**Модернизация Nuclotron с точки зрения возможности изучения ЭДМ дейтрона и протона.**

Наибольший интерес может представлять структура, способная одновременно быть использована для изучения ЭДМ как дейтронов, так и протонов. С точки зрения орбитальной динамики протон и дейтрон практически идентичны, масса дейтрона, вдвое больше, чем у протона. Спиновая же динамика отличается достаточно существенно для разного сорта частиц.

Для исследования предлагается структура с пространственно разделенными магнитными и электрическими полями. В таких структурах возможно исследование ЭДМ при помощи метода «квази-замороженного» спина. Рассмотрим подробно поведение частиц в поворотных элементах с магнитным и электрическим полем.

**Магнитные и электростатические поворотные элементы**

*Орбитальная динамика*

Для заряженной частицы в поперечном магнитном поле (рис.1a) можно записать

где – заряд, – скорость света, – вектор относительной скорости, – поперечное магнитное поле, – импульс частицы, – вектор угловой скорости (индексы означают, что происходит вращение импульса в магнитном поле). Учтем, что импульс частицы представим в виде , тогда ур.(1) с учетом перестановки векторного произведения получаем

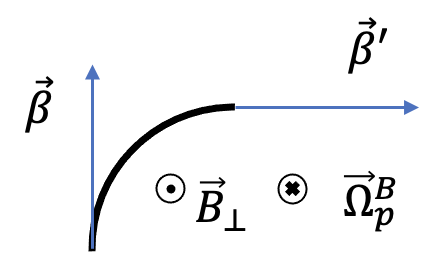
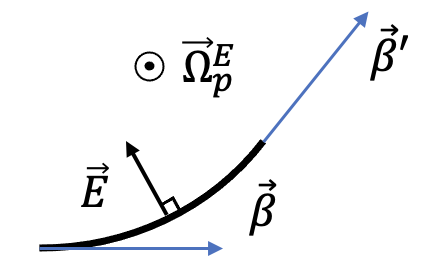
Для угловой скорости

Рис. Вращение положительно заряженной частицы а) в магнитном поле; б) электростатическом поле.

Для заряженной частицы в электростатическом дефлекторе, выполняющего функцию поворота всегда соблюдается условие , тогда происходит движение по окружности (рис.1б) и аналогично ур.(1).

где – электростатическое поле перпендикулярное импульсу, – вектор угловой скорости (индексы означают, что происходит вращение импульса в электростатическом поле).

Для угловой скорости с учётом векторного произведения , *.*

*Спиновая динамика*

Уравнение эволюции спинового движения описывается уравнением Т-БМТ. В наиболее корректном виде для вращательного движения по аналогии с ур.(1, 4), его можно записать как

Где – усредненный спин-вектор по ансамблю частиц, либо количеству оборотов, – вектор угловой скорости, обусловленный наличием *магнитного* дипольного момента, вектор угловой скорости, обусловленный наличием *электрического* дипольного момента, – аномальный магнитный момент. Такая запись наиболее точно отражает суть вращения вектора по правилу правой руки вдоль вектора . Для изучения ЭДМ необходимо скомпенсировать МДМ-вращение.

*Относительное движение*

Рассмотрим вращение спинового вектора под действием МДМ относительно вектора импульса.

Величина – спин-тюн (spin-tune) является скалярной величиной и отражает во сколько раз поворот вектора спина больше поворота вектора импульса

Аналогично для вращения в электростатическом поле

Спин-тюн в электростатическом поле

Примечательно, что спин-тюн как в магнитном поле ур.(9), так и электростатическом ур.(11) не зависит от величины поля в дефлекторе.

*Влияние сорта частиц на динамику спина*

Исходя из полученных выражений (8-9) и (10-11), видно, что для частиц с отличным поведение спин вектора частиц может существенно отличаться. Аномальный магнитный момент для протона , для дейтрона . Энергия эксперимента принимается равной 270 МэВ и определяется потребностями поляриметрии.

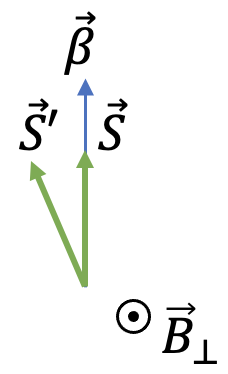
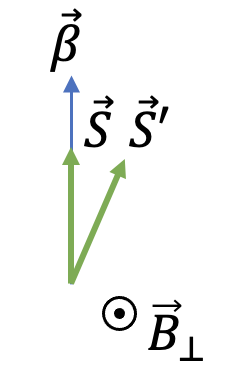
 В случае магнитного поля, направление вращения зависит только от знака аномального магнитного момента и не зависит от энергии. Величина относительного вращения зависит от энергии, а также величины .

Рис. Относительное вращение спин-вектора в магнитном поле для а) дейтрона; б) протона.

На рис.2 показано наглядно, что вращение спин-вектора в магнитном поле для дейтрона – против часовой, для протона – по часовой. Что соответствует выражениям ур.(8-9). Если – против часовой, – вращение по часовой.

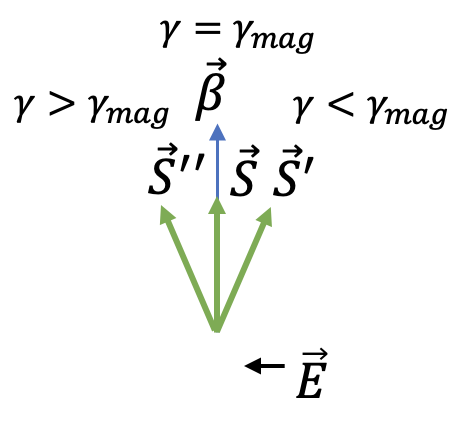
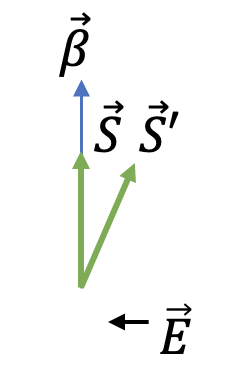
 В электростатическом поле направление вращения в случае протона может зависеть от энергии. Рассмотрим выражение , полученное в ур.(10-11). При , можно получить фиксированное значение энергии . Для дейтрона с отрицательным значением , всегда и магической энергии не существует. Для протона, при, , при , . В зависимости от энергии меняется направление вращения в электростатическом поле для протона (рис.3)

Рис. Относительное вращение спин-вектора в электростатическом поле для а) дейтрона; б) протона.

**Магнитные и электростатические кольца для изучения ЭДМ**

Для изучения ЭДМ заряженной частицы применяются накопительные кольца, способные долго удерживать частицы на орбите и накапливать изменение спин-вектора. В «квази-замороженной» структуре предполагается пространственное разделение магнитного и электростатического поля.

Рассмотрим структуру с магнитными поворотными арками с расположенными между ними электростатическими дефлекторами. Количество поворотных арках определяет периодичность структуры.

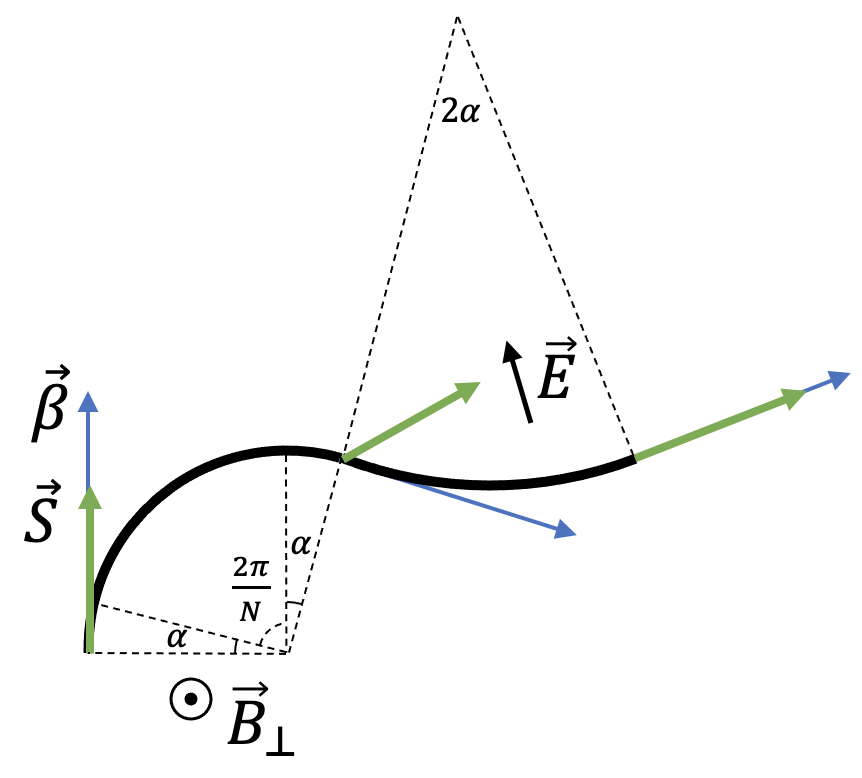
*Принципиальная структура периода для дейтрона*

Рис. Простейший случай поворотной магнитной арки и электростатического дефлектора для обеспечения "квази-замороженного" режима для дейтрона

Рассмотрим простейший случай одного периода. На рис.4 изображено поведения спин-вектора для дейтрона при последовательном действии сначала магнитной арки, а затем электростатической арки с отрицательной кривизной. В отсутствии электростатических дефлекторов, вращение импульса в магнитной арке происходит на . При необходимости введения электростатической арки с отрицательной кривизной , магнитные арки должны дополнительно поворачивать на угол , который будет в последствии скомпенсирован поворотом в электростатической арке. Окончательно, импульс, после прохождения периода, будет повернут на

Спин-вектор в магнитной арке совершит отклонение , где . В электростатической где , знак ‘минус’ обусловлен отрицательной кривизной дефлектора. Условие сохранения ориентации спин-вектора можно записать в виде

Подставив введённые углы поворота

Отсюда можно получить выражение для угла

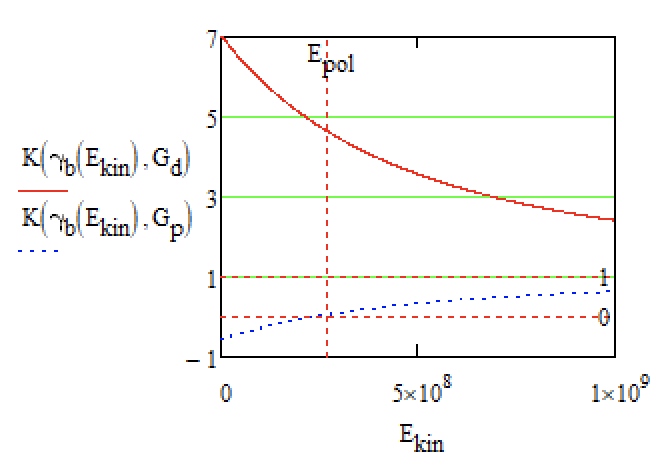
**Выражение для угла поворота зависит от коэффициента *.* На рис.5 показана зависимость от энергии эксперимента. соответствует энергии 270 МэВ, при которой сечение рассеяния на поляриметре наиболее эффективно. Для дейтрона , что означает необходимость использования электростатического дефлектора с отрицательной кривизной.

Рис. Изменение коэффициента в зависимости от кинетической энергии пучка для а) дейтрона (красная линия); б) протона (синяя линия).

Для дейтрона при , , , , .

Если перииод структуры , тогда , ,

В случае , тогда , ,

*Принципиальная структура для протона*

Основным требованием при проектировании структуры является реализация компенсация МДМ. Для структуры, описанной выше для дейтронов с электростатическими дефлекторами с отрицательной кривизной, может происходить компенсация МДМ. Однако, для протона вблизи энергии эксперимента (270 МэВ) . Тогда угол, определенный в ур.(13), становится отрицательным . Условие «квази-замороженного» спина не выполняется для протона в такой структуре

Поведение спин-вектора протонного пучка в электростатическом поле разнится в зависимости от энергии. И изменяется при прохождении через магическую энергию ( МэВ). В таблице 1 приведены принципиальные случаи

Таблица . Возможность реализации подавления МДМ-компоненты для протона в структуре с пространственно разделенными полями.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *Отрицательная кривизна* | *Положительная кривизна* |
| *Выше магической энергии* | *невозможно* | *Отсутствует компенсация МДМ* |
| *Ниже магической энергии* | *Отсутствует компенсация МДМ* | *от до* |

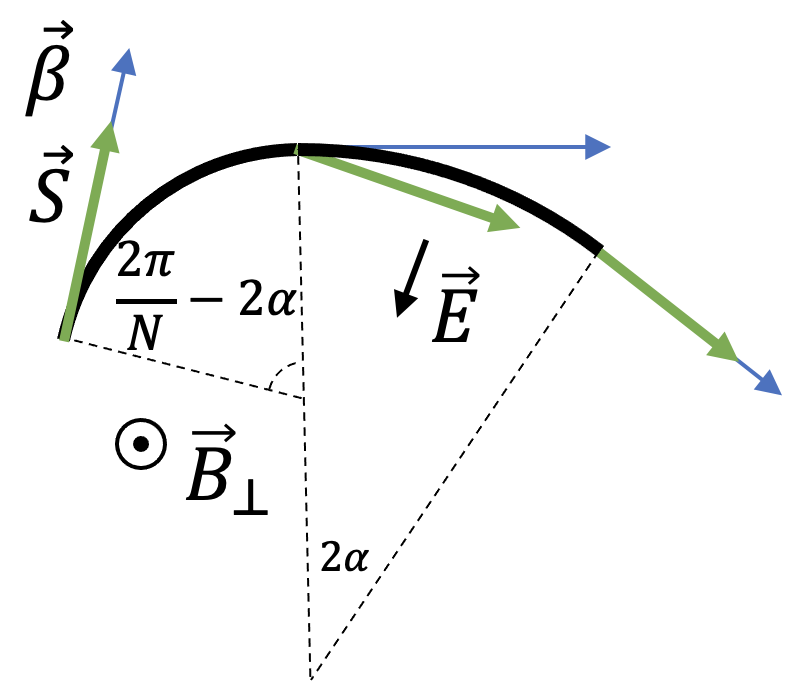
** Для электростатического дефлектора с положительной кривизной *ниже* магической энергии можно записать условие «квази-замороженного» спина, приняв во внимание, что , и условие ур.(12) выполняется

Рис. Простейший случай поворотной магнитной арки и электростатического дефлектора для обеспечения "квази-замороженного" режима для протона ниже магической энергии.

Для угла

Определим границы, в которых угол может быть варьирован и рассмотрим крайние случаи. При , , что соответствует случаю полностью электростатического кольца (без магнитных дефлекторов), где реализован режим «замороженного» спина. В экстремальном случае нулевой энергии (), , , таким образом , .

Стоит отметить, что рассматривалась энергия *ниже* магической, соответственно ниже 270 МэВ, при этом эффективность измерения на поляриметре неизбежно падает.

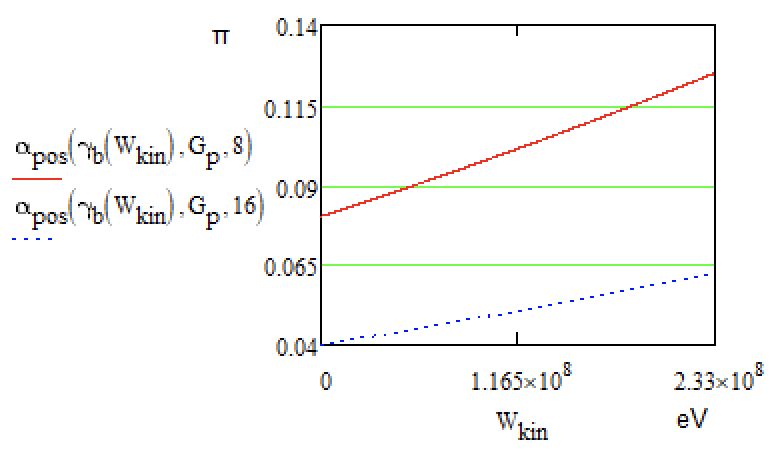


Рис. Зависимость угла от энергии для электростатического дефлектора с положительной кривизной ниже магической энергии. Красная линия – для 8-периодической структуры, синяя – для 16-периодической структуры.

**Необходимая длина электростатического дефлектора**

Поскольку спиновое вращение было рассмотрено относительно движения импульса, полагалось, что требуемый поворот импульса может быть осуществлен электростатическим элементом. На деле, максимальный возможный градиент поля может достигать порядка 10 МВ/м. Что может наложить существенные ограничения на длину поворотного дефлектора. И конечный размер структуры.

Найдём длину дефлектора в зависимости от угла . Длина дефлектора может быть записана как . А радиус вычислен из преобразованного движения по окружности ур.(5) в скалярном виде

Окончательно для радиуса

где – импульс.

м при энергии 270 МэВ () и поле .

м при энергии 100 МэВ () и поле .

Тогда длина соответствующего дефлектора

При энергии 270 МэВ (), для **дейтрона** в 8-периодичной структуре длина дефлектора с отрицательной кривизной м.

При энергии 270 МэВ (), для **дейтрона** в 16-периодичной структуре длина дефлектора с отрицательной кривизной м.

На энергии 100 МэВ (), для **протона** в 8-периодичной структуре длина дефлектора с положительной кривизной м.

На энергии 100 МэВ (), для **протона** в 16-периодичной структуре длина дефлектора с положительной кривизной м.

**Заключение**

Было показано, что изучение ЭДМ **протона** в структуре с пространственно разделенными полями возможно только *ниже* магической энергии. При этом падает эффективность поляриметрии. Помимо прочего, использование Нуклотрона определяется потребностями его работы в качестве бустера протонов и дейтронов на энергии 2-3 ГэВ/нуклон в коллайдер НИКА. Сокращение длины магнитной арки приведёт к невозможности ускорения и удержания на орбите протонов и дейтронов до 2-3 ГэВ/ нуклон. Что ведёт к невозможности изучения ЭДМ **протона** в описанной структуре с пространственно разделенными полями.

При этом, для **дейтронов**, необходимо увеличение длины магнитной арки. Хоть это и создаст необходимость дополнительного поворота магнитными арками на и согласования с электростатическими арками, всё же может сохранить в себе ключевую функцию бустера.