# Прецессия спина частиц, подавление МДМ Патриция, МИФИ …

# Абстракт (Введение)

Изучение ЭДМ происходит по его воздействию на спин частиц. Пучки частиц, которые применяются для исследования ЭДМ, образуют квантовую систему, поэтому, в следствии теоремы Эренфеста, спиновая динамика описывается прецессией классических спин-векторов. При рассмотрении прецессии спин-вектора в случае отдельной частицы подразумевается рассмотрение прецессии усредненного значения спина, наблюдаемого за продолжительное время.

Эволюция спин-вектора частицы зависит от МДМ и ЭДМ прецессии во внешних полях. Одним из необходимых условий для изучения ЭДМ частиц является подавление МДМ-прецессии, характер которой зависит от сорта частиц. Для проведения исследований необходимо использовать накопительное кольцо, устройство которого должно обеспечивать эффективное подавление МДМ. Для частиц различного сорта структура кольца будет отличаться.

В данной работе рассматривается движение частицы по референсной орбите.

Содержание

Введение

Глава 1. Динамика спина во внешнем поле

1.0 Уравнение Т-БМТ

* 1. Прецессия в продольном магнитном поле
  2. Прецессия в вертикальном магнитном поле
  3. Прецессия в вертикальном электрическом поле
  4. Прецессия в скрещенных полях
  5. Прецессия в фильтре Вина

Глава 2. Зависимость прецессии спин-вектора от сорта частиц

2.1 Спин-тюн

2.2.1 ЭДМ-прецессия

2.2 Влияние аномального магнитного момента частиц на прецессию спин-вектора

Глава 3. Устройство ускорителей. Способы подавление МДМ частиц в различных ускорителях.

3.0 Магическая энергия

3.1 Структура для исследования ЭДМ дейтрона

3.2 Структура для исследования ЭДМ протона

Глава 4. Измерения

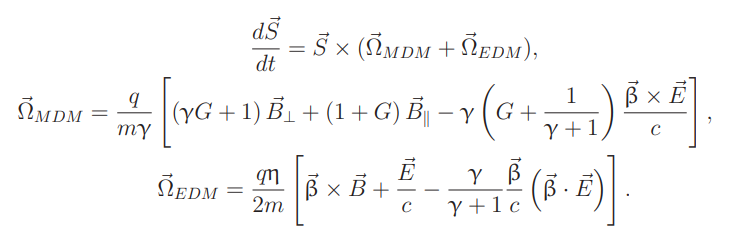
Заключение

Глава 1. Динамика спина во внешнем поле

В данной главе рассматривается движение частицы с произвольными параметрами во внешних полях.

1. Уравнение Т-БМТ

Уравнение Т-БМТ (Уравенение 1) описывает эволюцию спин-вектора частицы в полуклассическом приближении.



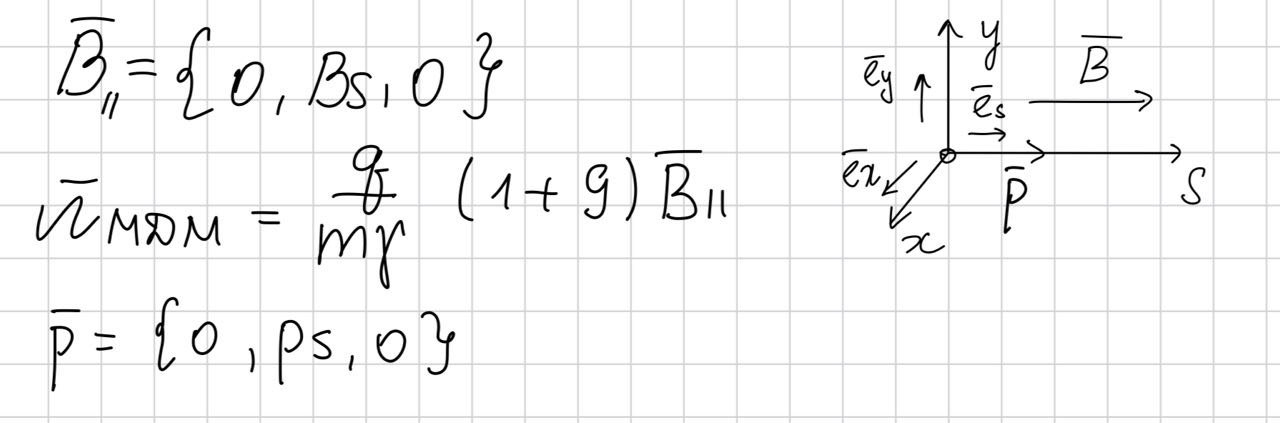
Где — угловые частоты вызванные МДМ (магнитный дипольный момент) и ЭДМ (электрический дипольный момент); — заряд, масса и магнитная аномалия; — нормализованная скорость; — Лоренц-фактор;— ЭДМ фактор, — спин.

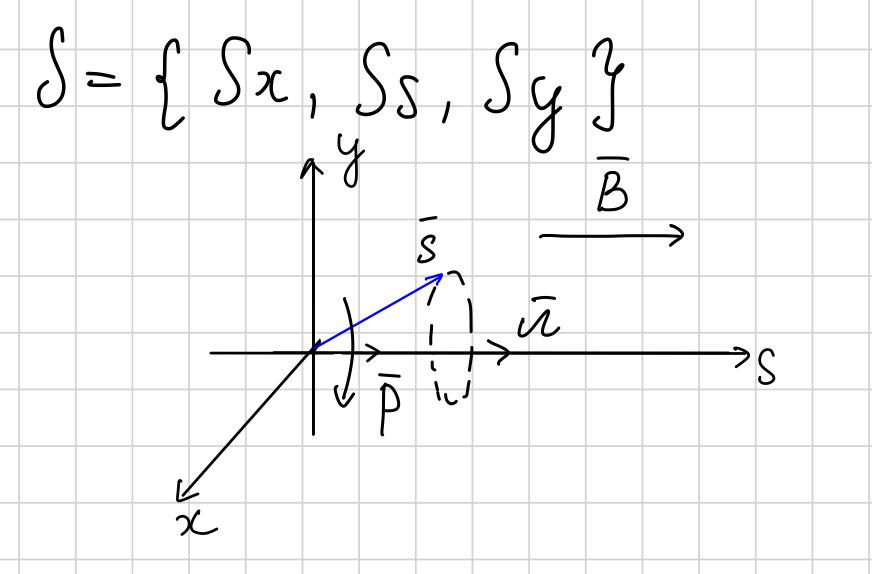
Основными параметрами, которые определяют характер прецессии спина, являются: сорт частицы, вид внешних полей, релятивистский Лоренц-фактор.

Помещая частицу в различные внешние поля, можно выяснить как будет меняться ее спин-вектор под действием МДМ-компененты, что в дальнейшем позволит понять каким образом можно изучить ЭДМ.

* 1. Продольное магнитное поле

Поместим частицу в однородное продольное магнитное поле, которое направлено параллельно вектору импульса частицы. В таком случае, в выражении для частоты МДМ-прецессии остается одно слагаемое, из которого следует, что частота прецессии спин-вектора будет сонаправлена с вектором продольного поля. Тогда направление поворота спин-вектора будет определяться произведением спин-вектора частицы на вектор частоты МДМ-прецессии или вектор внешнего поля (см. 1.0)



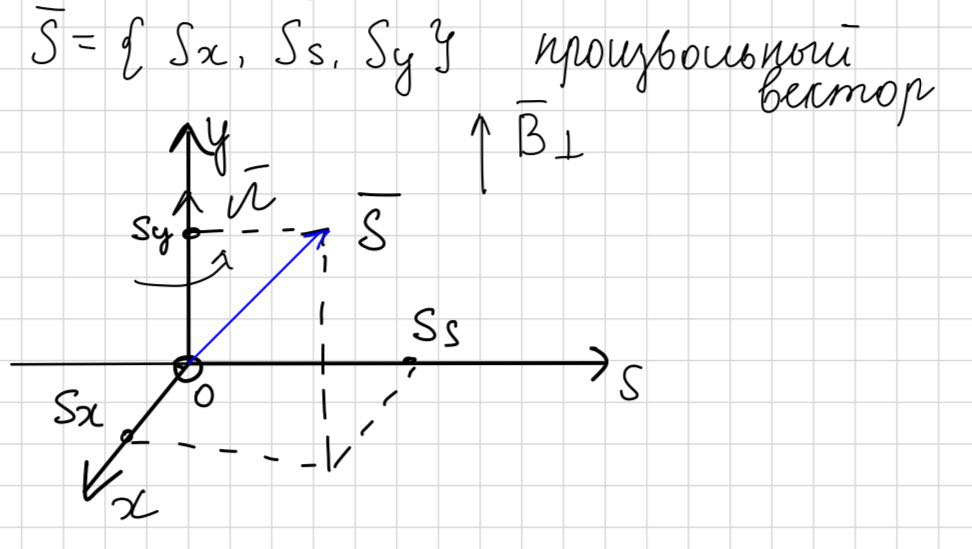
Рассмотрим случай произвольной поляризации спин-вектора (рис 1.1.1).

*Рис. 1.1.1 Прецессия произвольного спин-вектора в продольном магнитном поле*.

Согласно выражению для МДМ-прецессии, будет происходить поворот спин-вектора вокруг направления продольной оси S с частотой , направленной вдоль оси S.

* 1. Вертикальное магнитное поле

Рассмотрим случай прецессии спин-вектора с произвольной поляризацией в вертикальном магнитном поле. Направим поле вверх вдоль вертикальной оси, а вектор импульса зададим в продольном направлении. Из выражения для частоты прецессии следует, что она будет сонаправлена с вектором внешнего поля (вертикально вверх). Тогда произведение спин-вектора частицы на вектор индукции поля позволит определить направление поворота спин-вектора.



*Рис. 1.2.1 Прецессия спина в вертикальном магнитном поле*

В рассматриваемом поле будет происходить поворот спин-вектора вокруг вертикальной оси с частотой , направленной вдоль оси Y (рис 1.2.1).

* 1. Вертикальное электрическое поле

Направим импульс частицы вдоль продольной оси, а поле вертикально вверх. Перед рассмотрением прецессии в вертикальном однородном электрическом поле нужно преобразовать выражение для МДМ-прецессии. Для этого отбросим слагаемые, отвечающие за другие виды полей и раскроем векторное произведение. Полученный вектор частоты МДМ-прецессии будет сонаправлен с положительным направлением радиальной оси.

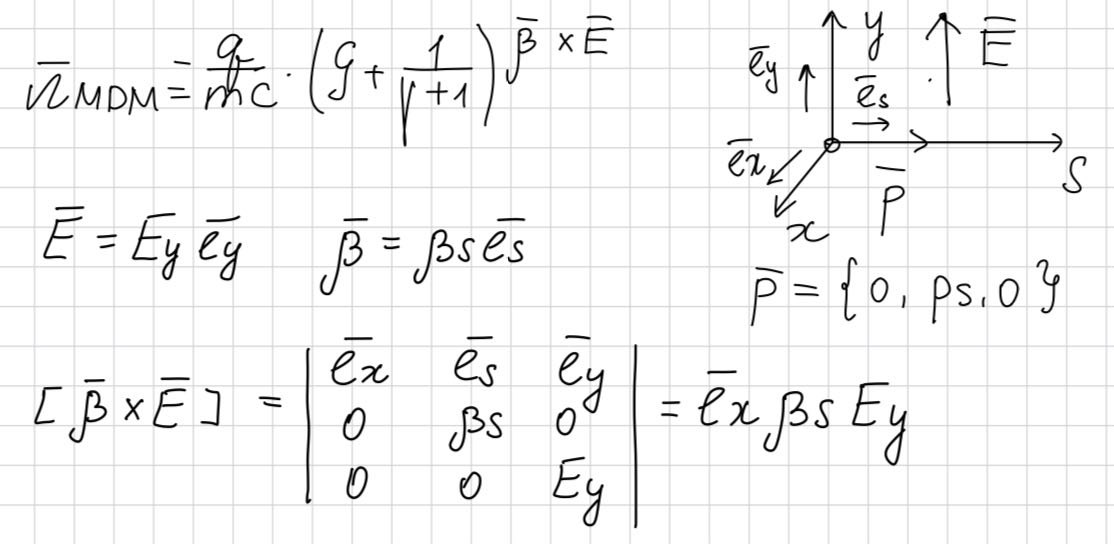
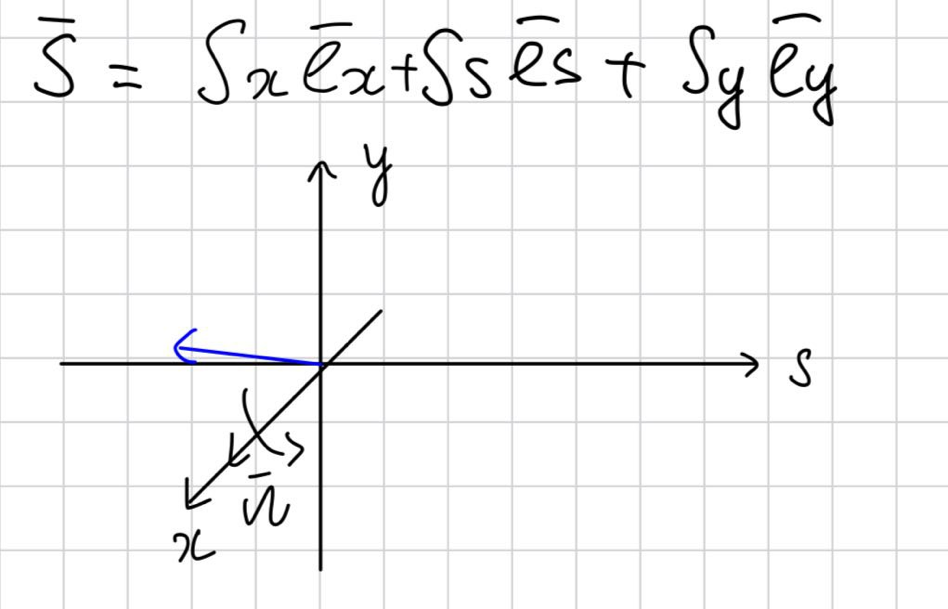
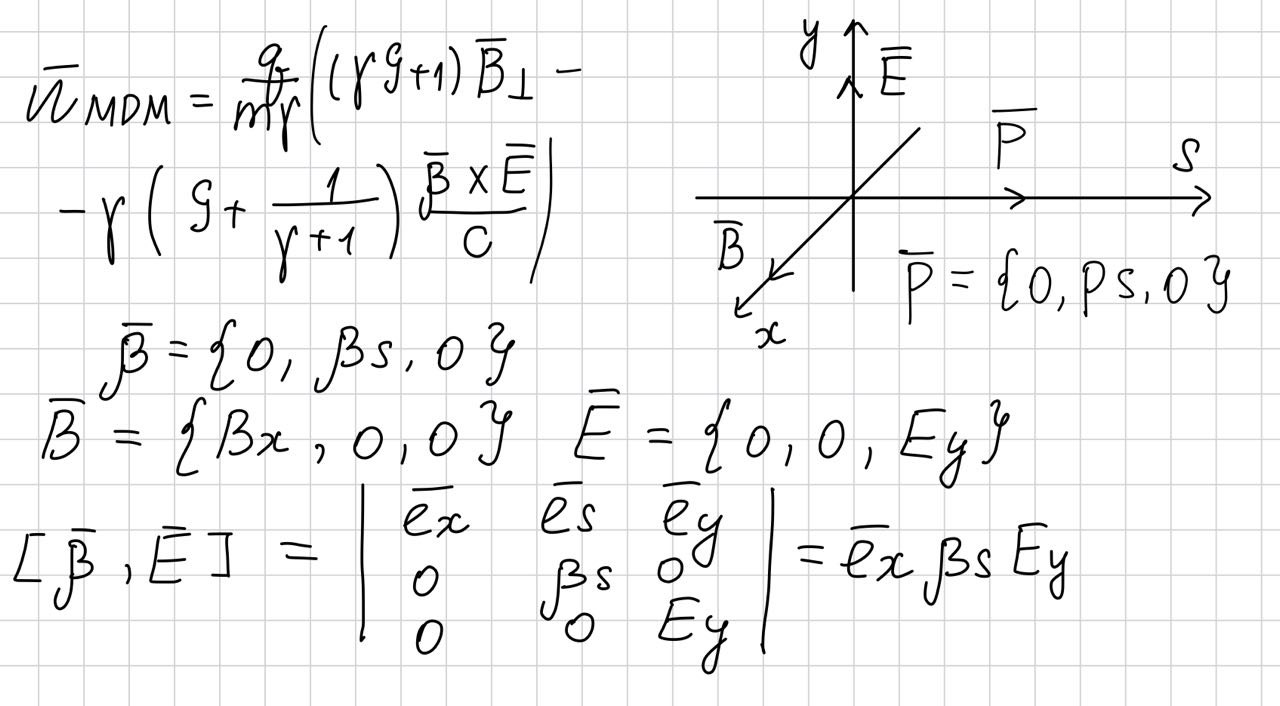
Рассмотрим случай произвольной поляризации спин-вектора.

Рис 1.3.1 Прецессия в вертикальном электрическом поле в случае произвольной поляризации

Поворот спин-вектора будет происходить вокруг радиальной оси, сонаправленной с векторным произведением [beta x E] с частотой (рис 1.3.1).

1.4 Скрещенные поля

Поместим частицу в скрещенные электрическое и магнитное поле. Зададим магнитное поле вдоль положительного направления радиальной оси, а электрическое вдоль положительного направления вертикальной оси. Вектор импульса частицы направим в продольном направлении. Частота МДМ прецессии будет определяться направлением векторного произведения [beta x E] и направлением магнитного поля.



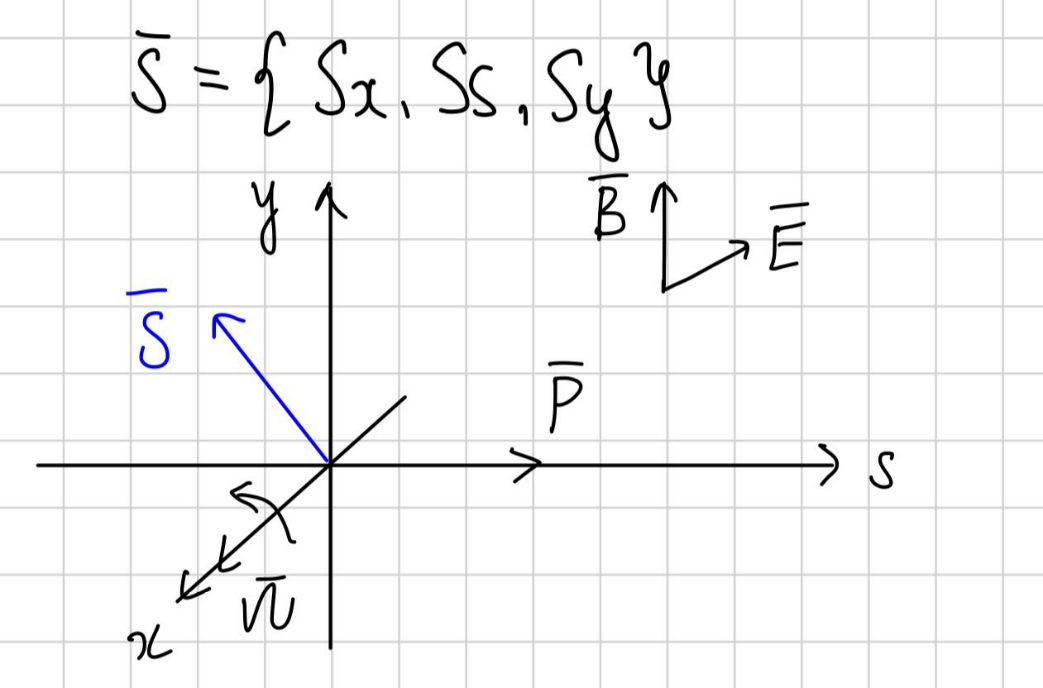
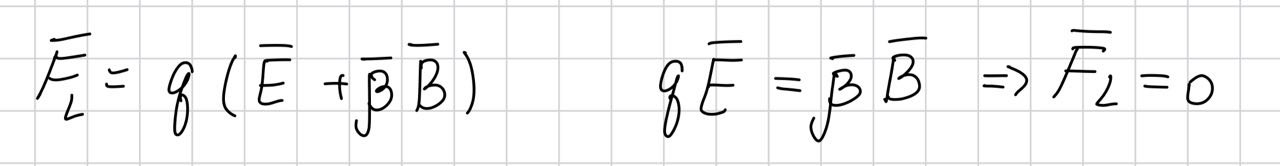
Рассмотрим спин-вектор с произвольной поляризацией:

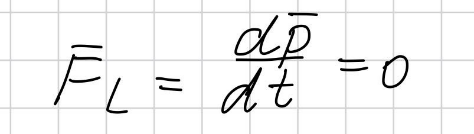
Рис. 1.4.3. Прецессия произвольного спина в скрещенных полях

Cпин-вектор прецессирует вокруг направления магнитного поля (или направления, заданного векторным произведением [beta x E], то есть в плоскости электрического поля) [можно и без скобок] с частотой , направленной вдоль оси X(рис 1.4.1).

1.5 Поле фильтра Вина. [не в этом разделе, тут мы всё-таки о разного рода полях в общем смысле говорим]

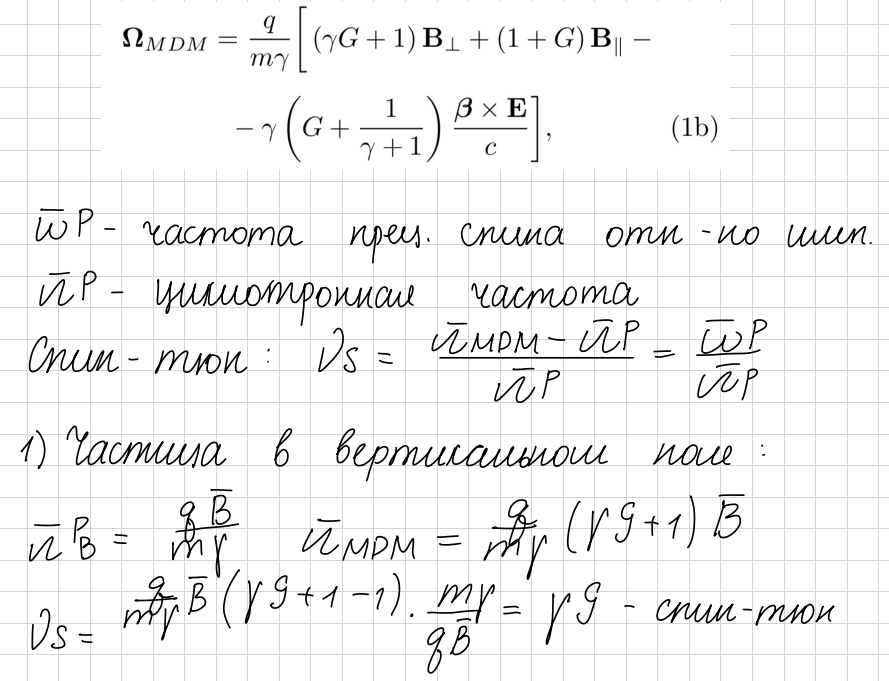
В ФВ перпендикулярно направлению движения частиц создается скрещенное электрическое и магнитное поле. Электрическое поле направляется вдоль радиальной оси, магнитное поле вдоль вертикальной. Поля подбираются таким образом, чтобы суммарная сила, которая действует на частицу, равнялась нулю [qE= ‘минус’ beta B]:

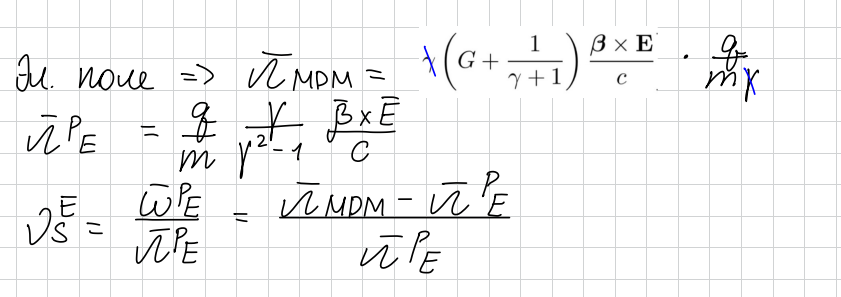
В таком случае, направление импульса частицы при прохождении через ФВ меняться не будет:

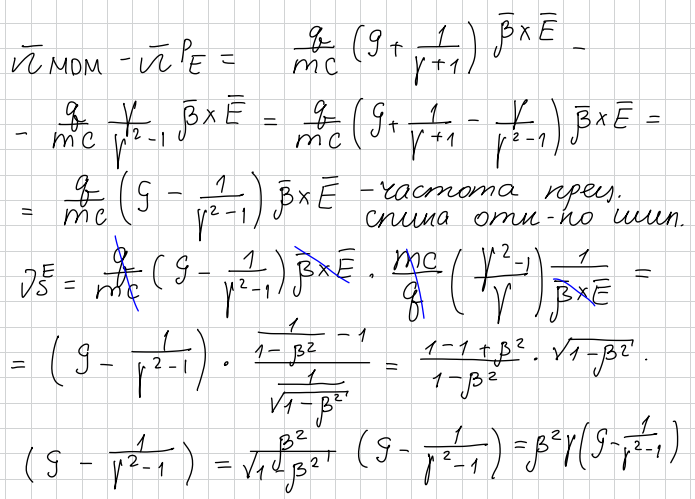
МДМ-прецессия спин-вектора частицы будет аналогична прецессии в скрещенных полях (см. 1.4), с тем отличием, что направление импульса частицы будет неизменным.

Глава 2. Зависимость прецессии спин-вектора от сорта частиц

2.1 Спин-тюн [это понятие появится позже, по факту ты рассматриваешь динамику спина относительно импульса]

Частицы, обладающие зарядом, отклоняются от прямолинейного движения во внешних полях под действием силы Лоренца. Поскольку изменяется и спин, и импульс, вводится понятие спин-тюна, который определяется как угловая скорость поворота спина относительно импульса к циклотронной частоте: [формулы – отлично, отсутствие их описание и смысла – не отлично. Тем более, ты сама задавалась вопросом ‘почему в эл.поле нужно вычитать’, если ты разобралась, то именно это и нужно пояснить в том числе]





Спин-тюн описывает различие в прецессии между импульсом и спином в пределах одного поля и позволяет оценить возможность восстановления изначальной ориентации спина после воздействия внешнего поля.

2.2 Влияние аномального магнитного момента частиц на прецессию спин-вектора

Сорт частиц определяет значение аномального магнитного момента G, который влияет на поведение спина. Аномальный магнитный момент отличается по знаку и модулю для различных частиц, что приведено в таблице 2.1:

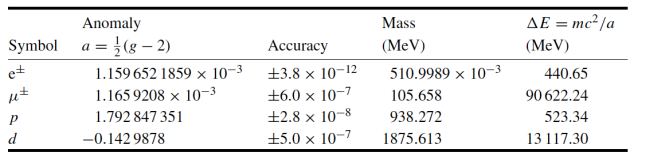
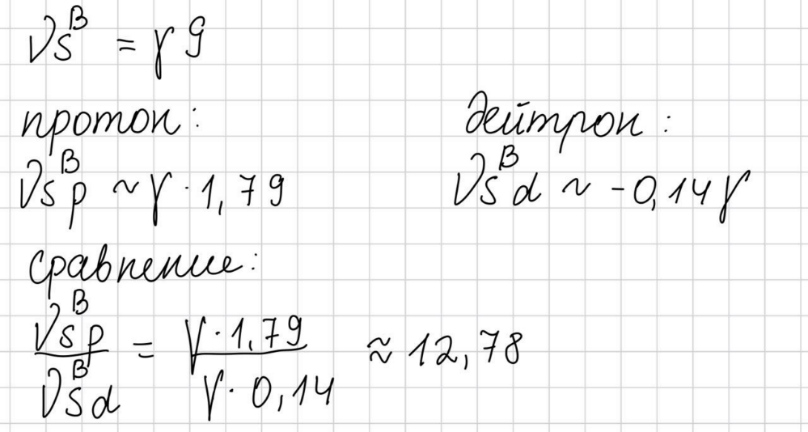


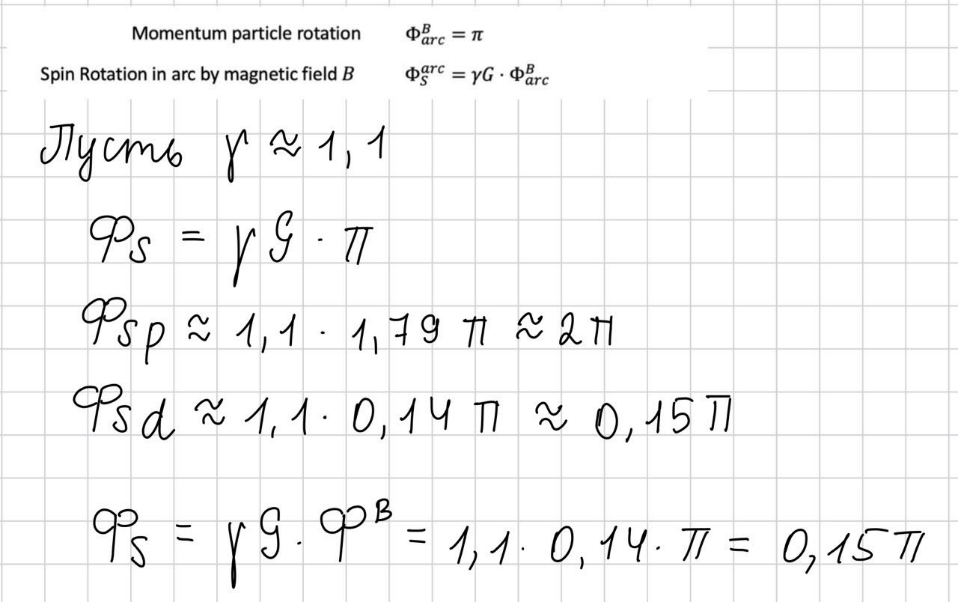
Таблица 2.1. Значения аномального магнитного момента частиц

Из выражения для спин-тюна можно увидеть, что он прямо пропорционален значению G

Пример: протон и дейтрон [почему же именно протон и дейтрон] находятся в поле поворотного магнита:

Из сравнения видно, что различие в частоте прецессии между спином и импульсом у протона значительно больше, чем у дейтрона. Теперь можно произвести оценку значения угла поворота спина относительно импульса для каждой из частиц при повороте на pi радиан.

Спин-тюн частицы равен отношению угла поворота спина от начального положения относительно импульса к углу поворота импульса:



Значение Лоренц-фактора исходит из энергии эксперимента (E=270 МэВ). При такой энергии наблюдается наибольшее сечение рассеяния пучка.

2.2.1 ЭДМ-прецессия

Отклонением является такое изменение в положении спин-вектора частицы относительно ее импульса, при котором происходит накопление ЭДМ-компоненты прецессии. В случае поворота накопление ЭДМ не происходит. [непонятно, как будто вырвано из контекста]

Рассмотрим частный случай: движение частицы в вертикальном магнитном поле.

Из векторного произведения в выражении для ЭДМ-прецессии следует, что ЭДМ компонента спин-вектора будет прецессировать вокруг радиальной оси с частотой . При этом МДМ-компонента будет прецессировать вокруг вертикальной оси с частотой (рис.2.1.).

При совершении МДМ-компонентой спин-вектора поворота относительно импульса ЭДМ-компонента будет совершать поворот вокруг радиальной оси. В таком случае проекция ЭДМ на вертикальную ось останется неизменной. Так происходит, поскольку в ходе прецессии вертикальная компонента ЭДМ успевает пройти дважды через точку минимума.[что такое точка минимума]

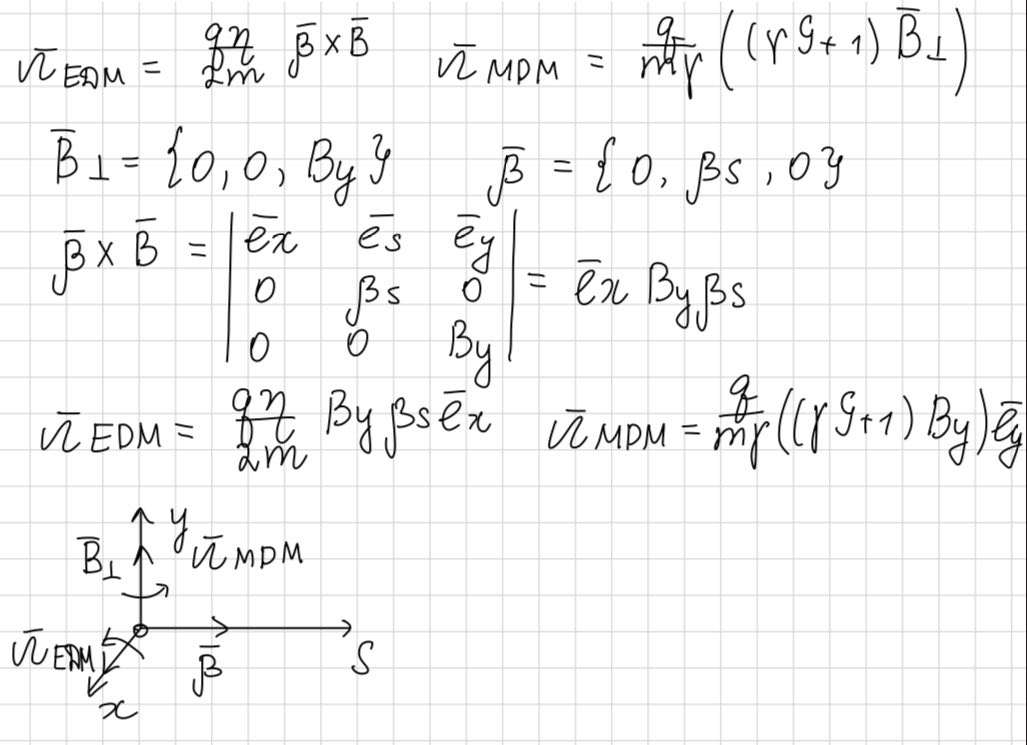


Рис 2.2.1.1. Направление частот прецессии спин-вектора в вертикальном поле

Можно сделать вывод [исходя из чего?], что поведение спин-вектора в полях зависит от сорта частиц. Для частиц с большим значением спин-тюна спин будет прецессировать с большей скоростью в пределах одного поля. Отклонением [звучит пока очень притянуто, нужно ли вообще такое определение вводить] является такое изменение в положении спин-вектора относительно импульса, при котором происходит накопление ЭДМ-компоненты спин-прецессии. В процессе поворота накопленный ЭДМ ликвидируется. [ликвидируется? Немного неподходящий глагол, но не отражает того, что ты рассказывала раньше]

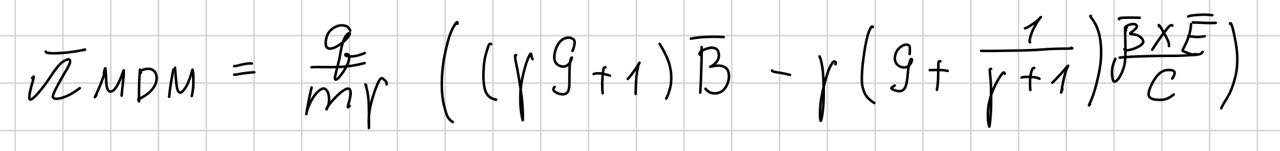
Из полученных оценок значений угла поворота спина относительно импульса при изменении импульса на pi радиан (см 2.1) следует, что у дейтрона будет отклонение, а у протона – поворот.

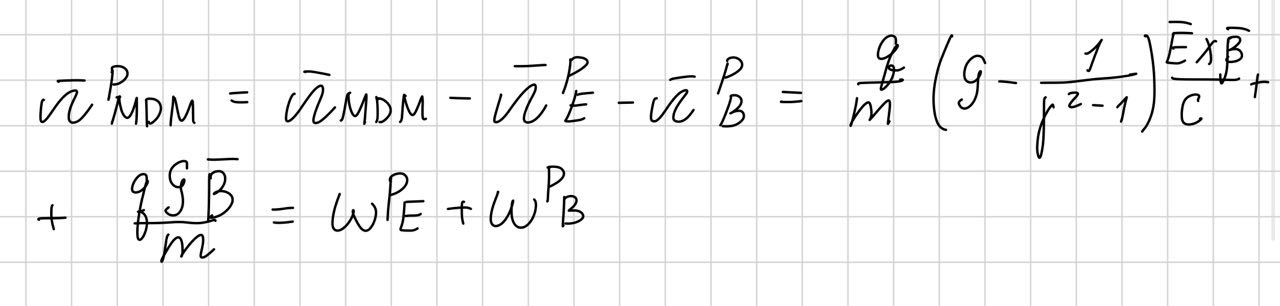
Глава 3. Устройство ускорителей. Способы подавление МДМ частиц в различных ускорителях.

Для проведения исследований ЭДМ частиц необходимо исключить примешивание МДМ к измеряемой ЭДМ компоненте.

3.0 Магическая энергия [1) для протона – да, а для дейтрона нет магической, тогда нужно ли главу суммарную так называть? 2) А нужно ли он этом говорить в 3 главе? Или это больше 2 глава? Посмотри на это структурно]

Как было выяснено в главе 2, сорт частиц определяет поведение спин-вектора во внешнем поле. Одной из характеристик является значение аномального магнитного момента, который отличается по модулю и знаку для разных частиц.

Рассмотрим уравнение Т-БМТ, приведенное в главе 1. Частота МДМ-компоненты: 

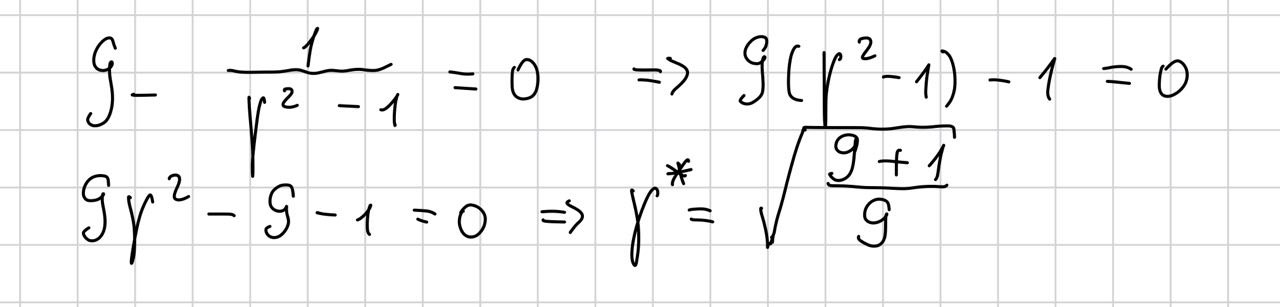
Тогда частота прецессии МДМ-компоненты спина относительно импульса (см. гл. 2):

Уравнение 3.1.

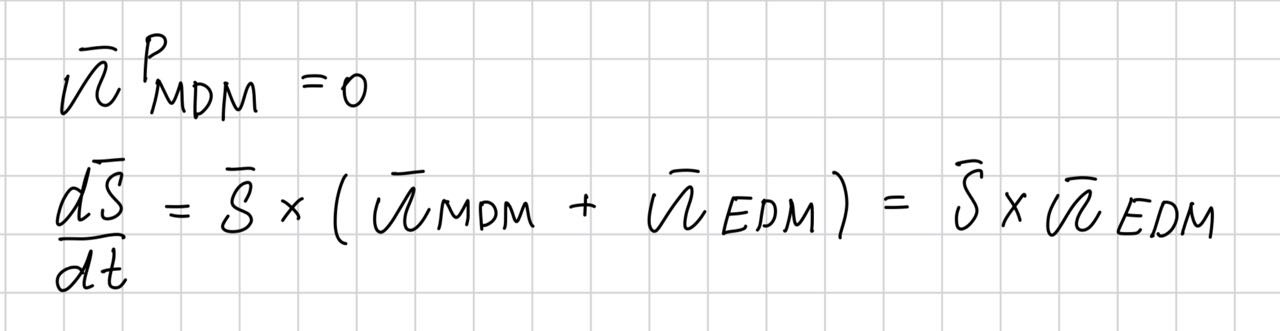
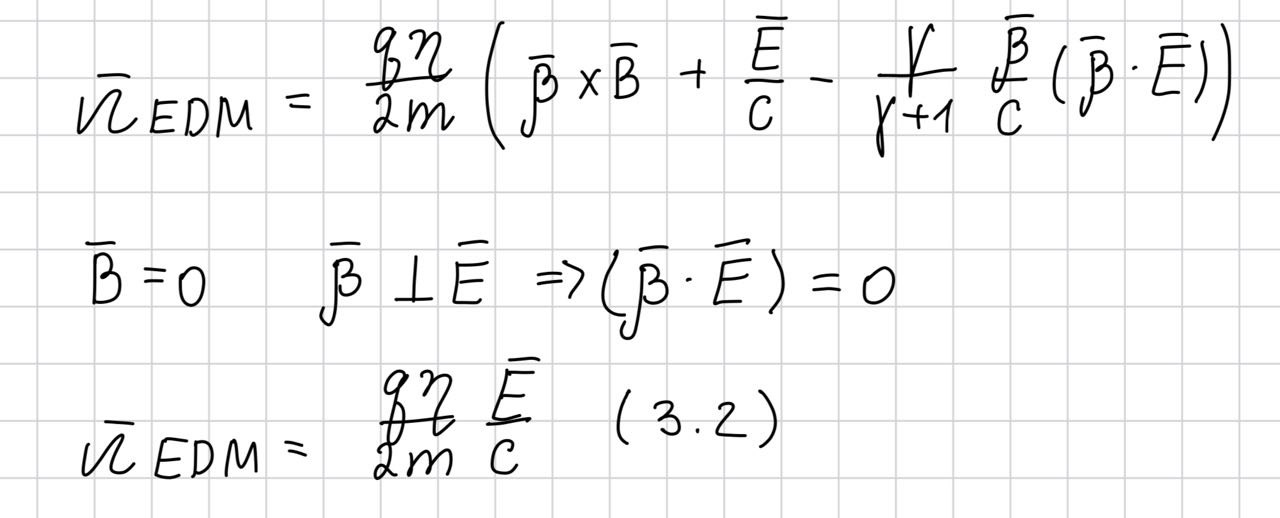
Теперь рассмотрим полученный результат в применении к разным частицам

3.1.1 Протон

Протон обладает положительным значением аномального магнитного момента (см. гл. 2). В таком случае из уравнения 3.1 можно устранить слагаемое, отвечающее за частоту МДМ-прецессии спина относительно импульса в электрическом поле.

Этого можно добиться задав частице “магическую” энергию [gamma\*].

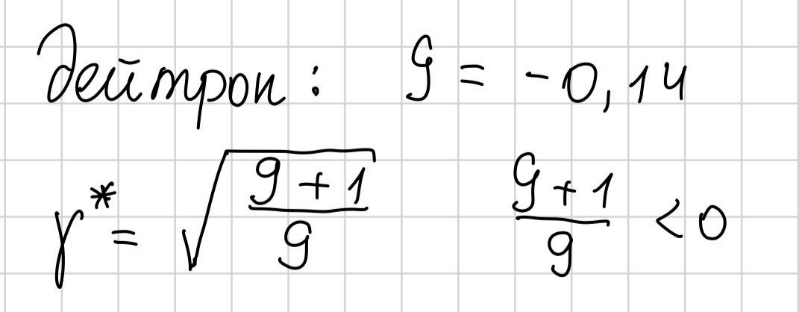
При отсутствии внешнего магнитного поля можно полностью избавиться от влияния МДМ-компоненты на прецессию спин-вектора. Тогда изменение положения спин-вектора относительно импульса будет определяться только ЭДМ-компонентой:

Преобразуем слагаемое, которое отвечает за ЭДМ-прецессию:

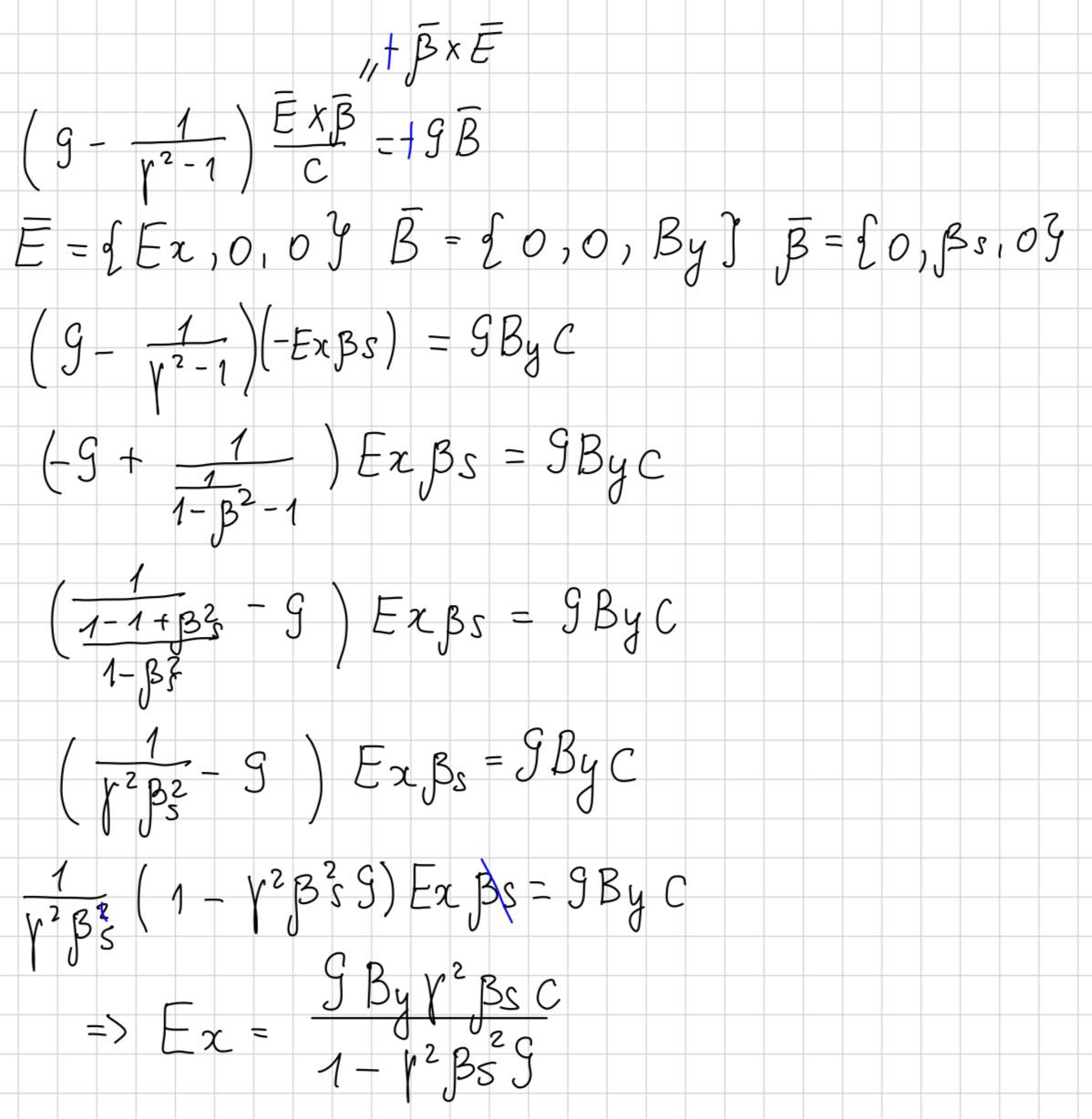
Используя условие отсутствия магнитного поля и перпендикулярность направления движения частицы направлению внешнего поля, получим зависимость частоты ЭДМ-прецессии протона от внешнего электрического поля.

Из этого следует, что в исследованиях ЭДМ протона можно использовать чисто электростатическое кольцо, задавая пучку «магическую» энергию, при которой произойдет избавление от влияния МДМ-компоненты прецессии.

3.1.2 Дейтрон

Дейтрон обладает отрицательным значением аномального магнитного момента (см. гл. 2). Поэтому для дейтрона не существует “магической'' энергии:

Это означает, что для исследования ЭДМ дейтрона необходимо использовать структуру с электростатическими и магнитными элементами. В случае магнитного кольца необходимо добавление электростатических элементов для компенсации вклада магнитного поля и избавления от МДМ-компоненты:

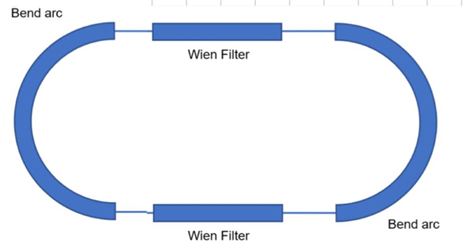


3.1 Структура для исследования ЭДМ дейтрона

Существует несколько вариантов структур для подавления МДМ-прецессии.

3.1.1 QFS структура с совмещенными E+B элементами

Чтобы подавить влияние МДМ в случае дейтрона используется структура QFS (racetrack), состоящая из поворотных арок и прямых участков с фильтрами Вина (рис 3.1.1).

Рис 3.1.1. Схема ускорителя

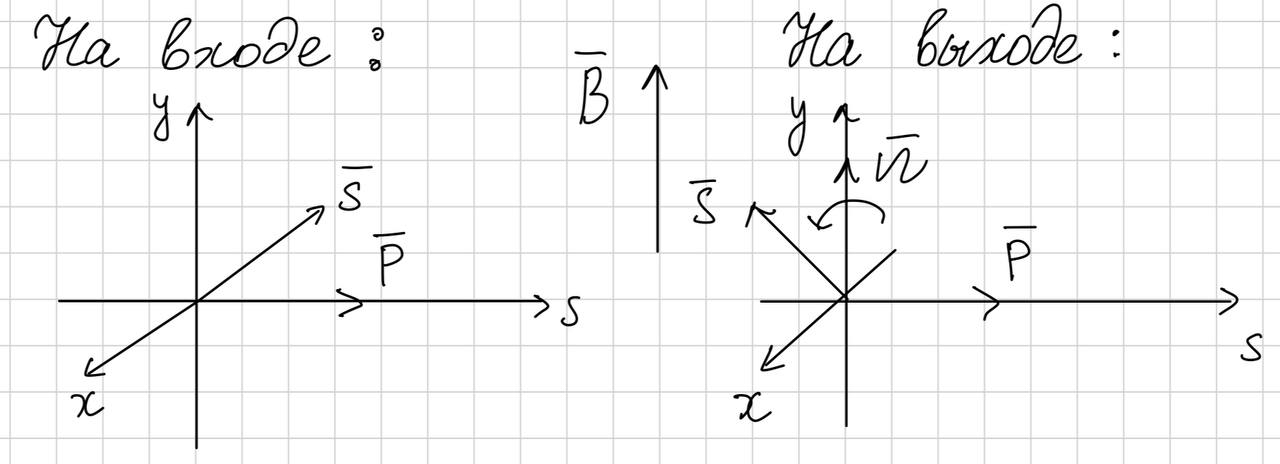
Пусть пучок влетает в поворотную арку. В вертикальном магнитном поле произойдет поворот спин-вектора вокруг направления поля. На выходе из арки спин будет отклонен (см. выше) от своего начального положения относительно импульса (рис 3.1.2)

Рис 3.1.2. Отклонение спина в поле поворотного магнита

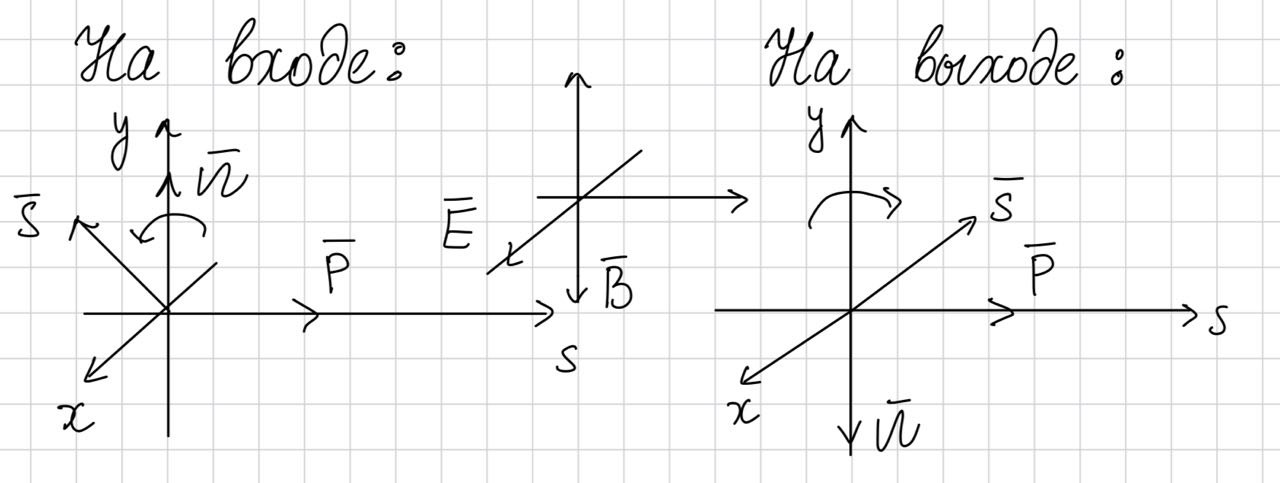
Далее частица попадает в фильтр Вина, где ее импульс не меняется (Раздел 1.3). Направив электрическое поле радиально, а магнитное поле в противоположном направлении относительно поля в арке можно скомпенсировать поворот спина (рис 3.1.3)

Рис 3.1.3. Восстановление ориентации спина в фильтре Вина.

Таким образом, спин возвращается в свое начальное положение, какое было до арки. По тому же принципу компенсируется изменение спина во второй половине кольца. В итоге, за полный оборот по кольцу вектор спина остается неизменным, т. е. устраняется влияние МДМ-прецессии.

Спин-вектор дейтрона, отклоненный полем поворотной арки восстанавливает свое направление на прямых участках. Таким образом устраняется влияние МДМ-компоненты. При этом можно отслеживать накопление компоненты спин-вектора в следствии ЭДМ-прецессии [как было показано во 2 главе]

3.1.2 FS структура с совмещенными E+B элементами

Как было выяснено в 3.0, для дейтрона не существует магической энергии, при которой можно полностью исключить влияние МДМ-компоненты на спин-прецессию. В таком случае, как следует из выражения для частоты прецессии спина относительно импульса, нужно обеспечить условия, при которых в магнитном кольце будет происходить компенсация вклада вертикального магнитного поля в суммарную частоту МДМ. Этого можно добиться добавлением радиального электрического поля с определенным значением (см 3.0).

Рассмотрим структуру FS (рис 3.1.2.1) для исследования ЭДМ дейтрона, в которой осуществлено совмещение вертикального магнитного поля и радиального электрического в один элемент (рис 3.1.2.2).

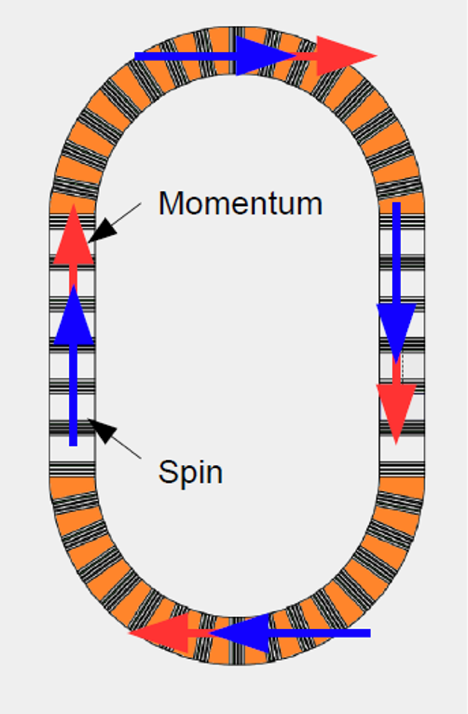
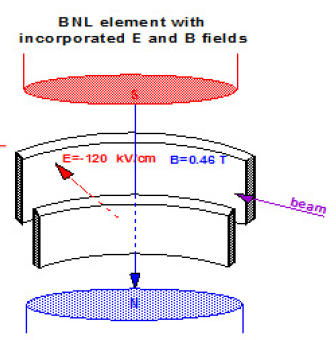
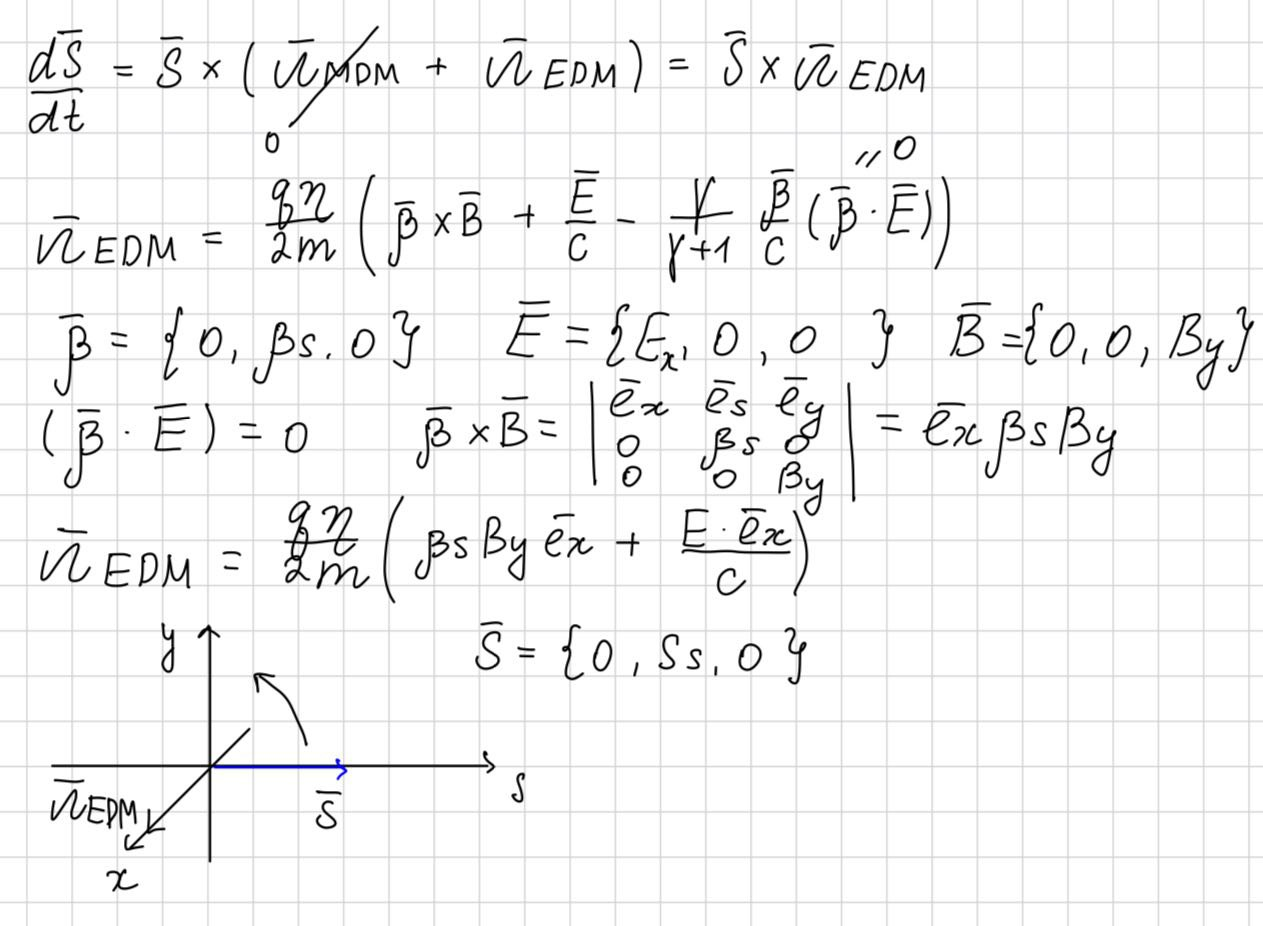


Рис 3.1.2.1. Кольцо FS, состоящее из E+B элементов

В таком случае спин-вектор частицы будет непрерывно сонаправлен с вектором ее импульса при циркуляции частицы по кольцу и не будет изменяться в следствии МДМ-прецессии.

Рис. 3.1.2.2 Схема элемента со скрещенными полями

Получается, что изменение в ориентации спин-вектора относительно направления импульса будет обусловлено ЭДМ-прецессией (рис 3.1.2.3):

Рис 3.1.2.3 изменение в ориентации спин-вектора в кольце FS в следствии ЭДМ-прецессии.

Таким образом, в структуре FS реализуется непрерывная сонаправленность спина и импульса.

3.2 Структура для исследования ЭДМ протона

3.2.1 QFS структура с раздельными E и B элементами

Структура QFS, состоящая из двух поворотных магнитов, не подходит для исследования ЭДМ протона, поскольку его МДМ-компонента будет совершать поворот относительно импульса при прохождении одной арки, из-за чего будет невозможно наблюдать приращение ЭДМ. В таком случае нужно увеличить число поворотных элементов. Тогда при прохождении каждого элемента спин-вектор частицы не будет успевать сильно измениться, что позволит накапливать ЭДМ.

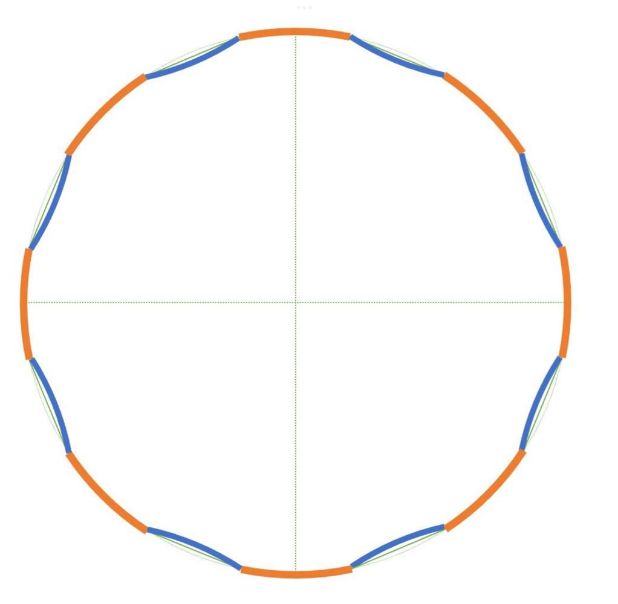
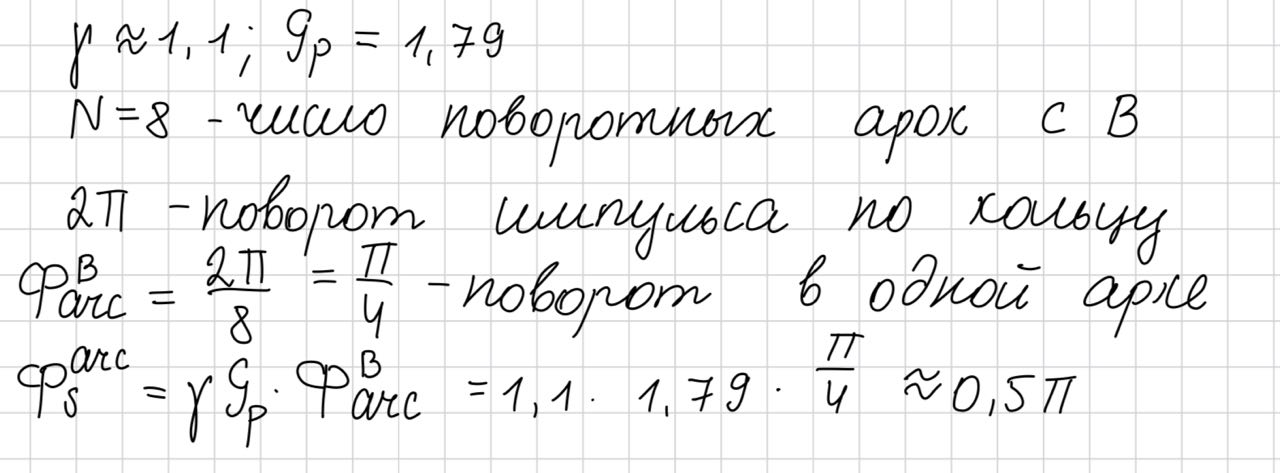
Пусть структура состоит из восьми дипольных магнитов (рис 3.2.1):

Рис 3.2.1. Структура с восьмью поворотными арками

Тогда можно посчитать угол поворота спин-вектора относительно импульса в одной арке:



Из полученного результата можно сделать вывод, что данная структура потенциально подходит для исследований, поскольку позволяет накопить спин-вектор от ЭДМ. Необходимо, чтобы прямые участки будут достаточно длинными для компенсации набранного за поворот в арке МДМ. Значение магнитного поля поворотных элементов не меняется. При некоторых значениях энергии поворотные элементы не смогут повлиять на траектории частиц, движение которых будет происходить по прямой.

3.2.2. FS структура

В 3.0 было выяснено, что для протонов можно использовать число электростатическое кольцо, при этом влияние МДМ-прецессии будет исключено. Направление оси ЭДМ-прецессии будет определяться направлением электрического поля (см 3.0).

Глава 4. Измерения

Заключение

Уравнение Т-БМТ описывает динамику спина в полуклассическом приближении. Спин частицы, помещенной во внешнее поле будет изменяться в следствии МДМ и ЭДМ прецессии. В магнитном поле будет происходить поворот спин-вектора частицы вокруг направления поля. В электрическом поле спин-вектор будет поворачиваться вокруг направления, которое определяется векторным произведением [beta x E]. В скрещенных полях спин-вектор поворачивается вокруг направления магнитного поля или вокруг направления [beta x E]. В фильтре Вина сила Лоренца, действующая на частицу, равна нулю и направление импульса частицы не меняется.

Сорт частиц определяет характер прецессии спин-вектора. Скорость прецессии спина в пределах поля зависит от значения спин-тюна частицы, который пропорционален углу смещения спин-вектора от начального положения относительно импульса. Отклонение спин-вектора позволяет накапливать ЭДМ, в случае поворота такая возможность отсутствует.

Структура накопительного кольца для подавления МДМ-прецессии отличается для разных частиц. Для протона существует “магическая энергия”, которая позволяет проводить исследования в чисто электростатическом кольце. В случае дейтрона необходимо использование кольца с магнитными и электрическими элементами. Есть две разновидности структур для дейтрона: обеспечивающие непрерывную сонаправленность вектора импульса и спина, и те в которых спин-вектор восстанавливает свое начальное положение при полном обороте по кольцу.