

Неуловимое НЕЙТРИНО

Б. ПОНТЕКОРВО,
член-корреспондент Академии
наук СССР

Рисунки Л. КАТАЕВА

СКВОЗЬ МИЛЛИАРДЫ МИЛЛИАРДОВ КИЛОМЕТРОВ ЧУГУНА

В микромире, где предметом исследований являются так называемые элементарные частицы, физик встречает много неожиданностей. И, безусловно, самая удивительная элементарная частица — это нейтрино.

Не так просто дать четкое определение элементарной частицы. Договоримся называть так микрообъекты, структура которых пока совсем не известна. Согласно этому определению атомы не являются элементарными частицами (ведь доказано, что они состоят из электронов и атомных ядер). То же можно сказать об атомных ядрах, которые сложены из нуклонов (нейтронов и протонов). Нейтрино же полностью выполняет требование, предъявляемое на «соискание» имени элементарной частицы: о его структуре не известно ровно ничего.

А удивительные свойства нейтрино лучше всего выражаются в его потрясающей проникающей способности: оно может беспрепятственно пронизывать огромные толщи вещества, скажем, чугунную плиту, толщина которой в миллиарды раз превышает расстояние от Земли до Солнца!

Здесь у читателя встает вопрос: как же можно поймать эту неуловимую частицу? И вообще как можно утверждать, что она существует?

На этот совершенно законный вопрос мы ответим позднее. Пока достаточно сказать, что громадная проникающая способность нейтрино объясняется чрезвычайно слабым взаимодействием его с другими элементарными частицами. О характере таких взаимодействий и надо рассказать прежде всего.

СИЛЬНЫЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ, СЛАБЫЕ

Читателю знакомы разные силы. Но, может быть, он никогда не задумывался над тем, что типов взаимодействия, глубоко различающихся по природе, 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 знакомы физике давно. Благодаря им движущийся неравномерно электрический заряд (скажем, электрон в атоме) испускает электромагнитные волны (например, видимый свет). С этим классом взаимодействий связаны также все молекулярные явления — поверхностное натяжение, капиллярность, адсорбция, текучесть. Электро-

магнитные взаимодействия, теория которых блестяще подтверждается опытом, глубоко связаны с электрическим зарядом элементарных частиц.

Теперь о сильных взаимодействиях. Они стали известны только после раскрытия внутренней структуры атомного ядра.

В 1932 году было найдено, что атомное ядро состоит из нуклонов (нейтронов и протонов). И именно сильные взаимодействия соединяют нуклоны в ядре — отвечают за ядерные силы, которые, в отличие от электромагнитных, характеризуются очень малым радиусом действия (около 10^{13} см) и большой интенсивностью.

Кроме того, сильные взаимодействия появляются при столкновениях частиц высоких энергий с участием так называемых пи- и К-мезонов, а также гиперонов. Об этих и других элементарных частицах читатель найдет сведения в таблице (см. стр. 15).

Интенсивность взаимодействий удобно оценивать по так называемой длине свободного пробега частиц в некотором веществе, то есть средней величине пути, который частица может пройти в этом веществе до разрушающего или сильно отклоняющего соударения. Ясно, что чем больше длина свободного пробега, тем менее интенсивно взаимодействие.

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

Иначе обстоит дело при слабых взаимодействиях.

Как мы уже сказали, нейтрино обладает колоссальной проникающей способностью. Длина его свободного пробега в плотном веществе измеряется в астрономических единицах. Это отражает малую интенсивность одного типично слабого взаимодействия — между нейтрино и нуклонами.

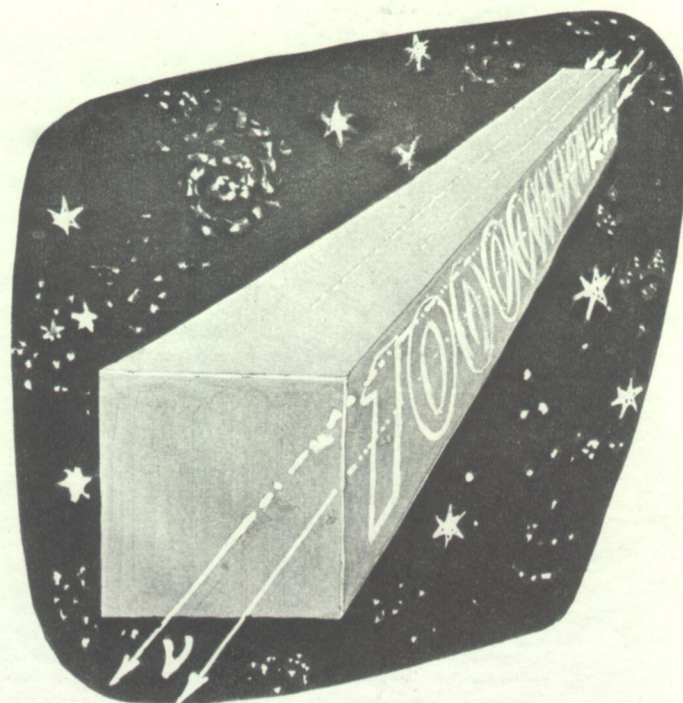
Впрочем, не только нейтрино испытывают слабые взаимодействия. Такое свойство характерно и для всех других элементарных частиц. Нейтрино же отличается тем, что не подвержено ни сильному, ни электромагнитному взаимодействиям (у нейтрино нет электрического заряда). Таким образом, нейтрино — почетный представитель частиц испытывающих слабые взаимодействия в чистом виде.

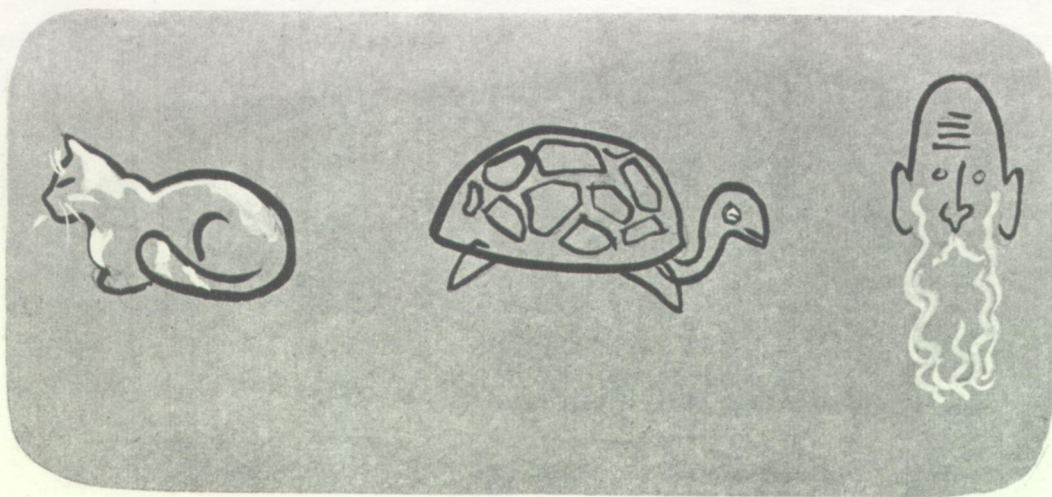
Нам остается привести некоторые примеры процессов, обусловленных слабыми взаимодействиями. Это, конечно, редчайшие соударения нейтрино с электронами и нуклонами при его прохождении через вещество. Зарегистрировать такие события необычайно трудно. Но

имеется ряд «слабых» процессов, более доступных исследованию. Речь идет о многочисленных спонтанных (самопроизвольных) превращениях элементарных частиц. Оказывается, что почти все такие превращения обусловлены слабыми взаимодействиями. И лучше других изучен так называемый бета-распад нуклона, когда одно ядро переходит в другое, испуская электрон и нейтрино.

Надо сказать, что любое спонтанное превращение характеризуется некоторым временем (его обозначают греческой буквой — τ), определяющим среднюю продолжительность жизни частиц до распада. Процессы, вызванные слабыми взаимодействиями, часто называют «медленными», так как время для них относительно велико. Это отмечено на нашей таблице. Читатель, правда, может удивиться тому, что явление, происходящее, скажем, за 10^{10} (одну десятиллиардную долю) секунды, классифицируется как медленное. Но все познается в сравнении. В мире элементарных частиц такой промежуток времени, действительно, весьма продолжителен.

Нейтрино свободно пронизывает миллиарды миллиардов километров чугуна.





Разная длительность жизни так же характерна для микрочастиц, как и для обитателей нашего мира.

В микромире естественной единицей длины будет пробег, равный радиусу ядерных сил (10^{-13} см). 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. Такое время характерно для сильных взаимодействий. Время же 10^{10} сек. для «граждан» микромира гораздо дольше, чем для нас с вами весь период существования жизни на Земле.

ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ

В нашей таблице читатель видит такие названия частиц, как антинейтрон, антипротон, антинейтрино. Приставка «анти» наводит на мысль о какой-то «противоположности». Это так и есть.

Понятие античастицы было введено более 30 лет тому назад английским физиком Дираком. Путем глубоких теоретических исследований он пришел к выводу о том, что наряду с обычными электронами, обладающими отрицательным электрическим зарядом, должны существовать антиэлектроны, наделенные зарядом положительным. Этот «антиэлектрон» или положительный электрон (позитрон, как его называют) с массой, тождественной массе обычного отрицательного электрона, был открыт в 1932 году.

Теоретический вывод об антиэлектронах справедлив и для других элементарных частиц. В природе имеет место очень красивая симметрия, которая в последние несколько лет была окончательно подтверждена рядом фундаментальных опытов. Каждой элементарной частице соответствует ее двойник, имеющий одинаковую массу и противоположный знак заряда.

Эта формулировка, правда, не полна. Элементарные частицы характеризуются не только электрическим зарядом. Существуют также иные типы «заряда», не имеющие отношения к электромагнитным свойствам частиц. Такие неэлектрические типы заряда пока еще не обсуждаются в элементарных учебниках физики, но, несомненно, вскоре они станут достоянием всех любителей науки.

Отличительное свойство зарядов всех типов состоит в том, что они квантованы, то есть могут иметь только дискретные величины. В разных превращениях они сохраняются точно так же, как электрический. Именно тот факт, что некоторые (на первый взгляд возможные) превращения частиц на самом деле не наблюдаются, заставил ввести понятие разных зарядов. Неуничтожимость заряда (любого типа, а не только электрического) запрещает эти превращения.

Например, мы знаем, что нуклоны никогда не распадаются только на «легкие» частицы. Почему? Потому, что всякий нуклон имеет так называемый барионный заряд (помимо того, что протон имеет еще и электрический), а никакая комбинация легких частиц барионного заряда не имеет.

Забегая вперед, придется уже сейчас сказать читателю, что нейтрино и другие частицы, именуемые лептонами, наделены третьим типом заряда — «нейтрино-зарядом». Неуничтожимость его также ограничивает число возможных превращений легких частиц.

В связи с этим надо отметить вот что. Каждой элементарной частице соответствует античастица со значениями всех зарядов, одинаковыми по величине, но противоположными по знаку. Значит, даже электрически нейтральная частица может отличаться от своей античастицы. Пример — нейтрон, который является электрически нейтральным, но имеет отличную от нуля величину барионного заряда.

Конечно, если все заряды данной частицы равны нулю, то частица тождественна со своей античастицей; она истинно нейтральна, то есть лишена всех зарядов. Таких истинно нейтральных частиц в природе известно только четыре: фотон, нейтральный пион, нейтральный каон-1 и нейтральный каон-2.

Отметим, наконец, характерное свойство частиц и античастиц: сталкиваясь друг с другом, они, как говорят физики, «аннигилируют» — превращаются в другие частицы, суммарный заряд которых равняется нулю. Ведь суммарный заряд (электрический, барионный и нейтринный) пары «частица-античастица» равен нулю, и ничто не запрещает превращения этой пары в систему частиц тоже с суммарными зарядами, равными нулю. В частности, при аннигиляции всегда имеется возможность испускания только фотонов.

ПОЧЕМУ ПРИДУМАЛИ НЕЙТРИНО!

После наших предварительных разговоров читатель легче поймет свойства нейтрино.

Я уже обещал ответить на вопрос о том, как физики узнали о существовании этой «неулови-

мой» частицы. Боюсь, что разочарую вас или, по крайней мере, разбуду ваш «здоровый скептицизм», если скажу, что нейтрино около 30 лет тому назад было открыто... теоретически. Поэтому я хочу сразу успокоить читателей: недавно нейтрино наблюдалось и экспериментально.

«Теоретическое открытие» частицы было сделано в 1931 году швейцарским физиком Паули. А имя ей дал итальянский физик Ферми. «Нейтрино» по-итальянски значит «маленький нейтральный», вероятно, по-русски можно было бы сказать «нейтральненький».

«Изобретение» нейтрино вызвано кажущимся парадоксом, обнаруженным при исследовании явления бета-радиоактивности.

Рассмотрим, например, процесс бета-распада нейтрона, который, как нам сегодня известно, происходит по схеме:

нейтрон → протон + электрон + антинейтрино.

Наблюдатели «донецких времен» думали, что распад этот происходит по схеме:

нейтрон → протон + электрон (без электрически нейтральных частиц).

Тут-то и получался парадокс: измеренные энергии вылетающего электрона оказались не строго определенными, а самыми разнообразными. В некоторых случаях у продуктов реакции явно не хватало энергии. Создавалось впечатление, что она куда-то исчезает. Трудности были настолько серьезными, что знаменитый ученый Нильс Бор даже предлагал отказаться от закона сохранения энергии!

А «изобретатель» нейтрино рассуждал так: если характеристики бета-распада несовместимы с принципом сохранения энергии, значит этот процесс неправильно описан. В распаде должна участвовать ненаблюдаемая в опыте нейтральная частица, уносящая «исчезнувшую» энергию. И хотя в каждом процессе выделяется строго определенная суммарная энергия всех частиц, она распределяется между продуктами распада так, что в разных случаях электрон получает разные ее порции.

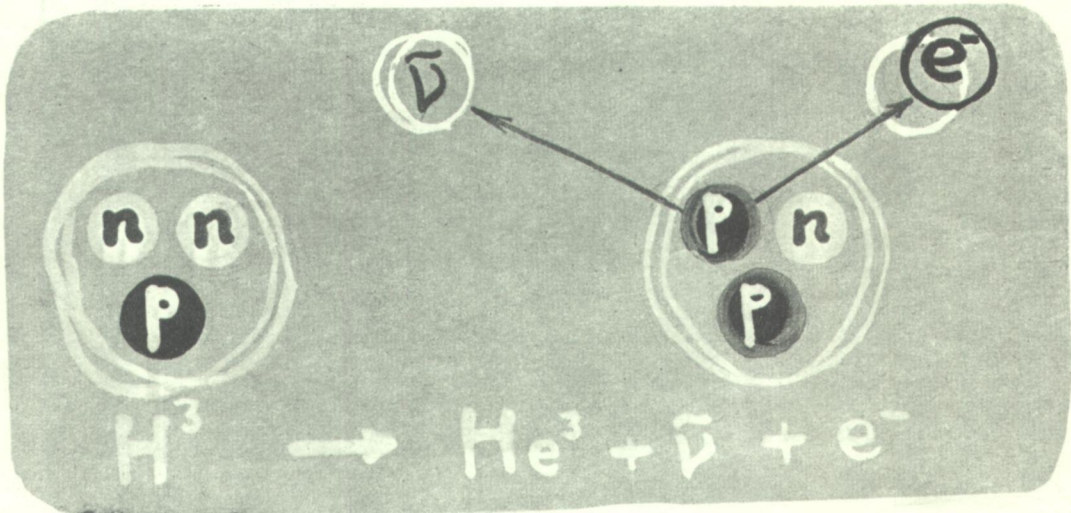
Итак, нейтрино — это частица, которая при бета-распаде уносит часть энергии. Так предположили физики-теоретики. И сразу же были предсказаны свойства новой частицы: она должна быть электрически нейтральной и чрезвычайно малой по массе. Иначе ее было бы нетрудно обнаружить.

После того как гипотеза о существовании нейтрино была сформулирована, физики попытались найти и другие доказательства его присутствия в бета-распаде.

Как известно, при превращениях частиц сохраняется не только энергия, но и импульс. Закон сохранения импульса, вероятно, известен читателю: на нем основан принцип действия ракет.

Если нейтрон, испытывающий бета-распад, неподвижен, то его импульс равен нулю. А тогда и суммарный импульс всех частиц — продуктов распада тоже должен быть равным

Когда ядро сверхтяжелого водорода претерпевает бета-распад, один из нейтронов превращается в протон, электрон и антинейтрино. Так возникает ядро гелия-3.



нулю согласно принципу сохранения импульса. Так ли это?

В многочисленных опытах, первый из которых был поставлен советским физиком Лейпунским, было показано, что суммарный импульс электрона и протона при бета-распаде покоящегося нейтрона не равен нулю. Это подтверждает гипотезу нейтрино: «неуловимая» частица уносит «исчезнувший» импульс.

Подводя итоги, можно сказать, что нейтрино было изобретено «теоретически», что свойства этой «ненаблюдаемой» частицы были постулированы, а затем подтверждены на опытах.

Такое положение господствовало в физике последние 25 лет. За это время нашлись люди, забывшие, что нейтрино вполне материально и в принципе доступно регистрации, что его «ненаблюдаемость» — временная, вызванная лишь трудностями, связанными с уровнем тогдашней экспериментальной техники. Но физики, равно как и читатели этой статьи, вправе требовать «железной» проверки гипотезы нейтрино.

КАК ПОЙМАЛИ «НЕУЛОВИМОЕ»

Поймать «неуловимое» — зафиксировать эффект, вызванный самим свободным нейтрино — вот что было необходимо для окончательного доказательства существования этой удивительной частицы. Сложность задачи состояла в том, что длина свободного пробега нейтрино в твердом веществе, как уже говорилось, измеряется миллионами миллиардов километров. Иными словами, через километр твердого вещества надо пропустить миллион миллиардов нейтрино, чтобы лишь одному из них дать шанс вызвать какой-нибудь эффект. Казалось бы, задача неразрешимая. Но она была решена.

Помогло бурное развитие нейтронной физики, связанное с открытием и техническим освоением атомной энергии.

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 бета-радиоактивных ядер. И если справедлива гипотеза о существовании нейтрино, то в распадах таких ядер нейтроны должны испытывать превращения согласно знакомой нам схеме:

нейтрон → протон + электрон + антинейтрино.

Поэтому мощные реакторы должны быть интенсивными источниками антинейтрино.

В качестве примера рассмотрим атомный реактор мощностью 300 тысяч киловатт. Полный поток энергии антинейтрино от него составит десятки тысяч киловатт. Очень много! И все же уловить «проскальзывающие» частицы крайне трудно.

О попытке зафиксировать нагрев вещества не может быть и речи. Калориметрические измерения здесь невозможны. Для того чтобы, скажем, половина энергии, перенесенной этим потоком частиц, освободилась в виде тепла, необходимо поглотитель массой 10^{50} тонн, что неизмеримо превышает массу Солнца.

Зато регистрация отдельных событий, вызванных антинейтрино, возможна! Каким же способом?

Физики предсказали любопытный ядерный процесс, который, несомненно, может быть вызван нейтрино и антинейтрино, если они существуют, — процесс обратный бета-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:

антинейтрино + протон → нейтрон + позитрон

Вероятность этого процесса, если он правильно описан, 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 нами реактор мощностью в 300 тысяч киловатт вполне пригоден для этой цели.

Каждую секунду такой реактор испускает около $5 \cdot 10^{19}$, то есть больше 10 миллиардов миллиардов антинейтрино! На расстоянии 10 метров от реактора через каждый квадратный сантиметр ожидаемый поток антинейтрино составит примерно 10^{13} частиц в секунду. Такой поток антинейтрино, бомбардирующий тонну водородсодержащего вещества (иначе говоря, запас протонов), по расчету должен каждый час вызвать около 100 превращений протонов в нейтроны.

И это предвидение сбылось. Оно подтвердилось в блестящем опыте, выполненном в 1957 году американскими физиками Райнсом и Коузном.

«Неуловимая» частица была, наконец, поймана.

Несколько слов о постановке эксперимента. Поток антинейтрино направлялся в огромный «сцинтилляционный» счетчик — цистерну с водородсодержащим веществом, способным испускать вспышку света («сцинтилляцию»), когда через него проходила электрически заряженная частица. Каждую такую вспышку регистрировали фотоэлементы.

Явления происходили в следующем порядке.

Как только протон, которому выпала судьба встретиться антинейтрино, превращался в нейтрон и позитрон, последний давал вспышку и регистрировался фотоэлементами. А 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.

Как видите, 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. Пришлось использовать более ста фотоумножителей. Необходимость громадной величины сцинтиллятора вызвана тем, что благодаря «инертности» антинейтрино меньший объем прибора привел бы к очень незначительному числу регистрируемых событий. Для подготовки и выполнения этого уникального эксперимента потребовалось более пяти лет!

Таблица элементарных частиц.

НАЗВАНИЕ ЧАСТИЦ	ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧ.	ЭЛЕКТРИЧ. ЗАРЯД	БАРИОННЫЙ ЗАРЯД	НЕЙТРИННЫЙ ЗАРЯД	МАССА (В ЕД. МАССЫ ЭЛЕКТРОНА)	ПРОДУКТЫ РАСПАДА	КЛАСС ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ОТВЕЧАЮЩЕГО ЗА РАСПАД	ПРИБЛИЖЕН. ВРЕМЯ ЖИЗНИ τ (СЕК)	
ФОТОН	γ	0	0	0	0				
НЕЙТРИНО	ν	0	0	-	0			∞	ЛЕПТОНЫ
АНТИНЕЙТРИНО	$\bar{\nu}$	0	0	+	0			∞	
ЭЛЕКТРОН	e^-	-	0	-	1			∞	
ПОЗИТРОН	e^+	+	0	+	1			∞	
ОТРИЦАТ. МЮОН	μ^-	-	0	-	206	$e^- + \nu + \bar{\nu}$	СЛАБОЕ	10^{-6}	МЕЗОНЫ
ПОЛОЖИТ. МЮОН	μ^+	+	0	+	206	$e^+ + \nu + \bar{\nu}$	СЛАБОЕ	10^{-6}	
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ПИОН	π^-	-	0	0	273	$\mu^- + \bar{\nu}; e^- + \bar{\nu}$	СЛАБОЕ	10^{-8}	
НЕЙТРАЛЬНЫЙ ПИОН	π^0	0	0	0	264	$\gamma + \gamma$	ЭЛЕКТРОМАГН.	10^{-16}	
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ПИОН	π^+	+	0	0	273	$\mu^+ + \nu; e^+ + \nu$	СЛАБОЕ	10^{-8}	
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ КАОН	K^-	-	0	0	967	$\mu^- + \nu; \pi^- + \pi^0; \pi^- + \pi^+$	СЛАБОЕ	10^{-8}	
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ КАОН	K^+	+	0	0	967	$\mu^+ + \nu; \pi^+ + \pi^0$	СЛАБОЕ	10^{-8}	
НЕЙТРАЛЬНЫЙ КАОН-ОДИН	K^0_1	0	0	0	973	$\pi^+ + \pi^-; \pi^0 + \pi^0; \pi^+ + \pi^- + \nu; \pi^0 + \pi^0 + \nu$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
НЕЙТРАЛЬНЫЙ КАОН-ДВА	K^0_2	0	0	0	973	$\pi^+ + \pi^- + \nu; \pi^0 + \pi^0 + \nu; e^+ + \pi^- + \nu; e^- + \pi^+ + \nu$	СЛАБОЕ	10^{-7}	
НЕЙТРОН	n	0	+	0	1839	$p + e^- + \bar{\nu}$	СЛАБОЕ	10^3	НУКЛОНЫ И АНТИНУКЛОНЫ
АНТИНЕЙТРОН	\bar{n}	0	-	0	1839	$\bar{p} + e^+ + \nu$	СЛАБОЕ	10^3	
ПРОТОН	p	+	+	0	1833			∞	
АНТИПРОТОН	\bar{p}	-	-	0	1836			∞	
ЛЯМБДА НОЛЬ	Λ^0	0	+	0	2182	$\pi^+ + p; \pi^0 + n$	СЛАБОЕ	10^{-10}	БАРИОНЫ И АНТИБАРИОНЫ
АНТИЛЯМБДАНОЛЬ	$\bar{\Lambda}^0$	0	-	0	2182	$\pi^+ + \bar{p}; \pi^0 + \bar{n}$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
СИГМА ПЛЮС	Σ^+	+	+	0	2328	$\pi^+ + n; \pi^0 + p$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
АНТИСИГМАПЛЮС	$\bar{\Sigma}^+$	-	-	0	2328	$\pi^- + \bar{n}; \pi^0 + \bar{p}$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
СИГМА НОЛЬ	Σ^0	0	+	0	2326	$\Lambda^0 + \gamma$	ЭЛЕКТРОМАГН.	?	
АНТИСИГМАНОЛЬ	$\bar{\Sigma}^0$	0	-	0	2326	$\bar{\Lambda}^0 + \gamma$	ЭЛЕКТРОМАГН.	?	
СИГМА МИНУС	Σ^-	-	+	0	2342	$\pi^- + n$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
АНТИСИГМАМИНУС	$\bar{\Sigma}^-$	+	-	0	2342	$\pi^+ + \bar{n}$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
КСИ МИНУС	Ξ^-	-	+	0	2585	$\Lambda^0 + \pi^-$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
АНТИКСИМИНУС	$\bar{\Xi}^-$	+	-	0	2585	$\bar{\Lambda}^0 + \pi^+$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
КСИ НОЛЬ	Ξ^0	0	+	0	?	$\Lambda^0 + \pi^0$	СЛАБОЕ	10^{-10}	
АНТИКСИНОЛЬ	$\bar{\Xi}^0$	0	-	0	?	$\bar{\Lambda}^0 + \pi^0$	СЛАБОЕ	10^{-10}	

В ПОИСКАХ НЕЙТРИНО-ЗАРЯДА

Распад нейтрона был записан выше несколько «догматично». «Неуловимую» частицу, возникающую в продуктах распада, мы назвали антинейтрино. Почему же антинейтрино, а не нейтрино?

Это название выбрано совершенно произвольно и только по соображениям удобства.

Такие условности в физике бывают нередко. Скажем, ничего не изменилось бы, если бы мы в один прекрасный день решили считать электрический заряд электрона положительным. Конечно, автоматически заряд у антинейтрона стал бы отрицательным.

Итак, мы называем антинейтрино ту частицу, которая испускается в бета-распаде совместно с электроном (когда нейтрон превращается в протон). Но физики давно знают и другой процесс, именуемый «бета-плюс-распадом», когда протон внутри атомного ядра самопроизвольно превращается в нейтрон, позитрон и «неуловимую» нейтральную частичку. И вот здесь эту частичку мы должны назвать нейтрино.

Однако пока совершенно не ясно, отражают ли эти два названия реальную суть вещей или являются чисто формальным делом. Нам надо выяснить, отличаются ли по каким-то характеристикам нейтрино от антинейтрино. Или они тождественны? Иными словами, нужно экспериментально выявить нейтрино-заряд. Надо выяснить опытом: является ли нейтрино частицей истинно нейтральной, то есть нейтральной по отношению ко всем видам заряда?

Вы уже знаете ответ на такой вопрос: да, нейтрино отличается от антинейтрино, и обе эти частицы обладают противоположными нейтрино-зарядами.

Как же это было доказано?

Принцип эксперимента, предложенного почти 15 лет назад, читатель, внимательно следивший за предыдущими строками, может придумать сам. Я буду помогать ему в решении этой задачи.

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:

нейтрино + протон → нейтрон + позитрон

и
антинейтрино + нейтрон → протон + электрон.

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, будут иметь место обе реакции. Если же различие между нейтрино и антинейтрино связано с различием внутренних свойств этих частиц, то обе эти реакции невозможны.

Итак, для проверки вопроса о различии нейтрино и антинейтрино можно использовать одну из последних реакций. Поскольку нет интенсивных источников нейтрино, а имеются интенсивные источники антинейтрино — урановые реакторы, то удобно исследовать реакцию: антинейтрино + нейтрон → электрон + протон. 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 хлора с атомным весом 37.

Этот крайне трудный опыт был закончен недавно американским физиком Девисом. Было найдено, что процесс антинейтрино + хлор-37 → аргон-37 + электрон не осуществляется. И поэтому, без сомнения, нейтрино и антинейтрино — разные частицы, имеющие противоположные знаки некоего неэлектрического нейтрино-заряда.

Какова природа этого заряда? Ответить окончательно на этот вопрос в настоящее время нельзя. Проблема связана с природой слабых взаимодействий, о которых мы пока знаем очень мало. Однако об одной характерной разнице между нейтрино и антинейтрино кое-что можно сказать. Предупреждаю, что разница, о которой пойдет речь ниже, может быть не единственным отличием нейтрино от антинейтрино.

ЧАСТИЦА — ШТОПОР

Со времени выдвижения гипотезы о нейтрино не было сомнения в том, что нейтрино, если они существуют, должны иметь «спин», т. е. являться вращающимися объектами (в квантово-механическом понятии). При этом ожидалось, что в составе пучка нейтрино одна половина частиц имеет правое вращение, а другая — левое (по отношению к направлению движения). Это ожидание было продиктовано физическим законом, который до 1957 года считался неоспоримым, — «законом сохранения четности».

Согласно закону сохранения четности во всех физических явлениях имеет место строгая право-левая («зеркальная») симметрия, — так что в природе якобы не могут происходить явления, в которых правое преобладает над левым и наоборот.

В нашем случае этот закон запретил бы испускание, как говорят физики, «продольно поляризованных» нейтрино, то есть нейтрино, имею-

щих преимущественно, скажем, левое вращение по отношению к направлению движения.

Кроме того, до 1957 года думали, что имеет место и другая симметрия — «зарядовая», благодаря которой любое физическое явление остается «инвариантным» (то есть описывается тем же математическим законом), когда каждая частица заменяется своей античастицей.

Эта симметрия запретила бы нейтрино иметь только левое вращение, а антинейтрино — только правое.

В 1957 году китайские физики Ли и Янг установили, что при слабых взаимодействиях эти два закона симметрии не имеют места. В экспериментах обнаружилось явление, в которых эти законы явно нарушаются, но обязательно это сразу. А советский физик Ландау показал, что в природе существует более глубокая симметрия, которую он назвал «комбинированной». Новый закон утверждает, что любое явление остается инвариантным, если одновременно правое заменить на левое и каждую частицу заменить ее античастицей.

С точки зрения нового закона нейтринный пучок может быть полностью поляризован. Кроме того, если нейтрино вращаются справа налево, то антинейтрино должны вращаться слева направо по отношению к направлению своего движения. Такая возможность естественно появляется в теории «продольного» нейтрино Ландау, Салама и Ли и Янга. Вместе с тем в этой теории получается, что нейтрино обязаны иметь массу, строго равную нулю, а значит согласно теории относительности скорость их всегда равна скорости света.

Все эти предсказания теории ныне подтверждаются в опытах. Причем доказано, что нейтрино вращается справа налево. Известно, что степень поляризации нейтрино и антинейтрино очень высока. Правда, еще не известно, полностью ли поляризованы неуловимые частицы, как этого требует теория продольного нейтрино, и точно ли равна нулю их масса. Если это окажется верным, мы сможем заключить, что единственная разница между нейтрино и антинейтрино — разное направление их «спиральности». К такой «спиральности» и сведется сущность нейтрино-заряда. Причем нейтрино будет напоминать штопор с бороздками налево.

Если же нейтрино не полностью поляризованы, и их масса, хотя и крайне мала, все-таки не равна нулю, то проблема природы нейтринного заряда становится менее ясной.

БЛИЖАЙШИЕ ЗАДАЧИ

Хочется сказать несколько слов и о других, еще не решенных проблемах физики нейтрино.

Как видно из нашей таблицы, «неуловимые» частицы испускаются вместе с электронами в бета-распаде и совместно с мюонами (мю-мезонами) в распаде пиона (пи-мезона). Являются ли эти «неуловимые» частицы, рождающиеся в совершенно разных процессах, тождественными частицами? Вот одна из центральных проблем сегодняшней физики нейтрино.

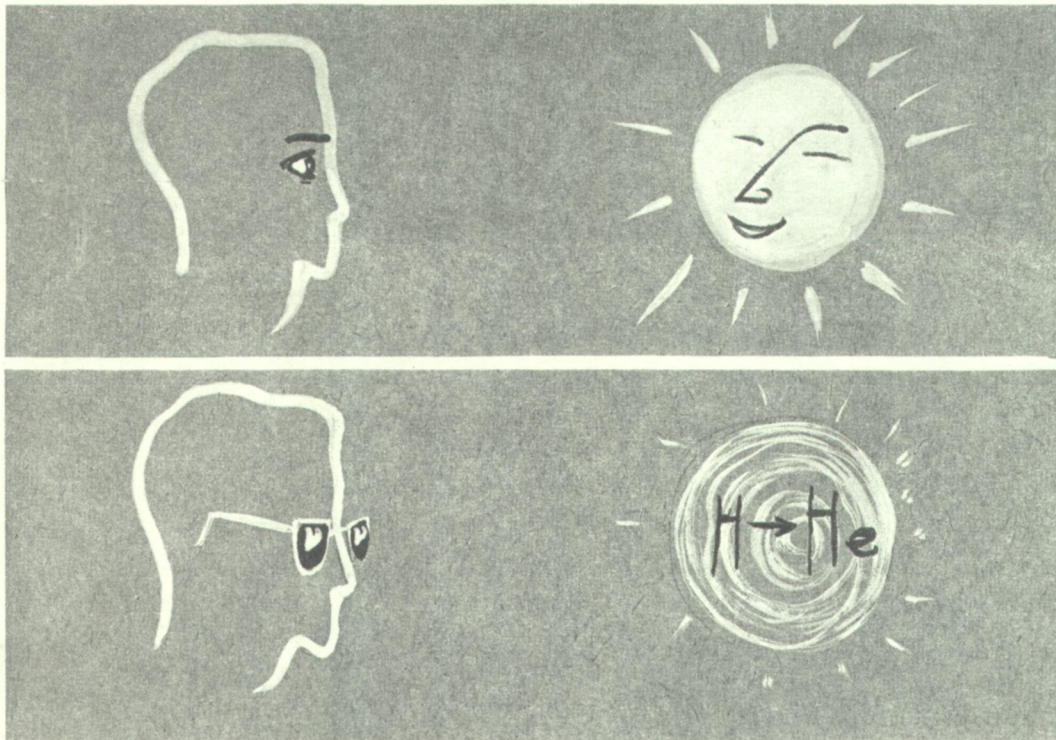
Этому вопросу сейчас уделяется большое внимание. Опыты, предложенные для решения проблемы, требуют огромных средств и мощных ускорителей, разгоняющих заряженные частицы до энергии в сотни миллионов электроновольт. Так можно будет получить интенсивные пучки пионов, которые, распадаясь, создадут потоки нейтрино мезонной природы.

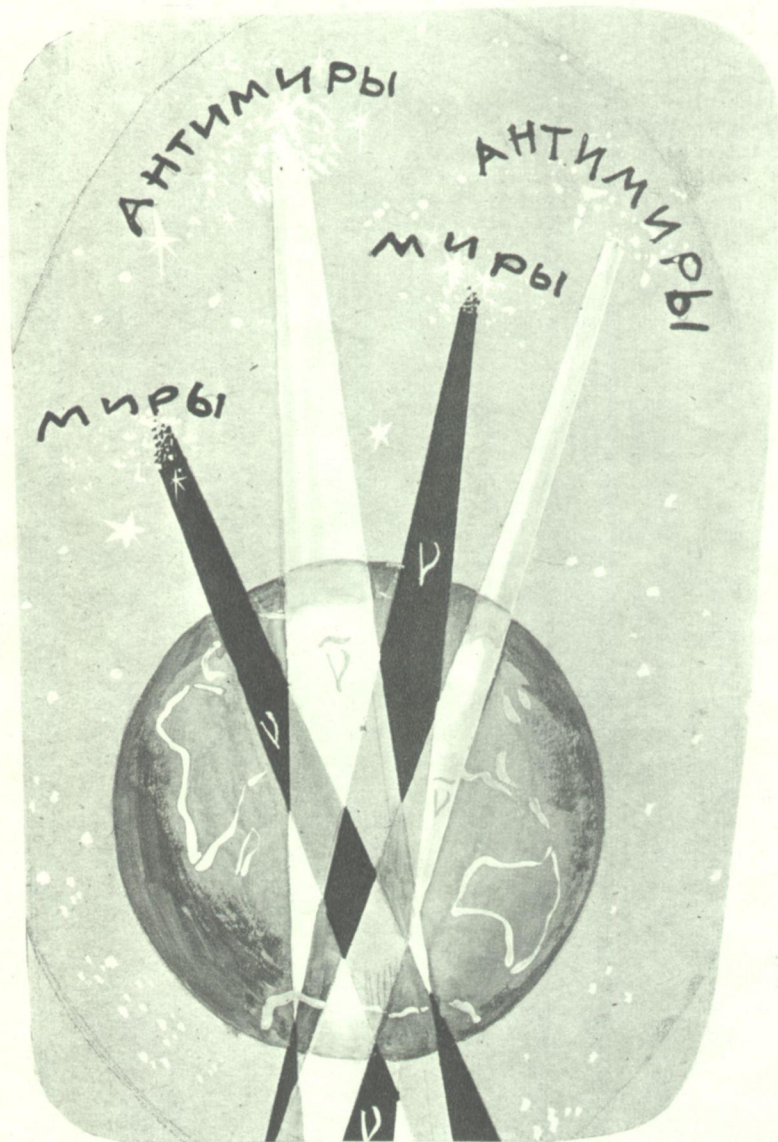
Эксперименты такого рода еще не выполнены. Но они на очереди.

Предстоит решить и другие проблемы новой, только что родившейся области физики — физики нейтрино высоких энергий.

Заслуживает упоминания еще один невыясненный вопрос: имеет ли место рассеяние нейтрино электронами, то есть отклоняется ли нейтрино электронами с вероятностью, сравнимой с вероятностью всех других процессов слабого взаимодействия? Этот вопрос не только крайне важен с точки зрения физики элементарных частиц, но, по-видимому, имеет значение в астрофизике. Недавно было показано, что существование электрон-нейтринного взаимодействия приводит к новому механизму потери энергии звездами, связанному с испусканием нейтрино-антинейтринных пар. Этот

«Увидев» нейтринные потоки Солнца, удастся «разглядеть» подробности процессов, протекающих в солнечных недрах.





От «миров» к нам летят потоки нейтрино, от «антимиров» — антинейтрино.

механизм играет роль на таких стадиях эволюции звезд, когда их температура очень высока.

Впрочем, проблем нейтринной астрофизики много, и им следует посвятить отдельную главу.

НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА

Колоссальная проникающая способность нейтрино наводит на мысль о том, что они могут играть важную роль в космических явлениях. Мысль, безусловно, верная и интересная. На ее основе недавно родилась новая область науки — нейтринная астрофизика, описывающая многочисленные явления, в которых первостепенную роль играют нейтрино.

Имеются две стороны нейтринной астрофизики.

Во-первых, нейтрино участвуют в ряде ядерных процессов, которые, как известно, происходят 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 в космогонии.

Во-вторых, нейтрино, вылетающие из звезд и вообще из космического пространства, могут быть зарегистрированы в опытах, выполненных на Земле. Таким образом, есть надежда 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, я сказал «прак-

тически единственный тип», поскольку в последнее время с позиций астрофизики исследуются также космические лучи. Но об этом здесь не будет идти речь.

Представьте себе, что со временем физики и астрофизики, работая совместно, получат возможность регистрировать интенсивность и энергию нейтрино и антинейтрино, летящих от отдельных звезд и от космического пространства. Тогда в руках исследователей появятся мощные дополнительные способы решения астрофизических проблем. Заметим, в частности, что, когда астрофизики регистрируют элек-

тромагнитные волны, они не «смотрят» глубоко внутрь звезд, ибо эти волны исходят только с поверхностного слоя небесных тел. Регистрация же нейтрино даст возможность «заглянуть» очень глубоко внутрь звезд. Ведь нейтрино могут пронизывать Солнце легче, чем свет — оконное стекло!

Разумеется, многое из сказанного выше, хотя и принципиально возможно, но пока очень далеко от практического осуществления. Однако некоторые вопросы могут быть решены сегодня или в весьма близком будущем. Сначала я остановлюсь именно на них.

Речь будет идти о Солнце.

Известно, что источником энергии Солнца являются термоядерные реакции, в которых при высоких температурах водород в конечном счете превращается в гелий. 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 (и поэтому возможность регистрации) нейтрино сильно зависят от энергии «неуловимых» частиц. Следовательно, число зарегистрированных нейтрино разных энергий будет давать сведения о том, какие реакции происходят в «глубинах» Солнца.

Из теоретических соображений уже достаточно хорошо известно, что Солнце испускает именно нейтрино, а не антинейтрино. Причем энергия, испускаемая Солнцем в виде нейтрино, довольно велика: она составляет несколько процентов всей энергии, излучаемой светилом! Полное число нейтрино от Солнца также известно, хотя и грубо. Первоочередная задача экспериментальной нейтринной астрофизики — определить с достаточной точностью это число.

Как же выполнить измерения?

На каждый квадратный сантиметр поверхности Земли «падают» ежесекундно десятки миллиардов нейтрино. Огромная величина! И хотя «поймать» даже столь «густой» поток «неуловимых» частиц все равно очень трудно, задача эта разрешима сегодня. Тут приходит на помощь уже знакомая нам реакция — взаимодействие нейтрино с атомным ядром хлора-37. В качестве «мишени» для нейтрино можно использовать несколько десятков тонн четыреххлористого углерода — вещества дешевого и широко распространенного. Напомню, что эта реакция характерна для регистрации именно нейтрино, а не антинейтрино, причем состояние сегодняшней техники таково, что допускает «ловлю» нейтрино с энергией больше миллиона электроновольт, если поток частиц не меньше 10 миллиардов штук в секунду через каждый квадратный сантиметр.

«Античеловек», если бы он существовал, был бы... левой. Прикосновение к нему вызвало бы взрыв — аннигиляцию.



Нет сомнения в том, что первый шаг экспериментальной нейтринной астрофизики будет сделан в ближайшем будущем именно при исследовании излучения Солнца.

АНТИМИРЫ

Для того чтобы сделать следующий шаг — измерять нейтринные потоки от космического пространства и от отдельных галактик, необходимо увеличить чувствительность современных методов регистрации нейтрино и антинейтрино больше чем в сто тысяч раз. Как это сделать, пока неясно. Поэтому я не буду останавливаться подробно на этих вопросах, а проиллюстрирую только одну принципиальную возможность, которая открывается нейтринной астрофизикой. Это касается весьма интересующей любителей науки проблемы антимиров — миров, целиком построенных из античастиц.

Такие античастицы, как позитроны и антипротоны, удается искусственно получать в физических лабораториях. Например, в столкновениях двух протонов при сверхвысокой энергии мы можем рожать протон-антипротонную пару. Однако античастицы, создаваемые в лабораториях, живут слишком мало: они быстро аннигилируют при столкновении с обычными частицами. Таким образом, о приготовлении в нашем мире макроскопического «кусочка» антиматерии, скажем антиводорода (атомы которого состоят не из протонов и электронов, как водород, а из антипротонов и позитронов), и думать нельзя. Но тогда получается ситуация вроде парадоксальной. Мы говорим о симметрии, но видим вокруг себя несимметричную природу: ведь мы наблюдаем только вещи, а не антивещи, мы знаем вино (антивино нигде нельзя найти), у всех нас сердце слева (я прошу прощения у тех, кто имеет сердце с правой стороны).

Парадокс этот может быть разрешен тем, что антиматерия (если мне позволят шутку — античеловек с сердцем справа) существует не в нашем мире, а в глубинах Вселенной, в других мирах и галактиках. В этих антимирах находится только антивещество, а для вещества нет места, равно как у нас на Земле нет места для антивещества.

Мы не будем вдаваться в подробности, но зададим вопрос, могут ли наблюдения на Земле сказать нам, существуют ли антимирры? Пусть мы видим какое-то небесное тело и хотим узнать издалека, из материи или антиматерии оно построено?

Сразу скажем, что наблюдение света и вообще электромагнитных волн никак не может ответить на этот вопрос. Свет, испускаемый, скажем, атомом водорода, тождествен свету, испускаемому атомом антиводорода (ведь кванты света — фотоны — являются истинно нейтральными частицами, они не имеют никаких зарядов и неотличимы от своих античастиц).

А как обстоит дело в случае нейтринного излучения?

Мы уже говорили, что Солнце испускает нейтрино, а не антинейтрино. Это будет справедливо для любых звезд, где основной источник энергии — термоядерные реакции, превращающие водород в гелий. Представим себе антисолнце, внутренние процессы которого аналогичны солнечным. Значит источником энергии там послужит превращение антиводорода в антигелий. Такие антисолнца дадут свет, неотличимый от света нашего Солнца. Однако они будут испускать антинейтрино, а не нейтрино! Поэтому если человек экспериментально определит, что далекая галактика излучает поток антинейтрино, он с уверенностью скажет: эта галактика — не что иное, как антимир.

Правда, надо предостеречь читателя от слишком оптимистического представления о возможности решения изложенного вопроса. Действительно, антимирры, если они существуют, находятся очень далеко от нас. Потоки антинейтрино, доходящих от них к Земле, ничтожно малы. И регистрация их сегодня является только принципиальной возможностью.

Но и это достаточно интересно!