

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель директора
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт» по направлению
теоретические и фундаментальные исследования,
директор Центра фундаментальных исследований



В.Я. Панченко

2014 г.

Отзыв

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

Экспериментальные поиски аксиона, продолжающиеся вот уже более 30 лет, до сих пор дают отрицательные результаты. Тем не менее, проблема экспериментального обнаружения данной частицы продолжает оставаться крайне **актуальной**, что связано как с тем, что ее обнаружение свидетельствовало бы в пользу наиболее красивого решения сильной CP-проблемы, так и с возможностями аксиона составлять существенную часть темной материи.

Принцип запрета Паули (ПП), сформулированный на заре становления квантово-механической картины мира, является одним из фундаментальных законов природы. Однако, отсутствие каких-либо самосогласованных и непротиворечивых моделей, позволяющих объяснить происхождение данного принципа, оставляет вопрос о его абсолютности (или ограниченности) открытым. По-видимому, процессы с нарушением ПП выходят за рамки описания с помощью КТП, и попытки их наблюдения являются одной из принципиальных проверок границ применимости квантово-полевого подхода как такового.

Диссертационная работа К.А. Фоменко посвящена экспериментальному поиску излучения аксиона в реакции $p(d, {}^3\text{He})A$ на Солнце и запрещенных ПП переходов в ядрах ${}^{12}\text{C}$. Направление исследований, результаты которых представлены в диссертационной работе К.А. Фоменко, связано с поиском поглощения аксионов, рожденных на Солнце, атомными ядрами, находящимися на Земле, и поиском излучения от «непаулевских» ядерных переходов.

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

Во **введении** дано краткое описание причин появления аксиона в теории и современный статус принципа Паули, сформулирован предмет исследований и изложена структура диссертации.

В **первой главе** представлен обзор свойств аксиона в современных моделях и основных экспериментальных результатов по его поиску. Рассмотрены основные каналы рождения аксиона и его взаимодействия с веществом, дан краткий обзор существующих экспериментальных ограничений на параметры аксионных моделей. Представлены некоторые первоначальные эксперименты по поиску «стандартного»

аксиона, более поздние эксперименты различных типов по поиску аксиона со слабым взаимодействием с веществом («невидимого»), обсуждаются также астрофизические ограничения и результаты по поиску солнечных аксионов.

Вторая глава посвящена обзору попыток построения теорий с возможностью малого нарушения ПП и экспериментальных подходов для поиска этого нарушения. Показано, что непротиворечивой теории на настоящий момент не существует, а результаты экспериментов по поиску нарушения ПП представляются как пределы на время жизни атомов или ядер относительно запрещенных переходов, или как пределы на отношение скоростей нормальных и непаулевских переходов. Представлены предшествующие экспериментальные исследования, нацеленные на две основные возможности для проверки ПП: поиск атомов и ядер, уже находящихся в непаулевских состояниях и поиск излучения, сопровождающего непаулевские переходы в атомах и ядрах.

В третьей главе описывается экспериментальная установка Борексина. Дано общее описание детектора и особенностей его конструкции, фоновых условий, а также класса решаемых задач. Рассматривается методика регистрации событий, особенности нелинейного отклика детектора в области низких энергий, частотные и временные спектры излучения сцинтиллятора, методы идентификации частиц по форме временного импульса. Дано подробное изложение методики и результатов калибровки пространственного разрешения и энергетической шкалы детектора с помощью радиоактивных источников. В заключительном разделе описываются электронный и программный интерфейсы сбора и обработки данных.

В главе четвертой представлен анализ данных по поиску аксионов, рождающихся в реакции $p(d, {}^3\text{He})A$ на Солнце. Проводится вычисление ожидаемого потока солнечных аксионов, оцениваются ограничения на величины констант связи, возникающие из факта удаленности источника и детектора. Описывается процедура нахождения функций отклика детектора для процессов комптоновской конверсии, аксиоэлектрического эффекта, конверсии аксиона в фотон в поле ядра и распада на 2 γ -кванта в детекторе Борексина. Детально описан анализ данных и процедуры получения результатов по ограничениям на величины аксионного потока и констант связи g_{AN} , g_{Ae} , $g_{A\gamma}$, проводится подробное сравнение с данными, полученными другими экспериментами.

Глава пятая посвящена методике и результатам экспериментального поиска запрещенных ПП переходов в ядрах ${}^{12}\text{C}$. Вычислены энергии реакций для «непаулевских» состояний ядра ${}^{12}\text{C}$ с тремя протонами или тремя нейтронами на S-оболочке. Описаны результаты моделирования функций отклика детектора в пакете GEANT4, методики отбора данных и идентификации событий от основных источников фона. Получены пределы на вероятности запрещенных переходов с испусканием γ -кванта, протона и нейтрона, а также пределы на вероятности «непаулевских» β^\pm -переходов. В заключение, вычисляются пределы на относительные интенсивности «непаулевских» переходов по отношению к «нормальным» для исследованных каналов, приводится сравнение результатов с данными других экспериментов.

Основные результаты диссертационной работы подытожены в **заключении**.

В целом, диссертационная работа К.А. Фоменко заслуживает **положительной оценки**, в ней получены важные результаты, среди которых можно выделить следующие:

– получены новые модельно-независимые ограничения на константы связи аксиона с электроном g_{Ae} , фотоном $g_{A\gamma}$ и нуклонами g_{AN} : $|g_{Ae} \times g_{3AN}| < 5.5 \times 10^{-13}$ и $|g_{A\gamma} \times g_{3AN}| < 4.6 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ для массы аксиона $m_A < 1 \text{ МэВ}$ (90% у.д.) и новые ограничения на константы связи g_{Ae} и $g_{A\gamma}$ как функций массы аксиона в модели адронного аксиона: $|g_{Ae} \times m_A| < 2.0 \times 10^{-5} \text{ эВ}$ и $|g_{A\gamma} \times m_A| < 1.7 \times 10^{-12}$ (90% у.д.). Данные

результаты исключают большую область возможных значений констант связи $g_{Ae} \in (10^{-11} \dots 10^{-9})$ и $g_{A\gamma} \in (2 \times 10^{-14} \dots 10^{-7}) \text{ ГэВ}^{-1}$ и масс аксиона $m_A \in (0.01 \dots 1) \text{ МэВ}$;

– получены новые, наиболее строгие на настоящий момент, пределы на вероятности «непаулевских» переходов нуклонов с $1P_{3/2}$ -оболочки на $1S_{1/2}$ -оболочку в ядрах ^{12}C с испусканием γ , n , p и β^\pm -частиц: $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{C}^{\text{NP}} + \gamma) > 5.0 \times 10^{31}$ лет, $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}^{\text{NP}} + p) > 8.9 \times 10^{29}$ лет, $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^{\text{NP}} + n) > 3.4 \times 10^{30}$ лет, $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{N}^{\text{NP}} + e^- + \nu) > 3.1 \times 10^{30}$ лет и $\tau(^{12}\text{C} \rightarrow ^{12}\text{B}^{\text{NP}} + e^+ + \nu) > 2.1 \times 10^{30}$ лет (90% у.д.). Соответственно, установлены наиболее строгие на настоящий момент верхние ограничения на относительные интенсивности «непаулевских» и «нормальных» переходов: $\delta_\gamma^2 \leq 2.2 \cdot 10^{-57}$, $\delta_N^2 \leq 4.1 \cdot 10^{-60}$ и $\delta_\beta^2 \leq 2.1 \cdot 10^{-35}$ (90% у.д.).

Предложенные в работе новые подходы к анализу результатов, полученных с жидкостинцилляционным детектором большого объема, могут использоваться при проведении фундаментальных исследований, связанных с регистрацией редких реакций и распадов на существующих и планирующихся нейтринных детекторах. Результаты работы представляют интерес для ряда лабораторий и центров, в нашей стране – ПИЯФ (Гатчина), НИЦ «Курчатовский институт» и ИЯИ РАН (Москва).

Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными и получены впервые. Они известны специалистам и опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. **В целом диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, она отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, а ее автор К.А. Фоменко заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертационная работа Фоменко Кирилла Александровича «Поиск аксионов, рождаемых в реакции $p(d, ^3\text{He})A$ на Солнце, и запрещенных принципом Паули переходов в ядрах ^{12}C на детекторе Борексино», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, рассмотрена и обсуждена на заседании заседания секции Ученого Совета Центра фундаментальных исследований НИЦ «Курчатовский институт» по направлению «Физика частиц». (Протокол № 6/5 от 16.06.2014 г.)

Председатель секции УС ЦФИ

 /М.Д. Скорохватов/

Ученый секретарь секции УС ЦФИ

 /В.Н. Тихонов/

Ученый секретарь УС ЦФИ

 /Г.А. Капустин/