

BEPC 共振事例的碎裂特性*

刘希明¹⁾ 张学尧 王海龙 王玉水
(山东大学物理系 济南 250100)

摘要 发现 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow 3g$ 三胶子碎裂的末态强子多重数 $\langle n \rangle$ 满足与 $e^+e^- \rightarrow q_0q_0$ 连续区事例相同的普适质量关系 $\langle n \rangle = A \frac{2S+1}{2I+1} \exp(-bm^2)$. 表明胶子、夸克碎裂成强子时有相同的规律性. 同样可以把参数 A 解释为直生介子、重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$. 虽然对 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 与连续区事例进行比较, 末态重子多重数增高 2.5 倍, 但是利用我们对 $J/\psi \rightarrow 3g$ 共振区的计算研究, 没有发现 $J/\psi \rightarrow 3g$ 事例有类似的特征.

关键词 高能反应 胶子碎裂 强子多重数 普适质量关系

1 引言

高能 e^+e^- 湮没后通过电(弱)作用产生的初始夸克 q_0q_0 可以进一步通过强相互作用辐射胶子形成多喷注事例. 强子喷注是夸克、胶子碎裂的结果, 反映了夸克、胶子碎裂成强子的重要信息, 是认识强相互作用机制检验 QCD 预言的重要途径. 其中夸克与胶子碎裂成强子时的差异是人们普遍关注的重要问题. 夸克胶子碎裂强度由色因子决定, 碎裂过程 $q \rightarrow qg$ 与 $g \rightarrow gg$ 的耦合强度分别是 $C_F = 4/3$, $C_A = 3$, 因此一个朴素的理解是胶子、夸克碎裂的带电粒子多重数之比为 $\langle n_g \rangle / \langle n_q \rangle \approx \langle C_A \rangle / \langle C_F \rangle = 9/4$. 由于实验上无法直接观察到自由的夸克与胶子, 一般通过 $e^+e^- \rightarrow q_0q_0g \rightarrow 3\text{jets}$ 三喷注末态强子事例研究夸克与胶子碎裂, 通过末态强子难以严格区分夸克、胶子喷注, 同时也难以挑选出能量相同的两种强子喷注进行比较, 因此这个朴素理解需要实验的进一步检验. 但实验上观察到的三喷注事例末态粒子分布的“弦效应”, 是对初始夸克、胶子通过色相互作用形成两个色单态独立碎裂图像的直接检验, 这个图像被广泛用来研究夸克与胶子碎裂. 事实上共振事例 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow 3g$ 与 $e^+e^- \rightarrow \Upsilon \rightarrow 3g$ 三胶子衰变成强子过程是研究胶子碎裂的理想途径. 因为这是纯粹胶子碎裂, 实验上没有区分夸克、胶子喷注的困难, 也不会因为喷注轴之间夹角模糊带来确定喷注能量时的不确定性. ARGUS 实验组^[1]对 Υ 共振事例末态粒子多重数进

2001-07-25 收稿, 2001-11-11 收修改稿

* 北京正负电子对撞机国家实验室开放课题

1) E-mail: xmliu@edu.edu.cn

行了比较广泛细致的测量,发现 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 三胶子碎裂产生的重子多重数是相近连续区 $e^+e^- \rightarrow q_0\bar{q}_0 \rightarrow 2\text{jets}$ 事例的 2 倍多,表明胶子,夸克碎裂成重子时的重大区别. 这一重要特征各种模型都无法合理解释,只有 Lund 模型能够定性解释^[2]. 北京谱仪(BES)^[3]对 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow 3g$ 多粒子产生过程末态粒子多重数进行了测量,给出胶子碎裂的许多重要信息. 由于实验无法与相近连续能区数据比较,是否存在重子产率变大现象并不清楚,这也是本文要讨论的问题.

由于部分子碎裂成强子的软过程只能借助唯象理论模型描述,而这些模型^[4]在解释实验时带有许多附加机制和自由参数,人们试图寻找更普适的规律性,用不多的参数就能解释实验. 最近人们对 e^+e^- 湮没以及 pp 反应的末态粒子产额分析中发现存在一个简单规律^[5], $SU(3)$ 九重态赝标介子与矢量介子,八重态与十重态重子多重数 $\langle n \rangle$ 仅由粒子质量 m 、自旋 S 以及同位旋 I 确定,对所有粒子都满足一简单普适关系

$$\langle n \rangle = A \frac{2S+1}{2I+1} \exp(-bm^2), \quad (1)$$

拟合实验给出普适参数 $b = 3.872 \pm 0.027 (\text{GeV}/c^2)^{-2}$ (与反应质心能量 \sqrt{s} 以及具体过程无关). 随反应质心能量变化,而且与高能反应具体过程有关的参数 A 仍需要进一步拟合实验给出,这样不需引入任何其它参数与附加机制就能够拟合出与实验一致的各种末态粒子多重数. 但这个质量关系自身无法解释指数函数的物理意义,也不能给出参数 A 的数值. 我们在文献[6]中通过严格计算证明了参数 A 就是高能反应直接产生的平均介子与重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$, 并通过详细的计算给出了 e^+e^- 湮没、 Υ 衰变以及 $pp(\bar{p})$ 反应过程中参数 A 随反应质心能量的关系,对参数 A 的物理意义给出一个合理解释. 事实上用粒子的质量作为基本参数描述粒子产率,在修正的 Lund 模型^[7] UCLA 中得到的夸克碎裂函数 $\exp(-bm^2)$ 就包括了粒子的质量,只需 5 个自由参数就能够很好解释实验.

对 BEPC 低能区 $J/\psi \rightarrow 3g$ 纯粹胶子碎裂过程,强子多重数是否同样满足简单的质量关系目前并不清楚. 本文的目的就是阐明 $J/\psi \rightarrow 3g$ 碎裂的强子多重数满足 e^+e^- 连续区同样的质量依赖关系. 通过分析发现 $J/\psi \rightarrow 3g$ 事例参数 b 取值比连续区变大,质量公式中的参数 A 同样可以解释为直接产生的平均介子与平均重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$. 共振事例参数 b 的改变反映出胶子、夸克碎裂成重子时的不同. 虽然 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 事例重子多重数比相近连续区变大,但我们的计算没有发现 $J/\psi \rightarrow 3g$ 事例具有类似的特征.

2 BEPC 共振事例强子多重数的质量关系

利用公式(1)对 BEPC-BES 合作组^[3]的 $J/\psi \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 实验结果进行了分析. 图 1 给出多重数与强子质量的关系曲线. 可以看出末态粒子多重数 $\langle n \rangle$ 同样满足普适的质量关系,得出的参数是 $A = 2.38 \pm 0.11$, $b = 3.99 \pm 0.07$. 作为比较,在图中分别给出 $b = 3.55$ (点线, Υ 事例参数), $b = 3.87$ (虚线, 连续区参数) 与 $b = 3.99$ (实线, J/ψ 事例) 3 种情况的比较,显然利用 Υ 事例与 $q_0\bar{q}_0$ 事例的参数 b 给出的曲线都偏离实验,特别对质量比较大的重子偏离更明显. 正是由于参数 b 的不同导致 Υ 事例重子多重数变大,而 J/ψ 事例几乎不变.

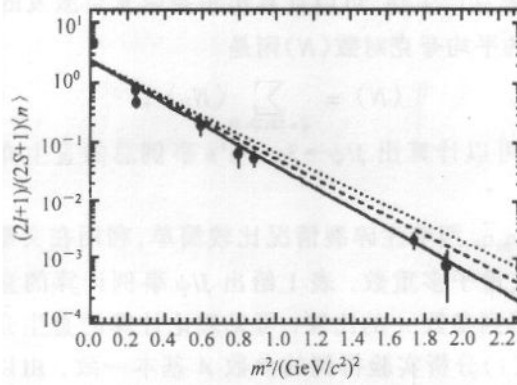


图 1 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow 3g$ 事例粒子多重数与质量的关系

3 BEPC J/ψ 事例平均直生介子重子多重数

J/ψ 是 $c\bar{c}$ 夸克偶素, PQCD 预言^[8] J/ψ 与 Υ 一样主要通过三胶子中间态衰变为末态强子. 因为碎裂过程 $J/\psi \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 的初态 J/ψ 与末态强子 $h's$ 都是色单态, 虽然胶子是色八重态, 但三胶子中间态色波函数必须处于色单态, 即要求满足关系 $1 \rightarrow 8 \otimes 8 \otimes 8 \rightarrow 1$. 通过对三胶子色波函数的系统分析^[9], 发现有 97% 的几率形成 3 条连接 3 个胶子的三重态色引力弦, 这 3 条弦相互联接的一个封闭三角形构成色单态, 每条弦与同 $q_0\bar{q}_0$ 系统一样通过 QCD 真空激发产生新夸克对, 所有产生的夸克共同组合成末态强子. 分别用 E_1, E_2, E_3 与 p_1, p_2, p_3 表示 J/ψ 质心系中 3 个胶子的能量与动量, 用 m 表示 J/ψ 的不变质量. 能量、动量守恒要求满足关系

$$m = E_1 + E_2 + E_3, \quad 0 = p_1 + p_2 + p_3, \quad (2)$$

式中已利用了胶子质量为零的假设 $E_i = p_i$. 胶子 i 的动量 p_i 与胶子动量方向之间夹角满足关系

$$p_i = \frac{m \sin \theta_i}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3}, \quad (3)$$

而胶子 i 与 j 之间形成的色引力弦的能量 E_{ij} 与动量 p_{ij} 分别是

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(E_i + E_j) = \frac{1}{2}(|p_i| + |p_j|), \quad p_{ij} = \frac{1}{2}(p_i + p_j), \quad (4)$$

该弦用于 QCD 真空激发产生新夸克对的有效能量就是弦的不变质量, 为

$$m_{ij} = \sqrt{E_{ij}^2 - p_{ij}^2} = \sqrt{\frac{1}{2}E_i E_j (1 - \cos \theta_k)}, \quad (5)$$

利用以上各式最后求出

$$m_{ij} = m \frac{\sqrt{\sin \theta_i \sin \theta_j}}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin \theta_3} \sin \frac{\theta_k}{2}, \quad (6)$$

以上式中 i, j, k 取 1, 2, 3 轮换, θ_k 是动量 p_i 与 p_j 方向之间的夹角. 利用上面的有效能量

按照文献[6]中提出的“夸克产生律”可以计算出每条弦真空激发的平均夸克对数 $\langle N_{ij} \rangle$, 而 $J/\psi \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 事例总的平均夸克对数 $\langle N \rangle$ 则是

$$\langle N \rangle = \sum_{ij=12,23,31} \langle N_{ij} \rangle, \quad (7)$$

然后利用“夸克组合律”可以计算出 $J/\psi \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 事例总的直生介子、重子平均多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$.

对于相近连续能区 $q_0 \bar{q}_0$ 两喷注碎裂情况比较简单, 利用在文献[6]中采用的方法同样可以计算出直生介子、重子多重数. 表 1 给出 J/ψ 事例计算的直生介子、重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$ 与分析实验得到参数 A 的比较. 可见理论计算的直生介子、重子平均多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$ 与利用公式(1)分析实验得到的参数 A 基本一致. 由以上分析可知 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow 3g$ 粒子多重数同样满足 e^+e^- 连续能区粒子多重数相同的质量关系, 而且质量关系中的参数 A 也是直生介子、重子多重数. 表明 J/ψ 三胶子、夸克碎裂成强子相似的规律性.

表 1 直生介子重子多重数

事例类型	$\langle M \rangle + \langle B \rangle$	参数 A	参数 b
$J/\psi \rightarrow 3g$ 衰变	2.42	2.38 ± 0.11	3.99 ± 0.07
3GeV $q_0 \bar{q}_0$ 连续区	2.02		3.87 ± 0.03

4 J/ψ 三胶子碎裂的特性

利用上面的结果可以给出 J/ψ 事例与相近连续区粒子产率的比值, 把上面计算的 $3g \rightarrow h's$ 事例与连续区的平均介子、重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$ 代替公式(1)中的参数 A , 并分别用不同的参数 b , 这个比率表示为

$$R = \frac{\langle n \rangle_{J/\psi \rightarrow 3g}}{\langle n \rangle_{q_0 \bar{q}_0}} = \frac{\langle M + B \rangle_{J/\psi \rightarrow 3g}}{\langle M + B \rangle_{q_0 \bar{q}_0}} \exp[-(b_{J/\psi \rightarrow 3g} - b_{q_0 \bar{q}_0}) m^2]. \quad (8)$$

利用粒子性质表给出的质量, 表 2 给出计算的 J/ψ 事例与相近连续区重子多重数比率. 实验上发现^[1] $\Upsilon \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 事例三胶子碎裂产生的重子多重数是相近连续区 $q_0 \bar{q}_0 \rightarrow 2jets$ 事例的 2 倍多, 作为对比, 表 2 中也列出了 $\Upsilon \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 事例的结果. 由表 2 看出, 对于 J/ψ 事例质量越大的重子比率 R 反而越低, 大部分重子是 $R < 1$, 平均比率为 $R = 0.97 \approx 1$. 这与 $\Upsilon \rightarrow h's$ 事例正好相反, 重子多重数平均比率为 $R = 2.35$. 同样可以分析介子情况, 由于介子质量比较低, 质量平方后就更小, 使得(8)式中指数函数近似为 1, 而连续区与共振事例的直生介子、重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$ 也很接近(见表 1), 使得介子比率接近 1, 这与实验也是基本一致的.

利用(8)式可以计算奇异强子与非奇异强子比率得到抑制因子 λ . 表 3 给出 J/ψ 事例与相近连续区结果的对照以及与实验结果的比较. 我们得到的结果基本与实验一致, 但 J/ψ 事例与连续区存在细微差别. 因为连续区夸克产生包括电磁作用与强作用两个过程, J/ψ 共振事例夸克产生仅有强作用过程. 电磁过程产生几率为夸克电荷平方, 与强作用产生几率 $u:d:s = 1:1:\lambda$ 是不同的, 这是引起奇异抑制不同的原因.

表 2 两种共振事例与相近连续区重子多重数比率 R

重子	$\Upsilon \rightarrow 3g$ 事例		$J/\psi \rightarrow 3g$ 事例
	理论预言	实验结果	本文预言
$\langle P + \bar{P} \rangle$	1.81	1.87 ± 0.16	1.06
$\langle \Lambda + \bar{\Lambda} \rangle$	2.03	$2.48 \pm 0.09 \pm 0.31$	1.00
$\langle \Xi^- + \bar{\Xi}^- \rangle$	2.38	$3.08 \pm 0.37 \pm 0.47$	0.94
$\langle \Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0 \rangle$	2.14	$2.48 \pm 1.05 \pm 0.72$	0.92
$\langle \Sigma^{*-} + \bar{\Sigma}^{*-} \rangle$	2.52	$2.57 \pm 0.59 \pm 0.58$	0.91
$\langle \Sigma^{*+} + \bar{\Sigma}^{*+} \rangle$	2.51	$3.28 \pm 0.83 \pm 0.74$	0.92
$\langle \Xi^{*0} + \bar{\Xi}^{*0} \rangle$	2.89	$3.27 \pm 1.39 \pm 0.67$	0.86
$\langle \Omega^- + \bar{\Omega}^- \rangle$	3.33	$2.54 \pm 1.54 \pm 0.64$	0.81

表 3 奇异抑制因子

粒子	J/ψ 事例	相近连续区	J/ψ 实验
$K^{*+}/2\rho^0$	0.34	0.32	0.29 ± 0.15
K^{*0}/ρ^0	0.34	0.32	0.28 ± 0.11
K^*/π^+	0.30	0.29	0.25 ± 0.05
K_s^0/π^0	0.30	0.29	0.33 ± 0.04

5 小结与讨论

我们把分析 $e^+e^- \rightarrow q_0\bar{q}_0 \rightarrow 2\text{jets}$ 事例得到的末态粒子多重数与粒子质量的普适关系推广到 $J/\psi \rightarrow 3g$ 碎裂, 发现强子多重数满足同样的质量依赖关系. 对于 BEPC 能区纯粹胶子碎裂情况同样可以把与反应质心能量、反应类型有关的参数 A 解释为直生介子、重子多重数 $\langle M \rangle + \langle B \rangle$, 给质量公式中的参数一个合理解释. 对于 $J/\psi \rightarrow 3g$ 事例, 实验上没有发现重子多重数增高的现象, 按照我们的计算也得不到重子多重数增高的预言, 这反映了 J/ψ 与 Υ 碎裂成重子时的不同. 对这个现象一个很自然的理解是因为反应能量过低不足以产生大质量的重子.

利用质量关系无需引入其他假定, 仅需粒子质量、自旋、同位旋这些最基本的量子数就可以完全解释粒子多重数实验, 表明粒子的质量是描述粒子多重数更基本的物理量, 这是非常有意义的. 粒子多重数是粒子质量的指数函数关系也能够通过严格计算直接得到, 我们将在另文详细讨论, 对这个质量关系的意义做出一个合理解释.

参考文献 (References)

- 1 Albrecht H et al (ARGUS Collab.). *Z. Phys.*, 1988, **C39**:177—186; *Phys. Lett.*, 1989, **B230**:161—169; *Phys. Lett.*, 1988, **B215**:329—334; *Phys. Lett.*, 1987, **183B**:419—423
- 2 Scheek H. *Nucl. Phys.*, 1988, **B1**(proc. suppl):291—302
- 3 BES Collab. *HEP & NP*, 1997, **21**:961—969 (in Chinese)
(BES 合作组. 高能物理与核物理, 1997, **21**:961—969)
- 4 Andersson B et al. *Phys. Rep.*, 1983, **97**:31; Marchesini G, Webber B R. *Nucl. Phys.*, 1994, **B238**:1
- 5 Chliapnikov P V et al. *Phys. Lett.*, 1995, **B345**(2):313—320; Szczkowski M. *Phys. Lett.*, 1995, **B359**(2):387—392; Szczkowski M, Wilk G. *Phys. Lett.*, 1996, **B374**:225—230; Chliapnikov P V, Uvarov V A. *Phys. Lett.*, 1996, **B381**:483—485
- 6 LIU Xi-Ming, ZHANG Xue-Yao et al. *HEP & NP*, 2001, **25**(5):777—782 (in Chinese)
(刘希明, 张学尧等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(5):777—782)
- 7 Chun S B, Buchanan C D. *Phys. Lett.*, 1993, **B308**:153
- 8 Appelquist T et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **34**:43
- 9 TIAN Li-Li et al. *HEP & NP*, 1993, **17**:717 (in Chinese)
(田丽丽等. 高能物理与核物理, 1993, **17**:717)

Fragmentation Character of Resonance Events in BEPC e^+e^- AnnihilationLIU Xi-Ming¹⁾ ZHANG Xue-Yao WANG Hai-Long WANG Yu-Shui

(Department of Physics, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract In this paper an important character was found that the final hadron multiplicities of direct J/ψ decays satisfy the same universal mass dependence as that in $e^+e^- \rightarrow q_0\bar{q}_0$ continuum events. This indicates that the fragmentation of quark and gluon to hadron follows the same mechanism. We give a reasonable interpretation to final baryon multiplicity that is enhanced by 2.5 times in direct Y decays compared to the continuum through our calculating results. But we cannot find this similar phenomenon in direct J/ψ decays.

Key words high-energy reaction, gluons fragmentation, multiplicities of particle, universal mass dependence

Received 25 July 2001, Revised 11 November 2001

* Supported by BEPC National Laboratory

1) E-mail: xmliu@sdu.edu.cn