

快报

重离子碰撞中发射核子的多重性*

张丰收 葛凌霄 吴国华

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

在激子模型中, 考虑了多次发射效应和它与态间跃迁的耦合, 计算了重离子碰撞中非平衡发射粒子的多重性, 并与实验做了比较.

重离子碰撞实验中已发现了发射非平衡粒子的现象. 随着轰击能量超过 10 MeV/A, 融合几率变小, 轻粒子非平衡发射已占相当地位, 实验上测量了发射粒子的多重性^[1,2]. 在碰撞过程中粒子逃逸原因的探索引起人们很大的兴趣, Fermi-jet 模型^[3]处理了平均场的贡献, 激子模型^[4]和改进的玻尔兹曼方程^[5]讨论了核子-核子碰撞的贡献, BUU 方程^[6]同时考虑了这两种效应. 本文希望在已有的激子模型框架下引入新自由度——多次发射链 s 来计算重离子碰撞中非平衡发射核子的多重性, 探索链效应对非平衡粒子发射的影响.

在只考虑单链过程的激子模型中^[7], 任一激子态 (n, E) 可以跃迁到相邻激子态 $(n \pm 2, E)$, 或发射粒子. 能量稍高于库仑位垒的较低能区中, 单链过程的激子模型是一个好的近似; 但能量高时, 一次粒子发射后, 残留体系的激发能还足以再次发射粒子, 因此, 此时必须考虑多次发射. 另外, 重离子碰撞中反应截面的确定还不很清楚, 而多重性的研究恰可以避开这一难题. 理论上一般采用下面多重性和截面的经验关系^[8]

$$\frac{d^2 M_n}{dE d\Omega} = \frac{d^2 \sigma_n}{dE d\Omega} \cdot \frac{1}{\sigma_R}, \quad (1)$$

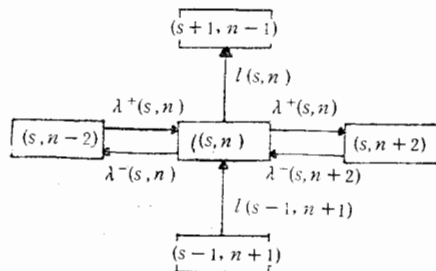
其中 M_n 为发射核子的多重性, σ_n 为发射核子的截面, σ_R 为反应截面.

在激子模型中引入多链发射后, 激子态变化的物理过程如图 1 所示, 其中 (s, n) 表示发射 $s-1$ 个核子后激子数为 n 的激子态. 在这里, 我们仅考虑了中子和质子的发射问题, 对其它复杂粒子的发射, 因其形成问题的困难, 在计算总发射几率时, 做了简单的实验修正^[11].

设 t 时刻, 第 s 链 n 激子态的占有几率为 $P(s, n, t)$, 由图 1, 它满足下面主方程:

$$\begin{aligned} \frac{dP(s, n, t)}{dt} = & -P(s, n, t)[\lambda^+(s, n) + \lambda^-(s, n) + L(s, n)] \\ & + P(s, n-2, t)\lambda^+(s, n-2) + P(s, n+2, t)\lambda^-(s, n+2) \\ & + P(s-1, n+1, t)l(s-1, n+1), \end{aligned} \quad (2)$$

* 国家自然科学基金和中科院课题资助
本文 1988 年 3 月 22 日收到

图 1 激子态 (s, n) 所参与的物理过程示意图

其中 $\lambda^+(s, n)$ 是激子态间的跃迁几率, $L(s, n)$ 是 s 链 n 激子态总的粒子发射几率, $l(s, n)$ 是核子(中子或质子)的发射几率. 主方程(2)中右边第一项为损失项, 中间两项为获得项, 最后一项是 $s-1$ 链同 s 链之间耦合而造成的源项, 这正是与一般激子模型不同之处. (2)式可用数值方法求解, 但比一般单链主方程复杂. 在物理上, 我们感兴趣的是平衡前发射核子的多重性, 希望尽可能排除复合核蒸发的贡献. 我们知道, 复合核蒸发主要来源于平衡激子数 \bar{n} 附近的态, $\lambda^+(s, n)$ 的主要贡献在 \bar{n} 激子数前, $\lambda^-(s, n)$ 主要贡献在 \bar{n} 激子数后, 因此, 采用无反馈近似 ($\lambda^-(s, n) \doteq 0$) 对主要考虑非平衡发射是很好的近似, 而且计算简便. 方程(2)可得到的解析解为:

$$P(s, n, t) = \sum_{i=1}^s \sum_{\substack{j=n_0 \\ \Delta j=2}}^n A(s, i; n, j) e^{-G(i, j)t} \quad (3)$$

其中 $G(s, n) = \lambda^+(s, n) + L(s, n)$, 系数 $A(s, i; n, j)$ 满足:

$$\begin{aligned} A(s, i; n, j) &= \lambda^+(s, n-2)A(s, i; n-2, j) \\ &\quad + l(s-1, n+1)A(s-1, i'; n+1, j), \quad (4) \\ i &= 1, 2, \dots, s-1; j' = n_0, n_0+2, \dots, n-2. \end{aligned}$$

而 $A(1, 1; n_0, n_0)$ 和 $A(s, s; n, n)$ 可以很容易由初始条件 $p(s, n, t=0) = \delta_{s1}\delta_{nn_0}$ 和(2)得到.

对时间积分态的占据几率为:

$$t(s, n) = \sum_{i=1}^s \sum_{\substack{j=n_0 \\ \Delta j=2}}^n A(s, i; n, j) / G(i, j). \quad (5)$$

由(1)式, s 链, 激子数为 n 的态发射中子的微分多重性为

$$\frac{dM_n(s, n)}{d\varepsilon} = t(s, n)W(s, n, \varepsilon_n) \quad (6)$$

其中 $W(s, n, \varepsilon_n)$ 为激子态 (s, n) 发射能量为 ε_n 中子的几率, 它可由细致平衡原理导出, 并通过逆截面和能级密度表示. 所不同的是本文采用了泡利原理修正后的能级密度公式, 详见参考文献[9].

模型的主要输入量为初始激子数和激发能. 不同于中子或质子引起的反应, 重离子碰撞中初始激子数必须由复杂的反应机制来确定, 文献[10]考虑了单粒子自由度和集体运动耦合的双中心壳模型, 但只计算了对称系统碰撞的初始激子数, 为简单起见, 计算中

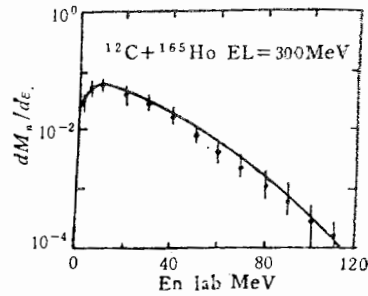


图2 $^{12}\text{C}(300\text{MeV}) + ^{165}\text{Ho}$ 的非平衡中子发射多重性能谱

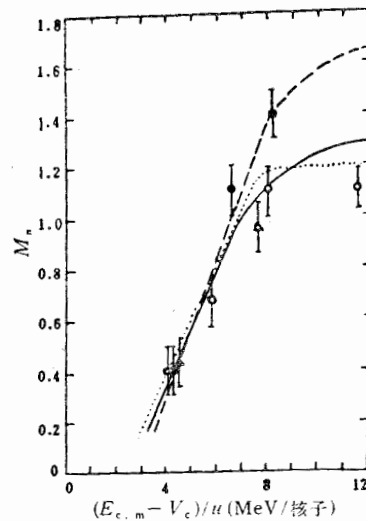


图3 ^{12}C , ^{13}C 和 ^{20}Ne 作为炮弹形成复合核 ^{170}Yb 在不同能量下的非平衡中子多重性

	Calc.	exp.
^{12}C	——	○
^{13}C	- - - -	●
^{20}Ne	⊕

把它作为参数,其数值在弹核核子数附近.对初始激发能,考虑到重离子碰撞中库仑能修正^[10],第 s 链的激发能取为

$$E_n^*(s) = E_n^*(s-1) - B_n(s-1) - \bar{\epsilon}_n(s-1) - V_c(s-1). \quad (7)$$

其中 B_n 为最后一核子的结合能, V_c 为库仑位垒, $\bar{\epsilon}_n(s) = \int \epsilon d\epsilon \frac{dM_n(s)}{d\epsilon} / \left[\int d\epsilon \frac{dM_n(s)}{d\epsilon} \right]$ 为 s 链核子发射平均能量.最大激子态由 $\lambda^+(s, n) / \lambda^-(s, n) \geq 10$ 确定,以满足无反馈近似.

图2给出了 $^{12}\text{C}(300\text{MeV}) + ^{165}\text{Ho}$ 反应系统的非平衡中子发射多重性能谱,图3是 ^{12}C , ^{13}C 和 ^{20}Ne 做为炮弹形成复合核 ^{170}Yb 在不同能量下的非平衡中子多重性,实验点^[11,12]同时标在图上.通过不同 s 下 $\frac{dM_n}{d\epsilon}$ 的比较,前平衡发射粒子的高能部分主要来自于低

链,高链的 $\frac{dM_n}{d\epsilon}$ 更接近于 Maxwell 分布. 图 3 中, ^{12}C 和 ^{13}C 结合能不同在发射粒子数目上体现出来, ^{13}C 中子结合能低, 中子发射数目多. ^{20}Ne 在 12MeV/u 后变平坦, 可能是由于发射中子的结合能随发射中子数目增加而增加, 使 Mn 有一极限值. 另外, 能量很高时, 单核子发射因复杂粒子发射几率增加而受到限制.

总之, 本文引入多次发射过程的激子模型, 并在无反馈近似下解析求解链耦合方程, 计算了重离子碰撞中非平衡发射核子的多重性, 计算结果与实验点基本符合, 这对于更进一步研究其它非平衡物理问题, 如非全融合反应提供了简便的方法, 更进一步非平衡发射多重性角分布的研究正在进行中.

作者感谢卓益忠教授的帮助和有益讨论, 感谢张竞上的讨论和提供了泡利原理修正后的能级密度公式.

参 考 文 献

- [1] A. Gavron et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 450.
- [2] E. Holumb et al., *Phys. Rev.*, **C33** (1986), 143.
- [3] J. P. Bondorf et al., *Phys. Lett.*, **84B**(1979), 162.
- [4] J. Griffin, *Phys. Rev. Letter.*, **17**, (1966), 478.
- [5] M. Blann, *Phys. Rev.*, **C23**(1981), 205.
- [6] J. Aichelin and G. Bertsch, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1730.
- [7] 王书暖等, 原子核物理, **4**(1982), 104.
- [8] T. C. Awes et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 236.
- [9] J. S. Zhang and X. J. Yang, *Z. Physik*, **A329**(1988), 69.
- [10] L. X. Ge and W. Nörenberg, *Z. Physik*, **A323**(1986), 393.
- [11] M. Blann, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 1245.

MULTIPLICITY OF EMITTED NUCLEONS IN HEAVY ION COLLISION

GE LINGXIAO WU GUOHUA ZHANG FENGSHOU

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

Introduced the multi-emission effect and the coupling between them in the exciton model, the multiplicities of preequilibrium emitted nucleons have been calculated and compared with experimental data.