

高能核-核碰撞的靶核黑碎片发射

刘福虎

(山西师范大学物理系, 临汾 041004)

许国发

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

本文提出了高能核-核碰撞中靶核旁观体接触层的摩擦蒸发机制, 计算给出了靶核黑碎片的多重数、方位角、空间角、横动量、动量和动能的分布规律, 并与200GeV/N ^{16}O 与核乳胶相互作用的有关实验结果作了比较.

一、引 言

高能核-核碰撞, 是当今原子核物理和粒子物理研究的一个重要前沿领域. 这种研究大体上可划分为两支: 其中大的一支着重于研究强烈碰撞部分的早期行为和动力学发展过程, 亦即研究夸克-胶子等离子体的形成和接着的强子化过程; 另一支集中研究非强烈碰撞部分的碎裂行为, 以及有关的碎片发射机制问题^[1].

非强烈碰撞部分的碎裂又分为弹核碎裂和靶核碎裂两部分. 靶核碎裂产生的碎片, 一部分由级联碰撞产生, 称为灰碎片; 另一部分由受激衰变产生, 称为黑碎片.

为了研究靶核黑碎片的发射问题, 本文提出靶核旁观体接触层的摩擦蒸发机制, 给出靶核黑碎片的多重数、方位角、空间角、横动量、动量和动能的分布规律, 并与200GeV/N ^{16}O 与核乳胶相互作用的有关实验结果^[2-4]作比较.

二、靶核旁观体接触层的摩擦蒸发过程

高能核-核碰撞通常可以用“反应体-旁观体”图象来描述. 在弹核和靶核碰撞时, 两者相互瞄准的部分参加反应, 称为反应体; 其余的部分不直接参加碰撞, 分别称为弹核旁观体和靶核旁观体^[5].

在碰撞发生时, 因反应体和旁观体之间有相对运动, 在它们相连接的接触层上就会引起摩擦, 它们都将获得摩擦热. 对于反应体而言, 由于它本身已经被高度激发, 所获得的摩

擦热小到可以忽略不计,但是对于旁观体,由于它没有直接参加碰撞,摩擦热却是它主要的激发能.

靶核旁观体获得摩擦热后会处于激发态,激发态退激发射出的碎片就是所谓的靶核黑碎片,弹核旁观体退激发射出的碎片称为弹核碎片.显然,靶核黑碎片多重数(即末态靶核黑碎片数目) N_b 与旁观体的激发程度有关,即与获得的摩擦热有关.在弹核一定时,摩擦热取决于接触层的面积 S .这样, N_b 与 S 有函数关系.

处于激发态的靶核旁观体在发射黑碎片前不可能整体达到平衡态,而是局域达到平衡态的.随着离反应体距离的由近到远,温度是减低的.从边缘碰撞过程只能产生少量的靶核碎片来分析,接触层以外的旁观体部分也可能没有获得摩擦热或获得的摩擦热很少.换句话说,接触层在完成向旁观体其它部分传递摩擦热之前,已经从母体核中碎裂出来了.接触层部分和其它部分分别达到了各自的平衡态,相应高、低不同的温度.

处于平衡态的旁观体接触层中的核子及核块会蒸发出来,在挣脱束缚后,就象发生爆炸一样四处散开,碎片分布是各向同性的.

三、公式描述

1. 多重数

根据靶核黑碎片多重数 N_b 与旁观体接触层面积 S 有关的考虑,问题归结于计算靶核旁观体接触层的面积 S ,并决定 S 与 N_b 之间的函数关系.

设 R_1 表示弹核的半径, R_2 表示靶核的半径, b 表示碰撞参数,靶核固定在实验室系不动.碰撞发生后,靶核旁观体接触层是一个不规则的柱面.对弹核小于靶核的情形,当 $0 \leq b \leq R_2 - R_1$ 时,接触层面积可表示为:

$$S = 4R_1 \int_0^\pi \sqrt{R_2^2 - R_1^2 - b^2 + 2bR_1 \cos\theta} d\theta; \quad (1)$$

当 $R_2 - R_1 < b \leq R_2 + R_1$ 时,

$$S = 4R_1 \int_{\arccos \frac{R_1^2 + b^2 - R_2^2}{2bR_1}}^{\arccos \frac{R_2^2 + b^2 - R_1^2}{2bR_1}} \sqrt{R_2^2 - R_1^2 - b^2 + 2bR_1 \cos\theta} d\theta. \quad (2)$$

对弹核大于或等于靶核的情形,当 $0 \leq b \leq R_1 - R_2$ 时, $S=0$;当 $R_1 - R_2 < b \leq R_1 + R_2$ 时,接触层的面积为(2)式.

作为近似考虑,认为 N_b 与靶核旁观体获得的摩擦热成正比;摩擦热与接触层的面积成正比.因此 $N_b \propto S$.而 S 是碰撞参数 b 的函数,据此可解出 b 与 N_b 之间的函数关系 $b = b_1(N_b)$.考虑到归一化因子, N_b 的分布可表示为:

$$f_1(N_b) = \frac{b_1(N_b)}{\int b_1(N_b) dN_b}. \quad (3)$$

对于由8种成份组成的核乳胶来说, N_b 的分布可表示为:

$$F_1(N_b) = \sum_{i=1}^8 \frac{n_i \sigma_{A_1 A_i}}{P_0} f_1(N_b), \quad (4)$$

式中 n_i 为核乳胶中第 i 种成份的密度; $\sigma_{A_1 A_2}$ 是质量数为 A_1 的弹核与质量数为 A_2 的靶核产生核反应的截面; $P_0 = \sum_{i=1}^8 n_i \sigma_{A_1 A_2}$ 是关于反应几率的归一化因子。

2. 方位角、空间角、横动量、动量和动能

以弹核入射方向为 z , 垂直于弹核入射方向的平面为 xoy 平面, 建立固定于靶核上的直角坐标系. 靶核黑碎片的发射方向在 xoy 平面上的投影与 x (或 y) 方向的夹角 φ 就是通常所说的方位角, 而靶核黑碎片的发射方向与 z 方向的夹角 θ 就是通常所说的空间角或发射角.

在低能情况下, 动能 T 可以表示为:

$$T = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \approx \frac{p^2}{2m}, \quad (5)$$

式中 m 和 p 分别是黑碎片的质量和动量, β 是黑碎片的速度与光速 c 的比值.

根据 200 GeV/N ^{16}O 与核乳胶相互作用中弹核 α 碎片的动量分量服从高斯分布这一实验事实^[6], 考虑到靶核黑碎片和弹核碎片的相对性, 假设靶核黑碎片的动量分量 p_x, p_y 和 p_z 均服从高斯分布, 且分布宽度 σ_x, σ_y 和 σ_z 相等, 均等于 σ . 取归一化形式, 有:

$$f_{p_{x,y,z}}(p_{x,y,z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{p_{x,y,z}^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

式中分布宽度 σ 可由实验来确定.

运用概率论的有关知识^[7]可以证明, 方位角 φ 服从均匀分布:

$$f_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{2\pi}; \quad (7)$$

空间角 θ 服从半正弦分布:

$$f_{\theta}(\theta) = \frac{1}{2} \sin\theta; \quad (8)$$

横动量 p_T 服从瑞利分布:

$$f_{p_T}(p_T) = \frac{p_T}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{p_T^2}{2\sigma^2}\right); \quad (9)$$

动量 p 服从麦克斯威尔分布:

$$f_p(p) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{p^2}{\sigma^3} \exp\left(-\frac{p^2}{2\sigma^2}\right); \quad (10)$$

动能 T 服从下面的分布:

$$f_T(T) = \frac{2m}{\sigma^3} \sqrt{\frac{mT}{\pi}} \exp\left(-\frac{mT}{\sigma^2}\right). \quad (11)$$

四、与实验结果的比较

图1是文献[2]测得的 200 GeV/N ^{16}O 与 NIKFI-BR2 型核乳胶相互作用的靶核黑碎片多重数分布 (446 个事例), 虚曲线是本文计算值. 实际计算时, 取 $N_b = \frac{S}{10.5}$, S 的单位为

fm^2 . 可见计算值与实验值符合得很好.

图2是文献[3]测得的200GeV/N ^{16}O 与核乳胶相互作用的靶核黑碎片方位角分布(160个事例),水平虚直线是根据(7)式画出的,可见由(7)式描述的靶核黑碎片方位角分布与实验结果符合得很好.

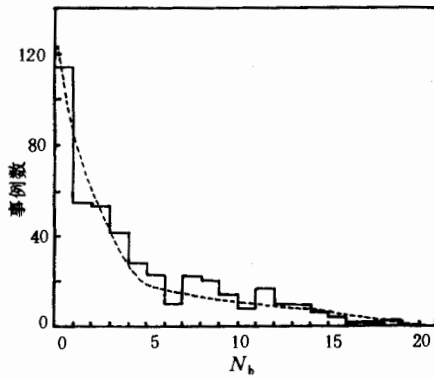


图1 靶核黑碎片多重数分布

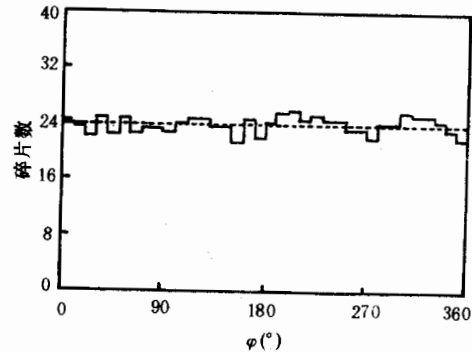


图2 靶核黑碎片方位角分布

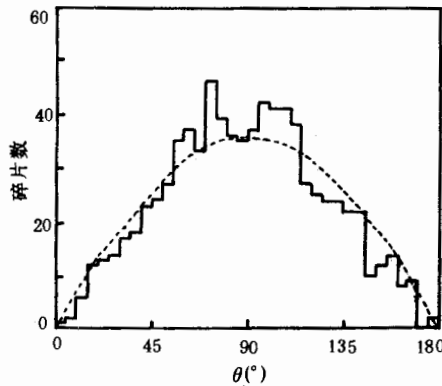


图3 靶核黑碎片空间角分布

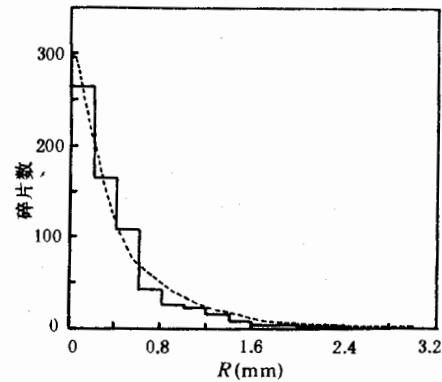


图4 靶核黑碎片射程分布

图3是文献[2]给出的靶核黑碎片空间角分布(随机抽样210个事例,其中有些事例没有靶碎片),虚曲线是根据(8)式画出的.实验值与计算值相比较可知,在 90° 方向前者比后者稍大,在小角度和大角度方向前者比后者稍小,这正是黑碎片各向同性发射且受到弹核电磁力作用的结果,计算曲线是纯各向同性发射的必然结果.

文献[4]测出了靶核黑碎片射程 R 的分布(132个事例),根据射程-动能关系的经验公式 $^{[8]} R = 10 \cdot 8T^{1.73} / (A_b^{0.73} Z_b^2) (\mu\text{m})$ 和(11)式(这里 A_b 和 Z_b 分别是黑碎片的质量数和电荷数),可作出射程分布曲线,如图4所示(将黑碎片均当作质子看待).图中虚曲线是由(11)式和射程-动能关系画出的,计算时取 $\sigma = 60\text{MeV}/c$.可见计算曲线与实验曲线基本符合,这就间接证明了靶核黑碎片动能符合(11)式给出的分布,同时也间接证明了横动量有瑞利分布和动量有麦氏分布.

参数 σ 反映了靶核旁观体受激发的程度,根据文献[9]可知,靶核旁观体的温度为

$\sigma^2/m = 3.8\text{MeV}$, 这个值与弹核旁观体发射 α 碎片时相应的温度 $6.4\text{MeV}^{[10]}$ 同量级.

五、结 论

通过以上比较分析,可以认为:在核-核碰撞中,靶核旁观体因获得摩擦热处于激发态;激发态退激会发射出靶核黑碎片;靶核黑碎片多重数与靶核旁观体接触层的面积成正比.

在碎片各向同性分布,且动量分量服从相同的高斯分布的假设条件下,得出:黑碎片的方位角有均匀分布;空间角有半正弦分布;横动量有瑞利分布;动量有麦氏分布;动能符合(11)式给出的分布.

本文提出的靶核旁观体接触层的摩擦蒸发机制及各向同性分布等假设,虽然在描述黑碎片的多重数、方位角、空间角、横动量、动量和动能等分布规律方面取得了一定成功,但因模型比较粗糙,缺乏动力学细节的考虑,模型本身的完善和推广,尚需作进一步努力.

赵维勤教授审阅了本文的部分内容,孙汉城教授审阅了全文,特此表示衷心感谢.

参 考 文 献

- [1] 萨本豪、郑玉明、张孝泽,高能物理与核物理,14(1990),555.
- [2] Beijing group, Proceedings of the 7th EMU01 Collaboration Meeting, Lund, October 24-26, 1989.
- [3] Jammu lab., Proceedings of the 8th EMU01 Collaboration Meeting, Moscow, April 3-5, 1990, p. 26.
- [4] Jaipur group, Proceedings of the 8th EMU01 Collaboration Meeting, Moscow, April 3-5, 1990, p. 32.
- [5] S. Nagamiya, preprint LBL-9494.
- [6] M. I. Adamovich et al., EMU01 Collaboration, *Phys. Rev. C* **40**(1989), 66.
- [7] 周概容,概率论与数理统计,北京,高等教育出版社(1984).
- [8] 孙汉城,物理通报,11(1965),666.
- [9] K. B. Bhalla et al., *Nucl. Phys.*, **A367**(1981), 446.
- [10] 刘福虎,中国原子能科学研究院硕士论文(1989).

On the Emission of Target Black Fragments in High Energy Nucleus-Nucleus Collisions

LIU FUHU

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

XU GUOFA

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

ABSTRACT

The mechanism of friction-evaporation process for target spectator contact layer in high energy nucleus-nucleus collisions is presented. The distribution of multiplicity, azimuthal and spatial angles, transverse and total momenta, as well as kinetic energy of target black fragments are calculated and compared with the experimental results of $200\text{GeV}/N$ ^{16}O -Em interactions.