

e^+e^- 湮灭中的夸克组合律

谢去病 墨文川 李裕发
(山东大学)

摘 要

本文指出,夸克组合中快度近关联与 QCD 的要求一致,并与慢强子先产生原则一起,完全确定夸克组合律,并自动排除重子偶素的产生. 给出了 N 对夸克随机组成介子、重子与反重子的计算公式. 把它用于 e^+e^- 湮灭,根本不需另引入双夸克对的真空激发等假定,即自然解释了重子的显著产生.

一、引 言

e^+e^- 湮灭中强子(喷注)产生的研究,不仅对夸克、胶子的存在与性质提供了最有力的证据,而且对 QCD 的发展起重要作用. 但由于对后阶段的软过程很不了解,各种模型又莫衷一是,阻碍着微扰 QCD 的进一步检验与非微扰 QCD 的研究. 实际上,这里主要包含两个前后联系但彼此独立的问题: e^+e^- 湮灭后按什么规律产生了多少夸克 (q) 反夸克 (\bar{q})? 这些 q 、 \bar{q} 按什么规律组合成最初的介子与重子和反重子? 我们简称前者为夸克产生律,后者为夸克组合律. 我们发现流行的许多模型中,后者并无原则区别,都有意无意的符合快度近关联. 但由于对快度近关联的意义与作用认识不足,并未充分或正确的利用. 有的模型中,它的作用则实际已被其它附加假定所掩盖. 例如,乍看起来 [1, 2] 的模型与 [3, 4] 非常不同,而且前者研究的 e^+e^- 湮灭,后者讨论的是强子-强子反应,实际其夸克组合都符合快度近关联,但由于 [1, 2] 中还假定夸克在级联产生后快度保持不变,结果快度近关联的组合便简并为原产生序列中时空近关联的结合. 又例如,文献 [5] 虽完全从快度近关联出发讨论夸克组合,实际其组合律并不符合快度近关联(详见第二节).

本文中,我们发现在夸克组合中快度近关联的要求,实际上与 QCD 的基本要求一致,并与慢强子先产生这一相对论运动学的结果一起,唯一地确定了夸克组合律,并自动排除重子偶素的出现. 然后仅从这一基本要求出发,用物理上最直观的数学方法,证明和给出了 N 对快度随机分布的 q 、 \bar{q} , 组成介子、重子与反重子的计算公式. 把它用于 e^+e^- 湮灭,根本不需另引入双夸克 (diquark) 对真空激发等一系列假定与参数,即自然解释了重子的显著产生.

二、快度近关联

部分子的运动状态近似地可用快度(或费曼变量 X_F)完全描写,部分子间的作用是短程快度关联,原来是部分子模型的基本假定^[7]. 在多重产生或喷注的研究中,纵向相空间(LPS)分析及快度近关联又得到广泛的实验支持. 但对快度近关联的意义与实质,并未作深入探讨. 另外,在研究喷注的时空发展时, Bjorken^[8] 和 Brodsky^[9] 首先指出,由相对论运动学原理得到总是慢的夸克先组成强子,即慢强子先产生. 现在,我们只要求夸克组合符合快度近关联原则.

当把已产生的 N 个 q 与 N 个 \bar{q} 按快度从小到大自左至右排列后, 如果恰好总是以 $q\bar{q}(\bar{q}q)$ 或 qqq 与 $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ 顺序出现, 例如

$$\underline{q\bar{q}} \quad \underline{\bar{q}\bar{q}\bar{q}} \quad \underline{qq} \quad \underline{qqq} \quad \underline{\bar{q}\bar{q}} \quad (1)$$

按照 QCD, $q\bar{q}$ (或 $\bar{q}q$) 可处于 $SU(3)_c$ 相互作用为斥力 $\sim \langle 8 | \lambda_1 \cdot \lambda_2 | 8 \rangle = \frac{2}{3}$ 的 8 重态 (λ_1 及 λ_2 为该两粒子的 $SU(3)$ 群 Gell-Mann 矩阵), 或相互作用为引力 $\sim \langle 1 | \lambda_1 \cdot \lambda_2 | 1 \rangle = -\frac{16}{3}$ 的色单态. 由于两粒子的快度之差是罗伦兹不变量. 注意到快度愈接近, 意味着两者相对运动愈慢、作用时间愈长, 总来得及等 q, \bar{q} 处于色单态而形成介子. 对快度序列为 qqq (或 $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) 时, 同理, qq 可处于 $SU(3)_c$ 的 6 或 3^* 态, 作用分别为 $\sim \langle 6 | \lambda_1 \cdot \lambda_2 | 6 \rangle = \frac{4}{3}$ 及 $\sim \langle 3^* | \lambda_1 \cdot \lambda_2 | 3^* \rangle = -\frac{8}{3}$, 快度近关联使 qq 一定能处于 3^* 先形成双夸克, 再与 q 处于色单态形成重子. 因而在类似 (1) 的情况, 快度近关联、色动力学要求与夸克组合律之间的一一对应是简单明确的.

但常会遇到这样的快度序列, 必须与相隔的 q (或 \bar{q}) 才有可能组合成色单态强子, 例如

$$\bar{q}\bar{q}q\bar{q}qq \quad (2)$$

这时似乎快度近关联对下面两种组合同样满足:

$$\underline{\bar{q}\bar{q}q} \quad \underline{\bar{q}qq} \quad (3)$$

$$\underline{\bar{q}\bar{q}qq} \quad \underline{qq} \quad (4)$$

规则 (3) 是每当出现 $\bar{q}\bar{q}q$ (或 $qq\bar{q}$) 序列时, 先跳隔构成介子 $\underline{\bar{q}\bar{q}q}$ (或 $\underline{qq\bar{q}}$), 而 (4) 则是先构成双夸克 $\underline{qq\bar{q}}$ (或 $\underline{\bar{q}\bar{q}q}$), 它再跳隔去构成重子或反重子, 文献 [5] 就是这样做的. 最后导致完全不同的结果, 如 (3) 产生三个介子, (4) 则产生一个重子及反重子. 但进一步分析即看到, 实际上只有前一种组合律符合快度近关联: 注意到慢强子先产生表示自左至右已构成强子的 q 或 \bar{q} 便已先从序列中拿走, (3) 的组合律永远不会导致多于一个间隔的组合, 例如

$$\begin{array}{c} \bar{q}\bar{q}q\bar{q} \quad q\bar{q}q\bar{q} \quad \bar{q}\bar{q}q \\ \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \\ \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \end{array} \quad (5)$$

但(4)的组合方式必导致快度相距很远才能组合的情况,如同对(5)的序列,一开始就将出现:

$$\bar{q}\bar{q}q\bar{q}q\bar{q}q\bar{q}q\bar{q} \quad (6)$$

不符合快度近关联要求. 可见快度近关联唯一地确定了组合律.

另一个非常重要的事实是: 只有符合快度近关联的组合律(3)才不仅符合 QCD 的要求,也符合基本的强子末态现象. 例如, QCD 要求所有产生的 q, \bar{q} , 最后只能以无色强子出现. 现以 b 表示 N 对夸克组成的重子数, a 表示组成的介子数, 在全面的数学推导中即发现^[6], 组合律(3)在任何情况总是自动满足

$$N = a + 3b \quad (7)$$

但是不难看到, 不满足快度近关联的组合方式(4), 则不满足(7)式的要求. 例如, 当 $N = 5$ 出现序列 $q\bar{q}q\bar{q}q\bar{q}q\bar{q}$ 时, 由(3)得

$$\begin{array}{c} q\bar{q}q \quad \bar{q}\bar{q}q \quad q\bar{q}q \quad \bar{q} \\ \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \\ \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \end{array}$$

这时 $a = 2, b = 1, a + 3b = 5$. 但按组合(4)则为

$$\begin{array}{c} q\bar{q}q \quad \bar{q}\bar{q}q \quad q\bar{q} \quad \bar{q}\bar{q} \\ \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \quad \underbrace{\quad} \end{array}$$

这时 $a = 0, b = 1, a + 3b = 3 \neq N$, 它将剩下双夸克对 $q\bar{q}q\bar{q}$, 即出现相当大几率的重子偶素产生, 这虽然与目前 QCD 的基本要求不矛盾, 但与强子末态的基本事实不符, 因为至今还未在末态中发现重子偶素.

最后, 快度近关联对(3)与(4)所作的选择, 正反映了 q, \bar{q} 之间色单态力与 q, q 间色 3^* 态力竞争的结果. 因为 $\langle 1 | \lambda_1 \cdot \lambda_2 | 1 \rangle = -\frac{16}{3}$ 从吸引力的角度看比 $\langle 3^* | \lambda_1 \cdot \lambda_2 | 3^* \rangle = -\frac{8}{3}$ 大一倍 (虽然严格的定量比较还必须考虑两粒子间自旋-自旋、自旋-轨道等其它作用力的修正, 事实上 QCD 至今还根本无法进行这种定量计算.) 而快度差只决定作用时间的长短, 并不改变作用力的大小, 因此当快度仅相差快度序列的一个间隔时, 仍保证 $q\bar{q}q$ 优先组合为 $q\bar{q}q$ 而不是 $q\bar{q}\bar{q}$. 也许, 这正是快度近关联要求的动力学原因.

三、组合公式

按上面确定的夸克组合律, 我们得到 N 对快度随机分布的夸克组合为 b 个重子(反重子)及 a 个介子的几率为

$$X_{ab} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{C_{2N}^N} \quad (8)$$

其中

$$Y_1 = \frac{(a+2b)!}{a!b!b!} 2^a \quad (9)$$

$$Y_2 = \sum_{T=1}^{\lfloor \frac{a}{2} \rfloor} \sum_{i=0}^{a-2T} C_{T+i-1}^i \frac{(a-T-i+2b)!}{(a-2T-i)!b!b!T!} 2^{a-T-i} \quad (10)$$

$$Y_3 = \sum_{s=1}^{2b} \sum_{\substack{s_1+s_2=s \\ s_1 \leq b \\ s_2 \leq b}} \sum_{j=0}^{a-s} C_{s+j-1}^j \frac{(a-s-j+2b)!}{(a-s-j)!(b-s_1)!(b-s_2)!s_1!s_2!} 2^{a-s-j} \quad (11)$$

$$Y_4 = \sum_{s=1}^{2b} \sum_{\substack{s_1+s_2=s \\ s_1 \leq b \\ s_2 \leq b}} \sum_{T=1}^{\lfloor \frac{a}{2} \rfloor} \sum_{i=0}^{a-2T} C_{T+i-1}^i \sum_{j=0}^{a-i-2T-i} C_{s+j-1}^j \\ \times \frac{(a-s-T-i-j+2b)!}{(a-s-2T-i-j)!(b-s_1)!(b-s_2)!s_1!s_2!T!} 2^{a-s-T-i-j} \quad (12)$$

$$C_{2N}^N = \sum_{a+3b=N} (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) \quad (13)$$

并可进一步证明^[6], (8) 可简单表示成:

$$X_{ab} = \frac{2N(N!)^2(a+2b-1)!}{(2N)!a!(b!)^2} 3^{a-1} \quad (14)$$

产生的平均介子数为:

$$\langle a \rangle = \sum_{a+3b=N} a X_{ab} \quad (15)$$

平均的重子数及反重子数为:

$$\langle b \rangle = \langle \bar{b} \rangle = \sum_{a+3b=N} b X_{ab} \quad (16)$$

(15) 与 (16) 有如下关系:

$$\langle a \rangle + 3\langle b \rangle = N \quad (17)$$

四、结 语

由上面看到, 1. 只要把快速近关联作为夸克组合为强子的唯一原则, 不仅可完全确定组合律, 而且正好符合 QCD 的要求及重子偶素不出现的事实. 表明夸克组合律不仅应该而且的确直接反映了长程夸克-夸克力的性质.

2. 在夸克组合为重子(或反重子)的过程中, 总是快速较近的 qq 先组合成 3^* 双夸克系, 然后它再作为一体在快速近关联条件下与另一 q 组合成色单态重子, 这是一个级联的两体组合过程, 不是在时空中的三体碰聚过程. 显然后者的几率是极小, 而前者的几率可以相当大. [1, 2] 中把快速近关联简并为时空近关联, 因此只有假定双夸克对的真空激发, 才能解释较大的重子产额. 如果用类似 [3, 4] 的组合规则来处理 e^+e^- 湮灭, 如我们在 [10] 中所作, 则完全不存在这问题.

3. 现在流行的 e^+e^- 湮灭的强子产生模型中, 夸克组合成各种强子的几率或平均产额都是用蒙特-卡洛方法计算, 未给出解析的组合公式. 上节中我们给出了组合公式, 便于直接研究组合的详细规律, 便于计算也便于与其它反应中的夸克组合律进行比较.

4. 例如, 假定在 pp 反应中与 e^+e^- 湮灭中同样产生了 N 对 $q\bar{q}$. 对 e^+e^- 湮灭, 这就是参加组合的全部夸克和反夸克. 但在 pp 反应, 则还有部分构成初态质子的夸克——两个人射夸克, 也参加这一组合. 初看起来, 两者 \bar{q} 数目仍相同, 平均构成的反重子数 $\langle \bar{b} \rangle$ 也会一样. 实际上由于 pp 反应中的 N 个 \bar{q} 与 $N+2$ 个 q 有更多的机会构成介子 $q\bar{q}$, 构成 $q\bar{q}q$ 的几率必变小, 使 $\langle \bar{b} \rangle_{pp} < \langle \bar{b} \rangle_{e^+e^-}$. 表 1 给出按上节计算的 $\langle \bar{b} \rangle_{e^+e^-}$ 与按 [4] 中组合公式算出的 $\langle \bar{b} \rangle_{pp}$, 在 N 相同时的比值 $\langle \bar{b} \rangle_{e^+e^-} / \langle \bar{b} \rangle_{pp}$. 可作为中间结果, 对组合公式进行独立检验.

表 1 当 N 相同时, e^+e^- 和 pp 反应中反重子数之比

N	3	5	7	9	11	13	15	...
$\langle \bar{b} \rangle_{e^+e^-} / \langle \bar{b} \rangle_{pp}$	2.50	2.12	1.71	1.57	1.45	1.38	1.32	...

5. 本文的夸克组合律及组合公式, 与一定的夸克产生律相联接, 即可计算 e^+e^- 湮灭中强子末态的性质, 并通过与实验比较, 对该夸克产生律及组合前夸克间的相互作用作出定量检验. 在 [10] 中, 我们用上节的组合公式结合我们自己的夸克产生律, 预言了各种重子、介子的绝对产额, 与已有实验符合较好.

参 考 文 献

- [1] R. D. Field and R. P. Feynman, *Nucl. Phys.*, B136(1978), 1; T. Meyer, *Z. Phys.*, C12(1982), 77.
- [2] B. Andersson et al., *Phys. Lett.*, 94B(1980), 211; *Nucl. Phys.*, B194 (1982), 95.
- [3] V. Cerny et al., *Phys. Rev.*, D16(1977), 2822.
- [4] V. N. Guman et al., *Nucl. Phys.*, B99(1975), 523.
- [5] V. V. Anisovich et al., *Z. Phys. C-Particles and Fields* 19(1983), 221.
- [6] 墨文川, 蔡相展, 李裕发(将在“山东大学学报”发表).
- [7] R. P. Feynman, “Photon-Hadron Interactions”, 1972.
- [8] J. Bjorken, SLAC Report SLAC-PUB-1756 (1976).
- [9] S. Brodsky and N. Weiss, *Phys. Rev.*, D16 (1977), 2325.
- [10] 谢去病, 陈鄂生, 刘希明 “ e^+e^- 湮灭中各种强子的产额”(尚未发表).

THE COMBINATION RULE OF QUARKS IN $e^+ e^-$ ANNIHILATION

XIE QU-BING Mo WEN-CHUAN LI YU-FA
(*Shandong University*)

ABSTRACT

We show that the near correlation in rapidity is consistent with the requirements of QCD, and completely determines the combination rule of quarks. We give the formulae for calculating yields of mesons, baryons and antibaryons, which are produced by a stochastic accumulation of quarks with similar rapidities. Using it to e^+e^- annihilation, the observation of recently unexpected copious production of baryons is explained naturally.