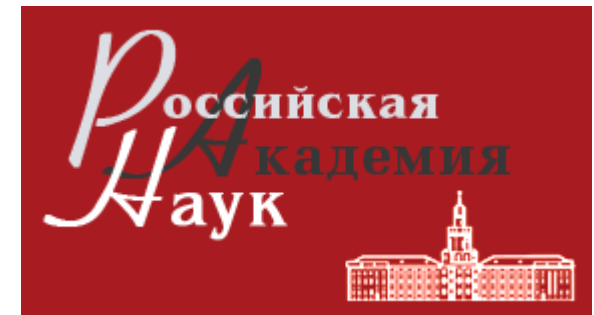


Президиум РАН  
Москва  
26-27 ноября 2008



*Научно-координационная сессия  
"Исследования неидеальной плазмы"*

## **ФЛУКТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД В ТЕОРИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ**

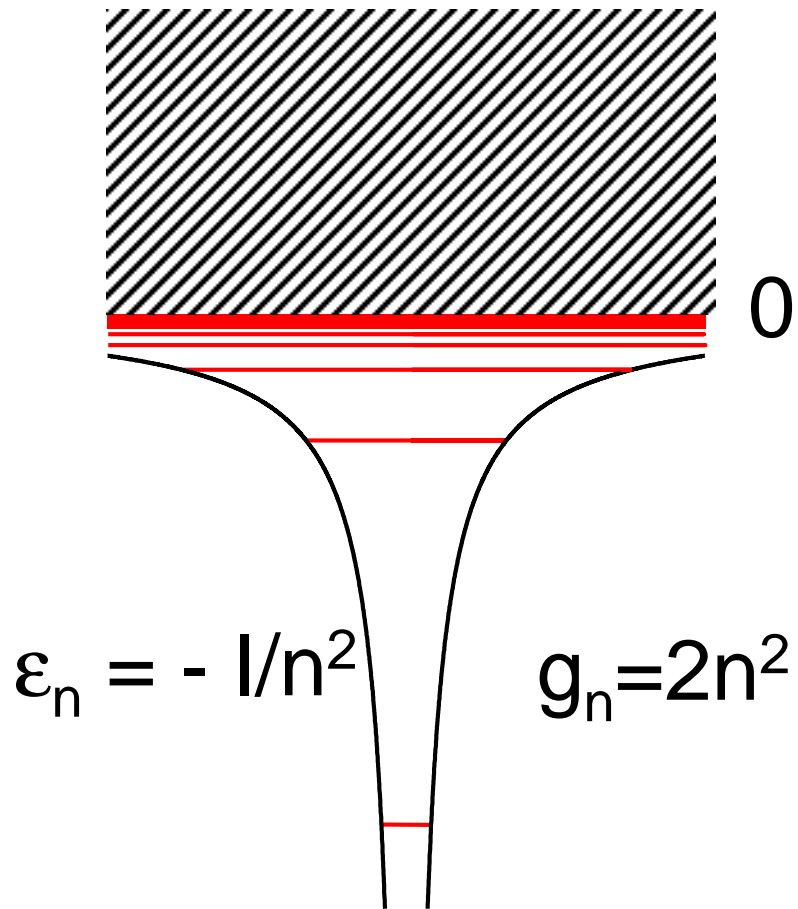
***А.В. Ланкин, Г.Э. Норман***

Объединенный институт высоких температур РАН  
Московский физико-технический институт

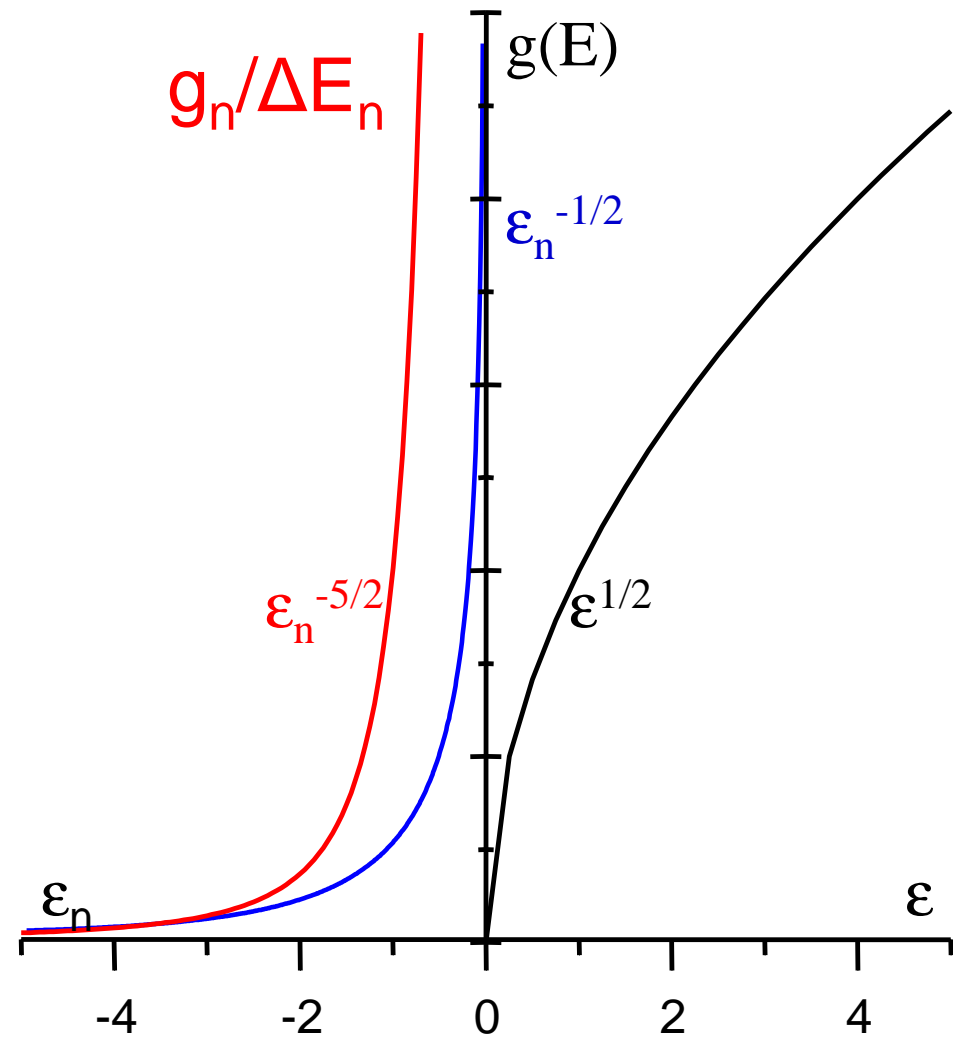


# Electron states in plasmas

*hydrogen atom*



**1.** Restriction of excited states of atoms



**2.** Transition from bound pair excited states to collective excitations of free electrons

# TWO PROBLEMS

1. Restriction of the number of excited states.  
It was treated a great number of times since 1913 by Bohr, Fermi, Plank, Brillouin, Larkin, Ebeling, Kraeft, Röpke, Schlanges, Redmer, Alastuey, Воробьев, Грязнов, Иосилевский, Старостин *et al.*
2. Crossover from bound pair electron-ion excited states to collective excitations of free electrons.

Our idea of the crossover is **to bridge**:  
excited atoms – pair fluctuations – triple  
fluctuations – multiple fluctuations – collective  
fluctuations or excitations (plasma waves)

# **СОДЕРЖАНИЕ** (*равновесная плазма*)

**1. Идея подхода**

**2. Плотность парных состояний у  
предела ионизации**

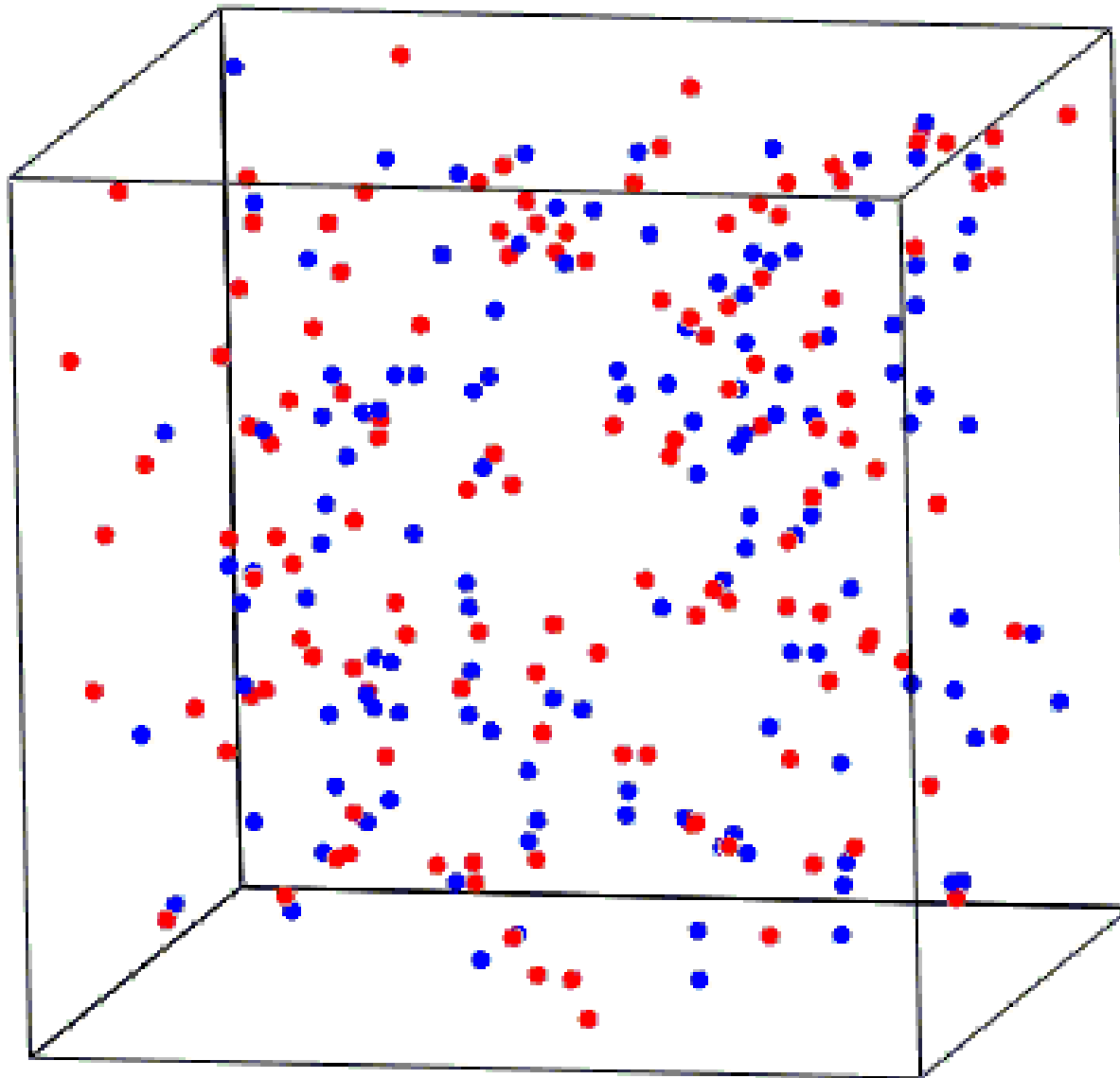
**3. Характерные области существования  
парных электронных состояний**

**4. Плотность состояний**

**Заключение**

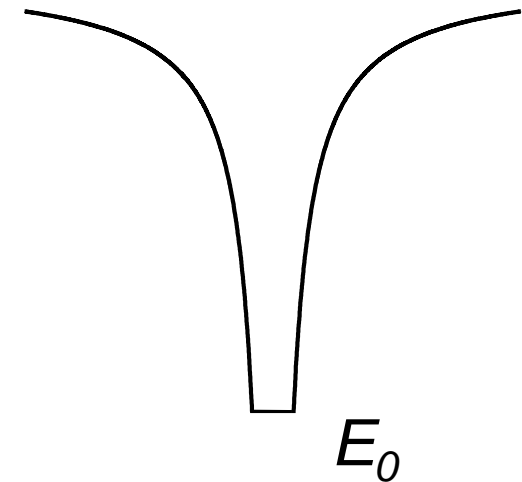
# **1. Идея подхода**

# Visualization of moving particles in MD-cell



● – electrons

● – ions



**$N = 128$**

**$N_D = 0.133$**

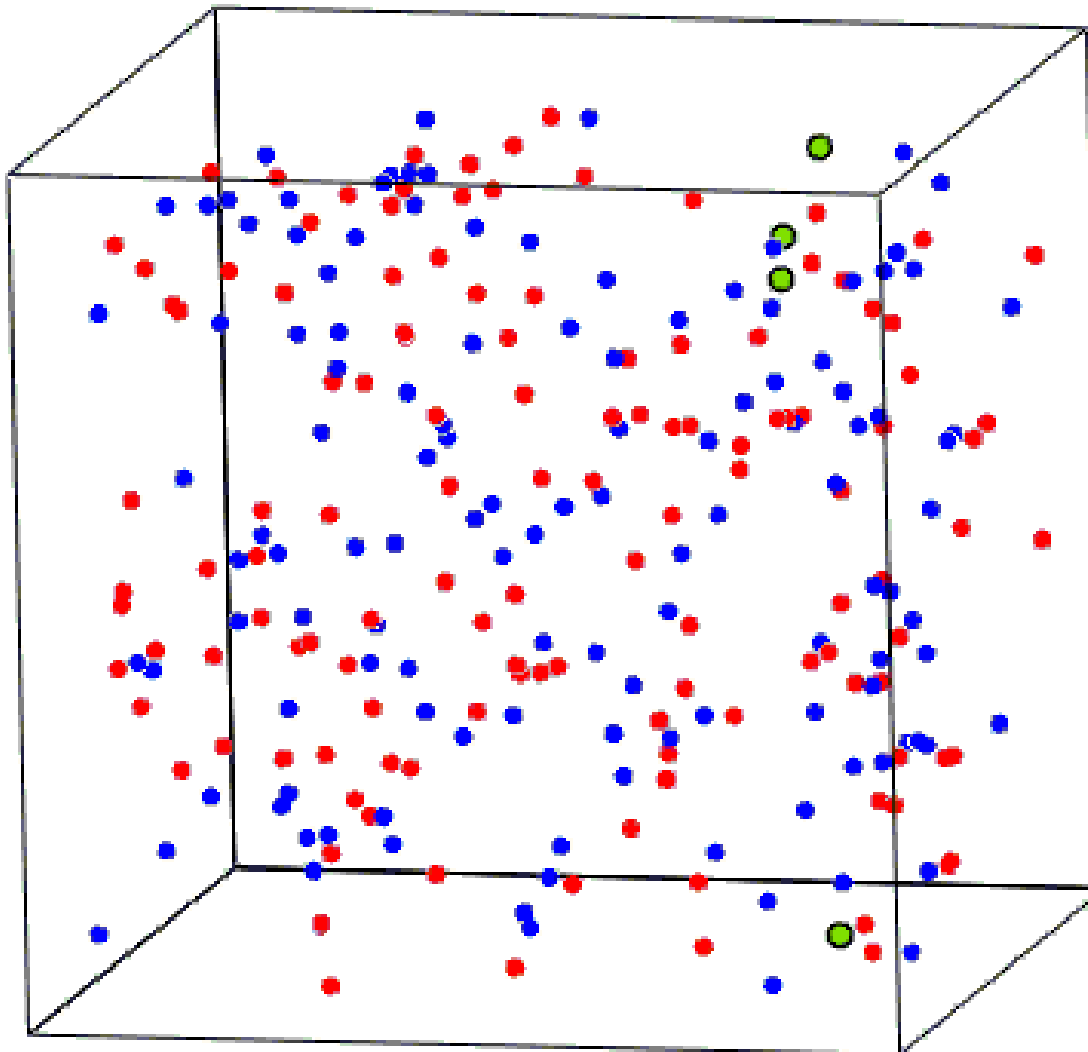
**$M/m = 10$**

$$\Gamma = (4\pi n_e / 3)^{1/3} (e^2 / kT) = 1.3$$

# Pair transient bound state visualization

$N_{bound} = 2$

$t = 0$



● – electron

● – ion

● – bound electron

● – bound ion

Selection  
criterion:

$$\varphi > \varphi_0 = 4\pi$$

$$N = 128$$

$$\Gamma = 1.3$$

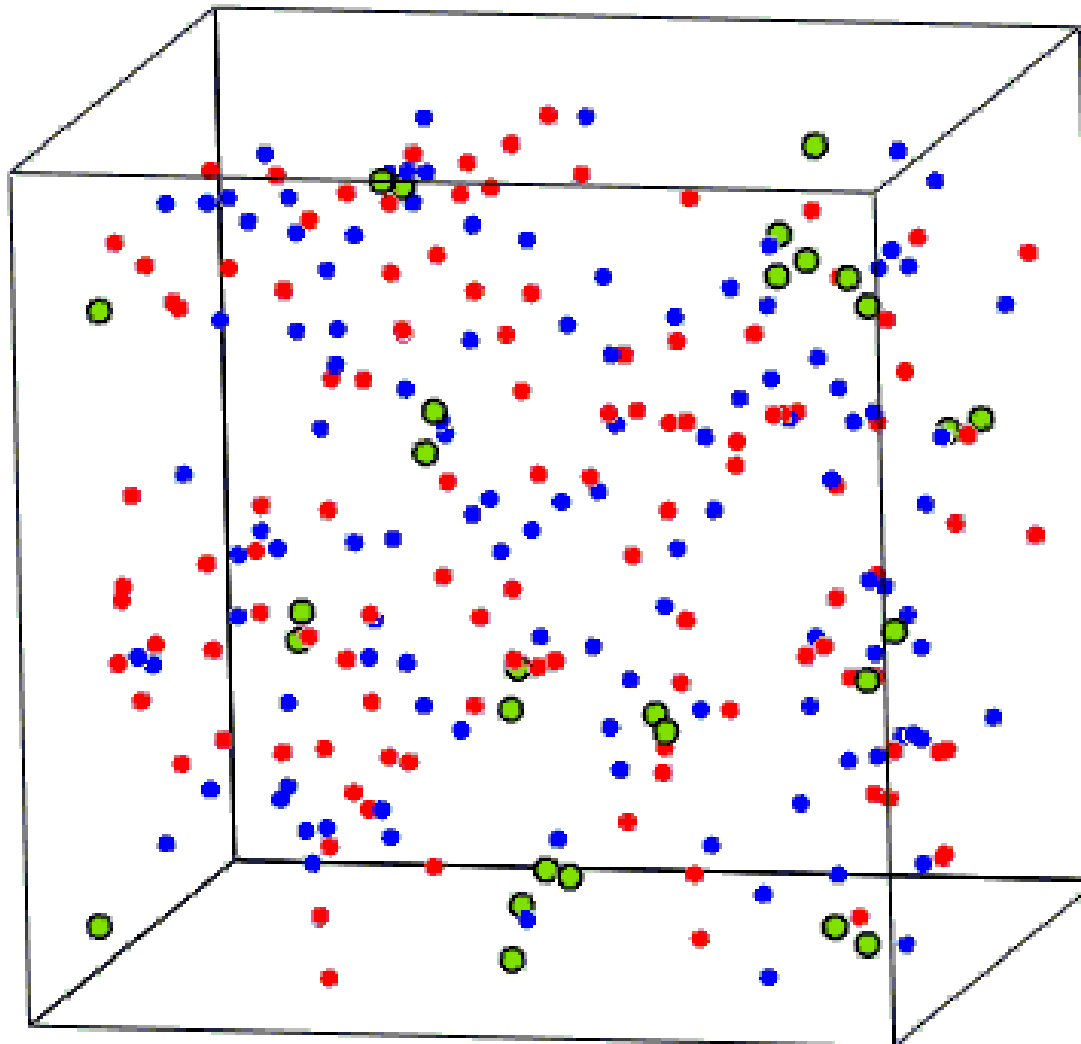
$$N_D = 0.133$$

$$M/m = 10$$

# Pair transient bound state visualization

$N_{bound} = 14$

$t = 0$



● – electron

● – ion

● – bound electron

● – bound ion

Selection  
criterion:

$$\varphi > \varphi_0 = 2\pi$$

$$N = 128$$

$$\Gamma = 1.3$$

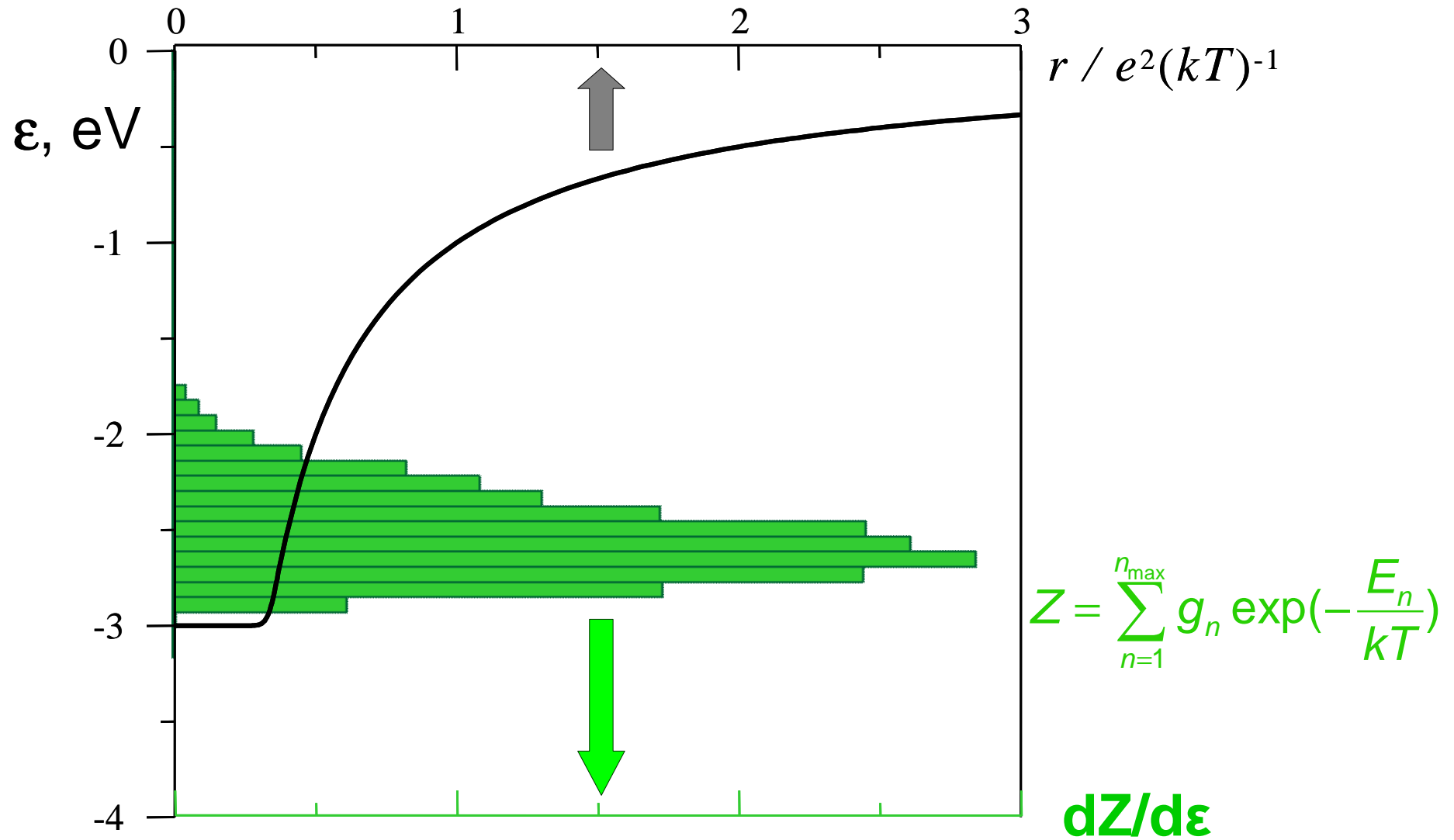
$$N_D = 0.133$$

$$M/m = 10$$

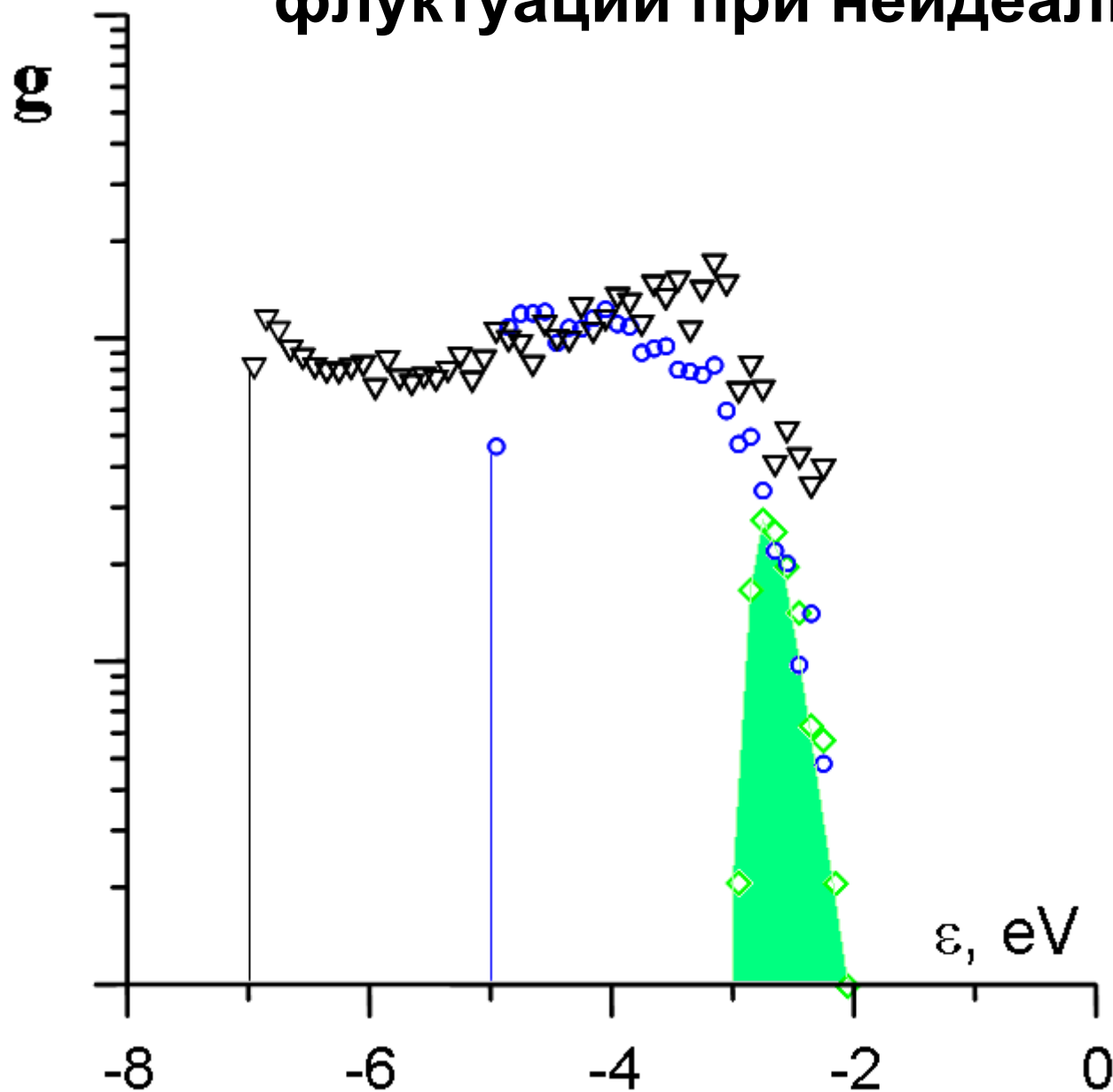


## **2. Плотность парных состояний у предела ионизации**

# Заселенности состояний парных флуктуаций



# Плотности состояний парных флуктуаций при неидеальности $\Gamma = 1$



$$\varphi_0 = 8\pi$$

# ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ПЛОТНОСТИ СВЯЗАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Isolated hydrogen atom

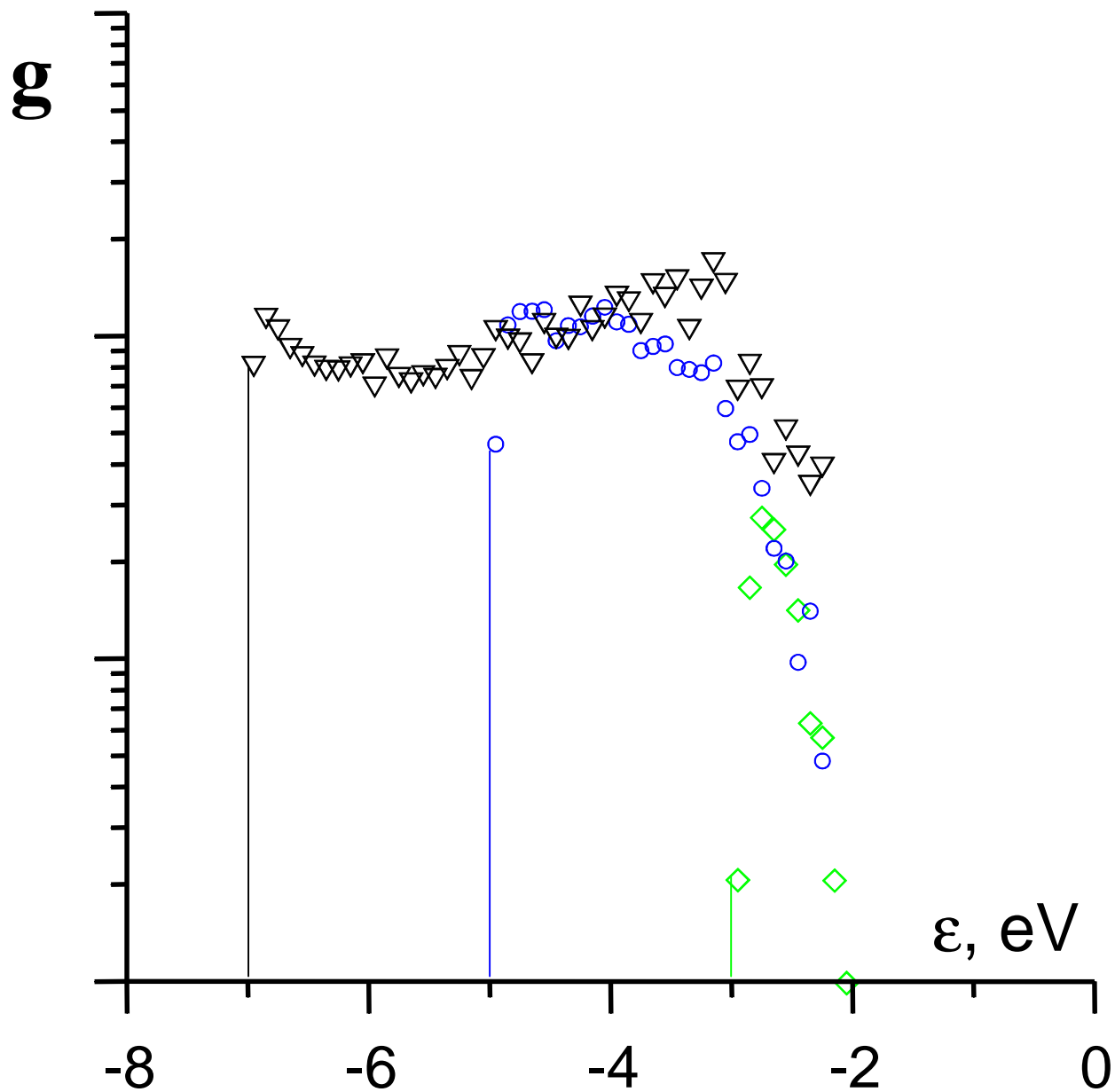
$$\varepsilon = \frac{Ry}{n^2}$$

$$g(\varepsilon) = \frac{1}{2} \cdot Ry^{\frac{3}{2}} \cdot |\varepsilon|^{-\frac{5}{2}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon}{kT}}$$

Plank-Larkin

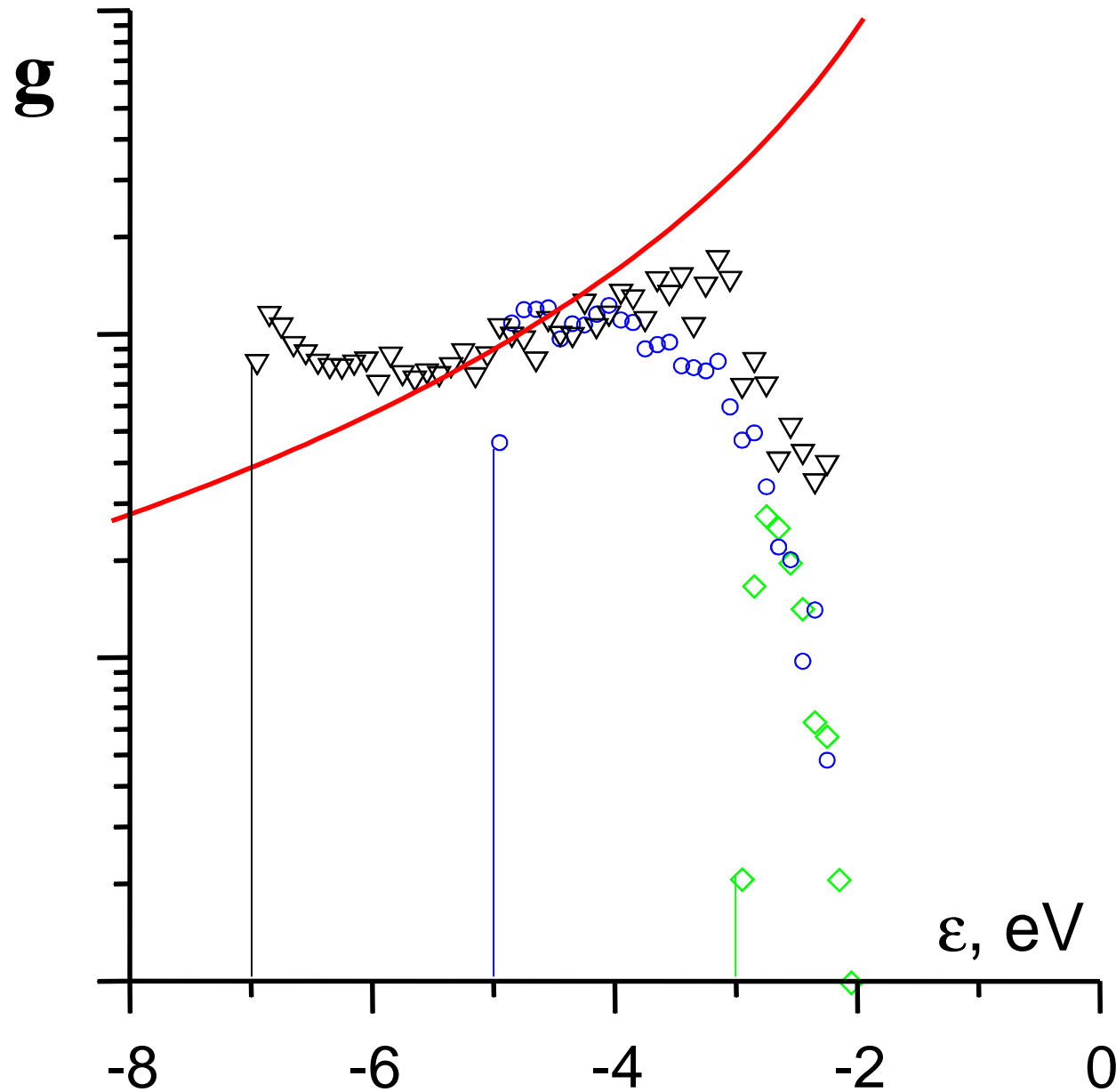
$$g(\varepsilon) = \frac{1}{2} \cdot Ry^{\frac{3}{2}} \cdot |\varepsilon|^{-\frac{5}{2}} \cdot \left[ e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} - 1 + \frac{\varepsilon}{kT} \right]$$

# Плотности состояний парных флуктуаций при неидеальности $\Gamma = 1$



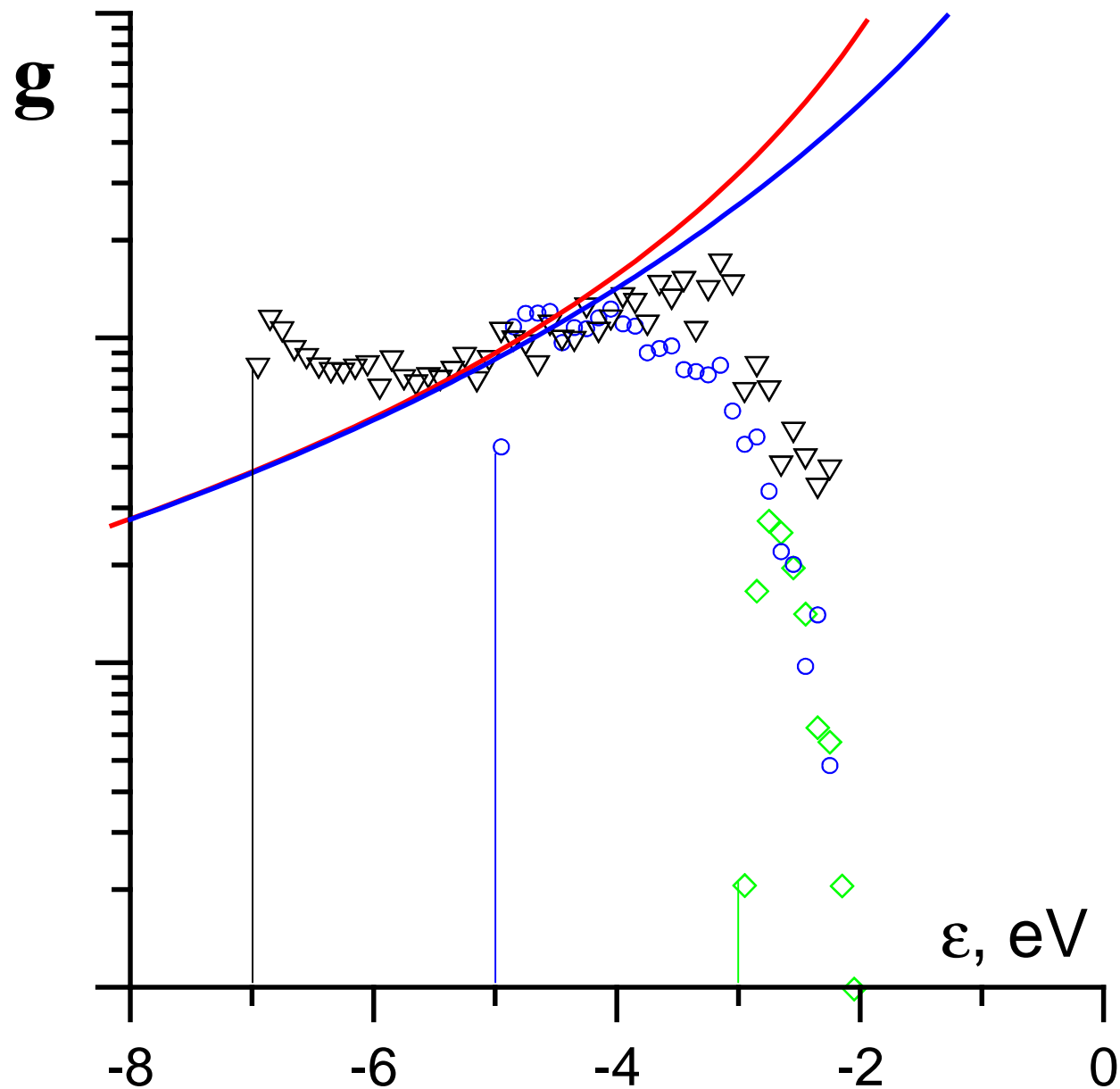
$$\varphi_0 = 8\pi$$

# Плотности состояний парных флуктуаций при неидеальности $\Gamma = 1$



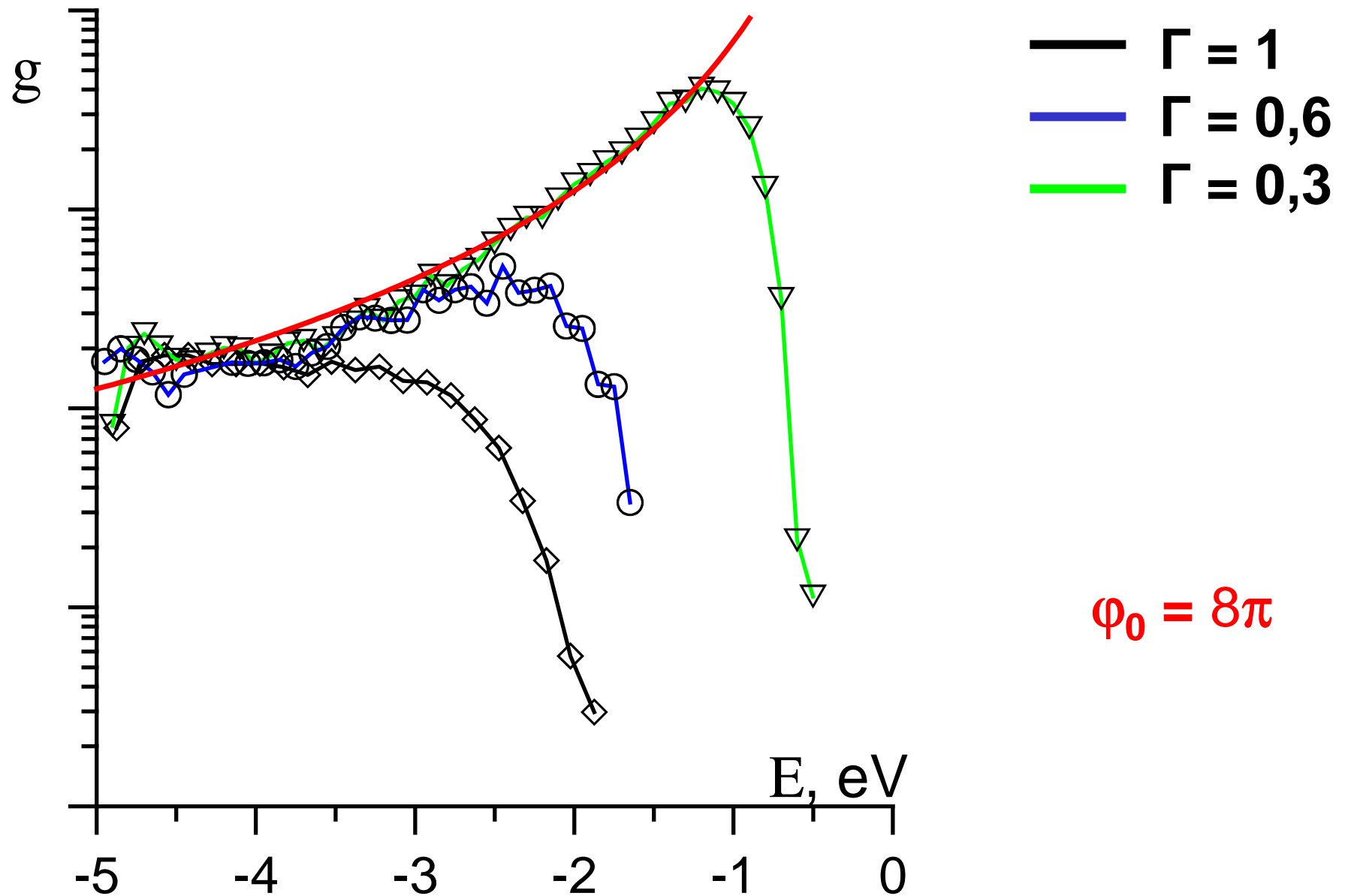
$$\varphi_0 = 8\pi$$

# Плотности состояний парных флуктуаций при неидеальности $\Gamma = 1$



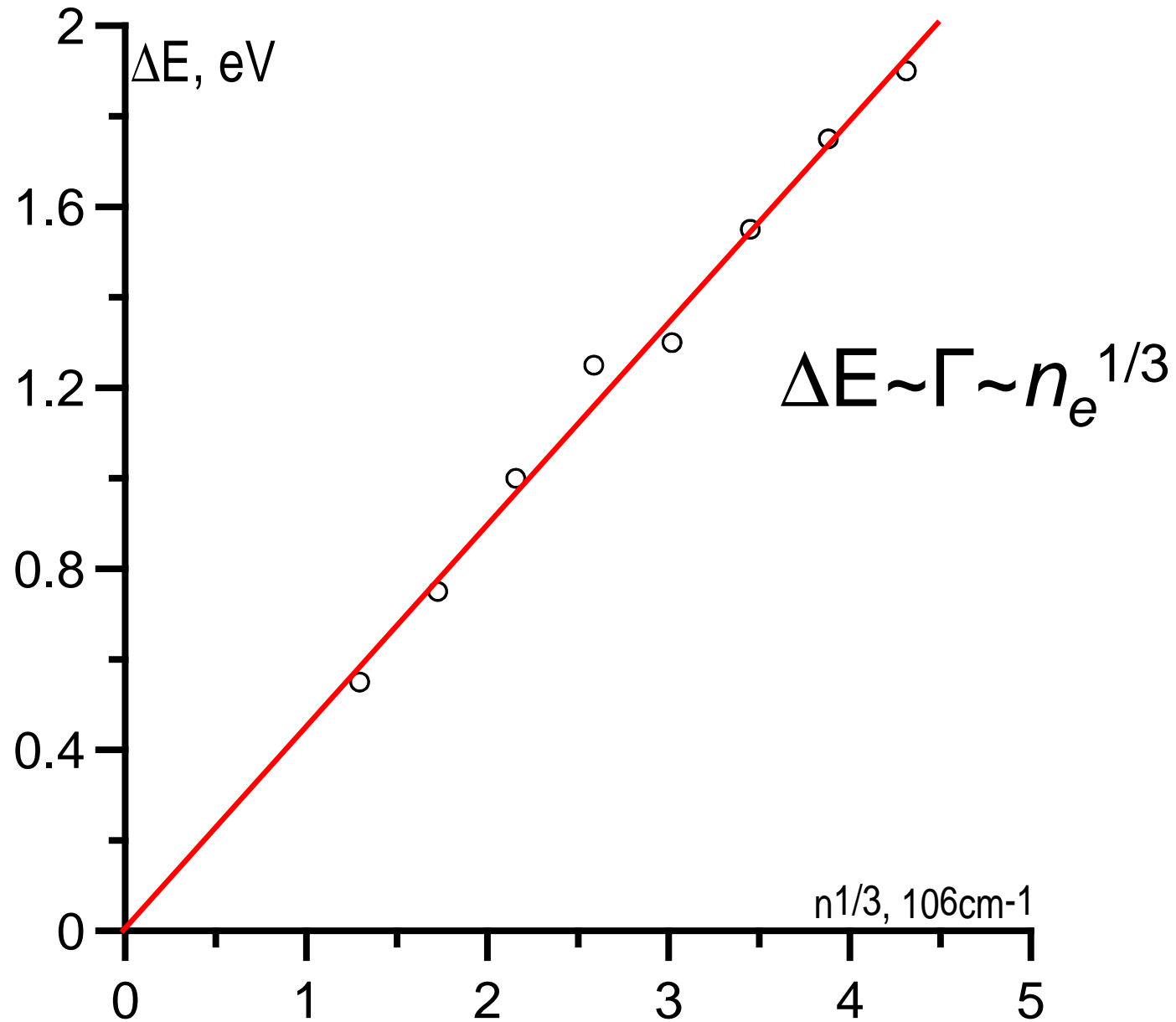
$$\varphi_0 = 8\pi$$

# Плотности состояний парных флуктуаций при различных неидеальностях



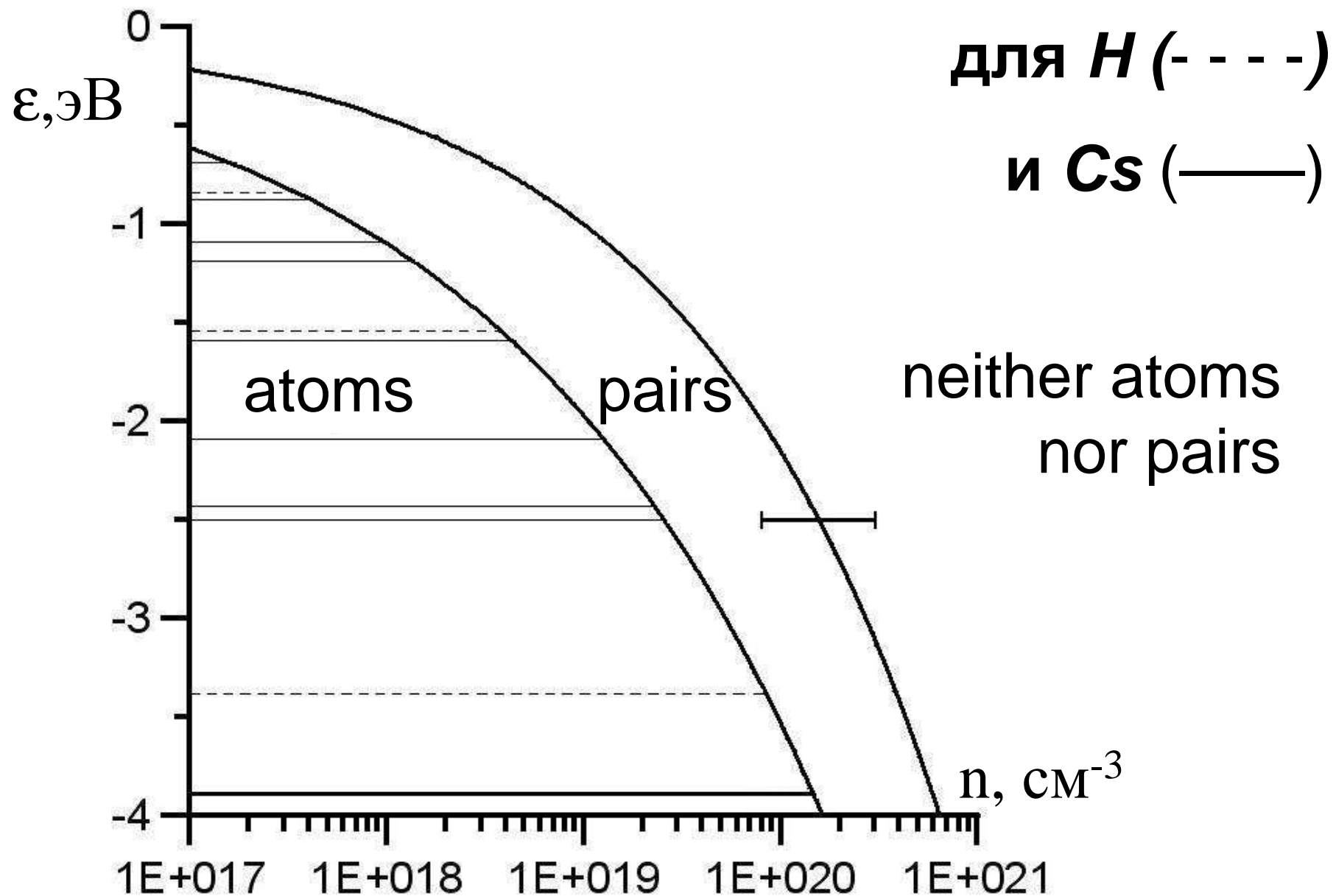


# Energy dependence of $\Delta E$ on the density $n$

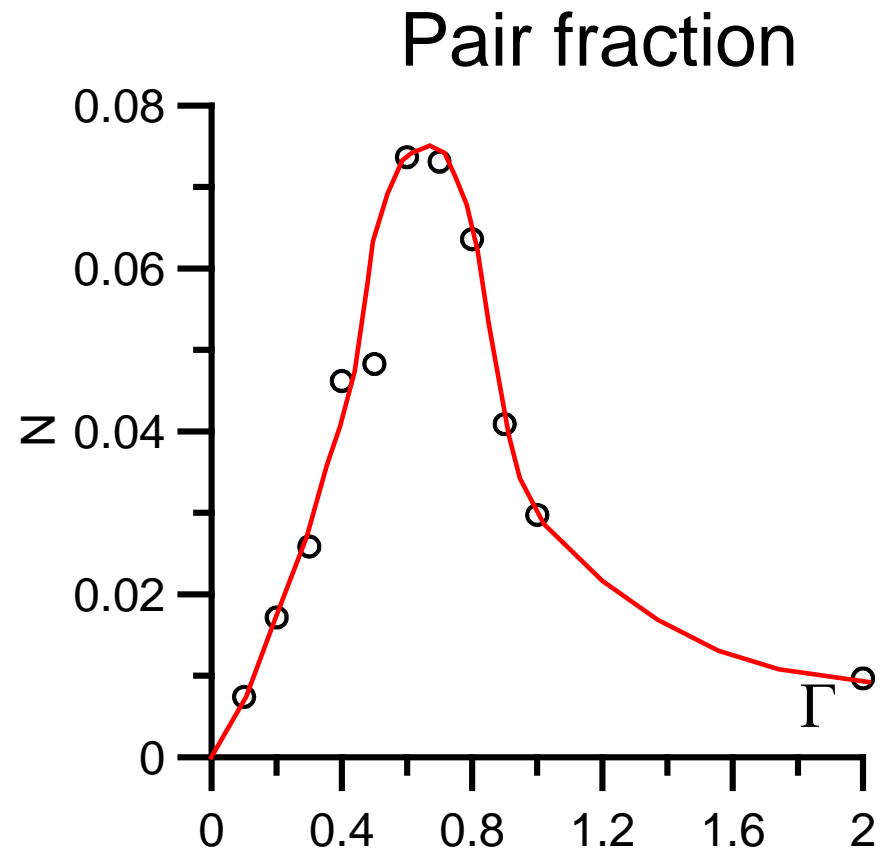
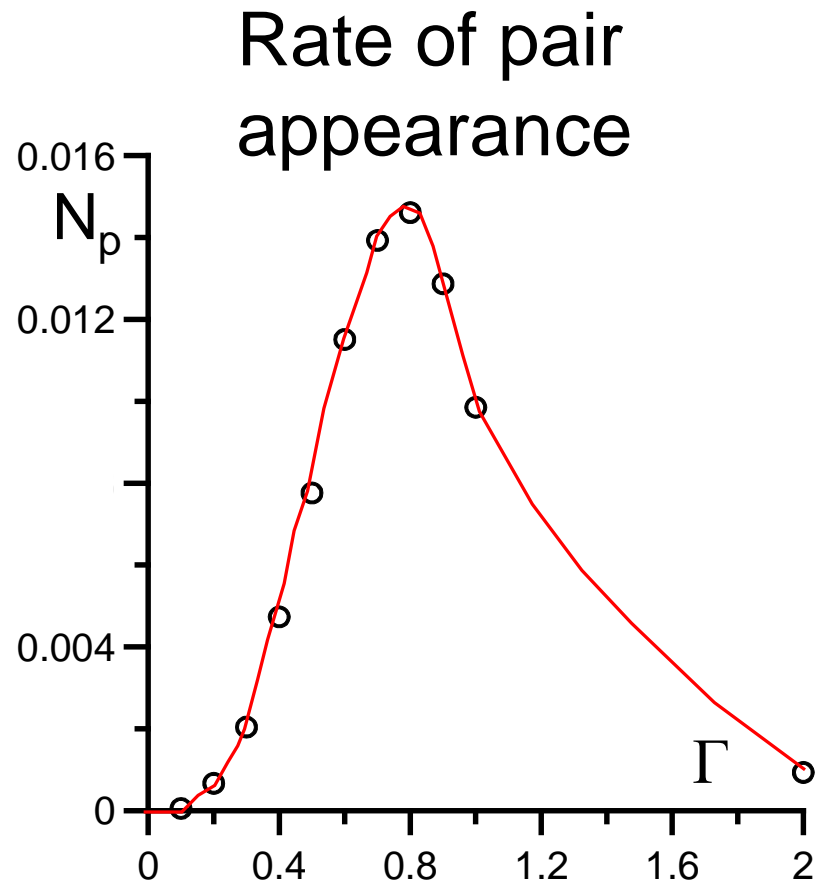


### **3. Характерные области существования электронных состояний**

# Диаграмма $n_e$ – энергия уровня

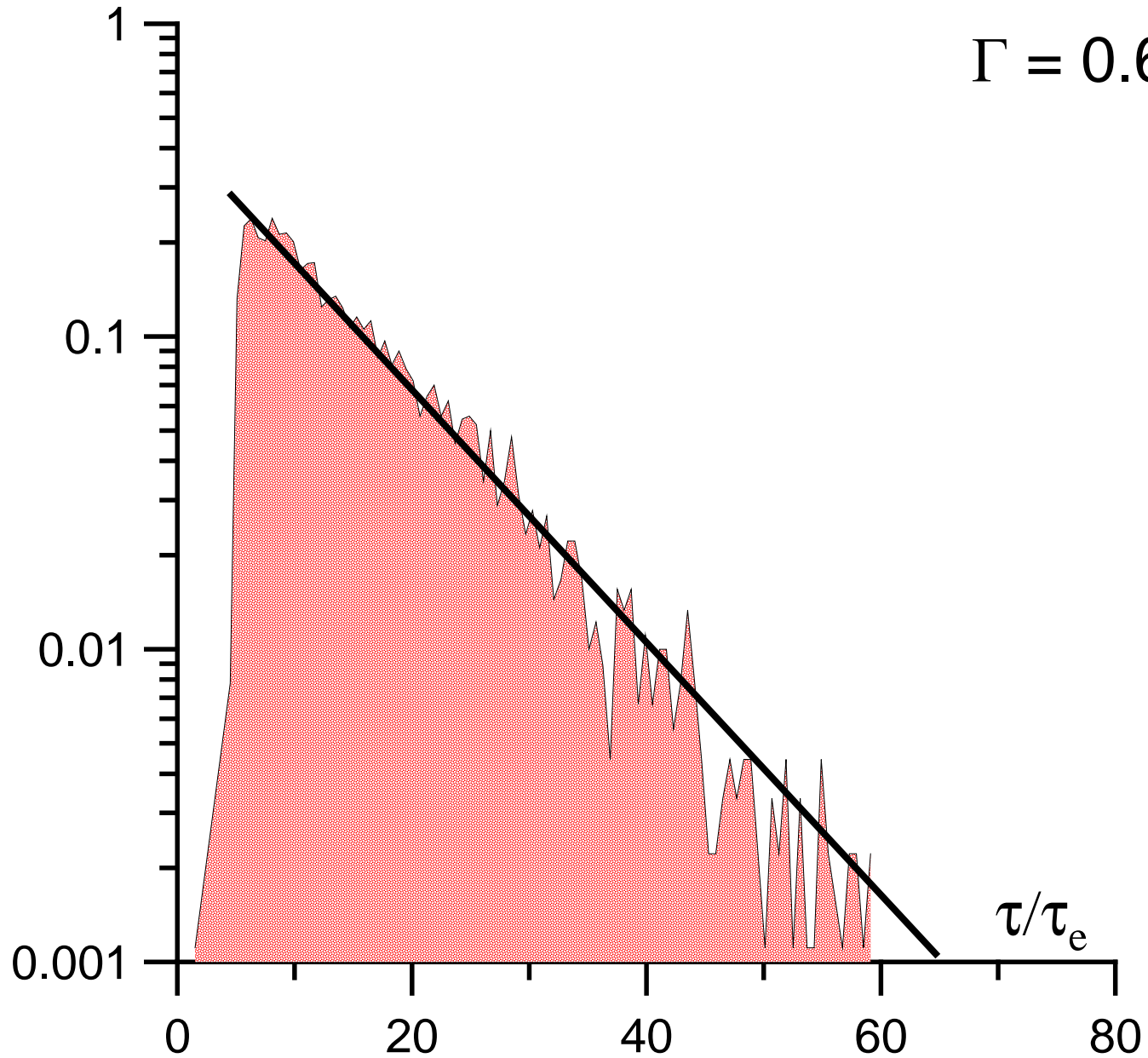


# Two dependencies on the nonideality parameter $\Gamma$



$$N = 500, \varphi_0 = 8\pi$$

# Lifetime distribution of pairs at bound energies **3kT**



# Диаграмма $n_e$ – квантовое число для $H$

principle quantum number

10

8

6

4

2

atoms

pair  
fluctuations

neither atoms  
nor pairs

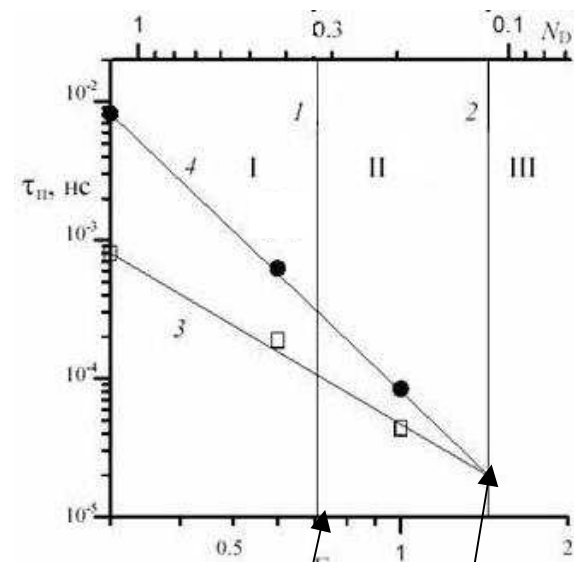
$10^{14}$

$10^{16}$

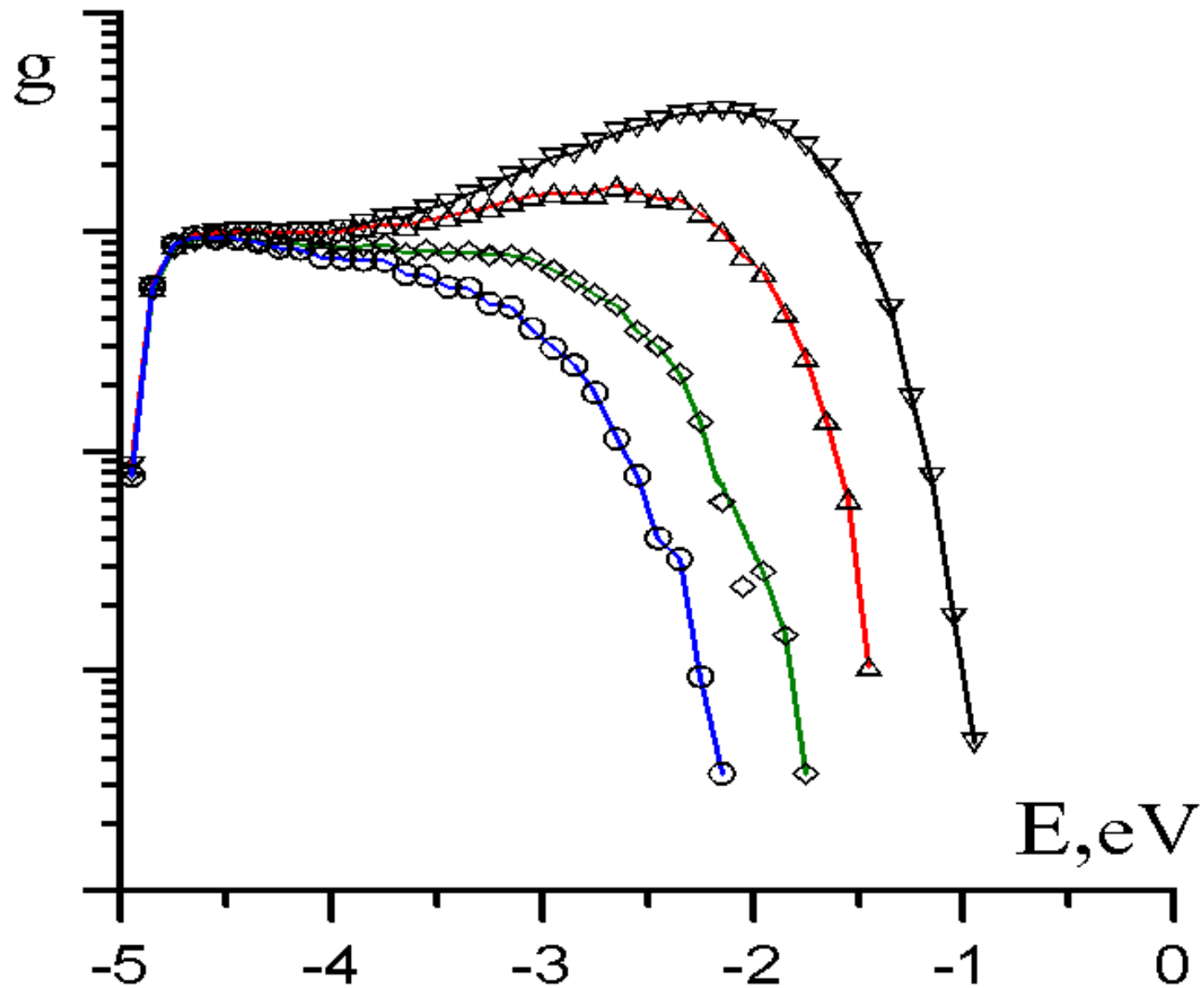
$10^{18}$

$10^{20}$

$n_e$



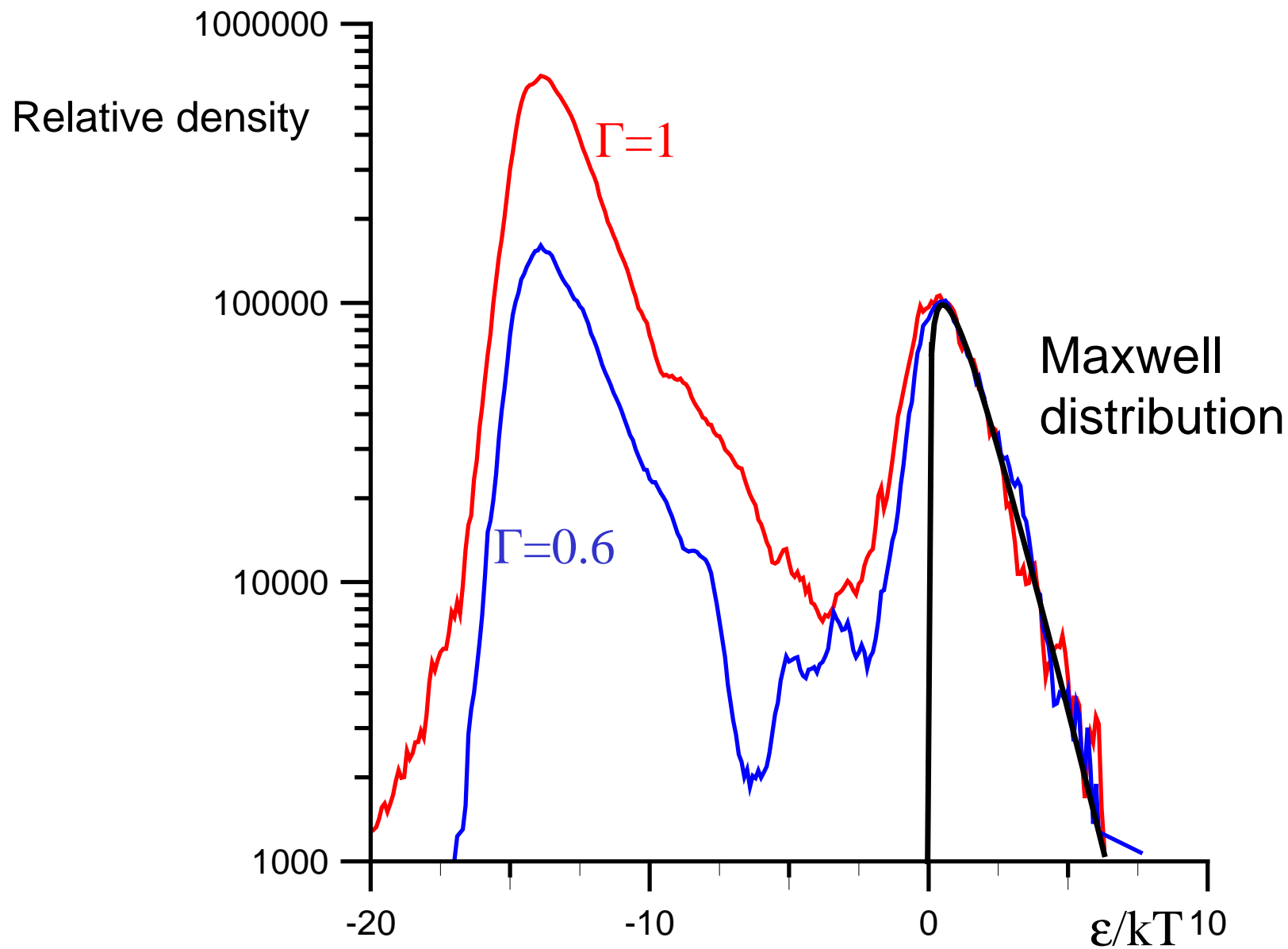
Density of pair states at  $\Gamma = 1$  for different values of cut-off phase  $\varphi_0 = 2\pi, 4\pi, 8\pi, 16\pi$



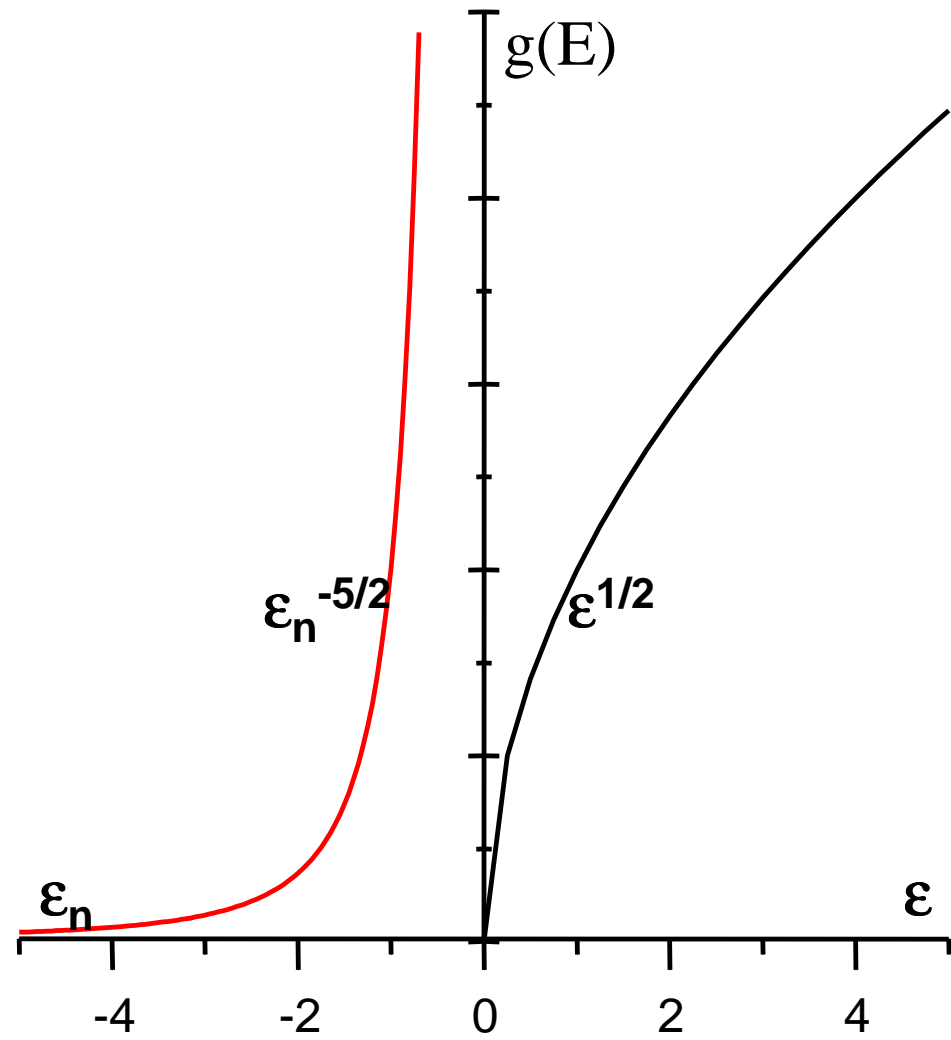
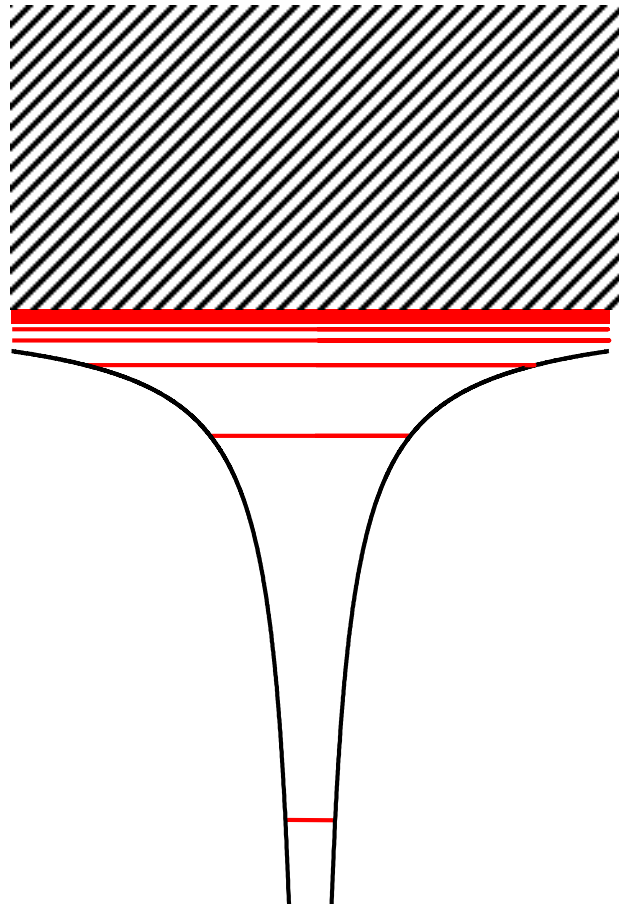
## **4. Плотность состояний**



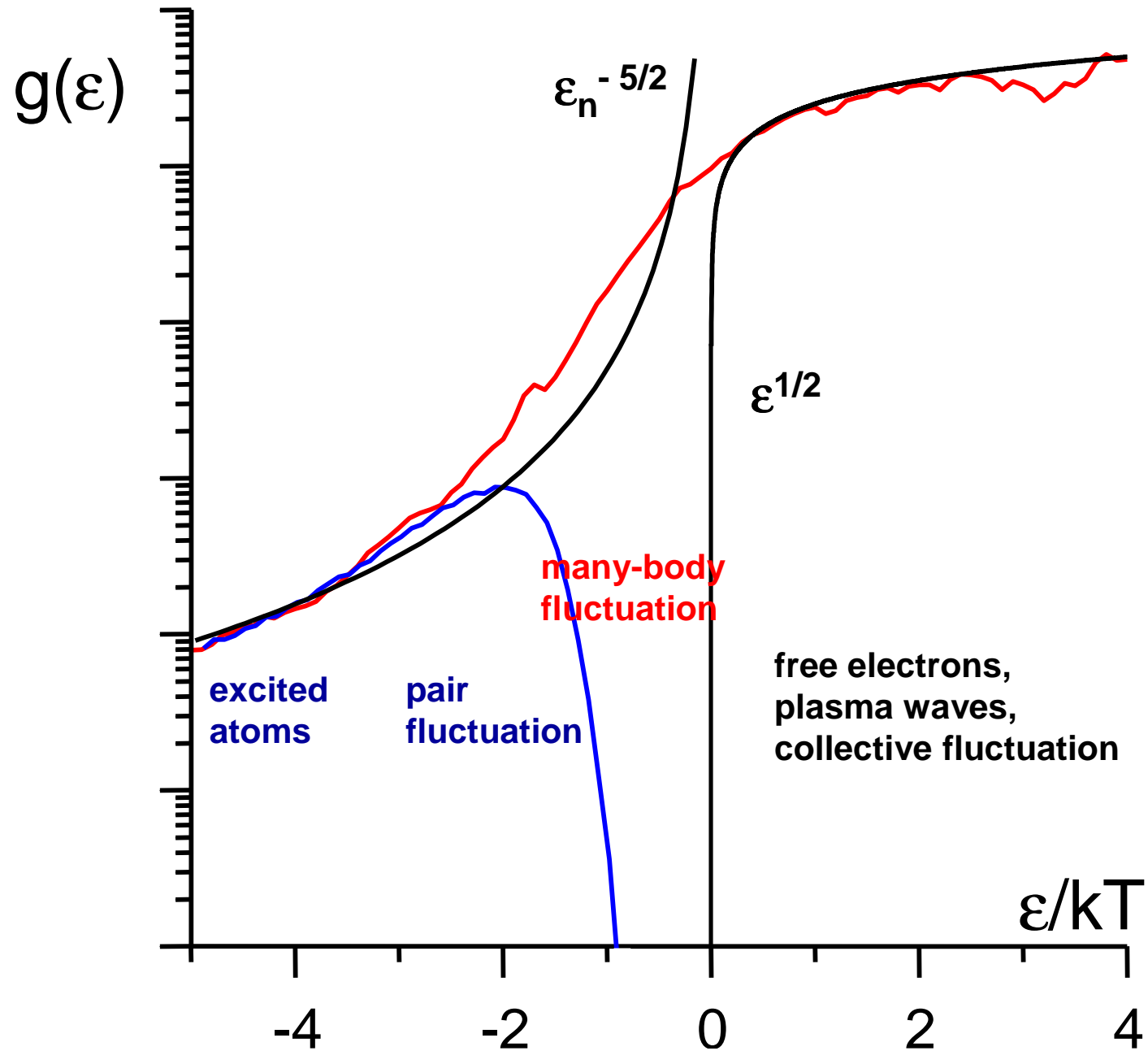
# Распределения заселенностей



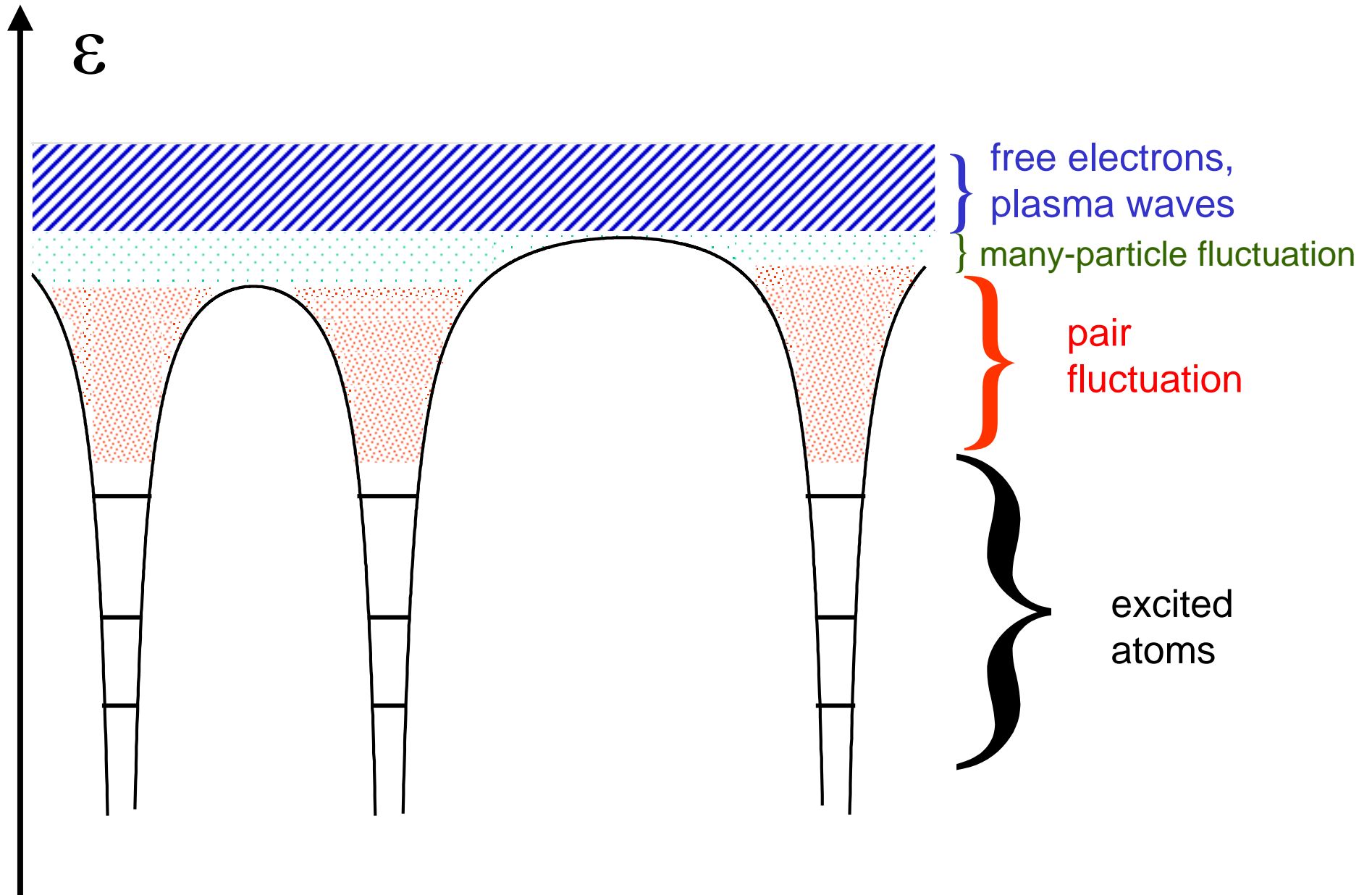
# Electron states in plasmas



# Density of electron states for $\Gamma = 0.6$

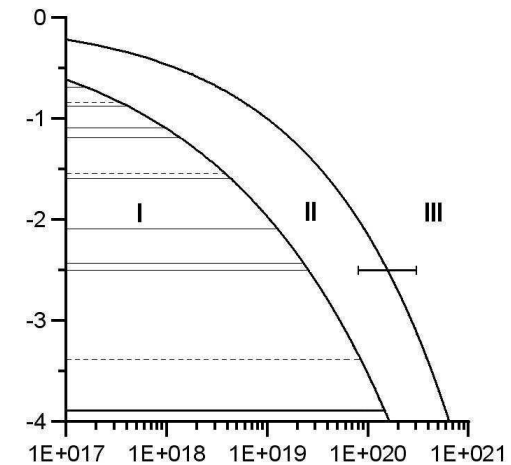
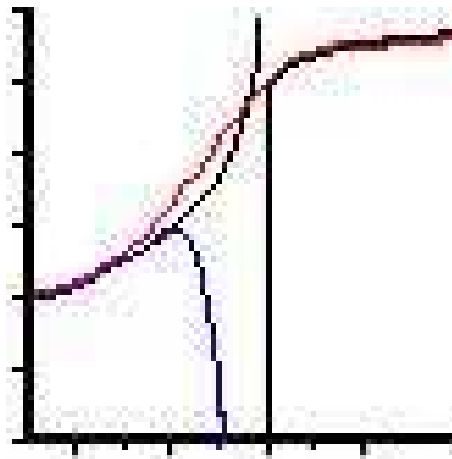


# Electron states in plasma



# CONCLUSIONS

*Fluctuation crossover approach is developed for the consideration of electron states intermediate between collective free and pair low-lying excited states.*



- The pair fluctuation (and atomic) density is close to zero in the energy domain adjoining to the ionization limit at negative energies.
- Energy distribution of free electrons turns out to be Maxwellian with the non-shifted zero energy.
- The area of the plasma nonidealities is discovered where there are neither excited atoms nor pair fluctuations.