

$30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中的 IMF 能谱*

苟全补 诸永泰 徐瑚珊 魏志勇 李松林 卢俊
张玉虎 王琦 江中和

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 测量了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar}$ 束流轰击 ^{115}In 反应靶时出射的中等质量碎片 (IMF) 的能谱. 通过比较在不同出射角度发射的同一种 IMF 的能谱, 得到了 IMF 的发射机制随出射角的演化关系. 在假定运动源速度和出射离子库仑位垒不随出射角变化的条件下, 通过改变发射源的强度和核温度参量完成了对实验测得能谱的运动源拟合, 并详细讨论了 3 个发射源所占份额和源强随出射角的演化关系.

关键词 中等质量碎片 能谱 运动源

1 引言

反应产物的能谱、元素分布和角分布通常被认为是标志核反应特征的几个主要物理量. 通过对出射碎片能谱、元素分布和角分布的分析, 人们可以了解到在中能重离子核反应中产生的各种物理现象和物理机制, 同时还可以在激发能和核温度比较高的情况下, 对核反应过程的统计性质、动力学性质和核物质的状态方程有进一步的认识^[1-3]. 能谱测量是研究中等质量碎片发射机制的主要途径之一. 本文为了研究费米能区重离子核反应中中等质量碎片的可能来源, 并以这些碎片为“探针”来探讨中能重离子碰撞过程中可能出现的反应机制以及所形成的核系统的衰变性质, 测量了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中出射的中等质量碎片能谱.

2 实验和实验数据分析

实验是在兰州重离子研究装置 (HIRFL) 的 TR4 实验终端上完成的. 所用束流是 30MeV/u 的 $^{40}\text{Ar}^{16+}$ 离子, 束流强度为 $40\text{--}80\text{nA}$. 反应靶为 ^{115}In 靶, 靶厚约为 1.5mg/cm^2 , 擦边角为 5.3° . 用 5 套多叠层粒子鉴别望远镜对反应产物进行了测量^[4-7].

1999-08-12 收稿

* 国家自然科学基金 (19235012) 和中国科学院九五重大 (KJ95T-03) 资助

2.1 实验测得的中等质量碎片能谱

图 1 和图 2 分别给出了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar}$ 轰击 ^{115}In 反应中在实验室系出射角 19° 和 60° 产生的中等质量碎片能谱随出射碎片原子序数演化的示意图. 从图 1 中可以看出, 随着原子序数 Z 的增大, 在能谱中间出现了一个比较明显的下陷点区, 这是因为在 $\text{Si}(\Delta E)$ 半导体探测器和 $\text{CsI(Tl)}(E)$ 闪烁探测器之间存在一个死层(封装铝箔)的缘故. 图 2 中 Li 元素的能谱后沿出现了一个台阶, 这是由于能量较高的一部分 Li 离子穿透 E 半导体探测器所致. 在实验室系角度 $\theta_{\text{Lab}} = 60^\circ$ 处出射的中等质量碎片能谱都有一个长的高能尾巴, 带有耗散碰撞的特征. 随着出射碎片原子序数的增大, 中等质量碎片的能谱峰位逐渐后移、能谱高度逐渐下降, 而且能谱的低能端的阈下丢失的部分越来越多.

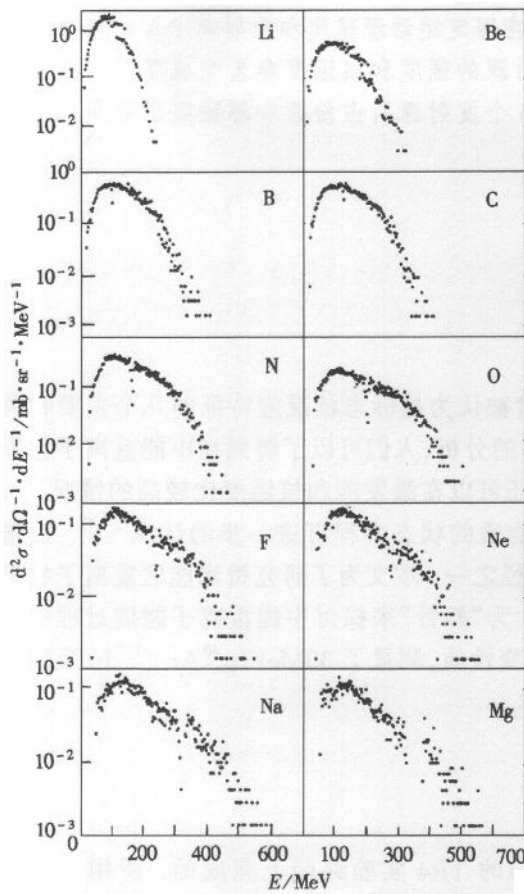


图 1 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应在实验室系 19° 出射的中等质量碎片能谱

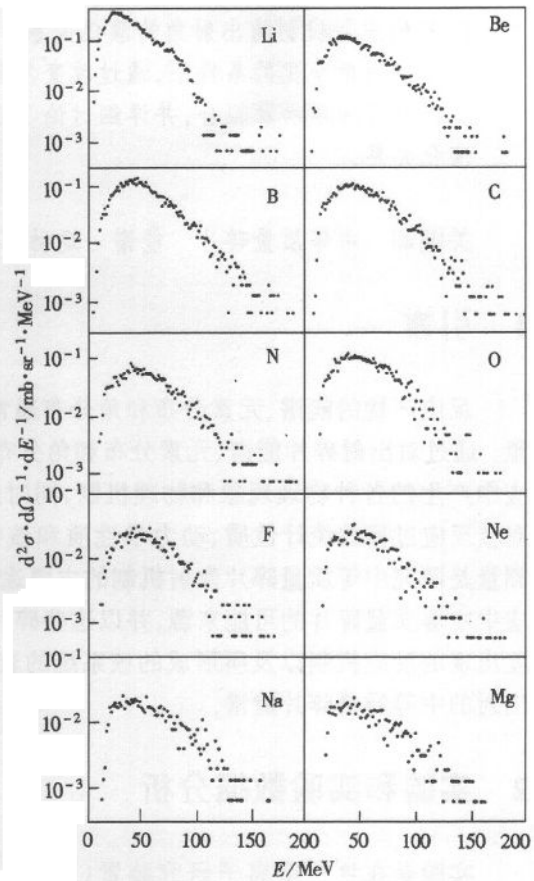


图 2 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应实验室系 60° 出射的中等质量碎片能谱

在中角区中等质量碎片的能谱不象碎裂反应那样是对称的高斯分布形状, 也不象平衡发射那样是纯的麦克斯韦分布, 而是能谱宽度有所展宽并且带有高能尾巴(这是中能重离子碰撞过程中非平衡发射的中等质量碎片的能谱特征). 在实验室系 19° 测得的能谱存在明显的两种成份, 能量较高的那部分出射碎片能谱(能谱的高能尾巴)在总能谱中所占

份额比较大;而在实验室系 60°测得的能谱中,能量较低的那部分出射碎片能谱(能谱的低能成份)在总能谱中占有绝大多数份额。

图 3 给出了 30MeV/u⁴⁰Ar 轰击 ¹¹⁵In 反应中出射碎片能谱随出射角演化的示意图。对于同一种出射碎片 Be,如果出射角不同,那么出射碎片的最可几能量、微分截面和能谱后沿斜率就明显不同。后角区的出射碎片能谱成份比较单一,主要来自于中心碰撞中形成的类靶源;中角区的出射碎片能谱成份比后角区的出射碎片能谱成份要复杂一些,这些出射碎片至少来自两种不同的发射源。与此同时,由图还可以看出,能谱随出射角变化的系统性很好。随着出射角度由大变小能谱从里向外层层展开,出射角度越小,能谱高度越高、能谱峰位越靠后,中等质量碎片的出射能量越大。对出射碎片能谱的进一步分析需要借助于理论模型。

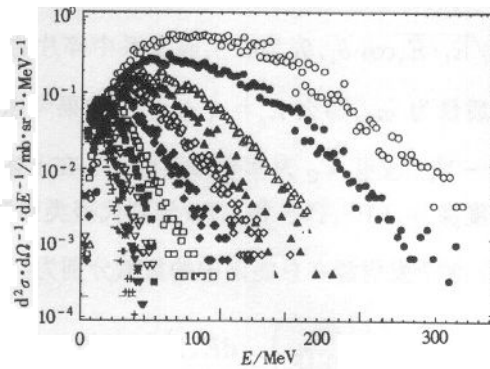


图 3 30MeV/u⁴⁰Ar + ¹¹⁵In 反应中出射的 Be 元素能谱
 ○19°, ●27°, ▲39°, ◆45°, ◇60°, ◆70°, □80°,
 ●90°, ○100°, ▼110°, ◆120°, ◆130°, 140°.

2.2 运动源模型分析

在中能区,描述中等质量碎片发射源最常用的理论模型是运动源模型,通常也叫三源模型^[2,3,8,9]。它假设中等质量碎片来自于三种成份:类弹源成份、类靶源成份和中速源成份。类弹源成份来源于弹核碎裂反应,主要贡献于前角区。在擦边角附近还有转移反应的贡献。来自于弹核碎裂反应的中等质量碎片能谱(或速度谱)峰位略低于束流单核子能量(或束流速度)、质量小于并接近弹核质量;类靶源成份来源于弹核和靶核的非完全熔合反应,主要贡献于后角区,其能谱成麦克斯韦分布;中速源成份来源于反应过程中形成的非平衡发射源,主要贡献是在中角区,其能谱不仅能谱宽度有所展宽而且带有高能尾巴。

类弹源的形式为^[10,11]:

$$\left(\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE_i} \right)_{LPS} = N_{LPS} \sqrt{A_f \cdot E_i} \exp \left[-\frac{A_f}{\sigma_f^2} (E_i - E_s - 2\sqrt{E_i E_s} \cos\theta_i) \right],$$

这里 A_f 为出射碎片的质量数, E_i 为出射碎片在实验室系中的能量, E_s 为碎片 A_f 以源速度 v_s 运动时所具有的能量, σ_f 为碎片的动量分布宽度,

$$\sigma_f^2 = \sigma_0^2 \frac{A_f (A_p - A_f)}{A_p - 1},$$

这里 σ_0 为约化动量分布宽度,它与核内核子的费米动量相关,我们通过拟合实验能谱得到它; A_p 为入射弹核质量数。

中等速度源选用体发射形式^[2,3,12]:

$$\left(\frac{d^2 \sigma}{dE_i d\Omega} \right)_{IVS} = N_{IVS} \sqrt{E_i} \exp(-E_i / T_{IVS}).$$

类熔合源选用的是面发射形式^[9,12]:

$$\left(\frac{d^2\sigma}{dE_i d\Omega}\right)_{LTS} = N_{LTS} \sqrt{E_i \cdot E'} \exp(-E'/T_{LTS}), \quad (4)$$

在(3)式和(4)式中, E' 为在源静止坐标系中出射碎片的能量. $E' = E_i + E_s - 2\sqrt{E_i \cdot E_s} \cos \theta_i$, θ_i 为在实验室系中碎片的出射角度. 如果发射源的运动速度为 v_s , 碎片的质量为 m_i , 那么 $E_s = \frac{1}{2} m_i v_s^2$. 如果考虑库仑修正, 就要把(3)式和(4)式中的 E_i 换成 $E_i - V_C$, 这里 V_C 为库仑修正因子. 在上述公式中 N_i 和 T_i 分别为 3 个源的强度因子和温度参数, LPS, IVS 和 LTS 分别代表类弹源、中速源和类靶源.

3 个发射源在总能谱中的贡献分别为: $\sigma_{LPS} = \int \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_{LPS} dE$, $\sigma_{IVS} = \int \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_{IVS} dE$ 和 $\sigma_{LTS} = \int \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}\right)_{LTS} dE$. 发射源的总贡献为 $\sigma_{tot} = \sigma_{LPS} + \sigma_{IVS} + \sigma_{LTS}$.

三源拟合实际上是一个多参数拟合, 对于中能重离子碰撞产生的中等质量碎片, 在前角区和中角区, 用三源模型拟合某个出射碎片的能谱通常能拟合得很好, 但是拟合能谱所用的参数具有很大的不确定性. 如果要对某一个出射碎片从前角区向后角区沿着出射角这个维度进行拟合并保持拟合参数的系统性是不容易的. 后角区的出射碎片主要来自于弹核和靶核的非完全熔合, 可以用一个类靶源来拟合. 但是, 由于后角区出射碎片的能量比较低, 受到探测器能量阈的限制, 能谱往往测不全, 实验中我们选用能量阈比较低的气体电离室探测器望远镜重点测量中、后角区的出射碎片, 使这个缺陷在很大程度上得到了弥补. 本文先用单源模型拟合在角度最大的地方测得的出射碎片能谱. 以此为基础沿着角度减小方向向前推进, 把发射源数目增加到 2 个、3 个.

图 4 给出了实验测得的 Li 元素能谱及其运动源拟合结果, 很明显, 在实验室系出射角 140° , 类靶源对实验结果的描述是比较成功的. 我们假设类靶源发射同一种离子的库仑能和发射源运动速度与出射角无关, 把可调参数进一步减少, 然后拟合在实验室系出射角 130° , 120° 和 110° 测得的中等质量碎片能谱. 拟合结果表明, 在实验室系出射角 130° 和 120° , 单个类靶源对实验结果的描述也比较成功, 但是在出射角 110° 就有点勉强, 需要

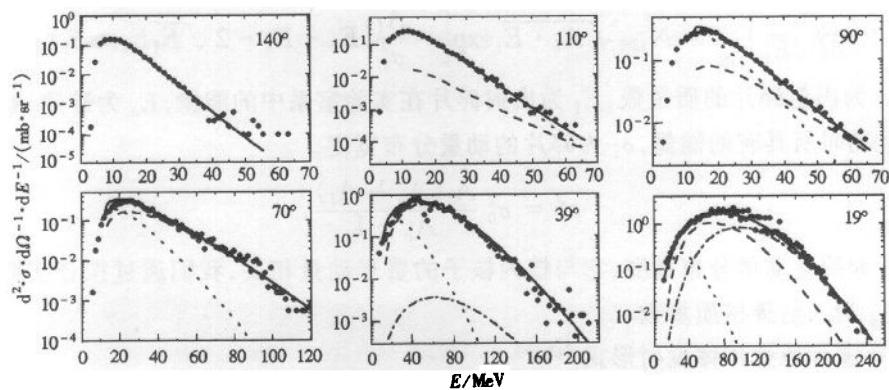


图 4 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应中测得的 Li 元素能谱

●实验数据,类靶源, - - - 中速源, - · - · 类弹源, ——三源之和.

考虑中速源的贡献. 随着出射角逐步减小, 能谱峰位逐步移向高能端, 出射碎片能量逐步增大, 类靶源在拟合中所占份额逐步减小, 中速源在拟合中所占份额逐步增大. 在实验室系出射角 60° 处的能谱和 100° 处的能谱相比, 不仅峰位明显移向高能端, 而且形状也明显不一样. 在实验室系出射角 39° 处中速源占有很大份额. 在实验室系出射角 27° 处仅靠类靶源和中速源已经无法较好地拟合实验数据, 必须再加上一个类弹源.

图 5 给出了拟合实验测得的 Li, Be, B 和 C 元素的能谱时, 得到的 3 个发射源的源强 (N_i) 和各个发射源所占份额 ($\sigma_i/\sigma_{\text{ex}}$) 随出射角 θ_i 的变化关系. 从图 5 中可以看出, 3 个源所占份额随出射角增大, 类靶源的贡献越来越大, 直到其所占份额为 100%; 中速源的贡献随着出射角增大呈“钟罩”形变化, 在前角区和后角区比较小, 在中角区比较大, 在 40° 附近占有绝对优势; 类弹源只贡献于小于 40° 的小角区, 随着出射角增大具有单一下降的趋势. 发射源强度随出射角的变化规律同 3 个源所占份额随出射角的变化规律有着相似之处. 随着出射角增大, 类靶源的源强起先缓慢增长, 到 40° 附近开始快速增长, 至 110° 以后渐渐趋于平坦; 中速源的源强随着出射角增大呈“钟罩”形变化, 在 80° 附近出现极大值; 类弹源的源强随着出射角增大具有单一下降的趋势.

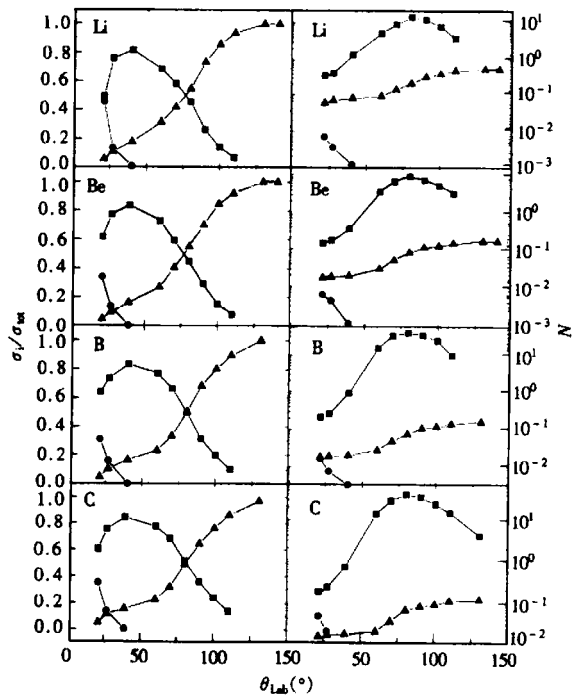


图 5 各源所占份额(左)和强度(右)随出射角的变化规律
—○— LPS, —■— IVS, —▲— LTS.

3 结果与讨论

本工作得到了出射碎片能谱随出射角演化的关系; 对于同一种出射碎片, 在出射角比较大的地方, 能谱成份比较单一, 随着出射角度由大变小, 中等质量碎片能谱成份逐步变得复杂, 出射角度越小, 能谱高度越高、能谱峰位越移向高能端, 碎片的出射能量越大; 在中后角区, 随着出射碎片电荷数由小变大, 能谱峰位逐渐向高能端移动、峰高度逐渐下降.

在假定运动源速度和出射离子库仑位垒不随出射角变化的条件下, 通过改变发射源的强度和核温度参数完成了对实验测得的 IMF 能谱的运动源拟合. 对于 Li, Be, B, C, N 元素运动源模型给出的结果和实验结果吻合得很好, 但是对于比较重的元素, 实验结果并不能完全用运动源模型来描述. 进而指出了运动源模型的限制性.

后角区中等质量碎片的来源与前角区和中角区相比要简单得多. 它是研究热核衰变性质的重要能区. 对于 30 MeV/u⁴⁰Ar + ¹¹⁵In 反应, 在实验室系 120° 以后, 出射碎片能谱

可以用单源模型拟合.

由中能重离子碰撞中发射的中等质量碎片能谱分析可见中能区核反应机制的复杂性. 在不同的角区,起主要贡献的反应机制不同,从后角区的类似于低能重离子碰撞中的类熔合源到中角区的高激发的高速源再到类似于高能重离子碰撞中的类弹源,它们同时存在,互相竞争,反映了中能区核反应机制的过渡性质.

参考文献 (References)

- 1 Sokolov A et al. Nucl. Phys. ,1993, **A562**:273—300
- 2 Wile J L et al. Phys. Rev. ,1992, **C45**:2300—2319
- 3 WU H Y et al. Nucl. Phys. ,1997, **A617**:385—394
- 4 XU H S et al. Nucl. Sci. and Tech. ,1996, **7**:198—201
- 5 GOU Q B et al. China Phys. Lett. ,1999, **16**:95—97
- 6 GOU QuanBu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese),1999, **23**(4):328
(苟全补等. 高能物理与核物理,1999, **23**(4):328)
- 7 GOU QuanBu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese),1999, **23**(6):512
(苟全补等. 高能物理与核物理,1999, **23**(6):512)
- 8 Borderie B et al. Z. Phys. ,1984, **A318**:315—321
- 9 QIAN Tao et al. Chin. Phys. Lett. ,1998, **15**:255
- 10 Goldhaber A S. Phys. Lett. ,1974, **53B**:306—308
- 11 Guerreau D. Nucl. Phys. ,1985, **A447**:37c—66c
- 12 Fields D J et al. Phys. Rev. ,1984, **C30**:1912—1923

Energy Spectra of Intermediate Mass Fragments Emitted in 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ Reaction *

GOU QuanBu ZHU YongTai XU HuShan WEI ZhiYong LI SongLin
LU Jun ZHANG YuHu WANG Qi JIANG ZhongHe

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The energy spectra of intermediate mass fragments (IMF) emitted in 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ reaction has been measured. After analyzed the energy spectra of the same kind of IMF emitted at different angles, the dependence of emission mechanism of IMF on the emission angles has been obtained. Assumed that the speed of the moving sources and the Coulomb energies do not change with the emission angles, the moving sources fitting of the measured energy spectra have been completed by changing the intensities and the temperature parameters of the emission sources. The evolution of the portions and intensities of three different emission sources as a function of the emission angles has been discussed.

Key words intermediate mass fragment, energy spectra, moving source

Received 12 August 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19235012) and Major Subject of The Chinese Academy of Science (KJ95T-03)