

Я-42

3-87-218

УДК 539.125.5

**ЯЙДЖИЕВ**  
Пламен Стоянов

**ИЗМЕРЕНИЕ**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НЕЙТРОНА**  
**С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ**

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.

**Научные руководители**

кандидат физико-математических наук,  
профессор

Кашукеев Н.Т.

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Серебров А.П.

**Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук, профессор,  
старший научный сотрудник

Абов Ю.Г.

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Франк А.И.

Ведущая организация - Физический институт им. П.Н.Лебедева  
АН СССР.

Защита диссертации состоится "20" мая 1987 г.  
в 11 30 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 "13" апреля 1987 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

 Таран Ю.В.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность проблемы. В соответствии с современными теориями Великого объединения, наличие у нейтрона электрического заряда приводит к существенным следствиям:

1. Так как электрический заряд меняет знак при осцилляции нейтрон-антинейтрон, то такие осцилляции, предсказываемые некоторыми теориями, запрещаются в соответствии с законом сохранения электрического заряда.

2. Если все барионы имеют электрический заряд, слабо отличающийся от обычно принимаемых величин их электрического заряда, то закон сохранения барионного числа будет следствием закона сохранения заряда, а не независимым принципом.

3. Распад протона, предсказываемый некоторыми теориями, запрещается, так как лептоны, на которые он распадается, будут иметь разный электрический заряд.

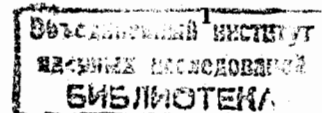
Поскольку нулевая величина заряда нейтрона не вытекает из теории, вопрос о степени электронейтральности нейтрона должен быть решен экспериментальным путем.

Основная цель работы состоит в создании установки для измерения электрического заряда свободного нейтрона при помощи ультрахолодных нейтронов.

Научная новизна работы: Впервые создана нейтронно-оптическая установка для ультрахолодных нейтронов, которая позволяет регистрировать смещения нейтронно-оптического изображения под действием электрического поля. Чувствительность установки равна чувствительности установки для измерений электрического заряда нейтрона на холодных нейтронах в ILL - Гренобль (Франция) -  $q_n = 5 \cdot 10^{-20} q_e / \text{сутки}$ , где  $q_e$  - заряд электрона. Впервые установлена верхняя граница заряда нейтрона при помощи УХН.

Практическая ценность работы. Создание установки позволило продемонстрировать возможность измерения электрического заряда нейтрона при помощи ультрахолодных нейтронов. Были выяснены возможные пути повышения чувствительности установки.

Опыт, накопленный в процессе данной работы, в значительной степени облегчает решение проблем, возникающих при создании оптических установок на холодных и ультрахолодных нейтронах.



### Автор защищает результаты:

I. Впервые создана оригинальная нейтронно-оптическая установка для измерения электрического заряда нейтрона при помощи ультрахолодных нейтронов.

II. Для получения нейтронно-оптического изображения применяется вертикальное цилиндрическое зеркало, которое исключает влияние гравитационного поля и дает возможность использовать весь спектр нейтронов, отражающихся от его поверхности. При этом:

1. Предложена и реализована многоцелевая система измерения.

2. Предложена и реализована дифференциальная система измерения.

III. Созданная установка использовалась для измерения степени электронейтральности нейтрона. Впервые при помощи ультрахолодных нейтронов была получена оценка  $q_n = (-4,3 \pm 7,1) \cdot 10^{-20} q_{el}$ .

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (84 страницы, 5 таблиц, 27 рисунков).

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматривается актуальность определения степени электронейтральности нейтрона. Если у нейтрона существует электрический заряд, то закон сохранения барионного числа можно рассматривать не как независимый принцип, а как следствие закона сохранения электрического заряда. Показана связь между зарядом нейтрона и предсказываемыми некоторыми теориями осцилляциями нейтрон-антинейтрон. Такие осцилляции (в модели с несохранением барионного числа  $\Delta B = 2$ ) при соблюдении закона сохранения электрического заряда возможны только при  $q_n = 0$ . В этой главе рассмотрены и некоторые следствия для космологии при  $q_n \neq 0$ . Так как электрический заряд нейтрона не затрагивается теорией, то эта проблема может быть решена только экспериментальным путем.

Кроме того, в первой главе рассмотрены косвенные и прямые эксперименты по измерению заряда нейтрона. Косвенные эксперименты можно разделить на две группы - эксперименты с молекулярными пучками и эксперименты по поиску дробного заряда в материи. При измерении сечениями пучка нейтральных молекул ( $CO_2$ , Ar,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $SF_6$ , CsI) в электрическом поле, были получены результаты  $q_n \leq 10^{-21} |q_{el}|$ . В одном чувствительном эксперименте с молекулами получен результат  $q_n \leq 1,3 \cdot 10^{-21} |q_{el}|$ . Был использован метод измерения амплитуды звуковых колебаний в объеме, заполненном молекулами  $SF_6$ , под действием осциллирующего электрического поля. В экспериментах с молекулами существует еще и метод изме-

рения изменения потенциала электрически изолированного контейнера при изменении давления газа в нем. Чувствительность этого метода на уровне  $10^{-20} \cdot 10^{-21} |q_{el}|$ .

Эксперименты по поиску дробного заряда материи являются аналогами опыта Милликана. Чувствительность таких косвенных экспериментов тоже на уровне  $10^{-21} |q_{el}|$ .

В прямых экспериментах измеряется отклонение пучка нейтронов в электрическом поле. В первом эксперименте такого типа с тепловыми нейтронами был получен результат  $q_n < 6 \cdot 10^{-12} |q_{el}|$ . Прецизионные измерения заряда нейтрона были сделаны при помощи двойного кристаллического спектрометра с результатом  $q_n < (-1,9 \pm 3,7) \cdot 10^{-18} |q_{el}|$ . Чувствительность данного типа экспериментов сильно зависит от времени прохождения нейтронов через электрическое поле. Переход на нейтроны с более низкими энергиями ( $\lambda = 20 \text{ \AA}$ ,  $v = 200 \text{ м/с}$ ) позволил получить результат  $q_n \leq (1,5 \pm 1,4) \cdot 10^{-20} |q_{el}|$ . Использование ультрахолодных нейтронов ( $v < 7 \text{ м/с}$ ,  $\lambda > 600 \text{ \AA}$ ) открывает новые возможности повышения чувствительности. В связи с прогрессом в разработке источников УХН эта возможность стала реальностью и была реализована на жидководородном источнике УХН, запущенном в ДИЯЭ на реакторе ВВР-М в 1986 г.

Вторая глава посвящена получению нейтронно-оптического изображения на ультрахолодных нейтронах. Основными элементами нейтронно-оптической камеры (рис. I) являются горизонтальные плоскопараллельные зеркала (1), цилиндрическое зеркало (2), электроды (3) с вкладышами из титана (4). Ультрахолодный нейтрон, входящий через точку А в установку, отражается от горизонтальных зеркал и цилиндрического зеркала и фокусируется в точке А'. Таким образом, если на входе в нейтронно-оптическую камеру имеется решетка со щелями, на выходе получится нейтронно-оптическое изображение этих щелей. Нейтроны, не попавшие на цилиндрическое зеркало, поглощаются титановыми вкладышами. Если на выходе имеется решетка, аналогичная входной решетке, и имеется детектор

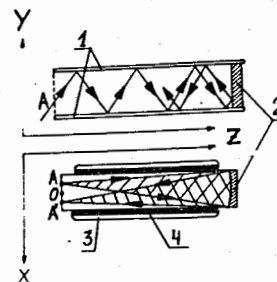


Рис. I Основные элементы нейтронно-оптической камеры и принципиальная схема действия установки: 1 - плоскопараллельные горизонтальные зеркала, 2 - вертикальное цилиндрическое зеркало, 3 - электроды, 4 - вкладыши из титана.

ультрахолодных нейтронов, то при смещении нейтронно-оптического изображения по оси  $x$  (рис.1) произойдет изменение счета детектора. Электроды (3) служат для подключения высоковольтного электрического поля разной полярности. Таким образом, измеряя смещение пучка ультрахолодных нейтронов под действием электрического поля, можно оценить электрический заряд нейтрона.

Нейтронно-оптическая камера показана на рис.2.

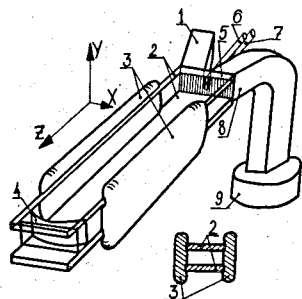


Рис.2 Нейтронно-оптическая камера:  
1 - входной нейтронвод, 2 - горизонтальные зеркала, 3 - электроды, 4 - вертикальное цилиндрическое зеркало, 5 - решетка, 6,7 - световоды, 8 - выходной нейтронвод, 9 - детектор УХН.

Входная и выходная решетки выполнены как единая механическая сборка, которая может передвигаться по оси  $x$ . Для детектирования нейтронов выходной нейтронвод изгибается вниз с радиусом поворота  $R = 250$  мм. Таким образом, ультрахолодные нейтроны ускоряются в гравитационном поле Земли и проходят через алюминиевую фольгу, которая является входным окошком газового детектора. Смещение изображения на выходе получается путем смещения решетки по оси  $x$  или поворота цилиндрического зеркала вокруг оси  $O$  (рис.1). При этом получается модуляция счета в детекторе (рис.3). В некоторых экспериментах в оптическом тракте запускался свет, и на рис.3 показана модуляция отсчетов оптического датчика.

Входная и выходная решетки выполнены как единая механическая сборка, которая может передвигаться по оси  $x$ . Для детектирования нейтронов выходной нейтронвод изгибается вниз с радиусом поворота  $R = 250$  мм. Таким образом, ультрахолодные нейтроны ускоряются в гравитационном поле Земли и проходят через алюминиевую фольгу, которая является входным окошком газового детектора. Смещение изображения на выходе получается путем смещения решетки по оси  $x$  или поворота цилиндрического зеркала вокруг оси  $O$  (рис.1). При этом получается модуляция счета в детекторе (рис.3). В некоторых экспериментах в оптическом тракте запускался свет, и на рис.3 показана модуляция отсчетов оптического датчика.

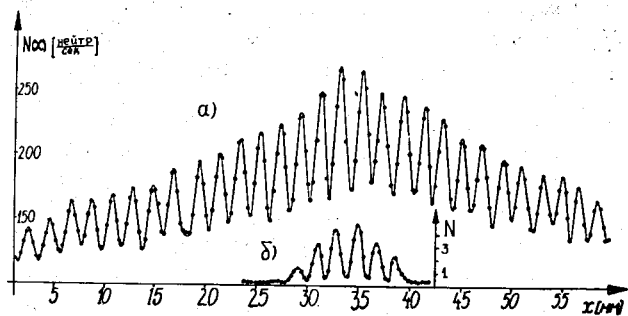


Рис.3 Зависимость скорости счета в детекторе при смещении нейтронно-оптического изображения по оси  $x$ : а - детектор УХН, б - оптический датчик.

Во второй главе рассмотрены факторы, дающие вклад в уменьшение светосилы и уширение изображения в установке. Такими факторами являются микро- и макрошероховатости зеркальных поверхностей, точность изготовления решетки и цилиндрического зеркала. Существенное влияние во время измерения может оказать и поведение оптических элементов в высоковольтном поле.

Если через установку проходят нейтроны с одинаковыми скоростями по оси  $z$  (рис.1, 2), то чувствительность определяется как:

$$\delta q_n = 4m \sqrt{2N/\tau} / (Et^2 dN/dx),$$

где  $N$  - скорость счета детектора в рабочей точке на склоне центрального пика,  $dN/dx$  - крутизна пика (рис.3),  $\tau$  - время измерения,  $m$  - масса нейтрона,  $E$  - напряженность электрического поля и  $t$  - среднее время пролета нейтрона через область, где подключается электрическое поле. Так как в установке используется весь спектр ультрахолодных нейтронов вплоть до  $v_z = 7,8$  м/с, для оценки чувствительности приходится, учитывая реальные параметры установки, разыграть по методу Монте-Карло этот спектр нейтронов. Получается оценка чувствительности на уровне  $\delta q = 5 \cdot 10^{-20} q_e / \text{сутки}$ .

Существенное влияние на чувствительность оказывает и горизонтальность установки. Если рабочая точка находится в середине склона пика (рис.3), то при изменении наклона относительно оси  $x$  на угол  $\alpha$  ультрахолодные нейтроны будут отклоняться под действием ускорения  $g \sin \alpha$  от своей траектории, в результате произойдет размытие и смещение нейтронно-оптического изображения. Изменение счета в рабочей точке в зависимости от угла наклона  $\alpha$  для монохроматических нейтронов связано с крутизной пика  $dN/dx$ :

$$\Delta N = g t^2 \sin \alpha / 4 \cdot (dN/dx).$$

В случае немонохроматического распределения нейтроны разных энергий будут иметь разные смещения вдоль оси  $x$ . Расчет величины  $dN/d\alpha$  для реальных параметров установки был произведен по методу Монте-Карло. Результат показан на рис.4 для несколько разных углов наклона. При отклонении установки от горизонтальности на одну минуту чувствительность по отношению к наклону, а следовательно, и среднеквадратичное время пролета уменьшаются почти в два раза. Этот способ дает возможность одновременно калибровать чувствительность установки, используя гравитационное поле Земли. На основании полученных оценок в конце второй главы дается оценка точности, с которой должны быть изготовлены отдельные узлы нейтронно-оптической камеры.

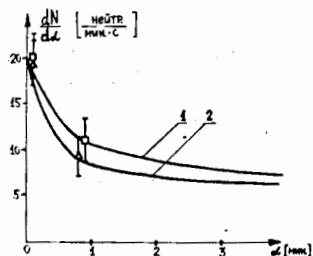


Рис.4 Изменение чувствительности установки при изменении наклона относительно оси  $x$  на угол  $\alpha$ . Гладкие кривые - расчет по методу Монте-Карло;  $\Delta$ ,  $\square$  - экспериментальные точки для разных склонов пика.

В третьей главе освещены технические вопросы создания первого и второго вариантов установки. В первом варианте установки смещение изображения осуществлялось путем поворота цилиндрического зеркала и использовалась одноканальная система регистрации. Плотность потока УХН во входном нейтроноводе была  $10^3$  нейтр./см<sup>2</sup>с. Были измерены спектры нейтронов по оси нейтроновода на входе установки и по оси  $z$  после пролета через установку и дана оценка среднего времени пролета через электрическое поле. На рис.5 показаны спектры нейтронов на входе и выходе установки.

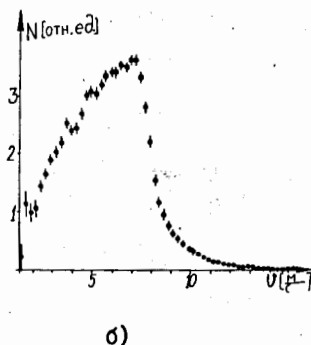
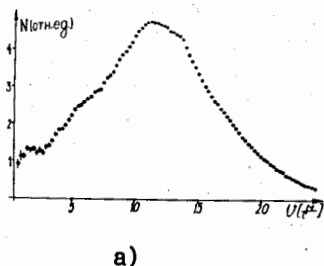


Рис.5 Спектры нейтронов: а) по оси входного нейтроновода; б) по оси  $z$  после прохождения через установку.

После ввода универсального канала УХН на реакторе ВВР-М в ЛИЯФ был реализован второй вариант установки. Плотность потока ультратонких нейтронов на входе установки повысилась до  $6 \cdot 10^3$  нейтр./см<sup>2</sup>с. Существенным изменением в этом варианте является введение дифференциальной системы измерения. Для этой цели выходная решетка сделана из двух частей, которые сдвинуты друг относительно друга так, как показано на рис.6. После выходной решетки был сделан двойной нейтроновод с двойным детектором УХН. Модуляция счета детектора при пере-

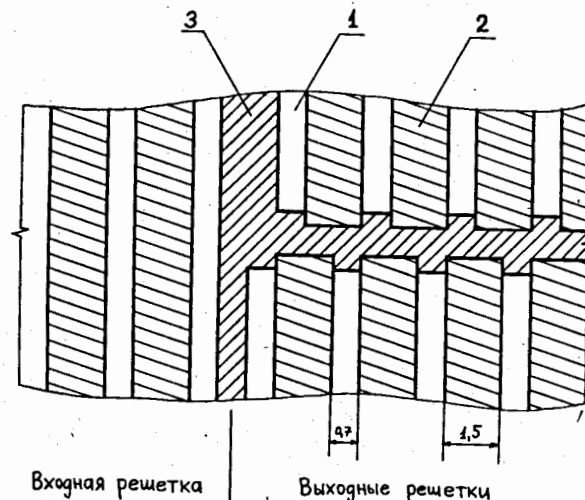


Рис.6 Дифференциальная решетка: 1 - щели, 2 - стеклянные пластинки, 3 - держатель из капролона.

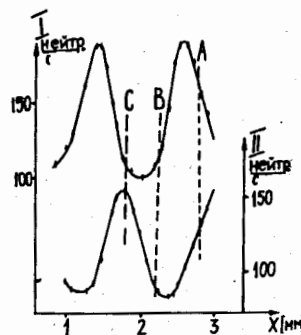


Рис.7 Модуляция счета детектора по двум каналам при смещении решетки по оси  $x$ .

мещении решетки по оси  $x$  (рис.1) показана на рис.7. Таким образом, в рабочей точке А (рис.7) один из детекторов считает УХН на левом склоне пика, а второй - на правом, и можно регистрировать изменения в счете, связанные только со сдвигом нейтронно-оптического изображения, в отличие от одноканальной системы регистрации.

В третьей главе описан высоковольтный источник, дающий возможность достижения напряженности поля  $10$  кВ/см, а также рассмотрена система управления высоковольтного источника, сбора и обработки информации. Автоматизация эксперимента осуществлялась в стандарте КАМАК при помощи ЭВМ СМ-3.

В четвертой главе приведены результаты измерения и интерпретация экспериментальных данных.

На первом этапе измерений наблюдался сдвиг нейтронно-оптического изображения под действием электрического поля. Для выяснения этого эффекта были сделаны несколько циклов измерений в разных режимах работы установки. В одном из них уменьшалась напряженность электрического поля, в следующем – переключалась только одна полярность напряжения, а во время измерений с другой полярностью подавалось нулевое напряжение. Были проделаны циклы измерений с изменением способа крепления цилиндрического зеркала и дифференциальной решетки относительно горизонтальных плоскопараллельных зеркал. Были проделаны и контрольные измерения для выяснения стабильности электронных трактов, по которым передавалась информация. В результате было выяснено, что сдвиг изображения происходит из-за смещения оптических элементов – зеркала и решетки при переключении высоковольтного поля. В последней серии измерений этот эффект был подавлен. Во время измерений нужно было контролировать и угол наклона установки относительно оси  $x$  (рис.1), так как чувствительность зависит от этого угла. Точность прибора была  $\pm 0,5$  минут. В этом цикле, выполненном за время  $22 \cdot 10^5$  секунд, был получен результат  $q_n = (-4,3 \pm 7,1) \cdot 10^{-20} q_e$ . Сам цикл состоит из тридцати отдельных серий измерений, и результат в каждой из них показан на рис.8 в единицах  $q_e \cdot 10^{-19}$ . Глава завершается

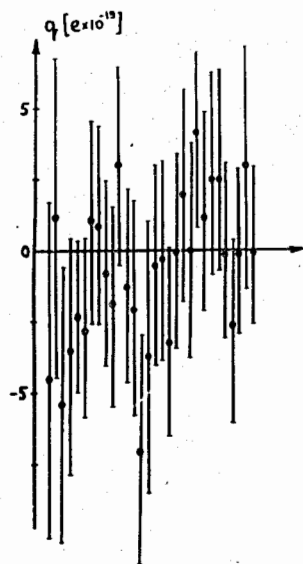


Рис.8 Измеренная величина электрического заряда нейтрона для каждой из 30 серий измерений.

анализом перспектив увеличения чувствительности установки, которые, в основном, связаны с повышением точности контроля наклона установки и улучшением оптических характеристик тракта для получения более узкого нейтронно-оптического изображения. В свете накопленного опыта сформулированы перспективные моменты в решении физических и технических проблем, возникающих в будущем варианте установки.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Калчев С.Д., Кашукеев Н.Т., Серебров А.П., Яйджиев П.С. Нейтронно-оптическая установка для определения степени электронейтральности нейтрона при помощи ультрахолодных нейтронов. – В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, 1984, № 3-84, с.33-41.
2. Борисов Д.В., Боровикова Н.В., Васильев А.В., Григорьева Л.А., Иванов С.Н., Кашукеев Н.Т., Несвижевский В.В., Серебров А.П., Яйджиев П.С. Изучение возможности применения ультрахолодных нейтронов для измерения электрического заряда нейтрона. – Ленинград, 1987. – 38 с. (Препринт/Ленинград. ин-т ядерн.физики: № 1249).
3. Борисов Д.В., Боровикова Н.В., Васильев А.В., Григорьева Л.А., Иванов С.Н., Кашукеев Н.Т., Несвижевский В.В., Серебров А.П., Яйджиев П.С. Измерение электрического заряда нейтрона при помощи ультрахолодных нейтронов. – В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, 1987, № 21-87, с.40-45.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 апреля 1987 года.