

35MeV/u $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中类弹产物的 同位素分布特性*

肖志刚¹⁾ 靳根明 吴和宇 胡荣江 王宏伟 李祖玉
段利敏 王素芳 魏志勇 张保国 刘建业 诸永泰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 测量了 35MeV/u $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中 5.3° 处类弹产物的同位素分布, 观察到随着出射动能的增加, 产物的平均中质比逐渐减小而接近弹核的平均中质比. 同位旋相关的量子分子动力学计算表明, 随着反应时间的增加, 类弹产物的平均出射动能逐渐减小而平均 N/Z 值则逐渐增大. 另外, 碰撞参数也影响类弹产物的同位素组成: 随着碰撞参数的减小, 类弹产物的平均 N/Z 值减小.

关键词 类弹 同位旋 同位旋相关的量子分子动力学 同位素组成

1 引言

中能反应中的中等质量碎片 (IMF) 测量有助于人们深入理解碰撞的动力学过程以及高激发核的形成衰变机制. 对 IMF 的动能, 角分布, 电荷分布和小角关联函数的测量和研究表明, 在很宽的时间范围内, 即从碰撞早期的非平衡过程到热核的统计发射过程都可能发射 IMF^[1]. 近期, 重离子碰撞中的同位旋效应引起人们的广泛兴趣, 对 IMF 的同位素组成 (即中质比 N/Z) 的测量和研究有助于提供更丰富的有关碰撞动力学、核物质的相变性质以及热核衰变性质的同位旋效应等方面的信息^[2-5].

研究表明, 在低能核反应中, 同位旋自由度是最快达到平衡的自由度^[6-8]. 随着入射能量的升高, 动能弛豫和同位旋弛豫时间均减小, 由于两体碰撞效应, 前者可能减小得更快. 因此, 在中高能区, 各种自由度弛豫的图像就变得相对复杂. 在实验上, IMF 的同位素组成是研究这一类问题的良好探针. 然而, 实验中所测量到的 IMF 产生于何种反应机制, 来自何种发射源, 在不同的实验条件下都是有差异的, 因此, 目前对这一问题的回答和解释并不统

一. Lozhkin 等人在中高能轻核引起的反应中, 在较大角度测量到的 IMF 发射的同位旋效应可以由统计模型加以解释, 意味着复合体系已经达到同位旋平衡^[9]. 但是, 最近更多的实验似乎并不支持这样的结论. Yennello 等人在 45MeV/u $^{40}\text{Cl}/^{40}\text{Ca}/^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}/^{58}\text{Fe}$ 等几个具有相同系统质量的反应中, 测量了实验室系 40° 处由中心碰撞产生的复杂碎片, 发现当入射能量升高到一定值的时候, 尽管入射能和体系的总质量相同, 但这些碎片的同量异位素产额比并不是简单地依赖于系统 N/Z 值, 还和弹靶组合有关, 由此认为 IMF 发射时, 复合系统的同位旋自由度并未达到平衡^[10,11]. 然而, 对于这种实验结果, Trautmann 等人却给出另外的解释, 认为 IMF 来源于一个同位旋平衡的复合源, 只不过这个复合源仅仅是弹核和部分靶核的复合体系, 因此, 测量的 IMF 的 N/Z 值不一定正比于整个系统的 N/Z 值^[12]. 理论上, 基于同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 的计算表明, 在入射能量高达 50MeV/u 的中心碰撞过程中, 动能弛豫的时间比同位旋弛豫时间小, 以至弹靶体系的同位旋自由度不能达到平衡^[13-15].

目前, 在费米能区下普遍为人们接受的重离子

2002-09-24 收稿

* 中国科学院百人计划, 国家重点基础研究发展规划 (G2000077401), 中国科学院知识创新工程 (KJ9X2-N11, KJ9X2-SW-N02) 和国家自然科学基金 (10175081, 10175080, 10205020) 资助

1) E-mail: xiaozg@impcas.ac.cn

碰撞图像是:随着碰撞参数和入射能量的增加,发射时间变短.在中心或近心碰撞中,IMF的发射在弹靶体系同位旋自由度平衡之前,随着碰撞参数的增加,在近周边或周边碰撞过程中,由于作用时间变短,出射产物的 N/Z 值可能带有同位旋自由度非平衡成分.人们甚至在入射能高至 65MeV/u 的反应中依然观测到明显的 DIC 现象^[16].在中能区,由于反应机制比较复杂,因此,分别研究反应时间和碰撞参数等对出射产物的分布特性的影响,将有助于人们深入了解重离子碰撞过程中的同位旋弛豫情况.本文分析了 $35\text{MeV/u}^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中前角出射产物的同位素产额比随粒子出射动能的变化关系,并基于同位旋相关的量子分子动力学,讨论了反应时间和碰撞参数分别对产物 N/Z 值的影响.

2 实验安排

实验是在兰州重离子加速器的大筒型散射室中进行.束流能量为 35MeV/u ,靶子选用 ^{124}Sn 稳定同位素靶.其厚度为 1.57mg/cm^2 ,纯度 84% .从 5.3° — 165° 分别摆放了 11 块粒子望远镜.同时在前角区以束流为轴对称地摆放了 6 块平行板雪崩计数器 (PPAC) 测量余核.为了研究粒子发射时标的同位旋效应,在 23° 放置了一套 13 单元的粒子望远镜阵列,以测量小角关联的出射粒子.位于 5.3° 的粒子望远镜由两块金硅面垒型探测器加一块锂漂移探测器组成,厚度分别为 $350, 500$ 和 $3500\mu\text{m}$,距离靶 120cm ,立体角为 0.05msr ,用来测量反应中耗散弹核碎裂产物.图 1 显示该探测器的粒子分辨图,由图可见,从 Li 至 F 的各种同位素能够非常清晰地鉴别,本文主要讨论的便是该望远镜的单举测量结果.

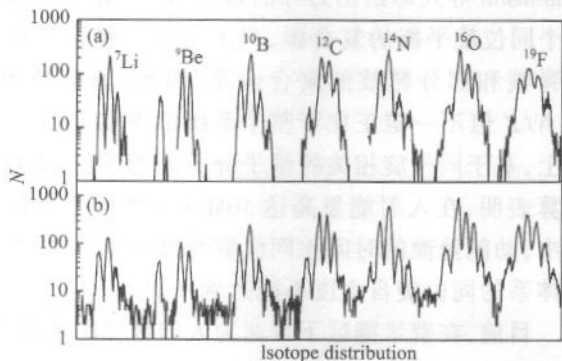


图 1 5.3° 处望远镜 $\Delta E_1 - \Delta E_2$ (a) 和 $\Delta E_2 - E_2$ (b) 散点图线性化后的同位素分布

3 实验结果

同位素产额比在此定义为:对于同一种元素,某种丰中子或缺中子的同位素与它的稳定同位素的产额之比.图 2 显示了 $^{36}\text{Ar} + ^{112}\text{Sn}$ 反应中 5° 处出射的 $3 \leq Z \leq 9$ 的类弹碎片同位素产额比随碎片每核

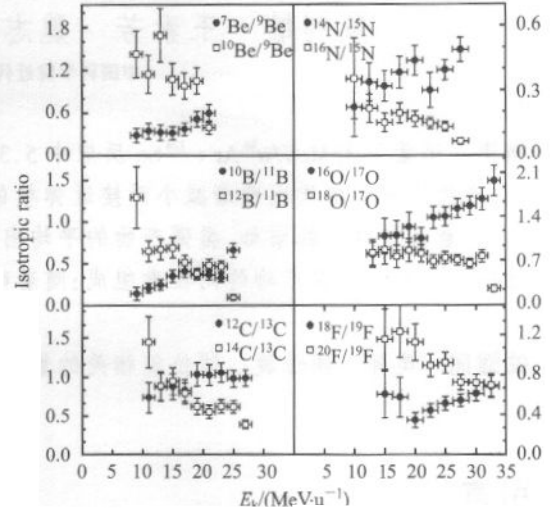


图 2 同位素产额比随出射动能的变化

子动能的变化关系.这些元素的能谱都有非常大的展宽,说明在这些粒子出射时经过了不同程度的耗散.从图中可以看出,对于丰中子同位素,如 ^{10}Be , ^{11}B , ^{13}C , ^{16}N , ^{20}F 等,它们的同位素产额比随能量的升高而减小,对于缺中子同位素,如 ^7Be , ^9B , ^{11}C , ^{14}N , ^{18}F 等,它们的同位素产额比随能量的升高而增加,这种变化趋势说明随着能量的升高,类弹粒子的发射更趋向于少中子的核素. $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中也有类似的现象.这种变化趋势将导致产物的平均中质比具有明显的能量依赖关系.图 3 进一步显示从 Be 至 F 6 种元素的平均中质比随碎片每核子动能的变化关系.图中 $\langle N/Z \rangle$ 定义为:

$$\langle N/Z \rangle = \frac{\sum_i Y_i \cdot N_i}{\sum_i Y_i \cdot Z}, \quad (1)$$

式中 N_i 和 Y_i 分别为核电荷数为 Z 的某种同位素 i 的中子数和产额,求和遍及 Z 的所有测量到的同位素.由图可见,在低能端,平均中质比较大,而高能端,平均中质比偏小,接近弹核的 N/Z 比.

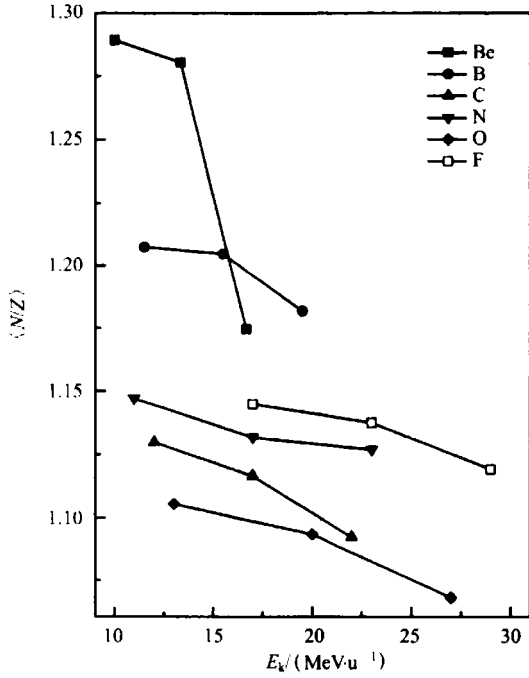


图 3 从 Be 至 F 各种元素平均中质比随动能的变化

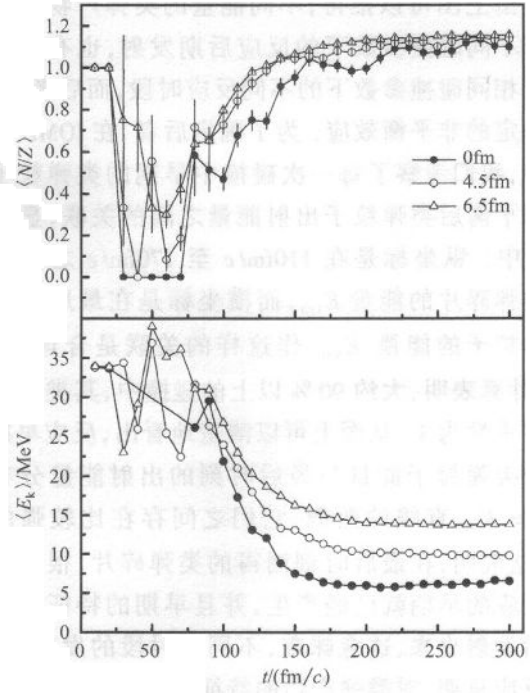


图 4 类弹粒子的平均动能和平均中质比随反应时间的演化

4 IQMD 模型分析

为什么类弹产物的平均 N/Z 值有如此明显的动能相关性? 这种动能相关性是否带有同位旋弛豫的信息? 类弹出射时弹靶体系的 N/Z 值是否达到平衡? 由于我们的实验结果是对各种碰撞参数的平均, 因此, 在回答上述问题时, 除了要研究碰撞过程的动力学特性之外, 还必须探讨不同碰撞参数对类弹产物 N/Z 值的影响. 为此, 采用 IQMD 模型, 系统研究了在各种碰撞参数下出射产物的平均中质比随反应时间和出射动能的变化关系. IQMD 模型所考虑的同位旋效应可以参见文献 [17—20]. 在计算中, 为了和实验结果比较, 同时考虑到统计因素, 挑选出射角度满足 $0^\circ < \theta < 30^\circ$, 电荷数满足 $3 \leq Z \leq 9$ 以及动能满足 $E_k < 35 \text{ MeV/u}$ 的类弹产物进行分析.

图 4 显示类弹碎片的平均中质比和平均动能随反应时间的变化关系. 从图中可以看出, 在反应的早期, 两核从远离到逐渐接近的过程中, 由于极稀少的随机核子-核子碰撞, 类弹粒子的产生几率、平均中质比及平均动能都出现很大的涨落. 但当反应进行到 70—80 fm/c 之后, 产物的平均中质比和平均动能均出现较好的系统性. 此后, 随着时间的推移, 或耗散程度的加深, 类弹碎片的出射动能逐渐减小, 同时由于核子在双核系统之间的交换, 靶核中的剩余中子扩散到弹核, 使得类弹碎片的平均中质比逐渐

增加. 在约 180 fm/c 时, 平均动能和平均中质比均趋于平衡. 从图上还可以看到, 这种变化趋势在各种碰撞参数下是相似的, 只不过平衡时刻其平均动能和 N/Z 比的值有一定差异. 在中心碰撞中, 由于碰撞剧烈, 耗散程度比较深, 类弹碎片在耗散之后的剩余能量最小, 而随着碰撞参数的增大, 出射动能增加. 而对于平均中质比, 当碰撞参数较小时, 尽管靶核参与程度深, 但由于碰撞更激烈, 更多的中子以自由核子或轻粒子形式发射出去, 导致平衡时刻类弹产物的平均 N/Z 比反而偏小, 这与最近的实验结果是一致的.^[3]

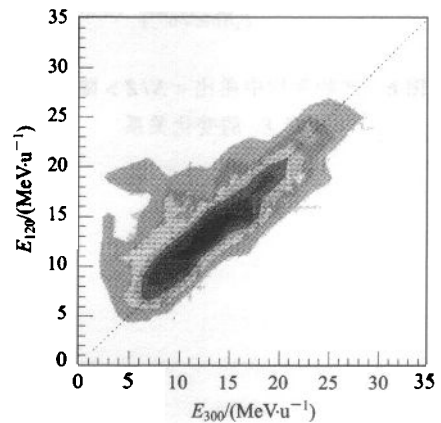


图 5 类弹粒子在反应早期(110—170fm/c)的动能与反应晚期(300fm/c)的动能关联图

由上图可以推得,不同能量的类弹产物可能产生于不同碰撞参数下的反应后期发射,也有可能来源于相同碰撞参数下的不同反应时段,而后者,则带有一定的非平衡效应.为了确定后者,在 IQMD 的计算中,我们考察了每一次碰撞中早期的类弹粒子能量和平衡后类弹粒子出射能量之间的关联,显示在图 5 中.纵坐标是在 $110\text{fm}/c$ 至 $170\text{fm}/c$ 之间形成的类弹碎片的能量 E_{120} ,而横坐标是在最后时刻的类弹粒子的能量 E_{300} ,作这样的关联是合理的,因为,计算表明,大约 90% 以上的碰撞中,其类弹粒子的多重性为 1.从图上可以清楚地看出,反应早期形成的类弹粒子能量与最后时刻的出射能量分布在 $E_{120} = E_{300}$ 直线的两侧,它们之间存在着比较强的关联,这表明,在最后时刻测得的类弹碎片,很有可能在反应的早期就已经产生,并且早期的特征保留到最后发射出来,这意味着,不同的时段的发射,尤其是反应早期,对类弹产物的特征有显著影响.

图 6 显示在反应的最后阶段 ($300\text{fm}/c$ 时) 不同碰撞参数下的类弹碎片平均中质比随出射动能的关系, QMD 的计算呈现出两个分布特征, 1) 在某个固定的碰撞参数下,随着入射能量的减小,类弹产物的平均中质比逐渐增大,由图 4 的分析可知,这是反应

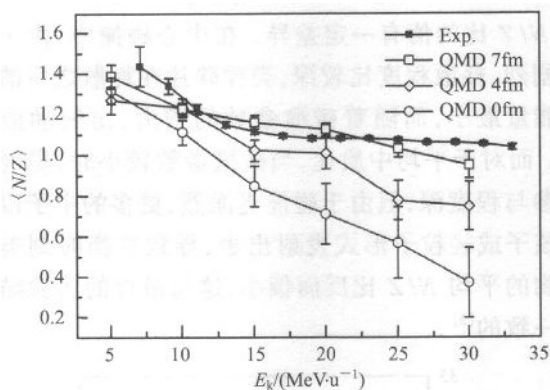


图 6 产物平均中质比 $\langle N/Z \rangle$ 随出射动能 E_k 的变化关系

不同时段的影响,即越早形成并出射的粒子,其 N/Z 值越小,更接近于弹核的 N/Z 值,而越晚形成出射的粒子,其 N/Z 值越大,更接近系统的 N/Z 值.这可能是同位旋没有达到平衡的表征. 2) 在不同的碰撞参数下,某个能量的类弹碎片其平均中质比也有一定的差异,在高端,不同碰撞参数之间的这种差异更大,而在低能端,这种差异逐渐变小.为了比较方便,将实验中测量的从 Li 至 F 各种产物的平均 N/Z 值也显示在图中.由图可见,在低能端,产物的平均 N/Z 值变化比较明显,是各种碰撞参数的平均结果,而在高能端,产物的平均 N/Z 值变化平缓,主要是周边碰撞的贡献.通过比较可知,在忽略二次衰变修正的影响下(这种修正对各种能量可以认为是接近的),产物 N/Z 值随能量的变化主要来自于两个因素: 1) 由于同位旋自由度在双核系统中的弛豫,不同时刻出射的粒子其 N/Z 值不同,越早出射的粒子,其平均中质比越接近于弹核,相应的能量也越大. 2) 不同碰撞参数时,出射的粒子,其 N/Z 值亦有差异.随着碰撞参数的减小,碰撞激烈程度增加,更多的中子将分配到自由度核子或轻粒子之中,使得出射的类弹产物的平均中质比随 b 的减小而减小.

5 小结

测量了 $35\text{MeV}/\text{u}$ $^{36,40}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中 5.3° 处类弹产物的同位素分布,观察到随着出射动能的增加,产物的平均中质比逐渐减小而接近弹核的平均中质比.同位旋相关的量子分子动力学计算表明,随着反应时间的增加,类弹产物的平均出射动能逐渐减小而平均 N/Z 值则逐渐增大.另外,碰撞参数也影响类弹产物的同位素组成:随着碰撞参数的减小,碰撞更趋激烈,更多的中子以自由核子的形式发射出去,从而导致类弹产物的平均 N/Z 值减小.

参考文献 (References)

- 1 HE Zhi-Yong, LI Zu-Yu, DUAN Li-Min et al. *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**:1312
- 2 Martin E, Laforest R, Ramakrishnan E R et al. *Phys. Rev.*, 2000, **C62**:027601
- 3 XU H S, Tsang M B, LIU T X et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**:716
- 4 MA Y G, SU Q M, SHEN W Q et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:024607
- 5 Dempsey J F, Charity R J, Soboka L G et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C54**:1710
- 6 Chiang T H, Guerreau D, Auger P et al. *Phys. Rev.*, 1979, **C20**:1408
- 7 Gatty B, Guerreau D, Lefort M et al. *Nucl. Phys.*, 1975, **A253**:511
- 8 Detraz C, Kienle P, Olimi A. *Nuclear Collisions from the Mean-Field into the Fragmentation Regime*, Elsevier Science Publishers, 1991, 67—95
- 9 Lozhkin O V, Trautmann W. *Phys. Rev.*, 1992, **C46**:1996
- 10 Yennello S J, Young B, Yee J et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B321**:15
- 11 Johnston H, White T, Winger J et al. *Phys. Lett.*, 1996, **B371**:186
- 12 Pochodzalla J, Trautmann W, *Chemical Equilibrium and Isotope Temperatures*. In: LI Bao-An, Udo Schröder W, *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies*, edited by Nova Sciences Publishers, 2001, 451—475
- 13 LI Bao-An, KO C M. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2065
- 14 CHEN L W, GEI X, ZHANG X D et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:211
- 15 LI Qing-Feng, LI Zhu-Xia. *Phys. Rev.*, 2001, **C64**:064612
- 16 Udo Schröder W, Jan Töke, *Dynamics of Heavy-Ion Collisions at Fermi Energies: Challenges and Opportunities*, In: LI Bao-An, Udo Schröder W, *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies*, edited by Nova Sciences Publishers, 2001, 451—475
- 17 Bertsch G F, Das Gupta S. *Phys. Rep.*, 1988, **160**:189—266
- 18 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shun-Jin et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**:975
- 19 LIU Jian-Ye, YANG Yan-Fang, ZUO Wei et al. *Phys. Rev.*, 2001, **C63**:054612
- 20 LIU Hang, LIU Jian-Ye. *Z. Phys.*, 1996, **A354**:311

Isotropic Distribution of the Projectile-Like Products in the Reaction $^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ at 35MeV/u^*

XIAO Zhi-Gang¹⁾ JIN Gen-Ming WU He-Yu HU Rong-Jiang WANG Hong-Wei LI Zu-Yu
DUAN Li-Min WANG Su-Fang WEI Zhi-Yong ZHANG Bao-Guo LIU Jian-Ye ZHU Yong-Tai
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The projectile-like products at 5.3° in the reaction $35\text{MeV/u } ^{36}\text{Ar} + ^{124}\text{Sn}$ were inclusively measured with good isotropic identification. With increasing kinetic energy, the average N/Z ratio of the products gradually decreases, approaching to that of the projectile. It is shown from the isospin dependent quantum mechanics (IQMD) that with the increasing of reaction time, the average kinetic energy of the projectile-like products decreases, while the N/Z ratio increases gradually. Moreover, the isotropic composition is obviously dependent on the impact parameter, and the N/Z ratio is becoming smaller with increasing collision centrality.

Key words projectile-like product, isospin, isospin-dependent quantum molecular dynamics isotropic composition

Received 24 September 2002

* Supported by 100 Persons Project of CAS, Major State Basic Research Development Program (G2000077401), CAS Knowledge Innovation Project (KJCX2-N11, KJCX2-SW-N02) and National Natural Sciences Foundation of China (10175081, 10175080, 10205020)

1) E-mail: xiaozg@impcas.ac.cn