

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Фоменко Кирилла Александровича «Поиск аксионов, рождаемых в реакции $p(d, {}^3\text{He})\text{A}$ на Солнце, и запрещенных принципом Паули переходов в ядрах ${}^{12}\text{C}$ на детекторе Борексино», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Возможность существования аксиона продолжает оставаться актуальной проблемой физики элементарных частиц. Аксион (гипотетическая нейтральная псевдоскалярная частица) был введен в теорию для решения проблемы отсутствия CP нарушения в сильном взаимодействии. Первоначальная модель аксиона была закрыта экспериментальными данными. Новые модели KSVZ-аксиона, и DFSZ-аксиона сохранили аксион в том виде, в каком он нужен для решения CP-проблемы сильных взаимодействий, и, в то же время, подавили его взаимодействие с веществом. Поэтому «невидимые» аксионы являются хорошим кандидатом на одну из составляющих тёмной материи, что является дополнительным аргументом в пользу продолжения экспериментальных поисков этих частиц. Если аксион существует, то Солнце должно являться их мощным источником. Поэтому одним из популярных направлений поиска аксиона является поиски аксионов от Солнца. Поиски аксиона ведутся уже многие годы в различных лабораториях мира и использованием совершенно разных экспериментальных подходов.

Принцип Паули является одним из наиболее фундаментальных законов природы. Он был сформулирован В. Паули в 1925 году (еще до введения понятия «спина»!) для объяснения закономерностей периодической системы элементов и особенностей атомных спектров. В современной квантовой теории поля принцип Паули автоматически вытекает из принципа тождественности частиц и антикоммутируемости операторов рождения (уничтожения) фермионов и заключается в том, что в системе тождественных фермионов не могут находиться в одном и том состоянии две (или более) частицы. Открытие в 1956 г. несохранения четности при β -распаде впервые показало, что фундаментальные законы могут нарушаться. В 1964 г. было обнаружено нарушение CP-инвариантности. Это привело к тому, что проверке стали подвергаться все законы сохранения. Так, в течение последних 25-30 лет интенсивно исследуются возможное несохранение лептонного квантового числа, барионного и электрического заряда, нарушение CPT-симметрии и лоренц-инвариантности. Что касается принципа Паули, то на основе современных теоретических представлений нет ответа на вопрос: «с какой точностью справедлив принцип Паули?». Это связано с отсутствием каких-либо «настоящих» (самосогласованных и непротиворечивых) моделей, допускающих слабое нарушение принципа Паули, и, вполне вероятно, что такие модели должны выходить за рамки стандартной квантовой теории поля. В любом случае экспериментальная проверка принципа Паули представляет фундаментальный интерес для современной физики. И такие эксперименты регулярно проводятся на протяжении уже более 50-ти лет, причем чувствительность современных экспериментов возросла более, чем на 10 порядков.

Диссертация К.А. Фоменко посвящена экспериментальному поиску солнечных аксионов и запрещенных принципом Паули переходов в ядрах ${}^{12}\text{C}$ на 300-килотонном нейтринном детекторе Борексино. Т.о. актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении диссертации обосновывается актуальность тематики исследования, сформулированы главные задачи, перечислены основные результаты диссертации и представлена ее структура.

В первой главе рассматриваются основные теоретические модели KSVZ- и DFSZ-аксиона. Подробно описано взаимодействие аксионов с фотонами, электронами и нуклонами. Дан краткий обзор современного состояния экспериментальных работ по поиску аксиона и приведены экспериментальные и астрофизические ограничения на параметры аксионных моделей.

Во второй главе диссертации представлен обзор попыток построения теорий с возможностью малого нарушения принципа Паули и обосновывается важность его экспериментальной проверки. Подробно излагаются результаты экспериментов различного типа по проверке справедливости принципа Паули.

Третья глава посвящена описанию уникальной экспериментальной установки Борексина. Подробно описаны характеристики детектора, методы, используемые при обработке данных, а также результаты калибровок детектора с использованием радиоактивных изотопов. В заключении главы описаны программы мониторинга электронных компонент детектора, разработанные специально для данного эксперимента.

В четвертой главе представлены методика и результаты анализа данных по поиску солнечных аксионов, рождающихся в реакции $p(d, {}^3\text{He})A$. Приведены результаты вычислений ожидаемого потока солнечных аксионов и оценка ограничений на величины констант связи, принципиально достижимые при регистрации земными экспериментами. Представлены результаты моделирования функций отклика детектора Борексина для различных процессов взаимодействия аксиона с веществом детектора. Подробно изложены процедуры получения ограничений на величины аксионного потока и констант связи. Полученные результаты сравниваются с данными предшествующих экспериментов.

Глава пятая посвящена поиску запрещенных принципом Паули переходов в ядрах ${}^{12}\text{C}$ на установке Борексина. Приведены результаты расчета энергетически разрешенных «непаулевских» реакций в ядре ${}^{12}\text{C}$ с тремя протонами или тремя нейтронами на S-оболочке. Приводятся результаты моделирования функций отклика детектора для каналов с испусканием γ -кванта, протона, нейтрона, а также для β^\pm -распадов. Описываются методики отбора данных и идентификации событий от основных источников фона. Приведены пределы на вероятности запрещенных переходов и полученные пределы на относительные интенсивности «непаулевских» переходов по отношению к «нормальным» для исследованных каналов. Приводится сравнение результатов с данными других экспериментов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Наиболее важные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

- впервые предложен и осуществлен анализ данных сверхнизкофонового детектора большого объема с целью поиска аксионного потока от Солнца и ядерных переходов с нарушением принципа Паули;
- рассчитан поток аксионов с энергией 5.5 МэВ, рождающихся в реакции $p+d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ на Солнце;
- получены энергетические спектры для процессов комптоновской конверсии, аксиоэлектрического эффекта, конверсии аксиона в фотон в поле ядра и распада на 2 γ -кванта в детекторе Борексина;
- установлены новые модельно-независимые ограничения на константы связи аксиона с фотонами, электронами и нуклонами в области масс аксиона ниже 1

МэВ;

- получены новые, наиболее сильные на настоящий момент, пределы на времена жизни и относительные силы «непаулевских» $1P_{3/2}-1S_{1/2}$ переходов в ядрах ^{12}C .

Достоверность и обоснованность результатов и выводов автора обеспечена правильным выбором методики эксперимента, квалифицированным исполнением и обстоятельным анализом полученных результатов с учетом литературных данных и теоретических расчетов.

Результаты, полученные в диссертации имеют несомненную научную и практическую ценность. Полученные ограничения на существование аксиона и результаты по проверке принципа Паули используются экспериментаторами и теоретиками во многих лабораториях мира. Полученные результаты и разработанные методы могут быть использованы при создании установок и проведении экспериментов по поиску редких процессов с детекторами нового поколения в подземных лабораториях.

Диссертация хорошо структурирована и написана четким и ясным языком.

К замечаниям по изложению материала диссертации следует отнести следующее: хороший обзор по состоянию дел с поиском нарушений принципа Паули не полон. Теоретические работы после 1990 г. практически не упоминаются. Так, например, не обсуждается идея А. Долгова и А. Смирнова о возможном нарушении принципа Паули в нейтринном секторе (Phys. Lett. B 621 (2005) 1). Обзор экспериментальных работ также не полон - не приведены последние результаты коллаборации VIP и результаты американской группы (S. Elliott et al., Found. Phys. 42 (2012) 1015).

Указанные замечания не снижают главных достоинств диссертационной работы К.А. Фоменко – получение важных экспериментальных результатов по поиску аксиона и проверке справедливости принципа Паули.

В целом диссертация К.А. Фоменко является завершенным исследованием, выполнена на высоком научном уровне и свидетельствует о высокой квалификации автора.

Диссертационная работа основана на результатах, представленных на российских и международных конференциях, семинарах, совещаниях и опубликованных в авторитетных отечественных и зарубежных журналах. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации. Автореферат полностью отражает основные положения диссертации.

Диссертация К.А. Фоменко выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук

А.С. Барабаш

30.05.2014

Подпись А.С. Барабаша заверяю:

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ



В.В. Васильев