

相对论性核-核碰撞中的弹核碎片 多重数与角分布*

刘福虎 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1992年12月1日收到

摘 要

讨论了相对论性核-核碰撞中弹核碎片的多重数分布与发射角分布。分别给出了多重数及发射角的几率分布公式。计算结果与15—200 GeV/N能区核-核碰撞的实验数据进行比较,二者在实验误差范围内符合。

关键词 核-核碰撞, 弹核碎片, 多重数分布, 角分布。

1 引 言

根据反应体-旁观体模型^[1],相对论性核-核碰撞发生时,反应系统可按末态粒子发射源相对于实验室系速度的从大到小,粗略地划分为:弹核旁观体、反应体和靶核旁观体三部分。反应体是弹核和靶核两者相互瞄准和强烈碰撞的部分,旁观体是反应体以外的不直接参加强烈碰撞的部分。反应体产生大量介子、核子、光子、轻子对等产物。旁观体也分别碎裂为核子或核碎片等末态产物。

如果在反应体中形成了理论上预期的夸克物质^[2],由于旁观体和反应体之间的相互联系,也会使旁观体产物的某些物理量分布呈现新的特征。因此,研究旁观体碎裂的特征成为相对论性核-核碰撞的一个重要方面。

旁观体碎裂的特征可用碎片多重数分布、发射角分布、质量分布、电荷分布等来描述,在这些方面已有大量实验结果发表,且已有了一些经验性的拟合公式。本文着重研究弹核碎片的多重数与发射角分布问题,基于简单的模型计算,得出与实验结果相符合的分布规律。

2 多重数分布

由于实验上很容易测定弹核碎片的电荷,这为分门别类地研究弹核碎片的发射问题提供了方便。弹核碎片按其电荷分类,可分为 $Z=1$ 的H碎片, $Z=2$ 的He碎片, $Z=$

* 国家自然科学基金资助。

3 的 Li 碎片, 等等。

在碰撞质心系中, 弹核和靶核均以一定动能向质心运动。发射弹核碎片的弹核旁观体(以下称为发射源)所获得的激发能, 主要来自弹核(P)和靶核(T)相对运动而产生的摩擦热。发射源获得摩擦热后, 可以在旁观体接触层上形成短寿命的局域平衡态, 这时将发射出 H 和 He 等小碎片, 其余部分则作为剩余核以大碎片的形式出现在末态。间或会有能量从接触层向离反应体较远的旁观体部分传递, 从而形成一个从接触层向外温度逐渐降低的核物质区域, 热核碎裂发射出小碎片和中等碎片, 而大碎片出现的几率较小。在特殊情况下, 发射源获得的摩擦热也可能在短时间内传递到离反应体较远的旁观体部分, 从而使整个发射源达到平衡态, 这时主要发射小碎片, 而中等碎片和大碎片或者作为剩余核出现(当发射的小碎片较少时), 或者不出现(当发射的小碎片较多时)。

本文以 He 碎片的发射为例, 研究多重数 n 的分布。设 E_P 和 E_T 分别表示发射源从弹核和靶核获得的激发能, 则发射源从弹核和靶核获得的激发能之和为

$$E = E_P + E_T. \quad (1)$$

粗略地考虑, 似乎 E_P 和 E_T 都随着碰撞参数的减小而增大, 二者间呈正相关性, 特别在弹核和靶核大小相等的情况下, E_P 和 E_T 相等。但由于核内核子数分布的涨落和碰撞过程的复杂性, 对每次碰撞来说, 发射源从弹核和靶核获得的激发能大小可以有很大不同, 且 E_P 和 E_T 的大小近似不相关。

设 $F_P(E_P)$ 和 $F_T(E_T)$ 分别表示发射源从弹核和靶核获得激发能的几率密度, 它们分别满足各自的归一化条件:

$$\int_0^{\infty} F_P(E_P) dE_P = 1; \quad (2)$$

$$\int_0^{\infty} F_T(E_T) dE_T = 1. \quad (3)$$

从弹核和靶核的相对性来考虑, $F_P(E_P)$ 和 $F_T(E_T)$ 有相同的形式, 假设为归一化的指数分布:

$$F_P(E_P) = C_1 \exp(-C_1 E_P); \quad (4)$$

$$F_T(E_T) = C_2 \exp(-C_2 E_T), \quad (5)$$

式中 C_1 和 C_2 是常数。

总激发能 E 的分布是 E_P 和 E_T 分布的卷积, 在 $C_1 = C_2 = C$ 的条件下, 得到

$$\begin{aligned} P(E) &= \int_0^E F_P(E_P) F_T(E - E_P) dE_P \\ &= C^2 E \exp(-CE). \end{aligned} \quad (6)$$

由平均值公式 $\int_0^{\infty} E P(E) dE = \langle E \rangle$, 可定出 $C = \frac{2}{\langle E \rangle}$, 所以

$$P(E) = \frac{4E}{\langle E \rangle^2} \exp\left(-\frac{2E}{\langle E \rangle}\right). \quad (7)$$

发射源获得的激发能越多, 它激发出的弹核小碎片就越多, 在初级近似下, 认为小碎片多重数 n 与 E 成正比, 归一化的多重数分布为

$$P(n) = \frac{4n}{\langle n \rangle^2} \exp\left(-\frac{2n}{\langle n \rangle}\right). \quad (8)$$

式(8)与描述强子-强子碰撞的三火球模型^[3]中一个火球产生的次级粒子多重数分布的形式^[4]相同。

$$\text{令} \quad z = \frac{n}{\langle n \rangle}; \quad (9)$$

$$\psi(z) = \langle n \rangle P(n), \quad (10)$$

以 z 为自变量, $\psi(z)$ 为函数, 描述弹核小碎片的多重数分布。如果 $\psi(z)$ 的分布形状与入射弹核的能量无关, 则多重数分布满足标度无关性。

将式(9)、(10)代入式(8)中, 得到弹核 He 碎片多重数的标度无关性分布:

$$\psi(z) = 4z \exp(-2z). \quad (11)$$

对弹核的其它小碎片, 可通过同样的分析得出类似的结果。

3 发射角分布

仍以弹核 He 碎片为例, 研究发射角 θ 的分布。

在初级近似下, 认为弹核碎片的发射源达到了平衡态, 至少是局域达到了平衡态, 在发射源静止系, 假设碎片是各向同性发射的, 且动量 \mathbf{P} 的三个分量 P_x, P_y 和 P_z 服从相同宽度 σ_p 的高斯分布, 即

$$f_{P_x, P_y, P_z}(P_x, P_y, P_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left(-\frac{P_{x,y,z}^2}{2\sigma_p^2}\right). \quad (12)$$

容易知道, 横动量 $P_{\perp} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ 的分布是瑞利型:

$$f_{P_{\perp}}(P_{\perp}) = \frac{P_{\perp}}{\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{P_{\perp}^2}{2\sigma_p^2}\right). \quad (13)$$

为了和实验给出的角分布进行比较, 下面将式(13)改写成对角度 θ 的分布。在实验室系中, 因为旁观体没有直接参加强烈碰撞, 可以认为弹核碎片保持了入射弹核的速度^[5], 即将弹核 He 碎片的动量 P 看成常数。根据定义, P_{\perp}, P 和 θ 的关系为

$$P_{\perp} = P \sin \theta, \quad (14)$$

由(13)、(14)两式可得出 θ 的分布为

$$f(\theta) = \frac{P^2 \sin 2\theta}{2\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{P^2 \sin^2 \theta}{2\sigma_p^2}\right). \quad (15)$$

因为发射角 θ 很小, $\sin 2\theta \approx 2\theta$, $\sin \theta \approx \theta$, 所以式(15)近似为

$$f(\theta) \approx \frac{P^2 \theta}{\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{P^2 \theta^2}{2\sigma_p^2}\right). \quad (16)$$

令 $\sigma = \frac{\sigma_p}{P}$, 得到

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right). \quad (17)$$

式(17)是归一化的发射角分布,即发射角的几率分布,它是瑞利型的, σ 是分布宽度。

将式(17)作适当变换,即令

$$k(\theta) = \frac{1}{\sigma} f(\theta), \quad (18)$$

得到

$$k(\theta) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right). \quad (19)$$

式(19)是高斯型分布,它满足的归一化条件是

$$\int_0^{\infty} k(\theta) d\theta = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma}. \quad (20)$$

对弹核的其它碎片,结果是类似的。

4 与实验结果的比较

EMU08 协作组^[6]给出了 200GeV/N³²S, 200 和 60GeV/N¹⁶O, 1.5GeV/N⁸⁴Kr 及 1.9GeV/N⁵⁶Fe^[7] 与核乳胶碰撞产生的弹核 He 碎片的多重数分布。对实验数据拟合表明,在 2—200GeV/N 能区,弹核 He 碎片的多重数分布满足标度无关性,函数 $\phi(z)$ 为

$$\phi(z) = Az \exp(-Bz), \quad (21)$$

式中 $A = 4.65 \pm 0.09$, $B = 2.05 \pm 0.04$ 。注意到式(21)与本文得到的式(11)不但形式是一致的,而且系数的值也基本相同。

为了更好地检验式(11)是否正确,把式(11)与 EMU08 协作组测得的 200GeV/N³²S 在核乳胶中碰撞产生的弹核 He 碎片的多重数分布进行比较,结果见图 1,计算时取 $\langle n \rangle = 1.70$ 。可以看出,计算曲线与实验数据符合得很好。

EMU01 协作组^[8]测量过 200GeV/N¹⁶O 与核乳胶碰撞的弹核 He 碎片的 θ_x 和 θ_y 分布,结果符合高斯分布。这里 θ_x 和 θ_y 分别是 He 碎片出射方向在 xoz 平面和 $yo z$ 平面上的投影与 z 方向的夹角,而 z 方向就是 ¹⁶O 束流入射的方向。根据该协作组关于 θ_x 和 θ_y 的定义可知, θ_x, θ_y 与发射角 θ 的关系为

$$\text{tg}^2 \theta = \text{tg}^2 \theta_x + \text{tg}^2 \theta_y, \quad (22)$$

因为发射角很小,近似有

$$\theta \approx \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}. \quad (23)$$

由 EMU01 协作组的实验结果推知,弹核 He 碎片的 θ 分布是瑞利型,这与式(17)的分

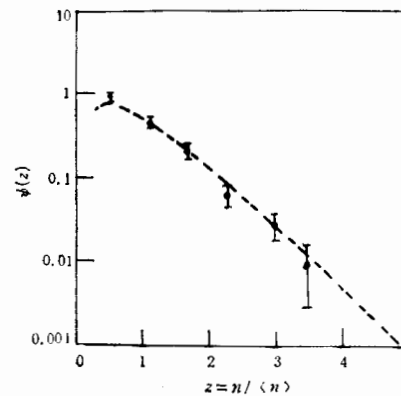


图 1 200GeV/N³²S 与核乳胶碰撞的弹核 He 碎片多重数的标度无关性分布
实验数据取自文献[6],曲线是本文计算结果。

布一致。

其它类型的核-核碰撞实验得到的数据,也支持本文关于弹核碎片发射角分布的结果。

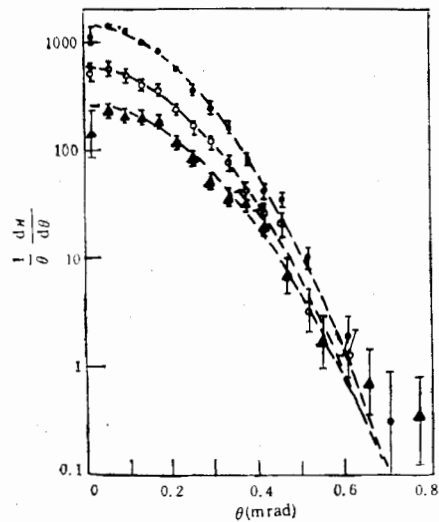


图2 200GeV/N¹⁶O与Pb碰撞的弹核O、N、C碎片的角分布

实验数据取自文献[9],曲线是文献[9]给出的拟合曲线,也是本文给出的计算曲线。黑点、圆圈、三角号分别对应O、N、C碎片,角分布宽度分别是0.161、0.167和0.178mrad。

如文献[9]给出了200GeV/N¹⁶O与Pb碰撞的弹核O、N、C碎片的角分布,结果见图2,纵轴用 $\frac{1}{\theta} \frac{dn}{d\theta}$ 标度。图2中的曲线是

本文根据式(19)计算得到的。文献[10]给出了14.5GeV/N²⁸Si与Pb和Cu碰撞的Si、Al、Mg、Na、Ne、F、O碎片的角分布,纵轴用 $\frac{1}{\theta} \frac{dn}{d\theta}$ 标度。实验数据也可用本文得出的式(19)拟合。

5 结论与讨论

本文给出弹核小碎片多重数和弹核碎片发射角的几率分布。所得半经验公式与15—200GeV/N能区的实验数据比较表明:在15—200GeV/N能区(对多重数分布可扩展到2—200GeV/N能区),本文关于弹核碎片多重数和角分布的计算结果与实验结果在误差范围内相符合。

对目前能量下的核-核碰撞过程,从弹核碎片多重数和角分布上看不出有夸克物质形成的迹象。如果在反应体中形成了夸克物质,这时旁观体与反应体的联系较弱,旁观体受到的激发较小,从旁观体产生的小碎片较少。反映在小碎片多重数分布上,表现为低多重数的事例增多,高多重数的事例减少,平均值减小。反映在碎片角分布上,表现为小角度发射的碎片增多,大角度发射的碎片减少,分布宽度变窄。

感谢赵维勤、郑蒲英、孙汉城、蔡勳等教授的讨论。

参 考 文 献

- [1] S. Nagamiya, preprint LBL-9494.
- [2] J. C. Collins and M. Perry, *Phys. Rev. Lett.*, **24**(1975) 1353.
- [3] Liu Lianshou and Meng Tachung, *Phys. Rev.*, **D27**(1983) 2640.
- [4] Chou Kuangchao, Liu Lianshou and Meng Tachung, *Phys. Rev.*, **D28**(1983) 1080.
- [5] 唐孝威、郑蒲英, *高能物理与核物理*, **12**(1988)455.
- [6] K. Sengupta, G. Singh and P. L. Jain, *Phys. Lett.*, **B222** (1989) 301.
- [7] P. L. Jain and M. M. Aggarwal, *Phys. Rev.*, **C33**(1986) 1790.
- [8] M. I. Adamovich et al., EMU01 Collaboration, *Phys. Rev.*, **C40**(1989) 66.
- [9] G. Gerbier et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987) 2535.
- [10] P. B. Price and Y. D. He, *Phys. Rev.*, **C43**(1991) 835.

Multiplicity and Angular Distribution of Projectile Fragments in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions

Liu Fuhu Tang Xiaowei

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

Received on December 1, 1992

Abstract

In this paper the multiplicity and angular distribution of projectile fragments produced in relativistic nucleus-nucleus collisions are discussed. The probability distribution of multiplicities, as well as the probability distribution of angles are given. The calculated results are compared with the experimental data in the energy range from 15 to 200 GeV/N, they are in good agreement within experimental errors.

Key words Nucleus-nucleus collision, Projectile fragment, Multiplicity distribution, Angular distribution.