

Нейтринная астрофизика. Космологические нейтрино

А.В. ИВАНЧИК,
член-корреспондент РАН

В.Ю. ЮРЧЕНКО,
аспирант
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН



Начиная с 1930-х годов нейтринная физика пере-

жила стремительное развитие, а процесс регистрации нейтрино, казавшийся неосуществимой задачей, стал мощным инструментом для изучения не только фундаментальных законов природы, но и Вселенной в целом. Все это позволяет говорить о возникновении нейтринной астрономии. В предлагаемой статье представлен обзор ключевых достижений нейтринной астрономии, а также



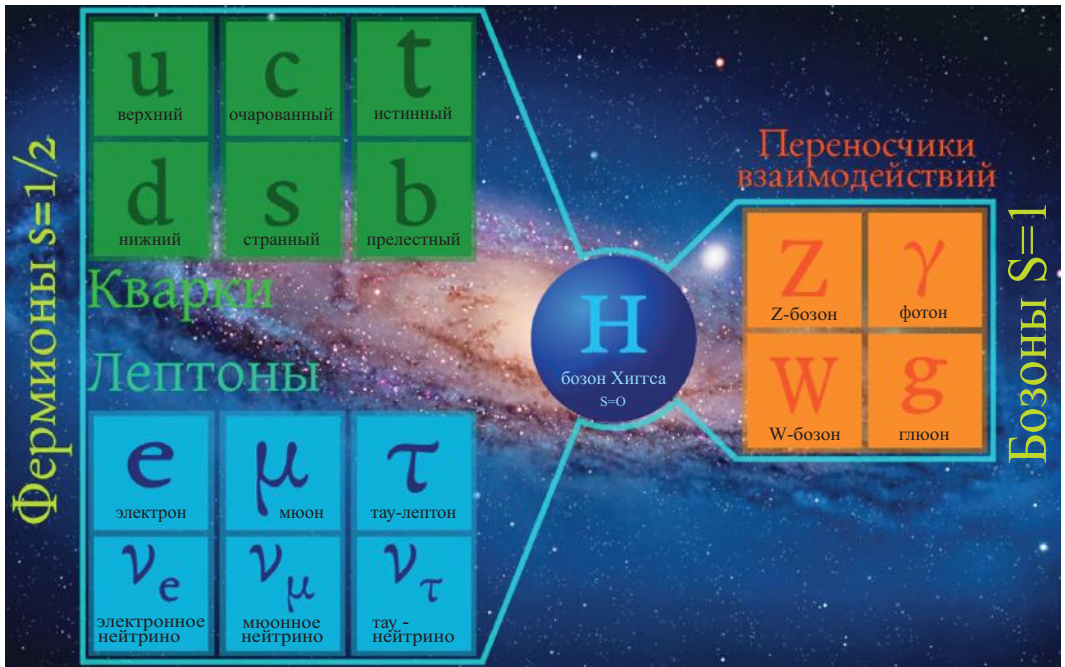
возможные перспективы ее развития.

ЗАГАДОЧНОЕ НЕЙТРИНО

В 2013 г. физикам-теоретикам Франсуа Энглеру (Бельгия) и Питеру Хиггсу

(Англия) была присуждена Нобелевская премия по физике за теоретическое предсказание механизма возникновения массы у ряда элементарных час-

тиц. Оно было блестяще подтверждено годом ранее в результате обнаружения бозона Хиггса на Большом Адронном Коллайдере (Земля и Вселенная,



Стандартная модель физики элементарных частиц – кварк-лептонная структура материи, образованная тремя поколениями фермионов. Каждое поколение включает в себя два кварка и два лептона (заряженный и нейтральный), взаимодействие между которыми осуществляется посредством бозонов.

2013, № 2; 2015, № 6). Это открытие стало последним фундаментальным “кирпичиком” в стройном “здании” теории, называемой “стандартная модель” физики элементарных частиц. Именно на этой концепции базируются современные представления о фундаментальном строении материи.

В соответствии с этими представлениями материя имеет кварк-лептонную структуру: из кварков образуются протоны и нейтроны, из которых, в свою очередь, состоят ядра; из ядер и электронов форми-

руются атомы, а перенос взаимодействия между этими частицами осуществляют бозоны. О каждой из частиц стандартной модели можно представить отдельный захватывающий рассказ, но, пожалуй, самой удивительной и загадочной частицей в этой картине является нейтрино.

Во-первых, нейтрино обладает довольно уникальными свойствами:

- оно является второй по распространенности (после фотона) частицей во Вселенной;
- это самая легкая из частиц с ненулевой массой по-

кой; и, хотя масса нейтрино до сих пор не измерена, точно известно, что она есть и не превышает 1 эВ (то есть нейтрино более чем в 500 тыс. раз легче электрона);

- оно явным образом нарушает симметрию правого и левого (фундаментальные взаимодействия в природе симметричны относительно зеркального отражения, то есть замены “левого” на “правое”, и лишь слабые взаимодействия с участием нейтрино изменяют эту симметрию);
- имеет одно из самых малых сечений вза-

имодействия с веществом ($\sigma \sim 10^{-44} \text{ см}^{-3}$), приводящее к его огромной проникающей способности, настолько большой, что это когда-нибудь позволит определить, как в первые секунды рождалась Вселенная;

– на радиационно-доминированной стадии эволюции Вселенной, начавшейся в первые доли секунды после Большого взрыва и длившейся около 50 тыс. лет, нейтрино наряду с фотонами вносило ключевой вклад в величину скорости расширения Вселенной, что в процессах первичного нуклеосинтеза определило относительное содержание гелия-4 (${}^4\text{He}$) – второго по распространенности химического элемента во Вселенной (Земля и Вселенная, 1967, № 1; 1972, 1985, № 1, № 3; 2014, № 1; 2016, № 6).

Во-вторых, главная особенность нейтрино заключается в феномене его осцилляций – превращении нейтрино “одного сорта” в нейтрино “другого сорта”. Нейтрино (как и все фермионы) представлено тремя поколениями: различают электронное, мюонное и τ -нейтрино. Электронное нейтрино, появившись в результате протекания процессов слабого взаимодействия и двигаясь в пустоте, превращается в мюонное, или τ -нейтрино, а затем снова преобразуется в электронное, и так далее: то есть происхо-

Швейцарский физик-теоретик Вольфганг Паули, выдвинувший гипотезу о существовании новой частицы – нейтрино.

дит процесс осцилляции нейтрино. Уникальность феномена осцилляций нейтрино связана с двумя обстоятельствами:

– они возможны только в том случае, если нейтрино массивны (!);

– осцилляции невозможно объяснить в рамках стандартной модели, поэтому экспериментально подтвержденный в начале 2000-х гг. феномен осцилляций нейтрино (Нобелевская премия за 2015 год, Такааки Кадзита и Артур Макдональд) является прямым указанием на неполноту стандартной модели и необходимость ее расширения.

ИСТОРИЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ И ОТКРЫТИЯ НЕЙТРИНО

В 1913 г. сэр Джеймс Чедвик, английский физик, открывший нейтрон, обнаружил, что при β -распаде радиоактивного препарата энергетический спектр образующихся β -частиц представляет собой не набор дискретных линий (как того требовали представления развивавшейся в то время квантовой механики), а непрерывный спектр. Это выглядело довольно странно – так, как будто



нарушаются ключевые законы физики: закон сохранения энергии, импульса и момента импульса. Появилось множество попыток объяснения этого явления. Однако их всеобщая несостоятельность привела к тому, что даже такой непререкаемый авторитет, как Нильс Бор (Земля и Вселенная, 1986, № 3), предложил в 1930 г. гипотезу о несохранении энергии в реакциях слабого взаимодействия. В итоге к началу 1930-х годов β -распад оставался загадочным явлением, не поддававшимся объяснению.

Решение этой загадки было предложено швейцарским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули. На тот момент оно было не менее экзотичным, чем вариант с не сохранением энергии; к тому же и сформулировано оно было в несколько экстравагантной форме. 4 декабря 1930 г. В. Паули

послал письмо специалистам по радиоактивности, собравшимся в немецком Тюбингене, начинавшееся словами: «Дорогие радиоактивные дамы и господа ...». В нем В. Паули предложил спасти законы сохранения, введя новую частицу, которая должна была быть электрически нейтральна, существенно легче электрона и обладать высокой проникающей способностью. Эта частица, по его идее, должна была вылетать при β -распаде из ядра одновременно с электроном, что делало бы их спектры непрерывными (в соответствии с наблюдениями). Экзотичность этого предложения (кстати, осознаваемая и самим ученым) заключалась в том, что к тому времени физикам были известны всего три элементарные частицы – фотон, электрон и протон – и введение четвертой с довольно умозрительными свойствами выглядело не



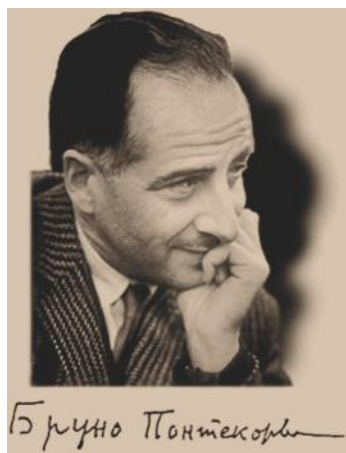
Нобелевский лауреат 1938 года Энрико Ферми – автор первой количественной теории бета-распада, одним из продуктов которого является нейтрино.

В. Паули признался, что совершил ужасную вещь: предсказал существование частицы, которую никогда не удастся обнаружить! Однако никогда не говори “никогда”...

менее революционно, чем гипотеза Нильса Бора о нарушении закона сохранения энергии.

Несколькими годами позже, в 1933–1934 гг., выдающийся итальянский физик Энрико Ферми (Земля и Вселенная, 2015, № 3) предложил теоретическое описание β -распада, основанное на гипотезе В. Паули о существовании нейтрино. Рассчитанная на основе этой теории проникающая способность нейтрино оказалась поистине грандиозной: для того чтобы с вероятностью, близкой к единице, поглотить солнечное нейтрино, необходимо использовать свинцовую плиту толщиной порядка 1000 световых лет! Узнав об этом,

Первым, кто предложил способ регистрации нейтрино, был физик Бруно Понтекорво. В 1946 г., работая в Канаде над созданием исследовательского реактора, он предложил метод детектирования электронного нейтрино с помощью реакции превращения ядер хлора в ядра аргона: $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$. Однако оставалось непонятным, как при чудовищно малых сечениях взаимодействия нейтрино с веществом ($\sigma \sim 10^{-44} \text{ см}^2$) все же его зарегистрировать? Очевидно: если регистрация одного нейтрино – событие катастрофически маловероятное, то в случае, когда есть источник, генерирующий огромный поток этих частиц, вероятность регистрации нейтрино возрастает до потенциально наблюдаемых значений. Одним из таких источников являются действующие ядерные реакторы, создающие вблизи себя локально большие потоки



Бруно Понтекорво – советский физик итальянского происхождения, автор большого количества плодотворных идей в нейтринной физике XX века.

нейтрино, что и позволило в начале 1950 гг. американским физикам Фредерику Райнесу и Клайду Коуэну зарегистрировать их в эксперименте, выполненном на базе ядерного реактора, располагавшегося в шахте Саванна Ривер в штате Южная Каролина (в 1995 г. Ф. Райнес был удостоен Нобелевской премии за это открытие). На самом деле в реакторах образуются антинейтрино, и именно их зарегистрировали Ф. Райнес и К. Коуэн. В научной литературе для нейтрино и антинейтрино (для краткости, когда это не приводит к недоразумениям) используют общий термин – нейтрино.

Исторически первыми были зарегистрированы нейтрино от ядерных реакторов, за ними последовали (в хронологическом порядке) открытия солнечных нейтрино, атмосферных, а также нейтрино сверхвысоких энергий. Самыми большими пото-

Энергетический спектр нейтрино, создаваемого различными источниками. Нейтрино рождается в процессах: реакциях термоядерного синтеза внутри Солнца, при взрывах сверхновых и взаимодействии космических лучей с ядрами атомов в атмосфере, за счет распада радиоактивных элементов в недрах Земли, в первые мгновения рождения Вселенной.

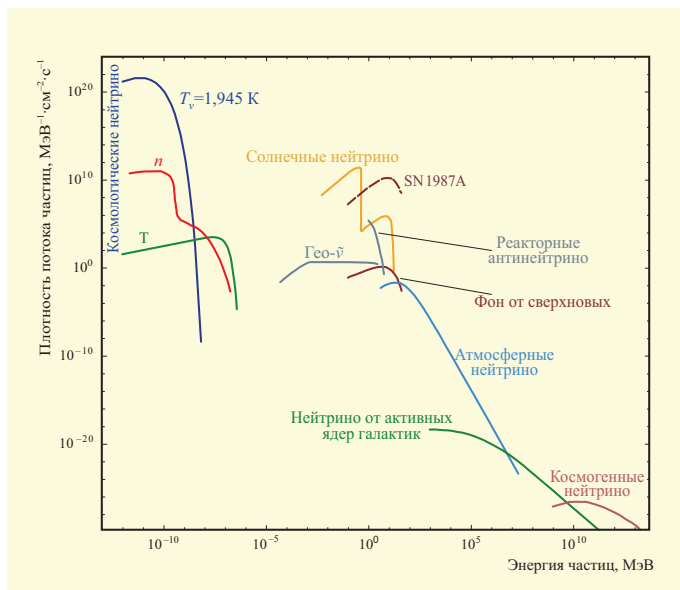
ками обладают космологические нейтрино (возникшие в начальной стадии расширения Вселенной), однако в современную эпоху они находятся в столь низкоэнергетической части спектра, поэтому пока невозможна их регистрация с помощью существующих в настоящий момент приборов.

Остановимся чуть более подробно на источниках возникновения нейтрино различной природы.

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

Солнце является еще одним мощным локальным источником рождения нейтрино. Термоядерные реакции, протекающие в недрах нашей звезды, не только обеспечивают энерговыделение, поддер-

живающее как жизнь самой звезды, так и жизнь на Земле, но и порождают огромные потоки нейтрино: каждую секунду через один квадратный сантиметр поверхности на Земле проходят более 60 млрд солнечных нейтрино. Только благодаря чрезвычайно малому сечению взаимодействия нейтрино с веществом этот процесс происходит совершенно незаметно и без каких-либо последствий для нас – человек и планета Земля прозрачны для нейтрино. Тем не менее предложенный Б. Понтекорво хлор-аргоновый метод регистрации нейтрино, реализованный в эксперименте американским ученым Реймондом Дэвисом, все же позволил зарегистрировать небольшое число солнечных





Резервуар с 380-ю тысячами литров жидкой мишени (перхлорэтилен C_2Cl_4) для детектирования солнечных нейтрино в ходе хлор-аргонового эксперимента, проведенного Р. Дэвисом в шахте Хоумстейк (США). Рисунок воспроизводится с разрешения Brookhaven National Laboratory.

нейтрино: за 25 лет удалось зарегистрировать около 2200 нейтрино (то есть в среднем около 90 нейтрино в год, или одно нейтрино за пять суток). При этом самой удивительной оказалась величина регистрируемого потока нейтрино от Солнца: она была в три раза меньше предсказываемой в теоретических моделях строения Солнца. Объяснение этому было предложено все тем же Б. Понтекорво. Это объяснение в современном изложении звучит следующим образом: в недрах Солнца

рождаются электронные нейтрино, и в процессе движения от Солнца до Земли они осциллируют, переходя в мюонные и τ -нейтрино; а так как в эксперименте Р. Дэвиса регистрировали только электронные нейтрино, то и поток их на Земле оказывался в три раза меньше, чем при рождении в центре Солнца.

Результаты Р. Дэвиса были подтверждены еще одним независимым экспериментом – в нейтринном детекторе “Камиоканде” (1986 г.), который к тому же в поисках нейтрино вы-

шел еще и за пределы Солнечной системы (об этом более подробно в следующем разделе). За открытие космических нейтрино (и, по сути, за создание нейтринной астрономии) были удостоены Нобелевской премии за 2002 год Р. Дэвис и независимо – руководитель проекта “Камиоканде” Масатоши Кошиба (Япония).

Сегодня нейтринная астрономия является еще одной областью исследования астрофизических явлений. Так, например, регистрируя нейтрино от Солнца, ученые осознают, что реакции термоядерного синтеза протекают на Солнце в данный момент: нейтрино, для которого Солнце прозрачно для проникновения, двигаясь практически со скоростью света, достигает Земли за 8 минут. При этом энергия электромагнитного излучения, сейчас рождающегося в недрах Солнца, будет диффундировать к его поверхности и вылетит из него в виде оптического излучения только через десятки-сотни тысяч лет.

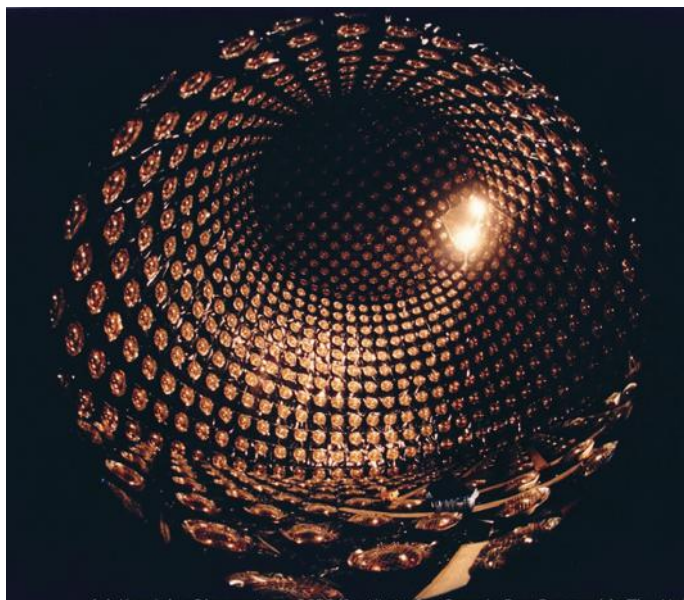
НЕЙТРИНО ОТ СВЕРХНОВЫХ

Сверхновые – одно из ярчайших и грандиозных явлений, происходящих во Вселенной (Земля и Вселенная, 1968, № 5; 1981, №№ 4, 5; 1982, № 3; 2008, № 1). Энергия, которая запасена в маломассивной звезде, подобной нашему Солнцу, медленно расходуется на протяжении нескольких миллиардов лет. В более массивной звезде в конце ее быстрой эволюции она высвобождается в виде взрыва, длительность которого на разных его стадиях составляет от нескольких часов до дней и месяцев, что в масштабе миллиардов лет, конечно, представляется мгновением. На пике своей яркости светимость сверхновой может превосходить светимость всех звезд родительской галактики; при этом начальная стадия взрыва сопровождается мощным всплеском нейтринного излучения, намного превосходящим звездные потоки нейтрино, формирующиеся во время их стационарно-

го горения. Относительная редкость таких взрывов и их существенная удаленность от Земли приводит к формированию нейтринного фона сверхновых, находящегося на пределе чувствительности современных нейтринных телескопов (Земля и Вселенная, 1967, № 4; 2011, № 1). Однако 23 февраля 1987 г. произошло событие, вписавшее в историю нейтринной астрофизики свою уникальную страницу. В Большом Магеллановом Облаке (карликовая галактика-спутник Млечного Пути), на расстоянии около 50 кпк от Земли (что сравнительно недалеко для такого рода события), вспыхнула сверхновая, получившая название SN 1987A (Земля и Вселенная, 1987, № 3; 1989, № 2). Сама вспышка

произошла около 160 тыс. лет назад, но только 23 февраля 1987 г. свет от нее достиг Земли и практически вместе с ним, опередив его на три часа (в соответствии с модельными представлениями о взрывах сверхновой), Землю “прошил” и нейтринный импульс, который зарегистрировали нейтринные обсерватории. С помощью детектора “Камиоканде” были зарегистрированы 12 из 10^{16} нейтрино, прошедших сквозь него, и смогли определить направление на небе, совпавшее с областью, где расположено Большое Магелланово Облако. Таким образом, результаты исследований, проводимых в области нейтринной астрономии, позволили обнаруживать нейтрино за пределами Солнечной сис-

Фотоэлектронные умножители на внутренней поверхности резервуара нейтринного детектора “Камиоканде”. Масса воды, заполняющей детектор, составляет 3 тыс. тонн. Рисунок воспроизводится с разрешения Kamioka Observatory, ICRR, Токийский университет.



темы. На этом развитие нейтринной астрономии не остановилось, и сейчас ученые полагают, что в наблюдениях нейтрино мы вышли за пределы нашей Галактики.

НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

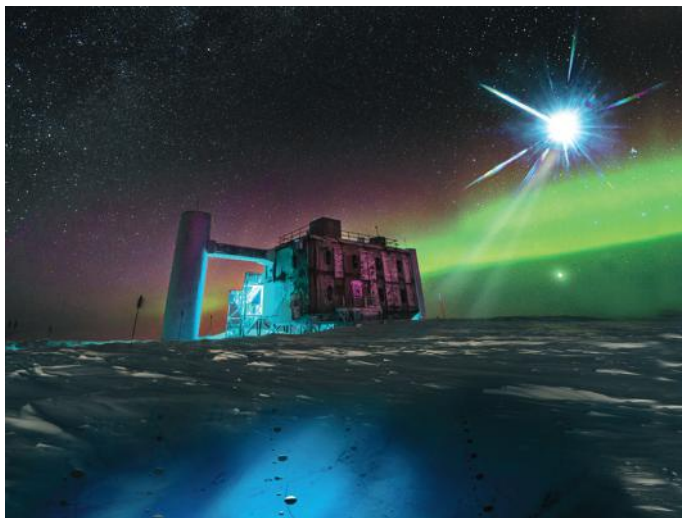
К 2010 г. в Антарктиде была построена новая нейтринная обсерватория "IceCube" (Ледяной куб; США). В толще антарктического льда, на глубине от 1,5 до 2,5 км, размещены на прочных нитях фотоумножители, регистрирующие черенковское излучение мюонов высоких энергий, рожденных в результате взаимодействия мюонных нейтрино с электронами и ядрами антарктического льда. Одной из особенностей этой обсерватории является возможность регистрации нейтрино сверхвысоких энергий. Так, в

2013 г. были зарегистрированы три нейтрино, энергия которых превышала величину 10^{15} эВ, т.е. частица, которая как минимум в 500 тыс. раз легче электрона, несет в себе энергию, соответствующую миллиону масс протона. Особенностью диапазона энергий для нейтрино, превышающих эту величину, является то, что потоки атмосферных нейтрино в этом диапазоне становятся очень малыми. Это свидетельствует о том, что с большой долей вероятности нейтрино с такими энергиями были порождены внегалактическими источниками (например активными ядрами галактик).

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ НЕЙТРИНО

Самыми распространенными и наиболее трудноуловимыми являются космологические, релик-

товые нейтрино. Родившись в первые мгновения после Большого взрыва, реликтовые нейтрино вместе с реликтовыми фотонами определяют скорость расширения Вселенной в первые 50 тыс. лет ее эволюции. Их число сопоставимо с числом реликтовых фотонов и огромно по сравнению с числом барионов: в среднем по Вселенной на один барион приходится около миллиарда фотонов и почти столько же нейтрино. Более того, если бы электрон-позитронная аннигиляция в первые секунды после Большого взрыва не подогрела бы фотоны и не увеличила их количество, то нейтрино было бы самой распространенной частицей во Вселенной. Спектр реликтовых нейтрино описывается равновесной функцией Ферми-Дирака и зависит лишь от одного параметра – от термодинамической температуры (Т). В ходе эволюции Вселенной из-за ее расширения температура, определяющая концентрацию и энергию нейтрино, уменьшается,



Наземное сооружение, использовавшееся в ходе эксперимента, проводившегося на нейтринной обсерватории "IceCube" (США). Рисунок воспроизводится с разрешения IceCube/NSF.

Погружение троса с закрепленными на нем оптическими детекторами в скважину, пробуренную в толще льда в Антарктиде. Эксперимент "IceCube" (США). Рисунок воспроизводится с разрешения Mark Krasberg, IceCube/NSF.

в соответствии с космологическим законом $T(z) = T_0(1+z)$, где $T_0 = 1,945$ К, где K – современное значение температуры реликтовых нейтрино, а z – показатель космологического красного смещения. С момента первичного нуклеосинтеза в результате космологического расширения Вселенной температура и энергия нейтрино уменьшились в миллиард раз, и в настоящий момент реликтовые нейтрино можно отнести к низкоэнергетической области спектра величиной $\epsilon_\nu < 10^{-2}$ эВ. Эти факторы делают их практически ненаблюдаемыми, поскольку сечение взаимодействия нейтрино с веществом существенно снижается с уменьшением их энергии. Тем не менее проекты регистрации реликтовых нейтрино существуют и развиваются, поскольку подтверждение факта их существования является фундаментальным как для космологии, так и для физики в целом.

Еще одним процессом, протекающим в первые минуты после рождения Вселенной, в котором нейтрино играют определяющую



роль, является первичный нуклеосинтез – процесс, в ходе которого из протонов и нейтронов образуются первые ядра легких элементов – таких как дейтерий, гелий, литий, бериллий и бор. Нейтрино не только определяют скорость расширения Вселенной в этот момент (а следовательно, и время нарушения баланса между прямыми и обратными ядерными реакциями), но также участвуют и в слабых реакциях, определяющих величину нейтрон-протонного отношения к моменту начала пер-

вичного нуклеосинтеза, которое, в свою очередь, определяет относительное содержание гелия-4 во Вселенной по его окончании.

Помимо стабильных легких элементов, рождающихся в процессах первичного нуклеосинтеза, на момент его окончания есть небольшое количество нестабильных нейтронов и ядер трития, распады которых приводят к формированию спектра нетепловых антинейтрино, в дополнение к термодинамически равновесному реликтовому спектру нейтрино и антинейтрино. И

если факт регистрации равновесных реликтовых нейтрино подтвердит правильность стандартной космологической модели и что во Вселенной действительно ре-

ализовывались температуры, превышающие миллионы электрон-вольт, то результаты регистрации спектра нетепловых нейтрино откроют возможность проследить

эволюцию Вселенной в первые минуты и часы.

Обзор выполнен в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 18-12-00301).

Информация

Трехмерная карта магнитного поля Юпитера

По данным АМС “Юнона” (“Juno”; Земля и Вселенная, 2011, № 6, с. 31), планетологи составили трехмерную карту магнитного поля Юпитера (см. 3-ю стр. обложки, вверху). Оно оказалось совсем не похоже на земное – дипольная часть магнитного поля была зафиксирована только в Южном полушарии планеты.

Группа ученых под руководством К. Мур (Гарвардский университет) использовала данные, полученные с помощью магнетометра, собранные за восемь оборотов станции вокруг Юпитера; была составлена модель магнитного поля планеты – самого мощного среди планет Солнечной системы, на разных глубинах от поверхности планеты-гиганта – до вероятной границы перехода водорода в металлическое состояние

($0,85 R_{\text{Ю}}$). Оказалось, что магнитное поле Юпитера отличается от всех известных нам магнитных полей планет: здесь большая часть магнитного потока покидает область динамо в Северном полушарии в виде узкой полосы и частично возвращается в изолированный участок около экватора – область Большого Синего Пятна; в других областях поле значительно слабее.

Кроме того, выяснено, что в Южном полушарии планеты магнитное поле – дипольное, а в Северном сосредоточена его недипольная часть; это чрезвычайно отличает Юпитер от Земли, где недипольная часть поля равномерно распределена между двумя полушариями. По мнению астрономов, причина такого различия – в проявлении механизма динамо не в однородном слое (как на Земле), а в нескольких слоях – с разными свойствами. Результаты недавних данных, полученных с помощью АМС “Юнона”, позволяют утверждать, что у газового гиганта может быть частично (или полностью) растворенное в водороде ядро, состоящее из скальной породы и

льда. Оно может доходить до половины радиуса планеты; в нем может быть два слоя: верхний (состоящий, в основном, из чистого водорода) и нижний (наполненный растворенными в нем породами и льдом); они могут быть неустойчивы (особенно верхний слой), учитывая наличие глубинных тепловых потоков. Присутствие отчетливо выраженных слоев металлического водорода может служить объяснением наличия необычного магнитного поля Юпитера.

Напомним, что АМС “Юнона” достигла Юпитера в июле 2016 г.

Главная задача миссии – исследование атмосферы, магнитного поля и магнитосферы планеты-гиганта, анализ его внутренней структуры, а также составление карты направления ветров. В июне 2018 г. принято решение о продлении исследований Юпитера с помощью АМС “Юнона” до 2021 г.

*Журнал “Nature”,
2018. Т. 561. Р. 76–78.*