

LUND 面积定律对 J/ψ 非微扰强衰变的描述*

胡海明^{1,1)} 戴玉梅^{1,2} 马凤才²

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(辽宁大学物理系 沈阳 110036)

摘要 基于微扰 QCD 所预言的 J/ψ 衰变道胶子分布及其分支截面和 LUND 弦碎裂模型强子化面积定律的严格解,得到 J/ψ 所有衰变模式的微扰和非微扰过程的一种可能的描述,相应的 Monte Carlo 产生器 LUARLW 所作的初步模拟结果与 BES 获取的 J/ψ 数据的多种带电粒子谱分布和事例形状拓扑分布符合较好.

关键词 弦 碎裂 面积定律 衰变

1 引言

量子色动力学(QCD)作为强相互作用的惟一候选理论,对强子产生的某些方面的描述和计算取得了很大的成功.但由于 QCD 的非阿贝尔渐近自由本质,它只能计算整个过程中大动量传递的夸克-胶子相,而不能给出从初始夸克到末态强子的完整的而且能与实验观测量相联系的理论计算.根据现今的知识,用部分子图像(等同于零阶 QCD)描述强子过程是很简单的:在单光子交换近似下,初态 e^+e^- 湮没一个光子(在极高能量下还可以是 Z^0),继而演化为一对夸克-反夸克,夸克可以韧致辐射胶子.对于非共振强子产生过程,夸克-胶子相的微扰级联演化可以用以 QCD 为基础的 Altare-Parisi 方程描述.但 QCD 对于夸克和胶子如何转化为强子的过程的预言却因非微扰技术未很好解决而有很大的局限性. J/ψ 等共振态的强衰变和电磁衰变过程也涉及到夸克和胶子的非微扰的强子化问题.目前对非微扰问题的解决办法主要是通过观测实验,积累数据,描述过程,总结规律,并在此基础上构造唯象强子化模型.

从 LUND 模型基本假设(因果性,相对论协变性,色禁闭)出发,可以建立强子产生过程的半经典

图像,并且可以导出定量描述强子化过程的 LUND 面积定律.在有限质心能量 \sqrt{s} (大于产生强子阈)下, e^+e^- 湮没产生确定的具有横质量为 $\{m_{\perp j}\}$, 纵动量为 $\{p_j\}$ 的 n 粒子态遍举碎裂分布为^[1,2]

$$d\mathcal{P}_n = N_n \prod_{j=1}^n dp_j^2 \delta(p_j^2 - m_{\perp j}^2) \cdot \delta\left(\sum_{j=1}^n p_j - P_0\right) \cdot \exp(-b \cdot \mathcal{A}). \quad (1)$$

最后的因子体现了弦碎裂为确定末态的动力学机制,类似于量子场论中的矩阵元平方

$$|M_n|^2 = \exp(-b \cdot \mathcal{A}), \quad (2)$$

其它因子则是相空间元.其中 \mathcal{A} 是由弦碎裂强子的所有味夸克和反夸克光锥动量分量 (z_{+i}, z_{-i}) 线所围成的面积.对于任一确定的产生道,光锥面积 \mathcal{A} 满足能量守恒条件和强子质壳条件,并且确定了遍举道所有碎裂强子的动量,见图 1 所示.在过去的工作中^[3],已得到 LUND 面积定律预言的 $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow$ 连续强子态的遍举分布公式(包括多重数分布,各种反应道的分支截面,碎裂强子相对于弦取向的横动量及纵向动量等),但其中包含待定的唯象参数.面积定律的 Monte Carlo 产生器 LUARLW 预言的末态整体分布在 2—5GeV 能量范围内与 BES 获取的连续强子态过程的数据符合很好,并应用于 BEPC/BES 的 R 值测量实验中^[4].如果忽略低能过程

2002-08-02 收稿,2003-02-24 收修改稿

* 国家自然科学基金(19805009)资助

1) E-mail: huhm@mail.ihep.ac.cn

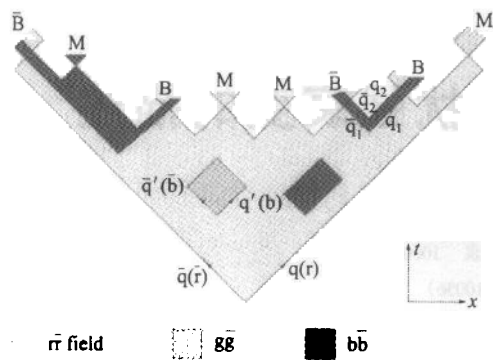


图 1 LUND 模型所描述的在 $x-t$ 二维时空中弦碎裂产生介子和重子

中的胶子效应,用 LUND 弦碎裂强子化图像,连续强子末态是经单弦碎裂的产物,面积定律的应用是直接的. 粲偶素共振态 J/ψ 的产生图像是简单的,它能直接与虚光子耦合产生. 但由于 J/ψ 粒子的质量低于产生一对粲介子的阈,因此它只能通过 (cc) 湮没后再衰变. J/ψ 衰变的最低阶费曼图如图 2 所示. 在重夸克近似下,由 QCD 可计算出 $cc \rightarrow ggg, \gamma gg, q\bar{q}, 1^+1^-$ 的微分衰变分布和总宽度^[5],因此得到 $ggg, \gamma gg$ 的动量分布和按各道衰变的分支比. 其中 3 个非轻子衰变道的强子化过程将是 QCD 不能计算的,也是本文所试图讨论和解决的问题.

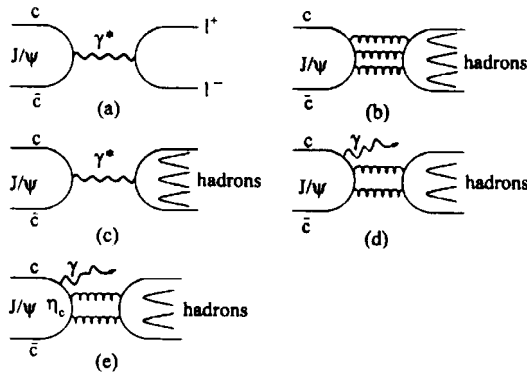


图 2 QCD 预言的 J/ψ 衰变模式
(a) 电磁轻子衰变;(b) 强衰变;(c) 电磁强子衰变;
(d) 辐射强子衰变;(e) 辐射 M1 转变.

在 LUND 模型的著名产生子 JETSET 中,有一子程序 LUONIA 可用以下过程

$$e^+ e^- \Rightarrow \gamma^* \Rightarrow 1^+ 1^- \text{ QQ onium resonance} \\ \Rightarrow ggg \text{ or } \gamma gg \\ \Rightarrow \text{shower} \Rightarrow \text{hadrons}$$

模拟 Υ 衰变过程以及在 PETRA 能量下研究顶夸克偶素 (toponium). JETSET 中没有类似的用于模拟 J/ψ 衰变的程序. JETSET 的作者 T. Sjostrand 认为^[6],对

于粲夸克偶素,其质量太小以致不能用喷注的图像来描述其衰变过程. T. Sjostrand 甚至认为 Υ 能区也只在可以应用 LUONIA 模拟的能标的低端,可用微扰级联演化图像描述的相空间也是很小的,因此并不推荐用 LUONIA 模拟 Υ 衰变过程. 基于这些原因及在文献[3]中的分析,把 JETSET 中的 LUONIA 级联和弦迭代碎裂处理强子化的方法用于描述 J/ψ 衰变在物理上是不合适的,也非可以通过调节原程序参数所能解决的.

ψ 族和 Υ 族共振态重夸克偶素 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 组成,有相同的量子数 $J^{PC} = 1^{--}$,都为 n^3S_1 态,具有相同的产生和衰变机制(即相同的 Feynman 图),在非相对论近似下有相同形式的强衰变宽度. 它们的差别在于: $J/\psi, \beta^2 \sim 0.3, \alpha_s(m_c) \sim 0.3$;对于 $\Upsilon, \beta^2 \sim 0.1, \alpha_s(m_b) \sim 0.2$. 后者的微扰性质和非相对论近似更好. 相关的研究表明^[7],QCD 预言的 $\alpha_s(s)$ 随能量 s 的演化关系(至 $O(\alpha_s^3)$ 量级)在能量低至 1.8GeV 时还与实验符合较好. 因此,文献[5]给出的各道分支比及胶子动量分布也还是较好的近似,可以直接用于模拟计算.

2 J/ψ 衰变的弦碎裂图像

在 LUND 弦碎裂模型中,弦是夸克-胶子相微扰演化过程进行到非微扰相时形成的色中性类强子实体. 非微扰强子化过程体现为弦以碎裂的方式产生实验观测到的强子态,也就是说弦碎裂方式体现了非微扰强子化机制在 LUND 模型中的具体表达形式. 以下分别分析 J/ψ 衰变的几种模式中弦的构型及如何应用面积定律. J/ψ 的电磁轻子衰变过程(a)末态的动量分布与 $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 过程相同,辐射 M1 转变过程(e)与电磁强衰变过程(d)相似.

(a) $J/\psi \rightarrow \gamma^* \rightarrow q\bar{q}$ 在 原点 产生 初始 夸克-反夸克 $q_0\bar{q}_0$ 对沿相反方向(即纵向)运动而分离. 在大距离时色力场的强耦合极限下,夸克-反夸克之间的色力线收缩为类似于相对论性的无质量弦(更形象地说,弦是典型横向尺度为强子直径的柱形色流管)的一维区域,如图 3(a)所示, q_0 和 \bar{q}_0 的初始动能转化为弦场的势能. 弦色场可以通过量子隧道效应从真空中激发产生新的夸克-反夸克 $q\bar{q}$ 对和双夸克-反夸克 $q\bar{q}q\bar{q}$ 对. 新产生的 $q\bar{q}$ 和 $qq\bar{q}\bar{q}$ 横向动量(相对于弦场的方向) k_\perp 作为弦基态的量子涨落,具有局域平衡的性质. 非闭合弦碎裂可以直接应用面

3 结果和结论

由于对撞机束流能散和初态辐射效应的存在, 在 BEPC 标称能量 $E_{cm} = M_{J/\psi}$ 下, BES 所获取的 J/ψ 实验数据样本中必然包含 J/ψ 事例和连续强子事例. 两类过程的比例可以由理论上 J/ψ 的有效总截面

$$\hat{\sigma}_{J/\psi}^T(W) = \int G(W, W') \sigma_{J/\psi}^T(W') dW' \quad (5)$$

与连续强子截面 $\sigma_{\text{con}}^T(W)$ 之比来估计. 其中 $G(W, W')$ 是高型能散分布函数^[8], $W = E_{cm}$, $\sigma_{J/\psi}^T$ 和 $\sigma_{\text{con}}^T(W)$

的计算按照文献[9]中的方案. 在与实验数据比较时, Monte Carlo 模拟样本中两类事例的比例也按理论截面确定. 所模拟的 J/ψ 事例中, 各道衰变的比例由 QCD 计算(确定图 2 的衰变模式)和 LUND 面积律(确定弦碎裂末态)决定. 图 5 比较了 LUND 面积律产生器 LUARI.W 产生的事例并经探测器模拟得到的 Monte Carlo 数据与 BES 获取的 J/ψ 事例衰变末态的多种带电单粒子谱分布和事例拓扑特性(球度和冲度), 两者符合较好. 模拟中所采用的参数类型与文献[3]中引入的相同, 但参数值根据 J/ψ 实验数据协调确定. 实验数据与 LUARI.W 模拟结果之间的细微差别来自 BES 数据中的剩余本底和模型参

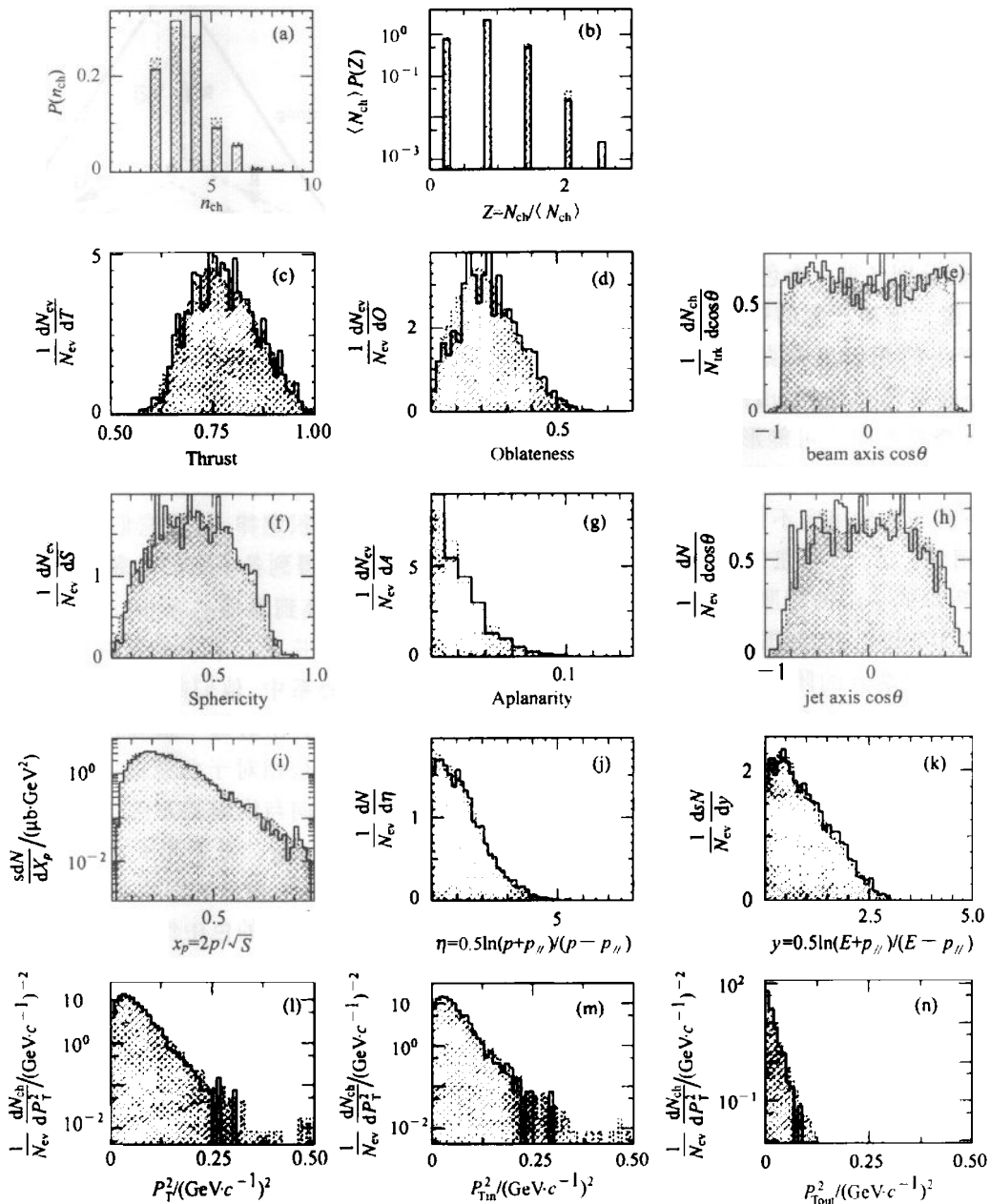


图 5 面积律预言的 J/ψ 衰变末态整体分布与 BES 数据(阴影区域)的比较

数还有待精确调试. 无需置疑, 一个完整的和可用于实际物理分析的物理产生器, 还需要对其单举谱, 各种类型的粒子产额比, 各产生道的分支比, 各种关联性质进行检验. 在目前, 作为本研究项目的第一阶段, 只完成了理论计算和 Monte Carlo 编程. 在参

数的调整中, 只比较了实验和在 Monte Carlo 的带电粒子谱分布(即不对粒子的种类作鉴别). 下一步的工作将进一步协调模型参数, 使 LUARLW 预言的各道的分支比也与实验数据符合, 使之发展为能应用于 2—5GeV 能区强子产生性质研究的产生器.

参考文献 (References)

- 1 Andersson B. The Lund Model, Cambridge University Press, Cambridge, 1988
- 2 Andersson B, HU H M. hep-ph/9910285
- 3 HU Hai-Ming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**: 1035—1043 (in Chinese)
(胡海明等. 高能物理与核物理, 2001, **25**: 1035—1043)
- 4 BAI Jing-Zhi et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**: 101802
- 5 Koller K et al. Nuclear Physics, 1984, **B140**: 449—467
- 6 Sjostrand T. PYTHIA5.7 and JETSET7.4 Physics and Manual, CERN-TH.7112/93
- 7 Girone M, Neubert M. Phys. Rev. Lett. 1996, **76**: 3061
- 8 ZHENG Zhi-Peng, ZHU Yong-Sheng. Electron-Positron Physics at Beijing Spectrometer. Guangxi: Guangxi Science and Technology Press, 1998 (in Chinese)
(郑志鹏, 朱永生. 北京谱仪正负电子物理, 广西科学技术出版社, 1998)
- 9 HU Hai-Ming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, **25**: 701—709 (in Chinese)
(胡海明等. 高能物理与核物理, 2001, **25**: 701—709)

Description of LUND Area Law to J/ψ Non-perturbative Hadronic Decay*

HU Hai-Ming^{1,1)} DAI Yu-Mei^{1,2} MA Feng-Cai²

1(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

2(Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract Based on the perturbative QCD predictions of gluonic distributions and branch cross section of the J/ψ decay via hadronic, electromagnetic, and radiative channels, the strict solutions of LUND area law of string fragmentation hadronization are used to treat nonperturbative hadronic production processes, a possible description and Monte Carlo packet for the J/ψ hadronic decay are obtained. The more than 14 spectra and event shapes of the charged particles simulated by Monte Carlo generator LUARLW agree with BES data well.

Key words string, fragmentation, area law, decay

Received 2 August 2002, Revised 24 February 2003

* Supported by NSFC(19805009)

1) E-mail: huhm@mail.ihep.ac.cn