



## Синхротронное излучение в экспериментальной физике взрыва

*К.А. Тен, Э.Р. Прууэл, А.О. Кашкаров, И.А. Рубцов, Б.П. Толочко,  
И.Л. Шехтман, В.М. Аульченко*

*[pru@hydro.nsc.ru](mailto:pru@hydro.nsc.ru), <http://ancient.hydro.nsc.ru/srexpl>*

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,  
Сибирский центр синхротронного и террагерцового излучения*

# Основные параметры детонационного течения

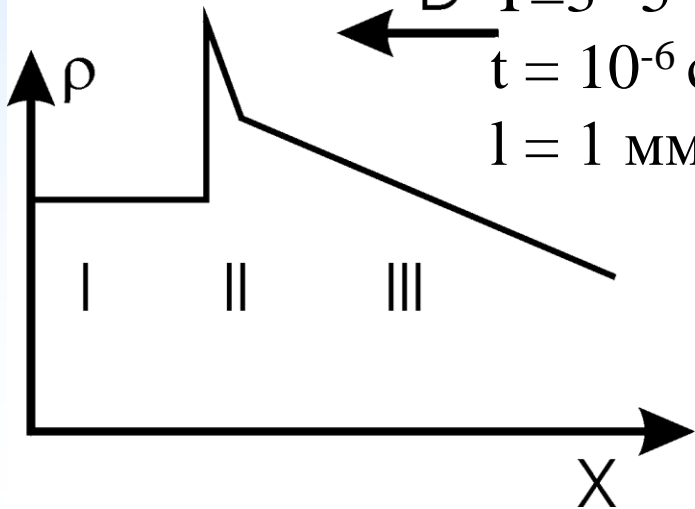
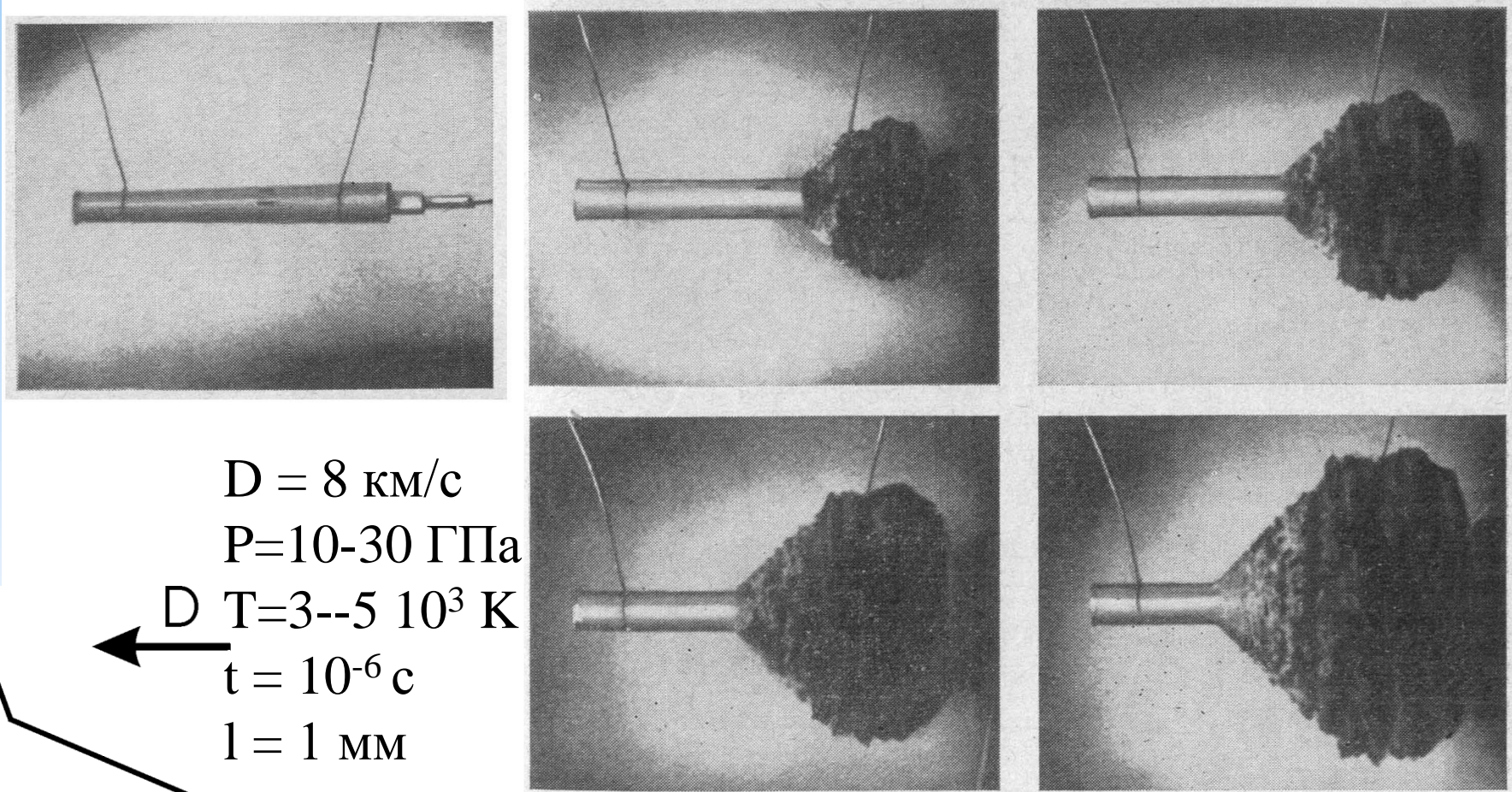
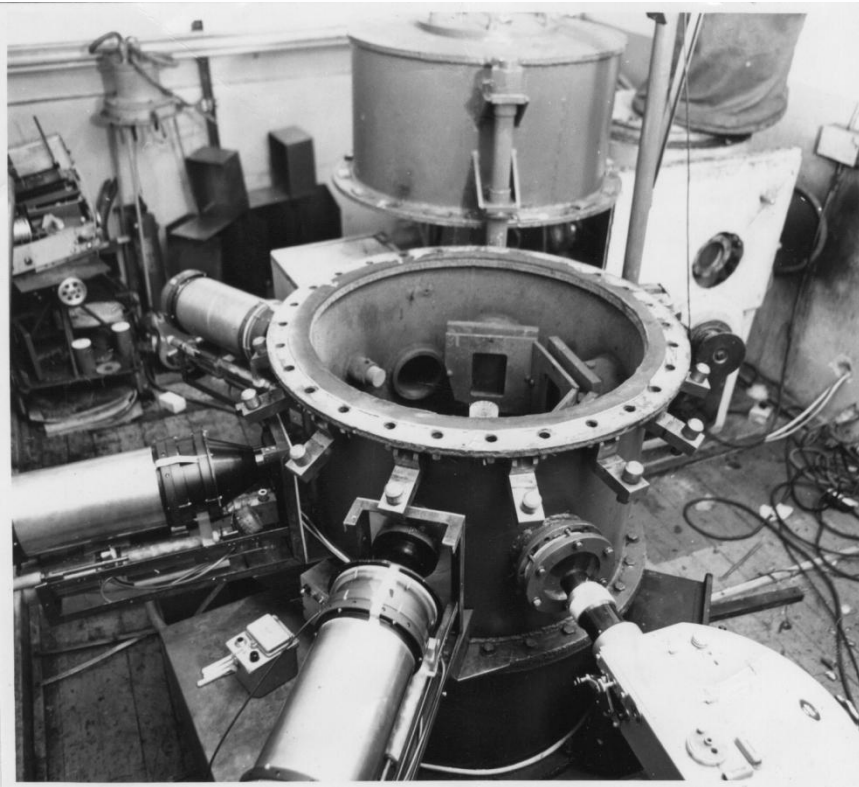
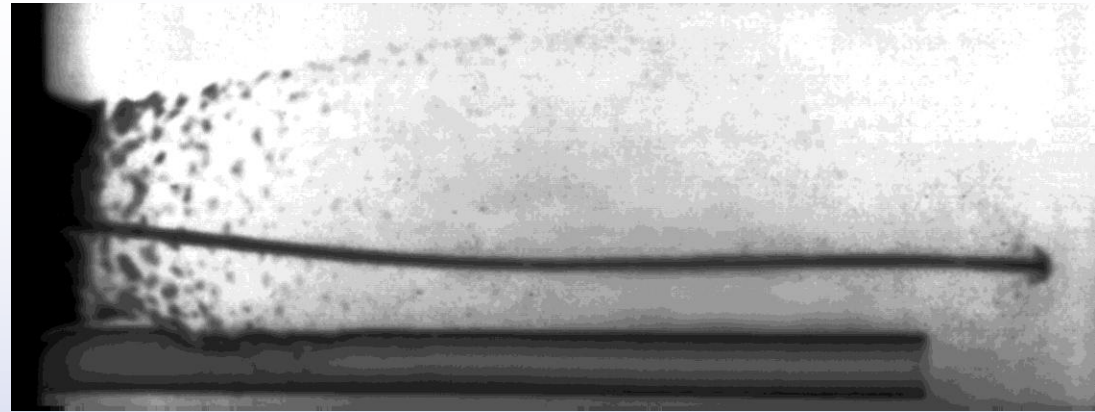


Рис. 32а. Фотографии детонирующего заряда динамита (большая скорость детонации 5400 м/с). Интервал между кадрами 5 мкс, время экспозиции 0,1 мкс.

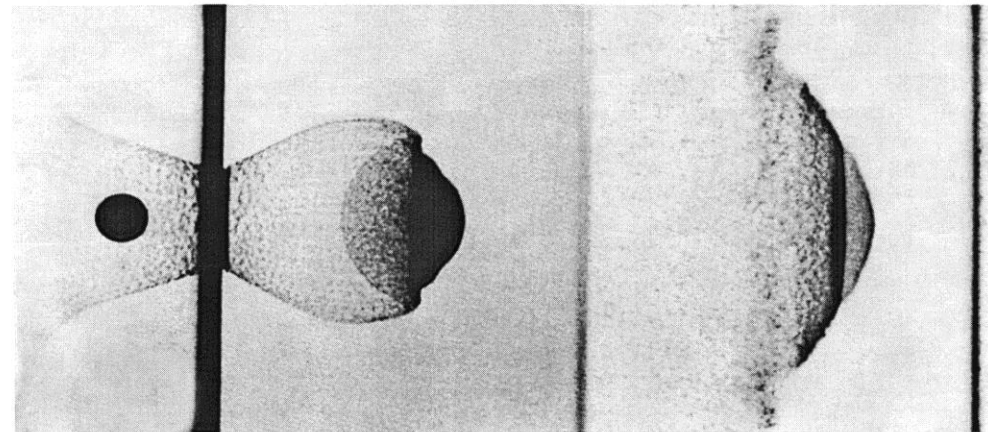
# Скоростная рентгенография



Взрывная камера для съёмки кумулятивных струй с тремя ПИР-600 и СФР в подвале главного корпуса Института гидродинамики.



Металлическая струя от кумулятивного заряда после преодоления стальной стенки. Скорость головы струи – 6 километров в секунду. Видна пелена из осколков, внедрение фрагментов пелены в стенку трубы (внизу).



Рентгенограмма запреградного облака осколков, образующегося при ударе 9-мм шарика из алюминия со скоростью 6,7 км/с по 1,5-мм пластинке из алюминия (интервал между кадрами – 15 мкс)

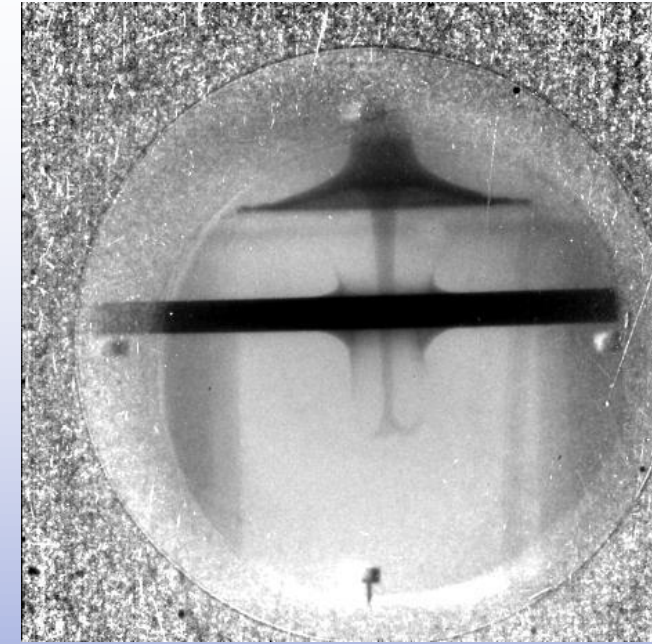
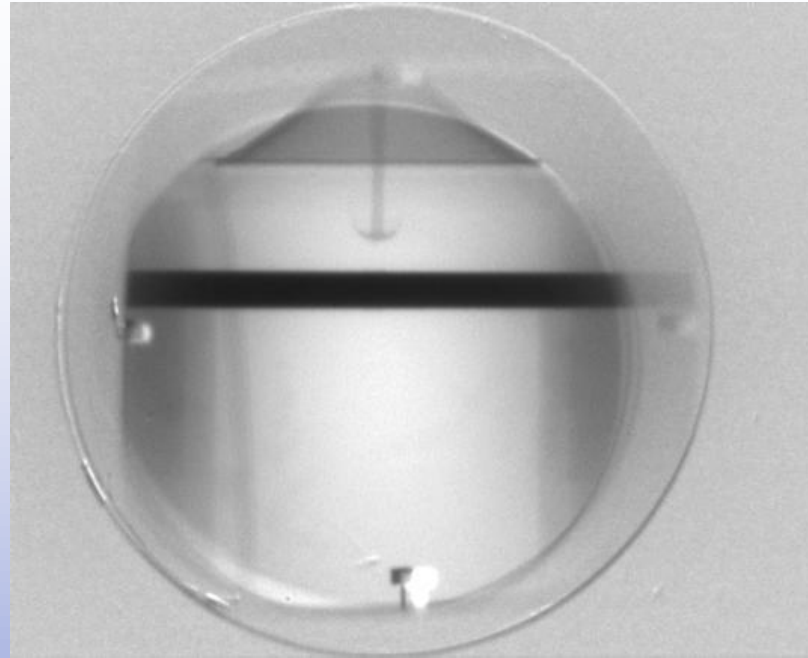
# Современные методы исследования динамических процессов

- Контактные датчики.
- Современные реализации традиционных методов генерации рентгеновского излучения.
- Velocity Interferometer System for Any Reflector (VISAR).
- Протонография.
- Методы диагностики синхротронным излучением.



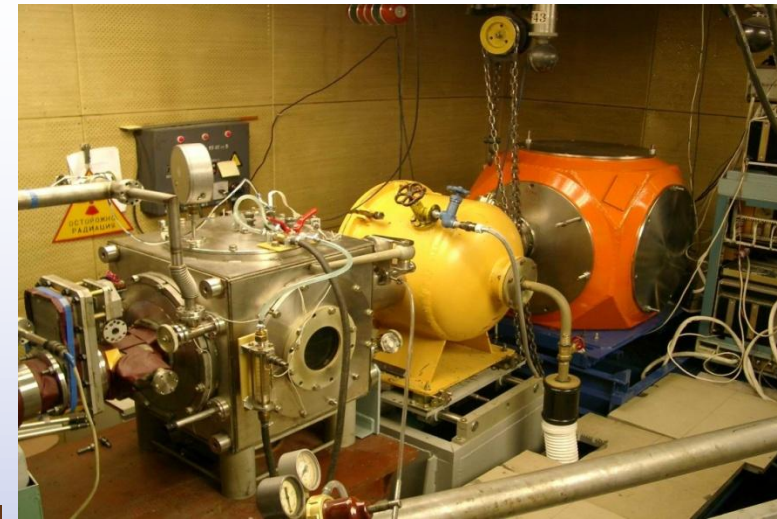
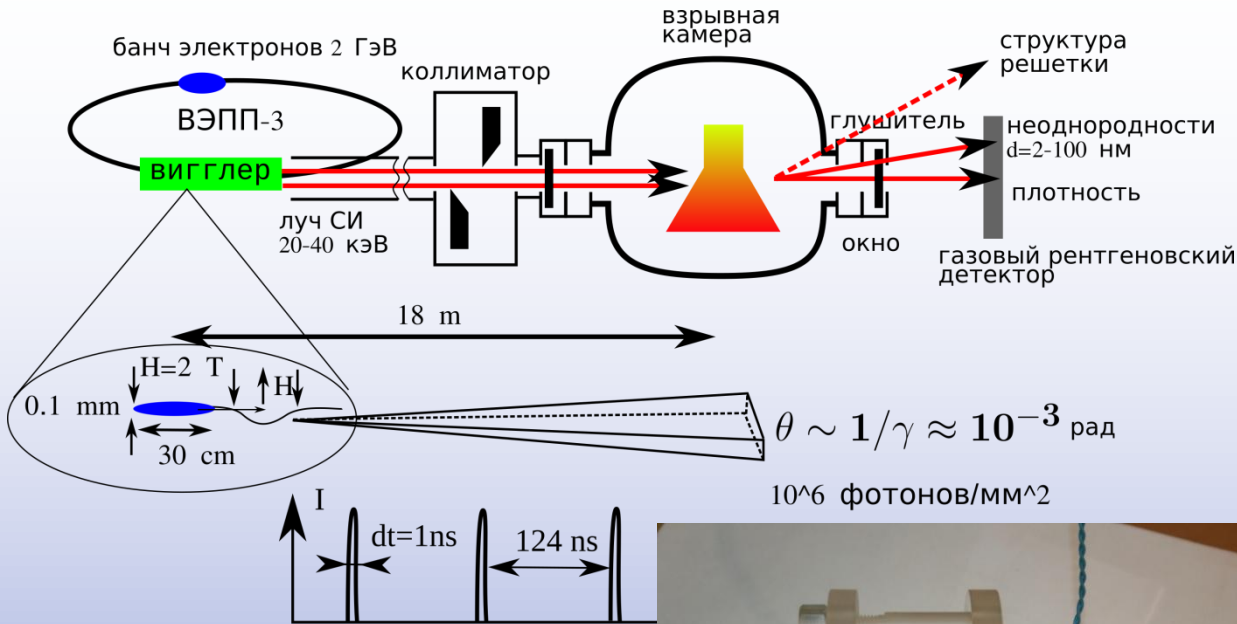
Центры по исследованию динамических процессов пучками различной природы.

# Протонография динамических процессов



Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино). Установка позволяет получать изображение объектов с оптической толщиной свыше  $300 \text{ г/см}^2$ . Оптическое разрешение установки составляет  $0.25 \text{ мм}$ .

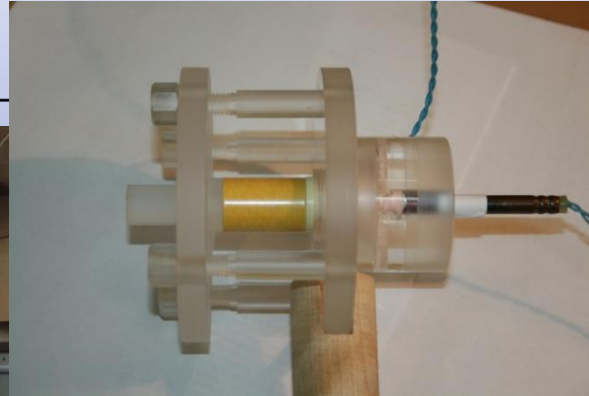
# Схема экспериментов и фотографии 2-х станций (ВЭПП-3 и ВЭПП-4)



1999 – 2019 г. Взрывная камера на 20 г.  
Время между кадрами 500 нс.

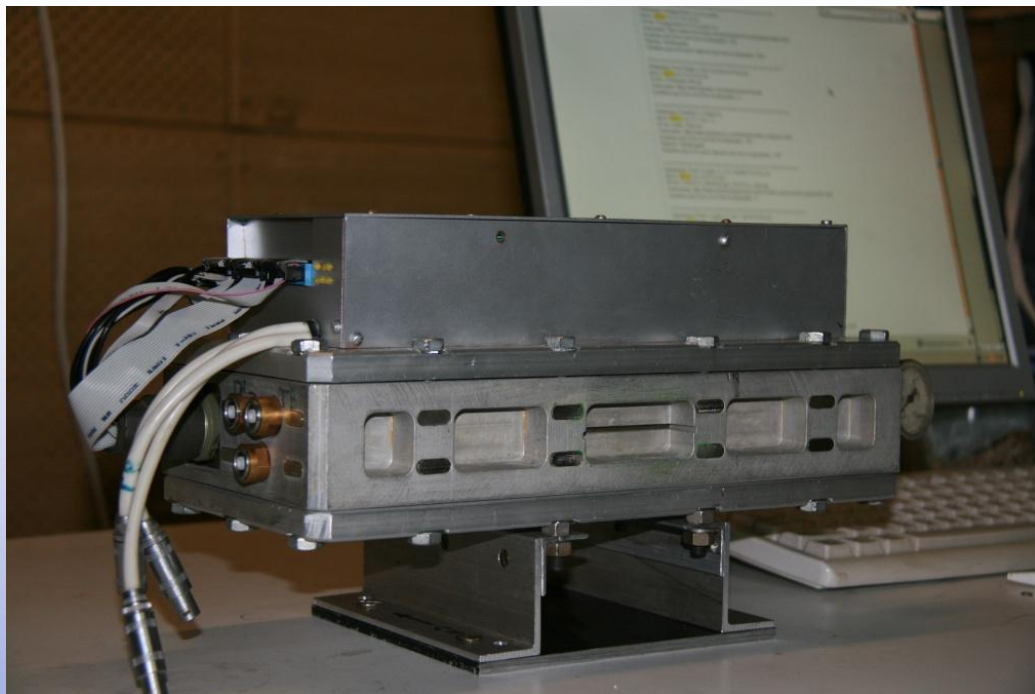


2019 г. Взрывная камера на 50 г.  
Время между кадрами 124 нс.  $E_{ef} = 20$  кэВ.

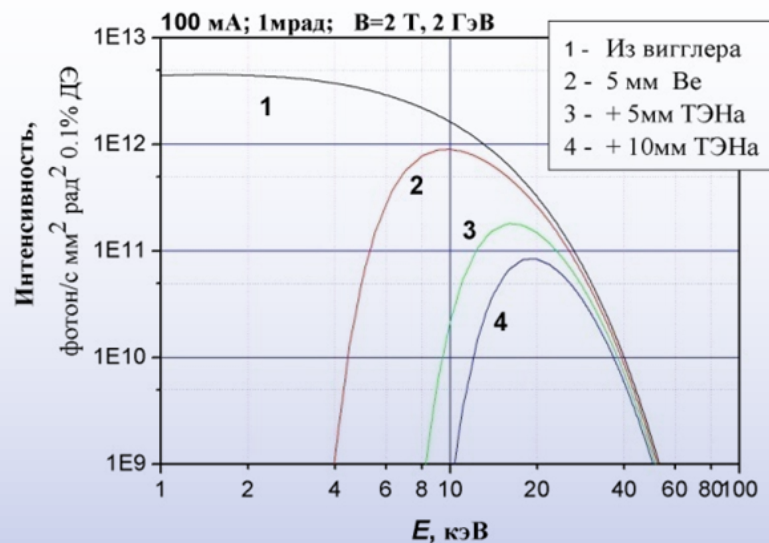


2013 г. Взрывная камера на 200 г.  
Время между кадрами 150-600 нс.  $E_{ef} = 40$  кэВ.

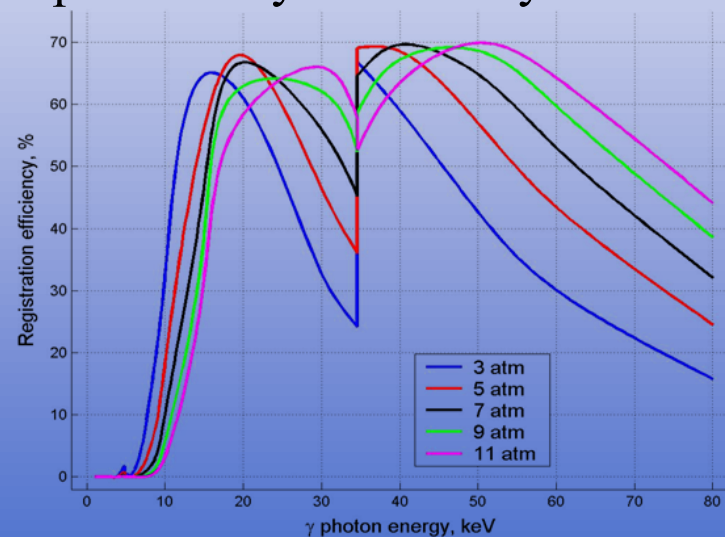
# Характеристики специализированного детектора (DIMEX)



Внешний вид детектора DIMEX-3.  
Шаг ползковой структуры – 100 мкм,  
количество пространственных каналов – 512,  
количество кадров по времени – 32,  
минимальное время между кадрами – 125 нс.

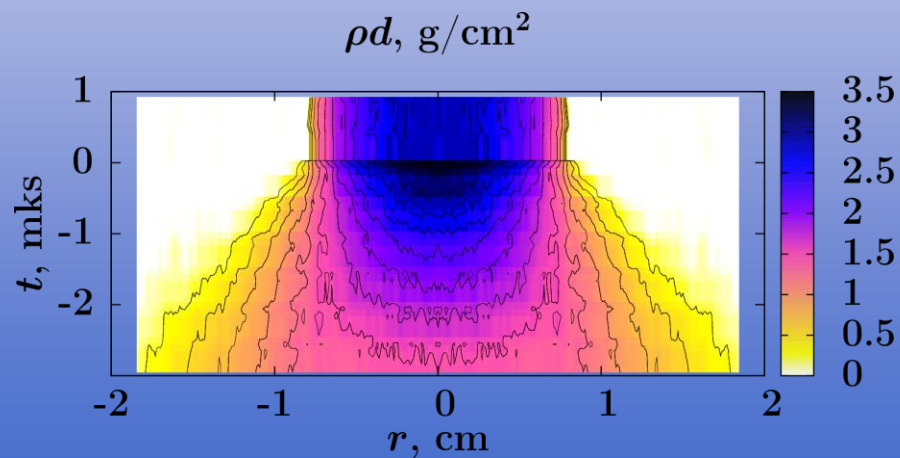
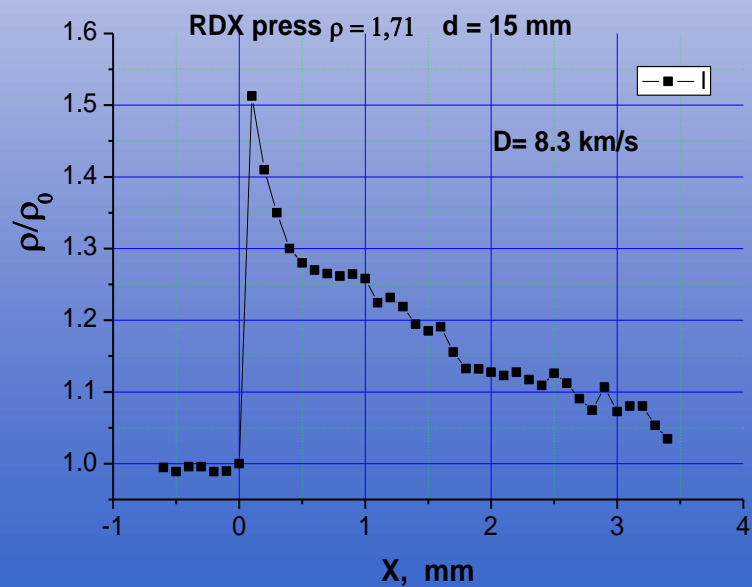
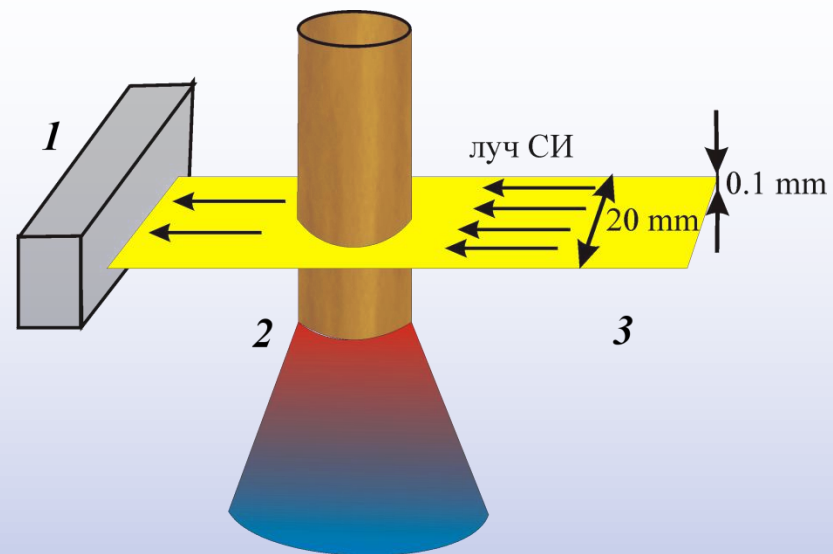
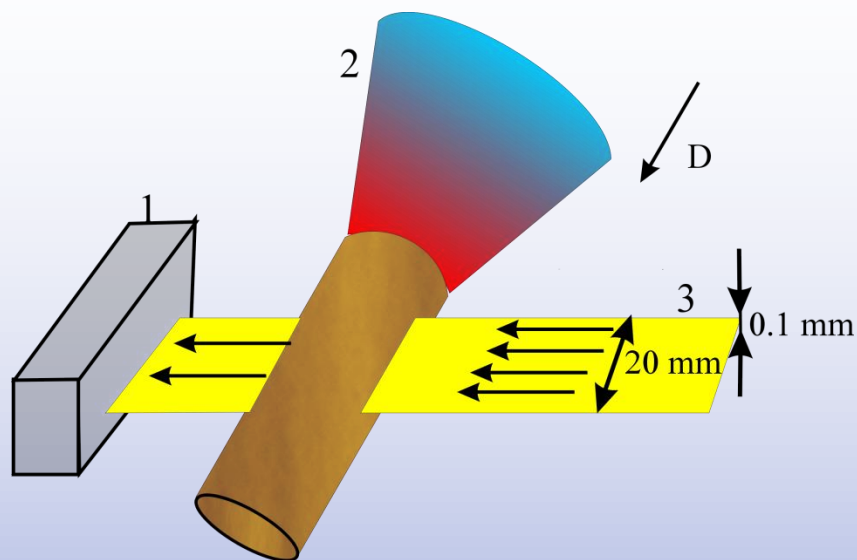


Спектр используемого излучения.



Квантовая эффективность детектора от энергии фотонов при разных давлениях газа.

# Скоростная томография плотности





# Восстановление газодинамических параметров течения: плотности, давления и массовой скорости

Уравнения газовой динамики для течения с цилиндрической симметрией

$$\frac{\partial r\rho u}{\partial r} + \frac{\partial r\rho v}{\partial z} = \frac{\partial r\rho}{\partial t},$$

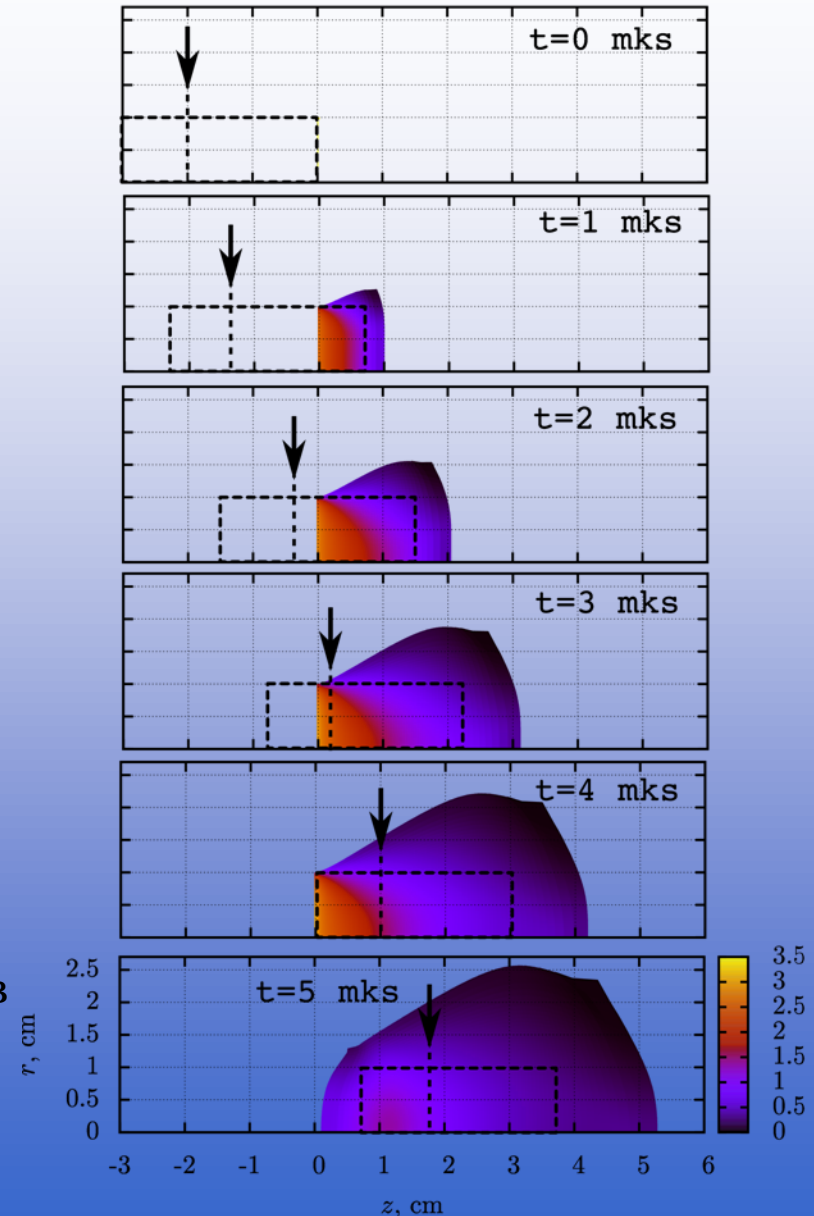
$$\frac{\partial r\rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial r\rho uv}{\partial z} + r \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial r\rho u}{\partial t},$$

$$\frac{\partial r\rho v^2}{\partial z} + \frac{\partial r\rho uv}{\partial r} + r \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial r\rho v}{\partial t},$$

$$p(\rho) = p_0(\rho/\rho_{00})^{\gamma(\rho)}.$$

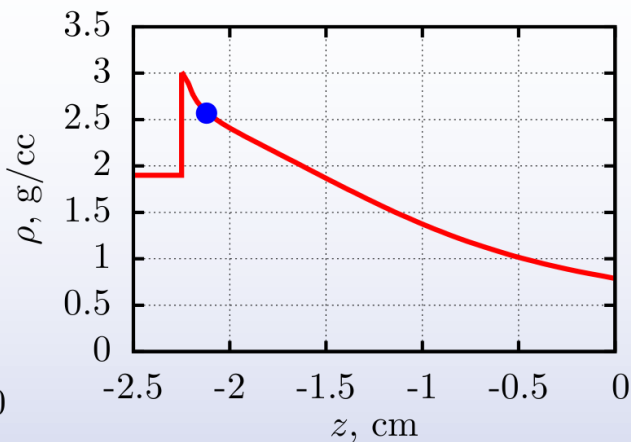
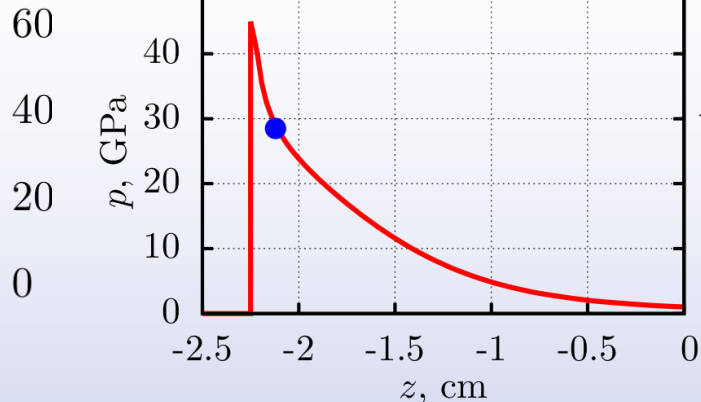
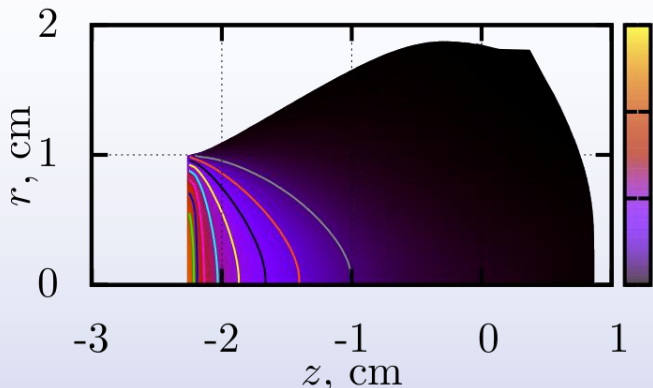
$\gamma(\rho)$  - искомая зависимость показателя адиабаты вдоль линии тока.

Задача решается численно методом Годунова, в Лагранжевых координатах, распады разрывов считались в акустическом приближении. Характерное количество "подгоночных" параметров 10, характерное количество расчетов течения  $10^3$ - $10^4$ .

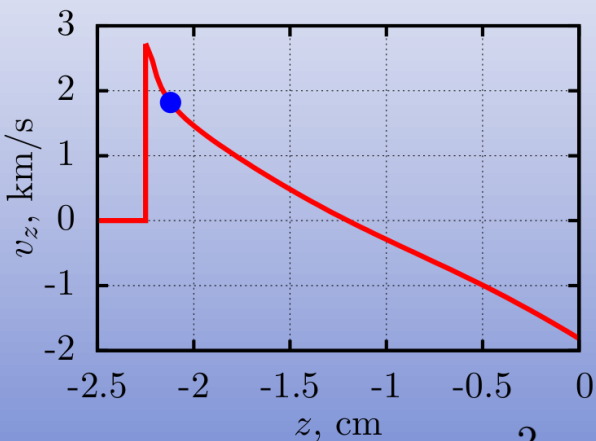
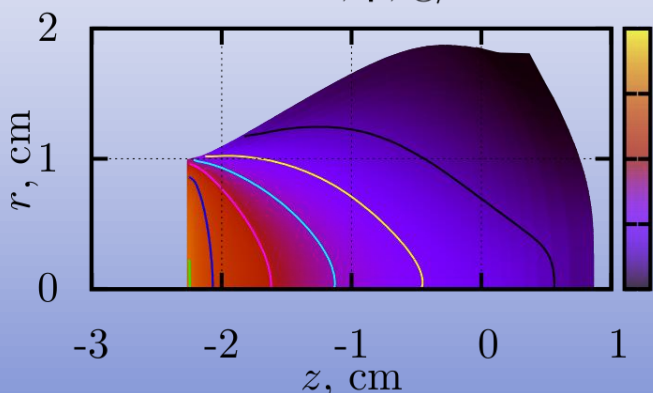


# Параметры течения при детонации заряда ТАТБ

ТАТБ,  $p$ , GPa



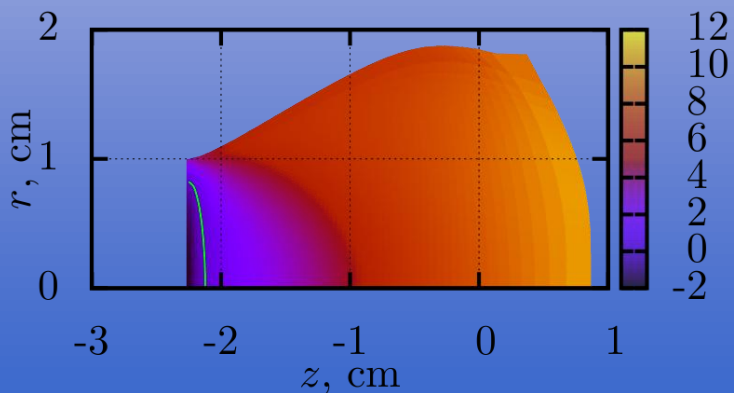
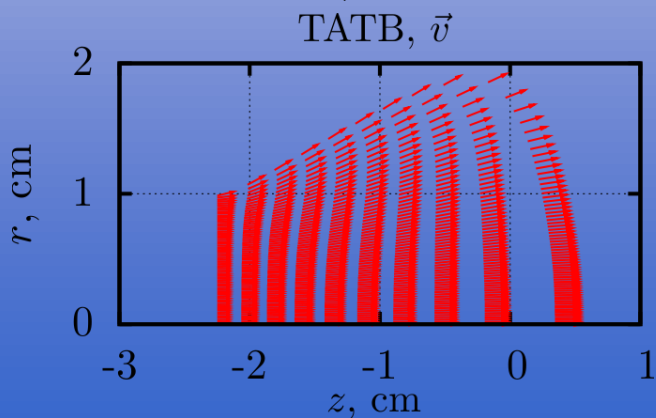
ТАТБ,  $\rho$ , g/cc



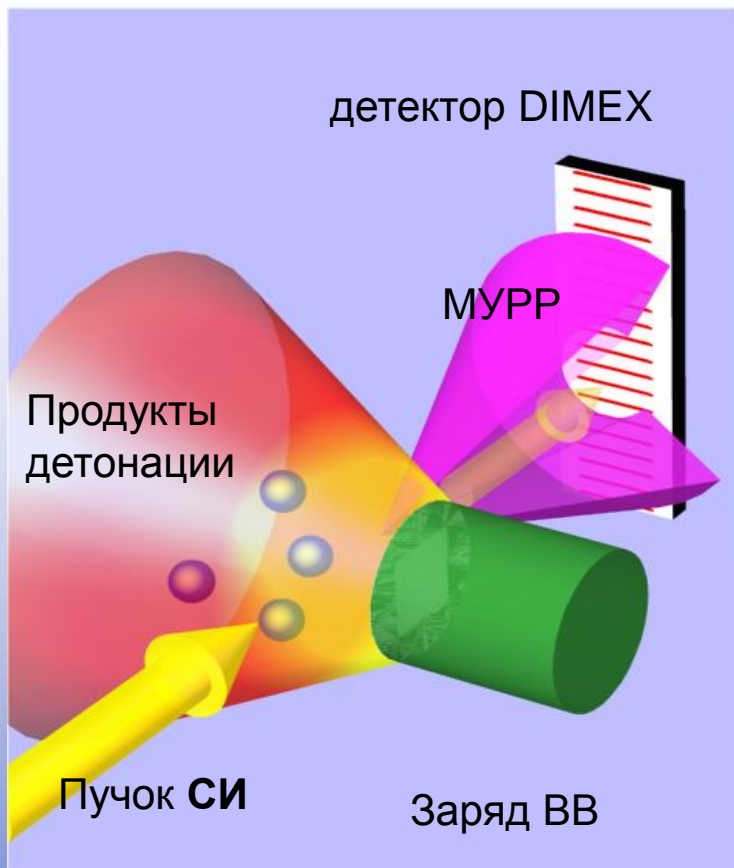
$$p(\rho)$$

$$c = (\partial p / \partial \rho)^{1/2}$$

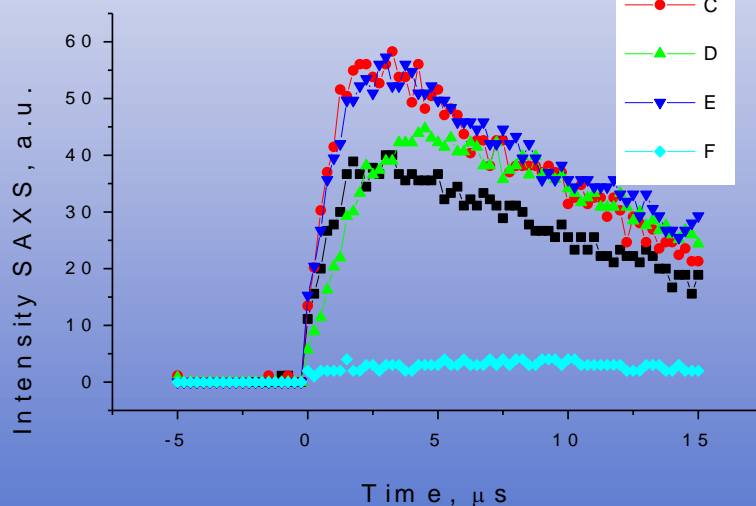
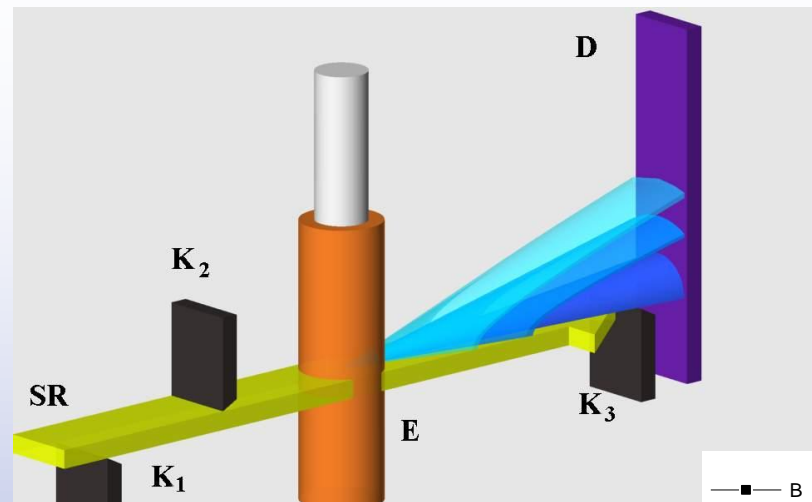
ТАТБ  $v_z - c$ , km/s



# Измерение МУРР при детонации ВВ

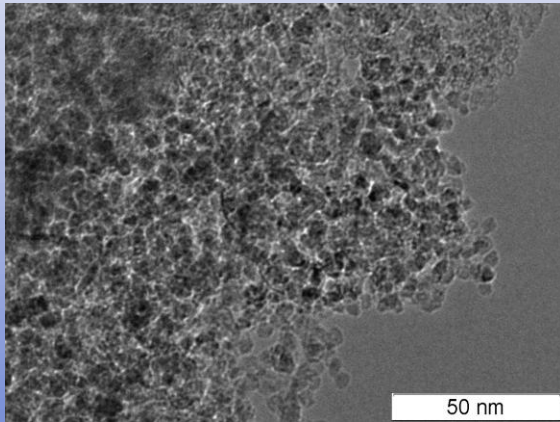
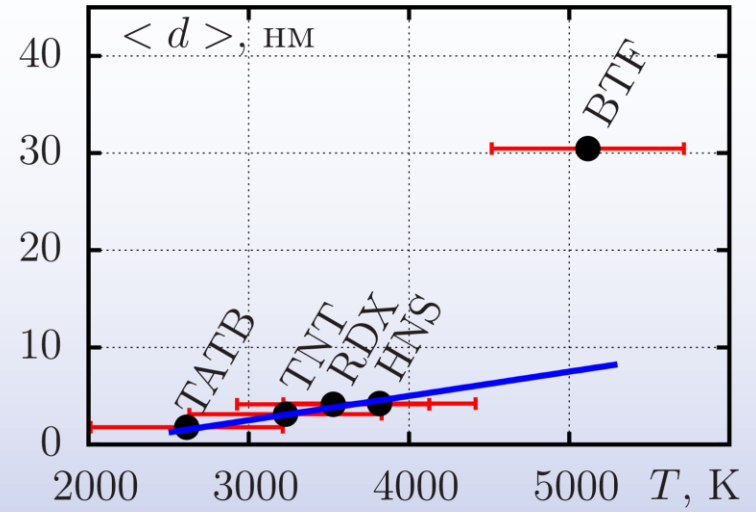
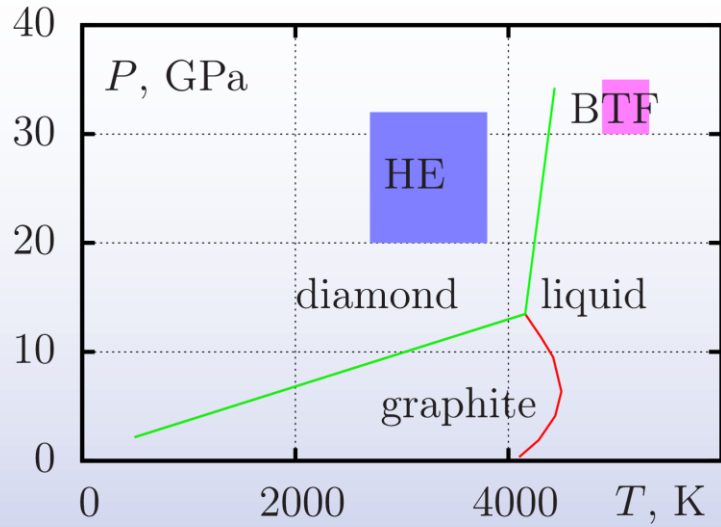


Желтая стрелка – падающий пучок СИ, фиолетовый конус – рентгеновское рассеяние на углеродных наночастицах.

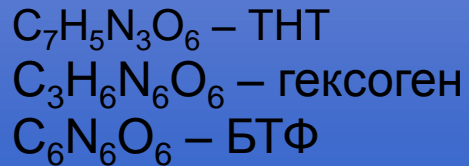


Изменение интегральной интенсивности от времени при детонации ряда ВВ: В – ТГ70/30, С – ТГ50/50, D – ТНТ ( $\rho = 1,6$ ), E - ТГ60/40, F - гексоген

# Детонационный синтез углеродных наноструктур

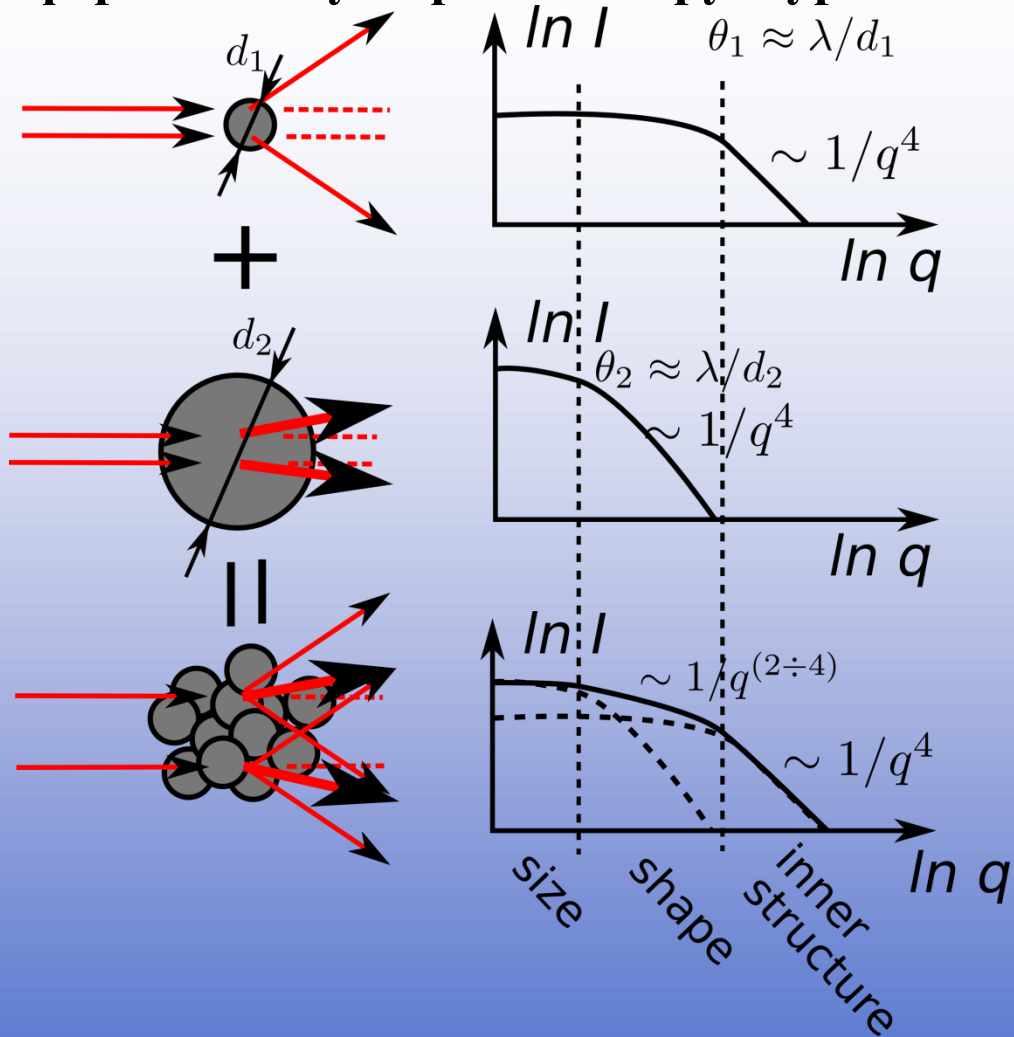


50%TNT+50%гексоген



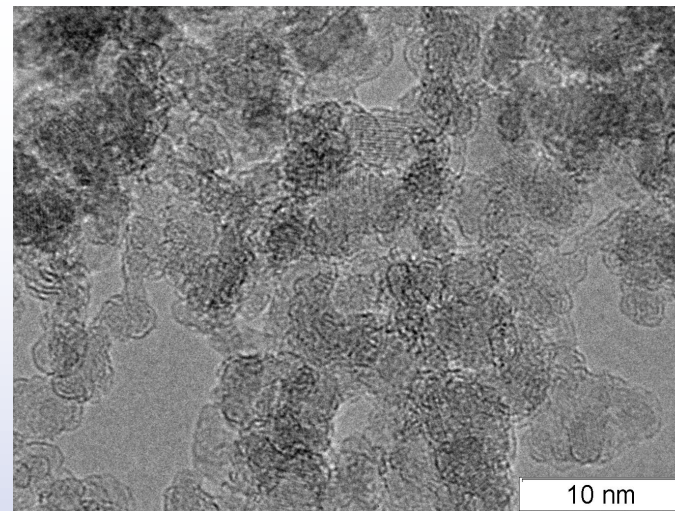
БТФ

# Попытки расшифровки структуры и формы нанокристаллических структур

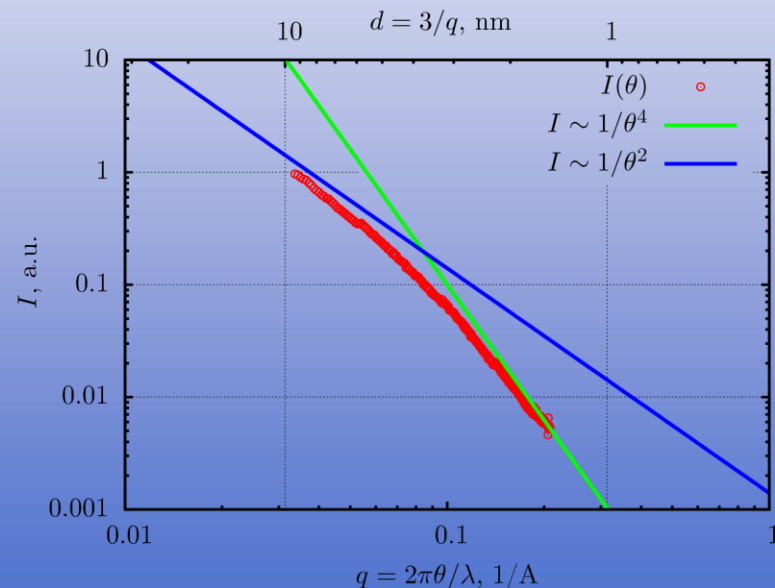


Упрощенные измерения

$$\theta \approx \lambda / d \quad I(\theta) \longleftrightarrow \Delta \rho \text{ (scale} = \lambda / \theta \text{)}$$

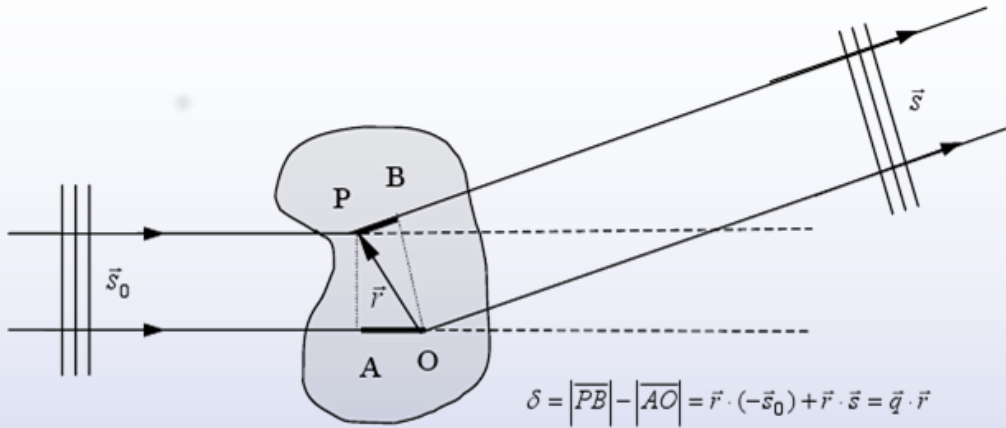


Детонационный нанокристаллический углерод.



МУРР от детонационного нанокристаллического углерода. Статический эксперимент.

# Определение параметров углеродных структур

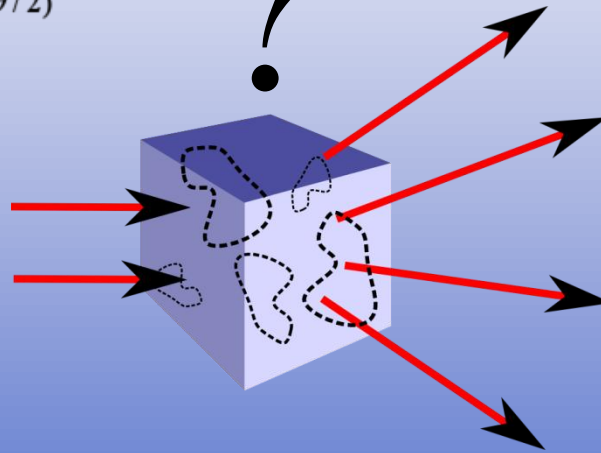


$$\vec{q} = \vec{s} - \vec{s}_0$$

$$q = |\vec{q}| = 2 \cdot |\vec{s}| \cdot \sin(\theta/2) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \sin(\theta/2)$$

## Обратная задача

$$\gamma(r) = \frac{1}{2\pi^2 V_0} \int_0^\infty I(q) \frac{\sin(qr)}{qr} q^2 dq$$



## Прямая задача

$$I(q) = 4\pi V_0 \int_0^\infty \gamma(r) \frac{\sin(qr)}{qr} r^2 dr$$

$$\gamma(0) V_0 = \int_V \Delta \rho^2(\vec{r}) dV \propto \int_0^\infty I(q) q^{-2} dq$$

$$I(q) = I_0 \exp(-q^2 R_g^2 / 3)$$

## Точные соотношения

$$E(\vec{q}) = A_e \int_V \rho(\vec{r}) e^{-i\vec{q}\vec{r}} dV$$

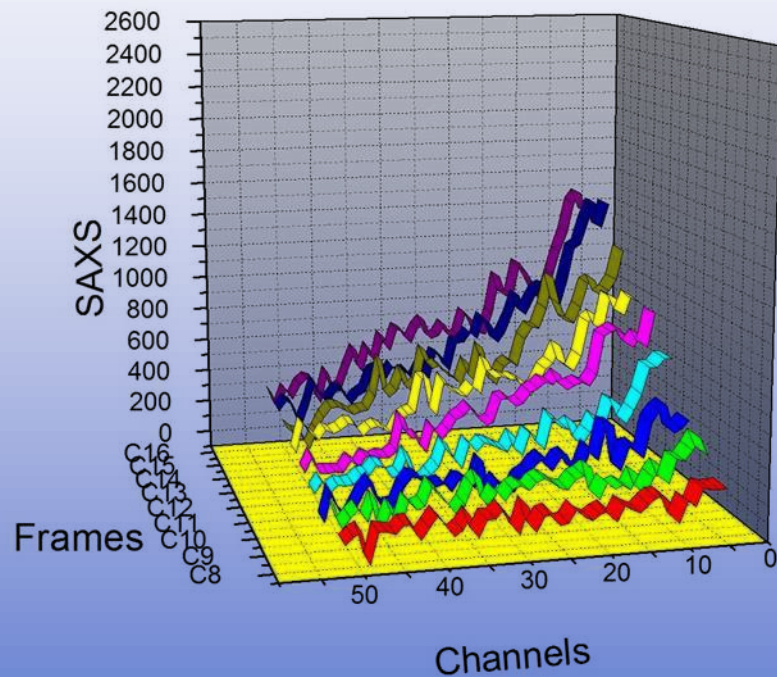
$$\gamma(\vec{r}) = \int_V \Delta \rho(\vec{r}') \Delta \rho(\vec{r}' - \vec{r}) d\vec{r}' / V_0$$

Интеграл по углам МУРР – полная масса конденсированной фазы в исследуемом объеме. Нет информации о форме частиц их размере ...

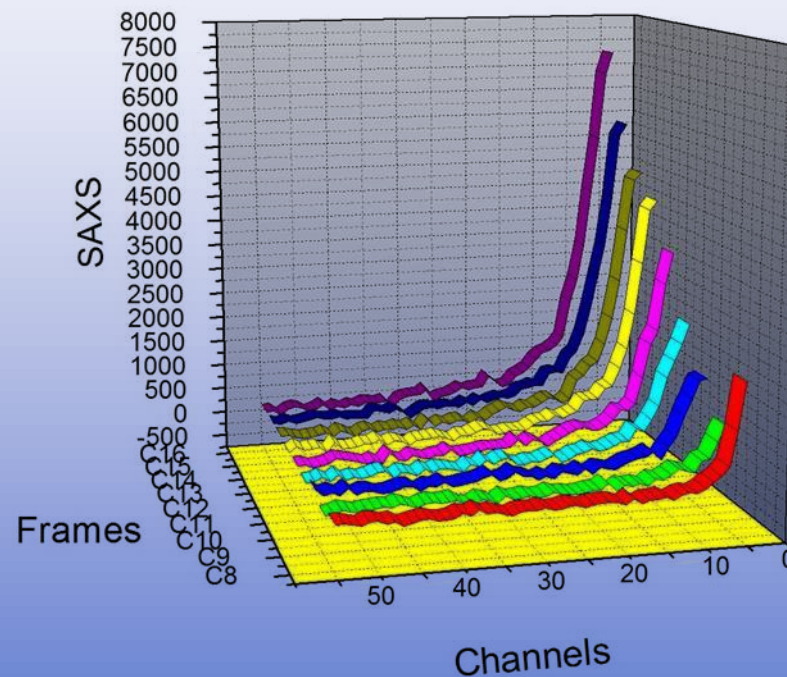
Соотношение Guinea – “средний” размер частиц.

# Динамика МУРР при детонации ряда ВВ

1010--TG

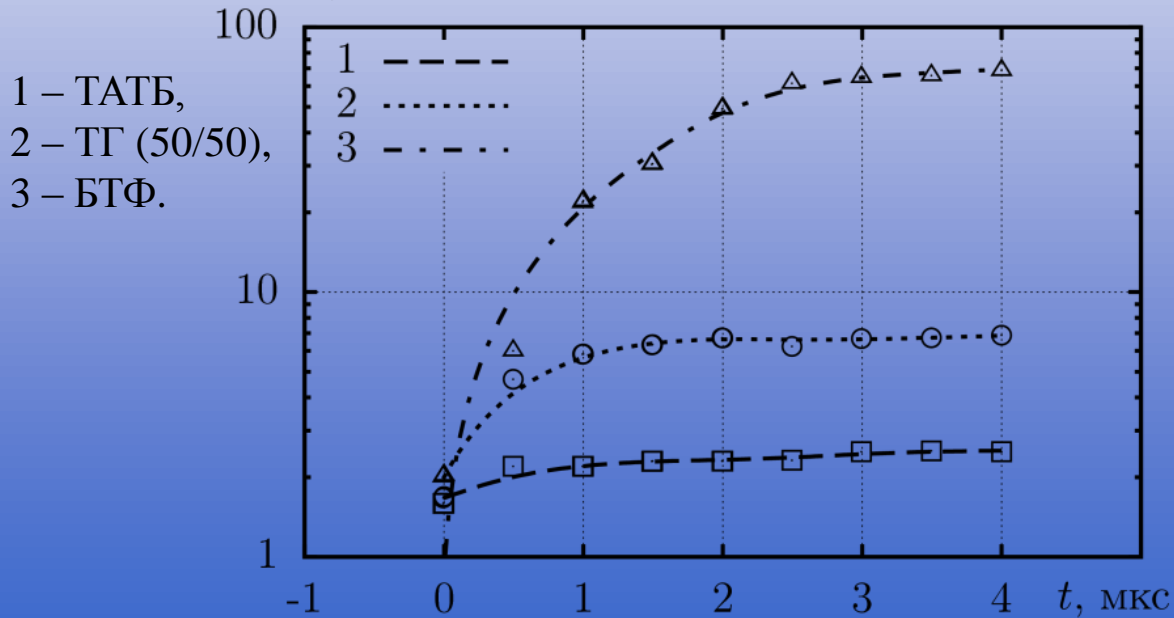
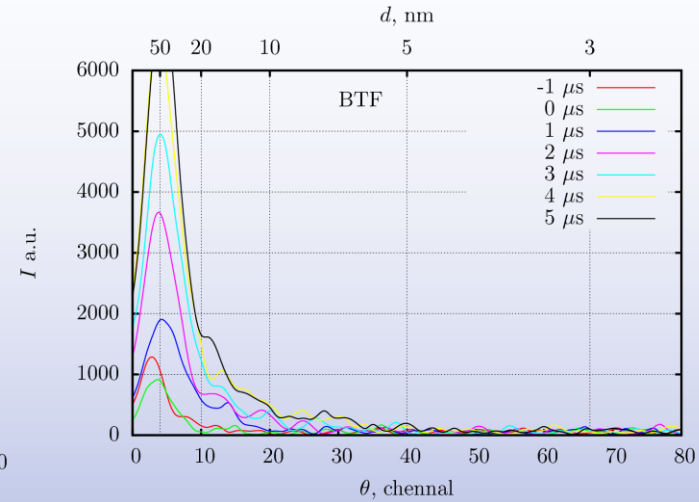
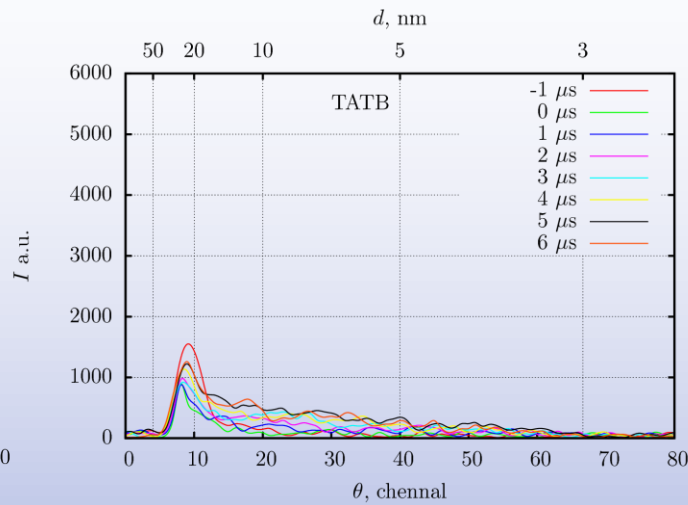
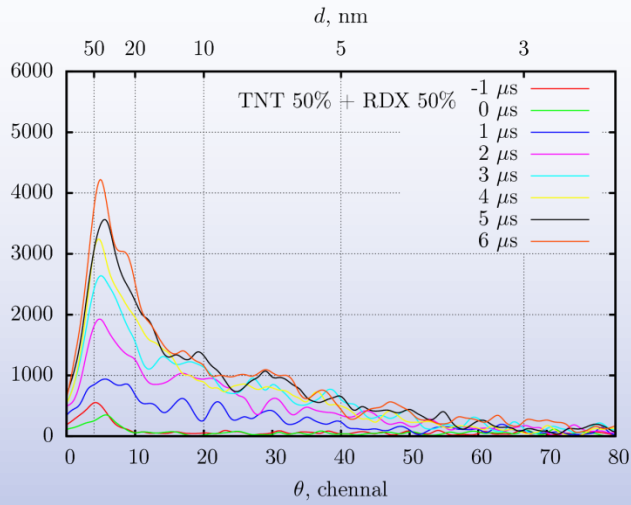


1009--BTF



Угловая зависимость МУРР при детонации ТГ50/50 (слева) и БТФ (справа). Линии разного цвета обозначают кадры МУРР, записанные с интервалом 0.5 мкс. Кадр С10 соответствует прохождению фронта детонации. Угол приведен в каналах детектора.

# Динамика МУРР и размеров наночастиц







*Thank you  
for your attention!*

*Благодарю  
за внимание!*