

中子晕核的松散结构在重离子碰撞动量耗散中的作用*

邢永忠^{1,2} 刘建业^{1,2,3;1)} 左维^{1,3} 李希国^{1,3}

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 (天水师范学院数理信息学院基础物理研究所 甘肃 天水 741000)

3 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用同位旋相关量子分子动力学模型,对比和研究了中子晕核¹⁹B和相等质量稳定核¹⁹F在相同入射道条件下引起核反应动量耗散中的特征.由于中子晕核的松散中子晕结构和小的分离能,与相等质量稳定核相比,在低能区具有减弱动量耗散的特征.但随入射能量的升高,这种晕核结构对动量耗散的作用减弱.而且对所有质量靶核,所有碰撞参数和中子晕核结构都具有减弱动量耗散的作用.

关键词 中子晕核 动量耗散 重离子碰撞

1 引言

晕核性质研究是原子核物理研究领域内感兴趣的热点课题.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^[1-12].相对而言,对晕核结构性质的研究描述得比较多.实际上在以Tanihata为代表的许多学者利用少体和平均场等理论将晕核分为核心和弱结合的晕核子等进行了解释^[1-5].国内学者马中玉、陈宝秋、孟杰和任中洲等^[6-9]结合实验从理论上对晕核结构性质进行了研究.沈文庆和张焕乔^[10, 13]等对中子晕核和质子晕核性质从实验和理论上进行了研究.他们都取得了具有自己特色的成果.近年来,对晕核反应动力学方面的研究侧重于弱束缚核,如^{6,7}Li, ^{9,11}Be和^{6,7}He等对中重靶核,特别是对重靶核在库仑位垒附近的破裂反应、转移反应、熔合反应和弹性散射的动力学机理及它们相互之间的关系进行了研究.如W.Y.So等人^[14]研究认为库仑位垒以上熔合截面的压低主要是由于弱束缚弹核的破裂反应造成的.但位垒以下熔合

截面是增加还是减少以及如何解释从实际和理论上还无定论. N. Alamanos等人^[11]认为光学势实部被弱束缚弹核破裂反应减弱.它们将破裂反应机理和晕核结构性质联系起来,得到了一些有价值的看法.例如P. Caple等人^[12]分析¹¹Be破裂反应数据后认为,¹¹Be的5/2⁺低位态共振引起破裂截面的窄峰是由弹核和靶核之间的核相互作用引起的,建议通过理论与实验分析将弹核破裂反应作为研究弱束缚核结构的探针. N.I. Ashwood等^[15]通过¹⁴Be集团破裂截面比¹⁴B相应截面大的事实证明¹⁴Be基态存在He集团结构等. Awed A. Ibraheem等人^[16]研究认为要正确地描述破裂反应道、核心的反冲效应和价核子的破裂需要统一考虑等.总之对于库仑位垒附近能区的弹核破裂反应机理与结构性质的研究得到了许多具有价值和启发意义的结果.但与晕核结构性质的研究相比较,相对而言,由晕核引起的核反应动力学研究得比较少,国内更是如此,特别是对晕核引起核反应动力学的系统学研究就更少.故我们尝试利用重离子反应输运理论即同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)研究一些典型中子晕核引起核反应动力学的系统学.在文献[17]

2005-01-21 收稿

*国家重点基础研究发展计划项目(G2000077400),国家自然科学基金重点项目(10435080),国家自然科学基金(10447006)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ951-A1-02)资助

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

中, 我们采用中子晕核与相等质量弹核对比的方式研究了中子晕核 ^{11}Li 在中能区对碎裂反应的影响. 本文同样对比中子晕核 ^{19}B 和稳定弹核 ^{19}F 引起的反应, 研究 ^{19}B 晕结构对重离子碰撞中动量耗散影响的系统学. 因为碎裂多重性和原子核阻止(动量耗散)是完全不同性质的物理观测量. 从本文研究可以了解晕结构对动量耗散反应的动力学机理及其随入射道条件的演化, 也就是从晕核弱束缚结构对动量耗散影响的系统学中了解晕核结构与反应动力之间的关系及其演化. 计算结果表明与碎裂情况正好相反, 由于晕核减弱了核子-核子碰撞截面, 从而对动量耗散起到了减弱的作用.

2 理论模型

IQMD 中互相作用如下^[18-21]:

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

其中 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 势:

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

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:

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

其中

$$\delta_{p_i p_j} = \begin{cases} 1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases};$$

U^{sym} 是对称势, 对称势的形式有很多种, 在本文中, 使用了一种常用的对称势^[22, 23]:

$$U_1^{\text{sym}} = c F_1(u) \delta \tau_z, \quad (6)$$

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, $u \equiv \rho/\rho_0$, $F_1(u) = u$, δ 是相对中子过剩 $\delta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p) = (\rho_n - \rho_p)/\rho$. 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^[24]:

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

这里参数取 $\alpha = -0.2$ 发现结果与集体流的实验数据符合得很好, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}$ 是实验核子-核子碰撞截面^[25].

3 结果和讨论

3.1 中子晕核结构的特征

晕核的主要特征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. 这些与稳定核不同的特征将在晕核引起核反应的动量耗散中必然有所表现. 例如中子晕核具有与稳定核完全不同的密度分布. 图 1 是利用 Skyrme-Hartree-Fock 理论计算的中子晕核 ^{19}B 和稳定核 ^{19}F 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 ^{19}B 和 ^{19}F . 由图可以看到中子晕核 ^{19}B 的中子分布比 ^{19}F 核的中子分布宽得多. 同时计算给出了 ^{19}B 和 ^{19}F 的中子均方半径 R_n 、质子均方半径 R_p 、核均方半径 R_N 和结合能 E_b , 如表 1 所示. 从图 1 和表 1 可以明显看到中子晕核 ^{19}B 具有宽的中子分布、大的中子均方半径和小的结合能.

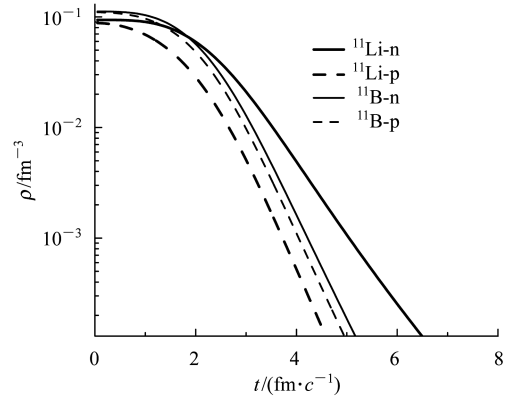


图 1 中子晕核 ^{19}B 和稳定核 ^{19}F 的中子和质子密度分布

表 1 ^{19}B 和 ^{19}F 的均方半径和结合能

	$E_b/(\text{MeV}\cdot\text{u}^{-1})$	R_n/fm	R_p/fm	R_N/fm
^{19}B	-5.04	3.15	2.50	3.45
^{19}F	-7.69	2.82	2.80	2.85

3.2 中子晕核结构在动量耗散过程中的作用

原子核阻止表示重离子碰撞中动量耗散的物理观测量, 这里定义原子核阻止为动量垂直分量 $P_{\perp}(i) = \sqrt{P_x(i)^2 + P_y(i)^2}$ 与平行分量 $P_{\parallel}(i) = P_z(i)$ 的比值 $R = (2/\pi)(\sum_i^A |P_{\perp}(i)|)/(\sum_i^A |P_{\parallel}(i)|)$. 这里

P_i 是核子 i 的动量, 系统核子数 A 是弹核核子数 A_p 与靶核核子数 A_t 之和. 计算中采用 σ_{NN}^{med} 和 σ_{NN}^{nomed} 两种核子-核子碰撞截面. σ_{NN}^{med} 表示考虑核子-核子碰撞的介质效应, 即(7)式中取 $\alpha = -0.2$. σ_{NN}^{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 $\sigma_{NN}^{nomed} > \sigma_{NN}^{med}$. 在我们以前的研究中表明, 在约 80MeV/u 以上能区, 原子核阻止灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面而弱的依赖于对称势^[26]. 图 2 是入射能量为 50, 80, 120 和 150MeV/u, 碰撞参数为 1.0fm 时原

子核阻止 R 随碰撞时间 t 的演化, 图中各条曲线的含意在图中有说明. 因为原子核阻止, 即动量由纵向分量向其他方向的转移和耗散主要是通过核子-核子碰撞中产生的, 由于晕核与核心结合松散, 故晕核的核子-核子碰撞要比稳定核弱. 所以在图 2 中, 由 4 种入射能量的结果明显看出, ^{19}B 的 R 都比稳定核 ^{19}F 相应的 R 小得多. 即松散的中子晕结构减弱了动量耗散过程.

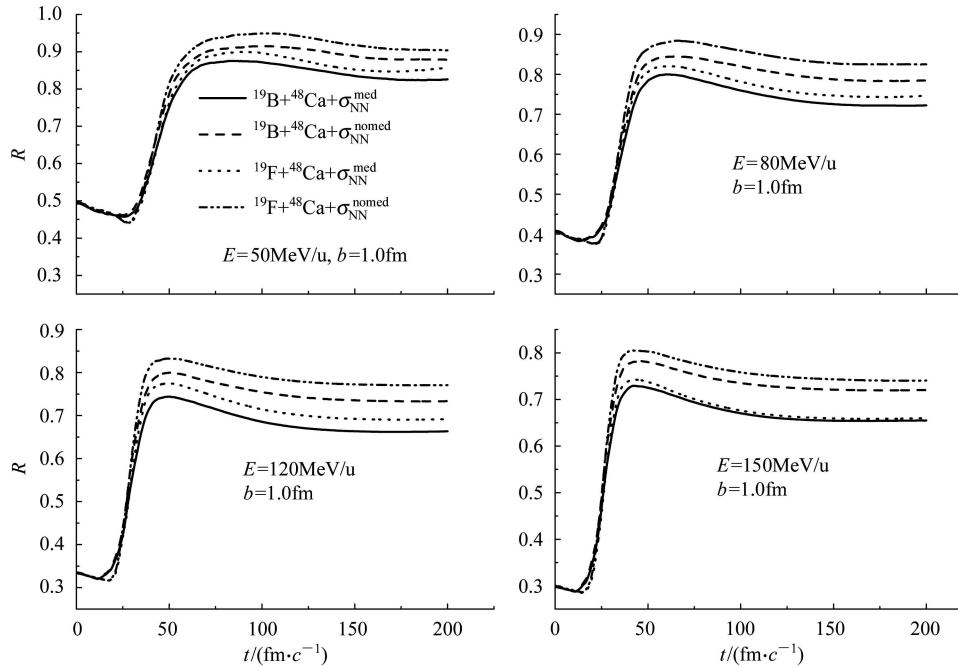


图 2 ^{19}B 引起 ^{48}Ca 反应中 R 随 t 的演化

根据我们以前的工作, 原子核阻止随入射能量的增加而减小^[26], 故为了检验晕核结构效应对原子核阻止作用随入射能量的演化, 图 3 给出了与图 2 相同入射道条件下, 在冻结时间原子核阻止随入射能量的演化.

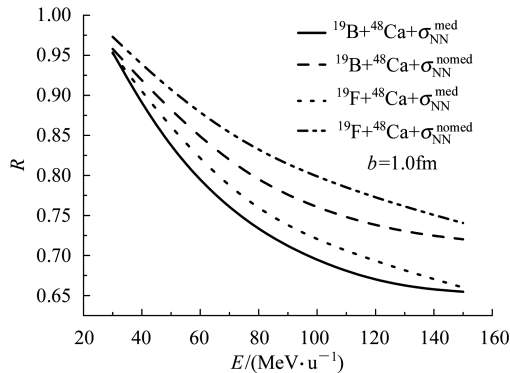


图 3 ^{19}B 和 ^{19}F 引起 ^{48}Ca 反应中冻结时间 R 随 E 的演化

图 3 中曲线的含义与图 2 相同. 实线与点线之差或虚线与点划线之差分别是晕核与稳定核原子核阻止之

差, 称为原子核阻止的晕结构效应. 而实线与虚线之差或者点线与点划线之差是由两种核子-核子碰撞截面引起的差, 称为原子核阻止的两体碰撞介质效应. 很明显, 在我们所研究的整个能区, 晕核 ^{19}B 原子核阻止都比相等质量稳定核 ^{19}F 的原子核阻止小. 在约 100MeV/u 以下的较低能区, 原子核阻止的晕核效应与核子-核子碰撞的介质效应属于同一数量级. 然而在 100MeV/u 以上能区, 随入射能量的增加, 原子核阻止的晕结构效应, 即晕核结构对于动量耗散的作用逐渐减小, 但是原子核阻止的两体碰撞介质效应随能量的增加一直在增加. 总之, 晕核结构对于动量耗散的作用在低能区比较明显, 随入射能量的增加逐渐减小.

在图 4 中, 我们同时计算了 ^{19}B 和 ^{19}F 轰击 ^{124}Sn 核反应. 如在入射能量 80MeV/u 和碰撞参数 2.0fm 时, ^{19}B 和 ^{19}F 引起 ^{124}Sn 反应中原子核阻止随碰撞时间的演化. 图中曲线的特征和结论与轰击 ^{48}Ca 的完全相同. 为了系统地检验晕核结构对于动量耗散作用随靶

核质量的演化, 图 5 给出了 ^{19}B 和 ^{19}F 轰击一系列靶核 ^{48}Ca , ^{89}Kr 和 ^{124}Sn 在冻结时间原子核阻止随靶核质量的演化. 这里 3 种靶核的中子-质子比都在 1.4 左右, 以减少中子-质子比生成的影响. 图 5 所有曲线的含义与图 2 相同. 从图 5 明显看出, 晕核 ^{19}B 和稳定核 ^{19}F 的原子核阻止均随靶核质量的增加而增加. 但是对于各种质量靶核, 晕核结构同样明显地减弱了动量耗散过程.

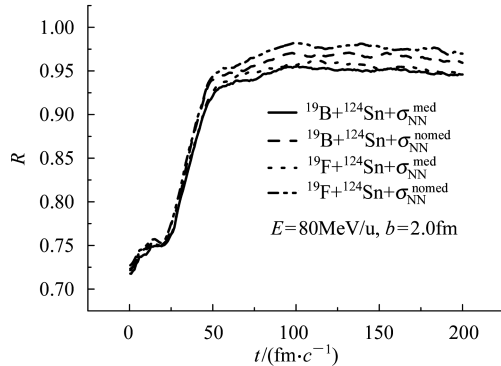


图 4 ^{19}B 和 ^{19}F 引起 ^{124}Sn 反应中 R 随碰撞时间的演化

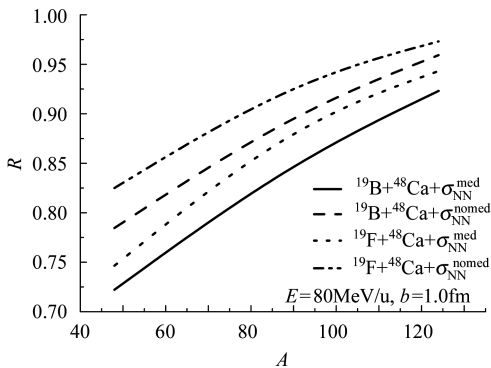


图 5 ^{19}B 和 ^{19}F 引起核反应冻结时间 R 随靶核质量的演化

一般的核反应动力学过程对碰撞参数是灵敏的, 为了检验原子核阻止的中子晕结构效应随碰撞参数的演化, 图 6 给出了与图 2 相同条件下在入射能量 80MeV/u 时, 冻结时间原子核阻止随碰撞参数的演化.

图 6 中各曲线含义与图 2 相同. 同样晕核和稳定核的原子核阻止均随碰撞参数的增加而下降. 特别是原子核阻止的晕结构效应和两体碰撞的介质效应随碰撞参数的增加而很快减小, 但是晕核 ^{19}B 的原子核阻止

在整个碰撞参数区域都比稳定核 ^{19}F 的原子核阻止小, 即在所有碰撞参数情况下, 中子晕结构都减弱了动量耗散过程, 只是碰撞参数大时, 由于原子核阻止很小, 这种晕核结构对动量耗散的减弱效应不明显.

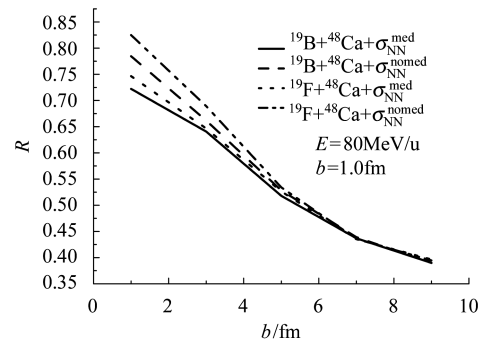


图 6 ^{19}B 和 ^{19}F 引起 ^{48}Ca 反应冻结时间 R 随 b 的演化

这里需要进一步说明的是: 1) 本工作采取晕核与相等质量稳定核在完全相同入射道条件下(相同能量, 相同碰撞参数和相同靶核)和相同相互作用参数但不同初态性质条件下的结果作对比分析, 从它们的差别中找寻和研究晕核对动量耗散中的特殊作用, 这样分析就是为了减少所选参数的影响; 2) 为了检验和确定晕核松散结构对动量耗散的减弱作用, 我们对不同靶核、不同能量和不同碰撞参数条件与相同质量弹核的结果做了对比和分析, 结果都表现出晕核对动量耗散的减弱作用. 对不同靶核计算时, 选取中子-质子比相同的靶核以减少同位旋效应的影响, 只看随着靶核质量的演化. 至于稳定核对动量耗散的作用, 我们在文献[26]中已有详细研究, 这里只是从晕核和相同质量核结果对比中看出晕核的特殊作用.

4 小结

(1) 由于中子晕核的中子晕与核心结合松散和小的分离能, 故在低能区与相等质量的稳定核比较, 晕核结构明显减弱了动量耗散过程.

(2) 中子晕核结构效应对动量耗散的作用随入射能量的增加而逐渐减小.

(3) 对于各种质量靶核和中等以下碰撞参数, 中子晕核都有减弱动量耗散的作用.

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**: 275
- 5 Ogawa Y, Yabana K, Suzuki Y. Nucl. Phys., 1992, **A543**: 722
- 6 ZHAO Y L, MA Z Y, CHEN B Q et al. High Energy Phys. Nucl. Phys., 2001, **25**: 506 (in Chinese)

- (赵耀林, 马中玉, 陈宝秋等. 高能物理与核物理, 2001, **25**: 506)
- 7 REN Z Z et al. Phys. Lett. 1990, **B252**: 311
- 8 MENG J, RING P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 460
- 9 GUO W J, HIAN H Q, LIU J Y et al. Commun. Theor. Phys., 2003, **40**: 577
- 10 MA Y G, SHEN W Q. Phys. Rev., 1993, **C48**: 850; Phys. Lett., 1993, **B302**: 386
- 11 Alamanos N, Pakou A, Lapoux V et al. Phys. Rev., 2002, **C48**: 054606
- 12 Cael P, Goldstein G, Baye D. Phys. Rev., 2004, **C70**: 064605
- 13 LIU Cheng-Jian, LIU Zu-Hua, ZHANG Huan-Qiao. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**(9): 1183
- 14 So W Y, Hong S W, Kin B T. Phys. Rev., 2001, **C70**: 064606
- 15 Ashwood N I, Feer M, Angelique J C et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 024608
- 16 Awad A I. Nucl. Phys., 2005, **A748**: 414
- 17 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, REN Zhong-Zhou et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2005, **29**(8): 761 (in Chinese)
(刘建业, 郭文军, 任中洲等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(8): 761)
- 18 Bertsch G F, Gupta S D, Phys. Rep., 1988, **160**: 1991
- 19 Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 1926
- 20 Aichelin J et al. Phys. Rev., 1988, **C37**: 2451
- 21 REN Z Z, Faessler A, J. Phys., 1998, **G24**: 1823
- 22 LIB A, Ko C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**: 147
- 23 LI B A, Udo Schröder W. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2001
- 24 Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**: 1982
- 25 Alkhozov G et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**: 365
- 26 LIU J Y, Gup W J, WANG S J et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**(6): 975

Special Role of Neutron-Halo Nucleus on the Momentum Dissipation in Heavy Ion Collisions^{*}

XING Yong-Zhong^{1,2} LIU Jian-Ye^{1,2,3;1)} ZUO Wei^{1,3} LI Xi-Guo^{1,3}

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

2 (Institute for the Theory of Basic Physics of Mathematics and Physics College,
Tianshui Normal University, Gansu, Tianshui 741000, China)

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

Abstract The special role of neutron-halo nucleus ^{19}B on the momentum dissipation was investigated by using isospin dependent quantum molecular dynamics. In order to compare and protrude the special role of neutron-halo-nucleus ^{19}B , the momentum dissipation induced by a same mass stable nucleus ^{19}F was investigated under the same incident channel condition. It is found that the weak bound neutron-halo structure of ^{19}B weakens the momentum dissipation process compared to those induced by stable nucleus ^{19}F in the lower energy region. However the nuclear stopping of colliding system with the neutron-halo nucleus ^{19}B decreases gradually with the increasing beam energy. For all of mass targets and impact parameters the neutron-halo nucleus ^{19}B weakens the momentum dissipation process.

Key words neutron-halo nucleus, momentum dissipation, heavy ion collision

Received 21 January 2005

^{*}Supported by Major State Basic Research Development Program in China (G2000077400), Key Project of National Natural Science Foundation of China (10435080), National Natural Science Foundation of China (10447006) and The CAS Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02)

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