

# 用同位旋分离的 RVUU 模拟重离子碰撞

储自力 郑玉明

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 推广了原来的 RVUU 模型,进一步分离了粒子的同位旋自由度.并用它模拟了每核子 1GeV 入射能量的 Au + Au 碰撞,得到了与实验符合很好的 p,  $\pi^+$  和  $K^+$  动量谱,  $K^+$  与  $\pi^+$  多重数及其比值  $K^+ / \pi^+$  随参加粒子数目的变化规律.同时从理论上分析了  $K^+ / \pi^+$  产额比曲线的物理意义.

**关键词** 重离子碰撞 粒子产生 同位旋分离 粒子谱

## 1 引言

相对论重离子碰撞生成高温高密度的中心区域,同时产生大量的新粒子.这些新粒子的特性反映了碰撞的物理过程,通常被用作新物理现象的探测信号.在到达探测器以前,这些粒子都要在特定的环境下输运,自然要受到周围介质的影响,使所观测到的特性偏离生成时的特性.为获得可靠的信号,必须考虑这些影响.

相对论核-核碰撞中,一部分能量转化为粒子的无规则运动和系统的压缩能量,另一部分变为核子的内部激发能.在 1GeV/u 的能量下,能够产生的共振态有  $\Delta$  和  $N^*$  等,它们是核碰撞的中间产物,其中储存了大量的能量,在以后的碰撞或者衰变为核子和  $\pi$  介子时释放出来.由于重离子碰撞中,高温高密度的中心区 ( $\rho \approx 3\rho_0, t = 10\text{fm}/c$ ) 可以持续相当长的一段时间,这使各核子之间有足够多的机会再碰撞,参与再碰撞的有以前碰撞产生的共振态,从而出现质心系能量足够高的碰撞,可以产生 K 介子等.

用推广的 RVUU 模型模拟了 1GeV/u 能量下的重离子反应.推广后的 RVUU 模型在原先 RVUU<sup>[1,2]</sup> 的基础上,区分同位旋不同的粒子,以便深入观察  $\pi^+, \pi^0, \pi^-, p$  和  $n$  的行为.我们模拟了 1GeV/u 能量下的 Au + Au 反应,得到了与试验符合相当好的 p,  $K^+, \pi^+$  谱,和  $K^+ / \pi^+$  产额比,进一步证实了在 1GeV/u 入射能量下, K 主要产生于两步反应  $N\Delta \rightarrow BYK$ .

## 2 RVUU 模型描述

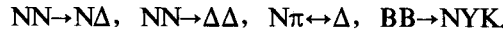
从量子强子动力学出发,在一定的近似下,可导出对于核子相空间分布函数  $f(r, p^*)$

的输运方程<sup>[3]</sup>. 它的解等价于对所有的试探粒子经典运动方程的解<sup>[1,2]</sup>, 运动方程中的有效质量, 有效动量和有效相互作用势体现了平均场效应. 这些有效量是局部变量, 它们不但随粒子和同位旋的不同而变, 而且与粒子所处的时空坐标点的密度和流有关. 每个粒子在碰撞前沿着经典运动方程所决定的轨道运动, 如果两个粒子之间距离小于 $\sqrt{\frac{\sigma}{\pi}}$  (其中,  $\sigma$  是两粒子的相互作用截面) 时, 它们之间发生一次碰撞. 如果是非弹性碰撞, 由分支比来随机确定反应道. 碰后, 粒子的方向依角分布以统计的方式改变. 在入射能量为  $1\text{GeV}/u$  时,  $K$  介子产生的数量很少, 为了得到很好的统计效果, 我们用  $K$  产生增强法来处理<sup>[4]</sup>.

利用 Klein-Gorden 系数, 计算出各反应道的分支比, 把这些包含同位旋分量的反应截面放入 RVUU 模拟程序, 就可以初步实现同位旋分离. 同位旋不同在介质中输运时受到的影响不同, 这些效应只有一部分得到考虑, 如  $\pi^+$ ,  $\pi^0$  与  $\pi^-$  在介质中的区别. 而其它粒子如  $K^+$  和  $K^-$  在介质中的区别, 在这里还没有被考虑.

### 3 反应截面

模拟过程中包含以下几种非弹性反应道:

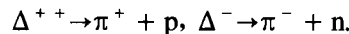


其中,  $N$  为质子或中子,  $\Delta$  为共振态  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$  和  $\Delta^-$ ,  $Y$  为超子  $\Lambda$  或  $\Sigma$ .

在我们的模型中用以下方法引入同位旋区分的反应道截面, 首先以实验数据拟合出的两反应道 ( $NN \rightarrow N\Delta$  和  $NN \rightarrow \Delta\Delta$ ) 的同位旋平均的总截面为基础<sup>[5]</sup>, 并假设  $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{tot}} \equiv \sigma_1$ ,  $\sigma_{NN \rightarrow \Delta\Delta}^{\text{tot}} \equiv \sigma_2$ . 再利用 Klein-Gorden 系数得到下面分支比截面:

$$\begin{aligned} \sigma_{pp \rightarrow \Delta^{++}n} &= \frac{3}{4} \sigma_1, \quad \sigma_{pp \rightarrow \Delta^+p} = \frac{1}{4} \sigma_1, \\ \sigma_{nn \rightarrow \Delta^0n} &= \frac{1}{4} \sigma_1, \quad \sigma_{nn \rightarrow \Delta^-p} = \frac{3}{4} \sigma_1, \\ \sigma_{pn \rightarrow \Delta^+n} &= \frac{1}{2} \sigma_1, \quad \sigma_{pn \rightarrow \Delta^0p} = \frac{1}{2} \sigma_1, \\ \sigma_{pp \rightarrow \Delta^+\Delta^0} &= \frac{6}{10} \sigma_2, \quad \sigma_{pp \rightarrow \Delta^+\Delta^+} = \frac{4}{10} \sigma_2, \\ \sigma_{nn \rightarrow \Delta^+\Delta^-} &= \frac{6}{10} \sigma_2, \quad \sigma_{nn \rightarrow \Delta^0\Delta^0} = \frac{4}{10} \sigma_2, \\ \sigma_{pn \rightarrow \Delta^+\Delta^0} &= \frac{3}{10} \sigma_2, \quad \sigma_{pn \rightarrow \Delta^+\Delta^-} = \frac{7}{10} \sigma_2, \end{aligned}$$

其中  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  是采用 Congnon 的动量相关的截面的表达式计算. 以上是碰撞中生成共振态  $\Delta$  粒子的反应截面,  $\Delta$  粒子的衰变是由抽样出的随机数与  $\Delta$  随时间衰变的几率相比较来决定的. 由分支比决定按什么衰变道进行反应.



$$\Delta^+ \rightarrow \pi^0 + p, \left(\frac{2}{3}\right), \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n, \left(\frac{1}{3}\right),$$

$$\Delta^0 \rightarrow \pi^- + p, \left(\frac{1}{3}\right), \Delta^0 \rightarrow \pi^0 + n, \left(\frac{2}{3}\right),$$

上几式后面圆括号中的分数为两个反应道的分支比. 核子吸收 $\pi$ 介子的反应, 不用考虑分支比问题, 由同位旋守恒就可以确定生成的粒子. 由于阈下 K 产生的主要反应道  $BB \rightarrow YBK$  是含有超子的多粒子反应, 超子的同位旋种类非常多, 很难用 Klein-Gorden 方法求得分支比, 本文中仍采用同位旋平均的方法处理 K 介子.

## 4 结果和讨论

用同位旋分离的 RVUU 程序, 模拟了每核子 1 GeV 入射能量的 Au + Au 反应. 在模拟计算中, 采用一组软的核态方程参数<sup>[6]</sup>:

$$C_\omega = (g_\omega / m_\omega)m_N = 8.498, C_\sigma = (g_\sigma / m_\sigma)m_N = 13.95,$$

$$B = b / (g_\sigma^3 m_N) = 1.99 \times 10^{-2}, C = c / g_\sigma^4 = -2.96 \times 10^{-3}$$

其相应的饱和密度为  $0.16 \text{fm}^{-3}$ , 束缚能为每核子 15.96 MeV, 核子的有效质量为  $0.83m_N$ , 核的不可压缩系数为 200 MeV.

图 1 给出了在实验室系中每核子 1 GeV 入射能量的 Au + Au 碰撞中, 在极角为  $40^\circ < \theta_{\text{lab}} < 48^\circ$  区域内测到的质子、 $\pi^+$  和  $K^+$  介子的双微分截面. 从图中看出, 理论结果同实验数据相当好地符合. 这表明我们的方法是成功的, 为将来分析实验信号打下了坚实的基础.

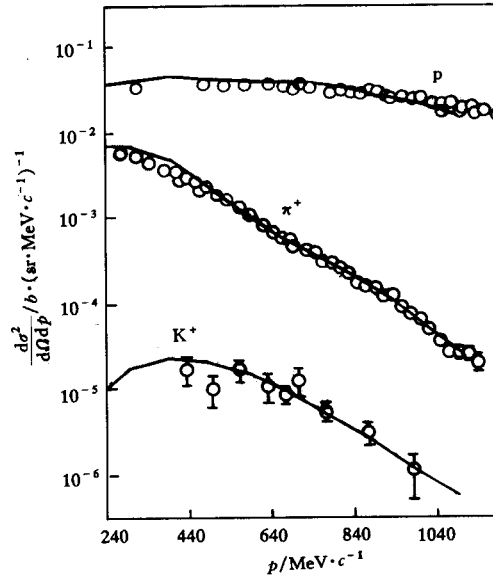


图 1  $p$ ,  $\pi^+$  和  $K^+$  的双微分截面随实验室动量的变化  
空心圆为 SIS 的实验数据<sup>[7]</sup>, 实线是计算结果.

重离子碰撞中的很多现象产生于高温高密度的中心碰撞区,也是人们常说的粒子生成源. 参加碰撞的粒子数的多少对源的性质将有重要影响,这种影响自然会反映到粒子谱上来. 为了研究这个问题,在图 2 中给出了每核子 1 GeV Au + Au 反应的极角为  $40^\circ < \theta_{\text{lab}} < 48^\circ$  的单位立体角内  $\pi^+$  和  $K^+$  多重数及其产额比  $K^+ / \pi^+$  随参加碰撞的粒子数  $A_{\text{part}}$  的变化结果. 图 2 清楚地显示出,我们的理论结果也与实验相符合.

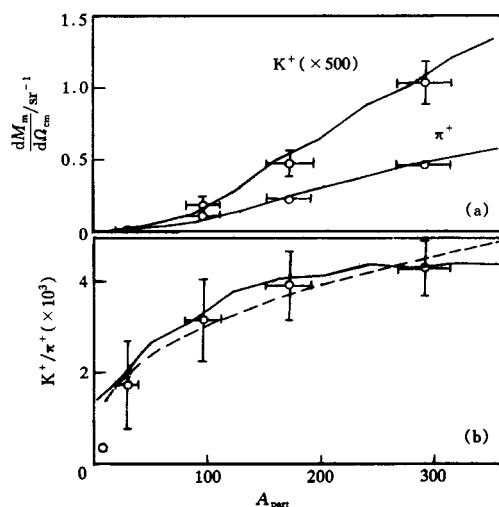


图 2 (a)  $K^+$  和  $\pi^+$  的多重数随参加粒子数的变化; (b) 相应的多重数比  $K^+ / \pi^+$  随参加粒子数的变化

空心圆为实验数据<sup>[7]</sup>, 实线是计算结果; 虚线是用指数型函数  $A^\alpha$  拟合实验数据所得的结果.

从图 2 中可以看出, 随着参加粒子数的增加,  $K^+$  的增长快于  $\pi^+$  的增长. 如何认识这个问题呢? 这是因为阈下  $K$  产生反应中, 两步反应道  $\Delta B \rightarrow YBK$  对  $K$  产生的贡献最大<sup>[8]</sup>. 相对核子来说  $\Delta$  数量较少, 假设其数量为  $D$ , 它们在核子中输运并且与核子再散射, 其再散射几率正比与中心碰撞区的线度, 即正比与  $A^{\frac{1}{3}}$ ,  $A$  为参加粒子总数. 可以认为  $K$  的产额  $M_K$  有下面正比关系:  $M_K \propto D \times A^{\frac{1}{3}}$ . 而  $\pi^+$  主要来源于  $\Delta$  衰变, 其反应道为  $\Delta \rightarrow N \pi$ , 使得  $\pi^+$  的产额  $M_{\pi^+}$  正比于  $\Delta$  的数量  $D$ . 综合以上分析得到:  $\frac{M_{K^+}}{M_{\pi^+}} \propto \frac{D \times A^{\frac{1}{3}}}{D} = A^{\frac{1}{3}}$ . 用  $A^\alpha$  形式的函数拟合  $K^+$  和  $\pi^+$  产额比  $K^+ / \pi^+$  的实验曲线, 拟合结果以虚线表示在图 2 中, 并定出参数  $\alpha$  为 0.36496, 其近似等于  $\frac{1}{3}$ . 这我们的理论分析相一致.

综合前面所述, 可以看出, 在原先的 RVUU 模型中加入了同位旋自由度, 对于成功地再现实验数据是重要的. 仔细区分不同特性的粒子, 并考虑这些粒子生成后的再碰撞和输运过程是得到真实可靠的重离子碰撞的探测信号所必须的.

## 参 考 文 献

- [1] Zheng Yuming, Chu Zili, Chinese Phys. Lett., 1996, **13**:730.
- [2] Chu Zili, Zheng Yuming, Wang Fei et al. High Energ. Phys. and Nucl Phys. (in Chinese), 1996, **20**:438  
(储自力、郑玉明、王飞等, 高能物理与核物理, 1996, **20**:438)
- [3] Ko C M. Nucl. Phys., 1989, **A495**: 321C.
- [4] Zheng Yuming, Ke Zhiming, Fang Xushan, Chinese Science Bulletin (in Chinese), 1994, **39**:120;1074.  
(郑玉明、柯治明、方绪珊, 科学通报, 1994 **39**:120;1074)
- [5] Cugnon J, Kinet D Vandermeullen J. Nucl. Phys., 1981, **A352**:505.
- [6] Fang X S, Ko C M, Li G Q et al. Nucl. Phys., 1994, **A575**:766.
- [7] MrsKowiec D, Ahner W et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **72**:3650.
- [8] Chu Zili, Zheng Yuming, Wang Fei et al. High Energ. Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**:365  
(储自力、郑玉明、王飞等, 高能物理与核物理, 1995, **19**:365.)

## Simulation of Heavy-Ion Collision With Isospin-Separated RVUU Model

Chu Zili Zheng Yuming

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** We generalize the previous RVUU model to be able to identify the isospin degree of freedom of particles. This modified model is used to simulate the particle production in Au + Au collision at 1GeV / u. The calculated momentum spectra of p,  $\pi^+$  and  $K^+$  particles and multiplicities of the  $\pi^+$  and  $K^+$  and the ratio  $K^+ / \pi^+$  as a function of the number of participating nucleons agree very well with experimental data. The physical origin of the ratio  $K^+ / \pi^+$  as function of participating nucleons is discussed.

**Key words** heavy-ion collision, particle production, isospin separation, particle spectrum.