

在 ^4He 与
及会得到较
01, 陈华中
(低于实验
球阶函数
上完成的,

Nucl. Phys.

Phys., 67

); S. Saito,

ION

action to
le in the
ilate the
means of
satisfac-

200 GeV/c 的质子-核碰撞中产生粒子的多重数分布与能量亏损

刘 波 王英才

(中国科学院高能物理所)

摘 要

我们用多次碰撞模型分析了入射质子动量为 200 GeV/c 的 p-Ar 和 p-Xe 碰撞中产生的负粒子的多重数分布。在与靶核子的每一次碰撞中,入射粒子损失能量,损失的能量用于产生粒子的概念在计算中明确考虑,理论结果与实验符合较好。

一、引 言

近年来,高能核子-核和核-核碰撞中的多粒子产生过程引起人们很大兴趣^[1]。人们期望,通过核子-核子碰撞与核子-核碰撞的比较得到关于粒子产生的空间-时间动力学方面的知识。人们对高能核-核碰撞的兴趣在于,极端相对论的重离子碰撞有可能产生从普通强子物质到夸克-胶子等离子体的相变^[2]。非弹性的高能强子-核作用,或核的停止本领是当前热烈争论的问题,因为它是与寻求夸克-胶子等离子体有关。一个大的停止本领意味着容易达到在核-核碰撞中产生高能量密度和高重子密度,即容易达到产生相变的条件。人们期望,从高能非弹性核子-核作用的研究,得到关于核停止本领方面的知识,通过研究高能核子-核碰撞中的多粒子产生过程,理解多粒子产生的机制和得到领头粒子能量损失方面的知识,而产生粒子的多重数是与领头粒子的能量损失有关。

为了理解高能碰撞中的多粒子产生过程,人们提出了很多模型^[3]描述多粒子产生机制,其中多次碰撞模型经常被用来分析高能核碰撞过程,虽然很多人用多次碰撞模型分析了高能强子-核碰撞中的多粒子产生过程,但是在碰撞过程中入射粒子的能量损失未明确计入。近来, Liu and Wong^[4]明确考虑了入射粒子通过原子核时所损失的能量,在多次碰撞模型的框架下分析了 αp 碰撞中产生的多重数分布,本文是把这个模型推广到中、重核;分析 200 GeV/c 的入射质子与核 Ar 和 Xe 碰撞中产生粒子的多重数分布,明确计入在碰撞过程中带头粒子的能量损失。为了避免多重数来自于靶核子贡献的复杂性,我们只分析在碰撞中产生的带负电粒子的多重数,原因是带负电粒子的多重数必定是来自于碰撞过程中产生粒子的贡献。由于靶核 Ar 和 Xe 是中、重核,将有利于检验不同的能量

损失模型,期望通过与实验比较得到关于领头粒子能量损失方面的知识,这就是这个工作的目的。

本文将如下安排,在第二节,我们给出多次碰撞模型,在第三节中,讨论单次碰撞中的多重数分布,在第四节中,讨论领头粒子的能量损失,最后一节给出理论与实验比较和讨论。

二、多次碰撞模型

我们用多次碰撞模型描述高能强子-核相互作用过程。模型有三个基本假设。首先,假设入射粒子在通过原子核时作连续非弹性碰撞,碰撞几率可以用 Glauber 理论作计算;其次,在每一次碰撞中,入射粒子损失能量,损失的能量用于产生粒子,能量损失假设是由一个参数化的停止规律描述;第三,假设粒子是在核外产生,这样在核内就没有次级碰撞。图 1 是多次碰撞过程的图形表示。在 p-A 碰撞中,入射质子与核 A 中的 ν 个靶核子发生相互作用,实验多重数分布则可以写为

$$p(n) = \sum_{\nu=1}^A W_{\nu} p(n, \nu) \quad (2.1)$$

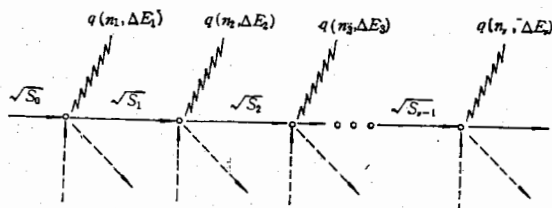


图 1 多次碰撞模型中的多粒子产生过程的图形表示

这里 W_{ν} 是入射质子与靶核子作 ν 次非弹性碰撞的几率,它可以用 Glauber 理论来计算:

$$W_{\nu} = \sigma_{\nu}^{pA} / \sigma_{in}^{pA} \quad (2.2)$$

式中^[3]

$$\sigma_{\nu}^{pA} = \binom{A}{\nu} \int db (\sigma_{in}^{pp} T_A(b))^{\nu} [1 - \sigma_{in}^{pp} T_A(b)]^{A-\nu} \quad (2.3)$$

$$T_A(b) = \int \rho_A(b, z) dz \quad (2.4)$$

$$\sigma_{in}^{pA} = \sum_{\nu=1}^A \sigma_{\nu}^{pA} = \int db \{1 - [1 - \sigma_{in}^{pp} T_A(b)]^A\} \quad (2.5)$$

这里 σ_{in}^{pp} 是非弹性的质子-质子碰撞截面,在计算中取 $\sigma_{in}^{pp} = 30\text{mb}$, ρ_A 是原子核密度,它的归一化为: $\int \rho_A(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = 1$, 在计算中,对于轻核取谐振子密度分布,对于中、重核取费米密度分布。 $p(n, \nu)$ 是入射核子与靶核子作 ν 次碰撞后产生粒子的多重数分布。我们这里用 $q(n_{\nu}, \Delta E_{\nu})$ 表示第 ν 次碰撞产生粒子的多重数分布, ΔE_{ν} 表示第 ν 次碰撞中的

能量损
积:

为了得
布 q :

右
射能
个变
量

这里 \bar{n}

(3.1)

在相
当

粒子,

已经

终

式能

符

为了得

重数 n

到第 i

量损

损失

函数 f

它的

多

就是这个工作
 单次碰撞中的
 实验比较和计

能量损失. 入射质子与靶核子作 ν 次碰撞后的多重数分布 $p(n, \nu)$ 是一个 ν 次碰撞的卷积:

$$p(n, \nu) = \int q(n_1, \Delta E_1) \cdots q(n_\nu, \Delta E_\nu) \delta(n - n_1 - \cdots - n_\nu) dn_1 \cdots dn_\nu \quad (2.6)$$

从上式可以得到如下递推关系:

$$p(n, \nu) = \int p(n_{\nu-1}, \nu-1) q(n_\nu, \Delta E_\nu) \delta(n - n_{\nu-1} - n_\nu) dn_{\nu-1} dn_\nu \quad (2.7)$$

为了得到在 p-A 碰撞中产生粒子的多重数分布, 我们需要第 ν 次碰撞所产生的多重数分布 $q(n_\nu, \Delta E_\nu)$, 下一节我们讨论如何得到 $q(n_\nu, \Delta E_\nu)$.

三、单次碰撞中的多重数分布

在 高能非绕射的质子-质子碰撞中, 多粒子产生的经验规律是 KNO Scaling^[6], 在入射能量为 E 时的质子-质子碰撞中, 观察几个带电粒子的分布 $p(n, E)$, 它可以由只有一个变量的普遍函数 $\phi(x)$ 来描述:

$$(2.1) \quad p(n, E) = \frac{1}{\bar{n}(E)} \phi\left(\frac{n}{\bar{n}(E)}\right) \quad (3.1)$$

这里 $\bar{n}(E)$ 表示在能量为 E 时带电粒子的平均数, 即平均的多重数, $\phi(x)$ 的经验形式^[7]是

$$\phi(x) = (3.79x + 33.7x^3 - 6.64x^5 + 0.332x^7)e^{-3.04x} \quad (3.2)$$

(3.1) 式被称为 KNO 分布, 它是一种统计现象的表示, 虽然它的物理原因仍在争论中, 但在相当宽的能量范围内, 它能较好地符合实验.

当入射核子通过原子核时, 与靶核子发生 ν 次碰撞, 每一次碰撞损失的能量用于产生粒子, 每次碰撞后产生的平均多重数 \bar{n} 应与在每次碰撞中丢失的能量 ΔE 有关. 实验上已经给出平均多重数与核子-核子质子系中的能量丢失 ΔE 之间的关系. 下面的经验公式能很好符合在 pp 和 e^+e^- 中实验平均多重数 \bar{n} ^[8]:

$$(2.2) \quad \bar{n}(\Delta E) = 2.47 + 0.03 \exp\left(1.97 \sqrt{\ln\left(\frac{\Delta E}{0.5 \text{ GeV}}\right)^2}\right) \quad (3.3)$$

为了得到在 p-A 碰撞中产生粒子的多重数分布, 我们需要第 i 次核子-核子碰撞产生的多重数分布. 我们假定每次核子-核子碰撞产生的多重数分布服从 KNO Scaling, 为了得到第 i 次核子-核子碰撞所产生的 KNO 分布, 我们需要计算第 i 次碰撞中领头粒子的能量损失, 下一节我们讨论这个问题.

四、能量损失

当高能核子通过原子核时, 与靶核子作多次非弹性碰撞, 在每一次碰撞中, 领头粒子损失能量, 如何得到关于领头粒子能量损失方面的知识是很重要的. 通常人们是用一个函数 $p(x)$ 表示一次核子-核子碰撞后找到领头粒子具有 x 的几率分布, 简便的办法是取它的参数化形式^[9]:

假设. 首先,
 er 理论作计
 能量损失假设
 为就没有次级
 中的 ν 个靶核

理论来计算:

(2.3)

(2.4)

(2.5)

子核密度, 它

1、重核取

分布. 我们

次碰撞中

$$p(x) = \alpha x^{\alpha-1} \quad (4.1)$$

这里

$$x = \frac{E^D + p_{\parallel}^D}{E^B + p_{\parallel}^B} \quad (4.2)$$

在(4.2)式中, E^D 和 p_{\parallel}^D 分别表示碰撞后被探测的领头粒子的能量和动量, E^B 和 p_{\parallel}^B 表示入射粒子的能量和动量, α 是一个可调参数, 对于在自由空间的核子-核子碰撞, $\alpha = 1$ 是实验材料的一个表示。(4.1)式通常被称为停止本领规律 (Stopping power law). 由(4.1)式可以得到 x 的平均值是

$$\bar{x} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \quad (4.3)$$

我们用 \sqrt{s} 表示碰撞前在核子-核子质心系中的总能量, 用 E_{Ld} 表示碰撞后领头粒子带走的能量, 则核子-核子碰撞中的能量损失可以写为:

$$\Delta E = \sqrt{s} - 2E_{Ld} \quad (4.4)$$

在上式中, 因子 2 的出现是假设反冲核子的快度分布是和领头粒子的快度分布对称。(4.4)式中的 E_{Ld} 可写为

$$E_{Ld} = m_{\perp}^p \text{Ch} y \quad (4.5)$$

这里 $m_{\perp}^p \equiv \sqrt{m_p^2 + p_{\perp}^2}$, 在计算中取 $p_{\perp} = 0.35 \text{ GeV}/c$, y 是快度, 它的定义是

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_{\parallel}}{E - p_{\parallel}} \right) \quad (4.6)$$

由(4.2)和(4.6)式可以得到

$$y = y_B + \ln x \quad (4.7)$$

这里 y_B 是碰撞前入射粒子的快度。

当用(4.1)式控制能量损失时, (4.4)式可以写为:

$$\Delta E = \sqrt{s} - 2m_{\perp}^p \text{Ch}(y_B + \ln \bar{x}) \quad (4.8)$$

五、与实验比较和讨论

在高能质子-核碰撞中, 带电粒子的多重数分布包括入射质子和碰撞中产生的带电粒子的贡献, 还有来自于靶核子的贡献。而带负电粒子的多重数分布必定是碰撞过程中产生的粒子的贡献。在本文中, 我们只分析带负电粒子的实验资料, 研究负粒子分布与 α 的关系。

在质子-质子碰撞中产生的负粒子的 KNO 分布是^[10]:

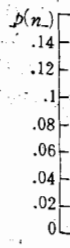
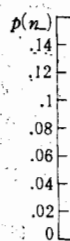
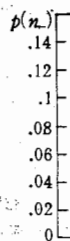
$$q(n_-, \Delta E) = \phi(z) / (2\bar{n}_- + 2) \quad (5.1)$$

式中

$$z = \frac{2n_- + 2}{2\bar{n}_- + 2} \quad (5.2)$$

这里 n_- 表示带负电粒子的数目, \bar{n}_- 表示平均多重数。

图 2
与实验
能量下,
为了
量损失,
次碰撞
不同描
核 Ar 和
分布。E
碰撞中
比较, 图
 $\alpha = 1^{[10]}$
v), 即在
3(b) 和
与靶核子



(4.1)

图 2 是入射动量为 200 GeV/c 的质子-质子碰撞中产生的带负电粒子的 KNO 分布与实验资料^[10]的比较,从图中看到,在这个能量下, KNO 分布是实验资料的表示。

(4.2)

动量, E^B 和
的核子-核子
opping power

为了描述领头粒子在碰撞过程中的能量损失,人们提出了各种模型。我们在多次碰撞模型的框架下,用能量损失的三种不同描述分别计算了 200GeV/c 的质子与核 Ar 和 Xe 碰撞中产生的带负电粒子的分布。图 3 和图 4 分别是 p-Ar 和 p-Xe 碰撞中产生的带负电粒子的分布与实验的比较,图中曲线是理论结果,矩形图是实验资料^[10]。

(4.3)

碰撞后领头粒

(4.4)

分布对称。

图 3 (a) 和图 4 (a) 中的实线是用 $\alpha = 1$ ^[4] 计算的结果,在每一次核子-核子碰撞中, α 都取为 1 ($\alpha_i = 1, i = 1, 2, \dots, \nu$),即每一次核子-核子碰撞中能量损失一半,我们称能量损失的这种描述为模型 I。图 3 (b) 和图 4 (b) 是用 $\alpha = 3$ (Hüfner et al.)^[11] 计算的结果与实验的比较,在入射核子与靶核子作 ν 次碰撞中, $\alpha = 1$ 描述第一次碰撞, $\alpha = 3$ 描述其后的各次碰撞,我们称之

(4.5)

是

(4.6)

(4.7)

(4.8)

产生的带电粒
碰撞过程中产
分布与 α 的

(5.1)

(5.2)

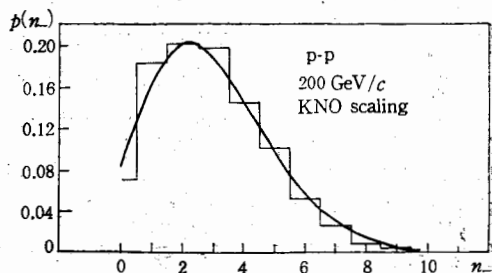


图 2

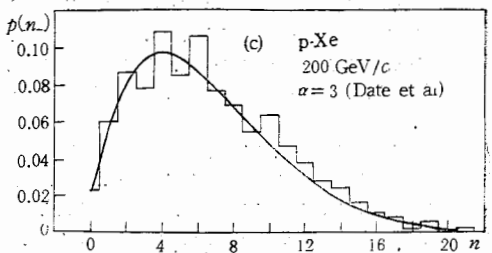
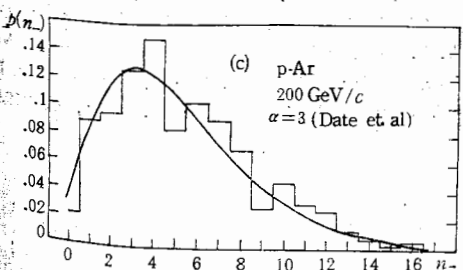
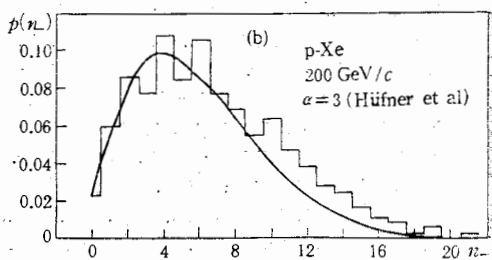
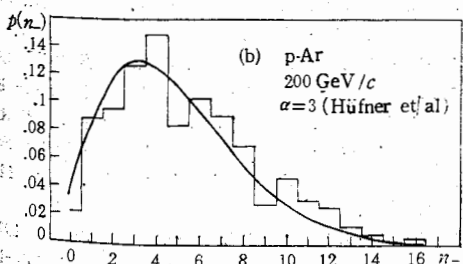
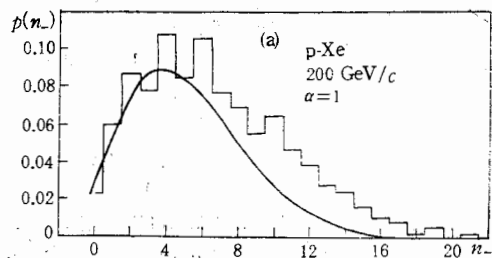
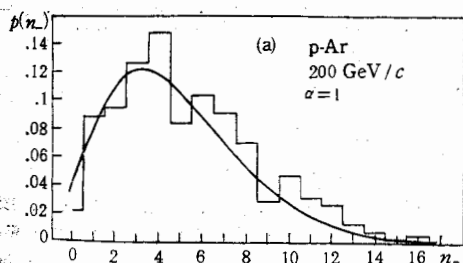


图 3

图 4

为模型 II ($\alpha_1 = 1, \alpha_i = 3, i = 2, 3, \dots, \nu$)。图 3(c) 和图 4(c) 是用 $\alpha = 3$ (Date et al.)^[12] 计算的结果与实验的比较, 最后一次碰撞 α 取为 1, 除了最后一次碰撞外, α 都取为 3, 我们这里称它为模型 III ($\alpha_i = 3, i = 1, 2, \dots, \nu - 1, \alpha_\nu = 1$)。

从图 3 和图 4 可以看到, 模型 I 给出的结果与实验符合较差, 尤其是对 p-Xe 理论结果明显偏离实验, 这是不难理解的, 原因是每一次碰撞中能量损失太大, 使得碰撞次数减少。对于 p-Ar, 模型 II 和模型 III 给出的结果差别不大, 都能符合实验, 由于原子核较轻, 所以对能量损失模型不灵感。但对 p-Xe, 模型 II 和 III 给出的结果明显地表现出差别, 这正说明, 重核有利于考察不同的能量损失模型。

为了能得到在 p-A 碰撞中, 入射核子与 ν 个靶核子非弹性作用后强子化过程的知识, 我们用描述能量损失的不同模型与实验作了比较, 实验支持模型 III。模型 III 给出的结果与实验符合较好, 可以如下来解释: 在入射核子与靶核子作 ν 次碰撞中, 由于重核密度大, 核子排列密集, 在前 $\nu - 1$ 次碰撞中, 仅仅靶核子被激发, 所以入射核子的能量损失较小, 在最后一次碰撞中, 不但靶核子被激发, 而且入射核子本身也被激发, 所以能量损失增加。如果这个图象是正确的, 将有助于推广应用到核-核碰撞中去。为能进一步考察在多粒子产生过程中的能量损失模型, 在重核上作更高能量的实验将是有益的。我们的结果与实验的符合也说明, 每一次核子-核子碰撞入射核子损失能量, 损失的能量用于产生粒子的假设是合理的, 这就是说每一次核子-核子碰撞是粒子产生的源的图象是一个有用的概念。

参 考 文 献

- [1] W. Busza, *Acta Phys. Pol.*, 8(1977), 333; A. Capella and A. Krzywicki, *Phys. Rev.*, D18(1978), 3357; M. A. Fessler, *Ann. Phys.*, 137(1981), 44; A. Capella et al., *Phys. Lett.*, 108B(1982), 347, First Workshop on Ultrarelativistic Nuclear Collisions, Lawrence Berkeley Report LBL-8957(1979); I. Otterlund, *Nucl. Phys.*, A418(1984), 87c; C. de Marzo et al., *Phys. Rev.*, D26(1982), 1019; W. Bell et al., *Phys. Lett.*, 128B(1983), 349; W. O. Chao, M. K. Hegab, and J. Hüfner, *Nucl. Phys.*, A395(1983), 482.
- [2] J. D. Bjorken, *Phys. Rev.*, C27(1983), 140; K. Kajantie and L. McLerran, *Phys. Lett.*, 119B(1982), 203; T. D. Lee, Columbia University Report No. CU-TP-226, 1981 (unpublished); M. Gyulassy, Lawrence Berkeley Report No. CBL-15175, 1982 (unpublished); J. Rafelski and M. Danos, N. B. S. Report No. NBSIR83-2725, 1983 (unpublished); C. Y. Wong, *Phys. Rev.*, D30(1984), 961; L. McLerran and B. Svetitsky, *Phys. Lett.*, 96B(1981), 195; *Phys. Rev.*, D24(1981), 450; I. Montvay and H. Pietarinen, *Phys. Lett.*, 115B(1982), 151; J. Kogut et al., *Phys. Rev. Lett.*, 48(1982), 1140.
- [3] G. Berlad, A. Dar, and G. Eilan, *Phys. Rev.*, D13(1976), 161; K. Gottfried, *Phys. Rev. Lett.*, 32(1974), 957; S. J. Brodsky, J. F. Gunion, and H. J. Huhn, *Phys. Rev. Lett.*, 39(1977), 1120; N. N. Nikolaev and A. Ya. Ostapchuk, CERN preprint TH-2575(1978); A. Bialas, W. Czyz, and W. Furmanski, *Acta Phys. Pol.*, B10(1979), 831; A. Capella and J. Tran Thanh Van, *Phys. Lett.*, 93B(1980), 146; *Z. Phys.*, C10(1981), 249; A. Bialas, W. Czyz, and L. Lesniak, *Z. Phys.*, C13(1982), 747; A. Bialas et al., *Nucl. Phys.*, B111(1976), 461; W. O. Chao and H. J. Priner, *Z. Phys.*, C14(1982), 165; J. Hüfner and B. Liu, *Z. Phys.*, C27(1985), 283; V. V. Anisovich et al., *Nucl. Phys.*, B133(1978), 477; *Z. Phys.*, C27(1985), 87.
- [4] B. Liu and C. Y. Wong, ORNR preprint.
- [5] A. Capella and A. Krzywicki, *Phys. Lett.*, 67B(1977), 84.
- [6] Z. Koba, H. B. Nielsen, P. Olesen, *Nucl. Phys.*, B40(1972), 317.
- [7] P. Slattery, *Phys. Rev. Lett.*, 24(1972), 1624.
- [8] M. Basile et al., *Nuo. Cim.*, 65A(1981), 400.
- [9] K. Kinoshita et al., *Prog. Theor. Phys.*, 63(1980), 928; 63(1980), 1268.

[10] C.
[11] J.
[12] S.

MUL
AN

We
collisions
dent bar
agreemer

用 $\alpha = 3$ (在一次碰撞外, $\alpha = 1$).

是对 p-Xe 理论, 使得碰撞次数, 由于原子核, 明显地表现出

子化过程的, 模型 III 给出的碰撞中, 由于重核, 对核子的能量损失, 所以能量损失, 能进一步考察, 用的. 我们的, 的能量用于产生, 图象是一个有用

- [10] C. De Marzo *et al.*, *Phys. Rev.*, **D26**(1982), 1019.
 [11] J. Hüfner *et al.*, *Phys. Lett.*, **145B**(1984), 167.
 [12] S. Date *et al.*, *Phys. Rev.*, **D32**(1985), 619.

MULTIPLICITY DISTRIBUTIONS OF PRODUCED PARTICLES AND ENERGY LOSS IN PROTON-NUCLEUS COLLISIONS AT 200GeV/c

LIU BO WANG YING-CAI

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

We analyse the multiplicity distributions of negative particles produced in p-Ar and p-Xe collisions at 200 GeV/c by a multiple collision model. The energy loss suffered by the incident baryons in its passage through the nucleus is explicitly included in the calculation. The agreement is satisfactory.

v., **D18**(1978), 335;
 32), 347, First Work
 1979); I. Otterlund
 W. Bell *et al.*, *Phys.*
1395(1983), 482.
 n., **119B**(1982), 203;
 ulassy, Lawrence Ber-
 Report No. NBSIR83-
 d B. Svetitsky, *Phys.*
 n, *Phys. Lett.*, **118B**

Rev. Lett., **32**(1974),
 20; N. N. Nikolaev
 V. Furmanski, *Acta*
 980), 146; *Z. Phys.*
 Bialas *et al.*, *Nucl.*
 Hüfner and B. Lüth-
Phys., **C27**(1983)