

## 超核 $\gamma$ 谱学研究进展

周书华

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 近年来, 在  $^6\text{Li}$  超核  $\gamma$  谱学实验中, 通过基态二重态间自旋翻转 M1 跃迁能量的测定, 为  $\Lambda\text{N}$  自旋-自旋相互作用强度提供了重要的信息; 通过对约化跃迁几率  $B(E2; ^6\text{Li } 5/2^- \rightarrow 1/2^+)$  的测定, 表明  $^6\text{Li}$  中的  $^4\text{Li}$  核心比自由空间中  $^4\text{Li}$  核要小,  $\Lambda$  超子的胶样作用引起了  $^6\text{Li}$  核的收缩。

**关键词:**  $\Lambda\text{N}$  自旋-自旋相互作用;  $B(E2; ^6\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^-)$ ; 超核的收缩

**中图分类号:** O571 **文献标识码:** A

### 1 引言

近年来由中日美韩的科学家组成的“超核的  $\gamma$  谱学研究合作组”在 KEK 进行的一项对  $^6\text{Li}$  超核的研究工作(ELLIP)获得了重要的进展<sup>[1-3]</sup>, 实验中所观察到的  $\Lambda$  粒子在超核中的胶样作用所引起的原子核的收缩效应在 Science 和 Physical Review Letter 的 Focus 栏目上进行了报道。

超核是由通常的核子与一个或多个超子组成的多体系统, 超核研究在核物理中开辟了一个新的自由度, 成为核物理的一个新的分支。由于  $\Lambda$  超子不受泡里原理的限制, 使得它成为研究原子核结构的非常好的探针。  $\Lambda\text{N}$  相互作用不同于  $\text{NN}$  相互作用,  $\Lambda$  粒子加入核中, 可能会引起核的形状、大小、集团特性及运动模式等的变化, 使超核的结构具有不同于普通核的特性。

第一例超核是波兰的一个研究小组于 1952 年在高空气球实验中受过宇宙射线照射的核乳胶中观测到的<sup>[4]</sup>, 此后, 用  $\pi$  介子和质子束在气泡室及核乳胶中产生的超核进行的研究中, 测量了超核的微分散射截面及总散射截面, 发现不存在  $\Delta\text{p}$  的束缚态, 测定了  $A \leq 15$  的一些超核的束缚能、自旋和寿命, 观察到了  $\Lambda\Lambda$  超核。随着实验技术的发展, 使用  $\text{K}^+$  束进行  $(\text{K}^+, \pi^+)$  奇异性转移机制及使用  $\pi^-$  束进行  $(\pi^-, \text{K}^-)$  奇异性协同产生机制产生超核, 利用磁谱仪对出射粒子进行分析, 对超核进行了系统

的研究, 测定了直到  $^{208}\text{Pb}$  的超核的质量谱, 观察到超核的核心激发态和  $\Lambda$  超核的壳层结构, 但是由于磁谱仪的能量分辨限于 2 MeV(FWHM), 远不能满足对  $\Lambda\text{N}$  自旋相关的相互作用引起的超核能级精细结构进行研究的需要。

当一个  $\Lambda$  超子加入普通的核中时,  $\Lambda\text{N}$  两体相互作用势可表示如下:

$$V_{\Lambda\text{N}}(r) = V_0(r) - V_1(r)(S_\Lambda \cdot S_N) + V_2(r) \cdot (I_{\Lambda\text{N}} \cdot S_\Lambda) - V_3(r)(I_{\Lambda\text{N}} \cdot S_N) + V_4(r)S_{12}, \quad (1)$$

其中,  $I_{\Lambda\text{N}}$  为相对运动轨道角动量,  $\Lambda$  超子与核子之间的距离  $r = |r_N - r_\Lambda|$ , 等号右边的各项分别为中心势、 $\Lambda\text{N}$  自旋-自旋、 $\Lambda$  自旋-轨道、 $\text{N}$  自旋-轨道和张量势,  $S_\Lambda$ ,  $S_N$  和  $S_{12}$  分别表示  $\Lambda$  自旋算符、核子自旋算符和  $\Lambda$  自旋与核子自旋之间的张量相互作用算符。

由于  $\Lambda$  与核子相互作用的自旋相关性,  $\Lambda$  与核的自旋  $J$  ( $J \neq 0$ ) 耦合成的自旋为  $J-1/2$  和  $J+1/2$  的两个能级是劈裂的, 这种相互作用很弱, 劈裂的能级间距, 在几十到几百 keV 左右。

为研究与  $\Lambda$  粒子自旋相关的相互作用, 自 20 世纪 70 年代中期开始了超核  $\gamma$  谱学的研究, 初期的研究工作采用了  $\text{NaI(Tl)}$  闪烁体测量  $\gamma$  射线, 能量分辨在 10 keV 左右<sup>[5-7]</sup>, 在镜象超核  $^6\text{H}$  和  $^6\text{He}$  的测量中, 由  $1^+ \rightarrow 0^+$  的跃迁  $\gamma$  能量上的差异, 推断

收稿日期: 2001-08-14; 修改日期: 2001-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19875079)

作者简介: 周书华(1941-), 男(汉族), 浙江镇海人, 研究员, 博士生导师, 从事实验核物理研究。

出电荷对称性破缺现象<sup>[1]</sup>。由于超核的  $\gamma$  谱线测量是在低效应和高本底下进行的, 难度很大。直到 1990 年只测量到 5 条超核的  $\gamma$  谱线<sup>[2]</sup>, 其中唯一的一次利用高纯锗探测器对  ${}^8\text{Li}$  进行的测量, 没有观察到  ${}^8\text{Li}$  的  $\gamma$  谱线<sup>[3]</sup>。

1998 年中国原子能科学研究院与日本东北大学合作建立了由 14 套带有 BGO 反康计数器的高纯锗探测器组成的 Hyperball 探测系统, 并由中日美韩科学家组成的研究组开始了对超核  $\gamma$  谱学的系统研究, 其中第一个实验 E419 的目的是测定  ${}^8\text{Li}$  基态的自旋翻转 M1 跃迁能量, 研究  $p$  壳超核的自旋-自旋相互作用强度, 并对  $\Lambda$  超子在核中的胶样作用将导致核收缩的理论预言进行检验。

## 2 E419 实验

### 2.1 实验描述

E419 实验是在 KEK 的 12 GeV 质子同步加速器的 K6 束流线上完成的,  ${}^8\text{Li}$  的束缚态通过  $(\pi^+, K^-)$  反应产生, 并由超导 K 谱仪 (SKS) 选择出来, 反应产物的  $\gamma$  射线用 Hyperball 探测, 所用的  $\pi^+$  束流的动量为 1.05 GeV/c, 流强为  $2 \cdot 10^{10}$  个  $\pi^+$ /循环, 束流粒子的轨迹由 K6 束谱仪测量, 入射的  $\pi^+$  介子轰击  ${}^7\text{Li}$  靶, 散射的  $K^+$  介子通过 SKS 谱仪进

行鉴别和动量分析, 所用的  ${}^7\text{Li}$  靶的厚度为 25 cm, 在靶中的能量损失效应决定了超核质谱的分辨约为 5 MeV (FWHM), Hyperball 由 14 个相对效率为 60% ( $\Phi 70 \text{ mm} \cdot 70 \text{ mm}$ ) 的 n 型同轴锗探测器组成, 所张的立体角约为  $15\% \cdot 4\pi \text{sr}$ , 对于 1 MeV 的  $\gamma$  射线光电峰的效率约为 2.5%, 锗探测器输出的信号经晶体管复位前置放大器及带有门积分器的快成形放大器 (ORTEK 973U) 处理, 每个锗探测器周围装有 6 个 BGO 计数器, 用以给出否决信号、抑制康普顿散射、 $\pi^+$  衰变高能  $\gamma$  和高能带电粒子本底, 在有束流的周期内, 锗探测器的分辨对于 1.33 MeV 的  $\gamma$  射线约为 3 keV (FWHM), 计数率为 20—60 kHz, 电子学的死时间为 30%—50%, 有束流和无束流之间峰位的移动小于 1 keV, 使用含有  ${}^{241}\text{Am}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{60}\text{Co}$  和  ${}^{22}\text{Na}$  的混合放射源在 0.1—1.8 MeV 的能区上进行了能量刻度, 在 25 天的测量时间内共辐照了  $1.0 \cdot 10^{11}$  的  $\pi^+$  粒子。

### 2.2 ${}^8\text{Li}$ 的 $\gamma$ 谱

${}^8\text{Li}$  的激发谱示于图 1, 标度为超核与靶核的质量差, 低能部分的峰主要是由  ${}^8\text{Li}$  的  $5/2^-$  和  $1/2^+$  的束缚态组成的, 数据分析中在束缚区域设的窗也示于图 1。

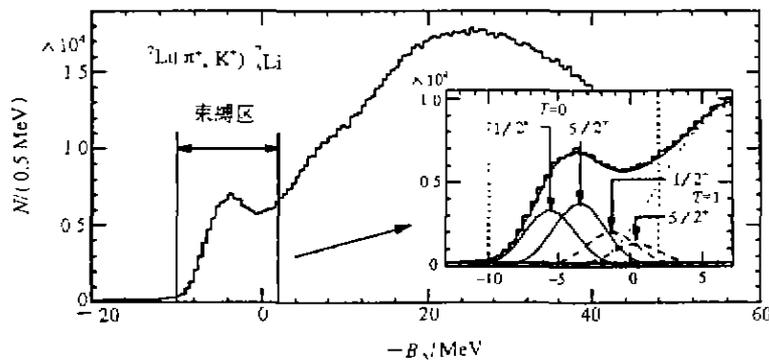


图 1  ${}^8\text{Li}$  的激发谱

图 2(a) 示出  ${}^8\text{Li}$  的非束缚区对应的  $\gamma$  能谱, 可以观察到  $\text{Ba}$  的 KX 射线 (74—88 keV) 和一些核的  $\gamma$  峰, 如  ${}^{76}\text{Ge}$  (596 keV) 和  ${}^{27}\text{Al}$  (811 keV) 等,  $e^+$  湮灭峰 (511 keV) 是由  $\pi^+$  产生的, 束缚区的  $\gamma$  谱示于图 2(b), 预期  ${}^8\text{Li}$  的跃迁将出现在这个区域, 从图中可以看到在 603 keV 和 2 050 keV 处出现两个峰, 而在 429 keV 和 178 keV 处的峰比在图 2(a) 中要

明显得多, 这后两个峰被认定为  ${}^8\text{Li}$  弱衰变的子核的跃迁, 即  ${}^8\text{Li} \rightarrow \pi^- + {}^7\text{Be}^*$  (429) 和  ${}^8\text{Li} \rightarrow \pi^0 + {}^8\text{Li}^*$  (178), 2 050 keV 的峰被指定为  ${}^8\text{Li}$  的  $E2(5/2^- \rightarrow 1/2^-)$  跃迁, 如图 3 所示, 它基本上与核心  ${}^7\text{Li}$  的  $E2(3^- \rightarrow 1^+)$  跃迁相同, 这个跃迁以前曾在 BNL 使用 NaI 探测器观测到过, 其能量为  $(2.034 \pm 0.023)$  MeV<sup>[2]</sup>, 本实验的高分辨  $\gamma$  谱揭示出这个峰是由一

个窄的成分和一个宽的成分构成的，表明  $\gamma$  射线的能量是部分的多普勒展宽的，也就是说，发射这一  $\gamma$  射线的激发态的寿命与反冲的超核在靶中的阻止时间 (10 ps) 相近，这一结果与 E2 跃迁速率相符。692 keV 的峰与模拟的完全多普勒展宽的峰是一致的 (见图 2(b))，这表明这一跃迁初态的寿命比 2 ps 要短，因而将 692 keV 的峰认定为 M1 跃迁，假定  $\gamma$  射线是在反冲的  ${}^6\text{Li}$  核减速之前发射的，可以逐事件地进行多普勒修正，经多普勒修正的谱示于图

2(c) 中，可以看出只有 692 keV 的峰经多普勒修正后变窄，表明是  ${}^6\text{Li}$  的跃迁，经修正后的能量为  $(691.7 \pm 0.6 \pm 1.0)$  keV，对于所观察到的 M1 跃迁，有两种可能的跃迁过程： $3/2^+ \rightarrow 1/2^+$  和  $7/2^+ \rightarrow 5/2^-$ ，但只有前者是可能的，这是由于下述原因：在束缚态区域  $-5.7 < -B_n < 2.3$  MeV 处开门以选择  $1/2^+ (T=1)$  的态，在  $(3877 \pm 5)$  keV 和  $(3186 \pm 4)$  keV 处观察到两个峰，见图 2(c) 中的插图，这两个峰出现在多普勒修正后的图 2(c) 中，因

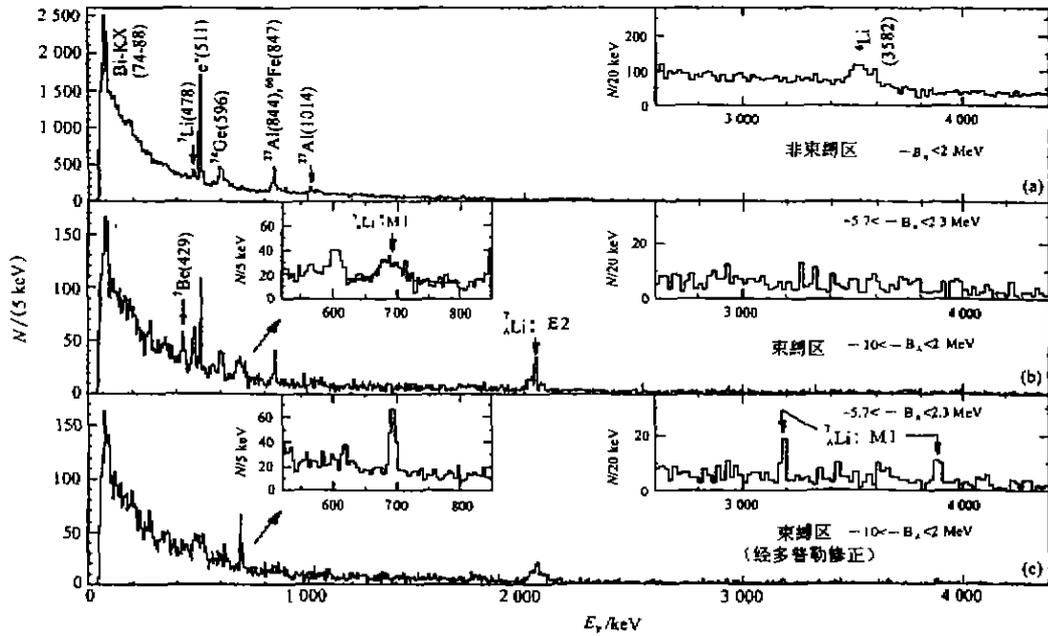


图 2 (a)  ${}^6\text{Li}$  非束缚区对应的  $\gamma$  能谱；(b) 束缚区的  $\gamma$  能谱；(c) 经多普勒修正后的能谱

而属于 M1 跃迁，根据它们的能量，分别认定为 M1 ( $1/2^- (T=1) \rightarrow 3/2^-$  和  $1/2^+$ ) 跃迁，它们的相对产额为 1:1，支持这种认定。 $(3877 \pm 5)$  keV 和  $(3186 \pm 4)$  keV 之差为  $(691 \pm 6)$  keV，与 692 keV 的峰相符，因而将 692 keV 的峰认定为 M1 ( $3/2^+ \rightarrow 1/2^+$ )，而非 M1 ( $7/2^+ \rightarrow 5/2^-$ ) 跃迁。此外，经效率修正后，所测量到的 692 keV 与 2050 keV E2 ( $5/2^+ \rightarrow 1/2^+$ )  $\gamma$  射线产额的比值为  $0.36 \pm 0.08$ ，考虑到  $\Lambda$  的自旋翻转态跃迁 ( $7/2^+$  和  $3/2^+$ ) 的生成截面要比非自旋翻转态 ( $5/2^-$  和  $1/2^+$ ) 小一个数量级 (见图 3)，若将该 M1 跃迁认定为  $7/2^+ \rightarrow 5/2^+$ ，则不能解释如此大的比值，然而如果  $3/2^-$  态还可通过生成截面很大的  $1/2^-$ ， $T=1$  态的  $\gamma$  衰变布居，则所观测到的比值可以用  $3/2^+ \rightarrow 1/2^+$  自旋

翻转 M1 跃迁来解释，图 3 表示出  ${}^6\text{Li}$  的能级和跃迁  $\gamma$ 。

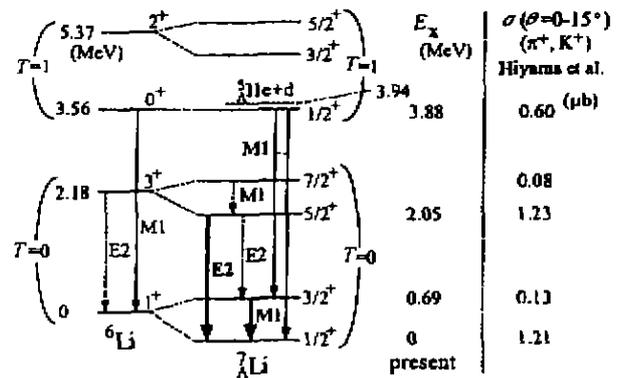


图 3  ${}^6\text{Li}$  的能级和跃迁  $\gamma$

实线箭头为 E419 中观测到的  $\gamma$  谱线， $\sigma$  为计算得到的 ( $\pi^+$ ,  $K^+$ ) 在 1.05 GeV/c 处的  $0-15^\circ$  范围积分生成截面 [11]。

### 2.3 AN 自旋-自旋相互作用

${}^8\text{Li}$  超核自旋翻转 M1 跃迁  $\gamma$  射线的能量 (692 keV) 相应于基态二重态 ( $3/2^+$  和  $1/2^+$ ) 的能级间隔. 它对 AN 自旋-自旋相互作用的强度给出严格的约束. 最近 Hiyama 等的四体 ( $\alpha + p + n + A$ ) 集团模型的计算, 使用了能再现  ${}^6\text{H}$  和  ${}^6\text{He}$  的二重态能级间隔 1.1 MeV 的唯象自旋-自旋相互作用, 没有考虑自旋-轨道相互作用, 其结果为 650 keV, 与本实验测定的结果相近. 在 Millener 等的壳模型计算中使用由质量数  $A=4$  的二重态能级间隔确定的自旋-自旋相互作用 (自旋-自旋项的径向积分参数  $\Delta = 0.5$  MeV), 得出结果为 610 keV<sup>[22]</sup>. Fetisov 的壳模型计算中, 通过调节自旋相关相互作用参数, 使之与  ${}^6\text{B}$  的结果 ( $\Delta = 0.3$  MeV) 相一致, 得到  ${}^8\text{Li}$  的能级间隔为 440 keV<sup>[13]</sup>. 本实验结果与  $A=4$  的基态二重态的能量间隔推出的有效自旋-自旋相互作用相符, 给出现有的重子-重子相互作用模型的自旋-自旋项更为严格的约束.

### 2.4 ${}^8\text{Li}$ 中 $A$ 的胶样作用

理论预期当一个超子添加到比较松散的轻核如  ${}^6\text{Li}$  中时, 核的大小会收缩<sup>[11, 14, 15]</sup>. 这是由于  $A$  超子不受泡里阻塞效应的限制, 可以处于已被质子和中子填充的核的中心位置, 从而增加了对外围核子的吸引力, 使核的体积收缩, 这就是所谓的超子在核中的胶样作用. 为从实验上验证这一作用, 采用子测量 E419 实验中观测到的  ${}^8\text{Li}$  的 E2 ( $5/2^+ \rightarrow 1/2^+$ ) 跃迁 (见图 2(b)) 约化矩阵元的方法. 按照  $\alpha$ -d 集团模型, 如果初态与末态的波函数相同, E2 约化跃迁几率与组成原子核的两个集团间的距离  $R$  的关系为

$$B(E2) \propto (R^2)^{-2}. \quad (2)$$

可见约化跃迁几率  $B(E2)$  对组成原子核的两个集团间的距离是非常敏感的.

利用谱形的分析方法, 通过蒙特卡罗模拟跃迁谱线的形状, 可以定出  $5/2^-$  能级的寿命为  $(5.8^{+0.3}_{-0.2} \pm 0.7)$  ps (见图 4), 采用 E2 ( $5/2^- \rightarrow 1/2^-$ ) 跃迁的分支比为  $93.8^{+2.9}_{-2.1}\%$ <sup>[21]</sup>, 从而求出其约化跃迁几率  $B(E2; 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  为  $(3.6 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.2}) e^2 \text{fm}^4$ .

为描述核心  ${}^6\text{Li}$  大小变化的程度, 引入因子

$S^{[21]}$ ,

$$S = \left[ \frac{9}{7} \frac{B(E2; {}^8\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)}{B(E2; {}^6\text{Li } 3^+ \rightarrow 1^+)} \right]^{1/4}, \quad (3)$$

式中因子  $9/7$  是由于核心的 ( $3^+ \rightarrow 1^+$ ) E2 跃迁分布在  ${}^6\text{Li}$  的两个 E2 跃迁 ( $5/2^- \rightarrow 1/2^+$ ) 与 ( $5/2^+ \rightarrow 3/2^+$ ) 中, 在弱耦合极限情况下,  $B(E2; {}^8\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ ;  $B(E2; {}^8\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 3/2^+) = 7:2$ . 如果  ${}^8\text{Li}$  中的  ${}^6\text{Li}$  与自由空间中的  ${}^6\text{Li}$  相同, 则  $S$  因子等于 1. 将测得的  $B(E2; {}^8\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^+) = (3.6 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.2}) e^2 \text{fm}^4$  及已知的  $B(E2; {}^6\text{Li } 3^+ \rightarrow 1^+) = (10.9 \pm 0.9) e^2 \text{fm}^4$ <sup>[26]</sup> 或  $(9.3 \pm 2.1) e^2 \text{fm}^4$ <sup>[27]</sup>, 分别得到  $S = 0.81 \pm 0.04$  和  $0.84 \pm 0.06$ , 均明显小于 1. 按照集团模型,  $B(E2; {}^8\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  值的减小可以解释为集团间距离的收缩. 如: 按照简单的  $\alpha$ -d ( ${}^6\text{Li}$ ) 和  ${}^8\text{He}$ -d ( ${}^8\text{Li}$ ) 集团模型,  $S = 0.81$  相当于  ${}^8\text{He}$ -d ( ${}^8\text{Li}$ ) 的均方根距离比  $\alpha$ -d ( ${}^6\text{Li}$ ) 缩短 19%. Motoba 等使用  $\alpha + d + A$  集团模型计算得到 16% 的收缩<sup>[14]</sup>, Hiyama 等使用  ${}^8\text{He} + p + n$  集团模型计算的收缩为 25%<sup>[15]</sup>, 而 Hiyama 等  $\alpha + p + n + A$  四体模型的结果为 22%<sup>[11]</sup>, 与实验结果相近.

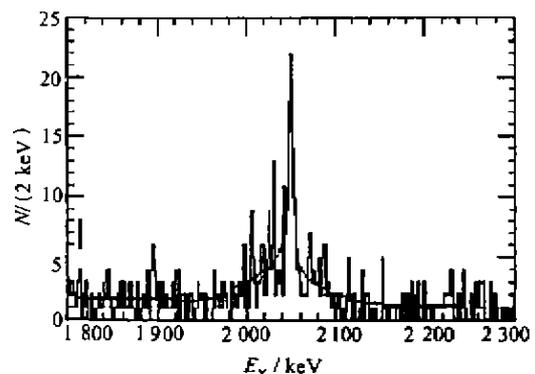


图 1 E2 跃迁附近的  $\gamma$  能谱

拟合曲线是用  $5/2^-$  能级的寿命  $\tau = 5.8$  ps 模拟的结果.

总之, E419 实验中首次使用锗探测器观测到了清楚鉴别的超核的  $\gamma$  跃迁. 观测到  ${}^8\text{Li}$  的基态二重态之间的自旋翻转 M1 ( $3/2^- \rightarrow 1/2^+$ ) 跃迁以及 E2 ( $5/2^+ \rightarrow 1/2^+$ ) 跃迁和 M1 ( $1/2^+ (T=1) \rightarrow 3/2^+, 1/2^+$ ) 跃迁. 所观测到的 M1 跃迁的能量  $(691.7 \pm 0.6 \pm 1.0)$  keV 可为 AN 自旋-自旋相互作用提供重要的信息, 所测量的  ${}^8\text{Li}$  的基态二重态的能量间隔可以由  $A=4$  的超核的基态二重态的能量间隔推导出的有效自旋-自旋相互作用来解释.

通过对 ${}^{\Lambda}\text{Li}$ 的 $B(E2; 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ 的测量,求得 ${}^{\Lambda}\text{Li}$ 的 ${}^{\Lambda}\text{He-d}$ 集团间的均方根距离比 ${}^6\text{Li}$ 的 $\alpha\text{-d}$ 集团缩

短 19%,为 $\Lambda$ 超子在核中的胶样作用提供了实验证据.

### 参 考 文 献:

- [1] Tamura H, Tanida K, Abe D, *et al.* Observation of a Spin-flip M1 Transition in  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  [J]. *Phys Rev Lett.* 2000, **84**: 5 963-5 966.
- [2] Tanida K, Tamura H, Abe D, *et al.* Measurement of the  $B(E2)$  of  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  and Shrinkage of Hypernuclear Size [J]. *Phys Rev Lett.* 2001, **86**: 1 982-1 985.
- [3] 周书华,竺礼华,夏海鸿等.  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  自旋翻转 M1 跃迁的实验研究 [J]. *高能物理与核物理*, 2000, **24** (增刊): 81-86.
- [4] Danysz M, Pniewski J. Delayed Disintegration of a Heavy Nuclear Fragment (I) [J]. *Phil Mag.* 1953, **44**: 348-350.
- [5] Bamberger A, Faessler M A, Lynen U, *et al.* Excited States of Light Hypernuclei [J]. *Nucl Phys.* 1973, **B60**: 1-25.
- [6] Bedjidian M, Filipkowski A, Grossiord T Y, *et al.* Observation of a  $\gamma$  Transition in the  ${}^{\Lambda}\text{H}$  Hypernucleus [J]. *Phys Lett.* 1976, **B62**: 467-470; Bedjidian M, Descroix E, Grossiord T Y, *et al.* Further Investigation of the  $\gamma$  Transition in  ${}^{\Lambda}\text{H}$  and  ${}^{\Lambda}\text{He}$  Hypernuclei [J]. *Phys Lett.* 1979, **B83**: 252-256.
- [7] May M, Bart S, Chen S, *et al.* Observation of Hypernuclear Gamma-ray Transition in  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  and  ${}^{\Lambda}\text{He}$  [J]. *Phys Rev Lett.* 1983, **51**: 2 085-2 088.
- [8] May M, Alburger D, Bart S, *et al.* First Observation of the  $\text{PA} \rightarrow \text{SA}$   $\gamma$ -ray Transition in  ${}^{\Lambda}\text{C}$  [J]. *Phys Rev Lett.* 1997, **78**: 4 343-4 346.
- [9] Chrien R E, Dover C B. Nuclear Systems with Strangeness [J]. *Ann Rev Nucl Part Sci.* 1989, **39**: 113-150.
- [10] Chrien R E, Bart S, May M, *et al.* Search for Radiative Transitions in the Hypernucleus  ${}^{\Lambda}\text{B}$  [J]. *Phys Rev.* 1990, **C41**: 1 062-1 074.
- [11] Hiyama E, Kamimura M, Miyazaki K, *et al.*  $\gamma$  Transitions in  $A=7$  Hypernuclei and a Possible Derivation of Hypernuclear Size [J]. *Phys Rev.* 1999, **C59**: 2 351-2 360.
- [12] Millener D J, Gal A, Dover C B, *et al.* Spin Dependence of the  $\text{AN}$  Effective Interaction [J]. *Phys Rev.* 1985, **C31**: 499-509.
- [13] Fensov N V, Majling L, Zofka J, *et al.* Effective  $\text{AN}$ -Interaction and Spectroscopy of Low-lying States of  $1p$ -Shell Hypernuclei [J]. *Z Phys.* 1991, **A339**: 399-407.
- [14] Motoba T, Bando H, Ikeda K. Light  $p$ -shell  $\Lambda$ -hypernuclei by the Microscopic Three Cluster Model [J]. *Prog Theor Phys.* 1983, **70**: 189-221.
- [15] Hiyama E, Masayasu K, Motoba T, *et al.* Three-body Model Study of  $A=6-7$  Hypernuclei, Halo and skin structures [J]. *Phys Rev.* 1996, **C53**: 2 075-2 085.
- [16] Eigenbrod F. Untersuchung der Vier Ersten Angeregten Zustände des  ${}^6\text{Li}$ -Kernes durch Elektronenstreuung [J]. *Z Phys.* 1969, **228**: 337-352.
- [17] Yen R, Cardman L S, Kalinsky D, *et al.* Determination of Nuclear Parameters by Inelastic Electron Scattering at Low-momentum Transfer [J]. *Nucl Phys.* 1974, **A2 315**: 135-153.

## Progress in Gamma-ray Spectroscopy of Hypernuclei\*

ZHOU Shu-hua

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The recent progress in gamma-ray spectroscopy of hypernuclei is described. The spin-flip M1  $\gamma$  transition between the ground-state spin doublet of  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  has been observed. The transition energy provides crucial information on the strength of the spin-spin interaction between  $\Lambda$  and nucleons. The experimental result of  $B(E2; {}^{\Lambda}\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$  gives evidence that the size of the  ${}^6\text{Li}$  core in  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  is smaller than that for the  ${}^6\text{Li}$  nucleus in the free space, indicating that the glue-like effect of  $\Lambda$  caused the shrinkage of the  ${}^{\Lambda}\text{Li}$  nucleus.

**Key words:**  $\text{AN}$  spin-spin interaction;  $B(E2; {}^{\Lambda}\text{Li } 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ ; shrinkage of hypernuclei

\* Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (19785079)