

走向统一的自然力

强力、弱力和电磁力的大统一 (V)

厉光烈¹ 阮建红²

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 华东师范大学 200062)

3. 夸克·标准模型·强弱电大统一

(1) 夸克

亚原子粒子及其分类

天然放射性的发现打破原子“永恒不变”的神话之后，比原子-分子尺度要小得多的亚原子粒子陆续发现：1897年，J. J. 汤姆生通过测定阴极射线的荷质比发现了第一个亚原子粒子，称其为“微粒”，并将其所带电荷称为“电子”，1901年洛伦兹进一步将其命名为电子；1905年，爱因斯坦发现光量子，后来人们将其称为光子；1911年，卢瑟福发现原子核，并于1919年用 α 粒子轰击氮核从中打出了氢核，将其命名为质子；1932年，查德威克发现中子，弄清了原子核的组成，同年，安德森(C. D. Anderson, 1905 ~ 1991)发现正电子，打开了通向反物质世界的大门；1937年，安德森和尼德迈耶(S. Neddermeyer, 1907 ~ 1988)在宇宙线中发现了静止质量约为电子207倍的新粒子，当时人们以为它是汤川核力介子交换理论所预言的粒子，称其为 μ 介子，

后来发现：它与原子核的相互作用较弱，穿透力强，寿命比汤川秀树所预言的传递核力的介子要长，其性质与电子相似，有人称其为重电子，现在称其为 μ 子。直到二战爆发，人们就认识这几个亚原子粒子，并将质子、中子和电子视为“基本粒子”。

原子弹爆炸，不仅迫使日本天皇宣布无条件投降，也使各国政府，特别是军方，认识到物理学基础研究的重要性。二战后，大规模物理实验研究，特别是核物理研究，得到了政府（特别是美苏两国政府）的大力支持，取得了迅猛发展，实验上陆续发现了数百种亚原子粒子：1947年，鲍威尔(C. F. Powell, 1903 ~ 1969)利用核乳胶发现了汤川所预言的传递核力的 π 介子；同年，罗彻斯特(G. D. Rochester, 1908 ~ 2001)和波特勒(C. C. Butler, 1922 ~)在宇宙线中发现了奇异粒子—— K 介子和 Λ 超子，后者因其在云室照片中的径迹呈“V”形，开始称为V粒子，后来改称 Λ 超子；1955年，美国物理学家张伯伦(O. Chamberlain, 1920 ~ 2006)和意大利物理学家塞格雷(E. G. Segre, 1905 ~ 1989)在加速器上发现



鲍威尔



塞格雷



张伯伦



王淦昌

了反质子，塞格雷等还发现了反中子；1956年，莱因斯和柯恩发现了泡利预言存在的中微子 ν ，现在称其为电子中微子 ν_e ；之后，科学家陆续发现了 Σ 、 Ξ 和 Ω 等超子及其反粒子，所谓超子，指的是质量大于核子的粒子，它们都是奇异粒子，特别应当指出的是，我国物理学家王淦昌（1907～1998）等于1959年在苏联杜布纳联合核子研究所发现了第一个荷负电的反超子 $\bar{\Sigma}^-$ ；进入20世纪60年代，在 高能加速器上还发现了许多寿命极短（在 $10^{-20} \sim 10^{-24}$ s）的共振态粒子……

这些亚原子粒子，质量从零到数千亿电子伏特，或带电，或不带电。最初，人们认为：粒子的性质与其质量密切相关，故按质量大小将其分为3类：质量大的叫重子；质量小的叫轻子；介于两者中间的叫介子。后来发现：粒子的一些主要性质并不依赖于质量，有些按其性质应该归入轻子一类的粒子竟比某些重子的质量还大，于是，又按自然力的作用情况将其分为强子、轻子和媒介子。参与强作用的粒子，被称为强子，例如质子、中子、 π 介子、 K 介子和 Λ 超子；不参与强作用的粒子，被称为轻子，例如电子、 μ 子以及只参与弱作用的中微子^①；传递自然力的粒子，被称为媒介子，例如光子和中间玻色子 W^\pm 和 Z^0 等。另外，根据它们服从不同的统计规律，还可将它们分为费米子和玻色子：自旋为 \hbar 的半整数倍、服从费米-狄拉克统计的粒子，称为费米子；自旋为 \hbar 的整数（包括零）倍、服从玻色-爱因斯坦统计的粒子，称为玻色子。费米子受泡利不相容原理制约，在一个量子态中不能同时出现两个或更多的全同费米子；玻色子不受泡利不相容原理限制，可以在同一个量子态中出现任意多个全同玻色子。

强子结构的夸克模型

与强子相比，轻子发现的数量甚少^①，而且，就目前的实验条件，尚未观察到轻子存在内部结构，故显得更像“基本粒子”。因此，从一开始，人们就着眼于研究强子的内部结构。到20世纪60年代，实验上发现的强子及其共振态已多达数百种。这些强子，无论是重子还是介子，每类都有相同或相似的地方，即具有一定的对称性，因此，人们期望能像原子按门

捷列夫周期表分类那样对众多强子作进一步的分类。

1949年，费米和杨振宁提出了一种强子结构的简单模型，后来被称为费米-杨模型。他们将核子（质子 p 和中子 n ）及其反粒子（ \bar{p} ， \bar{n} ）作为构成强子的基础粒子，而将介子作为它们结合成的束缚态。例如， $\pi^+ = p\bar{n}$ ， $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(p\bar{p} - n\bar{n})$ ， $\pi^- = n\bar{p}$ 等。这个模型的基础粒子都是自旋为1/2的费米子，因而能够很简单地构成具有各种自旋的强子，只是奇异粒子在这个模型中完全没有地位。后来提出的以核子和 k 介子为基础粒子的哥德哈伯模型克服了这一不足之处。但是，从历史上讲，费米-杨模型的提出仍是强子结构模型发展的重要一步。

1956年，日本物理学家坂田昌一（S. Sakata，1911～1970）提出了一个新的强子结构模型。他把核子和 Λ 超子及其反粒子作为构成强子的基础粒子，认为其他一切强子都是它们结合成的束缚态。这个模型，因其基础粒子的自旋宇称相同、质量相近，并包含奇异粒子（ Λ 超子），不仅比早先提出的费米-杨模型和哥德哈伯模型更为优越，而且为小川修三（S. Ogawa，1924～2005）等提出强子结构的 $SU(3)$ 对称性理论奠定了基础。顺便指出：美国物理学家盖尔曼（M. Gell-Mann，1929～）和日本物理学家西岛和彦（K. Nishijima，1926～2009）于1955～1956年间分别独立地提出了后来被称为盖尔曼-西岛关系的经验规律： $Q = T_3 + \frac{Y}{2}$ ，这里 Q 、 T_3 和 Y 分别是强子的电荷、同位旋第三分量和超荷，为将同位旋（ $SU(2)$ 群）和超荷（ $U(1)$ 群）合并为么旋（ $SU(3)$ 群）提供了线索和依据。

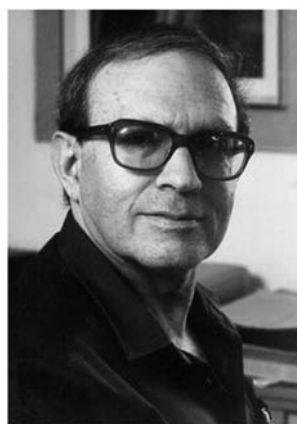
坂田模型，比较成功地解释了介子谱，但在说明重子谱时遇到了困难，所得结果与实验不符。这一困难，在盖尔曼于1962年提出“八重法”方案后得到了解决。所谓“八重法”，指的是：运用 $SU(3)$ 群分类，



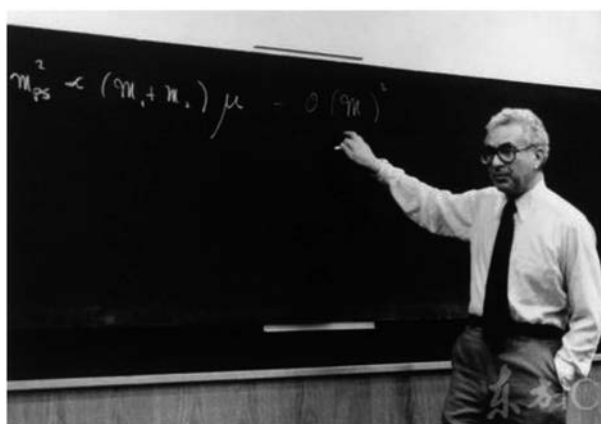
坂田昌一



盖尔曼



尼曼

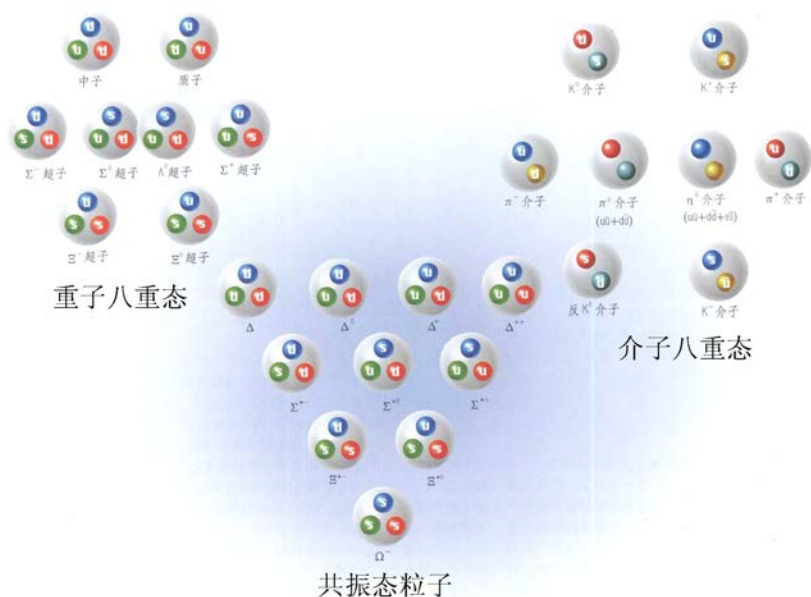


茨威格

把重子和介子按对称性质分成八个一组或十个一组，例如：两个核子（ n 、 p ）和六个超子（ Σ^- 、 Σ^0 与 Δ^0 、 Σ^+ 、 Ξ^- 和 Ξ^0 ）构成重子八重态；八个介子（ K^0 、 K^+ 、 π^- 、 π^0 与 η 、 π^+ 、 K^- 和 \bar{K}^0 ）构成介子八重态；另有九个 $J^P = \frac{3^+}{2}$ 的共振态粒子（ Δ^- 、 Δ^0 、 Δ^+ 、 Δ^{++} 、 Σ^{*+} 、 Σ^{*0} 、 Σ^{*-} 、 Ξ^{*+} 和 Ξ^{*0} ）和一个空位构成十重态。盖尔曼还于1964年预言这个空位应是一个 $J^P = \frac{3^+}{2}$ 、奇异数 $S=-3$ 的带负电的粒子并预言其质量为1653 MeV，同年，实验上就发现了这个粒子，即下面示意图中的 Ω^- ，测得的质量（ 1686 ± 12 MeV）与理论预言惊人地一致。这一发现有力地支持了强子结构的 $SU(3)$ 对称性，盖尔曼因此荣获了1969年度诺贝尔物理学奖。应当指出：

以色列物理学家尼曼（Y. Neeman, 1925 ~ 2006）也独立地提出了类似的“八重法”。

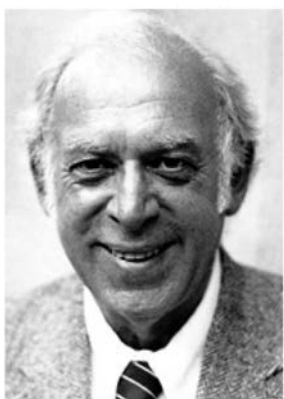
1964年，在给强子分类取得成功的八重法方案的基础上，盖尔曼在欧洲《物理快报》上发表了题为“重子和介子的一个简单模型”的论文，提出了关于强子结构的夸克模型。该文指出：作为么正对称群 $SU(3)$ 基础表示的三重态应为3种夸克：上夸克 u 、下夸克 d 和奇异夸克 s ，它们的电荷分别为 $2/3$ 、 $-1/3$ 和 $-1/3$ （都以 e 为单位）。重子由3个夸克组成；介子由一个正夸克和一个反夸克组成。“夸克”一词，盖尔曼取自乔埃斯的小说《芬尼根彻夜祭》中的诗句：“为马克检阅者王，三声夸克”。“夸克”在该书中有多种含义，其中之一是指海鸟的叫声。盖尔曼的学生茨威格（G. Zweig, 1937 ~）也于同年独立地提出了夸克模型，他称强子的组分粒子为“爱斯（Ace）”，有人译为“王牌”；我国北京基本粒子理论组也于1965 ~ 1966年间提出相对论协变的层子模型来描述强子参与的各种过程，获得了一系列有兴趣的结果。但是，无论是“爱斯”或“王牌”，还是“层子”，这些名称后来都没有保留住。



了夸克模型，他称强子的组分粒子为“爱斯（Ace）”，有人译为“王牌”；我国北京基本粒子理论组也于1965 ~ 1966年间提出相对论协变的层子模型来描述强子参与的各种过程，获得了一系列有兴趣的结果。但是，无论是“爱斯”或“王牌”，还是“层子”，这些名称后来都没有保留住。

标度无关性和部分子模型

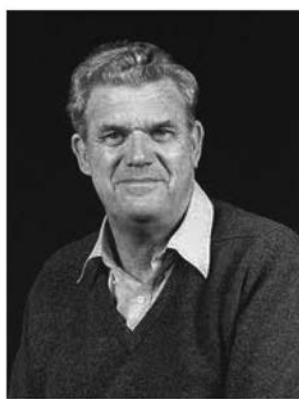
在夸克模型成功地将强子进行分类并解释了大量有关强子谱的实验事实后，1967年，美国斯坦福直



弗里德曼



肯德尔



理查德·泰勒



布约肯

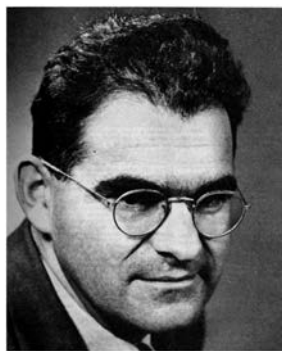
线加速器中心 (SLAC) 在高能电子轰击质子靶的深度非弹性散射实验中发现了标度无关性现象。因此, 该中心的弗里德曼 (J. Friedman, 1930 ~)、肯德尔 (H. Kendall, 1926 ~) 和理查德·泰勒 (R. Taylor, 1929 ~) 荣获了 1990 年年度的诺贝尔物理学奖。

SLAC 理论组成员布约肯 (J. D. Bjorken, 1934 ~) 首先认识到: 上述实验结果意味着高能电子轰击质子靶时所发射的虚光子以极大的动量深入到质子内部, 它遭遇到的不是“软”的质子靶, 而是电子尺度的点状“硬”核; 当时, SLAC 的实验物理学家并没有领悟到这一点, 布约肯运用流代数求和规则分析了实验结果, 提出“标度无关性”对实验结果进行了解释。但是, 由于流代数是抽象的数学方法, 他的工作未能得到人们的理解。两年后, 费曼提出“部分子模型”形象地解释了高能电子-质子深度非弹性散射实验和标度无关性。所谓“部分子模型”, 就是把质子看成是由近乎自由的点状粒子——部分子组成的; 把电子-质子深度非弹性散射看成是电子与质子内的部分子发生弹性散射。经过计算, 费曼成功地解释了 SLAC 的实验结果, 证明了布约肯的标度无关变量正是部分子动量与质子动量之比, 并确认部分子所带的电荷刚好就是夸克带有的分数电荷, 这使人们意识到, 部分子和夸克实际上是一回事, 故又将费曼的模型称为夸克-部分子模型。只是质子内的盖尔曼夸克只有 3 个, 而费曼的部分子却有无限多个, 因此, 人们把费曼的部分子称为“流夸克”, 包括价夸克和海夸克 (即夸克-反夸克对), 而将盖尔曼的夸克视为由价夸克和海夸克构成的“组分夸克”。

顺便指出: 上述实验还表明, 盖尔曼于 1962 年预言的电中性粒子——“胶子”可能存在。1971 年, 韦斯柯夫 (V. F. Weisskopf, 1908 ~ 2002) 和库提 (N. Kurti, 1908 ~ 1998) 进一步指出: 正是这种“胶子”在夸克间传递色力才使夸克“黏合”成强子; 1979 年, 在欧洲核子研究中心 (CERN) 的正负电子对撞机 (PETRA) 上所作的 e^+e^- 对撞实验中末态出现三喷注现象^②间接地证实了强子内部确实存在胶子。

夸克的“味”和“色”

盖尔曼的夸克模型, 抛弃了坂田模型以核子和 Λ 超子及其反粒子为强子结构的基础粒子, 代之以 u 、 d 和 s 3 种夸克及其反夸克。1964 年, 实验发现 Ω^- 超子不仅验证了夸克模型而且间接确认了这 3 种夸克及其反夸克的存在。为了解释弱中性流, 格拉肖等还引入第 4 种夸克——粲夸克 c , 美国布鲁克海文实验室丁肇中 (C. C. Ting, 1936 ~) 领导的实验组和斯坦福实验室里克特 (B. Richter, 1931 ~) 领导的实验组于 1974 年各自独立地发现了 J/ψ 粒子, 间接验证了粲夸克 c 的存在, 他们俩因此共同分享了 1976 年度诺贝尔物理学奖。后来, 实验上又间接地发现了底夸克 b 和顶夸克 t ^③。这样, 便有了 6 种“味道” (以下简称“味”) 的夸克, 而不是原先的 3 种。因此, 作为 $SU(3)$ 群基础表示的三重态不应为 3 种“味”的夸克, 而应为夸克引进新的自由度。另外, 夸克的自旋为 $1/2$, 是费米子, 应服从泡利不相容原理, 即在同一量子态不能同时存在两个或更多的全同夸克, 而 Ω^- 就是由三个全同的 s 夸克构成的, 这就同样需要为夸克引进新的自由度。1964 年, 格林贝格 (O. W.



韦斯柯夫



库提



丁肇中



里克特

Greenberg, 1932~)首先提出了这一想法,随后,韩(M. T. Han)和南部以及中国科技大学刘耀阳也提出了类似看法。1972年,盖尔曼想到了与“味道”相近的“颜色”,便将这个新的自由度称为“颜色”(以下简称“色”),即每一种“味”的夸克都有红、绿和蓝3种颜色。这种“色”自由度的引入,随即得到了实验验证,例如 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变几率和 e^+e^- 对撞中产生强子与产生 $\mu^+\mu^-$ 的反应截面之比 R 值的测量等,应当强调指出的是, R 值的精确测量还验证了“色”自由度的数目确实为3,但是,到目前为止,实验上观测到的都是不带色的粒子,尚未直接观测到带色的夸克,也就是说,夸克被色力囚禁在强子之内,出现所谓的“颜色禁闭”。

应当指出:无论是“味”还是“色”,都不是真正的“味道”和“颜色”,而是夸克所具有两种新的内禀自由度。夸克之间的电磁作用和弱作用是通过“味”自由度进行的,描述它的动力学就是弱电统一理论,即 $SU(2)\times U(1)$ 规范场理论,也有人称其为量子味动力学;夸克之间的强作用是通过“色”自由度进行的,考虑到夸克带有3种“色”,描述强作用的色力场应是 $SU(3)$ 规范场,相应的动力学就是量子色动力学。

量子色动力学的创建

为了解释强作用的“渐近自由”和“颜色禁闭”性质,美国普林斯顿大学的格罗斯小组和哈佛大学的科尔曼小组于1972年研究了所有可能的量子场论,试图发现具有这两种特性的强作用理论。同年,射曼切克(Symanzik, 1923~1983)和特霍夫特在马赛的国际会议上首先注意到非阿贝尔规范场理论有可能具有“渐近自由”的性质。1973年春天,格罗斯(D. J.

Gross, 1941~)和他的学生威尔切克(F. Wilczek, 1951~)与科尔曼(S. Coleman, 1937~2007)的学生波利策(H. D. Polizer, 1949~)先后在《物理评论快报》上发表论文,提出:在 $SU(3)$ 色规范群下的非阿贝尔规范场理论可以作为强作用的量子场论,成功地创建了量子色动力学。因此,格罗斯、波利策和威尔切克共同分享了2004年度诺贝尔物理学奖。

在“量子电动力学”一节中,我们谈及解决发散困难的重整化方法时曾经提到:实验测量到的电子电荷应是电子的固有电荷(即裸电子的电荷)加上真空极化引起的感应电荷。具体的物理图像是,裸电子在其周围产生电磁场,或者说,它通过发射虚光子来传递电磁力,由于光子不带电,没有自作用,或者说,它与其他的光子没有任何直接的耦合,只能与带电粒子相互作用,因此,它只能通过激发虚的电子-反电子偶来进行传递,于是,围绕裸电子的虚电子偶中的正电荷会受到吸引靠拢它,而负电荷则会受到排斥离开它,即出现真空极化,其净效应就是裸电子被带正电的真空所包围,出现屏蔽效应。通常,实验测量到的电子电荷就是以裸电子为中心的半径为 r 的球面所包围的电荷,例如,在原子物理实验中,取 $r=10^{-10}$ m,这样测得的电子电荷就是 $-e$,它是有限的。鉴于真空极化产生的感应电荷的密度会随 r 减小而变大,这就意味着,当 r 趋于零时,实验“测得”的裸电子的负电荷和真空极化在其周围产生的正的感应电荷都将趋于无穷大。同样,由电荷决定的电磁力耦合常数 $\alpha=e^2/\hbar c$ 也会因真空极化随 r 变化,量子电动力学正是利用这一效应成功地解释了兰姆位移。但是,因为光子没有自作用, α 对 r 的依赖实际上很弱,通常可以忽略不计。

与量子电动力学不一样,在量子色动力学中,一



格罗斯



威尔切克



科尔曼



波利策

个带有色荷的夸克不仅可以使其周围真空极化，产生色屏蔽效应，还因传递色力的胶子本身带有色荷，它们之间有自作用，可以吸收和放出胶子，出现3个和4个胶子作用于一点的费曼图，使围绕夸克的虚胶子云能够有效地把其色荷拓展出去，这个色的反屏蔽效应甚至超过了真空极化产生的色屏蔽效应，最终导致带正色荷的夸克被带正色荷的真空所包围。由于色荷的扩展，当 r 接近强子大小时，由半径为 r 的球面内的色荷 g_s 所决定的强力耦合常数 $\alpha_s = g_s^2 / \hbar c$ 会趋于无穷大，也就是说，强力会变成无穷大，使得带色的夸克无法从强子中分离出来，即出现“颜色禁闭”；而当 r 趋于零时， α_s 会缓慢地趋于零，使得强力在极短的距离内变得很弱，即出现渐近自由。实际上，高能电子-质子非弹性散射可以看作是用电子所发射的虚光子来“看”质子内部的夸克、“测”色荷 g_s ，进而得到 α_s ，于是，上面的结论也可用量子色动力学

公式： $\alpha_s(Q^2) = \frac{4\pi}{\beta_0 \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}}$ 来表述，这里 β_0 是与夸克

味数 N_f 有关的普适参数； $Q^2 = -q^2$ 是虚光子四动量平方的负值； Λ 是QCD标度参量。显见， $Q^2 \rightarrow \infty$ 时 $\alpha_s \rightarrow 0$ ； $Q^2 \rightarrow \Lambda^2$ 时 $\alpha_s \rightarrow \infty$ ，考虑到虚光子的 Q^2 越大它所“看”到的空间尺度越小，这就意味着，在 高能 ($Q^2 \rightarrow \infty$) 情况下，或者说，在极小的范围 ($r \rightarrow 0$) 内，会出现“渐近自由”；而在低能 ($Q^2 \rightarrow \Lambda^2$) 情况下，或者说，在接近强子大小 ($r \rightarrow 10^{-15} \text{m}$) 时，会出现“颜色禁闭”。

α_s 随 Q^2 “跑动”的这一性质是强作用的重要特性，

它不仅使量子色动力学可以采用微扰论方法来处理高动量迁移下的强作用过程并成功地解释了许多高能物理实验现象，而且为“大统一”主宰粒子世界的强力、弱力和电磁力创造了条件。

① 1962年，美国物理学家莱德曼 (L. Lederman, 1922~)、施瓦茨 (M. Schwartz, 1932~2006) 和斯坦博格 (J. Steinberger, 1921~) 在布鲁克海文实验室的高能 (33 GeV) 加速器上作实验证实了美国物理学家范伯格 (G. Feinberg, 1933~1992) 预言存在的两种中微子 ν_e 和 ν_μ 确实是不同的粒子，并通过 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm$ 的弱衰变发现了 μ 子中微子 ν_μ 及其反粒子 $\bar{\nu}_\mu$ ，他们3人因此荣获了1988年度诺贝尔物理学奖；1975年，佩尔 (M. L. Perl, 1927~) 等在美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的SPEAR e^+e^- 对撞机上首先发现有新轻子对 $\tau^+\tau^-$ 产生的迹象，1年后，他们确认存在第三种轻子 τ ，其质量为 $(1784 \pm 4) \text{MeV}$ ，故称其为重轻子，现在叫 τ 子，伴随产生的中微子 ν_τ 叫 τ 子中微子。佩尔和实验发现 ν_e 的莱因斯 (F. Reines, 1918~) 共同分享了1995年度诺贝尔物理学奖。这样，实验上一共发现了3代6种“味”的轻子： (e, ν_e) ； (μ, ν_μ) 和 (τ, ν_τ) 及其反粒子。

② 量子色动力学认为，在 高能 e^+e^- 对撞过程中，既会产生夸克-反夸克对 ($q\bar{q}$) 也会同时产生夸克对和胶子，即 $q\bar{q}g$ ，在实验上，这就意味着在末态同时出现两个夸克喷注和一个胶子喷注。1979年，在欧洲核子研究中心 (CERN) 的正负电子对撞机 (PETRA) 上所作的 e^+e^- 对撞实验中确认存在三喷注现象证实了量子色动力学的上述预言。

③ 1977年，美国费米国家实验室的莱德曼实验组发现了 τ 粒子，促使人们引入了第五种夸克——底夸克 b ，并使人相信还存在第六种夸克——顶夸克 t 。1994年4月，费米实验室的CDF组观察到了顶夸克存在的实验证据。1995年3月，CDF组找到更多的证据，另一实验组D0组用不同的方法也找到了顶夸克的衰变事例，于是，共同宣布发现了顶夸克 t 。至此，实验上间接地发现了3代6种“味”的夸克： (u, d) ； (s, c) 和 (b, t) 及其反夸克。