

从晕中子核引起核反应中提取对称势^{*}

刘建业^{1,2,3;1)} 肖国青^{1,3} 左维^{1,3} 李希国^{1,3}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (天水师范学院数理信息学院基础物理研究所 天水 741000)

3 (重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 利用同位旋相关量子分子动力学理论研究了中子晕核引起核反应机制中重要的同位旋效应以提取对称势. 因为同位旋相关量子分子动力学理论中的相互作用和介质中核子-核子碰撞截面都灵敏地依赖于碰撞系统的密度分布, 本项研究工作基于中子晕核扩展的密度分布. 该密度分布包含了反应机制中同位旋效应和疏散内部结构的平均特征. 为了弄清楚晕核引起核反应机制的同位旋效应, 在完全相同的入射道条件下, 比较了由中子晕核炮弹引起的同位旋效应和由相等质量的稳定核炮弹引起同位旋效应. 结果发现中子晕核炮弹引起的发射中子-质子比和同位旋分馏比明显大于相等质量稳定核产生的结果. 因而可以通过理论结果与实验数据的系统比较提取对称势.

关键词 中子晕核 同位旋效应 对称势 同位旋分馏比 发射中子-质子比

1 引言

通过理论和实验对于晕核反应机制和结构晕现象的研究发现, 晕核子小的分离能、扩展的密度分布和窄的动量分布是晕核的主要特征^[1-21]. 晕核反应机制研究主要集中在库仑位垒附近原子核碎裂、转移、熔合和弹散等精细反应机制问题上. 理论研究主要基于直接反应和道耦合理论来研究精细反应机制. 然而反应机制同位旋效应的平均特征, 如发射中子-质子比和同位旋分馏比同位旋效应的平均特征未被研究. 因为中子晕核具有明显扩散的密度分布, 而通过依赖于密度分布的重离子碰撞理论——同位旋相关量子分子动力学理论将重要的同位旋效应引入反应机制. 例如本文通过计算中子晕核引起核反应发射中子-质子比和同位旋分馏比将重要的同位旋效应表现出来. 这个研究结果建议, 从实验上测量以上两个物理观量的同位旋效应来研究中子晕核引起反应机制同位旋效应的平均特征和提取对称势.

2 理论模型

2.1 同位旋相关量子分子动力学理论(IQMD)^[22-25]

IQMD中相互作用如下

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

其中 U^{Sky} , U^{Yuk} 和 U^{Pauli} 分别是 Skyrme 势、Yukawa 势和 Pauli 势如下

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

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

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{q_0 p_0} \right)^3 \times \exp \left(- \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2)^2}{2p_0^2} \right) \delta_{p_1 p_2}, \quad (4)$$

$$\delta_{p_1 p_2} = \begin{cases} 1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}.$$

2006-04-06 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)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJJCX2-SW-N02)资助

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

U^{MDI} 是动量相关势,

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln[t_5(\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (5)$$

对称势 U^{Sym} 如下

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

$$U_0^{\text{Sym}} = 0.0, \quad (7)$$

其中

$$\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases},$$

$F_1(u) = u$ 和 $u = \frac{\rho}{\rho_0}$. $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$. ρ, ρ_0, ρ_n 和 ρ_p 分别是总的, 正常的, 中子和质子密度.

经验的密度相关的介质中核子-核子碰撞截面为^[27,28]

$$\sigma_{\text{NN}}^{\text{med}} = \left(1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0}\right) \sigma_{\text{NN}}^{\text{free}}, \quad (8)$$

其中 $\alpha = -0.2$.

重离子碰撞系统密度分布如下

$$\rho_i(\mathbf{r}) = (2\pi L)^{-3/2} \exp\left(-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2}{2L}\right), \quad (9)$$

密度可以通过相空间分布几率 $f_i(\mathbf{r}, \mathbf{P})$ 来计算. 这里

$$f_i(\mathbf{r}, \mathbf{P}) = (h\pi)^{-3} \exp\left(-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2}{2L} - \frac{2L}{h^2}(\mathbf{P} - \mathbf{P}_i)^2\right), \quad (10)$$

而 $f_i(\mathbf{r}, \mathbf{P})$ 可以从单核子波函数 $\varphi_i(\mathbf{r}, \mathbf{P})$ 通过 Wigner 变换计算得到. 这里

$$\varphi_i(\mathbf{r}, \mathbf{P}) = (2\pi L)^{-3/4} \exp\left(-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2}{4L} - \frac{i}{h}(\mathbf{P}_i \cdot \mathbf{r})\right). \quad (11)$$

从上面公式 (2), (5)—(9) 很清楚地看到同位旋相关量子分子动力学中的相互作用势和介质中两体碰撞截面灵敏的依赖密度分布 $\rho_i(\mathbf{r}, \mathbf{P})$. 而密度分布包含了反应机制同位旋效应和原子核内部结构的平均特征.

有关同位相关量子分子动力学的详细情况可以参看文献 [22—25] 和文献 [26] 的第 10 章.

3 中子晕核 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^8\text{He}$ 引起反应机制的同位旋效应

3.1 中子晕核 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^8\text{He}$ 以及相等质量弹核 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 的中子和质子密度分布

图 1 是利用 Skyrme-Hatree-Fock 理论计算的中子晕核 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^8\text{He}$ 及相等质量弹核 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 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密度分布, 粗线和细线分别表示晕核和稳定核的密度分布. 与 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 相比, 很清楚, 中子晕核 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^8\text{He}$ 表现出明显扩展的中子密度分布. 用同样的理论计算了这些原子核的中子、质子均方半径、结合能和中子-质子比放于表 1 中. 与相等质量稳定弹核相比, 中子晕核 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^8\text{He}$ 有大的中子均方半径, 大的中子-质子比和小的结合能. 图 1 和表 1 中, 中子晕核的晕特征一定会通过扩展的密度分布将重要的同位旋效应引入反应机制.

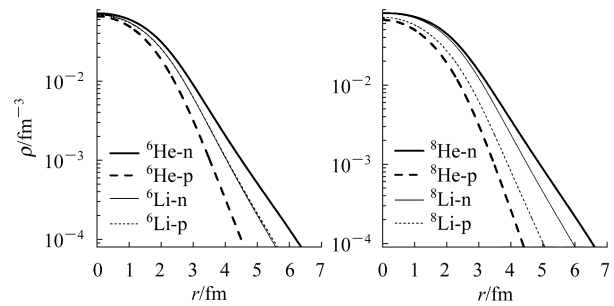


图 1 晕核 ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$ 和稳定核 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 的中子和质子密度分布

表 1 以上 4 个原子核中子、质子均方半径、结合能和中子-质子比

	$E_{\text{bin}}/(\text{MeV/nucleon})$	R_n/fm	R_p/fm	(n/p)
${}^6\text{He}$	-5.32	2.68	1.74	2.0
${}^6\text{Li}$	-6.14	2.31	2.20	1.0
${}^8\text{He}$	-4.09	2.77	1.90	3.0
${}^8\text{Li}$	-5.89	2.54	2.20	1.67

3.2 中子晕核引起反应中发射中子-质子比 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 随碰撞时间 t 的演化

图 2 表示两对核反应: ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$, ${}^6\text{Li}+{}^9\text{Be}$ 和 ${}^8\text{He}+{}^9\text{Be}$, ${}^8\text{Li}+{}^9\text{Be}$ 引起反应中发射中子-质子比 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 在对称势 U_1^{Sym} 和不考虑对称势 $U_0^{\text{Sym}}=0$ 的条件下, 在能量=50MeV/核子时随碰撞时间的演化. 从图 2 很清楚地看出, 两个中子晕核反应系统对应的实线分别明显地高于相应的稳定弹碰撞系统的虚线, 即两个中子晕核 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^8\text{He}$ 碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 明显大于相应稳定 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^8\text{Li}$ 碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}$.

出现以上特征的原因在于 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 灵敏地依赖于对称势. 而对称势对于中子是斥力, 对于质子是吸引力. 中子晕核与相应稳定弹核相比, 它扩展的中子密度分布具有大的中子过剩 $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$. 其中 ρ_n, ρ_p 和 ρ 分别是中子、质子和总密度分布. 参看式 (6), 可知大的 δ 则对称势作用强. 即与相应稳定弹碰

撞系统相比中子晕核碰撞系统具有更强的对称势. 强的对称势与弱对称势相比, 会发射更多的中子, 因而中子晕核碰撞系统明显增加了 $(n/p)_{\text{nucl}}$. 同时可以看出, 尽管两曲线随时间起伏较大, 但总体上, 特别是后期, 粗线和相应细线的差别, 即对称势 U_1^{Sym} 和不考虑对称势 U_0^{Sym} 引起 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 的差别是明显的. 可以直接给出对称势 U_1^{Sym} 对发射中子-质子比的影响程度.

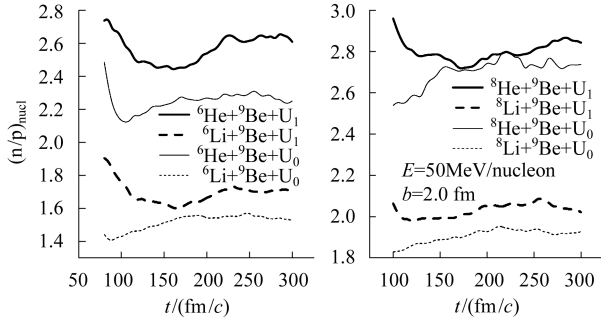


图 2 4 个核反应中发射中子-质子比 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 随时间 t 的演化

为了研究 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 随束流能量的演化, 图 3 是冻结时间以上 4 个反应系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 随束流能量 E 的演化. 从图 3 可以明显看出在所研究的束流能范围内, 图 2 中中子晕核碰撞系统和相应稳定核碰撞系统之间的大的差别一直保持. 表明在研究的束流能量范围内中子晕核碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 一直明显大于相应稳定核系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}$. 这充分显示出中子晕核引起核反应中 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 明显的同位旋效应. 同时可以看出, 粗线和细线的差别, 即对称势 U_1^{Sym} 和不考虑对称势 U_0^{Sym} 引起 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 的差别随束流能量 E 的演化是明显的. 即给出对称势 U_1^{Sym} 对发射中子-质子比的影响程度.

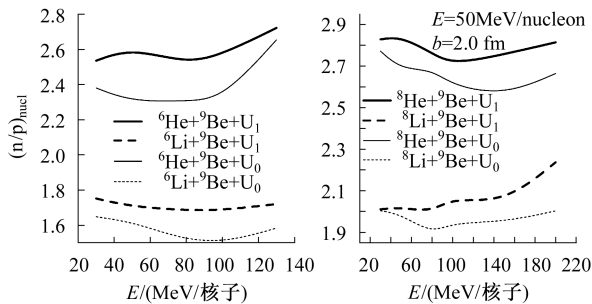


图 3 4 个核反应中 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 随束流能量的演化

与 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 类似, 中子晕核扩散的密度分布同样会将重要的同位旋效应引入同位旋分馏比 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{liq}}$ 中. 图 4 表示以上 4 个核反应中同位旋分馏比 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{liq}}$ 随碰撞时间 t 的演化. 这里 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 和 $(n/p)_{\text{liq}}$ 分别是发射核子和发射碎片

的中子-质子比. 碎片质量取自范围 $2 \leq A < (A_p + A_t)$, A_p 和 A_t 分别是弹核和靶核的质量数. 从图 4 清楚的看到, 尽管两曲线随时间的起伏较大, 但总体上, 特别是后期, 对应于中子晕核碰撞系统 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{frag}}$ 的实线分别大于稳定核碰撞系统的虚线. 其原因是, 分子 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 与图 2 中 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 特征的解解释相同. 但分母 $(n/p)_{\text{frag}}$ 由于碰撞系统电荷守恒与碰撞系统中子质子比相比而减小. 但它的值仍比 1 大, 故 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{frag}}$ 比 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 要小. 特别是中子晕碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{frag}}$ 都分别大于相应稳定核碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{frag}}$. 然而由于发射碎片的中子-质子比 $(n/p)_{\text{frag}}$ 随束流能量的增加其演化过程变化较大, 致使 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{frag}}$ 随束流能量的演化与 $(n/p)_{\text{nucl}}$ 很不相同.

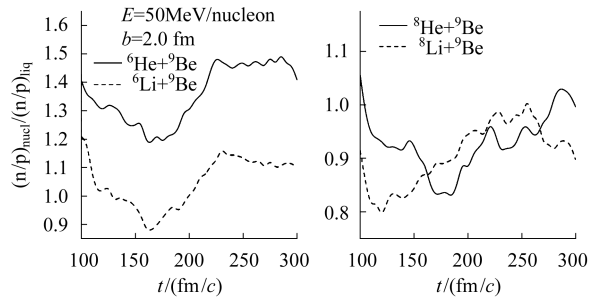


图 4 4 个核反应中同位旋分馏比 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{liq}}$ 随时间 t 的演化

图 5 表示以上 4 个反应系统的同位旋分馏比 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{liq}}$ 随束流能量的演化. 从图 5 明显看到, 在研究的束流能量范围内中子晕核碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{liq}}$ 始终分别明显高于相等质量稳定核碰撞系统的 $(n/p)_{\text{nucl}}/(n/p)_{\text{liq}}$. 尽管由于发射碎片中子-质子比 $(n/p)_{\text{liq}}$ 随束流能量的演化起伏较大, 从而引起同位旋分馏比随束流能量的起伏较大. 但是晕核碰撞系统同位旋分馏比明显的同位旋效应总是存在. 通过理论与实验系统的比较可以提取关于对称势的知识.

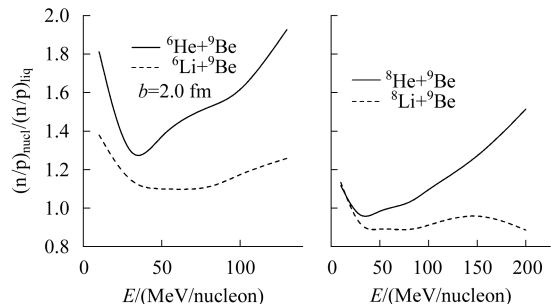


图 5 4 个核反应中同位旋分馏比随束流能量的演化

4 小结

通过以上结果和讨论, 可以看出中子晕核扩展的密度分布将重要的同位旋效应引入反应机制, 从而在

本文研究的能量范围内与相等质量稳定弹核相比, 中子晕核碰撞系统明显的增大了发射的中子-质子比和同位旋分馏比. 从而实验上通过测量以上两个物理观测量的同位旋效应来研究相关物理观测量同位旋效应的平均特征和提取对称势.

参考文献(References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Lett., 1985, **B160**: 380
- 3 Mittig W, Chouvel J M, ZHAN Wen-Long et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**: 1889
- 4 Pietro A Di, Figuera P, Amorini F et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 044613
- 5 Gomes P R S, Anjos R M, Muri C et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 054605
- 6 MA Y G, SHEN W Q et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 850; Phys. Lett., 1993, **B302**: 386
- 7 ZHAO Y L, MA Z Y, CHEN B Q et al. HEP & NP, 2001, **25**(6): 506 (in Chinese)
(赵耀林, 马中玉, 陈宝秋等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(6): 506)
- 8 REN Z Z, XU G G, CHEN B Q 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 et al. Commun. Theor. Phys., 2003, **40**: 577
- 11 Carstoiu F, Trache L, Tribble Robert E et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 054610
- 12 Navin A, Tripathi V, Blumenfeld Y et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 044601
- 13 LIN C J, LIU Z H, ZHANG H Q. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**: 1183
- 14 Alamanos N, Pakou A, Lapoux V et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 054606
- 15 Fukuda N, Nakamura T, Aoi N et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 054606
- 16 Zadro M. Phys. Rev., 2004, **C70**: 044605
- 17 Rusek K, Alamanos N, Keeley N et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 014603
- 18 LIU J Y, GUO W, REN Z Z et al. Phys. Lett., 2005, **B617**: 24
- 19 CAI X Z, ZHANG H Y, SHEN W Q et al. Phys. Rev., 2003, **C65**: 024610
- 20 Gomez Camacho A, Aguilera E F et al. Nucl. Phys., 2004, **A735**: 425
- 21 Suzuki T, Ogawa Y, Chiba M et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **89**: 012501
- 22 Bertsch G F, Das. Gupta S. Phys. Rep., 1988, **160**: 1991
- 23 Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 1926
- 24 Aichelin J et al. Phys. Rev., 1988, **C37**: 2451
- 25 LI B A, KO C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**: 147
- 26 LI B A, Udo Schroder W. Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies. Nova Science Publishers, Inc. Huntington, New York, 2001
- 27 Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**: 1982
- 28 Alkhozov G, Bauer T, Bertini R. Nucl. Phys., 1977, **A280**: 365

Probing the Symmetrical Potential in Nuclear Reaction Induced by Neutron-Halo Nuclei^{*}

LIU Jian-Ye^{1,2,3;1)} XIAO Guo-Qing^{1,3} ZUO Wei^{1,3} LI Xi-Guo^{1,3}

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

2 (Institute of Basic Physics, College of Mathematics-Physics and Information,
Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

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

Abstract In terms of the isospin-dependent quantum molecular dynamics model (IQMD), important isospin effect in the halo-neutron nucleus induced reaction mechanism is investigated, and consequently, the symmetrical potential form is extracted in the intermediate energy heavy ion collision. Because the interactive potential and in-medium nucleon-nucleon (N-N) cross section in the IQMD model sensitively depend on the density distribution of the colliding system, this type of study is much more based on the extended density distribution with a looser inner nuclear structure of the halo-neutron nucleus. Such a density distribution includes averaged characteristics of the isospin effect of the reaction mechanism and the looser inner nuclear structure. In order to understand clearly the isospin effect of the halo-neutron nucleus induced reaction mechanism, the effects caused by the neutron-halo nucleus and by the stable nucleus with the same mass are compared under the same condition of the incident channel. It is found that in the concerned beam energy region, the ratio of the emitted neutrons and protons and the ratio of the isospin fractionations in the neutron-halo nucleus case are considerably larger than those in the stable nucleus case. Therefore, the information of the symmetry potential in the heavy ion collision can be extracted through such a procedure.

Key words neutron-halo nucleus, isospin effect, symmetrical potential, isospin fractionation ratio, ratio of emitted neutron and proton

Received 6 April 2006

^{*} Supported by State Key Program of Basic Research of China(G2000077400), Major Program of the National Natural Science Foundation of China (10435080, 105350101), National Natural Science Foundation of China (10447006,10575075) and Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N02)

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