

Измерение электрического дипольного момента на ускорителе дейтронов

Оглавление

1. Физическое обоснование эксперимента
2. Методическое основание эксперимента. Явление спин-прецессии и электрический дипольный момент. Современная теория явления
3. Технологическая экспериментальная база. Ускоритель заряженных частиц вообще. Накопительное кольцо
4. Метод наблюдения ЭДМ на кольце-накопителе. Проблемы и способы их решения
5. Заключение

Раздел 1. Физическое обоснование

Физическим обоснованием обнаружения и количественной оценки электрического дипольного момента частиц выступает наблюдаемая в обозримой вселенной асимметрия количества вещества над антивеществом. (То есть существование обозримой вселенной как таковое, поскольку вещество и антивещество взаимодействуют друг с другом аннигилирующим образом, с высвобождением энергии. Но если точнее, то вопрос физиков это не существование вселенной, а механизм её порождения: почему антивещества мало.) Одним из объяснений этого положения дел выступает теория бариогенеза, выдвинутая академиком А.Д. Сахаровым в 1967 году.

Теория Сахарова опирается на CPT-теорему, согласно которой физические законы не могут одновременно нарушать все три фундаментальные симметрии природы: C, P, T. При нарушении одной из симметрий, одна другая также должна нарушиться — но не две одновременно, так что физический процесс $CPT |\psi\rangle = |\psi\rangle$.

На основании этой теории, А.Д. Сахаров предположил нарушение временной симметрии T, в процессе рождения вселенной. В силу теоремы CPT, ускоритель заряженных частиц позволяет проверить нарушение T-симметрии, путём эквивалентного (в предпосылках CPT-теоремы) нарушения CP-симметрии. Фактически это можно осуществить либо путём ускорения антивещества (т.е. нарушая C-симметрию физического процесса взаимодействия частиц пучка и мишени), либо нарушая P-симметрию (т.е. **меняя направление движения пучка, импульс частицы**).

Раздел 2. Методическое обоснование эксперимента

Под методическим обоснованием эксперимента мы понимаем физическое явление, на основании которого можно судить о нарушении Т-симметрии. Нарушение Т-симметрии это наблюдаемое свойство физического явления.

Первое предложение возможного способа наблюдать и измерить электрический дипольный момент поступило от коллаборации в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL, США) и носит имя “замороженного спина” (Frozen Spin).

Предложенный ими способ не предполагает нарушения какой-либо симметрии, а основан на теории явления спин-прецессии Томаса-Баргмана-Мишеля-Телегди. Дифференциальное уравнение движения спин-вектора в этой теории содержит два члена, один из которых нарушает Т-симметрию, а второй не нарушает. Первый связан с наличием у частицы электрического дипольного момента, второй с наличием магнитного. Путём исключения действительности второго члена изолируют действие ЭДМ. Измерив интересующий член Т-БМТ уравнения возможно (в рамках теории) определить величину ЭДМ, порождающего этот член.

Таким образом, исходное предложение не предполагает производство явления нарушения временной симметрии, и является установлением величины составляющего теорию спин-прецессии члена. Оно обосновано тем, что ЭДМ это один из возможных кандидатов на причину (предполагаемой) Т-асимметрии. Обнаружение ЭДМ будет гарантом нарушения временной симметрии, а также позволит подтвердить какую-либо из конкурирующих со Стандартной моделью теорий вселенной из числа теорий суперсимметрии.

3. Технологическая база

Технологической базой выступает разновидность ускорителя заряженных частиц под названием накопительное кольцо. Особенность накопительного кольца состоит в том, что циркулирующий в нём пучок не набирает энергию, а держится на требуемой энергии эксперимента. Это позволяет вовсе не включать ВЧ-станцию, служащую цели набора энергии. Пучок в накопительное кольцо инжектируется из так называемого “бустера,” в котором происходит ускорение для нужной энергии; в накопителе только накапливается нужная интенсивность.

Структура ускорителя заряженных частиц определяется конкретной задачей, под которую он строится. (Обычно при проектировании также стремятся заложить возможность модификации под другие задачи.) В случае ЭДМ-экспериментов, существует несколько требований, налагаемых на структуру ускорителя.

- (1) аннулирование действия магнитного дипольного момента на спиновую динамику пучка (что позволяет наблюдать действие ЭДМ);
- (2) сохранение поляризации пучка.

Из первого требования следует, что в накопителе под ЭДМ-задачу вместо обычных поворотных магнитов-диполей используют так называемые “Е+В” элементы. Помимо дипольных магнитов в них стоят также цилиндрические электростатические дефлекторы. Это, в свою очередь, требует построения совершенно нового ускорителя. В связи с этой трудностью была предложена идея “квази-замороженного спина” (QFS) — поворотные магниты в арках кольца не изменяются, но в прямых секциях устанавливаются элементы (фильтры Вина) с электростатическим полем.

Второе требование вынуждает использование, в первую очередь, ВЧ-станции в кольце-накопителе. Пучок от этого не ускоряется, в силу специально подобранной фазы ускоряющего поля (электрического), в которой он приходит в ВЧ. Использование ВЧ позволяет преобразовать фазовое пространство, описывающее орбитальную динамику пучка, с тем эффектом, что уровни равновесной энергии различных частиц, в среднем, начинают сходиться.

Во-вторых, требование на сохранение поляризации пучка вынуждает использование секступольных магнитов. Секступольные магниты действуют на пучок как призмы, фокусируя равновесные орбиты частиц, ещё больше собирая в точку их равновесные энергии. По теории, равновесная энергия частицы определяет угловую скорость спин-прецессии частицы. Фактический опыт использования секступолей подтверждает эту теорию.

4. Метод наблюдения ЭДМ в кольце-накопителе

Ограничимся рассмотрением метода “замороженного спина.” В этом методе стремятся привести к очевидности действие ЭДМ на физическое явление спин-прецессии. Наблюдению той части физического явления в основании метода, которая отвечает на вопрос о наличии у частиц ЭДМ, мешает наличие у них МДМ, чьё действие значительно превосходит предполагаемое действие ЭДМ, заслоняет его. Для разрешения этой проблемы (и других) использованы технологические средства, описанные в предыдущем разделе.

После нейтрализации МДМ-действия, наблюдают за движением поляризации пучка, задаваемым ЭДМ. В силу малости ЭДМ, это движение — отклонение по линейному закону поляризации пучка от плоскости кольца. Измерив количество накопленной вертикальной компоненты поляризации за время измерительного цикла определяют угол наклона линейного закона, из которого вычисляется величина ЭДМ.

Проблемы метода, побудившие метод “квази-замороженного спина,” зиждятся в спиновой динамике пучка. Классически, она определяется двумя параметрами: нормализованной частотой спин-прецессии (спин-тюн) и осью стабильного спина. (Отметим, что проблема сохранения поляризации пучка в ЭДМ-экспериментах возникает в силу использования пучка, с ортогональной оси стабильного спина мгновенной поляризацией.) Поскольку эффективность МДМ

аннулирована, ось стабильного спина в эксперименте (в идеальном случае) определяется ЭДМ. Но величина ЭДМ, даже если он существует, слишком мала, чтобы противостоять случайным возмущениям электромагнитного поля, которые двигают ось в ходе измерения. Таким образом возникает известная в литературе проблема “геометрической фазы” : накопление вертикальной поляризации не связанное с ЭДМ. Приверженцы исходного метода предлагают решать эту проблему путём развития технологий по экранированию.

Ещё одна проблема возникает в силу неидеальности установки элементов кольца ускорителя. Использование совмещённых Е+В элементов исключает действие МДМ, определяющее вертикальную компоненту оси стабильного спина. ЭДМ в эксперименте движет поляризацию пучка вокруг радиальной оси. Наклоны поворотных магнитов вокруг продольной оси порождают радиальное магнитное поле, действующее на частицы через магнитный дипольный момент, и движущее поляризацию также вокруг радиальной оси. При практически реализуемых на настоящий момент технологиях юстировки элементов кольца, радиальный эффект МДМ существенно превосходит ЭДМ-эффект. Опять же, предлагается развитие технологий юстировки. Одной такой технологией выступает “юстировка при помощи пучка” (beam-based alignment [Tim Wagner]).

5. Заключение

В ходе описательной работы было выявлено несколько слабых мест научной отрасли, известной как поиск ЭДМ на ускорителе.

Во-первых, нужно отметить, что задача этой отрасли не соразмерна физической мотивации её появления. По существу, в отрасли речь идёт только об ЭДМ, но не об явлении, изначально побудившее исследование.

...