

штабах производства энергии. Более того, исследования показали, что вред, наносимый окружающей среде электростанциями на угольном топливе, существенно больше, чем вред от атомных электростанций.

§ 96. Природный ядерный реактор в Окло

1. В 1972 г. во время масс-спектрографического анализа на заводе Пьерлатте (Франция), где проводилось обогащение ядерного топлива из гексафторида урана (UF_6), было обнаружено, что в этом материале из общего числа атомов урана содержится 0,717 % атомов урана-235, тогда как в земных породах, метеоритах и образцах лунного грунта содержание урана-235 больше, а именно 0,72 %. Урановая руда для переработки доставлялась из рудника Окло, расположенного в Габоне вблизи города Франсфиля (Африка). Как выяснилось позднее, уже в более раннее время (в 1970 — 1972 гг.) на переработку поступала руда, содержащая временами до 20 % урана, обедненного до 0,64 % изотопом ^{235}U . Так как руда при добыче перемешивалась, то обеднение ураном-235 в отдельных образцах могло быть еще сильнее. Всего обедненного урана, использованного в цепной реакции деления, было добыто более 700 т, причем дефицит урана-235 (не замеченный первоначально) составил примерно 200 кг. Изотопный анализ урановых образцов, значительно обедненных ураном-235, обнаружил также заметные отклонения от природного распределения именно тех редкоземельных изотопов, которые являются продуктами деления ядер урана. Каковы же возможные причины этих отклонений?

Урановое месторождение Окло, исследованное по методу содержания свинца в урановой руде, сформировалось примерно $1,8 \cdot 10^9$ лет тому назад. Как полагают геологи, в дельте древней реки образовался осадочный слой богатого ураном песчаника толщиной 4—10 м и шириной 600—900 м. Под ним находилась базальтовая порода, которая под действием тектонических процессов опустилась на глубину в несколько километров. При таком опускании урановая жила растрескалась, и в нее проникли грунтовые воды. Десятки миллионов лет тому назад месторождение поднялось вверх до современного уровня. В руде со средней весовой концентрацией урана 0,5 % были обнаружены 6 глинистых линз, т. е. образований размером от 10 до 20 м и толщиной порядка метра, в которых концентрация урана доходит до 20—40 % и больше. Образование линз со сверхвысоким содержанием урана произошло, по-видимому, под действием фильтрационных вод, хотя детальная картина этого процесса и не ясна.

2. Урановый рудник в Окло в какой-то мере напоминает геотермический ядерный реактор. Роль ТВЭЛов выполняют линзы,

содержащие уран, роль замедлителя — грунтовая вода между ними. Цепная реакция в таком руднике была бы невозможна, если бы изотопный состав урана в нем был бы таким же, как и изотопный состав современного естественного урана. И действительно, в настоящее время цепная реакция в руднике не идет. Однако уран-238 распадается медленнее, чем уран-235. Их периоды полураспада равны соответственно $4,5 \cdot 10^9$ и $7,1 \cdot 10^8$ лет. Исходя из этих данных, нетрудно подсчитать, что $1,8 \cdot 10^9$ лет тому назад содержание атомов изотопа ^{235}U должно было составлять примерно 3,1 % от общего количества атомов урана. А для такого обогащенного урана в присутствии воды (в качестве замедлителя) коэффициент размножения k_∞ мог достигнуть критического значения $k_\infty = 1$ и даже несколько превзойти его. При таких условиях в далекие времена могла возникнуть самонеизвольная цепная ядерная реакция, что, по-видимому, и произошло на самом деле.

Продолжительность работы естественного ядерного реактора в Окло была оценена по количеству образовавшегося плутония ^{239}Pu . Таким путем было найдено, что она составляет около 0,6—0,8 млн лет. Эта оценка не очень надежна хотя бы потому, что доля делений ^{239}Pu относительно полного числа делений составляет всего лишь несколько процентов и сравнима с долей делений ^{238}U на быстрых нейтронах.

Общее количество энергии, выработанной реактором в Окло, оценивается приблизительно в $1,5 \cdot 10^4$ МВт · лет. Такое же количество энергии вырабатывают два блока Ленинградской АЭС за 2,3 года при полной нагрузке. Если принять среднюю продолжительность работы реактора в Окло равной 0,6 млн лет, то средняя мощность выделяющейся в нем энергии составляет всего лишь 25 кВт. Это соответствует среднему потоку тепловых нейтронов в реакторе не выше $10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Не следует думать, что цепная реакция, шедшая в Окло, носила бурный характер — с гулом, шипением пара и пр. На самом деле реакция была медленной — она скорее «тлела». Температура в руднике никогда не превышала 300—600 °C, так как природный реактор был саморегулирующейся системой. При повышении температуры из зоны реакции удалялась вода, а это вело к уменьшению количества медленных нейтронов, к затуханию и даже полному угасанию реакции. Затем рудник начинал остывать и в него снова набиралась вода, замедляющая нейтроны. Это создавало благоприятные условия для возобновления цепной реакции, а следовательно, и для повышения температуры. Вода снова удалялась из реактора, и реакция затухала. Затем опять начиналось накопление воды, увеличение количества тепловых нейтронов, возобновление цепной реакции и т. д. Таким образом, периодически происходила смена возбуждения и затухания реакции.

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,