

高能核-核碰撞的灰粒子多重数分布和统计模型

秦 玉 明

(山西师范大学物理系, 临汾 041004)

摘 要

本文用统计模型讨论了高能核-核碰撞中灰粒子的产生过程, 给出与实验数据相符合的灰粒子多重数分布, 并分析了靶核参加者数目 N , 碰撞参数 b 与灰粒子多重数 n_i 的关联。

高能核-核碰撞已成为粒子物理领域的一个活跃分支, 目前主要目标集中于快度中心区多粒子产生的研究。为了整体理解高能核-核碰撞的反应机制, 有必要对靶核区碎裂进行深入细致的研究。

高能强子-核, 核-核碰撞的靶核碎裂产物中, 有一部分动能介于 26.2MeV 和 375MeV 之间的单电荷粒子, 被称为灰粒子^[1,2]。从实验上确定, 灰粒子主要是靶核的反冲质子。文献[3,4]研究了高能强子-核碰撞中灰粒子的问题, 找到灰粒子多重数与入射强子在靶核内碰撞次数之间关系。对于高能核-核碰撞, 文献[2]用 Fritiof 模型^[5]计算的灰粒子多重数分布和实验数据比较, 结果指出, 由于 Fritiof 模型中灰粒子仅是弦碎裂产生的低能量质子, 而没有考虑靶核的核内级联效应, 因而低估了灰粒子多重数。

本文根据核碰撞几何, 将灰粒子的来源分为两个, 即靶核的直接碰撞部分和未直接碰撞部分, 给出一个较为合理的统计模型, 描述高能核-核碰撞中灰粒子产生过程。

首先, 考虑入射核 B 以碰撞参数 b 与靶核 A 发生碰撞, 两核重叠区域的核子称为参加者, 而重叠区域之外的核子称为旁观者^[6]。在末态, 靶核质子参加者的动能 E 以一定几率 k 满足能量条件:

$$26.2\text{MeV} < E < 375\text{MeV}.$$

即作为灰粒子出现。

靶核核子为质子的几率是 $q = Z/A$, 这里 Z 和 A 分别表示靶核的电荷数和质量数。则, 每个靶核参加者成为一个末态灰粒子的几率为:

$$W = kq, \quad (1)$$

碰撞参数为 b 的核-核碰撞有 $N(b)$ 个靶核参加者, 其中有 n 个成为灰粒子的几率是:

$$P_{N(b)}^{(n)} = \binom{N(b)}{n} (1-W)^{N(b)-n} W^n. \quad (2)$$

由于靶核核内级联效应, 靶核旁观者在核-核碰撞中可能受撞而发生反冲, 其中质子在末态也会作为灰粒子出现, 它们是核内级联产生的灰粒子。对此, 本文作出两个基本

考虑:

i) 核内级联产生灰粒子的过程与靶核参加者数目有关, 入射核对过程没有直接贡献.

ii) 从核碰撞几何考虑, 靶核参加者对核内级联过程的贡献是不均等的, 重叠区域表面附近的靶核参加者贡献大, 区域中部的靶核参加者贡献较小, 本文简单考虑平均效应, 即靶核的每个参加者给出的核内级联产生的灰粒子多重数平均值为一常量^[7] ($\langle n_g \rangle - W\langle N \rangle$)/ $\langle N \rangle$. 这里 $\langle n_g \rangle$ 表示总的灰粒子多重数平均值, $\langle N \rangle$ 表示靶核参加者平均数目. 靶核的每个参加者独立给出一个灰粒子多重数分布, 引用文献[3]的结果, 用几何分布描述:

$$P^{(2)}(m) = (1 - X)X^m. \quad (3)$$

这里 $X = \frac{(\langle n_g \rangle - W\langle N \rangle)/\langle N \rangle}{(\langle n_g \rangle - W\langle N \rangle)/\langle N \rangle + 1}$ X 是反映靶核每个参加者给出的核内级联过程产生的灰粒子所占比例大小的特征量.

靶核 $N(b)$ 个参加者提供的核内级联产生的灰粒子多重数分布是每个参加者独立贡献的叠加, 从(3)式几何分布导出负二项分布:

$$P_{N(b)}^{(2)}(m) = \binom{m + N(b) - 1}{m} (1 - X)^{N(b)} X^m. \quad (4)$$

则直接碰撞和核内级联产生的灰粒子多重数 n_g ($n_g = n + m$) 的分布为:

$$\begin{aligned} P_{N(b)}(n_g) &= \sum_{n=0}^{\min(n_g, N(b))} P_{N(b)}^{(1)}(n) P_{N(b)}^{(2)}(n_g - n) \\ &= \sum_{n=0}^{\min(n_g, N(b))} \binom{N(b)}{n} (1 - W)^{N(b)-n} W^n \\ &\quad \times \binom{n_g - n + N(b) - 1}{n_g - n} (1 - X)^{N(b)} X^{n_g - n}. \end{aligned} \quad (5)$$

靶核参加者数目 $N(b)$ 与碰撞参数 b 的关系由下式计算:

$$N(b) = \rho_0 \int dx dy dz \theta(R_A - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \theta(R_B - \sqrt{x^2 + (b - y)^2}), \quad (6)$$

这里 $\rho_0 = 3/4\pi r_0^3$ 是核子密度, $R_A = r_0 A^{1/3}$ 和 $R_B = r_0 B^{1/3}$ 分别为靶核和入射核的半径, 取 $r_0 = 1.2\text{fm}$.

将(5)式对 b 积分, 得到总的灰粒子多重数分布 $P(n_g)$, 即:

$$P(n_g) = \frac{1}{\pi b_{\max}^2} \int_0^{b_{\max}} 2\pi b db P_{N(b)}(n_g), \quad (7)$$

则有:

$$\int n_g P(n_g) dn_g = \langle n_g \rangle. \quad (8)$$

的关系. (7)式中碰撞参数最大值由条件 $N(b_{\max}) = 1$ 确定.

为了与 ^{16}O 束流轰击核乳胶的实验数据相比较, 将核乳胶的靶核分为三类: H 靶, 轻靶(CNO) 和重靶 (AgBr). 根据核碰撞几何, 参数化非弹性作用截面^[8]和乳胶成分, 计算得到 ^{16}O 与核乳胶相互作用的有关参数(见表 1).

表1 ^{16}O 与核乳胶相互作用的参数

参 数	靶 核 类 型		
	H	CNO	AgBr
质量数 A	1	14	95
电荷数 Z	1	7	41
荷质比 Z/A	1	0.5	41/95
参加者平均值 $\langle N \rangle$	1	4.9	14.6
$\langle N \rangle$ 的偏差 D	0	3.5	11.8
反应几率(%)	11.2	31.6	57.2

EMU01 组发表的 $14.6 A \text{ GeV}$, $60 A \text{ GeV}$ 和 $200 A \text{ GeV}$ 入射能的 ^{16}O 与核乳胶相互作用的实验结果^[7]表明,靶核碎裂具有能量无关特性。对于三种不同入射能量,实验观测的灰粒子多重数分布及平均值起伏很小。实验得到的无偏样本灰粒子多重数平均值是核乳胶中各种靶核的贡献。入射核 ^{16}O 与 H 靶碰撞时,由于 H 核质量很小,动量变化比较大,末态作为灰粒子出现的几率取作零。轻靶 (CNO) 和重靶 (AgBr) 的灰粒子多重数平均值之比 $R = \langle n_g \rangle_{\text{CNO}} / \langle n_g \rangle_{\text{AgBr}}$ 作为可调参数,拟合 EMU01 组实验^[7]给出的 ^{16}O 与核乳胶相互作用的灰粒子多重数分布及其平均值 $\langle n_g \rangle = 4.9$, 得到 $R = 0.22$ 。从表 1 中三类靶核的反应几率,可计算得到 $\langle n_g \rangle_{\text{CNO}} = 1.7$ 和 $\langle n_g \rangle_{\text{AgBr}} = 7.6$ 。

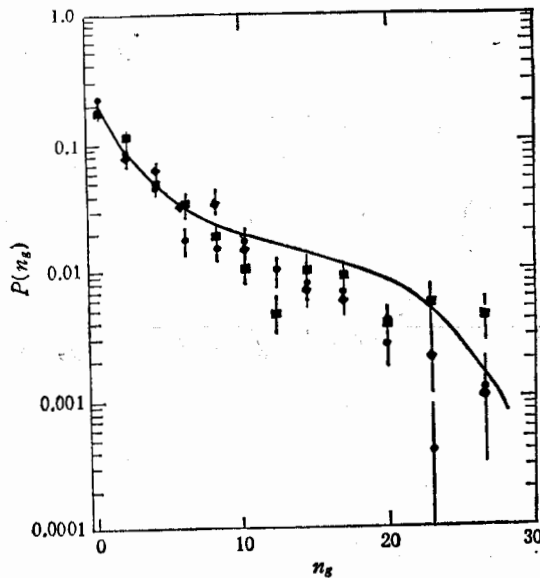


图1 ^{16}O 与核乳胶相互作用产生的灰粒子多重数分布,实验数据点取自文献[7]

—理论曲线 ●200A GeV ■60A GeV ◆14.6A GeV

需要指出,从 $p-p$ 碰撞的实验结果^[9]获得 $k = 0.5$; 本文计算中,对轻靶取 $k = 0.5$,而对重靶作了调整,取 $k = 0.8$ 。对于重靶参数 k 调大作如下解释,在重靶中,入射核的核子要穿过较多的核子,碰撞能量依次减小,以致整个重叠区域的靶核质子末态平均能量较轻靶的情况低,因而出现灰粒子

对于重靶的灰粒子产生,核内级联效应是一个重要因素,且靶核参加者对核内级联过程的贡献近于均等,本文给出的模型是较合理的,核内级联过程的特征量 $X = 0.15$ 。而轻靶的参加者对核内级联过程的贡献差别较大,但由于靶核剩余部分少,核内级联效应很微弱,特征量 $X = 0.08$,所以这里对轻靶的核内级联不作精确的分析,近似用本文给出的模型进行计算。

根据(7)式分别计算 ^{16}O 与轻靶和重靶碰撞产生的灰粒子多重数分布,对于 H 靶,有 $P(n_g = 0) = 1$ 。考虑三类靶核的反应几率,计算出 ^{16}O 与核乳胶相互作用产生的灰粒子多重数分布。图 1 是本文计算结果与实验数据的比较。

的几率较大。

高能核-核碰撞中事例中心度可用实验观测量来确定。本文试用灰粒子多重数 n_g 确定参加者数目 N 及碰撞参数 b 。在给定 n_g 的情况下, 靶核参加者数目 N 的平均值如下计算:

$$\langle N \rangle_{n_g} = \frac{1}{\pi b_{\max}^2} \int_0^{b_{\max}} 2\pi b db P_{N(b)}(n_g) N(b) / \frac{1}{\pi b_{\max}^2} \int_0^{b_{\max}} 2\pi b db P_{N(b)}(n_g), \quad (9)$$

其偏差为:

$$D_{n_g} = (\langle N^2 \rangle_{n_g} - \langle N \rangle_{n_g}^2)^{1/2}. \quad (10)$$

可由(9),(10)两式计算 ^{16}O 与轻靶和重靶碰撞中不同灰粒子多重数对应的靶核参加者数目平均值 $\langle N \rangle_{n_g}$ 及其偏差 D_{n_g} , 计算结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 看到, 固定多重数 n_g 的平均值 $\langle N \rangle_{n_g}$ 随 n_g 增大而增大, n_g 的大小反映了参加者数目的多少。将图 3 的

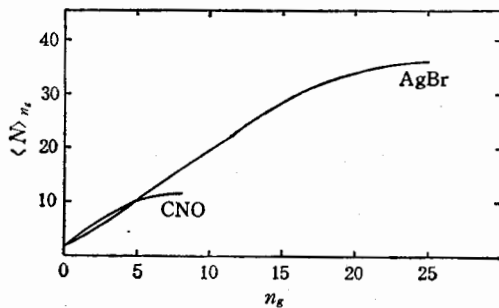


图 2 靶核参加者数目平均值 $\langle N \rangle_{n_g}$ 与 n_g 的关系

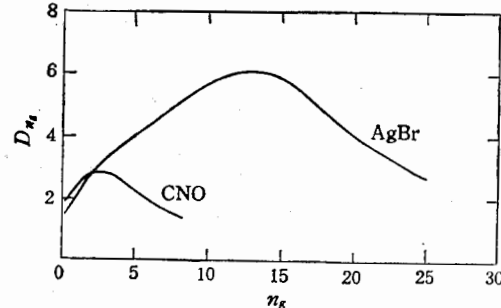


图 3 靶核参加者数目平均值的偏差 D_{n_g} 与 n_g 的关系

结果与表 1 相比表明, $\langle N \rangle_{n_g}$ 的偏差小于总的靶核参加者数目平均值 $\langle N \rangle$ 的偏差 (表 1 中的 D 值), 即核-核碰撞中事例的参加者数目分布很宽, 而若用 n_g 挑选的一组事例, 参加者数目的分布较窄。由此可见, 用灰粒子多重数 n_g 确定靶核参加者数目的平均值具有一定精确性。靶核参加者数目与碰撞中心度在核几何考虑下有一一对应关系, 因而, 由实验观测量 n_g 可估计核-核碰撞的中心度。

灰粒子的产生是一个随机物理过程, 即使同一碰撞参数的核-核碰撞, 灰粒子多重数有一定涨落, 但可以计算当碰撞参数 b (或靶核参加者数目) 一定时, 灰粒子多重数的平均值为:

$$\langle n_g \rangle_{N(b)} = \int n_g P_{N(b)}(n_g) dn_g. \quad (11)$$

由计算结果 (见图 4) 可以发现, 碰撞参数 b 与灰粒子多重数 n_g 之间有很强的关联。随着碰撞参数 b 的减小, 平均值 $\langle n_g \rangle_{N(b)}$ 增大。对于中心碰撞 ($b = 0$), 轻靶 (CNO) 和重靶 (AgBr) 的灰粒子多重数平均值分别为 4.9 和 20.0。

本文基于核碰撞几何, 考虑了核-核碰撞重叠区域靶核质子的反冲和重叠区域外靶核核内级联效应, 用统计方法分析了高能核-核碰撞中灰粒子的产生过程。结果表明, 核内级联效应是靶核 (尤其是重靶核) 碎裂的一个重要机制, 灰粒子多重数与碰撞参数之间有很强的关联。对于高能核-核碰撞中核碎裂现象的更多认识, 需要进一步的理论和实验研究。

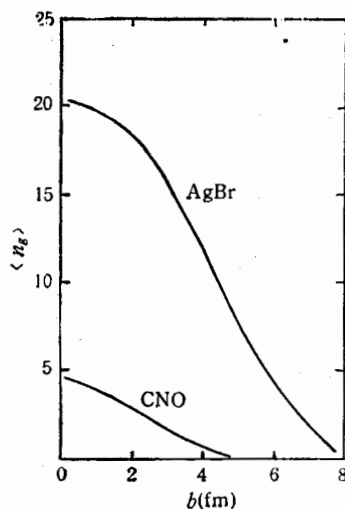


图4 碰撞参数 b 和灰粒子多重数 n_g 的平均值的关系

作者感谢中国科学院高能物理研究所赵维勤老师的有益指导, 并感谢唐孝威和郑蒲英两位老师的关心和指导。

参 考 文 献

- [1] I. Otterlund, *Z. Phys.*, **C38**(1988), 65.
- [2] M. I. Adamovich et al., *Phys. Lett.*, **234B** (1990), 180.
- [3] B. Andersson, I. Otterlund and E. Stenlund, *Phys. Lett.*, **73B**(1987), 343.
- [4] M. K. Hegab and J. Hüfner, *Nucl. Phys.*, **A384**(1982), 353.
- [5] B. Nilsson-Almqvist and E. Stenlund, *Comp. Phys. Commun.*, **43**(1987), 387.
- [6] 赵维勤, 刘波, 高能物理与核物理, **13**(1989), 285.
- [7] M. I. Adamovich et al., *Phys. Lett.*, **230B**(1989), 175.
- [8] EMU01 Collab., *Lund University Report*, LUIP.8904(1989).
- [9] J. Babecki and G. Nowak, *Acta Phys. Pol.*, **B9**(1978), 401.

Multiplicity Distribution of Grey Particles in High Energy Nucleus-Nucleus Collisions and Statistical Model

QIN YUMING

(Department of Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004)

ABSTRACT

The production process of grey particles in high energy nucleus-nucleus collisions is investigated in this paper. The comparison of the experimental multiplicity distributions with the calculations reveals that the statistical model well describes the production of grey particles. The correlation between the number of participating target N , the impact parameter b and the multiplicity of grey particles n_g is studied.