

ФИЗИКА ЧАСТИЦ

Загадка нейтрино

Самый большой эксперимент
по исследованию этих таинственных частиц
может указать путь к новой физике

Клара Москович



ОБ АВТОРЕ

Клара Московиц (Clara Moskowitz) — старший редактор *Scientific American*, рубрики «Космос» и «Физика». Имеет степень бакалавра по астрономии и физике в Уэслианском университете и степень магистра по научной журналистике в Калифорнийском университете в Санта-Крузе.



Тлупоко под землей под моими ногами словно распростерся гигант, облаченный в технологические доспехи. Мне сказали: тысячи миллиардов нейтрино ежесекундно пронзают каждый квадратный сантиметр моего тела. Я вытягиваю руки в инстинктивном желании усилить ощущения, но, конечно, ничего не чувствую. Эти призрачные частицы, почти лишенные массы, мчатся с околосветовой скоростью и легко проходят сквозь металлический ящик, занимающий большую часть пещеры. Несколько раз в день одна такая частица все-таки сталкивается с атомом внутри ящика, размеры которого сравнимы со школьным автобусом, и тогда высвобождаются заряженные частицы, чьи световые следы смогут зарегистрировать ученые. Эти следы, как надеются физики, поведут по тропам в неизведанные земли.

Прибор, о котором я говорю, — часть эксперимента по поиску электронных нейтрино, называемого *NuMI Om-Axis* (сокращенно *NOvA*) и базирующегося в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилабе) в Батавии, штат Иллинойс. Похожий, но более крупный детектор размещен под землей за 800 км, в Миннесоте; он ловит нейтрино, проходящие сквозь него и через весь слой земли между ними. Проект *NOvA* начал работу в 2014 г. и представляет собой самый длинный в мире нейтринный эксперимент, но в действительности закладывает основу для более грандиозного эксперимента *DUNE* (*Deep Underground Neutrino Experiment*, «глубокий подземный нейтринный эксперимент»). *DUNE* начнется в Фермилабе, где ускоритель разгонит и столкнет протоны с графитовой мишенью, чтобы породить пучок нейтрино. Затем нейтрино полетят за 1,3 тыс. км под землей из Иллинойса в Южную Дакоту.

Дополнительные 500 км пути смогут сделать более вероятными проявления особых свойств нейтрино.

DUNE — это самый амбициозный эксперимент по физике частиц, который планируется к осуществлению на территории США после *SSC* (*Superconducting Super Collider*, «сверхпроводящий суперколлайдер»), неудавшегося проекта 90-х гг. прошлого века. Начало *DUNE* планируется на 2020-е гг., его стоимость составит \$1,5 млрд и работать он должен не менее 20 лет. Этот самый большой нейтринный эксперимент на планете важен не только американцам: его участниками стали более 1 тыс. исследователей из 30 стран. Крупнейшая европейская лаборатория физики частиц, *CERN*, тоже вовлечена в этот проект. Подобно тому как Большой адронный коллайдер (БАК) в 2012 г. обнаружил бозон Хиггса, указав присутствие скрытого поля, заполняющего космос, ученые возлагают большие надежды на *DUNE*, который мог

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Вполне возможно, нейтрино — самые малоизученные фундаментальные частицы из известных нам. Почти иллюзорные, не обладающие зарядом, нейтрино редко взаимодействуют с другими частицами и, согласно первоначальным предсказаниям, не обладают массой. Теперь физики знают, что небольшая масса у нейтрино все-таки есть, но причина ее появления остается загадкой.
- Строящийся амбициозный проект *DUNE* пронесет нейтрино на расстояние 1,3 тыс км от Иллинойса до Южной Дакоты.
- Во время своего путешествия частицы могут совершать превращения из одного типа (или аромата) в другой. Этот феномен носит название «нейтринные осцилляции». Изучая такое своеобразное поведение нейтрино, ученые надеются понять происхождение массы нейтрино и ответить на другие вопросы.

бы использовать нейтрино для понимания устройства Вселенной на глубинном уровне. Марк Томсон (Mark Thomson), пресс-секретарь *DUNE*, говорит: «Мы хотим сделать для нейтрино то, что БАК сделал для Хиггса». Этот энергичный британец из Кембриджского университета, который помогает руководить экспериментом, считает, что мы находимся у истоков следующей большой революции в физике частиц.

Нейтрино поддерживают такие смелые надежды из-за того, что они — первые частицы, способные вырваться за пределы так называемой Стандартной модели физики частиц, которая дает наилучшее на сегодня физическое описание природы фундаментальных частиц и управляющих ими законов. Стандартная модель может объяснить поведение любой другой известной частицы с беспрецедентной точностью — и она предсказывает, что нейтрино должно быть безмассовым. Так думали ученые примерно 15 лет назад, когда в результате экспериментов в Канаде и Японии было обнаружено, что нейтрино действительно обладают небольшой массой. Однако нейтрино, похоже, приобретают массу не так, как это делают остальные частицы. Оказывается, масса возникает благодаря так называемой новой физике, то есть частицам, силам или феноменам, которые еще неизвестны ученым. За последние несколько лет нейтрино стали выглядеть еще более многообещающим мостом в будущее физики, потому что другие попытки достичь грани областей применимости Стандартной модели быстро сводились на нет. Дело в том, что до сих пор на БАК не удалось произвести никаких частиц, которые не предсказывались бы Стандартной моделью. Эксперименты, призванные обнаружить гипотетические частицы темной материи — невидимой, но доминирующей составляющей нашей Вселенной, — тоже обернулись ничем. Сотрудник Фермилаба, специалист по физике нейтрино Стивен Парк (Stephen Parke) говорит о том, что Стандартная модель неполна, что существует что-то другое, нам неизвестное. По его словам, в этом вопросе «некоторые исследователи делают ставку на БАК, а другие — на нейтрино».

Массивная тайна

Через день после моего визита в пещеру *NOvA* я очутилась в пустом кабинете на третьем этаже главного здания Фермилаба, названного в честь Роберта Ратбуна Уилсона (Robert Rathbun Wilson). Стивен Парк, который тоже пришел сюда вместе с физиком-теоретиком Андре де Гувейе (André de Gouvêa), объяснил мне, что выбрал это помещение для нашей встречи потому, что здесь когда-то располагался кабинет Леона Ледермана (Leon Lederman), бывшего директора Фермилаба. Именно он придумал способ создания пучка нейтрино с помощью ускорителя частиц. В 1962 г. с помощью

работы Ледермана, лежащей в основе *DUNE*, было доказано существование одного из трех известных типов нейтрино — впоследствии за это открытие ученый был удостоен Нобелевской премии. Парк и де Гувейе признают, что, несмотря на долгий путь, который был пройден после Ледермана, все еще остается много загадок. Как говорит Парк, «все дело в нейтрино: чем больше вы понимаете, тем больше появляется вопросов. Нейтрино — очень озорные частицы».

Парк, уроженец Новой Зеландии, увлекся нейтрино в 1970-х гг., вскоре после приезда в США для поступления в аспирантуру. В следующие десятилетия нейтрино утратили репутацию безмассовых «скучных» частиц. Революции в области нейтринной физики следовали одна за другой. «Будут ли еще [революции]? — спрашивают Парк и де Гувейе, и сами же отвечают: — Да!» Вот слова де Гувейе: «Мы еще только начали измерять свойства нейтрино на уровне точности, сопоставимом с другими частицами. Мы не знаем их массы, к тому же могут быть новые типы нейтрино. Нейтрино могут "разговаривать" с другими частицами, которые отказываются "общаться" с любыми другими».

Проект *DUNE* сосредоточится на необычном свойстве нейтрино менять облик. Такой процесс называется осцилляцией нейтрино. Дело в том, что эти частицы бывают трех видов, или ароматов: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино. Исследователи умеют их различать, потому что при их взаимодействии с атомами детектора они порождают разные частицы. Так, электронное нейтрино порождает электроны, мюонное нейтрино — мю-мезоны (мюоны), а тау-нейтрино рождает тау-лептоны (таоны). Две последние частицы, мюоны и таоны, — это двоюродные братья электрона. Странность заключается в том, что эти три аромата изменчивы. Так, частицы могут выйти из Фермилаба как мюонные нейтрино, а прийти в Южную Дакоту как электронные нейтрино. Или могут появиться как тау-нейтрино. Насколько известно физикам, нейтрино — это единственные частицы, которые подвергаются такому причудливому преобразованию аромата.

Когда полтора десятилетия назад физики открыли изменчивость нейтрино, это помогло разгадать одну давнюю загадку. Дело в том, что в 60-х гг. прошлого века, когда началось изучение солнечных нейтрино, удалось измерить только одну треть от количества, предсказываемого теорией. Осцилляции нейтрино дали ответ: недостающие две трети перешли в мюонные и тау-нейтрино во время путешествия от Солнца к Земле, а приборы были настроены на регистрацию только электронных нейтрино. Однако, несмотря на то что это открытие поставило точку в проблеме солнечных нейтрино, оно породило новую тайну. Так, согласно теории, единственный способ изменить аромат

Озадачивающие частицы

Нейтрино — это крошечные частицы, которые пролетают сквозь вещество с околосветовой скоростью. Различают нейтрино трех типов, называемых ароматами. Необычность нейтрино в том, что во время своего путешествия они могут менять аромат: начать с одного, а потом переключиться или «осциллировать» в другой. Ученые намерены исследовать эту особенность в эксперименте *DUNE* — «глубоком подземном нейтринном эксперименте» — который представляется самым амбициозным проектом из когда-либо предпринятых по поиску нейтрино. *DUNE* вступит в работу в 2020-х гг. Из Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (Фермилаба), расположенной в Иллинойсе, будет выпущен пучок нейтрино, который промчится в Сэнфордский подземный научно-исследовательский центр в Южной Дакоте. Ученые оценят количество нейтринных осцилляций, произошедших в пути. Изучая феномен нейтрино, исследователи рассчитывают прийти к более глубокому пониманию физических законов.

Сэнфордский подземный научно-исследовательский центр (штат Южная Дакота)

Азбука нейтрино

Три типа нейтринных ароматов созвучны названиям частиц, с которыми они взаимодействуют: электронное нейтрино, мюонное нейтрино и тау-нейтрино соответствуют электрону, мюону и таону. Когда-то ученые считали нейтрино безмассовыми, но это оказалось не так. В силу законов квантовой механики ароматы не обладают определенными массами, но каждый представляет собой однозначную суперпозицию трех разных так называемых массовых состояний. Точные значения масс остаются неизвестными.

Свойства нейтрино

Аромат



Электронное нейтрино



Мюонное нейтрино



Тау-нейтрино

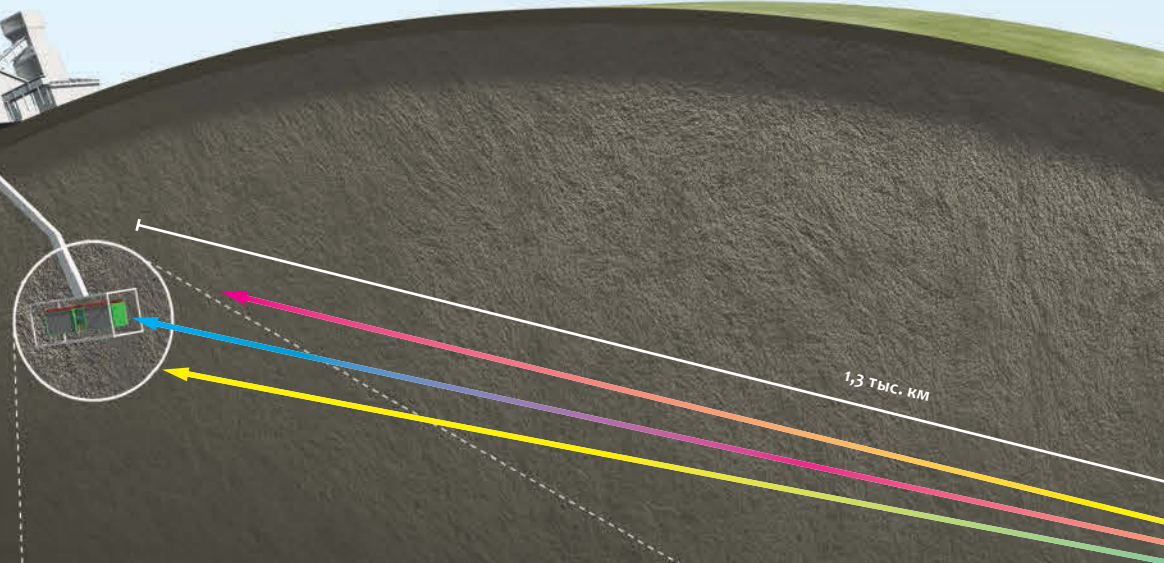
Каждый аромат нейтрино представляет собой разную суперпозицию трех массовых состояний.

При движении через пространство нейтрино могут мутировать, меняя аромат и массу

Массовые состояния

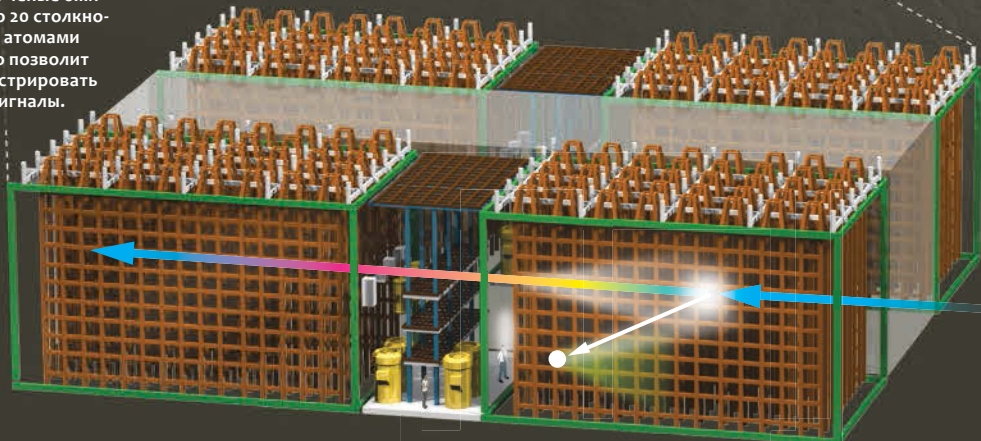


Каждый аромат нейтрино представляет собой разную суперпозицию трех массовых состояний.



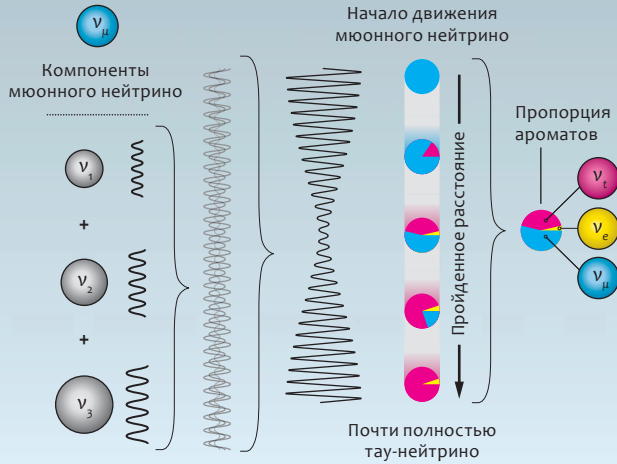
Удаленный детектор

Каждый из четырех модулей удаленного детектора *DUNE* будет содержать 17 тыс. т жидкого аргона. Ученые ожидают от десяти до 20 столкновений нейтрино с атомами аргона в день, что позволит приборам зарегистрировать и отождествить сигналы.

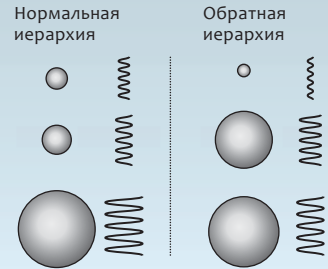


Осцилляции ароматов и роль массы

При движении нейтрино через пространство его массовые состояния движутся с разными скоростями. Различие скоростей невелико, но со временем оно приводит к изменению суперпозиции массовых состояний нейтрино, и, соответственно, меняется и его аромат. Таким образом, нейтрино, начавшее свой путь, например, как мюонное, может превратиться в тау-нейтрино или электронное нейтрино.



Ученым неизвестны значения трех массовых состояний, но, согласно теоретическим предположениям, существуют либо два легких нейтрино и одно тяжелое (нормальная иерархия), либо одно легкое и два тяжелых (обратная иерархия). DUNE должен определить, какой вариант реализуется в природе.



Проходя расстояния

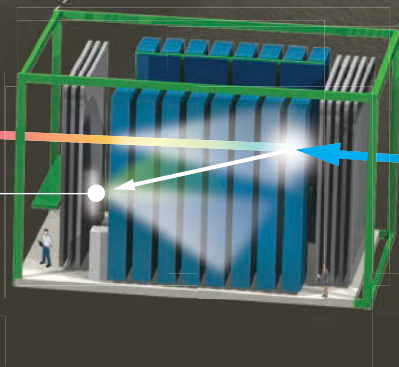
DUNE пошлет нейтрино за 1,3 тыс. км из Фермилаба в Батавии, штат Иллинойс, в Сэнфордский подземный научно-исследовательский центр в Лиде, штат Южная Дакота. Такой длинный путь — самый длинный в когда-либо осуществленных экспериментах по поиску нейтрино — должен предоставить нейтрино достаточно времени для осцилляций.



У детектора

Уменьшенный вариант удаленного детектора. Ученые сравнят результаты измерений, сделанных двумя приборами, для того чтобы оценить, сколько нейтрино осциллировали от одного аромата к другому на протяжении всего пути следования.

Заряженная частица



Путь пучка нейтрино

Пучок мюонных нейтрино

Ускоритель частиц рождает пучок нейтрино

Фермилаб (штат Иллинойс)



Главный инжектор Фермилаба: ускоряющее частицы подземное кольцо наращивает число протонов для создания пучков нейтрино, которые будут исследоваться в эксперименте DUNE

нейтрино — это приписать ему ненулевую массу, наличие которой Стандартной моделью не предсказывалось.

Причина, по которой физики с необходимостью приписывают нейтрино массу, кроется в одной проблеме, имеющей корни в квантовой теории. Для того чтобы нейтрино изменило аромат, каждый такой аромат с необходимостью должен состоять из разных «массовых состояний». Оказывается, каждый аромат не обладает какой-то определенной массой, но существует суперпозиция трех возможных масс. В том, что это звучит странно, виновата квантовая механика, согласно которой частицы — не определенные сущности, а вероятностные облака. Нейтрино летят через пространство, и части, ассоциированные с каждым массовым состоянием, путешествуют с чуть разными скоростями. Последнее есть следствие специальной теории относительности Эйнштейна, согласно которой околосветовые скорости частиц зависят от их масс. С течением времени разница в скоростях приводит к изменению суперпозиции массовых состояний для каждого нейтрино. Таким образом, частица, которая начинала свой путь как, например, мюонное нейтрино, определяемое точной суперпозицией массовых состояний, может с течением времени превратиться

в электронное нейтрино или в тау-нейтрино. Ученым до сих пор неизвестны точные массовые состояния нейтрино — пока ясно только то, что массы нейтрино разные и не равны нулю. Однако, подсчитывая, сколько нейтрино будут осциллировать на пути из Иллинойса в Южную Дакоту, DUNE попытается определить пропорции разных масс нейтрино. Согласно теоретическим представлениям, три возможные массы нейтрино могут быть упорядочены двумя возможными способами: либо существуют два очень легких нейтрино и одно тяжелое, либо, наоборот, существуют два тяжелых нейтрино и одно легкое. Первый способ носит название «нормальная иерархия», а второй — «обратная (или инверсная) иерархия». DUNE должен быть в состоянии различать эти два способа, потому что вещество внутри Земли, как считается, влияет на осцилляцию нейтрино. Так, если в природе реализуется нормальная иерархия, то ученые ожидали бы увидеть одну пропорцию трех ароматов, а при обратной иерархии — другую пропорцию. По словам Томсона, считающего DUNE гарантированно способным в течение нескольких лет обеспечить возможности такого физического эксперимента, «пропуская нейтрино сквозь вещество, можно легко определить разницу, и чем больший путь пройдет нейтрино, тем яснее сигнал».

Происхождение массы

Зная иерархию масс нейтрино, ученые смогут дать ответ на более глубокий вопрос: как именно нейтрино приобрели свою массу. Большинство частиц, таких как протоны и нейтроны внутри атомов, приобретают массу, взаимодействуя с полем Хиггса (это поле, которое пронизывает все пространство и ассоциируется с бозоном Хиггса, обнаруженным на БАК). Однако механизм Хиггса работает только для частиц, которые могут быть и левыми, и правыми. Последнее — это фундаментальная классификация, связанная с ориентацией спина частицы относительно направления ее движения. До сих пор наблюдались только левые нейтрино. Если же нейтрино приобрели массу от поля Хиггса, то с необходимостью должны существовать и правые нейтрино. Однако последние никогда не наблюдались, что говорит о том, что если они и существуют, то вообще не взаимодействуют ни с какими другими силами и частицами в природе, — перспектива, представляющаяся многим физикам малореалистичной. Более того, если бы поле Хиггса определяло массы нейтрино, то теоретики ожидали бы, что массы нейтрино будут похожи на массы других частиц. Однако это не так, потому что нейтрино — необъяснимо легкие частицы. Какими бы ни были массовые состояния нейтрино, они меньше одной стотысячной доли массы какого-нибудь тщедушного электрона. По мнению директора Фермилаба Найджела Локьера (Nigel Lockyer), «очень мало людей думают, что механизм Хиггса дает массу нейтрино; там, вероятно, совершенно иной механизм, за который должны отвечать совсем другие частицы». Одна из возможностей, притягательная для исследователей, заключается в том, что нейтрино могут оказаться майорановскими частицами, то есть такими, которые сами выступают в роли собственных античастиц (это вполне допустимо, потому что нейтрино электрически нейтральны, а частицы и античастицы различаются зарядом). Теоретики считают, что майорановские частицы могут приобретать массу, минуя механизм Хиггса, — возможно, путем взаимодействия с каким-то новым неизвестным полем. Математическая база такого сценария требует наличия очень тяжелых нейтрино, которые еще предстоит обнаружить; такие частицы могут превышать массы некоторых самых тяжелых известных частиц в триллион раз и, таким образом, в некотором смысле «уравновешивать» легкие нейтрино.

Для специалистов в области физики частиц перспектива открытия новой шкалы масс звучит заманчиво. По словам де Гувеа, «исторически мы всегда добивались прогресса, исследуя природу на разных масштабах». Если существует какое-то новое поле, дающее массу нейтрино, то, быть

может, это поле способно как-то влиять и на другие частицы. Локьер рассуждает на эту тему: «Если природа знает, как дать массу нейтрино, где еще она могла бы проделать то же самое? Теоретики задаются вопросом, состоит ли темная материя из майорановских частиц?» *DUNE* не сможет непосредственно проверить, майорановские ли частицы — нейтрино, но понимание иерархии масс даст возможность интерпретировать результаты экспериментов, происходящих сейчас в Японии, Европе, США и повсюду. Кроме того, *DUNE* способен предоставить подробную информацию о том, как нейтрино «переключаются» между комбинациями масс во время осцилляций, и, таким образом, позволит выяснить, как нейтрино приобретают массу. Как говорит де Гувеа, «мы хотим сделать наилучший возможный эксперимент по исследованию осцилляций нейтрино, потому что это единственное известное нам место, где можно что-то узнать о массах нейтрино».

«Все дело в нейтрино: чем больше вы понимаете, тем больше появляется вопросов».

Стивен Парк (Фермилаб)

Материя vs. антиматерия

Исследование странностей этих крошечных частиц может помочь и в другом исследовании, в разгадке тайны космических пропорций: почему во Вселенной вещество преобладает над антивеществом (*так называемая проблема барионной асимметрии Вселенной. — Примеч. пер.*)? Космологические модели предсказывают, что оба компонента должны были бы существовать в равных количествах после Большого взрыва. Но почему-то случилось так, что после того как большая часть вещества аннигилировала с большей частью антивещества (как они всегда делают при контакте), осталось небольшое избыточное количество вещества. Последнее образовало галактики, звезды и планеты, которые мы видим сегодня.

Для того чтобы объяснить асимметрию, ученые ищут такой тип частиц, который ведет себя иначе, чем его антипартнер. Эксперименты дают косвенные указания на то, что такими частицами могут оказаться нейтрино. В проекте *DUNE* будет осуществляться поиск проявлений так называемого *CP*-нарушения (*одновременное нарушение двух симметрий: зарядового сопряжения C и четности P , то есть неинвариантность физических законов при замене частиц на античастицы одновременно с зеркальным отражением. — Примеч. пер.*). Другими словами, будет вестись поиск того, что антинейтрино осциллируют от аромата

к аромату не так, как нейтрино. Например, согласно теории, *DUNE* может увидеть, что темп превращения мюонных нейтрино антивещества в электронные нейтрино отличается от соответствующего темпа превращения для обычных нейтрино от 0,5 до двух раз. Эта, по словам Парка, «огромная разница» может объяснить, почему материя стала доминировать над антиматерией в ранней Вселенной. Странно, что нейтрино все еще может осциллировать иначе, чем антинейтрино, при условии, что они одинаковы (то есть если нейтрино — майорановские частицы). В последнем случае единственное свойство, отличающее нейтрино от антинейтрино, — это ориентация спина. Нейтрино вещества, будучи левыми, могут действовать не так, как нейтрино антивещества, которые должны быть правыми. *DUNE* сможет определить и то, ограничиваются ли сорта нейтрино только тремя ароматами или есть и другие, еще не обнаруженные, о чем говорят некоторые теории. Дополнительные ароматы нейтрино будут называться стерильными нейтрино, потому что совсем не будут взаимодействовать с обычным веществом. Предыдущие эксперименты, включая жидкий сцинтилляционный детектор нейтрино в Национальной лаборатории Лос-Аламоса и мини-ускорительный нейтринный эксперимент (*MiniBooNE*) в Фермилабе, показали неубедительные признаки того, что дополнительный тип нейтрино препятствовал осцилляциям, предполагая существование стерильных нейтрино, более тяжелых, чем три известных. Исследователи рассчитывают на то, что *DUNE* либо подтвердит, либо исключит эту возможность. По словам Томсона, «стерильные нейтрино могут существенно изменить структуру осцилляций, которые мы увидим на *DUNE*».

Крупные ставки

Для решения всех этих вопросов ученые разработали *DUNE*, который будет собирать гораздо больше данных и с гораздо более высокой точностью, чем это когда-либо делалось в нейтринных экспериментах. В проекте планируется использовать пучок нейтрино примерно в два раза более мощный, чем самый сильный существующий высокоэнергетический поток нейтрино. Соответствующий детектор будет в 100 раз больше, чем имеющиеся детекторы такого рода. Ключевое место в эксперименте займет удаленный детектор, установленный в Сэнфордском подземном научно-исследовательском центре в Лиде, штат Южная Дакота. Этот прибор будет состоять из четырех модулей, каждый величиной с олимпийский бассейн, но в шесть раз глубже последнего, заполненных 17 тыс. т жидкого аргона. При соударении нейтрино с ядрами атомов аргона как в дальнем, так и в ближнем детекторах нейтрино породит — в зависимости от своего аромата — электрон, мюон или таон. Мюоны будут

двигаться сквозь жидкий аргон по прямым линиям, выбивая электроны из атомов аргона и оставляя за собой видимый детектором след электронов. Если же нейтрино порождает электрон, то будет рождаться фотон, который, в свою очередь, породит два электрона и еще фотоны и т.д., создавая каскад новых частиц. Наконец, тау-нейтрино породят таоны, но только если начальный нейтрино обладал достаточной энергией. Таоны, будучи более массивными, чем электроны и мюоны, требуют больше энергии для рождения. Ученые *CERN* начнут тестирование уменьшенной версии удаленных детекторов *DUNE* в 2018 г. По словам заместителя директора Фермилаба Джозефа Ликкена (Joseph Lykken), «эти детекторы — как космические приборы, потому что, раз собранные, они уже не могут быть остановлены или разобраны, если вдруг что-то пойдет не так». Дело в том, что, залив 17 тыс. т жидкого аргона, не стоит и помышлять о том, как вытащить его обратно. Чтобы добиться успеха, *DUNE* нужно будет преодолеть и политические, и финансовые препятствия, которые уже загубили несколько предыдущих крупных физических проектов. В июле ученые и чиновники провели церемонию закладки фундамента в Сэнфорде, чтобы обозначить начало крупного подземного строительства, на которое уйдет не менее трех лет. Конечно, много работы пришлось на сверхпроводящий суперколлайдер *SSC*, который планировалось сделать больших размеров, чем БАК. Проект *SSC*, возможно, обнаружил бы бозон Хиггса, но был прикрыт в 1993 г. из-за перерасхода затрат на строительство и не без политической составляющей. Найджел Локьер говорит: «Ты можешь вернуться в прошлое и посмотреть на суперколлайдер, и, парень, это будет грустная история». *DUNE* как международный проект — это шаг вперед, потому что наличие обязательств финансирования более чем от одной страны должно помочь избежать печальной судьбы *SSD*. «И сейчас это определенно происходит, — добавляет Локьер, но тут же продолжает диалог с собой: — А могло бы и не происходить? О да».

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

■ Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects. DUNE Collaboration. Препринт представлен 20.01.2016 и доступен по адресу: <https://arxiv.org/abs/1601.05471>

■ Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 2: The Physics Program for DUNE at LBNF. DUNE Collaboration. Препринт представлен 22.01.2016 и доступен по адресу: <https://arxiv.org/abs/1512.06148>