

# 高能核-核碰撞中蒸发碎片的研究\*

刘福虎

(山西师范大学物理系 临汾 041004)

**摘 要** 在 高 能 核-核 碰 撞 中, 基 于 简 单 的 模 型 计 算, 描 述 了 来 自 弹 核 和 靶 核 旁 观 体 的 蒸 发 碎 片 的 多 重 数 分 布 与 角 分 布.

**关 键 词** 核-核碰撞 蒸发碎片 多重数分布 角分布

**分 类 号** O571.4

## 1 引 言

根据反应体-旁观体模型<sup>[1]</sup>, 高能核-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、光子和轻子对等产物. 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<sup>[2]</sup>, 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高能核-核碰撞的一个重要方面<sup>[3,4,5]</sup>. 最近, 随着高能金核和铅核束流的加速成功, 有关研究工作变得愈加活跃起来<sup>[6,7,8]</sup>.

此文论述了高能核-核碰撞中来自弹核和靶核旁观体的蒸发碎片的多重数分布与角分布, 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蒸发碎片的电荷, 这为分门别类地研究弹核蒸发碎片的

发射问题提供了方便. 弹核蒸发碎片按其电荷分类, 可分为  $Z=1$  的 H 碎片,  $Z=2$  的 He 碎片及  $Z=3$  的 Li 碎片等.

在碰撞质心系中, 弹核和靶核均以一定速度向质心运动. 发射弹核(或靶核)蒸发碎片的弹核(或靶核)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. 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, 则发射源获得的总激发能  $E$  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. 特别在弹核和靶核质量相等的情况下,  $E_P$  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

$$\int F_P(E_P) dE_P = 1, \quad \int F_T(E_T) dE_T = 1 \quad (2)$$

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

\* 国家教委留学回国人员科研启动基金、山西省归国留学人员基金和山西省中青年学科带头人基金资助课题, 课题编号 [1997]436 97030 96024.  
1996-07-15 收稿, 1997-08-07 收到修改稿.

$$F_P(E_P) = C_P \exp(-C_P E_P),$$

$$F_T(E_T) = C_T \exp(-C_T E_T) \quad (3)$$

这里  $C_P$  和  $C_T$  是常数.

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

$$P(E) = \int_0^E F_P(E_P) F_T(E-E_P) dE_P$$

$$= C^2 E \exp(-CE) \quad (4)$$

由平均值公式  $\int E P(E) dE = \langle E \rangle$ , 可定出  $C = 2/\langle E \rangle$ , 所以

$$P(E) = \frac{4E}{\langle E \rangle^2} \exp\left(-\frac{2E}{\langle E \rangle}\right) \quad (5)$$

因为产生一个电荷数为  $Z$  的碎片, 需要激发能  $\Delta E$ , 所以在激发能区间  $(\Delta E, 2\Delta E)$ , 只能产生一个碎片. 在一次碰撞中, 产生  $N_Z$  个碎片的几率是

$$P(N_Z) = A \int_{N_Z \Delta E}^{(N_Z+1)\Delta E} P(E) dE \quad (6)$$

这里  $A$  是归一化常数

$$A = 1 / \sum_{N_Z=1}^{\max} \int_{N_Z \Delta E}^{(N_Z+1)\Delta E} P(E) dE \quad (7)$$

利用关系式  $\langle E \rangle = \langle N_Z \rangle \Delta E$  和  $E = N_Z \Delta E$ , 得到

$$\int_{N_Z \Delta E}^{(N_Z+1)\Delta E} P(E) dE$$

$$\int_{N_Z}^{N_Z+1} \frac{4N_Z}{\langle N_Z \rangle^2} \exp\left(-\frac{2N_Z}{\langle N_Z \rangle}\right) dN_Z \quad (8)$$

这里  $N_Z$  作为积分变量可以连续变化. 最后得到归一化的多重数分布为

$$P(N_Z) = \frac{\int_{N_Z}^{N_Z+1} N_Z \exp\left(-\frac{2N_Z}{\langle N_Z \rangle}\right) dN_Z}{\sum_{N_Z=1}^{\max} \int_{N_Z}^{N_Z+1} N_Z \exp\left(-\frac{2N_Z}{\langle N_Z \rangle}\right) dN_Z} \quad (9)$$

对各种电荷数的蒸发碎片混合在一起不易区分的情形, 例如对核乳胶中测得的靶核黑碎片(靶核蒸发碎片), 其多重数  $N_b$  的分布为

$$P(N_b) = \int dN_1 \cdots dN_k P(N_1) \cdots$$

$$\cdots P(N_k) \delta(N_1 + \cdots + N_k - N_b) \quad (10)$$

这里  $k$  是最大黑碎片的电荷数.

(9)和(10)式描述了蒸发碎片的多重数

分布, 它们的分布形式与反应体中是否形成了夸克物质无关, 但平均值与夸克物质的形成有关.

### 3 角分布

在初级近似下, 认为蒸发碎片的发射源达到平衡态, 至少是局域达到平衡态. 在发射源静止系, 假设碎片是各向同性发射的, 且动量  $\vec{P}$  的三个分量  $P_x, P_y$  和  $P_z$  服从相同宽度  $\sigma_p$  的高斯分布, 即

$$f_{P_{x,y,z}}(P_{x,y,z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left(-\frac{P_{x,y,z}^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (11)$$

在实验室系, 即在靶核静止系, 令  $\theta$  表示蒸发碎片的发射角, 则从(11)式可得出靶核蒸发碎片的角分布为

$$f_b(\theta) = \frac{1}{2} \sin\theta \quad (12)$$

容易知道, 横动量  $P_T$  服从瑞利分布

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

为了和实验给出的弹核蒸发碎片的角分布作比较, 下面将(13)式改写成对角度  $\theta$  的分布. 在实验室系, 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<sup>[5]</sup>, 即将弹核蒸发碎片的动量  $P$  看成常数. 根据定义

$$P_T = P \sin\theta \quad (14)$$

由(13)和(14)式可得出  $\theta$  的分布为

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

因为弹核碎片的发射角  $\theta$  很小,  $\sin 2\theta \approx 2\theta$ ,  $\sin\theta \approx \theta$ , 所以(15)式近似为

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

令  $\sigma = \sigma_p / P$ , 得到

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

(17)式是弹核蒸发碎片的角分布, 它是瑞利型,  $\sigma$  是分布宽度.

(12)和(17)式分别描述了靶核和弹核蒸发碎片的角分布,其分布形式与反应体中是否形成了夸克物质无关,但(17)式中的分布宽度与夸克物质的形成有关.

#### 4 与实验结果的比较

为了检验(9)、(10)、(12)和(17)式的可靠性,本课题组把计算结果与在核乳胶中测

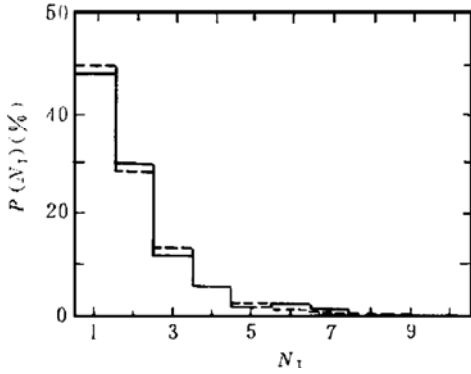


图 1 3.7GeV/u <sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞时弹核 H 碎片的多重数分布

得的实验结果作比较.图 1 给出 3.7GeV/u 的<sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞时弹核 H 碎片的多重数分布,实线直方图是笔者以前在 EMU01 协作组提供的核乳胶叠中测得的实验结果<sup>[10]</sup>,虚线直方图是本课题组根据(9)式的计算结果,取平均值  $\langle N_1 \rangle = 1.8$ . 可以看出,计算结果与实验结果符合得很好.

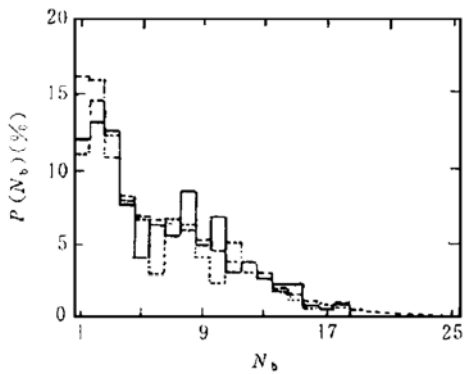


图 2 3.7 和 200GeV/u <sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞时靶核蒸发碎片的多重数分布

图 2 给出了高能<sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞时靶核蒸发碎片(靶核黑碎片)的多重数分布,实线和点线分别是入射能量为 3.7GeV/u 和

200GeV/u 时的实验结果<sup>[11]</sup>,虚线是本课题组根据(10)式计算的结果.在计算时,仅考虑了对靶核蒸发碎片多重数贡献较大的 H 和 He 碎片.核乳胶中两种主要成分 CNO 和 AgBr 贡献的比率由作用截面和含量决定,非主要成分 H、S 和 I 的贡献忽略不计<sup>[12]</sup>.对 CNO,取  $\langle N_1 \rangle = 1.4$ ,  $\langle N_2 \rangle = 0.8$ ;对 AgBr,取  $\langle N_1 \rangle = 5.6$ ,  $\langle N_2 \rangle = 3.2$ .计算得到的结果见图 2 中的虚线直方图,可以看出,计算结果与实验结果符合.

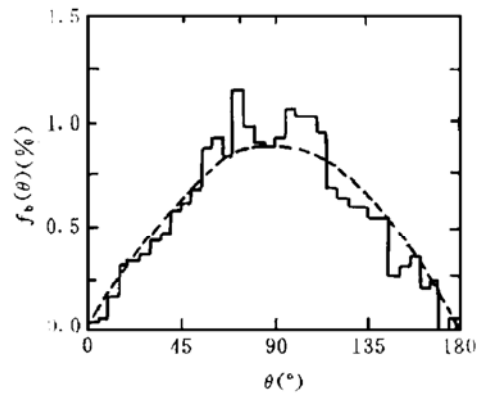


图 3 200GeV/u <sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞时靶核蒸发碎片的角分布

图 3 是 200GeV/u<sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞时靶核蒸发碎片的角分布.实线直方图是笔者以前测得的实验结果<sup>[13]</sup>,虚曲线是根据(12)式画出的.通过对实验结果与计算结果比较可知,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,这正是靶核蒸发碎片各向同性发射且受到弹核电磁力作用的结果.从图 3 看出,弹核电磁力对靶核蒸发碎片各向同性发射的影响很小,可近似的把靶核蒸发碎片看成是各向同性发射的.此外,蒸发碎片之间的电磁作用也会对发射角产生影响<sup>[14]</sup>.

EMU01 协作组测量过 200GeV/u<sup>16</sup>O 与核乳胶碰撞的弹核 He 碎片的  $\theta_x$  和  $\theta_y$  分布,结果符合高斯分布<sup>[15]</sup>.这里  $\theta_x$  和  $\theta_y$  分别是 He 碎片出射方向在  $xoy$  平面和  $yoz$  平面上的投影与  $z$  方向的夹角,而  $z$  方向就是<sup>16</sup>O 束流入射的方向.根据该协作组关于  $\theta_x$  和  $\theta_y$

的定义可知,  $\theta_x, \theta_y$  与发射角  $\theta$  的关系为

$$\text{tg}^2\theta = \text{tg}^2\theta_x + \text{tg}^2\theta_y \quad (18)$$

因为发射角很小, 近似有

$$\theta \approx \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (19)$$

由 EMU01 协作组的实验结果推知, 弹核 He 碎片的  $\theta$  分布是瑞利型,  $\sigma \approx 3 \times 10^{-14}$  rad, 这与(17)式的计算分布一致.

## 5 结论与讨论

综上所述, 结论是: 在 高能核-核碰撞中, 来自弹核和靶核旁观体的蒸发碎片的多重数分布符合(9)和(10)式; 靶核蒸发碎片的角分布符合半正弦型[(12)式], 弹核蒸发碎片的角分布符合瑞利型[(17)式].

由于在目前能区, 没有证据表明夸克物质已经形成, 可以认为文中给出的蒸发碎片多重数的平均值和弹核蒸发碎片角分布的宽度是旁观体碎裂正常性质的一种反映.

随着入射能量的提高, 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, 从而旁观体产生的蒸发碎片也较小. 反映在蒸发碎片多重数分布上, 表现为低多重数的事例增多, 高多重数的事例减少, 即平均值减小. 反映在弹核蒸发碎片角分布上, 除了由于入射能量提高引起的分布宽度变窄外, 还由于旁观体受到的激发较小导致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.

## 参 考 文 献

1 Hufner J. Some Basic Concepts for Nucleus-nucleus Collisions at High Energy. GSI-Preprint80-1, 1980

2 Lee TD. Relativistic Heavy Ion Collisions and Future Physics. Preprint CU-TP-226, 1981

3 Hufner J. Heavy Fragments Produced in Proton-nucleus and Nucleus-nucleus Collisions at Relativistic Energies. Phys Rep, 1985, 125: 129~229

4 Fredriksson S, Eilam G, Berlad G et al. High Energy Collisions with Atomic Nuclei; the Experimental Results. Phys Rep, 1987, 144: 187~320

5 唐孝威, 许国发, 刘福虎. 相对论性核-核碰撞中的弹核碎裂过程. 物理学进展, 1993, 13: 378~404

6 Waddington CJ, Cherry ML, Dabrowska A et al. Multi-fragmentation of 10.6 A GeV Gold Nuclei. Proc Quark Matter'95: Abstracts of Contributed Papers. Monterey, CA: University of California Press, Jan9~13, 1995, 45

7 Nystrand J. Slow Target Associated Particles in Ultra-relativistic Au-induced Heavy-ion Interactions. Proc Quark Matter'95: Abstracts of Contributed Papers. Monterey, CA: University of California Press, Jan9~13, 1995, 178

8 Angelis ALS, Carlen L, Donni P et al. Performance of a Multistep Avalanche Chamber Tracking System in Pb + Pb Collisions. Proc Quark Matter'95: Abstracts of Contributed Papers. Monterey, CA: University of California Press, Jan9~13, 1995, 156

9 唐孝威, 郑蒲英. 一个相对论性氧原子核三分裂事例的观测及其机制解释. 高能物理与核物理, 1988, 12: 455~458

10 刘福虎. 3.7 A GeV  $^{16}\text{O}$  与核乳胶碰撞的相对论性粒子发射. 中国科学院研究生院学报, 1996, 13: 12~20

11 刘福虎. 3.7 A GeV  $^{16}\text{O}$  与核乳胶碰撞的靶核碎裂. 中国科学院研究生院学报, 1994, 11: 156~162

12 Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A et al. On the Energy and Mass Dependence of the Multiplicity in Relativistic Heavy-ion Interactions. Mod Phys Lett, 1990, A5: 169~174

13 刘福虎. 原子核乳胶中的高能核碰撞. 中国原子能科学研究院博士学位论文, 1993

14 刘福虎. 中能原子核多重碎裂中的方位角关联. 高能物理与核物理, 1995, 19: 217~222

15 Adamovich M I, Aggarwal M M, Arora R et al. Production of Helium ( $Z=2$ ) Projectile Fragments in  $^{16}\text{O}$ -Emulsion Interactions from  $B/A=2$  to 200 GeV. Phys Rev, 1989, C40: 66~71

Phys G; Nucl Part Phys, 1996, 22: 1077~1087

11 H of G, Bacelar J C S, Dioszegi I et al. Viscosity and Fission Time Scale of  $^{156}\text{Dy}$  at High Excitation Ener-

gies and Large Angular Momenta. Nucl Phys, 1996, A599: 17c~22c

## Study of Dynamics for Heavy-ion-induced Fission Reaction

LIU Guoxing DAI Guangxi

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

**Abstract** The present status of the dynamics study for heavy-ion-induced fission reaction including the dynamical fission width, the fission time scale, the temperature and deformation dependence of the nuclear viscosity and the methods of the extracting viscosity from fission experiments induced by heavy ion reactions is reviewed.

**Key Words** fission width fission time scale nuclear viscosity fission angular distribution fission probability

(上接第 238 页)

## On Evaporated Fragments in High Energy Nucleus-nucleus Collisions

LIU Fuhu

(*Department of Physics, Shanxi Teachers University, Linfen 041004*)

**Abstract** Based on the simple modelling calculation, the multiplicity and angular distribution of evaporated fragments from both projectile and target spectators in high energy nucleus-nucleus collisions are described.

**Key Words** nucleus-nucleus collisions evaporated fragments multiplicity distribution angular distribution