

ΛN 张量相互作用的首次观测^{*}

周书华^{1;1)} 周静¹ 孟秋英¹

S. Ajimura³ H. Akikawa⁴ D. E. Alburger⁵ A. Banu⁶ R. E. Chrien⁵
G. B. Franklin⁷ J. Franz⁸ O. Hashimoto² T. Hayakawa³ H. Hotchi⁵
K. Imai⁴ T. Kishimoto³ M. May⁵ D. J. Millener⁵ S. Minami³ Y. Miura²
T. Miyoshi² K. Mizunuma² T. Nagae⁹ S. N. Nakamura² K. Nakazawa¹⁰
Y. Okayasu² P. Pile⁵ B. P. Quinn⁷ A. Rusek⁵ Y. Sato⁹ R. Sutter⁵
H. Takahashi⁴ L. Tang¹¹ H. Tamura² K. Tanida¹² M. Ukai² L. Yuan¹¹

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

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

3 (Department of Physics, Osaka University, Toyonaka 5560-0043, Japan)

4 (Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-85023, Japan)

5 (Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA)

6 (GSI, Darmstadt D-64291, Germany)

7 (Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, USA)

8 (Department of Physics, University of Freiburg, Freiburg 79104, Germany)

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

10 (Department of Physics, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan)

11 (Department of Physics, Hampton University, Hampton, Virginia 23668, USA)

12 (RIKEN, Wako 351-0198, Japan)

摘要 在用 HYPERBALL 进行的 $^{16}_{\Lambda}O$ 的 γ 射线谱学测量中,观察到由 $^{16}_{\Lambda}O$ 的 $6.6\text{MeV } 1_2^-$ 激发态跃迁到基态自旋翻转二重态(1_1^- 和 0^-) 之间的两条 γ 射线. 由这两条 γ 射线的能量差得到基态二重态之间的能量间隔为 $26.4 \pm 1.6(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst})\text{keV}$, 并由此推导出 ΛN 之间的张量相互作用强度 $T = 0.03\text{MeV}$. 实验还测定了 $^{16}_{\Lambda}O$ 的 1_2^- 激发态的激发能为 $6561.7 \pm 1.1(\text{stat}) \pm 1.7(\text{syst})\text{keV}$.

关键词 超核 ΛN 张量相互作用 γ 谱学

1 引言

超核是由通常的核子与一个或多个超子组成的多体系统. 超核研究在核素图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 Λ 超子不

受泡里原理的限制, 因此可作为研究原子核结构的非常好的探针. 对 Λ 与核子(N)相互作用的研究, 可以把对核子与核子之间的强相互作用研究推广到重子与重子之间的强相互作用研究. 然而由于 Λ 超子与核子散射实验的困难很大, 超核精细结构的研

2005-01-21 收稿

^{*} 国家自然科学基金(1987507, 10375094), U. S. DOE(DE-AC02-98CH10886)和 Grant-in-Aid for Scientific Research from the Ministry of Education of Japan(11440070, 15204014) 资助

1) E-mail: shzhou@iris.ciae.ac.cn

究就成为研究 ΔN 相互作用的主要途径.

对于 Λ 超子处于 0_s 轨道的 p 壳超核, ΔN 两体相互作用势可表示如下^[1]:

$$V_{\Delta N}(r) = V_0(r) + V_\sigma(r)(s_\Lambda \cdot s_N) + V_\Lambda(r)(I_{\Delta N} \cdot s_\Lambda) + V_N(r)(I_{\Delta N} \cdot s_N) + V_T(r)s_{12}, \quad (1)$$

其中, $I_{\Delta N}$ 为相对运动轨道角动量, Λ 超子与核子之间的距离 $r = |\mathbf{r}_N - \mathbf{r}_\Lambda|$, 等号右边的各项依次为中心势、 ΔN 自旋-自旋势、 Λ 自旋-轨道势、 N 自旋-轨道势和张量势. s_Λ, s_N 和 s_{12} 分别表示 Λ 自旋算符、核子自旋算符和 Λ 自旋与核子自旋之间的张量相互作用算符. (1) 式中的后 4 项均与自旋有关, 其径向积分通常分别记为 Δ, S_Λ, S_N 和 T . 这些参数可通过拟合各种 p 壳超核能级间隔的实验值来确定. 此前, 采用 T 的理论预期值 (0.01—0.06 MeV)^[2], 通过 ${}^7_\Lambda \text{Li} (3/2^+, 1/2^+)^{[3,4]}$ 及 ${}^9_\Lambda \text{Be} (3/2^+, 5/2^+)^{[5]}$ 能级间隔的测量和 ${}^7_\Lambda \text{Li} (5/2^+)^{[3,4]}$ 激发态能量的测量分别定出:

$$\Delta = +0.43, S_\Lambda = -0.01, S_N = -0.39 \text{ MeV}, \quad (2)$$

Λ 超子与核子间单个 π 介子交换是禁戒的, 尽管 K 介子交换和通过 Σ 中间态进行的两 π 介子交换预计会对张量相互作用有所贡献, 但这种作用很弱, 因此一直没有 ΔN 张量相互作用强度 T 的实验值. 为获得不依赖于理论计算的 Δ 和 S_Λ 值也需要对 T 值进行实验测定.

在 p 壳超核中, $p_{1/2}$ 壳的 ${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 基态的自旋翻转能级 ($1^-, 0^-$) 之间的间距主要来自张量相互作用的贡献^[1], 由简单的粒子空穴计算得到^[1,6]

$$E(1^-) - E(0^-) = -0.38\Delta + 1.38S_\Lambda - 0.005S_N + 7.85T. \quad (3)$$

2 实验

${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 的 γ 谱学实验是在美国 BNL 实验室 AGS 加速器的 D6 束流线^[7]上进行的. 由于超核自旋相关的相互作用引起的能级劈裂间隔很小 (几十到几百 keV), 分辨率只有 2 MeV 左右的磁谱仪方法不适用. 为此, 实验采用了日本东北大学与中国原子能科学研究院合作研制的用于测量超核能级精细结构的 γ 谱仪 (HYPERBALL), 其分辨率比磁谱仪高约 3 个数量级. 具体采用的实验设备和方法与文献^[5]相同. 利用能量为 0.93 GeV/c 的 K^- 介子束流轰击厚度为 20 g/cm² 的 H_2O 靶, 通过奇异性转移反应 ${}^{16}_\Lambda \text{O} (K^-, \pi^-)$ 布居由处于 0_s 轨道的 Λ 粒子与 ${}^{15}\text{O}$ 的

$1/2^-$ 基态及 6.2 MeV 的 $3/2^-$ 激发态耦合成的 ${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 的两个 1^- 态^[8]. 所用 K^- 束的 K^-/π^- 值为 3. 在每 4.6 s 的周期中, K^- 束占 1.5 s, 强度为 $\sim 2 \times 10^5$. 累计照射到 H_2O 靶上的 K^- 粒子数为 4×10^{10} . (K^-, π^-) 事件通过气凝硅胶阈式切伦柯夫计数器在触发级以上以及在离线处理时根据飞行时间进行鉴别. 入射与出射粒子的动量由磁谱仪进行分析. 在重构的 ${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 的质量谱中选出 1_2^- 激发态. 谱仪系统类似于文献^[9]中所述.

HYPERBALL 谱仪^[3,4]包括 14 个 $\Phi 70 \times 70$ 的锗探测器, 每个锗探测器的端面距束流线 10 cm, 周围有 6 个锗酸铋 (BCGO) 计数器包围着, 用来压低康普顿散射及 π^0 衰变等造成的本底. 14 个锗探测器共覆盖由靶中心算起的立体角约为 $0.25 \times 4\pi \text{ sr}$. 在束流打到靶上的期间, HYPERBALL 对 2.3 MeV γ 射线的总的光电峰的探测效率为 $(1.5 \pm 0.3)\%$. 根据模拟计算, 谱仪对 6 MeV γ 射线光电峰的探测效率约为 1.0%.

利用 γ 源和束流引起的活化所产生的延迟 γ 射线在 0.1—7.1 MeV 范围对所用的锗探测器进行了能量刻度. 在束流打到靶上的期间, γ 射线峰形的响应函数直到 6.1 MeV 是高斯函数. 由在 6.1 MeV 测量的能量分辨外推, 估计在 6.6 MeV 处的能量分辨约为 8.6 keV.

选择锗探测器在 20 ns 的时间窗内有 5 MeV 以上的信号, 而相应的 BGO 计数器在 50 ns 的符合门中没有信号的事件进行记录.

3 数据分析及结果

${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 的 ~ 6.6 MeV 的 1_2^- 激发态通过 M1 跃迁衰变到基态自旋翻转二重态, 根据单粒子模型计算, 其寿命小于 1 fs. 而反应中产生的反冲动量为 0.1—0.2 GeV/c 的 ${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 在靶中的阻停时间估计在 1.0 ps 的数量级. 因此, γ 射线的峰形是多普勒展宽的, 宽度超过 100 keV. 使用重构的 ${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 的动量、反应顶点、锗探测器晶体的位置、对静止源的 γ 射线峰的响应函数等, 通过模拟计算, 可以对多普勒效应的影响进行逐个事件的修正. 由于修正后的 γ 射线峰形是由实验的几何布局、运动学条件、反应顶点和探测器的参数所唯一确定的, 因此, 可以对多普勒效应修正后的峰形进行模拟.

${}^{16}_\Lambda \text{O}$ 的质量是作为 ${}^{16}\text{O}(K^-, \pi^-)$ 反应的丢失质

量来计算的. 通过重现 $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$ 事件中 π^0 的丢失质量对 ${}^{16}_\Lambda O$ 的质量标度做绝对刻度. 质量分辨为 15MeV. 在 $-17 < -B_\Lambda < 3\text{MeV}$ 的区域开窗来选择 1^1_2 态 ($-B_\Lambda \sim -7\text{MeV}$). 图 1 是用伴随有 γ 射线的事件重构的 ${}^{16}_\Lambda O$ 的质量随 Λ 的结合能 (B_Λ) 的变化关系, (a) 伴随有能量为 5—7MeV 的 γ 射线, (b) 伴随有经多普勒效应修正后能量在 6500—6600keV 的 γ 射线.

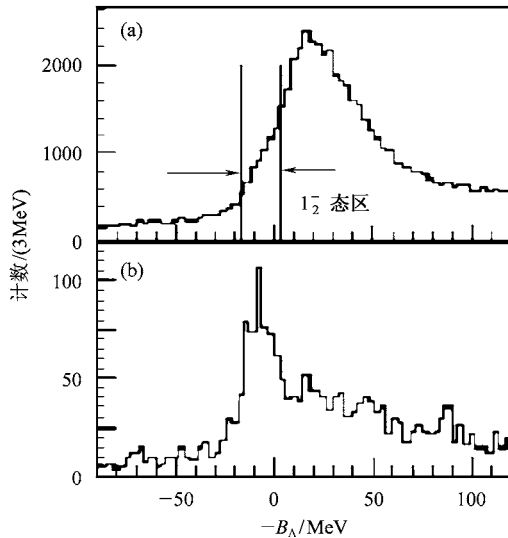


图 1 ${}^{16}O(K^-, \pi^-)$ 反应中用伴随有 γ 射线的事件重构的 ${}^{16}_\Lambda O$ 的质量随 Λ 的结合能 (B_Λ) 的变化关系 (a) 伴随有能量为 5—7MeV 的 γ 射线; (b) 伴随有经多普勒效应修正后能量在 6500—6600keV 的 γ 射线.

图 2(a)—(c) 给出用质量开窗的 γ 射线能谱, (a) 是 $-B_\Lambda > 50\text{MeV}$ 的未经多普勒效应修正的非束缚区, (b) 是未经多普勒修正的 1^1_2 态区, (c) 是做了多普勒修正的 1^1_2 态区. 在非束缚态区 (a) 和 1^1_2 态区 (b) 都观察到 ${}^{16}O$ (6129keV) 和 ${}^{15}O$ (6175keV) 的 γ 峰. 此外, 在 $\sim 6.6\text{MeV}$ 处, 只在 1^1_2 态区 (b) 中可看到一个很宽的凸起部分, 这个凸起部分经多普勒效应修正后变成两个窄的峰, 如 (c) 所示. 在比这两个峰低 511keV 处有类似的双峰结构. 因此, 将这两组双峰认定为 ${}^{16}_\Lambda O$ 的退激发 γ 射线. 由于在所进行的反应中除了 6.6MeV 的 1^1_2 激发态和基态二重态中的 1^1_1 态之外没有其他束缚态能够很强烈地布居, 所以这些双峰被认定为由 ${}^{16}_\Lambda O$ 的 1^1_2 态向其基态二重态的两个能级的 M1 跃迁. 这些 γ 射线的多普勒展宽情况也支持这种认定. 此外, 在图 1(b) 中, 有一个明显的峰, 其质量与 ${}^{16}_\Lambda O$ 的 1^1_2 态的实验值 ($-B_\Lambda = -7\text{MeV}$) 相符^[8,10,11].

图 2(d) 给出模拟的 γ 射线峰形, 点线对应于 ${}^{16}_\Lambda O$ 在静止状态发射的 γ 射线, 细实线属于在 ${}^{16}_\Lambda O$ 减速前发射的 γ 射线, 而粗实线是对细实线进行多普勒效应修正后的结果. 我们用模拟的经多普勒修正的峰形, 即 (d) 中的粗实线, 对 (c) 谱进行了拟合. 假定全能峰附近的本底由两种成分组成: 其一在 γ 射线峰 (E_0) 两侧附近的整个区域是不变的, 而另一成分是由多重康

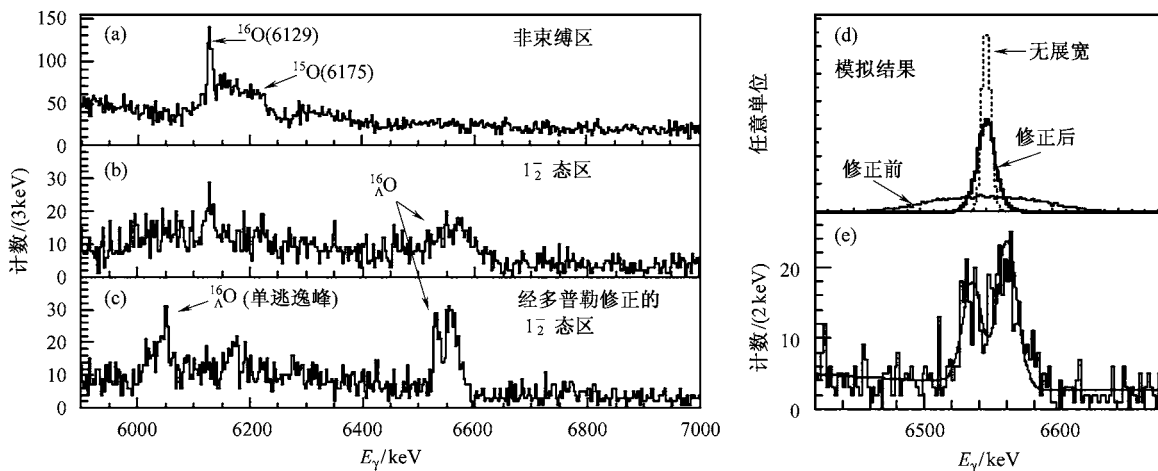


图 2 ${}^{16}O(K^-, \pi^-)$ ${}^{16}_\Lambda O$ 反应中用质量开窗的 γ 射线能谱 (a) 非束缚区; (b) 1^1_2 态区; (c) 经逐事件做多普勒效应修正的 1^1_2 态区; (d) 模拟的 6.55MeV γ 射线峰形, 点线为静止的 ${}^{16}_\Lambda O$ 发射的 γ 射线, 细实线是 ${}^{16}_\Lambda O$ 在阻停前发射的 γ 射线, 粗实线是对细实线代表的事件做了多普勒效应修正后的结果; (e) 是用模拟的峰形对 (c) 中 6550keV 附近的双峰拟合的结果.

普顿散射所引起的,只存在于低于峰位的一边.其形式是一阶梯函数,当 $E < E_0$ 时等于 $a + b(E - E_0)$,当 $E > E_0$ 时为 0.考虑到多普勒修正,基于模拟结果对阶跃函数在 $E = E_0$ 附近进行了光滑化,然后用于拟合.拟合结果示于图 2(e).对能量较低的峰,能量和产额分别为 $6533.9 \pm 1.2 \pm 1.7\text{keV}$ 和 $127 \pm 15 \pm 5$ 个计数,对能量较高的峰,分别为 $6560.3 \pm 1.1 \pm 1.7\text{keV}$ 和 $183 \pm 16 \pm 5$ 个计数.所标出的误差中,前者为统计误差,后者为系统误差(下同).系统误差中包括了多普勒效应修正的精度和能量刻度的误差.两个峰之间的能量差相当于 ${}^{16}_\Lambda\text{O}$ 的基态二重态之间的能量间距.

由产额比 $N(6534)/N(6560) = 0.69 \pm 0.11 \pm 0.10$ 可给出基态二重态能级的排列次序.在弱耦合极限内,分支比 $I_\gamma(1_2^- \rightarrow 1_1^-)/I_\gamma(1_2^- \rightarrow 0^-)$ 为 0.5.此外, HYPERBALL 对这两个跃迁的效率是不同的.这是由于出射的 π^- 和 γ 射线的角关联为^[12]

$$\omega(\theta) = \begin{cases} 1 + \cos^2\theta & \text{对于}(1^- \rightarrow 1^-)\text{跃迁,} \\ 1 - \cos^2\theta & \text{对于}(1^- \rightarrow 0^-)\text{跃迁,} \end{cases}$$

其中 θ 是 π^- 和 γ 之间的角度,以及由于锗探测器相对于 π^- 的出射方向不是各向同性放置的缘故.通过模拟计算得到效率比 $\varepsilon(1_2^- \rightarrow 1_1^-)/\varepsilon(1_2^- \rightarrow 0^-) = 0.80 \pm 0.05$ (系统误差).因而, $1_2^- \rightarrow 1_1^-$ 跃迁的产额预计要比 $1_2^- \rightarrow 0^-$ 跃迁小 0.4 倍.所测量的比值 0.69 意味着基态二重态中较低的能级是 0^- , 如图 3 所示.考虑到能级混合时的计算得到相同的结果.对所测量

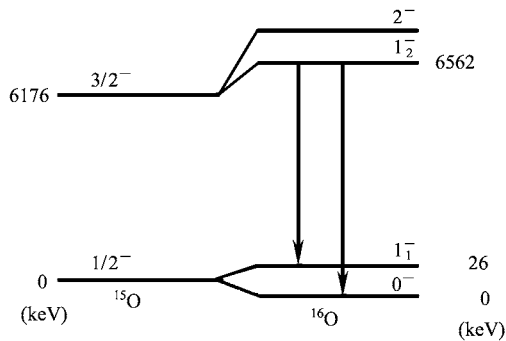


图 3 本实验确定的 ${}^{16}_\Lambda\text{O}$ 的能级图

图中同时标出了相应的 ${}^{15}\text{O}$ 的能级,测量得到的 γ 跃迁和激发能.

到的 γ 射线能量进行核反冲修正后得到 1_2^- 态的激发能为 6561.7keV .由此确定了 $p_{1/2}$ 壳超核基态二重态的能级次序及间距.

用这些结果和已知的自旋相关的相互作用参数,由方程(3)求出张量相互作用强度 $T = +0.03\text{MeV}$ ^[13],这里使用了参数值 $\Delta = 0.47$, $S_\Lambda = -0.01$ 和 $S_N = -0.42\text{MeV}$,这些参数是计入核半径和单粒子结合能效应^[14]后由方程式(2)中的初始值经标度化关系推导出 ${}^{16}_\Lambda\text{O}$ 得到的.对 T 值的这一估计值还包括了 Λ - Σ 耦合对方程(3)的贡献 -0.030MeV 和由于与弱耦合极限的小的偏离产生的贡献 $+0.0016\text{MeV}$.不考虑标度化关系或忽略 Λ - Σ 耦合及偏离弱耦合极限所产生的影响最多为 2keV . Δ 和 T 相抵消的贡献约为 200keV ,这一贡献导致能级劈裂变得很小.此外,应提到的是所测量的 1_2^- 态的激发能与(2)式中的 S_N 值相一致.

在 G 矩阵计算中使用 Nijmegen 的 OBE(单玻色子交换)模型(NSC97, NSC89, ND 和 NF)的 Λ -N 相互作用对张量相互作用强度 T 的理论预言值在 0.01 — 0.06MeV 范围^[2],其中大多数与本实验结果相符.本次实验结果与我们以前的结果^[3-5]一起在实验上确定了所有自旋相关的 Λ -N 相互作用参数.最近用 NSC97f 相互作用进行的壳模型计算^[15]几乎再现了所观察到的小的二重态间距.

4 结论

实验中观察到由 ${}^{16}_\Lambda\text{O}$ 的 1_2^- 态到基态自旋二重态 ($1_1^-, 0^-$) 的 2 条 γ 跃迁,测量了 1_2^- 能级的能量为 $6561.7 \pm 1.1 \pm 1.7\text{keV}$,以及基态二重态之间的间距为 $26.4 \pm 1.6 \pm 0.5\text{keV}$.这是至今所观测到的超核最小的精细结构能级间距,由此间距确定出很小的 ΛN 张量相互作用强度,现有的 OBE 模型预言大多与所得到的张量相互作用强度一致.这是首次从实验上给出的关于 ΛN 张量相互作用的数据.

作者感谢 T. Kiek 博士和 BNL-AGS 的成员对本实验的支持.

参考文献 (References)

- 1 Millener D J et al. Phys. Rev., 1985, **C31**:499—509
- 2 Millener D J. In *Hypernuclear Physics with Electromagnetic Probes*. Tang L, Hashimoto O. Hampton: Hampton University, 1999, 79
- 3 Tamura H et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**:5963—5966
- 4 ZHOU Shu-Hua et al. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2002, **24**(Suppl.):81 (in Chinese)
(周书华等. 高能物理与核物理, 2002, **24**(增刊):81)
- 5 Akikawa H et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**:082501-1—082501-4
- 6 Millener D J. nucl-th/0402091[*Nucl. Phys. A* (to be published)]
- 7 Pile P H et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 1992, Sect. **A321**:48—58
- 8 Brückner et al. Phys. Lett., 1987, **79B**:157—160
- 9 Kohri H et al. Phys. Rev., 2002, **C65**:034607-1—034607-9
- 10 Tamura H et al. Prog. Theor. Phys., 1994, **117**(Suppl.):1—15
- 11 Hashimoto O et al. Nucl. Phys., 1998, **A639**:93c—102c
- 12 Dalitz R H and Gal A. Ann. Phys. (N. Y.), 1978, **116**:167—243
- 13 Ukai M et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **93**:232501-1—232501-5
- 14 Millener D J. Nucl. Phys., 2001, **A691**:93c—100c
- 15 Fjii S, Okamoto R, Suzuki K. Phys. Rev., 2002, **C66**:054301-1—054301-10

First Observation of the ΛN Tensor Interaction*ZHOU Shu-Hua^{1;1)} ZHOU Jing¹ MENG Qiu-Ying¹

S. Ajimura³ H. Akikawa⁴ D. E. Alburger⁵ A. Banu⁶ R. E. Chrien⁵ G. B. Franklin⁷
 J. Franz⁸ O. Hashimoto² T. Hayakawa³ H. Hotchi⁵ K. Imai⁴ T. Kishimoto³ M. May⁵
 D. J. Millener⁵ S. Minami³ Y. Miura² T. Miyoshi² K. Mizunuma² T. Naga⁹
 S. N. Nakamura² K. Nakazawa¹⁰ Y. Okayasu² P. Pile⁵ B. P. Quinn⁷ A. Rusek⁵ Y. Sato⁹
 R. Sutter⁵ H. Takahashi⁴ L. Tang¹¹ H. Tamura² K. Tanida¹² M. Ukai² L. Yuan¹¹

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

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

3 (Department of Physics, Osaka University, Toyonaka 5560-0043, Japan)

4 (Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-85023, Japan)

5 (Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA)

6 (GSI, Darmstadt D-64291, Germany)

7 (Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, USA)

8 (Department of Physics, University of Freiburg, Freiburg 79104, Germany)

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

10 (Department of Physics, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan)

11 (Department of Physics, Hampton University, Hampton, Virginia 23668, USA)

12 (RIKEN, Wako 351-0198, Japan)

Abstract In a $^{16}_{\Lambda}O$ γ -ray spectroscopy experiment with HYPERBALL, two γ -ray transitions from the 6.6 MeV excited 1_2^- state to both ground-states spin-doublet members 1_1^- and 0^- have been observed. The measured ground-state doublet spacing is $26.4 \pm 1.6(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst})$ keV. Thus a small but nonzero strength of the tensor interaction between a Λ and a nucleon is deduced to be $T = +0.03$ MeV. The excitation energy of the 1_2^- state is also determined to be $6561.7 \pm 1.1(\text{stat}) \pm 1.7(\text{syst})$ keV.

Key words hyper-nuclei, ΛN tensor interaction, γ -ray spectroscopy

Received 21 January 2005

* Supported by NSFC(1987507, 10375094), U. S. DOE(DE-AC02-98CH10886) and Grant-in-Aid for Scientific Research from the Ministry of Education of Japan(11440070, 15204014)

1) E-mail: shzhou@iris.ciae.ac.cn