

## О Т З Ы В

научного руководителя на диссертационную работу  
**Салеева Артема Владимировича**  
**«Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов  
по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на  
накопительных кольцах»,**  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 - **Физика атомного ядра и элементарных частиц**

С 2012 года я был научным руководителем А.В. Салеева. Его диссертационная работа «Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах» выполнена в рамках программы работ большой международной коллаборации JEDI (**Juelich Electron Dipole moment Investigations**) с участием более 100 физиков из 25 университетов и лабораторий Европы, США и Корейской Республики.

Конечная цель коллаборации JEDI — строительство накопителя нового класса для поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) протонов и дейтронов с предельно достижимой точностью лучше  $10^{-28}$  е см, выше точности, достижимой в обсуждаемых в литературе экспериментах по поиску ЭДМ нейтронов. Эта амбициозная цель отвечает поиску запрещенного CP-инвариантностью ЭДМ, который более чем на 14 порядков меньше, чем разрешенный всеми симметриями магнитный момент. Если на таком уровне точности ЭДМ *будет найден*, то это будет неоспоримым доказательством неполноты Стандартной Модели электрослабых взаимодействий. С другой стороны, нарушение CP-инвариантности --- это один из трех фундаментальных критериев бариогенезиса по Сахарову. Если на таком уровне точности ЭДМ *не будет найден*, то это практически полностью исключит возможность описания наблюдаемой барионной асимметрии Вселенной за счет ныне обсуждаемых обобщений Стандартной Модели.

Экспериментальный сигнал ЭДМ — это вращение спина в электрическом поле. В отличие от электронейтральных нейтронов, это вращение для заряженных частиц можно наблюдать только если электрическое поле есть часть механизма удержания частиц на орбите. История поиска ЭДМ нейтрона насчитывает уже 60 лет. Первым идеям поиска ЭДМ заряженных частиц уже около 20 лет, но первые прямые экспериментальные работы по прецизионной спиновой динамике в накопителях были начаты коллаборацией JEDI только после 2010 г. Такие эксперименты — это императив для выяснения фоновых систематических эффектов, без понимания которых переход к строительству специального накопителя, оптимизированного под поиск ЭДМ, невозможен. Именно это главная

цель программы экспериментов JEDI, намеченных на ближайшие годы на ускорителе COSY в Институте Ядерной Физики в Юлихе.

Все работы А.В. Салеева выполнены в рамках программы коллаборации JEDI. В диссертационную работу А.В. Салеева включены следующие оригинальные результаты:

1. А.В. Салеевым предложен и разработан до уровня практических рекомендаций новый метод прецизионного *in situ* определения оси средней поляризации накопленных в кольце ускорителя частиц (оси стабильного спина). Суть метода в чувствительности частоты прецессии спина к наклону оси стабильного спина, вызванной электрическими и паразитными по отношению к сигналу ЭДМ магнитными полями, лежащими в плоскости кольца. Для измерения интегрального эффекта этих полей предложено использовать настраиваемые дополнительные статические ротаторы спина. Картина интерференции с вкладом паразитных магнитных полей позволяет оценить вклад фоновых к ЭДМ эффектов. Работоспособность метода убедительно доказана в эксперименте JEDI на ускорителе COSY. Рекордно высокая точность в измерении частоты прецессии спина, которая была достигнута в опытах коллаборации JEDI, позволила впервые в мире определить ориентацию оси стабильного спина с точностью в несколько единиц  $10^{-6}$ .

2. В первом эксперименте в качестве дополнительных ротаторов спина были использованы уже имевшиеся в кольце COSY дрейфовые магниты двух установок электронного охлаждения протонного пучка. Неидеальность этих соленоидов вносила свои неточности, и их понимание в ходе анализа полученных экспериментальных данных позволило уточнить требования к этой новой методике 3D картографирования частоты прецессии спина. Решение этой задачи потребовало от диссертанта остроумного разделения эффекта неидеальной ориентации дрейфовых соленоидов и вызванного этой неидеальностью эффекта искажения орбиты пучка в самом кольце ускорителя — такая задача в этой постановке решалась впервые. Нарботанное в ходе этого анализа понимание будет учтено в ходе первой попытки выделения сигнала ЭДМ в запланированном на 2018-19 годы эксперименте JEDI с радиочастотным фильтром Вина в качестве ротатора спина.

3. Выделение сигнала вращения спина за счет крайне малого ЭДМ требует накопления угла вращения в течение максимально большого времени. В течение этого времени следует поддерживать максимально точную синхронность частот на COSY. В ускорителе COSY рассеянием на внутреннем поляриметре реализовано непрерывное измерение спиновой фазы. Как было найдено в предыдущем эксперименте коллаборации JEDI, из-за нестабильностей кольца COSY уход частоты прецессии спина может более чем на порядок превышать точность, с которой эта частота могла бы быть измерена. А.В. Салеев принял активное участие в разработке системы обратной связи, с помощью которой относительные фазы

прецессии спина и радиочастотного поля удалось на опыте стабилизировать с точностью 0.2 радиана. Такая стабилизация достигнута впервые в мире.

4. Синхротронные колебания модулируют частоту прецессии спина индивидуальной частицы и частоту её обращения в кольце. Это нарушает условие точного резонанса, и степень ухода от резонанса зависит от амплитуды синхротронных колебаний. Из-за высокой частоты синхротронных колебаний и разброса их фазы от частицы до частицы техника обратной связи здесь бессильна. Из-за этой декогерентности спинов усредненная по ансамблю поляризация пучка будет убывать со временем. В диссертации А.В. Салеева показано, что убывание будет степенным в отличие от обычного экспоненциального. Тот же механизм неэкспоненциальной декогерентности предсказывает заметный ход спиновой фазы. Оба явления ранее в литературе не обсуждались. Ведущая роль А.В. Салеева в этой работе отмечена первым местом в списке авторов.


Представленные в диссертации результаты прошли научную апробацию и получили должную известность в научном сообществе. Они опубликованы в ведущих международных физических журналах, докладывались на Ученом Совете Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, на Ученом Совете Самарского университета, на рабочих совещаниях коллаборации JEDI, на ежегодных сессиях Немецкого физического общества, докладывались на международных конференциях по спиновой физике и опубликованы в трудах этих конференций.

Я бы особо отметил вклад А.В. Салеева в работу по изучению ориентации оси стабильного спина накопленных в кольце частиц. Эта работа была в экспериментальной программе коллаборации JEDI первой, полностью посвященной проблеме именно систематических ошибок в поисках ЭДМ дейтронов на ускорителе COSY. Она была полностью инициирована теоретическим анализом А.В. Салеева, им же был проведен анализ полученных экспериментальных данных, и по решению коллаборации особая роль А.В. Салеева подчеркнута тем, что в этой коллаборационной публикации именно он указан первым автором. Эта публикация вышла в *Physical Review: Accelerators* как «Editor's suggestion» --- это высшая оценка, которой редколлегия журнала отмечает избранные статьи. Вообще в коллаборации JEDI А.В. Салеев стал признанным экспертом в тематике фоновых к ЭДМ систематических эффектов. Достоверность развитых им подходов к спиновой динамике полностью подтверждена полученными JEDI экспериментальными данными.

За время активного сотрудничества с коллаборацией JEDI А.В. Салеев ярко продемонстрировал творческий подход к новым проблемам и уверенное владение методами как теоретической, так и экспериментальной физики. Диссертационная работа А.В. Салеева «Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах» является законченным исследованием. По

совокупности и значимости полученных новых фундаментальных результатов, она полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. А.В. Салеев безусловно заслуживает ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Научный руководитель, г.н.с. ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, д.ф.-м.н.



Н.Н. Николаев

5 сентября 2017 г.

Подпись Н.Н. Николаева заверяю.

Ученый секретарь ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, к.х.н.

С.А. Крашаков

