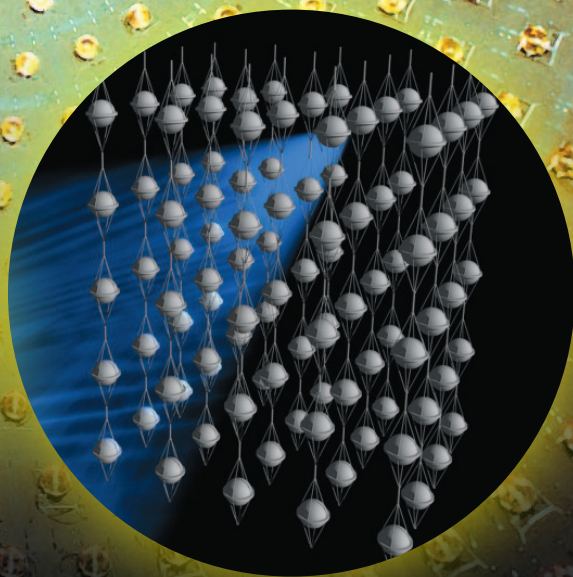
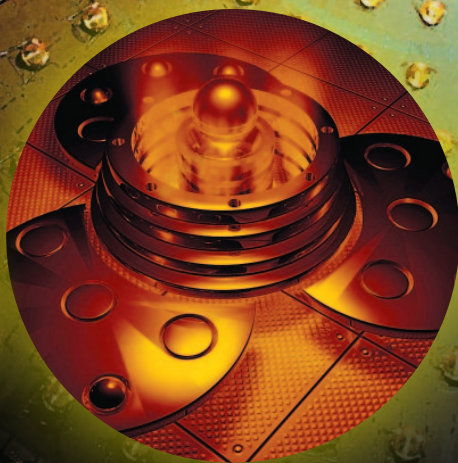
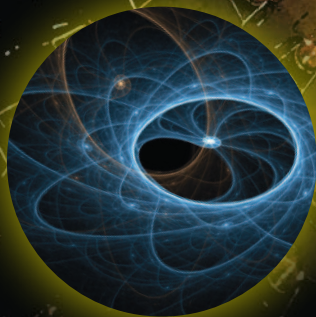


Неуловимые **НЕЙТРИНО,**

*или Гости Соляриса —
предвестники
новой физики*



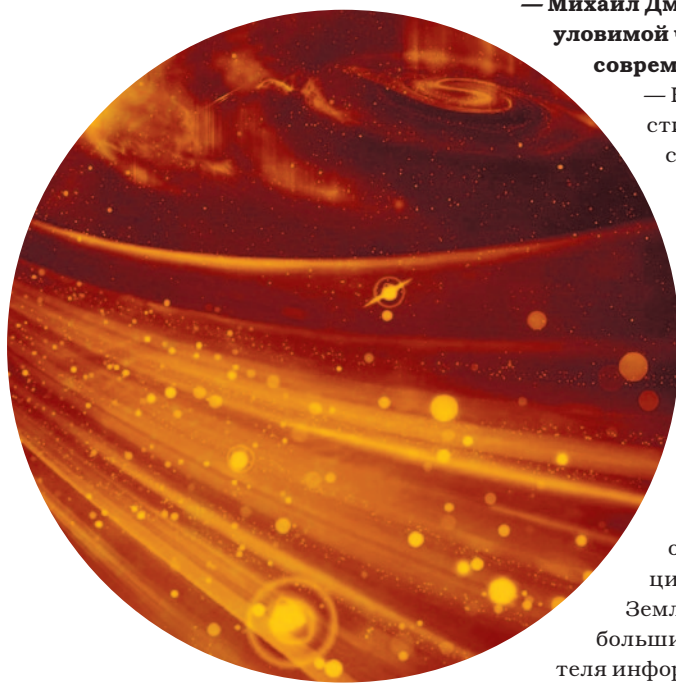
Нейтрино — самая распространенная частица во Вселенной. Каждую микросекунду человека пронизывают около 1 млрд нейтрино только от Солнца. Однако регистрация нейтрино остается трудной задачей. За десятки лет, прошедших после открытия этой неуловимой частицы, исследователи научились регистрировать нейтрино не только от атомных реакторов или ускорителей, но и от Солнца и недр нашей планеты. Как новые исследования могут помочь физикам развить стандартную модель элементарных частиц, выяснить природу темной материи во Вселенной, а также найти пути практического использования нейтринного излучения, вы можете узнать из интервью с заместителем директора Центра фундаментальных исследований НИЦ «Курчатовский институт» доктором физико-математических наук Михаилом Дмитриевичем Скорохватовым.



.....

— Михаил Дмитриевич, почему исследования нейтрино, этой трудноуловимой частицы с крохотной массой, становятся все важнее для современной физики?

— Есть несколько причин. Нейтрино — это элементарная частица, которая входит в семейство лептонов — частиц, не участвующих в сильных взаимодействиях. Но еще она не имеет заряда, а значит, не участвует в электромагнитных взаимодействиях и не входит в состав окружающего нас вещества. Такая частица может быть нейтральной, т.е. тождественной собственной античастице — антинейтрино, что отличает ее от других заряженных элементарных частиц. Кроме того, до настоящего времени нам не удалось измерить массу нейтрино. Существуют и другие удивительные свойства и явления, связанные с нейтрино, которые невозможно объяснить с помощью современной теории — стандартной модели частиц. Это первая причина актуальности исследований. Во-вторых, нейтрино, которое очень слабо взаимодействует со средой, оказывается весьма полезным инструментом для междисциплинарных исследований крупных объектов — Солнца, Земли и т.д. Нейтрино может «без искажений» проходить через большие объемы вещества и тем самым сохранять для исследователя информацию о внутренней структуре этих объектов. И, наконец,



третий важный аспект — это глубокая связь нейтринной физики с другими областями науки, такими как астрофизика или космология: мы будем лучше понимать свойства материи и Вселенной, именно изучая фундаментальные свойства нейтрино.

— **Что мы сейчас знаем про массу нейтрино? Лет 15 назад считалось, что ее нет; теперь она есть. Для человека постороннего выглядит путаницей, вряд ли способной внести ясность в фундаментальные свойства материи.**

— Масса нейтрино — один из центральных вопросов в физике нейтрино. Сейчас мы уверены, что она есть, но почему такая маленькая? Все объяснения этого факта выходят за рамки стандартной модели. Наиболее популярная гипотеза заключается в следующем. Как известно, у элементарных частиц есть такое квантовое число, как спин. И для некоторых взаимодействий очень важно, как направлен этот спин — по движению частицы или против. Для нейтрино спин направлен против движения, и такие частицы мы называем левосторонними. Оказывается, что как раз в слабых взаимодействиях могут участвовать только они. Это приводит к тому, что мы наблюдаем лишь левосторонние нейтрино. Но если предположить, что правосторонние нейтрино все-таки существуют и обладают очень большой массой, то в квантовой теории разработан специальный механизм, действие которого связывает «правые» и «левые» состояния и обеспечивает малую массу экспериментально наблюдаемых нейтрино. Так что вопрос массы нейтрино очень сложен. И, возможно, он может быть причиной дисбаланса материи и антиматерии в природе, а это одна из глубинных проблем современной науки. Однако про массу нейтрино мы знаем, что ее значение, по видимому, составляет ничтожные доли электронвольта, хотя экспериментальное ограничение для массы электронного нейтрино — примерно 2 эВ. Для сравнения: аналогичная цифра для ближайшего соседа по массе, электрона, — уже половина мегаэлектронвольта.

— **Откуда получают такие оценки по массе нейтрино?**

— Еще в середине прошлого века стали наблюдать солнечные нейтрино, поток которых оказался гораздо меньше предсказанной величины. Было много гипотез на этот счет. Бруно Максимович Понтекорво, который тогда работал в Дубне, предложил идею, согласно которой нейтрино может переходить из одного типа в другой. Этот процесс

теперь широко известен как нейтринные осцилляции. Что это такое? Есть как минимум три типа нейтрино — электронное, мюонное и тау-нейтрино. Это разные частицы с разными массами, но при свободном распространении они могут трансформироваться друг в друга, т.е. если сначала на ускорителе создали, например, пучок мюонных нейтрино, то при удалении от точки рождения уже можно наблюдать их переходы в электронные или тау-нейтрино. Такие превращения невозможны, если у нейтрино нет массы, и они же дают оценку для разницы квадратов масс разных поколений нейтрино. Вопрос теперь только в абсолютных значениях этих величин.

— **Таким образом, на сегодня уже есть экспериментальные подтверждения осцилляций нейтрино?**

— Да, эксперименты такого рода уже есть. После их теоретического предсказания осцилляции очень долго пытались найти в потоке нейтрино от атомных реакторов, ускорителей или даже в природе. Но и сегодня еще остаются ученые, которые не совсем верят в это явление. Почему?

Потому что в экспериментах мы наблюдали исчезновение нейтрино — родился поток электронных нейтрино на Солнце, а до Земли дошел уже уменьшенным. Есть мнение, что это может быть следствием не осцилляций, а какого-то другого механизма. Теперь уже есть эксперименты, в которых фиксируется не только ослабление потока рожденных нейтрино одного типа, но и появление нейтрино других типов. Например, недавно появилось сообщение об успехе эксперимента OPERA. Его проводили приблизительно следующим образом. В CERN пучок протонов бил по мишени. Рождались заряженные каоны и пионы, которые отбирались по знаку заряда и импульсу, фокусировались и поступали в вакуумный туннель, двигаясь в котором, они распадались на лету на мюоны и мюонное нейтрино. Пучок мюонных нейтрино направлялся в итальянскую подземную Национальную лабораторию Гран-Сассо, проходил под землей примерно 730 км, и детектор OPERA достоверно регистрировал появление в нем новых нейтрино — тау-нейтрино. В другом ускорительном эксперименте T2K в Японии наблюдались переходы мюонных нейтрино в электронные.

— **Впечатляющий эксперимент: 730 км под землей ради регистрации превращения одной неуловимой частицы в другую.**

— Безусловно. Но такие исследования сейчас планируются по всему миру. Нейтринные пучковые эксперименты играют очень важную роль в современной

*В середине
прошлого века
стали наблюдать
солнечные нейтрино, поток
которых оказался гораздо
меньше предсказанной величины.
Согласно идее Б.М. Понтекорво,
работавшего тогда в Дубне,
нейтрино может переходить
из одного типа в другой.
Этот процесс теперь
широко известен
как нейтринные
осцилляции*

физике. С чем это связано? Вернемся немного к теме, о которой мы уже говорили, — дисбалансу материи и антиматерии. В физике существует комбинированная CP -симметрия — инвариантность законов при одновременной операции зеркального отражения координат и замене частицы на античастицу. Изучение распадов нейтральных мезонов показало, что в слабом взаимодействии CP -симметрия тоже нарушена. Это говорит о том, что в природе между частицами и античастицами существуют фундаментальные различия. Однако такие явления были обнаружены только в кварковом секторе, а у лептонов эффектов CP -нарушения пока не наблюдалось. Изучение осцилляций нейтрино и антинейтрино в экспериментах с интенсивными нейтринными пучками от ускорителей дает нам уникальный инструмент для решения проблемы. Поэтому ускорительные эксперименты, в которых планируется изучать осцилляции нейтрино высоких энергий на больших расстояниях, — это одни из наиболее приоритетных проектов во всем мире. Они обсуждаются, в частности, и в России: в рамках Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» такие исследования рассматриваются в планах модернизации ускорительного комплекса Института физики высоких энергий в Протвине. Здесь уместно упомянуть об одном крайне интересном следствии двух гипотез об упомянутых ранее массивных нейтрино и нарушении CP -симметрии при взаимодействии лептонов. На их основе была развита теория, известная как лептогенезис, которая может помочь объяснить происхождение вещества во Вселенной и наблюдаемое нарушение симметрии между материей и антиматерией. Конечно, это всего лишь сценарий, но есть надежда, что развитие экспериментальных нейтринных исследований позволит проверить эту теорию.

— Вы говорили о том, что многие явления, связанные с нейтрино, выходят за рамки стандартной модели. Об осцилляциях вы уже рассказали. Но какие еще?

— Важно понимать, что стандартная модель не есть какая-то застывшая теория. Стандартной она называется только потому, что фиксирует наши знания на текущий момент. В рамках стандартной модели предполагается, что у нейтрино нулевая масса. Но сегодня мы знаем, что это не так. И, как я уже говорил, именно нейтринная физика позволяет нам так или иначе искать явления за пределами стандартной модели. Приведу еще один пример. На сегодня мы считаем, что существует три поколения частиц: три поколения кварков, три поколения лептонов (электрон, мюон, тау-лептон и соответствующие нейтрино). Но есть некие указания на то, что существует и четвертое поколение нейтрино — стерильное нейтрино. Опять новая цель: поставить эксперименты для обнаружения таких частиц. В этом сила нейтринной физики. В других областях физики частиц мы пока не видим никаких отклонений от стандартной модели. Посмотрите: на Большом адронном коллайдере была открыта частица, которая очень похожа на бозон Хиггса. Выражаюсь так аккуратно, следуя заявлениям коллег —

участников этого открытия. Очевидно, что нужны дополнительные исследования, которые планируются в ближайшие годы. Но ведь ранее предполагалось, что на БАК мы будем находить и другие предсказанные частицы, например суперсимметричные. Однако пока мы их там не видим. И что если дальше кроме бозона Хиггса мы там ничего не обнаружим? Наверное, все равно ускорительные эксперименты будут развиваться, есть еще много интересных предложений. Но в нейтринной физике уже есть все указания, что делать дальше. Нейтринные осцилляции, масса нейтрино, стерильные нейтрино, CP -нарушение. Сама природа нам подсказывает, что на этом пути мы можем обнаружить что-то принципиально важное для расширения стандартной модели.

— И при этом объяснить для себя еще, например, природу темной материи?

— Сейчас мы не знаем, из чего эта темная материя состоит, т.е. мы видим, что она есть, но что дальше? В первую очередь мы понимаем, что составляющие ее частицы должны быть электрически нейтральными. Если правые нейтрино существуют и действительно обладают подходящей массой, то это идеальный кандидат на роль темной материи. Не надо придумывать никаких других частиц. Минимальный способ, чтобы расширить стандартную модель. Но как можно поймать эту темную материю? Единственный способ, который мы сейчас можем представить, основан на движении частиц темной материи. Например, если мы пролетаем сквозь ее скопления и принимаем детектор за систему покоя, то частицы темной материи, обладающие скоростью, должны рассеиваться на ядрах в чувствительном объеме детектора. Но если частицы темной материи очень тяжелые, то ядро получит маленькую отдачу, которую можно зарегистрировать только весьма тонкими и чувствительными методами, которые уже развиты в рамках нейтринной физики. Именно поэтому эксперименты по прямому детектированию частиц темной материи сегодня становятся частью нейтринных исследований.

— Расскажите, пожалуйста, об этих сверхчувствительных методах нейтринной физики.

— Экспериментальный путь, связанный с исследованиями нейтрино, очень непрост. Нейтрино слабо взаимодействует с веществом, и, чтобы наблюдать его, нужны очень крупные установки, которые смогут регистрировать достаточное количество событий. Кроме того, естественная радиоактивность материалов и фон космического излучения, который имитирует нейтринные взаимодействия, мешают проведению тонких нейтринных экспериментов. Поэтому нейтринные установки — это не просто детектор. Это огромные экспериментальные платформы, заглубленные лаборатории: только в них можно достичь низкого фона посторонних событий. Все такие проекты очень дорогостоящие. Сегодня ни одно государство в мире не может себе позволить в одиночку построить и эксплуатировать нейтринные комплексы. Мы в России очень заинтересованы в создании новых совместных лабораторий — на нашей территории или рядом. Например, рассматривается возможность создания

такой инфраструктуры в Финляндии. Там есть глубокие шахты, а совсем рядом, в Гатчине Ленинградской области, находится Санкт-Петербургский институт ядерной физики, который тоже входит в состав НИЦ «Курчатовский институт».

— В каких международных нейтринных проектах сейчас участвует Курчатовский институт?

— Ученые институтов НИЦ «Курчатовский институт» задействованы в нескольких крупных международных проектах, которые охватывают фактически весь спектр фундаментальных и междисциплинарных исследований в области нейтринной физики. В качестве примера приведу один из крупнейших проектов, который реализуется в Национальной лаборатории Гран-Сассо в Италии. Это проект «Борексино». На разных этапах проекта в нем участвовали 11 стран, основные игроки — это, безусловно, Италия, США, Франция, Германия и Россия. На стадии разработки проект развивался 17 лет, и в результате была создана экспериментальная платформа, которая позволила проводить эксперименты в условиях с непревзойденными фоновыми характеристиками. С помощью крупномасштабного нейтринного детектора «Борексино» было получено очень много интересных для нейтринной физики результатов — измерены потоки солнечных нейтрино, геонейтрино, исследовались фундаментальные свойства нейтрино и редкие процессы за пределами стандартной модели. Далее, развиваются новые проекты по изучению звезд на разных стадиях эволюции, рассматриваются возможности поиска стерильных нейтрино. В скором времени на этой экспериментальной платформе планируется запуск нового эксперимента *Dark Side* по обнаружению тех самых частиц темной материи. Таким образом, «Борексино» — это в чистом виде междисциплинарный проект: его инфраструктура, уникальные коллективы физиков, инженеров позволяют решать самые разные задачи. Очевидно, что в рамках таких проектов развиваются и передовые технологии. Так, например, в Гран-Сассо создан завод по производству сверхчистых жидкостей, синтезу сцинтилляторов.

— Побочный практический эффект от фундаментальных исследований?

— Да, как с Интернетом, который родился, по сути, из работ по физике частиц, для коммуникаций внутри и между экспериментами на ускорителях. Сегодня актуально создание низкофоновых установок на основе сверхчистых материалов, таких как, например, титан, который по своим прочностным характеристикам

подходит для создания детекторов. Но как убрать из него радиоактивные примеси, которые мешают проведению экспериментов? Для титана эта задача сейчас решается российскими специалистами. При разработке проекта «Борексино» мы нашли подходы и создали чистые жидкости, обладающие беспрецедентно низким уровнем содержания радиоактивных примесей. Можно смело сказать, что сейчас самая чистая среда в мире находится в подземелье Гран-Сассо внутри детектора «Борексино». Эти же технологии, найденные в рамках фундаментальных исследований, могут широко применяться и в других областях. Например, сверхчистые жидкости крайне востребованы в фармакологической промышленности, а другие материалы — в радиоэлектронной. Многие дефекты в структуре полупроводников электронных микросхем образуются как раз после распада вкраплений радиоактивных элементов в их составе. Сверхчистым титаном, необходимым для производства различных элементов при протезировании, очень заинтересовались медики.

— Мы плавно перешли к практической стороне нейтринных исследований. Вы упомянули, что они могут быть полезны при изучении строения Солнца или Земли. Расскажите, пожалуйста, об этом.

— Сегодня мы уверенно регистрируем солнечное нейтрино от разных термоядерных процессов в недрах нашего светила, и это дает дополнительную информацию для физиков, работающих в области астрофизики и физики Солнца. Нейтринное излучение выходит буквально из недр Солнца, и, регистрируя его и сравнивая с предсказаниями разных солнечных моделей, мы можем судить о степени содержания тяжелых элементов, предсказывать внутреннюю температуру, плотность и многое другое. С геонейтрино все еще интереснее. Поразительно, но мы, наверное, лучше знаем, как устроены звезды, чем нашу планету, т.к. у нас нет инструментов, чтобы заглянуть в недра Земли. Есть сейсмометоды, с помощью которых анализируются сигналы при землетрясениях, подземных взрывах и т.д., — таким путем мы примерно установили состав и плотность вещества нашей планеты. Но что происходит внутри Земли, мы до сих пор досконально не знаем. Например, Земля имеет высокую внутреннюю температуру — но из чего она складывается? Каков вклад радиогенного тепла? Нейтринная физика и здесь может помочь. В последние годы уже два детектора в мире, один из которых — «Борексино», стали регистрировать геонейтрино от распадов трансурановых тяжелых элементов в недрах планеты, и это дает нам новый мощный инструмент исследования.

Ученые НИЦ
«Курчатовский
институт»
задействованы в нескольких
крупных международных
проектах, которые
охватывают фактически весь
спектр фундаментальных
и междисциплинарных
исследований в области
нейтринной
физики

— Какие еще возможны применения для наработок нейтринной физики?

— Курчатовский институт был пионером в практическом применении нейтрино. Это первое предложение было связано с контролем атомных реакторов по нейтринному излучению. Атомный реактор в процессе цепной реакции деления ядерного топлива производит огромное количество антинейтрино, которые можно регистрировать дистанционно, на расстоянии вплоть до нескольких километров. А по характеру излучения можно судить о текущей мощности реактора, составе его активной зоны, накоплении тяжелых трансурановых элементов и, в частности, изотопов плутония, который можно использовать для создания атомного оружия. Получается, можно поставить нейтринный детектор вдали от реактора и в режиме черного ящика передавать данные по спутниковому каналу связи, контролировать работу реактора постоянно, в режиме онлайн, и следить, чтобы его тайно не останавливали в своих целях для изъятия делящихся материалов. Сценарий такого контроля предлагается для решения задач нераспространения в случае поставок атомных реакторов в страны, не обладающие ядерными технологиями, но стремящиеся к созданию собственного атомного оружия. Другое применение метода связано с безопасным развитием атомной энергетики. В случаях, подобных Фукусиме, где были уничтожены все внутриреакторные средства контроля, использование дистанционных нейтринных детекторов вообще может быть единственным способом получения информации о состоянии АЭС и оценки интенсивности цепной реакции деления ядерного топлива. Поэтому Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) сейчас очень заинтересовано в развитии нейтринного метода. В Курчатовском же институте уже создается при кооперации с институтами и организациями МГУ, «Росатома» и РАН первый

в мире индустриальный детектор реакторных нейтрино под названием *iDREAM (industrial Detector for REactor Antineutrino Monitoring)*.

— Получается, такие детекторы для атомных реакторов — это уже почти реальность. А какое обсуждается самое фантастическое применение нейтринных технологий?

— Наверное, это нейтринная связь. Когда мы говорили про нейтринные пучковые эксперименты, то упоминали, что пучки нейтрино от ускорителя можно регистрировать на расстоянии в 1 тыс. км — и даже прошедшие сквозь недра Земли. Фактически это новый вид связи. Конечно, в данный момент она пока односторонняя. Мы можем на ускорителе произвести пучок нейтрино, запустить его в заданном направлении и на расстоянии тысячи километров заметить сигнал. Но ученые начинают над этим работать, и уже сейчас появляются статьи с предложениями и экспериментальными соображениями по поводу модуляции такого нейтринного сигнала. Мы сможем передать не только нейтринный сигнал, но и какую-то информацию, и даже туда, куда обычные электромагнитные волны никак не «дотянутся», — например, на подводную лодку. Вспоминаются слова Вольфганга Паули — ученого, который предсказал существование нейтрино, о том, что он сделал ужасную вещь, изобретя частицу, которую невозможно зарегистрировать. Но сейчас мы видим, что нейтрино уже уверенно регистрируется. Это большой прогресс, который произошел за время моей жизни. Поэтому я уверен, что если работать дальше, то мы вскоре приблизимся к ответам на самые фундаментальные вопросы современного естествознания, а нейтрино, как когда-то рентгеновское излучение, будет постепенно внедряться в различные практические стороны нашей жизни. ■

Подготовил Михаил Петров



! Справка

Михаил Дмитриевич Скорохватов

Доктор физико-математических наук, заместитель директора Центра фундаментальных исследований НИЦ «Курчатовский институт», директор отделения физики частиц НИЦ «Курчатовский институт», заведующий кафедрой «Физика элементарных частиц» в МИФИ.

- ✓ Окончил факультет теоретической экспериментальной физики МИФИ в 1973 г. по специальности «Экспериментальная ядерная физика».
- ✓ Область научных интересов: физика частиц, физика нейтрино и астрочастиц.
- ✓ Заместитель председателя экспертного совета ВАК по физике.
- ✓ Автор и соавтор более 170 научных работ.