

# J/Ψ 粒子是由粲夸克和反粲夸克组成的束缚态的实验证明\*

何景棠<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 叙述了 J/Ψ 粒子是由粲夸克和反粲夸克组成的束缚态的实验证明的历史过程,以及发现 J/Ψ 家族,一系列粲介子和粲重子的实验.人们可以从中获得有益的启示.

**关键词** J/Ψ 粒子,粲夸克,粲介子,粲重子

## How it was shown experimentally that the J/Ψ particle is composed of charm and anti-charm quarks

HE Jing-Tang<sup>†</sup>

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** A historical account is given of how the charm and anti-charm composition of the J/Ψ particle was experimentally determined. The series of experiments that led to the discovery of charm mesons and charm baryons is also recounted, from which we can gain much enlightenment.

**Key words** J/Ψ particle, charm quark, charm meson, charm baryon

### 1 引言

2004 年是 J/Ψ 粒子发现 30 周年, J/Ψ 粒子的发现是粒子物理发展过程中的一个里程碑.回顾 J/Ψ 粒子是由新的第四种夸克,即由粲夸克和反粲夸克组成的束缚态的实验证明的历史过程,我们可以从中获得有益的启示.

### 2 夸克模型的伟大成就

第二次世界大战以后,1948 年, Powel 利用核乳胶在南美的高山宇宙线站照射后,分析核乳胶照片,发现了 π 介子,这是粒子物理研究一个新时代开始的标志. Powel 获得 1950 年诺贝尔物理学奖.直到 20 世纪 60 年代初,世界上各个高能物理实验室已经发现的“基本粒子”已有 100 多个.人们思考一个问题:100 多种化学元素可按门捷列夫周期表分类,

人们能否找到一种办法,也把“基本粒子”按类似门捷列夫周期表的办法分类?1962 年, Gell-Mann 和 Zweig 终于找到了把“基本粒子”分类的办法.他们设想,自然界存在 u(上), d(下), s(奇异)三种夸克,以及它们的反夸克.介子是由夸克和反夸克组成的,而重子是由三个夸克组成的.于是,可以把当时实验上找到的介子和重子有规律地分类.图 1 是自旋为 0 的介子八重态的分类图以及它们的夸克组分;图 2 是自旋为 1 的介子八重态的分类图以及它们的夸克组分;图 3 是自旋为 3/2 的重子十重态(三个夸克自旋同向)的分类图以及它们的夸克组分;图 4 是自旋为 1/2 的重子(两个夸克自旋同向,另一个夸克自旋反向)八重态的分类图以及它们的夸克组分.所有当时实验上找到的介子和重子的性质:质量,寿命,自旋,同位旋,奇异数等都与理论预言的在误差范围内相符.当时实验上还没找到图 3 顶角上

\* 2004-06-07 收到初稿, 2004-08-19 修回

† 通讯联系人. E-mail: jingtang@mail.ihep.ac.cn

的  $\Omega^-$  粒子. Gell-Mann 根据已有的实验数据以及他的理论, 预言了必然存在由三个奇异夸克组成的, 奇异数  $S = -3$  的  $\Omega^-$  粒子, 并且预言了  $\Omega^-$  粒子的质量为  $1670\text{MeV}$ .  $\Omega^-$  粒子位于图 3 三角形的顶尖上.  $\Omega$  是希腊文, 意思是宝塔上的顶尖. 1964 年, 利用气泡室作探测器, 果然找到了  $\Omega^-$  粒子. 其质量为  $1672\text{MeV}$ , 与理论的预言值一致. 找到了  $\Omega^-$  粒子是简单的夸克模型的伟大胜利. 这样一来, 只有  $u, d, s$  三种夸克的夸克模型就能解释当时实验上找到的所有的介子和重子的性质. Gell-Mann 因为创建夸克模型的成功, 获得 1969 年诺贝尔物理学奖.

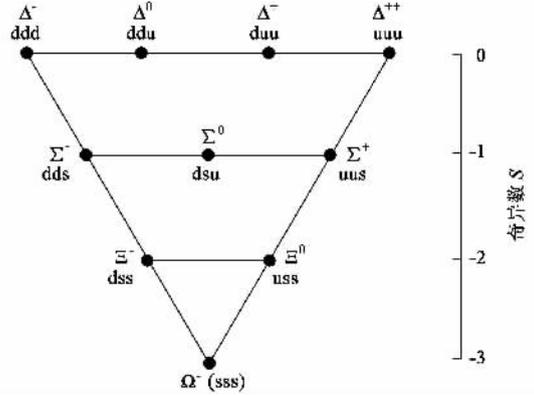


图 3 自旋为  $3/2$  的重子十重态及它们的夸克组分(右边的数字是奇异数  $S$  的值)

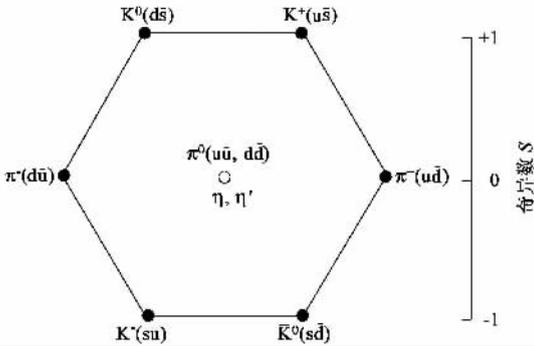


图 1 自旋为  $0$  的介子八重态及它们的夸克组分(右边的数字  $+1, 0, -1$  是奇异数  $S$  的值)

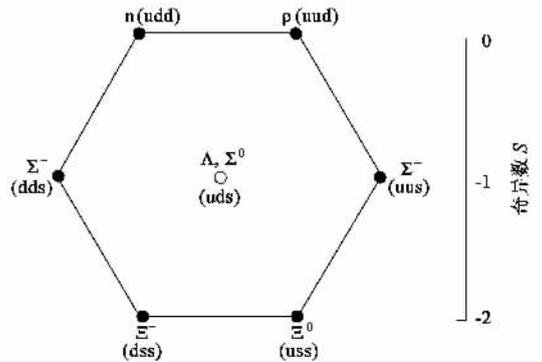


图 4 自旋为  $1/2$  的重子八重态及它们的夸克组分(右边的数字是奇异数  $S$  的值)

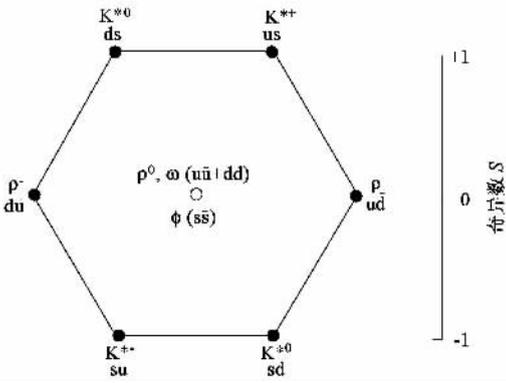


图 2 自旋为  $1$  的介子八重态及它们的夸克组分(右边的数字  $+1, 0, -1$  是奇异数  $S$  的值)

### 3 粒子物理另一个新纪元的开始

30 年前, 就在人们欢呼只有  $u, d, s$  三种夸克的夸克模型的伟大胜利的时候, 1974 年 12 月, Phys. Rev. Lett. 同时发表了三篇文章: 其一是丁肇中在美国布鲁克海文国家实验室利用质子打击铍靶, 产生正负电子对, 发现了一个质量为  $3.1\text{GeV}$ , 而衰变宽

度只有约  $\text{keV}$  数量级的新粒子, 丁肇中把他发现的粒子命名为  $J$  粒子<sup>[1]</sup>; 其二是 Richter B 在美国斯坦福电子正电子对撞机通过改变电子正电子对撞束流能量的办法进行扫描, 在不变质量为  $3.1\text{GeV}$  处, 找到一个新的共振态, Richter B 把他发现的粒子命名为  $\Psi$  粒子<sup>[2]</sup>; 其三是意大利的 Frascati 加速器中心, 在知道了丁肇中发现  $J$  粒子的消息后, 本来其电子正电子对撞加速器最高束流能量为  $1.5\text{GeV}$ , 但为了寻找  $J$  粒子, 冒险地把加速器运行于束流能量超过  $1.5\text{GeV}$ , 通过改变电子正电子对撞束流能量的办法进行扫描实验, 在不变质量为  $3.1\text{GeV}$  处, 也找到  $J$  粒子<sup>[3]</sup>. 由于  $J/\Psi$  粒子的发现标志了粒子物理研究另一个新纪元的开始, 丁肇中和 Richter 共同获得了 1976 年诺贝尔物理学奖. 由于两位发现者均坚持自己对同一个粒子的不同命名, 所以粒子物理学界只好把这同一个新粒子定名为  $J/\Psi$  粒子. 一直沿用至今.

J/ψ 粒子是什么东西？当时众说纷纭. 图 5 是 J/ψ 粒子发现后, 丁肇中的一个朋友送给他的一张漫画. 这张漫画形象地表明了当时的情况. 漫画右边的小峰代表实验结果文章的数量; 左边的高峰代表理论文章的数量. 漫画表明, 只有为数不多的实验结果, 但却有铺天盖地的理论文章. 事实上, 在这一大堆理论文章中, 却只有少数是对的.

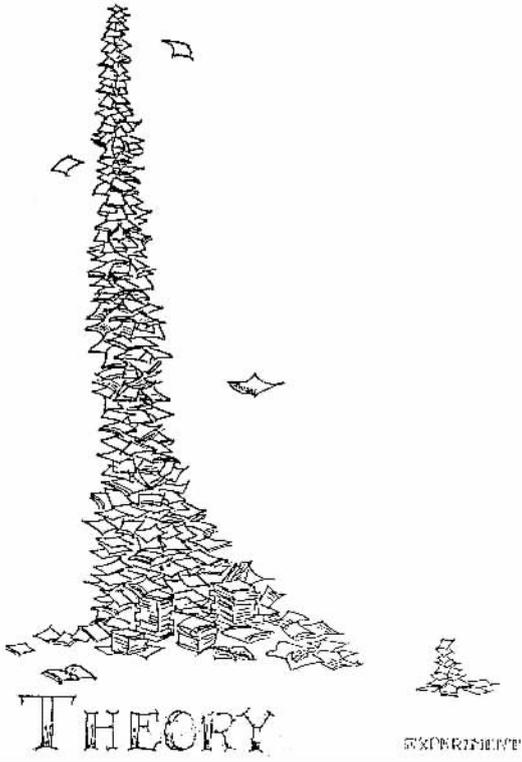


图 5 实验数据少, 理论文章多

J/ψ 粒子与已知的“基本粒子”的不同之处在于它的质量大, 约为 3.1 GeV, 但寿命却很长. 普通介子, 例如 ρ 介子, 质量只有 770 MeV, 而衰变全宽度 Γ 为 150 MeV [ ( 149.0 ± 0.7 ) MeV ]. 量子力学的测不准原理是

$$\Delta t \Delta E \sim h,$$

式中, h 是普朗克常数. 若把粒子的寿命 τ 等同于 Δt, 衰变全宽度 Γ 等同于 ΔE, 那么,

$$\tau \Gamma \sim h$$

$$\tau \sim 1/\Gamma.$$

如果 Γ ~ 100 MeV, τ ~ 10<sup>-24</sup> s. 这是强相互作用的特征时间(质量越大的普通介子, 寿命越短).

现在, 对于 J/ψ 粒子, 其质量约为 3.1 GeV, 但衰变全宽度 Γ 却只有 keV 数量级, 所以, 寿命比普通介子长了万倍以上.

丁肇中发现 J 粒子后, 拿着他的结果去问一个理论家, 这个理论家对丁肇中说: “在我的理论中, 没有你的 J 粒子的位置, 我的理论不需要你的 J 粒子.” 这位理论家的话只说对了一半, 的确, 在只有 u, d, s 三种夸克的简单的夸克模型中, 所有应该填充的粒子的位置都已经填满了. 因此, 在只有 u, d, s 三种夸克的简单的夸克模型中, 确实没有 J 粒子的位置了. 但是他的话的另一半却是错的. 确凿无疑的新实验结果是对旧理论的挑战, 是创立新理论的基础. 不是理论不需要 J 粒子, 而是需要一种新理论去解释 J 粒子存在的实验事实.

#### 4 新的实验事实呼吁新的理论

一些理论物理学家跳出成就辉煌的只有 u, d, s 三种夸克的原始的夸克模型的框框, 提出 J/ψ 粒子是由新的第四种夸克, 即粲夸克和反粲夸克组成的束缚态. 这个理论一经提出, 整个物理图像就简单而清楚. 它既解释了新的 J/ψ 粒子的性质, 又预言了必然存在一系列的新现象.

首先, 粲夸克和反粲夸克都是自旋为 1/2 的基础粒子, 它们组成束缚态时, 自旋可以是反平行的, 即总自旋为 S=0, 也可以是平行的, 即总自旋为 S=1. 自旋复合态的数目为 N = ( 2S + 1 ), 所以, 对 S=0, N=1, 此即为自旋单态; 对 S=1, N=3, 此即为自旋三重态, 又叫做 P 态: χ<sub>0c</sub>, χ<sub>1c</sub>, χ<sub>2c</sub>. 此外, 两个粒子相互围绕着旋转, 有轨道角动量 L. L 与自旋 S 之间有耦合, 总角动量 J = L + S. 所以, 可以组成不同总角动量的态, 此外, 还有径向激发态, 如 ψ( 2S ), ψ( 3S ). 图 6 表示具有不同的自旋宇称 J<sup>PC</sup> 的粲夸克和反粲夸克组成的束缚态. 横坐标是不同的自旋宇称 J<sup>PC</sup> 的值, 垂直方向的不同位置代表不同的态的不同质量的值. 所有这些粒子态被称为 J/ψ 家族.

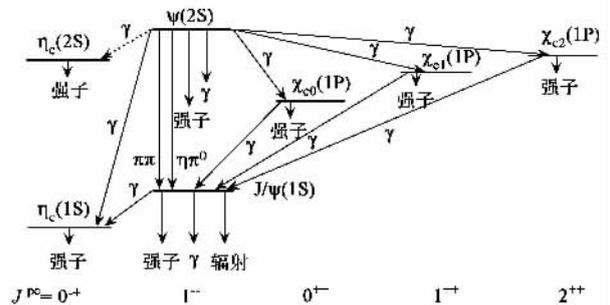


图 6 由粲夸克和反粲夸克组成的具有不同 J<sup>PC</sup> 值的 J/ψ 家族



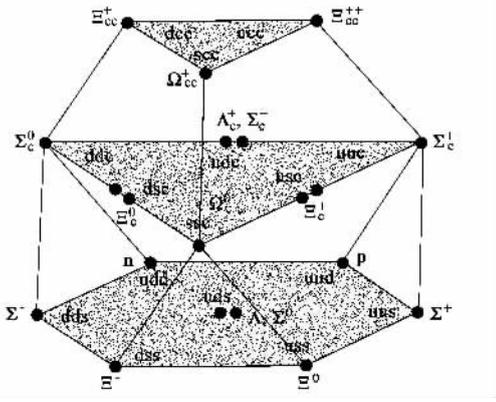


图 10 由  $u, d, s, c$  夸克组成的自旋为  $1/2$  的重子态 (下部是图 4 的粲数  $C=0$  的自旋为  $1/2$  的重子八重态, 依次向上为粲数的  $C=1$  和  $C=2$  的自旋为  $1/2$  的粲重子)

1975 年, 德国汉堡的 DASP 合作组测量  $\Psi(2S)$  的辐射衰变, 找到  $J/\Psi$  家族的两个 P 态:  $\chi_{c0}, \chi_{c1}, \chi_{c2}$ .<sup>[5]</sup>

1982 年, 美国的晶体球合作组, 用对  $\gamma$  射线能量分辨率非常高的 NaI(Tl) 晶体, 建造了一个晶体球探测器, 专门研究  $J/\Psi$  家族成员的质量及其他性质<sup>[6]</sup>. 图 11 是他们测量到的  $\Psi(2S) \rightarrow \gamma + X$  的单举  $\gamma$  谱:

$$\begin{aligned} \Psi(2S) &\rightarrow \gamma_0 + \chi_{c0}, \\ \Psi(2S) &\rightarrow \gamma_1 + \chi_{c1}, \\ \Psi(2S) &\rightarrow \gamma_2 + \chi_{c2}, \end{aligned}$$

的能量为 258MeV, 170MeV 和 126MeV 的三条  $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$  的  $\gamma$  射线. 确实无误地证实存在  $J/\Psi$  家族的两个 P 态  $\chi_{c0}, \chi_{c1}, \chi_{c2}$ .

晶体球合作组还测量到<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned} J/\Psi &\rightarrow \gamma + \eta_c(1S), \\ \Psi(2S) &\rightarrow \gamma + \eta_c(2S). \end{aligned}$$

实验物理学家在不同的电子正电子对撞机继续调高电子正电子对撞束的能量, 进行扫描, 继续发现  $\Psi(3836), \Psi(4040), \Psi(4160)$  和  $\Psi(4415)$  等  $J/\Psi$  粒子的径向激发态. 实验上, 一直未找到  $J/\Psi$  家族的另一个自旋  $S=0$ , 角动量  $L=1$  的最重要的成员  $^1P_1$  态. 理论认为,  $^1P_1$  态的质量应该位于  $\chi_{c0}, \chi_{c1}, \chi_{c2}$  的质量的平均值附近. 1986 年, 欧洲核子研究中心的 SPEC 合作组在质子反质子的对撞中

$$\begin{aligned} \bar{p}p &\rightarrow ^1P_1 + X \\ &\hookrightarrow J/\Psi\pi \end{aligned}$$

找到  $^1P_1$  态存在的实验证据<sup>[8]</sup>. 其质量为  $(3525.4 \pm 0.8 \pm 0.4)$  MeV, 宽度少于 1MeV.

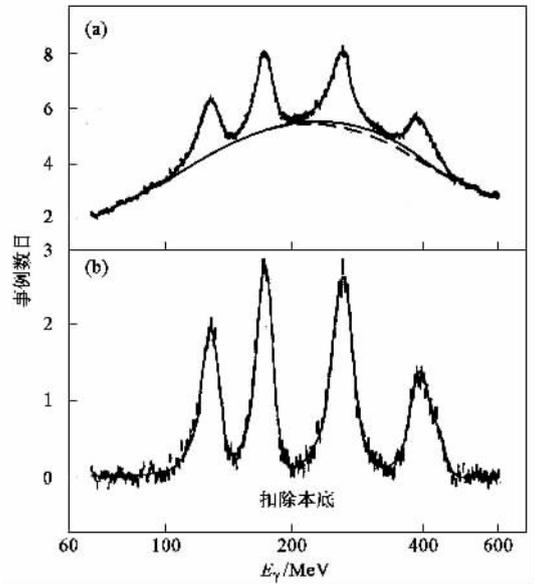


图 11 晶体球合作组在  $\Psi(2S) \rightarrow \gamma + X$  测量到的  $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$  三条  $\gamma$  射线, 清楚说明存在  $J/\Psi$  家族的两个 P 态  $\chi_{c0}, \chi_{c1}, \chi_{c2}$ . [(a) 原始数据 (b) 扣除本底的拟合谱]

1992 年, 美国费米实验室的 E760 合作组在质子反质子的对撞中

$$\begin{aligned} \bar{p}p &\rightarrow ^1P_1 + X \\ &\hookrightarrow J/\Psi\pi \end{aligned}$$

确认存在  $^1P_1$  态<sup>[9]</sup>, 其质量为  $(3526.20 \pm 0.15 \pm 0.20)$  MeV, 宽度少于 1MeV.

实验上, 找到了由新的第四种夸克, 即粲夸克和反粲夸克组成的具有不同的自旋宇称  $J^{PC}$  值的  $J/\Psi$  家族的所有成员, 这是存在新的第四种粲夸克且  $J/\Psi$  粒子是由粲夸克和反粲夸克组成的束缚态的有力证据之一.

### 5.2 粲介子存在的实验证据

1976 年, 美国斯坦福加速器中心由 Goldhaber G 领导的 MarkI 合作组测量:

$$e^+e^- \rightarrow K\pi\pi\pi + X$$

发现在  $K\pi$  以及  $K\pi\pi\pi$  的不变质量为 1.86GeV 处, 有一个新的共振峰, 而  $KK, \pi\pi$  或  $KK\pi\pi$  组合却没有共振峰, 如图 12 中间部分 (b) (e) (h) 所示. 这是实验上发现的最早的  $D^0$  介子. 随后, 世界各地的实验组从不同的反应里, 发现了所有的由新的第四种粲夸克  $c$  与旧的  $u, d, s$  三种夸克组成的粲介子, 为节省篇幅, 不能举出每个实验的细节. 结果如表 1 和表 2 所示. 其中,  $D_s$  表示既含有粲夸克  $c$ , 又有奇异夸克  $s$  的粲介子.

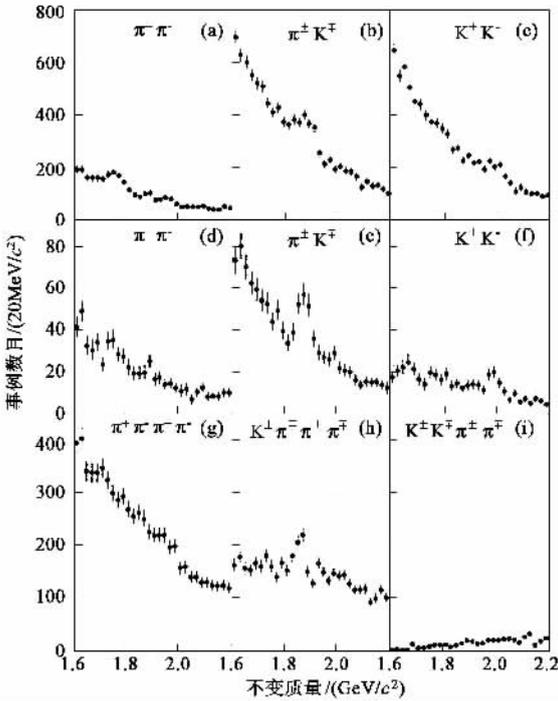


图 12 第一次发现粲介子  $D^0$  的实验结果

表 1 自旋为 0 的粲介子

粲介子	质量 (MeV)	寿命 $\times 10^{-15} s$	参考文献
$D^0$	$1865 \pm 15$	$420 \pm 50$	[ 10 ,11 ]
$D^+$	$1876 \pm 15$	$1090 \pm 30 \pm 25$	[ 12 ,13 ]
$D_s^+$	$1975 \pm 4$	$470 \pm 40 \pm 20$	[ 14 ]
$\bar{D}^0$	$1865 \pm 15$	$420 \pm 50$	[ 10 ,11 ]
$D^-$	$1876 \pm 15$	$1090 \pm 30 \pm 25$	[ 12 ,13 ]
$D_s^-$	$1975 \pm 4$	$470 \pm 40 \pm 20$	[ 14 ]

表 2 自旋为 1 的粲介子

粲介子	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	参考文献
$D^{*0}$	$2006.0 \pm 1.5$	$<21$	[ 15 ,16 ]
$D^{*+}$	$2008.6 \pm 1.0$	$<131$	[ 17 ,18 ]
$D_s^{*+}$	$2106.6 \pm 2.1 \pm 2.7$	$<22$	[ 19 ]
$\bar{D}^{*0}$	$2006.0 \pm 1.5$	$<21$	[ 15 ,16 ]
$D^{*-}$	$2008.6 \pm 1.0$	$<131$	[ 17 ,18 ]
$D_s^{*-}$	$2106.6 \pm 2.1 \pm 2.7$	$<22$	[ 19 ]

实验上,找到了由新的第四种夸克,即粲夸克  $c$ ,与旧的  $u, d, s$  三种夸克组成的具有自旋为 0(两个夸克自旋反向)和自旋为 1(两个夸克自旋同向)的所有粲介子成员,这是存在新的第四种粲夸克  $c$  的又一有力证据。

### 5.3 粲重子存在的实验证据

寻找粲重子比寻找粲介子困难.原因是:介子是

由夸克和反夸克两个夸克组成的,而重子是由三个夸克组成的.所以,一般地说,重子比介子的质量大.产生粲重子所需的能量比产生粲介子所需的能量高;其次,如果由强相互作用产生粲重子,因为强相互作用重子数守恒,粲量子数守恒,所以,粲重子和反粲重子必需同时成对产生,由于粲夸克  $c$  是第二代夸克,它与第一代  $u, d$  夸克的耦合系数不大,而在固定靶实验中,加速器加速的原始粒子是质子,质子打靶再产生  $\pi, K, \Xi$  等次级粒子, $\pi, K, \Xi$  等次级粒子再打靶产生粲重子和反粲重子对,产生粲重子的截面很小,再加上入射的  $\pi, K, \Xi$  次级粒子的流强很弱,所以,产生粲重子是很困难的,其次,必需探测粲重子的所有衰变产物,才能准确无误地鉴别粲重子,这又给实验增加了困难,目前,只找到一部分粲重子.此外,因为随着找到了  $J/\psi$  家族的所有成员,找到了全部的粲介子,存在新的第四种粲夸克已经是被公认的实验事实,寻找粲重子的存在证据已经不是重大科学成就,所以,没有迫切的科学动力去推动实验物理学家去寻找粲重子存在的证据.目前,只找到一部分容易产生和容易辩认的粲重子.实验结果如表 3 所示,由于目前找到的每种粲重子的数量不多,不可能作衰变产物的角分布,因此,目前尚未准确定出每种粲重子的自旋宇称的值。

## 6 启示

让我们再回过头来看图 5 的漫画.左边的铺天盖地的理论文章的大部分之所以是错的,究其主要原因,可能是只有  $u, d, s$  三种夸克的原始的夸克模型的成就太伟大了,以致于束缚了某些理论家的头脑.他们试图将已被实验证明是正确的旧理论,用修修补补的办法去解释新的  $J/\psi$  粒子的性质.漫画左边的高峰代表理论文章的数量.漫画表明,只有为数不多的实验结果,但却有铺天盖地的理论文章.这其中部分错误的理论的失败之处在于不能创新,不能跳出旧理论的框框,没有提出新的理论,去解释新的  $J/\psi$  粒子的性质.其实,问题是非常简单的,既然已经意识到在成功的旧理论中,没有  $J$  粒子的位置,为什么不在成功的旧理论的基础上,发展出一种新的理论,使新的理论能为  $J/\psi$  粒子找一个存身之地呢?

表3 目前找到的一部分容易产生和容易辨认的粲重子

粲重子	质量 (MeV)	寿命 ( $\times 10^{-13}$ s) /或宽度 (MeV)	参考文献*
$\Lambda_c^+$	2290 $\pm$ 3	(220 $\pm$ 30) $\times 10^{-13}$ s	[ 20 ]
$\Lambda_c^+(2593)$	2593.9 $\pm$ 0.8	3.9 + 1.4 + 2.0 -1.2 -1.0	[ 21 ]
$\Lambda_c^+(2625)$	2626.6 $\pm$ 0.5 $\pm$ 1.5	340 $\pm$ 0.6 $\pm$ 0.3	[ 22 ]
$\Lambda_c^+(2880)$	2880.9 $\pm$ 2.3	<8	[ 23 ]
$\Sigma_c^{++}(2455)$	2452.6 $\pm$ 0.6	2.05 $\pm$ 0.41 $\pm$ 0.38	[ 24 ]
$\Sigma_c^+(2455)$	2451.3 $\pm$ 0.7	<4.6	[ 25 ]
$\Sigma_c^0(2455)$	2452.2 $\pm$ 0.6	1.55 $\pm$ 0.41 $\pm$ 0.38	[ 24 ]
$\Sigma_c^{++}(2520)$	2519.4 $\pm$ 1.5	17.9 $\pm$ 3.8 $\pm$ 4.0	[ 25 ]
$\Sigma_c^+(2520)$	2515.9 $\pm$ 2.4	<17	[ 26 ]
$\Sigma_c^0(2520)$	2517.5 $\pm$ 1.4	13.0 $\pm$ 3.7 $\pm$ 4.0	[ 26 ]
$\Xi_c^+$	2460 $\pm$ 25	200 + 110 - 60	[ 27 ]
$\Xi_c^0$	2472 $\pm$ 3 $\pm$ 4	(82 + 59 - 30) $\times 10^{-13}$ s	[ 28 ]
$\Xi_c'^+$	2574.1 $\pm$ 3.3	107.8 $\pm$ 1.7 $\pm$ 2.5	[ 28 ]
$\Xi_c^+(2645)$	2647.4 $\pm$ 2.0	<3.1	[ 29 ]
$\Xi_c^0(2645)$	2644.5 $\pm$ 1.8	<5.5	[ 30 ]
$\Xi_c^+(2790)$	2790.0 $\pm$ 3.5	<15	[ 31 ]
$\Xi_c^0(2790)$	2790 $\pm$ 4	<12	[ 32 ]
$\Xi_c^+(2815)$	2814.9 $\pm$ 1.8	<3.5	[ 33 ]
$\Xi_c^0(2815)$	2819.0 $\pm$ 2.5	<6.5	[ 34 ]
$\Omega_c^0$	2740 $\pm$ 20	86 $\pm$ 27 $\pm$ 28	[ 35 ]

\* 这里所引用的粲介子和粲重子的参考文献是第一次找到粲介子和粲重子的参考文献,在第一次找到粲介子和粲重子之后,仍有不少实验组继续实验,不断更新同一种粲介子和粲重子的各种数值.

山穷水尽疑无路,柳暗花明又一村.一些有创新精神的理论物理学家跳出成就辉煌的只有  $u, d, s$  三种夸克的旧夸克模型的框框,提出  $J/\psi$  粒子是由新的第四种夸克,即粲夸克和反粲夸克组成的束缚态.这个理论一经提出,整个物理图像就简单而清楚,预言存在  $J/\psi$  家族,存在一系列新的粲介子,存在一系列新的粲重子.使实验物理学家忙得不亦乐乎.从1974年到现在,30年过去了,实验中找到了全部  $J/\psi$  家族的成员,全部粲介子,部分粲重子.说明新的理论建立在新的实验事实的基础上,预言存在新的现象,反过来指导了实验,实验又进一步证明新的理论是正确的.

现在,类似30年前的情况又出现了,这就是从2003年起,连续几个实验室宣布找到了由五个夸克组成的五夸克新粒子态.这是粒子物理发展的另一

个新的里程碑.目前,也是只有为数不多的实验结果,但却有铺天盖地的理论文章.这是创立新理论的大好时机,就看理论物理学家能否冲破旧理论的框框,提出具有创新精神的理论了.从一些实验组发现五夸克新粒子态的情况看,从20世纪八九十年代进行的粒子物理实验就已经获取了五夸克态的实验数据,由于没有理论的指导,以至于2003年才在重新分析八九十年代获取的实验数据中,获得五夸克新粒子态的新发现.所以,寻找多夸克新粒子态的实验工作,急需正确的理论指导.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Aubett J J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1974 33( 23 ) :1404  
 [ 2 ] Augustin J-E *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1974 33( 23 ) :1406  
 [ 3 ] Bacci C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1974 33( 23 ) :1408  
 [ 4 ] Abrams G S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1974 33( 24 ) :1453  
 [ 5 ] Brauschweig W *et al.* Phys. Lett. ,1975 57B( 4 ) :407  
 [ 6 ] Edwards C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1982 48( 1 ) :70  
 [ 7 ] Gaiser J E *et al.* Phys. Rev. ,1988 34D( 3 ) :711  
 [ 8 ] Baglin C *et al.* Phys. Lett. ,1986 171B( 1 ) :135  
 [ 9 ] Armstrong T A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1992 69( 16 ) :2337  
 [ 10 ] Goldhaber G *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1976 37( 5 ) :255  
 [ 11 ] Barlag S *et al.* Z. Phys. ,1987 37( 1 ) :17  
 [ 12 ] Peruzzi I *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1976 37( 4 ) :569  
 [ 13 ] Raab P *et al.* Phys. Rev. ,1988 37D( 9 ) :2391  
 [ 14 ] Bailey *et al.* Phys. Lett. ,1984 139B( 3 ) :320  
 [ 15 ] Goldhaber G *et al.* Phys. Lett. ,1977 69B( 4 ) :503  
 [ 16 ] Abachi S *et al.* Phys. Lett. ,1988 212B( 4 ) :533  
 [ 17 ] Peruzzi I *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1977 39( 21 ) :1301  
 [ 18 ] Barlay S *et al.* Phys. Lett. ,1992 278B( 4 ) :480  
 [ 19 ] Blaylock G T *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987 58( 21 ) :2171  
 [ 20 ] Anjos J C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1988 60( 10 ) :1979  
 [ 21 ] Edwards K W *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 74( 17 ) :3331  
 [ 22 ] Frabetti P L *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1994 72( 7 ) :961  
 [ 23 ] Artuso M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 86( 20 ) :4479  
 [ 24 ] Link J M *et al.* Phys. Lett. ,2002 525B( 2 ) :205  
 [ 25 ] Ammer R *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 86( 7 ) :1167  
 [ 26 ] Brandenburg G *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1997 78( 12 ) :2304  
 [ 27 ] Baigi S F *et al.* Phys. Lett. ,1989 122B( 5 ) :455  
 [ 28 ] Jessop C P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 82( 4 ) :492  
 [ 29 ] Avery P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 75( 24 ) :4364  
 [ 30 ] Gibbons L K *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1996 77( 5 ) :810  
 [ 31 ] Avery P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 75( 24 ) :4364  
 [ 32 ] Csorna S E *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 86( 19 ) :4243  
 [ 33 ] Alexander J P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 83( 17 ) :3390  
 [ 34 ] Baigi S F *et al.* Z. Phys. ,1985 28C( 1 ) :175  
 [ 35 ] Frabetti P L *et al.* Phys. Lett. ,1995 357B( 4 ) :678