

## О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА АТОМНЫХ ЯДЕР

*В. Л. Михеев, В. А. Морозов, Н. В. Морозова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Предпринята попытка изменения скорости радиоактивного распада атомных ядер за счет интерференции волновых функций исходного ядра и ядер, идентичных продуктам радиоактивного распада. Первые эксперименты были проведены с  $^{212}\text{Po}$ , испытывающим  $\alpha$ -распад с периодом полураспада 0,3 мкс. Для  $^{212}\text{Po}$ , имплантированного в натуральный металлический свинец, было зарегистрировано увеличение скорости распада на  $\sim 0,2\%$  по сравнению со скоростью распада  $^{212}\text{Po}$  в никеле.

An attempt has been made aimed at a change in the decay rate of atomic nuclei using an assumption of interference of wave functions of the initial nucleus and those of nuclei identical to radioactive decay products. The first experiments have been carried out with  $\alpha$ -emitter  $^{212}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 0.3 \mu\text{s}$ ) implanted into natural lead. An increase in the decay rate of  $\sim 0.2\%$  has been registered as compared with that in nickel environment.

PACS: 21.10.Tg; 23.60.+e

### ВВЕДЕНИЕ

Поиски способов влияния на скорость радиоактивного распада ведутся с первых лет становления ядерной физики [1, 2]. Реализованные до сих пор подходы можно охарактеризовать как силовые (динамические), использующие прежде всего изменение энергетического баланса радиоактивного распада: создание изомерных состояний, вариации энергии химической связи в молекулах с радиоактивными атомами,  $\beta$ -распад на связанные состояния в ионизированных атомах. Наиболее тщательно измерено изменение скорости распада  $^7\text{Be}$ . Было зарегистрировано изменение скорости  $K$ -захвата на величину  $\sim 10^{-2}$  за счет влияния энергии химической связи и атомной конфигурации окружения (включая измерения с  $^7\text{Be}$ , помещенным внутри фуллерена  $\text{C}_{60}$ ) [2–4]. Существенно большие эффекты проявляются при  $\beta$ -распаде на связанные состояния электронов в дочерних ионизированных атомах [5]. Полная ионизация  $^{163}\text{Du}$  в накопительном кольце ускорителя тяжелых ионов делает возможным его  $\beta$ -распад на  $K$ -оболочку  $^{163}\text{Ho}$  с периодом полураспада 47 сут, в то время как в нейтральном атоме распад энергетически невозможен [6].

Аналогичный эффект получен и для  $^{187}\text{Re}$  [7]. Весьма интригующими кажутся результаты по изменению скорости распада мессбауэровских изомеров за счет интерференции

электромагнитных волн в системе мессбауэровского излучателя и расположенного на расстоянии  $\sim 2$  мм экрана из тех же атомов в основном состоянии [8]. Величина измеренного относительного изменения скорости распада  $^{119m}\text{Sn}$  и  $^{125m}\text{Te}$  достигает  $\sim 10\%$ .

В работе [9] при изучении ядерных реакций  $d + d$ ,  $\text{Li} + p$ ,  $\text{Be} + p$  в металлических средах было получено существенное увеличение сечения подбарьерного слияния по сравнению с сечениями реакций в неметаллической среде. Авторы объяснили наблюдаемый эффект за счет дебаевского экранирования электронами металла зарядов взаимодействующих ядер, которое может привести к существенному снижению барьера взаимодействия. Согласно этой идее, оценено возможное изменение периода  $\alpha$ -распада  $^{210}\text{Po}$  в металлической среде, охлажденной до 4 К, со 138 сут до 0,5 сут, а  $^{226}\text{Ra}$  с 1600 лет до 1,3 года соответственно.

Однако теоретические оценки этих эффектов в работе [10] привели к выводам, что электронное экранирование не может дать существенного изменения скорости  $\alpha$ -распада.

В настоящей работе впервые делается попытка использовать для влияния на скорость  $\alpha$ -распада тождественность ядра продукта распада и ядер атомов среды, в которую помещен радиоактивный атом. С учетом различия размеров ядер и межатомных расстояний в твердотельной среде проверяется возможность не динамического, а своего рода информационного [11] воздействия на процессы сильного взаимодействия ядерных частиц, результатом которого, в частности, является  $\alpha$ -распад.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

В случае альфа-распада  $^{212}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 0,3$  мкс) за счет механизма образования этого нуклида в природном радиоактивном семействе  $^{232}\text{Th}$  имеется возможность за счет отдачи предшественников имплантировать  $^{212}\text{Po}$  в твердотельную среду (например, металлический свинец), содержащую ядра  $^{208}\text{Pb}$ , идентичные дочерним ядрам, образующимся в результате распада  $^{212}\text{Po}$ .

При этом небольшая глубина имплантации позволяет вести эффективную регистрацию как  $\alpha$ -частиц, так и предшествующих им  $\beta$ -частиц. Короткое время жизни  $^{212}\text{Po}$  позволяет измерять его распад на протяжении более 10 периодов полураспада.

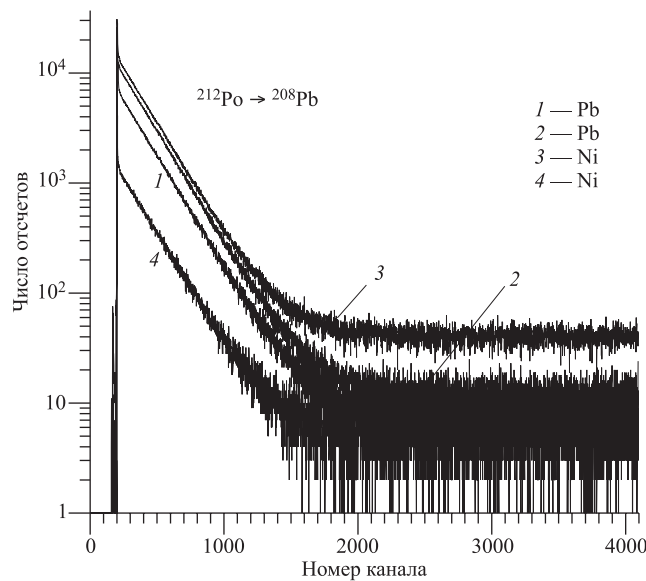
В наших экспериментах источники ядер  $^{212}\text{Po}$  приготавливались методом электростатического сбора ионизированных продуктов распада его предшественников в радиоактивном семействе с помощью эманатора, конструкция которого была аналогична той, которую использовали основатели ядерной физики. Это герметичный объем, в который заложено  $\sim 10$  г порошка окиси  $^{232}\text{Th}$  и введены два электрода для создания электростатического поля с напряженностью  $\sim 100$  В/см. Сборники ионизированных продуктов распада  $^{220}\text{Rn}$ , выделяемого порошком окиси тория в воздушную среду эманатора, располагались на катоде. Свинцовые сборники были сделаны из пластинок натурального свинца (содержание изотопа  $^{208}\text{Pb}$  — 52,4 %) толщиной 2 мм. Перед помещением в эманатор поверхность свинца очищалась от окислов до зеркального блеска путем аккуратного механического срезания окисленных слоев и уплотнения полученной поверхности прессовым усилием  $\sim 1000$  кг/см<sup>2</sup>. Использувавшиеся в контрольных опытах никелевые сборники были сделаны из полированной фольги толщиной 50 мкм.

После суточной экспозиции сборника в эманаторе исходная  $\alpha$ -активность  $^{212}\text{Po}$  составляла  $\sim 10^3$  распадов в секунду за счет цепочки распадов:  $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$  лет)  $\rightarrow$

→  $^{228}\text{Ra}$  (5,7 года) →  $^{228}\text{Ac}$  (6,13 ч) →  $^{228}\text{Th}$  (1,9 года) →  $^{224}\text{Ra}$  (3,64 сут) →  $^{220}\text{Rn}$  (55,6 с) →  
 →  $^{216}\text{Po}$  (0,15 с) →  $^{212}\text{Pb}$  (10,6 ч) →  $^{212}\text{Bi}$  (60,6 мин) →  $^{212}\text{Po}$  (0,3 мкс) →  $^{208}\text{Pb}$ .

Положение  $^{212}\text{Po}$  в сборнике определяется положением  $^{212}\text{Pb}$  благодаря малому эффекту отдачи при  $\beta$ -распаде. Механизм сбора ионизованных атомов в эманаторе приводит к тому, что половина  $^{212}\text{Pb}$  имплантируется в сборник на глубину до  $24 \text{ мкг/см}^2$  в свинцовом эквиваленте ( $\sim 200$  атомных слоев) за счет отдачи ядер  $^{212}\text{Pb}$  при  $\alpha$ -распаде  $^{216}\text{Po}$ . Другая половина ионов  $^{212}\text{Pb}$  адсорбируется на поверхности сборника. В экспериментах со свинцовыми сборниками мы проводили термовакуумное напыление добавочного свинцового слоя толщиной  $\sim 500 \text{ мкг/см}^2$  на поверхность сборника после его экспозиции в эманаторе, чтобы обеспечить полное погружение всех атомов  $^{212}\text{Po}$  в свинцовую среду.

Измерение кривых распада  $^{212}\text{Po}$  проводилось на однокристалльном сцинтилляционном спектрометре задержанных  $\beta$ - $\alpha$ -совпадений [12]. Начальная отметка времени задавалась регистрацией  $\beta$ -частицы  $^{212}\text{Bi}$ . Стоп-сигнал задержанных совпадений определялся регистрацией  $\alpha$ -частицы  $^{212}\text{Po}$ . Для регистрации  $\beta$ - и  $\alpha$ -частиц использовался один и тот же пластмассовый сцинтиллятор NE104. Результаты измерений представлены на рисунке.



Кривые распада  $^{212}\text{Po}$ , собранного на свинцовый сборник без последующего термовакуумного покрытия свинцом (1) и с добавочным напыленным слоем свинца  $\sim 500 \text{ мкг/см}^2$  (2); 3, 4 — кривые распада  $^{212}\text{Po}$ , собранного на никелевых фольгах с фоновым плато случайных совпадений выше и ниже уровней фоновых плато в измерениях со свинцовыми сборниками. Цена временного канала равна 1,99 нс

При математической обработке кривых распада мы получили для  $^{212}\text{Po}$ , собранного на свинцовый сборник без последующего запыления свинцом, величину  $[T_{1/2}(\text{Pb}) - T_{1/2}(\text{Ni})] = (-0,22 \pm 0,33)$  нс. Для разности периодов полураспада  $^{212}\text{Po}$ , имплантированного в натуральный свинец с запылением добавочным слоем свинца, и  $^{212}\text{Po}$ ,

собранного на никелевой подложке, обработка результатов измерений дает значение  $[T_{1/2}(\text{Pb}) - T_{1/2}(\text{Ni})] = (-0,66 \pm 0,25)$  нс. Величина наблюдаемого в этом случае эффекта в 2,6 раза превышает стандартную ошибку. Статистическая значимость полученного результата превышает 95 %, но, конечно, требует увеличения, достижимого в дальнейших экспериментах. Табличное значение периода полураспада  $^{212}\text{Po}$  равно  $(299 \pm 2)$  нс [13]. Соответственно, измеренное нами относительное увеличение скорости  $\alpha$ -распада  $^{212}\text{Po}$  составляет  $\sim 0,2$  %.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние электромагнитных взаимодействий для разных конфигураций электронного окружения через изменение кулоновской части потенциального барьера может дать для изменения скорости  $\alpha$ -распада величину  $\sim 10^{-7}$  [2], что существенно меньше наблюдаемого нами эффекта. Представляется допустимым рассматривать полученный результат как указание на возможность влияния на скорость  $\alpha$ -распада ядер путем формирования поля волновых функций объектов, находящихся друг от друга на расстояниях порядка межатомных.

Естественно, необходимы дальнейшие эксперименты по повышению точности полученных результатов и поиски путей увеличения наблюдаемого эффекта. Можно отметить использование в опытах разделенных изотопов свинца, измерения в среде жидкого  $^4\text{He}$ , ядра которого идентичны  $\alpha$ -частицам. Опыты с кристаллическими соединениями свинца представляются особенно важными, поскольку в системе упорядоченных излучателей интерференция любых волн (включая квантово-механические) может сформировать высокоинтенсивные амплитудные максимумы. Необходимо детальное теоретическое рассмотрение возможных процессов.

Все частицы, участвующие в процессе  $\alpha$ -распада  $^{212}\text{Po}$ , можно рассматривать как бозоны. Соответственно, при совпадении состояний (импульсов)  $^{208}\text{Pb}$ , образующегося при  $\alpha$ -распаде  $^{212}\text{Po}$ , и ядер  $^{208}\text{Pb}$  в окружающей среде можно ожидать увеличения вероятности распада пропорционально общему числу конечных ядер  $^{208}\text{Pb}$  в окружении исходного ядра  $^{212}\text{Po}$ .

Для количественных расчетов нужна информация о механизме приобретения энергии (импульса) продуктами  $\alpha$ -распада при преодолении потенциального барьера. В экспериментах и теории этот вопрос не получил определенного решения. Требуется и анализ вероятности состояний  $^{208}\text{Pb}$  в твердотельной среде, перекрывающихся с состояниями  $^{208}\text{Pb}$ , образующегося в процессе  $\alpha$ -распада  $^{212}\text{Po}$ . В нашем случае волновые функции ядер атомов свинцовой среды не являются когерентными. Однако можно отметить, что результирующая интенсивность интерференции колебаний с произвольными фазами (в том числе и волновых функций) от  $n$  источников изменяется в диапазоне пропорциональности между 0 и  $n^2$  при среднем значении  $n$  [14].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кюри М.* Радиоактивность: Пер. с фр. М.; Л.: ОГИЗ, 1947.
2. *Emery G.T.* Perturbation of Nuclear Decay Rates // *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 1972. V. 22. P. 165–202.
3. *Ohtsuki T. et al.* Enhanced Electron–Capture Decay of  $^7\text{Be}$  Encapsulated in  $\text{C}_{60}$  Cages // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 93, No. 11. P. 112501–112504.

4. Nir-El Y. *et al.* Precision Measurement of the Decay Rate of  ${}^7\text{Be}$  in Host Materials // *Phys. Rev. C.* 2007. V. 75, No. 1. P. 012801(R)–012804.
5. Takahashi K. *et al.* Bound-State Beta Decay of Highly Ionized Atoms // *Phys. Rev. C.* 1987. V. 36, No. 4. P. 1522–1528.
6. Jung M. *et al.* First Observation of Bound-State  $\beta^-$ -Decay // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 69, No. 15. P. 2164–2167.
7. Bosch F. *et al.* Observation of Bound-State  $\beta^-$ -Decay of Fully Ionized  ${}^{187}\text{Re}$  // *Phys. Rev. Lett.* 1996. V. 77, No. 26. P. 5190–5193.
8. Годовиков С. К. Управление процессом радиоактивного распада долгоживущих мессбауэровских изомеров // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2001. Т. 65, № 7. С. 1063–1067.
9. Kettner K. U. *et al.* High  $Z$  Electron Screening: the Cases  ${}^{50}\text{V}(p, n){}^{50}\text{Cr}$  and  ${}^{176}\text{Lu}(p, n){}^{176}\text{Hf}$  // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2006. V. 32, No. 4. P. 489–495.
10. Zimmer N. T. Alpha-Decay Rate Enhancement in Metals: an Unlikely Scenario // *Nucl. Phys. A.* 2007. V. 781, No. 1–2. P. 81–87.
11. Кадоццев Б. Б. Динамика и информация // *УФН.* 1994. Т. 64, № 5. С. 449–530; М.: Ред. УФН, 1999.
12. Morozov V. A. *et al.* High Sensitivity Delayed-Coincidence Spectrometer to Search for Short-Lived Nuclear States // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 484, No. 1–3. P. 225–232.
13. Brown E. Nuclear Data Sheets for  $A = 212$  // *Nucl. Data Sheets.* 2005. V. 104, No. 2. P. 427–495.
14. Стретт Дж. В. (лорд Рэлей). Волновая теория света: Пер. с англ. М.: УРСС, 2004.

Получено 4 июля 2007 г.