

СЗ44.1м

Т-19

Таран Ю.В.

Б1-3-7151.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-3-7151

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1973

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Ю.В.ТАРАН

Б1-3-7151

тип. 490

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОМЕТРА ЭДМ НА УХН.

С.ф. 3679

Рукопись поступила
в Центральную библиотеку
... 8 мая 1973

Кач

Дубна, 1973.

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе определяются основные параметры спектрометра электрического дипольного момента нейтрона с использованием ультрахолодных нейтронов в окончательном варианте применительно к реактору ИБР-2. Проектная чувствительность спектрометра равна около 10^{-25} см.

I. ВВЕДЕНИЕ.

В 1968г. Ф.Л.Шапиро теоретически показал /1/, что экспериментальная оценка верхней границы электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона может быть сильно понижена, если обычно используемую резонансную методику (см., например, /2/) использовать в сочетании с удержанием ультрахолодных нейтронов (УХН) в измерительной установке. В работе /3/ были теоретически рассмотрены различные варианты такой установки и было показано, что наибольшая чувствительность может быть достигнута в, так называемом, накопительном варианте спектрометра ЭДМ с использованием метода отдельных осциллирующих полей Рамзея. Проектирование такого спектрометра (установка "Тристом") начато в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Очевидная сложность этой установки и отсутствие действующего прототипа вынуждает к поэтапному освоению новой методики. В начале целесообразно создать установку с чувствительностью, обеспечивающую существенное улучшение существующей экспериментальной оценки верхней границы ЭДМ /2/, но не находящуюся на пределе современных технических возможностей. Исходя из накопленного опыта эксплуатации и проверки правильности технических решений, можно будет или существенно модернизировать действующую установку, или вовсе создать новую с максимальной возможной чувствительностью. Если выразить значение ЭДМ в единицах заряда электрона, то достигнутая точность эксперимента /2/ равна $|\Delta D| \simeq 10^{-23}$ см. С этой точностью ЭДМ у нейтрона не обнаружен.

Что говорит теория о возможном значении ЭДМ в свете твердо установленного факта нарушения CP - четности в распадах нейтральных K - мезонов? Существует множество теоретических работ, дающих оценки ЭДМ на основе различных моделей и гипотез. Спектр этих оценок очень широк: от 10^{-19} см до 0. Современный эксперимент опроверг большинство из этих работ. Однако осталось достаточное их количество, дающих оценки ЭДМ менее 10^{-23} см. Известные автору работы сведены в таблицу I. Из нее видно, что большинство оценок сосредоточено в диапазоне 10^{-25} - 10^{-23} см. Поэтому повышение точности эксперимента, скажем, до 10^{-25} см будет представлять большой шаг в ограничении возможных моделей нарушения временной четности. Естественно, с точки зрения экспериментатора, названную цифру взять за проектное значение чувствительности спектрометра ЭДМ на первоначальном этапе. Целью настоящей работы является выбор основных параметров установки, исходя из требования обеспечения проектной чувствительности 10^{-25} см.

2. Схема и режим работы установки.

Принципиальная схема спектрометра ЭДМ в накопительном варианте изображена на рис. I. Поляризованные УХН внутри камеры 2 выдерживаются в течении некоторого времени под действием трех полей: статических магнитного H_0 и электрического E , и осциллирующего ^{МАГНИТНОГО} H_1 с частотой ω . Затем их поляризация анализируется устройством Z . Со следующей порцией УХН делают все в точности то же самое, только при этом знак электрического поля заменяется на противоположный. Если нейтрон имеет ЭДМ, то поляризации УХН в конце выдержки в этих двух случаях будут отличаться, и эта разница может быть измерена.

Если же разницы не будет наблюдеено, то из ошибки эксперимента может быть установлена верхняя граница ЭДМ.

Режим работы установки в рассматриваемом варианте носит импульсный характер. Примем за исходное такое состояние, когда заслонка I открыта, а раздаточный вентиль 8 находится в таком положении, что канал УХН IO, ведущий к реактору, закрыт; при этом путь из камеры 2 на детектор 9 открыт. После команды на запуск установки для измерений вентиль 8 переводится в положение, соответствующее открытому каналу IO и закрытому детектору 9. Камера 2 и нейтроновод 5 наполняются поляризованными нейтронами так как на пути нейтронов стоит поляризатор 7. По истечении некоторого времени, когда плотность УХН в камере окажется близкой к их плотности в канале IO, камерная заслонка I закрывается, включается высокое напряжение на камеру и вентиль 8 переводится в исходное состояние. Оставшиеся в нейтроноводе 5 нейтроны сосчитываются детектором и в дальнейшем этот счет используется как монитор наполнения камеры.

Накопительную камеру составляют цилиндр из неметаллического вещества, хорошо отражающего УХН, и два металлических диска, одновременно выполняющих роль обкладок конденсатора, создающего необходимое в установке электрическое поле и закрывающих цилиндр с торцов. Диск, на котором установлена камерная заслонка, из соображений упрощения технических решений все время находится под нулевым потенциалом относительно земли, а второй диск электрически изолируется от других частей установки и на него подается постоянное высокое напряжение по кабелю П.

По достижении номинального напряжения на камере включается первый импульс осциллирующего магнитного поля, создаваемого

резонатором 3. Затем производится выдержка в течении времени жизни нейтронов в камере относительно захвата в ее стенках. В конце выдержки подается второй импульс, снимается высокое напряжение, открывается камерная заслонка и УХН вытекают через устройство 7, служащее сейчас анализатором поляризации, на детектор 9 и сосчитываются им. Затем цикл повторяется с другим знаком электрического поля.

Параллельное электрическому постоянное магнитное поле может создаваться соленоидом 4, системой катушек или их комбинацией. Для устранения влияния внешних полей может потребоваться магнитный экран 6.

Чувствительность такой установки была рассчитана в работе /3/ и она дается следующим выражением:

$$\Delta D = \frac{2 \cdot 10^{-15} e^{\lambda' t_0}}{\pi^2 R (a_+ + a_-) V_H \sqrt{n_0} \mu_g K K_1 \Delta t} \cdot \frac{h_K}{\sqrt{V_K}} \cdot \frac{\sqrt{t' + 2t_0 + t}}{t} \cdot \exp\left\{\frac{1}{2} [\lambda' + 2a] t\right\},$$

где R - пропускание нейтроновода, n_0 - плотность УХН на входе нейтроновода, a_{\pm} - пропускание поляризатора для нейтрона со спином $\pm \frac{1}{2}$, V_H - напряжение на камере,

μ_g - эффективность детектора, Δt - длительность эксперимента, V_K - объем камеры, h_K - длина камеры, t_0 - длительность импульса осциллирующего магнитного поля, t - промежуток времени между импульсами (выдержка), t' - время, затрачиваемое в одном цикле на все технологические операции (например, движение заслонок, напуск и выпуск УХН, подъем и сброс напряжения и т.д.), $\tau = \frac{1}{f_n} (1 - 2w)^2$, f_n - поляризация нейтронов, w - вероятность переворота спина нейтрона на пути между поляризатором и камерой, $\lambda' = \lambda + \frac{v}{a_0} \mu_K$,

λ - ~~скорость~~ ^{в 1 сек} вероятность распада нейтрона, \bar{v} - средняя скорость УХН, $\bar{\mu}_k$ - средняя вероятность поглощения нейтрона в стенках камеры, $a_d = 4V_k / S_k$ - средняя длина свободного пробега УХН в камере, S_k - площадь внутренней поверхности камеры, $a = \frac{\chi^2 (\Delta H_0)^2}{\tau_c}$, χ - гиромагнитное отношение нейтрона, $(\Delta H_0)^2$ - дисперсия статического магнитного поля, характеризующая его однородность, $\tau_c = a_0 / \bar{v}$ - ^{среднее время свободного} _{пробега} K и K_1 - степень ^н наполнения и опорожнения камеры.

Сейчас мы перейдем к определению конкретных параметров установки.

3. Электрическое поле.

Простейшая система для создания электрического поля - это плоский конденсатор, ~~как~~ ^{нбий} изображено на рис. I. Если на одну из пластин конденсатора подать напряжение V_H , то внутри его создастся поле напряженности $E = V_H / h_k$. Практика показывает, что получение напряженности поля с находящимся внутри конденсатора диэлектриком (в нашем случае цилиндр камеры 2) более 30 кв. см^{-1} представляет сложную техническую задачу. Поэтому в качестве первого этапа примем $E = 30 \text{ кв. см}^{-1}$.

4. Геометрические размеры камеры.

В ЛНФ имеется компактный источник высокого напряжения на $\pm 300 \text{ кв}$. Отсюда сразу получаем длину камеры $h_k = (300 \text{ кв}) / (30 \text{ кв. см}^{-1}) = 10 \text{ см}$. В работе /3/ было показано, что ухудшение чувствительности установки за счет конечного значения h_k по сравнению с идеальной равно $m \approx \sqrt{1 + 2h_k / D_k}$, где D_k - диаметр цилиндра камеры. Считая, что 20% - ухудшение чувствитель-

ности вполне допустимо, получим условие на диаметр камеры $D_{\text{к}} = 50$ см. Тогда $V_{\text{к}} = 19,6$ л и $S_{\text{к}} = 0,55$ м².

5. Время удержания.

Время удержания УХН равно $T = 1/\lambda'$. Достигнутое в настоящее время /10/ значение $\overline{\mu_{\text{к}}}$ для наиболее подходящего материала камеры - меди - равно 10^{-3} (с $\overline{v} = 5$ м.сек⁻¹) при теоретическом значении $3 \cdot 10^{-4}$. Для выбранных размеров камеры экспериментальное значение $\overline{\mu_{\text{к}}}$ дает ожидаемое значение T в установке 30 сек, и $\lambda' \approx 3 \cdot 10^{-2}$ сек⁻¹.

6. Однородность магнитного поля.

В работе /3/ показано, что ухудшение чувствительности установки за счет неоднородности поля по сравнению с идеальной равно $m' = \sqrt{1 + 2\alpha/\lambda'}$. Имея ввиду, что для выбранных размеров камеры $\overline{\tau_{\text{к}}} \approx 0,03$ сек, подставляя численное значение $\underline{\gamma}$ и выражая поле в гаммах (1 гамма = 10^{-5} эрстед), получим $\alpha \approx 10^{-3} (\Delta H_0)^2$. Считая, что 20% - ухудшение чувствительности вполне допустимо, получим требование на однородность поля $\sqrt{(\Delta H_0)^2} \leq 2,5 \underline{\gamma}$.

7. Потери времени.

Они связаны с технологическими операциями в одном измерительном цикле. Рассмотрим их во временной последовательности. Перевод вентиля 8 (см.рис.1) из исходного состояния в открытое занимает 1 сек. Длительность наполнения камеры может быть оценена как двухкратная постоянная времени t_{11} ,

характеризующая процесс натекания:

$$t_{\eta} \approx \left[\frac{\bar{v}}{4(V_T + V_K)} (S_T \bar{\mu}_T + S_K \bar{\mu}_K + \frac{\pi}{4} d_T^2) \right]^{-1}$$

где d_T и V_T - диаметр и объем нейтроновода, S_T - площадь его внутренней поверхности, $\bar{\mu}_T$ - вероятность поглощения УХН в стенках нейтроновода. Выражение для ΔD , приведенное во введении, получено при предположении, что $S_K \bar{\mu}_K \ll \frac{\pi}{4} d_T^2$.

Отсюда можно определить диаметр нейтроновода. Подставляя

$S_K = 0,55 \text{ м}^2$ и $\bar{\mu}_K = 10^{-3}$, получим $d_T \gg 3 \text{ см}$. Для сокращения времени наполнения и опорожнения возьмем максимально возможный в данных условиях $d_T = 14 \text{ см}$. Для получения

длины нейтроновода используем следующие соображения. Из §6 мы видели, что требуемая однородность магнитного поля довольно высока, что предполагает или хорошую магнитную защиту камеры или отсутствие ферромагнитных масс вблизи нее. Последнее условие практически выполнить не удастся, так как установка должна располагаться в экспериментальном зале какого-либо реактора, обычно имеющих плохую магнитную обстановку. Поэтому установка будет окружена магнитным экраном из магнитомягкого материала (например, пермаллоя). С другой стороны для предполагаемого поляризатора необходимо будет использовать магнитное поле в несколько сот эрстед, поэтому он должен быть отнесен от магнитного экрана на некоторое расстояние.

Ориентировочные расчеты показывают, что это расстояние должно быть не менее 1м. Учитывая, что длина предполагаемого экрана равна около 2м, получим для длины нейтроновода оценку $l_T \approx 2\text{м}$.

Полагая $\bar{\mu}_T \approx \bar{\mu}_K = 10^{-3}$ и подставляя цифры в выражение

для t_1 , получим $t_1 \approx 2,5$ сек. Тогда за время $2t_1 = 5$ сек степень наполнения камеры будет равна $K \approx 0,9$. По истечении времени $2t_1$ закрывается камерная заслонка, время ее срабатывания технически возможно сделать за 1 сек. Подъем напряжения до номинала можно оценить исходя из емкости камеры и сопротивления в цепи источника питания. Оценки показывают, что здесь можно уложиться в 5 сек. Аналогично для сброса напряжения.

Длительность вытекания можно оценить подобно оценке длительности наполнения. В данном случае были проведены численные расчеты методом Монте-Карло в различных предположениях о характере отражения в камере и нейтронноводе. Вариант с полностью диффузным отражением стенок дал для постоянной времени $t_2 = 6,5$ сек при $\bar{\mu} = 0$ и 5,1 сек при $\bar{\mu} = 10^{-3}$ (при этом пропускание нейтронновода $R = 0,75$). Вариант с диффузным отражением в камере и зеркальным в трубе дал $t_2 = 2$ сек при $\bar{\mu} = 10^{-3}$ ($R = 0,9$). На практике случай будет промежуточный. Однако надо стремиться к максимальной зеркальности нейтронновода. Для камеры характер отражения не играет роли. Для дальнейших оценок будем считать, что длительность опорожнения камеры со степенью $K_1 = 0,9$ равна 8 сек.

Суммируя все затраты времени, получим $t_{\Sigma} \approx 26$ сек.

8. Длительность импульса осциллирующего поля.

В дальнейшем будет показано, что частота осциллирующего магнитного поля должна быть выбрана довольно низкой, в диапазоне $10^1 - 10^2$ гц. Длительность импульса должна быть такова, чтобы произошло достаточное число осцилляций. Но с другой стороны большое значение t_0 понижает чувствительность, так как оно входит в технические потери времени /3/.

Компромиссным значением является $t_a \approx 1$ сек.

9. Длительность выдержки.

В работе /3/ показано, что выдержка УХН в камере t (расстояние между импульсами осциллирующего поля) должна быть равна:

$$t = \frac{T^* - t_p + \sqrt{(T^* - t_p)^2 + 8 T^* t_p}}{2}$$

где $T^* = (\lambda' + 2a)^{-1}$, $t_p = t' + 2t_0$. Подставляя сюда полученные значения λ' , a , t' и t_0 имеем $t \approx 35$ сек. При этом ухудшение чувствительности за счет технологических потерь времени равно /3/ : $m' \approx \sqrt{1 + \lambda' t_p} \approx 1,35$. Полная длительность одного цикла равна $\Delta t_{\text{ц}} = t_p + t \approx 1$ мин.

10. Стабильность магнитного поля и частоты.

Ширина резонансной линии, определяемая как расстояние между ее максимумом и минимумом, равна $\Delta \nu_{\omega} = (\pi T^*)^{-1}$ /3/, что в нашем случае дает 11,5 мгц. Абсолютная стабильность частоты (и поля) должна быть, по крайней мере, лучше этого значения. С другой стороны, ошибка, обусловленная нестабильностью частоты и поля, должна быть малой по сравнению со статистической ошибкой в определении ЭДМ из двух соседних циклов измерения. Вводя следующие обозначения: ΔD_j - полная ошибка в ЭДМ, определяемая из двух соседних циклов с номерами j и $j+1$, $(\Delta D_j)_{\text{ст}}$ - статистическая ошибка, $(\Delta D_j)_{\text{нст}}$ - ошибка за счет нестабильности ν и H , мы можем написать:

$$\Delta D_j = \sqrt{(\Delta D_j)_{\text{нст}}^2 + (\Delta D_j)_{\text{ст}}^2}$$

Если обеспечить стабильность $\underline{\nu}$ и \underline{H} такую, что выполняется условие $(\underline{\Delta D}_j)_{\nu, H} \leq \frac{1}{3} (\underline{\Delta D}_j)_j$, то полная ошибка будет отличаться от статистической не более, чем на 5%. Требование на абсолютную стабильность можно найти из приведенного условия, которое выразим через окончательную ошибку всего измерения

$$(\underline{\Delta D}_j)_{\nu, H} \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{j \cdot \max}{2}} \underline{\Delta D},$$

где фактор $\frac{1}{2}$ возникает из-за того, что каждое значение счѐта детектора используется для вычисления двух значений $|\underline{\Delta D}_j|$. Пользуясь соотношением $\underline{\nu} = 10^{15} \cdot D \cdot E$, где D - в см, E в $\text{в} \cdot \text{см}^{-1}$ /3/ и выражая число циклов через длительности всего эксперимента и одного цикла, получим:

$$\underline{\Delta \nu} \leq \frac{10^{15}}{3\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{ц}}}} E \cdot \underline{\Delta D}$$

Подставляя в выражение для $\underline{\Delta D}$ полученные в §3 - 9 параметры и учитывая, что в настоящее время достигнута эффективность детектора к УХН $\overline{Mg} \approx 0,5$ и поляризация УХН $f_n \approx 0,8$ и считая, что эти значения могут быть получены на обсуждаемой установке, имеем для чувствительности установки:

$$\underline{\Delta D} \approx \frac{5 \cdot 10^{-22}}{\sqrt{\eta_0 \cdot \Delta t}}$$

и для абсолютной стабильности частоты:

$$\underline{\Delta \nu} \leq \frac{0,5}{\sqrt{\eta_0}} \text{ мш}$$

Условие на $\underline{\Delta H}$ можно получить отсюда, учитывая, что $\underline{\nu} (\text{мш})$

$$= 29,2 H(\gamma) \text{ . Окончательные численные оценки могут}$$

быть сделаны при известной плотности УХН на входе в установку (или то же самое на выходе канала УХН).

II. Плотность УХН.

В работе /II/ на выходе медного канала УХН, установленного на реакторе ИБР-30, была получена плотность $n_0 = (6 \pm 2) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$. Поток тепловых нейтронов составлял на поверхности замедлителя $3,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Установкой дырочного замедлителя внутри канала в непосредственной близости от конвертора удалось увеличить счет примерно в 2,5 раза, а охлаждение конвертора до азотной температуры дало еще выигрыш в $(4 \pm 0,2)$ раза.

На строящемся реакторе ИБР-2 расчетный тепловой поток на поверхности замедлителя равен $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Ожидаемый выход УХН соответствует $n_0 \approx 0,1 \text{ см}^{-3}$. С учетом возможности увеличения выхода за счет установки дополнительного замедлителя и охлаждения конвертора реально ожидать плотность около 1 нейтрона в 1 см^3 . На импульсном реакторе также имеется дополнительная возможность увеличения выхода УХН из канала за счет накачки до импульсной плотности /I2/. Однако реализация этой возможности представляет трудную физическую и техническую задачу и до сих пор не осуществлена.

I2. Значения магнитного поля и частоты.

Используя полученную оценку плотности УХН $n_0 \approx 1 \text{ см}^{-3}$, имеем для абсолютной стабильности частоты $\underline{\Delta \nu} \leq 0,5 \text{ мгц}$ и для абсолютной стабильности магнитного поля $\underline{\Delta H} \leq 0,017 \underline{\gamma}$. При создании магнитного поля безжелезными системами (соленоид, катушки и т.д.) требуется обеспечить соответствующую стабильность источника питания. Получение относительной стабильности таких источников лучше 10^{-5} представляет сложную техническую

задачу, поэтому мы можем на первом этапе остановиться на требовании $\frac{\Delta N}{N} \approx 10^{-5}$, что немедленно дает $N \approx 1700 \gamma$ и соответствующее значение частоты $\nu \approx 50$ гц.

13. Проектная чувствительность установки.

С учетом вышеизложенного чувствительность спектрометра ЭДМ на реакторе ИБР-2 ожидается равной

$$\Delta D \approx \frac{5 \cdot 10^{-22}}{\sqrt{\Delta t}}$$

что при длительности измерения $\Delta t = 2,5 \cdot 10^7$ сек дает точность в определении ЭДМ около 10^{-25} см.

В заключении автор пользуется случаем поблагодарить Лущикова В.И. за полезные дискуссии и Шиканяна А.А. за некоторые численные расчеты.

Ю. Марин

Подписи к рисункам.

Рис. I Схематическое изображение спектрометра ЭДМ в накопительном варианте: I - камерная заслонка, 2 - камера, 3 - резонатор, 4 - соленоид, 5 - нейтронотвод, 6 - многослойный магнитный экран, 7 - устройство для поляризации и анализа поляризации нейтронов, 8 - раздаточный вентиль, 9 - детектор нейтронов, 10 - канал УХН, II - высоковольтный ввод.

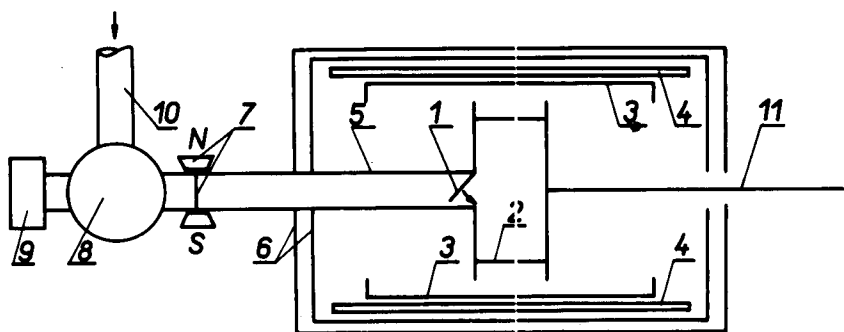


Таблица I.

Величина ЭДМ в единицах 10^{-23} см.

№№ пп	нарушающее взаимодействие	оценка	ссылка
1.	Электромагнитное	I	4
2.	СЛАБОЕ	0,05-I	5
3.	СЛАБОЕ	0,5-0,8	7
4.	Электромагнитное	0,I-I	6
5.	слабое	0,05-0,II	4
6.	СЛАБОЕ	0,0I	8
7.	сверхслабое	10^{-5}	9
8.	сверхслабое	10^{-8}	I

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.Л.Шапиро, УФН, 95, 146, 1968.
 2. П.Д.Миллер. ЭЧАЯ, 2, 961, 1972.
 3. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ, ^{РЗ-7147}~~РЗ-7149~~, Дубна, 1973.
 4. G. Barton, E.D. White. Phys. Rev., 184, 1660, 1969.
 5. R. Gouzisshakar. Не опубликовано, цитируется в [2].
 6. Б.Арбузов. Доклад на семинаре по нарушению CP - инвариантности, Москва, январь 1968. цитируется в /1/
 7. P. Me Namee, J.C. Pati. Phys. Rev., 178, 2273, 1968.
 8. M. Paskin, L. Bollinger. Не опубликовано, цитируется в [2].
 9. D. G. Boulware. Nuovo Cimento, XLA, N4, 1041, 1965.
 10. Ф.Л. Шапиро. Сообщение ОИЯИ, ^{РЗ-7135} Дубна, 1973 .
-
11. В.В.Голиков и др. Препринт ОИЯИ РЗ-6556, Дубна, 1972.
 12. Ф.Л.Шапиро. ЭЧАЯ, 2, 372, 1972.