有其他较高能级上的电子跃迁到 $n = 1$ 的能级上所发射的辐射所形成的谱线系；巴尔末系是 $n_1 = 2, n_2 = 3, 4, 5, \dots$ ，也就是所有其他较高能级上的电子跃迁到 $n = 2$ 的能级上所发射的辐射所形成的谱线系；而帕邢系则是所有其他较高能级上的电子跃迁到 $n = 3$ 的能级上所发射的辐射所形成的谱线系。玻尔理论可以很好地解释氢原子光谱，取得了成功，普朗克时代的量子论假设在原子物理上得到了普遍应用。

3. 新量子论

但玻尔理论有很大的局限性，它是建立在经典基础上的量子论。这些量子规律只是作为假设引入的，没有理论根据，它也只能解释氢原子和类氢离子的光谱，对碱金属原子的光谱尚勉强可以解释。实际上，微观粒子的行为与经典微粒的行为很不一样。人们把玻尔的理论称为旧量子论，但不管如何，玻尔理论是玻尔-德布罗意（Louis de Broglie）-薛定谔（Erwin Schrodinger）-海森伯（Werner Heisenberg）等导致现代量子力学发展链上基本的第一步。

薛定谔等人从微观粒子的波粒二重性出发提出并发展了量子力学理论，人们把他们的量子论称为新量子论，以区别玻尔的量子论。这里以薛定谔方程为例进行简单介绍。

在量子力学中，粒子的状态用波函数描述，它是坐标和时间的复函数。为了描写微观粒子状态随时间变化的规律，就需要找出波函数所满足的运动方程。这个方程是薛定谔在 1926 年首先找到的，被称为薛定谔方程。

在量子论中，一个粒子的位置和动量是不能同时确定的，也即所谓的测不准关系，它首先由海森伯提出： $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$ 。量子力学也可以严格证明能量和时间也具有测不准关系： $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ 。在量子力学中，力学量都可用算符表示，例如能量算符（也称哈密顿算符） $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r})$ ，这样定态的薛定谔方程和含时间的薛定谔方程可分别表示为 $\hat{H}\psi = E\psi$ 和 $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H}\psi$ 。在量子力学中，波函数具有统计意义，例如在空间 $d\tau$ 体积内发现一个粒子的概率 dW 就等于概率密度 $\psi^* \psi$ 乘以空间体积，即

$dw = \psi^* \psi d\tau$ 。在新量子力学中, 氢原子不连续能级的存在及其数值, 和表征电子运动状态的量子数 n 、 l 和 m 等都可从解薛定谔方程式很自然得到, 而不必人为加上。而由波函数的统计解释, 旧量子论中所说的电子轨道, 只不过是电子出现概率最大的区域而已。

4. 泡利 (W. Pauli) 不相容原理

泡利在分析原子能级的经验数据以及在解释元素周期表的理论研究工作的基础上, 于 1925 年提出了泡利原理: 在多电子原子中, 任何两个电子都不可能处于相同的量子态, 因此泡利原理又称不相容原理。

泡利于 1940 年进一步提出, 全同粒子系统的对称性与粒子的内禀属性有关。全同粒子系统的波函数的交换对称性与粒子的自旋有确定的关系。凡是由自旋为 $\frac{\hbar}{2}$ 奇数倍的粒子所组成的全同粒子系统, 如电子和质子, 它的波函数一定是交换反对称的, 它们遵守费米 (Fermi) - 狄拉克 (Dirac) 统计, 所以称为费米子。而自旋为 \hbar 整数倍 (包括零) 的粒子所组成的全同粒子系统, 例如光子 ($S = \hbar$) 其波函数必定是交换对称的, 它们遵守玻色 (Bose) - 爱因斯坦 (Einstein) 统计, 称为玻色子。泡利原理在粒子物理中有着极其重要的作用, 相当程度主宰了整个微观世界。

5. 狄拉克的相对论量子力学

量子力学初步成功后, 基本物理存在两个明显的前沿。一是把量子力学推广到相对论现象。狄拉克把薛定谔波方程推广为一个相对论波方程。另一个明显的前沿是需要克服原子核的库仑 (Coulomb) 壁垒, 它阻碍了卢瑟福实验室中由镭辐射出的 α 粒子进入原子核。这就需要设计一种可以提供更高能量的“轰击”粒子源, 这方面的需要导致了粒子加速器的最初发展。

理论物理中, 相对于薛定谔方程之于非相对论量子力学, 狄拉克方程是相对论量子力学的一项描述自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的波函数方程, 由英国物理学家狄拉克于 1928 年建立, 此方程同时遵守了狭义相对论与量子力学两者的原理, 实则为薛定谔方程的洛伦兹协变式。狄拉克方程的形式如下:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = \left(\frac{1}{i} \alpha \cdot \nabla + \beta m \right) \psi(x,t),$$

其中 m 是自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的质量, x 与 t 分别是空间和时间的坐标。

这个方程预言了反粒子的存在, 1932 年美国物理学家安德森 (C. D. Anderson) 在宇宙线实验中观察到高能光子穿过重原子核附近时, 可以转化为一个电子和一个质量与电子相同但带有单位正电荷的粒子, 从而发现了正电子, 狄拉克对正电子的这个预言得到了实验的证实。正电子的发现表明对于电子来说, 正、负电荷还是具有对称性的。狄拉克的空穴理论给出了反粒子的概念, 正电子是电子的反粒子。

6. 量子场论

但把狄拉克方程推广到包含多电子系统也很棘手。后来的发展就由量子场论替代。量子场论是从狭义相对论和量子力学的观念的结合而产生的。它和标准 (亦即非相对论性) 的量子力学的差别在于, 任何特殊种类的粒子的数目不必是常数。每一种粒子都有其反粒子 (有时, 诸如光子, 反粒子和原先粒子是一样的)。一个有质量的粒子和它的反粒子可以湮灭而形成能量, 并且这样的一对正反粒子可由能量产生出来。甚至粒子数也不必是确定的; 因为不同粒子数的态的线性叠加是允许的。最成功的量子场论是量子电动力学——基本上是电子和光子的理论。该理论的预言具有令人印象深刻的精确性。然而, 计算中会出现没有意义的“无限大”答案, 必须用称为“重整化”的步骤才能把这些无限大消除。到了 20 世纪 40 年代后期, 量子电动力学中的无穷大问题已经被重整化理论解决。但并不是所有量子场论都可以用重整化来补救的。即使是可行的话, 其计算也是非常困难的。除去引力, 另三种相互作用都找到了合适满足特定对称性的量子场论来描述。强作用有量子色动力学 (QCD, Quantum Chromodynamics); 电磁相互作用有量子电动力学 (QED, Quantum Electrodynamics), 理论框架建立于 1920 到 1950 年间, 主要的贡献者为狄拉克、福克、泡利、朝永振一郎、施温格、费曼和迪森等; 弱作用有费米点作用理论。后来弱作用和电磁相互作用实现

了形式上的统一，通过希格斯机制（Higgs Mechanism）产生质量，建立了弱电统一的量子规范理论，即 GWS（Glashow, Weinberg, Salam）模型。量子场论成为现代理论物理学的主流方法和工具。

三、原子核结构和核力的研究

——初识强相互作用

1. 中子的发现——完整了原子核结构

为了给原子核一个正确的质量和电荷，物理学家最初假设原子核是由质子和电子组成的，但这样的假设会使氮-14 核成为费米子，这与从分子谱中已经知道氮-14 核是玻色子的实验事实不符。

卢瑟福被公认为质子的发现人。1918 年他任卡文迪什实验室主任时，用 α 粒子轰击氮原子核，注意到在使用 α 粒子轰击氮气时他的闪光探测器记录到氢核的迹象。卢瑟福认识到这些氢核唯一可能的来源是氮原子，因此氮原子必须含有氢核。他因此建议原子序数为 1 的氢原子核是一个基本粒子（以今日标准模型的观点，质子已不再是基本粒子了。）卢瑟福发现质子以后，又预言了不带电的中子存在。

关于中子的概念一直到 1932 年其被查德威克（Chadwick）发现时才被真正接受。当时，人们正在研究金属铍在 α 粒子轰击下产生的贯穿性极强的不带电的次级辐射，原先都以为这是一种硬 γ 射线。约里奥-居里夫妇用这种次级辐射去轰击石蜡，打出的竟是能量约为 5MeV 的质子。按照康普顿散射公式计算，入射的

次级辐射流（他们以为是 γ 光子）能量至少要有 50MeV。查德威克打破了前人的思路，提出了原子核中可能存在中性粒子的假设，并轻易地解释了约里奥-居里的实验，即次级辐射是能量为 5MeV 的中子。

中子发现以后，海森伯很快就提出，原子核是由质子和中子组成，它们统称为核子。

2. 核力与 π 介子

1935 年，日本科学家汤川秀树（Hideki Yukawa）在已知核力射程的基础上带着足够的勇气假设存在一种约为 $\frac{1}{10}$ 质子质量的玻色子。不久，安德森在宇宙

线中找到了一种粒子，它的质量与这个值相近，人们以为找到了此种介子，但很快弄清楚这种粒子并不是传递核力的介子，其相互作用很弱，后被称为 μ 子。直到 1947 年，鲍威尔（C. F. Powell）和他的合作者发表了《关于乳胶照相中慢介子轨迹的观测报告》的论文，正式表明他们发现了新粒子，并命名其为 π 介子。同时，他们指出， π 介子可以衰变为另一种粒子（ μ 子）和中微子。经过详细的计算，得知 π 介子和 μ 子的质量分别为电子质量的 273 倍和 207 倍。 π 介子正是汤川预言的粒子， π 介子有三种， π^+ ， π^- ， π^0 ，质量分别为 $m_{\pi^{\pm}} = 140\text{MeV}$ ， $m_{\pi^0} = 135\text{MeV}$ 。

3. 同位旋对称性

期间，中子和质子质量类似要求在它们之间存在一种对称性。1936 年图夫（Merle Tuve）和他的同事测得的质子-质子之间的核力，并发现与已知的中子-质子之间的力相似。几乎同时，一些理论学家布赖特（G. Breit）、费恩伯格（E. Feenberg）、卡森（B. Cassen）和康登（E. Condon）得出结论：关联质子和中子的对称性是同位旋守恒群，数学上称为 SU（2）群。

4. 奇异粒子的发现

1947 年在宇宙线实验中，罗切斯特（G. D. Rochester）和巴特勒（C. C. Butler）用云室首先观察到了后来被称为奇异粒子的粒子，即“V”型事例。因中性粒子在云室中不能留下径迹，所以只观察到两个末态带电粒子留下的叉形径迹。通过对带磁场的云室中带电粒子径迹的偏转曲率以及电离密度的测量分析，知道这两个末态粒子一个是质子，一个是 π 介子。通过测量末态粒子的能量和动量可以定出这个中性粒子的质量。它的质量显然比质子



一张早期的捕获 π 介子核乳胶的照片。在宇宙线碰撞中产生的 π 介子从照片的底部右边进入，衰变成一个 μ 子和中性的（因而看不见）中微子。 μ 子从底部向顶部行进并衰变成一个电子和中微子。在发展高能加速器以前，宇宙线是新粒子的丰富来源。（照片取自鲍威尔的诺贝尔颁奖演讲）。

大。这是当时所知的质子、中子、电子、光子和 π 介子之外的一个新粒子。后来称其为 Λ 粒子(超子)。罗切斯特和巴特勒观察到的过程为 $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ 。

新粒子的发现引起了人们的广泛注意。后来又发现了另一类“V”型事例，末态是 π^- 和 π^+ ，其质量是电子质量的 1000 倍，当时称为 θ^0 介子，其寿命为 10^{-10} 秒，这就是后来的短寿命粒子 K_s^0 。接着陆续又发现了 K^+ 介子等。

但是直到 1954 年美国布鲁克海文实验室 3GeV 质子同步加速器实验上大量产生了奇异粒子后，它们的“奇异”特性才展现出来并得到系统的研究。“奇异粒子”是当时新发现的一批粒子的总称，它们具有以下几个明显的特性：一是产生截面大而衰变寿命很长，即“产生快，衰变慢”；并且它们是协同产生的，即两个或多个这类新型粒子在一次碰撞过程中同时产生。后来，人们认识到新型粒子的这两个特性都是与一个新量子数——奇异数相关联的。

四、 β 衰变研究带来的冲击 ——克服危机迎来跨越

1. β 衰变中的“能量失窃案”和中微子的引入

人们对原子核的了解最早是从放射性开始的。1896 年，贝克勒尔 (A. H. Becquerel) 发现了穿透力很强的铀元素的放射性。在这以后，居里夫妇发现并提取了比铀元素放射性更强的钋和镭元素。人们发现的放射性衰变类型包括 α 粒子(即氦核)、 β 粒子(即电子)或 γ 光子。在这些放射性现象中，对粒子物理发展影响最大的则是 β 衰变。

20 世纪 20 年代，物理学家一般都认为：构成原子的粒子只有电子和质子，不存在其他新的粒子。1914 年，查德威克在对放射性物质的 β 衰变进行观测时，发现 β 衰变放射出的电子的能谱不像 α 射线和 γ 射线那样是单一的，呈连续分布，而且，整过反应过程能量不守恒，总能量发生了损失！这就是轰动一时的“能量失窃案”。这个谜让玻尔甚至猜想在这些衰变中能量可能是不守恒的。1930 年底，泡利这位具有强烈物理直觉的物理学家，与众不同地提出了一种新的设想：核中除了公认的电子和质子之外，还有一种自旋为 $\frac{1}{2}$ 、不带电荷的中性粒子，在 β 衰变中，除了放出电子外，也同时放出这种中性粒子。开始时，泡利把它称为“中子”，但在查德威克发现真正的中子之后，费米就把它改称为“中

微子”。并提出了完整、详细、定量的 β 衰变中微子理论。例如中子和质子的 β 衰变反应方程分别为： $n \rightarrow p + e + \nu$ ， $p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}$ ，式中的 ν 就是中微子(实际上后来我们知道质子和中子 β 衰变中发射的中微子是不同的，是一对正反中微子)。由于中微子质量为零，且穿透能力极强，即基本不与其他物质发生相互作用，因此，要用实验来观测它也就相当困难了。而当时泡利的中微子假设面临广泛的怀疑，直到四分之一世纪后中微子在实验上发现时此谜团才得以完全散去。

2. τ - θ 之谜——弱作用宇称不守恒

在粒子物理发展过程中，弱相互作用爆出的谜团可谓一桩接一桩。1956 年在研究和分析 τ^+ ， θ^+ 介子的衰变现象中，人们才怀疑宇称守恒定律的普遍性。实验中知道它们的衰变方式为 $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ； $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^0$ 。实验测得 θ^+ 和 τ^+ 的质量相等，平均寿命相同，而且都是自旋为零的粒子，因而自然会想到它们可能是同一种粒子。但经过分析知，它们的宇称又是不同的，因此怀疑它们不可能是同一种粒子。这就产生 τ - θ 之谜。1956 年，李政道和杨振宁根据“ τ - θ ”之谜的启发，认真分析了有关的宇称守恒的实验资料，结果发现在强相互作用和电磁相互作用中，有大量的实验证明宇称是守恒的，而对弱相互作用并没有用实验验证过，只是作为一个理论的推论被大家接受下来。于是他们提出了在弱相互作用过程中宇称不守恒的假说，提出 τ - θ 其实就是一种粒子，即是奇异介子 K^+ 。他们还具体建议可以通过一些实验来检验宇称是否守恒，其中的一个实验就是极化原子核 ^{60}Co 的 β 衰变，吴健雄及其合作者在 1957 年完成了这个实验，证实在 β 衰变中宇称是不守恒的。

3. 中性 K 介子的弱衰变中发现有 CP 破坏(千分之几的破坏效应)

1957 年，弱作用中的宇称不守恒发现以后，有一段时间，人们相信，弱作用中 CP 联合变换还是守恒的。但是，1964 年，菲奇 (Val Fitch) 和克罗宁 (J. W. Cronin) 实验发现中性长寿命 K_L 介子也有千分之二的概率衰变到两个 π 介子。现有实验给出的结果为 $\text{Re } \epsilon = 1.63 \times 10^{-3}$ 。

反粒子共轭运算是粒子与反粒子之间的对称，因此 CP 对称被看作是物质与反物质间的对称。宇称不守恒或可解释物质为何能成为宇宙的主导。

4. β 衰变费米理论——弱相互作用登场

(1) 费米的弱作用理论

β 衰变费米理论的最主要的实验基础是：电子与中微子是在原子核 β 衰变的过程中产生并发射出来的。这与原子核电磁跃迁中产生并发射 γ 光子类似。不同的是跃迁的始末态不属于同一个原子核，而且所发射的量子不是光子而是电子和中微子。 β 衰变具有比其他衰变长得多的寿命，测得的寿命在 3×10^{-2} 秒到 4×10^{10} 年的范围内。更长的寿命无疑是存在的。由此推断，电子-中微子与核相互作用是一种弱相互作用，不同于我们熟知的万有引力和电磁相互作用。

原子的辐射理论认为，辐射是由于电磁场与原子的轨道电子发生电磁相互作用而使原子在不同能态之间跃迁产生的。费米类比于这一理论提出了 β 衰变理论。他把质子和中子看作是同一种核子的不同能量状态， β 衰变是由于电子-中微子场与原子核发生弱相互作用而使核子不同能态间发生跃迁 ($p \rightarrow n, n \rightarrow p$) 并发射电子和中微子的物理过程。费米给出的跃迁概率

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \int \psi_f^* \tilde{H} \psi_i d\tau \right|^2 \frac{dN}{dE_0}.$$

式中 E_0 是终态能量， dN/dE_0 是终态密度，而 ψ_i 和 ψ_f 分别是初态（即母核）和终态的波函数，终态波函数为子核、电子和中微子的波函数的乘积， \tilde{H} 为弱相互作用算符，详细情况较为复杂，费米当初假设它为常数 g ，于是得到单位时间内发射一个动量在 p 到 $p+\Delta p$ 之间的 β 粒子的概率为

$$W = \frac{g^2 |M_{if}|^2}{2\pi^3 c^3 \hbar^7} F(Z, E) (E_{\max} - E)^2 p^2 dp.$$

式中的 M_{if} 称跃迁矩阵元。此时与 β 谱符合的较好，取得了成功。 β 衰变也遵循角动量守恒定律，由电子和中微子的自旋角动量和轨道角动量取向不同可分别得出费米跃迁和伽莫夫-特勒 (Gamov-Teller) 跃迁。

(2) 普适性的弱相互作用的 V-A 理论

费米理论认为，在 β 衰变过程中，中子变成质子，同时中微子变成电子。重子弱流（例如中子和质子）被认为形成一个与电流类似的带电的矢量流（记为 \mathbf{V} 流），中微子与电子形成另一个矢量电流。四个费米子在一点的弱作用，可看成是矢量流与矢量流的相互作用，它保持宇称不变。由于弱作用力程太短，所以费米假定这四个粒子是在同一点

发生相互作用的。由于这四个粒子都是费米子，所以称这个理论为四费米子理论。

1958 年，费曼 (Feynman) 和盖尔曼 (Gell-Mann) 等人提出了“V-A”理论，修改了费米理论。按照 V-A 理论，中子与质子或中微子与电子不仅形成了矢量流 (\mathbf{V})，而且还形成了一种轴矢量流 (\mathbf{A})。流-耦合还是对的，只不过现在的流是矢量流与轴矢量流的组合。 \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 在空间反射变换下符号的变化刚好相反，所以“V-A”理论中的拉格朗日函数包括的两项在空间反射变换下符号的变化相反，变换后的拉格朗日函数与变换以前不再相同，不变性不再存在，故弱相互作用呈宇称不守恒。

V-A 理论虽在唯象上获得很大成功，但在理论上存在着严重困难，由于它不可重整化，于是在计算高阶修正时将不能避开发散困难。这表明它不是一个完整的理论，只能给出初级近似的结果。这种初级近似的结果虽然在低能领域与实验相符合（当时所研究过的弱作用过程只是各种粒子的衰变，它们都属于低能领域），一旦过渡到高能领域，理论计算值将不可避免地会与实验结果相矛盾。

5. 中微子的发现——让许多科学大师都松了一口气

中微子的假设是于 1930 年由奥地利物理学家泡利提出的，此假设维护了能量守恒定律。由于长期没有证实，难免成了科学家的一块心病。1956 年，柯温 (C. L. Cowan) 和弗雷德里克·莱因斯 (F. Reines) 利用核反应堆产物 β 衰变的强大反中微子流，观测到了中微子诱发的反应： $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 。这是第一次从实验上得到中微子存在的证据。这个重要发现才使泡利提出的谜团得以完全消失。

6. 轻子家族的配齐

1937 年安德森等人在宇宙线中发现了 μ 子，它的质量比电子大 207 倍。 μ 子和电子都是带电粒子，故参与电磁相互作用。 μ 子和电子在相互作用等性质上非常相似，都参与弱相互作用，但不参与强相互作用。它们被称为轻子。1975 年，发现了一种性质与 μ 子相似但质量很大的 τ 粒子， $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$ ，这比作为重子的质子和中子还重。1962 年，美国布鲁克海文国家实验室的物理学家莱德曼 (L. M. Lederman) 等人发现了中微子有“味”的属性，证实了 μ 子中微子和电子中微子是不同的中微子。2000 年 7 月美国费米国家实验室宣布发现了 τ 子中微子

存在的证据。到此，轻子都到齐了，带电轻子包括 e^- 、 μ^- 、 τ^- 以及它们的反粒子 e^+ 、 μ^+ 、 τ^+ ；与带电轻子对应的中微子则为 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 以及它们的反粒子 $\bar{\nu}_e$ 、 $\bar{\nu}_\mu$ 、 $\bar{\nu}_\tau$ 。

电子、 μ 子和 τ 子都被分类为轻子，但它们的普适性在定量上尚有待确定。1991 年上半年，由 LEP 几个实验组报告的 Z_0 粒子宽度的测量结果，可以推断中微子只有 3 种。根据当时 τ 轻子寿命、质量 m_τ 以及 τ 轻子衰变分支比 $B(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$ 的数据导致了 $G_F^e/G_F^\mu < 1$ ，即轻子普适性不成立的危机。当然，另一种可能性就是轻子普适性还是成立的，但当时上述三个物理量的测量值全不对，或者不全对。因而 m_τ 的精确测量显得更为重要和迫切。1991 年底，北京 BES 合作组给出

$$m_\tau = 1776.9_{-0.5}^{+0.4} \pm 0.2 \text{ MeV}。$$

这个结果使 τ 轻子质量世界平均值改变了 3 倍标准差，精度提高了 10 倍。

自 1990 年以来，上述三个物理量的测量都取得了很大进展。LEP 利用 Z_0 的 τ τ 衰变的巨大样本以及“运动钟变慢”的优势，也对 τ 的寿命做了精确测量。由 PDG96 给出的上述三个物理量的测量结果，最后确定轻子普适性依然成立：

$$\frac{g_\tau}{g_\mu} = 1.0005 \pm 0.0069。$$

在检验 μ - τ 普适性的世界范围联合研究中，BES 合作组起了重要作用。

7. 中微子振荡现象的发现——中微子有质量

多年来，一直认为中微子无质量，实验上也只给个质量上限。但中微子无质量的假设多年以前就遭到意大利科学家庞蒂科夫 (Pontecorvo) 和其他一些科学家的怀疑。直到 1968 年，庞蒂科夫及其合作者发展出不同种类的中微子 (或反中微子) 之间相互振荡的理论，成为今天解释各种振荡实验现象的理论基础。如果中微子有质量且其质量本征态与弱作用本征态不简并，则不同的中微子之间可发生振荡。其振荡 (即一种中微子在飞行过程中变成另一种中微子) 的概率 (即“产生类实验”) 可表示为：

$$P(\text{产生}) = \sin^2 2\theta \sin^2 (1.27 \Delta m^2 L E)。$$

而原来的中微子在飞行过程中“丢失”的概率

$$P(\text{丢失}) = 1 - P(\text{产生})。$$

式中， E 为中微子能量， L 为飞行距离， Δm^2 为两种中微子质量平方差， $\sin^2 2\theta$ 为最大振荡概率。自然界存在 e 、 μ 、 τ 三种中微子，上面这个公式也可写成类似于夸克的 CKM 矩阵的形式，为纪念三位日本理论物理学家把这矩阵称为 MNS (Maki-Nagakawa-Sakada) 矩阵，三种中微子之间的振荡也分别以混合角 θ_{12} 、 θ_{23} 和 θ_{13} 来表征。中微子振荡已在太阳、大气层、核反应堆和粒子束等不同来源的多个实验进行。其中的两种振荡模式自 20 世纪 60 年代起即有迹象，当时称作“太阳中微子之谜”和“大气中微子之谜”。1998 年小柴昌俊等科学家在超级神冈实验上正式发现了大气中微子振荡，戴维斯 (Davis) 领导的胡姆斯塔克 (Homestake) 也证实了太阳中微子振荡。太阳中微子振荡实验决定了 θ_{12} ，大气中微子振荡实验决定了 θ_{23} ，但第三个混合角 θ_{13} 则一直未被确定，甚至有理论预言其根本不存在 (即其振荡几率为零)。

2012 年 3 月，大亚湾中微子实验国际合作组发言人王贻芳在北京宣布了大亚湾中微子的实验结果： $\sin^2 2\theta_{13}$ 为 9.2%，误差为 1.7%，以超过 5 倍的标准偏差确定 $\sin^2 2\theta_{13}$ 不为零，首次发现了这种新的中微子振荡模式。这一发现具有重要意义： θ_{13} 不仅是物理学中的一个基本参数，其数值的大小也对未来中微子物理的发展方向起着决定性的作用。如果它足够大，我们就能进行下一代实验来测量中微子振荡中的宇称和电荷对称性 (CP) 破坏，以理解宇宙中物质-反物质不对称现象，即宇宙中“反物质消失之谜”。

五、夸克模型和强相互作用

1. 对称性和守恒量

物理学中存在着许多守恒定律，如能量守恒、动量守恒、角动量守恒、电荷守恒、奇异数守恒、重子数守恒、同位旋守恒……这些守恒定律的存在并不是偶然的，它们是自然规律具有各种对称性的结果。在经典物理中，诺特定理就讲到了体系的对称性与守恒量之间的关系。一种体系具有某种对称性是指：当对体系进行某种操作后其动力学方程是保持不变的，这些操作通常使得坐标发生了变化。诺特定理是德国女数学物理学家艾米·诺特 (Emmy Noether) 在 1918 年首先发现的，她给出了对称性和守恒定律之间的联系，这些联系就被称为诺特定

守恒量	相互作用类型		
	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用
能-动量	守恒	守恒	守恒
电荷	守恒	守恒	守恒
重子数	守恒	守恒	守恒
轻子数	守恒	守恒	守恒
CPT	守恒	守恒	守恒
P (宇称)	守恒	守恒	不守恒
C (电荷共轭宇称)	守恒	守恒	不守恒
CP (或 T)	守恒	守恒	10^{-3} 破坏
I (同位旋)	守恒	不守恒	不守恒

理。在经典物理中，时间平移对称性对应了总能量守恒（1 维），空间平移对称性对应了总动量守恒（3 维），空间旋转对称性对应了总角动量守恒（3 维），速度变换对称性对应了自由质心运动（3 维）。在量子力学主导的粒子物理学拓展了对称性和守恒量。有些守恒定律在各种相互作用过程中都严格成立，而有些则是在某些相互作用过程中守恒。下表给出了三种相互作用下的一些守恒定律。

在粒子物理中拓展的守恒量子数还包括奇异数、不同类轻子的电子数、 μ 子数、 τ 子数，以及不同类夸克的粲数 C、底数 b 等。

2. 夸克模型——让世界变得更简单

(1) 夸克的特性

1932 年在发现了由狄拉克量子理论预言的第一个反粒子——正电子以后，人们在宇宙线的研究中还发现了 μ 子，接着又陆续发现了一系列的介子和超子，特别是 20 世纪 50 年代以后，由于粒子加速器的发展，物理学家在实验中发现了更多的类似质子、中子、 π 介子以及它们的反粒子这样的“基本粒子”，至今各种粒子已达 400 多种，大大超过了化学元素的数目。这就促进了人们对于强子对称性及其分类的研究。关于强子的组成，从 20 世纪 50 年代起就有人提出过不同的模型。但最成功的要数 1964 年美国科学家盖尔曼和茨维格（Zweig）提出的夸克模型。在用 SU(2) 群描写的同位旋 I 对称性和用 U(1) 群描写的奇异数 s 对称性基础上，人们提出了用 SU(3) 群描写的夸克模型。夸克是一种费米子，即有自旋 1/2。最初的夸克模型只包括 3 种夸克，即 u、d 和 s，它们的电荷分别假设为 +2/3e、-1/3e 和 -1/3e 电荷（e 为质子电荷单位）。s 是奇异夸克，带有奇异量子数。质子、中子和其他重

子由 3 个夸克组成：例如质子的夸克组合为 uud；中子为 udd，奇异重子 Σ^0 则为 uds。介子则有一个正夸克和一个反夸克组成：例如 π^+ 介子为 $u\bar{d}$ 组合，奇异介子 K^- 则为 $\bar{u}s$ 组合。

(2) 强相互作用和色荷

虽然夸克模型取得了许多成功，当时也遇到了一些麻烦，如重子的夸克结构理论认为，像 Ω^- 和 Δ^{++} 这样的重子可以由三个相同夸克组成，且都处于基态，自旋方向相同，这种在同一能级上存在有三个全同粒子的现象是违反泡利不相容原理的。泡利不相容原理说的是两个费米子是不能处于相同的状态中的。夸克的自旋为半整数，是费米子，当然是不能违反泡利原理的。1964 年，格林伯格提出了一种被称为“色”的新的自由度，色有 3 种，即红、绿、蓝，这样一来，那三个夸克就不全同了，从而不再违反泡利原理了。当然这里的“颜色”并不是视觉感受到的颜色，它是一种新引入的自由度的代名词，与电子带电荷相类似，夸克带色荷。虽然夸克带有 3 种不同的“色”但所有自然界存在的粒子都是无色的。在夸克间的相互作用中，色量子数起了基本的作用。物理学家注意到，量子电动力学 QED 的规范理论（gauge theory）在计及电荷间相互作用时取得了巨大的成功。例如，量子电动力学方法成功地处理了氢原子谱的兰姆移动和电子的反常磁矩。受此鼓舞，他们为强相互作用寻求一个类似的理论。这个理论就是量子色动力学 QCD。色规范相互作用远比电磁相互作用要强。色对称性用 SU(3) 群描写。在量子色动力学中，色荷之间的相互作用通过交换胶子实现，胶子已在 1979 年在德国 DESY 的 Petra 正负电子对撞机的 Mark J、Tasso 等实验上被发现。

(3) 强相互作用的渐近自由和色囚禁

这种强相互作用还具有渐近自由和色囚禁两个特点。在用高能研究近距离效应的过程中, 粒子间强相互作用减弱, 这时可以近似地把相互作用着的粒子作为相互间没有相互作用的自由粒子来处理, 这就是渐近自由。正是这个性质, 我们就可以用高能电子去“自由”探测核子内部夸克的电荷结构。

如果带色荷的粒子在相互作用过程中的能量动量交换很少, 反屏蔽的效应导致带色荷粒子和胶子的有效耦合常数随相互作用所传递的能量动量的减少而增加, 也就是说, 随带色荷粒子的距离增加而增加。这个性质用色相互作用位势 $U(r)$ 描写的话, 则可表示成 $r \rightarrow \infty$ 时, $U(r) \rightarrow \infty$ 。这个性质称为色囚禁。色囚禁要求所有的带色荷粒子都不能自由地独立存在。

(4) 夸克模型的实验验证举例:

这里特别需要指出的是: 夸克模型并不是一种数字游戏, 它们得到大量实验支持。这里举几个简单例子。

① R 值测量

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 是最简单的 QED 过程, 容易得到: $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = 4\pi\alpha^2/3S$; 由部分子 (parton) 模型, 如不考虑色荷, 则 $\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \sum e_i^2$, 这时考虑 u, d, s , 但不考虑“色”, $\sum e_i^2 = 4/9 + 1/9 + 1/9$; 但考虑到夸克有 3 种颜色, 还得 $\times 3$, 于是 $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子}) = \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \times 3 \sum e_i^2$, $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = 3 \sum e_i^2 = 2$ (在质心能量容许产生 3 味夸克的条件下)。实验测得的 R 值支持了对夸克的电荷和色荷的假设。

② 在 $2 \sim 5\text{GeV}$ 能区 R 值精确测量

5GeV 以下的 R 值是标准模型计算不确定性的主要部分, 国际上只有北京正负电子对撞机和北京谱仪在 $2 \sim 5\text{GeV}$ 能区运行。1998~2001 年 BES 合作组在 $2 \sim 5\text{GeV}$ 能区的近百个能量点上进行能量扫描测量, 并在数据分析中, 发展和应用了多项创新方法和理论模型, 测量的系统误差大大降低, 平均测量精度达到 6.6%, 比国际上原有的实验结果提高了 2~3 倍, 使精细结构常数 $\alpha(M_z^2)$ 的误差减少了 2 倍。北京谱仪所测得的 R 值与量子色动力学理论的预言在一倍标准偏差内符合, 也对希格斯粒子 H_0 质量的预期产生了显著影响。

③ π 介子——核子截面

高能强子-强子的强作用截面可以解释为个别组分夸克之间碰撞的散射振幅的相加效应。在 π 介子-核子情况下, 参加碰撞的夸克组合数为 $2 \times 3 = 6$, 而在核子-核子, 参加碰撞的夸克组合数则为 $3 \times 3 = 9$, 于是 $\frac{\sigma(\pi N)}{\sigma(NN)} = \frac{2}{3}$ 。在 60GeV 束流能量下,

发现 $\sigma(\pi^+p)$ 和 $\sigma(\pi^-p)$ 几乎相等, 平均为 25mb , 而在相等的能量范围, 发现 $\sigma(pp) \cong \sigma(np) = 38\text{mb}$, 两者之比确实为 $2/3$ 。

(5) 重夸克的发现

1974 年丁肇中和里克特 (Richter) 发现了 J/ψ 粒子。实际上这是由粲夸克 c 和反粲夸克 \bar{c} 组成的夸克对。

量子色动力学认为, 夸克共有 6 种, 分别称为上夸克 (u)、下夸克 (d)、奇夸克 (s)、粲夸克 (c)、顶夸克 (t)、底夸克 (b), 它们组成了所有的强子。

底夸克 (b) 已于 1977 年在美国的国立费米实验室由赫伯 (Herb) 和伊内斯 (Innes) 等人发现。而质量出乎意料高达 174GeV 的 t 夸克也于 1995 年被美国费米实验室质心能量约为 2TeV 的 $p\bar{p}$ 对撞机 TEVATRON 上的 CDF 和 D0 实验组发现。

这样, 考虑到每味夸克就有三种颜色, 夸克的种类一下子由原来的 6 种扩展到 18 种, 再加上它们的反粒子, 那么自然界一共有 36 种夸克, 还有 8 种胶子传递强 (色) 相互作用。

(6) 胶子球和多夸克态

由夸克和胶子的自旋、宇称可以讨论它们各种可能组态 (包括不同的轨道角动量 L) 的 J^{PC} , 并开展对这些组态的寻找, 也可对实验上新发现的共振态做性质判断。夸克是费米子, 对于由正反夸克组成的介子系统, 实验上发现它们质量谱的排列符合上述计算的基本定性特征, π 等介子是 $J^{PC} = 0^{-+}$ 的质量最低的介子, 而 ω 、 ρ 等粒子则是质量较大的矢量介子 $J^{PC} = 1^{--}$ 。这是对把介子视为由一对正反费米子组成的观点的重要支持。

胶子是玻色子, 同样可以分析它们各种可能组态的 J^{PC} , 对于两个胶子组成的系统总角动量不能为 1, 而三个胶子组成的胶球则可以取各种可能的量子数。同样也可以由对称性的要求对多夸克系统组态的 J^{PC} 做出预测。

2003 年, BESII 实验曾在 J/ψ 粒子辐射衰变到正反质子的过程中, 发现正反质子不变质量在阈值

现代物理知识

处有一个奇异的增长, 质量为 1.859 GeV, 自旋为 0, 并命名该共振态为 X (1860)。该结果发表后引起了国际高能物理界的重视, 认为该共振态可能是重子反重子束缚态。利用 BESIII 新采集的 $\psi(2S)$ 数据, 分析了 $\psi(2S)$ 衰变到两个带电 π 介子和 J/ψ , 然后 J/ψ 粒子辐射衰变到正反质子, 同样观测到了清楚的阈值增长结构, 拟合结果和 BESII 实验结果非常一致, 从而证实了结构 X (1860) 的存在。2006 年, BES 合作组在 J/ψ 粒子辐射衰变到两个带电 π 介子和一个中性 η 介子的衰变道中发现了质量为 1.835 GeV 新粒子, 命名为 X (1835)。对此, 人们认为它可能和 X (1860) 是同一个粒子, 也可能是胶球或别的常规介子。X (1835) 的发现也已被 BESIII 所证实, 并在不变质量谱上又发现了两个新共振结构, 质量分别在 2.122 GeV 和 2.376 GeV。

六、标准模型——美妙但决不是终极的理论

1. 弱电统一理论

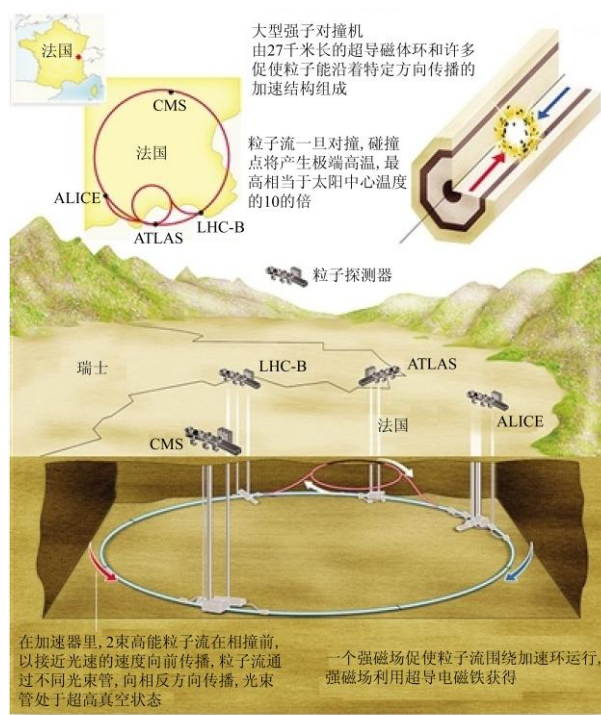
1961 年, 格拉肖 (Glashow) 提出了一个 $SU(2) \times U(1)$ 电弱统一模型, 1967 年温伯格 (Weinberg) 和萨拉姆 (salam) 把这个理论建立在规范场理论的基础上, 并引入对称性自发破缺的机理, 使这个理论发展完善。1971 年和 1972 年霍夫特 ('t Hooft) 和韦尔特曼 (Veltman) 等人证明了这个理论是可重整化的。当把这个理论推广到包括夸克和强子时, 该理论曾遇到了如何保证不出现奇异数改变弱中性流的问题。1970 年格拉肖、伊略普洛斯 (Iliopoulos) 和迈安尼 (Maiani) 提出了夸克混合 (Cabibbo 旋转) 的机理, 解决了这个困难。这个机理称为 GIM 机理, 它预言了有第 4 味夸克-粲夸克的存在, 并预言了粲夸克的质量。1974 年发现了 J/ψ 粒子证实了粲夸克的存在, 并且其质量也和 GIM 机理中预言的相符合。1973 年, 小林诚 (Kobayashi) 和益川敏英 (Maskawa) 又把这种混合机理推广到 3 代夸克的情形。这样一个包括轻子和夸克的 $SU(2) \times U(1)$ 电弱统一的规范理论就形成并建立起来了。

电弱统一理论可以解释过去电磁相互作用理论和弱相互作用理论所解释的所有实验事实, 还预言了存在中性流弱相互作用; 中性流弱相互作用和带电流弱相互作用强度是同量级的; 中性流的结构唯一由参数 $\sin^2 \theta_w$ 决定。20 世纪 70 年代实验定出 $\sin^2 \theta_w = 0.230 \pm 0.005$ 。

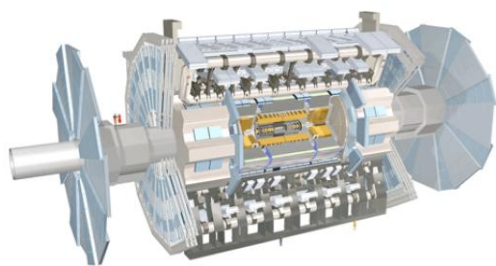
尽管 1978 年前后, 对中性流弱相互作用过程的实验研究已经对 $SU(2) \times U(1)$ 电弱统一理论给出了判定性检验, 但是对这个理论的更直接的检验则应是传递弱相互作用的中间玻色子 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子的发现。电弱统一理论还预言 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子的质量关系唯一地由温伯格角 θ_w 决定: $m_Z^2 = \frac{m_W^2}{\cos^2 \theta_w}$ 。

预言的 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子的质量约 80、90 GeV, 这远重于当时已发现的其他粒子。这些粒子只有等到 1982 年 CERN 建成正负质子对撞机时才有可能发现。幸运的是, 就在 1983 年上半年, CERN 的 UA1 和 UA2 先后发现了 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子。 $m_W = (80.3 \pm 0.3) \text{ GeV}$, $m_Z = (91.163 \pm 0.031) \text{ GeV}$, 测量结果与理论给出的预言在误差范围内完全符合, 这是对 $SU(2) \times U(1)$ 电弱统一理论的直接验证。

在最小 $SU(2) \times U(1)$ 电弱统一理论中对称性自发破缺后将出现物理上可观察到的希格斯粒子 H^0 , 但找了几十年, 尚未发现。当代最大的粒子物理实验计划——LHC 实验正是瞄准了这个目标, 我们对 LHC 实验结果充满期待。关于 LHC 实验计划的详细描述可以参阅本刊 2008 年第 5 期 LHC 实验计划的专题介绍。这里给出的是 LHC 强子对撞机和



大型强子对撞机 LHC



ATLAS 实验

其中的一个实验 ATLAS 探测器的图片。共有 37 个国家 172 个研究所的 2900 科学家参加了 ATLAS 合作组。探测器长 46 米，高 25 米，宽 25 米，重量达 7000 吨重。

2. 标准模型的基本粒子

标准模型包括电弱统一理论和强相互作用（量子色动力学）。在这框架下，基本粒子中的费米子包括夸克和轻子：夸克有 6 味，考虑它们的“色”以及正反粒子，自然界一共有 36 种夸克，而轻子（如电子、 μ 子、 τ 子及其相应的中微子，加上每种粒子还都有反粒子）则有 12 种，规范玻色子（如光子、三个传递、控制夸克和轻子衰变的弱相互作用的中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 、8 个传递强（色）相互作用的胶子 g ），如果再加上正在寻找的希格斯（ H^0 ），那么标准模型的基本粒子就是 61 种。基本粒子的示意图见下。

	I	II	III	
质量→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
电荷→	2/3	2/3	2/3	0
自旋→	1/2	1/2	1/2	1
名字→	u 上夸克	c 粲夸克	t 顶夸克	γ 光子
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
夸克	d 下夸克	s 奇夸克	b 底夸克	g 胶子
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e 电子中微子	ν_μ μ 子中微子	ν_τ τ 子中微子	Z^0 Z玻色子
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	1/2	1/2	1/2	1
轻子	e 电子	μ μ 子	τ τ 子	W^\pm W玻色子

三代费米子

标准模型包含费米子及玻色子，费米子就是组成物质的粒子，而玻色子则负责传递各种作用力。在标准模型的三种相互作用中，弱相互作用的

一个显著特点是对称性低。在弱相互作用中，空间反演、电荷共轭和时间反演的对称性都有破坏；同位旋、奇异数、粲数、底数等在强相互作用下守恒的量子数都不守恒。但是破坏时间反演的弱作用比不破坏时间反演的弱作用弱得多（千分之几）。

3. 标准模型的局限性

今天，粒子物理学的标准模型是一套描述强力、弱力及电磁力这三种基本力及组成所有物质的基本粒子的理论。它隶属量子场论的范畴，并与量子力学及狭义相对论兼容。到现时为止，几乎所有对以上三种力的实验的结果都合乎这套理论的预测。但是标准模型还不是一套完善的理论，它所预言的希格斯粒子尚在寻找；它也不是万有理论，主要是因为它并没有描述到引力。至于面对近十几年出现的暗物质、暗能量问题，标准模型根本还没有解决的头绪。有关暗物质的探索情况可以参看本刊登载的许多文章，例如本刊 2011 年第 1 期的文章《纷繁隐秘的暗世界》。

4. 新物质的标度和超标准模型

近些年来我们发现证据表明新物质标度大约出现在 10^{16} GeV 附近。此外，也观察到这样的事实，即标准模型的强耦合常数和电、弱两个耦合常数仅依赖于能量的对数，并似乎在 $10^{15} \sim 10^{16}$ GeV 能量级处收敛于一个公共常数。

现在已存在许多超越标准模型的好想法，其中包括超对称性理论和所谓弦理论，但还没有实验数据可以确认它们。即使将来的政治家对粒子物理宽宏到疯狂的程度，我们也永远不可能建造一台能量为 $10^{15} \sim 10^{16}$ GeV 那样的加速器。

当下我们可以希望 LHC 和它的成功将会提供一些为了超越过去 100 年成就我们所需要的线索。

七、感想与思考

百年回眸匆匆而过，历史让人回味，未来需要思考。

1. 百年社会进步大，发展快，粒子物理成就惊人。卢瑟福实验组只是个三人小组，曼彻斯特大学的一两个房间大小的实验室足以安置整个实验装置；但现在为了寻找标准模型预言的希格斯粒子而建造的 LHC 加速器周长达到 27 千米（加速圈内足以容纳 30 多个北大校园），投资超过 44 亿美元，加速圈上布置了 4 个大型实验，每个实验都吸引了来自几十个国家上千名合作者，甚至几千名合作者参

自然界的四种基本相互作用（表中的引力不属于标准模型范围）

作用类型	强作用	电磁作用	弱作用	万有引力作用
源	色荷	电荷	弱荷	质量
作用对象	强子	带电及带磁矩粒子	轻子与强子	所有粒子
耦合强度典型值(近似)	1	10^{-2}	10^{-7}	10^{-39}
规范玻色子（媒介子）	胶子 g	光子 γ	中间玻色子 (W^{\pm}, Z^0)	引力子（待证实）
力程	$\sim 10^{-15}m$	∞	$< 10^{-18}m$	∞

加，动辄几亿美元的投资，这样的高能物理实验装置早已成了当地的地标性建筑。如此的进步肯定是卢瑟福时代的先贤们所想象不到的。在上一节中曾谈到新物理可能就在能量标度 $10^{15} \sim 10^{16} GeV$ 地方，但我们有可能建造那样的高能加速器吗？！毫无疑问，LHC 实验是空前规模的，大概也很难不绝后。发展粒子物理不能光拼能量，拼规模，对此还得另辟蹊径。

2. 科学是人类的一种探索活动，过程是曲折的，很难有人一贯正确

早期 1914 年，查德威克在对放射性物质 β 衰变进行观测时，发现 β 射线呈连续能谱时，这就是所谓的“能量失窃案”，正是这个“能量失窃案”甚至曾让玻尔对能量守恒发生动摇。

狄拉克最初设想在他相对论量子力学理论中的负能电子海中的空穴必须是质子，而质子正是当时知道的唯一正电粒子。当然后来狄拉克改变了他的想法。

科学研究的曲折性，或者说难预见性也常常让一些结果出乎意料。大家知道，1974 年丁肇中和里克特分别发现了重 c 夸克。3 年后人们又发现了重 b 夸克，这时人们急于发现当时已被理论预言的最后一个重夸克 t，并投入了巨大的财力、人力：于是西德 Desy 1978 年设计、建设了 Petra（质心能量约 30GeV）正负电子对撞机，日本 KEK 1986 年设计、建设了 Tristan（质心能量约 60GeV）正负电子对撞机以及 1989 年 CERN 设计、建设了 LEP（质心能量 100~200GeV）正负电子对撞机，这些加速器建造的主要目的之一都是为了寻找这味 t 夸克，最后它们的这个目标全都落空，t 夸克根本没有出现在这些能区，正应了“人算不如天算”那句话。当然，Petra 加速器还是发现了量子色动力学所预言的胶子，也算有了个交待。粒子物理界都难否定“有没有运气”这样的心理。

在科学发展过程中，时代呼唤英雄，也造就了

英雄，而正是这些英雄，使科学得到了跨越式发展。原子结构的探索唤醒了卢瑟福； β 衰变的“能量失窃案”唤醒了狄拉克提出的中微子假说； τ - θ 的谜团唤醒了李政道、杨振宁；弱电统一假说唤醒了发现 W^{\pm} 、 Z^0 的鲁比亚 (C. Rubbia) 等，而正是这些英雄、大师推动了科学的跨越。

3. 科学没有终极真理，探索没有尽头

在某个时期，人们在科学研究中得到的近乎完美的真理都不过是相对真理。一百年来建立起来的标准模型似乎非常完美，几乎可以解释自然界除引力作用以外的一切物质相互作用现象。其实不然，直到今天，人们还在 LHC 上为标准模型的完备而在苦苦寻找希格斯粒子；除此之外，近一二十年又出现了暗物质和暗能量的问题：宇宙学观测数据表明宇宙中除了我们理解的 4% 的可见物质外，还存在占 23% 的暗物质和占 73% 的暗能量，我们对它们几乎全然不知。这里引用屈原老先生的名句共勉：路漫漫兮其修远兮，吾将上下而求索。

（中国科学院高能物理所 100049）



科苑快讯

最细的导线

担心量子效应会打破欧姆定律以及微小导线具有更大的电阻，现在看来是毫无事实依据的。美国印第安纳州普度大学 (Purdue University) 的柳勋 (Hoon Ryu 音译) 和同事研发出只有 4 个原子粗细的导线，这些磷导线被嵌入硅晶片中，深度为 1 个原子。

出人意料的是，这些导线的电阻非常小，约为 $0.4m\Omega$ ，导电能力与铜导线相似；而且欧姆定律在这样的微小尺度下竟仍然适用。这对摩尔定律是个好消息，说明它最后也能适用于几个原子宽的电路，这已经是经典电子学的极限了。

（高凌云编译自 2012 年 2 月《欧洲核子中心快报》）