

寻找多夸克新粒子态的实验进展*

何景棠[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 文章叙述了强子结构的夸克模型的成就和不足,详细介绍了寻找多夸克新粒子态的实验进展.寻找多夸克新粒子态对中国粒子物理实验学家可能作出世界创新成果是一个良好机遇.

关键词 夸克模型,手征孤子模型,多夸克态

Experimental progress in the search for multiquark states

HE Jing-Tang[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The successes and insufficiencies of the quark model in the classification of hadrons are reviewed, and experimental progress in the search for multiquark states is covered in detail. To search for multiquark states is a good chance for Chinese experimental particle physicists to make a visible contribution to particle physics in the world.

Keywords quark model, chiral soliton model, multiquark states

1 夸克模型的成就和不足

1962年,Gell-Mann M和Zweig G分析了当时实验找到的100多个基本粒子的结果,提出了强子结构的夸克模型,认为自然界存在3种夸克:它们是上夸克(up,u),下夸克(down,d),和奇异夸克(strange,s),介子是由夸克和反夸克组成的,而重子是由3个夸克组成的,介子和重子统称为强子.图1是最轻的由u,d,s夸克组成的自旋为0的介子八重态及其夸克组分.它们是 $\pi^-(d\bar{u})$, $\pi^0(\frac{d\bar{d}+u\bar{u}}{2})$, $\pi^+(u\bar{d})$, $K^-(s\bar{u})$, $K^0(\frac{s\bar{d}}{2})$, $\bar{K}^0(\frac{d\bar{s}}{2})$, $K^+(u\bar{s})$ 和 $\eta(\frac{d\bar{d}+u\bar{u}+s\bar{s}}{3})$;图2是由u,d,s夸克组成的自旋为3/2的重子十重态及其夸克组分,它们是 $\Delta^-(ddd)$, $\Delta^0(udd)$, $\Delta^+(uud)$, $\Delta^{++}(uuu)$, $\Sigma^-(dds)$, $\Sigma^0(uds)$, $\Sigma^+(uus)$, $\Xi^-(dss)$, $\Xi^0(uss)$ 和 $\Omega^-(sss)$.当时实验还未找到位于这个三角形顶角的由3个奇异夸克组成的奇异数 $s=-3$ 的 $\Omega^-(sss)$

粒子. Gell-Mann M根据强子结构的夸克模型预言, $\Omega^-(sss)$ 粒子的质量为1670MeV.1964年,在美国布鲁克海温国家实验室利用高能质子打击固定靶,利用汽泡室作探测器,果然找到 $\Omega^-(sss)$ 粒子,其质量为1672MeV,与理论预言值一致.

由于提出了强子结构的夸克模型,并且成功地预言存在由3个奇异夸克组成的奇异数 $s=-3$ 的 $\Omega^-(sss)$ 粒子,Gell-Mann M获得1969年诺贝尔物理奖.

1974年就在人们欢呼只有u,d,s3种夸克的夸克模型的伟大胜利的时候,1974年12月,Phys. Rev. Lett.杂志同时发表了3篇文章.其一是丁肇中先生在美国布鲁克海温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3.1GeV而衰变宽度只有约keV数量级的新粒子,丁肇中先生把他发现的粒子命名为J粒子;其二是Richter B在

* 2004-08-20收到初稿,2004-12-27修回

[†] Email:jingtang@mail.ihep.ac.cn

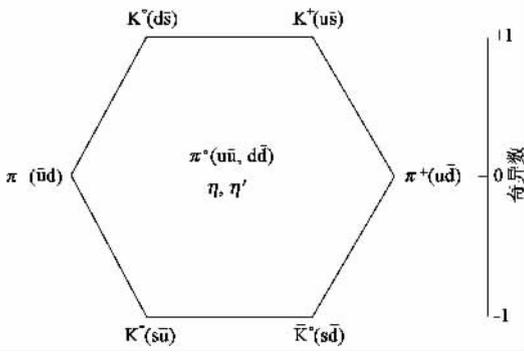


图1 自旋为0的介子八重态及它们的夸克组分(右边的数字+1,0,-1是奇异数s的值)

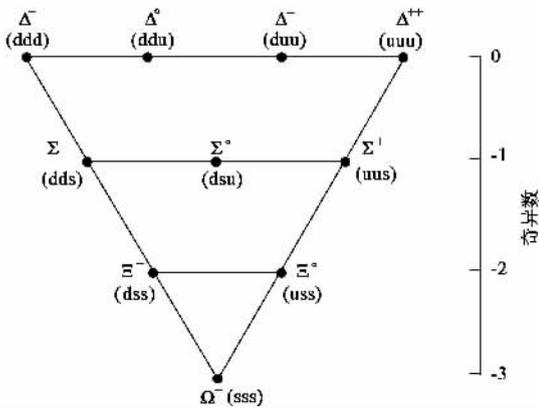


图2 自旋为3/2的重子十重态及它们的夸克组分(右边的数字是奇异数s的值)

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3.1GeV处,找到一个新的共振态,Richter B把他发现的粒子命名为 Ψ 粒子;其三是意大利的Frascati加速器中心,在知道了丁肇中先生发现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1.5GeV,但为了寻找J粒子,冒险地把加速器运行于束流能量超过1.5GeV,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3.1GeV处,也找到J粒子。

一些理论物理学家跳出成就辉煌的只有u,d,s 3种夸克的夸克模型的框框,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。后来实验证明,这个理论是正确的。

首先,找到了由粲夸克和反粲夸克组成的具有不同的自旋宇称 J^{PC} 值的一组束缚态,即叫做J/ Ψ 家族的一组粒子。

其次,介子由夸克和反夸克组成。如果存在新的

第四种夸克,即粲夸克,那么,粲夸克c可以与旧的u,d,s 3种反夸克组成新的粲介子,它们是: $D^0(c\bar{u})$, $D^+(c\bar{d})$, $D_s^+(c\bar{s})$;而反粲夸克 \bar{c} 可以与旧的u,d,s 3种夸克组成新的粲介子,它们是: $\bar{D}^0(\bar{c}u)$, $D^-(\bar{c}d)$, $D_s^-(\bar{c}s)$ 。图3表示由u,d,s,c 4种夸克组成的自旋为0的介子。图中中间的六角形为由u,d,s 3种夸克组成的自旋为0的普通介子八重态,图的上部为粲量子数 $C=1$ 的3个粲介子,图的下部为粲量子数 $C=-1$ 的3个粲介子。

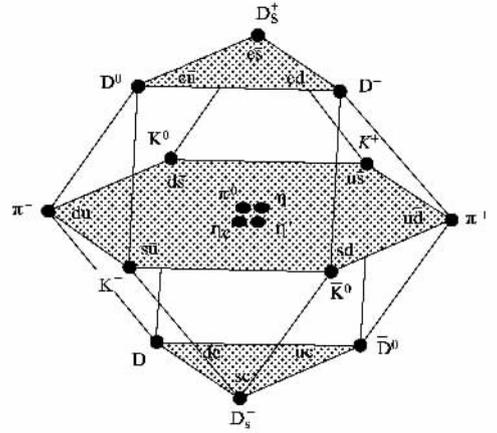


图3 由u,d,s,c 4种夸克组成的自旋为0的介子

再者,重子是由3个夸克组成的。如果存在新的第四种夸克,即粲夸克,那么,粲夸克c可以与旧的u,d,s 3种夸克组成新的粲重子。图4表示由u,d,s,c 4种夸克组成的自旋为3/2的重子(3个夸克自旋同向)以及它们的夸克组分,图的下部为粲量子数 $C=0$ 的如图2所示的普通重子十重态,依次为粲量子数 $C=1$, $C=2$, $C=3$ 的粲重子。请注意位于三角形的顶尖上的 Ω_{ccc}^{+++} 粒子,它是由3个粲夸克组成的,所以,它的电荷为2。目前,实验上找到了J/ Ψ 家族的所有成员,全部的粲介子,大部分的粲重子。

由于J/ Ψ 粒子的发现标志着粒子物理研究另一个新时代的开始,丁肇中先生和Richter B共同获得了1976年诺贝尔物理奖。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/ Ψ 粒子。一直沿用至今。

1978年,Lederman L在美国费米国家实验室发现了质量约为10GeV的Y粒子,被认为是由第五种夸克即底夸克(Bottom)和反底夸克组成的束缚态。从此,夸克模型由1974年以前的三种夸克扩大为6种夸克。它们是:上(up,u),下(down,d),粲

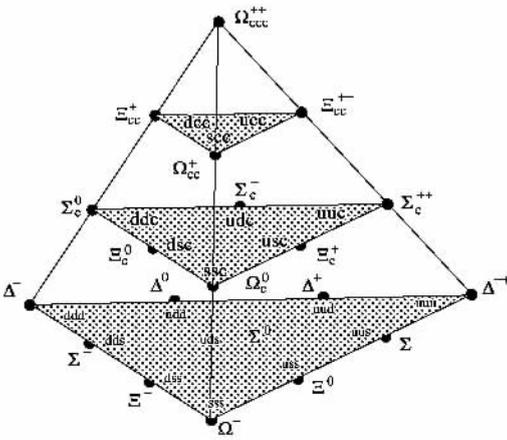


图4 由 u, d, s, c 4 种夸克组成的自旋为 3/2 的重子及它们的夸克组分

(charm c), 奇(strange s), 顶(top t), 底(bottom, b). 并且分成三代:

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

寻找顶夸克存在的证据就成为粒子物理实验的头号任务. 从 20 世纪 70 年代末就开始寻找顶夸克, 但一直都没有找到. 1987 年, 美国在费米实验室建成了束流能量为 $1\text{TeV} \times 1\text{TeV}$ 的质子反质子对撞机 TEVATRON. 有 2 台探测装置工作在 TEVATRON 上, 它们是 D0 和 CDF. 1997 年, 这两个实验组同时宣布找到了顶夸克存在的证据. D0 和 CDF 组给出的顶夸克质量的平均值为 $(174.3 \pm 3.2 \pm 4.0)\text{GeV}$. 这样, 夸克模型预言的 6 个夸克全都找到了. 顶夸克的发现是夸克模型的伟大胜利, 说明了夸克模型是正确的.

1979 年, 工作在德国汉堡高能电子-正电子对撞机 PETRA 上的由丁肇中先生领导的 Mark-J 实验组和其他实验组先后发现了高能电子-正电子对撞时产生的三喷注, 这是胶子存在的证据. 胶子是强相互作用的传播子.

从 60 年代起, 粒子分类一直采用夸克模型. 现代夸克模型认为, 自然界存在 6 种夸克: 它们是上夸克(up, u), 下夸克(down, d), 粲夸克(charm, c), 奇异夸克(strange s), 顶夸克(top t)和底夸克(bottom, b); 介子是由夸克和反夸克组成的, 而重子是由 3 个夸克组成的. 介子和重子统称为强子. 由胶子传播强相互作用. 量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)描写强相互作用. 夸克模型已经 40 多年持续地、成功地解释强子谱的分类.

QCD 还预言, 除了介子和重子之外, 还应该存

在由 2 个胶子或 3 个胶子组成的胶子球(glueball), 由胶子和夸克组成的混杂态(hybrid state), 由 4 个夸克组成的四夸克态, 由 5 个夸克组成的五夸克态, 由 6 个夸克组成的六夸克态. 但夸克模型并没有准确预言四夸克态、五夸克态和六夸克态的质量和衰变宽度(寿命). 这使实验上寻找四夸克态、五夸克态和六夸克态带来困难. 事实上, 在 20 世纪 80 年代和 90 年代进行的某些粒子物理实验已经获得有多夸克态的数据, 只是由于没有理论的指导, 以致没有很好地对数据进行分析. 但目前实验上已经找到了一些可能是四夸克态、五夸克态和六夸克态等新粒子态.

2 寻找四夸克态的实验进展

2.1 U 粒子

1980 年, 工作在欧洲核子研究中心超级质子同步加速器 SPS 上的 WA62 实验合作组^[1], 利用 Σ^- 超子打击固定靶, 发现 $\Lambda\bar{P}\pi^+\pi^+$, $\Lambda\bar{P}\pi^+\pi^+\pi^-$ 和 $\Lambda\bar{P}\pi^+\pi^-$ 的不变质量在 3.1GeV 处有超过 3σ 的峰, 如图 5 所示. 他们把这 3 个电荷分别为 $+1, 0, -1$ 的粒子命名为 U^+, U^0 和 U^- 粒子. U^+, U^0 和 U^- 粒子可能是一组粒子电荷多重态. 由于 U 粒子的重子数为 0, 而奇异数为 -1 , 因此, U 粒子不可能是重子. 而不变质量为 3.1GeV 的 U 粒子在夸克模型的介子分类中, 没有它的位置. 所以, 他们认为 U 粒子是四夸克态. 例如, U^+ 粒子可能是 $sudd$ 四夸克态. 合作组的领导成员 Bourquin M 曾经告诉笔者, 他们发表的 U 粒子的数据都是超过 3σ 的峰, 他们手中还有没发表的没超过 3σ 的 $\Lambda\bar{P}\pi^+\pi^+\pi^+$ 和 $\Lambda\bar{P}\pi^+\pi^-\pi^-$ 的不变质量也是 3.1GeV 的 U^{++} 和 U^{--} 双电荷粒子峰. 因此, 更坚定了他们把 U 粒子认为是四夸克态的信念. 事实上, 从 1988 年起, 直到 2000 年, 基本粒子数据手册 PDG, 一直把 U 粒子认为是四夸克态.

2.2 $\alpha(600)$, $f_0(980)$, $a^0(980)$ 和 $\kappa(800)$ 粒子

这四个粒子都是 J^{PC} 量子数为 0^{++} , 在夸克模型的介子分类中, 没有它的位置. Jaffe R J^[2]认为, 这四个粒子是四夸克态: $\alpha(600) = (u\bar{u}d\bar{d})$; $f_0(980) = 1/\sqrt{2}(s\bar{s}(u\bar{u} + d\bar{d}))$; $a^0(980) = (u\bar{u}s\bar{s})$; $\kappa(800) = (s\bar{u}u\bar{d})$. 1974 年以前, 这四个粒子的名字是 $\epsilon_s^* \delta_{\kappa}$, 与现在的名字不同.

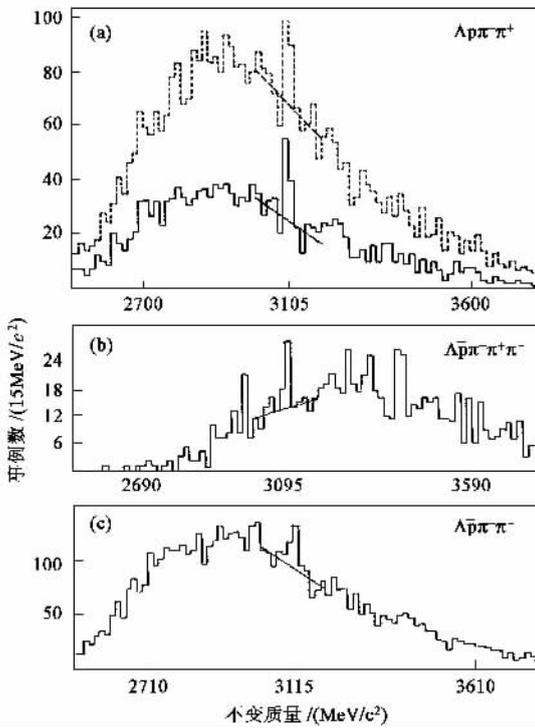


图5 U^+, U^0, U^- 粒子的不变质量分布

2.2.1 $\sigma(600)$ 粒子

2004年,在基本粒子数据手册 PDG 中, $\sigma(600)$ 的名字是 $f_0(600)$,它的质量是(400—1200)MeV,宽度是(300—500)MeV. 2000年,在日本京都的汤川理论物理研究所召开了一次国际会议,专门讨论 $\sigma(600)$. 图6表示不同实验组给出的 $\sigma(600)$ 的结果. 横坐标表示质量值,纵坐标表示宽度. 这次会议上众多的实验结果表明, $\sigma(600)$ 是一个客观存在的粒子.

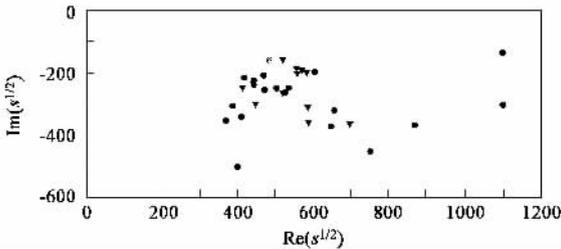


图6 不同实验组给出的 σ 粒子的质量和宽度分布

图7是工作在北京正负电子对撞机上的北京谱仪分析

$$J/\Psi \rightarrow \omega + \sigma(600)$$

$\hookrightarrow \pi^+ \pi^-$ 衰变给出的结果^[3]. 图中带误差的点是实验结果,曲线是拟合结果,可以看到,除 $\sigma(600)$ 之外,还有 $f_0(980)$ 和 f_2

(1270). 拟合结果给出: $\sigma(600)$ 的质量为(390 + 60 - 39)MeV,宽度是(282 + 77 - 50)MeV,自旋宇称是 J^{PC} 为 0^{++} .

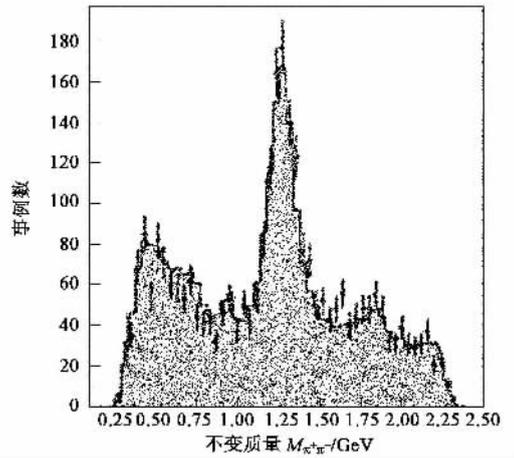


图7 北京谱仪 BES 合作组获得的 σ 共振峰

2.2.2 $f_0(980)$ 粒子

$f_0(980)$ 主要衰变为 $K\bar{K}$,在夸克模型的介子分类中,没有它的位置. 长期以来,理论上主要两种解释:一种认为是 $K\bar{K}$ 分子态^[4];另一种认为是四夸克态^[5].

2.2.3 $a^0(980)$ 粒子

$a^0(980)$ 是什么粒子,也是长期争论不休. 有人认为是普通的 $q\bar{q}$ 介子态^[6],有人认为是四夸克态^[7]. 对 $a^0(980)$ 是否是四夸克态的一个重要判断标准是 $\Phi \rightarrow a^0 \gamma$ 的分支比. 如果 $\Phi \rightarrow a^0 \gamma$ 的衰变分支比为 10^{-5} ,则是普通的 $q\bar{q}$ 介子态,如果 $\Phi \rightarrow a^0 \gamma$ 的衰变分支比为 10^{-4} ,则是四夸克态.

2003年,在意大利的 Frascati 的 Φ 介子工厂 DAΦNE 上的 KLOE 探测器,进行了 $\Phi \rightarrow a^0 \gamma$ 的测量^[8],结果是: $BR(\Phi \rightarrow a^0 \gamma) = (7.4 \pm 0.7) \times 10^{-5}$,与 10^{-4} 非常接近. 说明, $a^0(980)$ 可能是四夸克态.

KLOE 探测器还进行了 $\Phi \rightarrow f_0(980) \gamma, f_0(980) \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 的测量^[9],结果是: $BR(\Phi \rightarrow f_0(980) \gamma) = (4.47 \pm 0.21) \times 10^{-4}$,支持 $f_0(980)$ 可能是四夸克态的解释.

2.2.4 $\kappa(800)$ 粒子

2002年,美国费米国家实验室的 E791 实验组利用 $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 反应,发现 $K\pi$ 的不变质量为 $797 \pm 19 \pm 43$ MeV 和宽度为 $410 \pm 43 \pm 87$ MeV 有共

振峰. 肯定存在 κ ($K\pi$) 标量介子^[10].

2.3 $\rho\rho$ 共振态

1991 年, 工作在德国汉堡高能电子-正电子对撞机 DORIS 上的 ARGUS 实验组, 利用高能双光子对撞产生强子反应, 分析不变质量谱, 发现在 $(I^G, J^P) = (2^+, 2)$ 有一个 $\rho^0\rho^0$ 不变质量约为 1.6GeV 的宽共振峰^[11]. 如图 8 所示.

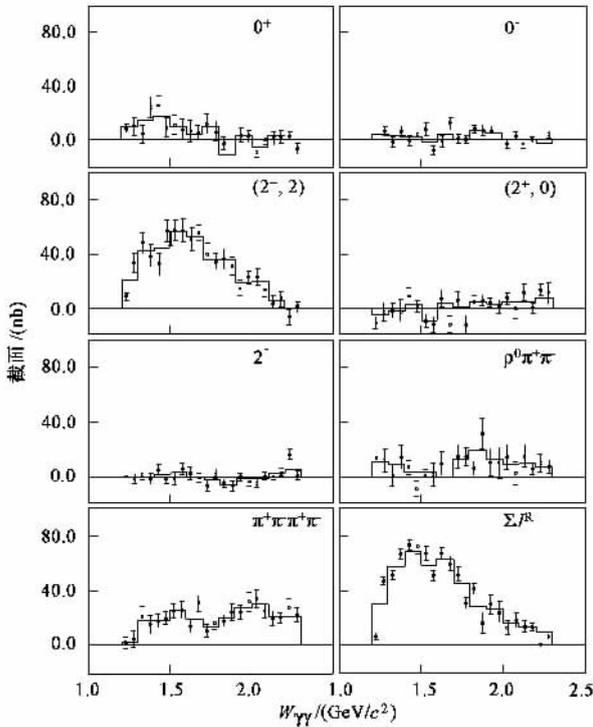


图 8 ARGUS 实验组发现在 $(I^G, J^P) = (2^+, 2)$ 有一个 $\rho^0\rho^0$ 不变质量约为 1.6GeV 的宽共振峰^[11]

1991 年, 工作在德国汉堡高能电子-正电子对撞机 PETRA 上的 CELLO 和 TASSO 实验组, 利用高能双光子对撞产生强子反应, 分析不变质量谱, 也发现有一个 $\rho^0\rho^0$ 不变质量约为 1.7GeV 的宽共振峰^[12]. 如图 9 所示.

李炳安和刘克非把这个 $\rho\rho$ 共振态解释为四夸克态^[13], 并从理论上预言存在一系列新的四夸克态.

2.4 $\Phi\Phi$ 共振态

1981 年, 欧洲核子研究中心 CERN 的 ACC-MOR 实验组^[14], 利用能量为 100GeV 和 175GeV 的 π^- 打击铍靶, 发现 $\Phi\Phi$ 的不变质量在 2100MeV 和 2300MeV 有共振峰.

1982 年, 美国 BNL 实验室的 MPSII 多粒子谱

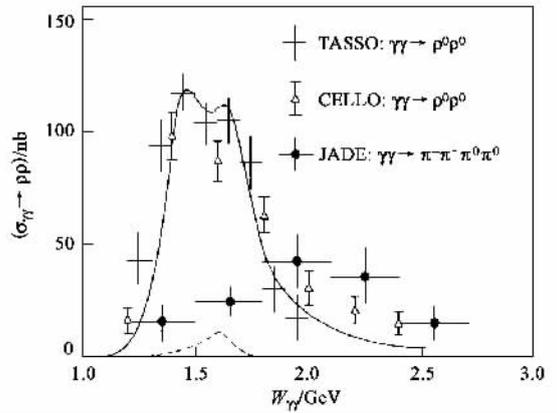


图 9 CELLO 和 TASSO 实验组也发现有一个 $\rho^0\rho^0$ 不变质量约为 1.7GeV 的宽共振峰^[12]

仪, 用动量为 22GeV/c 的 π^- 进行 $\pi^-P \rightarrow \Phi\Phi n$ 研究, 发现 $\Phi\Phi$ 的不变质量在 2160MeV 和 2320MeV 有共振峰. 他们并进行了分波分析, 共振态的量子数 I^G, J^{PC} 和质量如表 1 所示^[15]:

表 1 $\Phi\Phi$ 共振态的量子数 I^G, J^{PC} 质量和衰变宽度 Γ

	I^G, J^{PC}	质量/GeV	衰变宽度 Γ /GeV
$g_1(2160)$	$0^+ 2^{++}$	2.16 ± 0.05	0.31 ± 0.07
$g_1(2320)$	$0^+ 2^{++}$	2.32 ± 0.04	0.22 ± 0.07

最初, 人们把 $g_1(2160)$ 和 $g_1(2320)$ 解释为胶子球. 但是, 如果 $\Phi\Phi$ 共振态 $g_1(2160)$ 和 $g_1(2320)$ 是胶子球的话, 那么, 它应该在 J/ψ 的辐射衰变中大量产生, 但是, 在 J/ψ 的辐射衰变中并没有找到 $\Phi\Phi$ 共振态 $g_1(2160)$ 和 $g_1(2320)$, 因此, $\Phi\Phi$ 共振态 $g_1(2160)$ 和 $g_1(2320)$ 可能是 $s^2\bar{s}^2$ 四夸克态^[16].

2.5 $X(3872)$ 粒子

2004 年, 工作在日本 KEK 高能电子-正电子对撞机 B 介子工厂上的 Belle 实验组, 分析 B 介子的衰变产物 ($J/\psi + \pi\pi$) 的不变质量, 发现 ($J/\psi + \pi\pi$) 的不变质量在 3872MeV 有一个共振峰. 他们把这个粒子命名为 $X(3872)$ 粒子. 如图 10 所示. 工作在美国 SLAC 高能电子-正电子对撞机 B 介子工厂上的 Babar 实验组, 分析 B 介子的衰变产物 ($J/\psi + \pi\pi$) 的不变质量, 也发现 ($J/\psi + \pi\pi$) 的不变质量在 3872MeV 有一个共振峰.

随后, 工作在美国费米实验室束流能量为 1TeV \times 1TeV 的质子-反质子对撞机 TEVATRON 上的 CDF 和 D0 实验组, 分析质子-反质子对撞产物

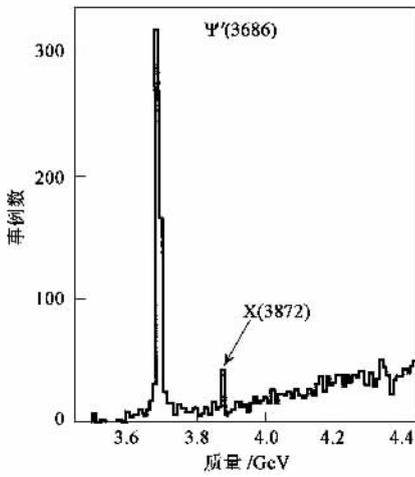


图10 日本 Belle 实验组发现(J/ψ + ππ)的不变质量在 3872MeV 处有一个共振峰

(J/ψ + ππ), 也发现(J/ψ + ππ)的不变质量在 3872MeV 有一个共振峰. 如图 11 所示.

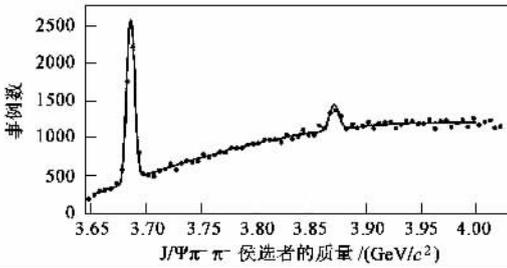


图11 CDF 和 D0 实验组也发现(J/ψ + ππ)的不变质量在 3872MeV 处有一个共振峰

粒子理论家把 X(3872)粒子解释为四夸克态、 $D^0\bar{D}^0$ 分子态, 以及由夸克、反夸克和胶子组成的混杂态.

3 寻找五夸克态的实验进展

1997 年, 俄罗斯理论物理学家 Diakonov D, Petrov V 和 Polyakov M^[17]利用手征孤子模型(chiral soliton model), 把重子看成是 π 场的孤子, 预言存在反十重态(antidecuplet)如图 12 所示. 这个三角形的 3 个顶角是带有奇特量子数的五夸克态. 图 2 所示的十重态的下顶角是由 3 个奇异夸克组成的质量最重的 $\Omega^-(sss)$, 而反十重态的上顶角是质量最轻的 Θ^+ , 它的质量为 1530MeV, 宽度很窄, 电荷为 +1, 奇异数 $s = +1$. 带有这种量子数的 Θ^+ 粒子不可能由 3 个夸克组成, 只能由 5 个夸克组成, 它们是 $uudd\bar{s}$ (u 夸克的电荷是 2/3, d 夸克的电荷是 -1/3, \bar{s}

夸克的电荷是 1/3, 奇异数 $s = +1$ 因此, Θ^+ 粒子的总电荷为 +1, 奇异数 $s = +1$). Θ^+ 粒子的衰变产物是 K^+n 或 K^0p .

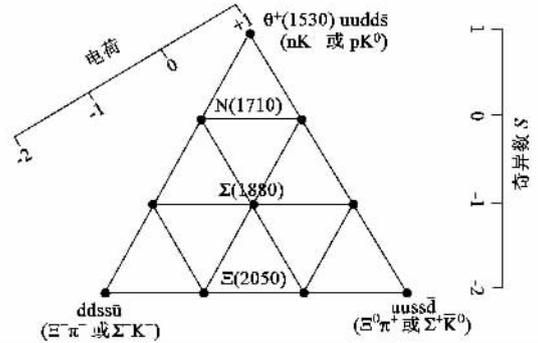


图12 Diakonov ,Petrov 和 Polyakov 预言存在反十重态^[17]

在 2000 年的一次国际会议上, Diakonov D 说服了日本的粒子实验物理学家 Nakano T 可在光生实验中寻找 Θ^+ 粒子. Nakano T 回到日本之后, 他的合作组 LEPS(Laser Electron Photon Facility)就开始利用日本的 Sping-8 电子储存环, 使用波长为 351nm 的 Ar 激光, 与电子产生向后散射而获得最大能量为 2.4GeV 的光子. 可以探测向后散射电子的动量来定出散射光子的能量. 他们利用这些高能光子进行光生实验:

$$\gamma n \rightarrow K^+ K^- n,$$

寻找 K^+n 共振态. 结果发现存在 K^+n 共振态, 如图 13 所示. LEPS 合作组给出的结果是: Θ^+ 粒子的质量为 (1.54 ± 0.01) GeV, 宽度少于 25MeV, 统计意义是 4.6σ . 与 Diakonov 等人预言的五夸克态相符^[18].

知道 Diakonov 等人预言存在五夸克态后, 位于俄罗斯莫斯科的理论与实验研究所(ITEP)的 Anatoli Dolgolenko 与他的合作者(DIANA 合作组)从 1999 年开始, 把 ITEP 1986 年进行的 850 MeV K^+ 束流打击液氙气泡室的照片重新扫描和分析, 在电荷交换反应

$$K^+ Xe \rightarrow K^0 PXe'$$

中寻找 K^0P 共振态. 重新扫描和分析工作一共进行了 3 年, 找到 541 个 K^0P 事例, 发现存在 K^0P 共振峰. DIANA 合作组给出的结果是: Θ^+ 粒子的质量为 1539 ± 2 MeV, 宽度少于 9MeV, 统计意义是 4.4σ ^[19].

2003 年 5 月, 美国 Thomas Jefferson 实验室连续电子束加速器装置(CEBAF)上的 CLAS(CEBAF Large Acceptance Spectrometer)合作组在粒子和核

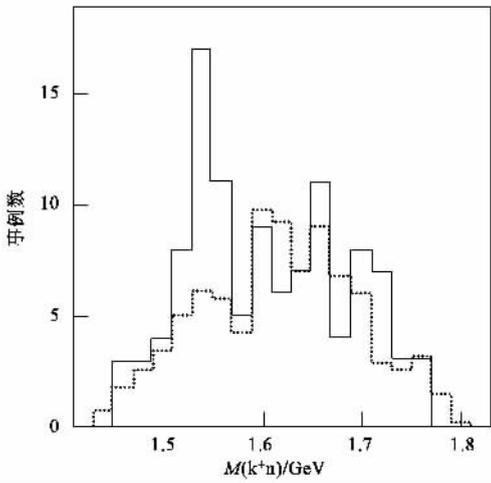


图13 日本 LEPS 合作组得到的 K^+n 不变质量分布图
[在 $M(K^+n)=1.54\text{GeV}$ 处有一个共振峰]

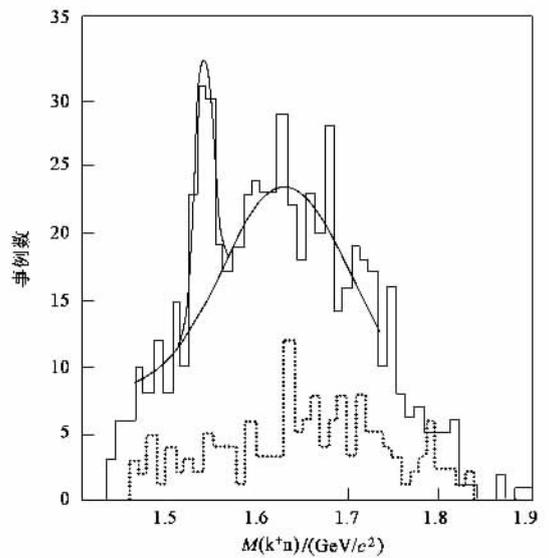


图14 美国 CLAS 合作组获得的 K^+n 不变质量分布图 [在 $M(K^+n)=1.542\text{GeV}$ 处, 有一个尖锐的 K^+n 共振峰, 其统计意义是 5.8σ]

国际会议上公布了他们重新分析 1999 年的光生实验：

$$\gamma d \rightarrow K^+ K^- p n$$

的数据, 结果找到了目前统计性最好的 K^+n 共振态^[20], 如图 14 所示. CLAS 合作组给出的结果是： Θ^+ 粒子的质量为 1542 MeV, 宽度为 21 MeV, 统计意义是 5.8σ .

2003 年 7 月, 工作在德国玻恩的电子拉长加速器 ELSA (Electron Stretcher Accelerator) 上的 SAPHIR 合作组, 重新分析了 1997 年和 1998 年光生实验：

$$\gamma p \rightarrow n K^+ K_s^0$$

的数据, 发现有 K^+n 共振态. SAPHIR 合作组给出的结果是： Θ^+ 粒子的质量为 1540 MeV, 宽度为 25 MeV^[21].

随后, 若干实验组宣布找到 Θ^+ 粒子存在的证据, 如表 2 所示. 但也有若干实验组宣布没找到 Θ^+ 粒子存在的证据. 如表 3 所示.

表 2 宣布找到 Θ^+ 粒子存在的实验

实验组	采用的物理过程	产物	质量/MeV	宽度/MeV	统计意义	参考文献
LEPS	$\gamma n \rightarrow K^+ K^- n$	K^+n	$1540 \pm 10 \pm 5$	< 25	$\approx 4.6\sigma$	[18]
DIANA	$K^+ Xe \rightarrow K_s^0 p Xe'$	$K_s^0 p$	$1539 \pm 2 \pm 2$	< 9	$\approx 4.6\sigma$	[19]
CLAS - 1	$\gamma d \rightarrow K^+ K^- n$	K^+n	1542 ± 5	< 21	$\approx 5.2\sigma$	[20]
CLAS - 2	$\gamma p \rightarrow K^+ K^- n \pi^+$	K^+n	1555 ± 10	< 26	$\approx 7.8\sigma$	
SAPHIR	$\gamma p \rightarrow n K^+ K_s^0$	K^+n	$1540 \pm 4 \pm 2$	< 25	$\approx 4.6\sigma$	[21]
HERMIES	$e^+ D \rightarrow \Theta^+ + X$	$K_s^0 p$	$1528 \pm 2.6 \pm 2.1$	$17 \pm 9 \pm 3$	$\approx 4\sigma$	[22]
ZEUS	$e^+ D \rightarrow \Theta^+ + X$	$K_s^0 p$	$1521 \pm 1.5^{+2.8}_{-1.7}$	8 ± 4	$\approx 4.6\sigma$	[23]
SVD - 2	$pA \rightarrow \Theta^+ + X$	$K_s^0 p$	$1526 \pm 3 \pm 2$	< 24	$\approx 5.6\sigma$	[24]
COSY - TOF	$pp \rightarrow \Theta^+ + X$	$K_s^0 p$	1530 ± 5	< 18	$\approx 5.9\sigma$	[25]
JINR	νCC	$K_s^0 p$	1533 ± 5	< 20	$\approx 6.7\sigma$	[25]

表3 宣布没有找到 Θ^+ 粒子存在的实验

实验组	采用的物理过程
HERA - B	$pA \rightarrow \Theta^+ + \Theta^-$
L3	$\gamma\gamma \rightarrow \Theta^+ + \Theta^-$
ALEPH	$Z^0 \rightarrow \Theta^+ + \Theta^- + X$
DELPHI	$Z^0 \rightarrow \Theta^+ + \Theta^- + X$
CDF	$pA \rightarrow \Theta^+ + \Theta^- + X$
E690	$pA \rightarrow \Theta^+ + \Theta^- + X$
Babar	$e^+e^- \rightarrow \Theta^+ + X$
PHENIX	$AuAu \rightarrow \Theta^+ + X$
BES	$J/\Psi \rightarrow \Theta^+ + \Theta^- \rightarrow K_s^0 p + K_s^0 \bar{p}$
	$\Psi' \rightarrow \Theta^+ + \Theta^- \rightarrow K_s^0 p + K_s^0 \bar{p}$

短期内,有这么多实验组相继宣布找到 Θ^+ 粒子存在的证据,看来 Θ^+ 粒子的存在是一个客观事实。但也有若干实验组宣布没找到 Θ^+ 粒子存在的证据。目前,宣布找到 Θ^+ 粒子存在的实验,都是低能实验,而宣布没找到 Θ^+ 粒子存在的多数实验都是高能实验。是否存在一种特殊的产生机制?理论家对 Θ^+ 粒子有不同的解释。有人认为, Θ^+ 粒子可能是一个介子八重态(K^+ 或 K^0) 和一个重子八重态(n 或 p) 组成的强子分子态: K^+n 或 K_s^0p , 也有其他的看法。实验上需要仔细测量 Θ^+ 粒子的其他性质, 以及寻找更多的多夸克态(四夸克态、五夸克态、六夸克态), 理论上才能最后确定 Θ^+ 粒子的性质。

上面所列的实验结果,除了少数的实验组重新进行实验寻找 Θ^+ 粒子存在的证据之外,大多数的实验组均是分析已往的实验数据,从而发现了存在 Θ^+ 粒子的证据。这充分说明理论对实验的指导作用。

在 Θ^+ 粒子发现后不久,工作在欧洲核子研究中心超级质子同步加速器 SPS 上的 NA49 实验组^[26], 利用质子打击固定靶,找到反十重态三角形下底边上的4个 Ξ 粒子,其中左顶角的 Ξ 是奇异数 $s = -2$, 电荷 $Q = -2$ 的奇特态,其夸克组分是($ddss\bar{u}$), 右顶角 Ξ^+ 也是奇特态,它的奇异数 $s = -2$, 电荷 $Q = +1$, 其夸克组分是($uuss\bar{d}$)。图 15(a) 是 $\Xi^-\pi^-$, $\Xi^-\pi^+$, $\Xi^+\pi^-$ 和 $\Xi^0\pi^+$ 的合并质量谱,在不变质量为 1.862GeV 有一个峰,图 15(b) 是扣除本底后的质量谱。拟合给出的结果是: $\Xi\pi$ 的不变质量为 $(1.862 \pm 0.002)\text{GeV}$, 其衰变宽度与仪器的分辨率差不多,说明其衰变宽度是非常窄的。统计意义是 5.6σ 。但是,也有若干实验组从不同反应过程没有找到 Ξ^- 是粒子,如表 4 所示。

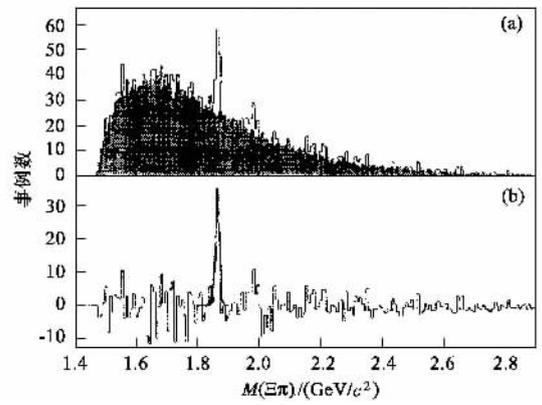


图 15 (a) $\Xi^-\pi^-$, $\Xi^-\pi^+$, $\Xi^+\pi^-$ 和 $\Xi^0\pi^+$ 的合并质量谱 (b) 扣除本底后的质量谱

表4 宣布没有找到 Ξ^- 粒子存在的实验证据

实验组	采用的物理过程
HERA - B	$pA \rightarrow \Xi^- + X$
ALEPH	$Z^0 \rightarrow \Xi^- + X$
CDF	$pA \rightarrow \Xi^- + X$
E690	$pA \rightarrow \Xi^- + X$
Babar	$e^+e^- \rightarrow \Xi^- + X$
ZEUS	$ep \rightarrow \Xi^- + X$

反十重态的成员似乎已在实验上被找到。特别是反十重态的三角形的三个顶角的带有奇特量子数的五夸克态在实验上被找到了。但是,由于一些实验组从不同反应过程中没有找到 Θ^+ 粒子和 Ξ^- 粒子,因此,必需进行更多的实验,以便进一步证实 Θ^+ 粒子和 Ξ^- 粒子存在的可靠性。

4 双重子态——可能的六夸克态

1975 年,美国布鲁克海温国家实验室利用 30in ($1\text{in} = 2.54\text{cm}$) 的液气泡室作探测器,使用 AGS 质子加速器进行反质子散射实验 $\bar{p} + d \rightarrow (\bar{p}n \rightarrow \text{湮灭}) + p$, 发现有 2 个 $\bar{p}n$ 共振峰^[27]。其中一个的质量和宽度分别是 $M = (1897 \pm 1)\text{MeV}$, $\Gamma = (25 \pm 6)\text{MeV}$, 另一个的质量是 1932MeV 。如图 16 所示。

1976 年,欧洲核子中心 CERN,利用 2m 的液氢气泡室作探测器,使用 PS 质子加速器,使用动量为 $(571.2 \pm 5.5)\text{MeV}/c$ 的反质子,进行反质子散射实验,发现有一个质子-反质子 $p\bar{p}$ 共振峰^[28]。其不变质量和宽度分别是: $M = (1936 \pm 1)\text{MeV}$, $\Gamma = (9 \pm 4)\text{MeV}$ 。如图 17 所示。

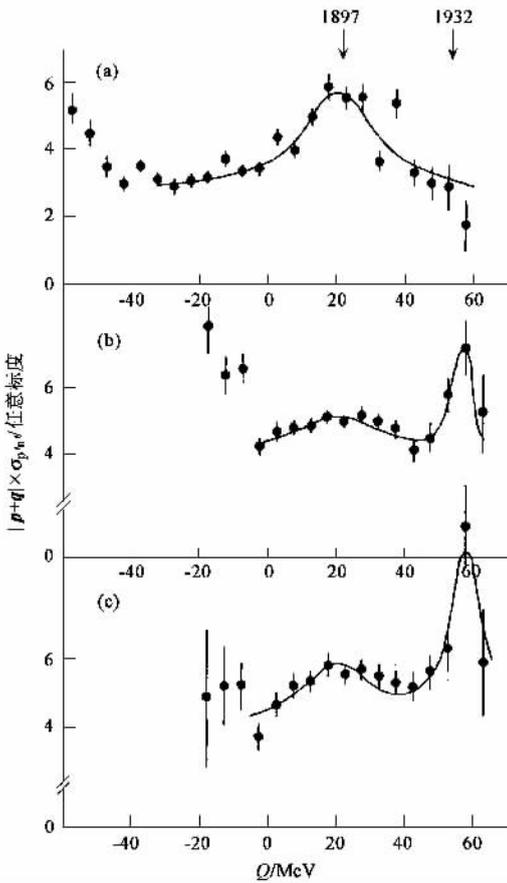
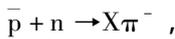


图 16 布鲁克海温国家实验室发现有 2 个 $\bar{p}n$ 共振峰^[27]

1976 年,法国斯特拉斯堡的核物理研究中心,分析欧洲气泡室的照片,从反应



可获得中性终态事例: $X(\bar{p}n\pi^+, \bar{p}p\pi^0, \bar{n}p\pi^-)$ 的不变质量为 2.85GeV 时有共振峰^[29],其不变质量和宽度分别是 $M=(2850 \pm 5)\text{MeV}$, $\Gamma=(47 \pm 14)\text{MeV}$. 如图 18 所示.

1977 年,欧洲核子中心 CERN 的 Omega 探测器合作组,利用 $\pi^- + p \rightarrow \bar{p}p\pi^- + p$,发现有一个 $\bar{p}p\pi^-$ 共振峰^[30],其不变质量是 $M=(2.95 \pm 0.01)\text{GeV}$,衰变宽度与仪器的分辨率 $\sigma = 15\text{MeV}$ 相当. 如图 19 所示.

1977 年,欧洲核子中心 CERN 的 Omega 探测器合作组,利用 $\pi^- + p \rightarrow \pi^- p + \bar{p}p$ 反应,发现有两个 $\bar{p}p$ 共振峰^[31],其不变质量和衰变宽度分别是: $M_1=(2020 \pm 3)\text{MeV}$, $\Gamma_1=(24 \pm 12)\text{MeV}$; $M_2=(2204 \pm 5)\text{MeV}$, $\Gamma_2=(16 + 26 - 16)\text{MeV}$. (见图 20).

由于这些新共振态都包含有重子-反重子对,当时的理论物理学家把它们解释为双重子态(baryon-

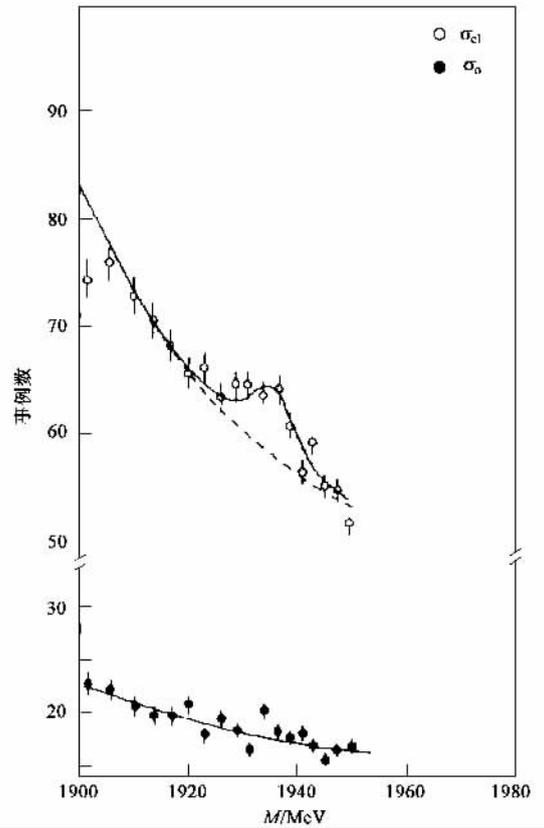


图 17 $\bar{p}p$ 共振峰^[28]

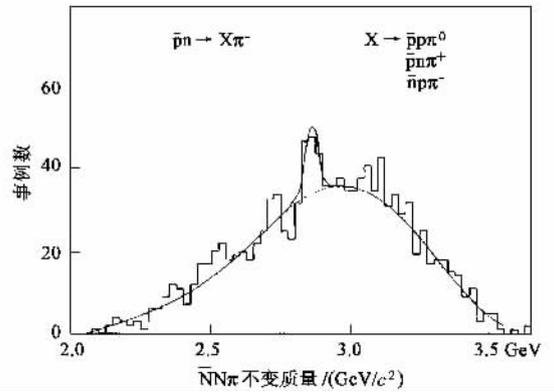
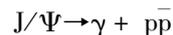


图 18 $X(\bar{p}n\pi^+, \bar{p}p\pi^0, \bar{n}p\pi^-)$ 共振峰

ium). 也可以理解为重子-反重子分子态. 由于重子由 3 个夸克组成,例如:质子(uud),反质子($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$),所以,由核子和反核子组成的 baryonium 是否就是六夸克态呢?

2003 年,工作在北京正负电子对撞机上的北京谱仪合作组分析



衰变时,发现有质量为 1859MeV 、宽度 $\Gamma < 30\text{MeV}$ 的 $\bar{p}p$ 共振峰^[32]. 在夸克模型的粒子分类中,没有这个

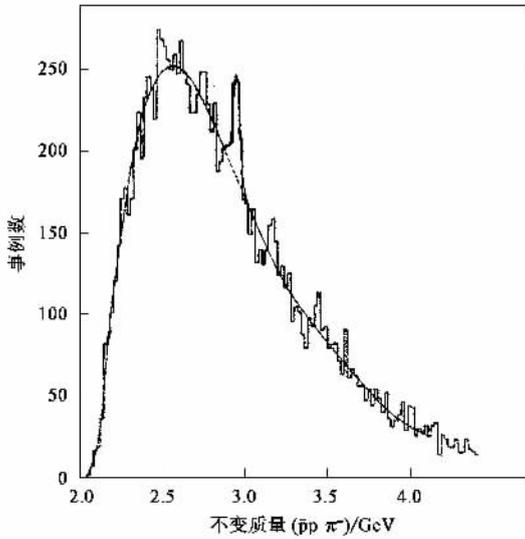


图 19 $\bar{p}p\pi^-$ 共振峰^[30]

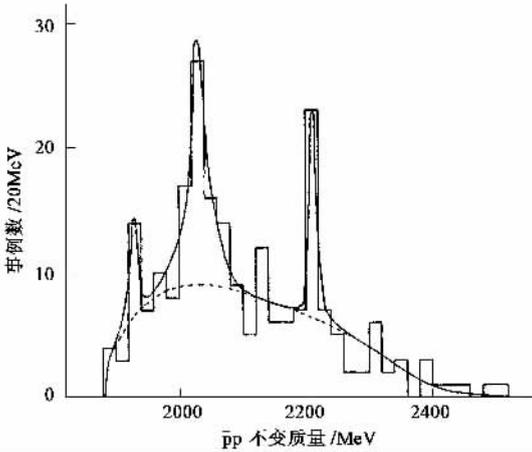


图 20 $\bar{p}p$ 不变质量分布图

$\bar{p}p$ 共振态的位置. 粒子理论家把这个 $\bar{p}p$ 共振态解释为 质子 - 反质子分子态即六夸克态.

5 机遇与挑战

2003 年, 欧洲核子中心 CERN 的著名理论家 John Ellis 说, 找到 Θ^+ 粒子以及北京正负电子对撞机上的北京谱仪发现的 $\bar{p}p$ 共振态是十分令人激动的事件. 似乎寻找新的强子谱正处于开始阶段. 这提供了一个检验强子结构的夸克模型或手征孤子模型或其他理论模型的平台.

夸克模型是 1962 年由 Gell-Mann M 和 Zweig G 提出的. 由于成功地进行强子分类及预言存在由 3 个奇异夸克组成的 $\Omega^-(sss)$ 粒子, Gell - Mann M 获

得 1969 年诺贝尔物理学奖. 夸克模型已经 40 多年持续地和成功地解释了强子谱的分类, 但它并没有准确预言四夸克态、五夸克态和六夸克态的质量和衰变宽度(寿命), 如果手征孤子模型或其他理论模型被实验证明是对的话, 这表明粒子物理的发展进入一个新的阶段. 表明夸克模型需要完善和发展. 需要发展出一种新的理论来进行强子结构的分类. 一个好的理论必然建筑在大量实验事实的基础上. 要建立一个好的粒子理论要求有一系列粒子谱系. 现在, 实验上似乎有一系列四夸克态、五夸克态和六夸克态的粒子谱系存在的证据, 实验走在了理论的前面. 相信不久的将来, 必定会出现好的描写强相互作用的理论, 它既能解释普通介子和重子等强子谱的分类, 又能准确预言四夸克态、五夸克态和六夸克态的质量和衰变宽度(寿命)和其他性质. 此外, 还能准确预言由 2 个胶子或 3 个胶子组成的胶子球(glueball), 由胶子和夸克组成的混杂态(hybrid state) 的质量和衰变宽度(寿命)等性质. 而在实验上, 则有一系列的新粒子有待发现. 那么, 这是否意味着中国的高能粒子实验物理学家面对着一作出世界创新成果的机会呢?

参 考 文 献

- [1] Bourquin M, Brown R M, Burekhardt H J *et al.* Phys. Lett., 1986, B172(1):113
- [2] Jaffe R J. Phys. Rev. D, 1977, 15(1):267
- [3] Wu Ning. <http://www.arXiv.hep-ph/0008135>
- [4] Weinstein J, Isgur N. Phys. Rev. Lett., 1982, 48(10):659
- [5] Törnqvist N A. Phys. Rev. Lett., 1982, 49(9):624
- [6] Close F E, Isgur N, Kumano S. Nucl. Phys., 1993, B389:513
- [7] Achasov N N, Gubin V V. Phys. Rev. D, 1997, 56(7):4084
- [8] Aloisio A, Ambrosino F, Antonelli A *et al.* <http://www.arXiv.hep-ex/0204012>
- [9] Aloisio A, Ambrosino F, Antonelli A *et al.* <http://www.arXiv.hep-ex/0204013>
- [10] Aitala E M, Amato S, Anjos J C *et al.* <http://www.arXiv.hep-ex/0204018>
- [11] Abrecht H, Ehrlichmann H, Gläser R *et al.* Z. Phys. C, 1991, 50(1):1
- [12] Brandelik R, Braunschweig W, Gather K *et al.* Phys. Lett. B, 1980, 97(1):448
- [13] Li B A, Liu K F. Phys. Rev. D, 1984, 30(3):613
- [14] Daum C, Hertzberger L O, Hooglan W *et al.* Phys. Lett., 1981, B104(1):246
- [15] Etkin A, Foley K J, Longacre R S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1982, 49(2):1620
- [16] Li B A, Liu K F. Phys. Rev. D, 1983, 28(7):1636

[17] Diakonov D , Petrov V , Polyakov M , Z. Phys. ,1997 ,A359 : 305

[18] Nakano T. Pyhs. Rev. Lett. ,2003 91 012002—1

[19] Barmin V. <http://arXiv.org/abs/hep-ep/0304040>

[20] Stepanyan S. 2003 hep-ep/0307018

[21] Alt C , Anticic T , Baatar B *et al.* <http://arXiv.org/abs/hep-ep/0310014>

[22] HERMES coll. <http://arXiv.org/abs/hep-ep/0312044>

[23] SAPHIR coll. <http://arXiv.org/abs/hep-ep/0307083>

[24] SVD -2 coll. <http://arXiv.org/abs/hep-ep/0401024>

[25] JINR -2 coll. <http://arXiv.org/abs/hep-ep/0404003>

[26] NA49 Coll. , Phy. Rev. Lett. 2004 92(4) 042003

[27] Kalogeropoulos T E , Tzanakos G S. Pyhs. Rev. Lett. ,1975 34 (17) :1047

[28] Chaloupa V , Dreverman H , Marzano F *et al.* Phys. Lett. B , 1976 ,61(5) :487

[29] Braum H , Brick D , Fridman A *et al.* Phys. Lett. B ,1976 60 (5) #81

[30] Evangelista C , Ghidini B , Palano A *et al.* Phys. Lett. B ,1977 , 72(1) :139

[31] Benkheiri P , Boucrot J , Bouquet B *et al.* Phys. Lett. B ,1977 , 68(5) #83

[32] Bai J Z , Ban Y , Bian J G *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 91 (2) 022001 - 1

· 物理新闻和动态 ·

h - 指数

对科学家们发表的论文应如何进行量化的评估 ,换句话说 ,也就是如何来确定他们的工作质量和效率. 美国加州大学圣地亚哥分校的 Jorge Hirsch 教授提出了一种定量评估论文质量的方法 称为 h - 指数法. 其具体计算的方法是以论文发表的数量和论文被引用的次数综合起来考虑的 ,例如一位科学家共发表了 10 篇论文 ,每篇论文被引用过一次 ,他的 h - 指数就是 10. 显然 h - 指数可以较好地反映出论文的重要性、创新性和在实用上的有效性的. 它的累积效应也可以用来作为招聘新工作人员和提升及奖励工作人员的评判标准.

Jorge Hirsch 教授曾经通过 ISI 网的数据库资料对各个领域的科学家进行了统计分析 ,他发现有成就的科学家确实有较高的 h - 指数 ,普林斯顿高等研究院 ,专门研究弦理论的粒子物理学家 Edward Witten ,他的 h - 指数 是 110 ,这表明他至少发表了 110 篇论文并至少被他人引用过 110 次 ;另一位高指数的物理学家是加州大学伯克利分校的凝聚态物理学家 Marvin Cohen ,他的指数是 94 ,其它高指数的科学家分别是 :普林斯顿大学的固体物理学家 Philip Anderson (91) ,德克萨斯大学奥斯汀分校的粒子物理学家 Steven Weinberg (88) ,马利兰大学的数学物理学家 Michael Fisher (88) ,而 Jorge Hirsch 本人的指数是 49. 因此 Jorge Hirsch 教授认为 h - 指数确实能较客观地反映出一位科学家的成就 ,经过数据分析后他得到一个统计平均的结果 ,若都以工作 20 年作为标准 ,一位成功的科学家 ,他的 h - 指数应该达到 20 ,而指数达到 40 的就是一位出色的科学家 ,如果指数能达到 60 就是一位科学大师了. 另一方面 ,作为工作考察的参数来看 ,当 h - 指数达到 12 时就可晋升为副教授 ,晋升正教授的指数大约是 18. 当然对于物理学中不同的子学科可能要作一些不同的调整

(云中客 摘自 Physics Web ,16 August 2005)

小世界网络的临界阈值

“小世界”网络可以为真实世界提供大量的信息和各种状态的模拟 ,例如真实世界中的互联网到供电的电力网 ,从生活中常发生的流行病传播到大选时的民意测验等都是一小世界网络. 一个“小世界”网络一般包含一定数量的网点 ,称为网络中心. 它们具有非常广泛的联系 ,通常可以从一个网络中心经过简单的几步就能进行到其它网点.

在实际生活的小世界网络中 ,研究者会观察到存在着某种临界阈值 ,就拿流行病来说 ,流行病有时可传播为无法控制的疾病疫区 ,有时却可以无声无息地自行消失. 这两种情况的出现依赖于疾病可能被传染的程度和带菌者的个人社会接触能力. 但到目前为止 ,网络理论对临界阈值的模拟与研究却进展甚少. 最近比利时 Katholieke 大学的 J. Indekeu 教授和他的同事们的工作表明用小世界网络是可以模拟存在的临界阈值的. 他们的做法是调低网络中心对其周围网点的影响力 ,这样就可以模拟出临界阈值. 例如在举行大选时 ,对如何挑选后选人的问题上 ,一个朋友的意见常常要比电视台资深评论员的话更能影响你的投票选择 ,尽管电视台评论员拥有广大的听众使他成为一个网络中心. 按数学角度来看 ,调低网络中心对周围网点的影响力实质上就是切断网络中心的部分联接. 研究组认为 ,他们的这种想法将有助于防止某些现象的发生 ,例如电力网的中断或流行病的传播等.

联想到广义相对论的结论 ,如果在四维时空坐标中存在着一定的物质时 ,时空空间的曲率会发生变化并导致引力场结构的变化. 因此 Indekeu 教授认为在平行网络间 ,若各网点间的相互作用发生变化时也会导致整个网络中心结构发生变化.

(云中客 摘自 Physics News Update 742 ,19 August 2005)