

夸克 30 年

黄 涛

1964 年盖尔曼和兹韦格提议称物质结构的最小微粒为夸克,至今已有 30 年的历史。再往前追溯 10 年,1954 年在英国格拉斯哥召开的原子核和介子物理的国际会议上,盖尔曼和派斯的报告中提出在强相互作用中缔合产生的新粒子是一种带有奇异量子数的粒子。从 1954 到 1964 年大量新粒子和共振态的发现导致了盖尔曼和兹韦格提出物质结构的三种最小组成子——上夸克 u 、下夸克 d 和奇异夸克 s 。

在夸克一词提议 10 年后,1974 年丁肇中和里克特发现*了粲夸克 c 。1977 年又发现了一种新夸克,称为底夸克 b ,是费米实验室的莱德曼实验组发现的。1994 年 4 月 26 日费米实验室的 CDF 实验组宣布存在顶夸克 t 的实验证据。1964 年是在大量实验基础上提出质子、中子、 π 介子等一百多种强子是由三种夸克 (u, d, s) 组成的,而在 1964 年以后,人们在实验中又发现了五种新夸克 (c, b, t) (顶夸克目前只是实验上有证据表明它存在,还不能称为被发现)。

一、夸克的诞生

大家知道,原子的大小只有一亿分之一厘米,原子核的大小只相当于原子的十万分之一到万分之一。原子核是由质子和中子组成的。20 世纪上半叶人们称质子、中子、电子等为基本粒子。然而 50 年代到 60 年代初,由于加速器的建造,人工产生了一百多种新粒子。人们自然要问,难道成百种粒子都是构成物质的基本粒子吗?更重要的是实验事实表明这些基本粒子并不基本,而是有它们的内部结构。当时最重要的实验事实有以下三个方面:

(1) 电子打质子的弹性散射实验表明质子并不是一个点粒子,而是有它的电荷分布,称为电磁形状因子,其电荷分布半径小于 10^{-13} 厘

米。这意味着质子具有内部结构,不是基本粒子。

(2) 一百多种基本粒子能按一定规则,像原子的门捷列夫周期表一样排列成八个一组或十个一组。它们所排列的规则可以用一种对称性质 ($SU(3)$ 对称性) 来描述。门捷列夫周期表的规律是原子内部的电子排列的反映,而基本粒子的 $SU(3)$ 对称规律也必然是质子、中子、 π 介子等具有内部结构的反映。

(3) 实验上还发现许多高自旋的新粒子,它们可能是具有内部结构的反映。

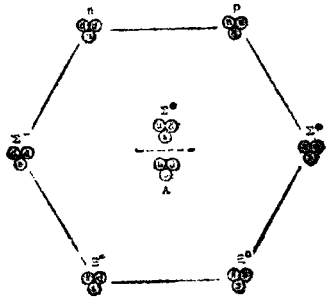
1963 年 Ω^- 粒子的发现证实了基本粒子按照 $SU(3)$ 对称性排列的规律性是正确的,因为实验上所发现的 Ω^- 粒子的质量、自旋、宇称、同位旋等性质完全与 $SU(3)$ 对称性所预言的一致。它是排在十重态中的最后一个(见图 1)。

$SU(3)$ 对称性的成功启发了人们思考它成功的原因。1964 年盖尔曼和兹韦格从 $SU(3)$ 对称性的三维基础表示的三个基出发,设想它们是一种数学上的符号,称为三种夸克。由这三个基的迭加构成各种八维表示和十维表示,当时所发现的上百种基本粒子都可以填充在这些八重态和十重态中。例如前面所说的 u, d, s 来标记三种夸克,那么 $(u\bar{d})$ 就标记 π^+ 介子, (uud) 就标记质子, (sss) 就标记 Ω^- 粒子。

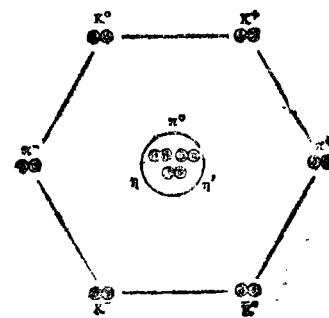
* 编者注:所谓“发现了某种夸克”,实际上是发现了由这种夸克及其反夸克组成的束缚态 ($q\bar{q}$),由此间接地证实夸克 q 的存在,而非意味着直接发现了单个夸克。



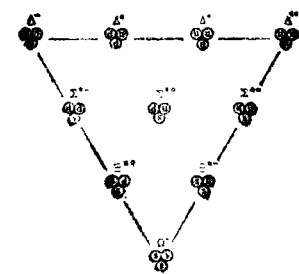
这种一开始只是数学符号形式的三种夸克一经提出，很多物理学家就从物质结构的思想去理解它们，提出了各种各样结构的模型理论去解释已观察到的上百种粒子。例如设想夸克是组成基本粒子的最小单元的夸克模型理论；中国北京基本粒子物理理论组认为基本粒子不基本，它们是物质结构的一个层次。实验上已



(a) 八重态重子



(b) 八重态赝标介子



(c) 十重态重子

图 1

证明基本粒子具有内部结构，具有下一层次，其基本组成成份是层子。于是在 1965 和 1966 年提出并构造了相对论性协变的层子模型理论。

二、1974 年 11 月革命

60 年代末期，实验和理论的进展已使物理

学家认识到夸克不再是一种解释 SU(3) 对称性的数学符号，而是真实存在的实体，它们是物质结构的最小组成成份，所有的强子都是由它们构成的。因此物理学家将基本粒子物理称为粒子物理。

既然夸克是构成物质结构的最小单元，那么夸克之间的相互作用和相互转化遵从什么样的规律呢？1967 年温伯格、萨拉姆在早先格拉肖构成的对称性模型框架里提出了弱、电统一模型理论。1973 年格罗斯、维尔切克和泡利等提出了夸克之间的强相互作用理论，这就是量子色动力学 (QCD)。这两种理论都是在非线性的杨-米尔斯场论基础上构成的。其理论预言已经在 70 年代、80 年代得到了一系列的实验证实。这两种理论已成为当今粒子物理学的标准模型理论。

1974 年夏天，在两年一度的国际高能物理大会的总结报告中，萨米奥斯说，SU(3) 对称性理论非常成功，所发现的粒子都能填充在八重态和十重态中。

同年 11 月，丁肇中和里克特同时宣布发现了 J/ψ 粒子，它质量大、寿命长、宽度窄，无法填充在由三种夸克为基础的 SU(3) 对称性的分类中。这一革命性的发现宣告了新的物理现象已超出原有的 SU(3) 对称性理论。物理学家很快就弄清楚了 J/ψ 粒子是由一种新夸克——粲夸克 c 及其反夸克组成的。粲夸克要比前三种夸克重得多，例如它的质量是奇异夸克的十倍，它却与奇异夸克组成一个家族。在粒子物理学史上，人称 J/ψ 粒子的发现为 11 月革命。

1977 年又发现了另一个重夸克，底夸克 b，它比粲夸克重三倍多，是通过发现 b 夸克和反 b 夸克组成的束缚态 Υ 而证实的。随着底夸克 b 的发现，物理学家从理论上预言自然界还存在一个顶夸克 t，与底夸克 b 组成一个家族。也就是说自然界存在三代夸克：

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

其中 u、c、t 三种夸克的电荷为 (2/3)e，而 d、s、b

三种夸克的电荷为 $-(1/3)e$ 。

三、顶夸克发现了吗？

1984年第22届国际高能物理会议在德国莱比锡召开，会议的头号新闻是西欧中心发现了顶夸克。事隔不久，这一新发现就被否定了。原来实验上所发现的顶夸克事例实际上是强作用过程的背景。十年以后，1994年4月26日美国费米实验室举行记者招待会，宣布找到了能给出顶夸克存在的实验证据的12个事例。该实验室接受了西欧中心仓促错误地宣布发现顶夸克的教训，实事求是地宣布有了顶夸克存在的实验证据。同年7月21日第27届国际高能物理会议在英国格拉斯哥开幕，高能物理学家们等待着费米实验室宣布最新的实验结果，其宣布仍然是说找到了顶夸克的实验证据而不是发现了顶夸克。其顶夸克的质量为

$$m_t = (174^{+13}_{-10} \pm 10) \text{GeV}.$$

这一质量值要比10年前西欧中心的错误发现大得多，几近4倍。

回忆这10年的历史过程是很有趣的。顶夸克和底夸克同属第三代。b夸克是1977年发现的，其质量为5GeV。从底夸克发现以后，理论物理学家预言顶夸克的质量从15GeV开始一直上涨到近200GeV。70年代末、80年代初，日本建造Tristan正、负电子对撞机时的主要目标是寻找顶夸克(质量在30GeV左右)，现在历史做了结论，日本的这一加速器寻找顶夸克的努力是徒劳的；西欧中心在1984年宣布顶夸克的发现是错误的。八十年代后半期到90年代初，科学家们更谨慎了，每年都宣布一次顶夸克的下限，下限从80GeV、90GeV增到100GeV。经过10年的奋斗，终于宣布找到了t夸克的实验证据，我们相信科学家们最终会宣布顶夸克的发现的。

目前费米实验室有两个实验组(CDF和D0组)在寻找顶夸克事例。虽然CDF组宣布有12个事例可作为顶夸克存在的证据，而且其实验截面比量子色动力学预言的要大，但D0组在国际高能物理会议上报告他们的实验结果时仍持保留态度。费米实验室正计划改进注

入器以期达到更高的亮度，从而使两个实验组积累更多的事例，以便做出明确的结论。

四、夸克有多少种？它们有下一层次吗？

前面提到底夸克b与顶夸克t组成自然界的第三代夸克，这三代夸克与三代轻子存在明显的对称性，可以排成下列对应的形式：

$$\text{夸克: } \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\text{轻子: } \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}.$$

近几年来西欧中心测量中间玻色子Z衰变为正、反中微子的宽度实验。轻子的代的数目给予了肯定的答案：只有三代轻子。由夸克和轻子的对称性可以推论夸克也只有三代。这样自然界中的轻子加上反轻子共有12种；夸克加上反夸克再考虑到每种夸克有三种不同的颜色，就有36种。这些夸克和轻子就是构成自然界的最小组成单元(见表1)。此外，还有传递电磁相互作用的光子 γ ，传递弱相互作用的中间玻色子 W^+ 、 W^- 、Z，传递强相互作用的8种胶子。胶子与光子的质量为零。 W^\pm 的质量为80.23GeV，Z的质量为91.188GeV。总共传递相互作用的媒介子有12种。因此，如今认识到微观世界的这一层次总共有60种粒子。人们自然会问这么多同一层次的粒子难道都是基本

表 1

轻 子			夸 克		
种类	质量(GeV)	电荷(e)	种类	质量(GeV)	电荷(e)
ν_e	$<2 \times 10^{-6}$	0	u	4×10^{-3}	+2/3
e	5.1×10^{-4}	-1	d	7×10^{-3}	-1/3
ν_μ	1.6×10^{-6}	0	s	0.15	-1/3
μ	0.106	-1	c	1.5	+2/3
ν_τ	$<3.1 \times 10^{-2}$	0	b	4.7	-1/3
τ	1.7769	-1	t	174	+2/3

的吗？它们排成一个从质量几乎为零到174GeV的质量谱是否反映有更深层次的物质结构？夸克是质子、中子的下一层次的基本组成成分，然而顶夸克的质量几乎与质子、中子的上一层次的金原子核一样重，如何理解微观世界的结构层次呢？同一层次的夸克的质量从几个



β 衰变对揭示弱作用本质的贡献

厉光烈

(中国科学院高能物理研究所)

在过去的半个多世纪里, β 衰变的研究对理解弱作用的本质起了主要的, 甚至可以说是决定性的作用。本文¹⁾将比较详细地介绍人们通过 β 衰变认识弱作用本质的过程: 从费米提出 β 衰变理论, 确定普适 ($V-A$) 费米相互作用, 一直到弱作用和电磁作用的统一。

一、 β 衰变的费米理论及其实验验证 理论的提出

费米在参加索尔维会议以后, 根据泡利的中微子假说提出了他的 β 衰变理论。他认为, 与原子发光类似, β 衰变也是一种跃迁过程。在此跃迁过程中, 原子核内的一个中子转变为质

MeV 到 174GeV, 相差五万倍, 质量的起源是什么? ……所有这些问题都促使高能物理学家深入研究它们的性质和探寻新的物理规律。

目前, 高能物理向两大方向发展: 一是向超高能发展, 如正在筹建的 LHC 就是西欧各国通过国际合作来完成的超高能加速器, 以期揭示新的物理规律; 二是向高精度发展, 如美国和日本分别正在建造的 B 介子工厂就是精细研究 b 夸克的性质的高能加速器和探测器。这两个方向的发展相辅相成, 目标在于深入研究现今这一层次甚至更新层次的物理性质和规律。

向超高能发展对揭示新物理固然很重要, 但耗资巨大, 达几十亿美元。LHC 正通过以欧洲为主的国际合作来完成。高能物理学家越来越重视精细研究现今这一层次的轻子和夸克。对底夸克 b 的精细研究的物理目标使得 B 介子工厂应运而生, 美国和日本同时筹建, 预期将在

子、电子和中微子²⁾。在原子发光过程中, 跃迁是通过电磁作用发生的; 在 β 衰变过程中, 跃迁是通过 4 个费米子之间的一种弱作用发生的 (人们称它为费米相互作用)。以量子力学的辐射理论为依据, 他直截了当地假设: 从一个中子态跃迁到 (质子 + 电子 + 中微子) 态的几率正比于波函数 ψ_n, ψ_p, ψ_e 和 ψ_ν 乘积的平方。由于波函数 ψ 是具有 4 个分量的旋量, 因此有各种各样的组合方式可以把它们相乘在一起。一般地讲, 由这 4 个波函数可以组成 5 种相对论不变的组合, 即标量耦合 (S)、矢量耦合 (V)、

1) 本文是上期“ β 衰变对物理学基本规律的两次冲击”一文的姐妹篇。
2) 现在我们知道, 不是中微子, 而是反中微子。

本世纪末投入运行。我国北京正负电子对撞机 (BEPC) 已取得国际瞩目的物理成果, 它的研究对象是第二代的粲夸克 c 和第三代轻子 ν_τ, τ 。我国高能物理学家正与国际同行讨论提出建造 τ -粲工厂的建议, 以期对 τ 轻子和粲夸克作精细研究。

高能物理学是研究微观世界物质结构、基本组成成份的性质及其相互作用规律的前沿科学。从提出夸克的设想至今已经历了 30 年, 高能物理的发展不仅发现了夸克家族, 揭示了夸克-轻子这一层次的物理性质和规律, 而且开始寻找超出夸克-轻子这一层次的物理性质和规律。人们期望, 21 世纪的高能物理学将对认识微观世界有新的突破, 就像 20 世纪初从原子物理学深入到原子核物理学和尔后的高能物理学一样。21 世纪必将把对微观世界的认识推向一个崭新的层次。