

中子晕核结构在引起核碎裂中的特殊作用*

刘建业^{1,3,4;1)} 郭文军² 任中洲^{2,4} 邢永忠^{3,4} 左维^{1,4} 李希国^{1,4}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (南京大学物理系 南京 210008)

3 (天水师范学院数理信息学院基础物理研究所 甘肃 天水 741000)

4 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 基于同位旋相关量子分子动力学模型,研究和对比分析了中子晕核¹¹Li和相等质量稳定核¹¹B在相同入射道条件下引起核碎裂反应中的特征.由于中子晕核松散的晕中子结构和小的分离能与相等质量稳定核相比具有容易碎裂的特征,因此在较低能区这种松散的晕结构有利于碎裂过程的发生,随入射能量升高,这种晕结构效应逐渐消失.而且这种在碎裂中的中子晕结构作用随靶核质量和碰撞参数的增加而减弱.

关键词 中子晕核 碎裂反应 量子分子动力学

1 引言

晕核结构性质和它引起的核反机制是原子核物理研究领域内非常感兴趣的热点课题.国际上自从日本学者 Tanihata 提出晕核存在以来,在中子晕和质子晕核研究方面取得了长足的进展^[1-5].同样在国内从实验和理论两个方面的研究工作也都取得了可喜的进展.例如中国科学院近代物理研究所(兰州)、中国科学院上海应用物理研究所、中国原子能科学研究院、北京大学和南京大学等都在晕核研究方面取得了具有自己特色的重要研究成果^[6-10].但相对而言,在晕核引起的反应动力学方面需要做更多的工作.为此我们最近利用同位旋相关分子动力学对中子晕核引起的核反应中的碎裂问题做了初步研究.为了对比和突出晕结构在碎裂中的特殊作用,同时对相等质量稳定核¹¹B在相同入射道条件下,做了计算和对比分析.发现中子晕结构在它引起的碎裂中呈现出与相对质量完全不同的特征.

2 理论模型

同位旋相关量子分子动力学理论(IQMD)中相互作用为^[11-14]

$$U(\rho) = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{sym}} + V^{\text{Yuk}} + V^{\text{MDI}} + U^{\text{Pauli}}, \quad (1)$$

式中 U^{Sky} 是密度相关的 Skyrme 势

$$U^{\text{Sky}} = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (2)$$

U^{Coul} 是库仑势; V^{Yuk} 表示 Yukawa 作用

$$V^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}\right) / \left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}\right), \quad (3)$$

V^{MDI} 是动量相关作用(MDI)

$$V^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (4)$$

U^{Pauli} 是泡里势

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{q_0 \rho_0} \right)^3 \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2}\right) \delta_{pp_j}, \quad (5)$$

2004-12-24 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 国家重点自然科学基金(10435080), 国家自然科学基金(10477006, 10125521, 10447113), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ9X2-SW-N02)和江苏省博士后科研计划项目资助

1) E-mail: liujy@lzb.ac.cn

式中, $\delta_{pp_j} = \begin{cases} 1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}$; U^{sym} 是对称势, 对称势的形式有很多种, 在本文中, 使用了两种常用的对称势^[15,16]:

$$U_1^{\text{sym}} = cF_1(u)\delta\tau_z, \quad (6)$$

$$U_2^{\text{sym}} = cF_2(u)\left[\delta\tau_z + \frac{1}{2}\delta^2\right],$$

其中 $\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$, 这里 $c = 32\text{MeV}$ 是对称势的强度, $u \equiv \rho/\rho_0$; $F_1(u) = u$ 和 $F_2(u) = u^2$; δ 是相对中子过剩 $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$. ρ , ρ_0 , ρ_n , ρ_p 分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 一个经验的密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的公式如下^[17]:

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (7)$$

这里参数取 $\alpha = -0.2$ 被发现与集体流的实验数据得到很好的符合, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验核子-核子碰撞截面^[18].

3 结果和讨论

计算中采用两种核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 和 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{nomed}}$. $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 表示考虑核子-核子碰撞的介质效应, 即(7)式中取 $\alpha = -0.2$. $\sigma_{\text{NN}}^{\text{nomed}}$ 为不考虑核子-核子碰撞的介质效应, 即(7)式中取 $\alpha = 0$. 显然有 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{nomed}} > \sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$. 这里碎裂多重性 N_f 包括质量数从 1 到 10 的所有出射产物的个数. 因为一旦产生从 1 到 10 的出射产物就表明弹核已经开始碎裂.

3.1 中子晕核结构特征

据我们所知, 晕核的主要特点是晕核子与核心的弱束缚、小的分离能、大的晕核子分布半径和窄的动量分布^[1-5]. 例如中子晕核具有与稳定核完全不同密度分布, 图 1 是利用 Skyrine-Hatree Fock 平均场理论计算的中子晕核¹¹Li 和稳定核¹¹B 的中子和质子密度分布. 图中实线和虚线分别表示中子和质子的密度分布; 粗线和细线分别对应¹¹Li 和¹¹B. 很明显, 中子晕核¹¹Li 的中子密度分布比¹¹B 核的中子密度分布宽得多, 表示出一个长的中子尾巴. 该计算同时给出了¹¹Li 和¹¹B 的均方半径 R 和结合能 E_{bin} , 如表 1 所示. 这些与稳定核的不同特征将在晕核引起核反应的碎裂中有所表现.

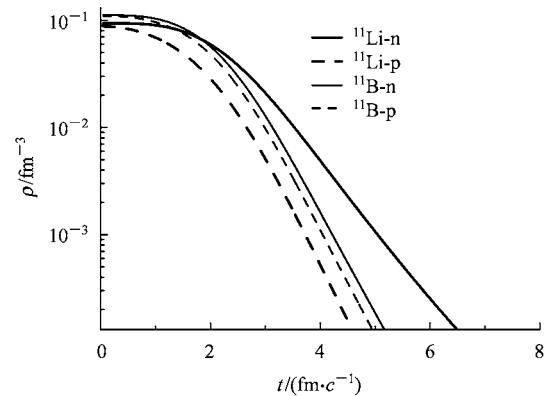


图 1 中子晕核¹¹Li 和稳定核¹¹B 的中子和质子密度分布

表 1 ¹¹Li 和¹¹B 的均方半径和结合能

	$E_{\text{bin}}/\text{MeV}$	R_n/fm	R_p/fm	R_N/fm
¹¹ Li	-4.75	3.063	2.155	2.844
¹¹ B	-6.91	2.43	2.39	2.46

3.2 中子晕核结构在中能重离子反应碎裂中的作用

3.2.1 碎裂中晕结构效应与两种对称势引起差别的比较

为了突出和显示中子晕结构在中能重离子反应碎裂中的特征, 我们同时计算和对比了中子晕核¹¹Li 和等质量稳定核¹¹B 在相同入射道条件下(相同入射能量、相同质量和相同碰撞参数)引起碎裂的特征. 图 2 分别给出¹¹Li 和¹¹B 在入射能量 $E = 30\text{MeV}/u$ 、碰撞参数 $b = 1.0\text{fm}$ 、两种对称势 U_1^{sym} 和 U_2^{sym} 以及一种核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 条件下引起⁴⁸Ca 碎裂多重性 N_f 随碰撞时间 t 的演化. 图中实线与点线之差或虚线与点划线之差表示晕核与稳定核 N_f 之差, 称为碎裂的晕核效应. 实线与虚线之差或点线与点划线之差表示两种不同的对称势引起碎裂之差, 称为对称势效应. 从图中明显看出, 在相同对称势(U_1^{sym} 或者 U_2^{sym})条件下, ¹¹Li 的碎裂多重性 N_f 都比¹¹B 相应的 N_f 大得多, 即称为碎裂的晕结构效应. 例如图中对于¹¹Li 具有 U_1^{sym} 的实线和具有 U_2^{sym} 的虚线都分别比¹¹B 相应的点线和点划线高得多. 表明这种松散的晕结构有利于碎裂过程的产生. 同时可以看出, 对于¹¹Li 和¹¹B, N_f 的对称势效应明显大于碎裂的晕结构效应. 同样我们计算了¹¹Li 和¹¹B 轰击重核¹²⁴Sn 的核反应, 如图 3 所示. 图中曲线的含义与图 2 相同. 比较图 3 和图 2, 相应的曲线可看到曲线的特征和结论与轰击⁴⁸Ca 的完全一致. 但是晕核效应对

N_f 的作用随靶核质量的增加而减弱. 后面还要仔细讨论.

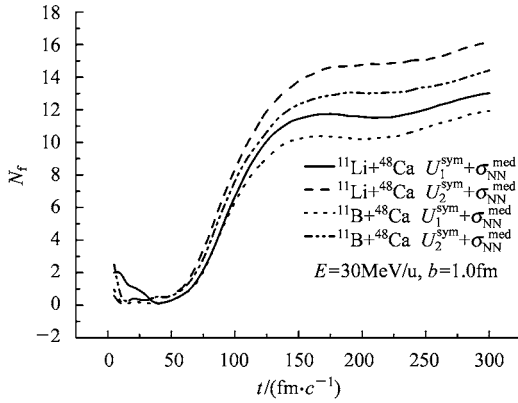


图 2 ^{11}Li 和 ^{11}B 在 $E = 30\text{MeV/u}$, $b = 1.0\text{fm}$ 时, 引起 ^{48}Ca N_f 随 t 的演化

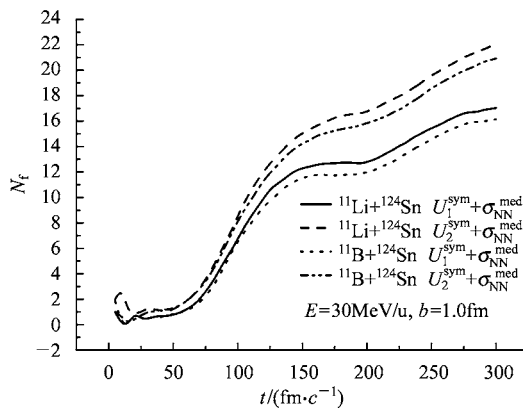


图 3 在 $E = 30\text{MeV/u}$, $b = 1.0\text{fm}$ 时, ^{11}Li 和 ^{11}B 引起 ^{124}Sn 反应 N_f 随 t 的演化

3.2.2 碎裂中晕核效应与核子-核子碰撞介质效应

另一种情况则是在相同对称势 U_1^{sym} 而不同核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 和 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{nomed}}$ 情况下的核反应, 如图 4 所示. 图中实线与点线之差或虚线与点划线之差表示晕核与稳定核 N_f 之差, 称为碎裂的晕核效应. 实线与虚线之差或点线与点划线之差表示核子-核子碰撞介质效应引起碎裂之差, 称为碎裂的介质效应. 从图 4 清楚地看到, 在两种核子-核子碰撞截面 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}}$ 和 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{nomed}}$ 条件下, 晕核 ^{11}Li 的 N_f 均明显比稳定核 ^{11}B 相应的 N_f 大得多, ^{11}Li 对应的实线和虚线都比稳定核 ^{11}B 相应的点线和点划线高. 对于晕核 ^{11}Li 和稳定核 ^{11}B 而言, 大的核子-核子碰撞截面即 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{nomed}}$ 均引起更多的碎裂过程产生. 特别是在这种

较低入射能量条件下, 多重碎裂的介质效应不大. 但晕核对于稳定核造成碎裂的差别远大于核子-核子碰撞介质效应引起碎裂的差别, 即碎裂的晕效应远大于核子-核子碰撞的介质效应. 同时我们计算了 ^{11}Li 和 ^{11}B 轰击 ^{124}Sn 的核反应, 如图 5 所示. 图中曲线的特征和结论与轰击 ^{48}Ca 的完全相同. 但是晕核效应对 N_f 的作用随靶核质量的增加而减弱. 为了检验此种晕核效应随入射靶核质量的变化, 图 6 给出了 ^{11}Li 和 ^{11}B 引起核反应中在冻结时, N_f 随靶核质量的演化. 从图中可以明显看出, 晕核 ^{11}Li 和稳定核 ^{11}B 的 N_f 均随靶核质量的增加而增加. 很明显, 随靶核质量的增加 N_f 的晕核效应缓慢减小; 而 N_f 的介质效应变化不大. 因为系统质量增大, 碎裂多重性必然增加. 然而随靶核质量的增加 N_f 的晕核效应缓慢减小, 碎裂多重性的介质效应变化不大. 因为核子-核子碰撞截面是入射能量的灵敏函数, 而对于系统质量不灵敏.

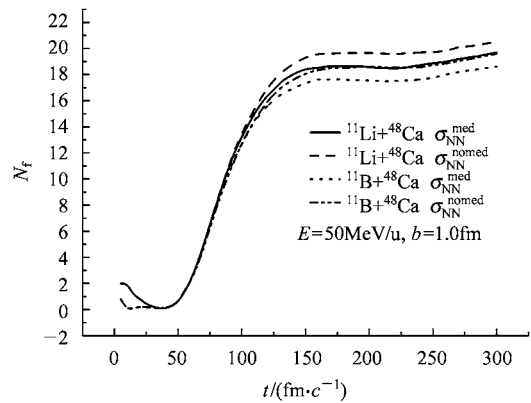


图 4 入射能量 30MeV/u 和 $b = 1.0\text{fm}$ 时, ^{11}Li 和 ^{11}B 引起 ^{48}Ca 反应 N_f 随 t 的演化

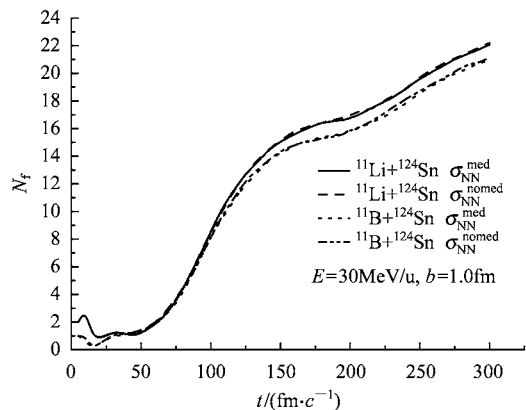


图 5 入射能量 30MeV/u 和 $b = 1.0\text{fm}$ 时, ^{11}Li 和 ^{11}B 引起 ^{124}Sn 反应 N_f 随 t 的演化

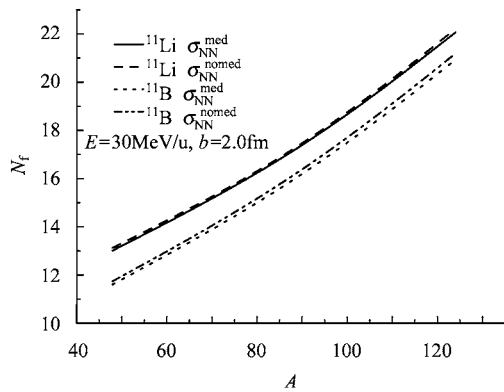


图 6 $E = 30\text{MeV/u}$, $b = 1.0\text{fm}$ 时, 冻结时间 ^{11}Li 和 ^{11}B 引起核反应 N_f 随靶核质量的演化

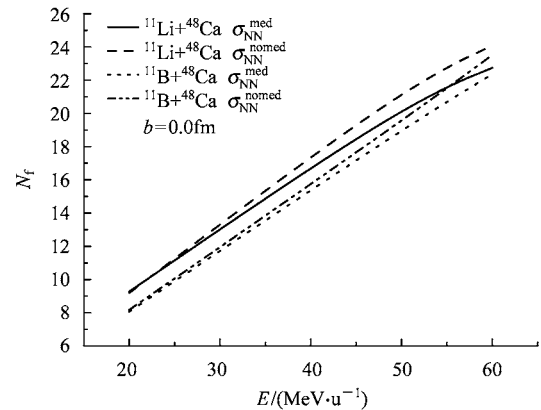


图 7 ^{11}Li 和 ^{11}B 引起 ^{48}Ca 反应 N_f 在冻结时间的值随 E 的演化

然而随着入射能量的增加, 碎裂中核子-核子碰撞的作用逐渐变得重要, 而晕核效应在逐渐减弱. 图 7 为 ^{11}Li 和 ^{11}B 引起 ^{48}Ca 反应在冻结时间 N_f 随 E 的演化. 图中曲线的含义与图 4 相同. 很明显, 在入射能量大约在 40MeV/u 以下较低能区, 碎裂中的晕核效应明显大于核子-核子碰撞介质效应, 即晕核对稳定核在碎裂中造成的差别远大于两体碰撞介质效应造成的差别. 但随着入射能量的增加核子-核子碰撞介质效应造成的碎裂多重性的差别明显增加. 同时碎裂多重性的晕效应在减小. 在大约 55MeV/u 以上, 核子-核子碰撞介质效应造成的碎裂多重性大于晕效应造成的碎裂多重性. 即在较低能区晕核松散的晕结构有利于碎裂过程的发生, 当入射能量升高时这种效应逐渐消失. 这里需要强调, 晕结构效应特指中子晕核与稳定核产生碎裂多重性之差. 因为在低能时能量还不足以使稳定核发生碎裂, 而晕中子的松散结构和小的分离能已经发生碎裂. 随着能量的升高稳定核开始碎裂, 但碎裂并不激烈, 故在低能区造成晕中子核和稳定核发生碎裂多重性有大的差别, 即碎裂大的晕结构效应. 随着能量的继续升高到一定值时, 中子晕核的核心部分和稳定核都发生碎裂, 即两类核都发生整体碎裂. 此时晕中子的松散结构对碎裂过程的有利作用与核整体碎裂比较相对减弱, 从而造成中子晕核和稳定核碎裂多重性差别的减小, 即碎裂的晕结构效应随能量的升高逐渐减弱. 随着能量的进一步升高, 晕中子弱束缚对碎裂过程的影响与核整体碎裂相比进一步减小, 直至观察不出来. 这样就造成晕结构对碎裂过程的影响随能量的升高逐渐减弱直至消失. 造成晕结构对碎裂过程的影响随能量的升高逐渐减弱直至消失的机理我们正在仔细研究.

一般核反应过程对碰撞参数是灵敏的, 为此, 图 8 是与图 4 相同条件下, 在入射能量 50MeV/u 时冻结时间 N_f 随 b 的演化. 在此入射能量条件下碎裂多重性的晕效应与两体碰撞介质效应差不多大小. 但是随 b 的增加晕核效应减小, 即图中实线与点线之差或虚线与点划线之差随 b 增加而减小, 但两体碰撞介质效应变化不大.

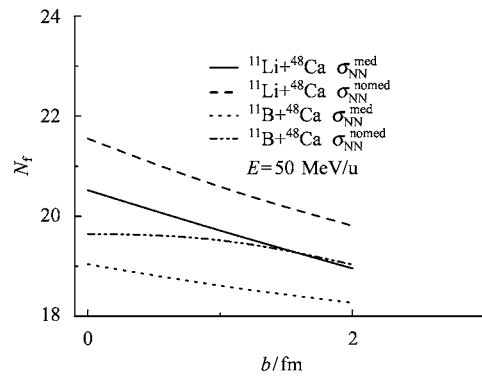


图 8 $E = 50\text{MeV/u}$ 时 ^{11}Li 和 ^{11}B 引起 ^{48}Ca 反应 N_f 随 b 的演化

4 小结

通过以上计算和对比分析, 可以得出以下结论:

(1) 由于中子晕核 ^{11}Li 的晕中子与核心结合松散和小的分离能, 故与等质量的稳定核 ^{11}B 相比, 松散的晕结构有利于碎裂只发生在低能区. 随着入射能量的提高, 这种晕结构效应逐渐减弱直至消失. 然而在中能区核子-核子碰撞截面对碎裂过程的影响随能量的增加一直在增加.

(2) 同样, 随靶核质量的增加碎裂多重性的晕核

效应缓慢减小.

(3)与稳定核相比,中子晕核对碎裂过程的影响

随碰撞参数的增加而逐渐减弱.然而晕核和稳定核碎裂多重性的介质效应随碰撞参数的增加变化不大.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:380
- 2 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676
- 3 Tanihata I et al. Phys. Lett., 1988, **B206**:592
- 4 Tanihata I et al. Nucl. Phys., 1991, **A522**:275C
- 5 Ogawa Y, Yabana K, Suzuk I Y. Nucl. Phys., 1992, **A543**:722
- 6 MA Y G, SHEN W Q. Phys. Rev., 1993, **C48**:850; Phys. Lett., 1993, **B302**:386
- 7 ZHAO Y L, MA Z Y, CHEN B Q et al. High Energy Phys. Nucl. Phys., 2001, **26**:506
- 8 REN Z Z et al. Phys. Lett., 1990, **B252**:311
- 9 MENG Jie, RING P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**:460
- 10 GUO W J, HAN H Q, LIU J Y et al. Commun. Theor. Phys., 2003, **40**:577
- 11 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**:1991
- 12 Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**:1926
- 13 Aichelin J et al. Phys. Rev., 1988, **C37**:2451
- 14 Reinhard P G et al. Computational Nuclear Physics, 1991, **1**:28—50
- 15 LI B A, Ko C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**:147
- 16 LI B A, Udo Schröder W. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2001
- 17 Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**:1982
- 18 Alkazzov G et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**:365
- 19 Das C D, Gupta S Das, Gale C et al. Phys. Rev., 2003, **C68**:014608

Special Role of Neutron-Halo Structure in the Fragmentation Reactions*

LIU Jian-Ye^{1,3,4;1)} GUO Wen-Jun² REN Zhong-Zhou^{2,4} XING Yong-Zhong^{3,4} ZUO Wei^{1,4} LI Xi-Guo^{1,4}

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

2 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

3 (Department of Physics, Tianshui Normal College, Tianshui 741000, China)

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

Abstract Based on the quantum molecular dynamics model the special role of neutron-halo structure in the fragmentation reactions was studied. In order to compare and emphasize the special role of neutron halo structure ^{11}Li in the fragmentation reactions we also studied the fragmentation reactions induced by the stable nucleus ^{11}B with the same mass and the same incident channel condition. We found that the special neutron-halo structure of ^{11}Li is of benefit to the fragmentation reactions in the lower energy region, compared to that induced by stable nucleus ^{11}B . However the beneficial role of neutron-halo ^{11}Li on the fragmentation reactions decreases till to be canceled with the increase of beam energy. The beneficial role of neutron-halo ^{11}Li on the fragmentation reactions also decreases with increasing target mass and impact parameter.

Key words neutron halo nuclei, fragmentation reaction, quantum molecular dynamics

Received 24 December 2004

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400), Key Project of National Natural Science Foundation of China (10435080), National Natural Science Foundation of China (10477006, 10125521, 10447113), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Science (KJ CX2-SW-N02) and Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds

1) E-mail: liujy@lzb.ac.cn