

Экспериментальные исследования по физике высокой плотности энергии в веществе на тяжелоионных ускорителях



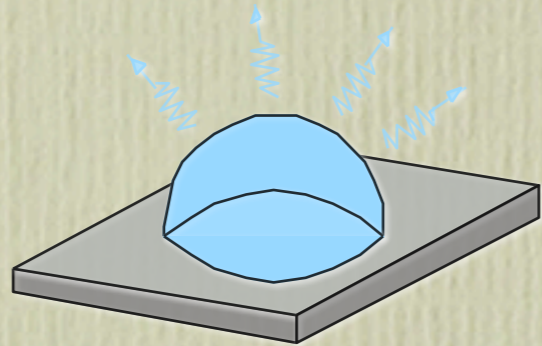
FAIR: Facility for Antiproton and Ion Research

Дмитрий Варенцов
GSI Helmholtzzentrum
г. Дармштадт, Германия

- мотивация исследований
- экспериментальные подходы
- разработка методов диагностики пучка и мишени
- (почти) никакой теории, только эксперименты

Экстремальные состояния вещества

Состояния вещества с высокой концентрацией энергии:
экзотически высокие давления и температуры



$T \sim 2,000 - 500,000 \text{ K}$

$\rho \sim 0.1 - 100 \text{ г/см}^3$

$P \sim \text{кбар, Мбар, ...}$

HIGH ENERGY DENSITY MATTER

WARM DENSE MATTER

Исследования вещества в экстремальных состояниях – фундаментальное и прикладное значение

- **Теплофизика, физика плазмы, атомная физика**
фундаментальные свойства вещества в неисследованных областях фазовой диаграммы: УрС, фазовые переходы и экзотические состояния, транспортные и оптические свойства, эффекты сильного межчастичного взаимодействия ...
- **Астрофизика и планетология**
коричневые карлики, пульсары, взрывы сверхновых, строение планет-гигантов (> 200), Земли и Солнца
- **Энергетика и УТС**
устройства управляемого инерциального термоядерного синтеза, мобильные ядерные реакторы, МГД генераторы, безопасность ядерной энергетики
- **Технологии**
материаловедение, импульсные и нано-технологии, динамический синтез новых материалов, высокотемпературные технологии, космические технологии
- **Спец. приложения и оборонные применения**

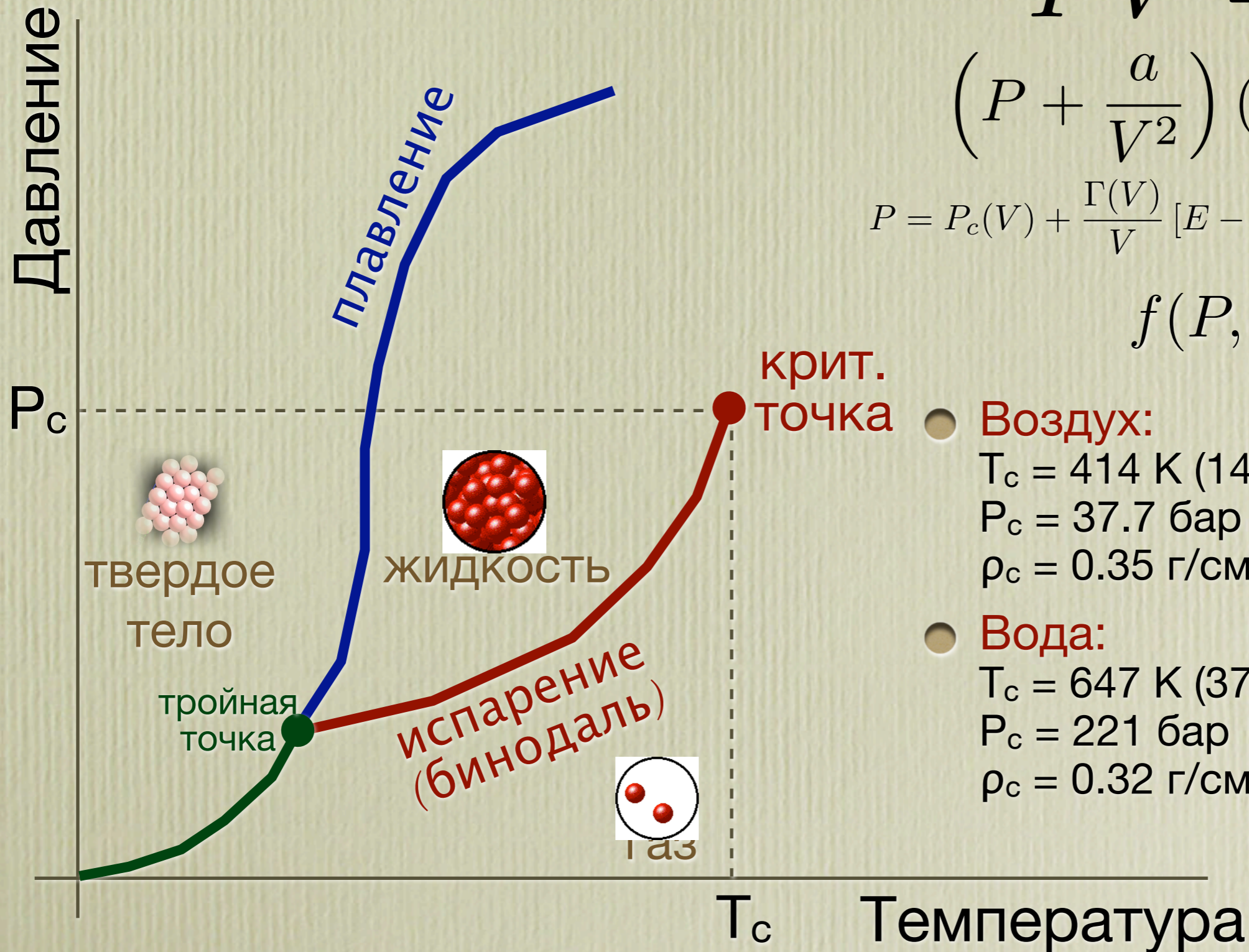
Уравнение состояния, фазовые переходы и крит. точка

$$PV = nRT$$

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = nRT$$

$$P = P_c(V) + \frac{\Gamma(V)}{V} [E - E_c(V)], \quad \Gamma = V \left(\frac{\partial P}{\partial E}\right)_V$$

$$f(P, V, T) = 0$$

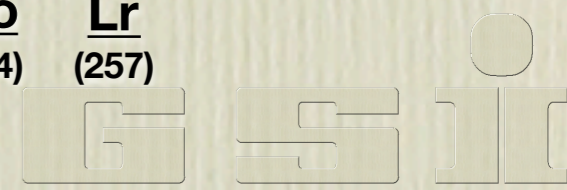


- **Воздух:**
 $T_c = 414 \text{ K (141 } ^\circ\text{C)}$
 $P_c = 37.7 \text{ бар}$
 $\rho_c = 0.35 \text{ г/см}^3$
- **Вода:**
 $T_c = 647 \text{ K (374 } ^\circ\text{C)}$
 $P_c = 221 \text{ бар}$
 $\rho_c = 0.32 \text{ г/см}^3$

Металлы занимают до 80% таблицы Менделеева, но положение большинства крит. точек неизвестно

1 H 1.008																2 He 4.003	
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.47	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 190.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.5	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)	
87 Fr (223)	88 Ra (226)	104 Rf (257)	105 Db (260)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 ---	111 ---	112 ---	114 ---	116 ---	118 ---				

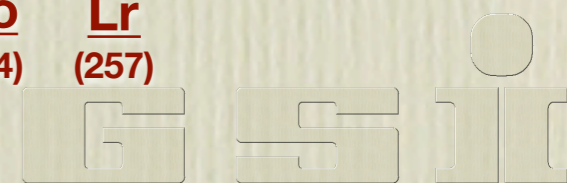
58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (147)	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175.0
90 Th 232.0	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (249)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (254)	103 Lr (257)



Металлы занимают до 80% таблицы Менделеева, но положение большинства крит. точек неизвестно

1 H 1.008																	2 He 4.003
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.47	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 190.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.5	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)	
87 Fr (223)	88 Ra (226)	104 Rf (257)	105 Db (260)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 ---	111 ---	112 ---	114 ---	116 ---	118 ---				

58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (147)	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175.0
90 Th 232.0	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (249)	99 Es (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (254)	103 Lr (257)



Критические точки металлов

	<i>Pressure</i> P_c kbar	<i>Temperature</i> T_c K	<i>Density</i> ρ_c g/cm ³	<i>Entropy</i> S_c J/g/K
<i>Be</i>	2.87	8877	0.398	13.18
<i>Mg</i>	2.46	3957	0.553	3.789
<i>Na</i>	0.47	2473	0.240	3.281
<i>Zr</i>	9.88	14860	1.634	1.693
<i>Hf</i>	11.74	15810	3.610	0.885
<i>V</i>	9.19	9915	1.631	2.718
<i>Nb</i>	11.06	19180	1.701	2.023
<i>Ta</i>	9.93	13530	4.263	0.923
<i>Cr</i>	9.91	7797	2.660	2.332
<i>Mo</i>	7.59	10180	3.690	1.520
<i>W</i>	11.80	15750	4.854	0.837
<i>Fe</i>	11.31	8787	2.183	2.496
<i>Co</i>	5.55	9157	1.890	2.458
<i>Ni</i>	10.42	7547	2.092	2.518
<i>Zn</i>	3.28	3079	2.381	1.468
<i>Cd</i>	0.87	2510	2.283	0.840
<i>Ag</i>	10.64	7053	3.279	1.118
<i>Au</i>	6.14	8515	6.061	0.624
<i>Re</i>	15.91	18710	6.024	0.824
<i>Ir</i>	13.40	16220	6.061	0.780
<i>Pt</i>	6.21	11430	5.236	0.807
<i>Sn</i>	2.39	8175	1.592	1.123
<i>Bi(VI)</i>	2.25	4869	3.937	0.529
<i>U</i>	7.70	9637	4.505	0.727

- различные теор. оценки положения критических точек могут отлучаться друг от друга по температуре и давлению на 100 – 200 %
- высокие температуры ($T_c \sim \text{эВ}$) и давления ($P_c \sim \text{кбар}$) – очень трудно получить в лаборатории
- т.к. T_c близки к потенциалам ионизации, испарение металлов происходит сразу в состоянии неидеальной (и возможно - вырожденной) плазмы, а не в газовую фазу

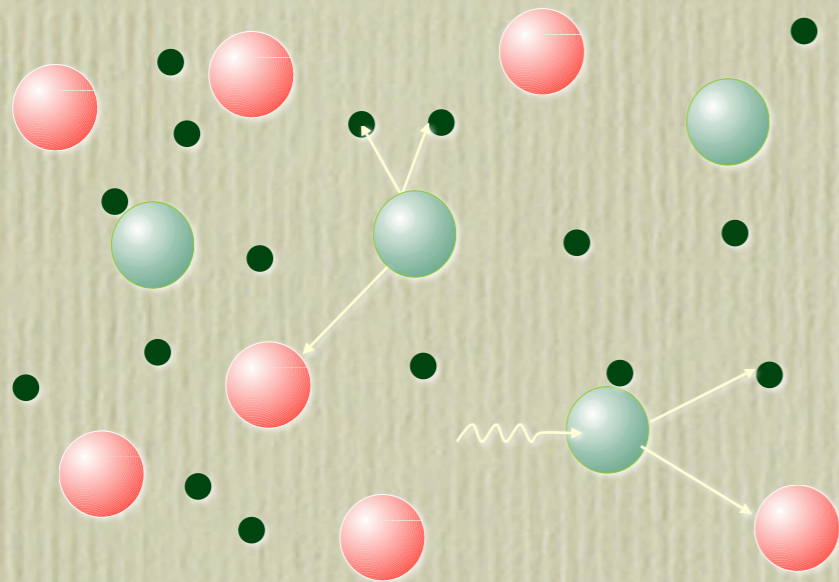
Неидеальность и вырождение плазмы

$$\Gamma = \frac{E_c}{E_k} \quad \text{- параметр неидеальности}$$

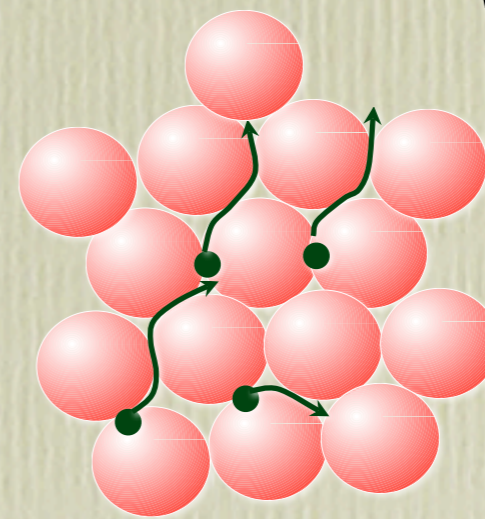
$$E_c = Z_i Z_j e^2 n^{\frac{1}{3}}$$

$$n_e \lambda_e^3 \quad \text{- степень вырождения}$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{h^2}{2\pi m k T}}$$



$$n_e \lambda_e^3 \ll 1 \quad E_k \sim kT$$



$$n_e \lambda_e^3 > 1 \quad E_k \sim \frac{h^2 n^{\frac{2}{3}}}{2m}$$

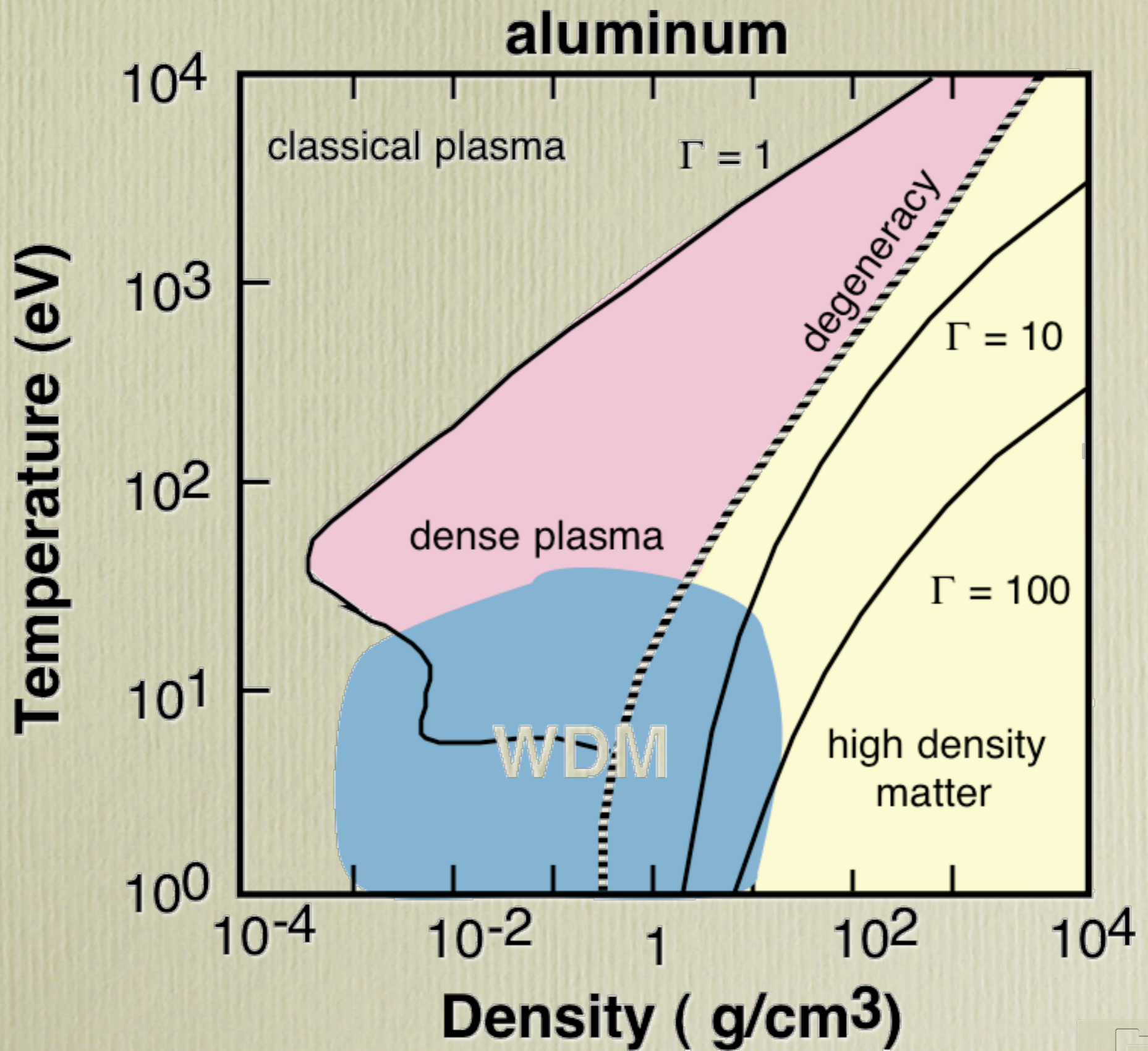
Высокие температуры, низкие плотности: $\Gamma \ll 1 \quad n_e \lambda_e^3 \ll 1 \Rightarrow$ идеальный газ

Высокие плотности: $n_e \lambda_e^3 \gg 1 \Rightarrow$ Томас-Ферми $\Gamma \ll 1 \Rightarrow$ ид. электр. Ферми-газ

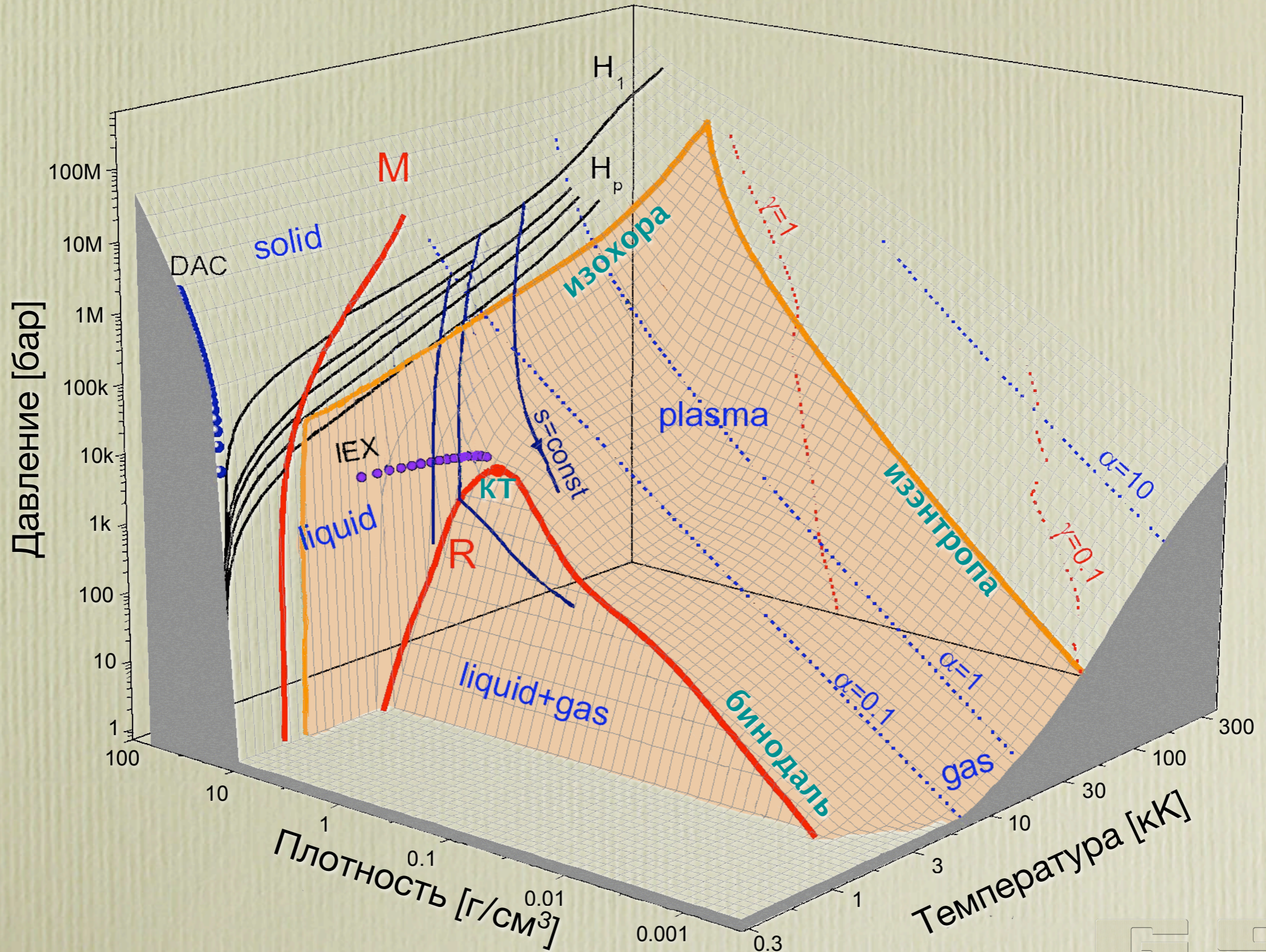
$\Gamma > 1 \Rightarrow$ Неидеальная

$n_e \lambda_e^3 > 1$ вырожденная или $n_e \lambda_e^3 \ll 1$ не вырожденная

Неидеальность и вырождение в состояниях с высокой концентрацией энергии



Урс свинца при высоких давлениях и температурах



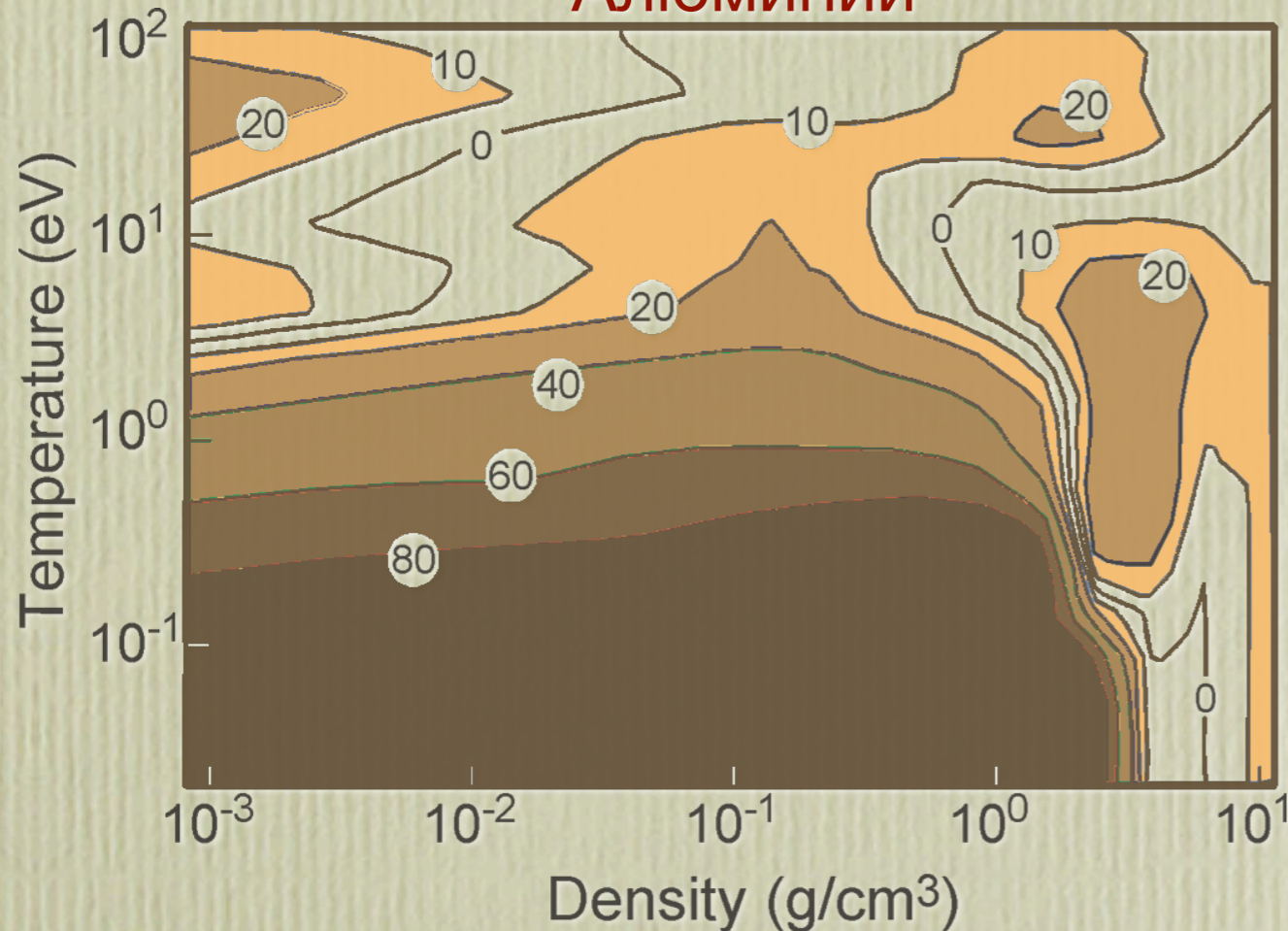
Методы изучения состояний вещества с высокой концентрацией энергии

- **Статические методы (алмазные наковальни и др.)**
изотермы $P(V, T=\text{const} \sim T_k)$, давление на кривой плавления, скачки объемов и энтальпии при плавлении, энергия связи, теплоемкость, крист. структура; **термпрочн. свойства, $P < 5$ Мбар**
- **Ударно-волновое сжатие**
ударные адиабаты сплошных и пористых образцов $H_1, H_m, E(P, V)$, сверхвысокие давления; **предельная плотность, температура**
- **Изэнтропическое расширение из ударносжатого состояния**
адиабаты разгрузки в области крит. точки и двухфазной области, кинетика кипения, $P, U, (T), s=\text{const}$; **сложность и точность данных**
- **Квазиадиабатическое сжатие / кумуляция**
адиабатическая сжимаемость при сверхвысоких плотностях, динамические структурные переходы, переход диэлектрик-металл, и др.
- **Электровзрыв проводников**
изобарический/изохор. нагрев, H, E, T, V, P, σ ; **предельное давление, неустойчивости в двухфазн. области, однородность по радиусу**
- **Квази-изохорический объемный нагрев мощными потоками высокоэнергетичных фотонов, электронов, ионов**

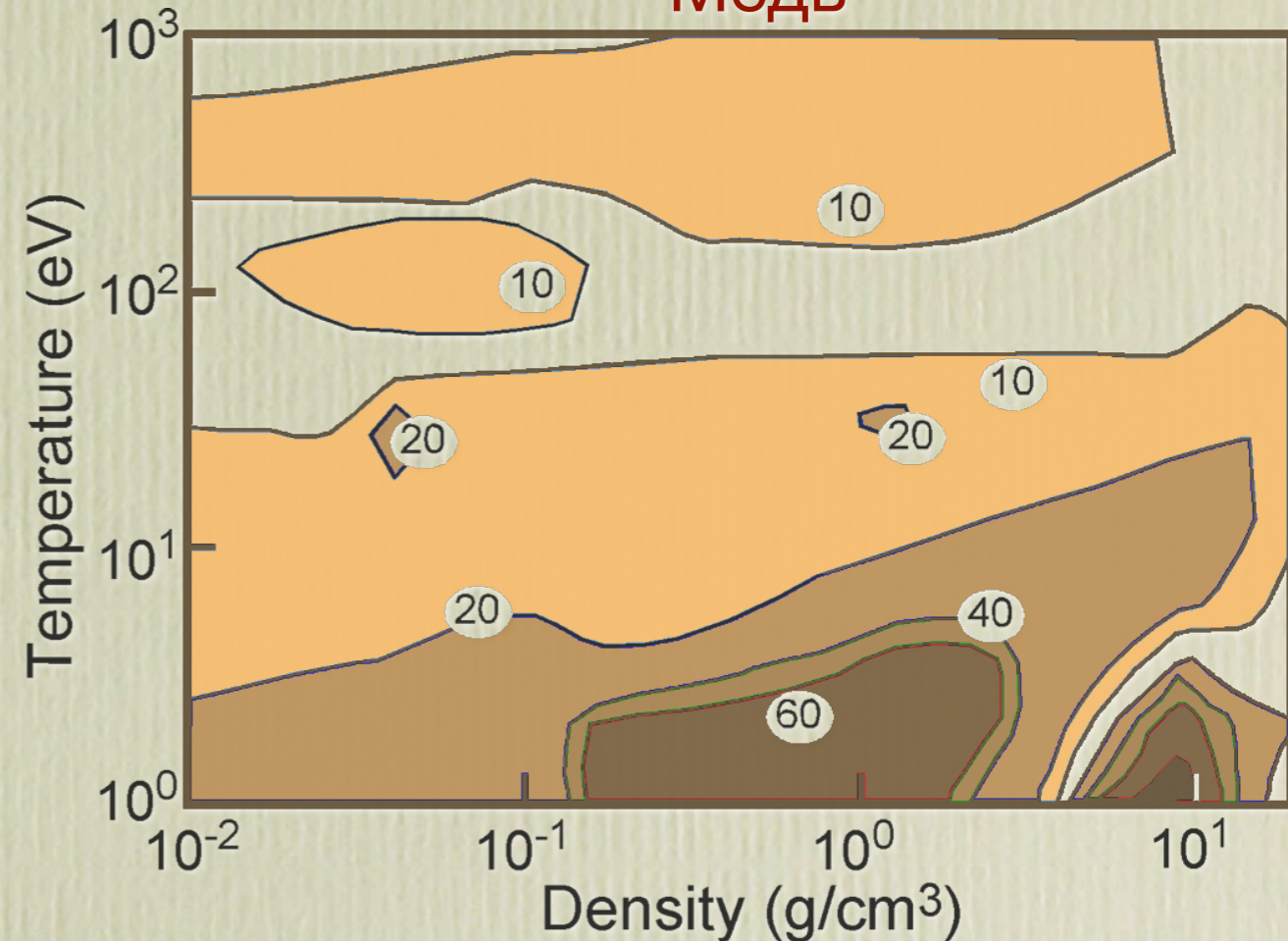
Сравнение теоретических моделей УрС

Контурные % различия по давлению между двумя наиболее продвинутыми и популярными широкодиапазонными моделями УрС

Алюминий



Медь



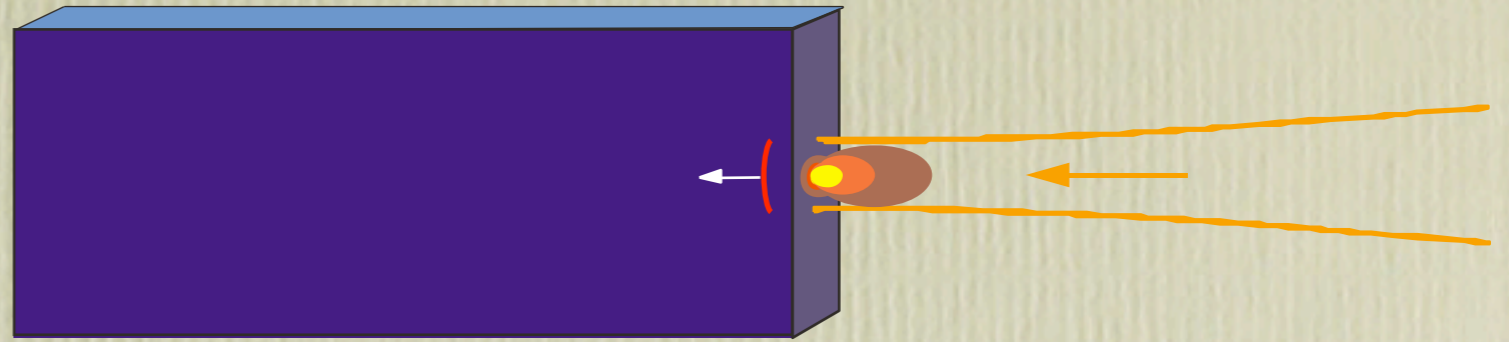
- различия между теор. моделями на 80% и более вполне типичны
- модели хорошо сходятся там, где есть экспериментальные данные
- особо остро необходимы данные по плотной, неидеальной плазме при $\rho = (0.01 - 1) \cdot \rho_0$, $T = 0.3 - 3$ эВ

Проблемы экспериментальных исследований свойств вещества в экстремальных состояниях

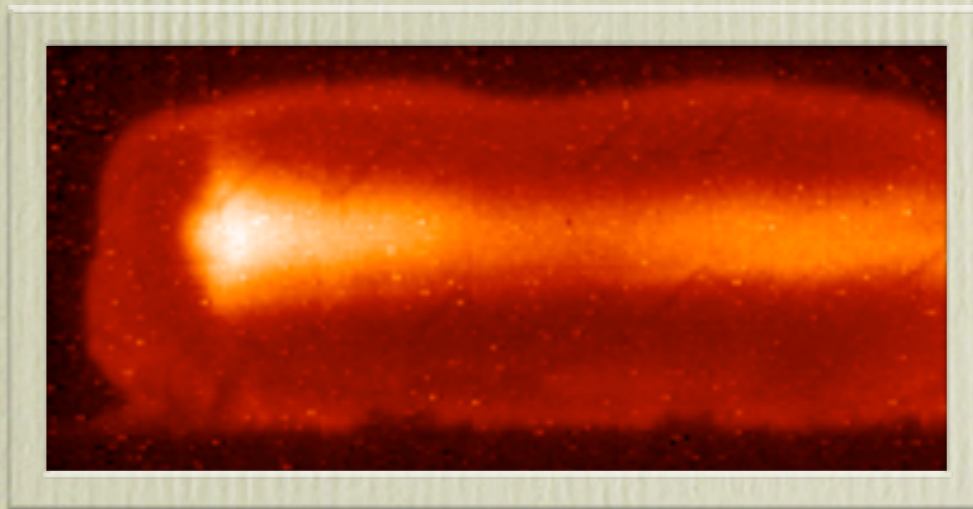
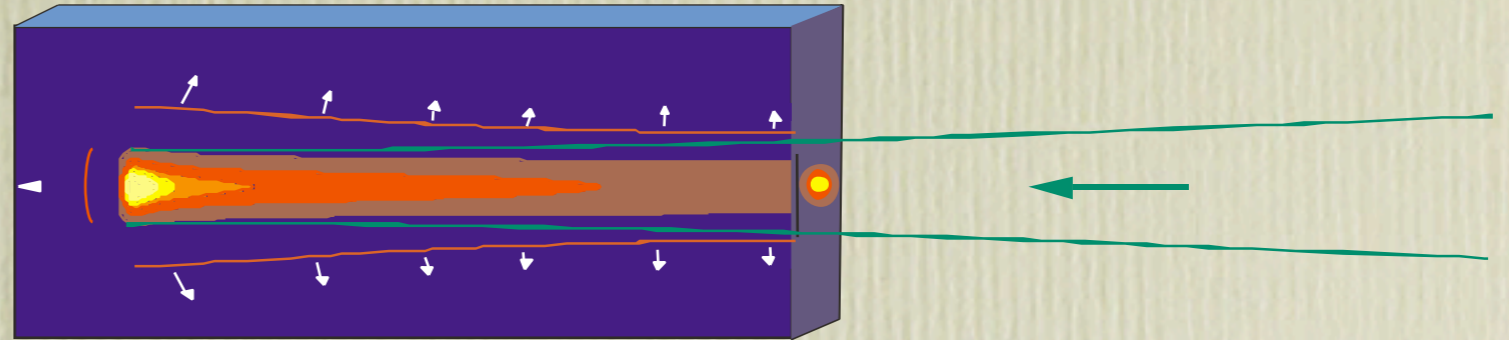
- имеющаяся на данный момент экспериментальная информация об УрС и транспортных свойствах вещества в экстремальных состояниях хотя и охватывает много порядков по давлению и температуре, покрывает только ограниченные области фазовой диаграммы, имеет разнородный характер, и, зачастую, неполна в термодинамическом смысле
- особо остро необходимы данные о свойствах элементов и материалов в районе кривой кипения, критической точки, двухфазной области жидкость-пар и плотной неидеальной плазмы: $\rho \sim 10^{-2} - 1 \cdot \rho_0$, $T \sim 0.3 - 3$ эВ

Взаимодействие с плотным веществом: релятивистские ионные пучки и мощные лазеры

Мощные лазеры:
энерговклад на поверхности
=> ударная волна, градиенты



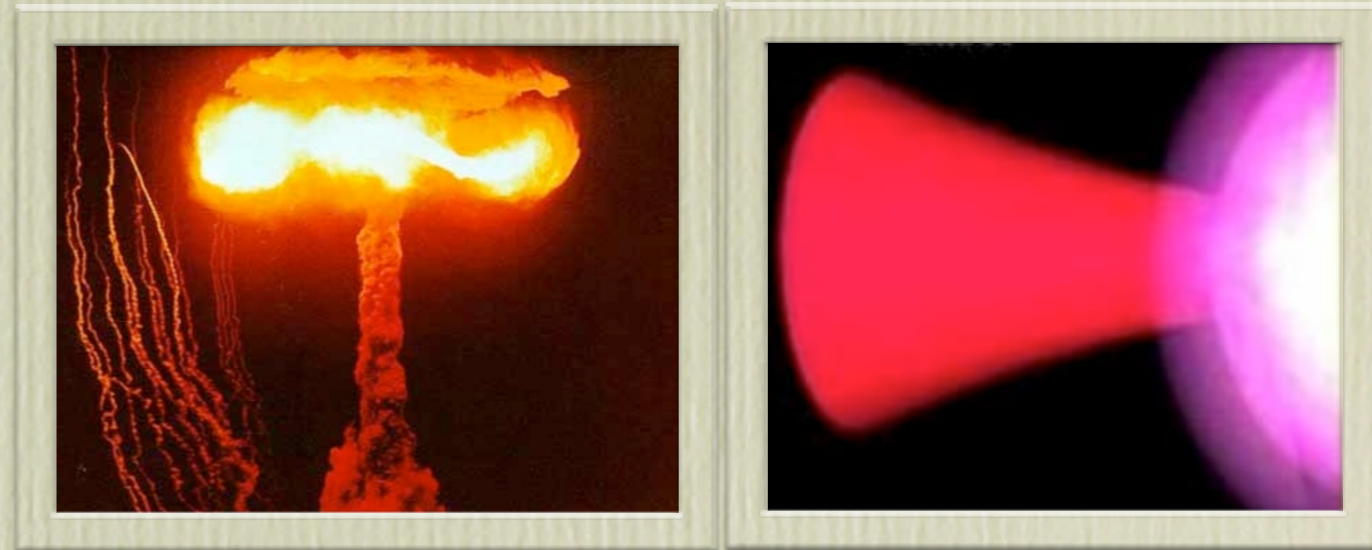
Мощный пучок быстрых ионов:
энерговклад в объеме образца
=> квази-изохорический нагрев



Мощный ионный пучок – великолепный инструмент для генерации экстремальных состояний в веществе

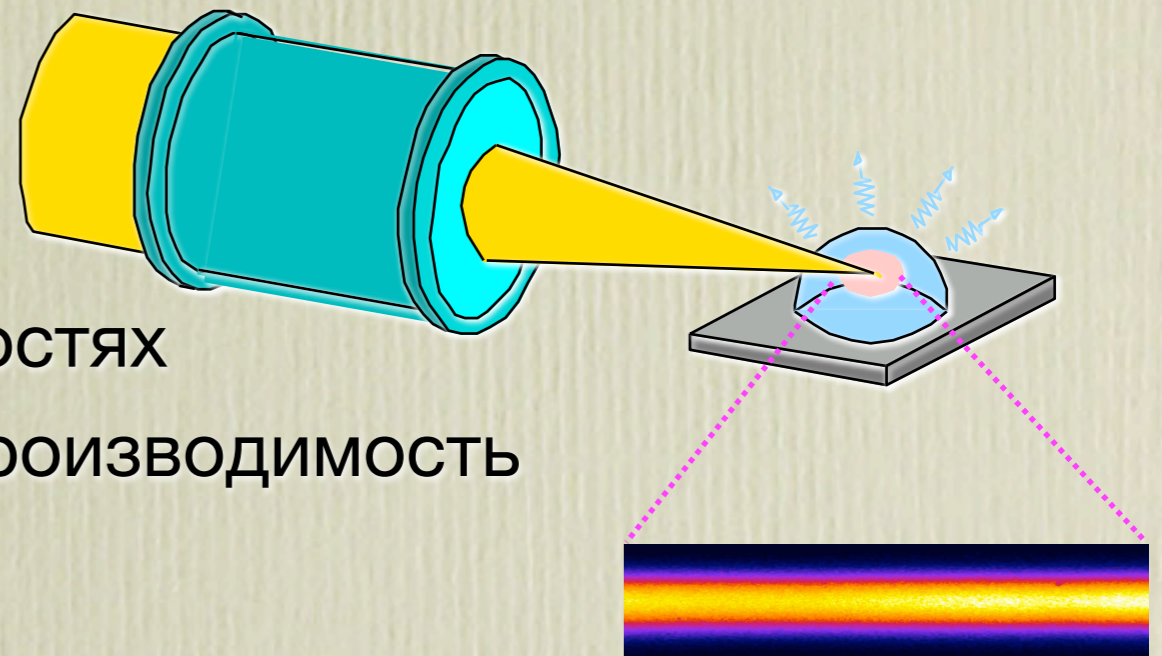
Традиционные генераторы:

- размеры образца / градиенты
- повторяемость / статистика
- условия для диагностики
- стоимость эксперимента

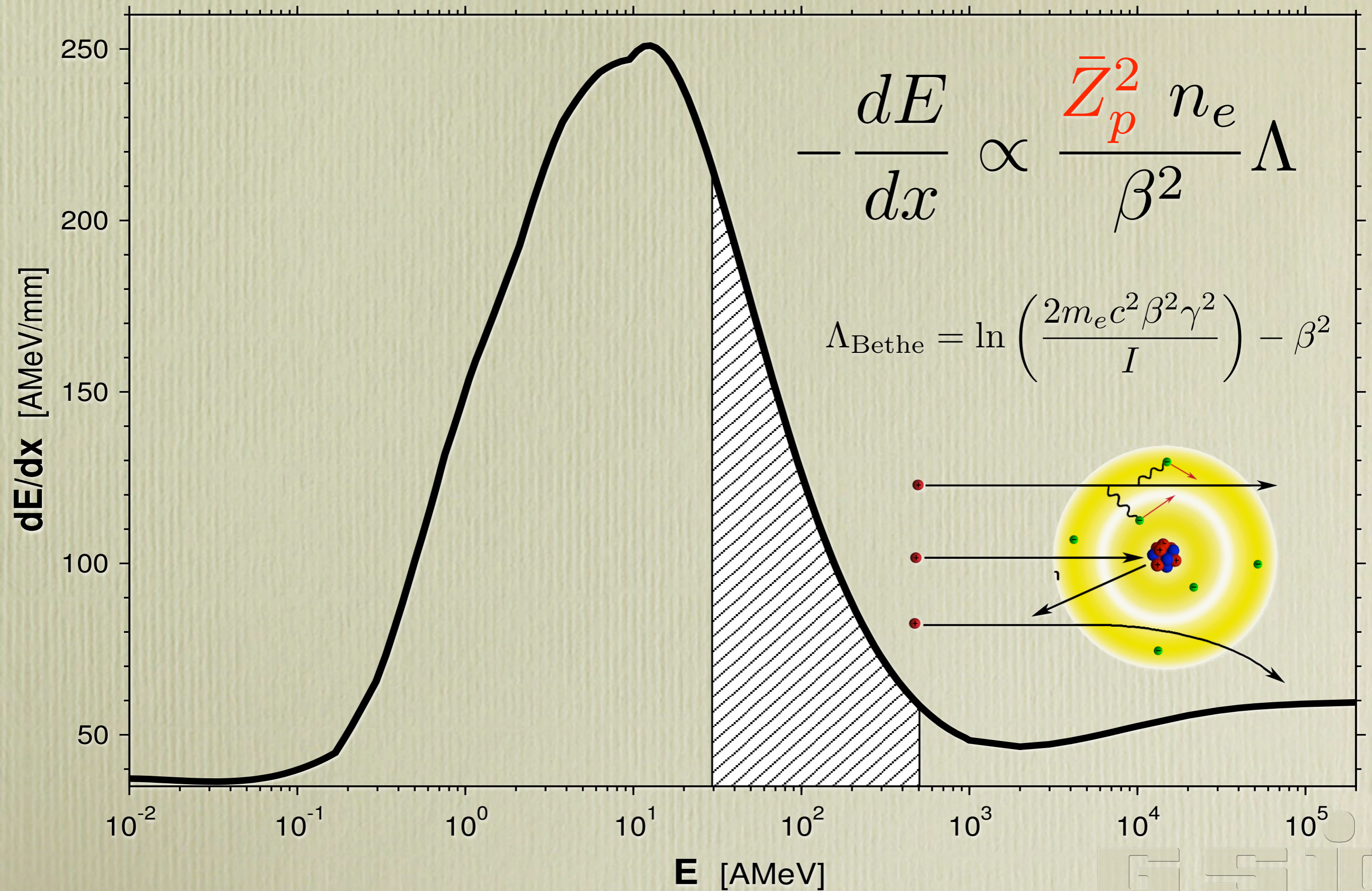


Мощный пучок быстрых тяжелых ионов:

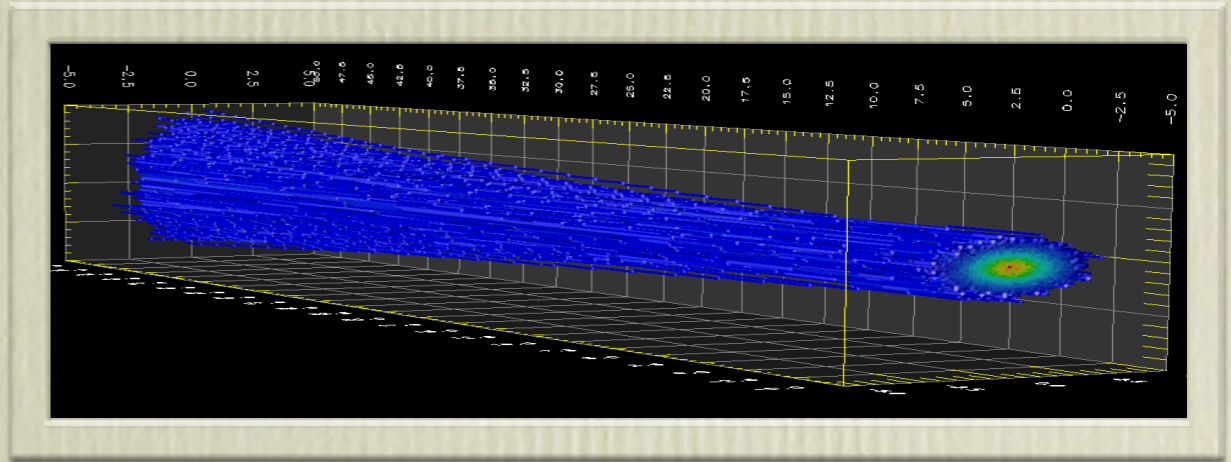
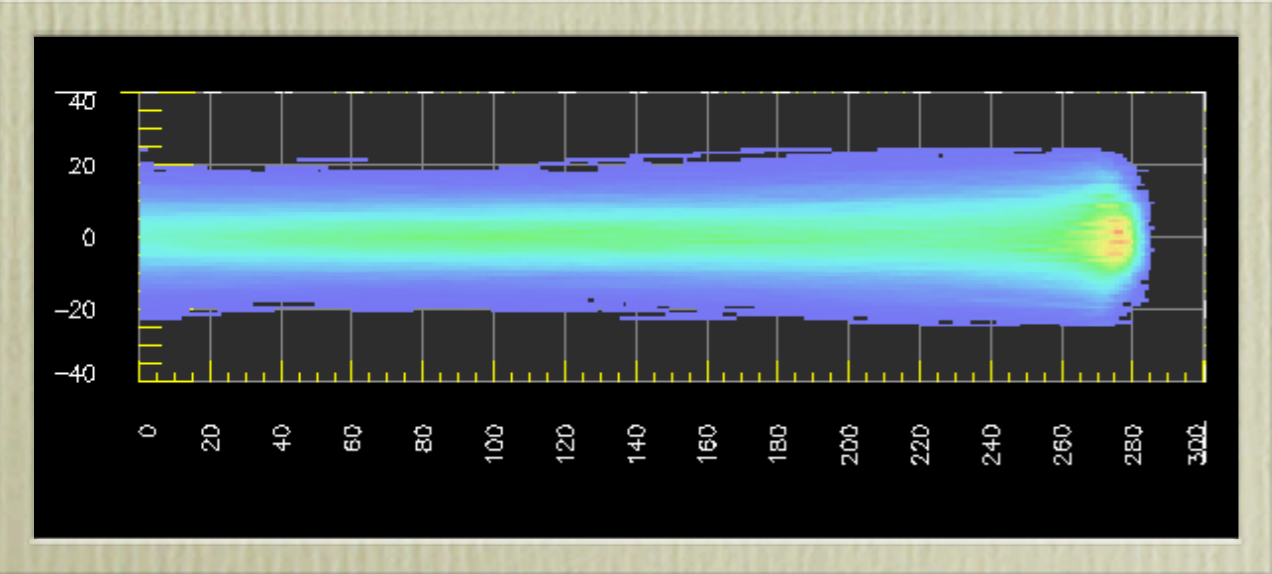
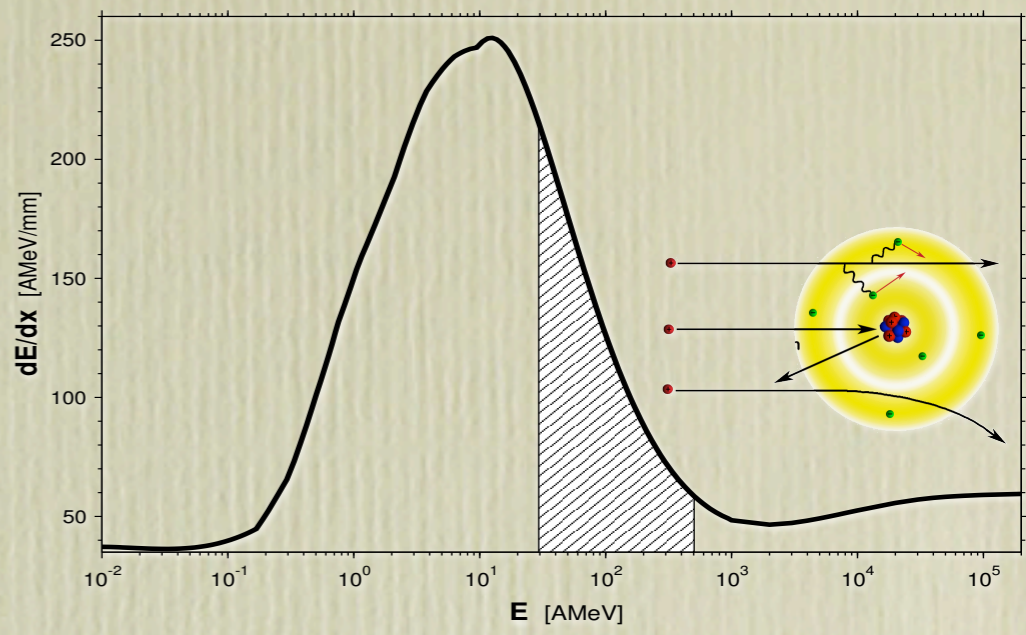
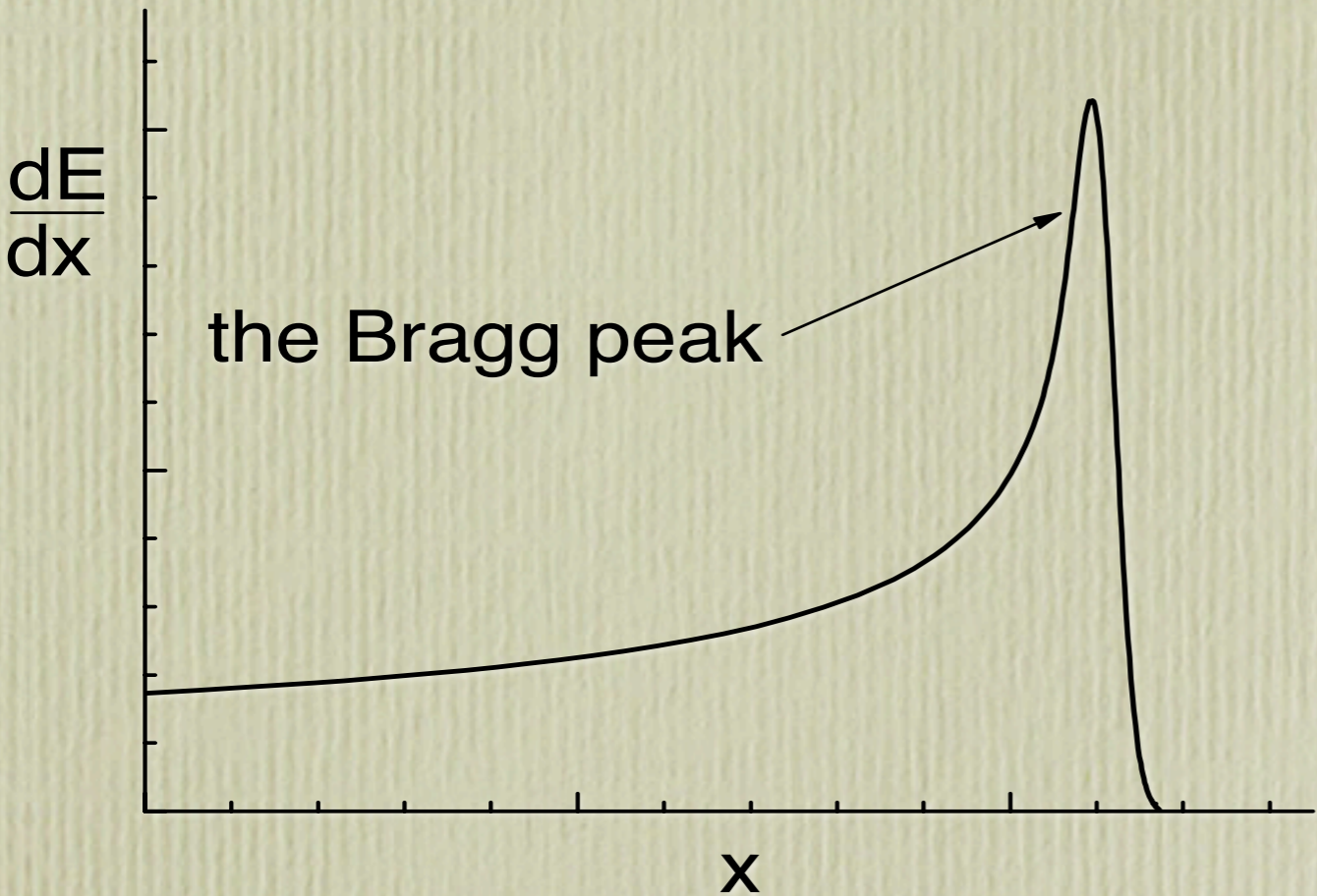
- большой объем образца (мм^3)
- хорошая однородность по объему
- высокая энтропия при больших плотностях
- рекордная частота повторения и воспроизводимость
- произвольный материал мишени



Торможение ускоренных ионов в веществе



Удельный энерговклад пучка тяжелых ионов



$$E_s \propto \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \frac{N}{r_b^2} \text{ кДж/г}$$

Ускорительные центры, проводящие исследования экстремальных состояний с тяжелоионными пучками



GSI, Darmstadt



ИТЭФ, Москва



HIFS-VNL, Berkeley

FAIR: Facility for Antiproton and Ion Research

● ~1.2 миллиарда €

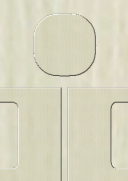
● 14+ стран-участниц



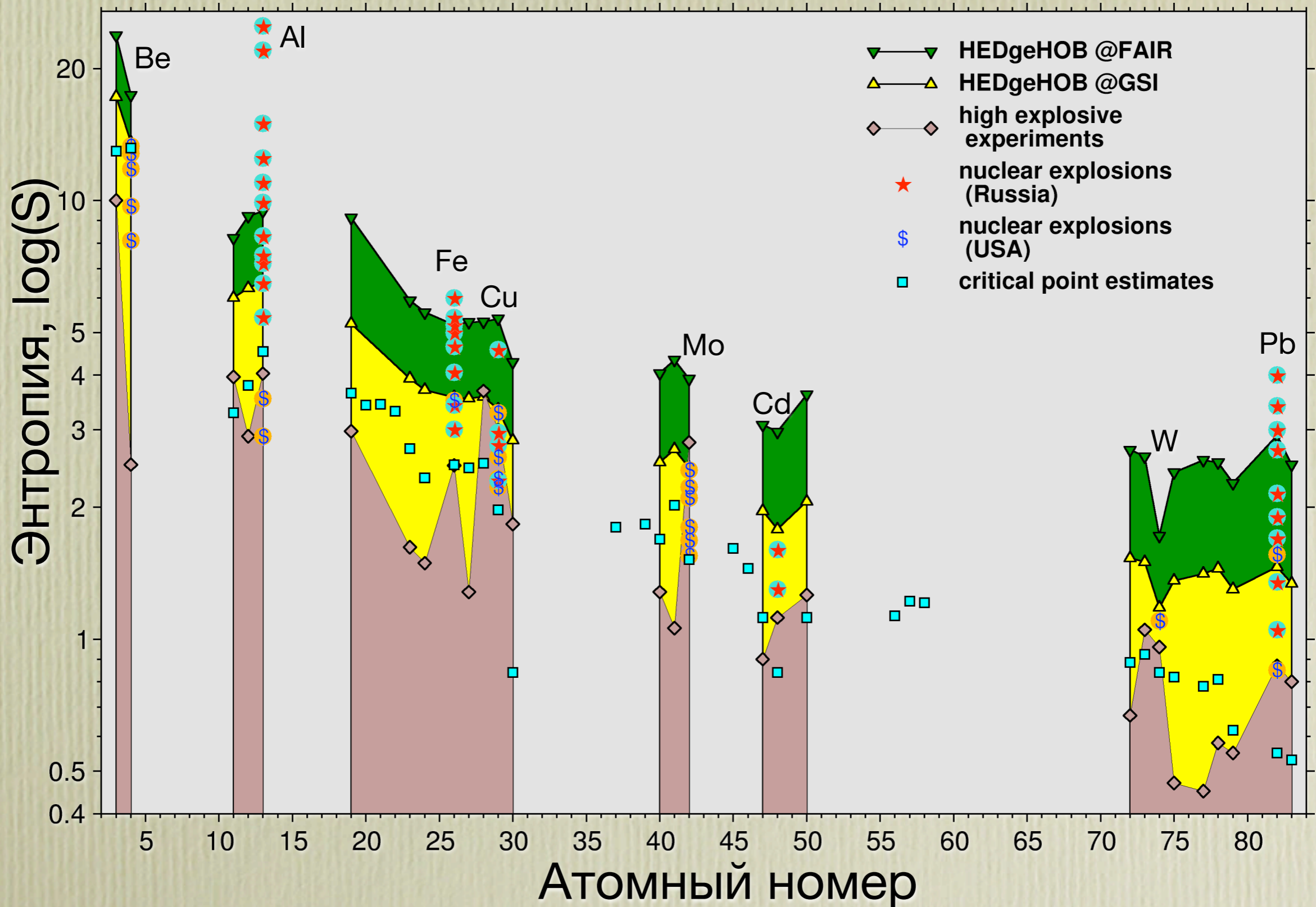
● **2007**
● начало
строительства

● **2012**
● первые
эксперименты

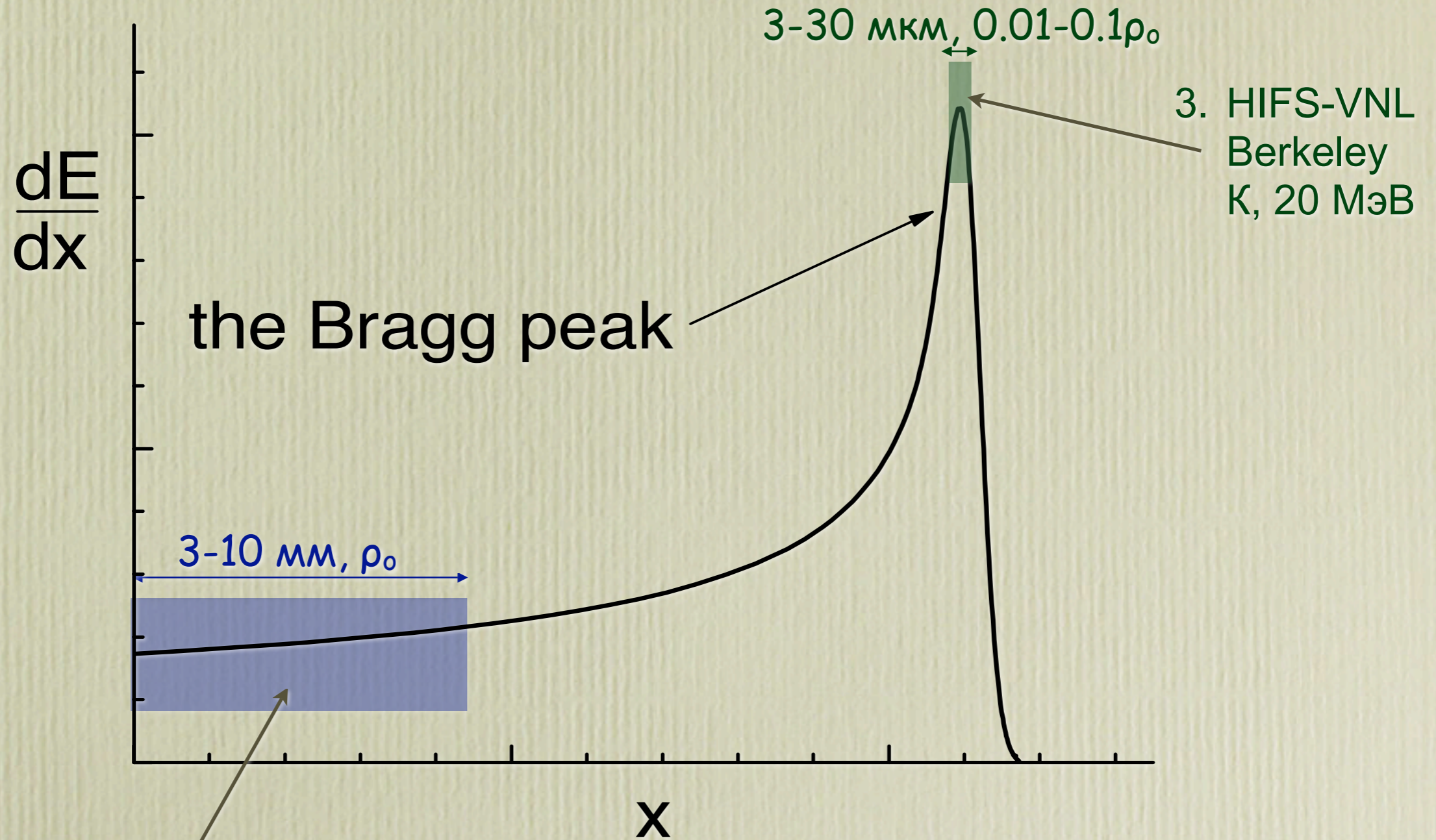
● **2015**
● окончание
строительства



Максимальная достигнутая энтропия металлов: сравнение ионных пучков с другими драйверами



Варианты использования специфических свойств энерговклада ионного пучка



2. GSI-Darmstadt,
ИТЭФ-Москва,
FAIR-Darmstadt
U, 10-100 ГэВ

1. Использовать брэгговский
пик для генерации
ударной волны

Требования к ускорителю и пучку для физики ВВКЭ

$$E_s \propto \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \frac{N}{r_b^2}$$

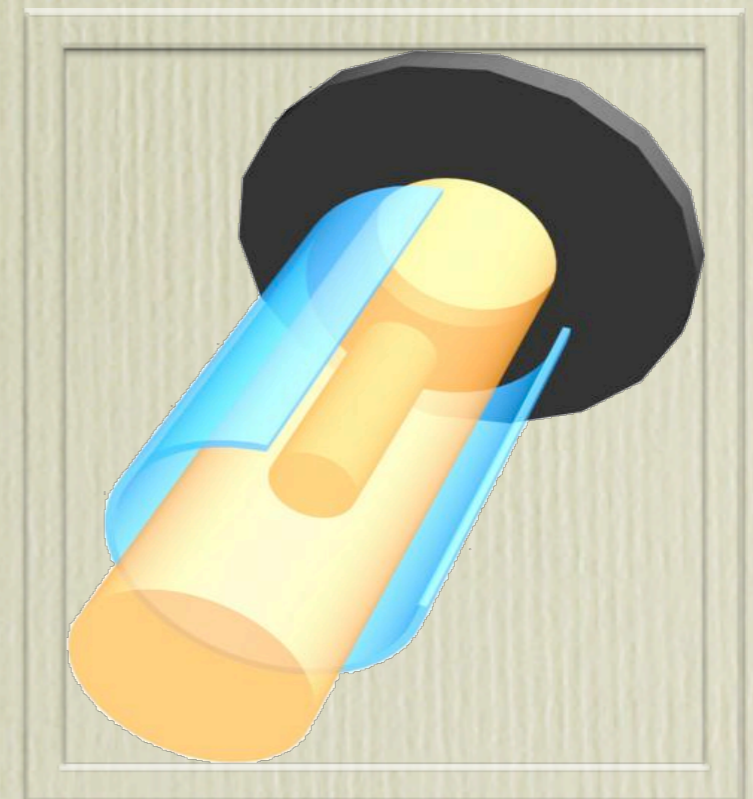
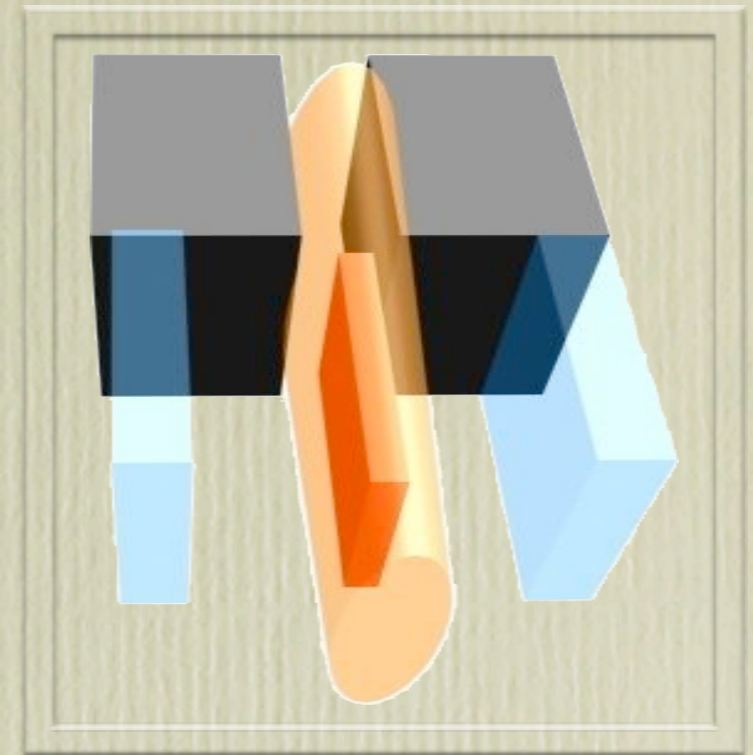
- **тяжелые** ионы ($dE/dx \sim Z^2$), $Z_U = 92$
- энергия 200 - 1500 МэВ /нук (50 - 350 ГэВ)
- максимальная **интенсивность пучка** (кол-во ионов в одном банче) $N \sim 10^9 - 10^{12}$
- минимальная **длительность банча** - компрессия
- минимальный **размер фокального пятна** на мишени r_b
 - => уменьшение эмиттанса - электронное охлаждение
 - => спец. система острой финальной фокусировки

HIHEX - квази-изохорический нагрев и изэнтропический разлет в одномерной геометрии

HIHEX

Heavy Ion Heating and Expansion

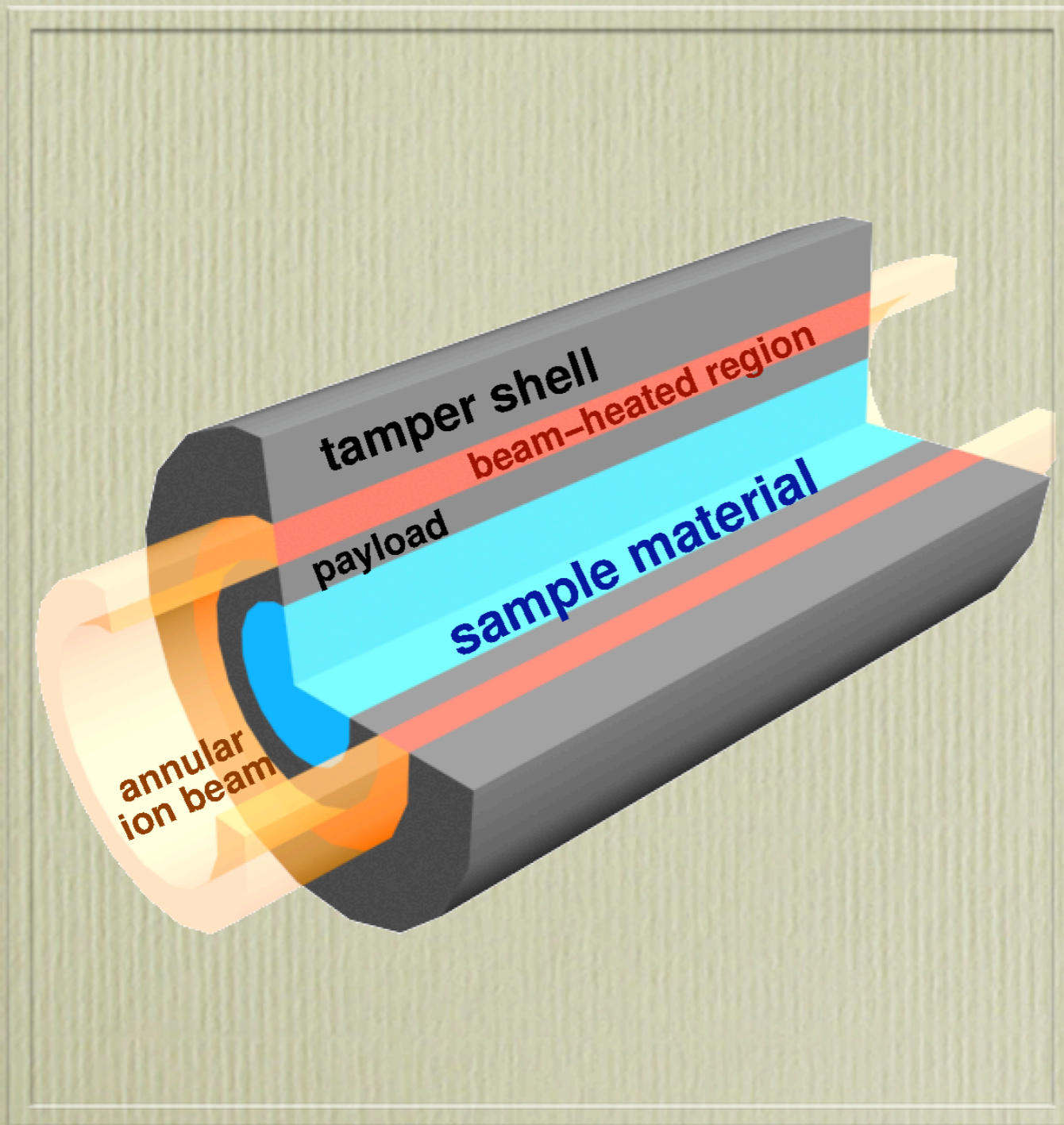
- однородный и квази-изохорический нагрев исходно твердой мишени большого объема
- изоэнтропический разлет в одномерной геометрии, ограниченный контейнером
- **Различные состояния вещества с высокой плотностью энергии:**
УРС и транспортные свойства неидеальной плазмы, области WDM и крит. точек различных веществ



LAPLAS: квази-адиабатическое сжатие в цилиндрической геометрии

LAPLAS

Laboratory Planetary Sciences



- полый пучок нагревает массивную внешнюю оболочку
- цилиндрическая кумуляция образца и изоэнтропическая компрессия
- Мегабарные давления при сравительно низких температурах сверх-плотные состояния, напр. проблема металлизации водорода, свойства ядер Юпитера и Сатурна

GSI: тяжелоионный синхротрон SIS-18

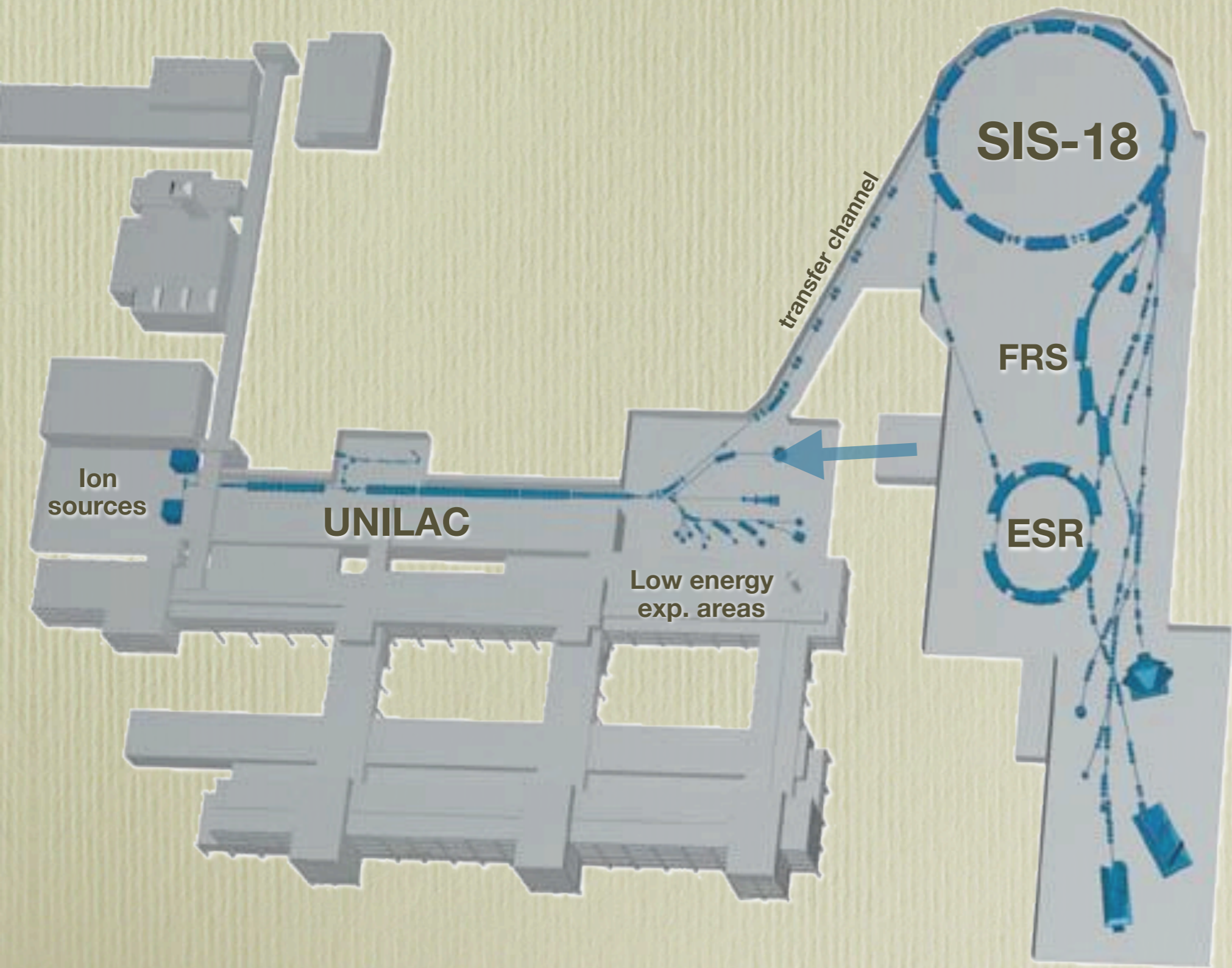


- все ионы, от протонов до урана, макс. 1 - 4.5 ГэВ/нук (18 Тм)
- $^{238}\text{U}^{73+}$, 1 ГэВ/нук, до 10^{10} ионов, ~ 100 нс банч
- $^{238}\text{U}^{28+}$, 198 МэВ/нук, до 10^{11} ионов

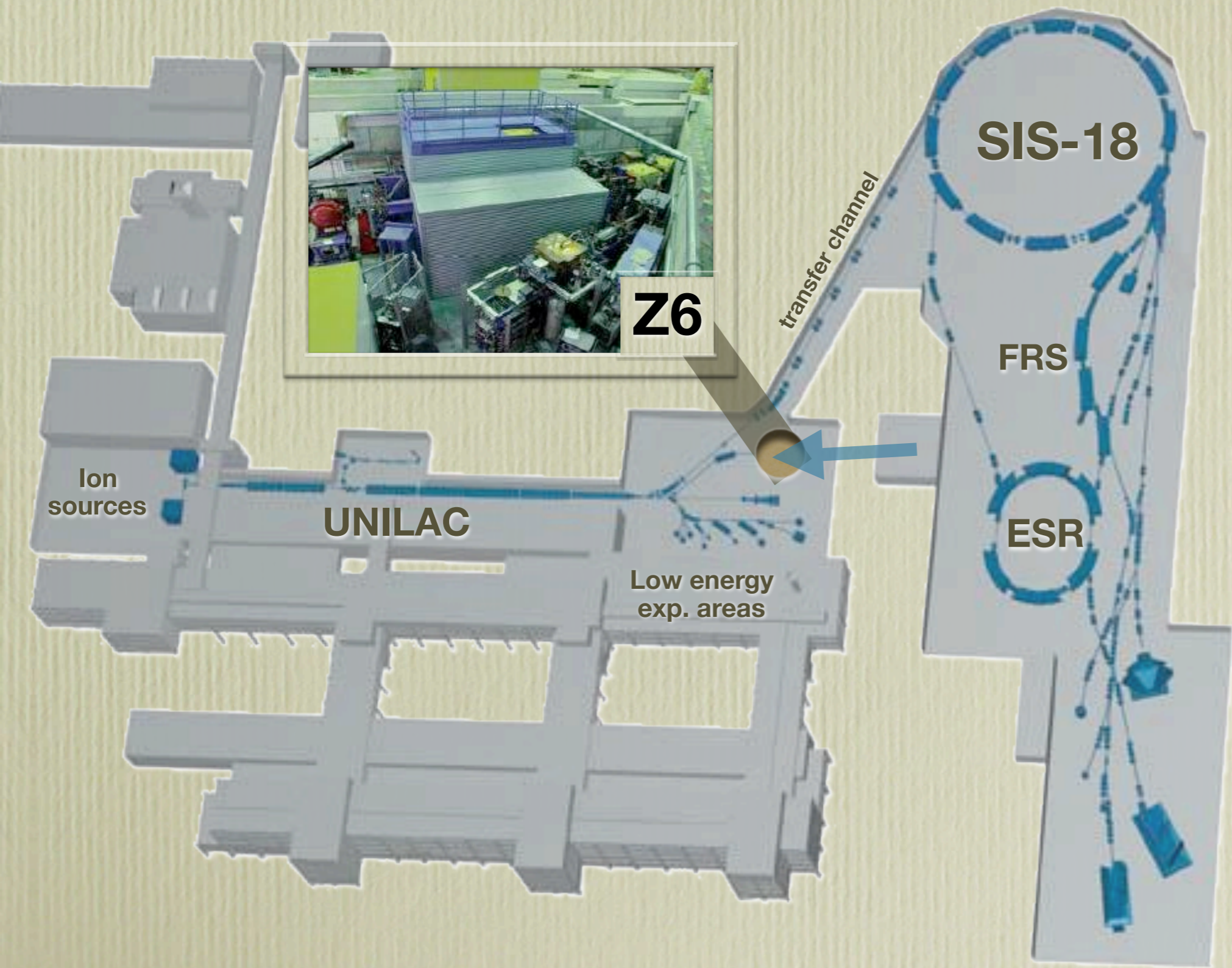
GSI: тяжелоионный синхротрон SIS-18



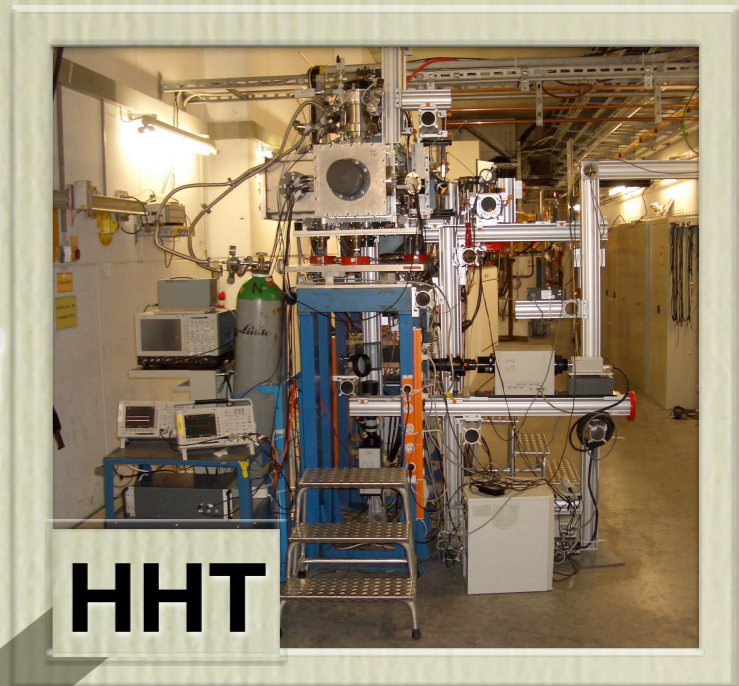
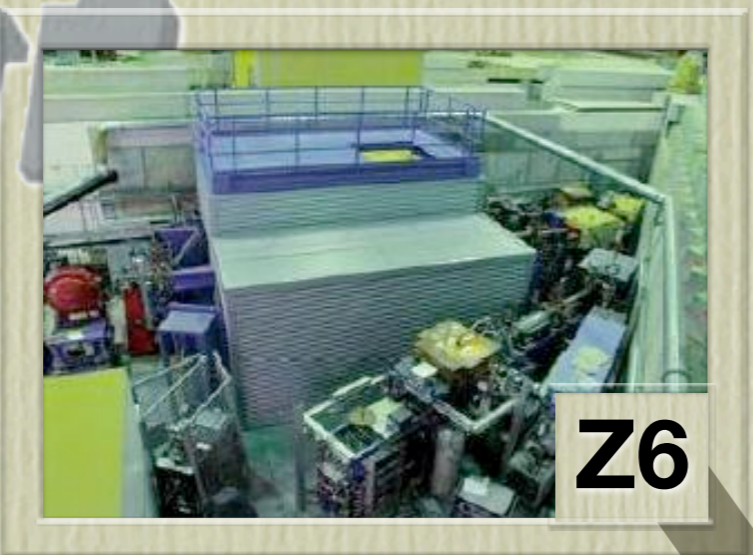
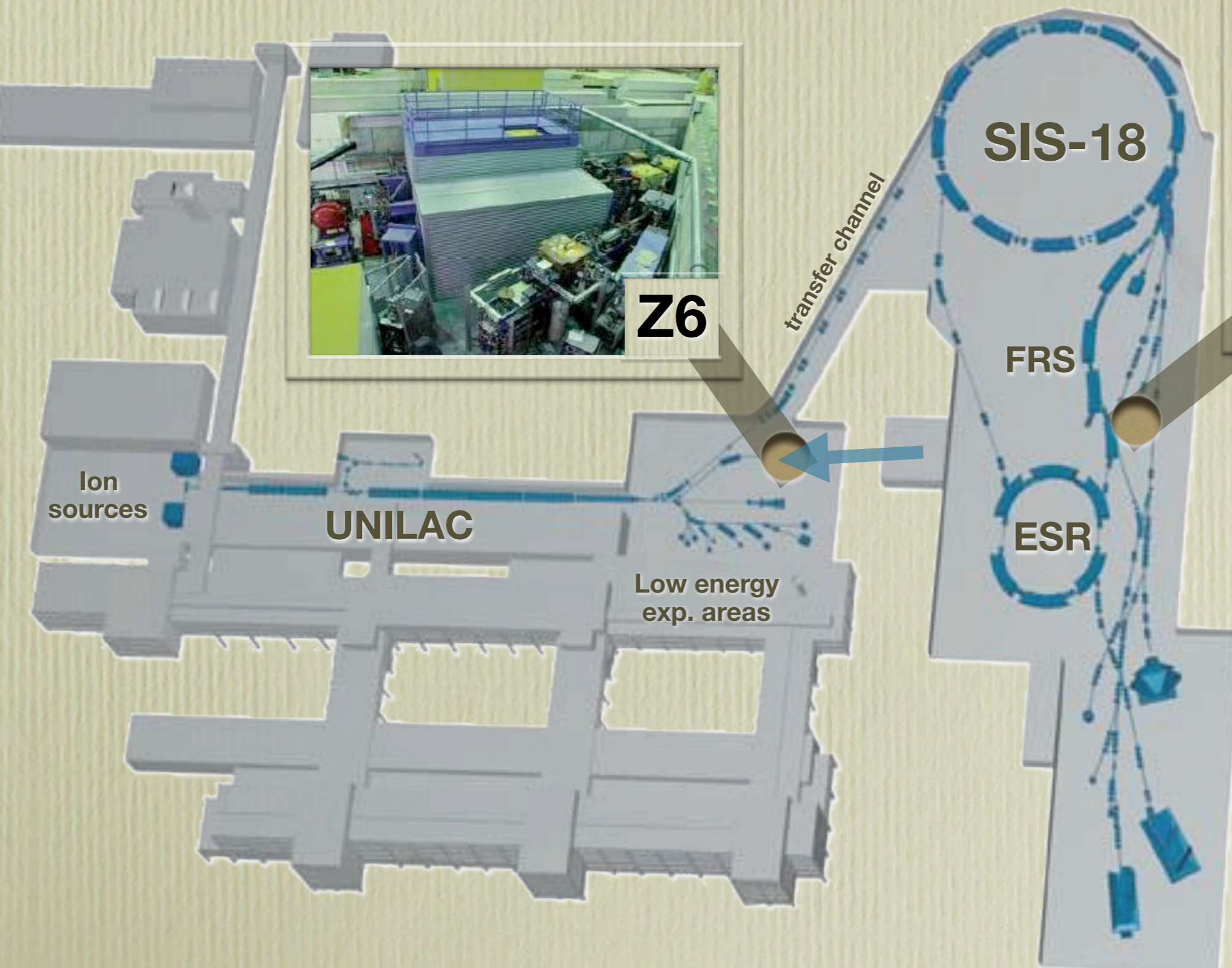
Экспериментальные установки отдела Физики плазмы в GSI



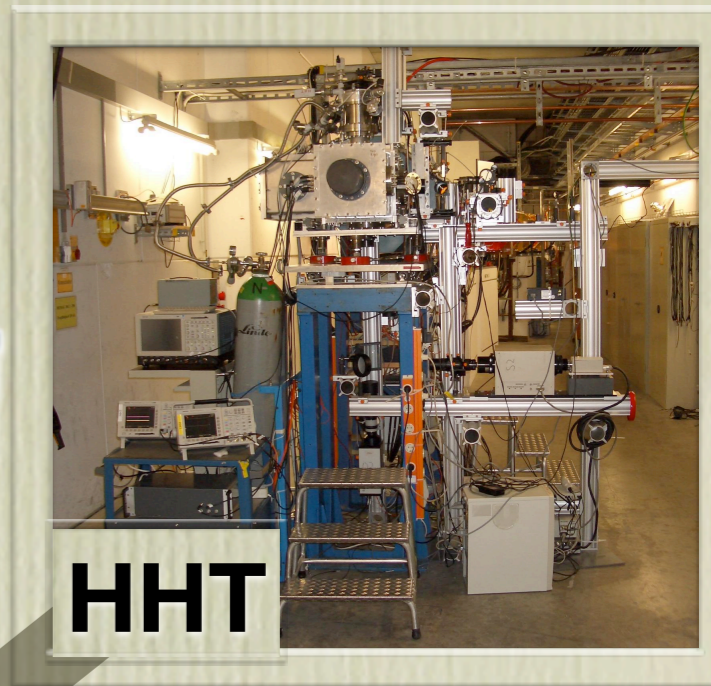
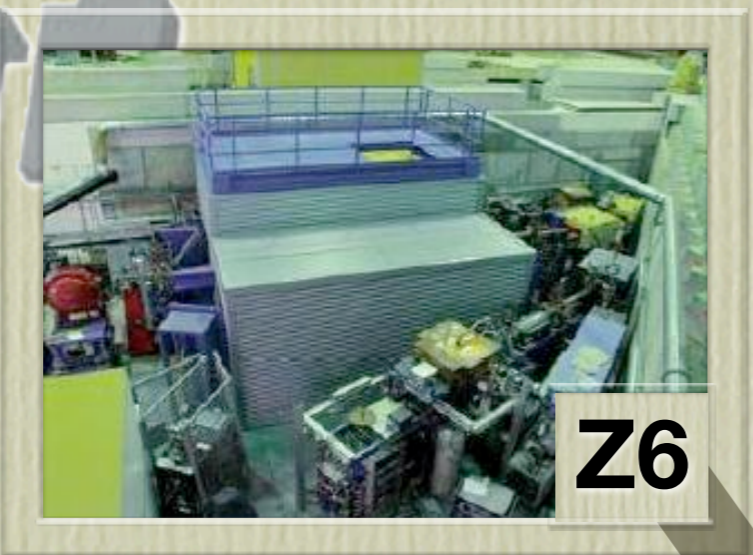
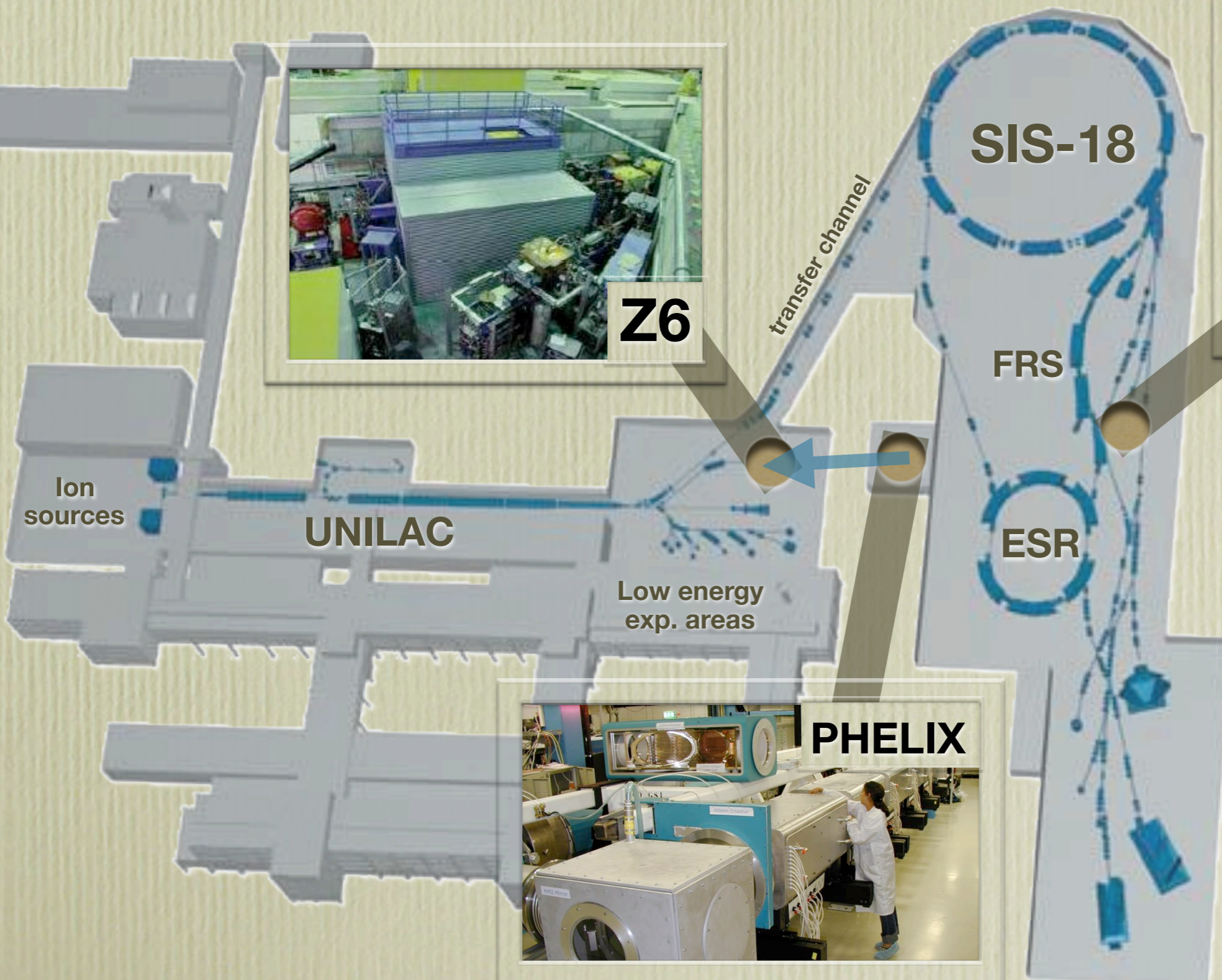
Экспериментальные установки отдела Физики плазмы в GSI



Экспериментальные установки отдела Физики плазмы в GSI



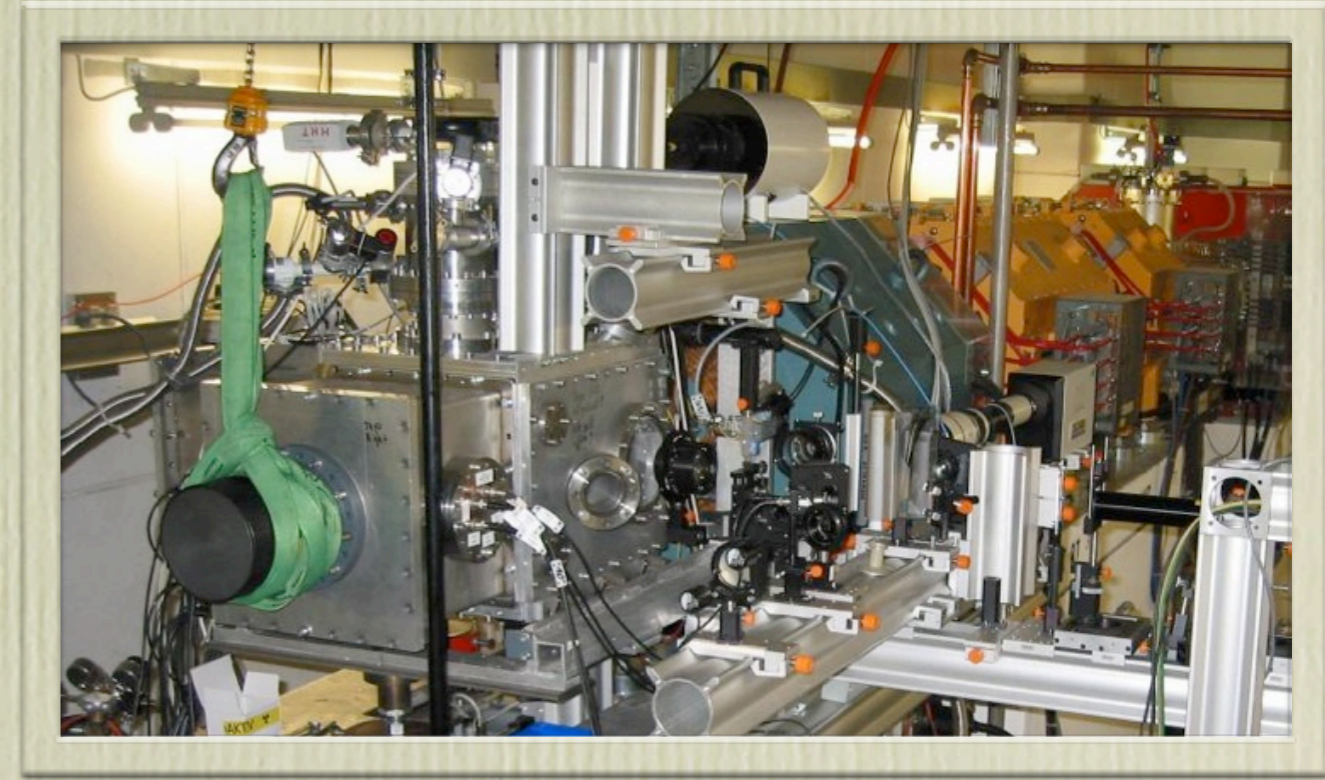
Экспериментальные установки отдела Физики плазмы в GSI



ННТ – уникальная экспериментальная площадка для изучения экстремальных состояний вещества

ННТ: High energy High Temperature:

- система острой фокусировки
- любые ионы, 50–450 МэВ/нук.
- 100 – 1400 нс импульсы
- размер фокуса 150 $\mu\text{м}$ – 1.5 мм
- спец. диагностика для мощных ионных пучков

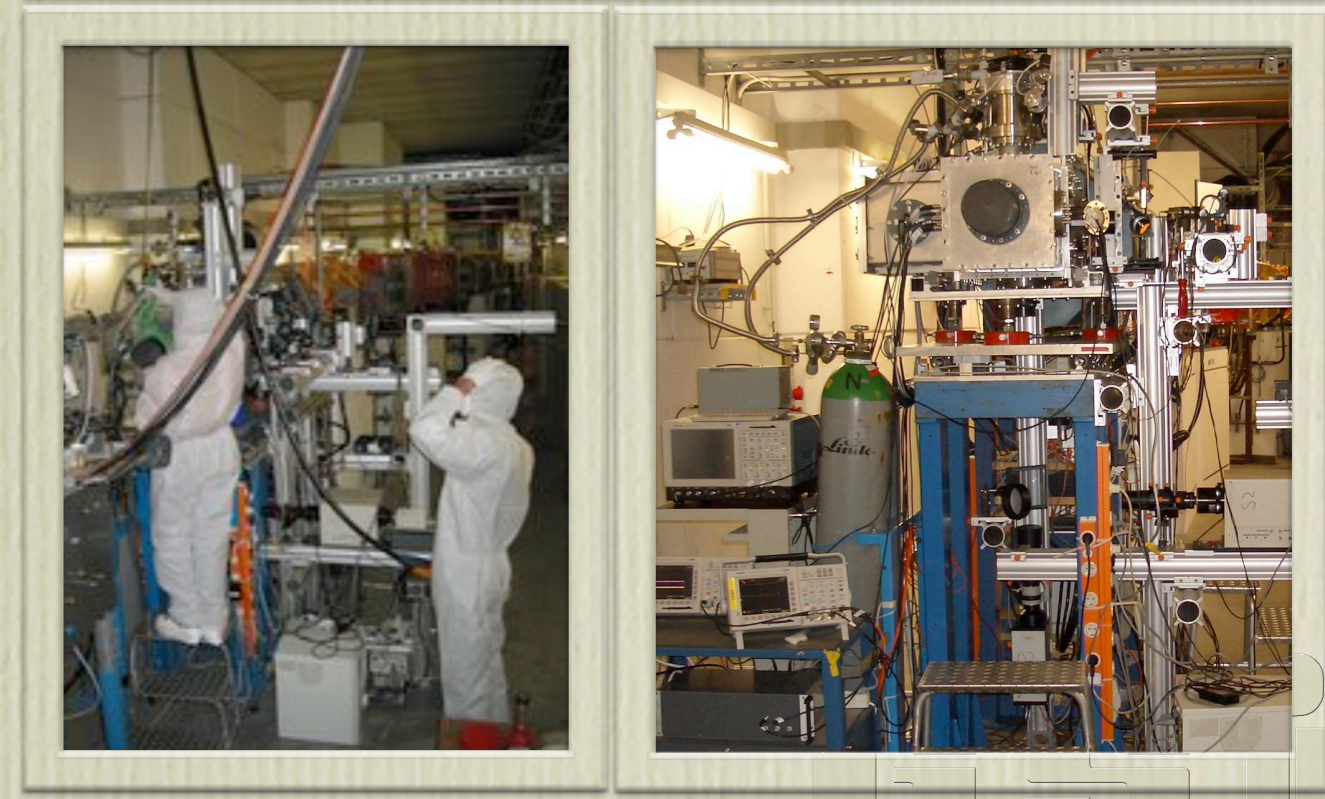


Типичные параметры пучка:

- $^{238}\text{U}^{73+}$, 80 ГэВ, эл. охлаждение
- $2-5 \cdot 10^9$ ионов в 100–300 нс банче
- фокус на мишени $\varnothing \leq 300 \mu\text{м}$

Твердотельная мишень:

- внутр. энергия: 1-5 кДж/г
- температура до 2 эВ
- давление в кбар-ном диапазоне

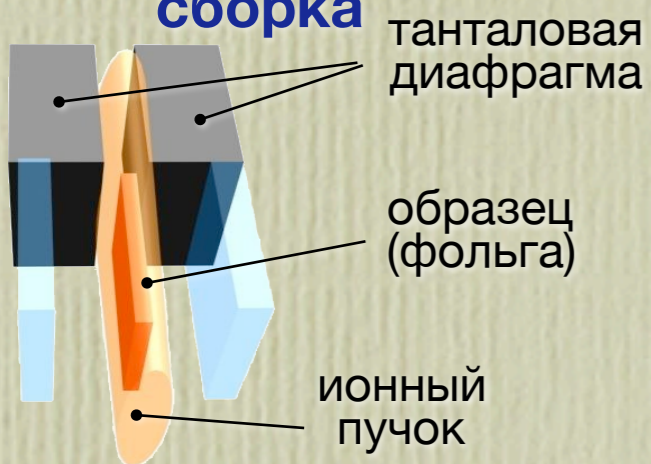


Основные цели экспериментов на ННТ

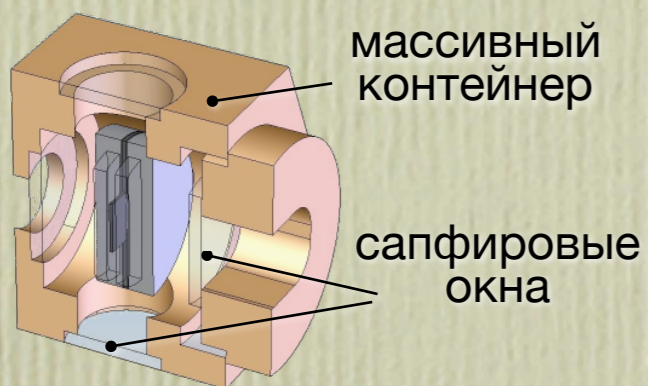
- разработка и испытание **основных диагностических методов и приборов** для **будущих экспериментов** HEDgeHOB на **FAIR** (T , P , ρ , E_s , ρ_{el} , C_s , ..., диагностика пучка)
- поиск и апробация **новых постановок эксперимента** по изучению экстремальных состояний **с использованием ионного пучка как генератора**: поиск способов **прямого измерения U_pC и транспортных свойств вещества** (без использования промежуточных расчетов)
- получение **новых данных** о **термофизических свойствах** и **гидродинамическом отклике** различных веществ в состояниях с высокой плотностью энергии **в районе двухфазной области жидкость-пар и окрестностях критической точки**
(Pb, W, Cu, Ag, Ti, Fe, C, Al, Au, Ta, Sn, UO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , LiF)

Схема эксперимента

Физическая сборка



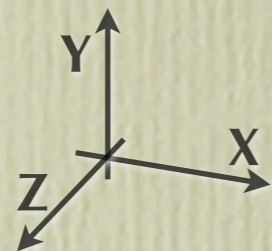
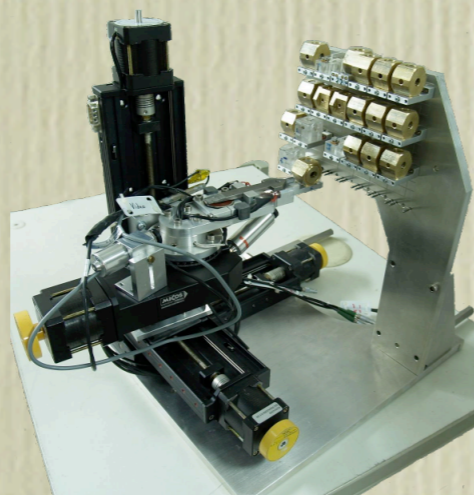
Сборка в контейнере



Контейнер на мишенном столике



Манипулятор и полки с мишенями



коллектор излучения (температура, спектроскопия)

многокан. пирометр, стрик-спектрометр

лазер подсветки

быстрая ПЗС камера с МКП

юстировка, диаг. пучка, объем, свечение

ионный пучок

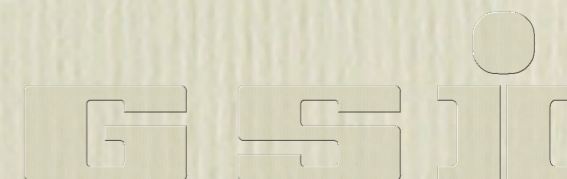
скорость, давление

интерферометры, визар

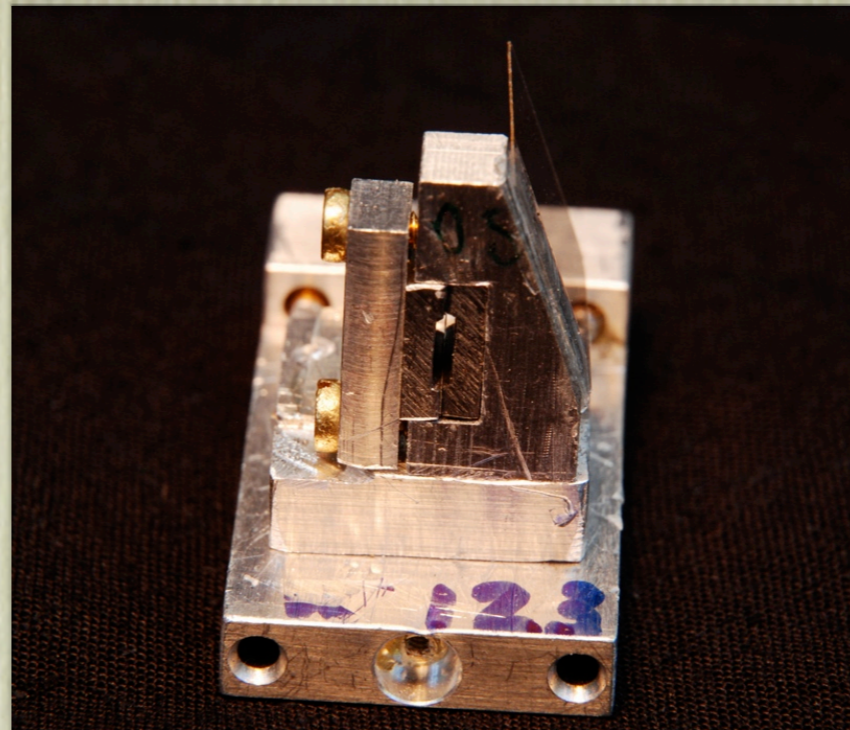
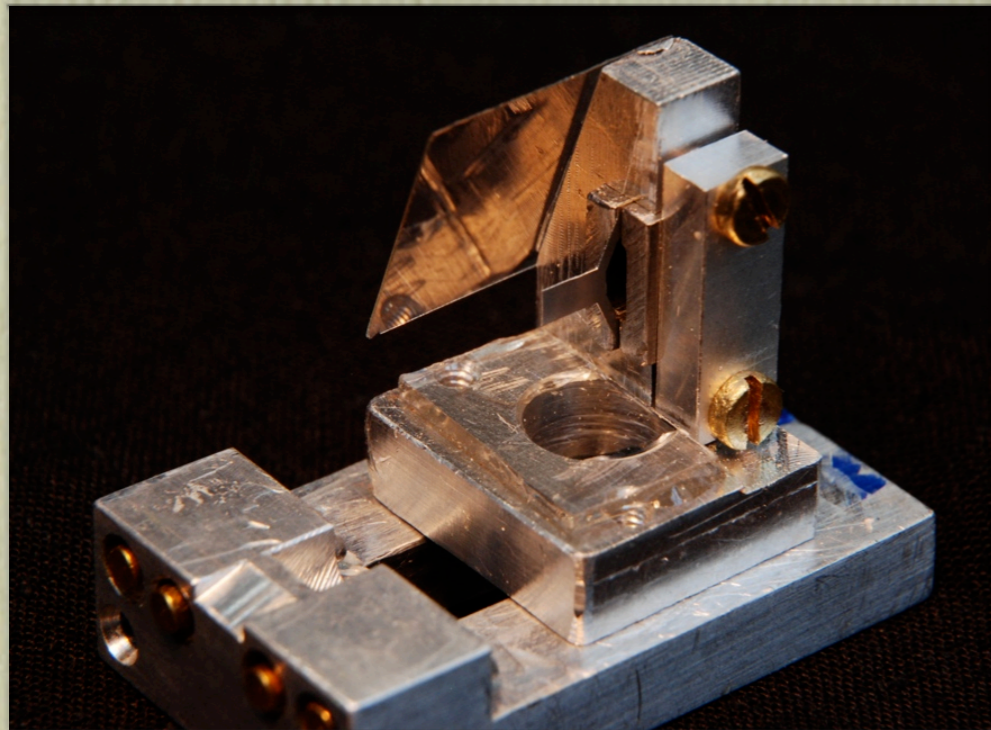
стрик-камера для теневой и шлирен съемки

объем, скорость разлета

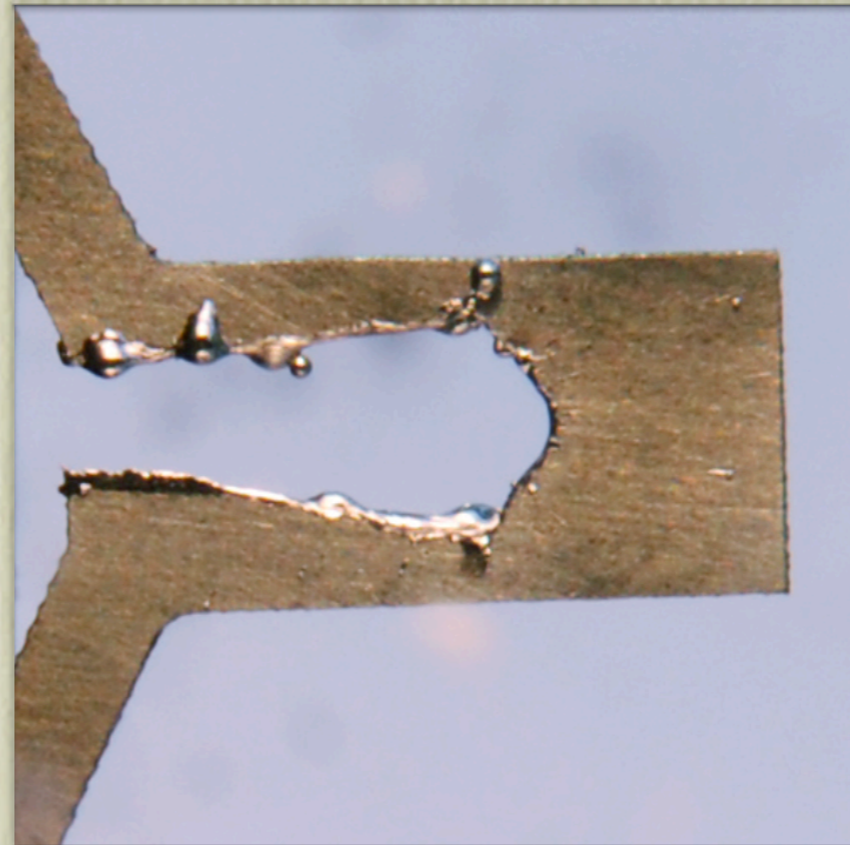
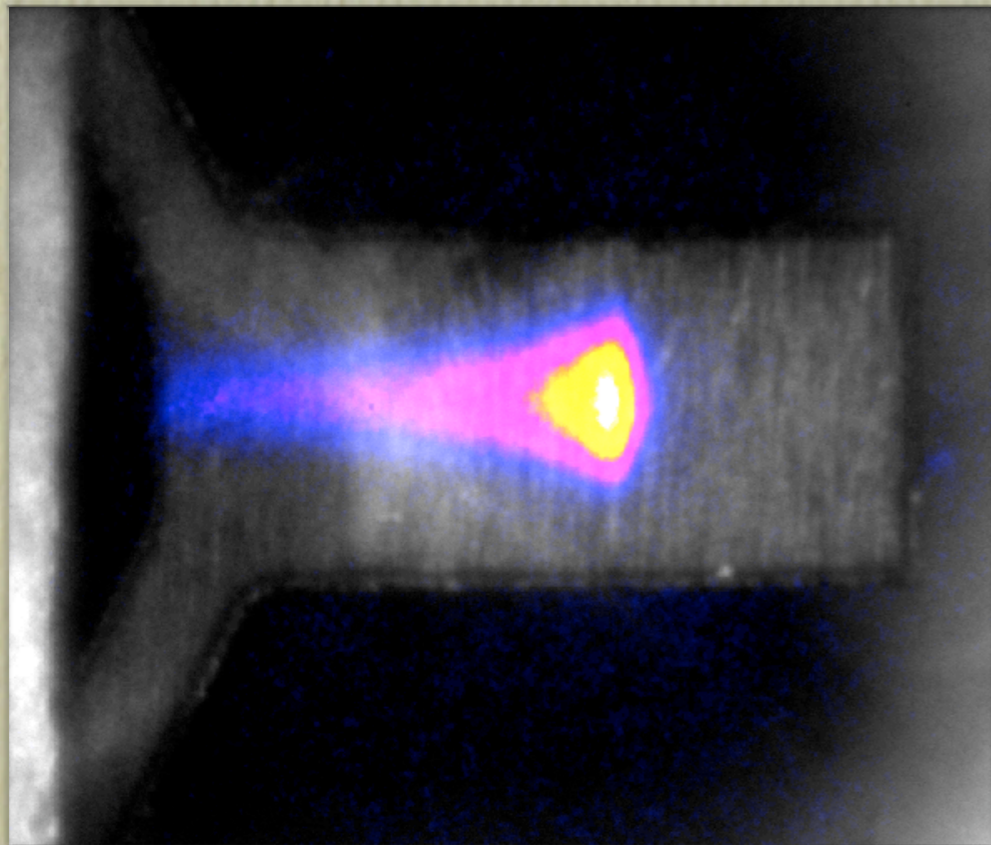
юстировка, диаг. пучка, объем, свечение



Экспериментальные сборки типа “У”

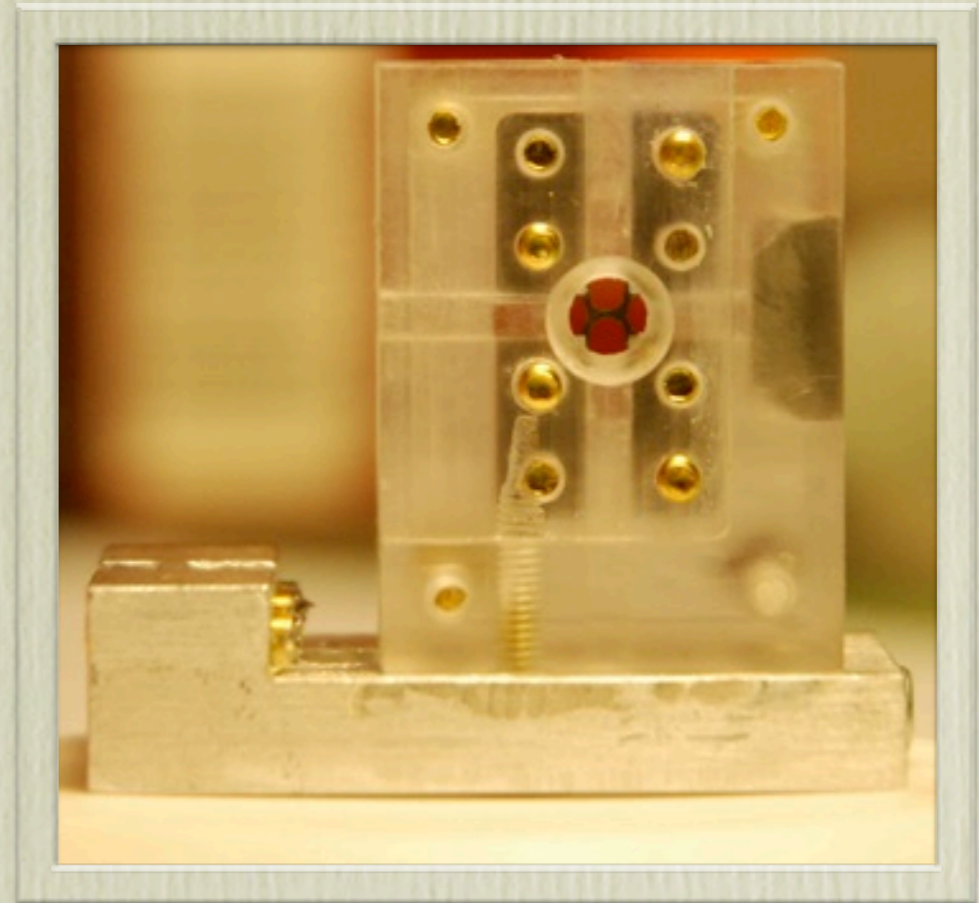
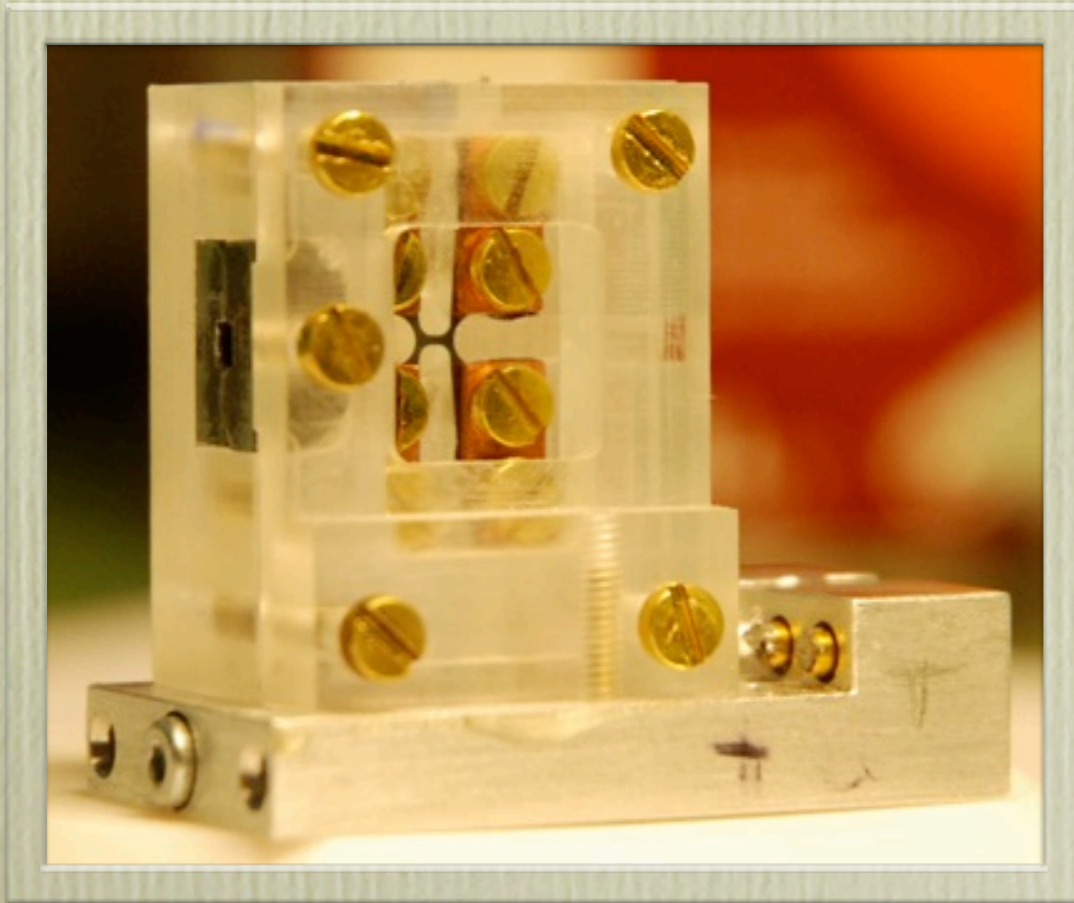
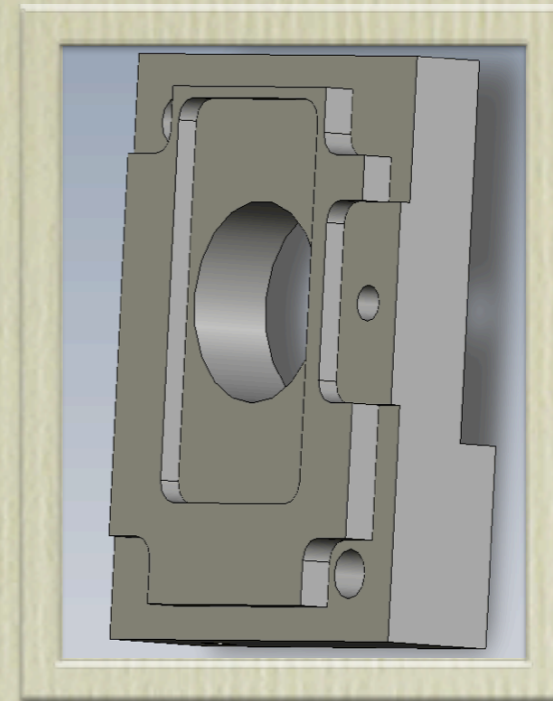
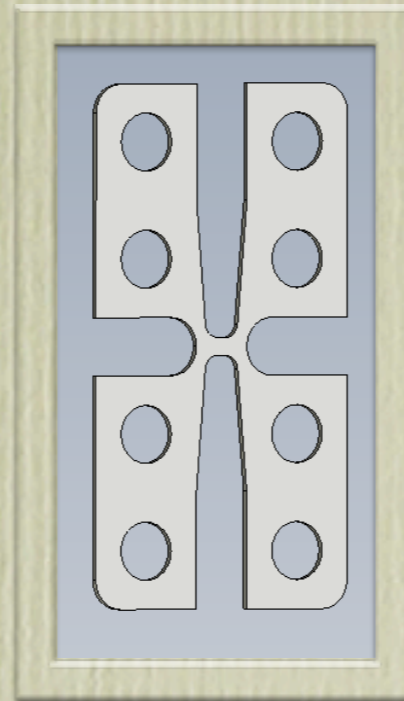
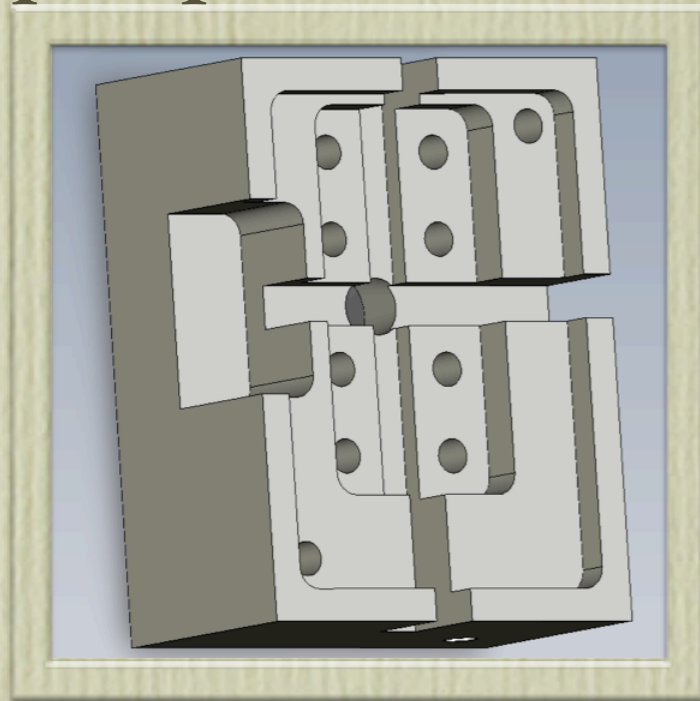


на мишенных
столиках без
контейнера

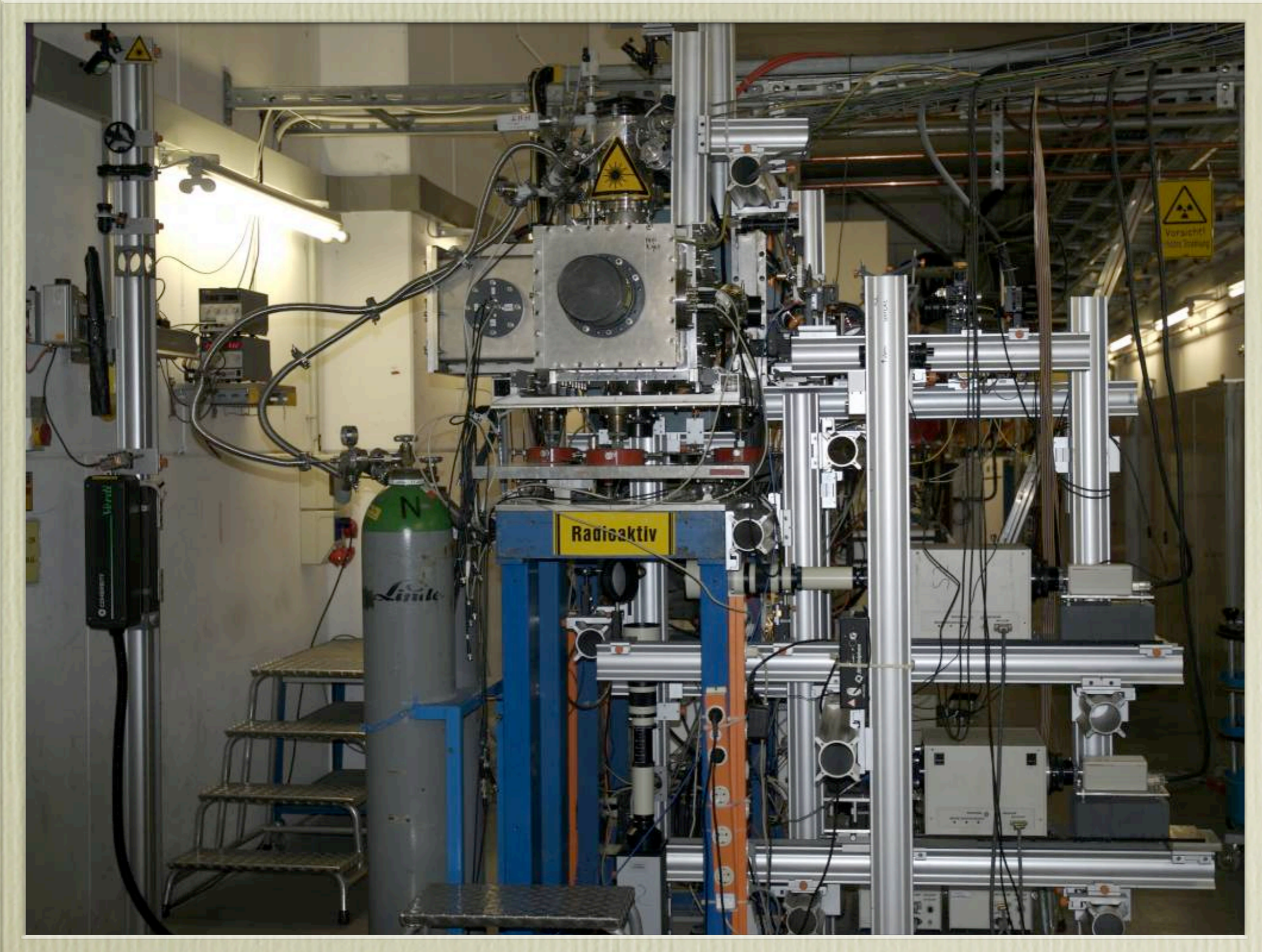


до, во время и
после выстрела

Сборки типа "Н" для четырех-контактного измерения электропроводности



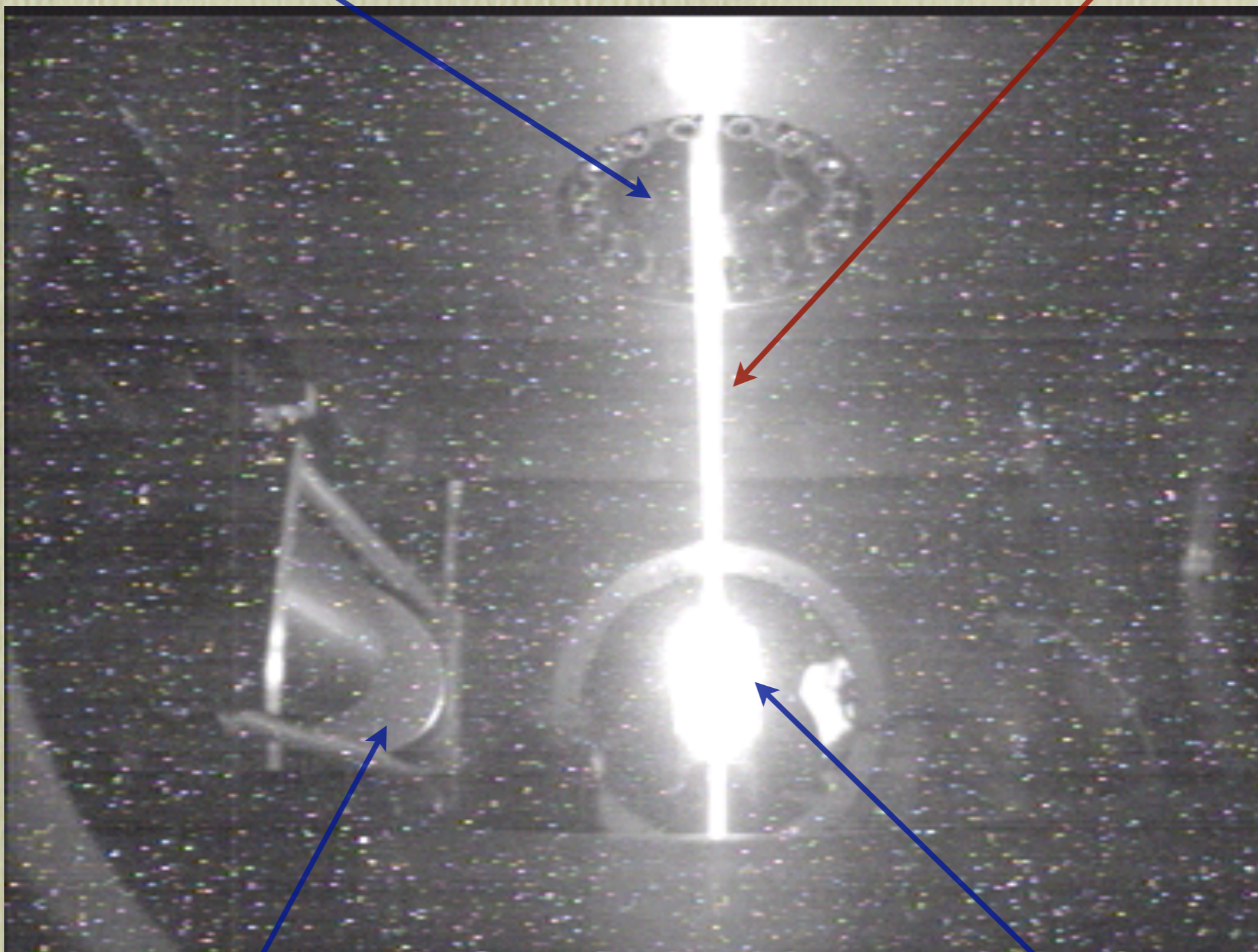
Экспериментальная площадка ННТ в GSI



Мишенная камера, вид сверху: мощный урановый пучок испаряет свинцовую фольгу

входное окно

ионный пучок

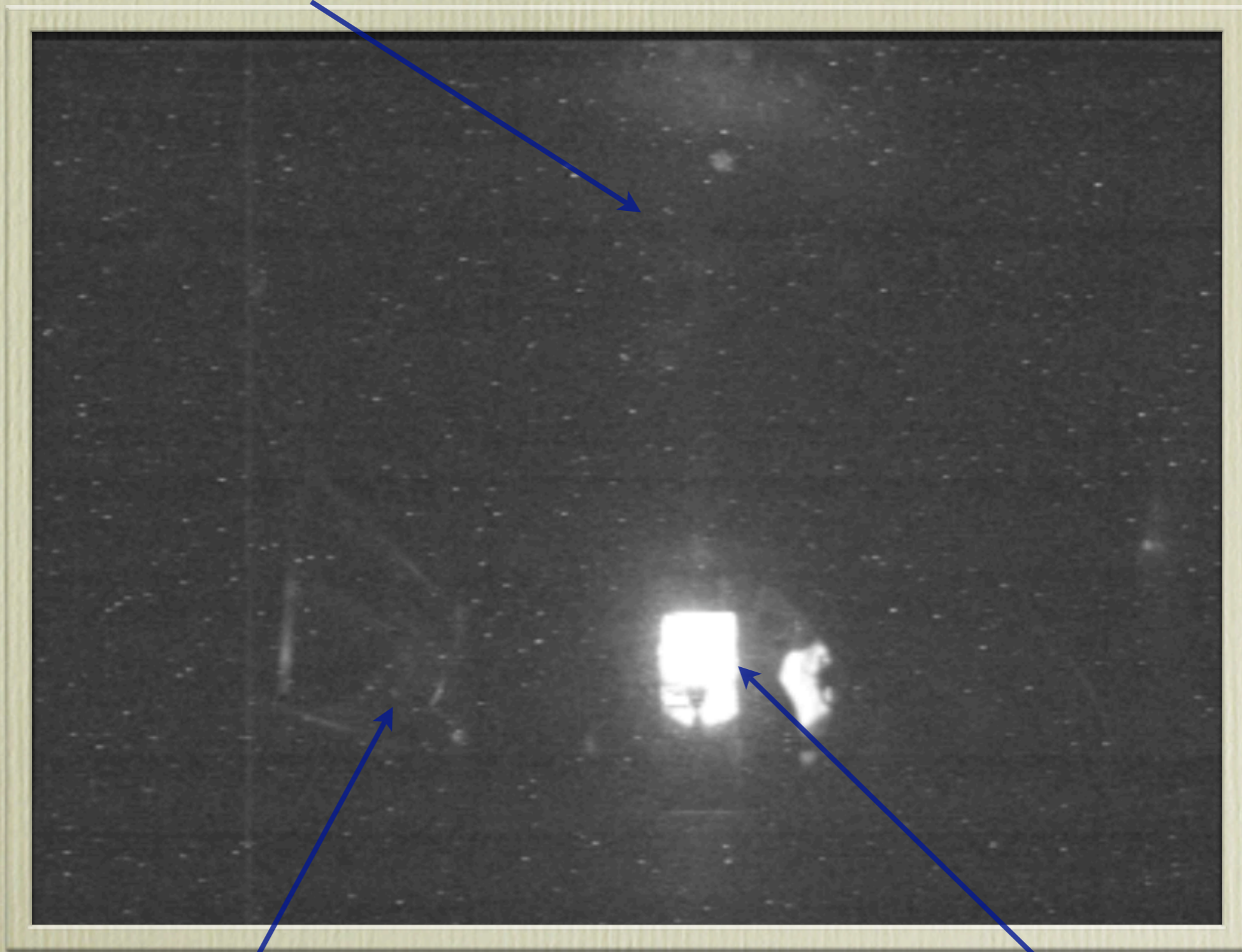


зеркала пирометра

мишень

Мишенная камера, вид сверху: мощный урановый пучок испаряет свинцовую фольгу

ВХОДНОЕ ОКНО

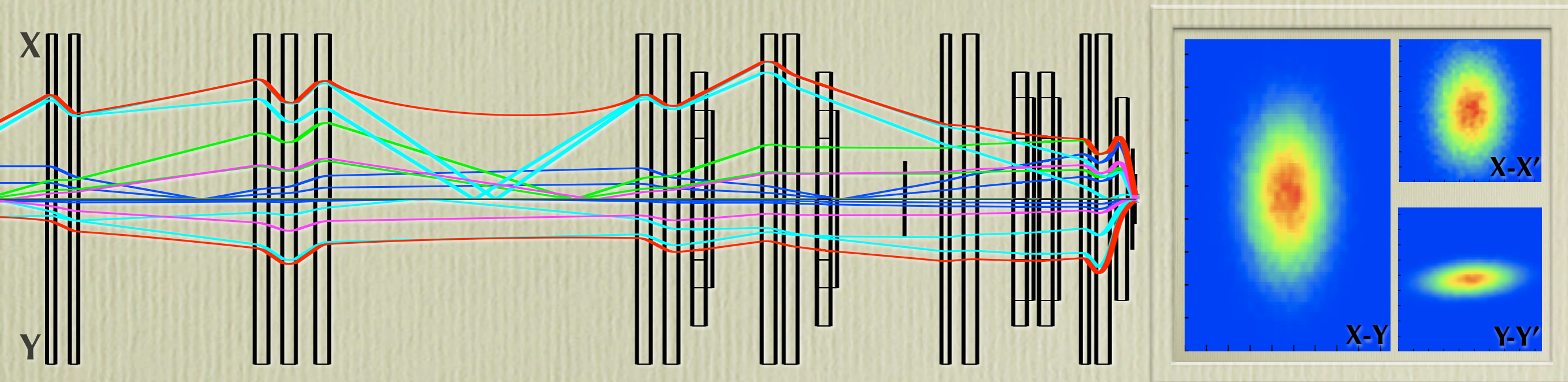


зеркала пирометра

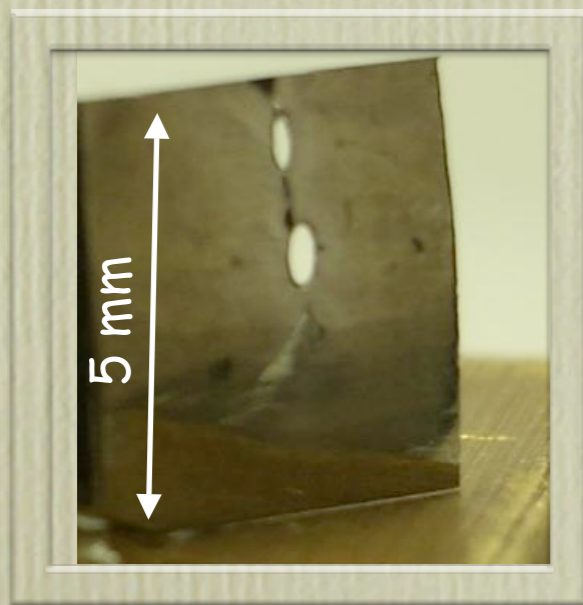
мишень

Транспортировка, фокусировка и диагностика интенсивного тяжелоионного пучка

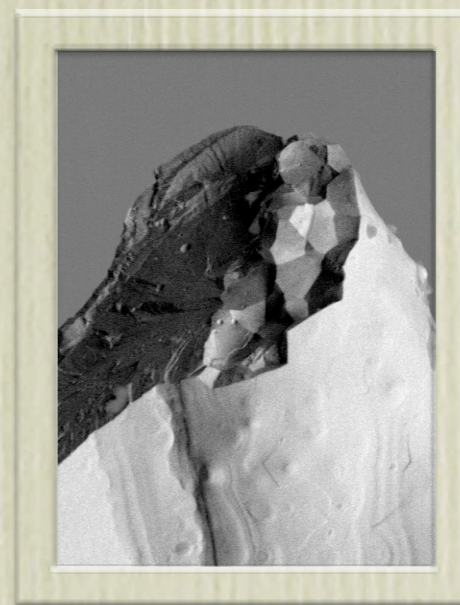
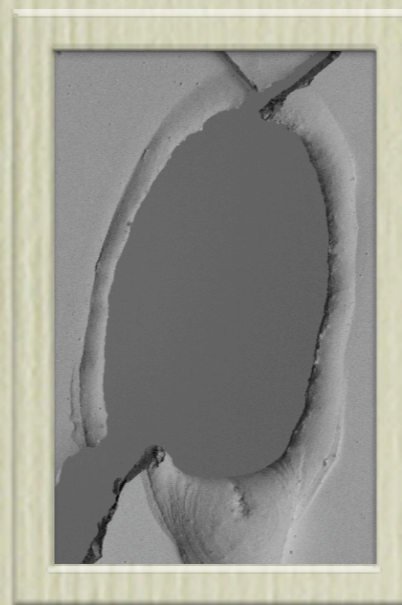
Ионно-оптический расчет транспортировки пучка и
сильной финальной фокусировки в ионопроводе ННТ



Фокальное пятно: ≤ 300 мкм (FWHM)



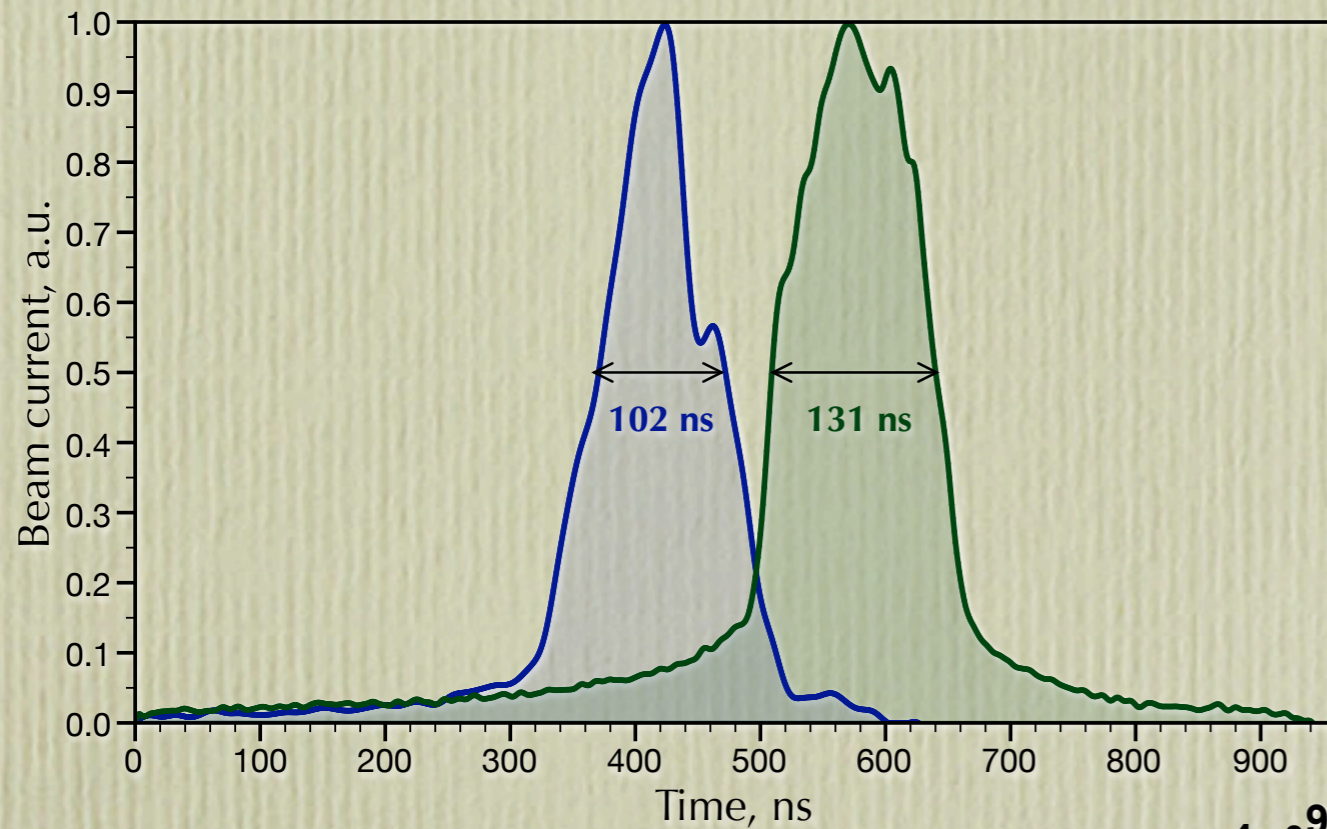
50 мкм вольфрамовая фольга
после двух выстрелов



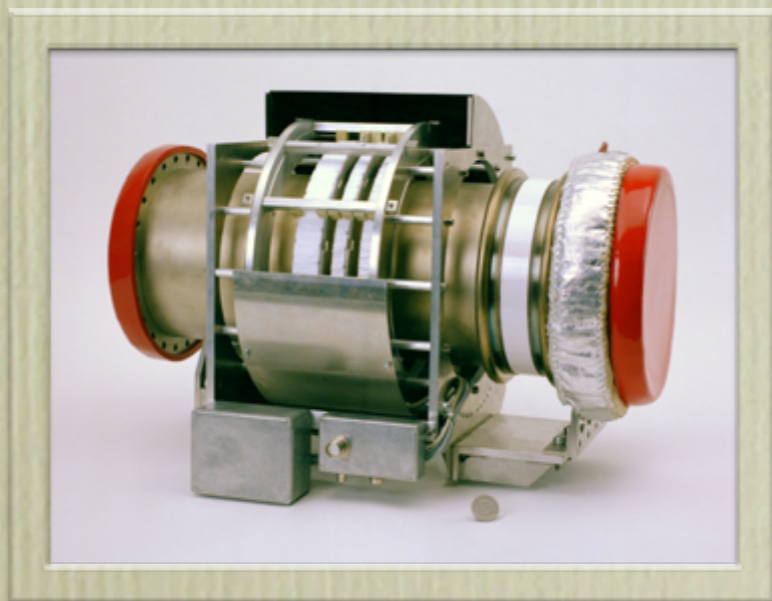
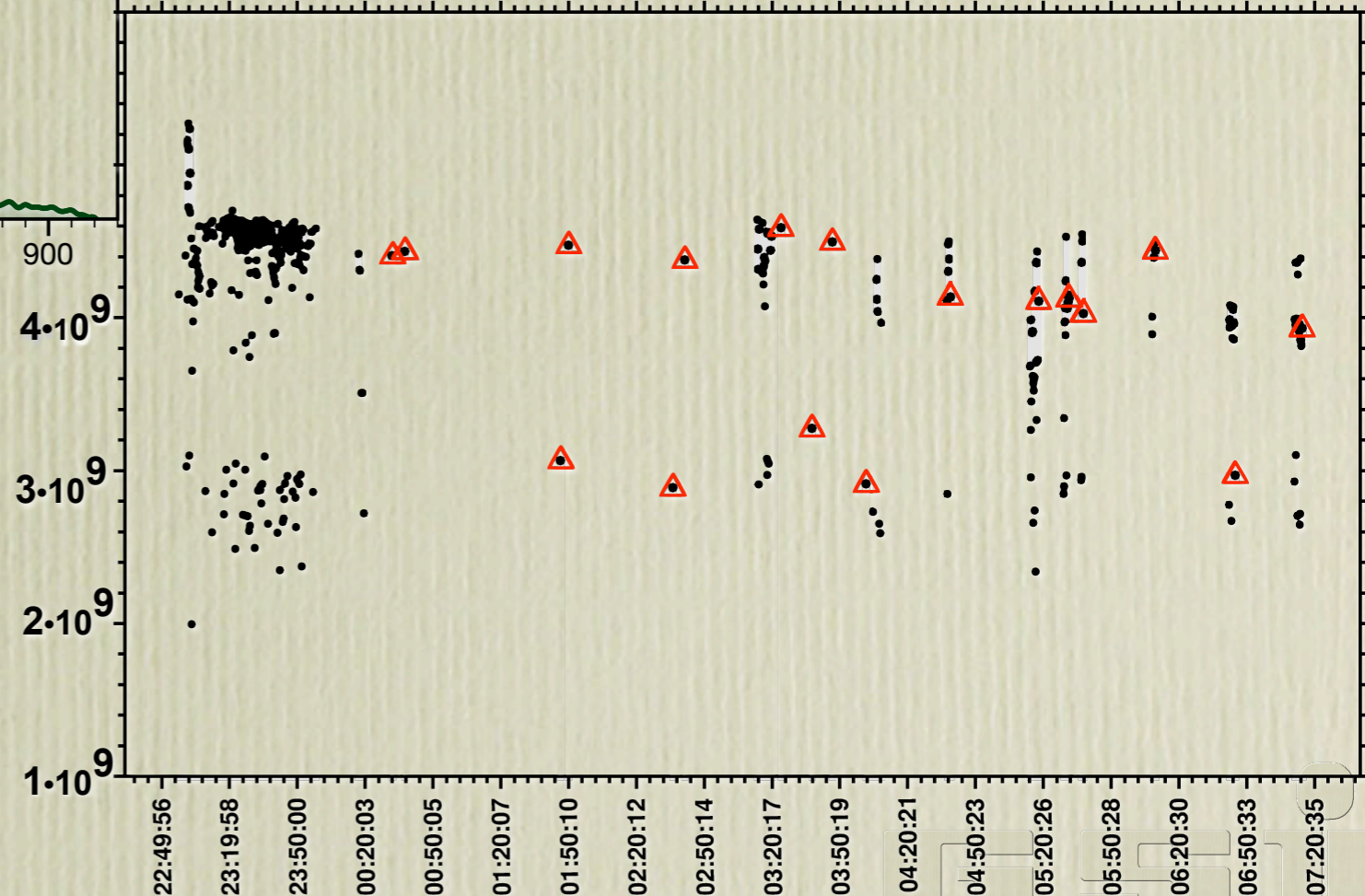
СЭМ снимки отверстия в
вольфрамовой фольге

Измерение временного профиля и интенсивности пучка

Временной профиль пучка измеряется быстрыми токовыми трансформаторами (пояса Роговского, 1-5 нс)



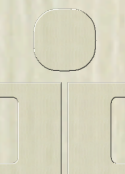
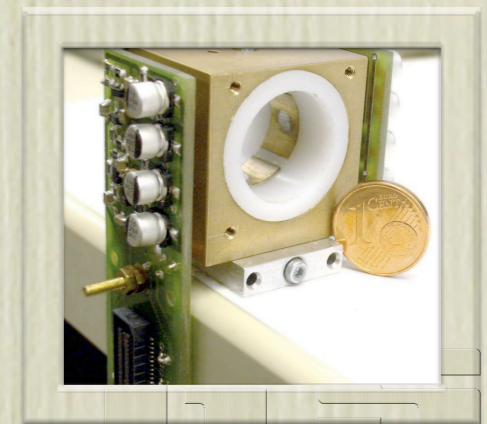
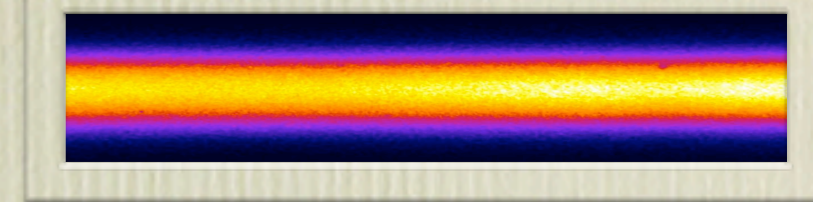
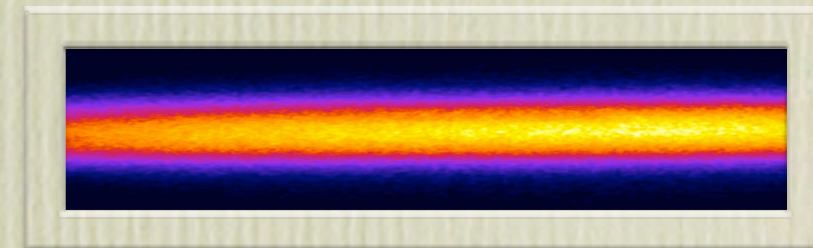
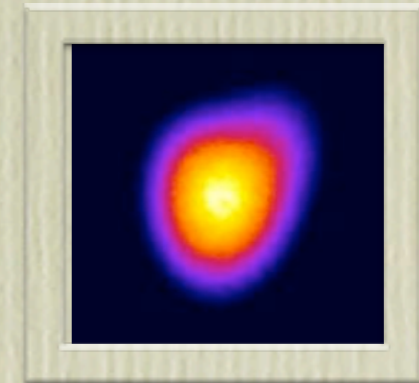
Интенсивность пучка (кол-во ионов) в каждом выстреле регистрируется интегрирующими (резонансными) трансформаторами



Измерение размера и позиции интенсивного сфокусированного пучка на мишени

Позицию пучка и размер пятна в фокусе можно измерять при помощи:

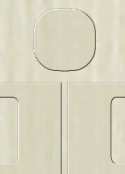
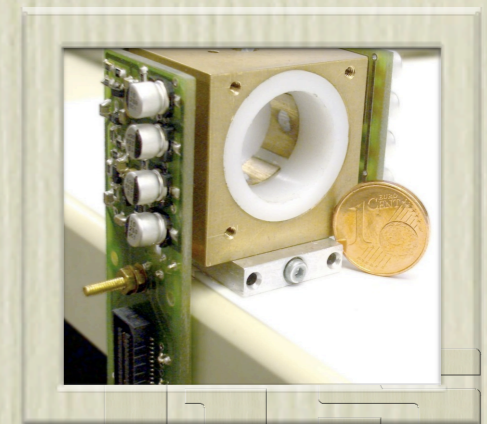
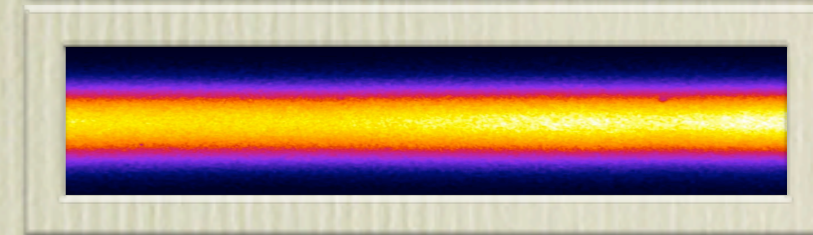
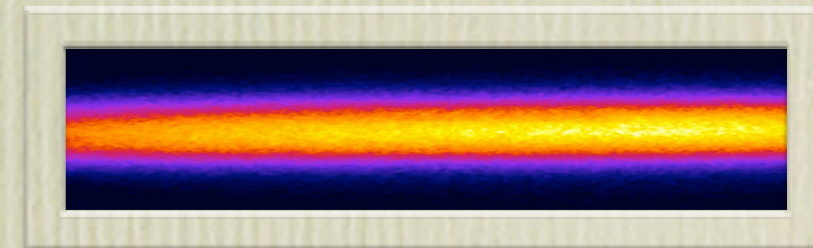
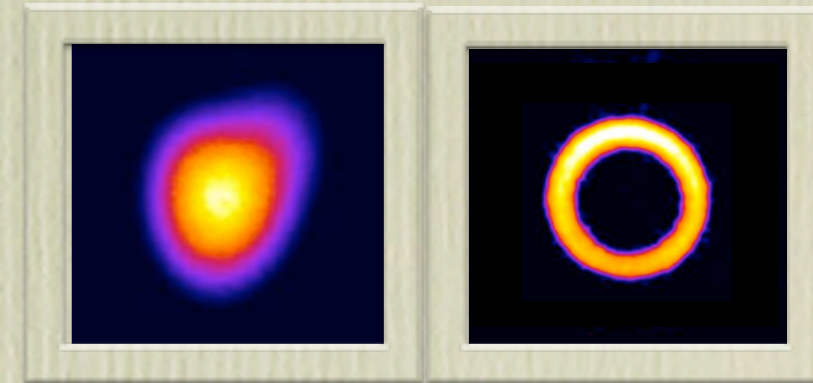
- специальных радиационно-стойких быстрых сцинтилляторов (кварц, алмаз) и быстрой ПЗС камеры
- регистрации индуцированного пучком свечения (остаточного) газа в мишенной камере в нескольких проекциях (например, излучение в линиях ArII)
- миниатюрных емкостных или индуктивных датчиков



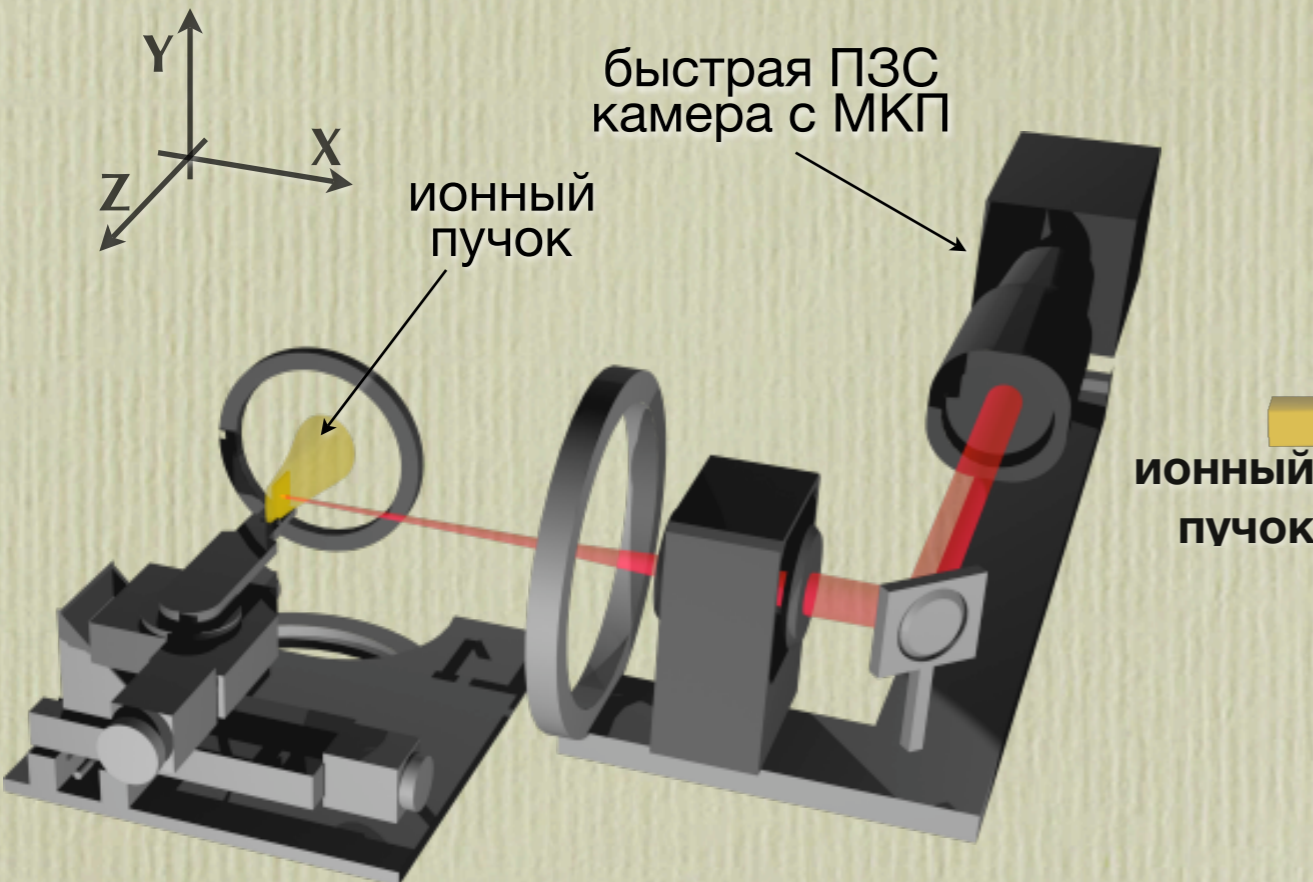
Измерение размера и позиции интенсивного сфокусированного пучка на мишени

Позицию пучка и размер пятна в фокусе можно измерять при помощи:

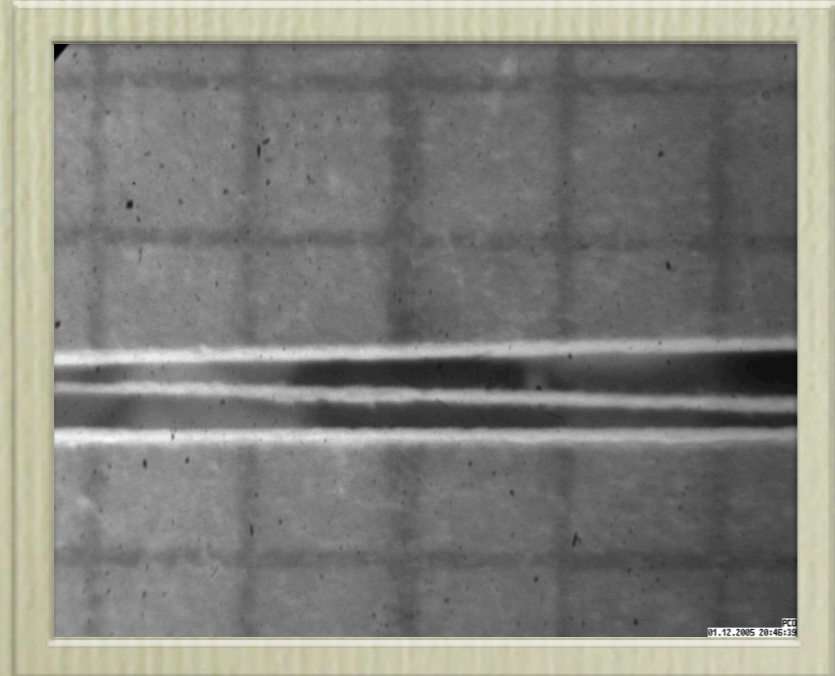
- специальных радиационно-стойких быстрых сцинтилляторов (кварц, алмаз) и быстрой ПЗС камеры
- регистрации индуцированного пучком свечения (остаточного) газа в мишенной камере в нескольких проекциях (например, излучение в линиях ArII)
- миниатюрных емкостных или индуктивных датчиков



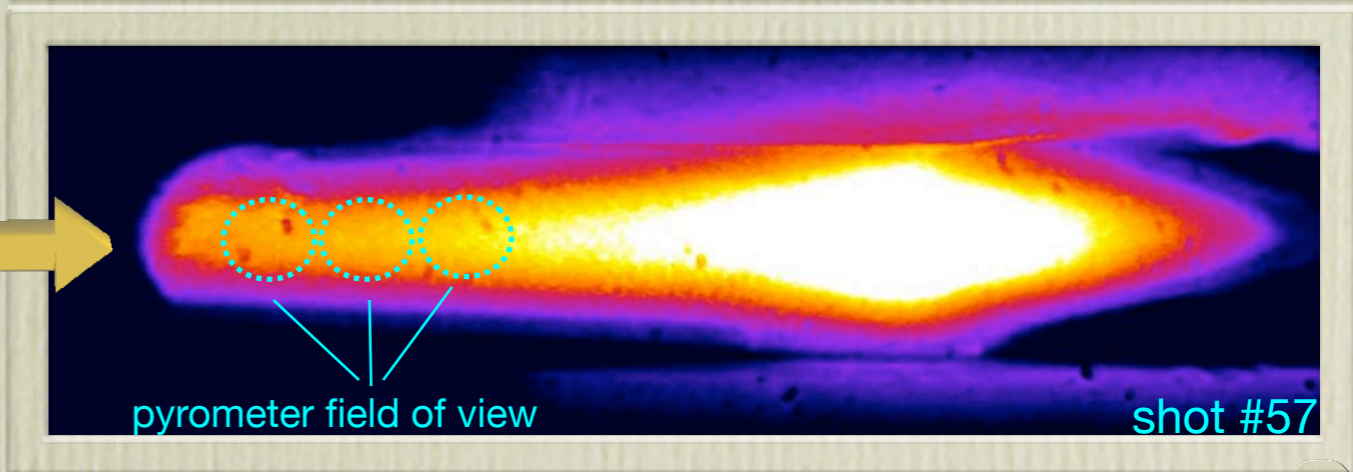
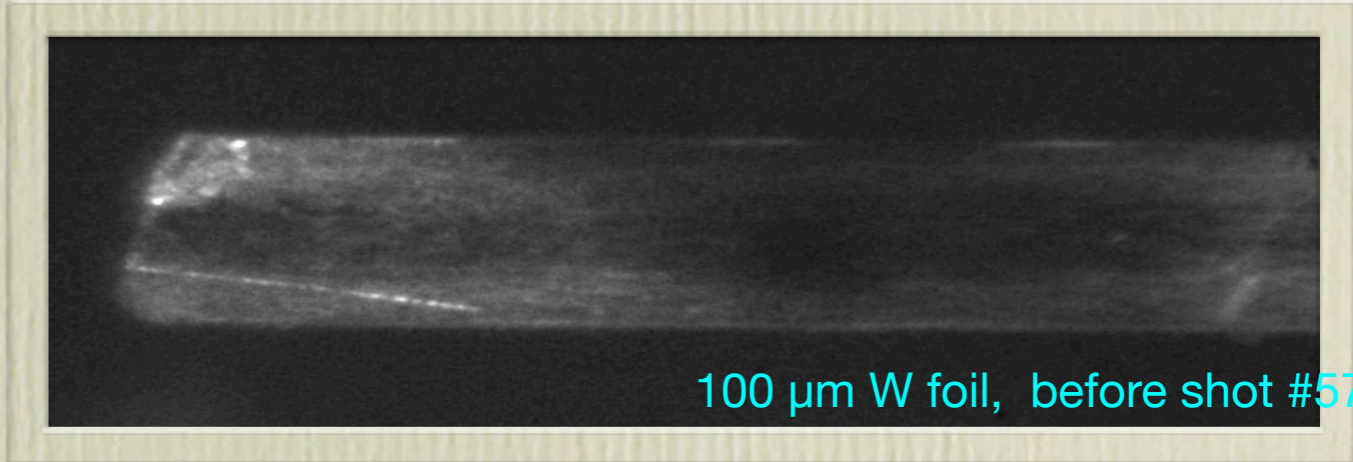
Диагностика мощного сфокусированного пучка по свечению остаточного газа



“мишень”-миллиметровка



свечение аргона, индуцированное ионным пучком

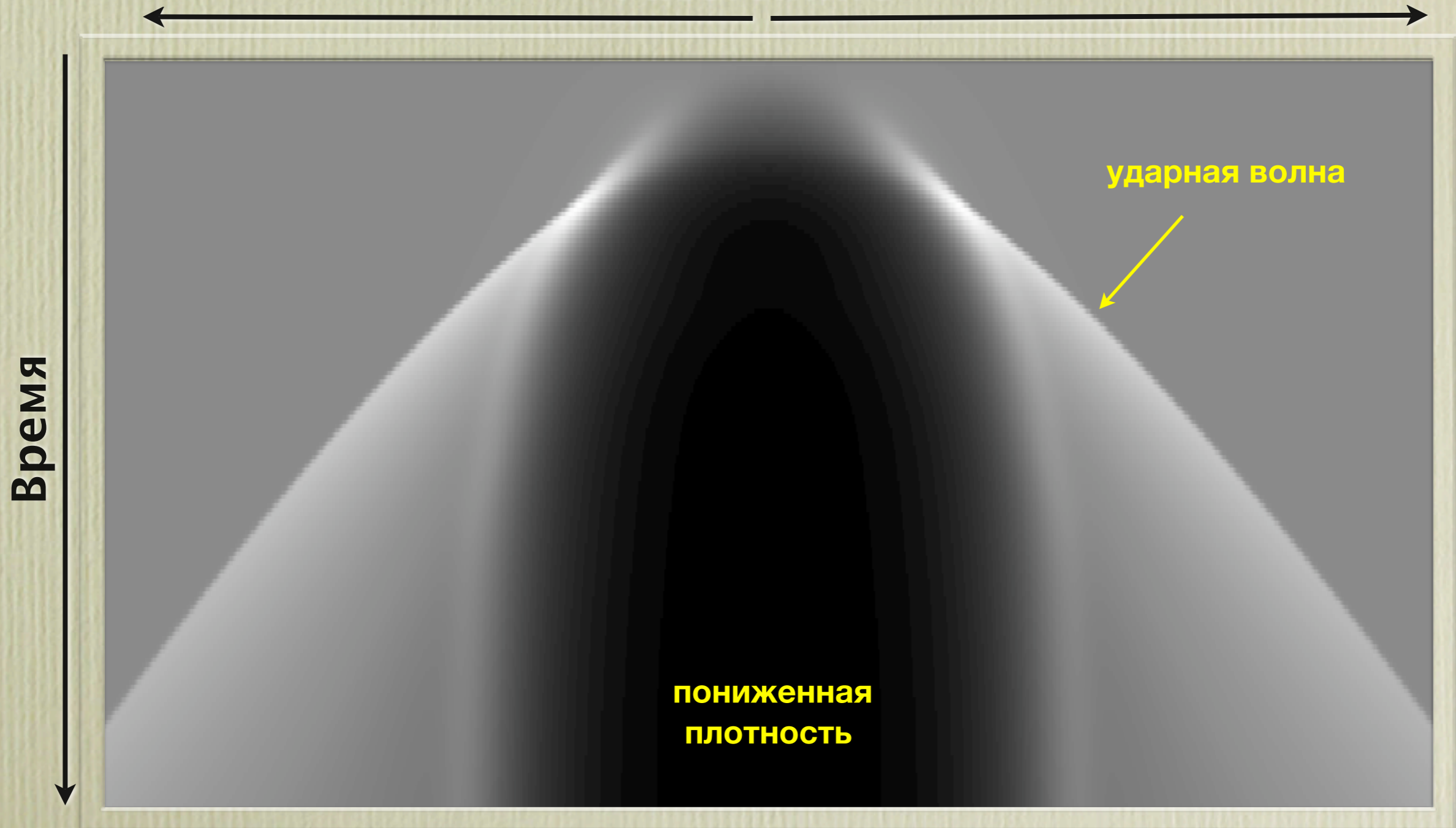


тепловое свечение разогретой мишени

Газодинамическое моделирование взаимодействия интенсивного пучка с газом в мишенной камере

Изменение радиального распределения плотности газа в течение взаимодействия с пучком

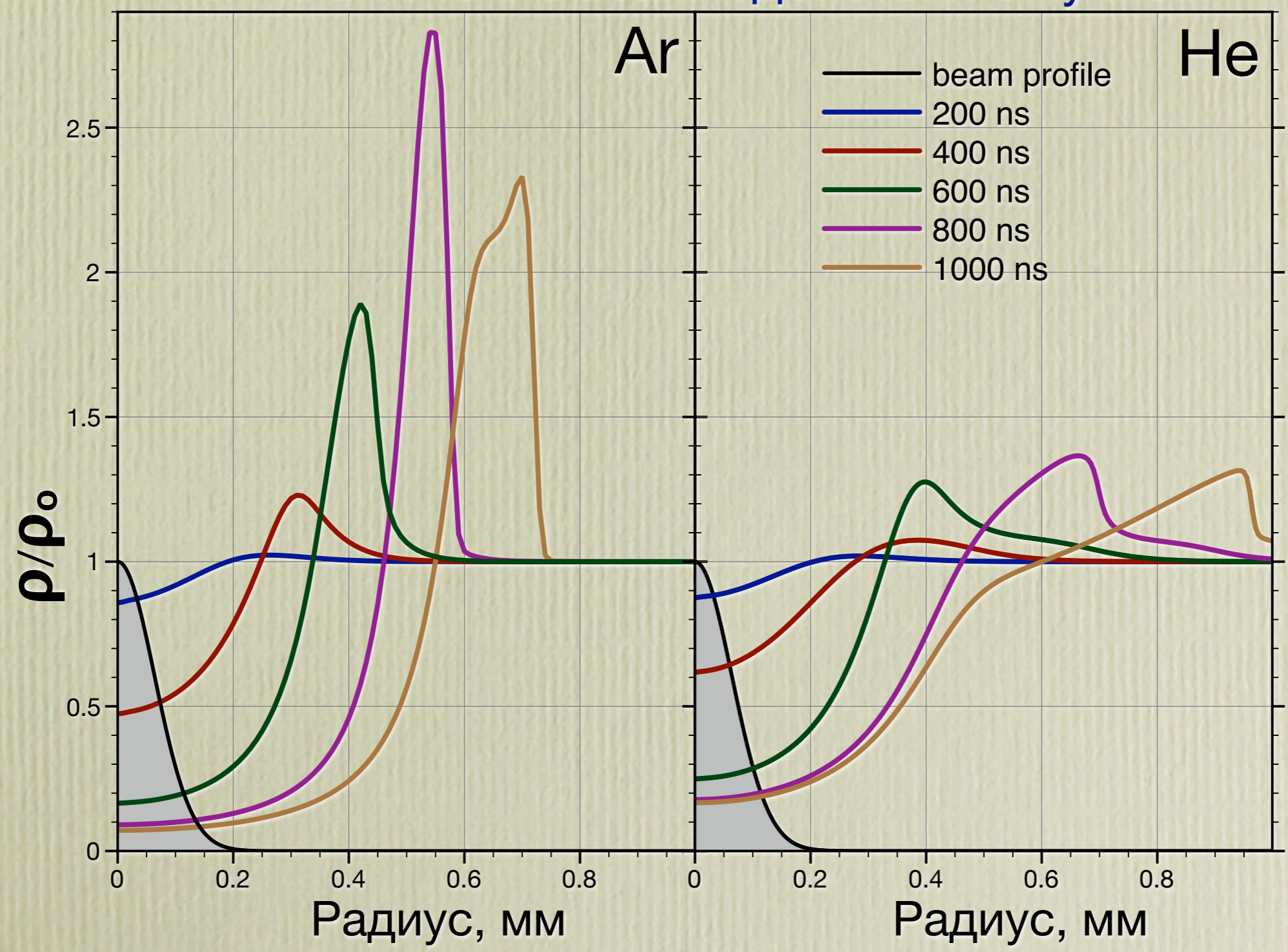
Расстояние



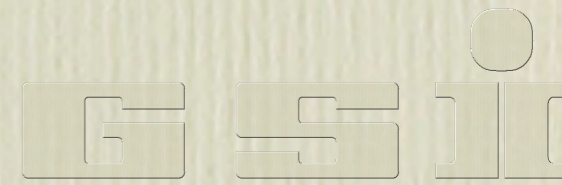
Calculated by VarJET code

Газодинамическое моделирование взаимодействия интенсивного пучка с газом в мишенной камере

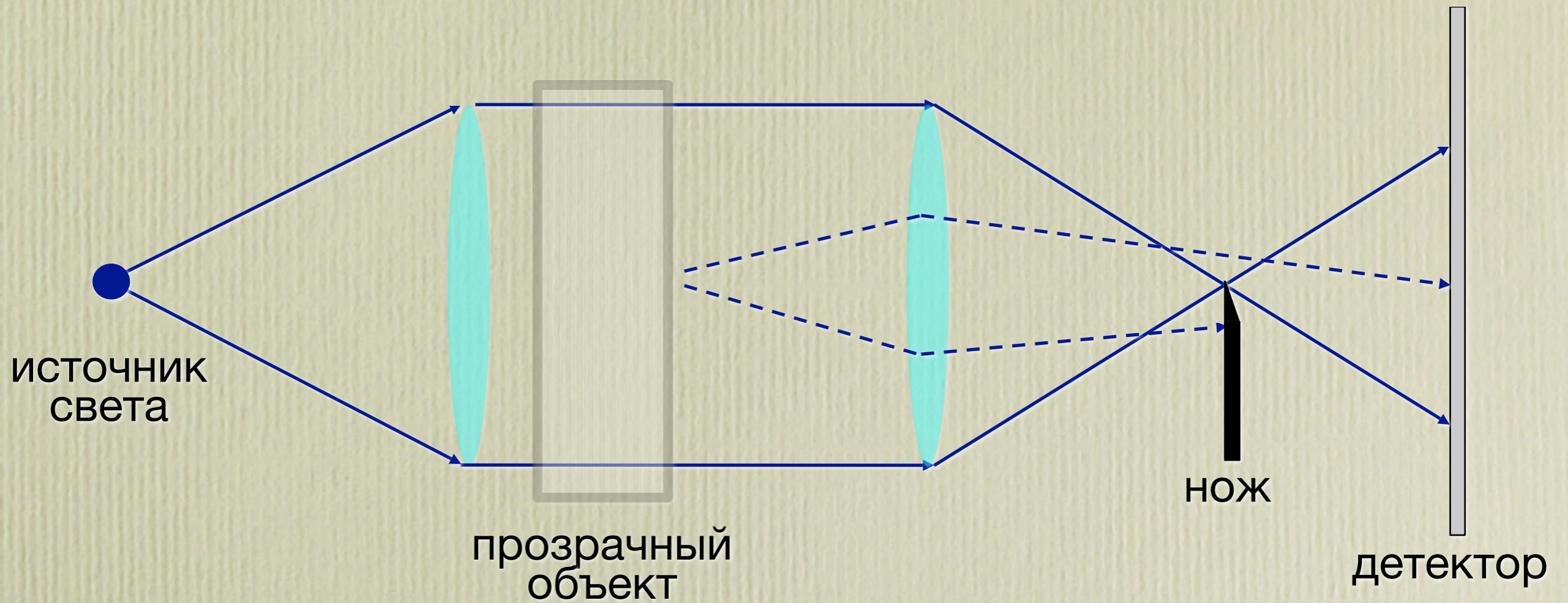
Изменение радиального распределения плотности Ar и He в течение взаимодействия с пучком



Calculated by VarJET code



Шлирен-метод

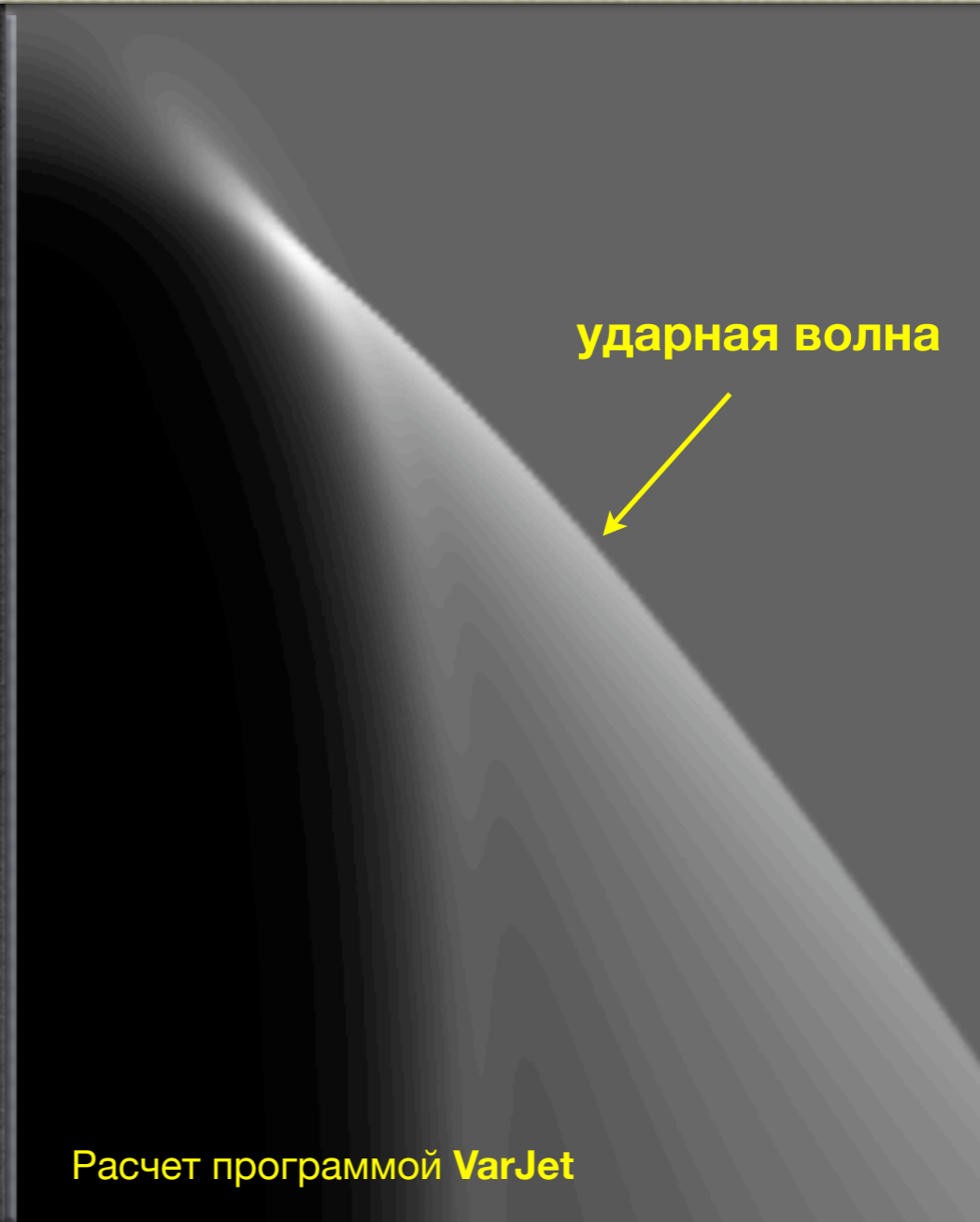
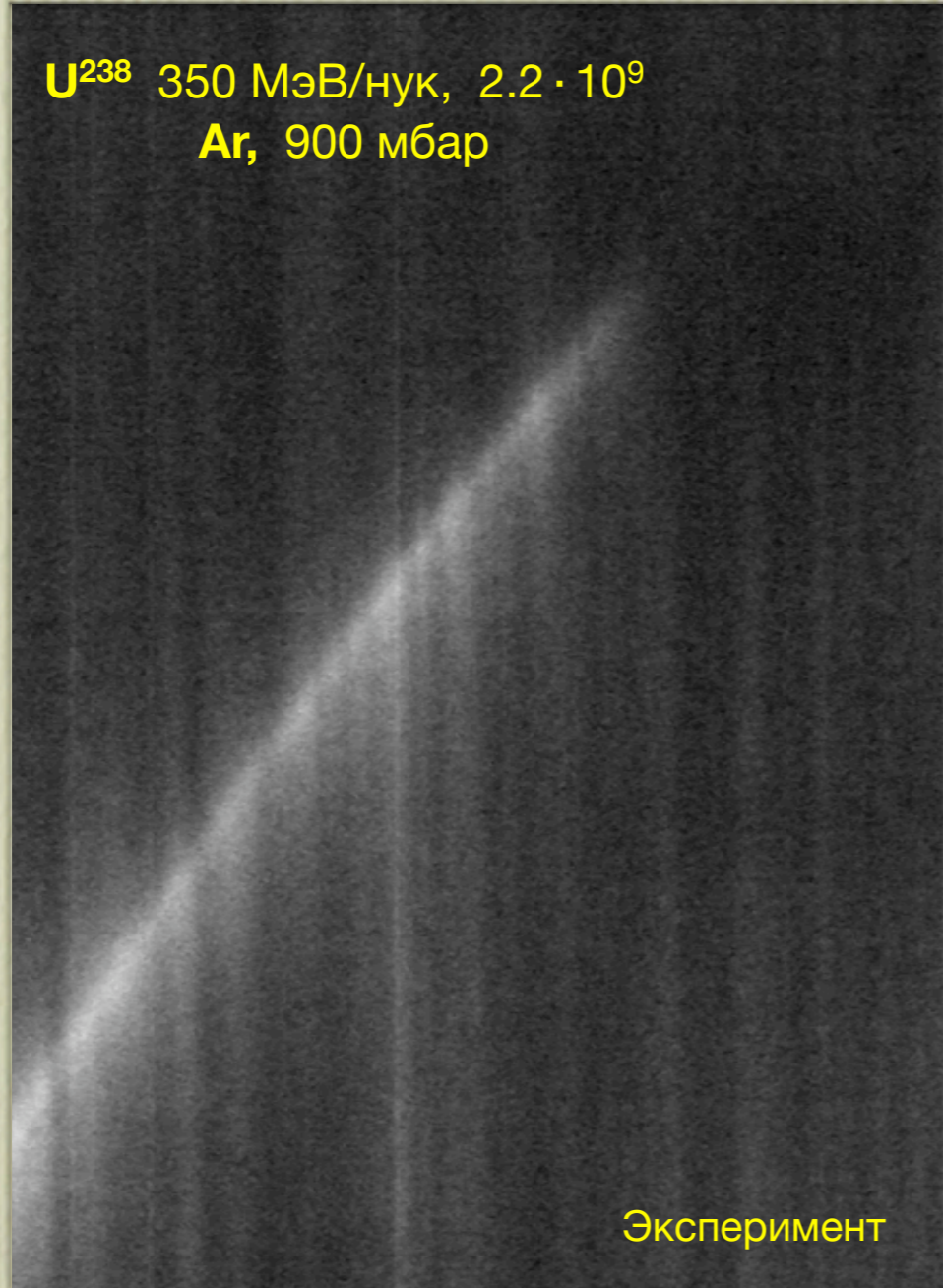


Шлирен-измерения и моделирование ударной волны, индуцированной мощным урановым пучком в аргоне

Расстояние (радиус) (0 .. 1.8 мм)

Время (0 .. 3.5 мкс)

U^{238} 350 МэВ/нук, $2.2 \cdot 10^9$
Ar, 900 мбар



Экспериментальная
Стрик-Шлирен запись

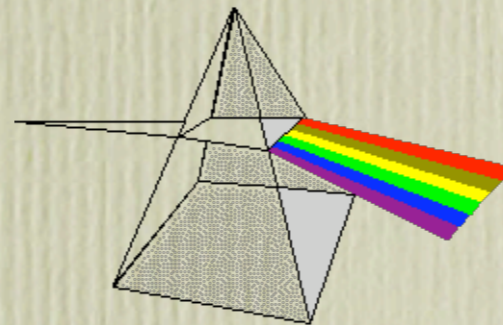
Расчитанное
распределение плотности

Измерения температуры мишени: быстрый многоканальный пирометр

Пирометр регистрирует тепловое излучение мишени в широком спектральном диапазоне (0.4 - 2 мкм) на нескольких длинах волн одновременно, с высоким временным (\sim нс) и пространственным (<50 мкм) разрешением



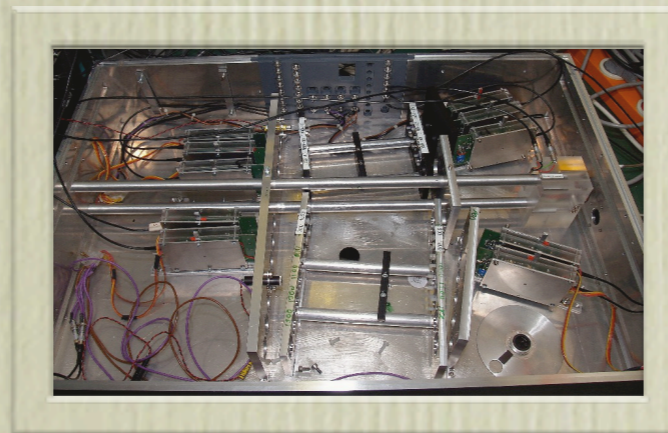
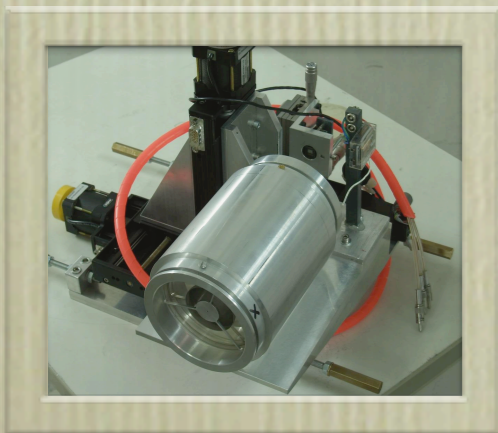
**коллектор
излучения**



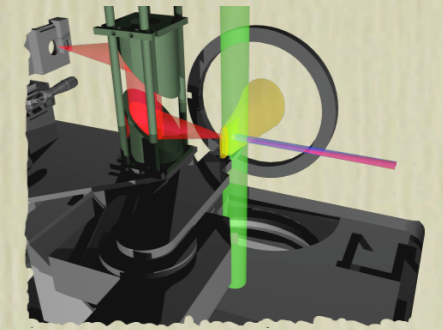
**анализатор
спектра**



**система
регистрации**



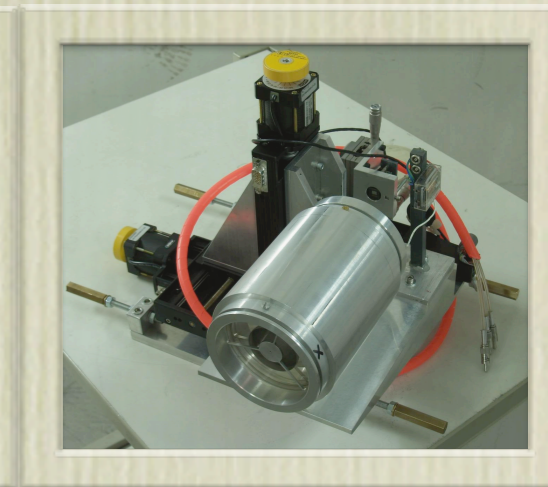
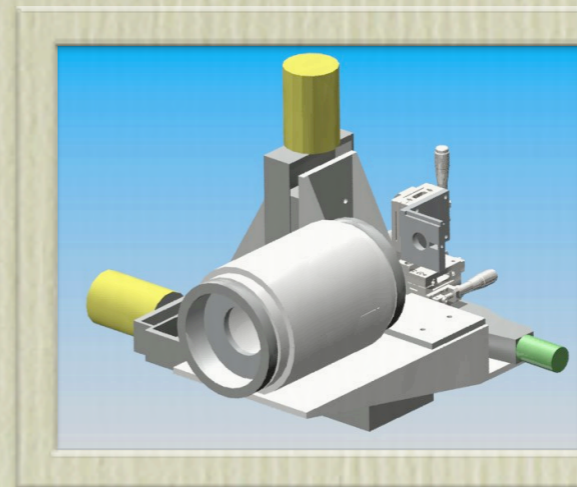
Коллектор излучения



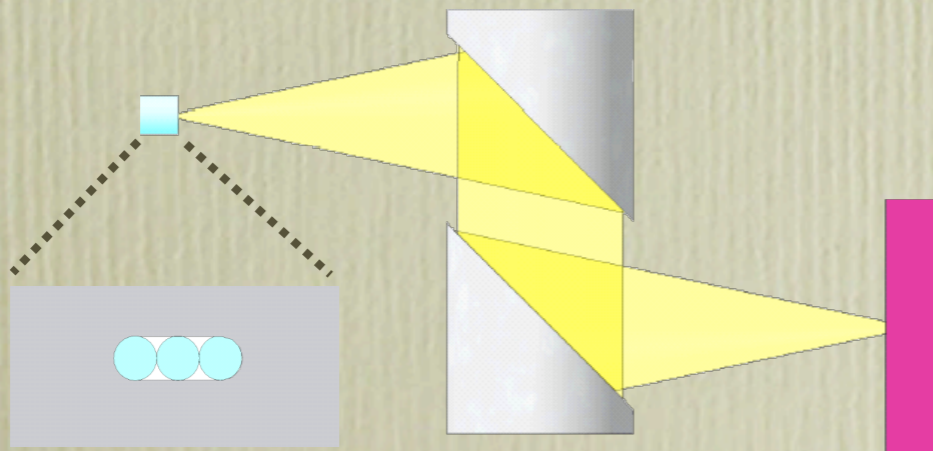
Требования к системе сбора света для пирометра:

- высокая эффективность (числ. аперт.)
- ахроматичность
- разрешение $< 20 - 50$ мкм
- большая глубина резкости изображения
- дистанционное 3D позиционирование на мишени с микронной точностью
- компактная конструкция
- работа в вакууме

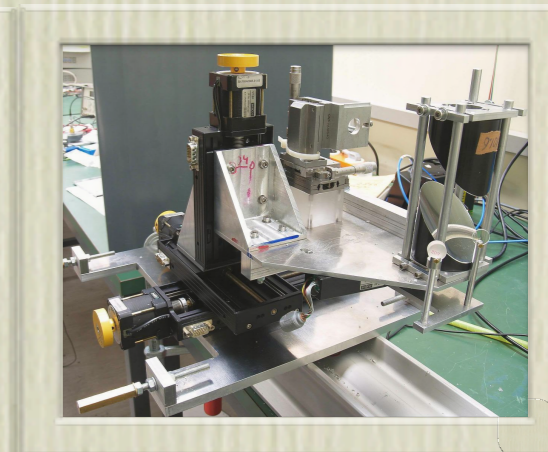
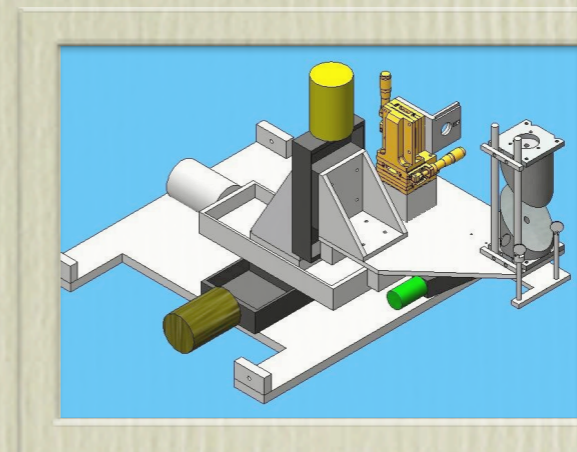
- сферические зеркала



свет направляется в линейку из кварцевых оптических волокон:



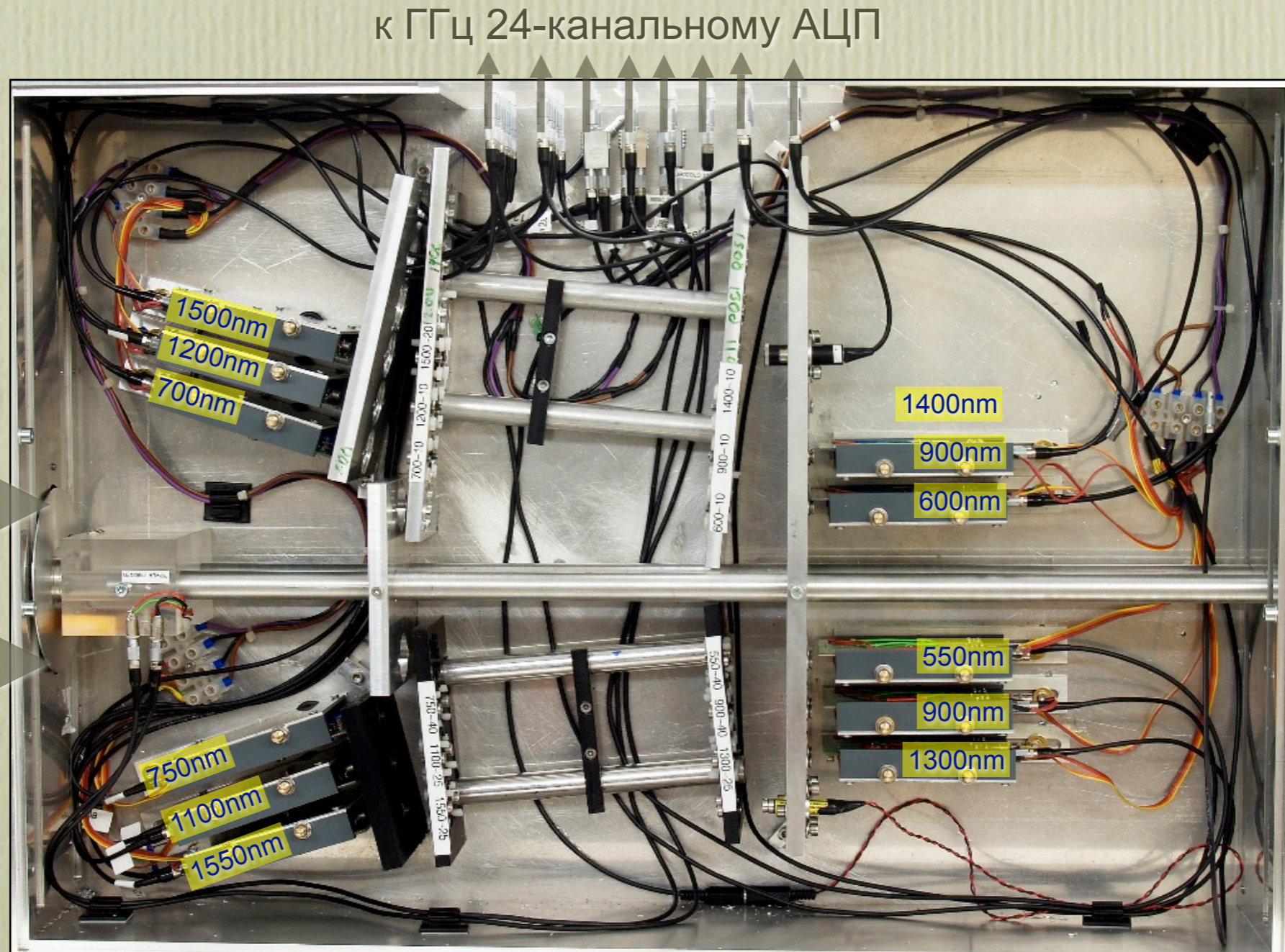
- параболические зеркала



Спектральный анализатор

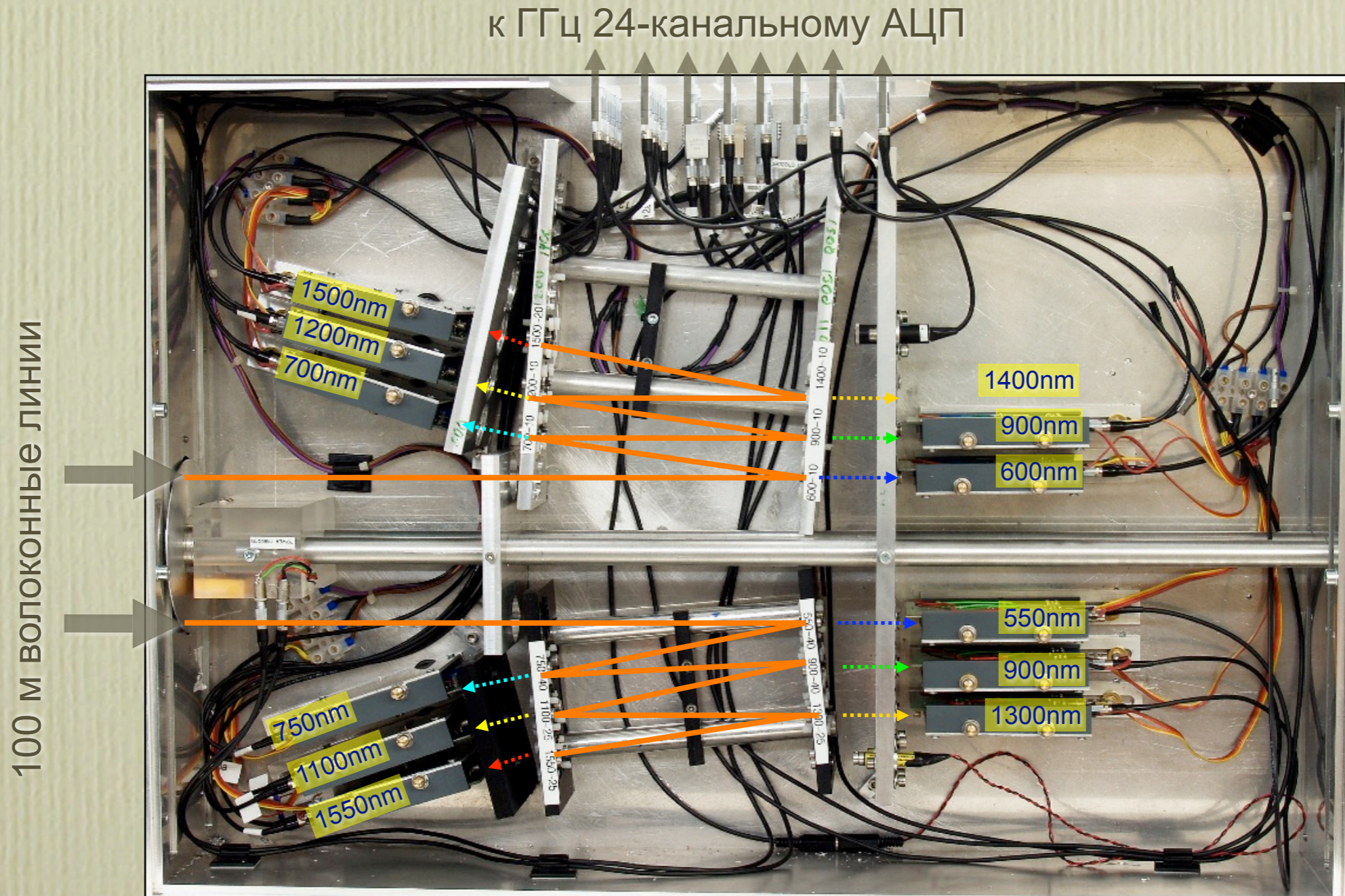
- нет светоделителей
- 12+ каналов (500 – 1500 нм)
- узкие по спектру (10 – 20 нм) каналы
- быстрые усилители и фотодиоды
- выс. чувствительность и дин. диапазон
- временное разрешение ≤ 5 нс
- каждый канал абсолютно откалиброван
- модульная конструкция

100 м волоконные линии



Спектральный анализатор

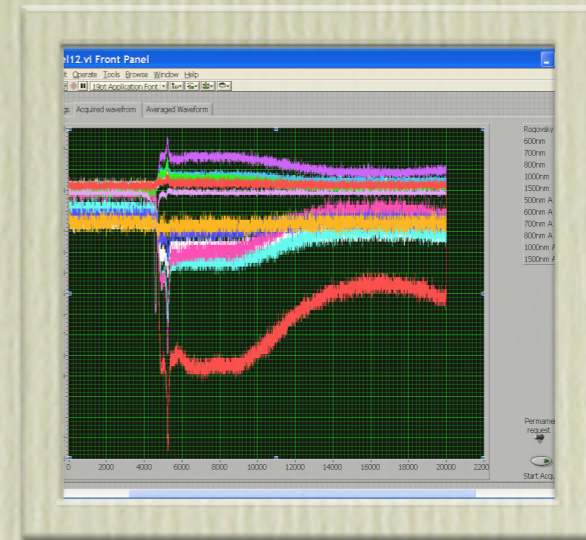
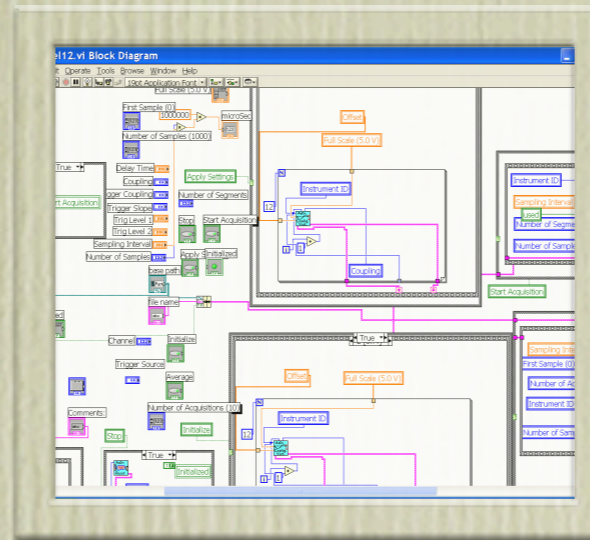
- нет светоделителей
- 12+ каналов (500 – 1500 нм)
- узкие по спектру (10 – 20 нм) каналы
- быстрые усилители и фотодиоды
- выс. чувствительность и дин. диапазон
- временное разрешение ≤ 5 нс
- каждый канал абсолютно откалиброван
- модульная конструкция



Система регистрации и калибровка пирометра

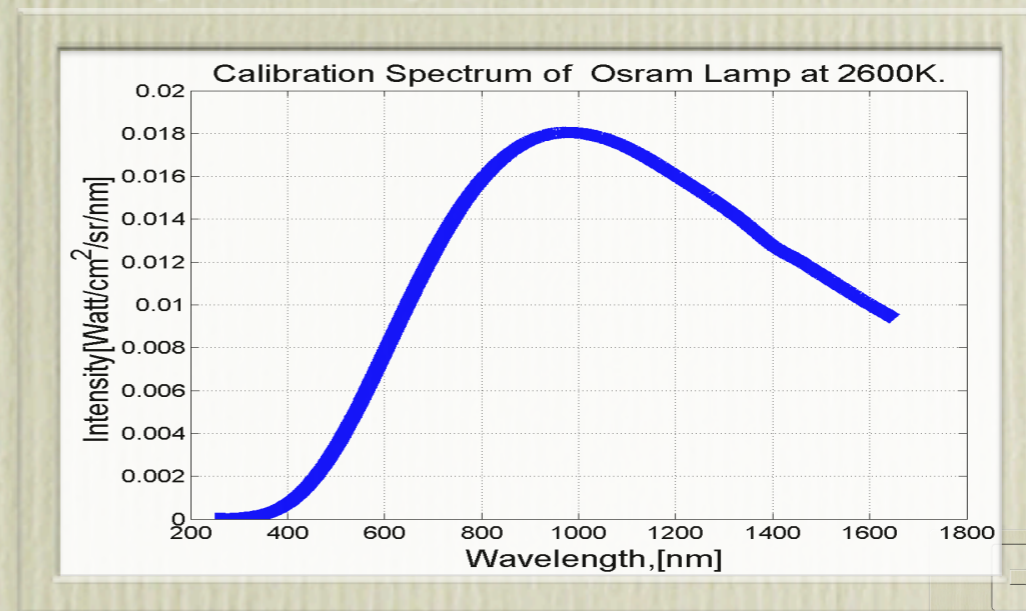
Система регистрации:

- 24-х каналный АЦП (Acqiris, 8 bit, 1 GHz, 1 GS/s)
- специализированное прогр. обеспечение на LabView и Python

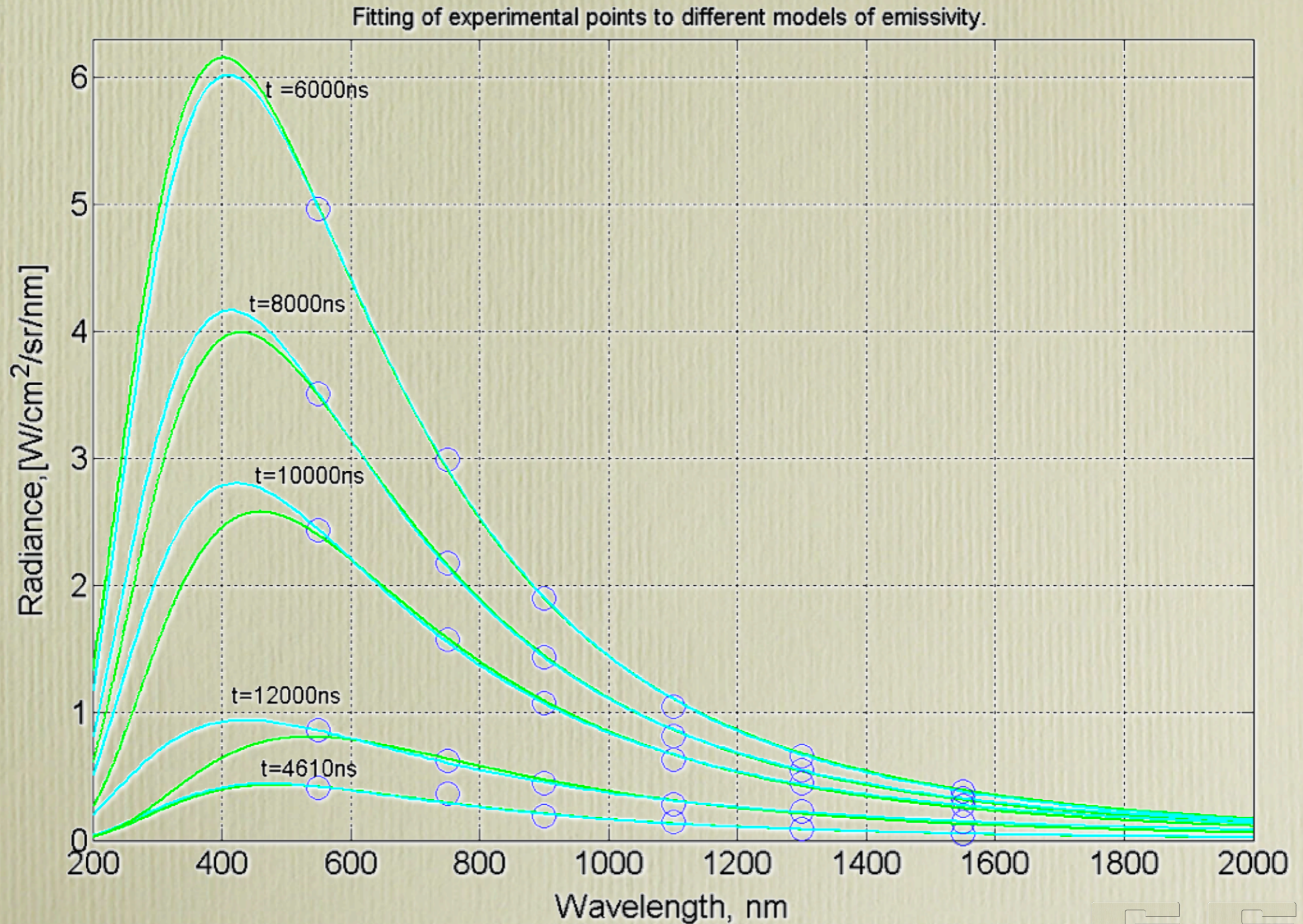


Калибровка пирометра:

- каждый канал абсолютно калибруется до и после эксперимента, используя калибровочную ленточную вольфрамовую лампу (OSRAM W17/G)



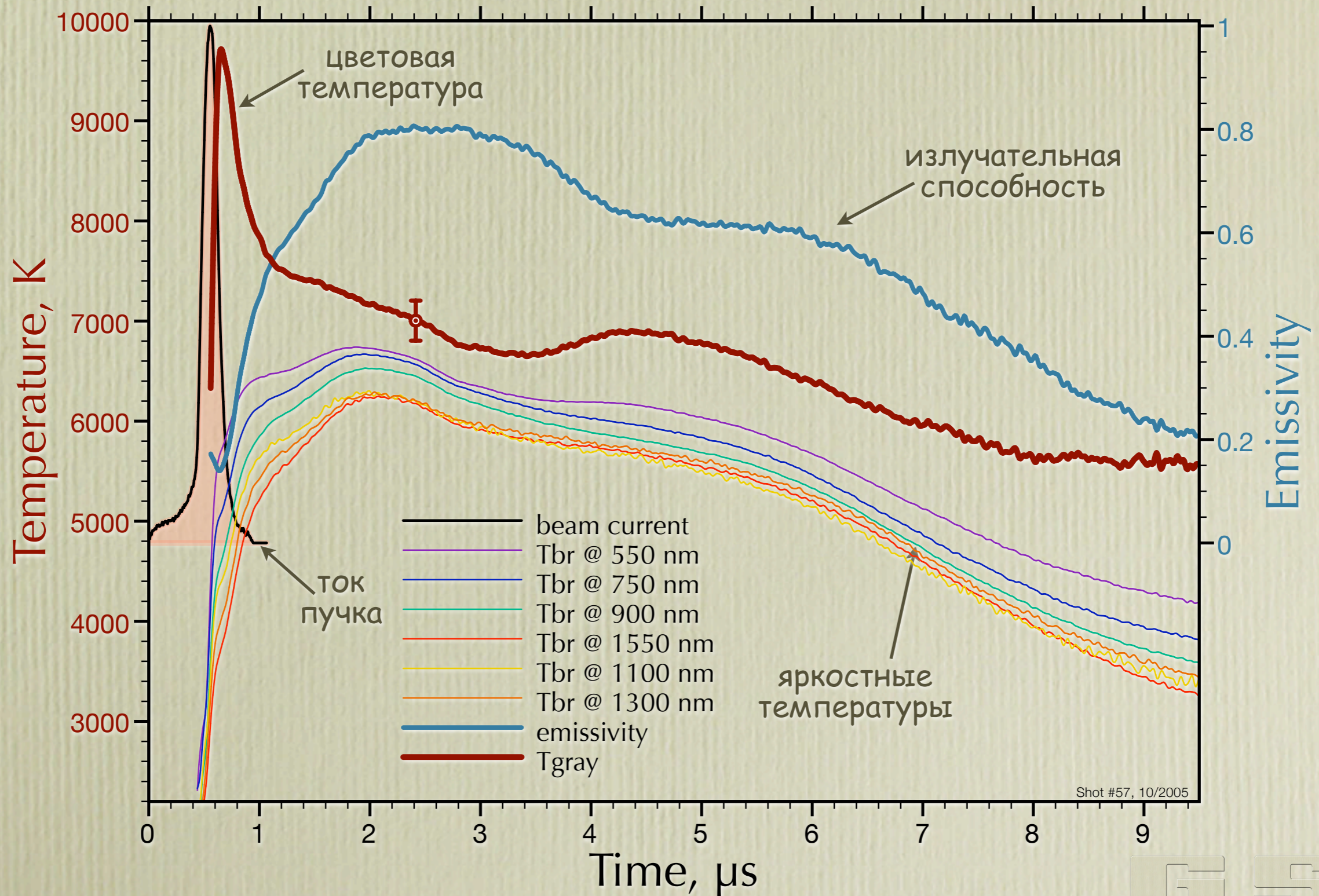
Определение мульти-цветовой температуры



Быстрые измерения температуры мишени: нагрев вольфрамовой фольги до 10 кК и последующий разлет

Пучок: ^{238}U , 350 МэВ/н, 120 нс, $2 \cdot 10^9$

Мишень: 100 μm W фольга



Оптический стрик-спектрометр как дополнение к быстрому многоканальному пирометру

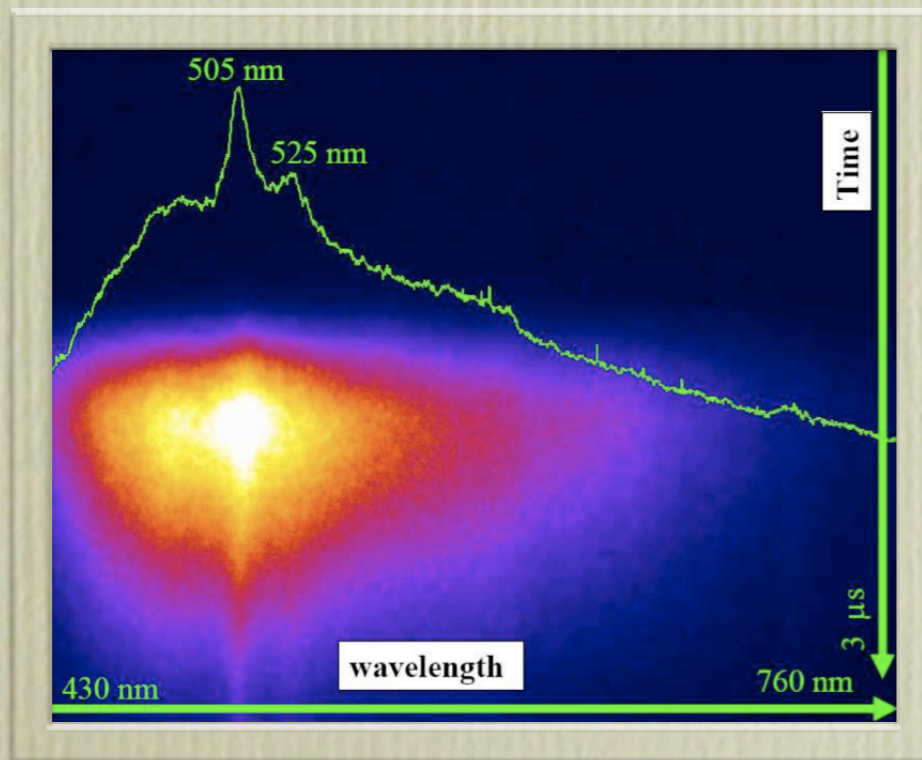
- непрерывный спектр 300 - 800 нм
- высокое временное разрешение
- ограниченная длительность записи
- низкая чувствительность
- трудности абсолютной калибровки

электронная
стрик-камера
(ЭОП)

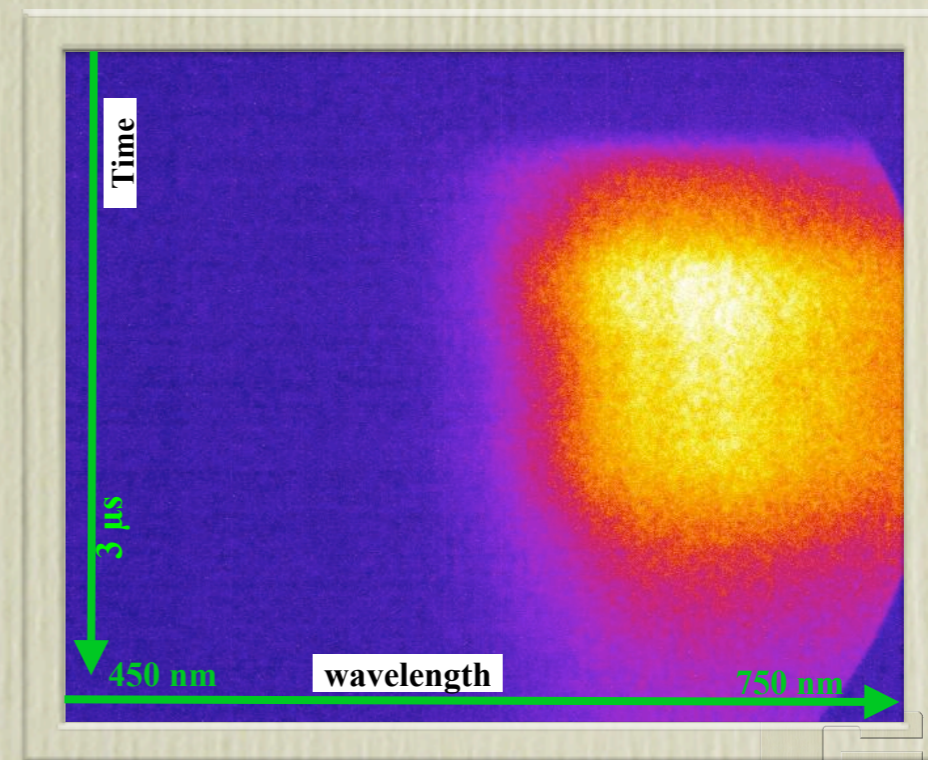
спектрометр с
голографической решеткой
и волоконным входом



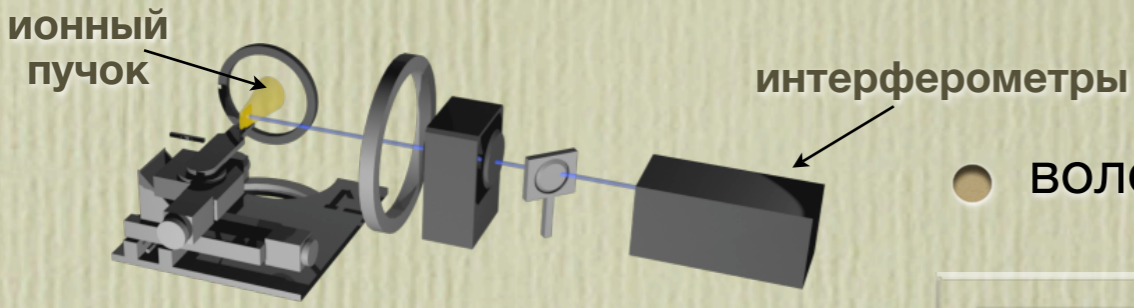
свинцовая мишень



вольфрамовая мишень

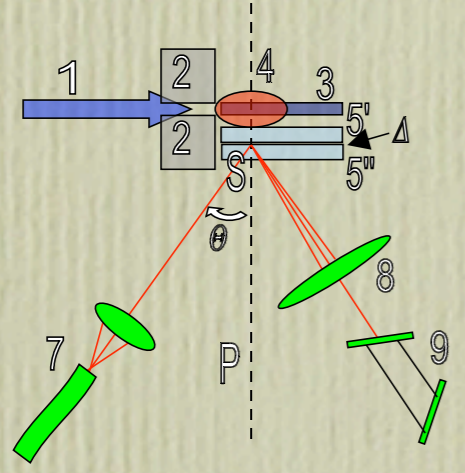


Лазерные интерферометры для измерения давления

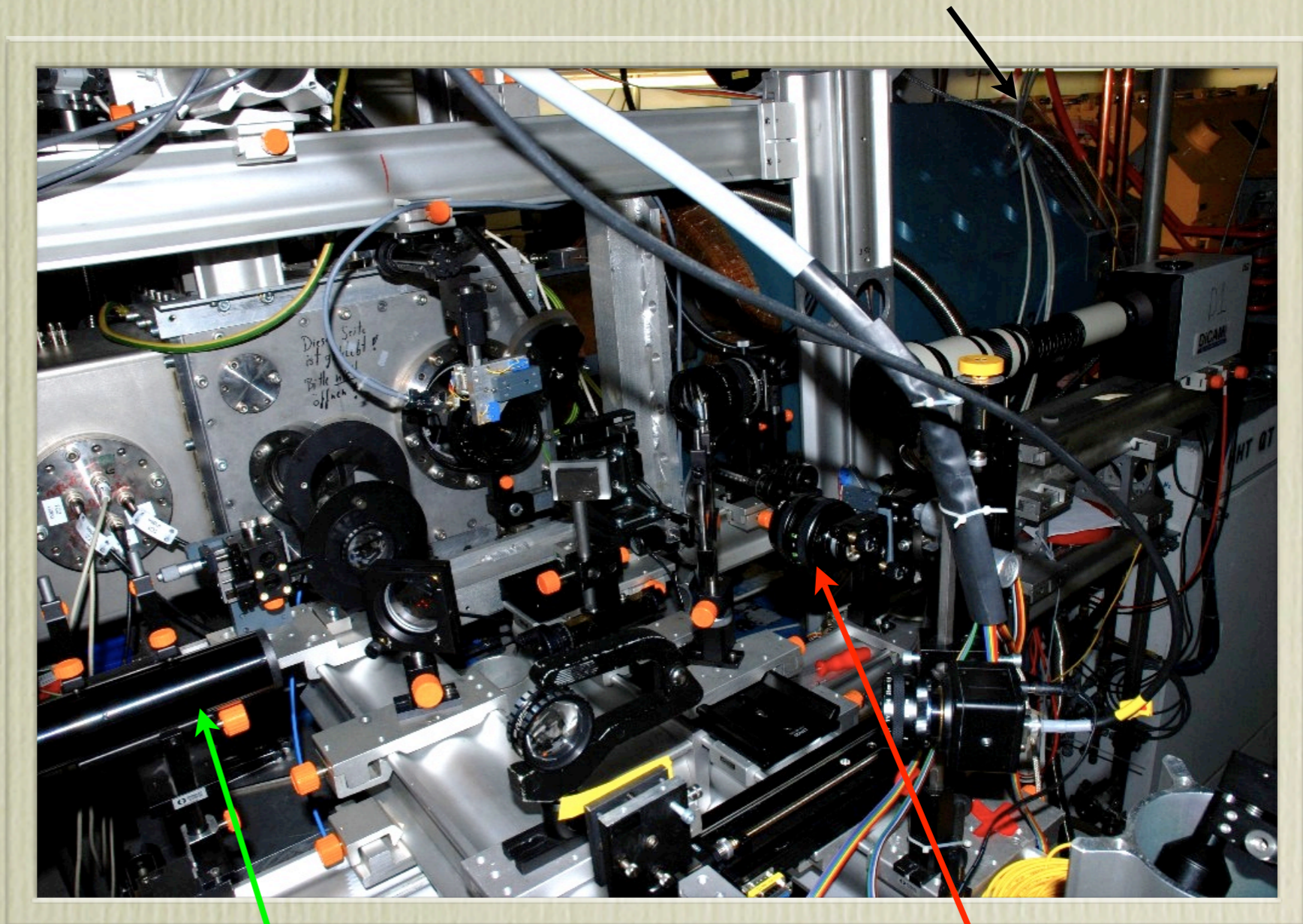
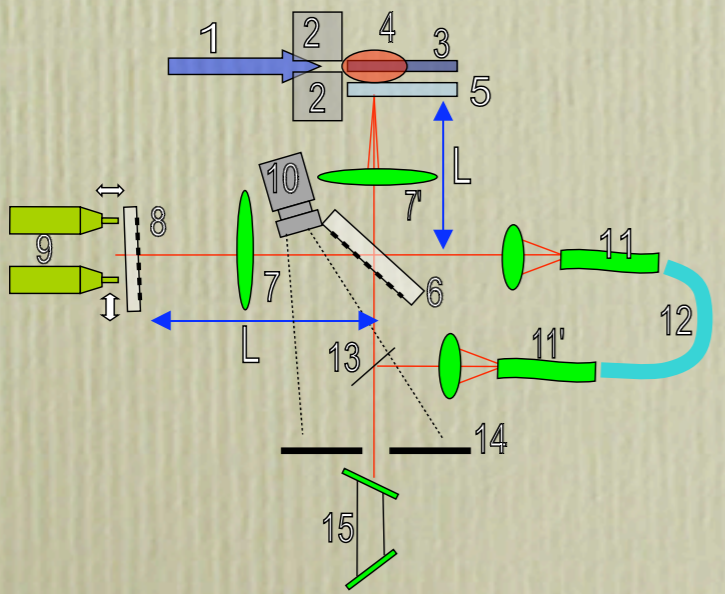


- волоконный доплеровский интерферометр(VISAR)

- 15° интерферометр смещения с "зазором"



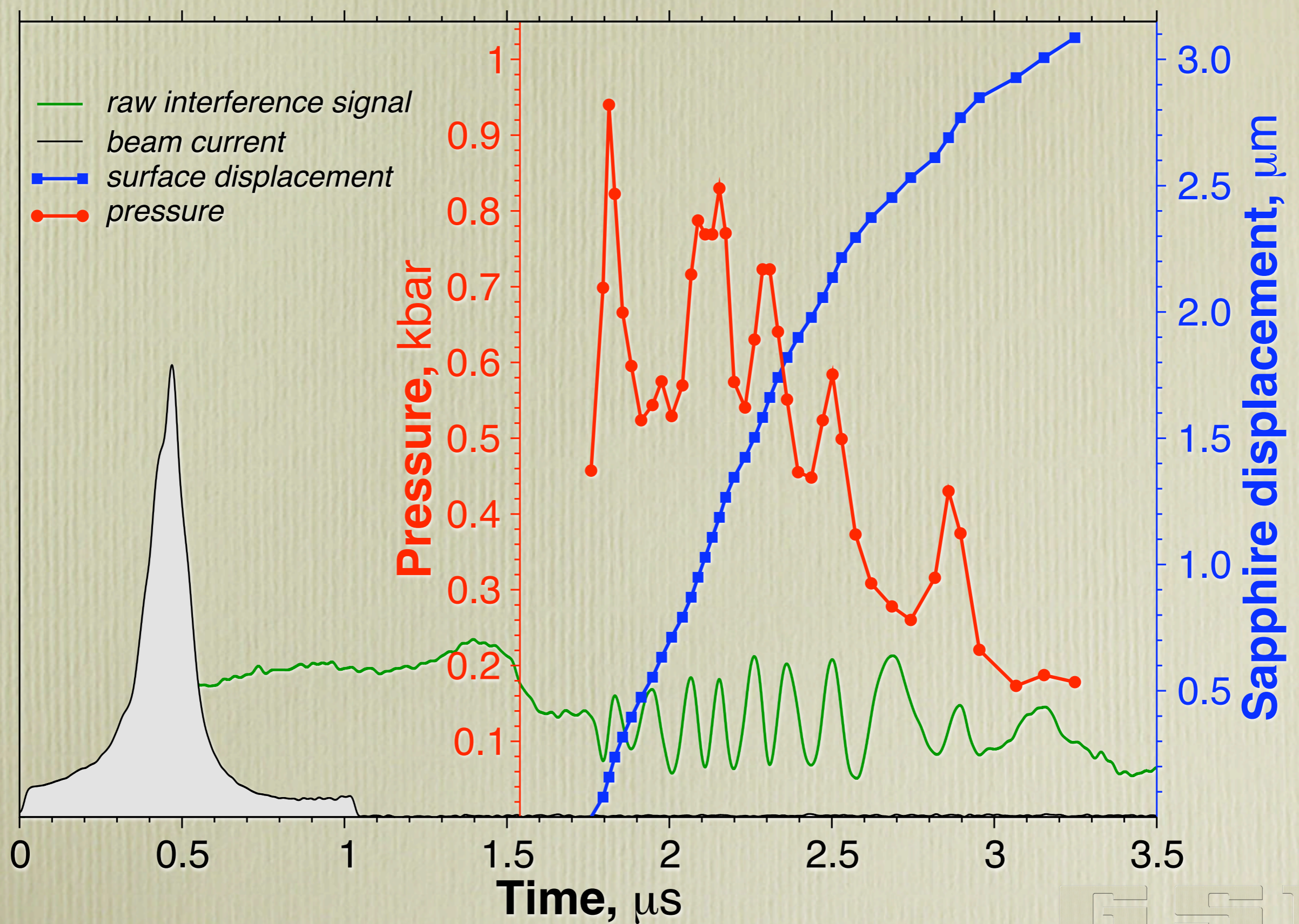
- 90° интерферометр Майкельсона



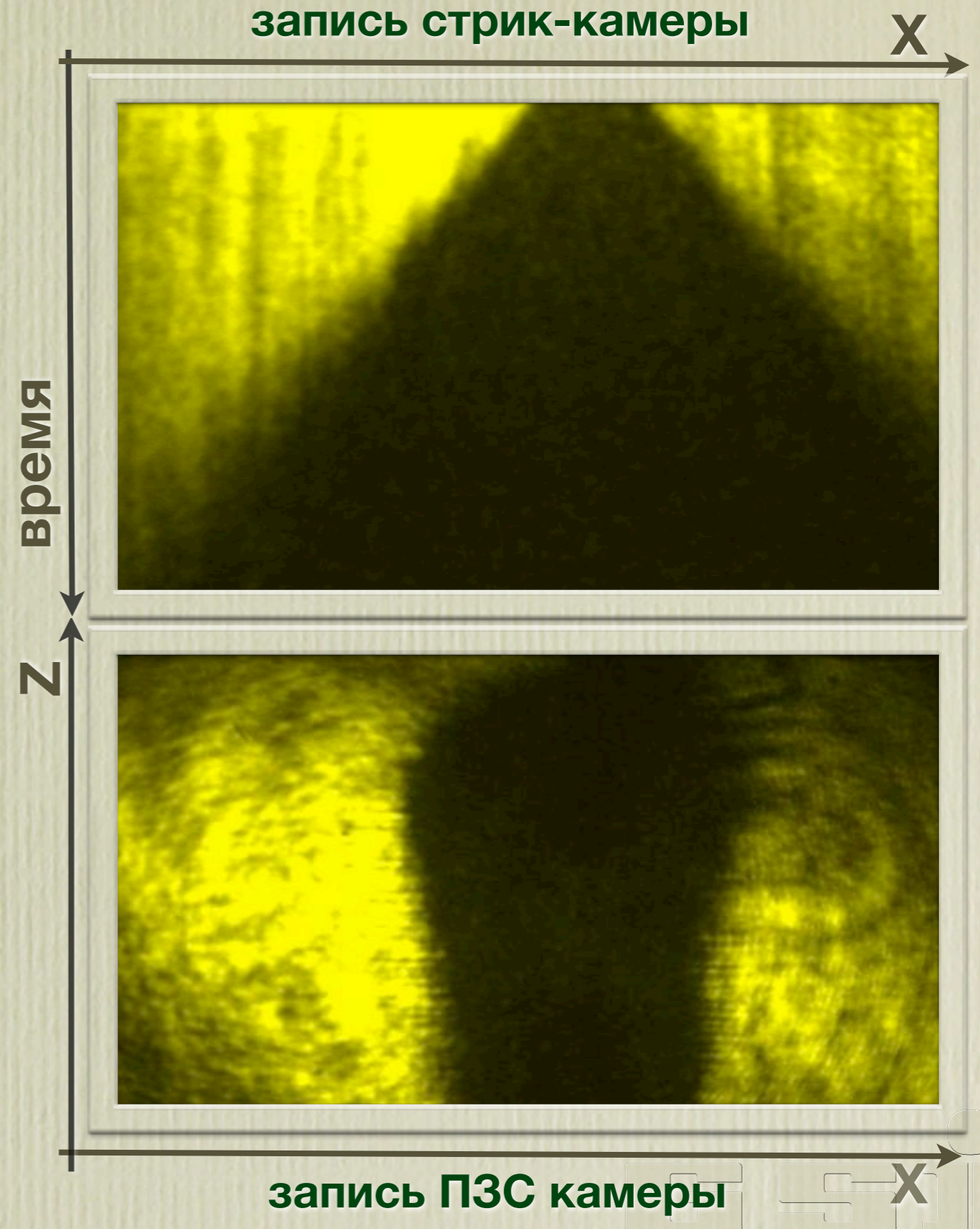
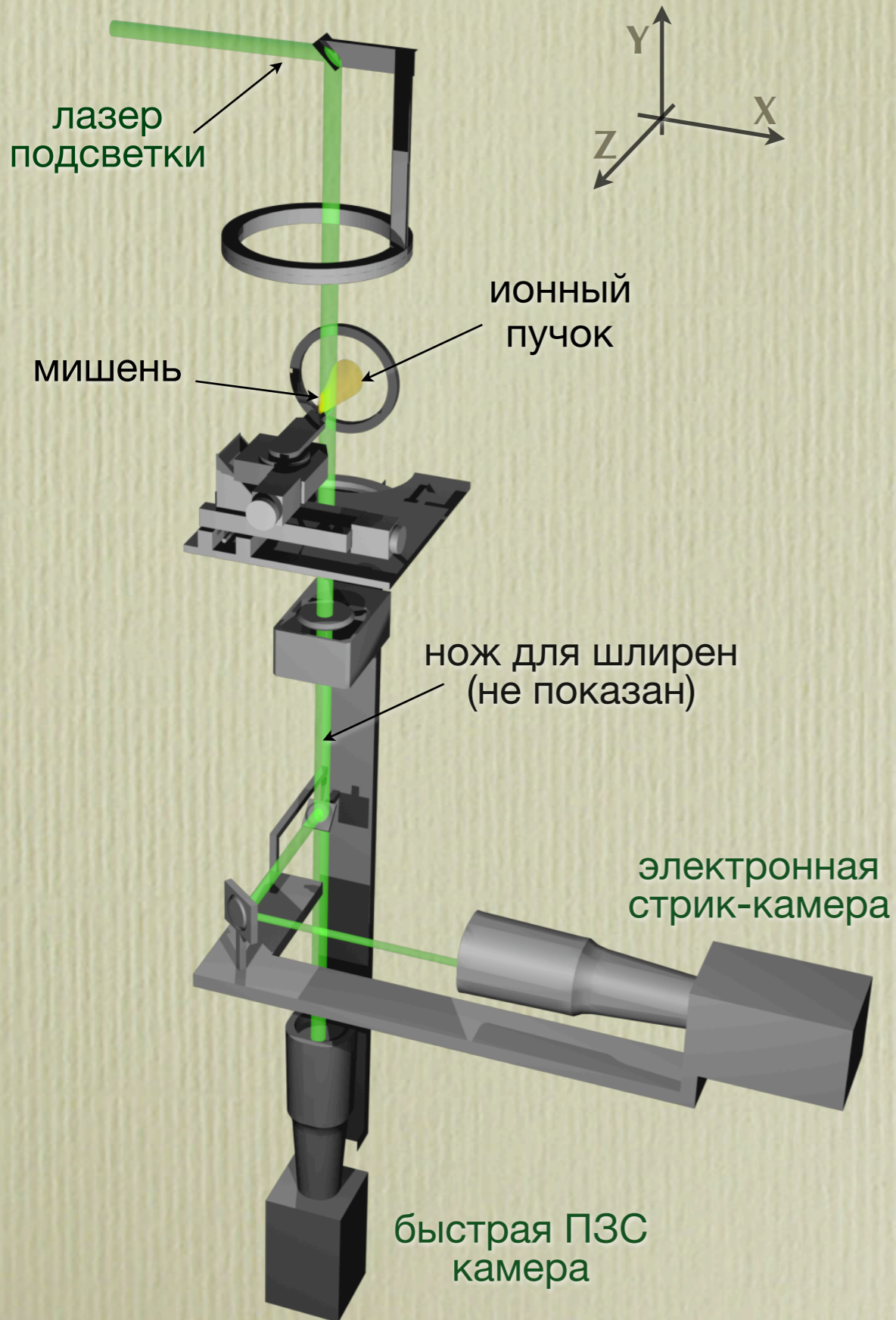
He-Ne лазер интерферометра Майкельсона

моторизованный объектив волоконной системы VISARa

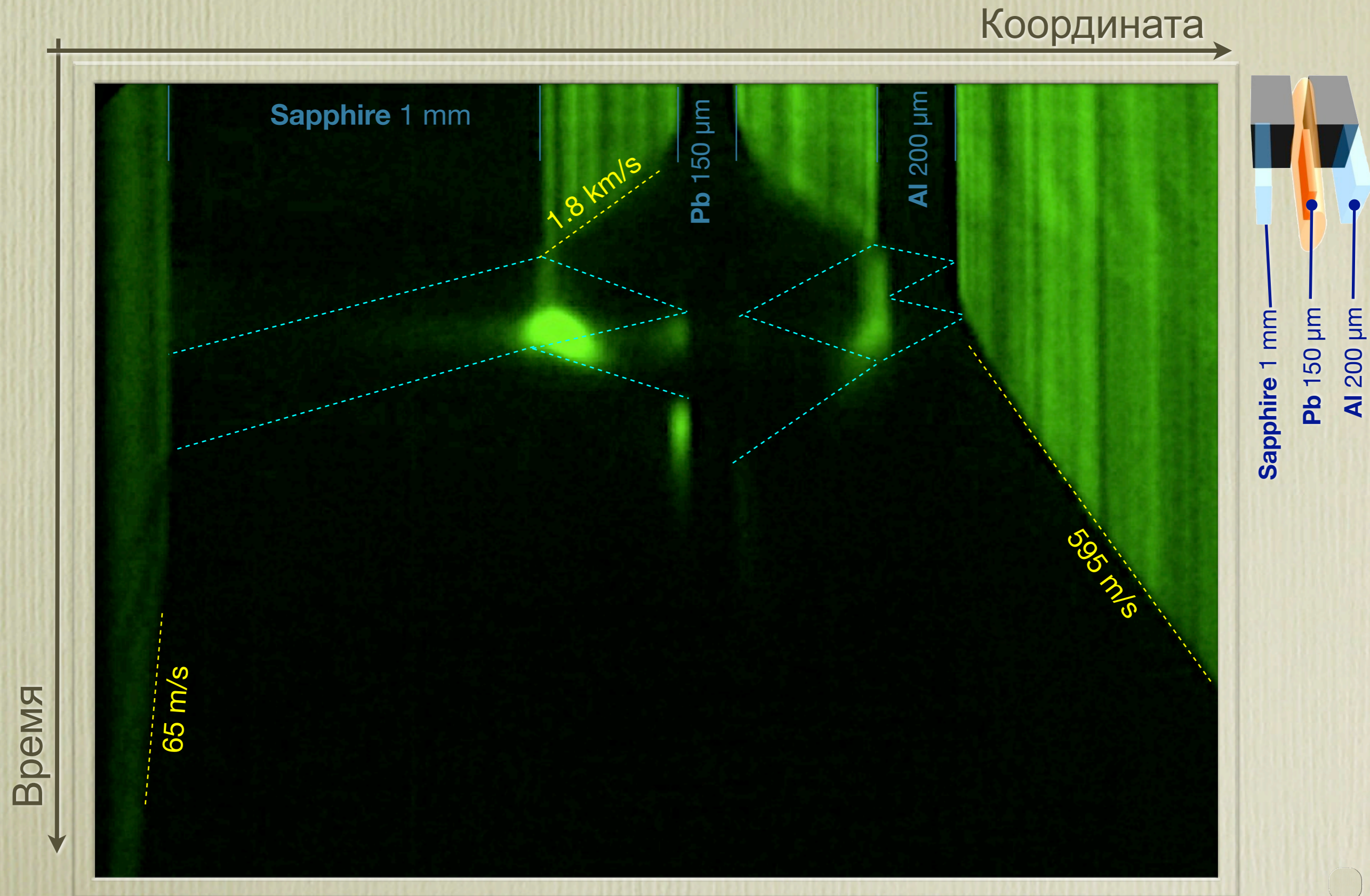
Измерение давления при помощи лазерного интерферометра смещения



Быстрая теневая съемка с лазерной подсветкой: измерение скорости разлета и объема образца



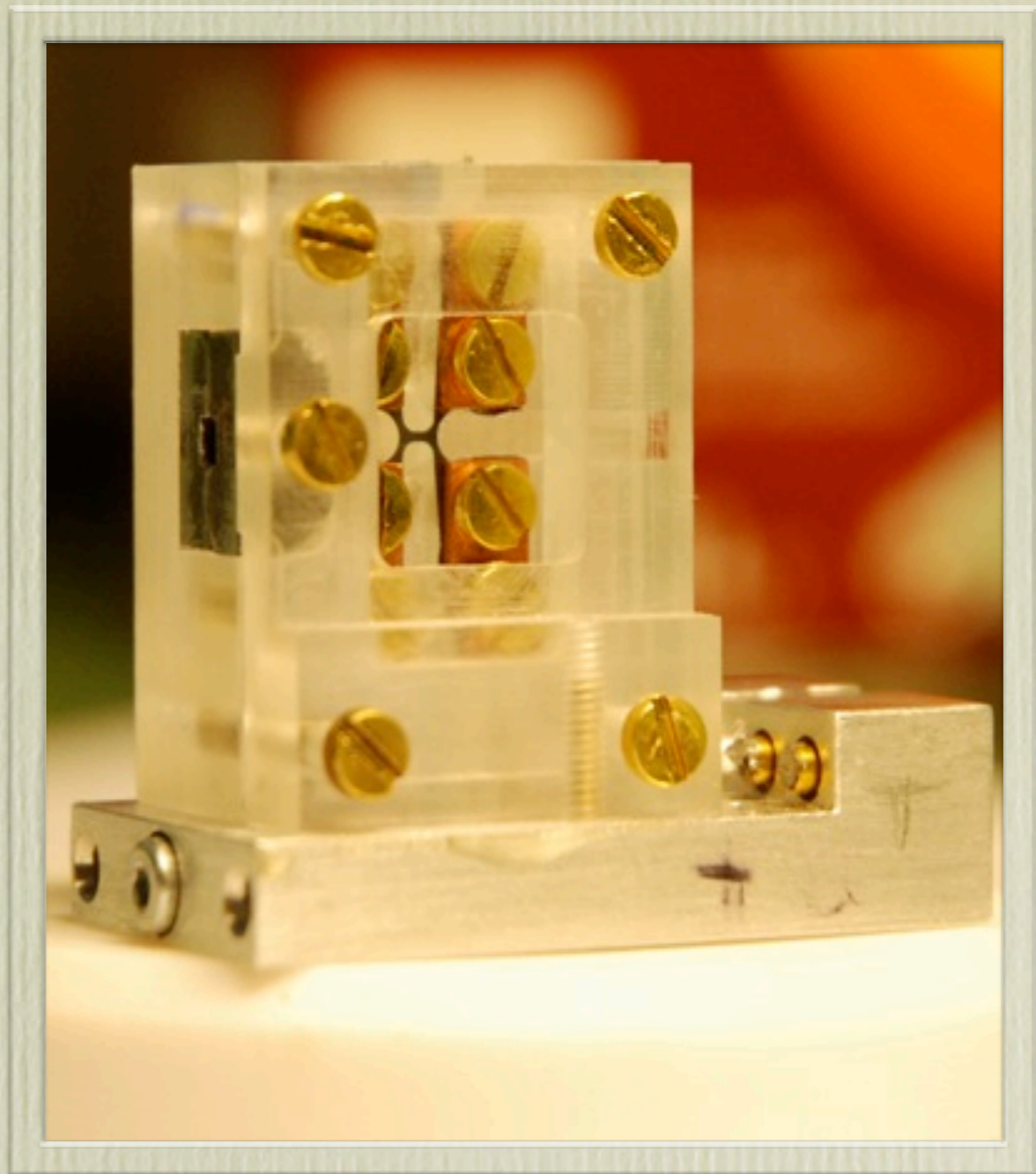
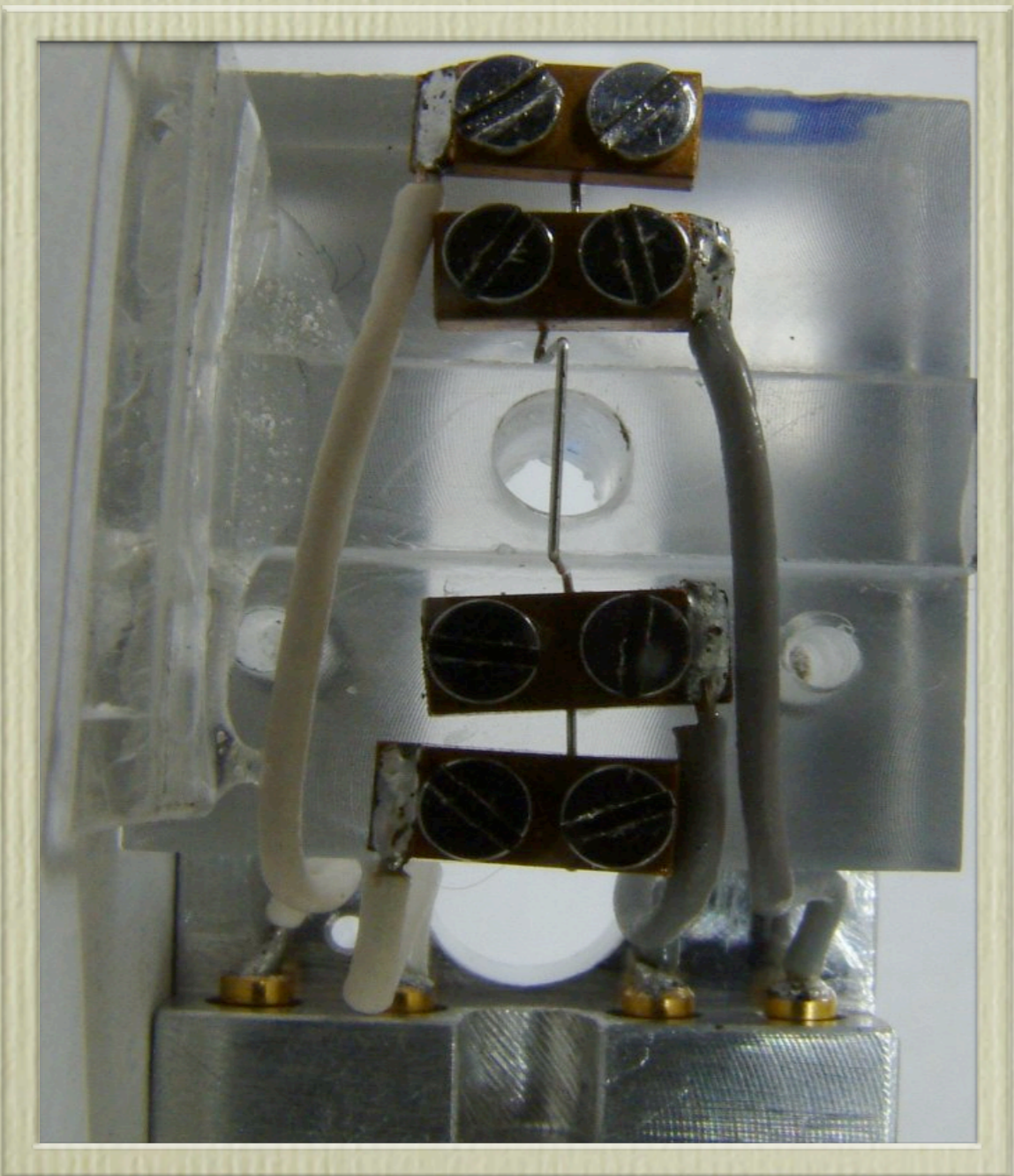
Быстрая теневая съемка с лазерной подсветкой: ударное ускорение алюм. фольги до ~км/с скоростей



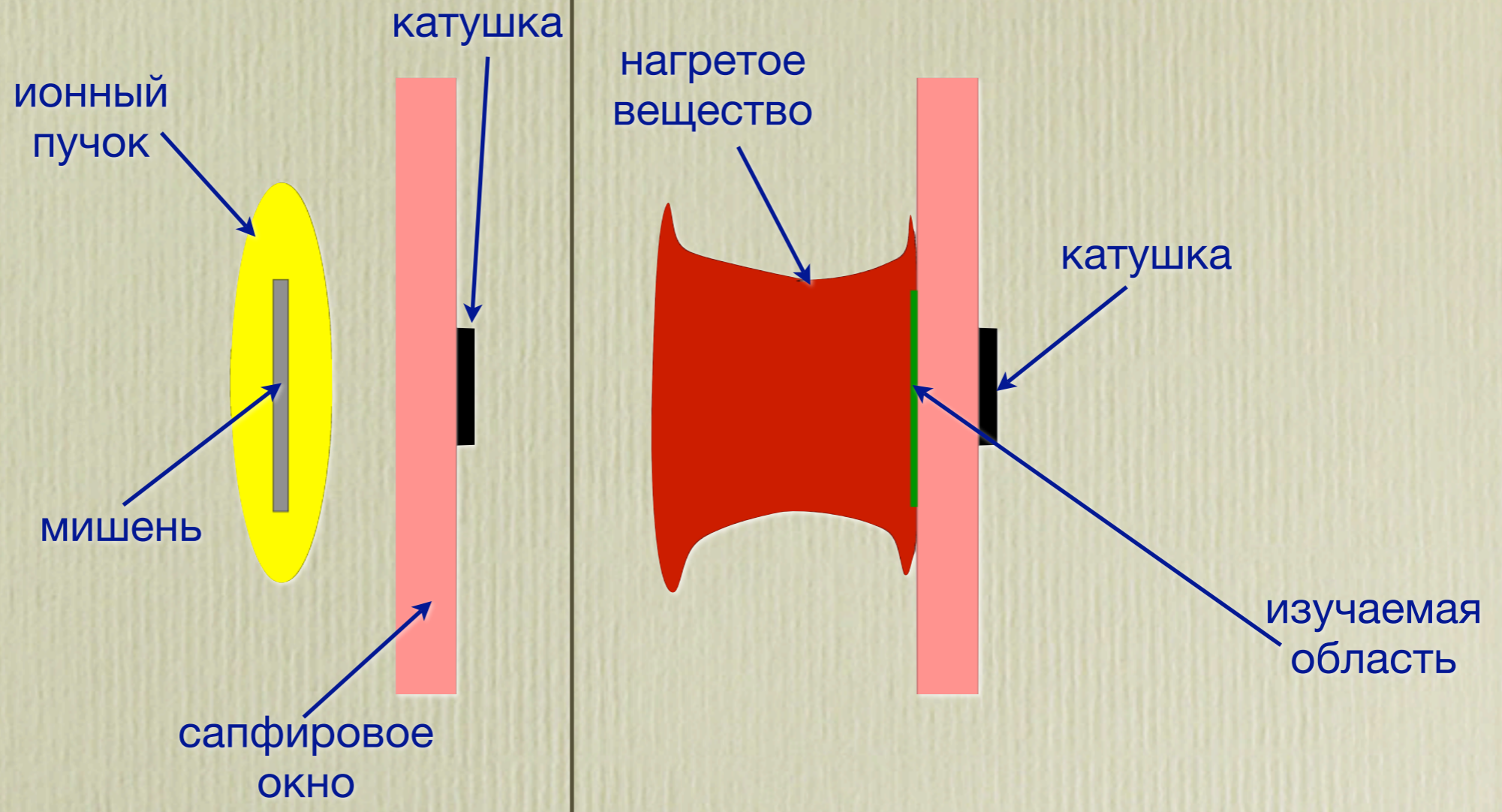
Измерение электропроводности

- фундаментальные транспортные свойства вещества
- предоставляют информацию, комплиментарную к УРС
- связь с другими свойствами и явлениями:
 - оптические свойства: прозрачность, излучательная способность
 - теплопроводность
 - вклад свободных электронов в тормозную способность
- зачастую более чувствительны к определенным процессам в мишени (фазовые переходы)
- информация о экзотических переходах и состояниях (металл-диэлектрик, металлизация, и др.)

Мишени для измерения электропроводности

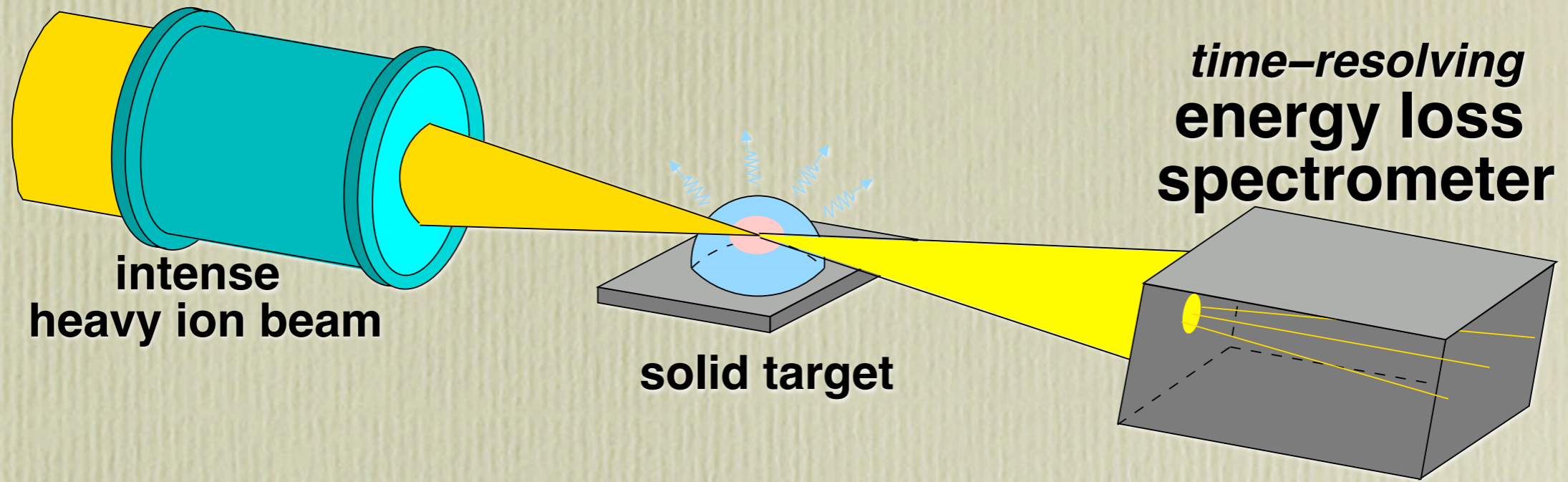


Перспективы измерения электропроводности: разработка бесконтактных методик



- высокое временное разрешение (100-500 МГц)
- хорошее пространственное разрешение
- измерения для различных состояний / фаз
- допускает одновременные измерения температуры и давления

Оригинальный метод диагностики мишени: динамика энергетических потерь

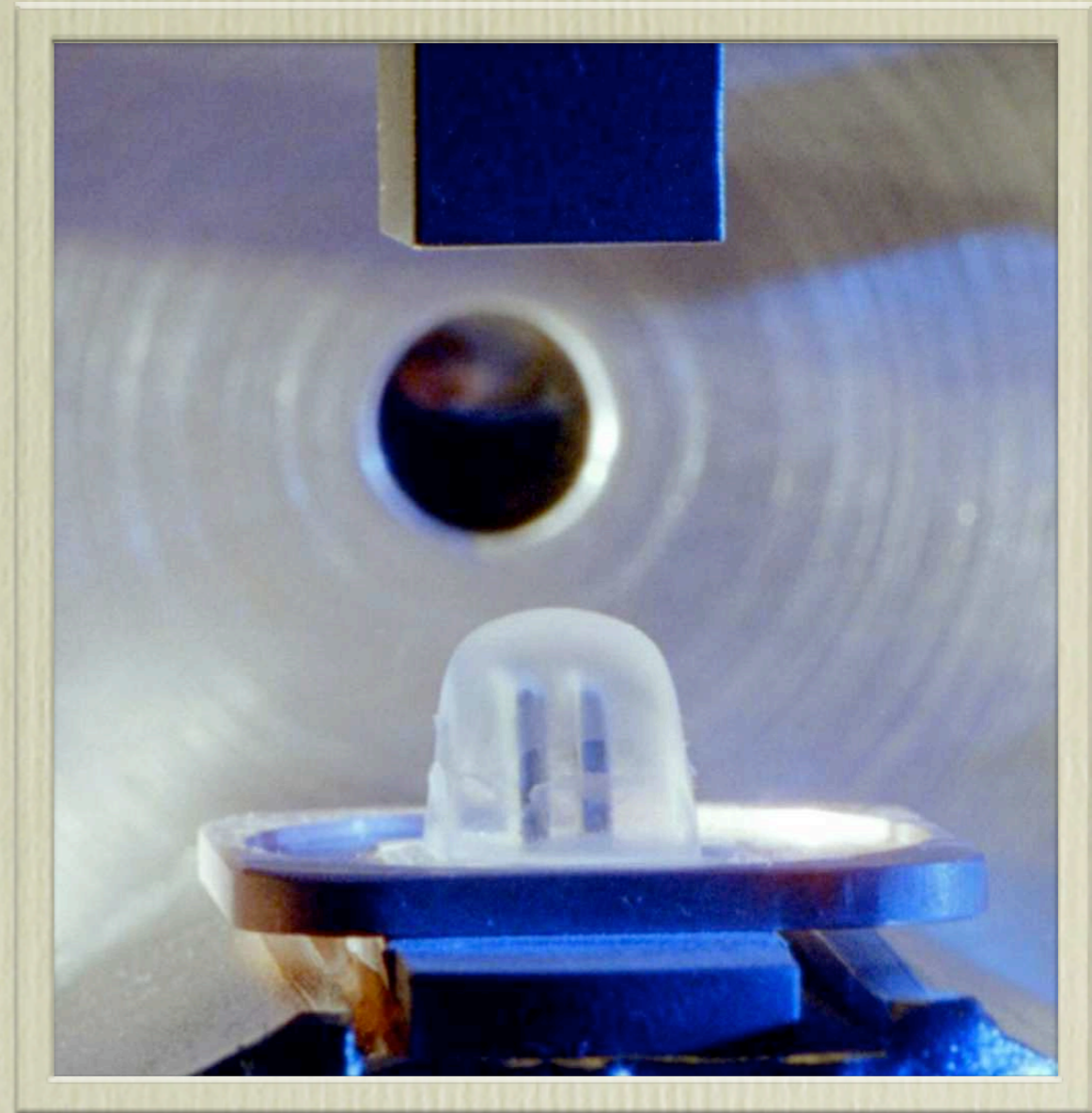
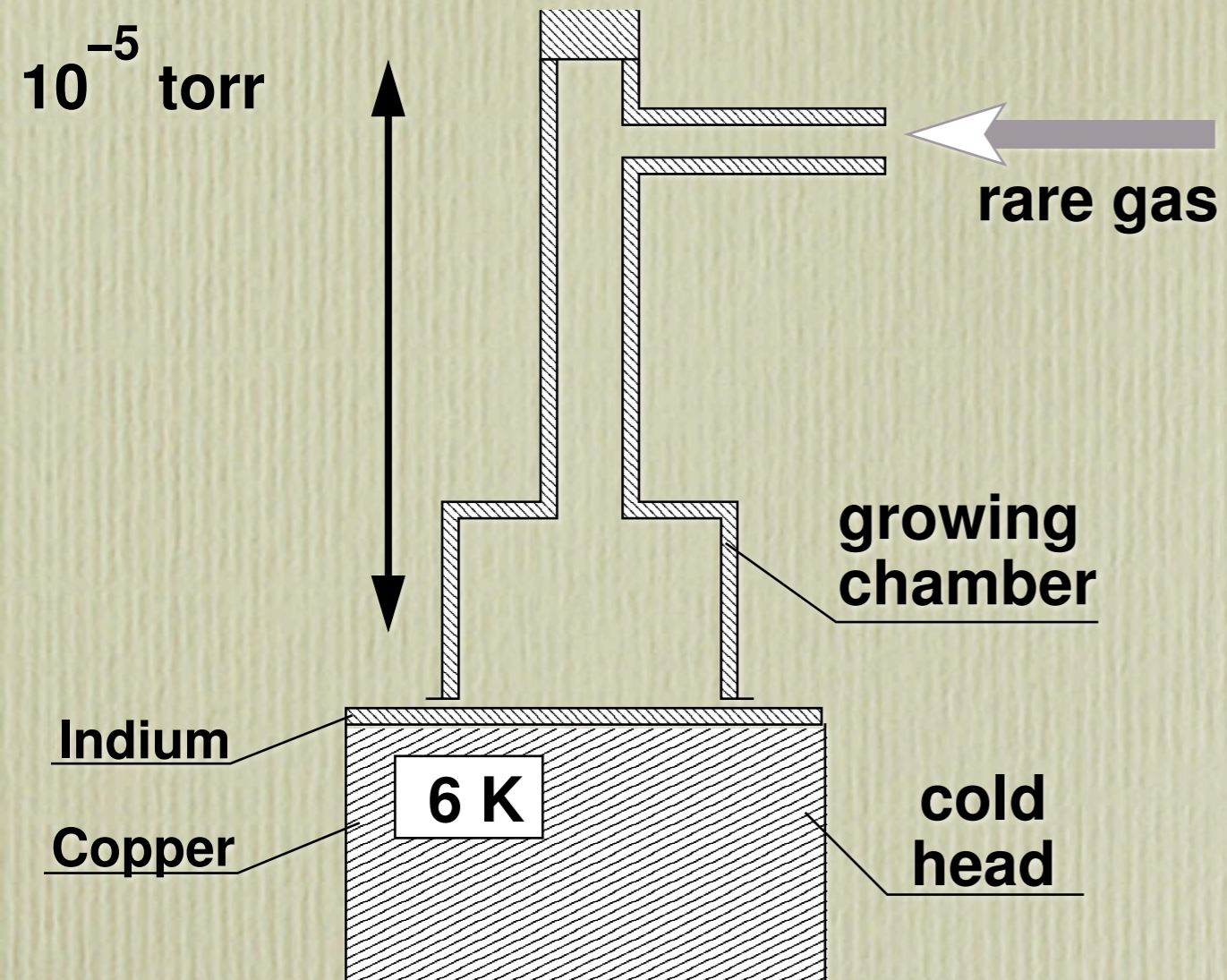


Временная зависимость энергетических потерь (ВЗЭП) пучка в течение взаимодействия с мишенью: **один и тот же пучок** используется как **для нагрева**, так и **для диагностики** мишени

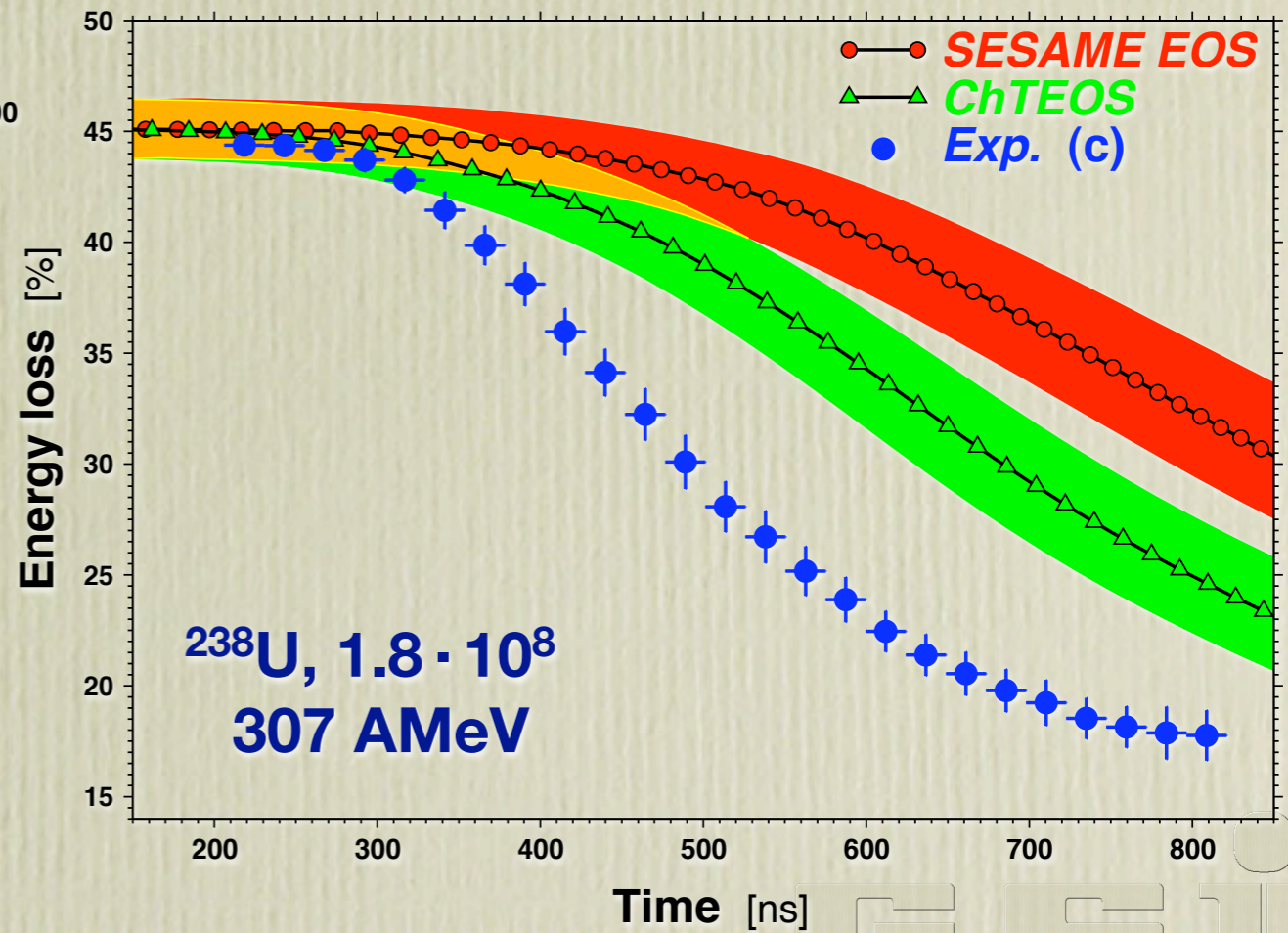
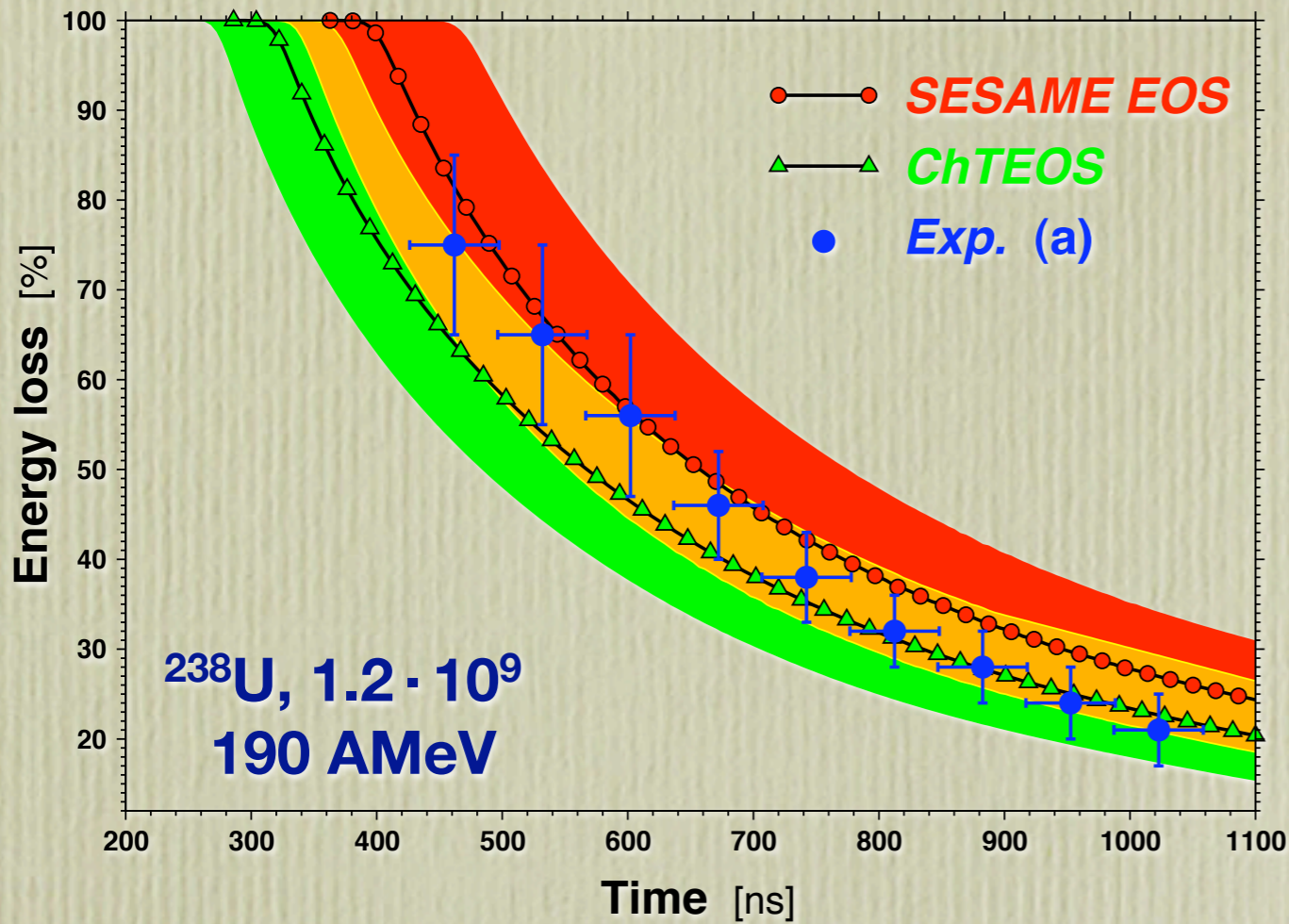
- **динамика линейной плотности мишени**
- **температурные эффекты тормозной способности вещества**

->данные для количественной проверки теор. моделей (УРС)

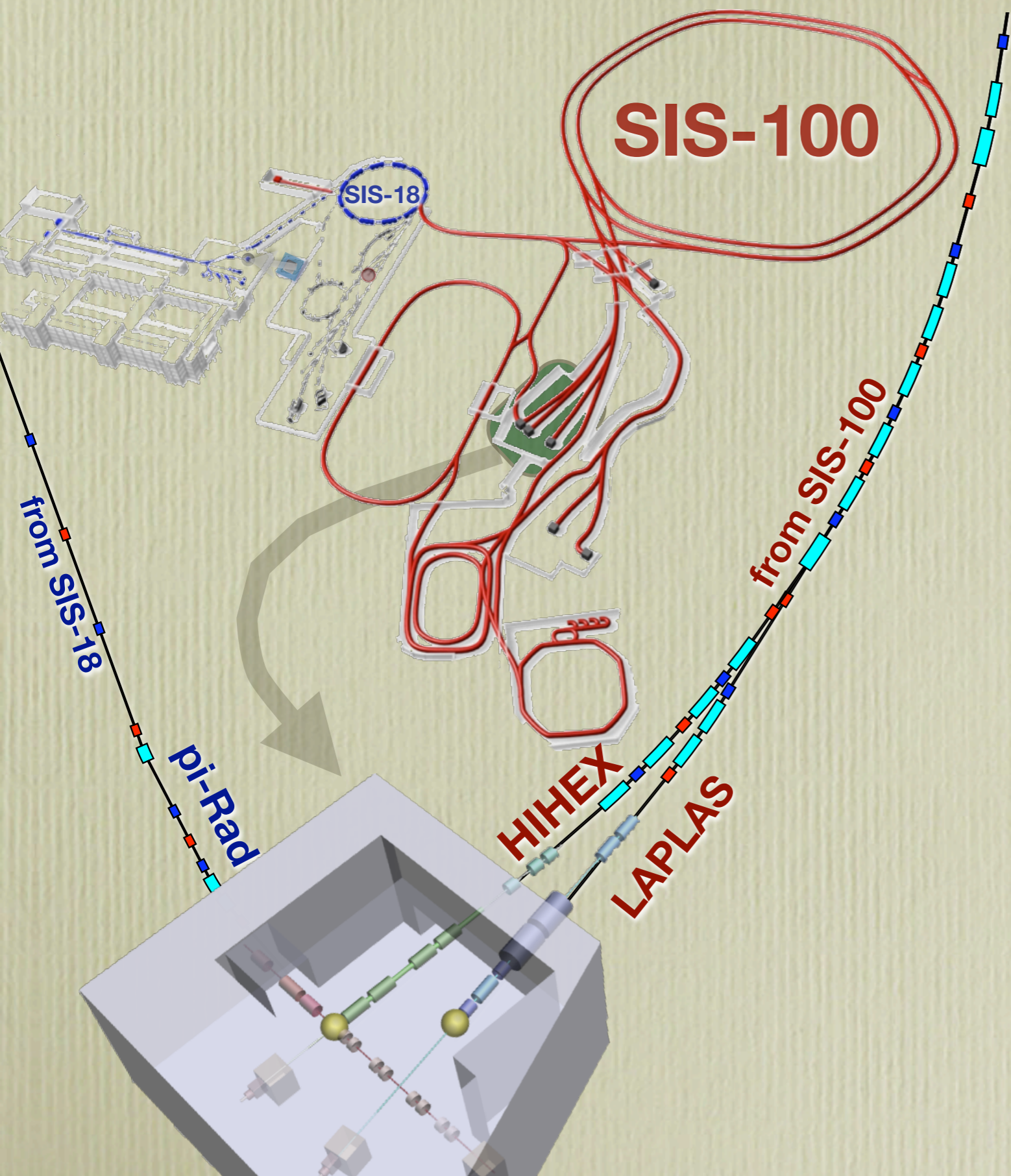
Криогенные кристаллы инертных газов



Измерение ВЗЭП: проверка моделей УРС неона



Parameters of intense uranium beams for generation of extreme states in matter at GSI and at FAIR



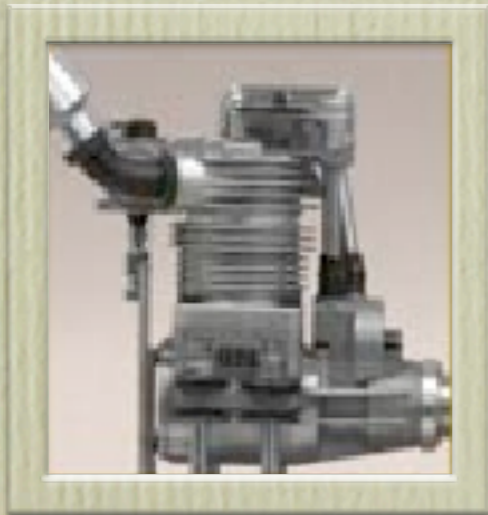
URANIUM BEAM	GSI	FAIR
E_0	400 AMeV	2700 AMeV
N	$4 \cdot 10^9$ ions	$2 \cdot 10^{12}$ ions
E_{beam}	0.06 kJ	76 kJ
τ	130 ns	50 ns
P_{beam}	0.5 GW	1.5 TW
S_f	$\sim 1 \text{ mm}^2$	$\sim 1 \text{ mm}^2$
		<i>Lead target</i>
E_s	$\sim 1 \text{ kJ/g}$	600 kJ/g
P_s	5 GW/g	12 TW/g

Протонная / ионная радиография

Преимущества протонной радиографии по сравнению с традиционной рентгеновской:

- магнитные линзы для манипуляций с пучком: построения и коррекции четкости изображения, устранения эффектов рассеяния
- высокое разрешение и дин. диапазон как по плотности, так и по составу
- лучшая чувствительность, сигнал/шум и эффективность регистрации
- большая глубина проникновения (образцы с большей лин. плотностью)
- возможность многокадровой съемки

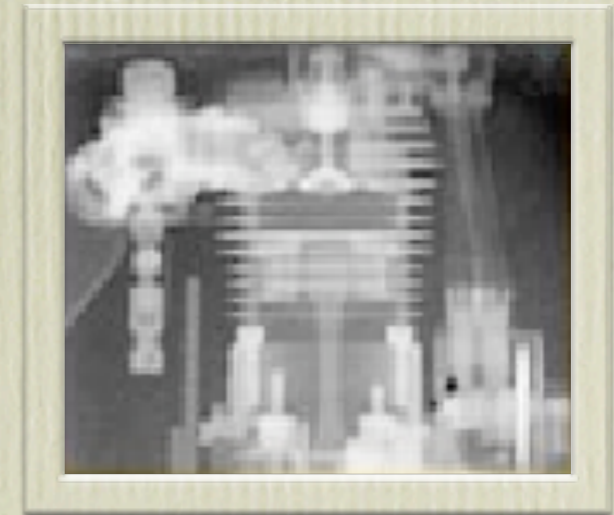
фото



рентген 100 кэВ



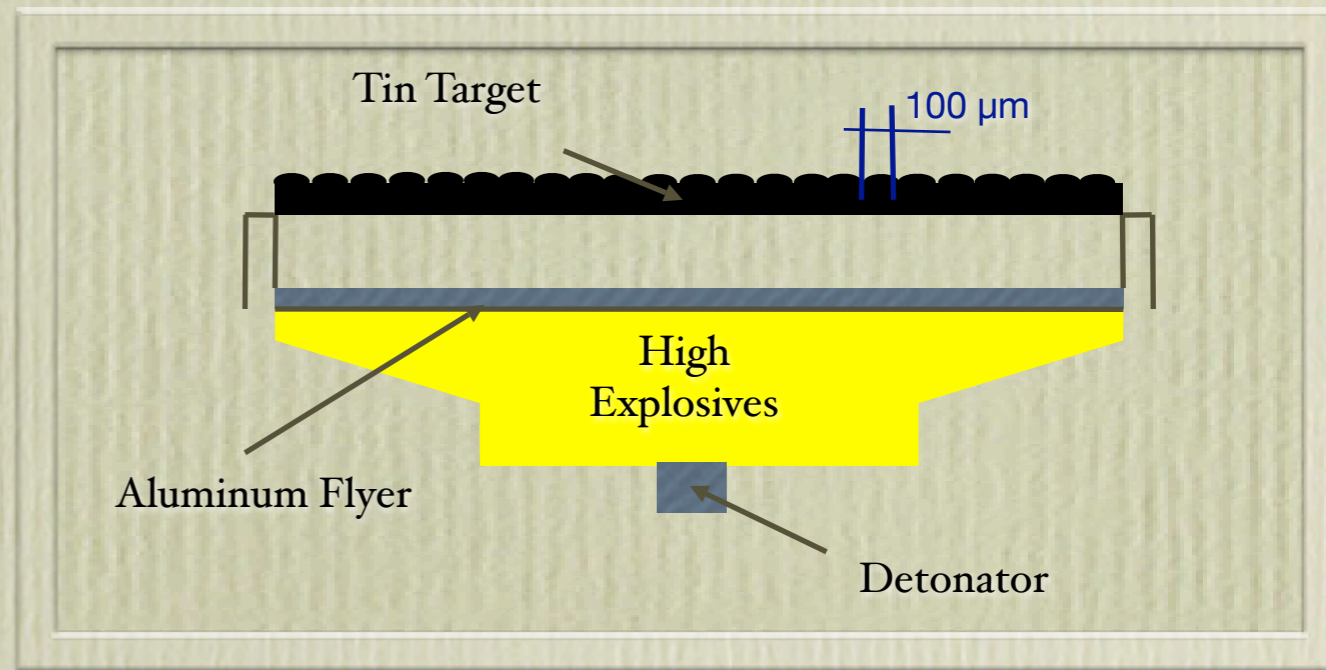
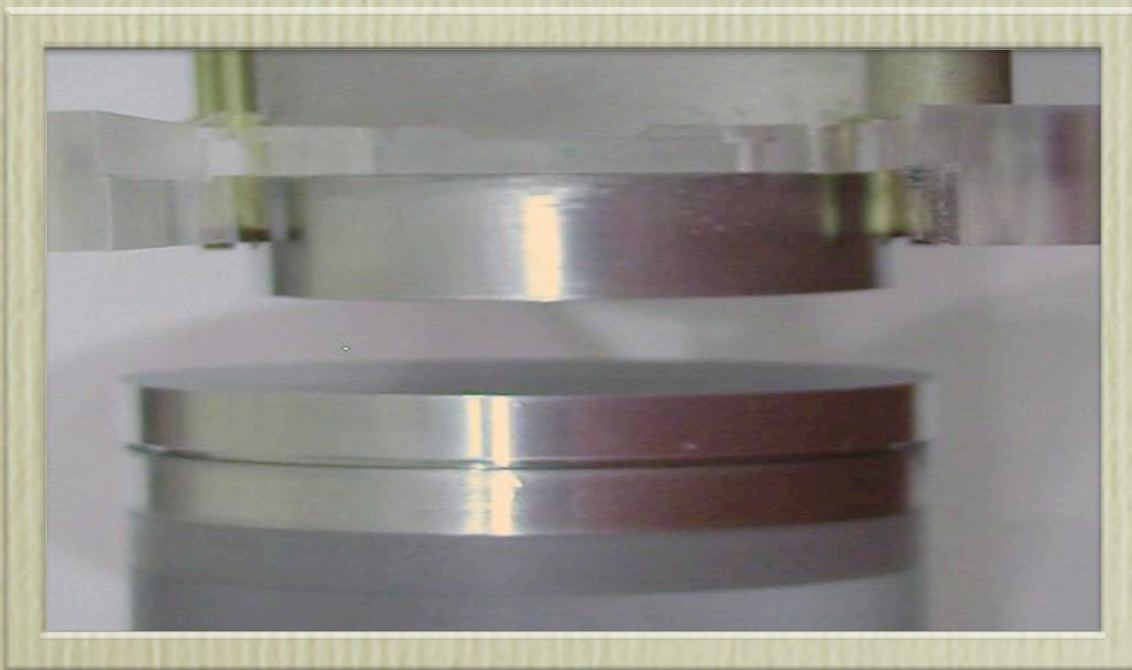
протоны 800 МэВ



В будущих экспериментах HEDgeNOB на FAIR протонная / ионная радиография будет играть исключительно важную роль. Для этой цели будет построена специальная 90° линия от синхротрона SIS-18.

Протонная радиография: установка pRad в центре LANSCE (LANL), Лос Аламос

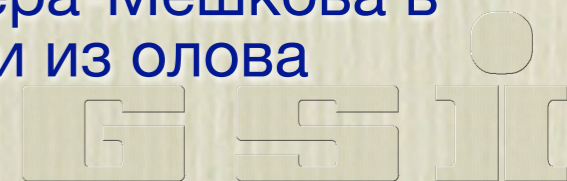
Плотность: $\rho = 3.09 \pm 0.024 \text{ г/см}^3$



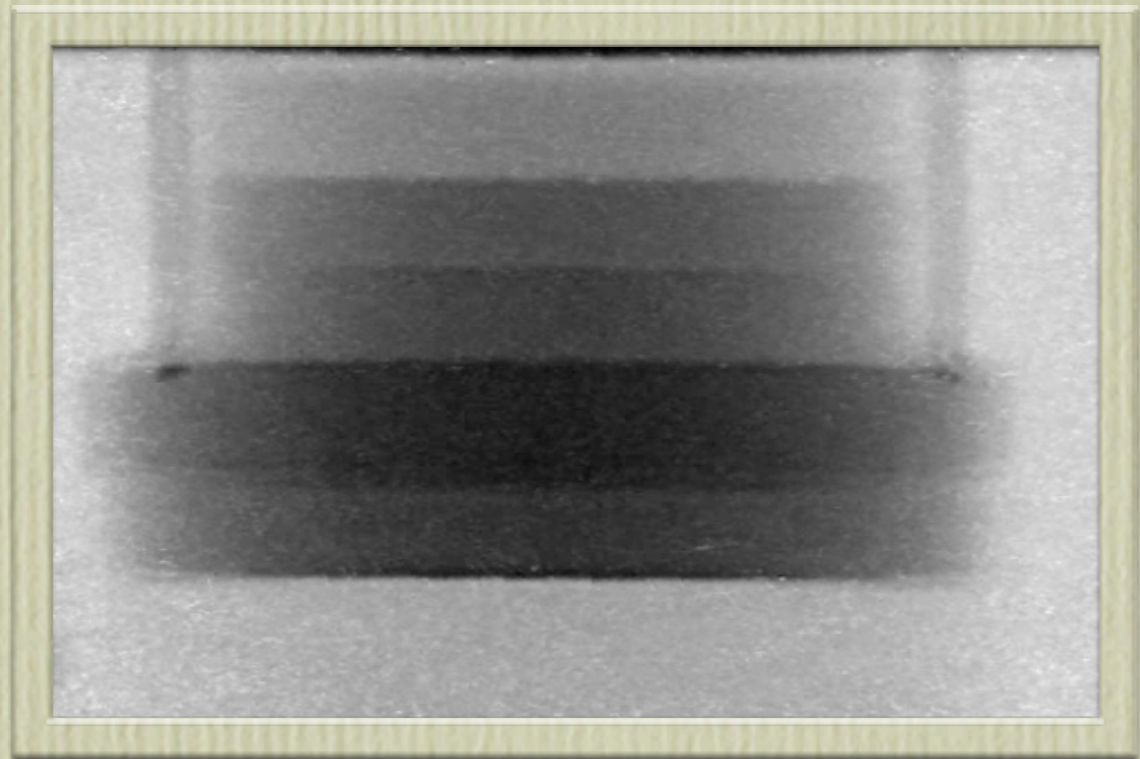
Определение УрС алюминия двумя независимыми способами в одном опыте при помощи протонографии

Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова в профилированной мишени из олова

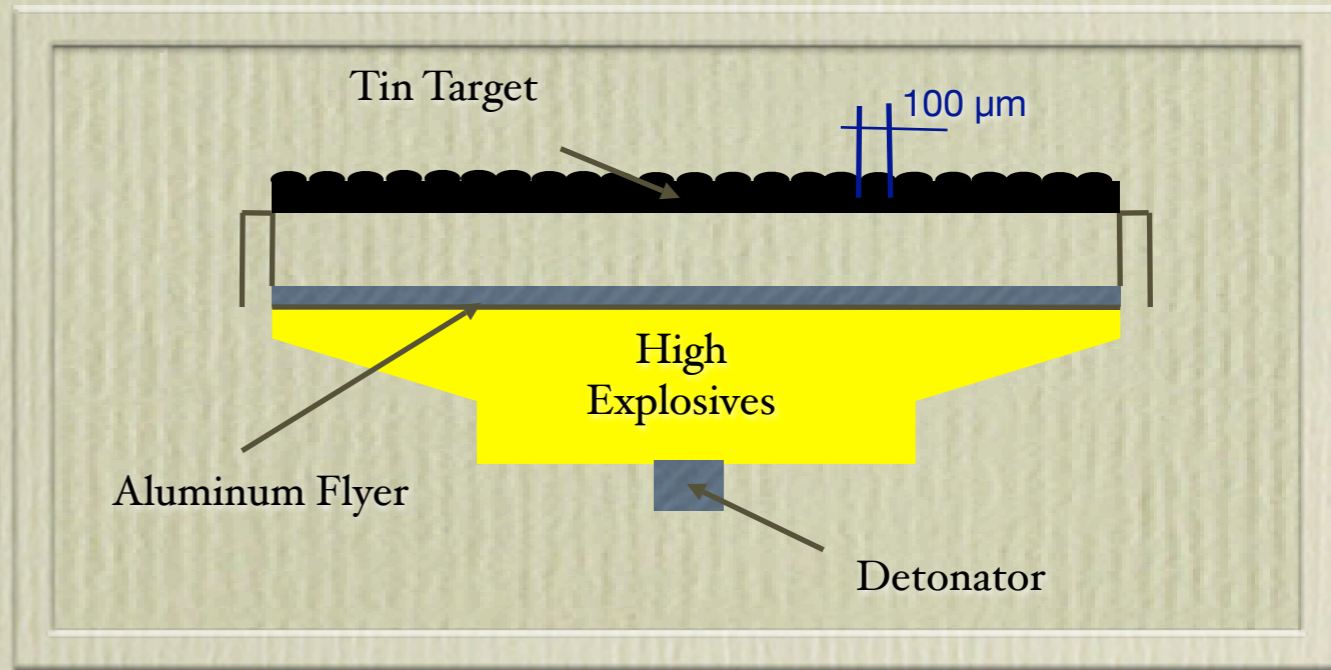
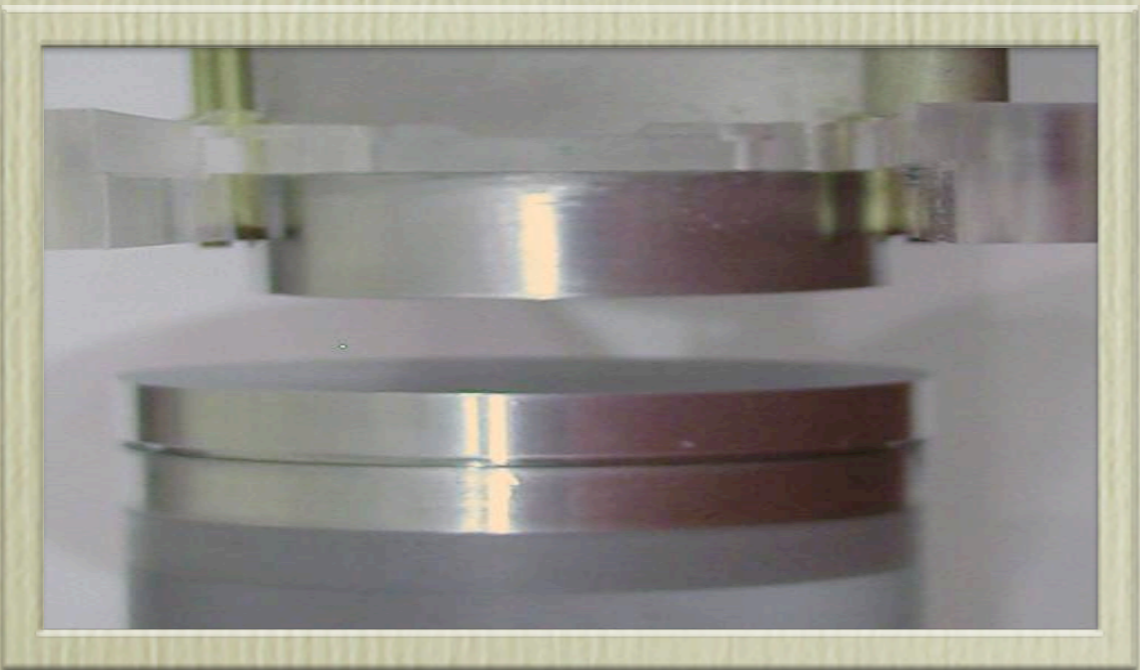
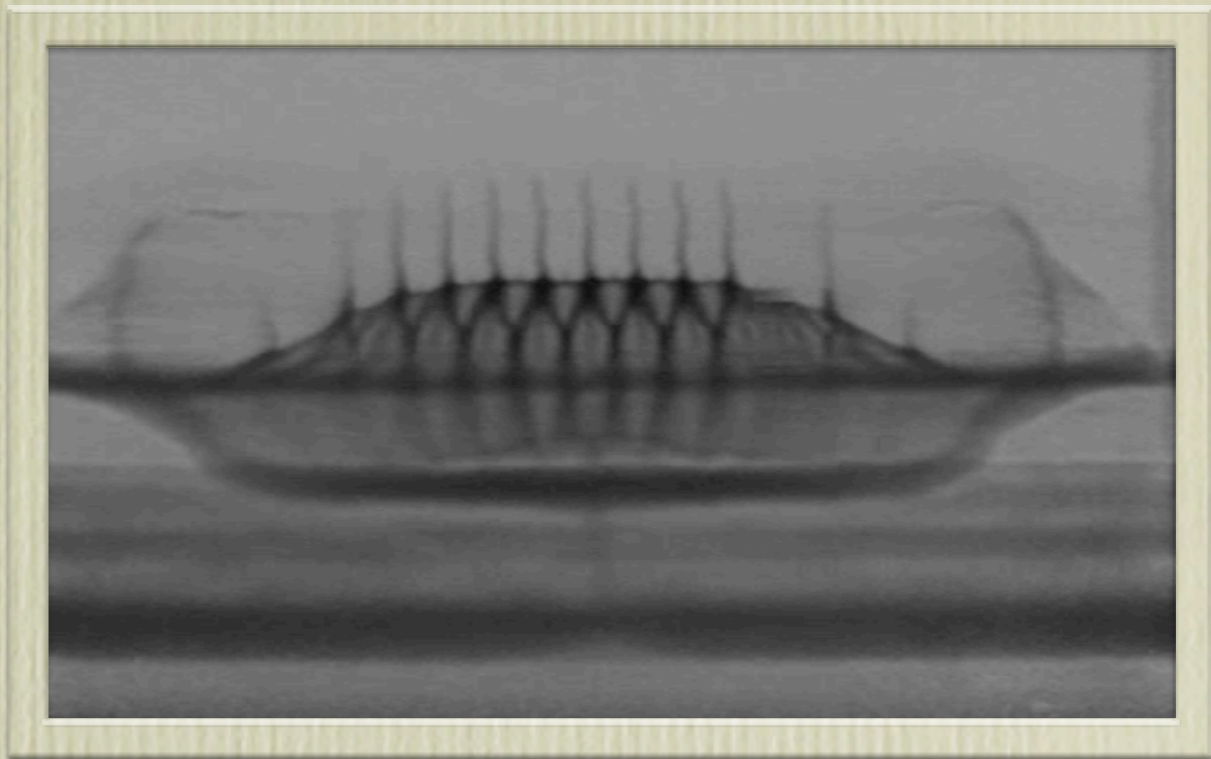
courtesy of Frank Merrill, LANL



Протонная радиография: установка pRad в центре LANSCE (LANL), Лос Аламос



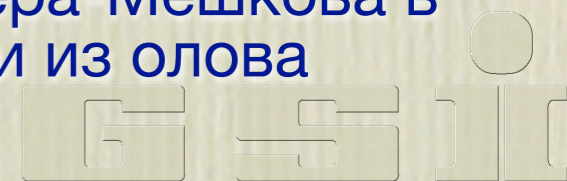
Плотность: $\rho = 3.09 \pm 0.024 \text{ г/см}^3$



Определение U_{rC} алюминия двумя независимыми способами в одном опыте при помощи протонографии

Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова в профилированной мишени из олова

courtesy of Frank Merrill, LANL

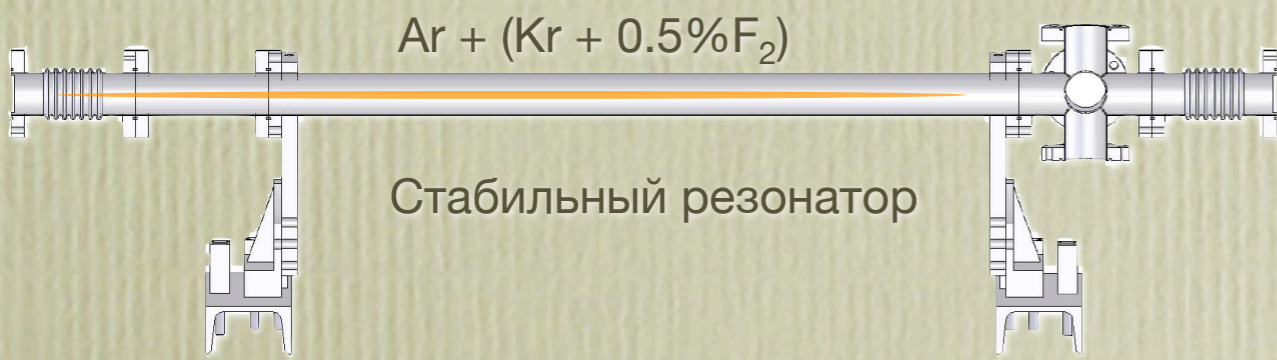
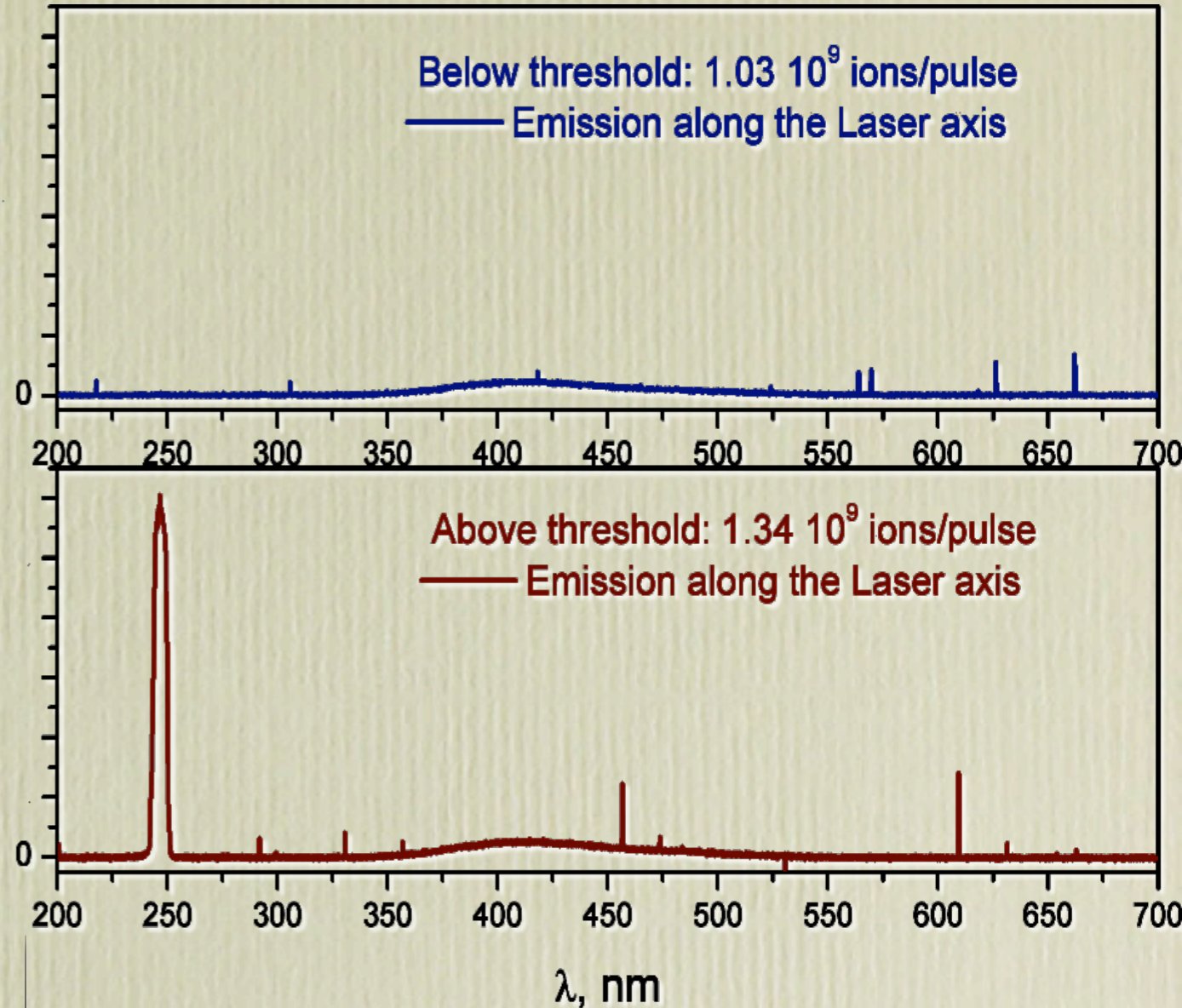
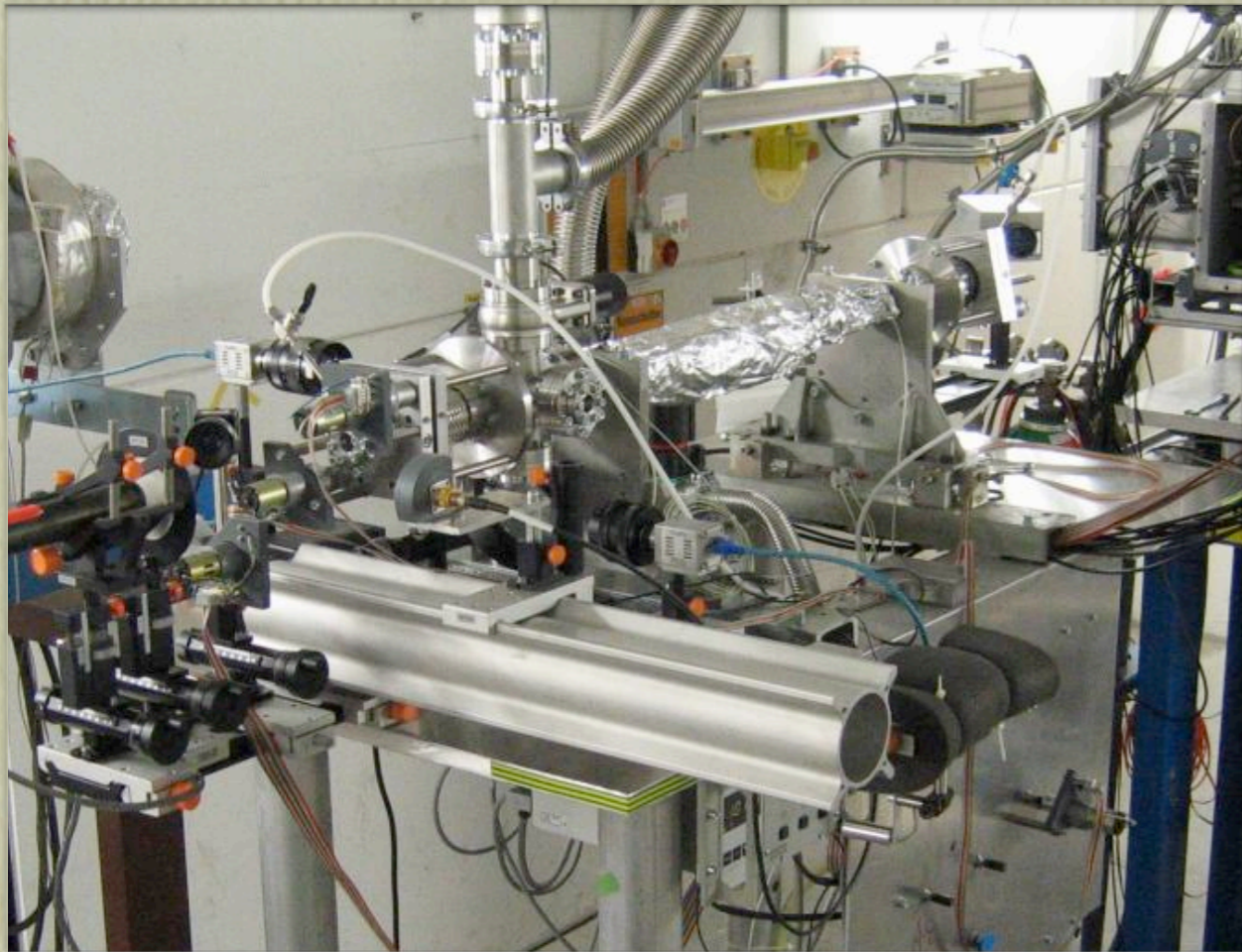




- мощные пучки тяжелых ионов и протонов высоких энергий (GSI, ИТЭФ, FAIR) предоставляют уникальные возможности для исследования экстремальных состояний вещества
- эксперименты по физике вещества с высокой концентрацией энергии на ускорителях - новая, перспективная и быстро развивающаяся область исследований
- нам очень нужны молодые, энергичные и талантливые ученые!

Первый эксимерный лазер с тяжелоионной накачкой

248 нм KrF лазер на ННТ



Плоское зеркало
(Quartz, Al-coated,
3.2mm thickness)

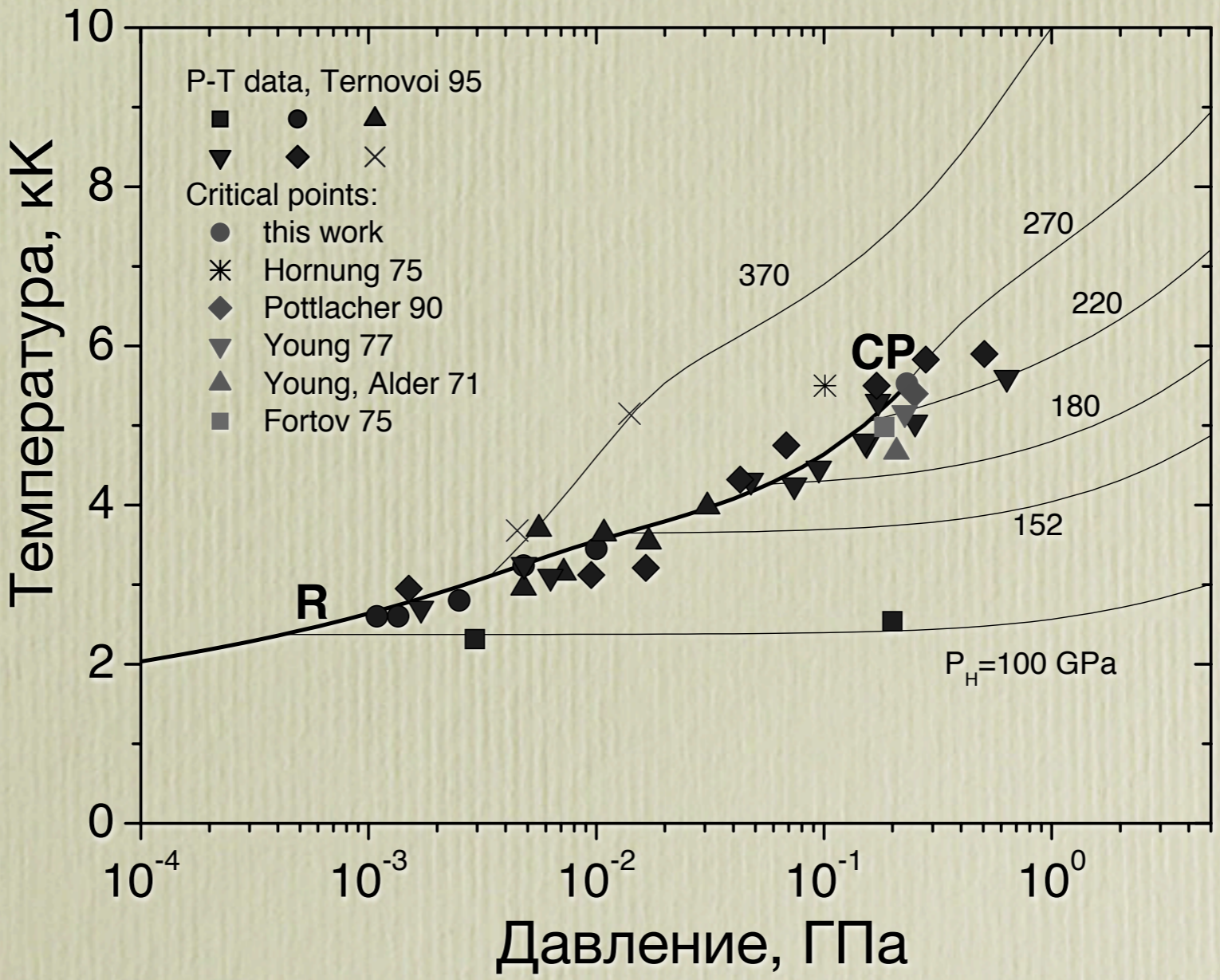
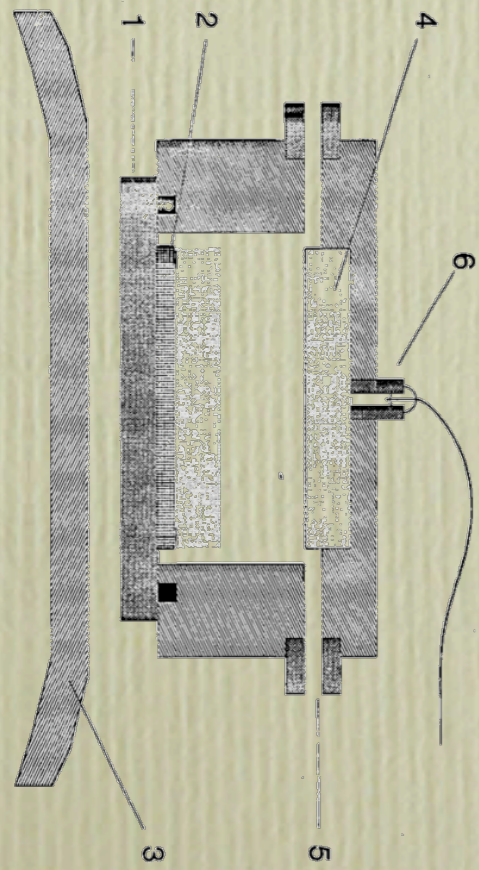
Сферическое зеркало
(MgF₂, HR on 248 nm, r=3m)

A. Ulrich et al., **PRL** 97 (2006) 153901,
Physics News Update 796, 11.11.2006

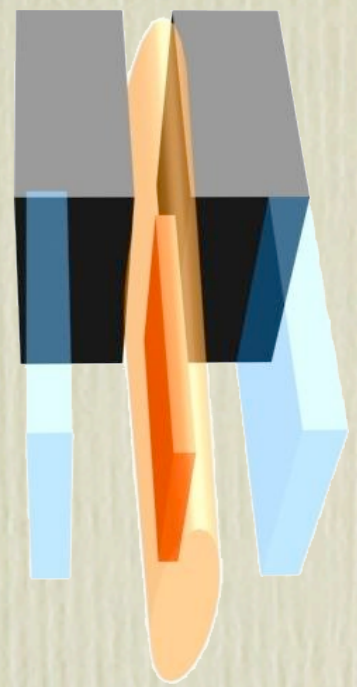
Динамика разлета испаряющегося свинца: сравнение результатов взрывных и пучковых экспериментов

Динамика разлета кипящего свинца в гелий (~1 атм): сравнение квази-изоэнтропического разлета в экспериментах с мощным урановым пучком (GSI, Darmstadt) и изэнтропы разгрузки из ударно-сжатого состояния в экспериментах со взрывными генераторами (ИПХФ, Черногоровка)

Ударно-волновые эксперименты, В.Я. Терновой и др., ИПХФ, 1995



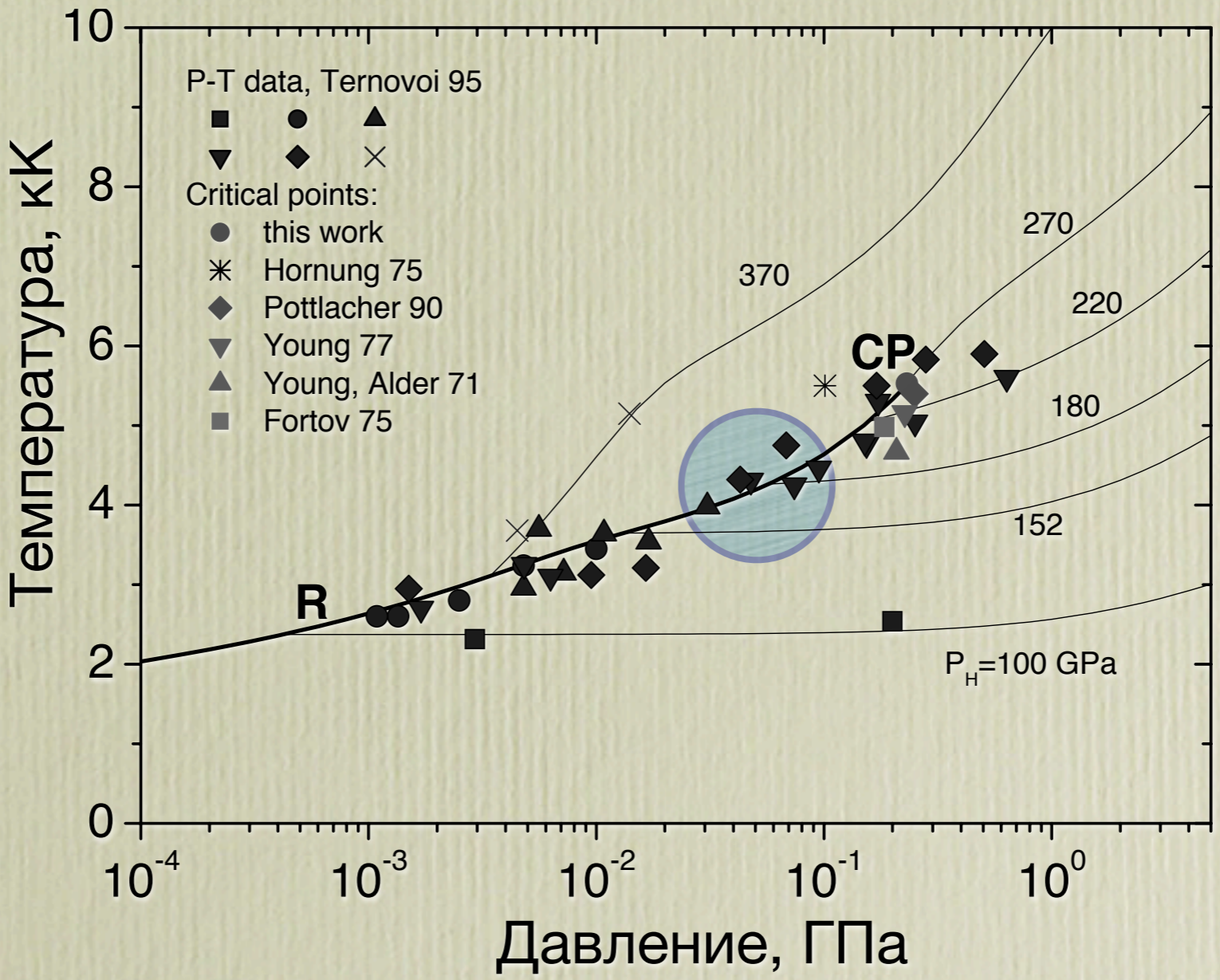
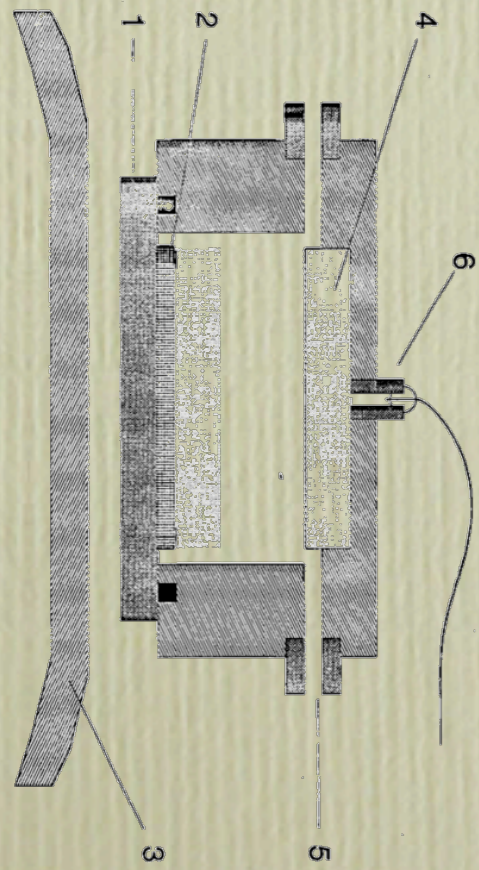
Эксперименты с урановым пучком HINEX, Д. Варенцов и др., GSI, 2006



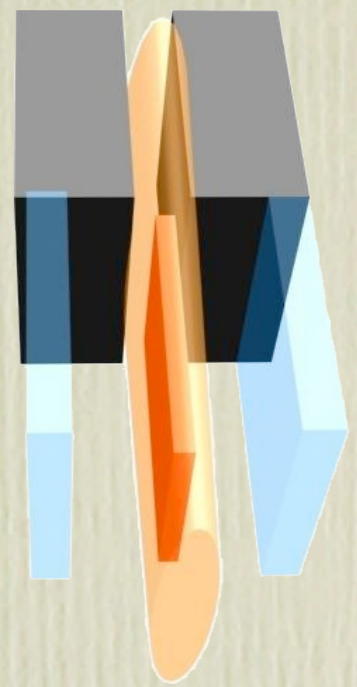
Динамика разлета испаряющегося свинца: сравнение результатов взрывных и пучковых экспериментов

Динамика разлета кипящего свинца в гелий (~1 атм): сравнение квази-изоэнтропического разлета в экспериментах с мощным урановым пучком (GSI, Darmstadt) и изэнтропы разгрузки из ударно-сжатого состояния в экспериментах со взрывными генераторами (ИПХФ, Черногоровка)

Ударно-волновые эксперименты, В.Я. Терновой и др., ИПХФ, 1995



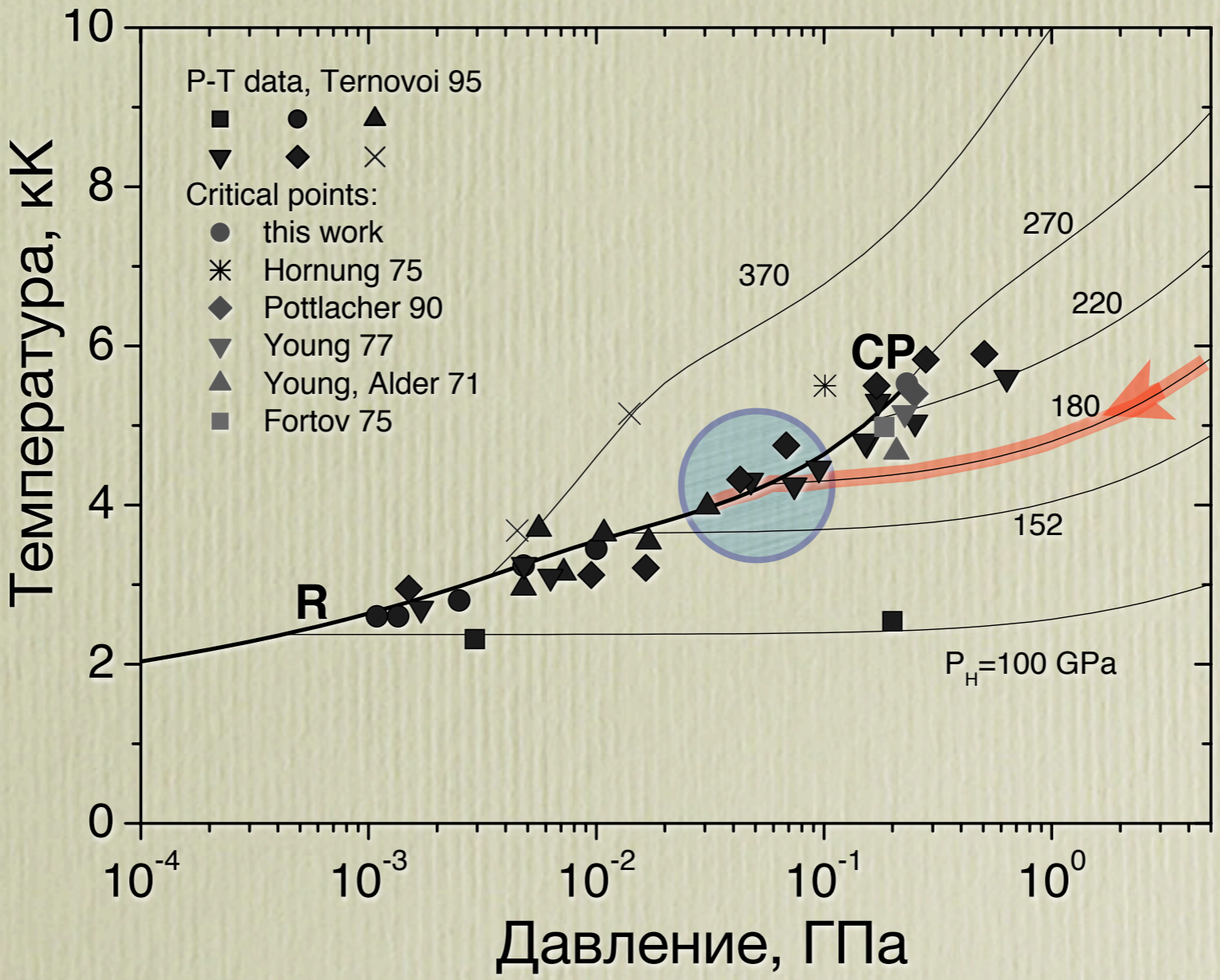
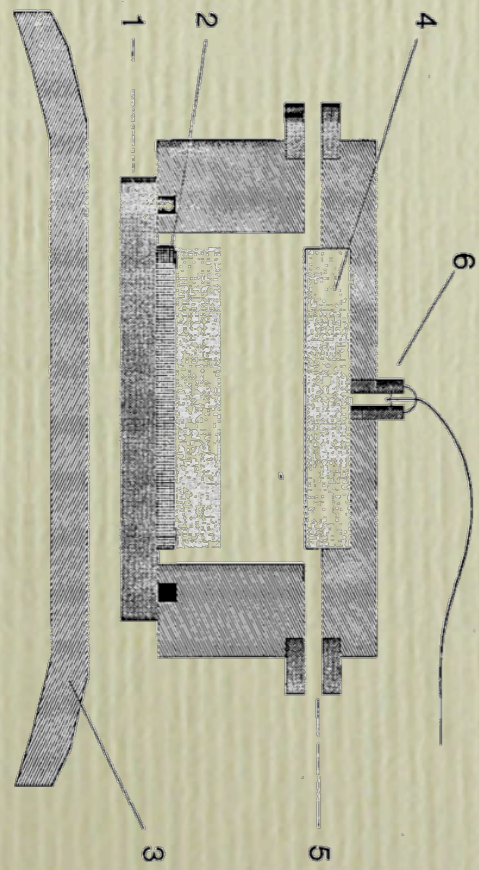
Эксперименты с урановым пучком HINEX, Д. Варенцов и др., GSI, 2006



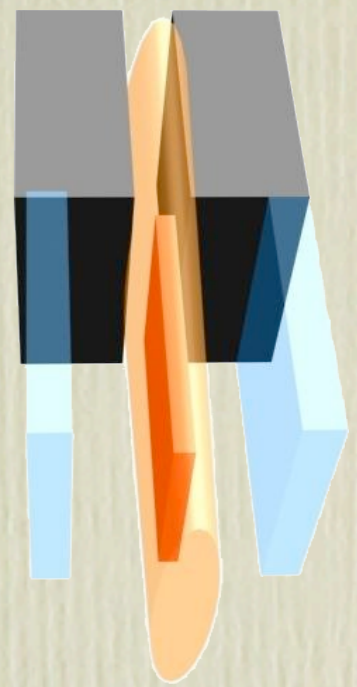
Динамика разлета испаряющегося свинца: сравнение результатов взрывных и пучковых экспериментов

Динамика разлета кипящего свинца в гелий (~1 атм): сравнение квази-изоэнтропического разлета в экспериментах с мощным урановым пучком (GSI, Darmstadt) и изэнтропы разгрузки из ударно-сжатого состояния в экспериментах со взрывными генераторами (ИПХФ, Черногоровка)

Ударно-волновые эксперименты, В.Я. Терновой и др., ИПХФ, 1995



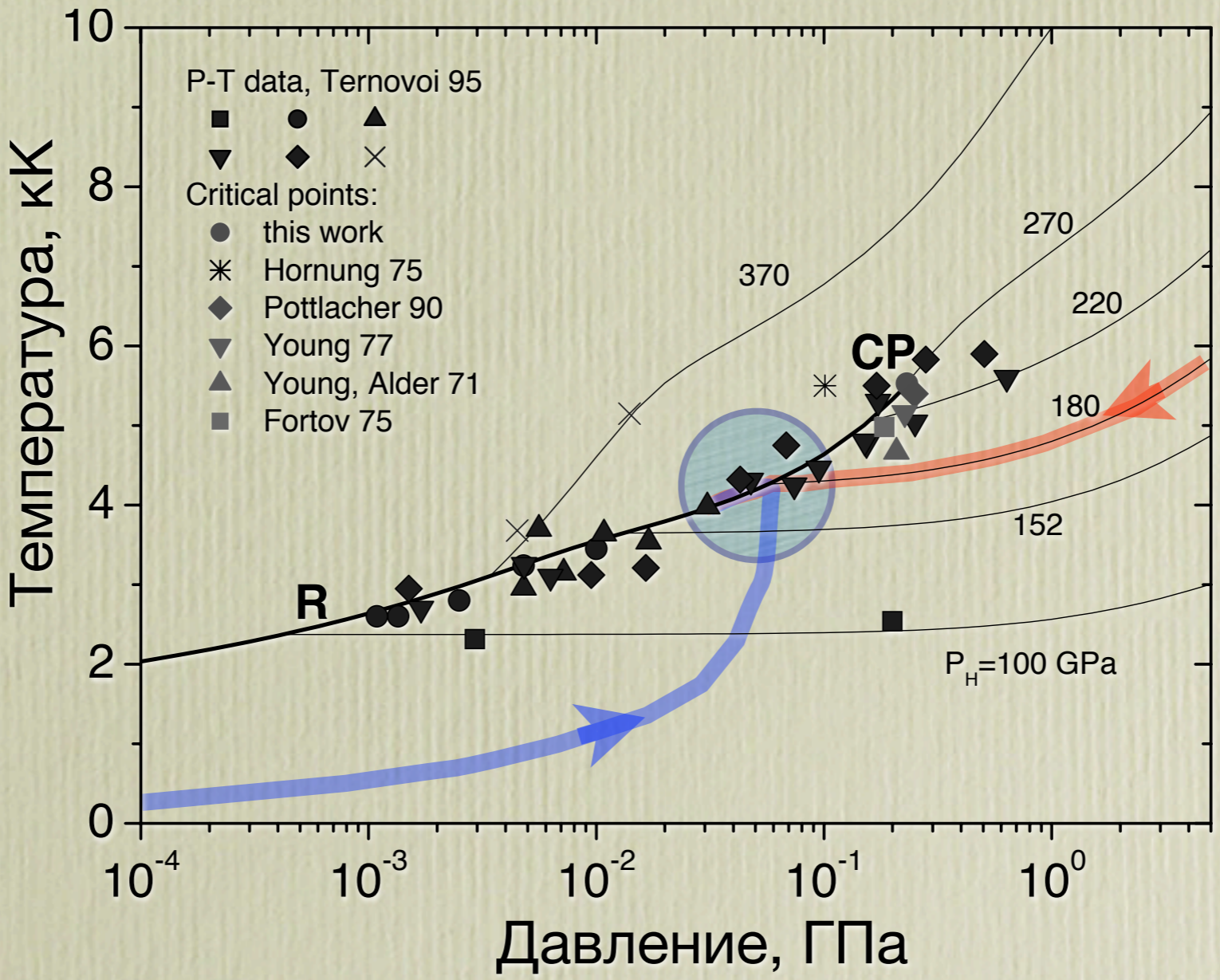
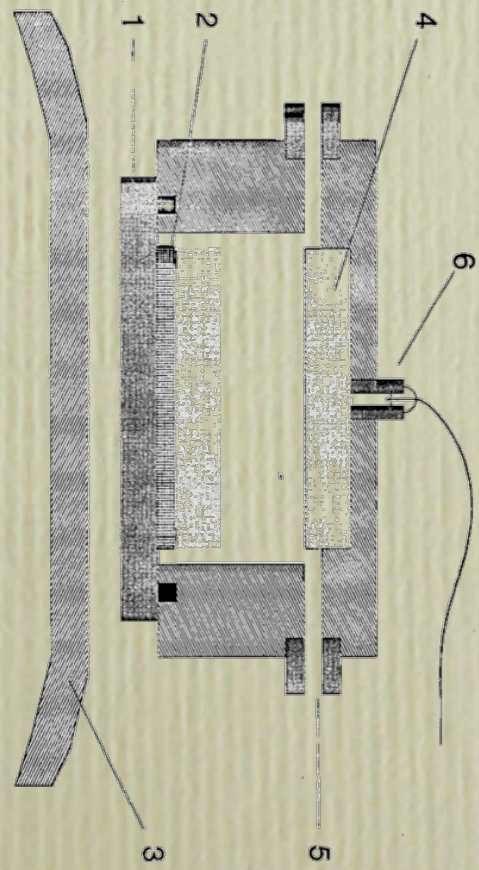
Эксперименты с урановым пучком HINEX, Д. Варенцов и др., GSI, 2006



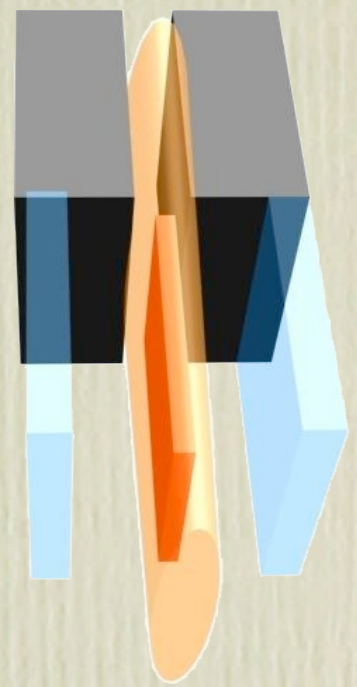
Динамика разлета испаряющегося свинца: сравнение результатов взрывных и пучковых экспериментов

Динамика разлета кипящего свинца в гелий (~1 атм): сравнение квази-изоэнтропического разлета в экспериментах с мощным урановым пучком (GSI, Darmstadt) и изэнтропы разгрузки из ударно-сжатого состояния в экспериментах со взрывными генераторами (ИПХФ, Черноголовка)

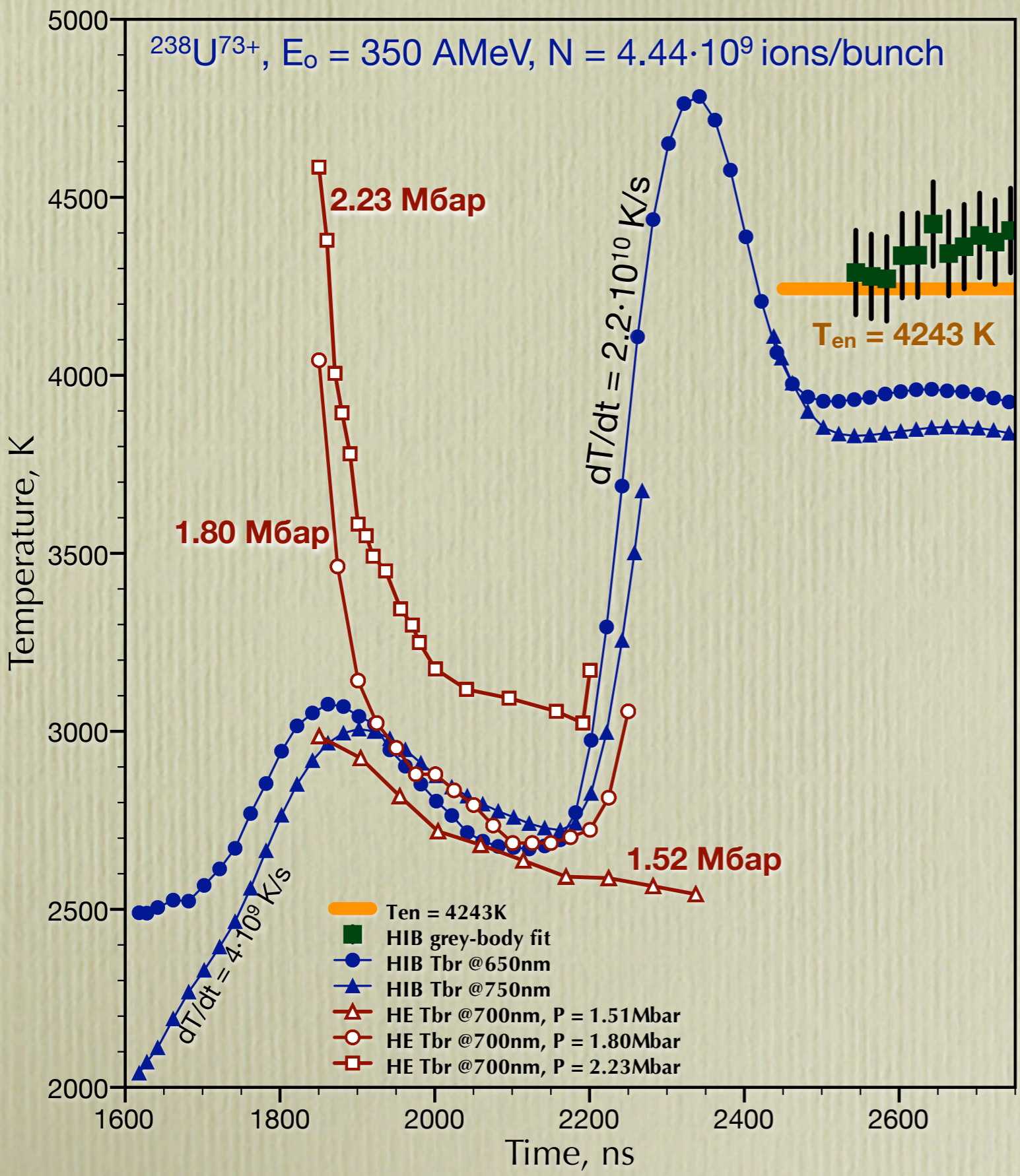
Ударно-волновые эксперименты, В.Я. Терновой и др., ИПХФ, 1995



Эксперименты с урановым пучком HINEX, Д. Варенцов и др., GSI, 2006

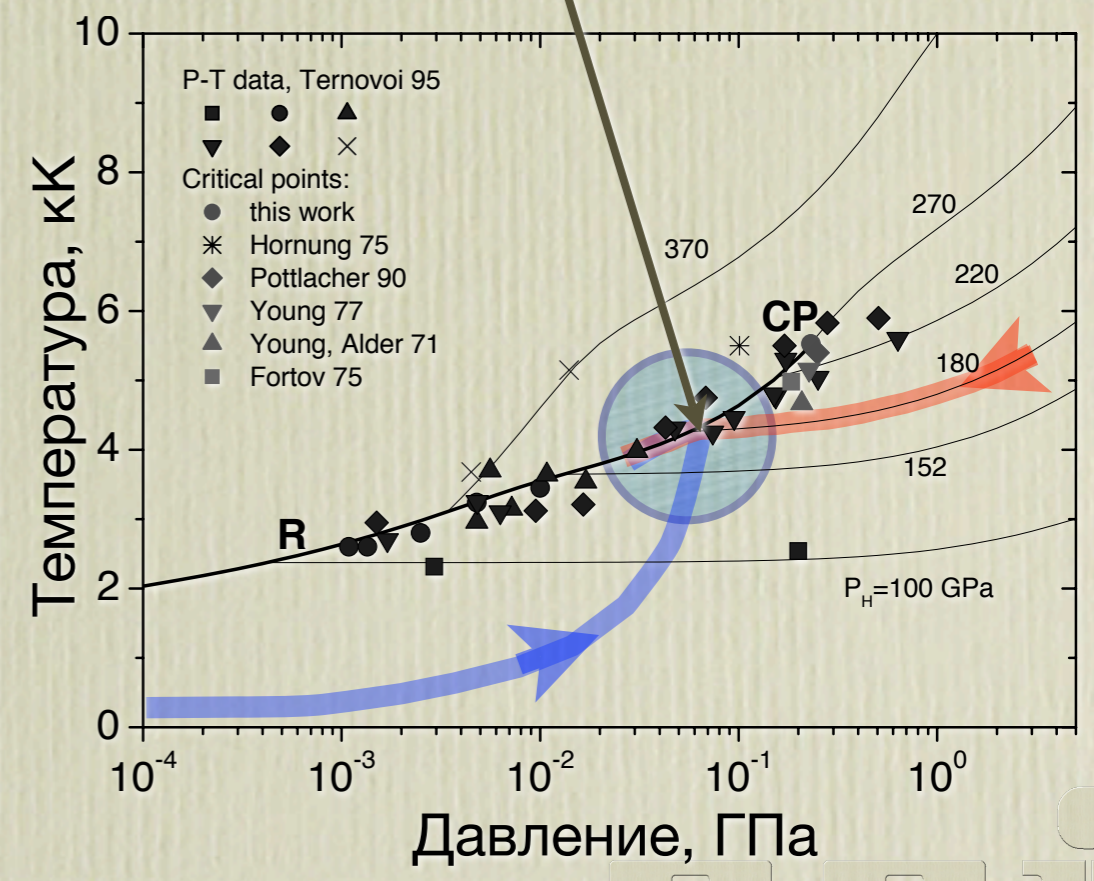


Динамика разлета испаряющегося свинца: сравнение результатов взрывных и пучковых экспериментов

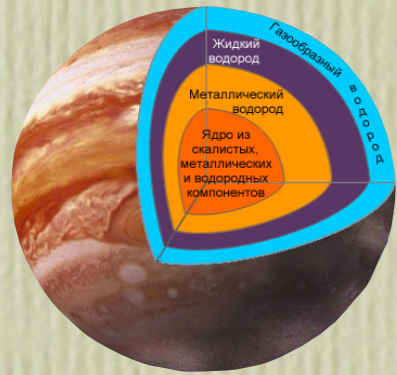


Изэнтропа разгрузки “1.80 Мбар”
входит в двухфазную область при:

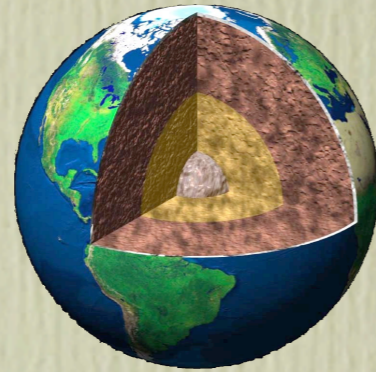
$T_{en} = 4243 \text{ K}$
 $P_{en} = 0.5 \text{ кбар}$
 $E_{en} = 0.727 \text{ кДж/г}$



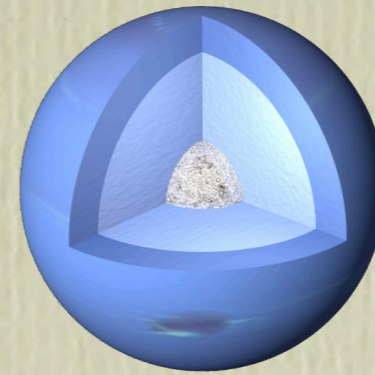
Некоторые астрофизические приложения



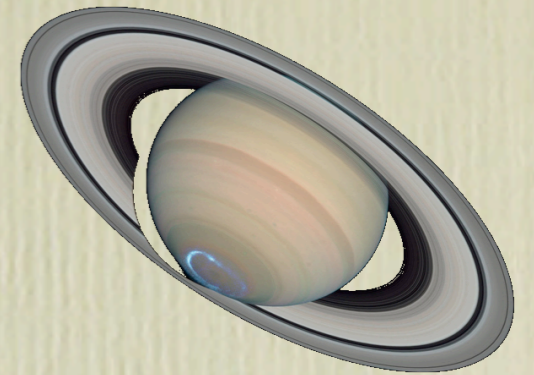
Юпитер
H, He



Земля
Fe

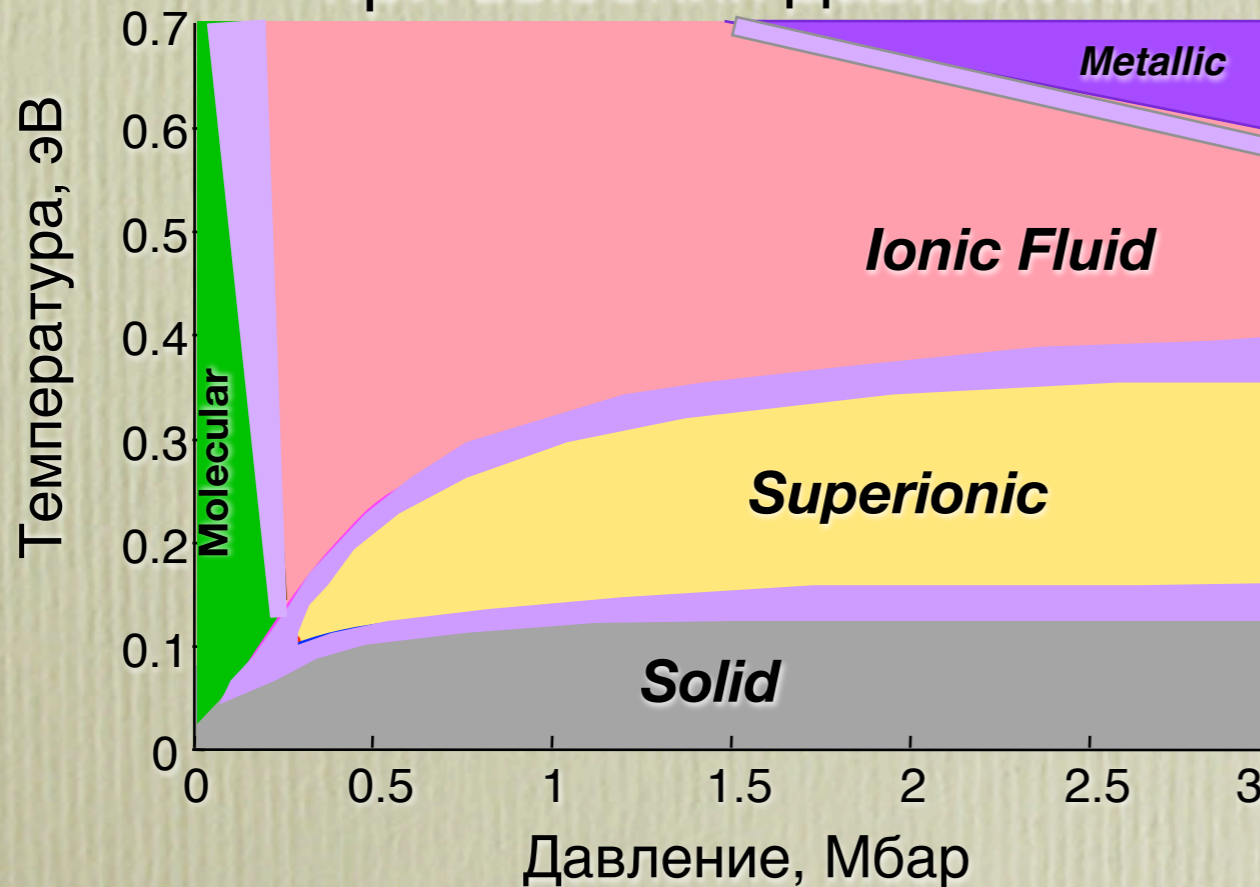


Нептун
H₂O



Сатурн
H, He

Фазовая диаграмма воды при высоких давлениях



Взрыв сверхновой

