



Регистрация методами СИ процесса выброса частиц со свободной поверхности ударно-нагруженных металлов.



*Тен^{1,4} К.А., Прууэл^{1,4} Э.Р., Кашкаров^{1,4} А.О., Рубцов⁴ И.А.,
Шехтман² Л.И., Жуланов² В.В., Косов² А.В., Толочко³ Б.П.,
Рыкованов⁵ Г.Н., Музыря⁵ А.К., Смирнов⁵ Е.Б., Столбиков М.Ю.,
Просвирнин⁵ К.М.,*

¹ Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН

² Институт ядерной физики им.Г.И. Будкера СО РАН

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

⁴ Новосибирский Государственный Университет

⁵РФ-ЯЦ ВНИИТФ



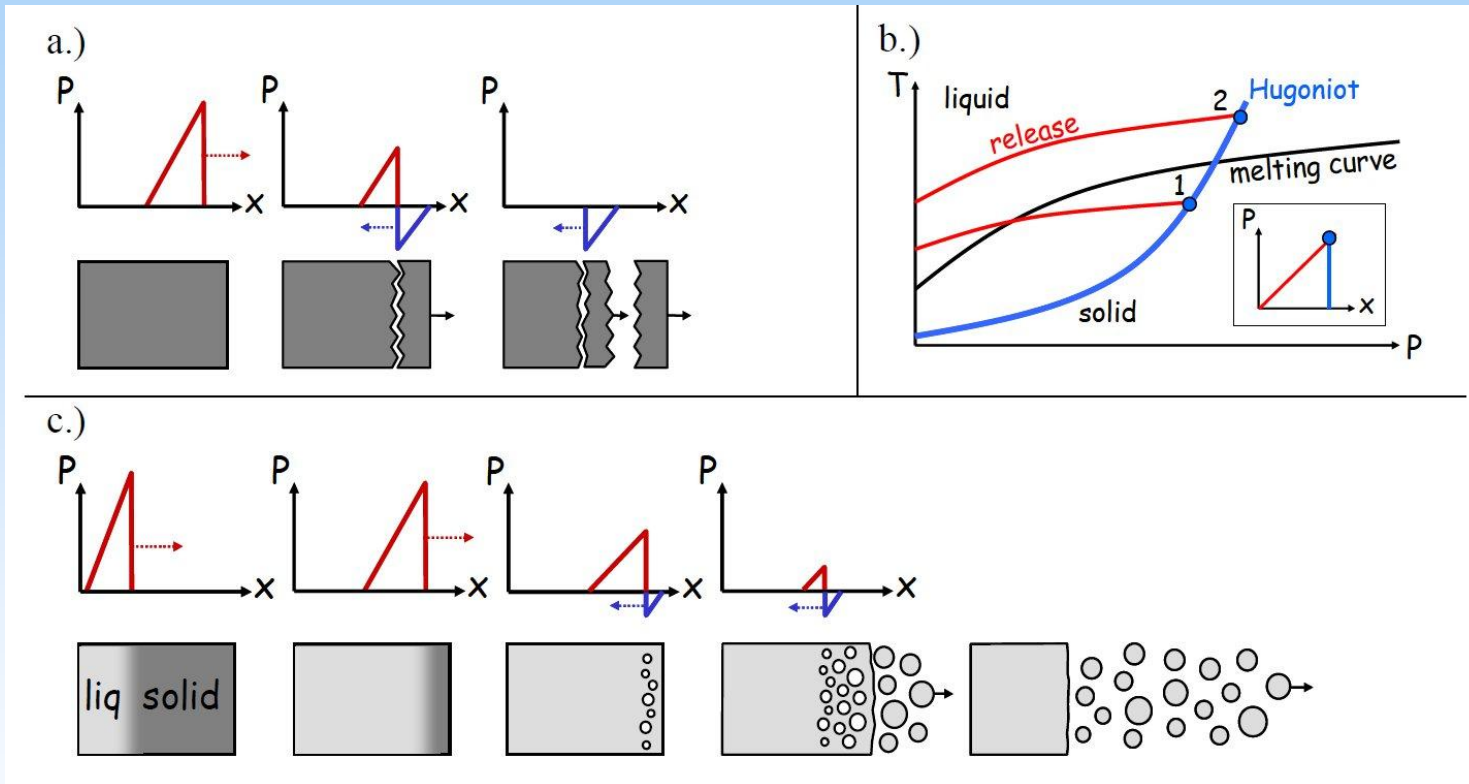
Актуальность проблемы регистрации микро и наночастиц.



1. *Для получения сверхвысоких параметров требуются большие скорости ударников.*
2. *Эффективность сжатия материалов сильно падает ввиду появления впереди ударника потока микрочастиц (пыли).*
3. *Существующие методики регистрации позволяют регистрировать микрочастицы размером порядка 3-5 микрон.*
4. *В настоящее время только дифракционные динамические методики с использованием СИ могут регистрировать присутствие наночастиц.*



Причины возникновения «пыления».



а) откол в твёрдых телах, в) P-T диаграмма плавления олова, с) пыление в жидкостях



Обзор работ по «пылению».

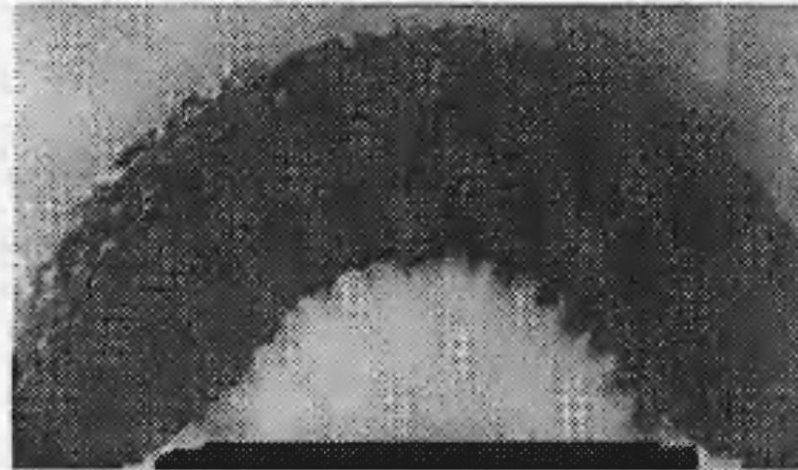
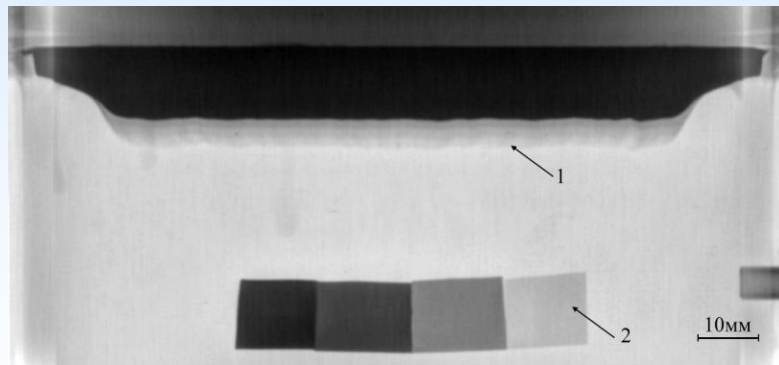
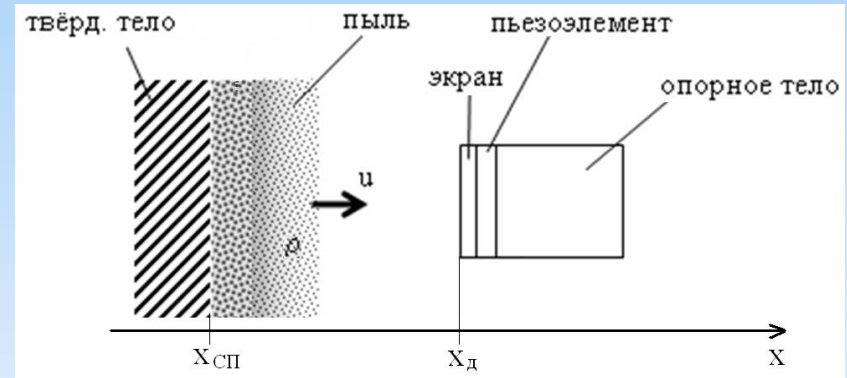
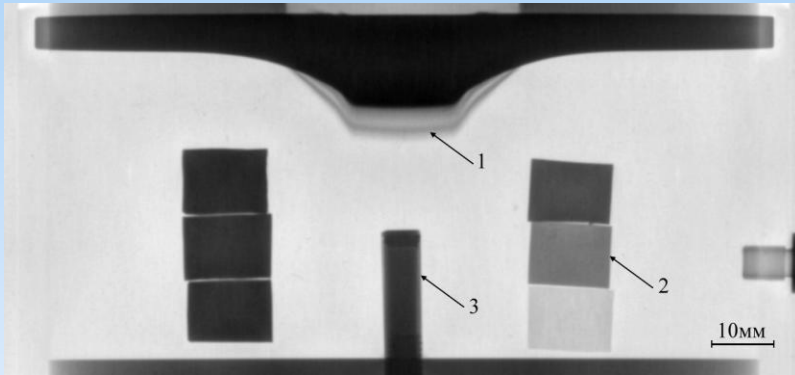


Рис. 3. Рентгеновский снимок в опыте с оболочкой из свинца, полученный при смещении ее СП от начального положения на 33 мм

ВНИИЭФ, 1970



Обзор работ по «пылению».



Пьезодатчиком можно измерять:

1. Давление $P(t)$, оказываемое потоком на датчик
2. Импульс $J(t)$, сообщаемый потоком датчику
3. Плотность $\rho(t)$
4. Скорость $u(t)$
5. Массу пыли $m(t)$, налетевшей на торец

ВНИИЭФ, 2016

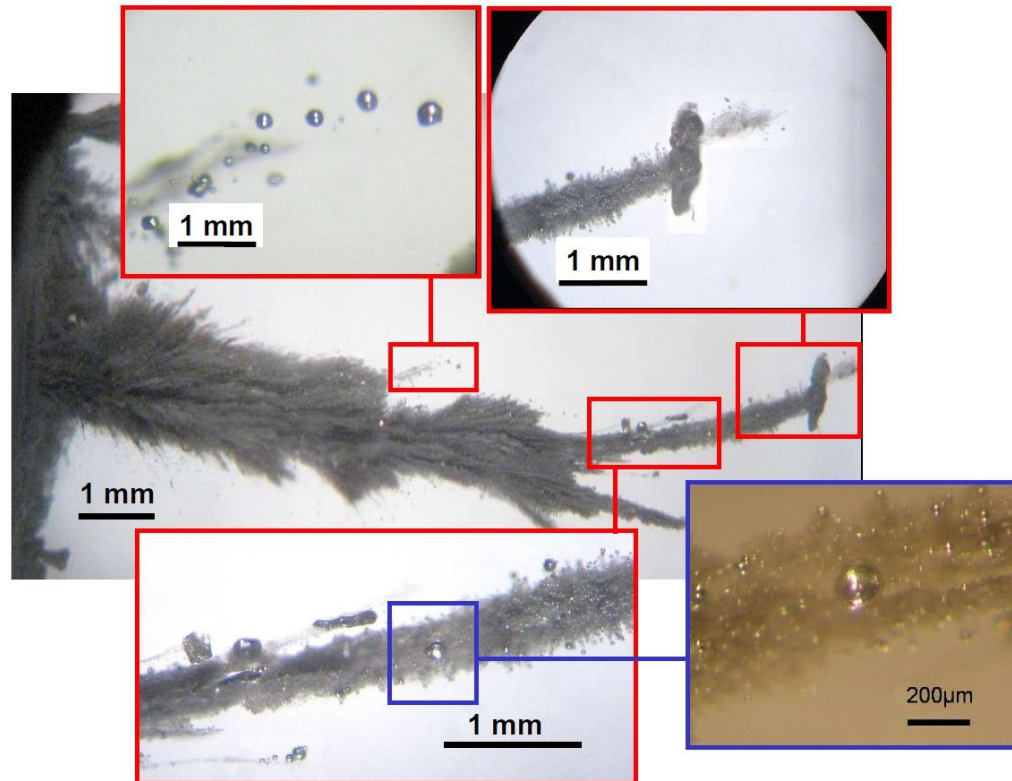


Fig. 6. Optical micrographs of fragments collected in gel set behind the free surface of laser shock-loaded tin target (Test 6).

Возможности оптической регистрации. Франция, 2010

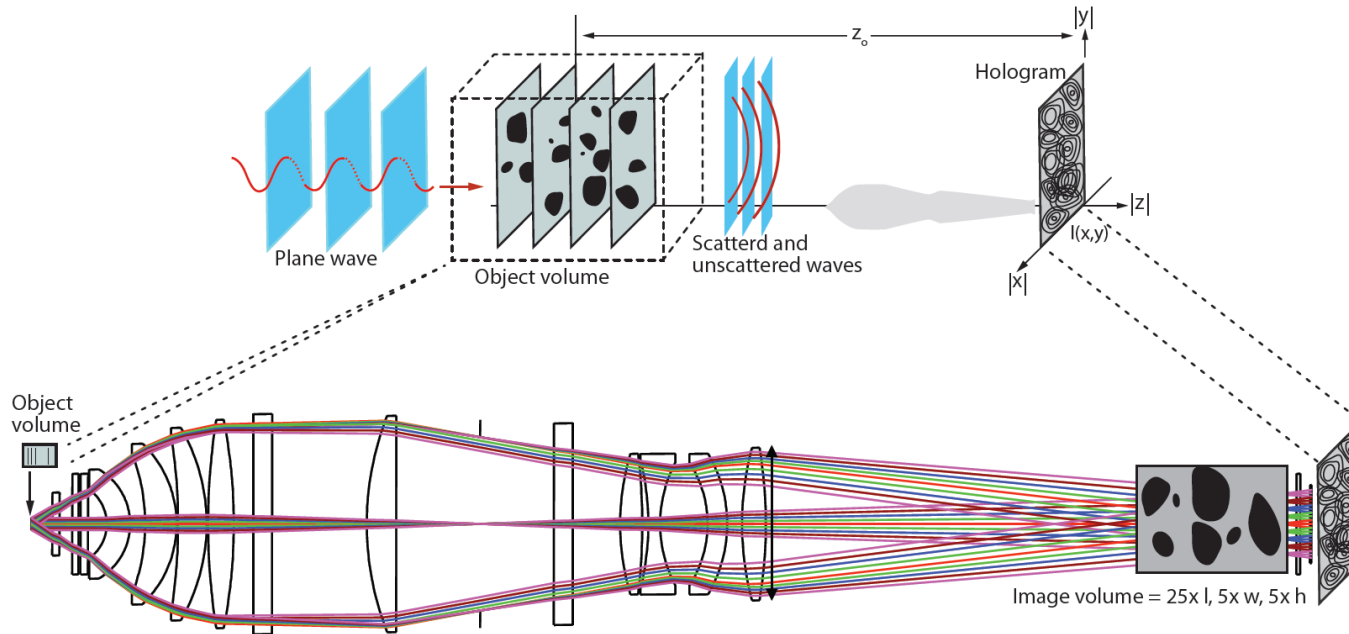


Fig. 2.1.2. The in-line Fraunhofer technique is adapted to be used to measure particles in a dynamic shock physics experiment. A high-resolution lens system is located just after the object volume as illustrated in the figure. The lens system relays the scattered and unscattered wavefronts some distance from the high-explosive experiment to where the hologram can be formed without being damaged. The lower part of the figure shows the lens system and the object volume being relayed with magnification of 5 to a location just in front of the film.

Fraunhofer Holography in LNL, 2013



Обзор работ по «пылению».

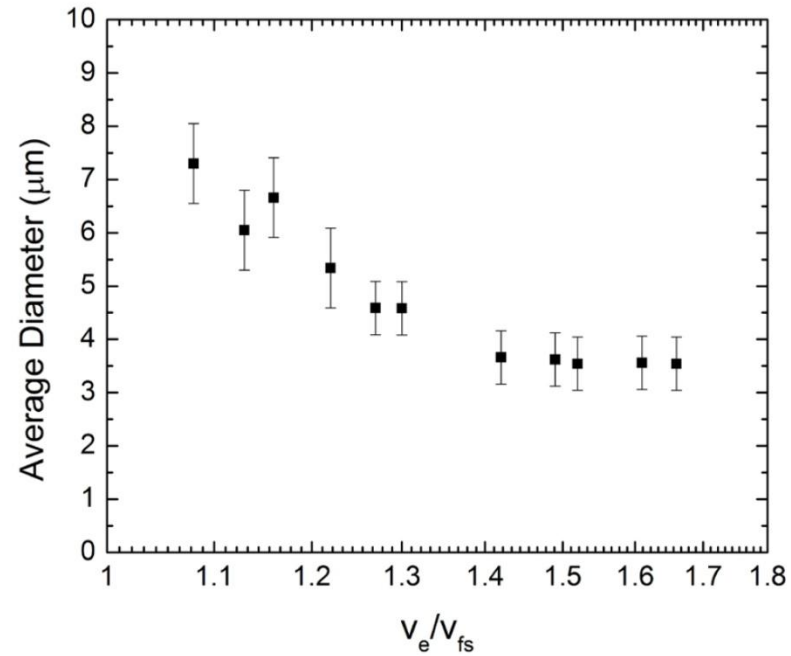
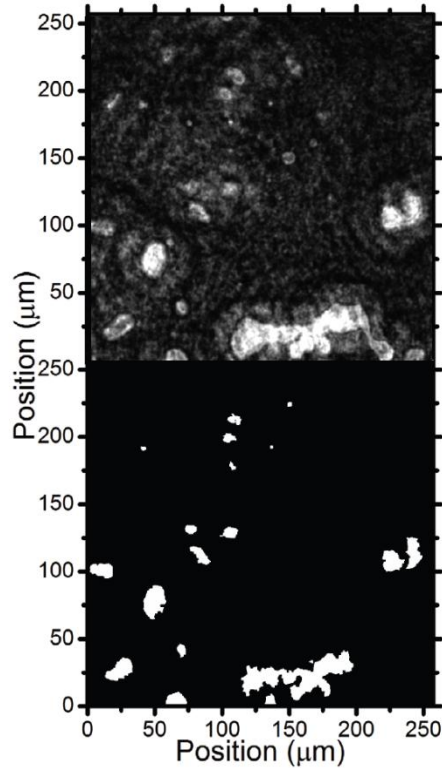
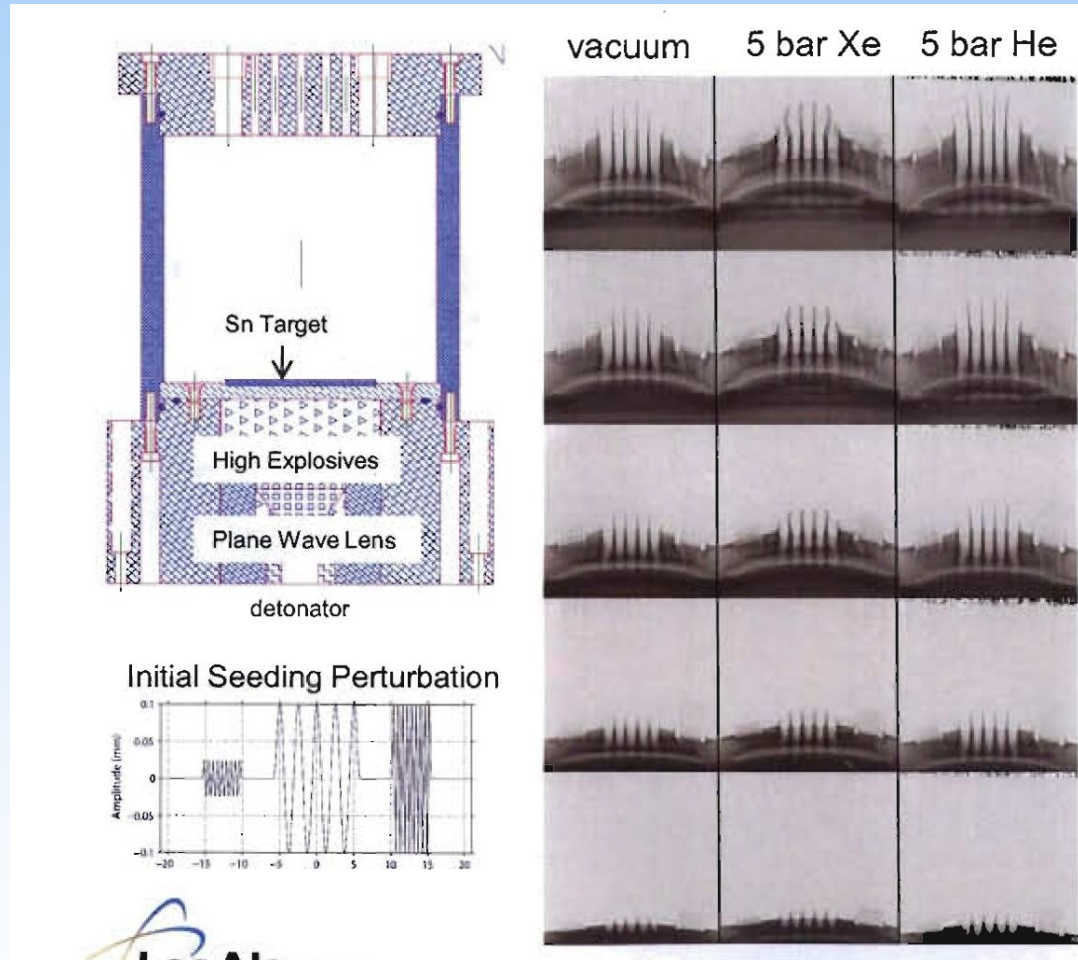


Fig. 3.1.6. The average particle diameter as a function of ejecta velocity.

Ultraviolet In-Line Fraunhofer Holography in LNL



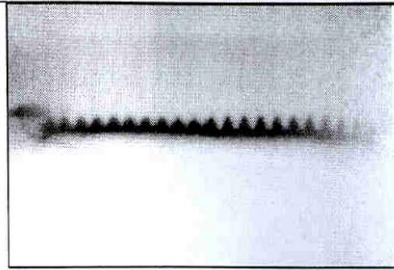
Обзор работ по «пылению».



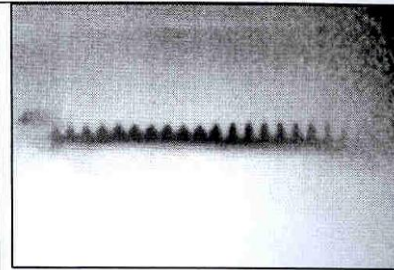
Протонная диагностика в LANL



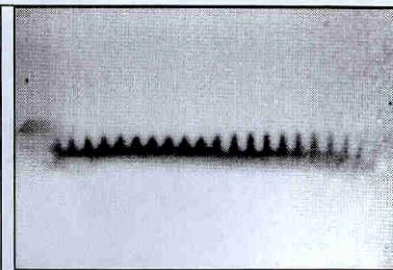
Обзор работ по «пылению».



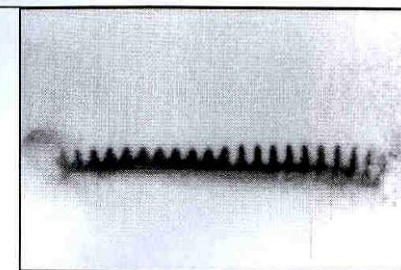
Кадр 3 (27,235мкс)



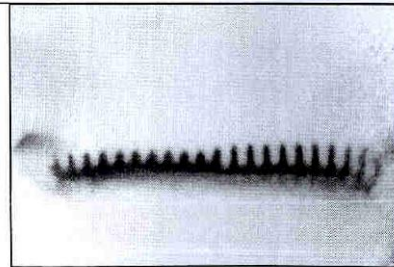
Кадр 4 (27,565мкс)



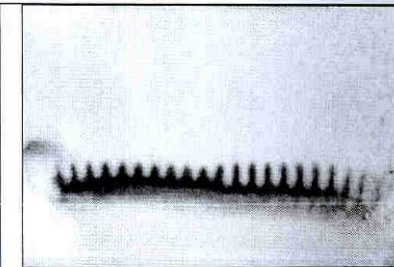
Кадр 5 (27,895мкс)



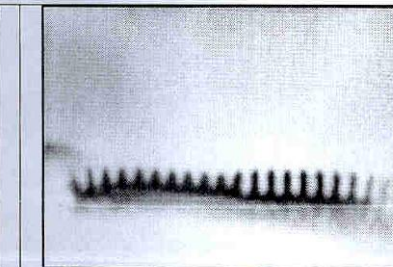
Кадр 6 (28,225мкс)



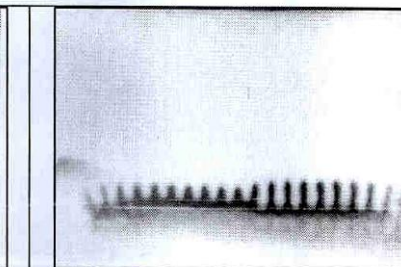
Кадр 7 (28,555мкс)



Кадр 8 (28,885мкс)



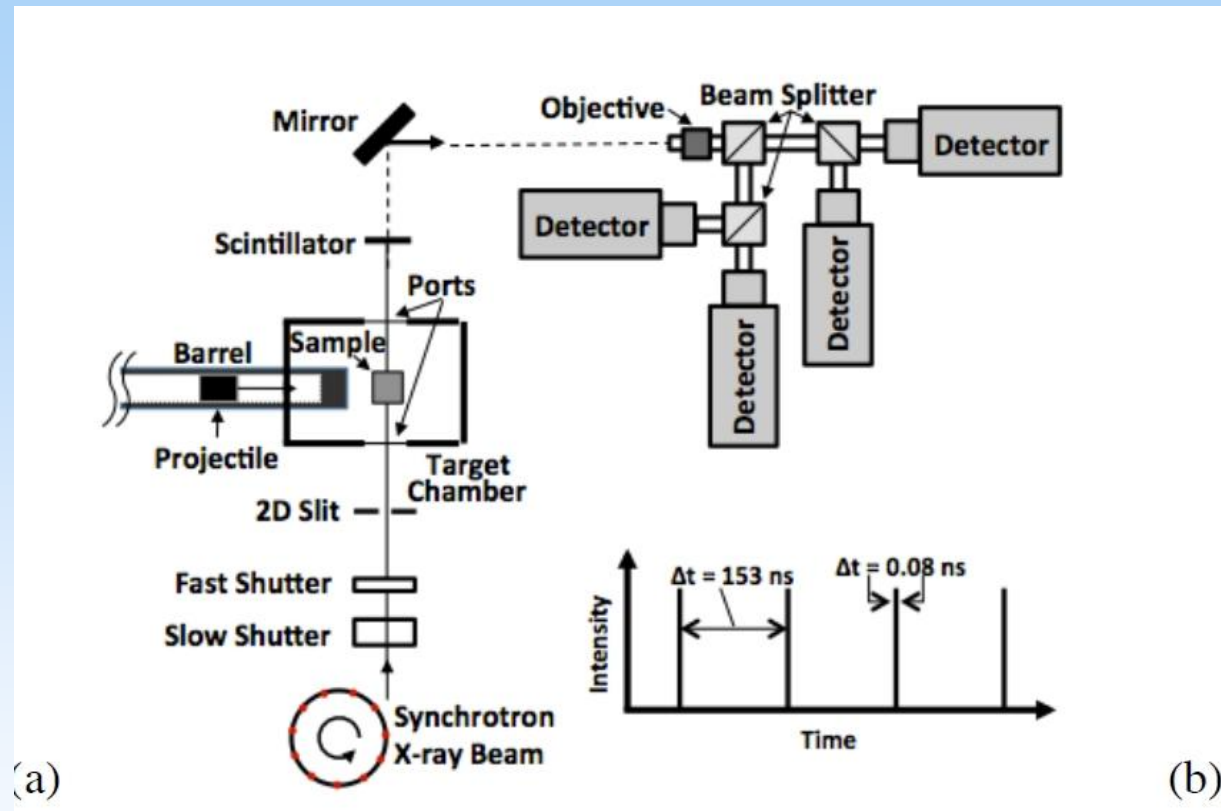
Кадр 9 (29,215мкс)



Кадр 10 (29,545мкс)

Рисунок 13 - Протонографические снимки процесса развития неустойчивости Рэлея-Тейлора при нагружении медного лайнера давлением до ≈ 55 ГПа, начальное возмущение 4мкм в левой части и 8мкм в правой части лайнера

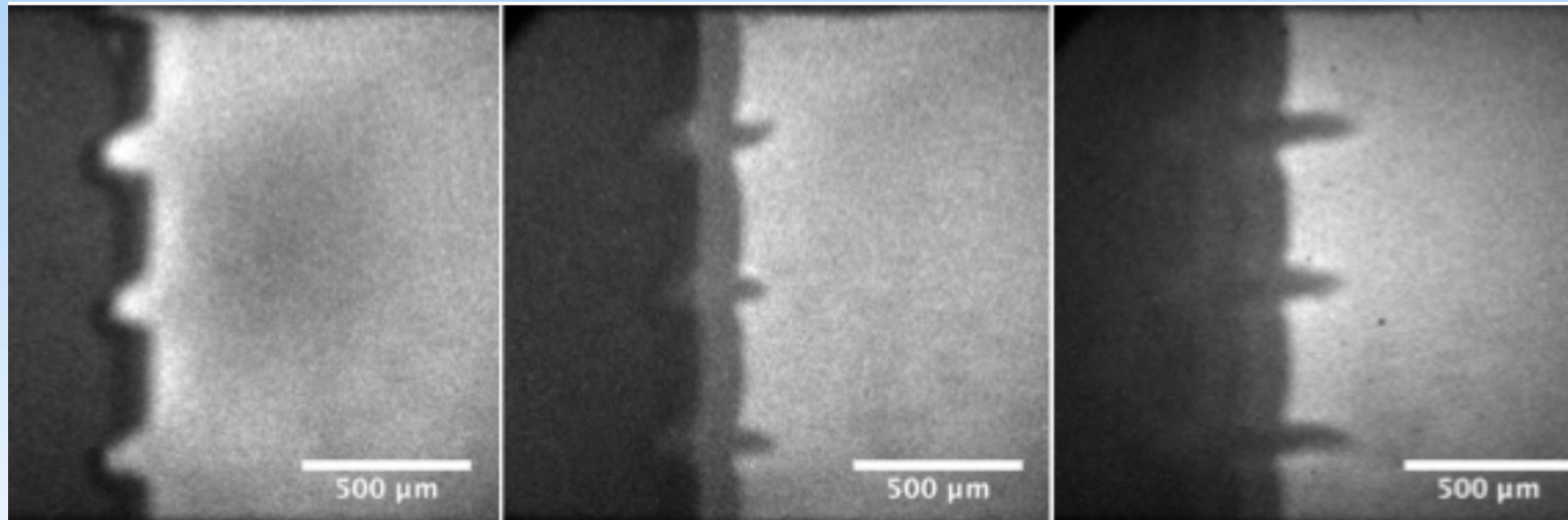
Протвино, 2009



IMPULSE at the Advanced Photon Source (IMPact system for Ultrafast Synchrotron Experiments)



Обзор работ по «пылению».



**APS, IMPULSE, exposure - 80 ps, frame rate – 153 ns, area 2 x 2 mm,
Spatial resolution – 2-4 mkm**



Обзор работ по «пылению».



Существующие методики могут измерять:

1. Давление $P(t)$, оказываемое потоком на датчик
2. Скорость $u(t)$
3. Размеры частиц (до 2 мкм)
4. Плотность $\rho(t)$ - плохо
5. Массу пыли $m(t)$ - плохо
6. Не могут регистрировать наночастицы.



Цели и задачи.



**С помощью регистрации СИ провести исследования потоков нано и микро частиц при выходе ударной волны на свободную поверхность разных материалов (меди, олова).
Получить динамику распределения плотности и массы вдоль потока микрочастиц.**

Зарегистрировать потоки наночастиц при ударном нагружении разных материалов.

Экспериментальная база в ИЯФ.

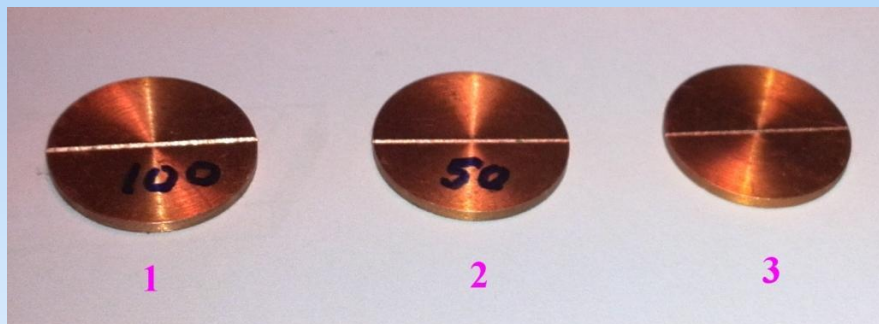


Стенд по исследованию
детонационных процессов на 0-м
канале накопителя ВЭПП-3.

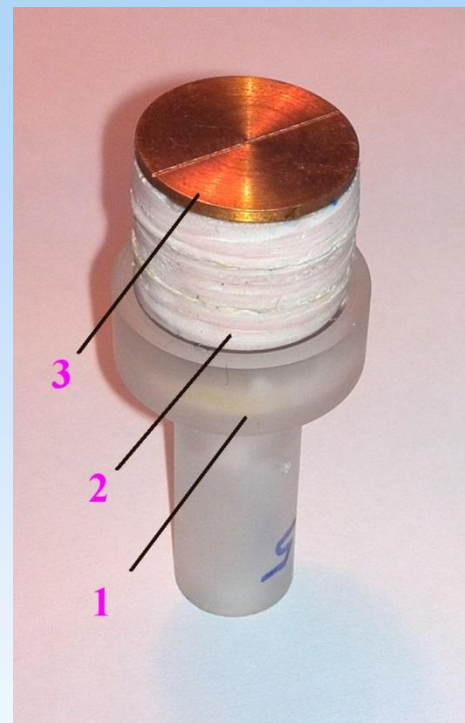


SYRAFEEMA (Synchrotron Radiation
Facility for Exploring Energetic
Materials) на ВЭПП-4

Постановка экспериментов.

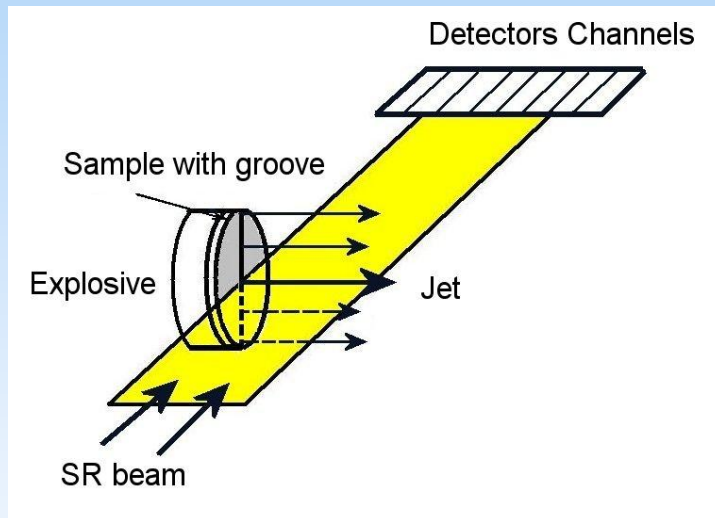


Медные диски (диаметр 20 мм, толщина 2 мм) с канавками: (1) – 100 мкм, (2) – 50 мкм, (3) – 30 мкм.

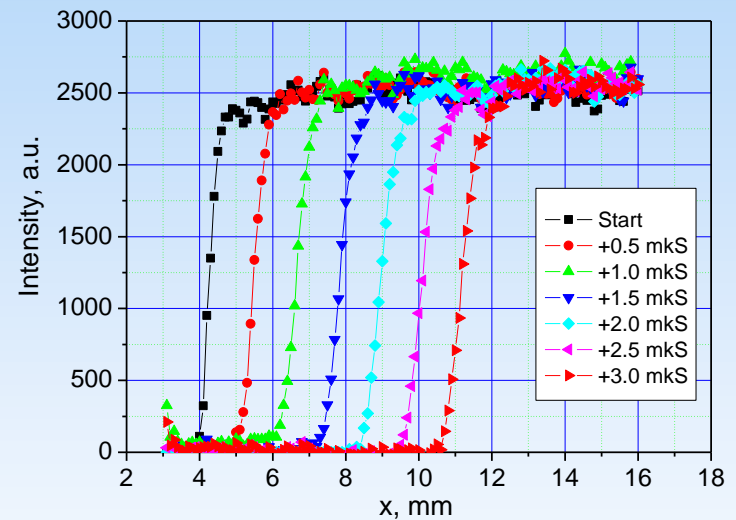


Экспериментальная сборка. 1 – взрывная линза, 2 – заряд ВВ, 3 – медный диск с канавкой.

Постановка экспериментов.

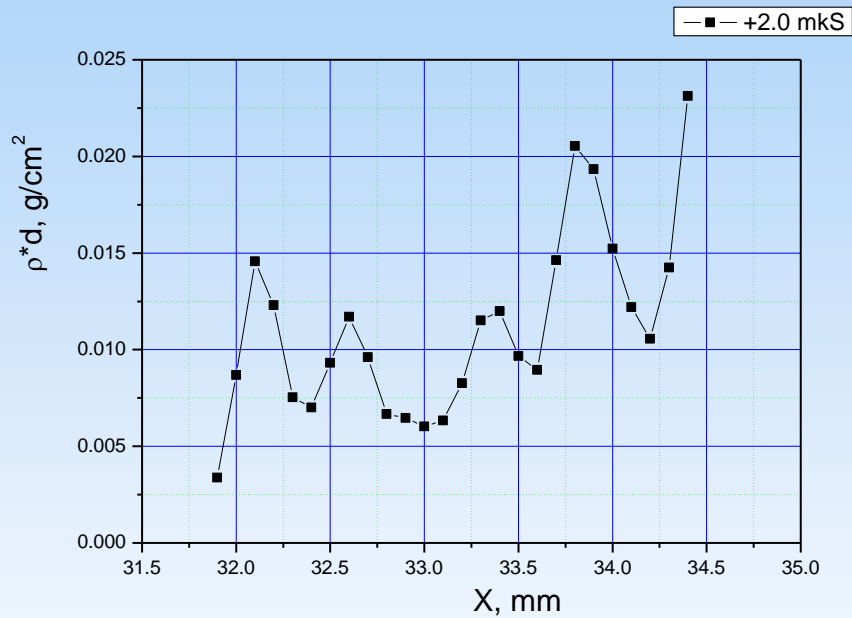


**Рентгенографическая регистрация
по длине микроструи**

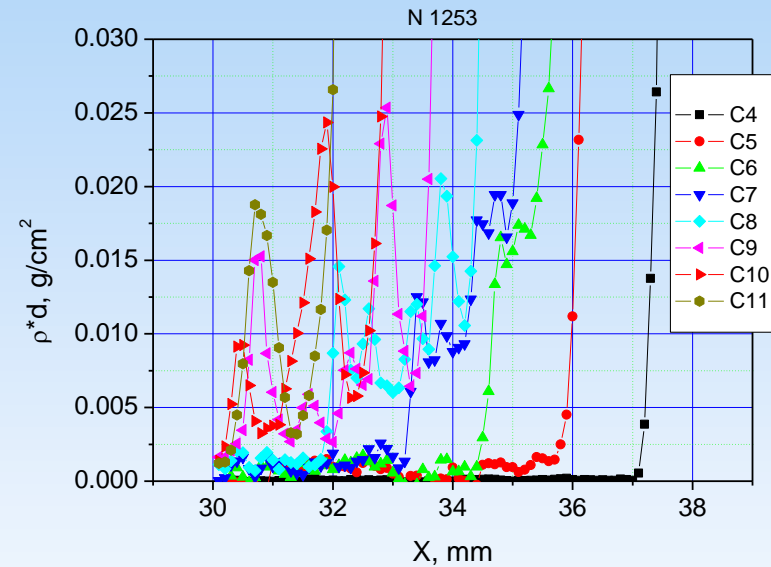


**Рентгенографическая тень полета
диска. X – направлена вдоль
движения диска.**

Потоки микрочастиц из канавок

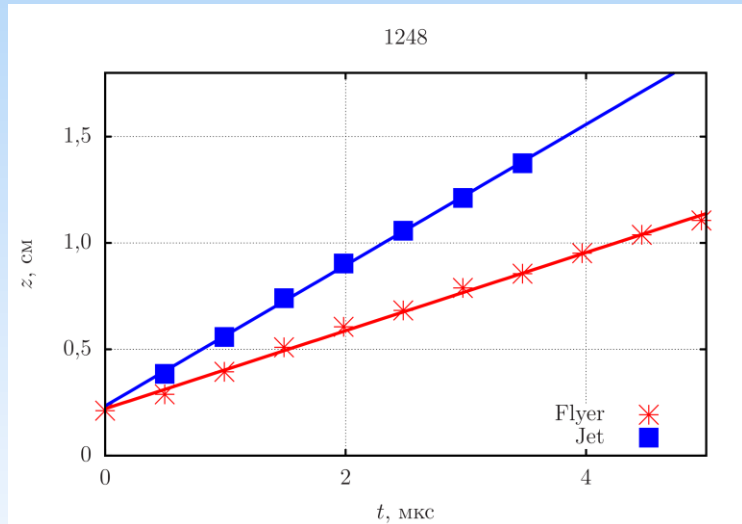


Распределение массы вдоль движения струи через 2 мкс (справа налево). Полная масса струи равна 0.56 мг/мм (на 1 мм высоты).



Рентгенографическая регистрация по длине микроструи (справа налево, 100 мкм).

Микро-частицы из канавок .



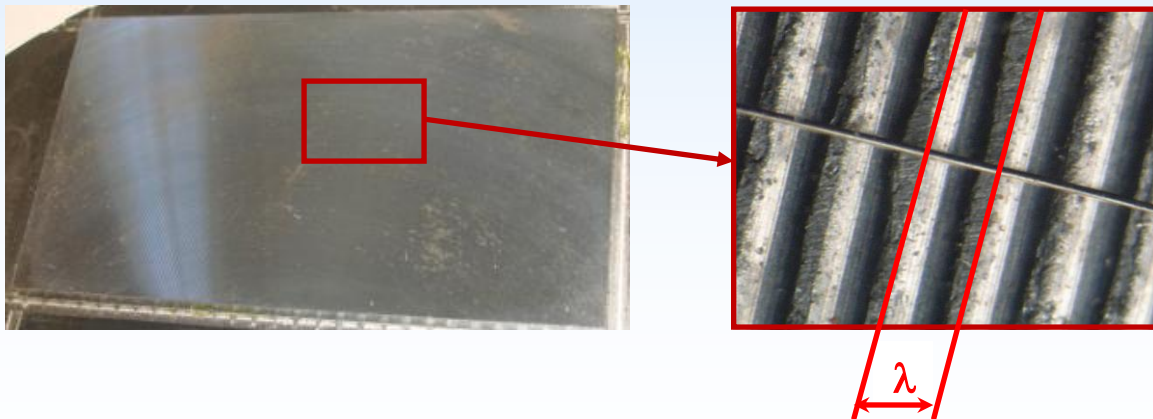
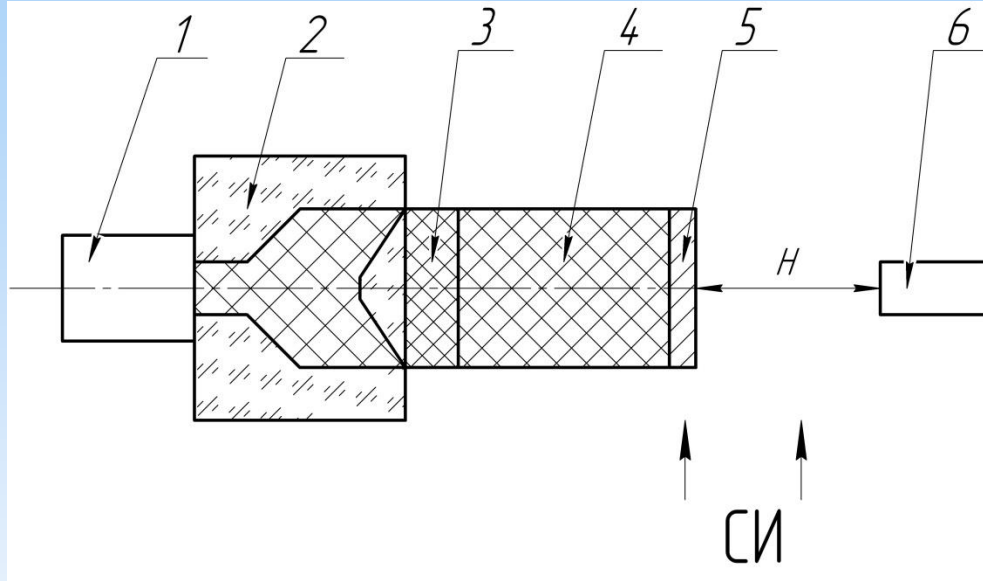
X-t диаграмма положения струи и диска. Скорость диска и струи равны 1.84 km/s и 3.31 km/s, соответственно.

Groove size	Jet mass, mg		
	50 μm	100 μm	200 μm
time			
t=1 μs	0.25	0.56	0.8
t=2 μs	0.22	0.56	1.45
t=3 μs	0.14	0.5	0.97

Таблица 1.
Динамика массы микрочастиц из канавок 50, 100 и 200 мкм.

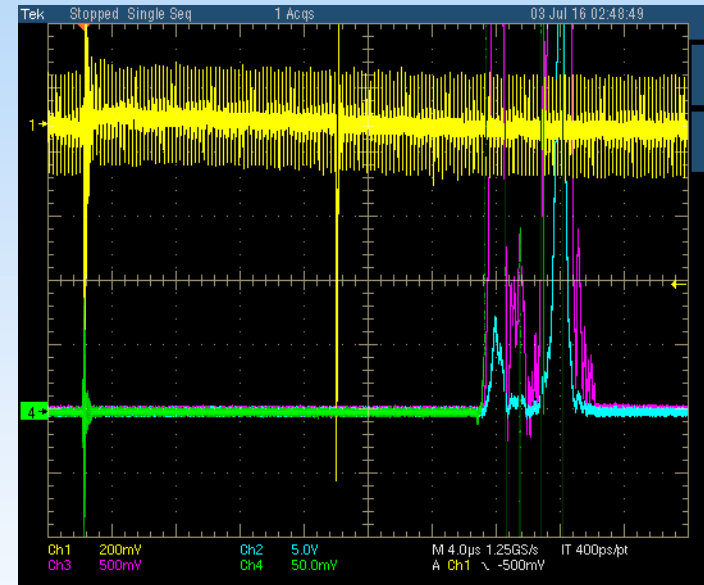
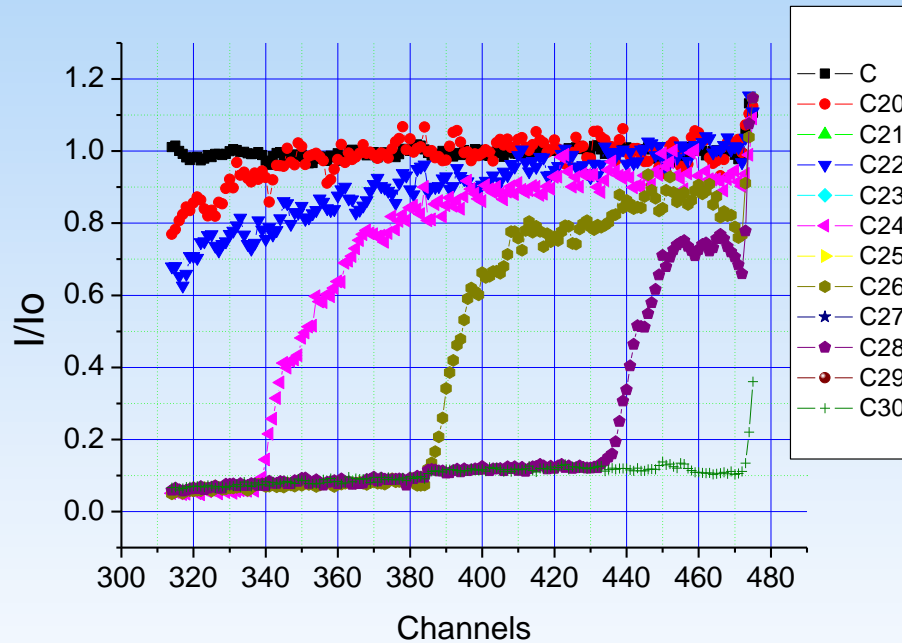


Эксперименты с пьезодатчиками.





Эксперименты с пьезодатчиками.

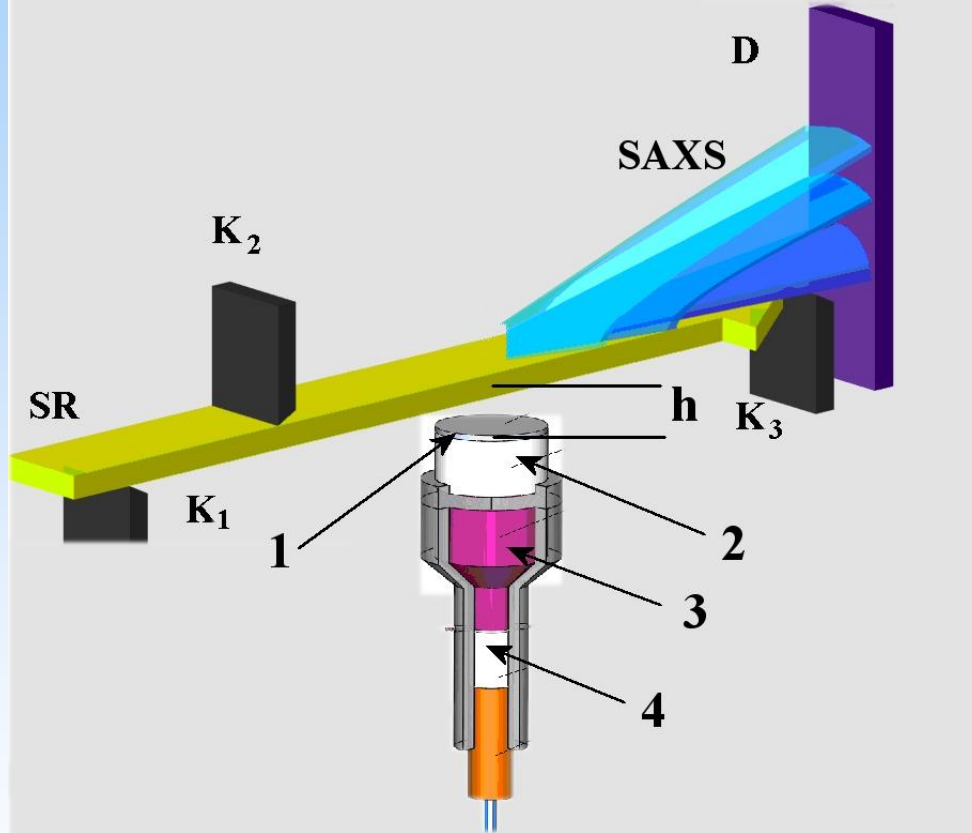


Относительная интенсивность СИ
вдоль полета частиц. **Время между
кадрами 2 мкс.**

Осциллограмма записи
пьезодатчика.



Динамическая регистрация наночастиц. Схема постановки экспериментов.



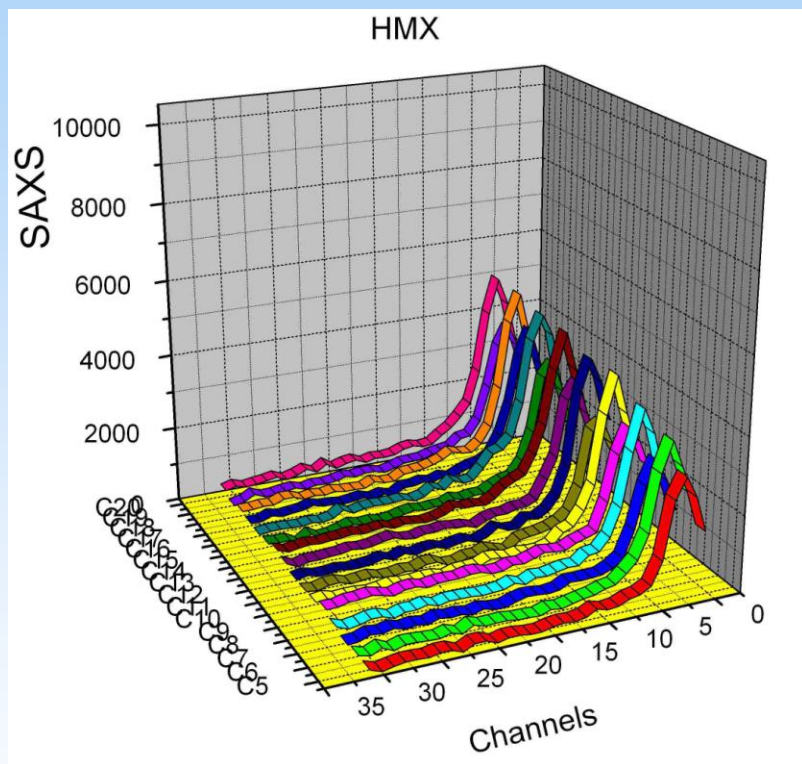
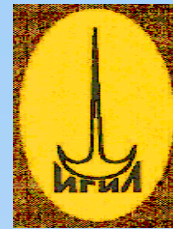
В опытах изменялись:

- материал фольги (олово, УДА, тантал, медь, молибден)
- ускоряющее ВВ – прессованный октоген, ТГ50/50, пластик ПТ-84
- расстояние между фольгой и плоскостью регистрации (h)

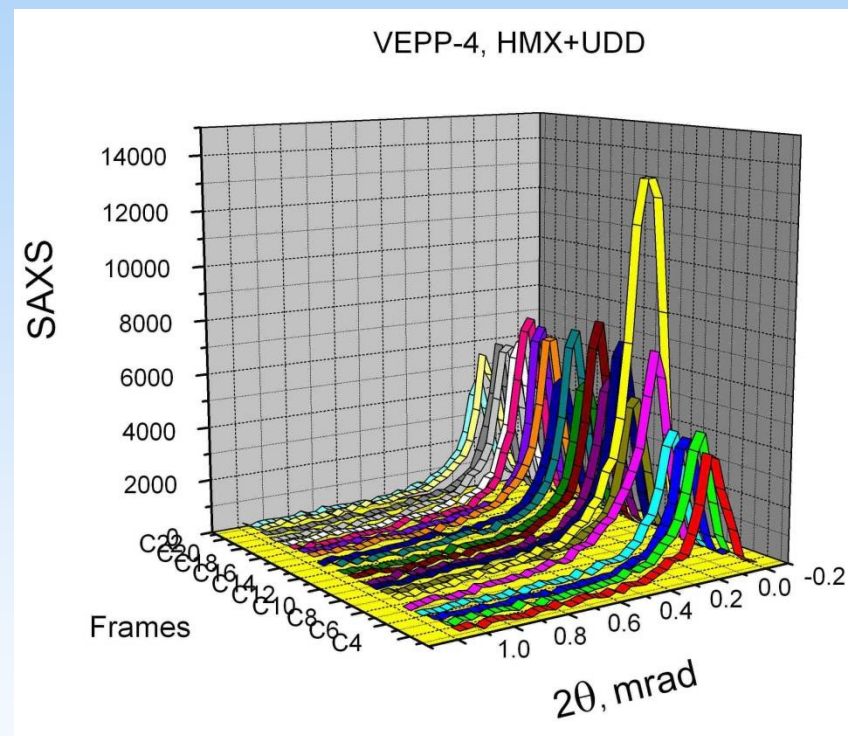
Схема измерения МУРР. K_1 и K_2 – ножи, формирующие пучок SR размером 20 x 0,5 мм, K_3 – нож, закрывающий прямой пучок SR, SAXS – рассеянное излучение SR, D – детектор DIMEX-3. h – расстояние между пучком SR и метаемой пластиной. 1 – исследуемая пластина; 2 – ускоряющий заряд; 3 – плоскостолновая линза; 4 – порошковый тэн.



Регистрация наночастиц при высокоскоростном нагружении металлических пластин.



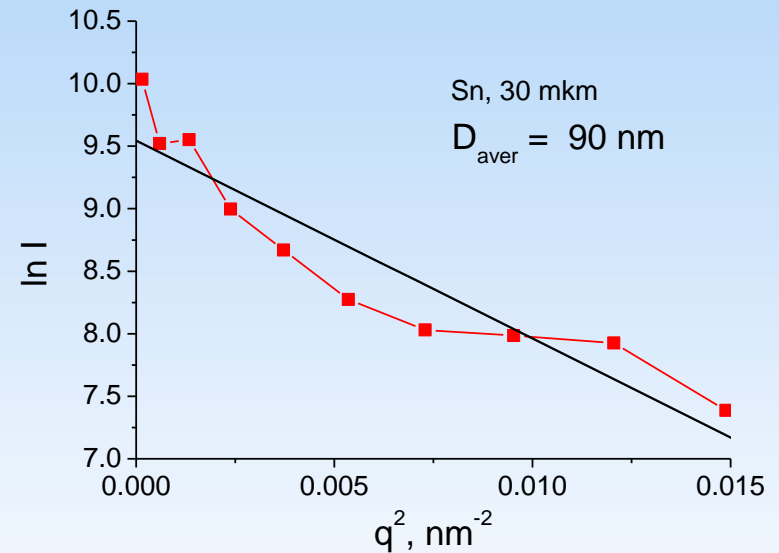
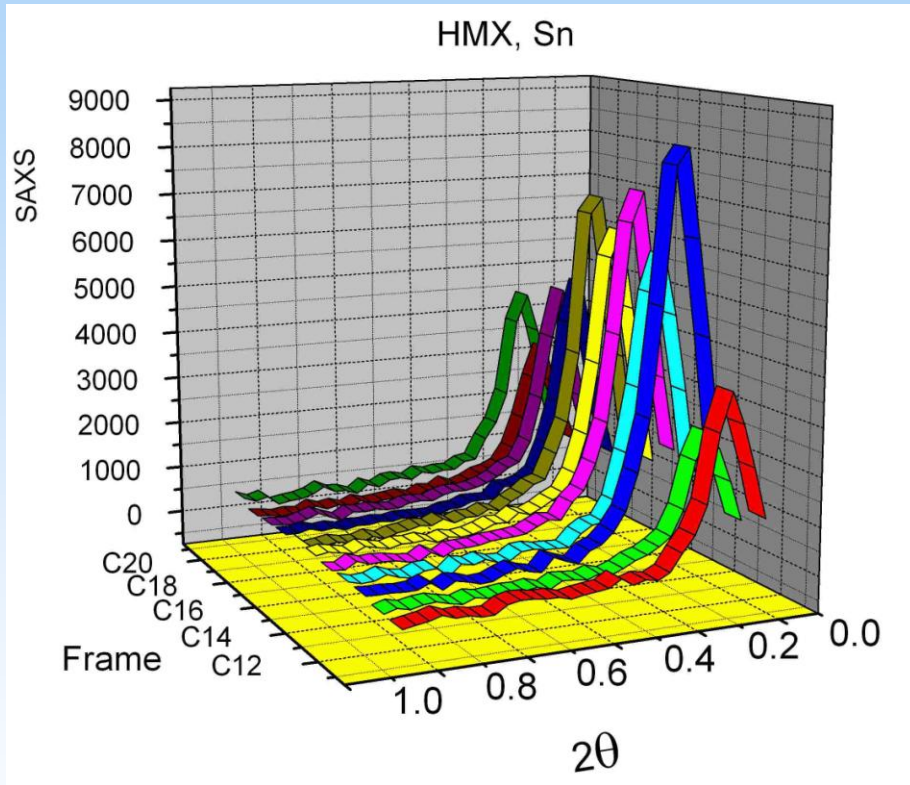
Динамика распределений МУРР при детонации НМХ. Угол рассеяния 2θ приведен в каналах детектора. 1 канал = 0,029 мрад. Время между кадрами 600 нс.



Динамика распределений МУРР при движении UDD. По оси X угол рассеяния 2θ в мрад. Время между кадрами 600 нс.



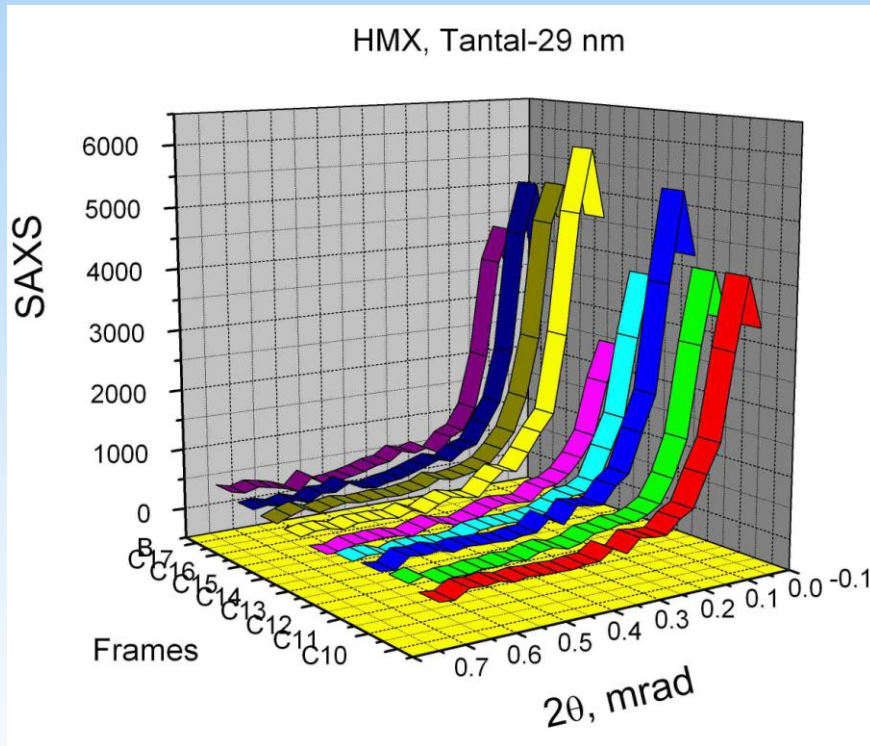
Регистрация наночастиц при высокоскоростном нагружении металлических пластин.



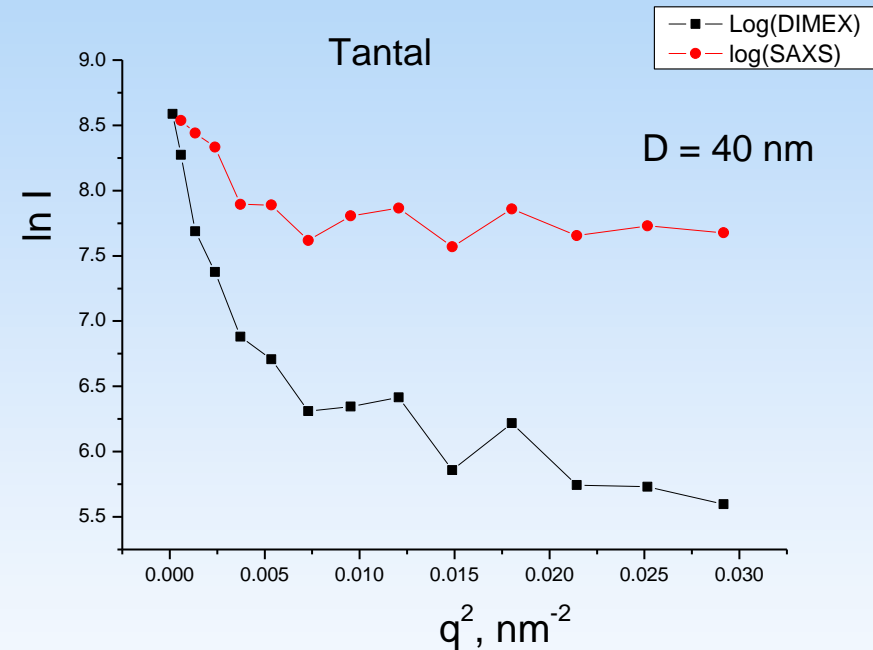
Динамика распределений МУРР при движении фольги из олова. По оси X угол рассеяния 2θ в mrad. Время между кадрами 600 нс.



Регистрация наночастиц при высокоскоростном нагружении металлических пластин.



Динамика распределений МУРР при движении фольги из тантала. По оси X угол рассеяния 2θ в mrad. Время между кадрами 600 нс.



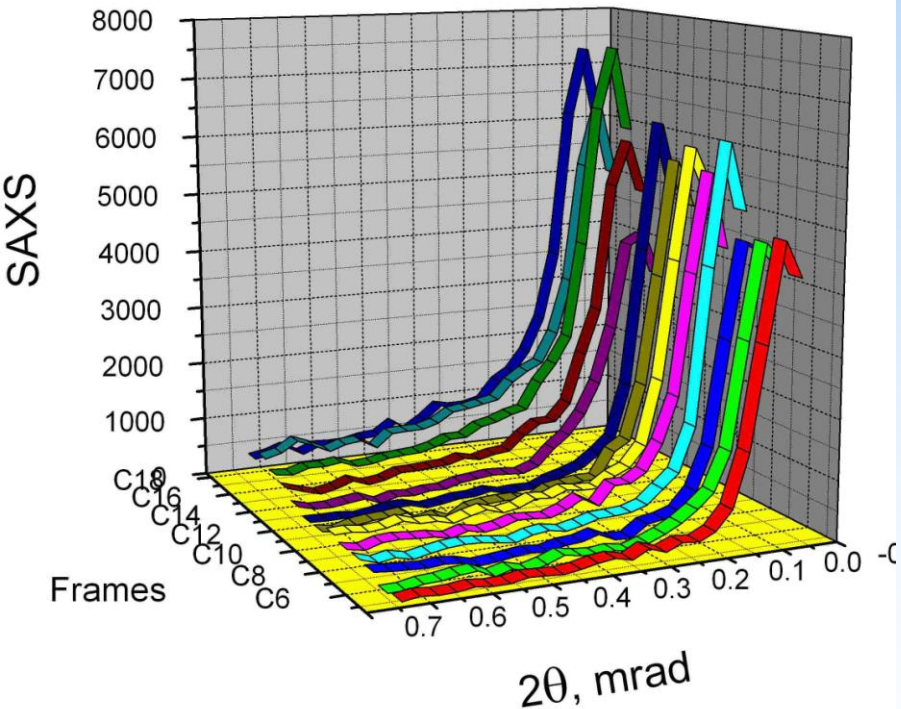
Динамика распределений МУРР при движении фольги из олова. Расстояние до плоскости регистрации 10 мм. Время между кадрами 600 нс.



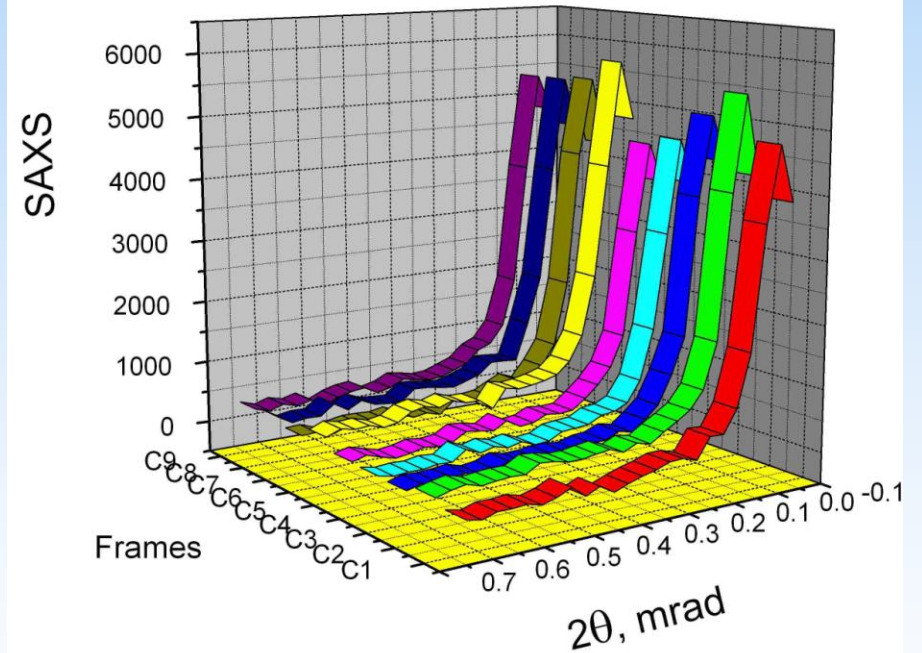
Регистрация наночастиц при высокоскоростном нагружении металлических пластин.



PT-84, Sn-72 мкм



HMX, Sn, h=10mm



Динамика распределений МУРР при движении фольги из олова. Заряд из ПТ-84. Время между кадрами 600 нс.



Выводы.



1. Измерены динамика распределения массы вдоль потока микрочастиц из микроканалов.
2. Проведены эксперименты по одновременной регистрации СИ и пьезодатчиком.
3. При метании фольги (толщиной от 20 до 70 нм) из олова впереди зарегистрирован поток наночастиц (размером порядка 100 нм).
3. Из исследованных материалов (Cu, Mo, Al, Ta) поток наночастиц зарегистрирован из тантала (размером порядка 40 нм).

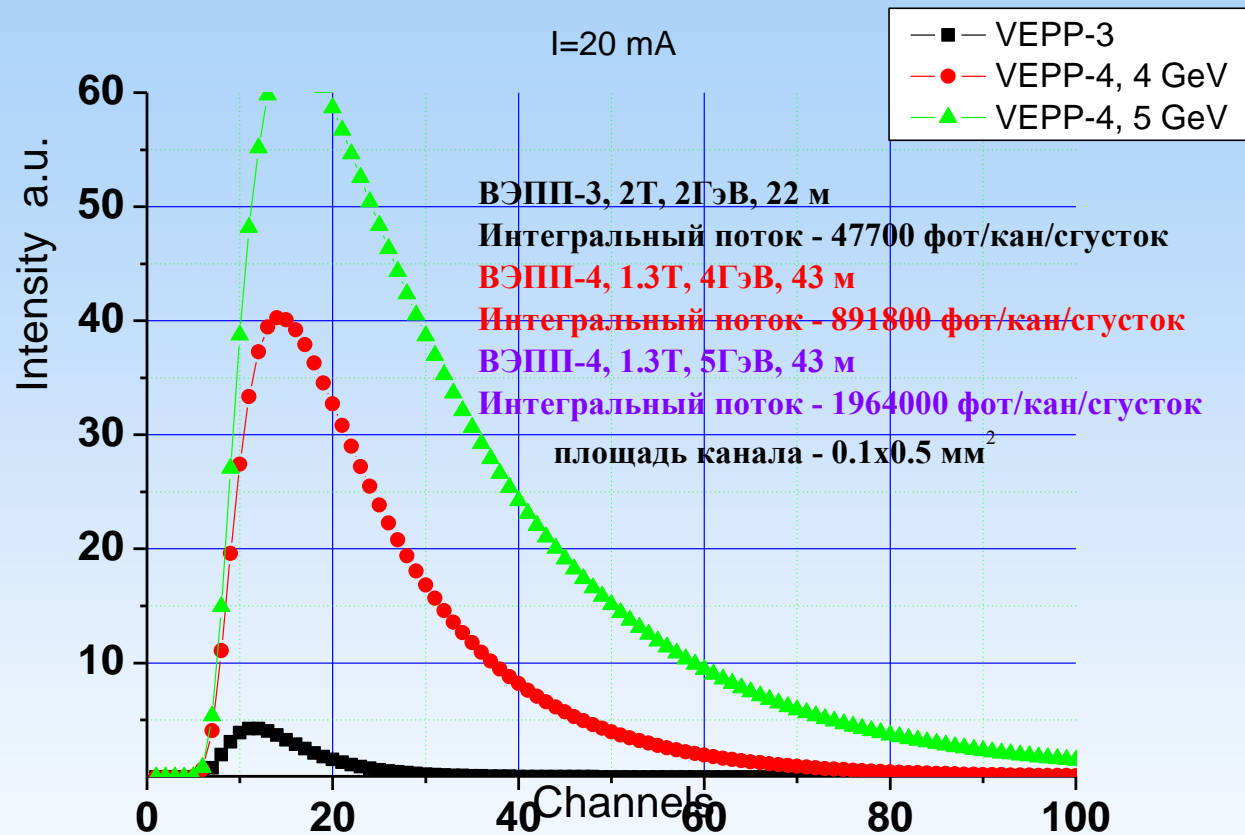
Спасибо за внимание.



Обзор работ по «пылению».



Параметры СИ на ВЭПП-4.



Сравнение спектров из вигглеров на ВЭПП-3 (черные точки) и ВЭПП-4 (красные точки $E=4$ ГэВ, зеленые – $E=5$ ГэВ).