

直生强子产率的普适质量关系*

刘希明¹⁾ 王海龙 张学尧 王玉水

(山东大学物理系 济南 250100)

摘要 利用“隧道效应”给出的 QCD 真空激发产生夸克的几率,结合夸克随机组合成强子的简单图像,不需要任何附加假定得到各种高能反应直生介子、重子相对产率都满足同样的普适质量关系 $\langle n \rangle = a \exp(-bm)$,这个质量关系与反应质心能量和具体反应过程无关.与最近分析实验发现的经验公式形式上完全一样,这意味着强子质量是描述粒子多重数最基本的物理量.

关键词 强子化 直生强子 普适质量关系

1 引言

高能粒子反应的多粒子产生过程提供了部分子碎裂成强子的重要信息,对量子色动力学 QCD 预言以检验.由于微扰 PQCD 再适用带色的部分子(夸克与胶子)碎裂为无色强子的强子化过程,这一复杂过程目前只能借助唯象模型描写.各种唯象模型大都假定初始部分子演化末态产生许多夸克对 $q\bar{q}$,这些带色的夸克按照 $SU_c(3)$ 对称性形成无色强子,进一步引入“奇异抑制”因子 λ 、十重态重子和矢量介子自旋抑制等参数,并考虑高激发态粒子衰变贡献后,可给出各种末态介子、重子的产生比率.其中以 Lund 弦碎裂模型^[1]为代表的“级联”模型,基本特点是夸克对的真空激发遵循相同的无标度动量分布函数, $q\bar{q}$ 对产生后紧接着形成强子.解释实验时需要引入很多自由参数,如描述重子产生还要引入附加的“Diquark”和“popcorn”机制,以及相对应的双夸克与夸克的产生比率(dq/q)等.另一类强子化模型^[2]考虑整体产生多少对夸克,然后按速度排序随机组合成强子,这类夸克随机组合模型(QCM)不需要任何参数就能够自然解释重子产生等许多实验.然而粒子的质量 m 是描述粒子的最基本的物理量,高能反应末态粒子多重数与其质量之间是否存在普适的简单关系,在这些强子化模型中都没有直接体现,只是用“奇异抑制”间接的反映粒子质量的差异对多重数的影响.探索粒子多重数与其质量 m 之间普适简单规律是人们十分感兴趣的问题.如 UCLA 模型^[3]利用了 QCD 面积律以及纵向相空间近似,给出的碎裂函数中就包含了与质量有关的因子 $\exp(-bm^2)$,只需 5 个可调参数比

2001-05-21 收稿,2001-09-11 收修改稿

* 北京正负电子对撞机国家实验室开放课题资助

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

Lund 弦模型更好地解释了实验结果. 人们通过^[4]分析 LEP 能区 e^+e^- 湮没末态强子多重数实验结果, 发现 $SU(3)$ 九重态赝标介子与矢量介子, 八重态与十重态重子的末态多重数 $\langle n \rangle$ 与其质量 m 、自旋 J 以及同位旋 I 之间满足一个简单关系 $\langle n \rangle = A \frac{2J+1}{2I+1} \exp(-bm^2)$,

由拟合实验数据给出的参数 b 与反应能量 \sqrt{s} 无关, 对各种反应 (e^+e^- , $pp(\bar{p})$) 都适用的普适常数. 最近人们进一步分析^[5] e^+e^- 湮没过程直生矢量介子、赝标介子, 八重态与十重态重子多重数, 发现 $\langle n \rangle$ 与其质量 m 、自旋 J 满足一个简单普适关系 $\langle n \rangle = A(2J+1)\exp(-bm)$. 虽然这些经验公式本身不可能确定出待定参数 A 与 b , 只能通过拟合实验给出, 也无法解释指数函数的物理意义. 但多重数与质量的普适关系得到了人们普遍的兴趣.

本文直接从夸克的产生几率出发, 结合夸克随机组合成强子的简单图像, 直接得到直生介子、重子产率都是其质量的简单指数函数, 这个简单关系与反应能量、具体过程无关, 与拟合 e^+e^- 湮没实验得到的经验公式形式上完全一样. 公式仅有两个普适参数由实验确定, 直接的检验是不需附加另外假定就自动包括“奇异抑制”效应. 进一步给出随能量变化的另一个参数, 可以解释、预言各种高能反应的末态实验结果.

2 真空激发新生夸克的几率

e^+e^- 湮没后通过电(弱)过程产生一对初始夸克 $q_0\bar{q}_0$, 这对初始夸克最终通过色相互作用真空激发产生许多新夸克对 $q\bar{q}$, 所有这些夸克在强作用下组合成各种强子. QCD 真空激发新生夸克的产生几率只能借助模型给出, 色流管模型^[5]可以估算不同味道的新生夸克对的相对产生几率. 因为强相互作用力程短强度大, 设 q_0 和 \bar{q}_0 之间的强作用力线局限于它们之间的管形区域内(色流管), 类似电荷为 g 场强为 ϵ 的平板电容器. 用与 QED 理论类比的方法, 给出了单位空间和单位时间产生一对 f 味道的夸克的几率是

$$p_f = g^2 \epsilon^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{n\pi m_f^2}{g\epsilon}\right), \quad (1)$$

其中 m_f 是新产生结构夸克 q_f 的质量, $k = \pi/g\epsilon$ 是与夸克之间强作用机制有关的常数. 因为这个结果也可以由量子力学的隧道效应得到, 因此通常把 QCD 真空激发新生夸克过程形象称为“隧道效应”. 通常取结构夸克质量 $m_u = m_d = 0.34\text{GeV}$, $m_s = 0.45\text{GeV}$, 利用实验得到奇异抑制因子 $\lambda = p_s/p_u \approx 0.3$ 确定出常数 k , 进而取重夸克质量 $m_c = 1.5\text{GeV}$ 以及 $m_b = 4.73\text{GeV}$, 得到新生的 5 种夸克味道相对几率之比为 $p_u : p_d : p_s : p_c : p_b = 1 : 1 : 0.3 : 10^{-10} : 10^{-95}$, 这个结果表明真空激发主要产生 uds 轻味夸克, 重味夸克 cb 完全可以忽略不计. 其中奇异夸克 s 相对 ud 夸克产生几率受到很大抑制. 这个预言不仅被 e^+e^- 实验证实, 也被其他高能反应实验证实, 是与反应能量与具体过程无关的普适规律. 这个 QCD 激发新生夸克的几率在理论研究上也被广泛运用, 并称之为“奇异抑制”效应. 经计算, 在精确到 $\approx 5\%$ 的情况下可忽略掉 $n \geq 2$ 的项, 从而给出简单的表示

$$p_f \propto e^{-km_f^2}. \quad (2)$$

下面分析中把(2)式作为真空激发新生夸克的几率, 给出直生介子、重子的产生几率.

3 直生介子产率

按照强子的夸克模型介子由夸克与反夸克组成 $q\bar{q}$, 重子由 qqq 组成, 同样反重子由 $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ 组成. 高能反应过程所有产生的夸克、反夸克都要通过色作用组合成无色的强子. 这是一个非常复杂的过程, 既与夸克产生几率也与夸克之间的相互作用机制有关, 目前还没有一个成熟的理论, 但强作用与夸克味道无关, 不同味道的夸克之间具有相同的作用机制. QCM 认为夸克组合成强子时快度近关联的 $q\bar{q}$ 能够形成 $SU(3)$ 引力色单态, 首先组合成无色强子. 并要求满足“慢强子先产生”相对论运动学的基本要求. “快度近关联”与“慢强子先产生”一起唯一地确定了夸克组合成强子的规则. 按照这个随机组合图像, 利用上面真空激发产生夸克的几率, 得到无色 $q_i\bar{q}_j$ 态的产率是

$$P(q_i\bar{q}_j) = A\exp(-km_i^2)\exp(-km_j^2), \quad (3)$$

这里 i, j 表示夸克的味道, m_i 表示结构夸克的质量. 待定参数 A 与强相互作用机制有关但与夸克味道无关, 对不同味道的 $q_i\bar{q}_j$ 是普适的. 按照夸克模型 u, d 夸克质量相同, 统一用 $\bar{m} = m_u = m_d$ 表示, 并用 m_s 表示奇异夸克 s 的质量, 在上式中进一步引入

$$a = A\exp(2km_s\bar{m}), \quad b = k(m_s + \bar{m}), \quad (4)$$

则各种不同味道 $q_i\bar{q}_j$ 态的产生几率都可以表示成夸克质量 m 的指数关系

$$P(q_i\bar{q}_j) = a\exp(-bm_{ij}), \quad (5)$$

这里 $m_{ij} = m_i + m_j$ 表示 $q_i\bar{q}_j$ 的夸克质量之和. 由 (4) 可知参数 a 与 b 对各种不同味道的 $q_i\bar{q}_j$ 都是普适的. 例如 $s\bar{s}$ 态容易给出

$$P(s\bar{s}) = A\exp(-2km_s^2) = A\exp[-k(m_s + \bar{m})(m_s + m_s) + 2km_s\bar{m}] = a\exp(-2bm_s), \quad (6.1)$$

同样得到其他不同味道 $q_i\bar{q}_j$ 态的产率是

$$P(s\bar{d}) = P(\bar{s}d) = P(s\bar{u}) = P(\bar{s}u) = a\exp[-b(m_s + \bar{m})], \quad (6.2)$$

$$P(\bar{u}d) = P(u\bar{d}) = P(\bar{u}u) = P(\bar{d}d) = a\exp(-2b\bar{m}). \quad (6.3)$$

表 1 各种直生介子的相对产率

介子	夸克波函数	相对产生几率	介子	夸克波函数	相对产生几率
K^+, K^{*+}	$ u\bar{s}\rangle$	$\exp[-b(m_s + \bar{m})]$	K^-, K^{*-}	$ s\bar{u}\rangle$	$\exp[-b(m_s + \bar{m})]$
K^0, K^{*0}	$ d\bar{s}\rangle$	$\exp[-b(m_s + \bar{m})]$	η	$\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u}\rangle + d\bar{d}\rangle + 2 s\bar{s}\rangle)$	$\frac{1}{3}\exp(-2b\bar{m}) + \frac{2}{3}\exp(-2bm_s)$
π^+, ρ^+	$ u\bar{d}\rangle$	$\exp(-2b\bar{m})$	η'	$\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u}\rangle + d\bar{d}\rangle + s\bar{s}\rangle)$	$\frac{2}{3}\exp(-2b\bar{m}) + \frac{1}{3}\exp(-2bm_s)$
π^0, ρ^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u}\rangle + d\bar{d}\rangle)$	$\exp(-2b\bar{m})$	ϕ	$ s\bar{s}\rangle$	$\exp(-2bm_s)$
π^-, ρ^-	$ d\bar{u}\rangle$	$\exp(-2b\bar{m})$	ω	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u}\rangle + d\bar{d}\rangle)$	$\exp(-2b\bar{m})$
\bar{K}^0, \bar{K}^{*0}	$ s\bar{d}\rangle$	$\exp[-b(m_s + \bar{m})]$			

夸克的自旋为 $\frac{1}{2}$, $q_i\bar{q}_j$ 既可以组合成自旋 $S = 1$ 的矢量介子也可以组合成自旋 $S = 0$

赝标介子. 利用以上各式可以按照强子的 $SU(6)_f$ 夸克模型给出各种直生介子的相对产率, 结果列在表 1 中.

4 直生重子产率

按照上面同样的考虑, 对于重子 $q_i q_j q_k$ 态同样给出产率是

$$P(q_i q_j q_k) = A' \exp(-km_i^2) \exp(-km_j^2) \exp(-km_k^2), \quad (7)$$

同样我们引入参数

$$a' = A' \exp(3km_s \bar{m}), \quad b = k(m_s + \bar{m}), \quad (8)$$

则不同味道的 $q_i q_j q_k$ 态产生几率都表示成结构夸克质量 m 之和的指数关系

$$P(q_i q_j q_k) = a' \exp(-bm_{ijk}), \quad (9)$$

这里 $m_{ijk} = m_i + m_j + m_k$, 显然参数 a', b 对各种不同味道的 $q_i q_j q_k$ 都是普适的. 利用上式不同味道的 $q_i q_j q_k$ 产率都可以写出具体的表示, 如

$$P(uds) = P(uus) = P(dds) = A' \exp(-2k\bar{m}^2 - km_s^2) = A' \exp[3k\bar{m}m_s - k(m_s + \bar{m})(2\bar{m} + m_s)] = a' \exp[-b(2\bar{m} + m_s)], \quad (10.1)$$

同样给出其他味道 $q_i q_j q_k$ 的产生几率是

$$P(uud) = P(duu) = P(uuu) = P(ddd) = a' \exp(-3b\bar{m}), \quad (10.2)$$

$$P(uss) = P(dss) = a' \exp[-b(2m_s + \bar{m})], \quad (10.3)$$

$$P(sss) = a' \exp(-3bm_s), \quad (10.4)$$

完全相同的讨论可以给出反重子 $\bar{q}_i \bar{q}_j \bar{q}_k$ 的产率与相同味道的 $q_i q_j q_k$ 一样. 进一步利用重子的 $SU(6)_f$ 夸克波函数, 在表 2 中给出各种直生重子的相对产率.

表 2 各种重子的相对产率

重子	夸克波函数	相对产率	重子	夸克波函数	相对产率
Δ^{++}	$ uuu\rangle$	$\exp(-3b\bar{m})$	Σ^{*0}, Σ^0	$ uds\rangle$	$\exp[-b(2\bar{m} + m_s)]$
Δ^+, p	$ uud\rangle$	$\exp(-3b\bar{m})$	Σ^{*-}, Σ^-	$ dds\rangle$	$\exp[-b(2\bar{m} + m_s)]$
Δ, n	$ udd\rangle$	$\exp(-3b\bar{m})$	Ξ^{*0}, Ξ^0	$ uss\rangle$	$\exp[-b(\bar{m} + 2m_s)]$
Δ^-	$ ddd\rangle$	$\exp(-3b\bar{m})$	Ξ^{*-}, Ξ^-	$ dss\rangle$	$\exp[-b(\bar{m} + 2m_s)]$
Σ^{*+}, Σ^+	$ uus\rangle$	$\exp[-b(2\bar{m} + m_s)]$	Ω^-	$ sss\rangle$	$\exp(-3bm_s)$

5 结果与讨论

本文给出各种直生介子、重子的相对产率, 这些相对产率是与反应能量及具体过程无关的, 惟一的要求是新产生夸克的产生几率 p_f 与具体反应过程及反应能量无关, 这已被大量实验所证实. 我们按照夸克随机组合成强子的图像得出直生介子、重子相对产率都满足相同的质量指数关系, 这是任何其他模型都没能给出来的, 这个关系与拟合 e^+e^- 湮没实验得到的经验公式^[5]形式上是完全一样的. 对这个公式的直接检验是奇异抑制效

应. 通常定义奇异抑制因子 $\lambda = \frac{2\langle s\bar{s} \rangle}{\langle u\bar{u} \rangle + \langle d\bar{d} \rangle}$, 是奇异夸克与非奇异夸克产率的比值. 实

验上通过测量奇异强子与非奇异强子直生多重数比例来确定抑制因子. 如 LEP 实验^[7] 测量出 $\langle K^{*0} \rangle / \langle \rho^0 \rangle = 0.29 \pm 0.01 \pm 0.05$, $\langle \phi \rangle / \langle K^{*0} \rangle = 0.29 \pm 0.01 \pm 0.04$, $\langle \Xi^- \rangle / \langle \Sigma^0 \rangle = 0.36 \pm 0.10$ 等, 目前的世界平均值是 $\lambda = 0.290 \pm 0.015$. 利用我们得到的相对产率公式容易得出同一个 $SU_3(3)$ 多重态中奇异与非奇异强子之比是同一个常数, 如介子

$$\lambda = \frac{\langle \phi \rangle}{\langle K^{*+} \rangle} = \frac{\langle K^{*0} \rangle}{\langle \rho^0 \rangle} = \frac{\langle K^{*+} \rangle}{\langle \rho^+ \rangle} = \frac{\langle K^+ \rangle}{\langle \pi^+ \rangle} = \frac{\langle K^0 \rangle}{\langle \pi^0 \rangle} = \dots = \exp[-b(m_s - \bar{m})], \quad (11)$$

对于重子存在同样的关系

$$\lambda = \frac{\langle \Sigma^{*+} \rangle}{\langle \Delta^+ \rangle} = \frac{\langle \Sigma^{*0} \rangle}{\langle \Delta \rangle} = \frac{\langle \Xi^* \rangle}{\langle \Sigma^* \rangle} = \frac{\langle \Omega^- \rangle}{\langle \Xi^- \rangle} = \frac{\langle \Sigma^+ \rangle}{\langle P \rangle} = \dots = \exp[-b(m_s - \bar{m})], \quad (12)$$

可见奇异抑制仅由奇异夸克与非奇异夸克质量差决定. 利用实验提供的 λ 值以及夸克模型给出的夸克质量, 由上式也可以确定出参数 b , 这样以上相对产率表式中就没有任何自由参数. 只要进一步确定出公式中的参数 a 与 a' , 就可预言各种反应多粒子产生过程末态粒子多重数等性质, 对上面的质量公式以细致检验. 参数 a 和 a' 与反应能量和具体过程有关, 我们将另文进行详细讨论. 最后指出, 在以上产率表示中的质量是组合成强子的结构夸克质量之和, 我们将进一步探索是否可用夸克模型给出的强子质量谱表示, 这会得到强子产率方面更细致特征, 是非常有意义的.

参考文献 (References)

- 1 Andersson B et al. Phys. Rep., 1983, **97**:31
- 2 XIE Qu-Bing LIU Xi-Ming. Phys. Rev., 1988, **D38**:2169—2177
- 3 Chun S B, Buchanan C D. Phys. Lett., 1993, **B308**:153; Phys. Rep., 1998, **292**:239—317
- 4 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
- 5 Chliapnikov P V. Phys. Lett., 1999, **B462**:341—353
- 6 Pavel et al. Z. Phys., 1991, **C51**:119
- 7 Barate R (ALEPH Collab.). Phys. Rep., 1998, **294**:1

Universal Mass Dependence of Directly Produced Hadron Rates*

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

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

Abstract In virtue of the simple physical picture of quark combination model and the probability for the production of a $q_f \bar{q}_f$ of a flavor f which is given by treating the pair creation of the $q \bar{q}$ as a quantum mechanical tunneling effect, an universal mass relation for direct hadron production rates, $\langle n \rangle = A \exp(-bm)$, is obtained without any additional assumption. It is satisfied by various high energy reactions. This universal mass relation is in agreement with a simple empirical regulation proposed recently and is independent of the mass-center energy and the process of the reactions. This suggests that the mass of hadrons is the primary factor for describing the particle multiplicities.

Key words hadronization, directly produced hadron, universal mass dependence

Received 21 May 2001, Revised 11 September 2001

* Supported by BEPC National Laboratory

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