

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПОИСКУ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА.  
РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ИХ УЛУЧШЕНИЯ

П. Д. Миллер

ОК-РИДЖСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ, США

## АННОТАЦИЯ

Описан эксперимент по измерению электрического дипольного момента нейтрона  $\mu_e$  с помощью методики нейтронного магнитного резонанса. Хотя значение  $\mu_e$ , полученное в эксперименте, отличается от нуля и в 1,4 раза превосходит статистическую ошибку, результат эксперимента лучше интерпретировать как установление верхнего предела на величину  $\mu_e$ , т. е.  $|\mu_e/e| < 5 \cdot 10^{-23}$  см, где  $e$  — заряд протона.

## АБСТРАКТ

A neutron beam magnetic resonance experiment, used to measure the electric dipole moment  $\mu_e$  of the neutron is described. Although the results for  $\mu_e$  differ from zero by 1,4 times the statistical error, the measurement is best interpreted as setting an upper limit on  $\mu_e$  i.e.  $|\mu_e/e| < 5 \cdot 10^{-23}$  cm, where  $e$  is the charge of the proton.

Прошло семь лет после открытия нарушения CP-четности в распаде долгоживущих нейтральных  $K$ -мезонов на два пиона [1]. Но до сих пор мы стоим перед неприятным фактом, что только в экспериментах по распаду  $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  и  $K_2^0 \rightarrow 2\pi^0$  наблюдается нарушение CP-четности. Эти эксперименты были много раз повторены, и вероятности распадов  $K_2^0$ -мезонов сейчас хорошо определены. Эксперименты по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона являются попытками наблюдать нарушение T- или CP-четностей в иной системе, чем  $K_2^0$ -мезон. Было сделано много теоретических оценок величины ЭДМ нейтрона, и их можно разбить на три группы:

1) наибольший ЭДМ нейтрона предсказывается в том случае, когда нарушение временной инвариантности предполагается в первом порядке электромагнитного взаимодействия. Соответствующие этому случаю расчеты были проведены Файнбергом [2] и Зальцманами [3] и из них следует оценка  $\mu_e/e \approx 10^{-20} - 10^{-19}$  см. Этот вариант теории отвергнут сообщенными здесь результатами по ЭДМ нейтрона;

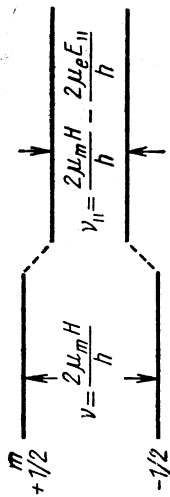
2) если сделать предположение, что CP-нарушающая мода в распаде  $K_2^0$ -мезона обусловлена небольшой CP-нарушающей примесью в сильном или слабом взаимодействии, то предсказываемый теорией ЭДМ окажется равным  $10^{-24} - 10^{-22}$  см. Подобная же оценка будет иметь место и в том случае, если нарушение временной инвариантности предположить во втором порядке электромагнитного взаимодействия [4]. Экспериментальный верхний предел лежит сегодня как раз в этом диапазоне  $\mu_e/e < 5 \cdot 10^{-23}$  см. Поэтому мы сильно заинтересованы в том, чтобы чувствительность эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона повысить в десять или более раз;

3) другой тип теоретической оценки ЭДМ нейтрона основывается на теории сверхслабого взаимодействия Вольфенштейна [5], которая дает  $\mu_e/e$  в диапазоне  $0 - 10^{-28}$  см. По-видимому, эта область практически недоступна для эксперимента.

Эксперименты в Ок-Риджской национальной лаборатории были проведены группой в составе Рамзея, Дресса, Бэрда и Миллера. Был использован магнитный резонансный спектрометр с раздельными осциллирующими полями на поляризованном пучке нейтронов. В нем сильное электростатическое поле приложено параллельно магнитному в промежутке между катушками. Схема энергетических уровней для нейтральной частицы со спином  $1/2$ , обладающей электрическим и магнитным моментами, показана на рис. 1. Если

$$\chi = -\mu_m h - \mu_e E$$

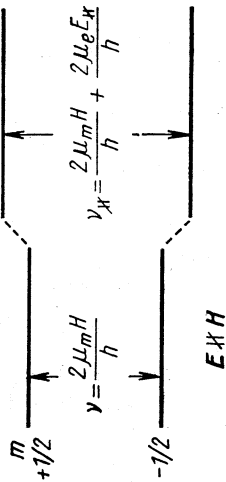
$$\mu_m = \gamma_m \sigma \quad \mu_e = \gamma_e \sigma = eD$$



$$E \parallel H$$

$$\Delta\nu \equiv \nu_{||} - \nu_{\kappa} = -\frac{2eD}{h}(E_{||} + E_{\kappa})$$

$$\Delta N \equiv N(E_{||}) - N(E_{\kappa}) = \frac{\partial N}{\partial \nu} \Delta \nu$$



$$D = -\frac{h}{2e} \frac{\Delta N}{(E_{||} + E_{\kappa}) \partial N / \partial \nu}$$

Рис. 1. Схема энергетических уровней для нейтральной частицы со спином 1/2 и электрическим  $\mu_e$  и магнитным  $\mu_m$  моментами в параллельном и антипараллельном электрических и магнитных полях.

частота осциллирующего поля близка к ларморовской, то в системе возбуждаются переходы с переопрокидыванием спинов. Соответствующая резонансная кривая показана на рис. 2. Согласно принципу неопределенности, обратная ширина резонансной кривой, а следовательно, и наклон кривой в резонансе пропорциональны интервалу времени, в течение которого нейтроны находятся между осциллирующими полями. Он равен  $L/\alpha$ , где  $L$  — расстояние между катушками;  $\alpha$  — скорость нейтронов. Чувствительность к ЭДМ нейтрона определяется следующими факторами: 1) длиной аппаратуры; 2) величиной поляризации; 3) величиной электрического поля; 4) интенсивностью пучка очень медленных нейтронов. Параметры экспериментальной установки следующие:

Длина области со статическим электрическим полем . . . . .	1,96 м
Напряженность статического электрического поля . . . . .	120 кв·см <sup>-1</sup>
Напряженность статического магнитного поля . . . . .	17 эрст
Поляризация нейтронов в пучке	70 %
Средняя скорость нейтронов в пучке . . . . .	115 м·сек <sup>-1</sup>
Наклон резонансной линии . . . . .	80 отсчет/гц
Ширина резонанса . . . . .	34 гц
Скорость счета в резонансе . . . . .	2800 сек <sup>-1</sup>
Тепловой поток на входе в трубу	$1,3 \cdot 10^{13}$ нейтрон $\times$ $\times$ см <sup>-2</sup> ·сек <sup>-1</sup>

Пучок холодных нейтронов получен с помощью изогнутого отражательного нейтронотода с полированной никелевой поверхностью. Подобные отражательные нейтронотоды предложены Майер-Лейбницем [6]. Спектрометр должен удовлетворять трем требованиям: однородности и стабильности магнитного поля и параллелизму статических магнитного и электрического полей.

На каждую частицу, проходящую через спектрометр, в промежутке между осциллирующими катушками действует статическое магнитное поле, усредняемое по пути пролета. Если бы все частицы следовали одним путем, то резонансная частота для них была бы одинаковой, а ширина резонансной линии составляла бы около 30 гц. В нашем же эксперименте пучок имеет ширину 1 и высоту 10 см, поэтому необходимо подобрать магнитное поле и спроектировать магнитные полюса так, чтобы вариации среднего магнитного поля для нейтронов, следующих различными путями через спектрометр, удовлетворяли условию:

$$\Delta H \ll \hbar \Delta v / \mu_m \approx 10^{-2} \text{ эрст.} \quad (1)$$

Временная стабильность магнитного поля должна быть такой, чтобы соответствующая погрешность была меньше погрешности, ожидаемой из распределения Пуассона для счета детектора. Эта погрешность для счетного интервала в 2 мин оценена величиной порядка  $D = 10^{-21}$  см, что соответствует сдвигу резонансной частоты

ты около 0,1 гц. Для резонансной частоты 50 кгц это приводит к требованию на временную стабильность:

$$\frac{\Delta H_t}{H} \ll 2 \cdot 10^{-6} \text{ за } 2 \text{ мин.} \quad (2)$$

При движении нейтрона со скоростью  $v$  в электрическом поле возникает ложный ЭДМ:

$$D_E = \frac{\mu m}{e} \cdot \frac{v}{c} \sin \theta. \quad (3)$$

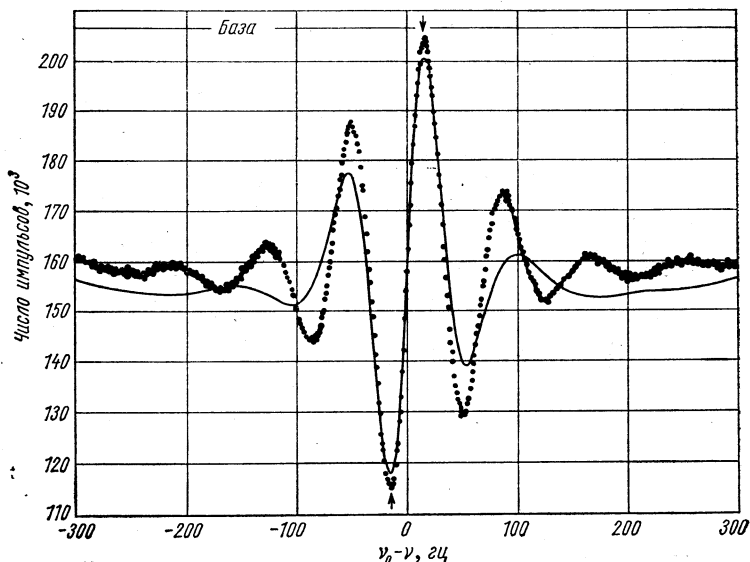


Рис. 2. Резонансная линия, полученная со сдвигом фазы на  $90^\circ$  между токами в катушках, создающих осциллирующие поля:

верхняя линия, обозначенная как «база», представляет число отсчетов без осциллирующего поля. Ширина резонанса определяется как разность частот экстремумов линии, маркированных вертикальными стрелками. Вычисленная вероятность переходов для максвелловского спектра с температурой  $1^\circ \text{K}$  показана сплошной линией. Близкое совпадение вычисленной и измеренной кривых показывает хорошую однородность поля; точки — данные эксперимента.

Это уравнение позволяет определить требуемую степень параллелизма между электрическим и магнитным статическими полями в спектрометре. Для того чтобы ложный ЭДМ подобного рода был меньше, чем  $D \approx 10^{-23} \text{ см}$ , для нейтронов со скоростью  $100 \text{ м/сек}$  требуется

$$\theta < 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ рад.} \quad (4)$$

Столь малая величина  $\theta$  должна быть выдержана в среднем по всей длине электрического поля. Однако, как будет видно из дальнейше-

го, величину  $D_E$  можно измерить экспериментально и учесть при получении истинного ЭДМ.

Установка, позволяющая получить поля с требуемой однородностью, показана на рис. 3. Магнитные полюса 7 и шиммы 16 были изготовлены из молипермаллоя (состав сплава: 79% Ni, 17% Fe и 4% Mo). Этот сплав имеет проницаемость около 25 000 при напряженности магнитного поля 17 эрст полюсов и шимм, поэтому плоскости оказались достаточно близкими к магнитной эквипотенциали. Каждый полюс имел размеры  $1,25 \times 30 \text{ см}^2 \times 2,44 \text{ м}$  с параллельностью сторон в пределах 7 мкм. Остальная часть магнитной цепи изготовлена из чистого железа толщиной 2,2 см. Между железными пластинами и полюсами из молипермаллоя имеется вакуумный зазор 0,6 мм, который с помощью пластмассовых прокладок поддерживается равномерным с точностью 7 мкм. С целью сохранения однородности магнитного поля зазор вакуумирован. При этом уравновешивается давление на обе стороны полюса и тем самым исключается изгибание полюса. Для того чтобы сохранить однородность магнитного поля, не было использовано ни одного болта для соединения частей магнитных полюсов. Стяжка магнита производится болтами 17. Болты 1 поддерживают шиммы в заданном положении, и болты 2 противостоят давлению воздуха на вакуумную камеру. Стеклоянные изоляторы приклеены к электростатическим пластинам и магнитным полюсам с помощью эпоксидного клея.

Магнитные шиммы 17 спроектированы, следуя Роузу [7], и они уменьшают неоднородность магнитного поля до  $10^{-4}$  эрст. Для того чтобы весь объем спектрометра удовлетворял условию (1), введены 30 кварцевых прокладок 11. Они позволяют поддерживать зазор одинаковым в пределах 3 мкм по всей длине спектрометра. Все материалы внутри магнитного зазора имеют магнитную восприимчивость менее чем  $10^{-5}$ . Сравнение вычисленной и наблюдаемой резонансной кривых, приведенных на рис. 2, показывает, что требуемая однородность выдержана.

Временная нестабильность магнитного поля имеет два источника: внешний и внутренний. Защитой против внешних флуктуаций, обусловленных случайными магнитными полями, служат два концентрических цилиндрических магнитных экрана из молипермаллоя толщиной 2,5 мм и диаметром 1 и 1,1 м. Торцы защиты сделаны из того же материала. Экранирующий фактор этой пары экранов оценивается равным 800, а полный экранирующий фактор, включая железное ядро магнита, экспериментально найден равным  $10^4$ . Чтобы минимизировать внутренние флуктуации, было решено получить магнитное поле с помощью постоянных магнитов, а не с катушками и источником постоянного тока. Стабильность лучших источников постоянного тока равна  $10^{-6}$ , в то время как постоянные магниты при таких же приблизительно изотермических условиях имеют стабильность  $5 \cdot 10^{-8}$ . В качестве материала для постоянных магнитов выбран сплав альнико IV, поскольку он имеет низкий температурный коэффициент намагниченности ( $2 \cdot 10^{-4}$  на  $1^\circ \text{C}$ ), а

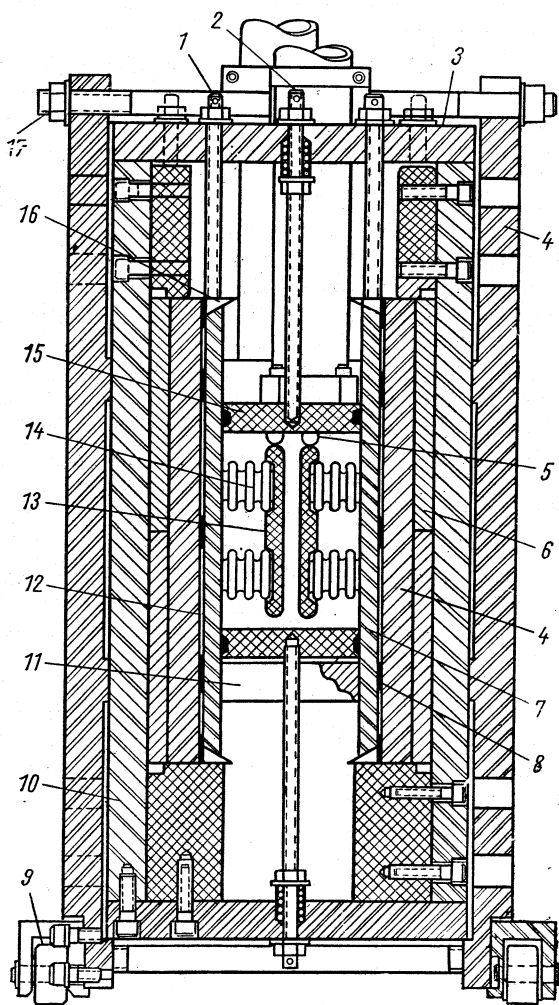


Рис. 3. Магнитный резонансный спектрометр:

1—болты для регулировки шимма; 2—болты для регулировки вакуумной камеры; 3—железо; 4—железные пластины; 5—высоковольтные вводы; 6—постоянные магниты; 7—полоса из молибденаллоя; 8—немагнитные прокладки; 9—колеса для вкатывания спектрометра в цилиндрическую магнитную защиту; 10—железо; 11—кварцевые прокладки; 12—вакуумный зазор; 13—электростатические пластины; 14—стеклянные изоляторы; 15—вакуумная камера; 16—треугольные шиммы из молибденаллоя; 17—стягивающие болты.



также малую чувствительность к ударам и вибрациям. Четыре пластины из альнико расположены с обратной стороны каждого полюса. Магниты намагничены до насыщения одинаковым способом, а точность обработки пластин такова, что магнитное поле получилось однородным во всем объеме в пределах условия (1). Тепловая изоляция осуществляется пенопластом, которым заполнено пространство между двумя магнитными экранами. Достигнутая временная стабильность дана на рис. 4. Добавочным указанием на достаточность временной стабильности является тот факт, что окончательная статистическая погрешность, получившаяся при чередующихся реверсах электрического поля, близка к ожидавшейся из статистики отсчетов. Анодированные алюминием электростатические пластины изолированы от поверхности полюсов стеклянными изоляторами. Предполагая, что поверхность полюса и соответствующая электростатическая пластина являются магнитной и электрической эквипотенциалами, из уравнения (4) можно получить допуск на их параллелизм. Учитывая, что высота электростатической пластины равна 11,3 см, получаем допустимое отклонение от параллелизма в пределах 0,2 мм. Практически же монтаж электростатических пластин, полюсов и изоляторов произведен так, что отступление от параллелизма не превосходит 0,05 мм.

Учитывая повышенное внимание к геометрической точности, можно считать, что, по-видимому, основной вклад в непараллелизм  $E$  и  $H$  вносит остаточная тангенциальная компонента магнитного поля, обусловленная неполным размагничиванием магнитных полюсов.

Накопление данных происходит в автоматическом режиме с реверсом электрического поля один раз в 1 мин, и отсчеты, накопленные в течение этого времени, записываются на перфоленту, которая затем пропускается через ЭВМ. Этот метод позволяет сделать около 44 000 реверсов электрического поля и вести анализ данных круглосуточно в течение двух месяцев.

Кроме направления электрического поля систематически изменялись и другие экспериментальные параметры. Знак наклона резонансной линии реверсировался с периодом 1 день. Это осуществлялось с помощью реверса сдвига фазы в  $90^\circ$  между двумя радиочастотными катушками. Сдвиг частоты, обусловленный реверсом электрического поля, приводит к изменению скорости отсчета на  $\Delta N$ . Если наклон резонанса реверсировать, то  $\Delta N$  изменит знак при том же сдвиге частоты. Таким образом, формула, приведенная на рис. 1, не должна зависеть от изменения знака наклона, если  $\Delta N$  обусловлено ЭДМ нейтрона. Любая заметная разница в данных с противоположными наклонами резонансной линии должна интерпретироваться как дефект в измерительной аппаратуре, а не как результат проявления нейтроном его внутренних свойств. Нами не был обнаружен эффект от реверса знака наклона резонансной линии.

Третьим параметром, который подвергается систематическим изменениям, является скорость нейтрона или, вернее, ориентация спек-

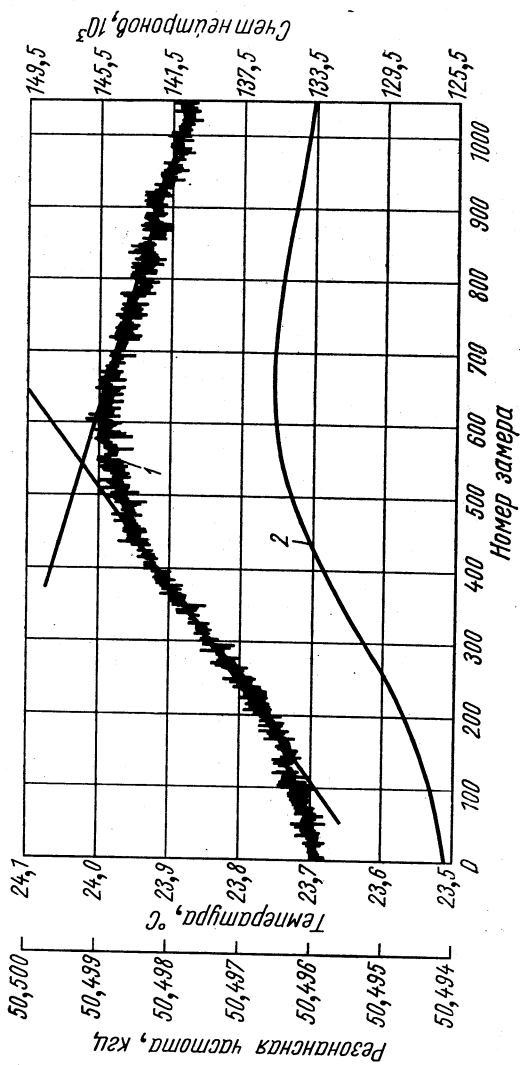


Рис. 4. Зависимость счёта нейтронов (1), зафиксированного в течение счетного интервала, и температуры спектрометра (2) от номера замера: корреляция между двумя кривыми доказывает влияние изменения температуры на статистическое магнитное поле спектрометра. Прямые линии использованы для оценки величины эффекта при линейном и квадратичном дрейфах.

трометра по отношению к направлению нейтронного пучка. Величину  $[v E]/c$ -эффекта, даваемую уравнением (3), можно определить сравнением набора измерений при  $+v$  с набором при  $-v$ . После 15 дней набора статистики спектрометр повернули на  $180^\circ$ , и в течение 17 дней данные накапливались снова. Затем спектрометр был возвращен в первоначальное положение, и набор шел 21 день. Четвертый набор должен был сравниваться со вторым, но техническая авария с электростатической пластиной, а также окончание аренды реактора прервали измерения.

Если обозначить реальную длину диполя  $D_r$  и выразить  $[v E]/c$ -эффект через длину диполя  $D_E$ , то средние результаты трех наборов будут следующие (в единицах  $10^{-23}$  см):

$$\left. \begin{array}{l} \text{I} \quad D_r + 34,0D_E/34 = +0,22 \pm 2,19; \\ \text{II} \quad D_r - 35,5D_E/34 = +3,56 \pm 1,87; \\ \text{III} \quad D_r + 31,5D_E/34 = -0,65 \pm 1,57. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Коэффициенты при  $D_E$  нормализуют скорость нейтронов к скорости, соответствующей среднему  $\delta v = +34$  гц (или около  $115$  м·сек $^{-1}$ ). Погрешностями являются наибольшее стандартное отклонение от среднего или погрешность, полученная из полного числа отсчетов. Эти обе погрешности всегда совпадали с точностью 10%.

Окончательные результаты после соответствующего комбинирования данных (5) следующие:

$$\begin{aligned} D_r &= \mu_e/e = 1,5 \pm 1,1; \\ D_E &= -1,9 \pm 1,1. \end{aligned} \quad (6)$$

Эта величина  $D_E$  соответствует углу

$$\theta = (2,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-3} \text{ рад}. \quad (7)$$

Таким образом, угол между электрическим и магнитным полями ставит критический предел на эксперимент, несмотря на то что можно учесть влияние этого эффекта на результат.

Так как были получены только три набора данных, то предпочтительно установить наш результат как

$$|\mu_e/e| < 5 \cdot 10^{-23} \text{ см}.$$

Этот результат вместе с более полными таблицами данных был сообщен в работе [8]. Другие эксперименты дают большие значения верхней границы. Измерения в Брукхейвене основывались на возможном вкладе мнимой части длины рассеяния, обусловленной взаимодействием ЭДМ нейтрона с кулоновским полем ядра [9]. Их результат следующий:

$$\mu_e/e = (+2,4 \pm 3,9) \cdot 10^{-22} \text{ см}. \quad (8)$$

Другие измерения методикой магнитного резонанса дают следующие результаты:

$$\begin{aligned} \text{Брукхейвен} &< 10^{-21} \text{ см} [10] \\ \text{Олдермастон} &< 10^{-21} \text{ см} [11] \\ \text{Румыния} &(0,2 \pm 3,9) \cdot 10^{-22} [12]. \end{aligned}$$

Чувствительность экспериментов по поиску ЭДМ нейтрона можно повысить. В ближайшем будущем мы должны получить результаты на Ок-Риджском исследовательском реакторе с тепловым потоком  $3 \cdot 10^{14}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·сек). На этот раз спектрометр смонтирован на вращающемся столе, так что его можно легко реверсировать на 180°. Предполагаем достигнуть чувствительности  $5 \cdot 10^{-24}$  см. Следующий порядок величины получить будет значительно труднее. Сильное повышение чувствительности увеличением длины спектрометра нашего типа получить, по-видимому, невозможно. Увеличение длины потребует еще большей однородности магнитного поля и, следовательно, повысит требования на параллелизм магнитных полюсов.

Более обещающим является использование накопительного ящика для нейтронов столь малых скоростей, что наблюдается полное отражение даже при нормальном падении. Возможность подобных ящиков впервые была отмечена Я. Б. Зельдовичем [13], а первые эксперименты с ультрахолодными нейтронами выполнены В. И. Луциковым, Ф. Л. Шапиро, Л. В. Грошевым совместно с сотр. [14, 15]. Время хранения нейтронов в ящике пока составляет 10 сек, а возможное теоретическое значение превосходит 100 сек. Штайерл в Мюнхене [16] показал, что можно с помощью нейтронной отражающей турбины получить поток ультрахолодных нейтронов  $10^4$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·сек × стер) от реактора с тепловым потоком  $10^{15}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·сек) и замедлителем из жидкого дейтерия.

Если предположить, что имеется напряженность электрического поля  $10^5$  в/см, полное время набора статистики  $10^6$  сек и что нейтроны испускаются с  $1$  см<sup>2</sup> в  $1$  стер, тогда при времени удержания 100 сек предельная чувствительность

$$D = \frac{h}{4eE \sqrt{N} \frac{dP}{dv}} \approx 10^{-27} \text{ см}. \quad (9)$$

Если зададимся вопросом, каковы конструктивные требования такого спектрометра, то найдем, что задача чрезвычайно трудная, но, возможно, выполнимая. Ширина линии магнитного резонанса будет равна около  $10^{-2}$  гу, так что поле должно быть однородным с точностью

$$\Delta H \ll \frac{10^{-2}}{3 \cdot 10^3} \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ эрст}. \quad (10)$$

Если предположим период реверса магнитного поля равным 100 сек, то требование на временную стабильность:

$$\Delta H_t \ll \frac{1}{\sqrt{N_t} \mu_m \frac{dP}{dv}} \approx 10^{-9} \text{ эрст/сек.} \quad (11)$$

Требования на параллелизм **E** и **H** являются здесь не очень жесткими. Если входное и выходное отверстие одно и то же, то  $[v \mathbf{E}]_c$ -эффект пренебрежим.

Условие (10) на однородность поля смягчается большим временем удержания, в течение которого каждый нейтрон усредняет магнитное поле. Требования на допуски изготовления можно снизить использованием небольших статических магнитных полей, возможно  $10^{-2} - 10^{-1}$  эрст. Более трудной проблемой является получение магнитных материалов с высокой проницаемостью и требуемой однородностью.

Если магнитное поле напряженностью 0,1 эрст создавать с помощью постоянного тока, то очень трудно достигнуть стабильности значительно лучше, чем  $10^{-8}$  за 100 сек. Многослойные хорошо размагниченные магнитные экраны использовались в экспериментах с лазерами, где требовалась такая же экранировка от магнитных флуктуаций.

Если время удержания предположить равным 10 сек, тогда требования на однородность и стабильность снижаются на порядок величины при соответствующем ухудшении чувствительности. Кажется, что такие требования можно выполнить и тогда чувствительность  $10^{-26}$  см вполне достижима, но  $10^{-27}$  см будет определяться предельными возможностями технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Christenson J. H. e. a. Phys. Rev. Lett., 1964, 13, 138.
2. Feinberg G. Phys. Rev., 1965, 140 B, 1402.
3. Salzman G., Salzman F. Phys. Lett., 1965, 15, 91.
4. Lee T. D. Частное сообщение.
5. Boulware D. G. Nuovo cimento, 1965, XLA, No. 4, 1041.
6. Maier-Leibnitz H., Springer T. J. Nucl. Energy, 1963, 17, 217.
7. Rose M. E. Phys. Rev., 1938, 53, 715.
8. Baird J. K. e. a. Phys. Rev., 1969, 179, 1285.
9. Shull C. G., Nathans R. Phys. Rev. Lett., 1967, 19, 384.
10. Cohen V. e. a. Phys. Rev., 1969, 177, 1942.
11. Smith K., Pendlebury M. Частное сообщение.
12. Apostolescu S., Louescu D. R., Ionescu-Vujog M., Meitert S., Petrascu M. Частное сообщение.
13. Зельдович Я. Б. ЖЭТФ, 1959, 9, 1389.
14. Лушиков В. И. и др. «Письма в ЖЭТФ», 1969, 9, 40.
15. Лушиков В. И. Препринт ОИЯИ РЗ-5392, 1970.
16. Steyerl A. Частное сообщение.