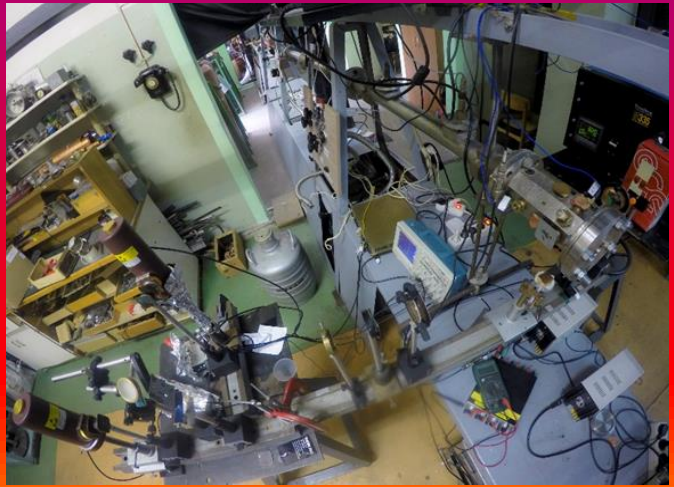
Фундаментальные работы В.Е. Фортова в физике плазмы

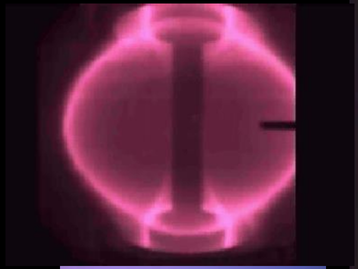
Сон Э.Е.
(по материалам лекции
В.Е.Фортова в МФТИ в 2012 г.)



ПЛАЗМА В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

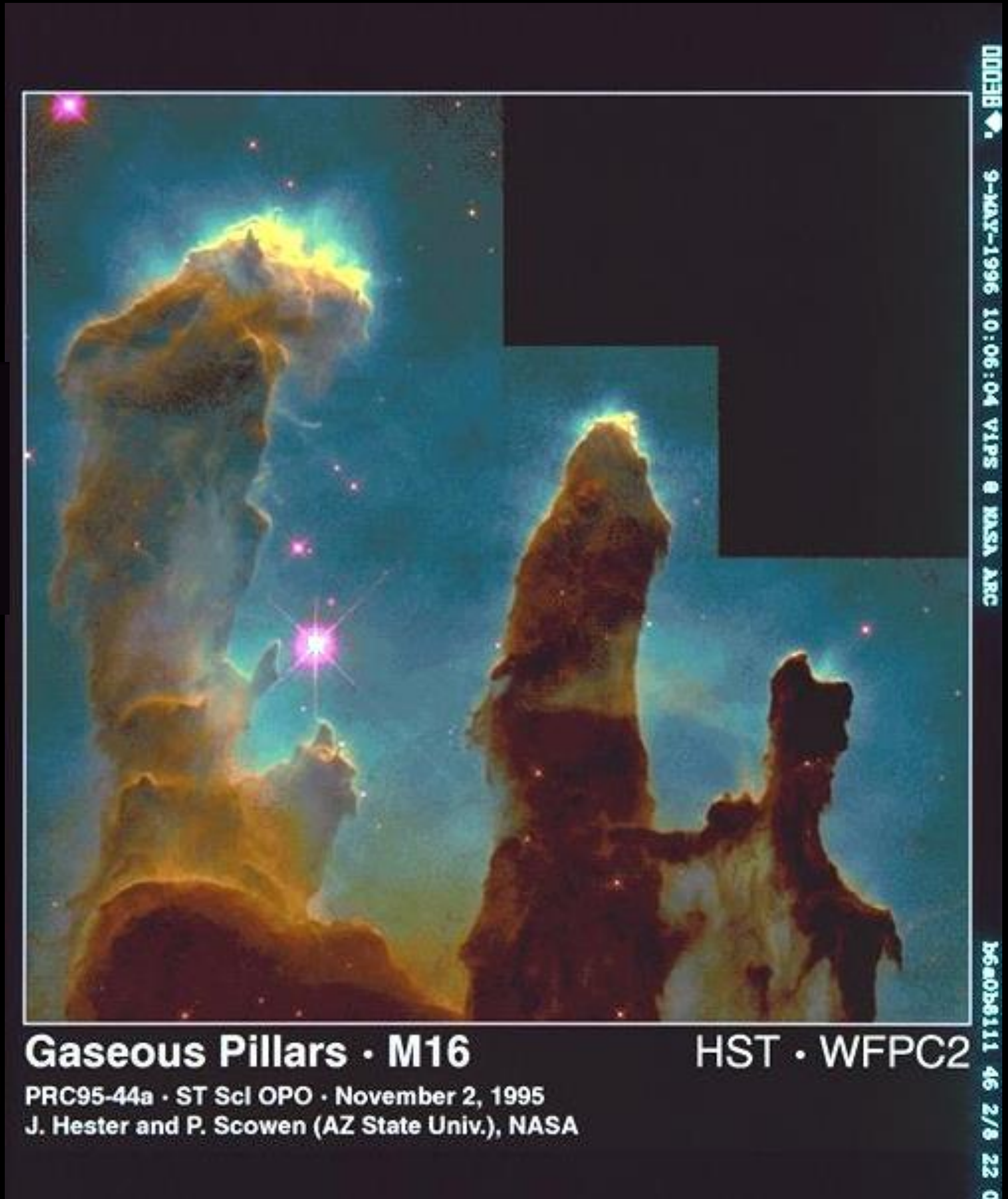
Солнце

Термояд

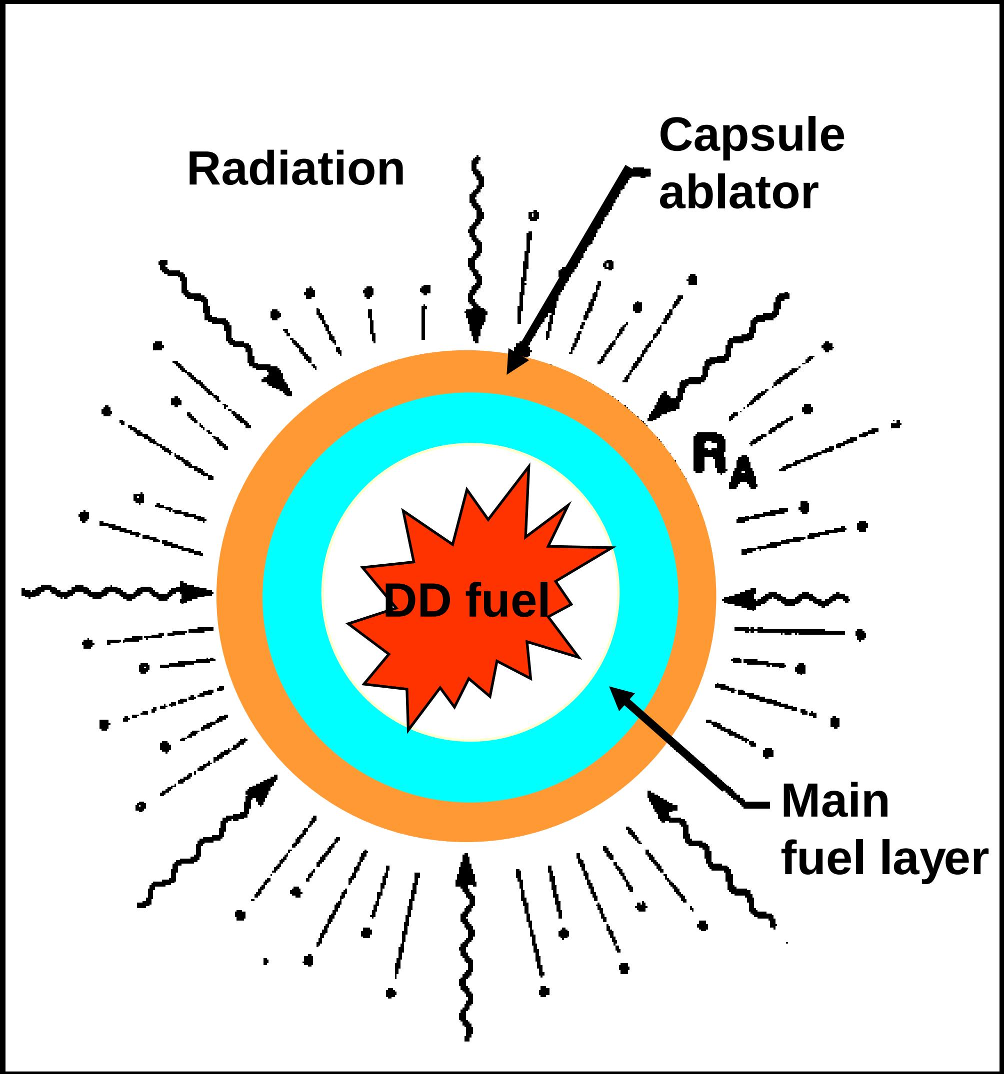


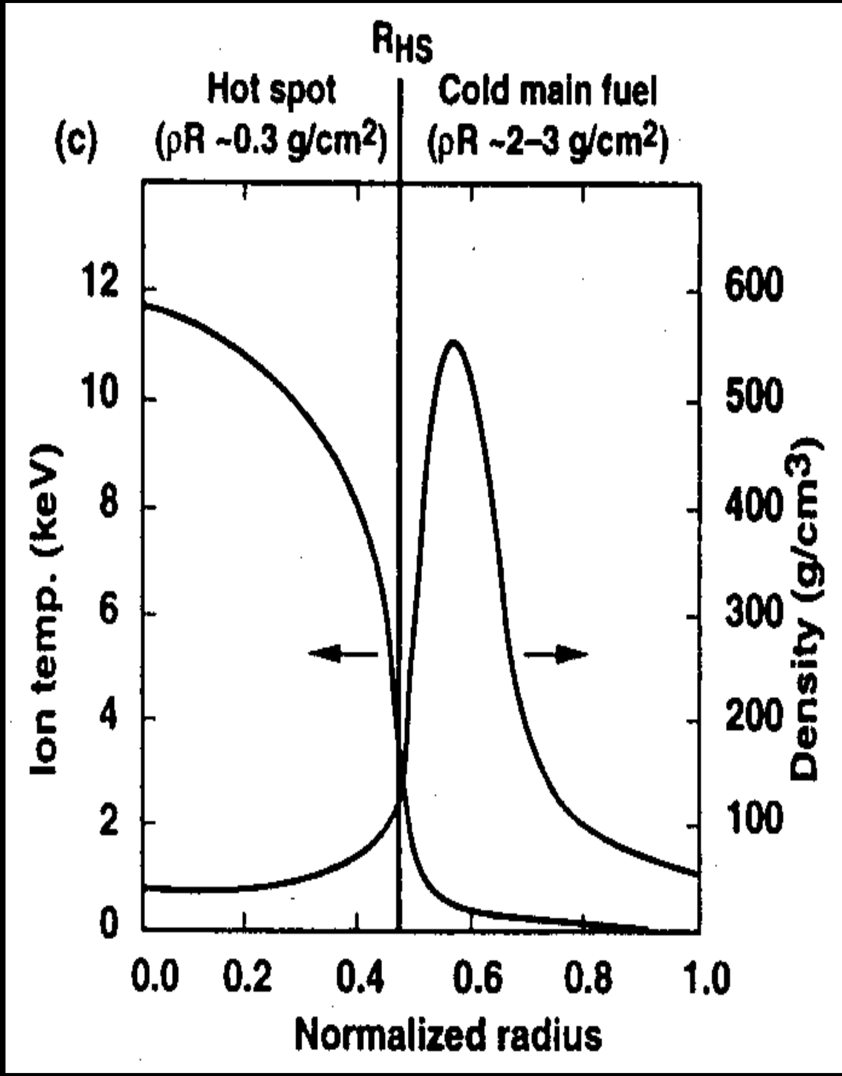
Свет

Пылевые туманности

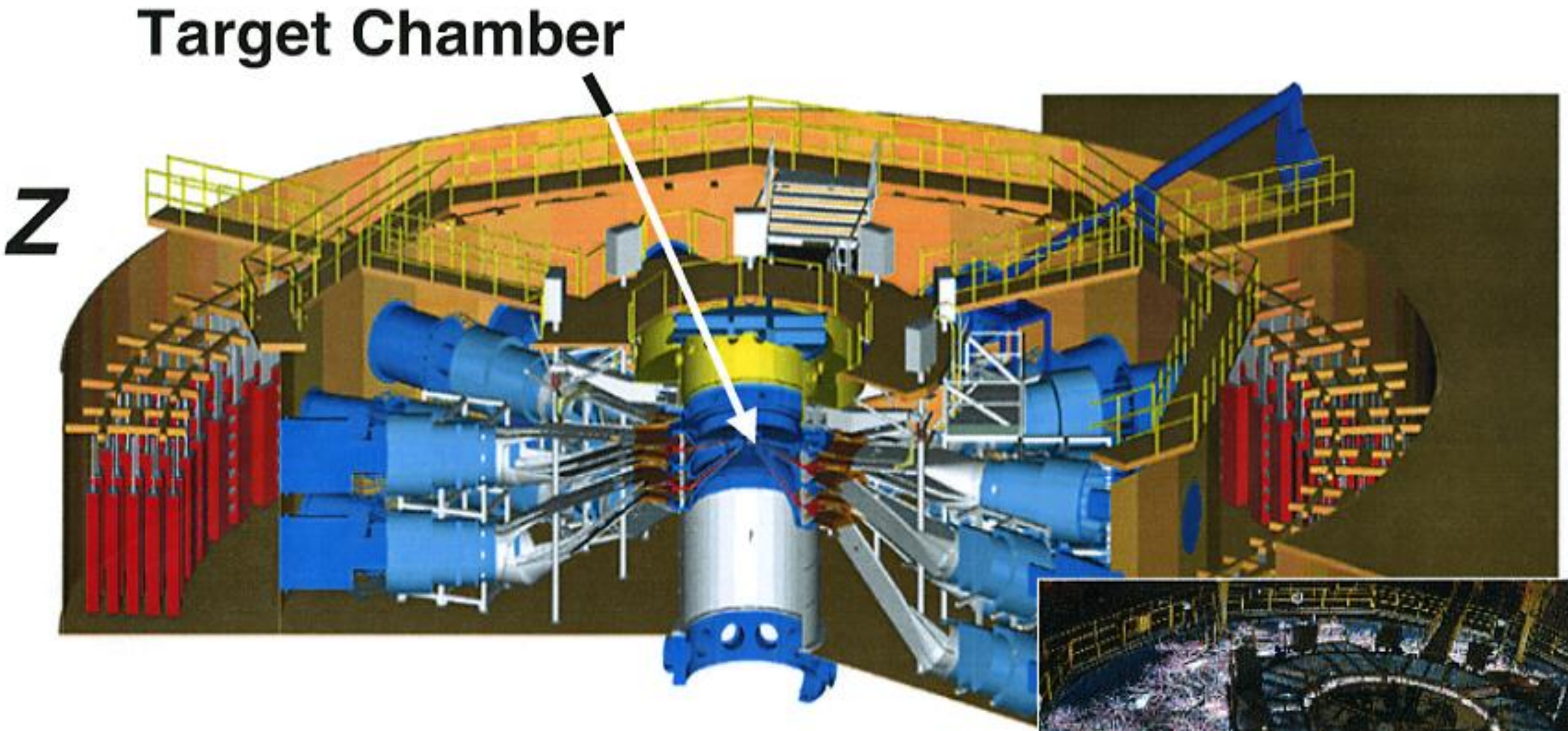


ИНЕРЦИОННЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ





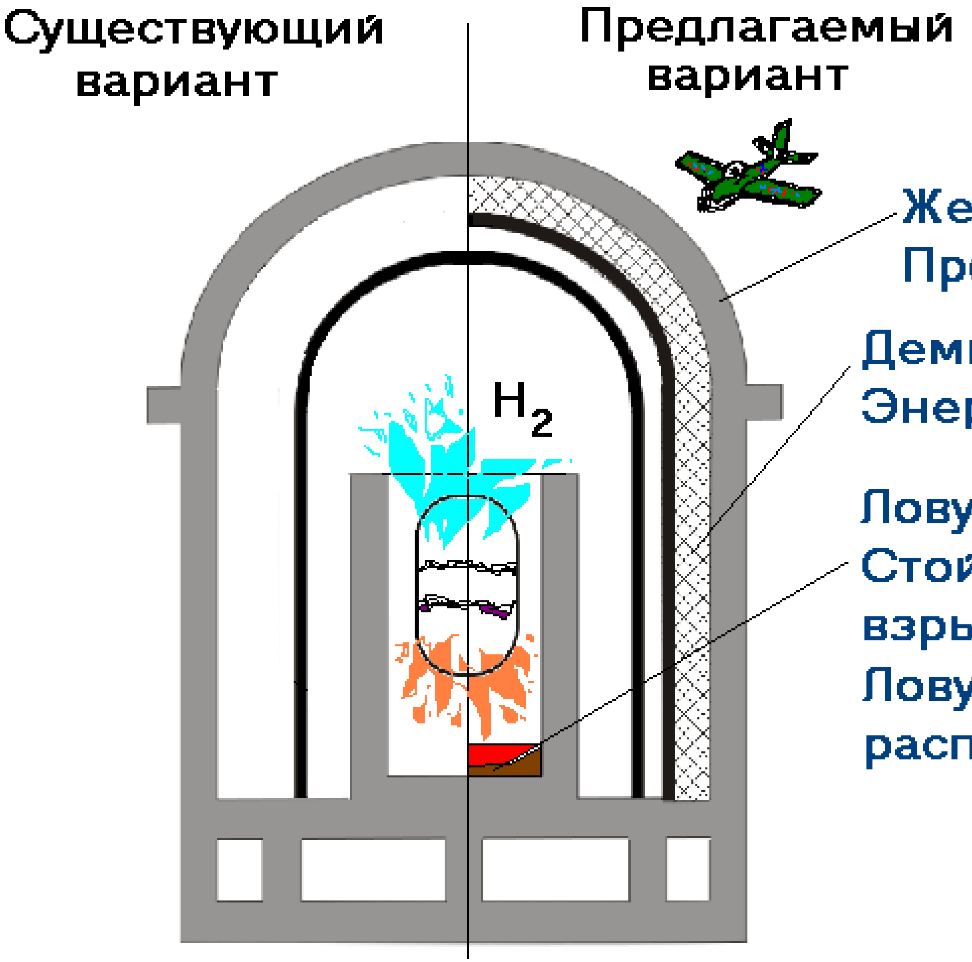
PULSED-POWER ACCELERATORS WITH Z-PINCH LOADS PROVIDE EFFICIENT TIME COMPRESSION AND POWER AMPLIFICATION



11.5 MJ stored energy
19 MA peak load current
40 TW electrical power to load
100-250 TW x-ray power
1-1.8 MJ x-ray energy

ВЗРЫВОСТОЙКИЙ КОНТЕЙНМЕНТ С ЛОВУШКОЙ

Взрывостойкость: взрыв 2т. водорода, паровой взрыв 1т. ТНТ



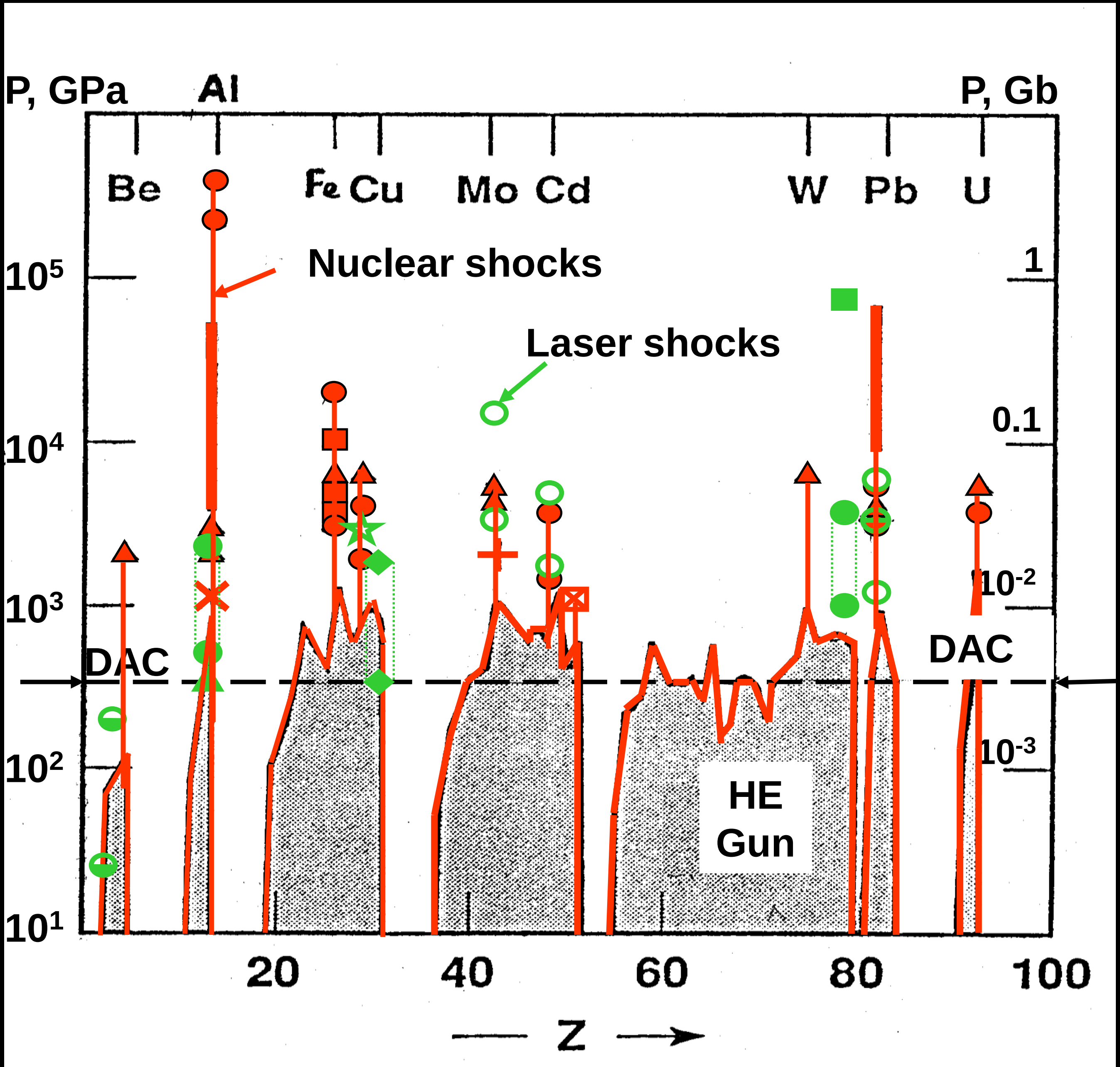
Железобетонная оболочка. Прочность при взрыве, ударе.

Демпфер из пористого огнеупора. Энергопоглощение

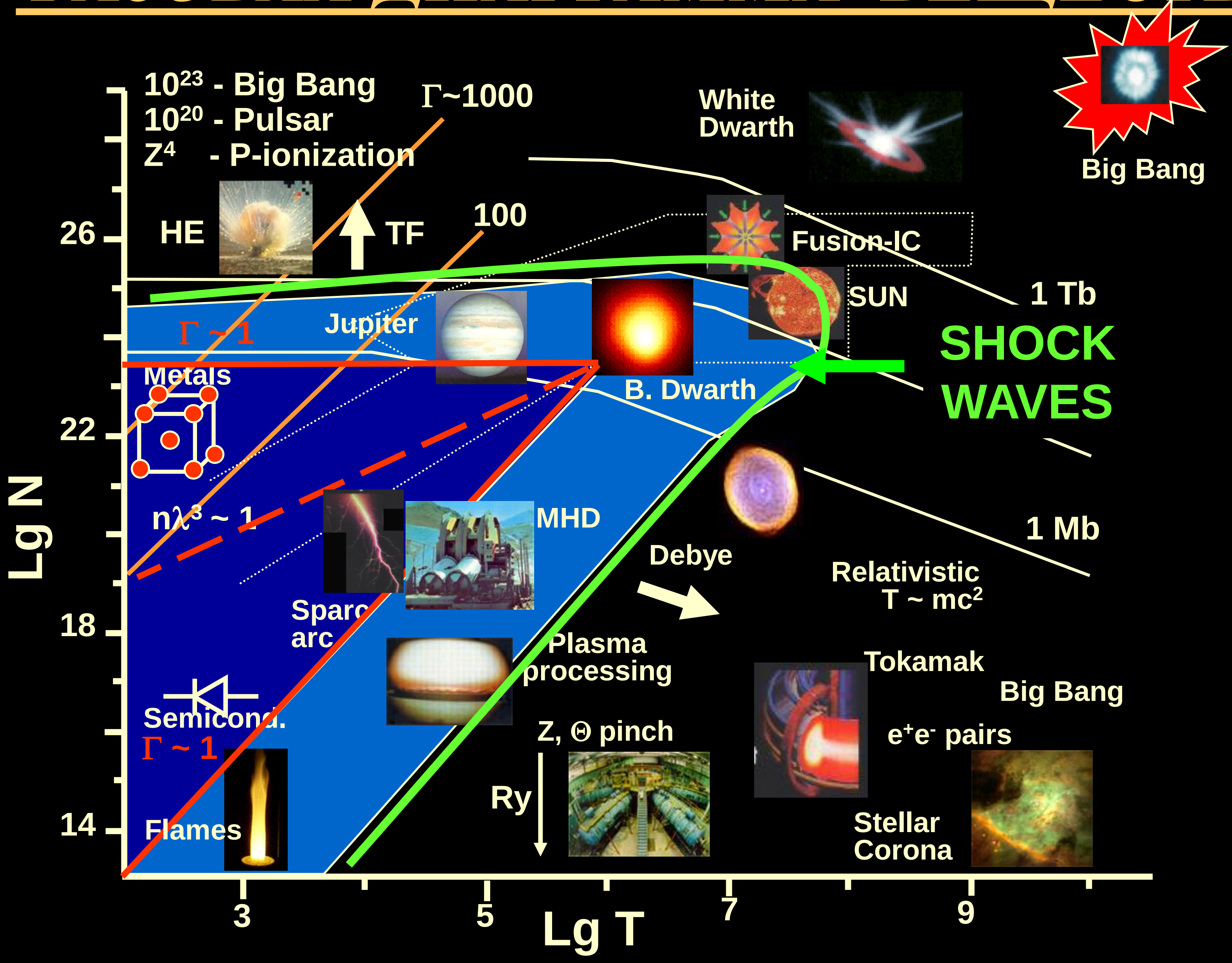
Ловушка с ZrO_2 покрытием. Стойкость к расплаву и паровому взрыву.

Ловушка - удержание 2000т. расплава с температурой 2800K.

МАКСИМАЛЬНЫЕ ДАВЛЕНИЯ



ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ВЕЩЕСТВА

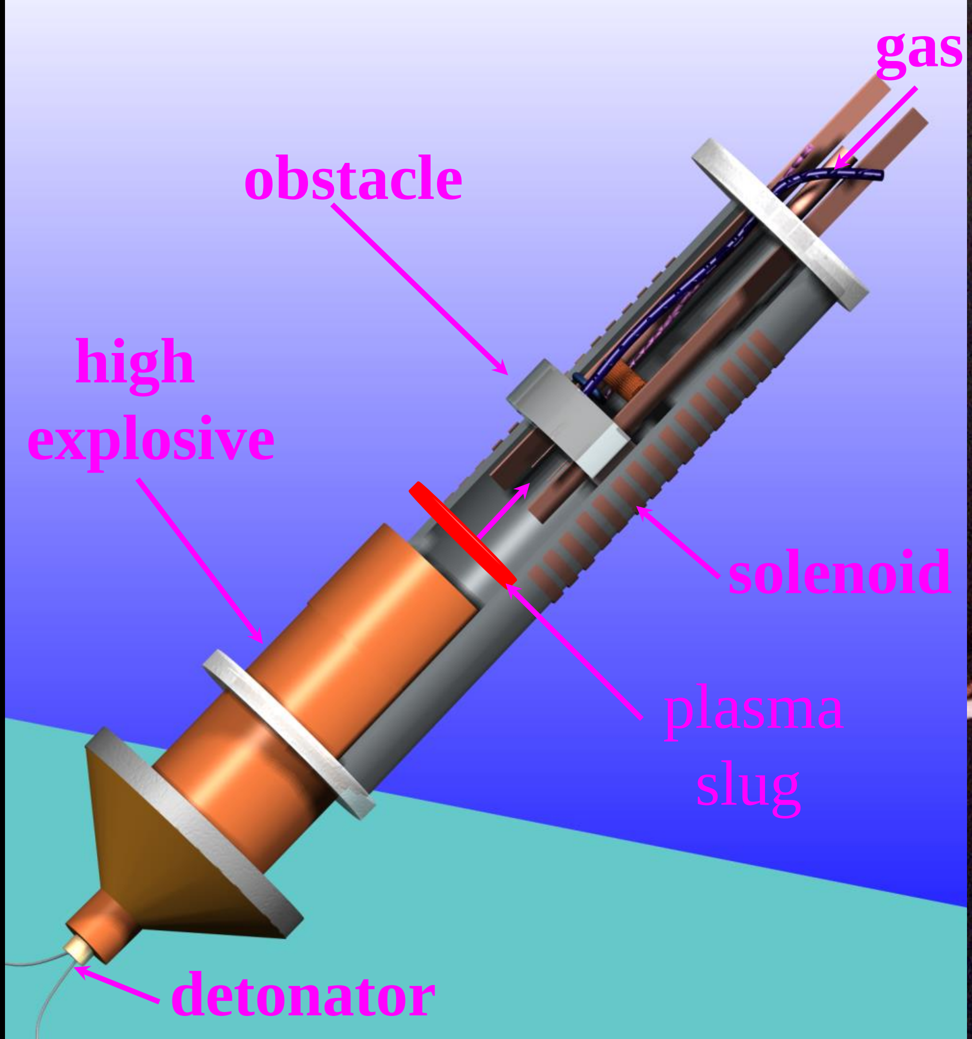


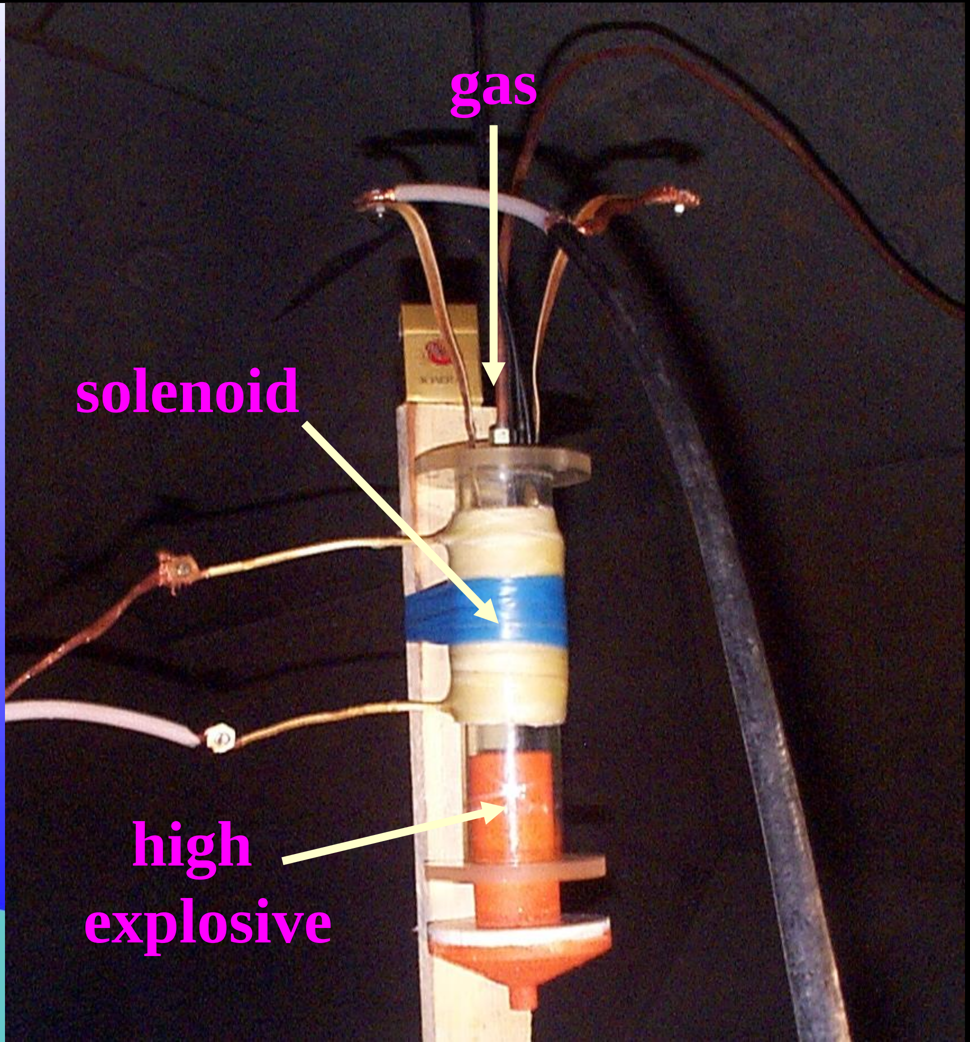
HE PLASMA GENERATOR

Plasma parameters:

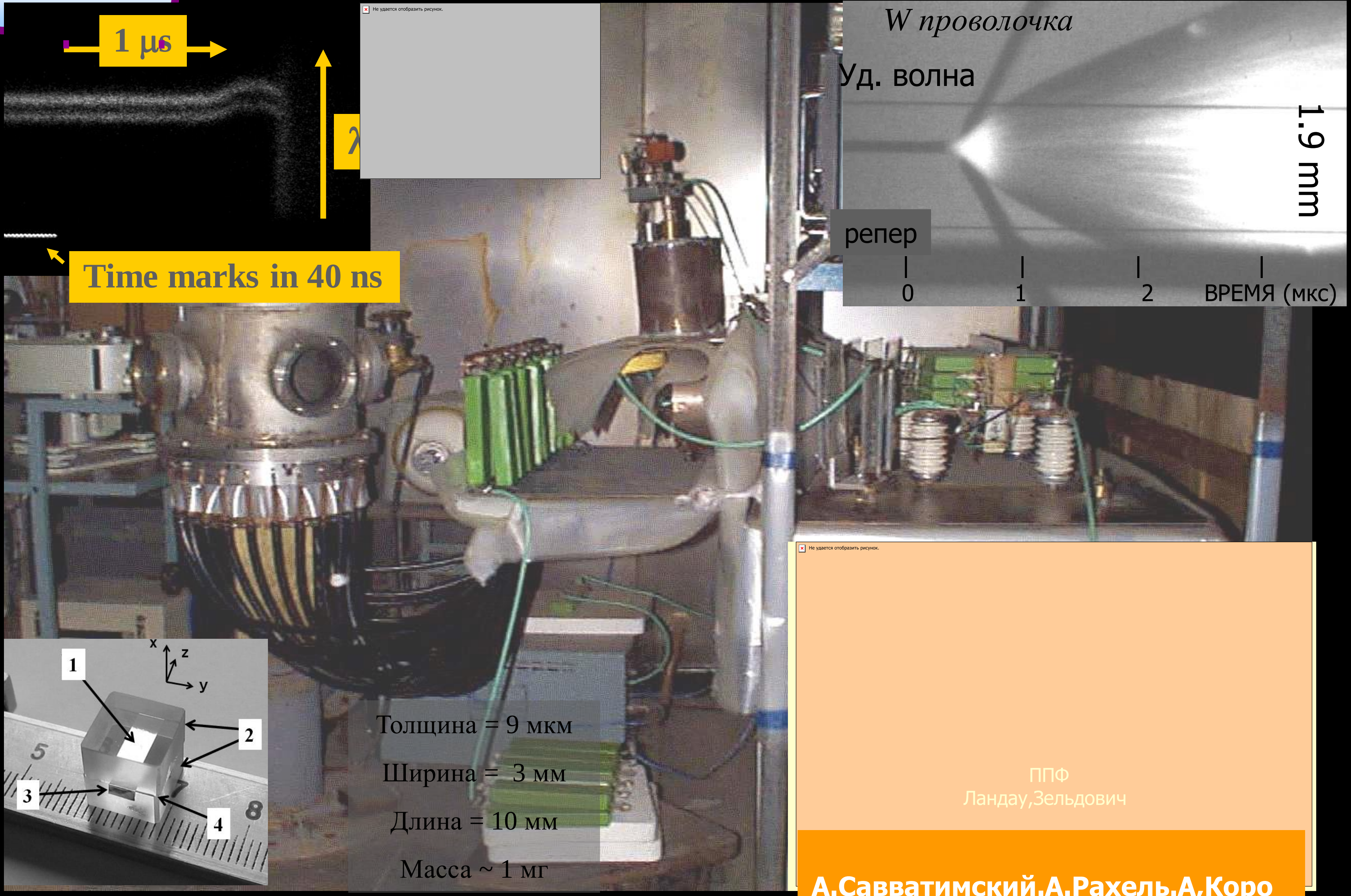
P=0,3–6,5 kbar T~0.5–1.5 eV n_e=5 10^{15}–3 10^{20} sm^{-3} σ=0.1–250 $\Omega^{-1}sm^{-1}$

Gases: Ar, Xe, He





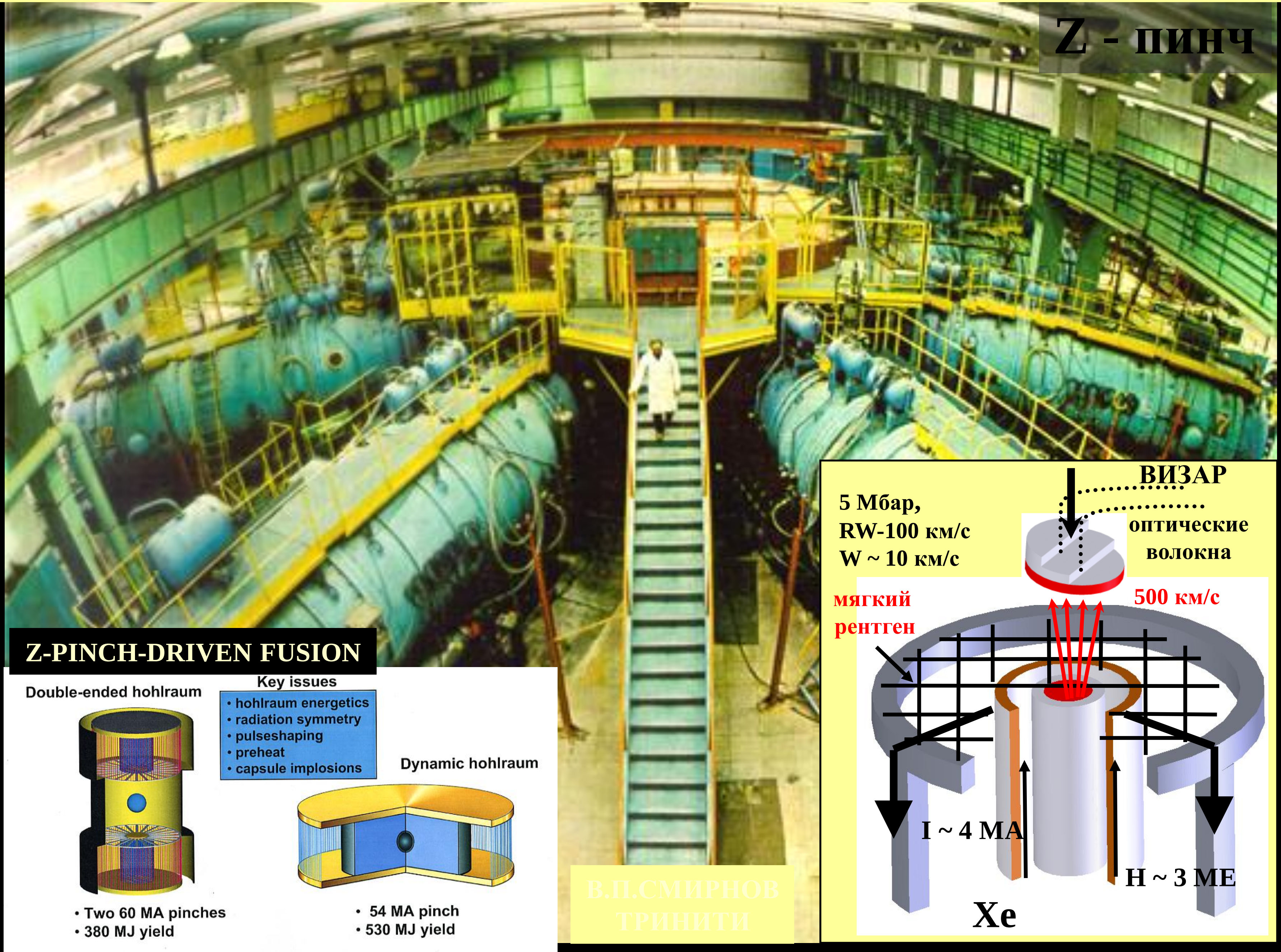
ЭЛЕКТРОВЗРЫВ ПРОВОДНИКОВ

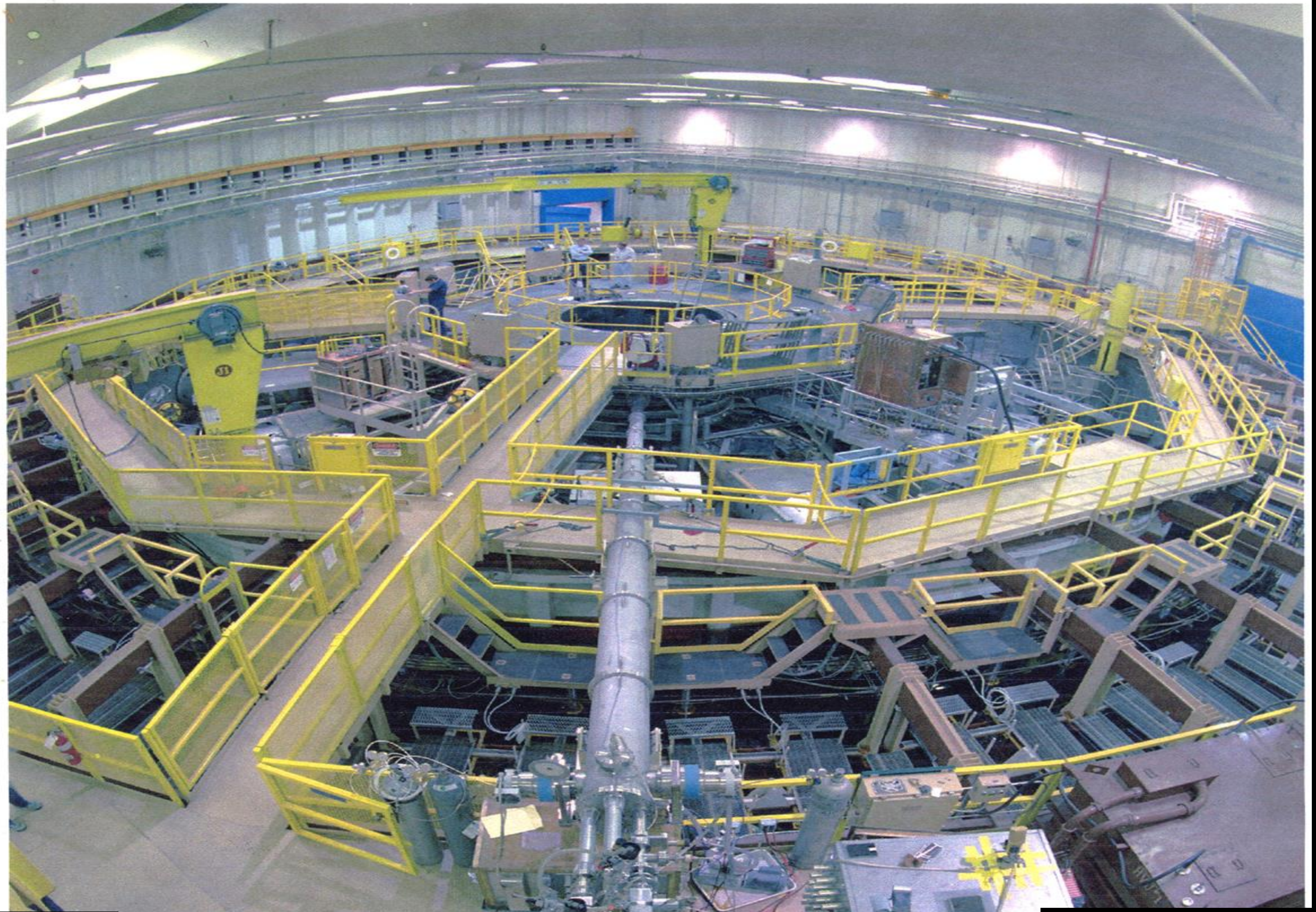


Запасенная энергия 20 кДж, ток до 500 кА

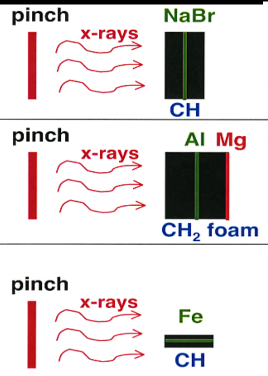
А.Савватимский.А.Рахель.А,Коробенко и др

ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР АНГАРА-5





RADIATION SCIENCE



Opacity Measurements
- Na acts as a "thermometer"
- Measure open M-shell Br opacity under known T_e, n_e conditions
- * J. E. Bailey et al., submitted to JQSRT (Jan. 2002)

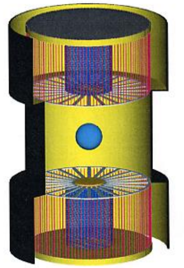
Radiative Transfer Experiments
- Al and Mg provide Te (x, t)
- Infer radiation propagation through foam sample
- * G. A. Rochau et al., Proceedings HTPD (2002)

Photoionization Measurements
- Fe ionization states probed by absorption and emission lines
- Infer photoionization in Fe
- * R. F. Heeter et al., Rev. Sci. Instr. 72, 1224 (2001)
- * R. F. Heeter et al., Proceedings ADNXA (2000)

Z-PINCH-DRIVEN FUSION

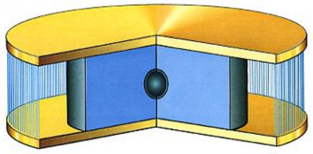
Key issues
- hohlraum energetics
- radiation symmetry
- pulseshaping
- preheat
- capsule implosions

Double-ended hohlraum



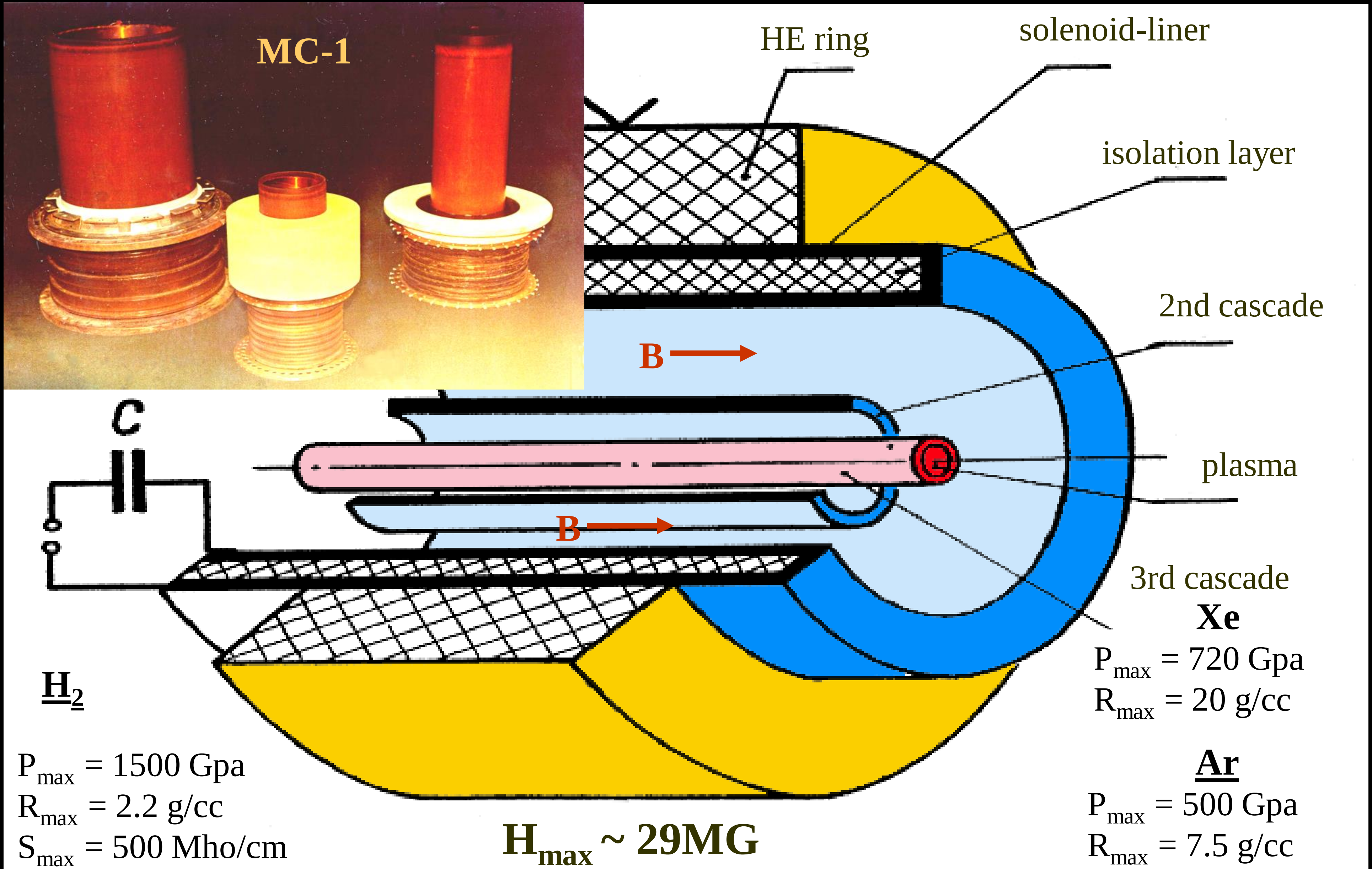
- Two 60 MA pinches
- 380 MJ yield

Dynamic hohlraum

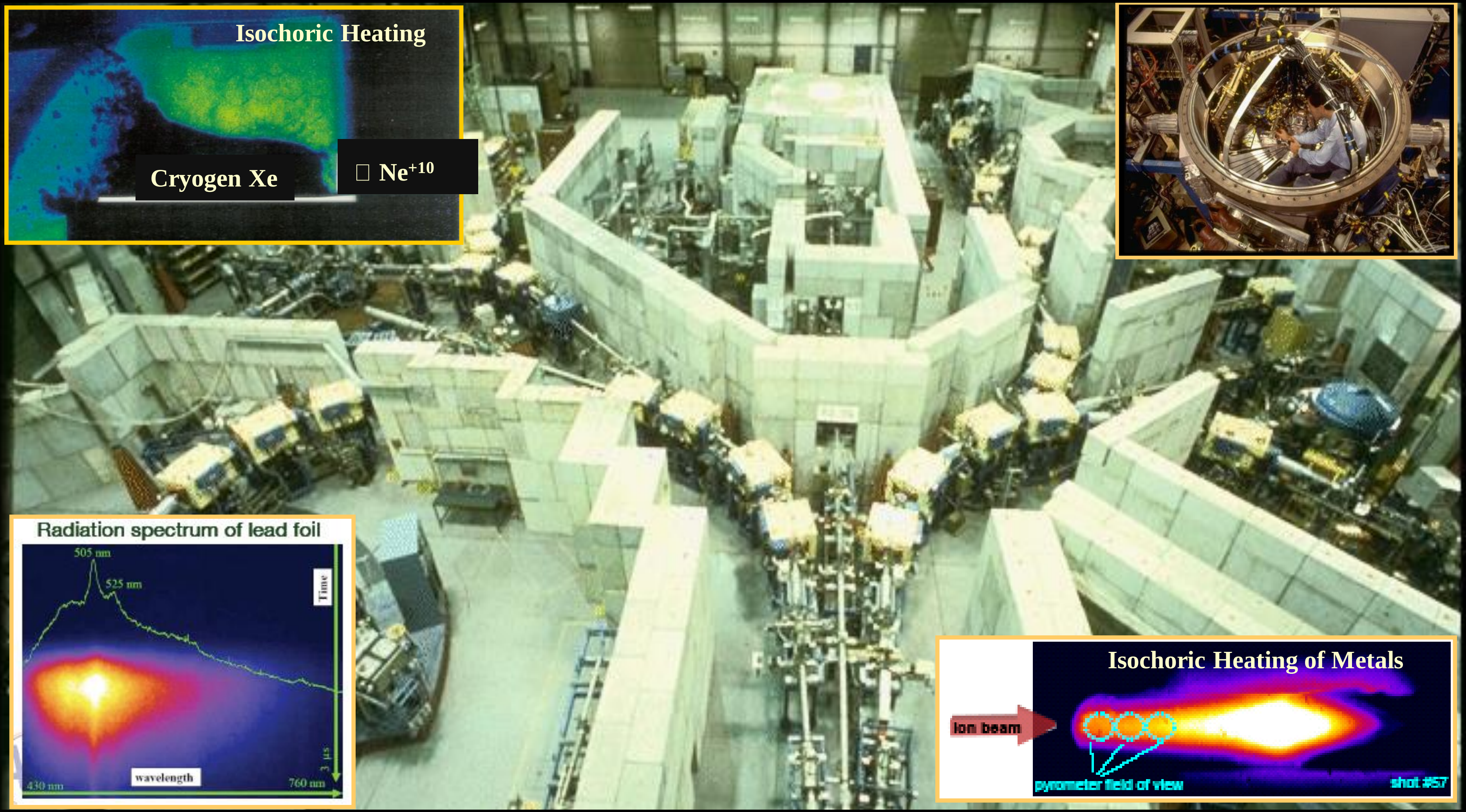


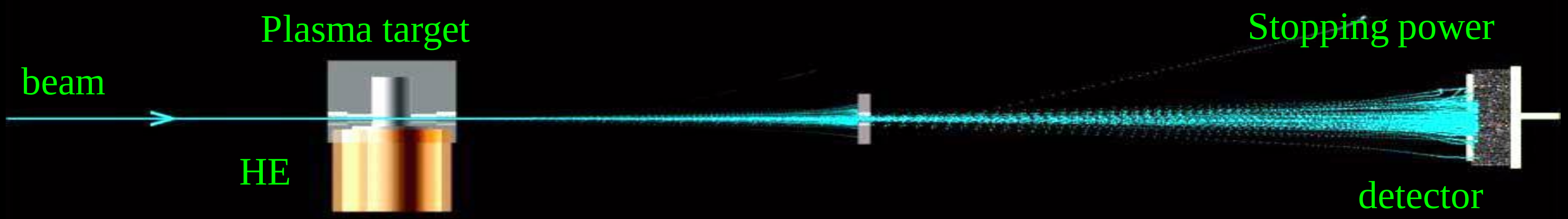
- 54 MA pinch
- 530 MJ yield

ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

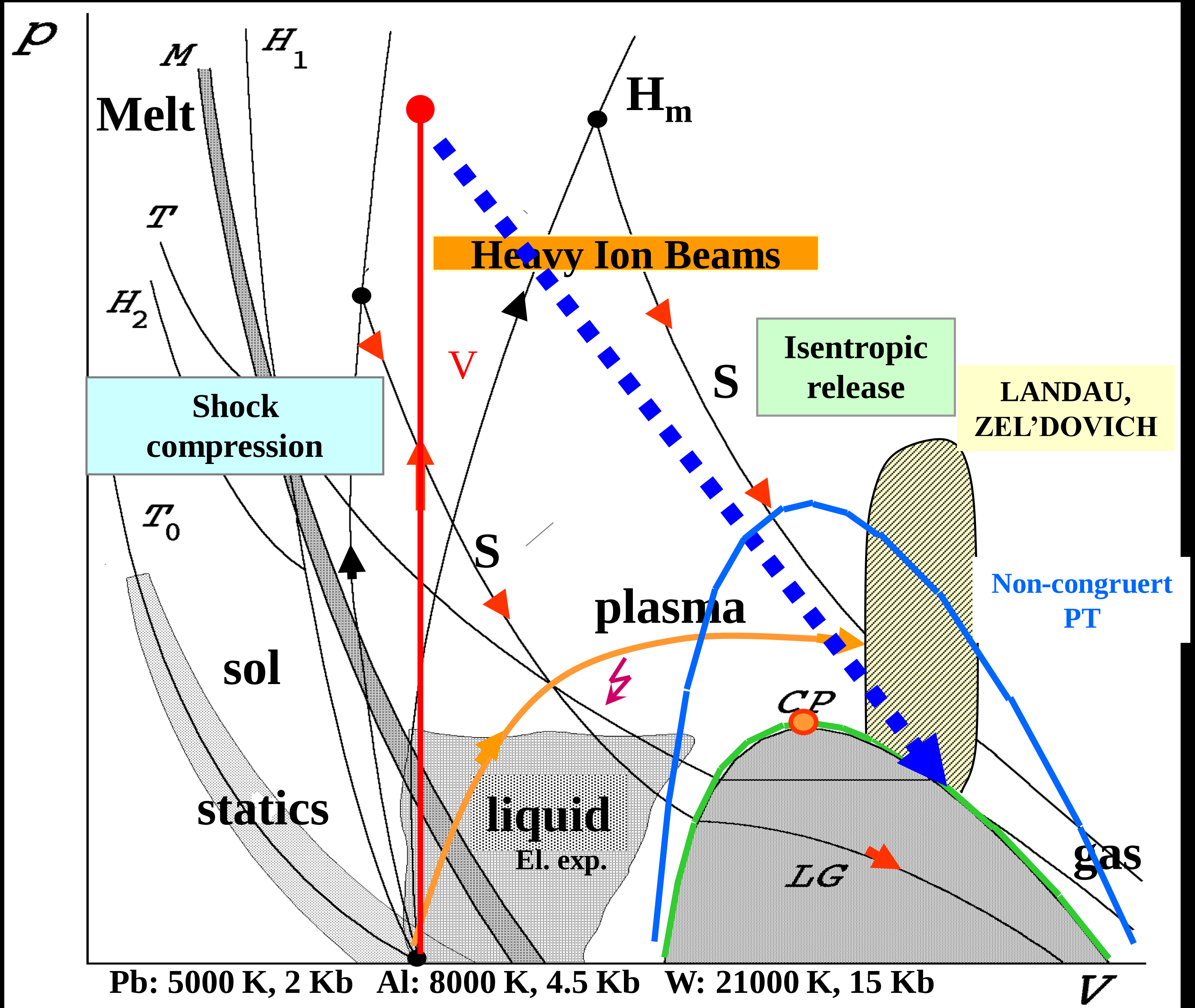


Релятивистские ионные пучки

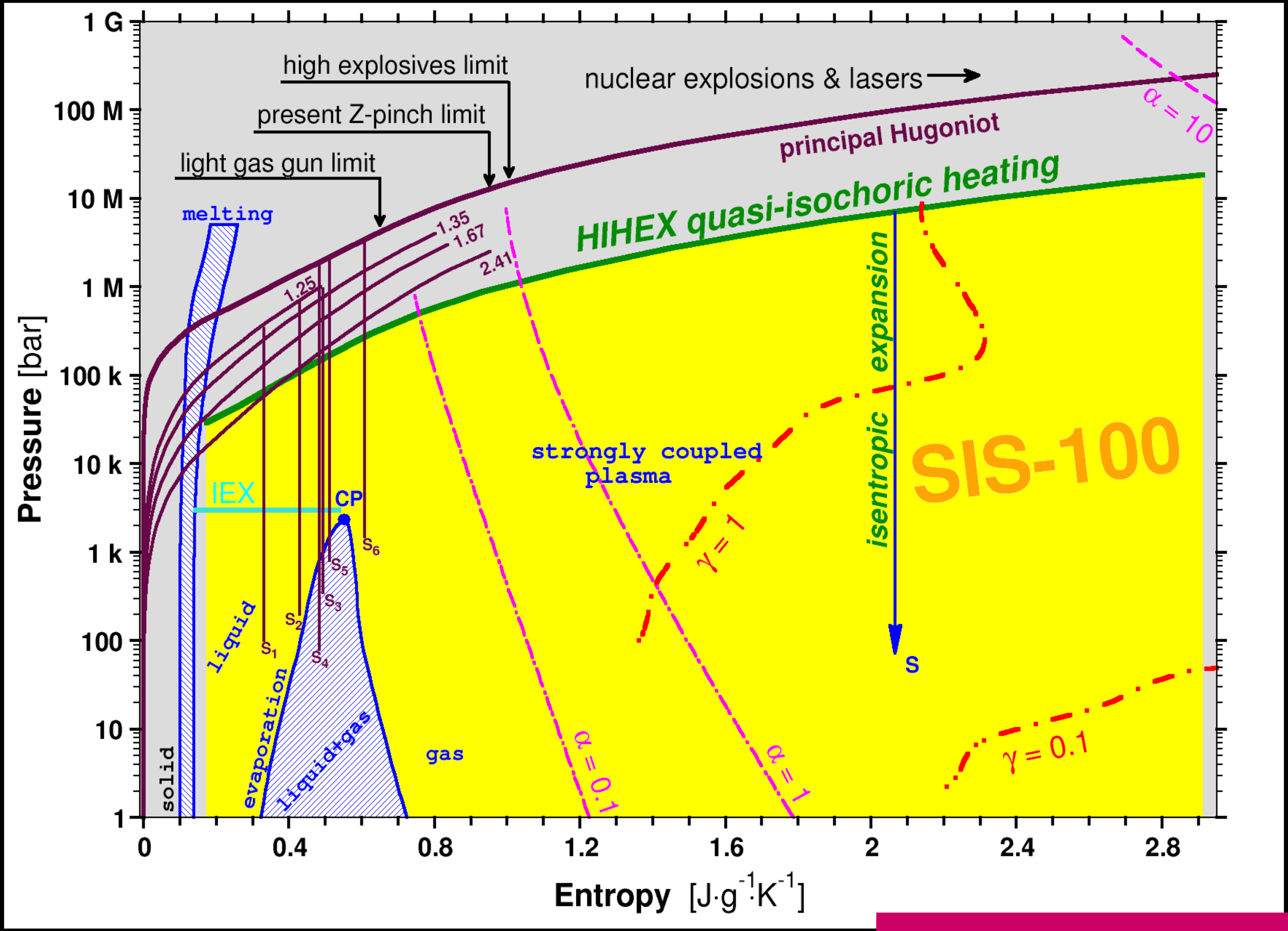




SHOCK COMPRESSION+ISOENTROPIC EXPANSION



"TERRA INCOGNITA" OF THE PHASE DIAGRAM AT FAIR

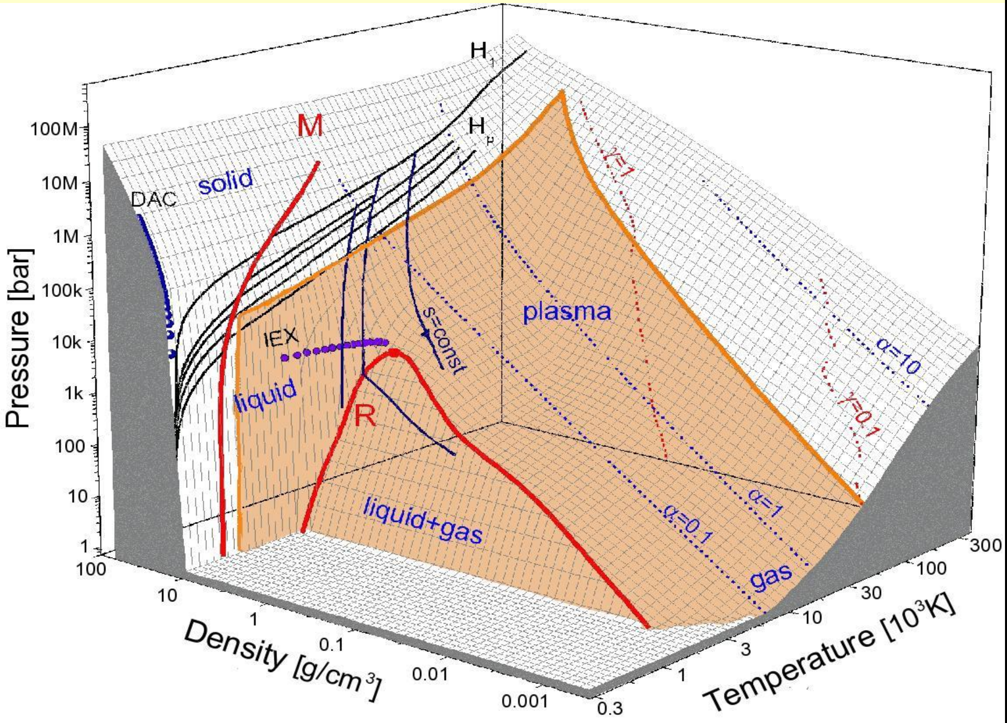


А.Шутов,И.Ломоносов

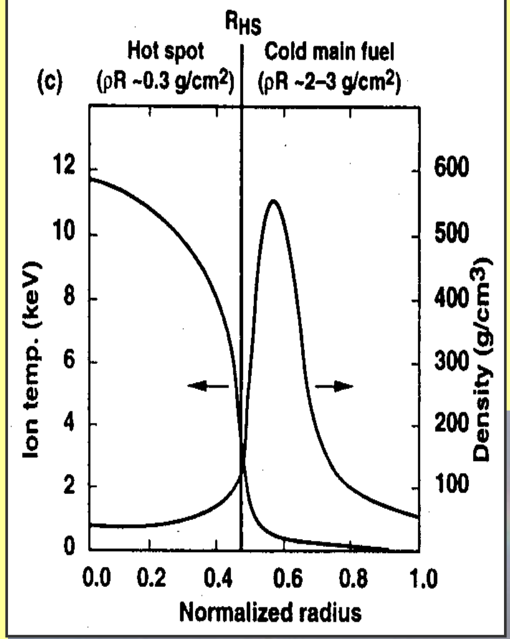
FAIR WILL OPEN A NEW ROUTE IN HEDP/WDM RESEARCH

- Intense heavy ion beams at FAIR provide unique capabilities for generating and studying HED states in matter:
  - SIS-100 intense beam can generate large volume (mm^3) homogeneous HED samples
  - specific energy of 0.6 MJ/g and deposition power of 12 TW/g at high densities
  - unique diagnostic tools: high-energy PW laser and SIS-18 ion beam (ion, proton or x-ray radiography, Thomson scattering)
  - high rep. rate, any target material
- Physics program – fundamental properties of matter under extreme conditions:
  - Equation-of-state (EOS) of HED matter
  - Phase transitions and exotic states of matter
  - Transport and radiation properties of HED matter
  - Stopping properties of non-ideal plasma

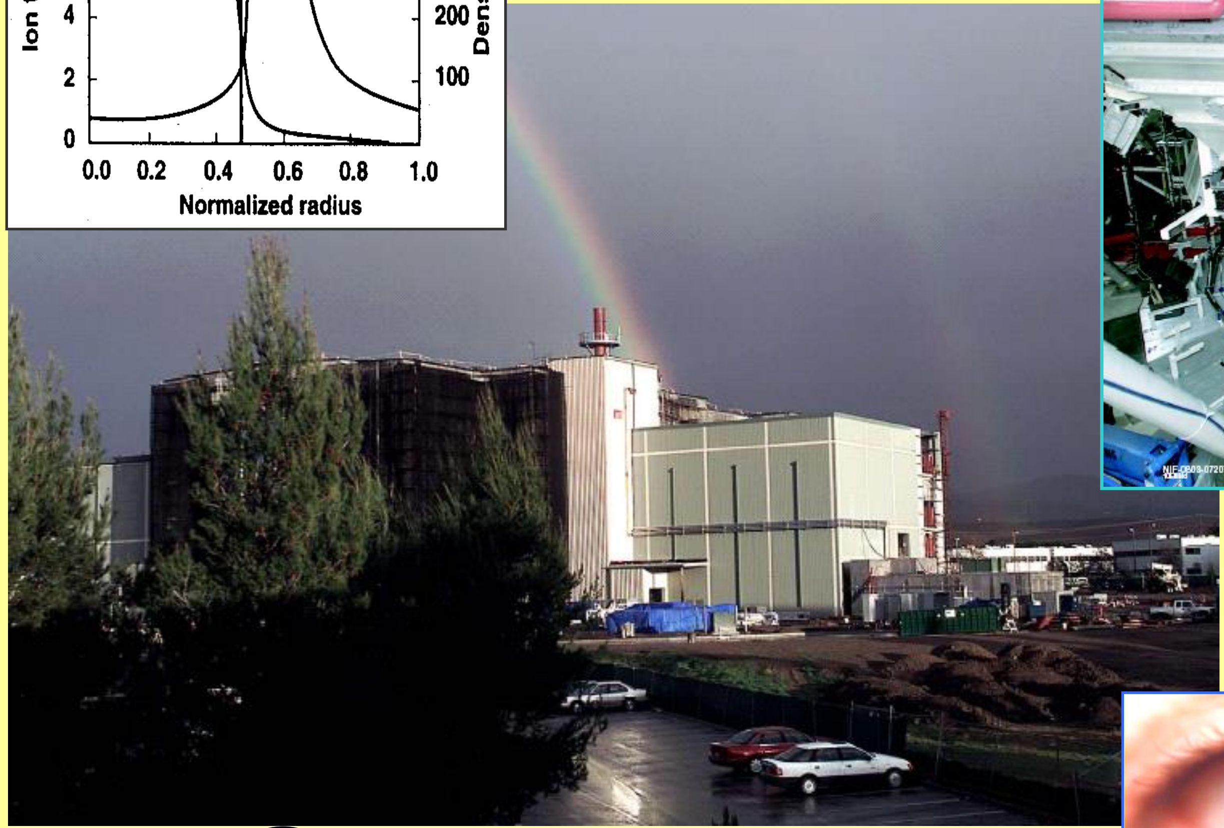
HED regions of Pb EOS accessible at FAIR

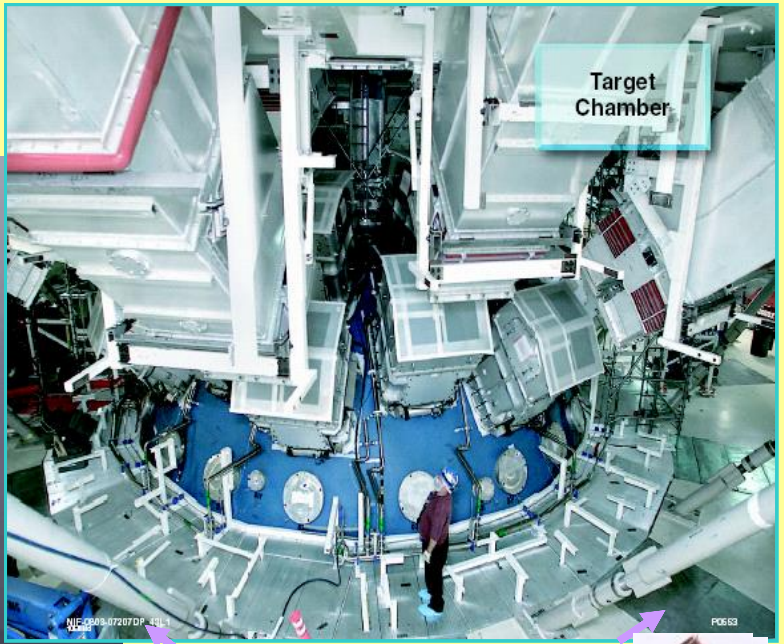


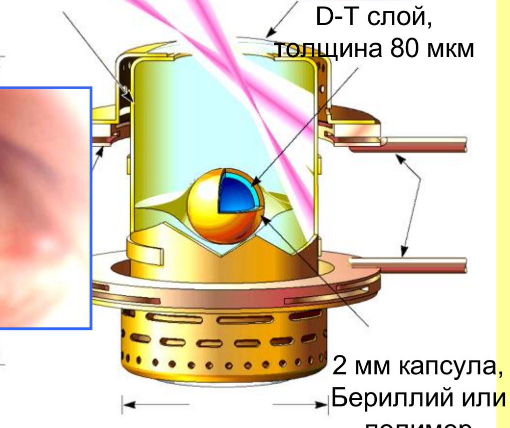
National Ignition Facility в Ливерморе

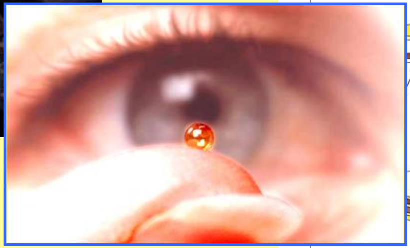


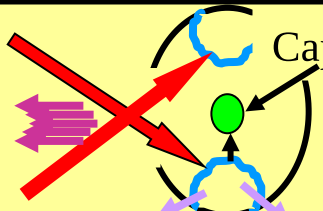
192 Beams
~1.8MJ at 351nm

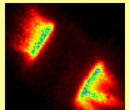






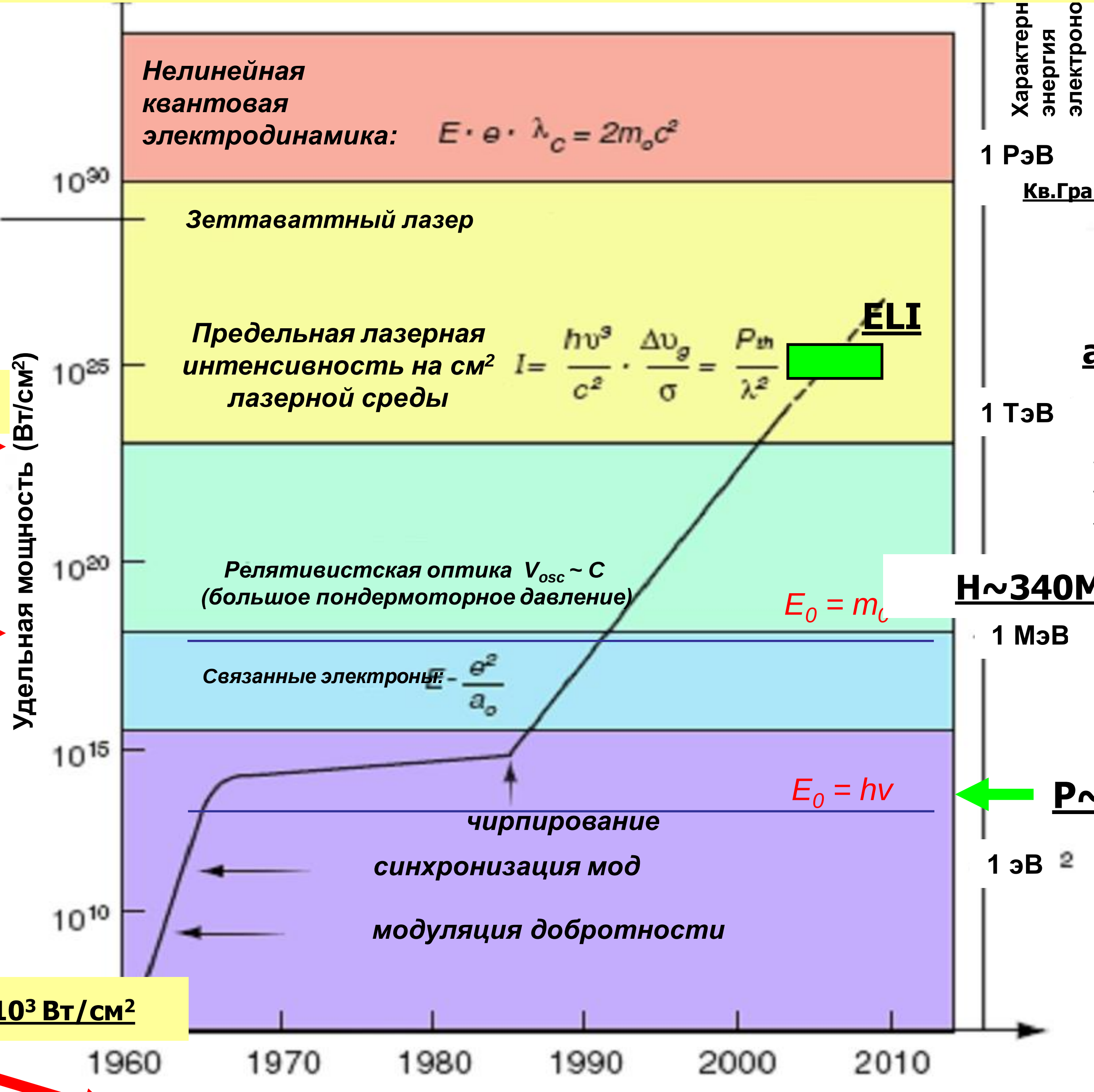






Plasma ablation c

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



"VULCAN" UK

FELIX

ИВТАН

Солнце-5.6 10^3 Вт/см^2

Эра электрослабого взаимодействия

Кв.Гравитация,Кв.Элдинамика

Кварковая эра

-Ч.ДЫРА

$a \sim 10^{27}g$

E ~ 0.1Пв/m

Позитрон-электронная эра

$E_0 = m_c$

H~340Мгс **P~300 Гb**

Пондер P~гидро

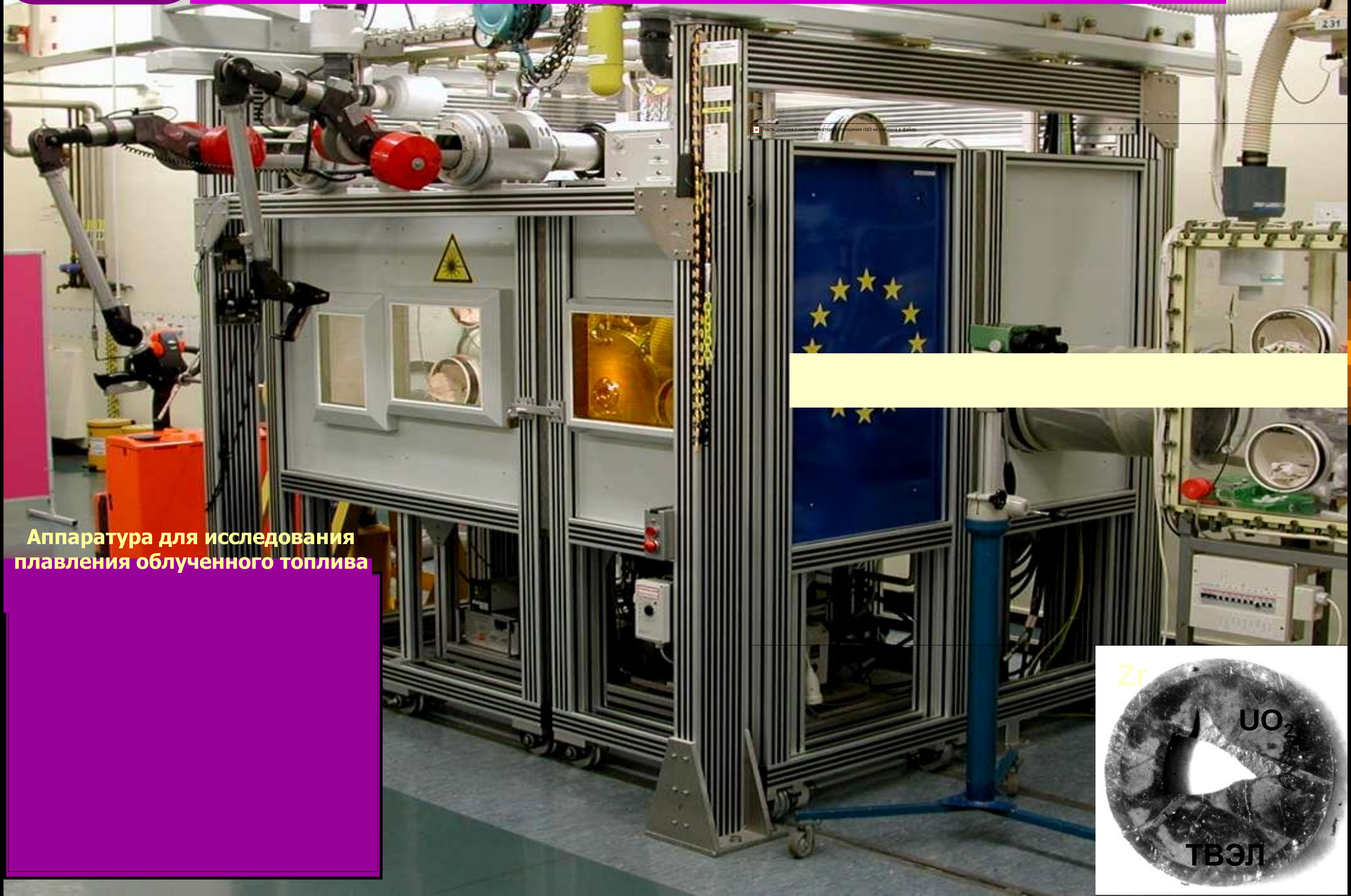
эра

P~1Mb

Атомная эра

Измерение теплопроводности облученного реакторного топлива (метод *лазерной вспышки*)

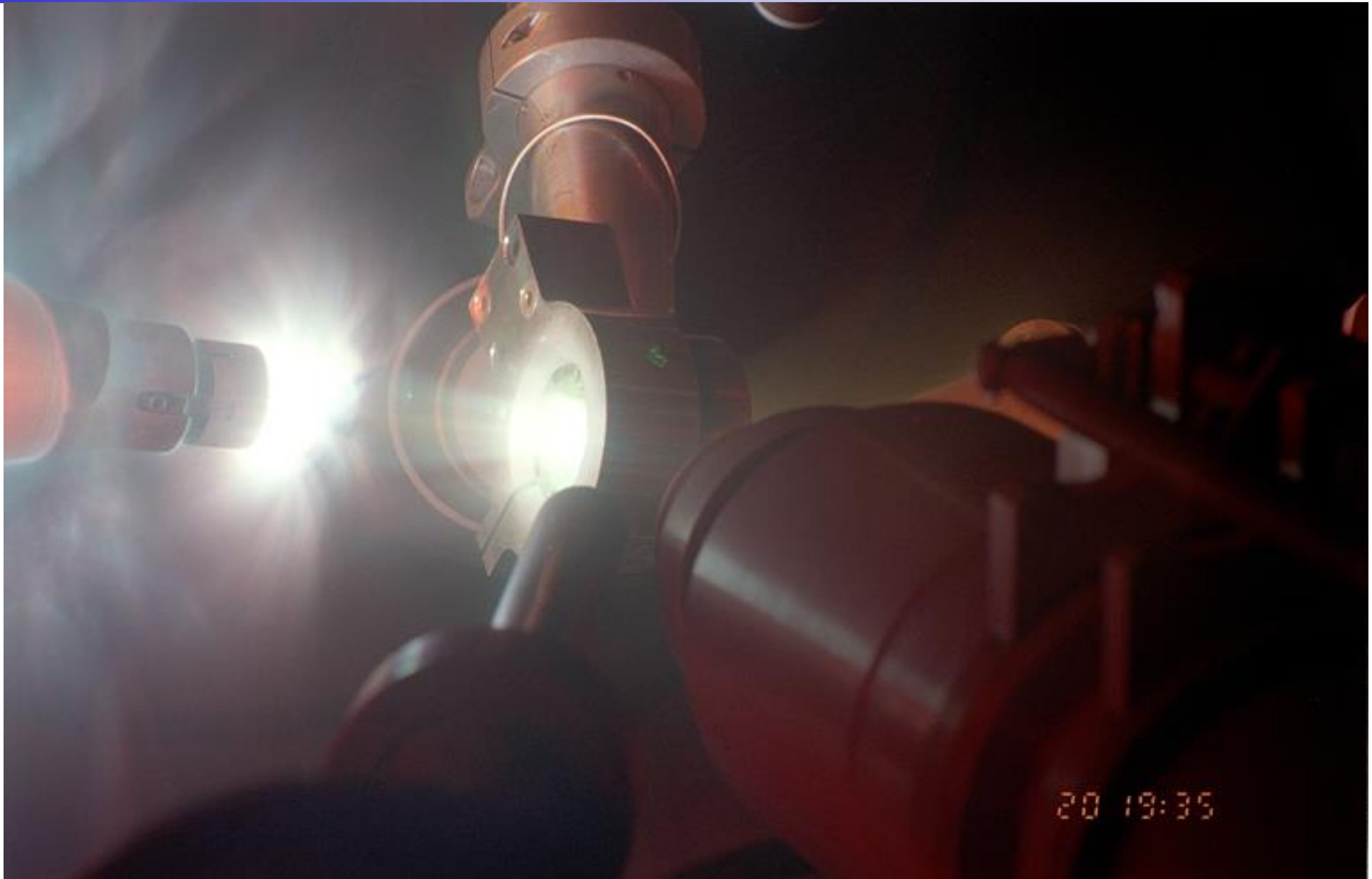
ОИВТ РАН

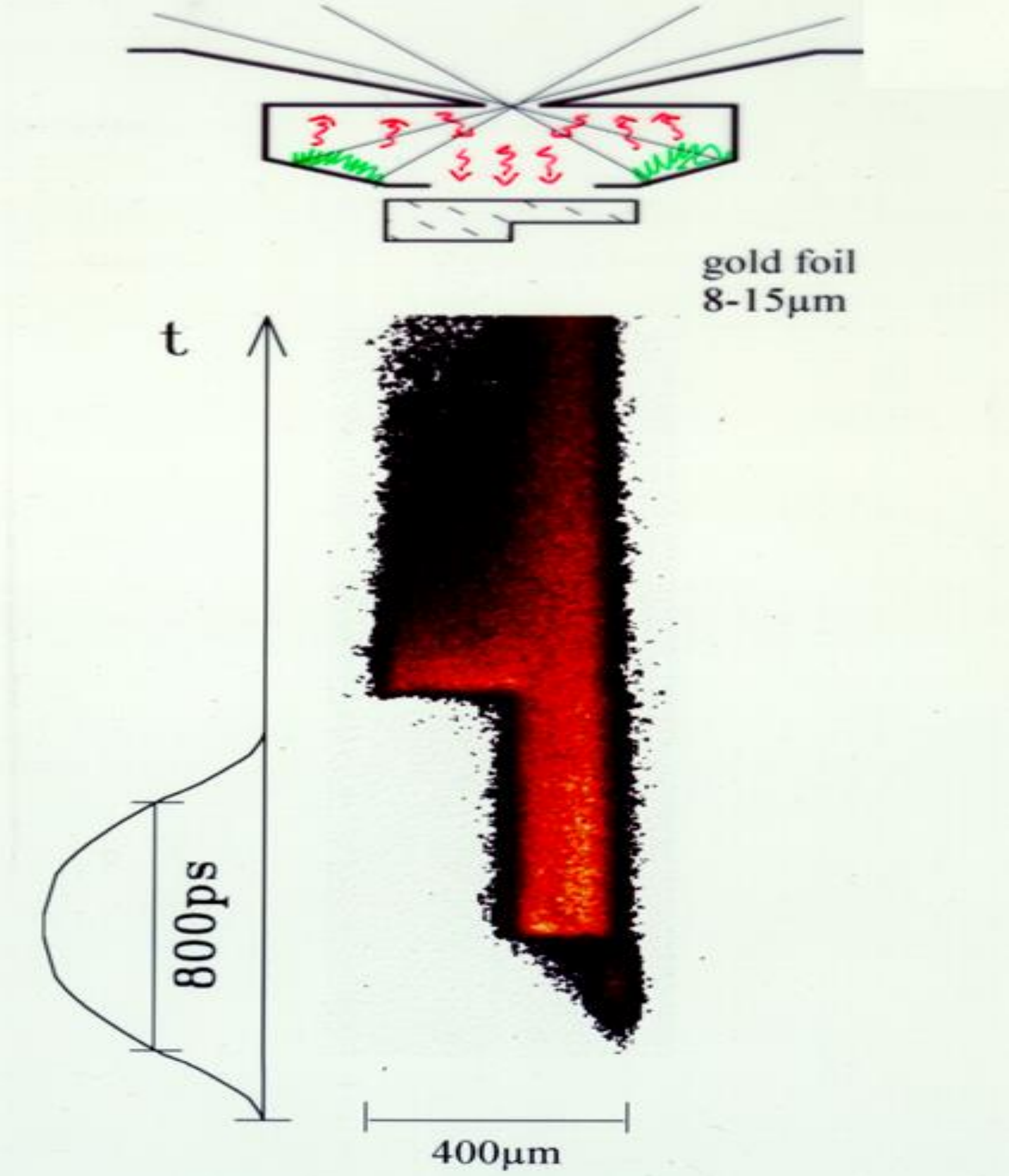


Аппаратура для исследования плавления облученного топлива

ЛАЗЕРНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Diamond anvil target being shot at the Omega laser facility





“РЕНТГЕНОВСКИЕ” УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

IHED
JIHT RAS

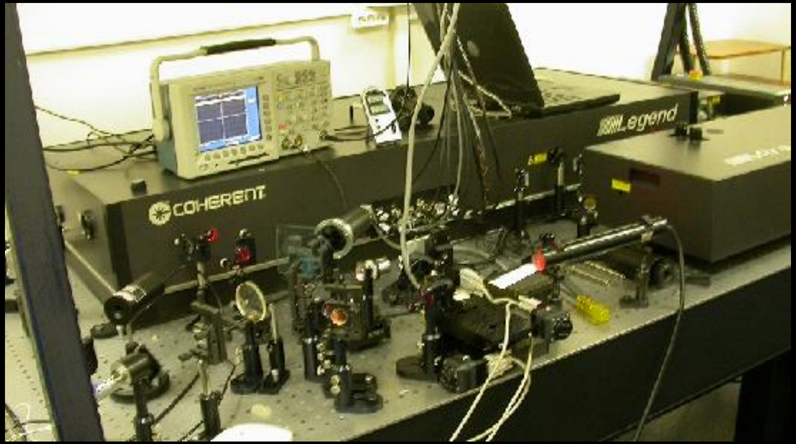
FEMTOSECOND LASER SYSTEMS at JIHT

Terawatt femtosecond Cr- forsterite laser system
1240 nm; 80 fs; 90 mJ; 10 Hz
(*made in Russia, has no analogues in the world*)

Femtosecond Cr- forsterite laser technological system
1240 nm; 80 fs; 1 mJ;100 ÷ 1000 Hz

Femtosecond Terawatt Ti:Sapphire Laser System
800 nm; 40 fs; 10 Hz, to 10 TW

Femtosecond Kilohertz Ti:Sapphire Laser System
800 nm, 30 fs,1 kHz, 2,5 mJ



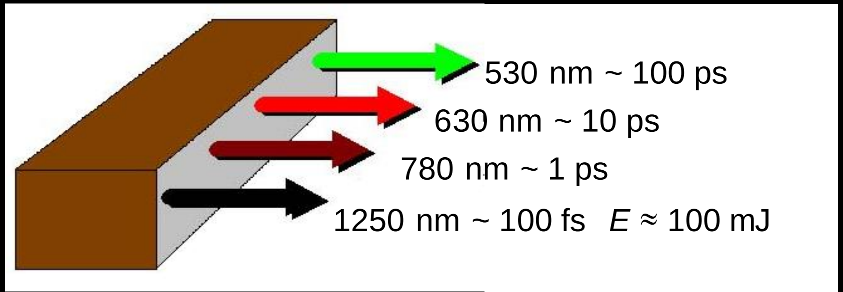
Фемтосекундная тераваттная “хром – форстерит” лазерная система инфракрасного диапазона спектра излучения изготовлена на базе российских комплектующих изделий.

λ= 1240 nm

$\tau \approx$ 80 fs

E $\approx$ 90 mJ

F=10 Hz

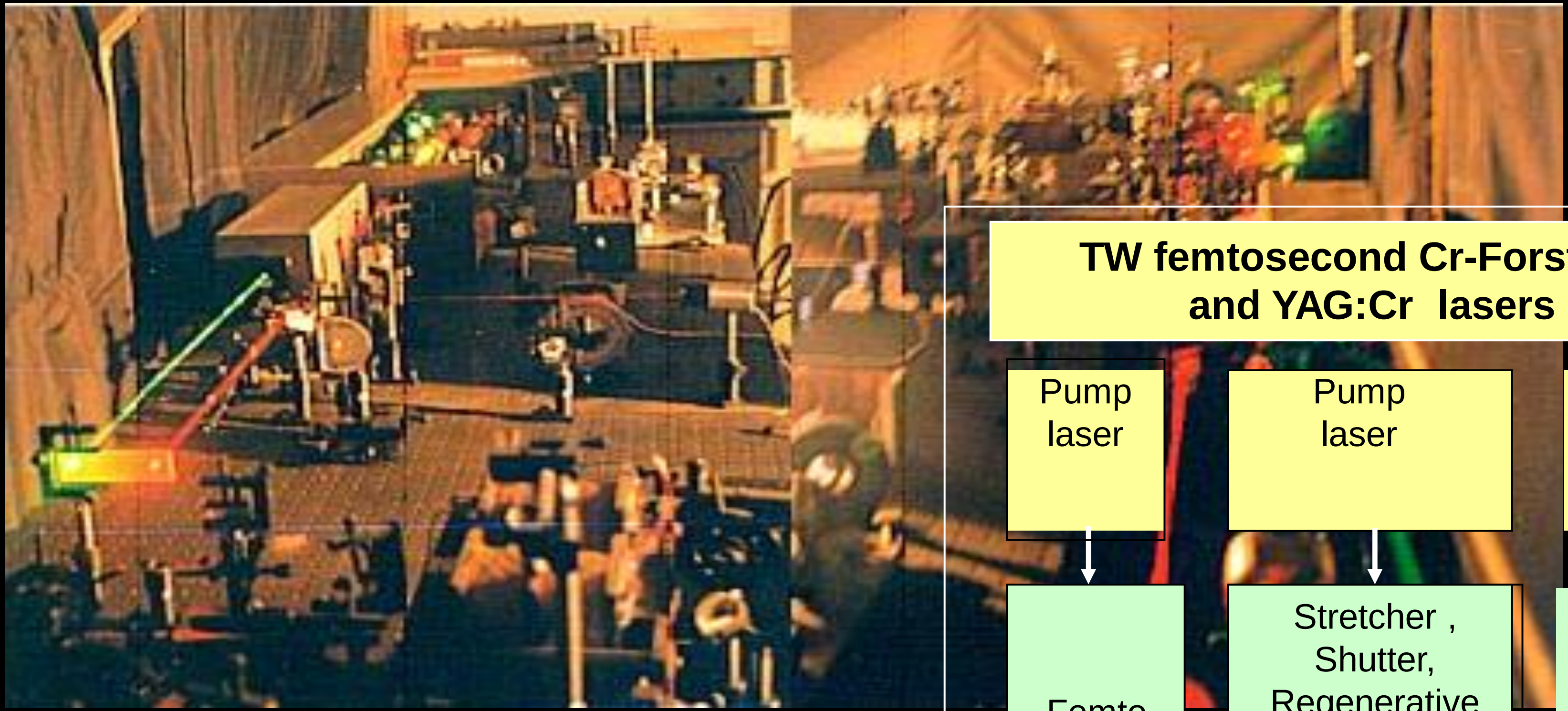


$I_{max} \sim 10^{16}$ W×cm^{-2} ($\varnothing \approx 5\ \mu$m)

***q* = 1-10 TW**

Компрессия импульса:
вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна
вынужденное комбинационное рассеяние

T^3 - ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ТЕРАВАТТНЫЕ ЛАЗЕРЫ



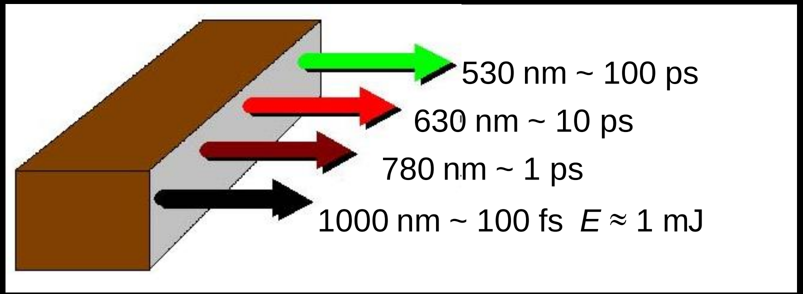
TW femtosecond Cr-Forsterite and YAG:Cr lasers

Pump laser → Femto Generator → 30 ÷ 80 fs, 100 MHz, 2 nJ

Pump laser → Stretcher , Shutter, Regenerative amplifier, Two-channel pulse picker → Compressor → 30 ÷ 80 fs, 10 Hz, 0,2 mJ

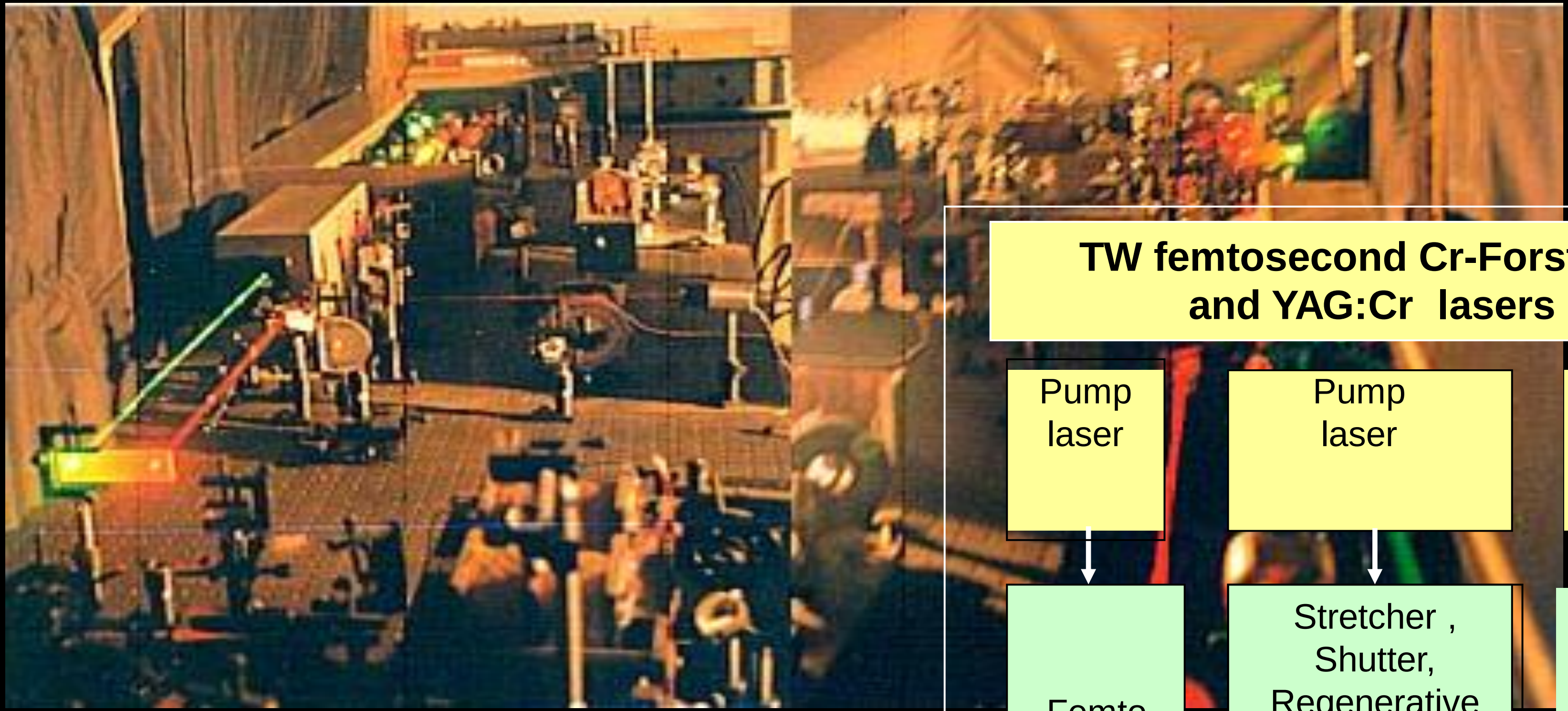
Pump laser → Power amplifier → Compressor → 30 ÷ 80 fs, 10 Hz, > 100 mJ

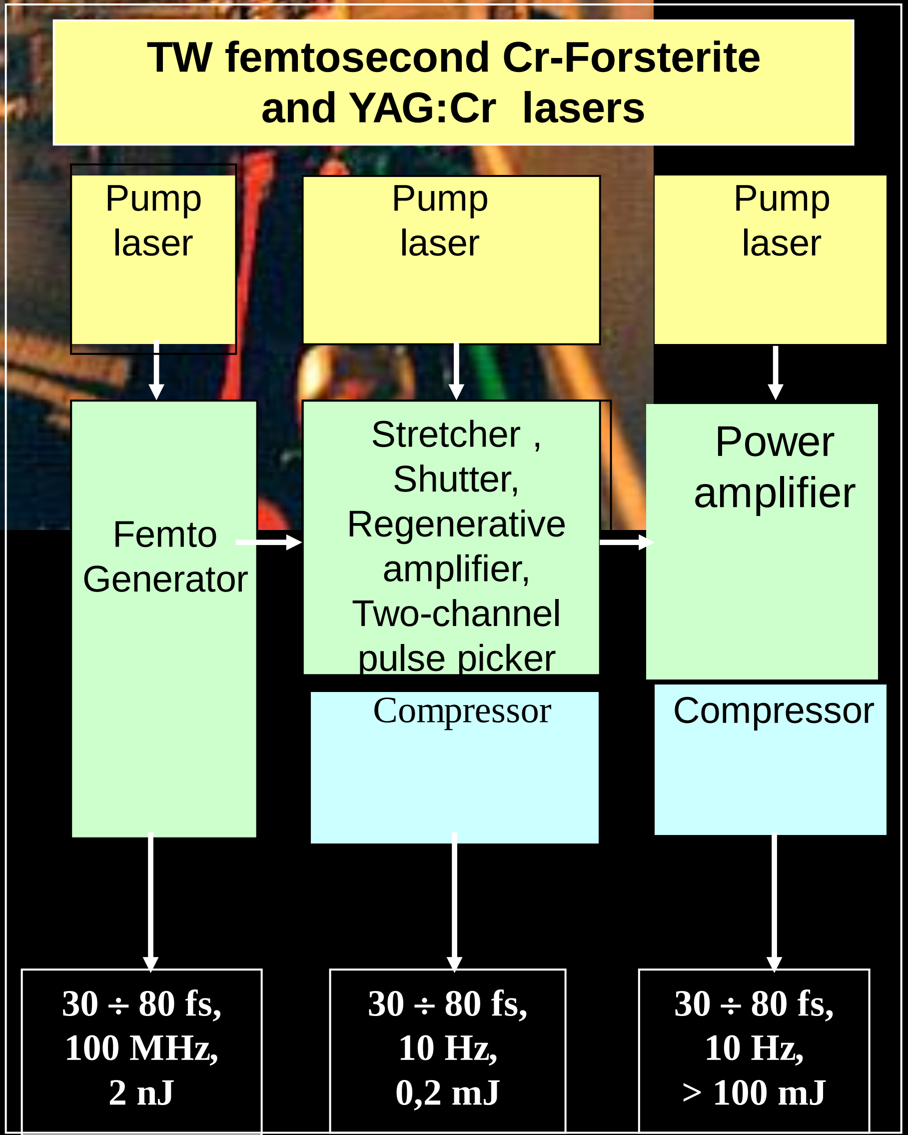
Компрессия импульса:
вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна
вынужденное комбинационное рассеяние



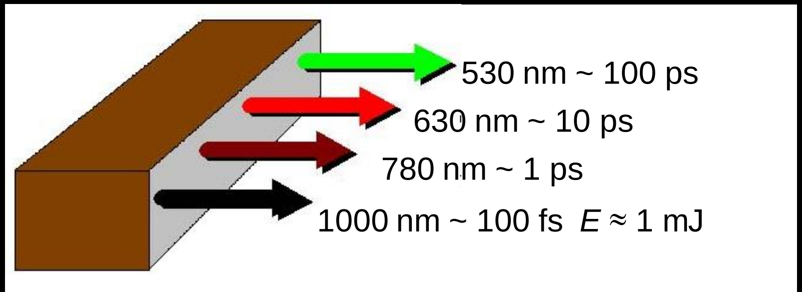
$I_{max} \sim 10^{16}$ W×cm^{-2} ($\varnothing \approx 5\ \mu$m)

T^3 - ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ТЕРАВАТТНЫЕ ЛАЗЕРЫ





Компрессия импульса:
вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна
вынужденное комбинационное рассеяние



$I_{max} \sim 10^{16}$ W×cm^{-2} ($\varnothing \approx 5\ \mu$m)

TW FEMTOSECOND CR:FORSTERITE LASER

$\lambda = 1250$ nm

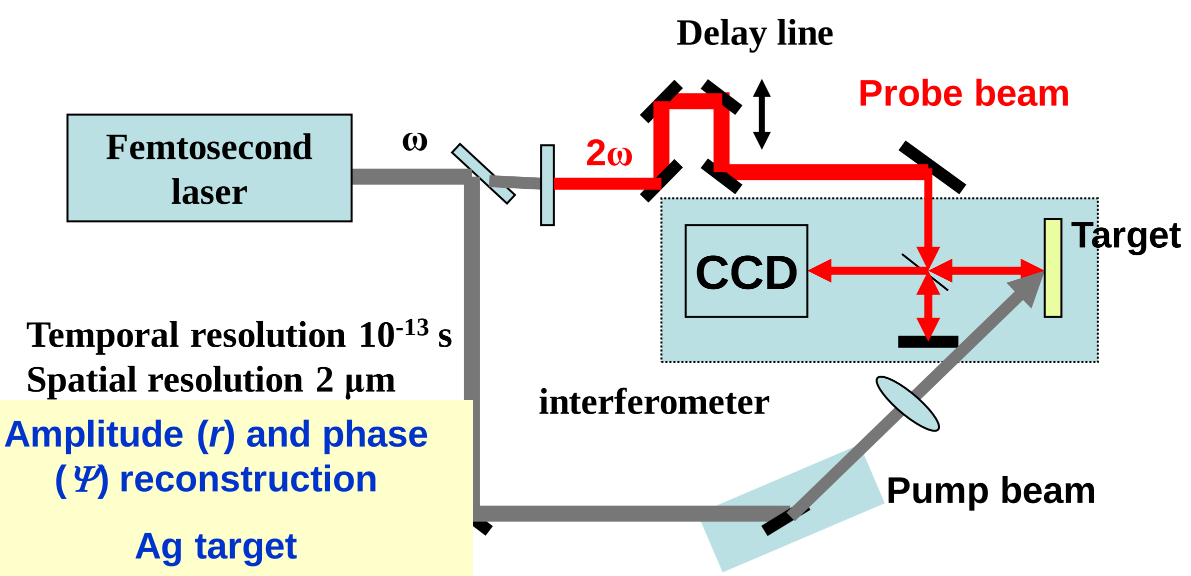
$\tau < 100$ fs

$E > 100$ mJ

$W \sim 1 \div 10$ TW

Фемтосекундная диагностика неидеальной плазмы при облучении твердой мишени фемтосекундным лазером

Femtosecond time-resolved interferometric microscopy

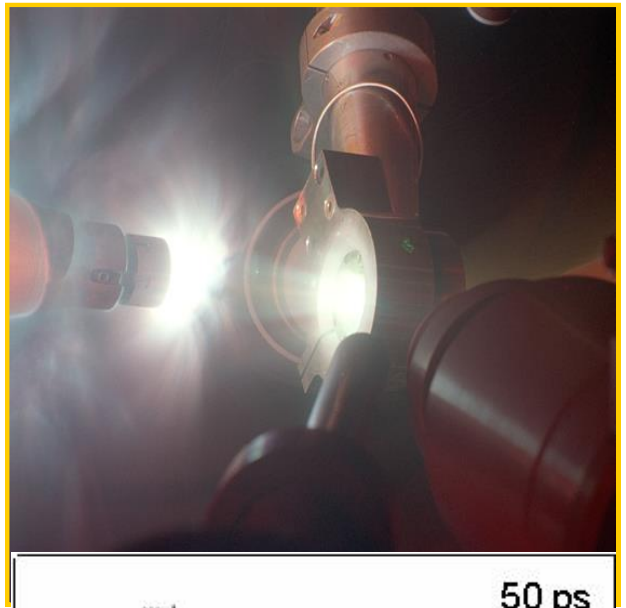


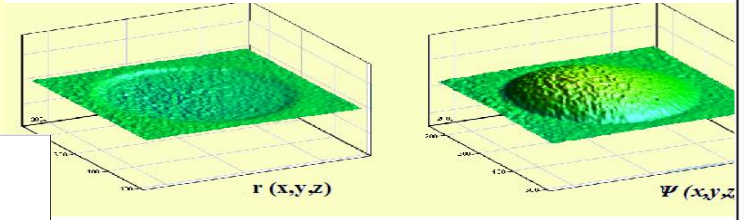
Temporal resolution 10^{-13} s
Spatial resolution 2 μm

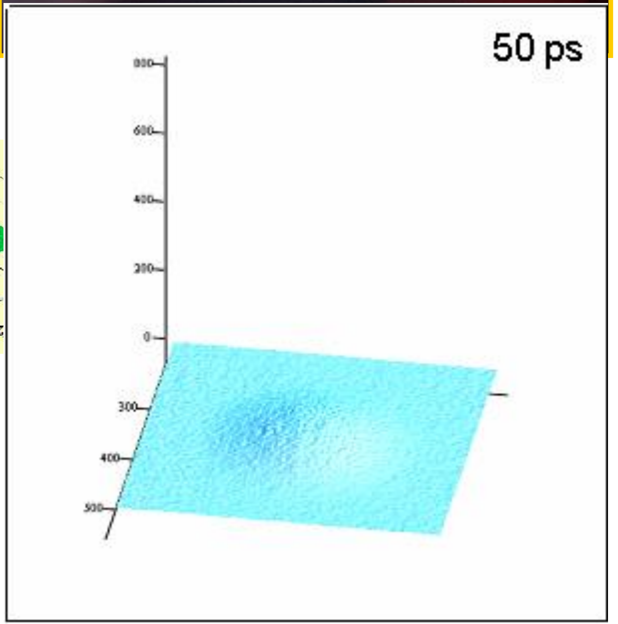
Amplitude (*r*) and phase (*Ψ*) reconstruction

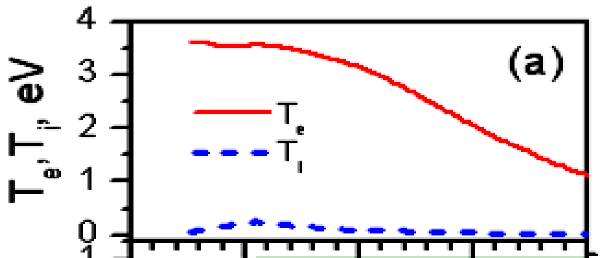
Ag target

pulse duration $\tau \approx 100$ fs
$I \sim 10^{14}$ W/cm^2



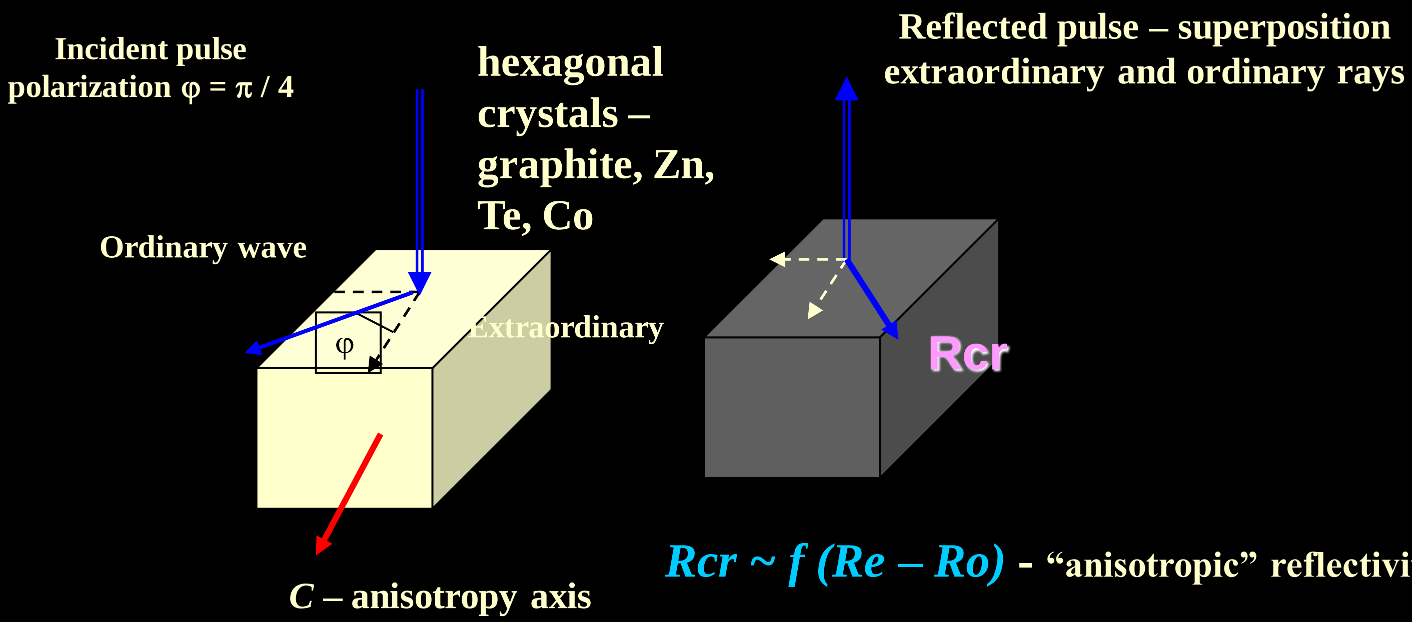






ULTRAFAST STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OPTICAL ANISOTROPY

The optical anisotropy disappears, when the long-range order of crystalline structure disappears, (melting, amorphous state)



$Rcr \sim f\,(Re - Ro)$ - "anisotropic" reflectivity component

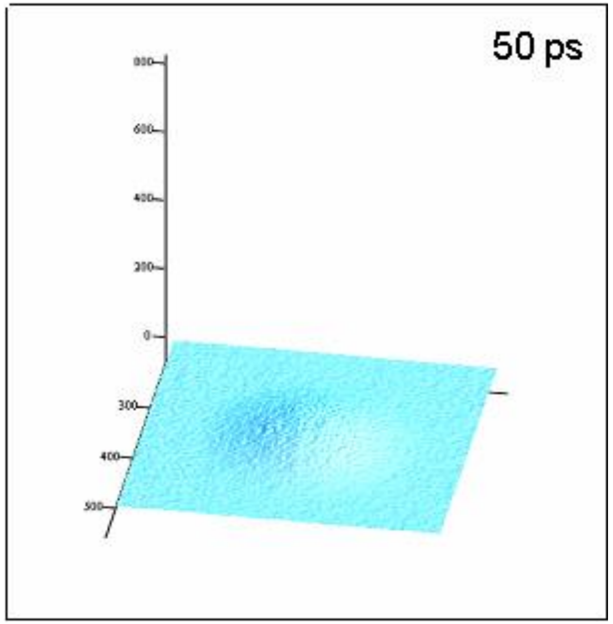
crystal structure $Re \neq Ro$ $Rcr \sim f\,(Re - Ro) \neq 0$

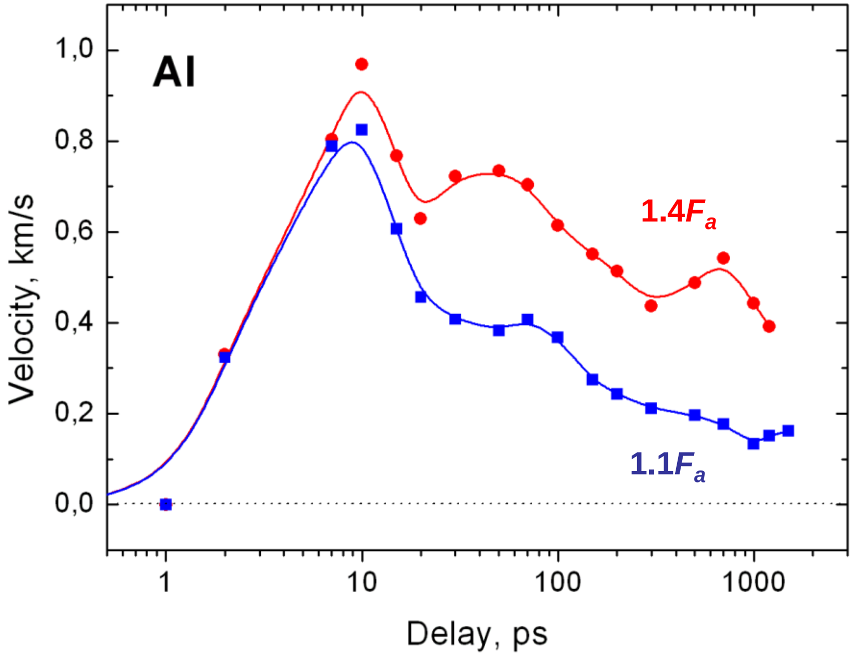
melting, amorphous state $Re \approx Ro$ $Rcr \sim f\,(Re - Ro) \rightarrow 0$

Dynamics of ablation

Femtosecond interferometry

Z, nm





Al target, F_0 = 1.4 F_a

τ_L = 100 fs, I = 10^{13} W/cm^2

MD-modeling

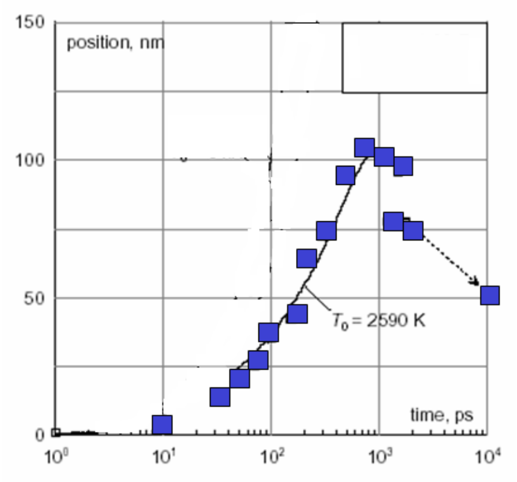
Часть рисунка с идентификатором отношения rId5 не найдена в файле.

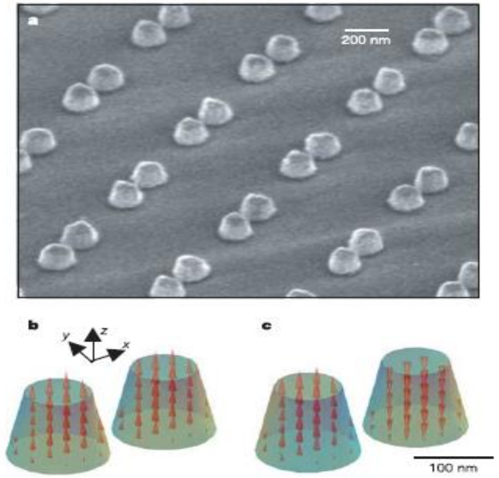
F=1.1Fa

12 ps **40 ps** **150 ps**

М.Агранат и др

Deformation of metal surface under action of femtosecond pulses, creation of surface nanostructures.





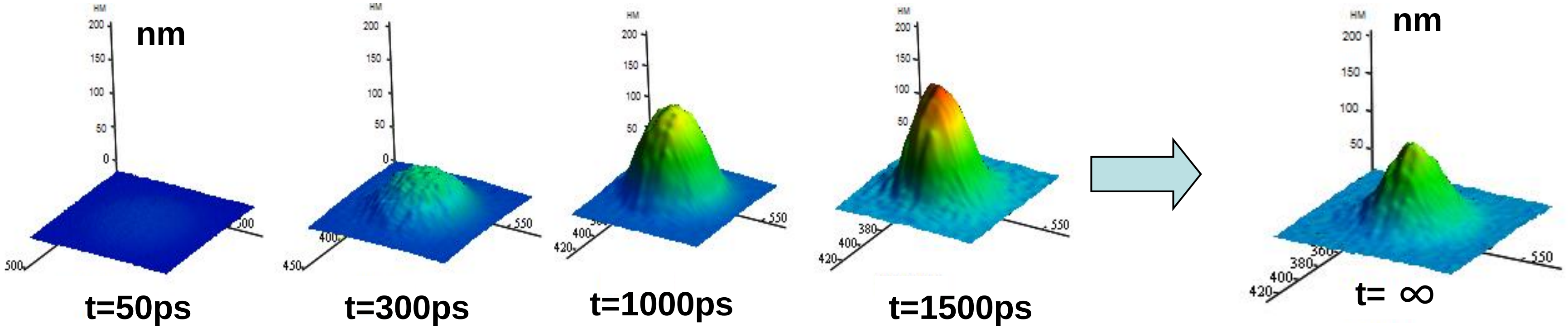
100nm

Metamaterial for optical range of spectra (nanostructured gold surface)

Nature, Vol 438|17November2005|doi:10.1038/nature04242

Dynamics of expansion of Al target surface near the ablation threshold (F=0.95F_{abl}; τ_L = 100fs)

The residual surface deformation of Al



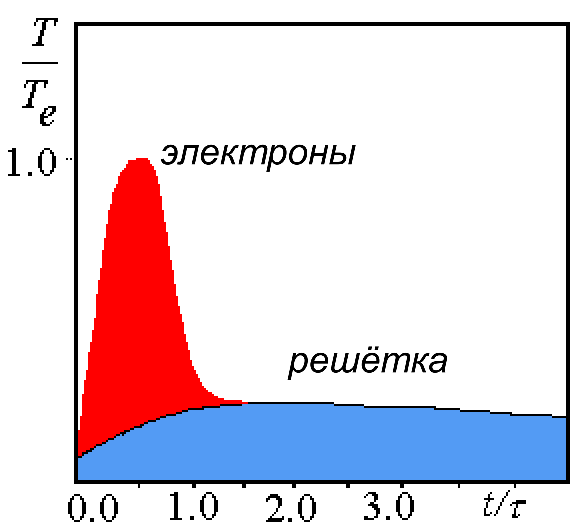
(utrafast imaging interferometry measurements)

М.Агранат и др

НЕРАВНОВЕСНЫЙ НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ, СПИНОВ И РЕШЕТКИ

«Горячие» электроны - «холодная» решётка, гидродинамика

$\tau_{ef} \leq 10^{-12}$ c $\longrightarrow$ Лазер: $\tau \sim 10^{-13} - 10^{-11}$ s, $I \sim 10^{10} - 10^{13}$ W·cm^{-2}

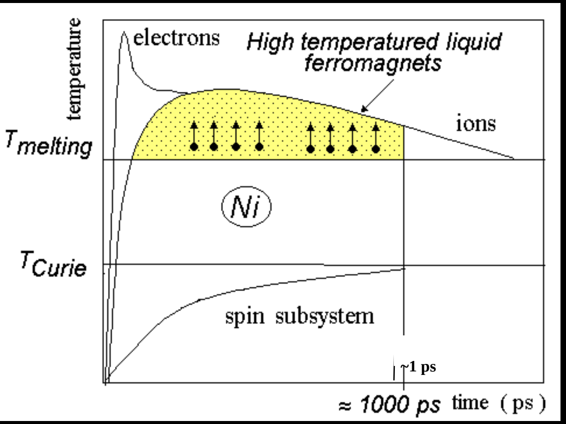


Ag: $T_e \sim 4 \cdot 10^3$ K, $T_i < 1000$ K

Потеря оптической анизотропии

Кинетика: плавление Zn - < 3 пс

рекристаллизация < 100 пс



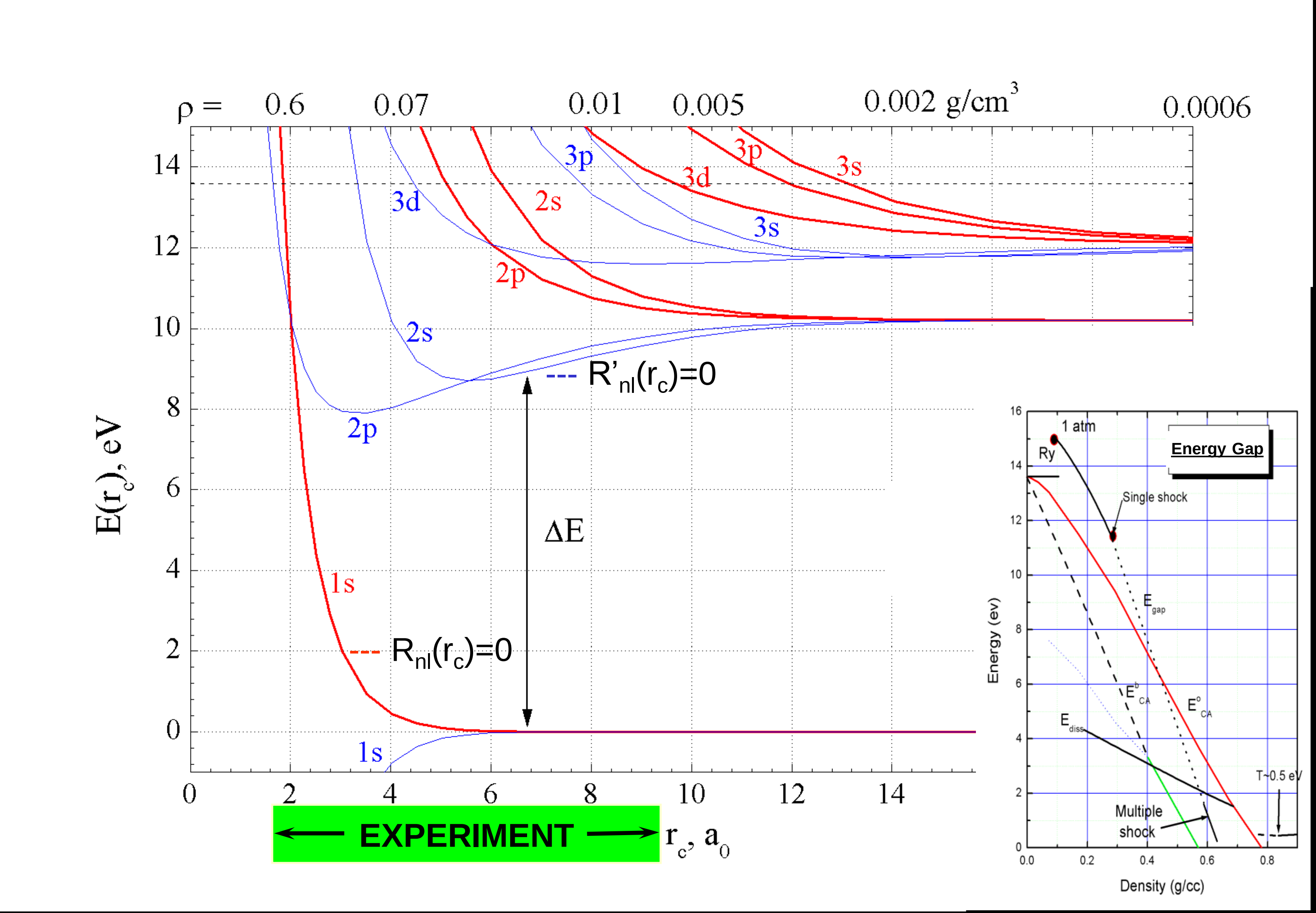
«Холодные» спины - «горячая» решётка

Высокотемпературный жидкий ферромагнетик (Ni)

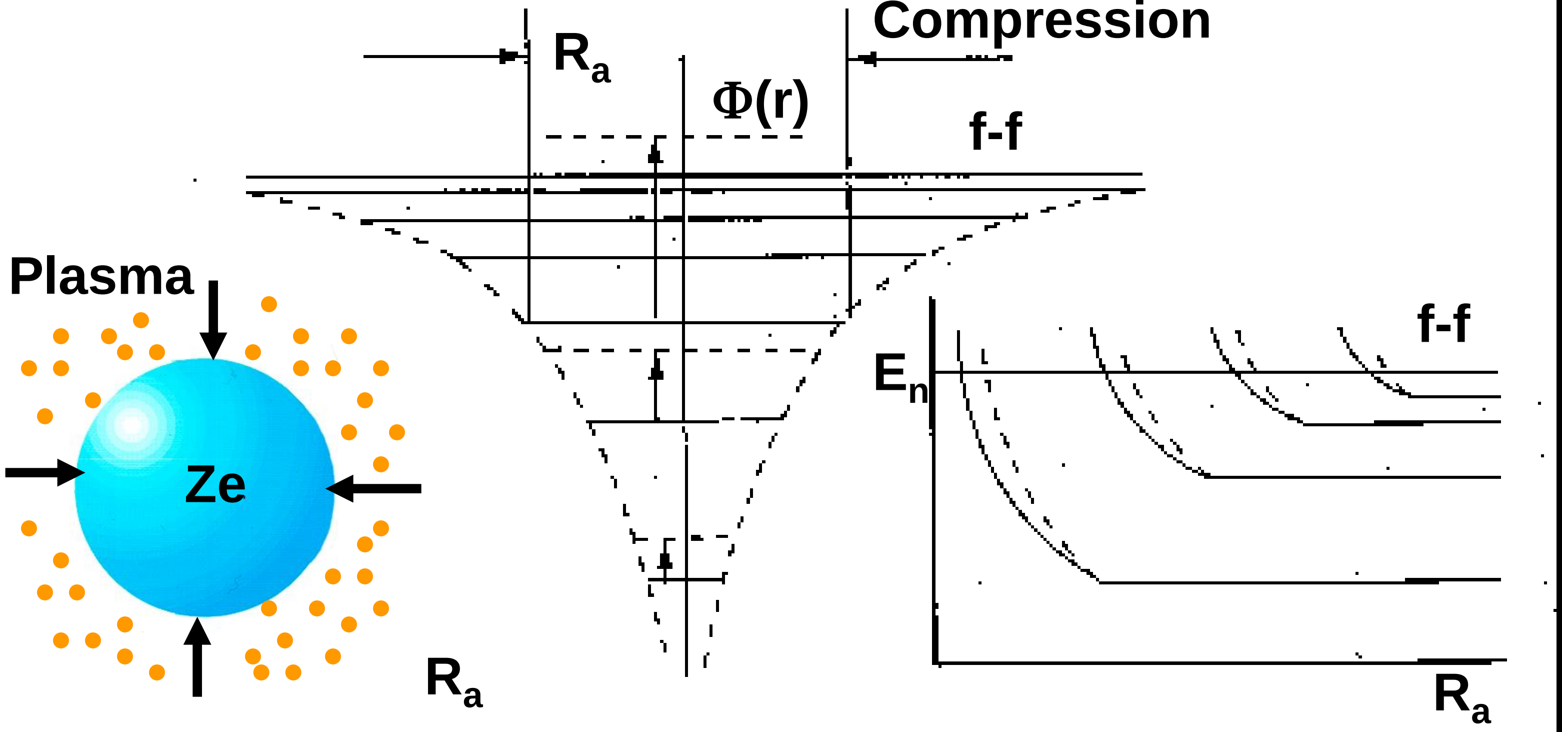
время жизни ~ 100 - 1000 пс

Реориентация спина ~ 1 пс (TbFeCo)

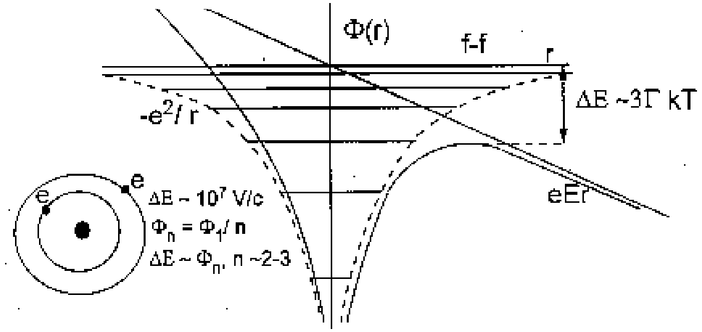
ELECTRONIC SPECTRUM OF COMPRESSED HYDROGEN



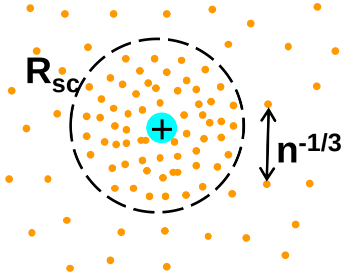
Pressure ionization



plasma microfields

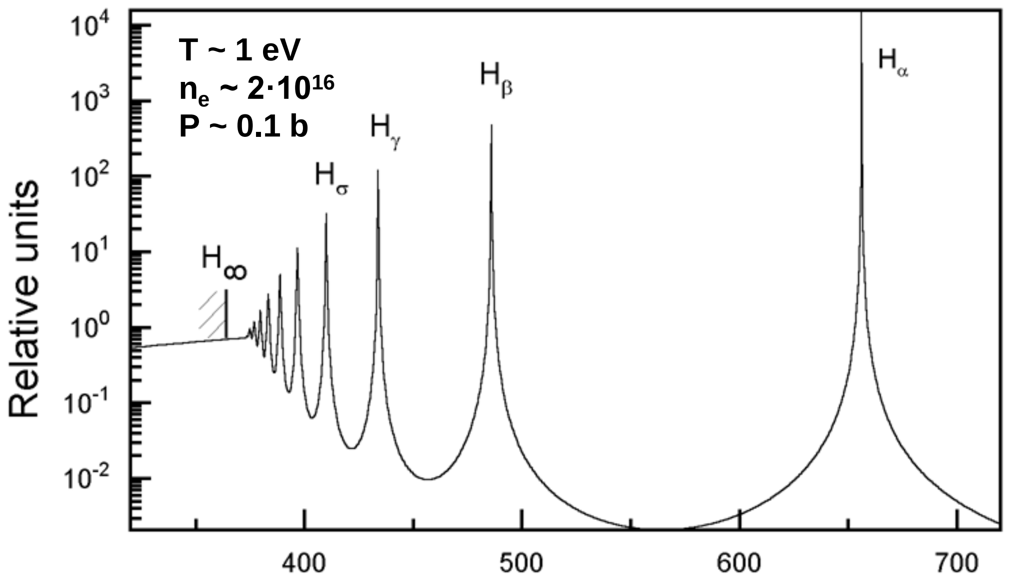


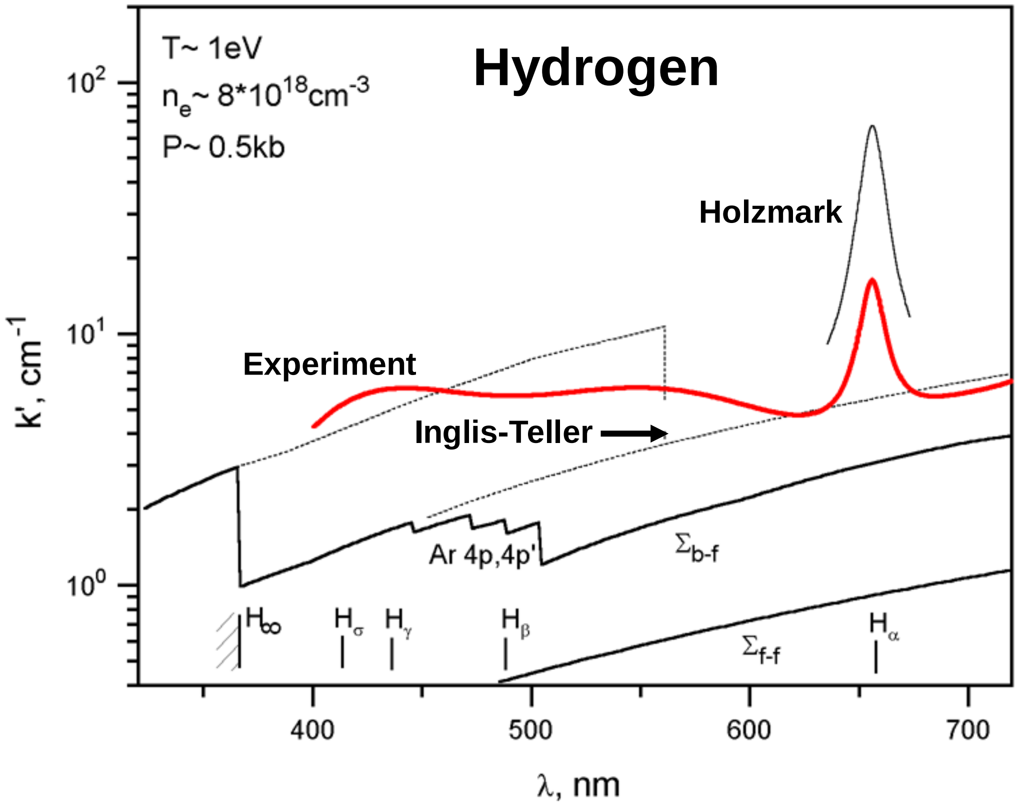
Screening



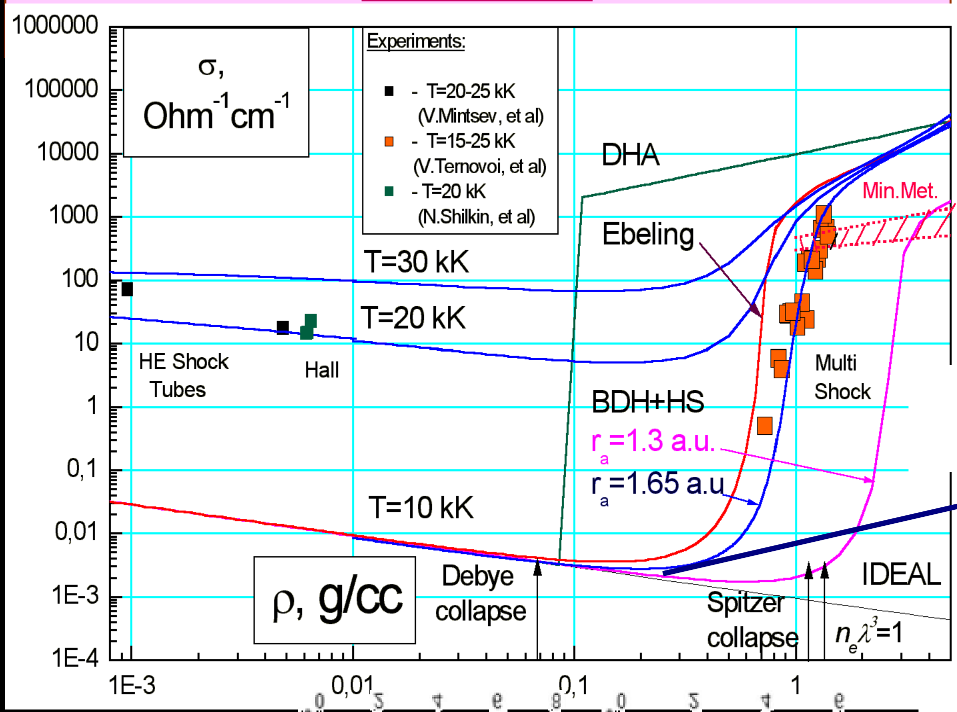
Wigner - Coulomb collapse

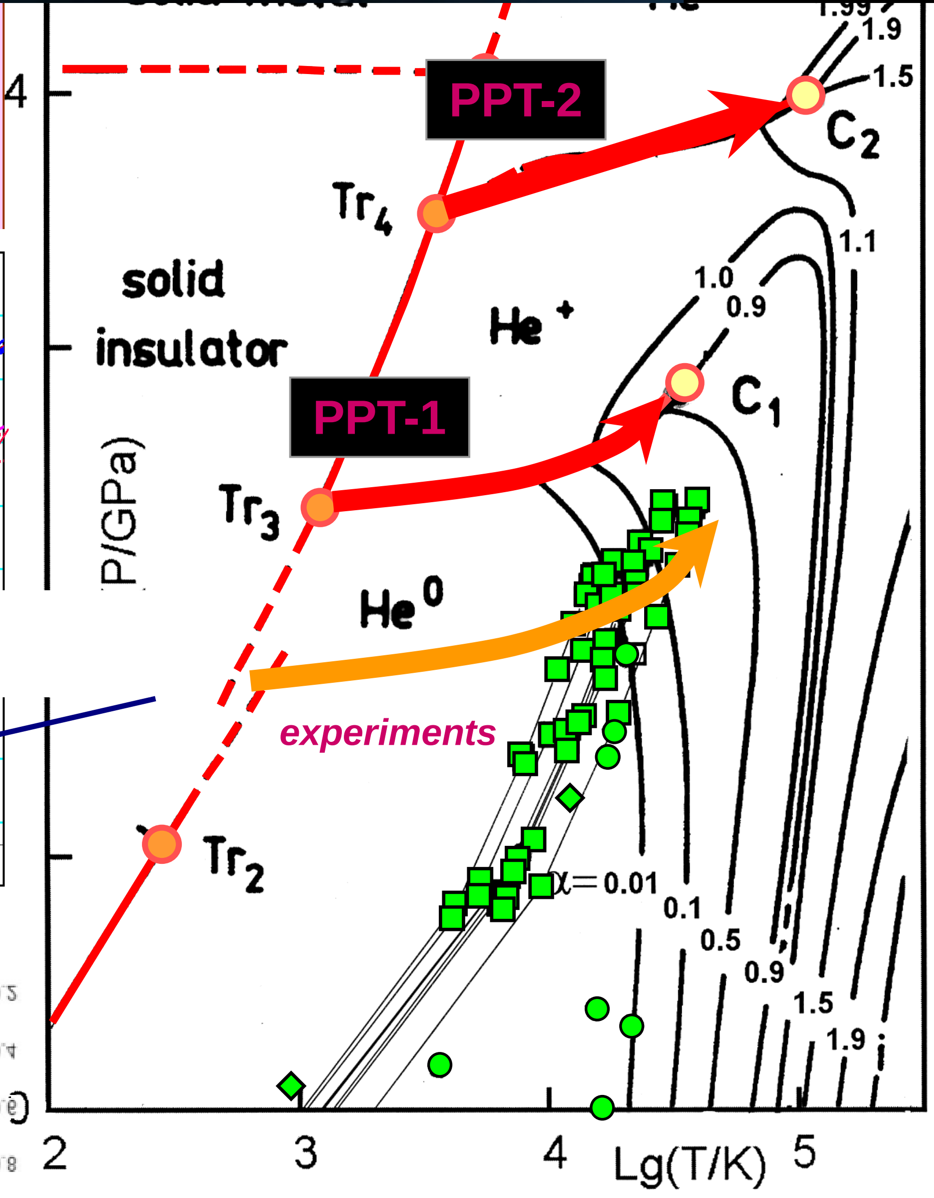
«РАСТВОРЕНИЕ» СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

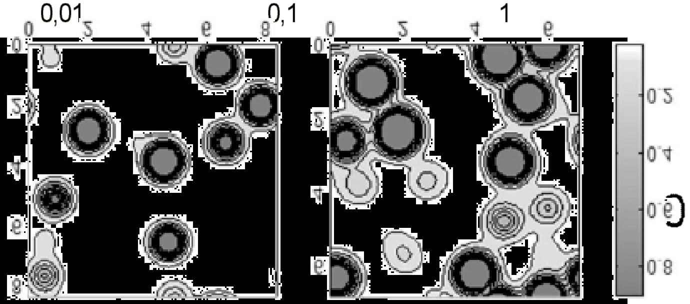




Plasma Phase Transition (transitions) in helium

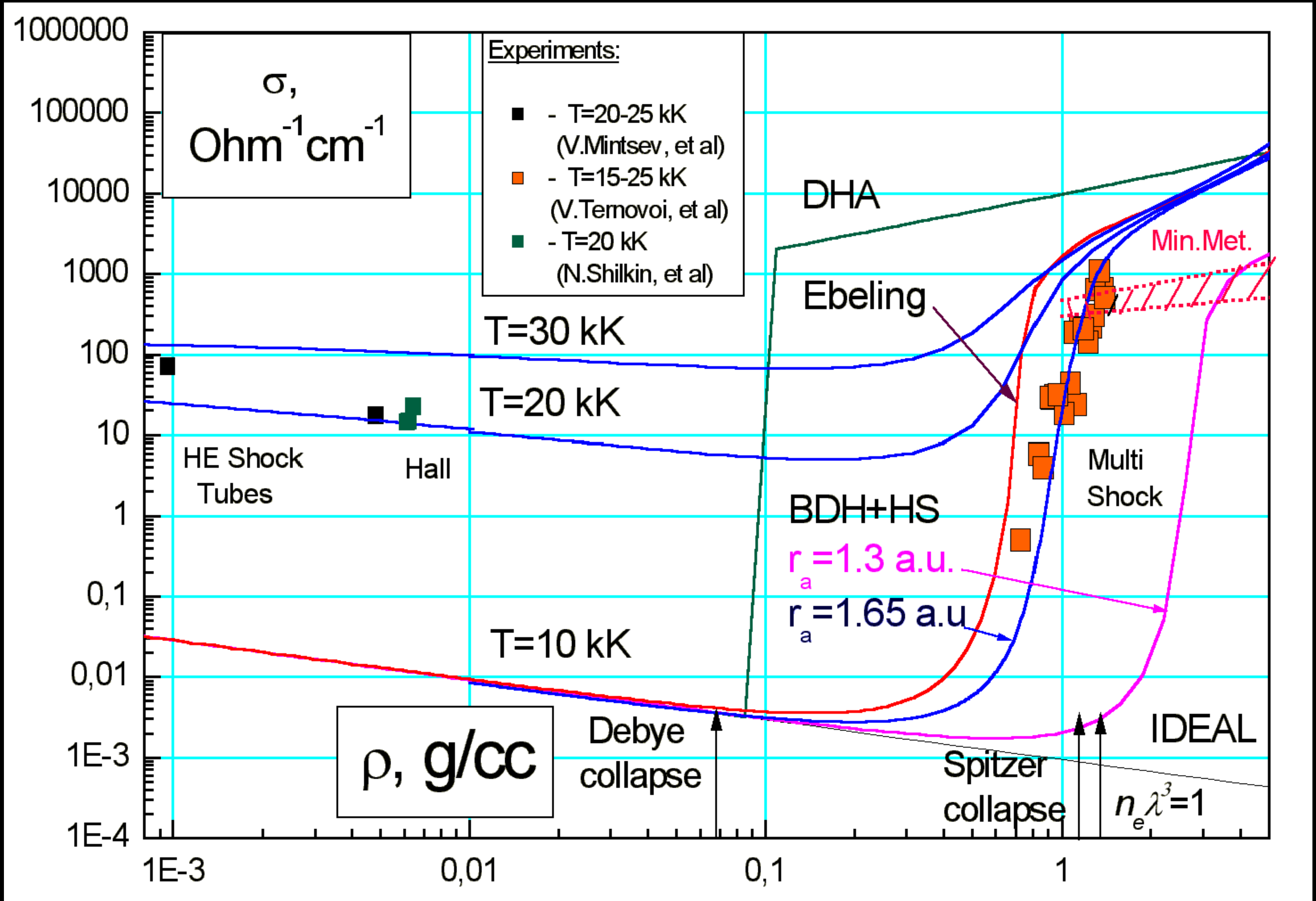






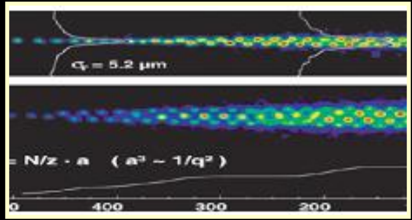
A. Kietzmann,,
R. Redmer,et.al
PRL(2007)

He CONDUCTIVITY

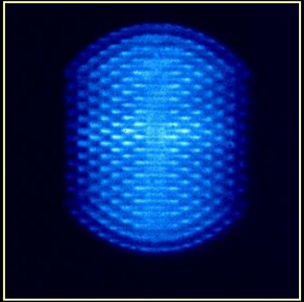


Плазменные фазовые переходы

CRISTALLINE BEAMS



NONNEUTRAL PLASMA

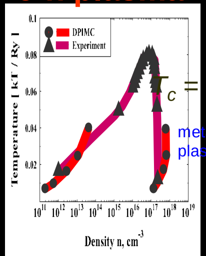


- Кварк-глюонная плазма
- Плазма
- Газ
- Жидкость
- Кристалл

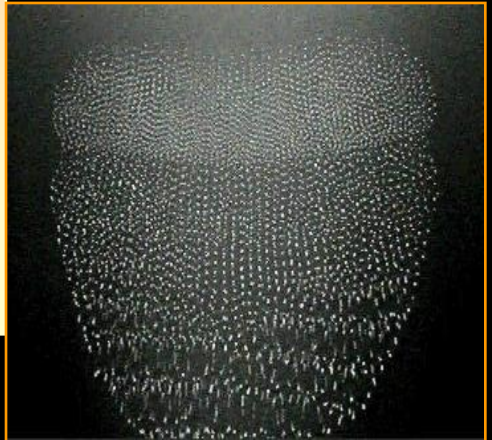
- Неидеальная плазма
- «Жидкая» плазма
- «Кристаллическая» плазма

рост температуры, беспорядка, энтропии

e-h plasma



DUSTY PLASMA CRYSTAL

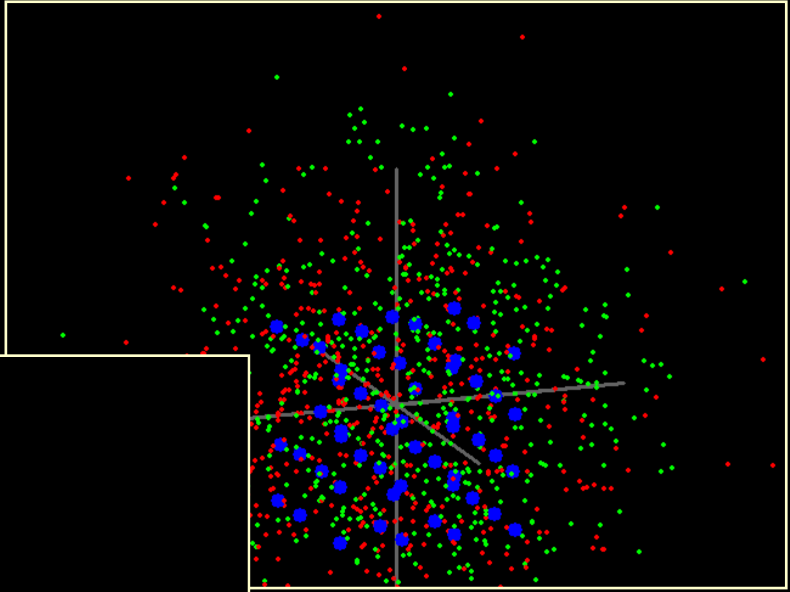


Водород: моделирование квантовым методом Монте-Карло

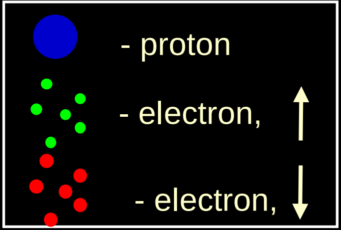
V. Filinov, M. Bonits, P. Levashov, V. Fortov
Phase Transition in Hydrogen Plasma
Pis'ma JETF **(2001);** ***J. Phys.*** **(2003);** ***Phys. Rev. E*** **(2004)**

DEUTERIUM PLASMA PHASE TRANSITIONS

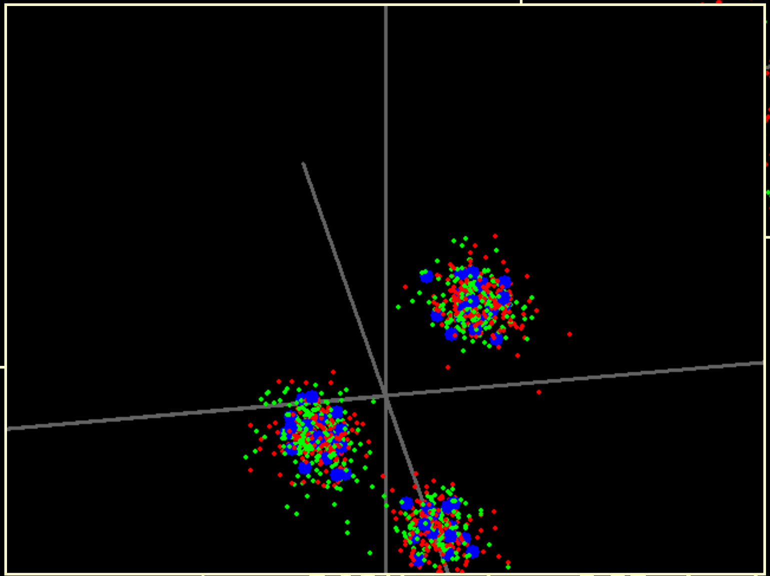
Protons ordering



n = 3·10^{25} cm^{-3}, ρ = 50.2 g/cm^3

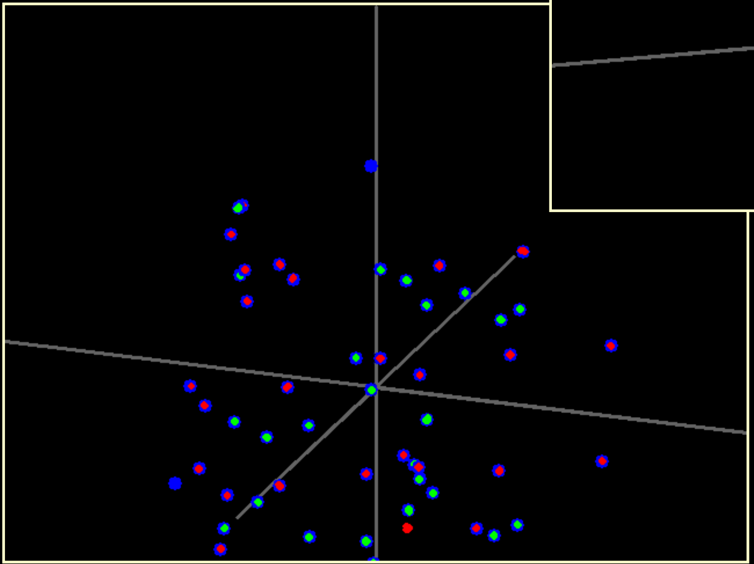


Plasma phase transition



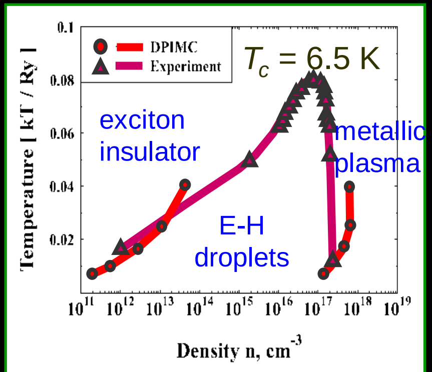
n = 3·10^{22} cm^{-3}, ρ = 0.05 g/cm^3

Dissociation



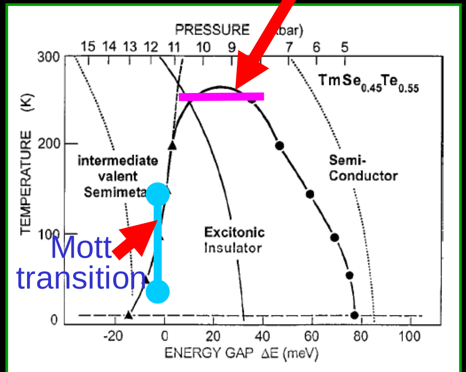
n = 10^{18} cm^{-3}, ρ = 1.67·10^{-6} g/cm^3 **T = 10000 K**

Ge



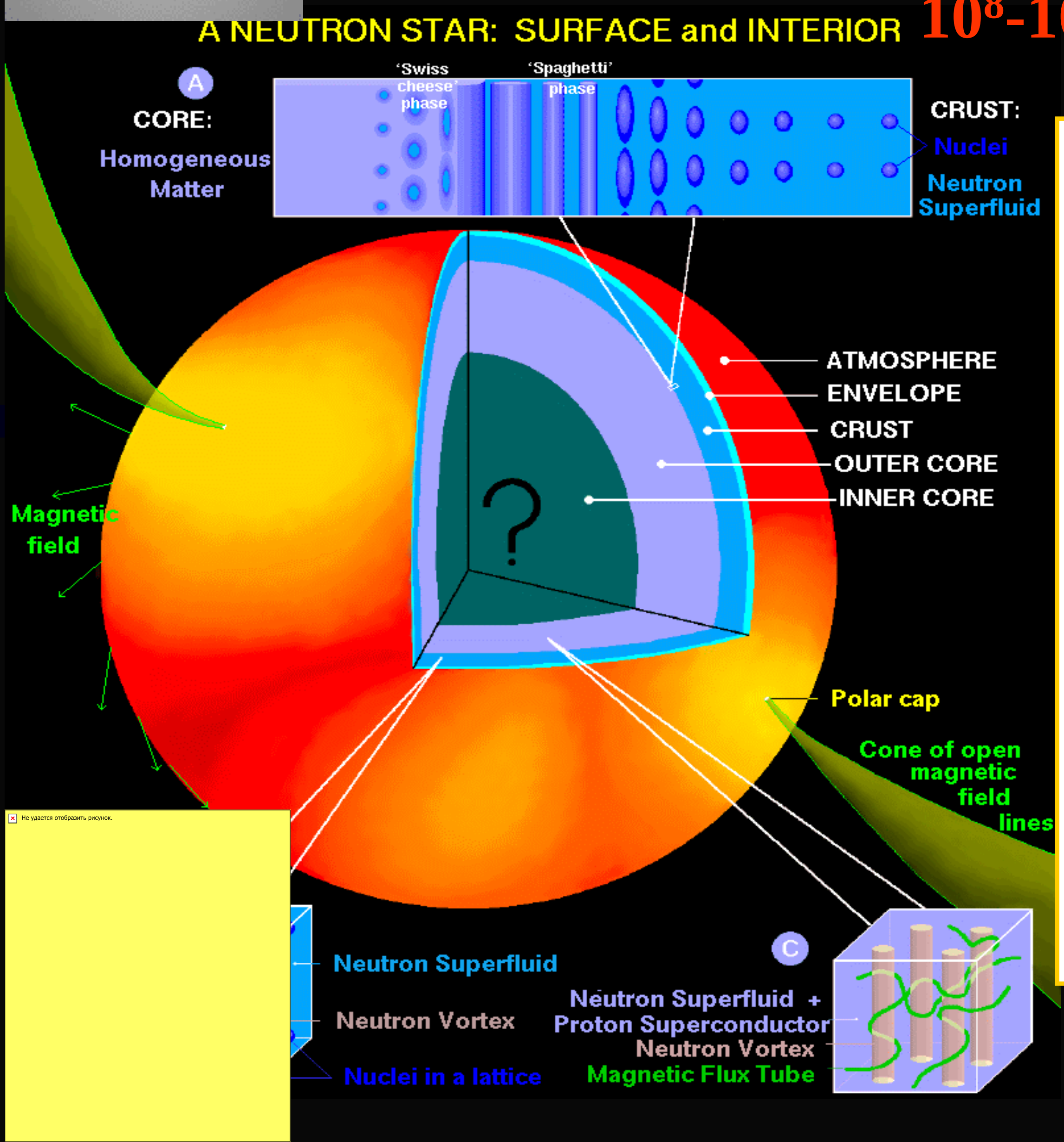
$TmSe_{0.45}Te_{0.55}$

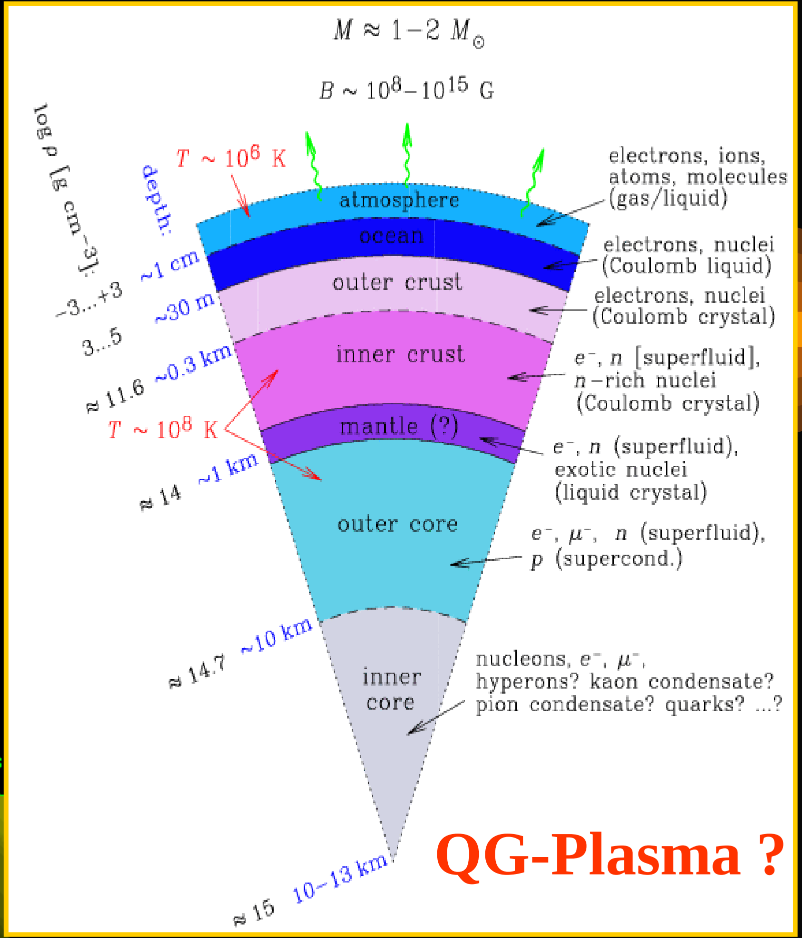
Temperature ionization



СТРУКТУРА НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

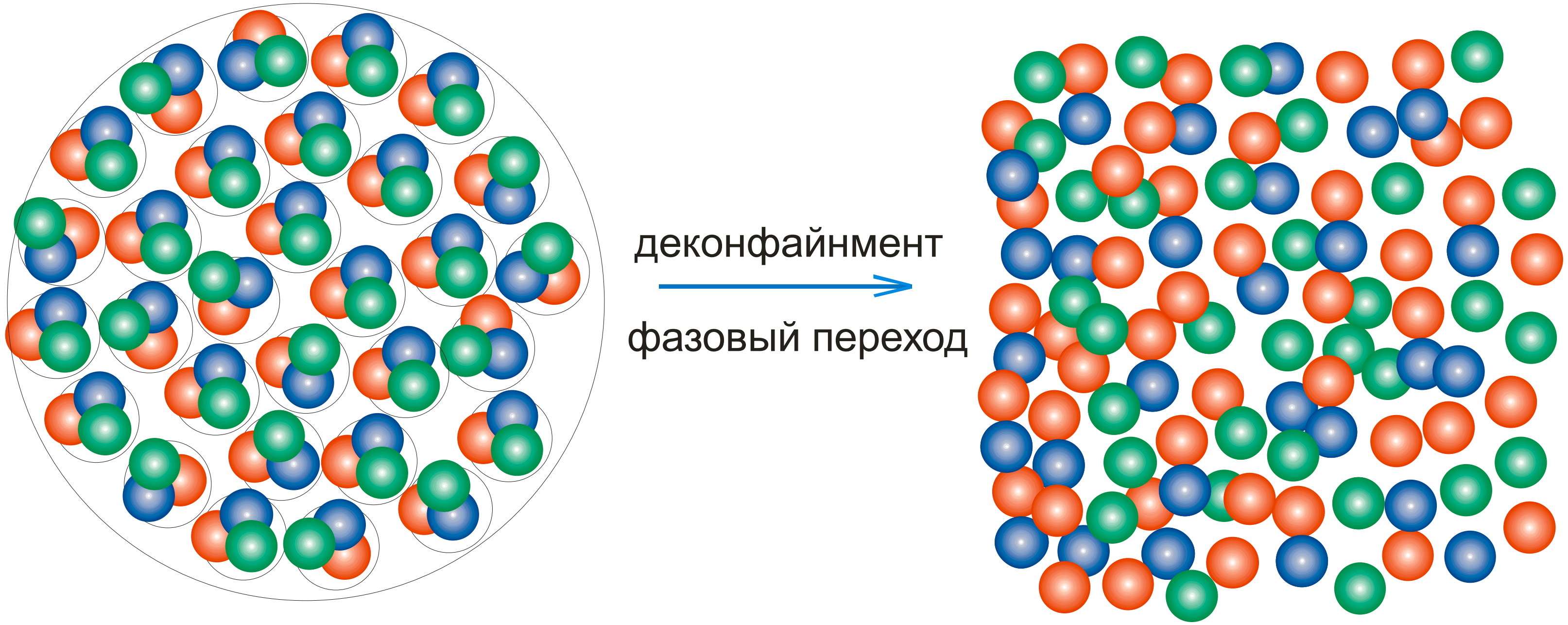
10^8-10^{11} K,10^{14}-5.10^{15} g/cc,10^{25}-10^{27} Bar





(credit: Dany Page)

Образование кварк-глюонной плазмы



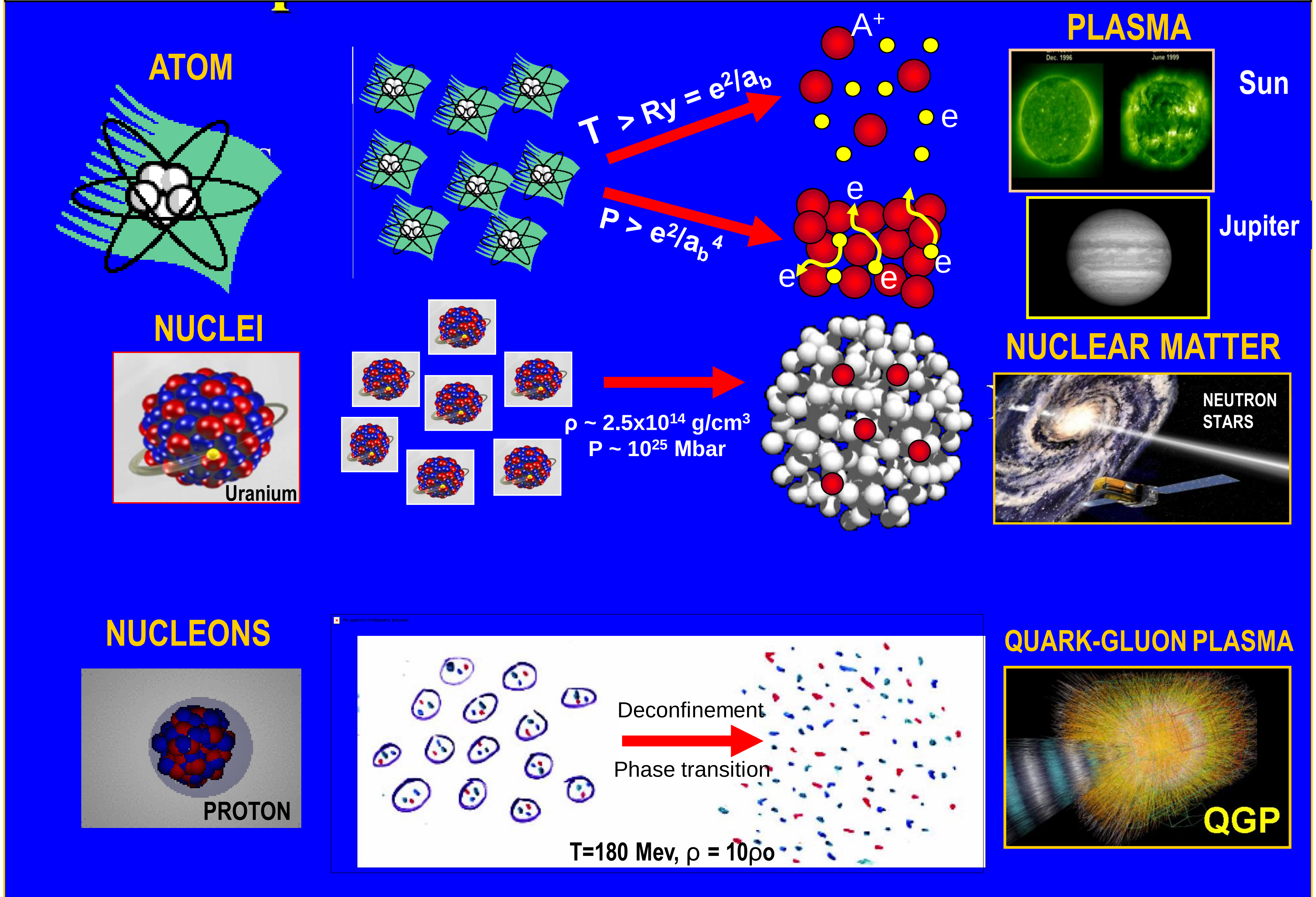
Deconfinement transition similar to Mott transition (insulator/conductor):

Electron concentration low → weak screening of ion potential
→ electrons bound in atoms → insulator (nucleus)

Electron concentration high → strong screening of ion potential
→ free electrons → conductor (QGP = color conductor)

Example: metallic hydrogen in Jupiter

НОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА ПРИ СЖАТИИ



КОСМИЧЕСКАЯ ШКАЛА ВРЕМЕНИ.
РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ ПОСЛЕ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

0 с — Рождение Вселенной

10^{-43} с — Эра квантовой гравитации: доминируют струны и другие экзотические объекты
10^{32} K

10^{-35} с — Вероятно эра инфляции: Вселенная расширяется экспоненциально
10^{28} C

10^{-11} с — Фазовый переход электрослабого взаимодействия: электронные и слабые силы становятся различными
10^{16} K

0.1 мкс — **$2 \cdot 10^{13}$ C**

1 мкс — **$6 \cdot 10^{12}$ K**

10 мкс — Кварки объединяются в протоны и нейтроны
$2 \cdot 10^{12}$Kk

100 — Нуклеосинтез: образование гелия и других элементов из водорода
10^9 C

380 тыс. лет — Образуются первые нейтральные атомы
2700 C

Кварк-Глюонная Плазма

Кварк-гл

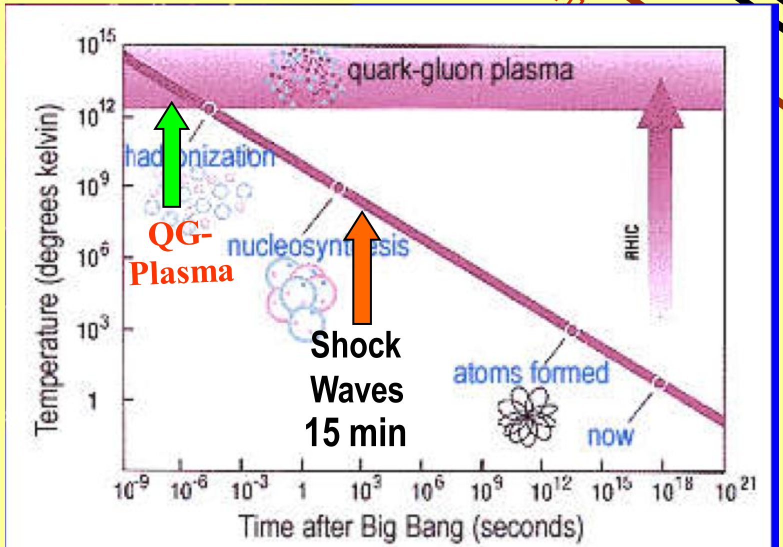
LHC

RHIC

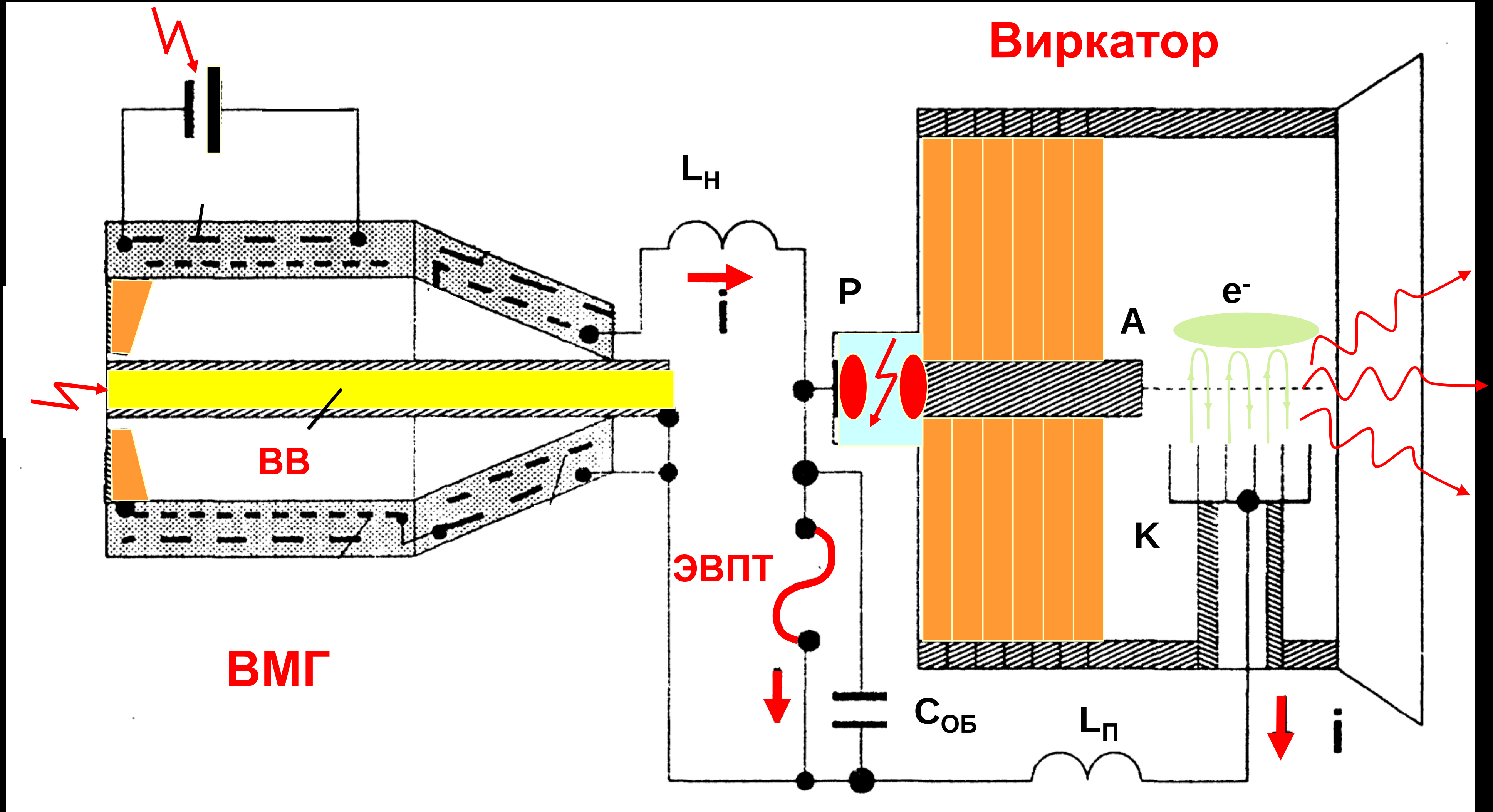
SPS (

ПротоХИМИЯ

Эра ХИМИИ

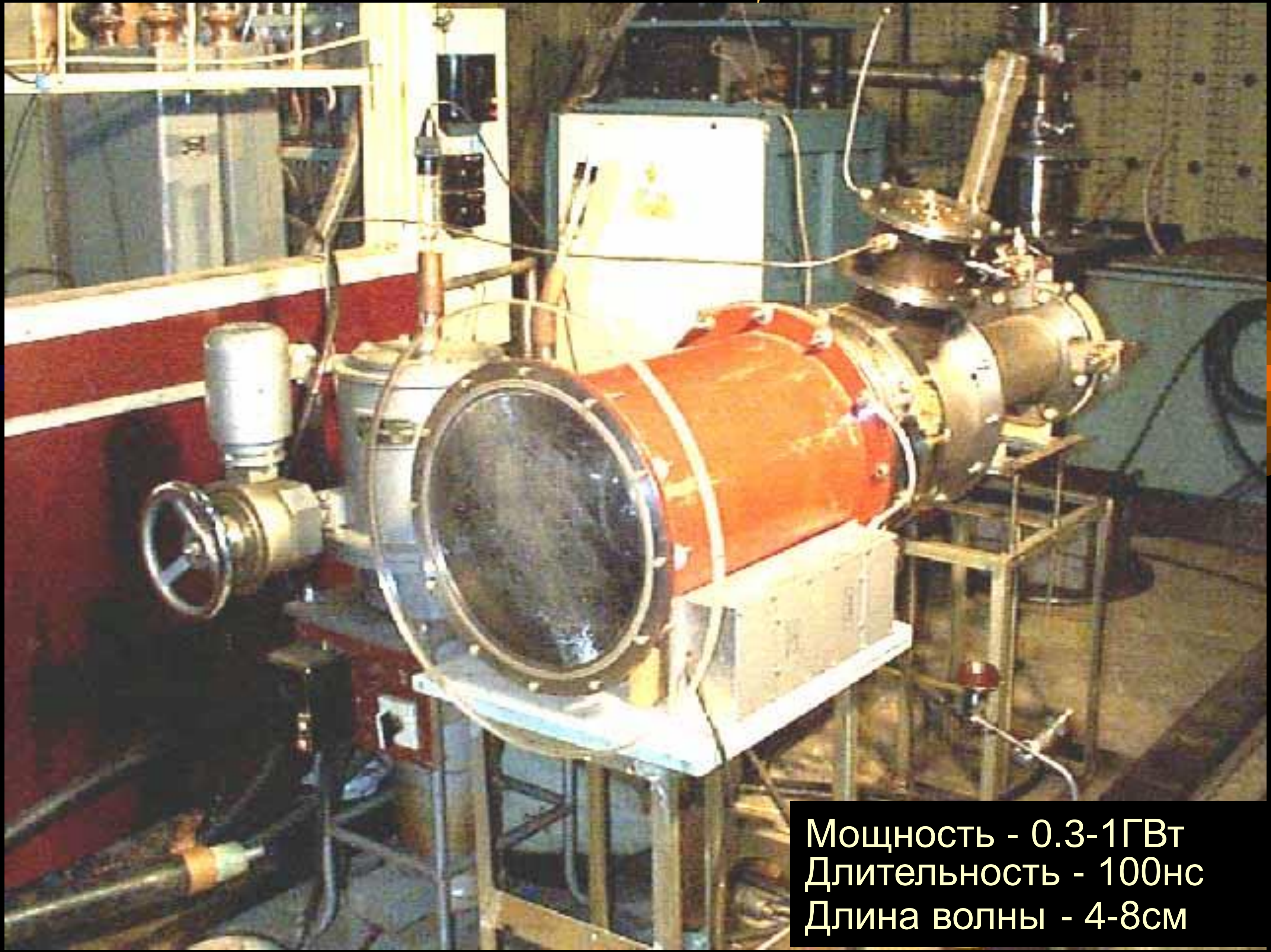


ВЗРЫВНОЙ СВЧ-ИЗЛУЧАТЕЛЬ



λ ~ 3-10 см, $P_и$ ~ 1 ГВт, τ ~ 0,5 мкм

МОЩНЫЙ ВИРКАТОР

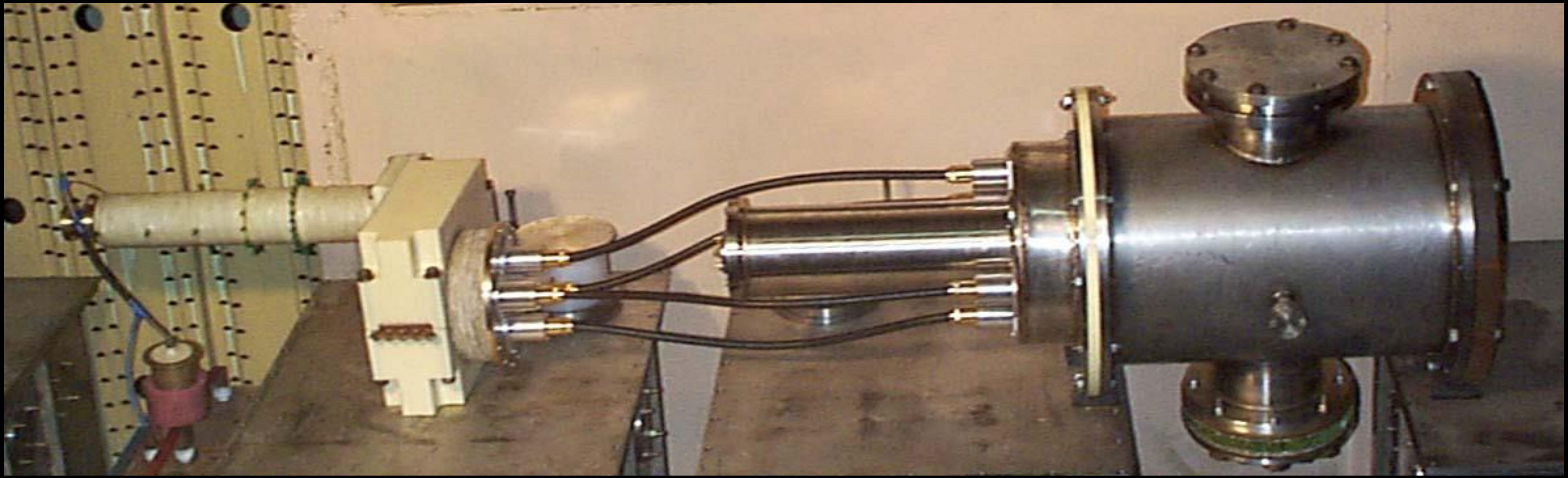


Мощность - 0.3-1ГВт
Длительность - 100нс
Длина волны - 4-8см

ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

- масса ВВ 0,1…1,0 кг
- энергия 5…1000 кДж
- мощность 8…12 ГВт

АВТОНОМНЫЙ ВЗРЫВНОЙ ГЕНЕРАТОР МОЩНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ



- пиковая мощность ~ 1 ГВт
- длительн. имп. 0,1-0,5 мкс
- частота изл. 3…10 ГГц
- длина 1,5 м
- диаметр 0,4 м

Спасибо!