

自旋相关的 Λ 超子与核子间张量 相互作用的首次观测*

周书华[†] 周 静 孟秋英

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 超核 γ 谱学国际合作组在用超球 γ 谱仪(Hyperball)进行的 $^{16}_{\Lambda}\text{O}$ 的 γ 射线谱学测量中,观察到由 $^{16}_{\Lambda}\text{O}$ 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 ± 1.6 (统计误差) ± 0.5 (系统误差)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 $^{16}_{\Lambda}\text{O}$ 的 1_2^- 激发态的激发能为 6561.7 ± 1.1 (统计误差) ± 1.7 (系统误差)keV.

关键词 超核, ΛN 张量相互作用, γ 谱学

First observation of the ΛN tensor interaction

ZHOU Shu-Hua[†] ZHOU Jing MENG Qiu-Ying

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

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

Keywords hyper-nuclei, ΛN tensor interaction, γ -ray spectroscopy

近年来由中日美德等国的科学家组成的“超核的 γ 谱学研究合作组”在BNL的AGS加速器上进行的一项对 $^{16}_{\Lambda}\text{O}$ 超核的研究工作中首次观察到 Λ 超子与核子自旋相关的张量相互作用.

超核是由通常的核子与一个或多个超子组成的多体系统.第一例超核是波兰的一个研究小组于1952年在进行高空气球实验时在受过宇宙射线照射的核乳胶中观测到的.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 超子不受泡利原理的限制,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,

超核精细结构的研究就成为研究 ΛN 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,唯象的 ΛN 两体相互作用势由中心势、 ΛN 自旋-自旋势、 Λ 自旋-轨道势、N自旋-轨道势和张量势组成^[1].其中后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($0.01-0.06\text{ MeV}$)^[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]激发态能量的测量得到

* 国家自然科学基金(批准号:1987507,10375094)资助项目

2005-03-07收到

[†] 通讯联系人. Email: shzhou@iris.ciae.ac.cn

$$\Delta = +0.43, S_{\Lambda} = -0.01, S_N = -0.39 \text{ MeV.} \quad (1)$$

ΛN 张量相互作用强度 T 很弱, 实验观测很困难. 但是为获得不依赖于理论计算的各种自旋相关的 ΛN 相互作用, 需要对 T 值进行实验测定.

在 p 壳超核中, $p_{1/2}$ 壳的 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 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], 因而, 通过 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 精细结构的研究可以获得 ΛN 张量相互作用的信息. 由简单的粒子空穴计算得到^[16]

$$E(1^-) - E(0^-) = -0.38\Delta + 1.38S_{\Lambda} - 0.005S_N + 7.85T. \quad (2)$$

${}^{16}_{\Lambda}O$ 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超球 γ 谱仪 (Hyperball)^[3,4], 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] 介绍的相同. 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, 布居由 0_s 轨道的 Λ 粒子与 ${}^{15}O$ 的基态及 6.2 MeV 的激发态耦合成的 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 的两个 1^- 态^[8]. 入射与出射粒子的动量由磁谱仪进行分析. 在重构的 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 的质量谱中选出 1^- 激发态. 谱仪系统类似于文献 [9] 中所述.

${}^{16}_{\Lambda}O$ 的 ~ 6.6 MeV 的 1^- 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 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 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. 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, 并对多普勒效应修正后的峰形进行模拟.

${}^{16}_{\Lambda}O$ 的质量是作为 ${}^{16}O(K^-, \pi^-)$ 反应的丢失质量来计算的. 在 $-17 < -B_{\Lambda} < 3$ MeV 的区域开窗来选择 1^- 态 ($-B_{\Lambda} \sim -7$ MeV). 图 1 是伴随有 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.

图 2(a)—2(c) 给出用质量开窗的 γ 射线能谱. 图 2(a) 是 $-B_{\Lambda} > 50$ MeV 的未经多普勒效应修正的非束缚区; 图 2(b) 是未经多普勒修正的 1^- 态区; 图 2(c) 是做了多普勒修正的 1^- 态区. 在非束缚态区图 2(a) 和 1^- 态区图 2(b) 都观察到 ${}^{16}O(6129 \text{ keV})$

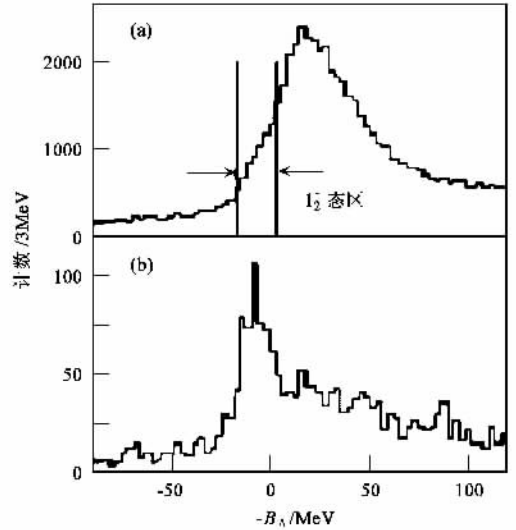


图 1 重构的 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 的质量随 Λ 的结合能 (B_{Λ}) 的变化关系 (a) 伴随有能量为 5—7 MeV 的 γ 射线; (b) 伴随有经多普勒效应修正后能量在 6500—6600 keV 的 γ 射线

和 ${}^{15}O(6175 \text{ keV})$ 的 γ 峰. 此外, 在 ~ 6.6 MeV 处, 只在 1^- 态区图 2(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, 如图 2(c) 所示. 在比这两个峰低 511 keV 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 6.6 MeV 的 1^- 激发态和基态二重态中的 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^- 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^- 态的实验值 ($-B_{\Lambda} = -7$ MeV) 相符^[8,10,11].

图 2(d) 给出了模拟的 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. 用模拟的经多普勒修正的峰形, 即图 2(d) 中的粗实线, 对图 2(c) 谱进行了拟合, 结果示于图 2(e) 中. 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. 在所标出的误差中, 前者为统计误差, 后者为系统误差(下同). 两个峰之间的能量差相当于 ${}^{16}_{\Lambda}O$ 的基态二重态之间的能量间距.

$$\text{由产额比 } N(6534)/N(6560) = 0.69 \pm 0.11 \pm$$

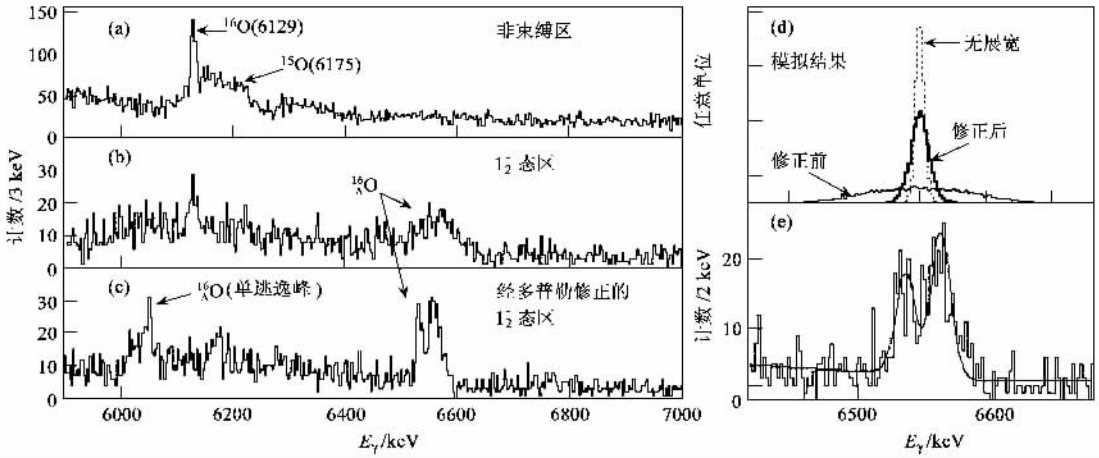
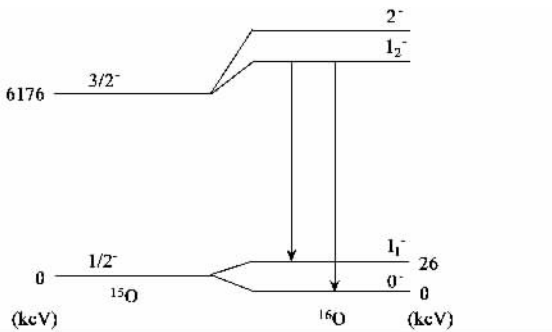


图2 $^{16}\text{O}(\text{K}^-\pi^-)^{16}\text{O}$ 反应中用质量开门的 γ 射线能谱 (a)非束缚区 (b) 1_2^- 态区; (c)经多普勒效应修正的 1_2^- 态区 (d)模拟的 6.55MeV γ 射线峰形, 点线为静止的 ^{16}O 发射的 γ 射线, 细实线是 ^{16}O 在阻停前发射的 γ 射线, 粗实线是对细实线代表的事件做了多普勒效应修正后的结果 (e)是用模拟的峰形对(c)中 6550keV 附近的双峰拟合的结果

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, 超球探测器对这两个跃迁的效率是不同的. 通过模拟计算得到效率比 $\epsilon(1_2^- \rightarrow 1_1^-)/\epsilon(1_2^- \rightarrow 0^-) = 0.80 \pm 0.05$ (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. 对所测量到的 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(2)式求出张量相互作用强度 $T = +0.03\text{MeV}^{[12]}$, 这里使用了参数值 $\Delta = 0.47$, $S_\Lambda = -0.01$ 和 $S_N = -0.42\text{MeV}$, 这些参数是在计入核半径和单粒子结合能效应^[13]后由(1)式中的初始值推导出的. 还应提到的是所测量的 1_2^- 态的激发能

与(1)式中的 S_N 值相符. 本次实验结果与合作组以前的结果^[3-5]一起在实验上确定了所有自旋相关的 $\Lambda - N$ 相互作用参数. 最近用 NSC97f 相互作用进行的壳模型计算^[14], 几乎再现了所观察到的小的二重态间距.

参 考 文 献

[1] Millener D J *et al.* Phys. Rev. C, 1985, 31 :499
 [2] Millener D J. In : Hypernuclear Physics with Electromagnetic Probes, edited by L. Tang and O. Hashimoto. Hampton : Hampton University, VA, 1999. 79
 [3] Tamura H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84 :5963
 [4] 周书华等. 高能物理与核物理, 2002, 增刊, 24 :81 [Zhou Shuhua. *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2002, Supp. 24 :81 (in Chinese)]
 [5] Akikawa H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88 :082501 - 1
 [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. A 321 :48
 [8] Brückner *et al.* Phys. Lett. B, 1987, 79 :157
 [9] Kohri H *et al.* Phys. Rev. C, 2002, C 65 :034607-1
 [10] Tamura H *et al.* Prog. Theor. Phys., 1994, Suppl. 117 :1
 [11] Hashimoto O *et al.* Nucl. Phys. A, 1998, 639 :93c
 [12] Ukai M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93 :232501-1
 [13] Millener D J. Nucl. Phys. A, 2001, 691 :93c
 [14] Fjii S, Okamoto R, Suzuki K. Phys. Rev. C, 2002, 66 : 054301-1