

# Fermi 能区核-核碰撞的平衡前中子发射

王志松 霍裕昆

(复旦大学核科学技术系 上海 200433)

1993 年 3 月 8 日收到

## 摘 要

利用 BUU 模型模拟核-核碰撞  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$ 、 $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  中的平衡前中子发射。模拟结果与唯象的运动源拟合给出的中等速度源成份相吻合。这说明中等速度源成份产生于核-核碰撞的早期,对应平衡前发射。并从级联碰撞的角度定量地研究了平衡前发射的持续时间。

**关键词** 原子核,碰撞,中子发射。

## 1 引 言

Fermi 能区(库仑位垒以上直至  $150\text{MeV/u}$ )核-核碰撞中发射的中子能量可高达束流能量的  $3\sim 4$  倍<sup>[1-8]</sup>。发射发生于核-核碰撞的早期,称为平衡前中子发射。由于中子不受库仑位垒的影响,所以平衡前中子谱更直接地反映碰撞动力学过程。通常采用运动源拟合方法(又称运动源模型)<sup>[3-8]</sup>从实验谱中分离出平衡前发射成份。中子截面的拟合形式(实验室参考系)为:

$$\frac{d^2\sigma_n}{dE d\Omega} = \sum_{i=1}^3 \frac{N_i \sqrt{E/\pi}}{2\pi T_i^{3/2}} \exp\left[-\frac{(E - 2\sqrt{\epsilon_i E} \cos(\theta) + \epsilon_i)}{T_i}\right], \quad (1)$$

其中  $E$  为中子能量,  $\theta$  为中子发射角。求和对三个发射源进行。每个源有三个参数:温度  $T(\text{MeV})$ 、速度  $\epsilon(\text{MeV/u})$  和发射截面  $N$ , 这些参数通过对实验数据的最佳拟合确定。根据源速度的不同,三个源分别称为中等速度源(Intermediate-rapidity Source, 简称 IRS)、类弹源(Projectile-like Source, 简称 PLS)和类靶源(Target-like Source, 简称 TLS)。PLS 和 TLS 的源速度分别近似为弹、靶核初速。实验表明, PLS 对应大碰撞参数下的类弹残余核, TLS 对应复合核和大碰撞参数下的类靶残余核。IRS 源速度近似为束流速度的二分之一,它没有对应的末态残余核。一般认为 IRS 对应平衡前发射。由于这种分析方法是完全唯象的,有必要从动力学观点定量地研究各个源的物理本质。常见的描述平衡前发射的动力学模型有:激子模型<sup>[9-11]</sup>、快速发射粒子模型(Fermi-Jet 模型或 PEP 模型)<sup>[12,13]</sup>、热带发射模型(JKL 模型)<sup>[14,15]</sup>和 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck 动力学输运模型(简称 BUU 模型)<sup>[7,16-18]</sup>等。其中 BUU 模型在完整的六维相空间中模拟反应,它不含可调参数。大量研究表明,模型对核-核碰撞动力学的描述是可靠的。本

文利用 BUU 模型模拟平衡前中子发射, 结果与运动源拟合给出的平衡前发射谱 (IRS 成份) 比较, 以研究 IRS 的物理含义。本文第二部分, 介绍 BUU 模拟方法, 并定量地研究平衡前发射时间。第三部分给出反应  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  和  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  的模拟结果, 并与 IRS 发射谱比较。进而从 BUU 动力学观点讨论了 IRS 与平衡前发射的关系。

## 2 平衡前中子发射的 BUU 模拟

BUU 方程描写核子相空间密度分布函数  $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$  随时间的演化:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla_{\mathbf{r}} f - \nabla_{\mathbf{r}} U(\rho) \nabla_{\mathbf{p}} f = & - \frac{1}{(2\pi)^6} \int d^3 p_2 d^3 p_2' d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega} v_{12} \\ & \times \{ [f_2(1-f_1')(1-f_2') - f_1'f_2'(1-f)(1-f_2)] \\ & \times (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{p}_2' + \mathbf{p}_1' - \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}) \}, \end{aligned} \quad (2)$$

$U(\rho)$  为密度相关的平均场, 本文采用软位参数。方程的右端为 Uehling-Uhlenbeck 碰撞积分, 其中  $d\sigma/d\Omega$  为核子-核子碰撞截面,  $v_{12}$  为核子相对速度。一般采用试验粒子方法求解 BUU 方程<sup>[19]</sup>。关于该模型的细节, 建议参考文献[16]。

出射中子产额  $N(b)$  由中子相空间分布得到。由于本文的 BUU 程序不区分质子和中子(不考虑库仑位), 它给出对同位旋平均的分布  $\langle f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \rangle_{i.o.}$ 。本文由  $\langle f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \rangle_{i.o.}$  乘以因子  $((N_p + N_n)/(A_p + A_n))$  得到中子分布。其中  $N_p, N_n$  分别为弹核与靶核中子数,  $A_p, A_n$  分别为弹核与靶核质量数。中子谱由产额对碰撞参数平均而得到:

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \int 2\pi b db \frac{dN(b)}{dE d\Omega}. \quad (3)$$

下面讨论平衡前中子发射持续的时间  $\tau_{pre}$ 。在核-核碰撞的早期, 弹、靶核的单粒子位阱相互融合, 导致两核间出现低位垒“窗口”。在穿越“窗口”的交换核子流中, 由于 Fermi 运动与弹、靶相对运动的耦合, 部分核子将有足够高的能量击穿核体积从而导致平衡前发射。随着这些高能核子的损失, 平衡前发射将趋于结束。在平均每核子几十 MeV 的入射能量下, 核子的平均自由程与核尺寸是可比的, 交换核子主要通过首次核子-核子碰撞损失其能量<sup>[20]</sup>。首次碰撞 (First-Chance Collision) 指参与碰撞的两个核子均为第一次参加核子-核子碰撞。这类碰撞对核子的能量和入射道特征造成最大程度的损失。基于这些考虑, 本文取首次碰撞达到饱和的时间为平衡前中子发射的结束时间。图 1 就本文选定的两个反应:  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  和  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$ , 给出累积首次碰撞数 ( $N_{fcc}$ ) 随时间的变化。  $t=0$  时刻弹核与靶核的相对位置为: 两核质心连线在入射方向上的投影距离为两个半径之和加上一常量  $\Delta R = 1.7\text{fm}$ 。在 BUU 模拟中,  $\Delta R$  也是核子-核子碰撞能够发生的最大核子间距。由图可见, 两个反应的  $N_{fcc}(t)$  具有相同的时间演化特征, 都在  $t \approx 60\text{fm}/c$  时趋于饱和。故本文得到统一的截止时间  $\tau_{pre} \approx 60\text{fm}/c (2.0 \times 10^{-22}\text{s})$ 。

文献[14]利用 JKL 模型研究反应  $^{12}\text{C} + ^{107}\text{Ag}(85\text{MeV/u})$  得到  $\tau_{pre} \approx 65\text{fm}/c$ , 文

献[21]利用含时间的 HF 理论 (TDHF) 研究反应  $^{16}\text{O} + ^{93}\text{Nb}$  (12.75 和 18.75 MeV/u)

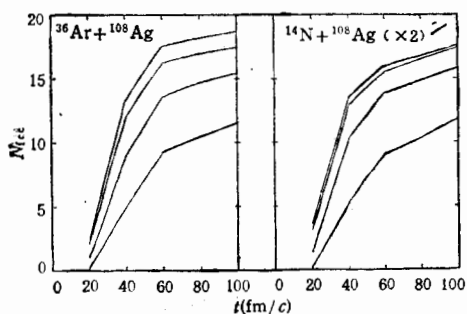


图1 反应  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}$  (35 MeV/u) 和  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}$  (35 MeV/u) 中首次碰撞数随时间的累积  
四条线按从上至下的顺序分别对应碰撞参数  $b = 0, 2, 4, 6\text{fm}$ .

得到  $\tau_{\text{pre}} \approx 2 \sim 3 \times 10^{-22}\text{s}$ . 与本文结果相比, 三个时间估计值在数量级上一致. 它们的时间零点相同, 所涉及的三组反应同属 Fermi 入射能区, 弹、靶核质量数也接近, 故三个  $\tau_{\text{pre}}$  值的相互吻合定性地说说明本文的估计是合理的. 本文的  $\tau_{\text{pre}}$  与弹核无相互作用地穿越靶核直径所需的时间 (穿越距离取为靶核直径加弹核直径),  $\tau_{\text{T}}$  也很接近 (对于  $^{14}\text{N}$  弹,  $\tau_{\text{T}} = 61\text{fm}/c$ , 对于  $^{36}\text{Ar}$  弹,  $\tau_{\text{T}} = 68\text{fm}/c$ ). 这说明本文的  $\tau_{\text{pre}}$  可理解为交换核子流穿越核体积的时间.

### 3 计算结果与讨论

本文模拟反应  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}$  和  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}$  的平衡前中子发射. 两个反应的人射能量均为  $E_0 = 35\text{MeV}/u$ . 在计算中, 试验粒子数取为 160 个/核子. 碰撞参数从  $b = 0$  取到  $b = 10\text{fm}$ , 间隔  $\Delta b = 2\text{fm}$ . 中子谱在演化时刻  $\tau_{\text{pre}} = 60\text{fm}/c$  时取出. 结果见图 2、3、4 中的阶梯线. 用以比较的 IRS 谱见图中的实线, 源参数见表 1.

表 1

反 应	$T(\text{MeV})$	$\epsilon(\text{MeV}/\text{nucleon})$	$N(b)$
IRS $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}$	$11.1 \pm 0.6$	$12.8 \pm 0.5$	$2.32 \pm 0.2$
$^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}$	$11.4 \pm 1.3$	$11.77 \pm 2.0$	$3.9 \pm 0.5$
PLS $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}$	$2.2 \pm 0.3$	$30.1 \pm 3.6$	$0.71 \pm 0.06$
$^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}$	$3.6 \pm 0.4$	$24.6 \pm 1.8$	$3.2 \pm 0.4$

IRS、PLS 源参数, 由对实验数据的运动源拟合给出, 取自实验文献[7,8].

图 2、3 给出双微分中子能谱. IRS 能谱在低能端的峰和高能端 ( $E_n > E_0$ ) 的指数衰减特征均被 BUU 模拟再现. 高能端的衰减斜率也吻合很好. IRS 谱的衰减斜率由其源温度决定, 故模拟再现了 IRS 源温度. 图 2 给出高能 ( $E_n > E_0$ ) 中子谱的实验数据. 在前向发射角处, 由于类弹源 (源参数见表 1) 的贡献, 实验谱与 IRS 谱的差别是明显的. 这说明出射高能中子并不总是平衡前发射的一部分. 这正是本文的模拟结果不与实验谱而与其 IRS 成份相比较的原因.

中子总截面 ( $\sigma_n$ ) 的计算结果为: 对于  $^{14}\text{N}$  弹,  $\sigma_n = 3.93\text{b}$ , 对于  $^{36}\text{Ar}$  弹,  $\sigma_n = 7.76\text{b}$ . 与  $N_{\text{in}}$  (见表 1) 相比, 两种结果在数量级上吻合. 但模拟值比 IRS 值约大一倍. 一个可能的原因是: 在 BUU 结果中未减去出射轻核 (如 d、t、 $\alpha$  等) 中所含的中子. 对于反应  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}$ , 文献[7]指出, 这部分中子的贡献高达 70% (对应  $E_n > 25\text{MeV}$ ,

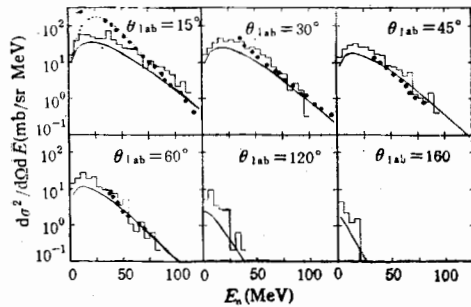


图 2 反应  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  的平衡前中子发射能谱(实验室参考系)

实线代表 IRS 成份, 虚线代表 IRS 成份与 PLS 成份之和, 阶梯线代表 BUU 计算结果, 点为实验数据, 源参数和实验数据取自文献[8].

$\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ .

图 4 比较中子角分布. 图中左侧为总角分布 ( $E_n > 0$ ), 右侧为高能中子角分布 ( $E_n > E_0$ ). 模拟结果已按中子总截面归一到 IRS 情况(见表 1). 高能中子角分布 ( $E_n > E_0$ ) 吻合很好. IRS 角分布的形状由源速度  $\varepsilon_{\text{irs}}$  决定, 故吻合说明: 就高能中子 ( $E_n > E_0$ ) 而言, 模拟再现了 IRS 的源速度. 总角分布 ( $E_n > 0$ ) 在前向发射角处吻合较好, 在背向发射角处模拟明显高于 IRS. 这说明在模拟结果中, 除 IRS 贡献外, 还有类似于 TLS 的另一发射源的微弱贡献. 该源对高能截面影响甚小. 在前向发射角处, 高的 IRS 截面使该源不能表现出来. 但在背向发射角处, IRS 截面很低, 该源导致模拟明显高于 IRS. 这说明本文的  $\tau_{\text{pre}}$  可能略微大了些.

总之, 模拟结果与唯象的运动源拟合得到的中等速度源成份相吻合. 仅考虑高能中子谱时, 吻合更加明显. 这说明中等速度源成份产生于核-核碰撞的早期(对于本文考虑的两个反应,  $t < \tau_{\text{pre}} \sim 60\text{fm}/c$ ). 如模拟计算所表明, 中等速度源温度大于  $8\text{MeV}$ , 对于这么高的核温度, 蒸发时间(寿命)大于驰豫时间的统计前提不再成立<sup>[1]</sup>. 因此, 中等速度源对应平衡前发射.

最后对本文进行总结. 本文利用 BUU 模型模拟核-核碰撞  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$ 、 $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  中的平衡前中子发射. 模拟中定量地研究了平衡前发射的持续时

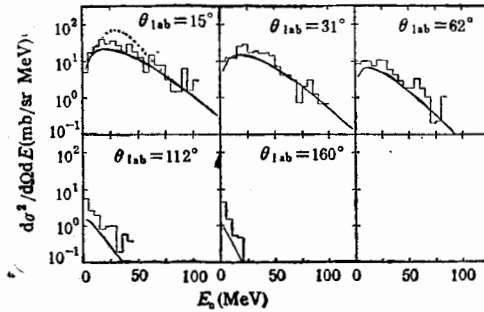


图 3 反应  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  的平衡前中子发射能谱

图形说明与图 2 相同, 但反应为  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}$ , 源参数取自文献[7].

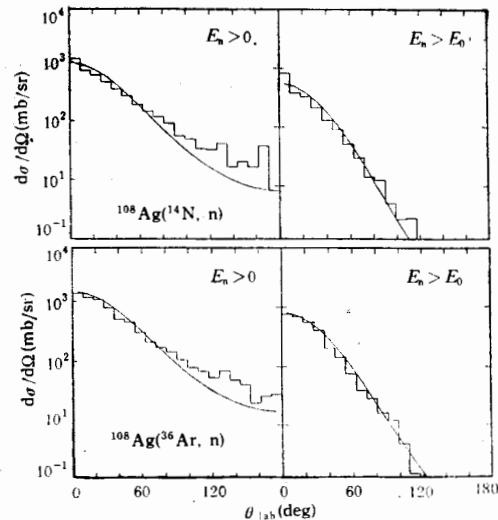


图 4 反应  $^{36}\text{Ar} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  和  $^{14}\text{N} + ^{108}\text{Ag}(35\text{MeV/u})$  的平衡前中子发射角分布

实线代表 IRS 成份, 阶梯线代表 BUU 模拟结果. BUU 结果已按中子总截面比归一到 IRS 情况(见表 1). 图中左侧为总角分布 ( $E_n > 0$ ), 右侧为高能中子角分布 ( $E_n > E_0$ ).

间,从而为唯象的运动源拟合方法提供了动力学依据。结果表明中等速度源对应平衡前发射。

### 参 考 文 献

- [1] D. Hilscher 等,“重离子深度非弹反应和熔合反应”专题会议文集(1979),柏林, P.100.
- [2] K. Yoshida et al., *Phys. Rev.*, **C46** (1992) 961.
- [3] B. A. Remington et al., *Phys. Rev.*, **C34** (1986) 1685.
- [4] T. C. Awes et al., *Phys. Rev.*, **C25** (1982) 2361.
- [5] Zhang Li et al., *Phys. Rev.*, **C37** (1988) 669.
- [6] D. Hilscher et al., *Phys. Rev.*, **C36** (1987) 208.
- [7] H. R. Schelin et al., *Phys. Rev.*, **C39** (1989) 1827.
- [8] D. Sackett et al., *Phys. Rev.*, **C44** (1991) 384.
- [9] M. Blann, *Nucl. Phys.*, **A213** (1973) 570.
- [10] M. Blann, *Nucl. Phys.*, **A235** (1973) 211.
- [11] E. Fabric et al., *Phys. Rev.*, **C40** (1989) 2548.
- [12] J. P. Bondorf et al., *Nucl. Phys.*, **A333** (1980) 285.
- [13] S. Bhattacharya et al., *Phys. Rev.*, **C40** (1989) 1814.
- [14] A. O. T. Karvinen et al., *Nucl. Phys.*, **A367** (1981) 122.
- [15] B. Jakobsson et al., *Nucl. Phys.*, **A531** (1991) 143.
- [16] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rep.*, **160** (1988) 189.
- [17] W. Cassing et al., *Phys. Rep.*, **188** (1990) 363.
- [18] A. Badala et al., *Phys. Rev.*, **C43** (1991) 190.
- [19] Cheuk-yin Wong, *Phys. Rev.*, **C25** (1982) 1461.
- [20] Bikash Sinha, *Phys. Rev. Lett.*, **50** (1983) 91.
- [21] A. K. Dhar et al., *Phys. Rev.*, **C25** (1982) 1432.

## Preequilibrium Neutron Emissions from Nucleus-Nucleus Collisions in Fermi Domain

Wang Zhisong    Huo Yukun

(Nuclear Science Department, Fudan University, Shanghai 200433)

Received on March 8, 1993

### Abstract

Preequilibrium neutron emissions from nucleus-nucleus collisions  $^{36}\text{Ar}+^{108}\text{Ag}$  (35MeV/u) and  $^{14}\text{N}+^{108}\text{Ag}$  (35MeV/u) are simulated in the BUU model. The simulations are in agreement with the intermediate rapidity source (IRS) parts in the moving source fit approach, which indicates that the IRS parts come from the very early stage of collisions, and are equivalent to preequilibrium emissions. The time interval of the preequilibrium neutron emission process is studied in terms of nucleon-nucleon collisions.

**Key words** nucleus, collision, neutron emission.