

粲夸克偶素强衰变中新的反常表现*

顾以藩 李新华

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 北京谱仪合作组利用其在北京正负电子对撞机上采集的 379 万 (2S) 数据研究了 (2S) 新的强衰变过程. 在未态为矢量 张量介子对 $f_2, a_2, K^{*0} \bar{K}_2^{*0}$ 及 $\psi_2(1525)$ 的衰变过程中观察到 (2S) 相对于 J/ψ 分支比的比值显著偏离理论预期值的反常表现.

关键词 粲夸克偶素, 强衰变, 矢量 张量末态

NEW ANOMALY IN HADRONIC DECAYS OF CHARMONIUM

Gu Yifan Li Xinhua

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

Abstract A sample of 3.79 million (2S) events produced in the BES detector at the BEPC collider is used to study new hadronic decays of the (2S). Measurements of (2S) decays to vector plus tensor meson final states, $f_2, a_2, K^{*0} \bar{K}_2^{*0}$, and $\psi_2(1525)$, reveal significant discrepancies with theoretical expectations.

Key words charmonium, hadronic decay, vector - tensor final state

在物理学发展过程中,特定的二体束缚系统经常被看成是研究该系统中二体所赖以维系的基本相互作用的最佳场所. 粲夸克偶素(简称粲偶素, charmonium)的发现向我们提供了考察夸克之间强相互作用(或称色力)的最简单的物理系统;作为一对正反夸克形成的束缚态,其在发展强相互作用规范场理论——量子色动力学(QCD)方面所起的作用,有如氢原子在发展量子力学(以及量子电动力学)方面所曾起过的重要作用,因此被喻为 QCD 的“氢原子”. 在现有各种夸克偶素中,粲偶素作为研究强相互作用的天然实验室有其突出的优点:在实验测量上,粲偶素具有较底偶素(bottomonium)为大的截面,因而更加有利于进行精确测量;在理论处理上,粲偶素虽然在相对论修正量(v^2/c^2)及强耦合常数(α_s)方面均较底偶素为大,但仍然可

以像底偶素那样适于采取非相对论近似和微扰处理.

诚如以上所述,在第一个粲偶素 J/ψ 粒子于 1974 年 11 月发现(丁肇中与 Richter 等)以后 20 多年来,我们关于粲偶素物理的知识依然十分匮乏^[1]. 在粲偶素家族中,唯一进行了广泛实验研究的是总内禀自旋为 1、轨道角动量为 0 的基态(按谱学标记法表为 1^3S_1),即 J/ψ 粒子的衰变性质. 其他粲偶素 (2S), $\psi_c(1S)$ 及 $\psi_{c,0,1,2}$ 三重态仅有非常有限的实验数据,并且绝大部分测量是在 70 年代末至 80 年代初期间完成的. 此外,还有两个理论上预期存在的粲偶素 $h_c(1P)$ 与 $\psi_c(2S)$ 粒子尚未得到实验的确证.

* 国家自然科学基金资助重大项目

1998 - 11 - 12 收到

迄今为止,对于粲偶素的理论描述在很大程度上基于唯象的(或者 QCD 引发的)模型,而不能和基础理论直接联系起来。

涉及 J/ψ 与 $(2S)$ 粒子的强衰变性质,出现了实验与理论之间的严重分歧。 $(2S)$ 是 J/ψ 的径向激发态 (2^3S_1),因此预期两者性质存在着许多相似性。按照微扰 QCD 理论的一般讨论 J/ψ 和 $(2S)$ 衰变成为强子 (h) 的过程在最低阶近似下主要是通过它们的正反组成夸克 $c\bar{c}$ 湮没成为 3 个胶子进行的,此时,衰变的部分宽度与其轻子衰变分支比一样正比于 $c\bar{c}$ 态的原点波函数的平方 $|\psi(0)|^2$,从而导出 J/ψ 与 $(2S)$ 相应衰变分支比 $B(J/\psi \rightarrow h)$ 与 $B[(2S) \rightarrow h]$ 之间的如下关系:

$$Q_h = \frac{B[(2S) \rightarrow h]}{B(J/\psi \rightarrow h)} \simeq \frac{B[(2S) \rightarrow e^+e^-]}{B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)} = (14.1 \pm 1.2) \%$$

式中采用了 J/ψ 及 $(2S)$ 轻子分支比 $B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$ 与 $B[(2S) \rightarrow e^+e^-]$ 的最近测量值^[1]。已有的实验表明,这个比例关系对于 J/ψ 及 $(2S)$ 的大部分遍举衰变道确实是成立的。但是,美国 SPEAR 正负电子对撞机上的 MARK 实验组于 1982 年发现了例外的情况^[2]:两个末态为矢量介子与赝标量介子的衰变道 $J/\psi \rightarrow K^*K$ 和 $(2S) \rightarrow K^*K$,所测得的 Q_h 值远远低于 14% 的比例关系,实验与理论的分歧达到一个数量级以上。这个反常表现被称做“疑难”,虽然先后激发了许多理论工作,提出各种可能的机制^[3]给以解释,但是至今没有一种解释得到了确认。形成这种局面的一个重要因素是 80 年代以来粲偶素物理实验研究很快陷入了停顿状态,在 $(2S)$ 强衰变方面几乎没有增添新的数据。

在这种背景情况下,北京谱仪(BES)国际合作组在中方科学家的倡导和推动下,于 1992 年起在北京正负电子对撞机(BEPC)上开展了粲偶素物理的实验研究,其中一项重要内容即是对于 $(2S)$ 与 J/ψ 强衰变性质的比较研究。由我国科技人员自行设计建造的 BEPC 对撞机工作在 3—5.6 GeV 质心能量范围,可以方便地

将正负电子束对撞的质心能量调到 $(2S)$ 共振能量 3.686 GeV 处,以大约 5×10^4 个/天的事例率采集相当干净的 $(2S)$ 事例。也是由我国科技人员自行设计建造的北京谱仪是一台由多种子探测器组合而成的大型通用型磁谱仪。这些子探测器包括中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器和 μ 子计数器等,围绕对撞机束流管壁依次由内向外分布。利用它们提供的各种信息触发电子学系统,确定带电粒子 ($\pi, K, p, \bar{p}, e, \mu$ 等)、光子以及衰变为光子的中性强子 (η, η') 的动量、能量、位置等,并进行粒子识别,由此重建起正负电子湮没产生的 $(2S)$ 衰变以及其他物理过程。

通过 1993 年 12 月至 1994 年 1 月以及 1995 年初先后两次运行,北京谱仪总共记录了 3.79×10^6 $(2S)$ 事例数^[4]。这个数据量约为 MARK 数据量的 4 倍,超出了 20 多年来国际各实验组采集的 $(2S)$ 数据总和,成为当前世界上最大的 $(2S)$ 数据样本,为开展粲夸克偶素物理实验研究创造了独一无二的良好条件。

利用采集到的 $(2S)$ 数据,BES 合作组广泛探索并测量了 $(2S)$ 各种可能的二体强度衰变过程。我们首先重新寻找了 $(2S) \rightarrow \eta$ 及 K^*K 衰变道,证实了 MARK 的实验结果:这两个在 J/ψ 衰变中分支比很大的过程在 $(2S)$ 衰变中是严重压制的。北京谱仪的高统计性测量将它们的分支比上限显著下推,从而进一步突显了“疑难”的存在^[5]。

在探索 $(2S)$ 新的衰变模式的过程中,BES 合作组首次观察到了 $(2S)$ 通过强子共振态的二体衰变模式 $(2S) \rightarrow \psi(0)$ 及 $(2S) \rightarrow b_1$,并测得它们的分支比在实验误差范围内与理论预期的大小是一致的^[6,7]。但是,当我们试图在 $(2S)$ 衰变中寻找与 b_1 同为 J/ψ 的主要中间过程的 f_2 二体衰变模式时,却发现扣除本底的 f_2 事例数仅为 8.8 ± 9.2 个,与 b_1 具有明显信号的情况形成强烈对比。由此定出的 $(2S) \rightarrow f_2$ 衰变分支比上限与 J/ψ 相应分支比相比显著低于理论预言的 14% 关系^[7]。

在发现了首例 $(2S)$ 衰变为矢量-张量介子物理

子对 f_2 的反常表现后,我们进而在 (2S) 衰变为 $^+ - ^+ - ^0$, $^+ - K^+ K^-$ 和 $K^+ K^- K^+ K^-$ 末态中研究其他可能的矢量-张量(VT)中间二体过程: a_2 , $K^{*0} \bar{K}_2^{*0}$ 及 $\psi_2(1525)$. 结果发现这4个(2S) VT衰变模式具有十分相似的反常表现,如表1中数据所示,它们相对于 J/ψ 相应衰变道的分支比均显著压制,其中 $K^{*0} \bar{K}_2^{*0}$ 的 Q_h 值上限偏离理论预言的14%关系已接近于一个数量级^[8].

表1 (2S) VT衰变分支比上限测量结果与 J/ψ 数据的比较

衰变道	$B[(2S)]$, $\times 10^{-4}$ *	$B(J/\psi)$, $\times 10^{-3}$ ^[11]	Q_h
f_2	< 1.7	4.3 ± 0.6	< 0.040
a_2	< 2.3	10.9 ± 2.2	< 0.021
$K^{*0} \bar{K}_2^{*0}$	< 1.2	6.7 ± 2.6	< 0.018
ψ_2	< 0.45	$1.23 \pm 0.06 \pm 0.20$	< 0.037

*置信水平 90 %

在北京谱仪上的这项发现突破了长期以来关于粲偶素强度变中的反常表现局限于矢量-赝标量(VP)衰变模式及 $K^* \bar{K}$ 的认识,反常扩展到了矢量-张量(VT)衰变模式,从而首次提供了(2S)衰变中不同类型的介子组合以及同类组合下不同介子味道的新的重要信息.值得进一步指出的是^[9]:在微扰 QCD 理论的夸克图像中 J/ψ 或 (2S) VT 是强子螺旋性守恒定理容许的过程,而 J/ψ 或 (2S) VP 则是强子螺旋性守恒定理禁戒的过程.因此,新的反常现象可能有着更深的物理涵义.

BES 合作组的以上研究进展早在有关国际学术会议上报道时即已受到了粒子物理理论界的重视,分析显示^[3]:矢量-张量反常现象连同北京谱仪另外一些实验结果向关于“疑难”的已有理论模型提出了新的挑战.在北京谱仪实验的激发下,沉寂多年的理论工作又活跃起来,在最近两年内接连提出了若干新的理论模型^[10].

继两篇关于粲偶素强衰变反常研究的论文

先后在美国《Physical Review D》(物理评论)上发表^[11]后,BES 合作组以“(2S) Hadronic Decays to Vector - Tensor Final States”为题的论文也已被接受在近期的美国《Physical Review Letters》(物理评论快报)上发表^[8].在该刊对文章组织证审的意见中写道:“本文提供了急需的实验输入数据,将有助于粲偶素衰变中一个悬而未决的疑难的解决”.

参 考 文 献

- [1] Particle Data Group, Caso C *et al.* Eur. Phys. J., 1998, C3:1-794
- [2] Franklin M E B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 34:43-45
- [3] Chao K T. Physics in Charm Energy Region. In: Proceedings of the 17th Intern. Symp. on Lepton and Photon Interactions at High Energies, Beijing, China, 1995. Singapore: World Scientific, 1996. 106-129(以及其中所引文献)
- [4] BES Collaboration, Bai J Z *et al.* Phys. Rev., 1998, D58: 92006 - (1-6)
- [5] BES Collaboration, Bai J Z *et al.* Phys. Rev., 1996, D54: 1221 - 1224; BES 合作组. 高能物理与核物理, 1996, 20:481-490
- [6] Gu Y F. Results on Hadronic (2S) Decays into VP and VT Final States. In: Proceedings of the 9th Meeting of the Division of Particles and Fields of American Physical Society, Minneapolis, USA, 1996. Singapore: World Scientific, 1998, 986-988
- [7] BES 合作组. 高能物理与核物理, 1995, 19:93-96
- [8] BES Collaboration, Bai J Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:5080-5084
- [9] Gu Y F, Tuan S F. Mod. Phys. Lett., 1995, A10:615-618
- [10] Li X Q, Bugg D V, Zou B S. Phys. Rev., 1997, D55: 1421-1424; Brodsky S J, Karliner M. Phys. Rev. Lett., 1997, 78:4682-4685; Chen Y Q, Braaten E. Phys. Rev. Lett., 1998, 80:5060-5063
- [11] BES Collaboration, Bai J Z *et al.* Phys. Rev., 1998, D58: 097101 - (1-4)