

нов на два заряженных  $\pi$ -мезона, что строго запрещено  $CP$ -инвариантностью. В большинстве случаев  $K_2^0$ -мезон, являющийся комбинированно-нечетной системой, распадается на три  $\pi$ -мезона. Комбинированная четность состояний ( $2\pi^0$ ) и ( $\pi^+$  и  $\pi^-$ ) положительная, а состояния ( $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$ ) может быть, как положительной, так и отрицательной. Таким образом, возможность распада  $K_2^0$  как на три, так и на два  $\pi$ -мезона указывает на несохранение  $CP$  в слабых взаимодействиях. Это создает трудность фундаментального характера.

В теории элементарных частиц важное значение имеют 3 типа скачкообразных преобразований, определяемых: заменой частицы на античастицу (зарядовым сопряжением —  $C$ ), заменой  $\vec{r}$  на  $-\vec{r}$  (инверсией пространства —  $P$ ) и заменой  $T$  на  $-T$  (инверсией времени, меняющей знаки скоростей, а следовательно, импульсов и проекции спинов всех частиц). Существующая — хотя и несовершенная — квантовая теория элементарных частиц инварианта относительно произведения преобразований  $C$ ,  $P$  и  $T$ :  $CPT=1$  (так называемая  $CPT$ -теорема Людерса — Паули [13]).

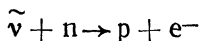
Эксперимент показывает, что сильные взаимодействия с большой степенью точности порознь  $C$ -,  $P$ - и  $T$ -инвариантны. Электромагнитные взаимодействия  $P$ -инвариантны, но, возможно, заметно нарушают  $C$ - (и  $T$ -) инвариантность. Наконец, слабые взаимодействия полностью нарушают  $C$ -,  $P$ - и, возможно,  $T$ -инвариантность. Будущая теория элементарных частиц должна в первую очередь объяснить этот факт.

### § 53. ФИЗИКА НЕЙТРИНО

**Нейтрино и антинейтрино.** Вопрос о нейтрино здесь выделен потому, что эта удивительная элементарная частица, участвующая только в слабых взаимодействиях, уже дала и может дать в будущем много необычайно важных научных сведений. К сожалению, эти сведения получаются с большим трудом из-за крайне малого эффективного сечения взаимодействия нейтрино с веществом, хотя, по-видимому, оно растет с энергией и при  $E \sim 10^{14}$  эв можно ожидать принципиально новых процессов.

После того как в опытах Рейнеса и Коуэна было доказано существование антинейтрино (§ 44), возник вопрос о том, являются ли нейтрино и антинейтрино разными частицами и в чем их отличие друг от друга.

Еще до открытия несохранения четности Дэвис провел опыты, показывающие, что нейтрино и антинейтрино — частицы разные. Если бы нейтрино и антинейтрино были тождественны, то реакция



должна была бы идти с такой же вероятностью, как и реакция

$$\nu + n \rightarrow p + e^-.$$

Поскольку не существует мишени из свободных нейтронов, приходится использовать ядра атомов, внутри которых при облучении нейтрино и антинейтрино могут идти эти реакции. В своих опытах Дэвис использовал четыреххлористый углерод  $CCl_4$ , удобный тем, что из больших масс  $CCl_4$  можно было без особого труда выделить получающийся радиоактивный  $Ar^{37}$ .

Если  $\nu \equiv \bar{\nu}$ , то реакции

$$\bar{\nu} + Cl^{37} \rightarrow Ar^{37} + e^- \quad (1)$$

и

$$\nu + Cl^{37} \rightarrow Ar^{37} + e^- \quad (2)$$

должны быть равновероятными.

Опыты на реакторных антинейтрино показали, что сечение реакции (1) меньше пяти процентов ожидаемого сечения реакции (2). Из этого следует, что  $\nu \neq \bar{\nu}$ .

В чем же различие нейтрино и антинейтрино? Из опытов по несохранению четности в процессах распада с участием нейтрино было получено, что нейтрино продольно поляризованы. При этом нейтрино является левополяризованной частицей, т. е. его спин направлен против импульса, или, говоря языком классической физики, оно представляет собой левый винт. Антинейтрино, напротив, является правополяризованной частицей, т. е. поляризованной по импульсу (правый винт). Эти выводы следуют также и из других экспериментов. Таким образом, различие между  $\nu$  и  $\bar{\nu}$  заключается в различии направлений их «спиральностей». Однако, исчерпываются ли этим различия между нейтрино и антинейтрино, пока неизвестно.

Итак, в настоящее время установлено, что нейтрино и антинейтрино — две различные нейтральные частицы с массой, равной нулю, очень малым или равным нулю магнитным моментом и спином, равным  $1/2\hbar$ . Они имеют различный лептонный заряд, по-разному взаимодействуют с веществом и возникают в различных процессах распада.

Можно показать, что продольно поляризованный, или, как кратко говорят, «продольные» нейтрино должны иметь массу, тождественно равную нулю и равный нулю магнитный момент.

Таблица 10

| Величина                  | По теории продольного нейтрино  | Эксперимент                     |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Электрический заряд . . . | 0                               | 0                               |
| Масса . . . . .           | 0                               | $\leq 60 \text{ эв}$            |
| Спин . . . . .            | 1/2                             | 1/2                             |
| Спиральность . . . . .    | полностью продольно поляризован | степень поляризации $\geq 97\%$ |
| Магнитный момент . . .    | 0                               | $\leq 10^{-9} \mu_B$            |

В табл. 10 перечислены свойства нейтрино, полученные из эксперимента и из теории продольного нейтрино.

Мы видим, что теоретические предсказания и экспериментальные результаты совпадают с точностью до малых ошибок измерений.

**Мюонное и электронное нейтрино.** Гипотеза о том, что существует два типа нейтрино: нейтрино электронное —  $\nu_e$  и нейтрино мюонное —  $\nu_\mu$  — выдвигалась многими исследователями. Основой для нее служил экспериментальный факт отсутствия реакции

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma. \quad (117)$$

Если бы существовало только одно нейтрино, то такая реакция должна была бы иметь место в результате взаимной аннигиляции нейтрино и антинейтрино, рожденных при распаде мюона:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + \gamma.$$

В 1962 г. в Брукхевенской лаборатории под руководством Шварца был закончен эксперимент, в котором изучались реакции, вызываемые нейтрино, образовавшимися при распаде пионов:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

При рассеянии на ядрах они должны давать реакции, обратные  $\mu$ -захвату ( $\mu$ -захват:  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ )

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+;$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-.$$

При этом если  $\nu_\mu \equiv \nu_e$ , то помимо  $\mu$ -мезонов должны наблюдаться также электроны от реакций, обратных  $\beta$ -распаду ( $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ):

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+;$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-.$$

Опыт проводился следующим образом. Мишень из Be, помещенная внутри камеры ускорителя (рис. 104), подверглась бомбардировке быстрыми протонами. На пути различных вторичных частиц, вылетающих из мишени, ставился фильтр  $\Phi$ , пропускавший только  $\pi$ -мезоны. Последние распались на мюон и нейтрино. Магнит отклонял в сторону мюоны, чтобы было возможно выделить пучок  $\nu_\mu$ . В дальнейшем поток нейтрино проходил через железные пластины искровой камеры, общий вес вещества которой достигал 10 т. В течение полугодовой работы был получен десяток тысяч снимков и в них найдено 34 случая рождения  $\mu$ -мезона и не было ни одного случая рождения электрона. Тем самым было доказано, что мюонные и электронные нейтрино не тождественны. Число найденных  $\mu$ -мезонов соответствовало сечению реакции порядка

$10^{-38} \text{ см}^2$ , ожидаемому при таких энергиях нейтрино ( $\approx 500 \text{ Мэв}$ ).

**Нейтрино и астрофизика.** За последние годы сформировалось новое научное направление, названное нейтринной астрофизикой,

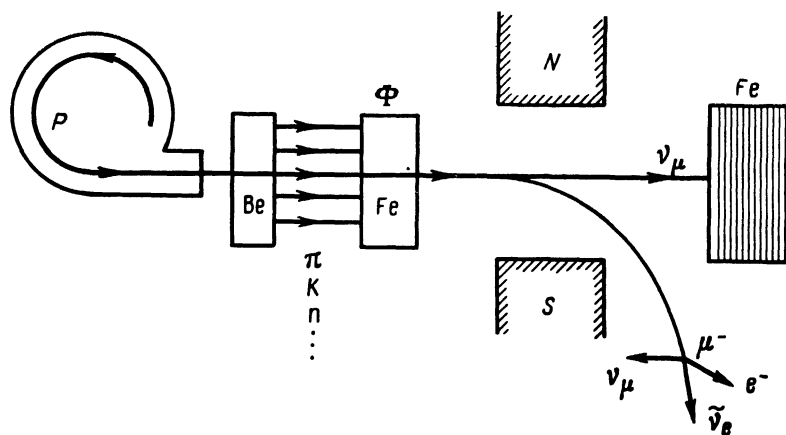


Рис. 104. Схема опыта для доказательства существования двух типов нейтрино

которое занимается получением и анализом информации о физических процессах, идущих внутри звезд: информацию приносят на Землю приходящие из космоса нейтрино.

Согласно современным представлениям, источником энергии Солнца и звезд являются термоядерные реакции (см. гл. 7), в результате которых водород превращается в гелий.

При этом обязательно идет  $\beta$ -распад с испусканием антинейтрино. Плотность потока антинейтрино, приходящего от Солнца на поверхность Земли, должна составлять  $10^{11}$  частиц  $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Около 10% всей энергии, излучаемой Солнцем, уносится нейтрино. Помимо указанной реакции и другие реакции внутри Солнца сопровождаются испусканием нейтрино. Они имеют различные энергетические спектры и различные интенсивности. Поскольку вероятность взаимодействия нейтрино с веществом зависит от их энергии, изучая потоки солнечных нейтрино и характер их взаимодействия, в принципе можно получить важные сведения о явлениях внутри Солнца и проверить правильность наших представлений о физических процессах в центре Солнца.

Особая роль нейтрино в астрофизических процессах связана с их колоссальной проникающей способностью. Долгое время астрономы имели возможность наблюдать единственный доступный нам тип излучения, попадающий на Землю из космического пространства — электромагнитные волны. Все это излучение рождается в поверхностных слоях небесного тела, так как излучение из глубин звезды поглощается в самой звезде. Исследования же с

нейтрино дают возможность заглянуть глубоко внутрь звезд, поскольку звездное вещество остается для них прозрачным.

Предполагают, что значительная энергия излучается в виде нейтрино звездами, находящимися на последней стадии эволюции, когда их недра характеризуются высокими плотностями и температурами. Энергия электромагнитного излучения в этом случае составляет лишь небольшую долю от энергии, уносимой нейтрино.

Так как нейтрино участвует только в слабых взаимодействиях, то основой нейтринной астрофизики и является слабое взаимодействие. Наиболее принятая теоретическая схема слабых взаимодействий, приводит к заключению, что хотя и с очень малой вероятностью, но все же должно существовать рассеяние электронных нейтрино на электронах:

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-;$$

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-.$$

Экспериментального доказательства существования такого процесса пока еще нет. С другой стороны, нет каких-либо соображений, накладывающих запрет на такое электрон-нейтринное взаимодействие. Но, допустив это, мы должны допустить также и существование других процессов подобного типа. В частности, перегруппировав частицы, вместо испускания фотона при электронно-позитронной аннигиляции, мы получим испускание нейтринно-антинейтринной пары ( $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ )

Эффекты, связанные с электрон-нейтринным взаимодействием, могут играть существенную роль только в звездах с большой плотностью и высокой температурой. Поэтому их можно не учитывать в энергетическом балансе Солнца.

Электрон-нейтринным взаимодействием обусловлены и другие процессы, эффективность которых зависит от температуры и плотности звезд.

К числу таких основных процессов можно отнести:

1.  $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$  — упомянутая уже нейтринная аннигиляция электронно-позитронных пар,
2.  $e^- + z \rightarrow e^- + z + \nu + \bar{\nu}$  (где  $z$  — некоторое ядро) — нейтринное тормозное излучение электронов,
3.  $\gamma + e^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$  — фотонейтринный эффект на электроне,
4.  $\gamma + z \rightarrow z + \nu + \bar{\nu}$  — фотонейтринный эффект на ядре.

Несмотря на то что вероятность испускания пары ( $\nu, \bar{\nu}$ ) значительно меньше вероятности испускания фотона, нейтринная светимость звезд сравнима с фотонной уже при температуре звезды  $T \geq 10^8$ , плотности  $\rho \approx 10^3$  г/см<sup>3</sup> и  $Z \geq 10$ . Это является следствием того, что нейтринное излучение идет из всего ядра звезды, а фотонное — только из поверхностного слоя.

Перечисленные выше четыре процесса образования пар ( $\nu$ ,  $\tilde{\nu}$ ) дают разный вклад при различных температурах звезд.

Если  $T < 10^{-8^\circ}$ , то идет в основном процесс (2); при  $T \approx 5 \cdot 10^{8^\circ}$  идут в основном процессы (3) и (4), а при  $T > 5 \cdot 10^{8^\circ}$  идет в основном процесс (1).

Нейтронный телескоп будущего будет «показывать» только небольшое ядро внутри звезды с радиусом  $< 1/10$  звездного радиуса. Те нейтрино, которые зарегистрирует этот телескоп, будут в первоначальном состоянии, т. е. будут иметь спектр, характерный для их рождения, и станет возможным наблюдать результаты процессов, протекающих в центре звезд. Пока такой телескоп не создан, однако уже сейчас можно отличать нейтрино от антинейтрино и по угловым корреляциям определять направление, в котором они рождались.

В последнее время в литературе усиленно обсуждается вопрос о возможности существования скопления антивещества и даже антимиров. Открытие античастиц заставило задуматься над вопросом о том, отдает ли природа предпочтение атому водорода, составленному из протона и электрона, перед атомом, составленным из антипротона и позитрона. Могут ли существовать антимир — системы, где все состоит из античастиц, и как можно их найти во Вселенной. Приходящий от них свет не дает нужной информации, так как фотон является абсолютно нейтральной частицей и все заряды его равны нулю. Квант и антиквант тождественны, поэтому мир и антимир посылает один и тот же свет. Но если есть антимир, то антивезды должны быть источником нейтрино во всех тех случаях, когда обычная звезда испускает антинейтрино, и наоборот. Наблюдая далекие миры и различия  $\nu$  и  $\tilde{\nu}$  можно будет решить вопрос о существовании мира из античастиц.