

# Ядерные реакции в плотном веществе: эффекты плазменного экранирования

А.И. Чугунов<sup>1</sup>, Н.Е. DeWitt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук  
Физико-технический институт им.

А.Ф. Иоффе РАН

(Санкт-Петербург, Россия)

<sup>2</sup> Lawrence Livermore National Laboratory  
(Livermore, USA)

Научно-координационная Сессия  
"Исследования неидеальной плазмы"  
26-27 ноября, Москва, Президиум РАН

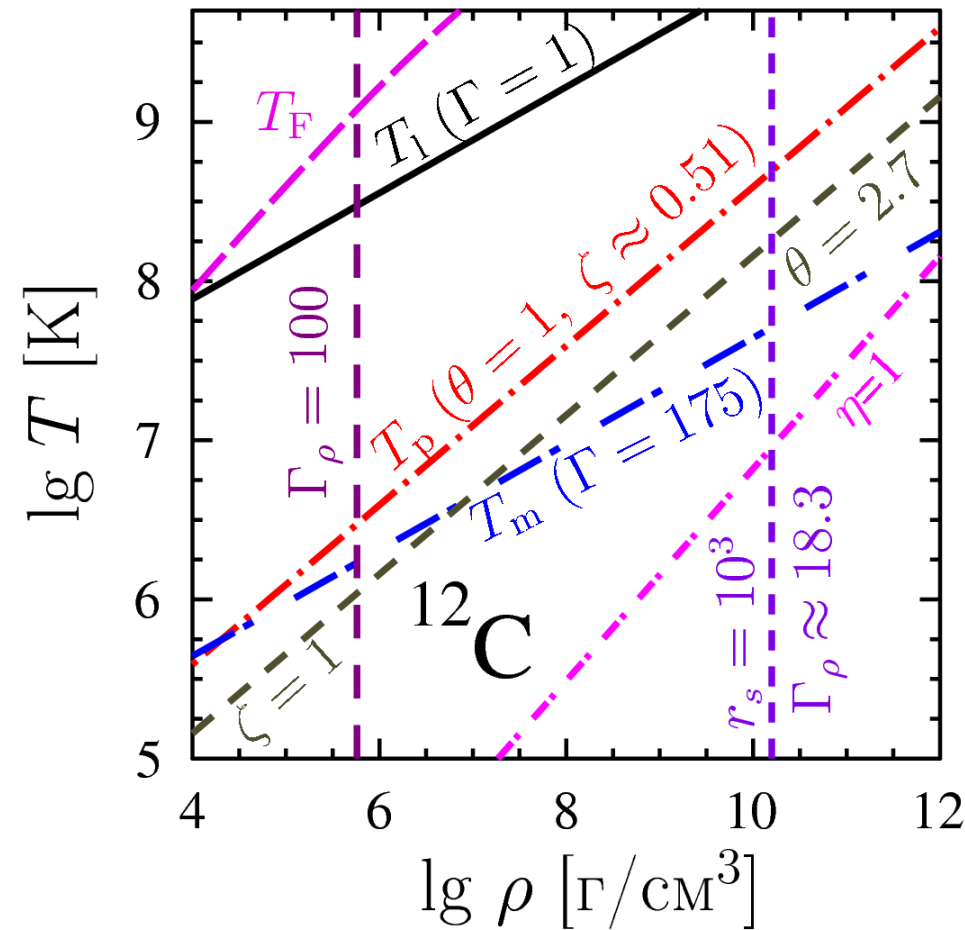


# План доклада

- Параметры вещества
- Однокомпонентная плазма
- Бинарные смеси
- Выводы



# Параметры вещества



$$\Gamma = \frac{Z^2 e^2}{a k_B T} \approx \frac{22.75 Z^2}{T_6} \left( \frac{\rho_6}{A} \right)^{1/3}$$

$$a = \left( \frac{3}{4\pi n_i} \right)^{1/3}$$

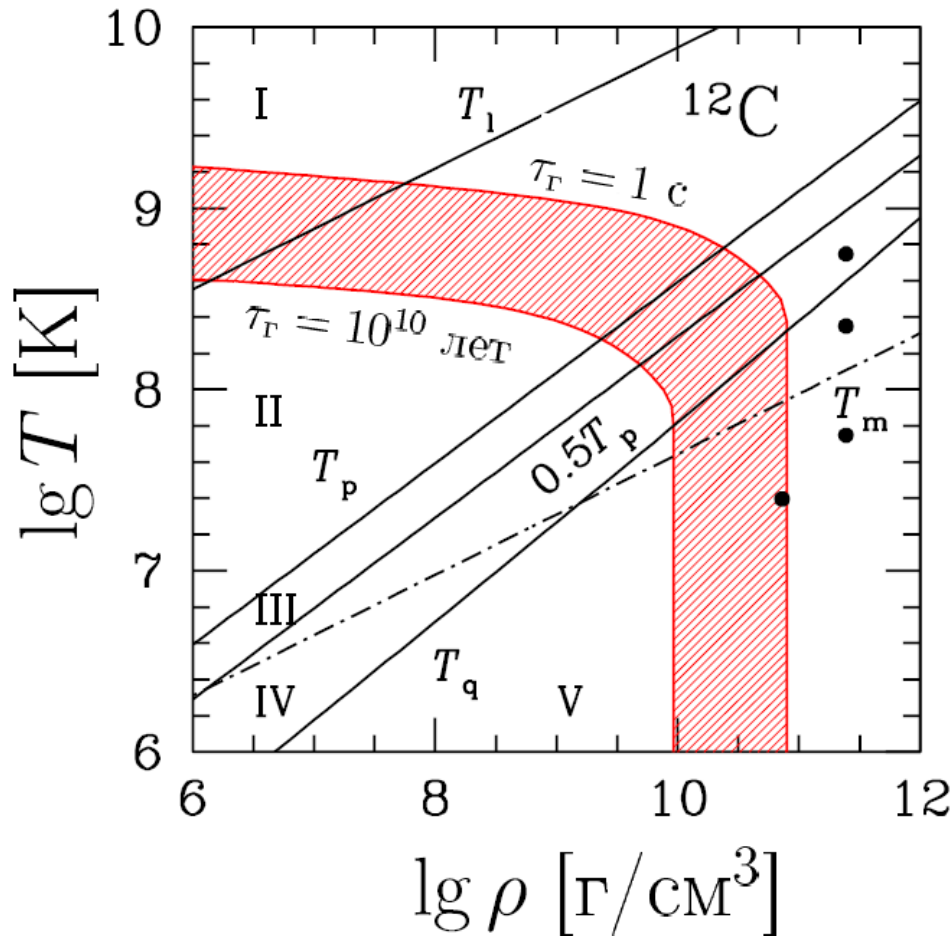
$$T_p = \frac{\hbar \omega_p}{k_B} \approx 7.832 \cdot 10^6 \left( \frac{Z}{A} \right) \rho_6^{1/2} \text{ K}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi Z^2 e^2 n_i}{m_i}}$$

$$r_s = \frac{a}{a_B} \quad \eta = \frac{\Gamma}{r_s} \quad a_B = \frac{\hbar^2}{Z^2 e^2 m_i}$$



# Режимы ядерного горения



№	Режимы	Область
I	Термоядерный со слабым экранированием	$T \gg T_l$
II	Термоядерный с сильным экранированием	$T_p \lesssim T \lesssim T_l$
III	Термопикноядерный	$0.5T_p \lesssim T \lesssim T_p$
IV	Пикноядерный с тепловым усилением	$T_q \lesssim T \lesssim 0.5T_p$
V	Пикноядерный	$T \lesssim T_q$



# Термоядерное горение

$$\frac{r_t}{a} = \zeta \ll 1$$

$$H(0) = \mathfrak{F}(N, N_c) - \mathfrak{F}(N - 2, N_c + 1)$$

$$F_{\text{scr}} = \frac{R}{R_G} = \exp\left(\frac{H(0)}{T}\right)$$

$$\Gamma \ll 1$$

Дебай-Хюккель

$$H(0) = \sqrt{3}\Gamma^{3/2}$$

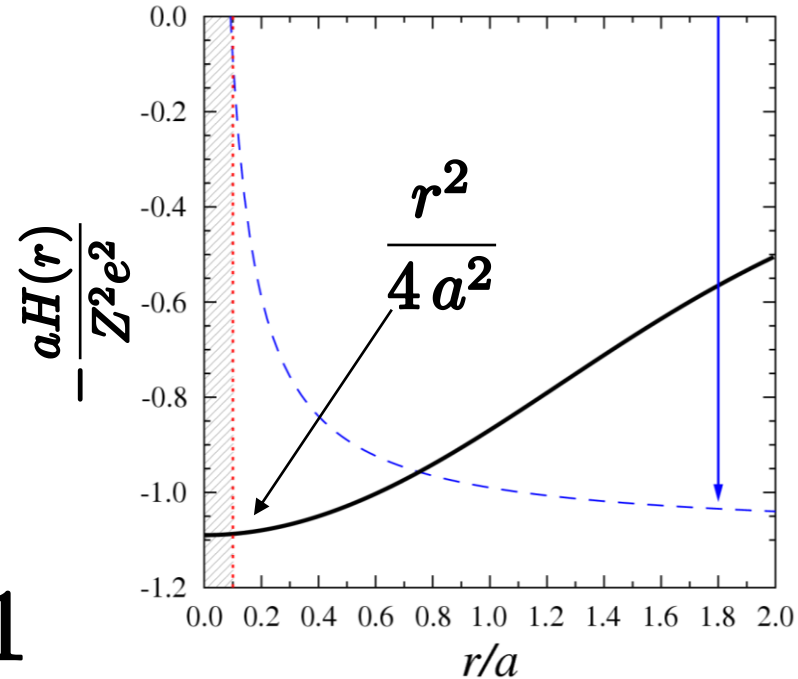
$$\Gamma \gg 1$$

Линейное смешивание

$$H(0) = 2f(\Gamma) - f(\Gamma_c) \quad \Gamma_c = 2^{5/3} \Gamma$$

$$F_{\text{scr}} = \exp\left(\frac{H(0)}{T} - \frac{5}{32}\Gamma\zeta^2\right)$$

Jancovici, J. Stat. Phys, 17 (1977), 357



# Модель среднего поля

Потенциал среднего поля  $H(r) = \frac{Z^2 e^2}{r} - U(r)$ :  $g_{\text{class}} = \exp \left\{ -\frac{1}{T} \left[ \frac{Z^2 e^2}{r} - H(r) \right] \right\}$

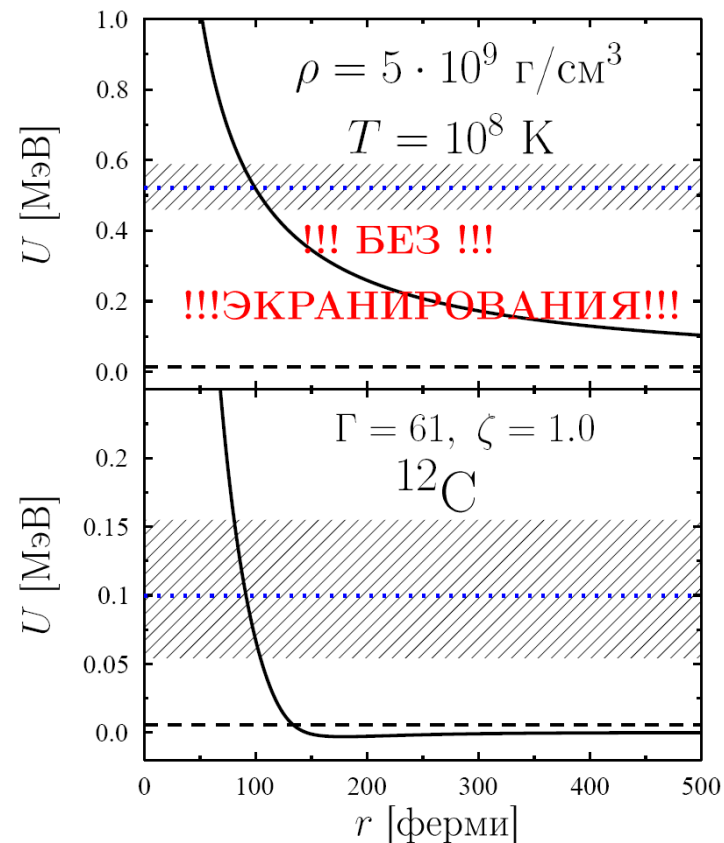
Расчет классическим методом Монте-Карло ➡ определяем

## Приближение среднего поля

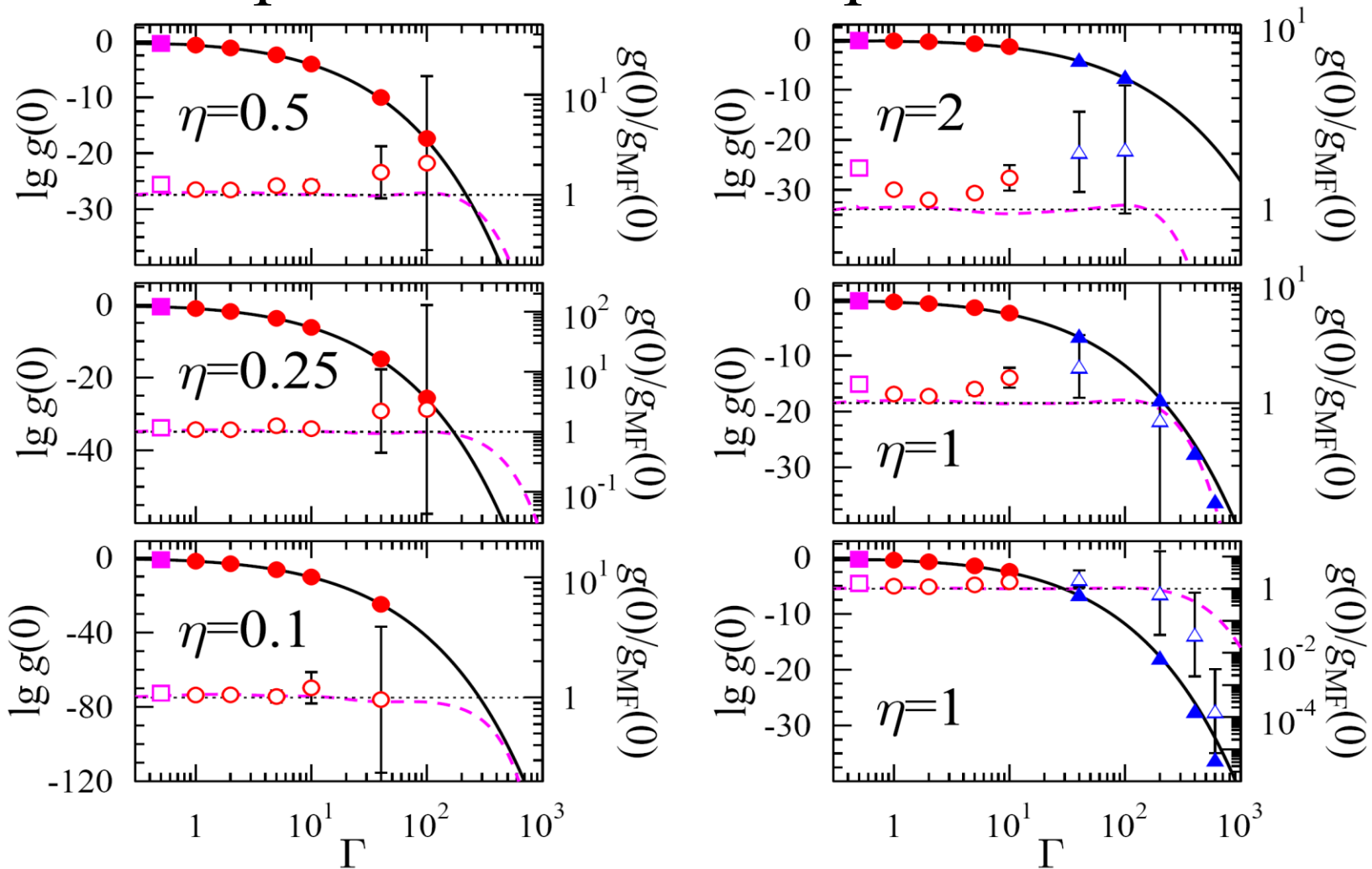
$$F = I\{H\} / I\{0\}$$

$$I\{H\} = \int_{E_{\min}}^{\infty} dE \exp \left( -\frac{E}{k_B T} - P(E) \right)$$

$$P(E) = \frac{2\sqrt{m}}{\hbar} \int_{r_n}^{r_t} dr \sqrt{\frac{Z^2 e^2}{r} - H(r) - E}$$



# Сравнение с МКИТ расчетами



$$R = \frac{n_i^2}{\pi} \frac{a_B}{\hbar} S(E_{pk}) g(0)$$



# Бинарные смеси: Параметры вещества

$$a_e = \left( \frac{3}{4\pi n_e} \right)^{1/3} \quad \Gamma_e = \frac{e^2}{a_e T}$$

$$a_i = a_{ii} = Z_i^{1/3} a_e \quad \Gamma_i = \Gamma_{ii} = \frac{Z_i^2 e^2}{a_i T} = Z_i^{5/3} \Gamma_e$$

$$a_{ij} = \frac{1}{2} (a_i + a_j) \quad a_{\text{eff}} = \frac{a_c}{2^{1/3}} = a_e \left( \frac{Z_i + Z_j}{2} \right)^{1/3}$$

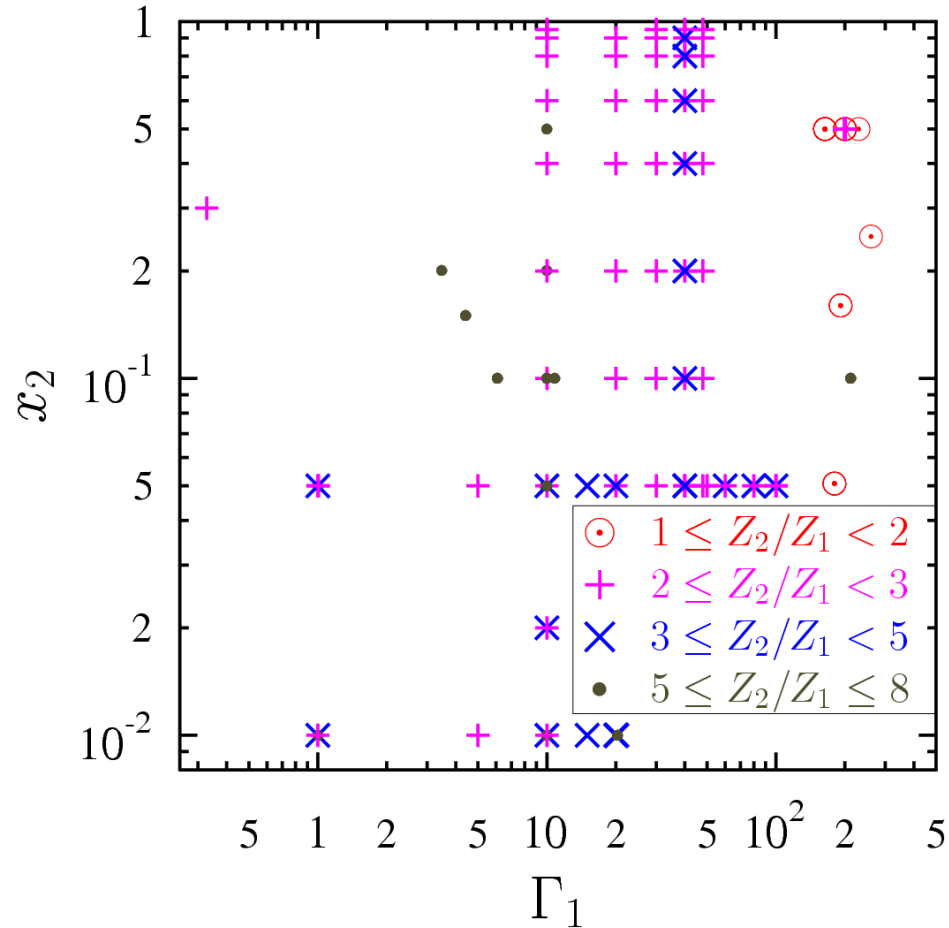
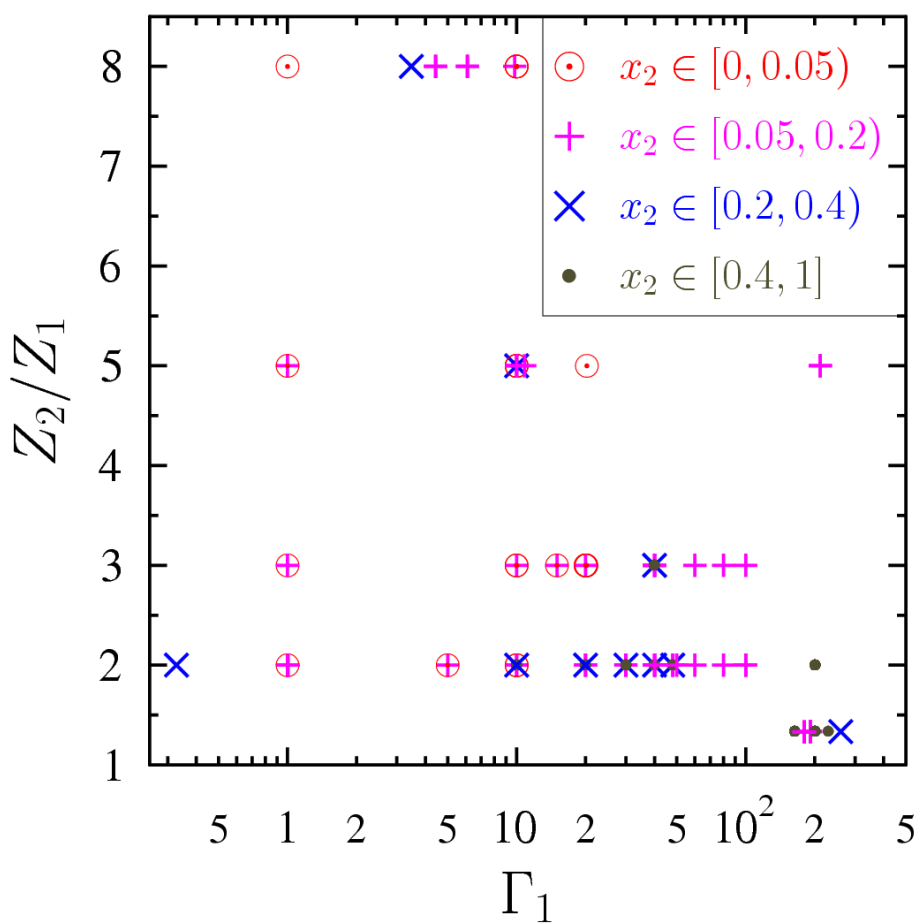
$$\Gamma_{ij} = \frac{Z_i Z_j e^2}{a_{ij} T} \quad \zeta_{ij} = \frac{r_{ij}^t}{a_{ij}} = a_{ij}^{-1} \left( \frac{2Z_i Z_j e^2 \hbar^2}{\pi^2 T^2 \mu_{ij}} \right)^{1/3}$$





# Бинарные смеси

129 МК расчетов ( $Z_1, Z_2, N_1, N_2, \Gamma_e$ )



$$\frac{1}{3} \lesssim \Gamma_e \lesssim 200$$

$$1 \leq Z_2/Z_1 \leq 8$$

$$0.01 \lesssim \frac{N_1}{N_2} \lesssim 1$$



# Бинарные смеси

129 МК расчетов ( $Z_1, Z_2, N_1, N_2, \Gamma_e$ )

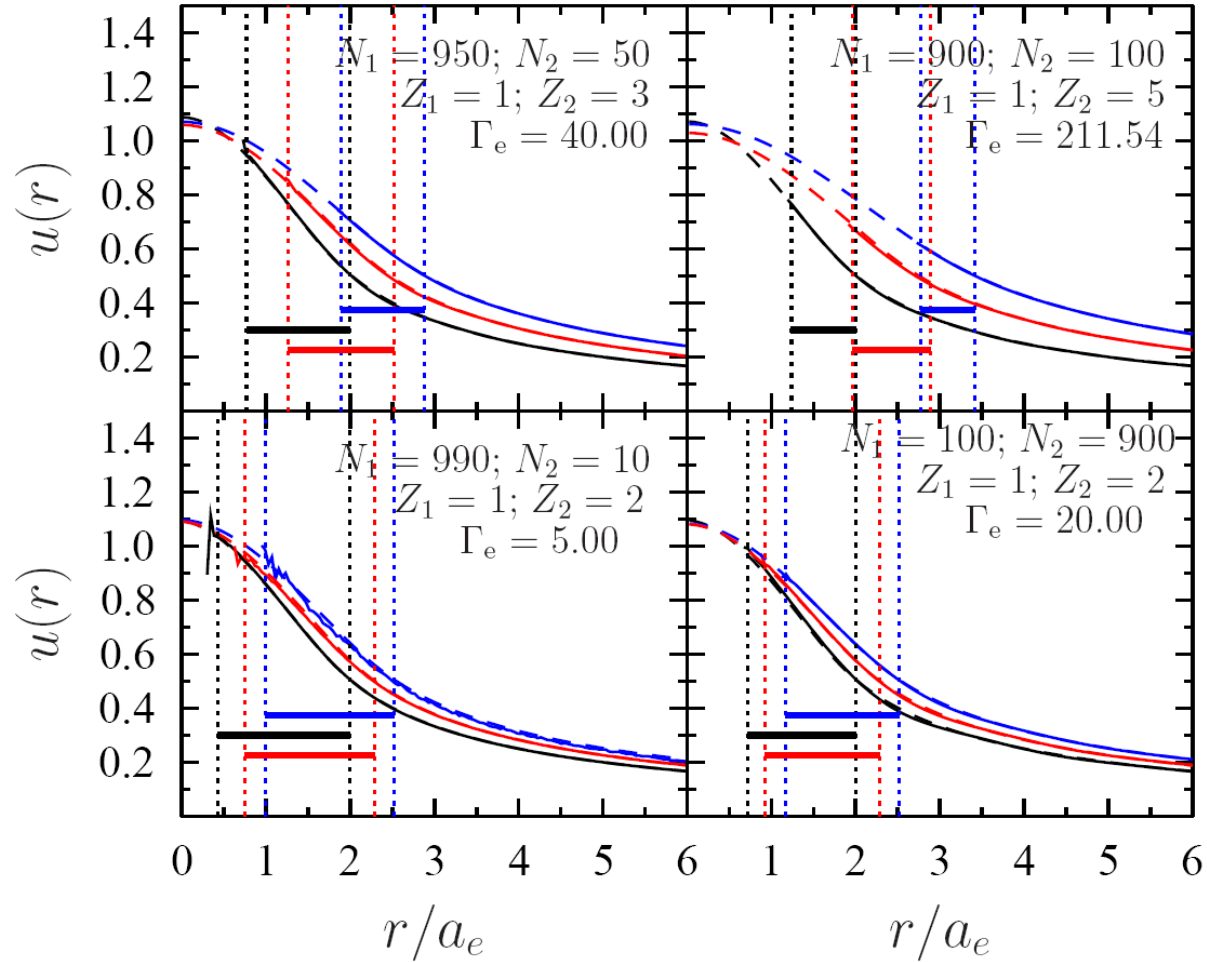
$$u_{ij}(r) = \frac{H_{ij}(r)a_{ij}}{Z_i Z_j e^2}$$

$$u_{ij}(0) = f(\Gamma_i) + f(\Gamma_j) - f(\Gamma_c)$$

$$u_{11} = u(\Gamma_1, r/a_1)$$

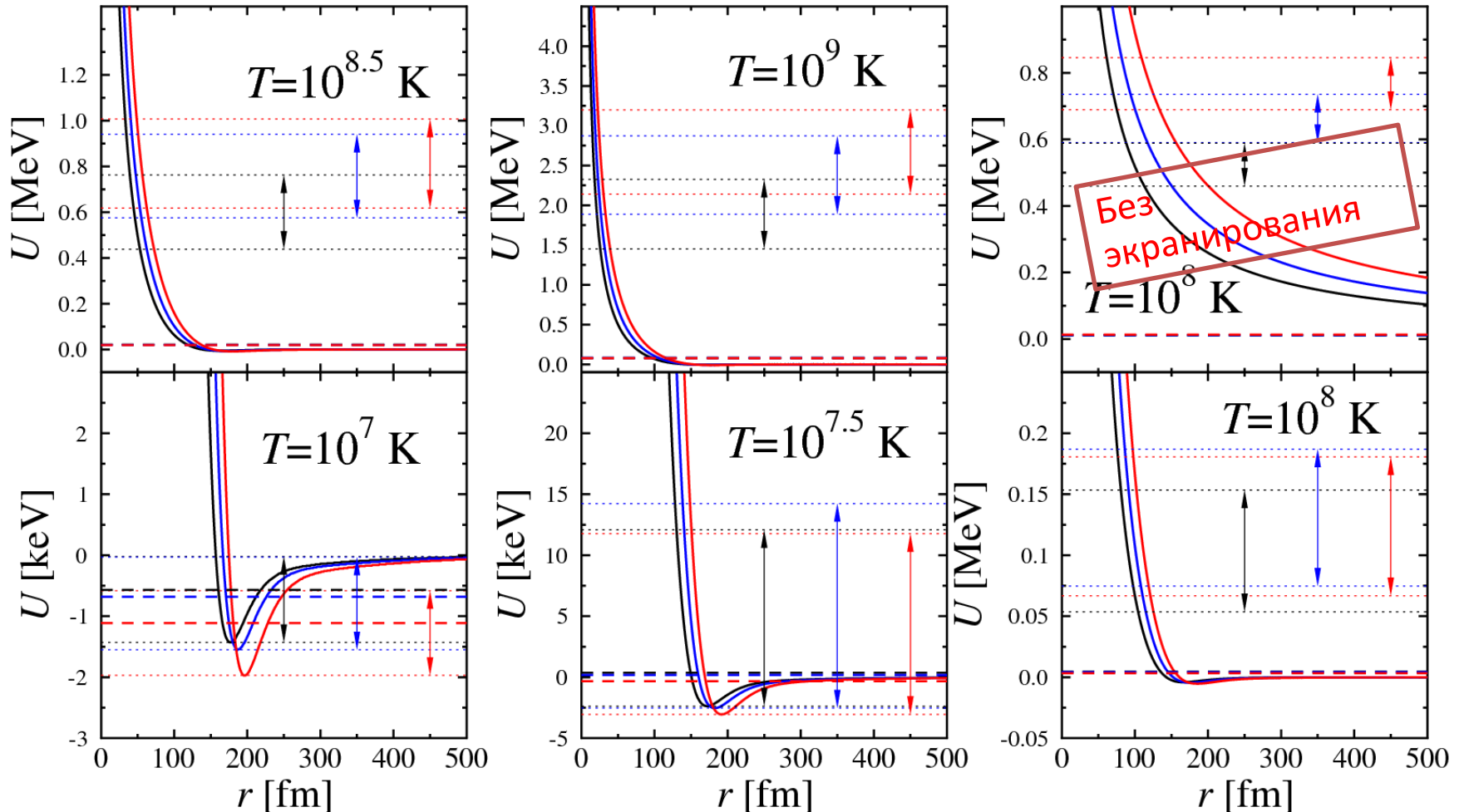
$$u_{22} = u(\Gamma_2, r/a_2)$$

$$u_{12} \neq u(\Gamma_{12}, r/a_{12})$$

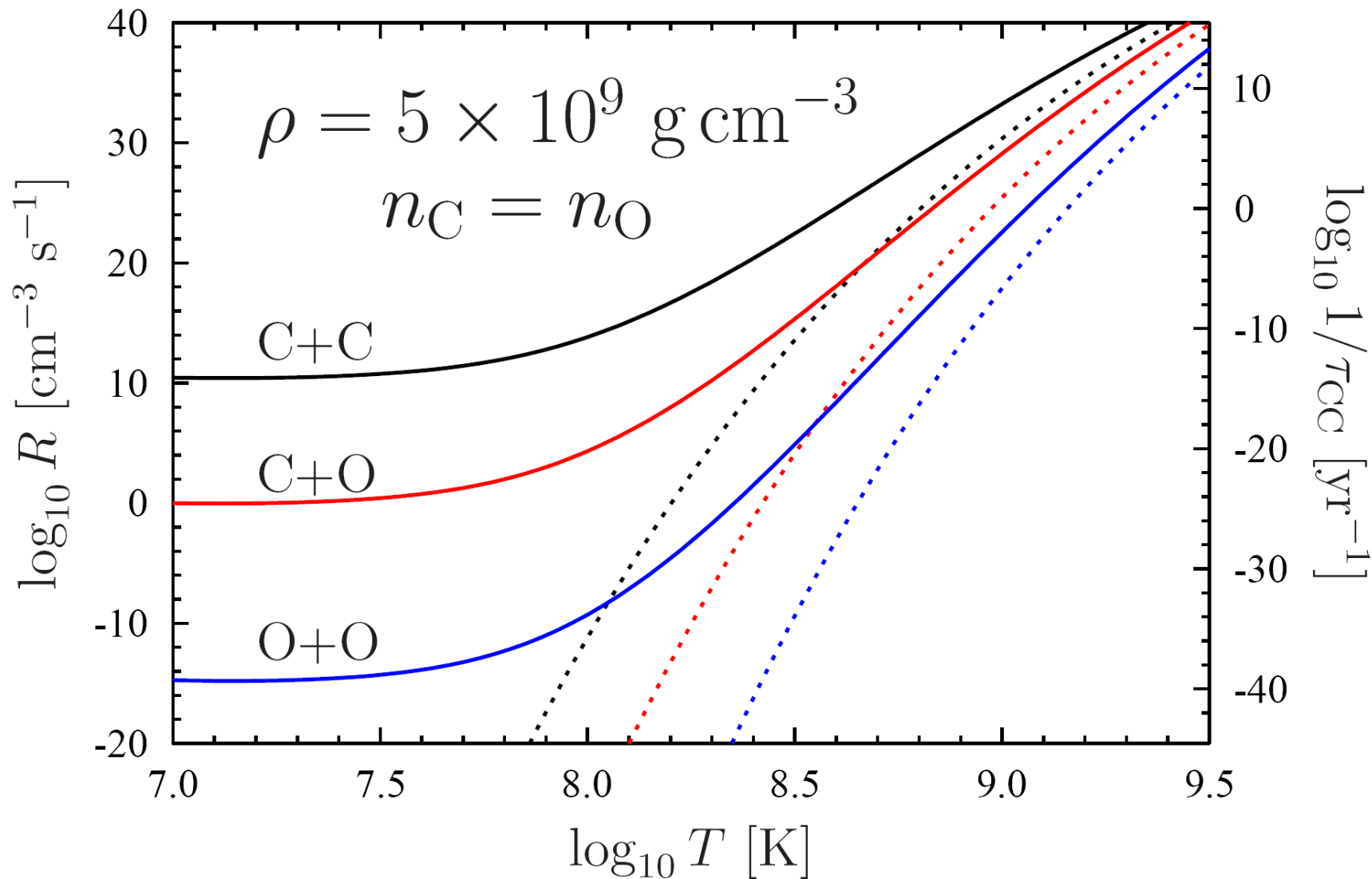


# Ионы гаммовского пика

$$\text{C}^{12} + \text{O}^{16}, \rho = 5 \cdot 10^9 \text{ g cm}^{-3}$$



# Скорости реакции



# Основные выводы и результаты

- Результаты расчетов методом МК интегрирования по траекториям хорошо согласуются с расчетами в модели среднего поля в широком диапазоне параметров.
- Проведён анализ большого объема расчетов потенциалов среднего поля в бинарных смесях, получены их аппроксимации.
- Вычислены и аппроксимированы коэффициенты усиления скоростей ядерных реакций в однокомпонентной плазме и бинарных смесях.



# Перспективы

- Экранирование при слабой неидеальности
- Пикноядерное горение
- Термопикноядерное горение: НЕТ УРОВНЕЙ
- Астрофизические факторы

