

# pp( $\bar{p}$ ) 反应过程强子产生的不对称性

刘希明 赵宁华 兰建胜

(山东大学物理系 济南 250100)

**摘要** 计算与分析了 pp 与 p $\bar{p}$  反应过程中轻味 uds 夸克的平均产生几率, 得到它们与反应类型和反应能量的关系. 进一步得出各种强子的相对产率, 发现平均粒子产率, 同位旋对称性, 正反粒子多重数比例以及奇异抑制因子等, 都与具体反应类型以及反应能量有关. 特别得出 pp 反应中正反重子比率大于 1, 这与重离子碰撞实验结果非常吻合.

**关键词** pp( $\bar{p}$ ) 反应 夸克产生几率 粒子多重数 正反重子比

## 1 引言

高能粒子(轻子轻子、轻子强子、强子强子和核核)反应提供了部分子碎裂与强子化的重要信息, 是揭示相互作用机制、检验 QCD 理论预言的重要途径, 一直是高能实验与理论的重要研究领域之一. 各种高能反应都要通过相变产生大量部分子(夸克与胶子), 部分子最终强子化为各种物理强子. 理论上可以把这一复杂过程分成为“硬过程”与“软过程”两个阶段, 前一个阶段可以由微扰 QCD(PQCD)描述, 而后一阶段目前只能借助各种唯象模型(如 Lund 的弦碎裂模型<sup>[1]</sup>、Webber 的团碎裂模型<sup>[2]</sup>等)描述.

近年来重离子碰撞强子化实验的一些结果也需要依靠强子化模型才能够解释. 如 RHIC 实验最近发现大横动量区质子 p 与  $\pi$  介子比例 p/ $\pi$  接近甚至超过 1, 在横动量  $p_T > 2\text{GeV}/c$  中等以上横动量区, 介子的横动量谱受到抑制, 而重子的横动量谱没有受到类似的抑制. 这一反常的比例以及不同强子的椭圆流  $v_2$  随横动量  $p_T$  变化明显不同的现象, 部分子碎裂模型没有给出合理解释. PQCD 通过部分子普适的碎裂函数  $D_{a \rightarrow h}(z)$  描述单举粒子 h 的产生截面

$$E \frac{d\sigma_h}{d^3P} = \sum_a \int_0^1 \frac{dz}{z^2} D_{a \rightarrow h}(z) E_a \frac{d\sigma_a}{d^3P_a},$$

但碎裂函数  $D_{a \rightarrow p}(z)/D_{a \rightarrow \pi^0}(z) < 1$ , 即使在很低的横动量  $p_T$  (如小于  $1\text{GeV}/c$ ) 下, 得到的重子介子比 p/ $\pi^0$

也比 1 小. 有的研究认为部分子穿越周围热密物质时, 部分子碎裂函数  $D_{a \rightarrow h}(z)$  会被“环境”改变, 引起变量  $z$  的重新标度, 但这种改变会以相同的方式影响产生的所有重子与介子, 也无法解释上述“反常”现象. 其原因在于重离子碰撞的部分子产生和部分子传播及与周围介质的相互作用过程虽然理论上已经比较明确, 但部分子的强子化过程目前并不清楚, 因此需要进一步深入研究. 事实上, 一方面产生大横动量的强子需要更大横动量部分子的碎裂, 而大横动量部分子产生截面随其横动量按指数规律下降, 因而截面非常小. 另一方面部分子的横动量被碎裂的多个强子所携带, 并非集中在一个强子内, 所以碎裂机制很难产生大横动量强子, 也就无法解释上述“意外”现象. 而在夸克组合模型中, 相空间中大量解禁闭的夸克反夸克在动量非常接近时, 能够组合成色单态形成介子, 介子的动量就是两者的动量和, 3 个夸克组合成的重子, 其动量则是 3 个夸克动量和, 这样较小横动量的部分子能够组合成较大横动量的强子, 因此很自然的能够解释大横动量区重子介子比趋近 1 的“意外”现象. 正是由于这些原因, 人们发展原来用作解释核反应的组合模型作为重离子碰撞的强子化机制描述其强子化. 其中由 R.J.Fries 等人提出的“小  $p_T$  夸克重组和大  $p_T$  夸克碎裂竞争机制”<sup>[3]</sup> 认为横动量小于  $6\text{GeV}/c$  的强子由夸克组合产生, 横动量特别大的强子由大横动量 jet 碎裂形成. 另一种由 V.Greco 等人提出的称为“部分子融合”的组合模型<sup>[4]</sup>, 认为 minjet 部分子与 QGP 中热部

分子相组合, 给出软硬部分子相组合的图像. 这些组合模型都能够解释 RHIC 的有关实验, 表明组合模型在解释 QGP 强子化方面的优势.

在研究  $e^+e^-$  湮没多粒子产生过程中提出并得到检验的比较成功的“夸克组合”强子化模型(QCM)<sup>[5]</sup>, 直接从夸克层次出发研究部分子的强子化, 不需要任何额外假定解释了  $e^+e^-$  湮没、 $pp(\bar{p})$  碰撞中末态粒子多重数、多重数分布、重子关联等一系列实验. 本文在夸克组合模型(QCM)框架下处理比较简单的  $pp$  与  $p\bar{p}$  反应过程, 这两种反应入射的强子都携带自身的净夸克与真空激发新产生的夸克一起强子化为末态强子, 这一本质的特征与重离子碰撞过程是完全相似的. 通过研究含有入射强子携带净夸克系统的强子化, 分析反应强子自身携带不同净夸克对末态强子的影响, 对研究重离子碰撞的强子化会有很多启示. 结果表明入射净夸克的影响即使在很高能量下也十分明显, 给出了同位旋不对称、奇异抑制因子随能量改变、重子与反重子比例大于 1 等等预言, 这些特征与重离子碰撞实验结果十分吻合. 下面首先给出强子化前随能量变化的夸克平均产生几率, 由此可以得到各种强子的相对产率, 进而给出  $pp$  与  $p\bar{p}$  反应强子化末态的不对称性特征. 最后对本文结果做了简单小结与讨论.

## 2 平均夸克产生几率

各种高能粒子反应类型不同, 夸克的产生机制与产生几率也不同. 背景最单纯的  $e^+e^-$  湮没过程夸克产生包括电弱与强相互作用两个阶段, 低能时按照夸克电荷平方的比例通过电弱过程产生一对“初始轻味夸克”,  $q_0\bar{q}_0$ ,  $q_0$  与  $\bar{q}_0$  通过强相互作用进一步激发产生许多对“新生轻味夸克”  $uds$ , 对于初始夸克为  $u_0\bar{u}_0$  的  $u_0$  jet 事例, 平均  $u\bar{u}$  夸克的几率比  $d\bar{d}$ ,  $s\bar{s}$  夸克的高, 仅考虑这一微少的差别就可以解释轻味夸克 jet 强子产生几率的不对称<sup>[6]</sup>. 对于背景稍微复杂的  $pp$  与  $p\bar{p}$  反应, 强子化前的夸克反夸克系统包括了入射  $p(\bar{p})$  的净夸克  $u_0$ ,  $d_0$ (或  $\bar{u}_0$ ,  $\bar{d}_0$ ), 同样会引起平均  $uds$  夸克几率的不对称性. 对于更复杂的重离子碰撞过程, 平均夸克几率也存在类似的不对称性. 强相互作用味道无关性是 QCD 的一个基本假定, 由强相互作用支配的新生夸克产生机制完全相同. 新生夸克主要是  $uds$  轻味夸克<sup>[7]</sup>, 其产生的几率与夸克质量  $m_u = m_d = m$ ,  $m_s$  有关, “隧道效应”给出这个几率是

$$P_u : P_d : P_s = ce^{-km_u^2} : ce^{-km_d^2} : ce^{-km_s^2}. \quad (1)$$

其中归一化常数是  $c = 1/(e^{-km_u^2} + e^{-km_d^2} + e^{-km_s^2})$ . 分别用  $n_u$ ,  $n_{\bar{u}}$ ,  $n_d$ ,  $n_{\bar{d}}$ ,  $n_s$ ,  $n_{\bar{s}}$  表示高能反应强相互作用过程以外产生(或入射强子携带)的不同味道的夸克、反夸克的数目, 用  $N$  表示一定能量下强相互作用过程产生的夸克对数, 则轻味夸克  $f$  与反夸克  $\bar{f}$  的平均产生几率可统一写成

$$\begin{cases} P_f = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km_f^2} + n_f) \\ P_{\bar{f}} = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km_{\bar{f}}^2} + n_{\bar{f}}) \end{cases}, \quad (2)$$

对于  $e^+e^-$  湮没过程, 因为初始夸克是成对产生的, 有关系  $n_f = n_{\bar{f}}$ . 比较复杂的  $pp$  反应理论上通常采用“领头粒子”模型描述,  $p$  中的一个  $u_0$ (或  $d_0$ ) 夸克与另一个  $p$  中的  $u_0$ (或  $d_0$ ) 夸克通过强相互作用产生  $N$  对新生夸克, 其中两个新生夸克分别与两个  $p$  中的旁观者  $u_0d_0$ (或  $u_0u_0$ ) diquark 组合成领头重子. 对于  $u_0u_0$  反应道只有  $n_u = 2$ , 其余皆为零, 按照(2)式得到平均  $uds$  夸克的产生几率为

$$\begin{cases} P_u(u_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km^2} + 2) \\ P_d(u_0) = P_{\bar{d}}(u_0) = P_{\bar{u}}(u_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km^2}) \\ P_s(u_0) = P_{\bar{s}}(u_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km_s^2}) \end{cases}, \quad (3)$$

对于  $d_0d_0$  反应道, 平均  $uds$  夸克的产生几率则为

$$\begin{cases} P_u(d_0) = P_{\bar{u}}(d_0) = P_{\bar{d}}(d_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km^2}) \\ P_d(d_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km^2} + 2) \\ P_s(d_0) = P_{\bar{s}}(d_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km_s^2}) \end{cases}, \quad (4)$$

这种情况下夸克、反夸克的几率不能分别单独归一化, 而是满足归一化条件

$$P_u(u_0) + P_d(u_0) + P_s(u_0) + P_{\bar{u}}(u_0) + P_{\bar{d}}(u_0) + P_{\bar{s}}(u_0) = 2,$$

在  $p\bar{p}$  反应过程中, 对于  $u_0\bar{u}_0$  反应道,  $n_u = n_{\bar{u}} = 1$ , 其余为零. 平均  $uds$  夸克与反夸克的产生几率是

$$\begin{cases} P_u(u_0) = P_{\bar{u}}(u_0) = \frac{1}{N+1} (Nce^{-km^2} + 1) \\ P_d(u_0) = P_{\bar{d}}(u_0) = \frac{1}{N+1} Nce^{-km^2} \\ P_s(u_0) = P_{\bar{s}}(u_0) = \frac{1}{N+1} Nce^{-km_s^2} \end{cases}, \quad (5)$$

反夸克与夸克的几率相等, 而且夸克、反夸克的几率是分别归一化的, 即

$$P_u(u_0) + P_d(u_0) + P_s(u_0) = 1, \quad P_{\bar{u}}(u_0) + P_{\bar{d}}(u_0) + P_{\bar{s}}(u_0) = 1$$

对于  $d_0\bar{d}_0$  反应道(取  $n_d = n_{\bar{d}} = 1$ , 其余为零)同样可以得出平均产生几率. 由此可以看出, 显然 pp 与  $p\bar{p}$  反应中夸克平均产生几率是不同的, 但所有这些夸克的平均产生几率都与夸克对数(也即反应能量)有关. 注意到 pp( $\bar{p}$ ) 反应平均带电粒子多重数与平均夸克对数近似相等  $\langle n_{ch} \rangle = \langle N \rangle$ , 而  $\sqrt{s} = 540\text{GeV}$  的  $p\bar{p}$  反应  $\langle n_{ch} \rangle \approx 20$ , 下面图 1, 图 2 给出 pp( $\bar{p}$ ) 反应  $u_0u_0(\bar{u}_0)$  道夸克平均产生几率随夸克对数  $N$  的关系, 可见这个差别是不能忽略的. 在下一节按照夸克组合图像, 给出各种强子的产生几率, 同样发现这些夸克几率的差异将引起粒子产率的不对称性.

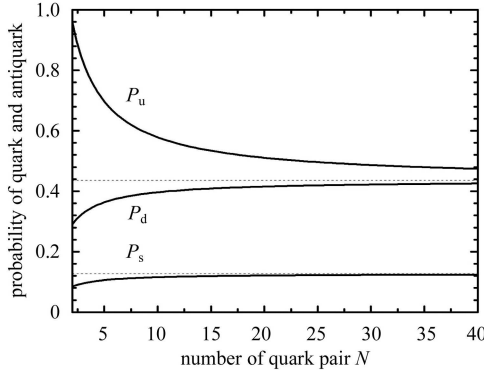


图 1 pp 反应  $u_0u_0$  道平均 uds 夸克产生几率随夸克对数  $N$  的变化

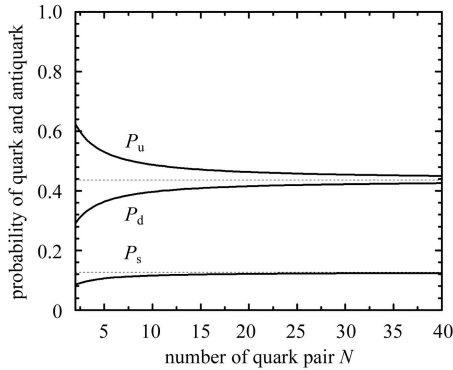


图 2  $p\bar{p}$  反应  $u_0\bar{u}_0$  道平均 uds 夸克产生几率随夸克对数  $N$  的变化

### 3 强子产率的不对称性

pp( $\bar{p}$ ) 反应过程所有产生的夸克、反夸克都要通过色相互作用组合成  $SU_f(3)$  介子 ( $q\bar{q}$ )、重子 ( $qqq$ ) 和反重子 ( $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ ) 态, 这个非常复杂的过程既与夸克之间的相互作用机制也与不同夸克产生几率有关. 在文献[6]中我们利用(1)式表示的夸克产生几率, 按照夸克组合图像得到夸克对数  $N$  很大时 ( $q_i\bar{q}_j$ ) 与 ( $q_iq_jq_k$ ) 态

的产生几率分别是

$$\begin{cases} P(q_i\bar{q}_j) = \langle M \rangle \exp(-bm_{ij}) \\ P(q_iq_jq_k) = \langle B \rangle \exp(-bm_{ijk}) \end{cases}, \quad (6)$$

这里  $m_{ij}$  与  $m_{ijk}$  分别表示 ( $q_i\bar{q}_j$ ) 与 ( $q_iq_jq_k$ ) 的结构夸克质量和, 结构夸克 uds 的质量由强子结构的夸克模型给出. 式中参数  $b = 7.114(\text{GeV}/c^2)^{-1}$  是与强相互作用强度有关的普通常数.  $\langle M \rangle$  与  $\langle B \rangle$  分别是一定能量下平均直生介子与直生重子多重数, 都可由夸克组合模型<sup>[5]</sup>给出.

由于 pp 与  $p\bar{p}$  反应平均夸克产生几率不同, 必然引起相同味道强子产率的不同, 下面举例说明. 如 pp 与  $p\bar{p}$  反应中  $\rho^+(u\bar{d})$  介子的产率及比值分别是

$$\rho^+(pp) = \langle M \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^2 e^{-2bm} + \langle M \rangle \frac{2Nc}{(N+1)^2} \exp\left(-\frac{bm(m+2m_s)}{m+m_s}\right), \quad (7)$$

$$\rho^+(p\bar{p}) = \langle M \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^2 e^{-2bm} + \langle M \rangle \frac{Nc}{(N+1)^2} \exp\left(-\frac{bm(m+2m_s)}{m+m_s}\right), \quad (8)$$

$$\frac{\rho^+(pp)}{\rho^+(p\bar{p})} = \frac{Nc + 2\exp(bm^2/(m+m_s))}{Nc + \exp(bm^2/(m+m_s))} > 1. \quad (9)$$

又如重子  $\Delta^{++}(uuu)$  在两种反应中其产率分别是

$$\begin{aligned} \Delta^{++}(pp) &= \langle B \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^3 e^{-3bm} + \langle B \rangle \frac{6(Nc)^2}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+2m)}{m_s+m}\right) + \\ &\langle B \rangle \frac{12Nc}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+m)}{m_s+m}\right) + \langle B \rangle \frac{1}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{3bmm_s}{m_s+m}\right), \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta^{++}(p\bar{p}) &= \langle B \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^3 e^{-3bm} + \langle B \rangle \frac{3(Nc)^2}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+2m)}{m_s+m}\right) + \\ &\langle B \rangle \frac{3Nc}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+m)}{m_s+m}\right) + \langle B \rangle \frac{1}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{3bmm_s}{m_s+m}\right), \quad (11) \end{aligned}$$

同样两种反应中  $\Delta^{++}(uuu)$  产率也是不同的

$$\frac{\Delta^{++}(\text{pp})}{\Delta^{++}(\text{p}\bar{\text{p}})} = \frac{(Nc)^3 + 6(Nc)^2 \exp\left(\frac{bm^2}{(m+m_s)}\right) + 12Nc \exp\left(\frac{2bm^2}{(m+m_s)}\right) + \exp\left(\frac{3bm^2}{(m+m_s)}\right)}{(Nc)^3 + 3(Nc)^2 \exp\left(\frac{bm^2}{(m+m_s)}\right) + 3Nc \exp\left(\frac{2bm^2}{(m+m_s)}\right) + \exp\left(\frac{3bm^2}{(m+m_s)}\right)} > 1. \quad (12)$$

按照同样的方法可以给出其他各种粒子的产率与比值. 以上结果可以看出在两种不同反应中, 相同味道的粒子的产率是不相等的. 在图3中给出两种反应过程中重子比值  $\Delta^{++}(\text{pp})/\Delta^{++}(\text{p}\bar{\text{p}})$  和介子比值  $\rho^+(\text{pp})/\rho^+(\text{p}\bar{\text{p}})$  随夸克对数的变化关系, 更容易看出这种差别直到很高能量时仍然存在.

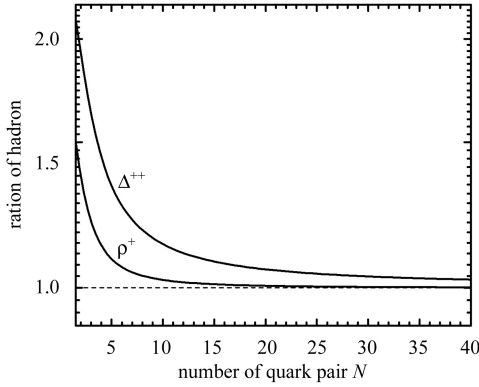


图 3 pp 与  $\text{p}\bar{\text{p}}$  反应过程中重子比例  $\Delta^{++}(\text{pp})/\Delta^{++}(\text{p}\bar{\text{p}})$  与介子比例  $\rho^+(\text{pp})/\rho^+(\text{p}\bar{\text{p}})$  随能量的变化

由于平均夸克产生几率不对称, 也必然会改变直生强子的同位旋对称性. 以 pp 反应为例, 如  $\Delta^+(\text{pp})$ ,  $\Delta^0(\text{pp})$  和  $\Delta^-(\text{pp})$  的产率分别是

$$\begin{aligned} \Delta^+(\text{pp}) &= \langle B \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^3 e^{-b3m} + \\ &\langle B \rangle \frac{4(Nc)^2}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+2m)}{m_s+m}\right) + \\ &\langle B \rangle \frac{4Nc}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+m)}{m_s+m}\right), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta^0(\text{pp}) &= \langle B \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^3 e^{-b3m} + \\ &\langle B \rangle \frac{2(Nc)^2}{(N+1)^3} \exp\left(-\frac{bm(3m_s+2m)}{m_s+m}\right), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Delta^-(\text{pp}) = \langle B \rangle \left( \frac{Nc}{N+1} \right)^3 e^{-b3m}, \quad (15)$$

把以上各式及式(10)相互对照, 容易看出同位旋对称性不再存在, 仅当  $N \rightarrow \infty$  时这种影响才会消失. 这种同位旋不对称的情况对于介子情况也同样存在.

对于 pp 反应, 由于正、反夸克的几率不相同, 必然导致正反粒子产率不相等. 如  $\bar{\Delta}^{++}(\text{pp})$  的产

率与(15)式相同, 该式与(10)式相比较, 容易看出  $\Delta^{++}(\text{pp})$  的产率高于  $\bar{\Delta}^{++}(\text{pp})$  的产率, 其比值是大于 1 的

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^{++}(\text{pp})}{\bar{\Delta}^{++}(\text{pp})} &= 1 + \frac{6}{Nc} \exp\left(\frac{bm^2}{m_s+m}\right) + \\ &\frac{12}{(Nc)^2} \exp\left(\frac{2bm^2}{m_s+m}\right) + \frac{1}{(Nc)^3} \exp\left(\frac{3bm^2}{m_s+m}\right) > 1. \end{aligned} \quad (16)$$

这种不对称性对于介子情况同样存在. 在图4中给出重子  $\Delta^{++}(\text{pp})/\bar{\Delta}^{++}(\text{pp})$  以及介子  $\rho^+(\text{pp})/\rho^-(\text{pp})$  比例随夸克对数的变化, 可以看出直到很高能量时这种不对称仍然很明显.

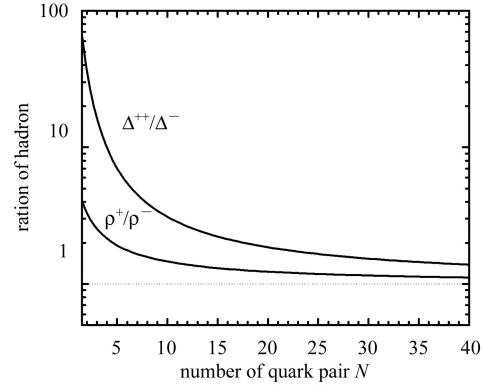


图 4 pp 反应过程正粒子产率明显高于相应反粒子的产率

早期的 pp 反应实验已经观测到这种正反粒子产率不对称的现象, 如低能实验上得到  $\langle \pi^+ \rangle - \langle \pi^- \rangle \approx 0.5$ ,  $\langle K^+ \rangle - \langle K^- \rangle \approx 0.1$ . 因为末态  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  介子的产率包括了共振粒子(介子与重子)的衰变贡献, 平均多重数可以表示成

$$\langle n_i \rangle = \sum_j P_j Br(j \rightarrow i) \langle M \rangle + \sum_k P_k Br(k \rightarrow i) \langle B \rangle, \quad (17)$$

式中  $P_j$ ,  $P_k$  分别是介子 j 与重子 k 的相对权重, 按照上面的方法都可以在夸克组合模型框架下计算出.  $Br(j \rightarrow i)$ ,  $Br(k \rightarrow i)$  则分别是介子 j 与重子 k 衰变为末态粒子 i 的衰变分支比, 粒子物理手册已经给出具体数据. 一般取夸克对数  $N$  满足 poisson 分布

$$P(N, \langle N \rangle) = \frac{\langle N \rangle^N e^{-\langle N \rangle}}{N!}.$$

利用 poisson 分布, 上面各种强子产率都变成平均夸克对数  $\langle N \rangle$  的函数, 而  $\langle N \rangle$  能够与质心能量相对应, 这

样就得到可以直接与实验比较的结果. 对于 pp 反应过程, 存在  $u_0u_0$  与  $d_0d_0$  不同的反应道, 平均强子多重数  $\langle n \rangle$  是对不同反应道的平均  $\langle n \rangle = \sum_i P_i \langle n_i \rangle$ , 在表 1

中给出计算的末态介子平均多重数  $\langle \pi^\pm \rangle$  及  $\langle K^\pm \rangle$  与实验<sup>[8]</sup>的比较. 图 5(a), (b) 分别给出  $\langle \pi^\pm \rangle$  及  $\langle K^\pm \rangle$  随能量的变化.

表 1 pp 反应过程正反粒子多重数不对称性

能量/ GeV	$\langle \pi^+ \rangle$		$\langle \pi^- \rangle$		$\langle K^+ \rangle$		$\langle K^- \rangle$	
	实验	理论	实验	理论	实验	理论	实验	理论
23	3.71±0.19	3.72	3.27±0.16	3.31	0.337±0.017	0.339	0.209±0.010	0.219
31	4.07±0.21	3.97	3.65±0.18	3.60	0.367±0.018	0.365	0.244±0.012	0.249
45	4.45±0.22	4.41	4.09±0.21	4.00	0.411±0.021	0.402	0.286±0.014	0.286
53	4.68±0.23	4.62	4.29±0.21	4.18	0.430±0.022	0.422	0.306±0.015	0.295

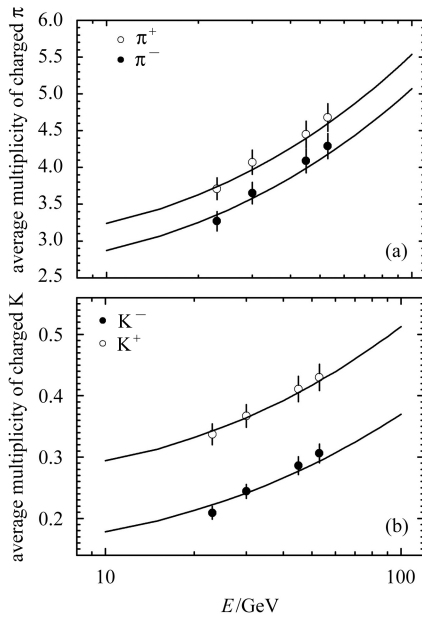


图 5 (a) pp 反应末态  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  多重数随能量的变化;

(b) pp 反应末态  $K^+$ ,  $K^-$  多重数随能量的变化

利用以上粒子产率公式, 也容易得到的奇异粒子与非奇异粒子产率比值也是与反类型和反应能量有关的, 可以解释低能量时 pp( $\bar{p}$ ) 反应奇异抑制因子随能量升高的现象.

## 4 小结与讨论

因为 pp 与  $p\bar{p}$  是两种入射强子不完全相同的高能

反应, 因此强子化前平均夸克产生几率也不同, 这种影响在很高能量下仍然比较明显. 按照夸克几率得到的两种反应末态粒子产率也不完全相同. 特别是对于 pp 反应, 因为入射的强子携带的都是夸克 ud, 使得平均 ud 夸克的几率比反夸克  $\bar{u}\bar{d}$  的几率明显提高(而  $s\bar{s}$  夸克的几率不变), 这样含有 ud 夸克粒子的产率也会提高. 非常有意义的预言是正粒子的产率明显高于相应的反粒子的产率, 这与重离子碰撞实验发现的  $\langle B \rangle / \langle \bar{B} \rangle > 1$  完全吻合. 对于末态  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  介子, 其多重数包括了各种衰变贡献, 但实验结果仍表明正粒子的产率大于相应反粒子的产率, 本文的计算结果基本与实验一致, 可见入射净夸克的影响是不能忽略的. 对于更复杂的重离子碰撞强子化事例, 最终产生的大量解禁闭(胶子碎裂为一对夸克反夸克)夸克反夸克物质, 构成一个大的色单态系统, 夸克的几率同样比反夸克的高, 也会引起重子比重反子产率高的现象. 同时在这个系统内, 由于夸克反夸克的相空间密度大, 更利于夸克、夸克(反夸克)之间的组合. 另一方面最近的实验<sup>[9]</sup>表明重离子碰撞过程与  $e^+e^-$  湮没过程的强子化特征具有许多相同的性质, 这意味着两种性质完全不同的反应过程, 导致多粒子产生的强子化机制必定存在着某些相同之处. 因此经过修正完善后的夸克组合模型有可能解释重离子碰撞的强子化过程. 事实上, 把组合模型推广到十分复杂的重离子碰撞过程, 需要解决许多理论分析问题, 这也是我们进一步探索分析的问题.

## 参考文献(References)

- 1 Andersson B, Gustafson G, Ingeman G et al. Phys. Rept., 1983, **97**: 31; Sjostrand T. Comput. Phys. Commun., 1986, **39**: 347; Sjostrand T, Bengtsson M. Comput. Phys. Commun., 1987, **43**: 367
- 2 Marchesini G, Webber B R. Nucl. Phys., 1984, **B238**: 1; Webber B R. Nucl. Phys., 1984, **B238**: 492; Marchesini G, Webber B R. Nucl. Phys., 1988, **B310**: 461; Marchesini G, Webber B R et al. Comput. Phys. Commun., 1992, **67**: 465
- 3 Fries R J, Muller B et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044902
- 4 Greco V, Ko M, Leval P. Phys. Rev., 2003, **C68**: 034904
- 5 XIE Qu-Bing, LIU Xi-Ming. Phys. Rev., 1988, **D38**(7): 2169; LIU Xi-Ming. HEP & NP, 1989, **13**(9): 803 (in Chinese) (刘希明. 高能物理与核物理, 1989, **13**(9): 803)
- 6 LIU Xi-Ming. HEP & NP, 2004, **28**(10): 1026—1032; **28**(1): 11—16 (in Chinese) (刘希明. 高能物理与核物理, 2004, **28**(10): 1026—1032; **28**(1): 11—16)
- 7 Chliapnikov P V. Phys. Lett., 1999, **B462**: 341—353
- 8 Rossi A M, Vannini G. Nucl. Phys., 1975, **B84**(84): 269—305
- 9 Peter Steinberg A et al. Nucl. Phys., 2003, **A715**: 490—493

## Asymmetry of Hadron Production in $pp(\bar{p})$ Reaction

LIU Xi-Ming ZHAO Ning-Hua LAN Jian-Sheng

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

**Abstract** The mean production probability of light flavor u, d and s quarks in the pp and  $p\bar{p}$  reaction is calculated and discussed in this paper. It is found that the production probability depends on the energy and type of the reaction. As a result, the average yields of directly hadrons, the asymmetry of isospin, and the ratio of particle to antiparticle are all dependent on the energy and type of the reaction. In particular, we find that the ratio of baryon to antibaryon in pp reactions is larger than 1, which is consistent with the experiment results of heavy ion colliding.

**Key words**  $pp(\bar{p})$  collision, probability of quark, rates of particles, ratio of baryon to antibaryon