

Г-453

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

6-93-398

**ГРАДЕЧНЫ
Честмир**

УДК 539.1.043

**СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЙ ДРЕЙФ АТОМОВ
РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ^{22}Na И ^{24}Na**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1993

Общая характеристика диссертационной работы

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.
Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
профессор Гангрский Ю.П.,
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник Марков Б.Н.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор Алхазов Г.Д.,
доктор физико-математических наук
профессор Ишханов Б.С.

Ведущая организация:

Институт спектроскопии РАН (г.Троицк, Московская обл.)

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 19__
года в " ____ " час. на заседании специализированного совета
Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики им. И.М.
Франка и Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 19__ года.

Ученый секретарь
специализированного совета

Таран Ю.В.

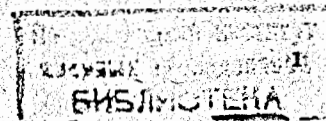
Актуальность темы. Эффект светоиндуцированного дрейфа (СИД) теоретически предсказанный и экспериментально обнаруженный в 1979 г. - это новое явление во взаимодействии лазерного излучения с веществом. Он позволяет селективно воздействовать на атомы выбранного изотопа или изомера, транспортировать их со скоростью ~ 10 м/с, локализовать их в объеме ~ 1 мм³. Такие возможности СИД предполагают и его успешное применение в ядерно-физических исследованиях.

Цель настоящей работы состояла в исследовании возможностей применения эффекта СИД в этих областях, в частности, при эффективном разделении радиоактивных изотопов и ядер изомеров и при измерении оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами с целью определения ядерных параметров.

К началу работ по теме диссертации СИД был экспериментально исследован только на естественных изотопах нескольких элементов. Был исследован СИД атомов Na, Ne и Rb, а также молекул CH₃F, NH₃, CH₃Br, CH₃OH, SF₆. Эти исследования сосредотачивались на получении максимального эффекта СИД в наиболее легко достижимых условиях. Не проводились исследования эффекта СИД при температурах выше 650 К и в условиях, не благоприятных для наблюдения эффекта СИД, например, при большой и долговременной адсорбции на стенках. Но использование эффекта СИД с радиоактивными изотопами часто можно осуществлять только в таких условиях. В этих неисследованных условиях и осуществлялись наши эксперименты при выполнении основной цели настоящей диссертации.

Научная новизна.

- 1) Впервые продемонстрирован СИД атомов радиоактивных изотопов на примере ²²Na и ²⁴Na.
- 2) Разработана методика разделения радиоактивных изотопов ²²Na и ²⁴Na с высокими значениями коэффициента разделения и эффективностью сбора.
- 3) На примере изотопов ²²Na и ²⁴Na впервые



продемонстрирован СИД при температуре - 1000 + 1200 К. Другие работы по СИД проводились при температурах до 650 К.

4) На примере атомов изотопов ^{22,23,24}Na впервые продемонстрирован СИД в широкой холодной трубке с долговременной адсорбцией на стенке и подтверждено, что эффект СИД может быть успешно использован для измерения оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами с целью определения ядерных параметров.

На защиту выносятся следующие результаты.

а) Создание экспериментальной установки для исследования светоиндуцированного дрейфа атомов микроколичеств изотопов ²²Na и ²⁴Na.

б) Эксперименты по разделению микроколичеств радиоактивных изотопов ²²Na и ²⁴Na с использованием эффекта СИД.

в) Эксперименты по СИД атомов изотопов ²²Na, ²³Na и ²⁴Na в широкой холодной трубке и оценка характеристик планируемого СИД - спектрометра.

Практическая ценность.

Разделение изотопов с помощью эффекта СИД позволяет получить на простом устройстве изотопы одновременно и высокое обогащение и низкие потери. Такая методика может найти применение при разделении дорогих (радиоактивных) изотопов и ядер изомеров и при производстве радиоизотопов применяемых в радиомедицине.

Методика измерения оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами с временами жизни до 1 мс с помощью эффекта СИД может найти применение в ядерно-физических исследованиях. В настоящее время она внедряется в ЛЯР ОИЯИ Дубна.

Апробация работы.

Диссертация основана на материалах, опубликованных в 8 печатных работах и доложенных на 6 международных конференциях и совещаниях:

1) VIIIth International Conference on Hyperfine Interaction, August 1989, Prague, Czechoslovakia.

2) Workshop on Application of Lasers in Atomic Nuclei Research, December 18 - 20, 1991, Dubna, USSR

3) Международное совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра, 21. - 24. апреля 1992 г., Алма Ата, Казахстан.

4) X. Международная вавиловская конференция по нелинейной оптике, 1. - 3. июня 1990 г., Новосибирск, СССР.

5) International Workshop on Laser Physics, 7 - 10 April, Dubna, 1992, Russia.

6) International Interdisciplinary Doppler Symposium, September 8 - 10, 1992, Prague, Czechoslovakia.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, в котором кратко сформулированы общие выводы. Общий объем работы составляет 102 страницы машинописного текста, включая 27 рисунков, четыре таблицы и 75 библиографических названий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано полуколичественное описание эффекта СИД, скорость U которого определяется следующим выражением:

$$U = v_L \phi \frac{\sigma_e - \sigma_g}{\sigma_e} \quad (1)$$

где v_L - средняя проекция скорости абсорберов, которые находятся в резонансе с лазерным излучением, ϕ - часть абсорберов, находящихся в возбужденном состоянии, но еще не испытавших "термализацию" вследствие столкновений, σ_e , σ_g - газокINETические сечения столкновений для возбужденного и невозбужденного абсорбера в буферном газе. Скорость U может достигать нескольких процентов от тепловой скорости атомов (десятки м/с) и ее зависимость от длины волны лазерного излучения имеет дисперсионный характер. Приведены примеры экспериментальных исследований, из которых можно судить о перспективности применения эффекта СИД в научных и практических приложениях, в том числе в ядерно-физических

исследованиях. Далее изложены цели и задачи исследования и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена количественному описанию эффекта СИД и в ней дан обзор важнейших работ по его исследованию. СИД абсорберов (атомов или молекул) светового излучения, находящихся в буферном газе, возникает, когда выполняются два условия: 1) возбуждение абсорберов селективно по скоростям (из-за эффекта Доплера); 2) газокINETические сечения столкновений абсорбера с атомами или молекулами буферного газа зависят от его состояния. Вследствие селективного по скоростям возбуждения возникают антипараллельные потоки абсорберов в основном и возбужденном состояниях. Когда выполняется условие 2), эти потоки испытывают неодинаковые диффузионные сопротивления. В результате этого абсорберы приобретают дрейфовую скорость.

В разделе 1.1 на примере простейшей двухуровневой системы представлены выражения, которые определяют или из которых можно установить зависимость скорости СИД от газокINETических и спектральных величин. Далее показано, что в многоуровневых системах с малой заселенностью "рабочего" уровня скорость СИД значительно меньше, чем для двухуровневых систем. Газовая система атомов с дрейфом описывается "обобщенным" уравнением диффузии:

$$\partial N / \partial t + \nabla (UN - \nabla DN) + \gamma N = 0, \quad (2)$$

где N - плотность атомов, D - эффективный коэффициент диффузии, γ - постоянная, характеризующая убыль абсорберов. В дальнейшем мы все системы с эффектом СИД моделировали, решая это уравнение при определенных начальных и граничных условиях.

В разделе 1.2 представлен краткий обзор наиболее важных работ по СИД, опубликованных до начала исследований по теме диссертации. Далее представлены особенности эффекта СИД для атомов и для молекул. Показано, что эффекты СИД для атомов с простой схемой уровней и с сильным рабочим переходом на несколько порядков больше, чем для молекул со сложной колебательной и вращательной структурой уровней. Сформулированы основные условия для осуществления СИД атомов

какого-нибудь элемента. Отмечено, что принципиально можно осуществить СИД с атомами любого элемента.

Глава 2 посвящена теоретическому рассмотрению разделения изотопов и/или ядер изомеров с помощью эффекта СИД названного ЛИДИС (LIDIS - Light Induced Drift Isotope Separation). Разделение изотопов с помощью эффекта СИД заключается в следующем: Оптические резонансы для абсорберов с разными изотопами обычно, отличаются друг от друга, благодаря изотопическому сдвигу и/или сверхтонкой структуре резонанса. Это позволяет настраивать длину волны лазерного излучения таким образом, что дрейфовые потоки разных изотопов могут быть разными, даже противоположными. Этот эффект может осуществить изотопное разделение абсорберов. Во вводной части далее обоснована актуальность изотопного разделения и характеризуются отдельные, сегодня используемые методы: электромагнитные, кинетические, физико-химические, лазерно-спектральные.

В разделе 2.1 начинается теоретическое описание ЛИДИС метода с общего случая схематически представленного на рис. 1. Главная часть сепаратора - это сепарирующая трубка с отростком, в который закладывается образец. Сепарирующей трубкой проходит луч лазерного излучения и ламинарный поток инертного газа со скоростью V . Атомы изотопов i ($i = a, b, c, d$, и т.д.) освобождаются из образца испарением или каким-нибудь другим способом атомизации и диффундируют в

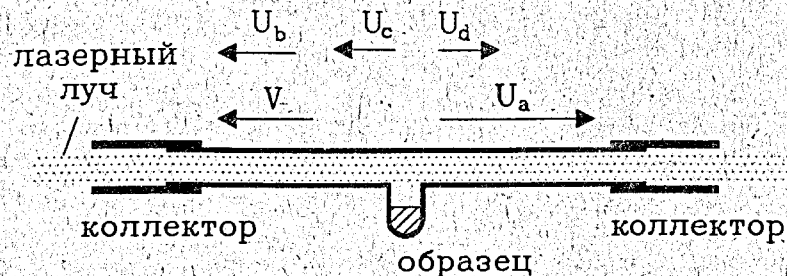


Рис. 1. Схема ЛИДИС сепаратора. Стрелки представляют величины скоростей и направления потока газа и СИД атомов изотопов a, b, c и d .

сепарирующую трубку. Здесь они вовлекаются в ламинарное течение инертного газа и взаимодействуют с лазерным излучением, создавая при этом СИД со скоростью U . Изотопы i будут улавливаться преимущественно правым или левым коллектором, в зависимости от того куда направлена сумма скоростей $V + U$.

Далее рассмотрены частные случаи ЛИДИС сепаратора, в которых атомы разделяемых изотопов не адсорбируются на поверхности сепарирующей трубки, а полностью улавливаются на коллекторах (граничные условия $N_0 = 0$, где L - расстояние от отростка до коллектора). Если образец в отростке полностью атомизирован, то эффективность ЛИДИС сепаратора близка к 100 %.

Рассмотрен стационарный случай, когда из образца освобождаются только нейтральные атомы и лазерное излучение взаимодействует с атомами только одного изотопа "а" (только $U_a \neq 0$) и выполняется $U_a \approx -2V$. Тогда атомы изотопа "а" будут дрейфовать и высаживаться на коллекторе, к которому направлен СИД, а остаток будет сноситься потоком инертного газа и высаживаться на противоположном коллекторе. Коэффициент разделения α_a изотопа "а" выделяемого на правом коллекторе определяется выражением

$$\alpha_a \approx \exp(L|V|/D_b) \quad (3)$$

Для атомов натрия можно легко реализовать СИД с характерной скоростью ≈ 5 м/с в условиях когда $D_a \approx D_b \approx 20$ см²/с. В таком случае параметр $D_b/|V|$ в (18) меньше, чем 0.1 см и коэффициент разделения на одном см может быть больше, чем $\exp(10) \approx 2,2 \cdot 10^4$.

Далее рассмотрены частные случаи без газового потока ($V = 0$). При высоких температурах ($T > 2000$ К) процессы образования и диссоциации молекул протекают достаточно быстро, так что смесь всех состояний разделяемых изотопов в сепарирующей трубке может находиться в динамическом равновесии. Коэффициент разделения такого ЛИДИС сепаратора опять растет экспоненциально с длиной L сепарирующей трубки, хотя более медленно, чем в предыдущем случае, поскольку скорость СИД в рассматриваемом случае меньше в силу того,

что изотопы находятся в атомарном состоянии не все время, а с вероятностью определяемой равновесной постоянной.

Рассмотрен частный случай ЛИДИС разделения двух изотопов а и б, который моделирует наши эксперименты по изотопному разделению ^{22,24}Na. Лазерное излучение взаимодействует с атомами обоих изотопов и индуцирует их дрейф с одинаковыми скоростями, но с противоположными направлениями ($U_a = -U_b$). Положим, что атомизация образца в отростке идет с определенной эффективностью, т.е. что только часть изотопов а и б выходит из образца в виде свободных нейтральных атомов. Относительное содержание φ разделяемых изотопов в неатомарном (молекулярном) состоянии определяет максимально достижимый коэффициент разделения α^{max} данного ЛИДИС сепаратора в соответствии с выражением

$$\alpha^{max} = 2/\varphi - 1 \quad (4)$$

Продуктивность метода ЛИДИС ограничена поглощением лазерного излучения в сепарирующей трубке. В случае, когда лазерное излучение поглощается только атомами одного, выделяемого, изотопа а, продуктивность j_a^{max} определяется следующим выражением:

$$j_a^{max} = \frac{k^{eff} \Phi}{2 \cdot \ln \alpha_a} \cdot (U_a/\bar{v})^2 \cdot (\xi/p_a) \quad (5)$$

где Φ - поток фотонов лазерного излучения, k^{eff} - эффективность использования лазерного излучения, p_a - частота поглощения фотонов одним атомом изотопа а, \bar{v} - тепловая скорость, ξ - эффективная частота столкновений. Оценено, что для выделения одного атома, ему надо поглотить $10^4 + 10^5$ фотонов.

В разделе 2.2 сравнивается ЛИДИС с другими методами разделения изотопов. Отмечаются достоинства метода: малые габариты и конструктивная простота сепаратора, возможность разделять изотопы одновременно с высоким обогащением и с низкими потерями, возможность для данного нуклида отделять изомерное ядерное состояние от основного. Низкая продуктивность метода (10^{14} атомов/с) и высокие энергетические затра-

ты ограничивают применение ЛИДИС метода. Но его можно успешно использовать для разделения дорогих радиоактивных изотопов. Недостатком ЛИДИС метода, как и других лазерных методов разделения, пока остается его малая универсальность. Из-за больших отличий в структуре атомных (или молекулярных) уровней существуют свои особенности для лазерного изотопного разделения каждого конкретного элемента и даже изотопа. В силу этого, для каждого отдельного случая будет нужно разработать свою специфическую методику. Большая часть элементов имеет сильные резонансные линии только в ультрафиолетовой или даже в вакуумно-ультрафиолетовой спектральных областях, недоступных сегодняшним перестраиваемым лазерам непрерывного действия с высоким к.п.д. Это обстоятельство тоже будет мешать быстрому внедрению ЛИДИС метода в практику.

В главе 3 описываются экспериментальные исследования разделения радиоактивных изотопов $^{22,24}\text{Na}$ ЛИДИС методом.

В разделе 3.1 перечисляются условия необходимые для осуществления эффективного изотопного разделения методом ЛИДИС: 1) низкая производительность метода и ограничение времени разделения (~ 1 час) ограничивают число атомов поглощающих лазерное излучение в образце до 10^{16} атомов натрия; 2) получение заметного коэффициента разделения требует высокой степени атомизации разделяемых изотопов.

В разделе 3.2 обоснован выбор объектов разделения.

Раздел 3.3 посвящен непосредственно разделению изотопов $^{22,24}\text{Na}$ методом ЛИДИС. Описаны возможные способы подготовки образца и обоснован выбор использованного образца в экспериментах. Мы экспериментально установили, что из алюминия натрий, образованный в процессе ядерных реакций $\text{Al}(\text{p}, \text{Zrxn})^{22,23,24}\text{Na}$, испаряется преимущественно в атомарном виде. Поэтому мы в наших экспериментах по ЛИДИС разделению непосредственно испаряли натрий из алюминия. Натрий из алюминия начинает интенсивно испаряться после его расплавления (при температурах выше 933 К). Это обстоятельство и необходимость подавления адсорбции атомов натрия на поверхности сепарирующей трубки (внутренний

диаметр $1,2 + 4$ мм) заставили нас проводить ЛИДИС эксперименты при температурах $\sim 1000 + 1200$ К, при которых до сих пор не проводились никакие эксперименты по СИД. Эксперименты по ЛИДИС разделению проводились в криптоне ($\sim 5 + 10$ торр) в сепараторах без газового потока трех типов. Длина волны лазерного излучения настраивалась на максимум поглощения D_2 линии атомов ^{23}Na . В таких условиях атомы ^{22}Na дрейфуют против и атомы ^{24}Na вдоль лазерного луча. Параметры ЛИДИС сепараторов обычно выбирались такими, чтобы при полной атомизации натрия в сепарирующей трубке расчетное значение обогащения на коллекторах достигало бы высоких значений ($\sim 100 + 10^6$). Тем не менее экспериментально достигнутое обогащение (определялось после разделения на полупроводниковом γ -спектрометре) было значительно ниже. В первом эксперименте обогащение достигло $\sim 19\%$, а в последнем, после оптимизации экспериментальных условий, 25 раз. Схема последнего ЛИДИС эксперимента представлена на рис. 2.

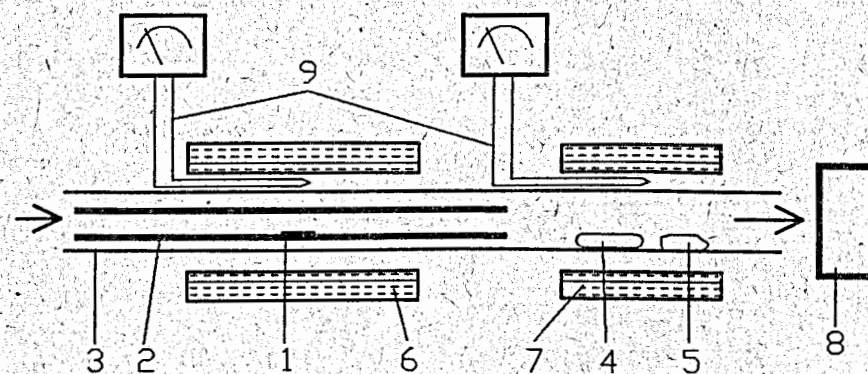


Рис. 2. ЛИДИС сепаратор с длинной сепарирующей трубкой. Цифры на рисунке представляют: 1 - образец с ^{22}Na и ^{24}Na ; 2 - сепарирующая трубка; 3 - кварцевая трубка; 4 - ампула с натрием; 5 - цирконий; 6 - и 7 - печки сопротивления; 8 - измеритель мощности лазерного излучения; 9 - термопара хромель - алюмель. Стрелка представляет направление лазерного излучения.

В разделе 3.4 описываются эксперименты, в которых было установлено, что в экспериментальных условиях, имеющих место при ЛИДИС разделении, время жизни свободных нейтральных атомов ~ 5 часов. Это означает, что достижению более высокого коэффициента обогащения, чем 25, наиболее правдоподобно препятствуют молекулярные соединения натрия, которые тоже испаряются из алюминия.

В разделе 3.5 представлены выводы из экспериментов по ЛИДИС разделению ^{22,24}Na. Наши результаты и результаты других работ по СИД, в которых имело место изотопное разделение, представлены в таблице 1.

Достигнутый коэффициент разделения $\alpha = 25$ и эффективность $\eta \approx 50\%$ уже представляют интерес для решения практических задач, например разделения радиоактивных изотопов и ядер изомеров.

Четвертая глава описывает исследования возможностей измерения оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами с помощью эффекта СИД. Оптические резонансы содержат информацию о ядерных параметрах (зарядовый радиус, параметр

Таблица 1

Объект СИД	Изотопы	ϵ	ϵ/L см ⁻¹	η
CH ₃ F	12, 13 C	1	0,0046	?
NH ₃	14, 15 N	3	0,009	?
Rb	85, 87 Rb	39	6,3	0
Na	22, 24 Na	24*	4,1*	0,5*

ϵ - коэффициент обогащения ($\epsilon = \alpha - 1$, где α - фактор разделения); L - длина сепарирующей трубки, на которой определялось обогащение; η - эффективность разделения.

* Результаты полученные при выполнении настоящей диссертации.

? - эффективность разделения не определялась.

деформации, толщина поверхностного слоя, влияние парных корреляций, спин, ядерные моменты и т.д.) и ее можно извлечь из измерений этих резонансов

В разделе 4.1 описан принцип работы СИД спектрометра. Напомним, что скорость СИД U в выражении (1) зависит от произведения $v_L \cdot \phi$, которое антисимметрично по отношению к отстройке длины волны λ лазерного излучения от длины волны λ_0 возбуждающего резонанса. Измеряя зависимость $U(\lambda)$, можно определить λ_0 . СИД атомов изучаемого изотопа может изменить распределение этого изотопа в данном пространстве. Если этот изотоп радиоактивен, то изменение его пространственного распределения можно зарегистрировать с помощью детекторов излучения от его распада. На этом может быть основанно измерение зависимости $U(\lambda)$ и определение λ_0 . Такой спектрометр должен быть очень чувствительным, поскольку излучение от ядерного распада можно регистрировать с большой эффективностью, с дискриминацией по энергиям и детекторы ядерного излучения имеют низкие собственные шумы. Важным является также факт, что до образования оптически плотной среды на пути лазерного луча, такому измерению не мешает большой избыток стабильных изотопов того же элемента.

Возможность использования СИД спектрометра для исследования короткоживущих изотопов летучих элементов подтверждает эксперимент, в котором атомы ²⁴Na "вгонялись" эффектом СИД в закрытую трубку из нержавеющей стали (внутренний диаметр 2,5 мм) нагретую до температуры 1000 + 1100 K (для уменьшения адсорбции на стенке). При сканировке частоты лазерного излучения менялась скорость СИД атомов ²⁴Na, что отражалось в количестве атомов, накопленных у закрытого конца трубки, и регистрировалось сцинтиляционным детектором. Зависимость скорости счета детектора от длины волны лазерного излучения представлена на рис. 3. Образец содержал около 10¹⁰ атомов ²⁴Na, но за время сканировки было израсходовано не более нескольких процентов от этой величины. Это свидетельствует о высокой чувствительности СИД спектрометра.

В разделе 4.2 представлены результаты экспериментов по исследованию эффекта СИД атомов ^{22,23,24}Na в широкой

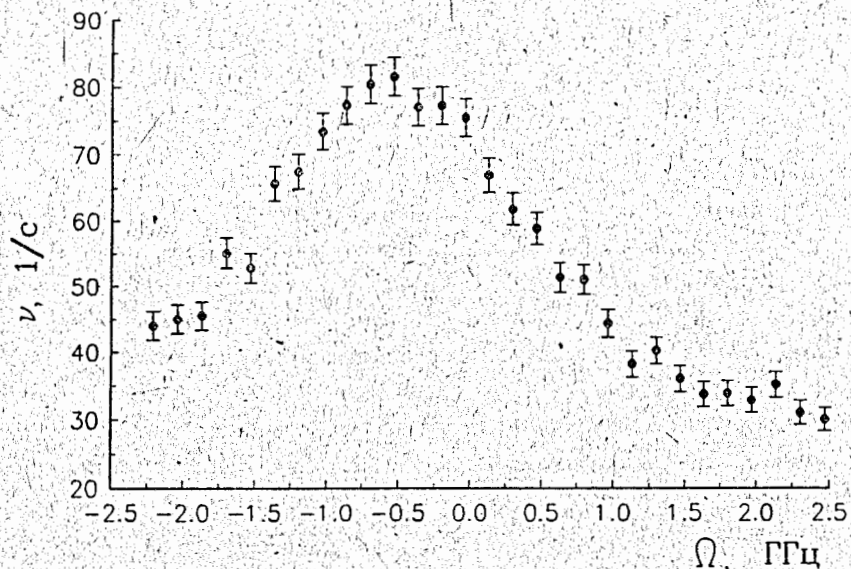


Рис. 3. Зависимость скорости счета ν детектора от длины волны лазерного излучения. $\Omega = 0$ соответствует центру D_2 линии атомов ^{24}Na .

холодной трубке, на стенке которой атомы натрия сильно адсорбируются. Отметим, что это были первые эксперименты по исследованию эффекта СИД в таких условиях и они были мотивированы потребностью выяснения возможности использования СИД спектрометра для исследования короткоживущих изотопов, атомы которых сильно адсорбируются на стенке.

Экспериментальная кювета представлена на рис. 4. Это стеклянная трубка с внутренним диаметром ≈ 8 мм, заполненная чистым криптоном при давлении ≈ 10 торр. Источник 1 атомов радиоактивного натрия находится в центре трубки. Это графитовый стержень, из которого при высокой температуре освобождаются атомы натрия. Справа и слева от источника расположены коллекторы 2. Луч 3 лазера, настроенного на D_2 линию атомов натрия, с мощностью ~ 130 мВт, расширяется телескопом, чтобы заполнить сечение трубки. При очистке буферного газа от реактивных примесей парами стабильного

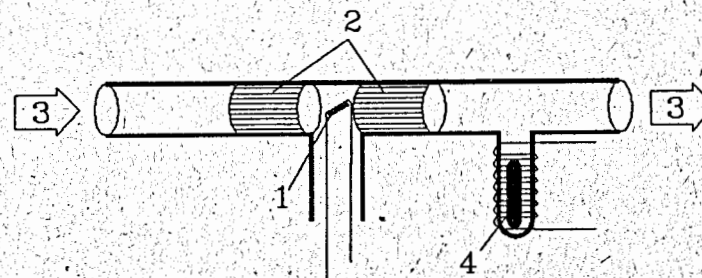


Рис. 4. СИД атомов $^{22,23,24}\text{Na}$ в широкой холодной трубке - экспериментальная кювета. 1 - источник атомов радиоактивного натрия, 2 - коллекторы, 3 - луч лазерного излучения, 4 - ампула со стабильным натрием.

натрия в присутствии лазерного излучения мы впервые наблюдали СИД атомов ^{23}Na в широкой холодной трубке. О величине эффекта СИД атомов $^{22,24}\text{Na}$ мы судили по коэффициенту разделения на разных участках коллекторов. Максимальный коэффициент разделения, который удалось определить, был 9 ± 3 . Было определено, что в левой части дрейфовой трубки скорость СИД была не меньше 22 см/с. В данных экспериментах на левом коллекторе, который находился от источника более чем 5 мм, собралось примерно 10 % радиоактивного натрия и коэффициент разделения $\alpha \approx 2$. Это является прямым подтверждением того, что СИД спектрометр может быть чувствительным прибором для измерения оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами.

На основании полученных результатов в разделе 4.3 предлагается использовать СИД спектрометр в линии с циклотроном (см. рис 5). Спектрометр состоит из дрейфовой трубки 1, наполненной буферным газом. Пучок 2 ядер отдачи с исследуемым изотопом или изомером вводится в дрейфовую трубку 1 окном 3 и тормозится в буферном газе в области с размерами ~ 1 см. Значительная часть заторможенных ионов отдачи превращается в свободные нейтральные атомы. На торцах

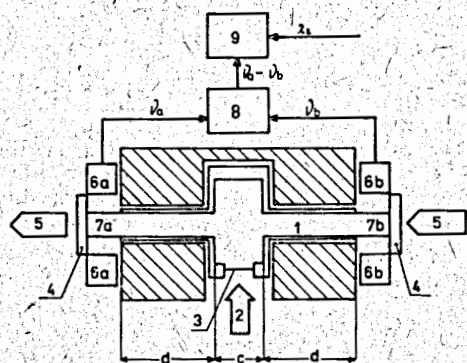


Рис. 5.
СИД спектрометр.

дрейфовой трубки имеются оптические окна 4 для ввода и вывода лазерного излучения 5. Его длина волны λ сканируется в спектральной области, в которой ожидается присутствие исследуемого резонанса. Когда лазерная длина волны проходит измеряемый резонанс, возникает СИД исследуемых атомов, который приводит к перераспределению исследуемого изотопа в дрейфовой трубке, в том числе и в зонах детектирования 7a и 7b. Это перераспределение сопровождается изменениями интенсивности характерного ядерного излучения, детектируемого системами детекторов 6a и 6b. Их скорости счета ν_a и ν_b сравниваются в схеме сравнения 8. Результирующий сигнал (разность или отношение) регистрируется многоканальным анализатором 9 в зависимости от длины волны λ лазерного излучения. Из этой зависимости можно определить длину волны λ_0 оптического резонанса атома исследуемого изотопа. СИД может достигать скоростей ~ 10 м/с. Если выбрать $d \approx 1$ см, то на данном СИД спектрометре можно исследовать нуклиды с периодом полураспада $\geq 10^{-3}$ с.

Лазерная спектроскопия с использованием СИД окажется удобным методом для исследования изотопов, основное состояние которых имеет небольшое сверхтонкое расщепление. В отличие от метода оптической поляризации этой методикой можно исследовать изотопы с нулевым спином ядра. Эта методика может оказаться пригодной для оптических исследований спонтанно делящихся изомеров америция ($^{240,242,244}\text{Am}^m$) с целью определения формы ядра в изомерном состоянии на пути к делению.

В заключении приведены основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы:

- 1) Была разработана методика эффективного разделения радиоактивных изотопов и изомеров с помощью эффекта СИД. Основные преимущества этого метода - низкие (теоретически нулевые) потери выделяемого изотопа или изомера при высоком обогащении, что очень важно при разделении дорогих радиоактивных изотопов и изомеров.
- 2) Была создана установка для работ по СИД с радиоактивными изотопами ^{22}Na и ^{24}Na в горячей трубке. В экспериментах было определено, что: а) более чем 92 % натрия испаряется из алюминия в атомарной форме и остаток (8 %) натрия испаряется в виде стабильных неатомарных образований (наиболее вероятно молекул); б) - СИД впервые осуществлялся при температурах выше 650 К; в) - для атомов ^{22}Na и ^{24}Na при температурах $950 + 1\ 000$ К отношение скорости СИД и коэффициента диффузии U/D не отличалось от общепринятых теоретических предсказаний.
- 3) Впервые было осуществлено разделение радиоактивных изотопов ^{22}Na и ^{24}Na с помощью эффекта СИД. Были достигнуты следующие экспериментальные результаты: Максимальный достигнутый фактор разделения ≈ 25 ; из образца извлекли и на коллекторах собрали до 50 % активности. Это означает, что эффективность применяемого ЛИДИС сепаратора была не меньше 50 %.
- 4) На примере атомов изотопов $^{22,23,24}\text{Na}$ был впервые реализован СИД в широкой трубке, стенки которой сильно адсорбировали исследуемые атомы. Результаты этих экспериментов подтверждают, что СИД спектрометр является достаточно эффективным и чувствительным и может быть использован для исследования целого ряда короткоживущих изомеров, например, ^{24m}Na , ^{130m}Ba , ^{136m}Ba , ^{242m}Am .
- 5) Предложен способ измерения оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами с помощью эффекта СИД, проведен расчет его ожидаемых характеристик и определена область его применения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ю.П. Гангрский, Ч. Градечны, Б.Н. Марков, О возможности измерения оптических резонансов атомов с короткоживущими ядрами с использованием светоиндуцированного дрейфа. - Сообщение ОИЯИ Дубна P13-89-741, 1989.
2. Yu.P. Gangrsky, C. Hradecny, B.N. Markov, Measurement of the Optical Resonances of Atoms with Short-Lived Nuclei by Using Light Induced Drift. - Hyperfine Interactions 61 (1990) 1411.
3. C. Hradecny, J. Slovak, T. Tethal, A.M. Shalagin, I.M. Yermolayev, Radioactive Isotope and Isomer Separation with Using Light Induced Drift Effect. - Preprint JINR Dubna E18-91-549, Дубна, 1991; Appl. Radiat. Isot. 43 (1992) 1259
4. C. Hradecny, J. Slovak, T. Tethal, I.M. Yermolayev, Radioactive Sodium Isotope Separation with Using Light Induced Drift Effect. - Proc. Int. Workshop on "Application of Lasers in Atomic Nuclei Research", Dubna, 18 - 20 December, 1990, Дубна 1991, с. 103.
5. Ю.П. Гангрский, Ч. Градечны, Я. Словак, Т. Тетгал, И.М. Ермолаев, Разделение изотопов натрия с помощью светоиндуцированного дрейфа. - В сборнике тезисов докладов международного совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра", Алма Ата, 21. - 24. апреля 1992 г.
6. C. Hradecny, T. Tethal, I.M. Yermolayev, S.G. Zemlyanoi, P. Zuzaan, Isotope Separation of ^{22}Na and ^{24}Na with Using Light Induced Drift Effect. - Communication of JINR E13-93-17, Dubna, 1993.
7. Ju.P. Gangrsky, C. Hradecny, J. Slovak, T. Tethal, I.M. Yermolayev, Light Induced Drift of $^{22,23,24}\text{Na}$ in Wide Cold Tube. - Physics Letters A 168 (1992) 230; Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research E13-92-197, Dubna 1992.
8. Yu.P. Gangrsky, C. Hradecny, G.V. Mishinsky, I. Stekl, T. Tethal, I.M. Yermolayev, Optical Trap for Free Radioactive Atoms on Base of Light Induced Drift, Communication of JINR E13-93-18, Dubna, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 ноября 1993 года.