

文章编号: 1007-4627(2009)04-0288-06

通过破裂反应研究轻丰中子核的集团结构*

范凤英, 郑 涛[#], 叶沿林[#], 江栋兴, 华 辉, 李智焕, 葛愉成, 史 帆, 聂鹏煊
(北京大学物理学院核科学与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 概括介绍了关于轻丰中子同位素链集团结构的理论模型和通过破裂反应研究该结构的实验方法、实验装置及物理分析。

关键词: 集团结构; 破裂反应; 激发能谱; 轻丰中子核

中图分类号: O571.2 **文献标识码:** A

1 引言

放射性核束的产生和发展为研究远离稳定线核素的奇异结构以及特殊反应机制提供了新的机遇。早在基于平均场理论的壳模型提出之前, 甚至在中子发现之前就有人提出了原子核集团结构的概念。

长期以来, $N=Z$ 核素基态和激发态的集团结构一直是非常重要的研究课题^[1-3]。对于不稳定核, 其衰变阈附近激发态集团结构的研究特别重要^[2, 3]。对于弱束缚的轻丰中子核, 当前研究的重点是 α 集团加价中子结构。Horiuchi^[4] 曾经用这样一个图像来描述该结构: 滴线核的自然态可以被看作是具有大致相同的质子数和中子数的核物质“岛”被包围在一个中子“海”中。核心集团结构的出现导致价中子的束缚能最大化, 从而使得滴线核达到稳定状态。这种结构将会引起共价分子的束缚效应, 原子核分子集团结构会出现在形变壳模型框架下的超形变和巨形变的极端情况下^[5]。

本文主要介绍轻丰中子核集团结构的理论研究及实验研究方法, 作为开展相关研究工作的参考。

2 集团结构的理论研究

19 世纪 60 年代, 微观集团结构模型广泛应用到 $N=Z$ 的具有 α 集团结构的核素中。1968 年 Ikeda 等提出的 Ikeda diagram 指出: α 集团结构存在

于集团衰变阈附近区域^[2, 3]。随后几十年该结构的研究引起了人们极大的兴趣。

Horiuchi 等应用反对称分子动力学 (Antisymmetrized Molecular Dynamics, 简称 AMD) 模型研

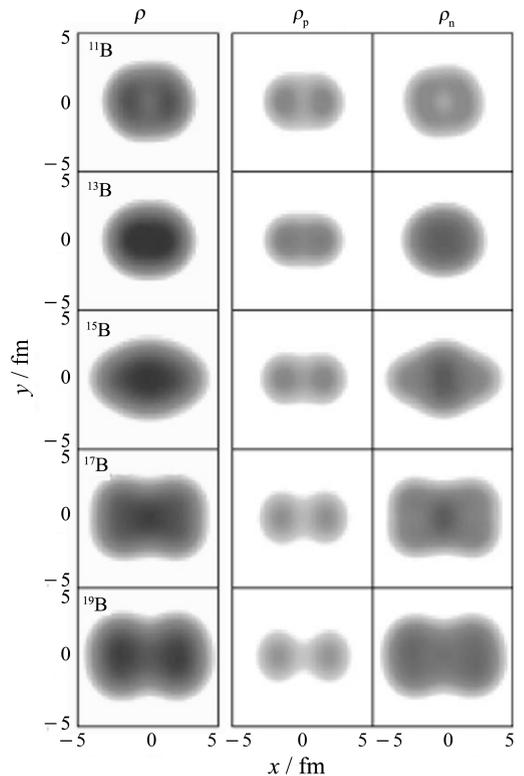


图 1 AMD 计算得到的奇 A 核¹¹B—¹⁹B 的密度分布^[6]

* 收稿日期: 2009-02-27; 修改日期: 2009-05-25

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB815002); 国家自然科学基金资助项目(10405002, 10775003, 10720003), 国家基础科学人才培养基金(J0730316)

作者简介: 范凤英(1977-), 女(汉族), 内蒙古呼和浩特人, 博士生, 从事实验核物理研究;

E-mail: fanfy@mail.tsinghua.edu.cn

通讯联系人: 郑涛, E-mail: tzheng@hep.pku.edu.cn; 叶沿林, E-mail: yeyl@pku.edu.cn

究了轻丰中子核的集团结构^[6-8]。该模型对轻核基态及激发态的结构研究是一种非常有用的理论方法。模型不依赖于惰性核心和集团存在的假设。在 AMD 的理论框架下,体系的基波函数由斯莱特行列式给出,其中每一个单粒子波函数空间部分是一个高斯波包。AMD 模型的一个特征是波函数的灵活性,波函数能描述不同的集团结构和类壳模型结构;另外一个特征是在能量变化中采用的摩擦冷却方法(the frictional cooling method)^[6],用来得到能量变化中的基态和激发态。AMD 模型系统研究了随着中子数增加和激发能增加核结构的变化趋势。奇质量数($A=11-19$)的 B 同位素的计算如图 1 所示。计算表明,随着中子数的增加分子集团效应变得非常显著,滴线核¹⁹B 具有高度集团结构。采用自旋-宇称投影后变分(Variation After the spin-parity Projection, 简称 VAP)方法的 AMD 模型计算也显示,¹⁰Be 和¹²Be 激发态存在分子集团结构。

Itagaki 等应用核分子轨道(Molecular Orbit, 简称 MO)模型研究了 Be 和 C 同位素的分子集团结构^[9, 10]。该模型分别引入了 π 轨道和 σ 轨道描述 α 集团周围的价中子,如图 2 所示。价中子轨道垂直于 α - α (z 轴)的称作 π 轨道;平行于 α - α (z 轴)的称作 σ 轨道。在目前理论框架下,引入的每一个价中

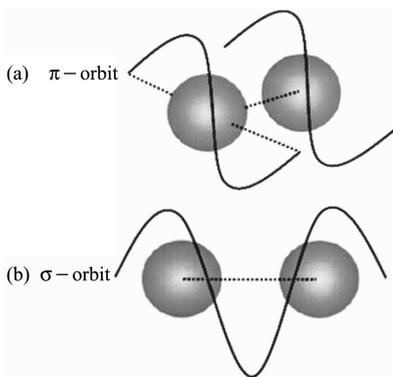


图 2 单价中子轨道示意图^[10]

子轨道都有明确的 K^π 值。对于 Be 同位素和 C 同位素,价中子具有 3 个基本的轨道。¹⁰Be 所有的低阶正宇称和负宇称态及¹²Be 基态,都可以通过 2α 集团周围价中子所占据的 3 个基本轨道清晰描述。对于 C 同位素($A=12, 14, 16$), 3α 线性链态稳定性的计算结果表明,两个价中子占据 π 轨道和两个价中子占据 σ 轨道的¹⁶C ($(3/2^-)_{\pi}^2 (1/2^-)_{\sigma}^2$) 结构是稳

定¹⁶C 线性链态最重要的结构,该结构可能出现在较高的激发能区。

Masui 等结合简化的自旋-轨道(Simplified Modeling of Spin-Orbit, 简称 SMSO)模型和 AMD triple-S 系统研究了 C 同位素集团态和壳模型态之间的竞争机制(the cluster-shell competition)^[11]。在该模型中,¹²C 核心被描述为具有等边三角形的 3α 集团结构。同时引入两个参数 R_1 和 Λ , 分别表征 α - α 之间的距离和其中一个 α 集团的弥散。随着中子数的增加,从这两个参数所表征的集团态和壳模型态的变化趋势中发现,基态¹⁶C 原子核中的¹²C 核心与自由的¹²C 核比较,更趋向于类似壳模型的结构。对¹⁶C 核的能级计算显示,要出现纯的集团结构,需要把¹⁶C 核布居到约 10 MeV 的激发能区。

迄今为止,对于更复杂的多集团体系的原子核结构研究还尚未成熟,有待相应理论研究的进一步发展。

3 破裂反应实验研究

基于以上的理论预言,轻丰中子核集团结构可以通过破裂反应进行研究。破裂反应过程可表述为: $A+T \rightarrow B^* + 3$, $B^* \rightarrow 1+2$ 。其中 A 代表炮弹核, T 代表靶核, B 代表目标核, 1, 2 和 3 分别代表 3 种末态粒子。当弹核和靶核发生相互作用,目标核被布居到具有集团结构的激发态,之后发生破裂反应,破裂产物集中在前角区。实验上通过测量破裂产物(1, 2)的动量,从而可以重建破裂前 B^* 核集团衰变阈附近的激发能谱^[12-28]。

图 3 给出了由破裂反应产生的三体末态产物的速度矢量示意图。其中 θ_{cm}^* 是 B 核在其质心系下的散射角; ψ 是破裂产物在 B 核质心系下的发射角。

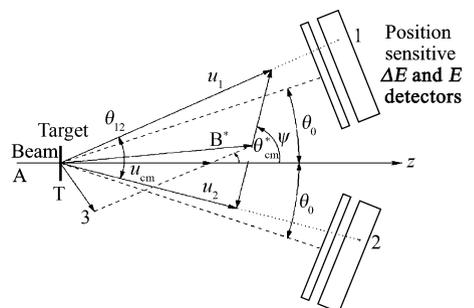


图 3 三体末态反应产物速度矢量示意图^[13]

B^* 核激发能 $E_x(B^*)$ 表示为

$$E_x(B^*) = E_{rel} + E_{thresh}$$

$$= E_{rel} + (m_1 + m_2 - m_B)c^2, \quad (1)$$

式中, E_{thresh} 是两体破裂反应 Q 值, E_{rel} 是相对运动能量. E_{rel} 可以表示为

$$E_{rel} = \frac{1}{2}\mu u_{rel}^2 = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \times$$

$$[u_1^2 + u_2^2 - 2u_1 u_2 \cos \theta_{12}]$$

$$= \frac{1}{m_1 + m_2} [m_1 E_2 + m_2 E_1 -$$

$$2\sqrt{m_1 m_2 E_1 E_2} \cos \theta_{12}], \quad (2)$$

式中, μ 是破裂碎片 1, 2 的约化质量, u_{rel} 是碎片 1, 2 的相对运动速度, u_1, u_2 和 θ_{12} 分别是其速度及其张角, 如图 3 所示. 通过破裂碎片的能量 (E_1, E_2) 和其张角 (θ_{12}) 测量, 通过公式 (1) 和 (2) 可以重构破裂前的激发状态.

图 4 给出了典型的轻丰中子核集团结构研究的破裂反应实验装置^[17-19]. 由图可见, 在次级靶前放置了两个位置灵敏气体探测器, 用以测量入射粒子的方向. 破裂产物的出射方向测量和能量测量由靶后望远镜结构的 ΔE - E 探测器给出. 该望远镜是由位置灵敏硅探测器 (硅微条探测器或者大面积位置灵敏硅探测器等) 和 CsI(Tl) 闪烁体探测器阵列组成. 利用硅探测器得到的带电碎片的能损信号 (ΔE) 和 CsI(Tl) 探测器得到的总能量信号 (E) 对反应碎片进行鉴别. 塑料闪烁体阵列组成的中子探测器可以探测在破裂反应过程中产生的中子.

Freer 等通过重建集团衰变阈附近的激发能谱对具有两中心结构的 Be 同位素 ($^9-^{14}\text{Be}$) 进行了实验研究^[12-14, 20, 23, 28]. 图 5 给出了由测量两个破裂碎片的相对运动速度重建的 ^{12}Be 与 ^{12}C 靶和 $(\text{CH}_2)_n$ 靶非弹散射后破裂反应前的激发能谱, 其破裂反应道分别是 $^6\text{He} + ^6\text{He}$ 和 $^4\text{He} + ^8\text{He}$ ^[12, 14]. 图 5 (a) 是

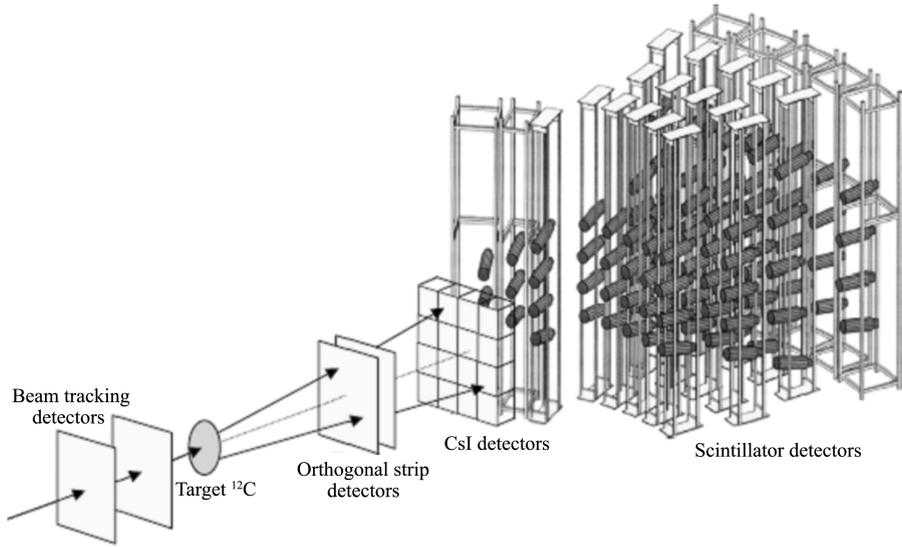


图 4 轻丰中子核破裂反应实验装置示意图

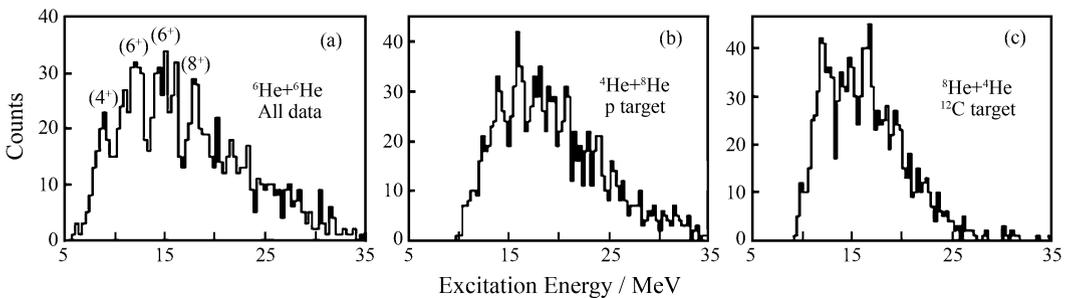


图 5 从破裂产物重建的 ^{12}Be 激发能谱^[12]

由 ${}^6\text{He}+{}^6\text{He}$ 破裂反应道重建得到的激发能谱。激发能值和部分自旋值如表 1 所示。分析该破裂反应道，末态产物的自旋都为 0，通过逐个事件测量衰变角(θ_{cm}^* 和 ψ)，可以得到对应于 ${}^{12}\text{Be}$ 每一激发态的衰变角关联，由角关联进一步抽取自旋信息。图 5 (b)和图 5(c)也分别给出了由 ${}^{12}\text{Be}$ 在 p 靶和 ${}^{12}\text{C}$ 靶上的 ${}^4\text{He}+{}^8\text{He}$ 破裂反应道重建的激发能谱。激发能值如表 2 所示。通过 ${}^6\text{He}+{}^6\text{He}$ 破裂反应道所对应激发态的能量-自旋特征分析与 AMD 的计算对比^[2]，得到 ${}^{12}\text{Be}$ 可能具有 α -4n- α 的分子集团结构^[12, 14]。要充分证实这一结论，实验上还需要精细测量这一反应道的衰变宽度。

表 1 从破裂产物 ${}^6\text{He}+{}^6\text{He}$ 重建的 ${}^{12}\text{Be}$ 激发能值及相应的自旋值^{[6]*}

E_x/MeV	J
13.2	4
14.9	—
16.1	6
17.8, 18.6, 19.3	6
20.9	8
22.8	—
(24.0)	—
(25.1)	—

* () 中的数据为试验值。

表 2 从破裂产物 ${}^8\text{He}+{}^4\text{He}$ 重建的 ${}^{12}\text{Be}$ 激发能值^[6]

${}^{12}\text{C}$ target	E_x/MeV	${}^1\text{H}$ target	E_x/MeV
	12.1		—
	14.1		14.1
	15.1		—
	16.5		16.0
	—		17.4
	—		18.2
	—		19.4
	—		20.7

近期对丰中子 C 同位素三中心分子集团结构的实验研究也逐渐丰富起来^[15, 16, 18, 20, 21, 24, 26, 27]。Price 等通过测量 ${}^{14}\text{C}({}^{14}\text{C}, {}^{14}\text{C}[{}^{10}\text{Be}+\alpha])$ 非弹激发后的两个破裂碎片的相对运动速度，重建了 ${}^{14}\text{C}$ 的激发能谱^[26]。通过动量守恒，由入射束流 ${}^{14}\text{C}$ 及两个破裂产物 ${}^{10}\text{Be}$ 和 α 的动量可以得到反冲靶核

(${}^{14}\text{C}$) 的动量，由此得到反冲靶核动能。进一步计算得到 3 个末态粒子(反冲靶核 ${}^{14}\text{C}$ 及破裂产物 ${}^{10}\text{Be}$ 和 α) 的总能量 E_{tot} 。由破裂产物 ${}^{10}\text{Be}$ 和 α 符合测量得到的 ${}^{14}\text{C}({}^{14}\text{C}, {}^{10}\text{Be}+\alpha){}^{14}\text{C}$ 反应的总末态能量谱如图 6 所示。由于总能量与反应 Q 值关系：

$$Q = E_{\text{tot}} - E_{\text{beam}}, \quad (3)$$

因此由总能量谱分析可以得到 3 个末态粒子各自所处的状态。如图 6 所示，86.2 MeV 处的最强峰相应于 ${}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}+\alpha$ 的衰变，反应 Q 值是一 12.011 MeV；82.8 MeV 处的峰对应于 ${}^{10}\text{Be}(2^+, 3.37 \text{ MeV})+\alpha$ 衰变；79.4 MeV 总能量峰相应于 ${}^{10}\text{Be}$ 或反冲粒子激发；总能谱上低于最强峰 10.8 MeV 处的峰相应于反冲粒子和破裂产物激发。

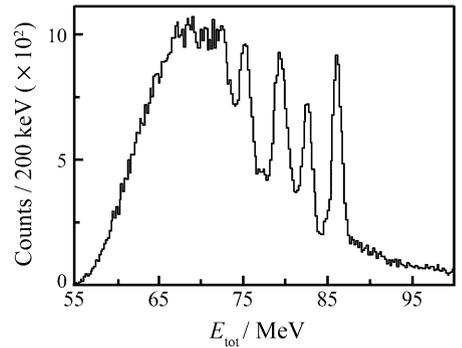


图 6 ${}^{14}\text{C}({}^{14}\text{C}, {}^{10}\text{Be}+\alpha){}^{14}\text{C}$ 反应的总末态能量谱^[26]

通过对总能量谱上不同的峰开门，重建了破裂前 ${}^{14}\text{C}$ 弹核的激发能谱，如图 7 所示。图 7(a)相应于 ${}^{10}\text{Be}_{\text{gs}}+\alpha$ 的衰变，重建的激发能值分别是 $E_x = 14.3, 14.8, 15.6, 16.4, 17.3$ 以及 18.6 MeV 。图 7(b)对应于 ${}^{10}\text{Be}(2^+, 3.37 \text{ MeV})+\alpha$ 衰变，激发能值 $E_x = 17.3, 18.4, (19.0), 19.8$ 以及 $(21.6) \text{ MeV}$ 。在以上两个激发能谱重叠区域具有很好的一致性。对于 79.4 MeV 总能量峰的分析较为复杂，相应于其高能区域的激发能谱是破裂到 ${}^{10}\text{Be}$ 的 $\sim 6 \text{ MeV}$ 的激发能区域，如图 7(c)所示，对应于激发能 $E_x = 20.4, 20.9, (21.9), (22.5)$ 以及 $(23.1) \text{ MeV}$ ；而对应于总能量峰低能区域的激发能谱主要是反冲粒子激发，重建的激发能 $E_x = (14.8), 15.7, 16.4 \text{ MeV}$ ，显示在 7(d)中。相应于更低的总能量峰的激发能谱，如图 7(e)所示，对应于激发能 $E_x = 18.4, (19.0), (19.3), 19.8, (20.3)$ 以及 $(20.6) \text{ MeV}$ 。衰变角(θ_{cm}^* 和 ψ) 关联分析^[29] 也给出了 15.6 MeV 的激发态的 $J^\pi = 3^-$ 。由于其它激发态

的数据统计不够,因此通过角关联分析不能很好地确定自旋和宇称。实验上需要通过高统计测量来进一步确定这些激发态的自旋和宇称。

^{14}C 激发态还可以通过单中子转移反应 ^{14}C (^{13}C , $^{10}\text{Be} + \alpha$)^[16], $^7\text{Li}(^9\text{Be}, ^{10}\text{Be} + \alpha)$ 反应^[27] 以及在 ^{13}C 靶上的中子共振散射 $^{13}\text{C}(n, n)$ ^[30] 等实验方法来布居。这些反应中观察到的 ^{14}C 的激发能谱具有很好的一致性。研究表明, ^{14}C 激发态既存在扁长形变也存在扁圆形变的分子集团结构^[15, 31]。

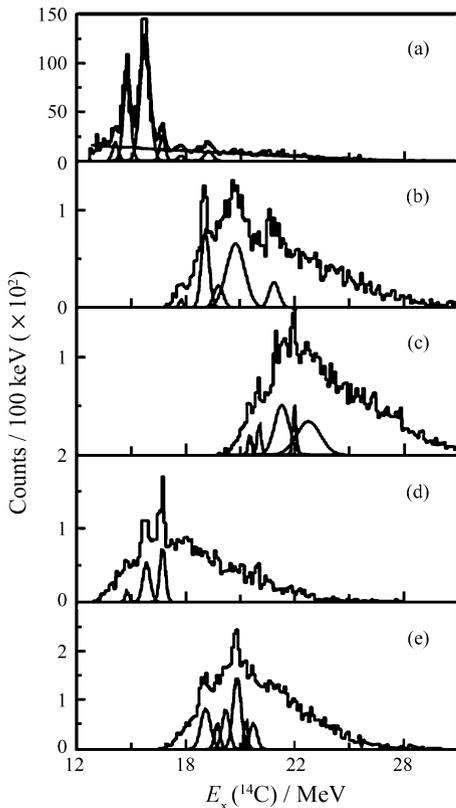


图 7 从破裂产物 ^{10}Be 和 α 重建的 ^{14}C 激发能谱^[26]

对于 C 同位素链上的丰中子核 ^{16}C 而言,理论上曾预言该核的激发态存在 3α 集团加 4 个价中子的分子集团结构。我们实验小组也通过 47.5 MeV/u 的 ^{16}C 在 ^{12}C 靶上的破裂反应对 ^{16}C 核的集团结构进行了实验研究。实验中测量到了 He, Li, Be 和 B 等带电碎片,它们是由前角度望远镜 ΔE -E 探测器阵列测量给出。通过分析破裂反应碎片可以进一步重建 ^{16}C 核的激发能谱,目前数据处理正在进行中。

4 小结

本文主要介绍了轻丰中子核集团结构研究的理

论模型及实验上通过破裂反应研究该结构的实验方法、实验装置及物理分析。

随着理论模型如 AMD, MO 和 SMSO 等的不断发展,人们对轻丰中子核的集团分子结构的物理图像越来越清晰。实验探测技术的发展和探测精度的提高,对轻丰中子核集团结构的研究从 Be 同位素的两中心分子集团结构扩展到 C 同位素的三中心分子集团结构。实验上通过对破裂反应碎片的符合测量可以重建发生破裂反应前核的激发能谱,进一步由衰变角关联测量来抽取激发态的自旋和宇称值,从而得到核的结构信息。要得到更精细的衰变宽度以及更多激发态的自旋和宇称等信息,还需要加入 γ 和中子的符合测量,这有赖于探测技术的进一步发展。

参考文献 (References):

- [1] Freer M, Merchant A C. J Phys, 1997, **G23**: 261.
- [2] Ikeda K, Tagikawa N, Horiuchi H, *et al.* Prog Theor Phys, 1968, Extra Number: 464.
- [3] Horiuchi H, Ikeda K, Suzuki Y, *et al.* Prog Theor Phys, 1972, Chapt. **3**(Suppl): 52.
- [4] Horiuchi H. Proceedings of the Seventh International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics. Singapore, River Edge, NJ, Island of Rab (Croatia): World Scientific, 2000, 405.
- [5] Von Oertzen W, Freer Martin, Kanada-En'yo Yoshiko, *et al.* Phys Rep, 2006, **432**: 43.
- [6] Kanada-En'yo Y, Horiuchi H. Prog Theor Phys, 2001, **142**: 205.
- [7] Takemoto H, Horiuchi H, Ono A. Phys Rev, 2001, **C63**: 034615.
- [8] Kanada-En'yo Y, Horiuchi H. Phys Rev, 2003, **C68**: 014319.
- [9] Itagaki N, Okabe S, Ikeda K, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 014301.
- [10] Itagaki N, Okabe S, Ikeda K. Prog Theor Phys, 2001, **142** (Suppl): 297.
- [11] Masui H, Itagaki N. Phys Rev, 2007, **C75**: 054309.
- [12] Freer M, Angelique J C, Axelsson L, *et al.* Phys Rev, 2001, **C63**: 034301.
- [13] Curtis N, Caussyn D D, Fletcher N R, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 044604.
- [14] Freer M, Angelique J C, Axelsson L, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **82**: 1383.
- [15] Von Oertzen W, Bohlen H G, Milin M, *et al.* Eur Phys J,

- 2004, **A21**: 193.
- [16] Price D L, Freer M, Ahmed S, *et al.* Nucl Phys, 2006, **A765**: 263.
- [17] Ahmed S, Freer M, Angelique J C, *et al.* Phys Rev, 2004, **C69**: 024303.
- [18] Ashwood N I, Freer M, Angelique J C, *et al.* Phys Rev, 2004, **C70**: 064607.
- [19] Ashwood N I, Freer M, Angelique J C, *et al.* Phys Rev, 2004, **C70**: 024608.
- [20] Leask P J, Achouri L, Angelique J C, *et al.* J Phys, 2001, **G27**: B9.
- [21] Greenhalgh B J, Fulton B R, Watson D L, *et al.* Phys Rev, 2002, **C66**: 027302.
- [22] Ashwood N I, Freer M, Ahmed S, *et al.* Phys Lett, 2004, **B580**: 129.
- [23] Curtis N, Ashwood N I, Catford W N, *et al.* Phys Rev, 2005, **C72**: 044320.
- [24] Soic N, Freer M, Donadille L, *et al.* Nucl Phys, 2003, **A728**: 12.
- [25] Curtis N, Ashwood N I, Baby L T, *et al.* Phys Rev, 2006, **C73**: 057301.
- [26] Price D L, Freer M, Ashwood N I, *et al.* Phys Rev, 2007, **C75**: 014305.
- [27] Soic N, Freer M, Donadille L, *et al.* Phys Rev, 2003, **C68**: 014321.
- [28] Brown T A D, Papka P, Fulton B R, *et al.* Phys Rev, 2007, **C76**: 054605.
- [29] Freer M. Nucl Instr and Meth, 1996, **A383**: 463.
- [30] Resler D A, Knox H D, Koehler P E, *et al.* Phys Rev, 1989, **C39**: 766.
- [31] Itagaki N, Otsuka T, Ikeda K, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **92**: 142501.

Investigation of Cluster Structures of Light Neutron-rich Nuclei by Breakup Reaction^{*}

FAN Feng-ying, ZHENG Tao[#], YE Yan-lin[#], JIANG Dong-xing, HUA Hui,

LI Zhi-huan, GE Yu-cheng, SHI Fan, NIE Peng-xuan

(*School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The theoretical models of the cluster structures of the light neutron-rich nuclei as well as the corresponding physical mechanism and experimental approaches by breakup reaction have been introduced, which may serve as references for possible experimental studies of the cluster structure of light neutron-rich nuclei.

Key words: cluster structure; breakup reaction; light neutron-rich nuclei; spectrum of excitation energy

* **Received date:** 27 Feb. 2009; **Revised date:** 25 May 2009

* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program(973 Program) of China(2007CB815002); National Natural Science Foundation of China(10405002, 10775003, 10720003); National Fund for Fostering Talents of Basic Science (NFFTBS)(J0730316)

Corresponding author: Zheng Tao, E-mail: tzheng@hep.pku.edu.cn; Ye Yan-lin, E-mail: yeyl@pku.edu.cn