

${}^6\text{Li}$ 第二激发态中子-质子晕结构的首次实验证实

李志宏, 柳卫平, 白希祥, 连 钢, 李志常, 曾 晟

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要: 利用北京 HF-13 串列加速器次级束流线产生的能量为 4.17 A MeV 的 ${}^6\text{He}$ 束对电荷交换反应 ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ 的角分布进行了逆运动学的测量。实验结果与微观计算的比较表明: ${}^6\text{Li}$ 第二激发态和 ${}^6\text{He}$ 的基态都具有晕结构。本工作首次证实了 K. Arai 等 1995 年提出的 ${}^6\text{Li}$ 第二激发态具有中子-质子晕结构的理论预言。

关键词: ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ 逆运动学反应; 角分布; 微观光学势; 核子密度分布; 晕结构

中图分类号: O571 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2003)02-0097-04

First Experimental Evidence of the Neutron-proton Halo Structure in the Second Excited State of ${}^6\text{Li}$

LI Zhi-hong, LIU Wei-ping, BAI Xi-xiang, LIAN Gang, LI Zhi-chang, ZEN G Sheng

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China)

Abstract: The angular distributions for charge exchange reaction of ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ are measured in inverse kinematics with a secondary ${}^6\text{He}$ beam at the energy of 4.17 A MeV produced by the secondary beam facility at HF-13 tandem accelerator, Beijing. The comparison between experimental results and theoretical calculation indicates that both the ground state of ${}^6\text{He}$ and the secondary excited state of ${}^6\text{Li}$ have halo structure. The present work reveals the neutron-proton halo structure in the secondary excited state of ${}^6\text{Li}$ predicted by K. Arai et al for the first time.

Key words: ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ reaction in inverse kinematics; angular distribution; microscopic optical potential; nucleon density distribution; halo structure

到目前为止,实验揭示的具有显著晕结构的基态核大多在中子滴线附近。由于位于中子滴线附近的原子核具有较高的同位旋, Y. Suzuki等^[1]提出一个问题:稳定核的高同位旋激发态是否具有晕结构? 如果答案是肯定

的,中子晕核的同位旋相似态则应具有晕结构。K. Arai等^[2]利用微观三体模型计算了 ${}^6\text{He}$ 基态及其同位旋相似态,即 ${}^6\text{Li}$ 的3.563 MeV 0^+ 态的核子密度分布,提出后者的晕比前者更显著,为一以 ${}^4\text{He}$ 为核心的中子-质子晕核。

收稿日期:2002-04-26;修回日期:2002-09-23

基金项目:国家重点基础研究发展规划973项目(G200077400);国家自然科学基金资助项目(19735010,19935030,10025524和10045002)

作者简介:李志宏(1968—),男,河南太康人,博士,副研究员,粒子物理与核物理专业

法国 GANIL 和美国 MSU 实验室曾分别用能量为 41.6 A MeV 和 93 A MeV 的 ^6He 次级束测量过 $^1\text{H}(^6\text{He}, ^6\text{Li})n$ 反应在 0 附近的微分截面, 试图通过 ^6He 基态到 ^6Li 第二激发态 (0^+) 的 Fermi 跃迁与到 ^6Li 基态 (1^+) 的 GT 跃迁的强度之比来研究 ^6Li 第二激发态的晕结构^[3~6]。在他们的实验中, 没有观察到预期的 ^6Li 第二激发态的中子-质子晕效应。有的微观理论分析表明: 0 附近的该跃迁强度比是对是否存在晕结构不敏感, 欲揭示 ^6Li 第二激发态的晕结构, 应该测量 $^1\text{H}(^6\text{He}, ^6\text{Li})n$ 反应完整的角分布。

本工作利用能量为 4.17 A MeV 的 ^6He 次级束测量逆运动学反应 $^1\text{H}(^6\text{He}, ^6\text{Li})n$ 布居 ^6Li 基态和第二激发态的角分布, 并给出微观分析的结果。

1 实验

本实验在 HF13 串联加速器的次级束流线^[7~9]上完成, 实验装置示于图 1。利用 44 MeV 的 ^7Li 束轰击前后窗为 1.9 mg/cm^2 、气压为 $1.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的氘气靶, 通过 $^2\text{H}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^3\text{He}$ 反应产生 ^6He 。仔细调节次级束流线的 D-Q-Q 磁分离聚焦系统, 得到能量为 35.7 MeV、纯度好于 90% 的 ^6He 次级束。次级束中的主要杂质是 $^7\text{Li}^{2+}$ 、 $^7\text{Li}^{3+}$ 、 $^4\text{He}^{2+}$ 和 $^6\text{Li}^{2+}$, 其中的 $^6\text{Li}^{2+}$ 虽很少, 但对次级反应的测量影响很大。为了阻止掉次级束中的 ^7Li 和 ^6Li 成分, 在次级靶前放置一厚度为 45.9 mg/cm^2 的 Al 吸收片。通过

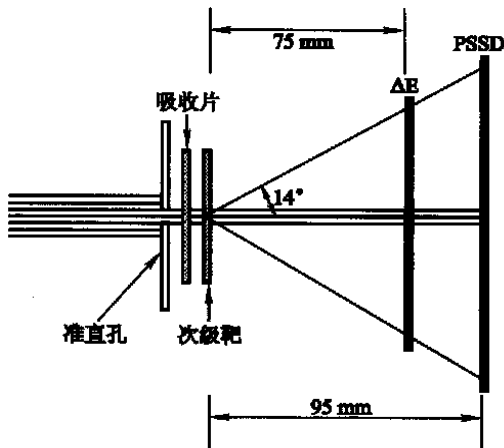


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

吸收片后的 ^6He 束能量为 25 MeV, 经 $\phi 3 \text{ mm}$ 的准直孔后打到厚度为 1.5 mg/cm^2 的 $(\text{CH}_2)_n$ 靶上, 用 E 和位置灵敏硅半导体探测器 (PSSD) 测量次级反应的产物。PSSD 与 $(\text{CH}_2)_n$ 靶的距离为 95 mm, 覆盖的实验室系出射角度的范围为 $0^\circ \sim 14^\circ$, 可保证对反应产物 ^6Li (最大出射角为 12.8°) 的全立体角探测。实验的角度误差为 2° , 主要来自 ^6He 通过 Al 吸收片时产生的角度歧离。

实验对 $(\text{CH}_2)_n$ 靶积累了 1.38×10^8 个 ^6He 事例, 对 C 靶积累了 6.53×10^7 个 ^6He 事例。测量的 $E-E$ 二维谱示于图 2。为了节省数据处理时间, 在 $E=1.8 \text{ MeV}$ 处用软件设置一条分隔线, 在该线下面的事例被随机地除以 100。由 $E-E$ 二维谱上选出 ^6Li 事例的 $E_t - \theta_{\text{lab}}$ 二维谱示于图 3。其中, E_t 为总能量, θ_{lab} 为由 PSSD 的位置数据转化成的实验室出射角。从图 3 可以鉴别出 ^6Li 的基态和第二激发态。

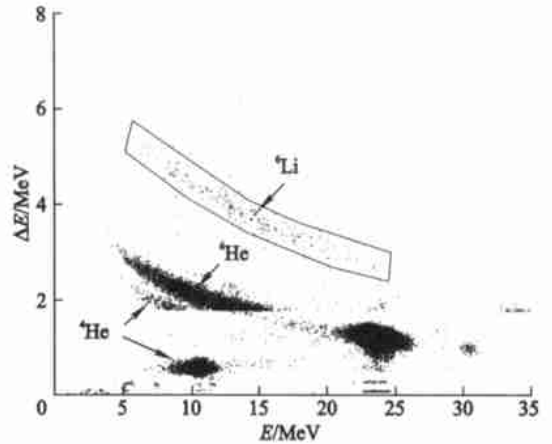


图 2 $E-E$ 二维谱

Fig. 2 Scatter plot of $E-E$

反应的角分布示于图 4。可以看出: 在质心系角度为 90° 附近, $^1\text{H}(^6\text{He}, ^6\text{Li})n$ 反应布居 ^6Li 第二激发态的几率明显高于布居 ^6Li 基态的几率。图中截面的误差主要来自统计的不确定性, 角分辨太差是由于出射粒子的角度误差从实验室系到质心系转换时被放大的缘故。实线和虚线是零力程的 DWBA 近似计算结果。

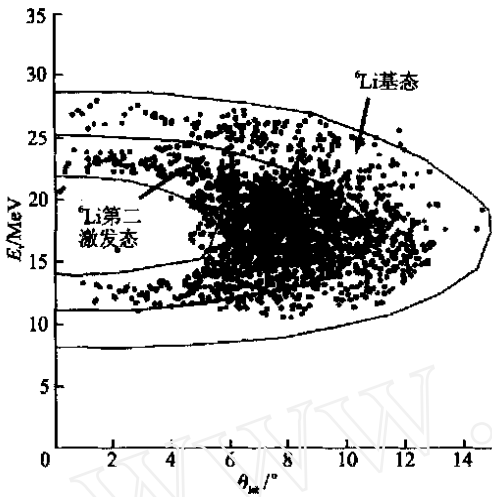


图3 ⁶Li 的 E_t -lab 二维谱
Fig. 3 Scatter plot of E_t -lab

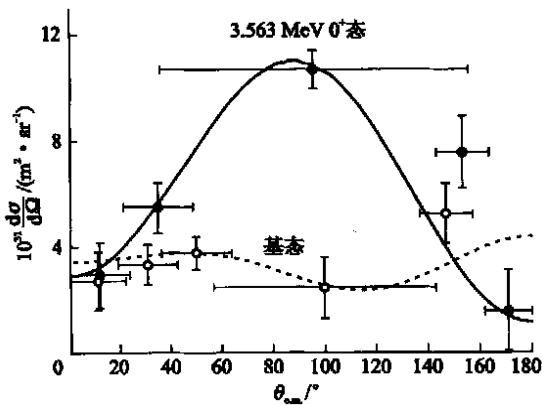


图4 ¹H(⁶He, ⁶Li) n 反应的角分布

Fig. 4 Angular distributions of ¹H(⁶He, ⁶Li) n reactions
——⁶Li 基态; ——⁶Li 第二激发态

2 理论分析

利用文献上给出的⁶He 和⁶Li 核子的密度分布, 计算了入射道和出射道的微观光学势^[10]。将该光学势输入 KORP 核反应程序^[11,12], 可以计算出反应布居⁶Li 的角分布。实际计算中, ⁶He 和⁶Li 第二激发态的核子密度分布利用了三体模型的计算结果^[2]。对于⁶Li 基态的无晕结构, 假定其中子密度分布和质子密度分布与高能电子散射实验得到的电荷密度分布^[13]一致。计算结果如图 4 中的实线和虚线所示, 与实验结果符合得相当好。

图 5 形象地显示出有晕结构和无晕结构的

核子密度分布计算出的¹H(⁶He, ⁶Li) n 反应布居⁶Li 第二激发态的角分布。有晕结构的核子密度分布如上所述。对于无晕结构的情况, 假定⁶He 的中子密度分布与质子密度分布相同, ⁶Li 的第二激发态的核子密度分布与⁶Li 基态的核子密度分布相同。由图 5 可以看出: 只有假定⁶Li 的第二激发态和⁶He 的基态都有晕结构, 才能得到与实验一致的结果。

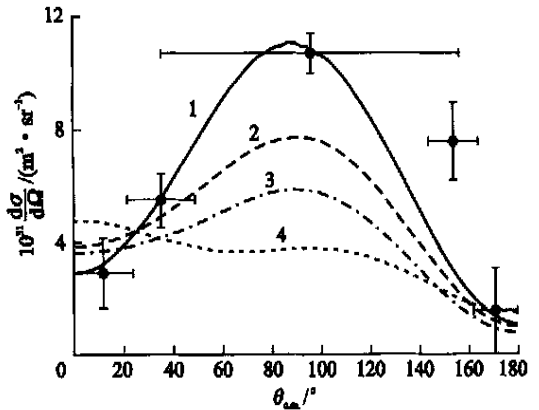


图5 不同核子密度分布的 DWBA 计算出的布居⁶Li 第二激发态的角分布

Fig. 5 Differential cross sections populated to the second excited state of ⁶Li calculated by DWBA with different nucleon density distributions

- 1 ——⁶Li 和⁶He 都有晕结构;
- 2 ——⁶Li 有晕结构, ⁶He 无晕结构;
- 3 ——⁶He 有晕结构, ⁶Li 无晕结构;
- 4 ——⁶Li 和⁶He 都没有晕结构

3 结论

利用 HF-13 串列加速器次级束流线产生的 4.17 A MeV 的⁶He 束, 测量了¹H(⁶He, ⁶Li) n 反应生成⁶Li 基态和第二激发态的角分布。利用核子密度分布进行的 DWBA 微观计算表明: 只有假定⁶Li 第二激发态和⁶He 的基态都具有晕结构才能得到与实验一致的结果。本实验首次证明了 K. Arai 等 1995 年提出的⁶Li 第二激发态具有中子-质子晕结构的理论预言。

作者对申庆彪、林承键的理论指导和 HF-13 串列加速器运行人员在实验中所给予的帮助表示感谢。

参考文献:

- [1] Suzuki Y, Yabana K. Isobaric Analogue Halo States [J]. Phys Lett, 1991, B272: 173~177.
- [2] Arai K, Suzuki Y, Varga K. Neutron-proton Halo Structure of the 3.563 MeV 0^+ State in ${}^6\text{Li}$ [J]. Phys Rev, 1995, C51:2 488~2 493.
- [3] Cortina-Gil MD, Rousset-Chomaz P, Alamanos N, et al. Search for the Signature of a Halo Structure in the $p({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ Reaction [J]. Phys Lett, 1996, B371:14~18.
- [4] Brown JA, Bazin D, Benenson W, et al. Measurement of the ${}^1\text{H}({}^6\text{He}, {}^6\text{Li})n$ Reaction in Inverse Kinematics [J]. Phys Rev, 1996, C54:R2 108~R2 150.
- [5] Cortina-Gil MD, Rousset-Chomaz P, Alamanos N, et al. Elastic Scattering and Charge Exchange Reaction With Light Neutron Rich Exotic Beams[J]. Nucl Phys, 1997, A616:215c~222c.
- [6] Cortina-Gil MD, Rousset-Chomaz P, Alamanos N, et al. Charge-exchange Reaction Induced by ${}^6\text{He}$ and Nuclear Densities [J]. Nucl Phys, 1998, A641:263~270.
- [7] Bai XX, Liu WP, Qin JC, et al. A Facility for Production and Utilization of Radioactive Beams [J]. Nucl Phys, 1995, A588:273c~276c.
- [8] Liu WP, Bai XX, Zhou SH, et al. Angular Distribution for the ${}^7\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$ Reaction at $E_{c.m.} = 5.8$ MeV and the $S_{17}(0)$ Factor for the ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ Reaction[J]. Phys Rev Lett, 1996, 77:611~614.
- [9] Liu WP, Bai XX, Zhou SH, et al. Measurement of the Angular Distribution for the ${}^7\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$ Reaction and Determination of the Astrophysical S Factor for the ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ Reaction[J]. Nucl Phys, 1997, A616:131c~136c.
- [10] Shen Q, Zhang J, Tian Y, et al. Semi-microscopic Optical Potential Calculation by the Nuclear Matter Approach [J]. Z Phys, 1981, A303:69.
- [11] Shen Q, Zhang J. Approach for Calculation Multi-step Direct Reactions of Continuum and Discrete Levels[J]. Phys Rev, 1994, C50:2 473~2 479.
- [12] Yu Z, Zuo Y. A Program for Calculating the Direct (n, p) or (p, n) Reaction by Using DWBA Method: CNIC-00736, NKU-0002 [R]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993.
- [13] Li GC, Sick I, Whitney RR, et al. High-energy Electron Scattering From ${}^6\text{Li}$ [J]. Nucl Phys, 1971, A162:583~592.