



Актуальность проекта по поиску ЭДМ обусловлена невозможностью объяснить Барионную асимметрию Вселенной в рамках Стандартной модели элементарных частиц. Как известно, одним из условий Барюгенеза является нарушение временной симметрии, и электрические дипольные моменты частиц, поскольку их существование её нарушает, могут быть использованы для открытия физики за рамками Стандартной модели.

Идея использования накопительного синхротрона для измерения ЭДМ не нова. Впервые она зародилась во время разработки эксперимента по детектированию аномального магнитного момента мюона в конце 1990-х годов в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (США). Это был классический метод “замороженного спина,” BNL-метод, послуживший основой целой линейки методов, к которым относится и представленный к защите метод “frequency domain”, в котором измерения частот прецессии спина в накопительном кольце являются единственными процедурами, используемыми для исследования электрического дипольного момента. Позднее были разработаны и другие подходы к измерению ЭДМ, не использующие состояние “замороженного спина” в накопителе. Однако исследования показывают, что все они уступают по точности определения ЭДМ методам с “замороженным спином.”

Заявленная в диссертации возможная точность определения ЭДМ представленным “frequency domain” методом находится на уровне  $10^{-29} e \cdot \text{см}$  за один год измерений. В конце раздела 1.2.5 сформулированы требуемые условия, при которых такая точность достижима: постоянная времени деполяризации порядка 1000 секунд; частота измерения поляризации порядка 400 Гц; начальная ошибка поляриметрии на уровне 3%. Говоря о “начальной” ошибке, А.Е. Аксентьев имеет ввиду постепенный рост

погрешности измерений, связанный с потерей частиц пучка при поляриметрии и предполагаемую интенсивность пучка  $\sim 10^{11}$  частиц.

Статистическому моделированию автор посвятил целую главу диссертации, в содержании которой мы также находим интересное предложение по частотной модуляции выборки поляриметрии, предположительно допускающее улучшение точности измерений на 40%.

Метод “frequency domain”, разработанный автором, призван решить несколько проблем, заложенных в сущности классического BNL-метода, относящегося к методам “пространственной области” (различие между методами пространственной и частотной областей проведено в разделе 1.2.3 диссертации). Основными проблемами методов пространственной области являются:

(1) Необходимость сверхточной установки оптических элементов ускорителя, для реализации *классического* состояния замороженности спина, при котором ориентация спин-вектора частицы фиксирована относительно её вектора импульса *во всех трёх* направлениях. Такое состояние А.Е. Аксентьев обозначает как “трёхмерно-замороженный спин.”

(2) Возникающая при трёхмерно-замороженном спине нестабильность ориентации оси поляризации пучка.

Список трудностей BNL-метода не исчерпывается выше обозначенными, однако именно решение этих двух проблем составляет “ядро” метода “frequency domain”: процедуру смены полярности ведущего поля ускорителя при попеременной инжекции пучка по часовой и против



часовой стрелке. При этом поля, индуцированные отличиями оптической структуры кольца от идеальной структуры, используются в качестве драйвера спин-прецессии, связанной с магнитным дипольным моментом (МДМ).

Стоит отметить *особенность* подхода представленного метода “частотной области” к проблеме смены полярности поля, которой посвящён раздел 2.4 диссертации. При возникновении подобной необходимости, первым делом возникает желание точного воспроизведения величины *магнитного поля*; однако, это желание ошибочно. А.Е. Аксентьев обращает внимание читателя на то, что при смене полярности поля нашей целью является точное воспроизведение величины *частоты* прецессии спина.

Действительно, на первый взгляд, исходя из дифференциального уравнения Томаса-БМТ, можно заключить, что восстановление величины магнитного поля *необходимо и достаточно* для восстановления величины частоты прецессии спина; однако при более детальном рассмотрении спиновой динамики частицы в кольце мы видим, что частота прецессии спина определяется энергией частицы, а та, в свою очередь, длиной орбиты последней. Соответственно, даже если допустить возможность точного (с точностью порядка  $10^{-15}$  Тл) восстановления величины ведущего поля кольца при смене его полярности, этого недостаточно для восстановления величины частоты прецессии спина, поскольку длина орбиты референсной частицы пучка меняется при каждой инъекции. Не говоря уже о трудности калибровки величины магнитного поля с такой точностью. К счастью, автор работы утверждает (и пытается подтвердить это утверждение численно), что оно и не требуется.

Ввиду важности рассматриваемого вопроса, досаден недостаток ясности изложения автора работы при постановке задачи для численного моделирования процедуры по смене полярности ведущего поля в разделе 2.4.1. Раздел начинается с утверждения, которое А.Е. Аксентьев пытается подтвердить моделированием. Уже это самое утверждение сформулировано неверно. Теоретическая постановка задачи очень трудна для восприятия, хотя можно видеть, каким образом из неё следует описанная программа моделирования.

Несмотря на это, в целом можно сказать, что проведённое исследование заслуживает внимания. Особенно это касается проведённого сравнения методов пространственной и частотной областей, ввиду того, что пространственный подход на данный момент является доминирующим.

Результаты работы могут быть использованы в работе Объединенного института ядерных исследований г.Дубна, Института физики высоких энергий (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ) г.Протвино, а также Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ) г. Саров

По теме исследований опубликовано 12 печатных изданий, из которых 5 изданы в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, и 7 — в трудах докладов международных конференций. Результаты работы были представлены на международных конференциях IPAC'17 и '19, и “Лазерные, плазменные исследования и технологии” с III по V.

Мы считаем, что диссертационная работа Аксентьева Александра Евгеньевича соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к

кандидатским диссертациям, а Александр Евгеньевич Аксентьев заслуживает присвоения ему звания кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 — “Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.”

Работа заслушана и обсуждена на семинаре отделения по ускорительному направлению НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ 21 декабря 2020 г.

Отзыв составил:

Д.ф.-м.н.



П.Н. Зенкевич

Зенкевич Павел Романович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории перспективных разработок, федерального государственного бюджетного учреждения «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

117218, г. Москва, ул. Большая Черемушкинская 25, ИТЭФ

Тел. +7 499 789 6128, email: zenkevich@itep.ru