

# Научно – координационная Сессия «Исследования неидеальной плазмы».

30 ноября – 1 декабря, 2009, Москва.

## ФЛУКТУАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ: ПРЕДВЕСТНИК ПЛАЗМЕННОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА.

*Ланкин А.В., Норман Г.Э., Саитов И.М.*

*ОИВТ РАН, г.Москва  
МФТИ, г. Долгопрудный*

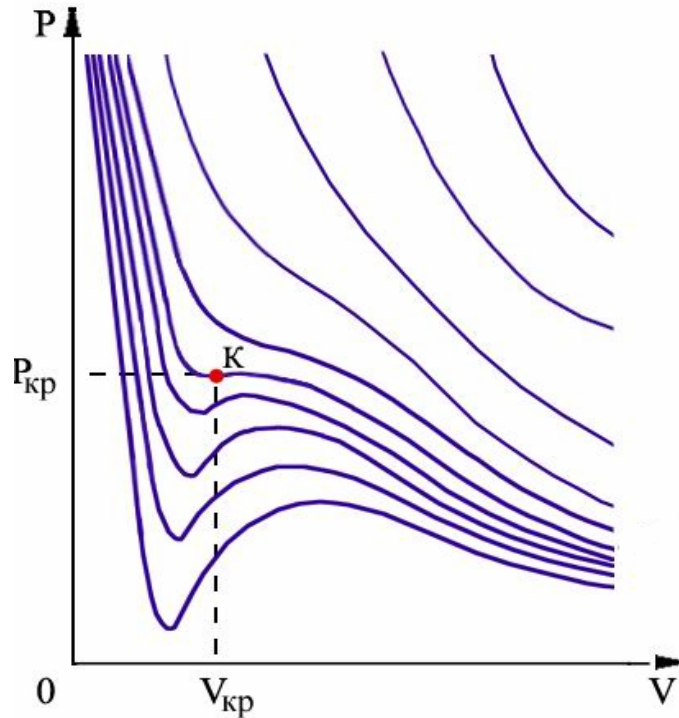


# Содержание

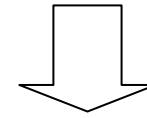
1. Плазменный фазовый переход. Аналогия с газом Ван – дер – Ваальса.
2. Химическая модель плазмы. Поправки к термодинамическим функциям.
3. Модель плазмы. Метод расчета.
4. Результаты расчета флуктуаций давления. Функция распределения.
5. Выводы.

# Плазменный фазовый переход.

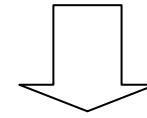
## Аналогия с газом Ван-дер-Ваальса.



$$\left( P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT$$



существует область V:  $\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T > 0$



нарушение условия устойчивости  
возникновение двухфазной области

Отличие от газа Ван-дер-Ваальса:

присутствие электронейтральных атомов

# Химическая модель плазмы.

## Поправки к термодинамическим функциям.

$$Z = \sum_{s=s_0}^{s_{\max}} g_s \exp\left(-\frac{E_s}{kT}\right)$$

$$s_{\max} = s_{\max}(n_e) \quad \left(\frac{\partial s_{\max}(n_e)}{\partial n_e}\right) < 0$$

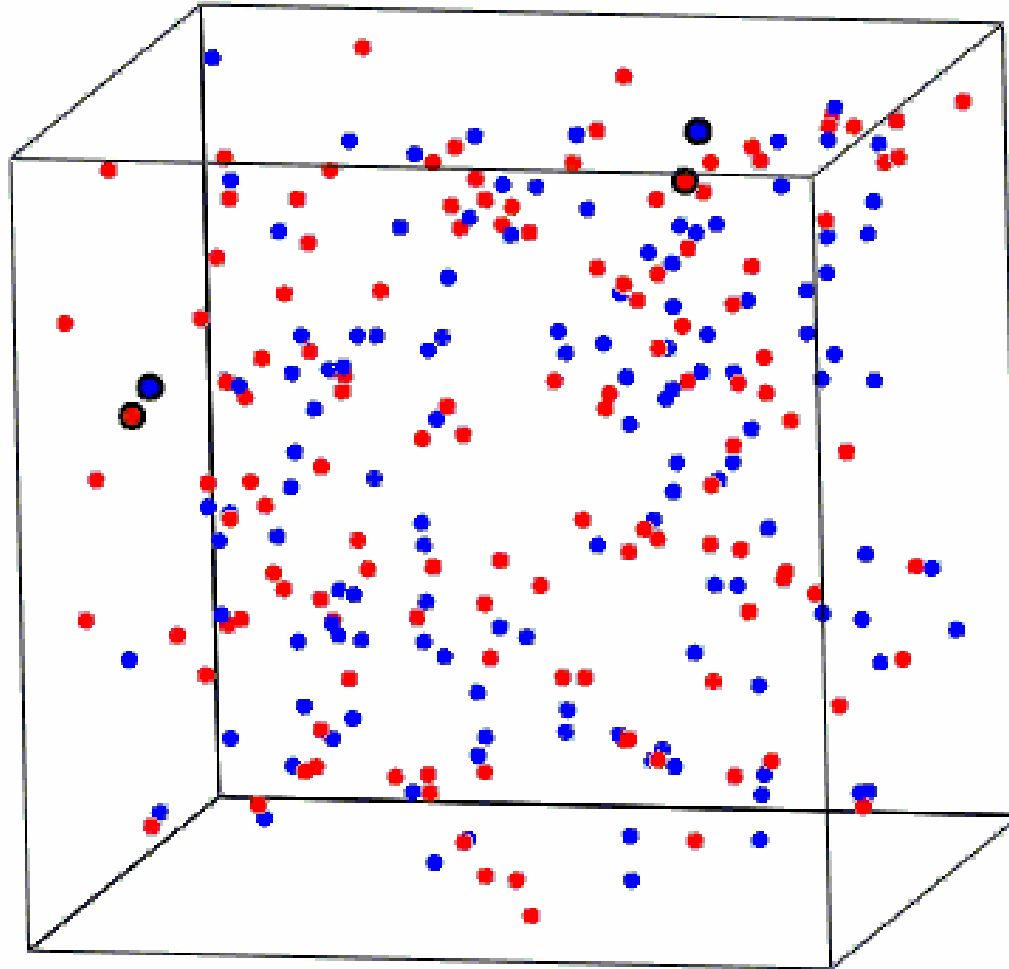
$$\frac{\Delta P}{nkT} = \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial \ln s_{\max}}\right) \left(\frac{\partial \ln s_{\max}}{\partial \ln V}\right) \sim \left(-\frac{\partial s_{\max}(n_e)}{\partial n_e}\right) > 0$$

эффективное отталкивание

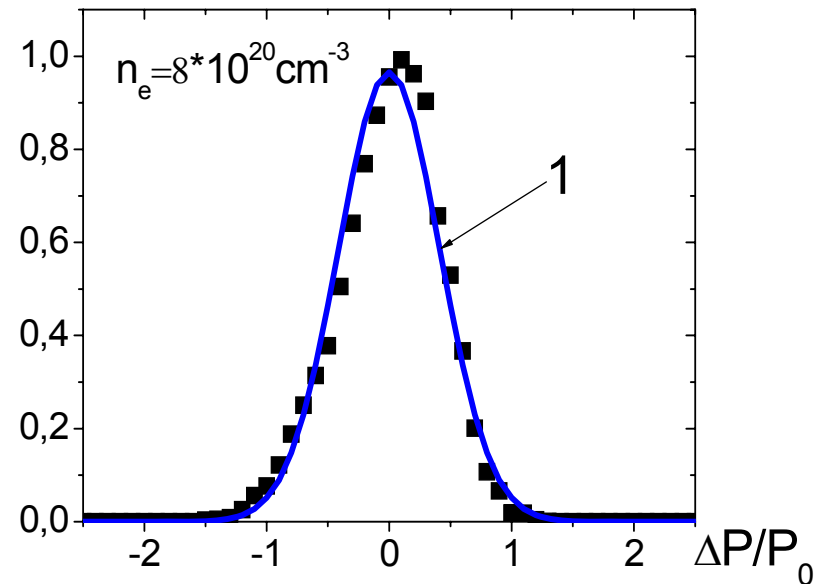
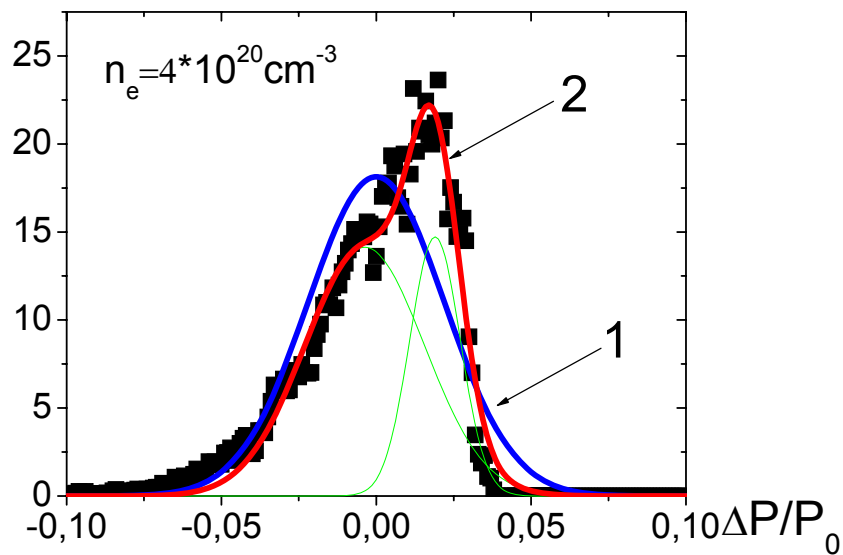
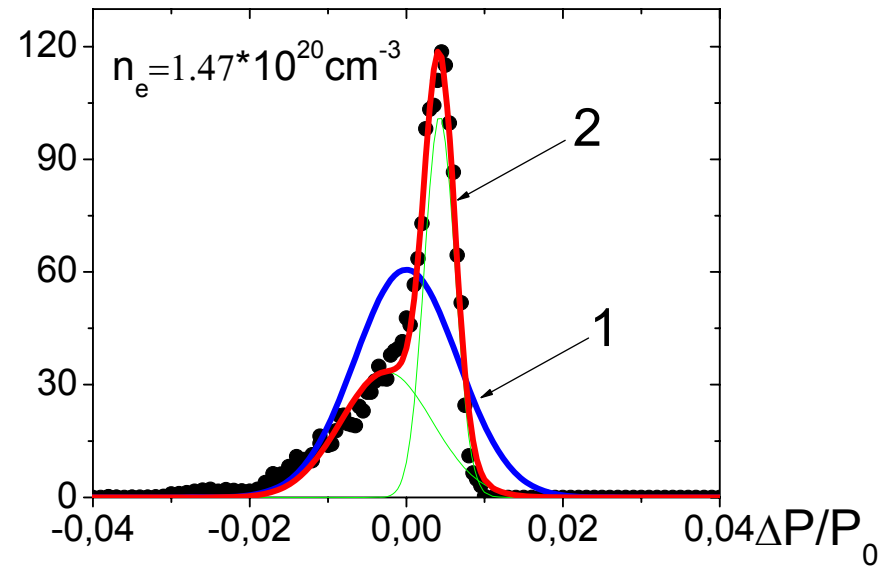
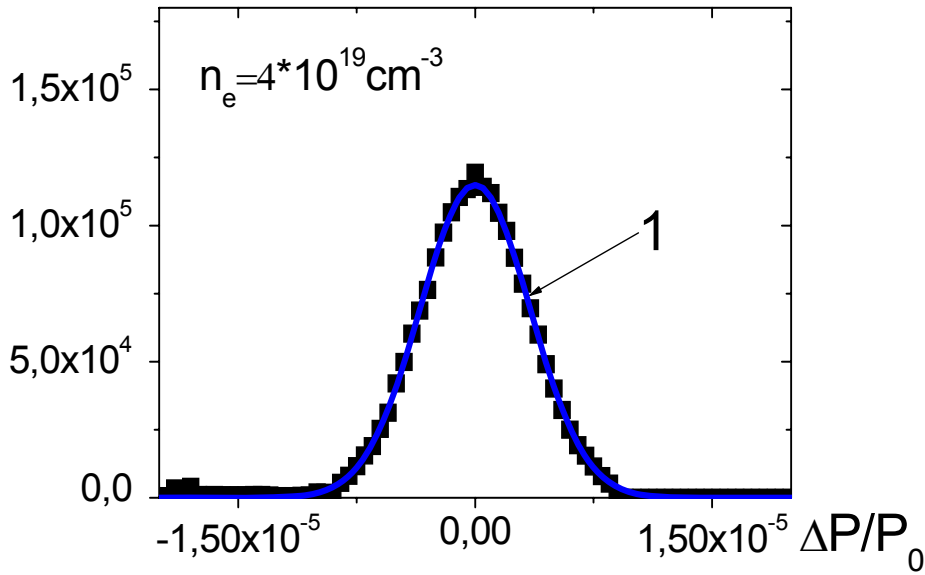
# Модель плазмы. Метод расчета.

$N_{bound} = 2$

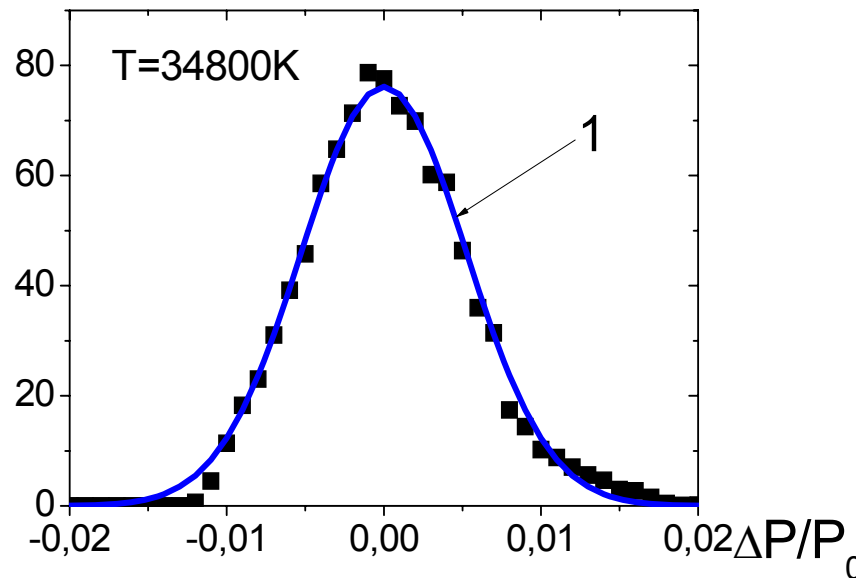
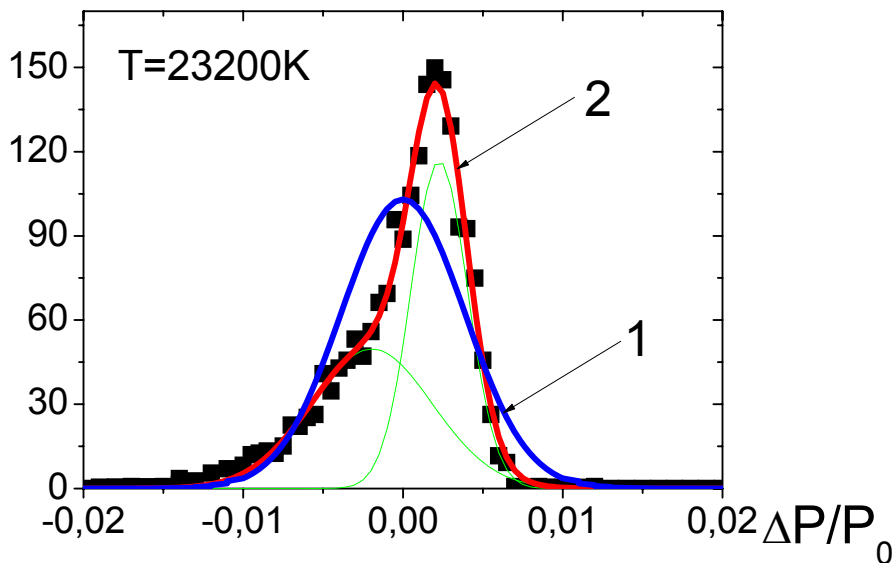
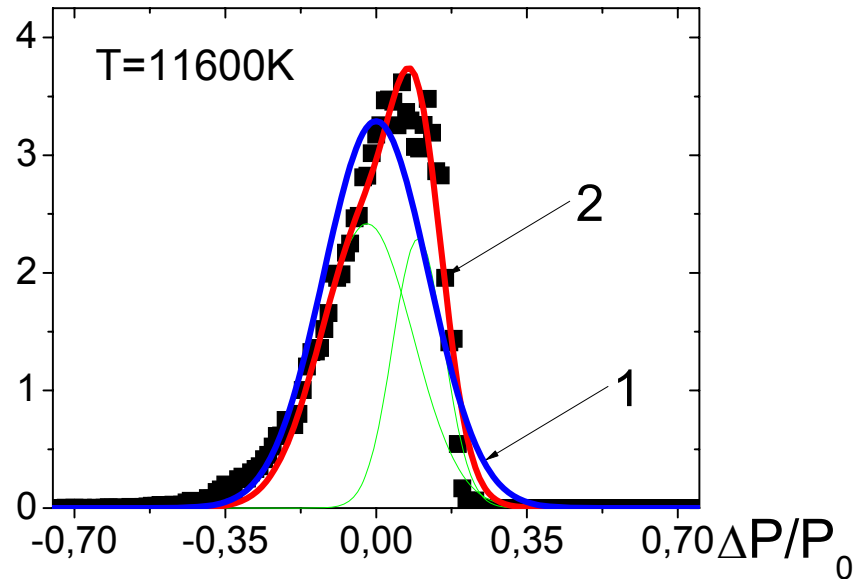
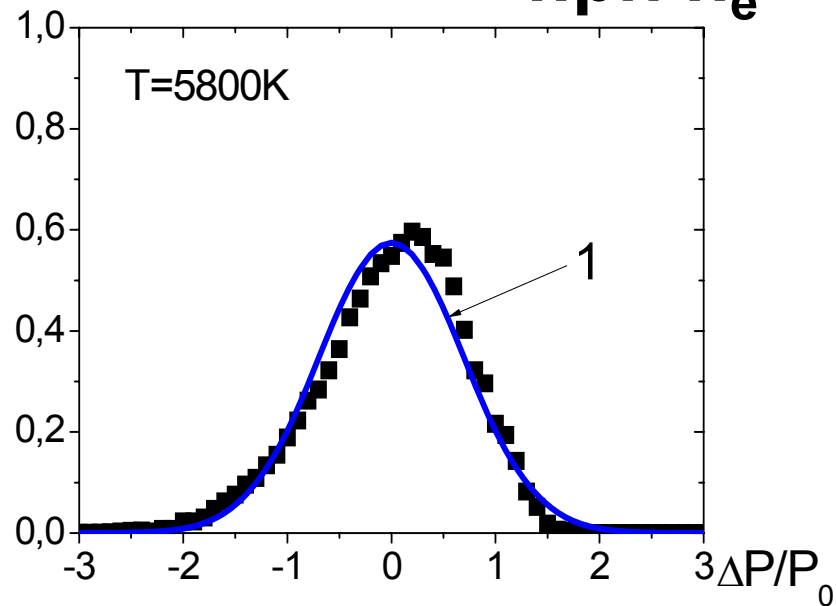
$t = 0$



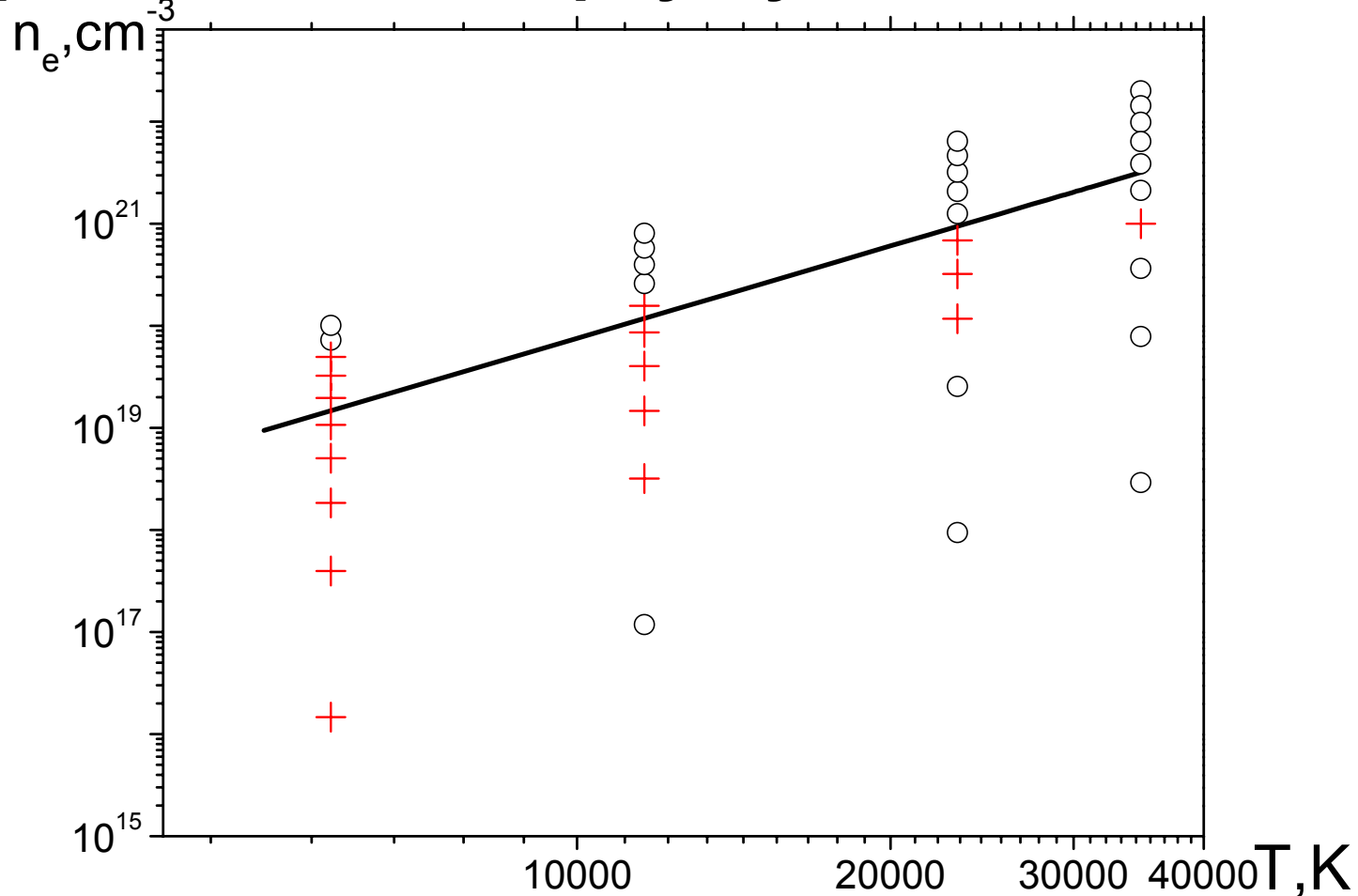
# Функции распределения флуктуаций давления при $T = 11600\text{K}$



# Функции распределения флуктуаций давления при $n_e = 1.6 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$



# Диаграмма характерных областей распределения флуктуаций давления



○ -функция распределения давления описывается нормальным распределением

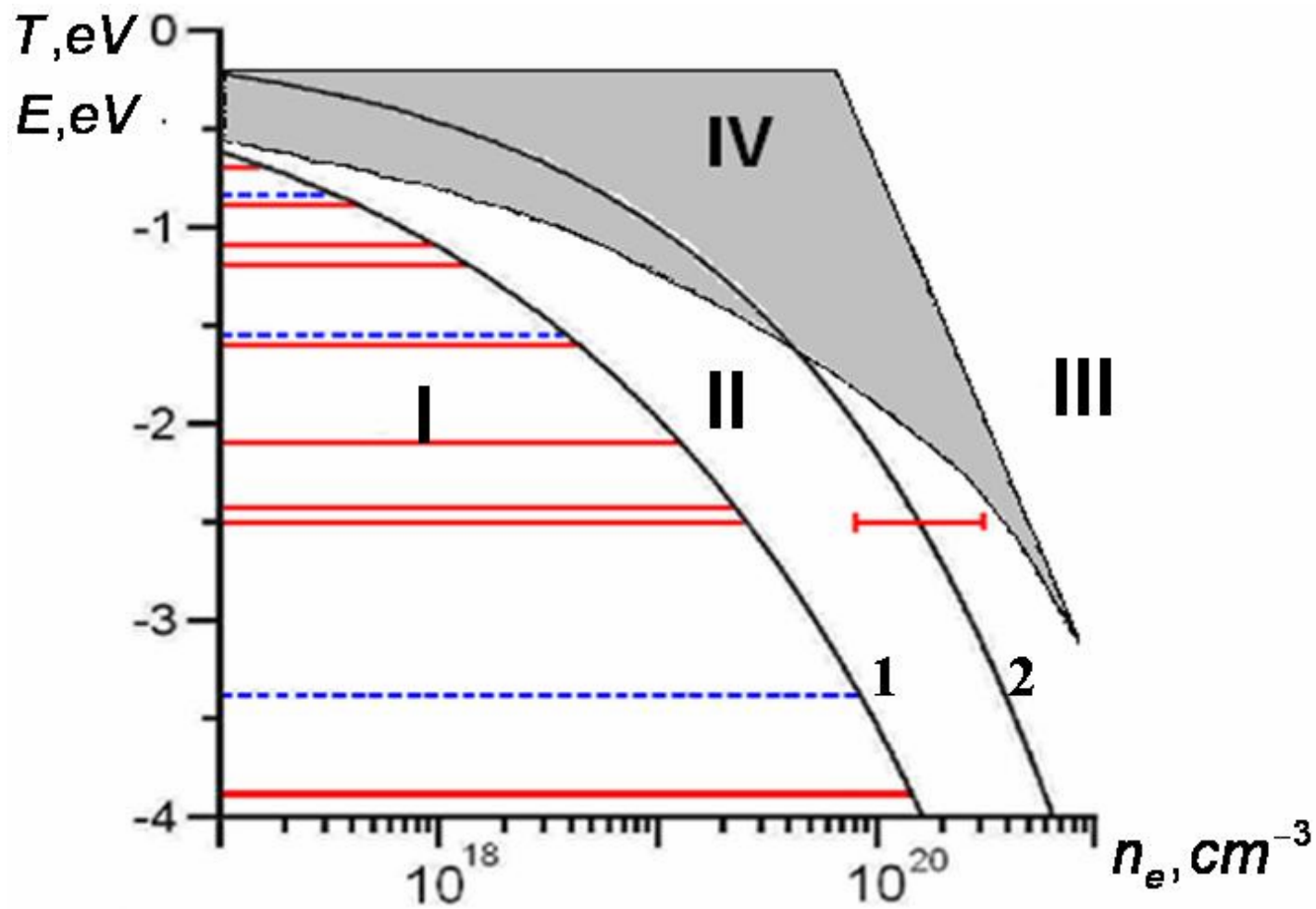
+ -функция распределения давления описывается суперпозицией двух нормальных распределений



# Диаграмма $n_e$ – энергия уровня

для  $H$  (---)

и  $Cs$  (—)



# Выводы

1. Обнаружена область плотностей зарядов и температур плазмы в которой функция распределения флуктуаций давления имеет асимметричную форму и не может быть описана функцией распределения Гаусса.
2. В этой области параметров плазмы нет парных связанных состояний, т.е. отсутствует стабилизирующий фактор Грязнова – Иосилевского.
3. Полученные функции распределения описаны суперпозицией двух распределений Гаусса. Данный факт может служить косвенным указанием на существование двухфазной области.



# Параметры МД расчета.

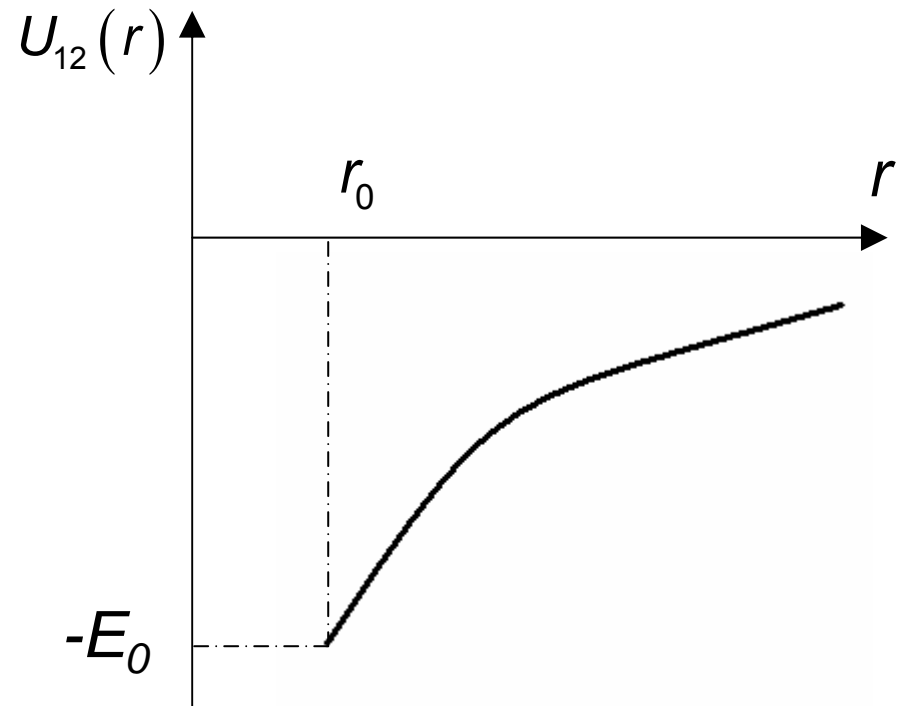
Рассматривается двухкомпонентная невырожденная система, состоящая из однократно заряженных частиц ( $Z=1$ ) электронов и ионов.

Отношение масс:  $M/m = 100$

Количество частиц:  $N = 1000$

Потенциал взаимодействия:

$$U_{12}(r) = \begin{cases} -\frac{e^2}{r}, & r > r_0 \\ -E_0, & r \leq r_0 \end{cases}$$



# Метод расчета флуктуаций давления.

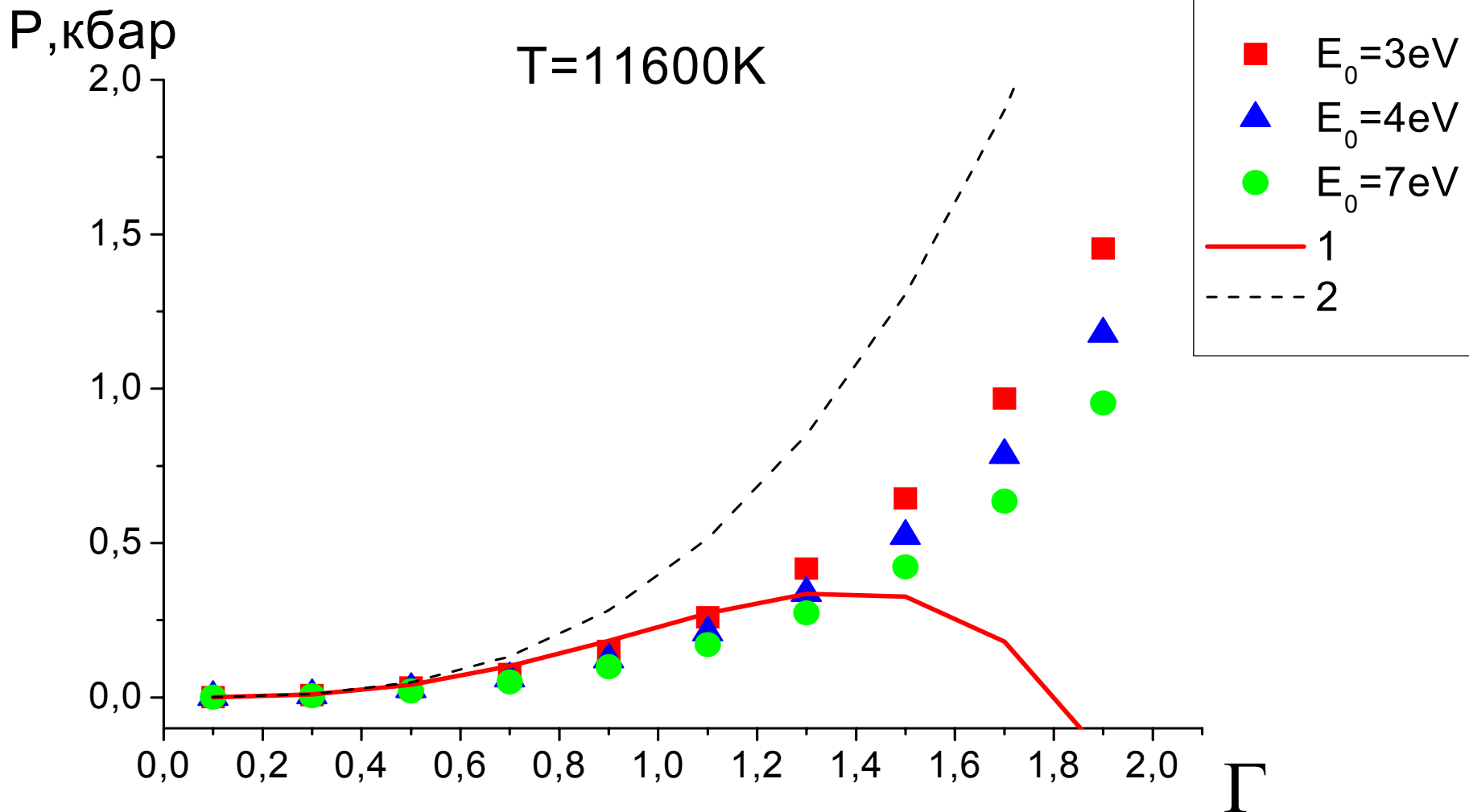
Расчет давления производится по следующему алгоритму:

1. Методом молекулярной динамики рассчитываются траектории всех частиц в равновесной плазме в течение полного времени моделирования.
2. На каждом шаге мгновенное значение давление рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{2}{3V} \sum_{i=1, N} \frac{m_i v_i^2}{2} - \frac{1}{3V} \sum_{i, j=1, N}^{i>j} r_{ij} \frac{\partial U(r_{ij})}{\partial r_{ij}}$$

3. Флуктуации давления:  $\Delta P = P - \bar{P}$   
значения давления получены в единицах  $P_0 = kT \left( \frac{kT}{e^2} \right)^3$

# Результаты расчета давления



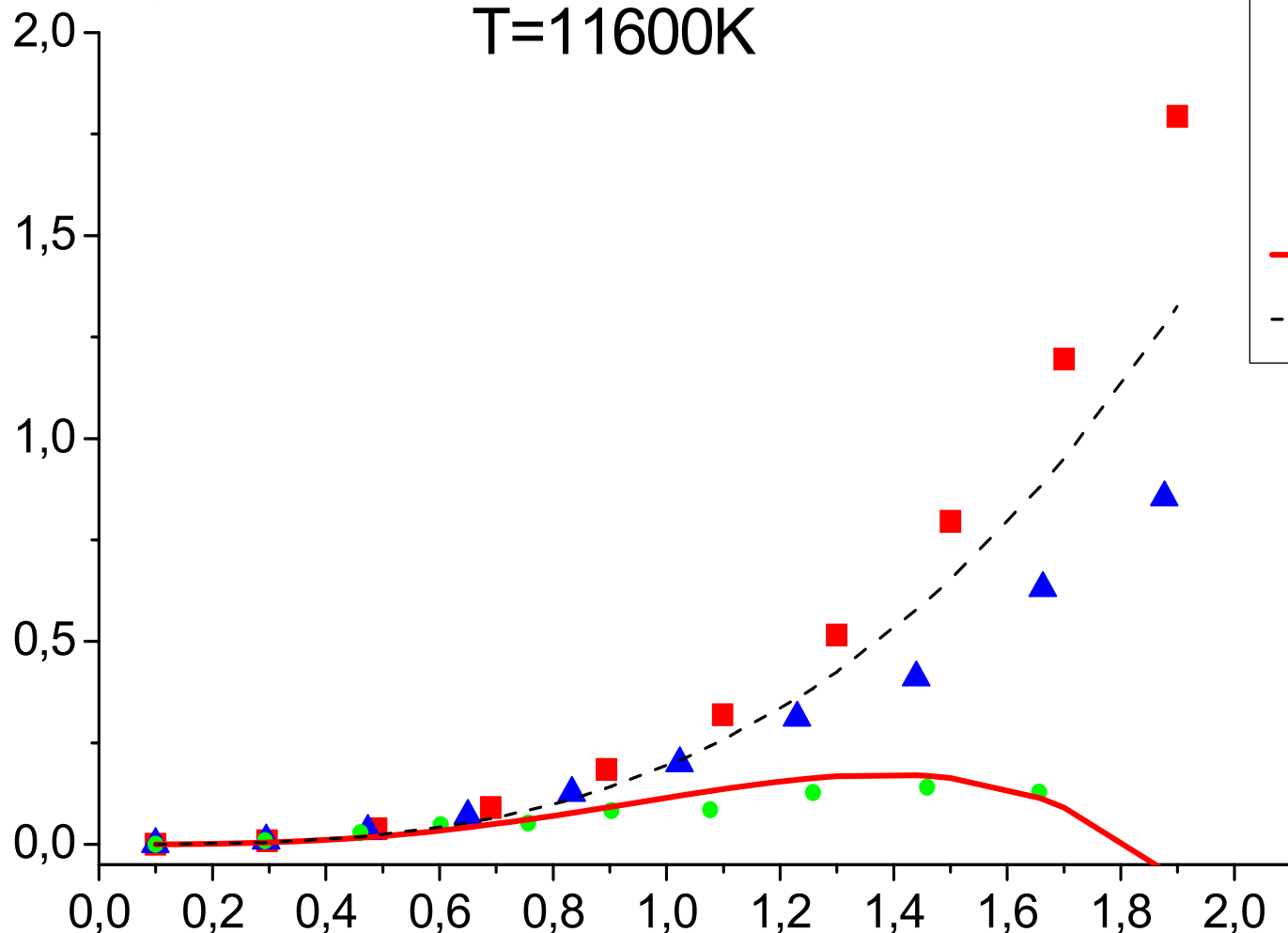
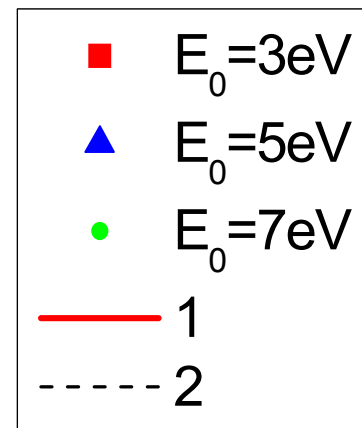
1 – давление дебаевской (идеальной) плазмы

2 – идеальный газ

# Давление свободной подсистемы

Р, кбар

T=11600K

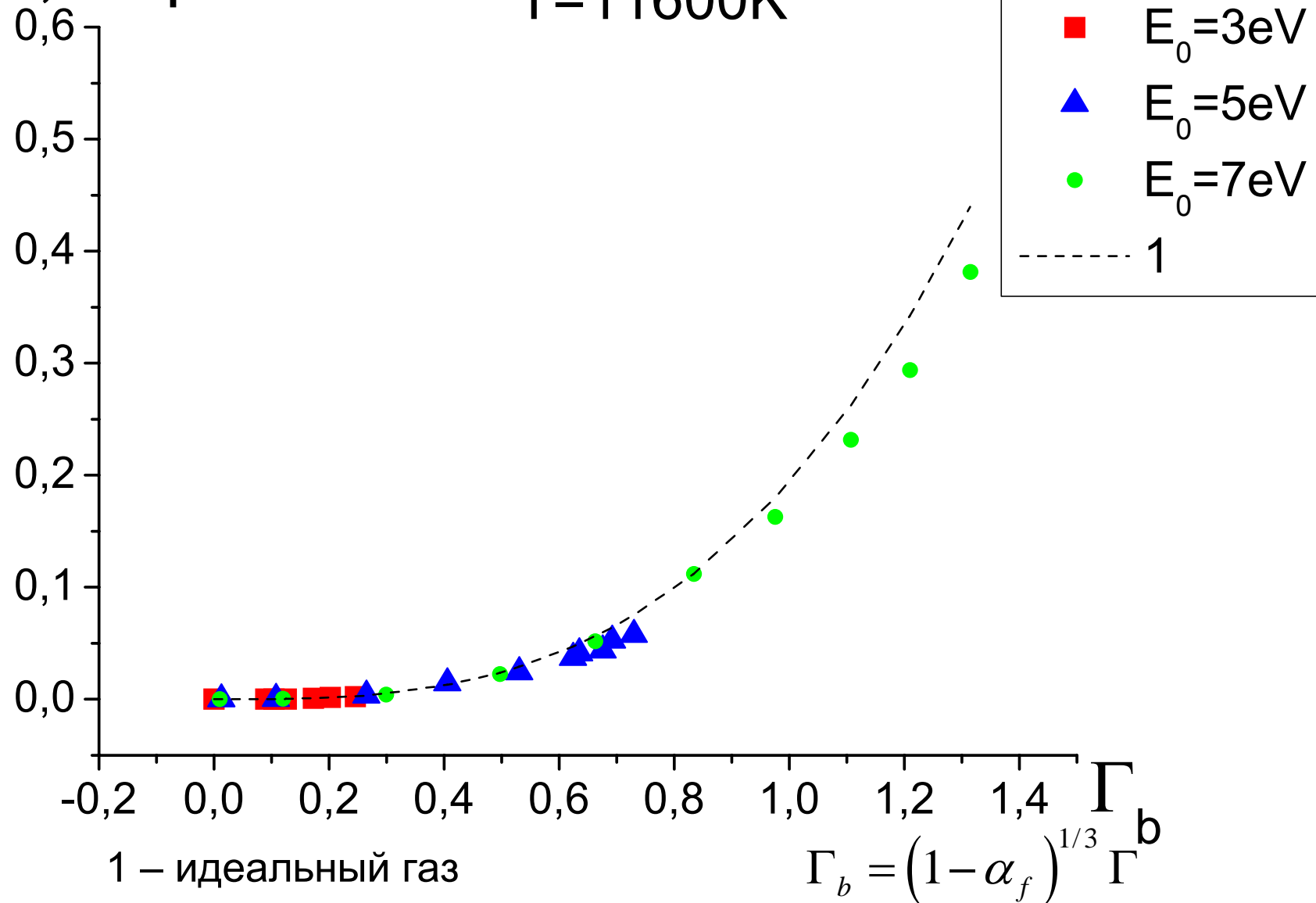


Параметр неидеальности для свободной подсистемы  $\Gamma_f = \alpha_f^{1/3} \Gamma$ ,  
где  $\alpha_f$  - доля свободных состояний.

# Давление подсистемы парных флуктуаций

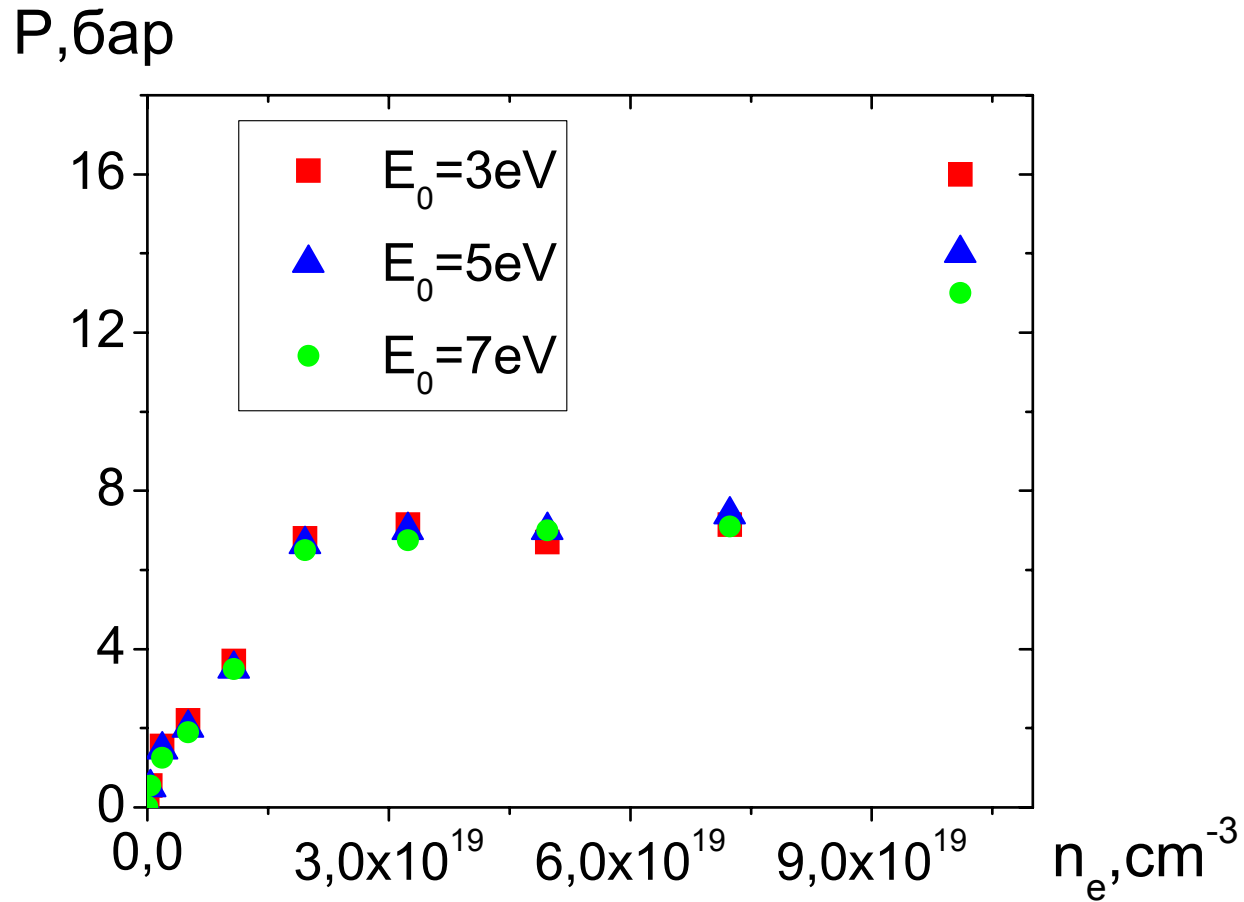
$P$ , кбар

$T=11600\text{K}$





# Результаты расчета давления при $T = 5800\text{K}$



# ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

