

# УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В УЛЬТРАКОРОТКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

*С.И. Анисимов, В.В. Жаховский,  
Н.А. Иногамов, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов*

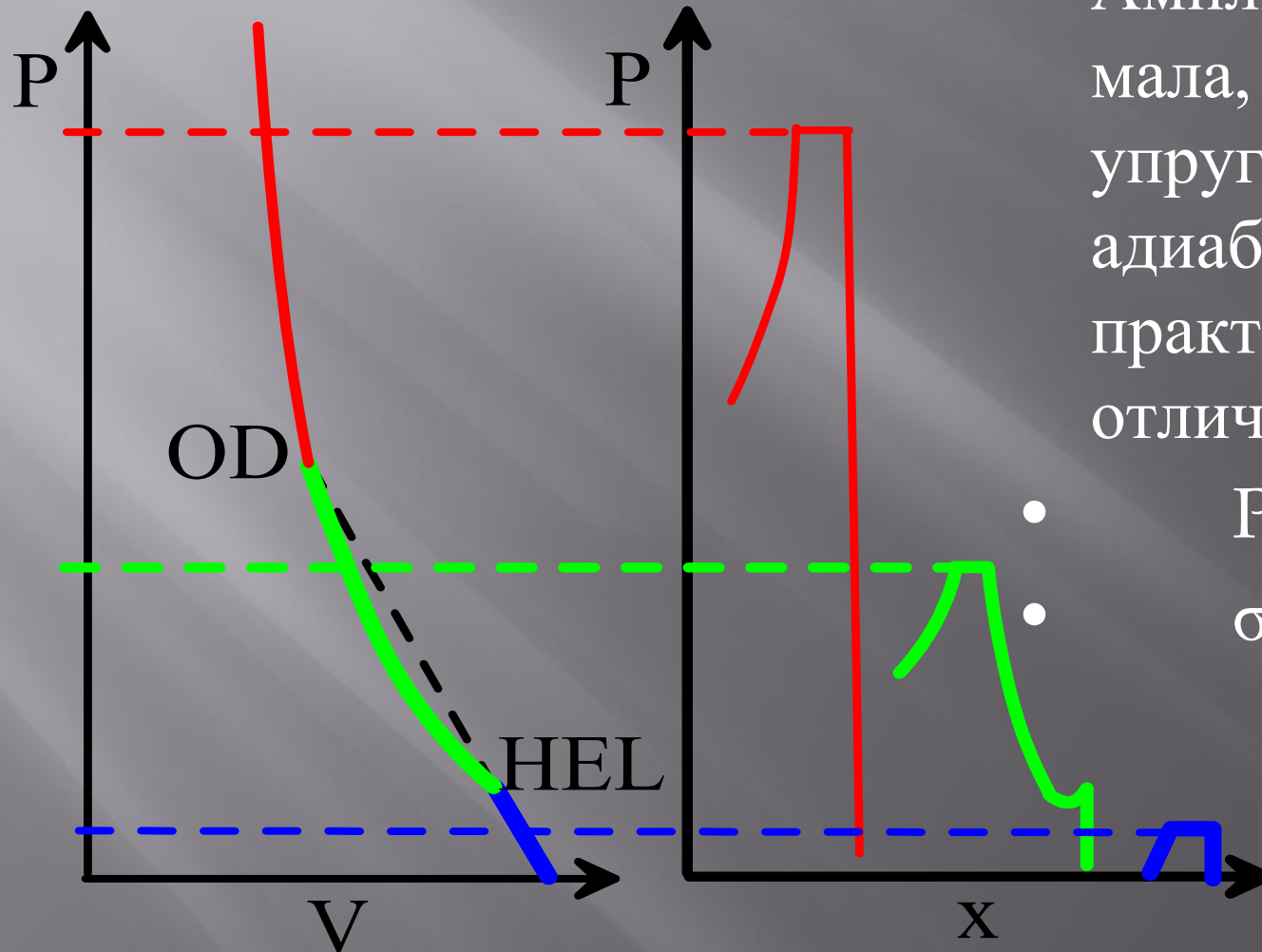
**Институт теоретической физики  
им. Л.Д. Ландау РАН**

**Объединенный институт высоких температур РАН**

- (1) Физико-математическая модель
- (2) Результаты моделирования
- (3) Сравнение с экспериментом

- ▣ Модель : комбинирование 2Т-гд и МД расчетов
  
- ▣ 2Т-гд : это двухтемпературная гидродинамика
  
- ▣ МД : это крупномасштабное молекулярно-динамическое моделирование с адекватными потенциалами многочастичного взаимодействия

# Представление об упругом пределе HEL (Hugoniot Elastic Limit)



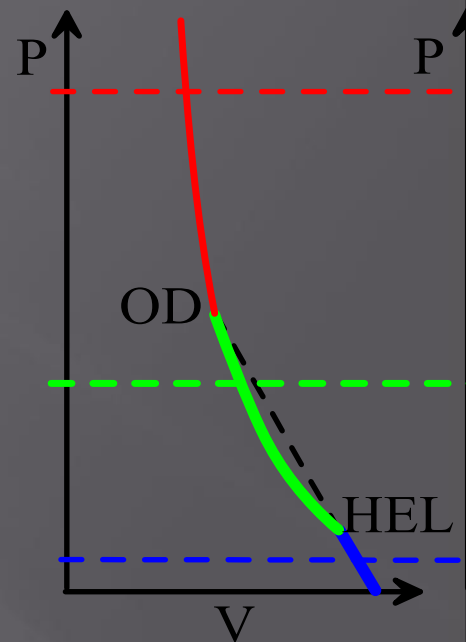
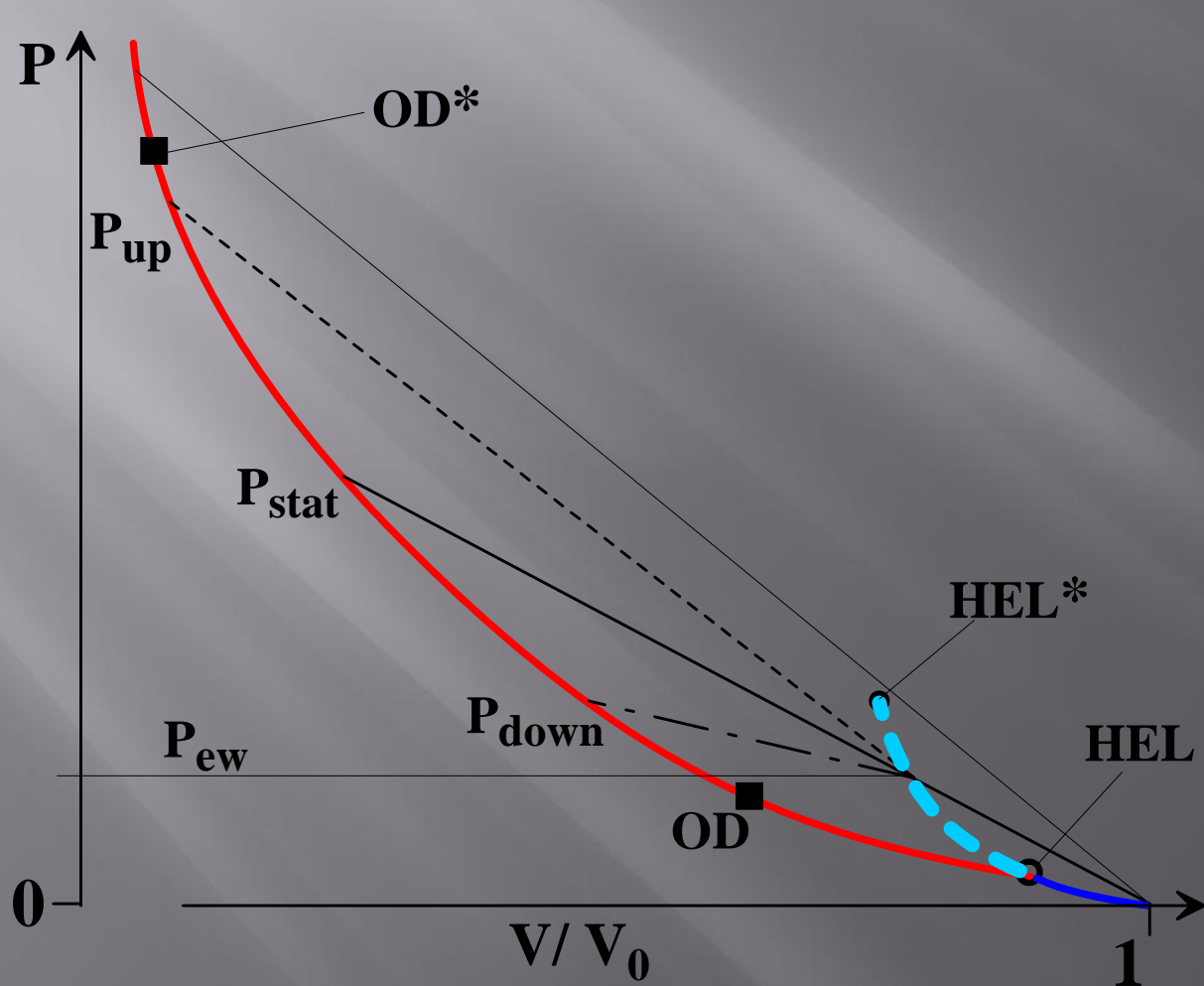
- Амплитуда HEL так мала, что отрезок упругой ударной адиабаты практически не отличается от прямой

- $P_{HEL} \ll K$
- $\sigma_{HEL} \ll G$

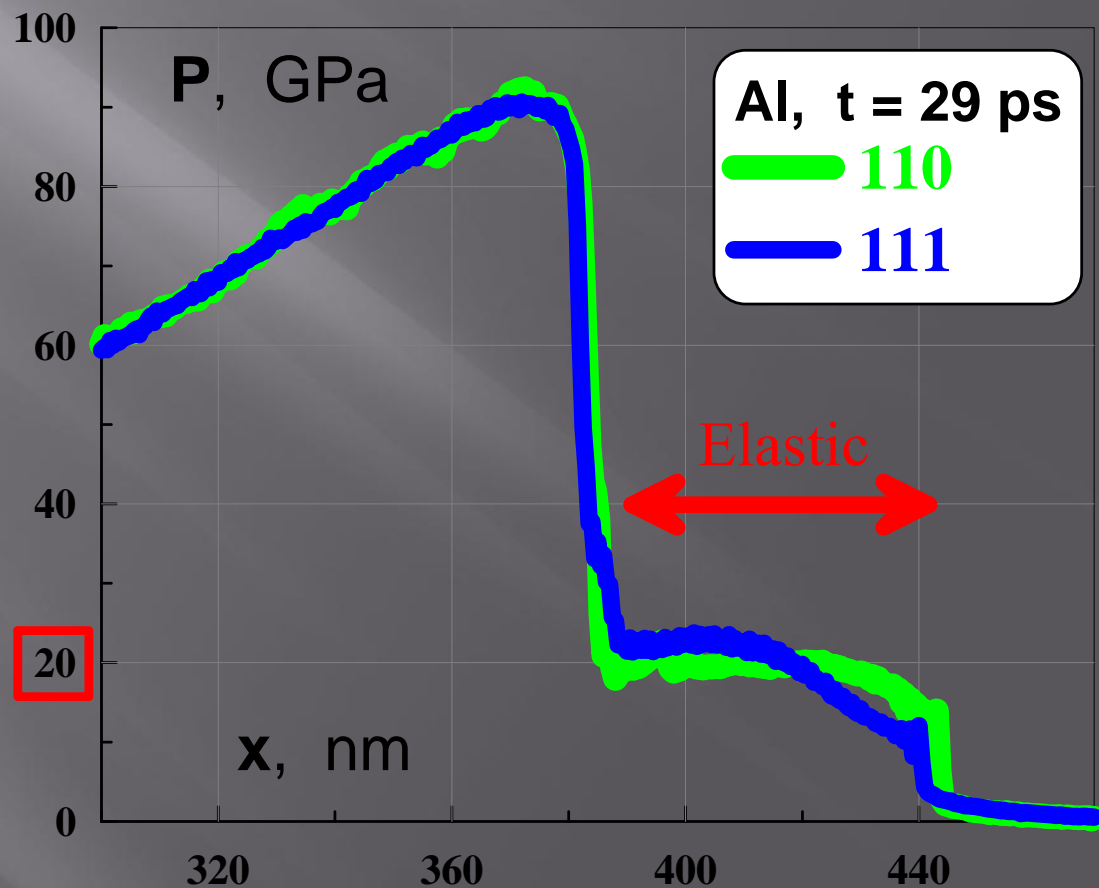
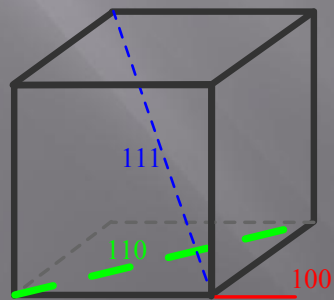
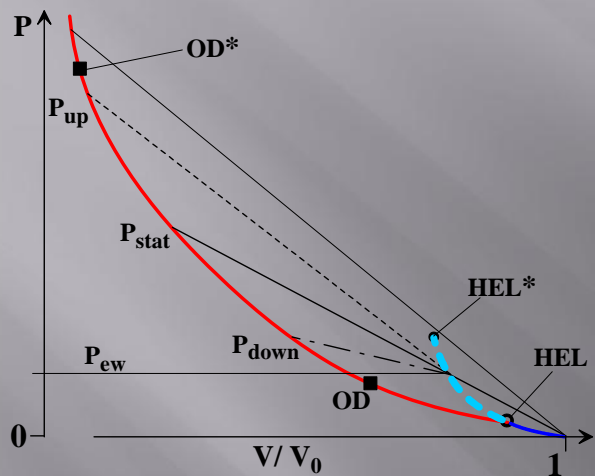
OD-OverDriven; Схема из Graham 1996

# Продолжение упругой ударной адиабаты в область повышенных давлений

$$P \gg P_{HEL}$$

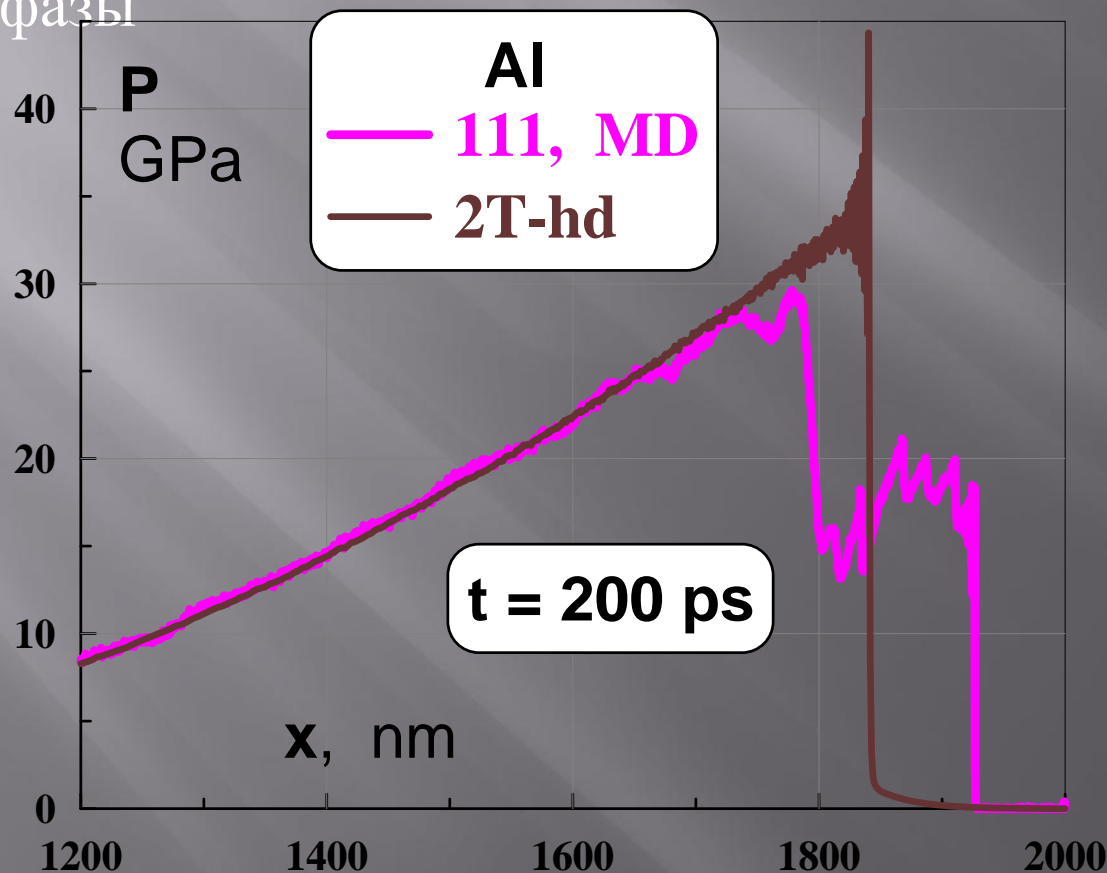


# Обнаружены ударные волны, распространяющиеся в соответствии с продленной упругой адиабатой



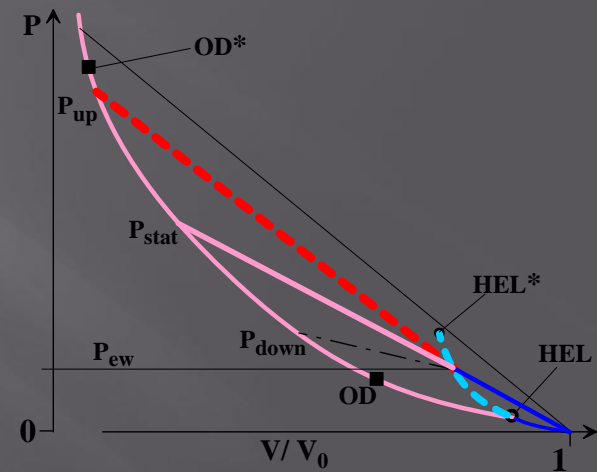
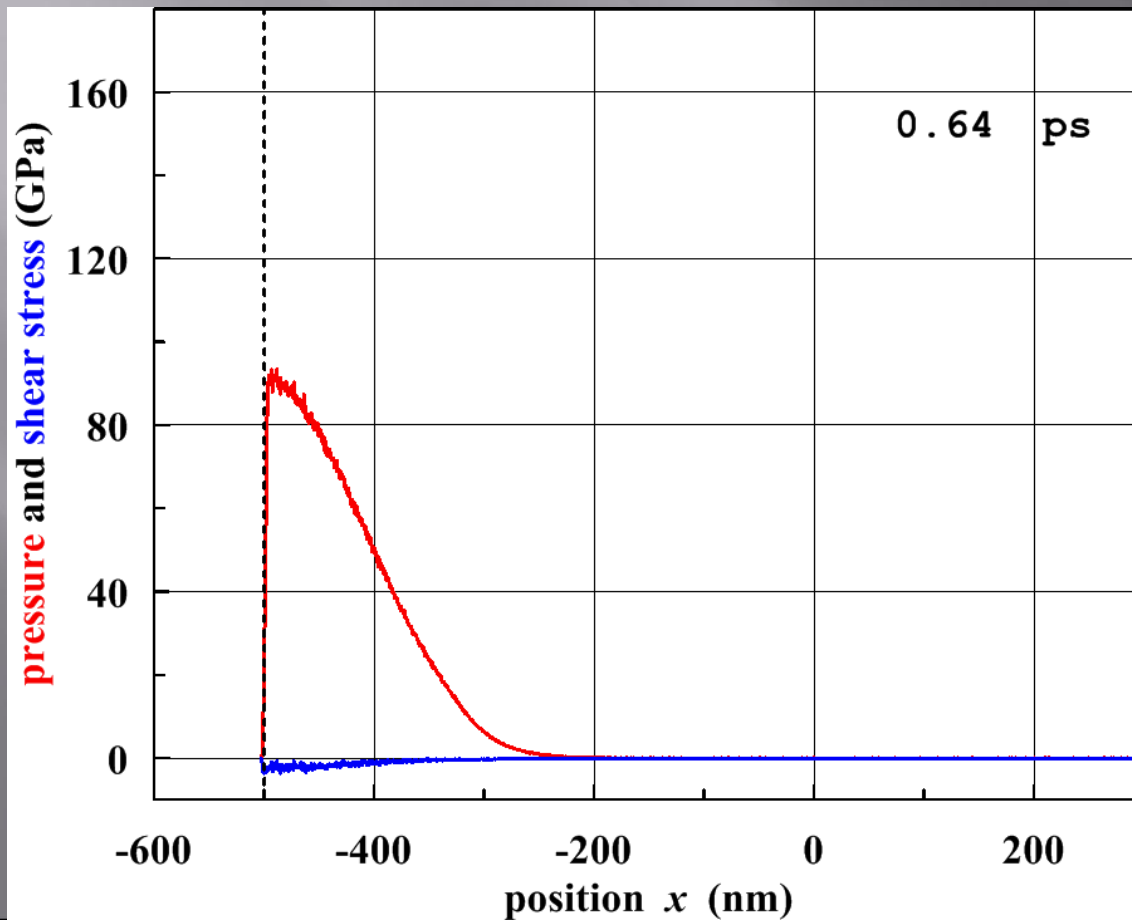
# Мощные упругие УВ возникают вследствие фемтосекундного лазерного воздействия

- Сравнение чисто гидродинамического расчета (2Т-гд) и расчета, представляющего собой комбинацию 2Т-гд и МД. 2Т-гд основывается на УРС с пластическим описанием твердой фазы



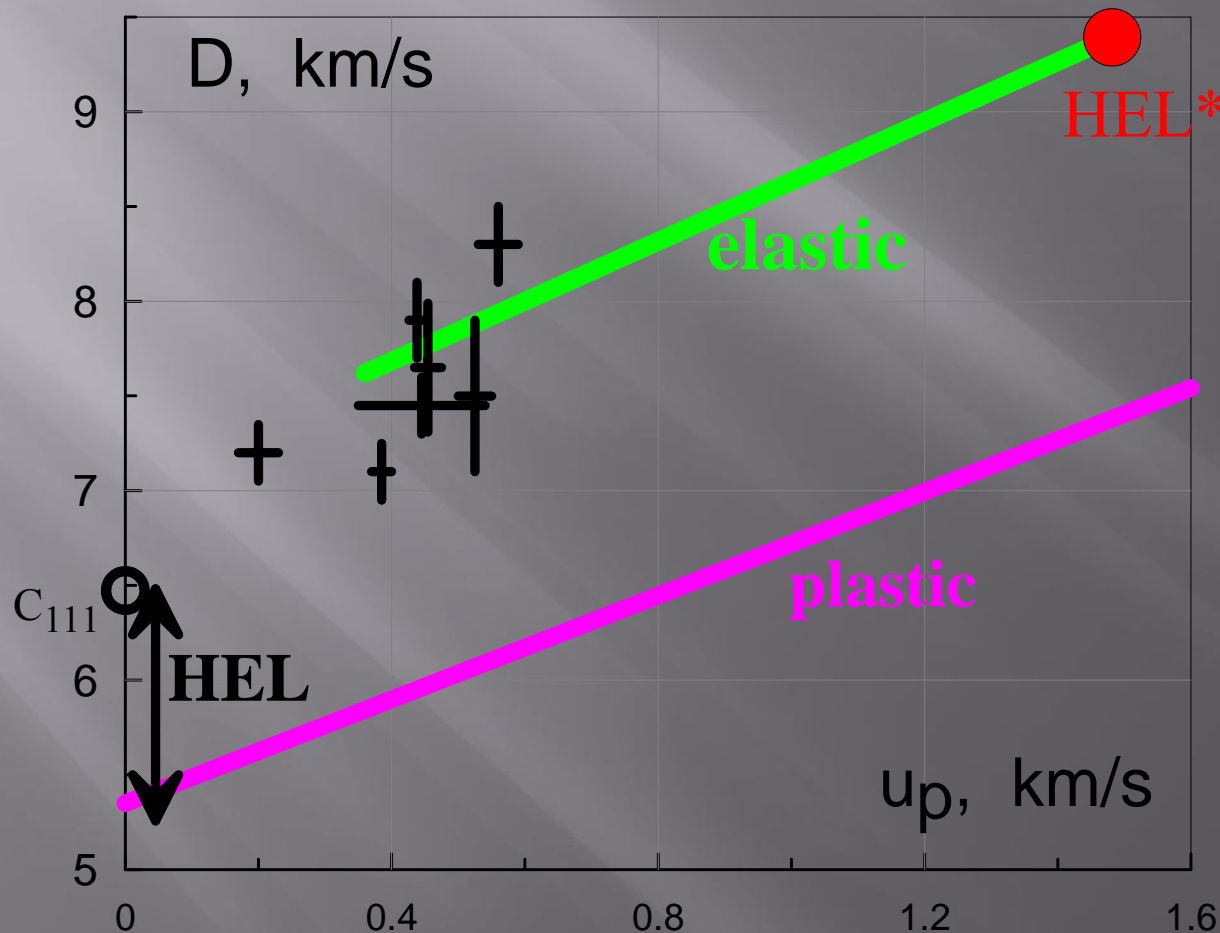
- Лазер на кристалле титан-сапфир
- $F_{\text{abs}} = 2.6 \text{ J/cm}^2$
- $\tau_L = 120 \text{ fs}$

- Методика с комбинированием 2Т-гд и МД расчетов позволяет детально проанализировать взаимодействие упругой и пластической УВ, инициированных фс лазерным импульсом



# Сравнение с фс экспериментом

- ▣ Лаборатория сверхбыстрого лазерного воздействия на вещество М.Б. Аграната
- ▣ С.И. Ашитков и др., Письма в ЖЭТФ (2010)



- ▣ Пример с алюминием



# Фс эксперимент на никеле

- Обнаружено, что УВ в никеле распространяются с высокой скоростью. Это не нашло объяснения у авторов

VOLUME 85, NUMBER 15

PHYSICAL REVIEW LETTERS

9 OCTOBER 2000

Edited by Foxit Reader  
Copyright (C) by Foxit Software Company, 2005-2008  
For Evaluation Only.

## Measurement of Shock Wave Rise Times in Metal Thin Films

K. T. Gahagan, D. S. Moore, David J. Funk, R. L. Rabie, and S. J. Buelow

*Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545*

J. W. Nicholson

*Department of Physics and Astronomy, University of New Mexico, 800 Yale Boulevard NE, Albuquerque, New Mexico 87131*

(Received 24 March 2000)

We have measured the rise time of laser-generated shock waves in vapor plated metal thin films using frequency-domain interferometry with subpicosecond time resolution. 10%–90% rise times of  $<6.25$  ps were found in targets ranging from  $0.25$  to  $2.0$   $\mu\text{m}$  in thickness. Particle and average shock velocities were simultaneously determined. Shock velocities of  $\sim 5$  nm/ps were inferred from the measured free surface velocity, corresponding to pressures of  $30$ – $50$  kbar. Thus, the shock front extends only a few



TABLE I. Average shock velocity ( $\bar{U}_{sh}$ ), shock velocity at breakout ( $U_{sh}$ ), final free surface velocity constant for the free surface velocity ( $\tau_{fs}$ ), and 10%–90% shock wave rise time ( $\tau_{sh}$ ) for nickel thickness probed at two different wavelengths,  $\lambda_{pr}$ .

Sample	$\lambda_{pr}$ (nm)	$\bar{U}_{sh}$ (nm/ps)	$U_{sh}^a$ (nm/ps)	$u_p$ (nm/ps)
1000 nm aluminum ( <i>D, E</i> )	400	–	$5.72 \pm 0.02$	$0.29 \pm 0.02$
750 nm aluminum	800	–	$5.76 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.01$
2000 nm aluminum	800	–	$5.59 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$
250 nm nickel	800	$6.28 \pm 0.5$	$5.13 \pm 0.01$	$0.36 \pm 0.01$
467 nm nickel ( <i>A</i> )	800	$6.62 \pm 0.4$	$4.90 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.01$
839 nm nickel ( <i>C</i> )	800	$6.15 \pm 0.39$	$4.80 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.01$
467 nm nickel ( <i>B</i> )	400	–	$5.03 \pm 0.06$	$0.30 \pm 0.04$

<sup>a</sup>Note:  $U_{sh} = 4.60 + 1.437u_p$  for nickel, and  $U_{sh} = 5.35 + 1.34u_p$  for aluminum (see Ref. [1])

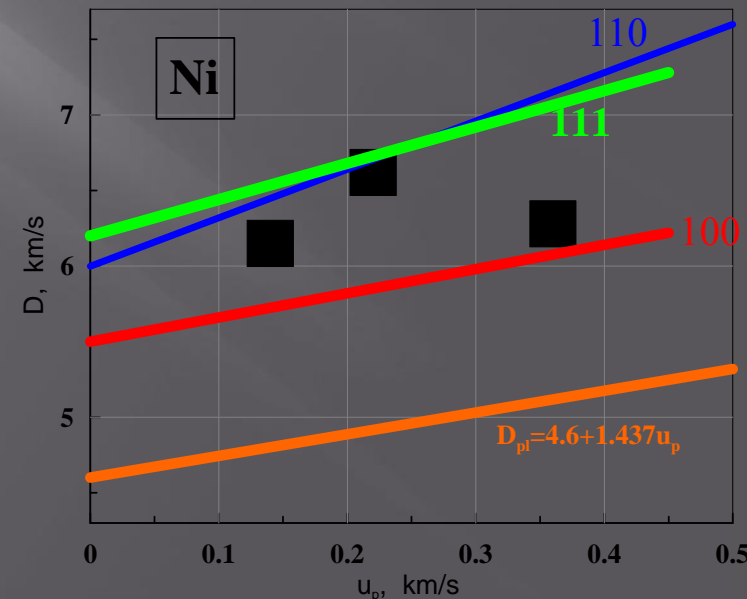
# Экспериментальные точки ложатся на продолжение упругой ударной адиабаты никеля

- ▣ Gahagan, Moore, Funk et al., 2000 привели свои данные с высокой скоростью, привели пластическую ударную адиабату с низкой скоростью. Но комментировать, с чем связано появление бьющей в глаза разницы в скоростях, они не стали
- ▣ Вместо этого статья посвящена тщательному поиску причин возможных неточностей. Т.е. в своих данных они сомневались

Table I. Average shock velocity ( $\bar{U}_{sh}$ ), shock velocity at breakout ( $U_{sh}$ ), final free surface velocity ( $u_p$ ), and 10%–90% shock wave rise time ( $\tau_{sh}$ ) for nickel and aluminum probed at two different wavelengths,  $\lambda_{pr}$ .

Sample	$\lambda_{pr}$ (nm)	$\bar{U}_{sh}$ (nm/ps)	$U_{sh}^a$ (nm/ps)	$u_p$ (nm/ps)
100 nm aluminum (D, E)	400	–	$5.72 \pm 0.02$	$0.29 \pm 0.02$
100 nm aluminum	800	–	$5.76 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.01$
100 nm aluminum	800	–	$5.59 \pm 0.01$	$0.18 \pm 0.01$
150 nm nickel	800	$6.28 \pm 0.5$	$5.13 \pm 0.01$	$0.36 \pm 0.01$
170 nm nickel (A)	800	$6.62 \pm 0.4$	$4.90 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.01$
190 nm nickel (C)	800	$6.15 \pm 0.39$	$4.80 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.01$
170 nm nickel (B)	400	–	$5.03 \pm 0.06$	$0.30 \pm 0.04$

$U_{sh} = 4.60 + 1.437u_p$  for nickel, and  $U_{sh} = 5.35 + 1.34u_p$  for aluminum (see Ref. [1])



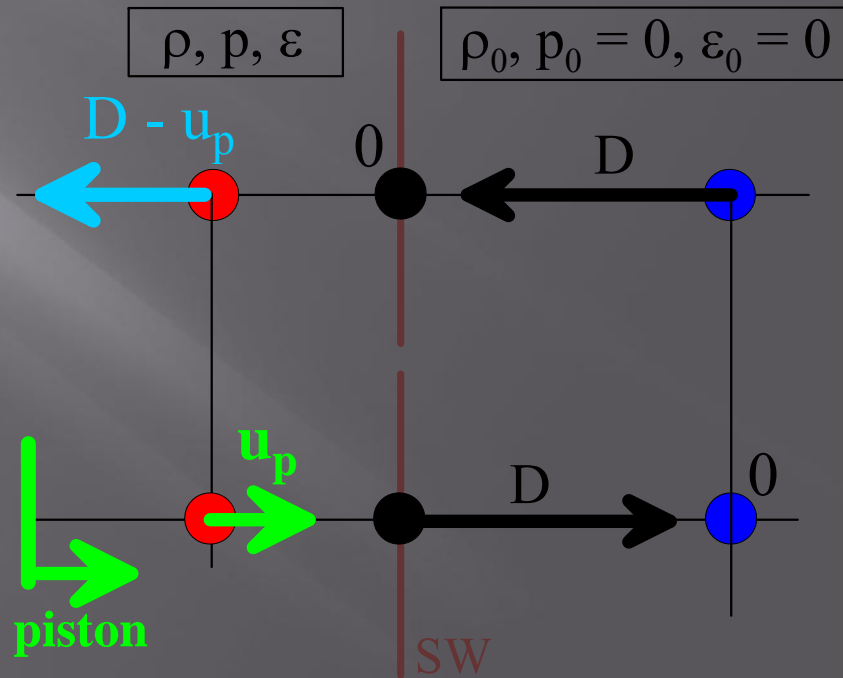
# Условия на скачке

- Сохранение потоков массы, импульса и энергии
- УРС – уравнение состояния  $p(\rho, \varepsilon)$

$$\rho(D - u_p) = \rho_0 D$$

$$p + \rho(D - u_p)^2 = \rho_0 D^2$$

$$\varepsilon + \frac{p}{\rho} + \frac{(D - u_p)^2}{2} = \frac{D^2}{2}$$



- Неизвестные  $\rho, P, D \rightarrow D(u_p), P(u_p), \rho(u_p)$ .
- $u_p$  – параметр. Можно использовать для кристалла  $\rightarrow P_n$

# Разложение ударной адиабаты $D(u_p)$ по степеням $u_p$

- Коэффициенты  $A, B$  берутся из холодных кривых никеля по направлениям 100, 110, 111
- Холодные кривые находятся с помощью DFT

$$\frac{D}{c} = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \left(\frac{u_p}{c}\right)^i$$

$$a_1 = (2 + 2A + \Gamma)/4, \quad (1)$$

$$a_2 = (4 + 8A - 12A^2 + 16B + 8g + 4\Gamma - 4A\Gamma + \Gamma^2)/32, \quad (2)$$

$$a_3 = (-2A^2 + 2A^3 + 2B - 4AB + g - Ag - A\Gamma + A^2\Gamma - B\Gamma)/4.$$

$$p/K = \delta + A\delta^2 + B\delta^3 + (\Gamma_0 + g\delta)(1 + \delta)\Delta e, \quad K = \rho_0 c^2,$$



- (1) Физико-математическая модель
- (2) Результаты моделирования
- (3) Сравнение с экспериментом

- ▣ Модель : комбинирование 2Т-гд и МД расчетов
  
- ▣ 2Т-гд : это двухтемпературная гидродинамика
  
- ▣ МД : это крупномасштабное молекулярно-динамическое моделирование с адекватными потенциалами многочастичного взаимодействия

# Двухтемпературная гидродинамика

Электронный тепловой баланс

$$\rho^0 \frac{\partial [E_e(\rho, T_e)/\rho]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x^0} \left( \frac{\rho \kappa(\rho, T_e, T_i)}{\rho^0} \frac{\partial T_e}{\partial x^0} \right) - p_e \frac{\partial u}{\partial x^0} - \frac{\rho^0}{\rho} \alpha (T_e - T_i) + \frac{\rho^0}{\rho} Q$$

Электронная  
теплопроводность

Работа  $p dV$

Электрон-  
фононный  
теплообмен

Лазерный  
нагрев

Ионный тепловой баланс

$$\rho^0 \frac{\partial [E_i(\rho, T_i)/\rho]}{\partial t} = -p_i \frac{\partial u}{\partial x^0} + \frac{\rho^0}{\rho} \alpha (T_e - T_i)$$

$$\partial x(x^0, t)/\partial t = u, \quad \rho \partial x(x^0, t) = \rho^0 \partial x^0$$

Кинематика,  
неразрывность

$$\rho^0 \partial u / \partial t = -\partial p / \partial x^0$$

Динамическое уравнение

# Двухтемпературная гидродинамика

- ▣ Разделение на электронную и ионную подсистемы

$$p = p_e + p_i, \quad E = E_e + E_i$$

- ▣ Фермиевская модель для электронов (металлы) и широкодиапазонное табличное уравнение состояния для ионной подсистемы. Оно берется в соответствии с A.V. Bushman, I.V. Lomonosov, K.V. Khishchenko, V.E. Kogan, P.R. Levashov and I.N. Lomov,

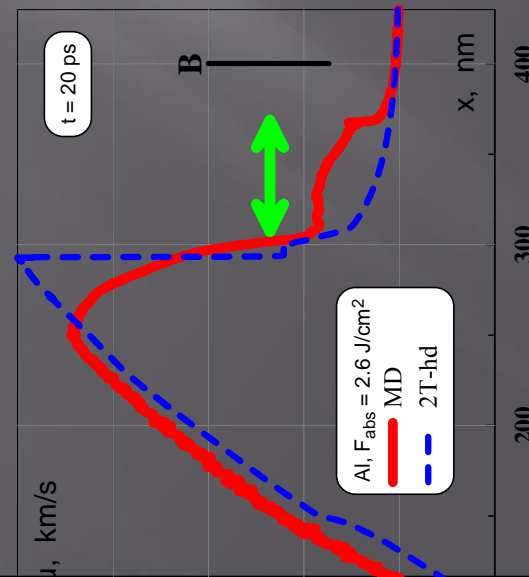
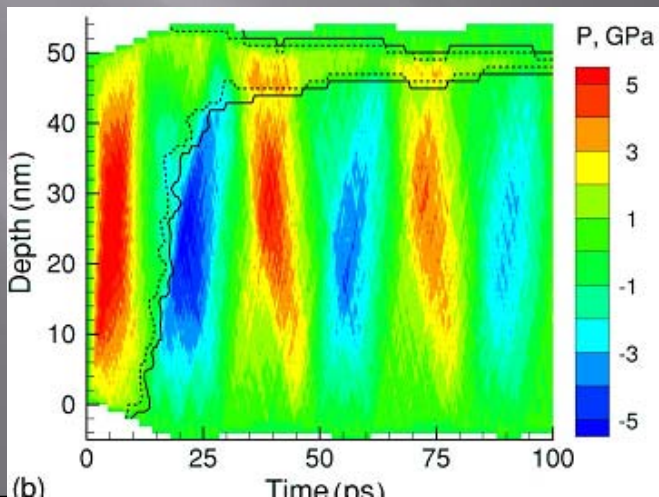
A.V. Bushman, G.I. Kanel', A.L. Ni, V.E. Fortov, *Intense Dynamic Loading of Condensed Matter* (Taylor & Francis, London, 1993)

- ▣ Литературные данные для электрон-ионного теплообмена – коэффициент  $\alpha$  в члене
- ▣ В случае алюминия теплопроводность  $k$  вычисляем по двухтемпературной модели  $k(T_e, T_i, \rho)$ , Иногамов, Петров, 2010



# Молекулярная динамика (МД)

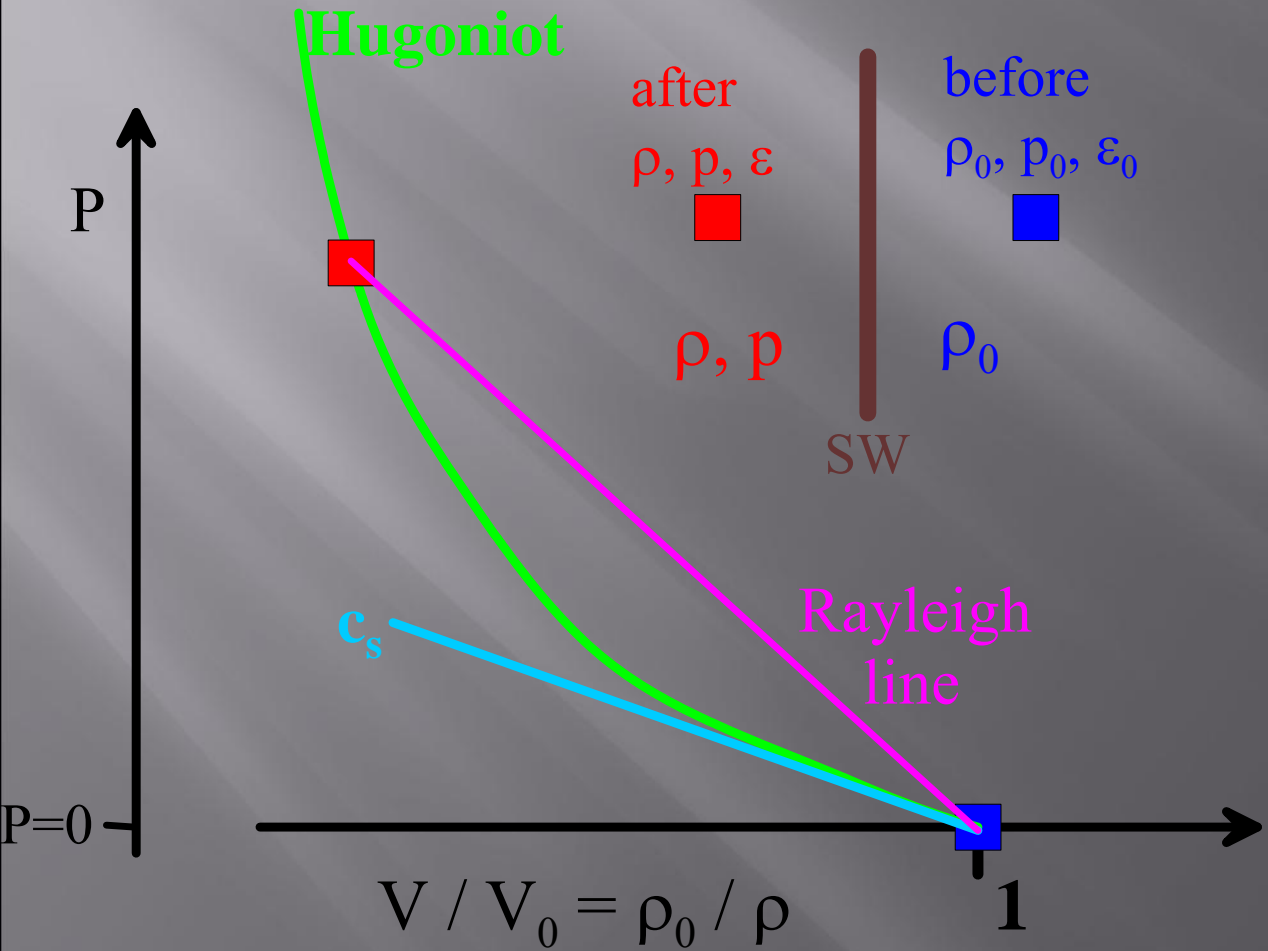
- ▣ Размеры системы поперечник и длина/толщина слоя
- ▣ В экспериментах толщина слоя от долей до единиц микрона и более
- ▣ Большой поперечник нужен для получения качественных профилей усредненных величин
- ▣ В наши расчеты фемтосекундного лазерного воздействия достигнуты наибольшие на сегодня размеры МД системы





# Ударная адиабата и прямая Релея

- Состояния **перед** и **за** фронтом УВ и скачок вдоль ударной адиабаты



$$(D - u_p) / V = D / V_0$$

$$p = \frac{D^2}{V_0} - \frac{(D - u_p)^2}{V}$$

$$\frac{p - p_0}{V_0 - V} = \frac{D^2}{V_0^2}$$

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**