

高能核碰撞中的 K^+/π^+ 比与次级碰撞效应*

刘波 姜焕清

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1992年8月20日收到

摘 要

用程函近似分析在 高能核碰撞中次级作用对 K^+/π^+ 比的影响。计算表明，在 K^+/π^+ 比中次级碰撞效应是重要的。

关键词 夸克, 胶子, 等离子体, K^+/π^+ 比。

1 引 言

相对论重离子碰撞中的 K^+/π^+ 比增大的实验观测^[1]引起很大兴趣, 很多作者提出了不同的模型^[2-11]解释高能核作用中的 K^+/π^+ 比增大, 其中奇异粒子产生增多可能与 QGP 形成有关的提议更引起人们的关注。是否需要引入 QGP 才能解释 K^+/π^+ 比增大的实验资料? 为了弄清高能核碰撞中的 K^+/π^+ 比增大的物理原因, 所有可能改变 K^+/π^+ 比的其他效应都应考虑。本文用传统的方法分析末态次级碰撞效应能否改变 K^+/π^+ 比? 我们用程函近似计算末态次级作用对 K^+/π^+ 比的贡献。

2 末态次级碰撞过程

当高能入射粒子或核通过靶核时, π 介子和 K 介子 在非弹性的核子-核子碰撞中产生, 我们称产生的 π 和 K 介子为原始的介子, 这些原始的介子可以与核中的核子发生次级作用。由于 K 介子与核子之间的作用较弱, 在一级近似下可以忽略, 但 π -核子作用较强, 而且可以被核中的核子吸收。由 π 介子引起的可以改变 K^+/π^+ 比的次级碰撞过程如下:

$$\pi^+ + N \longrightarrow K^+ + X, \quad (2.1)$$

$$\pi^- + N \longrightarrow K^+ + X, \quad (2.2)$$

$$\pi^0 + N \longrightarrow K^+ + X, \quad (2.3)$$

* 国家自然科学基金资助。



在上述的反应中, N 表示核子, p 表示质子, n 表示中子, X 表示 λ 或 Σ .

在核碰撞中产生的 π 介子可以与核中的核子发生次级作用产生带奇异数的粒子. K^+ 介子产生反应(2.1)–(2.3)是可以改变 K^+/π^+ 比的重要反应. 一些作者^[4]用蒙特卡罗方法研究了这类过程对 K^+/π^+ 比的影响. 我们用 σ_{re} 表示反应(2.1)的截面, 在计算中, 反应(2.2)和(2.3)的贡献近似取为和反应(2.1)的贡献相同^[4]. 反应(2.1)–(2.3)可以增加 K^+ 介子数目, 但反应(2.1)同时减少 π^+ 介子数目.

π 介子在核物质中可以被吸收. 低能 π 吸收的实验和理论分析表明, 静止的 π 介子主要被两核子吸收^[12,13], 在中能, 除了两核子吸收机制之外, 还有三核子参加吸收过程. 一些作者^[4]研究了中能的 π 吸收过程, 但在高能区, 对于 π 吸收的了解甚少, 我们用半唯象的公式估算 π 介子能量在 1 GeV 附近的吸收截面^[5]. 在碰撞参数 b , 一个 π 介子通过原子核时的扭曲因子可以写为^[4]:

$$DF(b) = e^{-C_2 \int_{-\infty}^{\infty} \rho_A^2(b,x) dx - C_3 \int_{-\infty}^{\infty} \rho_A^3(b,x) dx}, \quad (2.9)$$

这里 $\rho_A(r)$ 是原子核密度, 归一化到核子数, C_2 和 C_3 是与能量有关的二体和三体吸收系数. 在 1.2 GeV 左右, 我们计算得到 $C_2 = 0.92 \text{ fm}^5$ 和 $C_3 = 2.87 \text{ fm}^8$. 为了简单起见, 我们将(2.9)式近似写为:

$$DF(b) = e^{-\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho_A(b,x) dx}{\lambda_2} - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho_A(b,x) dx}{\lambda_3}}, \quad (2.10)$$

并定义 π 介子吸收的平均自由程为:

$$\frac{1}{\lambda_{\pi b_0}} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3}, \quad (2.11)$$

这里 $\lambda_2 = 1/C_2 \rho_0^2$ 和 $\lambda_3 = 1/C_3 \rho_0^3$ 分别为二体和三体吸收的平均自由程, ρ_0 是原子核中心的密度. 近似公式(2.10)被一些作者^[12]用来研究 π 吸收. 我们得到在 1.2 GeV 左右的 π 吸收平均自由程约为 40 fm. 本文我们用平均自由程来考虑 π 吸收的贡献.

一个 π^+ 介子与中子作用, 将中子变成一个质子, π^+ 介子变成 π^0 介子, 使得末态 π^+ 介子数目减少; 但另一方面, π^0 介子与质子发生单电荷交换, 将质子变成中子, π^0 介子变成 π^+ 介子, 使末态 π^+ 介子数目增加. 但在重核, 中子数总是大于质子数, 所以单电荷交换反应的贡献取决于核中的中子数与质子数之差 ($N - Z$). 在 1 GeV 左右, 单电荷交换反应的截面约为 1 mb, 而且随能量变化较快^[4]. 在计算中, 我们用 σ_{sc} 表示单电荷交换反应的截面.

反应(2.7)和(2.8)式不但增加末态 K^+ 介子数目, 而且增加末态 K^- 介子数目, 这两个反应可以同时改变 K^+/π^+ 和 K^-/π^- 比, 实验上还没有 K^-/π^- 比增大的迹象, 所以本文先不考虑, 只考虑 π 介子引起的 K^+ 介子产生反应, π 吸收和 π -核子单电荷交换反应

这三种次级过程对 K^+/π^+ 比的影响。

为了更好地理解 B-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比增大,我们首先计算 p-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比并与 B-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比进行比较,寻求它们之间的关系,有利于分析次级作用的重要性的了解 K^+/π^+ 比增大的原因。

3 计算公式

在程函近似下,反应 $p + A \rightarrow \pi^+ + X$ 的截面可以写为^[17]:

$$\sigma_{pA \rightarrow \pi^+} = A \sigma_{pN \rightarrow \pi^+} P(PA \rightarrow \pi^+), \quad (3.1)$$

这里 $\sigma_{pN \rightarrow \pi^+}$ 是质子与核子碰撞产生 π^+ 介子的截面, P 代表 $PA \rightarrow \pi^+$ 的几率

$$P(PA \rightarrow \pi^+) = \frac{1}{A} \int d^2b dz \rho_A(\mathbf{b}, z) e^{-\frac{1}{\lambda} \int_z^\infty \frac{\rho_A(\mathbf{b}, z') dz'}{\rho_0}}, \quad (3.2)$$

其中 λ 是平均自由程:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_{rc}} + \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{N-Z}{A} \frac{1}{\lambda_{scc}}, \quad (3.3)$$

这里 $\lambda_x = 1/(\sigma_x \rho_0)$, $\sigma_x = \sigma_{rc}$ 或 σ_{scc} , ρ_0 是原子核中心的密度。

在 p-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比可以写为:

$$R_{pA} = R_{pA}^{(0)} \cdot W_{pA}, \quad (3.4)$$

其中

$$R_{pA}^{(0)} = \sigma_{pA \rightarrow K^+}^{(0)} / \sigma_{pA \rightarrow \pi^+}^{(0)} \quad (3.5)$$

是没有末态作用的产生截面比,而 W_{pA} 是由于末态的次级碰撞引起的核效应的修正因子,可以表示为:

$$W_{pA} = (1 + X_K) / (1 - X_\pi), \quad (3.6)$$

这里 X_K 表示在末态增加一个 K^+ 介子的几率, X_π 表示在末态减少一个 π^+ 介子的几率:

$$X_\pi = 1 - P(pA \rightarrow \pi^+), \quad (3.7)$$

$$X_K = 2X_\pi \Big|_{\lambda = \lambda_{rc}}. \quad (3.8)$$

用类似的方法,核-核碰撞 $B + A \rightarrow \pi^+ + X$ 的截面可以写为:

$$\sigma_{BA \rightarrow \pi^+} = A \cdot B \cdot \sigma_{pN \rightarrow \pi^+} \cdot P(BA \rightarrow \pi^+), \quad (3.9)$$

这里

$$P(BA \rightarrow \pi^+) = \frac{1}{A \cdot B} \int d^2b d^2s dz_1 dz_2 \rho_B(\mathbf{s}, z_1) \rho_A(\mathbf{b} - \mathbf{s}, z_2) \cdot e^{-\frac{1}{\lambda_B} \int_{z_1}^\infty \frac{\rho_B(\mathbf{s}, z') dz'}{\rho_0}} e^{-\frac{1}{\lambda_A} \int_{z_2}^\infty \frac{\rho_A(\mathbf{b} - \mathbf{s}, z') dz'}{\rho_0}}, \quad (3.10)$$

其中,

$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \frac{1}{\lambda_{rc}} + \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{N_\alpha - Z_\alpha}{\alpha} \frac{1}{\lambda_{scc}}, \quad \alpha = A, B. \quad (3.11)$$

在(3.10)中的 b 是碰撞参数, s 表示相互作用核子的横坐标, ρ_B 和 ρ_A 分别表示 λ 射核和靶核密度. 末态次级碰撞的效应包含在(3.10)式的指数中, π^+ 介子通过靶核时是在朝前方向, 在 λ 射核的静止系这等效于 π^+ 介子是向后运动. 在(3.11)式中的 N_a 和 Z_a 表示入射核和靶核中的中子数和质子数.

类似地, 在 B-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比可以表示为:

$$R_{BA} = R_{BA}^{(0)} \cdot W_{BA}, \quad (3.12)$$

这里

$$R_{BA}^{(0)} = \sigma_{BA \rightarrow K^+}^{(0)} / \sigma_{BA \rightarrow \pi^+}^{(0)} \quad (3.13)$$

是没有次级碰撞的 K^+/π^+ 比. 在(3.12)式中的 W_{BA} 是由于末态作用引起的修正因子, 可以写为:

$$W_{BA} = (1 + y_K) / (1 - y_\pi), \quad (3.14)$$

其中

$$y_\pi = 1 - P(BA \rightarrow \pi^+), \quad (3.15)$$

$$y_K = 2y_\pi |_{\lambda_a = \lambda_{\pi^+}, \alpha = A, B}. \quad (3.16)$$

4 结果与讨论

我们用公式(3.4)和(3.12)计算了 14.5GeV/核子的 p-Au 和 Si-Au 碰撞中的 K^+/π^+ 比. 在计算中 p-p 碰撞中的 K^+/π^+ 比取为 0.05 作为输入^[10], 入射核和靶核的密度取均匀分布, $r_0 = 1.2\text{fm}$. 由于现有的实验资料没有完全确定各种次级碰撞过程的截面, 所以我们把它们作为参数在一定的范围内变化, 以使能得到 K^+/π^+ 比对不同过程的灵敏度. 图 1 是三种不同的次级作用分别对 K^+/π^+ 比的贡献. 图 1(a) 是计算的 K^+/π^+ 比随 σ_{rc} 的变化关系, K^+/π^+ 比随 σ_{rc} 增加而增大, R_{BA} 的增大比 R_{pA} 稍快, 在 $\sigma_{rc} = 1\text{mb}$ 时, R_{BA} 是 R_{pA} 的 1.5 倍左右. 为了计入 π 介子吸收的贡献, 我们用有效的平均自由程 λ_{ab} 方法估算 π 吸收对 K^+/π^+ 比的影响. 图 1(b) 是估算的 K^+/π^+ 比随 $1/\lambda_{ab}$ 的变化关系, 从图中看到, K^+/π^+ 比随 $1/\lambda_{ab}$ 增加而增大, 在 $1/\lambda_{ab} =$

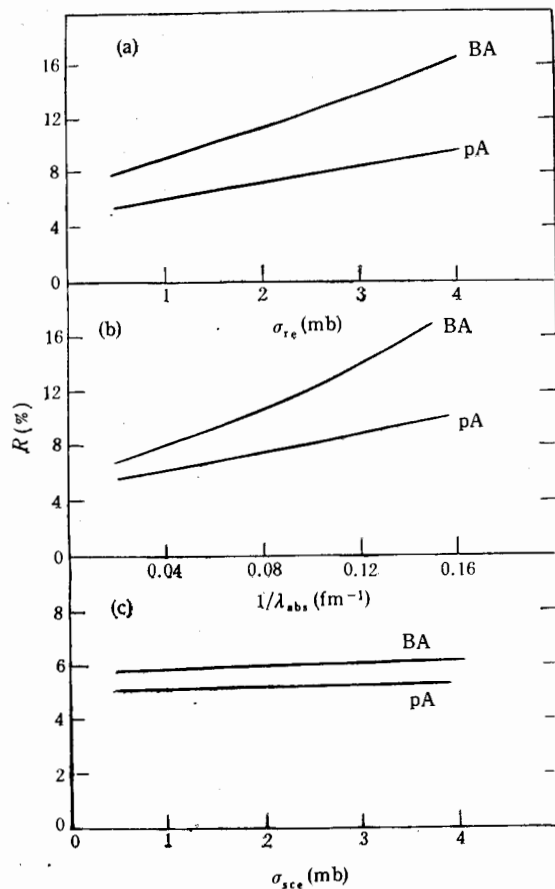


图 1

0.083fm^{-1} 时, R_{BA} 大约是 R_{pA} 的 1.5 倍左右. 单电荷交换反应对 K^+/π^+ 比的贡献决定于核中的中子数与质子数之差. 图 1(c) 是计算的 K^+/π^+ 比与 σ_{cc} 的变化关系, 从图中看到, R_{BA} 和 R_{pA} 之间的差别不大, 这是由于我们所考虑的反应, 单电荷交换反应的贡献完全是靶核的贡献, 而且 R_{BA} 和 R_{pA} 都很小, 对所有的 σ_{cc} , $R_{\text{BA}}/R_{\text{pA}} \approx 1.2$.

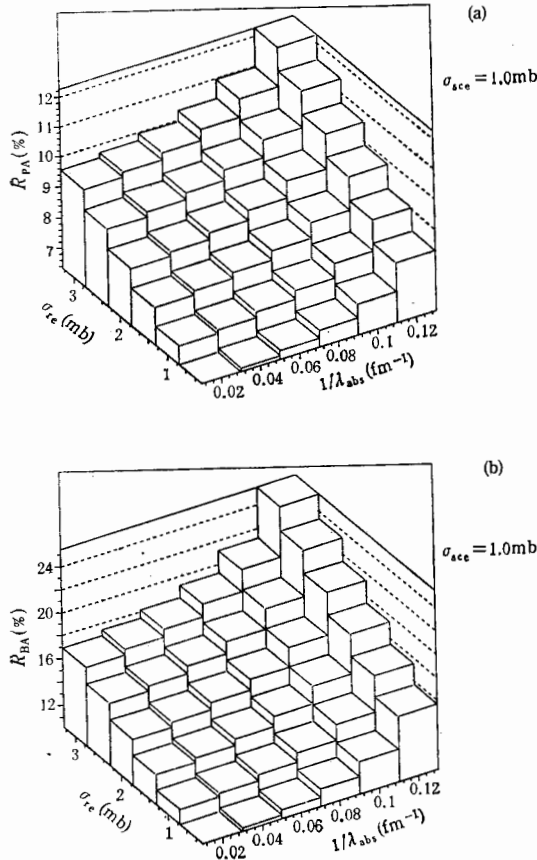


图 2

解释相对论重离子碰撞中的 K^+/π^+ 比增大是重要的, 单电荷交换反应对 K^+/π^+ 比的贡献可以忽略不计. 为了更好地理解 B-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比增大, p-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比资料是需要的以及其他可以引起 K^+/π^+ 比增大的机制和更精细的计算都在期待中.

π 介子引起的 K^+ 产生反应, π 吸收和单电荷交换反应这三种不同的次级碰撞过程的贡献同时计入的结果给在图 2 中. 由于 K^+/π^+ 比对 σ_{cc} 的变化不灵感, 所以在考虑单电荷交换反应的贡献时, 我们是取固定的 σ_{cc} , 在图 2 中我们取 $\sigma_{\text{cc}} = 1\text{mb}$, 当取其他的 σ_{cc} 值时, 结果是基本上类似的. 图 2(a) 是对于 p-Au 碰撞的结果, 图 2(b) 是对于 Si-Au 碰撞的结果. 图 2 表示的 K^+/π^+ 比都随 σ_{cc} 和 $1/\lambda_{\text{abs}}$ 的增加而增大, 而且 R_{BA} 比 R_{pA} 大, R_{BA} 大约是 R_{pA} 的 1.5—2.0 倍. 我们所计算的在 p-A 碰撞中的 K^+/π^+ 比增大, 很显然是由于末态次级作用.

计算结果表明, 末态次级作用, 象 π 引起的 K^+ 产生反应和 π 吸收对于

参 考 文 献

- [1] E802 Collaboration, Y. Miake et al., *Z. Phys.*, **C38**(1988) 135; P. Vincent et al., *Nucl. Phys.*, **A498**(1989) 67.
- [2] C. M. Ko and L. Xia, *Phys. Rev.*, **C38**(1989) 179.
- [3] L. Xia and C. M. Ko, *Phys. Lett.*, **222B**(1989) 343.
- [4] Chao Wei qin et al., *Nucl. Phys.*, **A514**(1990) 734.
- [5] Ren Jiang long and Chao Wei Qin, *Commun. in Theor. Phys.*, **12**(1989) 299.
- [6] H. Sorge et al., *Nucl. Phys.*, **A498**(1989) 567.
- [7] P. Koch., *Z. Phys.*, **C38**(1988) 269.
- [8] C. M. Ko., *Nucl. Phys.*, **A498**(1989) 561.
- [9] J. Rafelski and B. Müller, *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982) 1066; **56**(1986) 2334.

- [10] T. S. Biro and J. Zimanyi, *Nucl. Phys.*, **A395**(1983) 525.
- [11] P. Koch et al., *Phys Reports*, **C142**(1986) 167.
- [12] H. C. Chiang and J. Hüfner, *Nucl. Phys.*, **A352**(1981) 442; H. C. Chiang et al., *Kexue Tongbao*, **21**(1981) 1290.
- [13] W. Thome et al., *Nucl. Phys.*, **B129**(1977) 365.
- [14] E. Oset et al., *Nucl. Phys.*, **A448**(1986) 597.
- [15] E. Oset et al., private communication.
- [16] G. Höhler et al., *Nucl. Phys.*, **48**(1963) 470.
- [17] C. Gerschel and J. Hüfner, *Phys. Lett.*, **207B**(1988) 253.
- [18] A. D. Niddens et al., *Nuovo Cimento*, **31**(1962) 961.

The K^+/π^+ Ratio in High Energy Nucleus Collisions and the Effect of Secondary Collisions

Liu Bo Jiang Huanqing

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

Received on August 20, 1992

Abstract

We calculate the effect of secondary collisions in the K^+/π^+ ratio by an eikonal approximation and find that the secondary collisions are important.

Key Words Quark, Gluon, Plasma, K^+/π^+ Ratio.