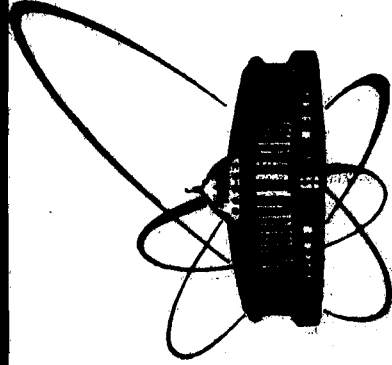


89-108



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

Г 753

13-89-108

Ч.Г.радечны

**ЛАЗЕРНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ,
КОРТОКЖИВУЩИХ ЯДЕР
НА ЦИКЛОТРОННЫХ ПУНКАХ**

Должено на II конференции молодых
ученых ЛЯР ОИЯИ, Дубна, 5-7 января
1988 г.

1989

1. Введение

В ЛЯР ОИЯИ уже 5 лет развивается методика, использующая уникальные свойства лазерного излучения для определения таких ядерных параметров, как разность средних квадратичных радиусов $\langle r_p^2 \rangle - \langle r_n^2 \rangle$; спин $- I$; магнитный дипольный момент $- \mu$; электрический квадрупольный момент $- Q$; параметр деформации $- \beta$. Имеющийся в ЛЯР лазерный спектрометр, детектирующий рассеянные фотоны флуоресценции, способен исследовать лишь стабильные, в исключительных случаях долгоживущие, радиоактивные изотопы $^{1/2}$.

Существует до сих пор единственный успешно реализованный оптический метод, позволяющий определять вышеуказанные параметры короткоживущих ядер на циклотронных пучках без применения масс-сепаратора. Этим методом является детектирование угловой анизотропии излучения ядер, ориентированных в процессе оптической накачки $^{2/}$ или в процессе спинного обмена с оптически ориентированными атомами щелочного металла $^{3,4/}$. Во всех этих экспериментах ориентация исследуемых ядер проводилась в газовой кювете.

Целью этой работы является:

- оценка условий лазерной оптической накачки в газовой кювете, в которой проходит циклотронный пучок;
- оценка границ применения метода детектирования угловой анизотропии γ -излучения лазером ориентированных ядер в газовой кювете на циклотронном пучке;
- показ возможностей этого метода для получения информации о параметрах исследуемых короткоживущих ядер;
- предложение приступить к экспериментальному исследованию этого метода.

ОБЪЕКТЫ ЕРЯНЪ Б ИСТИТУТ

ЯДЕР НН СОСТАВ

БИБЛИОТЕКА

рне не экранируются свинцовым коллиматором, подавляется особым про-
двом кветы буферным газом. Двадцатиградное подавление этого выса-
живания атомов позволяет детектировать ориентацию ядер, верхняя гра-
ница времени жизни которых ~ 100 с.

Во время прохождения циклотронного пучка через газовую квету
в зоне измерения возбуждается большое число ядер буферного газа, ко-
торые при переходе в основное состояние излучают большее число
фоновых β -квантов. Чтобы избавиться от этого фона, нужно прово-
дить измерения лишь после прохождения импульса циклотронного пучка.
На циклотронах ЛНР можно менять длительность импульсов в пределах
 $10^3 - 10^{-4}$ с.

При сканировании частоты лазерного излучения появление анизот-
ропии β -излучения исследуемых ядер свидетельствует о настройке
лазерного излучения в резонанс с их атомным переходом. Этот факт
позволяет измерять изотопический сдвиг и сверхтонкую структуру ис-
следуемых атомных переходов и из этих величин определять $\delta\langle M^2 \rangle$, I ,
 A , Q и A исследуемого ядра.

3. Анализ условий лазерной ориентации ядер

3.1. Электрон-ионная рекомбинация в газовой квете

Поскольку оптически ориентировать можно только свободные нейт-
ральные атомы, нужно обеспечить в газовой квете такие условия, при
которых будет достаточно большая вероятность перехода ионов отдачи
в свободные нейтральные атомы. В процессе торможения в буферном га-
зе при столкновениях с атомами буферного газа ионы отдачи по-
нижают свою зарядность до величины $+1$. Последняя стадия нейтрализа-
ции происходит в процессе электронной диссоциативной рекомби-
нации ионных молекул типа $(AX)^+$, где A - атом исследуемого ядра и
 X - атом буферного газа. Этот процесс можно представить в виде
 $(AX)^+ + e^- \rightarrow A + X.$ (1)

При прохождении через буферный газ циклотронного пучка с интен-
сивностью $\sim 10^{11}$ ион/с в объеме ~ 10 см³ возникает $\sim 10^{16}$
пар ион-электрон в секунду. Если коэффициенты электронной диссоци-
ативной рекомбинации ионных молекул $\alpha_{(AX)^+} \geq \alpha_{(X_2)^+} \sim 10^{-7}$ см³/с,
то в области прохождения циклотронного пучка равновесная концент-
рация электронов $\sim 10^{11}$ см⁻³ и время рекомбинации ионов отдачи будет
порядка $\sim 10^{-4}$ с.

3.2. Процессы, конкурирующие с процессом образования сво-
бодных нейтральных атомов

а) Процесс перезарядки при столкновении нейтрального исследуе-
мого атома A с ионом инертного газа X^+ :

2. Газовая продувная кветка

Из мишени, облучаемой пучком тяжелых ионов, вылетают с большой
скоростью ($\sim 10^3$ км/с) ядра отдачи в виде ионов высокой средней
зарядности (~ 10). Для того чтобы эти ядра оптически ориентировать
(и детектировать угловую анизотропию вылета частиц при их распаде),
нужно эти ионы отдачи сначала перевести в нейтральные атомы (нейт-
рализовать их) и заставить их существенную часть времени жизни на-
ходиться в зоне измерения. Обе эти задачи можно решить с использо-
ванием газовой кветы, схема которой представлена на рис. 1.

Циклотронный пучок проходит через входное окно кветы, его интен-
сивность измеряется цилиндром Фарадея. Из мишени выбитые ядра отда-
чи в процессе торможения в буферном газе нейтрализуются и с наи-
большей вероятностью останавливаются в центре кветы. Нейтральные
атомы с исследуемыми ядрами ориентируются в процессе оптической на-
качки циркулярно-поляризованным излучением, проходящим через газовую
квету. Ядерное излучение ориентированных ядер будет обладать угло-
вой анизотропией, которую можно обнаружить с помощью детектора.

В рассматриваемой экспериментальной схеме предполагается ис-
следовать β -активные короткоживущие ядра. Свинцовый коллиматор
выделяет в газовой квете область пересечения циклотронного пучка
и лазерного луча - зону измерения и защищает β -детектор от попа-
дания β -квантов, испущенных мимо этой зоны. Это подавляет фон
 β -квантов, испущенных дезориентированными ядрами, прилившими к
основным стенкам кветы. Высаживание атомов на стенках кветы, кото-

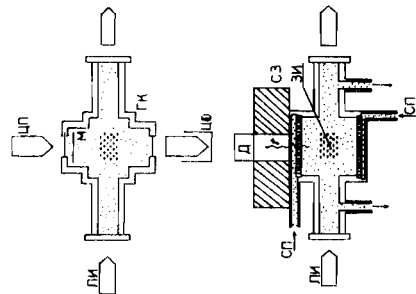
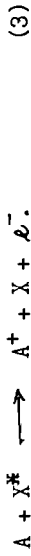


Рис. 1. Схема эксперимента по ориентации короткоживущих β -активных ядер. ЦФ - циклотронный пучок, ЛМ - лазерный луч, М - мишень, ГК - газовая кветка, ЦФ - цилиндр Фарадея, СЗ - свинцовая защита, СП - система продува, СИ - зо-
на измерения.

имеет сечение $\sim 10^{-15} \text{ см}^2$ и не может существенно конкурировать с процессом рекомбинации.

б) Ионизация исследуемых атомов А при столкновении с метастабильным атомом инертного газа X^* с их девозбуждением - процесс Пеннинга:



Этот процесс не будет играть существенную роль при выполнении соотношения

$$c \cdot \tau \cdot \nu \cdot \sigma \ll I \quad \text{при} \quad \sigma \leq T_{1/2}, \quad (4)$$

или

$$c \cdot T_{1/2} \cdot \nu \cdot \sigma \ll I \quad \text{при} \quad \tau > T_{1/2},$$

где c , τ , ν - концентрация, время жизни и тепловая скорость движения метастабильных атомов инертного газа, σ - сечение процесса (3), $T_{1/2}$ - время жизни исследуемого ядра. Возможным способом подавления этого процесса является тушение метастабильных состояний атомов в процессе столкновения с атомами другого инертного газа.

в) Исследуемые атомы могут образовывать стабильные молекулы с посторонними примесями в буферном газе. Опасными примесями являются: H_2O , O_2 , CO_2 , SO_2 и т.д. Для уменьшения концентрации этих примесей нужно проводить тщательную очистку буферного газа и непрерывный продув газовой кюветы.

3.3. Лазерная ориентация

При использовании мощного ($\sim I \text{ Вт/см}^2$) лазерного излучения можно в процессе оптической накачки ориентировать исследуемые ядра за время $\sim 10^{-6} \text{ с}$. Сечение дезориентации атомов при столкновениях с электронами имеет значение $\sim 10^{-14} \text{ см}^2 / A$. При концентрации электронов $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ времена дезориентации атомов в процессе их столкновения с тепловыми электронами $\sim 10^{-4} \text{ с}$. Из сказанного следует, что в зоне прохождение лазерного луча (зона ориентации) большинство исследуемых атомов находится в ориентированном состоянии. Вне этой зоны все атомы дезориентируются. Переходный слой имеет толщину доли миллиметра. Среднее время диффузии атома из зоны ориентации $\sim 1 \text{ с}$.

Из сказанного следует, что в рассматриваемой газовой продувной кювете можно определить параметры β -активных ядер, время жизни которых лежит в пределах $10^{-4} \text{ с} < T_{1/2} < 100 \text{ с}$.

В работе [7] в аналогичной газовой кювете пытались лазером ориентировать ядра спонтанно делящегося изотопа ^{240}Am ($T_{1/2} = 10^{-3} \text{ с}$) и детектировать анизотропию осколков деления.

3.4. Ориентация ядер в процессе спинового обмена

Атомы многих элементов имеют резонансные линии в спектральной области, недоступной имеющимся лазерам на красителе, и невозможна с ними проводить оптическую накачку. В таком случае можно ориентировать эти атомы и их ядра при их столкновениях с атомами другого элемента, ориентированными в процессе оптической накачки.

Такой процесс принято называть ориентацией посредством спинового обмена. Этот механизм ориентации можно реализовать в рассмотренной газовой кювете в экспериментах на циклотронных пучках. Экспериментальная схема такая же, как на рис. 1, только буферный газ содержит атомы щелочного металла с концентрацией $\sim 10^{13} \text{ атом/см}^3$. Оптическая накачка проводится на резонансном переходе присутствующих атомов щелочного металла, которые ориентируются и в процессе спинового обмена передают ориентацию исследуемым атомам и их ядрам. Если сечение этого процесса $\sim 10^{-14} \text{ см}^2 / 8$, то время ориентации исследуемых атомов будет $\sim 10^{-4} \text{ с}$. Присутствие атомов щелочного металла облегчает и нейтрализацию исследуемых ядер отдачи, берет на себя девозбуждение метастабильных атомов инертного газа и "нейтрализацию" посторонних примесей в буферном газе. В экспериментах с детектированием угловой анизотропии ядерного излучения, используемого ориентированными ядрами, можно этот механизм ориентации использовать лишь тогда, когда атомы исследуемых ядер не образуют с атомами щелочного металла стабильные молекулы или комплексы. При этом способе ориентации нельзя измерить изотопический сдвиг и определить β -сечение исследуемого ядра, но при использовании метода ядерного магнитного резонанса на ориентированных ядрах (ЯМР/ОЯ) можно определить I с большей точностью исследуемого ядра. Именно эти параметры определялись для ядер ^{21}Na и $^{37}\text{K} / 3 / 20\text{Na}$ и $^{36}\text{K} / 4 /$, которые ориентировались посредством спинового обмена в экспериментах на пучках легких ионов.

3.5. Чувствительность метода

Предположим, что все исследуемые ядра будут распадаться в зоне измерения и что для набора достаточной экспериментальной статистики за разумное время нужна минимальная скорость счета β -квантов, регистрируемых детектором, $\sim 10 \text{ счет/с}^{-1}$. Если β -детектор занимает телесный угол к зоне измерения $\sim 10^{-3}$ по отношению к 4π , то минимальный поток исследуемых ядер должен быть $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$. При интенсивности циклотронного пучка $\sim 10^{11} \text{ ион/с}$ и толщине мишени $\sim 5 \text{ мт/см}^2$ можно еще исследовать ядра с сечением образования $\sim 10^{-27} \text{ см}^2$. Для ядер с временем жизни $T_{1/2}$ больше, чем время диф-

физии исследуемого атома из зоны измерения $\tau_{\text{диф}} \sim 1$ с, минимальное сечение образования будет $\sim 10^{-27}$ ($\tau_{1/2}/\tau_{\text{диф}}$) см². Для образования большого числа короткоживущих β -активных ядер можно подобрать ядерные реакции с сечением в пределах $10^{-24} - 10^{-25}$ см². Система дискриминации β -квантов по энергиям позволит проводить детектирование анизотропии β -квантов ориентированных исследуемых ядер в присутствии большого числа посторонних β -активных ядер.

4. Дополнительные возможности исследования лазером ориентированных β -активных короткоживущих ядер

К оптически ориентированным ансамблям можно применить все важные методы измерения, используемые для ансамблей ядер, ориентированных при сверхнизких температурах (~ 10 мК), такие, как измерения поляризации и углового распределения β -излучения ориентированных ядер и ЯМР/ОЯ. Данные, полученные при этих измерениях, содержат дополнительную информацию о M , Q , I исследуемого ядра, о коэффициенте смеси мультипольностей ядерного излучения, об относительной четности исходного и конечного состояния β -перехода β/β' .

5. Ограничения метода лазерной ориентации

Метод лазерной ориентации не универсальный. Его использование обусловлено многими факторами:

- наличием S -герма основного состояния электронной оболочки нейтрального атома;
- наличием β -линий при распаде исследуемого ядра;
- величине спина ядра I ;
- химическими свойствами исследуемых элементов;
- длиной волны резонансных переходов исследуемых атомов;
- величиной сверхтонкого расщепления накачиваемого перехода;
- наличием подходящей комбинации меньш-ускоренный ион;
- временем жизни исследуемого ядра и т. д.

Из вышеприведенного перечня следует, что метод лазерной ориентации не может заменить другие методы лазерной спектроскопии (основанные на детектировании флуоресценции исследуемых атомов или на детектировании фотоионов, возникших в процессе многоступенчатой фотоионизации), а лишь их дополняет.

6. Заключение

На сегодня лазерные спектроскопические установки, работающие в линии с масс-сепаратором, могут измерять β - M^2 , I , M , Q , A лишь для ядер, минимальное время жизни которых $\sim 0,1$ с. Рассмотренная проточная газовая кивета позволяет определить эти параметры

для β -активных ядер с временем жизни $10^{-3} < \tau_{1/2} < 100$ с (± 1 порядок). Этот метод является оптимальным для лазерных исследований короткоживущих β -активных ядер, получаемых на циклотронных пучках.

Нужно отметить, что точность измерения изотопического сдвига и с ним связанного определения β - M^2 ограничена долгеровским и столкновительным уширением спектральных линий исследуемых атомов и в большинстве случаев понадобятся лазера на красителе с перестраиваемой частотой, как в работе [10].

Доступный экспериментальный материал позволяет лишь приблизительно раскрыть проблемы сложных процессов рекомбинации плазмы в газовой кивете, и точные границы для времени жизни исследуемых ядер нужно установить экспериментально. Экспериментальные условия для исследования разных ядер сильно отличаются друг от друга и их уточнение можно сделать лишь после выбора исследуемого ядра.

В настоящее время в ЛЯР имеются лазеры и ускорители тяжелых и легких ионов, позволяющие осуществить исследование короткоживущих β -активных ядер с помощью лазерной ориентации. Существует около сотни ядер, которые подходят для лазерной ориентации на циклотронных пучках и для которых можно определять ядерные параметры I, I_2 .

В таблице приведены элементы с S -гермом основного состояния. Опыт, полученный при экспериментальном изучении этой методики, может быть очень полезен при возможной реализации экспериментов по лазерной ориентации спонтанно-делящихся изомеров A_m , позволяющих определить их β - M^2 и A/β .

На основании вышесказанного предлагается:

- а) приступить к изготовлению продвинутой газовой киветы с замкнутой системой циркуляции буферного газа с очистительной колонкой;
- б) приступить к экспериментальному исследованию метода детектирования угловой анизотропии лазером ориентированных короткоживущих ($10^{-3} < \tau_{1/2} < 100$ с) β -активных ядер, получаемых на циклотронных пучках.

Автор выражает благодарность Ю.П.Гангрскому и Б.Н.Маркову за постановку задачи и многократные полезные обсуждения.

Таблица

Элементы с J -термом основного состояния электронной оболочки нейтрального атома

$2s_{1/2}$	H	Li	Na	K	Cu	Rb	Ag	Cs	Au	Fr
$1s_0$	Be	Mg	Ca	Zn	Sr	Cd	Ba	Hg	Ra	
$4s_{3/2}$	N	P	As	Sb	Bi					
$1s_0$	Ne	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn				
$7s_3$	Cf	Mo								
$6s_{5/2}$	Mn	To	Re							
$8s_{7/2}$	Eu	Am								
$1s_0$	Yb	No								

Литература

1. С.К.Борисов, Ю.П.Гаурский и др. ОИЯИ, Р15-87-115, Дубна, 1987.
2. G. Huber, J. Vomp, H.-J. Kluge and E. W. Otten. - *Z. Phys.*, 1976, v. 276A.
3. U. Kopf, H.-J. Vesch, E. W. Otten and Ch. von Platen. - *Z. Phys.*, 1969, v. 226, p. 297-327.
4. H. Schweickert, J. Dietrich, R. Neugart, E. W. Otten. - *Nucl. Phys.*, 1975, v. 246A, p. 187-209.
5. Дж.Б.А. Митчелл, Д.У.Мак-Тоуэн. - В кн.: Физика ион-ионных и электрон-ионных столкновений. Москва, Мир, 1986, с. 219.
6. Б.М.Смирнов. Комплексные ионы. Москва, Наука, 1983.
7. C.E. Bemis, Jr., J.R. Beene, J.P. Young, S.D. Kramer. - *Phys. Rev. Lett.*, 1979, v. 43, p. 1859.
8. W. Harper. - *Rev. Mod. Phys.*, 1972, v. 44, p. 169.
9. М.Фингер. - В сб.: Современные методы ядерной спектроскопии, 1983, Ленинград, Наука, 1984, стр. 90 - 131.
10. G. Shinkaveg, W.W. Quivers, Jr., R.R. Pasag, C.H. Holbrow, P.G. Pappas, M.A. Attili, T.E. Thomas, D.E. Murnick, V.S. Field. - *Phys. Rev. Lett.*, 1984, v. 53, p. 2230-33.
11. А.А.Радшиг, Б.М.Смирнов. Параметры атомов и атомных ионов (Справочник). М., Атомиздат, 1986.
12. *Table of Isotopes*. 7th ed. edited by C.M. Lederer and V.S. Shirley. New York, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел

20 февраля 1989 года.

Градечны Ч.

Лазерная ориентация короткоживущих ядер на циклотронных пучках

Предложено устройство /газовая кювета/, в котором можно проводить в режиме "on-line" с циклотроном лазерную ориентацию короткоживущих ядер с детектированием угловой анизотропии ядерного излучения. На этом устройстве можно измерять изотопические сдвиги и сверхтонкую структуру атомных уровней и определять параметры ориентированных ядер. Представлен анализ процессов рекомбинации плазмы, которая возникает при торможении ядер отдачи в буферном газе. Рассмотрены основные механизмы оптической ориентации и дезориентации атомов и ядер, имеющие место в данном устройстве. Определена область применения устройства, которое позволяет исследовать ядра с временем жизни в пределах 10^{-3} - 10^2 с и сечением их образования $\geq 10^{-27}$ см². Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод О.С.Виноградовой

Нрадецнў Ї.

Laser Orientation of Short-Lived Nuclei on the Cyclotron Beams

The device (a gas cell) is proposed in which the laser orientation of short-lived nuclei with the detection of angle anisotropy of nuclear radiation can be carried out in "on-line" mode. The main atomic processes, such as recombination, mechanism of orientation and desorientation are analysed. The device can be used for measurement of isotope shifts and hyperfine structures of atomic levels and for determination of nuclear parameters of isotopes with a lifetime within 10^{-3} - 10^2 s and with the cross section of origin in nuclear reactions $\geq 10^{-27}$ cm².

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1989