



²⁰⁵Po激发态研究

李金泽 郑云 李聪博 李天晓 吴晓光 吴鸿毅 袁岑溪 贺子阳 洪锐 李韵秋 郑敏 赵子豪 郭冰 贺创业 刘伏龙 邱奕嘉 李广顺 柳敏良 周小红 张玉虎 王守宇 王硕 竺礼华

Excited States in ²⁰⁵Po

LI Jinze, ZHENG Yun, LI Congbo, LI Tianxiao, WU Xiaoguang, WU Hongyi, YUAN Cenxi, HE Ziyang, HONG Rui, LI Yunqiu, ZHENG Min, ZHAO Zihao, GUO Bing, HE Chuangye, LIU Fulong, QIU Yijia, LI Guangshun, LIU Minliang, ZHOU Xiaohong, ZHANG Yuhu, WANG Shouyu, WANG Shuo, ZHU Lihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC53>

引用格式:

李金泽, 郑云, 李聪博, 李天晓, 吴晓光, 吴鸿毅, 袁岑溪, 贺子阳, 洪锐, 李韵秋, 郑敏, 赵子豪, 郭冰, 贺创业, 刘伏龙, 邱奕嘉, 李广顺, 柳敏良, 周小红, 张玉虎, 王守宇, 王硕, 竺礼华. ²⁰⁵Po激发态研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):239–243. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC53

LI Jinze, ZHENG Yun, LI Congbo, LI Tianxiao, WU Xiaoguang, WU Hongyi, YUAN Cenxi, HE Ziyang, HONG Rui, LI Yunqiu, ZHENG Min, ZHAO Zihao, GUO Bing, HE Chuangye, LIU Fulong, QIU Yijia, LI Guangshun, LIU Minliang, ZHOU Xiaohong, ZHANG Yuhu, WANG Shouyu, WANG Shuo, ZHU Lihua. Excited States in ²⁰⁵Po[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):239–243. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC53

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用多普勒移动衰减法研究⁴⁶Ti核的激发态能级寿命

Studies on the Lifetimes of ⁴⁶Ti Excited States via the Doppler Shift Attenuation Method

原子核物理评论. 2023, 40(2): 193–197 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023021>

铜原子单激发态 $3d^{10}4p^2P_{1/2}$ 的光电离(英文)

Photoionization of Excited State $3d^{10}4p^2P_{1/2}$ of Cu

原子核物理评论. 2019, 36(3): 357–366 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.357>

1P波激发态粲介子和底介子的质量劈裂

Mass Splitting of Excited Charmed and Bottom Mesons in 1P Wave

原子核物理评论. 2022, 39(1): 30–36 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022001>

一些近期发现的同核异能态的壳模型解释

Shell-Model Explanation on Some Newly Discovered Isomers

原子核物理评论. 2020, 37(3): 447–454 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC18>

基于熔合蒸发反应的超重新元素 $Z = 119, 120$ 的产生截面

Production Cross-sections of New Superheavy Elements with $Z = 119, 120$ in Fusion-evaporation Reactions

原子核物理评论. 2022, 39(4): 421–433 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022112>

^{235, 237}Np高自旋态的理论研究

Theoretical Investigation of the High-spin States in $^{235, 237}\text{Np}$

原子核物理评论. 2022, 39(4): 413–420 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022047>

文章编号: 1007-4627(2024)01-0239-05

^{205}Po 激发态研究

李金泽¹, 郑云^{1,†}, 李聪博¹, 李天晓¹, 吴晓光¹, 吴鸿毅¹, 袁岑溪², 贺子阳¹, 洪锐¹,
李韵秋¹, 郑敏¹, 赵子豪^{1,3}, 郭冰¹, 贺创业¹, 刘伏龙¹, 邱奕嘉¹, 李广顺⁴, 柳敏良⁴,
周小红⁴, 张玉虎⁴, 王守宇⁵, 王硕⁵, 竺礼华^{6,7}

- (1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
2. 中山大学中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082;
3. 吉林大学物理学院, 长春 130015;
4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
5. 山东大学(威海)物理学院, 山东 威海 264209;
6. 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191;
7. 深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 5180603)

摘要: 本工作利用重离子熔合蒸发反应 $^{196}\text{Pt}(^{13}\text{C}, 4n)^{205}\text{Po}$ 布居了 ^{205}Po 核的高自旋态, ^{13}C 束流能量为 72 MeV. 扩展了 ^{205}Po 的能级纲图, 新建了 3 个退激序列, 新发现了 19 条 γ 射线。 $^{203, 205, 207}\text{Po}$ 的晕态结构与大规模壳模型的计算结果进行了比较, 壳模型计算使用的组态空间包含相同的质子和中子轨道, 包括 $0h_{9/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$, $1g_{9/2}$ 。理论计算结果很好地再现了实验数据。

关键词: 重离子熔合蒸发反应; 高自旋态; 大规模壳模型

中图分类号: O571.23

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC53

0 引言

质子数 $Z=82$ 、中子数 $N=126$ 闭壳附近的原子核结构信息, 对于人们认识重原子核以及检验大规模壳模型在该核区的适用性都非常重要。壳模型虽能解释原子核的幻数, 然而这些解释还有很多不完善的地方, 尤其处理高 Z 重核过大组态空间存在困难, 很多中重核单个壳层的组态远远超过了目前计算机可以处理的极限。因此, 必须要用更多的实验事实, 特别是 ^{208}Pb 核区附近的实验数据与壳模型比较, 深入探索大组态空间下的核子相互作用规律, 对 ^{208}Pb 核区壳模型有效相互作用的适用性进行验证和改进。

^{205}Po 核的激发态早在 1984 年就由 Rahkonen 等^[1] 采用 $^{206}\text{Pb}(\alpha, 5n)^{205}\text{Po}$ 开展过研究, 建立了一个自旋 $I=37/2$ 的能级纲图。总体上看能级结构信息并不全, 主要给出了晕态的单粒子激发能级, 之后未见文献报道 ^{205}Po 高自旋态相关研究。 ^{205}Po 核与 ^{208}Pb 核心相比, 多了 2 个价质子和 5 个中子空穴, 是一个近球形核, 结

合壳模型可以开展从低自旋到高自旋的激发态研究。前人对奇 A 同位素核 $^{201-209}\text{Po}$ ^[1-9] 的高自旋态能级结构的研究中, 没有发现规则的集体运动现象, 能级结构可以用壳模型进行描述。

本文介绍 ^{205}Po 新的能级结构信息, 作为系列研究之一, 后续将结合中国原子能科学研究院在束伽马谱学课题组在 ^{203}Po 和 ^{209}Po 的实验工作, 系统性研究 Po 同位素核的能级结构特性。此外, 利用大规模壳模型在质子 Z 、中子 $N=82\sim 126$ 的全模型空间 $\pi(0h_{9/2}, 1f_{7/2}, 1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 0i_{13/2})$ 和 $\nu(0h_{9/2}, 1f_{7/2}, 1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 0i_{13/2})$ 计算了奇 A 核 $^{203, 205, 207}\text{Po}$ 的能级, 并与实验值进行了比较。

1 实验测量

实验是在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器上开展的。通过重离子熔合蒸发反应 $^{196}\text{Pt}(^{13}\text{C}, 4n)^{205}\text{Po}$ 布居了 ^{205}Po 核的激发态, ^{13}C 束流能量为 72 MeV。实验用靶为 1.34 mg/cm^2 的自支撑 ^{196}Pt 靶。利用中国联合

收稿日期: 2023-07-25; 修改日期: 2023-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2167201, U2167202, 11975315, U1932209)

作者简介: 李金泽 (1999-), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 从事原子核物理研究; E-mail: lijnaze20170083@163.com

† 通信作者: 郑云, E-mail: zhengyun@ciae.ac.cn

伽马探测阵列探测退激 γ 射线, 实验期间共使用 23 个高纯锗-锗酸铋 (HPGe-BGO) 反康探测器和 5 个带 BGO 反康 Clover 探测器, 分别放置在与束流方向成 60° , 90° , 120° 和 150° 的环型支架上, 探测器的能量分辨率普遍在 2.0~2.8 keV 之间。使用 ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 标准源的特征 γ 射线对所有锗探测器进行了能量和效率刻度。实验采用数字化获取系统总共收集到 3.0×10^9 个 γ - γ 两重及以上符合事件。经过能量刻度和增益匹配后, 实验记录的 γ - γ 符合事件被反演成二维 $E_\gamma - E_\gamma$ 对称矩阵, 然后采用 Xtrackn 开窗软件进行数据分析。

为了提取 γ 射线的多极性信息, 反演了非对称的方向角关联 (Directional Correlation of Oriented, DCO) 矩阵, 矩阵的一个轴上放 90° 的探测器, 另一个轴上放 60° 和 120° 的探测器。DCO 比值可以定义为 $R_{\text{DCO}} = I_\gamma(60^\circ)/I_\gamma(90^\circ)$, 实验在 DCO 矩阵的不同轴上开相同的能量窗得到符合开窗谱, 然后从开窗谱中分别提取出 γ 射线强度 $I_\gamma(60^\circ)$ 和 $I_\gamma(90^\circ)$, 用这些强度数据就可以计算出相应的 DCO 比值。本实验条件下, 当使用 $\Delta I = 2$ 的四极跃迁开窗时, $\Delta I = 2$ 的四极跃迁 R_{DCO} 值在 1 附近, 而 $\Delta I = 1$ 的偶极跃迁 R_{DCO} 值小于 0.6; 当使用 $\Delta I = 1$ 的偶极跃迁开窗时, $\Delta I = 1$ 的偶极跃迁 R_{DCO} 值接近于 1, 而 $\Delta I = 2$ 的四极跃迁 R_{DCO} 值在 1.7 附近。从 DCO 矩阵提取的 ^{205}Po 各 γ 射线的 DCO 比值如图 1 所示。

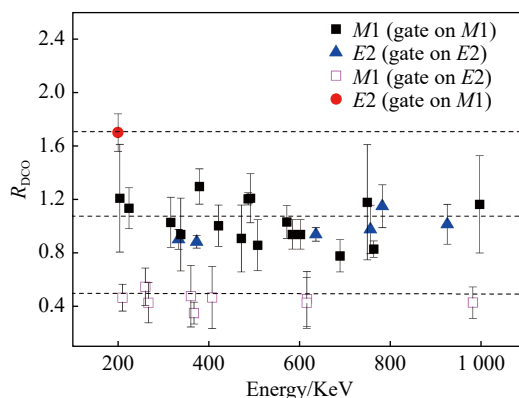


图 1 本实验提取的 ^{205}Po 各 γ 射线 DCO 比值

■为 $\Delta I = 1$ 跃迁开窗得到 $\Delta I = 1$ γ 射线的 DCO 比值; ▲为 $\Delta I = 2$ 跃迁开窗得到 $\Delta I = 2$ γ 射线的 DCO 比值; □为 $\Delta I = 1$ 跃迁开窗得到 $\Delta I = 2$ γ 射线的 DCO 比值; ●为 $\Delta I = 1$ 跃迁开窗得到 $\Delta I = 2$ γ 射线的 DCO 比值。

2 结果与讨论

根据 γ - γ 级联关系以及 γ 射线能量和强度平衡原则, 扩展了 ^{205}Po 的能级纲图, 如图 2 所示。基于 R_{DCO} 值以及文献 [1] 中给出的退激方式, 指定了各 γ 跃迁的自旋宇称。与文献 [1] 相比, 能级纲图被明显扩展, 新发现了 14 个能级和 19 条 γ 射线。特别是发现了 3 个新的退激序列, 扩展了原有的两个退激序列, 在图 2 上分别用退激序列 1-5 标注。

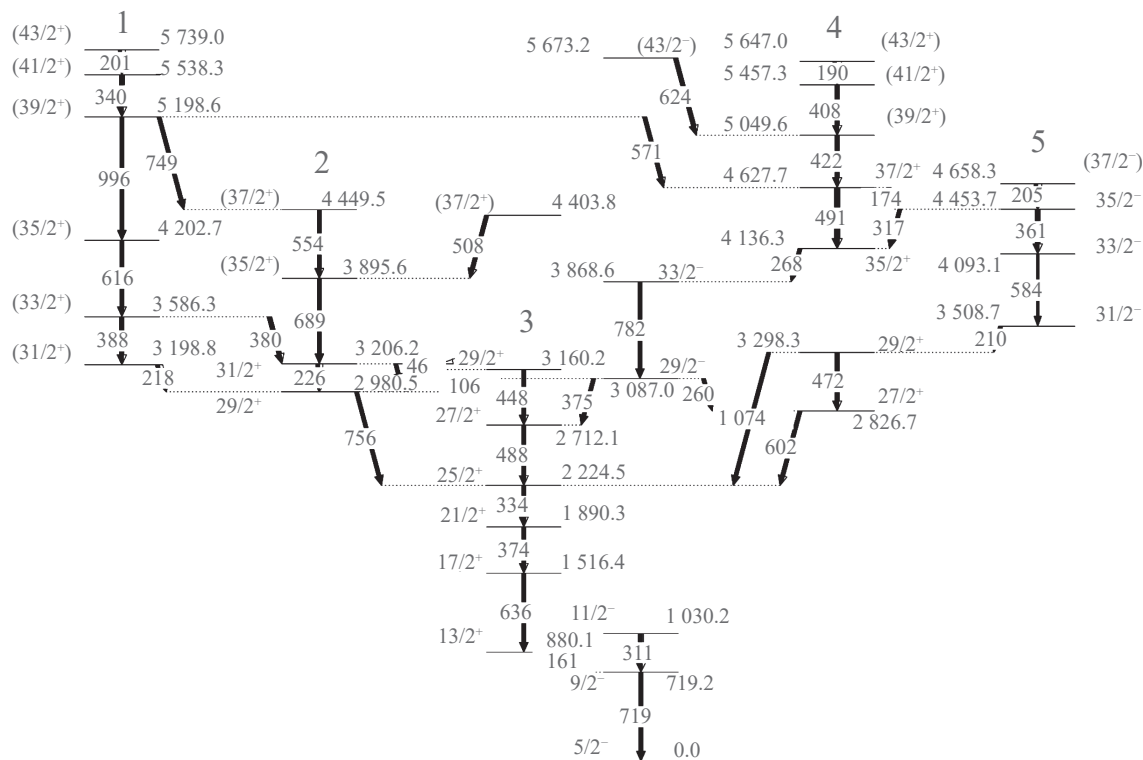


图 2 本工作新建的能级纲图
新的能级用括号标示。

序列 1 是由本工作新发现的 6 个能级和 5 条 γ 射线组成, 最高自旋达到 $I = (43/2^+)$, 同时观测到 1 条从序列 1 的 $I = (39/2^+)$ 能级退激到序列 4 的 $I = 37/2^+$ 能级的 571 keV 跃迁, 以及两条分别从序列 1 的 $I = (39/2^+)$ 能级退激到序列 2 的 $I = (37/2^+)$ 能级的 749 keV 跃迁和从序列 1 的 $I = (33/2^+)$ 能级退激到序列 2 的 $I = (31/2^+)$ 能级的 380 keV 跃迁。从图 3(a) 756 keV γ 射线开窗谱中可以观测到 996, 616, 218, 340, 201 keV 等 5 条新 γ 射线, 以及一条在前一篇文章中给出但不确定的 388 keV γ 射线^[1]。根据本工作提取的各 DCO 比值和跃迁选择定则, 尝试指定了 3 198.8, 3 586.3, 4 202.7, 5 198.6, 5 538.3, 5 739.0 keV 等 6 个新能级的自旋和宇称为 $(31/2^+)$, $(33/2^+)$, $(35/2^+)$, $(39/2^+)$, $(41/2^+)$, $(43/2^+)$ 。

序列 2 是本工作新发现的退激序列, 由 3 条新的 γ 射线组成。从图 3(b) 448 keV γ 射线开窗谱中可以看到 689、508、554 等 3 条新 γ 射线。从图 3(b) 448 keV γ 射线开窗谱中还可以看到属于序列 1 的 340, 616 keV γ 射线以及连接跃迁 749, 380 keV 这两条连接跃迁, 根据当前的数据可以推测存在一条从序列 2 的 $I = (31/2^+)$ 能级退激到序列 3 的 $I = (29/2^+)$ 能级的连接跃迁, 其能量在 46 keV, 但由于探测效率太低在本实验数据中没能观测到。根据实验提取的 DCO 比值和跃迁选择定则, 尝试指定了 3 895.6, 4 449.5 和 4 403.8 keV 等 3 个新能级的自旋和宇称为 $(35/2^+)$, $(37/2^+)$, $(37/2^+)$ 。

序列 3 由已知的晕态组成, 本工作确认了文献^[1]报道的各条 γ 跃迁(如图 3(c) 所示), 提取的 DCO 比值也支持前人指定的能级自旋和宇称。

序列 4 在已知纲图的基础上, 新增加了 4 个能级和 6 条 γ 射线。新发现的 422, 408, 189, 317, 175 和 624 keV 等 γ 射线可以在图 3(d) 中观测到。根据实验提取的 DCO 比值和跃迁选择定则, 尝试指定了 5 049.6, 5 457.3, 5 647.0 和 5 673.2 keV 等 4 个新能级的自旋和宇称分别为 $(39/2^+)$, $(41/2^+)$, $(43/2^+)$, $(43/2^-)$ 。

序列 5 主要是确认了文献^[1]给出的能级纲图, 在此基础上新发现了 1 条 205 keV 的 γ 射线, 根据 DCO 比值该跃迁被指定为 $\Delta I = 1$ 的偶极跃迁, 4 658.3 keV 能级的自旋宇称相应指定为 $(37/2^-)$ 。发现了序列 4 和序列 5 之间的 2 条能量分别为 175 keV 和 317 keV 的连接跃迁。

为了解释 ^{205}Po 核中的退激序列, 利用壳模型计算了晕带的能级信息, 同时还计算了 $^{203,207}\text{Po}$ 并与实验结果进行了比较。壳模型计算的质子和中子组态空间均为 $N, Z = 82 \sim 126$ 的全模型空间 $\pi(0h_{9/2}, 1f_{7/2}, 1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 0i_{13/2})$ 和 $\nu(0h_{9/2}, 1f_{7/2}, 1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 0i_{13/2})$ 。哈密顿相互作用两体矩阵元包括三部分, 质子-质子相互作用

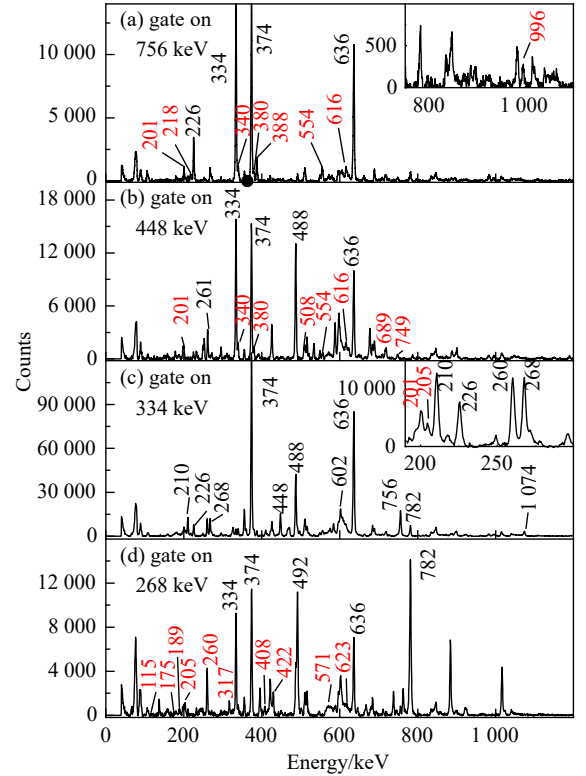


图 3 典型开窗谱

(a) 为 756 keV 射线开窗谱; (b) 为 448 keV 射线开窗谱; (c) 为 334 keV 射线开窗谱; (d) 为 268 keV 射线开窗谱。

采用 KHPE^[10], 中子-中子相互作用采用 KHHE^[11], 质子-中子相互作用由 V_{MU} ^[12] 相互作用加 M3Y^[13] 自旋轨道力计算得出。

$^{203,205,207}\text{Po}$ 正宇称晕态的壳模型计算结果与实验能级的比较见图 4。总体上看, 大规模壳模型计算的 $^{203,205,207}\text{Po}$ 晕态和实验观测的能级符合得比较好, 特别是 ^{205}Po 晕态理论计算结果和实验能级之间的误差都较小。 ^{205}Po 的 $5/2^-$ 基态的组态为 $\pi(0h_{9/2})^2 \otimes \nu[(0h_{9/2})^{10} (1f_{7/2})^8 (1f_{5/2})^2 (2p_{3/2})^4 (2p_{1/2})^1 (0i_{13/2})^{14}]$, 自旋主要由 2 个价质子和 3 个价中子耦合形成; $9/2^-$ 能级的组态在基态的基础上处于 $2p_{1/2}$ 轨道的 1 个中子激发到了 $1f_{5/2}$ 轨道; 更高自旋 $9/2^-$ 能级则由 2 个 $0h_{9/2}$ 质子耦合 2 个 $1f_{5/2}$ 中子空穴和 1 个 $2p_{3/2}$ 中子空穴形成。自旋继续升高到 $17/2^+$ 和 $21/2^+$ 则出现 $0i_{13/2}$ 轨道的中子空穴, 组态变为 $\pi(0h_{9/2})^2 \otimes \nu[(0h_{9/2})^{10} (1f_{7/2})^8 (1f_{5/2})^4 (2p_{3/2})^4 (2p_{1/2})^0 (0i_{13/2})^{13}]$ 。更高自旋的 $25/2^+$, $27/2^+$, $29/2^-$ 和 $3/2^-$ 出现质子激发现象, 处于 $0h_{9/2}$ 轨道的一个质子激发到了 $0i_{13/2}$ 质子轨道。

从图 4 中看出, ^{203}Po 的第一激发态自是 $I^\pi = 7/2^-$ 能级, 而 $^{205,207}\text{Po}$ 的第一激发态是 $I^\pi = 9/2^-$ 能级, 自旋宇称不尽相同但第一激发态的激发能很相似。 $^{203,205}\text{Po}$ 的 $I^\pi = 11/2^-$ 能级能量也很相似, 遗憾的是实验上并没有在 ^{207}Po 中发现 $I^\pi = 11/2^-$ 能级, 不能做更细致的比较。

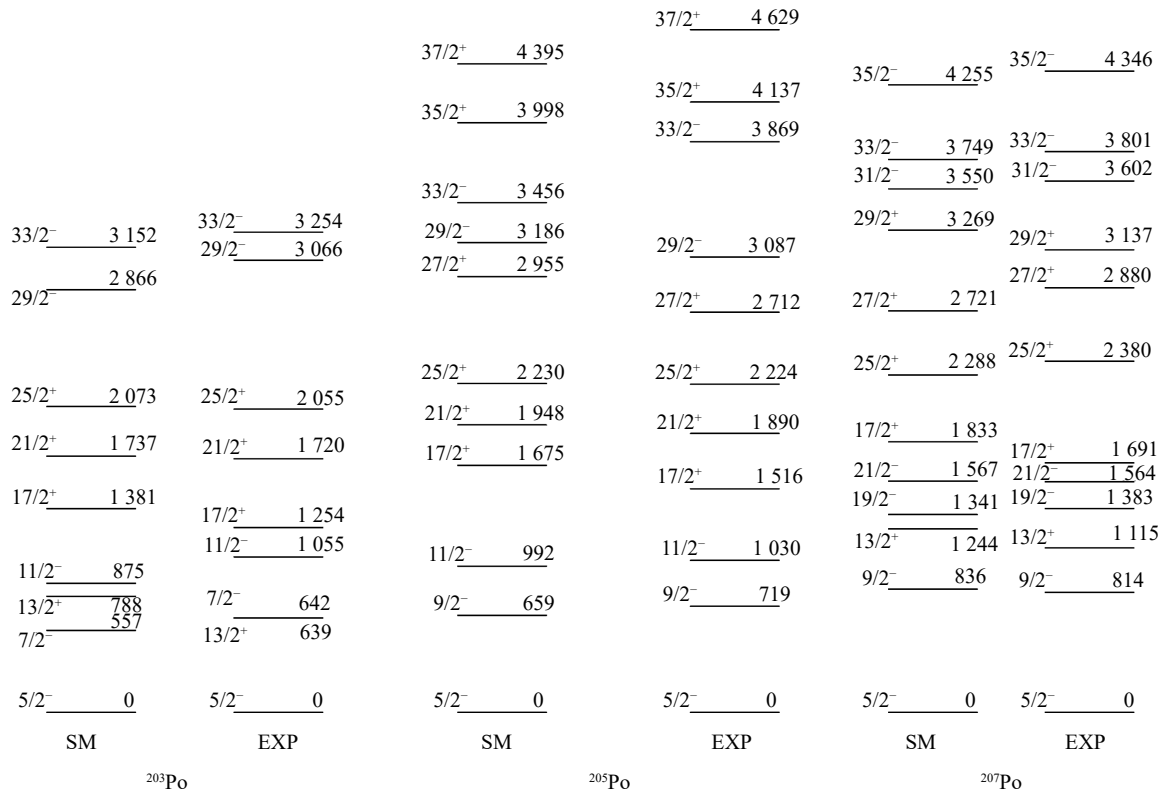


图 4 ^{203}Po , ^{205}Po , ^{207}Po 部分实验能级与大规模壳模型理论计算结果比较 (实验数据来自文献 [1, 6–9] 及本实验)

目前理论和实验结果比对发现, 放大组态空间的大规模壳模型可以很好地再现实验能级, 验证了 ^{208}Pb 核区壳模型有效相互作用的适用性。壳模型的改进仍然需要实验上发现更多新的能级, 这些实验值作为壳模型计算的输入参数, 将有助于提升壳模型的计算适用性。

3 总结

本工作利用重离子熔合蒸发反应 $^{196}\text{Pt}(^{13}\text{C}, 4n)^{205}\text{Po}$ 布居了 ^{205}Po 核的高自旋态, 扩展了 ^{205}Po 的能级纲图, 新发现了 14 个能级和 19 条新 γ 射线。 ^{203}Po , ^{205}Po , ^{207}Po 的实验数据与大规模壳模型计算结果进行了比较, 发现壳模型计算结果很好地再现了实验数据, 验证了 ^{208}Pb 核区壳模型有效相互作用的适用性。后续工作中, 还需要将更加完整的能级纲图信息作为大规模壳模型的输入参数, 完善壳模型计算。同时, 结合课题组在 ^{203}Po 和 ^{209}Po 上的相关实验工作, 开展 Po 同位素核的系统学研究。
致谢 感谢 HI-13 加速器工作人员在历次实验中提供高品质的束流, 感谢樊启文为实验准备实验用靶。同时, 向参与实验的每个人表示感谢。

参考文献:

- [1] RAHKONEN V, FANT B, HERRLANDER C J, et al. *Nucl Phys A*, 1985, 441: 11.
- [2] WECKSTRÖM T, FANT B, LÖNNROTH T, et al. *Z Phys A*, 1985, 321: 231.
- [3] JONSON B, ALPSTEN M, APPELQVIST Å, et al. *Nucl Phys A*, 1971, 174: 225.
- [4] OHYA S, SHIDA Y, YOSHIKAWA N, et al. *Nucl Phys A*, 1974, 233: 20.
- [5] JONSON B, ALPSTEN M, APPELQVIST Å, et al. *Nucl Phys A*, 1971, 177: 81.
- [6] FANT B, WECKSTRÖM T, RAHKONEN V, et al. *Nucl Phys A*, 1986, 453: 77.
- [7] ALPSTEN M, ASTNER G. *Phys Scripta*, 1972, 5: 41.
- [8] BERGSTRÖM I, BLOMQVIST J, HERRLANDER C J, et al. *Phys Scripta*, 1974, 10: 287.
- [9] DAFNI E, RAFAILOVICH M H, MARSHALL T, et al. *Nucl Phys A*, 1983, 394: 245.
- [10] WARBURTON E K, BROWN B A. *Phys Rev C*, 1991, 43: 602.
- [11] WARBURTON E K. *Phys Rev C*, 1991, 44: 233.
- [12] OTSUKA T, SUZUKI T, HONMA M, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 012501.
- [13] BERTSCH G, BORYSOWICZ J, MCMANUS H, et al. *Nucl Phys A*, 1977, 284: 399.

Excited States in ^{205}Po

LI Jinze¹, ZHENG Yun^{1,†}, LI Congbo¹, LI Tianxiao¹, WU Xiaoguang¹, WU Hongyi¹, YUAN Cenxi², HE Ziyang¹, HONG Rui¹,
LI Yunqiu¹, ZHENG Min¹, ZHAO Zihao^{1,3}, GUO Bing¹, HE Chuangye¹, LIU Fulong¹, QIU Yijia¹, LI Guangshun⁴,
LIU Minliang⁴, ZHOU Xiaohong⁴, ZHANG Yuhu⁴, WANG Shouyu⁵, WANG Shuo⁵, ZHU Lihua^{6,7}

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

3. College of Physics, Jilin University, Changchun 130015, China;

4. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

5. School of Physics, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China;

6. School of Physics and Nuclear Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

7. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: High-spin states in ^{205}Po have been investigated by using in-beam γ ray spectroscopy with the $^{196}\text{Pt}(^{13}\text{C}, 4n)^{205}\text{Po}$ reaction at a beam energy of 72 MeV. The previously known level scheme has been extended, and 3 new decay sequence have been established by adding nineteen new γ rays. The yrast level structures in $^{203,205,207}\text{Po}$ are compared with large-scale shell model calculations performed in a configuration space with the same proton and neutron orbits, which are $0h_{9/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$, $1g_{9/2}$. The calculated results are in reasonable agreement with experimental data.

Key words: heavy-ion fusion evaporation reaction; excited state; large-scale shell model

Received date: 25 Jul. 2023; Revised date: 29 Nov. 2023

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U2167201, U2167202, 11975315, U1932209)

† Corresponding author: ZHENG Yun, E-mail: zhengyun@ciae.ac.cn