

## ИЗМЕРЕНИЕ ИЗОТОПИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЗАРЯДОВЫХ РАДИУСОВ ЯДЕР ЕВРОПИЯ МЕТОДОМ ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ ЛАЗЕРНОЙ ФОТОИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

*Г.Д.Алхазов, А.Е.Барзах, Э.Е.Берлович, В.П.Денисов,  
А.Г.Дернятин, В.С.Иванов, А.Н.Жерихин, О.Н.Компанец, В.С.Летохов,  
В.И.Мишин, В.Н.Федосеев*

Впервые методом лазерной многоступенчатой фотоионизации атомов измерены оптические изотопические сдвиги в атомных спектрах и определены изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов радиоактивных ядер. Измерения выполнены для радиоактивных изотопов  $^{145-149}\text{Eu}$  на переходе  $4f^7 6s^2 \text{ } ^8S_{7/2}^0 - 4f^7 6s 6p \text{ } ^6P_{7/2}$ ,  $\lambda = 576,5 \text{ нм}$ .

Высокая чувствительность и высокая разрешающая способность методов лазерной спектроскопии позволяет по изотопическим сдвигам (ИС) и сверхтонкой структуре оптических линий измерять характеристики основных и изомерных состояний короткоживущих ядер (спины, магнитные и квадрупольные моменты), а также изотопические изменения зарядовых радиусов ядер. Такие исследования проведены методом коллинеарной флуоресцентной лазерной спектроскопии <sup>1</sup> и методом лазерного оптического магнитного резонанса <sup>2</sup> для длинных цепочек изотопов некоторых элементов.

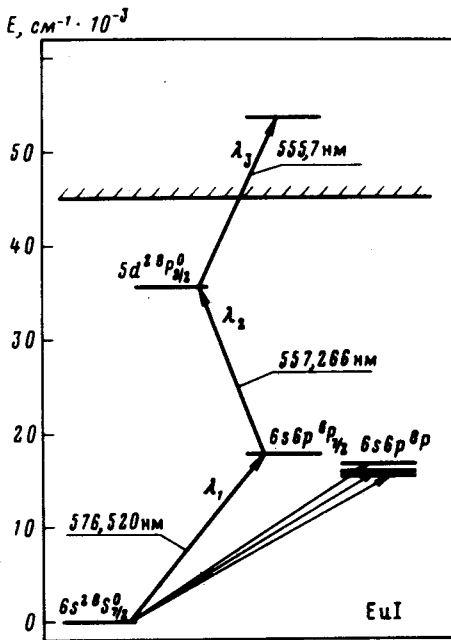


Рис. 1

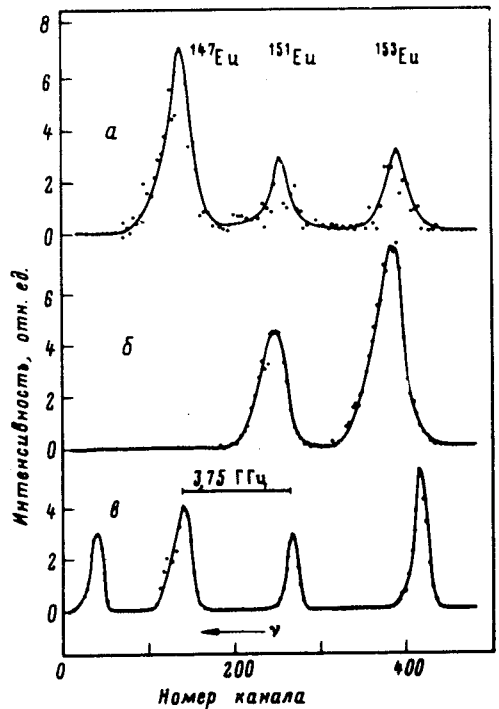


Рис. 2

Рис.1. Схема фотоионизации атомов  $\text{Eu}$  излучением импульсных лазеров на красителях (средняя мощность излучения и ширина линии генерации лазера первой ступени  $P_1=2$  мВт,  $\Delta\nu_1=0,02$  см $^{-1}$ , лазера второй ступени  $P_2=150$  мВт,  $\Delta\nu_2=0,8$  см $^{-1}$ , лазера третьей ступени  $P_3=250$  мВт,  $\Delta\nu_3=0,8$  см $^{-1}$ )

Рис.2.а – Фотоионизационный спектр образца с радиоактивным изотопом  $^{147}\text{Eu}$ ; б – то же для изотопов  $^{151,153}\text{Eu}$ ; в – полосы пропускания конфокального интерферометра с базой 2 см

В ЛИЯФ совместно с ИСАН для исследований свойств радиоактивных ядер создан лазерно-ядерный комплекс с использованием разработанного в ИСАН метода <sup>3</sup> детектирования одиночных атомов путем их ступенчатой фотоионизации излучением импульсных лазеров на красителях. В качестве первоочередных объектов выбраны ядра редкоземельных элементов в окрестности заполненной оболочки с числом нейтронов  $N=82$ .

Исследование ядер в этой области представляет интерес по следующим причинам. Во-первых, изучение зарядовых радиусов цепочки изотопов, включающей магические (с  $N=82$ ) ядра, позволит понять роль оболочечных эффектов для удаленных от полосы стабильности нейтроннодефицитных ядер. Во-вторых, при увеличении  $N$  от 82 до 90 форма ядра должна изменяться от сферической к сильнодеформированной. Изучение характера этого изменения представляет особый интерес <sup>4</sup>. И, наконец, при  $N < 82$  предсказывается существование новой области деформации <sup>5</sup>.

В настоящей работе представлены данные об измерениях зарядовых радиусов изотопов европия ( $Z=63$ ) с  $A=145-149$ , которые получались при облучении танталовой мишени (120 г) пучком протонов с энергией 1 ГэВ и интенсивностью  $10^{12}$  сек $^{-1}$  на синхротронном ЛИЯФ. Продукты реакций выделялись из мишени нагреванием до  $t \cong 2500^\circ \text{C}$ , разделение изотопов осуществлялось с помощью масс-сепаратора. Накопленные на отожженных танталовых фольгах изотопы  $\text{Eu}$  в количествах  $10^{10}-10^{11}$  атомов помещались в высокотемпературный источник атомного пучка. Лазерная установка состояла из трех перестраиваемых по частоте лазеров на красителях <sup>6</sup>, накачиваемых излучением двух импульсных лазеров на парах меди, работающих синхронно с частотой следования импульсов

10 Гц. Частота излучения первого лазера на красителе, имевшего узкую линию генерации, перестраивалась в интервале  $\Delta\nu = 0,6 \text{ см}^{-1}$ , что обеспечивало селективное возбуждение из основного состояния различных изотопов европия. Последующее их возбуждение и ионизацию через автоионизационное состояние обеспечивало излучение других двух лазеров на красителях, которые имели фиксированные частоты генерации, настроенные в резонанс с выбранными переходами. Характеристики выбранных оптических переходов европия и соответствующие параметры лазеров на красителях для каждого перехода приведены на рис. 1.

Лазерные лучи пересекали под прямым углом атомный пучок. Эффективность ионизации атомов в области взаимодействия с излучением  $\cong 0,01$  и определялась в основном степенью насыщения перехода в автоионизационное состояние. Поскольку длительность импульса лазерного излучения  $\tau_{\text{и}} = 17 \text{ нс}$ , то с излучением взаимодействовало примерно 0,02 от числа атомов, пролетающих через область ионизации. Угловой размер области ионизации был таков, что вероятность попадания в нее атомов, вылетевших из источника, равнялась 0,01.

Образующиеся при фотоионизации ионы регистрировались вторично — электронным умножителем (ВЭУ). Изменение длины волны перестраиваемого лазера контролировалось сферическим интерферометром с расстоянием между зеркалами 2 см. Изотопические сдвиги определялись на первом резонансном переходе (576,5 нм), для которого сверхтонкое расщепление аномально мало (для стабильных изотопов около  $300 \text{ МГц}^{-1}$ ) и меньше ширины линии генерации сканирующего лазера (600 МГц). Для калибровки интерферометра в качестве реперов использовались также линии первого перехода стабильных изотопов  $^{151,153}\text{Eu}$ , при этом измерения проводились одновременно с измерениями для исследуемых изотопов на реперном атомном пучке. Сигналы от ВЭУ, сферического интерферометра и датчиков мощности излучения поступали на измерительно-вычислительный комплекс, включающий в себя малые ЭВМ „Электроника-60” и СМ-3. Для уменьшения числа фоновых ионов, создаваемых источниками атомных пучков, на их пути устанавливалась электростатическая защита в виде системы диафрагм, а также вводились временные ворота длительностью 10 мкс в цепи регистрации ионов.

Массовое число изотопа $A$	149	148	147	146	145
Изотопический сдвиг относительно $^{151}\text{Eu}$ , Гц	-1,73 (7)	-3,00 (7)	-3,25 (7)	-4,19 (10)	-5,03 (7)

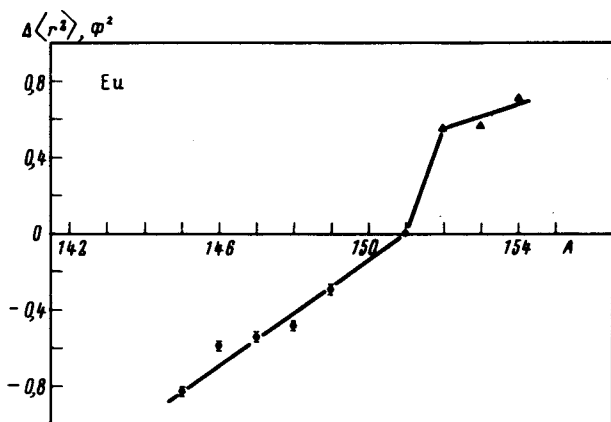


Рис. 3. Изменение среднеквадратичных радиусов распределения заряда ядер изотопов европия относительно изотопа  $^{151}\text{Eu}$  в зависимости от массового числа

На рис.2 приведены результаты одного цикла сканирования частоты для случая  $^{147}\text{Eu}$ . На спектре (а) видны также линии от остатков стабильных изотопов в фольге после ее отжига. Полученные ИС радиоактивных изотопов европия относительно  $^{151}\text{Eu}$  приведены в таблице. Погрешности определения ИС обусловлены нестабильностью спектра генерации и неравномерностью сканирования частоты во времени.

По измеренным ИС были вычислены величины  $\Delta \langle r^2 \rangle_{A, 151} = \langle r^2 \rangle_A - \langle r^2 \rangle_{151}$ , где  $\langle r^2 \rangle_A$  — среднеквадратичный радиус распределения заряда в ядре изотопа с массовым числом  $A$ . Вычисления выполнены аналогично <sup>7</sup>. Значения  $\Delta \langle r^2 \rangle_{A, 151}$  представлены на рис. 3, где треугольниками представлены результаты измерений других авторов <sup>8</sup>. Скачок в районе  $N=89$  связан с известным возрастанием деформации (параметр деформации  $\delta$  меняется от 0,14 у  $^{151}\text{Eu}$  до 0,28 у  $^{153}\text{Eu}$  <sup>4</sup>). Характер поведения значений  $\Delta \langle r^2 \rangle_{A, 151}$  до этого скачка может свидетельствовать о малой деформации ядер  $^{145-149}\text{Eu}$ ; однако для более однозначных выводов необходимо измерение их квадрупольных моментов. Ход измеренных значений  $\Delta \langle r^2 \rangle_{A, 151}$  приблизительно соответствует пропорциональности зарядовых радиусов величине  $A^{1/3}$ , что согласуется с систематикой указанных радиусов вблизи заполненной нейтронной оболочки для изотопов с числом нейтронов, большим магического <sup>9</sup>.

### Литература

1. Otten E.-W. In Proceedings of 4-th International Conference on Nuclei far from Stability; Skolen L.O. Helsingar (Denmark). Vol. 1, CERN 81-09, 20 July 1981, Geneva, p. 3.
2. Klapish R. Atomic Physics 7, Plenum Press, New York and London, 1981.
3. Балькин В.И., Беков Г.И., Летохов В.С., Мишин В.И. УФН, 1980, 132, 293.
4. Берлович Э.Е. Известия АН СССР, сер. физ., 1979, 43, 2046.
5. Leander G.A., Möller P. Phys. Lett., 1982, 110B, 17.
6. Жерихин А.Н., Летохов В.С., Мишин В.И., Беляев В.П., Евтюнин А.Н., Лесной М.А. Квантовая электроника, 1981, 8, 1340.
7. Zaal G.J., Hogervorst W., Eliel E.R., van Leeuwen K.A.H., Blok J.Z. Physik, 1979, A290, 339.
8. Heilig K., Stuedel A. Atomic Data and Nucl. Data Tables, 1974, 14, 613.
9. Angeli I., Csatlo's M. Nuclear Phys., 1977, A288, 480.