

3. Приведенные факты дают достаточно убедительное доказательство существования в отдаленные времена природного ядерного реактора. Однако ясны далеко не все детали, относящиеся к этому вопросу. Например, среди продуктов деления в природном ядерном реакторе был обнаружен хотя и небольшой, но несомненно существующий избыток изотопов ксенона — ^{131}Xe , ^{132}Xe и ^{134}Xe — по сравнению с изотопным составом ксенона, который возникает при делении ^{235}U тепловыми нейтронами. Причина такого расхождения еще не выяснена.

§ 97. Использование антинейтрино для контроля ядерного реактора

1. В опытах Райнеса и Коуэна (см. § 74) было найдено, что сечение реакции обратного β -распада (74.12) для антинейтрино, исходящих из ядерного реактора (т. е. антинейтрино низких энергий), составляет примерно $\sigma = 10^{-43} \text{ см}^2$. Чтобы более наглядно представить этот результат, допустим, что плоскопараллельный пучок антинейтрино распространяется в железе, причем поглощение антинейтрино происходит исключительно за счет реакции (74.12). В одном моле содержится примерно $6 \cdot 10^{23}$ атомов, т. е. $26 \cdot 6 \cdot 10^{23}$ протонов (26 — атомный номер железа). Так как атомная масса железа 56, а плотность $7,8 \text{ г}/\text{см}^3$, то в 1 см^3 железа будет $n = (7,8/56) \cdot 26 \cdot 6 \cdot 10^{23} = 2,2 \cdot 10^{24}$ протонов. Если среда (железо), в которой распространяются антинейтрино, однородна, то формулу (65.3) можно представить в виде

$$dN/N = -n\sigma l,$$

где l — путь, проходимый антинейтрино в железе. Определим путь l , на котором из пучка выбывает миллионная доля всех антинейтрино. Для этого в предыдущей формуле положим $|dN/N| = 10^{-6}$ и найдем

$$l = \frac{1}{n\sigma} \left| \frac{dN}{N} \right| = 45 \cdot 10^{11} \text{ см} = 45 \cdot 10^6 \text{ км}.$$

Таким образом, при прохождении пучка из миллиона антинейтрино через слой железа толщиной в 45 млн км (эта величина примерно только в три раза меньше расстояния от Земли до Солнца) в среднем только одно антинейтрино поглотится и выйдет из пучка. Если же толщину слоя железа довести до $45 \cdot 10^{12}$ км (приблизительно 5 световых лет), то на этой толщине интенсивность пучка антинейтрино уменьшится всего в e раз. Эти факты, кажется, не оставляют возможности для практических применений нейтрино и антинейтрино.

И все же такая возможность существует, так как ничтожное поглощение антинейтрипо в веществе может быть компенсировано исключительно большой мощностью пучков антинейтрипо,

исходящих из крупных ядерных реакторов. Допустим в качестве примера, что детектор антинейтрино имеет форму куба со стороной 1 м и что вещество этого детектора поглощает антинейтрино так же, как и железо (это делается только для того, чтобы не повторять вычисления, аналогичные приведенным выше). Пусть в детектор попадает 10^{21} антинейтрино в сутки (это может обеспечить современный большой ядерный реактор). Толщина поглотителя по сравнению с предыдущим случаем уменьшена в $45 \cdot 10^9$ раз, а число нейтрино увеличено в $10^{21} : 10^6 = 10^{15}$ раз. Поэтому число актов обратного β -распада, зафиксированных детектором в сутки, будет

$$1 \cdot \frac{10^{15}}{45 \cdot 10^9} \approx 2 \cdot 10^4.$$

Приведенная оценка показывает, что поток антинейтрино можно регистрировать и гораздо меньшим детектором.

2. В СССР на Ровенской АЭС с 1982 г. функционирует специализированная нейтринная лаборатория. Основным помещением лаборатории является экспериментальный зал площадью $6,5 \times 6,5$ м и высотой 3,5 м. Этот зал расположен прямо под ядерным реактором на расстоянии 19,2 м от центра активной зоны. От потоков частиц из реактора зал огражден мощной защитой из нескольких слоев специального так называемого тяжелого бетона, стали, воды. Такая защита по своим поглощающим свойствам эквивалента слою воды толщиной около 30 м. Детектором служит резервуар объемом 235,5 л, заполненный органическим сцинтиллятором — декалином ($C_{10}H_8$), в состав которого входит большое количество водорода и который содержит небольшую примесь гадолиния, поглощающего нейтроны.

В осколках деления ядерной зоны реактора в процессе β -распада нейтроны превращаются в протоны с испусканием электронов и антинейтрино ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$). Антинейтрино и должны регистрироваться. Принцип регистрации по существу не отличается от того, какой применялся в опытах Райнеса и Коуэна (см. § 74). Антинейтрино, взаимодействуя с протоном в обратной реакции β -распада ($\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$), порождает в сцинтилляторе нейтроны и позитроны. Позитрон сразу же аннигилирует с электроном, в результате чего возникает сцинтилляционная вспышка. Нейtron же через время порядка 10^{-8} с захватывается ядром гадолиния с испусканием γ -кванта, что дает вторую вспышку. Световые вспышки улавливаются фотоумножителями (всего их 24), сигналы с которых поступают на электронную схему. Если реакция действительно вызывается антинейтрино, то в сцинтилляторе детектора должны появиться одна за другой две вспышки через определенное короткое время.

Всего за сутки детектор регистрирует до тысячи таких пар вспышек. Трудность опыта состоит в том, что за то же время

на детектор обрушивается громадное число нейтронов и γ -квантов и почти каждый из них вызывает в нем соответствующий сигнал. Задача заключается в том, чтобы выделить относительно слабые сигналы от нейтрино на громадном фоне этих не имеющих отношения к делу сигналов. Задача эта успешно решена. Не останавливаясь на этом вопросе, укажем только, что это делается с помощью электрической схемы совпадений, позволяющей регистрировать только нужные пары следующих друг за другом сцинтилляционных вспышек. Таким путем достигается, что полезный сигнал не только не теряется на фоне посторонних событий, но даже значительно превышает его.

3. Как уже говорилось в § 74, реакция обратного β -распада ($\bar{v} + p \rightarrow n + e^+$) эндотермична. Действительно, сумма масс нейтрона и позитрона ($939,5731 + 0,5110034$ МэВ) превышает массу протона ($938,2796$ МэВ) на $1,8045$ МэВ. Недостаток массы у протона должен быть компенсирован за счет энергии антинейтрино \bar{v} . Реакция может идти только тогда, когда энергия антинейтрино превышает $1,8$ МэВ. В нейтринном спектрометре как раз и измеряется энергия позитрона, равная энергии антинейтрино за вычетом $1,8$ МэВ. Это позволяет восстановить энергетический спектр антинейтринного излучения, падающего из активной зоны реактора на прибор.

Количество вылетающих антинейтрино пропорционально числу разделившихся ядер и поэтому позволяет точно судить о выделении энергии в реакторе. Кроме того, антинейтринное излучение осколков деления урана и плутония существенно различно по своему спектральному составу. Это открывает возможность по спектру нейтринного излучения контролировать накопление плутония непосредственно в процессе его образования. В начале работы реактора его антинейтринный спектр полностью определяется осколками деления изотопа ^{235}U . В дальнейшем же, по мере накопления плутония, пропорционально растет и его вклад в спектр антинейтринного излучения.

В качестве иллюстрации приведем некоторые результаты измерений, произведенных на Ровенской АЭС. В течение примерно недели непрерывно регистрировался антинейтринный поток из реактора. Одновременно тепловым методом определялась средняя мощность реактора. За это время всего было выработано энергии $9,79$ ГВт · сут по измерениям нейтринным способом, тогда как тепловой метод дал близкое значение $9,64$ ГВт · сут (израсходованное топливо соответственно равно $9,41$ и $9,27$ кг). Принципиальное достоинство нейтринного метода заключается в том, что он не требует непосредственного контакта с делящимся веществом и может производиться дистанционно. Вероятно, что нейтринный метод окажется в будущем основным источником информации о цепных реакциях, идущих в активной зоне ядерного реактора.