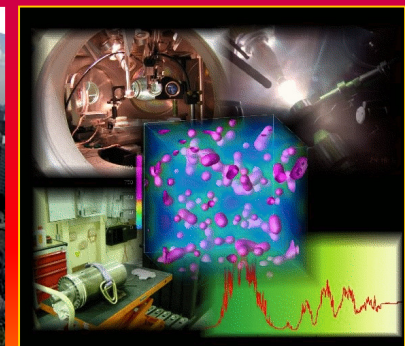
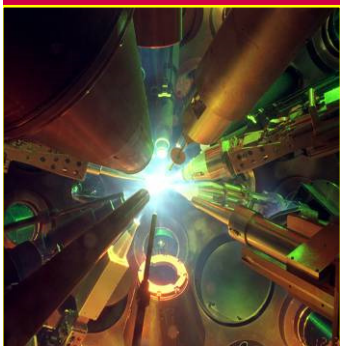




**Объединенный  
институт высоких температур РАН**  
**Основные научные результаты  
2013 года**



# Излучение горячих электронов металлов и металлических наночастиц под действием фемтосекундных лазерных импульсов

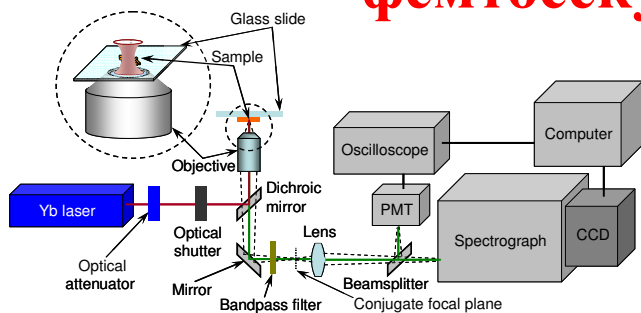
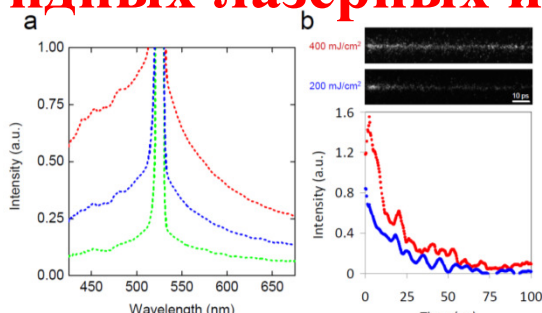
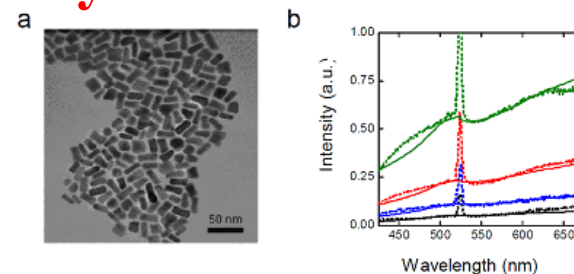


Схема измерений



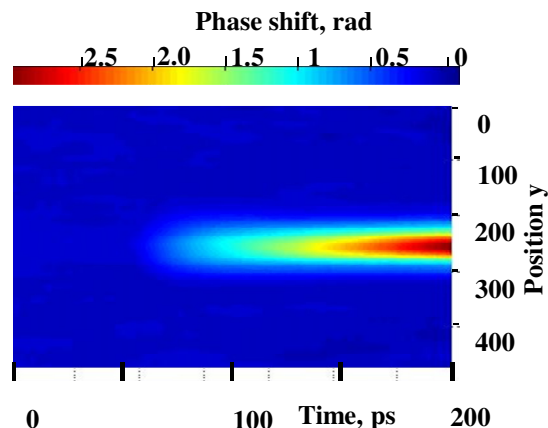
Спектр и динамика излучения массивного золота



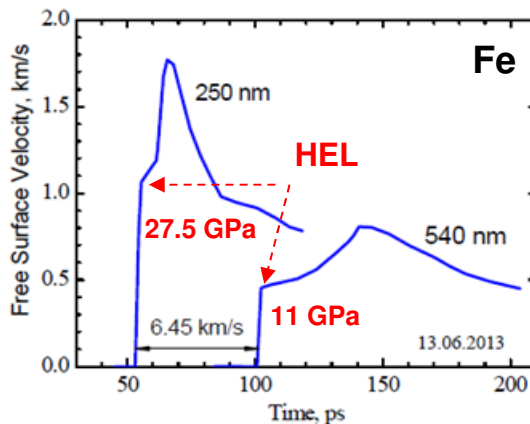
Спектр излучения золотых наностержней

Статья по результатам работы отправлена в Nature (на рецензии)

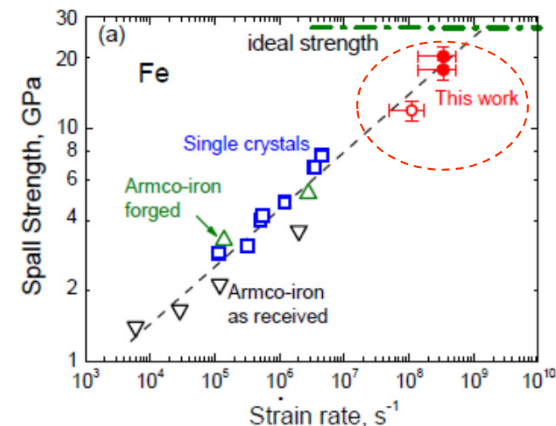
## Реализация предельных значений объемной и сдвиговой прочности железа при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами



Интерферометрическая методика непрерывной регистрации смещения в пикосекундном диапазоне



Расщепление ультракороткой ударной волны сжатия на упругую и пластическую волну



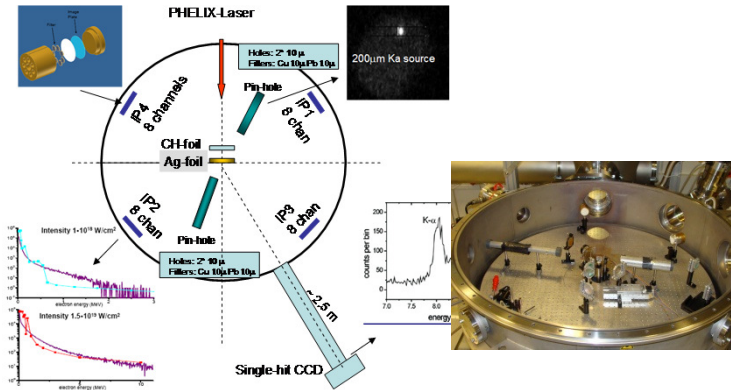
Прочность Fe при предельно высоких скоростях растяжения

Письма в ЖЭТФ, 98,439(2013)

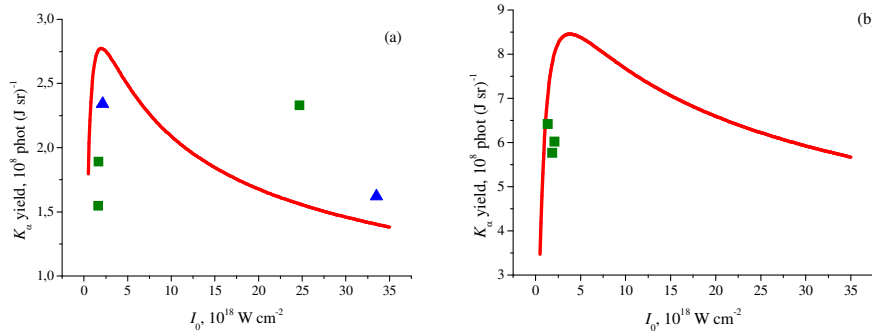


# Вторичные источники излучения и частиц высоких энергий при воздействии высокоинтенсивных коротких лазерных импульсов на вещество

Совместный OIBT–GSI–PHELIX проект  
relativistic laser interaction with solids  
for effective generation of Ka-radiation



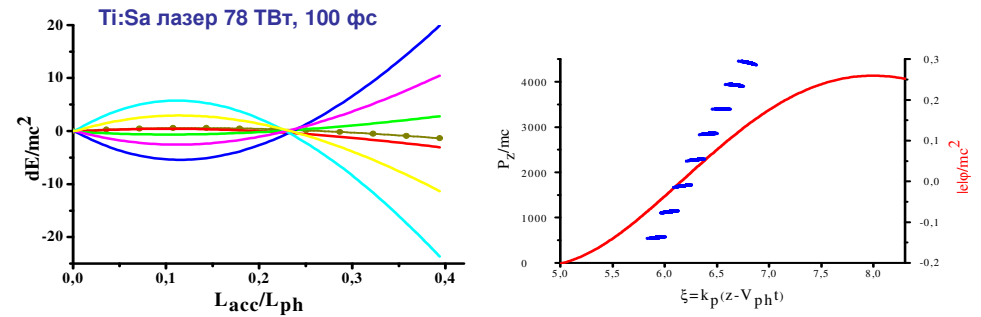
Теоретические зависимости отражают особенности, выявленные в эксперименте:



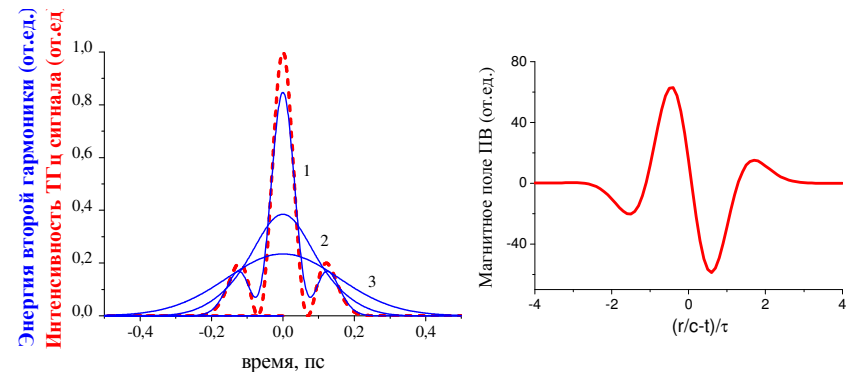
Выход фотонов  $K_{\alpha}$  излучения из серебряной фольги в зависимости от интенсивности лазерного импульса. Линии – расчет. Точки - измерения: (а) с фольгой толщиной 10 мкм, расположенной на плексигласе (квадраты) и алюминии (треугольники); (б) с фольгой толщиной 100 мкм, расположенной на плексигласе. Угол наблюдения  $45^{\circ}$ .

Эффект фокусировки в энергетическом пространстве электронов в процессе их ускорения в кильватерном поле позволяет получать моноэнергетические компактные сгустки релятивистских электронов

сгусток электронов, ускоренный до энергии 2.1 ГэВ, с разбросом по энергии  $\sim 0.25\%$

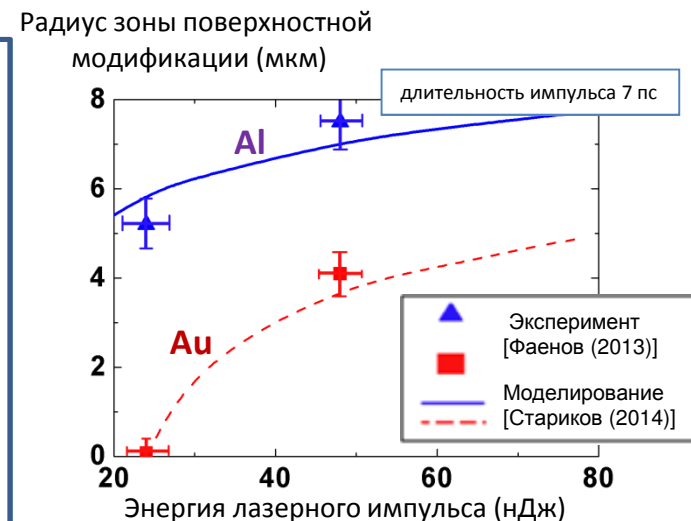
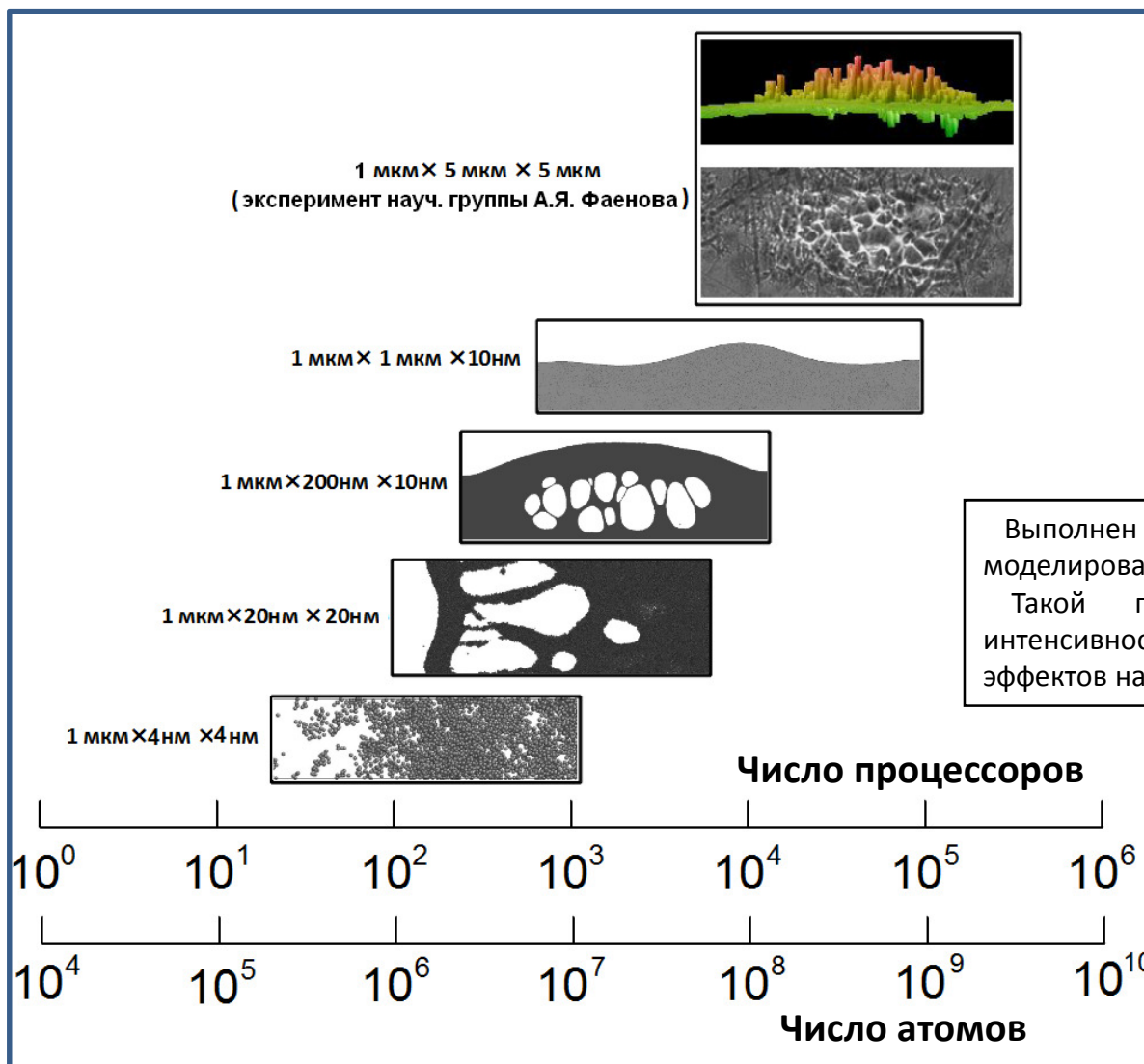


Детектирование терагерцового излучения и возбуждение поверхностных волн (ПВ) при воздействии фемтосекундного импульса лазерного излучения на проводник

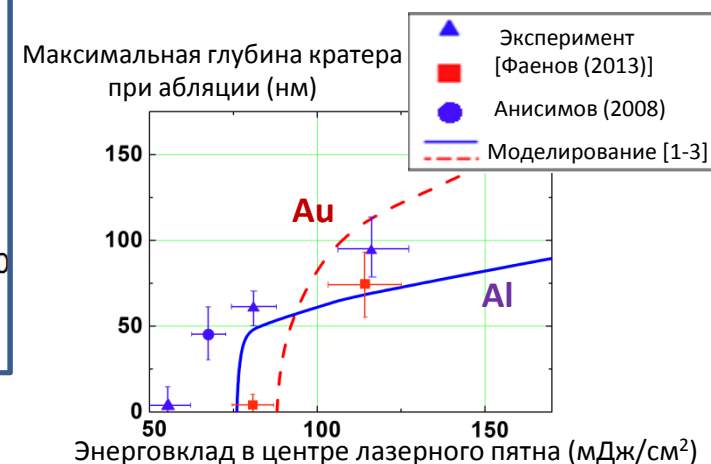




# Крупномасштабное атомистическое моделирование наноструктурирования поверхности при взаимодействии с лазерным импульсом



Выполнен переход к крупномасштабному атомистическому моделированию лазерной абляции/плавления поверхности. Такой переход позволил учесть распределение интенсивности по поверхности и влияние поверхностных эффектов на процесс модификации.



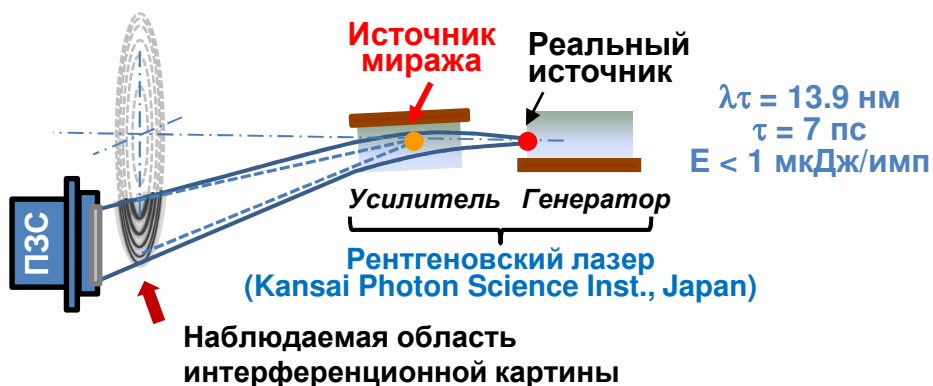
- [1] Starikov, Faenov, Pikuz, Skobelev, Fortov et al. // Appl. Phys. B: Lasers and Optics (2014)
- [2] Norman, Starikov, Stegailov, Saitov, Zhilyaev // Contrib. Plasma Phys. V. 53, P. 129 (2013)
- [3] Норман, Стариков, Стегайлов // ЖЭТФ, т. 141, стр. 910 (2012)



# Первое экспериментальное наблюдение и теоретическое обоснование рентгеновского когерентного миража при усилении первичного пучка в двухкаскадном рентгеновском лазере

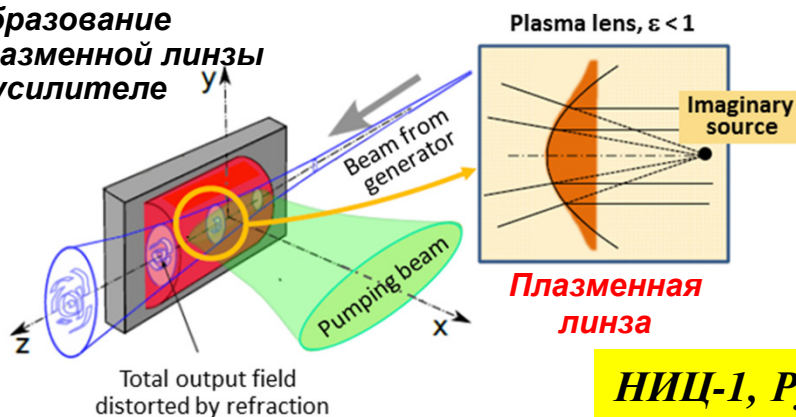
Показано, что в плазменной среде усилителя рентгеновского лазера происходит образование **вторичного когерентного источника, сфазированного с излучением генератора**, а условия его формирования аналогичны формированию миража в оптическом диапазоне.

Схема наблюдения рентгеновского миража

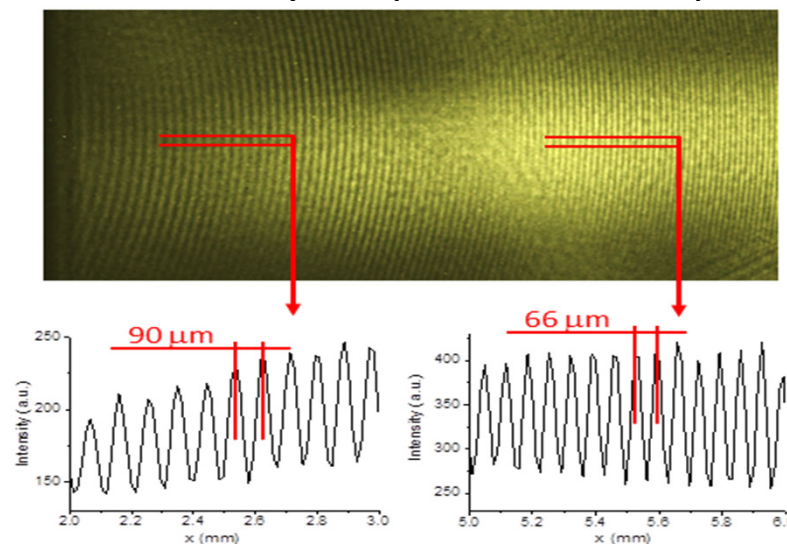


Для интерпретации наблюдаемого явления предложен **новый теоретический подход** и сформулированы необходимые и достаточные условия его возникновения

Образование плазменной линзы в усилителе



Интерференционные полосы в выходном излучении рентгеновского лазера



Полученные результаты углубляют понимание процессов усиления рентгеновского излучения в лазерно-индуцированных активных средах, а также представляют практический интерес для рентгеновской интерферометрии, рентгеновской литографии, для диагностики активных плазменных сред, а также для создания фазово-адаптивной рентгеновской плазменной оптики

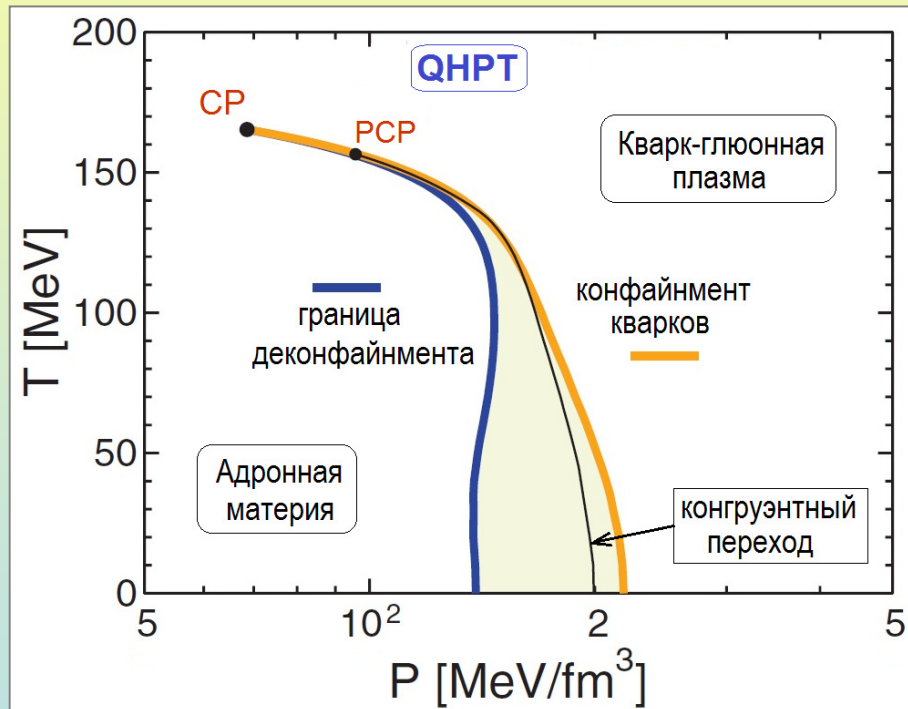
НИЦ-1, Рук. зав. лаб. к.ф.-м.н. Пикуз Сергей Алексеевич



# Исследование физики фазовых превращений в экстремальных состояниях вещества

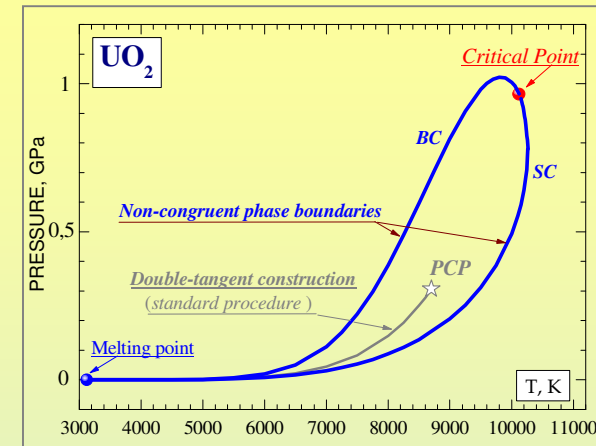
Универсальный характер неконгруэнтных фазовых переходов

Проведены расчеты параметров неконгруэнтности фазовых превращений в сверхплотном веществе экстремальных параметров  
(плотной ядерной материи и кварк-адронной смеси)

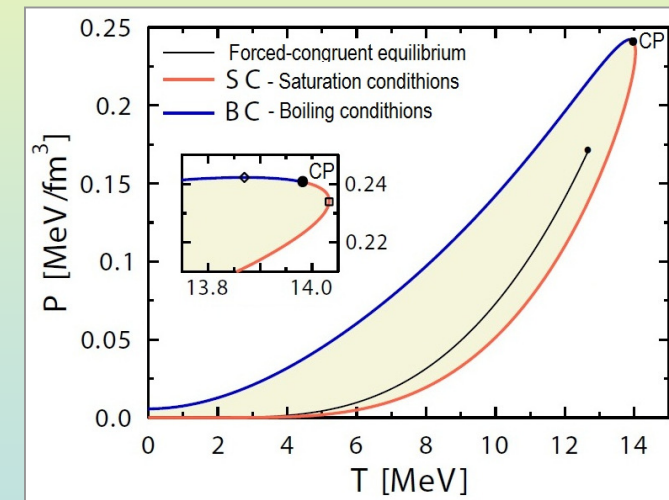


Неконгруэнтный фазовый переход в кварк-адронной материи

*Phys. Rev. C* 88, 014906 (2013)



Неконгруэнтный фазовый переход в диоксиде урана



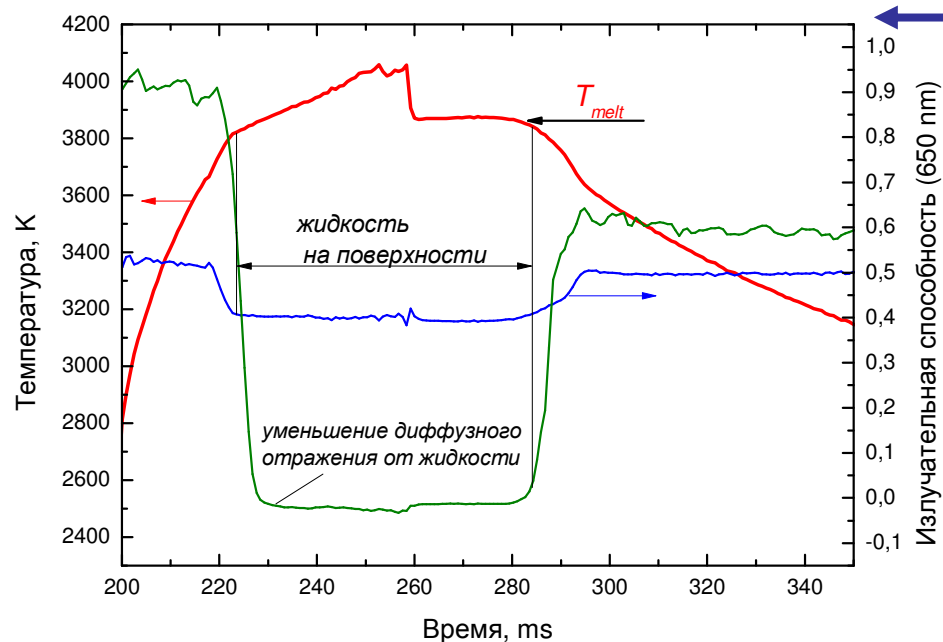
Неконгруэнтный фазовый переход в сверхплотной системе протонов, нейтронов, гиперонов и ядер

Рук. работ: д.ф.м.н. Иосилевский Игорь Львович, НИЦ-1

# Изучение фазовых диаграмм сверхтугоплавких веществ с помощью лазерного нагрева

**Цель работы:** получение данных по условиям плавления сверхтугоплавких карбидов, нахождение температуры и состава, соответствующего конгруэнтному плавлению.

Изучался карбид циркония – наиболее исследованный сверхтугоплавкий карбид.



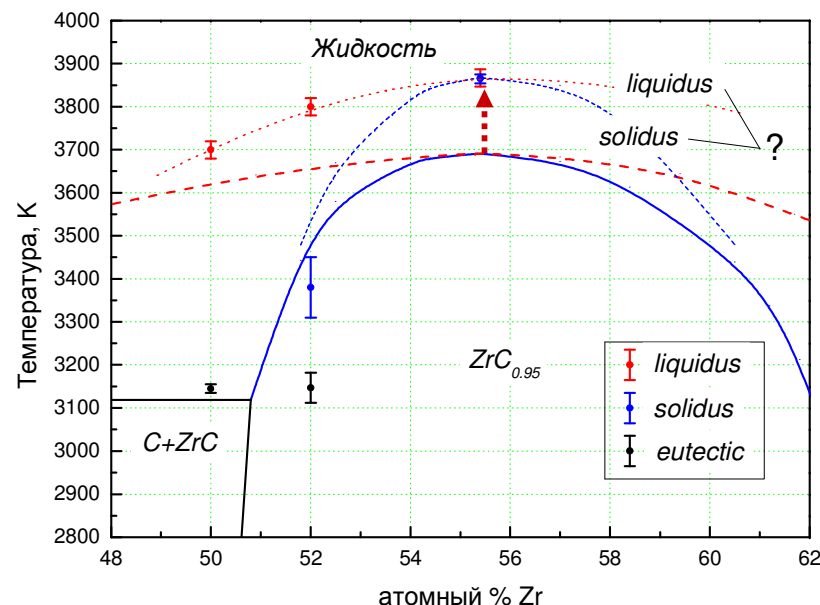
Термограмма нагрева ZrC(55,4 ат%).

Истинная температура определялась многоканальными пирометром. Моменты плавления и кристаллизации определялись по изменению характера отражения поверхности.

Образцы различного составе  $ZrC_x$  синтезированы с помощью высокотемпературного спекания в лаб.1.8.1.

Результаты измерения параметров солидуса и ликвидуса, нанесенные на известную фазовую диаграмму.

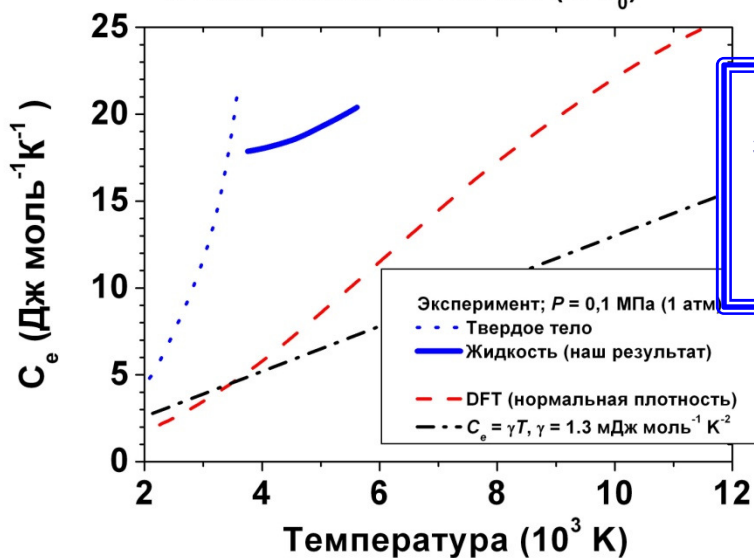
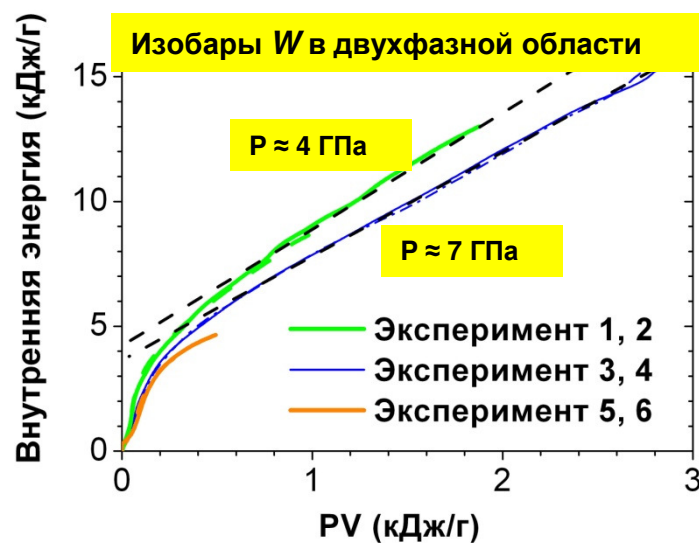
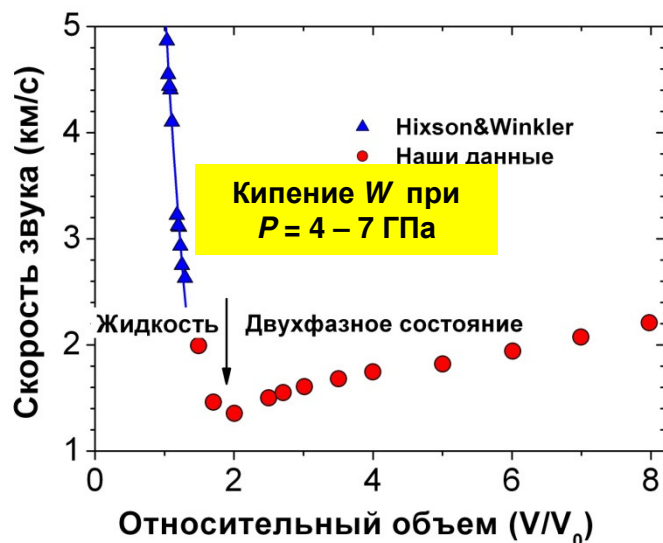
Полученная температура конгруэнтного плавления **более чем на 200 К** превышает недавние результаты, полученные в ITU (Karlsruhe) – 2011 год.





Путем прямых измерений показано, что критическое давление вольфрама превышает 7 ГПа. Это означает, что во всех практически важных случаях, при  $T > 6 \cdot 10^3$  К (генерация плазмы для Z-пинчей, разряды с вольфрамовым катодом и др.) происходит кипение вольфрама.

V. N. Korobenko, A.D. Rakhel, PRB, 88, 134203 (2013)



Установлено, что для жидкого вольфрама электронный вклад в теплоемкость  $C_e$  сопоставим с атомным вкладом ( $\sim 3R$ ).

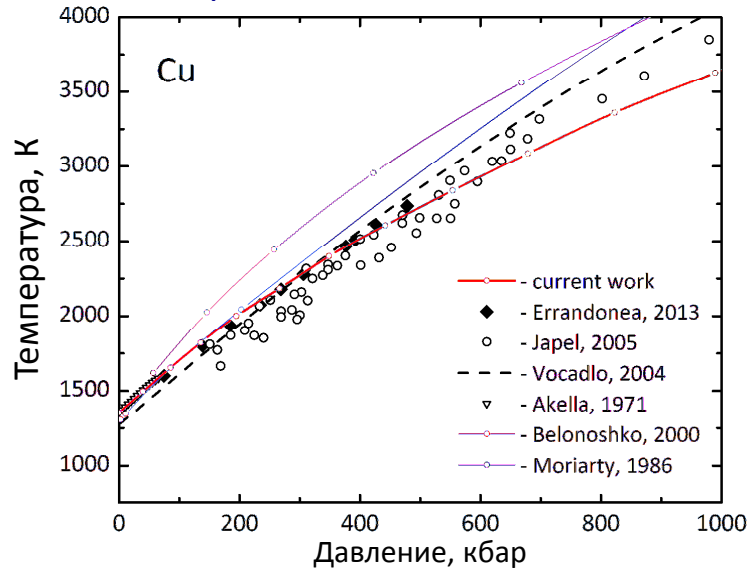
V. N. Korobenko, A.D. Rakhel, *J. Phys.: Condens. Matter* 26 045701 (2014)



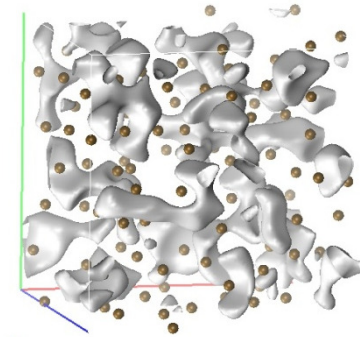
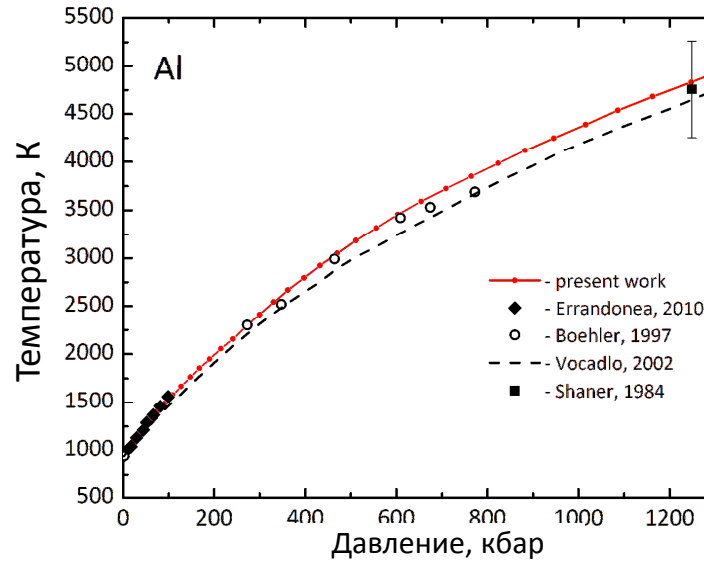


# МЕТОД ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ И КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

Кривая плавления меди



Кривая плавления алюминия



Критерий Линдемана

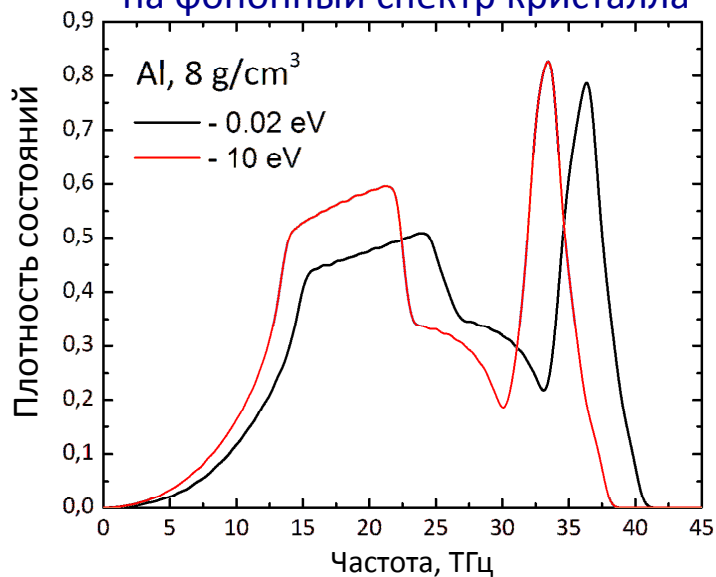
$$T_m = \frac{(Ld_{NN})^2}{k_B} \frac{M}{\langle \omega^{-2} \rangle}$$

$$\langle \omega^{-2} \rangle = \int_0^{\infty} \frac{g(\omega)d\omega}{\omega^2}$$

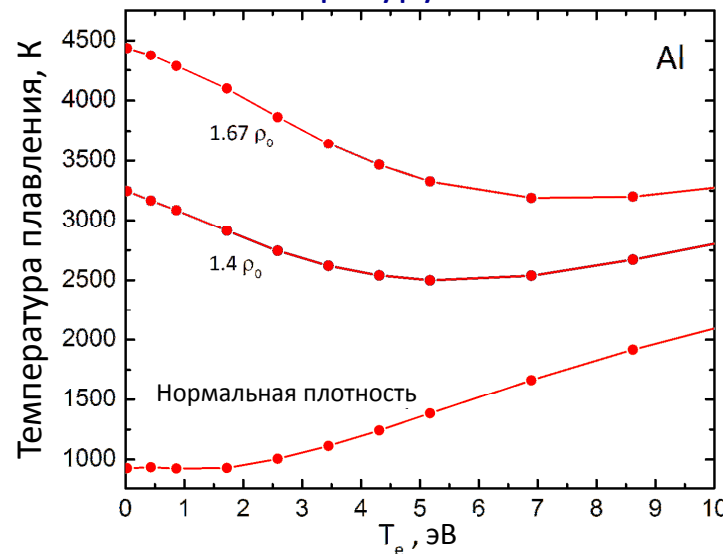
Свойства кристалла  
из первопринципного  
расчета



Влияние нагрева электронов  
на фононный спектр кристалла



Влияние нагрева электронов  
на температуру плавления Al



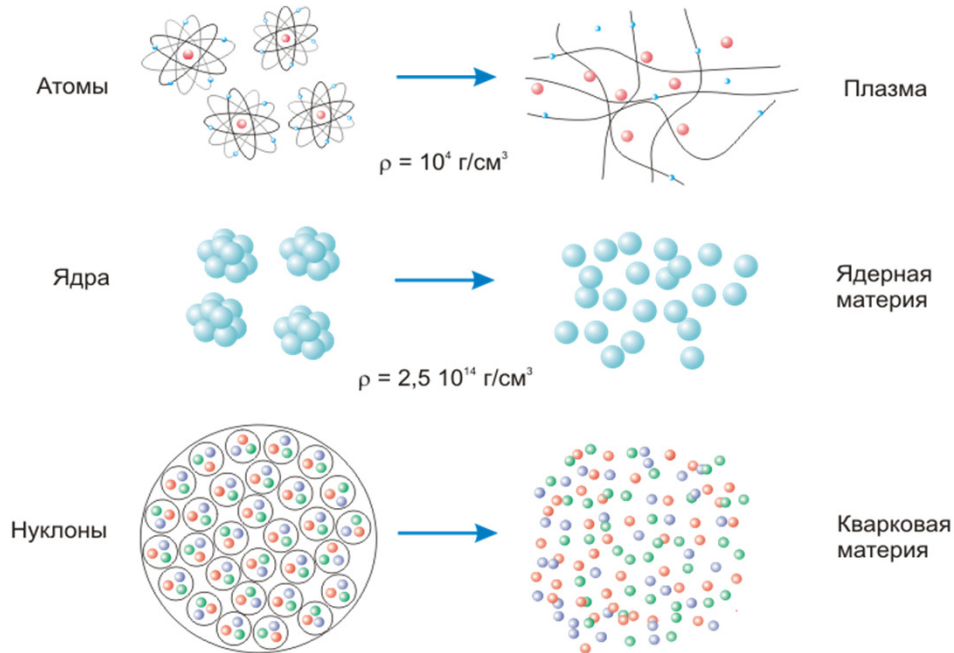
Минаков Д.В  
Левашов П.Р.



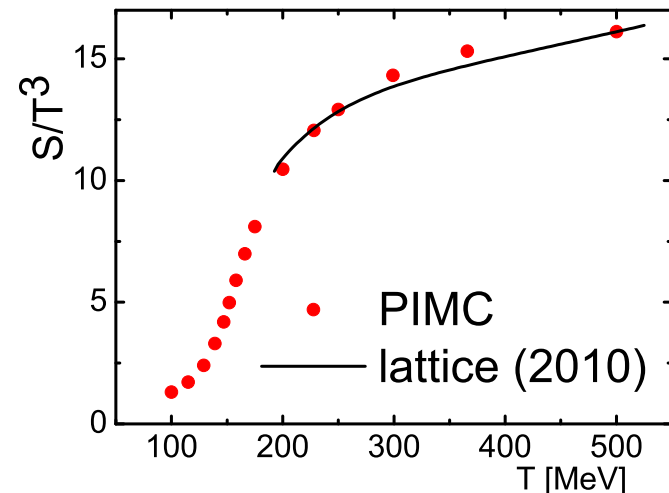
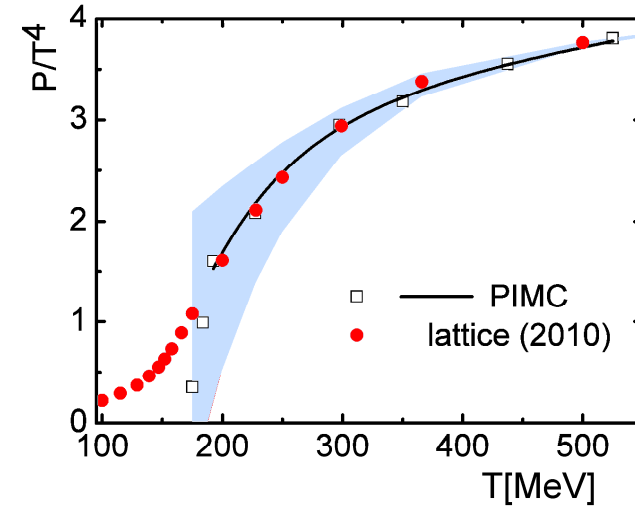
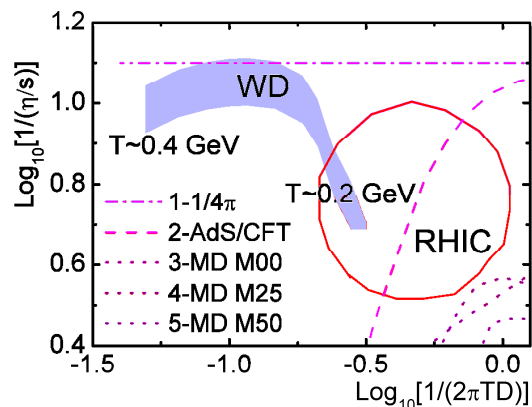
# Квантовое моделирование термодинамических и кинетических свойств неидеальной релятивистской кварк – глюонной плазмы

Превращения вещества при больших давлениях и высоких температурах

Уравнение состояний (P) и энтропия (S)  
Сравнений с расчетами  
в решеточной модели КХД



Коэффициенты диффузии и сдвиговой вязкости  
Сравнение с экспериментальными оценками RHIC



Рук. работ: д.ф.-м.н. Филинов Владимир Сергеевич

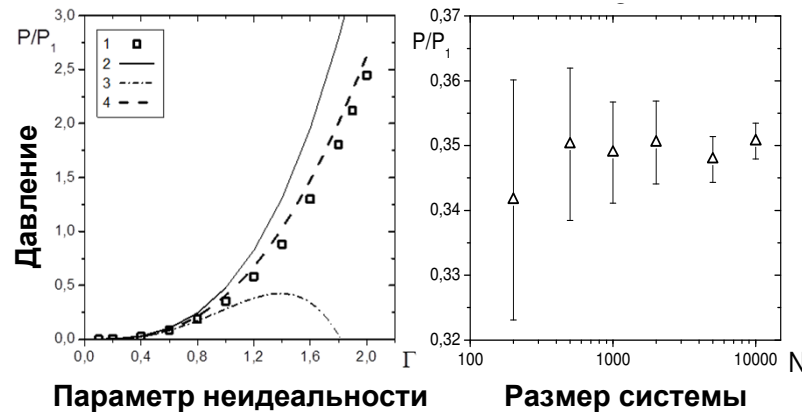
# Применение графических ускорителей для моделирования неидеальной плазмы

НИЦ-1, рук. зав. лаб. Морозов Игорь Владимирович

Графические ускорители (GPU) позволяют увеличить размер исследуемой системы на 1-2 порядка

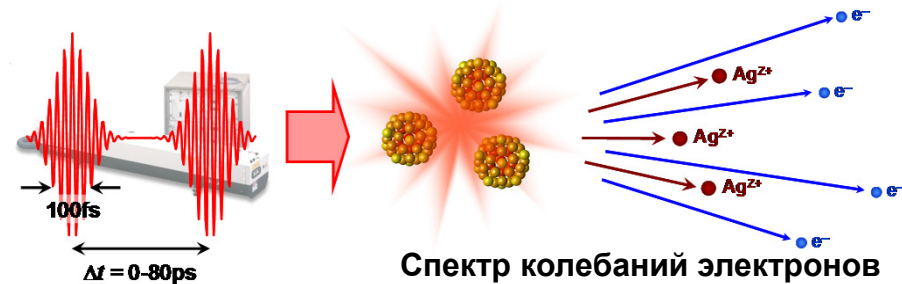


Уравнение состояния и флуктуации в равновесной неидеальной плазме

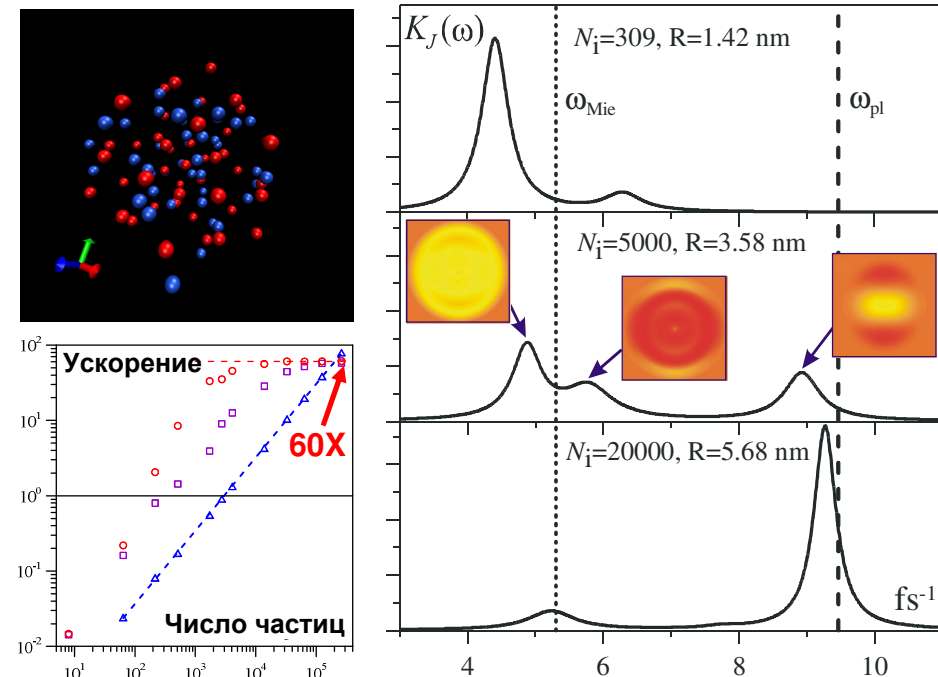


Р.Г. Быстрый, Я.С. Лавриненко, А.В. Ланкин, И.В. Морозов, Г.Э. Норман, И.М. Саитов // TBT 2014 (в печати)

Неидеальная кластерная наноплазма



Спектр колебаний электронов



Bystryi R.G., Morozov I.V. // Phys. Rev. E 2014 (submitted)



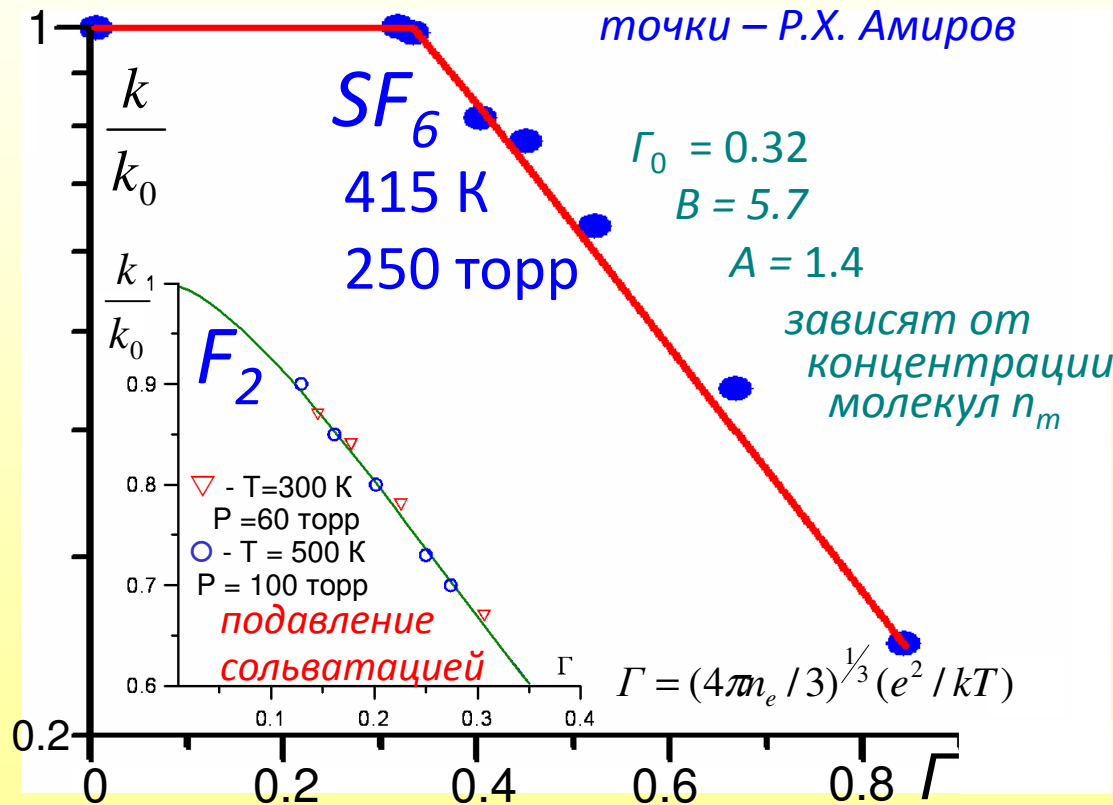
# Рекомбинация зарядов, $\Gamma > \Gamma_0$ . Формула Ланкина

$$\frac{k}{k_0} = B \exp\left(-\frac{A \cdot \Delta E}{kT}\right) = B \exp(-2A\Gamma)$$

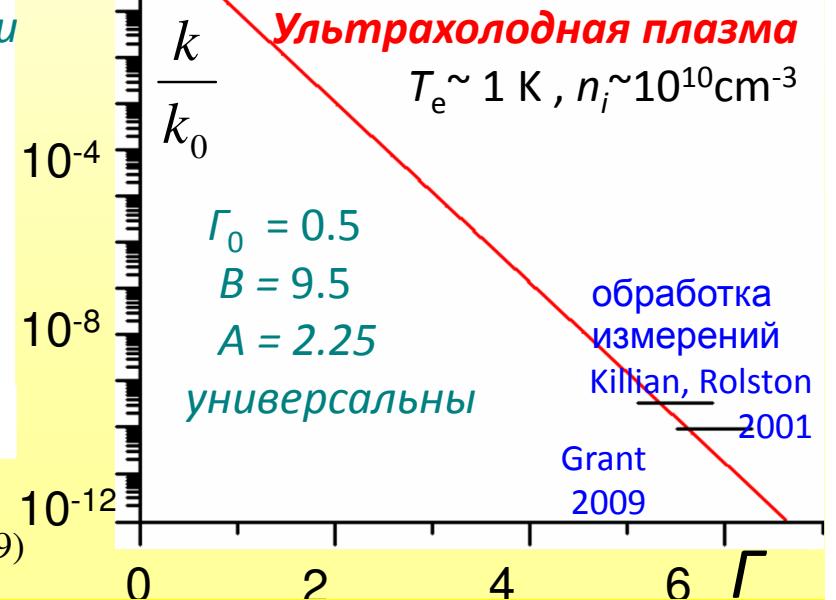
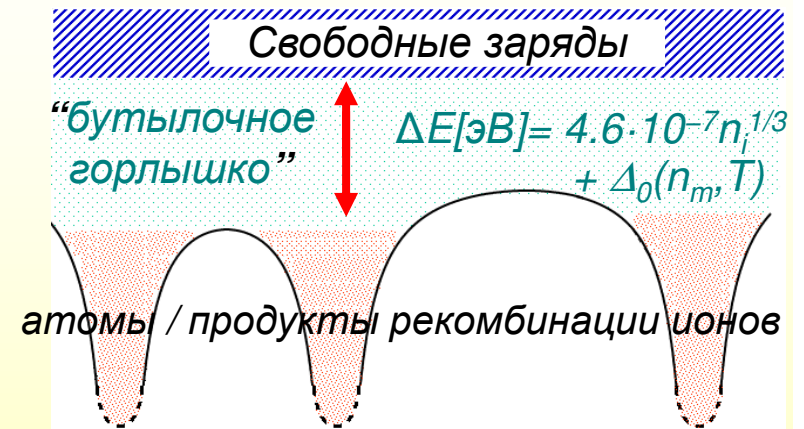
$k$  – коэффициент рекомбинации  
в неидеальной плазме,  $k_0$  – в идеальной

Значения  $A$ ,  $B$  и  $\Gamma_0$  определяются при расчёте рекомбинации методом молекулярной динамики

## Ионная плазма



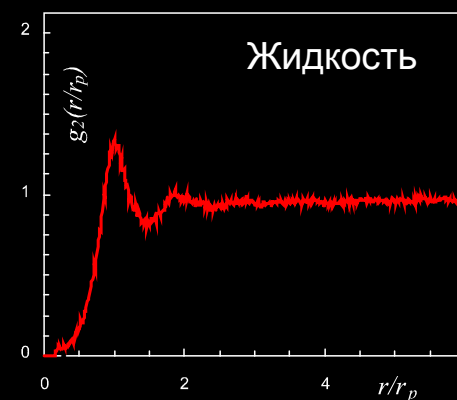
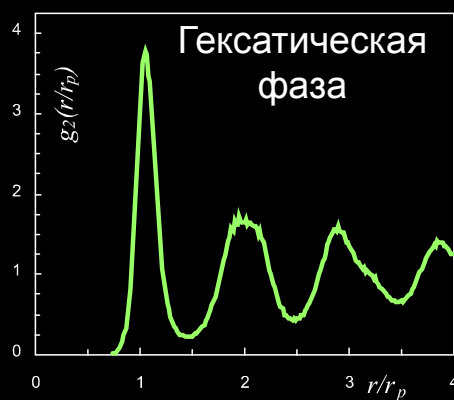
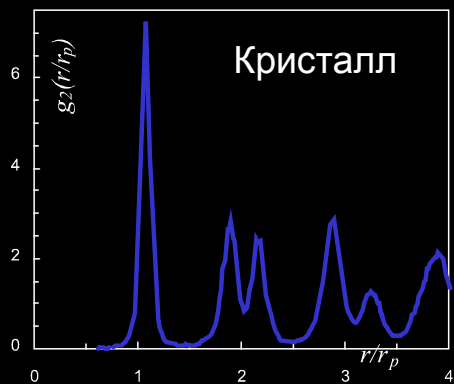
## Аррениусова природа формулы



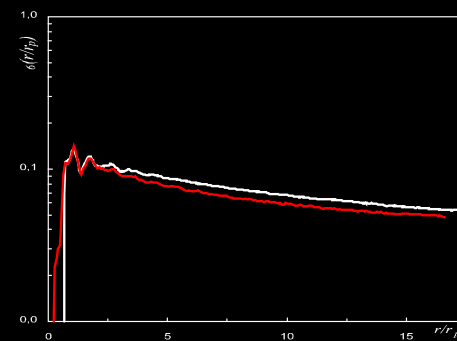
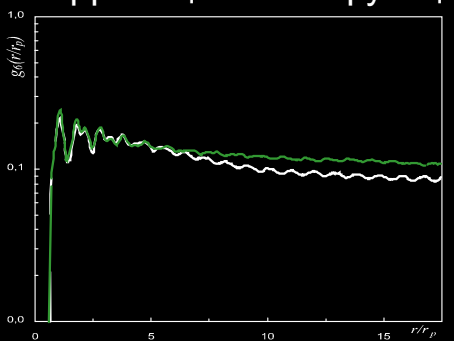
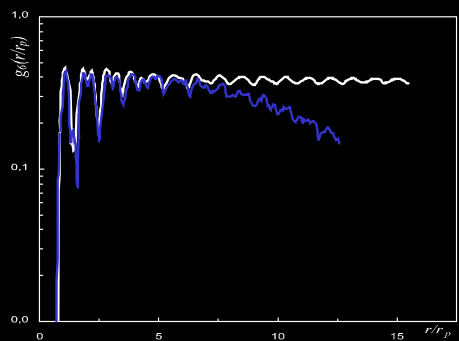
Р.Х. Амиров, А. В. Ланкин, Г. Э. Норман. ЖЭТФ в печати  
 А.Ланкин, G.Norman. Contrib. Plasma Phys. **53**,711(2013), **49**,723(2009)  
 А. Ланкин, G. Norman. J.Phys.A: Math. and Theor. **42**, 214042 (2009)  
 А. В. Ланкин. ЖЭТФ **134**, 1013 (2008)



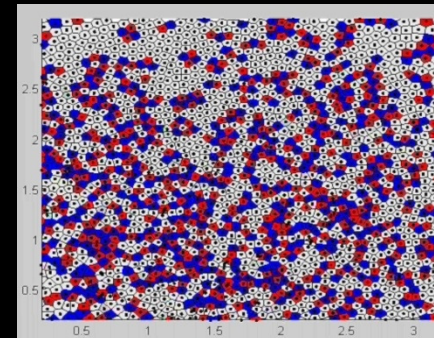
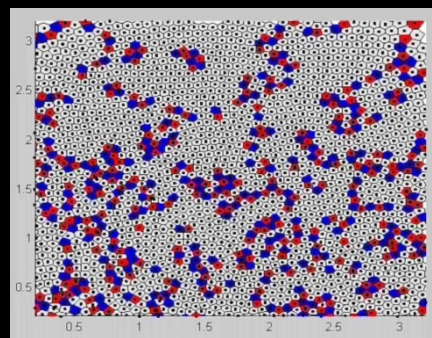
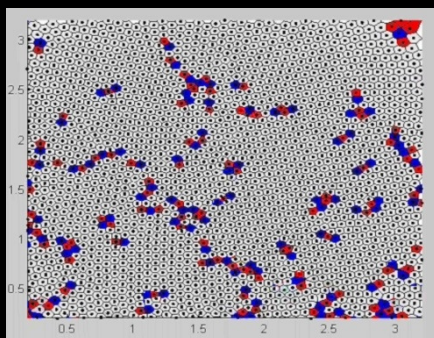
# Фазовый переход в 2D плазменно-пылевых системах



Парные корреляционные функции



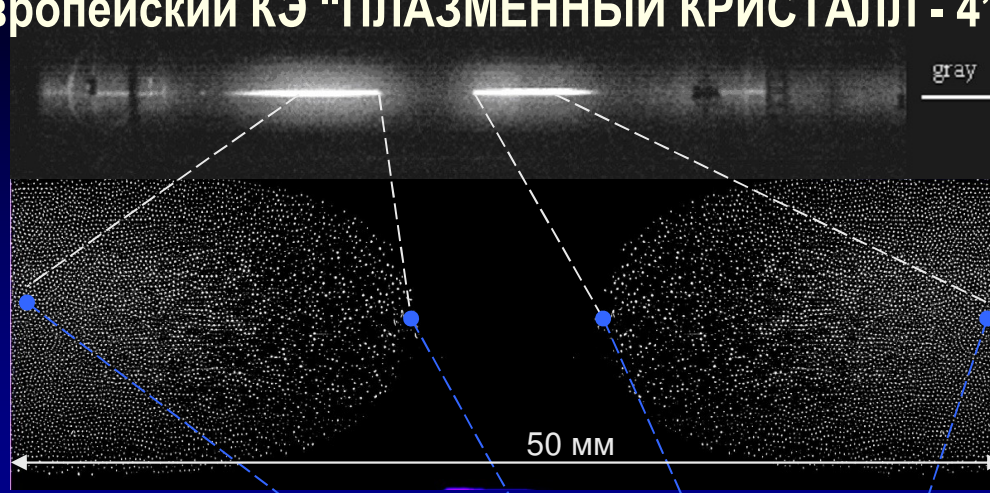
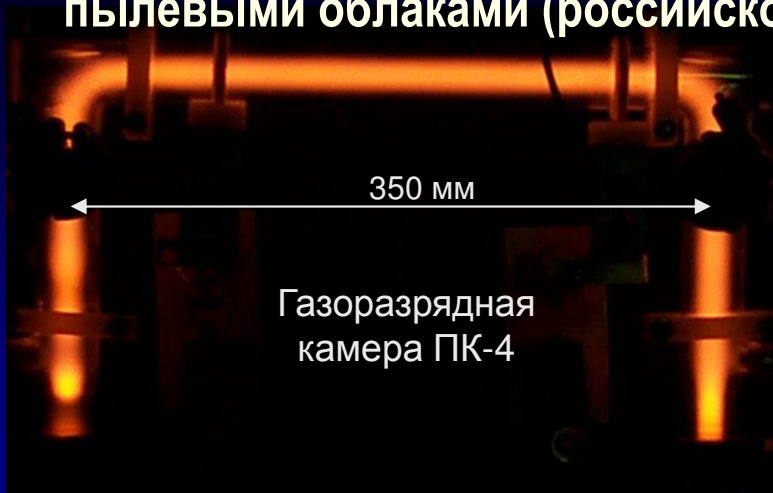
Ориентационные корреляционные функции



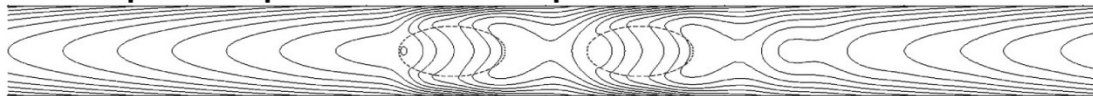
Дефекты выделены красным цветом (5 и ме

Рук. работ: чл.-корр. РАН Петров Олег Федорович, НИЦ-1

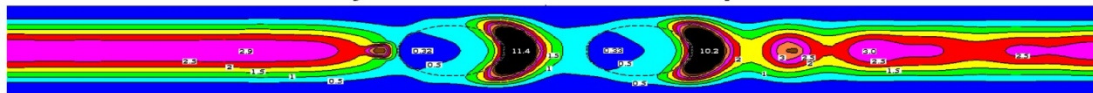
# Численное моделирование разряда постоянного тока с плотными плазменно-пылевыми облаками (российско-европейский КЭ "ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ - 4")



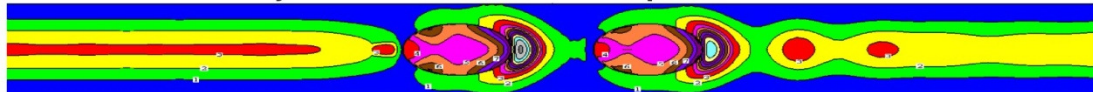
Electric potential profiles with the step of 5 V



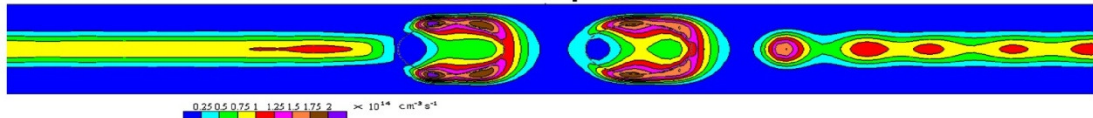
Electron number density distribution with the step of  $0.5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$



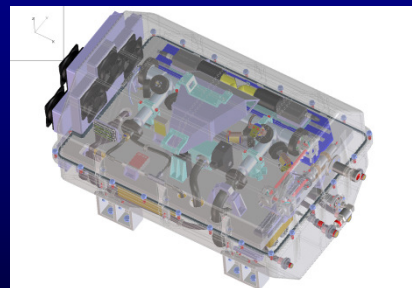
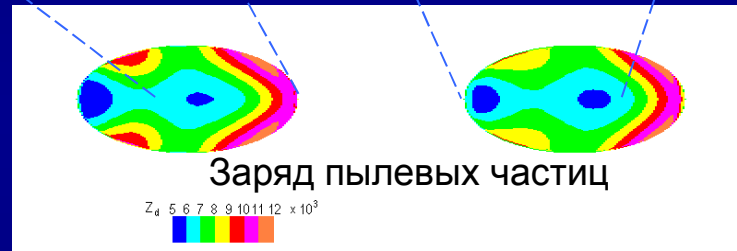
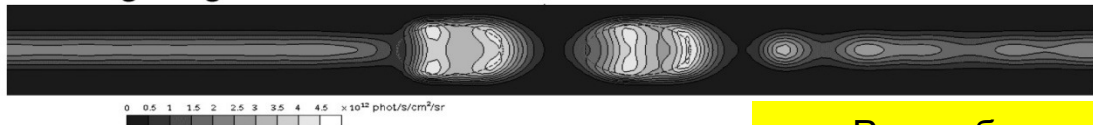
Ion number density distribution with the step of  $1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$



Ionization rate distribution with the step of  $0.25 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$



Discharge brightness in 585 nm line for side view



Космическая аппаратура ПК-4

Октябрь 2014





# Плазменная медицина

Приборы, используемые в плазменной медицине:  
СВЧ плазма      Сегнетоэлектрический реактор



## Диагностика

- Определен профиль температуры в плазменном потоке.
- Измерен плавающий потенциал при помощи сеточного зонда.
- Проведен газовый анализ активных компонентов плазмы.
- Измерено СВЧ излучение плазменного факела.
- Проведен газовый анализ активных компонентов плазмы.
- Проведена спектральная диагностика плазменного потока.

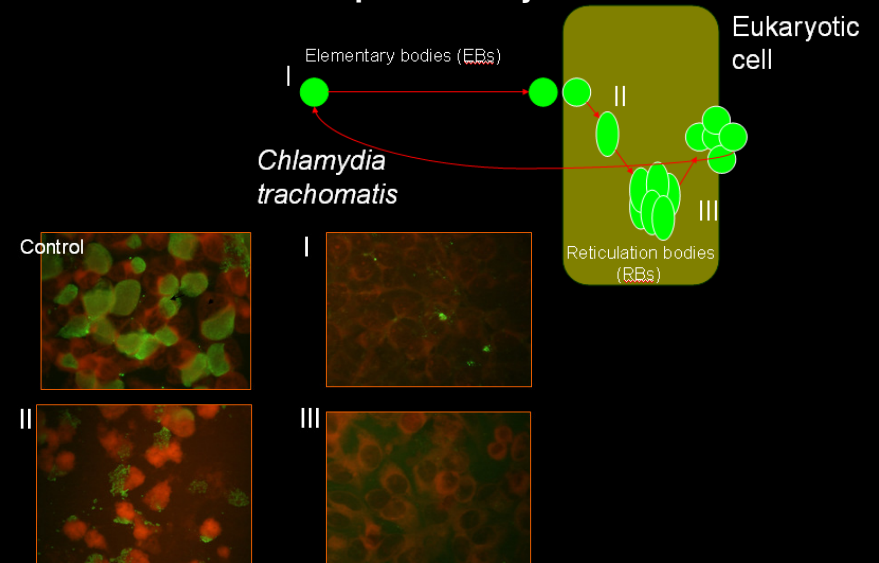


## Активные компоненты в плазме:

Активные незаряженные атомы (озон  $O_3$ , радикалы  $NO$  и  $OH$ ,  $NO_2$ ,  $N$ ,  $O$ )  
Ультрафиолетовое излучение,  
Заряженные частицы

## In vitro

Жизненный цикл внутриклеточной бактерии *Chlamydia trachomatis*



Control – материнские ретикулярные тельца  
I – Внеклеточная форма, обработанная плазмой, использована для заражения  
II – Плазмой обработаны внутриклеточные вегетативные тельца  
III – Плазмой обработаны внутриклеточные бактерии

## In vivo

Влияние плазмы на заживление ран

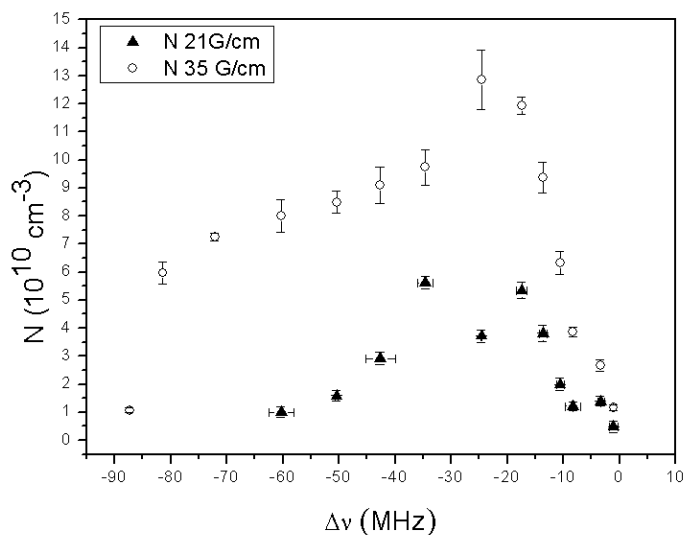
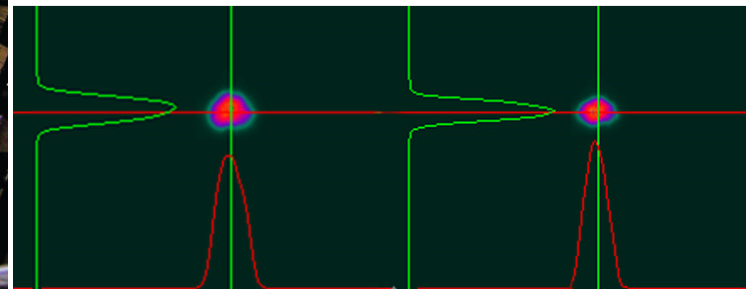
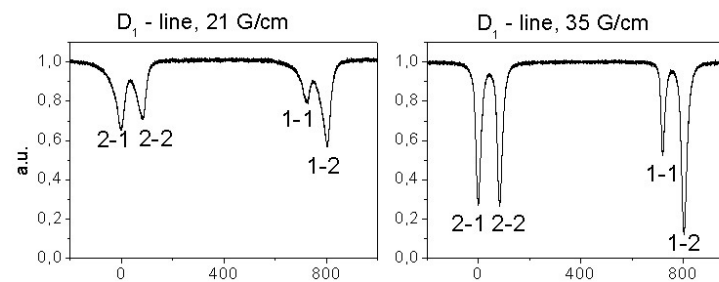




# Стенд по получению ультрахолодной плазмы и ридберговского вещества



Рост поглощения пробного лазерного излучения при увеличении градиента магнитного поля



Высокая плотность оптически охлажденных атомов лития необходима для приготовления сильно взаимодействующей холодной плазмы и ридберговского вещества.

Максимальная плотность  $N=1.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  достигается при градиенте магнитного поля **35 Гс/см**.

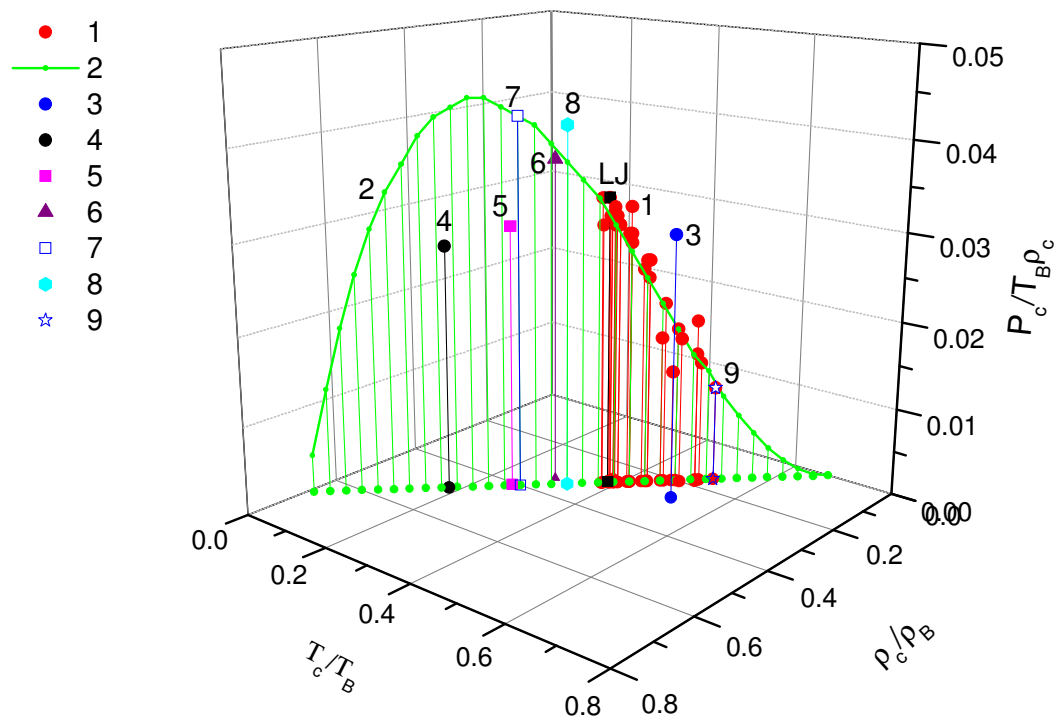
Приготовление и диагностика сильно взаимодействующей холодной плазмы осуществляется при помощи уникального УФ-лазера, с шириной линии генерации **60 кГц**.

Рук. Работ: зав. лаб., к.ф.-м.н. Зеленер Борис Борисович, НИЦ-1





## Универсальные соотношения для критических параметров различных веществ



Зависимость критического давления  $P_c$  различных веществ от критической плотности  $\rho_c$  и температуры  $T_c$  в координатах, приведенных к бойлевским значениям ( $T_B$ ,  $\rho_B$ ).

Теоретическая линия 2 вытекает из обобщенного закона подобия.

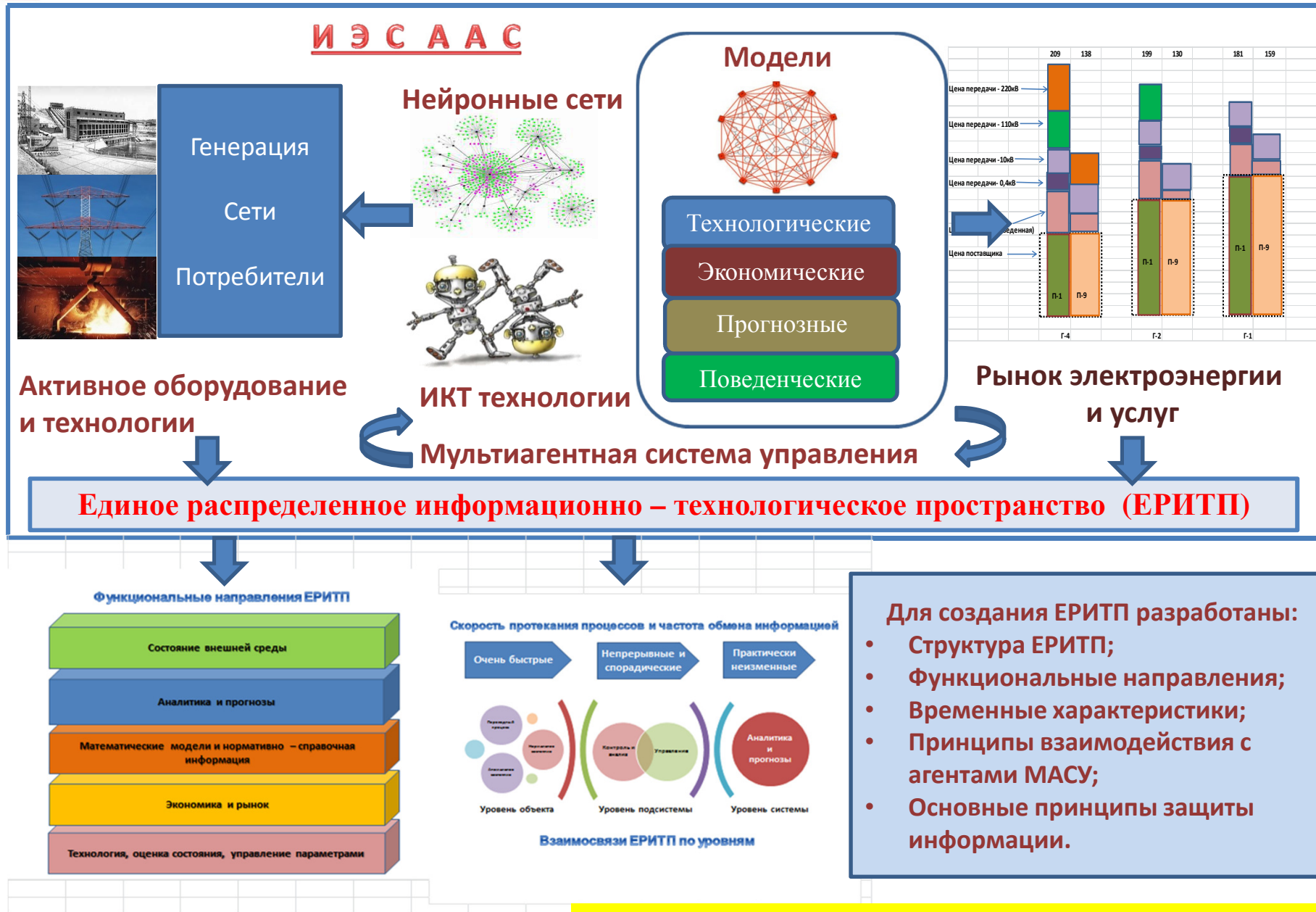
Символы: 1-вещества из базы данных NIST 3 -  $H_2O$ , 4 –  $He_3$ , 5 –  $He_4$ , 6 – уравнение Ван дер Ваальса, 7 – Hg, 8 –  $H_2$ , 9 – Zr, LJ – модель Леннард-Джонса.

E. M. Apfelbaum, V.S. Vorob'ev, J. Chem. Phys. 139, 046101 (2013).

**Фундаментальные проблемы современной  
электротехники, импульсной и  
возобновляемой энергетики**



# Информационная система для интеллектуальной энергетики



- Для создания ЕРИТП разработаны:
- Структура ЕРИТП;
  - Функциональные направления;
  - Временные характеристики;
  - Принципы взаимодействия с агентами МАСУ;
  - Основные принципы защиты информации.

**Механика жидкости, газа и плазмы,  
многофазных и неидеальных сред,  
механика горения, детонации и взрыва.**





# Влияние галогенуглеродов на инициирование воспламенения и детонации вблизи низкотемпературных пределов

Известные ингибиторы горения, применяемые в пожаротушении, неожиданно оказались промоторами развития детонации

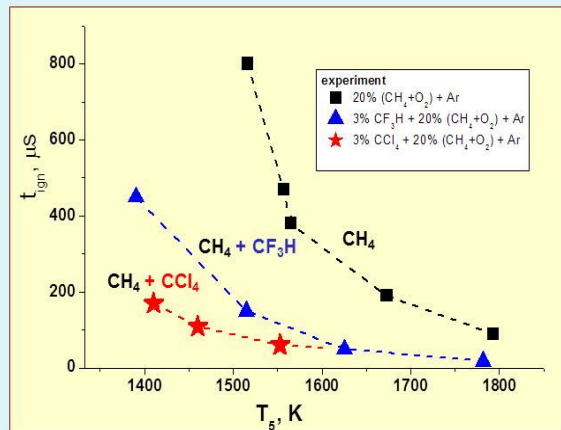
## Ударные волны в смесях

20%( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ )+Ar  
3% $\text{CF}_3\text{H} + 20\%$ ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ )+Ar  
3% $\text{CCl}_4 + 20\%$ ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ )+Ar

## Начальные параметры

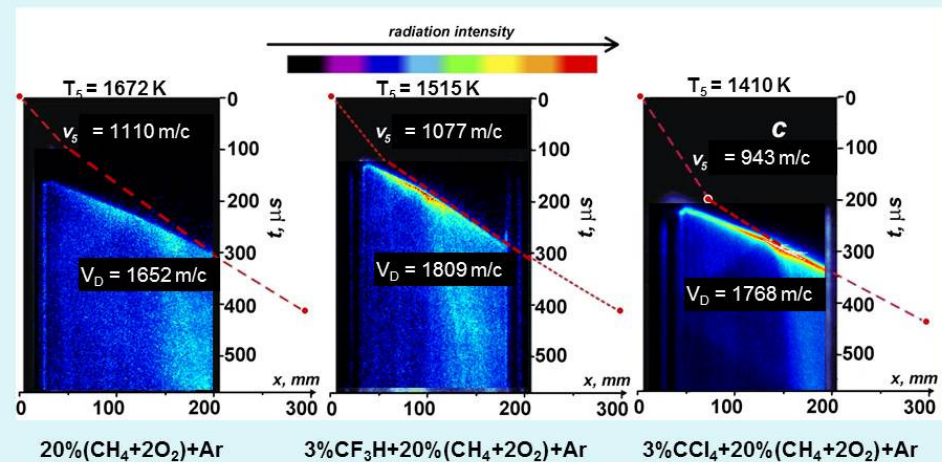
$T = 1300 - 1800 \text{ K}$ ,  
 $P = 5.5 - 6.5 \text{ bar}$

## Температурные зависимости времени индукции



В обеих смесях с галогенуглеродами наблюдается существенное ускорение формирования детонации

## ICCD изображения распространения УВ

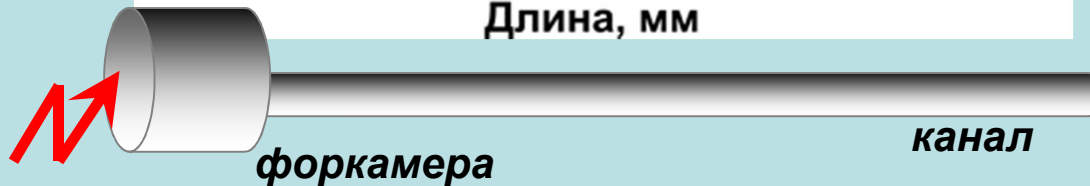
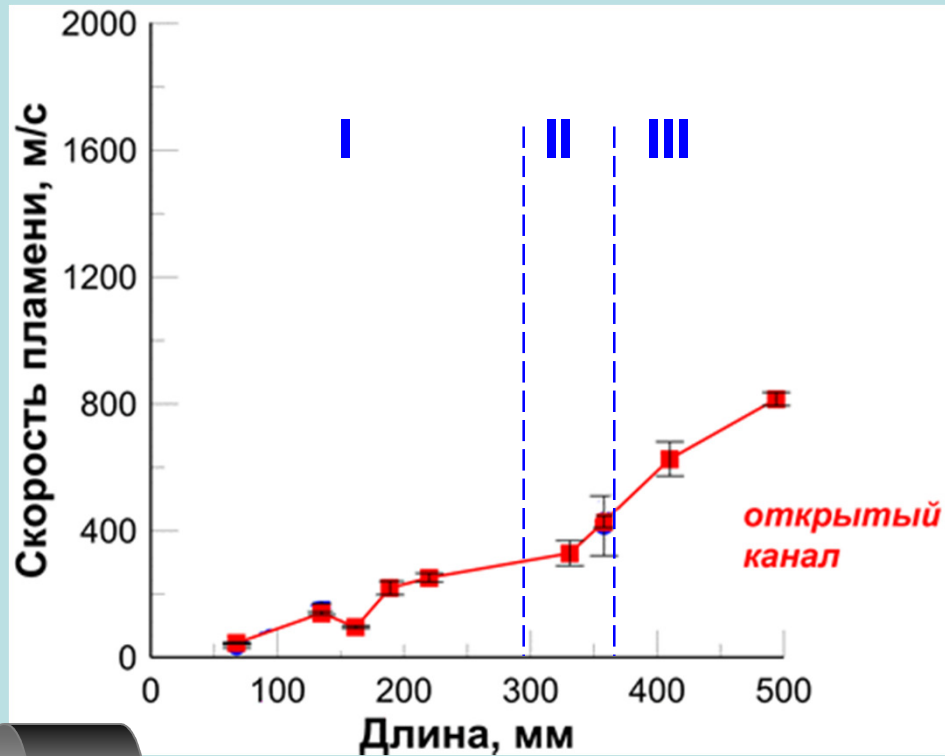


В обеих смесях, содержащих галоген-углероды не наблюдается подавления детонации

- Экспериментально исследовано влияние примесей  $\text{CF}_3\text{H}$  и  $\text{CCl}_4$  (известных как средства пожаротушения) на развитие детонации в метано-кислородной смеси.
- Было замечено, что при повышенных температурах обе исследованные добавки демонстрируют существенный эффект промотирования детонации.
- Предложен простой кинетический механизм активного влияния примесей на развитие детонации. Результаты кинетического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.



## Немонотонное влияние акустических возмущений на скорость фронта пламени в углеводородно-кислородных смесях в каналах субкритического диаметра



На начальном стадии распространения фронта пламени в закрытом канале генерируемые акустические возмущения приводят к ускорению фронта пламени (I),

затем рост возмущений тормозит фронт пламени (II),

что приводит к повышению тепловыделения и к переходу к детонации (III).



$$ER = 0.5$$

$$P_0 = 1 \text{ атм}, \quad T_0 = 300 \text{ К}$$

$$\frac{d_{\text{канала}}}{\lambda_{\text{детонация}}} < 1$$

### Определение условий формирования детонации в каналах субкритического диаметра

Впервые экспериментально изучен переход горения в детонацию пропано-бутано-кислородной смеси в канале с субкритическим диаметром. Измерена динамика скорости фронта пламени вдоль открытого и закрытого каналов. Определено влияние отраженных от конца канала акустических возмущения на скорость фронта пламени. Обнаружено немонотонное влияние акустических возмущений на скорость фронта пламени. Полученные данные могут быть использованы для создания научного задела при проектировании устройств с использованием детонации, например таких как безыгольный иньектор, детонационный двигатель и создание покрытий с помощью детонации.

Изучен переход горения в детонацию пропано-бутано-кислородной смеси в канале с субкритическим диаметром. Под субкритическим каналом подразумевался такой канал, диаметр которого сравним с шириной детонационной ячейки газовой детонации. Эксперименты проводились на стенде, состоящем из форкамеры и узкого канала общей длиной более 600 мм. Конструкция форкамеры позволяла изменять её длину и диаметр. Смесь поджигалась электрическим разрядом с энергией разряда 0,1 Дж.

Проблема инициирования детонации в подобном канале решалась размещением форкамеры с одного конца. Величина теплоотвода на стенки форкамеры была значительно ниже величины тепловыделения в объеме форкамеры. Это приводило к значительному повышению давления продуктов сгорания в форкамере, в результате чего возникал push-эффект. В результате этого происходило ускорение фронта пламени (рис. 1, зона I) в узком субкритическом канале до формирования детонационной волны (рис. 1, зона III).

Рис. Эволюция скорости пламени в открытой и закрытой камере. 1 – закрытый канал; 2 – открытый канал.

Было произведено сравнение развития пламени в каналах с открытым и закрытым концом. Определено влияние отраженных от конца канала акустических возмущения на скорость фронта пламени. Обнаружено немонотонное влияние акустических возмущений на скорость фронта пламени (рис. 1, зона III).

Полученные данные могут быть использованы для создания научного задела при проектировании устройств с использованием детонации, например таких как безыгольный иньектор, детонационный двигатель и создание покрытий с помощью детонации.

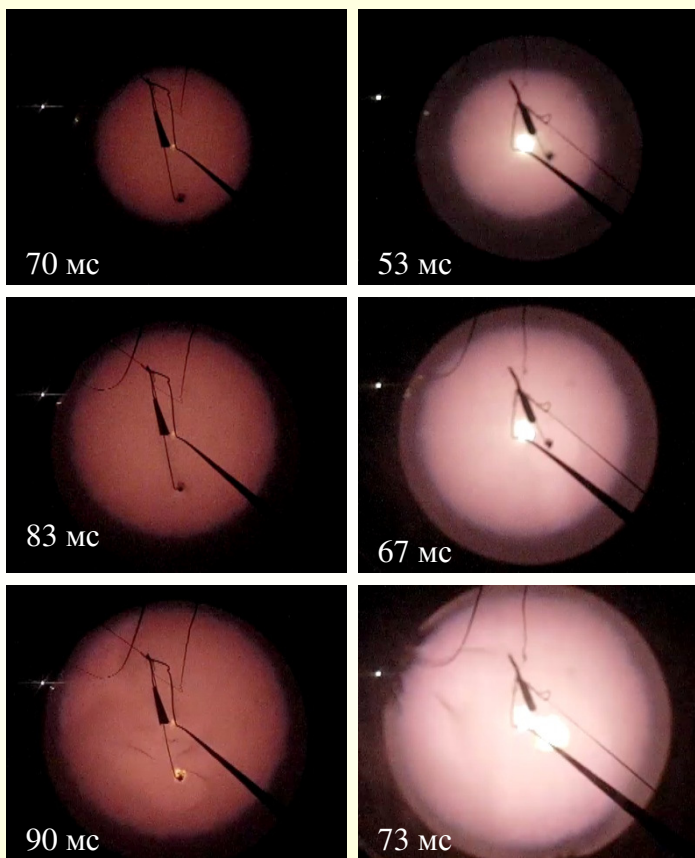
Руководитель работы: Голуб Виктор Владимирович, 8 495 484 21 38



## Эволюция сферического водородно-воздушного пламени при различной энергии инициирования

Кадры видеofilьмов

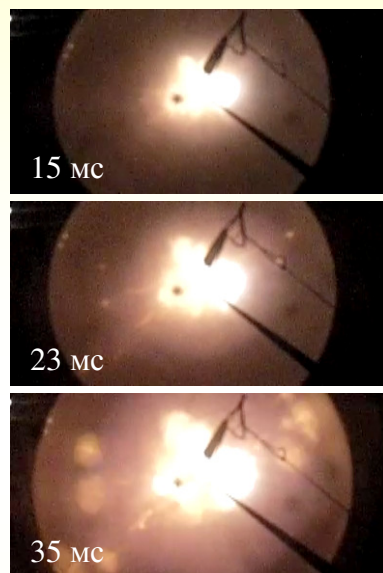
скорость съемки 300 к/с



$E_{\text{ин}} = 1$  Дж

$E_{\text{ин}} = 20$  Дж

скорость съемки 600 к/с



$E_{\text{ин}} = 2300$

Дж

Исследования проводились на стехиометрической водородно-воздушной смеси, ограниченной тонкой резиновой оболочкой с начальным объемом 40 м<sup>3</sup>. Инициирование осуществлялось в центре сферы энергией  $E_{\text{ин}} = 1; 20; 2300$  Дж. Получены результаты по влиянию энергии инициирования на скорость пламени, гидродинамическую неустойчивость и турбулизацию пламени.



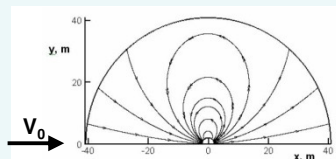
Взрывная камера 13Я3

Руководитель работ: к.т.н. Петухов Вячеслав Александрович, НИЦ-1



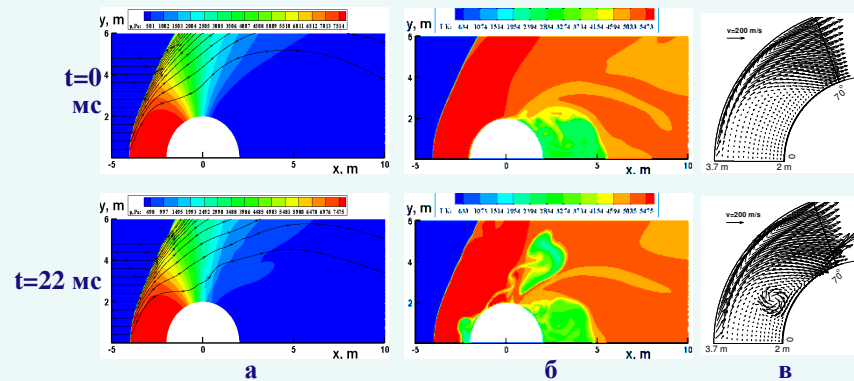
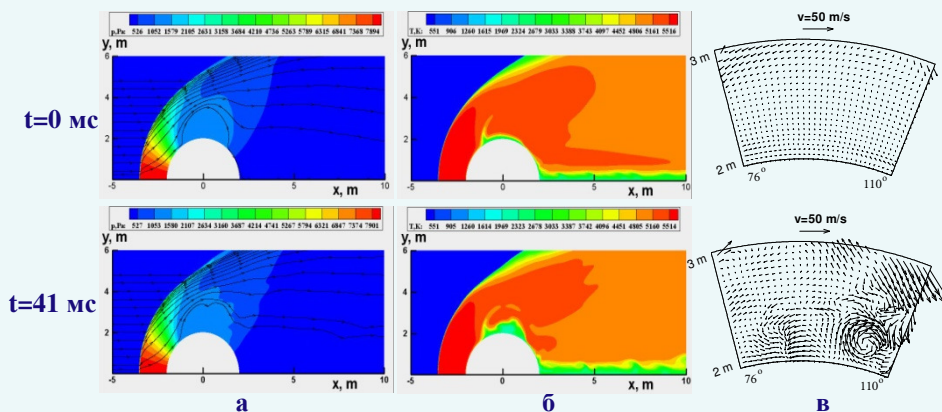
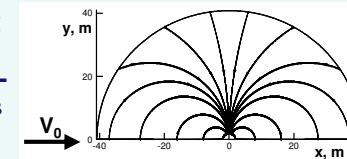


# Влияние импульсного вдува холодного газа в зону отрыва на характеристики теплообмена при гиперзвуковом МГД обтекании тел вращения

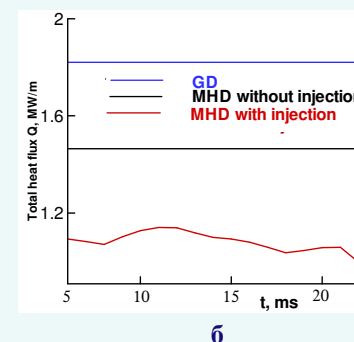
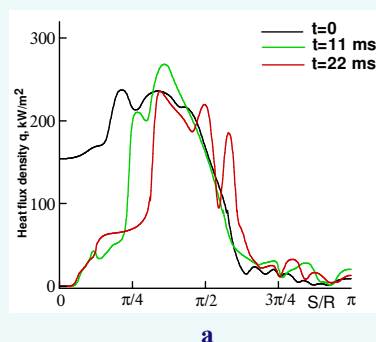
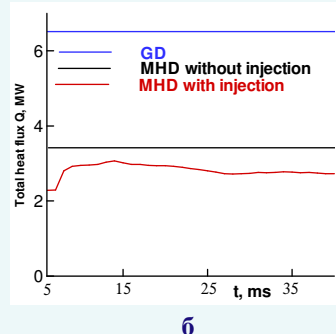
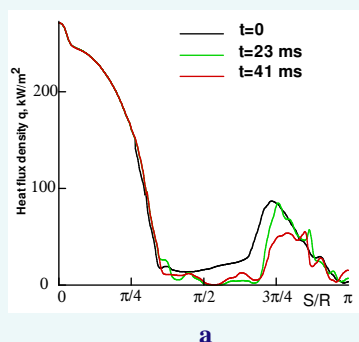


МГД обтекание сферы: параллельная ориентация векторов магнитного момента диполя и скорости набегающего потока, зона отрыва располагается на боковой поверхности сферы

МГД обтекание цилиндра: нормальная ориентация векторов магнитного момента диполя и скорости набегающего потока, зона отрыва располагается в ударном слое перед цилиндром



Давление и линии ГД тока (а), температура (б) и векторная диаграмма скоростей (в). Длительность вдува - 5 мс.



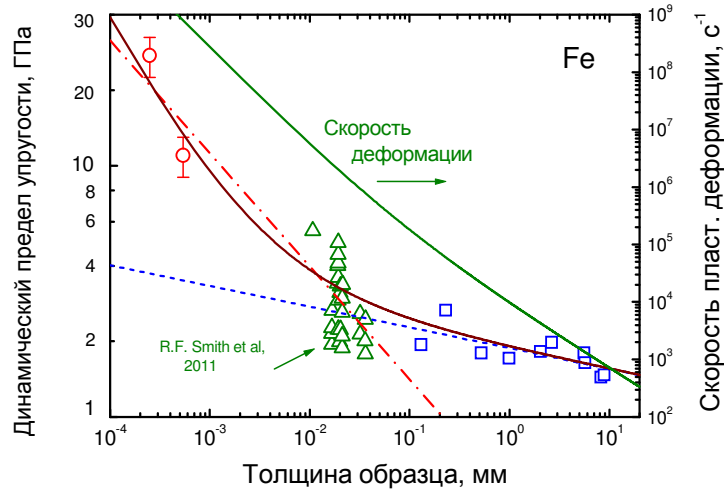
Распределение плотности теплового потока в стенку  $q$  вдоль поверхности тела (а) и зависимость суммарного теплового потока  $Q$  от времени (б)

**Вдув холодного газа в зону отрыва приводит к существенному снижению суммарного теплового потока в обтекаемое тело, причем этот эффект сохраняется долгое время после завершения вдува и не зависит от расположения отрывной зоны**

**Механика деформирования и  
разрушения материалов, сред, изделий,  
конструкций, сооружений и  
триботехнических систем при  
механических нагрузках, воздействии  
физических полей и химически  
активных сред**

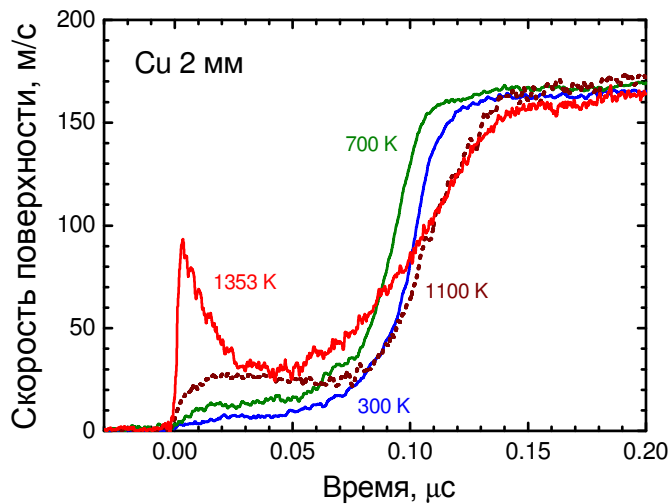


# Экспериментальное исследование температурно-скоростных зависимостей напряжений течения и разрушения металлов и сплавов

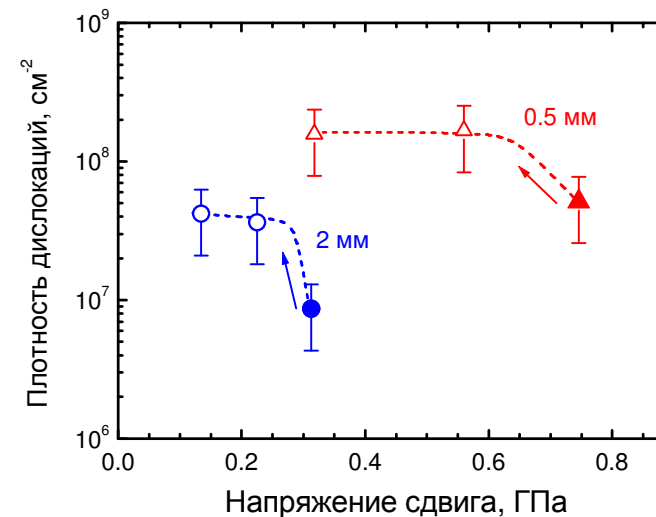


Проведены исследования ударно-волновых нагрузок субмикросекундной и пикосекундной длительностей, в образцах железа толщиной от 0.25 мкм до 10 мм. Результаты измерений в широком временном диапазоне объединены единой зависимостью напряжения течения от скорости деформации в диапазоне  $10^3 - 10^9 s^{-1}$ .

Определены температурно-скоростные зависимости начального напряжения течения в диапазоне скоростей деформации  $10^3 - 10^6 s^{-1}$  при температурах от 296 К до 1353 К. Подтверждено явление аномального термического упрочнения при высоких скоростях деформации. Обнаружено изменение волновой динамики и кинетики размножения дислокаций с ростом температуры.



Эволюция волны ударного сжатия в чистой меди с увеличением температуры испытаний.



Оценка плотности подвижных дислокаций за фронтом упругого предвестника волны ударного сжатия в меди при 1353 К.

***Спасибо  
за внимание.....!***

