

АКАДЕМИК **Б.М.ПОНТЕКОРВО**



нейтрино

СЕРИЯ IX·1966

16

новое в жизни
науке
технике

ФИЗИКА
МАТЕМАТИКА
АСТРОНОМИЯ



Академик

Б. М. ПОНТЕКОРВО

НЕЙТРИНО



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1966

530.4
П56

СОДЕРЖАНИЕ

Нейтрино 3
Энрико Ферми 26

2—3—7

Бруно Максимович Понтекорво

Редактор **И. Б. Файнбойм**

Техн. редактор **М. Т. Перегудова**

Худож. редактор **Е. Е. Соколов**

Корректор **Н. Д. Мелешкина**

Обложка **Л. П. Ромасенко**

Сдано в набор 1/VII 1966 г.
Подписано к печати 11/VIII 1966 г.
Изд. № 241. Форм. бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 1,0.
Печ. л. 2,0.
Уч.-изд. л. 2,03. А00905. Цена 6 коп.
Тираж 57 700 экз. Заказ 2041.
Издательство «Знание». Москва, Центр,
Новая пл. д. 3/4

Типография изд-ва «Знание». Центр, Новая пл.,
д. 3/4.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ НЕОБХОДИМОСТЬ НЕЙТРИНО

В последнее время все чаще и чаще не только в солидных научных журналах, но и на страницах газет и популярных изданий читатель встречается с «таинственной» элементарной частицей, носящей довольно странное название — «нейтрино». Что же это за частица, какую роль она играет в физике элементарных частиц и во Вселенной?

Начнем с того, что объясним ее название.

Когда эта частица впервые появилась в физике, ученые уже твердо знали, что существуют такие элементарные частицы, как нейтроны и протоны — «кирпичики», составляющие атомное ядро. Нейтрон не имеет электрического заряда, и по этой причине он получил такое название.

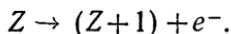
В 1931 г. известный швейцарский физик Вольфганг Паули по причинам, которые я объясню ниже, пришел к выводу, что в природе должна существовать еще одна нейтральная частица с массой, намного меньшей, чем у нейтрона, как он говорил, «маленький нейтрон». Когда он излагал эту идею с трибуны одного международного научного совещания, итальянский физик Энрико Ферми перебил его словами:

— Называйте его «нейтрино»!

Дело в том, что по-итальянски уменьшительно-ласкательное окончание «ино» соответствует русскому суффиксу «чик». Так что нейтрино в переводе с итальянского будет означать «нейтрончик».

Так нейтрино было изобретено Паули, а окрещено Ферми. Как часто бывает в науке, новые идеи выдвигаются тог-

да, когда в рамках существующих знаний возникает парадокс. «Изобретение» нейтрино также было вызвано кажущимся парадоксом, обнаруженным при экспериментальном исследовании β -распада. Этот процесс состоит в самопроизвольном испускании отрицательных электронов (e^-) атомными ядрами. Когда нейтрино еще не было «изобретено», предполагали, что β -распад ядра Z , имеющего заряд $+Ze$, происходит по схеме

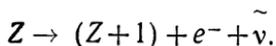


Но оказалось, что энергии вылетающих электронов в этом процессе не строго определенные, а самые разнообразные. В большинстве случаев энергии явно было меньше той, которую электроны должны были бы теоретически иметь. Создавалось впечатление, что энергия куда-то исчезает, как будто нарушался закон сохранения энергии. Трудности были настолько серьезными, что некоторые крупные физики предлагали даже отказаться от этого фундаментального закона.

Кажущееся несохранение энергии, однако, носило довольно странный характер. Действительно, если энергия не сохраняется в процессе β -распада, следовало бы ожидать, что иногда энергии электронов будет не хватать, а иногда появится лишняя. Однако оказалось, что выпрышка энергии не бывает.

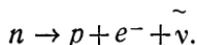
Таким образом, не естественное стремление сохранить неизблемыми законы физики, а факты, которым в науке всегда принадлежит последнее слово, заставили встать на защиту закона сохранения энергии. Но как?

«Изобретатель» нейтрино рассуждал так. Кажущееся несохранение энергии обусловлено просто тем, что приведенная схема неправильно описывает процесс β -распада. В нем должна участвовать ненаблюдаемая на опыте нейтральная (и потому практически не обнаружимая) частица, уносящая «исчезнувшую» энергию. Она и была названа нейтрино (ν). Схема β -распада выглядела так:

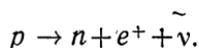


(Я пока не даю объяснения значку над буквой ν).

Выделяющаяся при этом суммарная энергия всех частиц хотя имеет точно определенную величину, распределяется между продуктами распада так, что в разных случаях электрон получает разные ее порции. Самый фундаментальный процесс β -распада — распад нейтрона будет поэтому описан схемой:



Внутри атомных ядер протон также может превращаться в нейтрон с испусканием положительного электрона (или позитрона) и нейтрино:



Заметим здесь, что, с логической точки зрения, тот тип рассуждений, который привел Паули к теоретическому предсказанию существования нейтрино, часто встречается при решении даже самых простых парадоксов. Вот, например, старый парадокс с цирюльником. В маленьком городке, скажем, в Дубне на Волге, живет парикмахер, который подстригает всех мужчин, кто не стрижет самих себя. Спрашивается, стрижет ли себя сам парикмахер? Ясно, что как положительный, так и отрицательный ответ на этот вопрос ведет к противоречию. Парадокс решается, если сообразить, что нет и не может быть такого парикмахера. И если вы внимательно проследите за рассуждениями Паули, вы увидите, что аргументы в пользу существования нейтрино в природе очень похожи на те, которые приводятся против существования нашего парикмахера в Дубне.

Итак, нейтрино — это частица, которая при β -распаде уносит часть энергии. Так предполагали физики-теоретики, которые с самого начала изобрели ее как «неуловимую» частицу. И сразу же были предсказаны свойства новой частицы: она должна быть электрически нейтральной, очень проникающей и чрезвычайно малой по массе. Иначе экспериментаторам было бы нетрудно обнаружить ее, а это оказалось совсем не просто. Последнее свойство — крайне малая масса — согласно теории относительности приводит к тому, что нейтрино практически не может находиться в состоянии покоя: оно всегда движется со скоростью, близкой к скорости света.

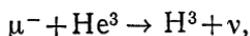
После того как гипотеза о существовании нейтрино была сформулирована, физики попытались найти и другие доказательства его присутствия в β -распаде. Как известно, при превращениях частиц, как и при любых физических процессах, происходящих в какой-нибудь системе, сохраняется не только энергия, но и количество движения, или импульс. Закон сохранения количества движения, вероятно, известен читателю: на нем основан, например, принцип действия ракеты.

Если нейтрон, испытывающий β -распад, неподвижен, то его импульс равен нулю. Значит, и суммарный импульс всех частиц — продуктов распада — также должен быть равен нулю. Но в многочисленных опытах, первый из которых еще в 1934 г. поставил советский физик А. И. Лейпунский, было показано, что суммарный импульс электрона и ядра отдачи ($Z+1$) при β -распаде ядра Z не равен нулю. Это подтверждает гипотезу о нейтрино: неуловимая частица уносит «исчезающий» импульс.

Как выяснилось после открытия других элементарных частиц, особенно мезонов, нейтрино принимает участие не только в β -распаде ядер, но и в других процессах. Его присутствие обнаруживается всегда, когда энергия как будто исчезает.

Кстати, в некоторых из этих процессов, где число образующихся частиц равно двум, а не трем, как в процессе β -распада, характер «несохранения энергии» более чем подозрителен и требует существования нейтрино еще яснее, чем в случае β -распада.

Например, при распаде пиона (или π -мезона) всегда «исчезает» определенная энергия, около 30 млн. эв. В процессе захвата мюона (или μ -мезона) ядром He^3



обнаруженном в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, «исчезает» около 100 млн. эв (энергия нейтрино), а ядра отдачи H^3 имеют энергию, всегда точно равную 1,9 млн. эв (см. на обложке рисунок, сделанный с фотографии, полученной в диффузионной камере, наполненной He^3 . Длинный след принадлежит остановившемуся мюону, короткий след вызван ядром H^3 . Нейтрино испускается в направлении, противоположном тритию, но, конечно, оно не «видно»). Если бы эти процессы были известны раньше, чем β -распад, быть может, не было бы необходимости в гении Паули для «изобретения» нейтрино.

Подводя итоги, можно сказать, что нейтрино было «изобретено» теоретически, что свойства этой «неуловимой» частицы были первоначально постулированы с целью оправдания ее «ненаблюдаемости». Такое положение господствовало в физике нейтрино в последние 25 лет.

Ферми, оставивший неизгладимый след во всех областях физики, не мог успокоиться только почетной ролью крестного отца нейтрино и создал количественную теорию процесса β -распада, основанную на аналогии с теорией излучения квантов света возбужденным атомом. Согласно этой теории, подобно тому, как фотон рождается в процессе разрядки возбужденного состояния, а не находится заранее внутри возбужденного атома, так и атомное ядро испускает пару нейтрино-электрон в процессе β -распада, а о существовании нейтрино и электронов внутри ядра речь идти не может.

Возможно, что у некоторых, если не у всех, читателей возникла скептическая мысль: ведь нейтрино открыли теоретически, исследовали косвенным образом, а не фантазия ли все это?

Теоретическое «изобретение» нейтрино, правда, вполне обоснованно. Но нейтрино, конечно, материально и, в принципе, доступно регистрации. Его ненаблюдаемость могла быть только временной, вызванной трудностями, связанными с уровнем экспериментальной техники. Поэтому физики, так же как и читатели этой статьи, вправе требовать «железной» проверки гипотезы нейтрино.

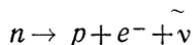
Поймать неуловимое, зафиксировать эффект, вызванный свободным нейтрино, — вот что было необходимо для окончательного доказательства существования этой таинственной частицы.

Сложность задачи объяснялась колоссальной проникающей способностью, которая ожидалась для нейтрино. Откровенно говоря, об этом не было достаточно конкретно сказано в начале нашей статьи, чтобы не вызвать у читателя полного недоверия. Но сейчас речь пойдет об опытах, которые позволили поймать нейтрино и доказали, что оно действительно обладает теоретически приписанными ему удивительными свойствами. Теперь можно сказать, что нейтрино могут беспрепятственно проникать, скажем, сквозь чугунную плиту, толщина которой в миллиарды раз превышает расстояние от Земли до Солнца! Иными словами, через километровую толщину твердого вещества надо пропустить миллион миллиардов нейтрино, чтобы хоть одно из них могло вызвать какой-нибудь эффект.

И все же эта, казалось бы, неразрешимая задача была решена. Понятно, что пропускать одно нейтрино сквозь астрономическую толщину вещества, чтобы оно с большой вероятностью прореагировало, — это нереально. Более практично пропускать астрономическое число нейтрино через разумную, скажем метровую, толщину жидкого или твердого вещества.

Бурное развитие нейтронной физики, связанное с открытием и техническим освоением атомной энергии, привело к созданию возможностей для таких экспериментов.

Известно, какое огромное значение в науке и практике имеют ядерные реакторы — устройства, в которых совершается деление ядер урана нейтронами. В каждом акте деления образуется несколько β -радиоактивных ядер. И если справедлива гипотеза о существовании нейтрино, то в распадах таких ядер нейтроны должны испытывать превращения согласно знакомой нам схеме:



(теперь можно пояснить, что значок $\bar{\nu}$ над символом нейтрино (ν) означает, что речь идет об антинейтрино; о том, что это такое, будет сказано дальше).

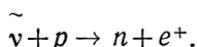
Значит, мощные реакторы должны быть интенсивными источниками антинейтрино.

В качестве примера рассмотрим атомный реактор мощностью 300 тыс. квт. Это очень большая мощность. Каждую секунду такой реактор испускает около $5 \cdot 10^{19}$, т. е. больше

10 млрд. млрд. антинейтрино. И все же уловить проскальзывающие частицы здесь крайне трудно. О попытке зафиксировать нагрев вещества под действием нейтрино не может быть и речи. Для того чтобы, скажем, половина энергии, переносимая этим потоком частиц, освобождалась в виде тепла, необходим поглотитель массой 10^{69} т, что неизмеримо превышает массу Солнца.

Зато регистрация отдельных событий, вызванных антинейтрино, возможна. Физики предсказали любопытный ядерный процесс, который, несомненно, может быть вызван нейтрино и антинейтрино, если они существуют,— процесс, обратный β -распаду.

Представьте себе, что антинейтрино встречается с протоном — ядром атома водорода. Что произойдет при этом? Теория утверждает: будут случаи, когда антинейтрино и протон превратятся в позитрон и нейтрон:



Вероятность этого процесса можно хорошо рассчитать. А регистрируя его в эксперименте, можно одновременно проверить гипотезу существования нейтрино.

Разумеется, для эксперимента необходим очень мощный источник «неуловимых» частиц. Но упоминавшийся реактор мощностью в 300 тыс. кэВ вполне пригоден для этой цели. На расстоянии 10 м от него ожидаемый поток антинейтрино через каждый квадратный сантиметр составит примерно 10^{13} частиц в секунду. Такой поток антинейтрино, бомбардирующих тонну содержащего водород вещества (иначе говоря, запас протонов), по расчету должен каждый час вызывать около 100 превращений протонов в нейтроны.

Это предвидение сбылось. Оно подтвердилось в блестящем опыте, законченном в 1957 г. американскими физиками Райнсом и Коуэном. Антинейтрино попадали в опромный сцинтилляционный счетчик — цистерну с содержащим водород веществом, способным испускать вспышку света (сцинтилляцию), когда сквозь него проходит электрически заряженная частица. Каждую такую вспышку регистрировали фотоэлементы.

Эксперимент проходил так. Как только протон, которому выпала крайне редкая судьба встретиться с антинейтрино, превращался в нейтрон и позитрон, последний давал вспышку и регистрировался фотоэлементами. Через некоторое время нейтрон замедлялся и, когда он становился совсем медленным, захватывался одним из ядер атомов вещества счетчика. При этом рождались кванты электромагнитного излучения, которые регистрировались в том же сцинтилляторе.

Таким образом, каждое взаимодействие антинейтрино с протоном влекло за собой две вспышки света. Одна из них фиксировалась сразу же, а другая — с некоторой задержкой.

Опыт был необычайно трудным. Достаточно сказать, что объем сцинтиллятора примерно в тысячу раз превышал обычный объем подобных устройств, используемых в исследовательских работах по ядерной физике. Это было вызвано тем, что благодаря «инертности» антинейтрино меньший объем прибора привел бы к очень незначительному числу регистрируемых событий.

Подготовка и выполнение этого уникального эксперимента потребовали более пяти лет.

Так нейтрино было, наконец, поймано. Оно занимает сейчас прочное место в семье элементарных частиц.

От всех других элементарных частиц нейтрино отличается чрезвычайно слабым взаимодействием с ними. Это объясняет и астрономическую проникающую способность нейтрино. Такое слабое взаимодействие могут испытывать и все другие элементарные частицы. Однако последние, кроме слабых взаимодействий, испытывают и иные, несравнимо более сильные, так что их проникающая способность измеряется, скажем, только десятками сантиметров ртутной трубки.

Нейтрино уникально тем, что у него только слабое взаимодействие, чистейшим представителем которого оно является.

РАЗНЫЕ ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Во взаимодействиях между телами проявляются разные по своей природе силы. Но глубоко различающихся в принципе типов взаимодействия очень мало. Если не считать тяготения, которое играет существенную роль только в присутствии огромных масс, то известны лишь три вида взаимодействий: сильные, электромагнитные и слабые.

Электромагнитные взаимодействия всем знакомы. Благодаря им движущийся неравномерно электрический заряд (скажем, электрон в атоме) испускает электромагнитные волны (например, видимый свет). С этим классом взаимодействий связаны все химические процессы, а также все молекулярные явления — поверхностное натяжение, капиллярность, адсорбция, текучесть. Электромагнитные взаимодействия, теория которых блестяще подтверждается опытом, глубоко связаны с электрическим зарядом элементарных частиц.

Сильные взаимодействия стали известны только после раскрытия внутренней структуры атомного ядра. В 1932 г.

было обнаружено, что ядро состоит из нуклонов — нейтронов и протонов. Именно сильные взаимодействия соединяют нуклоны в ядре — они отвечают за ядерные силы, которые в отличие от электромагнитных характеризуются очень малым радиусом действия (около 10^{-13} , т. е. одной десятиллионной доли сантиметра) и большой интенсивностью. Кроме того, сильные взаимодействия появляются при столкновениях частиц высоких энергий с участием пионов и странных частиц.

Интенсивность взаимодействий удобно оценивать по длине свободного пробега частиц в некотором веществе, т. е. по средней величине пути, который частица может пройти в этом веществе до разрушающего или сильно отклоняющего соударения. Ясно, что чем больше длина свободного пробега, тем меньше интенсивность взаимодействия.

Если рассматривать частицы очень высокой энергии, то соударения, обусловленные сильными взаимодействиями, характеризуются длиной свободного пробега частиц, соответствующей по порядку величины десяткам сантиметров в меди или железе.

Иначе обстоит дело при слабых взаимодействиях. Длина свободного пробега нейтрино в плотном веществе измеряется в астрономических единицах. Это указывает на удивительно малую интенсивность слабых взаимодействий.

Любой процесс взаимодействия элементарных частиц характеризуется некоторым временем, определяющим его среднюю продолжительность. Процессы, вызванные слабыми взаимодействиями, часто называют медленными, так как время для них относительно велико.

Читатель, правда, может удивиться тому, что явление, происходящее, скажем, за 10^{-6} (одну миллионную долю) секунды, классифицируется как медленное. Такое время жизни характерно, например, для распада мюона, вызванного слабыми взаимодействиями. Но все познается в сравнении. В мире элементарных частиц такой промежуток времени действительно весьма продолжителен. Естественной единицей длины в микромире служит 10^{-13} см — радиус действия ядерных сил. А так как элементарные частицы высокой энергии имеют скорость, близкую к скорости света (порядка 10^{10} см/сек), то нормальный масштаб времени для них составит 10^{-23} сек.

Это значит, что время 10^{-6} сек для частиц гораздо более продолжительно, чем для нас весь период существования жизни на Земле.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ НЕЙТРИНО НЕЙТРАЛЬНО?

Урановые реакторы помогли выяснить еще одну важную характеристику нейтрино, а именно — существование у него нейтринного заряда. Но разве нейтральная частица может обладать зарядом?

Известно, что в природе имеется очень красивая симметрия, которая в последние несколько лет была окончательно подтверждена рядом фундаментальных опытов. Симметрия эта состоит в том, что каждой частице соответствует двойник — античастица, имеющая массу, одинаковую с частицей, а все заряды противоположного знака.

Заряд — это любая внутренняя характеристика частицы, которой приписывается знак: либо положительный, либо нейтральный, либо отрицательный. Любому виду заряда обязательно свойственны неуничтожаемость и дискретность (т. е. они могут принимать только вполне определенные и выделенные значения).

Ясно, что электрически заряженная частица, скажем, отрицательный электрон, будет отличаться от своей античастицы — положительного электрона. Но и электрически нейтральная частица, т. е. частица, не имеющая электрического заряда, может отличаться от своей античастицы. Конечно, если все заряды данной частицы равны нулю, то она тождественна со своей античастицей; она в этом случае истинно нейтральна.

А как обстоят дела с нейтрино? Мы уже знаем, что оно электрически нейтрально. Но является ли нейтрино истинно нейтральным? Отличается ли нейтрино от антинейтрино? И вот опыты с реактором дали следующий ответ: да, нейтрино и антинейтрино — разные частицы. Нейтрино не истинно нейтрально; оно имеет неэлектрический заряд — так называемый нейтринный заряд.

Но прежде чем рассказать о том, как это было показано, мне предстоит еще выполнить обещание и раскрыть смысл значка $\bar{\nu}$ над ν , символом нейтрино.

Как уже отмечалось, $\bar{\nu}$ означает антинейтрино. Так назвали «неуловимую» частицу, которая возникает при распаде нейтрона.

Почему же антинейтрино, а не нейтрино?

Это название выбрано совершенно произвольно и только ради удобства. Такие условности в физике встречаются нередко. Например, ничего не изменилось бы, если бы в один прекрасный день мы решили считать электрический заряд

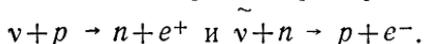
электрона положительным. Конечно, автоматически заряд у антиэлектрона стал бы отрицательным.

Итак, мы называем антинейтрино ту частицу, которая испускается при β -распаде совместно с отрицательным электроном (когда нейтрон превращается в протон). Но давно известен и другой процесс, именуемый β^+ -распадом, когда протон внутри ядра самопроизвольно превращается в нейтрон, позитрон и «неуловимую частицу». Тогда именно эту частицу мы должны назвать нейтрино.

Однако пока совершенно не ясно, отражают ли эти два названия реальную суть вещей или различие между ними чисто формальное. Иначе говоря, нам надо выяснить, отличаются ли по каким-то характеристикам нейтрино от антинейтрино.

Мы видели, что антинейтрино с протоном может дать позитрон и нейтрон. Аналогично этому столкновение нейтрино с нейтроном может дать электрон и протон (ибо последняя реакция вызвана тем же самым взаимодействием, что и предыдущая).

Но другое дело, если мы рассмотрим реакции:



Обе эти реакции получены из двух предыдущих путем замены нейтрино на антинейтрино и наоборот. Если различие между нейтрино и антинейтрино чисто формальное, если оно существует лишь в записи, то, конечно, возможны обе реакции. Если же это различие реальное, т. е. отражает различие внутренних свойств этих частиц, то эти реакции невозможны.

Итак, для проверки вопроса о различии нейтрино и антинейтрино можно использовать одну из последних реакций. Поскольку мы не имеем интенсивных источников нейтрино, но у нас есть зато источники антинейтрино — урановые реакторы, то удобно исследовать вторую из приведенных выше реакций. Правда, вещества, состоящего из одних только нейтронов, не существует. Но это не принципиальный вопрос. Можно изучить реакцию на нейтронах, находящихся внутри атомного ядра. Особенно удобным оказалось ядро Cl^{37} .

Этот крайне трудный опыт был закончен недавно. Было найдено, что процесс



не осуществляется. Значит, в самом деле нейтрино и антинейтрино — разные частицы, имеющие противоположные знаки некоего неэлектрического, нейтринного заряда.

Какова природа этого заряда?

С тех пор как была выдвинута гипотеза о нейтрино, не было сомнения в том, что нейтрино должны иметь спин, т. е. являться вращающимися объектами (в квантово-механиче-

ском смысле). Можно было ожидать, что в составе пучка нейтрино половина частиц имеет правое вращение по отношению к направлению движения, а другая половина — левое. Это следовало из физического закона, который до 1957 г. считался неоспоримым, — закона сохранения четности. В соответствии с ним во всех физических явлениях должна иметь место строгая право-левая (зеркальная) симметрия, так что в природе не должны происходить явления, в которых правое преобладает над левым и наоборот.

В нашем случае закон сохранения четности запрещает испускание, как говорят физики, продольно поляризованных нейтрино, т. е. нейтрино, имеющих, скажем, преимущественно левое вращение по отношению к направлению движения.

Кроме того, до 1957 г. думали, что существует и другая симметрия — зарядовая, благодаря которой любое физическое явление остается инвариантным (т. е. описывается одним и тем же математическим законом), если каждую частицу заменить ее античастицей. Такая симметрия не позволяет нейтрино иметь только левое вращение, а антинейтрино — только правое.

Однако в 1957 г. американские физики китайского происхождения Ли Дзун-дао и Янг Фжень-нин выдвинули гипотезу, что при слабых взаимодействиях эти два закона симметрии не имеют места. В многочисленных экспериментах обнаружилось явления, в которых эти законы явно нарушаются, но обязательно оба сразу.

Советский физик, лауреат Ленинской и Нобелевской премий академик Л. Д. Ландау показал, что в природе существует более глубокая симметрия, которую он назвал комбинированной инверсией. Предложенный им новый закон утверждает, что любое явление остается инвариантным, если одновременно правое заменить на левое, а каждую частицу заменить ее античастицей.

С точки зрения нового закона, нейтринный пучок имеет право быть полностью поляризованным. Кроме того, если нейтрино вращается справа налево, то антинейтрино должно вращаться слева направо по отношению к направлению своего движения. Такая возможность и предусматривается теорией продольного нейтрино А. Салама, Л. Ландау, Ли и Янга, согласно которой эти частицы должны быть полностью поляризованы. Вместе с тем, по этой теории, нейтрино обязаны иметь массу, строго равную нулю, а значит, в соответствии с теорией относительности, скорость их всегда равна скорости света.

Все эти предсказания теории ныне подтверждаются в опытах. Доказано, что нейтрино вращается справа налево (если смотреть по ходу его движения). Известно, что степень поляризации нейтрино и антинейтрино очень высока. Правда,

не доказано еще экспериментально, полностью ли поляризованы неуловимые частицы, как этого требует теория продольного нейтрино, и точно ли равна нулю их масса.

Таким образом, можно заключить, что нейтрино и антинейтрино отличаются друг от друга тем, что имеют разное направление «спиральности», причем нейтрино напоминает винт с левой резьбой, а антинейтрино — с правой. Но здесь возникает естественный вопрос: сведется ли к этому сущность нейтринного заряда? Иными словами, является ли разное направление спиральности нейтрино и антинейтрино единственной разницей между этими частицами?

Еще сравнительно недавно большинство физиков, я думаю, дали бы положительный ответ на этот вопрос. Однако выполненный важный опыт, о котором речь пойдет дальше, показывает, что вопрос о природе нейтринного заряда не такой простой.

НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

То, о чем говорилось до сих пор, — это прошлое физики нейтрино. Сейчас я скажу о задачах физики нейтрино, которые еще не решены или решаются в настоящее время.

Исследования нейтрино бурно развиваются, особенно в связи с созданием советскими и иностранными физиками новой области физики элементарных частиц — физики нейтрино высоких энергий.

Нейтрино, испускаемые радиоактивными ядрами урановых реакторов, имеют энергию, по порядку величины равную характерной ядерной энергии, т. е. несколько миллионов электрон-вольт. Эта энергия в миллион раз превышает энергию электронов в атоме. Но сейчас, когда имеются машины, ускоряющие частицы до десятков миллиардов электрон-вольт, реакторы рассматриваются, как источники нейтрино низкой энергии.

Для физики нейтрино высоких энергий характерно то, что в этой области науки исследуются главным образом нейтрино пионной природы, т. е. нейтрино, рождающиеся при распаде пиона.

Как можно получить пучок нейтрино пионной природы?

Представьте себе современный ускоритель, дающий протоны с энергией в десятки миллиардов электрон-вольт (такой, как дубненский синхрофазотрон Объединенного института ядерных исследований или американский брукхейвенский ускоритель). Когда протоны попадают на мишень (скажем, алюминиевую пластинку толщиной в несколько санти-

метров), рождаются пионы. Эти пионы распадаются на легу (средний путь их до распада в вакууме измеряется десятками метров). При этом образуется нейтрино согласно схеме:

$$\pi \rightarrow \mu + \nu.$$

И вот именно пучки нейтрино пионной природы используются в настоящее время в крупнейших лабораториях мира. Масштаб опытов потрясаящ. Для их выполнения необходимы ускорители с магнитами, вес которых превышает десятки тысяч тонн, а сам детектор нейтрино весит десятки тонн.

Каковы главные проблемы физики нейтрино высоких энергий? Современная количественная теория слабых взаимодействий, созданная недавно Ричардом Фейнманом и Мэрреем Гелл-Манном на основе идей Ферми, Ли и Янга, Ландау и Салама, универсальна. Это означает, что поведение всех других частиц при слабых взаимодействиях, по существу, одинаково с поведением нейтрино.

Согласно теории Фейнмана и Гелл-Манна, физические процессы, связанные со слабым взаимодействием, в области малой энергии можно рассчитать довольно хорошо. Но при больших энергиях появляются фундаментальные трудности. Сама теория предсказывает, что слабость взаимодействия нейтрино относительно уменьшается, когда энергия нейтрино увеличивается.

Если это увеличение интенсивности взаимодействия нейтрино с возрастанием энергии продолжается, то при фантастически высокой энергии в 300 млрд. эв мы столкнулись бы с абсурдным результатом: вероятность некоторых событий превышала бы единицу, а мы знаем, что вероятность по ее природе всегда менее единицы или равна ей. Это означает, что при энергии меньше 300 млрд. эв увеличение интенсивности взаимодействия должно прекратиться.

Но сразу возникают следующие вопросы.

Будет ли увеличение интенсивности взаимодействия прекращаться вблизи 300 млрд. эв или при существенно меньшей энергии? Этот вопрос можно поставить и по-другому: станет ли слабое взаимодействие сильным при очень высокой энергии или нет?

Второй вопрос: какой механизм отвечает за прекращение роста интенсивности взаимодействия?

Определенных ответов на эти вопросы физики пока не могут дать. Самый простой теоретический ответ (правда, не обязательно правильный) состоит в предположении, что слабые взаимодействия четырех частиц (например, нейтрона, протона, электрона и нейтрино при β -распаде) имеют, так сказать, вторичный характер: они как будто обусловлены ги-

потетической частицей B (физики называют ее промежуточным бозоном, а почему, я не стану объяснять), которая является носителем слабых взаимодействий. Приводимые здесь

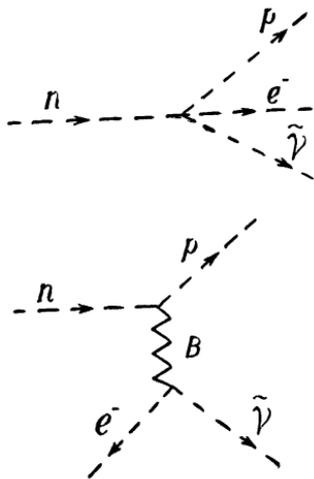


Рис. 1. Схемы распада нейтрона: вверху — при предположении локального взаимодействия частиц; внизу — с участием промежуточного бозона.

схемы (рис. 1) представляют соответственно β -распад нейтрона при двух предположениях:

а) без промежуточного бозона, т. е. когда процесс взаимодействия четырех частиц первичный (или, как говорят, локальный);

б) когда взаимодействие четырех частиц вторично и осуществляется промежуточным бозоном.

Оказывается, что во втором случае увеличение интенсивности взаимодействия с ростом энергии частиц естественным образом прекращается при относительно небольшой энергии.

Таким образом, существование частицы B помогает понять трудный теоретический вопрос. В настоящее время в разных лабораториях предпринимаются попытки наблюдать

эту частицу при помощи пучков нейтронов высокой энергии. Опыты пока дали отрицательный результат. Частицу B не наблюдали, а она могла бы быть зарегистрирована в экспериментах, если бы масса ее не превышала $2m_p$, где m_p — протонная масса. Значит, либо частица B не существует, либо ее масса должна быть больше $2m_p$. Опыты продолжаются. С другой стороны, следует заметить, что несколько лет назад существование этой гипотетической заряженной частицы как будто создало определенные трудности.

Дело в том, что на основании ее существования физики предсказали ряд процессов, которые в действительности не происходят. Правда, трудность довольно общая и не связана только с существованием частицы B , но она особенно ярко проявится, если заряженный промежуточный бозон существует. Типичный пример таких неосуществимых процессов — радиационный распад мюона, т. е. испускание мюоном электрона и фотона:

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma.$$

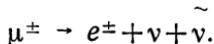
В течение долгого времени физики безуспешно пытались

обнаружить этот процесс. Что же запрещает мюону превращаться в электрон и фотон? Здесь следует возвратиться к общему понятию о зарядах частиц.

Вспомним, что при разных превращениях любой заряд сохраняется точно так же, как электрический. Именно тот факт, что некоторые, на первый взгляд возможные, превращения частицы на самом деле не наблюдаются, заставил ввести понятие разных зарядов. Неуничтожаемость заряда (любого, а не только электрического) запрещает эти превращения. Например, мы знаем, что нуклоны — протоны и нейтроны — никогда не распадаются только на легкие частицы. Это позволяет утверждать, что нуклон имеет так называемый барионный заряд, а никакая комбинация легких частиц барионного заряда не имеет.

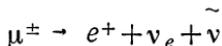
Сразу возникает подозрение, что процессы типа распада мюона на электрон и фотон, которые ожидалось теоретически, но в действительности не происходят, запрещены законом сохранения некоторого до сих пор неизвестного заряда, скажем мюонного заряда, характерного для мюона, но не для электрона. Здесь следует напомнить, что фотон — истинно нейтральная частица. Он не имеет никаких зарядов.

Однако имеется один процесс — распад мюона, в котором мюон и электрон участвуют совместно. Такой процесс состоит в испускании мюоном электрона совместно с двумя разными частицами ничтожно малой массы, о чем свидетельствуют экспериментальные исследования формы спектра электронов в этом процессе. На этом основании долго думали, что процесс идет по схеме



Но такая схема трудно совместима с предложением о существовании мюонного заряда, запрещающего переход мюона в электрон и фотон. Ведь пара $\nu\tilde{\nu}$, по определению частицы и античастицы, не имеет никаких зарядов, как и фотон, так что в описанной схеме мюонный заряд, если он существует, не сохраняется.

Можно предположить, что имеются два сорта пар нейтрино-антинейтрино: мюонные и электронные. Они отличаются друг от друга тем, что у мюонных нейтрино ν_μ (но не у электронных ν_e) имеется мюонный заряд. Тогда распад мюона может происходить по схеме



и мюонный заряд сохраняется, поскольку разница зарядов мюона и электрона компенсируется разницей зарядов испускаемых «неуловимых частиц».

В настоящее время неизвестно, все ли приведенные аргу-

менты правильны, но именно они, по существу, заставили советского физика М. А. Маркова и других ученых предсказать существование двух типов нейтрино. Это разрешило бы трудности, связанные с отсутствием процесса распада мюона на электрон и фотон и с возможностью существования β -частицы. Скажу сразу, что опыты показали как раз, что в природе существуют два типа нейтрино (см. ниже).

Таким образом, выявились в последнее время следующие главные проблемы физики нейтрино высоких энергий.

Как зависит интенсивность слабого взаимодействия от энергии? Первично ли слабое взаимодействие или оно обусловлено некоторой промежуточной частицей? Существует ли в природе только одна пара нейтрино или их две пары? Сейчас расскажу, как на третий вопрос экспериментаторы уже дали исчерпывающий ответ.

ДВА ТИПА НЕЙТРИНО

Существование двух типов нейтрино означало бы, что нейтрино, участвующие в разных реакциях совместно с электроном (электронные нейтрино ν_e), отличаются от нейтрино, участвующих в реакциях совместно с мюоном (мюонные нейтрино ν_μ). В частности, нейтрино, испускаемые в процессе β -распада (ν_e), отличаются от нейтрино, испускаемых в распаде пиона (ν_μ) с испусканием мюона (рис. 2).

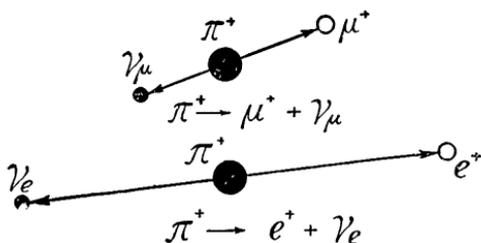


Рис. 2. Схема распада пионов. Процесс с испусканием мюонов в 10 000 раз более вероятен, чем с испусканием электрона.

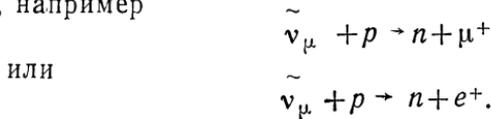
Но как можно показать, что эти частицы действительно отличаются друг от друга?

Если вы внимательно следили за принципом описанного выше опыта, в котором было показано, что нейтрино и анти-

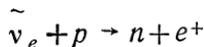
нейтрино — разные частицы, то вы поймете, как можно решить проблему различия мюонных и электронных нейтрино.

Действительно, логические аргументы, позволяющие доказать различие ν от $\bar{\nu}$ и ν_e от ν_μ очень близки.

Из сказанного ясно, что источниками мюонных нейтрино должны быть мощные синхрофазотроны. Рассмотрим некоторые реакции, которые могут быть вызваны этими частицами, например



Процесс



был обнаружен при помощи электронных антинейтрино, испускаемых реактором. Отсюда понятно, что исследование приведенных выше реакций послужит однозначной проверкой гипотезы о различии ν_e и ν_μ . Первая реакция будет идти наверняка. Что же касается второй, то она будет наблюдаться, если ν_e и ν_μ — одно и то же, а если ν_e и ν_μ — разные частицы, реакция не произойдет. Иными словами, опыт должен выяснить вопрос о том, могут ли мюонные нейтрино от ускорителя вызывать реакцию с испусканием электронов.

Такой опыт был выполнен группой американских физиков, в том числе известными учеными Ледерманом, Шварцем и Стейнбергером, и находился в центре внимания Международной конференции по физике высоких энергий, проходившей в Женеве летом 1962 г. Результат опыта гласил: да, мюонные и электронные нейтрино — разные частицы.

Эксперимент происходит так. Пучок мюонных нейтрино с энергией порядка миллиарда электрон-вольт от синхрофазотрона, ускоряющего протоны до энергии 15 млрд. эв, фильтровался через 13-метровую толщу чугуна, поглощающую все другие частицы, кроме нейтрино. Нейтрино, конечно, проникает сквозь эту толщу так же беспрепятственно, как лучи солнца сквозь окошко. Эффекты, вызываемые нейтрино, регистрировались в искровой камере — приборе, который показывает треки проходящих через него электрически заряженных частиц в виде следов искр. Конечно, в искровой камере регистрировались не сами нейтрино: были зафиксированы заряженные продукты взаимодействия нейтрино с материалом камеры, которая служила мишенью для нейтрино. Камера весила 10 т, основным ее материалом был алюминий в виде пластин толщиной около 2 см.

Более 100 тыс. млрд. мюонных нейтрино прошло через камеру, а зарегистрировано было только 51 взаимодействие.

И при этих взаимодействиях образовывались не электроны, а мюоны.

Аналогичный опыт был поставлен и только что закончен в Женеве группой физиков под руководством профессора Бернардини, в которой участвовал советский физик В. С. Кафтанов. Результат тот же: электронные и мюонные нейтрино — разные частицы. Но здесь в достоверности результата не приходилось сомневаться: ведь в этом опыте уже наблюдалось более тысячи событий взаимодействия ν_{μ} с ядром!

Мы уже убедились раньше, что нейтрино (в частности, мюонное нейтрино) поляризовано и характеризуется определенным знаком спиральности. Теперь, после этого эксперимента, можно утверждать, что спиральность — не единственный заряд мюонного нейтрино. У этой частицы, как и у мюона, есть еще одна внутренняя характеристика — мюонный заряд. На вопрос о том, какова природа этого заряда, пока нельзя ответить.

В настоящее время физики пытаются понять до конца, что означает существование двух нейтрино для теории слабого взаимодействия.

Прежде чем закончить часть статьи, посвященную роли нейтрино в микромире, следует упомянуть еще об одной нерешенной важной проблеме физики нейтрино. Происходит ли рассеяние нейтрино электронами, т. е. отклоняется ли нейтрино электронами с вероятностью, сравнимой с вероятностью всех других процессов слабого взаимодействия?

На этот вопрос теория дает положительный ответ. Однако степень достоверности теории нейтрино пока еще недостаточна высока. Поэтому опыт по обнаружению нейтрино электронного рассеяния стоит на очереди и в недалеком будущем безусловно будет выполнен, несмотря на очень серьезные трудности, связанные с ним.

Этот вопрос крайне важен не только для физики элементарных частиц, но и для астрофизики, о чем речь пойдет ниже.

НЕЙТРИНО И КОСМОС

Нейтрино обязательно должно играть роль в явлениях макроскопического масштаба.

Прежде всего необходимо сказать (более подробно мы поговорим об этом дальше), что внутри звезд нейтрино образуются в большом количестве при ядерных превращениях, в частности при β -распаде разных нестабильных ядер. Заметим, что сомнений в существовании такого испускания ней-

трино звездами практически нет, хотя оно еще не обнаружено экспериментально.

Естественно, что нейтрино выходят без всяких затруднений, скажем, из Солнца.

А вот еще один пример макроскопического эффекта. Урановый атомный реактор мощностью в сотни тысяч киловатт теряет в виде антинейтрино десятки тысяч киловатт!

Часто встречаются ситуации, когда конкретную количественную роль нейтрино в том или ином явлении нельзя оценить из-за отсутствия сведений о некоторых его свойствах. Например, ответ на такой довольно тонкий вопрос физики элементарных частиц, как существование процесса нейтрино-электронного рассеяния, о котором уже говорилось, имеет далеко идущие астрофизические следствия.

В самом деле, в последние несколько лет было показано, что существование этого явления должно привести к новому механизму интенсивной потери энергии звездами, связанному с испусканием пар нейтрино-антинейтрино. Этот механизм должен осуществляться на таких стадиях эволюции звезд, когда их температуры и плотности очень высоки. Оказывается, что нейтринная светимость некоторых звезд может намного превышать их световую светимость. Однако неизвестно, осуществляется ли этот процесс в действительности.

Во всяком случае, нигде так ясно не проявляется связь между микромиром и космосом, как в физике нейтрино. Недавно родилась новая область науки — нейтринная астрофизика, описывающая многочисленные явления, в которых нейтрино играют первостепенную роль. Нейтринная астрофизика имеет две стороны.

Во-первых, нейтрино участвуют в ряде процессов, происходящих внутри звезд. Поэтому астрофизика, как теоретическая наука, должна учитывать роль «неуловимых частиц» в динамических внутризвездных процессах. Не исключено, что нейтрино будут играть существенную роль и для космогонии.

Во-вторых, нейтрино, испускаемые звездами и вообще исходящие из космического пространства, могут быть зарегистрированы в опытах, выполненных на Земле. Есть надежда, таким образом, получить ценные данные о Вселенной.

Эта сторона нейтринной астрофизики как экспериментальной науки особенно заманчива. Дело в том, что до сих пор нам был доступен практически единственный тип излучения, попадающего на Землю из космического пространства, — электромагнитные волны (видимый свет, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, короткие радиоволны). Правда, в последнее время с позиций астрофизики исследуются также космические лучи. Но об этом здесь мы говорить не будем.

Представьте себе, что со временем физики и астрофизики, работая совместно, получают возможность регистрировать ин-

тенсивность и энергию нейтрино и антинейтрино, летящих от отдельных небесных объектов и из космического пространства. Тогда в руках исследователей появятся мощные дополнительные способы решения астрофизических проблем. Заметим, в частности, что электромагнитные волны исходят только с поверхностного слоя небесных тел. Регистрация же нейтрино даст возможность заглянуть очень глубоко внутрь звезд. Ведь нейтрино легко пронизывают Солнце!

Разумеется, многое из сказанного выше хотя и принципиально возможно, но пока очень далеко от практического осуществления. Однако некоторые вопросы могут быть решены в близком будущем. Сейчас мы остановимся именно на них. Речь будет идти о Солнце.

Несмотря на то, что вопрос об образовании нейтрино в звездах остается довольно неясным, все-таки кое-что об этом уже известно. Поток нейтрино от Солнца, например, теоретически вычислен. По порядку величины он равен 10^{10} — 10^{11} нейтрино в секунду на квадратный сантиметр поверхности Земли. Перенос энергии на поверхность Земли, связанный с потоком солнечных нейтрино, колоссален. Он составляет несколько процентов от общего солнечного излучения.

Так же определенно можно утверждать, что Солнце испускает именно нейтрино, а не антинейтрино. Это связано с типами ядерных реакций, которые могут происходить в звездах. Как известно, энергия Солнца и других звезд освобождается в водородных и углеродных циклах, в которых водород превращается в гелий. При этом в виде нейтрино излучается около 5% энергии Солнца.

Первостепенный теоретический интерес имеет вопрос, какие именно ядерные реакции происходят в центральной части Солнца?

Нейтрино образуются в разных ядерных реакциях прямым или косвенным образом, причем энергия испускаемых нейтрино зависит от процесса, в котором они родились. Последнее обстоятельство очень важно, так как мы видели, что вероятность взаимодействий (а значит, и возможность регистрации) нейтрино сильно зависит от энергии «неуловимых частиц». Следовательно, число зарегистрированных нейтрино разных энергий будет давать сведения о том, какие реакции происходят в глубинах Солнца.

Кроме того, полное число нейтрино, излучаемых Солнцем, известно пока слишком грубо. Первоочередная задача экспериментальной нейтринной астрофизики — определить с достаточной точностью это число.

Но как можно это сделать?

Мы уже говорили, что каждый квадратный сантиметр поверхности Земли пронизывают ежесекундно десятки миллиардов нейтрино. Огромная величина! И хотя поймать даже

столь густой поток «неуловимых частиц» все равно очень трудно, задача эта разрешима. Тут приходит на помощь уже знакомая нам реакция — взаимодействие нейтрино с ядром Cl^{37} . В качестве мишени для нейтрино можно использовать, скажем, тысячи тонн четыреххлористого углерода — вещества дешевого и широко распространенного. Напомним, что реакция



характерна именно для нейтрино, а не для антинейтрино.

Состояние сегодняшней техники таково, что мы можем ловить нейтрино, имеющие энергию 1—2 млн. эв, если поток составляет не меньше 10 миллиардов частиц в секунду через каждый квадратный сантиметр.

Нейтрино же с энергией около 10 млн. эв можно поймать, если их поток составляет только 10 миллионов частиц в секунду через квадратный сантиметр. Заметим, что метод четыреххлористого углерода — химический по характеру — в течение многих лет был единственным предложением для регистрации солнечных нейтрино.

В последнее время появились другие предложения, в которых регистрация событий взаимодействия солнечных нейтрино с веществом осуществляется при помощи детекторов, основанных на методах электроники: речь идет о массивных сцинтилляционных и черенковских счетчиках, о громадных искровых камерах. Новые опыты (учтите, что старый опыт с четыреххлористым углеродом еще не завершен!) планируются, исходя из предположения, что в спектре нейтрино от Солнца имеется малоинтенсивный компонент (одна тысячная доля полного числа нейтрино) с энергией более 10 млн. эв. Согласно современным представлениям о термоядерных реакциях в Солнце, эти энергетичные нейтрино как будто рождаются в процессе β -распада ядра B^8 . Но только опыт скажет, правда ли это.

Во всяком случае нет сомнения в том, что первый шаг экспериментальной нейтринной астрофизики будет сделан в будущем именно при исследовании Солнца.

А теперь пофантазируем — поговорим о менее реальных вещах. Я расскажу о некоторых принципиальных возможностях экспериментальной нейтринной астрофизики. Практические решения здесь еще очень далеки и, быть может, никогда не увидят свет.

После того как будут зарегистрированы нейтринные потоки от Солнца, необходимо будет сделать следующий шаг — измерить нейтринные потоки из космического пространства (мы уже видели, насколько важна эта задача) и от отдельных галактик. Для этого нужно увеличить чувствительность современных методов регистрации больше чем в миллион

раз. Поэтому я не буду останавливаться подробно на этих вопросах, а проиллюстрирую только одну принципиальную возможность, которая открывается перед нейтринной астрофизикой. Это решение проблемы антимиров — миров, целиком построенных из античастиц.

Могут ли наблюдения с Земли сказать нам, существуют ли антимирры? Пусть мы видим какое-то небесное тело и хотим узнать, из вещества или из антивещества оно построено. Наблюдения света и вообще электромагнитных волн никак не могут дать ответ на этот вопрос. Свет, испускаемый, скажем, атомом водорода, тождествен свету, испускаемому атомом антиводорода. Ведь фотоны — истинно нейтральные частицы: они не имеют никаких зарядов и не отличаются от своих античастиц.

А как обстоит дело с нейтринным излучением? Мы уже видели, что Солнце испускает нейтрино, а не антинейтрино. Это же относится и к любым звездам, где основной источник энергии — термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

Теперь представьте себе антисолнце, внутренние процессы которого аналогичны солнечным. Это значит, что источником энергии там служит превращение антиводорода в антигелий. Такие антисолнца дадут свет, не отличимый от света нашего Солнца. Однако они будут испускать антинейтрино, а не нейтрино. Можно представить себе, какие перспективы открываются перед нейтринной астрономией.

Правда, надо предостеречь от слишком оптимистического представления о возможности решения изложенных вопросов. Дело не только в том, что речь идет о крайне малой интенсивности нейтрино и антинейтрино. Самая большая трудность связана с тем, что неизвестно, как создать эффективный нейтринный телескоп.

Нейтринных линз нет. Для того чтобы утверждать, что нейтринное излучение приходит от определенного небесного тела, необходимо измерить угловое распределение заряженных частиц, вызванных взаимодействием нейтрино. Но оказывается, что в случае нейтрино с энергией 1—2 млн. эв или меньше это угловое распределение по отношению к направлению падающего пучка очень нечувствительно. Эта трудность так велика, что неизвестно, будет ли задача когда-нибудь решена. Но сама принципиальная возможность ее решения достаточно интересна.

Задача построения нейтринного телескопа значительно упрощается для нейтрино высокой энергии, превышающей 10 млрд. эв. Особенно в случае очень высокой энергии, превышающей 1 млрд. эв, заряженные продукты, образующиеся при взаимодействии нейтрино с ядрами, сохраняют направление налетающих нейтрино, а это позволяет создать телескоп

для «неуловимых частиц» высоких энергий. Таким телескопом может служить установка, помещенная на большую глубину и регистрирующая мюоны, которые рождаются в реакциях типа:



Подземная установка, по предложению М. А. Маркова, может выделять мюоны, образованные нейтрино, исходящими из нижней полусферы, т. е. проходящими сквозь всю Землю! Это возможно, конечно, так как длина свободного пробега нейтрино несравнимо больше диаметра Земли.

Заметим, что опыты такого типа уже дали первые качественные результаты. Они выполняются на глубине нескольких километров грунта в двух подземных лабораториях в Индии и Южной Африке: обе лаборатории находятся в шахтах, где добывается золото.

Подводя итоги, можно сказать, что существуют два аспекта физики нейтрино.

С одной стороны, исследование нейтрино как элементарной частицы имеет первостепенное значение для построения теории слабых взаимодействий элементарных частиц, почетным представителем которых нейтрино и является.

С другой стороны, нейтрино, без сомнения, играет важнейшую роль в астрофизике и, быть может, в космогонии. Экспериментальная нейтринная астрофизика — почти еще не рожденная наука, первоочередная задача которой состоит в регистрации нейтрино, исходящих от Солнца.

Эти два аспекта, конечно, очень тесно связаны между собой. Некоторые макроскопические явления, в которых участвуют нейтрино, можно будет рассчитать только тогда, когда будут лучше известны некоторые фундаментальные свойства нейтрино как элементарной частицы.

Исследования нейтрино требуют усилий больших коллективов и очень крупных средств. Но проблема вызывает настолько большой интерес, что уже сейчас ею занимаются в разных лабораториях многих стран мира.

ЭНРИКО ФЕРМИ

Среди современных нам ученых великий итальянский физик Энрико Ферми занимает особое место. В наше время, когда узкая специализация в научных исследованиях стала обычным явлением, трудно указать столь универсального физика, каким был Энрико Ферми. Он внес большой вклад в развитие теоретической, экспериментальной и даже технической физики. Не удивительно, что советские физики, как и физики всего мира, так остро восприняли утрату Ферми 28 ноября 1954 года.

Ферми родился в Риме 26 сентября 1901 г. в семье простого служащего. Если можно говорить о призвании, то, без сомнения, Ферми был рожден физиком. Несмотря на то, что в семье и среди окружающих никто не побуждал его к занятиям наукой, Ферми еще мальчиком проявляет исключительный интерес к математике и физике. Он без посторонней помощи с энтузиазмом читает и осваивает содержание ряда книг по физике и высшей математике. Разнообразный ассортимент книг по физике, которые Ферми читал, будучи еще мальчиком, включает в себя, наряду со случайными книгами, как, например, один из старинных курсов физики и математики, написанный еще на латинском языке, также работы вроде широко известного курса физики Хвольсона.

Но не только в книгах ищет Ферми объяснение происходящего вокруг него; он самостоятельно пытается проанализировать заинтересовавшие его явления. Часто на решение научных проблем его наталкивают игрушки. Таким образом, например, совершенно самостоятельно Ферми разработал теорию волчка, радуги, колеблющейся струны и др.

Когда Ферми был принят студентом в Пизанский университет в 1918 г., он уже знал классическую физику. Насколько глубоко он владел этой областью науки в то время, можно судить по его словам, сказанным в 1934 г.: «Когда я поступил в университет, классическую физику и теорию относительности я знал так же, как и теперь».

В университете профессора не смогли дать ему ничего нового: уже в то время Ферми разбирался в проблемах физики лучше своих учителей. Большую пользу принесло Ферми общение с талантливым однокурсником Франко Разетти. В частности, совместное обсуждение вопросов теоретической физики помогло развитию проявившихся впоследствии исключительных дидактических способностей Ферми.

В этот период времени Ферми посвящает себя глубокому изучению квантовой физики, которая в то время была еще не известна в Италии. Еще до получения степени (в 1922 г.) Ферми написал несколько теоретических работ в области классической механики, статистической механики и теории относительности. Диссертацией (соответствующей нашей дипломной работе), однако, явилось экспериментальное исследование по рентгеновской спектроскопии.

После получения степени Ферми на короткое время едет за границу (Германия, Голландия). В это время Ферми не знал собственных сил. В Италии не было физиков, с которыми бы он мог сравнить себя, и мо-

лодой Ферми не имел той уверенности в себе, которая так необходима для творческой работы. Как рассказывал сам Ферми, он, наконец, обрел такую уверенность благодаря известному физика Эренфесту, который не замедлил сказать ему, что он имеет дар крупного физика. Моральная поддержка, которую оказал ему Эренфест во время его поездки в Голландию, имела в жизни Ферми даже большее значение, чем его встречи за границей с такими блестящими молодыми физиками-теоретиками, как Паули и Гейзенберг, которым, в отличие от Ферми, посчастливилось учиться у таких больших ученых, как Зоммерфельд и Борн.

Во время преподавательской деятельности во Флоренции Ферми опубликовал (1926) свою знаменитую работу о статистической механике частиц, подчиняющихся принципу Паули. В этой работе были заложены основы так называемой статистики Ферми — Дирака. Как известно, основное значение статистики Ферми — Дирака заключается в том, что она дала ключ для понимания свойств электронов в металлах. Но и другие применения статистики Ферми весьма многочисленны, что иллюстрируется множеством выражений, вошедших в научную литературу, таких, как газ Ферми, фермион, модель ядра по Ферми, модель атома Томаса — Ферми, фермиевские моменты нуклонов в ядре и т. д.

После открытия статистики, которая носит его имя, Ферми стал хорошо известен сначала за пределами Италии и только потом, как это ни странно, на родине.

В 1928 г. он был приглашен на место профессора теоретической физики Римского университета, и, когда ему было всего 27 лет, он был избран членом Королевской Академии Италии. Впоследствии он избирался членом многих Академий наук всего мира.

Ферми создал итальянскую школу современной физики. Многие из его учеников, такие, как Разетти, Амальди, Серге, Вик, Рака, Росси, Ферретти, Бернардини, Кожкони, стали широко известными физиками.

О неизгладимом следе, оставленном Ферми в развитии итальянской физики, можно судить по тому, что в настоящее время, почти через 30 лет после того, как он покинул свою родину, там успешно работает группа довольно известных молодых физиков, продолжающих традицию современного высококачественного исследования, созданную самим Ферми.

В период с 1930 г. по 1938 г., впервые в этом столетии, благодаря Ферми иностранные физики потянулись к итальянскому центру исследований. Эти физики, среди которых были Бете, Баба, Блох, Лондон, Пайерлс, Плачек, Теллер, Уленбек, принимали участие в семинарах Римского института физики вместе с небольшой группой итальянских ученых, одного из которых — Майорана — Ферми считал крупнейшим физиком-теоретиком нашего времени. Семинары Ферми протекали в непринужденной обстановке и всегда много давали их участникам.

Ферми был прирожденным учителем. Его лекции в университете по квантовой механике, атомной физике, математической физике, термодинамике и его любимый курс по геофизике отличались большой ясностью и стройностью изложения, что, однако, не было результатом особой подготовки к лекциям (Ферми почти никогда не готовился к ним), но объяснялось глубокими знаниями и исключительной ясностью ума учителя. В конечном счете качество лекций являлось отражением его самостоятельной работы, проводимой еще школьником, когда он пытался осознать и понять различные явления природы.

В физике, по мнению Ферми, нет места для путаных мыслей: физическая сущность любого действительно понятного вопроса может быть объяснена без помощи доски для записывания сложных формул. Правильность такого мнения иллюстрировалась замечательной способностью Ферми быть понятным слушателям самого различного уровня.

Ферми всегда подчеркивал огромную важность для студентов хорошей подготовки по классической физике, и он сам любил читать лекции по элементарной физике. Общий курс математической физики, прочитанный Ферми в Риме, представлял собой нечто вроде энциклопедии, содер-

жавшей элементы электродинамики, теорий потенциала, относительности, распространения тепла, диффузии и упругости; он очень возражал против курса математической физики монографического типа.

Невозможно провести грань между Ферми-физиком и Ферми-человеком. Своих студентов и сотрудников Ферми учил не только физике в прямом смысле этого слова. Собственным примером он учил их страстно любить физику, равно как и понимать дух и этику науки. Ферми упорно подчеркивал исключительную моральную ответственность ученого при опубликовании научной работы, в частности, он нетерпимо относился к часто встречающейся тенденции экспериментаторов переоценивать точность своих измерений.

Для Ферми интересы науки всегда были выше личных интересов. На вопросы, связанные с собственным приоритетом, он не обращал никакого внимания. Он всегда подчеркивал вклад сотрудников в свои исследования. Энрико Ферми был необычайно простым и скромным. Рамки этой статьи, автору которой выпало счастье учиться у Ферми и работать под его руководством, не позволяют со всей полнотой охарактеризовать этого замечательного ученого и человека.

Пленительная ясность мыслей, характерная для лекций Ферми, выделяет также все его книги (Ферми написал их девять) и статьи, как обзорные, так и оригинальные. Некоторые его книги хорошо известны в Советском Союзе. Однако его двухтомный «Курс элементарной физики» для средних школ и великолепное «Введение в атомную физику» (служившее в качестве учебника теоретической физики в Римском университете), в СССР почти не известны.

Ферми писал свои книги так же, как и читал лекции,— предельно ясно и, казалось, с минимальным усилием. Некоторые физики помнят, как они, тогда студенты, занимались по его книге «Молекулы и кристаллы», когда автор еще писал ее. Каждое утро, между 6 и 8 часами, Ферми аккуратно писал на нечетных страницах тетради, оставляя чистыми четные страницы для поправок. Однако, когда рукопись книги была готова к печати, число поправок оказалось буквально ничтожным.

Удивляло также то, что Ферми мог писать, почти не прибегая к другим статьям или книгам. Вообще Ферми мало читал, а тем более мало покупал книг по физике после окончания университета; он предпочитал разрабатывать данный вопрос сам, нежели находить готовый ответ.

Ферми также проводил сравнительно мало времени за научными журналами, хотя он всегда был великолепно осведомлен о происходящем в мире физики. Это достигалось «вытягиванием», по выражению самого Ферми, сведений в непосредственном разговоре с другими физиками. Вспоминается случай, хорошо показывающий еще одну характерную для Ферми черту — способность давать советы людям, работающим даже в узких областях применения физики, с которыми Ферми сам был мало знаком. В 1942 г. мне довелось встретиться с Ферми в Чикаго. Я в то время работал в области применения ядерной физики в разведке местонахождений нефти (нейтронный кароттаж и гамма-кароттаж). Поскольку Ферми не имел сведений, касающихся кароттажа, он, конечно, начал «вытягивать» их из меня. Вскоре он уже сам давал мне советы и высказывал многочисленные идеи, послужившие основой для дальнейшей длительной работы в этой области.

Среди многочисленных теоретических работ Ферми, появлявшихся начиная со времени опубликования работы по статистике до 1934 г., когда он начал работать в области ядерной физики, следует отметить метод Томаса — Ферми (1928) — применение статистики Ферми в определении среднего электрического потенциала в атоме, теорию сверхтонкой структуры спектральных линий (1933) и его переформулировку квантовой электродинамики (1932), которая представляет собой блестящий пример ясной трактовки трудного вопроса.

В качестве дебюта в области ядерной физики Ферми опубликовал в 1934 г. свою известную теорию β -распада — классическую работу, ос-

нованную на предположении Паули о том, что в β -процессе электрон испускается одновременно с нейтрино. Имеющая сама по себе большое значение, эта работа явилась и прототипом современных теорий взаимодействия элементарных частиц. В настоящее время физики считают, что найденное Ферми взаимодействие между нуклонным полем и полем пары электрон — нейтрино представляет собой особый случай более общего взаимодействия между любыми четырьмя фермионами — так называемое универсальное взаимодействие Ферми, крайне малая интенсивность которого определяется величиной «константы Ферми».

Несмотря на то, что исследовательская деятельность Ферми до 1934 г. носила теоретический характер, скрытый экспериментатор изредка пробуждался в нем. Был, например, такой случай: однажды Ферми получил корректуру своей книги «Молекулы и кристаллы»; один из снимков, на котором было изображено чередование интенсивностей в молекулярном спектре азота, не удовлетворил автора книги, Ферми немедленно нашел свободный подходящий спектрограф (это было в Римском институте физики, фактически являвшемся в то время лабораторией спектроскопии) и, превратившись в экспериментатора, изготовил нужный для книги хороший снимок.

Первые же крупные экспериментальные работы Ферми выполнил в области ядерной физики (1934). Этим работам, за которые Ферми получил Нобелевскую премию, предшествовали два события: поездка Разетти в Германию с целью изучения ядерной экспериментальной методики и обсуждение на семинаре института под руководством Ферми классической книги Резерфорда по радиоактивности.

Тут же после открытия Фредериком и Ирен Жолио-Кюри явления искусственной радиоактивности Ферми пришел к выводу, что нейтроны, поскольку они не имеют заряда, должны особенно эффективно образовывать радиоактивные элементы, и со свойственной ему энергией начал систематическую бомбардировку нейтронами почти всех существующих элементов. Нет необходимости напоминать здесь о всех поразительных результатах экспериментов Ферми — образование более шестидесяти радиоактивных элементов; открытие замедления нейтронов в их большой вероятности захвата в таких элементах, как кадмий и бор; группы нейтронов и т. д. Все эти блестящие и совершенно неожиданные открытия были опубликованы в виде коротких сообщений в итальянском журнале «Ricerca Scientifica», превратившемся благодаря Ферми из совершенно неизвестного издания в журнал международного значения. Только за год лаборатория спектроскопии превратилась в первоклассную, хотя и маленькую, лабораторию ядерной физики.

Римская лаборатория была действительно маленькой. Общее число научных работников и механиков, работавших с Ферми, едва доходило до десяти. Ежегодно диплом по физике получали, в среднем, один-два студента, несмотря на то, что на физико-математическом факультете профессорами были Ферми, Разетти, Вольтерра, Леви-Чивита. Малое число дипломантов объяснялось неблестящими перспективами, ожидавшими молодых физиков-итальянцев в то время.

Что касается средств, необходимых для исследовательских работ, то фашистское правительство, так щедро помогавшее крупным промышленникам, оказалось довольно скупым, когда речь шла о средствах для науки. Однажды с целью экономии средств, Ферми решил, что стандартные электрические вилки следует изготовлять в лабораторной мастерской: он провел два дня с механиком, стараясь найти удобный способ их изготовления, но после этого ему пришлось оставить свое предложение, как неэкономичное.

Участие Ферми в качестве исполнителя в экспериментальной работе было всегда непосредственным, он не только руководил, но и любил работать своими собственными руками. В частности, Ферми был неплохим стеклодувом. Непосредственное и повседневное участие Ферми в работе, руководимой им, было возможно только потому, что он настойчиво и уп-

прямо отказывался занимать административные должности. Немногие знают, что он никогда не был во главе лабораторий, в которых работал.

Ферми в лаборатории всегда сохранял неизменное спокойствие. Говорили, что в 1942 г., когда первый ядерный реактор, построенный им, приближался к критическим условиям, Ферми прервал общее напряжение известной фразой: «Пойдем обедать». Почти за десять лет до этого случая, когда в Римском институте физики неожиданно было обнаружено увеличение радиоактивности, вызванной нейтронами, обусловленное наличием водородосодержащих веществ, Ферми охладил пыл своих сотрудников той же фразой: «Пойдем обедать». К концу обеда Ферми уже объяснил открытие (эффект Ферми) как явление замедления нейтронов и заметил: «Как глупо, что мы не предсказали это раньше». Примерно через год основы той области физики, которая сегодня носит название «нейтроники», были так ясно сформулированы Ферми, что некоторые его статьи, в частности работы «О движении нейтронов в средах, содержащих водород» и «Поглощение и диффузия медленных нейтронов», сегодня, почти 20 лет спустя после опубликования, являются лучшим введением в науку, одинаково интересующую как физиков, так и инженеров.

В опытах, выполненных в Риме в 1934—1935 гг., бомбардировка урана нейтронами вызвала образование ряда радиоактивных элементов, среди которых, по мнению Ферми, был и элемент с атомным номером 93. Как стало ясно впоследствии, эти элементы в действительности оказались продуктами деления, и, хотя при бомбардировке урана образуются трансурановые элементы, сообщение Ферми об элементе 93 было неверно — единственная ошибка в течение его долгой и славной исследовательской деятельности. Это, надо отметить, не затормозило развитие исследований, которые вели к открытию деления. Однако Ферми очень переживал опубликование работы по элементу 93.

В Римском институте физики Ферми получил прозвище «папы», с которым все его сотрудники и друзья не только в Риме, но и во всем мире обращались к нему. Прозвище это означало, что Ферми (в области физики!) был непогрешим так же, как считается непогрешимым в вопросах религии глава католической церкви — папа римский. Ферми, конечно, остался «папой» даже после случая с элементом 93.

Во время пребывания в Риме в период фашистской диктатуры Ферми сохранил свою непоколебимую честность, находясь даже в совершенно развращенной фашистской Академии Италии. В частности, в Академии и в университетах он всегда смело боролся за признание научных достижений, а не заслуг перед фашистским государством, как критерия при назначении университетских профессоров.

Однако, общаясь с весьма узким кругом профессоров университета, которым мир героического антифашистского итальянского рабочего класса был совершенно не известен, Ферми не проявлял никакого интереса к политике.

Позднее Ферми пришлось проявить свою антипатию к фашизму более прямо. В 1938 г. он был награжден Нобелевской премией за исследовательские работы по свойствам нейтронов. После введения антисemitских фашистских законов он с семьей поехал из Стокгольма, куда ездил за премией, прямо в Нью-Йорк, хотя законы эти непосредственно его не касались (жена Ферми была итальянкой еврейской веры, сам он был католиком).

Впоследствии Ферми собственным примером внес значительный вклад в то, чтобы рассеять весьма распространенное в капиталистических странах мнение о том, что «итальянец» и «фашист» — синонимы. И не случайно, что в Италии именно неофашистская печать не считает для себя позором оскорблять память человека, которым весь итальянский народ вправе гордиться, как одним из своих лучших сынов.

В США Ферми принял должность профессора физики Колумбийского университета. Там он создал (1939) количественную теорию ионизационных потерь энергии заряженными частицами, учитывающую поляризацию

вещества, через которое эти частицы проходят. Из этой теории, впоследствии проверенной опытом, следует, что тормозная способность веществ зависит от степени их конденсации (фермиевский эффект плотности).

Сразу после открытия деления Ганом и Штрассманом Ферми понял, какие революционные возможности могли вытекать из этого явления. Независимо от группы экспериментаторов, работавших под руководством Жолио-Кюри, Ферми экспериментально доказал, что при делении испускается несколько нейтронов — обстоятельство, делающее возможной цепную реакцию.

С этого времени (1939) вся деятельность Ферми на несколько лет была посвящена получению атомной энергии из урана: добился он этого в декабре 1942 г. Ферми назвал первый ядерный реактор «*pila*», что по-итальянски означает что-то сложное из многих подобных слоев, подобно тому, как вольтов столб — первый источник длительного постоянного тока — по-итальянски называется «*pila*» Вольты. В Советском Союзе, где впервые в мире построена электростанция, работающая на атомной энергии, всем ясно, что «*pila*» Ферми имеет не меньшее историческое значение, чем вольтова «*pila*».

Невозможно дать здесь хотя бы отдаленное представление о колоссальной работе, выполненной Ферми в области атомной энергии. Остается надеяться, что многие неопубликованные работы Ферми, имеющие историческое значение, скоро появятся в печати. Работы, выполненные Ферми совместно с Андерсоном, по замедлению и диффузии нейтронов в графите являются примером экспериментального и теоретического мастерства. Многие научные термины, распространенные в этой области, носят имя Ферми: нейтронный возраст по Ферми, фермиевская тепловая колонна и др. Здесь же следует напомнить о методе Ферми определения критических размеров реагирующей среды в опытах, выполненных при относительно маленьком количестве урансодержащего вещества (экспоненциальный опыт Ферми). Опыт, описание которого можно найти во всех книгах, посвященных ядерным реакторам, так прост, что сегодня трудно представить себе иной подход к рассматриваемому вопросу.

Ферми обладал исключительной физической интуицией, он всегда находил наиболее простые подходы к решению самых сложных практических задач. Что же касается исследований фундаментального характера, то избранные Ферми большие проблемы становились всегда простыми, хотя такая простота, конечно, наступала только после того, как он их блестяще разрешал.

После войны Ферми принял должность профессора физики Чикагского университета. Используя построенный им реактор в качестве источника нейтронов, он открыл новую главу в области ядерной физики — нейтронную оптику, ряд важных вопросов которой хорошо описан в его переведенной на русский язык книге «Лекции по атомной физике». В этой же книге можно найти обсуждение фундаментальной проблемы нейтронно-электронного взаимодействия, решению которой Ферми посвятил (1947) остроумный опыт.

Создатель ядерной науки Резерфорд сказал, что ученики не позволяют ему стареть. Это утверждение верно для большинства учителей, достойных этого звания. Что же касается Ферми, то до конца своей жизни он был моложе любого своего ученика или сотрудника. И до конца своих дней Ферми оставался студентом, всегда полным страстного желания получить новые знания.

В возрасте около 50 лет Ферми, имевший в своем распоряжении ряд реакторов для фундаментальных исследований в крайне интересной, им же созданной области, решает полностью изменить направление своей деятельности и посвящает себя исследованиям частиц высоких энергий. В частности, его привлекает одна из центральных проблем современной физики — проблема мезон-нуклонного взаимодействия. Его работа (1953) о рассеянии положительных и отрицательных λ -мезонов разных энергий

протонами открыла новую главу экспериментальной и теоретической физики.

В работах по рассеянию π -мезонов на водороде особенно ярко выявляется личность Ферми как выдающегося теоретика и экспериментатора. Что он в этих работах участвовал не только как руководитель, но и как непосредственный исполнитель, видно хотя бы из того, что он был ответственным за конструкцию таких деталей, как внутренняя мишень синхротрона, управляемая дистанционно.

В работах о π -мезонах, как и в других работах, неизгладимый след, оставленный Ферми, выражался не только в содержании, но также и в особые методических подходах, в новых научных выражениях и даже в крайне удачных обозначениях. Между прочим, Ферми был того мнения, что вопрос о простоте обозначений имеет первостепенное значение в теоретической физике.

Невозможно получить представление обо всем труде, вложенном Ферми в теоретические работы, только по тем из них, которые опубликованы: для опубликования была отобрана лишь незначительная часть всех работ. Вот почему нет ни одной выдающейся теоретической работы Ферми.

Из теоретических статей Ферми в области высоких энергий особое место занимают две, касающиеся так называемого фермиевского механизма ускорения первичных космических лучей и теории множественного образования мезонов. Обе основаны на идее, столь же простой, как и позитивной.

В основе объяснения (1949) механизма ускорения первичных частиц в космических лучах лежит следующее рассуждение, основанное на принципе равномерного распределения энергии. Рассмотрим соударения микро-частиц с движущимися макроскопическими телами. Хотя в одном столкновении частицы могут потерять или увеличить свою энергию, в конечном счете имеется тенденция к статистическому равновесию, а это значит, что частицы в среднем ускоряются в соударениях с макроскопическими телами. В теории Ферми заряженные частицы отклоняются магнитными полями, связанными с проводящим газом, и в конце концов стремятся приобрести энергию, равную энергии движущегося газа в целом.

В теории множественного образования частиц (1950) процесс соударения при очень высоких энергиях рассматривается при помощи статистических и даже термодинамических методов. Теорию значительно расширили и усовершенствовали советские физики.

Все труды Ферми характеризуются крайней конкретностью. Его теории все созданы, чтобы объяснить, скажем, поведение определенной экспериментальной кривой, «странность» данного экспериментального факта и т. д.

В двадцатых годах этого столетия, когда основные принципы физики претерпевали коренную ломку, молодому Ферми без учителей должно было быть крайне трудно ориентироваться. Не исключено, что черты, присущие Ферми,— конкретность, ненависть к неопределенности, исключительный здравый смысл,— содействуя ему в создании многих фундаментальных теорий, в то же время в этих условиях не позволили ему создать такие теории и принципы, как квантовая механика, соотношение неопределенностей и принцип Паули.

В заключение хочется отметить, что после смерти Ферми некоторые его работы на фоне развития современной физики оказались даже более глубокими, чем считались в то время, когда автор их написал. В качестве примера можно упомянуть его открытие (1952) резонансного взаимодействия пиона и нуклона в состоянии с определенными квантовыми числами. После того, когда Ферми уже не стало, физика резонансных состояний элементарных частиц превратилась в важнейшую главу современной физики. Очень жаль, что Ферми не смог увидеть этого! Он, конечно, был бы главным действующим лицом и в этом деле.



6 коп.

Индекс
70072

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1966