

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2323/82

19/6-82

P15-82-92

Ю.Ц.Оганесян, Ю.П.Гангрский, Б.Н.Марков

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЯДЕР
С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Направлено в Оргкомитет II Всесоюзной школы по
применению лазеров в атомной, молекулярной и ядерной
физике. Вильнюс, 29 июня-7 июля 1981 года.

1982

В последние годы в экспериментальных исследованиях свойств атомных ядер все более широкое распространение получают лазеры с перестраиваемой частотой. Эти лазеры позволяют осуществлять плавную перестройку частоты во всем видимом диапазоне светового излучения, характеризуются высоким энергетическим разрешением $\Delta E/E=10^{-8}-10^{-9}$ / и большой мощностью /до нескольких десятков Вт в непрерывном режиме и до 10^8 Вт в импульсном/. Такие свойства лазерного излучения открывают новые возможности в исследовании структуры атомного ядра.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР

Для определения средних радиусов распределения заряда и ядерного вещества, а также отклонений этих распределений от сферической симметрии используется целый ряд методов: упругое и неупругое рассеяние электронов, протонов и тяжелых ионов, оптические и рентгеновские спектры атомов, γ -спектры мюонных и пионных атомов. Все эти методы требуют значительных количеств исследуемых атомов /как правило, более 10^{16} ат/см²/ и поэтому пригодны лишь для стабильных ядер и, в крайнем случае, - для радиоактивных ядер, получаемых в реакциях с большими выходами. Использование лазерного излучения для возбуждения резонансных частот атомов требует значительно меньших количеств вещества из-за высокой интенсивности светового потока /до 10^{19} квантов/с/ и большого сечения резонансного возбуждения /порядка 10^{-10} см²/ . Это позволяет проводить измерения с радиоактивными ядрами, образующимися в реакциях с малыми выходами и лежащими вдали от линии β -стабильности.

Данные о зарядовых радиусах и ядерных моментах /спины, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты/ получают из измерений изотопных сдвигов /разности резонансных частот атома для соседних изотопов одного элемента/ и сверхтонкой структуры оптических линий. Описание используемых при этом методик и обсуждение полученных результатов подробно изложены в обзорах¹⁻³. Эти методики достаточно многообразны и требуют как получения атомных /или ионных/ пучков исследуемых изотопов, так и определения частоты резонансного поглощения лазерного излучения атомами изотопов. Если первая задача зависит от метода получения и выделения изотопов, то для решения второй обычно используют один из трех способов: 1/ регистрация

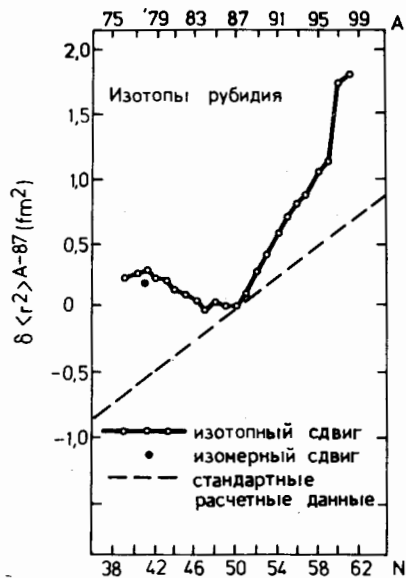


Рис.1. Изменение зарядового радиуса изотопов рубидия.

резонансно-рассеянного светового излучения; 2/ многоступенчатая ионизация атомов с последующей регистрацией образующихся ионов; 3/ измерение анизотропии ядерного излучения при облучении атомов циркулярно-поляризованным светом /оптическая накачка/. Последний способ имеет наибольшую чувствительность /при регистрации α -частиц или осколков деления, когда детекторы излучения имеют

низкий фон, для измерений достаточно $10^5 - 10^6$ атомов/, однако он неприменим к ядрам со спином 0 или 1/2.

К настоящему времени с помощью лазерного излучения проведены измерения разностей зарядовых радиусов и ядерных моментов для длинных изотопных цепочек целого ряда элементов - $^{20-31}\text{Ne}$ /4/, $^{40-48}\text{Ca}$ /5/, $^{78-98}\text{Rb}$ /6/, $^{119-145}\text{Cs}$ /7/, $^{126-140}\text{Ba}$ /8/, $^{181-205}\text{Hg}$ /9/. В основном это щелочные и щелочноземельные металлы, так как они эффективно разделяются на масс-сепараторах и имеют удобные для измерений оптические спектры. На рис.1 в качестве примера представлено изменение зарядового радиуса ядер Rb с ростом числа нейтронов /по отношению к изотопу ^{87}Rb , имеющему замкнутую оболочку 50 нейтронов/. Видно, что измеренная зависимость совершенно не соответствует той, которая следует из постоянной плотности ядерного вещества и определяется выражением: $R = r_0 A^{1/3}$, где A - массовое число изотопа. Такое различие объясняют изменением формы ядра по мере заполнения нейтронных оболочек /появление деформации при числе нейтронов $N < 44$ и $N > 60$ /. Подобные отклонения имеют место и для других изотопных цепочек. Поэтому представляет безусловный интерес расширить область исследуемых ядер, в частности, перейти к более тяжелым элементам. В первую очередь необходимо отметить Ra, который является щелочноземельным металлом, поэтому для него пригодна та же методика измерений. Изотопная цепочка Ra пересекает замкнутую оболочку из 126 нейтронов, при 136 нейтронах начинается область деформи-

рованных ядер. Есть указания на то, что в начале этой области ядра Ra имеют статистическую окупольную деформацию /грушевидную форму//10/.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ЯДЕР В ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Использование лазерного излучения позволяет также определить изменение формы ядра при переходе к изомерному состоянию. В этом случае измеряется разница резонансных частот атома в основном и изомерном состоянии и сверхтонкое расщепление оптической линии. Измеренные таким образом разность зарядовых радиусов, значения спина и квадрупольного момента позволяют однозначно установить величину, знак и характер /статистическая или динамическая/ деформации ядра в изомерном состоянии.

Эти эксперименты связаны, как правило, с большими трудностями по сравнению с описанными выше измерениями изотопного сдвига, так как приходится иметь дело со смесью ядер в основном и изомерном состояниях. Это предъявляет более жесткие требования к энергетическому разрешению и стабильности светового излучения лазера, связанные с необходимостью многократных измерений /разделение эффектов основано на разнице в периодах полураспада ядер в основном и изомерном состояниях или на разнице выходов в реакциях с различными бомбардирующими частицами/. Более четкое разделение ядер может быть достигнуто при измерениях анизотропии ядерного излучения, так как его энергия и интенсивность, как правило, различны для основного и изомерного состояний.

Из теоретических расчетов формы потенциального барьера, а также из измеренных на опыте спектров возбужденных уровней следует, что в целом ряде ядер могут иметь место изомерные состояния, характеризующиеся равновесной деформацией, которая значительно отличается от деформации ядра в основном состоянии. Эта разница деформаций особенно велика для некоторых изомерных состояний тяжелых ядер /спонтанно делящиеся изо-

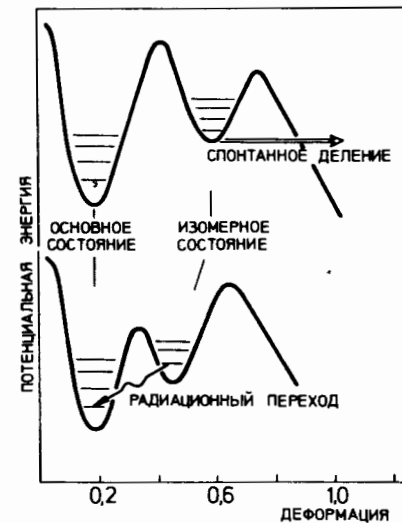


Рис.2. Зависимость потенциальной энергии от деформации ядра. Способы разрядки изомерных состояний.

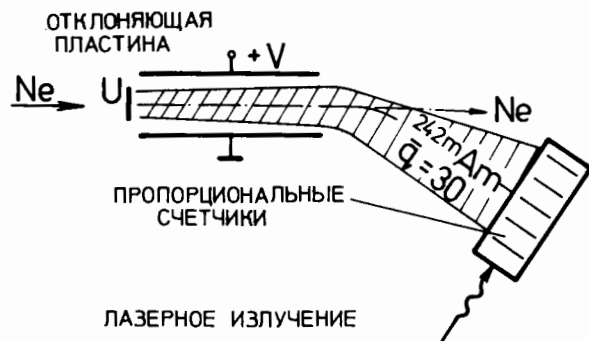


Рис.3. Схема эксперимента для определения квадрупольной деформации спонтанно делящихся изомеров.

меры, рис.2/. Для одного из таких состояний ^{240}Am , $T_{1/2} = 0,9$ мс/ в Ок-Ридже /США/ был измерен изомерный сдвиг 11 . Оказалось, что этот сдвиг соответствует параметру квадрупольной деформации ядра в изомерном состоянии $\beta_2 = 0,66$, что вдвое больше, чем для основного состояния $\beta_2 = 0,28$. Однако малая статистика событий, недостаточное энергетическое разрешение, которое не позволило наблюдать сверхтонкого расщепления, плохая воспроизводимость результатов делают крайне желательным проведение дальнейших, более точных, измерений для окончательного решения вопроса о величине деформации ядра в изомерном состоянии.

Проведение такого эксперимента планируется в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ на циклотроне тяжелых ионов. Схема этого эксперимента представлена на рис.3. Выбитые из мишени ядра отдачи в изомерном состоянии отделяются с помощью электрического /или магнитного/ поля от пучка бомбардирующих ионов и тормозятся в камере, наполненной Ne, где они облучаются циркулярно-поляризованным световым излучением лазера. При резонансном возбуждении атомов Am таким излучением происходит их ориентация, а вследствие сверхтонкого взаимодействия электромагнитных моментов ядра и электронной оболочки - и ориентация ядер. Поэтому при делении ядер изомеров появляется анизотропия в испускании осколков, которые регистрируются двумя позиционно-чувствительными пропорциональными счетчиками. Если выбрать для измерений спонтанно делящийся изомер ^{242}Am / $T_{1/2} = 14$ мс/, реакцию его получения $^{238}\text{U} + ^{22}\text{Ne}$ /ее сечение составляет 10^{-31} см²/, то при токе ионов ^{22}Ne 10 мкА /такая интенсивность получена на циклотронах ЛЯР/ скорость счета осколков, испускаемых под углом 90° по отношению к направлению лазерного луча, будет составлять ≈ 1000 1/ч, что в 50 раз выше, чем в отмеченном ранее опыте в Ок-Ридже с изомером ^{240}Am .

Такая же схема эксперимента применима и для других короткоживущих изомеров, распадающихся путем испускания γ -квантов или электронов конверсии, если использовать для их регистрации соответствующие детекторы. Измерения изомерного сдвига и сверхтонкого расщепления позволят определить деформацию ядра в изомерном состоянии и таким образом однозначно судить о природе изомера.

3. ОРИЕНТАЦИЯ ЯДЕР

Как уже отмечалось выше, резонансное возбуждение атомов циркулярно-поляризованным световым излучением лазера приводит к ориентации ядер, если их спин не равен 0 или 1/2. Это открывает возможности создания радиоактивных источников ориентированных ядер, ускоренных поляризованных ионов, мишеней из поляризованных ядер и использования их в целом ряде экспериментов. Основными характеристиками таких ансамблей ориентированных ядер являются время установления ориентации, доля ориентированных ядер и время дезориентации. Время установления ориентации в несколько раз больше времен жизни возбуждаемых атомных состояний по отношению к спонтанному излучению. Эти времена обычно составляют 10^{-8} - 10^{-7} с и определяют нижнюю границу периодов полураспада исследуемых ядер или ядерных состояний. В работе 12 показано, что, используя модуляцию мощности резонансного лазерного излучения, можно осуществить ориентацию ядер с еще более короткими временами жизни /до 10^{-11} с/.

Высокая интенсивность лазерного излучения /до 10^{28} 1/с в импульсе/ и большое сечение резонансного возбуждения / 10^{-10} см²/ позволяют в принципе осуществить практически полную ориентацию облучаемых ядер /до 10^{18} ядер/см²/ . Время дезориентации определяется главным образом взаимодействием возбужденных атомов между собой, а также с посторонними атомами. Оно достаточно велико в случае атомных пучков или атомов в атмосфере инертных газов /их атомы имеют замкнутую электронную оболочку/. Однако в случае твердых тел время дезориентации оказывается, как правило, очень малым /< 10^{-10} с/, и это приводит к большим трудностям в создании твердых мишеней ориентированных ядер. Поэтому наибольшее число ориентированных ядер можно получить лишь при работе с атомными пучками 13 .

4. ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СКОРОСТИ ЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Энергия световых квантов /несколько эВ/ много меньше типичных энергий ядерных переходов / 10^4 - 10^5 эВ/, а создаваемые даже самыми мощными лазерами напряженности электрического поля

/не более 10^9 В/см/ недостаточны для индуцированных переходов в ядре. Однако в ряде случаев лазерное излучение может существенно воздействовать на скорости ядерных процессов. Это воздействие может проявляться через электронную оболочку атома, а также в области высоких энергий возбуждения ядра, когда расстояние между уровнями близко к энергии лазерного кванта. Ряд ядерных процессов /захват орбитальных электронов ядром, внутренняя конверсия/ протекает в результате взаимодействия ядра с электронной оболочкой. Поэтому скорость этих процессов в значительной степени определяется состоянием электронной оболочки. В предельном случае полной ионизации атома такие процессы вообще не будут иметь места, и, если какой-либо из этих процессов является единственным способом распада ядра, то радиоактивное ядро становится стабильным. Например, если полностью ионизировать атом бериллия / $z=4$ / с радиоактивным ядром ${}^7\text{Be}$ /оно распадается путем электронного захвата/, то ядро, лишенное электронной оболочки, станет стабильным.

Ионизация или возбуждение внешних электронных оболочек также приводит к изменению скорости распада /меняется вероятность электронного захвата или внутренней конверсии/. Здесь имеет место тот же эффект, что и при изменении химического состояния вещества. При использовании лазерного излучения можно возбуждать различные состояния электронной оболочки и тем самым более детально исследовать эти явления.

Когда в атоме имеются вакансии в глубоких электронных оболочках, то при заполнении этих вакансий выделяется энергия в несколько кэВ. Эта энергия может быть передана ядру, в результате чего возможно возбуждение низколежащих изомерных состояний /процесс, обратный внутренней конверсии/^{14, 15/}. Такой процесс, по-видимому, наблюдался в случае изомерного состояния с энергией 70 эВ в ядре ${}^{235}\text{U}$ при облучении урановой мишени мощным лазерным излучением^{16/}.

В области высоких энергий возбуждения ядра, когда расстояние между уровнями составляет несколько эВ, становится возможным захват ядром лазерного кванта. При этом энергия возбуждения ядра практически не меняется, а его спин может изменяться на 1. В ряде случаев это может существенно изменить вероятность распада возбужденного ядра. Например, в четно-четных тяжелых ядрах делительные ширины /а следовательно, и вероятности деления/ для состояний со спином 0^+ и 2^+ значительно больше /на несколько порядков/, чем для состояний 1^- . Это связано с разной высотой барьера деления для этих состояний /рис.4/. Состояния 1^- обычно возбуждаются в ядрах при поглощении γ -квантов. Одновременное облучение ядер лазерным излучением и γ -квантами приводит к возбуждению состояний 0^+ и 2^+ и тем самым повышает вероятность деления. Сечение одновремен-

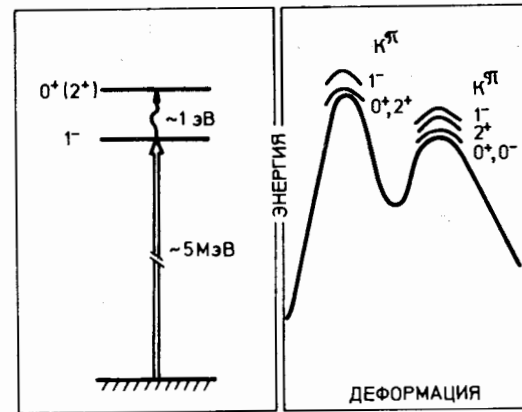


Рис.4. Изменение высоты барьеров деления в поле лазерного излучения.

ного поглощения γ -кванта с энергией в несколько МэВ и светового кванта определяется интенсивностью лазерного излучения и матричным элементом перехода между соседними уровнями возбуждаемого ядра /величина его неизвестна и измерение ее представляло бы большой

интерес для выяснения структуры высоковозбужденных состояний ядер/. Возможен и другой способ возбуждения состояний 0^+ и 2^+ - через электронную оболочку с помощью указанного выше процесса, обратного внутренней конверсии. В этом случае резонансное лазерное излучение возбуждает атом, и после захвата ядром γ -кванта энергия возбуждения атома передается ядру. Этот способ возбуждения должен иметь большее сечение, так как он связан с резонансным поглощением световых квантов и процессом внутренней конверсии, которая при малых энергиях ядерных переходов преобладает над процессом γ -излучения.

В работах^{17, 18/} рассматривалось влияние лазерного излучения на сечение взаимодействия нейтронов низких энергий с ядрами. Показано, что в поле сильной электромагнитной волны, создаваемой лазерным излучением, у уровней составного ядра появляются сателлиты /дополнительные компоненты уровней вследствие колебаний иона/. Это в ряде случаев может существенно увеличить сечение захвата или упругого рассеяния нейтронов ядром.

5. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ АТОМОВ

Большое сечение резонансного поглощения световых квантов и высокая интенсивность лазерного излучения позволяют осуществлять регистрацию одиночных атомов. При типичном времени жизни возбужденного состояния атома 10^{-8} с и скорости атома 10^5 см/с на пути в 1 см произойдет 10^3 последовательных возбуждений и девозбуждений атома. Если эффективность регистрации испускаемого атомом света достаточно высока, то импульс детектирующего устройства /например ФЭУ/ будет значительно выше фона. Вопросы детектирования одиночных атомов подробно рассмотрены в обзоре^{19/}. Необходимо указать на принципиальное отличие

способов регистрации одиночных ядерных частиц и одиночных атомов. В первом случае регистрация основана на изменении их состояния, например, при распаде или при торможении в веществе. Поэтому с каждой ядерной частицей можно произвести лишь одно измерение, его нельзя повторить. В то же время атом после каждого акта возбуждения возвращается в исходное состояние, поэтому с ним можно проводить многократные измерения. Это открывает новые возможности в исследованиях очень редких процессов.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Н.Флерову за поддержку работы, а Д.Ф.Зарецкому, Ю.В.Наумову, В.А.Карнаухову и М.С.Баткину за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Otten E. Nucl.Phys., 1981, A354, p. 471.
2. Берлович Э.Е.Изв. АН СССР, сер.физ., 1981, т. 45, с.2.
3. Jacquinet P., Klapish R. Rep.Prog.Phys., 1979, 42, p. 774.
4. Thibault C. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1981, v. 186, p. 193.
5. Bergman E. et al. Zeit.Phys., 1980, A294, p. 319.
6. Thibault C. et al. Phys.Rev. C, 1981, v. 23, p. 2730.
7. Thibault C. et al. Nucl.Phys., 1981, A367, p. 1.
8. Beck K. et al. Zeit.Phys., 1979, A291, p. 219.
9. Bonn J. et al. Zeit.Phys., 1976, A276, p. 203.
10. Kurzewicz W. et al. Nucl.Phys., 1981, A356, p. 15.
11. Bemis K. et al. Phys.Rev.Lett., 1979, v. 43, p. 1854.
12. Зарецкий Д.Ф., Козлинский А.В. ЯФ, 1980, т. 31, с. 891.
13. Andersen L.W., Nimmo C.A. Phys.Rev.Lett., 1979, v. 42, p. 1520.
14. Okamoto K. Nucl.Phys., 1980, A341, p. 75.
15. Гольданский В.И., Намиот В.А. ЯФ, 1981, т. 33, с. 319.
16. Izawa Y., Yamataka S. Phys.Lett., 1979, 88B, p. 59.
17. Добрынин Ю.Л., Зарецкий Д.Ф., Ломоносов В.В. ЯФ, 1979, т. 29, с. 1198.
18. Зарецкий Д.Ф., Ломоносов В.В. ЖЭТФ, 1981, т. 81, с. 429.
19. Балькин В.И. и др. УФН, 1980, т. 132, с. 294.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 февраля 1982 года.

Оганесян Ю.Ц., Гангрский Ю.П., Марков Б.Н. Исследование структуры ядер с помощью лазерного излучения P15-82-92

Описываются методы применения лазерного излучения с переменной частотой для определения размеров и формы радиоактивных ядер как в основном, так и в изомерном состояниях, например, в случае спонтанно делящихся изомеров. Отмечается, что лазерное излучение можно использовать для ориентации ядер, с его помощью возможно влиять на скорости ядерных процессов, а также детектировать одиночные атомы.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Oganessian Yu.Ts., Gangrskij Yu.P., Markov B.N. Nuclear Structure Studies by Means of Laser Radiation P15-82-92

Some methods of application of tunable dye lasers for determining dimensions and shapes of radioactive nuclei both in the ground and in isomeric states, for instance, in the case of spontaneously fissioning isomers are described. It will be emphasized that laser radiation could be used for orientation of nuclei, by its means one could affect rates of nuclear processes and detect single atoms.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.