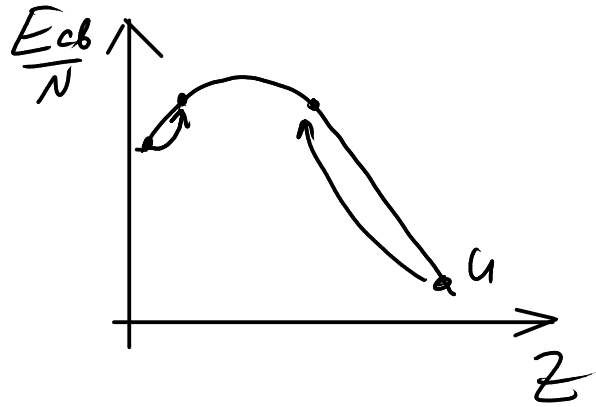
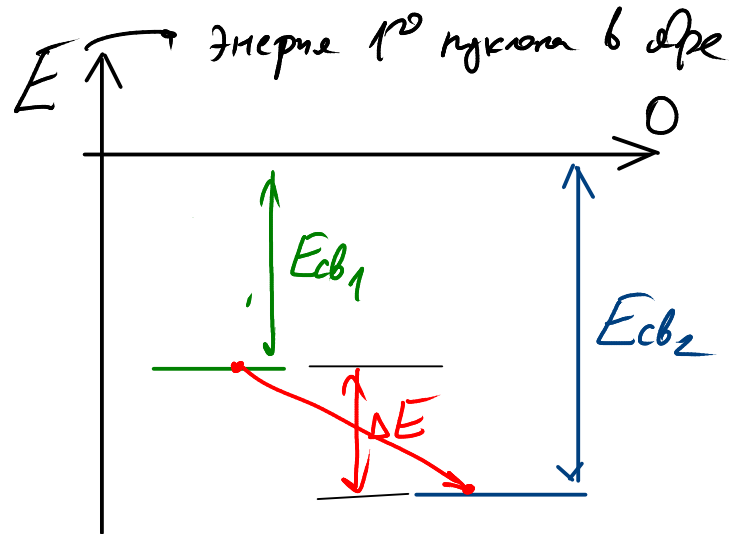


Глава 8. Термоядерная энергия

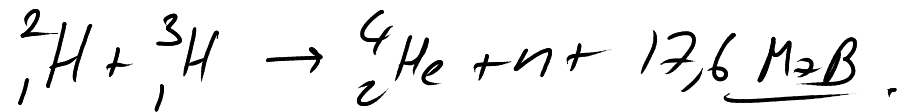
§.1. Термоядерный синтез



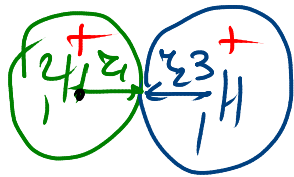
При слиянии 2^х легких ядер из таблицы Менделеева получается более тяжелое и энергичное



ΔE - выделяется



Для того чтобы на расстоянии r между ядрами сил.



Результат у.м. $Z = Z_1 + Z_2$

Размер ядра $Z_0 \approx \underline{1,3 \cdot A^{1/3}}$

$$Z = 1,3(2^{1/3} + 3^{1/3}) = 3,5 \text{ фм} = 3,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$

Энергия т.стат. вза; $E = e\varphi = \frac{ke^2}{Z} =$ $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ч}}{\text{ф}}$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{3,5 \cdot 10^{-15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,11 \cdot 10^5 \text{ эВ} \approx \underline{0,4 \text{ МэВ}}$$

Эта реакция возможна только при такой энергии

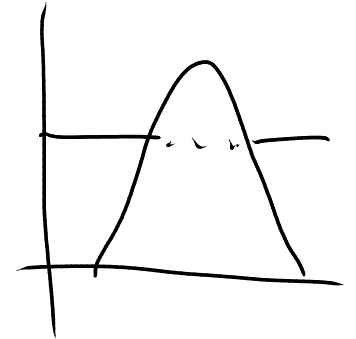
$$\frac{\sigma_{\text{ионизации}}}{\sigma_{\text{ядерн.р}}} \approx 10^8$$

Т.е. подавляющая часть энергии ^2H пойдет на ионизацию.

При темп., соотв. этой энергии все атомы — ионизированы

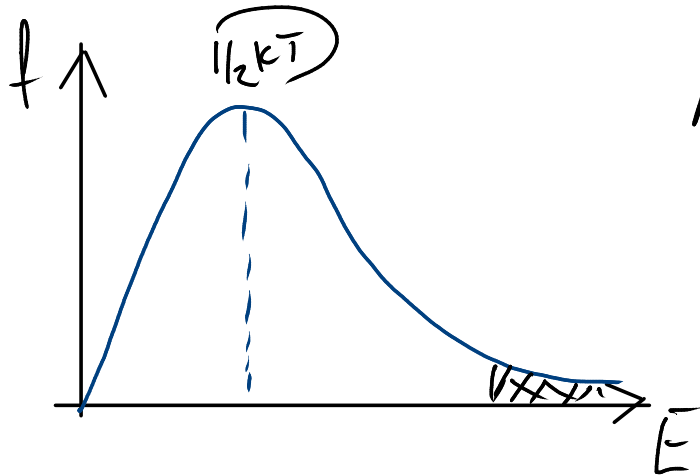
⇒ Ионизация

ИД. раз



При темп. $T = 10^4 \text{ K}$ $\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT \approx 1 \text{ эВ}$

$T = 20 \cdot 10^6 \text{ K}$ ср. кин. эн. протонов $E \approx 0,002 \text{ МэВ}$



Помогает 2 графика:

- 1) Высокоэнерг. "хвост" распределения
- 2) Туннельный эффект,

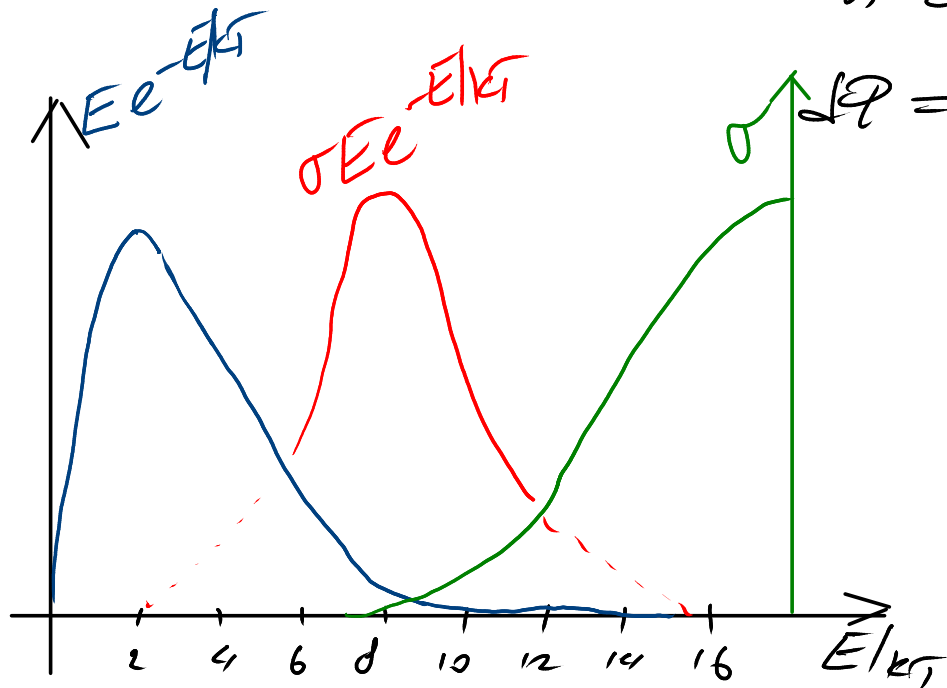
$$F(E) = A \sqrt{E} e^{-E/kT}$$

$$F(\nu) d\nu = F(E) dE$$

$$\begin{aligned} f(\vec{r}) &\sim e^{-mv^2/2kT} \\ F(\nu) &= 4\pi\nu^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-m\nu^2/2kT} \end{aligned}$$

$$v(E) = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

Поток частиц с энергией
от E до $E + dE$



$$dP = v(E) F(E) dE \sim \underline{E e^{-E/kT}}$$

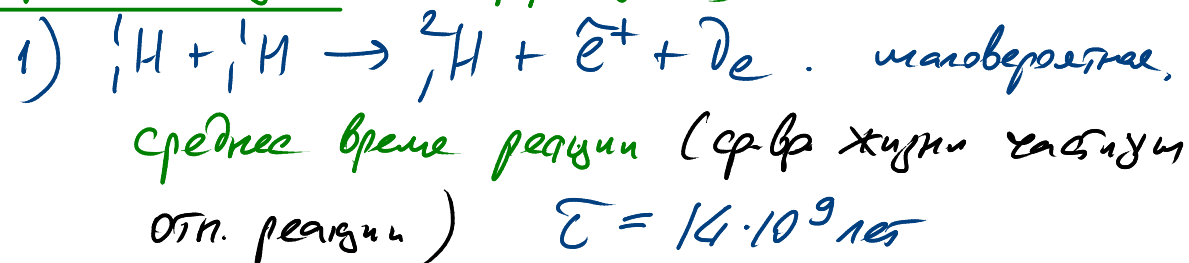
Вклад в реакцию пропорционален
произв $\sigma E e^{-E/kT}$.

↓
max при энергии больше, чем
средняя

§.2. Термоядерные реакции на звездах

Внутри Солнца при $T = 10^7 \text{ K}$ протекает т.н.

Водородный цикл (pp-цикл):

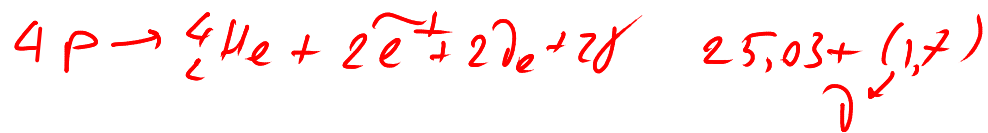


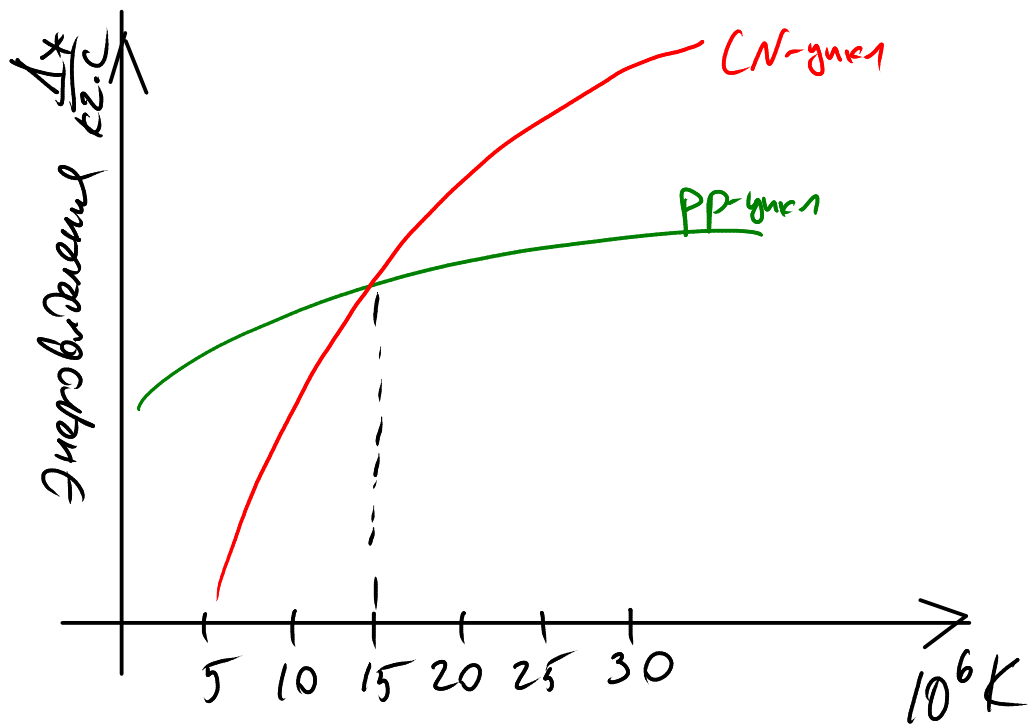
pp-цикл — основной на ранних стадиях эволюции звезды
при отн. низких $T \sim 10^7 \text{ K}$.

При температуре углерода $T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$ возможен
 углеродно-азотный цикл (CN)

C - катализатор

Реакция	Q, МэВ	ср. в. τ
$p + {}^1_6\text{C} \rightarrow {}^1_7\text{N} + \gamma$	1,95	$1,3 \cdot 10^7 \text{ лет}$
${}^1_7\text{N} \rightarrow {}^1_6\text{C} + e^+ + \nu$	$1,5 + (0,72)$	7 мин
$p + {}^1_6\text{C} \rightarrow {}^1_7\text{N} + \gamma$	7,54	$2,7 \cdot 10^6 \text{ лет}$
$p + {}^1_7\text{N} \rightarrow {}^1_8\text{O} + \gamma$	7,35	$3,2 \cdot 10^4 \text{ лет}$
${}^1_8\text{O} \rightarrow {}^1_7\text{N} + e^+ + \nu$	$1,737 + (0,99)$	82 сек
$p + {}^1_7\text{N} \rightarrow {}^1_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	4,96	$1,1 \cdot 10^5 \text{ лет}$





Солнце $T \sim 15 \cdot 10^6 \text{ K}$

CN и PP —

— везд широко распространены

④ При больших T возникает He и Ne гнет —

— в звездах-гигантах,

§3. Термоядерные реакции в лабораторных условиях

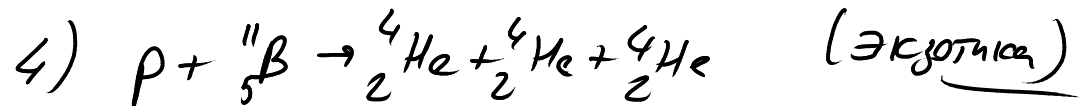
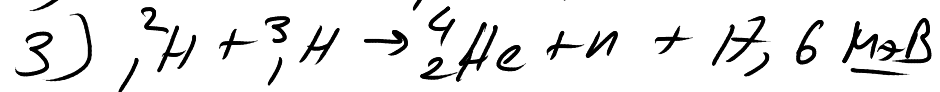
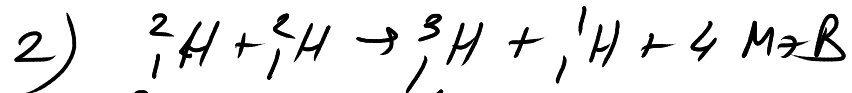
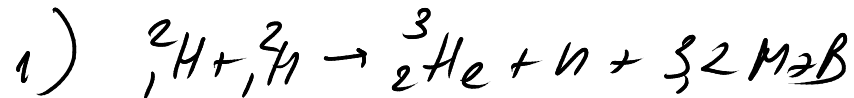
С 1940х гг.

Преимущества по ср. с ДЭ :

- 1) Не образуются радиоактивные ядра
- 2) Топливо практически не исчерпается (${}^2_1\text{H}$)

Проблемы : $\rho\beta$ и CN -ячейки — очень маленькие

Перспективные реакции



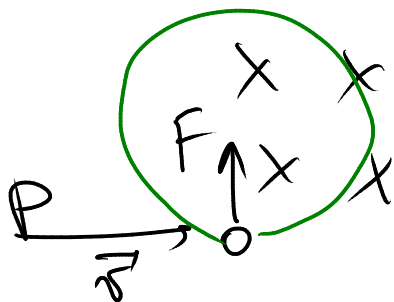
Барьер T в 10^8 раз от ДЭ

Задача

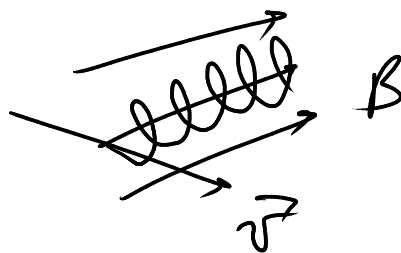
- 1) Найти высоту T
- 2) Удержать плазму в токеми дугельного вращеня в кукной объеме

$T > 10^6 \text{ K}$ — никакие стенки из вещества не держат.

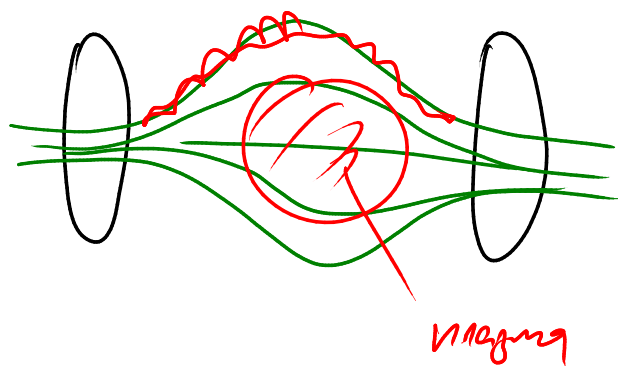
Магнитное удержание



$$\vec{F}_n = q[\vec{v}\vec{B}]$$

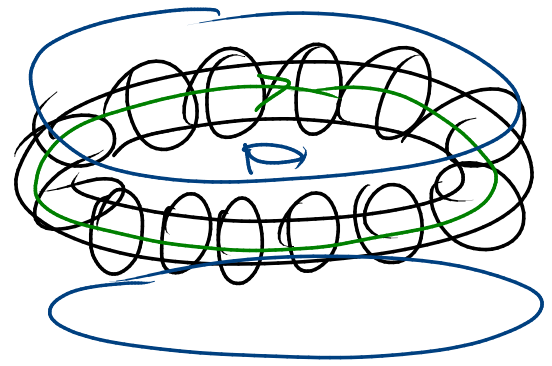


Открытая дуга

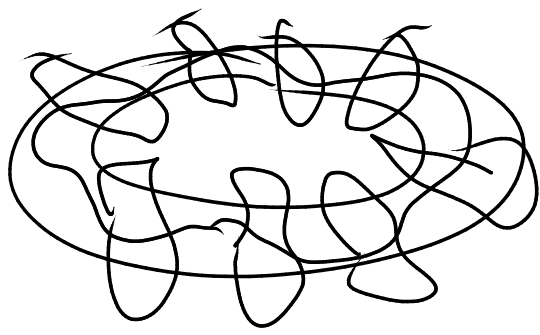


мат. дуги
и пробирки

Торкмак



Стерлинг



ITER