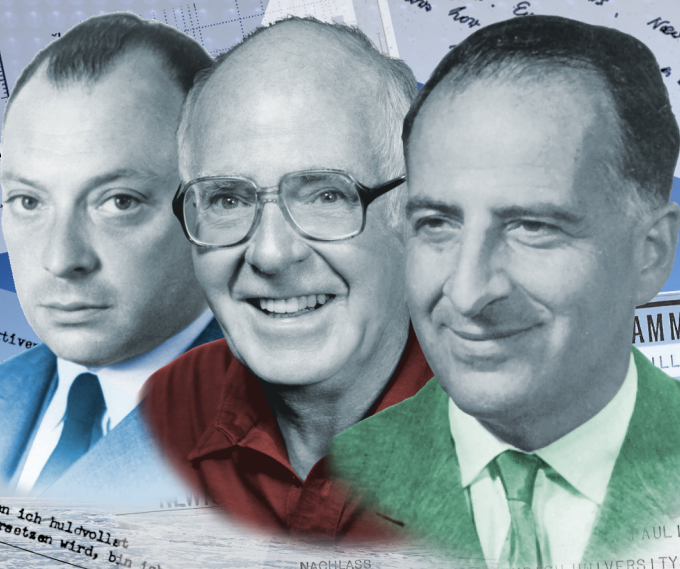
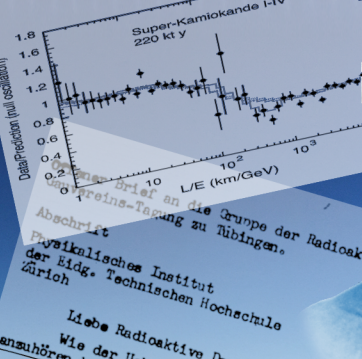
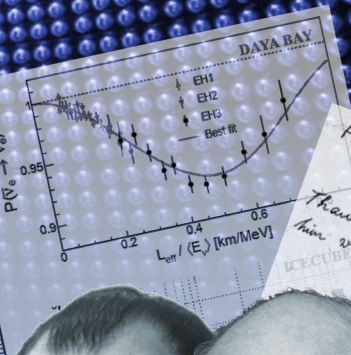
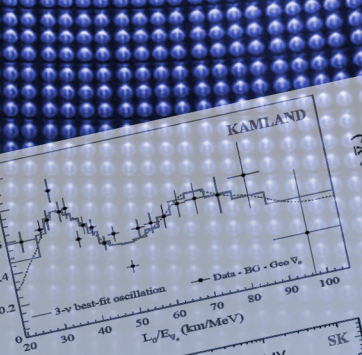
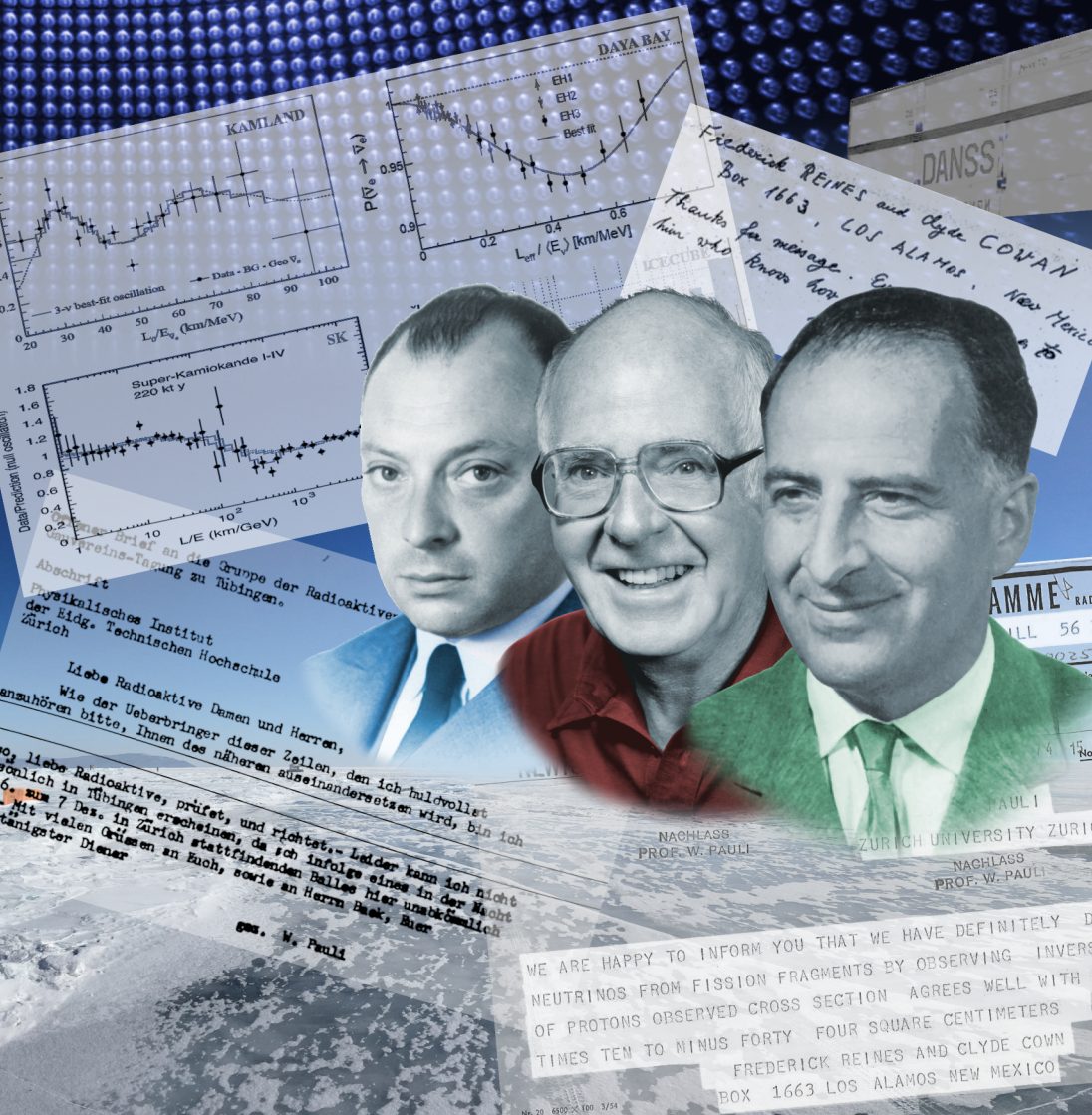


Удивительные превращения нейтрино

Ю. А. Шитов, В. Б. Бруданин, М. В. Фомина



Friedrich REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Abschritt
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Liebe Radioaktive Damen und Herren,
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen,
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich

0, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet, - Ledder kann ich nicht
6. aus 7 Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unüblich
Mit vielen Grüßen an Euch, sowie an Herrn Buek, Euer
einstigster Diener

ges. W. Pauli

NACHLASS
PROF. W. PAULI

PAULI
ZURICH UNIVERSITY ZURICH

NACHLASS
PROF. W. PAULI

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY D
NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERS
OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH
TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS
FREDERICK REINES AND CLYDE COWAN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю. А. Шитов, В. Б. Бруданин, М. В. Фомина

Удивительные превращения нейтрино

Дубна
2020

Обложка *Елены Наумовой*

Шитов Ю. А., Бруданин В. Б., Фомина М. В.

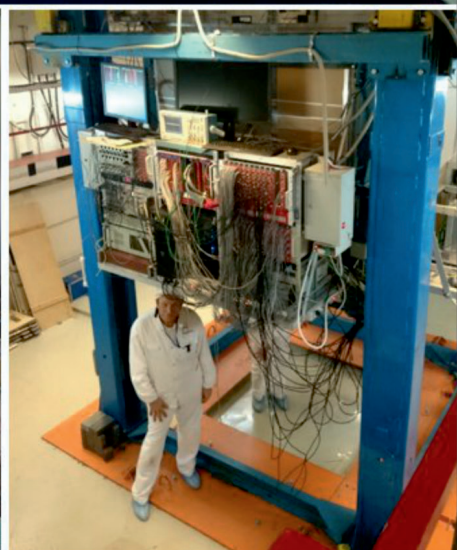
Ш64 Удивительные превращения нейтрино. — Дубна: ОИЯИ, 2020. — 30 с.; ил.

ISBN 978-5-9530-0542-5

ISBN 978-5-9530-0542-5

© Объединенный институт
ядерных исследований, 2020

*Памяти
Вячеслава Георгиевича Егорова
посвящается*



Вверху: В. Г. Егоров с Ш. Бриансон и Ж. Дойчем (PSI, Швейцария, 1991). Внизу: мыслитель в лаборатории (слева); атлант, держащий DANSS (КАЭС, 2016) (справа)

В зоопарке элементарных частиц нейтрино остается одним из самых загадочных и экстравагантных жителей. Вся яркая, богатая и увлекательная история исследований нейтрино наполнена романтикой, парадоксами, везением, трагедиями, фанатичной преданностью работе и колоссальной самоотдачей... В этой статье мы приоткроем завесу тайны нейтрино.

Призрак, летящий на крыльях бета-распада

Существование нейтрино предсказал Вольфганг Паули в своем одностраничном письме от 4 декабря 1930 года. Письмо было адресовано коллегам на конференции в Тюбингене. И начиналось оно так: «Дорогие радиоактивные дамы и господа!» (рис. 1). Письмо было кратким, но содержало перечисление всех основных свойств «нейтрона», как Паули изначально назвал свою частицу, — легкой, слабо взаимодействующей частицы со спином $1/2$, подчиняющейся принципу запрета [Паули] и вылетающей вместе с электроном в процессе бета-распада. Письмо заканчивалось фразой: «Извините, не могу быть с вами в Тюбингене, потому как должен присутствовать здесь, в Цюрихе, в ночь с 6 на 7 декабря, на балу». Как изящно было само письмо, так же изящно решала предложенная в нем гипотеза загадку непрерывности бета-спектра (и сохранения энергии в этом процессе), не дававшую покоя лучшим умам. Сделать между делом мировое открытие, а затем отправиться на бал — не это ли апофеоз гениальности?!

Через два года Джеймс Чедвик открывает нейтральную частицу — парника протона, входящего в состав ядра, и она получает имя «нейтрон». Однако довольно скоро выясняется, что эта частица слишком тяжела, чтобы быть гипотетической частицей Паули. И тогда Энрико Ферми, работая над теорией слабо взаимодействующих частиц, дает «нейтрону Паули» итальянское имя «нейтрино» — «маленький нейтрон, или нейтрончик», закрепившееся окончательно. Вместе с тем Паули был безутешен: «Какой ужас, я постулировал частицу, которую никто никогда не откроет!» Считая свое предположение чисто спекулятивным, он даже не задумывался (или не решался) опубликовать свою гипотезу вплоть до 1934 года, когда его нейтрино уже было встроено в теорию электрослабых взаимодействий его коллегой Энрико Ферми! Теперь каждый физик знает, что «фермион — это частица, подчиняющаяся принципу запрета Паули». Если задуматься, есть в этом определении что-то нелогичное... Хорошо, что в итоге награда

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich

Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabhkömmlich
bin.- Mit vielen Grüßen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer
untertänigster Diener

ges. W. Pauli

Рис. 1. Начало и окончание письма В. Паули, где он высказывает гипотезу существования нейтрино

нашла своего героя — в 1945 году В. Паули был удостоен Нобелевской премии именно за открытие «принципа запрета», носящего его имя.

Нейтральность и неуловимость нейтрино трудно себе представить. Пока вы читаете эту статью, сквозь ваше тело пролетает около 10^{15} (квадрильон) только солнечных нейтрино! Причем это не зависит от времени, когда вы читаете. Даже ночью, когда вы заслонены от Солнца Землей, вся ее огромная масса вещества в $6 \cdot 10^{24}$ кг бессильна и почти прозрачна для солнечных нейтрино, облучающих вас практически так же, как и днем. Но не пугайтесь: в отличие от остальных частиц, гигантские потоки нейтрино не нанесут вам никакого вреда. Чтобы дожидаться одной реакции нейтрино внутри вашего тела, вам придется постараться прожить всего лишь... 1700 лет! Действительно, у Паули были причины для «нейтриноскептицизма»! Ну а «нейтринооптимисты» понимали, что главные ключи успеха для детектирования неуловимых нейтрино — это мощный источник, большой детектор, эффективная реакция и защита от космического излучения в подземных лабораториях.

Но в неуловимости нейтрино великий гений ошибся, и уже через 25 лет, 15 июля 1956 года, он получил радиограмму из Лос-Аламоса от Фредерика Райнеса и Клайда Коуэна: «Счастливы сообщить Вам о безусловном детектировании нейтрино от продуктов деления [ядерного топлива] через **обратный бета-распад** протонов. Наблюдаемое сечение находится в согласии с ожиданиями на уровне 10^{-40} см⁻²». На что Паули ответил: «Спасибо за

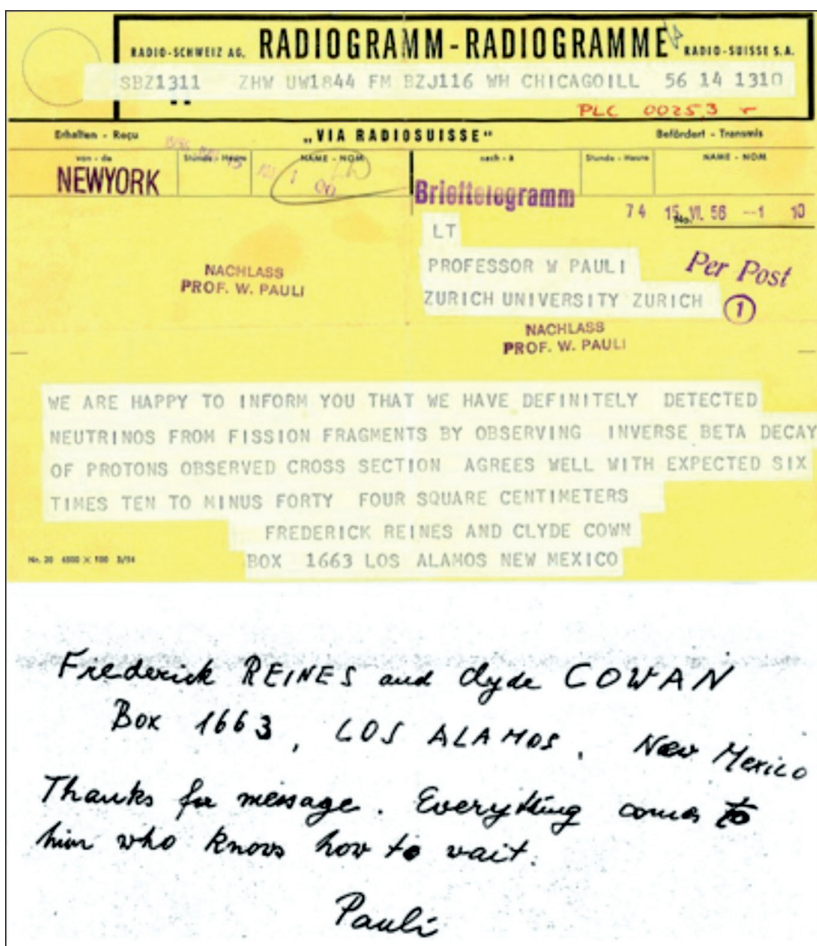


Рис.2. Радиограмма Райнеса и Коуэна об открытии нейтрино, постулированного 25 лет назад (вверху). Ответ Паули (из архива Паули в ЦЕРНе) (внизу)

сообщение. Все однажды приходит к тому, кто умеет ждать» (рис.2). Не это ли счастье для теоретика — стать свидетелем подтверждения собственной теории, пусть и через 25 лет! Вольфганг Паули переживет открытие нейтрино всего лишь на два года. К сожалению, сечение взаимодействия открытия нейтрино с Нобелевской премией оказалось таким же малым, как и с веществом: Нобелевская премия была вручена Фредерику Райнесу только в 1995 году, почти через 40 лет после открытия (уже после премии за открытие мюонного нейтрино в 1988 году). А Клайд Коуэн, увы, не дожил до этого момента.

Тремя важнейшими факторами успеха эксперимента Райнеса–Коуэна стали:

1) **использование мощного источника антинейтрино** — ядерного реактора (Savannah River). Современный коммерческий реактор является мощнейшим нейтринным источником, излучая около 10^{20} антинейтрино в секунду на 1 ГВт мощности (мощность стандартного модуля современной станции составляет 3 ГВт). Физическая защита реактора останавливает все частицы, кроме, как вы уж догадались, антинейтрино. «Только людям моим это не говорите, а то будут требовать доплату за вредность», — попросил ученых один из начальников АЭС. Мощность реактора Savannah River составляла $5 \cdot 10^{13}$ антинейтрино в секунду, и детектор находился в 11 метрах от него;

2) **использование обратного бета-распада (ОБР) в качестве реакции детектирования**. Электронные антинейтрино от реактора (1,8–10 МэВ) взаимодействуют с протонами детектора с образованием **позитрона**, который немедленно поглощается в детекторе (быстрый сигнал), и нейтрона, который захватывается в детекторе спустя определенное время после термализации (медленный сигнал). Регистрация двух сигналов от ОБР в совпадении позволяет эффективно подавлять фон;

3) **защита от космического и гамма-излучения**. Детектор Райнеса и Коуэна находился на глубине 12 метров под землей, что идентично сорокаметровой водной толще в плане защиты от космических лучей или, как говорят физики, 40-метровому водному эквиваленту — 40 м в.э.

Именно совокупность этих трех факторов позволила физикам обнаружить нейтрино при помощи детектора объемом всего лишь 200 литров — крошечный размер для нейтринной физики.

Превращения начинаются

Во время проведения эксперимента Райнеса–Коуэна по поиску антинейтрино произошло еще одно эпохальное событие. До Дубны, где работал уже всем известный «отец нейтрино», бывший итальянский, а тогда уже советский физик Бруно Максимович Понтекорво, в 1956 году дошел слух, что Райнес и Коуэн вместо антинейтрино детектировали **нейтрино** от реактора. Этот парадокс не давал покоя Бруно Максимовичу, и за несколько дней он нашел элегантное объяснение этой проблемы — **осцилляции** (превращения) антинейтрино в нейтрино на пути от реактора к детектору Райнеса–Коуэна! И хотя позже слух не подтвердился, разработанная Б.М.Понтекорво концепция и ее математическое воплощение с минимальными изменениями превратилась в то, что теперь известно всему миру как теория нейтринных осцилляций, триумфально подтвержденная экспериментами (Нобелевская премия 2015 года) и ставшая частью Стандартной модели. Невероятно, но Б.М.Понтекорво и его коллеги сочли идею осцил-

ляций слишком безумной и не опубликовали ее в солидном издании, ограничившись препринтами ОИЯИ. Такая вот мистическая параллель с Паули и его гипотезой о нейтрино. Из-за этой оплошности матрицу нейтринных состояний в нейтринной теории сначала назвали **MNS-матрицей** в честь японских ученых З.Маки, М.Накагавы и С.Сакаты, предложивших ее позже и независимо от Б.М.Понтекорво. Однако, в том числе и благодаря усилиям наших ученых (прежде всего соавтора Б.М.Понтекорво выдающегося советско-российского физика С.М.Биленького), заслуги Б.М.Понтекорво были признаны во всем мире, и теперь матрица в теории нейтринных осцилляций носит имя Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты (**PMNS-matrix**).

Раз зашел разговор о первенстве в науке, есть еще один печальный факт в истории нейтринной физики. Потенциально и совершенно заслуженно Б.М.Понтекорво мог быть соавтором всех четырех нобелевских премий, врученных до сих пор за достижения в нейтринной физике. Но в силу разных объективных причин не получил ни одной — к сожалению, справедливость не всегда торжествует в этом мире... Одна из нобелевских идей выгравирована на могиле Б.М.Понтекорво в Риме, подчеркивая его вечный приоритет. Согласно завещанию прах Бруно Максимовича «осциллировал» в две компоненты: одна захоронена в Италии, другая — в России... (рис.3).

Но хватит о грустном. После открытия реакторных антинейтрино воодушевленные физики захотели поймать нейтрино и от других источников «за шкуру», как пел Владимир Высоцкий. Их выбор пал на Солнце — нерукотворную термоядерную станцию, рождающую 10^{39} нейтрино в секунду.



Рис.3. Памятники Б.М.Понтекорво: на протестантском кладбище Тестаччо (Рим, Италия) (слева, фото Alvaro de Alvareis @ www.flickr.com), на Большевожском кладбище (Дубна, Россия) (справа, фото moscow-tombs.narod.ru)



Рис. 4. Бруно Максимович Понтекорво, хлор-аргоновый метод и нейтринные осцилляции. Рисунки М. С. Биленького

ду, мощностью 10^{19} одногигаваттных ядерных реакторов. Но не все так просто. Во-первых, квадрат расстояния (лучший способ борьбы с радиацией) никто не в силах отменить — и поверхности Земли достигают лишь 10^{11} нейтрино на 1 см^2 в секунду. Во-вторых, в отличие от реакторов, Солнце производит не антинейтрино, а нейтрино, да еще большая их часть имеет низкие энергии, и ОБР не может быть использован для их детектирования. В-третьих, необходима мощная защита от космического излучения.

Идея применения **хлор-аргонового метода** для регистрации солнечных нейтрино принадлежит... Б.М.Понтекорво (рис.4). И не только идея, но и полностью готовая методика измерений, разработанная «под ключ» в цикле экспериментально-практических работ, выполненных еще в 1946 году. Солнечные электронные нейтрино ($E > 0,8 \text{ МэВ}$) взаимодействуют с хлором ^{37}Cl , превращая его в радиоактивный аргон ^{37}Ar с периодом К-захвата 35 суток. Извлечение и детектирование ^{37}Ar позволяет зафиксировать сам факт взаимодействия солнечных нейтрино с веществом и определить сечение реакции. Эксперимент, основанный на этой методике, начался в 1967 году в шахте Хоумстейк (США) под руководством Реймонда Дейвиса. Детектором служил огромный 380 000-литровый бак, который содержал 610 тонн жидкого перхлорэтилена (ПХЭ) C_2Cl_4 и был расположен на глубине 1500 м под землей (4500 м в.э.). Раз в два месяца в течение 20 часов производилась продувка ПХЭ гелием и последующее извлечение 95% наработанного аргона. Весь ^{37}Ar , наработанный солнечными нейтрино за 2 месяца в 610 тоннах ПХЭ, умещался в крохотном пропорциональном счетчике-пипетке объемом $0,25/0,5 \text{ см}^3$! Солнечные нейтрино собирались, в буквальном смысле, поштучно. В ходе фантастиче-

ского эксперимента, продолжавшегося 30 лет, удалось зарегистрировать всего лишь 2200 солнечных нейтрино (**70 нейтрино в год**). Эксперимент Реймонда Дейвиса можно назвать делом всей его жизни, потребовавшим колоссальных усилий и самоотдачи. В 2002 году этот подвиг Геракла был совершенно заслуженно вознагражден Нобелевской премией за открытие космических (солнечных) нейтрино.

И уже первые результаты, полученные Р. Дейвисом, удивили всех: его детектор регистрировал **лишь треть нейтрино** от ожидаемого потока, рассчитанного по достаточно точной стандартной солнечной модели. То есть и после своего открытия нейтрино не перестало удивлять и ставить вопросы перед исследователями. Возникшая «загадка солнечных нейтрино» будоражила умы ученых в течение 30 последующих лет. Дефицит солнечных нейтрино, обнаруженный Р. Дейвисом, подтвердился и в ряде последовавших экспериментов. А решение этой загадки было найдено только в начале 2000-х годов, когда результатами трех экспериментов (SK, SNO и KAMLAND) были окончательно подтверждены нейтринные осцилляции, за открытие которых была присуждена Нобелевская премия по физике за 2015 год. В отличие от В. Паули, который через 25 лет дождался экспериментального подтверждения своей гипотезы существования нейтрино, Б. М. Понтекорво так и не дождал до экспериментального триумфа своей теории нейтринных осцилляций, потребовавшего в два раза больше времени — почти 50 лет. Здесь параллели между В. Паули и Б. М. Понтекорво, увы, расходятся.

Было установлено, что три типа наблюдаемых в природе нейтрино (электронное, мюонное и тау-нейтрино), или нейтринных ароматов, как романтично называют их физики, не являются унитарными частицами, а представляют собой суперпозицию из трех нейтринных состояний, описываемых той самой PMNS-матрицей, о которой уже шла речь ранее. Реальное нейтрино представляет собой **волновой пакет из трех компонент (нейтринных состояний)**, движущихся с разными фазовыми скоростями из-за различий в их массах. В результате соотношение (сочетание) компонент в волновом пакете летящего нейтрино **постоянно изменяется**. Поэтому, к примеру, электронное нейтрино ν_e , родившееся в реакции на Солнце в момент времени t_0 , через какое-то время в момент времени t_1 превращается в мюонное ν_μ . И все потому, что сочетание его нейтринных состояний преобразовалось из комбинации ν_e в комбинацию ν_μ . Пролетая в этот момент через резервуар с ПХЭ в Хоумстейке (чувствительный только к электронным нейтрино), мюонное нейтрино просто не могло быть в нем зарегистрировано. Детектор Р. Дейвиса (и все другие детекторы солнечных нейтрино) регистрировал треть солнечных электронных нейтрино, поскольку остальные две трети на момент пролета через детектор находились в ином состоянии (мюонное или тау-нейтрино). Да, через момент времени $2t_1$ нейтрино возвращается обратно в электронное состоя-

ние, но «поезд ушел» и оно уже далеко от нашего детектора! Если кому-то объяснение показалось слишком сложным, пусть посмотрит его популярную интерпретацию на рис. 4.

Обнаружение нейтринных осцилляций — это одно из революционных открытий, которое подарила нам современная фундаментальная физика. Из всех известных стабильных элементарных частиц только нейтрино обладают свойством осциллировать, и в этом их уникальность. И хотя нейтральные каоны также осциллируют (аналогия с которыми также сыграла свою роль в появлении идеи об осцилляциях нейтрино у Б.М.Понтекорво), по сравнению с нейтрино они нестабильны. В упрощенной двухкомпонентной модели вероятность превращения нейтрино $\alpha = A|v_1, v_2\rangle$ в нейтрино $\beta = B|v_1, v_2\rangle$ описывается элементарной формулой:

$$P_{\alpha\beta} = \sin^2(2\theta_{12}) \times \sin^2(1,27 \times \Delta m_{12}^2 \times L/E),$$

где L — расстояние от источника до детектора (м), E — энергия нейтрино (МэВ), $\sin^2(2\theta_{12})$ — угол смешивания, отвечающий за амплитуду осцилляций, и Δm_{12}^2 — разность квадратов масс нейтринных состояний v_1 и v_2 , определяющая частоту (скорость) осцилляций. Количественные величины $\sin^2(2\theta_{12})$, Δm_{12}^2 являются неизвестными параметрами (константами) модели, определяемыми экспериментально. При варьировании энергии нейтрино и расстояния от источника до детектора (изменении соотношения L/E) сканируется фазовое пространство нейтринных осцилляций и определяются реализованные в природе величины ($\sin^2(2\theta_{ij})$, Δm_{ij}^2).

В реальности мы имеем дело с трехкомпонентной PMNS-матрицей, формулы осцилляций заметно усложняются, добавляются различные эффекты, но основной осцилляционный принцип остается в силе. За последние 30 лет в мире проведено огромное количество нейтринных осцилляционных экспериментов, обзор которых выходит далеко за рамки настоящей статьи. Главный результат — успешное подтверждение теории нейтринных осцилляций, измерение с хорошей точностью большинства параметров, входящих в PMNS-матрицу, в частности всех углов смешивания и разности квадратов масс нейтринных состояний ($\sin^2(2\theta_{ij})$, Δm_{ij}^2 , $i, j = 1-3$, $i \neq j$). В настоящее время осцилляции подтверждены на всех источниках нейтрино (солнечных, атмосферных, реакторных, ускорительных) на большом диапазоне (5–6 порядков) энергий нейтрино и расстояний от источника до детектора (рис. 5).

Еще один важный момент теории: **осцилляции нейтрино возможны, только если масса нейтрино отлична от нуля**. Сейчас это считается очевидным, но в конце 1950-х годов эта гипотеза была смелой, поскольку подавляющее большинство физиков были убеждены, что нейтрино имеет нулевую массу — почти непререкаемый факт Стандартной модели того времени.

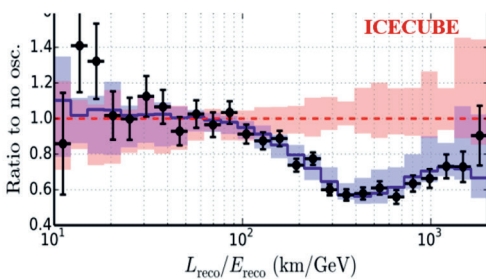
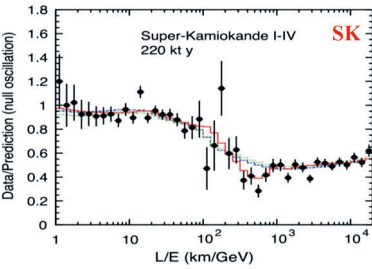
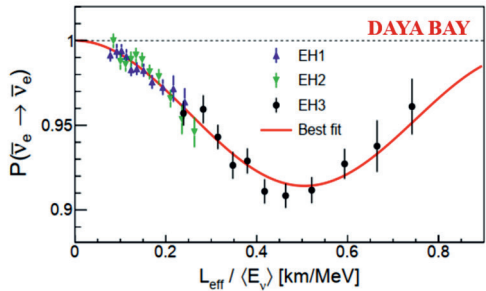
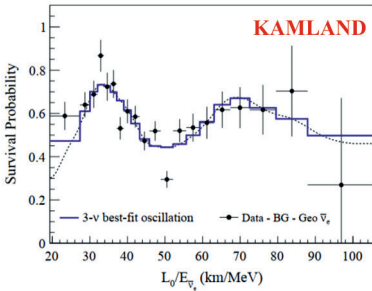
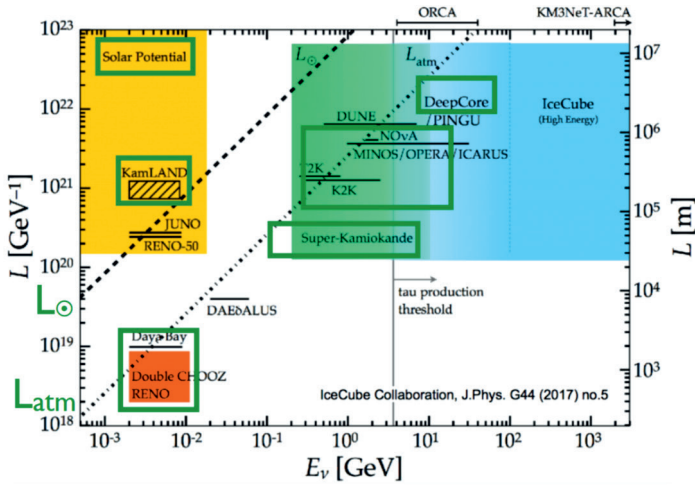


Рис. 5. L/E ландшафт нейтринных осцилляционных экспериментов, охватывающий 5–6 порядков величины по энергии нейтрино и расстоянию детектор–источник (IceCube // J. Phys. G. 2017. V.44(5)) (вверху). Экспериментальные осцилляционные L/E кривые, полученные в различных экспериментах (внизу)

Если вы подумали, что триумфальное открытие нейтринных осцилляций позволило спокойно почивать на лаврах, то сильно ошибаетесь. Нейтрино не спешило полностью раскрыть свои карты.

Исчезновение в никуда?

В 2011 году появляется статья французских ученых (*G. Mention et al. // Phys. Rev. D. 2011. V.83. P.073006*), которые пересчитали теоретический спектр реакторных электронных антинейтрино с учетом всех современных уточненных знаний о природе процесса. И неожиданно выяснилось, что результаты измерений потока реакторных электронных антинейтрино в 20 предыдущих экспериментах в среднем на 7 ± 2 % меньше расчетных (3σ эффект). Кроме того, калибровочные измерения с антинейтринным источником ^{51}Cr в галлиевых экспериментах по регистрации солнечных нейтрино SAGE и GALLEX также показали дефицит экспериментального потока нейтрино по сравнению с теоретическими ожиданиями на уровне 14 ± 6 %. Очередной дефицит и очередная загадка от нейтрино, получившая название **реакторная (и галлиевая) антинейтринная аномалия (RAA)**. Решение проблемы может иметь несколько вариантов: неизвестный систематический эффект, неверные расчеты или новый тип нейтринных осцилляций. Последняя гипотеза показалась физикам наиболее заманчивой. Предложенная идея напоминала выдвинутое и подтвержденное решение проблемы солнечных нейтрино. Напоминала, но не являлась его полным аналогом, поскольку дьявол, как всегда, таится в деталях. Во-первых, электронное антинейтрино не могло превращаться в другие известные типы нейтрино (мюонное или тау), поскольку параметры этих осцилляций уже были измерены в других экспериментах и отсутствовали в этой области фазового пространства осцилляций. Осцилляции могут происходить только в новый, четвертый тип нейтрино, в дополнение к трем уже имеющимся. Во-вторых, этот гипотетический четвертый тип нейтрино должен принципиально отличаться от трех известных **активных** нейтрино ($\nu_e, \nu_{\mu}, \nu_{\tau}$). Жесткие требования ровно трех активных нейтрино (не более и не менее) были получены на ускорителе в ЦЕРНе (измерение резонанса Z-бозона в эксперименте ALEPH).

Здесь мы сделаем небольшое отступление и отметим, что придумать теоретическую модель процесса не сложно. Гораздо сложнее придумать ее таким образом, чтобы она объясняла, а не противоречила многочисленным экспериментальным данным о массе других явлений и процессов, уже изученных в экспериментах разных направлений физики. Мы живем в удивительное время конвергенции результатов физических экспериментов, проводимых в совершенно различных и даже противоположных сферах физики, когда исследования макромира (космология и астрофизика) конкурируют с исследованиями микромира (физика ядра и элементарных частиц), измеряя и определяя пределы одних и тех же фундаментальных физических констант. И это убеждает физиков в том, что они находятся на верном пути понимания и составления цельной картины физического мира. Именно исследования свойств нейтрино объединили усилия микро-



Рис.6. Дизайн паспорта программы «Две бесконечности» (слева) и новый логотип французского Национального института физики ядра и элементарных частиц IN2P3 (справа)

и макроподходов — измерение двух бесконечностей, как образно назвали это явление французские физики (рис. 6). Идея настолько понравилась, что этот термин появился на логотипе института IN2P3. Измерение массы нейтрино потенциально возможно как в макро- (космология), так и в микрофизике (эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета-распада). Оба направления сейчас выдают пределы на массу нейтрино, которые конкурируют между собой.

Возможное четвертое нейтрино может быть только **стерильным**, то есть оно не может взаимодействовать с частицами нашего мира, или, как принято говорить, с **белой (видимой) материей**, иначе, как только через осцилляции с тремя активными нейтрино. Если гипотеза верна, то часть родившихся в реакторе электронных антинейтрино осциллирует в стерильные нейтрино на пути к детектору реакторных электронных антинейтрино. И, соответственно, не детектируется, объясняя тем самым дефицит в полной аналогии с решением загадки солнечных нейтрино. Описанная модель стерильного нейтрино в литературе часто называется $4\nu: 3 + 1$. Если же гипотеза $3 + 1$ справедлива, то наиболее вероятное значение параметров осцилляции (лучший фит), согласно RAA-публикации: $\sin^2(2\theta_{14}) = 0,05$, $\Delta m_{14}^2 = 2 \text{ эВ}^2$. Для сообщества нейтринных физиков это значение стало реперной точкой, проверку которой необходимо осуществить в эксперименте.

Куда же исчезают стерильные нейтрино? Это трудно представить, но они переходят в «потусторонний» мир **темной материи (bulk, brane world)**, в котором, возможно, существуют и другие **темные частицы**. Мистика?

Отчасти, ибо таковы наши современные представления о Вселенной, 95 % которой состоит из неизвестной и невидимой субстанции — **темной материи** и **темной энергии**, чью сущность нам еще только предстоит изучить (если это вообще поддается изучению...). Существование темной материи подтверждено многочисленными экспериментальными данными, обсуждение которых выходит за рамки этой статьи. Отметим лишь один важнейший известный факт о белой и темной материи: они взаимодействуют посредством гравитации.

Сделаем здесь еще одно отступление и расскажем историю известного американского эксперта в области двойного бета-распада Фрэнка Авиньони Третьего (Frank Avignone, III), который возглавлял оргкомитет крупной международной конференции по темной материи в Бразилии — очень религиозной стране. В разгар конференции неожиданно появилась делегация священников. Возглавлял их человек, занимавший высокое положение. Он стал на повышенных тонах задавать Фрэнку совершенно неожиданные вопросы: «Что за темная материя? Вы чем тут занимаетесь? Вы что, сатанисты? Требуем немедленно прекратить это безобразие!» И Фрэнку пришлось провести получасовую научно-популярную лекцию про темную материю, объяснить возбужденной группе религиозных деятелей, что они ученые и не питаются кровью христианских младенцев. Обычным людям надо рассказывать о том, что происходит в науке, пока они не начали сжигать ученых на костре...

Поиск темной материи — наиболее актуальная тема современной фундаментальной физики. А обнаружение стерильного нейтрино — частицы темной материи — станет фундаментальным прорывом и открытием Новой физики. Статья об RAA вызвала широкий резонанс в научном обществе (более 1500 цитирований) и породила большую экспериментальную активность в самых разных направлениях физики, нацеленных на проверку гипотезы осцилляций в стерильное нейтрино. Ученые ОИЯИ также участвуют в этом интригующем процессе погони за очередной потенциальной Нобелевской премией в области нейтринной физики.

DANSSы с нейтрино

Работы над проектом DANSS начались в конце 2006 – начале 2007 года с моделирования и поиска оптимальной конфигурации спектрометра. В качестве места для измерений была выбрана Калининская АЭС (КАЭС, г. Удомля), которая усилиями ученых Дубны и ИТЭФ превратилась в настоящую реакторную нейтринную лабораторию (рис. 7). Здесь проводятся эксперименты по поиску магнитного момента нейтрино — GEMMA (модуль 2), когерентного рассеяния нейтрино на ядрах — ν GEN (модуль 3) и осцилляций в стерильное нейтрино — DANSS (модуль 4). Началом экспериментальной

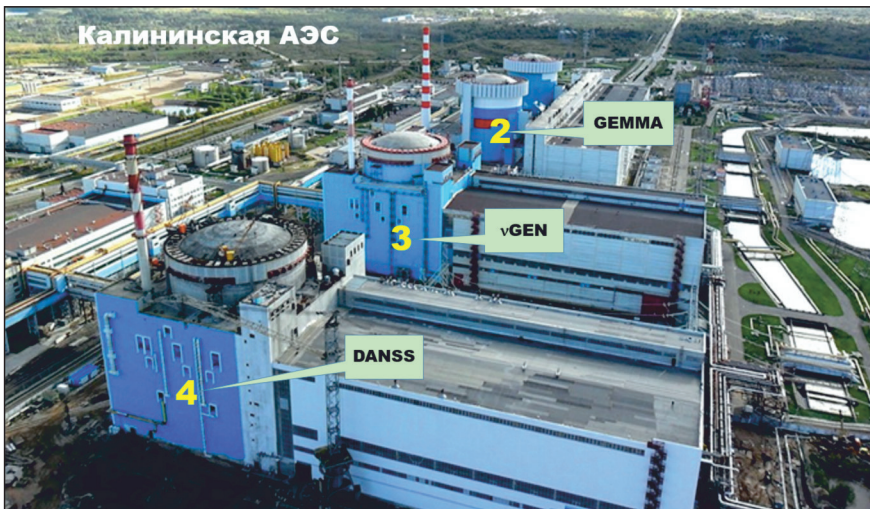


Рис. 7. Реакторные блоки Калининской АЭС в привязке к нейтринным экспериментам

части последнего стало создание прототипа DANSSINO, использующего ту же технологию детектирования антинейтрино, что и планируемый основной спектрометр. Размер прототипа мал — объем всего лишь 40 литров со светосбором всего лишь на два ФЭУ. Он был смонтирован в 11 м от реактора мощностью 3,15 ГВт (модуль 4 КАЭС). В 2012 году DANSSINO измерил спектр реакторных антинейтрино, регистрируя 70 событий в сутки при отношении сигнала к фону $S/B = 1$ (рис. 8). Повторив эксперимент Райнеса–Коузена в миниатюре, DANSSINO подтвердил работоспособность предлагаемой методики.

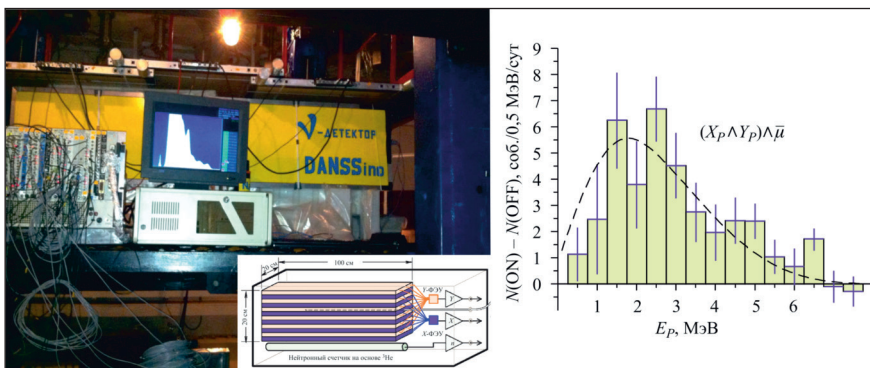


Рис. 8. Набор данных DANSSINO на КАЭС (слева) и разностный спектр реакторных антинейтрино, полученный в ходе измерений (справа)

С 2013 по 2016 год шли работы по созданию полномасштабного спектрометра DANSS, физический пуск которого состоялся весной 2016 года. Спектрометр DANSS представляет собой высокосегментированный пластмассовый сцинтиллятор общим объемом 1 м³, окруженный комбинированной пассивной защитой (медь, свинец, борированный полиэтилен), а также активной защитой от космических мюонов в виде сцинтилляционных пластин (рис. 9).

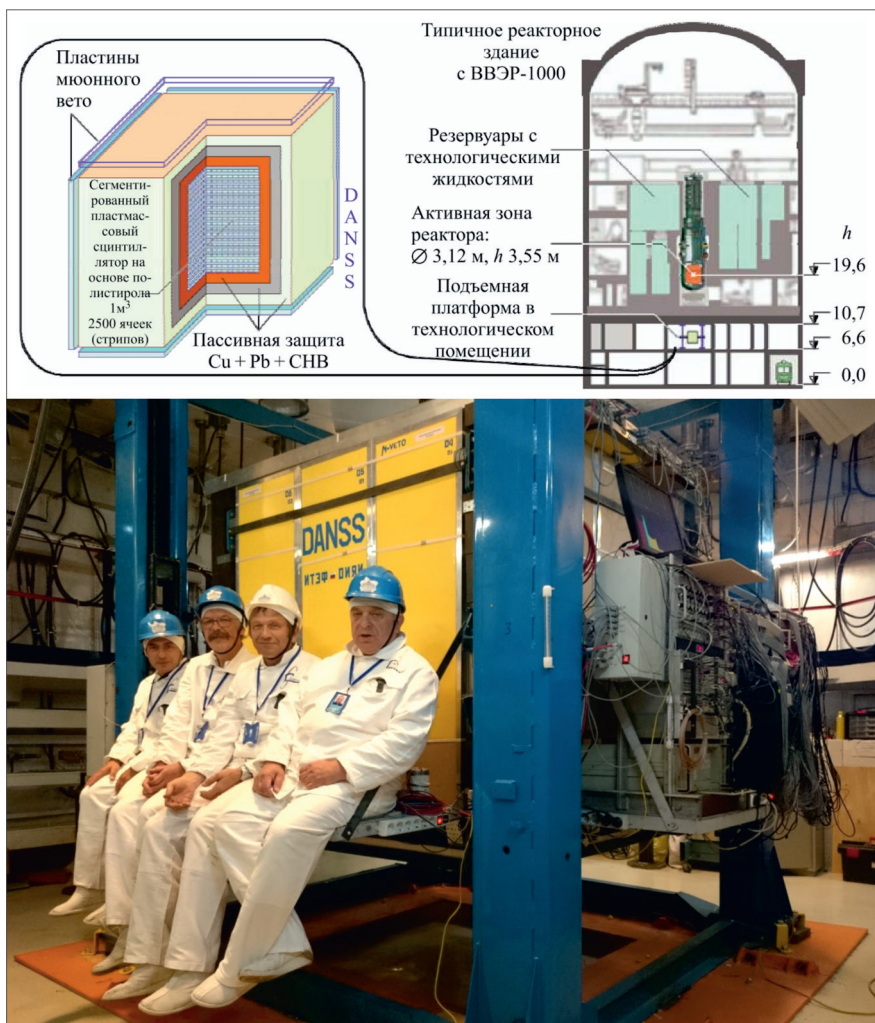


Рис. 9. Конструкция спектрометра DANSS (вверху слева), его расположение на подвижной платформе под реактором (вверху справа) и команда DANSS на борту (внизу)

DANSS расположен под 4-м энергоблоком Калининской АЭС на **подвижной платформе**, благодаря которой измерения производятся в трех положениях детектора: верхнем (10,9 м до реактора), среднем (11,9 м) и нижнем (12,9 м). Это рекордно малое расстояние до промышленного реактора, на котором проводятся научные измерения. Конкуренты находятся на расстояниях от 17 м и далее, чаще всего 25 м — таков размер герметичной зоны большинства иностранных коммерческих реакторов, внутрь которой физиков не пускают.

Смена положений DANSS происходит регулярно с недельным циклом прохода трех позиций. Это делается для нивелирования систематической погрешности измерений, связанных с непрерывным изменением состава ядерного топлива (отношение U/Pu) в ходе топливной кампании реактора. Сам реактор и примыкающие к нему большие водные бассейны для хранения отработанного ядерного топлива обеспечивают хорошую защиту от космического излучения (примерно 50 м.э. 6-кратное подавление космических мюонов и полное подавление первичных нейтронов от космических лучей).

Базовый элемент (ячейка) DANSS — это брусок (стрип) из пластического сцинтиллятора, покрытого тонким Gd-содержащим слоем, выполняющим функции рефлектора и захватчика нейтронов (рис. 10). Отметим, что этот инновационный метод был впервые предложен именно коллаборацией DANSS, хотя патент на технологию не был оформлен. Сбор света осуществляется через 3 спектросмещающие (WLS) фибры, одна из которых заведена на мультипиксельный лавинный фотодиод (SiPM, 2500 каналов), а две подсоединяются к ФЭУ (50 каналов). Стрипы уложены в слои, при этом соседние слои расположены ортогонально друг другу для фиксации

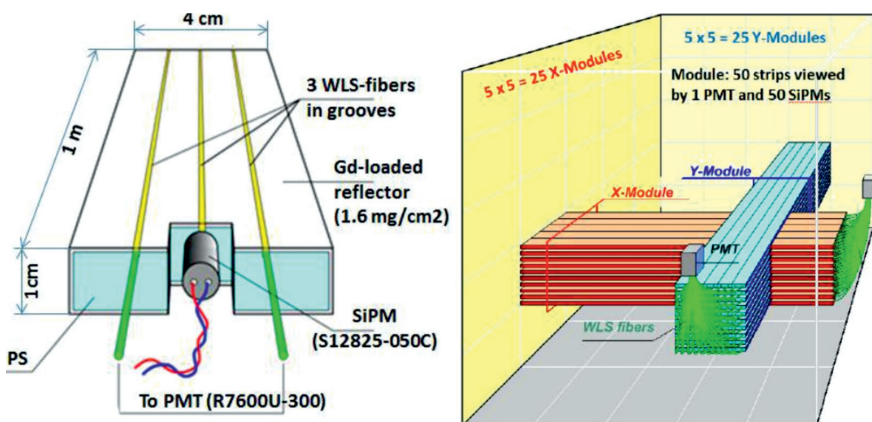


Рис. 10. Базовая ячейка (стрип) детектора DANSS (слева), принцип организации модульного светосбора на ФЭУ (справа)

XУ-координаты частиц, вызвавших срабатывание двух соседних слоев. ФЭУ собирают свет с 50 стрипов (5×10), **модулями** 20×20 см². В такой смешанной системе светосбора сигналы с ФЭУ используются и как триггеры событий, и для измерения энерговыделения, в то время как SiPM позволяют определять пространственные паттерны событий с точностью до единичных сработавших стрипов.

Детектирующей реакцией является обратный бета-распад (ОБР), что в сочетании с высокой сегментацией детектора позволяет эффективно измерять и фильтровать все известные компоненты фона: фон случайных совпадений, фон от космических мюонов и фон от быстрых нейтронов (более подробно детали определения и фильтрации фонов, а также критерии отбора событий обсуждаются в публикациях). Для калибровки детектора используются космические мюоны, источники гамма-излучения (²²Na и ⁶⁰Co) и нейтронов (²⁴⁸Cm), ¹²B и мишелевские электроны, образующиеся в распадах космических мюонов. Тем самым, калибровки покрывают область [1–50] МэВ, при этом точность калибровки, включая все систематические погрешности, составляет 1,5 %.

За четыре года измерений (3 топливных кампании реактора) DANSS зарегистрировал почти 4 миллиона событий, то есть скорость набора составляет 1М нейтрино в год (сравните с 70 нейтрино в год у Р. Дейвиса). Аккумулированная статистика и спектры ОБР-позитронов, измеренные спектрометром DANSS, показаны на рис. 11. Здесь и далее мы говорим о спектрах ОБР-позитронов, но, фактически, это спектры электронных нейтрино. Для грубой оценки энергии исходного электронного антинейтрино к энергии позитрона необходимо добавить (то есть сдвинуть горизонтальную шкалу на) 1,8 МэВ — порог ОБР-реакции.

Прежде чем перейти к основным результатам, хочется отметить специфику проведения работ возле ядерного реактора. Поскольку это объект со строго регламентированным режимом, каждое действие, каждое изменение в ходе работы требует больших усилий: только на монтаж подвиж-

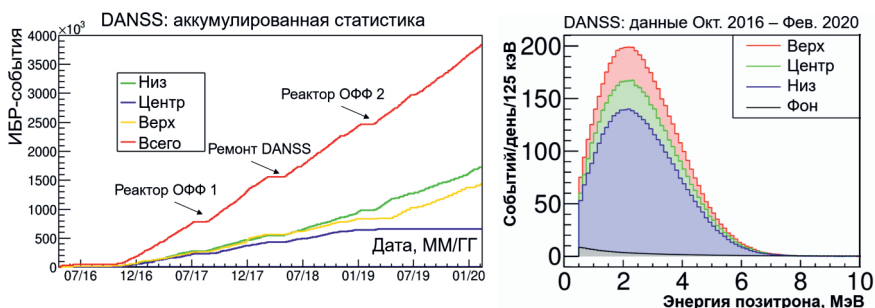


Рис. 11. Статистика накопленных антинейтрино (слева) и спектры ОБР-позитронов, набранные в разных позициях детектора (справа)

ной платформы под спектрометр потребовался почти год. Сначала согласование конструкции потребовало бесконечной бумажной работы. Затем мы долго ждали сборку платформы — ее могут выполнять только специально лицензированные для этого специалисты станции, занятые массой других дел по своим прямым обязанностям. Затем тестирование и сертификация электросистемы платформы. По требованиям безопасности с установкой DANSS нет интернет-связи, поэтому сбор данных и их перенос превращается в проблему. Кроме того, поочередные выездные дежурства, а это каждую неделю 285 км от Дубны до Удомли и обратно, регулярные капризности, устранения поломок и неполадок... За красивыми картинками спектров антинейтрино стоит большая и напряженная работа дубненской группы DANSS, на плечи которой выпала основная тяжесть создания, настройки, проведения и поддержания эксперимента в течение всего времени существования проекта. Конечно, это не 600-тонный бак Р. Дейвиса, «но что-то героическое в этом есть».

Помимо фундаментальных исследований свойств нейтрино создание DANSS также преследовало цель решить две прикладные задачи. А именно: 1) осуществить прецизионный мониторинг работы (мощности) ядерного реактора, 2) продемонстрировать чувствительность к измерению состава топлива (различного соотношения $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ в начале и конце топливной кампании). Вторая задача связана с тем обстоятельством, что во время топливной кампании в реакторе выгорает ^{235}U и нарабатывается ^{239}Pu (два основных изотопа, обеспечивающих «горение» реактора) и, соответственно, изменяются вклады ^{235}U и ^{239}Pu в процесс «горения» ядерного топлива. Поскольку спектры антинейтрино и энерговыделение от деления изотопов урана и плутония немного различаются, с течением времени изменяется как общая скорость счета, так и энергетический спектр электронных реакторных антинейтрино, регистрируемых в DANSS. Решение обеих этих задач важно для разработки экспериментальных подходов к контролю нераспространения ядерных материалов, а именно предотвращению сценариев несанкционированного извлечения ядерного топлива из реактора (прежде всего плутония — заряда для ядерной бомбы).

И здесь спектрометр DANSS убедительно продемонстрировал свои возможности. Во-первых, спектрометр осуществляет непрерывный и долгосрочный (уже почти 4 года) мониторинг мощности ядерного реактора на высоком уровне точности (1,5% на основании двухдневной статистики). Во-вторых, в экспериментальных данных четко прослеживается временная эволюция потока (и спектра) антинейтрино, связанная с изменением состава ядерного топлива (рис. 12).

И, наконец, переходим к основному результату. Проведение измерений на разных расстояниях от детектора до реактора является принципиально важной характеристикой проекта DANSS. Благодаря этому мы используем

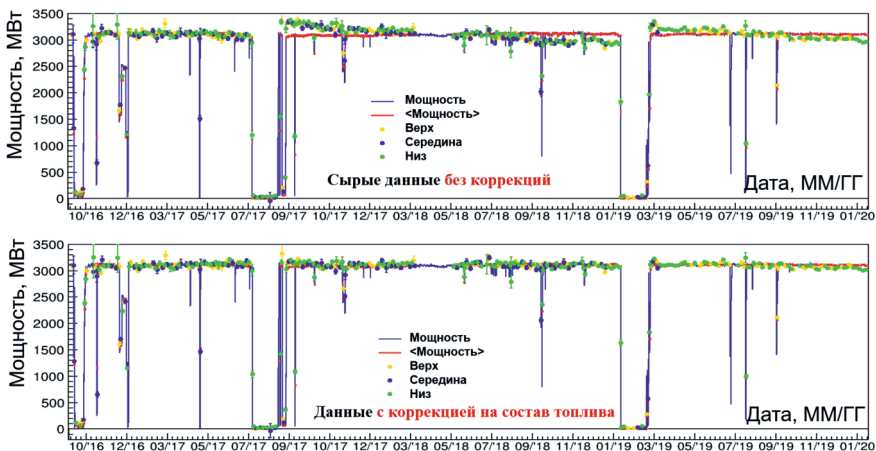


Рис. 12. Сравнение мощности реактора (синяя линия) с измерениями DANSS (цветные точки трех положений, нормированных на R^2). Вверху: данные без коррекции на состав топлива; внизу: данные с коррекцией на состав топлива

методику относительных измерений, анализируя отношения энергетических спектров электронных антинейтрино, измеренных на разных расстояниях. Эта методика **не зависит** от точной формы спектра и абсолютной эффективности детектирования нейтрино. Эти важные качества устраняют большую долю тех систематических погрешностей, которые обычно вносят существенный вклад в данные экспериментов, сравнивающих расчетные и измеренные спектры реакторных антинейтрино.

Основные результаты DANSS по всей собранной на сегодня статистике (3 миллиона ОБР-событий в позициях низ/верх, использовавшихся в осцилляционном анализе) отражены на рис. 13. Слева показано отношение энергетических спектров ОБР-позитронов, измеренных спектрометром DANSS в положениях низ/верх. Визуально и математически осцилляционный паттерн на ней не наблюдается. Лучший фит модели $3 + 1$ (фиолетовая кривая) имеет значимость менее $1,5\sigma$ и значимо не отличается от нулевой гипотезы (отсутствия осцилляций, синяя кривая). Для примера на график нанесена ожидаемая форма этого спектра при наличии осцилляций, соответствующих лучшей точке RAA-статьи ($\sin^2(2\theta_{14}) = 0,05$, $\Delta m_{14}^2 = 2 \text{ эВ}^2$, оранжевая кривая). Наличие таких осцилляций исключено на уровне значимости более 5σ . На рис. 13, справа показана область фазового пространства, в которой осцилляции исключены текущим анализом (заливка бирюзой). На сегодня это лучший в мире результат среди реакторных экспериментов по поиску стерильного нейтрино.

Здесь мы не можем снова не сказать о роли личности в истории. Успех DANSS был бы невозможен без решающей роли его инициатора, идейно-

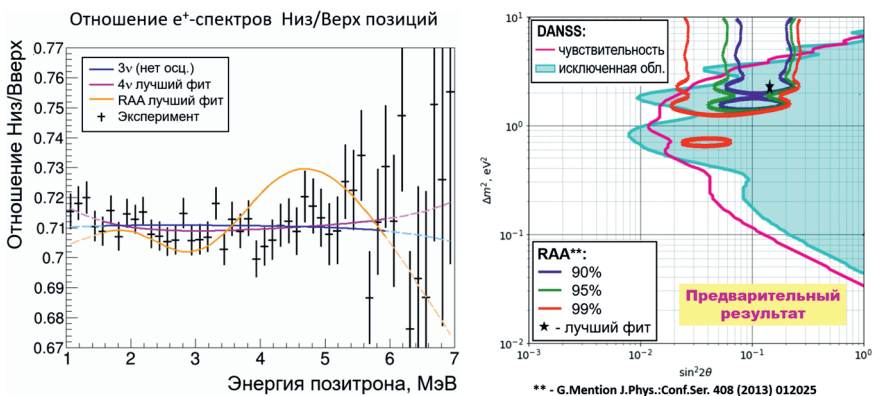


Рис. 13. Слева: отношение позитронных ОБР-спектров, измеренных в позициях низ/верх спектрометром DANSS. Справа: область, исключенная в результате текущего анализа (бирюзовая заливка). Модель 3 + 1, соответствующая лучшему фиту согласно RAA-публикации, показана оранжевой кривой слева и черной звездой справа

го вдохновителя, умелого практика, отличного наставника и бесменного руководителя **Вячеслава Георгиевича Егорова (02.10.1953–07.07.2019)**. К сожалению, смерть внезапно оборвала научные планы этого блестящего физика, полного идей и замыслов, но теперь его дело продолжают его коллеги, ученики, друзья, следуя главному завету Мастера: «Делай физику по-умному и с душой»!.. (рис. 14).

«Так что же, осцилляции в стерильное нейтрино отсутствуют?» — спросит вдумчивый читатель. Мы не сможем ответить на этот вопрос, пока на фазовом пространстве осцилляций остаются белые нетронутые места (рис. 13, справа) — там всегда может быть обнаружен эффект. Чем меньше угол смешивания (то есть амплитуда осцилляций) $\sin^2(2\theta_{14})$, тем сложнее бу-

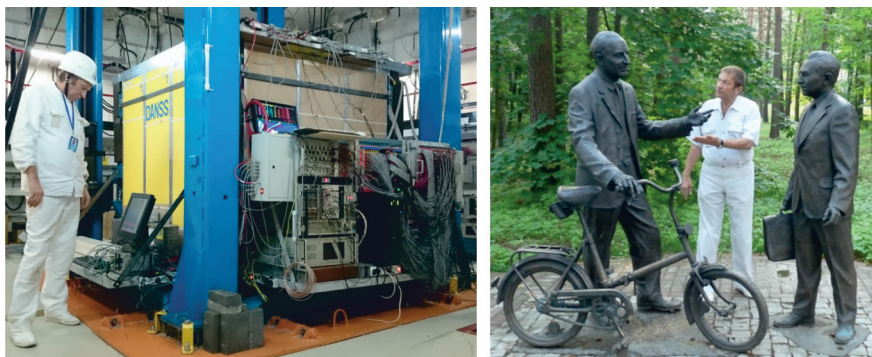


Рис. 14. Руководитель проекта DANSS В.Г.Егоров рядом с последним проектом его жизни (слева) и в дискуссии с Б.М.Понтекорво и В.П.Джелеповым (справа)

дет обнаружить эффект, поскольку требуемая точность должна быть существенно меньше угла смешивания. Поэтому мы еще долго будем лицезреть пустое поле в области $\sin^2(2\theta_{14}) \leq 0,01$ (амплитуда осцилляций $\leq 1\%$). Кроме того, существует и более серьезный фактор. В 2018 году группа физиков под руководством А. П. Сереброва (ПИЯФ, Гатчина) объявила об открытии осцилляций в стерильное нейтрино в эксперименте NEUTRINO-4 (наиболее свежая публикация — arXiv:2005.05301) с параметрами $\sin^2(2\theta_{14}) = 0,26$, $\Delta m_{14}^2 = 7,25 \text{ эВ}^2$. Пока научное сообщество относится к данному результату с большой долей скепсиса, прежде всего из-за того, что коллаборация NEUTRINO-4 применяет в анализе нестандартный подход, вызывающий много критических замечаний со стороны конкурентов — коллабораций PROSPECT и STEREO. Бурная дискуссия в разгаре, она выплеснулась на страницы arXiv.org, где стороны обмениваются сериями критических статей. Физики из PROSPECT и STEREO требуют от NEUTRINO-4 провести стандартный анализ, открыть данные. Коллаборация NEUTRINO-4 отстаивает правильность своего подхода и вместо открытия данных призывает изучать их публикации. Результат NEUTRINO-4 явно не вписывается в современные общепринятые теории нейтрино, но при этом отсутствуют факты или экспериментальные данные, гарантированно закрывающие результат этого эксперимента. Поэтому независимая проверка заявленного открытия — актуальная задача на ближайшее время.

В своей нынешней конфигурации DANSS не чувствителен к фазовой точке заявленного эффекта. Это связано с большим размером нейтринного источника, имеющего характерный размер ~ 3 метра (размер коммерческого реактора), что приводит к размыванию осцилляционного эффекта в области больших Δm_{14}^2 . Коллаборация NEUTRINO-4 работала на исследовательском реакторе CM-3 с характерными размерами $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ м}^3$. Дополнительной проблемой является невысокое энергетическое разрешение DANSS, дополнительно уменьшающее искомый эффект.

Для продвижения в область эффекта NEUTRINO-4 необходима модернизация спектрометра DANSS, план которой на ближайшие два года уже подготовлен. Главная ее цель — существенное повышение разрешения до 15% на МэВ с нынешних 34% на МэВ. Для этого будет собран новый спектрометр на новых стрипах ($2 \times 5 \times 120 \text{ см}^3$, 8 фибр по 2 SiPM на каждый) из лучшего пластического сцинтиллятора. При этом обновленный DANSS будет использовать ту же защиту и подвижную платформу, что позволит существенно снизить затраты на его усовершенствование.

Прекрасное далеко к нейтрино не жестоко

«Возможные осцилляции в стерильное нейтрино — это последняя оставшаяся загадка нейтрино?» — спросите Вы. Ну, конечно же, нет, «нейтрино только жить начинает — на пенсию переходит». А если серьезно,

то нейтрино еще таит в себе массу загадок, над которыми предстоит поломать голову. Попробуем очертить перспективы нейтринной физики в необычном ракурсе. Давайте предположим, сколько потенциальных нобелевских премий за исследования в области нейтринной физики может ожидать своих лауреатов — такой своеобразный рейтинг топ-10!

1. Открытие стерильных нейтрино. Стерильное нейтрино как частица темной материи станет свидетельством существования Новой физики.

2. Определение природы нейтрино, несохранения лептонного числа и абсолютной шкалы масс нейтринных состояний. Несмотря на длительные исследования нейтрино, мы до сих пор не можем дать ответ на один принципиальный вопрос: являются нейтрино и антинейтрино тождественными (одинаковыми) частицами (**майорановское** нейтрино) или это разные частицы (**дираковское** нейтрино)? Вопрос этот является ключевым для решения ряда фундаментальных проблем теории. В частности, может быть объяснено, почему наша видимая Вселенная состоит только из материи, хотя в начальный момент Большого взрыва (БВ) материи и антиматерии было поровну? Эта загадка давно волнует ученых, и одна из самых популярных и общепринятых гипотез предлагает механизм исчезновения антиматерии в ходе эволюции Вселенной после БВ при помощи майорановских нейтрино. Главный экспериментальный способ определения природы нейтрино — это обнаружение **безнейтринного двойного бета-распада (БДБР)**. В этом секторе наблюдается большая активность, реализуются крупномасштабные проекты нового поколения, и многие члены коллаборации DANSS также активно участвуют в этих работах (проекты GERDA, LEGEND и SuperNEMO). Обнаружение БДБР приведет к целому ряду других фундаментальных выводов для теории, а именно подтвердит несохранение лептонного заряда (числа), позволит определить иерархию масс нейтринных состояний, зафиксировать абсолютную шкалу масс нейтринных состояний и, наконец, потенциально — определить нарушение CP-четности.

3. Определение нарушения CP-четности в лептонном секторе и иерархии масс нейтринных состояний. Разность квадратов масс и углы смешивания между нейтринными состояниями в PMNS-матрице хорошо измерены. Однако порядок ранжирования нейтринных состояний по массе (и привязку к абсолютной шкале) определить из нейтринных экспериментов очень сложно. Нейтринные состояния могут ранжироваться по возрастанию массы двумя вариантами: **прямой** (ν_1, ν_2, ν_3) или **обратной (инвертированной)** (ν_3, ν_1, ν_2) **иерархиями**. Какой из этих вариантов реализован в природе — вопрос фундаментальный, поскольку имеет серьезные следствия для целого ряда параметров и процессов. Реализация в природе обратной иерархии была бы отличным подарком для исследователей БДБР. В этом случае поиски БДБР в проектах нового поколения могут увенчаться

успехом уже в ближайшие 5–10 лет. Одновременно с доказательством майорановской природы нейтрино БДБР закрыл бы и вопросы этого пункта.

В случае же реализации в природе прямой иерархии масс нейтринных состояний измерение БДБР через общепринятый механизм массового легкого майорановского нейтрино становится практически невозможным при современных технических возможностях. Малость измеряемого эффекта потребует гигантских размеров эксперимента (десятки тонн источника) одновременно с нулевым фоном.

И тогда загадки CP-четности могут первыми решить ряд новых нейтринных экспериментов, находящихся в фазе активного строительства: JUNO, DUNE и HK.

Неутешительные для экспериментов БДБР вести поступают из сектора исследований нейтринных осцилляций и астрофизики. Глобальный фит последних данных осцилляционных и космологических экспериментов закрывает обратную иерархию на серьезном уровне $3,5\sigma$, и в ближайшие 1–2 года значимость может вырасти еще больше.

Нужно ли закрывать поиски БДБР? Ни в коем случае! БДБР может также проходить через ряд механизмов, которые считаются пока альтернативными и экзотическими: примесь правых токов в электрослабом взаимодействии, CP-нарушение в слабом взаимодействии, тяжелое и стерильное нейтрино, безмассовый майорон и др. Сколько раз уже было так в истории физики, что общепринятые, общепризнанные, красивые и логичные теоретические модели рушились под ударом неопровержимых экспериментальных фактов! Поэтому открытие БДБР может быть где-то совсем близко, за углом. Кто знает, какой сюрприз приготовила нам природа?

4. Открытие экстрагалактических источников нейтрино. В ходе этой статьи мы неоднократно жаловались на тот факт, как слабо нейтрино взаимодействует с веществом и как сложно его обнаружить. Но, в соответствии с гегелевской диалектикой, любой недостаток неизбежно превращается в достоинство (и наоборот). Нейтрино образуются практически во всех вселенских катастрофах: взрывах сверхновых, коллапсах звезд, слияниях черных дыр и т.д. Обладая сверхмалой массой, они рождаются в большом количестве и уносят большую часть энергии, выделяемой в процессе. И если все другие возникающие частицы, активно взаимодействуя с окружающей средой, быстро забывают о процессе рождения, то нейтрино способно пронести начальную информацию (энергию и импульс) без изменений через всю Вселенную и передать ее в точке регистрации (нейтринный телескоп на Земле). Идеальный курьер! Более того, уже существует патент на «нейтринное радио» — передачу информации при помощи нейтрино. Пока это кажется фантастикой, но в ЦЕРНе эта концепция уже была подтверждена экспериментально: информация была передана на расстояние при помощи нейтринного пучка. И кто знает, что будет дальше?

Открытие экстрагалактических нейтринных источников даст нам новую фундаментальную информацию о явлениях и процессах, происходящих во Вселенной. Освоение нового канала информации — «нейтринного спектра» Вселенной — приведет к новым открытиям. Дубненские ученые и здесь находятся на переднем крае, активно участвуя в крупномасштабном проекте Baikal-GVD. Вместе со своими коллегами из IceCube, ORCA, KM3NET и др. они планируют подробно изучить нашу Вселенную в спектре нейтрино сверхвысоких энергий.

5. Открытие когерентного рассеяния реакторных нейтрино (КРН) на ядрах и поиск Новой физики в этом процессе. КРН — процесс, разрешенный в Стандартной модели, но пока окончательно не открытый в силу больших экспериментальных трудностей его регистрации. В 2017 году коллаборация COHERENT объявила об обнаружении КРН на цезии (Cs), а в этом году — на аргоне (Ar). Однако нейтрино от используемого «источника сколотых нейтронов» (Spallation Neutron Source) имеют слишком высокую энергию и процесс их взаимодействия с ядрами не является полностью когерентным. Поэтому данный результат требует подтверждения в независимых экспериментах, проведение которых уже планируется. Наиболее интересным было бы обнаружение КРН на реакторных нейтрино, где должна наблюдаться полная когерентность процесса. Важным преимуществом КРН является его повышенная интенсивность — на 2–3 порядка по сравнению с другими методами детектирования нейтрино (ОБР и эластичное рассеяние на электронах). Это позволит делать компактные детекторы антинейтрино для научных и прикладных целей, а также более интенсивно тестировать Стандартную модель на предмет наличия Новой физики. Дубненские ученые реализуют собственный проект ν GEN по поиску КРН на германиевых детекторах с точечным контактом и сверхнизким порогом. Проект базируется на соседнем с DANSS третьем модуле КАЭС (рис. 7).

6. Открытие магнитного момента нейтрино. Предсказываемый Стандартной моделью магнитный момент нейтрино крайне мал ($\mu_\nu \sim 10^{-18} \mu_B$) и не может быть зарегистрирован современными техническими средствами. В случае реализации в природе различных моделей Новой физики магнитный момент может быть существенно усилен ($\mu_\nu \sim 10^{-10} - 10^{-12} \mu_B$), и этот уровень уже может быть проверен экспериментально. Дубненские физики также пытаются совершить это фундаментальное открытие на 4-м энергоблоке Калининской АЭС в эксперименте GEMMA-2 (рис. 6).

7. Регистрация реликтовых нейтрино, которые должны существовать так же, как и реликтовые фотоны (реликтовое (космическое) микроволновое излучение, CMB). С учетом малой массы нейтрино, их отделение во время Большого взрыва прошло практически одновременно с безмассовыми фотонами. Поэтому плотность реликтовых нейтрино в первом приближении сравнима с плотностью реликтовых фотонов $\sim 300 \text{ см}^{-3}$

(возможно, только с поправкой на гравитационное уплотнение за счет взаимодействия с темной материей). Открытие CMB (Нобелевская премия по физике за 1978 год) было огромным прорывом в космологии и стало главным свидетельством в пользу Большого взрыва, а точные измерения CMB позволили построить прецизионную модель Вселенной. Похожий эффект ожидается и от измерений реликтового нейтринного излучения. Зарегистрировать такое малое количество нейтрино современные технологии пока не позволяют, существующие проекты (PTOLEMY) пока похожи на фантастику, но кто знает, что будет в будущем?

8. Прямое детектирование массы нейтрино через форму бета-спектра трития. Это еще один важный метод определения массы нейтрино вне зависимости от теоретических предположений о его природе. Этот метод был известен еще В. Паули и Э. Ферми, однако достижение требуемых сейчас уровней чувствительности к массе нейтрино < 1 эВ предполагает колоссальные усилия от экспериментаторов. После многолетних усилий по решению разнообразных технических проблем в прошлом году был запущен немецкий эксперимент KATRIN (рис. 15). Один коллега сказал: «Только немцы — самая педантичная и упорная нация — могли преуспеть в таком эксперименте». Так вот, KATRIN выдал ограничение $< 1,1$ эВ и в пределе способен достигнуть уровня чувствительности $\sim 0,25$ эВ к массе нейтрино. Интересно, что в случае справедливости результата, предсказанного в NEUTRINO-4, KATRIN должен видеть положительный эффект на уровне $\sim 0,5$ эВ. Поэтому будем с интересом следить за прогрессом этого эксперимента. Ранее считалось, что цель KATRIN на уровне 0,25 эВ является технологическим пределом для этого направления экспериментов. Теперь ситуация меняется. Предложен и поддержан новый проект (<https://clck.ru/PP4Ly>), в основе которого лежат самые современные технологические наработки: использование ионных ловушек, способных удерживать макрокочества трития; регистрация энергии бета-частиц по циклотронной частоте (радиочастотный метод); использование новейших квантовых усилителей со сверхнизкими уровнями шумов. Авторы проекта не видят принципиальных технических ограничений для достижения уровня чувствительности к прямому измерению массы нейтрино на уровне 0,01 эВ. Если успех технологии будет подтвержден, то здесь нас также может ожидать серьезное открытие. При успешном развитии этой методики она может быть применена для детектирования реликтовых нейтрино.

9. Открытие диффузного потока нейтрино от сверхновых во Вселенной и прямая регистрация нейтрино от взрыва сверхновой в нашей Галактике. Еще одно крайне интересное направление исследований нейтрино. Взрыв сверхновой в нашей Галактике даст нам огромный пласт информации — и в современных больших детекторах (SNO, SK, KAMLAND), и в будущих (JUNO, HK, DUNE) в течение десятка секунд будут зарегистри-



Рис. 15. KATRIN на пути к лаборатории (вверху, фото Karlsruhe Institute of Technology) и работы внутри спектрометра (внизу, фото Michael Zacher)

рованы сотни и тысячи нейтринных событий! Анализ этих данных имеет большой потенциал для новых открытий! К сожалению, частота таких событий крайне редка (~ 3 взрыва в 100 лет). Последний раз вспышка сверхновой была зарегистрирована в 1987 году, как раз ровно 33 года назад, поэтому есть надежда, что следующий взрыв не за горами. В то же время

вспышки сверхновых во всей Вселенной происходят несколько раз в секунду, поэтому суммарный изотропный поток от этих источников может быть зарегистрирован в планируемых новых больших нейтринных детекторах (HK, DUNE). Это будет новое важное открытие и новый фундаментальный кирпичик в здании наших знаний о природе мира.

10. Определение массового механизма нейтрино. «Частица Бога», бозон Хиггса, открытый на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе, — самое яркое и известное научное открытие современной физики — дал массу всем элементарным частицам... кроме нейтрино, разумеется! Масса нейтрино слишком мала по сравнению с массами других фермионов, что требует аномально малой константы связи с бозоном Хиггса. Кроме того, для связи с ним необходимо существование правых нейтрино, которые пока не детектировались. В Стандартной модели, начиная с Э.Ферми и до наших дней, нейтрино имеет нулевую массу и механизм формирования его массы **остается неизвестным!** И самое главное: какой бы вариант не реализовывался в природе, он потребует привлечения Новой физики, новой частицы. И это будет новое фундаментальное открытие.

Как видно из нашего рейтинга топ-10 потенциальных нобелевских премий, нейтринная физика будет оставаться привлекательным направлением, как минимум, ближайшие лет сто. Молодым и честолюбивым физикам работы хватит надолго, нейтрино же продолжит удивлять нас своими головоломками и удивительными превращениями.

Шитов Юрий Александрович
Бруданин Виктор Борисович
Фомина Мария Викторовна

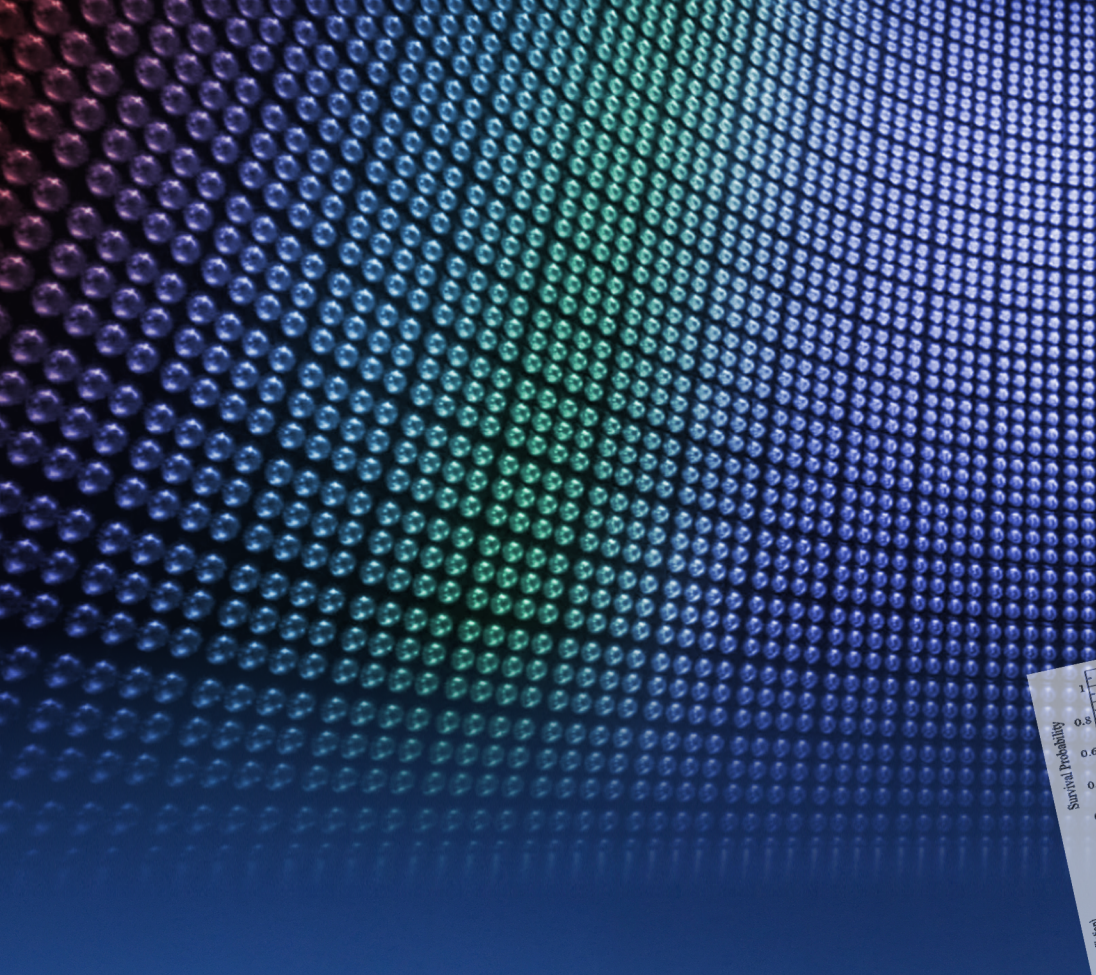
Удивительные превращения нейтрино

2020-21

Редактор *Е. В. Калининкова*
Компьютерная верстка *И. Г. Андреевой*

Подписано в печать 25.09.2020.
Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,08. Тираж 135 экз. Заказ 59986.

Издательский отдел
Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/



BAIKAL-GVD



Survival Probability
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

Ala
per
vom
td.,
unter