



РОСАТОМ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР ВНИИЭФ

# Лазерные мишени

В. Г. Рогачев

11-я Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям  
Россия, Саров, Дом Ученых, 25–28 апреля, 2017 г.



## Кто придумал лазер?

---



**А. М. Прохоров**



**Н. Г. Басов**



**Ч. Х. Таунс (США)**

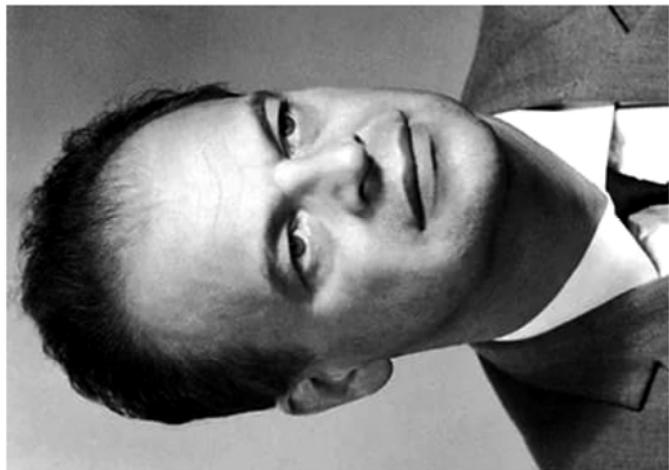
**Нобелевские лауреаты по физике 1964 г.**

## Кто предложил ЛТС?

---



**А. Д. Сахаров**



**Н. Г. Басов**



**О. Н. Крохин**

---

## Лазерный термояд

---

Предложения по использованию лазера для достижения условий управляемого зажигания термоядерного вещества были впервые высказаны Н. Г. Басовым и О. Н. Крохиным в 1962–1964 гг. и независимо А. Д. Сахаровым.

Эти предложения базировались на замечательном свойстве лазера обеспечивать аномально высокую концентрацию энергии в малом объеме, приближающуюся к концентрации энергии при ядерном взрыве.

Лазерная наука и техника за последние пол века прошли большой путь от Джоулей до миллиона Джоулей лазерной энергии; практически достигнут уровень break-even и выход около  $10^{16}$  нейтронов за импульс из мишени (Ливермор, США).

Впереди – решение проблемы зажигания и горения топлива, решение огромного числа технических вопросов на пути практического использования термоядерной энергии

---

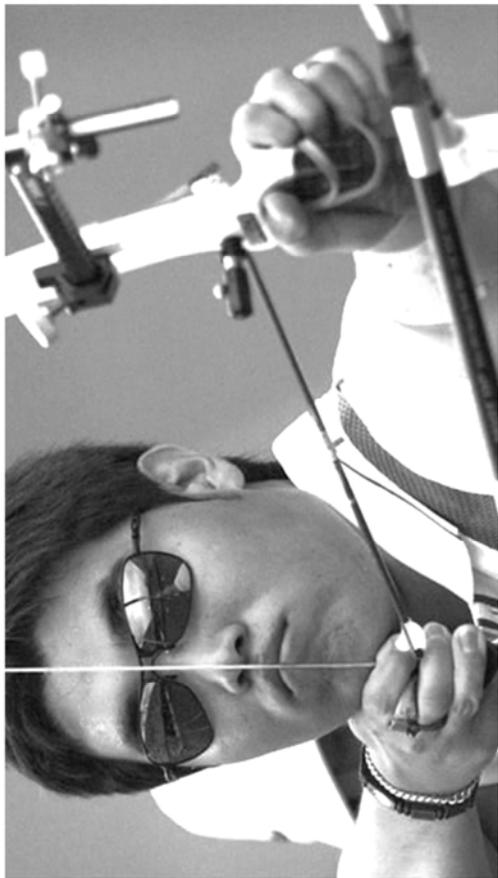
## Основные направления исследований

---

- Уравнения состояния веществ при давлениях до 100 Мбар
- Пробеги мягкого РИ при температурах до 50 эВ
- Перенос мягкого рентгеновского излучения
- ГД неустойчивости и турбулентное перемешивание
- Перенос лазерного излучения в замкнутых полостях
- Поглощение и отражение ЛИ при потоках  $10^1 - 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>
- Повышение симметрии лазерного излучения
- Физика замагниченной плазмы
- Физика работы мишеней ЛТС прямого облучения
- Физика работы рентгеновских мишеней ЛТС
- Неравновесные процессы в мишенях с обращенной короной
- Газодинамические процессы при умеренных потоках ЛИ

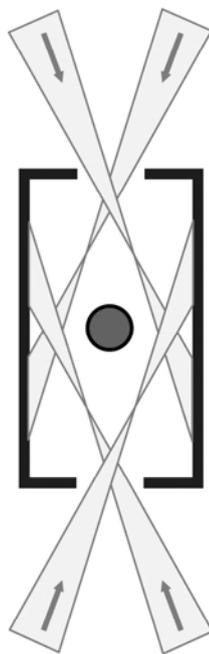
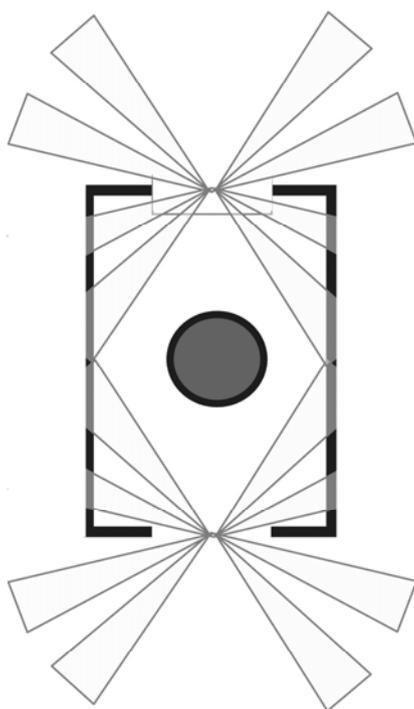
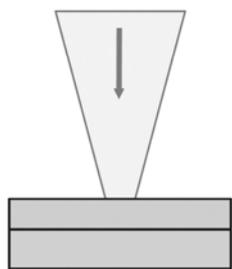
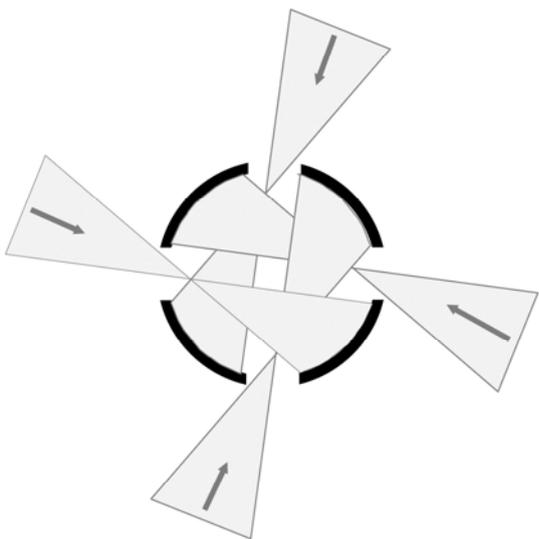
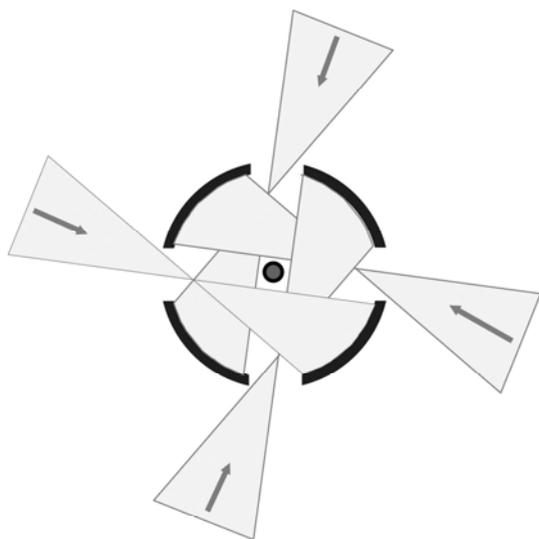
## Лазерные мишени (1)

---

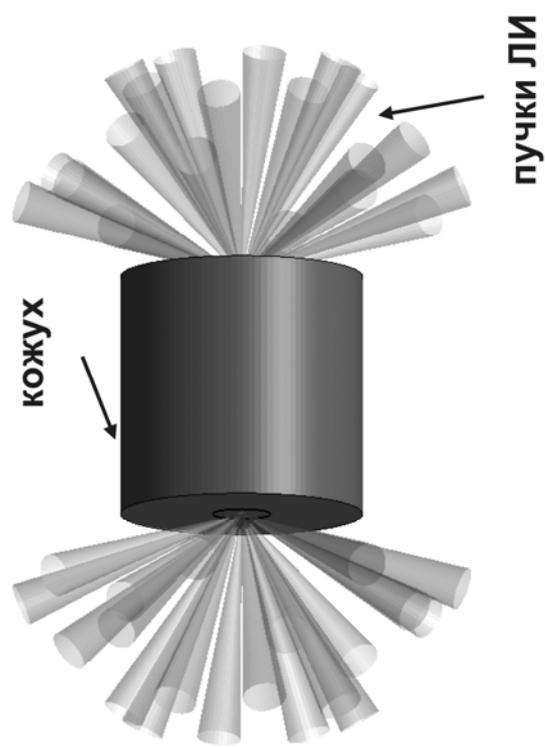
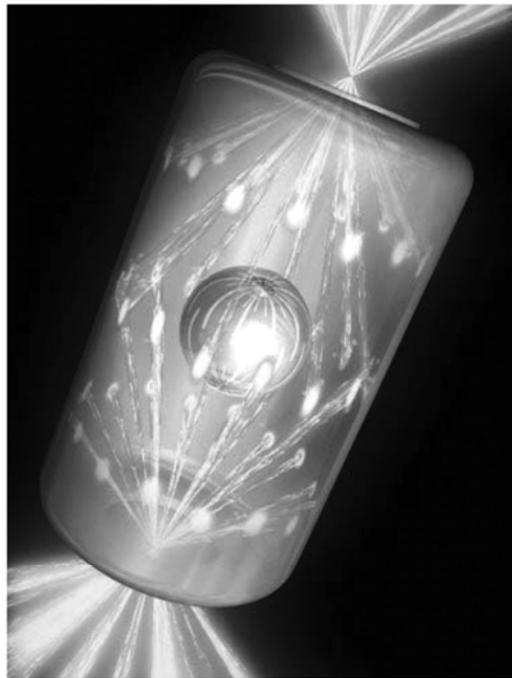


**Лазерные мишени –  
это совсем другое!**

# Лазерные мишени – схемы (2)

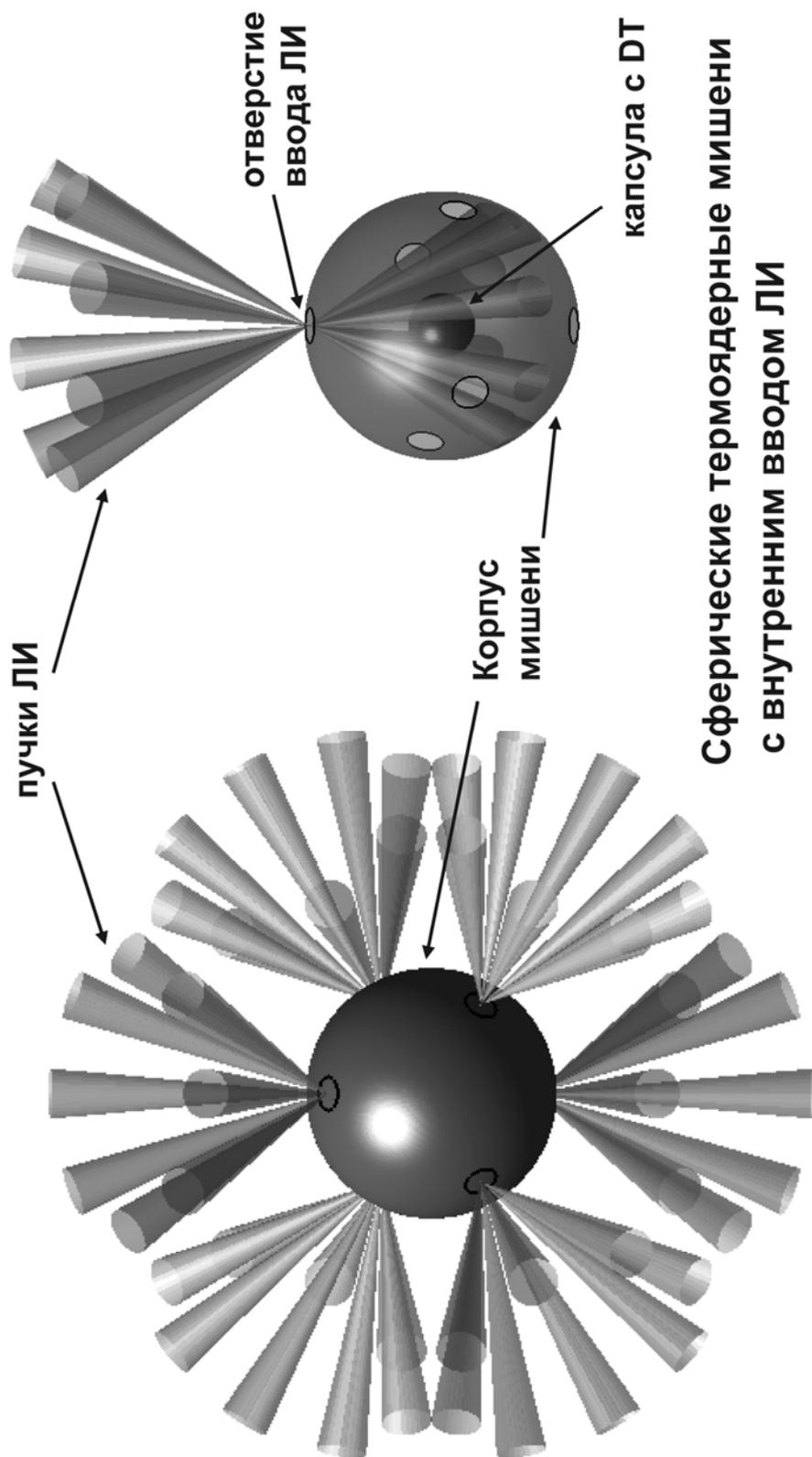


## Лазерные мишени (3)



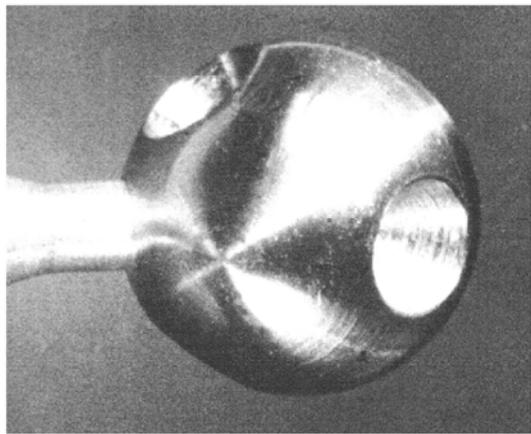
Цилиндрическая мишень с двусторонним вводом 192 пучков лазерного излучения на установке NIF (Ливермор).

## Лазерные мишени (4)

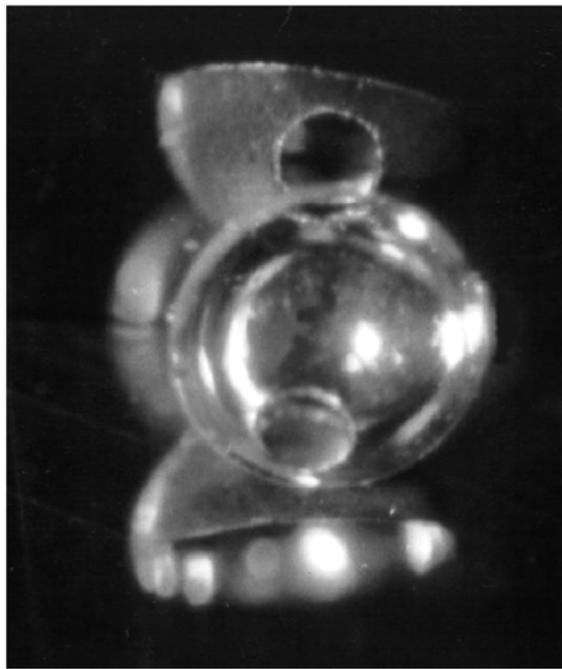


## Мишени с Обращенной Короной (МОК)

---

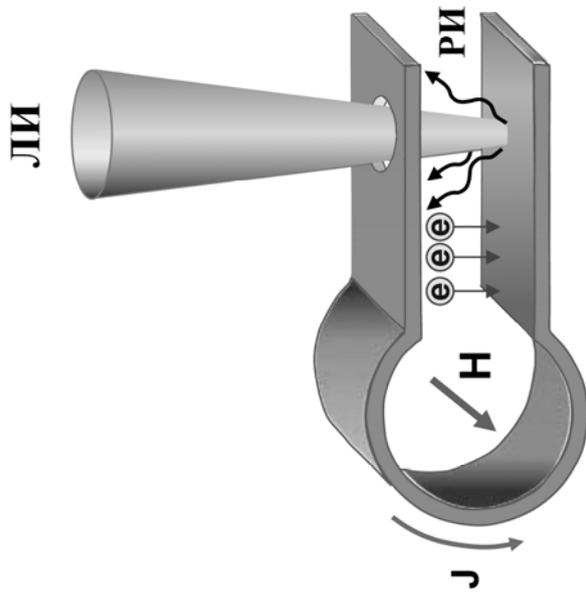


Вид снаружи на стальной корпус мишени МОК

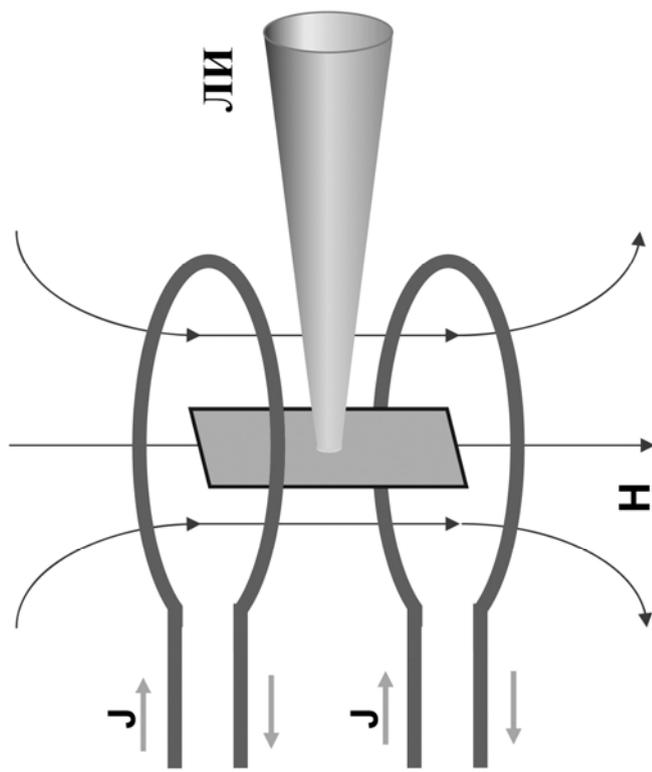


Тонкостенный корпус мишени МОК.  
Медная сферическая полу оболочка  $\varnothing$  2 мм,  
расположенная в вершине двугранного  
зеркального угла

# Мишени для лазерных экспериментов с магнитными полями



Генерация магнитного  
поля



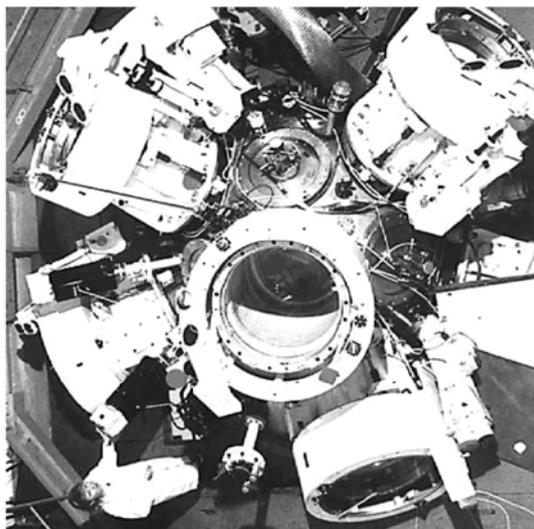
Воздействие магнитного поля  
на лазерную плазму

## Лазерная установка ИСКРА-5



### Внешний вид здания установки ИСКРА-5

**12-канальный фотодиссоциационный йодный лазер с  $\lambda = 1,315$  мкм;**  
**Энергия ЛИ в первой гармонике – до 30 кДж**  
**Длительность импульса – 0,4 нс**  
**Мощность – до 100 ТВт**  
**Работает свыше 25 лет**



### Двухдцатилучевая сферическая камера Ø 2 м

# Лазерная установка ЛУЧ

Твердотельный ND лазер

$\lambda = 1054 \text{ нм}$

Каналов усиления – 4

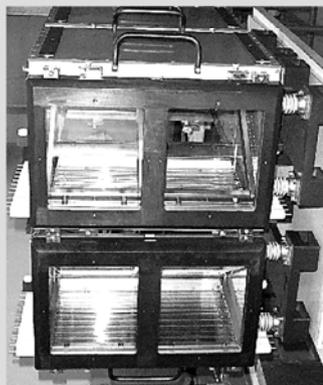
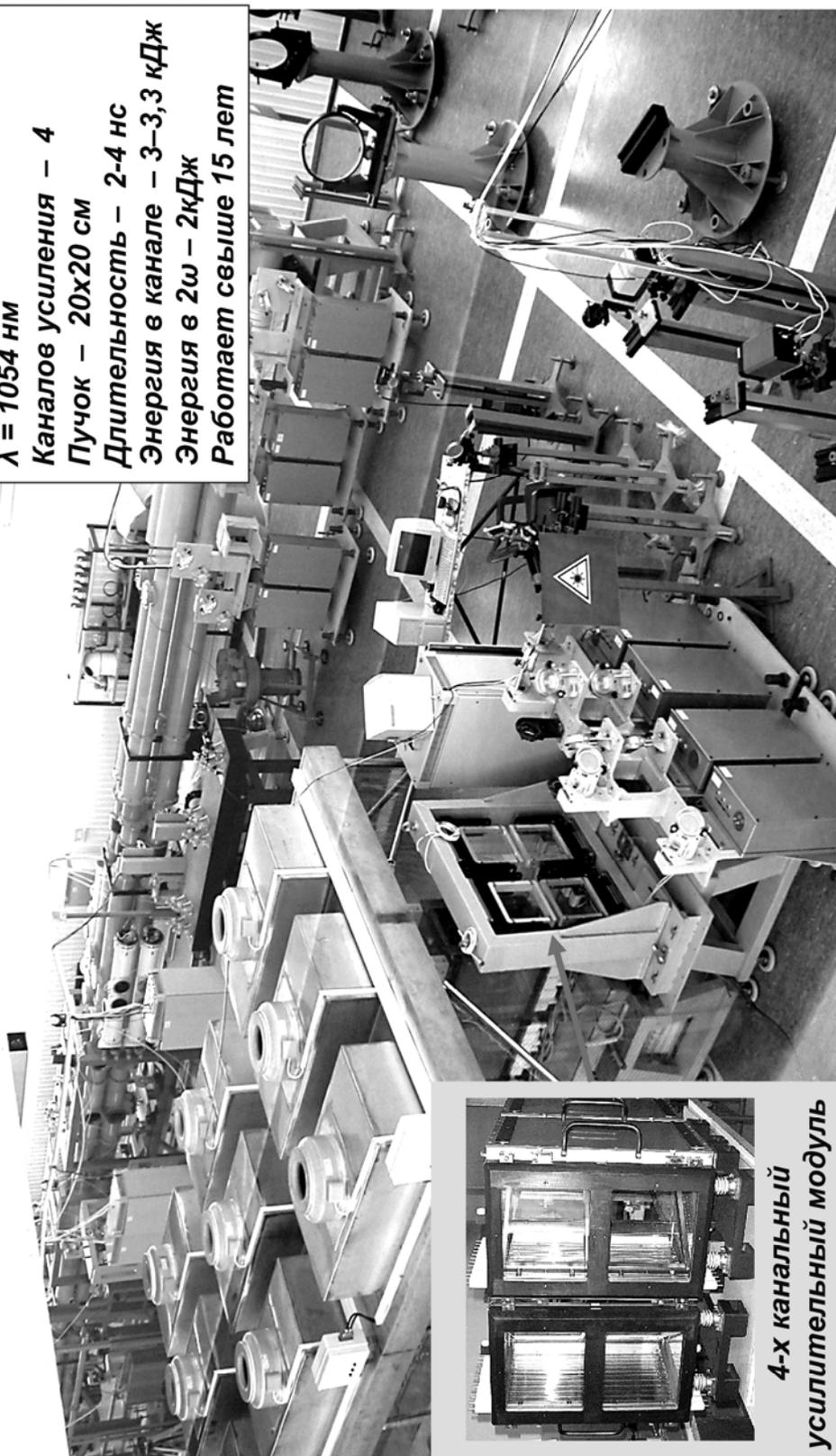
Пучок – 20x20 см

Длительность – 2-4 нс

Энергия в канале – 3–3,3 кДж

Энергия в 2 $\omega$  – 2кДж

Работает свыше 15 лет



4-х канальный  
усилительный модуль

# Французская установка "Мегаджоуль" (строится)

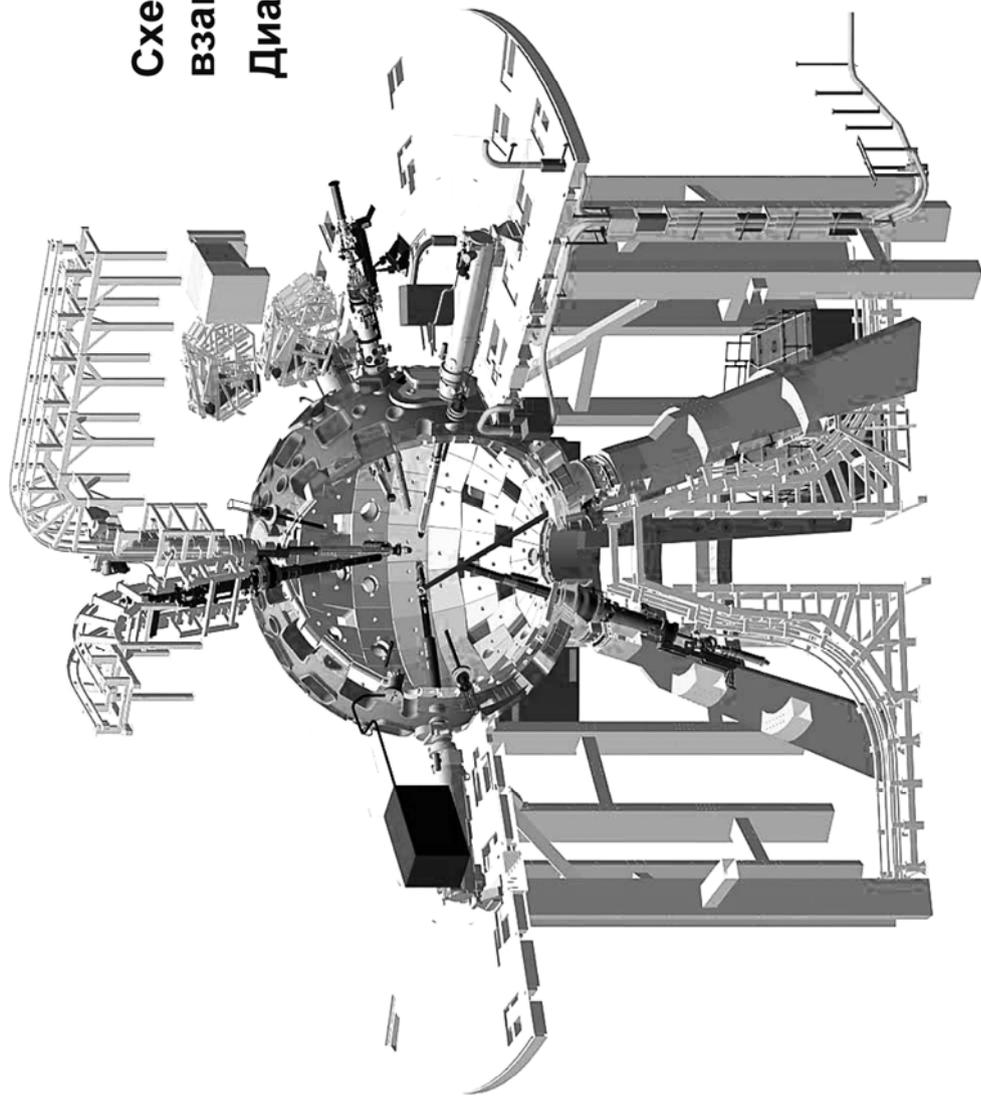


Схема камеры  
взаимодействия

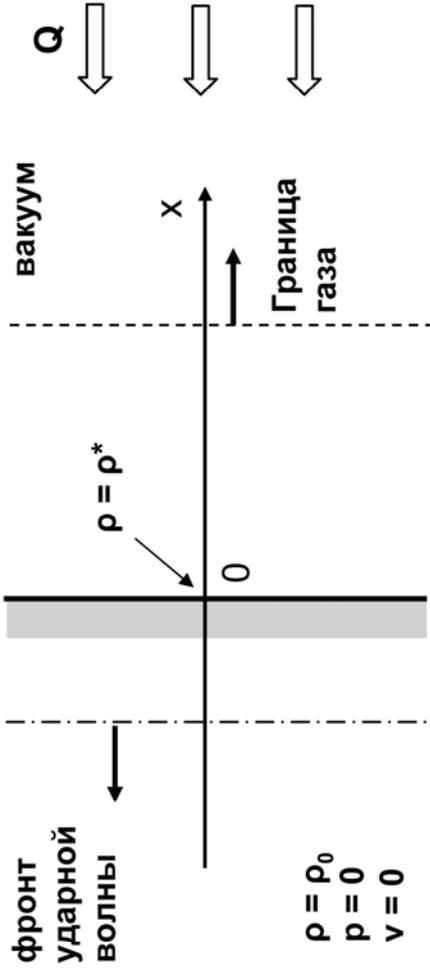
Диаметр камеры ~10 м

### Задача о светодетонации

При  $t = 0$  и  $x < 0$  находится холодный покоящийся газ с показателем адиабаты  $\gamma$ , плотностью  $\rho_0$ ; при  $x > 0$  – вакуум. При  $t > 0$  на границу газа падает постоянный поток ЛИ  $Q$  Ватт/см<sup>2</sup>, полностью поглощающийся в тонком слое, где  $\rho = \rho^*$ . Нагретый газ разлетается в вакуум, а в область поглощающийся в тонком слое, где  $\rho = \rho^*$ . Нагретый газ разлетается в вакуум, а в область холодного газа движется сильная ударная волна.

#### Уравнения газодинамики

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \left( \frac{p}{\rho^\gamma} \right)}{\partial t} + v \frac{\partial \left( \frac{p}{\rho^\gamma} \right)}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

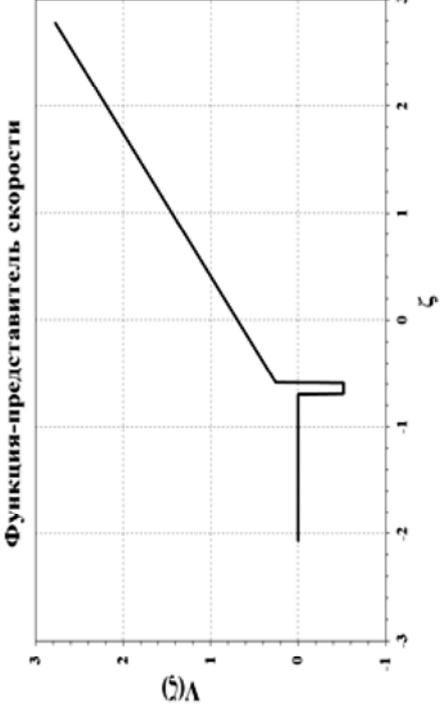


#### Автономные переменные

$$\alpha = \frac{\rho_0}{\rho^*} \quad x = \zeta \cdot \left( \frac{Q}{\rho^*} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot t \quad v(x, t) = \left( \frac{Q}{\rho^*} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot V(\zeta) \quad \rho(x, t) = \rho^* \cdot R(\zeta) \quad p(x, t) = \rho^* \left( \frac{Q}{\rho^*} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot P(\zeta)$$

# Лазерная корона, автономность

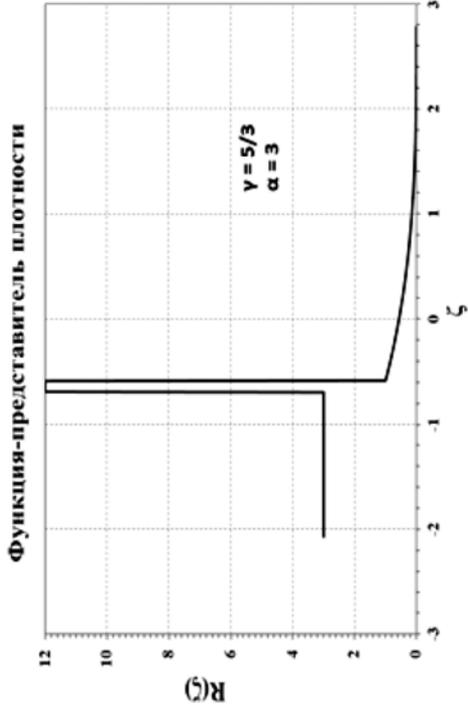
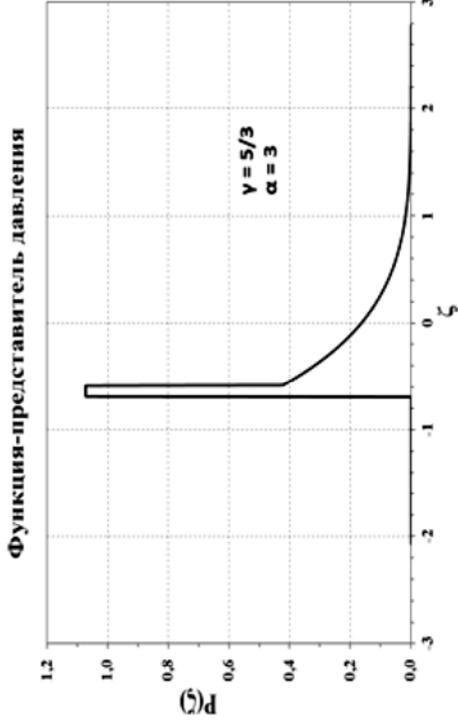
## Немного теории (2)



Требуется найти распределение газодинамических величин при  $t > 0$ .

Задача имеет простое аналитическое решение, представленное на графиках для случая  $\alpha = 3$ .

Решение качественно описывает ионную компоненту плазмы в плоской лазерной мишени.

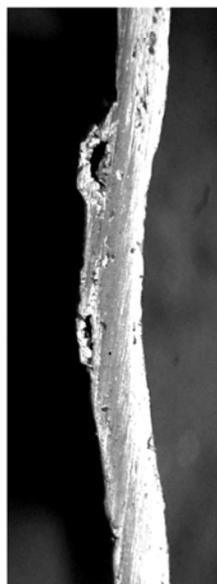


# Плоская мишень, отколы (Эксперименты на установке ЛУЧ)

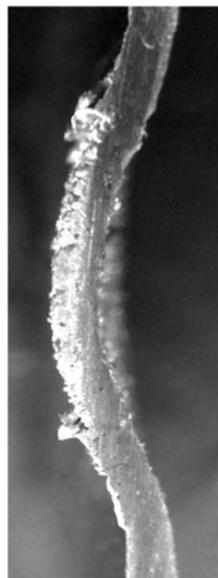
## Фотографии поперечных разрезов мишеней



нет откола



скрытый откол



полный откол

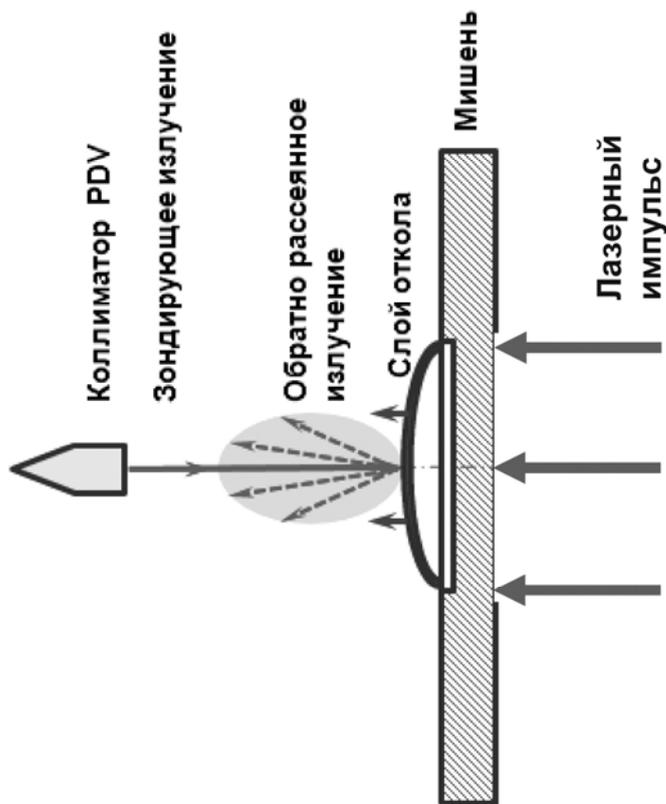
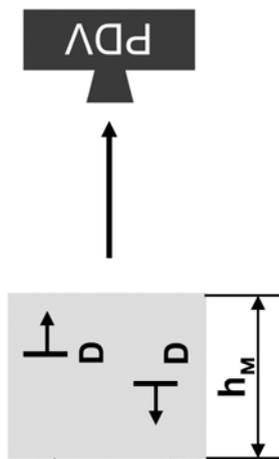


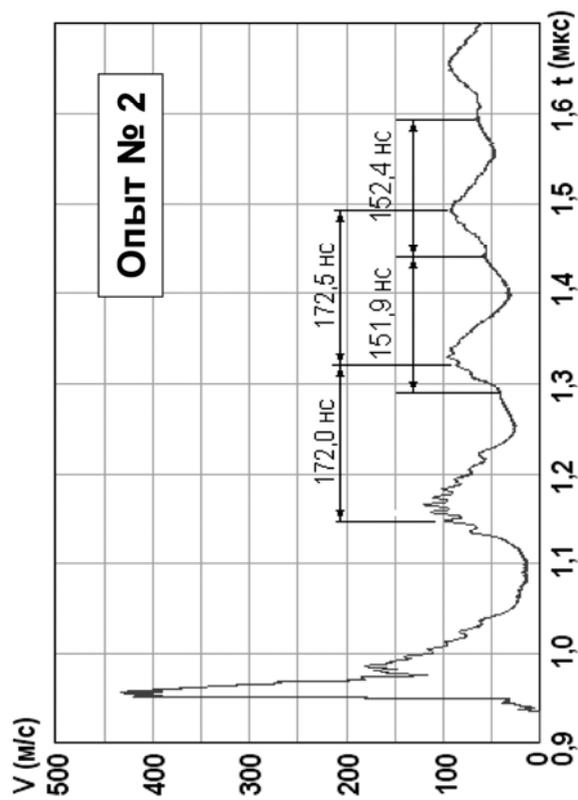
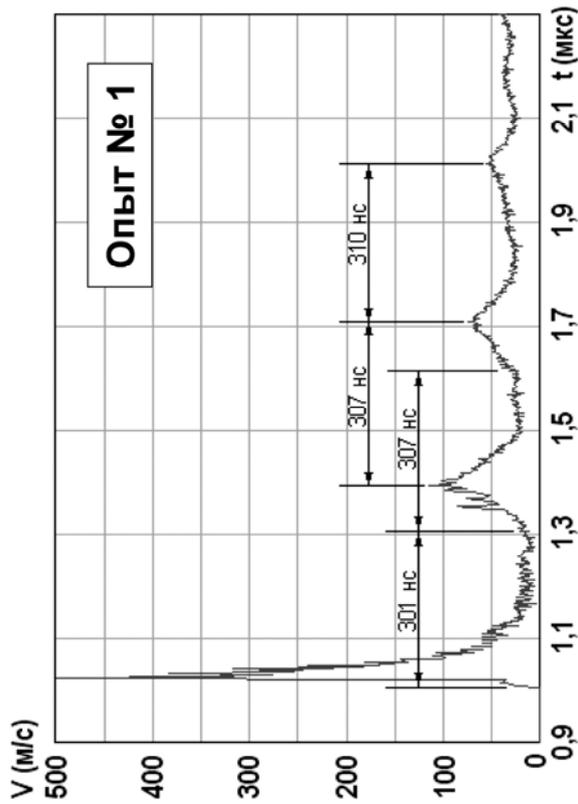
Схема эксперимента на установке ЛУЧ  
(плоская мишень)

# Звуковые волны в плоской мишени (отколы отсутствуют)



$h_M = 975 \pm 1 \mu\text{m}$   
 $Q_{\text{ли}} = 107 \pm 16 \text{ J}$   
 $\tau_{\text{ли}} = 5,0 \pm 0,3 \text{ ns}$   
 $S_{\text{ли}} = 9,5 \pm 0,9 \text{ mm}^2$   
 $\tau = 308,5 \pm 2 \text{ ns}$   
 $D = 6,32 \text{ km/s}$

$h_M = 515 \pm 1 \mu\text{m}$   
 $Q_{\text{ли}} = 86 \pm 13 \text{ J}$   
 $\tau_{\text{ли}} = 4,5 \pm 0,1 \text{ ns}$   
 $S_{\text{ли}} = 9,5 \pm 0,9 \text{ mm}^2$   
 $\tau = 172,2 \pm 1 \text{ ns}$   
 $D = 5,98 \text{ km/s}$



Скорость движения тыльной поверхности плоской мишени из сплава AL1060 в зависимости от времени. Затухание слабых ударных (звуковых) волн.

## Схема мишени МОК (1)

---

- В экспериментах со стеклянными капсулами энергии ЛИ расходуется не эффективно. Для обеспечения однородности облучения мишень помещают в широкие пучки ЛИ. При этом значительная часть излучения проходит мимо мишени, или отражается от плазменной короны, особенно при наклонном падении.
- Плотность энергии в рабочем газе повысится, если перейти к мишени МОК, в которой практически вся энергия ЛИ передается непосредственно рабочему веществу.
- МОК позволяет достигать высоких значений ионной температуры и выхода термоядерных нейтронов и является удобной «микроработаторией» для исследования неравновесных плазменных процессов при высокой плотности энергии в многокомпонентных плазмах.

## Схема мишени МОК (2)

---

- МОК представляет собой пустотелую сферу, на внутреннюю поверхность которой нанесен слой рабочего вещества. В корпусе симметрично размещены отверстия для ввода ЛИ, а также диагностические отверстия.
- Площадь всех отверстий много меньше площади корпуса для того, чтобы отраженное лазерное излучение вновь направлялось на облучаемую внутреннюю поверхность, повышая КПД использования энергии ЛИ.
- Длительность импульса должна быть достаточно короткой с тем, чтобы разлетающаяся плазма не успела перекрыть отверстия ввода ЛИ.
- Рабочее вещество содержит тяжелые изотопы водорода. Из-за отрыва электронной и ионной температур можно использовать  $CD_2$ ,  $CDT$  либо им подобные, что делает постановку экспериментов более простой, поскольку не требует сложных криогенных установок.

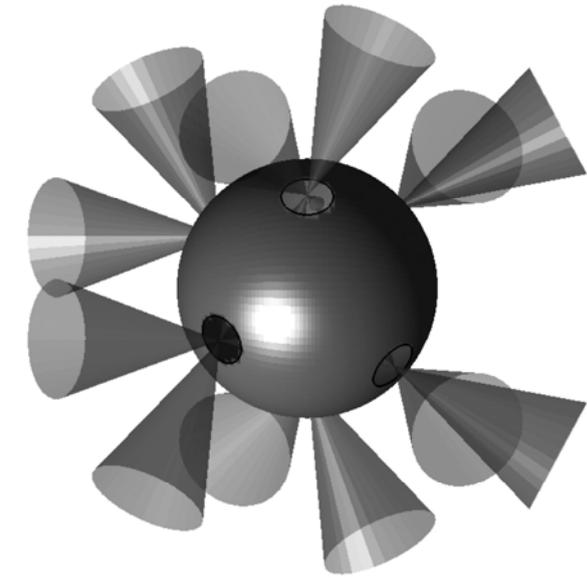
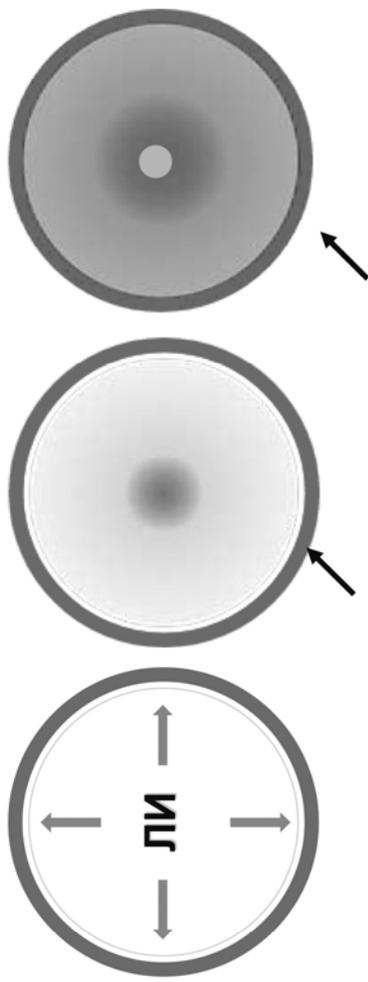


Схема ввода ЛИ  
12 каналов ИСКРА-5



1. Стандартная мишень      2. МОК со сверхтонким  
слоем  $CD_2$

## Эксперименты на установке ИСКРА-5:

Мишень:  $R_M = 1$  мм,  $CD_2$ -слой,  $(1 - \delta) = 1$   $\mu$ м;

$2 - \delta = 0,01$   $\mu$ м)  $Q_{ли} = 3$  кДж,  $\tau = 0.35$  нс,  $\lambda = 0,66$   $\mu$ м

Температура плазмы:  $T_i \approx 7 \div 8$  кэВ

Выход свыше  $10^9$  DD – нейтронов

### Цель:

- исследование сильно неравновесной термоядерной плазмы
- подготовка и совершенствование нейтронных и рентгеновских диагностик
- подготовка физиков-исследователей

## Этапы работы МОК

---

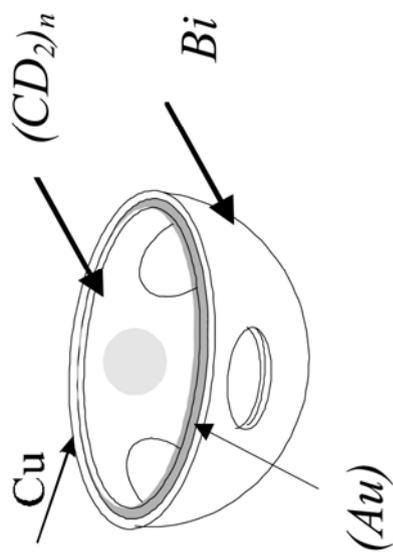
**Первая стадия** – воздействие ЛИ на внутреннюю поверхность. Энергия ЛИ преобразуется в тепловую энергию электронов. Плотность уменьшается от  $\sim 1 \text{ г/см}^3$  до критической  $\rho^* \sim 10^{-3} \text{ г/см}^3$  и ниже. Температура электронов превышает температуру ионов и достигает значений  $\sim 1 \text{ кэВ}$ .

**Вторая стадия** – полет плазмы по инерции к центру мишени. Плотность, электронная и ионная температуры уменьшаются. Энергия плазмы за счет работы электронного давления переходит из тепловой энергии электронов в энергию кинетического движения ионов с высоким КПД.

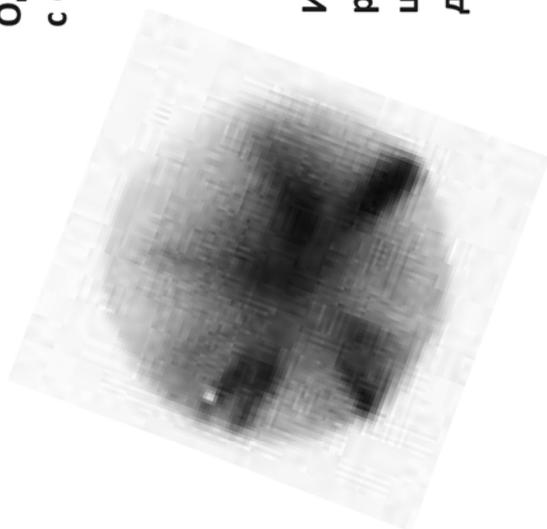
**Третья стадия** – фокусирование плазмы в центре мишени. Повышается плотность, резко возрастает ионная температура. Кинетическая энергия ионов преобразуется в энергию их теплового движения. В центре образуется сгусток плазмы с ионной температурой в десятки кэВ. Активно протекают термоядерные реакции.

**Четвертая стадия** – разлет плазмы от центра мишени. Температуры уменьшаются. Термоядерные реакции затухают.

## Изображение мишеней МОК



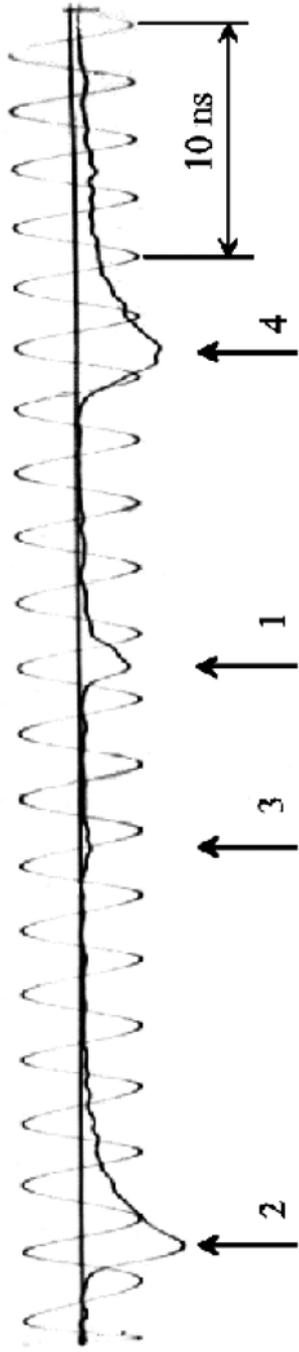
Одна из двух полуоболочек мишени с обращенной короной МОК



Интегральные по времени рентгеновские фотографии центра мишени через диагностическое отверстие

## Времяпролетные измерения МОК

ИСКРА-4, База пролета  $L = 0,78$  м

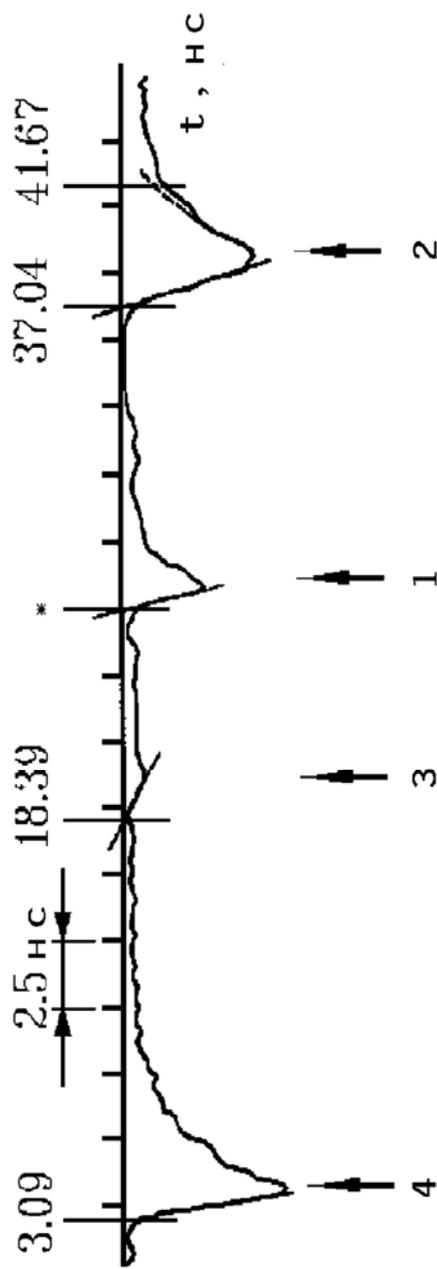


### Характерная осциллограмма времяпролетной методики

- 1 – реперный световой сигнал, введенный за 26 нс до ввода ЛИ;
- 2 –  $\gamma$ -кванты с энергией  $> 0,3$  МэВ, рожденные в мишени;
- 3 –  $\gamma$ -кванты с энергией 0,847 МэВ, рожденные в  $pp'$  реакциях на стальной стенке вакуумной камеры;
- 4 – нейтроны с энергией 2,45 МэВ.

## Времяпролетные измерения МОК

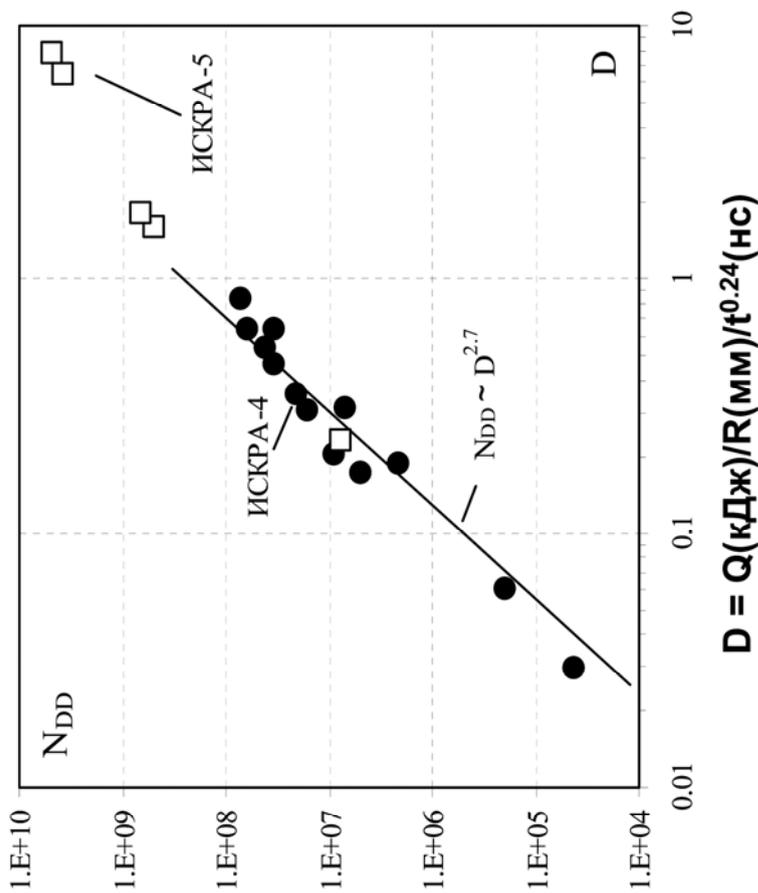
ИСКРА-5, База пролета  $L = 11,45$  м



**Характерная осциллограмма времяпролетной методики.**

- 1 – реперный лазерный импульс; 2 – импульс DD нейтронов;
- 3 – импульс – квантов от  $pp'$  реакций на стальном корпусе камеры;
- 4 – импульс гамма-квантов из неравновесной плазмы.

# Скейлинг нейтронного выхода



**Зависимость нейтронного выхода из D-содержащих мишеней МОК от параметров ЛИ и мишени.**

● – опыты на ИСКРА-4; □ – опыты на ИСКРА-5.

# Опыты ВНИИЭФ-ЛАНЛ с плоскими МОК в Лос Аламосе

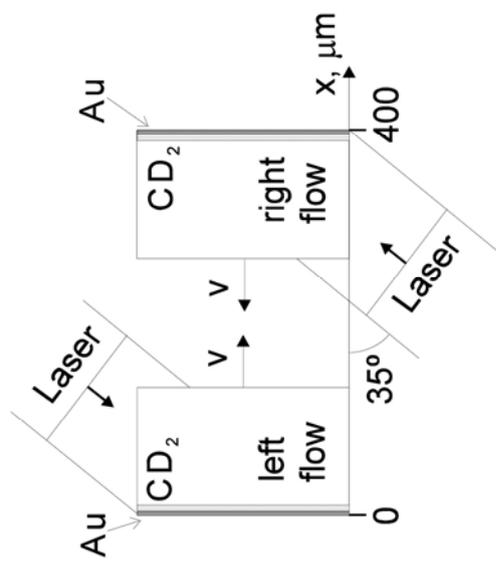


Схема облучения мишени  
на установке ТРАЙДЕНТ  
(расчеты ВНИИЭФ)

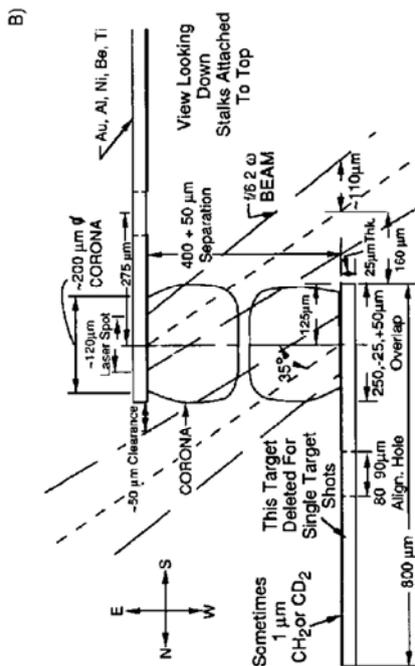
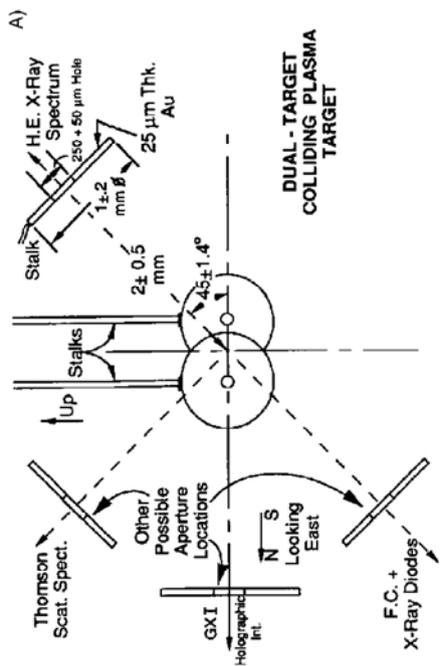
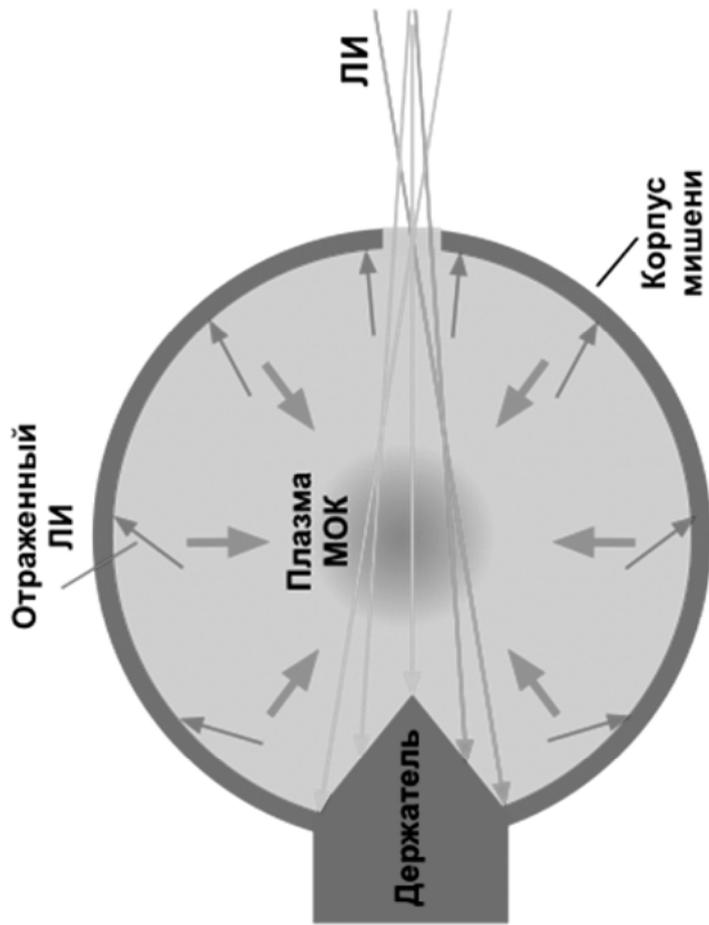


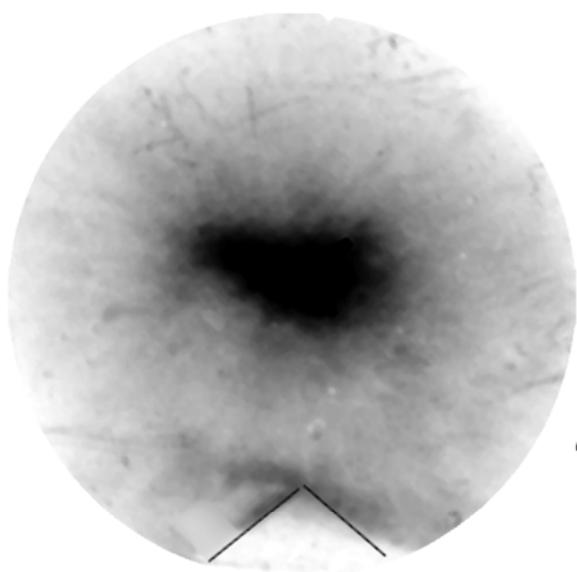
Схема мишени «Tuna can»

# Симметризация потоков ЛИ (ИСКРА-5 1 луч)

Схема эксперимента



Рентгеновская  
обскурограмма



Область кумуляции  $\text{CH}_2$ -плазмы

---

## Заключение

- Физика – увлекательная область человеческой деятельности
- Лазерная физика и физика плазмы находятся на острие фундаментальных исследований природы
- Результаты этих исследований находят необычайно широкие практические приложения
- Вам повезло подружиться с этими дисциплинами
- Физике повезло в том, что Она нашла Вас.
- Не подведите друг друга!

## Литература

1. Басов Н. Г., Крохин О. Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора, ЖЭТФ, 1964. Т. 46, вып.1.
2. Афанасьев Ю. В., Крохин О. Н. Физика высоких плотностей энергии, М., Мир. С. 336-342, 1974.
3. Бессараб А. В., Долголева Г. В., Зарецкий А. И., Кириллов Г. А., Кочемасов Г. Г., Муругов В. М., Насыров Г. Ф., Рогачев В. Г., Романов Ю. А., Сенник А. В., Сухарев С. А. Исследование термоядерной лазерной плазмы в мишенях с обращенной короной. Доклады АН СССР, 1985. Т. 282, с. 857–861.
4. Абрамов Ю. А., Бессараб А. В., Веселов А. В., Гаврилов П. И., Дружинин А. А., Изгородин В. М., Карельская Т. В., Кириллов Г. А., Комлева Г. В., Лямин Г. А., Николаев Г. П., Пинегин А. В., Пунин В. Т., Рабинович К. Г., Ромаев В. Н., Рогачев В. Г., Соломатина Е. Ю., Тарасова Н. Н., Тачаев Г. В., Андрюшин В. В., Емельянов С. А., Крюченков В. Б., Маркелов Н. Н., Маркушкин Ю. Е., Чирин Н. А. Слои, содержащие тяжелые изотопы водорода, в мишенях для ЛТС // Квантовая Электроника, 1984. т. 21, № 2, с.155–157.
5. Бессараб А. В., Гайдаш В. А., Долголева Г. В., Жидков Н. В., Изгородин В. М., Кириллов Г. А., Кочемасов Г. Г., Кунин А. В., Литвин Д. Н., Муругов В. М., Насыров Г. Ф., Пунин В. Т., Рогачев В. Г., Сенник А. В., Суслов Н. А., Тачаев Г. В., Шемякин В. И. Результаты первых экспериментов с термоядерными мишенями на мощной лазерной установке ИСКРА-5 // ЖЭТФ, 1992. т. 102, вып. 6(12), с.1800-1807.
6. Bessarab A. V., Gaidach V. A., Dolgoleva G. V., Izgorodin V. M., Kirillov G. A., Kochemasov G. G., Kunin A. V., Litvin D. N., Murugov V. M., Nasyrov G. F., Punin V. T., Rogachev V. G., Senik A. V., Suslov N. A., Tachaev G. V., Shemyakin V. I. Results of first experiments with fusion targets at the ISKRA-5 high power laser installation, Sov. Phys. JETP, 75(6), December 1992, p. 970, © 1993 American Institute of Physics, 1993.
7. Jones M. E., Winske D., Goldman S. R., Kopp R. A., Rogachev V. G., Bel'kov S. A., Gasparyan P. D., Dolgoleva G. V., Zhidkov N. V., Ivanov N. V., Kochubej Yu. K., Nasyrov G. F., Pavlovskii V. A., Smirnov V. V., Romanov Yu. A. Modeling ion interpenetration, stagnation and thermalization in colliding plasmas // Phys. Plasmas. March, 1996. 3(3), p. 1096–1108.