

轻丰中子核反应中子集团产生截面的理论研究*

高辉^{1,2,4,1)} 肖国青^{1,2} 张丰收^{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 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (北京师范大学低能核物理研究所 北京 100875)

4 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 采用 Boltzmann-Langevin 方程研究了能量为 35MeV/u 的 ^{14}Be , ^8He , ^6He , ^{11}Li , ^{17}B , ^{11}Be , ^{19}C 与 ^{12}C 靶的反应, 计算了产生中子集团的截面, 发现 ^{14}Be 与 ^{12}C 靶反应产生 ^4n 的截面与实验值符合得很好. 通过这几个入射核与 ^{12}C 靶形成中子集团截面的对比, 发现核的晕中子越多产生中子集团的截面越大, 晕中子数相同时, 质量数越大产生中子集团的截面越大. 中子集团可能主要来自晕核子.

关键词 Boltzmann-Langevin 方程 中子集团 产生截面

1 引言

中子集团是只有中子而没有质子的中性结构. 中子集团的研究对检验原子核模型和研究核子-核子相互作用有重要意义. 长期以来, 人们观测到的中子在自由空间只有单个存在的, 而没有发现几个中子一起组成集团. 很多人对此进行了研究, 试图发现束缚态的中子集团, J.Gräter^[1] 通过 $^3\text{He}(\pi^-, \pi^+)\text{nnn}$ 反应, 没有发现 ^3n 存在的证据, 得出截面的上限是 30nb/sr. Belozyorov^[2] 等人通过对 ^{14}O , ^{15}O 和 ^{12}N 反应能谱的分析, 也没有得到束缚态的中子集团. Chulkov^[3] 等人通过对 ^5He 的研究也没有发现中子集团的证据. Tilley 和 Weller^[4] 对 $A=4$ 的核进行分析也没有发现中子集团. 但是最近 Marques 和 Orr^[5] 等人利用新的实验方法探测到 6 个 ^4n 事件, 推算出反应截面约为 1mb.

Boltzmann-Langevin 方程是研究中能碎裂反应有效的输运理论模型^[6, 7], 利用中子滴线核反应来研究中子集团可能是一个较好的方法. 本文用 Boltzmann-Langevin 方程对丰中子核碎裂反应进行了计算, 并与实验结果相比较. 发现中子不只是以单个的形式存在, 在一定的条件下中子也会组成中子集团.

2 理论模型

Boltzmann-Langevin 方程是 BUU (Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck) 方程的推广, BUU 方程在描述中能重离子碰撞时取得一定的成功. 重离子碰撞在低能时, 平均场起主要作用. 在高能时起主要作用的是核子之间的两体碰撞, 平均场可以忽略. 在中能时比较复杂, 既有平均场的作用, 又有两体相互作用. BUU 方程恰当地包括了平均场作用和两体相互作用. 但是 BUU 方程没有考虑两体关联效应, 而 Boltzmann-Langevin 方程包括了动力学涨落效应^[8, 9]. 描述涨落的单粒子密度 $\hat{f}(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 的 Boltzmann-Langevin 方程为

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

方程的左边是由平均场决定的 Vlasov 传播, 右边是碰撞项 $K(\hat{f})$ 和碰撞项的涨落 $\delta K(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$, 涨落没有包含在碰撞项中, 可由关联函数 $C(p, p', r)$ 来表征

$$\langle \delta K(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) \delta K(\mathbf{r}', \mathbf{p}', t') \rangle = C(p, p', r) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t'), \quad (2)$$

这是在时间步长内的涨落, 对时间和空间是局域的. 平均场采用下面的形式

2005-07-18 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401)和国家自然科学基金(10105011)资助

1) E-mail: gaohui@impcas.ac.cn

$$U(\hat{f}, \tau_z) = U^{\text{loc}} + U^{\text{sym}} + U^{\text{C}}, \quad (3)$$

其中局域相互作用势

$$U^{\text{loc}} = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (4)$$

系统的对称能

$$U^{\text{sym}} = C \left(\frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} \right) \tau_z, \quad (5)$$

库仑作用势

$$U^{\text{C}} = \frac{1}{2}(1 - \tau_z)V_{\text{C}}, \quad (6)$$

上式中 $\rho_0 = 0.16\text{fm}^{-3}$ 为核物质饱和密度; ρ , ρ_n 和 ρ_p 分别为总的、中子和质子的密度; τ_z 是同位旋第3分量, 对于中子和质子分别等于1和-1; V_{C} 代表库仑势; α , β , γ 采用软势参数. 对称能强度系数 $C = 32\text{MeV}$. 采用并和模型构造原子核碎片, 当两个核子相对位置 $\Delta r_{ij} \leq 2.4\text{fm}$ 、动量差 $\Delta p_{ij} \leq 200\text{MeV}/c$ 时, 这两个核子并到一个碎片中. 为了排除非物理的线状集团, 碎片的半径不能太大. 满足这些条件后就认为是中子集团. 这样我们就可以区分出单个的中子和中子集团.

一般认为晕核由核芯和晕核子组成, 核芯为核物质饱和密度, 晕核子弥散在核芯周围, 因此晕核的核子密度分布是弥散的. 在计算的初始化过程中, 采用了 Skyrme-Hartree-Fock 模型^[10] 计算得出密度分布形式. 然后从密度分布随机抽样出核子的初始坐标和动量, 通过多次的抽样而给出计算误差.

3 结果和讨论

3.1 产生总截面

为了比较不同的晕核产生中子集团的截面, 以 $35\text{MeV}/u$ 的入射能量分别计算了 ^{14}Be , ^{11}Be , ^8He , ^6He , ^{11}Li , ^{17}B 和 ^{19}C 与 ^{12}C 靶的反应, 结果如图1所示. ^{14}Be 和 ^{11}Be 与 ^{12}C 靶反应产生 A_n 的截面如图1(a)所示, 在 ^{14}Be 反应产生的中子集团中, 4_n 的产生截面是 1.65mb , 与 Marques^[5] 的实验结果 1mb 相当. ^{14}Be 的中子集团产生截面在 4_n 处成峰, 而 ^{11}Be 的 3_n 的产生截面最大, 之后随中子集团的中子数增加而减少. ^{14}Be 产生中子集团的截面高于 ^{11}Be .

^8He 和 ^6He 与 ^{12}C 靶反应产生中子集团的截面如图1(b)所示, ^8He 和 ^6He 产生的中子集团中都是 4_n 产生的截面最大, 但是 ^8He 的中子集团产生的截面要比 ^6He 大. ^{11}Li , ^{17}B 和 ^{19}C 与 ^{12}C 靶的反应如图1(c)所示, ^{11}Li 和 ^{17}B 都是在 4_n 处成峰, 具有两个晕中子的 ^{11}Li 和 ^{17}B 产生中子集团的截面比具有一个晕中子的 ^{19}C 要大.

综合图1, 发现中子集团 3_n 和 4_n 产生截面一般比较大, 4_n 以后产生截面随中子数增加而减小, 表明中子越多结合越困难. 对于具有不同晕中子的核, ^{14}Be 和 ^8He 的中子集团产生的截面最大, ^6He , ^{11}Li 和 ^{17}B 次之, ^{11}Be 和 ^{19}C 最小. 因此得出结论, 入射核的晕中子越多产生中子集团的截面越大. 当晕中子数相同时, ^{17}B 产生中子集团的截面比 ^{11}Li 大, ^{11}Li 又比 ^6He 大, ^{19}C 产生中子集团的截面比 ^{11}Be 大. 因此在晕核子数相同时核的质量数越大产生中子集团的截面越大. 但是 ^8He 产生中子集团的截面要比 ^{14}Be 大, ^8He 的物质半径是 $2.52 \pm 0.03\text{fm}$ ^[11], 而 ^{14}Be 的物质半径是 $3.16 \pm 0.38\text{fm}$ ^[11], 也就是说 ^8He 外围的中子分布不像 ^{14}Be 那样弥散得很大, 而是相对集中一些, ^8He 外围的中子可能在核内已经以集团的形式存在, 因此 ^8He 的中子集团产生截面要比 ^{14}Be 大一些. 我们还发现偶数个晕中子的核在 4_n 成峰, 而单中子晕核没有成峰, 是随着中子数增加而减小. 这是由于对效应的影响, 偶数中子晕核容易形成 4_n , 而单中子晕核没有在 4_n 成峰, 表明单中子晕核不容易产生中子集团.

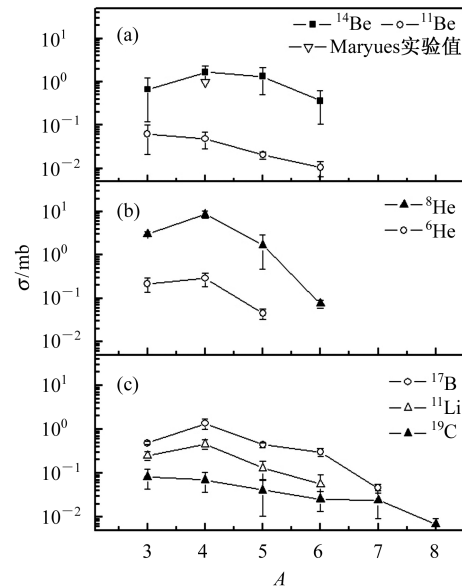


图1 入射能量 $35\text{MeV}/u$ 时, 不同核与 ^{12}C 靶反应产生中子集团 A_n 的截面随 A 的变化

3.2 产生截面与碰撞参数的关系

中子晕核中心是稳定的核芯, 在外围是离中心比较远的晕中子. 由于中子密度分布的这种弥散性, 使得中子集团的产生与碰撞参数有关. 计算中发现具有4个价中子的 ^{14}Be 和 ^8He 产生包含中子数不大于4的中子集团的截面与碰撞参数有很大的关系(如图2所示), 图中 ^{14}Be 和 ^8He 是在不同的碰撞参数下 3_n , 4_n 产

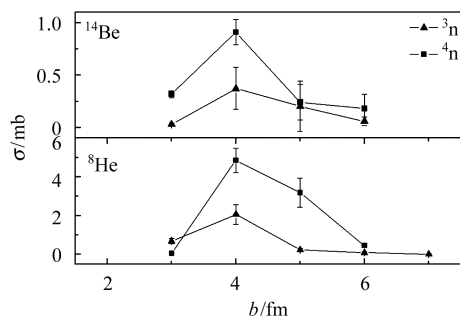


图2 产生截面与碰撞参数的关系

生的截面. 它们有一个共同点就是在碰撞参数 $b = 4\text{fm}$ 时截面出现极大值, 这时的碰撞参数大约是入射粒子核芯半径与靶核半径之和, 这表明擦边碰撞时中子集团容易形成. 在对心碰撞或者近对心碰撞时很难产生中子集团. 因此形成中子集团的中子可能主要

来自晕中子.

4 结论

本文计算了几个晕核的反应中产生中子集团的截面. 发现 ^{14}Be 与 ^{12}C 靶反应的结果与实验结果相当. 通过对具有不同价核子的入射核的比较, 发现晕中子越多越容易产生中子集团, 当晕中子相同时, 质量数越大中子集团产生截面越大. 通过比较不同碰撞参数时的产生的截面, 发现擦边碰撞时中子集团容易形成, 在对心碰撞或者近对心碰撞时很难产生中子集团, 因此形成中子集团的中子可能主要来自价中子. 这些结论对利用放射性核束引起的反应来研究中子集团的实验具有一定的参考意义.

参考文献(References)

- Gräter J et al. Eur. Phys. J., 1999, **A4**: 5—7
- Belozorov A V et al. Nucl. Phys., 1988, **A477**: 131—142
- Chulkov L V et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 201
- Tilley D R, Weller H R. Nucl. Phys., 1992, **A541**: 1—104
- Marques F M et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 044006
- ZHANG F S, Suraud E. Phys. Lett., 1993, **B319**: 35
- ZHANG F S, Suraud E. Phys. Rev., 1995, **C51**: 3201
- ZHANG Feng-Shou, GE Ling-Xiao. Nuclear Multifragmentation. Beijing: 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)
- MING Zhao-Yu et al. HEP&NP, 2000, **24**: 656(in Chinese) (明照宇等. 高能物理与核物理, 2000, **24**: 656)
- Reinhard P G. Computational Nuclear Physics 1 (Edited by Langanke K, Marrhn J A, Koonin S E). Germany: Springer-Verlag, 1991. 28—49
- Ozawa A et al. Nucl. Phys., 2001, **A693**: 32—62

Production Cross Section of Neutron Cluster from the Reaction of Light Neutron Rich Nuclei*

GAO Hui^{1,2,4;1)} XIAO Guo-Qing^{1,2} ZHANG Feng-Shou^{1,3}

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

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

3 (Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing 100875, China)

4 (Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Within the Boltzmann-Langevin equation, the neutron cluster production cross sections in the reactions induced by ^{14}Be , ^8He , ^6He , ^{11}Li , ^{17}B , ^{11}Be , ^{19}C on ^{12}C at 35MeV/u were studied. The experimental data for ^4n production cross section from $^{14}\text{Be}+^{12}\text{C}$ at 35MeV/u can be reproduced. It is found that the production cross section of neutron cluster is large in the reaction that the projectile has more halo nucleons. And the projectiles with big mass number are easy to produce the neutron cluster, when they have the same number of halo nucleons. The neutron cluster is probably mainly from the halo nucleons of projectile.

Key words Boltzmann-Langevin equation, neutron cluster, production cross section

Received 18 July 2005

*Supported by Major State Basic Research Development Program(G2000077401) and National Natural Science Foundation of China(10105011)

1) E-mail: gaohui@impcas.ac.cn