

${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 自旋翻转 M1 跃迁的实验研究*

周书华 竺礼华³ 夏海鸿 朱晓峰
吴晓光 侯 龙 杨春祥 刘祖华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

H. Tamura¹ K. Tanida² D. Abe¹ H. Akikawa³ K. Araki¹ H. Bhang⁴ T. Endo¹ Y. Fujii¹
T. Fukuda⁵ O. Hashimoto¹ K. Imai³ H. Hotchi² Y. Kakiguchi⁵ J. H. Kim⁴ Y. D. Kim⁶
T. Miyoshi¹ T. Murakami³ T. Nagae⁵ H. Noumi⁵ H. Ota⁵ K. Ozawa¹ T. Saito⁷
J. Sasao¹ Y. Sato¹ S. Satoh¹ R. Sawafuta⁸ M. Sekimoto⁵ T. Takahashi¹ L. Tang⁹

1(Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan)

2(Department of Physics University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan)

3(Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan)

4(Department of Physics, Soul National University, Soul 151-742, Korea)

5(Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan)

6(Department of Physics, Sejong University, Soul 143-747, Korea)

7(Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Sendai 980-0826, Japan)

8(Physics Department, North Carolina A&T State University, Greensboro, NC 27411, USA)

9(Department of Physics, Hampton University, Hampton, VA 23668, USA)

摘要 使用大立体角的锗探测器阵列(Hyperball),观测到 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 基态二重态之间的自旋翻转 M1 γ 跃迁($\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$),能量为 $691.7 \pm 0.6 \pm 1.0 \text{keV}$. 为 Λ 与核子之间的自旋-自旋相互作用提供了重要的信息.

关键词 M1 γ 跃迁 ΛN 自旋-自旋相互作用 Hyperball谱仪

1 引言

Λ 超子与核子(ΛN)相互作用的研究可以使我们了解描述核子-核子(NN)相互作用的介子交换模型是否可以在不考虑夸克-胶子自由度的情况下,推广到对 ΛN 相互作用的描述. ΛN 相互作用也是研究超核结构的基础.由于 Λ 不受泡里原理的限制,以及 ΛN 相互作用不同于 NN 相

* 国家自然科学基金(19875079)和日本教育科学研究(08239102)资助

互作用, Λ 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.

本文是通过超核能级结构的研究获得 Λ 超子与核子相互作用的信息. 自旋相关的 ΛN 相互作用(自旋-自旋, 自旋-轨道及张量相互作用)的信息很难通过 Δp 散射实验来获得, 但可以从超核结构的详细研究中抽取. 当一个 Λ 超子加入普通的核中时, Λ 的自旋与核能级的自旋 J 发生相互作用, 由于 Λ 与核子相互作用的自旋相关性, 耦合成的自旋为 $J - \frac{1}{2}$ 和 $J + \frac{1}{2}$ 的两个能级是劈裂的. 因这种相互作用很弱, 劈裂的能级间距很小. 磁谱仪的能量分辨限于 2MeV(FWHM), 远不能满足对超核能级的这种精细结构进行研究的需要. M. Bedjidian 等^[1] 和 M. May 等^[2,3] 用 NaI 计数器对超核能级劈裂进行过研究, 观测到 $^4_{\Lambda}\text{H}$ 和 $^4_{\Lambda}\text{He}$ 的能量为 1.1MeV 的 $1^+ \rightarrow 0^+$ 的基态二重态间的 M1 跃迁. 为了确定由 s 壳超核数据导出的 ΛN 相互作用的自旋相关项是否可以外推到 p 壳的超核, 需要对 p 壳超核进行研究. 为此目的用 Ge 探测器对 $^{10}_{\Lambda}\text{B}$ 进行的测量没有观测到基态二重态自旋翻转 M1 跃迁 ($2^- \rightarrow 1^-$)^[4]. $^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的核心 $^6\text{Li}(1^+)$ 几乎是纯的 $^3\text{S}_1$ 组态, $^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的基态二重态 ($\frac{3}{2}^+, \frac{1}{2}^+$) 能级间距几乎完全由自旋-自旋相互作用决定. 因而 $^7_{\Lambda}\text{Li}$ 最适宜用来研究 ΛN 自旋-自旋相互作用.

采用大接收角 HPGe-BGO 反康 γ 谱仪-Hyperball 对超核结构进行研究. 其优点是: 能量分辨高达 2keV; 通过 γ 级联跃迁可研究各种激发态, 包括不能由反应直接布局的自旋翻转态; 可通过跃迁速率和角关联的测量确定电磁矩阵元及能级的自旋和宇称. 由于采用了晶体管复位前置放大器, 使得探测器可以在高计数率环境下工作. 在本实验中首次观测到 $^7_{\Lambda}\text{Li}$ 基态二重态之间的自旋翻转 M1 γ 跃迁 ($\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$)^[5], 本文给出实验情况的描述及对结果进行讨论.

2 实验

实验(E419)是在 KEK 的 12GeV 质子同步加速器上的 K6 束流线上完成的. $^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的束缚态通过(π^+, K^+) 反应产生并由超导 K 谱仪(SKS)选择出来. 反应产物的 γ 射线用 Hyperball 探测. 所用的 π^+ 束流的动量为 1.05GeV/c, 流强为 2×10^6 个 π^+ /循环. 束流粒子的轨迹由 K6 束谱仪测量. 入射的 π^+ 介子轰击 ^7Li 靶, 散射的 K^+ 介子通过 SKS 谱仪进行鉴别和动量分析. 所用的 ^7Li 靶的厚度为 25 厘米, 在靶中的能量损失效应决定了超核质谱的分辨约为 5MeV(FWHM). Hyperball 由 14 个相对效率为 60% ($70\text{mm}\Phi \times 70\text{mm}$) 的 n 型同轴锗探测器组成. 每个探测器距束流线 15 厘米. 所张的立体角约为 $15\% \times 4\pi\text{sr}$, 对于 1MeV 的 γ 射线的光电峰的效率约为 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、 π^0 衰变高能 γ 和高能带电粒子本底. 记录锗探测器数据的触发信号是由 K6/SKS 系统的计数器给出的(π^+, K^+) 符合信号. 每个锗探测器的工作情况, 如: 增益的漂移、分辨、电子学的死时间和与计数率相关的峰位移动等由一放置在每个锗探

测器后面的、镶在塑料闪烁体中的 ${}^{60}\text{Co}$ 源的 γ 射线进行监视.在有束流的周期内,锗探测器的分辨对于1.33MeV的 γ 射线约为3keV(FWHM),计数率为20—60kHz,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1keV.使用含有 ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{109}\text{Cd}$, ${}^{57}\text{Co}$, ${}^{139}\text{Ce}$, ${}^{51}\text{Cr}$, ${}^{113}\text{Sn}$, ${}^{85}\text{Sr}$, ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{60}\text{Co}$ 和 ${}^{88}\text{Y}$ 的混合放射源在0.1—1.8MeV的能区上进行了能量刻度.在25天的测量时间内共辐照了 1.0×10^{12} 的 π^+ 粒子.

3 结果与讨论

${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的激发谱见图1,标度为超核与靶核的质量差.在低能部分的峰主要是由 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 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出示于图1.

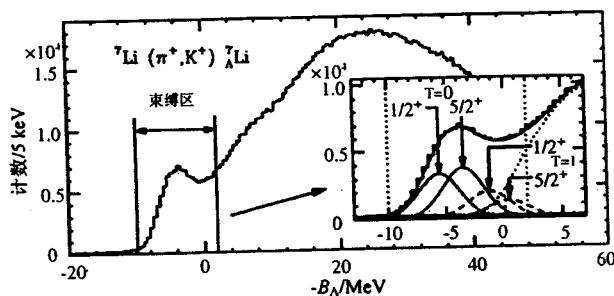


图1 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的激发谱

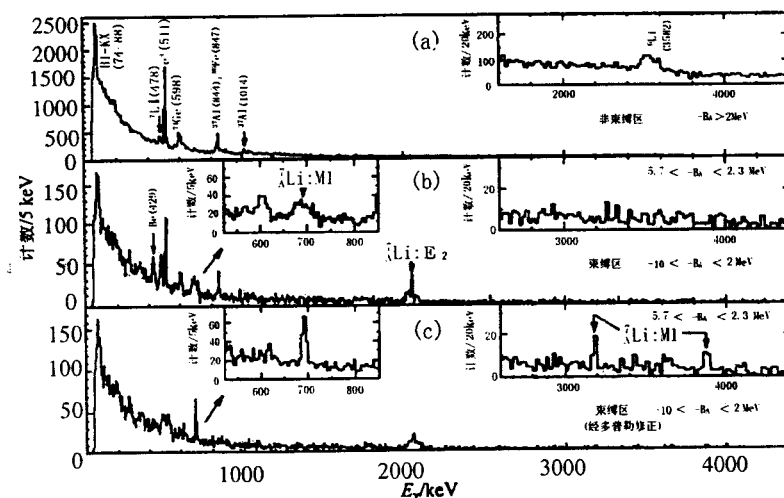


图2 (a) ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 非束缚区对应的 γ 能谱;(b)束缚区的 γ 能谱;
(c)经多普勒修正后的能谱

图 2(a) 示出 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的非束缚区对应的 γ 能谱. 可以观察到 Bi 的 KX 射线(74keV—90keV)和普通核的 γ 峰, 如: ${}^{74}\text{Ge}$ (596keV), ${}^{27}\text{Al}$ (844keV) 等. e^+ 湮没峰(511keV)是由 π^0 产生的. 束缚区的 γ 谱见图 2(b). 预期 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的跃迁将出现在

这个区域. 从图中可以看到在 692keV 和 2050keV 处出现两个峰, 而在 429keV 和 478keV 处的峰比在图 2(a) 中要明显得多. 这后两个峰认定为 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 弱衰变的子核的跃迁, 即 ${}^7_{\Lambda}\text{Li} \rightarrow \pi^- + {}^7\text{Be}^*$ (429) 和 ${}^7_{\Lambda}\text{Li} \rightarrow \pi^0 + {}^7\text{Li}^*$ (478). 2050keV 的峰指定为 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的 $E2(\frac{5}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+)$ 跃迁, 如图 3 所示, 它基本上

与核心 ${}^6\text{Li}$ 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 $2.034 \pm 0.023\text{MeV}$ ^[2]. 本实验的高分辨 γ 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 γ 射线的

能量是部分地多普勒展宽的. 也就是说, 发射这一 γ 射线的激发态的寿命与反冲的超核在靶中的阻止时间(10ps)相近, 这一结果与 E2 跃迁速率相符. 692keV 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 2ps 要短. 因而将 692keV 的峰认定为 M1 跃迁. 由于 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的反冲动量矢量可以由 π^+ 和 K^+ 的动量矢量求得, 假定 γ 射线是在反冲的 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 核减速之前发射的, 可以逐事件地进行多普勒修正. 经多普勒修正的谱见图 2(c). 可以看出只有 692keV 的宽峰经多普勒修正后变窄, 表明是 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的跃迁. 经修正后的能量为 $691.7 \pm 0.6 \pm 1.0\text{keV}$. 对于所观察到的 M1 跃迁, 有两种可能的跃迁过程: $\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$

和 $\frac{7}{2}^+ \rightarrow \frac{5}{2}^+$, 但只有前者是可能的. 这是由于下述原因: 在束缚态区域 $-5.7 < -B_{\Lambda} < 2.3$

MeV 处开门以选择 $\frac{1}{2}^+$ ($T=1$) 的态, 在 $38775 \pm \text{keV}$ 和 $3186 \pm 4\text{keV}$ 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, 因而属于 M1 跃迁. 根据它们的能量, 分别认定为 $M1(\frac{1}{2}^+ (T=1) \rightarrow \frac{3}{2}^+)$ 和 $\frac{1}{2}^+$ 跃迁. 它们的相对产额为 1:1, 支持这种认定.

$3877 \pm 5\text{keV}$ 和 $3186 \pm 4\text{keV}$ 之差为 $691 \pm 6\text{keV}$, 与 692keV 的峰相符, 因而将 692keV 的峰认定为 $M1(\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+)$ 而非 $M1(\frac{7}{2}^+ \rightarrow \frac{5}{2}^+)$ 跃迁. 此外, 经效率修正后, 所测量到的

692keV 与 2050keV $E2(\frac{5}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+)$ γ 射线产额的比值为 0.36 ± 0.08 , 考虑到 Λ 的自旋翻转

态($\frac{7}{2}^+$ 和 $\frac{3}{2}^+$) 的生成截面要比非自旋翻转态($\frac{5}{2}^+$ 和 $\frac{1}{2}^+$) 小一个数量级(见图 3), 若将该

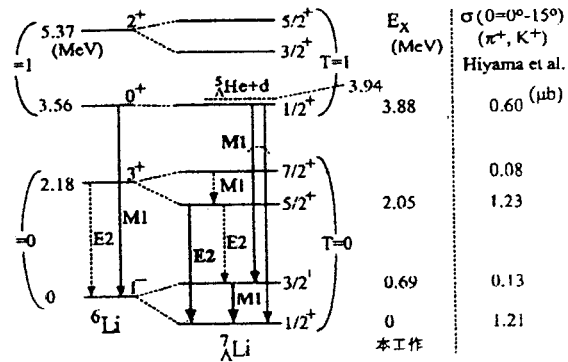


图 3 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的能级图与 γ 跃迁. 粗箭头表示所观测到跃迁, “本实验”表示测量到的能级能量, $\sigma(\theta = 0^\circ-15^\circ)$ 为 $1.50\text{GeV}/c(\pi^+, K^+)$ 的产生截面在 SKS 接收度范围($0^\circ-15^\circ$)内的积分值^[6]

M1 跃迁认定为 $\frac{7}{2}^+ \rightarrow \frac{5}{2}^+$, 则不能解释如此大的比值. 然而如果 $\frac{3}{2}^+$ 态还可通过生成截面很大的 $\frac{1}{2}^+$, $T=1$ 态的 γ 衰变布居, 则所观测到的比值可以用 $\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$ 自旋翻转 M1 跃迁来解释. 在谱中观察不到自旋翻转 M1 跃迁 ($\frac{7}{2}^+ \rightarrow \frac{5}{2}^+$) 和 $E2(\frac{5}{2}^+ \rightarrow \frac{3}{2}^+)$ 跃迁, 这分别是由于 $\frac{7}{2}^+$ 的生成截面很小及 $\frac{5}{2}^+ \rightarrow \frac{3}{2}^+$ 跃迁的分支比很小 (约 4%) 所致. M1 γ 射线的能量 (692 keV) 相应于基态二重态 ($\frac{3}{2}^+$ 和 $\frac{1}{2}^+$) 的能级间隔. 它对 ΔN 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 ($\alpha + p + n + \Lambda$) 集团模型的计算, 使用了能再现 ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 和 ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ 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 $A=4$ 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 $\Delta = 0.5 \text{ MeV}$), 得出结果为 610 keV^[6]. Fetisov 的壳模型计算中, 通过调节自旋相关相互作用参数 ($\Delta = 0.3 \text{ MeV}$), 使之与 ${}^{10}_{\Lambda}\text{B}$ 的结果相一致, 得到 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的能级间隔为 440 keV^[7]. 本实验结果与 $A=4$ 的数据相符, 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. 由 $E2(\frac{5}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+)$ 跃迁可以利用多普勒移动衰减模型^[14] 抽取出 $B(E2)$ 值. 总之, 本工作首次使用锗探测器观测到了清楚鉴别的超核的 γ 跃迁. 通过在 ${}^7\text{Li}(\pi^+, K^+){}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 反应能谱的束缚区域开窗, 观测到 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 的 $691.7 \pm 0.6 \pm 1.0 \text{ keV}$ 处的自旋翻转 M1 ($\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$) 跃迁以及 $E2(\frac{5}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+)$ 跃迁和 M1 ($\frac{1}{2}^+ (T=1) \rightarrow \frac{3}{2}^+, \frac{1}{2}^+$) 跃迁. 所观测到的 M1 跃迁的能量可为 ΔN 自旋-自旋相互作用提供重要的信息. 本工作还证实了所测量的 ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ 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出的有效自旋-自旋相互作用来解释.

作者感谢 K. Nakamura 和 KEK-PS 运行人员, 感谢 T. Motoba, E. Hiyama 和 D. J. Millener 为本实验所做的理论估算和讨论.

参考文献 (References)

- 1 Bedjidian M et al. Phys. Lett. ,1976, **B62**:467; Bedjidian M et al. Phys. Lett. ,1979, **B83**:252
- 2 May M et al. Phys. Rev. Lett. ,1983, **51**:2085
- 3 May M et al. Phys. Rev. Lett. ,1997, **78**:4343
- 4 Chrien R E et al. Phys. Rev. , 1990, **C41**:1062
- 5 Tamura H et al. Phys. Rev. Lett. , 1997, **78**:4343
- 6 Hiyama E et al. Phys. Rev. , 1999, **C59**:2351
- 7 Millener D J et al. Phys. Rev. , 1985, **C31**:499
- 8 Fetisov N V et al. Z. Phys. ,1991, **A339**:399

Experimental Study of Spin-Flip M1 Transition of ${}^7_{\Lambda}\text{Li}^*$

ZHOU Shu-Hua ZHU Li-Hua³ XIA Hai-Hong ZHU Xiao-Feng
WU Xiao-Guang HOU Long YANG Chun-Xiang LIU Zu-Hua

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

H. Tamura¹ K. Tanida² D. Abe¹ H. Akikawa³ K. Araki¹ H. Bhang⁴ T. Endo¹ Y. Fujii¹
T. Fukuda⁵ O. Hashimoto¹ K. Imai³ H. Hotchi² Y. Kakiguchi⁵ J.H. Kim⁴ Y. D. Kim⁶
T. Miyoshi¹ T. Murakami³ T. Nagae⁵ H. Noumi⁵ H. Outa⁵ K. Ozawa¹ T. Saito⁷
J. Sasao¹ Y. Sato¹ S. Satoh¹ R. Sawafuta⁸ M. Sekimoto⁵ T. Takahashi¹ L. Tang⁹

1 (Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan)

2 (Department of Physics University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan)

3 (Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan)

4 (Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

5 (Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan)

6 (Department of Physics, Sejong University, Seoul 143-747, Korea)

7 (Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Sendai 980-0826, Japan)

8 (Physics Department, North Carolina A&T State University, Greensboro, NC 27411, USA)

9 (Department of Physics, Hampton University, Hampton, VA 23668, USA)

Abstract Using a large-acceptance germanium detector array (Hyperball), the spin-flip M1 γ transition between the ground-state spin doublet of ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ has been observed. The transition energy is $692 \pm 1\text{keV}$, which provides crucial information on the strength of the spin-spin interaction between Λ and nucleons.

Key words M1 γ transition, ΛN spin-spin interaction, Hyperball spectrometer

* Supported by NSFC (19875079) and Ministry of Education of Japan (08239102)