

中能重离子周边反应产物的同位素 分布与中子皮、激发能的关系*

冯 军 沈文庆 曾跃武 马余刚 王 柄
詹文龙 诸永泰 冯恩普

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

对中能重离子周边反应产物的同位素分布与中子皮、激发能的关系进行了研究。在同位素分布计算中考虑了小液滴模型预言的中子皮厚度的影响, 并加入了中能区经验的耗散计算方法, 拟合了中能 ^{40}Ar 和 ^{86}Kr 炮弹产生的同位素分布。

一、引 言

近年来, 在重离子物理研究中, 一个重要的研究方向就是利用奇异核放射性束流进行核反应机制、原子核特性和新核素的合成及其衰变特性的研究。在法国 GANIL、美国 MSU 及欧洲 CERN 等研究所, 人们用这一技术得到了许多新的丰中子和缺中子同位素^[1,2], 并发现了 β 延迟多中子、多质子发射等奇异的衰变方式^[3] 和原子核相互作用半径参数 γ_0 随中子过剩自由度 ($N - Z$) 的增加而增加的现象^[4]。同时人们还发现 ^{11}Li 、 ^{14}Be 碎裂反应产生的 ^9Li 、 ^{12}Be 的横向动量分布是由不同宽度的两个高斯分布组成的, 从而提出了在 ^{11}Li 、 ^{14}Be 核中可能存在很长的中子分布尾巴^[5] 及软模式巨偶极共振等现象。这些新的实验结果, 提供了关于核的形状、半径、结构和核反应的新信息, 促使人们进一步研究, 把适用于 β 稳定线区域的理论外推到远离 β 稳定线的核是否正确, 以及在多大程度上是正确的。同时, 也促使理论工作者对远离 β 稳定线的核性质进行新的估计。

中能区重离子周边反应产生的同位素分布, 不仅给中能区反应机制及原子核的特性提供了许多信息, 而且是开展奇异核束流技术及寻找新的远离 β 稳定线核素的重要依据^[6]。Guerreau 等^[7] 通过相互作用核重迭区的几何考虑及利用统计蒸发理论, 发展了一个计算中能重离子周边反应产物的同位素分布的简单模型。对于用中能 ^{40}Ar 炮弹轰击不同的靶的产物的同位素分布, 该模型的计算结果与实验符合得不错; 但对于较重的炮弹 (如 ^{86}Kr), 该模型不能拟合实验数据。目前, 这一问题还未解决。

本文 1990 年 5 月 28 日收到。

* 国家自然科学基金资助。

中高能特别是高能重离子产生奇异核束流的基础是碎裂反应. 在中能区碎裂反应中, 还有耗散存在. 目前, 从实验和理论上, 对中能重离子碎裂反应中耗散机制进行了很多研究^[6], 但是否还有别的反应机制, 人们正在进行探索.

本文在采用 Guerreau 的计算方法时, 考虑了中子皮和耗散使碎片产物激发能增加对中能重离子周边反应产物的同位素分布的影响 (尤其是对于较重的炮弹在较大的碰撞参数时, 中子皮的影响会增加), 发展了这一半经典模型, 拟合了中能区⁴⁰Ar 和⁸⁶Kr 炮弹产生的产物同位素分布.

二、计算中能区同位素分布的 Guerreau

模型及耗散对同位素分布的影响

Guerreau^[7] 用两个相互作用核重迭区的几何考虑得到碎片产品的质量分布; 用重迭区内弹核偶极巨共振零点振动模型计算碎片产物的电荷分布, 得到产生 A 、 Z 类弹初级碎片产物截面为:

$$\sigma(Z, A) = \frac{1}{(2\pi\sigma_Z)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{[Z - A(Z_P/A_P)]^2}{2\sigma_Z^2}\right\} \sigma(A), \quad (1)$$

其中: A_P 、 Z_P 分别为入射炮弹的质量数, 电荷数; 产生质量为 A 的碎片产物的截面为:

$$\sigma(A) = 10\pi [b_{(a+0.5)}^2 - b_{(a-0.5)}^2] \text{mb}, \quad (2)$$

$\sigma(Z)$ 为碎片产物的电荷分布宽度, a 是碰撞参数为 b 时擦去的核子数, 它与重迭区的体积和炮弹体积之比及炮弹的质量数成正比. 相应的初级碎片产物的激发能为:

$$E^* = \gamma \Delta S, \quad (3)$$

其中 $\gamma = 0.9517(1 - 1.7826I^2) \text{MeV} \cdot \text{fm}^{-2}$, $I = \frac{N-Z}{A}$, 而 ΔS 是碎片产物剩余表面积^[7].

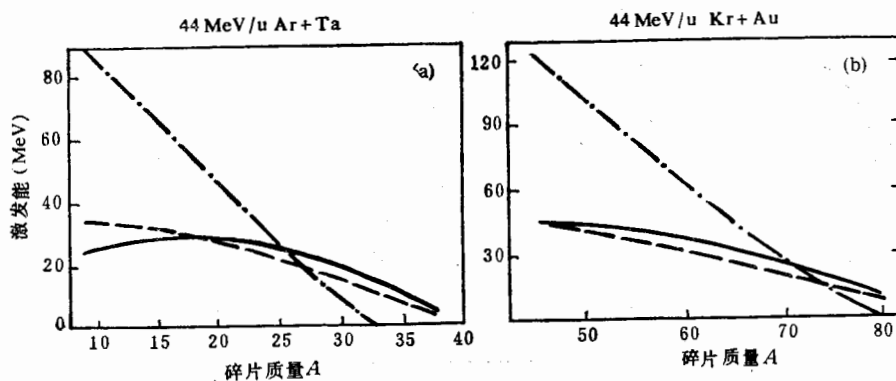


图 1 44 MeV/u ⁴⁰Ar + Ta (a) 及 44 MeV/u ⁸⁶Kr + Au 反应产物激发能曲线.

— Guerreau
 --- Bonesera
 -·- Dayras [Conn = 0.8]

在上述理论上考虑了统计蒸发修正后,计算得到的同位素分布与中能 ^{40}Ar 引起反应的实验结果符合较好。但在中能 ^{86}Kr 入射时,计算所得的同位素分布与实验结果相比,峰位及分布宽度都差得较大。这可能是由于 ^{86}Kr 比 ^{40}Ar 重得多,而使按照(3)式计算的反应碎片的激发能偏低而造成的。

由于中能重离子反应既有核子-核子二体碰撞的影响,又包含平均场造成的一体耗散的影响, Bonsera^[8]等人认为,在中能区碎裂反应的初级阶段,当两个核接触时将会形成一个颈,此时主要是一体耗散。考虑了泡利原理修正后的窗公式为:

$$F_{\text{窗}} = \frac{1}{4} \pi r_N^2 m \rho \langle v \rangle [v_t + 2v_r] N_{\text{eff}}, \quad (4)$$

其中: r_N 为颈半径 (fm), m 为单核子静止质量, $931.55\text{MeV}/c^2$, ρ 为核平均密度 0.145fm^{-3} , $\langle v \rangle = \frac{3}{4} v_F$ m/s, v_F 为费米速度, v_t 、 v_r 分别为切向速度和径向速度 (m/s), N_{eff} 是考虑泡利原理限制后参与纯一体耗散的核子数。

径向耗散能和切向耗散能分别为:

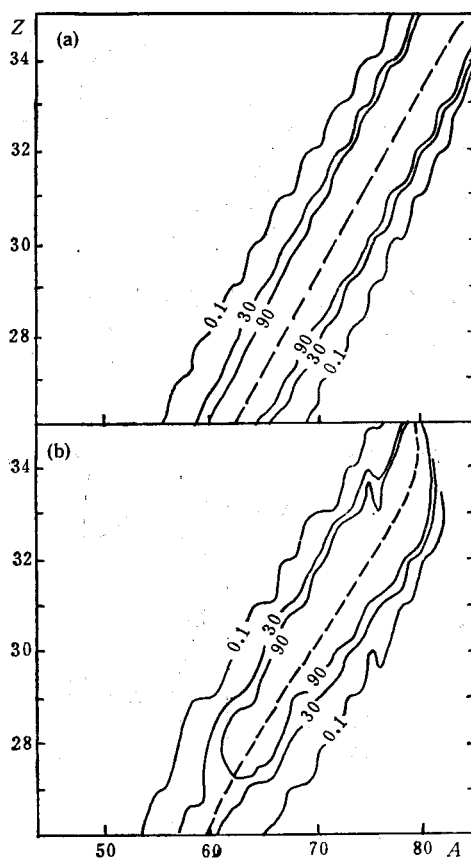


图 2 $44\text{MeV}/u$ $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应中计算的蒸发前 (a) 和蒸发后 (b) 的产物分布二维等高图,虚线是不同 Z 的同位素分布的峰位连线。

$$E_{\text{径向}} = F_r d_r, \quad (5)$$

$$E_{\text{切向}} = F_t d_t, \quad (6)$$

其中 F_r 是径向摩擦力; $d_r = R_1 + R_2 - b$ 是从两核接触点到碎片形成的最接近点处的径向距离; F_t 是切向摩擦力; $d_t = 2r_N$ 为切向距离。考虑耗散后, 转移给碎片产物的激发能为:

$$E_{\text{PLF}}^* = \frac{1}{2} E_{\text{径向}} \frac{A_{\text{PLF}}}{A_{\text{PLF}} + A_{\text{TLF}}}. \quad (7)$$

该模型可较好地解释中能重离子产物的能谱和角分布等数据。按照这种模型计算得到的 44MeV/u 的 ^{40}Ar 和 ^{86}Kr 分别轰击 Ta 和 Au 的产物激发能的结果如图 1 所示。

从图 1 中看出, 考虑一体耗散后, 产物的激发能增加, 但对于较大碰撞参数, 即质量数接近炮弹的产物, 耗散掉的能量较小。图 1 还给出了 Dayras 的计算结果。这样考虑一体耗散后, 我们计算得到蒸发修正前后的 44MeV/u $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应产物在 $A-Z$ 平面上的二维等高图如图 2 所示。从图上看, 考虑了耗散及蒸发修正后产物同位素分布的峰位将下移, 但仍和实验结果相差较大, 尤其是对于接近炮弹质量数的产物。

不能拟合的原因可能是由于轻的碎片产物的激发能虽然增高, 但并不完全是通过蒸发中子退激的。质子及 α 粒子等轻带电粒子的蒸发也很重要, 从而使同位素分布的峰位下移不多。因此, 蒸发造成的同位素分布宽度的变化也不能解释 ^{86}Kr 作炮弹的实验数据。

三、考虑中子皮的中能区重离子周边反应同位素分布的半经典计算

中能区重离子核反应中核子-核子相互作用的贡献随轰击能增加而越来越大, 核表面核子分布对产物同位素分布应有一定的影响。Myers 等人^[9]提出的小液滴模型预言, 核内中子数比质子数多到一定的程度时中子分布锐半径会大于质子分布锐半径, 即在核表面出现“中子皮”。而且, 中子皮的厚度和中子相对过剩 $(N-Z)/A$ 成线性增加的关系。计算表明: 中子皮对原子核反应总截面^[10]及相互作用半径参数^[11]都有一定的影响。

按照小液滴模型得出的结果, 对于 ^{40}Ar 核中子皮厚度 $D = 0.14\text{fm}$, 对于 ^{86}Kr 核中子皮厚度 $D = 0.27\text{fm}$, 小液滴模型给出的 Ar 和 Kr 的中子、质子分布关系曲线如图 3 所示。

在考虑了中子皮效应后, 并分别

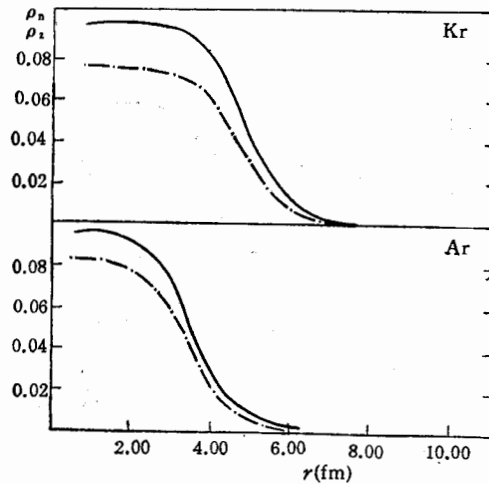


图 3 小液滴模型给出的 ^{86}Kr (a) 和 ^{40}Ar (b) 的中子和质子分布。

— ρ_n
- - ρ_p

考虑入射炮弹和靶核相互作用擦去的中子数和质子数,对下式进行计算:

$$a_n = a \frac{N_P}{A_P} + a \frac{3R^2D}{(R+D)^3} \cdot P(b), \quad (8)$$

$$a_z = a \frac{Z_P}{A_P} - a \frac{3R^2D}{(R+D)^3} \cdot P(b), \quad (9)$$

碎片产物的电荷分布为:

$$\sigma(Z) = \sigma_{\text{disp}} \left(\frac{da}{db} \right) \frac{Z_P}{A_P} \left(1 + P(b) \frac{3R^2D}{(R+D)^3} a \right), \quad (10)$$

其中

$$\sigma_{\text{disp}} = \frac{2.619}{A_P^{1/2}} \left(\frac{\mu^2}{(1+\mu)^3} \right)^{1/4}, \quad \mu = 3J/(QA_P^{1/3}),$$

J 、 Q 分别为小液滴模型给出的两个参数:

$$J = 25.76 \text{ MeV}, \quad Q = 11.9 \text{ MeV}.$$

产生某一核素的截面不仅与相互作用核的几何截面有关,还与核子-核子碰撞截面及泡利原理的限制等因素有关。 $P(b)$ 是与碰撞相关的参量(因为核中质子与中子都有一部分),而 $\frac{3R^2D}{(R+D)^3}$ 为具有锐截止半径时中子皮的影响。至于核子-核子碰撞截面及泡

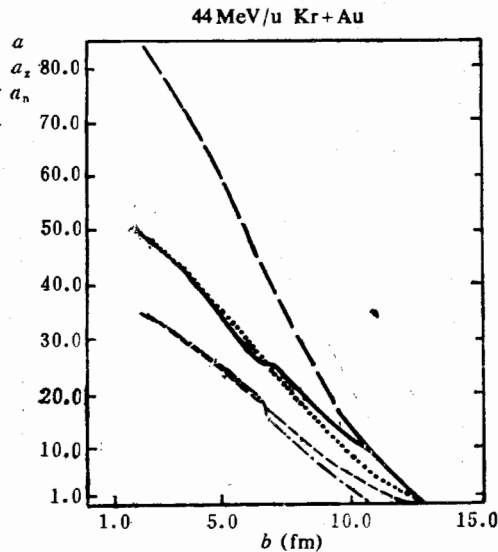


图 4 44 MeV/u $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应擦去的核子数、中子数、质子数和碰撞参数的关系

— A
 — N (加中子皮)
 - - - Z (加中子皮)
 - · - · Z -Guerreau
 · · · · · N -Guerreau

利原理等效效应反映在 a 内。对于同一系统,随着碰撞参数的不同, $P(b)$ 可以取不同值。原则上它可从擦碎模型中的方程精确解出。从几何的考虑出发,可认为当擦去的核子数为炮弹的一半时, $P(b) = 0$, 此时的碰撞参数为 $b_{1/2}$ 。当碰撞参数较大时,由于中子皮的存在,与不考虑中子皮效应时相比,将有更多的中子被擦去, $P(b)$ 的取值将大于零。可认为当擦去核子数约为炮弹 $1/4$ 时 $P(b)$ 为最大,并可定出 $b_{1/4}$ 的值。而随着碰撞参数的减小, $b < b_{1/2}$ 时,由于中子皮的存在,留在类弹碎片产物中的中子数将比没有考虑中子皮时留在碎片产物中的中子数多,此时 $P(b)$ 的取值将小于零。擦去核子约为炮弹的 $3/4$ 时, $P(b)$ 绝对值为极大,同时也可定出 $b_{3/4}$, 把 $P(b)$ 分别表成两个抛物线, $b > b_{1/2}$ 及 $b < b_{1/2}$ 时 $P(b)$ 的绝对大小作为两个参数来调节。

对于 44 MeV/u $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应,当 P 取为 -0.1 和 0.2 时,用上述模型计算得到的擦去中子数、质子数和总核子数随碰撞参数的变化曲线如图 4 所示,从图中可以看出,随

着碰撞参数的增大,中子皮的影响越来越大。

四、计算结果及讨论

用考虑中子皮的影响和一体耗散计算得到的 $44\text{MeV/u}^{40}\text{Ar} + {}^{181}\text{Ta}$ 反应产生的不同元素的同位素分布如图 5 所示。从图中看出,计算结果和实验符合得较好,对于该系统 P 的取值为 -0.03 和 0.07 。

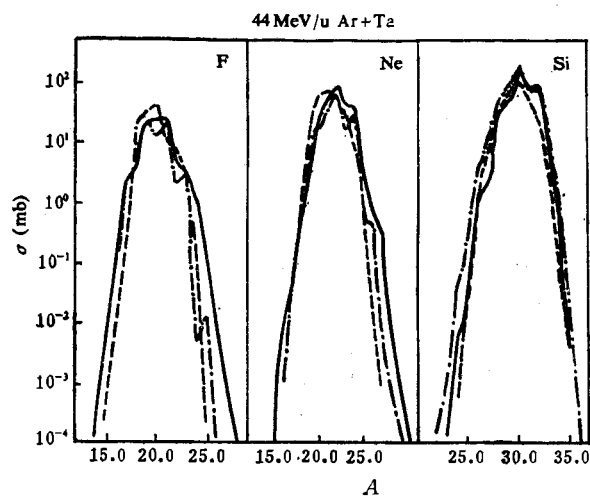


图 5 $44\text{MeV/u}^{40}\text{Ar} + {}^{181}\text{Ta}$ 实验和计算的同位素分布曲线

— Guerreau
 ---- 实验
 - · - 本工作

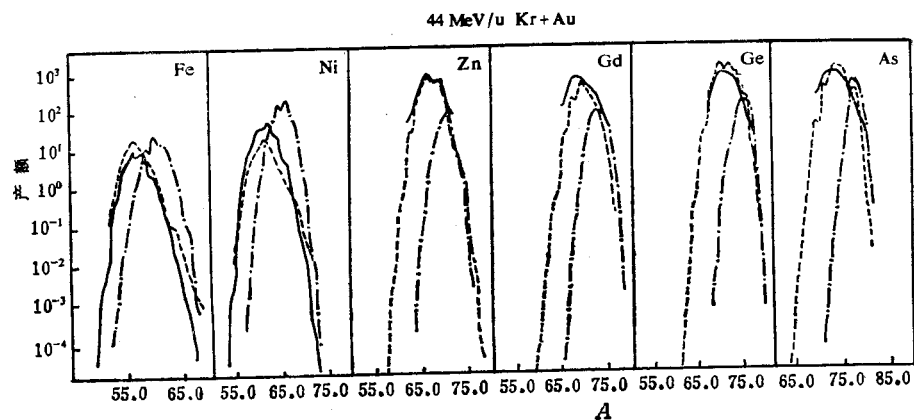


图 6 $44\text{MeV/u}^{86}\text{Kr} + {}^{197}\text{Au}$ 实验和计算的同位素分布产额曲线

— 实验
 - · - Guerreau
 ---- 本工作

用考虑了中子皮的影响和耗散使激发能增加两个因素,计算得到的 $44\text{MeV}/u^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应不同元素的同位素分布如图6所示。

由于我们不知道实验曲线覆盖的立体角,对 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 计算的同位素分布产额曲线为相对值,但对于不同元素用的是同一个归一值。由图上可见,我们的计算较好地拟合了实验测得的分布峰位及分布宽度。图中的点划线为 Guerreau 的计算值,它和实验的偏差较大,实验结果取自文献[7, 12]。

从上面的计算可以看出,中子皮厚度对中能区重离子周边反应同位素分布有一定的影响,对于越接近炮弹的碎片产物,中子皮的影响会越大。在考虑了中子皮厚度及耗散使激发能增加后,该计算能较好地 and 实验测得的同位素分布峰位及半宽度相符合,比 Guerreau 的计算有明显的改善。由于计算中没有考虑中子和质子的具体分布及核子-核子碰撞截面不同等因素,使得拟合参数 $P(b)$ 不能得到具体的解析式。另外由于实验上的困难,目前国际上测得的不同炮弹引起周边反应的同位素分布数据较少,使得该计算的普适性还需要进一步的实验来检验。

参 考 文 献

- [1] M. Langevin et al., *Phys. Lett.*, **150B**(1985), 71.
- [2] D. G. Muller et al., *Z. Phys.*, **A322**(1985), 415.
- [3] A. C. Muller et al., *Phys. Lett.*, **160B**(1985), 80.
- [4] W. Mittig et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1988), 1889.
- [5] I. Tanihata et al., *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 113C.
- [6] 冯军、沈文庆等,核技术,**13**(1990),385.
- [7] D. Guerreau, *J. D. Phys.*, **C4**(1986), 207.
- [8] A. Bonesera et al., *Nucl. Phys.*, **A463**(1987), 653.
- [9] W. D. Myers et al., *Ann. Phys.*, **84**(1974), 186.
- [10] 冯军 沈文庆 王柄等,高能物理与核物理,**13**(1989),459.
- [11] Shen Wenqing Wang Bin Feng Jun et al., *Nucl. Phys.*, **A491**(1987), 130.
- [12] D. Bazin., Thèse GANIL, France.

The Relation of Isotopic Distribution of Heavy Ion Peripheral Reaction Products to Neutron-Skin and Excitation Energy in Intermediate Energy Range

FENG JUN SHEN WENQING ZENG YUEWU WANG BING MA YUGANG
ZHAN WENLONG ZHU YONGTAI FENG ENPU

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

The relation of isotopic distribution of the heavy ion peripheral reaction products in intermediate energy range to neutron-skin and excitation energy has been studied. The thickness of neutron-skin predicated by the droplet model and empirical one-body dissipation in the intermediate energy range has been considered. The experimental isotopic distribution produced by ^{40}Ar and ^{86}Kr as projectiles in the intermediate energy can be reproduced by calculation.