

H 62

УДК 539.125.5

3-88-163

НИКИТЕНКО
Юрий Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
ОТ СПЛОШНЫХ И ДИСПЕРГИРОВАННЫХ СРЕД**

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

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

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Голиков В.В.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Казарновский М.В.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Морозов В.И.

Ведущая организация - Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1988 г.
в _____ час. на заседании Специализированного совета
Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1988 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета

Таран Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

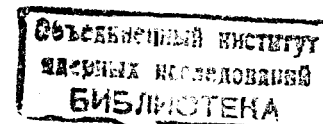
Актуальность проблемы. Интерес к исследованиям отражения ультра-холодных нейтронов (УХН) от веществ с отношением χ мнимой части амплитуды рассеяния к реальной в диапазоне $10^{-5}+10^{-3}$ (слабопоглощающие вещества) обусловлен существующим с 1970 г. расхождением между экспериментальными и расчетными значениями вероятности поглощения μ (под поглощением УХН понимается их захват ядрами и нагрев средой) УХН при их отражении от поверхности. За 15-летний период экспериментальных исследований по этой проблеме "аномального" поглощения УХН было получено много данных, но они часто противоречат друг другу /1/.

Сам метод определения вероятности поглощения, основанный на измерении времени жизни УХН в ловушке, до последнего времени был по существу единственным. Этот метод обладает определенными недостатками. В связи с этим представлялось целесообразным разработать новый высокочувствительный способ измерения вероятности поглощения и провести с его помощью измерения на ряде слабопоглощающих веществ.

Интерес к исследованиям отражения УХН от веществ с большим сечением захвата ($\chi = 10^{-1}+10$) связан прежде всего с возможностью проверки предсказанного в 1961 г. И.И. Гуревичем и П.Э. Немировским /2/ явления роста коэффициента отражения УХН от поверхности вещества с увеличением сечения захвата, так называемого "металлического" отражения УХН.

Кроме того, исследования отражения УХН от веществ с большим сечением захвата позволяют посмотреть в целом на задачу рассеяния частицы на комплексном потенциале. Действительно, для низкоэнергетических нейтронов (в частности, УХН) изотопы гадолиния и кадмия и их соединения реализуют случаи, когда реальная часть потенциала взаимодействия может быть положительной или отрицательной, а по абсолютной величине - сравнимой с мнимой. При этом в диапазоне УХН исследования могут быть проведены в широком по отношению к величине потенциала энергетическом интервале.

Целью диссертационной работы явилось измерение вероятности поглощения УХН слабопоглощающими веществами, экспериментальная проверка применимости комплексного потенциала взаимодействия с большой мнимой частью для описания отражения УХН от поверхности твердого тела и ис-



следование распространения УХН в сложных конфигурациях нейтронных труб с учетом их магнитного и гравитационного взаимодействий. Первой задачей работы была разработка нового высокочувствительного способа измерения вероятности поглощения УХН. Вторая задача состояла в экспериментальном исследовании отражения УХН от веществ с большим сечением захвата и выявлении характерных особенностей отражения. Третьей задачей, непосредственно связанной с первыми двумя, была разработка метода и создание установки для измерения интегрального по углу коэффициента отражения УХН. Четвертая задача состояла в необходимости решения задач диффузии УХН в составном, разветвленном и намагниченном нейтронных трубах.

Научная новизна работы состоит в том, что при ее выполнении впервые:

- разработан метод измерения интегрального по углу коэффициента отражения УХН от поверхности твердого тела, при этом:

1) показано, что данным методом можно измерять граничную скорость материала, толщину слоя окисла на металле, исследовать слоистые материалы;

2) новым методом определена граничная скорость замороженного на алюминиевую фольгу льда D_2O ;

- разработан способ измерения вероятности поглощения УХН, основанный на диффузии УХН в порошках, при этом:

1) проведены исследования диффузии УХН в порошках различных веществ;

2) экспериментально показано, что этим способом можно проводить измерения величины η на уровне $\sim 10^{-5}$;

3) проведены измерения η для материалов порошков меди, окиси меди и графита; для отожженных порошков меди, окиси меди и графита при $200^\circ C$ получено согласие экспериментальных данных с теорией;

4) экспериментально показано, что этим способом можно исследовать пористость материала;

- исследовано отражение УХН от таких веществ с большим сечением захвата как Cd , ^{113}Cd , Gd , ^{155}Gd , Gd_2O_3 , $^{155}Gd_2O_3$ и установлено:

1) для веществ с положительной реальной частью амплитуды рассеяния коэффициент отражения УХН с ростом сечения захвата сначала падает, проходит через минимум, а в дальнейшем растет;

2) для веществ с отрицательной реальной частью амплитуды рассеяния коэффициент отражения УХН с ростом сечения захвата монотонно растет;

3) с уменьшением энергии УХН коэффициент отражения возрастает;

- решены задачи диффузии УХН в составном, разветвленном и намагниченном нейтронных трубах, при этом:

1) дана интерпретация экспериментальных данных на основе теории диффузии УХН в разветвленном нейтронной трубе;

2) выявлен характер влияния параметров гравитационного спектрометра на пропускание УХН;

3) исследовано влияние поляризационных характеристик и толщины слоя порошка на отражение и пропускание УХН.

Практическая ценность работ

1. Экспериментальные данные по вероятности поглощения УХН в отожженных меди, окиси меди и графите объясняются исходя из известных сечений захвата и нагрева УХН в этих веществах, что важно для выяснения характера взаимодействия УХН с поверхностью и, в частности, для разработки сосудов с временем хранения УХН, близким к времени β -распада нейтрона.

2. Исследование отражения УХН веществами с большим сечением захвата позволило установить, что комплексный потенциал с большой мнимой частью может быть использован для описания взаимодействия УХН со средой, что важно для физики УХН.

3. Данные граничной скорости D_2O важны для создания сосуда хранения УХН с замороженным слоем льда D_2O .

4. Явление диффузии УХН в порошках в условиях полного отражения от поверхности зерен может быть использовано как чувствительный метод изучения свойств поверхности твердого тела (в том числе и магнитных), а также при разработке поляризатора УХН.

5. Проведенные исследования по диффузии УХН в нейтронных трубах сложных конфигураций могут быть применены для разработки установок, использующих газ УХН.

6. Выполненное исследование свойств гравитационного спектрометра позволяет повысить точность спектральных измерений диффузионного потока УХН.

Апробация работ. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Сессии Отделения ядерной физики АН СССР (г. Москва, 1986 г.), на II рабочем совещании по исследованию конденсированных сред на реакторе ИБР-2 (Дубна, 1985 г.), на Международной школе по рассеянию нейтронов в конденсированных средах (Штадт-Велен, ГДР, 1987 г.), на XIV совещании по координации научно-исследовательских работ, выполненных с использованием исследовательских ядерных реакторов (г. Димитровград, 1986 г.), на Международной конференции по нейтронной физике (Киев, сентябрь 1987 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано восемь печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (94 страницы, 4 таблицы, 26 рисунков).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены предметы исследований, излагается их актуальность и общее состояние к моменту исследования, формулируются цели и задачи, решенные при их выполнении, перечисляются положения, выносимые автором на защиту. Дается краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе описывается метод измерения интегрального по углу коэффициента отражения УХН. Метод реализован на канале УХН реактора ИБР-2 (рис.1). Канал изготовлен из цилиндрической стальной трубы

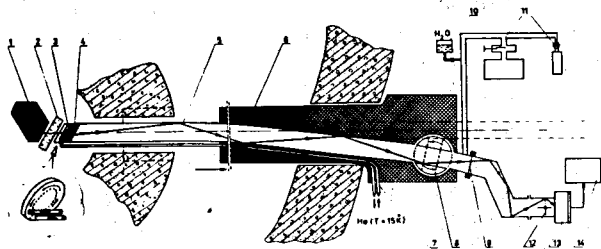


Рис.1. Канал УХН на ИБР-2. 1 - активная зона реактора, 2 - замедлитель, 3 - конвертор УХН, 4 - дырочный замедлитель, 5 - нейтронный канал, 6 - защита, 7 - криогенные трубопроводы, 8 - защитный шибер, 9 - вакуумная мембрана, 10 - вода для намораживания конвертора, 11 - система вакуумной откачки, 12 - шторка, 13 - детектор, 14 - электронная аппаратура.

с внутренним диаметром 187 мм и имеет длину 9,6 м. Нейтронный канал выложен из 200 мм отрезков электрополированной медной трубы. Пропускание УХН нейтронным каналом составляет 0,24. Для получения чистого пучка УХН к каналу УХН подсоединяются угловые повороты из нержавеющей стали или меди. В головной части нейтронного канала расположен источник УХН, представляющий собой плоскую пластину из гидрида циркония и "дырочный" замедлитель. В качестве замедляющей среды в дырочном замедлителе ис-

пользуется вода. Детектором УХН служит пропорциональный счетчик на основе ^3He с входным алюминиевым окном площадью 130 см^2 . При мощности реактора 2 МВт счет УХН детектором составлял 20 с^{-1} при отношении потока УХН к фоновому 20:1. За угловыми поворотами к нейтронному каналу подсоединяется устройство (рис.2) для измерения коэффициента отражения УХН от исследуемого образца.

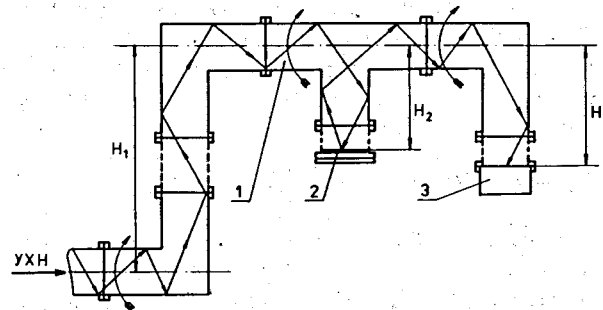


Рис.2. Устройство для измерения интегрального коэффициента со спектрометрией в гравитационном поле. 1 - тройник, 2 - образец, 3 - детектор.

Основным элементом устройства является разветвитель нейтронного канала (тройник). С помощью S-образного колена тройник располагается на высоте H_1 над уровнем нейтронного канала. Таким образом, благодаря замедлению УХН в гравитационном поле обеспечивается изменение спектра УХН на образце 2. Участок (отвод) тройника с образцом может вращаться вокруг оси тройника, обеспечивая тем самым дополнительную возможность изменения спектра. При исследованиях порошков этот отвод ориентировался вертикально вниз. Детектор 3 устанавливается на расстоянии $H_3 = 73 \text{ см}$ ниже оси тройника, что обеспечивает регистрацию всего спектра УХН, находящихся на уровне оси тройника.

Для изменения чувствительности к измерению вероятности поглощения УХН в образце, а также минимизации времени измерений в отводах тройника установлены диафрагмы. Такая конструкция устройства, когда исследуемый образец и детектор разнесены, выбрана из соображений независимого и простого доступа к образцу и детектору. Опыт эксплуатации устройства показал, что в нем достаточно легко можно осуществлять нагрев образца до 600°C и охлаждение до -190°C , переходить от сплошных образцов к таким сильно диспергированным, как порошок, размещать заслонки непосредственно перед образцом или детектором. В случае моноэнергетических нейтронов интегральный по углу коэффициент отражения

УХН от образца площадью S_0 определяется так:

$$R(\nu) = \frac{J_0^{-1} - \omega J^{-1} + J_1^{-1}(\omega - 1)}{J_0^{-1} - J_1^{-1}}, \quad (I)$$

где J - счет с исследуемым образцом; J_0 - счет с образцом, для которого коэффициент отражения равен нулю (полиэтилен); J_1 - счет с образцом, для которого коэффициент отражения равен единице (медь); $\omega = S/S_0$; S - максимально возможная площадь образца.

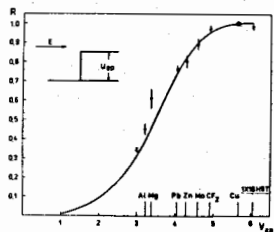
С другой стороны, интегральный коэффициент $R(\nu)$ может быть выражен через коэффициент отражения $R(\nu, \theta)$, где θ - угол падения, и анизотропию потока $A(\theta)$ на образце

$$R(\nu) = \int R(\nu, \theta) A(\theta) d\cos^2 \theta / \int A(\theta) d\cos^2 \theta. \quad (2)$$

Анизотропия потока $A(\theta)$ была определена из измерений $R(\nu)$ с калибровочным образцом, для которого $R(\nu, \theta)$ хорошо известно. Калибровочным образцом служил образец из молибдена. В результате было получено $A(\theta) = \cos \theta$.

Явный вид $R(\nu, \theta)$ определяется характером исследуемого образца. В простейшем случае слабопоглощающего сплошного образца $R(\nu, \theta)$ определяется только граничной скоростью $\nu_{гп}$ материала. В этом случае измерения коэффициента отражения позволяют определить $\nu_{гп}$. Экспериментальные данные и расчетная кривая зависимости $R(\nu_{гп})$ приведены на рис.3.

Рис.3. Зависимость коэффициента отражения УХН R от граничной скорости $\nu_{гп}$ (м/с).



Из рисунка видно, что наибольшая точность измерения $\nu_{гп}$ при заданной точности измерения $\Delta R/R = 0,01$ достигается в интервале значений $\nu_{гп} = 3+4,5$ м/с и составляет $\Delta \nu_{гп}/\nu_{гп} = 0,007$.

Описанный метод измерения интегрального коэффициента отражения УХН был использован при определении граничной скорости намораживаемого на поверхность алюминиевой фольги льда \mathcal{D}_2O . Ранее наморажива-

ние \mathcal{D}_2O осуществлялось в экспериментах по определению времени хранения УХН в замкнутых сосудах и привело к противоречивым результатам. Поскольку в этих экспериментах не проводилось измерений граничной скорости тяжелого льда, то случаи отсутствия эффекта намораживания можно было объяснить низкой граничной скоростью \mathcal{D}_2O . Измеренное значение граничной скорости \mathcal{D}_2O составило $\nu_{гп} = 4,85 \pm 0,15$ м/с, что, по-видимому, ниже максимальной границы спектра УХН в экспериментах, где намораживание \mathcal{D}_2O не привело к увеличению времени хранения, и выше максимальной границы спектра в экспериментах, где наблюдался рост времени хранения.

Интегральный метод позволяет проводить измерения толщины слоя окисла на поверхности металла. Чтобы убедиться в этом, были проведены измерения коэффициента отражения в зависимости от толщины напыленного на алюминиевую фольгу слоя меди. В результате было получено, что точность 1% в измерении коэффициента отражения соответствует точности 4,5 Å в измерении толщины слоя $\alpha = 0+200$ Å. Отметим, что точность 1% в измерении коэффициента отражения, обусловленная статистикой, достигается за 0,5+1 час измерений.

Совершенно естественным было использовать методику измерения интегрального коэффициента отражения в исследованиях диффузии УХН в такой сильнодиспергированной среде, какой является порошок. Уже первые измерения на порошке меди, в которых определялась величина η для неотожженного, промытого в спирте и отоженного материала, дали значения, хорошо согласующиеся с данными, полученными методикой хранения УХН в сосуде.

Вторая глава посвящена описанию ранее выполненных работ по проблеме "аномального" поглощения УХН, обоснованию и описанию нового способа измерения вероятности поглощения, а также описанию выполненных новым способом измерений. Решения проблемы "аномального" поглощения УХН нет и в настоящее время. После многолетних усилий экспериментаторов и теоретиков в нашей стране и за рубежом удалось установить, что причиной потерь УХН на уровне $\eta \approx 10^{-3}$ является их нагрев на стенках сосуда. Проведя очистку поверхности материала, на меди удалось вплотную приблизиться к значениям η , предсказываемым теорией. Совершенствовалась методика измерений. Так, было осуществлено измерение вероятности поглощения путем регистрации нагретых УХН. Для исключения паразитного влияния щелей исследуемый материал стал вноситься в сосуд хранения. Был осуществлен проточный режим измерений. Основным способом очистки поверхности стал высокотемпературный отжиг материала.

Новый способ измерения вероятности поглощения основан на использовании диффузии УХН в порошке. Диффундируя в порошке, УХН в условиях

полного отражения от поверхности зерен испытывают, как и при хранении УХН в ловушке, большое число столкновений. Тем самым увеличивается в сотни раз по сравнению с однократным отражением вероятность поглощения УХН и, как следствие, растет чувствительность к измерению вероятности поглощения.

Существование диффузии УХН в слое порошка приводит к зависимости коэффициента отражения от толщины слоя (рис.4). Из зависимости

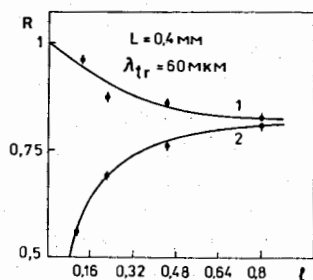


Рис.4. Зависимость коэффициента отражения R от толщины l (мм) слоя порошка меди. 1 - отражающая (медная) подложка, 2 - поглощающая (полиэтиленовая) подложка.

коэффициента отражения $R(l)$ можно извлечь параметры, характеризующие диффузию (вообще, достаточно знать два значения коэффициента отражения R_1 и R_2 при двух значениях толщины l_1 и l_2 , со-

ответственно), например длину диффузии L и транспортную длину λ_{t2} . Транспортная длина λ_{t2} равна длине рассеяния λ_s , непосредственно связанной с размерами зерна и плотностью упаковки зерен в порошке. С экспериментальной точностью $\sim 30\%$ было подтверждено, что для УХН, диффундирующих в порошке, $\lambda_s = \lambda_{t2}$.

Для определения вероятности поглощения УХН при столкновении с зерном достаточно знать коэффициент отражения R_∞ от слоя бесконечной толщины

$$M = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{1 - R_\infty}{1 + R_\infty} \right)^2 \quad (3)$$

В экспериментах по определению M толщина слоя порошка выбиралась из условия $l = 3L_M$ (L_M - максимально возможная длина диффузии), при котором отличие M от значения, соответствующего бесконечной длине слоя, не превышает 1%.

Большинство измерений по определению M методикой хранения в сосуде было выполнено в медных сосудах. В связи с этим измерения новым способом проводились вначале на порошке меди. Порошок был получен из бруска бескислородной меди и имел средний размер зерна ~ 800 мкм. Для этого свеженаточенного порошка получено значение $\eta = (8,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-4}$. После этого порошок был промыт в спирте и для него получено $\eta = (1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$. Эти результаты хорошо согласуются с полученными ранее соответствующими данными $7 \cdot 10^{-4}$ и $1,45 \cdot 10^{-3}$ (см. /3/). После отжига порошка при 500°C в вакууме 10^{-2} Торр получено значение $\eta = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$, что согласуется с расчетным зна-

чением $1,45 \cdot 10^{-4}$ и результатами /4,5/, полученными методикой хранения. Условия отжига не исключали, однако, образования на поверхности зерен слоя закиси Cu_2O . Предполагая, что слой закиси образовался настолько толстым, что отражение УХН происходило исключительно только от Cu_2O , получим экспериментальное значение $\eta = (9,25 \pm 2,3) \cdot 10^{-5}$. Это значение согласуется с расчетным $\eta_a = 1,05 \cdot 10^{-4}$, основанным на известных сечениях захвата в меди и кислороде. Естественным было провести измерения η на не исследованном ранее веществе. В частности, был выбран порошок химически чистой окиси меди CuO с размером зерна 15 мкм. Отжиг порошка приводил к значительному уменьшению η . На отожженном при 500°C порошке получено значение $\eta = (9,8 \pm 2,0) \cdot 10^{-5}$, что в пределах ошибки измерений совпадает с расчетным значением $\eta_a = 8,3 \cdot 10^{-5}$.

Для проверки влияния пор в зерне на вероятность поглощения УХН при столкновении с зерном были проведены измерения на гранулированном CuO . Средний диаметр гранул равнялся 4 мм. Плотность материала гранулы составляла 0,55 от плотности, соответствующей кристаллу CuO . Для η отожженной гранулы получено значение, в ~ 7 раз превышающее значение, полученное для зерна порошка, что связывается с существованием диффузии УХН в порах гранулы. Эти измерения показали, что с помощью диффузии УХН в порошках можно определять пористость материала.

Методика измерений позволяет проводить измерения η на уровне $10^{-6} - 10^{-5}$. Поэтому целесообразно было провести измерения на слабопоглощающих веществах, какими являются графит, бериллий, алюминий и т.д.

Для измерений был выбран графит, который имеет высокую граничную скорость, выдерживает высокотемпературный отжиг, не взаимодействуя с конструктивными материалами. Графитовый порошок с размером зерен 7 мкм был получен из блока реакторного графита плотностью $1,6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

На отожженном при 500°C графите в вакууме 10^{-6} Торр получено значение $\eta = (3,0 \pm 0,65) \cdot 10^{-5}$ при 20°C и $(0,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$ при 200°C . Если значение η при 20°C примерно в 7 раз превышает расчетное, то при 200°C оно совпадает с расчетным значением $\eta_a = 0,9 \cdot 10^{-5}$. Значение η_a , в основном, связано с сечением неупругого рассеяния УХН.

Полученное значение для графита на уровне $\eta = 10^{-5}$ является первым, и для повышения надежности этого вывода предполагается провести измерения на других слабопоглощающих веществах, в частности на бериллии и окиси бериллия.

В третьей главе описываются исследования отражения УХН от веществ с большим сечением захвата.

Коэффициент отражения частицы от прямоугольного потенциала определяется двумя параметрами $\alpha = v_0/v_2$ и $\beta = v_i/v_2$ ($v_0 = \frac{\hbar}{m} \sqrt{Nv_0/\pi}$, $v_i = \frac{\hbar}{m} \sqrt{Nv_i/\pi}$; v_0, v_i - действительная и мнимая части амплитуды рассеяния; N - плотность ядер; m - масса нейтрона; \hbar - постоянная Планка). В связи с этим интересно было выявить зависимость $R(\beta)$ при фиксированных α . В качестве веществ с положительной реальной частью амплитуды рассеяния были выбраны $Al, Cd, {}^{155}Gd_2O_3, Gd_2O_3, Gd$, с отрицательной реальной частью - $V, {}^{113}Cd, {}^{155}Gd$. Следует обратить внимание на пару ${}^{155}Gd$ и V , у которых совпадают реальные части амплитуды рассеяния и в 4000 раз различаются мнимые. Измерения с этой парой удобны тем, что их можно проводить с одним спектром УХН. Поскольку глубина проникновения УХН в среду при отражении составляет 50-100 Å, для правильной интерпретации экспериментальных данных необходимо знать состояние поверхности исследуемого образца. В зависимости от условий приготовления и содержания металлического образца на его поверхности может присутствовать слой окисла металла. В связи с этим были приняты меры, исключающие его образование. В частности, после механической обработки образцов на глубину не менее 1 мкм образцы помещались в вакуумную камеру и извлекались из нее непосредственно перед измерениями. Периодически также проводился контроль состояния поверхности образцов и ее очистка. Образцы окиси гадолиния были получены прокаливанием азотнокислой соли гадолиния, а также наращиванием окиси путем отжига металлического гадолиния. Контрольные измерения не позволили выявить различия между полученными двумя способами образцами Gd_2O_3 в способности их отражать УХН (с точностью 2%).

На рис.5 и рис.6 приведены результаты измерений отражения УХН от веществ с большим сечением захвата $\sigma \sim v_i^2$. Из рис.5 видно, что для веществ с $v_0 > 0$ с ростом сечения захвата σ коэффициент отражения вначале падает, достигает минимума, а в дальнейшем растет. Из рис.6 видно, что для веществ с $v_0 < 0$ с ростом сечения захвата σ наблюдается монотонный рост коэффициента отражения.

Насколько велико влияние сечения захвата на коэффициент отражения УХН, видно из результатов измерений при $v_2 = 1,1$ м/с. Так, на ванадии V коэффициент отражения составил $0,05 \pm 0,03$, в то время как на имеющем в 4000 раз большее сечение захвата ${}^{155}Gd$ - $0,51 \pm 0,05$. Как было предсказано И.И.Гуревичем и П.Э.Немировским, коэффициент отражения УХН на гадолинии может достигать значительной величины.

Глава четвертая посвящена вопросам диффузии УХН в составном и разветвленном нейтроноводе с учетом их магнитного и гравитационного взаимодействий. Примером составного нейтроновода, помещенного в гра-

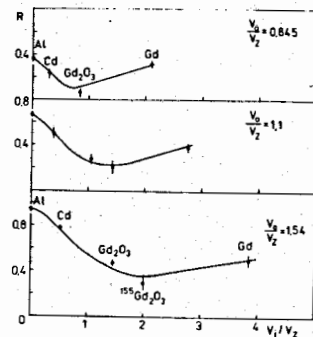


Рис.5. Экспериментальные данные и расчетные кривые зависимости $R(\beta)$ для веществ с положительной реальной частью v_0 амплитуды упругого когерентного рассеяния.

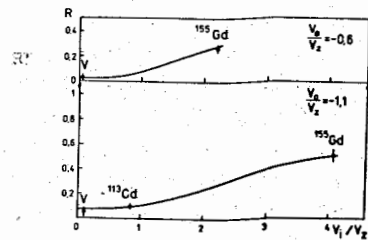


Рис.6. Экспериментальные данные и расчетные кривые зависимости $R(\beta)$ для веществ с отрицательной реальной частью v_0 амплитуды упругого когерентного рассеяния.

витационное поле, является гравитационный спектрометр УХН. Гравитационный спектрометр представляет собой П-образное колено. При повороте колена вокруг оси горизонтального нейтроновода оно поднимается на высоту $h = l \sin \varphi$, где l - длина вращающегося участка колена, φ - угол наклона колена к горизонтальной плоскости, в результате чего на пути нейтронов создается гравитационный барьер. Таким образом, спектрометр является фильтром, который позволяет измерять интегральное количество нейтронов $N(\varphi)$ (спектральная кривая) в первом спектре с энергией $E > mgh$, где m - масса нейтрона, g - ускорение свободного падения:

$$N(\varphi) = \int_{\frac{mgh}{\hbar v}}^{\infty} T(\varphi, v) \Phi(v) dv, \quad (4)$$

где $\Phi(v)$ - спектр потока УХН на входе в спектрометр, $T(\varphi, v)$ - пропускание УХН спектрометром.

До последнего времени описание диффузии УХН в нейтроноводе с гравитационным полем не было и это не позволяло рассчитать $T(\varphi, v)$. В результате гравитационный спектрометр стал считаться пригодным скорее для качественных выводов, чем количественных измерений [6]. В 1987 г. задача диффузии УХН в нейтроноводе с гравитационным полем была решена В.К.Игнатовичем, и стало возможным выполнить расчеты $N(\varphi)$. При расчетах $N(\varphi)$ варьировались длины участков спектрометра, вероятность поглощения УХН η в стенках, спектр $\Phi(v)$, вводились

диафрагмы. В результате было показано, что можно описать все экспериментально наблюдаемые формы спектральной кривой. Выполненные расчеты убеждают в том, что измерения гравитационным спектрометром станут более точными и надежными.

Требования отдельных измерений на установке (см. рис.2) приводили к необходимости участка под образец выполнять протяженным (до 100 см). В этом случае нельзя было пренебрегать диффузией УХН в этом участке. А надо было считать, что диффузионный поток j_0 , идущий от источника по входному участку, разделяется на поток j_1 в участке с образцом и поток j_2 в участке с детектором.

Решение задачи диффузии УХН в разветвленном нейтронноводе дает для потока на детекторе следующую зависимость от вероятности поглощения M УХН в образце:

$$j \sim \frac{1 + \varepsilon M}{1 + \sigma M}, \quad (5)$$

где ε , σ - не зависящие от M коэффициенты.

Как показали экспериментальные исследования, зависимость вида (5) действительно имеет место. Однако поток УХН в установке является не изотропным, и для описания экспериментальных данных потребовалось феноменологически ввести различные для трех участков коэффициенты диффузии. По-видимому, более последовательной теорией диффузии, в условиях не изотропного потока УХН, может быть теория двухгрупповой в отношении направления движения диффузии. Разработка такой теории в настоящее время осуществляется.

Описание диффузии УХН в намагниченном нейтронноводе или порошке удобно проводить с помощью двухкомпонентного вектора плотности $N(z) = \begin{pmatrix} N_1(z) \\ N_2(z) \end{pmatrix}$ ($N_1(z)$ - плотность нейтронов с направлением спина по магнитному полю, $N_2(z)$ - против поля), подчиняющегося уравнению

$$d^2 N(z) / dz^2 = M N(z), \quad (6)$$

где $M = \begin{pmatrix} L_{11}^{-2} & -L_{12}^{-2} \\ -L_{21}^{-2} & L_{22}^{-2} \end{pmatrix}$; L_{ik} - длина диффузии нейтрона, находящегося в состоянии "i" и перешедшего в состояние "k".

При заданных характерных размерах нейтронновода или порошка диффузия УХН определяется вероятностями поглощения УХН μ_1 и μ_2 в обоих спиновых состояниях и вероятностью перехода μ_3 из одного спинового состояния в другое (величина индукции магнитного поля предполагается небольшой). Проведенные расчеты показали, что определение параметров μ_1 , μ_2 и μ_3 возможно из измеренных зависимостей поляризации отраженного или прошедшего потока от толщины слоя порошка. При этом точность определения того или иного параметра определяется степенью поляризации первично падающего потока и знаком поляризации.

Так, при высокой степени поляризации первичного потока возможно измерение очень малых значений μ_3 . Например, при параметрах $\mu_1 = 10^{-1}$ и $\mu_2 = 10^{-4}$ изменение поляризации прошедшего слой потока на $\sim 100\%$ происходит при десятикратном на уровне 10^{-7} изменении μ_3 при фиксированном значении толщины слоя ~ 30 длин рассеяния.

В заключении приведены следующие основные результаты работы:

1. Разработан метод и созданы установки для измерения интегрального по углу коэффициента отражения УХН от сплошных и диспергированных сред.

2. Разработан новый, основанный на диффузии УХН в порошках, способ измерения вероятности поглощения УХН. Проведены экспериментальные исследования диффузии УХН в порошках различных веществ. Проведены измерения величины η и получены следующие значения:

а) для отожженных меди и окиси меди $(1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$ и $(9,8 \pm 2,0) \cdot 10^{-5}$, соответственно;

б) для отожженного графита $(3,0 \pm 0,65) \cdot 10^{-5}$ при 20°C и $(7,0 \pm 5,0) \cdot 10^{-6}$ при 200°C .

Результаты по η для меди, окиси меди и графита при 200°C согласуются с расчетом.

3. Впервые экспериментально исследовано отражение УХН от таких веществ с большим сечением захвата, как Cd , ^{113}Cd , Gd , ^{155}Gd , Gd_2O_3 , $^{155}Gd_2O_3$. Наблюденный характер поведения коэффициента отражения УХН от веществ с положительной и отрицательной амплитудами рассеяния в зависимости от сечения захвата соответствует представлению о комплексном потенциале взаимодействия УХН со средой. Коэффициент отражения УХН от ^{155}Gd и V , имеющих равные реальные, но отличающиеся в 4000 раз мнимые части потенциала взаимодействия, составил $0,51 \pm 0,05$ и $0,05 \pm 0,03$, соответственно, что указывает на возрастание отражения с увеличением сечения захвата.

4. Решены диффузионные задачи:

а) определено пропускание УХН составным и разветвленным нейтронноводами;

б) исследовано влияние параметров гравитационного спектрометра на пропускание УХН;

в) рассмотрена диффузия УХН в намагниченных нейтронноводах и порошках.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Канал ультрахолодных нейтронов на реакторе ИБР-2. - Дубна, 1985. - 8 с. (Сообщение/Объедин-г ядерн.исслед.: РЗ-85-285).

2. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Измерение интегральных коэффициентов отражения ультрахолодных нейтронов от поверхностей твердых тел. - Дубна, 1985. - 14 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: РЗ-85-286).
3. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Отражение ультрахолодных нейтронов от сильнопоглощающих сред. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, 1985, № 9, с.26-34.
4. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Отражение ультрахолодных нейтронов от веществ с большим сечением захвата. - Дубна, 1986. - 12 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: РЗ-86-767).
5. Голиков В.В., Кулагин Е.Н., Никитенко Ю.В. Отражение ультрахолодных нейтронов от порошкообразных материалов. - Дубна, 1987. - 12 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: РЗ-87-20).
6. Игнатович В.К., Никитенко Ю.В. Диффузия ультрахолодных нейтронов в намагниченных нейтроноводах и порошках. - Дубна, 1987. - 15 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: РЗ-87-326).
7. Игнатович В.К., Никитенко Ю.В. Физические особенности действия гравитационного спектрометра ультрахолодных нейтронов. - Дубна, 1987. - 12 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: РЗ-87-832).
8. Голиков В.В., Игнатович В.К., Никитенко Ю.В. Диффузия ультрахолодных нейтронов в разветвленном нейтроноводе. - Дубна, 1988. - 9 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: РЗ-88-48).

Цитируемая литература:

1. Игнатович В.К. Физика ультрахолодных нейтронов. - М.: Наука, 1987. - 271 с.
2. Гуревич И.И., Немировский П.Э. "Металлическое" отражение нейтронов. - ЖЭТФ, 1961, т.41, вып.4(10), с.1175-1177.
3. Морозов В.И. Хранение ультрахолодных нейтронов в замкнутых сосудах: Обзор. - Димитровград, НИИАР, 1982. - 76 с.
4. Эксперименты по хранению УХН в сосудах в проточном режиме. В.К.Игнатович, Ким Зун Бок, В.И.Лушиков и др. - Дубна, 1982. - 11 с.
5. Косвинцев Ю.В., Кушнир Ю.А., Морозов В.И., Терехов Г.И. О причине аномальной утечки ультрахолодных нейтронов из медных и бериллиевых сосудов. - АЭ, 1984, т.55, с.288-293.
6. Лушиков В.И. Ультрахолодные нейтроны. - В кн.Нейтрон.К пятидесятилетию открытия.М.:Наука,1983,с.132-151.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 марта 1988 года.