

Таран Ю.В.
Б1-13-8441.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С342Г2
Т-19.

401/75

Б1-13-8441а

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1972.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

Ю.В.Таран

Б1-13-8441a

К ОПТИМИЗАЦИИ НАКОПИТЕЛЬНОГО ВАРИАНТА УСТАНОВКИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА
НЕЙТРОНА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

Рукопись поступила
в библиотеку
№ дек. 74

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

Дубна, 1974

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассмотрен режим работы установки для измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона с использованием ультрахолодных нейтронов в накопительном варианте. Обсуждены два способа оптимизации установки: на основе минимизации полной ошибки измерения ЭДМ и ошибки из пары соседних измерений с различными относительными ориентациями магнитного и электрического полей (ошибка цикла). Показана практическая эквивалентность обоих подходов для реалистических ситуаций.

I. Введение

Обнаружение в 1968 году /1/ ультрахолодных нейтронов (УХН) и обширные исследования по их получению, транспортировке, поляризации и накоплению, выполненные в последние годы (см., например, обзор /2/), были стимулированы возможностью существенного повышения точности измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона, впервые отмеченной Ф.Л.Шапиро в докладе /3/, прочитанном на семинаре по нарушению CP-инвариантности (Москва, 23 - 26 января 1968 г.).

Сейчас в ряде лабораторий проектируются и создаются установки для поиска ЭДМ нейтрона с помощью УХН. В конструктивном решении таких установок наметились два принципиальных варианта, так называемые, проточный (сейчас осуществляемый в ЛИЯФ АН СССР /4/ под руководством В.М.Лобашова) и накопительный /5,6/. Как показано в работе /6/, накопительный вариант несколько более чувствителен. С другой стороны, он позволяет проводить параллельный эксперимент на том же канале УХН.

В настоящей работе обсуждаются вопросы оптимизации режима работы и некоторых параметров установки для измерения ЭДМ в накопительном варианте.

2. Возможные схемы установки

Ф.Миллером /5/ предложена возможная схема установки в накопительном варианте, воспроизводимая на рис.1. В ЛНФ ОИЯИ осуществляется схема /6/, изображенная на рис.2 (установка "Тристом").

В отличие от проекта Ф.Миллера в установке "Тристом" вход в камеру сделан через электрод, находящийся под нулевым потенциалом, однако, в этом случае для получения той же напряженности электрического поля требуется источник питания с вдвое большим выходным напряжением.

3. Режим работы.

На рис. 3 показана временная диаграмма половины цикла работы установки (цикл включает измерения с параллельной и антипараллельной ориентациями электрического поля \vec{E} относительно магнитного поля \vec{H}_0). В момент времени $t=0$ открывается напускная заслонка. Введем следующие обозначения: t_1 - время срабатывания напускной заслонки, t_2 - время наполнения накопительной камеры, t_3 - время закрывания камерной заслонки, t_4 - время подъема высокого напряжения на камере до номинального значения, t_5 - длительность импульса магнитного поля H_1 *, перпендикулярного H_0 , обеспечивающего поворот вектора нейтронной поляризации на 90° , t - выдержка УХН, t_6 - длительность второго импульса магнитного поля H_1 (обычно $t_5 = t_6$),

* В работе /7/ предлагается использовать постоянное магнитное поле H_1 , равное по величине H_0 (метод Миллера). Тогда длительность импульса должна быть равна $t_5 = \hbar / 4 \mu_n H_{res}$, где $H_{res} = \sqrt{2} H_0$. Возможно также использование осциллирующего магнитного поля с частотой, равной ларморовской (метод Рамзея). В этом случае длительность действия этого поля связана с амплитудой соотношением $H_1 = 8,6 / t_5$, где H_1 в единицах 10^{-5} э, t_5 в сек^{6/}. Сравнение двух способов требует дополнительного анализа.

t_7 - время сброса высокого напряжения с камеры, t_8 - время срабатывания камерной заслонки (практически $t_3 \approx t_8$), t_9 - время вытекания УХН из камеры.

Время нахождения УХН в камере t' , состоящее из двух частей: собственно выдержки t и времени, затрачиваемого на различные операции $t_p = t_4 + t_5 + t_6 + t_7$, определяет количество нейтронов, оставшихся в камере перед открыванием заслонки:

$$N = N_0 e^{-\lambda' t'} \quad (1)$$

где N_0 - начальное число УХН в камере,

λ' - вероятность в I сек исчезновения нейтрона из камеры, равная:

$$\lambda' = \lambda + \frac{\bar{v} S_K}{4V_K} \bar{M}_K, \quad (2)$$

где, в свою очередь, λ - постоянная распада нейтрона, \bar{v} - скорость УХН, V_K и S_K - объем и площадь внутренней поверхности камеры, \bar{M}_K - усредненная по углу вероятность поглощения нейтрона в стенках камеры.

Длительность половины цикла равна $t_c = t_p + t$, где $t_p = \sum_{i=1}^9 t_i$ - время на технологические операции. Обозначая полную длительность эксперимента через Δt , получим число циклов $M = \frac{\Delta t}{2t_c}$.

4. Чувствительность установки.

Сдвиг ларморовской частоты γ прецессии нейтрона в магнитном и электрическом полях, вызываемый реверсом электрического поля и равный:

$$\underline{\Delta \nu} = - \frac{4\bar{e} D}{h} E, \quad (3)$$

где D - величина ЭДМ в единицах длины, приводит к соответствующему изменению счета детектора:

$$\underline{\Delta N} = N_+ - N_- = \frac{dN}{d\nu} \underline{\Delta \nu}, \quad (4)$$

где N_{\pm} - счет детектора за одно наполнение камеры (полцикла) при параллельной (антипараллельной) ориентации \vec{E} относительно \vec{H}_0 .

В методе Рамзея зависимость счета детектора от частоты дается следующим выражением /6/:

$$N(\nu) = \frac{1}{2} (N_+ + N_-) \left[1 \pm \sin 2\pi (\nu - \nu_1) t \right], \quad (5)$$

где ν_1 - частота осциллирующего поля H_1 , знаки \pm относятся к разности фаз между импульсами осциллирующего поля $\delta = \pm \frac{\pi}{2}$ (эффективности поляризатора и анализатора предлагаются равными I). Максимальная чувствительность достигается при $\nu = \nu_1$.

В методе Миллера /5/:

$$N(\nu) = \frac{1}{2} (N_+ + N_-) (1 + \cos 2\pi \nu t) \quad (6)$$

Максимальная чувствительность достигается при значениях $\nu t = \frac{2n+1}{4}$.

В обоих случаях производятся в точках с максимальной чувствительностью равной $\frac{1}{4}$.

$$\frac{dN}{d\nu} = \pi (N_+ + N_-) t \quad (7)$$

Пользуясь уравнениями (3), (4) и (7), найдем значение $D_{\text{ср}}$ и его ошибку $\Delta D_{\text{ср}}$ в i - цикле измерения:*)

ж) В работе /5/ в ур. (22), по нашему мнению, имеется лишняя двойка в знаменателе.

$$D_i = \frac{h(N_+ - N_-)}{4\pi e E t (N_+ + N_-)}, \quad (8)$$

$$\Delta D_i = \frac{h}{4\pi e E t \sqrt{N_+ + N_-}} \quad (9)$$

Если число циклов M достаточно велико, то с хорошей точностью ошибка всего эксперимента равна:

$$\Delta D = \frac{\Delta D_i}{\sqrt{M}} \quad (10)$$

С точки зрения оптимизации установки и получения наибольшей чувствительности имеются два пути: минимизация полной ошибки эксперимента ΔD и минимизация ошибки цикла ΔD_i . Исследуем обе возможности.

5. Минимизация ошибки цикла.

Подставляя ур. (I) в (9) и анализируя полученное выражение на экстремум по длительности выдержки t , получим оптимальное время выдержки:

$$t_0 = \frac{2}{\lambda'} = 2T, \quad (11)$$

где T - время жизни УХН в накопительной камере установки.

Тогда ошибка цикла равна:

$$\Delta D_i = \frac{2,71828 h}{8\pi e E T \sqrt{2N_0}} e^{\frac{1}{2} \frac{t_p}{T}}, \quad (12)$$

а полная ошибка, соответственно:

$$\Delta D = \frac{2,71828 h \sqrt{t_p + 2T}}{8\pi e E T \sqrt{N_0 \Delta t}} e^{\frac{1}{2} \frac{t_p}{T}} \quad (13)$$

Далее возможна также минимизация ΔD_i по размерам камеры. Действительно, считая заданным напряжение высоковольтного

источника \sqrt{N} и используя следующие соотношения:

$E = \sqrt{N} / h_{\bar{k}}$, $N_0 = n_0 \sqrt{\bar{k}}$, $V_{\bar{k}} = \frac{\pi}{4} D_{\bar{k}}^2 h_{\bar{k}}$, где $D_{\bar{k}}$ - диаметр камеры (предполагая ее цилиндрической), $h_{\bar{k}}$ - ее длина, получим,

оставляя в ур. (I2) множители, зависящие от размеров камеры:

$$\Delta D_i \sim \frac{\sqrt{h_{\bar{k}}}}{D_{\bar{k}}} \left(\lambda + \frac{\sqrt{\bar{\mu}_k}}{2 h_{\bar{k}}} + \frac{\sqrt{\bar{\mu}_k}}{D_{\bar{k}}} \right) e^{\frac{1}{2} \frac{t_p'}{T}} \quad (I4)$$

В случае $t_p' \ll T$ ур. (I4) имеет минимум при

$$h_{\bar{k}} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\bar{\mu}_k}}{\lambda + \frac{\sqrt{\bar{\mu}_k}}{D_{\bar{k}}}} \quad (I5)$$

При достаточно больших $\frac{\sqrt{\bar{\mu}_k}}{D_{\bar{k}}}$ оптимальная длина камеры близка к ее радиусу:

$$h_{\bar{k}} \approx \frac{1}{2} D_{\bar{k}} \quad (I6)$$

На рис. 4 приведена зависимость $h_{\bar{k}}$ от $\frac{\sqrt{\bar{\mu}_k}}{D_{\bar{k}}}$ при $D_{\bar{k}} = 52$ см.

Если использовать в качестве материала камеры медь, для которой $\bar{\mu}_k(\text{теор.}) = 3 \cdot 10^{-4}$ и $\bar{\mu}_k(\text{экспер.}) \approx 10^{-3} / 8$, то ур. (I6) практически выполняется. При этом для \sqrt{N} в диапазоне 300+600 кв требуемая напряженность поля 10+20 кв/см лежит в практически разумных рамках.

Изложенный способ оптимизации установки был использован автором и Шиканяном А.А. в 1970г. /9/. Аналогичный подход был изложен в лекции Миллера /5/ в Алуште.

В работе /6/ производилась минимизация полной ошибки. Кратко повторим полученные в ней результаты, чтобы произвести сравнение двух подходов.

6. Минимизация полной ошибки.

Анализ ур. (10) на экстремум по t дает оптимальное время выдержки /6/:

$$t_{\bar{t}} = \underline{x} T, \quad (I7)$$

где

$$\underline{x} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t_p}{T} + \sqrt{\left(1 - \frac{t_p}{T} \right)^2 + 8 \frac{t_p}{T}} \right), \quad (I8)$$

тогда полная ошибка равна:

$$\underline{\Delta D} = \frac{h}{4\pi e E \sqrt{N_0 \Delta t}} \frac{\sqrt{t_p + \underline{x} T}}{\underline{x} T} e^{\frac{1}{2} \left(\underline{x} + \frac{t_p}{T} \right)} \quad (I9)$$

Полная ошибка в этом случае не имеет оптимума по размерам камеры и уменьшается с уменьшением $h_{\bar{K}}$ при фиксированном $D_{\bar{K}}$. Ограничением на минимальное значение $h_{\bar{K}}$ является максимально достижимая напряженность электрического поля.

7. Сравнение обоих способов оптимизации.

Наиболее просто сравнить чувствительности двух установок, оптимизированных различными способами, но имеющих камеры одинаковых размеров.

Деля ур. (13) на (18), получим отношение чувствительностей:

$$\rho = \frac{1}{2} \underline{x} e^{1 - \frac{1}{2} \underline{x}} \frac{\sqrt{t_p + 2T}}{\sqrt{t_p + \underline{x} T}} \quad (20)$$

На рис. 5 приведена зависимость ρ от $\frac{t_p}{T}$ (кривая I). Видно, что оба варианта оптимизации практически эквивалентны, хотя второй несколько более предпочтителен. Аналитическое сравнение обоих вариантов для камер, оптимизированных по размерам,

затруднительно, поэтому проведем такое сравнение на более или менее реалистическом конкретном примере.

Предположим, что имеется в наличии (или его нетрудно изготовить) источник, дающий разность потенциалов на камере $V_{\text{н}} = 300$ кв, а максимально достижимая напряженность не превышает 30 кв/см. Далее считаем, что в обоих вариантах диаметр $D_{\text{к}}$ один и тот же и равен 50 см, а внутренняя поверхность эквивалентна меди с $\bar{\mu}_{\text{к}} = 10^{-3}$. 1 вариант. Из ур. (15) определяем $h_{\text{к}} = 25$ см, что дает $E = 10$ кв/см $< E_{\text{max}}$. Время жизни УХН в камере получается равным 50 сек. 2 вариант. В соответствии с результатами §6 полагаем $E = E_{\text{max}}$, тогда длина камеры равна $h_{\text{к}} = 10$ см. Соответственно, время жизни равно $T = 28$ сек.

Отношение чувствительностей ρ в этом случае как функция затрат времени на технологические операции $t_{\text{р}}$ приведено на рис. 5 в виде кривой 2. Выбор варианта определяется абсолютным значением $t_{\text{р}}$. Если воспользоваться результатами анализа /10/ возможных значений временных интервалов t_i , то $t_{\text{р}} = \sum_{i=1}^9 t_i \approx 2 + 7 + 2 + 5 + 1 + 1 + 5 + 2 + 7 = 32$ сек, и оба варианта дают близкие результаты. Поэтому практический выбор, по-видимому, должен производиться из конструктивных, технологических и иных соображений. В частности, с точки зрения получения нужной напряженности электрического поля первый вариант более легок, однако, в этом случае надо обеспечить нужную однородность магнитного поля в значительно большем объеме и т.д.

В заключение автор пользуется случаем поблагодарить проф. Ф.Миллера за полезные дискуссии.

Тошорин

ЛИТЕРАТУРА.

1. В.И.Лушиков и др. Письма ЖЭТФ, 9, 23 (1969);
Препринт ОИЯИ РЗ-4127, Дубна, 1968.
2. Ф.Л.Шапиро. Препринт ОИЯИ РЗ-7135, Дубна, 1973. Доклад
на Международной конференции по изучению структуры ядра
с помощью нейтронов, Будапешт, 1972.
3. Ф.Л.Шапиро, УФН, 95, 146 (1968)
4. А.И.Егоров и др. ЯФ, 19, 300 (1974); В.М.Лобашов и др.
Препринт ЛИЯФ АН СССР №37, Ленинград, 1973.
5. P.D. Miller. Summary of a seminar on UCN at
ILL Grenoble, 2-3 april 1973 (prepared by R. Golub
and J. M. Pendlebury).
6. Ю.В.Таран. Сообщение ОИЯИ РЗ-7149, Дубна, 1973.
7. P.D. Miller. Lecture at the Second Inter. School
on Neutron Physics, Alushta, 2-19 april 1974.
8. Л.В.Грошев и др. Препринт ОИЯИ РЗ-5392, Дубна, 1970.
9. А.А.Шиканян. Дипломная работа, МГУ им. Ломоносова, Москва, 1971.
10. Ю.В.Таран. Депонированное сообщение ОИЯИ, БИ-3-7151, Дубна,
1973.

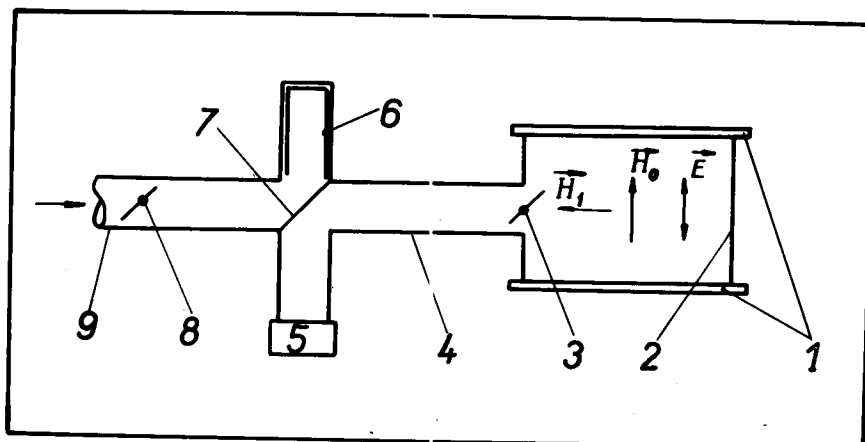


Рис. 1 Схема установки для измерения ЭДМ нейтрона (по Миллеру):
 1 - электроды плоского конденсатора, 2 - камера (изолятор),
 3 - камерная заслонка, 4 - нейтроновод, 5 - детектор,
 6 - поглотитель, 7 - поляризатор, 8 - напускная заслонка,
 9 - канал УХН.

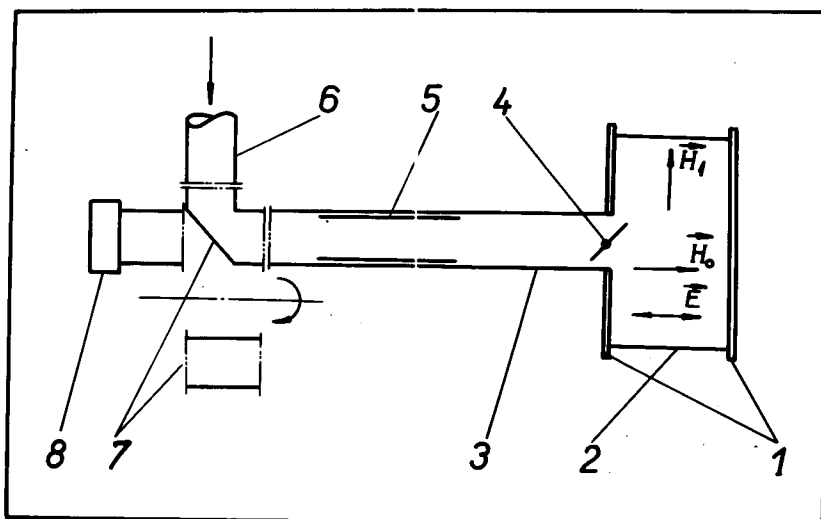


Рис. 2 Схема установки "Тристом" для измерения ЭДМ нейтрона:
 1 - электроды плоского конденсатора, 2 - камера (изолятор),
 3 - нейтроновод, 4 - камерная заслонка, 5 - поляризатор,
 6 - канал УХН, 7 - раздаточный вентиль, 8 - детектор.

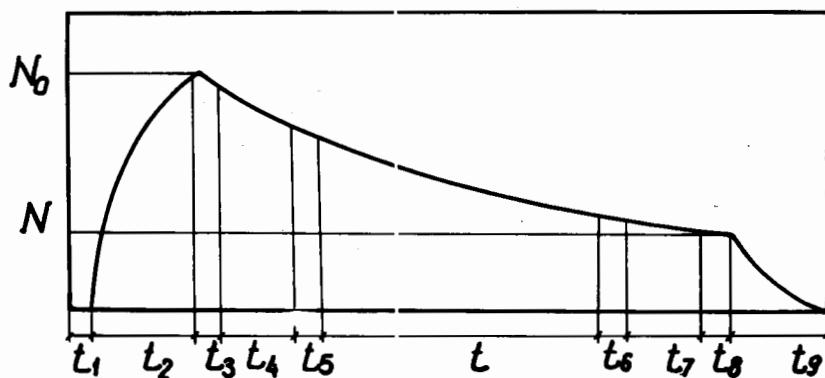


Рис. 3 Временная диаграмма половины цикла работы установки в накопительном варианте.

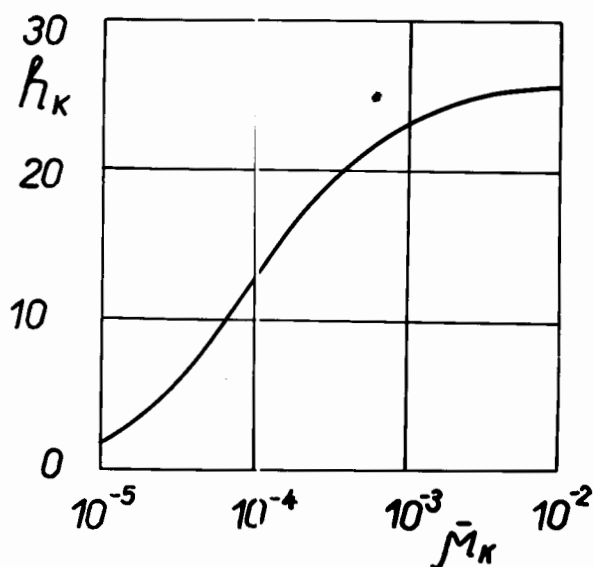


Рис. 4 Зависимость оптимальной длины накопительной камеры h_k (см) от вероятности поглощения УХН в стенке μ_k для диаметра $D_k = 52$ см.

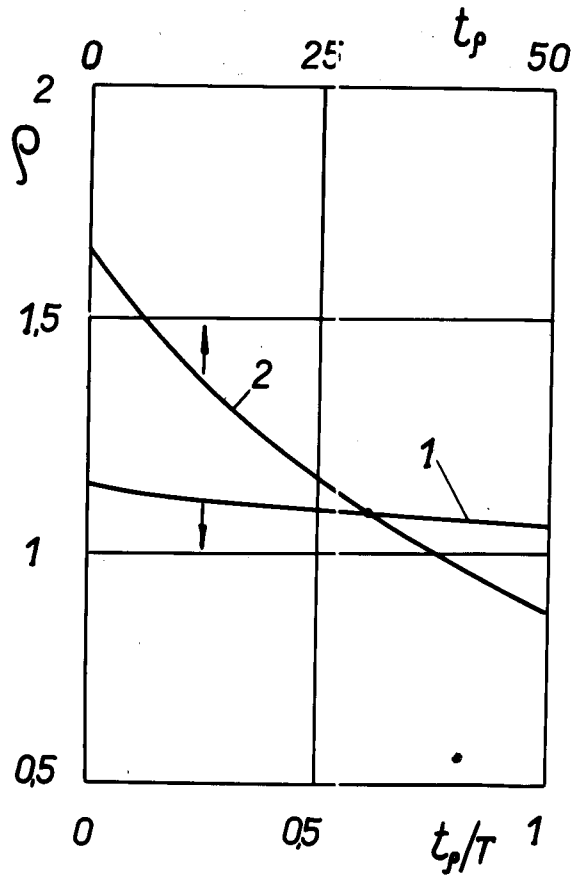


Рис. 5 Отношение чувствительностей ρ для двух вариантов оптимизации установки для измерения ЭДМ: 1 – при одинаковых размерах камер; 2 – для примера, рассмотренного в тексте.