

## "УТВЕРЖДАЮ"

Директор НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ

академик РАН С.В. Иванов "12" августа 2022 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации – НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ на диссертацию **Краснова Игоря Вячеславовича** «Перспективы поиска новой физики в экспериментах на фиксированной мишени нового поколения», представленную на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Диссертация И. В. Краснова посвящена определению ограничений на Новую Физику(НФ), то есть физику вне Стандартной Модели (СМ), которые можно будет получить из некоторых будущих экспериментов на выведенных пучках (Fixed Target Experiments=FTE ) и которые следуют из уже выполненного FTE эксперимента PS191.

Поиски НФ на выведенных пучках являются популярным и активно развивающимся направлением. Это связано с тем, что есть твердая уверенность в существовании НФ. Во первых, есть много косвенных экспериментальных данных, которые не вписываются в рамки СМ. Во вторых, в СМ есть внутренние противоречия. Прямые поиски НФ на LHC коллайдере пока не привели к успеху, поэтому в последнее время фронт исследований значительно расширился, в том числе он включает и FTE эксперименты. Например, в ЦЕРН запущена программа «Physics Beyond Colliders», включающая в себя порядка десяти новых экспериментов.

Перечисленные обстоятельства определяют актуальность представленного исследования.

Высокий научный уровень диссертации определяется тем, что работа выполнена в ИЯИ РАН — одном из лидеров в этой области физики.

Остановимся кратко на содержании работы и на наиболее важных и интересных, с нашей точки зрения, результатах диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

**Во введении** обсуждаются некоторые экспериментальные факты, которые противоречат СМ. Это осцилляции нейтрино, галиева аномалия, различные факты из космологии. Рассматриваются возможные варианты НФ и определяется направление НФ, которое исследуется в диссертации — это поиск слабовзаимодействующих частиц (FIMP) небольшой массы. Далее рассматриваются возможные способы обнаружения таких частиц. Обсуждается актуальность диссертации, новизна, значимость, личный вклад автора.

*Замечание: На стр.8 эксперименты на выведенных пучках называются «экспериментами на фиксированной мишени», что является переводом английского термина «fixed target experiments» и далее дается обратный перевод «beam dump experiments»? «Beam dump» - это отдельный класс экспериментов на выведенных пучках, когда пучок полностью поглощается в мишени и в защите, установленной сразу после мишени. Как пример автор использует PS191, NA62, T2K, которые не «beam dump», а вот SHIP- это «beam dump».*

**В первой главе** представлены оценки ограничений на тяжелые стерильные нейтрино, которые могут быть получены в будущих экспериментах DUNE и SHIP. В начале главы дается введение в феноменологию стерильных нейтрино, затем идет подробное описание эксперимента DUNE и описание схемы Монте-Карло расчетов, в которых моделируются процессы рождения, распространения и распада стерильных нейтрино. Так как в расчетах не используются готовые пакеты типа Pythia, Geant и т.д., то автору пришлось все делать с нуля, при этом диссертант демонстрирует высокую квалификацию теоретика и программиста. В итоге получаются изоконтуры для разного количества зарегистрированных событий на плоскости  $(M_N, |U|^2)$ , где  $U$  — амплитуда смешивания с активными нейтрино,  $M_N$  — масса стерильного нейтрино.

*Замечания: На стр.29-31 рассматривается идея разделения тяжелых стерильных нейтрино от активных по времени пролета до ближнего детектора. При этом используется длительность вывода пучка (которая называется автором «длительностью соударения») 10 мкс. При таких условиях только 0.1% стерильных нейтрино можно отделить от фона. Однако при быстром выводе из ускорителя пучок «банчирован», то есть временная структура пучка — это сгустки длительностью ~ 10 нсек с промежутком ~300 нсек (всего ~30 банчей). Это обстоятельство может сильно изменить оценку;*

*На стр. 46 рассматривается идея установить рядом с «тяжелым» ближним детектором «легкий» детектор для регистрации распадов стерильного нейтрино. В состав ближнего детектора DUNE наряду с основным жидкоаргоновым TPC «LAr» как раз входит MPD- Multi-Purpose Detector, который представляет собой газовую TPC. Его вес ~1/50 от веса основного детектора. Это из доклада A.Weber в DESY 21.10.2019 ;*

*Конечно в симуляции потока рожденных в мишени  $\pi$  и  $K$  надо было учесть фокусировку с помощью HORN, например, в приближении тонкой линзы.*

*Параметры HORN можно взять из эксперимента MINOS или NovA.*

**В части 1.3 первой главы** представлены оценки ограничений на стерильные нейтрино, которые можно будет получить из эксперимента SHIP. SHIP - это «beam-dump» эксперимент для поисков стерильных нейтрино, рождающихся в распадах D-мезонов. При этом поток активных нейтрино подавлен. Этот подход оптимален для стерильных нейтрино с

массой больше массы каона. Для «легких» стерильных нейтрино более правильной является классическая «нейтринная» постановка эксперимента, где после мишени есть распадный объем(как в PS191). Поэтому вклад каонов в SHIP ранее игнорировался. Значительным достижением диссертанта является расчет этого вклада. Показано, что он доминирует над вкладом D-мезонов в соответствующей области масс и дает возможность получить ограничения на уровне лучших экспериментов. Расчеты производились с помощью пакета GEANT-4. В итоге получены ограничения на плоскости ( $M_N, |U|^2$ ) и проведено их сравнение с результатами PS191, T2K, E949, NA62.

*Замечания: в тексте используется терминология, которая отличается от общепринятой: вместо «относительная вероятность» или просто «брэнчинг»- «коэффициент ветвления»; вместо «геометрическая эффективность» или «аксептанс» - «геометрический фактор».*

**Вторая глава** посвящена получению ограничений на параметры гипотетических скалярных частиц из данных эксперимента PS-191, который был проведен на нейтринном пучке для пузырьковой камеры BEBC ЦЕРН в 80-е годы. PS-191 работал во время запуска и начала работы LEP. Тогда не была актуальна тематика тяжелых лептонов и в целом FIP. Эксперимент оказался очень удачным, диссертант справедливо отмечает, что его ограничения часто превосходят результаты современных экспериментов и даже планирующихся проектов (например, SHIP). Поэтому очень правильным, на мой взгляд, является использование его данных для получения новых ограничений, в частности, на легкие скаляры. Расчеты проводились на базе GEANT-4. Подробно описаны все этапы моделирования. В итоге было получено ограничение на плоскости ( $M_\phi, \theta^2$ ), которое в некоторых областях по  $M_\phi$ : (100-150 МэВ) и (200-300 МэВ) улучшает существующие ограничения по  $\theta^2$  до  $10^{-7}$  и  $10^{-9}$ .

*Замечания: Остается только повторить, что надо было учесть эффект от магнитных фокусирующих устройств- HORN. Это не трудно и могло заметно улучшить ограничения.*

**В третьей главе** оцениваются ограничения на миллизаряженные частицы (MCP), которые можно будет получить на статистике событий в модифицированном ближнем детекторе эксперимента T2K и позже в T2HK. В модифицированном детекторе главный элемент- это SuperFGD, который представляет является активной мишенью, состоящей из  $\sim 2$  миллионов оптически изолированных кубиков  $1 \times 1 \times 1$  см<sup>3</sup>, сигнал с которых считывается с помощью трех взаимно перпендикулярных спектросмещающих волокон. Этот детектор создан в ИЯИ РАН. Основная задача ближнего детектора- мониторинг потока нейтрино в Super-Kamiokande. Главная идея поиска MCP с помощью этого детектора состоит в поиске двух сигналов взаимодействия, возникающих от рассеяния MCP, при этом прямая, проведенная через две 3D точки взаимодействия должна смотреть на мишень. В диссертации подробно описаны все этапы МК-моделирования: рождение MCP в распадах  $\rho, \omega, \phi$  и  $\pi^0, \eta, \eta'$ , образование которых

симулируется GEANT-4, детально рассматривается регистрация электронов отдачи, диапазон их энергий, эффективность и порог регистрации, временное разрешение детектора и т.д. Подробно оцениваются различные источники фона. В этой главе, в отличие от первой, правильно учитывается временная структура быстрого вывода синхротрона. В итоге приводятся ограничения на параметры миллизаряженных частиц на плоскости  $\{m_\chi, \epsilon\}$ , которые могут быть получены в экспериментах T2K и T2HK. Проведено сравнение с экспериментами ArgoNeuT и др. Показано, что в области масс 100-500 МэВ можно улучшить ограничения на заряд в 5-10 раз.

*Замечания: Рис.39 не имеет отношения к содержанию этой главы и повторяет(частично) Рис.19 из 1.3.6.*

В **заключении** подробно перечислены основные научные результаты и положения, выдвигаемые автором диссертации для защиты.

Диссертация содержит большой материал. Она относится к промежуточной области между теорией и экспериментом. Созданный программный код может быть использован для планирования различных экспериментов с выведенными пучками, что имеет большое практическое значение.

Полученные результаты выглядят весьма убедительными и характеризуют диссертанта как зрелого физика высокой квалификации в области теоретической физики, программирования и моделирования различных процессов. Большой, часто решающий личный вклад диссертанта в представленные результаты не вызывает сомнения и подтверждается выступлениями на конференциях. Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в ведущих реферируемых журналах Phys. Rev. D, Phys. Lett. B. Материалы работы докладывались автором на четырех российских и международных научных конференциях.

Диссертация была заслушана на семинаре Отделения экспериментальной физики ИФВЭ 29.07.2022 и получила положительную оценку.

Представленная диссертация И. В. Краснова является законченным научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика, а её автор И. В. Краснов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил главный научный сотрудник Отделения экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Доктор физико-математических наук

В.Ф. Образцов

142281 Московская обл., г. Протвино, площадь Науки дом1 Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Тел. +7(496)7713480 e-mail: [Vladimir.Obraztsov@ihep.ru](mailto:Vladimir.Obraztsov@ihep.ru)

Список основных публикаций с участием сотрудников ведущей организации по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. NA64 Collaboration, "Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment", Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 8, 081801
2. CMS Collaboration, "Search for long-lived heavy neutral leptons with displaced vertices in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV", JHEP 07 (2022) 081
3. NA62 Collaboration, "Searches for lepton number violating  $K^+ \rightarrow \pi^-(\pi^0)e^+e^+K^+ \rightarrow \pi^-(\pi^0)e^+e^+$  decays", Phys.Lett.B 830 (2022) 137172
4. DIRAC Collaboration, "Investigation of  $K^+K^-$  pairs in the effective mass region near  $2m_K$ ", Phys.Rev.D 106 (2022) 3, 032006
5. NA62 Collaboration, "Search for a feebly interacting particle XXX in the decay  $K^+ \rightarrow \pi^+ X K^+ \rightarrow \pi^+ X$ ", JHEP 03 (2021) 058
6. NA62 Collaboration, "Search for heavy neutral lepton production in  $K^+K^+K^+$  decays to positrons", Phys.Lett.B 807 (2020) 135599