论文

稳定核 ^{195}Pt 的高自旋态能级结构

王思成^{①②}, 周小红^{①*}, 方永得^①, 张玉虎^①, 石跃^③, 柳敏良^①, 王建国^①, 郭应祥^①, 高丙水^{①②}, 滑伟^①, 李仕成^{①②}, 马飞^①, 李广顺^{①②}, 何龙^{①②}, 王志刚^{①②}, 颜鑫亮^{①②}, 方芳^①, 吴晓光^④, 贺创业^④, 郑云^④, 王治民^④, 许甫荣^③

① 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

④ 中国原子能科学研究院, 北京 102413

*联系人, E-mail: xhzhou@impcas.ac.cn

收稿日期: 2011-10-31; 接受日期: 2011-12-13; 网络出版日期: 2012-05-21

国家自然科学基金(批准号: 10905075, 10825522, 10735010, 10975006)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815005)和中国科学院基金资助项目

摘要 利用非完全熔合反应 $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, (p, d, t) xn)$ 布居了稳定核 ^{195}Pt 的高自旋态. 根据 γ - γ 符合关系、 γ 射线的相对强度和各向异性度的测量结果, 建立了 ^{195}Pt 核的能级纲图, 其中包括 11 条新的 γ 跃迁和 9 个新能级. 通过与邻近核的能级系统性比较, 指出了 ^{195}Pt 核基于 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 和 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}(j = p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态的转动带能级结构. 同时, 利用 Total-Routhian-Surface (TRS) 理论计算结果讨论了 ^{195}Pt 核的转动带性质.

关键词 高自旋态, 非完全熔合反应, 奇 A 核, 转动带

PACS: 21.10.Re, 23.20.En, 23.20.Lv, 27.60.+j

doi: 10.1360/132011-1101

1 引言

质量数 $A \approx 190$ 区的 Pt 同位素核具有典型的过渡区核性质, 这些核的势能曲面对 β 和 γ 形变非常软, 处于不同轨道的价核子的极化驱动效应使得核形状表现出强烈的组态相关性. 早在 20 世纪 70 年代, Piiparinen 等人^[1] 在奇 $A^{187-193}\text{Pt}$ 核中观测到了基于 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 和 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}(j = p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态的转动结构. 随后发展起来的三轴粒子转子模型(TRM)可以很好地重现

$^{191,193}\text{Pt}$ 核 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 转动带的激发能级(该模型认为 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 转动带结构是由 $\nu i_{13/2}$ 中子空穴耦合相应的偶质量 Pt 核芯而形成的)^[2]. 近年来, 随着在束 γ 谱学实验和探测技术的不断发展, 人们能够进一步扩展并更新 $^{187,189,191}\text{Pt}$ 核原有的能级纲图^[3-5], 并可以探寻原子核在更高自旋时所表现出的新的物理特征. 当中子数继续增加, 对于 $N=117$ 的稳定核 ^{195}Pt , 其中子费米面处于 $i_{13/2}$ 亚壳层上部并且靠近 $f_{5/2}$ 和 $p_{3/2}$ 轨道, 具有 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 和 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}(j = p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态的转动结构应该依然

引用格式: 王思成, 周小红, 方永得, 等. 稳定核 ^{195}Pt 的高自旋态能级结构. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 639–646

Wang S C, Zhou X H, Fang Y D, et al. High-spin level structure in the stable nucleus ^{195}Pt (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 639–646, doi: 10.1360/132011-1101

存在. 然而在实验测量方面, 虽然很早以前就确认了 ^{195}Pt 核的一个激发能为 259-keV 的 $\nu i_{13/2}^{-1}$, $13/2^{+}$ 同核异能态^[6], 但由于 ^{195}Pt 核处在 β 稳定线上的丰中子区域一侧, 采用传统的重离子熔合蒸发反应很难找到有效的弹靶组合来布居它的高自旋态. 因此, 至今未能建立起 ^{195}Pt 核基于 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 以及 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态的转动结构, 这也使得人们对质量数相对较重的 Pt 同位素核的 γ 谱学特征缺乏深入了解. 到目前为止, 有关 ^{195}Pt 核的实验数据主要来自 ^{195}Au 与 $^{195}\text{Ir}^m$ 核的 β 衰变^[7], 库仑激发^[8], 以及 $^{196}\text{Pt}(p, d)^{195}\text{Pt}^{[9]}$ 和 $^{196}\text{Pt}({}^3\text{He}, \alpha)^{195}\text{Pt}^{[10]}$ 中子转移反应. 由于受到反应机制的限制, 这些实验只能观测到 ^{195}Pt 的一些低自旋能级结构.

当前, 利用弱束缚核 ${}^7\text{Li}$ 引起的非完全熔合反应, 为研究稳定线附近丰中子原子核的高自旋结构提供了一种有效方法^[11-16]. 当 ${}^7\text{Li}$ 轰击重核时, 会有一定概率发生碎裂而产生 p, d, t 和与之相应的 ${}^{4,5,6}\text{He}$ 粒子, 其中 p, d, t 粒子会高速飞离靶核, 而 ${}^{4,5,6}\text{He}$ 粒子则会带入较高的角动量来与靶核发生完全熔合蒸发反应^[13-15]. 本次实验正是利用 ${}^7\text{Li}$ 束流的这种独特性质来轰击靶核 ^{192}Os , 从而布居了 ^{195}Pt 核的高自旋态, 并首次建立了 ^{195}Pt 核基于 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 和 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态的转动带能级纲图.

2 实验和结果

2.1 实验方法

实验是在中国原子能科学研究院(CIAE)HI-13 串列加速器上完成的. 利用加速器提供的 ${}^7\text{Li}$ 束流轰击 ^{192}Os 同位素靶并发生核反应, 产生了处于高激发态的 ^{195}Pt 核. 靶的质量厚度约为 1.7 mg/cm^2 , 并衬有约 1.1 mg/cm^2 厚的碳衬以阻止反应产物从同位素靶中反冲出来, 造成在束 γ 射线的多普勒位移. 探测器阵列由 12 套带有 BGO 反康抑制的高纯锗探测器和 2 台小平面对探测器组成. 在实验前后, 用 ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{133}\text{Ba}$ 和 ${}^{152}\text{Eu}$ 标准放射源对高纯锗探测器做了能量和相对效率刻度. 对于 ${}^{60}\text{Co}$ 源的 1332.5 keV 的 γ 射线, 各探测器的能量分辨在 2.0–2.5-keV 之间. 本实验在 44 MeV 的束流能量下进行了 γ - γ 和 X- γ - t 的符合测量, 这里 t 是符合的两条 γ 射线到达探测器的相对时间差, 符合时间窗为 400 ns. 实验中共获得了大约 9×10^7 个 γ - γ - t 符合事件. 在离线数据处理时, 将探测器记录到的 γ

射线的能量信息反演成一个 4096×4096 对称矩阵. 为了获得 γ 射线的跃迁多级性信息, 将探测器分为 3 组并分别放置在与束流成 $40^\circ, 90^\circ$ 和 152° 的角度上. 把位于小角度($\theta_1=40^\circ$ 和 152° , 平均角度约为 35°)和大角度($\theta_2=90^\circ$)的探测器记录到的 γ 射线分别放在两个矩阵的 y 轴上, 与之符合的 γ 射线不论被哪个角度的探测器所记录都被放到相应矩阵的 x 轴上, 从而建立了两个 4096×4096 的非对称 ADO (Angular Distribution of γ rays deexciting the Oriented states) 矩阵. 选用较强的 γ 射线分别在这两个矩阵的 x 轴总投影谱上开窗, 对矩阵向 y 轴投影, 得到对应于小角度($\theta_1=35^\circ$)和大角度($\theta_2=90^\circ$)方向上的两个投影谱. 从投影谱中分别提取出 γ 射线的相对强度 $I_\gamma(35^\circ)$ 和 $I_\gamma(90^\circ)$, 从而求出 γ 射线的 ADO 系数, 即 $R_{\text{ADO}} = I_\gamma(35^\circ)/I_\gamma(90^\circ)$. 通过比较已知极性的 γ 射线的 ADO 系数, 我们将 R_{ADO} 值大于 1 的 γ 射线指认为拉伸电四极跃迁, 将 R_{ADO} 值小于 1 的 γ 射线指认为偶极跃迁.

2.2 ^{195}Pt 核的识别及能级纲图的建立

在 ${}^7\text{Li}+{}^{192}\text{Os}$ 反应中, 通过 $pxn, d(x-1)n$ 和 $t(x-2)n$ 三个不同的反应道可以产生一系列 Pt 同位素链上的核素. 因此, 很难利用实验产生的 γ 射线与 Pt 同位素的特征 X 射线之间的符合关系来对 Pt 核的 γ 跃迁进行有效的核素归属指认. 但是借助于实验上已经确立的 $^{193,194,196}\text{Pt}$ 核的高自旋能级结构^[2,17,18], 在 Pt 同位素的特征 X 射线开门谱中, 我们很容易就鉴别出来自 $^{193,194,196}\text{Pt}$ 核的 γ 跃迁. 除此之外, 有两条跃迁能量分别为 368.8-和 578.1-keV 的 γ 射线, 它们相互符合但却与 $^{193,194,196}\text{Pt}$ 核中的已知 γ 射线没有任何符合关系. 因此, 我们初步认为它们可能是来自 ^{195}Pt 核的 γ 跃迁. 这一观点同样得到 ${}^{82}\text{Se}+{}^{192}\text{Os}$ 反应数据的支持, 在文献[19,20]中, 作者利用 460 MeV 的 ${}^{82}\text{Se}$ 束流轰击 ^{192}Os 同位素靶而引起的深度非弹反应, 研究了类弹与类靶丰中子原子核的高自旋能级结构. 通过对 ${}^{82}\text{Se}+{}^{192}\text{Os}$ 反应中的三重 γ - γ - γ 符合数据进行分析, 我们发现 368.8-和 578.1-keV γ 射线分别与 ${}^{78}\text{Ge}$ 核中的 $2^+ \rightarrow 0^+$ 619-keV 以及 $4^+ \rightarrow 2^+$ 951-keV γ 跃迁有很强的符合关系^[20]. 在 ${}^{82}\text{Se}+{}^{192}\text{Os}$ 反应中, 弹核与靶核之间可以转移多个核子来同时布居 ${}^{78}\text{Ge}$ 核和 Pt 同位素核($A \leq 196$)的高激发态. 由于从 ${}^{78}\text{Ge}$ 核与 Pt 同位素核退激发出的 γ 射线具有同时性, 因而可以被探测器同时探测到.

为了进一步确认 368.8-和 578.1-keV γ 射线的核素归属, 我们定性地分析了实验产生的 Pt 同位素核的相对产额. 原则上, 通过提取直接跃迁到原子核基态的所有 γ 射线的强度可以计算相应原子核的相对产额. 但是, 在奇质量 Pt 核中都存在长寿命的同核异能态 $13/2^+$, 在 $^7\text{Li}+^{192}\text{Os}$ 反应中, 来自奇质量 Pt 核的大部分 γ 射线都会退激到相应的同核异能态上. 因此, 很难获得直接跃迁到相应原子核基态的 γ 射线的强度信息. 一种可行的方法是在门宽大小保持一致的前提下, 对比 341.0-keV $17/2^+ \rightarrow 13/2^+$ (^{193}Pt), 328.5-keV $2^+ \rightarrow 0^+$ (^{194}Pt), 355.6-keV $2^+ \rightarrow 0^+$ (^{196}Pt) 以及 368.8-keV γ 射线开门谱中与之符合的 γ 射线的强度. 图 1 给出了 341.0-, 328.5-, 355.6- 以及 368.8-keV γ 射线的开门谱,

从图中可以很明显看出, 本次实验产生的 Pt 同位素核中 ^{194}Pt 核的相对产额最高, ^{193}Pt 核与 ^{196}Pt 核的相对产额则最低. 由于在 $^7\text{Li}+^{192}\text{Os}$ 反应中 ^{194}Pt 与 ^{196}Pt 核都被布居, 再根据对实验产生的 Pt 同位素核相对产额的分析结果, 我们有理由相信 368.8-keV γ 射线及其开门谱中的 γ 跃迁应该来自 ^{195}Pt 核(在 $^{82}\text{Se}+^{192}\text{Os}$ 反应中, 与 ^{78}Ge 核同时布居的 Pt 同位素核的质量数应小于 197).

通过与奇质量 $^{187-193}\text{Pt}$ 核中的 $17/2^+ \rightarrow 13/2^+$ γ 射线(能量 E_γ 为 300–400-keV)进行系统性比较, 我们将 368.8-keV γ 射线指认为 ^{195}Pt 核中的 $17/2^+ \rightarrow 13/2^+$ 跃迁. 仔细分析图 1(c) 中各 γ 射线之间的符合关系, 并结合它们的强度信息、能量加和关系以及 ADO 系数等,

图 1 Pt 同位素核 γ 射线开窗的符合谱

Figure 1 The γ -ray coincidence spectra gated by γ -ray transitions in $^{193-196}\text{Pt}$.

建立了 ^{195}Pt 核新的能级纲图, 其中包括 11 条 γ 射线和 9 条能级, 结果展示在图 2 中. 纲图中标明了各个能级的激发能和相应 γ 跃迁的能量值, 箭头线的粗细代表 γ 跃迁相对强度的大小. 这些新观测到的 γ 射线清晰地展现在图 3 所示的 578.1-和 204.5-keV γ 射线开门谱中. 表 1 给出了实验所提取的 ^{195}Pt 核的 γ 射线的能量、相对强度、初末态能级的位置、自旋宇称值、ADO 系数以及 γ 跃迁的多极性.

带 1(见图 2)建立在 $13/2^+$ 同质异能态上, 其优先(Favored)分支由 259.3-, 628.1-, 1206.2-和 1915.8-keV 4 条激发能级构成, 非优先(Unfavored)分支只发现 2 条能级, 它们分别通过 499.2-和 559.6-keV 两条偶极跃迁退激到优先分支的 $13/2^+$ 和 $17/2^+$ 态上. 实验中, 由于 709.6-keV γ 峰的统计量较小, 实验数据不能给出其 ADO 系数. 基于 γ - γ 符合关系和能级系统性, 我们建议 709.6-keV γ 射线为 $(25/2^+) \rightarrow 21/2^+$ 的 $E2$ 跃迁.

对于带 2, 我们识别了三条能量分别为 143.9-, 411.6-以及 645.3-keV 的 $E2$ 跃迁, 其中, 411.6-和 645.3-keV γ 射线的跃迁极性可以利用实验得到的 ADO 系数进行判断, 而能量较低的 143.9-keV γ 射线的跃迁极性则是通过比较实验与理论内转换系数而确定的. 根据 γ 跃迁强度平衡原理, 我们提取出 143.9-keV γ 射线的内转换系数 $\alpha_{\text{tot}}^{\text{exp}} = 1.13(10)$, 理论计算 143.9-keV γ 射线的内转换系数为 $\alpha_{\text{tot}}^{\text{th}} = 2.36$ ($M1$),

$\alpha_{\text{tot}}^{\text{th}} = 0.16$ ($E1$), $\alpha_{\text{tot}}^{\text{th}} = 1.17$ ($E2$) 以及 $\alpha_{\text{tot}}^{\text{th}} = 15.14$ ($M2$). 可以看出, 143.9-keV γ 射线内转换系数的实验值与它属于 $E2$ 跃迁的理论值十分接近, 因此我们认为 143.9-keV γ 射线为 $E2$ 跃迁. 此外, 带 1 与带 2 之间通过 185.7-和 204.5-keV 两条 γ 跃迁连接起来. 值得注意的是, 基于 ADO 系数分析, 我们不能分辨四极($\Delta I=2$)

图 2 本工作建立的 ^{195}Pt 核的能级纲图
Figure 2 Level scheme of ^{195}Pt deduced from the present work.

表 1 实验测量到的 ^{195}Pt 核 γ 射线的能量、相对强度、初末态能级激发能、自旋宇称、ADO 系数及跃迁极性

Table 1 γ -ray transition energies, relative intensities, excitation energies of initial and final states, spin-parity assignments, ADO ratios and γ -ray multipolarity in ^{195}Pt

E_{γ} (keV) ^{a)}	I_{γ} ^{b)}	$E_i \rightarrow E_f$ (keV) ^{c)}	$J_i^{\pi} \rightarrow J_f^{\pi}$ ^{d)}	R_{ADO}	Multipolarity
143.9	27(4)	1535.8 $\rightarrow$ 1391.9	$25/2^- \rightarrow 21/2^-$	—	$E2$
185.7	29(3)	1391.9 $\rightarrow$ 1206.2	$21/2^- \rightarrow 21/2^+$	1.29(17)	$E1$
204.5	47(6)	1391.9 $\rightarrow$ 1187.5	$21/2^- \rightarrow 19/2^+$	0.76(8)	$E1$
368.8	100(8)	628.1 $\rightarrow$ 259.3	$17/2^+ \rightarrow 13/2^+$	1.26(13)	$E2$
411.6	30(4)	1947.4 $\rightarrow$ 1535.8	$29/2^- \rightarrow 25/2^-$	1.32(15)	$E2$
429.0	47(6)	1187.5 $\rightarrow$ 758.5	$19/2^+ \rightarrow 15/2^+$	1.40(27)	$E2$
499.2	35(4)	758.5 $\rightarrow$ 259.3	$15/2^+ \rightarrow 13/2^+$	0.61(11)	$M1/E2$
559.6	74(6)	1187.5 $\rightarrow$ 628.1	$19/2^+ \rightarrow 17/2^+$	0.50(6)	$M1/E2$
578.1	64(5)	1206.2 $\rightarrow$ 628.1	$21/2^+ \rightarrow 17/2^+$	1.49(20)	$E2$
645.3	23(3)	2592.7 $\rightarrow$ 1947.4	$33/2^- \rightarrow 29/2^-$	1.34(37)	$E2$
709.6	12(2)	1915.8 $\rightarrow$ 1206.2	$(25/2^+) \rightarrow 21/2^+$	—	$E2$

a) γ 射线的能量, 不确定性在 0.1–0.5 keV 之间;
b) γ 射线的相对强度, 不确定性在 5%–30% 之间;
c) γ 射线跃迁的始末态激发能级的位置 E_i 和 E_f ;
d) γ 射线跃迁的始末态自旋宇称值 J_i^{π} 和 J_f^{π} .

图 3 578.1-和 204.5-keV γ 射线开窗的符合谱Figure 3 The γ -ray coincidence spectra gated by 578.1- and 204.5-keV transitions.

跃迁和偶极($\Delta I=0$)跃迁. 谱图中 185.7-keV γ 射线便是如此, 其 ADO 系数为 1.29(17). 对于 1391.9-keV 能级自旋宇称的指认主要是通过能级系统性以及 204.5-keV γ 射线的跃迁极性确定的.

2.3 稳定核 ^{195}Pt 的产生机制

本次实验也同时布居了 $^{194,195}\text{Au}$ 核, 它们的反应道分别为 $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, 5n)^{194}\text{Au}$, $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, 4n)^{195}\text{Au}$. 利用 γ - γ 符合数据, 我们估算了实验产生的 $^{194,195}\text{Au}$ 以及 $^{194,195}\text{Pt}$ 核的相对产额, 它们分别为 100, 85(10), 79(14), 7(1). 计算时对 γ 射线的强度进行了相对效率和内转换系数修正. 通过统计模型 PACE2 程序计算, 我们得出了在束流能量为 44 MeV 的 $^7\text{Li}+^{192}\text{Os}$ 反应中, $^{194,195}\text{Au}$ 与 $^{194,195}\text{Pt}$ 核相对产额的理论值分别是 100, 39, 0.09 和 <0.001 . ^7Li 与 ^{192}Os 完全熔合形成具有高激发能的复合核 $^{199}\text{Au}^*$, $^{199}\text{Au}^*$ 蒸发 4 或 5 个中子生成 $^{194,195}\text{Au}$ 核, 这一点实验观测值与理论计算结果是一致的. 但是对 $^{194,195}\text{Pt}$ 核来说, 其相对产额的实验值比理论值大至少 3 个数量级, 这表明若 $^{194,195}\text{Pt}$ 核仅仅是通过完全熔合蒸发反应产生, 则难以获得如此大的相对产额, 需要引入另一种物理机制对其进行解释. 事实上, ^7Li 是一种弱束缚核, 它在轰击靶核时极易发生碎裂而生成 α 和 t 粒子($^7\text{Li} \rightarrow \alpha + t$, 反应能 $Q=-2.467$ MeV), 其中的一个粒子与靶核发生熔合, 另一个粒子则会高速飞离靶核而不与其产生相互作用.

人们往往利用 ^7Li 的这种特性来研究稳定线附近原子核的结构. 例如在文献[16]中, 作者利用 ^7Li 束流轰击 ^{192}Os 同位素靶而引起的非完全熔合反应, 通过 $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, \alpha 2n)$ 反应道研究了丰中子核 ^{193}Ir 的激发态.

同样, ^7Li 碎裂生成的 α 粒子也可以与 ^{192}Os 发生完全熔合反应形成具有高激发能的复合核 $^{196}\text{Pt}^*$, $^{196}\text{Pt}^*$ 再分别以蒸发 2 个和 1 个中子的方式生成 ^{194}Pt 和 ^{195}Pt 核. 依据对实验产生的 $^{194,195}\text{Pt}$ 核的分析结果, 我们认为 $^{194,195}\text{Pt}$ 核主要通过 $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, t xn)$ 反应道产生, t 粒子的主要来源则是 ^7Li 发生的碎裂反应.

3 讨论

为了分析 ^{195}Pt 核中转动带的性质, 我们系统地比较了 $^{191-196}\text{Pt}$ 核正负宇称带的能级激发能, 结果显示在图 4 中. 同时, 在三维形变(β_2 , β_4 和 γ 形变)空间中, 对 $^{191,193,195}\text{Pt}$ 核的 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 转动带以及 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核的 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1} (j=p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态进行了 Total-Routhian-Surface (TRS) 理论计算. 在计算中, 采用了非轴对称形变 Woods-Saxon (WS) 势^[21]. 在给定的某一转动频率下, 对计算得到的 TRS 取极小值, 从而确定原子核的平衡形变参数(β_2 , β_4 , γ). 图 5 给出了在转动频率为 0.15 MeV 时, 奇质量 $^{191-195}\text{Pt}$ 核(π, α)=(+, +1/2) 组态的势能曲面图(π 和 α 分别表示宇称量子数和旋称量子数).

图 4 $^{191-196}\text{Pt}$ 核部分能级激发能的系统性比较
Figure 4 Energy systematics of excited states in $^{191-196}\text{Pt}$.

数). 图 5 中 $\gamma=0^\circ$ 表示原子核具有轴对称的长椭圆形变, $\gamma=-60^\circ$ 则对应扁椭圆形变.

3.1 正宇称带

带 1 的带头自旋和宇称被指认为 $13/2^+$. 在较重奇 A Pt 同位素核中, 实验上已经观测到了建立在该激发态上的退耦合带^[1]. 基于三轴粒子转子模型 PRM 理论计算结果和实验事实^[2], 人们认为该转动带结构是由 $i_{13/2}$ 中子空穴耦合相应偶质量 Pt 核的基态带而成, 并且指认其组态为 $\nu i_{13/2}^{-1}$. 通过系统性比较 $^{191,193,195}\text{Pt}$ 核 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 转动带和与之对应的 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核基态带能级结构(见图 4), 我们发现 $^{191,193,195}\text{Pt}$ 核的能级间隔与 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核基态带接近, 并且随着中子数的增加, 相对应不同自旋的能级间间隔会有相同的变化趋势. 在文献[6]中 Bacon 等人也将 ^{195}Pt 的 $13/2^+$ 同核异能态的组态指认为 $\nu i_{13/2}^{-1}$. 因此, 同样的组态可以用来解释 ^{195}Pt 核中的带 1. 从 TRS 理论计

算结果中, 我们提取了 ^{191}Pt , ^{193}Pt 和 ^{195}Pt 核 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 转动带的形变参数 (β_2 , γ), 它们分别是 $(0.154, -41^\circ)$, $(0.149, -47^\circ)$ 以及 $(0.141, -59^\circ)$. 可以看出, 从 ^{191}Pt 到 ^{195}Pt 核, 它们的四极形变 β_2 随着中子数的增加逐渐减小, 三轴形变 γ 逐渐增大, 其中, $^{191,193}\text{Pt}$ 核表现出一定程度的三轴形变, 而 ^{195}Pt 核则具有轴对称的扁椭圆形变. 这与实验测量得到的偶质量 $^{192-196}\text{Pt}$ 核晕带的形变趋势是一致的 ($A \geq 188$ 的偶质量 Pt 核晕带具有近似扁椭球的形变, 四极形变 β_2 随着中子数的增加而减小)^[22].

3.2 负宇称带

在偶质量的 Pt 和 Hg 核中, 人们系统地观测到了建立在 5^- 态上的转动带能级结构, 建议该转动带组态为 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1} (j=p_{3/2}, f_{5/2})$ ^[23-26]. 而建立在 $21/2^-$ 态上的奇质量 Pt 和 Hg 核的转动带则被认为是由 $i_{13/2}$ 中子空穴耦合相应偶质量的 Pt 和 Hg 核的 $5^-, 7^-, 8^-, \dots$ 态而成, 并且指认其组态为 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1} (j=p_{3/2}, f_{5/2})$ ^[1-5]. 从图 4 可以很明显地看出, 偶质量 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核的负宇称带能级间隔及激发能随中子数的变化趋势与奇质量 $^{191,193,195}\text{Pt}$ 核的负宇称带保持一致. 而且 ^{195}Pt 核的中子费米面处在 $\nu i_{13/2}$ 亚壳层上部. 在 Nilsson 能级图中扁椭圆形变一侧, 准中子可能占据的轨道为低 K 的 $i_{13/2}$ 以及 $f_{5/2}$ 和 $p_{3/2}$. 由处于这些轨道的粒子耦合而成的多准粒子态预期应该在奇质量 ^{195}Pt 核中得到观测. 因此, 我们建议带 2 的组态为 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1} (j=p_{3/2}, f_{5/2})$.

对比偶(奇)质量 Pt 和 Hg 核的基于 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1}$ ($\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}$) 组态的负宇称带(这里 $j=p_{3/2}, f_{5/2}$), 我们观察到它

图 5 在 $\hbar\omega=0.15$ MeV 时, TRS 理论计算给出的 $^{191,193,195}\text{Pt}$ 核 $(+, +1/2)$ 组态的势能曲面图
Figure 5 Total Routhian surfaces at $\hbar\omega=0.15$ MeV calculated for the lowest $(\pi, \alpha)=(+, +1/2)$ configurations in $^{191,193,195}\text{Pt}$.

表 2 TRS 理论计算得出的 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态的四极形变 β_2 及三轴形变 γ 值

Table 2 Calculated equilibrium deformations β_2 and γ from the TRS calculations for $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ configurations in $^{192,194,196}\text{Pt}$ at relate rotational frequencies

Nucleus	Configuration	$\hbar\omega$ (MeV)	β_2	γ ($^\circ$)
^{192}Pt	(-, 0)	0.1	0.151	-45
	(-, 1)	0.1	0.145	-46
^{194}Pt	(-, 0)	0.05	0.142	-43
	(-, 1)	0.05	0.141	-42
^{196}Pt	(-, 0)	0.1	0.131	-74
	(-, 1)	0.1	0.133	-71

们的能级结构存在两处明显差异: (i) Pt 核中的 $9^- \rightarrow 7^- (29/2^- \rightarrow 25/2^-)$ γ 跃迁能量比 Hg 核大 200–300 keV. Toki 等人^[22]利用粒子-转子模型计算很好地解释了这一现象, 他们认为这种能级间的差别是由 Pt 核芯的三轴形变引起的. 在此, 我们对 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1}$ 组态进行了 TRS 理论计算(见表 2). 计算结果表明 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核的 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ 转动带具有一定程度的三轴形变, TRS 理论结果同样支持 Toki 等人的观点; (ii) Pt 核

中 $5^-(21/2^-)$ 态的激发能比 Hg 核小几百 keV, 在文献 [22] 中, 作者通过模型计算发现, 由于 Pt 核比 Hg 核在 $5^-(21/2^-)$ 态中混杂有更多质子 $\pi h_{11/2} \pi j$ ($j=s_{1/2}, d_{3/2}$) 成分, 使得 Pt 核中 $5^-(21/2^-)$ 态的激发能降低.

4 结论

本工作利用非完全熔合反应 $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, (p, d, t) \text{ xn})$ 对稳定核 ^{195}Pt 进行了高自旋态在束 γ 实验研究. 根据 γ - γ 符合关系、 γ 射线的相对强度和各向异性度的测量结果, 建立了 ^{195}Pt 核新的能级纲图. 通过与周围核的系统性比较, 并结合已有的高自旋态核结构知识, 指出了 ^{195}Pt 核基于 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 组态的正宇称能级结构和 $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}$ ($j=p_{3/2}, f_{5/2}$) 组态的负宇称能级结构. 同时, 在三维形变(β_2, β_4 和 γ 形变)空间中, 对 $^{191,193,195}\text{Pt}$ 核的 $\nu i_{13/2}^{-1}$ 转动带以及 $^{192,194,196}\text{Pt}$ 核的 $\nu i_{13/2}^{-1} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ 组态进行了 TRS 理论计算, 并根据计算结果, 定性地讨论了 ^{195}Pt 的能级结构. 这是迄今为止对奇 A Pt 核高自旋转动带研究最丰中子的一个同位素核.

致谢 作者衷心感谢中国原子能科学研究院工作人员提供 ^7Li 束流及实验期间提供的各种帮助.

参考文献

- Piiparinen M, Cunnane J C, Daly P J, et al. High-spin level systematics in $^{186-194}\text{Pt}$ and rotation-alignment coupling. Phys Rev Lett, 1975, 34: 1110–1113
- Saha S K, Piiparinen M, Cunnane J C, et al. High-spin levels in ^{191}Pt and ^{193}Pt and the triaxial rotor model. Phys Rev C, 1977, 15: 94–103
- Kutsarova T, Schück C, Gueorguieva E, et al. Coexisting oblate and strongly triaxial structures in ^{191}Pt . Eur Phys J A, 2005, 23: 69–78
- Zhou X H, Xing Y B, Liu M L, et al. Band properties of the transitional nucleus ^{187}Pt . Phys Rev C, 2007, 75: 034314
- Hua W, Zhou X H, Zhang Y H, et al. Properties of the rotational bands in the transitional nucleus ^{189}Pt . Phys Rev C, 2009, 80: 034303
- Bacon F, Kaundl G, Mahnke H E, et al. Nuclear magnetic resonance on oriented platinum-195 m in iron. Phys Rev Lett, 1972, 28: 720–722
- Jansen J F W, Faas A, Winter W J B, et al. Excited states in ^{195}Pt from the decay of 2.3 h $^{195}\text{Ir}^g$, 3.7 h $^{195}\text{Ir}^m$ and 183 d ^{195}Au . Z Phys, 1973, 261: 95–116
- Lamparda G J, Stuchbery A E, Bolotina H H, et al. Magnetic moment measurements in ^{195}Pt : A critical test of U(6/12) supersymmetry. Nucl Phys A, 1994, 568: 617–632
- Metz A, Eisermann Y, Gollwitzer A, et al. One neutron transfer reaction spectroscopy of ^{195}Pt as a detailed test of the U(6/12) supersymmetry. Phys Rev C, 2000, 61: 064313
- Thorsteinsen T F, Vaagen J S, Løvøden G, et al. Distributions of $i_{13/2}$ transfer strength in (τ, α)-induced population of odd- a platinum isotopes. Nucl Phys A, 1985, 435: 125–151
- Dracoulis G D, Byrne A P, Kibédi T, et al. Incomplete fusion as a spectroscopic tool. J Phys G-Nucl Part Phys, 1997, 23: 1191–1202
- Jungclauss A, Egido J L, Sun Y, et al. Backbending region study in $^{160,162}\text{Dy}$ using incomplete fusion reaction. Phys Rev C, 2002, 66: 014312
- Clark R M, Phair W, Descovich M, et al. Population of nuclei via ^7Li -induced binary reactions. Phys Rev C, 2005, 72: 054605
- Utsunomiya H, Kubono S, Tanaka M H, et al. Breakup fusion of ^7Li . Phys Rev C, 1983, 28: 1975–1985
- Dasgupta M, Gomes P R S, Hinde D J, et al. Effect of breakup on the fusion of ^6Li , ^7Li , and ^9Be with heavy nuclei. Phys Rev C, 2004, 70:

- 024606
- 16 Fang Y D, Shi Y, Zhang Y H, et al. Properties of the $\pi h_{11/2}$ band in the stable nucleus ^{193}Ir . *Phys Rev C*, 2011, 83: 054323
 - 17 Jones G A, Podolyak Z, Schunck N, et al. Oblate collectivity in the yrast structure of ^{194}Pt . *Acta Phys Pol B*, 2005, 36: 1323–1327
 - 18 Mauthofer A, Stelzer K, Idzko J, et al. Triaxiality and γ -softness in ^{196}Pt . *Z Phys A*, 1990, 336: 263–278
 - 19 Zhang Y H, Podolyak Z, de Angelis G, et al. Stability of the $N=50$ shell gap in the neutron-rich Rb, Br, Se, and Ge isotones. *Phys Rev C*, 2004, 70: 024301
 - 20 Firestone R B, Shirley V S, Baglin C M, et al. *Tables of Isotopes*. New York: Wiley, 1996
 - 21 Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R, et al. Microscopic study of the high-spin behaviour in selected $A\approx 80$ nuclei. *Nucl Phys A*, 1985, 435: 397–447
 - 22 Toki H, Neergard K, Vogel P, et al. Non-axial deformations and the odd parity states in the even Pt and Hg isotopes. *Nucl Phys A*, 1977, 279: 1–28
 - 23 Hjorth S A, Johnson A, Lindblad T, et al. Two-quasiparticle and rotation-aligned structures in ^{190}Pt , ^{192}Pt and ^{194}Pt . *Nucl Phys A*, 1976, 262: 328–355
 - 24 Cunnane J C, Piiparinen M, Daly P J, et al. High-spin level structure of ^{190}Pt and ^{192}Pt . *Phys Rev C*, 1976, 13: 2197–2207
 - 25 Hübel H, Byrne A P, Ogaza S, et al. High-spin structure of $^{190-194}\text{Hg}$ and the cranked shell model. *Nucl Phys A*, 1986, 453: 316–348
 - 26 Mehta D, Agarwal Y K, Blume K P, et al. Spectroscopy of ^{195}Hg and ^{196}Hg . *Z Phys A*, 1991, 339: 317–323

High-spin level structure in the stable nucleus ^{195}Pt

WANG SiCheng^{1,2}, ZHOU XiaoHong^{1*}, FANG YongDe¹, ZHANG YuHu¹, SHI Yue³,
 LIU MinLiang¹, WANG JianGuo¹, GUO YingXiang¹, GAO BingShui^{1,2}, HUA Wei¹,
 LI ShiCheng^{1,2}, MA Fei¹, LI GuangShun^{1,2}, HE Long^{1,2}, WANG ZhiGang^{1,2},
 YAN XinLiang^{1,2}, FANG Fang¹, WU XiaoGuang⁴, HE ChuangYe⁴,
 ZHENG Yun⁴, WANG ZhiMin⁴ & XU FuRong³

¹ *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³ *School of Physics, and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;*

⁴ *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*

The incomplete fusion reaction $^{192}\text{Os}(^7\text{Li}, (p, d, t) xn)$ has been used to populate high-spin states in the heavy stable nucleus ^{195}Pt at a beam energy of 44 MeV. Based on the γ - γ coincidence relationships, relative intensities and ADO ratios, a level scheme consisting of 11 new γ transitions and 9 new levels is established for ^{195}Pt . In comparison with the level structures observed in neighboring nuclei, the $\nu i_{13/2}^{-1}$ and $\nu i_{13/2}^{-2} \nu j^{-1}(j=p_{3/2}, f_{5/2})$ configurations have been proposed to the $13/2^+$ and $21/2^-$ states, and the properties of rotational band built on these states have been discussed with the help of Total-Routhian-Surface (TRS) calculations.

high-spin states, incomplete fusion reaction, odd- A nucleus, rotational band

PACS: 21.10.Re, 23.20.En, 23.20.Lv, 27.60.+j

doi: 10.1360/132011-1101