

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

ПОИСК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ДЕЙТРОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА

© 2021 г. А. Е. Аксентьев*

Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

*E-mail: a.aksentyev@inr.ru

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 01.07.2021 г.

Одной из альтернатив Стандартной Модели (СМ) элементарных частиц являются теории суперсимметрии; электрический дипольный момент (ЭДМ) элементарных частиц может служить отличным инструментом для подтверждения валидности одной из этих моделей. К примеру: в случае нейтрона, ЭДМ, совместный с СМ, находится в диапазоне 10^{-33} до 10^{-30} е см, в то время как теории суперсимметрии предсказывают наличие ЭДМ гораздо большей величины — на уровне 10^{-29} – 10^{-24} е см. Эксперименты по поиску ЭДМ проводятся больше 50-ти лет, однако большинство из них — на зарядово-нейтральных частицах (нейтрон, атомы). ЭДМ заряженных частиц (протон, дейтрон) можно измерить в накопительном кольце, используя феномен прецессии поляризации пучка в электромагнитном поле. Накопительное кольцо обладает рядом преимуществ при его использовании в качестве инструмента для измерения ЭДМ; однако существует также и ряд проблем. В данной работе рассматриваются основные подходы к решению этих проблем: BNL, Spin Wheel, Frequency Domain методы.

Ключевые слова: поляризованные пучки, накопительное кольцо, синхротрон, дейтрон, электрический дипольный момент, замороженный спин, BNL, spin wheel, frequency domain

DOI: 10.56304/S2079562920060019

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных проблем современной физики является барионная асимметрия Вселенной (БАВ), [1] т.е. превалирование количества материи над количеством антиматерии, которое наблюдается, например, в таких экспериментах как COBE и WMAP [2, 3]. Объяснить БАВ можно, предположив нарушение CP-симметрии; [4] однако, существует проблема: CP-асимметрия плохо согласуется со стандартной моделью (СМ) физики элементарных частиц. Нарушения CP-симметрии, вписывающиеся в рамки СМ посредством введения матрицы Кабиббо–Кобаяси–Масакавы, предсказывают БАВ на несколько порядков меньше наблюдаемой — а значит требуются более мощные источники нарушения CP-симметрии, чем существующие в рамках СМ.

По этой причине были построены теории за пределами СМ (например [5, 6]), однако ни одной из них пока еще не было найдено экспериментальное подтверждение. Одним из возможных свидетельств нарушения CP-симметрии может служить наличие у элементарных частиц ненулевого электрического дипольного момента (ЭДМ).

Несмотря на то, что эксперименты по поиску ЭДМ проводятся уже более пятидесяти лет, в большинстве из них измеряется ЭДМ зарядово-нейтральных частиц (например, нейтрона [7]), и поэтому не используются преимущества накопительного кольца как инструмента измерения ЭДМ. К таким преимуществам относятся: чистота среды кольца, высокая интенсивность и поляризованность, а также длительность времени жизни циркулирующего пучка. [8, стр. 9]. Также стоит отметить, что ЭДМ, например, дейтрона — более чувствительный индикатор наличия ЭДМ кварков, чем ЭДМ того же нейтрона. [8, стр. 7].

В настоящей работе суммируются основные известные проблемы измерения ЭДМ в накопительном кольце, и рассматриваются магистральные подходы решения этих проблем в рамках концепции “замороженного спина.” Нужно отметить, что “замороженный спин” — не единственная парадигма решения задачи измерения ЭДМ в накопительном синхротроне; альтернативой, к примеру, служат методы “частично замороженного спина” [9] и метод мэппинга частоты прецессии спина [10].

(б) Возможная реализация

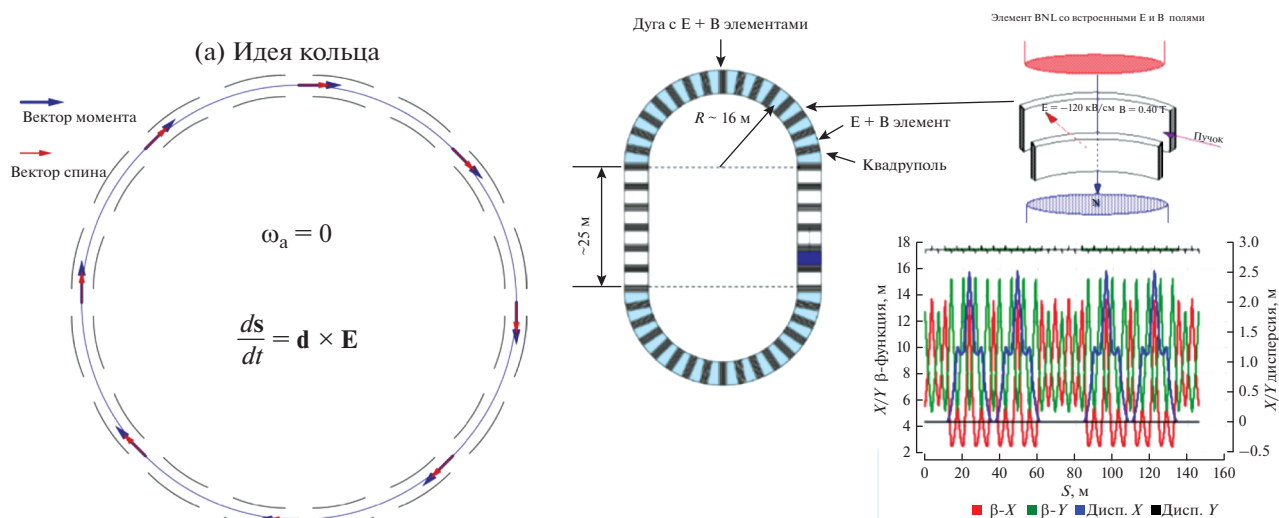


Рис. 1. Кольцо с замороженным спином.

2. МЕТОД “ЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА” (BNL-МЕТОД)

Уравнение Т-БМТ описывает динамику спин-вектора $\mathbf{s}$ в магнитном поле $\mathbf{B}$ и электростатическом поле $\mathbf{E}$. С учетом влияния ЭДМ оно может быть записано как

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = \mathbf{s} \times (\boldsymbol{\Omega}_{\text{МДМ}} + \boldsymbol{\Omega}_{\text{ЭДМ}}), \quad (1a)$$

где, в лабораторной системе координат, МДМ и ЭДМ угловые скорости $\boldsymbol{\Omega}_{\text{МДМ}}$ и $\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЭДМ}}$

$$\boldsymbol{\Omega}_{\text{МДМ}} = \frac{q}{m\gamma} \left[(\gamma G + 1) \mathbf{B} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\beta \mathbf{E}}{c} \right], \quad (1b)$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЭДМ}} = \frac{q}{m} \frac{\eta}{2} \left[\beta \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E}}{c} \right]. \quad (1c)$$

В уравнениях выше $m, q, G = (g - 2)/2$ есть соответственно масса, заряд, и магнитная аномалия частицы; $\beta = v_0/c$ — ее нормализованная скорость, а γ — Лоренц-фактор. ЭДМ множитель η определяется уравнением $d = \eta \frac{q}{2mc} s$, где d — ЭДМ частицы, а s ее спин.

“Замороженным спином” называют ситуацию, при которой в уравнении (1) $\boldsymbol{\Omega}_{\text{МДМ}} - \boldsymbol{\Omega}_p = 0$, т.е. направление спин-вектора частицы “заморожено” относительно ее вектора импульса $\mathbf{p}$. В этом случае, изменение направления вектора $\mathbf{P}$ поляризации пучка определяется только $\boldsymbol{\Omega}_{\text{ЭДМ}}$, если последний отличен от нуля.

Основная идея метода заключается в следующем. Пучок изначально продольно поляризован-

ных ионов инжектируется в кольцо. Посредством поляриметрии наблюдают за его спин-прецессией в горизонтальной и вертикальной плоскостях. ЭДМ сигнал — это изменение вертикальной компоненты поляризации со временем, выражаемое как: [8, стр. 8].

$$\Delta P_y = P \frac{\omega_{\text{ЭДМ}}}{\Omega} \sin(\Omega t + \Theta_0), \quad (2)$$

где $\Omega = \sqrt{\omega_{\text{ЭДМ}}^2 + \omega_a^2}$; $\omega_a, \omega_{\text{ЭДМ}}$ — частоты прецессии спина, связанные, соответственно, с магнитным и электрическим дипольными моментами. Таким образом, выводы о величине ЭДМ делаются на основании набег фазы спин-прецессии за один измерительный цикл $\Delta t_{\text{сис}}$; мы классифицируем такие методы как “фазовые.” В связи с последним, в методе предполагается как можно более полное исключение МДМ-компоненты спин-прецессии, так чтобы набег фазы определялся только ЭДМ. С одной стороны — в этом и заключается идея метода; с другой — ввиду малости гипотетической величины ЭДМ, направление оси стабильного спина теряет устойчивость, и становится подверженным малейшим возмущениям электромагнитного поля (см. проблемы ниже).

На рис. 1 изображены: концепция кольца с замороженным спином и одна из его возможных реализаций, использующая цилиндрические $E + V$ элементы в арках для синхронного поворота спин-вектора и вектора импульса частицы в горизонтальной плоскости.

Основными проблемами метода являются:

1. дестабилизация оси стабильного спина, необходимо связанная с подавлением МДМ спин-прецессии;

2. требуемая для этого подавления точность установки оптических элементов кольца, позволяющая пренебречь ω_a в (2);

3. трудности поляриметрии, вызванные малостью измеряемой величины $\Delta P_V(\Delta t_{\text{сис}})$.

Очевидно, все эти проблемы возникают по причине того, что в методе предполагается подавление (вплоть до полного исключения) МДМ-компоненты частоты спин-прецессии. Их решение необходимо вовлекает увеличение скорости поворота вектора поляризации Ω и переход от измерения фазы, к измерению частоты спин-прецессии. Следующие два метода используют именно этот, “частотный,” подход.

3. SPIN WHEEL МЕТОД

Метод Spin Wheel, был предложен проф. И.А. Коопом (ИЯФ СО РАН) в 2015 г. [11].

Основная идея метода: ЭДМ вычисляется путем сравнения величины угловой скорости поворота вектора поляризации $\mathbf{P}$ вокруг радиальной оси x (рис. 2) при различных условиях. Основными моментами метода являются:

1. в структуру кольца вводится дополнительный магнитный диполь с варьируемой силой поля, вращающий $\mathbf{P}$ за счет МДМ с $\Omega_{\text{МДМ}} \in [0.1, 1.0]$ Гц;

2. одновременно с основным, поляризованным, пучком инжектируется неполяризованный пучок, движущийся в обратном направлении, и используемый в качестве комагнетометра;

3. измеряются две величины:

(а) разделение $\Delta = \langle z_1 \rangle - \langle z_2 \rangle$ средних вертикальных уровней замкнутых орбит пучков, управляемое подстройкой силы поля введенного диполя;

(б) совокупная угловая скорость $\Omega(\Delta) = \Omega_{\text{МДМ}}(\Delta) + \Omega_{\text{ЭДМ}}$.

Таким образом, ЭДМ-компоненту частоты можно получить как

$$\Omega_{\text{ЭДМ}} = \frac{\Omega(+\Delta) + \Omega(-\Delta)}{2}.$$

Достоинство: переход от измерений фазы к измерениям частоты позволяет решить две обозначенные выше проблемы классического метода “замороженного спина.”

Основными проблемами метода являются:

1. Поляриметрия. Необходимость использования двух пучков частиц различного сорта накладывает ограничения на возможные энергии этих пучков, и соответственно — на величину сечения взаимодействия целевого пучка и мишени.

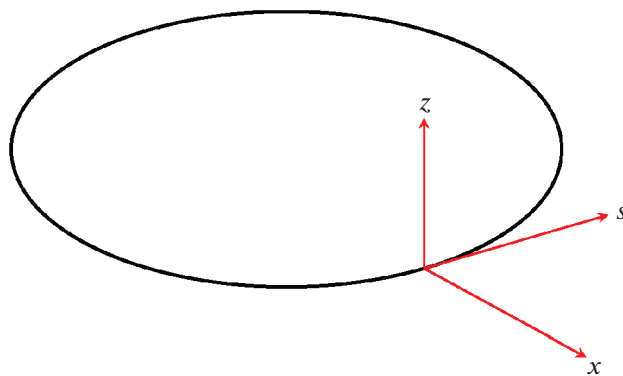


Рис. 2. Направления координатных осей в методе spin wheel.

2. Измерение величины вертикального разделения орбит пучков. Для определения величины ЭДМ, скажем, на уровне 10^{-29} е см требуется возможность измерять $\Delta \sim 10^{-12}$ м [12].

4. МЕТОД “FREQUENCY DOMAIN”

Для того, чтобы оценить достоинства данного метода, суммаризируем выводы, сделанные в предыдущих разделах:

1. Подавление МДМ-компоненты спин-прецессии вызывает проблемы. Если же МДМ спин-прецессию не подавлять, необходимо перейти от измерений фазы, к сравнению частот.

2. Настроить параметры накопителя с одним пучком проще, чем коллайдера.

3. Чем больше физических величин участвуют в определении целевой физической величины, тем меньше точность определения.

Основная идея метода [13] — попытка измерить частоту спин-прецессии пучка:

- не требуя сверхточную установку оптических элементов;
- используя только один пучок в каждом измерительном цикле;
- все время эксперимента наблюдая только за единственной физической величиной — частотой спин-прецессии.

Основные моменты метода, следующие из обозначенных выше требований:

1. Неидеальности ускорителя используются в качестве дополнительно вводимого в Spin Wheel методе магнитного диполя.

2. В связи с этим, возникает необходимость смены полярности ведущего поля ускорителя. Для контроля точности воспроизведения величины поля разработана процедура калибровки [14].

3. При калибровке поля достаточно следить за точностью выполнения условия замороженности спина в горизонтальной плоскости. Это связано с тем, что все компоненты частоты Ω спин-прецессии однозначно связаны с эффективным Лоренц-фактором пучка.

Таким образом, ЭДМ-компонента частоты спин-прецессии вычисляется как

$$\Omega_{\text{EDM}} = \frac{\Omega_{\text{CW}} + \Omega_{\text{CCW}}}{2}, \quad (3)$$

где CW и CCW обозначают направление движения пучка в ускорителе (по/против часовой стрелки).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы определили понятие состояния “замороженного спина” и описали классический метод измерения ЭДМ заряженной частицы в накопительном кольце использующий это состояние (BNL-метод). Мы отметили основные проблемы, присущие BNL-методу, а также способы их решения. Таковых способов два: Spin Wheel и Frequency Domain методы. Главным недостатком Spin Wheel метода данный автор считает необходимость измерения величины разделения орбит циркулирующих пучков. Главным недостатком Frequency Domain метода можно назвать необходимость смены полярности ведущего поля ускорителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Canetti L., Drewes M., Shaposhnikov M.* // New J. Phys. 2012. V. 14. P. 095012. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/9/095012>
2. *Fixsen D.J., Dwek E., Mather J.C., Bennett C.L., Shafer R.A.* // Astrophys. J. 1998. V. 508. P. 123. <https://doi.org/10.1086/306383>
3. *Hinshaw G., Larson D., Komatsu E. et al.* // J. Suppl. Ser. 2013. V. 208. P. 19. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/19>
4. *Sakharov A.* // J. Exp. Theor. Phys. 1967. V. 5. P. 24.
5. *Mohapatra R.N., Pati J.C.* // Phys. Rev. D. 1975. V. 11. P. 2558. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.11.2558>
6. *Maniatis M.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2010. V. 25. P. 3505. <https://doi.org/10.1142/S0217751X10049827>
7. *Smith J.H., Purcell E.M., Ramsey N.F.* // Phys. Rev. 1957. V. 108. P. 120. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.120>
8. *Anastassopoulos D. et al.* Brookhaven National Laboratory Report. 2008. https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf
9. *Morse W.M., Orlov Y.F., Semertzidis Y.K.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2013. V. 16. P. 114001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.16.114001>
10. *Saleev A., Nikolaev N.N., Rathmann F. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2017. V. 20. P. 072801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072801>
11. *Koop I.A.* // Phys. Scr. 2015. V. 2015. P. 014034. <https://doi.org/10.1088/00318949/2015/T166/014034/meta>
12. *Kawall D.* Report at 485 WE-Heraeus EDM Seminar. Bad Honnef. 2011.
13. *Aksentev A.E., Senichev Y.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1435. P. 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1435/1/012026/pdf>
14. *Aksentev A., Senichev Y.* Proc. 10th Intl. Particle Accelerator Conference IPAC'19. May 19–24, 2019. Melbourne, Australia. 2019. P. 858. <https://ipac2019.vrws.de/papers/mopts010.pdf>

Search for the Electric Dipole Moment of a Deuteron Using a Storage Ring

A. E. Aksentev*

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

*e-mail: a.aksentyev@inr.ru

Received February 9, 2021; revised June 21, 2021; accepted July 1, 2021

One of the alternatives to the Standard Model (SM) of elementary particles is the supersymmetry theories; the electric dipole moment (EDM) of elementary particles can serve as an excellent tool to confirm the validity of one of these models. For example: in the case of a neutron, the EDM, compatible with the SM, is within a range of 10^{-33} to 10^{-30} e cm, whereas the supersymmetry theories predict the presence of an EDM of much larger value, at the level of 10^{-29} – 10^{-24} e cm. Experiments on the search for EDM have been carried out for more than 50 years; however, most of them are based on charge-neutral particles (neutron, atoms). The EDM of charged particles (proton, deuteron) can be measured in a storage ring with the use of the phenomenon of the beam polarization precession in an electromagnetic field. The storage ring has a number of advantages when used as a tool for EDM measurement; however, there are also a number of problems. This paper discusses the main approaches to solving these problems: the BNL, spin wheel, and frequency domain methods.

Keywords: polarized beams, storage ring, synchrotron, deuteron, electric dipole moment, frozen spin, BNL, spin wheel, frequency domain