

p-A 作用的非弹性度及对 靶核质量的依赖

荆贵茹 王广君 丁林垵 经才骝

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1993年10月14日收到

摘 要

采用核碰撞几何和强子作用二分量模型,建立了 p-N 和 p-A 作用的 Monte-Carlo 产生器。用这个产生器,研究了 p-A 作用的非弹性度分布和平均非弹性度,以及它们对靶核质量的依赖关系。

关键词 强子-核作用,非弹性度,核碰撞几何, Monte-Carlo 产生器。

1 引 言

p-A 作用的非弹性度,对了解强子-核作用的机制,是一个重要的物理量,对研究宇宙线在大气中的核级联过程,尤其具有重要的实用意义。宇宙线实验观察到的超高能级联的快速衰减,导致了对初级宇宙线成分和超高能作用碎裂区行为的热议讨论。实际上,这种快速衰减现象对 p-A 作用的非弹性度有很大的依赖。至今,加速器对 p-A 作用非弹性度的测量并不够全面,例如,对领头粒子的 x 分布,在 $x < 0.3$ 和 $x > 0.9$ 范围内,仍缺乏测量数据。因此, p-A 作用的平均非弹性度以及对靶质量的依赖,仍然是一个不完全清楚的问题。

本工作将采用一种比较准确的核碰撞几何^[1]和核子-核子作用的二分量模型,采用独立核子作用图象,考虑弹丸核子在靶核内的多次碰撞,分别建立 p-N 作用和 p-A 作用的 Monte-Carlo 事例产生器。要求所得到的模拟结果与 CERN SPS 和 Fermilab 的动量为 $100\text{GeV}/c$ — $200\text{GeV}/c$ 的 p-p 和 p-A 作用提供的质子的 x 分布,次级粒子的快度分布和多重数分布要较好地符合,在此基础上,去推 p-A 作用领头粒子在 $(0, 1)$ 整个区间的 x 分布,从而得出 p-A 作用非弹性度的分布、平均非弹性度以及它随着靶核质量的变化。

2 方 法

假设 p-A 非弹性碰撞的物理图象为: P 随机地以某个瞄准参量入射到靶核 A 内,与

A 中一个以上的核子发生非弹性碰撞,碰撞次数 ν 由碰撞几何决定. 每次核子-核子碰撞用“单衍射-非单衍射”二分量模型处理,弹丸核子在靶核内每碰撞一次损失份额能量(即 p-N 作用的非弹性度),此能量用于产生次级粒子. p-A 作用的非弹性度就是产生的次级粒子所具有的总的能量份额. 作为第一步,暂时忽略次级粒子在核内级联. 显然,这不会影响本文所要讨论的主题.

2.1 核碰撞几何

首先用 Monte-Carlo 方法产生一个核. 采用修改的 Woods-Saxon 分布作为核子密度分布:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{d - \delta}\right)}, \quad (1)$$

其中 r 是由一个核子到这个核的中心的距离, R_0 是核的电荷半径, d 是核的表面弥散度(单位为 fm), δ 是表面弥散度的修正量, R_0 , d 和 δ 的取值均见工作[1].

然后让入射质子以随机的瞄准参量,轰击这个核. 每一次入射核子与靶核子发生非弹性碰撞的几率,由一个重迭函数 $f(b)$ 决定,其中 b 是弹丸核子对靶内核子的瞄准参量, $f(b)$ 取程函(eikonal)分布形式:

$$\begin{aligned} f(b) &= 1 - \exp(-Q(b)), \\ Q(b) &= Q_0 \exp(-\beta b^2/b_0^2), \end{aligned} \quad (2)$$

满足以下条件:

$$\begin{aligned} \sigma_{pN}^{\text{tot}} &= 2 \int f(b) d^2b; \\ \sigma_{pN}^{\text{el}} &= \int f^2(b) d^2b, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 σ_{pN}^{tot} 和 σ_{pN}^{el} 分别是质子-核子作用的总截面和弹性截面. 当入射核子实验室系动量在 50 GeV/c—200 GeV/c 的范围内由(3)确定(2)中的参量,得 $Q_0 = 1.4$, $\beta = 1.62$, $b_0 = 0.993\text{fm}$.

表 1 列出动量在 50GeV/c—200GeV/c 的范围内的 P 和 C,N,Al,Ar,Cu,Ag, Xe, W 核内核子碰撞的平均次数 $\langle \nu \rangle$ 的计算结果. 图 1 给出

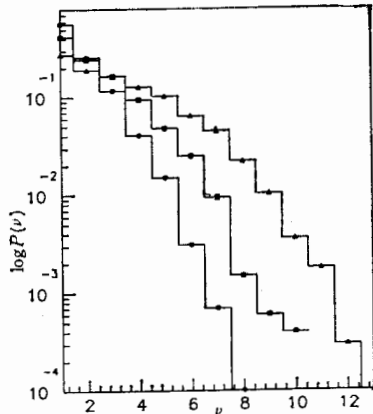


图 1 p 与 C,Ar 和 Xe 核内核子碰撞次数 ν 的分布
● p-C, ■ p-Ar, ▲ p-Xe.

p 与 C,Ar 和 Xe 核碰撞的碰撞次数分布.

表 1 在 p-A 碰撞中,用 Monte-Carlo 方法得到的 p-N 碰撞的平均次数 $\langle \nu \rangle$

靶核	C	N	Al	Ar	Cu	Ag	Xe	W
$\langle \nu \rangle$	1.71	1.69	2.02	2.24	2.53	3.04	3.19	3.57

2.2 p-N 碰撞

质子与核子的非弹性碰撞,分为两个过程处理: 单衍射分解过程 (SD) 和非单衍射多重产生过程 (NSD).

2.2.1 非单衍射过程

已知 p-N 非单衍射作用的次级粒子多重数服从负二项式分布, 平均带电粒子多重数 $\langle n_{ch} \rangle = 0.6 + 0.416 \ln S + 0.122 \ln^2 S$. 工作[2]指出, 负二项式分布可由 Γ 分布与泊松分布卷积组成, 我们由 Γ 分布抽样得到一次作用的平均多重数, 然后由此平均值进行泊松分布抽样, 得到这次作用的多重数.

次级粒子的横动量 p_t 取 $P(p_t) \propto p_t e^{-2p_t/\langle p_t \rangle}$ 分布, $\langle p_t \rangle$ 是平均横动量. 对 π^\pm , $\langle p_t \rangle$ 取为 $0.32 \text{ GeV}/c$; 对 K 介子, $\langle p_t \rangle$ 取为 $0.42 \text{ GeV}/c$; 对 p, n, $\langle p_t \rangle$ 取为 $0.45 \text{ GeV}/c$.

次级粒子的快度取 $(-y_{\max}, y_{\max})$ 区间的均匀分布.

2.2.2 单衍射分解

单衍射截面取 6.4 mb . 衍射体系不变质量平方 M^2 的分布在 $1.21 \leq M^2 < 2(\text{GeV}/c^2)^2$ 区间取均匀分布, 在 $M^2 \geq 2(\text{GeV}/c^2)^2$ 区间取为 $1/M^2$ 分布. 当 $M < 1.6 \text{ GeV}/c^2$ 衍射体系将转变到二至三个末态粒子, 简单地按二体或三体衰变处理, 对 $M \geq 1.6 \text{ GeV}/c^2$, 次级粒子多重数分布取为

$$P(n) = \frac{4}{\sqrt{2\pi n_0}} e^{-2(1-\frac{n}{n_0})^2}, \quad (4)$$

$$n_0 = 2M^{1/2}.$$

从这个分布取出多重数, 由纵向相空间分布决定每个粒子的快度, 横动量单独抽样.

3 结果和讨论

3.1 对 p-p 作用二分量模型的检验

采用上述 p-p 作用二分量模型的 Monte-Carlo 产生器, 模拟了 $100 \text{ GeV}/c$ 的 pp 碰撞, 并与 Fermilab 的 SAS 实验^[3]进行了比较. 图 2(a) 给出 $p + p \rightarrow p + X$ 的 $x \frac{d\sigma}{dx}$ 对 x 的依赖, 黑点为实验点, 实线为模拟结果, 两者在 $x = 0.4$ 处归一. 在 $x > 0.9$ 区, 截面的上升是由于单衍射过程; 如果不计入单衍射过程, 所得结果就会如图 2(b) 所示那样.

为了和 C. De. Marzo 等^[4]对 $200 \text{ GeV}/c$ pp 作用的快度分布和多重数分布作比较, 也在相同动量下, 对 pp 作用的负粒子产生作了模拟计算. 所得结果显示于图 4(a) 和图 5(a). 这些结果说明, 本文的 pp 作用二分量模型描写了 pp 非弹性作用的主要特征.

3.2 对 p-A 作用模型的检验

Fermilab 实验^[4]测量了 $100 \text{ GeV}/c$ 的人射质子与 C、Al、Cu、Ag 和 Pb 靶碰撞下,

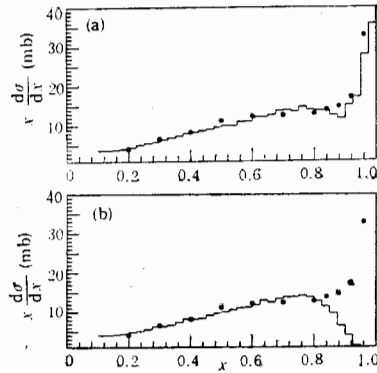


图2 100GeV/c 的 $p + p \rightarrow p + X$ 的 $x \frac{d\sigma}{dx}$ 与 x 的关系

(a) 用二分量模型 (NSD + SD) 的模拟值与实验值比较, (b) 用 NSD 过程模拟值与实验比较。

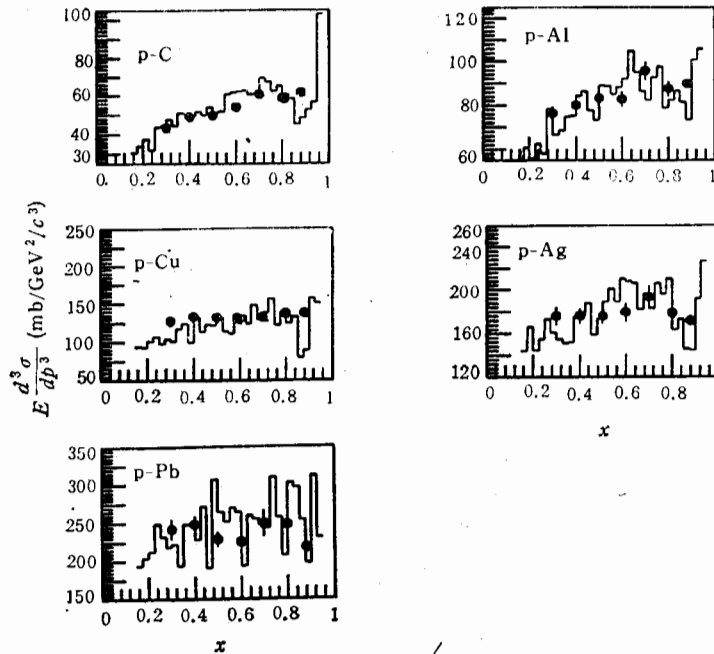


图3 100GeV/c 的 p 和 C, Al, Cu, Ag, Pb 核碰撞, $p + A \rightarrow p + X$
($p_t = 0.3 \text{ GeV}/c$) 不变微分截面 $E \frac{d^3\sigma}{dp^3}$ 与 x 的关系

$p + A \rightarrow p + X$ 过程末态质子在 $p_t = 0.3 \text{ GeV}/c$ 时的 $E \frac{d^3\sigma}{dp^3}$ 对 x 的依赖关系 (见图

3 的黑点)。如本文引言中提到的在 $x < 0.3$ 和 $x > 0.9$ 没有实验测量值。采用本文的 $p-A$ 作用模型, 所得结果如图 3 实线所示。模拟结果与实验值在 $x = 0.4$ 处归一。在有实验测量值的区间内, 二者的符合还比较好。

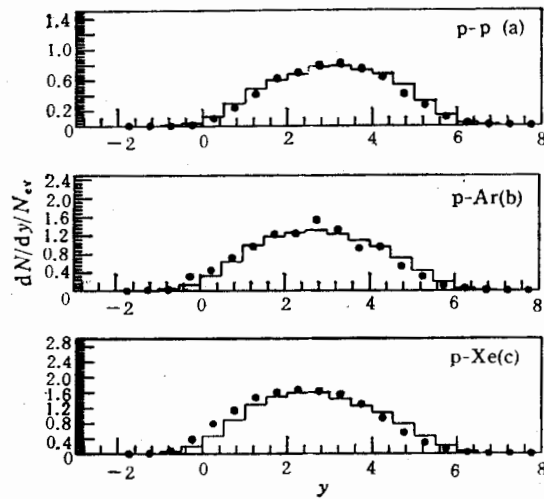


图 4 200GeV/c 的 p 与 p 及 Ar, Xe 核作用产生的负粒子的快度分布
黑点为实验值, 实线为模拟值

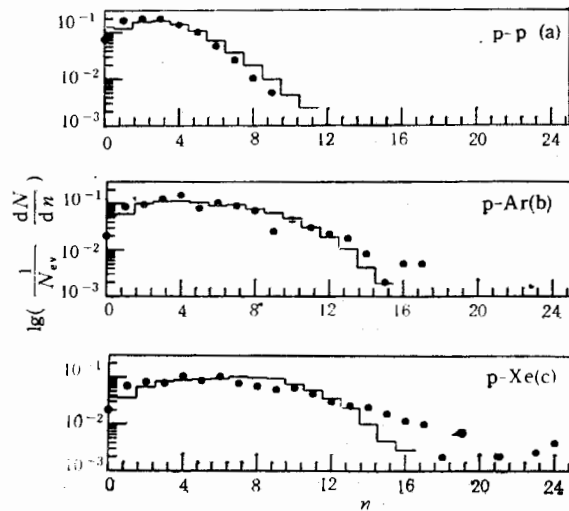


图 5 200GeV/c 的 p 与 p 及 Ar, Xe 核作用产生的负粒子的多重数分布
黑点为实验值, 实线为模拟值

对 200GeV/c p-A 作用的快度分布和多重数分布, 以 p-Ar 和 p-Xe 为例子, 将模拟结果和实验结果^[5]表示在图 4(b,c) 和图 5(b,c)。在小 y 区和大 n 区间, 本工作所得结果稍低于实验值, 表明低能粒子数和高多重数事例的短少。这二者是互相联系的。这是由于忽略了次级粒子中有一部分能量较低者会在核内再次作用。如前面强调过的, 这不会影响对领头粒子的行为和非弹性度的讨论。

3.3 p-A 碰撞的非弹性度

在以上模拟结果与实验结果一致的基础上, 用我们的 p-A 作用 Monte-Carlo 产生器, 作出了 p-A 碰撞的平均非弹性度 $\langle K \rangle$ 及其在(0,1)区间的非弹性度的分布. 在表 2 中列出了 P 和 C, Al, Cu, Ag, Pb 核碰撞的平均非弹性度. 为了方便比较, 同时列出 pp 碰撞的 $\langle K \rangle$. 可以看到 $\langle K \rangle$ 随着靶的质量增加而增加, 换言之靶核越重弹丸 P 用于多重产生的份额能量越大, 领头粒子带有的能量越小. 这种依赖关系可以用以下关系表示:

$$\langle K \rangle = 0.135 \lg A + 0.48. \quad (5)$$

在 P 和 P 及 C, Al, Cu, Ag, Pb 核碰撞中, 领头粒子的 x 分布, 即 $\frac{dN}{N_{ev} dx}$ 与 x 的关系,

显示在图 6 中. 在这些图中, x 接近 1 的部分仍可看到一个小的 pA 作用衍射峰, 但随着靶核质量数的增加而减弱. 在 x 接近 0 的部分, 领头粒子的 x 分布呈上升趋势, 靶核愈重愈明显. 这是入射质子在靶核内多次碰撞, 不断损失能量的结果, 靶核愈重, 质子在靶核内碰撞次数愈多, 这就是 pA 作用 $\langle K \rangle$ 随靶核质量数 A 上升的原因.

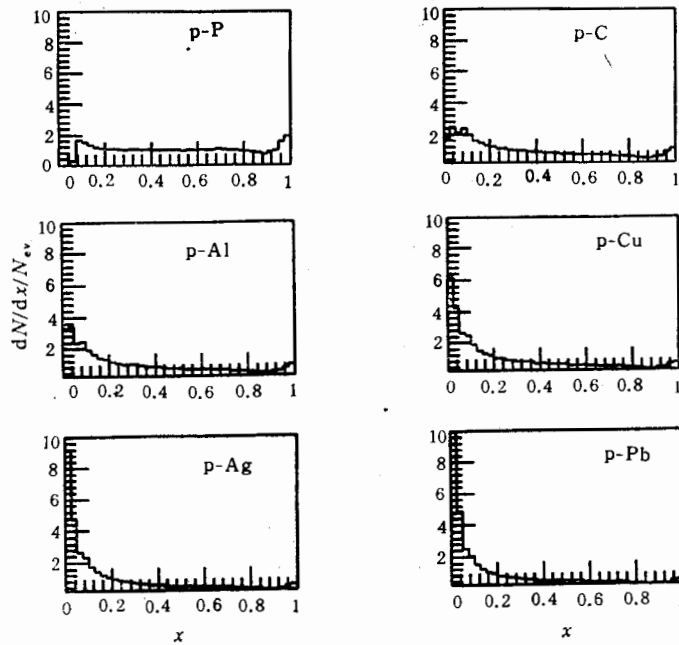


图 6 100GeV/c 的 p 与 p 及 C, Al, Cu, Ag, Pb 核碰撞领头粒子的 x 分布

表 2 动量为 100GeV/c 的 p 和 p 及 C, Al, Cu, Ag, Pb 核碰撞的平均非弹性度

靶核	P	C	Al	Cu	Ag	Pb
A	1	12	27	64	108	207
$\langle K \rangle$	0.48	0.62	0.66	0.71	0.76	0.79

作者衷心地感谢朱清棋教授有益的讨论和三室计算机组的全力支持。

参 考 文 献

- [1] 丁林垲, 高能物理与核物理, 14(1990)303.
- [2] He Yudong et al., *Europhys. Lett.*, 9(7) (1989) 645.
- [3] A.E. Brenner et al., *Phys. Rev.*, D 26 (1982) 1497.
- [4] D.S. Barton et al., *Phys. Rev.*, D 27 (1983) 2580.
- [5] C.D. Marzo et al., *Phys. Rev.*, D 26 (1982)1019.

Inelasticity of p-A Interaction and Its Dependence on the Mass of Target

Jing Guiru Wang Guangjun Ding Linkai Jing Cailiu
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

Received on October 14, 1993

Abstract

Adopting a nuclear collision geometry and two-component model of hadron-hadron interaction, a Monte-Carlo generator on p-N and p-A interaction has been established. Using this generator, the inelasticity distribution, average inelasticity of p-A interaction and their dependence on the mass of target have been studied.

Key words hadron-nucleus interaction, inelasticity, nuclear collision geometry, Monte-Carlo generator.