

缺中子¹⁷⁶Ir核β⁺/EC衰变研究*

王华磊^{1,2} 张玉虎^{1,2,1)} 周小红¹ 郭应祥¹ 雷祥国¹ 谢元祥¹ 徐树威¹ 邢焯炳¹
郑勇¹ 柳敏良¹ 谢成营¹ 宋立涛¹ 骆鹏¹ 于海萍¹
郭文涛¹ 丁华杰¹ 牛雁宁¹

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)

摘要 在210MeV的束流能量下,利用重离子熔合蒸发反应¹⁴⁶Nd(³⁵Cl, 5nγ)¹⁷⁶Ir产生具有β⁺/EC衰变性质的核素¹⁷⁶Ir,由氦喷嘴快速带传输系统将反应产物传送到低本底区进行测量.经过实验数据的离线处理分析,对早先发表的¹⁷⁶Ir衰变γ跃迁进行确认的同时又发现了3个新能级和10条新的γ射线,丰富了¹⁷⁶Os核的低位激发态能级纲图.并根据典型γ射线的衰变时间谱建议了¹⁷⁶Ir核的一个长寿命的低自旋同核异能态.

关键词 EC/β⁺衰变 氦喷嘴带传输系统 衰变纲图 半衰期

1 引言

β⁺/EC衰变是缺中子核素常见的衰变方式,它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,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β⁺/EC衰变能,这就为研究衰变子核较高自旋和激发能级的非晕态结构提供了可能,人们已经利用这种方法取得了丰硕的研究成果^[1].

¹⁷⁶Ir为缺中子双奇核,其β⁺/EC衰变的分支比为96.9%,衰变能为8.00MeV,α衰变的分支比为3.1%,衰变能为5.118MeV^[2,3].早在1967年,Siivola^[4]通过α衰变给出了¹⁷⁶Ir的衰变半衰期为8(1)s.1990年,Bosch^[5]等人通过β⁺/EC衰变给出了¹⁷⁶Ir的半衰期为9(1)s,并且给出基态自旋宇称为5⁺,但是没有给出时间谱.1994年,Kibedi^[6]等人通过¹⁷⁶Ir β⁺/EC衰变建立了包括17个能级39条γ射线的衰变能级纲图,同

时给出¹⁷⁶Ir的衰变半衰期为8s(没给误差),然而也没给时间谱.本实验小组,在对¹⁷⁶Ir高自旋态研究^[7]时,也在线得到了一些新的衰变信息,新发现了一些γ射线.为了进一步确认这些γ射线,进而获得丰质子核¹⁷⁶Os的低位态核谱学信息,借助氦喷嘴带传输系统,利用¹⁴⁶Nd(³⁵Cl, 5nγ)¹⁷⁶Ir反应研究了¹⁷⁶Ir的β⁺/EC衰变性质.

2 实验方法

实验是在中国科学院近代物理研究所的兰州重离子加速器国家实验室完成的.由扇形聚焦回旋加速器(SFC)引出的210MeV的重离子束³⁵Cl穿过2.0mg/cm²的Havar窗后,进入充满一个大气压氦气的靶室,并轰击到1.8mg/cm²厚自支撑的同位素¹⁴⁶Nd靶上.束流强度约为0.5μA,束流经能损后到达靶芯的能量约为180MeV,正好对应于理论预言产生目标核截面最大的能量.为防止靶在强流轰击下熔化,在其周围靶室系统中设计和安装了流动水冷却装置,

2005-04-29 收稿

* 国家杰出青年科学基金(10025525),国家自然科学基金(10375077, 10221003),国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077400)和中国科学院基金资助

1) E-mail: yhzhang@impcas.ac.cn

另外流动的氦气也可以带走部分热量. 该反应产生的放射性产物从自支撑靶中反冲出来附着在气溶胶状的NaCl添加剂上形成大分子集团同时得到慢化, 加热NaCl的炉温大约是600°C, 然后反应产物在压力差的作用下, 随氦气经6m长的毛细管被快速传送到低本底区的真空收集室并喷溅到传输带上, 再由带传输系统周期性地将反应产物传送到测量区进行测量. 详细的实验布局请参阅文献[8]. 整个实验是分3个阶段进行的. 第一阶段和第二阶段进行的是 γ - t 单谱测量, 带传输系统的时间设置是: 收集时间分别为18.3和36.3s, 等待时间均为0.3s, 拉带时间均为0.22s, 对应的测量时间为18和36s; 第三阶段进行的是 γ - γ - t 符合测量, 带传输系统的时间设置是: 收集时间为18.3s, 等待时间为0.3s, 拉带时间为0.22s, 测量时间为18s.

测量系统是由3台探测器构成, 一台平面型高纯锗(GLP)探测器用于测量低能 γ 及KX射线, 一台同轴型高纯锗(GMX)探测器和一台Segmented Clover探测器, 用于测量 γ 射线, 要说明的一点是, 一台Segmented Clover探测器由4块锗晶体构成, 实验时可以分4路使用, 相当于4个独立的高纯锗探测器. 它们分两组分别放置在传输带的两侧, 正对着放射性盐斑进行测量. 实验前后分别用 ^{60}Co , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 标准放射源对高纯锗探测器进行能量和效率刻度, GLP探测器对 ^{133}Ba 的356.0keV的 γ 射线能量分辨是1.0keV; GMX探测器和4路Clover探测器对 ^{60}Co 的1332.5keV的 γ 射线能量分辨在2.4—4.0keV之间.

实验数据通过多参数数据获取系统(MPA3)记录在微机硬盘上供离线处理分析.

3 结果与讨论

在实验之前, 本工作组对 ^{176}Ir 高自旋能级结构进行了研究(具体实验条件和结果请参阅文献[7]), 在离线数据处理时, 发现了一些新的高能 γ 跃迁, 它们与 ^{176}Os 核^[6]的KX射线、已知 γ 跃迁和正电子湮灭所产生的511.0keV的 γ 射线相符合. 图1给出了几个典型开门谱, 从图中可以清晰地看出1396.0keV的 γ 射线与 ^{176}Os 核已知的135.0, 260.3, 346.9keV的射线符合而与414.9keV的 γ 射线不符合, 706.5keV的 γ 射线与已知的689.4keV的 γ 射线符合, 且706.5keV与689.4keV能量和为1396.0keV, 我们认为1396.0和706.5keV的射线退激于 ^{176}Os 核的2138.3keV的激发能级(文献[6]报道观测到了跃迁到 β 带的707.7keV的 γ 射线, 由于它的孤立性而没有放入网图), 但 ^{176}Os 核

的高自旋研究^[9]中没有观测到这些 γ 射线, 其原因可能是该能级为高位非晕态能级, 而通过重离子融合蒸发反应易于布居的只是原子核的晕态或近晕态能级, 所以我们认为这一新的激发能级极有可能通过 ^{176}Ir 核的 β^+ /EC衰变得布居.

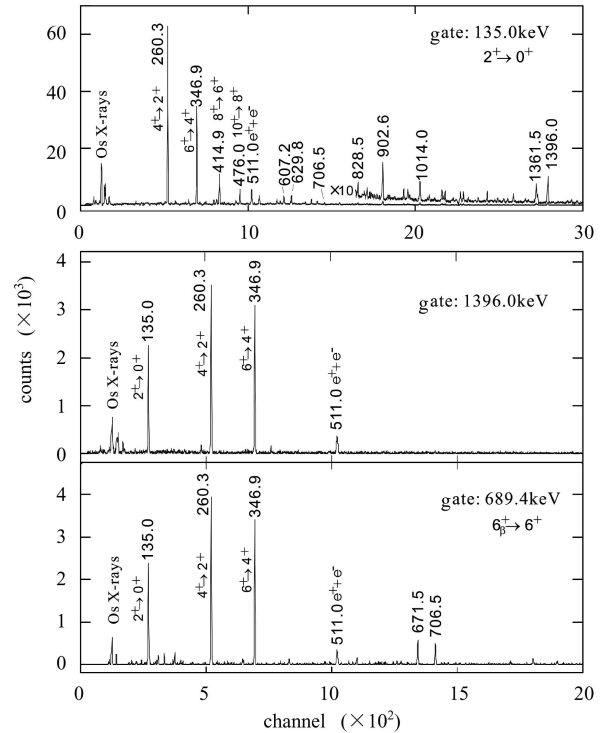


图1 几个典型的 γ 射线开门谱

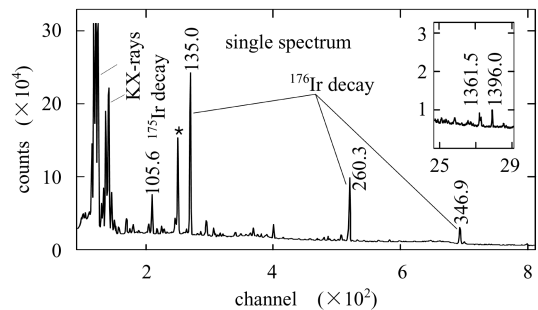


图2 本工作测量的 γ 单谱

图2给出了本工作测量的 ^{176}Ir 核衰变的单谱, 可以看出在本工作选择的弹靶组合、束流能量和测量条件下, 目标核 ^{176}Ir 衰变的 γ 射线具有非常突出的优势, 同时可以看出 γ 射线具有较好的能量分辨率. 更重要的一点是, 我们在单谱测量中清晰地看到了1396.0和706.5keV的 γ 射线, 这一测量结果进一步表明了 ^{176}Ir 核 β^+ /EC衰变的产物. 此外, 以前人们通过衰变研究在W^[10], Os^[6], Pt^[11]核素中除了系统地发现了基态带(ground state band)、(准) γ 振动带、(准) β 振动

带和八级振动带之外, 还在 $\text{W}^{[10]}$, $\text{Pt}^{[11]}$ 同位素中发现了一些激发模式和自旋宇称值都不太清楚的高位激发能级, 此处与其也非常类似.

同样地, 经过仔细的开门分析, 根据这些 γ 射线与已知 γ 跃迁、KX射线的符合、能量和的关系以及 ^{176}Ir 核衰变测量的结果, 对比周围核已知的在束及衰变信息^[6, 9-11], 图3给出了本工作建立的衰变能级

纲图. 我们在已有的能级纲图中添加了新发现的激发能为1929.5, 2102.8, 2138.3keV的3个能级和与之相连接的671.5, 706.5, 1077.5, 1112.8, 1361.5, 1396.0, 1534.2, 1707.5, 1743.5和1794.5keV的10条 γ 跃迁. 纲图中标明了各个能级和相应各条跃迁的能量值, γ 射线的粗细代表其相对强度的大小. 表1给出了 γ 射线的能量、跃迁的始末态能级和相对强度的具体数值.

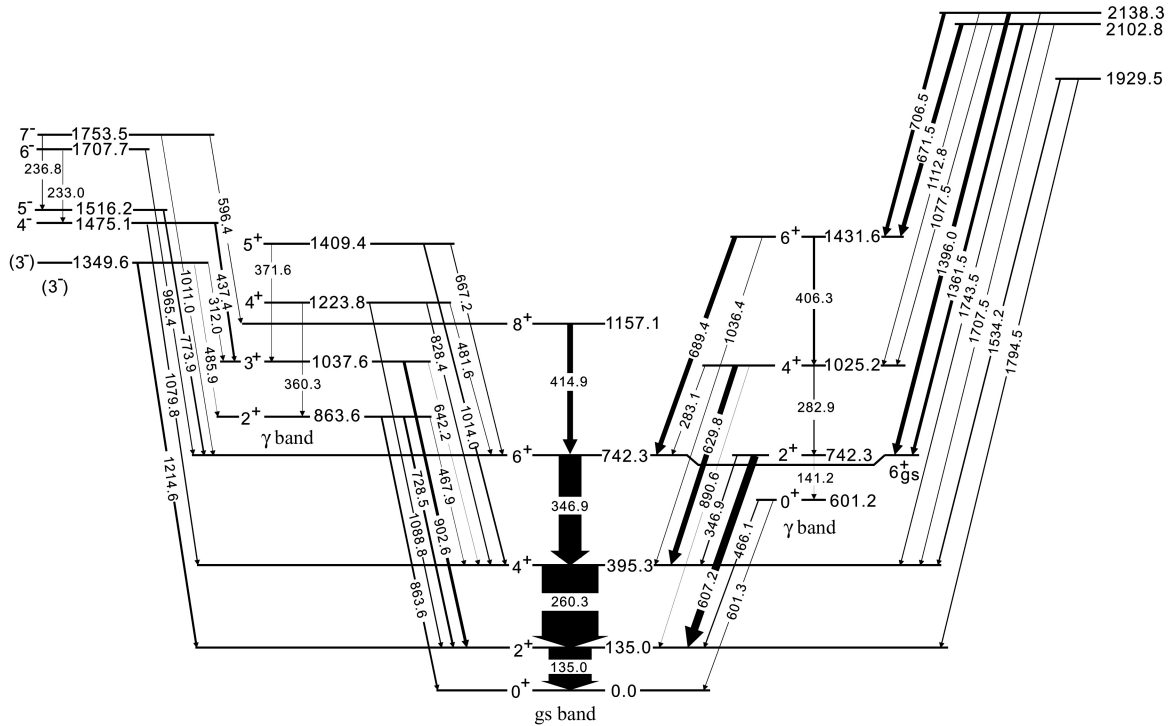


图3 本实验建立的 ^{176}Ir 衰变能级纲图

本实验的另一个重要目的是通过提取、拟合衰变 γ 射线的衰变时间谱得到衰变母核的衰变半衰期. 实验数据在离线处理时被反演成了相应的 γ - t 能量时间矩阵, 通过能量开门并仔细地扣除本底后, 可以得到该能量对应的 γ 射线的衰变时间谱. 图4给出了测量时间为36s时几条典型 γ 射线的衰变曲线, 并标明了衰变 γ 射线的母核、能量及拟合得到的半衰期. 在本实验中也清晰地观测到了 ^{175}Ir 核 β^+ /EC衰变 $7^+ \rightarrow 5^-$ 跃迁的105.6keV的 γ 射线(可看图2), Bouldjedri等人^[12]采用He-jet带传输测量技术, 在测量时间为40s的条件下, 给出了它的半衰期 $T_{1/2}^{\gamma}$ 为13(2)s, 并且提供了衰变曲线, 这里可以作为我们提取半衰期的参考. 本工作在统计更好的情况下, 采用最小二乘法拟合得到105.6keV射线的半衰期为13.7(0.8)s, 与文献[12]报道的结果完全相符, 从而肯定了本实验数据的可取性. 拟合本实验目标核 ^{176}Ir 核 β^+ /EC衰变强度相对较

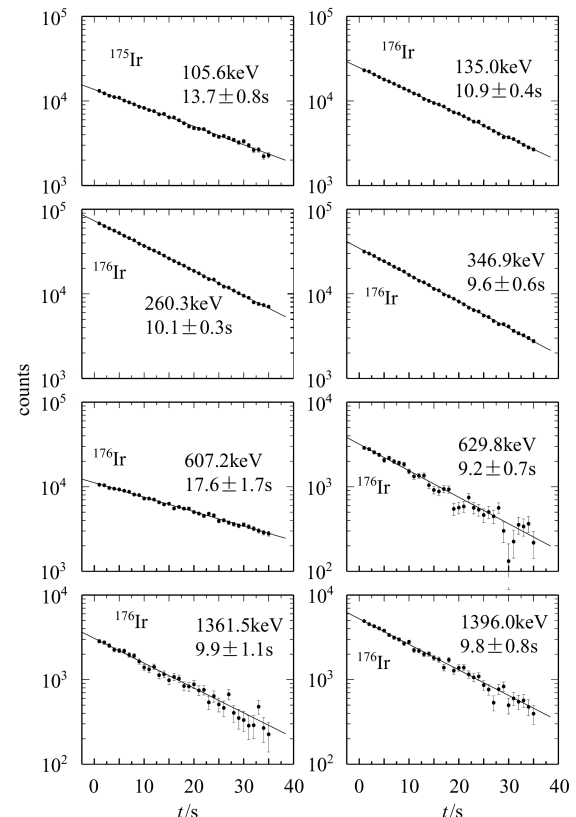
强的 γ 射线的衰变时间谱, 结果发现 $2_{\text{gs}}^+ \rightarrow 0_{\text{gs}}^+$ 跃迁的135.0keV γ 射线衰变半衰期比 $4_{\text{gs}}^+ \rightarrow 2_{\text{gs}}^+$ 的260.3和 $6_{\text{gs}}^+ \rightarrow 4_{\text{gs}}^+$ 的346.9keV的 γ 射线的衰变半衰期要长, 在误差范围内不能与以前的报道9(1)s相符^[5]. 拉门分析可以确认它不是沾污所致, 并且从图2中可以看出目标核 ^{176}Ir 的产额明显强于其他成分, 即使存在少量的沾污也不会导致其半衰期的较大改变. 这里可能的原因只有3个: 2_{gs}^+ 态即能量为135.0keV的激发能级寿命较长; 有一个半衰期较长的 γ 射线衰变到了该能级, 即135.0keV的 γ 射线混有两种不同寿命的成分; 母核的一个长寿命的同核异能态衰变到了该能级. 周围核的系统信息及开门谱的快符合关系可以帮助我们排除第一和第三种可能, 所以我们仔细提取了退激到135.0keV能级的 γ 射线的半衰期, 发现 $2_{\beta}^+ \rightarrow 2_{\text{gs}}^+$ 跃迁的607.2keV的 γ 射线的半衰期为17.6(1.7)s. 接下来我们就要寻找和讨论607.2keV的 γ 射线的半衰期较长

表1 本工作提取的 ^{176}Ir 衰变的 γ 射线的相对强度

$E_{\gamma}^{\text{a)}}$ /keV	E_i /keV	E_f /keV	$I_{\gamma}^{\text{b)}$
135.0	135.0	0	759(38)
141.2	741.2	601.2	2(1)
233.0	1707.7	1475.1	6(2)
236.8	1753.5	1516.2	13(3)
260.3	395.3	135.0	1000(40)
282.9	1025.2	742.3	39(3)
283.1	1025.2	742.3	
312.0	1349.6	1037.6	5(1)
346.9	742.3	395.3	423(22)
346.9	742.3	395.3	
360.3	1223.8	863.6	7(1)
371.6	1409.4	1037.6	5(1)
406.3	1431.6	1025.2	38(3)
414.9	1157.1	742.3	88(7)
437.4	1475.1	1037.6	33(5)
466.1	601.2	135.0	10(2)
467.9	863.6	395.3	5(1)
481.6	1223.8	742.3	8(1)
485.9	1349.6	863.6	3(1)
596.4	1753.5	1157.1	9(2)
601.3	601.2	0	19(2)
607.2	742.3	135.0	135(8)
629.8	1025.2	395.3	95(6)
642.2	1037.6	395.3	2(1)
667.2	1409.4	742.3	15(2)
671.5	2102.8	1431.6	76(5)
689.4	1431.6	742.3	81(5)
706.5	2138.3	1431.6	57(4)
728.5	863.6	135.0	35(3)
773.9	1516.2	742.3	25(2)
828.4	1223.8	395.3	18(2)
863.6	863.6	0	30(3)
890.6	1025.2	135.0	2(1)
902.6	1037.6	135.0	50(4)
965.4	1707.7	742.3	15(2)
1011.0	1753.5	742.3	7(1)
1014.0	1409.4	395.3	26(3)
1036.4	1431.6	395.3	8(1)
1077.5	2102.8	395.3	9(1)
1079.8	1475.1	395.3	20(2)
1088.8	1223.8	135.0	19(2)
1112.8	2138.3	1025.2	11(2)
1214.6	1349.6	135.0	35(3)
1361.5	2102.8	742.3	43(3)
1396.0	2138.3	742.3	75(3)
1534.2	1929.5	395.3	23(2)
1707.5	2102.8	395.3	12(2)
1743.5	2138.3	395.3	15(2)
1794.5	1929.5	395.3	18(2)

a) 能量不确定度为0.5—1.0keV; b) 相对于260.3keV的 γ 射线($I=1000$).

的原因, 由于 $4_{\beta}^{+} \rightarrow 2_{\beta}^{+}$ 跃迁的282.9keV的 γ 射线统计太弱, 图4中提取了 $4_{\beta}^{+} \rightarrow 4_{\text{gs}}^{+}$ 跃迁的629.8keV的 γ 射线的半衰期为9.2(0.7)s, 可以断定它与其他射线的半衰期一致均来自母核的同一核态的衰变, 再考虑符合关系, 我们推知 4_{β}^{+} 和 2_{β}^{+} 态都不是长寿命激发能级, 所以有理由认为母核的一个长寿命的同核异能态衰变到了 2_{β}^{+} 的激发能级. 从衰变的系统性分析, 这与 $^{172,174}\text{Ir}^{[1, 13]}$ 同位素的衰变非常相似(^{174}Ir 中也观测到 $2_{\beta}^{+} \rightarrow 2_{\text{gs}}^{+}$ 跃迁的532.4keV的 γ 射线有一个较长的衰变半衰期), 并且随着中子数的递减, 衰变能逐渐增大衰变半衰期逐渐减小. 在Tl, Au, Re, Ta等 $^{[13]}$ 双奇核中也有类似的情况. 根据系统性和G-T跃迁规则 $^{[14]}$, 我们建议母核有一个低自旋同核异能态, 其最佳自旋值为2或3. 另外拉门分析还发现607.2keV的 γ 射线除了与135.0keV的 γ 射线符合外, 还与282.9keV的 γ 射线有较弱符合, 这说明607.2keV的 γ 射线来自两个不同的成分而主要成分是母核的低自旋同核异能态. 文献[4]中测到 ^{176}Ir 核衰变半衰期为8(1)s、能量为5.118MeV的 α 粒子应来自母核的高自旋同核异能态的衰变. 图4还给出了本工作所得到的较强的新的1361.5和1396.0keV的 γ 射线的半衰期分别为9.9(1.1)和9.8(0.8)s, 它们与 ^{176}Ir 核 β^{+}/EC 衰变的已知 γ 射线的半衰期(607.2keV的 γ 射线除外)相符, 这也进一步

图4 本工作提取的典型 γ 射线的时间曲线

支持了我们对这些 γ 射线归属的指定.

在邻近的 $^{175,177}\text{Ir}^{[15, 16]}$, $^{175}\text{Os}^{[15]}$ 和 $^{177}\text{Pt}^{[16]}$ 等奇 A 核素中, 观测到了 $\pi 1/2[541]$, $\pi 9/2[514]$, $\pi 5/2[402]$, $\pi 3/2[402]$, $\pi 1/2[530]$, $\pi 1/2[660]$ 和 $\nu 5/2[512]$, $\nu 7/2[633]$ 和 $\nu 1/2[521]$ 的一准粒子带头激发能, 采用半经验计算^[17–20] 方法, 图 5 给出了零级近似^[17] 并且不考虑 Gallagher-Moszkowski(GM) 劈裂^[21] 时耦合得到的相应两准粒子态的带头激发能位置, 虚线表示耦合该能级的奇 A 核带头激发能有近似值, K_{π}^{\pm} 和 K_{ν}^{\pm} 分别表示按照 GM 规则^[21, 22] 两准粒子耦合的自旋平行三重态和自旋反平行单态带的带头自旋和宇称, 带“*”的组态表示在 ^{176}Ir 的高自旋能级结构研究中^[7, 23] 已经观测转动带能级结构. 结合图 5, 并考虑到稀土区双奇核 GM 劈裂的大小^[21] 以及 $\pi 1/2[541]$ 的带头为 $5/2^{-[14, 24, 25]}$, 我们可以得到能量较低时带头自旋值可以耦合出 2–3 的低自旋组态可能是 $\pi 1/2^{-}[541] \otimes \nu 1/2^{-}[521]$ 和 $\pi 9/2^{-}[514] \otimes \nu 5/2^{-}[512]$. $\pi 1/2^{-}[541] \otimes \nu 1/2^{-}[521]$ 可以耦合出 3^+ 态, $\pi 9/2^{-}[514] \otimes \nu 5/2^{-}[512]$ 可以耦合出为 2^+ 态, 这也是我们所建议的衰变母核的低自旋同核异能态的两个最可能组态.

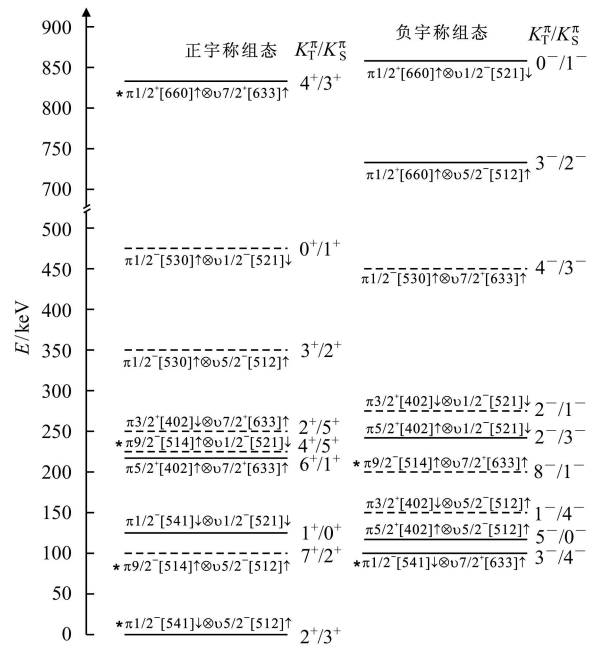


图 5 预言的 ^{176}Ir 两准粒子态带头激发能

作者感谢中国原子能科学研究院制靶实验室提供的 ^{146}Nd 同位素靶, 感谢兰州重离子加速器国家实验室 SFC 提供高品质的 ^{35}Cl 束流.

参考文献(References)

- Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1995, **A595**: 409
- Browne E, Huo J. Nucl. Data Sheets, 1998, **84**: 337
- Singh B. Nucl. Data Sheets, 1995, **75**: 199
- Siivola A. Nucl. Phys., 1967, **A92**: 475
- Bosch U, Koschel P, Schmidt-Ott W D et al. Z. Phys., 1990, **A336**: 359–360
- Kibedi T, Dracoulis G D, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 1994, **A567**: 183
- ZHANG Y H, Oshima M, Toh Y et al. Eur. Phys. J., 2002, **A13**: 429
- WANG X D, XU S W, LI Z K et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(4): 309(in Chinese)
(王旭东, 徐树威, 李占奎等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(4): 309)
- Dracoulis G D, Fahlander C, Fewell M P. Nucl. Phys., 1982, **A383**: 119
- Kibedi T, Dracoulis G D, Byrne A P et al. Nucl. Phys., 2001, **A688**: 669
- Davidson P M, Dracoulis G D, Kibedi T et al. Nucl. Phys., 1999, **A657**: 219
- Bouldjedri A, Duffait R, Beraud R et al. Z. Phys., 1992, **A342**: 267

- Schmidt-Ott W D, Salewski H, Meissner F et al. Nucl. Phys., 1992, **A545**: 646
- Konopinski E J. Rev. of Mod. Phys., 1943, **15**: 209
- Basunia M S. Nucl. Data Sheets, 2004, **102**: 719
- Kondev F G. Nucl. Data Sheets, 2003, **98**: 801
- Cardona M A, Kreiner A J, Hojman D et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 1298
- Drissi S, Bruder A, Carlen M et al. Nucl. Phys., 1992, **A543**: 495
- Hoff R W, Kern J, Piepenbring R et al. Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics. AIP Conf. Proc.(No.125). New York, 1985. 274
- ZHANG Y H, Hayakawa T, Oshima M et al. Eur. Phys. J., 1999, **A5**: 345
- Jain A K, Sheline R K, Sood P C et al. Rev. of Mod. Phys., 1998, **70**: 843
- Gallagher C J, Moszkowski S A. Phys. Rev., 1958, **111**: 1282
- Bark R A, Baxter A M, Byrne A P et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 014320
- JIN H Q, Riedinger L L, YU C H et al. Phys. Lett., 1992, **B277**: 387
- YANG C X, Kownacki J, Garrett J D et al. Phys. Lett., 1983, **B133**:39

β^+ /EC-Decay Study of ^{176}Ir Neutron-Deficient Isotope*

WANG Hua-Lei^{1,2} ZHANG Yu-Hu^{1,2;1)} ZHOU Xiao-Hong¹ GUO Ying-Xiang¹ LEI Xiang-Guo¹
XIE Yuan-Xiang¹ XU Shu-Wei¹ XING Ye-Bing¹ ZHENG Yong¹ LIU Min-Liang¹
XIE Cheng-Ying¹ SONG Li-Tao¹ LUO Peng¹ YU Hai-Ping¹
GUO Wen-Tao¹ DING Hua-Jie¹ NIU Yan-Ning¹

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

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The β^+ /EC decay of doubly odd ^{176}Ir has been investigated using $^{146}\text{Nd}(^{35}\text{Cl}, 5n\gamma)^{176}\text{Ir}$ heavy ion fusion evaporation reaction at 210MeV bombarding energy. With the aid of a helium-jet recoil fast tape transport system, the reaction products were transported to a low-background location for measurements. Based on the data analysis, the previously published γ rays in ^{176}Ir decay were proved, moreover, 3 new levels and 10 new γ rays were assigned to ^{176}Ir decay. The new level scheme of ^{176}Os with low excitation energy has been established. The time spectra of typical γ rays clearly indicate a long-lived low-spin isomer in ^{176}Ir nuclide.

Key words β^+ /EC decay, He-jet tape transport system, decay scheme, half life

Received 29 April 2005

*Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10025525), NSFC(10375077,10221003), Major State Basic Research Development Program (TG2000077400) and Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: yhzhang@impcas.ac.cn