

日俄美欧科学家相继发现五夸克新粒子态

何景棠

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

从 60 年代起,粒子分类一直采用夸克模型。自然界存在六种夸克:它们是上夸克(up,简称为 u),下夸克(down,简称为 d),粲夸克(charm,简称为 c),奇异夸克(strange,简称为 s),顶夸克(top,简称为 t)和底夸克(bottom,简称为 b)。夸克模型认为,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。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,简称为 QCD)描写强相互作用。图 1 表示按夸克模型分类的自旋为 0 的介子八重态及其夸克组分,图 2 表示按夸克模型分类的自旋为 1/2 的重子八重态及其夸克组分。QCD 预言,除了介子和重子之外,还应该存在由两个胶子或三个胶子组成的胶子球(Gueball);由胶子和夸克组成的混杂态(Hybrid State);由四个夸克组成的四夸克态,由五个夸克组成的五夸克态,由六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,五夸克态和六四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 80~90 年代进行的某些粒子物理实验已经获得有多夸克态存在的数据,只是由于没有理论的指导,以致没有很好进行分析。

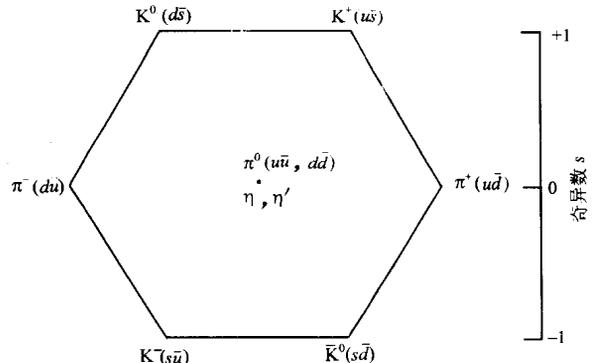


图 1 自旋为 0 的介子八重态及它们的夸克组分
右边的数字 +1、0、-1 是奇异数 s 的值

1997 年,俄罗斯理论物理学家 D. Diakonov、V. Petrov 和 M. Polyakov 利用手征孤子模型(chiral soliton model),把重子看成是场的孤子,预言存在反十重

同核异能态初、末态的自旋相匹配从而释放能量。

同核异能态储存的能量是惊人的。以 ^{178}Hf 同核异能态为例,每个 ^{178}Hf 同核异能态所存储的能量为 2.4MeV,每 1 克 ^{178}Hf 同核异能态可释放 361 千瓦时的能量。我国 2003 年耗电总量约为 17800 亿千瓦时,这相当于 4931 吨 ^{178}Hf 所存储的能量。

同核异能态的研究一直被许多国家所重视。日本科学家长期以来一直在积累同核异能态的有关数据,并且正在设计建造 K 阱束流线装置。1999 年,Collins 等人在美国空军资助下,利用 X 光机激发 ^{178}Hf 中半衰期为 31 年的同核异能态的射线辐射,取得积极结果。尽管这一工作不被随后美国阿贡、洛斯阿拉莫斯、利物莫等国家实验室独立进行的实验所支持。2003 年 8 月 16 日,《新科学家》杂志上关于“伽玛射线武器可能引发新一轮军备竞赛”的报道在国际上引起很大反响,激起了各国对研究新型武器的兴趣。而美国五角大楼国防高级研究计划署正在审定这些结果,考虑发展这种能够释放大量高

能伽玛射线的新型武器。

产生和控制衰变能的关键在于理解自旋阱的衰变机制,了解电磁跃迁、隧道效应和同核异能态的结构。自旋阱的研究包括能量和寿命的预言,以及结构和衰变模式的研究。能量和寿命的预言对模型的要求很高,它要求利用全空间多粒子激发情况下精确的壳模型来处理;而且必须认真处理费米子之间的对超导性。目前,关于这个问题的处理无论是理论上还是实验上都存在很大的困难,无法进行精确的处理。

由于国防需要,中国在核科学领域聚集了一大批人才。特别是自上世纪七十年代以来,我国理论与实验工作者在高自旋态、超形变原子核、磁转动、手征双重带、同核异能态、自旋阱和 K 阱等的研究中做出了重要贡献,先后有一些理论和实验工作者在国际上著名研究所从事研究工作,为新的能量存储及释放机制的研究作了充分准备,相信能够在该领域做出独特贡献。

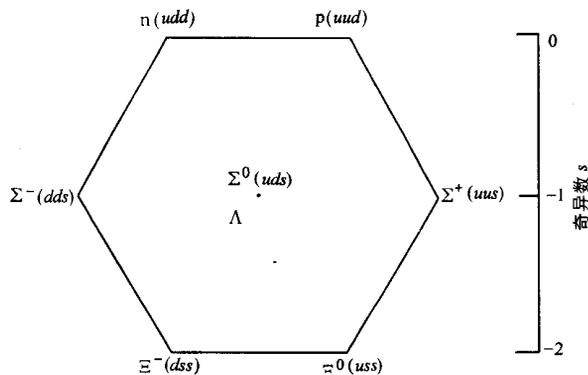


图2 自旋为 1/2 的重子八重态及它们的夸克组分
右边的数字 0、-1、-2 是奇异数的值

态 (antidecuplet)。这个三角形的三个顶角是五夸克态。十重态的下顶角是由三个奇异夸克组成的质量最重的 $\Xi^- (sss)$ ，而反十重态的上顶角是质量最轻的 $\Sigma^+ (uus)$ ，它的质量为 1530MeV，宽度为 15MeV，电荷为 +1，奇异数 $s = +1$ 。带有这种量子数的 Σ^+ 粒子不可能由三个夸克组成，只能由五个夸克组成，它们是 $uudds$ (u 夸克的电荷是 2/3，d 夸克的电荷是 -1/3，s 夸克的电荷是 1/3；奇异数 $s = +1$ ，因此， Σ^+ 粒子的总电荷为 +1，奇异数 $s = +1$)。 Σ^+ 粒子的衰变产物是 K^+n 或 K^0p 。

在 2000 年的一次国际会议上，D. Diakonov 说服了日本的粒子实验物理学家 T. Nakano 可在光生实验中寻找 Σ^+ 粒子。T. Nakano 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：



寻找 K^+n 共振态。结果发现了 K^+n 共振态，如图 3 所示。LEPS 合作组给出的结果是： Σ^+ 粒子的质量为 $1.54 \pm 0.01 \text{ GeV}$ ，宽度少于 25MeV，统计意义是 4.6。与 Diakonov 等人预言的五夸克态相符。

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 850MeV 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：



中寻找 K^0p 共振态。重新扫描和分析工作一共进行

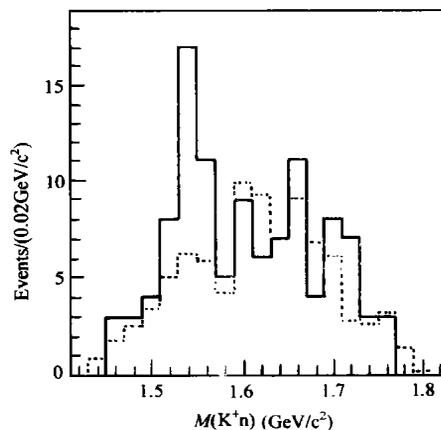
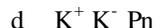


图3 日本 LEPS 合作组得到的 K^+n 不变质量分布图在 $M(K^+n) = 1.54 \text{ GeV}$ 处有一个共振峰

了三年，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： Σ^+ 粒子的质量为 $1539 \pm 2 \text{ MeV}$ ，宽度少于 9MeV，统计意义是 4.4。

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) 合作组在粒子和核国际会议上公布了他们重新分析 1999 年的光生实验：



的数据，结果找到了目前统计性最好的 K^+n 共振态，如图 4 所示。CLAS 合作组给出的结果是： Σ^+ 粒子的质量为 1542MeV，宽度为 21MeV，统计意义是 5.8。

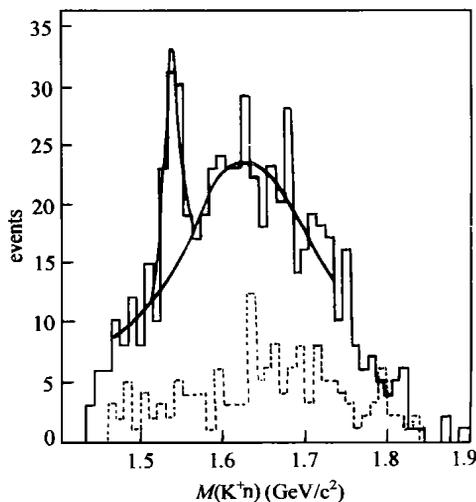


图4 美国 CLAS 合作组获得的 K^+n 不变质量分布图在 $M(K^+n) = 1.542 \text{ GeV}$ 处有一个尖锐的共振峰，统计意义是 5.8

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：

弦理论大师威滕谈超对称

梅 健 伟

(中国科学院高能物理研究所)



爱德华·威滕博士是国际著名的数学家和物理学家,现任普林斯顿高等研究院教授;为美国科学院院士,英国皇家学会外籍院士。他于1951年8月26日出生于美国马里兰州的巴尔的摩。早年就学于布兰戴斯(Brandeis)大学,1971年获得学士学位,而后分别于1974年和1976年在普林斯顿获得硕士和博士学位。然后他前往哈佛大学,1976~1977年为博士后,1977~1980年为初级研究员。1980年9月威滕出任普林斯顿的物理学教授,并一直延续到1987年他出任高等研究院自然科学院的教授。此后,1997~1999年,查尔斯·西蒙讲座教授;1999~2001年,加州理工学院的访问教授。1985年威滕获阿尔伯特·爱因斯坦奖,并于同年获国际理论物理中心颁发的狄拉克奖。然后在1990年,他获得了被称为数学的诺贝尔奖的菲尔茨奖。1997年他获美国科学成就金奖。威滕至今已经发表了280多篇文章,被引用次数超过6万次,平均每篇超过两百次,是迄今为止论文被引用总次数最多的理论物理学家。2003年8月11~16日在美国费米国家加速器实验室召开了第21届国际高能轻光子会议,威滕在会上做了关于超对称的报告。这是一个对大多数人来说相对陌生的题目。为了让更多的人对超对称有所了解,我们把这个报告翻译成中文。除了因可读性要求作了一些小的改动之外,尽量保持了原文的风貌,希望对大家有所帮助。

从标准模型建立到现在三十多年以来,它的绝大多数方面获得了越来越好的验证——这甚至包括了CP破坏和最近报告的有关顶夸克的一些性质。然而,标准模型中也有一部分内容人们仍然知之甚少,至今没有获得明晰的实验信息,那就是弱电对称

性的破缺机制。

为什么弱作用在日常生活中远没有电磁作用那么明显?长久以来,这个问题一直使得人们相信新物理是应该存在的。而且不少人也相信,我们现在也许正接近发现这些新物理的边缘。在以后的几年

$$P \rightarrow nK^+ K^0$$

的数据,发现有 K^+n 共振峰。SAPHIR合作组给出的结果是: Λ^+ 粒子的质量为1540MeV,宽度为25MeV。

一年之内,有四个实验组相继宣布找到 Λ^+ 粒子存在的证据,看来 Λ^+ 粒子的存在是一个客观事实。理论家对它却有不同的解释。有人认为, Λ^+ 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^0p),也有其他的看法。实验上需要仔细测量 Λ^+ 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),才能最后确定 Λ^+ 粒子的性质。

欧洲核子中心CERN的著名理论家John Ellis则说,找到 Λ^+ 粒子是一个十分令人激动的事件,寻找新的强子谱似乎正处于开始阶段,这提供了一个检

验重子结构的夸克模型还是手征孤子模型的平台。

夸克模型是1962年由M. Gell-Mann和G. Zweig提出的。由于成功地预言存在由三个奇异夸克组成的 Ω^- (sss)粒子,M. Gell-Mann获得1969年诺贝尔物理奖。夸克模型已经40年持续地、成功地解释了强子谱的分类。如果手征孤子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。

如上所述,日俄美欧四个实验组,除了日本LEPS合作组重新进行实验之外,其余三个合作组均是分析已往的实验数据,从而发现了存在 Λ^+ 粒子的证据。这充分说明理论对实验的指导作用。

如果 Λ^+ 粒子的发现是寻找大量新强子谱的开始,那么,这是否意味着中国的高能粒子实验物理学家和高能粒子理论物理学家面对着一次作出世界创新成果的机会呢?