

## $^{176,178}\text{Ir}$ $\beta^+$ /EC 衰变及其系统性分析\*

王华磊<sup>1,2;1)</sup> 张玉虎<sup>1</sup> 周小红<sup>1</sup> 郭应祥<sup>1</sup> 雷祥国<sup>1</sup> 徐树威<sup>1</sup> 谢元祥<sup>1</sup>  
邢焯炳<sup>1</sup> 郑勇<sup>1</sup> 柳敏良<sup>1</sup> 宋立涛<sup>1,2</sup> 谢成营<sup>1</sup> 于海平<sup>1</sup> 郭文涛<sup>1</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(郑州大学物理工程学院 郑州 450052)

**摘要** 在束实验条件下用  $\gamma$ - $\gamma$  符合方法研究了具有  $\beta^+$ /EC 衰变性质的核素  $^{176,178}\text{Ir}$  的衰变  $\gamma$  射线. 另外借助氦喷嘴快速带传输系统在排除在束干扰的条件下, 进一步对  $^{176}\text{Ir}$  的  $\beta^+$ /EC 衰变进行了研究, 在确认在束测量新  $\gamma$  射线的同时建议了  $^{176}\text{Ir}$  的一个低自旋同核异能态. 从衰变系统性方面对  $^{176,178}\text{Ir}$  核中存在同核异能态的合理性和可能性进行了分析.

**关键词**  $\beta^+$ /EC 衰变 氦喷嘴带传输系统 半衰期

缺中子核素的  $\beta^+$ /EC 衰变是研究和确认衰变母核基态及同核异能态性质的主要方法, 也是研究衰变子核低位态, 特别是非晕态能级结构的主要手段. 尤其是对于缺中子双奇核, 由于它的两个未成对价核子可以处于费米面附近不同的尼尔逊轨道上, 从而可以耦合出较高的带头和基态自旋值, 若再考虑其大的  $\beta^+$ /EC 衰变能, 人们就能够通过这种方式研究衰变子核较高自旋和激发能级的非晕态结构, 并且已取得了丰硕的研究成果<sup>[1]</sup>. 本工作在前人对  $^{176,178}\text{Ir}$  核的研究基础<sup>[2]</sup>上, 结合在束和衰变测量的实验数据进一步丰富了  $^{176,178}\text{Ir}$  的衰变能级纲图, 发现了  $^{176}\text{Ir}$  核的一个低自旋同核异能态, 并从系统性方面考察了衰变母核存在同核异能态的合理性与可能性.

$^{176,178}\text{Ir}$   $\beta^+$ /EC 衰变延迟  $\gamma$  射线的在束测量实验在日本原子力研究所 (JAERI) 串列静电加速器实验室完成. 用加速器提供的  $^{31}\text{P}$  束流分别轰击  $^{149,152}\text{Sm}$  同位素靶, 产生了具有  $\beta^+$ /EC 衰变性质的母核  $^{176,178}\text{Ir}$ , 由 11 个带有 BGO 反康普顿抑制的高纯锗探测器阵列进行了在束  $\gamma$  测量. 为了排除在束产物的沾污干扰和提取出母核的衰变半衰期, 借助氦喷嘴带传输系统, 在中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器国家实验室对  $^{176}\text{Ir}$  的衰变进行了实验研究. 由 SFC 引出的  $^{35}\text{Cl}$  束流轰击  $^{146}\text{Nd}$  同位素自支撑靶, 产生目标

核  $^{176}\text{Ir}$ , 接着将反应产物传送到远离靶室的低本底区域, 由一台平面型高纯锗、一台同轴型高纯锗和一台 Segmented Clover 探测器进行时间和能量的单谱与符合测量. 更详细的实验描述请参阅文献[3—5].

本工作对  $^{176,178}\text{Ir}$  新衰变射线和激发能级的识别主要结合在束和衰变数据(矩阵), 基于与衰变子核  $^{176,178}\text{Os}$  已知射线的符合关系、能量和、衰变单谱及衰变半衰期的测量<sup>[5, 6]</sup>. 详细的数据反演及分析过程可参考文献[7]. 图 1 和图 2 分别展示了本工作建立的  $^{176}\text{Ir}$  和  $^{178}\text{Ir}$  核的  $\beta^+$ /EC 衰变纲图. 其中同前人一样的是本工作中观测到了基态带 (ground state band), (准) 振动带, (准)  $\beta$  振动带和负宇称的八级振动带, 另外我们还在  $^{176}\text{Ir}$  已有的衰变纲图中添加了位于为 1723.8, 1929.5, 2102.8, 2138.3keV 的 4 个能级和能量为 671.5, 706.5, 742.3, 982.0, 1077.5, 1112.8, 1328.5, 1361.5, 1396.0, 1534.2, 1707.5, 1743.5, 1794.5keV 的 13 条  $\gamma$  跃迁, 在  $^{178}\text{Ir}$  已有的衰变纲图中增添了位于 1332.8, 1564.3, 1603.2, 1962.3 和 1975.2keV 的 5 个新能级和 270.4, 300.9, 372.0, 398.0, 468.5, 532.4, 545.9, 571.3, 700.0, 749.3, 793.3, 832.2, 943.3, 952.0keV 的 14 条新  $\gamma$  射线. 纲图中标明了各个能级和相应各条跃迁的能量值,  $\gamma$  射线的粗细代表其相对强度的大小. 图中标出的自旋和宇称采用了文献[2]的结果.

\* 国家自然科学基金(10025525, 10375077, 10221003), 国家重点基础研究发展规划(TG2000077400)和中国科学院资助

1) E-mail: wanghuallei2004@163.com

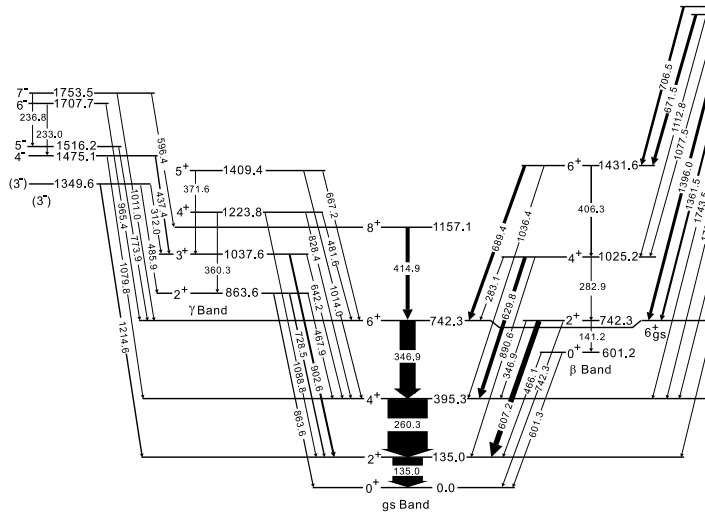


图 1 本工作建立的  $^{176}\text{Ir}$  衰变纲图

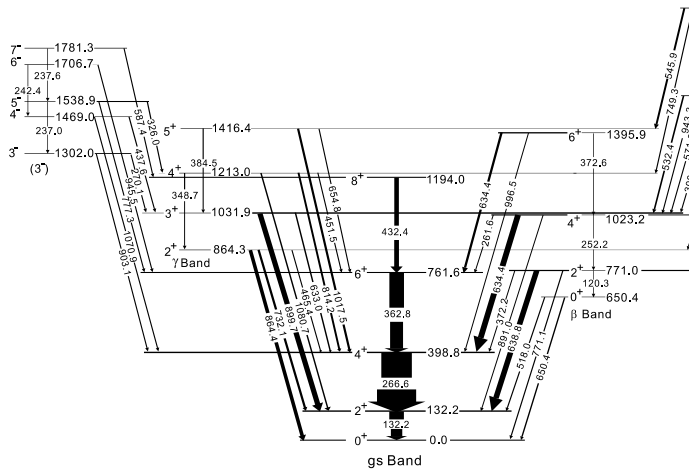


图 2 本工作建立的  $^{178}\text{Ir}$  衰变纲图

参考邻近的  $\text{Re}^{[8]}$ ,  $\text{Au}^{[9]}$  同位素的  $\beta^+/\text{EC}$  衰变, 也发现了非常类似的一些激发能级. 同时考虑这些新激发态能级退激的  $\gamma$  射线的特征 (如这些  $\gamma$  射线有的是高能的, 与正电子湮没所产生的  $511.0\text{keV}$  的  $\gamma$  射线有较强的符合关系, 并且在衰变子核  $^{176,178}\text{Os}$  在束高自旋态研究<sup>[10]</sup> 中没有被观测到等), 我们认为这些新的能级可能是高位非晕态能级, 实验采用的重离子融合蒸发反应只易于布居原子核的晕态和近晕态能级, 所以这些新的激发态极有能来自于  $^{176,178}\text{Ir}$  核的衰变,  $^{176}\text{Ir}$  衰变实验的单谱与时间序列谱的测量进一步肯定了我们这一认识<sup>[5]</sup>. 这里我们尚无足够的信息判定新能级的自旋和宇称值.

图 3 给出了奇奇核  $^{172,174}\text{Ir}^{[1, 11]}$  和本工作目标核  $^{176}\text{Ir}$  的系统衰变情况, 与  $^{172,174}\text{Ir}$  的衰变一样, 发现  $^{176}\text{Ir}$  的衰变能级纲图中  $2^+_{\beta} \rightarrow 2^+_{\text{gs}}$  的  $607.2\text{keV}$  的  $\gamma$  射线的半衰期比其他  $\gamma$  射线的半衰期长很多 (无法用误差来解释), 通过对  $^{176}\text{Ir}$  核衰变  $\gamma$  射线的时间谱的认真分析, 我们建议了  $^{176}\text{Ir}$  核的一个新的半衰期为  $17.6\text{s}$  左右

的低自旋同核异能态<sup>[5]</sup>. 大家知道原子核衰变的时间信息是与其衰变几率相联系的, 进而与核衰变的初、末态波函数及衰变能相关, 且此处同核异能态可能形成于能量与基态相近而自旋相差较大的态(带头).

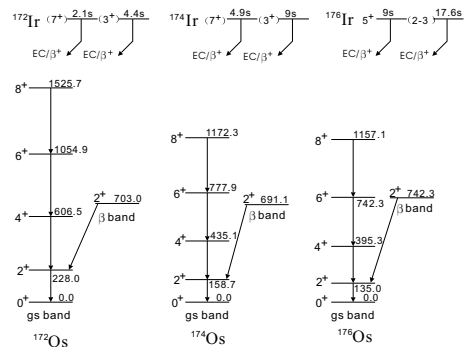


图 3  $^{172,174}\text{Ir}$  和  $^{176}\text{Ir}$  (本工作) 的系统衰变情况

图 4 给出了  $A=180$  核区奇  $Z$  核  $\text{Ta}$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Ir}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Tl}$  衰变能和半衰期随质量数  $A$  的变化趋势. 图 4(b) 中空符号表示已发现该核素还存在一个同核异能态. 从图 4 可以看出衰变能和半衰期均呈现出很好的系统性,

奇A核与双奇核都随着质量数(中子数)的递增衰变能逐渐减小,衰变半衰期逐渐增大,即在缺中子方向一侧随着向稳定线的靠近,原子核的稳定性逐渐增加.另外还在文献[5]中根据邻近奇A核带头激发能进行的两准粒子耦合的半经验计算建议了 $^{176}\text{Ir}$ 的基态最佳组态为 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 5/2^- [512]$ ,  $J^\pi$ 值为 $5^+$ ,其低自旋同核异能态的组态可能是 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 1/2^- [521]$ 或 $\pi 9/2^- [514] \otimes \nu 5/2^- [512]$ ,对于 $^{178}\text{Ir}$ 其基态组态构成最可能是 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 1/2^- [521]$ ,  $J^\pi$ 值为 $2^+$ 或 $3^+$ ,同时考虑衰变纲图,已观测到 $7^-$ 和 $8^+$ 态,母核 $2^+$ 或 $3^+$ 态衰变到如此高自旋激发态的几率非常小,所以我们推测 $^{178}\text{Ir}$ 还存在一个高自旋的同核异能态,其组态可能是 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 5/2^- [512]$ ,  $J^\pi$ 值为 $5^+$ ,但这有待于进一步从实验上进行验证,同时也可以说实验上验证 $^{178}\text{Ir}$ 核中是否同样存在同核异能态将是下一个有意义的实验目标.总之从该核区核素衰变的系统性分析,在 $^{176,178}\text{Ir}$ 中存在一个同核异能态是可能的、合理的.

本工作结合在束与衰变实验数据,进一步丰富了

$^{176,178}\text{Ir}$ 衰变能级纲图,发现了衰变母核 $^{176}\text{Ir}$ 的一个新的同核异能态,同时提出 $^{178}\text{Ir}$ 中可能存在同核异能态,并通过系统学知识对同核异能态存在的可能性与合理性进行了初步考察.

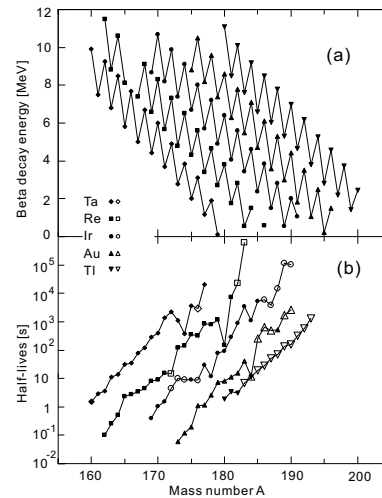


图4  $A=180$ 核区核素衰变能和半衰期随质量数A的变化

## 参考文献(References)

- 1 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 409
- 2 Kibedi T, Dracoulis G D, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 1994, **A567**: 183
- 3 ZHANG Y H, Oshima M, Toh Y et al. Eur. Phys. J., 2002, **A13**: 429
- 4 ZHANG Y H, Hayakawa T, Oshima M et al. Eur. Phys. J., 2000, **A8**: 439
- 5 WANG H L, ZHANG Y H, ZHOU X H et al. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**(9): 2211
- 6 WANG H L, ZHANG Y H, ZHOU X H et al. Nucl. Phys. Rev., 2006, **23**(1): 13 (in Chinese)  
(王华磊, 张玉虎, 周小红等. 原子核物理评论, 2006, **23**(1): 13)
- 7 WANG H L. Doctor Thesis. 2006, 59—71
- 8 Kibedi T, Dracoulis G D, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 2001, **A688**: 669
- 9 Davidson P M, Dracoulis G D, Kibedi T et al. Nucl. Phys., 1999, **A657**: 219
- 10 Dracoulis G D, Fahlander C, Fewell M P. Nucl. Phys., 1982, **A383**: 119
- 11 Schmidt-Ott W D, Salewski H, Meissner F et al. Nucl. Phys., 1992, **A545**: 646

## $\beta^+/\text{EC}$ Decay and Systematic Analysis of $^{176,178}\text{Ir}^*$

WANG Hua-Lei<sup>1,2,1)</sup> ZHANG Yu-Hu<sup>1</sup> ZHOU Xiao-Hong<sup>1</sup> GUO Ying-Xiang<sup>1</sup> LEI Xiang-Guo<sup>1</sup>

XU Shu-Wei<sup>1</sup> XIE Yuan-Xiang<sup>1</sup> XING Ye-Bing<sup>1</sup> ZHENG Yong<sup>1</sup> LIU Min-Liang<sup>1</sup>

SONG Li-Tao<sup>1,2</sup> XIE Cheng-Ying<sup>1</sup> YU Hai-Ping<sup>1</sup> GUO Wen-Tao<sup>1</sup>

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Department of Physical Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract** The  $\gamma$  rays following the  $\beta^+/\text{EC}$  decay of  $^{176,178}\text{Ir}$  nuclei have been investigated using in-beam  $\gamma$ -ray experiment. In addition, with the aid of a helium-jet recoil fast tape transport system, the  $\beta^+/\text{EC}$  decay of  $^{176}\text{Ir}$  was further studied, the new  $\gamma$  rays were proved and a low-spin isomer was proposed in  $^{176}\text{Ir}$ . The isomeric state was analyzed according to the systematics in neighboring nuclei.

**Key words**  $\beta^+/\text{EC}$  decay, He-jet tape transport system, half life

\* Supported by Natural Science Foundation of China (10025525, 10375077, 10221003), Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: wanghualai2004@163.com