

## СТОЛКНОВЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Я.Б.Зельдович

Предложен метод диагностики развитой термоядерной реакции горения смеси  $T + D$  по регистрации аномальных нейтронов с энергией  $E > 14$  Мэв. Оценки показывают, что при каждом энерговыделении в одном акте больше  $3 \cdot 10^{16}$  эрг (сгорание 0,01 г смеси) заметная доля нейтронов приобретает энергию  $E > 14$  Мэв.

Сгорание смеси  $T + D$  при плотности 1000 — 10000 г/см<sup>3</sup> и оптимальной температуре, протекает столь быстро, что мгновенная концентрация нейтронов становится значительной. При этом появляется заметная вероятность столкновения нейтронов между собой. В результате часть нейтронов приобретает энергию превышающую 14 Мэв, до удвоенной 28 Мэв. Измерение аномальных ( $E > 14$  Мэв) нейтронов позволяет в принципе получить дополнительные данные для диагностики развитой термоядерной реакции.

При массе мишени 0,01 г и плотности 3000 г/см<sup>3</sup> радиус шарика равен 0,01 см,  $\rho_f = 30$  г/см<sup>2</sup>, время пролета нейтронов  $2 \cdot 10^{-12}$  сек. Скорость термоядерной реакции при температуре 70 кэв<sup>1)</sup> характеризуется усредненным произведением скорости на сечение  $\sigma v = 10^{-15}$  см<sup>3</sup>/сек. При плотности 3000 г/см<sup>3</sup> концентрации  $D$  и  $T$  равны  $3,6 \cdot 10^{26}$  см<sup>-3</sup> число реакций в единице объема в единицу времени  $W = 10^{-15} (3,6 \cdot 10^{26})^2 = 10^{39}$  см<sup>-3</sup>сек<sup>-1</sup> время реакции  $t = 10^{-14} (3,6 \cdot 10^{26})^{-1} = 3 \cdot 10^{-12}$  оказывается как раз порядка времени пролета.

Следовательно максимальная концентрация нейтронов соответствует по порядку величины стехиометрии реакции,  $n \sim 10^{26}$  см<sup>-3</sup>. Сечение рассеяния, интересующее нас, оценим применяя принцип изотопической инвариантности ( $\sigma_{nn} = \sigma_{pp}$ , пренебрегая кулоновским взаимодействием) и микроскопической обратимости — возьмем сечение рассеяния протона с энергией 28 Мэв на покоящемся протоне,  $\sigma = 1$  бн. Тогда получим по наиболее благоприятной оценке для однократного рассеяния  $l\sigma n \sim 0,01$  см  $\cdot 10^{-24}$  см<sup>2</sup>  $10^{26} = 1$ . Заметная доля нейтронов около 5 или 10% могла бы приобрести энергию больше 14 Мэв.

В действительности из-за протекания реакции при более низкой температуре и неодновременно по всему объему доля аномальных нейтронов будет существенно меньше, но все же достаточной для регистрации и применения в диагностических целях.

Доля аномальных нейтронов существенно упадет при затягивании реакции на время больше времени вылета  $2 \cdot 10^{-12}$  сек. Регистрация длительности реакции такого порядка прямыми методами весьма затруднительна уже из-за разброса основной массы "14 Мэв" нейтронов по энергиям.

<sup>1)</sup> Заметим, что полное превращение энергии  $\alpha$  частиц  $T + D$  реакции в энергию излучения при указанной плотности дает равновесную температуру  $T = 70$  кэв из условия  $\alpha T^4 = Qn$ , с  $Q = 4$  Мэв.

Общий выход энергии при этом может быть малочувствителен к условиям протекания реакции после воспламенения  $D + T$  смеси.

Рассеяние и потери энергии нейтронами в оболочке мало изменит отношение между аномальными и основными ( $14 \text{ Мэв}$ ) нейтронами на выходе из термоядерного устройства.

Подчеркнем однако, что проделанный выше расчет требует полной энергии одного акта, соответствующей сгоранию  $0,01 \text{ г}$  смеси, т. е. около  $3 \cdot 10^{16} \text{ эрг}$ . Эффект отсутствует в модельных опытах с чистым или разбавленным дейтерием без трития, с пониженной мощностью.

Поступила в редакцию  
22 ноября 1976 г.

---