

# ЭФФЕКТЫ КУЛОНОВСКОЙ НЕИДЕАЛЬНОСТИ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

**Рахель А. Д.**

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,  
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2*

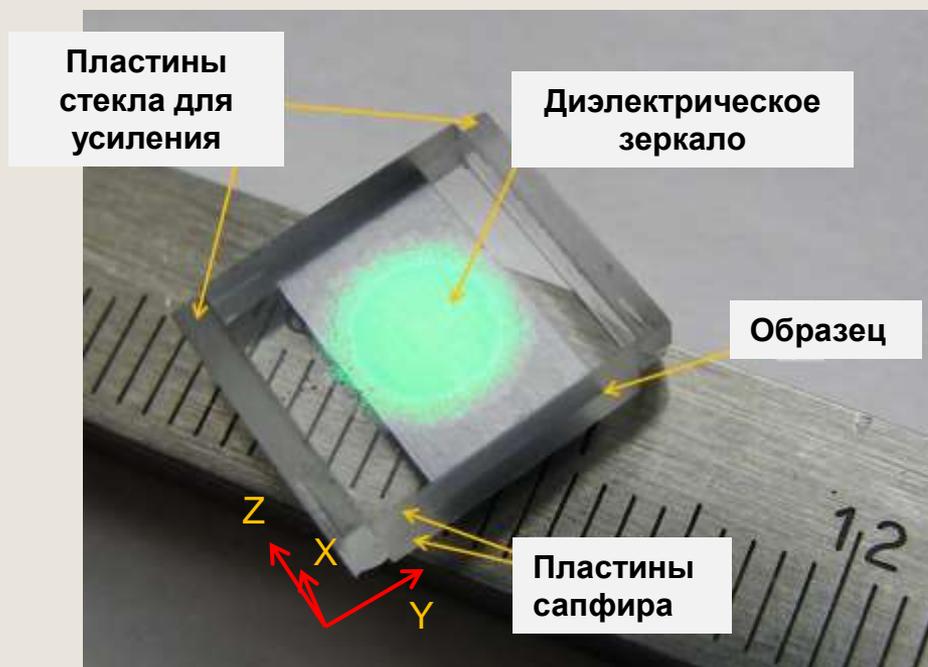
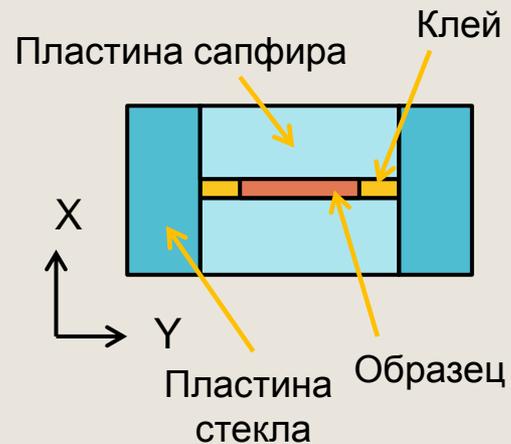
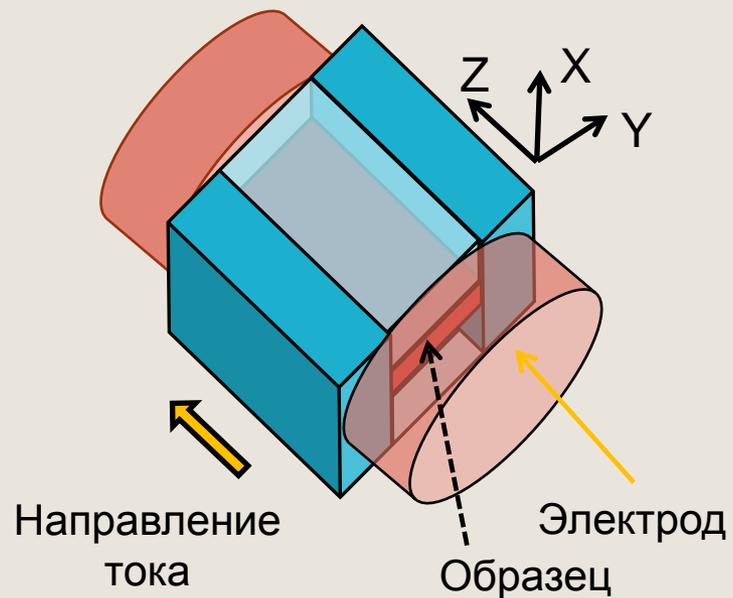


# План доклада

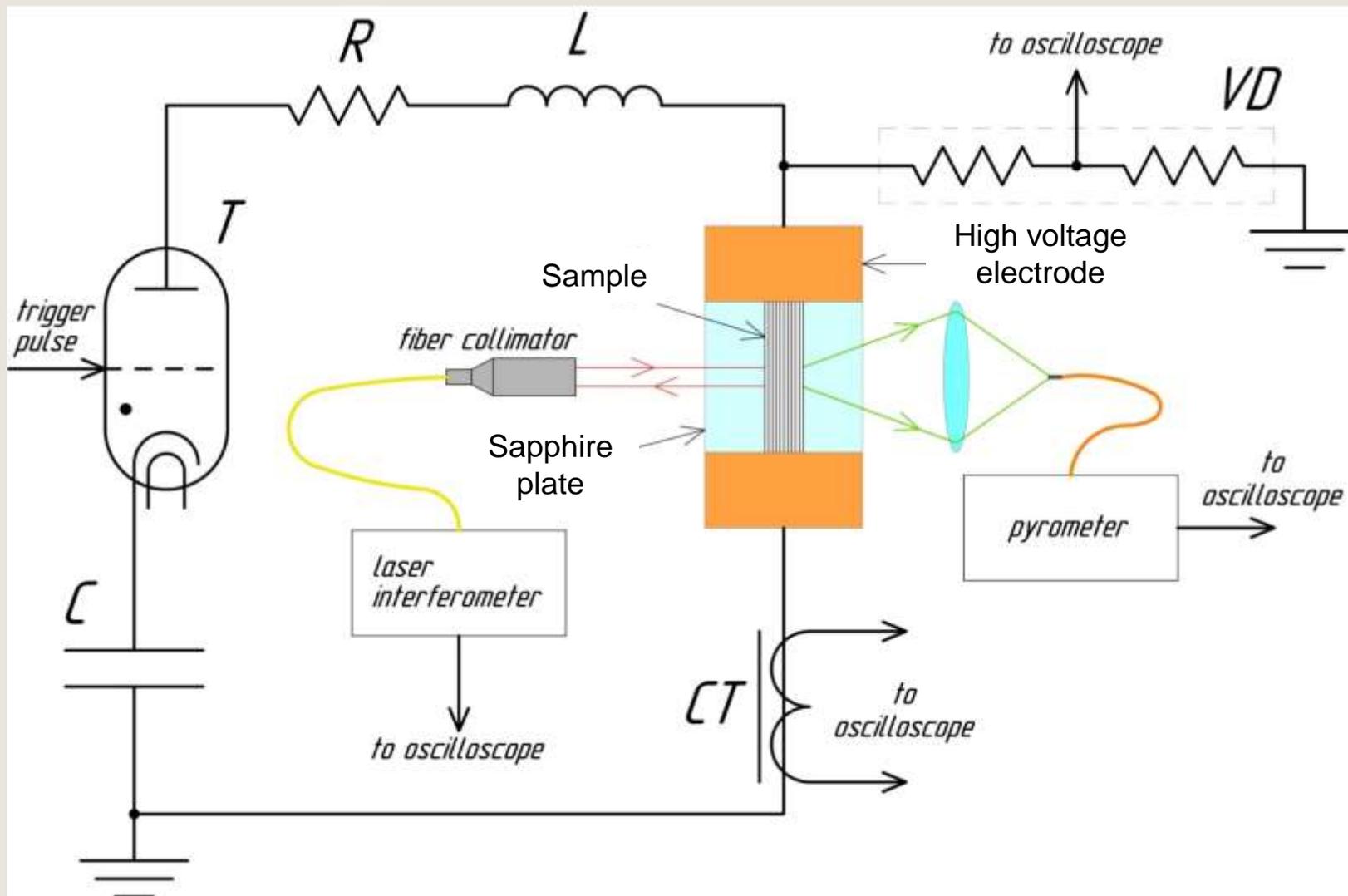
---

- 1. Как оказалось, уравнение состояния флюида алюминия имеет форму уравнения Ми-Грюнайзена. Это обстоятельство позволило сделать некоторые нетривиальные выводы о переходе металл-неметалл в этом флюиде [[A.D. Rakhel J. Phys.: Condens. Matter \(2018\)](#)].
- 2. Недавно мы измерили термодинамические функции и удельное электросопротивление флюида свинца для широкой области его фазовой диаграммы с погрешностями, которые в 2 - 3 раза меньше, чем в экспериментах с алюминием и которые сопоставимы с погрешностями стационарных методов [[A.M. Kondratyev, V.N. Korobenko, A.D. Rakhel, JETP \(2018\)](#)].
- 3. В этой работе строится уравнение состояния флюида свинца. Мы показываем, что оно также имеет форму уравнения Ми-Грюнайзена и это позволяет оценить степень неидеальности для неметаллического (плазменного) состояния этого флюида.

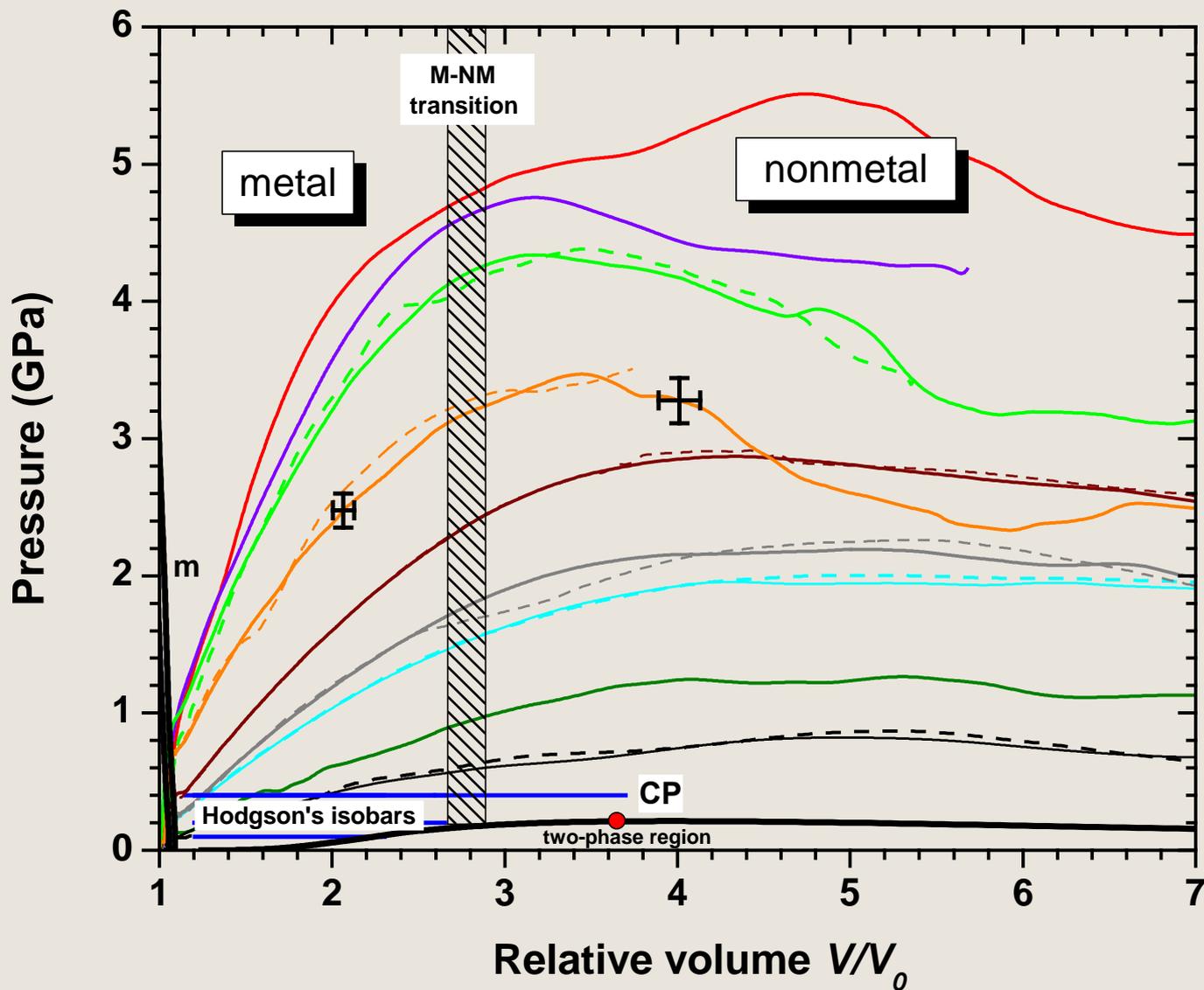
# Образец



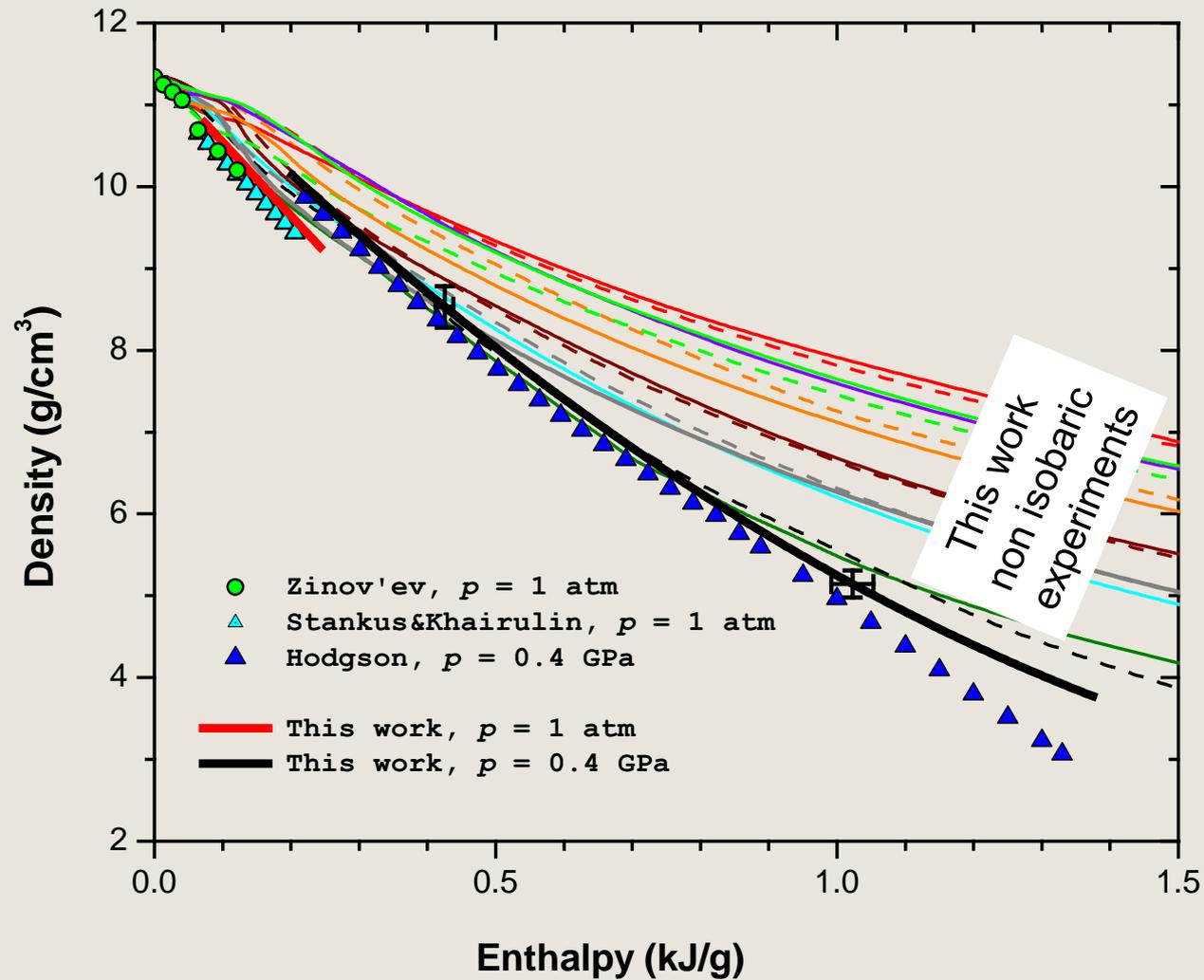
# Принципиальная схема эксперимента



# Квазистатический процесс нагрева образца на плоскости $PV$ для экспериментов со свинцом

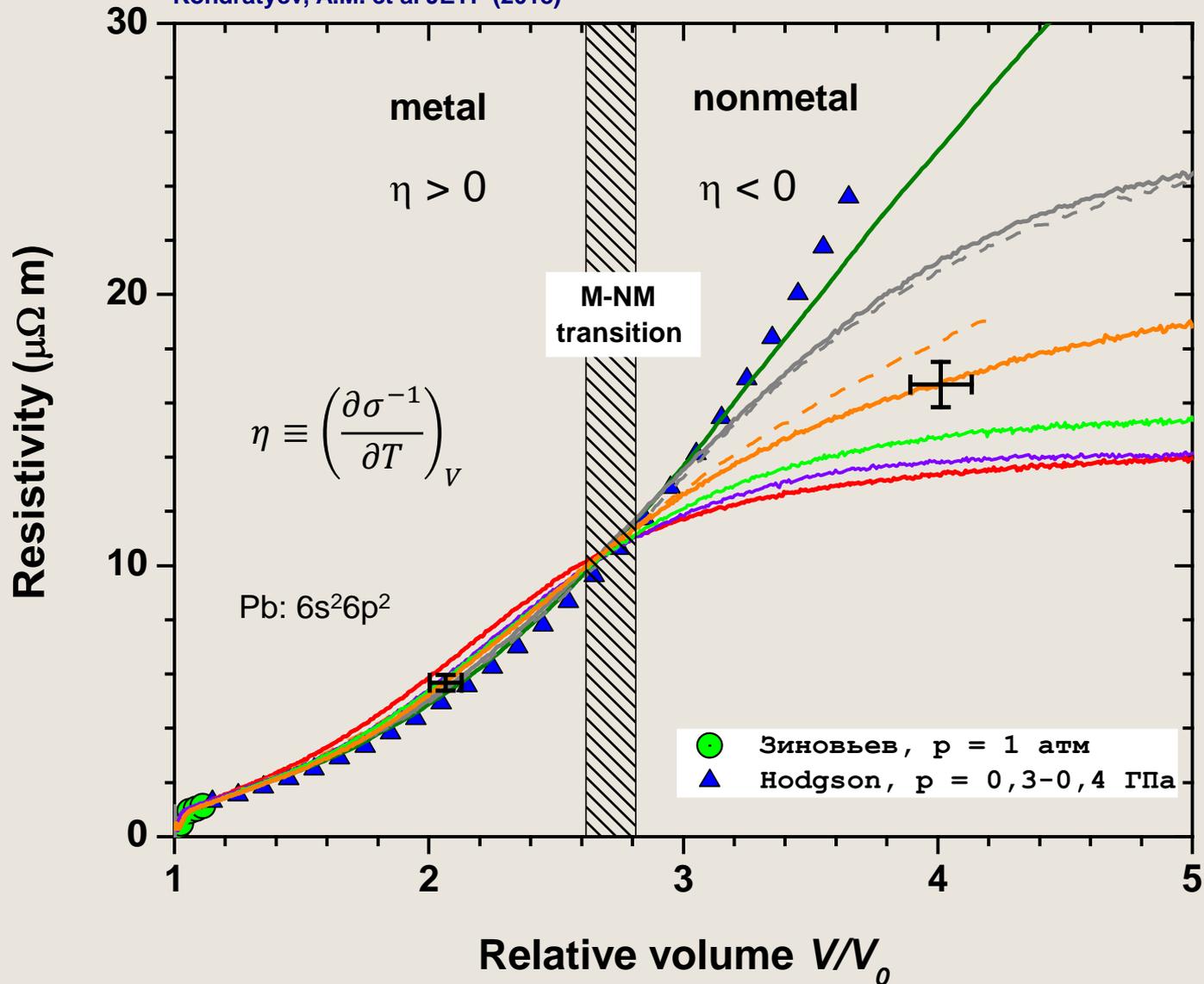


# Сравнение результатов измерения плотности с литературными данными и оценка погрешности

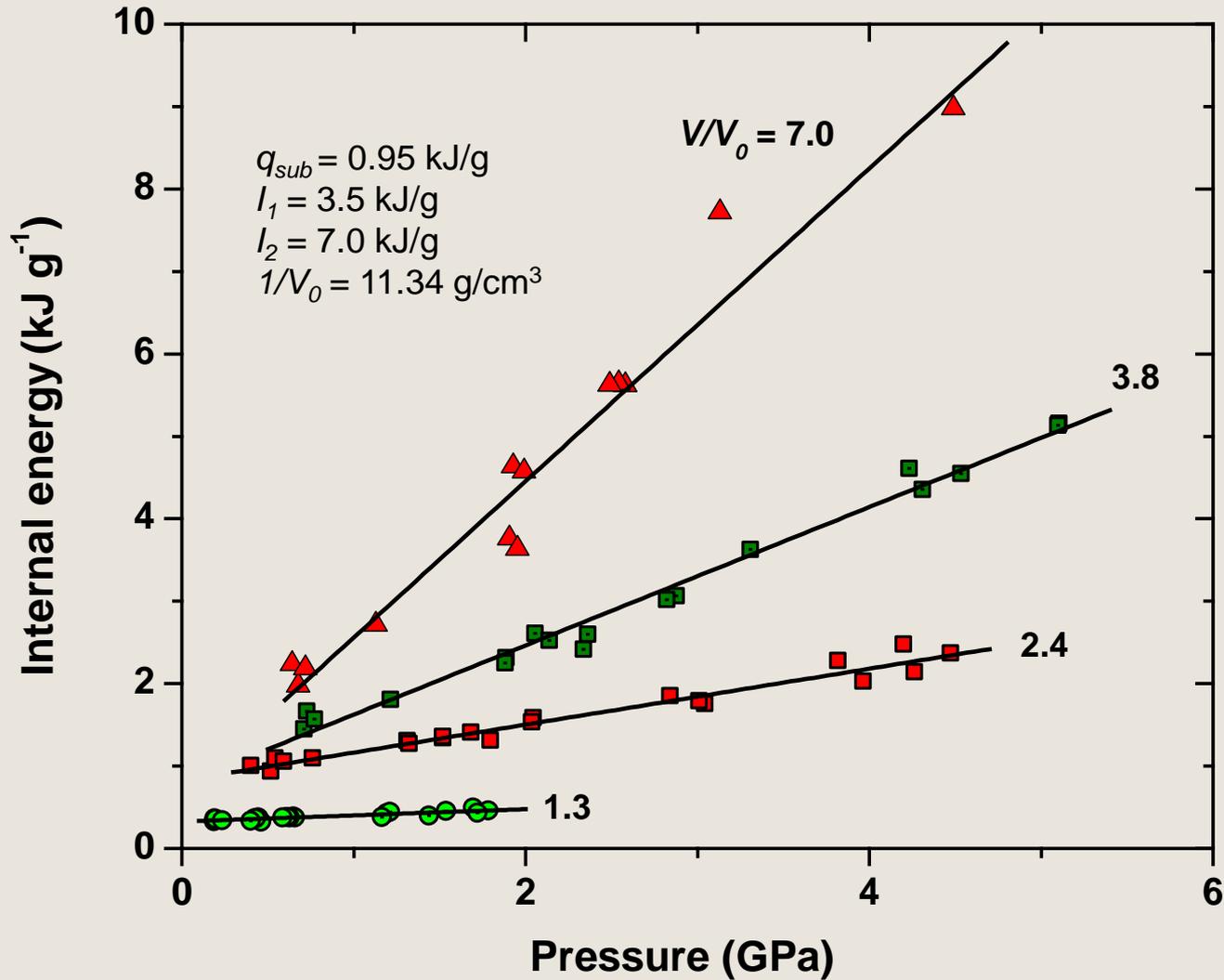


# Обнаружение перехода металл-неметалл

Kondratyev, A.M. et al JETP (2018)



Внутренняя энергия как функция давления вдоль изохор:  
значки – эксперимент, линии – линейные аппроксимации



## Вывод уравнения состояния

---

$$E(P, V) = a(V)P + b(V) \quad (1)$$

$$E(S, V) = \theta(V) \left[ \int_{V_m}^V \frac{b(V')}{a(V')\theta(V')} dV' + \xi(S) \right] \quad (2)$$

$$\theta(V) = \exp \left( - \int_{V_m}^V \frac{dV'}{a(V')} \right) \quad (3)$$

## Вывод уравнения состояния

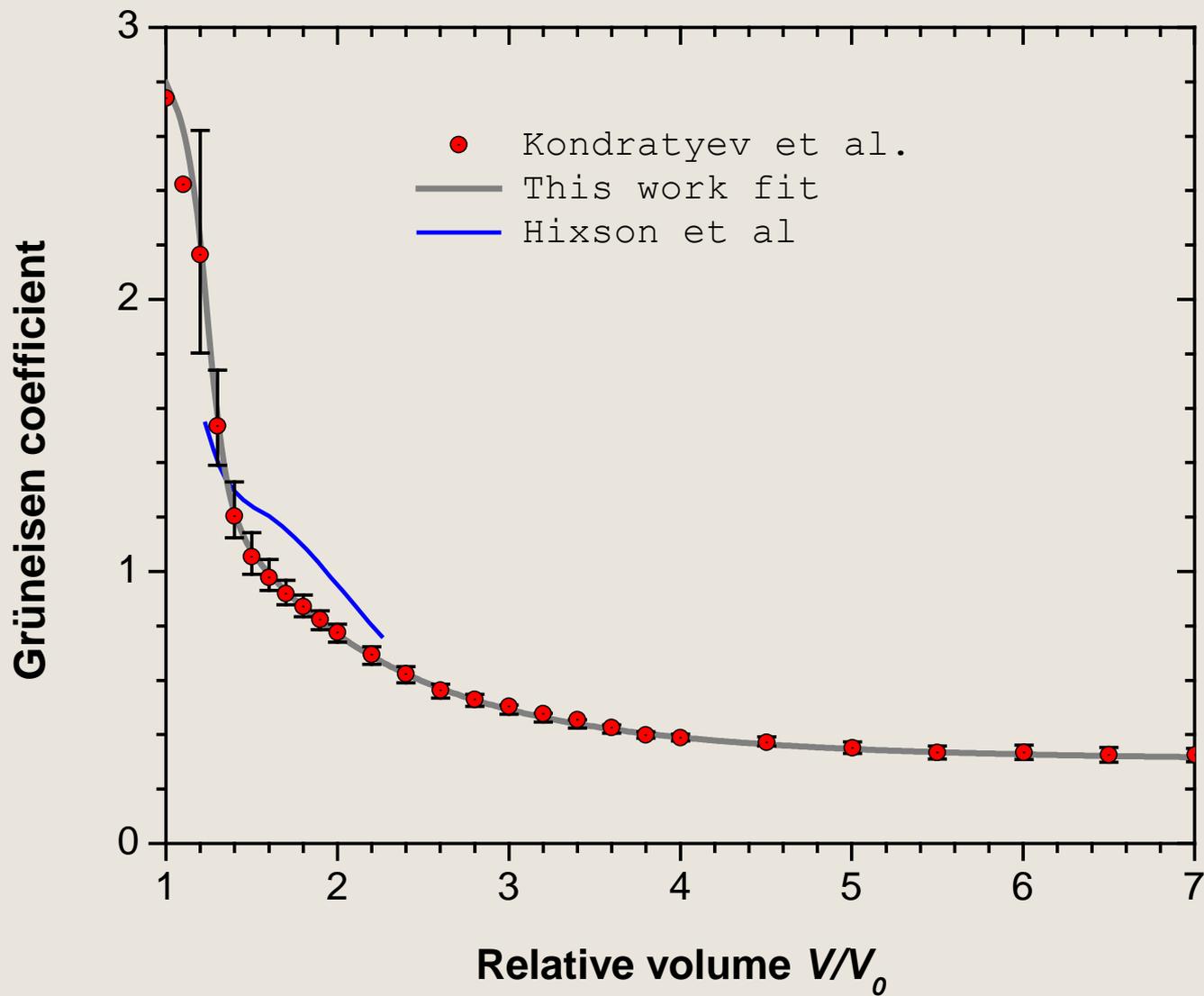
---

$$E = E_c(V) + \frac{V}{\gamma(V)} [P - P_c(V)] \quad (4)$$

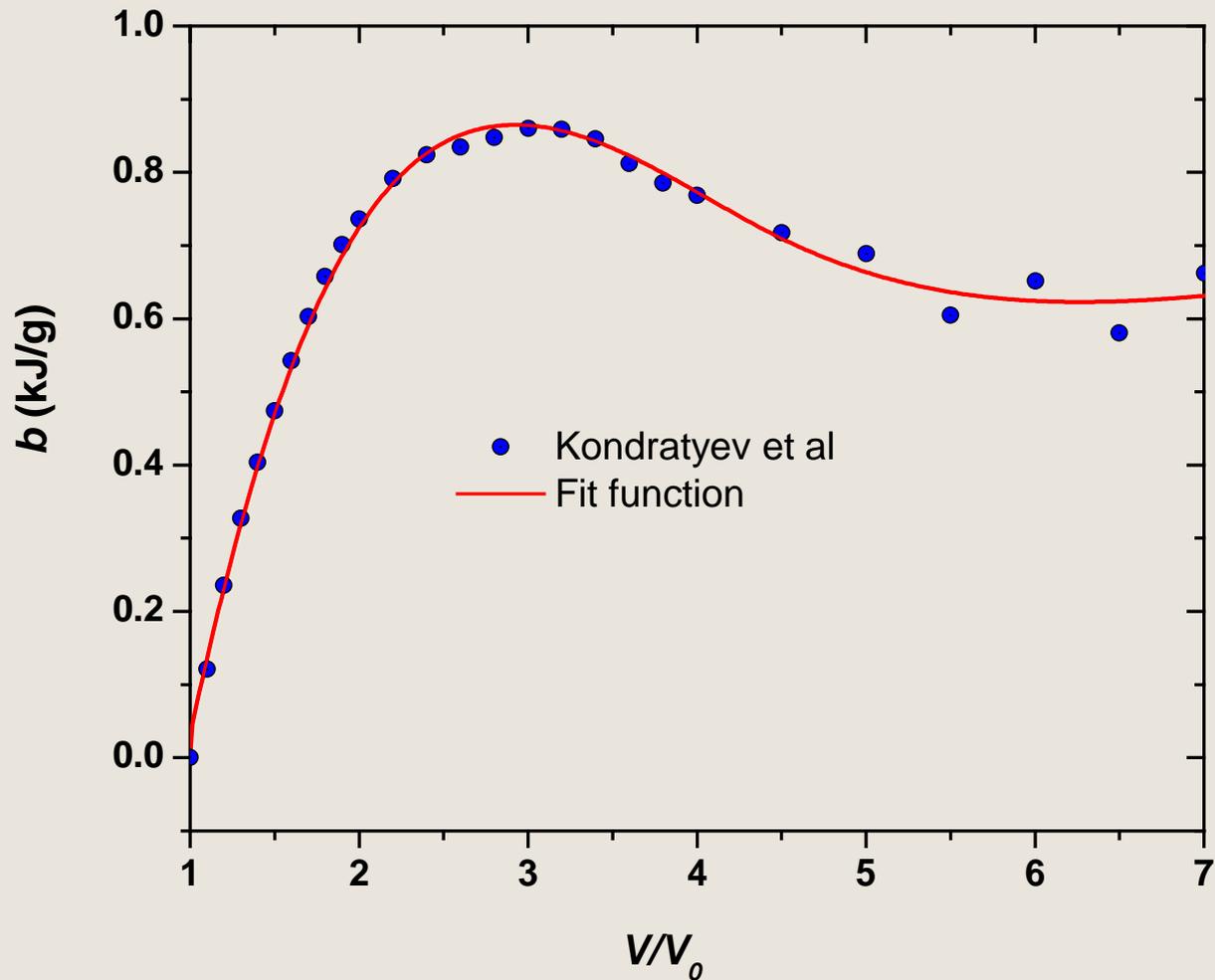
$$\gamma = - \frac{d \ln \theta(V)}{d \ln V} \quad \text{--- Коэффициент Грюнайзена} \quad (5)$$

$$F(V, T) = E_c(V) - (R/A) T f \left( \frac{T}{\theta(V)} \right) \quad (6)$$

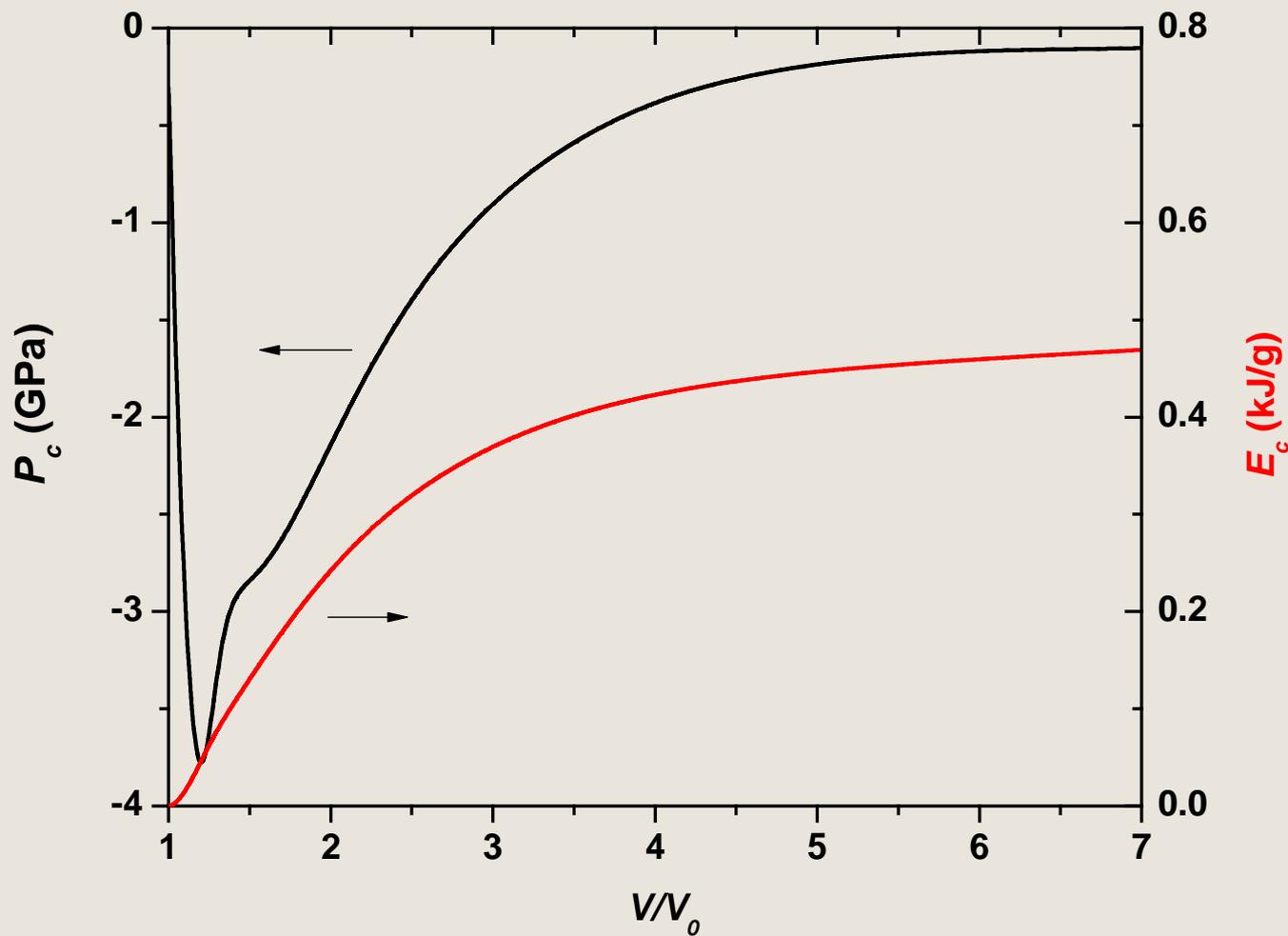
# Измерения коэффициента Грюнайзена для флюида свинца



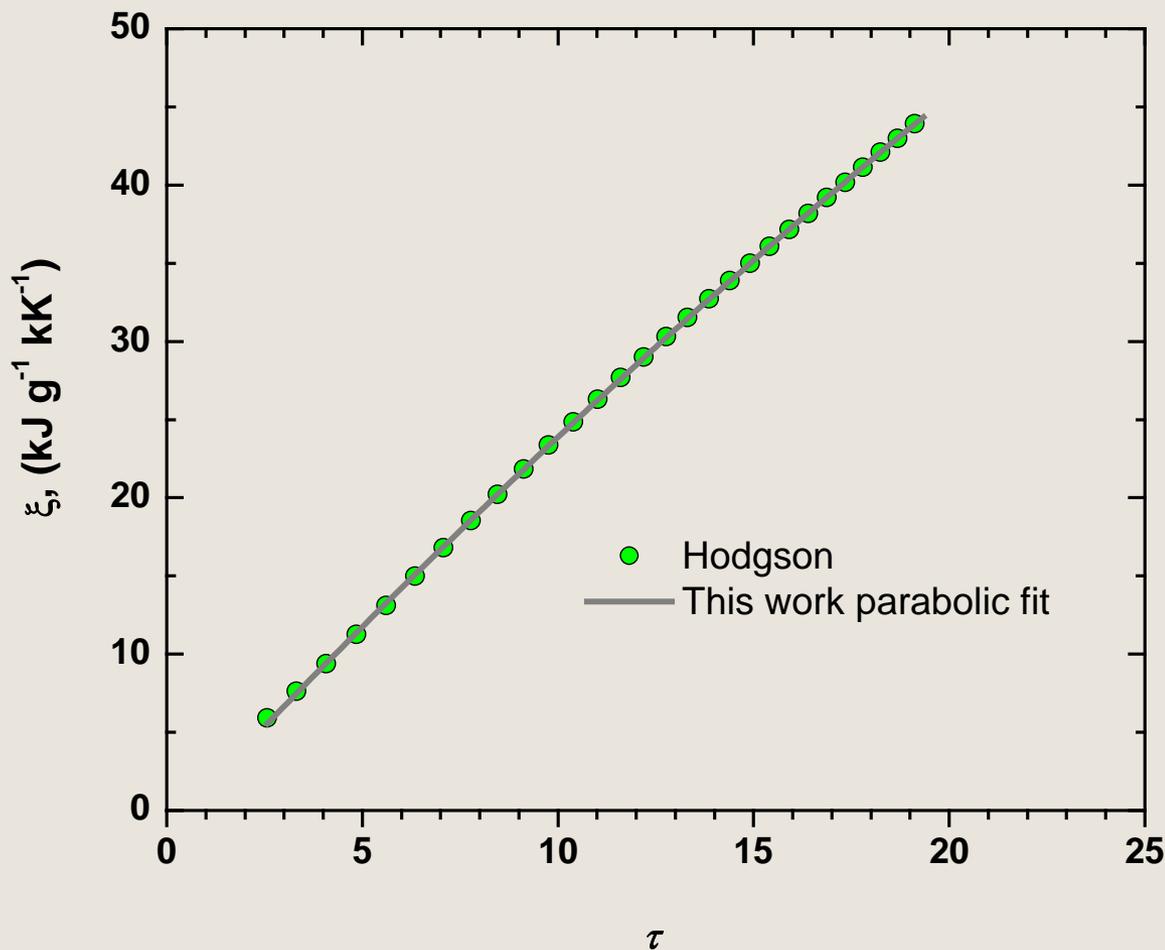
## Значения коэффициента $b(V)$ на изохорах



# Холодные кривые (энергии и давления) для флюида свинца



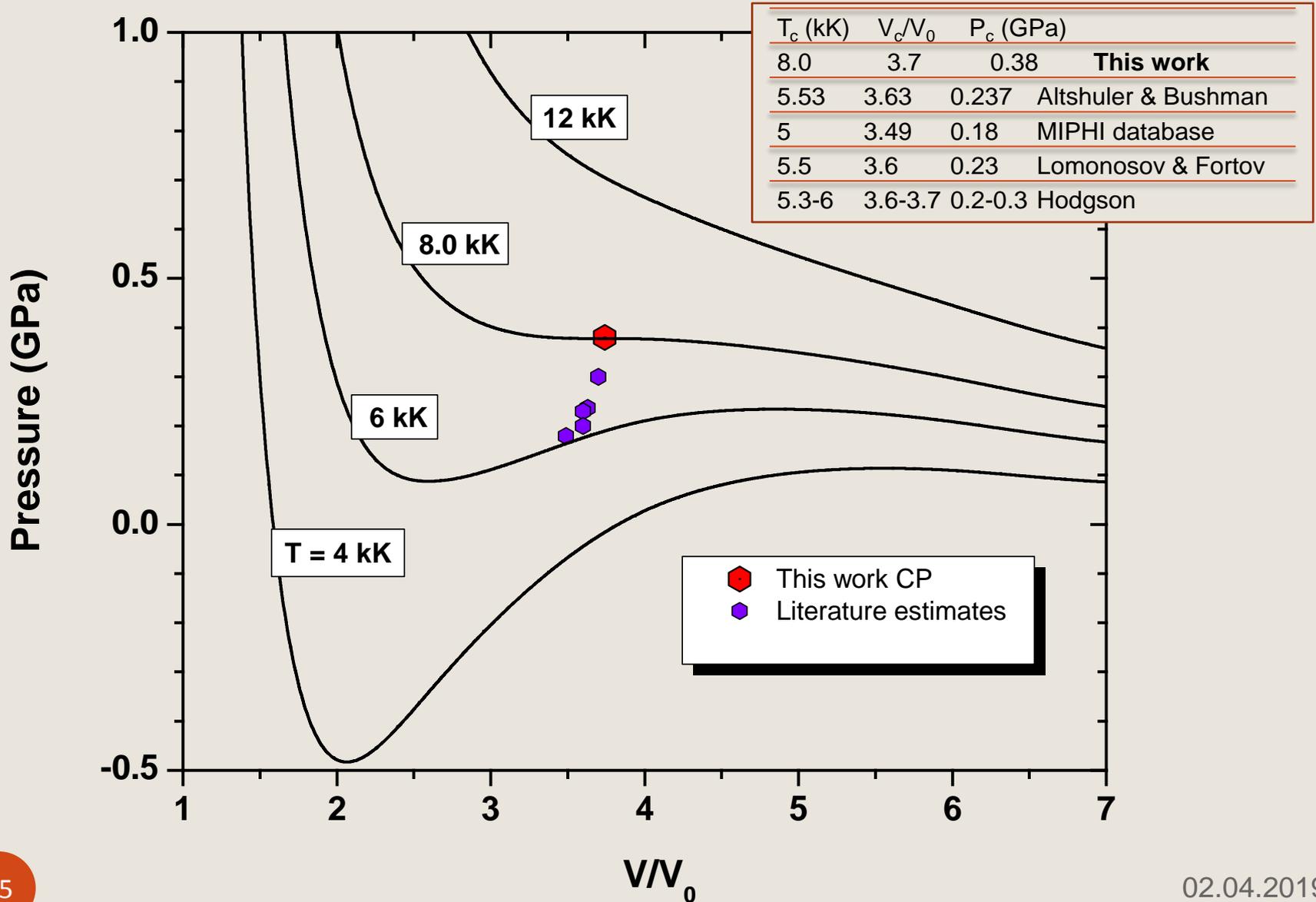
## Определение тепловой компоненты внутренней энергии



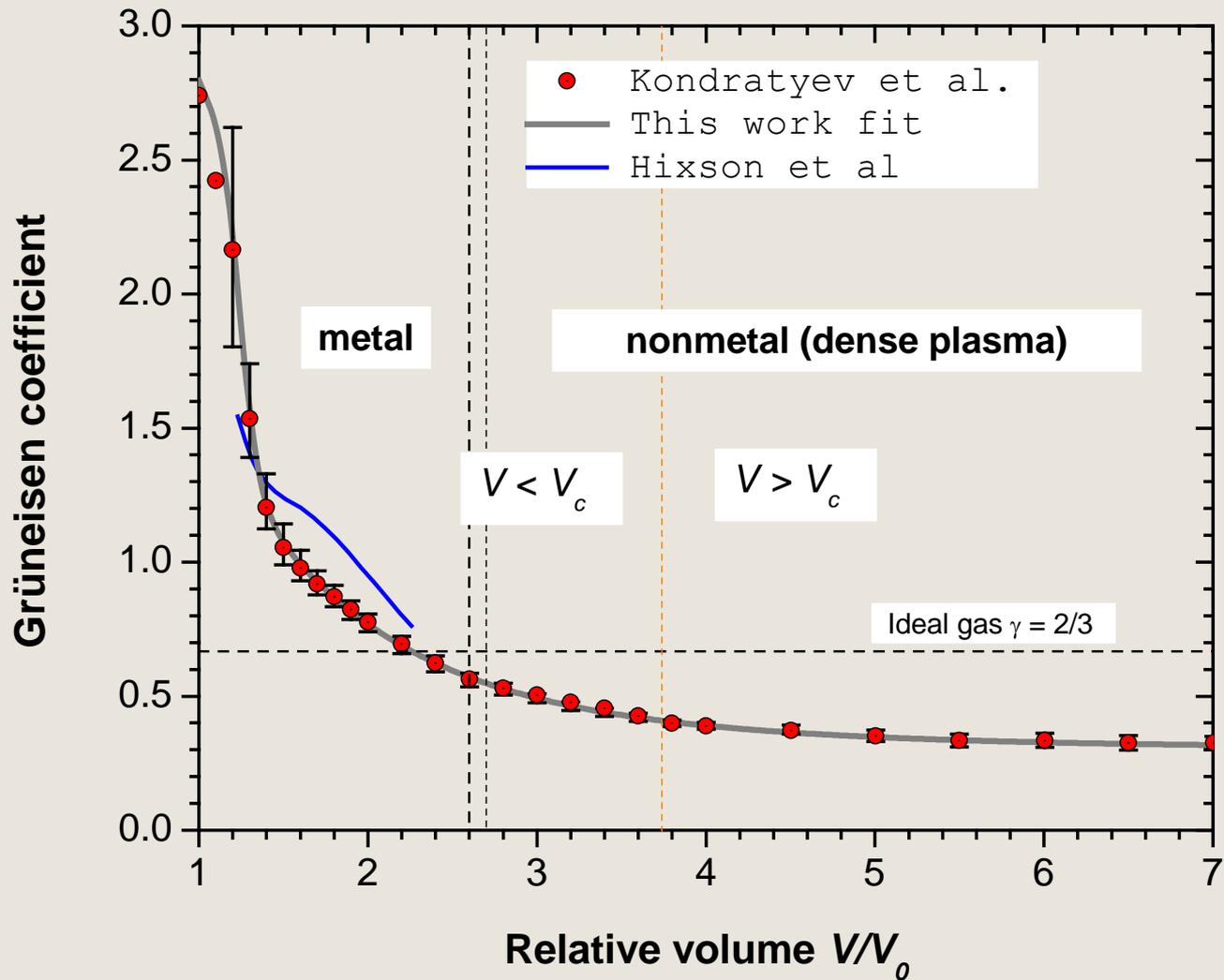
$$\xi = \frac{E(T,V) - E_c(V)}{\theta(V)}$$

$$\tau = \frac{T}{\theta(V)}$$

# Критическая точка свинца



# Проявления кулоновской неидеальности



# Классическая полностью ионизованная слабонеидеальная плазма

---

$$\Gamma = \frac{(ze)^2}{r_s T}, \quad \frac{4}{3} \pi r_s^3 n_i = 1 \quad (7)$$

$$E = E_{ideal} + E_{corr} \quad (8)$$

$$E_{corr} \propto -\frac{N_n^{3/2}}{\sqrt{TV}} \quad (9)$$

Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.  
Стат. физика, ч. 1

$$\gamma = \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{1}{1 - \frac{E_{corr}}{3N_n T}} \right) \rightarrow \gamma < \frac{2}{3} \quad (10)$$

# Оценка степени неидеальности плазмы свинца с помощью теоремы вириала

---

$$3PV = E + K \quad (11)$$

$$3P_c(V)V = E_c(V) + K_c(V) \quad (12)$$

$$\frac{U_t}{K_t} = \frac{2 - 3\gamma(V)}{3\gamma(V) - 1} \quad (13)$$

Из измерений  $\gamma$  следует, что  
есть состояния где

$$\frac{U_t}{K_t} \sim 10 \quad (14)$$

# Выводы

---

- Уравнение состояния флюида свинца в широкой области его фазовой диаграммы имеет вид уравнения Ми-Грюнайзена.
- Это обстоятельство позволяет достаточно точно оценить его критическую точку по результатам динамических экспериментов [[A.M. Kondratyev et al, JETP \(2018\)](#)]
- Плазма свинца в области состояний  $V/V_0 = 4 - 7$ ,  $T = 10 - 30$  кК является сильно неидеальной ( $\Gamma \sim 10$ ).
- Неидеальная плазма может быть изучена экспериментально и, следовательно, можно попытаться построить микроскопическую теорию её уравнения состояния.

**Спасибо за внимание**