

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ)**

29 января 2021 г. **Заседание Диссертационного совета Д 201.004.01**
Протокол № 2021-1

Стенограмма заседания диссертационного совета Д 201.004.01

**Защита диссертации Аксентьева Александра Евгеньевича
«Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного
момента дейtrona в накопительном кольце»
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника**

Председатель: председатель диссертационного совета Д 201.004.01
доктор физико-математических наук, профессор, Тюрин Николай Евгеньевич.

Секретарь: временно исполняющий обязанности учёного секретаря диссертационного совета Д 201.004.01 доктор физико-математических наук, Мочалов Василий Вадимович.

Всего членов диссертационного совета: 22 человека.

Присутствует: 20 человек.

На заседании присутствуют следующие члены диссертационного совета Д 201.004.01:

1. Тюрин Н.Е., доктор ф.-м.-н., 01.04.02 - председатель;
 2. Зайцев А.М., доктор ф.-м.н., 01.04.23 - заместитель председателя;
 3. Мочалов В.В., доктор ф.-м.н., 01.04.23 – временно исполняющий обязанности. учёного секретаря диссертационного совета;

4. Арбузов Б.А., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
5. Герштейн С.С., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
6. Денисов С.П., доктор ф.-м.н. 01.04.23;
7. Зайцев Ю.М., доктор ф.-м.н. 01.04.23;
8. Иванов С.В., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
9. Качанов В.А., доктор ф.-м.н. 01.04.23;
10. Козуб С.С. .., доктор ф.-м.н. 01.04.20;
11. Образцов В.Ф., доктор ф.-м.н. 01.04.23;
12. Петров В.А., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
13. Петрухин А.А., доктор ф.-м.н. 01.04.23;
14. Разумов А.В., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
15. Саврин В.И., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
16. Сенько В.А., доктор ф.-м.н. 01.04.20;
17. Ткаченко Л.М. доктор ф.-м.н. 01.04.20;
18. Трошин С.М., доктор ф.-м.н. 01.04.02;
19. Фещенко Ф.В., доктор ф.-м.н. 01.04.20;
20. Чесноков Ю.А., доктор ф.-м.н. 01.04.20;

Диссертационный совет Д 201.004.01 утверждён приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки №105/нк от 11 апреля 2012 года в составе 22 человек. На заседании присутствуют 20 членов совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, кворум имеется. На заседании присутствуют также научный руководитель доктор физико-математических наук Сеничев Юрий Валерьевич, научный консультант доктор физико-математических наук Полозов Сергей Маркович и официальный оппонент: кандидат физико-математических наук Филатов Юрий Николаевич.

Н.Е. Тюрин: Учёный секретарь, Рябов Юрий Григорьевич, решил уйти на пенсию. Он был учёным секретарём диссертационного совета более 40 лет, безусловно внёс большой вклад в дело аттестации научных кадров в нашем институте. Уверен, что весь наш учёный совет благодарен ему за эту большую работу, которую он вёл. Приказом по институту временно исполняющим обязанности ученого секретаря диссертационного совета назначен член диссертационного совета Мочалов Василий Вадимович.

Переходим к повестке дня: защита диссертации Александра Евгеньевича «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

В.В. Мочалов представляет материалы, имеющиеся в деле: Диссертация принята к защите 28 октября 2020 года. Протокол заседания диссертационного совета Д 201.004.01 имеется.

Соискатель, Аксентьев Александр Евгеньевич, 1992 года рождения, в 2019 году окончил аспирантуру НИЯУ «МИФИ», работает младшим научным сотрудником в Институте ядерных исследований РАН. Диссертация выполнена на кафедре электрофизических установок НИЯУ «МИФИ» в основном во время обучения в аспирантуре.

Научный руководитель - доктор физ.-мат. наук, Сеничев Юрий Валерьевич, ведущий научный сотрудник отдела ускорительного комплекса Института ядерных исследований РАН, а научный консультант - доктор физ.-мат. наук, Полозов Сергей Маркович, доцент кафедры электрофизических установок НИЯУ «МИФИ».

Официальные оппоненты: Андрианов Сергей Николаевич, доктор физ.-мат. наук, профессор СПбГУ (отсутствует по уважительной причине, положительный отзыв имеется), и Филатов Юрий Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент МФТИ и заведующий лабораторией физики ускорителей.

Ведущая организация НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, представила положительный отзыв, подписанный доктором физ.-мат. наук ведущим научным сотрудником лаборатории перспективных разработок Зенкевичем Павлом Романовичем.

Соискатель имеет 12 работ по теме диссертации, в том числе 5 работ, опубликованных в журналах, которые индексируются в Web of Science.

Н.Е. Тюрин: Хорошо, спасибо. Есть вопросы по этой части? Нет вопросов? Переходим к выступлению. Пожалуйста, Александр Евгеньевич, Вам слово.

А.Е. Аксентьев: Диссертация посвящена изучению спин-орбитальной динамики пучка в накопительном кольце и относится к одному из разделов ускорительной физики. Интерес к поиску электрических дипольных моментов (ЭДМ) обусловлен возможностью использования их в качестве инструментов для подтверждения одной из конкурирующих теорий за гранью Стандартной модели. Это связано с тем, что ЭДМ элементарных частиц, если они существуют, то они нарушают временную симметрию, а значит являются одним из условий Бариогенеза, т.е. позволяют объяснить Барионную Асимметрию Вселенной.

Поиск ЭДМ был начат более 50 лет назад, и с тех пор было проведено множество всё более точных экспериментов; на данный момент ЭДМ

нейтрона (его верхняя граница) определяется на уровне 10^{-26} е см. Однако большинство экспериментов проводятся на заряженно-нейтральных частицах; ЭДМ же заряженных частиц можно измерить в накопительном кольце. В связи с чем целью диссертации была разработка метода поиска электрического дипольного момента частицы в накопительном кольце, позволяющего достичь точность 10^{-29} е см.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- (1) Разработать метод измерения ЭДМ дейтрана на основе измерений частоты прецессии спина в накопительном кольце.
- (2) Проанализировать требования к магнитооптической структуре кольца-накопителя для поиска ЭДМ.
- (3) Исследовать спин-декогеренцию пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного спина.”
- (4) Исследовать влияние несовершенства оптической структуры кольца на спин-орбитальную динамику.
- (5) Промоделировать процедуру калибровки нормализованной частоты прецессии спина (также она называется “спин-тюн”) при смене полярности ведущего поля.
- (6) Изучить статистические свойства предложенного метода измерения электрического дипольного момента.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- (1) Впервые предложен метод измерения ЭДМ дейтрана, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина в накопительном кольце, с ограничением по точности, оцениваемым на уровне 10^{-29} е см.
- (2) Изучена спин-орбитальная динамика дейтронного пучка в окрестности состояния “замороженного спина.”
- (3) Предложен метод калибровки среднего по пучку спин-тюна, позволяющий уменьшить вклад систематических ошибок.
- (4) Введено определение эффективного значения Лоренц-фактора частицы, необходимое для определения зависимости спин-тюна частицы от её координат в фазовом пространстве.
- (5) А также, сделаны статистические оценки предельной чувствительности измерения ЭДМ предложенным методом.

Разработанный метод представляет практический интерес с точки зрения планирования экспериментов по поиску ЭДМ на различных ускорителях, в том числе на ускорительном комплексе NICA ОИЯИ.

Результаты работы были апробированы во время исследований по оптимизации времени когерентности спина при помощи секступольных полей на ускорительном комплексе COSY (находящемся в Исследовательском центре “Юлих”). Результаты работы вошли в подготавливаемый коллаборацией CPEDM для CERN отчёта (входящего в Yellow Book) под названием: «Feasibility study for an EDM Storage Ring». Основные результаты работы докладывались на международных конференциях IPAC 2017 и 2019 годов, а также конференциях LaPlas с III по V и конференциях коллаборации JEDI и студенческих семинарах Исследовательского центра “Юлих.”

На защиту выносятся:

- (1) Метод измерения электрического дипольного момента дейtronов.
- (2) Принцип построения магнитооптической структуры накопительного кольца.
- (3) Результаты исследования спин-декогеренции пучка дейtronов в окрестности состояния “замороженного спина.”
- (4) Результаты исследования влияния различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
- (5) Метод калибровки нормализованной частоты прецессии спина.
- (6) Результаты исследования систематических ошибок в различных методах поиска ЭДМ.
- (7) А также результаты исследования статистических свойств разработанного метода.

Технической базой исследования служило накопительное кольцо COSY. Это чисто магнитное кольцо, поэтому, к сожалению, для дейtronов, у которых отрицательное значение аномального магнитного момента, в этом кольце невозможно создать *классические* условия замороженности спина; тем не менее, это уникальная установка для проведения экспериментов с поляризованными пучками, состоящая из источника поляризованных протонов и дейtronов, инжекторного циклотрона JULIC, самого кольца COSY длиной 184 м, двух мишеней (внешней и внутренней), и также на COSY есть два вида охлаждения: электронное (работающее на всём диапазоне энергий от 0.3 до 3.7 ГэВ) и стохастическое (работающее на всём диапазоне энергий от 1.5 ГэВ).

Численное моделирование проводилось с помощью пакета программ COSY Infinity. Это разработка Мартина Берца и Киоко Макино из университета штата Мичиган. Код основан на дифференциальной алгебре и позволяет вычислять трансфер-матрицы элементов до (потенциально) любого порядка разложения ряда Тэйлора. Помимо возможности определять такие характеристики кольца как функции Твисса, это трекинговый код, учитывающий спиновую динамику частиц.

Спин-трекинг в COSY Infinity проводится на основании двух трансфер-матриц: орбитальной, M , и спиновой, A . Орбитальная трансфер-матрица вычисляется единожды, и затем на всём диапазоне оборотов применяется без изменений. Спиновая трансфер-матрица зависит от координаты частицы в фазовом пространстве, и поэтому на каждом обороте вычисляется отдельно.

Представленный к защите метод основан на принципе “замороженного” спина, поэтому вкратце о том, что такое “замороженный” спин. Спиновая динамика частицы, помещённой в электромагнитное поле описывается уравнением Томаса-Баргмана-Мишеля-Телегди. Здесь оно представлено в форме, учитывающей как спин-прецессию за счёт магнитного дипольного момента, так и за счёт электрического дипольного момента.

Предположим теперь, что электрический дипольный момент не существует и омега-ЭДМ равна нулю. В этом случае, если мы создаём в ускорителе такие условия, что омега-МДМ также стремится к нулю в системе центра масс пучка (соответственно в лабораторной системе координат она стремится к циклотронной частоте), мы получаем ситуацию при которой ориентация вектора импульса частицы фиксирована относительно её вектора импульса, и такую ситуацию мы называем “замороженным спином.”

В кольце это выглядит следующим образом: красным обозначен спин-вектор частицы, синим её вектор импульса, и в *классическом* методе “замороженного спина” в каждой точке кольца эти векторы сонаправлены.

Теперь предположим, что электрический дипольный момент d отличен от нуля. В этом случае, вектор поляризации пучка начнёт медленно поворачиваться вокруг радиальной оси. Постепенно он будет отклоняться от плоскости замкнутой орбиты, и наблюдая за этим процессом можно судить о величине ЭДМ. На этом основаны все методы, основанные на принципе замороженного спина.

На данном слайде представлена возможная магнитооптическая структура кольца, реализующая классическое состояние замороженности спина. В арках расположены цилиндрические спин-ротаторы, это $E+B$ элементы, создающие как электростатическое так и магнитное поля.

Кольцо рассчитано на инжекцию дейtronов на энергию 270 МэВ; длина кольца 146 м, и циклотронная частота, соответственно, 1 МГц.

Говоря о “замороженном спине,” необходимо различать две концепции: трёхмерно-замороженный спин и двухмерно-замороженный спин.

Оригинальная концепция 3D-замороженного спина предполагает полное зануление всех трёх компонент частоты спин-прецессии за счёт магнитного дипольного момента. У этой концепции есть ряд негативных характеристик; к ним относятся следующие:

- (1) Во-первых, когда мы полностью убираем МДМ частоту спин прецессии, направление оси поляризации пучка определено только электрическим дипольным моментом. Электрический дипольный момент — малая величина (если не равная нулю), и поэтому возникает проблема дестабилизации оси поляризации, потому что любое локальное возмущение электромагнитного поля способно отклонить ось поляризации от её изначального направления.
- (2) Также, для того, чтобы реализовать 3D-замороженный спин, необходима большая точность установки оптических элементов (потому что, если они установлены недостаточно точно, возникает радиальная компонента магнитного поля, которая будет нарушать 3D-замороженность спина).
- (3) Но, этим дело не ограничивается. Даже если нам удалось реализовать 3D-замороженный спин возникает следующая проблема: трудность поляриметрии. Это связано с тем, что поскольку теперь спин-прецессия обусловлена одним лишь ЭДМ, она происходит с очень маленькой угловой скоростью, поэтому через один измерительный цикл отклонение поляризации от плоскости замкнутой орбиты на очень малый угол, который трудно измерить. Для справки, этот угол составляет порядка микrorадиан за 1000 секунд измерительного цикла.

В противовес была предложена концепция 2D-замороженного спина, используемая в представленном методе.

В этой концепции поляризации пучка позволено свободно прецессировать вокруг радиальной оси, которая является выделенной осью поляризации. Эта ось задана самими неидеальностями машины, т.е. со стороны спиновой динамики не возникает дополнительных требований на точность установки оптических элементов. И также нет проблем с поляриметрией, потому что в этом случае у нас есть хороший осциллирующий сигнал, который можно легко измерить.

Тем не менее, у всех методов измерения ЭДМ в накопительном кольце есть ряд проблем. К ним относятся:

- (1) Возмущения спиновой динамики, связанные с бетатронными колебаниями частиц.
- (2) Спин-декогеренция частиц пучка, и в частности — в окрестности состояния “замороженного спина.”
- (3) Наличие МДМ-компоненты спин-прецессии, связанной с неидеальностями оптической структуры ускорителя.
- (4) И связанная с предыдущей проблема смены полярности ведущего поля, требуемой для сокращения МДМ-компоненты частоты спин-прецессии в конечном выражении оценки ЭДМ.

Начнём по порядку. Проблема возмущения спин-динамики состоит в следующем. В методе оценка ЭДМ производится путём сравнения двух частот спин-прецессии пучка: в первом случае пучок движется в ускорителе по часовой стрелке, во втором против часовой. Частоты спин-прецессии пучка определяются путём фитирования данных поляриметрии гармонической функцией; при этом, решение уравнения Т-БМТ показывает, что для бетатрон-осциллирующей частицы амплитуда фитируемого сигнала является переменной величиной, а фитируем данные поляриметрии мы функцией с постоянными параметрами, в связи с чем возникает ошибка несоответствия фитируемых данных и фитирующей функции, и систематическая ошибка определения параметров модели.

Тем не менее, численное моделирование показывает, что возмущения амплитуды сигнала:

- (1) Во-первых, на два порядка меньше случайной ошибки поляриметрии, и, соответственно, общая ошибка не должна проявлять статистически значимого систематического характера.
- (2) Также, возмущения амплитуды сигнала в первую очередь влияют на оценку амплитуды, и опосредованно влияют на оценку частоты через коэффициент аттеньюации 10.
- (3) К тому же, данная систематическая ошибка относится к тому классу систематических ошибок, которые контролируются при определённых методах измерения (к которым относится представленный метод). То есть, мы можем уменьшать её до любой необходимой величины, свободно.

Проблема спин-декогеренции состоит в том, что спин-декогеренция это механизм деполяризации пучка, основанный на конечности фазового объёма пучка.

Со спин-декогеренцией борются путём применения секступольных полей; данные графики представляют численное моделирование такого подавления спин-декогеренции в двух случаях: в первом случае частицы совершили бетатронные колебания в горизонтальной плоскости, во втором случае в вертикальной.

Чёрные графики представляют зависимость нормализованной частоты спин-прецессии от амплитуды бетатронных колебаний в случае выключенных секступолей; красные — в случае со включёнными; и как видно, при включении секступолей пропадает параболическая зависимость частоты спин-прецессии, а остающаяся линейная зависимость усредняется в процессе синхротронных колебаний.

МДМ-компоненты спин-прецессии, связанная с неидеальностями ускорителя — это основная систематическая ошибка данного эксперимента. Под “неидеальностями ускорителя” мы здесь понимаем преимущественно наклоны поворотных магнитов вокруг оптической оси (в связи с которыми возникает радиальная компонента магнитного поля, вращающая вектор поляризации в той же плоскости, в которой её должен вращать электрический дипольный момент, т.е. создаётся фальш-сигнал).

Однако, моделирование показывает, что эта ошибка линейно зависит от среднего угла наклона элементов и не зависит от их конкретного распределения; поэтому, когда мы запускаем пучок сначала по часовой стрелке, а потом против часовой, в ожидании эта систематическая ошибка имеет одинаковое значение (модуль этого значения), и может быть сокращена в конечной статистике.

Но для того, чтобы это сделать, необходимо сменить полярность ведущего поля, и проблема здесь заключается в том, чтобы сделать это таким образом, чтобы в каждом измерительном цикле восстановить величину систематической ошибки на уровне не хуже 10^{-7} рад/сек. 10^{-7} рад/сек — это оцениваемая точность определения частоты спин-прецессии за один измерительный цикл.

Идея метода калибровки состоит в том, чтобы наблюдать и корректировать частоту спин-прецессии в плоскости замкнутой орбиты. В этой плоскости практически нет спин-прецессии за счёт электрического дипольного момента и вся спин-прецессия происходит за счёт магнитного дипольного момента. В свою очередь, отношение между вертикальной и радиальной компонентами

частоты спин-прецессии определяется средним углом наклона элементов, а величина этой частоты определяется величиной эффективного Лоренц-фактора частицы. Поэтому, если нам удаётся уменьшить различие между вертикальными компонентами частоты спин-прецессии в соответствующих циклах, моделирование показывает, что различие между радиальными компонентами в соответствующих циклах также не превосходит 10^{-7} рад/сек.

По результатам статистического моделирования было сделано два основных вывода:

- (1) Полезная длительность измерительного цикла не превосходит трёх постоянных времени жизни поляризации.
- (2) За один измерительный цикл в 1000 секунд, при определённых условиях (к которым относится интенсивность пучка 10^{11} частиц), можно получить точность определения частоты спин-прецессии на уровне 10^{-7} рад/сек. Это позволяет определить ЭДМ с точностью 10^{-29} е см за один год измерений. Под “одним годом измерений” мы подразумеваем 6000 часов времени работы.

Также необходимо отметить результаты исследований, которые проводились на COSY, которые релевантны данной работе. Среди них:

- (1) Высокоточное измерение нормализованной частоты спин-прецессии; была получена точность определения спин-тюна на уровне 10^{-10} .
- (2) Исследования по юстировке квадрупольей с помощью пучка; получена точность определения положения квадрупольей до 0.2 мм.
- (3) Также, исследования по оптимизации времени когерентности спина, в которых было получено время жизни поляризации свыше 1000 секунд. Поскольку это важные исследования, о них стоит поговорить отдельно.

Эксперимент по оптимизации времени когерентности спина на COSY проводился следующим образом. В одну из арок кольца были расположены три секступольных магнита, соответственно в максимумах функции дисперсии, и вертикальной и горизонтальной бета-функций. Затем градиенты этих секступолей варьировались, и варьировались по-отдельности. При этом силы двух других секступолей были фиксированы на найденных ранее оптимальных значениях.

По результатам можно видеть, что время когерентности спина (здесь оно представлено в секундах) максимально при некотором значении градиента секступоля, и падает при удалении от этого значения.

Результаты работы следующие:

- (1) Был разработан метод измерения ЭДМ дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина частицы при движении в накопительном кольце.
- (2) Предложен принцип построения магнитооптической структуры кольца-накопителя для поиска ЭДМ дейтрона.
- (3) Получены результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного спина.”
- (4) Исследовано влияние различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
- (5) Проведено численное моделирование процедуры калибровки нормализованной частоты спин-прецессии.
- (6) А также, проведена оценка статистических свойств разработанного метода разработанного метода измерения ЭДМ.

Н.Е. Тюрин: Вопросы, пожалуйста.

Ю.А. Чесноков: Собственно говоря, предлагается метод реализации состояния “замороженного спина”. Значит, это будет совершенно новый ускоритель? Измерение можно будет реализовать в рамках того же COSY или NICA, или нужно будет с нуля строить ускоритель?

А.Е. Аксентьев: В случае полностью замороженного спина необходимо новое кольцо, однако у нас есть концепция квази-замороженного спина. Сейчас я открою [перелистывает слайды]... Вот что я имею ввиду под *классическим* “замороженным спином”: это когда в каждой точке накопительного кольца спин-вектор частицы и её вектор импульса сонаправлены. В “квази-замороженном спине” это не так, они сонаправлены только в среднем, в какой-то точке. Спин-вектор, отклоняясь от вектора импульса при движении по кольцу, приходит в какую-то точку, в которой мы измеряем, в одном и том же направлении на каждом обороте. Вот такую концепцию, “квази-замороженного спина,” можно реализовать в существующих ускорителях.

Н.Е. Тюрин: Ещё вопросы.

А.М. Зайцев: У меня два вопроса. Во-первых, как зависит точность определения ЭДМ от неопределённости магнитного дипольного момента?

А.Е. Аксентьев: Я предполагаю, что, если я правильно понял вопрос, неопределённость измерения магнитного дипольного момента входит в член систематической ошибки оценки электрического дипольного момента $\omega_{edm} =$

$\omega_{edm} + \frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_\omega^+ - (\omega_{mdm} - \omega_{mdm})$ (последнее слагаемое, заключённое в скобки), и в нашем методе нет дополнительных средств её контроля. Нужны дополнительные методы, для того, чтобы контролировать эту статистическую ошибку.

А.М. Зайцев: А ещё предлагается метод измерения электрических дипольных моментов в электростатическом кольце. В этом плане точность сопоставима?

А.Е. Аксентьев: ЭДМ можно измерять в чисто электростатическом кольце, но там другая частица; там протон. Для дейтрана нужно комбинированное кольцо, потому что у него аномальный магнитный момент отрицательный. Поэтому мы должны разделять методы в соответствии с частицами; в электростатическом кольце другая частица.

Для дейтронов существует несколько методов. Один из них — это “полностью замороженный спин” предложенный в БНЛ, в котором не измеряется *частота*; там 3D-замороженный спин, и мы измеряем очень малый угол. То есть, это ещё одно деление методов, в соответствии с измеряемой величиной. Методы, основанные на измерении частоты — наиболее точные.

Есть метод, основанный на измерении частоты, как и в нашем случае, но в этом методе добавляется дипольный магнит; магнитный диполь с радиальным магнитным полем, который создаёт спин-прецессию, но в нём точность должна быть хуже. У него есть большая проблема: необходимо измерять две величины: частоту спин-прецессии и разделение замкнутых орбит пучков. Это является проблемой, потому что во-первых у нас уже не одна величина, а две (появляются дополнительные неопределённости), а во-вторых, есть проблема с определением замкнутых орбит пучков: их необходимо измерять с точностью 10^{-12} м. Теоретически, такие возможности есть, но практически они нигде, кажется, ещё не использовались. То есть, мы предполагаем, что этот метод не может достичь той же точности 10^{-29} .

А.М. Зайцев: А что мешает провести измерения ЭДМ на COSY?

А.Е. Аксентьев: Мне кажется, что ничего не мешает. До того, как я начал принимать участие в экспериментах на COSY, была идея начать мерить именно этим методом. Но на COSY более популярен метод 3D-замороженного спина и поэтому, насколько я понимаю, просто не захотели. Также, на COSY есть нежелание входить в резонанс. Сейчас там используются другие методы измерения ЭДМ, которые не находятся в “замороженном спине,” то есть вектор поляризации там свободно прецессирует вокруг ведущего поля. “Замораживать” спин-прецессию в горизонтальной плоскости на COSY не хотят. Основная же проблема в том, что ускоритель COSY собираются закрыть.

Н.Е. Тюрин: Есть ещё вопросы? Нет? Спасибо большое, присаживайтесь. Теперь слово предоставляется научному руководителю Сеничеву Юрию Валерьевичу.

Ю.В. Сеничев: Ну, мне очень приятно было работать с Александром; он блестяще закончил «МИФИ», потом год проходил практику после пятого курса, а уже в аспирантуре мы с Сергеем Марковичем Полозовым решили, что он должен поработать на реальной установке, и он четыре года проработал на COSY.

Сама обозначенная тема его докторской очень интересна. Я считаю, что обычно мы занимались ускорителями, для того, чтобы получить ту или иную светимость для определённых экспериментов. В данном случае, ускоритель — это сама по себе экспериментальная установка, и играет роль мониторирования изучаемого эффекта.

Основные вещи, которые были сделаны Александром за это время — это во-первых отказ от 3D-замороженного спина. Это принципиально важно, поскольку при 3D-замороженном спине точность на установку элементов в ускорителе составляла 10^{-14} м. Ничего подобного никто никогда не знал, то есть, сделать это не реально. В данном методе это уже не используется.

Что касается NICA — почему в названии докторской мы написали «для дейtronов» и не поместили слово «протоны» — Александр правильно сказал, что для протонов должна быть электростатическая машина. Сейчас CERN хочет строить протонную машину, электростатическую, а в Дубне мы можем сделать измерения для дейtronов. И кольцо — очень правильный был вопрос: «нужно ли специально строить кольцо?» — в нашей концепции, “квази-замороженного спина”, не нужно строить. Поэтому в Дубне был сделан обширный доклад, после которого администрация заинтересовалась измерением ЭДМ на NICA. В итоге, я говорю все эти вещи потому, что мы с Александром Евгеньевичем сейчас продолжаем работать над NICA, т.е. весь данный эксперимент мы хотим перенести на NICA, и, наверное, получить пионерские результаты по получению значений ЭДМ. Вот это кратко. (Полный отзыв научного руководителя Сеничева Ю.В. имеется в деле)

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Теперь у нас по докторской есть научный консультант, Сергей Маркович Полозов.

С.М. Полозов: В дополнение к тому, что сказал научный руководитель, хочу сказать, что Александр — человек активный, наверное, из всех моих аспирантов он наиболее самостоятельный за всю мою жизнь. Его никогда не приходилось подталкивать, понуждать и так далее; он в общем-то всё делает самостоятельно. Кроме того, что он сейчас работает в ИЯИ, он у нас на кафедре

читает очень тяжёлый курс по математике, специальные главы, чем очень сильно нам помогает. Так что, я надеюсь, что NICA заработает, и то, что было получено при моделировании можно будет проверить экспериментально. Считаю, диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а Аксентьев Александр Евгеньевич заслуживает присвоения ему звания кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Итак, теперь переходим к оглашению письменных отзывов. У нас есть таких отзывов два: это МИФИ, где выполнялась работа, и ИТЭФ, где она рецензировалась. Пожалуйста.

В.В. Мочалов: Зачитывает заключение организации, в которой была выполнена работа — НИЯУ «МИФИ», в стенограмме отмечены только недостатки (Заключение есть в диссертационном деле).

К недостаткам работы можно отнести:

- (1) В разделе 2.2.4 не рассмотрен вопрос о причинах невозможности одновременной оптимизации всех трёх семейств секступолей; не ясно, это следствие только использованного численного метода, или же физических процессов.
- (2) В разделе 2.2.6 нет объяснения, каким образом секступольные поля унифицируют не только нормализованную частоту прецессии спина, но также и направления осей стабильного спина частиц пучка.
- (3) В разделе 2.4.3 ничего не сказано о характере калибровочных графиков процедуры по смене полярности ведущего поля, а именно множественности значений разницы между радиальными компонентами частоты прецессии спина пучков, движущихся в противоположных направлениях в кольце, при одном и том же значении разницы вертикальной компоненты.

Принято следующее решение:

Диссертация Аксентьева Александра Евгеньевича «Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 — Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Диссертация была заслушана и одобрена на семинаре института ЛаПлаз НИЯУ «МИФИ» 26 февраля 2020 года. На нём присутствовало 17 человек; результаты голосования: «за» — 17, «против» — нет.

Н.Е. Тюрин: У Вас есть, что ответить?

А.Е. Аксентьев: По поводу первой проблемы: я не нашёл объяснения почему я не смог оптимизировать все три семейства сектуполей. В предшествующих моей диссертации работах была та же самая проблема, в результате удалось оптимизировать только два семейства сектуполей.

По поводу второй проблемы: я хорошо рассмотрел этот процесс унификации, и у меня есть отдельный раздел, посвящённый численному анализу этого механизма, но я не могу сказать, что у меня есть физическое понимание этого процесса.

По третьей проблеме я могу сказать, что эти графики двумерные, но должны, по идее, быть трёхмерные. Там есть дополнительный параметр, который эти графики не учитывают, который влияет на результаты.

Н.Е. Тюрин: Теперь отзыв ИТЭФ.

В.В. Мочалов: Зачитывает отзыв ведущей организации. В стенограмме приведены основные аспекты (Отзыв ведущей организации есть в диссертационном деле).

Ведущая организация НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ в своём положительном отзыве сделала следующее замечание: «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 Объединённого института ядерных исследований г. Дубна, Института физики высоких энер-

гий (НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ) г. Протвино, а также Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (ВНИИЭФ) г. Саров.

И в заключении: «диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а Аксентьев А.Е. заслуживает присвоения ему звания кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.»

Отзыв составлен доктором физико-математических наук Павлом Романовичем Зенкевичем.

А.Е. Аксентьев: Критика моих писательских способностей обоснована. На тот момент, когда я писал диссертацию, я умел писать хуже, чем я делаю это сейчас. Сейчас я это делаю лучше, и надеюсь буду ещё улучшаться в этом направлении.

Н.Е. Тюрин: Теперь переходим к заключениям официальных оппонентов. Первым, давайте, отзыв отсутствующего оппонента, Анрианова Сергея Николаевича.

В.В. Мочалов: Зачитывает отзыв отсутствующего по уважительной причине оппонента Анрианова С.Н. В стенограмме приведены основные аспекты (Отзыв есть в диссертационном деле).

Представленная к защите работа, несомненно, является актуальной. К недостаткам работы можно отнести:

- (2) В разделе 2.2.4 утверждается невозможность одновременной оптимизации всех трёх семейств сектуполей, однако не ясно есть ли у этого утверждения достаточные основания.
- (3) В разделе 2.2.6 отмечается, что использование сектупольных полей унифицирует как частоты прецессии спина, так и направления осей поляризации частиц; опять же не указаны возможные причины этого явления.
- (4) Не рассматриваются эффекты спиновой динамики пучка, которые влияют на результат измерения ЭДМ, хотя данное направление, несомненно, актуально.

В целом, представленная к защите диссертация в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а сам соискатель заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физ.-мат. наук.

Н.Е. Тюрин: Ну, Александр Евгеньевич, Вам слово. Признаёте замечания?

А.Е. Аксентьев: По третьему пункту замечаний — я признаю, и буду рассматривать дальше эти эффекты. И те эффекты, по поводу которых я не могу сейчас хорошо ответить, я в диссертации обозначил как проблемы и до определённой степени описал. Я знаю об этих проблемных местах диссертации.

Н.Е. Тюрин: Теперь Юрий Николаевич Филатов, пожалуйста.

Ю.Н. Филатов: Я хотел бы тоже кратко отметить самое важное, потому что многое уже прозвучало. Во-первых, я для себя отметил, что разработанный метод — это попытка не обойти, а именно *заставить работать* неидеальности ускорителя. Если же говорить о критике, то (зачитывает из отзыва) «в разделе 2.2.4 упоминается линейная зависимость частоты прецессии спина не контролируемая подстройкой градиентов секступолей. Сделано предположение о возможных физических основаниях этого, но автор признаёт, что точно не знает причину этого.»

Но в целом, работа оставляет очень хорошее впечатление. Работа в полной мере отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, и заслуживает присвоения звания кандидата наук по специальности физика пучков заряженных частиц. (Полный отзыв имеется в деле)

Н.Е. Тюрин: Спасибо, Юрий Николаевич. Вы не настаиваете на дискуссии?

Ю.Н. Филатов: Нет, я думаю, я уже ответы услышал.

Н.Е. Тюрин: Тогда переходим к общей дискуссии. Есть ли желающие высказаться? Давайте, Сергей Владиславович.

С.В. Иванов: Я хотел бы обратить внимание, что мы сейчас занимаемся научно-квалификационной работой. Сам научный объект исследования достаточно сложный, экзотичный, но если принять во внимание то, что человек только что закончил аспирантуру, и речь идёт о том, чтобы мы присудили ему квалификацию, то этот объект в этом отношении, по-моему, ни у кого не вызывает вопросов. Хотя бы по этой причине, призываю голосовать за присуждение учёной степени.

Н.Е. Тюрин: Хорошо, спасибо. Есть ещё? Да, Александр Михайлович.

А.М. Зайцев: Я хочу, собственно, высказаться по актуальности. Поиск электрических дипольных моментов — это задача очень интересная, важная; достаточно сказать, что ограничения на так называемые аксионы — огромный

кусок нашей физики, — они применимы и к поиску дипольных моментов. К сожалению, соответствующие спектры мы не можем с высокой точностью измерить.

Нужно сказать, что несколько небрежно и в самой диссертации, и в отзывах прозвучал переход от электрических дипольных моментов сразу к барийонной асимметрии, пропуская огромный пласт интересной физики, о которой стоило бы упомянуть. Так или иначе, конечно, это очень актуальная проблема.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Нет больше желающих? Ну тогда давайте дискуссию мы закроем, и Вам (обращаясь к соискателю) предоставляется заключительное слово.

А.Е. Аксентьев: Я хотел бы поблагодарить научных руководителей: Юрия Валерьевича Сеничева и Сергея Марковича Полозова за научное руководство, и те большие усилия, которые они вложили в меня, а также коллектив JEDI-коллaborации, в которой я работал, потому что большая часть диссертации возникла как моя попытка доказать, что наш метод всё-таки лучше, чем 3D-замороженный спин, и если бы этих дискуссий не было, то и диссертации тоже бы не было.

Н.Е. Тюрин: Спасибо. Так, теперь мы с вами должны выбрать счётную комиссию. Есть предложение: А.В. Разумов, Л.М. Ткаченко и В.А. Сенько.

(Комиссия избрана)

Объявляется перерыв на голосование.

После перерыва.

В.А. Сенько: Результаты счётной комиссии: раздано бюллетеней - 20, осталось не раздано - 2, после вскрытия в урне оказалось - 20, «за» присуждение учёной степени кандидата физ.-мат. наук - 20, «против» - нет, недействительных бюллетеней нет.

Н.Е. Тюрин: Давайте теперь открытым голосованием утвердим результаты голосования.

Диссертационный совет утверждает результаты голосования.

Н.Е. Тюрин: Александр Евгеньевич, я Вас поздравляю с успешной защитой, желаю Вам новых целей.

Теперь мы должны принять открытым голосованием Заключение диссертационного совета о научном значении диссертации. Оно подготовлено, члены совета ознакомились. Есть замечания? Нет замечаний? Тогда давайте за него проголосуем.

Проходит открытое голосование:

Н.Е. Тюрин: Есть кто против? Нет? Тогда принято. Ну что-ж (обращаясь к соискателю), всего Вам самого доброго; заседание наше завершено.

Заседание диссертационного совета завершено.

Председатель
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук,
профессор



Н.Е. Тюрин

Вр. и.о. учёного секретаря
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

Мочалов В.В. Мочалов

29 января 2021 г.