

ПОИСК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА

И.С.Алтарев, Ю.В.Борисов, Н.В.Боровикова, А.Б.Брандин,
 А.И.Егоров, С.Н.Иванов, Э.А.Коломенский, М.С.Ласаков,
 В.М.Лобашев¹⁾, А.Н.Пирожков, А.П.Серебров, Ю.В.Соболев,
 Р.Р.Тальдаев, Е.В.Шульгина

Методом длительного удержания ультрахолодных нейтронов (УХН) проведено измерение CP -нарушающего эффекта электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона. Измеренное значение $d_n = - (1,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}$ интерпретируется как новый верхний предел $|d_n| < 2,6 \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}$ на 95%-ном уровне достоверности.

В данной работе представлены результаты новых экспериментов по поиску ЭДМ нейтрона, выполненных в ЛИЯФ им. Б.П.Константинова АН СССР на реакторе ВВР-М с использованием УХН.

Особенностью предыдущих экспериментов^{1, 2} являлось использование магниторезонансного спектрометра так называемого проточного типа со средним временем удержания УХН порядка 5 с и двумя камерами для удержания нейтронов с противоположными направлениями электрического поля (дифференциальный метод измерения ЭДМ).

Результаты измерений дали величину ЭДМ нейтрона $d_n = - (2 \pm 1) \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}$, что интерпретировалось как ограничение на величину дипольного момента $|d_n| < 4 \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}$ при 95 %-ном уровне достоверности.

Дальнейшее увеличение чувствительности в проточном варианте спектрометра представлялось затруднительным, поэтому был разработан вариант спектрометра с длительным удержанием УХН в закрытой камере. В последнее время в экспериментах группы Института Лауэ – Ланжевена (Гренобль) в накопительном варианте с одной камерой реализовано время удержания порядка 80 с и получен результат $d_n = (0,3 \pm 4,8) \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}$ ³.

В нашей работе снова был применен дифференциальный метод, использующий две камеры для удержания нейтронов с противоположным направлением электрических полей, как показано на рис. 1, и с общими постоянным магнитным и радиочастотным полями, что позволило компенсировать флуктуации магнитного поля и контролировать возможные систематические ошибки. Конструкция камер была такова, что высоковольтный электрод, разделяющий камеры, находился между двумя заземленными электродами (крышками), образующими как бы заземленный экран вокруг высоковольтного электрода. Средняя напряженность электрического поля составляла $\pm (12 - 15) \text{ кВ/см}$ при токах утечки меньше 30 нА. Стенки камер представляли собой кварцевые кольца с напыленным на них слоем BeO и Be_3N_2 . Система шторок на входных и выходных нейтронных трубах обеспечивала открывание и закрытие со временем $\sim 0,3 \text{ с}$. Как и в прежних измерениях^{1, 2}, применялась система одновременной регистрации УХН, поляризованных в противоположных направлениях.

Поскольку трехслойный пермаллоевый экран, примененный нами, не обеспечивал стабильность магнитного поля, необходимую при времени удержания 50 – 100 с, стабилизация положения резонанса была обеспечена с помощью квантовых самогенерирующих цезиевых магнитометров, размещенных сверху и снизу камер удержания УХН. Поскольку отношение резонансной частоты цезиевых магнитометров к частоте нейтронного резонанса составляет 119,9, что близко к 120, была разработана система стабилизации с делением частоты одного либо усредненной частоты двух магнитометров на 120 и подачей сигнала с делителя на радиочастотную катушку, охватывающую камеры хранения УХН⁴. Применение такой системы позволило обеспечить поддержание резонансных условий со стабильностью, соответствующей стабильности магнитного поля лучше $2 \cdot 10^{-12} \text{ Т}$ за 5 – 10 мин. Эффективный фактор стабилизации в одноканальном варианте составил ~ 7 и в двухканальном ~ 15 .

¹⁾ Институт ядерных исследований АН СССР.

Дальнейшее подавление флуктуаций резонансных условий осуществлялось за счет дифференциального метода измерений, так что отличие среднеквадратичного разброса от статистического составляло не более 5 – 10 %.

В качестве источника УХН в первых измерениях использовался жидководородный конвертор в бериллиевом отражателе ⁵. В основных измерениях использовался новый универсальный источник холодных и ультрахолодных нейтронов ⁶.

Увеличение интенсивности УХН от нового источника в 3 – 4 раза и создание накопительной системы спектрометра с временем удержания УХН ~ 50 с позволили достичь максимальной чувствительности измерения ЭДМ $\sim (2,5 - 2,7) \cdot 10^{-25}$ е · см в сутки.

Цикл измерений включал: заполнение камер УХН – 30 с, удержание – 50 – 55 с, выпуск и счет УХН – 30 с. Радиочастотные сигналы длительностью 1,2 с подавались в начале и в конце времени удержания. Переключение полярности электрического поля производилось в интервале 40 с между циклами измерений. Прочие условия измерений были аналогичны работе ¹.

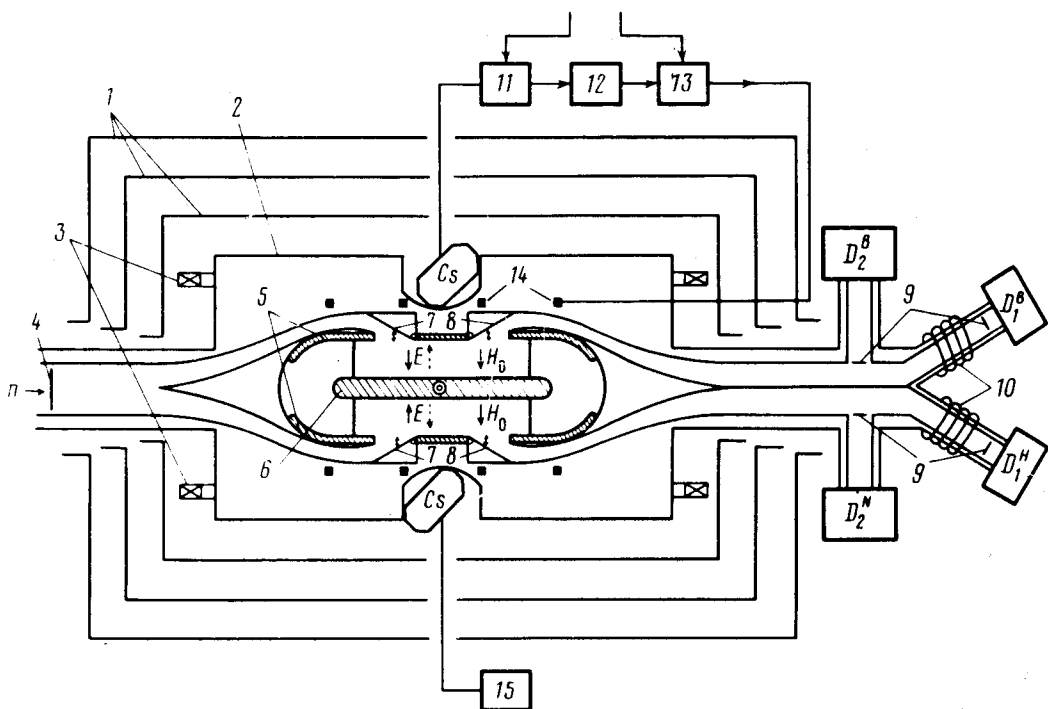


Схема магниторезонансного спектрометра УХН для измерения ЭДМ нейтрона. 1 – магнитные экраны, 2 – вакуумная камера, 3 – кольца Гельмгольца для создания постоянного магнитного поля H_0 , 4 – поляризатор УХН, 5 – заземленные электроды, 6 – высоковольтный электрод, 7 – входные щотки, 8 – выходные щотки, 9 – анализаторы, 10 – радиочастотный флиппер, 11 – Cs-магнитометр, управляемый от ЭВМ, 12 – делитель частоты, 13 – блок для создания радиоимпульсов, управляемый от ЭВМ, 14 – катушки для создания социллирующего поля, 15 – Cs-магнитометр, D – детекторы УХН (индексы В и Н соответствуют верхней и нижней камерам, а 1 и 2 – противоположным поляризациям УХН).

Для каждого детектора вычислялась величина ЭДМ $d_{1,2}^{B,H}$. Индексы в, н и 1, 2 соответствуют обозначениям на рис. 1.

Результаты измерений для четырех детекторов объединялись в следующие комбинации аналогично (1):

$$d_n = \frac{1}{4} [(d_1^B + d_2^B) + (d_1^H + d_2^H)],$$

$$R = \frac{1}{4} [(d_1^B + d_2^B) - (d_1^H + d_2^H)],$$

$$P = \frac{1}{4} [(d_1^B - d_2^B) - (d_1^H - d_2^H)],$$

$$C = \frac{1}{4} [(d_1^B - d_2^B) + (d_1^H - d_2^H)].$$

При этом d_n определяет искомый эффект — ЭДМ нейтрона, R определяет синхронное смещение нейтронного резонанса в обеих камерах, P может служить критерием влияния переключения высоковольтного напряжения на счетные тракты, C — критерий компенсации этих систематических и случайных факторов.

Результаты измерений ЭДМ нейтрона (в единицах 10^{-25} е · см)

Условия проведения измерений	ЭДМ	Эффект магнитного поля	Эффект набросов	Эффект компенсации
	$d_n \left(\frac{\text{ско}}{\text{стат}} \right)$	R (ско)	P (ско)	C (ско)
Проточный спектрометр	$2,1 \left(\frac{2,4}{2,4} \right)$	16,6 (4,8)	5,3 (3,5)	4,8 (2,4)
	$-1,0 \left(\frac{2,8}{2,7} \right)$	1,5 (5,8)	- 5,0 (4,1)	- 2,6 (2,7)
	$-3,4 \left(\frac{1,3}{1,3} \right)$	1,1 (2,8)	0,4 (2,2)	- 3,6 (1,3)
Среднее	- 2,0 (1,0)	4,5 (2,2)	0,6 (1,7)	- 1,8 (1,0)
Накопительный спектрометр				
Источник УХН в бериллиевом отражателе, одноканальная стабилизация резонанса	$0,97 \left(\frac{2,60}{2,55} \right)$	- 3,7 (4,5)	1,3 (2,9)	0,8 (2,6)
Универсальный источник ХН и УХН				
$H_0 \downarrow$ двухканальная стабилизация	$10,4 \left(\frac{4,9}{4,2} \right)$	- 12,5 (8,2)	5,0 (5,7)	2,9 (4,8)
$H_0 \downarrow$ двухканальная стабилизация	$-1,9 \left(\frac{1,1}{1,1} \right)$	8,9 (1,7)	- 0,7 (1,6)	0,9 (1,1)
$H_0 \downarrow$ одноканальная стабилизация	$-0,6 \frac{2,3}{2,3}$	9,4 (4,4)	- 0,8 (3,1)	- 1,2 (2,1)
$H_0 \uparrow$ одноканальная стабилизация	$-3,9 \left(\frac{2,2}{2,1} \right)$	5,2 (4,4)	- 0,5 (2,5)	1,0 (2,1)
$H_0 \uparrow$ двухканальная стабилизация	$-0,5 \left(\frac{1,4}{1,3} \right)$	- 1,9 (2,3)	5,4 (1,7)	0,3 (1,3)
Среднее	- 1,1 (0,7)	4,0 (1,2)	1,7 (1,0)	0,4 (0,7)
Общее среднее	- 1,4 (0,6)	4,1 (1,0)	1,4 (0,9)	0,3 (0,6)

В таблице сведены вместе результаты измерений ЭДМ, включая результаты работ ^{1, 2} с проточной системой. Как видно из таблицы, результаты для ЭДМ, полученные проточным методом и методом удержания, хорошо согласуются между собой. В некоторых сериях величина R весьма значительна, однако, точность компенсации синхронных эффектов для двух камер, оцененная на основе анализа отдельных измерений с большой величиной R , дает фактор $\sim 0,05$, т. е. возможный вклад в среднем меньше $0,3 \cdot 10^{-25}$ е · см.

Другие возможные систематические эффекты, согласно проведенным оценкам, несущественны. Так, например, вклад эффекта непараллельности электрического и магнитного полей и влияние токов утечки (при $I < 30$ нА) не превышает 10^{-26} е · см.

Таким образом, суммарный результат измерений:

$$d_n = - (1,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}.$$

Хотя полученная величина ЭДМ несколько отличается от нуля, достоверность существования ненулевого ЭДМ, определяемую величиной ошибки, нельзя считать достаточной, в особенности учитывая фундаментальную важность этого явления. Поэтому наиболее естественной интерпретацией полученного результата является новый верхний предел

$$|d_n| < 2,6 \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см} \text{ (95 \% -ный уровень достоверности)}.$$

Этот результат с определенностью противоречит оценкам ЭДМ, выполненным в рамках модели Вайнберга, например, $d_n = - 9 \cdot 10^{-25}$ е · см ⁷ или $d_n \sim 10^{-22}$ е · см ⁸. Для ряда других моделей можно сделать ограничения на величину используемых параметров.

В заключение авторы выражают благодарность В.Л.Рябову за помощь в обработке измерений, В.Л.Варенцову за помощь в измерениях, В.Г.Муратову, Л.А.Григорьевой и В.Н.Слюсарю за помощь в наладке аппаратуры. Особую благодарность авторы выражают коллективу сотрудников реактора ВВР-М, в том числе К.А.Коноплеву, Р.Г.Пикулику и всем сотрудникам криогенной службы за обеспечение условий для проведения эксперимента.

Литература

1. Altarev I.S. et al. Phys. Lett., 1981, 102B, 269.
2. Lobashev V.M., Serebrov A.P. J. Physique Colloq., 1984, 45, C3-11.
3. Pendlebury M.J. et al. Phys. Lett., 1984, 136B, 327.
4. Алтарев И.С., Борисов Ю.В., Брандин А.Б., Иванов С.Н., Лобашев В.М., Серебров А.П., Тальдаев Р.Р. Препринт ЛИЯФ- 1117, Л., 1985.
5. Altarev I.S. et al. Phys. Lett., 1980, 80 A, 413.
6. Алтарев И.С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 269.
7. Житницкий А.Р., Хриплович И.Б. ЯФ, 1981, 34, 167.
8. Anselm A.A. et al. Phys. Lett., 1985, 152B, 116.