

С 344.2
Л-878

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

8 - 4126

В.И.Лущиков

ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО ВЫНУЖДЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР
И ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ПРОТОННОЙ МИШЕНИ

Специальность 055 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1968

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук профессор Ф.Л.Шапиро,

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор Л.И.Лапидус,

кандидат физико-математических наук М.А.Кожушнер,

Ведущее предприятие: Физический институт АН СССР

Автореферат разослан " " 1968 г.

Защита диссертации состоится " " 1968 г. на заседании объединенного Ученого совета Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ г. Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований, конференц-зал Лаборатории ядерных реакций.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь совета

Ю.Чубурков

8 - 4126

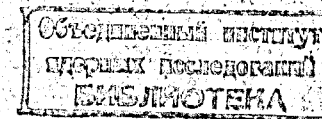
В.И.Лушиков

ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО ВЫНУЖДЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЯДЕР
И ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ПРОТОННОЙ МИШЕНИ

Специальность 055 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

56736



Исследования с поляризованными мишенями позволяют самым непосредственным образом получить информацию о спиновой зависимости ядерных взаимодействий. Кроме того, поляризованные ядра служат удобным инструментом для проверки законов сохранения пространственной и временной чётности. В диссертации описываются эксперименты по получению поляризованных ядерных мишеней методом вынужденной динамической поляризации.

Требования, предъявляемые к поляризованной ядерной мишени, существенно зависят от характера проводимого эксперимента. Однако в большинстве случаев эти требования сводятся к следующим:

1. Степень поляризации ядер должна быть не менее 10-20%.
2. Мишень должна содержать 10^{20} - 10^{22} ядер/см³ и иметь минимальное количество посторонних ядер.
3. Конструкция мишени должна быть удобной для проведения эксперимента.

Наиболее универсальным методом поляризации является так называемый статический метод поляризации во внешнем магнитном поле. Получаемая этим методом поляризация (для ядер со спином $I = 1/2$ и магнитным моментом $\mu_{\text{я}}$) дается выражением

$$p = \text{th} \frac{\mu_{\text{я}} H}{k T}, \quad (1)$$

где H - внешнее магнитное поле, T - температура мишени и k - постоянная Больцмана.

Для достижения поляризации порядка 10-20% необходимы магнитные поля 100-200 килоэрстед и температуры $0,01^{\circ}\text{K}$. Помимо того, что технические трудности в получении таких магнитных полей и температур чрезвычайно высоки, практическое использование метода ограничивается также малой холодопроизводительностью известных методов получения сверхнизких температур, которая исчисляется эргами в секунду. Это обстоятельство ограничивает возможности экспериментов с более или менее интенсивными пучками заряженных частиц из-за неизбежного разогрева мишени. Использование высоких внутренних магнитных полей на ядрах в ферромагнитных и парамагнитных материалах значительно сужает круг ядер, которые могут быть поляризованы. Введение примесных ядер в ферромагнитную кристаллическую решетку ограничивается допустимым содержанием поляризуемых примесных ядер 1-2%. Кроме того, последние методы в большинстве случаев также требуют применения сверхнизких температур $\approx 0,01^{\circ}\text{K}$.

Трудности, связанные с получением и использованием сверхнизких температур, в значительной мере удается обойти в развиваемых за последние годы динамических методах поляризации ядер, в которых тем или иным способом создается поляризация, отличная от ее термически равновесного значения (1).

Наилучшие результаты получены с помощью так называемого метода вынужденной динамической поляризации ядер, предложенного А.Абрагамом^{1,2/}. (В иностранной литературе часто используется предложенное Абрагамом название метода "солид-эффект"). Этот метод позволяет получать значительную ядерную поляризацию при обычных гелиевых температурах и в умеренных магнитных полях 10-20 килоэрстед. В принципе метод применим к любым твердым диамагнитным материалам, в которые каким-либо способом введено небольшое количество парамагнитной примеси. В основе механизма вынужденной динамической поляризации лежит явление ядерного и электрон-

ного магнитного резонанса. В первой главе диссертации изложены некоторые аспекты теории магнитного резонанса, существенные для описания процесса динамической поляризации. В частности, поведение спиновой системы в переменном магнитном поле, ширина линии при магнитном дипольном взаимодействии, процессы спиновой диффузии. Вторая глава посвящена краткому изложению теории вынужденной динамической поляризации.

Механизм вынужденной динамической поляризации наиболее наглядно может быть выяснен на примере простейшей системы, состоящей из отдельных независимых пар электрон+ядро со спинами соответственно $S = 1/2$ и $I = 1/2$. Энергетические уровни такой пары в магнитном поле H приведены на рис. 1, где также указаны больцмановские значения населенностей уровней при температуре T (первый столбец справа). Хорошо известно, что внешним высокочастотным полем в этой системе могут быть вызваны так называемые разрешенные переходы между уровнями 1-3 и 2-4 (электронный парамагнитный резонанс на частоте $\nu_e = \frac{2\mu_e H}{h}$, μ_e - магнитный момент электрона) и между уровнями 1-2 и 3-4 (ядерный магнитный резонанс на частоте $\nu_n = \frac{2\mu_n H}{h}$).

Магнитное диполь-дипольное взаимодействие между ядром и электроном частично перемешивает волновые функции всех четырех состояний, что приводит к возможности возбуждения высокочастотным полем "запрещенных" переходов 1-4 и 2-3. Облучение образца интенсивным в.ч. полем, например, с частотой запрещенного перехода 2-3 $\nu_+ = \nu_e - \nu_n$ приведет к выравниванию заселенностей уровней 2 и 3 (насыщение перехода), в то время как релаксационные переходы между уровнями, обусловленные взаимодействием системы с решеткой, будут стремиться поддерживать равновесное больцмановское распределение заселенностей. Из-за незначительности ядерного магнитного момента вероятности ядерных релаксационных переходов 1-2 и 3-4 обычно малы по сравнению с вероятностью

тепловое равновесие | насыщение перехода 2-3 | насыщение перехода 1-4

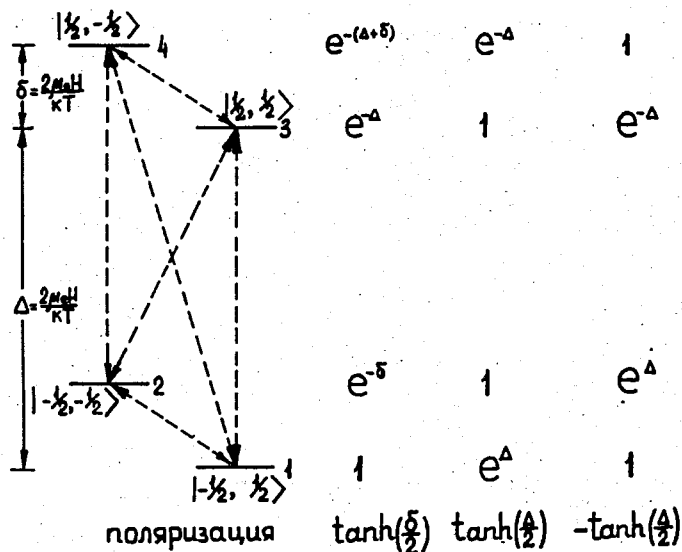


Рис. 1. Схема уровней и возможных переходов системы электрон + ядро.

электронных релаксационных переходов, и ими можно пренебречь. В этом случае при наличии насыщающего поля с частотой ν устанавливается новое распределение заселенностей, приведенное во втором столбце справа на рис. 1, и соответствующее ядерной поляризации

$$p = \text{th} \frac{\mu_n H}{k T}, \quad (2)$$

что значительно больше термически-равновесного значения (1), поскольку $\mu_n \approx 10^3 \mu_B$. Аналогично возбуждение второго запрещенного перехода 1-2 приводит к установлению ядерной поляризации, лишь знаком отличающейся от (2).

Основные трудности в практической реализации этого метода связаны с тем, что, в отличие от рассмотренной выше модели независимых пар, в реальных системах имеет место взаимодействие между всеми электронными и ядерными спинами. Это приводит к значительному размыванию уровней, в результате чего внешнее высокочастотное поле возбуждает оба запрещенных перехода, и достижимая поляризация оказывается ниже ее ожидаемого значения (2). Уменьшение размывания уровней возможно за счет снижения концентрации электронных спинов. В этом случае непосредственно динамической поляризации подвержены лишь ядра, расположенные вблизи электронного парамагнитного центра, а поляризация удаленных ядер осуществляется за счет механизма спиновой диффузии^{/3/}.

В последние годы успешно стала развиваться строгая кванто-статистическая теория динамической поляризации, предложенная в работе М.А.Кожушнера и Б.Н.Провоторова^{/4/}, а также А.Абрагамом и М.Боргини^{/5/}. В основу этой теории легли работы Б.Н.Провоторова по исследованию поведения спиновой системы в сильном радиочастотном поле. Хотя сложность теории не позволяет провести детальных расчетов для конкретных случаев, можно однако надеяться, что дальнейшая разработка теории существенно расширит практические возможности метода динамической поляризации.

Для проведения экспериментальных исследований по динамической поляризации нами было создано несколько установок для работы в магнитных полях $H = 3$ кэ (частота насыщения $\nu = 9$ Гц, длина волны $\lambda = 3$ см), $H = 10$ кэ ($\nu = 35$ Гц, $\lambda = 8$ мм) и $H = 17$ кэ ($\nu = 65$ Гц, $\lambda = 4,5$ мм). Принципиальная схема этих установок приведена на рис. 2. Исследуемый образец помещался в высокочастотный резонатор и погружался в гелиевый криостат, позволявший проводить эксперименты при температурах вплоть до 1°K . Стабильное и однородное по образцу (с точностью до одного эрстеда) внешнее маг-

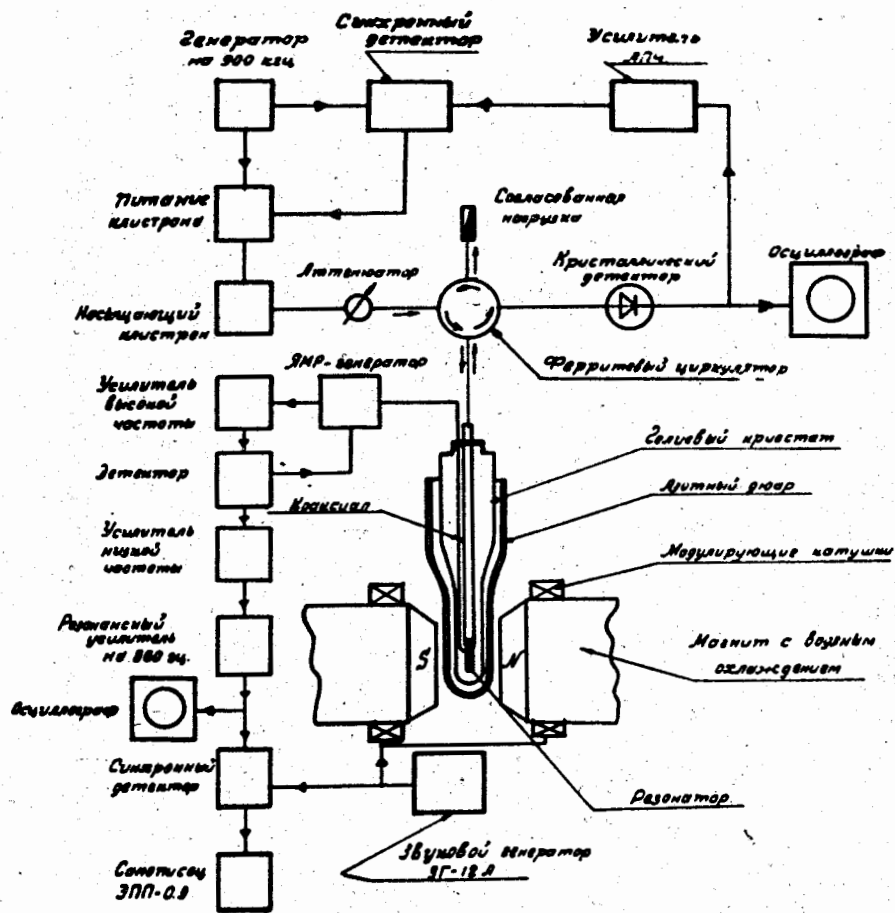


Рис. 2. Принципиальная схема установки для исследования динамической поляризации.

нитное поле создавалось электромагнитом. Высокочастотный генератор системой автоматической подстройки частоты стабилизировался по собственной частоте резонатора. Настройка установки и измерение достигаемой поляризации осуществлялись путем наблюдения сигнала ядерного магнитного резонанса, площадь которого пропорциональна величине ядерной поляризации. В качестве датчиков резонанса использовались автодинные генераторы и схемы Q-метра.

Первые эксперименты, проведенные при $H = 3 \text{ кэ}$, изложены в третьей главе диссертации. Образцом служил полиэтилен, парамагнитные центры в котором создавались при облучении быстрыми нейтронами в канале ядерного реактора в течение 20-40 часов (интегральная доза облучения $\approx 10^{18}$ нейтронов/см²). Максимальная достигнутая поляризация протонов составила 0,75% в поле $H = 3,5 \text{ кэ}$ и при температуре $T = 1,6^\circ\text{K}/6/$. Низкое значение полученной поляризации связано, по-видимому, с довольно сложным характером парамагнитных центров, образующихся при нейтронном облучении. Гораздо лучшие результаты были получены в тех же экспериментальных условиях в кристаллах двойного лантан-магниевого нитрата $\text{La}_2\text{Mg}_x(\text{NO}_3)_{12}24\text{H}_2\text{O}$ [7]. В качестве парамагнитной примеси в эти кристаллы вводилось небольшое количество церия (0,1 - 1,0% по отношению к лантану). Достигнутая поляризация протонов кристаллизационной воды в кристалле с содержанием церия 0,5% составила 4%, что в 170 раз выше ее термически равновесного значения (1), однако еще в 4 раза меньше максимально возможной величины (2).

Поляризованная протонная мишень, пригодная для проведения ядерно-физических экспериментов, была получена в поле $H = 10 \text{ кэ}$ при температуре $1,5^\circ\text{K}/8/$ (4 глава диссертации). Образцом служил также кристалл лантан-магниевого нитрата, в который вводилось 0,5% неодима, обогащенного до 98% четными изотопами. По сравнению с примесью церия, линия электронного резонанса ионов Nd^{+++} размыта значительно

меньше (ширина линии 5 эрстед для неодима и 12 эрстед для церия). Обогащение четными изотопами устраняет сверхтонкое расщепление зеемановских уровней. В образце размерами 33 x 23 x 7,5 мм³ была получена поляризация протонов 35% (максимальное теоретическое значение - 55%). Этот образец был успешно использован в экспериментах по получению поляризованного нейтронного пучка путем пропускания через поляризованную протонную мишень^{/9/}.

Следующим этапом усовершенствования мишени явился переход к работе в магнитном поле 17 кэ (частота облучения 65 Гц) и при температуре 1°К. В этих условиях в образцах лантан-магниевого нитрата с примесью 0,5 - 1,0% неодима, имеющих объем до 50 см³, достигается поляризация протонов 70%. Мишень с указанными параметрами использовалась для дальнейшей отработки метода поляризации нейтронов^{/10/}, а также в экспериментах по определению спинов нейтронных резонансов гольмия^{/11,14/}.

Помимо работ с поляризованной протонной мишенью была предпринята попытка получить поляризованную дейтериевую мишень. С этой целью вместо обычной кристаллизационной воды в кристалл вводилась тяжелая вода. Первые эксперименты^{/12/} в поле 10 кэ показали, что при возбуждении запрещенных переходов имеет место более чем 300-кратное увеличение поляризации ядер дейтерия по сравнению с ее равновесным значением - 0,015%. Точное измерение достигнутой поляризации выполнить не удалось из-за слабости равновесного сигнала ядерного резонанса дейтерия. Однако эти результаты позволили рассчитывать на достижение 10%-й поляризации дейтерия в поле 17 кэ и при температуре 1,3°К. В этих условиях с мишенью размерами 15 x 24 x 35 мм³ был поставлен эксперимент по исследованию n-d рассеяния^{/13,14/}. Помимо основного результата эксперимента, позволившего выбрать истинный набор длин рассеяния нейтрона на дейтоне, измерения с нейтронным пучком позволили

оценить поляризацию дейтерия в мишени, которая оказалась близкой к ожидаемому значению и была равна (12±5)%.

Основным результатом настоящей работы является получение поляризованной протонной мишени большого объема (до 50 см³) с высокой степенью поляризации (70%) и использование этой мишени для проведения ряда физических экспериментов. Исследования с дейтерированной мишенью показали возможность динамической поляризации дейтонов. Дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных работ по динамической поляризации должно позволить получать поляризованные мишени, более удобные для проведения физических экспериментов. В частности, первоочередной является проблема выбора нового материала для мишени, более водородосодержащего, чем лантан-магниевого нитрат. Такими материалами могли бы служить органические соединения при использовании более высоких магнитных полей или более низких температур, чем в настоящей работе.

Основной материал диссертации опубликован в следующих работах:

1. В.И.Лушиков, А.А.Маненков, Ю.В.Таран, ФТТ, 3, 3503 (1961).
2. В.И.Лушиков, Ю.В.Таран, Препринт ОИЯИ 1117, Дубна (1962).
3. П.Драгическу, М.Драгическу, В.И.Лушиков, Б.С.Неганов, Л.Б.Парфенов, Ю.В.Таран. Препринт ОИЯИ Р-1626, Дубна (1964).
4. В.И.Лушиков, Ю.В.Таран, ЯФ, 1, 850 (1965).
5. В.И.Лушиков, Ю.В.Таран, А.И.Франк. Письма ЖЭТФ, 1, 21 (1965).

Л и т е р а т у р а

1. A.Abragam, W.G.Proctor, *Compt. Rend.*, 246, 2253 (1958).
2. Джеффрис "Динамическая ориентация ядер" Изд-во "Мир" Москва (1965).
3. Г.Р.Хуцишвили УФН, 87, вып. 2 (1965).
4. М.А.Кожушнер, Б.Н.Провотовов. ФТТ. 6. 1472 (1964).
5. A.Abragam, M. Borghini, *Progress in Low Temperature Physics*, IV, 384, Amsterdam (1964).

6. В.И.Лушиков и др. ФТТ, 3, 3503 (1961); А.В.Кессенних и др. ФТТ, 5, 1640 (1963).
7. В.И.Лушиков, Ю.В.Таран. Препринт ОИЯИ 1117, Дубна (1962).
8. П.Драгическу и др., препринт ОИЯИ Р-1626, Дубна (1964).
9. P. Draghicescu et al., Phys. Lett., 12, 334 (1964).
10. Ю.В.Таран. Диссертация, препринт ОИЯИ 3221, Дубна (1967).
11. В.П.Алфименков и др. ЯФ, 3, 55 (1966).
12. В.И.Лушиков и др. Письма ЖЭТФ, 1, 21 (1965).
13. V.P. Alfimenkov et al. preprint JINR E3-3030, Dubna, (1966).
14. В.П.Алфименков. Диссертация, препринт ОИЯИ, 3280, Дубна (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел

25 октября 1968 года.