

Исследования неидеальной плазмы 2009 (NPP 2009)

# Тепловые свойства неидеальных систем

теплоемкость, плотность энергии, диффузия

О. С. Ваулина, Ю. В. Хрусталеv

ОИВТ РАН

1 – 2 декабря, Москва, 2009

# Аппроксимация для плотности энергии двумерной системы

$$U = U_0 + T + 4\varepsilon_f / \left[ 1 + \exp(\varepsilon_f / T) \right]$$

$$\varepsilon_f / T = 1/2 + \Gamma^* / \Gamma_h^*$$

Приведенный параметр неидеальности  $\Gamma^*$ :

$$\Gamma^* = \frac{(eZ)^2}{Tl_p} \left( 1 + \kappa + \frac{\kappa^2}{2} \right) \exp(-\kappa) \cong \frac{3}{2} l_p^2 \frac{\phi''_{r=l_p}}{2T}$$

$$\kappa = l_p / \lambda \quad l_p = n^{-1/2}$$

# Система уравнений

электродинамики, непрерывности и уравнений движения с учетом стохастической силы

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \mathbf{E} = -4\pi e \delta n \\ \frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot (n \mathbf{v}) \\ \frac{dM\mathbf{v}}{dt} = -v_{fr} M \mathbf{v} - Ze \mathbf{E} + \tilde{\mathbf{F}} \end{array} \right. \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} U = U(T) \\ \delta T^2 = f(T) \\ U = U(\Gamma^*) \\ \delta T^2 = f(\Gamma^*) \end{array}$$
$$\langle \tilde{\mathbf{F}} \rangle = 0$$
$$\langle \tilde{\mathbf{F}}(0) \cdot \tilde{\mathbf{F}}(t) \rangle = 4TM v_{fr} \delta(t)$$

# Теплоемкость

$$C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

$$C_V = \frac{T^2}{\delta T^2}$$

# Решение

$$\Rightarrow U = U_0 - T_c + 3T - 2(\nu_{fr} + \omega^*)D$$

$$\Rightarrow \delta T^2 = 0.4 \cdot T^2 + 0.4 \cdot (\nu_{fr} + \omega^*) \cdot DT$$

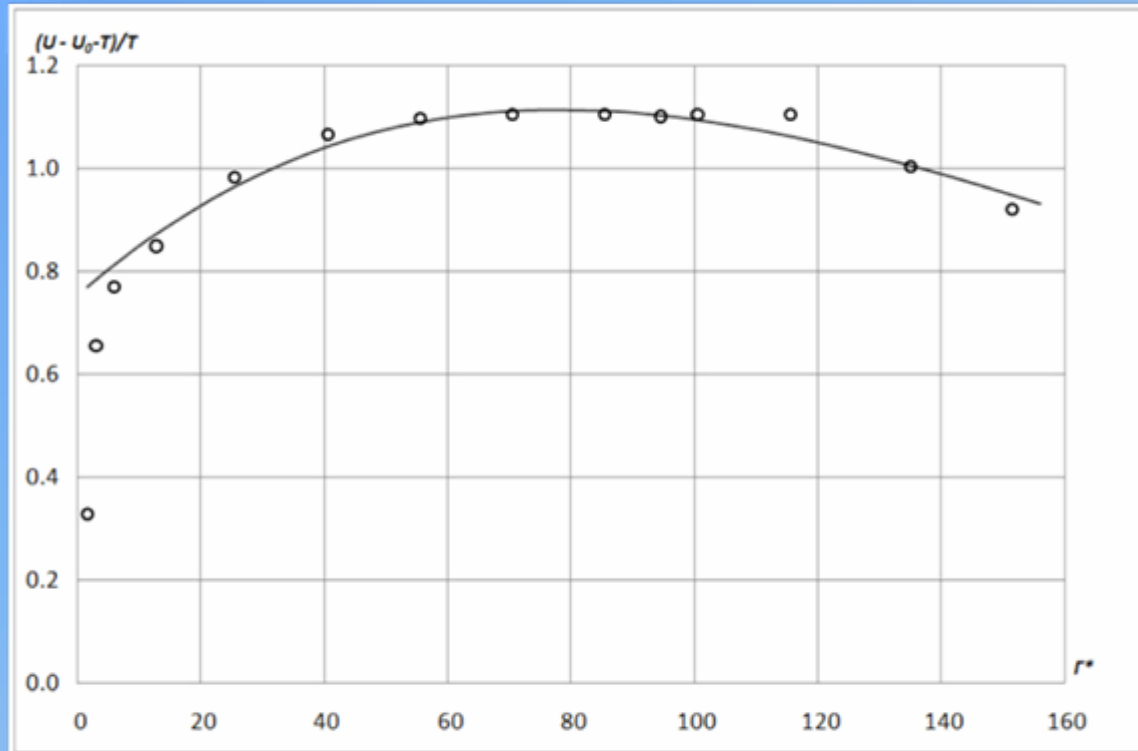
$D$  – константа диффузии,  $T_c$  – температура, при которой  $\Gamma^* = \Gamma_c^* \sim 153$ ;  $U_0$  – предел  $U(T)$  при  $T \rightarrow 0$ ;  $\omega^*$  – “приведенная” плазменная частота:

$$\omega^* = \sqrt{\phi''_{r=l_p} / l_p^3 \pi M}$$

При условии

- частота  $\omega^*$  столкновений между заряженными частицами не зависит от  $T$ ;
- $|\phi'(l_p)| \cdot l_p / |\phi(l_p)| < 2\pi$

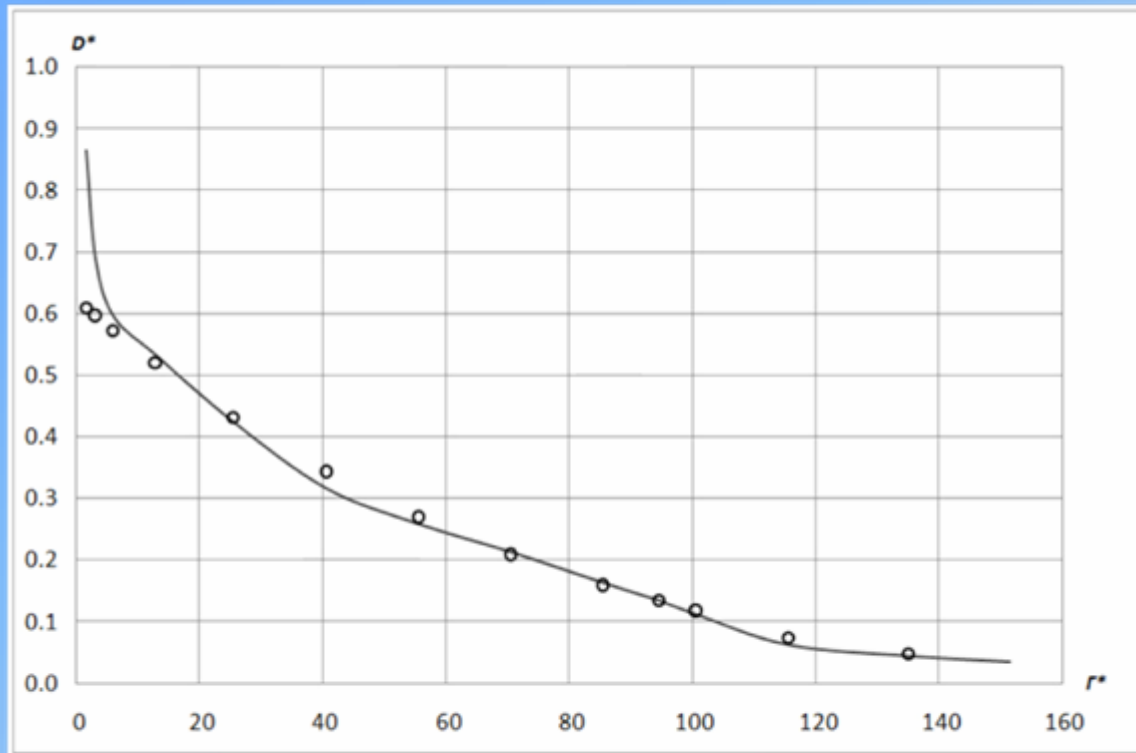
# Энергия $(U - U_0 - T) / T$ в зависимости от $\Gamma^*$



линия – по соотношению  $U = U_0 + T + 4\varepsilon_f / [1 + \exp(\varepsilon_f / T)]$

○ – по формуле  $U = U_0 - T_c + 3T - 2(v_{fr} + \omega^*)D$

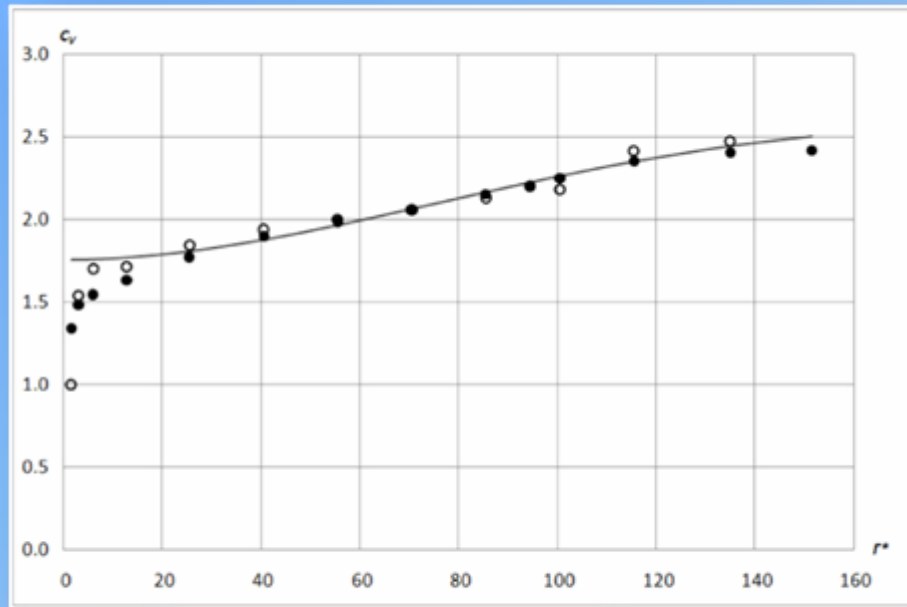
$$D^* = D(v_{fr} + \omega^*)M/T$$



линия – численное моделирование [4]

○ – из формулы  $U = U_0 - T_c + 3T - 2(v_{fr} + \omega^*)D$

# Теплоемкость $C_V$ в зависимости от $\Gamma^*$



линия – из соотношения

$$U = U_0 + T + 4\varepsilon_f / \left[ 1 + \exp(\varepsilon_f / T) \right] \quad \text{и} \quad C_V = (\partial U / \partial T)_V ;$$

o – по формулам

$$U = U_0 - T_c + 3T - 2(\nu_{fr} + \omega^*)D \quad \text{и} \quad C_V = (\partial U / \partial T)_V ;$$

• – на основе уравнений

$$\delta T^2 = 0.4 \cdot T^2 + 0.4 \cdot (\nu_{fr} + \omega^*) \cdot DT \quad \text{и} \quad C_V = \frac{T^2}{\delta T^2}$$



# Выводы

1. Проведено исследование теплоемкости, плотности энергии и диффузии для двумерных неидеальных диссипативных систем в широком диапазоне  $\Gamma^*$  соответствующем лабораторной пылевой плазме.
2. Предложено соотношение между плотностью энергии, теплоемкостью и диффузией.
3. Приведено сравнение значений теплоемкости, полученных по разным аналитическим подходам.

# Спасибо за внимание!

*Эта работа частично поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (07-08-00290), CRDF (RUP2-2891-MO-07), NWO (047.017.039) и программой Президиума РАН.*



experiment | lies :-)

## Литература

1. *Vaulina O. S. [et al.]. Evolution of the mass-transfer processes in nonideal dissipative systems. I. Numerical simulation. // Physical Review E. – 2008. – V. 77. – N. 066403, 066404.*
2. *Vaulina O. S. [et al.]. Determination of the pairwise interaction potential between dust grains in plasma // Plasma Physics Reports. – 2007. – V. 33. – P. 278–288.*
3. *Vaulina O. S. [et al.]. Two-Stage Melting in Quasi-Two-Dimensional Dissipative Yukawa Systems // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – N. 195001.*
4. *Vaulina O. S. [et al.]. Transport of macroparticles in dissipative two-dimensional Yukawa systems // Physica Scripta. – 2006. – V. 73. – P. 577–586.*