

Минцев В.Б.
Грязнов В.К.,
Ломоносов И.В.



**МОЕЙ СУДЬБЫ КРИВАЯ ЛИНИЯ
БЫЛА КРУТА,
НО И ТОГДА Я НЕ ВПАДАЛ
ВО ГРЕХ УНЫНИЯ
И ГРЕХ ПОСТЫЛОГО ТРУДА.**
И. Губерман

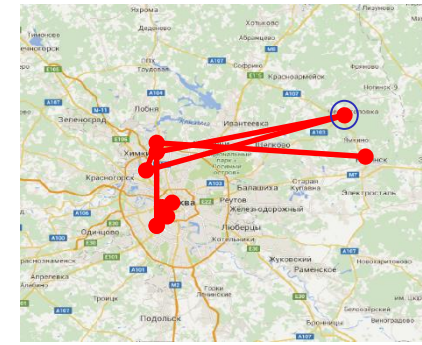
Траектория:

Неидеальная плазма в ИПХФ РАН Черноголовка



1971 год

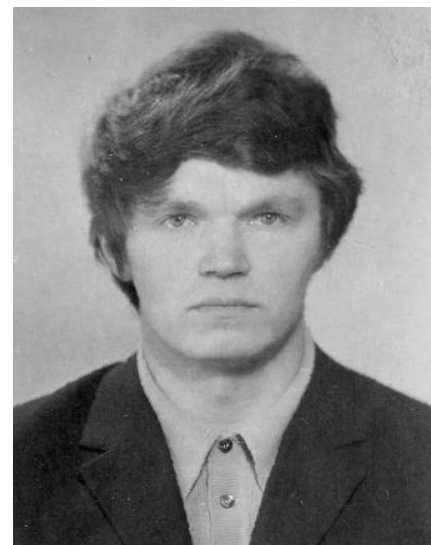
Трудный путь в Черногловку
ОИХФ АН СССР



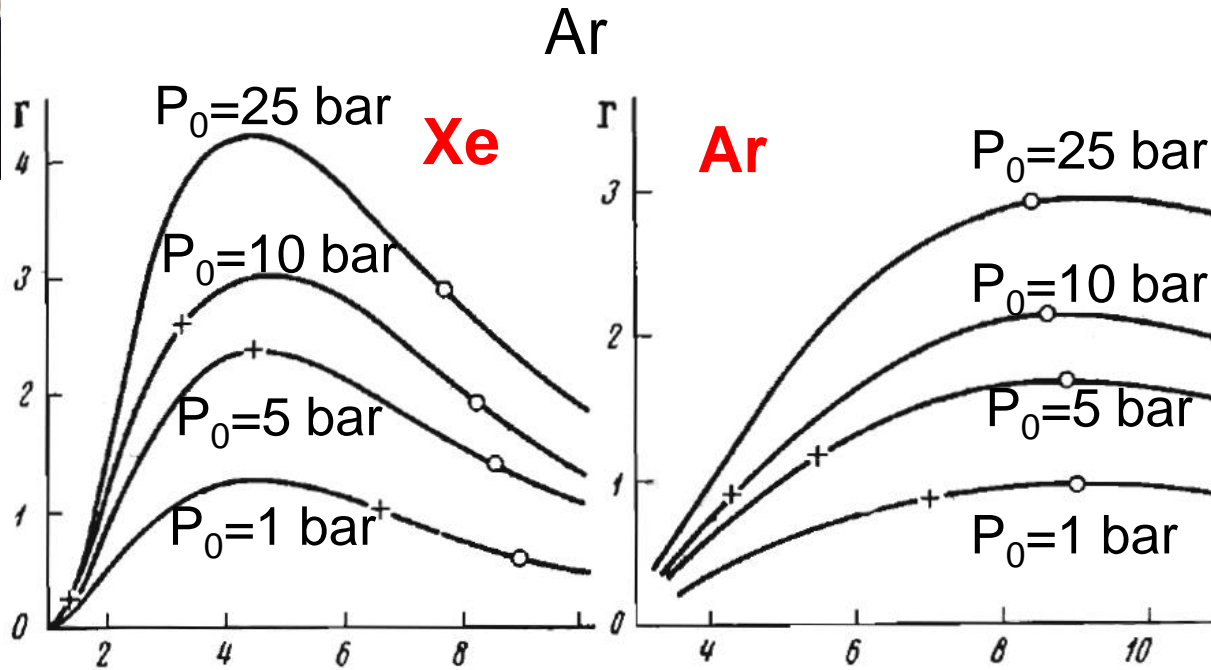
Основное задачи: *Исследования генерации, изучение физических свойств и газодинамики плотной низкотемпературной плазмы*

1972 год

Первые студенты, аспиранты

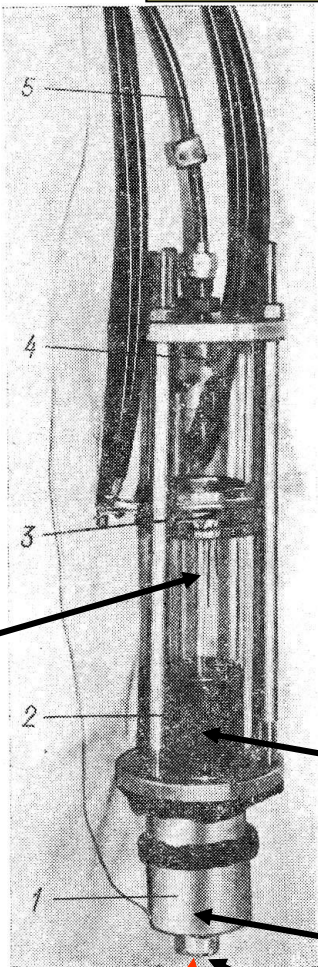


Неидеальная плазма за фронтом мощных ударных волн в Ar и Xe



Расчет ударных адиабат аргона и ксенона // Журнал прикладной механики и технической физики. 1973. Вып. 3. С. 70-76. Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Фортов В.Е.

ОИХФ АН СССР. Взрывная ударная труба



Ar, Xe,
Ne

Energy
~ 3MJ

Power
~ 100 GW

High
Explosive
Charge

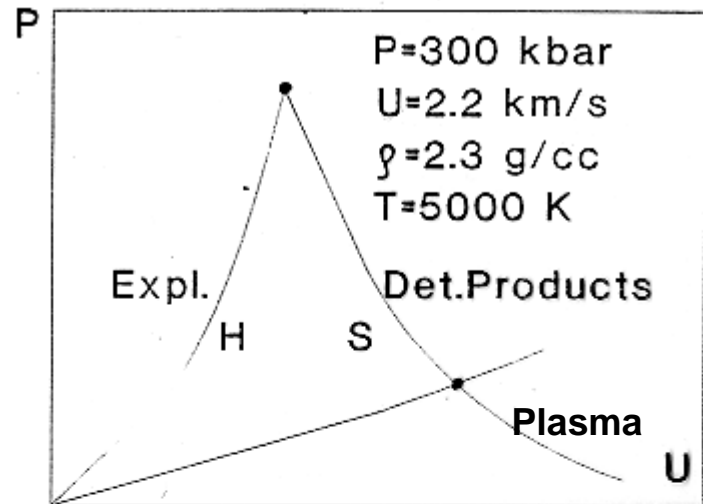
Lens

Detonator

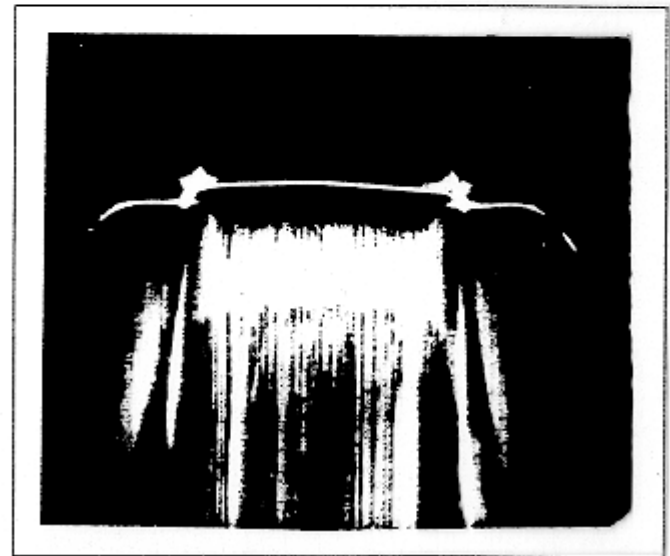
взрывной
грубы:

1 — детонационная линза;
2 — заряд ВВ; 3 — кольцо-
вставка с электроконтактны-
ми датчиками и окном для
рентгеновских измерений;
4 — зеркало для оптических
регистраций; 5 — трубка для
подачи газа

Фотография
ударной
грубы:



Shock Front Curvature



Fortov et al, DAN, 1975

Dynamic compression of non-ideal argon plasma

V. E. Bespalov, V. K. Gryaznov, A. N. Dremin, and V. E. Fortov

Division of Institute of Chemical Physics, USSR Academy of Sciences

(Submitted June 27, 1975)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. **69**, 2059–2066 (December 1975)

Experimental results are presented on the investigation of the equation of state of a non-ideal argon plasma obtained with an explosive shock tube. The registration of the shock-wave front velocity, of the plasma density, and of the plasma temperature made it possible to obtain P - V - H - T information on the thermodynamic properties of the shock-compressed plasma. The obtained data are compared with theories of a non-ideal plasma; it is noted that bound states make an appreciable contribution.

PACS numbers: 52.25.Kn, 52.35.Lv

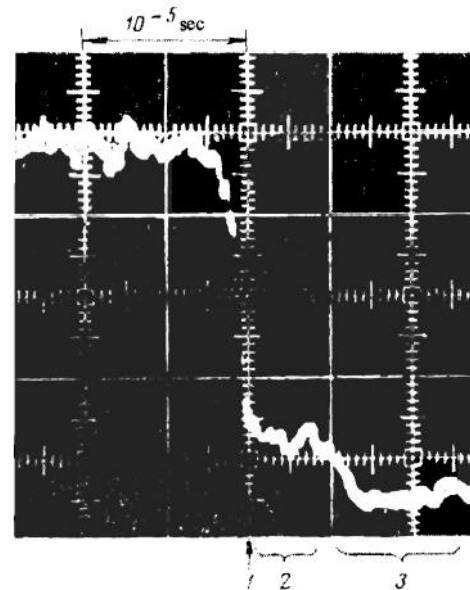


FIG. 2. X-ray pattern of density profile: 1—shock-wave front, 2—shock-compressed plasma, 3—detonation products.





Shock-wave production of a non-ideal plasma

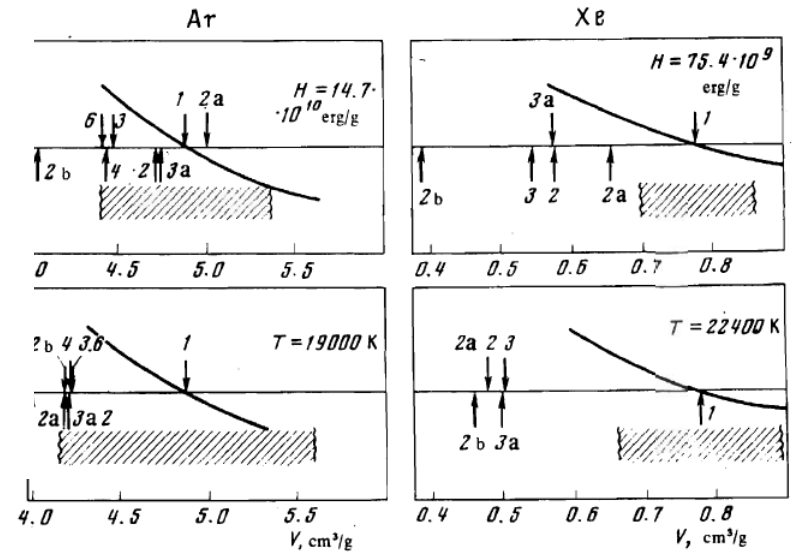
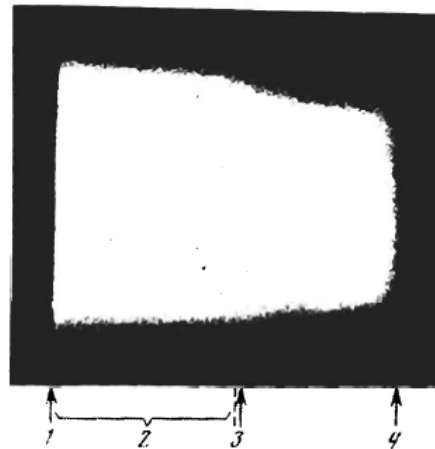
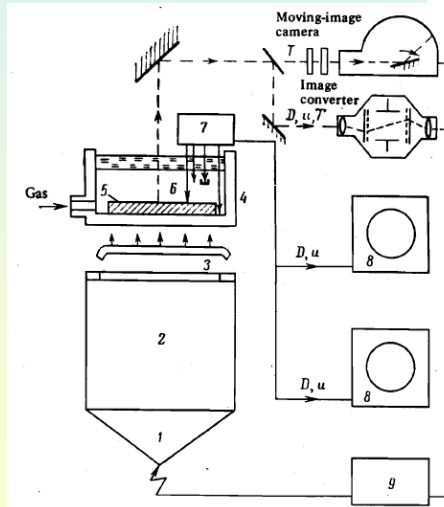
V. E. Fortov, A. A. Leont'ev, A. N. Dremin, and V. K. Gryaznov

Division of Institute of Chemical Physics, USSR Academy of Sciences

(Submitted January 14, 1976)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. **71**, 225–236 (July 1976)

Experiments on generation of a non-ideal argon or xenon plasma by intense shock waves are described, and results of investigation of the equation of state of the plasma are presented. The experiments are performed with explosive generators of rectangular shock waves in which condensed explosives are employed as the active elements. A thermodynamically complete equation of state of the imperfect plasma is determined by recording the kinematic parameters of the shock wave and the temperature. The equation is compared with theoretical models.



Electric conductivity of a non-ideal plasma

Yu. V. Ivanov, V. B. Mintsev, V. E. Fortov, and A. N. Dremin

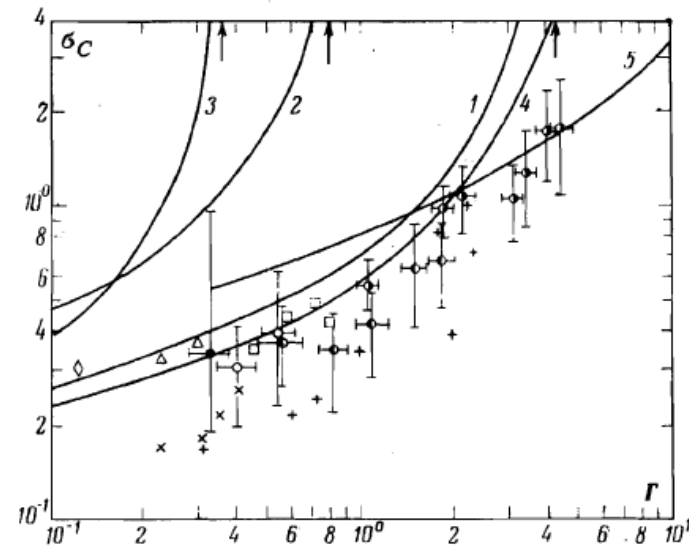
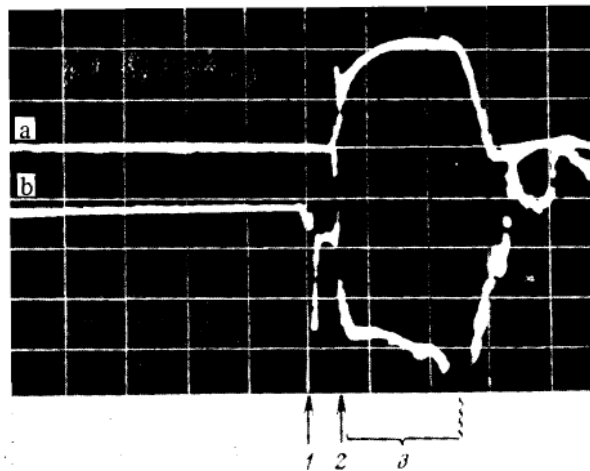
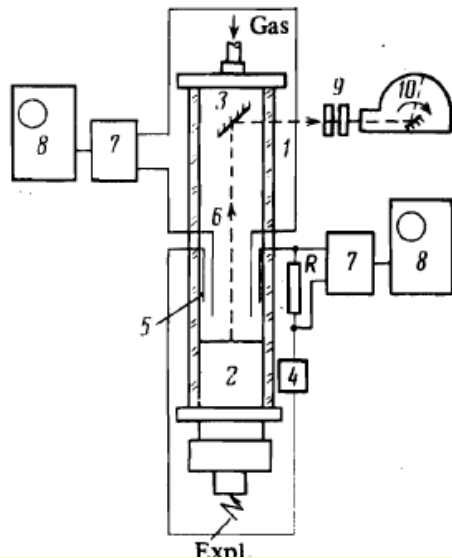
Division of Institute of Chemical Physics, USSR Academy of Sciences

(Submitted January 14, 1976)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. **71**, 216–224 (July 1971)



Results are presented of measurements of the electric conductivity of a dense plasma with strong interparticle Coulomb interaction. Experiments with air, neon, argon and xenon were carried out with an explosive nonideal-plasma generator. A four-point probe recording technique was used. The Coulomb component of the electric conductivity is compared with that predicted by theories of a non-ideal plasma.



Фортов, Владимир Евгеньевич.



Исследование неидеальной плазмы динамическими методами:

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук.

01.04.08

Ин-т высоких температур АН СССР. – Черногоровка : 1976.

Оглавление

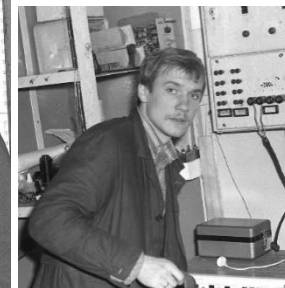
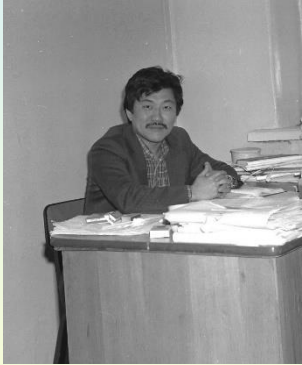
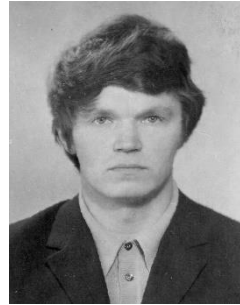
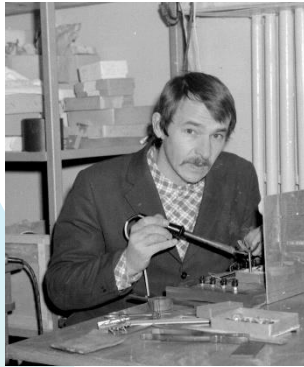
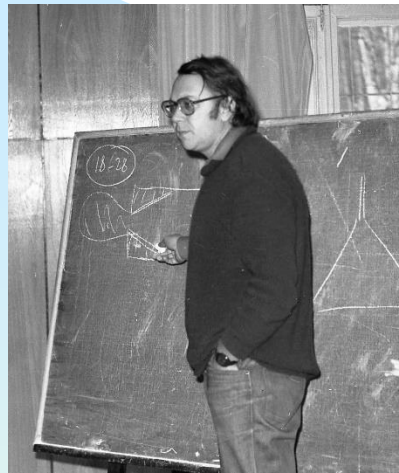
Введение

- I. Обзор работ по исследованию неидеальных сред
- II. Построение термодинамически полного уравнения состояния неидеальных сред по динамическим экспериментам
- III. Уравнение состояния неидеальной цезиевой плазмы
- IV. Динамическое сжатие неидеальной плазмы аргона
- V. Генерация неидеальной плазмы мощными ударными волнами
- VI. Электропроводность неидеальной плазмы
- VII. Уравнение состояния конденсированных сред
- VIII. Исследование уравнения состояния металлов методом изэнтропического расширения
- IX. О «плазменном фазовом переходе» при детонационных явлениях
- X. Гидродинамические эффекты в неидеальных средах

Заключение

1977 год

Лаборатория физической газодинамики



Thermodynamic properties of a nonideal argon or xenon plasma

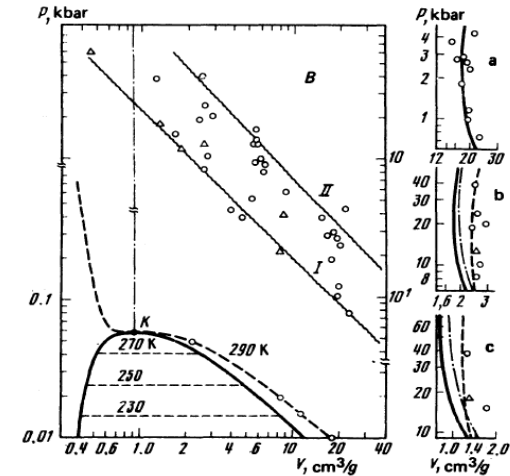
V. K. Gryaznov, M. V. Zhernokletov, V. N. Zubarev, I. L. Iosilevskii, and V. E. Tortov

Division of the Institute of Chemical Physics of the USSR Academy of Sciences

(Submitted 21 June 1979)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 78, 573–585 (February 1980)

Results are presented on shock-wave dynamic compression and on the investigation of the equation of state of a strongly nonideal argon and xenon plasma. The experiments were performed with explosive propelling devices, using the energy of the detonation of powerful condensed explosives. A considerable increase of the pressure and a decrease of the internal energy are established. This is a consequence of the deformation of the electronic energy levels of the strongly compressed plasma. A quantum-mechanical model of a bounded atom and a pseudopotential model of a plasma are proposed to describe this effect.



Electric conductivity of a high-temperature nonideal plasma

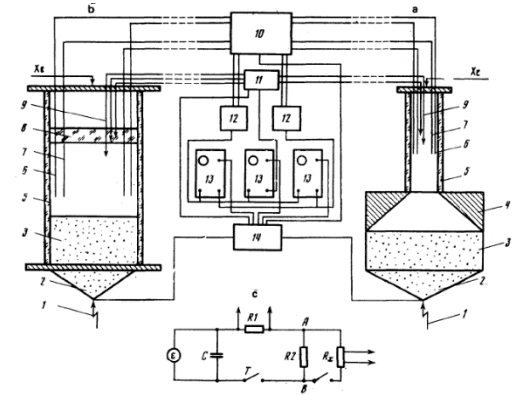
V. B. Mintsev, V. E. Fortov, and V. K. Gryaznov

Institute of Chemical Physics, USSR Academy of Sciences

(Submitted 12 November 1979)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 79, 116–124 (July 1980)

Results are presented of measurements of the electric conductivity of a nonideal xenon plasma at high temperatures $T \sim (3-10) \times 10^4$ K. Explosive cumulative plasma generators and linear explosive devices were used in the experiments to obtain a highly heated plasma in the reflected shock waves. Non-Coulomb scattering of the electrons by ions was observed and qualitative agreement was demonstrated with a model that describes the presence of an ion core in the pseudopotential approximation by the partial-wave method.



Radiation emitted by a shock-compressed high-pressure argon plasma

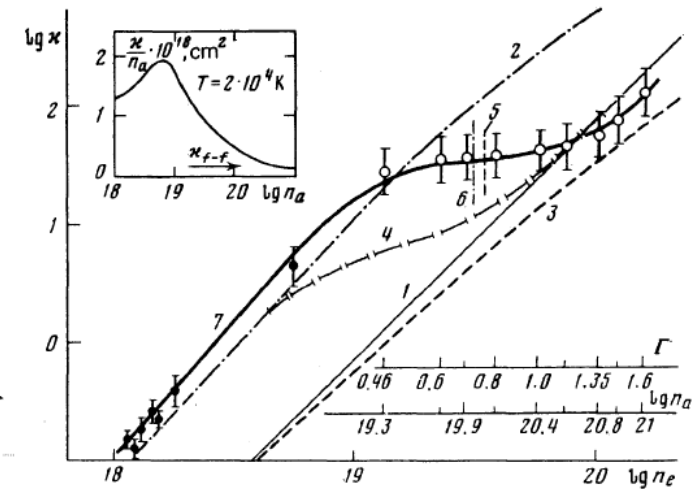
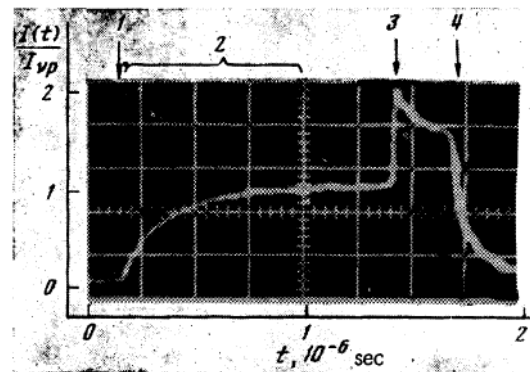
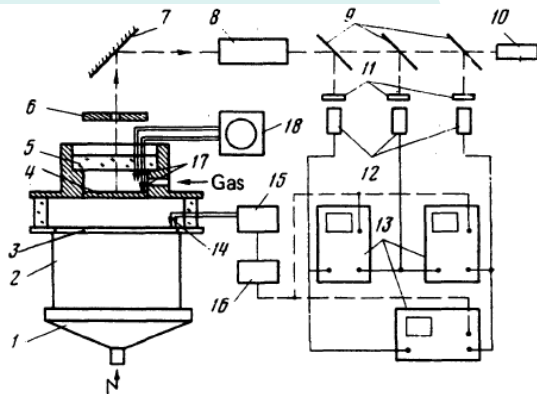
V. E. Bespalov, V. K. Gryaznov, and V. E. Fortov

Division of Institute of Chemical Physics, USSR Academy of Sciences

(Submitted 20 July 1978)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 76, 140-147 (January 1979)

Results are presented of measurements of the coefficient of optical absorption of a non-ideal argon plasma produced by powerful ionizing shock waves. The experiments were performed with explosive generators of rectangular shock waves, using condensed explosives. The obtained radiation of the shock-compressed plasma turned out to be much less than theoretical. The "transparentization" of the plasma is explained by using a bounded-atom model that takes into account the deformation of the electron energy spectrum.





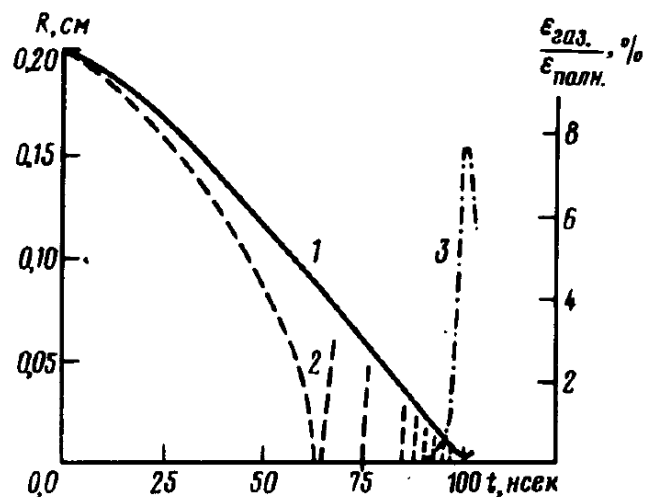
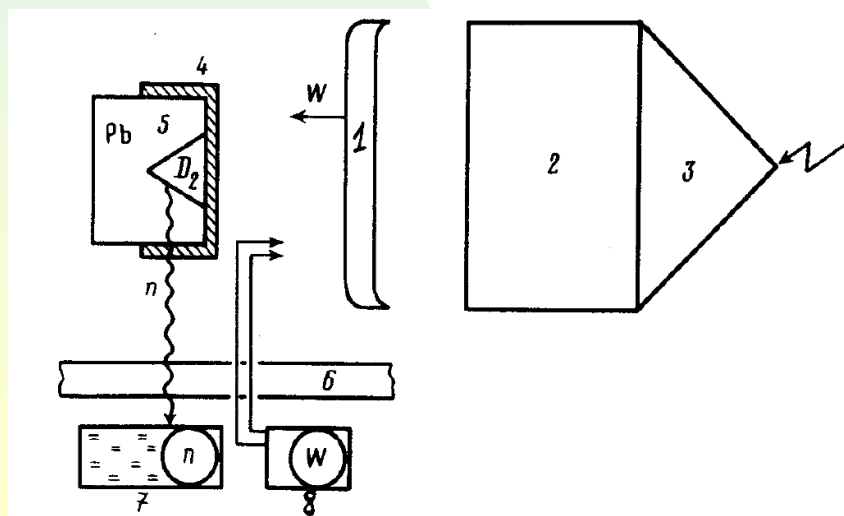
Письма в ЖЭТФ, том 31, вып. 1, стр. 67 – 70

5 января 1980 г.

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ДД-РЕАКЦИИ В КОНИЧЕСКИХ МИШЕНЯХ

*С.И.Анисимов, В.Е.Беспалов, В.И.Вовченко
А.Н.Дрёмин, Ф.И.Дубовицкий, А.П.Жарков, М.Ф.Иванов,
И.К.Красюк, П.П.Пашинин, А.М.Прохоров,
В.Я.Терновой, В.Е.Фортвов, Л.Н.Щур*

Зарегистрирован нейтронный выход около 10^6 нейтронов при торможении в конических мишенях, заполненных дейтерием, металлических лайнеров, ускоряемых продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ. Проведены теоретические расчеты процесса генерации нейтронов, учитывающие деформацию конуса на конечной стадии сжатия и нагрева дейтерия.

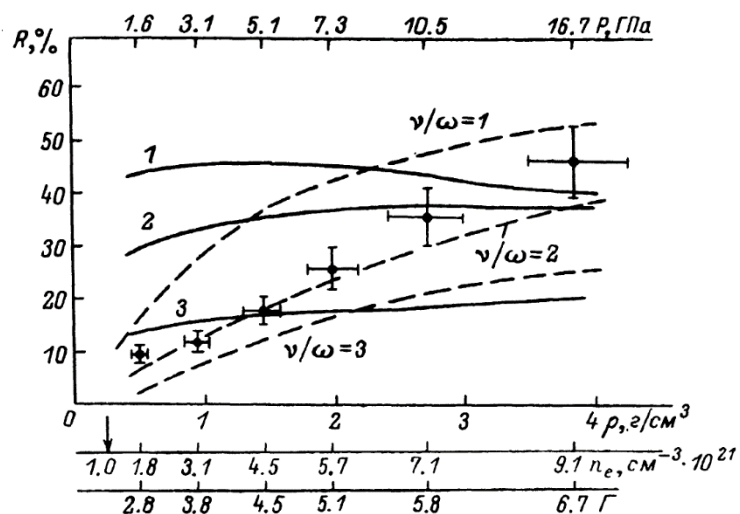




ОТРАЖЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ УДАРНО-СЖАТОЙ ПЛАЗМЫ
КСЕНОНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.Б. Запорожец, В.Б. Минцев,
В.Е. Фортков, О.М. Батовский

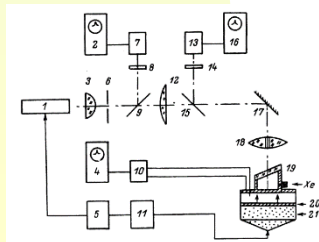
Представлены результаты измерений коэффициента отражения лазерного излучения ($\lambda = 1.06$ мкм) от ударно-сжатой плотной плазмы ксенона. Зафиксированные высокие (до 50%) значения коэффициента отражения сравниваются с теоретическими моделями. Взрывное плазменное зеркало использовано для модуляции добротности неодимового лазера.



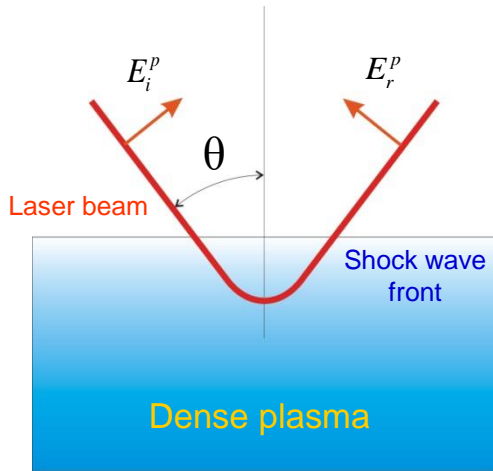
Структурные характеристики и отражение
лазерного излучения от ударно-сжатой
плазмы ксенона

Махлайчук В.Н., Ортнер Й., Рылюк В.М.,
Ткаченко И.М., В.Б.Минцев, Фортков В.Е.

Черноголовка, 1991.



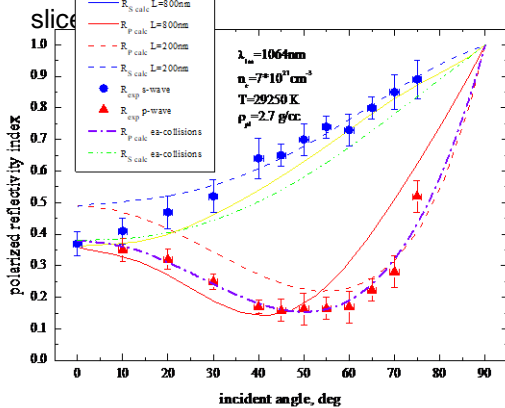
INTERACTION OF EXPLOSIVELY DRIVEN DENSE PLASMA WITH A LOW INTENSITY LASER RADIATION



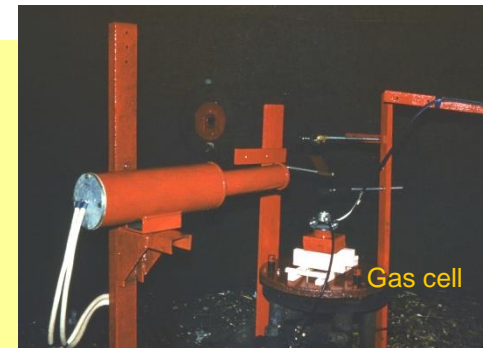
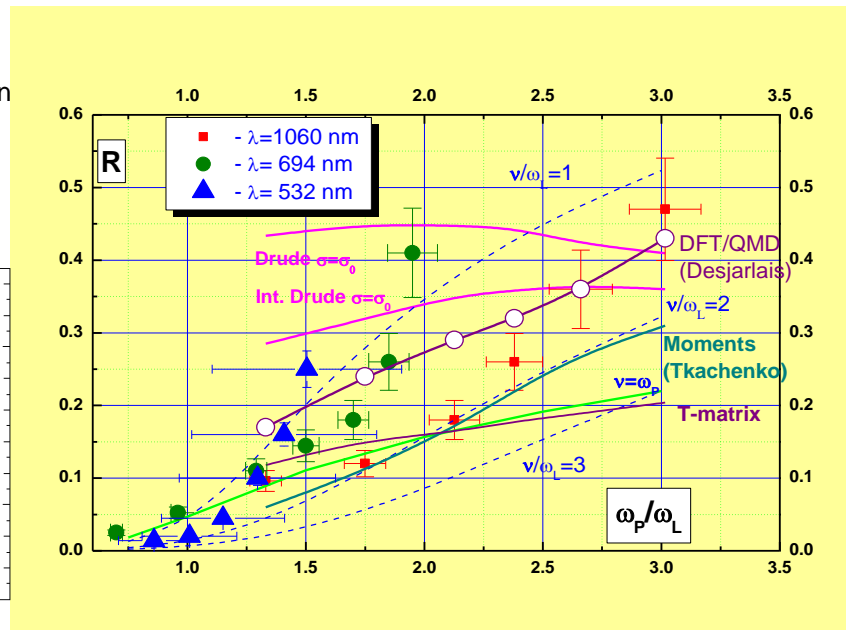
The pulsed laser system

Interaction of plasma with laser radiation

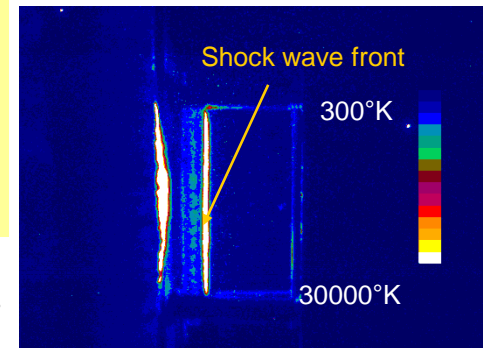
Angular dependence of p-polarized reflectivities vs extent of transitive slice



Dense plasma angular dependence of s- and p-polarized reflectivities. Solid curves are results calculated for 800 nm transitive slice extent.



Investigation of polarized reflectivities of explosively driven dense plasma

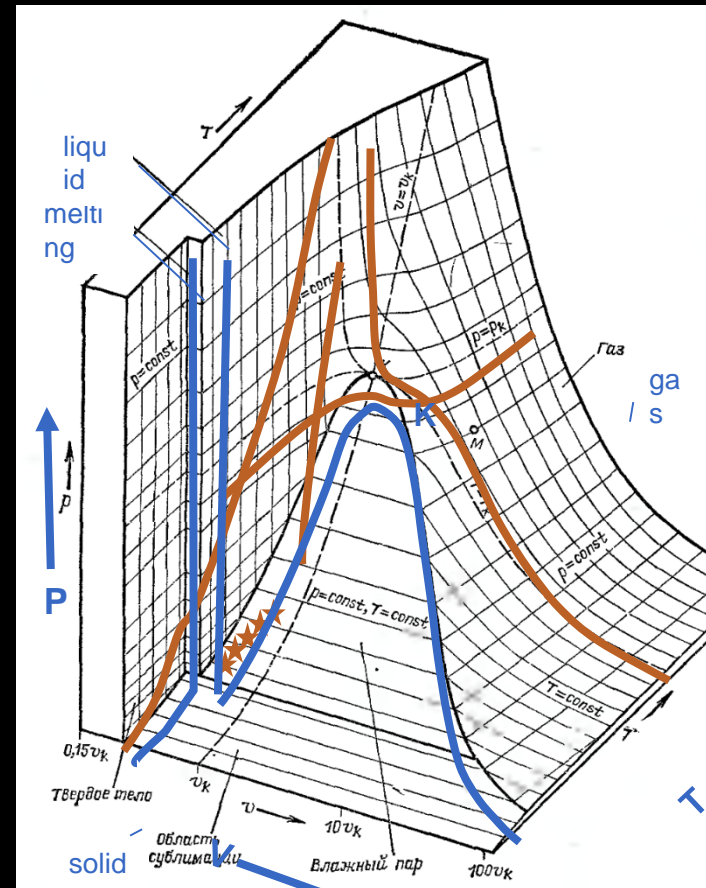
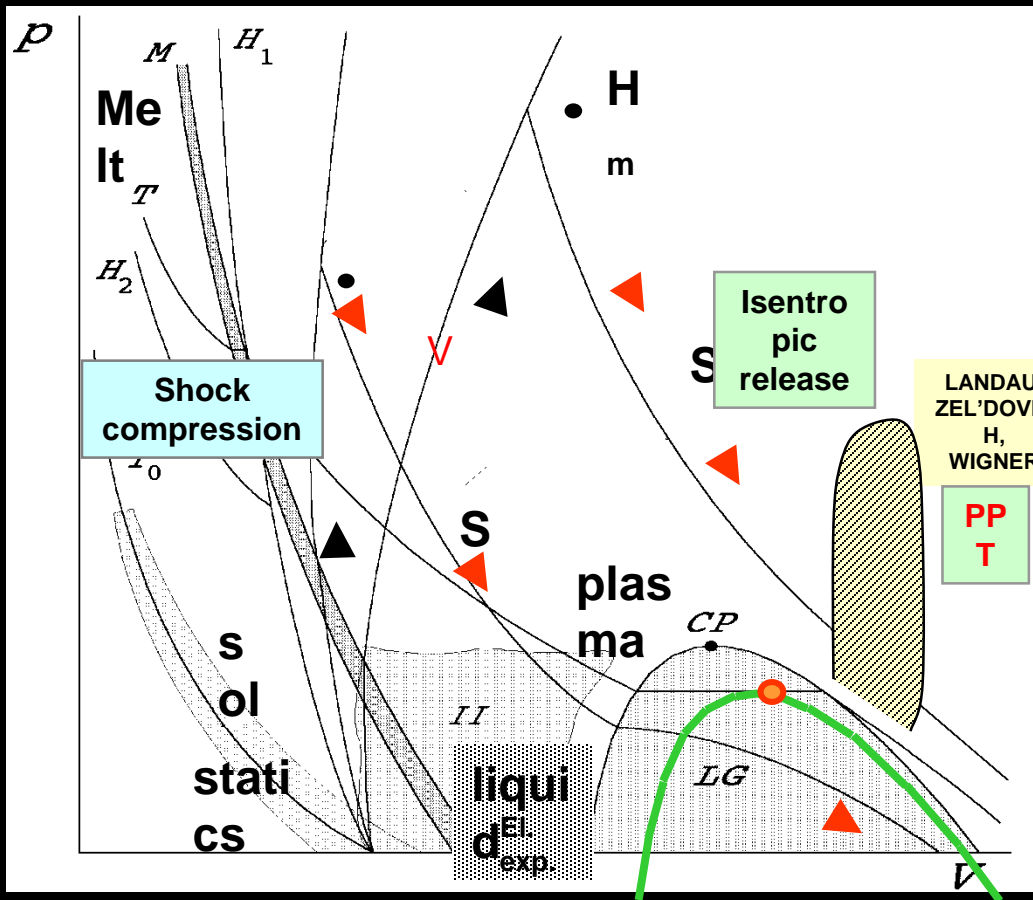


Shock wave propagation

H. Reinholz, Yu. Zaporozhets, V. Mintsev, V. Fortov, G. Roepke
PHYSICAL REVIEW E 99, 043202 (2019)



ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА



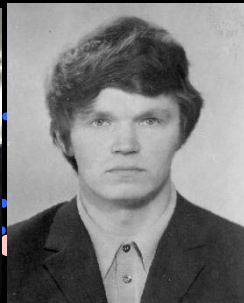
Pb: 5000 K, 2 Kb Al: 8000 K, 4.5 Kb W: 21000 K, 15 Kb

МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ

Atoms, Ions:



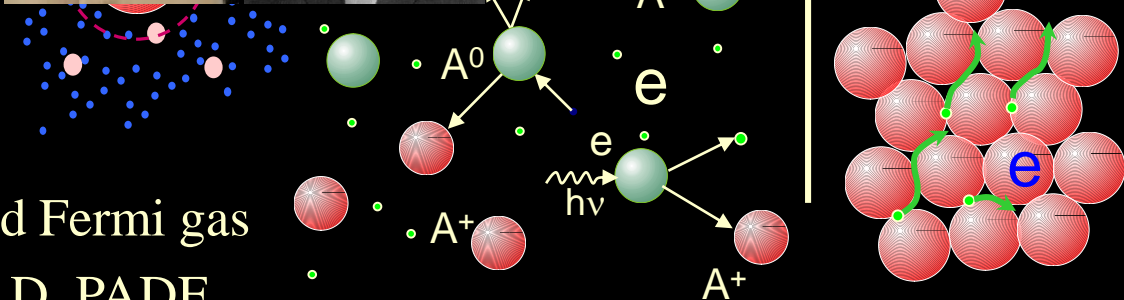
$$F_i^{id} = \sum_i N_i kT \left[\ln \frac{n_i \lambda_i^3}{Q_i(R_c)} - 1 \right]$$



IONIZATION BY:

TEMPERATURE

PRESSURE



Electrons: partially degenerated Fermi gas

Coulomb interaction: GDH, LD, PADE ...

Short Range repulsion: Hard or Sort Spheres – R_s

MD simulation

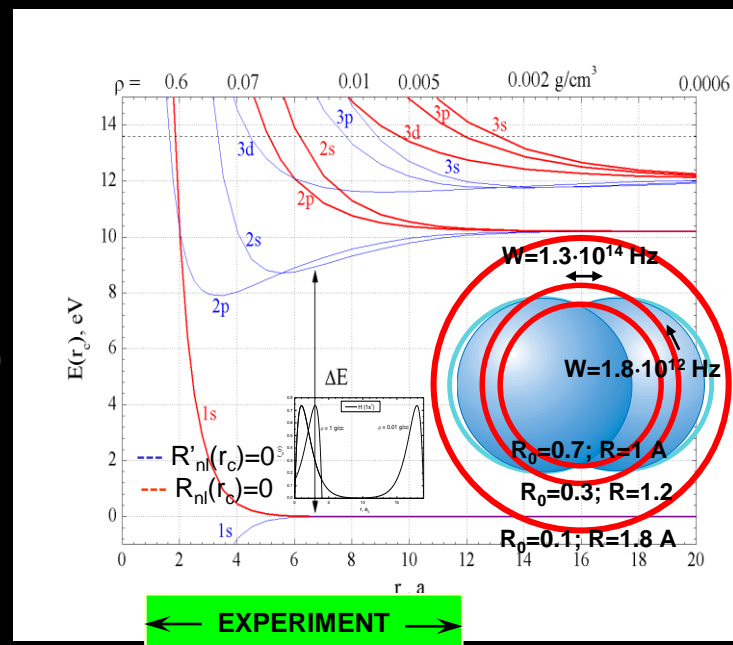
$$F_i^{HS} = N_i kT \nu \frac{4 - 3\nu}{(1 - \nu)^2}; \quad \nu = \frac{4\pi R_s^3}{3} N_i$$

Bound States – Hartree Fock: $Q_i(R_c) = \sum g_k \exp\left\{-\frac{E_k(R_c)}{kT}\right\}$

$$\frac{d^2 f_{nl}(R)}{dr} + V_{nl}(R) f_{nl}(R) + \int_0^{R_c} G_{nl} f_{nl} dr' = \lambda_{nl} f_{nl}(R_c)$$

Variation:

$$\frac{\partial F}{\partial R_c} = 0 \rightarrow R_c(N, T)$$



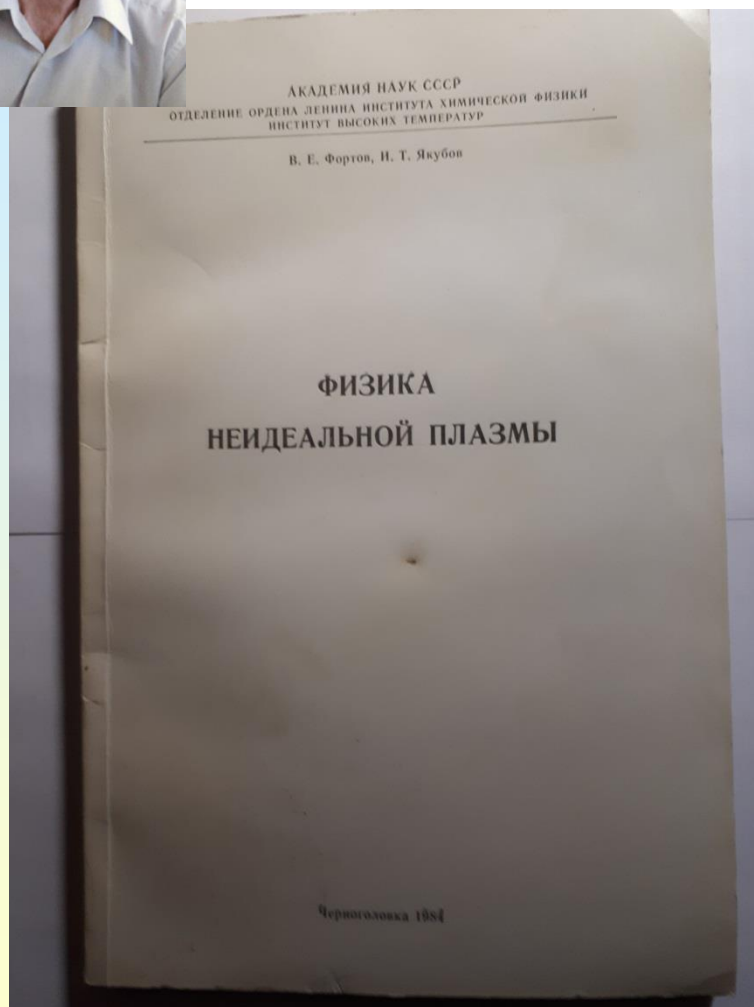


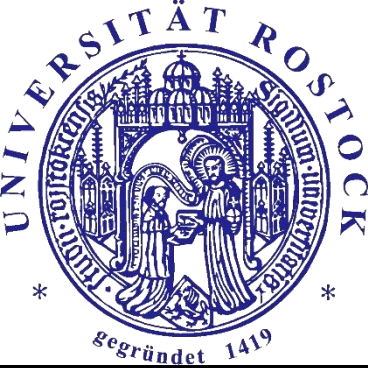
Динамические методы в физике плазмы // Успехи физических наук. 1982. Т. 138. Вып. 3. С. 361-412.

Модели уравнения состояния вещества // Успехи физических наук. 1983. Т. 140. Вып. 2. С. 177-232. – Соавт.: Бушман А.В.

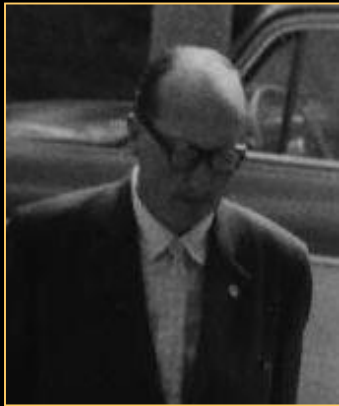
Физические свойства плазмы высокого давления // Успехи физических наук. 1983. Т. 139. Вып. 2. С. 193-222. – Соавт.: Алексеев В.А., Якубов И.Т.

Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН. 1984. Т. 142. Вып. 3. С. 395-434. – Соавт.: Анисимов С.И., Прохоров А.М.

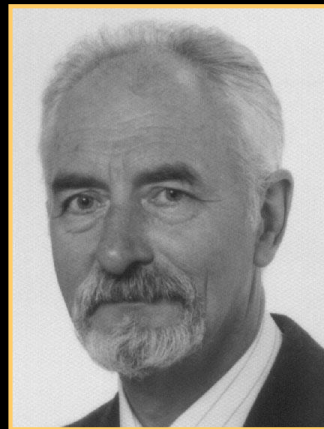




Statistical Physics of Nonideal Plasma



G. Kelbg



W. Ebeling



W.-D. Kraeft



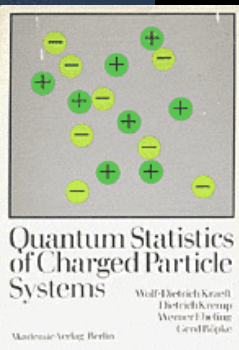
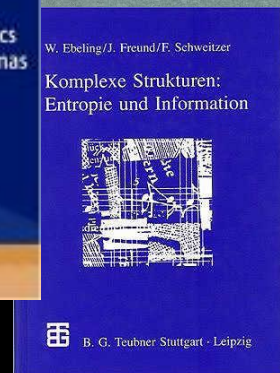
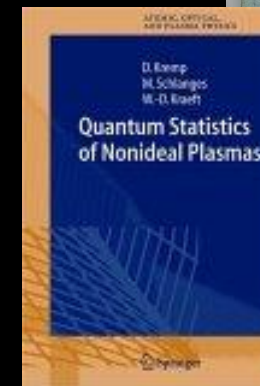
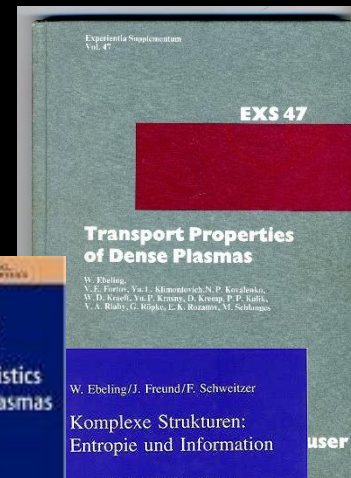
D. Kremp



G. Roepke



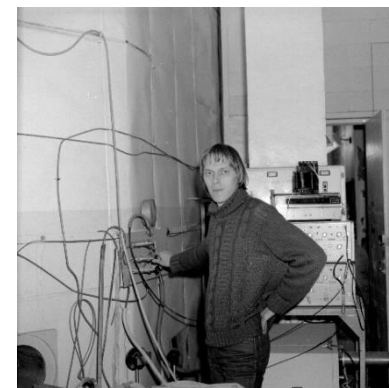
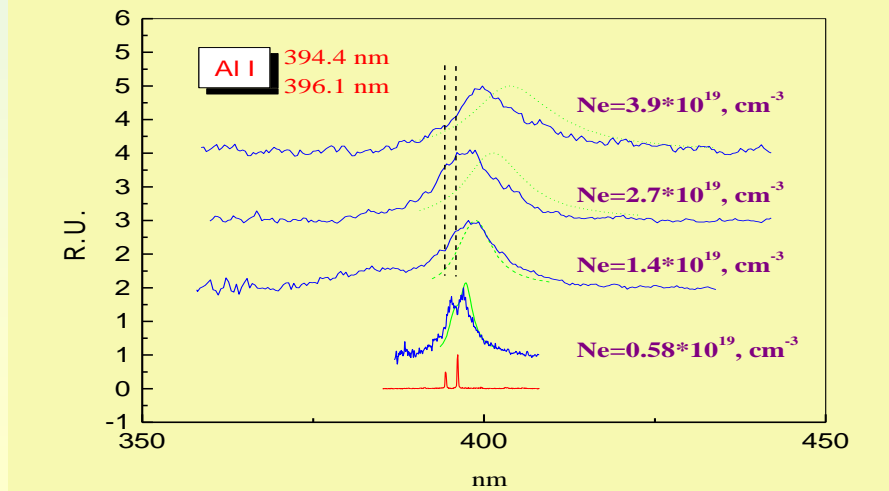
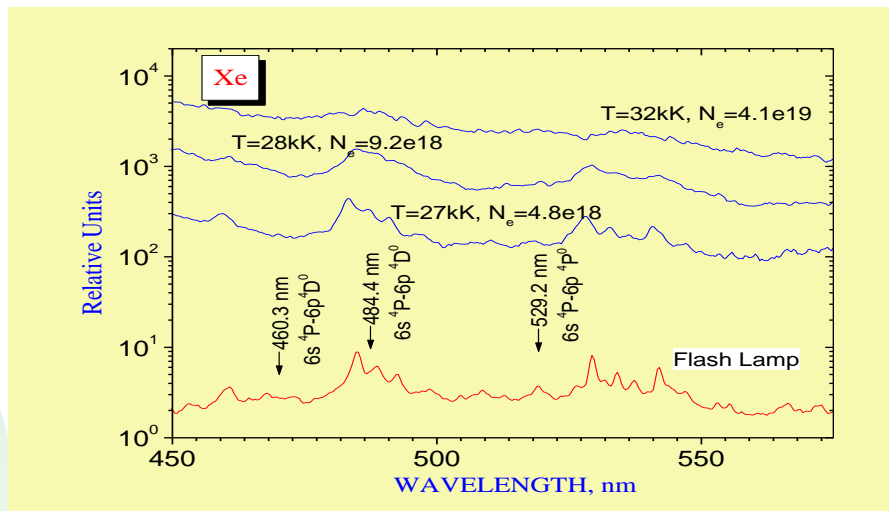
R. Redmer



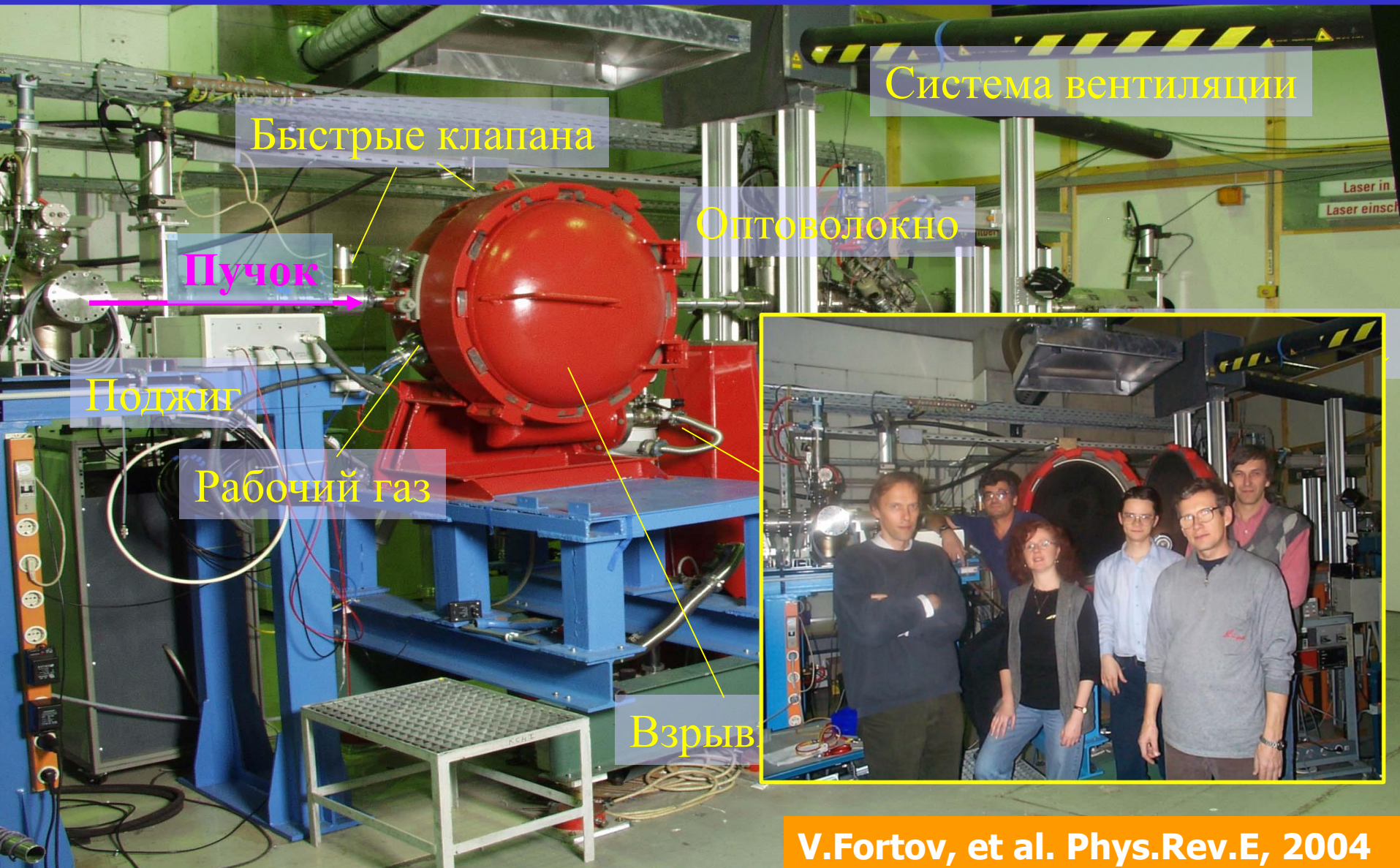
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ АРГОНА И КСЕНОНА

© 1995 г. М. И. Кулиш, В. К. Грязнов, С. В. Квитов, В. Б. Минцев, Д. Н. Николаев,
В. Я. Терновой, А. С. Филимонов, В. Е. Фортов, А. А. Голубев, Б. Ю. Шарков,
Д. Хоффманн, К. Штокль, Х. Ветцлер

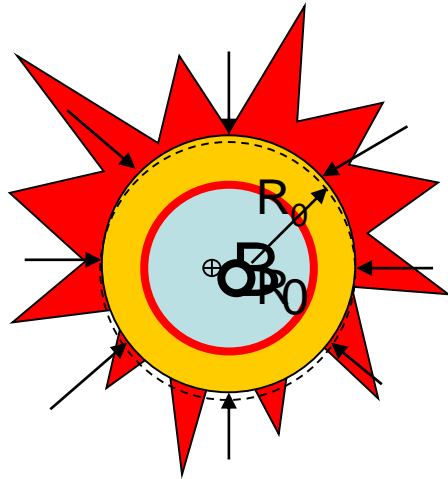
ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ТОМ 33 № 6 1995



Экспериментальный стенд для исследования тормозных потерь ионов в плазме, генерируемой взрывом



ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ КВВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ ЭНЕРГИЮ



При компрессии магнитного поля энергия КВВ преобразуется в электромагнитную

$$E_1 \approx E_0 \frac{R_0^2}{R^2}$$

На этом принципе созданы взрывомагнитные генераторы (ВМГ) с рекордными значениями тока ~ 300 МА, энергии ~ 300 МДж, магнитных полей ~ 2800 Т

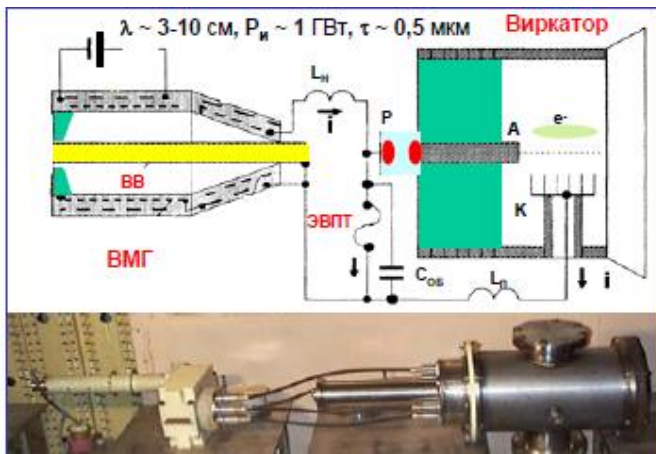
ВМГ на 300 МДж



Взрывной имитатор удара молнии



Взрывной СВЧ-излучатель



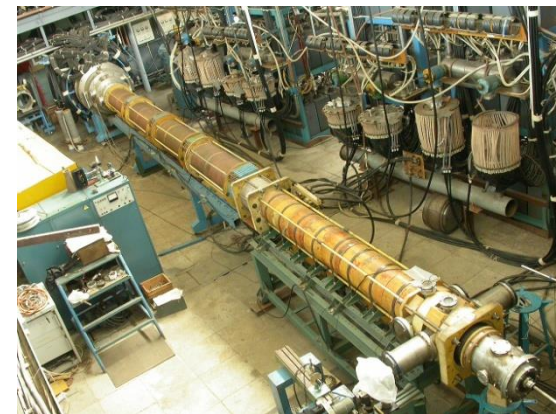
ВМГ являются компактными мощными источниками импульсной энергии для широкого круга спецстройств, таких как:



Состояние вещества в экстремальных условиях

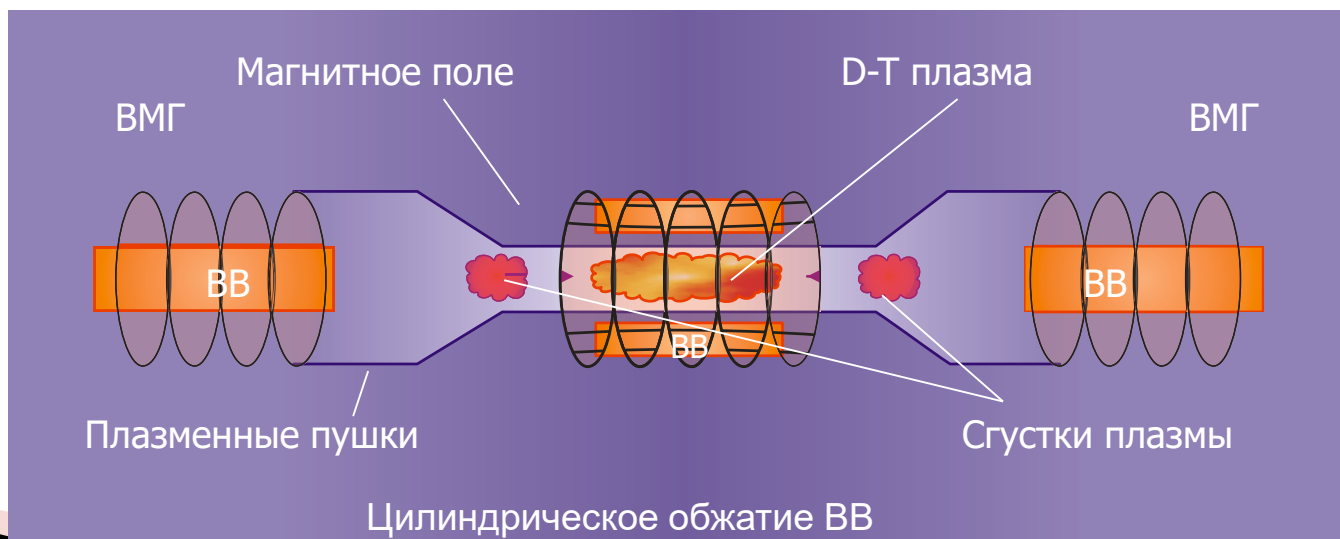
Источник на базе плазменных ускорителей
(ИПХФ РАН, ОИВТ РАН, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ГосНИИмаш, РФЯЦ ВНИИЭФ)

Экспериментальный стенд



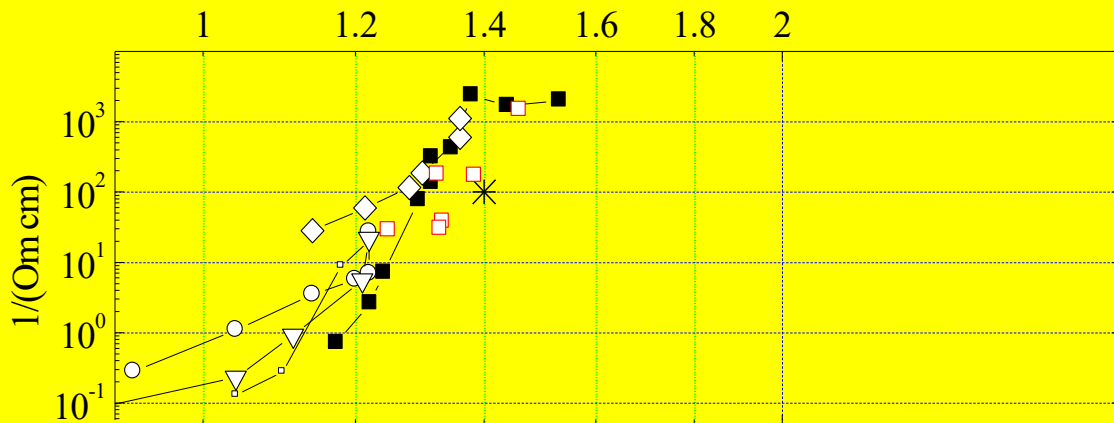
Скорость потока дейтериевой плазмы ~ 300 км/сек
При столкновении встречных потоков реализованы:
температура плазмы ~1-2 кэВ
плотности до ~10¹⁸ см⁻³
выход DD нейтронов ~10¹¹

Схема устройства с выходом DT нейтронов ~10¹⁸

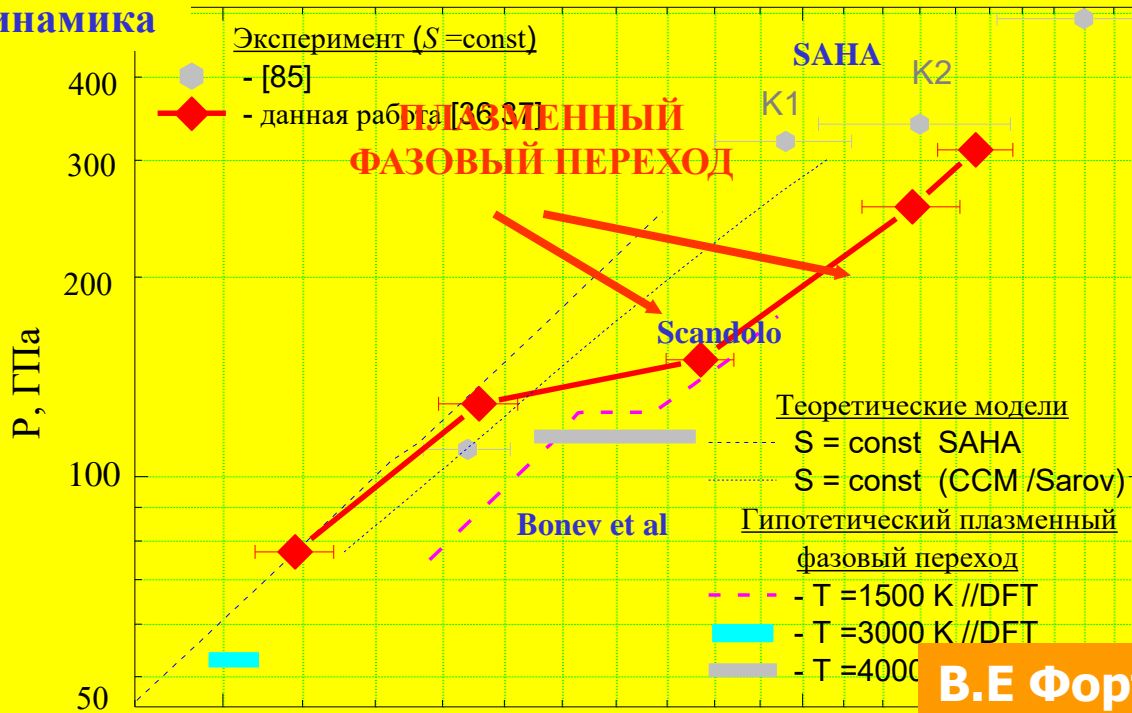


Плазменный фазовый переход

Электропроводность



Термодинамика

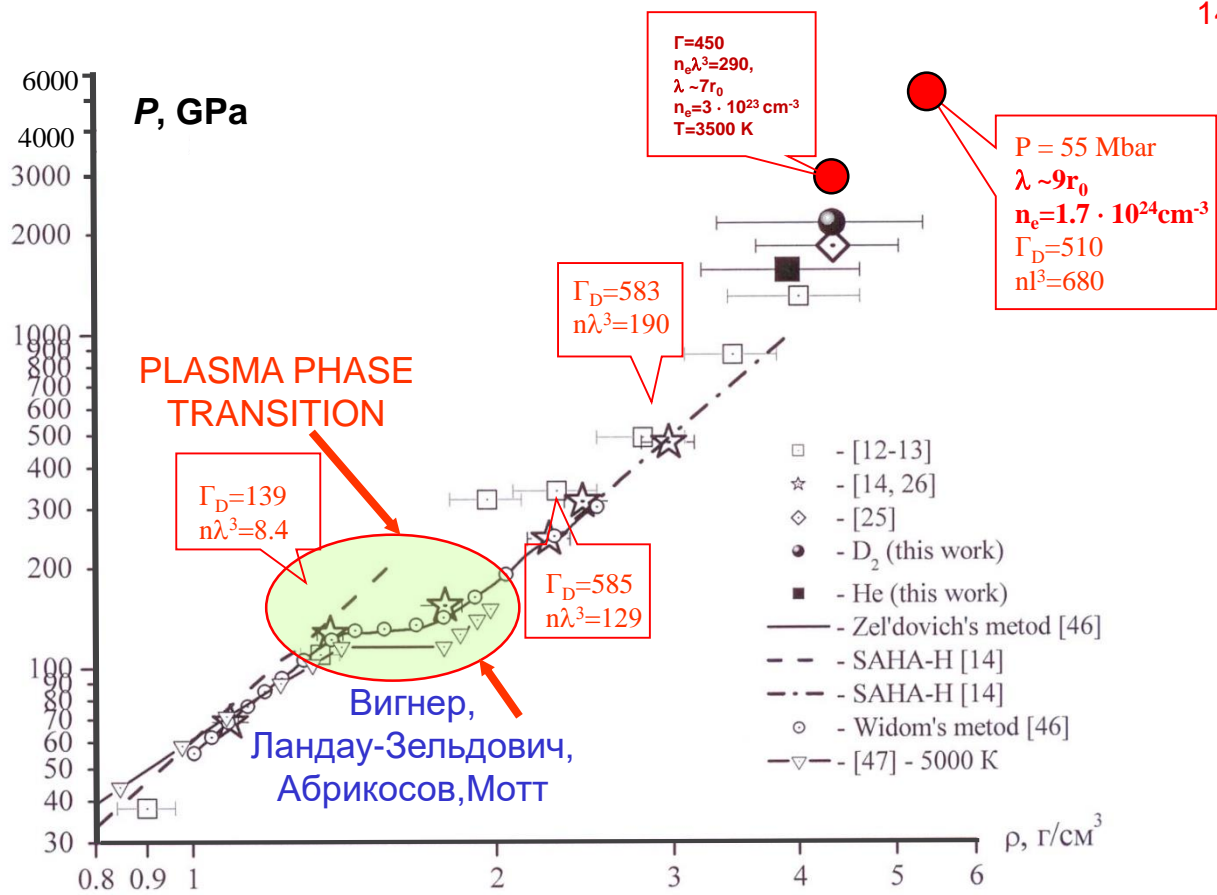




POCATOM

Isentrops of D2 Plasma Plasma Phase Transition

● 185 Mbar !
14 g/cm³ !



Plasmas Viscosity as a Test for String Theories

Superstring Theory: „Theory of Everything“, (i.e. of all **particles** and **fundamental forces** strong interaction (QCD), electroweak interaction, gravity)

In particular most promising candidate for **quantum gravity**
(Local quantum field theory for gravity non-renormalizable)

Experimental verification missing, no unique formulation

For all relativistic quantum field theories (QED, QCD, etc.):

$$\frac{\eta}{s} \geq \frac{\hbar}{4\pi k_B} = 6.08 \times 10^{-13} \text{ Ks}$$

Argument: Viscosity is proportional to energy density times mean free path $\eta \sim \varepsilon \tau$

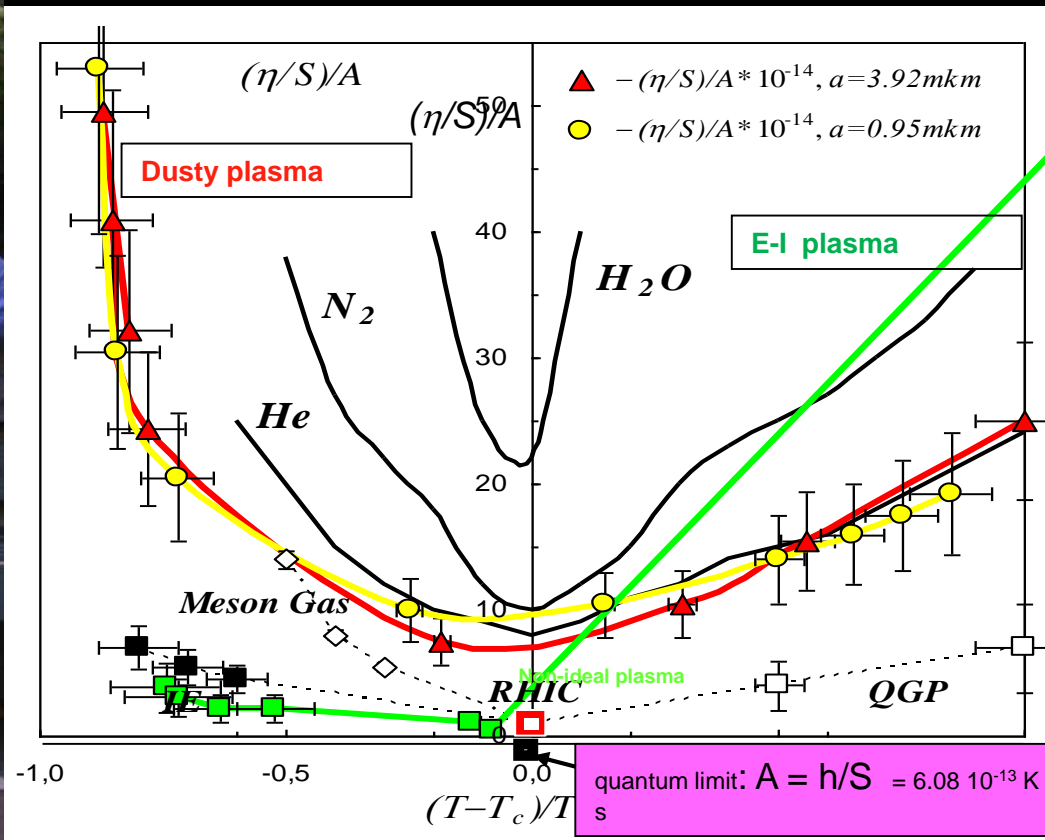
Entropy density is proportional to density of quasiparticles $s \sim k_B n$

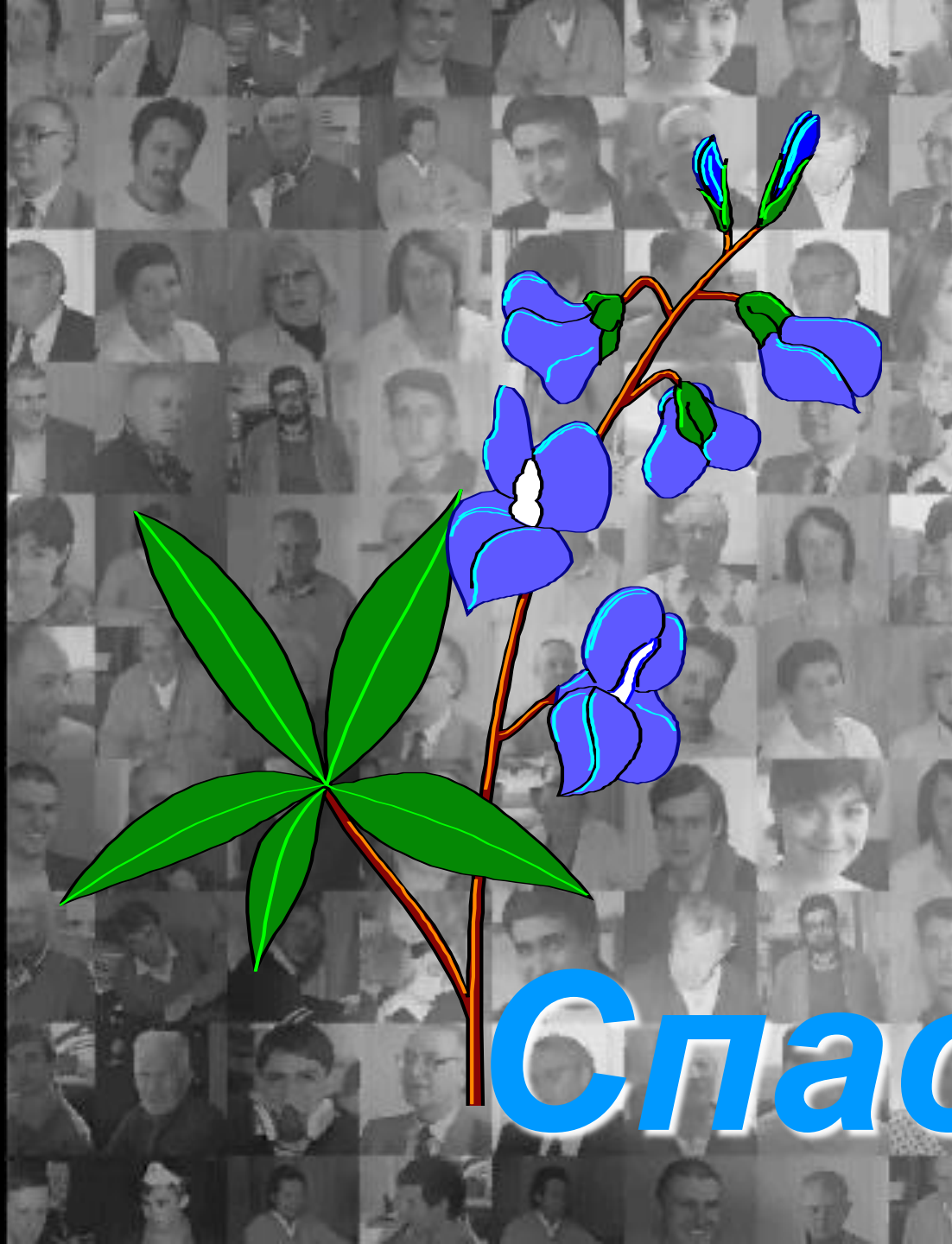
Uncertainty principle: quasiparticle energy ε/n times mean free path τ larger than \hbar

$$\frac{\eta}{s} > \frac{\hbar}{k_B}$$

JFC

Viscosity to Entropy Ratio (Experiments)





- # Shock compression
 - Hydrogen, Helium
 - Noble gases
 - I, S, Br, Si, W, H₂O
 - Fullerenes
- # Pressure dielectrization at Megabars:
 - Li, K, C
- # Conclusions

Спасибо!