

$\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$ 时 Au+Au 碰撞中的 反重子与重子比率

刘希明

(山东大学物理系 济南 250100)

摘要 按照夸克随机组合的简单组合模型, 本文通过分析得出重子反重子比率与夸克反夸克平均产生几率的关系. 进一步计算了相对论重离子碰撞过程中各种反粒子与粒子的比率, 不需要任何额外假定, 预言的比率与 RHIC 加速器 $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$ 时 Au+Au 碰撞 STAR 实验的结果基本一致. 表明夸克组合模型能够解释相对论重离子碰撞过程的反粒子与粒子比率.

关键词 相对论重离子碰撞 夸克组合模型 反重子与重子比率

1 引言

相对论重离子碰撞实验的目的是探索极端相对论情况下极高温与能量密度下核物质通过相变解禁闭形成夸克胶子等离子体(QGP)存在的信号. 格点QCD理论通过计算^[1]给出相变的临界温度 $T_c \approx 170\text{MeV}$, 能量密度 $\varepsilon \approx 2\text{GeV}/\text{fm}^3$. 按照 Bjorken 的预言^[2]以及 $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$ 能量时 Au+Au 碰撞实验测量的横能量 (E_T) 等, 预言 RHIC 中心 Au+Au 碰撞实验的空间能量密度能够产生这种解禁闭的物质. 许多低能重离子碰撞实验也得到了这种新物质存在的间接证据. 如实验上广泛测量的反粒子相对粒子的比率, 给出了关于净重子密度或重子化学势的有关信息. 这些实验启示人们进一步测量反奇异重子相对奇异重子的比率, 这种测量利于区别强子气和解囚禁的夸克胶子等离子体. 而各种反粒子相对粒子的比率也能够对各种“组合模型”做出直接检验^[3].

相对论重离子碰撞的强子化结果是检验强子化机制的重要途径, 强子化机制的研究也能够对实验做出预言或检验. “强子化”是指高能反应中产生的末态部分子(夸克与胶子)如何产生实验上观察到的物理强子以及强子的各种谱分布. 由于支配这一过程的非微扰量子色动力学(NPQCD)没有真正解决, 至今只能借助实验结果参数化的“碎裂函数”或唯象模型来描述. 而如相对论重离子碰撞实验得到的中等

以上横动量区, 质子 p 与 π 介子的比率 p/π 接近甚至超过 1, 以及不同强子的椭圆流 v_2 与横动量 P_T 明显不同关系的“反常”现象, 部分子的标准碎裂模型没有给出自洽的解释. 为此人们开始发展原来用作解释核核反应的“组合模型”研究相对论重离子碰撞实验的强子化过程, 并解释了有关的实验现象. 另一方面, PHOBOS 实验组的结果^[4]表明, RHIC 能区重离子碰撞的带电粒子多重数 $\langle n_{ch} \rangle / \langle N_{part}/2 \rangle$ 、带电粒子赝快度分布 $dn_{ch}/d\eta / \langle N_{part}/2 \rangle$ 以及带电粒子平台分布的高度 $dn_{ch}/d\eta|_{|\eta|<1} / \langle N_{part}/2 \rangle$, 与 e^+e^- 湮没实验具有相同的行为. 这些实验事实似乎表明两种完全不同的反应, 导致多粒子产生的强子化机制具有某些共同之处. 因此发展与完善在 e^+e^- 湮没过程取得成功的强子化模型, 探索能否推广到相对论重离子碰撞, 解释重离子碰撞实验是很有必要的.

相对论重离子碰撞过程可以简单概括为高度洛伦兹收缩的核以接近光速的速度发生对撞, 在对撞区产生大量夸克胶子, 夸克胶子相互作用形成解禁闭的夸克物质. 在 1999 年夸克物质国际会议上^[5], 提出了一种相对论重离子碰撞强子化的简单图像. 碰撞的第一阶段, 形成夸克胶子等离子体色单态火球. 随着火球膨胀与冷却, 胶子碎裂成新的夸克反夸克. 这个由大量夸克反夸克(包括碰撞强子携带的净味初始夸克)组成的色单态系统相空间密度非常大, 夸克与反夸克(夸克)之间不断的交换颜色发生相互作用, 如果它们

之间相对速度足够低, 即相互作用时间足够长, 总能够形成色单态形成强子, 如介子 $q\bar{q}$ 、重子 qqq 与反重子 $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ 等. 而夸克组合模型最适合处理这种大量夸克反夸克系统的强子化过程.

基于以上考虑, 本文把我们提出的夸克组合模型^[6] (QCM) 推广到相对论重离子碰撞, 试图用一个简单图像解释实验上观测的反重子与重子比率. 这个组合模型直接从夸克层次出发, 经过完善后能够处理含有初始夸克系统的强子化过程, 解释了 pp 与 $p\bar{p}$ 反应过程^[7] 强子产率的不对称性等. 这两种反应入射的质子(反质子)都携带自身的净味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. 我们的分析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 pp 与 $p\bar{p}$ 反应中强子同位旋不对称、奇异抑制因子随能量改变、反重子与重子比例小于1等等预言, 这些特征与重离子碰撞实验结果十分吻合. 把这个简单模型用来研究相对论重离子碰撞强子化过程强子之间的比率, 需要的基本参数是夸克、反夸克的平均产生几率, 也即新生夸克的数量与入射核子携带的净味夸克的数量, 以及作为产生 QGP 信号之一的奇异抑制因子 λ_s , 这些参数目前只能够由实验资料抽出. 在第二节首先给出“夸克组合”(QCM)模型得到的各种反强子、强子比率的普适关系, 与 CERN SPS 的 Pb+Pb 碰撞实验的比较表明夸克组合模型(QCM)在这一点上是合理的. 在第三节确定出模型需要的参数, 给出可以直接与 RHIC 实验比较的强子比率, 其中绝大部分预言在实验误差范围内与实验是一致的. 最后给出简单的小结与讨论.

2 强子比率的普适关系

各种高能反应所有产生的夸克、反夸克都要通过色相互作用强子化为物理强子, 最基本的强子是 $SU_f(3)$ 介子 ($q\bar{q}$)、重子 (qqq) 和反重子 ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$), 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的几率有关. 在文献[8]中利用结构夸克质量表示夸克的产生几率 p_i , 得到 $(q\bar{q})$ 态的产生几率是

$$P(q_i\bar{q}_j) = a \exp(-km_i^2) \exp(-km_j^2) = ap_i p_j.$$

因为强相互作用与味道无关, 式中参数 a 对不同味道的 $(q\bar{q})$ 是普适的, 是仅与强相互作用组合机制有关的参数. 同样可以写出 (qqq) 与 $(\bar{q}\bar{q}\bar{q})$ 的几率表示式.

分别用 $p_q, p_{\bar{q}}$ ($q=u, d, s$) 表示夸克与反夸克的几率. 并用 $b(\bar{b})$ 表示夸克组合成重子(反重子)与强相互作用

机制有关而与夸克味道无关的普适参数. 则容易给出各种 (qqq) 的产生几率, 表示为

$$\begin{aligned} |uuu\rangle &= bp_u^3, & |uud\rangle &= bp_u^2 p_d, & |uus\rangle &= bp_u^2 p_s, \\ |ddd\rangle &= bp_d^3, & |ddu\rangle &= bp_d^2 p_u, & |dds\rangle &= bp_d^2 p_s, \\ |sss\rangle &= bp_s^3, & |ssu\rangle &= bp_s^2 p_u, & |ssd\rangle &= bp_s^2 p_d, \\ |uds\rangle &= bp_u p_d p_s. \end{aligned} \quad (1)$$

同样 $(\bar{q}\bar{q}\bar{q})$ 的几率表示为

$$\begin{aligned} |\bar{u}\bar{u}\bar{u}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{u}}^3, & |\bar{u}\bar{u}\bar{d}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{d}}, & |\bar{u}\bar{u}\bar{s}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{s}}, \\ |\bar{d}\bar{d}\bar{d}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{d}}^3, & |\bar{d}\bar{d}\bar{u}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{d}}^2 p_{\bar{u}}, & |\bar{d}\bar{d}\bar{s}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{d}}^2 p_{\bar{s}}, \\ |\bar{s}\bar{s}\bar{s}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{s}}^3, & |\bar{s}\bar{s}\bar{u}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{s}}^2 p_{\bar{u}}, & |\bar{s}\bar{s}\bar{d}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{s}}^2 p_{\bar{d}}, \\ |\bar{u}\bar{d}\bar{s}\rangle &= \bar{b}p_{\bar{u}} p_{\bar{d}} p_{\bar{s}}. \end{aligned} \quad (2)$$

对于 $(q\bar{q})$ 态的几率, 可同样得到, 分别是

$$\begin{aligned} |u\bar{u}\rangle &= ap_u p_{\bar{u}}, & |u\bar{d}\rangle &= ap_u p_{\bar{d}}, & |u\bar{s}\rangle &= ap_u p_{\bar{s}}, \\ |d\bar{d}\rangle &= ap_d p_{\bar{d}}, & |d\bar{u}\rangle &= ap_d p_{\bar{u}}, & |d\bar{s}\rangle &= ap_d p_{\bar{s}}, \\ |s\bar{s}\rangle &= ap_s p_{\bar{s}}, & |s\bar{u}\rangle &= ap_s p_{\bar{u}}, & |s\bar{d}\rangle &= ap_s p_{\bar{d}}. \end{aligned} \quad (3)$$

利用强子结构的 $SU_f(3)$ 夸克波函数, 由以上3式容易得到各种介子、重子以及反重子产生几率的表示式. 而以上各式中的普适参数 a, b 及 \bar{b} 在归一化时自动消去. 把粒子几率乘以平均直接产生的介子、重子和反重子多重数 M, B 与 \bar{B} , 就是这些粒子的直生多重数. 分别用 $N_u, N_{\bar{u}}, N_d, N_{\bar{d}}, N_s, N_{\bar{s}}$ 表示高能反应产生的 uds 与 $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$ 夸克总的数目. 因为强子化过程不改变夸克的数目, 则联立以上3个方程, 给出有关参数的约束方程

$$\begin{aligned} N_u &= B(3|uuu\rangle + 2|uud\rangle + 2|uus\rangle + |ddu\rangle + \\ &|ssu\rangle + |uds\rangle) + M(|u\bar{u}\rangle + |u\bar{d}\rangle + |u\bar{s}\rangle) = \\ &B(3p_u^3 + 2p_u^2 p_d + 2p_u^2 p_s + p_d^2 p_u + p_s^2 p_u + p_u p_d p_s) + \\ &M(p_u p_{\bar{u}} + p_u p_{\bar{d}} + p_u p_{\bar{s}}), \end{aligned} \quad (4)$$

同样的方法给出下列关系

$$\begin{aligned} N_d &= B(3p_d^3 + 2p_d^2 p_u + 2p_d^2 p_s + p_u^2 p_d + p_s^2 p_d + p_u p_d p_s) + \\ &M(p_d p_{\bar{u}} + p_d p_{\bar{d}} + p_d p_{\bar{s}}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} N_s &= B(3p_s^3 + 2p_s^2 p_u + 2p_s^2 p_d + p_u^2 p_s + p_d^2 p_s + p_u p_d p_s) + \\ &M(p_s p_{\bar{u}} + p_s p_{\bar{d}} + p_s p_{\bar{s}}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} N_{\bar{u}} &= \bar{B}(3p_{\bar{u}}^3 + 2p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{d}} + 2p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{s}} + p_{\bar{d}}^2 p_{\bar{u}} + p_{\bar{s}}^2 p_{\bar{u}} + p_{\bar{u}} p_{\bar{d}} p_{\bar{s}}) + \\ &M(p_{\bar{u}} p_u + p_{\bar{u}} p_d + p_{\bar{u}} p_s), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} N_{\bar{d}} &= \bar{B}(3p_{\bar{d}}^3 + 2p_{\bar{d}}^2 p_{\bar{u}} + 2p_{\bar{d}}^2 p_{\bar{s}} + p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{d}} + p_{\bar{s}}^2 p_{\bar{d}} + p_{\bar{u}} p_{\bar{d}} p_{\bar{s}}) + \\ &M(p_{\bar{d}} p_u + p_{\bar{d}} p_d + p_{\bar{d}} p_s), \end{aligned} \quad (8)$$

$$N_s = \bar{B}(3p_s^3 + 2p_s^2 p_{\bar{u}} + 2p_s^2 p_{\bar{d}} + p_{\bar{u}}^2 p_s + p_{\bar{d}}^2 p_s + p_{\bar{u}} p_{\bar{d}} p_s) + M(p_s p_u + p_s p_d + p_s p_s). \quad (9)$$

(4)–(9) 式为非线性方程组, 给出夸克与反夸克几率、直生介子多重数与直生重子多重数等之间的约束条件.

利用(1), (2)式容易给出反重子与重子的比率. 为直观采用粒子符号表示粒子多重数, 如 $\Lambda = |uds\rangle$ 等.

$$\begin{aligned} \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} &= \frac{\bar{B} p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{d}}}{B p_u^2 p_d}, & \frac{\bar{\Lambda}(\bar{u}\bar{d}\bar{s})}{\Lambda(uds)} &= \frac{\bar{B} p_{\bar{u}} p_{\bar{d}} p_s}{B p_u p_d p_s}, \\ \frac{\bar{\Xi}^+(\bar{d}\bar{s}\bar{s})}{\Xi^-(dss)} &= \frac{\bar{B} p_{\bar{d}} p_s^2}{B p_d p_s^2}, & \frac{\bar{\Xi}^0(\bar{u}\bar{s}\bar{s})}{\Xi^0(uss)} &= \frac{\bar{B} p_{\bar{u}} p_s^2}{B p_u p_s^2}, \\ \frac{\bar{\Sigma}^-(\bar{u}\bar{u}\bar{s})}{\Sigma^+(uus)} &= \frac{\bar{B} p_{\bar{u}}^2 p_s}{B p_u^2 p_s}, & \frac{\bar{\Sigma}^+(\bar{d}\bar{d}\bar{s})}{\Sigma^-(dds)} &= \frac{\bar{B} p_{\bar{d}}^2 p_s}{B p_d^2 p_s}, \\ \frac{\bar{\Omega}^+(\bar{s}\bar{s}\bar{s})}{\Omega^-(sss)} &= \frac{\bar{B} p_s^3}{B p_s^3}, \end{aligned} \quad (10)$$

同样得出介子之间的比率

$$\begin{aligned} \frac{K^-(\bar{u}s)}{K^+(u\bar{s})} &= \frac{M p_{\bar{u}} p_s}{M p_u p_s}, & \frac{\bar{K}^0(\bar{d}s)}{K^0(d\bar{s})} &= \frac{M p_{\bar{d}} p_s}{M p_d p_s}, \\ \frac{\rho^-(\bar{d}u)}{\rho^+(d\bar{u})} &= \frac{M p_d p_{\bar{u}}}{M p_{\bar{d}} p_u}, \end{aligned} \quad (11)$$

利用(11)式, 可以把式(10)中的重子比率用质子比率 p/\bar{p} 与介子比率的乘积表示出, 得到重子比率关系的另一种表示形式

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\Lambda}(\bar{u}\bar{d}\bar{s})}{\Lambda(uds)} &= \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} \frac{K^+(u\bar{s})}{K^-(\bar{u}s)}, \\ \frac{\bar{\Xi}^+(\bar{d}\bar{s}\bar{s})}{\Xi^-(dss)} &= \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} \left(\frac{K^+(u\bar{s})}{K^-(\bar{u}s)} \right)^2, \\ \frac{\bar{\Xi}^0(\bar{u}\bar{s}\bar{s})}{\Xi^0(uss)} &= \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} \frac{K^+(u\bar{s}) K^0(d\bar{s})}{K^-(\bar{u}s) K^0(d\bar{s})}, \\ \frac{\bar{\Sigma}^-(\bar{u}\bar{u}\bar{s})}{\Sigma^+(uus)} &= \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} \frac{K^0(d\bar{s})}{\bar{K}^0(\bar{d}s)}, \\ \frac{\bar{\Sigma}^+(\bar{d}\bar{d}\bar{s})}{\Sigma^-(dds)} &= \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} \frac{K^+(u\bar{s}) \rho^+(u\bar{d})}{K^-(\bar{u}s) \rho^-(\bar{u}d)}, \\ \frac{\bar{\Omega}^+(\bar{s}\bar{s}\bar{s})}{\Omega^-(sss)} &= \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} \left(\frac{K^+(u\bar{s})}{K^-(\bar{u}s)} \right)^2 \frac{K^0(d\bar{s})}{\bar{K}^0(\bar{d}s)}, \end{aligned} \quad (12)$$

联立以上有关表示式, 重子混合乘积的比率可以用直生介子的比率给出, 进而可以表示成夸克(反夸克)产生几率的比值. 分别用符号 d_i 表示

$$d_1 = \frac{\bar{\Lambda}(\bar{u}\bar{d}\bar{s})}{\Lambda(uds)} \frac{p(uud)}{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})} = \frac{K^+(u\bar{s})}{K^-(\bar{u}s)} = \frac{p_u p_s}{p_{\bar{u}} p_s},$$

$$d_2 = \left[\frac{\bar{\Xi}^+(\bar{d}\bar{d}\bar{s})}{\Xi^-(dss)} \frac{p(uud)}{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{K^+(u\bar{s})}{K^-(\bar{u}s)} = \frac{p_u p_s}{p_{\bar{u}} p_s},$$

$$d_3 = \left[\frac{\bar{\Xi}^0(\bar{u}\bar{s}\bar{s})}{\Xi^0(uss)} \frac{p(uud)}{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})} \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$\left[\frac{K^+(u\bar{s}) K^0(d\bar{s})}{K^-(\bar{u}s) \bar{K}^0(\bar{d}s)} \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{p_u p_d p_s}{p_{\bar{u}} p_{\bar{d}} p_s}},$$

$$d_4 = \frac{\bar{\Sigma}^-(\bar{u}\bar{u}\bar{s})}{\Sigma^+(uus)} \frac{p(uud)}{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})} = \frac{K^0(d\bar{s})}{\bar{K}^0(\bar{d}s)} = \frac{p_d p_s}{p_{\bar{d}} p_s},$$

$$d_5 = \frac{\bar{\Sigma}^+(\bar{d}\bar{d}\bar{s})}{\Sigma^-(dds)} \frac{p(uud)}{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})} = \frac{K^+(u\bar{s}) \rho^+(u\bar{d})}{K^-(\bar{u}s) \rho^-(\bar{u}d)} = \frac{p_u^2 p_{\bar{d}} p_s}{p_{\bar{u}}^2 p_d p_s},$$

$$d_6 = \left[\frac{\bar{\Omega}^+(\bar{s}\bar{s}\bar{s})}{\Omega^-(sss)} \frac{p(uud)}{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})} \right]^{\frac{1}{3}} = \left\{ \left(\frac{K^+(u\bar{s})}{K^-(\bar{u}s)} \right)^2 \frac{K^0(d\bar{s})}{\bar{K}^0(\bar{d}s)} \right\}^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{p_u^2 p_d p_s^3}{p_{\bar{u}}^2 p_{\bar{d}} p_s^3} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (13)$$

这是一组仅由夸克(反夸克)产生几率决定的普适关系, 按照同样的分析也可以得到其他所有重子混合乘积的比率. 如果夸克几率满足关系 $p_u = p_d = p_{\bar{u}} = p_{\bar{d}}$, $p_s = p_s$, 则上面式(13)中的所有重子混合乘积比率皆为1. 对于高能 e^+e^- 湮没过程, 可以忽略弱电过程产生初始夸克的影响时, 就属于这种情况. 对于 pp 反应, 如果考虑入射质子携带初始净味夸克的影响, 分析表明 $p_u \neq p_{\bar{u}}$, 式(13)中的各种比率会略有差别. 如果夸克几率满足关系 $p_u = p_d$, $p_{\bar{u}} = p_{\bar{d}}$ 与 $p_s = p_s$, 则式(13)中的比率是由夸克 u(或 d) 的几率 p_u 与反夸克的 \bar{u} (或 \bar{d}) 几率 $p_{\bar{u}}$ 的比值决定的相同的常数, 即满足关系 $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = d_6 = p_u/p_{\bar{u}}$. CERN SPS Pb + Pb 碰撞实验^[9] 给出的结果 $d_1 = 1.9 \pm 0.3$, $d_2 = 1.89 \pm 0.15$ 与 $d_6 = 1.76 \pm 0.20$ 是近似相等的常数. 我们的预言与这个实验结果是基本一致的. CERN SPS 的 Pb + Pb 碰撞的实验结果表明夸克 u(d) 的几率大于反夸克 \bar{u} (\bar{d}) 的几率, 这正是入射核子携带净味夸克(ud) 引起的效应. 在下一节进一步给出相对论重离子碰撞过程夸克的产生几率, 可以给出各种重子比率能够与实验直接比较的数值结果.

3 相对论重离子碰撞中反重子与重子比率

相对论重离子碰撞过程强子化前的夸克反夸克系统包括入射核子携带的净味初始夸克, 也包括新产生的 $q\bar{q}$ 夸克对, 新生夸克是成对产生的, 也即夸克反夸克的几率(或数量)相等, 分别用 p'_u, p'_d 与 p'_s 表示新生

轻味夸克uds的几率,通常称奇异夸克相对非奇异夸克几率的比值 $\lambda_s = p'_s/p'_u = p'_s/p'_d$ 为奇异抑制因子. 因为夸克几率是归一的: $p'_u + p'_d + p'_s = 1$, 以及u, d夸克的产生几率相等: $p'_u = p'_d (= p'_q)$, 因此只要抑制因子 λ_s 确定, 则新生夸克的几率完全确定. 因为相对论重离子碰撞实验末态带电粒子多重数 $\langle n_{ch} \rangle$ 非常高, 表明强子化前夸克数目非常大, 可以认为入射核子携带的初始轻味u与d夸克的数量近似相等. 用 N_q 表示这些净夸克的对数, 用 N 表示总的夸克对数, 则平均uds轻味夸克的几率分别是

$$\begin{aligned} p_u = p_d &= \frac{(N - N_q)p'_u + N_q}{N} = \left(1 - \frac{N_q}{N}\right)p'_u + \frac{N_q}{N}, \\ p_s &= \frac{(N - N_q)p'_s}{N} = \left(1 - \frac{N_q}{N}\right)p'_s; \end{aligned} \quad (14)$$

而反夸克的几率则是

$$\begin{aligned} p_{\bar{u}} = p_{\bar{d}} &= \frac{(N - N_q)p'_{\bar{u}}}{N} = \frac{(N - N_q)p'_u}{N} = \left(1 - \frac{N_q}{N}\right)p'_u, \\ p_{\bar{s}} &= \frac{(N - N_q)p'_{\bar{s}}}{N} = \frac{(N - N_q)p'_s}{N} = \left(1 - \frac{N_q}{N}\right)p'_s. \end{aligned} \quad (15)$$

可见夸克平均几率可由净夸克对数 N_q 与总夸克对数 N 的比值 N_q/N 以及奇异抑制因子 λ_s 来确定. 由于碰撞核子携带的为净夸克ud, 以上两式表明夸克u(d)几率大于反夸克 $\bar{u}(\bar{d})$ 的几率: $p_u = p_d > p_{\bar{u}} = p_{\bar{d}}$, 因为新生夸克、反夸克的几率相等, 所以平均奇异夸克反夸克几率也相等, 即有 $p_s = p_{\bar{s}}$. 以上夸克与反夸克的几率不能单独归一化, 而满足“归一化”条件

$$\sum_q p_q + p_{\bar{q}} = 2 \quad (16)$$

利用(14), (15), 按照(1), (2), (3)的规则, 可以得到各种直生强子的产率, 下面举例说明直生重子多重数的比率与 N_q/N , λ_s 的关系

$$\begin{aligned} \frac{\bar{p}(\bar{u}\bar{u}\bar{d})}{p(uud)} &= \frac{\bar{B}}{B} \left[\frac{(N - N_q)p'_q}{(N - N_q)p'_q + N_q} \right]^3 \\ \frac{\bar{\Lambda}(\bar{u}\bar{d}\bar{s})}{\Lambda(uds)} &= \frac{\bar{B}}{B} \left[\frac{(N - N_q)p'_q}{(N - N_q)p'_q + N_q} \right]^2 \\ \frac{\bar{\Xi}^+(\bar{d}\bar{d}\bar{s})}{\Xi^-(dds)} &= \frac{\bar{B}}{B} \frac{(N - N_q)p'_q}{(N - N_q)p'_q + N_q} \end{aligned} \quad (17)$$

式中 B 与 \bar{B} 是平均重子多重数与反重子多重数. 因为总的夸克数量大于反夸克数量, 则成立 $\bar{B} < B$, 因此上式的比率必然小于1. 相同的办法可以给出直生重子

多重数的混合比率

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\Lambda}/\Lambda}{\bar{p}/p} &= \frac{(N - N_q)p'_q + N_q}{(N - N_q)p'_q} \\ \frac{\bar{\Xi}^+/\Xi^-}{\bar{\Lambda}/\Lambda} &= \frac{(N - N_q)p'_q + N_q}{(N - N_q)p'_q} \\ \frac{\bar{\Omega}^+/\Omega^-}{\bar{\Xi}^+/\Xi^-} &= \frac{(N - N_q)p'_q + N_q}{(N - N_q)p'_q} \end{aligned} \quad (18)$$

可见所有比率都可以表示成 N_q/N 与 λ_s 的函数. 但要得到能够直接与实验比较的末态多重数比率, 还要考虑共振粒子的衰变贡献.

设重离子碰撞总共产生 N 对夸克, 包括入射核子携带的 N_q 对净味夸克ud, 也包括新生的uds轻味夸克, 分别用 N_u , N_d 与 N_s 表示新生的 $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ 与 $s\bar{s}$ 夸克的对数(因为新生夸克是成对产生的, 正反夸克数量相等), 则满足关系

$$N = N_u + N_d + N_s + N_q, \quad (19)$$

其中新生轻味ud夸克对数相等

$$N_u = N_d, \quad (20)$$

奇异夸克s与非奇异ud夸克产生几率之比为奇异抑制因子

$$\lambda_s = \frac{2p_s}{p_u + p_d} = \frac{2N_s}{N_u + N_d} = \frac{N_s}{N_u}, \quad (21)$$

设新生反夸克 $\bar{u}(\bar{d})$ 与所有u(d)(包括新生的与碰撞核子携带的静夸克)夸克的比值为

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u} = \frac{\bar{d}}{d}, \quad (22)$$

利用以上式子可以确定出净夸克对数 N_q . 高能pp反应平均带电粒子多重数与平均夸克对数近似相等 $\langle n_{ch} \rangle \approx \langle N \rangle$, 可以认为相对论重离子碰撞这个近似关系仍然成立. PHOBOS实验组^[10]最近测量了 $\sqrt{s_{NN}} = 19.6, 130, 200\text{GeV}$ 不同中心度的带电粒子多重数, 其中130GeV时最中心碰撞的结果是 $\langle n_{ch} \rangle = 4100 \pm 210$, 可以取 $N \approx 4100$. 奇异抑制因子 λ_s 作为QGP存在的信号之一, 其中实验^[11]测量了矢量介子多重数比率 $\bar{K}^{*0}/K^{*0} = 0.92 \pm 0.14$, $\phi/K^{*0} = 0.49 \pm 0.05 \pm 0.12$, 按照介子的夸克波函数可以推算出 $\lambda_s \approx 0.5$, 明显比 e^+e^- 湮灭实验得到的 $\lambda_s \approx 0.3$ 高. 在下面的计算中取 λ_s 的各种不同的数值进行对比. STAR实验^[12]最近测量了反质子与质子多重数比率为 $\bar{p}/p \approx 0.71$, 按照质子的夸克波函数, 可以推得 $\alpha \approx 0.90$. 利用以上(19)–(22)就可以得到130GeV时净夸克的对数 N_q , 计算表明相对总的夸克对数 N_q 是非常小的量.

按照以上讨论, 可以计算各种反强子与强子的比率. 下面表中列出取不同 λ_s 值时本文的预言与实验结果的比较.

表 1 反重子相对重子比率与 STAR 实验^[13]的比较

重子 类型	奇异抑制因子 λ_s					STAR 实验
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
\bar{p}/p	0.71	0.71	0.72	0.72	0.73	$0.71 \pm 0.01 \pm 0.04$
$\bar{\Lambda}/\Lambda$	0.78	0.78	0.78	0.79	0.79	$0.71 \pm 0.01 \pm 0.04$
Ξ^+/Ξ^-	0.85	0.85	0.85	0.84	0.84	$0.83 \pm 0.04 \pm 0.05$
$\bar{\Omega}^+/\Omega^-$	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	$0.95 \pm 0.15 \pm 0.05$

可以看出对于不同的 λ_s 值, 本文预言的比值 $\bar{\Lambda}/\Lambda$ 都比实验值高. 而预言的其他比值都在实验误差范围内与实验一致.

表 2 K 介子比率及重子混合比率与 STAR 实验^[13]的比较

粒子 类型	奇异抑制因子 λ_s					STAR 实验
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
K^+/K^-	1.074	1.084	1.092	1.099	1.105	1.092 ± 0.023
$\frac{\bar{\Lambda}/\Lambda}{\bar{p}/p}$	1.10	1.10	1.09	1.09	1.09	0.98 ± 0.09
$\frac{\Xi^+/\Xi^-}{\bar{\Lambda}/\Lambda}$	1.09	1.09	1.08	1.07	1.07	1.17 ± 0.11
$\frac{\bar{\Omega}^+/\Omega^-}{\Xi^+/\Xi^-}$	1.12	1.12	1.12	1.13	1.13	1.14 ± 0.21

同样可以看出, 因为比值 $\bar{\Lambda}/\Lambda$ 比实验值高, 因此 $\frac{\bar{\Lambda}/\Lambda}{\bar{p}/p}$ 也明显比实验结果偏高, 而其他所有比率在误差范围内都与实验一致.

表 3 介子比率与 STAR 实验^[14]的比较

粒子 类型	奇异抑制因子 λ_s					STAR 实验
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	
ϕ/K^{*0}	0.27	0.36	0.44	0.53	0.62	$0.49 \pm 0.05 \pm 0.12$
K^+/π^-	0.132	0.144	0.154	0.161	0.167	$0.161 \pm 0.002 \pm 0.024$
K^+/π^+	0.123	0.133	0.141	0.147	0.151	$0.146 \pm 0.002 \pm 0.022$

同样看出, 仅在 $\lambda_s=0.3$ 时, 比率 ϕ/K^{*0} 与 K^+/π^- 明显偏低实验外, 其他所有预言都在误差范围内与实验一致.

利用以上结果也可计算 RHIC 实验 130GeV 能量时重子混合比率(即式(13)中的 d). 下面表中给出计算的 d 随 λ_s 变化的预言. 虽然重子混合比率随奇异抑制因子 λ_s 而改变, 但式(13)中列出的 6 种重子混合比率都是相同的常数. 而且这些混合比率都比 CERN SPS 的实验结果偏低, 这是因为 RHIC 实验入射核子携带的净夸克对数偏低引起的.

表 4 重子混合比率

λ_s	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
d	1.24	1.27	1.31	1.34	1.37

4 小结与讨论

相对论重离子碰撞的强子化过程是非常复杂的远没有解决的问题. 虽然有的研究在夸克组合模型框架下通过 M.C 计算解释了部分实验, 本文中提及的“意外”现象目前也只能依靠组合模型作出解释, 随着实验的深入进行, 还会出现许多新的现象, 这会对理论分析提供更多重要信息, 也会对各种强子化模型作出进一步检验, 因此深入的探索分析与研究仍然是十分艰巨的问题. 本文在夸克组合图像下, 推导得到的反重子、重子混合比率是与正、反夸克几率有关的常数, 所预言的这个大于 1 的常数与 CERN SPS 实验结果基本吻合. 在此基础上, 考虑了入射核子携带净味 ud 夸克这一基本事实, 给出平均夸克、反夸克几率的表示式, 因为夸克几率大于反夸克的几率, 必然导致反重子与重子比率小于 1. 不需要其他任何额外假定, 仅需要由实验数据获得净夸克与总的夸克的比率, 得到的各种正反粒子比率基本与 RHIC 的 $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$ 时 Au+Au 碰撞的 STAR 合作组的实验结果一致. 在这一点上表明夸克组合模型是成功的. 另一方面我们的计算表明, 作为 QGP 信号之一的奇异抑制因子 λ_s 对正反粒子比率影响不大, 或者说正反粒子比率还不能对奇异增大做出判断.

事实上, 相对论重离子碰撞是非常复杂的过程. 特别是涉及到 QCD 相变的问题, 基本的物理机制并不清楚, 组合模型也不可能揭示这一复杂的强相互作用过程. 而目前所有组合模型也只是对中横动量区的强子化结果给出了解释, 也许表明目前能量下仍然是强子化为主要机制. 真正理解相对论重离子碰撞的物理机制需要更深入的严格理论分析与实验研究. 但进一步发展与完善夸克组合模型, 解释与预言 RHIC 更多的强子化实验, 探索这一复杂过程的强子化性质, 还是十分必要的.

作者衷心感谢与邵凤兰博士有益的讨论与提供的帮助.

参考文献(References)

- (刘希明, 赵宁华, 兰建胜. 高能物理与核物理, 2005, **29**(12): 1125)
- 1 Laermann E, Philipsen. hep-ph/03303042
 - 2 Bjorken J D. Phys.Rev., 1983, **D27**: 140
 - 3 Adams J et al. Phys. Lett., 2003, **B567**: 167—174
 - 4 Peter A Steinberg et al. Nucl. Phys. 2002, **A715**: 490c—493c
 - 5 Zinnanyi J. Nucl. Phys., 1999, **A661**: 224
 - 6 XIE Qu-Bing, LIU Xi-Ming. Phys. Rev., 1988, **D38**(7): 2169
 - 7 LIU Xi-Ming, ZHAO Ning-Hua, LAN Jian-Sheng. HEP & NP, 2005, **29**(12): 1125 (in Chinese)
 - 8 LIU Xi-Ming. HEP & NP, 2004, **28**(10): 1026—1032) (in Chinese)
 - 9 Bialas A. Phys. Lett., 1998, **B442**: 449
 - 10 Back B B et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 052303
 - 11 Adler C et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 061901
 - 12 Adams J et al. nucl-ex/0211024; Hippolyte B et al. nucl-ex/0306017
 - 13 Adams J et al. Phys. Lett., 2003, **B567**: 167—174
 - 14 Adler C et al. nucl/ex/0206008

Anti-Particles-to-Particles Ratios in Au+Au Collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$

LIU Xi-Ming

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

Abstract In virtue of the simple physical picture of quark combination model, we determine the dependence of anti-particle to particle ratios on the mean production probability of anti-quarks and quarks. The ratios of various anti-particle to particle at relativistic heavy ion collisions are calculated without any additional assumption, which are consistent with the experiment results of the Au+Au collision at $\sqrt{S_{NN}} = 130\text{GeV}$ measured by STAR collaboration at RHIC. These results provide a basis for further studies of particles ratios in relativistic heavy ion collisions.

Key words relativistic heavy ion collision, quark combination model, antiparticles-to-particles ratios