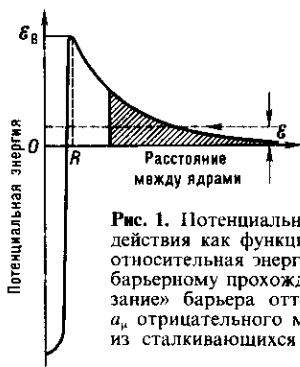


Моргулис Н. Д., Преобразование тепловой энергии в электрическую с помощью термоэлектронной эмиссии, «УФН», 1960, т. 70, с. 679; Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма, М., 1973; Стаханов И. П., Черковец В. Е., Физика термоэмиссионного преобразователя, М., 1985; Математическое моделирование процессов в низковольтном плазменном-пучковом разряде, М., 1990. *Ф. Г. Бакитов.*

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ — ядерные реакции между лёгкими атомными ядрами, протекающие при очень высоких темп-рах ($\geq 10^7$ — 10^8 К). Т. р.—основной (хотя и не единственный) тип процессов, в которых ядрам, испытывающим взаимное кулоновское отталкивание, удаётся, преодолев соответствующий электростатический барьер (рис. 1), сблизиться на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил притяжения и, провалившись в образуемую ими глубокую потенц. яму, совершить ту или иную экзотергич. (т. е. сопровождающуюся выделением энергии) ядерную перестройку. Под «выделением энергии» подразумевается выделение в продуктах реакции избыточной кинетич. энергии, равной увеличению суммарной энергии связи. Т. о., относительно рыхлые ядра перестраиваются в более прочно связанные, а поскольку ядра с наибольшей энергией связи на один нуклон находятся в ср. части периодич. системы Менделеева, то наиб. типичным механизмом экзотергич. реакции является слияние (синтез) лёгчайших ядер в более тяжёлые. Вместе с тем существуют и экзотергич. реакции деления лёгких ядер, напр. благодаря особой прочности ядра ${}^4\text{He}$ возможна реакция ${}^{11}\text{B} + \text{p} \rightarrow 3\text{He} + 8,7 \text{ МэВ}$.



Ниже, для краткости, все охарактеризованные выше процессы именуется реакциями ядерного синтеза (ЯС).

По механизму преодоления кулоновского барьера реакции ЯС можно разделить на два осн. класса: А — реакции при неискажённом барьере, требующие для своего протекания достаточно большой относит. энергии сталкивающихся ядер, к-рая сообщается им в результате ускорения или сильного разогрева; Б — реакции т. н. холодного синтеза, к-рые становятся возможными в результате сильного искажения самого барьера — прежде всего его сужения благодаря «срезанию» внешней, наиб. широкой части.

Реакции класса А могут реализоваться либо в нек-ром ускорителе (реакция ЯС на мишени; возможен также случай «микроускорителя», см. ниже), либо в высокотемпературной плазме звёздных недр, ядерного взрыва, мощного газового разряда или в плазме вещества, разогретого гигантским импульсом лазерного излучения, бомбардировкой интенсивным пучком частиц и т. п.; именно в последнем круге явлений реакции ЯС сводятся к собственно Т. р.

Реакции класса Б являются следствием таких физически разнородных явлений, как: 1) смятие кулоновского барьера колоссальным давлением в недрах плотных звёзд ($\rho \gg 10^4 \text{ г/см}^3$) — случай т. н. *пикноядерных реакций* [3]; 2) прямое кулоновское экранирование поля дейтрона или протона захваченным на боровскую орбиту отрицат. мюоном (рис. 1) — случай т. н. *мюонного катализа*.

Существуют и такие реакции ЯС, сама принадлежность к-рых к классу А или Б пока совершенно неясна. Это относится, в частности, к сенсационным экспериментам Флейшмана — Понса (США, 1989, т. н. холодный синтез), в к-рых реакции ЯС наблюдались при электролитич. насыщении дейтерием кристаллич. решётки палладия (а затем

титана и др.). Физически более интересным и практически крайне заманчивым механизмом ЯС здесь явилась бы взаимная кулоновская экранировка дейтронов в результате каких-то весьма нетривиальных квантово-механич. эффектов (класс Б), однако более вероятным механизмом представляется всё же ускорение дейтронов в электрич. полях, возникающих в микротрещинах решётки при электролизе или при внедрении в неё дейтронов из газовой среды под давлением (класс А) [11].

Непреодолимый интерес к реакциям ЯС, и прежде всего к Т. р., связан с тем, что они являются: 1) гл. источником энергии Солнца и звёзд, а также механизмом дозвёздных и звёздных процессов синтеза атомных ядер хим. элементов; 2) одной из физ. осн. основ ядерного взрыва и (термо)ядерного оружия; 3) основой *управляемого термоядерного синтеза* (УТС) — экономически и экологически перспективного направления энергетики будущего.

Скорости Т. р. Для ряда экзотергич. ядерных реакций, представляющих интерес в проблеме УТС, в табл.

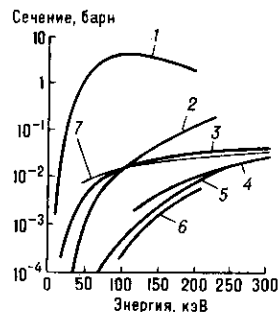
Табл. — Экзотергические реакции между лёгкими ядрами

№	Реакция	Энерговыделение, МэВ	$\sigma_{\text{макс}}$, барн (в области энергий $\leq 1 \text{ МэВ}$)	Энергия налетающей частицы, соответствующая $\sigma_{\text{макс}}$, МэВ
1	$\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{d} + \text{e}^+ + \nu$	2,2	10^{-23}	—
2	$\text{p} + \text{d} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,5	10^{-6}	—
3	$\text{p} + \text{t} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19,7	10^{-6}	—
4	$\text{d} + \text{d} \rightarrow \text{t} + \text{p}$	4,0	0,16 (при 2 МэВ)	2,0
5	$\text{d} + \text{d} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n}$	3,3	0,09	1,0
6	$\text{d} + \text{d} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	24,0	—	—
7	$\text{d} + \text{t} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$	17,6	5,0	0,13
8	$\text{t} + \text{d} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$	17,6	5,0	0,195
9	$\text{t} + \text{t} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{n}$	11,3	0,10	1,0
10	$\text{d} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p}$	18,4	0,71	0,47
11	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{p}$	12,8	—	—
12	$\text{n} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{t}$	4,8	2,6	0,26
13	$\text{p} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	4,0	10^{-4}	0,3
14	$\text{p} + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	17,3	$6 \cdot 10^{-3}$	0,44
15	$\text{d} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + \text{p}$	5,0	0,01	1,0
16	$\text{d} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2\text{He}$	22,4	0,026	0,60
17	$\text{d} + {}^7\text{Li} \rightarrow 2\text{He} + \text{n}$	15,0	10^{-3}	0,2
18	$\text{p} + {}^9\text{Be} \rightarrow 2\text{He} + \text{d}$	0,56	0,46	0,33
19	$\text{p} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^4\text{He}$	2,1	0,35	0,33
20	$\text{p} + {}^{11}\text{B} \rightarrow {}^3\text{He}$	8,7	0,6	0,675
21	$\text{p} + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	5,0	0,69 (при 1,2 МэВ)	1,2

p — протон, d — дейтрон (ядро дейтерия ${}^2\text{H}$), t — тритон (ядро трития ${}^3\text{H}$), n — нейтрон, e^+ — позитрон, ν — нейтрино, γ — фотон. Распределение энерговыделения между продуктами реакции обычно обратно пропорционально их массам.

приведены значения энерговыделения и макс. эфф. сечения $\sigma_{\text{макс}}$. На рис. 2 приведены зависимости σ от энергии налетающей частицы (в ф-лах реакций — первая слева).

При интерпретации этих данных, и в частности большого разброса значений $\sigma_{\text{макс}}$, следует иметь в виду, что сечение любой из реакций есть, грубо говоря, произведение



сечения прохождения сквозь кулоновск. барьер и вероятности последующего, собственно ядерн., превращения.

сечения прохождения сквозь кулоновск. барьер и вероятности последующего, собственно ядерн., превращения.