

## ОТЗЫВ официального оппонента на диссертацию

Салеева Артёма Владимировича

на тему «Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах»

по специальности 01.04.16 — «физика атомного ядра и элементарных частиц»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

### Актуальность и научно-практическая значимость темы исследования

Наши представления о мире полны пробелов, не миновали они и загадку асимметрии частиц и античастиц в видимой части вселенной. Одно из объяснений заключается в работе механизмов нарушения CP-инвариантности при неравновесном расширении вселенной. Однако, имеющиеся на сегодня экспериментальные данные о нарушении CP-инвариантности из осцилляций каонов и В-мезонов приводят к меньшей на девять порядков величине барионной асимметрии, чем наблюдается. Этот факт является указанием на новую физику за пределами Стандартной модели, например на CP-нарушения в квантовой хромодинамике (КХД).

Следствием нарушения CP-инвариантности в КХД является на несколько порядков больший электрический дипольный момент (ЭДМ) нуклонов, чем предсказываемый Стандартной Моделью  $\sim 10^{-31}e \cdot \text{см}$ . На сегодняшний день самые жесткие верхние пределы были установлены на ЭДМ нейтральных частиц, например для нейтрона был достигнут предел  $3 \times 10^{-26}e \cdot \text{см}$  (J. M. Pendlebury (Sussex U.) et al., Sep 15, 2015, 22 pp.). В настоящее время не существует прямого измерения ЭДМ дейтрона  $10^{-24}e \cdot \text{см}$  или протона  $2.1 \times 10^{-23}e \cdot \text{см}$ , пределы на которые рассчитываются из экспериментов с нейтральными частицами, например величина предела на ЭДМ протона рассчитывается из предела на ЭДМ атома  $^{199}\text{Hg}$ .

Новый амбициозный эксперимент по изучению ЭДМ протона и дейтрона на накопительных кольцах запланирован в Юлихе (Германия) в коллаборации JEDI (Julich Electric Dipole moment Investigations). На накопителе COSY отработаны методики по измерению ЭДМ и в 2018 году планируется провести первые прямые измерения ЭДМ дейтрона с точностью  $10^{-19} \div 10^{-21}e \cdot \text{см}$  с дальнейшей модернизацией COSY и улучшением верхнего предела до  $10^{-24}e \cdot \text{см}$  к 2023 году. Общий метод измерения ЭДМ заряженных частиц на накопительных кольцах заключается в измерении прецессии их спина в специальных конфигурациях электромагнитных полей накопителя.

Основная сложность подобных экспериментов на накопительных заключается в скрупулёзном учете и исключении систематических погрешностей. В частности — отделении вклада магнитно-дипольной прецессии в искомый ЭДМ эффект, учёт неидеальностей магнитной структуры накопителя. Целью данного диссертационного исследования является разработка теоретического аппарата, его экспериментальной и численной проверки для определения вклада паразитной магнитно-дипольной прецессии в наблюдаемый

ЭДМ эффект в присутствии неидеальности магнитной структуры накопителя. Всё сказанное ранее делает данную работу актуальной и своевременной.

На защиту вынесены следующие положения (формулировки из диссертационной работы):

1. Разработка теории затухания вертикальных осцилляций спина в резонансном радиочастотном режиме.
2. Теоретическая разработка нового метода прямого измерения интегральных паразитных радиального и продольного магнитного полей в накопительных кольцах с помощью модуляции спинтьюна частиц.
3. Результаты численного моделирования режимов работы статического соленоида, при которых происходит возбуждение коллективного бетатронного движения пучка.
4. Теоретическая разработка метода контроля относительной фазы радиочастотного поля ротатора спина и фазы прецессии спина в накопительном кольце.

Конкретные задачи по проблемам поиска ЭДМ напрямую связаны с экспериментами, планируемыми коллаборацией JEDI на ускорителе COSY.

## Структура и оформление диссертационной работы

Диссертационная работа А.В. Салеева имеет объем 134 страницы и состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Она содержит 10 таблиц и 34 рисунка. Список литературы включает 65 наименований. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, и 3 — в тезисах докладов, из них 6 работ входят в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

**Введение** посвящено обоснованию актуальности темы исследования: сделан краткий обзор текущего теоретического и экспериментального состояния исследований по электрическим дипольным моментам нуклонов; обоснована научная и практическая значимость работы; сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** описана методика измерения ЭДМ при помощи радиочастотного фильтра Вина на установке COSY. Выполнены расчёты для случая точного и неточного параметрического резонанса. Поскольку на величину резонансного эффекта от ЭДМ существенное влияние оказывает относительная фаза между радиочастотным полем фильтра Вина и углом прецессии спина заряженной частицы, в конце главы описана методика и эксперименты по её измерению и стабилизации. Достигнутый уровень стабилизации 0.2 рад позволит в дальнейшем измерить ЭДМ дейтрона с точностью лучше  $10^{-24} e \cdot \text{см}$ .

Во **второй главе** представлены аналитические и численные расчёты затухания вертикальных осцилляций поляризации пучка. Сделано заключение о неэкспоненциальном характере затухания.

В **третьей главе** изложен метод определения оси стабильного спина с целью измерения вклада неидеальностей накопительного кольца в наблюдаемый резонансный эффект. Метод основан на измерении сдвига частоты спиновой прецессии в присутствии контролируемых неидеальностей кольца. Выполнены соответствующие расчёты для кольца одной и двумя искусственными воздействиями.

**Четвёртая глава** посвящена первому измерению неидеальностей магнитной системы накопителя COSY при помощи вышеуказанного метода. Описана экспериментальная процедура измерения неидеальностей, приведён анализ данных и систематических погрешностей метода. Перечислены достоинства и недостатки конкретной реализации метода, а также способы улучшения при помощи статического фильтра Вина с горизонтальным магнитным полем.

В **пятой главе** подробно рассматриваются систематические погрешности метода определения оси стабильного спина, вызванные перекосом соленоидов, задающих искусственные неидеальности кольца, а также влияние корректирующих магнитов. Приведены результаты численных расчётов, сделан вывод о возможности определения направления оси стабильного спина с точностью 2.8 мкрад.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан метод измерения оси прецессии стабильного спина с точностью 2.8 мкрад при помощи статических соленоидов, имитирующих неидеальности накопителя. Метод был применён для определения неидеальностей кольца COSY. Это позволит получить статистическую точность измерения ЭДМ дейтрона  $10^{-20} e \cdot \text{см}$  для энергии пучка  $T=270$  МэВ.
2. Выполнено численное моделирование орбитальной и спиновой динамики для равновесной частицы при наличии неточности позиционирования оси соленоида, создающего искусственную неидеальность. Проведено сравнение с экспериментальными данными.
3. Разработана теория затухания осцилляций вертикальной поляризации в резонансном радиочастотном режиме.
4. Разработан метод контроля относительной фазы между фазой радиочастотного поля ротатора спина и фазой прецессии спина в накопительном кольце с точностью 0.21 радиан. Метод будет задействован при поисках ЭДМ дейтрона с радиочастотным фильтром Вина и, в перспективе, при поисках ЭДМ в электростатическом кольце.

## **Соответствие автореферата основному содержанию диссертации**

Автореферат диссертации точно и полностью отражает содержание диссертации.

## **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов основана использовании давно известной теории эволюции спина в электромагнитных полях. Результаты работы проверены численным моделированием при помощи используемой несколькими группами программного комплекса «COSY Infinity», а также подтверждены экспериментальными результатами. Кроме того, результаты неоднократно представлялись научной общественности на рабочих совещаниях, конференциях и в рецензируемых научных статьях.

## Апробация работы

Представленные в диссертации результаты прошли научную апробацию и получили должную известность в научном сообществе. Они докладывались на Ученом Совете Самарского Университета, Ученом Совете Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, рабочих совещаниях коллаборации JEDI (2013-2017 гг., г. Юлих, Германия), на ежегодных конференциях «DPG Frühjahrstagung» Немецкого Физического Общества (Дрезден, 2013 и 2017 гг.; Франкфурт, 2014 г.; Вупперталь, 2015 г.; Дармштадт, 2016 г.), семинарах «CANU/FFE» в Центре Физики г. Бад Хоннеф (2013 и 2015 гг., Германия), 21 Международном Симпозиуме по Спиновой Физике в Пекинском Университете (SPIN-2014, Китай, 20-24 октября 2014г.), 16 и 17 Рабочих совещаниях по физике спина при высоких энергиях (DSPIN 2015 и 2017 гг., ОИЯИ, г. Дубна, Россия) и на семинаре Лаборатории Ядерных Проблем имени Л.П. Джелепова ОИЯИ.

## Научная новизна

Работа посвящена теоретическому формализму для расчёта спиновой динамики для определения вклада магнитного дипольного момента в измеряемый ЭДМ эффект из-за влияния неидеальностей магнитной структуры накопителя. Впервые в мире разработан метод определения частоты прецессии спина с относительной точностью  $10^{-10}$ . Экспериментально достигнута стабилизация относительной фазы радиочастотного поля соленоида и направления спина с точностью 0.21 радиан. Разработана методика калибровки стабильной оси прецессии спина с точностью 2.8 мкрад. Впервые получена зависимость скорости неэкспоненциального затухания вертикальной поляризации из-за синхротронных колебаний во время спинового резонанса и предсказан уход фазы осцилляций.

## Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации

К достоинствам работы следует отнести следующее:

1. подробность изложения математических расчётов, позволяющая следовать за мыслью автора с самых основ — БМТ уравнения эволюции спина в электромагнитных полях;
2. достаточное хорошее покрытие текста цитированиями, дает возможность подробнее познакомиться как с результатами работы, так и предпосылками, лежащими в основании работы;

К диссертационной работе можно сделать ряд замечаний.

1. Использование терминов в тексте:

- (а) Использование сокращений и терминов «ЭДМ», «РЧ», «скейлинг», «рельеф частоты прецессии спина», « $S_1$ », « $S_2$ » в названиях глав, а также до их определения в тексте: «ИН» (искусственная неидеальность), или вообще без определения «рельеф частоты прецессии», «скейлинг» понять последние два удалось лишь из контекста повествования.



(b) кальки с английского языка и приобретают черты научного жаргона: «спинтьюн», «магнитная дорожка», «фоновый сигнал», «ось стабильного спина», «спиновая фаза», «скейлинг», «эластичность», «горизонтальное время декогеренции», «фитирование», «дэмпинг», «ортонормальный» (ортонормированный). Вместо «спинтьюна», по моему мнению, лучше использовать частоту прецессии спина в единицах частоты обращения, то вместо «магнитной дорожки» лучше использовать термин «магнитная структура», вместо «фоновый сигнал» — вклад фона [в наблюдаемую величину], вместо «спиновая фаза» — фаза прецессии спина и т.д.

2. Орфографические и пунктуационные ошибки. Ввиду большого их количества (почти на каждой странице), очевидно, что автор работы не воспользовался средствами проверки орфографии. Перечислю лишь некоторые:

- заглавие раздела 3.2.2 «Соленоиды электронных систем *охлаждени* пучка...» (стр. 3, 60)
- *ассиметрия* пишется с одной буквой «с» и двумя «м» (стр. 5, 36, 37, 105, 124)
- «... инвариантности обращения *времени*» (стр.5)
- *модельнозависимый* пишется через дефис: модельно-зависимый (стр. 8, 131)
- *прецезионной* → прецизионной (стр. 8)
- «*Опрделение* влияния систематических ошибок...» (стр. 8)
- «... к *планируему* предварительному ЭДМ-эксперименту на COSY.» (стр. 9)
- «... возможности скомпенсировать эти *неидельные* поля ...» (стр. 10)
- «... для каждого элемента, и следовательно, они ...» — пропущена запятая перед словом «следовательно» (стр. 10)
- «... Измерение рельефа *чатоты прецесси* спина как спинового ...» (стр. 11)
- «... перед *искусственной* неидеальностью» (стр.11)
- «... предположении *отсутствия* искажений замкнутой орбиты неидеальностями ...» (стр.12)
- «... экспериментам, *планируемым* коллаборацией JEDI ...» (стр.13)
- «... и *подтверждаются* в эксперименте с достаточно высокой точностью...» (стр.15)
- «*Сопутствующие* этой методике рекомендации по учёту...» (стр. 16)
- «... *стематической* точностью определения спинтьюна.» (стр. 16)
- «... *амплитуда* электрического поля ...» (стр. 22)
- «Огибающая  $\vec{S}_{env}(n)$  определяется как ...» (стр. 24)
- «... не совпадает с *частототой* прецессии спина ...» (стр. 25)
- «... вращении является рост (вертикальной) *поляризации* вдоль направления...» (стр. 28)

3. В тексте отсутствует описание и основные характеристики накопителя COSY, на котором получены основные экспериментальные результаты, а также недостаточно информации о детекторе поляризации частиц - хотелось бы увидеть картинку с

системой измерения поляризации. Хотя данная работа и является в в большей степени теоретической, тем не менее, я считаю, что описанию всей экспериментальной установки необходимо было посвятить отдельный раздел, чтобы у читателя сложилось общее представление.

4. В целом работа написана небрежно и достаточно трудна для понимания.

Отмеченные недостатки не влияют на основные теоретические и практические результаты работы.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

### **Существенное замечание о затухании осцилляций**

Результат, изложенный во второй главе, посвященной затуханию осцилляций вертикальной поляризации пучка нуждается в более детальном исследовании.

В этой главе источником декогеренции поляризации называются синхротронные колебания. При этом в расчётах принимается во внимание лишь их когерентный характер и никак не учитываются стохастические процессы, являющиеся истинными причинами декогеренции, такие как флуктуации напряжения ВЧ резонатора, флуктуации магнитных и электрических полей накопителя, флуктуации когерентных и некогерентных (синхротронное излучение) потерь, а также взаимодействие с остаточным газом в вакуумной камере. Как известно, что декогеренция происходит при взаимодействии с окружением, когда волновая функция системы запутывается с волновой функцией внешней системы.

Подобный результат расчётов вызывает удивление, однако при ближайшем рассмотрении источник декогеренции был найден в используемом математическом аппарате. Поведение спинора поляризации  $\zeta(n)$  при большом числе оборотов  $n$  было получено методом усреднения Боголюбова-Крылова с отбрасыванием ряда нелинейных членов. Это приводит к потере информации об относительных спиновых фазах частиц и, следовательно, к декогеренции.

Я считаю, что синхротронные колебания сами по себе не могут являться источником декогеренции. Тем не менее, из-за возникающей нелинейности вследствие отклонения энергии частицы от равновесной изменяется частота обращения (слип-фактор) и «спинтьюна», происходит усиление вклада в спиновую диффузию вышеуказанных стохастических явлений. Имеется и ещё один, как мне кажется, существенный источник нелинейности — бетатронные колебания при наличии квадратичной нелинейности поля.

Теперь рассмотрим вопрос о численном моделировании, которое показало затухание осцилляций вертикальной поляризации. По представленным в работе данным нельзя сделать однозначный вывод о поведении амплитуды осцилляций за достаточно большой промежуток времени. Либо мы имеем диффузию, вызванную ошибками округления при компьютерных расчётах, либо на рисунках А.1, А.2 приложения представлено лишь когерентные «биения» амплитуды вертикальной поляризации, и, наконец, возможна ошибка в расчётах. Первый вариант, скорее всего, исключается из-за проявления затухания лишь на небольшом числе оборотов  $10^5$ , что недостаточно для диффузии при использовании чисел двойной точности. Второй и третий вариант нуждаются в изучении.

Надеюсь автор диссертационной работы учёт приведённые замечания и подготовит к защите ответ на поставленные вопросы. Хотя количественный анализ вкладов величины

источников декогеренции требует отдельного исследования и, возможно, новой диссертационной работы.

Тем не менее, все вышесказанное, не делает формулу (2.22) полностью неверной. При использовании усреднения природа стохастичности не имеет значения, все детали должны быть скрыты в параметре  $\rho$ , задающим скорость диффузии и который может быть извлечен из эксперимента.

### **Критика в научном сообществе.**

Следует обратить внимание на появившуюся в декабре 2017 года уже после представления текста диссертационной работы статью S.R. Mane *A critical analysis of the technique of spin tune mapping in storage rings* Nucl. Instr. Meth., A 875 (2017) 141–145, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.026> посвященную критике предложенного в диссертационной работе способа определения направления оси стабильного спина. Автор критической работы указывает на более ранние эксперименты по измерению направлению оси стабильного спина на IUCF Cooler Ring в 1989 году, чего не упоминается в диссертационной работе. Кроме того, использование двух возмущающих движение спина элементов и измерению получаемого таким образом сдвига спиновой частоты было на установке HERA-I,II в 1998. а также на накопительном кольце RICH в 2003.

Также в этой статье указывается на расхождение в расчётах господина Мане и критикуемой работы. Подвергается сомнению факт определения направления оси стабильного спина с точностью 2.8 мкрад.

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

Отмеченные недостатки снижают качество данного исследования, но они не влияют на основные теоретические и практические результаты работы и их значимость. Мои замечания и замечания такого специалиста по поляризации частиц в накопителях как Мане открывают научную дискуссию, вызывают живейший интерес специалистов в данной области, тем самым подчёркивая актуальность данной диссертационной работы.

В целом работа является законченным научным исследованием и заслуживает высокой положительной оценки.

### **Личный вклад автора**

Все результаты исследования, вошедшие в диссертацию, были получены непосредственно автором или при его прямом участии. Работа выполнена автором в составе международной коллаборации JEDI, где он является одним из лидеров группы теоретической поддержки в области систематических эффектов. Коллаборация одобрила использование результатов в диссертационной работе А.В. Салеева.

### **Заключение**

Диссертация Салеева Артёма Владимировича «*Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах*» на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи расчёта движения спина заряженных частиц в накопителе COSY для экспериментов по измерению электрического дипольного момента протонов и дейтронов, что имеет важное значение для физики элементарных частиц. Работа соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 (приказ №335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор **Салеев Артём Владимирович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - «физика атомного ядра и элементарных частиц».

Официальный оппонент,  
Николаев Иван Борисович,  
кандидат физико-математических наук,  
01.04.16 — «физика атомного ядра и элементарных частиц»,  
старший научный сотрудник лаборатории 3-2  
ИЯФ СО РАН  
тел. +7(383)329-48-37,  
E-mail: I.B.Nikolaev@inp.nsk.su

15.01.2018



// И.Б. Николаев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИЯФ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11,  
+7(383)329-47-60, факс +7(383)330-71-63, E-mail: inp@inp.nsk.su

Подпись И.Б. Николаева заверяю  
кандидат физико-математических наук,  
ученый секретарь ИЯФ СО РАН



// Я.В. Ракшун

15.01.2018