

Разработка метода по поиску электрического дипольного момента на накопительном  
кольце ускорителя дейтронов

П. Паламарчук, А. Аксентьев, С. Колокольчиков

<sup>1</sup>МИФИ

<sup>2</sup>ИЯИ

## Введение

Электрический дипольный момент (ЭДМ) у элементарных частиц обусловлен неоднородностью распределения заряда внутри частицы. Наличие ЭДМ у элементарной частицы приводит к нарушению четности (P) и симметрии по отношению к обращению времени (T). При преобразовании четности ЭДМ меняет свое направление на противоположное, в то время как направление МДМ остается неизменным. При преобразовании времени направление МДМ меняется, а направление ЭДМ — нет, что показано на рис.1. Таким образом система после P и T преобразований не симметрична по отношению к начальной системе [4]. Если предположить, что комбинированная операция CPT инвариантна, то нарушение T означает, что CP также нарушается, что было показано Сахаровым в \_\_\_\_ в работе [Сахаров]. Целью экспериментов является проверка нарушения T-симметрии путем проверки эквивалентного нарушения CP- симметрии, а так

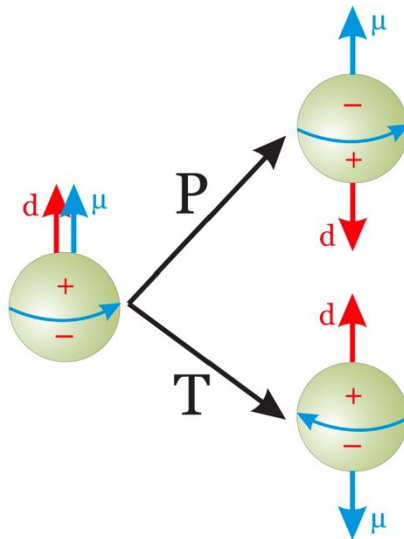


Рисунок 1. Электрический дипольный момент при различных преобразованиях

же подтверждение одной из фундаментальных теорий (SUSY или Стандартной модели). Основопологающим посылом для исследований стало стремление понять механизм нарушения CP-инвариантности, который приводит к барионной асимметрии Вселенной. Согласно теории А. Д. Сахарова CP-нарушение является необходимым условием для значительного преобладания материи над антиматерией.

Более того, стандартная модель предсказывает величину ЭДМ на несколько порядков меньше, чем альтернативная теория суперсимметрии (SUSY-теория) [AGS Proposal]. Ограничения для величины ЭДМ, полученной из экспериментальных данных, могут позволить подтвердить одну из них.

Малая величина ЭДМ затрудняет её изучение. Такие эксперименты по своей сути требуют долгого накопления малого сигнала. С этой целью возможно использовать накопительное кольцо в качестве измерительного прибора. Длительное удержание пучка с неизменной поляризацией, позволяет накопить достаточно статистических данных для измерения ЭДМ с необходимой точностью. Способом для наблюдения и измерения электрического дипольного

момента является метод «замороженного спина», в котором направления векторов спина и импульса референсной частицы совпадают в каждый момент времени. Такая методика основана на изучении спина как прецессии классического вектора. Изолируя ЭДМ от влияния магнитного дипольного момента можно определить величину ЭДМ.

Исследование ЭДМ может также помочь в изучении галактического аксиона, потенциального кандидата в частицы темной материи [Николаев]. В подобных экспериментах накопительное кольцо может быть использовано в качестве аксионной антенны. Для этого изменяется частота прецессии спина.

Необходимым условием для изучения ЭДМ является наличие поляриметра.

## Поведение спина в электрических и магнитных полях

Для изучения поведения ансамбля спинов частиц в пучке предполагается справедливость теоремы Эренфеста, согласно которой средние значения квантовомеханического оператора и действующие силы подчиняются законам классической механики. Таким образом, не смотря на то, что спин является чисто квантовой величиной, может быть изучен в квазиклассическом приближении. Уравнение эволюции спина Т-БМТ [Т-БМТ] под действием внешних полей:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} \wedge \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}),$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} \wedge \frac{q}{m\gamma}$$

$$\begin{matrix} \uparrow \\ \downarrow \end{matrix}$$

Ненулевая ЭДМ прецессия, влияет на изменение спина, что проявляется в повороте спин-вектора. Для измерения ЭДМ нужно исключить примешивание к сигналу ЭДМ сигнала магнитного дипольного момента. Изучение эволюции спина в случае наличия ЭДМ будет приводить к изучению изменений в динамике отвечающей за него компоненты спин-прецессии.

## Методы подавления прецессии спина от магнитного дипольного момента

Из уравнений (1) видно, что подавление МДМ прецессии является неотъемлемым требованием для изучения ЭДМ. Один из способов, при помощи которого это можно осуществить называется методом «замороженного спина». Из уравнения (1) следует, что в отсутствии ЭДМ направление вектора спина частицы может быть зафиксировано относительно ее вектора импульса. Более того, конкретная разновидность частиц, а также их энергия является определяющими при изучении поведения спина. В случае дейтрона ( $G=-0.142$ ) условие замороженного спина можно реализовать совмещая магнитное и электрическое поле.

Существуют два подхода к подавлению МДМ на ускорителе дейтронов.

«Замороженная» структура предполагает непрерывную сонаправленность горизонтальной проекции спина с вектором импульса частицы. Для того, чтобы реализовать условие FS в горизонтальной плоскости используется радиальное электрическое и вертикальное магнитное поле, совмещенные в один элемент.

"Квазизамороженная" структура отличается от "замороженной" тем, что спин под действием МДМ восстанавливает своё направление, а не сохраняет его постоянным в каждом элементе. Сохраняется "замороженность" в смысле полного обращения по

кольцу. То есть в QFS – происходит пространственное разделение полей, а в FS – поля совмещены в 1 элемент.

## Метод наблюдения ЭДМ в накопительном кольце

Необходимым условием для изучения ЭДМ, является обеспечение длительного сохранения когерентности пучка, что предполагает одинаковую частоту прецессии спина частиц. Следует учитывать, что у частиц в пучке существует разброс по длине орбит относительно референсной орбиты, и полное подавление влияния МДМ будет только для референсной частицы. Остальные частицы будут находиться в состоянии близкому к состоянию с «замороженным спином». Из-за этого будет возникать разница в частоте прецессии спина у частиц пучка, что приводит к деполяризации пучка. Сохранение когерентности в течении времени, необходимого для сбора данных является одним из условий для последующего измерения поляризации. Существуют различные методы наблюдения за частотой прецессии спина.

Пространственный метод предполагает, что спин всегда будет со-направлен с вектором импульса и за определённое время (SCT) успеет накопить значимый для детектирования сигнал в пространстве. В рамках пространственного метода происходит наблюдение за изменением пространственной ориентации пучка, вызванным ЭДМ. Измерив количество накопленной вертикальной компоненты поляризации за время измерительного цикла определяют угол наклона линейного закона, из которого вычисляется величина ЭДМ. Предполагается, что в таком случае влияние МДМ на получаемый сигнал отсутствует. В силу малости измеряемой величины она подвержена влиянию случайных возмущений внешних полей, что приводит к проблеме «геометрической фазы». Другая проблема заключена в неидеальности установки E + B элементов кольца (FS), что приводит к возникновению радиального магнитного поля, движущее поляризацию также вокруг радиальной оси.

Частотный метод предполагает изучение частоты прецессии по всё тому же изменению поляризации на поляриметре, но уже не требует со-направленности векторов спина и импульса, а позволяет спину в одной плоскости прецессировать. Методология частотной области основана на измерении ЭДМ-добавки к полной (МДМ и ЭДМ вместе) частоте прецессии спина.

Окончательным представляет интерес измеряемая величина на поляриметре...

..