

Υ 三胶子碎裂粒子产率的普适质量关系*

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 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 三胶子碎裂的末态强子多重数满足与 $e^+e^- \rightarrow q_0\bar{q}_0$ 事例相同的普适质量关系,表明胶子、夸克碎裂成强子时有相同的规律性. 不需引入任何其它假定,就自然解释了 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 三胶子碎裂末态重子多重数增高的重要特征.

关键词 三胶子衰变 粒子多重数 普适质量关系

1 引言

高能反应的多粒子产生过程提供了部分子(夸克与胶子)碎裂成强子的重要信息,是认识相互作用机制检验 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. 实验上通过 $e^+e^- \rightarrow q_0\bar{q}_0g \rightarrow 3\text{jets}$ 三喷注事例的研究得到夸克与胶子碎裂的许多重要信息,如三喷注末态粒子分布的“弦效应”,这是对初始夸克、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证明. 由于胶子比夸克带有更多的色荷, QCD 预言相同能量的胶子喷注带电粒子多重数比夸克喷注的高,也被大量实验所证实. 由于部分子碎裂成强子的软过程只能借助唯象模型描述,而这些模型^[1]都带有一些附加机制和自由参数,人们试图寻找更普适的规律,如用粒子的质量 m 作为基本参数描述其产率. 在修正的 Lund 模型^[2] UCLA 中利用 QCD 面积律以及纵向相空间近似,得到夸克碎裂函数 $\exp(-bm^2)$ 与粒子质量有关,只需 5 个自由参数就能够很好解释实验. 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更一般的规律^[3], $SU(3)$ 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 J 以及同位旋 I 确定,满足一简单普适关系

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

不需引入任何其它参数与附加的机制就能够得到与实验一致的末态粒子多重数. 式中参数 $b = 3.872 \pm 0.027(\text{GeV}/c^2)^{-2}$ 是与反应质心能量 \sqrt{s} 以及反应类型无关的,对各种反应 (e^+e^- , $pp(p)$) 都适用的普适常数. 唯一待定参数 A 随反应质心能量变化,而且与高能反

2001-05-09 收稿

* 北京正负电子对撞机实验室开放课题基金资助

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

应的具体过程有关. 文献[4]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平均重子数目 $\langle M+B \rangle$, 并通过详细的计算给出了 e^+e^- 湮没以及 $pp(\bar{p})$ 反应过程中参数 A 随反应质心能量的数值关系, 对参数 A 的物理意义做出合理解释.

$\Upsilon \rightarrow 3g$ 三胶子衰变成强子过程是研究胶子碎裂的最好途径. 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, 也不会因为喷注夹角模糊带来确定喷注能量时的困难. 实验已对 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 碎裂做了系统研究, 但对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. 本文的目的就是说明胶子碎裂与夸克碎裂的强子多重数满足同样的质量依赖关系. 通过分析发现仅参数 b 的取值不同, 这反映出夸克、胶子碎裂成强子时的不同. 正是由于参数 b 的改变, 不需引入任何假定仅利用这个质量关系可以定量解释 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 事例重子多重数是相近连续区 2—3 倍的实验.

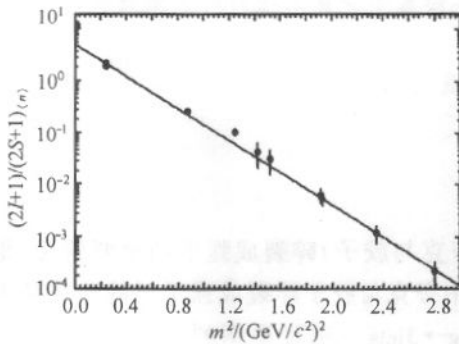


图 1 Υ 共振事例末态粒子多重数与质量的关系

2 分析

ARGUS 实验组^[5]对 Υ 共振事例末态粒子多重数进行了比较广泛细致的测量, 得到各种介子、重子多重数. 利用公式(1)我们对这些数据进行了分析, 图 1 给出分析的结果. 发现 Υ 共振事例末态粒子多重数同样满足普适的质量关系, 得到结果是 $b = 3.55 \pm 0.12$, $A = 4.93 \pm 0.21$, 参数 b 比连续区的 3.87 稍低, 这个微小差别反映了胶子、夸克碎裂成强子比率的差别.

下面我们会看到正是由于这个差异可以自然解释 Υ 共振事例重子多重数是连续区 2—3 倍的关系.

3 Υ 三胶子碎裂的直生介子重子多重数

在本节我们证明上面的参数 A 就是 Υ 衰变的直生介子、重子多重数. Υ 是 $b\bar{b}$ 夸克偶素, PQCD 预言主要通过三胶子中间态衰变为末态强子. 因为过程 $\Upsilon \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 的初态 Υ 与末态强子都是色单态, 要求三胶子中间态色波函数也只能处于色单态. 通过对三胶子色波函数的系统分析^[6], 发现有 97% 的几率形成三条连接 3 个胶子的三重态引力弦, 这三条弦相互联接构成一个封闭三角形是色单态, 每条弦与同 $q_0\bar{q}_0$ 系统一样通过真空激发产生新夸克对. 分别用 E_1, E_2, E_3 与 p_1, p_2, p_3 表示 Υ 质心系中 3 个胶子的能量与动量. 胶子 i 与 j 之间的色弦的能量与动量分别是

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

$$p_{ij} = \frac{1}{2}(p_i + p_j), \quad (3)$$

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

$$m_{ij} = \sqrt{E_{ij}^2 - p_{ij}^2} = \sqrt{\frac{1}{2} p_i p_j (1 - \cos\theta_k)},$$

利用能量、动量守恒基本条件

$$m_\Upsilon = E_1 + E_2 + E_3,$$

$$0 = p_1 + p_2 + p_3,$$

最后求出

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

以上式中 i, j, k 取 1, 2, 3 轮换, θ_k 是动量 p_i 与 p_j 之间的夹角, m_Υ 是 Υ 的不变质量. 至此利用文献[4]中的“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 $\Upsilon \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 事例总的直生介子、重子平均多重数 $\langle M + B \rangle$.

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[4]中采用的方法同样可以计算出直生介子、重子多重数. 在表 1 中给出对两种事例计算的 $\langle M + B \rangle$ 与分析实验得到参数 A 的比较, 并给出两种事例参数 b 的比较.

表 1 直生介子重子多重数

事例类型	$\langle M + B \rangle$	参数 A	参数 b
$\Upsilon \rightarrow 3g$ 衰变	5.03	4.95 ± 0.13	3.55 ± 0.12
相近 $q_0 \bar{q}_0$ 连续区	4.12	4.22 ± 0.14	3.87 ± 0.03

可见理论计算的直生介子、重子平均多重数 $\langle M + B \rangle$ 与利用公式(1)分析实验得到的参数 A 完全一致. $\Upsilon \rightarrow 3g \rightarrow h's$ 不仅与连续能区的末态粒子多重数具有相同的质量关系, 而且质量关系中的参数 A 都是直生介子、重子多重数, 表明胶子、夸克碎裂成强子相似的规律性.

4 Υ 共振与连续能区重子多重数比率

实验上发现^[5] $\Upsilon \rightarrow 3g$ 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 到 3 倍. 这一重要特征其它模型都无法解释, 只有 Lund 模型能够定性解释, 但即使调整模型中的参数, 也不能定量解释这一特点^[7]. 利用上面粒子多重数与质量的普适关系则能够自然得到与实验一致的重子多重数比率. 把上面计算的连续区与共振事例的平均介子、重子多重数 $\langle M + B \rangle$ 代替(1)中的参数 A , 并分别用不同的参数 b , 这个比率表示为

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

计算结果如表 2, 与实验结果在误差范围内一致.

表 2 重子多重数比率 R

重子	理论预言	实验结果	重子	理论预言	实验结果
$\langle P + \bar{P} \rangle$	1.81	1.87 ± 0.16	$\langle \Sigma^{*-} + \bar{\Sigma}^{*-} \rangle$	2.52	$2.57 \pm 0.59 \pm 0.58$
$\langle \Lambda + \bar{\Lambda} \rangle$	2.03	$2.48 \pm 0.09 \pm 0.31$	$\langle \Sigma^{*+} + \bar{\Sigma}^{*+} \rangle$	2.51	$3.28 \pm 0.83 \pm 0.74$
$\langle \Xi^- + \bar{\Xi}^- \rangle$	2.38	$3.08 \pm 0.37 \pm 0.47$	$\langle \Xi^{*0} + \bar{\Xi}^{*0} \rangle$	2.89	$3.27 \pm 1.39 \pm 0.67$
$\langle \Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0 \rangle$	2.14	$2.48 \pm 1.05 \pm 0.72$	$\langle \Omega^- + \bar{\Omega}^- \rangle$	3.33	$2.54 \pm 1.54 \pm 0.64$

对于介子情况, 利用(8)式我们也作了分析. 由于介子质量比较低, 平方后就更小, 使得(8)式中指数函数近似为 1, 而两种事例的直生介子、重子多重数也很接近(表 1), 得到的介子产额比例比 1 稍大, 这与实验也是一致的.

5 小结与讨论

我们把 $e^+e^- \rightarrow q_0\bar{q}_0 \rightarrow 2\text{jets}$ 事例中得到的末态粒子多重数与粒子质量的普适关系推广到 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 碎裂, 发现夸克、胶子碎裂产生的强子多重数满足同样的质量依赖关系. 对于胶子碎裂情况同样可以把与能量、反应类型有关的参数 A 理解为直生介子、重子多重数. 这一简单质量关系也能够自然解释 $\Upsilon \rightarrow 3g$ 事例重子多重数增高的重要特征. 利用这个关系无需引入奇异抑制等参数, 也不需要引入如“Diquark”, “popcorn”等额外的重子产生机制, 仅需粒子质量 m 、自旋 J 、同位旋 I 就可以完全解释实验, 这是非常有意义的. 我们将另文详细讨论粒子质量与产生几率之间的关系, 对这个简单关系的意义做出合理解释.

参考文献 (References)

- 1 Andersson B et al. Phys. Rep., 1983, **97**:31; Marchesini G, Webber B R. Nucl. Phys., 1994, **B238**:1
- 2 Chun S B, Buchanan C D. Phys. Lett., 1993, **B308**:153
- 3 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
- 4 LIU Xi-Ming, ZHANG Xue-Yao, WANG Hai-Long. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**(5):777—782 (in Chinese)
(刘希明, 张学尧, 王海龙. 高能物理与核物理, 2001, **25**(5):777—782)
- 5 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
- 6 TIAN Li-Li et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1993, **17**:717 (in Chinese)
(田丽丽等. 高能物理与核物理, 1993, **17**:717)
- 7 Scheek H. Nucl. Phys., 1988, **B1**(proc. suppl):291—302

Mass Dependence of the Particle Multiplicity in Υ Three Gluon Fragmentation

LIU Xi-Ming¹⁾ ZHANG Xue-Yao WANG Hai-Long WANG Yu-Shui

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

Abstract In this paper we found that the final state hadron multiplicities in $\Upsilon \rightarrow 3g$ fragmentation satisfy the same general mass dependence as in $e^+ e^- \rightarrow q_0 \bar{q}_0$ events. This indicates that the fragmentation of quarks and gluons to hadrons follows the same mechanism. The important character of increment of the baryon multiplicity in $\Upsilon \rightarrow 3g$ fragmentation is interpreted naturally without any other assumptions.

Key words three gluons fragmentation, multiplicity of particle, universal mass dependence

Received 9 May 2001

* Supported by BEPC National Laboratory

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