

ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРОВ В (e, e')-РАССЕЯНИИ

И. Н. Вишнеvский, В. А. Желтоножский, А. Г. Зелинский, В. И. Кирищук,
Н. В. Стрильчук, П. Н. Трифонов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

На линейном ускорителе электронов ИЯИ НАН Украины были измерены сечения разрядки ^{180m}Ta и возбуждения ^{176m}Lu , ^{113m}In и ^{115m}In при рассеянии электронов с энергиями до 3 МэВ. Впервые измерены сечение разрядки $\sigma(^{180m}\text{Ta}) = (9 \pm 2) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ и сечение возбуждения $\sigma(^{176m}\text{Lu}) = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ при энергии электронов 3 МэВ.

Введение

Хотя фотовозбуждение ядер изучается уже не одно десятилетие, интерес к этому процессу не ослабевает.

Возбуждение изомеров при электромагнитном взаимодействии фотонов с ядром происходит известными каналами резонансного фотовозбуждения, неупругого рассеяния фотонов, кулоновского возбуждения. Рассматриваются и менее вероятные процессы одновременного возбуждения ядра и атомной оболочки.

Особый интерес представляет исследование фотовозбуждения долгоживущих изомеров ядер. В недавних экспериментах был обнаружен ускоренный распад ^{178m}Hf ($T_{1/2} = 31$ год) под действием низкоэнергетического тормозного излучения. В эксперименте на сверхмощном фотонном источнике [1] было обнаружено, что стимулированный распад ^{178m}Hf происходит при таких энергиях фотонов, при которых эффективно ионизируются определенные ядерные оболочки [2].

Представляет интерес исследование процессов фотоэлектровозбуждения и разрядки других долгоживущих ядерных изомеров. Некоторые из них представляют интерес и для астрофизики. Так, учет возбуждения ^{176}Lu и ^{180m}Ta при резонансном поглощении фотонов и электронов сильно влияет на оценку распространенности этих нуклидов, и это может пролить свет на аномальное содержание этих изотопов в природе.

В настоящей работе были проведены исследования возбуждения ^{180}Ta , ^{176m}Lu , ^{113m}In и ^{115m}In в (e, e')-рассеянии, поскольку электроны более эффективно ионизируют атомные электронные оболочки и, кроме того, вносят больший угловой момент, чем фотоны. Выбор тантала связан также с тем, что в нем имеется естественный высокоспиновый изомер ^{180m}Ta , на котором началось изучение стимуляции распада ядерных изомеров [3, 4].

Методика эксперимента и результаты

На линейном ускорителе электронов ИЯИ НАН Украины нами проведены измерения сече-

ния разрядки ^{180m}Ta при энергии электронов 3, 2 и 1 МэВ, точность измерения энергии составила 0,5 МэВ. При облучении на пучке электронов использовались мишени толщиной 60 мкм из естественного тантала при энергии 3 МэВ и 110 мкм для энергий 2 и 1 МэВ. Первая мишень облучалась прямым пучком электронов с ускорителя, вторая и третья мишени располагались за алюминиевыми поглотителями с толщинами, которые позволяли уменьшить энергию электронов до 2 и 1 МэВ соответственно. Более "толстые" мишени для меньших энергий были выбраны с учетом уменьшения сечения (e, e')-рассеяния при уменьшении энергии электронов.

Для определения среднего тока электронов на мишени использовался образец из естественного индия толщиной 300 мкм, который облучался пучком электронов одновременно с облучением тантала. При этом происходило возбуждение электронами хорошо изученного изомера ^{115}In [5], схема распада которого показана на рис. 1.

$N \cdot 10^2$

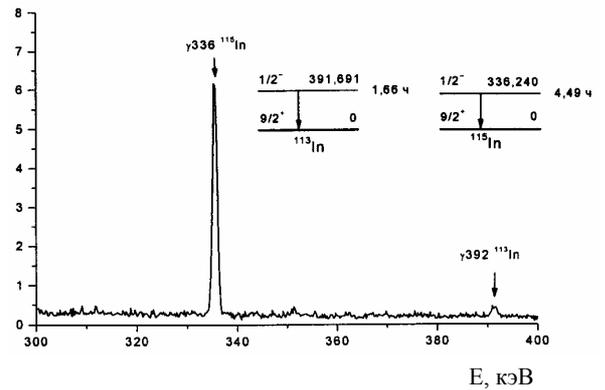


Рис. 1. Схемы распада изомеров индия ^{113m}In и ^{115m}In и участок γ -спектра, измеренный после облучения мишени электронами с энергией 3 МэВ.

Измерения проводились на полупроводниковом спектрометре с Ge-детектором, имеющим эффективность регистрации 40 % (по сравнению с NaI(Tl)-детектором объемом 3" x 3") и энергетическое разрешение 1,5 кэВ на $\gamma 662$ кэВ ^{137}Cs . В качестве калибровочного источника использо-

вался ^{133}Ba , в спектре распада которого имеются интенсивные γ -линии в области 53 - 400 кэВ. На рис. 1 показан также γ -спектр облученного образца естественного индия. Как видно, в спектре с высокой эффективностью регистрируются не только $^{115\text{m}}\text{In}$, но и $^{113\text{m}}\text{In}$, содержание которого в мишени около 4 %. Используя сечения возбуждения $^{115\text{m}}\text{In}$ электронами с энергией 3 МэВ из работы [6] ($\sigma = 2,4 \pm 0,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2$), мы рассчитали ток электронов на мишени, который составлял $\bar{I} = 0,34 \pm 0,4 \text{ мкА/см}^2$.

Для определения сечения разрядки $^{180\text{m}}\text{Ta}$ в (e, e')-рассеянии облученные на протяжении 4 ч образцы тантала были измерены на детекторах из сверхчистого германия с бериллиевым окном последовательными сериями по 8 ч. γ -спектр облученного образца тантала при энергии 3 МэВ показан на рис. 2, там же приведена схема распада $^{180\text{m}}\text{Ta}$. γ -линию 93 кэВ в распаде $^{180\text{g}}\text{Ta}$ для определения сечения разрядки $^{180\text{m}}\text{Ta}$ нам использовать не удалось, так как она совпадает по энергии с фоновой γ -линией тория, и в то же время интенсивность γ -линии 103 кэВ недостаточна для точных измерений сечения. Поэтому идентификация распада $^{180\text{g}}\text{Ta}$ проводилась по рентгеновским линиям гафния, образующимся при электронном захвате (см. рис. 2). Для того, чтобы убедиться, что наблюдаемое K_{α} -излучение принадлежит распаду $^{180\text{g}}\text{Ta}$, из измерений K_{α} -излучения в различных сериях был также вычислен период полураспада, который оказался равен $T_{1/2} = 8 \pm 1 \text{ ч}$. Как видно, он находится в хорошем согласии с ранее измеренным значением (см. рис. 2).

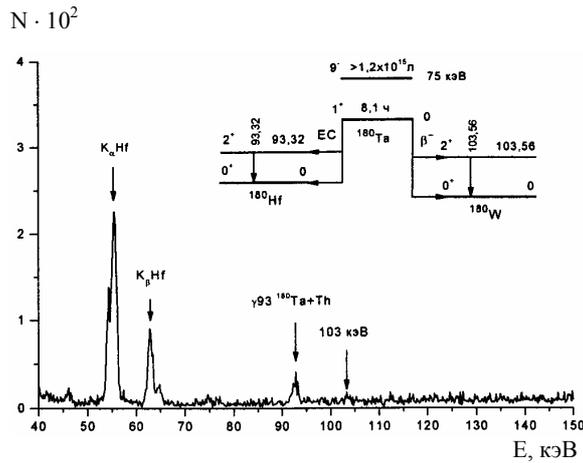


Рис. 2. Схема распада $^{180\text{m}}\text{Ta}$ и участок γ -спектра, измеренный после облучения электронами 3 МэВ.

Одновременно было проведено измерение рентгеновских и γ -спектров при облучении мишеней тантала электронами с энергией 1 и 2 МэВ.

После обработки спектров, зная ток электронов на мишени, определенный по возбуждению $^{115\text{m}}\text{I}$, были получены сечения разрядки $^{180\text{m}}\text{Ta}$ в (e, e')-рассеянии. Для электронов с энергией 3 МэВ сечение составляет $\sigma = (9 \pm 2) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$, для 2 МэВ - $\sigma = (2,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ и для 1 МэВ - $\sigma = (2,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$.

Нами были также проведены измерения возбуждения изомерного состояния в ^{176}Lu . Схемы распада основного и изомерного состояния ^{176}Lu показаны на рис. 3. В качестве мишени использовали обогащенный изотоп ^{176}Lu , напыленный на алюминиевую фольгу. Облучение проводилось на пучке электронов с энергией 3 МэВ.

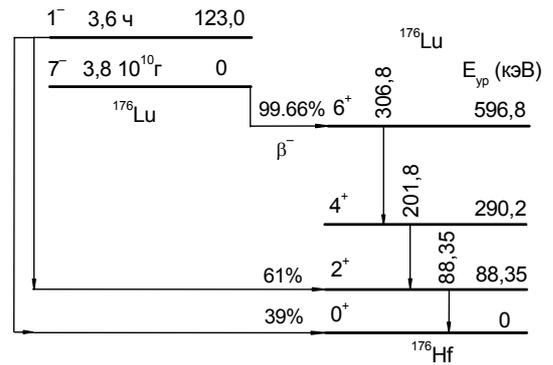


Рис. 3. Схема уровней ^{176}Hf , заселяемых в β -распаде $^{176\text{m}}\text{Lu}$.

Как видно из схем распада, единственная γ -линия с энергией 88 кэВ, которая сопровождает распад $^{176\text{m}}\text{Lu}$, присутствует также и в распаде основного состояния ^{176}Lu .

Для того, чтобы выделить γ 88 кэВ из распада $^{176\text{m}}\text{Lu}$, мы проводили измерения на антикомптоновском спектрометре с Ge-детектором с бериллиевым окном, имеющем максимальную эффективность регистрации γ -квантов в области 70 - 80 кэВ. Измеренные спектры γ -лучей приведены на рис. 4.

Из схемы уровней видно, что γ 88 кэВ из распада основного состояния ^{176}Lu будет регистрироваться только в спектре совпадений, так как она находится в каскаде с двумя γ -линиями - 201 и 306 кэВ, а γ 88 кэВ, из распада изомерного состояния $^{176\text{m}}\text{Lu}$, будет регистрироваться только в спектре антисовпадений. Такую ситуацию мы и наблюдаем при измерении спектров после облучения: в спектре антисовпадений наблюдается γ 88 из распада $^{176\text{m}}\text{Lu}$ (см. рис. 4). В этом же режиме были проведены фоновые измерения, которые проводились через $t = 10 T_{1/2}$ с этим образцом лютеция. Полученные спектры представлены на рис. 4 (в, г). Как видно, в спектре антисовпадений отсутствует линия с энергией 88 кэВ, что однозначно подтверждает возбуждение

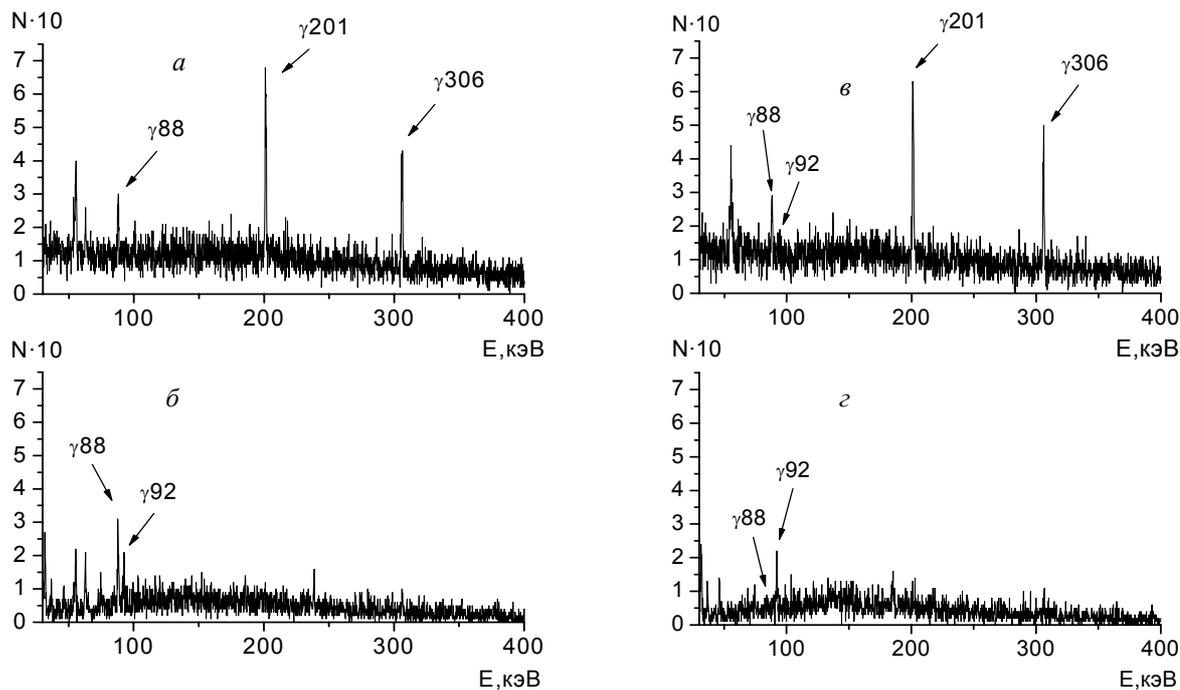


Рис. 4. Гамма-спектры совпадений (а) и антисовпадений (б) при распаде ^{176m}Lu , измеренные на антикомптоновском спектрометре сразу после облучения; в, г - γ -спектры совпадений и антисовпадений облученной мишени ^{176}Lu , измеренные на антикомптоновском спектрометре через время, равное 10 периодам полураспада ^{176m}Lu .

^{176m}Lu в нашем эксперименте. Из полученных данных о интенсивности γ_{88} кэВ в спектре совпадений было рассчитано сечение возбуждения ^{176m}Lu электронами, которое оказалось равным $\sigma = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$.

Обсуждение

Сечения возбуждения в ^{180}Ta и ^{176m}Lu при энергии электронов 3 МэВ оказались на три порядка больше, чем сечения возбуждения ^{113m}In и ^{115m}In [5], где $\sigma = 3 \pm 1 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2$, $\sigma = 2,4 \pm 0,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}^2$ соответственно. Точно такое же увеличение вероятности возбуждения этих изомеров наблюдается и в (γ, γ') -реакциях [3, 4]. Природа этого явления пока детально не изучена, однако можно отметить, что такое увеличение вероятности наблюдается только в деформированных ядрах.

Состояния как в ^{176}Lu , так и в ^{180m}Ta различаются не только большими значениями углового момента ΔI , но и такими же большими значениями ΔK . Как известно, запрет по К приводит к большим значениям $T_{1/2}$, так как на каждую единицу К-величины приходится увеличение периода полураспада на два порядка.

Можно предположить, что в (e, e') - и (γ, γ') -рассеянии равновероятно заселяются состояния с одинаковыми значениями спинов, но с разными значениями К. Именно это приводит к увеличению вероятности заселения К-изомеров.

К сожалению, полученные данные о возбуждении ^{180m}Ta при энергиях электронов 2 и 1 МэВ нелегко интерпретировать однозначно, поскольку сейчас не представляется возможным отделить вклад электронов от вклада тормозного излучения на тормозной мишени из алюминия и в танталовой мишени.

Тем не менее необходимо отметить, что сечение возбуждения ^{180}Ta и ^{176m}Lu оказалось возможным экспериментально определить при довольно низких энергиях (до 3 МэВ) и токах (до $0,4 \text{ мкА/см}^2$) электронного пучка. Таким образом, электроны действительно оказываются более эффективными, чем тормозное излучение для исследования возбуждения ядерных изомеров. Этот экспериментальный результат может быть важен для понимания явления стимулирования распада $^{178m2}\text{Hf}$, хотя и эксперименты, и теоретический анализ в этом направлении необходимо продолжить.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Collins C. B., Zoita N. C., Davanloo F. et al. Accelerated decay of the 31-yr isomer of Hf-178 induced by low-energy photons and electrons // Laser Phys. - 2004. - Vol. 14. - P. 1 - 12.
2. Kirischuk V. I., Strilchuk N. V., Zheltonozhsky V. A. Accelerated Decay of Long-Lived Nuclear Isomers and Nuclides Induced by Low-Energy Photons and Electrons // Proc. of the II Intern. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics". - Nizhni Novgorod, 2004. - P. 477 - 481.
3. Collins C. B., Carroll J. J., Sinor T. W. et al. Resonant excitation of the reaction $^{180}\text{Ta}^m(\gamma, \gamma')^{180}\text{Ta}$ // Phys. Rev. C. - 1990. - Vol. 42. - P. R1813 - R1816.
4. Belic D., Arlandini C., Besserer J. et al. Photoactivation of $^{180}\text{Ta}^m$ and Its Implications for the Nucleosynthesis of Nature's Rarest Naturally Occurring Isotope // Phys. Rev. Lett. - 1999. - Vol. 83. - P. 5242 - 5245.
5. Booth E. C. and Brownson J. Electron and photon excitation of nuclear isomers // Nucl. Phys. A - 1967. - Vol. 98. - P. 529 - 541.

ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРІВ У (e, e')-РЕАКЦІЇ

**І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, А. Г. Зелінський, В. І. Кирищук,
М. В. Стрільчук, П. М. Трифонов**

На лінійному прискорювачі електронів ІЯД НАН України було виміряно перерізи розрядки ^{180m}Ta та збудження ^{176m}Lu , ^{113m}In і ^{115m}In при розсіянні електронів з енергіями до 3 МеВ. Уперше виміряно переріз розрядки $\sigma(^{180m}\text{Ta}) = (9 \pm 2) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ та переріз збудження $\sigma(^{176}\text{Lu}) = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ при енергії електронів 3 МеВ.

ISOMER EXCITATION IN (e, e')-REACTION

**I. N. Vishnevsky, V. A. Zheltonozhsky, A. G. Zelinsky, V. I. Kirischuk,
N. V. Strilchuk, P. N. Trifonov**

^{180m}Ta deexcitation and ^{176m}Lu , ^{113m}In and ^{115m}In excitation cross-sections have been measured for the energy of electrons up to 3 MeV at the electron linear accelerator of Institute for Nuclear Research of National Academy of Sciences of Ukraine. For the first time ^{180m}Ta deexcitation cross-section $\sigma(^{180m}\text{Ta}) = (9 \pm 2) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ and ^{176m}Lu excitation cross-section $\sigma(^{176m}\text{Lu}) = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ have been measured at the energy of electrons of 3 MeV.

Поступила в редакцію 29.03.06,
после доработки – 26.04.06.