

Томас Вейлер, Грациела Джелмини и Александр Кузенко

ГЛАЗАМИ НЕЙТРИНО

Нейтрино — это уже не просто любопытный элемент физической теории, а важный рабочий инструмент астрономов

Нобелевская премия по физике 2002 г., врученная Рэю Дэвису (Ray Davis) и Масатоши Кошибе (Masatoshi Koshiba), была призвана отметить всю совокупность достижений этих ученых. Дэвис завоевал имя в науке детектированием солнечных нейтрино, впервые обнаружив эти неуловимые частицы, рожденные за пределами нашей планеты. Кошиба открыл нейтрино, пришедшие к нам в результате мощнейшего взрыва сверхновой в 1987 г. Полученные результаты стали знаковым наблюдательным исследованием нейтрино, в результате которого было опровергнуто представление теоретиков о том, что нейтрино — безмассовая частица. В действительности оно обладает небольшой массой. Высокая награда была вручена Дэвису и Кошибе еще и за то, что они создали новую науку — нейтринную астрономию.

Так нейтрино из гипотетической частицы превратилось в практический инструмент исследования кос-

моса. Вдобавок к изучению свойств нейтрино как элементарных частиц, с их помощью ученые смогли приоткрыть завесу над ранее скрытыми тайнами Вселенной. Подобно тому, как почти век назад строились гигантские оптические телескопы, современные астрономы разрабатывают и внедряют большие нейтринные телескопы, ожидая увидеть новые чудеса. Эти обсерватории уже поймали десятки тысяч нейтрино и получили изображение Солнца в нейтринных лучах. Нейтрино от более далеких космических источников сложнее детектировать по сравнению с теми, которые рождаются в верхней атмосфере Земли, но скоро приборы смогут преодолеть все трудности.

Распахнуты врата дальнейших исследований в области нейтрино, и эта частица, которую ранее считали ненаблюдаемой, может теперь стать необходимой. С помощью нейтрино можно увидеть то, что остается скрытым для лучей обычно-

го света. Например, изучая Солнце в световых лучах, мы видим только его поверхность — несколько сотен километров газа. Источник световой энергии Солнца — ядерные реакции в его ядре. Солнечное излучение поглощается и переизлучается в газовых слоях миллиарды раз на своем пути к поверхности, и только вблизи нее получает возможность свободно уходить в космос. В противоположность этому процессу, в нейтринных лучах мы видим недра Солнца, его самую горячую центральную область, занимающую 1% объема нашей звезды. Рождающиеся в центре Солнца нейтрино свободно проходят сквозь все его слои как сквозь пустоту.

Благодаря нейтрино стало возможным взглянуть вглубь сверхновых и других звезд с мощными энергетическими процессами, таких как источники гамма-излучения, а также аккрецирующие диски вещества вблизи сверхмассивных черных дыр. Готовящиеся к работе новые нейтринные обсерватории

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Нейтрино дадут астрономам зрение острее рентгена. Будучи частицами, слабо взаимодействующими с веществом, нейтрино практически свободно проникают повсюду, принося ученым информацию как из недр звезд, так и из ранее недоступных загадочных уголков нашей Вселенной.
- К сожалению, самое замечательное свойство нейтрино — всюду проникать — затрудняет их детектирование. Только в последнее время детекторы нейтрино стали настолько чувствительны, чтобы с уверенностью регистрировать эти неуловимые частицы.
- Приходящие к нам нейтрино бывают разных сортов, и во время своего путешествия по Вселенной они способны превращаться из одного сорта в другой.

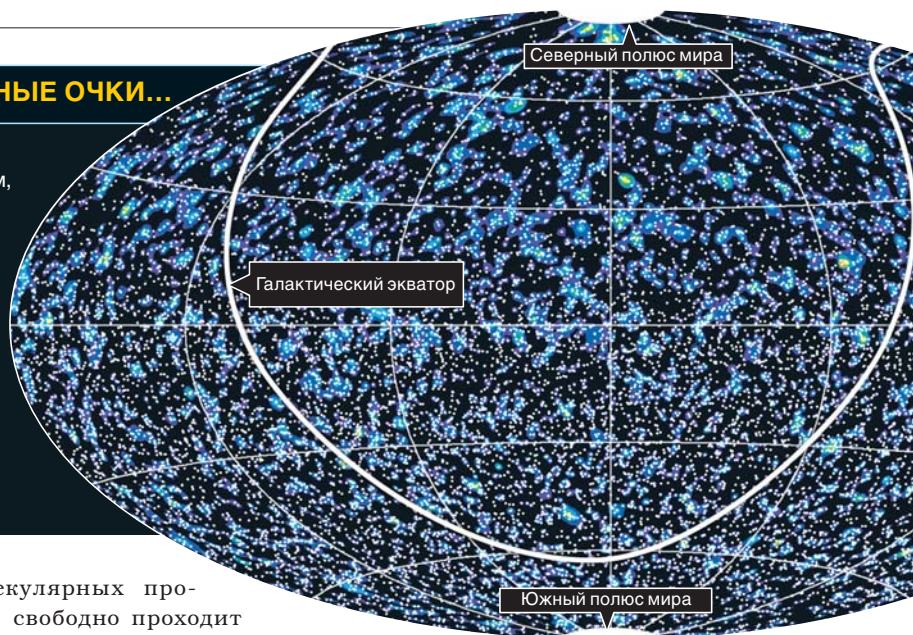
НЕВИДИМОЕ НЕЙТРИНО проникает слева в пузырьковую камеру и ударяет электрон (отмечен маленьким желтым кольцом), заставляя его двигаться по извилистой траектории (на рис.). Этот снимок пузырьковой камеры «Гаргамель» в ЦЕРН, выполненный в 1972 г., помог доказать Стандартную модель физики частиц и понять, каким образом нейтрино могут быть использованы в задачах астрономии



ЕСЛИ ВЗГЛЯНУТЬ СКВОЗЬ НЕЙТРИННЫЕ ОЧКИ...

НЕБО В НЕЙТРИННЫХ ЛУЧАХ

Сквозь такие очки небо выглядело бы очень пестрым, как показано на изображении, полученном работающей половиной нейтринной обсерватории «Ледяной куб» за период с апреля 2008 по май 2009 г. Около 20 тыс. нейтрино (на рис. показаны точками) пришли из космоса и из верхней атмосферы Земли. Сигналы космической природы, отделенные от атмосферных, показаны на рисунке цветом (это лишь предварительные данные — для того чтобы отделить события, необходима вся обсерватория целиком). «Ледяной куб» наблюдает северное и южное небо одновременно, поскольку нейтрино практически свободно проходят сквозь Землю



смогут детектировать одну сверхновую в год в ближайших 50 галактиках. Они также смогут обнаружить некоторые из сотен источников гамма-излучения.

Выгода одиночества

В физике частиц нейтрино аналогично электрону, но только не обладает электрическим зарядом, что делает его невосприимчивым к электромагнитным силам, которые доминируют в нашем повседневном мире. Когда вы сидите в кресле, сила электрического отталкивания препятствует тому, чтобы вы провалились сквозь сиденье. При химических реакциях атомы захватывают или теряют электроны. Когда вещество поглощает или отражает свет, заряженные частицы реагируют на колебания электромагнитного поля. Нейтрино же, будучи электрически нейтральным, не принимает участия в атомных

и молекулярных процессах, свободно проходит сквозь сплошную среду и практически остается невидимым.

Известные сорта нейтрино должны принимать участие в процессах слабого ядерного взаимодействия, которое отвечает за радиоактивный бета-распад и распад тяжелых элементов. Слабое взаимодействие, в соответствии со своим названием, заметно только на очень коротких расстояниях. Поэтому нейтрино редко взаимодействует с другими частицами. Для того чтобы обнаружить нейтрино, физики и астрономы должны наблюдать за большими объемами вещества в поисках редкого события, когда нейтрино оставит свой знак. Если, как считают астрономы, космические нейтрино в совокупности обладают такой же энергией, как и космические лучи (протоны и ионы, бомбардирующие нашу планету), то необходим кубический километр вещества, чтобы

захватить достаточное количество нейтрино для каких-либо уверенных выводов. Самые большие нейтринные обсерватории близки к такому размеру.

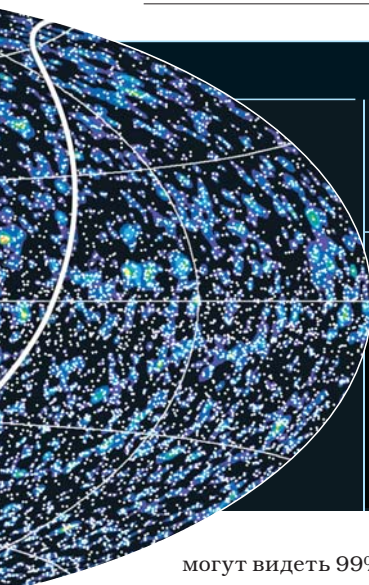
Кроме нейтрино, которые хотя бы редко взаимодействуют с веществом, физики предполагают существование и так называемых стерильных нейтрино, которые настолько надменны, что редко вступают даже в слабые взаимодействия, поэтому их еще труднее обнаружить.

Несмотря на такую кажущуюся обособленность нейтрино, эти частицы — примы космической сцены. Они — обязательный элемент бета-распада, благодаря которому разогреваются осколки взорвавшихся звезд и внутренние области планет, и из-за которого существует промежуточное звено при запуске механизма ядерных реакций в звездах. Нейтрино имеют решающее значение для одного из двух основных типов сверхновых, которые образуются в результате сжатия массивной звезды в конце ее жизненного цикла. Такое сжатие сдавливает центральную область звезды до ядерной плотности, что приводит к рождению 10^{58} нейтрино за 10–15 с. На нейтрино приходится 99% всей энергии, порожденной этим процессом. Наблюдая такой объект в нейтринных лучах, ученые

ОБ АВТОРАХ

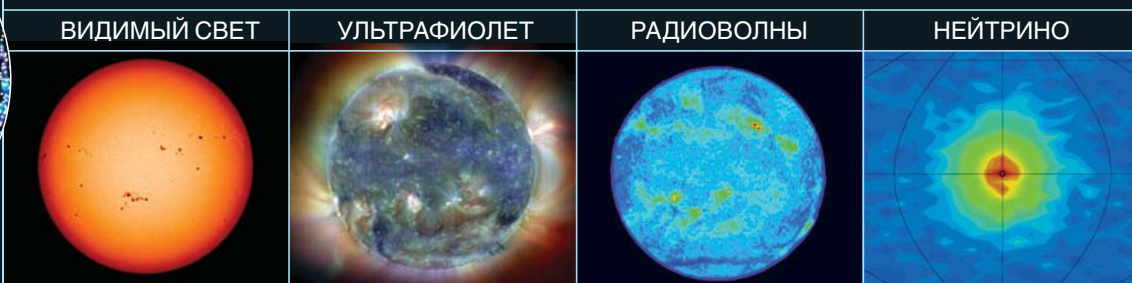
Томас Вейлер (Thomas J. Weiler) — профессор физики Университета Вандербилта, мечтавший стать ковбоем, но увлекшийся квантовой механикой и теорией относительности. **Грациела Джелмини** (Graciela B. Gelmini) — профессор физики Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. До того как отдать предпочтение физике, она сделала карьеру в области искусства, философии и астрономии в Высшей школе в Аргентине. Она — член группы Обсерватории им. Пьера Оже, как и бывший солдат Советской Армии **Александр Кузенко** (Alexander Kusenko), оставленный за прилежную работу в Калифорнийском университете. Каких же разных людей способна объединять наука — несостоявшегося ковбоя, поклоннику искусств и философии и бывшего советского солдата!

COURTESY OF CERN (preceding page); COURTESY OF THE ICECUBE COLLABORATION (sky in neutrinos)



ВИД СОЛНЦА В ЛУЧАХ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН

Астрономы видели Солнце в лучах света на всех волнах, а теперь они наблюдали его и в нейтринных лучах. Изображение очень размытое, поскольку разрешение в эксперименте на японском детекторе нейтрино «Супер-Камиоканде» составляло 26°, тогда как угловой размер Солнца — всего полградуса (на рис. — черный кружок). Однако это всего лишь технологический этап. Лучи света показывают нам только поверхность Солнца, а нейтрино — его ядро



могут видеть 99% полной картины динамики звезды — то, что не в состоянии заметить обычные телескопы. Регистрация нейтрино в 1987 г. подтвердила теорию звездного сжатия (см.: Вусли С., Уивер Т. Грандиозная сверхновая 1987 года // ВМН, № 10, 1989). Современные детекторы способны показать в реальном времени коллапс звезды и следующий за ним взрыв.

Где бы они ни рождались, нейтрино без труда достигают Земли. Они проходят сквозь газ и вещество, они могут легко пересечь всю Вселенную, что невозможно для электромагнитного излучения. Лучи самой высокой энергии, гамма-лучи, сильно уменьшают свою энергию, проходя сквозь космическое фоновое излучение — «туман» из микроволнового реликтового излучения, звездного света и радиоволн. Фотоны гамма-излучения с энергией 100 ТэВ (тераэлектронвольт) способны пройти расстояние всего в несколько десятков световых лет. По этой же причине блокированы и космические лучи.

Поэтому для астрономов нейтрино служит одним из инструментов исследования наиболее высокоэнергетических процессов во Вселенной. Их трудно изловить, но оно того стоит.

Многогранная наука

Помимо своей необщительности нейтрино обладают еще одной отличительной чертой: странным

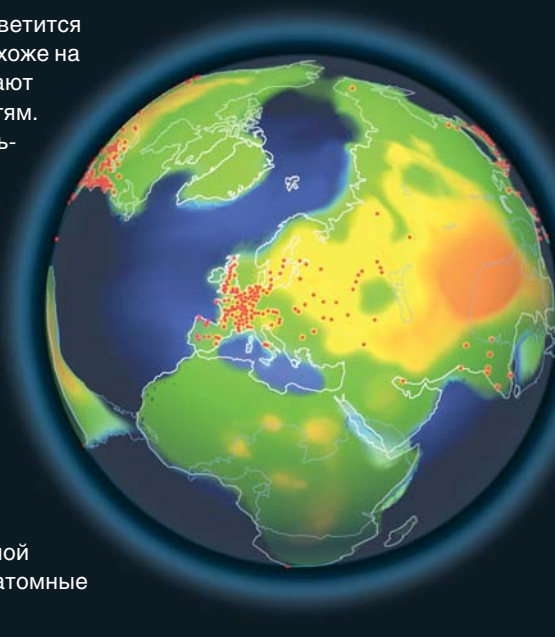
свойством метаморфозы. Следуя разбиению элементарных частиц на поколения, нейтрино бывают трех сортов. Так, электрону (e) соответствуют две тяжелые частицы, мюон (μ) и тау-лептон (τ), каждая из которых обладает своим нейтрино-партнером: электронным (ν_e), мюонным (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ) соответственно. Но в то время как электрон, мюон и тау-лептон имеют вполне определенные массы, у соответствующих нейтрино такой определенности нет. Измеряя массу нейтрино из конкретного поколения, мы получим один из трех

вариантов (ν_1, ν_2, ν_3), каждый с определенной вероятностью. Если же мы попытаемся определить сорт нейтрино, зная его массу, то перед нами также предстанет равновероятный выбор из трех возможностей (ν_e, ν_μ, ν_τ). Нейтрино может либо принадлежать к конкретному сорту, либо обладать определенной массой, но не двумя точными значениями этих характеристик одновременно.

Таким образом, нейтрино нарушает наше интуитивное представление об объектах. Предположим, например, что два мяча — баскет-

ЗЕМНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРИНО

Наша планета слабо светится в лучах нейтрино: похоже на картину, где цвета отвечают различным интенсивностям. Геофизики начали использовать нейтринные наблюдения, чтобы изучить распределение радиоактивных изотопов, поскольку эти источники излучают нейтрино. Другими источниками нейтринного излучения могут быть столкновения частиц космических лучей в верхних слоях земной атмосферы, возможная аннигиляция частиц темной материи в ядре, а также атомные реакторы



COURTESY OF SOHO/EIT CONSORTIUM/MDI TEAM, COURTESY OF ESA/NASA/SOHO, COURTESY OF STEPHEN WHITE University of Maryland/NRAO/AUI AND COURTESY OF SUPER-KAMIOKANDE COLLABORATION (suns, left to right); GEORGE RETSECK (Earth)

большой и бейсбольный — весят соответственно 600 и 150 г, но если они поведут себя как нейтрино, то первый будет иногда весить 600 г, а иногда 150 г. Нейтрино — как буквы — персонажи известной детской сказки «Аля, Кляксич и Буква «А»»: «Один день мы Журавль и Заяц, другой — Жaba и Зебра, третий — Жук и Зяблик». Отловленное детектором нейтрино с известной вероятностью будет либо ν_e , либо ν_μ , либо ν_τ .

Сорт нейтрино характеризует его поведение в слабых ядерных реакциях, а масса показывает, как нейтрино распространяется в пространстве-времени. Например, во время бета-распада образуется только один сорт нейтрино, ν_e . Пока эти частицы путешествуют в пространстве, их сорт не важен, их поведение определяется только их массой. Частица ν_e есть смесь ν_1 , ν_2 и ν_3 в пропорциях, которые физики называют углами смешивания. Вместо одной частицы нужно рассматривать суперпозицию трех. В реакциях с веществом детектора сорт нейтрино становится важен. Если относительные пропорции масс не меняются, то в детекторе регистрируется нейтрино исходного сорта (для бета-распада — ν_e). Но это не обязательно так. Когда частица распространяется в виде суперпозиции состояний с разными массами, на нее могут повлиять факторы, искажающие пропорции и, таким образом, меняющие сорт. Этот процесс называется метаморфозой нейтрино.

Согласно принципам квантовой механики, каждое массовое состояние соответствует волне с фиксированной длиной. Волны могут интерферировать друг с другом. Используя акустическую аналогию, можно сказать, что нейтрино есть звуковая волна, состоящая из трех чистых тонов. Те, кто хотя бы раз имел дело с музыкальными инструментами, знают, что смешанные звуковые волны, немного различающиеся по тону (длине волны), создают «пульсации» за счет осцилляции интенсивности звуковых волн.

Источник

Траектория нейтрино

Земля

Траектория нейтрино

Атомные ядра

Траектория мюона

Траектория электрона

17 м

Детектор света

Передача данных по кабелю

НЕОБЫЧНЫЙ ТЕЛЕСКОП

Нейтрино проявляют себя в столкновениях с атомными ядрами с излучением заряженных частиц — электрона или его аналога в других поколениях, мюона и тау-лептона, которые в свою очередь излучают видимый свет или радиоволны. Такие события редки, и поэтому астрономам приходится следить за большими объемами вещества, чтобы зафиксировать хотя бы десяток. Обычно в качестве вещества используется вода, жидкая или замороженная, поскольку она достаточно плотная, что увеличивает вероятность искомых столкновений, и достаточно прозрачная, чтобы фиксировать излучение в нужных реакциях

ВЗГЛЯД ВБЛИЗИ: «ЛЕДЯНОЙ КУБ»

«Ледяной куб» — одна из нескольких обсерваторий, способных практически осуществлять описанные выше принципы ловли нейтрино. Материал детектора — плита антарктического льда на 1,4 км в глубину под станцией «Южный полюс»

Световые детекторы размером с баскетбольный мяч вкраплены в лед, чтобы отлавливать свет, излученный заряженными частицами. Точное вычисление времени регистрации света (на основном рис. отмечено цветом) позволяет астрономам узнать направление прихода и энергию испустивших заряженные частицы нейтрино

Система детекторов на поверхности выявляет космические лучи, чтобы не спутать их сигналы с сигналами нейтрино

«Ледяной куб» — 1 тыс. м
«Эмпайр стейт билдинг» — 381 м

COURTESY OF REINA MARUYAMA National Science Foundation (photograph), GEORGE RETSECK (illustration), JESSICA HUPPI (scale icons), JEN CHRISTIANSEN (flavor diagrams)



Ученые начали работу по размещению детекторов южным летом 2005-2006 гг. и планируют закончить ее этим летом. С помощью горячей воды они пробурили во льду скважины на глубину 2,5 км и опустили на кабеле фотодетекторы

ОБСЕРВАТОРИИ	ОСНАЩЕНИЕ
<p>«СУПЕР-КАМИОКАНДЕ» Расположение: к северу от Нагои, Япония Объем детектора: 50 тыс. куб. м Начало работы: 1996 г. Угловое разрешение: 26° Интервал энергий: 10⁸–10¹² эВ</p>	<p>Фотодетекторы расположены в гигантской емкости с водой в шахте по добыче цинка. Ученые планируют увеличить емкость в 20 раз, создав «Гипер-Камиоканде»</p>
<p>ОБСЕРВАТОРИЯ ИМ. ПЬЕРА ОЖЕ Расположение: к югу от Мендосы, Аргентина Объем детектора: 30 тыс. куб. км (покрытие телескопа), 20 тыс. куб. м (наземные детекторы) Начало работы: 2004 г. Угловое разрешение: 0,5–2° Интервал энергий: 10¹⁷–10²¹ эВ</p>	<p>Первоначально детектор космических лучей позволяет наблюдать и нейтрино высоких энергий с помощью системы 1,6 тыс. небольших емкостей с водой. В дополнение к этому телескопы ультрафиолетового диапазона ищут события столкновений частиц в атмосфере</p>
<p>АНТАРКТИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ («АНИТА») Расположение: станция Мак-Мердо, Антарктида Объем детектора: 1 млн куб. км Начало работы: 2006–2007, 2008–2009 гг. Угловое разрешение: 1–2° Интервал энергий: 10¹⁷–10²¹ эВ</p>	<p>Баллон, летающий над Антарктикой в течение месяца, сканируя радиоволны, которые могут возникать при столкновениях нейтрино высоких энергий с пластами льда</p>
<p>НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП «АНТАРЕС» Расположение: участок Средиземного моря близ Марселя, Франция Объем детектора: 0,05 куб. км Начало работы: 2008 г. Угловое разрешение: 0,3° Интервал энергий: 10¹³–10¹⁶ эВ</p>	<p>12 нитей подводных детекторов закреплены на якорь в поисках столкновений частиц в воде. Это один из головных проектов для <i>KM3NeT</i> — кубического километра нейтринного телескопа, который планируется построить за период 2011–2015 гг.</p>
<p>«ЛЕДЯНОЙ КУБ» Расположение: Южный полюс Объем детектора: 1 куб. км Оценка времени запуска: 2011 г. Угловое разрешение: 1–2° Интервал энергий: 10¹¹–10²¹ эВ</p>	<p>86 нитей светочувствительных детекторов (а в некоторых случаях и радиоантенн) вморожены в лед. Это более совершенная версия эксперимента «АМАНДА»</p>
<p>КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ EUSO Расположение: Международная космическая станция Объем детектора: 1 млн куб. км воздуха (эквивалентно 1 тыс. куб. км льда) Оценка времени запуска: 2015 г. Угловое разрешение: 1–2° Интервал энергий: 10¹⁹–10²¹ эВ</p>	<p>Телескоп ультрафиолетового диапазона волн, установленный на японском экспериментальном модуле, будет осуществлять мониторинг атмосферы Земли с целью засечь треки заряженных частиц</p>

В случае нейтрино различие в массах действует аналогично различию в тонах, создавая осцилляции сортов нейтрино.

Проиллюстрируем сказанное примерами. В Солнце образуются электронные нейтрино. Прежде чем достигнуть Земли, они становятся смесью трех сортов. Первые эксперименты Дэвиса и Кошибы были чувствительны только к электронным нейтрино, соответственно, они упустили мюонное и тау-нейтрино, в которые превратились многие электронные нейтрино в ходе своего движения. Понадобился детектор, чувствительный ко всем трем типам нейтрино, детектор Нейтринной обсерватории Садбери в Канаде, который в 2001 и 2002 гг. зафиксировал репрезентативную выборку частиц (см.: *Макдональд А., Клейн Д., Вок Д. Разгадка тайны солнечных нейтрино // ВМН, № 9, 2003*).

Другой пример уверенно обнаруженного превращения одного сорта нейтрино в другой — это образование нейтрино в верхних слоях земной атмосферы. Космические лучи сталкиваются с ядрами в атмосфере, рождая нестабильные частицы — пионы, которые тут же распадаются на электронное и мюонное нейтрино. Эти нейтрино распространяются сквозь атмосферу и саму планету. Чем больше они пройдут с момента детектирования, тем больше мюонных нейтрино превратится в тау. Нейтринные обсерватории видят около половины мюонных нейтрино, прошедших сквозь Землю и вышедших с противоположной стороны, из числа нейтрино, приходящих из верхних слоев атмосферы.

Шутки с пропорциями

Для астрономов сорт нейтрино аналогичен поляризации света в том смысле, что эти характеристики могут кодировать информацию. Подобно тому как небесный источник может излучать свет определенной поляризации, он излучает и нейтрино определенных сортов, и определяя эти типы, ученые могут ска-

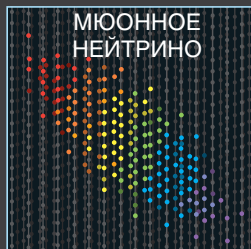
КАКОГО СОРТА БЫЛО НЕЙТРИНО?

Появление каждого типа, или сорта, нейтрино определяется своей частицей — электронное нейтрино от электрона, мюонное нейтрино от мюона, тау-нейтрино от тау-лептона. Наблюдательными методами можно различать сорта нейтрино с точностью 25%



ЭЛЕКТРОННОЕ НЕЙТРИНО

Электрон взаимодействует с атомами и уменьшает их энергию, формируется сферическая область излучения



МЮОННОЕ НЕЙТРИНО

Мюон, будучи слабозадействующим, проходит километры и больше, создавая конус излучения



ТАУ-НЕЙТРИНО

Тау-лептон быстро распадается. Его рождение и гибель сопровождаются двойной вспышкой излучения

ПЛОДОВИТОСТЬ СТЕРИЛЬНОГО НЕЙТРИНО

Некоторые астрономы считают, что нейтрино может отвечать за возникновение темной материи во Вселенной. Эта идея не слишком популярна, поскольку нейтрино очень легкие: их масса составляет не больше одной миллионной части массы электрона. Однако ученые все-таки оставляли возможность того, что существуют до сих пор не обнаруженные нейтрино, которые могут претендовать на роль кандидатов в частицы темной материи, так называемые стерильные нейтрино, не участвующие в реакциях слабого взаимодействия.

Кажется, что стерильные нейтрино в принципе невозможно детектировать, но ведь то же самое говорили когда-то и про обычные нейтрино. Считается, что стерильные нейтрино все-таки могут проявлять себя в наблюдениях астрономических объектов. Например, они могут излучаться при взрыве сверхновой. Поскольку согласно своей природе такие взрывы несимметричны, в одну сторону может уйти большее количество нейтрино, чем в другую, и остаток сверхновой может сместиться в противоположном направлении со скоростью сотни километров в секунду. Астрономы наблюдают подобное поведение, которое долгое время остается загадочным.

Стерильные нейтрино могут проявлять себя путем распада на фотоны рентгеновского излучения, поскольку они нестабильны. Рентгеновский спутник «Чандра» обнаружил излучение, которое можно сопоставить со стерильным нейтрино с массой в сотые доли массы электрона, и наблюдения рентгеновского спутника «Сузаку» также выявили слабый сигнал, идущий, возможно, именно от стерильного нейтрино. Распад стерильного нейтрино мог ионизовать водород в ранней Вселенной и быть ответственным за преобладание материи над антиматерией. Но пока этих указаний еще недостаточно, чтобы делать выводы о существовании стерильного нейтрино.

зать, какие процессы происходят в исследуемом источнике. Фокус в том, чтобы предсказать все превращения, которые случатся с нейтрино по дороге.

Если бы мы смогли точно измерить энергию нейтрино и установить, насколько издалека оно пришло, то мы смогли бы определить, в каком из циклов осцилляций оно находится, и вычислить относительный вклад трех сортов. Нам не хватает точности. Двигаясь долгое время и перемещаясь на большие расстояния, нейтрино осциллируют так много раз, что мы не можем точно определить пропорцию сортов. За неимением лучшего мы берем статистическое среднее, характеризующее так называемой матрицей распространения сортов. По такой матрице астрономы могут определить, что в реальности соответствует наблюдениям.

Например, известно, что много нейтрино образуется в ходе высокоэнергичных процессов столкновения фотонов и протонов. Такой процесс происходит в природных ускорителях космических частиц — в ударных волнах остатков сверхновых и в выбросах, вызванных взаимодействием излучающих объ-

ектов с черными дырами, а также и в далеком межзвездном пространстве, где космические лучи взаимодействуют с фоновым излучением. Взаимодействия порождают заряженные частицы — пионы, которые распадаются на мюоны и мюонные нейтрино. В свою очередь мюоны распадаются, помимо других продуктов распада, на электроны и электронные нейтрино. Результирующий поток нейтрино состоит на одну часть из ν_e , на две части из ν_μ и не содержит ν_τ , т.е. отношение сортов нейтрино таково: 1:2:0. Смотри соответствующие величины в матрице распространения, мы обнаруживаем, что это соотношение стало 1:1:1. Таким образом, если в эксперименте на Земле получено другое соотношение, чем 1:1:1, то это означает, что цепочка распада пиона не может быть причиной зарегистрированных нейтрино.

В некоторых случаях пион может потерять энергию, сталкиваясь с другими частицами или излучая, двигаясь по искривленной траектории в магнитном поле. В этом случае мюон, на который он распадается, становится запрещенным как высокоэнергичный источник, и отношение сортов становится 0:1:0.

Вычисления матрицы распространения, т.е. пересчет соответствующих величин для наблюдателя на Земле, дает 4:7:7 вместо 1:1:1. Если эксперимент показывает отношение 1:1:1 для нейтрино низких энергий и отношение 4:7:7 для нейтрино высоких энергий, то астрономы могут определить плотность частиц и характеристики магнитного поля, в котором двигались частицы.

Нейтрино могут приходиться также от так называемых источников бета-излучения. В природных ускорителях космических частиц высокоскоростные атомные ядра могут обмениваться пионами или распадаться, приводя к рождению потока быстрых нейтронов, которые подвергаются радиоактивному бета-распаду, давая ливни электронов и электронных нейтрино с отношением сортов 1:0:0. Соответствующая матрица дает для наблюдателя на Земле значения 5:2:2.

Каким бы ни было начальное соотношение сортов нейтрино, два их сорта, мюонное и тау, приходят к Земле в равных долях — примечательное равенство, которое отражает до конца не понятое учеными свойство внутренней симметрии этих частиц. Тау-нейтрино астрономы видят всегда больше, хотя даже нет известных источников, их производящих.

Совместно с гамма-излучением и космическими лучами нейтрино помогают лучше понять природные механизмы образования энергии в космических объектах. Они могут определить, являются ли ускорители космических частиц электромагнитными (в них нет нейтрино) или увлекают тяжелые частицы (нейтрино есть). Нейтрино могут также помочь ответить на один из десятка основных вопросов современной астрофизики: как формируются космические лучи сверхвысоких энергий? Некоторые космические лучи настолько энергичны, что раскрытие их природы может привести к перевороту в физике.

Нейтрино могут быть полезными, и вот в чем. Распад частиц темной материи приводит к рождению

МЕТАМОРФОЗЫ НЕЙТРИНО

В отличие от других частиц, нейтрино изменяются, путешествуя по Вселенной. Астрономы должны принимать во внимание странное свойство этих частиц, чтобы понять, какая же частица была испущена, и что послужило ее источником

НЕЯСНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

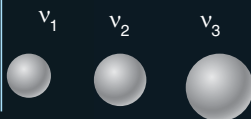
Нейтрино обладают способностью видоизменяться. Они могут быть одного из трех сортов и обладать одной из трех масс, но каждый сорт не соответствует какой-то определенной массе

ТИП НЕЙТРИНО определяет, как эта частица взаимодействует с веществом



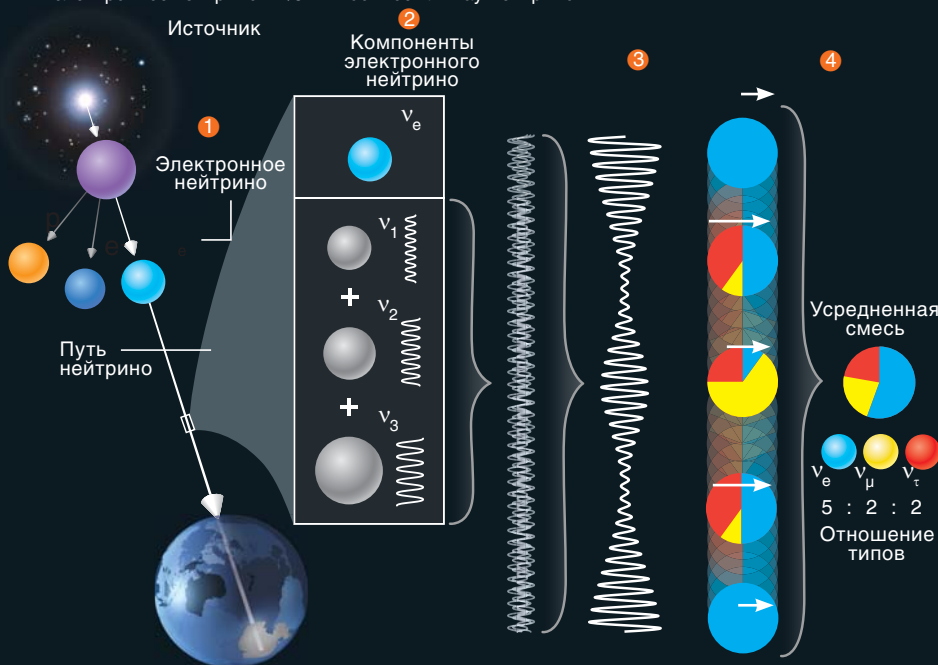
Обычные тела обладают постоянными свойствами: мяч может быть баскетбольным (600 г), или футбольным (400 г), или бейсбольным (150 г). Но если бы эти мячи вели себя как нейтрино, то их вес и тип могли бы меняться в процессе движения

МАССА нейтрино определяет, как эта частица распространяется в пространстве-времени



ОСЦИЛЛЯЦИИ СОРТОВ НЕЙТРИНО

Когда нейтрино рождается или когда его детектируют, оно обладает определенным сортом. Например, бета-распад нейтрона рождает электронное нейтрино (1). Это нейтрино не имеет какой-то конкретной массы, но представляет собой смесь одного из трех возможных вариантов (сумма трех волн различной длины) (2). По мере распространения нейтрино оно становится смесью трех сортов (3), которая меняется в процессе его движения (4). На диаграмме представлена смесь в пропорции 5:2:2, что означает, что детектор обладает вероятностью 1/5 обнаружить электронное нейтрино и 4/5 — мюонное или тау-нейтрино



СМЕСИ СОРТОВ

Астрофизические процессы рожают различные смеси сортов нейтрино, которые астрономы могут выявить путем подсчета количества превращений нейтрино. Мюонное и тау-нейтрино приходят всегда в равных пропорциях, согласно свойствам внутренней симметрии

Источник	Пропорции сортов нейтрино в источнике	Пропорции сортов нейтрино в детекторе
Распад нейтрона	1 _e :0 _{μ} :0	5 _e :2 _{μ} :2
Распад пиона (полный)	1:2:0	1:1:1
Распад пиона (частичный)	0:1:0	4:7:7
Распад частиц темной материи	1:1:2	7:8:8
Пространственно-временная пена	любое	1:1:1
Распад нейтрино (первый самый легкий)	любое	4:1:1
Распад нейтрино (второй самый легкий)	любое	0:1:1

нейтрино с пропорцией сортов 1:1:2, что приводит к соотношению 7:8:8. В современных квантовых теориях гравитации ткань пространства-времени идет рябью возмущений на микроскопических масштабах. Нейтрино сверхвысоких энергий с соответственно очень короткими длинами волн могут быть чувствительны к этой микроскопической структуре. Возмущения были бы способны изменить отношение сортов как 1:1:1. Зная это соотношение, ученые в будущем могли бы отсеять нежизнеспособные теории, а также определить уровень энергии, на котором эффекты квантовой гравитации становились бы значимыми.

Еще один экзотический процесс — распад тяжелого нейтрино на более легкие, что может повысить отношение сортов. Изучая солнечные нейтрино, физики нашли, что одно массовое состояние нейтрино легче второго, но неизвестно соотношение их с третьим массовым состоянием. Если астрономы обнаружат пропорцию 4:1:1, это будет означать, что первое нейтрино самое легкое, а соотношение 0:1:1 — что таково третье.

Исторически астрономы начали изучение Вселенной в видимом свете, переходя к инфракрасному, микроволновому, радиоизлучению и рентгеновским и гамма-лучам. Начинается золотой век нейтрино в астрономии. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- High Energy Cosmic Rays. Graciela B. Gelmini in Journal of Physics: Conference Series, Vol. 171, No. 1, Paper No. 012012; June 29, 2009. arxiv.org/abs/0903.4716
- Sterile Neutrinos: The Dark Side of the Light Fermions. Alexander Kusenko in Physics Reports, Vol. 481, Nos. 1–2, pages 1–28; September 2009. arxiv.org/abs/0906.2968
- Kilometer-Scale Neutrino Detectors: First Light. Francis Halzen. Presented at CCAPP Symposium 2009. arxiv.org/abs/0911.2676