

УЧЕТ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ПОИСКУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА

А. Я. Силенко

НИУ «Институт ядерных проблем БГУ», Минск, Белоруссия

Проведен анализ проблемы учета вращения Земли при поиске электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона в экспериментах с ультрахолодными нейтронами и в дифракционном эксперименте. Для достигнутой к настоящему времени точности в дифракционном эксперименте учет вращения Земли дает пренебрежимо малую (и точно рассчитываемую) поправку. В экспериментах с ультрахолодными нейтронами эта поправка превышает систематическую погрешность измерения ЭДМ нейтрона, причем ее точный расчет требует дополнительных исследований. В связи с этим дальнейшее развитие дифракционного метода должно в значительной степени способствовать прогрессу в поиске ЭДМ нейтрона.

Analysis of the problem of taking into account the Earth's rotation in a search for the electric dipole moment (EDM) of neutron in experiments with ultracold neutrons and in a diffractive experiment is fulfilled. Taking into account the Earth's rotation in the diffractive experiment gives an exactly calculated correction which is negligible as compared with the accuracy reached at present time. In the experiments with ultracold neutrons, the correction is greater than the systematic error and the exact calculation of it needs further investigations. In this connection, further developments of diffractive method would considerably promote progress in the search for the electric dipole moment of neutron.

PACS: 14.20.Dh, 91.10.Nj

Постоянное увеличение точности в экспериментах по поиску электрического дипольного момента нейтрона делает необходимым учет вращения Земли. При достигнутой экспериментальной точности поправка к частоте прецессии спина нейтрона во внешнем поле уже не является пренебрежимо малой.

Традиционный метод поиска ЭДМ нейтрона заключается в измерении частоты лармовской прецессии спина ультрахолодных нейтронов в слабом магнитном ($B \sim 1$ мкТл) и достаточно сильном электрическом ($E \sim 1$ МВ/м) полях (см. [1]). Зависящая от спина часть гамильтониана медленно движущейся частицы в электрическом и магнитном полях равна

$$\mathcal{H} = -\frac{\mu}{s} \mathbf{s} \cdot \mathbf{B} - \frac{d}{s} \mathbf{s} \cdot \mathbf{E}, \quad (1)$$

где μ — магнитный момент; d — ЭДМ; s — оператор спина частицы, а спиновое число s в данном случае равно $1/2$.

В экспериментах, основанных на измерении частоты прецессии спина нейтрона для двух противоположных направлений магнитного поля, важной является проблема определения величины магнитной индукции. В [1, 2] эта проблема решалась путем измерения отношения частот прецессии спина нейтронов и атомов ^{199}Hg .

Как известно, во вращающейся системе отсчета, связанной с Землей, появляется зависящая от спина поправка к гамильтониану $\mathcal{H}_{\text{rot}} = -\hbar\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{s}$, а спин вращается с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$, равной по абсолютной величине угловой скорости вращения Земли $\boldsymbol{\omega}$ [3–5]. Существование этого эффекта было подтверждено экспериментально [6]. В результате угловые частоты вращения спина в магнитном поле, направленном вертикально вверх и вертикально вниз, различаются на величину

$$2\omega_z = 4\pi f \sin \Phi, \quad f = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ Гц},$$

где f — частота вращения Земли; Φ — географическая широта, а отрицательные значения Φ соответствуют южному полушарию. Эта величина достаточно велика. Такую же разность частот создает ЭДМ

$$d_{\text{eff}} = \frac{hf \sin \Phi}{E}.$$

На широте Гренобля (Франция), в котором производился эксперимент [1] ($\Phi \approx 45^\circ$), и в постоянном электрическом поле $E = 1$ МВ/м вклад вращения Земли соответствует ЭДМ нейтрона $1,6 \cdot 10^{-24} e \cdot \text{см}$ при экспериментальной точности $2,9 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$.

При наличии вращения спина в электромагнитном поле, характеризуемого угловой скоростью $\boldsymbol{\Omega}$, угловая скорость вращения спина в системе отсчета, связанной с Землей, равна

$$\boldsymbol{\Omega}' = \boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\omega}. \quad (2)$$

Разумеется, указанная поправка на вращение Земли устраняется путем периодической переориентации электрического поля. Однако центр тяжести облака ультрахолодных нейтронов в эксперименте [1] лежит на 0,28 см ниже, чем для атомов ртути. При наличии градиента магнитного поля этот фактор приводит к систематической ошибке и требует внесения поправки [7]. Как показано в [8], при вычислении поправки на градиент магнитного поля необходимо учитывать вращение Земли, вклад которого в итоговый результат оказывается равным $(2,57 \pm 0,34) \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ [8]. В итоге экспериментальное значение ЭДМ нейтрона оказывается отличным от нуля больше, чем на величину одного стандартного отклонения [8]. В работе [8] это объясняется чувствительностью эксперимента к корреляциям вида $\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{V}$.

Таким образом, в эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона, проводимом с ультрахолодными нейтронами стандартным методом [1, 2], влияние вращения Земли проявляется уже на уровне $10^{-26} e \cdot \text{см}$, причем имеющиеся экспериментальные (и теоретические) данные не позволяют определить это влияние с достаточной точностью. Отметим, что в экспериментах этого типа планировалось достичь точности на два порядка выше. В настоящее время достижение такой точности представляется существенно более сложной задачей, чем это казалось до появления работы [8]. Отметим, что в предыдущих экспериментах, проводимых при постоянной ориентации магнитного поля [9, 10], основная систематическая ошибка была обусловлена его флуктуациями, которые было невозможно адекватно компенсировать с помощью внешнего магнитометра. Схема эксперимента, реализованная

в [1, 2], позволяет радикально уменьшить эту ошибку путем введения «ко-магнитометра», в качестве которого используются поляризованные атомы ^{199}Hg .

Разумеется, возникновение трудностей с полным учетом эффектов, обусловленных вращением Земли, не умаляет важности проведения экспериментов типа [1, 2]. Однако это делает необходимым развитие и усовершенствование альтернативных методов поиска ЭДМ нейтрона.

Одним из наиболее перспективных является дифракционный метод, который основан на поиске вращения спина, обусловленного взаимодействием ЭДМ нейтрона с электрическим полем нецентросимметричного кристалла [11]. Величина этого поля на 4–5 порядков превышает поля, достижимые в лабораторных условиях, и достигает 10^{10} – 10^{11} В/м [12]. Постановка данного эксперимента позволяет также исследовать T -нечетные взаимодействия нейтрона с ядрами, приводящие к аналогичному эффекту вращения спина [13]. Знак и величина электрического поля, действующего в кристалле на нейтрон с энергией, близкой, но не равной энергии брэгговского отражения, могут быть изменены без переворота рабочего кристалла [14], что облегчает устранение систематических ошибок и снижает требования на остаточные магнитные поля в установке [15]. Кроме того, при проведении эксперимента при угле дифракции, равном 90° , электрическое поле кристалла параллельно скорости нейтрона и швингеровское взаимодействие, являющееся основным источником систематических ошибок, равно нулю. Существенно, что требования к совершенству используемых кристаллов не очень высоки [14].

Швингеровское взаимодействие обусловлено взаимодействием магнитного момента нейтрона с магнитным полем, возникающим в его системе покоя, и имеет вид

$$\mathcal{H} = -\frac{2\mu}{c} \mathbf{s} \cdot [\mathbf{E} \times \mathbf{v}]. \quad (3)$$

Существование швингеровского взаимодействия позволяет определить величину напряженности электрического поля (например, путем измерения деполяризации нейтронного пучка [16]). Интересной особенностью является то, что при дифракции по Лауэ существенно возрастает время пребывания нейтрона в кристалле, что при углах дифракции, близких к 90° , увеличивает время действия электрического поля. В проведенных в [17] измерениях скорость прохождения нейтрона через кристалл равнялась $\simeq 40$ м/с при скорости налетающего нейтрона 800 м/с.

Проведенный в [18] анализ показал, что для уже имеющихся сейчас в наличии нецентросимметричных кристаллов кварца и пучков холодных нейтронов можно достичь точности измерения ЭДМ нейтрона $\sim 10^{-26} e \cdot \text{см}$, что существенно лучше, чем современное ограничение на ЭДМ, полученное с использованием ультрахолодных нейтронов. Использование нового класса нецентросимметричных кристаллов может привести к дальнейшему улучшению точности еще как минимум на порядок [18]. Таким образом, дифракционный метод по точности может конкурировать с традиционным методом, базирующимся на измерении частоты ларморовской прецессии спина ультрахолодных нейтронов.

Естественно, большая величина напряженности электрического поля в дифракционном эксперименте [18] приводит к радикальному уменьшению роли вращения Земли по сравнению с экспериментами с ультрахолодными нейтронами. На широте Санкт-Петербурга, где производится дифракционный эксперимент ($\Phi \approx 60^\circ$), и для измеренного в [16] поля плоскости (110) кристалла кварца ($E = (2,24 \pm 0,05(0,20)) \cdot 10^{10}$ В/м)

поправка на вращение Земли соответствует ЭДМ $2 \cdot 10^{-28} e \cdot \text{см}$. При поиске ЭДМ на уровне $10^{-26} e \cdot \text{см}$ эта поправка является пренебрежимо малой. Однако при значительном увеличении точности, вплоть до $10^{-28} e \cdot \text{см}$, поправка на вращение Земли должна быть учтена. В соответствии с оценкой, сделанной в [18], достижение такой точности в принципе является возможным. Однако и в этом случае указанная поправка легко может быть учтена с помощью формулы (2).

Таким образом, сравнительный анализ, проведенный в настоящей работе с использованием полученных в [8] результатов, показывает, что для достигнутой точности измерения ЭДМ нейтрона ($\sim 10^{-26} e \cdot \text{см}$) в дифракционном эксперименте учет вращения Земли дает пренебрежимо малую (и точно рассчитываемую) поправку, в то время как в экспериментах с ультрахолодными нейтронами эта поправка превышает систематическую погрешность, причем ее точный расчет требует дополнительных исследований. Поиск ЭДМ нейтрона является важной частью исследования фундаментальных взаимодействий, и поэтому необходимо развивать экспериментальные исследования на базе всех существующих конкурентоспособных методов. В связи с этим дальнейшее развитие дифракционного метода измерения ЭДМ нейтрона должно в значительной степени способствовать прогрессу в этой области.

Автор выражает благодарность В. Г. Барышевскому, В. В. Воронину и С. Л. Черкасу за сделанные замечания и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФФИРБ (грант Ф06Р-074).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baker C. A. et al.* An Improved Experimental Limit on the Electric Dipole Moment of the Neutron // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97, No. 13. P. 131801.
2. *Harris P. G. et al.* New Experimental Limit on the Electric Dipole Moment of the Neutron // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 82, No. 5. P. 90–907.
3. *Mashhoon B.* Neutron Interferometry in a Rotating Frame of Reference // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 61, No. 23. P. 263–2642.
4. *Bini D., Cherubini C., Mashhoon B.* Spin, Acceleration and Gravity // *Class. Quant. Grav.* 2004. V. 21, No. 16. P. 3893–3908.
5. *Mashhoon B. et al.* Observable Frequency Shifts via Spin-Rotation Coupling // *Phys. Lett. A.* 1998. V. 249, No. 3. P. 161–166.
6. *Venema B. J. et al.* Search for a Coupling of the Earth's Gravitational Field to Nuclear Spins in Atomic Mercury // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68, No. 2. P. 13–138.
7. *Pendlebury J. M. et al.* Geometric-Phase-Induced False Electric Dipole Moment Signals for Particles in Traps // *Phys. Rev. A.* 2004. V. 70, No. 3. P. 032102.
8. *Lamoreaux S. K., Golub R.* Comment on «An Improved Experimental Limit on the Electric-Dipole Moment of the Neutron». hep-ex/0609055. 2 p.
9. *Smith K. F. et al.* A Search for the Electric Dipole Moment of the Neutron // *Phys. Lett. B.* 1990. V. 234, No. 1–2. P. 191–196.

10. *Altarev I. S. et al.* Search for the Neutron Electric Dipole Moment // *Phys. At. Nucl.* 1996. V. 59, No. 7. P. 1152–1170.
11. *Fedorov V. V., Voronin V. V., Lapin E. G.* On the Search for Neutron EDM Using Laue Diffraction by a Crystal without a Center of Symmetry // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 1992. V. 18, No. 7. P. 1133–1148.
12. *Алексеев В. Л. и др.* Измерение сильного электрического внутрикристаллического поля в швингеровском взаимодействии дифрагирующих нейтронов // *ЖЭТФ.* 1989. Т. 96. С. 1921–1926.
13. *Baryshevsky V. G.* *T*-Violating Neutron Spin Rotation and Spin Dichroism in Crystals // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 1997. V. 23, No. 5. P. 509–515.
14. *Fedorov V. V. et al.* Redoubled Effect of a Neutron Spin Rotation in Deformed Noncentrosymmetric Crystal for the Bragg Diffraction Scheme // *Письма в ЖЭТФ.* 2004. Т. 80, вып. 9. С. 675–679.
15. *Fedorov V. V. et al.* Neutron Spin Optics in Noncentrosymmetric Crystals as a New Way for nEDM Search // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2006. V. 252, No. 1. P. 131–135.
16. *Воронин В. В. и др.* Обнаружение эффекта деполяризации нейтронного пучка при дифракции по Лауэ в нецентросимметричном кристалле // *Письма в ЖЭТФ.* 2000. Т. 72, вып. 6. С. 445–450.
17. *Воронин В. В. и др.* Прямое измерение времени задержки нейтрона в кристалле при дифракции по Лауэ // *Там же.* Т. 71, вып. 2. С. 110–115.
18. *Voronin V. V., Fedorov V. V.* Neutron Diffraction and Optics of a Noncentrosymmetric Crystal. New Feasibility of a Search for Neutron EDM // *Frontiers in Condensed Matter Physics Research.* N. Y., 2006. P. 13–39; hep-ex/0504042. 34 p.

Получено 20 ноября 2006 г.