**Актуальность**

Данная работа посвящена изучению спин-орбитальной динамики пучка, и относится к одному из разделов ускорительной физики.

Интерес к измерению электрического дипольного момента обусловлен возможностью его использования в качестве инструмента для подтверждения одной из конкурирующих альтернативных теорий за гранью Стандартной Модели. Это связано с тем, что, если ЭДМ существуют, они нарушают временную симметрию, а это — одно из условий бариогенеза.

Поиск ЭДМ был начат более 50 лет назад. С тех пор были проведены всё более точные измерения, и на данный момент верхняя граница ЭДМ нейтрона оценивается на уровне 1е-26 есм. Однако, большинство экспериментов проводятся на зарядово-нейтральных частицах (нейтрон, атомы). Измерение ЭДМ заряженной частицы можно провести в накопительном кольце.

**Цель исследования**

В связи с этим возникла необходимость разработки метода поиска ЭДМ в накопительном кольце, позволяющего достичь точность 1е-29 есм.

**Задачи исследования**

Для того, чтобы достичь поставленную цель, необходимо было решить следующие задачи:

Во-первых, стало понятно, что измерения ЭДМ нужно проводить на основе частоты прецессии спинов частиц пучка. Поэтому

…

Мы работаем с поляризованным пучком. Основным механизмом деполяризации пучка является спин-декогеренция. Необходимо было исследовать этот феномен в окрестности рабочей точки.

Соответственно, нужно было разработать метод подавления спин-декогеренции, что осуществляется посредством использования нелинейных магнитных элементов.

Основным источником систематической ошибки измерений ЭДМ является спин-прецессия за счёт МДМ, вызванная электромагнитными полями, связанными с неидеальностью оптической структуры ускорителя.

Для борьбы с этой систематической ошибкой была разработана процедура калибровки нормализованной частоты спин-прецессии. Нужно было её промоделировать.

Нужно было избежать систематические ошибки, присутствующие в альтернативных предложениях по измерению ЭДМ.

Также, требовалась предварительная оценка предельной точности измерений, ограниченной статистическими свойствами данных предполагаемого эксперимента.

**Научная новизна**

Читаем со слайда.

**Практическая значимость**

То же самое.

**Апробация**

Читаем со слайда.

**Структура диссертации**

Читаем со слайда.

**Кольцо с замороженным спином**

Спин-динамика частицы в электромагнитном поле описывается уравнением Томаса-Баргмана-Мишеля-Телегди. Здесь оно представлено в форме, учитывающей спин-прецессию за счёт ЭДМ. Если бы омега-ЭДМ было равно нулю, то при устремлении омега-МДМ к нулю (в системе центра масс пучка, т.е. относительно вектора импульса частицы), мы бы получили ситуацию, при которой ориентация спин-вектора частицы фиксирована относительно её вектора импульса. Мы бы сказали, что “спин заморожен.”

**Схема ускорителя**

Здесь схематично изображено кольцо с замороженным спином; спин-вектор референсной частицы в каждый момент времени сонаправлен с её вектором импульса. При этом, если ЭДМ , то вектор поляризации пучка будет вращаться вокруг радиальной оси, и поворачиваться **из** плоскости замкнутой орбиты. На этом процессе основаны все методы измерения ЭДМ в накопительном кольце.

**Схема ускорителя** (более детальная)

На этом слайде представлена магнитооптическая структура, в которой реализуется состояние замороженности спина.

В арках размещены цилиндрические спин-ротаторы (E+B элементы), создающие одновременно и электростатическое и магнитное поля.

Представленное кольцо рассчитано на энергию инжекции дейтронов 270 МэВ, имеет длину около 146 метров; соответственно, циклотронная частота 1 МГц.

**Синхротрон COSY**

Синхротрон COSY — это техническая база нашего исследования; это установка, находящаяся в Исследовательском центре “Юлих,” Германия. Это чисто магнитное кольцо, поэтому для дейтрона, у которого аномальный магнитный момент отрицательный, на COSY невозможно создать условия замороженности спина. Тем не менее, COSY это уникальная установка для проведения экспериментов с поляризованными пучками. Она состоит из источника поляризованных и неполяризованных протонов и дейтронов, инжекторного циклотрона JULIC, самого кольца синхротрона, и двух мишеней (внешней и внутренней). Также на COSY есть два типа охлаждения пучка: электронное (работающее во всём диапазоне энергий пучка 0.3—3.7 ГэВ) и стохастическое (для энергий свыше 1.5 ГэВ).

**Код COSY Infinity**

Численное моделирование проводилось в пакете программ COSY Infinity.

Код разрабатывается Мартином Берцем и Киоко Макино Университета штата Мичиган.

Он основан на дифференциальной алгебре, что позволяет вычислять трансфер-матрицы (орбитальную и спиновую) элементов (потенциально) до любого порядка разложения ряда Тэйлора.

С помощью COSY Infinity можно не только вычислять различные характеристики ускорительной структуры (например функции Твисса), но и проводить трекинг частиц; в том числе, учитывая спиновую динамику пучка.

**Спин-трэкинг в COSY Infinity**

Спин-трекинг в COSY Infinity проводистя на основании двух трансфер-матриц. Орбитальная трансфер-матрица М вычисляется один раз, и затем применяется без изменений на протяжении всего требуемого диапазона оборотов. Спиновая же трансфер-матрица (А) зависит от точки частицы в фазовом пространстве, и должна вычисляться на каждом обороте отдельно.

**Эффект бетатронных колебаний**

На это исследование я был мотивирован по следующей причине:

В частотном методе, ЭДМ-статистика получается путём сложения частот прецессии векторов поляризации пучков в двух случаях: когда МДМ и ЭДМ вращают вектор поляризации пучка в одном направлении, и когда в противоположных.

Для получения оценки частоты прецессии, мы фитируем поляризацию пучка гармоническим сигналом с постоянными параметрами; при этом, исходя из решения Т-БМТ уравнения, амплитуда сигнала варьируется от оборота к обороту, из-за влияния фокусирующих полей.

(следующий слайд)

На этом рисунке по горизонтальной оси отложена относительная скорость вращения вектора поляризации; как видим, дисперсии компонент оси прецессии спина падают, при увеличении скорости вращения. Это логично, потому что чем выше скорость вращения, тем более определена ось прецессии; на этом основано главное преимущество частотного метода перед альтернативными.

При этом можно видеть, что на дисперсию (относительной) частоты прецессии спина скорость вращения вектора поляризации оказывает минимальный, если вообще, эффект.

А на этом рисунке изображены стандартные отклонения невязки (эпсилон-2) между данными спин-трекинга и соответствующего гармонического сигнала с постоянными параметрами (идеального), и невязки (эпсилон-1) между данными гармонического сигнала с осциллирующими параметрами, и идеального.

**Выводы**

По результатам моделирования, были сделаны следующие выводы:

1. Осцилляции амплитуды, связанные с возмущениями оси прецессии спина, значительно меньше ошибки измерения поляризации (она на уровне единиц процентов, а уровень вариации амплитуды оценивается на 2 порядка меньше).
2. Даже если эти оценки не совсем верны, вариация амплитуды влияет в первую очередь на оценку **амплитуды**, и лишь затем на оценку частоты. Но коэффициент корреляции между оценками мал, поэтому какой бы эффект не был на оценку амплитуды, его передача на оценку частоты аттеньюирутеся как минимум в 10 раз.
3. Если и этого недостаточно, есть третий момент: эффект вариации направления оси прецессии спина поддаётся контролю в структуре частотного метода измерений.

**Калибровка МДМ сигнала**

Почему это важно. Как можно видеть, в структуре оценки ЭДМ частоты прецессии присутствует систематическая ошибка, связанная с различием МДМ частот прецессии в разных измерительных циклах.

Идея метода калибровки состоит в наблюдении и корректировке частоты прецессии в горизонтальной плоскости; в этой плоскости практически отсутствует спин-прецессия связанная с ЭДМ, при этом радиальная и вертикальная компоненты МДМ частоты связаны между собой через эффективный Лоренц-фактор.

На этом графике видно, что при уменьшении разницы между вертикальными компонентами частоты прецессии поляризации в соответствующих циклах до уровня 1е-7 (это точность оценки частоты из данных одного цикла), разница между радиальными компонентами также не превосходит 1е-7. Нам хватает этой точности, чтобы получить за год точность оценки ЭДМ на уровне 1е-29 есм.

**Подавление спин-декогеренции**

Спин-декогеренция вызывает деполяризацию пучка, и служит ограничивающим фактором длительности измерительного цикла.

Она подавляется посредством использоввания нелинейных магнитных элементов (секступолей).

На данных рисунках изображены результаты численного моделирования подавления спин-декогеренции в случаях, когда частицы пучка совершают бетатронные колебания в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также синхротронные колебания.

Чёрные графики представляют зависимость нормализованной частоты спин-прецессии **до** включения секступолей, красные — после. Мы видим, что включение секступолей подавляет параболическую зависимость частоты прецессии от отклонения частицы от замкнутой орбиты по соответствующей координате; остающаяся линейная зависимость усредняется в процессе синхротронных колебаний.

**Исследования на COSY**

На синхротроне COSY проводились исследования по оптимизации времени когерентности спина с помощью секступольных полей. Для оптимизации использовались три секступоля: MXG, MXL, MXS, расположенные в одной из арок, в максимумах, соответственно, функции дисперсии, а также радиальной и вертикальной бета-функций.

Градиент поля каждого секступоля варьировался отдельно; при этом градиенты двух других были фиксированы на найденных ранее оптимальных значениях. На данных графиках видно, что время когерентности спина оптимально при некотором значении градиента, и падает при удалении от этого значения.

**Результаты работы**

Читаем со слайда.

**Положения выносимые на защиту**

Читаем со слайда.