

PACS №: 01.65.+g

Ю.П. Степановский

Институт теоретической физики

ННЦ "Харьковский Физико-Технический Институт"

Akademicheskaya Str. 1, Kharkov, 61108, Ukraine

e-mail: yustep@kipt.kharkov.ua

Нейтринная и Рентгеновская Астрономия (Нобелевская премия по физике 2002)

Содержание

1. Нобелевские лауреаты по физике 2002	276
2. Ранняя история нейтрино	277
3. Физика нейтрино и Бруно Понтекорво	282
4. Нейтринная астрономия Солнца, нейтрино от сверхновой 1987А	285
5. Достижения рентгеновской астрономии	289

Abstract

The development of neutrino physics is briefly reviewed from its beginning to nowadays. The contribution to astrophysics of Nobel laureates in physics for 2002 is considered: the neutrino astronomy of the Sun and Supernova 1987 and the X-ray astronomy of the distant objects of the universe.

1. Нобелевские лауреаты по физике 2002

В 2002 году Шведская Королевская Академия Наук присудила нобелевскую премию по физике [1] **Раймонду Дэвису младшему** (1914 г. рожд., почетному профессору университета Пенсильвании, Филадельфия, США),

Масатоши Кошибе (1926 г. рожд., почетному профессору Токийского университета, Япония)

за пионерский вклад в астрофизику, в частности, за детектирование космических нейтрино (1/2 премии),

Риккардо Джиаккони (1931 г. рожд., президенту Ассоциации университетов, Вашингтон, США)

за пионерский вклад в астрофизику, который привел к открытию космических рентгеновских источников.



Рис. 1. Нобелевские лауреаты по физике 2002 Р. Дэвис, М. Кошиба, Р. Джаккони.

Далее в сообщении Нобелевского комитета говорится [1]:

Два новых окна во вселенную

Земля пронизывается непрерывным потоком космических лучей и других типов излучения. Лауреаты Нобелевской премии по физике этого года использовали мельчайшие компоненты вселенной для того, чтобы увеличить наше понимание очень больших компонент:

Солнца, звезд, галактик и сверхновых. Новое знание изменило наш взгляд на вселенную.

Таинственная частица, названная нейтрино, была предсказана в начале 30-ых годов Вольфгангом Паули (Нобелевская премия, 1945), но понадобилось 25 лет, чтобы доказать его существование (Фредерик Рейнес, Нобелевская премия, 1995). Это связано с тем, что нейтрино, которое образуется в Солнце и в других звездах в ядерных реакциях синтеза гелия из водорода, практически не взаимодействует с веществом, и поэтому его очень трудно детектировать. Например, тысячи миллиардов нейтрино ежесекундно проходят сквозь нас, совершенно нами не замечаемые. **Раймонд Дэвис младший** построил совершенно новый детектор, гигантский бак, наполненный 600 тоннами жидкости, который был помещен в шахту. За 30 лет ему удалось поймать около 2000 нейтрино от Солнца и тем самым доказать, что источником энерговыделения Солнца являются реакции ядерного синтеза. На другом гигантском детекторе, названном Камиоканде, группа исследователей во главе с **Масатоши Кошибой**, подтвердила результаты Дэвиса. Эта же группа 23 февраля 1987 года зарегистрировала нейтрино, образовавшиеся при взрыве далекой сверхновой. Исследователи поймали двенадцать из 10^{16} нейтрино (10 000 000 000 000 000), которые прошли сквозь детектор. Работы Дэвиса и Кошибы привели к неожиданным открытиям и к новой интенсивной области исследований — *нейтринной астрономии*.

Солнце и другие звезды излучают электромагнитное излучение различных длин волн, испуская видимый и невидимый свет, например, рентгеновские лучи. Для того, чтобы исследовать космическое рентгеновское излучение, которое поглощается земной атмосферой, необходимо поместить соответствующую аппаратуру в космическое пространство. **Риккардо Джиаккони** сконструировал такую аппаратуру. Он впервые зарегистрировал источник рентгеновского излучения, находящийся за пределами солнечной системы, и первый доказал, что вселенная наполнена фоновым рентгеновским излучением. Он также зарегистрировал источни-

ки рентгеновского излучения, которые большинство астрономов считают теперь содержащими черные дыры. Джиаккони сконструировал первые рентгеновские телескопы, с помощью которых были получены совершенно новые — и четкие — изображения вселенной. Джиаккони были заложены основы *рентгеновской астрономии*.

2. Ранняя история нейтрино

Трудно найти пример, где слово "интуиция" характеризовало бы человеческий подвиг лучше, чем в случае "изобретения" нейтрино Паули. Во-первых, 50 лет тому назад были известны только две "элементарных" частицы — электрон и протон, и даже мысль, что для понимания вещей необходимо ввести новую частицу, была сама по себе революционной идеей. Какая разница по сравнению с сегодняшним положением, когда масса людей при возникновении малейшей провокации готовы изобрести любое число частиц!

Бруно Понтекорво, 1983 г. [2].

Абдус Салам (1926–1996), один из создателей теории электрослабого взаимодействия (Нобелевская премия по физике, 1979, совместно с Ш. Л. Глэшоу и С. Вайнбергом), вспоминал урок своего школьного учителя в родном городе Джангмагхияне в Пакистане в 1935 году, посвященный фундаментальным силам [3]. Вначале учитель познакомил учеников с тяготением и теорией Ньютона. Потом он показал ученикам магнит и объяснил, что есть такая сила — "магнитная", после чего учитель рассказал, что есть еще "электрическая сила", но ее "можно найти" только в столице Пенджаба, Лахоре. Существуют еще "ядерные силы", добавил учитель, но они "есть только в Европе". Учитель не рассказал ученикам о "слабой силе", потому что в 1935 году ее еще не было даже в Европе. Выражение *слабые взаимодействия* появилось только в 1948–1949 годах, когда А. Салам уже был аспирантом в колледже св. Джона в Кембридже. К этому времени уже были открыты μ -мезоны (мюоны) и π -мезоны, и физики пришли к заключению, что за распады μ -мезонов и π -мезонов ответственны те же взаимодействия, которые приводят к β -распаду атомных ядер, открытому Э. Резерфордом в 1899 году (Нобелевская премия по химии, 1908).

Слабые взаимодействия поставили перед физиками много проблем, распутывание которых при-



Рис. 2. Нобелевский лауреат 1945 В. Паули.

водило к удивительным открытиям. Первой серьезной проблемой было наблюдаемое на опыте несохранение энергии при β -распаде ядер, которое склонило даже таких великих, как Бор и Ландау, к признанию того, что энергия сохраняется не всегда. Однако, 4 декабря 1930 года В. Паули отправил письмо "радиоактивным дамам и господам", собравшимся на конференции в Тюбингене, в котором высказал предположение, что при β -распаде ядер, кроме β -частиц (то есть электронов и тогда еще не открытых позитронов), атомные ядра испускают некоторую нейтральную частицу, уносящую недостающую энергию и названную вскоре *нейтрино*. (Сам Паули не мог появиться в Тюбингене, поскольку серьезные причины удерживали его в Цюрихе: Паули был приглашен на танцы в ночь с 6 на 7 декабря.) Паули спасал не только закон сохранения энергии. В то время ядра предполагались состоящими из протонов и электронов (нейтроны были открыты только в 1932 году). А это противоречило эксперименту. Наблюдаемое чередование интенсивностей во вращательных спектрах двухатомных молекул азота однозначно приводило к выводу, что спин ядер азота — целый (в единицах $\hbar/2$), в то же время, если, как это считалось, ядро азота состоит из 21 частицы — 14 протонов и 7 электронов — то его спин должен быть полуцелым. Нейтрино Паули спасало положение и устраняло "азотную катастрофу", так как Паули предположил, что нейтрино имеет спин $1/2$, и его наличие в ядре делало спин ядра целым. Паули считал, что пробег нейтрино в веществе очень большой, примерно раз в 10 больше, чем у γ -квантов, и поэтому нейтрино будет невозможно зарегистрировать. (Паули несколько преуменьшил проникающую способность нейтрино: пробег нейтрино в веществе — не сантиметры, как думал Паули, а сотни и даже тысячи световых лет (пробег зависит от вещества и от энергии нейтрино)!) Несмотря на то, что Паули ошибся на много порядков, нейтрино все же удалось зарегистрировать. Рассказывают, как Паули заключил пари со своим близким другом аст-

рономом В. Бааде [4]. Предположив существование нейтрино, Паули сказал Бааде: "Я сделал сегодня что-то ужасное. Физику-теоретику никогда не следует делать такого. Я предположил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально". Астрофизик Фред Хойл, которому об этой истории рассказал сам Бааде, продолжает [4]: "Бааде тут же заключил пари на шампанское — любимый напиток Паули — что придет день, когда это нейтрино будет зарегистрировано. Когда много лет спустя Коуэн и Райнес и в самом деле зарегистрировали нейтрино, Паули выставил шампанское, чему я могу быть свидетелем, поскольку мне довелось выпить часть проспороженного". Паули в это время был в ЦЕРН'е (Европейском Совете Ядерных Исследований). Получив в июне 1956 года телеграмму от Коуэна и Райнеса и выпив с друзьями ящик шампанского, Паули ответил: "Спасибо за сообщение. Все приходит к тому, кто умеет ждать". Только через 30 лет Ф. Райнес получил этот ответ (точнее, его копию) [5] (Клайд Коуэн (1919–1974) к этому времени уже умер).

Фредерик Райнес (1918–1998) в 1995 году "за регистрацию нейтрино" получил Нобелевскую премию совместно с Мартином Перлом (род. в 1927 г.), получившим премию "за открытие τ -лептона" (второго, после мюона, "тяжелого электрона"). τ -лептон, который тяжелее электрона в 3477 раз, был открыт М. Перлом в экспериментах, проведенных в 1974–1977 годах на Стэнфордском линейном ускорителе. Мюон, который тяжелее электрона в 207 раз, был открыт К. Андерсоном (Нобелевская премия, 1936, за открытие позитрона в 1932 году) и С. Неддермейером в 1938 году в космических лучах. Каждому из трех "электронов" соответствует свое нейтрино. Таким образом, в природе существуют нейтрино трех типов — электронное, мюонное и τ -лептонное.

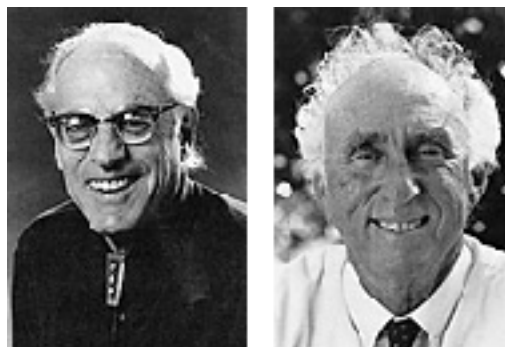


Рис. 3. Нобелевские лауреаты 1995 Ф. Райнес и М. Перл.

Из шести лептонов (электрона, мюона, τ -лептона и трех нейтрино) и шести "цветных" кварков (и соответствующих лептонам и кваркам античастиц) построены "элементарные частицы", ато-

мы, молекулы, звезды – все, чем наполнена Вселенная (есть еще, конечно, электромагнитное и гравитационное излучение и пока неясно что собой представляющая "темная материя").

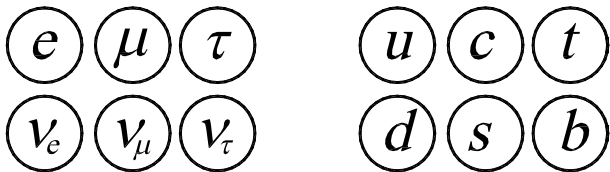


Рис. 4. Лептоны и кварки.

В своей нобелевской лекции [5] Ф. Райнес рассказывал, что в 1951 году, во время испытаний атомной бомбы, в которых он участвовал, ему пришла в голову идея, что хорошо бы использовать бомбу как источник нейтрино и попытаться зарегистрировать нейтрино¹. Райнес рассказал об этом Энрико Ферми, непревзойденному авторитету во всех таких вещах. Ферми согласился с тем, что атомная бомба – отличный источник нейтрино, и поразил Райнеса тем, что тоже, как и Райнес, по-

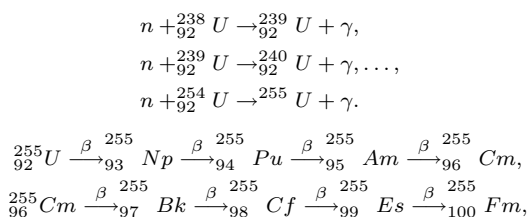
¹В 1966 году в количестве 120 пронумерованных экземпляров был напечатан сборник "Будущее науки" с грифом "для служебного пользования". В этом сборнике была напечатана футурологическая статья А. Д. Сахарова "Наука будущего" [6], в которой был раздел "Использование ядерных взрывов в научных и технических целях". Вот некоторые из заманчивых проектов, ушедших в небытие с распадом СССР:

- а. Ускорители элементарных частиц высокой энергии (до $(1 - 3) \cdot 10^{12}$ эВ) с высокой интенсивностью в импульсе (до 10^{18} частиц) могут быть разработаны в срок 10–15 лет при условии затрат на разработку около 100–200 млн. рублей и при стоимости одного опыта около 20 млн. рублей.

В этих опытах подземные термоядерные взрывы с мощностью до 5 мегатонн производятся в подземных камерах, расположенных на расстоянии до 2 километров от поверхности (без выброса радиоактивных продуктов). Не исключено, что более мощные взрывы (до 1000 мегатонн и более) более дешево и безопасно проводить в далеком космосе (2000 год – с получением энергии до 10^{14} эВ...

- б. Получение трансурановых элементов с рекордно большим массовым числом возможно уже в ближайшие годы с использованием специально сконструированных термоядерных зарядов...

А.Д. Сахаров при обсуждении пункта б. напомнил о том, что "в 1954 году в продуктах взрыва термоядерного заряда, испытанного в Бикини, были открыты элементы эйнштейний и фермий". Действительно, вот что произошло при образовании фермия: вначале уран-238 захватил 17 нейтронов, а потом произошло 8 β -распадов,



нятия не имел о том, как же сделать детектор нейтрино. (Рис. 5 представляет собой фотографию Э. Ферми, Нобелевского лауреата 1938 года, читающего лекцию 26 марта 1948 года в Чикагском университете. На доске Ферми сделал две ошибки: забыл написать волновую функцию в уравнении Шрёдингера и неправильно написал формулу для постоянной тонкой структуры. Эти ошибки были замечены в 2001 году на марке, выпущенной к столетию Ферми [7].)

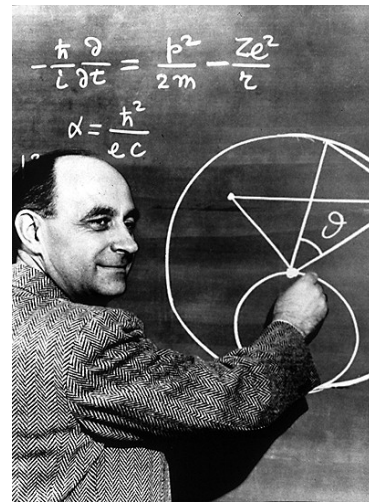


Рис. 5. Нобелевский лауреат 1938 Э. Ферми.

Райнес поделился своими идеями с Коуэном: "Клайд, давай работать над проблемой нейтрино". "Его мгновенный ответ был: "Замечательная идея!" Он знал о нейтрино так же мало, как и я, но он был хорошим экспериментатором и отчаянно храбрым человеком. Поэтому мы ударили по рукам и приступили к работе над нейтрино" [5]. Вскоре Райнес и Коуэн придумали, как сделать детектор нейтрино. Идея построения детектора основывалась на сделанном недавно, в 1948 году, открытии нестабильности нейтрона. Оказалось, что нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино (с вероятностью 1/2 нейтрон распадается примерно за 10 минут),

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \tag{1}$$

Райнес и Коуэн решили обратить реакцию (1) (нужно сказать, что в то время еще никто не отличал антинейтрино от нейтрино и не знал, что существуют нейтрино разного вида),

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \tag{2}$$

В качестве источника протонов решили взять воду. Образующийся позитрон проаннигилирует с электроном, образуются два γ -кванта, которые можно зарегистрировать изобретенными недавно, в 1950 году, сцинтилляционными детекторами. Но позитроны, с гораздо большей вероятностью, чем

от нейтрино, могут образоваться космическими лучами, проникшими в детектор. Поэтому следующая идея — добавить в воду хлорид кадмия, чтобы нейтрон захватился ядром кадмия, это ядро возбуждилось и излучило, еще несколько γ -квантов. Срабатывание сначала двух детекторов, а потом, с небольшим запаздыванием еще нескольких могло бы служить свидетельством того, что детектор зарегистрировал нейтрино.

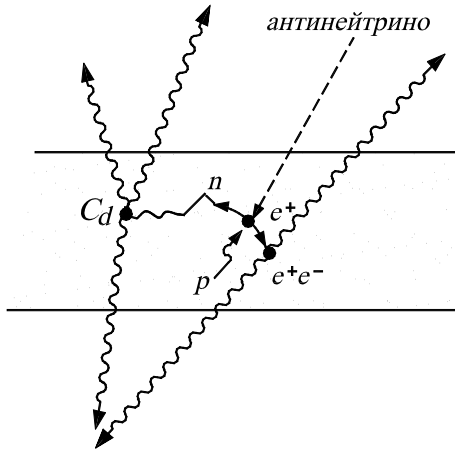


Рис. 6. Регистрация антинейтрино Райнесом и Коуэном.

Пока Райнес и Коуэн размышляли, как сделать детектор, их посетила еще одна счастливая мысль: отказаться от атомной бомбы как источника антинейтрино и поставить эксперимент вблизи атомного реактора. По расчетам, атомный реактор давал поток антинейтрино порядка 10^{13} антинейтрино на см^2 в секунду (для сравнения, поток нейтрино от Солнца порядка 10^{11} нейтрино на см^2 в секунду). Эксперименты продлились три года, с 1953 по 1956 год. Окончательный эксперимент был проделан вблизи тяжеловодного реактора в Саванна Ривере. Детектор состоял из двух баков, в которых было по 200 литров воды, в воде было растворено 40 кг хлорида кадмия. Каждый из баков был окружен емкостями со сцинтилирующей жидкостью, каждая из трех емкостей содержала по 110 пятидюймовых фотоумножителей. Весь детектор занимал не более двух метров в любом измерении и был помещен на глубину 12 метров в 11 метрах от реактора. В те годы этот детектор представлялся фантастически огромным сооружением (большим считался детектор литрового объема). Детектор регистрировал примерно 3 антинейтрино в час. Существование нейтрино было доказано!

В 1956 году в физике слабых взаимодействий было сделано замечательное открытие: два моло-

²На эту фотографию грустно смотреть: известно, что в июне 1962 года произошел полный разрыв отношений между Ли и Янгом. А. Пайс, который продолжает нежно дружить и с Ли, и с Янгом, пишет [8], что ему не хватает понимания китайских нравов, чтобы осознать произошедшее.

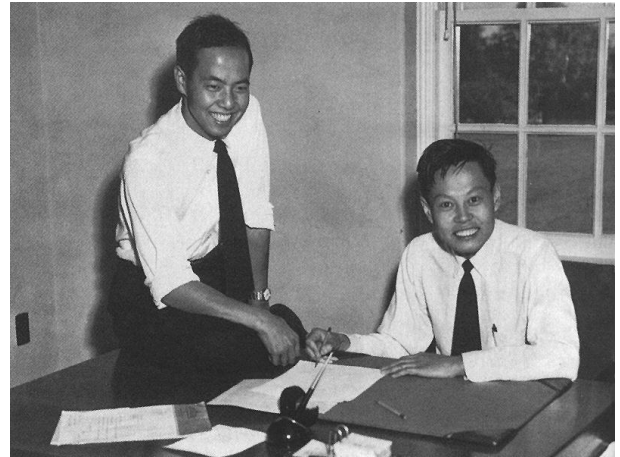


Рис. 7. Нобелевские лауреаты 1957 Ц.Д. Ли и Ч.Н. Янг².

дых китайских физика Цзун Дао Ли (род. 1926 г.) и Чжен Нин Янг (род. 1922 г.) (Нобелевская премия 1957), изучив соответствующую литературу, к своему большому изумлению обнаружили, что нет никаких экспериментальных доказательств существования зеркальной симметрии в физике слабых взаимодействий. Зеркальная симметрия приводит к тому, что одна и та же частица может распадаться либо на четное число π -мезонов, либо на нечетное (что связано с тем, что волновая функция π -мезона — псевдоскаляр). Но, судя по всему, такая, запрещенная зеркальной симметрией, частица была. Существовала "проблема τ - θ ": две частицы, одна — " τ ", другая " θ ", распались одна — на два, другая — на три π -мезона,

$$\tau \rightarrow \pi + \pi + \pi, \quad \theta \rightarrow \pi + \pi. \quad (3)$$

У " τ " и у " θ " была одна и та же масса и одно и то же время жизни. Было похоже на то, что " τ " и " θ " — это одна и та же частица, но этого не могло быть, поскольку это запрещалось законом сохранения четности. В июне 1956 года Ли и Янг отправили в Physical Review статью, в которой они написали, что, поскольку экспериментов, подтверждающих или опровергающих сохранение четности в слабых взаимодействиях, нет, хорошо бы такие эксперименты провести. Ли и Янг предложили конкретные эксперименты по проверке сохранения четности, но желающих их проделать не было, потому что отсутствие зеркальной симметрии в физике микромира представлялось даже выдающимся физикам совершенно невероятным³. Но эксперименты все же были проведены. Одной из первых,

³Свидетельством этого может служить случай с И.С. Шапиро, который работал в то время в Московском университете. Об этом случае рассказывает в своей книге о Л.Д. Ландау Ф. Яноух [9]. В 1956 году Шапиро очень активно занимался так называемой τ - θ проблемой, которая длительное время была мучительной загадкой для физиков, занимающихся элементарными частицами. Шапиро

принявшей вызов своих друзей Ли и Янга, была Цзянь Сюн Ву. Ву и ее коллеги убедительно показали: да, четность не сохраняется, да, в природе существует асимметрия между правым и левым, проявляющаяся в слабых взаимодействиях при распаде атомных ядер. В опыте Ву (рис. 8) была зафиксирована асимметрия при β -распаде поляризованных ядер ^{60}Co : электроны преимущественно испускались в направлении, противоположном спину ядра, то есть в направлении южного полюса, если представлять себе ядро вращающимся, как земной шар (зеркальное отражение этого опыта невозможно наблюдать в природе).

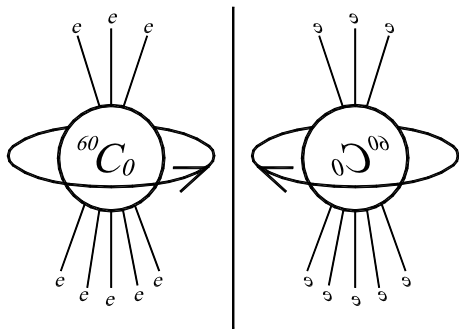


Рис. 8. Опыт Цзянь Сюн Ву и его зеркальное отражение.

Зеркальная асимметрия в природе проявляется также в том, что все частицы при β -распаде (электроны, нейтрино) испускаются закрученными по

пришел к выводу, что единственное возможное объяснение происходящего — это несохранение четности при распаде мезонов. Поскольку этот распад относится к слабым взаимодействиям, Шапиро предсказал и рассчитал некоторые другие явления, которые могут указывать на несохранение четности при бета-распаде, такие, как продольная поляризация электронов, круговая поляризация внутреннего тормозного излучения и асимметрия при бета-распаде поляризованных ядер... Ландау, когда Шапиро показал ему свою статью, высмеял эту идею — а без "святейшего" согласия Ландау статья Шапиро не могла быть опубликована. Статья осталась лежать в ящике стола Шапиро, где я и видел ее за много месяцев до того, как Ли и Янг послали в печать их статью. Так, из-за Ландау, советская физика потеряла Нобелевскую премию". Сам Шапиро вспоминал о том, как Ландау отнесся к идее о нарушении зеркальной симметрии в природе. "В принципе это возможно, но такой горбатый мир был бы настолько ужасным, что я не хочу и думать об этом", — такова была его реакция, и это было концом нашего разговора" [9]. Впоследствии, когда Ландау был вынужден признать, что зеркальной симметрии в природе нет, он пытался "подправить" этот "горбатый" мир, предположив, что то, что мы видим в зеркале, хотя и не может происходить в нашем мире, но может происходить в "антимире", в котором все частицы заменены на античастицы. Но, как было установлено в 1964 году (Дж. Кронин, В. Фитч, Нобелевская премия 1980), и эта новая симметрия, введенная Ландау, тоже нарушается. Кронин и Фитч обнаружили, что долгоживущие нейтральные K_0^L - мезоны, которым положено распадаться только на три π -мезона в случае справедливости новой симметрии Ландау, в редких случаях распадаются и на два π -мезона (Кронин и Фитч обнаружили 45 таких "запрещенных" распадов на 23000 сфотографированных распадов).

левому венту, а все античастицы (позитроны, антинейтрино) — по правому венту. Если, как это было заманчиво предположить, масса нейтрино равна нулю, то тогда нейтрино — всегда левое (**L**), а антинейтрино — всегда правое (**R**) (рис. 9) (говорят, что спиральность нейтрино — левая, а спиральность антинейтрино — правая).

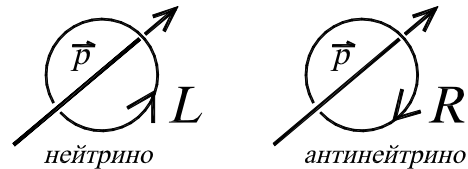


Рис. 9.

" τ " и " θ " частицы были известны и под другим названием — положительные τ -мезоны, τ^+ . До открытия Ли и Янга думали, что τ^+ существуют в двух разновидностях, " τ " и " θ ". Оказалось, что это не так. Существуют еще отрицательные τ -мезоны и нейтральные τ -мезоны, и у всех есть распады " τ "-типа и " θ "-типа. Особенно интересны нейтральные τ -мезоны. Их " τ " и " θ " частицы — это, действительно, разные частицы: массы и времена жизни у этих частиц немного отличаются. Стоит привести их значения: $m_\tau \approx m_\theta = 498 \text{ МэВ}/c^2$, $m_\tau - m_\theta = 3.5 \cdot 10^{-12} \text{ МэВ}/c^2$, $\tau_\tau = 5.1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $\tau_\theta = 8.9 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Видно, с какой фантастической точностью измерена разность масс нейтральных " τ " и " θ " частиц. Превышение массы одной из частиц относится к массе этих частиц, как один миллиметр относится к расстоянию от Земли до Солнца! Нейтральные τ -мезоны обозначаются как K_0 и \bar{K}_0 , каждый из них является античастицей по отношению к другому. В 1955 году А. Пайс и О. Пиччиони предсказали удивительное явление: родившийся в эксперименте K_0 -мезон через некоторое время превращается в свою античастицу \bar{K}_0 , \bar{K}_0 снова превращается в K_0 и так далее (если пренебречь распадами τ -мезонов). Как если бы кошка бежала по улице и через некоторое время превратилась в собаку, собака опять в кошку, кошка в собаку и так далее (рис. 10). Вскоре, в 1960 году, эти предсказанные осцилляции нейтральных τ -мезонов были установлены экспериментально. (Нам важно разобраться в том, что при этом происходит, потому что аналогичные осцилляции происходят и с нейтрино. В существовании осцилляций нейтрино окончательно убедились только в 2002 году.)

Оказалось, что " τ " и " θ " частицы, или, как их теперь называют K_0^L (Long — "долго" живущий K_0) и K_0^S (Short — "коротко" живущий K_0), — это суперпозиции K_0 и \bar{K}_0 ,

$$\theta \equiv K_0^S = \frac{K_0 + \bar{K}_0}{\sqrt{2}}, \quad \tau \equiv K_0^L = \frac{K_0 - \bar{K}_0}{\sqrt{2}} \quad (4)$$



Рис. 10. Осцилляции нейтральных -мезонов.



Рис. 11. Коротко живущие и долго живущие нейтральные -мезоны.



Рис. 12. Регенерация 0-мезонов.

и, наоборот, K_0 и \bar{K}_0 – это суперпозиции K_0^L и K_0^S ,

$$K_0 = \frac{K_0^S + K_0^L}{\sqrt{2}}, \quad \bar{K}_0 = \frac{K_0^S - K_0^L}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

Если пренебречь тем, что K_0^L и K_0^S распадаются и считать, что K_0 движется со скоростью, много меньшей скорости света, то, учитывая то, что именно K_0^L и K_0^S обладают определенными массами, найдем, что происходит с K_0 с течением времени,

$$K_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e^{-i\frac{m_S c^2}{\hbar} t} K_0^S + e^{-i\frac{m_L c^2}{\hbar} t} K_0^L \right). \quad (6)$$

Через некоторое время, определяемое из условия

$$T = \frac{\pi \hbar}{(m_L - m_S)c^2} \quad (7)$$

и равное $5.9 \cdot 10^{-10}$ секунды, показатели экспонент наберут разность фаз, равную π , и K_0 превратится в \bar{K}_0 . Нетрудно вычислить длину осцилляций

$$2L = 2TV = \frac{2\pi \hbar}{(m_L - m_S)c^2} \cdot \frac{2p}{m_L + m_S} = \frac{4\pi \hbar}{(m_L^2 - m_S^2)c^2}. \quad (8)$$

Формула (8) выведена в нерелятивистском пределе малых скоростей -мезонов, но она справедлива и при движении частиц больших энергий со скоростями, близкими к скорости света.

С течением временем K_0 превратится в K_0^L , поскольку коротко живущее слагаемое исчезнет из суммы (6). А. Пайс и О. Пиччиони, кроме осцилляций, предсказали еще одно удивительное явление — *регенерацию* K_0 : если пучок K_0^L пропустить через регенерирующую пластину, то, поскольку \bar{K}_0 сильнее поглощается веществом, а K_0^L состоит из K_0 и \bar{K}_0 , то при выходе из регенератора опять получится K_0 .

3. Физика нейтрино и Бруно Понтекорво

Пусть не поймаешь нейтрино за бороду
И не посадишь в пробирку, —
Но было бы здорово, чтоб Понтекорво
Взял его крепче за шкирку!

В. Высоцкий "Марш физиков"

Нобелевская премия по физике 2002 г. присуждена за выдающиеся достижения в нейтринной и рентгеновской астрономии. Говоря о нейтринной астрономии, нельзя не вспомнить замечательного ученого и человека, ученика и сотрудника великого Энрико Ферми, Бруно Понтекорво (1913–1993), благодаря идеям и работам которого нейтринная астрономия возникла. Бруно Понтекорво родился,



Рис. 13. Бруно Понтекорво.

учился и до 23 лет работал в Италии, потом жил и работал во Франции, в США, в Канаде, в Англии. Летом 1950 года британский гражданин Бруно Понтекорво, работавший в это время в британском атомном центре Харуэлле, взял отпуск и вместе с женой и тремя детьми отправился на родину, в Италию. Затем "вся семья самолетом прилетела из Рима через Стокгольм в Хельсинки. Далее на двух автомобилях до границы с Россией, затем поездом в Ленинград. В Ленинграде они на несколько дней остановились в гостинице, а затем также поездом прибыли в Москву. Это было в августе 1950 г. В Москве Бруно Понтекорво была предоставлена пятикомнатная квартира со всеми удобствами в доме на ул. Горького (ныне Тверская). Спустя три месяца, в начале ноября, вся семья прибыла в Дубну. В Дубне Бруно поселился в двухэтажном коттедже на главной улице" научного городка [10]. Последние 44 года своей жизни Бруно Понтекорво (или, как его теперь стали называть, Бруно Максимович) жил и работал в Дубне, в институте, который с 1956 года стал называться ОИЯИ (Объединенный институт ядерных исследований). Что заставило Бруно Понтекорво скрыться за "железным занавесом"? Сам Понтекорво объяснял свое бегство в Советский Союз тем, что, как коммунист, после ареста в феврале 1950 года коммуниста и атомного шпиона Клауса Фукса, он опасался, что его арестуют тоже. В 2002 г. в "Вестнике Российской Академии Наук" появилась статья Ж.А. Медведева, в которой говорится [11]:

В течение 1942 г. советская разведка получила очень большое число документов по урановой проблеме. Из Англии наиболее ценные сведения поступали от Клауса Фукса, физика-атомщика, уехавшего в 1933 г. из Германии...

Из США в это же время стала поступать информация от Бруно Понтекорво, эмигранта из Италии, близкого сотрудника знаменитого Энрико Ферми, строившего

в 1942 г. первый в мире урановый реактор...

По сообщениям от Фукса и Понтекорво, производство урана-235 и плутония в США позволяло изготавливать до восьми атомных бомб в месяц. В этих новых условиях атомный проект стал для Сталина абсолютным приоритетом...

От Фукса, и независимо от него также и от Понтекорво, в 1945 г. были получены подробные описания и чертежи плутониевой бомбы того типа, которая была взорвана над Нагасаки...

Рассекреченные в 2003 г. документы Британского Национального архива содержат материал о том, как был арестован Клаус Фукс, работавший в то время в том же Харуэлле, где работал и Бруно Понтекорво. К концу 1949 г. западными спецслужбами был взломан советский секретный код и из расшифрованных материалов следовало, что Фукс — атомный шпион. Но владение шифрами было важнее, чем арест Фукса, к тому же шифрограммы нельзя было предъявить в суде. Поэтому "британская секретная служба в Харуэлле должна была смириться с тем, что Фукс, известный ей как отъявленный советский шпион, выдавший самые важные научные секреты Великобритании и США, спокойно разгуливает на свободе" [12]. Однако у Фукса не выдержали нервы, и 2 февраля 1950 г. он сделал добровольное письменное признание в том, что в течение многих лет передавал секретные сведения Советскому Союзу. Судили Фукса 1 марта 1950 г., заседание суда продолжалось полтора часа. Он ожидал смертного приговора за измену родине, но был осужден на 14 лет лишения свободы за ... неправильное обращение с секретными документами (было учтено, что Фукс передавал секреты не врагу, а союзнику). 8 марта 1950 г. было опубликовано заявление ТАСС о том, что "Фукс неизвестен Советскому правительству, и никакие "агенты" советского правительства не имели к Фуксу никакого отношения". Через девять с половиной лет, 24 июня 1959 г., Клаус Фукс был досрочно освобожден за примерное поведение и уехал жить в ГДР. Жить и работать в СССР он отказался. 28 февраля 1988 г. Клаус Фукс умер. На похоронах не было ни одного человека из Советского Союза. Только 8 декабря 1992 г. в газете "Известия" Ю.Б. Харитон, один из "отцов" атомного оружия, признал: "За обширную информацию, которую передавал для советских физиков Клаус Фукс, весь советский народ должен быть ему глубоко благодарен" [13].

Обычно "незапятнанность" Понтекорво доказывают следующим образом: никакие спецслужбы никаких претензий после отъезда Понтекорво ему не предъявили. Следовательно, он чист. Но, ведь,

Клаусу Фуксу тоже никаких претензий не предъявляли. Если Ж.А. Медведева никто сознательно не ввел в заблуждение, и то, что он пишет, правда, то мы должны быть благодарны Бруно Понтекорво за его вклад в то, что США не "восстановили демократию" в СССР с помощью планировавшихся массивных ядерных бомбардировок крупнейших городов Советского Союза (в том числе и Харькова) и что Хиросима и Нагасаки остались единственными городами, на которые были сброшены атомные бомбы.

В память о Бруно Понтекорво Объединенный институт ядерных исследований учредил ежегодную премию имени Б.М. Понтекорво, которая с 1995 года присуждается ученым "за наиболее значительные научные труды в области физики элементарных частиц, признанные международным научным сообществом". В январе 2000 года диплом лауреата премии имени Б.М. Понтекорво за 1999 год был вручен нобелевскому лауреату 2002 года Раймонду Дэвису. Премия была присуждена "за выдающиеся достижения в разработке хлор-аргонового метода регистрации солнечных нейтрино", предложенного Бруно Понтекорво еще в 1946 году. Понтекорво работал тогда в Канаде, в Чок Ривере, над проектом и над введением в строй тяжеловодного исследовательского реактора, в качестве научного руководителя физического проекта. Вот что сам Понтекорво говорил об этом и об опытах Раймонда Дэвиса [14]:

...в 1946 г. я предложил радиохимические методы для детектирования свободных нейтрино, в частности хлор-аргоновый метод. Радиохимические методы вполне подходят для регистрации нейтрино с энергией приблизительно 0.5–15 МэВ... Хлор-аргоновый метод, обоснованию которого я посвятил ряд экспериментальных и теоретических работ, основан на реакции $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. Чем хороша эта реакция? Во-первых, можно использовать перхлорэтилен — сравнительно дешевую, не ядовитую, не огнеопасную жидкость, содержащую хлор. Ее можно применять в качестве гигантской мишени. Во-вторых, аргон — благородный элемент, и процедура извлечения нескольких атомов ^{37}Ar из огромного количества ^{37}Cl относительно проста. Однако я хотел бы подчеркнуть, что, несмотря на эту "простоту", опыт Дэвиса потребовал героических усилий автора. И, наконец, существенно то, что радиоактивный ^{37}Ar живет достаточно долго — около 35 дней. Его распад — это следствие захвата ядром электрона с K -оболочки,

в которой в результате образуется "дырка". Когда электроны с других оболочек займут эту "дырку", избыточная энергия выделится в виде рентгеновского излучения и (или) пойдет на отрыв одного из электронов внешних оболочек (так называемый эффект Оже). В любом случае суммарная выделившаяся энергия имеет вполне определенное значение — 2.8 кэВ. Я не сразу осознал принципиальную важность этого обстоятельства и вначале предполагал использовать счетчик Гейгера в качестве детектора извлеченного из мишени радиоактивного аргона. Однако вскоре мы с Дж. Ханна обнаружили, что небольшое количество ионов (порядка 100), образующихся в счетчике при освобождении энергии 2.8 кэВ, позволяет применить пропорциональные счетчики с большим коэффициентом газового усиления... Так я пришел к выводу о необходимости использования пропорциональных счетчиков в хлор-аргоновом методе. В пропорциональном счетчике, в отличие от гейгеровского, распад ^{37}Ar оставляет красивый и довольно отчетливый "автограф", и это позволяет значительно снизить фон. Уменьшение достигается не только возможностью измерения в пропорциональном счетчике амплитуды импульсов, но и их формы. Второе обстоятельство стало мне ясно только в 1968 году, и я сообщил о нем Дэвису на нейтринной конференции в Москве... Я хотел бы подчеркнуть, что Р. Дэвис, зарегистрировав солнечные нейтрино, сделал большое астрономическое открытие и экспериментально доказал, что энергия звезд действительно имеет термоядерное происхождение. Однако проблема солнечных нейтрино не закрыта, и дальнейшие эксперименты могут сыграть важную роль в развитии наших представлений, как о Солнце, так и о свойствах самих нейтрино.

Бруно Понтекорво успел поделиться идеей хлор-аргонового метода со своим учителем Э. Ферми. Однако, как пишет Понтекорво [2], "Дон Кихот не был героем Ферми". Ферми без энтузиазма отнесся к идее ловить нейтрино от Солнца, но ему очень понравились пропорциональные счетчики, придуманные Понтекорво.

В 1959 году Бруно Понтекорво опубликовал статью [15], в которой подробно обсудил проблему существования второго, мюонного нейтрино, и предложил эксперимент, в котором можно было бы

проверить, действительно ли нейтрино, связанное с мюоном, отличается от нейтрино, связанного с электроном. В Советском Союзе не существовало ускорителя протонов с необходимыми параметрами, поэтому осуществить эксперимент, предложенный Понтекорво, было невозможно. Такой эксперимент был осуществлен в Брукхейвене, США, в 1962 году. В 1988 году за экспериментальное доказательство существования мюонного нейтрино Леон Ледерман, Мелвин Шварц и Джек Штейнбергер были удостоены Нобелевской премии.



Рис. 14. Нобелевские лауреаты 1988 Л. Ледерман, М. Шварц, Дж. Штейнбергер.

Задача эксперимента заключалась в том, чтобы, во-первых, получить пучок мюонных нейтрино и, во-вторых, проверить, только ли мюоны будут образовываться в реакции

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow p + \mu. \quad (9)$$

Если да, то это было бы доказательством, что мюонное нейтрино отличается от электронного. В Брукхейвском эксперименте пучок протонов с энергией 15 ГэВ направлялся на бериллиевую мишень. Порождались различные вторичные частицы, 90 % вторичных частиц составляли π -мезоны. π -мезоны, пролетев 20 метров, попадали в стальную стену толщиной 13 метров и весом около 2000 тонн. π -мезоны распадались на мюоны и мюонные нейтрино, мюоны задерживались стальной защитой, а мюонные нейтрино попадали в искровую камеру весом в 10 тонн. За 8 месяцев было зарегистрировано 51 событие с рождением мюона и не одного события с рождением электрона (рис. 15).

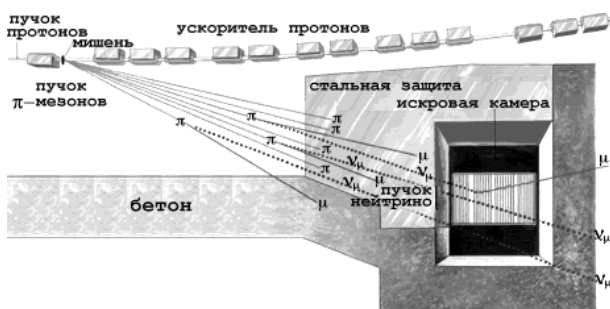


Рис. 15. Открытие мюонного нейтрино.

4. Нейтринная астрономия Солнца, нейтрино от сверхновой 1987А

Было известно, что на Земле в штате Южная Дакота доктор Дэвис восемь лет в заброшенной шахте пытается поймать в бак с перхлорэтиленом (жутко герметизированный, защищенный от всех излучений) нейтрино от Солнца, чтобы узнать, что там у Солнца в недрах. И никак не поймает. Теперь в горах Кабардино-Балкарии устраивают ловушку для того же нейтрино, пробивают тоннель возле Эльбруса и скоро пробьют. Значит, надо уберечь нейтрино от ловушек и запудрить земным умникам мозги.

В. Орлов "Альтист Данилов"

Те, кто читал "Альтиста Данилова", вышедшего впервые в 1981 году, могут почувствовать демонам, в обязанности которых входило мешать людям заниматься наукой. Доктор Дэвис оказался чрезвычайно упрямым. Потом еще появился японец Кошиба, затеявший тоже ловить солнечные нейтрино и итальянец Джаикони с его итальянскими правами⁴ и маниакальной идеей запустить рентгеновские телескопы в космос. Даже русские, и те, правда, с помощью американцев, запустили свой галлиево-германиевый нейтринный детектор в горах Кабардино-Балкарии, не пожалев для него 60 тонн галлия (при мировом производстве галлия 10 тонн в год). А, ведь, у демонов и без того полно проблем — на их попечении лешие, домовые, русалки, которым приходится работать все в более тяжелых экологических условиях, и в существование которых люди последнее время верят так же мало, как демоны в существование нейтрино.

Хлор-аргоновый метод детектирования нейтрино обладает серьезным недостатком: этим методом можно зафиксировать только нейтрино с энергией, большей, чем 0.86 МэВ. В связи с этим нужно знать, в каких реакциях и с какой энергией образуются нейтрино на Солнце (и в других звездах). В 1938 году Карл-Фридрих фон Вайцзеккер в Германии и Ганс Бете⁵ в США открыли

⁴И.С. Шкловский писал о Джаикони [16]: Известный американский рентгеновский астроном итальянского происхождения Риккардо Джаикони как-то заметил: "У вас, у русских, имеется совершенно ошибочное представление о мафии. Вы наивно представляете какого-нибудь мафиози как злодейского вида малого в маске, с кинжалом в зубах и с "машинганом". Это дикая чушь! Лучше всего перевести на русский язык слово "мафия" словом "блат". Услуга за услугу! Ты мне, я тебе! И все это окрашено в оптимистические тона добрых семейных отношений!"

⁵В 1967 г. Бете была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие углеродного цикла, которое было сделано им в 1938 г. вместе с Вайцзеккером. В этом случае

углеродно-азотный цикл превращения водорода в гелий (приведены максимальные энергии, которые могут иметь испускаемые нейтрино),

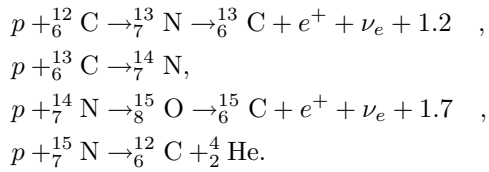


Рис. 16. Нобелевский лауреат 1967 г. Г. Бете.

Ядро атома углерода играет в этих реакциях роль ядра-ловушки, ядра-катализатора. Такое ядро необходимо, оно обеспечивает последовательный захват протонов, в конечном итоге протоны превращаются в гелий, два позитрона и два нейтрино, энергия которых достаточна, чтобы они могли быть зафиксированы хлор-аргоновым методом.

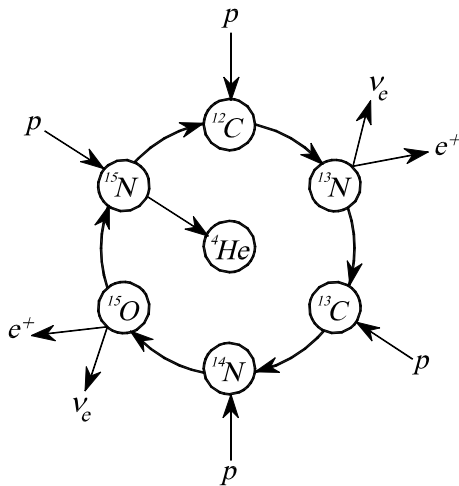


Рис. 17. Углеродно-азотный цикл.

В 1955 году Р. Дэвис в Брукхейвенской национальной лаборатории осуществил свой первый нейтринный эксперимент. Детектор представлял собой

Нобелевский комитет, по всей видимости, забыл, что честь открытия принадлежит не одному Бете [17].

бак емкостью 3800 л, заполненный перхлорэтиленом C_2Cl_4 и закопанный на глубину 5.8 м в песчаном грунте. Поймать ни одного нейтрино не удалось. Из этой неудачи следовал грубый верхний предел потока солнечных нейтрино в 10^{14} нейтрино на см^2 в секунду, при условии, что в недрах Солнца происходит углеродно-азотный цикл. Если бы поток был больше, детектор должен был бы его зафиксировать. Рецензент справедливо писал о статье Дэвиса [18]: "Любой подобный эксперимент, если он не обладает необходимой чувствительностью, не имеет никакого отношения к вопросу о существовании нейтрино. Иллюстрацией моей точки зрения служит тот факт, что никто не взялся бы писать научную статью об эксперименте, в котором экспериментатор, забравшись на гору, безуспешно попытался дотянуться до Луны и сделал вывод, что Луна находится на расстоянии более 2.5 м от вершины горы". В 1956 году Дэвис с помощью своего детектора попытался зарегистрировать нейтрино (на самом деле антинейтрино) от атомного реактора. Результат был нулевым, но из него следовало важное следствие: *нейтрино и антинейтрино — разные частицы.*

Для регистрации солнечных нейтрино детектор с баком 3 800 литров был явно мал. Дэвис решил строить детектор в 100 раз больший, объемом 380 000 литров. Было решено поместить детектор на глубину 1455 м в золотоносную шахту Хоумстейк-Голд-Майн (штат Южная Дакота, США). За 125 000 долларов летом 1965 года на нужной глубине в скальных породах была сделана полость, представлявшая собой подземный зал площадью 9×18 м и высотой 10 м. Были изготовлены и доставлены в этот зал части огромного резервуара и насосной системы, которые к лету 1966 года были собраны под землей и проверены на абсолютную герметичность. К стволу шахты были доставлены 10 железнодорожных цистерн, наполненных перхлорэтиленом. Пять недель ушло только на то, чтобы заполнить резервуар. Затем начался период длительной предварительной очистки, цель которой состояла в удалении растворенного воздуха и в уменьшении объема атмосферного аргона, присутствовавшего в количестве, не превышающем нескольких десятых долей кубического сантиметра. Когда все это было сделано, можно было приступить к измерениям потока солнечных нейтрино.

Конечно, все это стоило больших денег. Возникли вопросы [18]: "Нужно ли тратить значительную сумму ради стремления измерить нечто такое, что с большой уверенностью рассчитывают специалисты по ядерной астрофизике, и кого заботит вопрос о том, подтвердятся ли предсказания относительно температуры в центре Солнца?" В действительности же, теория была не в состоянии с уверенностью предсказать температуру в центре Солнца и дать детальное описание вклада различных ядер-

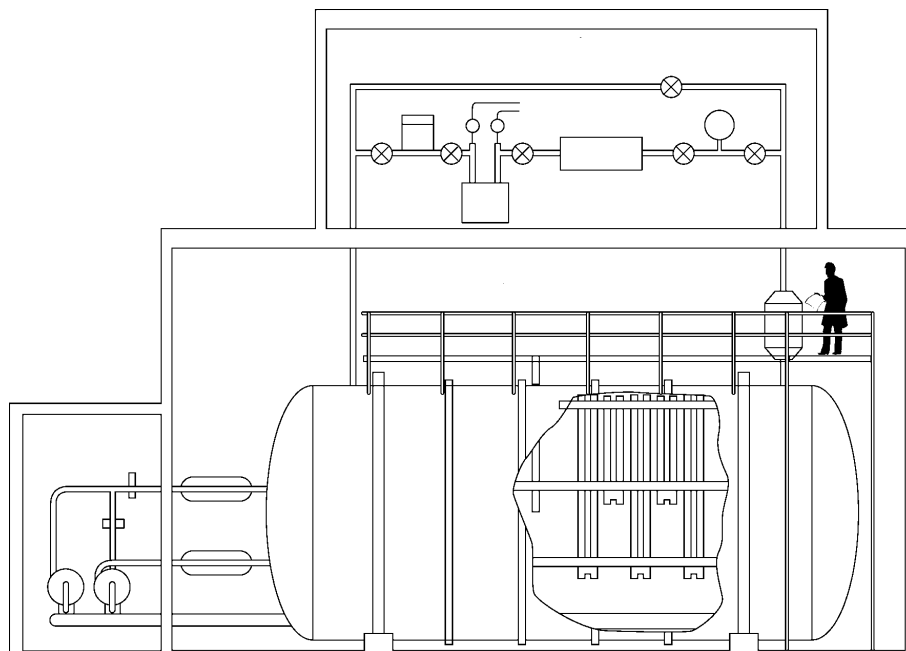
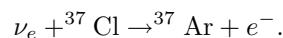


Рис. 18. Установка Дэвиса.

ных реакций в энерговыделение Солнца. Р. Дэвис и его многолетний сотрудник, специалист по Солнцу, Дж.Н. Бакал очень волновались накануне совещания с директором Брукхейвенской национальной лаборатории Голдхабером⁶ по поводу целесообразности выделения средств на проведение крупномасштабного эксперимента по регистрации солнечного нейтрино. Голдхабер был известен своим скептическим отношением "к способности астрономов сказать что-нибудь правильное о чем-нибудь интересном". Бакал и Дэвис вспоминали [18]: "Мы намеревались подчеркнуть ту мысль, что уже сама неспособность теории предсказать правильную скорость захвата в экспериментах с солнечными нейтрино является важным результатом хотя бы по той причине, что это подтвердило бы его (Голдхабера) убеждение в том, что астрофизики действительно не имеют представления о том, что они обсуждают. Сейчас мы не можем вспомнить, с чем (если он вообще с чем-нибудь был согласен) согласился Голдхабер на этом первом совещании. Однако позднее в опубликованном отчете Голдхабер публично признался, что не понял, о чем мы толковали". Несмотря на это, нужная финансовая поддержка на нейтринный эксперимент была выделена. В 1968 году, на конференции по физике нейтрино и нейтринной астрофизике в Москве, Дэвис так ответил на вопрос о стоимости его нейтринного эксперимента [18]: "Десять минут времени на ком-

мерческом телевидении (600 000 долларов)".

С 1971 года установка Дэвиса с 615 тоннами перхлорэтилена C_2Cl_4 начала регистрировать захват нейтрино в реакции



Дэвису удалось добиться практически стопроцентной эффективности извлечения нескольких радиоактивных атомов аргона, появляющихся в баке с перхлорэтиленом при захвате нейтрино. В среднем захватывалось одно нейтрино за двое суток, что означало, что поток солнечных нейтрино равен 2.1 ± 0.3 SNU (такой точности удалось добиться после многих лет работы, SNU (Solar Neutrino Unit) — солнечная нейтринная единица, введенная Бакалом и равная одному событию в секунду для каждых 10^{36} атомов мишени). В то же время стандартная теория ядерных реакций на Солнце предсказывает, что поток нейтрино равен 7.7 ± 1.2 SNU. Эта стандартная теория много раз пересматривалась и совершенствовалась за те 30 лет, которые длился нейтринный эксперимент Дэвиса, и в настоящее время приняла следующий вид (рис. 19):

Таким образом, энерговыделение Солнца обязано протон-протонной цепочке, теоретически открытой Г. Бете и Ч. Кричфилдом в 1938 году. Детектор Дэвиса, в основном, детектировал нейтрино от распада бора, как обладающие наибольшей энергией, но эти реакции составляют только 0.015 % по отношению к другим ядерным реакциям протон-протонной цепочки. Процентные соотношения между различными реакциями очень сильно зависят от температуры в центральной части Солнца (приблизительно 15 млн. К), где происхо-

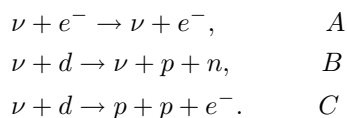
⁶Морис Голдхабер родился в 1911 году во Львове. В 1934 году он установил, что ядро тяжелого водорода — дейтрон — состоит из протона и нейтрона. Вместе с женой Гертрудой в 1948 году он доказал, что β -лучи — это электроны. В 1958 году Голдхабер измерил спиральность нейтрино.

Таблица 1. Расчетные и наблюдаемые потоки солнечных нейтрино.

Источник	Поток ($10^{10}/\text{см}^2\text{с}$)	Cl-Ar (SNU)	Ga-Ge (SNU)
pp	5.94	0.0	69.6
pep	$1.39 \cdot 10^{-2}$	0.2	2.8
^7Be	$4.80 \cdot 10^{-1}$	1.15	34.4
^8B	$5.15 \cdot 10^{-4}$	5.9	12.4
^{13}N	$6.05 \cdot 10^{-2}$	0.1	3.7
^{15}O	$5.32 \cdot 10^{-2}$	0.4	6.0
В сумме		7.7 ± 1.2	129 ± 7
эксперимент		2.1 ± 0.3	79 ± 10

тий вместо ожидаемых 80, что также говорит в пользу существования осцилляций.

Убедительным свидетельством существования осцилляций солнечных нейтрино являются эксперименты 2002 года на нейтринном детекторе SNO (Sudbury Neutrino Observatory, Канада, США, Великобритания), работающем в Канаде (детектор содержит 1000 тонн тяжелой воды и помещен в никелевую шахту Садбери, на глубину 2070 м). В этом детекторе нейтрино может рассеиваться на электронах, вызывая вспышку черенковского излучения, может расщеплять дейтрон на протон и нейтрон, или на два протона и электрон,



Реакции вызываются только электронными нейтрино, и при их регистрации наблюдается обычный дефицит солнечных нейтрино. Реакции одинаково чувствительны ко всем трем видам нейтрино и общее их количество, фиксируемое детектором в Садбери, хорошо согласуется со стандартной моделью Солнца.

Нейтринный детектор Камиоканде, построенный Масатоши Кошибой в начале 80-ых годов, первоначально предназначался для наблюдения гипотетического распада протона с помощью наблюдения черенковского излучения, испускаемого продуктами распада протона. Он содержал 2140 т воды (Супер-Камиоканде содержит 50 000 т воды) и был помещен в шахту Камиока на глубину 2700 м водного эквивалента. В 1986 году, за несколько месяцев до взрыва Сверхновой в феврале 1987 года, Камиоканде был модернизирован в Камиоканде II так, чтобы он мог ловить солнечные нейтрино. Было установлено, что при взаимодействии с нейтрино электроны, испускающие черенковское излучение, преимущественно рассеиваются вдоль

линии, соединяющей Солнце и Землю, что говорит о том, что нейтрино действительно приходят к нам от Солнца. Был обнаружен дефицит нейтрино, в согласии с экспериментами Дэвиса. 23 февраля 1987 года детектором Камиоканде II были зарегистрированы 12 электронных нейтрино от Сверхновой 1987А, взорвавшейся 150 000 лет тому назад в Большом Магеллановом облаке. Энергии этих нейтрино находились в диапазоне 7.5–36 МэВ, и пришли эти нейтрино в течение 12 секунд, причем 8 нейтрино пришли в первые 2 секунды. Эти данные дают возможность оценить массу электронного нейтрино, $m_{\nu_e} < 23 - 28$ эВ (более точную оценку массы электронного нейтрино дают измерения формы энергетического спектра β -распада трития, $m_{\nu_e} < 2.2$ эВ [23]).

5. Достижения рентгеновской астрономии

Глубокоуважаемый профессор! В последнем заседании Московского физического общества я сделал доклад о Ваших "Х-лучах" по тому оттиску, который Вы были столь добры мне прислать.

Интерес к Вашему открытию превзошел все ожидания, и Общество настоятельно просило меня воспроизвести в одном из заседаний Ваши опыты ... Я был бы Вам особо благодарен, если бы Вы прислали мне свою фотографию, которую я хочу в заключение показать на экране: это желание может показаться наивным — но я придаю таким демонстрациям гораздо больше значения, чем это принято обычно: широкая публика, для которой всякое исследование и всякое открытие сами по

себе представляются чем-то непривычным и даже чуть ли не сверхъестественным, при виде изображения исследователя бессознательно для себя приучается верить, что наука и движется вперед не X-лучами, а живыми людьми, их современникам — уже одна эта вера представляет огромный шаг в духовном развитии человека. Об этом, однако, — и особенно у нас — приходится специально заботиться.

Из письма П.Н. Лебедева В.К. Рентгену от 20 января 1896 года [25].

В 1901 году первую Нобелевскую премию по физике получил Вильям Конрад Рентген (1845–1923), открывший в 1895 году рентгеновские лучи, или, как он их называл, X-лучи. Вряд ли мог подумать Рентген, что чуть больше, чем через 100 лет после его открытия Нобелевскую премию присудят за создание *рентгеновской астрономии*.



Рис. 20. Нобелевский лауреат 1901 г. В.К. Рентген.

Рентгеновская астрономия исследует электромагнитное излучение астрономических объектов с энергиями фотонов в диапазоне от 100 эВ до нескольких сотен кэВ. Рентгеновское излучение очень сильно поглощается земной атмосферой, поэтому появление рентгеновской астрономии стало возможным только после того, как ракеты стали летать за пределы земной атмосферы. С 1946 по 1951 год в США, с целью изучения верхних слоев атмосферы, практически в вертикальном направлении, были запущены около 60 трофейных ракет Фау-2. Из Фау-2 вынималась боевая начинка (весом в одну тонну) и заменялась исследовательской аппаратурой. Высота полета достигала 214 км. В 1949 году, с помощью счетчиков Гейгера, помещенных на одну из таких ракет, было открыто рентгеновское излучение солнечной короны. Следующей на очереди была Луна: в группе, исследующей в июне

1962 года рентгеновское излучение Луны, вместе с его учителем Бруно Росси, был и Риккардо Джиаккони. Рентгеновское излучение Луны тогда зафиксировано не было, но зато был обнаружен первый рентгеновский источник, находящийся за пределами Солнечной системы, в созвездии Скорпиона (Скорпион X-1). В счетчики Гейгера попадали сотни фотонов в секунду от этого источника. День, когда это произошло, 18 июня 1962 года, считается днем рождения рентгеновской астрономии.

С 1959 года Джиаккони стал работать в частной научной фирме American Science and Engineering (AS&E), организованной при NASA (National Aeronautics and Space Administration). Джиаккони возглавил в этой фирме работы по созданию рентгеновских спутников Земли, то есть спутников, оснащенных специальным оборудованием для регистрации рентгеновского излучения. Рентгеновский источник Скорпион X-1 излучал в рентгеновском диапазоне в тысячу раз больше энергии, чем в оптическом. Вскоре был открыт рентгеновский источник в Крабовидной туманности, образовавшейся на месте взрыва сверхновой, наблюдавшейся китайскими астрономами в 1054 году (рис. 22 представляет собой современный снимок этого источника, сделанный рентгеновским спутником "Чандрой"). Этот источник излучал в десять миллиардов раз больше энергии в рентгеновском диапазоне, чем Солнце.

Позднее было установлено, что этот источник представляет собой нейтронную звезду диаметром 20–30 км, с массой, равной массе Солнца, и со скоростью вращения 30 оборотов в секунду. Горячий газ притягивается нейтронной звездой и испускает рентгеновское излучение. К 1970 году, с помощью ракет, было открыто около 50 рентгеновских источников. Под руководством Джиаккони 12 октября 1970 года, был запущен рентгеновский спутник UHURU (спутник был запущен из Кении, "ухуру" — это "свобода" на языке суахили). За три года работы UHURU обнаружил много новых источников и более тщательно исследовал уже открытые, всего рентгеновских источников стало 339. Неожиданным было открытие того, что многие рентгеновские источники представляют собой двойные системы с компактными компонентами. В их числе оказался источник Лебедь X-1, представляющий собой, как выяснилось впоследствии, двойную звездную систему, в которой одна из звезд — черная дыра с массой порядка 10 солнечных масс. Важным событием для рентгеновской астрономии был запуск рентгеновского спутника "Эйнштейн" 13 ноября 1978 года. На "Эйнштейне" был установлен первый фокусирующий рентгеновский телескоп для исследования объектов вне Солнечной системы. "Эйнштейн" подробно исследовал структуру обнаруженных до него скоплений галактик и остатков сверхновых и получил более 4000 изображений рентгеновских ис-

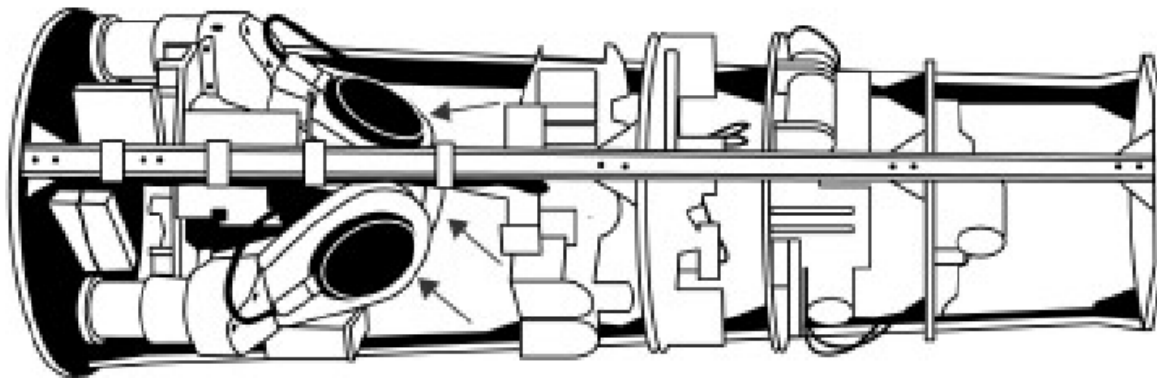


Рис. 21. Научно-исследовательское оборудование ракеты, запущенной 18 июня 1962 г., стрелками указаны счетчики Гейгера.

точников. Успех рентгеновской обсерватории "Эйнштейн" был связан, в значительной степени, с увеличением точности наблюдений. Чувствительность аппаратуры "Эйнштейна" была в 1000 раз больше, чем у *UHURU*. Так, "Эйнштейн" зафиксировал далекий квазар, от которого регистрировались 0.00003 фотона на см^2 в секунду. Джаккони мог теперь наблюдать источники, в миллион раз более слабые, чем Скорпион X-1, с которого начиналась его карьера рентгеновского астронома. В июле 1999 года был запущен рентгеновский телескоп "Чандра", названный в честь выдающегося астрофизика Субраманьяна Чандрасекара (1910–1995), нобелевского лауреата 1983 года.

Разрешающая способность рентгеновского телескопа "Чандры" сравнима с разрешающей способностью лучших оптических телескопов. "Чандра" уже получил множество интереснейших рентгеновских снимков самых различных объектов во Вселенной (все снимки, начиная с 1999 года и кончая сегодняшним днем, можно увидеть на сайте <http://chandra.harvard.edu>). Так, на рис. 22 приведена полученная "Чандрой" рентгеновская фотография остатков сверхновой в созвездии Кассиопеи, которую наблюдал Тихо Браге в 1572 году. Расстояние до этого источника 7 500 световых лет, поперечник источника — 20 световых лет. На рис. 24 изображены центр нашей Галактики (возможно, содержащий черную дыру) и галактика NGC 5128, расстояние до которой от Земли равно 11 миллион световых лет.

UHURU, "Эйнштейн", "Чандра" — это важнейшие космические рентгеновские аппараты, созданные Рикардо Джаккони, хотя они далеко не исчерпывают сделанное им. В одном из интервью Рикардо Джаккони сказал [25]: "... у нас появились более точные и надежные приборы, позволяющие наблюдать за самыми экзотическими и самыми удаленными объектами. Человечеству надо поддерживать связь со Вселенной, в которой мы

живем. Поймите, мы же все — дети звезд".

Поступила в редакцию 24 июля 2003 года

Список литературы

- [1] Press Release: The 2002 Nobel Prize in Physics — <http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/press.html>
- [2] Понтекорво Б.М. Страницы истории нейтринной физики // УФН. — 1983. — Т. 141, Вып. 4. — С. 675–709.
- [3] Салам А. Унификация сил. — В кн.: Фундаментальная структура материи. — М.: Мир. — 1984. — С. 173–203.
- [4] Нейтрино. — М.: Нейтрино. — М.: Наука. — 1970. — 360 с.
- [5] Райнес Ф. Нейтрино: от полтергейста к частице // УФН. — 1995. — Т. 166, N 12. — С. 1352–1359.
- [6] Сахаров А.Д. Наука будущего (прогноз перспектив развития науки) — В кн.: Академик А.Д. Сахаров. Научные труды. — М.: АОЗТ Издательство ЦентрКом. — 1995. — С. 376–383.
- [7] Huber G. Postage Stamp Poses a Fermi Problem // Science. — 2001. — October 5.
- [8] Пайс А. Гении науки. — М.: Институт компьютерных исследований. — 2002. — 448 с.
- [9] Janouch F. Lev Landau, Portrait of Theoretical Physicist. — Stockholm: Research Institute for Physics. — 1988. — 87 p.
- [10] Джелепов В.П. Гений Бруно Понтекорво (см. <http://pontecorvo.jinr.ru>)

- [11] Медведев Ж.А. Сталин и атомная бомба // Вестник РАН. – 2002. – Том 72, N 1. – С. 57–66.
- [12] Бекетов А. Клаус Фукс: рассекреченная история // <http://news.bbc.co.uk/hi/russian/news> 22 мая 2003 г.
- [13] Феклисов А. Признание разведчика. – М.: ОЛМА-ПРЕСС. – 1999. – 480 с.
- [14] Понтекорво Б. Я не абсолютно уверен, что "загадка солнечных нейтрино" реально существует (интервью с Б. Понтекорво) (см. <http://pontecorvo.jinr.ru>)
- [15] Понтекорво Б. Электронные и мюонные нейтрино // ЖЭТФ. – 1959. – Том 37, Вып. 6. – С. 1751–1757.
- [16] Шкловский И. Эшелон. – М.: Новости. – 1991. – 224 с.
- [17] Кишпенхан Р. 100 миллиардов солнц: рождение, жизнь и смерть звезд. – М.: Мир. – 1990. – 294 с.
- [18] Бакал Дж.Н., Дэвис Р. мл. История проблемы солнечных нейтрино. – В кн.: Ядерная астрофизика. – М.: Мир. – 1986. – С. 236–277.
- [19] Бакал Дж.Н. Проблема солнечных нейтрино // В мире науки. – 1990. – N 7, июль. – С. 16–24.
- [20] Bahcall J.N. Solar neutrinos: an overview // Physics Reports. – 2000. – V. 333–334. – P. 47–62.
- [21] Fukuda Y. et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos // Phys. Rev. Lett. – 1998. – V. 81. – P. 1562–1570. – hep-ex/ 9807003.
- [22] Ahn M.H. et al. Indications of Neutrino Oscillation in a 250 km Long-baseline Experiment // Phys.Rev.Lett. – 2003. – V. 90, 041801. – P. 1–5. – hep-ex/ 0212007.
- [23] Bilenky S.M., Giunti C., Grifols J.A., Massy E. Absolute Values of Neutrino Masses: Status and Prospects // hep-ph/0211462 – 90 p.
- [24] Научная переписка П.Н. Лебедева. – М.: Наука. – 1990. – 500 с.
- [25] Германский К. Интервью с Рикардо Джиаккони 15.10.2002 // [chttp://main.izvestia.ru/science/article25127](http://main.izvestia.ru/science/article25127)

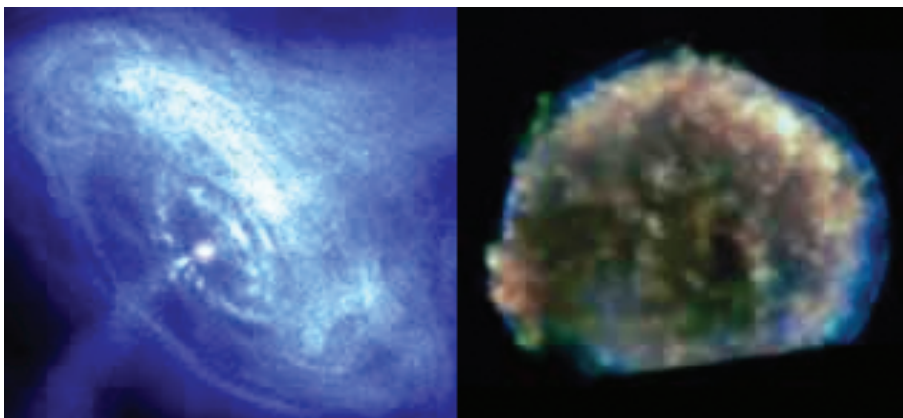


Рис. 22. Остатки сверхновых 1054 г. и 1572 г.



Рис. 23. Рентгеновский спутник "Чандра", 1999.

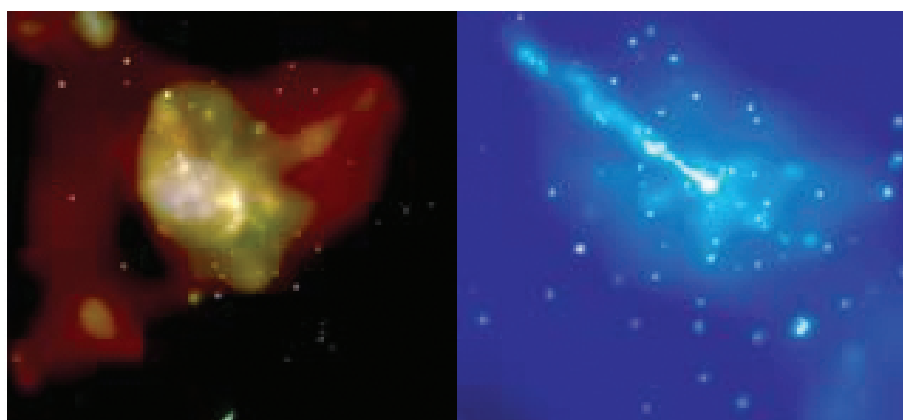


Рис. 24. Центр нашей Галактики и галактика NGC 5128.