

28.7MeV/u 的 $^{14,16,18}\text{O} + ^{7,9}\text{Be}$ 反应中的 同位素分布研究*

明照宇^{1,2} 张丰收^{1,2,4} 陈列文^{1,2} 朱志远^{1,3}
詹文龙² 郭忠言² 肖国青²

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4(中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 用同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程研究了在入射能量为 28.7MeV/u 下,不同弹核 ^{14}O , ^{16}O 和 ^{18}O 轰击不同靶核 ^7Be 和 ^9Be 的反应,计算了生成碎片的产生截面,发现用丰中子(缺中子)炮弹或丰中子(缺中子)靶进行反应,所得到的产物均有丰中子(缺中子)的碎片出现. 同位素分布宽度和峰位与入射体系密切相关,产生碎片的电荷数越接近入射弹核的电荷数,则同位素分布的宽度越大,峰位偏离 β 稳定线值越远,其同位旋效应越明显.

关键词 同位素分布 放射性核束物理 同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程

1 引言

长期以来,重离子束流都是通过对地球上存在的稳定的同位素进行加速而获得的,因此可以利用的重离子束种类是非常有限的,基本上是位于核素图上 β 稳定线及其附近的核素. 近年来,随着次级束流装置,如兰州重离子加速器国家实验室的 RIBLL 和正在建造的 CSR^[1],RIKEN 的 RIPS^[2],GSI 的 FRS^[3],GANIL 的 LISE,SISSI 和 SPIRAL^[4],MSU 的 A1200^[5] 相继建成并投入使用,使重离子物理的研究开辟了一个崭新的领域,即放射性核束(RNB)物理.

放射性核次级束流的产生和利用使核反应中的同位旋效应的研究成为可能,而放射性奇异核的结构及其衰变过程的研究,将检验和发展现有的原子核结构模型. 但是如何预言放射性核次级束流强度就成为一个十分重要的课题,由于核反应产生的同位素分布是进行这些研究的重要基础之一,因此对核反应产生的同位素分布^[6],特别是同位旋效应

2000-04-07 收稿

* 国家自然科学基金(19875068,19847002),国家重点基础研究发展规划(G2000077407)和中国科学院基金资助

对同位素分布影响的研究就具有重要的意义.

在以前的工作中,我们采用同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程 (IBLE)^[7] 研究了核素 ^{19}Na 在不同反应体系中的产生截面,并且初步讨论了同位旋效应对同位素分布的影响. 同现有的描述放射性核素引起反应的两种输运理论同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型^[8,9] 和同位旋相关的玻尔兹曼类型方程 (IBUU)^[10] 相比, IBLE 既有完善的理论基础,同时又包含了由多体关联导致的动力学涨落. 本文采用 IBLE 模型,通过对 $^{14,16,18}\text{O} + ^{7,9}\text{Be}$ 在 28.7 MeV/u 入射能量下的系统研究,给出了同位素生成截面与反应体系的弹靶相关性.

2 IBLE 模型

描述涨落的单粒子密度 $\hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 的 IBLE 模型为:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla_r - \nabla \cdot U(\hat{f}, \tau_z) \cdot \nabla_p \right) \hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = K(\hat{f}) + \delta K(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t), \quad (1)$$

方程的左边描述了由同位旋相关的平均场 $U(\hat{f}, \tau_z)$ 决定的 Vlasov 传播,右边是碰撞项 $K(\hat{f})$ 和碰撞项的涨落 $\delta K(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ ^[11-13]. 其中,

$$U(\hat{f}, \tau_z) = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{1}{2} (1 - \tau_z) V_C + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z, \quad (2)$$

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \int \hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}, \quad (3)$$

$$\rho_p(\mathbf{r}, t) = \int \hat{f}_p(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}, \quad (4)$$

$$\rho_n(\mathbf{r}, t) = \int \hat{f}_n(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}, \quad (5)$$

其中(2)式右面第一和第二项、第三、第四项分别是局域相互作用势、库仑相互作用势和对称能项. 式中 $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3}$, 即正常核物质的饱和密度; ρ , ρ_n 和 ρ_p 分别是总的、中子的和质子的密度; τ_z 是同位旋自由度的第 3 分量,对于中子和质子分别等于 1 和 -1. V_C 代表库仑势. 在本文的计算中,参数 α , β 和 γ 的选择将采用所谓的软势(不可压缩系数为 200 MeV),对称能强度系数 $C = 32 \text{MeV}$.

在碰撞项、泡利阻塞效应的计算中也考虑了同位旋效应. 碰撞项的涨落来自于关联效应,它并没有包含在碰撞项中,可由关联函数表征如下:

$$\langle \delta K(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, t_1) \delta K(\mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2, t_2) \rangle = C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \delta(t_1 - t_2), \quad (6)$$

这里的平均是对时间步长 δt 内涨落的单粒子密度来进行的. 关联函数 $\langle \delta K(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, t_1) \delta K(\mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2, t_2) \rangle$ 对空间和时间是局域的,和马尔可夫处理碰撞项一致.

通过对非线性的相对论平均场(RMF)理论的计算^[14],能够给出弹核与靶核中质子和中子密度分布. 数值求解 IBLE 方程原则上可以采用标准的求解随机微分方程的方法. 但是,要直接求解六维相空间分布的微分方程在目前还不可能. 另外,在适当的近似下可以描述密度涨落的粗糙性质. 我们采用投影法来模拟求解 IBLE 方程. 涨落被投影到动

量分布的局域多极矩上,即在动量空间展开时的第一和第二非零项,四极矩和八极矩. 这些涨落最终以局域的形式被加入动量分布本身,它足以描述密度涨落. 在本文的计算中,一个真实核子波包的试验粒子数取为 20,碰撞积分的求解是采用全系统技术来实现的. 对每一个碰撞系统,在参数从 1—8fm 时,模拟的总事件数为 3600.

3 结果和讨论

利用 IBLE 模型,首先研究了在入射能量为 28.7MeV/u 下,不同弹核 ^{14}O , ^{16}O 和 ^{18}O 轰击不同靶核 ^7Be 和 ^9Be 的反应中生成核素的产生截面 图 1(a),(b)和(c)给出不同弹

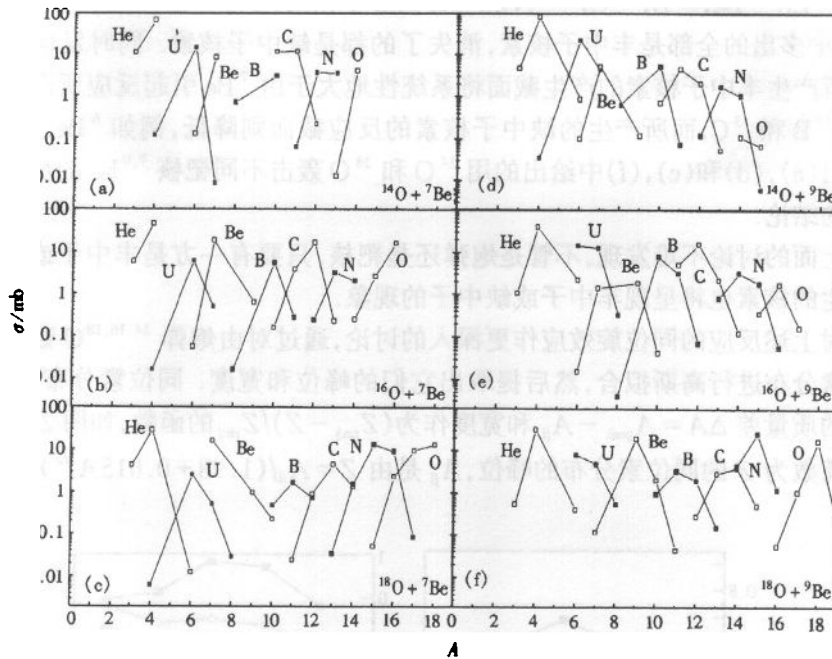


图 1 28.7MeV/u $^{14,16,18}\text{O} + ^{7,9}\text{Be}$ 生成核素的产生截面随同位素质量的变化关系
□ 偶数核同位素链的结果, ■ 奇数核同位素链的结果.

核 $^{14,16,18}\text{O}$ 轰击同一靶核 ^7Be 的反应. 从图 1(b)可以看出,在 He($Z=2$)到 O($Z=8$)区间中产生的核素有 $^{3,4}\text{He}$, $^{4,6,7}\text{Li}$, $^{6,7,9}\text{Be}$, $^{8,10,11}\text{B}$, $^{10-13}\text{C}$, $^{12-14}\text{N}$ 和 $^{14-16}\text{O}$,若不包括弹核和靶核的贡献,共 19 个核素. 而缺中子核 ^{14}O 轰击 ^7Be 生成的核素(图 1(a))与稳定核 ^{16}O 引起反应产生的核(图 1(b))相比,它有 ^{11}N 和 ^{13}O 两个新的缺中子核素产生,而少了丰中子核或稳定核 ^9Be , ^{11}B , ^{13}C , ^{14}N 和 $^{15,16}\text{O}$ 共 6 个核素. 同时可以看出丰中子核素的产生截面下降而丰质子核素的产生截面升高,例如 $^{4,7}\text{Li}$, ^6Be , ^8B , $^{10-12}\text{C}$, ^{12}N 和 ^{14}O ,这似乎表明缺中子弹核会导致缺中子核素的产生. 图 1(c)是丰中子炮弹 ^{18}O 轰击靶核 ^7Be 反应生成核素的产生截面,相比图 1(b)稳定核 ^{16}O 轰击靶核 ^7Be 有 ^6He , ^8Li , ^{10}Be , ^{12}B , ^{14}C , $^{15-17}\text{N}$ 和 $^{17,18}\text{O}$ 共 10 个丰中子核素生成,而缺中子核素产生截面减小, ^6Be , ^8B , ^{10}C , ^{12}N 和 ^{14}O 等 6 个缺中子核素没有生成,这是由于丰中子弹核引起反应所致.

从上面稳定核 ^{16}O 轰击 ^7Be 的反应结果分别与缺中子弹核 ^{14}O 和丰中子弹核 ^{18}O 轰击 ^7Be 的反应结果相比较来看,发现缺中子核素引起的反应(图 1(a)),更容易产生缺中子核素;丰中子核素引起的反应(图 1(c)),则更容易产生丰中子核素. 比较图 1 中不同情况下各核素产生截面的数值大小,不难发现,对于越是缺中子的反应系统,生成缺中子核素的产生截面数值越大,如图 1(a)中的 ^4Li , ^8B , ^{10}C 和 ^{12}N 等越是丰中子的反应系统,生成的丰中子核的产生截面数值越大,如图 1(c)中 ^{12}B 和 ^{13}C 等所示. 同样对图 1(d), (e)和(f)中给出的 $^{14,16,18}\text{O}$ 轰击 ^9Be 的反应,也可以得出同样的结论.

通过对同一稳定弹核 ^{16}O 轰击不同靶核 $^7,9\text{Be}$ (图 1(b)和(e))的反应进行分析发现,丰中子靶核 ^9Be 引起的反应所产生的核素比缺中子靶核 ^7Be 引起的反应所产生的核素多出 ^6He , ^8Li , ^{10}Be , ^{12}B , ^{14}C , $^{15,16}\text{N}$ 和 ^{17}O 共 8 个核素,少了 ^4Li , ^{10}C , ^{12}N 和 ^{14}O 等 4 个核素,其中多出的全部是丰中子核素,消失了的都是缺中子核素. 同时发现, ^9Be 为靶核的反应所产生丰中子核素的产生截面将系统性地大于由 ^7Be 引起反应所产生的,例如 ^7Li , ^9Be , ^{11}B 和 ^{13}C ,而所产生的缺中子核素的反应截面则降低,例如 ^6Be , ^8B , ^{13}N 和 ^{15}O . 对图 1(a), (d)和(c), (f)中给出的用 ^{14}O 和 ^{18}O 轰击不同靶核 $^7,9\text{Be}$ 的反应,也可以得出同样的结论.

通过上面的讨论不难发现,不管是炮弹还是靶核,只要有一方是丰中子或缺中子的,那么所产生的核素也将呈现丰中子或缺中子的现象.

为了对上述反应的同位旋效应作更深入的讨论,通过对由炮弹 $^{14,16,18}\text{O}$ 轰击 $^7,9\text{Be}$ 产生的同位素分布进行高斯拟合,然后提取出它们的峰位和宽度. 同位素分布的峰位与稳定同位素的质量差 $\Delta A = A_{\text{peak}} - A_{\beta}$ 和宽度作为 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的函数,如图 2 所示. 其中 A_{peak} 是电荷数为 Z 的同位素分布的峰位, A_{β} 是由 $Z = A_{\beta}/(1.98 + 0.015A^{2/3})$ 得到的稳定

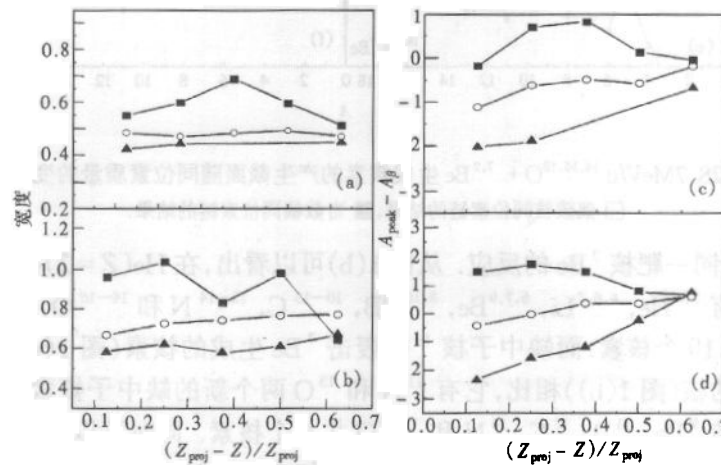


图 2 在 $^{14,16,18}\text{O} + ^7,9\text{Be}$ 反应中,所产生同位素分布的宽度((a), (b))和峰位与稳定同位素的质量差 $\Delta A = A_{\text{peak}} - A_{\beta}$ ((c), (d))随 $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 的变化关系

(a), (c): \blacktriangle $^{14}\text{O} + ^7\text{Be}$, \circ $^{16}\text{O} + ^7\text{Be}$, \blacksquare $^{18}\text{O} + ^7\text{Be}$;

(b), (d): \blacktriangle $^{14}\text{O} + ^9\text{Be}$, \circ $^{16}\text{O} + ^9\text{Be}$, \blacksquare $^{18}\text{O} + ^9\text{Be}$.

同位素的质量数. 在一定意义上, $(Z_{\text{proj}} - Z)/Z_{\text{proj}}$ 可以看作是 与核反应时间、耗散能量、激发能或碰撞参数(炮弹与靶相重叠的程度)相关的表征核反应强烈程度的物理量.

图 2(a) 和 (b) 分别给出 $^{14,16,18}\text{O}$ 轰击 ^7Be 产生的同位素分布宽度的比较. 从图中可以看出, 随着入射炮弹中子的增加, 所产生核素的宽度也依次增加, 其中 ^{18}O 入射引起反应产生核素的宽度最大, ^{14}O 则最小, 以 ^{16}O 为入射炮弹的居中. 比较后可以发现, 丰中子核引起反应所产生的核素个数将比由稳定核或缺中子所引起反应生成的核素个数要多. 值得注意的是, 在以 ^{18}O 为炮弹轰击 ^7Be 引起的反应中, Li 的同位素分布宽度相比 ^{14}O 和 ^{16}O 的要小一些, 这是由于对轻碎片产生地计算具有一些涨落所致.

图 2(c) 和 (d) 分别给出 $^{14,16,18}\text{O}$ 轰击 ^7Be 产生的同位素分布峰位与稳定同位素的质量差 $\Delta A = A_{\text{peak}} - A_{\beta}$ 的比较. 可以看出, 随着入射炮弹中子的增加产生核素的峰位中心值也依次增加, 其中奇异核 ^{18}O 和 ^{14}O 入射引起反应产生核素的峰位偏离稳定值最远, 以 ^{16}O 为入射炮弹的则较为接近于稳定值. 从中也可以发现, 随着质子数的增加, 同位素分布的峰位值偏离稳定值越远, 这说明生成核素和入射炮弹质子数越接近, 所生成同位素分布的峰位值偏离稳定值越远, 即它对是否奇异核入射将越敏感, 而和入射炮弹质子数相差较远的核素, 它的同位素分布的峰位值则对入射核的奇异性不敏感.

4 结论

利用 IBLE 分别对 $^{14,16,18}\text{O} + ^7\text{Be}$ 反应系统在 28.7 MeV/u 入射能量下的反应进行了研究, 从对各种核素产生截面的比较中可以发现, 丰中子核(缺中子核)引起的反应, 产生丰中子核(缺中子核)的几率将更大. 通过对生成同位素分布宽度和其峰位的研究发现, 反应中新产生的核素随它与入射炮弹的质子数差的增加, 而对入射核奇异性的敏感度降低, 这些结果对在实验中如何选择炮弹来产生所需的放射性核束具有一定的指导意义.

参考文献(References)

- 1 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, LIU Guan-Hua et al. *Science in China*, 1999, **42**(5):528—536
- 2 Kubo T. *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, 1992, **B70**:309—319
- 3 Geissel H. *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, 1992, **B70**:286—297
- 4 Mueller A C, Anne R. *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, 1991, **B56/57**:559—563
- 5 Sherrill B M. *Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res.*, 1991, **B56/57**:1106—1110
- 6 FANG De-Qing, SHEN Wen-Qing, FENG Jun et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(4):267—269
- 7 MING Zhao-Yu, ZHANG Feng-Shou, CHEN Lie-Wen et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* 2000, **24**(7):656—661(in Chinese)
(明照宇, 张丰收, 陈列文等. *高能物理与核物理*, 2000, **24**(7):656—661)
- 8 CHEN Lie-Wen, ZHANG Feng-Shou, JIN Gen-Ming. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**(4):2283—2291
- 9 ZHANG Feng-Shou, CHEN Lie-Wen, MING Zhao-Yu et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**(12):064604
- 10 LI B A, Ko C M, Bauer W. *Inte. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**(2):147—229
- 11 ZHANG Feng-Shou, Surand E. *Phys. Rev.*, 1995, **C51**(10):1201—1210
- 12 ZHANG Feng-Shou, Surand E. *Phys. Lett.*, 1993, **B319**:35—41
- 13 ZHANG Feng-Shou, GE Ling-Xiao. *Nuclear Multifragmentation*. Beijing: Chinese Science Press, 1998 (in Chinese)

(张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京: 科学出版社, 1998)

14 ZHU Zhi-Yuan, SHEN Wen-Qing, CAI Y H et al. Phys. Lett., 1994, B328:1-8

Isotopic Distribution in Reactions of $^{14,16,18}\text{O} + ^7,9\text{Be}$ at 28.7 MeV/u *

MING Zhao-Yu^{1,2} ZHANG Feng-Shou^{1,2,4} CHEN Lie-Wen^{1,2} ZHU Zhi-Yuan^{1,3}
ZHAN Wen-Long² GUO Zhong-Yan² XIAO Guo-Qing²

1(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

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

3(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

4(CCAST (World Laboratory), Beijing 100080, China)

Abstract Within the framework of isospin-dependent Boltzmann-Langevin equation, the isotopic distribution in reaction systems of $^{14,16,18}\text{O} + ^7,9\text{Be}$ at 28.7 MeV/u were studied. It was found that the neutron rich (poor) nuclei were produced at the reaction of neutron rich (poor) projectile or target. The peak and width of the isotopic distribution shift toward the neutron rich side for neutron rich projectile. These shifts decrease with increasing the difference of proton numbers between the produced isotopes and the projectile.

Key words isotopic distribution, radioactive nuclear beam physics, isospin dependent Boltzmann-Langevin equation

Received 7 April 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19875068, 19847002), Major Basic Research Development Program (G2000077407), and the Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences