缺中子同位素 $^{215-217}\text{U}$ 的 α 衰变研究

甘再国^{①*}, 姜舰^{①②}, 杨华彬^{①②③}, 张志远^①, 马龙^{①②③}, 郁琳^{①②}, 王建国^①, 田玉林^①, 丁兵^①,
黄天衡^①, 王永生^①, 郭松^①, 孙明道^{①②③}, 王凯龙^{①②}, 周善贵^④, 任中洲^⑤, 周小红^①, 徐瑚珊^①

① 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

② 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;

③ 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

④ 中国科学院理论物理研究所, 北京 102413;

⑤ 南京大学物理学院, 南京 210093

* 联系人, E-mail: zggan@impcas.ac.cn

2015-11-25 收稿, 2015-12-21 修回, 2015-12-27 接受, 2016-04-30 网络版发表

国家自然科学基金(11475226, 11405225, 11305230, 11120101005, 11405243, 11205208)和国家重点基础研究发展计划(2013CB834403)资助

摘要 通过重离子熔合蒸发反应 $^{180}\text{W}(^{40}\text{Ar}, xn)^{220-x}\text{U}$, 合成了两个缺中子新核素 ^{216}U 和 ^{215}U . 目标核由熔合反应产生后从薄靶中反冲出来, 在飞行中被兰州充气谱仪从大量的本底离子中分离并偏转到探测系统. 探测系统对目标核的注入以及随后将发生的 α 衰变进行探测. 探测器上产生的信号经电子学处理后被数据获取系统转换成一定格式的数据保存下来. 实验采用能量-位置-时间关联的数据分析方法来寻找和鉴别目标核. 在束流能量为187.2 MeV的情况下, 新核素 ^{216}U 的两个 α 衰变态被观察到: 一是基态, 它的 α 粒子能量为10.384(30) MeV, 半衰期为 $4.72_{-1.57}^{+4.72}$ ms; 二是自旋宇称为 8^+ 的同核异能素态, 它的 α 粒子能量为10.582(30) MeV和8.182(30) MeV, 半衰期为 $1.31_{-0.48}^{+1.80}$ ms. 在束流能量为205.5 MeV的情况下, 新核素 ^{215}U 被观测到, 它的 α 粒子能量和半衰期被确定为8.428(30) MeV和 $0.73_{-0.29}^{+1.33}$ ms. 此外, 实验还观测到从 ^{217}U 的基态产生的两个新的 α 跃迁, 它们的 α 粒子能量分别为8.210(30) MeV和8.098(30) MeV.

关键词 缺中子新核素, 熔合蒸发反应, 充气谱仪, α 粒子能量, 半衰期, 同核异能素

远离 β 稳定线的新核素合成及其衰变性质研究是核物理学中的一个重要研究领域. 截止到2014年, 核素图上已有近3200种核素^[1], 除去自然界存在的300多种核素之外, 其余都是人工合成的. 在中子数 $N \leq 126$, 质子数 $Z=82 \sim 92$ 的缺中子核区, 原子核有着丰富的能级结构和 α 衰变模式^[2~7]. 其中偶质量数的 $N=126$ 的同中子素有两 $I^\pi=8^+$ 的同核异能素^[6,7]: 第一个 8^+ 态的组态为 $(\pi h_{9/2}^2)$, 它的激发能随质子数的增加而增加; 第二个 8^+ 态的组态为 $(\pi h_{9/2} \pi f_{7/2})$, 这个态由于受到处在质子能级 $f_{7/2}$ 上的质子和处在中子能级 $f_{5/2}$

上的中子相互吸引的影响成为闯入态, 它在 ^{216}Th 中开始低于第一个 8^+ 态, 人们预言它在 ^{218}U 中会低于 6^+ 能级^[8,9]. 类似于偶质量数的 $N=126$ 的同中子素的能级结构, 在 $N=124$ 的同中子素 ^{208}Po ^[10], ^{210}Rn ^[11], ^{212}Ra ^[12]和 ^{214}Th ^[7]中也都存在 $I^\pi=8^+$ 的同核异能素. 而下一个偶质量数的 $N=124$ 的同中子素是 ^{216}U , 由于它和 ^{218}U 有相同的质子数, 又和 ^{214}Th 有相同的中子数, 那么它的能级结构和衰变性质应与 ^{218}U 和 ^{214}Th 有类似之处. 为了验证这一想法, 本次实验把合成新核素 ^{216}U 并寻找其同核异能素作为研究目标之一.

引用格式: 甘再国, 姜舰, 杨华彬, 等. 缺中子同位素 $^{215-217}\text{U}$ 的 α 衰变研究. 科学通报, 2016, 61: 2502~2511

Gan Z G, Jiang J, Yang H B, et al. α decay studies of the neutron-deficient uranium isotopes $^{215-217}\text{U}$ (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2502~2511, doi: 10.1360/N972015-01316

实验发现, ^{211}Ra 和 ^{212}Ra ^[13], ^{212}Ac 和 ^{213}Ac ^[2], ^{213}Th 和 ^{214}Th ^[14], ^{214}Pa 和 ^{215}Pa ^[2]等 $N=123$ 和 $N=124$ 的相邻同位素有着非常接近的基态到基态的 α 衰变性质. 以此推测, ^{215}U 和 ^{216}U 的基态 α 衰变性质也可能会非常接近. 其实早在1968年, Valli等人^[15,16]就曾预测 ^{216}U 和 ^{215}U 的 α 粒子的能量分别为8.380(50) MeV和8.390(50) MeV. 为了验证这一预测, 研究 ^{215}U 的 α 衰变性质也是本工作的研究目标之一. ^{217}U 是目前已知的质量数最轻的U的同位素, 它被Malyshev等人^[17]首次合成. 就在 ^{217}U 首次合成的工作中, ^{217}U 的 α 粒子能量和半衰期被确定为8.005(20) MeV和 $15.6^{+21.3}_{-5.7}$ ms. 到目前为止, 这是文献报道的关于 ^{217}U 衰变性质的全部实验数据. 然而由已知的奇质量的 $N=125$ 的同中子素的 α 衰变性质推测, 基态的 ^{217}U 可能存在多条 α 衰变线, 但尚未有文献报道. 因此, 有必要对 ^{217}U 的 α 衰变性质做进一步的研究.

1 实验过程

本实验在兰州充气谱仪^[18]上进行, 利用完全熔合反应 $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{W}\rightarrow^{220}\text{U}^*$, 通过蒸发3~5个中子生成目标核 $^{215-217}\text{U}$. ^{40}Ar 束流从兰州重离子加速器提供, 流强约为150~250 pnA (1 pnA= 6.25×10^9 离子/秒). 实验所用的靶为提纯的 ^{180}W 同位素, 纯度为91.4%, 杂质主要是 ^{182}W , 含量约为8.5%. 本次实验采用固定靶的形式. 靶的厚度约为480 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 前后两面分别有厚约40和15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜做衬. 这样做的主要目的是减少靶因溅射而引起的损耗, 延长靶的使用寿命.

根据选取的束流能量的不同, 本次实验可分成三个阶段. 在实验的第一阶段, 束流能量取为189.5 MeV, 经过半靶的能量损失后束流在靶中心的能量约为187.2 MeV, 这是由HIVAP^[19,20]程序计算产生 ^{216}U 的最优束流能量. 在这个能量下的有效束流照射时间为103 h, 总的束流粒子数为 4.1×10^{17} . 在实验的第二阶段, 束流能量取为204.5 MeV, 靶中心的能量约为202.4 MeV, 这个束流能量是计算产生 ^{215}U 的最佳束流能量. 经过89 h的照射后, 实验观察到一个疑似事件, 然而由于 ^{216}U 和 ^{215}U 在该束流能量下截面相近且它们的子核和孙子核 α 衰变性质相似, 因此无法指认这个疑似事件. 在实验的第三阶段, 束流能量被提高到207.6 MeV, 这时候的束流在靶中心的能量约为205.5 MeV. 在这个能量下, 虽然 ^{215}U 的截面会稍小一些, 但要远大于 ^{216}U 的截面, 在利用 α 衰变性质

无法区分 ^{215}U 与 ^{216}U 的情况下, 实验可以利用这一点来指认 ^{215}U . 在第三个能量下束流的有效照射时间是157 h, 总的束流粒子数为 7.9×10^{17} . 如果没有特别说明, 下文中所提到的束流能量均指束流在靶中心的能量.

蒸发剩余核从薄靶中反冲出来后, 在充有稀薄He气(60 Pa)的磁场中飞行. 利用蒸发余核磁刚度与束流粒子磁刚度的不同, 充气谱仪会把大部分的束流粒子偏转到束流挡板上而把蒸发余核偏转到位于谱仪后面的焦平面探测系统. 被谱仪分离后的蒸发余核会被并肩放置在焦平面上的三块位置灵敏的硅条探测器记录. 每块硅条探测器厚约300 μm , 灵敏面积为50 mm $\times$ 50 mm, 被等分成16竖条. 当有粒子注入到硅条探测器时, 它的水平位置由所在的条数给出, 其竖直方向的位置由电荷分除法确定. 通过测试得知, 硅条对于动能为5~9 MeV的 α 粒子的能量分辨约为60~70 keV, 竖直方向的位置分辨约为2.0~2.5 mm. 在这三块位置灵敏的硅条探测器周围还有8块非位置灵敏的方硅探测器, 这8块方硅的主要作用是探测从硅条上反冲出来的 α 粒子或者裂变碎片. 硅条探测器和方硅探测器一起构成一个开口逆着束流方向的盒子结构, 通过模拟得知, 整个硅盒子对蒸发余核衰变的 α 粒子的探测效率为80%. 硅条和方硅探测器的能量刻度采用 α 源刻度与测试实验刻度相结合的方法. 外源是具有三组分的 α 源(^{244}Cm , ^{241}Am 和 ^{239}Pu), 测试实验为 $^{40}\text{Ar}+^{175}\text{Lu}$, 刻度时所用的已知能量为6.26055 MeV($^{205,206}\text{Rn}$), 6.641 MeV (^{208}Fr), 7.016 MeV (^{210}Ra)和7.4695 MeV ($^{210,211}\text{Ac}$), 这些已知数据都来自NNDC (<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>). 为了区分硅条探测器上的信号是注入信号还是衰变信号, 两个同一型号的多丝正比室被分别放置在硅盒子探测器前方约15和25 cm的位置. 多丝正比室的工作气体是异丁烷, 工作气压在200 Pa左右.

2 实验结果与讨论

数据处理过程中, 对目标核的寻找采用能量-位置-时间关联的方法^[21]. 所谓的能量-位置-时间关联是指: (1) 目标核的注入能量要和估算的动能一致, α 粒子能量要与目标核及其子核、孙子核的已知 α 粒子能量一致; (2) 目标核的注入信号和随后发生的衰变信号都必须发生在同一硅条的同一位置上(在位置分辨的范围内); (3) 衰变链中每个核的寿命一般要求在6倍已知半衰期范围之内. 如果数据中的某些事件同

时满足上述三个条件, 并且关联在一起成为一串事件, 那么这样一串事件就称作是一条关联链. 然而满足这3个条件的关联链并不一定都是物理上的真关联事件, 它们还有一定的概率是随机事件偶然符合得到的. 这种偶然符合的概率与本底事件的计数率、寻找关联的时间窗和位置窗相关. 本底计数率越高, 时间窗和位置窗的范围越大则偶然符合的概率越大. 本文对偶然概率的估算采用文献[21]中的方法. 如果关联链的偶然符合概率非常小, 则认为其是真关联.

一般来说只有在真关联的情况下, 才对关联链的母核进行指认. 在低统计量情况下, 被指认出的核素的半衰期和 α 粒子能量的确定采用文献[22,23]中的方法. 本次实验寻找了在不同束流能量下的三重关联链ER(蒸发余核)- α 1- α 2, ER到 α 1的时间窗取为100 ms, α 1到 α 2的时间窗取为10 s, 两相邻事件的位置窗设为 ± 2.5 mm. 图1是呈现的是按照上述条件找到的关联链, 横轴代表母核的 α 粒子能量, 纵轴代表子核的 α 粒子能量, 每一个点代表一个关联链. 图1中各图

图1 (网络版彩色) $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{W}$ 反应产物三重关联链ER- α 1- α 2的二维图. 横坐标代表母核的 α 粒子能量, 纵坐标代表子核的 α 粒子能量. ER- α 1的时间窗取为100 ms, α 1- α 2的时间窗取为10 s. (a)~(c)分别是束流能量为187.2、202.4和205.5 MeV时的结果

Figure 1 (Color online) Mother and daughter α -particle energies for all chains of the type ER(Evaporation Residue)- α 1- α 2 observed in the $^{40}\text{Ar}+^{180}\text{W}$ irradiation. Maximum search times were 100 ms for the ER- α 1 pair and 10 s for the α 1- α 2 pair. (a)~(c) show the decay data obtained at the beam energies of 187.2, 202.4 and 205.5 MeV, respectively

是在不同束流能量下的结果. 根据每个点对应的 α 粒子能量可以对关联链进行指认, 指认的结果如图1上所标.

2.1 新核素 ^{216}U

在实验的第一阶段, 通过关联链寻找, 7条疑似 ^{216}U 的 α 衰变链被找到(其中有6条链可以从图1(a)上观察到). 这些衰变链有的只能找到三重关联, 有的却可以找到四重或者五重关联. 表1列出每条链中每个事件的能量、位置、时间间隔等信息. 通过偶然符合概率的计算可知, 这7条链是偶然符合的概率都非常小, 例如三重和四重关联链的偶然符合概率都小于 10^{-10} . 因此, 这几条链都被认为是真关联事件.

表1所列的前4条关联链中事件的衰变性质相似. 这4条链被认为来自于同一个核的同一个衰变. 根据这4条链, 子核的 α 粒子能量和半衰期被确定为7.788(30) MeV和 $21.6^{+21.6}_{-7.2}$ ms; 孙子核的 α 粒子能量和半衰期被确定为7.165(30) MeV和 $0.83^{+1.13}_{-0.30}$ s; 曾孙核的 α 粒子能量和半衰期确定为6.399(30) MeV和 77^{+140}_{-30} s. 这里在确定 α 粒子能量时没有用到加和值, 这是由于加和值的分辨一般在200 keV左右, 误差较大. 在确定 α 粒子能量时一般要排除这种误差较大的加和值. 但是在确定半衰期的时候, 仍然会用到它的寿命值. 根据确定的 α 粒子能量和半衰期, $\alpha 2$, $\alpha 3$ 和 $\alpha 4$ 被分别指认为是 ^{212}Th , ^{208}Ra 和 ^{204}Rn 的衰变事件, 母核被指认为是 ^{216}U . 母核的 α 粒子能量和半衰期被确定为8.384(30) MeV和 $4.72^{+4.72}_{-1.57}$ ms. 利用Rasmussen方法^[24]并假设 $\Delta L=0$ 计算得到这个 α 衰变的约化宽度为 34^{+34}_{-11} keV, 这个值与附近偶偶核 ^{218}U , ^{216}Th 和 ^{214}Th 的约化衰变宽度 66^{+23}_{-14} keV^[9], 26(3) keV^[9]和54(8) keV^[9]大小相当. 另外, 从图2上可以看出8.384(30) MeV很好地满足基态到基态 α 跃迁的系统性. 因此, 这个衰变被指认为是 ^{216}U 基态到子核 ^{212}Th 基态的 α 跃迁.

第5条关联链中 $\alpha 1$ 的能量为10.71 MeV, 这是个加和值. 第6条关联链中 $\alpha 1$ 的能量为10.582 MeV. 尽管这两个能量值相差约120 keV, 但在误差范围之内仍然可以认为是同一值. 由于 $\alpha 2$, $\alpha 3$ 和 $\alpha 4$ 事件被分别指认是 ^{212}Th , ^{208}Ra 和 ^{204}Rn 的衰变事件, 母核还是 ^{216}U . 根据这两个条衰变链, 又一新的 ^{216}U 的 α 衰变被确定, 其 α 粒子能量和半衰期分别为10.582(30) MeV和 $0.74^{+1.34}_{-0.29}$ ms. 类比如 ^{216}Th ^[6]和 ^{218}U ^[9]的同核异能素的 α 衰变, 这一衰变被指认为是从 ^{216}U 的同核异

表1 ^{216}U 的关联链以及关联链中每个衰变事件的类型、位置、能量和时间间隔

Table 1 Measured energies, vertical positions and time intervals of correlated α decay chains assigned to ^{216}U

关联链	核	类型	位置 (mm)	能量 (MeV)	时间间隔
1		ER	0.88	15.51	0
	^{216}gU	$\alpha 1$	-0.34	8.412	3.89 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	0.53	7.789	7.21 ms
	^{208}Ra	$\alpha 3$	0.97	7.153	1.48 s
2		ER	-7.74	15.07	0
	^{216}gU	$\alpha 1$	-7.41	8.359	2.7 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	-8.25	7.750	30.51 ms
	^{208}Ra	$\alpha 3$	-4.37	7.18 ^{a)}	0.32 s
	^{204}Rn	$\alpha 4$	-7.06	6.402	154.6s
3		ER	-4.06	15.2	0
	^{216}gU	$\alpha 1$	-3.16	8.384	1.71 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	-3.26	7.806	52.78 ms
	^{208}Ra	$\alpha 3$	-3.18	7.177	1.79 s
	^{204}Rn	$\alpha 4$	-3.97	6.396	68 s
4		ER	-10.57	19.54	0
	^{216}gU	$\alpha 1$	-9.85	8.376	18.93 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	-9.46	7.809	34.22 ms
5		ER	-2.17	16.30	0
	^{216}mU	$\alpha 1$	-1.02	10.71 ^{a)}	0.70 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	-1.26	7.795	0.58 ms
	^{208}Ra	$\alpha 3$	-1.72	7.122	451.8 ms
	^{204}Rn	$\alpha 4$	-1.27	6.62 ^{a)}	27.1 s
6		ER	0.27	13.93	0
	^{216}mU	$\alpha 1$	0.59	10.582	1.43 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	0.63	7.816	79.70 ms
	^{208}Ra	$\alpha 3$	-0.12	7.093	741.1 ms
7		ER	17.68	12.34	0
	^{216}mU	$\alpha 1$	17.81	8.182	3.53 ms
	^{212}Th	$\alpha 2$	18.66	7.740	105 ms
	^{208}Ra	$\alpha 3$	16.73	7.113	3.49 s
	^{204}Rn	$\alpha 4$	18.43	6.405	47.86 s

a) 加和 α 粒子能量, 能量值是由硅条上的能量和方硅上的能量相加得到的

能素态($\pi h_{9/2} \pi f_{7/2}$) 8^+ 态到 ^{212}Th 基态的跃迁. 取 $\Delta L=8$ 并假设其衰变分支比为100%, 计算得到这一衰变的约化宽度为0.31 keV, 这个值与 $^{216}\text{mTh}(8^+)$ 和 $^{218}\text{mU}(8^+)$ 的约化衰变宽度0.2 keV^[9]和0.24 keV^[9]大小相当. 由10.582(30) MeV和8.384(30) MeV这两个 α 粒子能量, 可估算出 $^{216}\text{mU}(8^+)$ 的激发能约为2239 keV, 这个值与

图2 (网络版彩色) 缺中子同位素(Rn~U)基态到基态的衰变 α 粒子能量随中子数的变化情况(^{209}Th 除外). 空心方块指的是文献值, 实心方块指的是本次实验的测量值

Figure 2 (Color online) α -particle energies of ground state to ground state transitions for neutron-deficient Rn-U isotopes (except ^{209}Th). The open squares refer to literature values and the solid squares refer to the values of $^{215-217}\text{U}$ measured in this work

$^{214\text{m}}\text{Th}(8^+)$, $^{216\text{m}}\text{Th}(8^+)$ 和 $^{218\text{m}}\text{U}(8^+)$ 的激发能2181 keV^[7], 2045 keV^[6]和2105 keV^[9]相一致.

表1中的第7条关联链是一个五重关联链. 根据关联链中的 α_2 , α_3 和 α_4 衰变事件不难指认母核仍然是 ^{216}U . 这条链中母核 α 粒子能量8.182 MeV与8.384(30) MeV和10.582(30) MeV都不相同. 这一衰变被初步指认为是从 $^{216\text{m}}\text{U}(8^+)$ 到 ^{212}Th 的 8^+ 能级的跃迁. 如果这个指认正确, 由8.182(30) MeV和10.582(30) MeV可计算得到 ^{212}Th 的 8^+ 态能级约为2445 keV. 这个值很好地满足其他 $N=122$ 的同中子素 8^+ 能级的系统性1585.9 keV (^{206}Po)^[25], 1828.3 keV (^{208}Rn)^[25], 2053.8 keV (^{210}Ra)^[26]. 根据5~7三条衰变链, $^{216\text{m}}\text{U}(8^+)$ 的半衰期被确定为 $1.31^{+1.80}_{-0.48}$ ms. 图3是本次实验建立的 ^{216}U 的衰变纲图. 取谱仪的传输效率为14%^[18], 估算出的 ^{216}U 的产生截面约为 300^{+170}_{-120} pb. ^{216}U 的部分实验结果已发表在*Phys Rev C*^[27]上. 需要说明的是本文报道的 $^{216\text{m}}\text{U}(8^+)$ 的半衰期与文献^[27]中的报道值稍有不同, 这是因为对第7条链的指认还有待证实, 出于可靠起见文献^[27]在确定 $^{216\text{m}}\text{U}(8^+)$ 的半衰期时没有用到第7条衰变链的数据.

2.2 新核素 ^{215}U

在实验的第三阶段, 通过关联链寻找两条疑似 ^{215}U 的衰变链被观察到(图1(c)和图4). 这两条链的偶然符合概率为 2.04×10^{-11} , 它们被认为是真关联事件. 然而, 根据 α_2 和 α_3 事件只能指认出母核可能是 ^{216}U 或

图3 ^{216}U 的衰变纲图. 虚线代表的衰变有待进一步证实

Figure 3 α -decay scheme proposed for ^{216}U . Dashed line indicates inconclusive assignment

图4 (网络版彩色) 本次实验产生的两条 ^{215}U 的 α 关联链. 图中标出了关联链中每个衰变事件的能量和时间间隔

Figure 4 (Color online) Observed α decay chains assigned to ^{215}U . Measured energies and time intervals of the observed decay events are shown

^{215}U . 这是由于 ^{216}U 和 ^{215}U 的子核和孙子核的 α 衰变性质十分相似, 并且两条链都缺少 α_4 事件. 为了对这两条链进行唯一指认, 我们利用了激发函数的方法.

在束流能量为187.2 MeV时, 复合核的激发能为45.7 MeV. 在这个束流能量下 ^{216}U , ^{216}Pa 和 ^{218}U 被观察到(如图1(a)所示), 这些产物都是通过四核子蒸发道产生的(^{218}U 是通过 $^{40}\text{Ar} + ^{182}\text{W}$ 的4n蒸发道产生的), 这说明在这个束流能量下四核子蒸发是主反应道. 在束流能量为205.5 MeV的情况下, 复合核的激发能为60.3 MeV, 这比四核子蒸发成主反应道时的激发能高出14.6 MeV. 根据经验, 在这个激发能下五核子蒸发道应该成为主反应道. 这一点可以从 ^{215}Pa 的增多得到印证(对比图1(a)和(c)). 另外, 利用HIVAP^[19,20]程序计算得到的激发函数也支持这种看法^[28]. 因此这两条衰变链被指认为是 ^{215}U 的衰变事件. 根据这两条链确定的 ^{215}U 的 α 粒子能量和半衰期分别为8.428(30) MeV和 $0.73^{+1.33}_{-0.29}$ ms. 由于这个 α 衰变的约化宽度 173^{+316}_{-70} keV大于40 keV, 这个 α 跃迁应是非禁戒的.

表 2 ^{217}U 的关联链及其相关信息

Table 2 The measured parameters of the correlated α decay chains assigned to ^{217}U

关联链	E_{lab} (MeV)	反应道	类型	位置(mm)	能量(MeV)	时间间隔
1	187.2	$^{180}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 3\text{n})^{217}\text{U}$	ER	2.18	16.69	0
			$\alpha 1$	2.90	8.197	10.87 ms
			$\alpha 2$	1.87	7.684	67.37 ms
			$\alpha 3$	2.95	7.007	10.41 s
2	187.2	$^{180}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 3\text{n})^{217}\text{U}$	ER	1.40	16.92	0
			$\alpha 1$	1.89	8.189	19.48 ms
			$\alpha 2$	1.02	8.02 ^{a)}	227.6 ms
			$\alpha 3$	2.66	6.979	5.22 s
3	202.4	$^{182}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 5\text{n})^{217}\text{U}$	ER	-18.09	13.19	0
			$\alpha 1$	-17.99	8.202	8.44 ms
			$\alpha 2$	-17.32	7.730	246.29 ms
			$\alpha 3$	-18.42	7.059	2.00 s
4	202.4	$^{182}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 5\text{n})^{217}\text{U}$	ER	13.65	11.23	0
			$\alpha 1$	14.36	8.226	78.89 ms
			$\alpha 2$	13.57	7.693	735.91 ms
5	202.4	$^{182}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 5\text{n})^{217}\text{U}$	ER	-15.76	12.05	0
			$\alpha 1$	-15.29	8.098	14.78 ms
			$\alpha 2$	-15.12	7.664	6.51 ms
6	205.5	$^{182}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 5\text{n})^{217}\text{U}$	ER	13.78	13.41	0
			$\alpha 1$	14.48	8.234	34.33 ms
			$\alpha 2$			
			$\alpha 3$	13.27	7.027	298.68 ms
			$\alpha 4$	13.63	3.262 ^{b)}	44.65 s

a) 加和 α 粒子能量, 能量值是由硅条上的能量和方硅上的能量相加得到的; b) 逃逸 α 粒子能量, α 粒子从硅条上逃逸而没有被方硅探测到

又由于这个衰变的 α 粒子能量8.428(30) MeV很好地满足基态到基态衰变的系统性(图2). 因此, 我们认为这个 α 衰变应是从 ^{215}U 基态到 ^{211}Th 基态的 α 跃迁. 在束流能量为205.5 MeV的情况下, ^{215}U 的产生截面为 50_{-30}^{+70} pb. ^{215}U 的实验结果也已发表^[28].

2.3 ^{217}U α 衰变的精细结构

2000年, Malyshev等人^[17]利用熔合蒸发反应 $^{182}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 5\text{n})^{217}\text{U}$ 首次合成出 ^{217}U , 他们根据实验观察到的3条衰变链确定 ^{217}U 的 α 粒子能量和半衰期分别为8.005(20) MeV和 $15.6_{-5.7}^{+21.3}$ ms. 2012年, Wakabayashi等人^[29]在 $^{82}\text{Kr}+^{138}\text{Ba}$ 的反应产物中观察到约20个 ^{217}U 的衰变事件, 然而他们测量到的大部分 ^{217}U 的 α 粒子能量比首次观测值8.005(20) MeV高100~200 keV左右, 他们认为这些衰变可能来自于 ^{217}U 的同核异能素态.

表2列出了此次实验观察到的6条 ^{217}U 的衰变链以及每条链的相关信息. 关联链1和2是在实验的第一阶段产生的, 此时 ^{217}U 很大可能性是通过熔合蒸发反应 $^{180}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 3\text{n})^{217}\text{U}$ 产生的. 关联链3~5是在实验的第二阶段产生的, 关联链6是在第三阶段产生的, 这4条关联链被认为是通过 $^{182}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 5\text{n})^{217}\text{U}$ 反应产生的. 这是因为靶中含有8.5%的 ^{182}W , 并且与别的可能产生 ^{217}U 的反应道相比, 该反应道在这两个束流能量下产生 ^{217}U 的可能性最大. 关联链1~4和6中 $\alpha 1$ 的能量相近, 在误差范围之内可以认为是同一个能量值, 由这5个测量值求得的平均 α 粒子能量为8.210(30) MeV. 关联链5中 $\alpha 1$ 的能量是8.098(30) MeV. 虽然和Wakabayashi等人^[29]的观测结果一样, 本次实验的测量值也比报道值8.005(20) MeV高100~200 keV, 然而我们却认为这两个不同能量的 α 衰变应来自 ^{217}U 基态核而并

非它的同核异能素. 这样指认的原因如下:

首先, 从 ^{217}U 附近核($^{218}\text{U}^{[9]}$, ^{216}U , $^{217}\text{Pa}^{[3]}$ 和 $^{216}\text{Th}^{[6]}$)的同核异能素的 α 衰变来看, 同核异能素主要衰变的 α 粒子能量一般要高于基态核的 α 粒子能量约1.5~2.5 MeV. 而本次实验的测量值与文献值的差别只有100~200 keV. 另外, 从 ^{217}U 的最近的三个 $N=125$ 的同中子素 $^{216}\text{Pa}^{[2]}$, $^{215}\text{Th}^{[6]}$ 和 $^{214}\text{Ac}^{[4]}$ 的 α 衰变来看, 至今人们还没有观察它们的具有 α 衰变的同核异能素. 由此认为, 在只有几个事件的低统计量下, 这两个新的 α 衰变不太可能来自 ^{217}U 的同核异能素.

其次, 奇质量的 $N=125$ 的同中子素的 α 衰变都存在精细结构 $^{[5,6,15]}$. 这主要是因为这些核素在进行 α 衰变时会从母核的基态往子核的基态和激发态跃迁. 文献 $^{[30]}$ 利用壳模型给出了奇质量数的 $N=125$ 的同中子素 α 衰变的清晰物理图像. ^{215}Th , ^{213}Ra , ^{211}Rn 和 ^{209}Po 的 α 谱中都存在这样的精细结构, 其中主要的三条 α 衰变线是: 基态到基态的跃迁($1/2^- \rightarrow 5/2^-$), 基态到第一激发态的跃迁($1/2^- \rightarrow 1/2^-$)和基态到第二激发态的跃迁($1/2^- \rightarrow 3/2^-$). 根据这个系统性, ^{217}U 的 α 谱也应该存在这样的精细结构. 早在1968年, Valli等人 $^{[15]}$ 就根据这个系统性预测出 ^{217}U 应该有三条 α 衰变线: 基态到基态的跃迁 $E_\alpha=8.210(50)$ MeV; 基态到第一激发态的跃迁 $E_\alpha=8.070(50)$ MeV; 基态到第二激发态的跃迁 $E_\alpha=8.030(50)$ MeV. 可以看出, 本次实验的测量值8.210(30) MeV和8.098(30) MeV与文献中的预测值8.210(50) MeV和8.070(50) MeV一致. 此外, 文献报道的测量值8.005(20) MeV也与文献预测值8.030(50) MeV在误差范围内一致.

最后, 从文献 $^{[28]}$ 的图4看出, 文献报道的 ^{217}U 的 α 粒子能量8.005(20) MeV明显偏离基态到基态 α 衰变的系统性, 由此可以认为8.005(20) MeV不应该是 ^{217}U 基态到基态跃迁的 α 粒子能量. 而本次实验的测量值8.210(30) MeV却很好地满足这个系统性(如图2). 综合以上几种原因, 我们指认本次测量的 α 粒子能量为8.210(30) MeV的 α 衰变是 ^{217}U 基态到子核基态($1/2^- \rightarrow 5/2^-$)的 α 跃迁; 本次测量的 α 粒子能量为8.098(30) MeV的 α 衰变是 ^{217}U 基态到子核第一激发态($1/2^- \rightarrow 1/2^-$)的 α 跃迁; 而文献报道的能量为8.005(20) MeV的 α 衰变是 ^{217}U 基态到子核第二激发态($1/2^- \rightarrow 3/2^-$)的 α 跃迁. 根据本次实验观察到的6条衰变链, ^{217}U 的半衰期被确定为 $19.3_{-5.6}^{+13.3}$ ms. 图5是本次实验建立起来的 ^{217}U 的衰变纲图, 由于统计量较低,

实验没有确定它的衰变分支比.

3 结论

通过熔合蒸发反应 $^{180}\text{W}(^{40}\text{Ar}, 4n)^{216}\text{U}$, 缺中子新核素 ^{216}U 被合成出来, 它的基态核的 α 粒子能量和半衰期被测定为8.384(30) MeV和 $4.72_{-1.57}^{+4.72}$ ms. 与 ^{216}Th 和 ^{218}U 能级结构相似, ^{216}U 也存在自旋和宇称为 8^+ 的同核异能素, 实验探测到从 ^{216m}U 分别到子核基态(0^+)和子核激发态(8^+)的 α 跃迁, α 粒子能量分别为10.582(30) MeV和8.182(30) MeV, 半衰期为 $1.31_{-0.48}^{+1.80}$ ms. 根据这些测量到的 α 粒子能量, ^{216}U 和 ^{212}Th 的 8^+ 态激发能分别被确定为2239和2445 keV. 在束流能量为187.2 MeV的情况下, ^{216}U 的产生截面约为 300_{-120}^{+170} pb. 除了 ^{216}U 之外, 本次实验还合成了新核素 ^{215}U , 它的 α 粒子能量和半衰期被确定为8.428(30) MeV和 $0.73_{-0.29}^{+1.33}$ ms, 这是 ^{215}U 基态到基态的 α 跃迁. 在束流能量为205.5 MeV的情况下, ^{215}U 的产生截面约为 50_{-30}^{+70} pb. 从实验结果来看, ^{216}U 和 ^{215}U 的基态衰变性质接近, 它们的 α 粒子能量与前人的预测值一致.

本次实验还观察到 ^{217}U 的两条新的 α 衰变: 其中一个衰变的 α 粒子能量为8.210(30) MeV, 它被认为是从母核基态($1/2^-$)到子核基态($5/2^-$)的 α 跃迁; 另一个衰变的 α 粒子能量为8.098(30) MeV, 它被认为是从母核基态($1/2^-$)到子核激发态($1/2^-$)的跃迁. 此外, 文献报道的 α 粒子能量为8.005(20) MeV衰变被指认为是从 ^{217}U 基态到子核第二激发态($3/2^-$)的跃迁. ^{217}U 的半衰期被测定为 $19.3_{-5.6}^{+13.3}$ ms, 这与文献值 $15.6_{-5.7}^{+21.3}$ ms

图5 ^{217}U 的衰变纲图. 其中 α 粒子能量 8.005(20) MeV来自文献 $^{[17]}$

Figure 5 α -decay scheme proposed for ^{217}U . The α -particle energy 8.005(20) MeV is taken from ref. $^{[17]}$

表 3 实验测量的 $^{215-217}\text{U}$ 的 α 衰变性质以及相应的文献值

Table 3 Measured α -particle energies and half-lives of $^{215-217}\text{U}$ and compared with available literature data

α 衰变	I_i^π	I_f^π	E_α (MeV)	$T_{1/2}$ (ms)	E_α (MeV)	$T_{1/2}$ (ms)	文献
			测量值		文献值		
$^{216\text{g}}\text{U}\rightarrow^{212}\text{Th}+\alpha$	0^+	0^+	8.384(30)	$4.72^{+4.72}_{-1.57}$			
$^{216\text{m}}\text{U}\rightarrow^{212}\text{Th}+\alpha$	(8^+)	0^+	10.582(30)	$1.31^{+1.80}_{-0.48}$			
	(8^+)	(8^+)	8.182(30)				
$^{215}\text{U}\rightarrow^{211}\text{Th}+\alpha$	$(5/2^-)$	$(5/2^-)$	8.428(30)	$0.73^{+1.33}_{-0.29}$			
$^{217}\text{U}\rightarrow^{213}\text{Th}+\alpha$	$(1/2^-)$	$(5/2^-)$	8.210(30)	$19.3^{+13.3}_{-5.6}$		$15.6^{+21.3}_{-5.7}$	[17]
	$(1/2^-)$	$(1/2^-)$	8.098(30)				
	$(1/2^-)$	$(3/2^-)$			8.005(20)		

一致。此次实验测量到的 $^{215-217}\text{U}$ 的衰变性质以及相关的文献值都总结在表3中。图2是缺中子 $\text{Rn} \sim \text{U}$ 同位素基态到基态的 α 粒子能量随中子数变化的二维图，

其中实心方块是本次实验测量到的 $^{215-217}\text{U}$ 的基态核的 α 粒子能量。可以看出，此次实验结果很好地符合 α 粒子能量的系统性。

致谢 感谢中国科学院近代物理研究所重离子加速工作人员为本实验提供的稳定束流。感谢中国科学院近代物理研究所气体探测器组的科研人员为实验研制的气体探测器。

参考文献

- Thoennessen M. 2014 updata of the discoveries of nuclides. Int J Mod Phys E, 2015, 24: 1530002
- Heßberger F P, Hofmann S, Ackermann D, et al. Decay properties of neutron-deficient nuclei in the region $Z=86-92$. Eur Phys J A, 2000, 8: 521-535
- Heßberger F P, Hofmann S, Kojouharov I, et al. Radioactive decay of ^{217}Pa . Eur Phys J A, 2002, 15: 335-342
- Kuusiniemi P, Heßberger F P, Ackermann D, et al. Decay studies of $^{214-216}\text{Ac}$ by α - γ - γ -coincidences. Eur Phys J A, 2004, 22: 429-442
- Kuusiniemi P, Heßberger F P, Ackermann D, et al. Studies of $^{213\text{g,m}}\text{Ra}$ and $^{214\text{g,m}}\text{Ra}$ by α and γ decay. Eur Phys J A, 2006, 30: 551-559
- Kuusiniemi P, Heßberger F P, Ackermann D, et al. Decay studies of $^{215-217}\text{Th}$ using ER- γ - α - γ coincidences. Eur Phys J A, 2005, 25: 397-404
- Khuyagbaatar J, Hofmann S, Heßberger F P, et al. Isomeric states in ^{214}Th and ^{213}Th . Eur Phys J A, 2007, 34: 355-361
- Hauschild K, Rejmund M, Grawe H, et al. Isomer spectroscopy in ^{216}Th and the magicity of ^{218}U . Phys Rev Lett, 2001, 87: 072501
- Leppänen A P, Uusitalo J, Leino M, et al. α decay studies of the nuclides ^{218}U and ^{219}U . Phys Rev C, 2007, 75: 054307
- Bergström I, Blomqvist J, Herrlander J C, et al. On the yrast two proton-two neutron hole states in ^{208}Po . Z Phys A, 1978, 287: 219-228
- Poletti A R, Dracoulis G D, Fahlander C, et al. Yrast traps and high-spin states in ^{210}Rn . Nucl Phys A, 1982, 380: 335-364
- Kohn T, Adachi M, Fukuda S, et al. Level structure and electromagnetic properties in ^{212}Ra . Phys Rev C, 1986, 33: 392-395
- Heßberger F P, Hofmann S, Ackermann D. Fine structure in the α -decay of radium isotopes with mass numbers 209-212. Eur Phys J A, 2003, 16: 365-370
- Vermeulen D, Clerc H G, Lang W, et al. ^{212}Th , a new isotope. Z Phys A, 1980, 294: 149-151
- Valli K, Hyde E K. New isotopes of thorium studied with an improved helium-jet recoil transport apparatus. Phys Rev, 1968, 176: 1377-1389
- Valli K, Hyde E K, Borggreen J. Production and decay properties of thorium isotopes of mass 221-224 formed in heavy-ion reactions. Phys Rev C, 1970, 1: 2115-2132
- Malyshev O N, Belozarov A V, Chelnokov M L, et al. The new isotope ^{217}U . Eur Phys J A, 2000, 8: 295-297
- Zhang Z Y, Ma L, Gan Z G, et al. A gas-filled recoil separator, SHANS. Nucl Instr Meth B, 2013, 317: 315-318
- Reisdorf W, Schädel M. How well do we understand the synthesis of heavy elements by heavy-ion induced fusion? Z Phys A, 1992, 343: 47-57

- 20 Reisdorf W. Analysis of fissionability data at high excitation energies. *Z Phys A*, 1981, 300: 227–238
- 21 Folden C M. Development of odd-Z-projectile reactions for transactinide element synthesis. Dissertation for Doctoral Degree. Berkeley: University of California, 2004
- 22 Schmidt K H, Sahm C C, Pielenz K, et al. Some remarks on the error analysis in the case of poor statistics. *Z Phys A*, 1984, 316: 19–26
- 23 Leppänen A P. Alpha-decay and decay-tagging studies of heavy elements using the RITU separator. Dissertation for Doctoral Degree. Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2005
- 24 Rasmussen J O. Alpha-decay barrier penetrabilities with an exponential nuclear potential: Even-even nuclei. *Phys Rev*, 1959, 113: 1593–1598
- 25 Firestone R B, Shirley V S. Table of Isotopes. New York: Wiley, 1996. 8886–8984
- 26 Heßberger F P, Hofmann S, Kojouharov I, et al. Decay properties of isomeric states in radium isotopes close to $N=126$. *Eur Phys J A*, 2004, 22: 253–260
- 27 Ma L, Zhang Z Y, Gan Z G, et al. α -decay properties of the new isotope ^{216}U . *Phys Rev C*, 2015, 91: 051302(R)
- 28 Yang H B, Zhang Z Y, Wang J G, et al. Alpha decay of the new isotope ^{215}U . *Eur Phys J A*, 2015, 51: 88
- 29 Wakabayashi Y, Nishio K, Mitsuoka S, et al. Attempt to synthesize a new neutron-deficient isotope, ^{216}U . *RIKEN Accel Prog Rep*, 2012, 45: 12
- 30 Xu C, Ren Z Z. α -decay studies of the exotic $N=125$, 126, and 127 isotones. *Phys Rev C*, 2007, 76: 027303

α decay studies of the neutron-deficient uranium isotopes $^{215-217}\text{U}$

GAN ZaiGuo¹, JIANG Jian^{1,2}, YANG HuaBin^{1,2,3}, ZHANG ZhiYuan¹, MA Long^{1,2,3}, YU Lin^{1,2}, WANG JianGuo¹, TIAN YuLin¹, DING Bing¹, HUANG TianHeng¹, WANG YongSheng¹, GUO Song¹, SUN MingDao^{1,2,3}, WANG KaiLong^{1,2}, ZHOU ShanGui⁴, REN ZhongZhou⁵, ZHOU XiaoHong¹ & XU HuShan¹

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

² School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁴ Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 102413, China;

⁵ School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

The α -decay study is an important tool for obtaining information on the nuclear structure of heavy neutron-deficient nuclei. For the $N=126$ and 124 isotones with even proton number, an intruder state $(\pi h_{9/2} \pi f_{7/2})8^+$ based on the attractive interaction of $f_{7/2}$ protons and $f_{5/2}$ neutrons was observed, which increases the binding energy of this configuration with increasing proton number. Additionally, taking into account the octupole correlations, a large-scale shell model calculations predict that the $(\pi h_{9/2} \pi f_{7/2})8^+$ state lies close or below the $(\pi h_{9/2}^2)6^+$ state in the ^{216}Th and ^{218}U . To extend the systematic of the $I^\pi=8^+$ isomeric state in $N=124$ isotones and search for the most neutron-deficient uranium isotopes, an experiment for the α -decay studies of $^{215-217}\text{U}$ was performed at the gas-filled recoil separator SHANS at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL). Heavy ion induced fusion evaporation reactions of the $^{180}\text{W}(^{40}\text{Ar}, xn)^{220-x}\text{U}$ ($x=3-5$) were used to synthesize these neutron-deficient uranium isotopes. The ^{40}Ar beam was delivered by the sector focusing cyclotron of the HIRFL. The evaporation residues recoiled from the thin target were separated in-flight from the primary beam particles by the gas-filled recoil separator SHANS. After passing through two multi-wire proportional counters, the residues were planted into a focal plane detection system. Based on the energy-position-time correlation measurement, the isotopes $^{215-217}\text{U}$ were identified. At a beam energy of 187.2 MeV , two α -decaying states were observed in ^{216}U with $E_\alpha=8.384(30)\text{ MeV}$, $T_{1/2}=4.72^{+4.72}_{-1.57}\text{ ms}$ for the ground state and $E_\alpha=10.582(30)\text{ MeV}$ and $8.182(30)\text{ MeV}$, $T_{1/2}=1.31^{+1.80}_{-0.48}\text{ ms}$ for an isomeric state. Through the analysis of the α -decay reduced width, the isomeric state is suggested to have the configuration $(\pi h_{9/2} \pi f_{7/2})8^+$. At the beam energy of 205.5 MeV , two decay chains of ^{215}U were observed and they were assigned to the decays from ground state to ground state transitions. The α -particle energy and half-life of ^{215}U were determined to be $8.428(30)\text{ MeV}$ and $0.73^{+1.33}_{-0.29}\text{ ms}$, respectively. In addition, two new α -decay transitions of ^{217}U with α -particle energy of $8.210(30)\text{ MeV}$ and $8.098(30)\text{ MeV}$ were also observed in this experiment, and they were assigned to the decay of ^{217}U populating the ground state and one low-lying excited state in ^{213}Th , respectively.

new neutron-deficient nuclide, fusion evaporation reaction, gas-filled recoil separator, α -particle energy, half-life, isomer

doi: 10.1360/N972015-01316