

AGS 能量下核系统的强阻止性*

宋 光 萨本豪 王仲奇 陆中道
张孝泽 郑玉明

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1993-10-11 收稿

摘 要

本文给出了一个简单的相对论性强子级联模型,并用它模拟了 $\text{Si}(14.6A\text{GeV}/c) + \text{Au}$ 的反应.研究了共振态对质子 π 的快度分布以及质子横质量分布的影响.在此模型中,碰撞粒子的纵动量变化(非弹情形)由阻止律给出;而粒子的横动量分布通过指数分布或高斯分布抽样.我们的结果与 E810(E814) 数据和 E802 的新结果较好地符合.这表明:共振态 Δ 的引入能更好地反映碰撞的物理过程;AGS 能量下核系统的强阻止性已无可非议.

关键词 AGS 能量 ($14.6A\text{GeV}/c$), 强子级联, 快度分布, 横质量分布, 阻止律, 指数分布.

1 引 言

相对论重离子碰撞是物理学中一个引人注目的研究领域.它提供了产生极高密度和温度的核物质的可能性.温度和密度可能会高到足以使部分(或全部)核子从禁闭的强子状态相变为非禁闭的夸克——胶子等离子体.如果探测到 QGP 信号,就将大大促进人们对物质结构的进一步认识.另外,这种高温高密过程,也可用于对宇宙初期过程进行模拟和研究.

为了寻找 QGP 信号以判断 QGP 是否真正形成,迄今为止已做了大量工作;有的采用热模型或者流体力学模型,有的采用输运模型;有的建立在强子层次上,有的建立在部分子层次上.

对于 $\text{Si}(14.6A\text{GeV}/c) + \text{Au}$ 反应中 $0.7 < y < 2.0$ 快度区域质子快度分布的 E802^[1] 实验结果,各种模型都能给出与实验的大体符合,(原 E802 结果比 E810(E814)^[2] 结果系统地偏低);但是在高快度区域不同模型却存在较大的差异.

上述 E802 与 E810(E814) 结果的不一致,导致 Chapman 等人^[3]用多流管(multi-stream)模型拟合 $\text{Si}(14.6A\text{GeV}/c) + \text{Au}$ 反应中质子的快度分布时,发现在快度 $y =$

* 国家自然科学基金资助.

2.4 附近存在一个峰;并被作为 AGS 能量(每核子入射动量为 $14.6 \text{ GeV}/c$) 下核系统有强穿透性的证据;核的穿透性问题一时成为争论的热点. 后来, E814 实验组给出了快度 $y > 2.0$ 区域的质子快度分布,并没有 Chapman 等人预言的峰的结果;我们也曾经给出一个简单的相对论强子级联模型^[4],认为 AGS 能量下核碰撞系统有强的但不完全的阻止性.

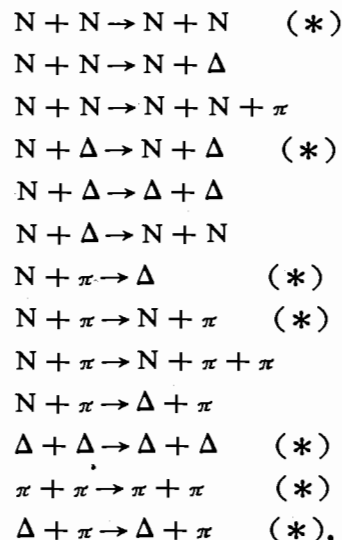
最近 QM'93 国际会议上 E802 组宣布了新的实验结果,和 E810(E814) 结果取得一致. 这样一来,Chapman 等人原作的拟合就不再成立,AGS 能量下核系统穿透性问题的争论似乎可以结束. 为此,我们对原有模型进行了改进,并对核阻止问题做了进一步研究. 由于原来的模型中 π 是完全直接产生的,我们称之为 DM 模型,而现在的模型是在原来的基础上加进了共振态,因而称之为真实模型 (RM). 在 RM 中直接产生的 π 和经共振态的 π 的比例,像通常那样设为 $1/4$ ^[5].

从计算结果可以看出, RM 的结果较好地符合实验数据(与 P.Yang^[6] 等人的计算结果相一致). 这表明: 共振态的引入能更好地反映实验的物理过程;在强子层次上可以模拟出反应过程,并给出 AGS 能量下核碰撞系统具有很强的阻止性.

2 模型描述

由于 DM 模型已在文献[4]中描述,这里只介绍 RM 模型. 同 DM 一样,在对反应 $\text{Si}(14.6A \text{ GeV}/c) + \text{Au}$ 的模拟中,首先要对弹核、靶核内的核子进行初始化,即认为核子分布在半径为 $1.14 A^{1/3}$ 的相应母核的球体内. 核子在核中的空间分布由 Woode-Saxon 分布给出. 费米动量被忽略,因此只赋弹核子以入射动量.

对于碰撞,我们考虑如下反应类型:



其中带(*)者为弹性散射过程. 其余为非弹过程. 另有衰变过程:



输运过程中两个粒子是否能发生碰撞要通过最小逼近距离,最小时间进行判定,通过

经典运动学求出两粒子可能接近的最小距离 R_{\min} , 如果 $R_{\min} > \sqrt{\frac{\sigma_{\text{tot}}}{\pi}}$ 则不碰撞. 对 $R_{\min} < \sqrt{\frac{\sigma_{\text{tot}}}{\pi}}$ 的所有碰撞对, 将它们相应的碰撞时间(构成的表, 称碰撞(时间)表)进行

比较, 与最小时间相应的碰撞为即将发生的碰撞. 碰撞的性质也由反应截面加以判定, 各种反应(弹性还是非弹性等等)均以相应截面与总截面的比为几率发生. 在此模型中, 截面均取为常数. $\sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} = 4.0\text{fm}^2$ ($\sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}}$ 表示 $\text{N} + \text{N}$ 反应的总截面, 以下类同). $\sigma_{\text{tot}}^{\text{N}\pi} = 2.5\text{fm}^2$, $\sigma_{\text{tot}}^{\pi\pi} = 1.0\text{fm}^2$. 而相应的弹性截面取为总截面的 $1/3$, 对于有 Δ 参加的反应, 由于实验数据不足, 故截面取为以 Δ 代 N 的相应的反应截面. 另需说明的是, $\text{N} + \text{N}$ 的非弹性反应中 π 的直接产生率取为 20% ^[5]. $\text{N} + \pi$ 反应也类似地认为 20% 为 $\text{N} + \pi \rightarrow \text{N} + \pi$, 其余为 π 吸收. $\text{N} + \Delta \rightarrow \text{N} + \text{N}$ 的反应截面, 由细致平衡给出. $\pi + \pi, \pi + \Delta$ 反应均按弹性散射处理. 为处理方便, π 的直接产生也当作共振态处理, 不过此时 Δ 的寿命为零. 对于其他“真正”的 Δ , 寿命 τ 由衰变宽度 Γ 给出, 具体如下^[5]:

$$\Gamma(p_\pi) = \frac{0.47 p_\pi^3}{[1 + 0.6(p_\pi/m_\pi)^2] m_\pi^2},$$

$$\tau = -\frac{0.197E}{m_\Delta \Gamma(p_\pi)} \ln(1 - \xi) \quad (\xi \text{ 为随机数}).$$

其中

$$p_\pi = \frac{1}{2m_\Delta} \{ [m_\Delta^2 - (m_n + m_\pi)^2][m_\Delta^2 - (m_n - m_\pi)^2] \}^{1/2}.$$

由于引入了 Δ , 在输运过程中, 在从碰撞时间表中找到最小碰撞时间后, 还需与 Δ 衰变表中的最小衰变时间进行比较, 哪一个小, 就发生哪一个过程. 在衰变或碰撞以前, 粒子均按牛顿力学规律自由运动, 粒子间的相互作用只在碰撞瞬时加以反映.

弹性散射后粒子的动量由传统方法给出^[7]. 对于非弹性碰撞(先转到两个粒子的质心系, 然后再将坐标轴旋转使一个粒子的动量方向沿 z 轴方向. 碰撞后再做反向过程, 转到实验室系), 散射后粒子的快度通过阻止律(stopping law)^[8] 给出:

$$\rho(x) = \frac{\alpha}{1 - x_L} \left[\frac{x - x_L}{1 - x_L} \right]^{\alpha-1} \theta(1 - X) \theta(X - X_L), \quad \alpha = 1-3,$$

$$X = \frac{E' + p'_z}{E + p_z}, \quad X_L = \exp[(y_j - y_i)/2].$$

上式中 X 是光锥变量. $X = X_L$ 对应碰撞后两粒子相对静止的情形.

由于非弹性散射过程中(不包括 Δ 吸收)都有 N 参加, 反应过程相当于一个 N 到 Δ 的过程. 对于反应中的另一个粒子, 其反应前后的属性将不会发生变化(对于 $\text{N} + \text{N}$ 反应两粒子各存在 $1/2$ 的几率转化为 Δ), 反应后它的快度为:

$$y'_i = y_i + \ln X \quad \text{或} \quad y'_i = y_i - \ln X,$$

于是,

$$p'_{i,z} = m_{i,z} \sinh(y'_i) \quad \text{或} \quad p'_{i,z} = m_{i,z} \sinh(y_i),$$

其中

$$m_{i,t} = \sqrt{m_i^2 + \langle p_i \rangle^2}.$$

对于属性发生变化的核子 ($N \rightarrow \Delta$), 其动量, 能量可由动, 能量守恒给出. 而 Δ 的质量可由质能关系得到. 如果其质量小于 1.078 GeV 则舍弃掉.

散射后粒子的横动量由指数分布给出^[6]:

$$F(p_i) = \exp(-p_i/\langle p_i \rangle)/\langle p_i \rangle,$$

$$\langle p_i \rangle = a_i + b_i \ln E_{ij}, \quad a_i = 0.27, b_i = 0.037.$$

E_{ij} 是碰撞粒子 i, j 的质心系能量. 对于吸收过程, 即 $\Delta + N \rightarrow N + N$, 由细致平衡可知其反应截面为:

$$\sigma_{n\Delta \rightarrow nn}^i = \frac{1}{8} (p_f/p_i)^2 \sigma_{nn \rightarrow n\Delta}$$

其中 p_i 和 p_f 分别为 $N\Delta \rightarrow NN$ 反应初道和末道的质心系中粒子的动量. p_f 由质能关系给出.

过程每进行一次(发生碰撞或衰变)后, 碰撞表以及 Δ 衰变表就要更新. 从而确定下一次过程将发生的时间. 如果碰撞表已空, 而 Δ 尚存在, 则要求 Δ 都瞬时衰变. 之后, 对所有粒子进行相应的统计, 包括质子和 π^- 的快度分布以及质子的横动量分布等. 对于 π , 我们假定 π^+, π^-, π^0 等几率产生.

3 结果与讨论

在图 1 中给出质子快度分布的实验^[1,2]以及文献[3]和我们的理论结果. 从我们的

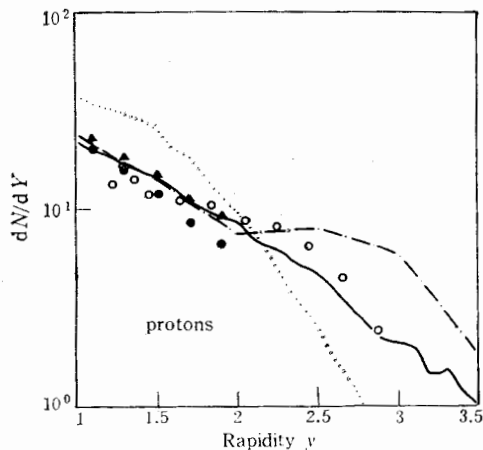


图 1 (14.6 A GeV/c) Si + Au 反应的质子快度分布
 ...DM($\alpha = 1$), -RM($\alpha = 1$), -·-·Chapman,
 ○ E810, ● E802 ▲ N802

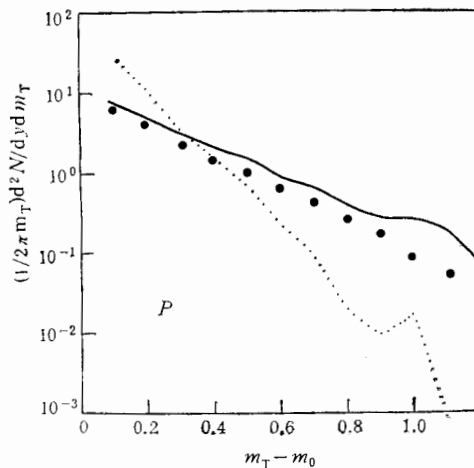


图 2 (14.6 A GeV/c) Si + Au 反应的
 质子横质量分布(其余说明同图 1)

结果(无论 DM 或 RM)可以看出, Chapman 等人预言的强穿透性(在快度 $y = 2.4$ 附近的峰)并不存在. 从对图 1, 图 2, 图 3 (图 2 为质子的横质量分布, 图 3 为 π^- 的快度分

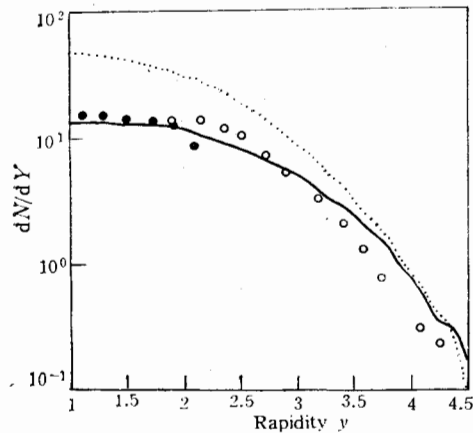


图3 (14.6A GeV/c)Si + Au 反应的 π^- 快度分布(其余说明同图1)

布)结果的综合分析,清楚地看出,取 $\alpha = 1$ 的结果与实验数据相符合的程度更好些。图1中的实三角表示 E802 的新结果 (N802)。正如引言中所述, E802 新结果与 E810 取得一致后, Chapman 等人原作的拟合显然不再成立, AGS 能量下核系统穿透性问题的争论可以结束, RM 的结果完全支持了这一论点。

总之,简单的相对论强子级联模型能给出与实验符合较好的结果, E802, E810 (E814) 实验结果得到了定性的解释。另外,共振态的引入更好地反映了反应的物理过程。这表明: AGS 能量下的核碰撞系统可以在强子层次上模拟,此核系统的强阻止性无可非议。

参 考 文 献

- [1] E802 Collab., T. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990) 847; **66**(1991) 1567.
- [2] E810 Collab., S. E. Eiseman et al., *Phys. Lett.*, **B292**(1992) 10.
- [3] S. Chapman, M. Gyulassy, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991) 1210; *Phys. Rev.*, **C45**(1992) 2925.
- [4] Wang Zhongqi et al., *Chinese. Phys. Lett.*, **10**(1993) 468.
- [5] Y. Kitazoe, M. Sano, H. Toki et al., *Phys. Lett.*, **B166**(1986) 35.
- [6] Y. Pang, T. J. Schlagel, S. H. Kahana, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992) 2743; **69**(1992) 3290.
- [7] G. F. Bertsch, S. Das Gupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988) 189.
- [8] Wong Cheukyiu, Lu Zhongdao, *Phys. Rev.*, **D39**(1989) 2606.

Strong Stopping of Nuclear System at AGS Energy

Song Guang Sa Benhao Wang Zhongqi Lu Zhongdao
Zhang Xiaoze Zheng Yuming

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

Received 11 October 1993

Abstract

A simple relativistic hadronic cascade model is given and then applied to simulate the reaction of $\text{Si}(14.6A \text{ GeV}/c) + \text{Au}$. The Δ resonance effects on the rapidity distributions of proton and pion and on the transverse mass distribution of proton are investigated. In this model, the longitudinal momentum of scattered particle is given by stopping law while the transverse momentum is sampled from exponential or Gaussian distribution. The theoretical results are in a good agreement with the E802 new results and with the E810(E814) data. This indicates that the introduction of Δ resonance is necessary for the better description of the reaction process. It is also convinced that the strong nuclear stopping at AGS energy is no doubt any more.

Key words AGS energy, hadronic cascade, rapidity distribution, transverse mass distribution, stopping law, exponential distribution.