

粲夸克偶素强衰变之谜*

顾以藩

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 北京正负电子对撞机上的最新实验研究结果在高灵敏度水平上展现了粲夸克偶素物理中的强衰变之谜. 新反常衰变道的发现突破了这个谜的原有图像, 对理论提出了新的挑战.

关键词 粲夸克偶素, 强衰变, 反常

Abstract Recent experimental results obtained at Beijing Electron-proton Collider sensitivity level the crisply defined nature of the hadronic decay puzzle in charmonium physics. Discovery of new anomalous decay modes breaks with the previously established pattern of the puzzle, and poses new challenges for its theoretical understanding.

Key words charmonium, hadronic decay, anomaly

1974年11月, J/ψ 与 $\psi(2S)$ 粒子的发现, 是粒子物理学中被称作“11月革命”的重大历史事件. 这个发现不仅让人们认识了一类新的介子, 而且促成了新的物质观念的确立: 原来看起来不可分割的数百种基本粒子(其中包括作为原子核基本组成的中子与质子)实际上都是由更为基本的物质单元——夸克与反夸克构成的. J/ψ 和 $\psi(2S)$ 粒子是正反粲夸克束缚在一个非相对论势中的二体系统; 鉴于这种系统与已知的电子偶素具有结构上的相似性, 因此被称做粲夸克偶素. 就象电子偶素有许多态一样, 粲夸克偶素也有整整一个家族: J/ψ 是总内禀自旋为 1、轨道角动量为 0 的基态, 表为 1^3S_1 , 而 $\psi(2S)$ 则是 J/ψ 的径向激发态, 即 2^3S_1 .

经过 20 多年来的实验与理论研究, 人们对于粲夸克偶素的认识仍然未能达到完美的程度. 诚然, 许多实验结果相当成功地成为量子色动力学以及在其基础上发展起来的势模型与求和规则等理论所描述; 但是与此同时也发现了当前理论所无法解释的实验现象^[1], 从而提出了新的研究课题.

北京正负电子对撞机国家实验室北京谱仪

(BES)合作组¹⁾的中国科学家们, 在美国同行的密切配合下, 近年来正致力于粲夸克偶素物理中的一个重大疑案——粲夸克偶素强衰变之谜的研究.

最早发现这个谜的是美国 SPEAR 对撞机上的 MARK I 实验组^[2]. 在比较 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 的一系列衰变道分支比的测量结果时, 这个组观察到: 对于大部分衰变道来说, $\psi(2S)$ 和 J/ψ 的相对比值基本保持为常数而与量子色动力学预期的 15% 规则在实验误差范围内一致. 但是有两个例外, 其衰变末态分别是 $\rho\pi$ 与 $K^+\bar{K}$; 它们在 J/ψ 的衰变过程中都占有显著份额(分支比大), 而在 $\psi(2S)$ 情况下, 却根本观察不到, 大

* 1995年9月25日收到.

1) 北京谱仪(BES)合作组是由中、美两国物理学家组成的高能物理实验组. 中国方面参加单位有中国科学院高能物理研究所、中国科技大学和山东大学等; 美国方面参加单位有 Boston University, California Institute of Technology, Colorado State University, Massachusetts Institute of Technology, Stanford Linear Accelerator Center, University of Hawaii at Manoa, University of California at Irvine, University of Texas at Dallas, University of Washington 和 Superconducting Super Collider Laboratory.

大偏离了理论预言的 15% 规则. 这种反常行为由于是在 $\rho\pi$ 衰变末态中首先发现的, 就被称作 $\rho\pi$ 之谜; 又因为 $\rho\pi$ 和 $K^+\bar{K}$ 都是一个矢量介子和一个赝标量介子的组合, 有时也被称作矢量-赝标量之谜.

由于这种反常的表现十分突出, 很快就引起了理论工作者的注意, 提出了这样那样的解释方案. 其中最被看好的一种方案是美国 Brodsky, Lepage 和 Tuan (在 Nambu, Freund, Hou 和 Soni 的基础上) 提出来的: 假设一个质量与 J/ψ 相近的矢量胶球的存在, 它与 J/ψ 的量子力学混合造成了 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ 分支比的反常增大^[3]. 显然, 为了证明这种解释是对的, 就需要寻找衰变到 $\rho\pi$ 末态的矢量胶球的证据.

在开展粲夸克偶素强衰变之谜的研究时, BES 合作组首先重新测量了 $\psi(2S) \rightarrow \rho\pi$ 和 $K^+\bar{K}$ 两个衰变道的分支比^[4], 来检验 MARK I 发现的反常是否确实存在. 这是必要的, 因为 MARK I 的实验结果发表以来实际上未曾经过其他实验组的严格验证. 在 BES 合作组采集的 127 万 $\psi(2S)$ 强子衰变事例中, 扣除本底之后, 没有发现一例 $\psi(2S) \rightarrow \rho\pi$ 或 $K^+\bar{K}$ 衰变. 考虑到测量分析过程中的效率因素, 可以确定这两道分支比的上限值: 在 90% 置信度情况下, 它们分别小于 3.6×10^{-5} 和 2.4×10^{-5} , 比 MARK I 的原有上限向下推了足足一倍有余. 新的测量结果与 J/ψ 相应衰变分支比的比值成为 < 0.0028 和 < 0.0048 , 偏离理论预期的 0.15 分别达到 50 倍和 30 倍以上, 从而无可置疑地展现了粲夸克偶素强衰变之谜.

在如此明显的反常现象背后, 究竟是否确实存在着一个矢量胶球呢? 这不仅对于解开 $\rho\pi$ 之谜要求认真回答, 而且寻找胶子束缚态本身更是粒子物理学的重大课题. 值得指出的是, 这样重要的工作, 由于实验条件的限制, 迄今还没有人认真进行过. BES 合作组第一次采用了一种新方法来寻找 Brodsky 等人所预言的矢量胶球^[4]. 这种方法的基本思想是: 矢量胶球与 J/ψ 的量子力学混合导致 J/ψ 共振峰形状的畸变;

因此, 通过在 J/ψ 峰区的能量扫描, 可望观察到 $e^+e^- \rightarrow \rho\pi$ 截面的能量关系与 $e^+e^- \rightarrow$ 强子总截面的能量关系之间的显著区别, 从而提供矢量胶球存在的证据. 事实上, BES 合作组早已有了 J/ψ 能区的扫描数据, 那是为了测量 J/ψ 共振参数而取的. 这批数据正好可以用于上述检验. 采用最大似然法进行细致分析, 得出了否定的结论: $\rho\pi$ 的与总强子的截面在 J/ψ 峰区的形状在实验误差范围内存在着很好的一致性, 没有找到足以支持质量与 J/ψ 相近的矢量胶球存在的证据. 看来, Brodsky 等人的模型无法解释 $\rho\pi$ 之谜!

利用采集了的 $\psi(2S)$ 数据, BES 合作组广泛研究了 $\psi(2S)$ 的许多新的二体衰变道. 现已得到的结果表明: 其中一些道的衰变分支比与 J/ψ 相应分支比之比确实是遵守理论预期的规律的, 这样的衰变末态有 $b, \pi, P\bar{P}, \Lambda\bar{\Lambda}, \Sigma\bar{\Sigma}$ 和 $\Xi\bar{\Xi}$ 等^[4]; 但是末态为矢量-张量介子组合的衰变道 ωf_2 和 $a_2 p$ 则显示了明显压制的现象, 表现在 ωf_2 上, 测量结果偏离了理论预言值 7 倍^[4,5].

这项发现突破了多年来认为粲夸克偶素强衰变之谜局限于末态为矢量·赝标量组合的图像, 反常表现扩展到了矢量·张量组合的末态. 但是, 它的物理含义还不止于此. 用微扰量子色动力学 (PQCD) 理论的强子螺旋性守恒定理来考察, 可以看到^[6]: J/ψ 或 $\psi(2S) \rightarrow \omega f_2$ 是强子螺旋性守恒定理容许的过程, 因此实验上观察到 J/ψ 具有相当大的分支比应属正常, 而 $\psi(2S)$ 的受压则是反常的; 反之, J/ψ 或 $\psi(2S) \rightarrow \rho\pi$ 是强子螺旋性守恒定理禁戒的过程, 因此实验上观察到 $\psi(2S)$ 压制是正常的现象, 而 J/ψ 具有如此大的分支比反倒成为反常的了. 看来要统一地解释这两种反常现象并不容易, 矢量胶球假设是难以胜任的. 这就对理论提出了新的挑战.

对于北京对撞机上的实验结果, 理论家们作出了积极的反响. 长期从事 QCD 理论研究的 S. J. Brodsky (美国 SLAC 和斯坦福大学) 在不久前举行的国际重味与弱电理论讨论会上

总结了当前 QCD 中的新现象,其中第一项便提到了 BES 合作组的结果.他强调这些结果“违反 PQCD 强子螺旋性守恒以及人们对于粲夸克偶素的基本认识”.重夸克有效理论(HQET)提出者之一 M. B. Wise (加州理工学院)确认说:“粲夸克偶素强衰变之谜确实是一个谜!”E. Braaten 在成功地解释了超高能 $P\bar{P}$ 反应中观察到的“ $\psi(2S)$ 过剩”现象^[7]之后,已表示要将粲夸克偶素强衰变之谜提上他的研究日程.我国一些理论工作者从一开始就和 BES 合作组建立了密切联系,自始至终注视着实验中每项新的进展,为寻找这个疑案的解答作出了不懈的努力.

最近,BES 合作组通过北京正负电子对撞机新一轮运行又采集了将近两倍已有的 $\psi(2S)$ 数据,从而建立了目前世界上最大的 $\psi(2S)$ 数据样本.这就为进一步开展粲夸克偶素强衰变性质以及其他物理课题的深入研究创造了新的良好条件.

人们期待着未来若干年内新的实验与理论进展.

参 考 文 献

- [1] S. J. Brodsky, Talk presented at 4th International Conference on Physics beyond the Standard Model, Lake Tahoe, California, Dec. 13-18, 1994, SLAC-PUB-95-6781(1995).
- [2] M. E. B. Franklin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 963.
- [3] S. J. Brodsky et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 621.
- [4] BES Collaboration, Contributed Papers, XVIth International Symposium on Lepton and photon Interactions, Beijing, Aug. 10-15, 1995.
- [5] BES 合作组, *高能物理与核物理*, **19**(1995), 93.
- [6] Y. F. Gu and S. F. Tuan, *Mod. Phys. Lett. A*, **10**(1995), 615.
- [7] E. Braaten and S. Fleming, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 3327.

半导体激光器的进展(I)

王 启 明

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室,北京 100083)

摘 要 经历了 40 年的发展,半导体激光器已经成为激光大家族中的极为重要的一员,由它引申发展的半导体光子学、集成光电子学已成为信息高科技的重要支柱,正在推动着诸如光通信、光信息处理、光互连、光计算等重要前沿应用领域的发展.该文从原理、结构出发,按其发展阶段的顺序有机地回顾回顾了同质结构、异质结构、量子阱结构、分布布拉格反馈结构、垂直腔面发射结构以及最新发展的单极性注入半导体激光器的进展及其主要应用,同时对其未来的发展作出了展望.

关键词 半导体,异质结构,量子阱,激光器

Abstract According to the principles and structures of semiconductor laser diodes, this paper systematically reviews and briefly discusses the progress and the main application of them in the order of their developing stages, including the lasers with homostructures, heterostructure, quantum wells, distributed Bragg feedback structures, vertical cavity surface emitting structures, and currently developed unipolar injection structures. Finally, the prospects of this field are also related.

Key words semiconductor, heterostructure, quantum well, laser diodes

1995 年 6 月 20 日收到初稿,1995 年 9 月 16 日收到修改稿.