

ПОИСКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА *)

П. Миллер

За открытием Кристенсоном и др.¹ распада долгоживущего нейтрального K -мезона на два заряженных пиона, нарушающего CP -инвариантность, немедленно последовало предложение Н. Рамзея возобновить поиски электрического дипольного момента нейтрона. Было начато планирование настоящего эксперимента, и в начале 1965 г. два студента Рамзея — У. Дресс и Д. Бейчд прибыли из Гарварда в Ок-Ридж для участия в проведении этого эксперимента.

В 1950 г. Перселл и Рамзей² заметили, что аргументы, которые используются при доказательстве того, что частицы не могут иметь электрический дипольный момент, основываются на гипотезе сохранения четности, которая должна обосновываться экспериментально, а не теоретически.

Для наблюдения электрического дипольного момента нейтрона Смит, Перселл и Рамзей^{3, 4} использовали магнитнорезонансную систему на нейтронном пучке. Они нашли, что электрический дипольный момент нейтрона, разделенный на заряд протона (μ_e/e), экспериментально меньше, чем $5 \cdot 10^{-20}$ см. Позже, из работ Ли и Янга⁵ и Ву и др.⁶ стало ясно, что четность нарушается. Однако Л. Ландау заметил, что существует дополнительный запрет на существование электрического дипольного момента, основанный на инвариантности относительно обращения времени⁷, хотя Рамзей⁸ подчеркивал, что эта инвариантность является не более чем предположением и должна проверяться на опыте.

Электрический дипольный момент нейтрона должен проявляться как взаимодействие с электрическим полем вида

$$\mathcal{H} = -\mu_e \mathbf{E} = -\gamma_e \boldsymbol{\sigma} \mathbf{E}. \quad (1)$$

Это взаимодействие четно относительно зарядового сопряжения (так как обе величины $\gamma_e \boldsymbol{\sigma}$ и \mathbf{E} отдельно нечетны). Кроме того, это взаимодействие нечетно относительно пространственного отражения, так как электрическое поле характеризуется полярным вектором, и нечетно относительно временного отражения, что связано с $\boldsymbol{\sigma}$. Таким образом, это взаимодействие разрешено требованием CPT -инвариантности.

В эксперименте был использован нейтронный пучок, проходящий через магнитнорезонансный спектрометр с приложенным переменным полем⁹. Сильное электростатическое поле было наложено параллельно статическому магнитному полю в области между радиочастотными катушками. Результирующие уровни энергии приведены на рис. 1 для двух случаев, когда электрическое поле параллельно и антипараллельно магнитному полю. Смещение резонансной частоты, связанное с электрическим дипольным моментом, проявляет себя через изменение поляризации пучка. Поляризация пучка после прохождения аппаратуры определялась детектором, регистрировавшим только нейтроны, сохранившие направление спина. Как показано на рис. 1, электрический дипольный момент, разделенный на заряд протона, равен

$$\frac{\mu_e}{e} = \frac{h}{2e} \frac{\Delta N}{(E_{\uparrow\uparrow} + E_{\uparrow\downarrow}) dN/dv_{\text{осц}}}, \quad (2)$$

*) Перевод с рукописи выполнен Л. А. Пономаревым.

где ΔN — изменение скорости счета, вызванное изменением электрического поля с $E_{\uparrow\uparrow}$ на $E_{\uparrow\downarrow}$, а $E_{\uparrow\uparrow}$ и $E_{\uparrow\downarrow}$ — величины электрического поля, параллельного и антипараллельного постоянному магнитному полю, $dN/d\nu_{\text{осл}}$ — производная от количества отсчетов по частоте переменного поля. Таким образом, чувствительность может быть повышена за счет увеличения интенсивности, за счет большего электрического поля и большей крутизны резонанса. Требование большей крутизны резонанса эквивалентно требованию, чтобы резонансная линия была достаточно узкой.

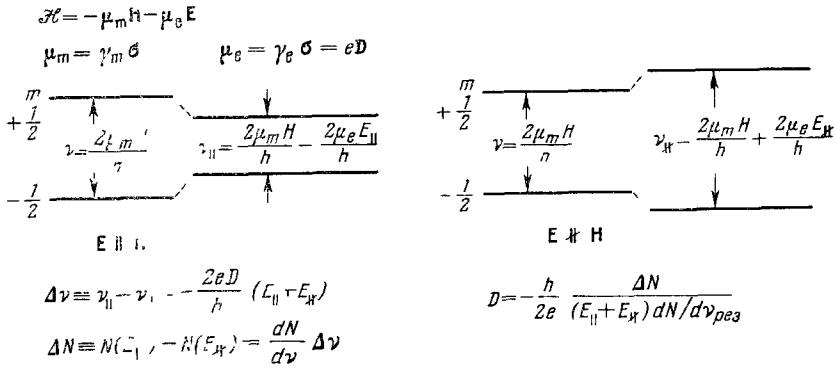


Рис. 1. Уровни энергии нейтрона с магнитным моментом μ_m и электрическим дипольным моментом μ_e в электрическом и магнитном полях.

Ширина резонансной линии в свою очередь определяется принципом неопределенности. Узкая линия связана с большим временем прохождения нейтрона через спектрометр.

Интенсивный пучок медленных нейтронов был получен захватом нейтронов с большим угловым разбросом. Отбор по скоростям производился с помощью изогнутой трубки, через которую проходил пучок нейтронов. Эффективность ее зависела от коэффициента отражения нейтронов от ее внутренней поверхности. Такие нейтронопроводящие трубки были впервые применены Майер-Лейбницем¹⁰, но в настоящем эксперименте они были использованы для более медленных нейтронов, чем в предыдущих случаях^{11, 12}.

Источник нейтронов и магнитный резонансный спектрометр изображены на рис. 2. Малоинтенсивный исследовательский реактор Национальной лаборатории в Ок-Ридже производит поток тепловых нейтронов на входе трубки, равный $1,4 \cdot 10^{13}$ нейтрон \cdot см⁻²сек⁻¹. Небольшой D₂O-замедлитель на конце нейтронного канала обеспечивает дополнительную термализацию потока, падающего на вход изогнутой трубки. Часть нейтронной трубки, лежащая внутри реактора, состоит из шлифованных никелевых пластин и имеет радиус кривизны 46 м для того, чтобы уменьшить поток быстрых нейтронов и γ -лучей. Во всей области, в которой проходили нейтроны, было понижено давление до 10^{-4} тор для увеличения их потока и достижения максимального электрического поля. Часть нейтронной трубки с радиусом кривизны 1 м уменьшала среднюю скорость нейтронов. Нейтроны поляризовались и анализировались посредством полного отражения от намагниченного зеркала, состоящего на 94% из Со и на 6% из Fe. Измеренная поляризация была порядка 70%. Магнитный резонансный спектрометр использовал постоянное магнитное поле 9 гс и имел электрическое поле переменного знака в 120 кв/см, приложенное на расстоянии 61 см между катушками с переменным полем. Нейтронным детектором служил стеклянный сцинтиллятор, содержащий Li⁶ и имеющий

размеры $1 \text{ см} \times 10 \text{ см}$. Детектор находился внутри вакуумной системы. Средняя скорость нейтронов определялась по ширине резонанса и менялась в пределах от 60 до 150 м/сек. Краткий список параметров установки приведен на рис. 3.

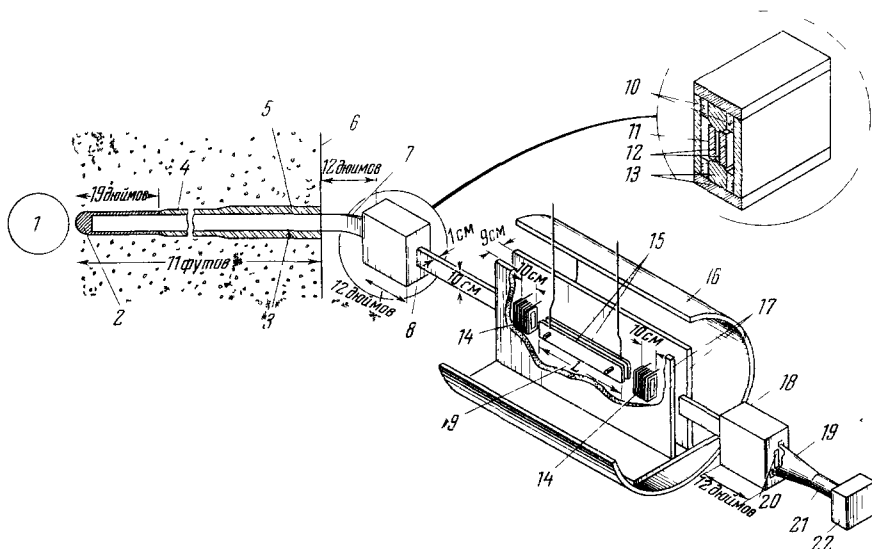


Рис. 2. Схематическое изображение источника поляризованных нейтронов и магнитнорезонансного спектрометра.

1 — Центр реактора; 2 — регулятор из D_2O ; 3 — защита пучка; 4 — трубка, проводящая нейтроны, с радиусом кривизны 46 м; 5 — защита из Al и H_2O и охлаждение; 6 — защита реактора; 7 — фильтр для отделения медленных нейтронов; радиус кривизны трубки 1 м; 8 — намагниченное зеркало из сплава Co — Fe, поляризующее нейтроны; 9 — первый вариант спектрометра с $L = 0,61$ м, окончательный вариант с $L = 1,83$ м; 10 — катушка; 11 — медь; 12 — Co — Fe-сплав; 13 — железо; 14 — радиочастотная катушка; 15 — пластины, между которыми приложено электростатическое поле; 16 — магнитная защита, 17 — части полюсов магнита, производящего постоянное магнитное поле; 18 — намагниченные зеркала из сплава Co — Fe, анализирующие спин; 19 — светопровод; 20 — стеклянный сцинтиллятор с добавками Li^6 ; 21 — фотоумножитель; 22 — основание.

Были произведены многочисленные контрольные опыты, чтобы исключить возможность систематических ошибок. Через каждые 5 мин электрическое поле меняло свой знак. Количество нейтронов сравнивалось

Расстояние между радиочастотными катушками	0,75 м
Скорость нейтронов	90 м/сек
Поляризация	70%
Интенсивность на детекторе	8000 нейтрон/сек
Чувствительность	43 отсчета на цикл
Электрическое поле	120 кв/см
Магнитное поле	10 гс
Поток из реактора	$1,4 \cdot 10^{13}$ нейтрон/см ² сек

Рис. 3. Наиболее существенные параметры, характеризующие эксперимент по поиску электрического дипольного момента нейтрона в Оксфордской Национальной лаборатории.

с показанием мониторингового счетчика, чтобы исключить эффект флуктуаций мощности реактора. Положение резонанса во времени сдвигалось меньше чем на 5 гц за 10 часов измерений. Электрический дипольный момент измерялся на противоположных склонах резонансной кривой, чтобы исклю-

читать еще один тип систематических ошибок, и результат, докладываемый ниже, усреднен по таким измерениям. Вторым источником систематических ошибок могло бы быть магнитное поле, действующее на магнитный момент, движущийся в электрическом поле. Величина его равна $[(v/c) E]$. Им можно было бы пренебречь, если бы постоянные электрические и магнитные поля были параллельны. В противном случае оно пропорционально скорости и синусу угла между полями. Со времени опубликования предварительного сообщения¹³ произошел ряд изменений: аппаратура была закреплена более жестко, и измерения были проведены в таких положениях аппаратуры, в которых эффект $[(v/c) E]$ менял знак. Было произведено примерно 17 000 изменений знака электрического поля и зарегистрировано $7 \cdot 10^9$ нейтронов.

В результате анализа экспериментальных данных для дипольного момента нейтрона было получено значение $D = (0,02 \pm 0,85) \cdot 10^{-22}$ см; при этом средний угол между электрическим и магнитным полями был примерно $4 \pm 0,5^\circ$. Точный результат и его ошибка зависят, однако, от того, как группируются 17 000 результатов, и от того, какие предположения были сделаны для того, чтобы эффект систематических ошибок, указанных выше, можно было бы считать постоянным.

Различные методы анализа результатов эксперимента давали результаты, не отличающиеся существенно от приведенного выше, и мы считаем, что верхняя граница для электрического дипольного момента нейтрона такова:

$$|\mu_e/e| < 3 \cdot 10^{-22} \text{ см.} \tag{3}$$

Подобные эксперименты по определению электрического дипольного момента нейтрона были произведены также в Олдермастене и Сассекском университете Д. Пендлебери и К. Смитом¹⁴ и в Брукхэйвене В. Коэном и др.¹⁵ Чувствительность обоих экспериментов должна быть близка к приведенной выше. Другой тип эксперимента по измерению электрического дипольного момента нейтрона был произведен в Брукхэйвене¹⁶. В этом эксперименте использован тот факт, что нейтрон, обладающий электрическим дипольным моментом, испытывает дополнительное взаимодействие с атомным кулоновским полем при прохождении через атом. Можно показать, что соответствующая амплитуда имеет вид

$$b = i \frac{Ze(1-f)}{h} \mu_e \frac{\operatorname{cosec} \theta}{v} \mathbf{p} \mathbf{e}, \tag{4}$$

где Ze — заряд ядра, $(1-f)$ — электронный экранирующий фактор, f — формфактор, характеризующий распределение заряда в атоме, μ_e — электрический дипольный момент нейтрона, v — скорость нейтрона, 2θ — угол рассеяния, \mathbf{p} — единичный вектор поляризации нейтрона, \mathbf{e} — единичный вектор, характеризующий рассеяние, которое определяется следующим образом:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2k \sin \theta} (\mathbf{k} - \mathbf{k}_0), \tag{5}$$

где \mathbf{k}_0 и \mathbf{k} — волновые векторы до и после столкновения.

Эта амплитуда мнимая, т. е. она отличается по фазе на 90° от реальной ядерной амплитуды рассеяния; она максимальна, когда вектор \mathbf{p} параллелен \mathbf{e} , и меняет свой знак с изменением знака поляризации нейтрона. Шалл и Натан искали эту мнимую часть амплитуды в брэгговском рассеянии на кристаллах CdS, где при изменении поляризации должно было бы происходить изменение интенсивности из-за когерентной интерференции с другими мнимыми членами в амплитуде. В эксперименте был использован CdS-отражатель. Схематически расположение аппаратуры

изображено на рис. 4. Было наблюдеено примерно $4 \cdot 10^8$ нейтронов. Принимались специальные меры для компенсации изменений интенсивности

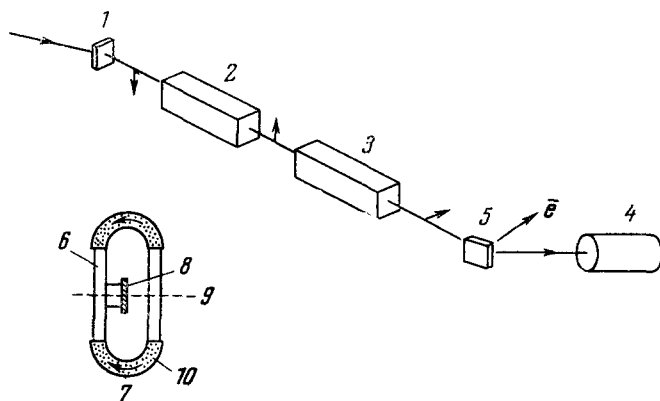


Рис. 4. Схематическое изображение спектрометра для поляризованных нейтронов, использованного для наблюдения электрического дипольного момента нейтрона в эксперименте с рассеянием нейтронов.

Отдельный рисунок изображает магнитную систему, окружающую кристалл, и его оси вращения. Поворот кристалла использовался для устранения эффектов, связанных с продольной поляризацией нейтронов. 1 — Поляризованный кристалл; 2 — резонансный инвертор поляризации; 3 — система, поворачивающая поляризацию на 90° ; 4 — детектор; 5 — кристалл; 6 — часть полюса; 7 — магнитная система, окружающая кристалл; 8 — отражающая поверхность кристалла; 9 — ось вращения; 10 — постоянный магнит.

при изменении поляризации, обусловленной швингеровским рассеянием. Окончательный результат брукхэйвенского эксперимента

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

В течение последних двух лет в литературе появился ряд теоретических оценок электрического дипольного момента нейтрона. Сводка

G. Feinberg, Phys. Rev. B140 , 1402 (1965).	1000
G. Salzman, F. Salzman, Phys. Lett. 15 , 91 (1965); Е. П. Шабалин. Препринт ИТЭФ № 367, Москва (1965).	100
N. T. Meister, T. K. Radha, Phys. Rev. B135 , 769 (1964).	20
G. Feinberg, H. S. Mani, Phys. Rev. 137 , 637 (1965);	10
H. Nieh, S. J. Chang, Ph. D. Thesis (Harvard University); S. L. Glashow, Phys. Rev. Lett. 14 , 35 (1965); K. Nishijima, L. Swank, частное сообщение.	9
P. Babu, M. Suzuki, Phys. Rev. 162 , 1359 (1967).	> 2,2
N. Gabibbo, Phys. Lett. 12 , 137 (1964).	1,5—3,5
J. Schwinger, Phys. Rev. B136 B821 (1964).	0,36—1,4
M. Peshkin, L. Bollinger, частное сообщение.	10^{-3}
D. G. Boulware, Nuovo Cimento A40 (4), 1041 (1965).	10^{-5}

Рис. 5. Теоретические оценки электрического дипольного момента нейтрона (в ед. 10^{-22} е.см).

этих оценок приведена на рис. 5. Наибольшая величина, приведенная Фейнбергом и Залцманами, основывается на предположении о нарушении T -инвариантности в электромагнитных взаимодействиях. Существующий

верхний предел на дипольный момент в $3 \cdot 10^{-22}$ см, по существу, исключает эту возможность. Оценки, которые лежат вблизи 10^{-22} см, основываются на предположении о нарушении временной инвариантности в слабых взаимодействиях. Было бы очень желательно, как это видно из рассмотрения рис. 5, увеличить чувствительность измерений электрического дипольного момента нейтрона примерно на порядок.

Мы сконструировали в Ок-Ридже новый резонансный спектрометр, который имеет в три раза большее расстояние между радиочастотными катушками. Магнитная защита улучшена, чтобы обеспечить большую стабильность. Для увеличения поляризации были сконструированы новые магниты. Было также достигнуто увеличение электрического поля. Эти улучшения позволят нам достичь чувствительности примерно в $0.5 \cdot 10^{-22}$ см. Шалл¹⁷ отмечал, что чувствительность его установки с новыми кристаллами может быть улучшена в четыре раза, т. е. она станет примерно равной 10^{-22} см.

Возможный эксперимент по измерению дипольного момента протона был предложен Сандерсом¹⁸. Он предлагает определять электрический дипольный момент непарного протона в ядре Tl в эксперименте с использованием магнитного резонанса в молекулярном пучке. По его оценкам может быть достигнута чувствительность 10^{-22} см.

Если задать вопрос, каковы максимальные возможности магнитно-резонансных измерений на нейтронах, то кажется возможным достичь следующего уровня:

1. Большой поток нейтронов из реактора $\sim 10^{15}$ нейтрон/см²сек.
2. Криогенный регулятор с нейтронно-проводящей трубкой.
3. Спектрометр с расстоянием между радиочастотными катушками примерно в 10 м.
4. Электрическое поле порядка 200—300 кв/см.

Такой эксперимент был бы очень трудным, дорогим и длительным, но его чувствительность могла бы быть $\sim 10^{-25}$ — 10^{-24} см.

Ок-Риджская Национальная лаборатория,
Ок-Ридж, Теннесси, США

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, Phys. Rev. Lett. **13**, 138 (1964).
2. E. M. Purcell, N. F. Ramsey, Phys. Rev. **78**, 807 (1950).
3. J. H. Smith, Thesis (Harvard University, 1950).
4. J. H. Smith, E. M. Purcell, N. F. Ramsey, Phys. Rev. **108**, 120 (1957).
5. T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev. **105**, 1671 (1957).
6. C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoopes, R. P. Hudson, Phys. Rev. **105**, 1413 (1957).
7. Л. Ландау, ЖЭТФ **32**, 405 (1957).
8. N. F. Ramsey, Phys. Rev. **109**, 225 (1958).
9. N. F. Ramsey, Molecular Beams, Oxford University Press, Oxford, England, 1956.
10. H. Maier-Leibnitz, T. Springer, J. Nucl., Energy **17**, 217 (1963).
11. P. D. Miller, Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL-TM-1149.
12. W. B. Dress, Oak Ridge National Laboratory Report No. ORNL-TM-1754.
13. P. D. Miller, W. B. Dress, J. K. Baird, N. F. Ramsey, Phys. Rev. Lett. **19**, 381 (1967).
14. K. F. Smith, J. M. Pendlebury, частное сообщение (1968).
15. V. W. Cohen, E. Lipworth, R. Nathans, N. R. Ramsey, H. B. Silsbee, частное сообщение (1967).
16. C. G. Shull, R. Nathans, Phys. Rev. Lett. **19**, 384 (1967).
17. C. G. Shull, частное сообщение (1968).
18. P. G. H. Sanders, Phys. Rev. Lett. **19**, 1396 (1967).

ДИСКУССИЯ

В. М. Лобашов:

Какая часть ошибки связана с флуктуациями магнитного поля? На сколько надо уменьшить флуктуацию магнитного поля, чтобы получить точность $\sim 10^{-24}$ — 10^{-25} см?

П. Миллер:

Только небольшая часть наших ошибок связана с флуктуациями. Значительно большая ошибка появляется вследствие систематических ошибок, обсуждавшихся выше. Фактор магнитной защиты для нашей аппаратуры был только 43. Для нашей новой аппаратуры он будет 1000. Еще с одним дополнительным слоем защиты он может быть увеличен до 10 000. Кроме того, интервал времени между изменением знака поля был около двух минут, а он может быть уменьшен до 10 сек.

В. М. Лобашов:

Среди результатов Ваших экспериментов есть один результат, который отличается от других на 3—4 стандартные ошибки. Какая могла бы быть причина для этого?

П. Миллер:

Я не знаю.

П. А. Крупчицкий:

Напишите, пожалуйста, две величины: значения дипольного момента нейтрона для двух ветвей резонансной кривой, соответствующих фазам $+90^\circ$ и -90° .

П. Миллер:

Эти величины могут быть получены из таблиц в нашей статье в «Phys. Rev.», которая будет опубликована. Я не помню сейчас точных значений.

К. Руббин:

а) Какие будут изменения в счете нейтронов, если дипольный момент будет 10^{-22} см? б) Как велики геометрические сдвиги, необходимые для объяснения наблюдаемых расхождений.

П. Миллер:

а) Дипольный момент порядка 10^{-22} см соответствует изменению скорости счета на 5 при скорости 10^5 . б) Если наша гипотеза о небольших геометрических изменениях правильна, то требуемый сдвиг будет порядка 10^{-4} см. Но это только предположение.

Ф. Л. Шапиро:

Какие механические сдвиги могут появиться в результате изменения знака электрического поля и как они влияют на измеренный результат?

П. Миллер:

Наша аппаратура связана с переключателем электрического поля через тяжелый жесткий кабель. Выключатель имеет воздушный компенсатор, и некоторые вибрации могли передаваться на спектрометр. Я должен подчеркнуть, что этот механизм является только предположением.