

高能 e^+e^- 湮没强子多重数的质量关系*

王海龙 刘希明¹⁾ 王玉水

(山东大学物理系 济南 250100)

摘要 利用一个描述强子质量谱成功的夸克模型确定出得到的强子多重数普适质量关系 $\langle n \rangle = a \exp(-bm)$ 中的参数 b , 发现对于介子、重子是一个普适的常数. 利用这个质量公式给出计算各种粒子多重数的表达式, 进而以高能 e^+e^- 湮没为例计算出各种粒子多重数与实验以及其他模型做了比较, 表明这个没有任何假定的质量关系同样能够解释实验.

关键词 普适质量关系 夸克模型 强子多重数

1 引言

高能反应的多粒子产生过程由于微扰 PQCD 不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理论模型描写, 各种唯象模型大都假定初始部分子演化末态通过 QCD 真空激发产生许多夸克对 $q\bar{q}$, 这些带色的夸克按照 $SU_c(3)$ 对称性形成无色强子. 不同的模型在解释实验时需要引入一些额外假定与自由参数, 如 LUND 模型在描述重子产生时还要引入附加的“Diquark”和“popcorn”机制, 以及相对应的双夸克与夸克的产生比率(dq/q)等系列参数. 事实上粒子的质量是描述粒子最基本的物理量, 人们一直在探索高能反应过程粒子多重数与其质量之间普适的关系. 如 UCLA 模型^[1]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 $\exp(-bm^2)$. 最近人们通过^[2]分析 LEP 能区 e^+e^- 湮没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直生多重数 $\langle n \rangle$ 与其质量 m 、自旋 J 满足一个简单普适关系

$$\langle n \rangle = A(2J + 1)\exp(-bm). \quad (1)$$

这个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, 也无法解释这个指数函数的物理意义. 但这个普适的规律得到了人们极大的兴趣^[3].

文献[4]中利用 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

2001-06-28 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

像,不需任何其他假定,直接得到直生介子、重子产率都满足夸克质量之和的简单指数函数关系,对于味道为 q_i, \bar{q}_j 的介子是

$$M(q_i, \bar{q}_j) = a \exp(-bm), \quad (2)$$

式中 $m = m_i + m_j$ 表示介子结构夸克质量的和, i 与 j 表示不同的夸克味道,参数 a 与 b 都与夸克质量有关,

$$a = A \exp(2km_s \bar{m}), \quad b = k(m_s + \bar{m}). \quad (3)$$

同样对于重子 q_i, q_j, q_k 则是

$$B(q_i, q_j, q_k) = a' \exp(-b'm), \quad (4)$$

式中 $m = m_i + m_j + m_k$ 是重子结构夸克质量之和,参数 a' 与 b' 与夸克质量的关系是

$$a' = A' \exp(3km_s \bar{m}), \quad b' = k(m_s + \bar{m}), \quad (5)$$

对于反重子 $\bar{q}_i, \bar{q}_j, \bar{q}_k$ 与重子完全相同. 上面式中 $\bar{m} = m_u = m_d$ 表示 u, d 夸克的质量, m_s 表示 s 夸克的质量. A 与 A' 是与夸克之间强相互作用机制有关的常数, k 则是与强相互作用强度有关的常数.

得到这个简单关系不需要任何附加机制. 是与反应能量、具体反应过程无关的普适关系. 本文的目的是利用一强子质量谱的夸克模型确定公式中的参数 b , 发现这个参数对于介子、重子是一样的. 进而给出计算各种粒子多重数的公式, 以高能 e^+e^- 湮没为例计算出末态粒子多重数与实验以及其他模型的预言进行了比较, 表明这个简单质量关系也能给出符合实验的预言.

2 夸克模型与参数 b 的确定

由于公式中的参数 b 与结构夸克的质量有关, 只要给出结构夸克的质量就可确定这个参数. 下面借助一个在粒子质量谱中得到成功应用的夸克模型^[5] 给出的结构夸克质量确定这个参数. 这个夸克模型忽略强子质量的精细劈裂以外的如电磁作用效应的影响. 强子质量由结构夸克质量与自旋相互作用决定, 介子质量由下式给出:

$$m = m_1 + m_2 + M \frac{S_1 \cdot S_2}{m_1 m_2}. \quad (6)$$

重子的质量则是

$$M' \left(\frac{S_1 \cdot S_2}{m_1 m_2} + \frac{S_2 \cdot S_3}{m_2 m_3} + \frac{S_3 \cdot S_1}{m_3 m_1} \right), \quad (7)$$

这个强子的质量公式明显分成两部分, 前一部分是结构夸克质量 m_i 之和. 后一部分则是唯象的表示质量的精细劈裂项, 这是单胶子交换引起的自旋自旋相互作用的贡献, 与夸克的自旋 S_i 、质量 m_i 以及自旋波函数的平方有关. 按照通常的约定介子、重子中结构夸克质量取不同的数值, 对于介子取 $\bar{m} = m_u = m_d = 310 \text{MeV}/c^2$, $m_s = 483 \text{MeV}/c^2$, 对于重子则取 $\bar{m}' = m'_d = m'_u = 363 \text{MeV}/c^2$, $m'_s = 538 \text{MeV}/c^2$. 介子、重子中结构夸克质量取值不同是因为他们分别处于不同的动力学系统中. 通过拟合实验给出唯象常数 M 与 M' 后, 这个公式能很好的给出轻味强子的质量谱, 也给出了 $SU_3(3)$ 乃至 $SU(6)$ 对称破缺的主要特征. 虽然

重子、介子中结构夸克质量略有差异,但奇异夸克与非奇异夸克质量差是近似相等的,对于重子这个质量差是 $m'_s - \bar{m}' = 173\text{MeV}/c^2$, 近似等于介子的 $m_s - \bar{m} = 175\text{MeV}/c^2$.

通常定义奇异夸克与非奇异夸克产生几率的比值为奇异抑制因子,写成 $\lambda = 2p_s/(p_u + p_d)$. 实验上则通过测量直生奇异强子(含有奇异夸克)与非奇异强子(不含有奇异夸克)的平均多重数比例确定奇异抑制因子,如 LEP 能区 e^+e^- 湮没实验^[6]测量的介子多重数比例是 $\langle K^{*0} \rangle / \langle \rho^0 \rangle = 0.29 \pm 0.01 \pm 0.05$, $\langle \phi \rangle / \langle K^{*0} \rangle = 0.29 \pm 0.01 \pm 0.04$, 与重子多重数比例是 $\langle \Xi^- \rangle / \langle \Sigma^0 \rangle = 0.36 \pm 0.10$ 近似相等. 其他大量实验结果都表明由介子、重子多重数比率得到的奇异抑制因子是近似相等的,目前奇异抑制的世界平均值是 $\lambda = 0.290 \pm 0.015$. 利用上面的(2)式容易给出各种奇异与非奇异介子多重数比率都是夸克质量差的函数

$$\lambda = \frac{\langle \phi \rangle}{\langle K^{*0} \rangle} = \frac{\langle K^{*0} \rangle}{\langle \rho^0 \rangle} = \frac{\langle K^{*+} \rangle}{\langle \rho^+ \rangle} = \frac{\langle K^+ \rangle}{\langle \pi^+ \rangle} = \frac{\langle K^0 \rangle}{\langle \pi^0 \rangle} = \dots = \exp[-b(m_s - \bar{m})], \quad (8)$$

利用(4)式给出重子多重数比率满足同样的质量关系:

$$\frac{\langle \Sigma^{*+} \rangle}{\langle \Delta^+ \rangle} = \frac{\langle \Sigma^{*0} \rangle}{\langle \Delta \rangle} = \frac{\langle \Xi^+ \rangle}{\langle \Sigma^+ \rangle} = \frac{\langle \Omega^- \rangle}{\langle \Xi^- \rangle} = \frac{\langle \Sigma^+ \rangle}{\langle P \rangle} = \dots = \exp[-b'(m'_s - \bar{m}')], \quad (9)$$

$$\lambda = e^{-b(m_s - \bar{m})} = e^{-b'(m'_s - \bar{m}')}. \quad (10)$$

又因为重子、介子的夸克质量差也是相同的,显然得到介子、重子质量公式中的参数 b 是相等的,

$$b = b'. \quad (11)$$

这表明介子质量公式(2)与重子质量公式(4)中的斜率参数相同. 进一步取奇异抑制因子世界平均值 $\lambda = 0.290$, 并取夸克模型给出的 $m'_s - \bar{m}' = m_s - \bar{m} \approx 174\text{MeV}$, 利用(10)式得到参数

$$b = 7.114(\text{GeV}/c^2)^{-1}, \quad (12)$$

对介子、重子质量公式是一个普适的常数. 在(2)与(4)式中的另一个参数 a 与 a' 已经证明^[7]分别是高能反应产生的总的直生介子、重子多重数 $\langle M \rangle$ 与 $\langle B \rangle$. 这样由(2)与(4)式给出的直生介子、重子产率没有任何自由参数,最直接的运用可以计算各种粒子多重数与实验比较给出检验.

3 高能 e^+e^- 湮没各种末态强子多重数

直生介子包括自旋 $J=1$ 的矢量介子与 $J=0$ 的赝标介子,矢量介子与赝标介子的比率通常称采用 $\alpha = V/P$ 表示,按照夸克自旋统计给出简单结果为 $\alpha = 3$. 同样直生重子包括自旋 $J = \frac{3}{2}$ 的十重态与 $J = \frac{1}{2}$ 八重态重子,相对产率用 $\beta = B_3/B_0$ 表示,按照自旋统计给出这个比率为 $\beta = 2$. 但是在各种理论模型中 α 与 β 的取值并不完全与自旋统计结果一致,甚至作为一个自由参数. 在下面的计算中为减少任意假定,取 $\alpha = 3, \beta = 2$.

用 $\langle M \rangle$ 表示高能反应直生的总的平均介子多重数,按照(2)式得到味道为 i, j 的直生

矢量、赝标介子多重数分别是

$$\begin{cases} M_V(q_i, \bar{q}_j) = \frac{\alpha \langle M \rangle}{G} \exp(-bm_V) \\ M_P(q_i, \bar{q}_j) = \frac{\langle M \rangle}{G} \exp(-bm_P) \end{cases}, \quad (13)$$

这里 $G = (1 + \alpha) \sum \exp(-bm)$ 是普适的常数. 如果取矢量、赝标介子相对产率为自旋统计结果 $(2J + 1)$, 上式可以统一写成为

$$M_k(q_i, \bar{q}_j) = \frac{(2J + 1) \langle M \rangle}{G} \exp(-bm_k), \quad (14)$$

这里 $J = 1, 0$ 分别表示矢量、赝标介子的自旋. 这个表示式在形式上与拟合实验得到的 (1) 式用完全相同的. 用 $\langle B \rangle$ 表示直生的总的平均重子多重数, 同样的分析给出各种直生的味道为 q_i, q_j, q_k 的十重态、八重态重子的多重数分别是

$$\begin{cases} B_d(q_i, q_j, q_k) = \frac{\beta \langle B \rangle}{H} \exp(-bm_d) \\ B_o(q_i, q_j, q_k) = \frac{\langle B \rangle}{H} \exp(-bm_o) \end{cases}, \quad (15)$$

式中 $H = \sum \exp(-bm_o) + \beta \sum \exp(-bm_d)$ 也是普适的常数. 同样取自旋统计结果 $(2J + 1)$ 表示十重态、八重态重子的相对产率, 也可以把 (15) 式统一写成与 (14) 式一样的简单形式.

以上分析可以看出, 只要已知高能反应产生的平均介子多重数 $\langle M \rangle$ 与平均重子多重数 $\langle B \rangle$ 就可以利用 (14), (15) 式计算各种直生介子、重子多重数. 各种理论模型一般都能够给出介子、重子多重数 $\langle M \rangle$ 与 $\langle B \rangle$, 利用没有自由参数的“夸克组合”模型⁷ 以高能 e^+e^- 湮没为例计算平均 $\langle M \rangle$ 与 $\langle B \rangle$, 利用 (14), (15) 式得到各种直生强子产额. 由于实验测量的多重数是包括了共振粒子的衰变贡献, 利用粒子表⁸ 给出的共振态粒子衰变分支比, 容易得到各种末态粒子多重数. 在表 1 中给出计算的 91 GeV 能量时 e^+e^- 湮没的各种末态粒子多重数与实验⁸ 以及 LUND 模型的 JETSET7.4, WEBBER 模型的 HERWIG5.9, UCLA 模型的 UCLA7.4 事例产生器³ 预言的比较. 可以看出各种理论模型与实验符合的程度都差不多, 但这里不需要引入任何附加假定, 直接由粒子的质量确定粒子多重数. 同样的计算也可以预言其他能量以及其他高能反应的末态粒子多重数. 需要指出的是表 1 计算的粒子多重数是包括共振粒子衰变贡献后的结果 (能够直接与实验测量结果相比较). 而奇异抑制是直接产生 (不包括衰变贡献) 的奇异与非奇异粒子多重数比例, 例 ϕ/K^* , Ω/Ξ^* 等粒子多重数比例. 其它粒子由于包括了衰变贡献, 多重数比例则不等于通常意义下的奇异抑制因子.

表 1 91 GeV e^+e^- 湮没末态粒子多重数

粒子	理论	实验	HERWIG5.9	JETSET7.4	UCLA7.4
π^0	9.92	9.47 ± 0.54	9.97	9.59	9.61
π^\pm	17.60	16.99 ± 0.27	17.41	16.95	17.04
K^0	2.000	2.013 ± 0.033	2.05	2.07	2.06
K^\pm	2.010	2.242 ± 0.063	2.16	2.30	2.24
η	1.140	0.971 ± 0.030	1.02	1.00	0.78

续表

粒子	理论	实验	HERWIG5.9	JETSET7.4	UCLA7.4
η'	0.144	0.156 ± 0.021	0.097	0.155	0.121
ρ^+	2.30	2.40 ± 0.43			
ρ^0	1.570	1.231 ± 0.098	1.18	1.50	1.17
K^{*+}	0.680	0.715 ± 0.059	0.670	1.10	0.779
K^{*0}	0.680	0.738 ± 0.024	0.676	1.10	0.760
ϕ	0.1000	0.0963 ± 0.0032	0.104	0.194	0.132
ω	1.18	1.08 ± 0.12	1.17	1.35	1.01
p	1.082	1.048 ± 0.045	0.863	1.19	1.09
Λ	0.300	0.374 ± 0.009	0.387	0.385	0.382
Σ^+	0.172	0.174 ± 0.009	0.154	0.140	0.118
Σ^0	0.082	0.074 ± 0.01	0.068	0.073	0.074
Ξ^-	0.022	0.0258 ± 0.001	0.0493	0.0271	0.0220
$\Delta^{*+}(1232)$	0.080	0.085 ± 0.014	0.156	0.189	0.139
Σ^{*+}	0.0468	0.0462 ± 0.0028	0.111	0.074	0.074
$\Xi^{*0}(1530)$	0.0064	0.0055 ± 0.0005	0.0205	0.0053	0.0081
Ω^-	0.0020	0.0016 ± 0.0003	0.0056	0.00072	0.0011

4 小结与讨论

由于高能反应的强子化过程只能由唯象理论模型描述,一个成功的强子化模型基本要求是在很少额外假定下能够得到与实验一致的末态粒子多重数.最近几年人们一直通过分析拟合实验探索粒子质量与多重数之间是否存在普适关系,这种尝试发现两类经验公式,一类用来描述直生粒子多重数(1)式,另一类^[9]被称为“striking regularity”用来描述各类反应末态粒子多重数 $\langle n \rangle = A(2J+1)/(2I+1)\exp(-bm^2)$,这两个公式形式有所不同,但都是以粒子的质量 m 、自旋 J (同位旋 I)为基本参量,不需任何假定可以很好拟合实验.虽然经验公式自身不可能确定出待定参数,也无法解释公式的物理意义,但得到人们极大的兴趣,认为粒子质量也许是描述高能反应末态粒子多重数最基本的物理量.直接从 QCD 真空激发夸克的几率出发,在 $SU_c(3)$ 框架下利用夸克组合成强子的简单图像得到了与经验公式(1)完全类似的直生粒子多重数产率质量公式.本文进一步证明了对于直生介子、重子多重数公式中的斜率参数都是相同的 $b = 7.114(\text{GeV}/c^2)^{-1}$.如果把质量公式改写成 $\exp(-m/T)$,给出 $T = 141\text{MeV}/c^2$,这个值很接近 π 介子质量,这意味着夸克转换为强子的强子化过程发生在夸克胶子处于热平衡态之后.

按照给出的多重数质量公式计算的 91GeV 能量 e^+e^- 湮没的各种末态粒子多重数与实验以及其他模型比较,可以看出这个多重数质量公式与其他模型的预言基本都与实验符合.但这个多重数公式仅仅依赖结构夸克的质量,没有任何附加假定.事实上夸克组合成强子的强子化过程与夸克之间的强相互作用机制有关,虽然目前还没有成熟的理论,但这是揭示粒子多重数与质量依赖关系的最终途径.

参考文献 (References)

- 1 Chun S B, Buchanan C D. *Phys. Rep.*, 1998, **292**:239—317
- 2 Chliapnikov P V. *Phys. Lett.*, 1999, **B462**:341—353
- 3 Webber B R. hep-ph/9912399
- 4 LIU Xi-Ming et al. *HEP & NP*, 2002, **26**(4):313(in Chinese)
(刘希明等. *高能物理与核物理*, 2002, **26**(4):313)
- 5 Gasiorowicz, Am Rosner. *J. Phys.*, 1981, **49**:954
- 6 ALEPH Collab. Barate R. *Phys. Rep.*, 1998, **294**:1
- 7 LIU Xi-Ming et al. *HEP & NP*, 2001, **25**:377—382(in Chinese)
(刘希明等. *高能物理与核物理*, 2001, **25**:377—382)
- 8 Particle Data Group. *Eur. Phys. J.*, 2000, **C15**:226
- 9 Chliapnikov P V, Uvarov V A. *Phys. Lett.*, 1995, **B345**:313

**Mass Dependence of Hadron Production Rates in
 e^+e^- Annihilations at High Energy***WANG Hai-Long LIU Xi-Ming¹⁾ WANG Yu-Shui

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

Abstract In this paper, the parameter b in the universal mass relation $\langle n \rangle = a \exp(-bm)$ is obtained in virtue of a quark model successfully applied in the field of mass spectroscopy and is found to be a universal parameter for both baryons and mesons. Using this mass relation we give the expression for calculating the multiplicities of all the particles, and calculate the yields of various final state particles and compare it with the data from e^+e^- annihilation experiments and other models. The result shows this universal mass relation can explain experiment as well without any additional assumption.

Key words universal mass dependence, quark model, multiplicities of hadron

Received 28 June 2001, Revised 11 September 2001

* Supported by BEPC National Laboratory

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