

ЛАЗЕРНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ ИЗОТОПОВ ВИСМУТА

П. Л. Молканов *, *А. Е. Барзах*, *Ю. М. Волков*,
В. С. Иванов, *Ф. В. Мороз*, *С. Ю. Орлов*, *В. Н. Пантелеев*,
М. Д. Селиверстов, *Д. В. Федоров*

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

На установке ИРИС (исследование радиоактивных изотопов на синхроциклотроне) ПИЯФ выполнены эксперименты по лазерной спектроскопии в лазерном ионном источнике для изотопов висмута на атомном переходе 306,77 нм. Из анализа измеренных изотопических сдвигов получены изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов (СКЗР) для изотопов и изомеров висмута с $A = 189-198, 211$. Для внедренных изомерных состояний висмута со спином $I = 1/2$ ($A = 193, 195, 197$) обнаружен большой изомерный сдвиг, что указывает на большую деформированность этих изомеров в сравнении с основными состояниями соответствующих ядер и, следовательно, на сосуществование различных форм в ядрах $^{193,195,197}\text{Bi}$. Ход изотопической зависимости СКЗР для четно-нейтронных изотопов висмута при $N < 109$ заметно отклоняется от хода таких же зависимостей для изотопических цепочек Pb и Tl (при том же числе нейтронов), для которых характерно сохранение сферической формы.

In-source laser spectroscopy experiments for bismuth isotopes at the 306.77 nm atomic transition have been carried out at the IRIS (Investigation of Radioactive Isotopes at Synchrocyclotron) facility of PNPI. New data on isotope shifts for $^{189-198,211}\text{Bi}$ isotopes and isomers have been obtained. The changes in the mean-square charge radii were deduced. The large isomer shift has been observed for the intruder isomer states of Bi with spin $I = 1/2$ ($A = 193, 195, 197$). This testifies to the shape coexistence in these nuclei with the intruder isomer states more deformed than the ground states. Marked deviation from the nearly spherical behavior for ground states of the even-neutron Bi isotopes at $N < 109$ is demonstrated, in contrast to the Pb and Tl isotopic chains.

PACS: 21.10.Ft; 27.80.+w; 31.30.Gs

*E-mail: molkanov_pl@pnpi.nrcki.ru

ВВЕДЕНИЕ

Исследования нейтронодефицитных изотопов вблизи заполненной протонной оболочки $Z = 82$ позволяют получить наиболее полную информацию о сосуществовании форм по сравнению с любой другой областью ядер [1]. Для таллия обнаружены состояния с конфигурациями «одна частица–две дырки» ($1p-2h$), включающими орбитали $\pi 1h_{9/2}$ и $\pi 1i_{13/2}$, расположенные над оболочечной щелью выше $Z = 82$. Эти так называемые внедренные (intruder) изомеры имеют большую, чем соответствующие основные состояния, деформацию [2]. В нейтронодефицитных изотопах висмута наблюдаются «зеркальные» внедренные изомерные состояния с конфигурацией типа «две частицы–одна дырка» ($2p-1h$) [1]. Поэтому представляется важным установить, различаются ли формы соответствующих ($2p-1h$) изомеров Вi и ($1p-2h$) изомеров Тl.

Ранее было показано, что изотопы свинца остаются сферическими вплоть до середины нейтронной оболочки ($N = 104$) [3], тогда как в изотопах Ро обнаружено появление деформации уже при $N < 113$ [4]. В то же время изотопы Тl ($Z = 81$) полностью повторяют поведение изотопической зависимости сферических изотопов Рb [2]. Чтобы иметь законченную картину эволюции формы в этой области нуклидной карты, важно исследовать поведение деформации для легких изотопов Вi.

Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов (СКЗР), дающие модельно-независимую информацию о форме основных и изомерных состояний, могут быть определены методами ядерно-атомной спектроскопии. До настоящего времени были выполнены лазерно-спектроскопические измерения для изотопов $^{202-213}\text{Вi}$ [5]. Эти исследования заканчиваются при $N = 119$, задолго до $N = 112$, где для соседней изотопической цепочки Ро наблюдаются структурные изменения [4].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД

В эксперименте использовался метод резонансной лазерной ионизации в лазерном ионном источнике (ЛИИ) [6, 7]. Радиоактивные изотопы Вi образывались в урановой мишени, облучаемой пучком протонов синхротрона ПИЯФ с энергией 1 ГэВ. Лазерная установка (подробное описание см. в [8]) обеспечивала трехступенчатую резонансную фотоионизацию атомов Вi [7]. На первой ступени использовался узкополосный лазер на красителях (ширина линии 700 МГц), сканирующий оптическую частоту атомного перехода висмута (306,77 нм). Экспериментальный спектр представлял собой зависимость фотоионного тока от частоты сканирующего лазера. Регистрация ионного тока проводилась с помощью детектирования α - или γ -излучения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика определения изменений СКЗР ($\delta\langle r^2 \rangle$) из оптических спектров подробно описана в [9, 2]. На рис. 1 представлены $\delta\langle r^2 \rangle$ для изотопов Вi по отношению к стабильному ^{209}Bi . Пунктирные линии на этом рисунке проведены в соответствии с дроплет-моделью (droplet model) при фиксированной среднеквадратичной деформации [9, 10]. Они дают представление об изменении деформации в изотопической цепочке Вi.

Для сравнения с другими изотопическими цепочками полезно использовать относительные $\delta\langle r^2 \rangle$ (ОСКЗР): $\delta\langle r^2 \rangle_{N,126} / \delta\langle r^2 \rangle_{124,122}$. На рис. 2 ОСКЗР для четно-нейтронных изотопов Вi сравниваются с ОСКЗР для четно-нейтронных изотопов Рb и Ро. Ход изотопической зависимости ОСКЗР висмута повторяет поведение ОСКЗР свинца вплоть до $N = 110$ и заметно отклоняется от него при $N < 110$. Это указывает на возможное появление стабильной деформации у ядер висмута при $N < 110$.

Таким образом, изменение деформации для четно-нейтронных изотопов ^{83}Bi является «промежуточным» по отношению к изменениям деформации для ^{82}Pb и ^{84}Po . При этом изменение СКЗР для изотопических цепочек Вi

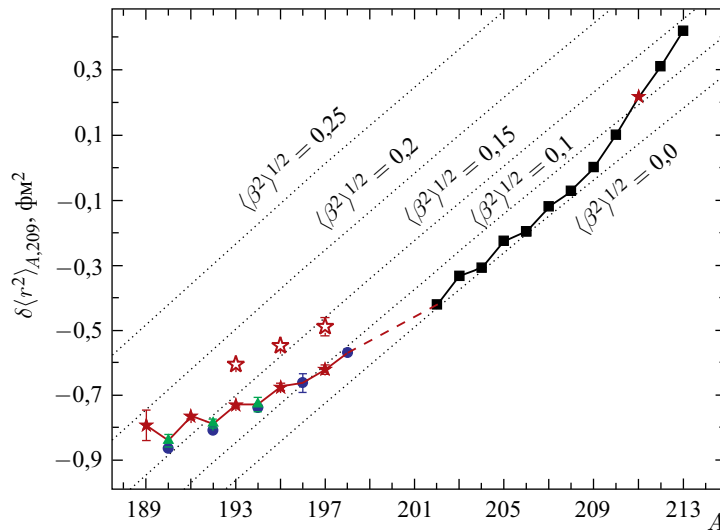


Рис. 1. Изотопическая зависимость изменений СКЗР для изотопов Вi. Квадраты — данные [5]. Настоящая работа: темные звездочки — нечетные по A изотопы с $I = 9/2$; светлые звездочки — нечетные по A изомеры с $I = 1/2$ (внедренные изомерные состояния); треугольники — нечетно-нечетные ядра с $I = 3$; кружки — нечетно-нечетные ядра с $I = 10$. Пунктирные линии — предсказания дроплет-модели [10] с различными фиксированными среднеквадратичными деформациями $\langle \beta^2 \rangle^{1/2}$

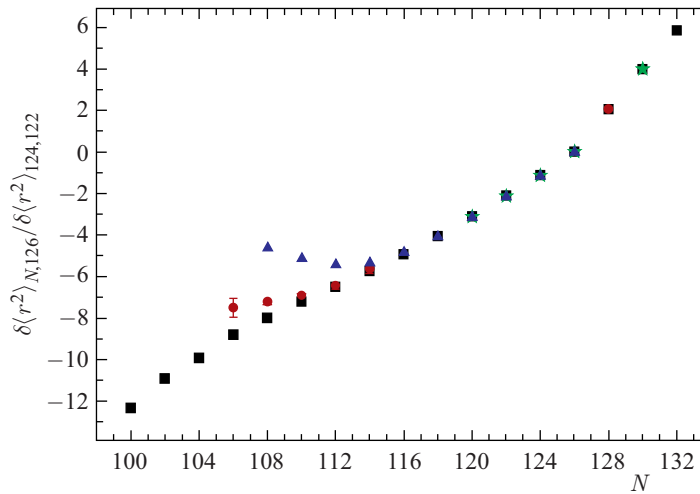


Рис. 2. Относительные изменения $\delta\langle r^2 \rangle$ для четно-нейтронных изотопов Pb, Bi и Po. Квадраты — четные по A изотопы Pb [3]; треугольники — четные по A изотопы Po [4]; звездочки — нечетные по A основные состояния Bi с $I = 9/2$ [5]; кружки — нечетные по A основные состояния Bi с $I = 9/2$ (настоящая работа)

и Tl отличаются друг от друга, хотя эти цепочки «зеркальны» относительно заполненной протонной оболочки ($Z = 82$).

Для внедренных изомерных состояний Bi со спином $I = 1/2$ ($A = 193, 195, 197$; см. рис. 1) наблюдается большой изомерный сдвиг. Этот скачок в СКЗР, подобный ранее обнаруженному скачку для внедренных изомерных состояний Tl со спином $I = 9/2$ ($A = 185, 191, 193, 195, 197$) (см. [2] и указанную там литературу), может быть интерпретирован как результат соответствующего скачка деформации. Примечательно, что величина этого скачка для Bi практически совпадает с величиной соответствующего скачка для изомеров Tl с тем же числом нейтронов. Это указывает на сходство форм внедренных изомеров таллия и висмута, хотя их конфигурации различны ($1p-2h$ в Tl и $2p-1h$ в Bi).

3. ВЫВОДЫ

С помощью метода резонансной лазерной ионизации в ЛИИ измерены изменения СКЗР для 20 изотопов и изомеров ${}_{83}\text{Bi}$. Установлено, что изменение деформации для четно-нейтронных изотопов Bi является «промежуточным» по отношению к изменениям деформации для изотопических цепочек ${}_{82}\text{Pb}$ и ${}_{84}\text{Po}$. Наблюдается большой изомерный сдвиг (скачок деформации) для внедренных изомерных состояний висмута (${}^{197,195,193}\text{Bi}^m$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heyde K., Wood J.L.* Shape Coexistence in Atomic Nuclei // *Rev. Mod. Phys.* 2007. V. 83. P. 1467–1521.
2. *Barzakh A. E. et al.* Changes in the Mean-Square Charge Radii and Magnetic Moments of Neutron-Deficient Tl Isotopes // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 88. P. 024315.
3. *Seliverstov M.D. et al.* Charge Radii and Magnetic Moments of Odd- A $^{183-189}\text{Pb}$ Isotopes // *Eur. Phys. J. A.* 2009. V. 41. P. 315–321.
4. *Cocolios T.E. et al.* Early Onset of Ground State Deformation in Neutron Deficient Polonium Isotopes // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. P. 052503.
5. *Pearson M.R. et al.* Nuclear Moments and Charge Radii of Bismuth Isotopes // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2000. V. 26. P. 1829–1848.
6. *Alkhazov G.D. et al.* A New Highly Efficient Method of Atomic Spectroscopy for Nuclides Far from Stability // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1992. V. 69. P. 517–520.
7. *Fedosseev V.N. et al.* Atomic Spectroscopy Studies of Short-Lived Isotopes with the ISOLDE RILIS // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2003. V. 204. P. 353–358.
8. *Barzakh A. E. et al.* New Laser Setup for the Selective Isotope Production and Investigation in a Laser Ion Source at the IRIS Facility // *Rev. Sci. Instr.* 2012. V. 83. P. 02B306.
9. *Otten E. W.* Nuclear Radii and Moments of Unstable Isotopes // *Treatise on Heavy-Ion Science.* New York, 1989. V. 8. P. 517.
10. *Berdichevsky D., Tondeur F.* Nuclear Core Densities, Isotope Shifts, and the Parameterization of the Droplet Model // *Z. Phys. A.* 1985. V. 322. P. 141–147.