

晕核反应机制与内部结构之间的关系*

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

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 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 在对中子晕核和质子晕核反应机制研究的基础上,经仔细分析和对比,进一步展现晕核反应机制和它的内部结构之间存在着内在的关系.计算结果分析表明,由于所选中子晕核¹¹Li的结构比质子晕核²³Al的结构更加松散,故与²³Al比较,¹¹Li更易碎裂,因而导致碎片多重性明显增加.同时由于¹¹Li的松散结构导致两体碰撞过程的减弱,因而导致动量耗散的减弱,故与²³Al对比,将引起原子核阻止明显减少.

关键词 中子晕核 质子晕核 碎裂反应 动量耗散 重离子碰撞

1 引言

近年来从实验和理论两个方面对晕核的结构和核反应机制进行了许多研究,并取得了明显的进展^[1-19],研究表明,晕核具有明显的中子过剩或质子过剩,晕核子与核心之间存在弱的束缚,晕核子有小的分离能,窄的动量分布和扩展的中子密度或质子密度分布等.而中子晕核引起的核反应机制的研究主要集中在库仑位垒附近的破裂、转移、熔合和弹性散射,例如:^{6,7,8}Li, ^{6,8}He和^{9,11}Be引起的核反应机制.理论研究方面主要基于直接反应理论,研究晕核子所在轨道对熔合反应以及破裂反应的影响等.而我们则利用重离子反应输运理论系统地研究了中子晕核和质子晕核引起的反应机制及与它们内部结构之间存在的紧密联系.本文主要通过分析和对比中子晕核和质子晕核结构松散程度的差别而造成两种晕核反应机制上的差别,依此来寻找和研究晕核反应机制与内部结构性质的联系.这种紧密联系在中子晕核和质子晕核引起的碎裂反应和动量耗散中反映出来.因而建议碎片多重性和原子核阻止是研究两种晕核反应机制,特别是反应机制和晕核内部结构之间联系可能的

实验探针.

2 同位旋依赖的量子分子动力学

同位旋相关量子分子动力学理论(IQMD)中相互作用如下^[20-23]:

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

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; U^{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} 是泡利势

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

2005 - 07 - 29 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, 105350101), 国家自然科学基金(10447006, 10575075, 10125521, 10447113), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ9CXZ-SW-N02)和博士后研究基金江苏计划项目资助

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

U^{sym} 是对称势, 对称势的形式是有很多种, 在本文中, 使用了一种常用的对称势^[24, 25]:

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

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

$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$. ρ , ρ_0 , ρ_n 和 ρ_p 分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 一个密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的经验公式如下^[26]:

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

这里参数取 $\alpha = -0.2$ 时, 结果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^[27].

3 结果和讨论

为了比较准确地研究晕核结构在核反应机制中的影响, 我们在研究中均将中子晕核或质子晕核引起的核反应结果与等质量稳定核引起的核反应结果在相同条件下进行比较. 这种晕核与等质量稳定核引起的反应机制的差别, 称作反应机制的晕结构效应. 例如本文图中实线和点线之差, 或者虚线与点-点-虚线之差称为晕核结构的效应. 同时称本文有关图中实线与虚线之差或者点线和点-点-虚线之差, 即图中与 σ^{med} 和 σ^{nomed} 有关的物理量之差称为核子-核子碰撞的介质效应. 本工作中中子晕核 ^{11}Li 和质子晕核 ^{23}Al 相应的等质量稳定核分别是 ^{11}B 和 ^{23}Na , 共同的靶核是 ^{48}Ca .

3.1 碎裂反应中中子晕核和质子晕核引起的差别

图1(a)和(b)分别是中子晕核 $^{11}\text{Li}+^{48}\text{Ca}$ 和相应的稳定核 $^{11}\text{B}+^{48}\text{Ca}$ 反应在冻结时间碎片多重性 FM 及质子晕核 $^{23}\text{Al}+^{48}\text{Ca}$ 和相应的 $^{23}\text{Na}+^{48}\text{Ca}$ 反应中的碎片多重性 FZ 随束流能量 E_l 的演化. 碰撞参数 $b = 1.0\text{fm}$. 本文中子晕核碰系统 FM 表示质量在 $1 \leq A \leq 10$ 之间的碎片多重性. FZ 表示电荷数在 $1 \leq Z \leq 12$ 之间的碎片多重性. 碎片一产生就表明碎裂或破裂反应已经开始. 因为晕核子与核芯的松散结合, 故应当首先是晕核子的破裂. 这里冻结时间取为 $t = 300\text{fm}/c$ 时, FM 和 FZ 的绝大部分来自碰撞前期弹核的碎裂, 但同时也包括了反应后期靶核碎裂和次级衰变的贡献. 这里4个核反应系统所用靶核和入射

道条件完全相同, 故后者贡献不会明显影响我们的结论. 各种曲线的物理含义在图中已有说明. 从图1(a), (b)中可以明显看出, 在小于 $60\text{MeV}/u$ 的低能区, 图1(a)中实线和点线之差, 以及虚线和点-点-虚之差别明显大于图1(b)相应曲线之差. 也就是说, 中子晕核 ^{11}Li 的晕结构效应明显大于质子晕核 ^{23}Al 的晕结构效应. 这主要是由于中子晕核 ^{11}Li 比质子晕核 ^{23}Al 的结构松散.

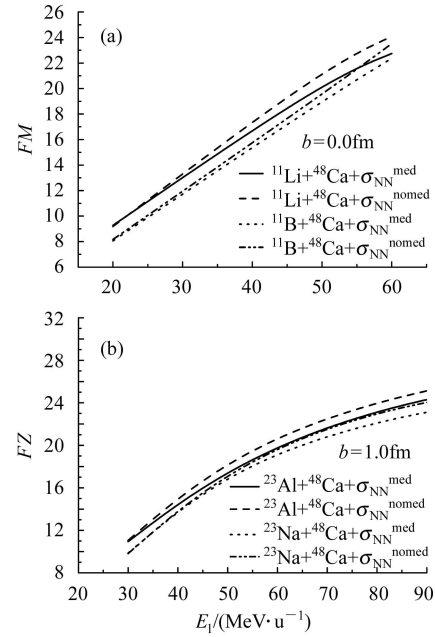


图1 中子晕 ^{11}Li ; 稳定核 ^{11}B (a) 和质子晕核 ^{23}Al ; 稳定核 ^{23}Na (b) 引起靶核 ^{48}Ca 碎片多重性 FM 和 FZ 随束流能量的演化

3.2 中子晕核和质子晕核在动量耗散中的差别

原子核阻止是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 $P_{//}(i) = P_z(i)$ 的比值 $R = (2/\pi) \left(\sum_i^A |P_{\perp}(i)| \right) / \left(\sum_i^A |P_{//}(i)| \right)$. 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. 如在文献[28]中所指出, 原子核阻止 R 灵敏地依赖核子-核子碰撞截面而弱的依赖对称势.

图2(a)表示中子晕核 ^{11}Li 核和稳定核 ^{11}B 两个反应系统的原子核阻止 R 随束流能量的演化, 图2(b)分别表示质子晕核 ^{23}Al 和稳定核 ^{23}Na 相应的结果. 靶核均为 ^{48}Ca . 碰撞参数 $b = 1.0\text{fm}$.

图中曲线的物理意义与图1相同. 很明显, 如文献[28]中指出的原子核阻止 R 均随束流能量的增加而下降. 且与稳定核相比, 中子晕核和质子晕核都减弱了原子核阻止. 这里我们主要感兴趣的是比较图

2(a)和(b)中各种曲线随束流的演化趋势和相对大小. 即图2(a)中有关实线和点线之差或虚线和点-点-虚线之差明显大于图2(b)中相应的曲线之差. 也就是说中子晕核的结构对原子核阻止的影响明显大于质子晕核的结构对原子核阻止的影响. 这主要是由于中子晕核的结构比质子晕核结构松散所致.

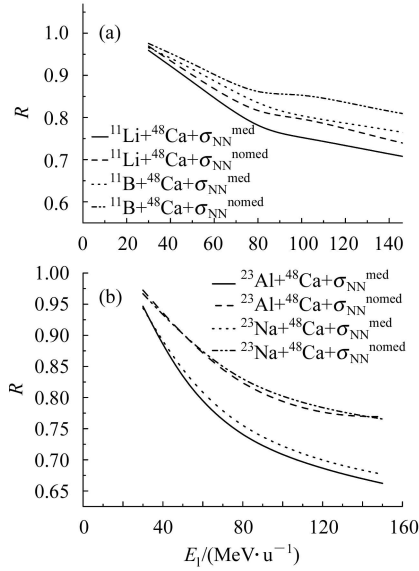


图 2 (a) 和(b) 分别是中子晕核 ^{11}Li 和质子晕核 ^{23}Al 及稳定核 ^{11}B ; ^{23}Na 碰撞系统原子核阻止随束流能量的演化

3.3 晕核反应机制与内部结构的紧密关系

我们基于晕核反应机制与内部结构的紧密关系对上述反应机制之间的差别作如下的解释.

图3(a)和(b)分别是 ^{11}Li 和 ^{11}B 以 ^{23}Al 和 ^{23}Na 的中子和质子密度分布. 其中实线和虚线分别代表中子和质子密度分布, 而粗线和细线分别表示晕核和稳定核的核子密度分布. 我们比较图3(a)和(b): 尽管质子晕核 ^{23}Al 的质量比中子晕核 ^{11}Li 的质量大得多, 但是 ^{11}Li 的晕中子密度分布比 ^{23}Al 的质子晕核密度分布扩展得多. 我们同时计算了以上4个原子核的中子、质子和原子核均方半径 R_n , R_p , R_A 以及相应的结合能 E_b 列于表1. 比较表1中两类晕核相应的数据, 明显看出尽管 ^{23}Al 的质量大得多, 但中子晕核 ^{11}Li 的中子均方半径与质子晕核 ^{23}Al 质子均方半径相差不多, 特别是 ^{11}Li 的结合能比 ^{23}Al 的结合能小得多. 以上比较表明, 中子晕核 ^{11}Li 的结构比质子晕核 ^{23}Al 的结构松散得多.

结构松散的原子核就容易碎裂或者破裂, 因而中子晕核 ^{11}Li 就产生更多的碎片多重性, 造成与相等质量稳定核 ^{11}B 的碎片多重性之间明显的差别, 也就是

说, 中子晕核 ^{11}Li 对 FM 的晕结构效应远比质子晕核 ^{23}Al 对 FZ 的结构效应明显.

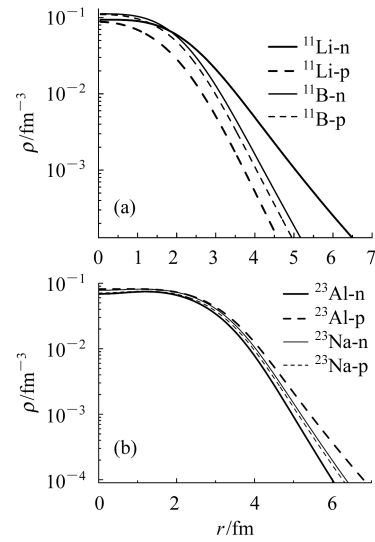


图 3 ^{11}Li , ^{11}B (a) 和 ^{23}Al , ^{23}Na (b) 的中子和质子密度分布

表 1 4 个原子核的结合能和相应的中子、质子和原子核均方半径

| | $E_b/(\text{MeV}\cdot\text{u}^{-1})$ | R_n/fm | R_p/fm | R_A/fm |
|------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ^{11}Li | -4.75 | 2.73 | 2.24 | 2.90 |
| ^{11}B | -6.90 | 2.42 | 2.39 | 2.46 |
| ^{23}Al | -7.21 | 2.97 | 3.07 | 2.84 |
| ^{23}Na | -7.78 | 2.94 | 2.93 | 2.95 |

关于动量耗散而言, 中子晕核 ^{11}Li 的晕结构效应同样比质子晕核 ^{23}Al 的明显, 正如以前指出的^[28, 29], 重离子碰撞过程中, 动量耗散和转移主要是由核子-核子碰撞引起的. 那么结构松散的原子核将导致核子-核子碰撞的减弱, 从而引起动量耗散和转移的减弱, 最后导致原子核阻止的减小. 于是就造成与等质量稳定核相关的原子核阻止之间明显的差别, 即结构松散的原子核阻止表现出更明显的晕核结构效应. 故在图2(a)中中子晕结构效应(实线和点线之差以及点线和点-点-虚线之差)比图2(b)中质子晕结构效应明显. 碎片多重性 FM , FZ 和原子核阻止 R 随束流能量的演化趋势也很不相同. 除了以上所讲, 中子晕核 ^{11}Li 内部结构比质子晕核 ^{23}Al 结构松散而外, 正如在文献[29]中指出的, 质子晕核 ^{23}Al 由于质子之间的库仑排斥作用, 对称势和核子-核子碰撞之间的竞争和交织, 其反应机制远比中子晕核引起的反应机制复杂, 这也是造成中子晕核和质子晕核在碎片多重性和原子核阻止之间结构效应差别原因之一. 我们以上的计算和讨论是在中低能区进行. 正如文献[18]中所指出的, 松散的晕结构效应主要出现在中低能区. 由于晕结构松散, 故当入射能量不高时松散的晕结构首先破裂,

同时在动量耗散中也有相应的效应. 但随入射能量的增加, 晕核的核心和相等质量稳定弹核开始发生碎裂, 加之两体碰撞效应随入射能量的增加而增加. 此时晕核与相等质量弹核比较, 两种碰撞系统之间在碎裂和动量耗散中的差别减弱, 即晕结构效应减小. 同时中子晕核和质子晕核在结构效应上的差别也在减小. 然而到了1 GeV/u能区, 中子晕核和质子晕核在碎裂和动量耗散中是否没有任何差别? 特别是质子晕核引起的反应机制比较复杂. 这些问题都需要进一步仔细研究.

通过以上的分析和讨论, 可以看出晕核反应机制和晕核内部结构之间存在着紧密的联系. 故中能重离子碰撞碎片多重性和原子核阻止是研究晕核反应

机制以及反应机制和晕核内部结构之间关系可能的实验探针.

4 小结

1) 由于中子晕核 ^{11}Li 的内部结构比质子晕核的结构松散, 故中子晕核与质子晕核相比, 在碎裂反应和动量耗散中表现出更为明显的晕结构效应.

2) 以上分析表明在晕核反应机制和内部结构之间存在着紧密的联系.

3) 质子晕核引起的核反应机制比中子晕核引起的核反应机制复杂. 反应机制的详细情况还需要进一步深入研究.

参考文献(References)

- 1 Tanihata L et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Brown B A, Hansen P G. Phys. Lett., 1996, **B381**: 391
- 3 Mitting W, Chouvet J M, ZHAN Wen-Long et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **B59**: 1889
- 4 Zhukov M V, Dinilin B V, Fedorov et al. Phys. Rep., 1993, **231**: 151
- 5 Ogawa Y, Yabana K, Suzuki 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, **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)
- 8 REN Z Z et al. Phys. Lett., 1990, **B252**: 311; Phys. Lett., 1995, **B351**: 11
- 9 LIU Z H, RUAN M, ZHAO Y L et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034326
- 10 GUO W J, JIAN H Q, LIU J Y et al. Commun. Theor. Phys., 2003, **40**: 577
- 11 Alamanos A, Pakou V, Lapoux et al. Phys. Rev., 2002, **C48**: 054606
- 12 Cael P, Goldstein G, Baye D. Phys. Rev., 2004, **C70**: 064605
- 13 LIN 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., 2004, **C79**: 064606
- 15 Navin A, Tripathi V, Blumenfeld Y et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 044601
- 16 Camacho A G, Aguilera E F. Nucl. Phys., 2005, **A748**: 414
- 17 Alamanos N, Pakou A, Lapoux V et al. Phys. Rev., 2002, **C48**: 054606
- 18 LIU J Y, GUO W J, REN Z Z et al. Phys. Lett., 2005, **B617**: 24
- 19 MENG J, RING P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 460
- 20 Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**: 1991
- 21 Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 1926
- 22 Aichelin J et al. Phys. Rev., 1988, **C37**: 2451
- 23 Reinhard P G et al. Computational Nuclear Physics, 1991, **1**: 28—50
- 24 LI B A, Ko C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**: 147
- 25 LI B A, Schroder W U. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. New York: Nova Science Publishers, 2001
- 26 Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**: 1982
- 27 Alkazzov G et al. Nucl. Phys., 1977, **A280**: 365
- 28 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, WANG Shan-Jin et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**(6): 975
- 29 LIU Jian-Ye, GUO Wen-Jun, XING Yong-Zhong et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 034610

Close Correlation between the Reaction Mechanism and Inner Structure of Loosely Halo-Nuclei *

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

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

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

3 (Institute for the Basic Physics of Mathematics Physics College, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

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

Abstract It was based on the comparisons of the variance properties of fragment multiplicities FM's and nuclear stoppings R's for the neutron-halo colliding system with those of FZ's and R's for the proton-halo colliding system with the increases of beam energy in more detail, the closely correlations between the reaction mechanism and the inner structures of halo-nuclei is found. From above comparisons it is found that the variance properties of fragment multiplicities and nuclear stopping with the increases of beam energy are quite different for the neutron-halo and proton-halo colliding systems, such as the effects of loosely bound neutron-halo structure on the fragment multiplicities and nuclear stopping are obviously larger than those for the proton-halo colliding system. This is due to that the structures of halo-neutron nucleus ^{11}Li is more loosely than that of the proton-halo nucleus ^{23}Al in this paper. In this case, the fragment multiplicity and nuclear stopping of halo nuclei may be used as a possible probe for studying the reaction mechanism and the correlation between the reaction mechanism and the inner structure of halo-nuclei.

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

Received 29 July 2005

*Supported by Major State Basic Research Development Program in China (G2000077400), Major Program of National Natural Science Foundation of China (10435080, 105350101), National Natural Science Foundation of China (10447006, 10575075, 10125521, 10447113), Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (KJCXZ-SW-N02) and Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds

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