

# 基于双核模型研究大质量转移反应中 结团发射机制

徐思宇 冯兆庆

(华南理工大学 物理与光电学院 广州 510641)

**摘要** 本文借助双核模型,进行了对多核子转移反应中前平衡结团发射机制进行了系统研究。以反应系统  $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$ 、 $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$  和  $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$  为例,重点分析了库仑位垒附近重离子碰撞产生前平衡轻粒子,如中子、质子、氘核、氚核、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 、 $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$ 、 $^8\text{Be}$  和  $^9\text{Be}$  时间演化、动能分布和角分布。研究表明:结团发射呈现出一定核结构效应, $^4\text{He}$  发射概率与质子相当并远大于  $^3\text{He}$ 。前平衡结团主要分布在“类弹”和“类靶”角度区域发射,其动能分布呈现出玻尔兹曼分布形式。考虑结团预形成因子后该方法可以拓展用于不稳定原子核引起的结团发射机制研究。

**关键词** 结团发射, 前平衡过程, 转移反应, 双核模型

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030501

## Cluster emission in massive transfer reactions based on dinuclear system model

XU Siyu FENG Zhaoqing

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract** [Background] The pre-equilibrium cluster manifests the nuclear structure and reaction dynamics of collision system. The systematical investigation of cluster emission in transfer reactions is of significance in deep understanding of the synthesis of superheavy nuclei, shell evolution, new isotope production, etc. [Purpose] The dynamics of pre-equilibrium cluster in a few of nucleon transfer reaction has been described by theoretical model, such as exciton model, cluster model. However, the cluster emission in massive transfer is very complicated because of the emission mechanism associated with the structure properties and also the dynamical process. [Methods] In this work, the pre-equilibrium cluster emission in massive transfer reaction has been systematically investigated within the dinuclear system model. The model has been successfully used for describing the massive fusion reaction and multi-nucleon transfer dynamics. The nucleon exchange and energy dissipation take place once the dinuclear system is formed. The nucleon transfer between the binary fragments is governed by the single-particle Hamiltonian and proceeds around the Fermi surface formed by the dinuclear system. The master equation is used for the nucleon transfer dynamics and the relative motion energy dissipation is taken into account. The dynamics of neutron, proton, deuteron, triton,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6,7\text{Li}$  and  $^8,9\text{Be}$  in collisions of  $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$ ,  $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$  and  $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$  near Coulomb barrier energies is analyzed, i. e., temporal evolution of production rate, kinetic energy spectra and angular distribution.

国家自然科学基金(No.12175072、No.11722546)、华南理工大学双一流建设经费(No.20210115)资助

第一作者: 徐思宇, 女, 2001 年出生, 在读本科生, 研究领域为原子核物理

通信作者: 冯兆庆, E-mail: fengzhq@scut.edu.cn

收稿日期: 2022-11-30, 修回日期: 2023-02-01

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12175072, No.11722546), Double First-class Construction Fund of South China University of Technology (No.20210115)

First author: XU Siyu, female, born in 2001, undergraduate student, focusing on nuclear physics

Corresponding author: FENG Zhaoqing, E-mail: fengzhq@scut.edu.cn

Received date: 2022-11-30, revised date: 2023-02-01

**[Results]** It is found that the emission probability of  $^4\text{He}$  is the same magnitude of proton emission and several orders larger than the one of  $^3\text{He}$ . Both the nuclear structure and dynamical effects influence the pre-equilibrium cluster production. **[Conclusions]** The pre-equilibrium clusters are emitted from the 'projectile-like' and 'target-like' fragments and the angular distributions manifest the similar trends. The kinetic energy spectra of clusters are shown as the Boltzmann distribution. The method is also extended to the cluster emission in weakly bound nuclei induced reactions by considering the preformation factor for the cluster construction.

**Key words** Cluster emission, Pre-equilibrium process, Transfer reaction, Dinuclear system model

大质量转移反应是人工产生新核素的主要途径之一<sup>[1-2]</sup>,其反应过程涉及能量、角动量、形状演化、核子转移等自由度演化。大质量转移反应中核结团发射机制与核结构、碰撞系统动力学演化等机制有关,是研究原子核结团结构和动力学演化主要方法。20世纪80年代初,我国在兰州重离子加速器上测量了库仑位垒附近大质量转移反应结团发射,如 $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$ 反应中 $^8\text{Be}$ 发射的动能分布、角分布、产生总截面等信息<sup>[3]</sup>。核结团可以看作强关联核子组成的空间定位子系统,由于其内部较强的结合能,为了处理方便,理论上可以把核结团看作一个整体,而不去关注它的内部结构<sup>[4]</sup>。许多核反应都涉及结团的发射和俘获,如氦、氘、 $^3\text{He}$ 和 $\alpha$ 粒子,这样的结团反应对研究核结构和核反应机制有很大的帮助。它们提供了关于单粒子和多粒子核态特性的重要信息,因此常常被广泛应用于核光谱分析。远离稳定线的弱束缚核引起的核反应中结团发射也是研究弱束缚核结构的主要途径之一。正在惠州建立强流重离子加速器装置(High Intensity Accelerator Facility, HIAF)为研究奇特核结团结构和结团发射提供了良好的实验平台。原子核内结团结构是由于核子之间关联效应导致,特别是在原子核表面容易形成结团结构。原子核结团结构在弱束缚核中较为明显,一些稳定核中也存在,如 $^6\text{Li}$ 为 $\alpha + \text{d}$ 、 $^8\text{Be}$ 为2个 $\alpha$ 、 $^{12}\text{C}$ 看成3个 $\alpha$ 等<sup>[5]</sup>。原子核反应中结团发射比较复杂,与基态原子核结团结构有关,也与反应过程中系统动力学演化相关,是一个非平衡的时空演化过程。核反应中前平衡结团发射可以通过中子、质子或氦核引起的散裂反应、转移反应、剥裂反应、拾取反应等机制进行研究,实验和理论方面已进行了大量研究<sup>[6]</sup>。大质量转移(多核子转移过程)反应中结团发射实验上进行了系统测量,但理论方面的研究工作非常少,特别是结团的产生截面、角分布、动能分布等信息。

目前,已有一些模型描述基态原子核结团结构。壳模型中考虑单粒子谱关联研究结团结构。为了同时考虑壳层结构和结团结构,Tomoda和Arima提出了共存模型<sup>[7]</sup>,并且用它很好地解释了 $^{20}\text{Ne}$ 的能量

和核内 $\alpha$ 粒子结构。核反应过程中前平衡粒子发射时间尺度要比复合核形成时间短,理论方法包括激子模型<sup>[8-9]</sup>、朗之万方程等<sup>[10]</sup>。在这里主要采用的是双核模型,早期由俄罗斯Volkov提出用于描述重系统碰撞深度非弹性散射<sup>[11]</sup>,之后由Adamian等<sup>[12-13]</sup>进行发展,用于超重核合成机制研究。国内科研人员做了进一步改进和发展,用于准裂变碎片分布、多核子转移反应和熔合蒸发反应研究<sup>[14-16]</sup>。双核模型主要物理思想是:弹靶核在位能曲面的作用下越过库仑位垒形成双核体系,然后二者之间进行质量(电荷)与能量的交换,相对运动能量与角动量全部耗散为内禀激发能以及内禀角动量,最后处于激发态的复合核通过蒸发轻粒子退激或者裂变掉。通过双核系统(Domain Name System, DNS)研究超重核合成截面方面已经取得了一定的成功,但也存在一些缺点,如没有考虑碰撞系统形状动力学演化(特别是动力学形变、形状演化和颈部动力学)。

## 1 模型介绍

### 1.1 前平衡结团发射

基于双核模型研究前平衡结团发射,把结团看成一个整体,类似于高激发态原子核的衰变产生结团,需要结团的结合能和库仑位垒,发射过程是时间演化的。与全熔合反应中弹核核子全部转移到靶核形成复合核物理思想不同,前平衡粒子发射是直接反应,反应系统没有达到统计平衡<sup>[17]</sup>,所以,结团发射是在核子转移过程中,此时还没有形成复合核。不同结团的形成概率不同,它们在某种程度上取决于能量,并且通常随着复合系统(或靶核)质量数的增加而减小,不同的文献给出不同的形成概率公式<sup>[18-20]</sup>。前平衡结团是从碰撞系统演化过程中发射出来,没有考虑结团的形成概率,着重处理结团发射过程。结团的产生截面是能量、角度和时间依赖的,表示如下:

$$\sigma_v(E_k, \theta, t) = \sum_{J, Z_1, N_1}^{J=J_{\max}} \sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J) P(Z_1, N_1, E^*, t) P_v(Z_v, N_v, E_k) \quad (1)$$

其中：最大角动量取为碰撞形态擦边角动量。 $\sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J)$ 为俘获截面，对应俘获过程，弹靶核在位能曲面作用下越过库仑位垒形成双核体系。入射能量在库仑位垒以下应考虑量子隧穿效应，穿透概率不仅与位垒的高度和宽度有关，还与相对运动以及其他内禀自由度的耦合有关。多维自由度的存在使得弹靶核之间的位垒不是简单的一维分布，而是含有多个自由度的多维分布。俘获截面为：

$$\sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E_{\text{c.m.}}} \sum_{J=0}^{J_{\text{max}}} (2J+1) T(E_{\text{c.m.}}, J) \quad (2)$$

式中： $T(E_{\text{c.m.}}, J)$ 为穿透概率。考虑库仑位垒的多维分布，通常用Hill-Wheeler公式<sup>[21]</sup>计算带有位垒分布函数的穿透概率：

$$T(E_{\text{c.m.}}, J) = \int f(B) \frac{1}{1 + \exp\left[-\frac{2\pi}{\hbar\omega(J)} \left(E_{\text{c.m.}} - B - \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2\mu R_B^2(J)}\right)\right]} dB$$

式中： $\hbar\omega(J)$ 是表征抛物线宽度的量； $R_B$ 是位垒B时弹靶质心距离； $f(B)$ 是位垒分布函数，这里取成反高斯形<sup>[22-24]</sup>。

$P(Z_1, N_1, E^*, t)$ 表示核子数为 $A_1(Z_1, N_1)$ 内部激发能为 $E^*$ 的质量分布概率，它的演化有主方程来描述<sup>[24-25]</sup>：

$$\begin{aligned} \frac{dP(Z_1, N_1, E_1, t)}{dt} = & \sum_{Z'_1} W_{Z_1, N_1; Z'_1, N'_1}(t) [d_{Z_1, N_1} P(Z'_1, N_1, E_1, t) - \\ & d_{Z'_1, N'_1} P(Z_1, N_1, E_1, t)] + \\ & \sum_{N'_1} W_{Z_1, N_1; Z_1, N'_1}(t) [d_{Z_1, N_1} P(Z_1, N'_1, E_1, t) - \\ & d_{Z_1, N'_1} P(Z_1, N_1, E_1, t)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $W_{Z_1, N_1; Z'_1, N'_1}(t)$ 表示从 $(Z_1, N_1, E_1)$ 态到 $(Z'_1, N_1, E'_1)$ 态的平均跃迁概率； $d_{Z_1, N_1}$ 表示碎片在宏观状态 $(Z_1, N_1, E_1)$ 时包含的微观状态。式(3)中对所有能取到的质子数 $Z'_1$ 和中子数 $N'_1$ 进行求和，且每次计算只考虑 $Z'_1 = Z_1 \pm 1, N'_1 = N_1 \pm 1$ 。 $E_1$ 是内禀激发能，它来自于相对运动动能的耗散，它又与双核系统的位能曲面共同决定了局域激发能。跃迁概率 $W_{Z_1, N_1; Z'_1, N'_1}$ 与局域激发能和核子转移有关，它满足 $W_{Z_1, N_1; Z'_1, N'_1} = W_{Z'_1, N'_1; Z_1, N_1}$ 。值得注意的是，这里忽略了碎片的裂变和准裂变，因为前平衡发射的时间与熔合蒸发反应，相比非常短。

$P_\nu(Z_\nu, N_\nu, E_\nu)$ 表示 $t-t + \Delta t$ 间隔内动能为 $E_\nu$ 的粒子 $\nu$ 的发射概率，由测不准关系给出：

$$P_\nu(Z_\nu, N_\nu, E_\nu) = \Delta t \Gamma_\nu / \hbar \quad (4)$$

式中： $\Gamma_\nu$ 是粒子 $\nu$ 的衰变宽度，可以用Weisskopf模型计算。前平衡粒子可以从双核碎片 $(Z_1, N_1, E_1)$ 或 $(Z_2, N_2, E_2)$ 发射出来，其中 $Z_1 + Z_2 = Z_{\text{tot}}$ 和 $N_1 + N_2 = N_{\text{tot}}$ ，反应系统总质子数 $Z_{\text{tot}}$ 和中子数 $N_{\text{tot}}$ 。根据Weisskopf的蒸发理论，粒子 $\nu$ 的蒸发宽度为<sup>[26]</sup>：

$$\Gamma_\nu(E^*(t), J_{\text{DNS}}(t)) = (2s_\nu + 1) \frac{m_\nu}{\pi^2 \hbar^2 \rho(E^*, J_{\text{DNS}}(t))} \times \int_0^{E^* - B_\nu - \delta - E_{\text{rot}}} \varepsilon \rho(E^*(t) - B_\nu - \delta - E_{\text{rot}} - \varepsilon, J_{\text{DNS}}(t)) \sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

式中： $s_\nu$ 为出射粒子 $\nu$ 的自旋； $m_\nu$ 为蒸发粒子的质量； $\rho(E^*, J)$ 为双核系统激发能 $E^*$ 和角动量 $J_{\text{DNS}}$ 时的能级密度； $B_\nu$ 是蒸发粒子的分离能； $\delta$ 是蒸发一个中子后剩余核的对修正能，对于奇 $A$ 核(仅对奇中子核) $\delta_n = 12/\sqrt{A}^{12}$ 。其余情况 $\delta_n = 0$ 。 $\sigma_{\text{inv}}(\varepsilon)$ 为反转截面<sup>[25]</sup>。

$$\sigma_{\text{inv}}(\varepsilon) = \begin{cases} \pi R_v^2 (1 - V_v/\varepsilon), & \varepsilon > V_v \\ 0, & \varepsilon < V_v \end{cases} \quad (6)$$

式中： $R_v = 1.21[(A - A_v)^{1/3} + A_v^{1/3}]$ ； $V_v$ 是库仑位垒，对于不带电的粒子， $V_v = 0$ ，对于带电粒子，它由参数化给出： $V_v = [(Z - Z_v)Z_v K_v]/R_v$ ，这里取对于质子，氘和氚的 $K_v = 1.15$ ，对于 $^3\text{He}$ 和 $\alpha$ 的 $K_v = 1.32$ ，对于 $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$ 、 $^8\text{Be}$ 的 $K_v = 1.44$ 。这里的能级密度由费米气体模型得到：

$$\rho(E^*(t), J_{\text{DNS}}(t)) = \frac{2J_{\text{DNS}}(t) + 1}{24\sqrt{2}\sigma^3 a^{1/4} (E^*(t) - \delta)^{5/4}} \exp\left[2\sqrt{a(E^*(t) - \delta)} - \frac{(J_{\text{DNS}}(t) + 1/2)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

其中： $\sigma^2 = 6\bar{m}^2 \sqrt{a(E^* - \delta)}/\pi^2$ ， $\bar{m}^2 \approx 0.24A^{2/3}$ ，对修正能 $\delta$ 对于偶偶核、奇 $A$ 核、奇奇核分别是 $12/\sqrt{A}$ 、 $0$ 、 $12/\sqrt{A}$ 。 $E_{\text{rot}} = J_{\text{DNS}}(J_{\text{DNS}} + 1)\hbar^2/2\xi_{\text{rel}}$ 为转动动能，转动惯量 $\xi_{\text{rel}} = \mu R_{\text{int}}^2$ ，其中： $\mu$ 和 $R_{\text{int}}$ 分别是双核系统的约化质量和质心距离。双核系统角动量随时间演化写成：

$$J_{\text{DNS}}(t) = J_{\text{st}} + (J - J_{\text{st}}) \exp(-t/\tau_j) \quad (8)$$

式中： $J$ 和 $J_{\text{st}}$ 分别为碰撞系统入射角动量和双核系统粘滞角动量 $J_{\text{st}} = J_{\text{rel}}^{\xi_{\text{rel}}}/\xi_{\text{tot}}$ ， $\xi_{\text{rel}}$ 和 $\xi_{\text{tot}}$ 分别是双核系统相对的和总的转动惯量。角动量弛豫时间取值 $\tau_j = 15 \times 10^{-22}$  s。

粒子从双核系统发射时会带走一定的动能，会导致系统激发能降低，对双核系统角动量的影响，但由于转动惯量的降低增加了系统的转动动能。出射粒子动能由Monte Carlo抽样方式给出，考虑粒子分离

能和双核系统转动能的影响。对于中子来讲,采用从精密中子实验数据中得到的 Watt 谱<sup>[27]</sup>:

$$\frac{dN_{pc}}{d\varepsilon_n} = C_n \frac{\varepsilon_n^{1/2}}{T_w^{3/2}} \exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{T_w}\right) \quad (9)$$

式中:  $T_w = (1.7 \pm 0.1) \text{ MeV}$ ; 归一化常数  $C_n$ 。对于带电粒子,采用玻尔兹曼分布谱:

$$\frac{dN_{pc}}{d\varepsilon_v} = 8\pi E_k \left(\frac{m}{2\pi T_m}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon_v}{T_m}\right) \quad (10)$$

式中:  $T_m$  为原子核温度,  $T_m = \sqrt{E^*/a}$ ,  $a$  是能级密度参数。具体的抽样过程参考文献[15]。首先对粒子能谱做归一化,  $f(\varepsilon) = C_0^{-1} dN_{pc}/d\varepsilon$ , 得到归一化系数:

$$C_0^{-1} = \int_0^{\varepsilon_{cut}} \frac{dN_{pc}}{d\varepsilon_v} d\varepsilon_v \quad (11)$$

式中:  $\varepsilon_{cut}$  是截止能量, 选取  $\varepsilon_{cut} = E^* - B_v - \delta_n - E_{rot}$ , 然后在  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_{cut})$  中计算最大值  $f_{max}(\varepsilon)$ 。然后在 0~1 区间内生成两个均匀分布的随机数  $r_1$  和  $r_2$ , 若  $f(\varepsilon_{cut} r_1) > f_{max} r_2$ , 那么粒子可以以  $\varepsilon_{cut} r_1$  动能发射出去, 否则将进行第二次采样, 重复之前的过程。

## 1.2 前平衡结团角分布

研究多核子转移过程中发射粒子的角分布对实验上的探测有很大的帮助。常用偏转函数法去估计出射粒子的角度分布, 它通常包括库仑偏转和核偏转两个部分<sup>[28-29]</sup>:

$$\Theta(l_i) = \Theta_C(l_i) + \Theta_N(l_i) \quad (12)$$

其中, 库仑偏转由卢瑟福方程给出:

$$\Theta_C(l_i) = 2\arctan \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E_{c.m.} b} \quad (13)$$

核偏转角度为:

$$\Theta_N(l_i) = -\beta \Theta_C^{gr}(l_i) \frac{l_i}{l_{gr}} \left(\frac{\delta}{\beta}\right)^{l_i/l_{gr}} \quad (14)$$

式中:  $\Theta_C^{gr}(l_i)$  是在掠入射角动量  $l_{gr} = 0.22R_{int} [A_{red}(E_{c.m.} - V(R_{int}))]^{1/2}$  处的库仑散射角, 其中,  $A_{red}$  和  $V(R_{int})$  分别是弹靶核的约化质量和在库仑半径处的相互作用势;  $l_i$  是入射角动量;  $\delta$  和  $\beta$  是通过拟合大规模碰撞中深度弹性散射实验数据得到的:

$$\beta = \begin{cases} 75f(\eta) + 15, \eta < 375 \\ 36\exp(-2.17 \times 10^{-3}\eta), \eta \geq 375 \end{cases} \quad (15)$$

$$\delta = \begin{cases} 0.07f(\eta) + 0.11, \eta < 375 \\ 0.117\exp(-1.37 \times 10^{-4}\eta), \eta \geq 375 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $f(\eta) = \left[1 + \exp\left(\frac{\eta - 235}{32}\right)\right]^{-1}$ , 索末菲参量  $\eta =$

$Z_1 Z_2 e^2 / v$ ,  $v$  是相对速度, 它的表达式为  $v = \sqrt{\frac{2}{A_{red}}(E_{c.m.} - V(R_{int}))}$ 。因此, 第  $i$  个碎片的转动惯量  $\xi_i$ , 就可以得到它的发射角度  $\Theta_i(l_i) = \Theta(l_i) \xi_i / (\xi_1 + \xi_2)$ 。

## 2 结果与讨论

前平衡结团粒子是在复合系统达到完全统计平衡之前就发射的粒子, 所以它发生的时间要快于复合核形成的时间。为了解释前平衡结团发射现象, 人们已经发展了基于半经典理论的前平衡模型<sup>[30-31]</sup>, 如激子模型、玻尔兹曼主方程理论、合并模型等, 也发展了基于量子力学的前平衡理论, 如扭曲波脉冲近似法 (Distortive Wave Impulse Approximation, DWIA)、多步复合反应 (MultiStep Compound reaction, MSC)、多步直接反应 (MultiStep Direct reaction, MSD) 等。在过去 40 余年, 人们主要开展了散裂反应、剥裂反应和拾取反应中结团的发射机制, 主要涉及中子、质子、 $\alpha$  粒子及其他轻粒子发射。然而, 大质量或多核子转移反应中结团发射理论研究比较缺乏, 其反应机制深入研究对于超重核合成、新同位素产生、壳层结构演化等具有重要意义。大质量转移反应中核结团发射后, 体系的激发能会降低, 导致“类弹”和“类靶”碎片产生截面、角分布等发生变化。

图 1 给出了  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  在入射能量  $E_{lab} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$  ( $E_{c.m.} = 73.76 \text{ MeV}$ ) 出射粒子的发射截面随时间的演化。可以看出, 在演化时间  $2 \times 10^{-21} \text{ s}$  后前平衡粒子发射达到了平衡, 即在形成复合核之前系统一直有一定概率发射粒子。前平衡粒子  $^3\text{He}$  要比  $\alpha$  粒子低 7 个数量级, 而  $^8\text{Be}$  产额要比锂同位素都要高。图 2 给出了  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  反应系统在  $E_{lab} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$  ( $E_{c.m.} = 259.64 \text{ MeV}$ ) 结团产生率随时间的演化。初始时刻不同粒子发射速率随时间快速上升, 随着时间的推移, 发射速率增加到一定值后达到稳定值, 粒子的发射截面即对不同时刻的发射速率乘以时间间隔做累加求和。结团的发射截面大小主要与它的形成概率和发射概率有关, 在计算中, 假设结团已经存在双核系统中, 因此, 不同结团发射截面主要取决于发射概率的大小。从图 2 可以看到, 中子的发射截面速率的稳定值要高于其他带电粒子 5 个数量级以上。这是由于中子不带电, 与其他带电粒子相比, 它的发射不受库仑位垒的阻碍。对于其他粒子, 如  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$ , 它们受到库仑阻碍的影响相差不大, 影响它们发射截面大小的主

要是分离能,即从双核系统中分离出结团粒子所需的最小能量。一般地,结团粒子分离能越大,其衰变宽度越小,根据式(4)可知,结团粒子的发射概率越大。如图2所示, ${}^4\text{He}$ 要比它的同位素 ${}^3\text{He}$ 的发射截面高出3个数量级,这是因为 ${}^4\text{He}$ 的分离能比 ${}^3\text{He}$ 要

大很多。同时,在核子转移过程中,双核系统随着不同结团粒子发射中质比也在发生变化,一般越是丰质子的核,其带电粒子的分离能越小,蒸发带电粒子就越容易。

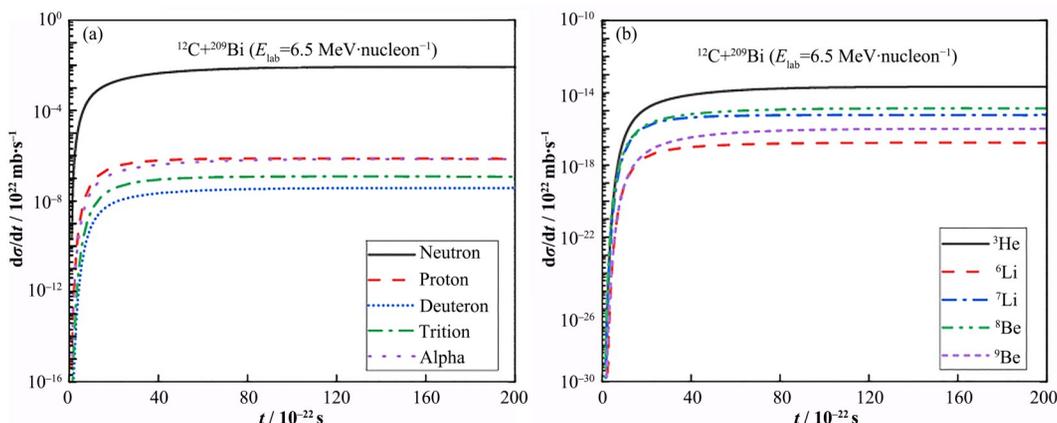


图1 系统 ${}^{12}\text{C}+{}^{209}\text{Bi}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV}$ 产生的前平衡粒子产生率随时间演化  
Fig.1 The pre-equilibrium particle generation rate with time for the reaction system  ${}^{12}\text{C}+{}^{209}\text{Bi}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

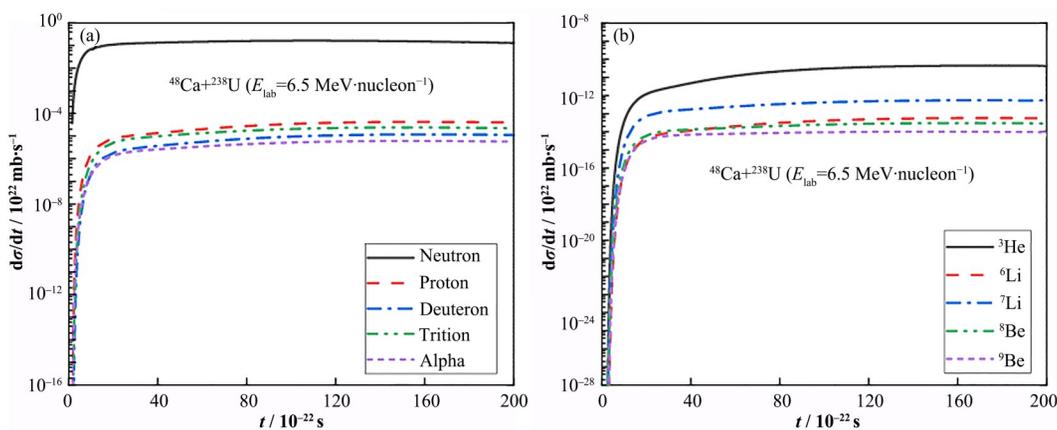


图2 系统 ${}^{48}\text{Ca}+{}^{238}\text{U}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV}$ 产生的前平衡粒子产生率随时间演化  
Fig.2 The pre-equilibrium particle generation rate with time for the reaction system  ${}^{48}\text{Ca}+{}^{238}\text{U}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

前平衡粒子动能分布能够呈现出核结构效应和动力学特征,较低分离能和库仑位垒有利于结团发射。图3给出了入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$ 反应 ${}^{40}\text{Ca}+{}^{208}\text{Pb}$ 产生中子、质子、氘核、氚核、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^8\text{Be}$ 和 ${}^9\text{Be}$ 动能分布。出射粒子动能分布呈现出波尔兹曼形式。前平衡结团动能主要由类弹核或类靶核局域激发能决定,较高的局域激发能有利于高动能结团发射。结团在碰撞系统中形成后需要克服库仑位垒发射出来,较高的位垒阻碍结团发射。因此,中子是最容易发生前平衡发射,也能降低反应系统激发能,中子前平衡发射也有利于形成较低激发能的复合核,在超重核形成概率精确计算有重要影响。在相同激发能和角动

量下,蒸发氢同位素、氦同位素、锂同位素和铍同位素库仑位垒依次升高,但分离能与结构有关,如母核质量数、电荷数、能级密度等。从图3可以看出, $\alpha$ 粒子发射概率远大于 ${}^3\text{He}$ , ${}^8\text{Be}$ 发射概率要大于 ${}^9\text{Be}$ 带电结团发射也与反应系统和入射能量有关。如图4所示,反应 ${}^{48}\text{Ca}+{}^{238}\text{U}$ 在实验室系入射能量 $6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$ 产生前平衡结团动能分布,带电粒子发射与 ${}^{40}\text{Ca}+{}^{208}\text{Pb}$ 略有不同,特别是 $\alpha$ 、 ${}^6,7\text{Li}$ 、 ${}^8,9\text{Be}$ 。总体而言,前平衡氢同位素和 $\alpha$ 发射概率相当,其中 $\alpha$ 发射更加敏感依赖于反应系统和入射能量, ${}^6,7\text{Li}$ 和 ${}^8,9\text{Be}$ 发射概率相当。低能重离子碰撞中前平衡粒子发射也是研究原子核结团结构有效方法。

多核子转移过程中结团粒子的发射是各向异性

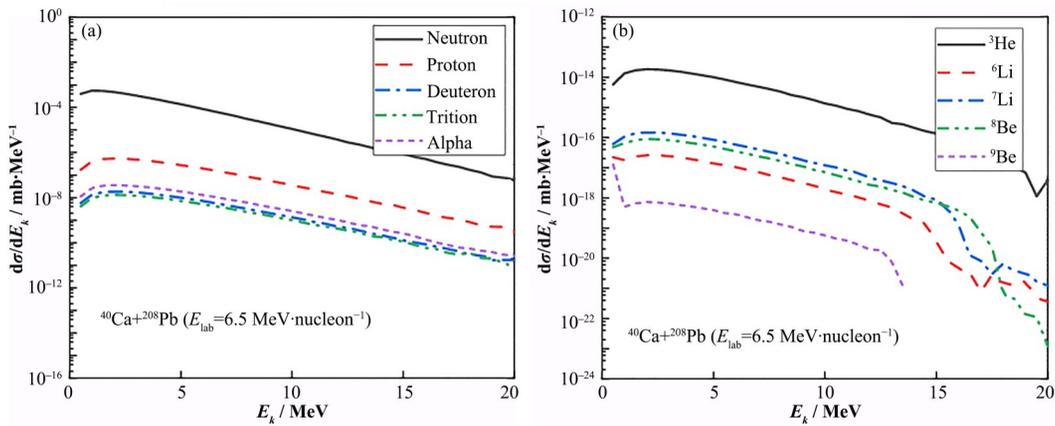


图3 系统在 $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV}$ 产生的前平衡粒子动能分布  
 Fig.3 The kinetic energy distribution of pre-equilibrium particles for the reaction system  $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

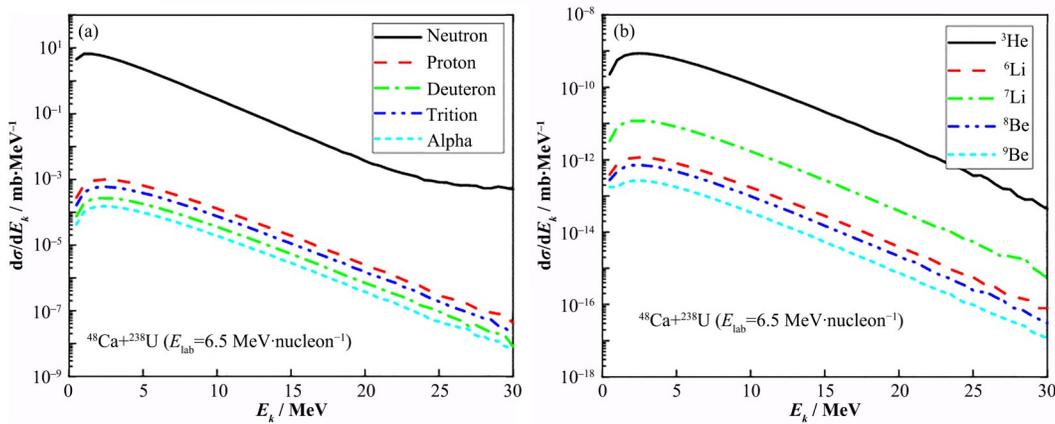


图4 系统 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV}$ 产生的前平衡粒子动能分布  
 Fig.4 The kinetic energy distribution of pre-equilibrium particles for the reaction system  $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

的,并且与反应系统和入射能量有关<sup>[29]</sup>。研究多核子转移过程中发射粒子的角分布对实验上的探测有很大的帮助,图5~7分别给出了 $^{12}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$ 在入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$  ( $E_{\text{c.m.}} = 259.64 \text{ MeV}$ ),  $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ 在入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$  ( $E_{\text{c.m.}} = 218.06 \text{ MeV}$ )和 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 在入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{核子}^{-1}$  ( $E_{\text{c.m.}} = 259.64 \text{ MeV}$ )下,前平衡发射粒子的角分布情况。可以看到,对于 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ 反应体系,发射粒子在质心系的低角度 $0^\circ \sim 40^\circ$ 下,截面几乎为0;在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 下,截面有个小幅度的增加;在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 下,发射粒子的截面随角度增大而迅速增加,且在 $80^\circ$ 附近有一个峰值;大于 $80^\circ$ 后,截面迅速减小。不同种类的出射粒子发射截面大小不同,主要取决于发射概率,这与图2的结果是一致的。而对于 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 反应体系,所有出射粒子都在角度在 $100^\circ \sim 120^\circ$ 之间有个峰值,对于较重的结团 $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$ 和 $^8\text{Be}$ 在 $160^\circ$ 附近也有峰值出现,从而出现双

峰。从图7中可以看出,出射粒子的角分布是不对称的,这表明反应不是形成完全的复合核,粒子在系统没有完全达到统计平衡的时候就发射出来。而且对于不同的反应体系,角度分布也不同,但对于同一个反应体系,不同的结团粒子角度分布的形态大致相同,这是由于不同的结团粒子是从同一个处于激发状态的双核系统中蒸发出来的。反应系统 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ 角分布呈现出两个峰值,分别在 $50^\circ$ 和 $70^\circ$ 附近,是从“类弹”和“类靶”碎片发射而出。出射结团角分布与多核子转移碎片角分布相似形式<sup>[32]</sup>,而与熔合蒸发反应出射粒子角分布不同。近期,相对论重离子对撞机STAR国际合作组利用干涉学方法测量了矢量介子并研究夸克胶子物质整体极化现象<sup>[33-34]</sup>,为获取量子色动力学(Quantum Chromodynamics, QCD)物质自旋排布奠定了基础。干涉学方法在低能核物理中也广泛应用,如测量前平衡发射中双 $\alpha$ 粒子角度和能谱可以获取发射 $^8\text{Be}$ 机制。

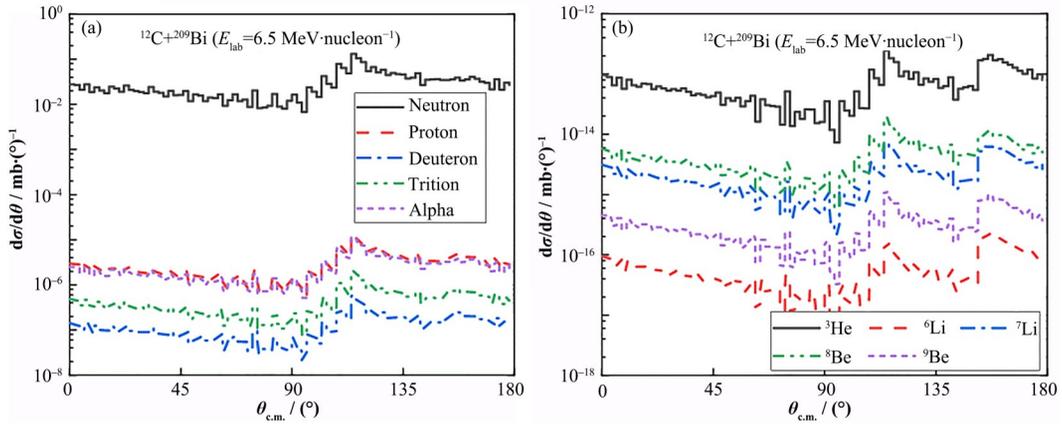


图5 系统 $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$ 前平衡出射粒子的角分布  
 Fig.5 Angular distribution of pre-equilibrium particles for the reaction system  $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

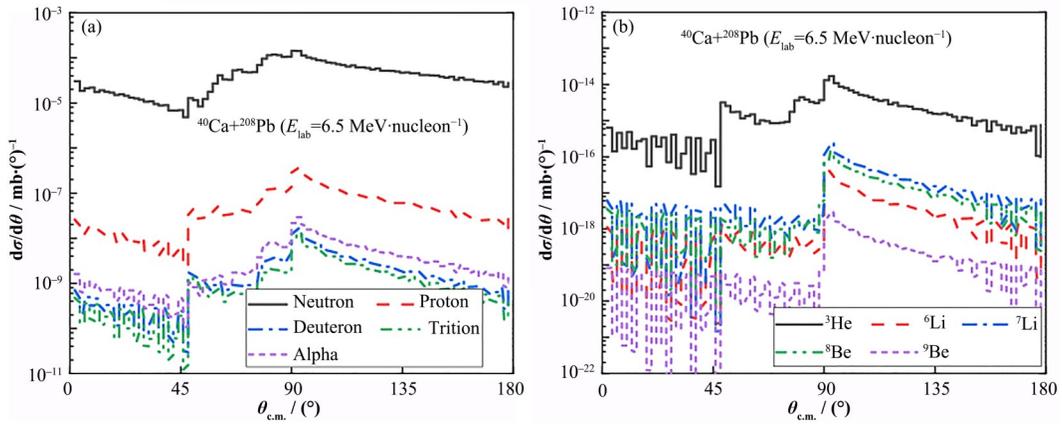


图6 系统 $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$ 前平衡出射粒子的角分布  
 Fig.6 Angular distribution of pre-equilibrium particles for the reaction system  $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

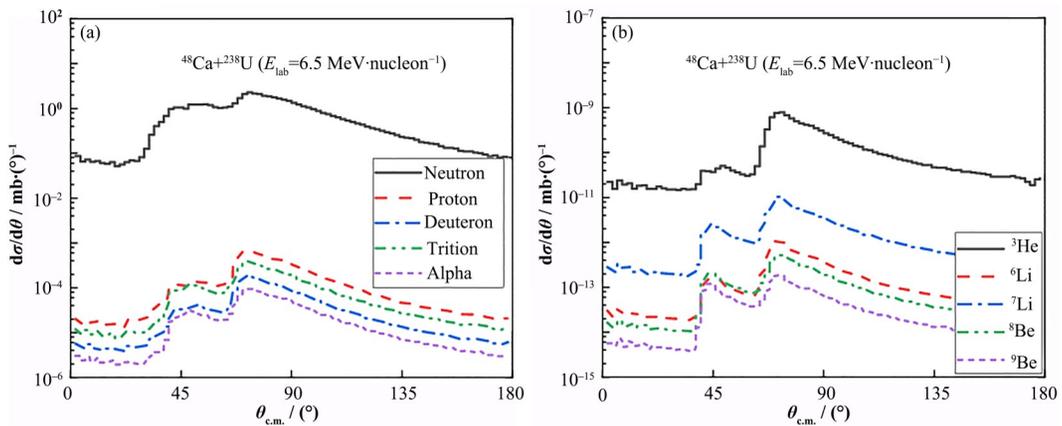


图7 系统 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ 在每核子入射能量 $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$ 前平衡出射粒子的角分布  
 Fig.7 Angular distribution of pre-equilibrium particles for the reaction system  $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$  at the incident energy  $E_{\text{lab}} = 6.5 \text{ MeV} \cdot \text{nucleon}^{-1}$

### 3 结语

本文基于双核模型,对大质量转移反应过程中前平衡结团发射机制进行了研究,其中包括了n、p、

d、t、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 、 $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$ 和 $^8\text{Be}$ 在 $^{12}\text{C}+^{209}\text{Bi}$ 、 $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 和 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ 反应体系中发射截面随时间的演化,发射截面随动能和角度的变化,其中结团粒子的发射

动能主要采用 Monte Carlo 抽样方式从双核系统中对粒子动能进行采样。通过分析计算结果发现,不同结团类型发射截面与结团的分离能和库仑位垒有关,其值越小越有利于结团产生。前平衡结团动能分布具有玻尔兹曼形式,中子发射概率最大,氢同位素和  $\alpha$  粒子相当,带电粒子发射与反应系统和入射能量有关并呈现出明显结构效应。不同的反应体系角度分布也大不相同,但对于同一个反应体系,不同的结团粒子角度分布大致相同,这是由于不同的核结团是从同一个处于局域激发的“类弹核”或“类靶核”发射,与多核子转移碎片角分布呈现出相同形式。目前计算中没有考虑结团预形成因子,特别是在弱束缚核引起的反应中尤为重要。计算结果能够再现与实验数据相符合的稳定核引起的大质量转移过程中结团发射的动能谱和角分布信息。

**致谢** 感谢中国科学院近代物理研究所靳根明研究员有益讨论和热情帮助。

**作者贡献声明** 徐思宇:完成理论计算并撰写了论文第一稿;冯兆庆:审阅修改论文。

#### 参考文献

- Artukh A G, Gridnev G F, Mikheev V L, *et al.* Multinucleon transfer reactions in the  $^{232}\text{Th}+^{22}\text{Ne}$  system [J]. Nuclear Physics A, 1973, **211**(2): 299 - 309. DOI: [10.1016/0375-9474\(73\)90721-5](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90721-5).
- Artukh A G, Gridnev G F, Mikheev V L, *et al.* Transfer reactions in the interaction of  $^{40}\text{Ar}$  with  $^{232}\text{Th}$ [J]. Nuclear Physics A, 1973, **215**(1): 91 - 108. DOI: [10.1016/0375-9474\(73\)90104-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(73)90104-8).
- Jin G M, Xie Y X, Zhu Y T, *et al.* Product cross sections for the reaction of  $^{12}\text{C}$  with  $^{209}\text{Bi}$ [J]. Nuclear Physics A, 1980, **349**(1 - 2): 285 - 300. DOI: [10.1016/0375-9474\(80\)90455-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(80)90455-8).
- Horiuchi H. An overview of the history of cluster conferences[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, **863**: 012004. DOI: [10.1088/1742-6596/863/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/863/1/012004).
- Buck B, Dover C B, Vary J P. Simple potential model for cluster states in light nuclei[J]. Physical Review C, 1975, **11**(5): 1803 - 1821. DOI: [10.1103/physrevc.11.1803](https://doi.org/10.1103/physrevc.11.1803).
- Hodgson P E, Béték E. Cluster emission, transfer and capture in nuclear reactions[J]. Physics Reports, 2003, **374**(1): 1 - 89. DOI: [10.1016/S0370-1573\(02\)00268-5](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(02)00268-5).
- Tomoda T, Arima A. Coexistence of shell structure and cluster structure in  $^{20}\text{Ne}$ [J]. Nuclear Physics A, 1978, **303**(1 - 2): 217 - 253. DOI: [10.1016/0375-9474\(78\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0375-9474(78)90052-0).
- Gadioli E, Gadioli-Erba E, Hogan J J. Preequilibrium decay of nuclei with  $A \cong 90$  at excitation energies to 100 MeV[J]. Physics Review C, 1977, **16**: 1404. DOI: [10.1103/PhysRevC.16.1404](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.16.1404).
- Fotina O V, Eremenko D O, Parfenova Y L, *et al.* Pre-equilibrium effects in the secondary particle spectra in the reactions with heavy ions[J]. International Journal of Modern Physics E, 2010, **19**(5n06): 1134 - 1140. DOI: [10.1142/s0218301310015588](https://doi.org/10.1142/s0218301310015588).
- Jia Y, Bao J D. Calculations of the anisotropy of the fission fragment angular distribution and neutron emission multiplicities precission from Langevin dynamics[J]. Physical Review C, 2007, **75**(3): 034601. DOI: [10.1103/physrevc.75.034601](https://doi.org/10.1103/physrevc.75.034601).
- Volkov V V. Deep inelastic transfer reactions—the new type of reactions between complex nuclei[J]. Physics Reports, 1978, **44**(2): 93 - 157. DOI: [10.1016/0370-1573\(78\)90200-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(78)90200-4).
- Adamian G G, Antonenko N V, Jolos R V, *et al.* Effective nucleus-nucleus potential for calculation of potential energy of a dinuclear system[J]. International Journal of Modern Physics E, 1996, **5**(1): 191 - 216. DOI: [10.1142/s0218301396000098](https://doi.org/10.1142/s0218301396000098).
- Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, *et al.* Fusion cross sections for superheavy nuclei in the dinuclear system concept[J]. Nuclear Physics A, 1998, **633**(3): 409 - 420. DOI: [10.1016/s0375-9474\(98\)00124-9](https://doi.org/10.1016/s0375-9474(98)00124-9).
- Li J Q, Wolschin G. Distribution of the dissipated angular momentum in heavy-ion collisions[J]. Physical Review C, 1983, **27**(2): 590 - 601. DOI: [10.1103/physrevc.27.590](https://doi.org/10.1103/physrevc.27.590).
- Feng Z Q, Jin G M, Fu F, *et al.* Production cross sections of superheavy nuclei based on dinuclear system model[J]. Nuclear Physics A, 2006, **771**: 50 - 67. DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2006.03.002](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2006.03.002).
- Li W, Wang N, Li J F, *et al.* Fusion probability in heavy-ion collisions by a dinuclear-system model[J]. Europhysics Letters (EPL), 2003, **64**(6): 750 - 756. DOI: [10.1209/epl/i2003-00622-0](https://doi.org/10.1209/epl/i2003-00622-0).
- Gadioli E, Hodgson P E. Pre-equilibrium nuclear reactions [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1992.
- Wu J R, Chang C C. Complex-particle emission in the pre-equilibrium exciton model[J]. Physical Review C, 1978, **17**(5): 1540 - 1549. DOI: [10.1103/physrevc.17.1540](https://doi.org/10.1103/physrevc.17.1540).
- Běták E, Dobeš J. The finite depth of the nuclear potential well in the exciton model of preequilibrium decay[J].

- Zeitschrift Für Physik A Atoms and Nuclei, 1976, **279**(3): 319 - 324. DOI: [10.1007/BF01408305](https://doi.org/10.1007/BF01408305).
- 20 Machner H. Pre-compound decay into complex particle channels[J]. AIP Conference Proceedings, 1978, **47**(1): 660 - 661. DOI: [10.1063/1.31538](https://doi.org/10.1063/1.31538).
- 21 Lawrence Hill D, Wheeler J A. Nuclear constitution and the interpretation of fission phenomena[J]. Physical Review, 1953, **89**(5): 1102 - 1145. DOI: [10.1103/physrev.89.1102](https://doi.org/10.1103/physrev.89.1102).
- 22 Zagrebaev V I. Synthesis of superheavy nuclei: Nucleon collectivization as a mechanism for compound nucleus formation[J]. Physical Review C, 2001, **64**(3): 034606. DOI: [10.1103/physrevc.64.034606](https://doi.org/10.1103/physrevc.64.034606).
- 23 Zagrebaev V I, Aritomo Y, Itkis M G, *et al.* Synthesis of superheavy nuclei: how accurately can we describe it and calculate the cross sections?[J]. Physical Review C, 2001, **65**: 014607. DOI: [10.1103/physrevc.65.014607](https://doi.org/10.1103/physrevc.65.014607).
- 24 Feng Z Q, Jin G M, Li J Q, *et al.* Formation of superheavy nuclei in cold fusion reactions[J]. Physical Review C, 2007, **76**(4): 044606. DOI: [10.1103/physrevc.76.044606](https://doi.org/10.1103/physrevc.76.044606).
- 25 Feng Z Q, Jin G M, Li J Q, *et al.* Production of heavy and superheavy nuclei in massive fusion reactions[J]. Nuclear Physics A, 2009, **816**(1 - 4): 33 - 51. DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2008.11.003](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2008.11.003).
- 26 Weisskopf V. Statistics and nuclear reactions[J]. Physical Review, 1937, **52**(4): 295 - 303. DOI: [10.1103/physrev.52.295](https://doi.org/10.1103/physrev.52.295).
- 27 Huizenga J R, Chaudhry R, Vandenbosch R. Helium-ion-induced fission of Bi, Pb, Tl, and Au[J]. Physical Review, 1962, **126**(1): 210 - 219. DOI: [10.1103/physrev.126.210](https://doi.org/10.1103/physrev.126.210).
- 28 Chen P H, Niu F, Guo Y F, *et al.* Nuclear dynamics in multinucleon transfer reactions near Coulomb barrier energies[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(12): 185. DOI: [10.1007/s41365-018-0521-y](https://doi.org/10.1007/s41365-018-0521-y).
- 29 Wolschin G, Nörenberg W. Analysis of relaxation phenomena in heavy-ion collisions[J]. Zeitschrift Für Physik A Atoms and Nuclei, 1978, **284**(2): 209 - 216. DOI: [10.1007/BF01411331](https://doi.org/10.1007/BF01411331).
- 30 Griffin J J. Statistical model of intermediate structure[J]. Physical Review Letters, 1966, **17**(9): 478 - 481. DOI: [10.1103/physrevlett.17.478](https://doi.org/10.1103/physrevlett.17.478).
- 31 Cole A J. Statistical models for nuclear decay: from evaporation to vaporization[M]. CRC Press, 2000.
- 32 Peng C, Feng Z Q. Production of neutron-rich heavy nuclei around  $N=162$  in multinucleon transfer reactions [J]. The European Physical Journal A, 2022, **58**(9): 162. DOI: [10.1140/epja/s10050-022-00819-2](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00819-2).
- 33 Ma Y G. New type of double-slit interference experiment at Fermi scale[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 16. DOI: [10.1007/s41365-023-01167-6](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01167-6).
- 34 Wang X N. Vector meson spin alignment by the strong force field[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 15. DOI: [10.1007/s41365-023-01166-7](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01166-7).