



Экспериментальное моделирование пылевой динамики безатмосферных тел

*Кузнецов И.А., Захаров А.В., Шашкова И.А., Ляш А.Н., Дольников Г.Г., Карташева А.А.,
Шеховцова А., Бычкова А.*

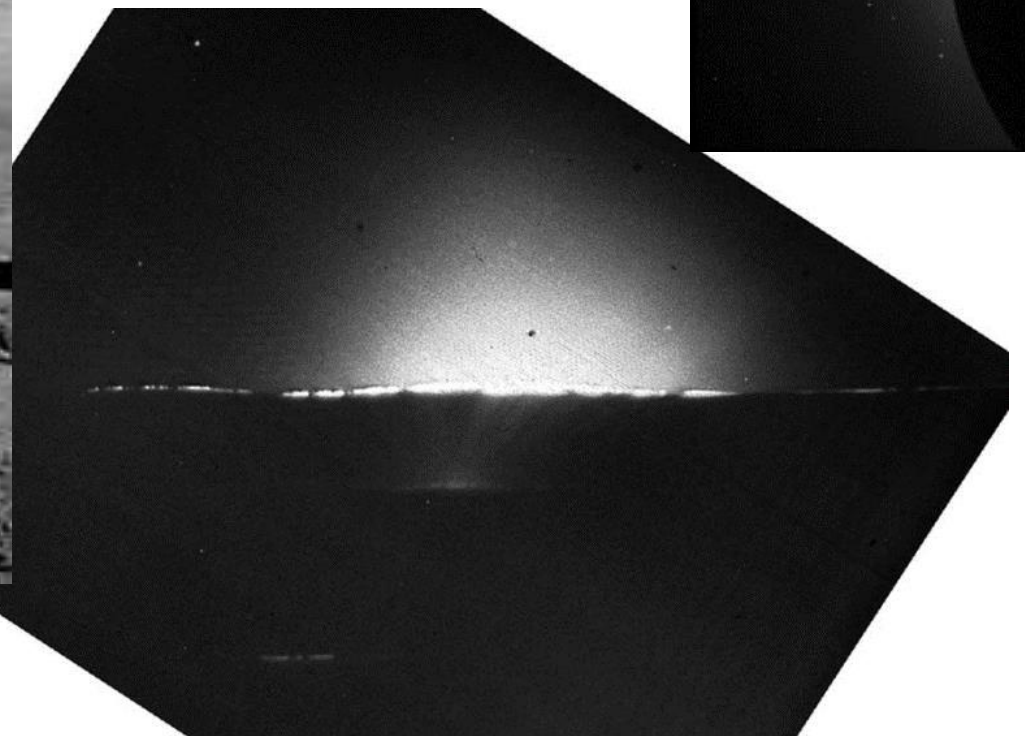
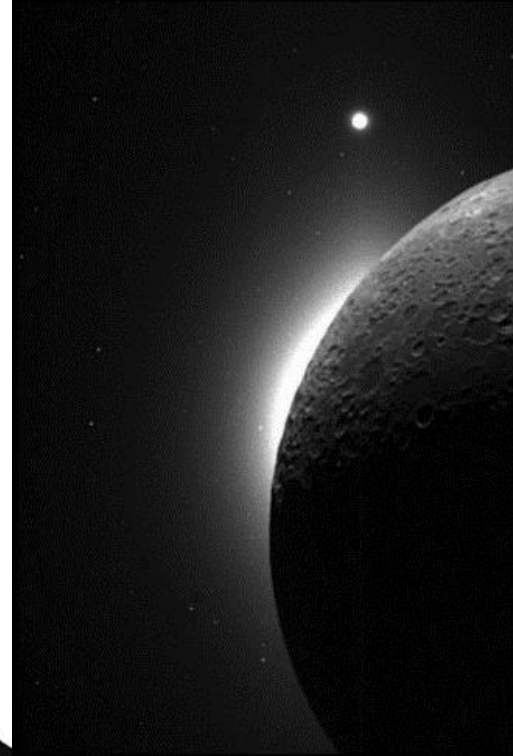
Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия; kia@iki.rssi.ru

Международная конференция «XIX научная школа "Нелинейные волны – 2020"»
ИПФ РАН, Нижний Новгород, 29.02 – 06.03.2020 г.

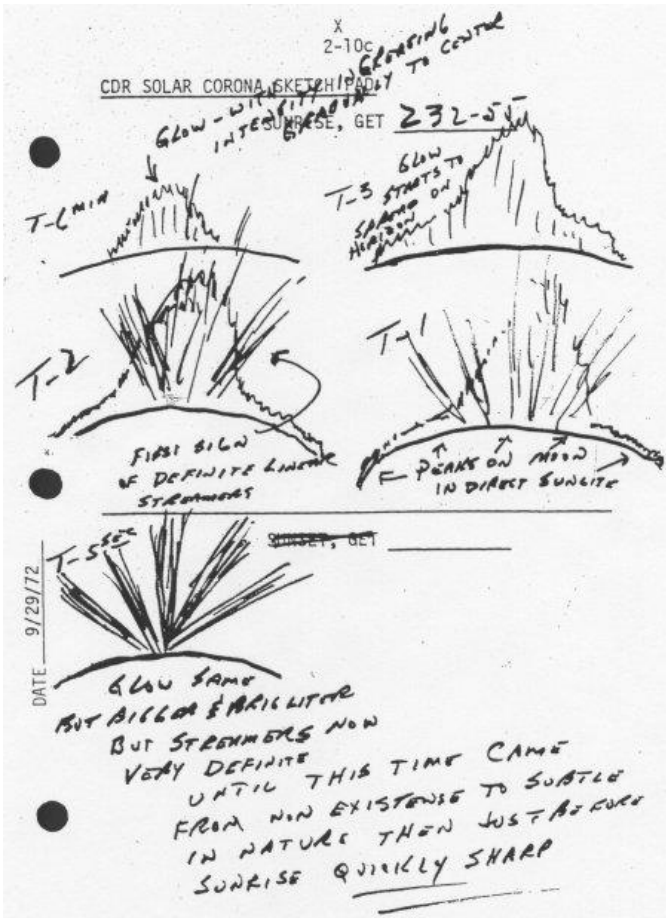
Все безатмосферные небесные тела покрыты слоем пыли, имеющей свойство взлетать и левитировать вблизи поверхности.

Она является угрозой как для АМС, так и для пилотируемых миссий. Угроза представляется со стороны высокоадгезивных частиц, мешающих работе астронавтов, солнечных панелей и механических устройств.

Свечение пыли над Луной,
Clementine Lunar Orbiter (1991)



«Пылевой фонтан» и свечение пыли над горизонтом
Луны, Surveyor (Rennilson and Criswell, 1974).



Наброски «пылевых фонтанов»
Луны астронавтами Аполлона-17
(McCoy and Criswell, 1974)

Свойства плазменно-пылевых структур
Взаимодействие с
поверхностью

- Локальные заряженные пылевые частицы, их левитация
- Падение микрометеоритов
- Электрическое поле
- Поток солнечного ветра
- Солнечный электромагнитный спектр

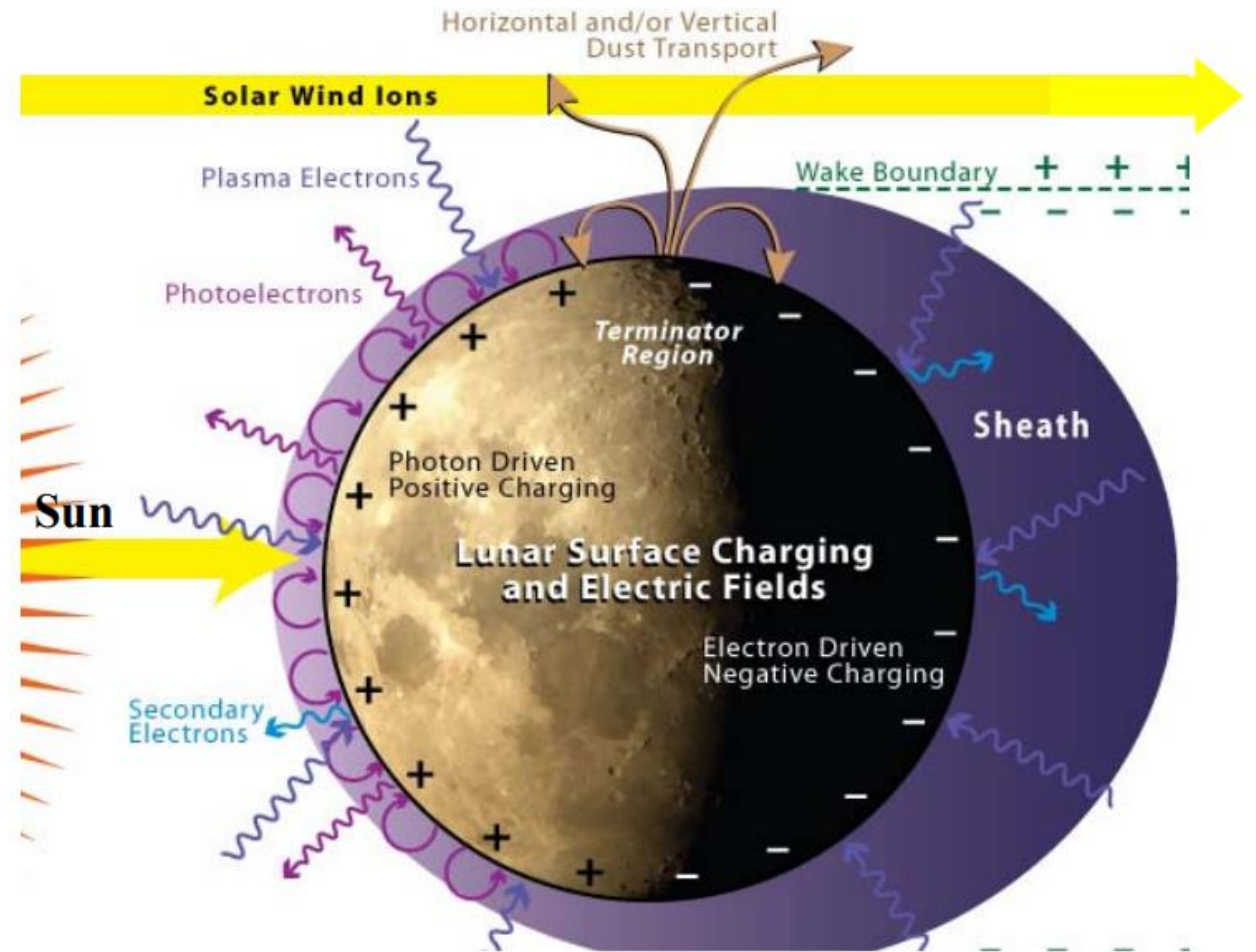


Схема лунной плазменно-пылевой среды [Halekas et al., 2015]

Цели исследований

- **Глобальные**

- Исследование и понимание динамики плазменно-пылевой экзосферы безатмосферных тел, включая динамику пылевой компоненты
- Построение систем калибровки научной аппаратуры
- Исследование влияния плазменно-пылевых структур на материалы и приборы
- Изучение риска загрязнения пылевыми частицами

- **В части космических пылевых экспериментов**

- Калибровка пылеударных анализаторов ПмЛ лунных миссий «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс-1»
- Калибровка датчиков Пылевого комплекса проекта «ЭкзоМарс-2020»
- Оценка пылевых потоков вблизи Ударных сенсоров приборов

Эксперименты

- **Микрометеоритная бомбардировка**
 - Построение систем калибровки научной аппаратуры
 - Влияние на материалы, риск загрязнения и повреждения
 - Отработка методов регистрации пылевых частиц
- **Левитация частиц в электрическом поле**
 - Исследование и понимание динамики плазменно-пылевой экзосферы безатмосферных тел, включая динамику пылевой компоненты
 - Исследование влияния плазменно-пылевых структур на материалы и приборы
 - Изучение риска загрязнения пылевыми частицами
- **Оптическая регистрация траекторий частиц**
- **Потоки частиц в аэродинамической трубе**
 - Система калибровки приборов/Измерение потоков пылевых частиц

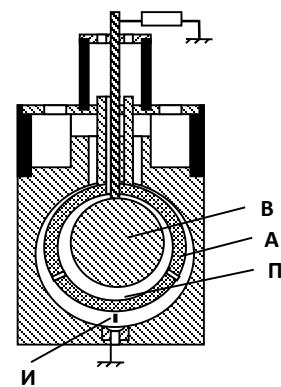
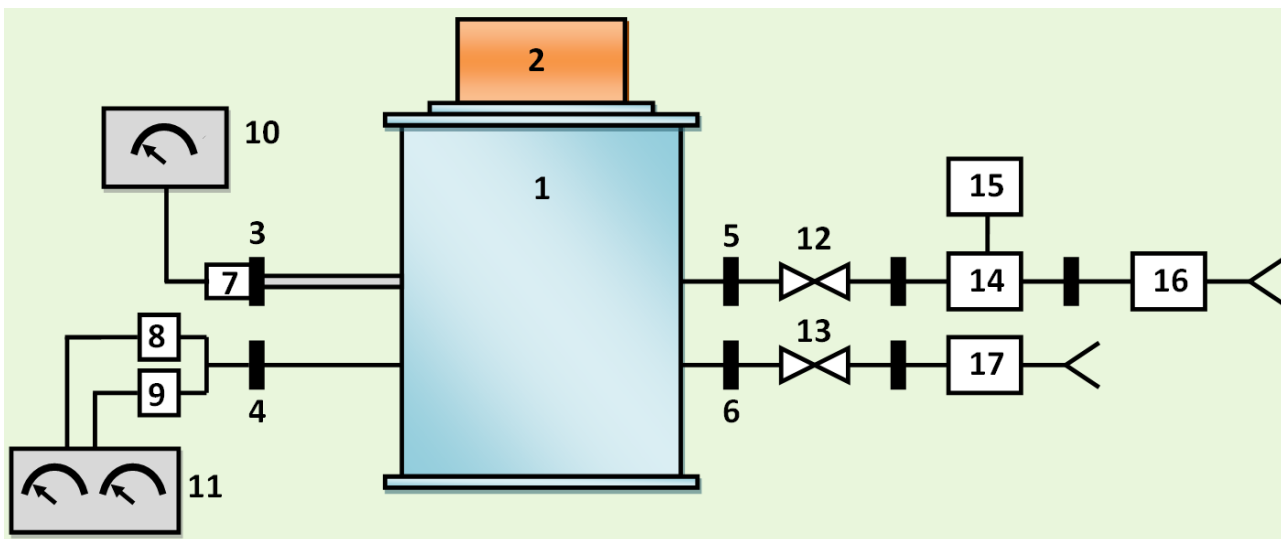
Микрометеоритная бомбардировка

Схема эксперимента:

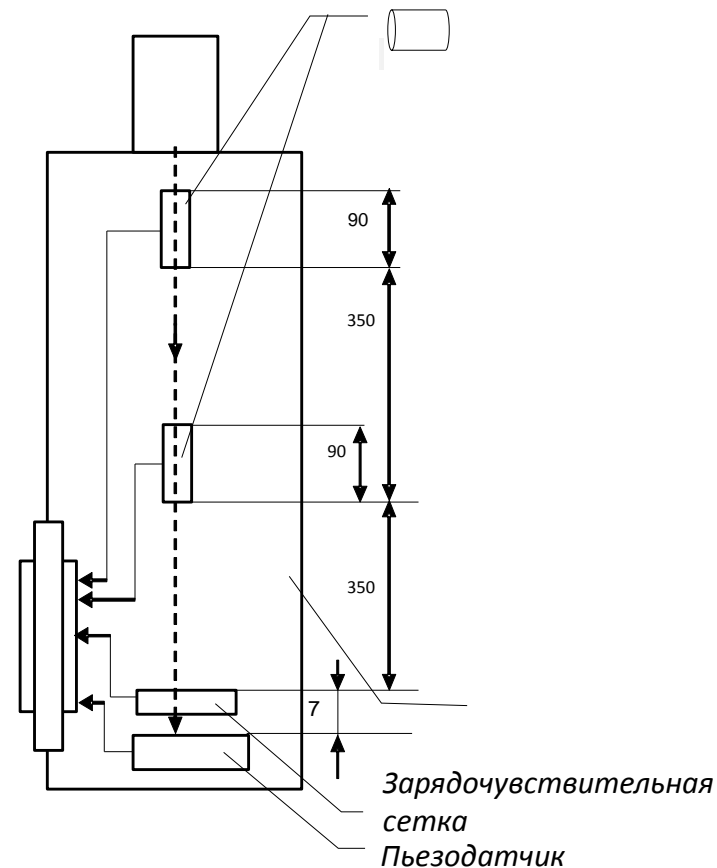
- 1 – Вакуумная камера MSH D400 H600KR;
- 2 – Инжектор заряженных пылевых частиц;
- 3-6 – вакуумная арматура;
- 7, 8 – ПМТ-2 (термопарный датчик давления);
- 9 – ПМИ-2 (ионизационный датчик давления);
- 10 – вакуумметр АВ 3401;
- 11 – вакуумметр ВИТ – 2;
- 12 – впускной клапан;
- 13 – выпускной клапан;
- 14, 15 – турбомолекулярный насос BALZERS THP050 с системой управления TCP121;
- 16 – форвакуумный насос PDV 500 GB;
- 17 - фильтр

Схема инжектора:

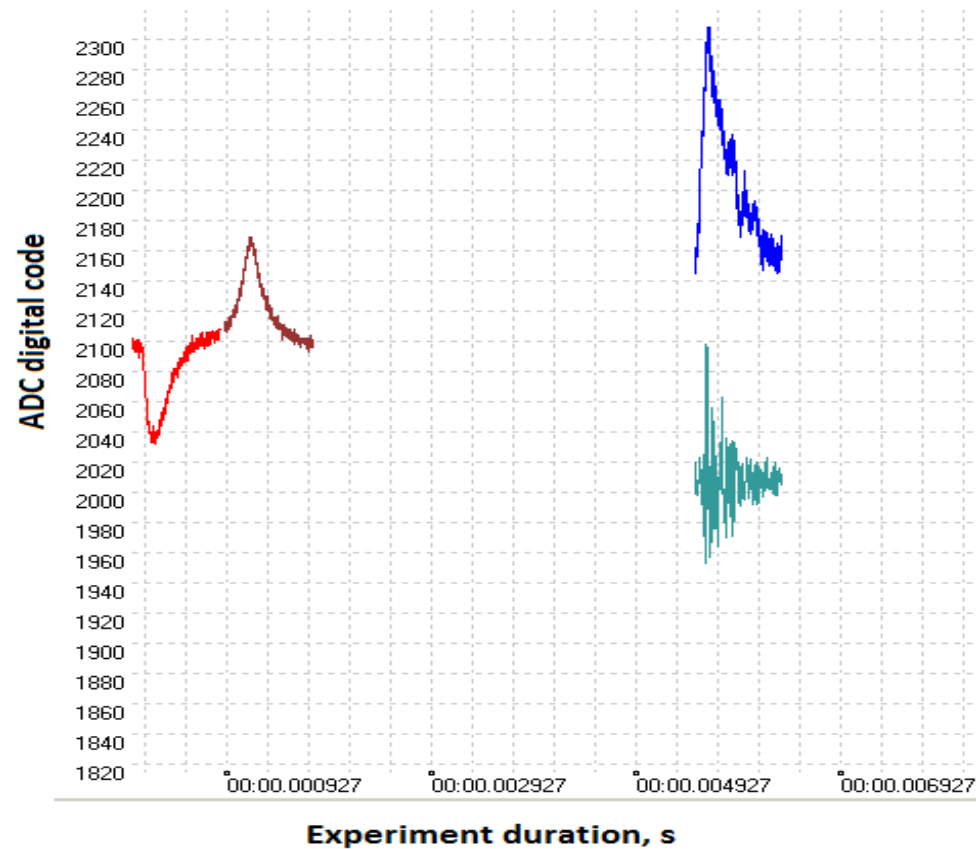
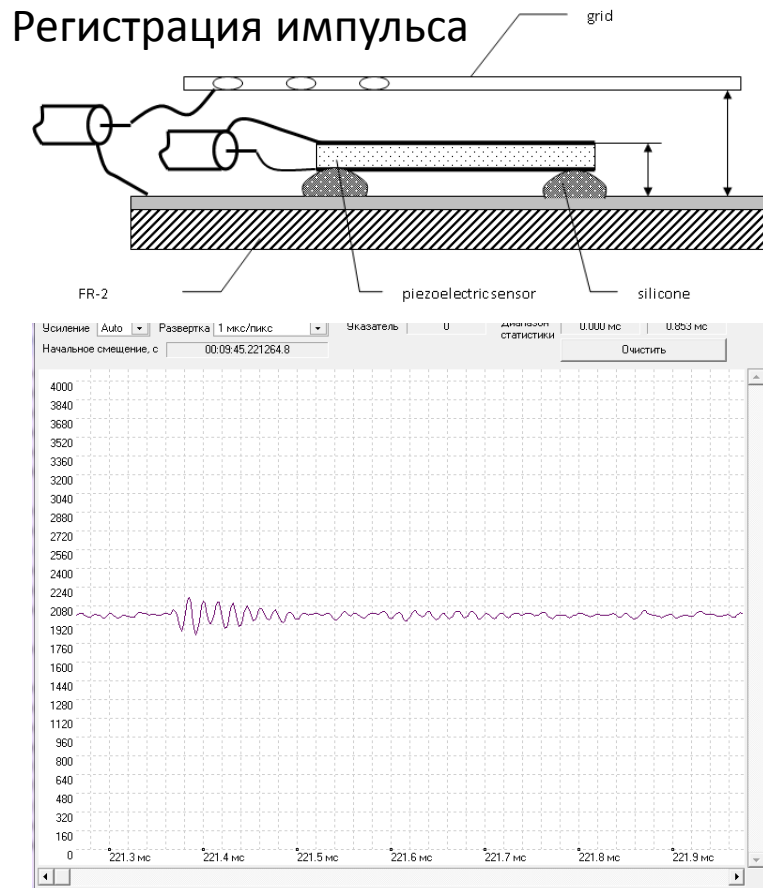
- П – емкость для инжектируемого вещества;
- И – инжекционное отверстие;
- А – внешняя сфера, 0 В;
- В – шар под напряжением



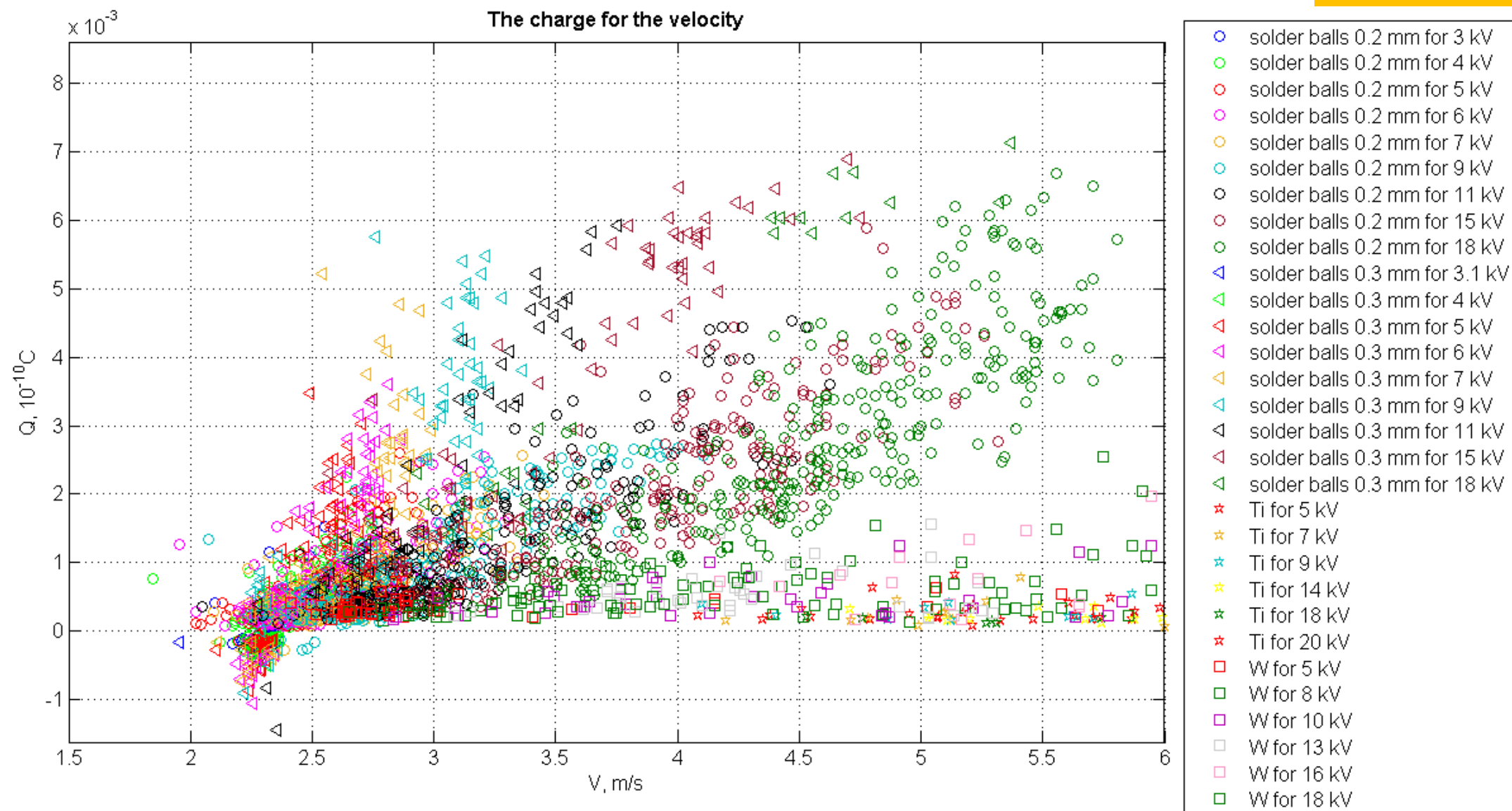
Зарядочувствительный пролетный датчик



Микрометеоритная бомбардировка

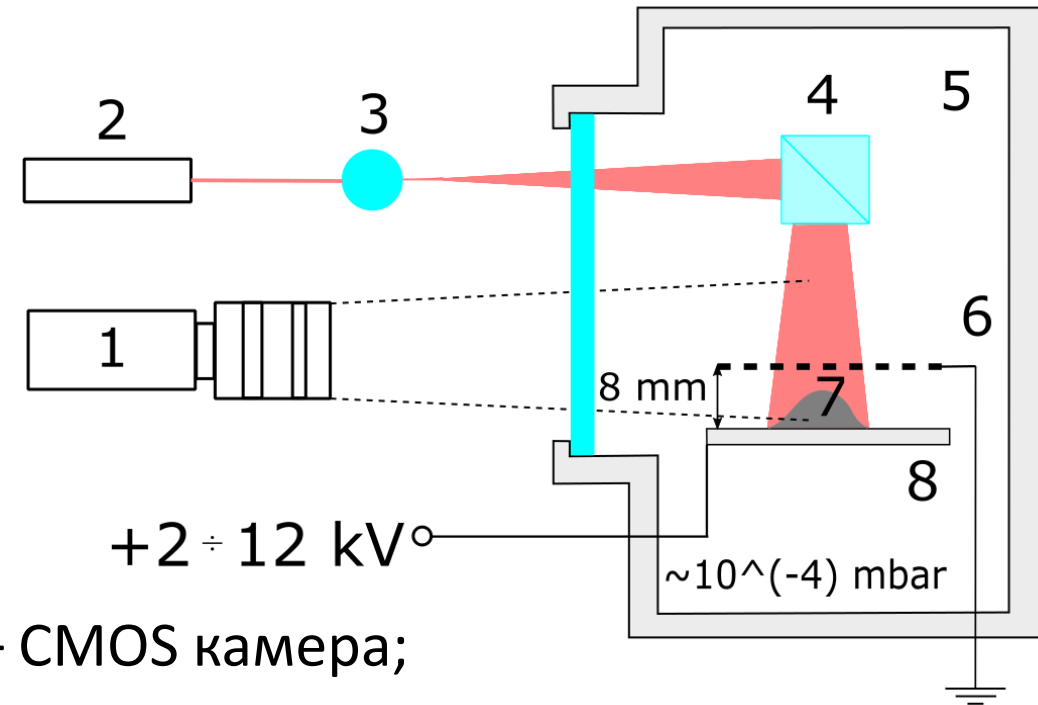
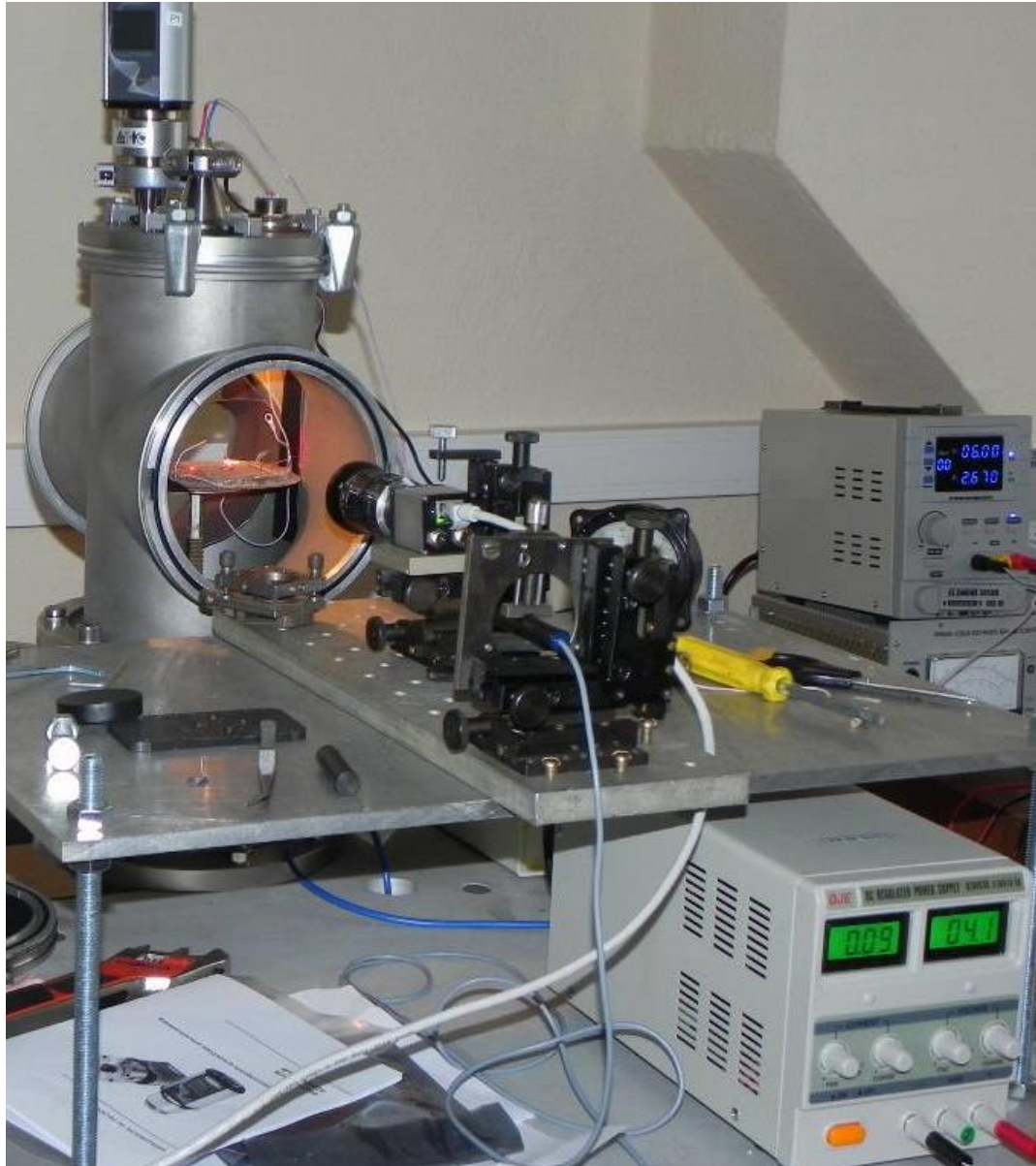


Давление, мм рт. ст.	Масса, кг	Размер частиц, мкм	Проводимость частиц	Скорость частиц, м/с	Импульс, Н·с	Заряд, e ⁻
< 10 ⁻³	>10 ⁻¹²	1 – 400	Проводящие, < 10 ⁻⁶ Ом	2 – 100	10 ⁻¹² – 10 ⁻⁸	>1000

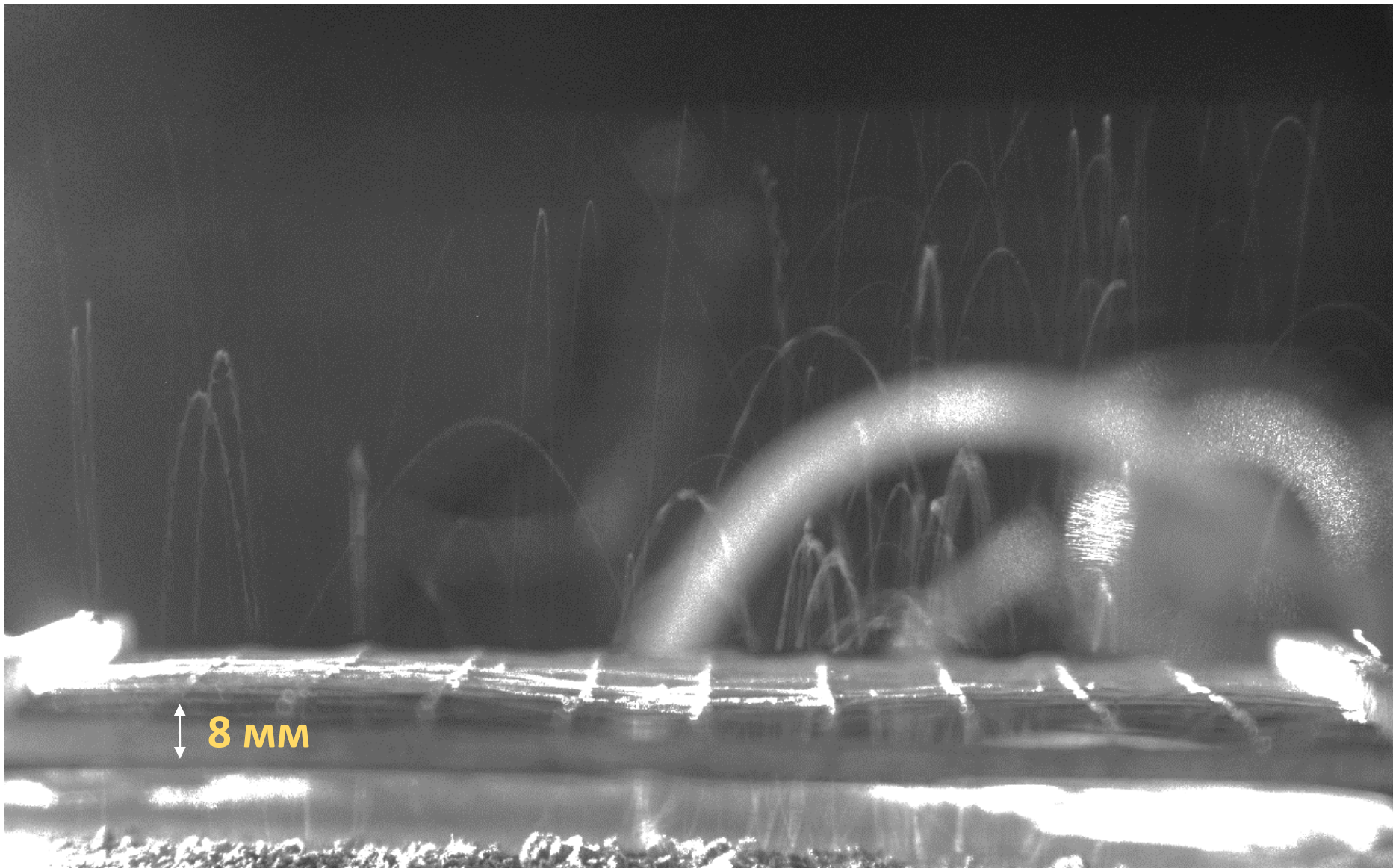


Наблюдаемые значения зарядов и скоростей частиц в потоке, создаваемом инжектором вакуумной установки для различных значений напряжения инжектора

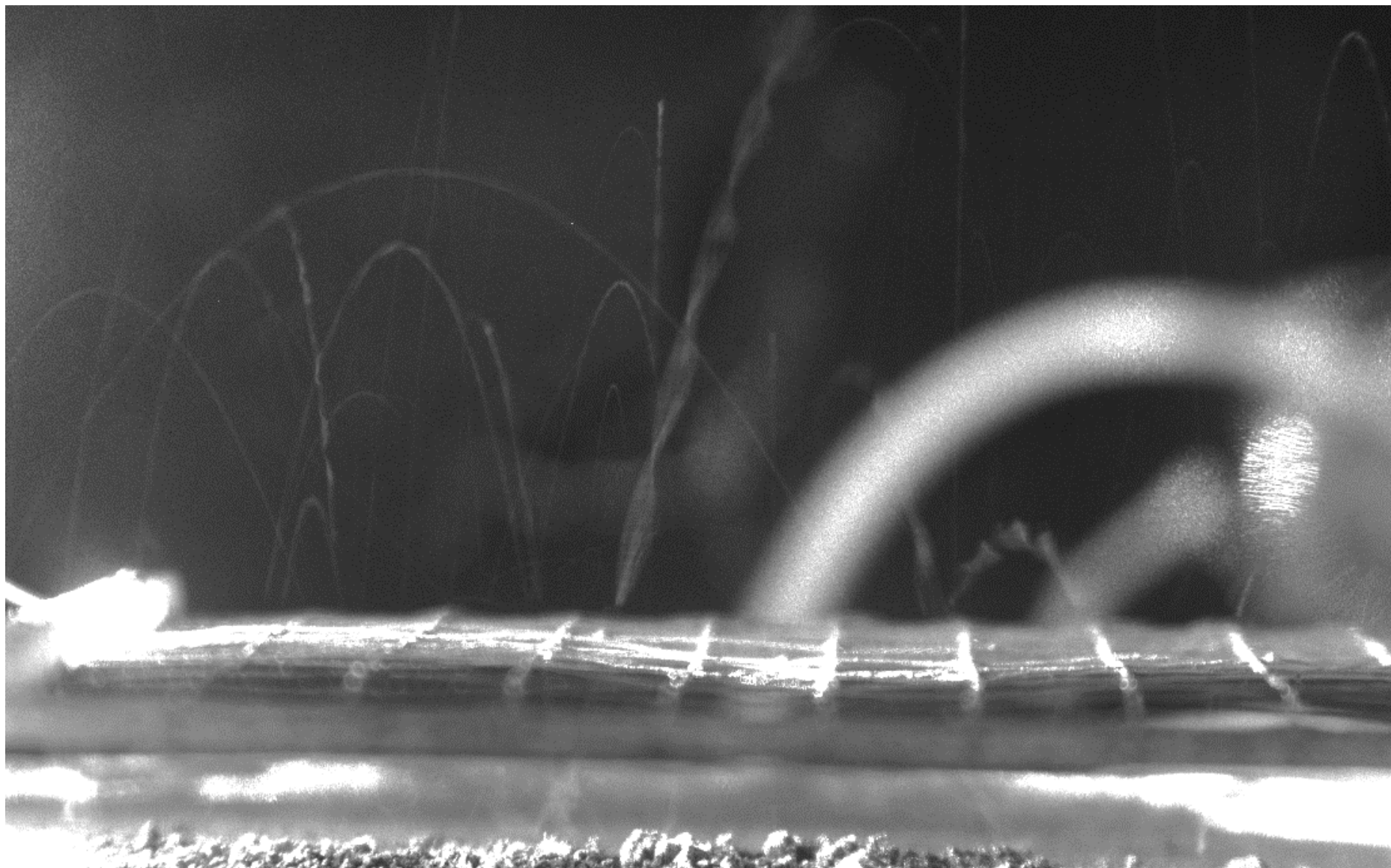
Левитация частиц в электрическом поле



- 1 – CMOS камера;
- 2 – лазер;
- 3,4 – оптическая система для выведения лазерной плоскости и подсветки частиц;
- 5 – вакуумная камера;
- 6 – сетка;
- 7 – частицы пыли (1 мкм, Fe; 40÷100 мкм, SiO₂);
- 8 – проводящая подложка



Изображение взлетевших частиц SiO₂ (40 – 100 мкм), 5 кВ - > 625 кВ/м



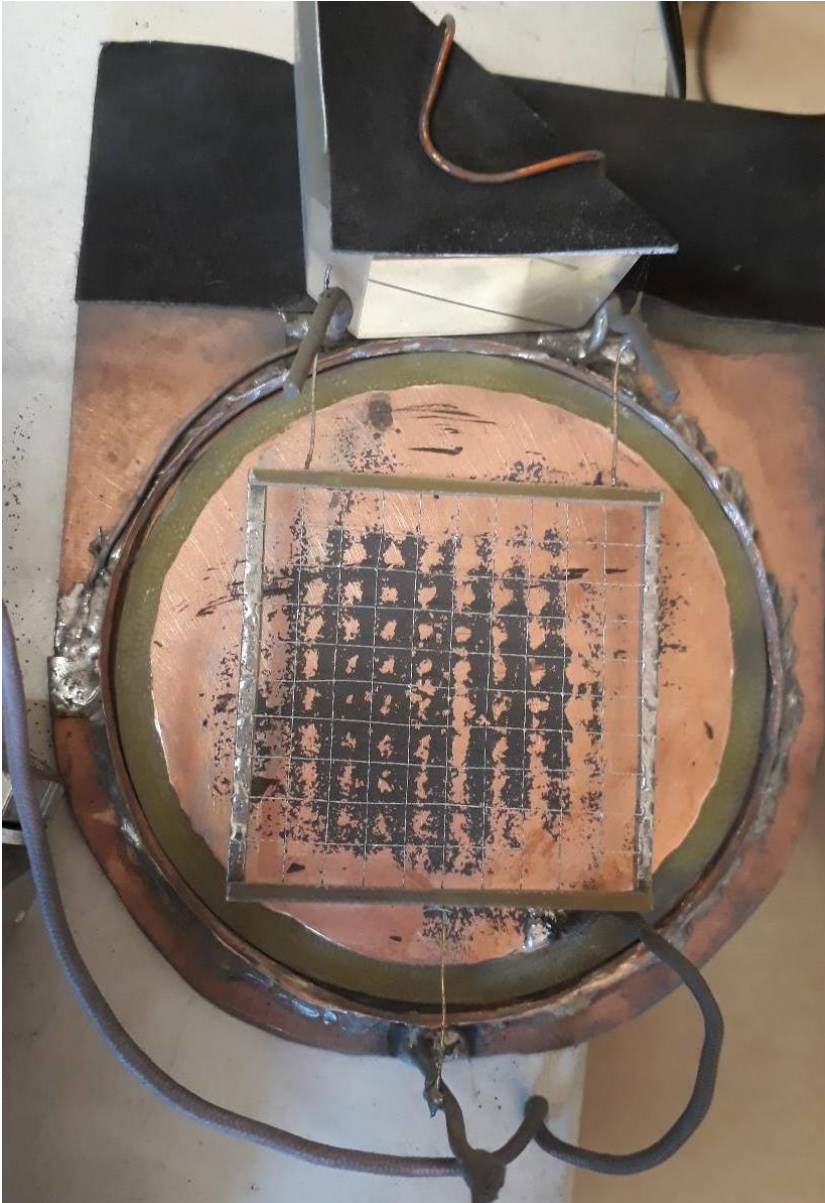
6 кВ - > 750 кВ/м

Распределение материала в течение эксперимента (1 мкм, Fe), ~1 час

до

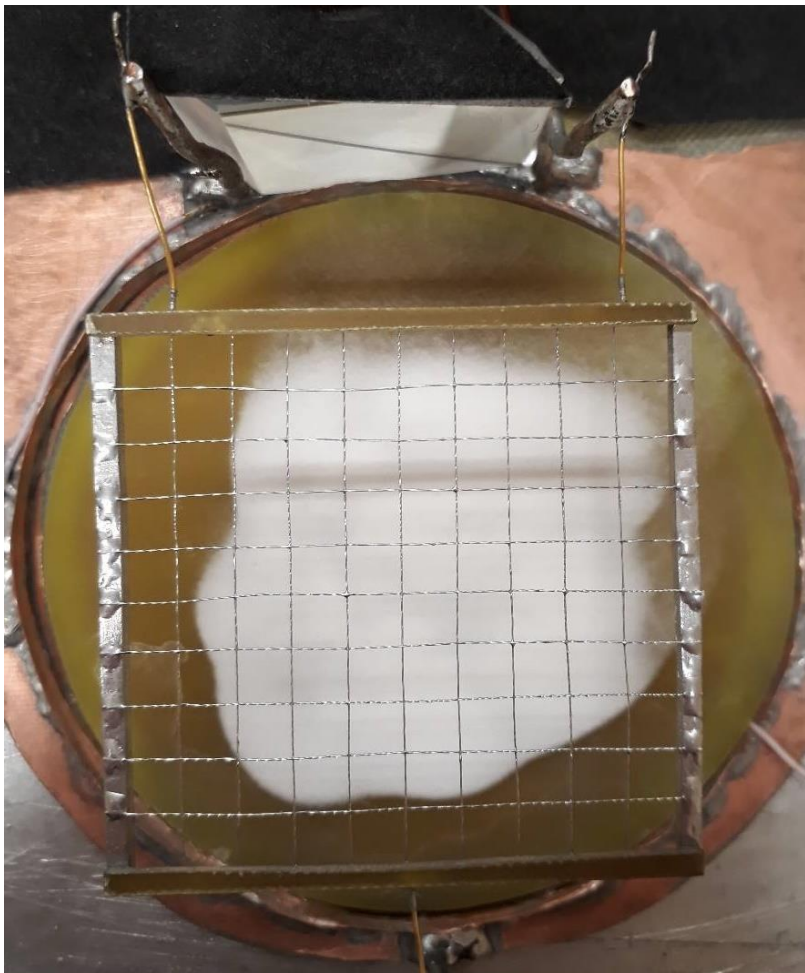


после

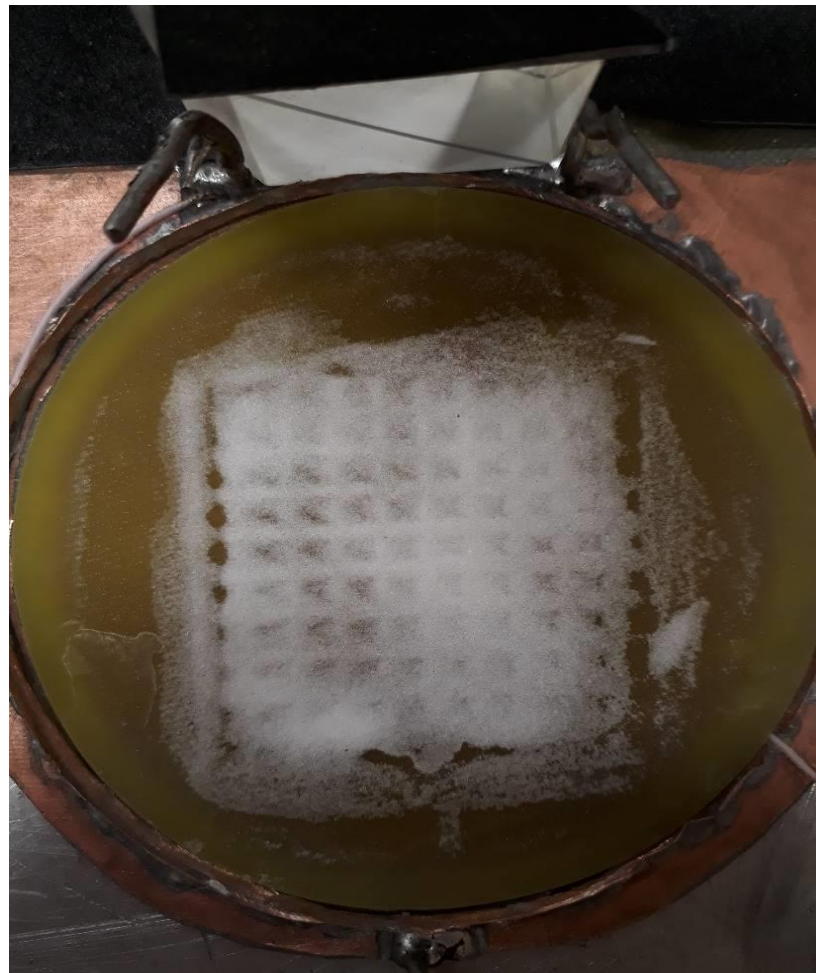


Распределение частиц пыли на подложке до и после левитации, $40\div 100\ \mu\text{m}$, SiO_2

до

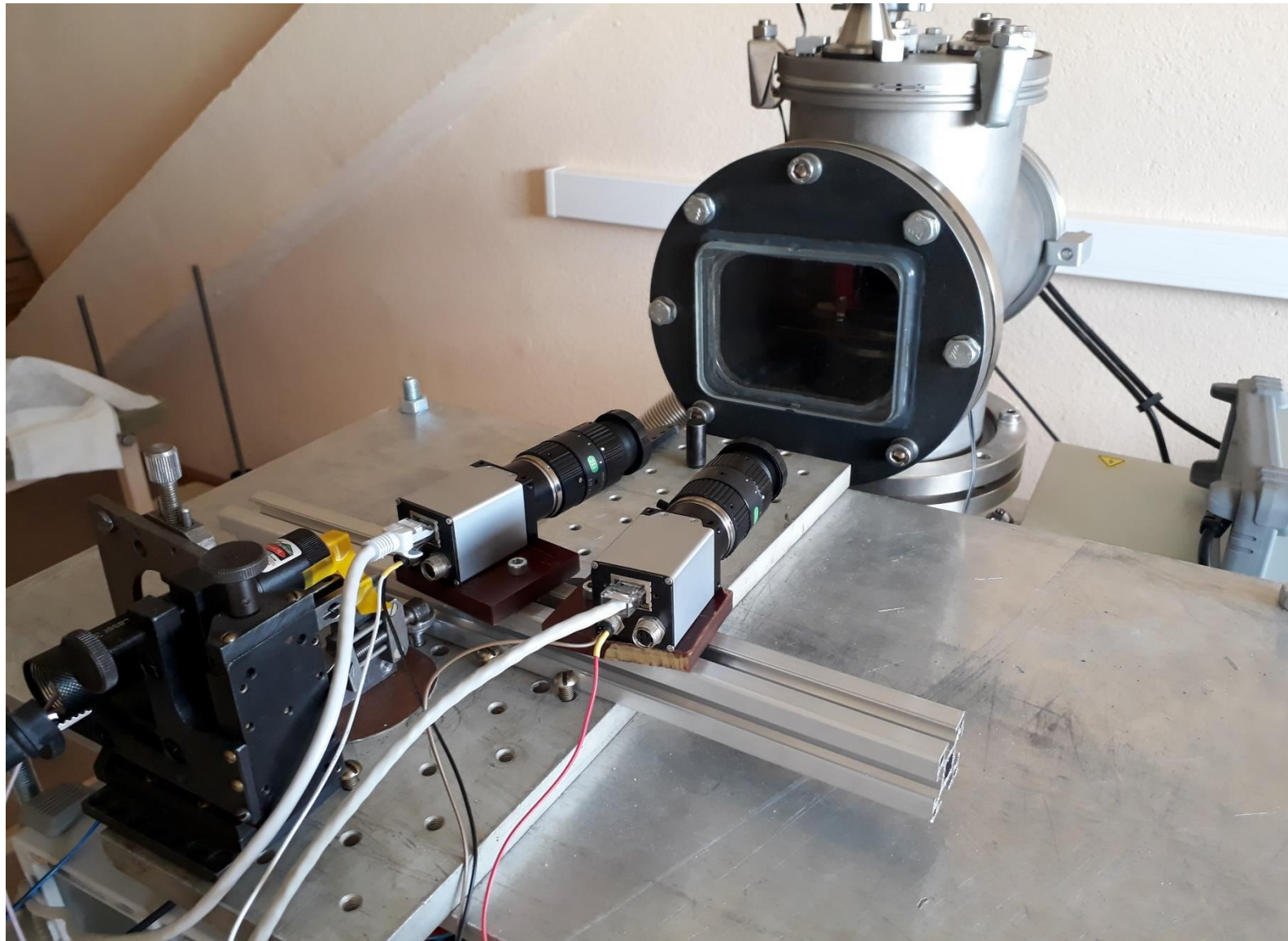


после



$40\div 100\ \mu\text{m}$, SiO_2

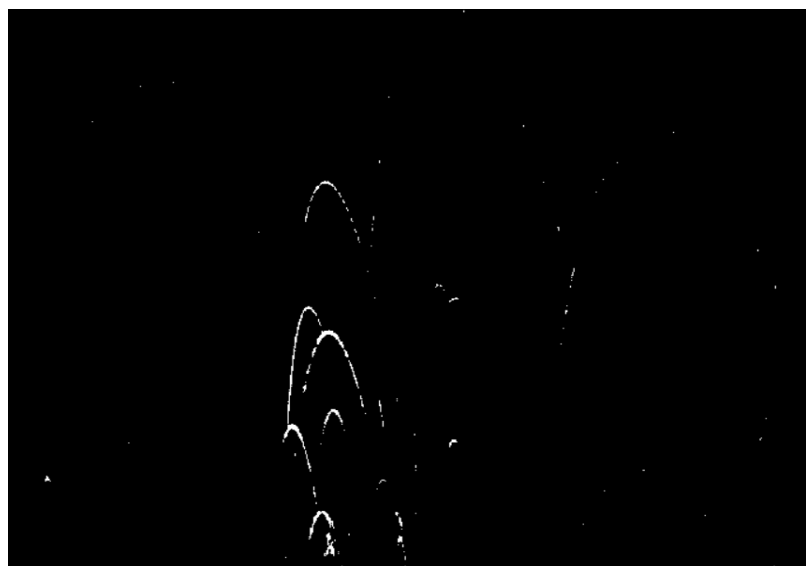
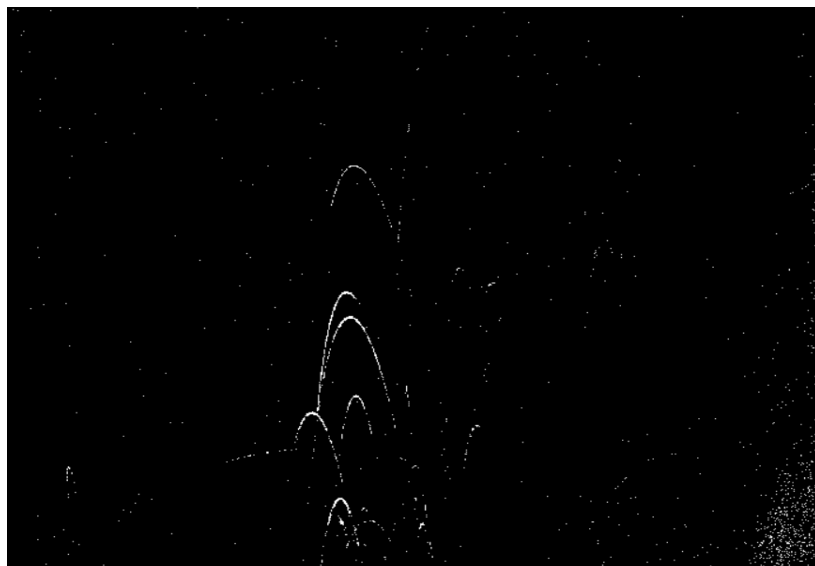
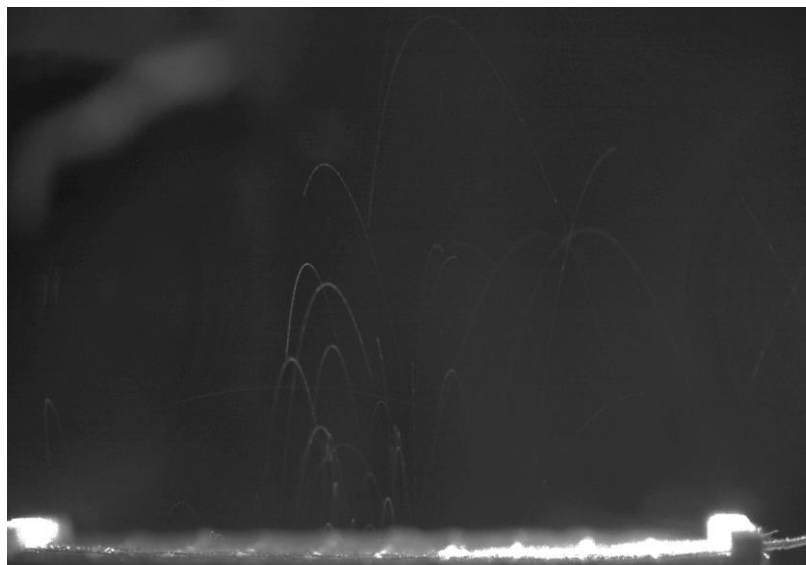
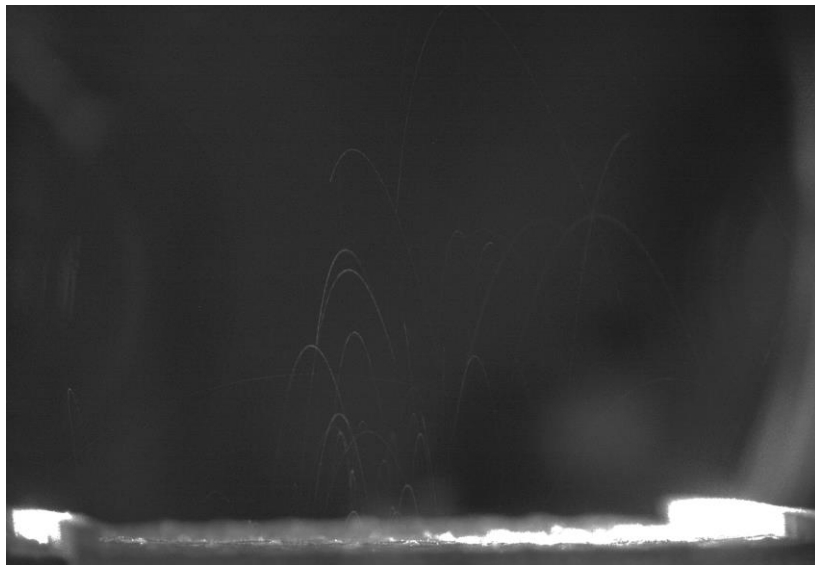
Стереосистема для определения траектории полета частиц



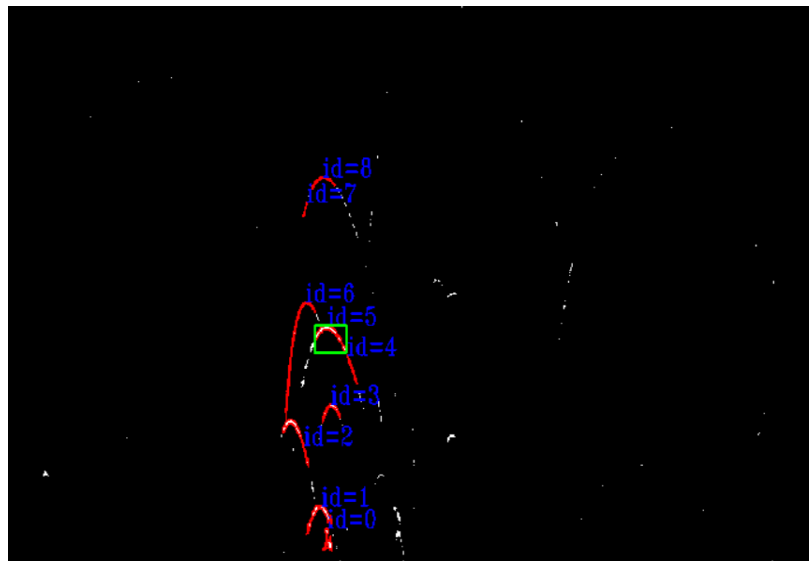
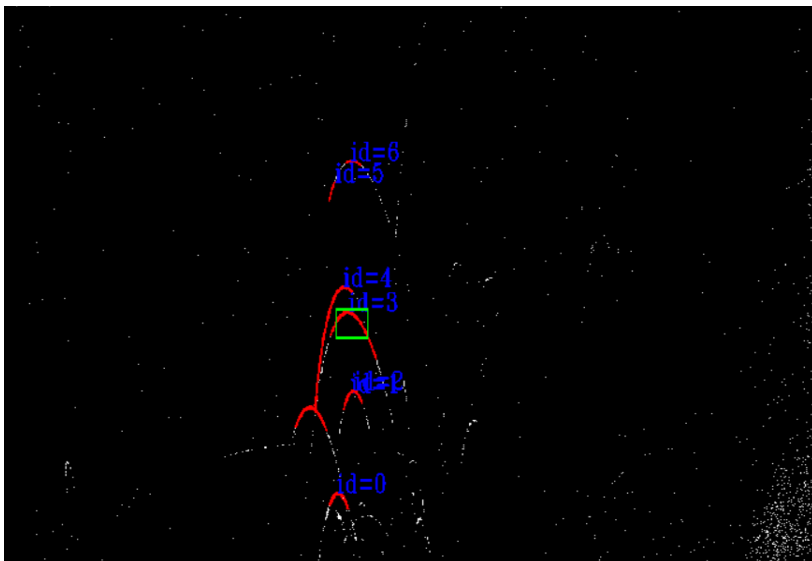
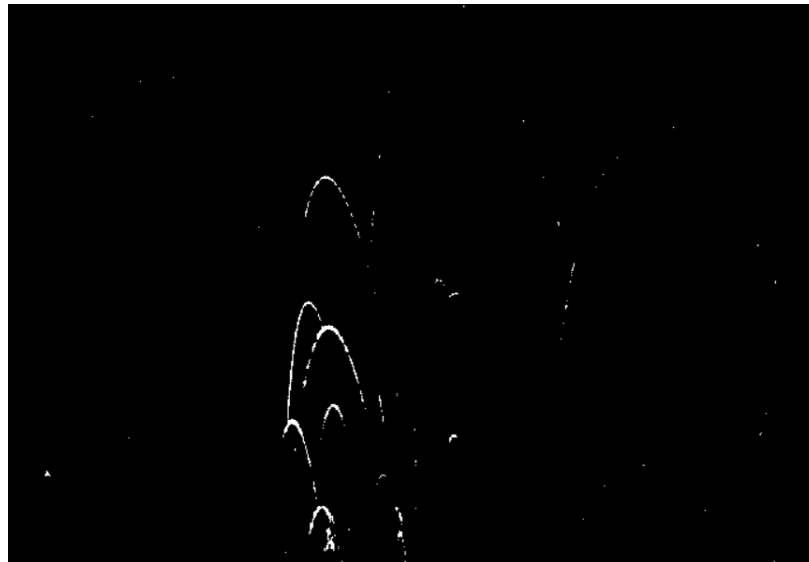
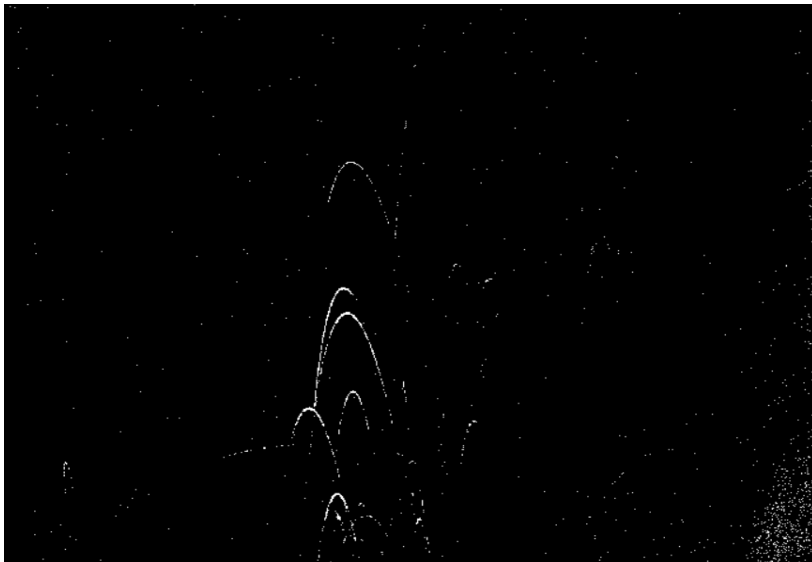
Обработка

- Удаление шума с помощью вычитания эталонного изображения – пороговая фильтрация
- Бинаризация трека – выделение контуров
- Определение связанных треком точек и дальнейшая фильтрация по положению и форме – поиск контуров
- Для каждого результата фильтрации находим наилучшее совпадение со второго снимка по критерию максимального нормированного коэффициента корреляции
- Вычисление двумерных координат точки
- Вычисление третьей координаты

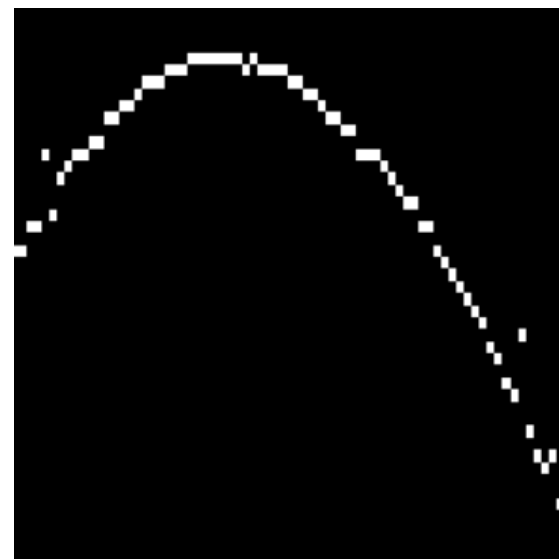
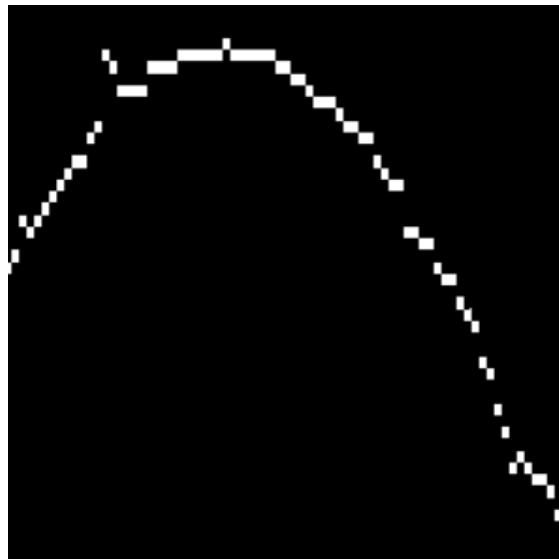
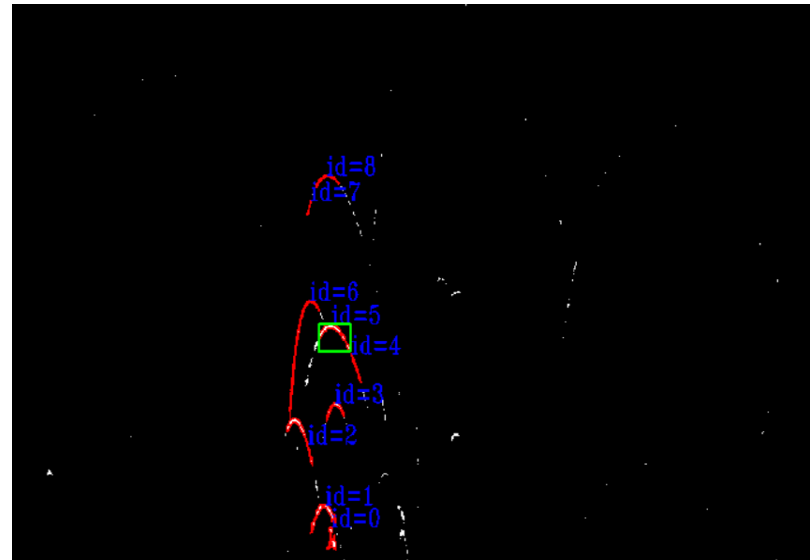
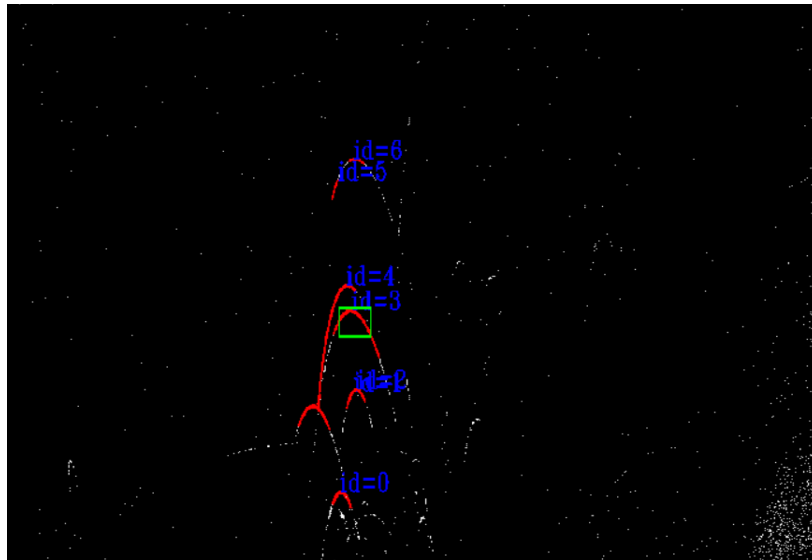
Этапы обработки: пороговая фильтрация



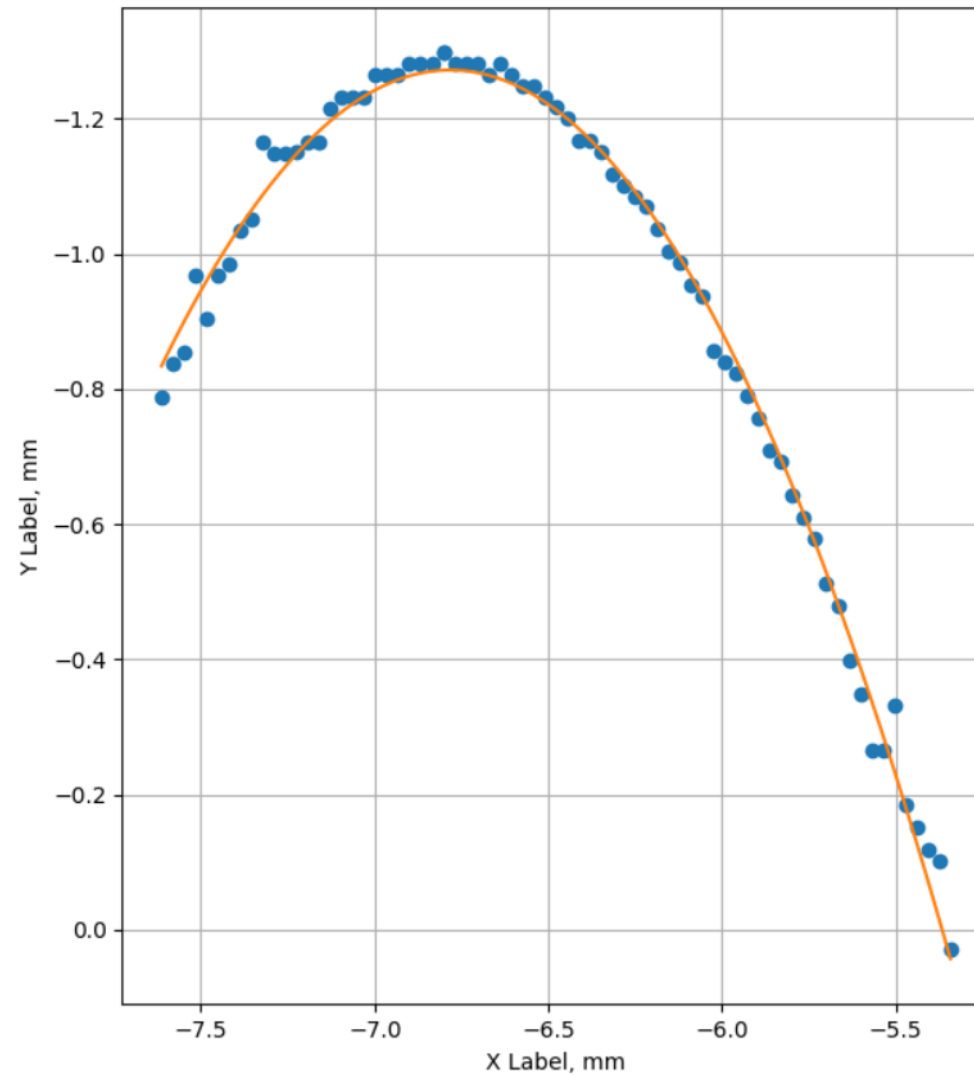
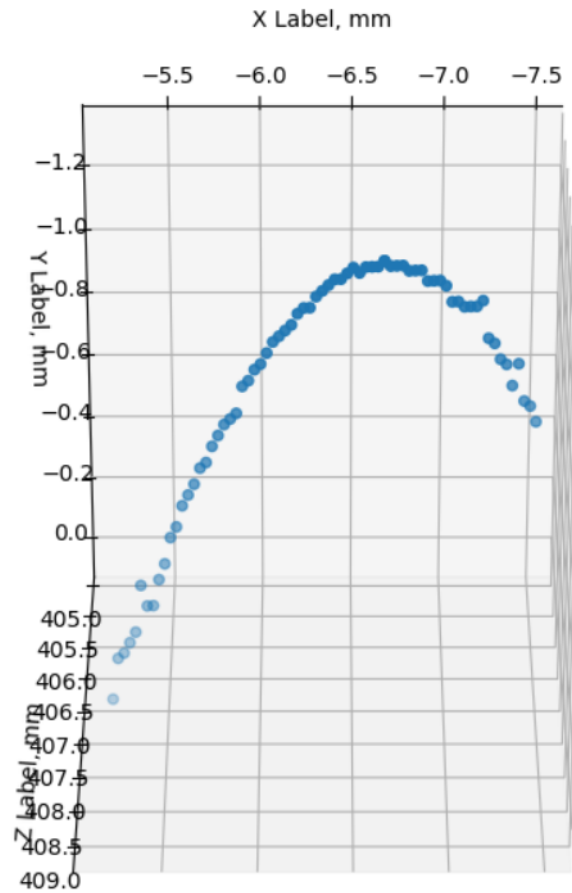
Этапы обработки: выделение контуров

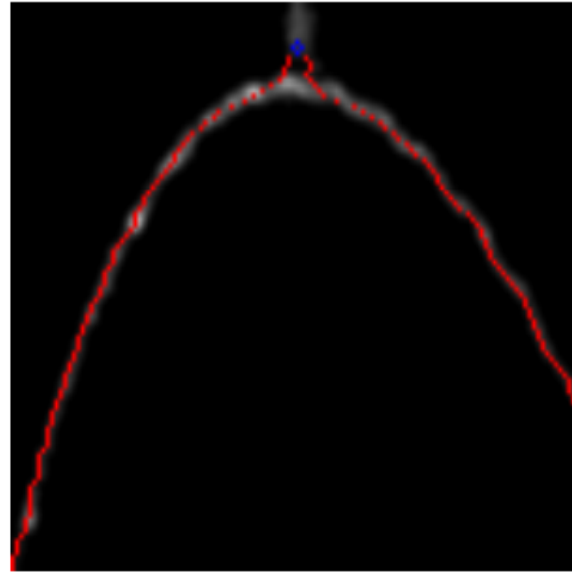
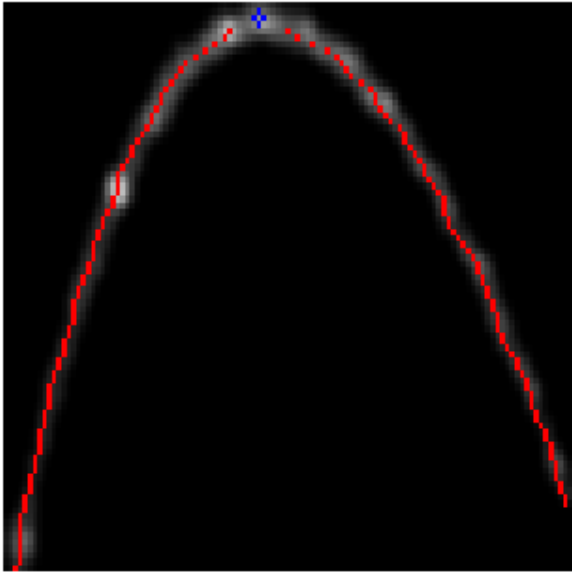


Этапы обработки: поиск соответствующих контуров



Этапы обработки: восстановление трехмерных координат





Обработка:

Максимум корреляционной функции
0.475

Рассчитанное смещение (265, 0) пкс

Длина трека 10.3548 мм

Параметры параболы $a=0.6867$ $b=-$
 22.8277 $c=187.5943$ невязка 1.79774

Скорость V_y 0.6123 м/с

Скорость V_x 0.0845 м/с

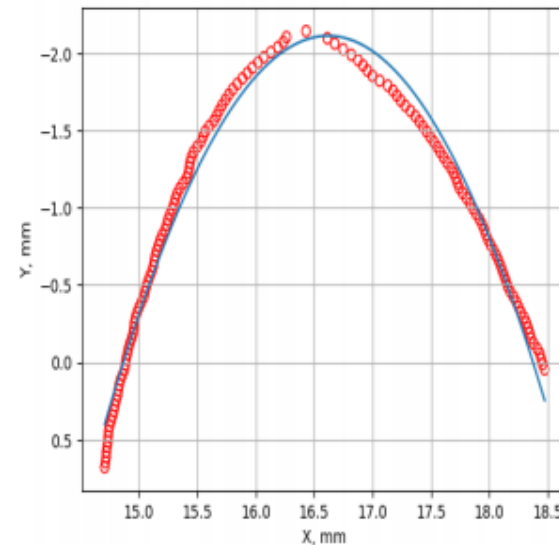
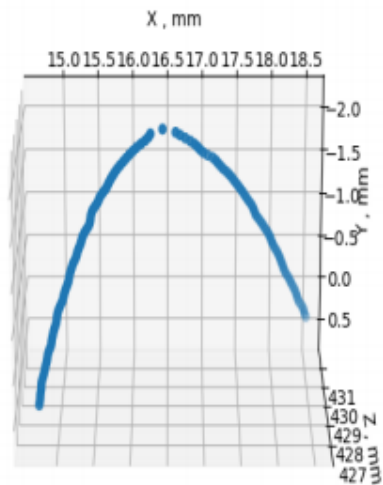
Скорость V 0.6181 м/с

Угол взлета 82.14 градусов

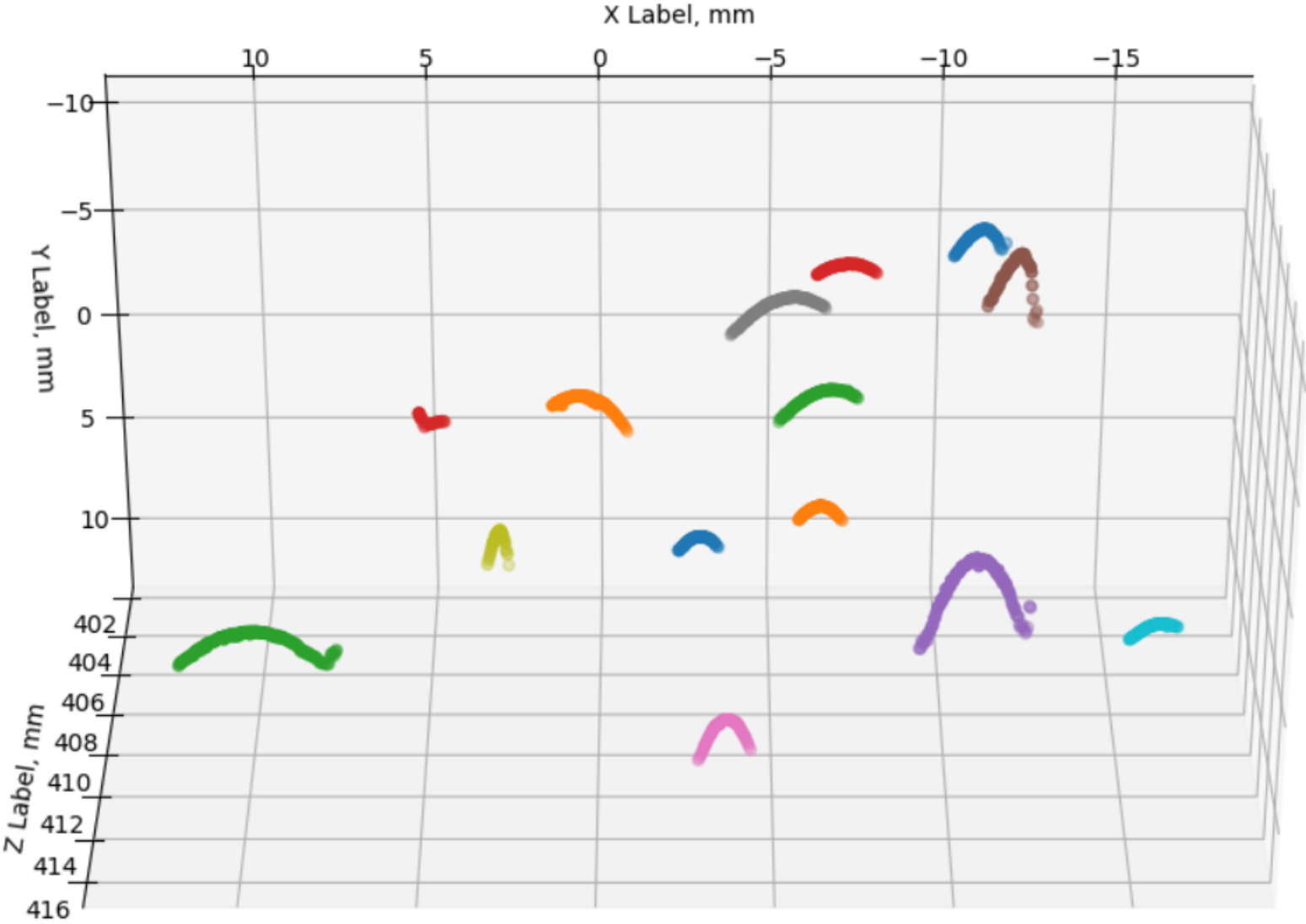
Радиус частицы $5.000000E-05$ м

Масса частицы $2.8798E-10$ кг

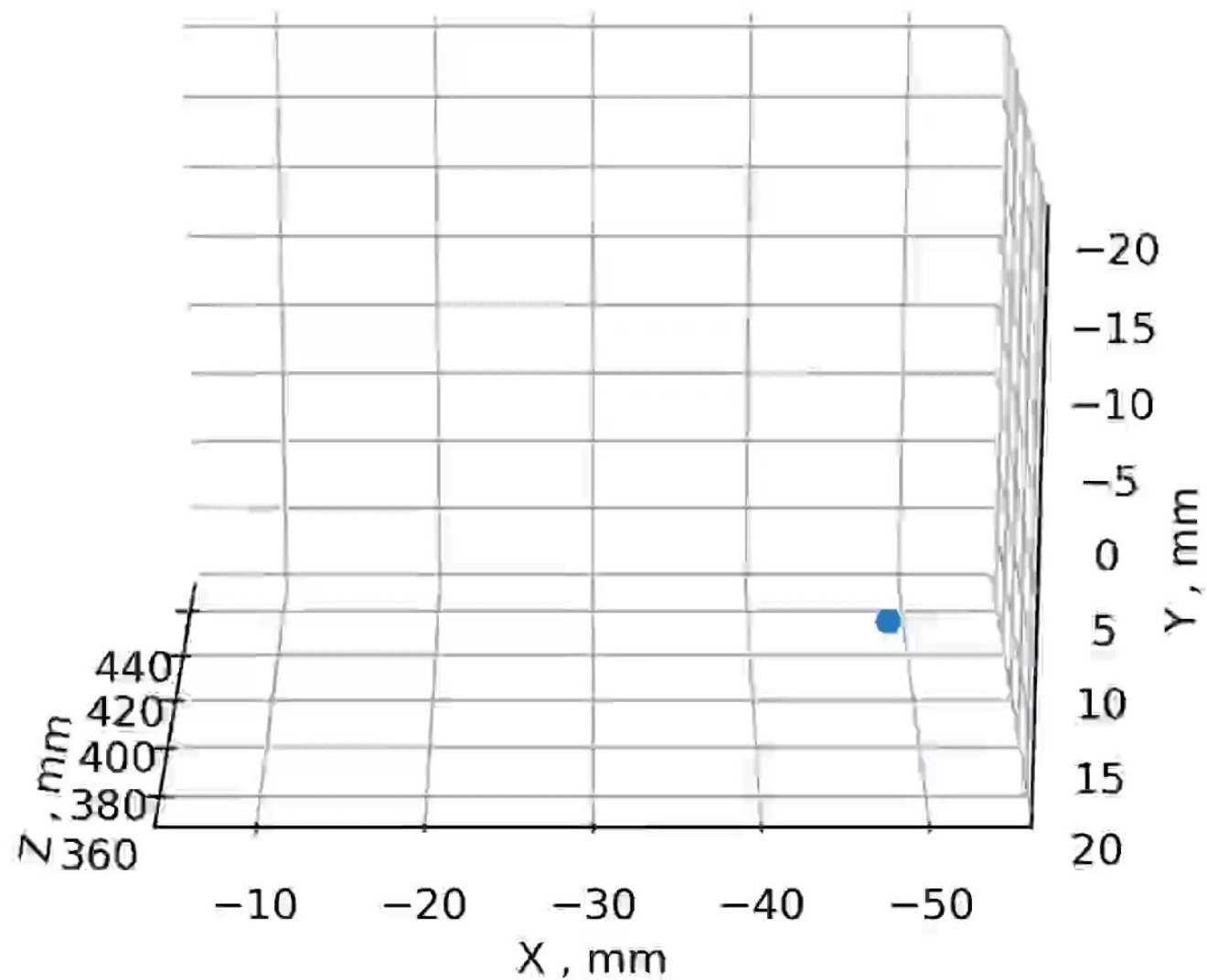
Заряд частицы $2.7757E-14$ Кл



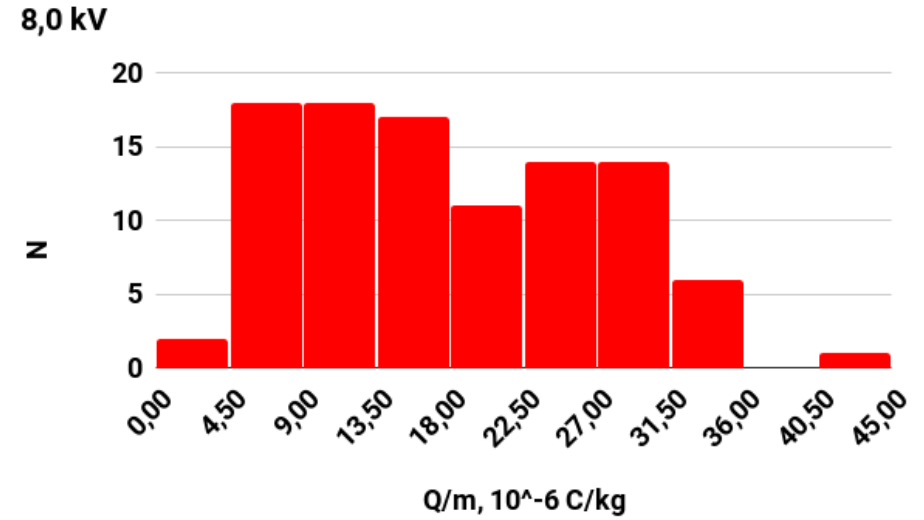
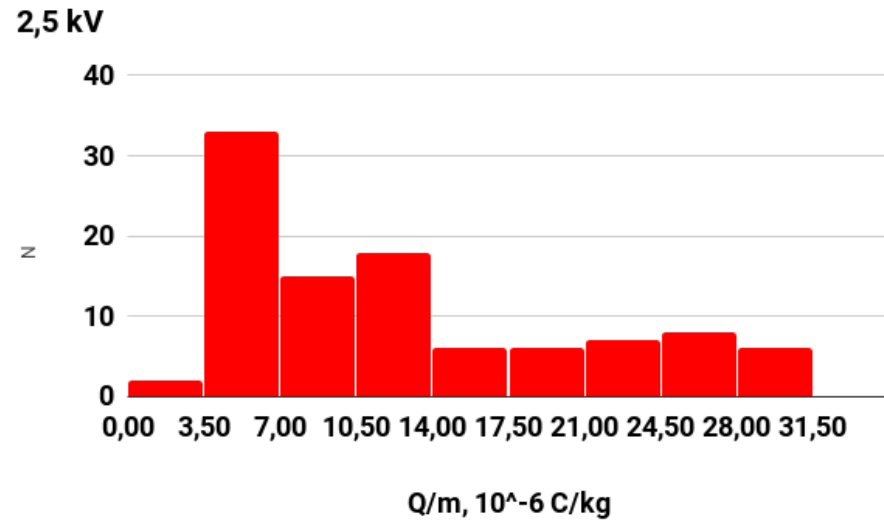
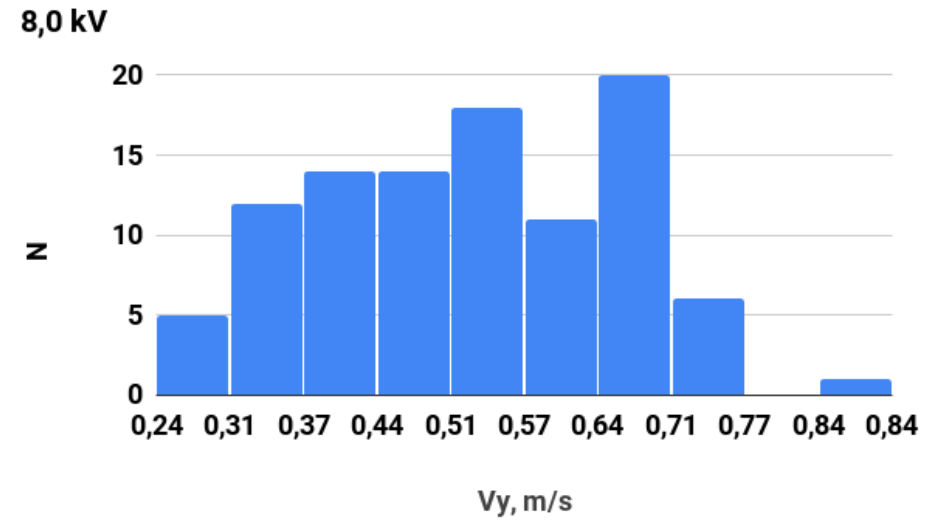
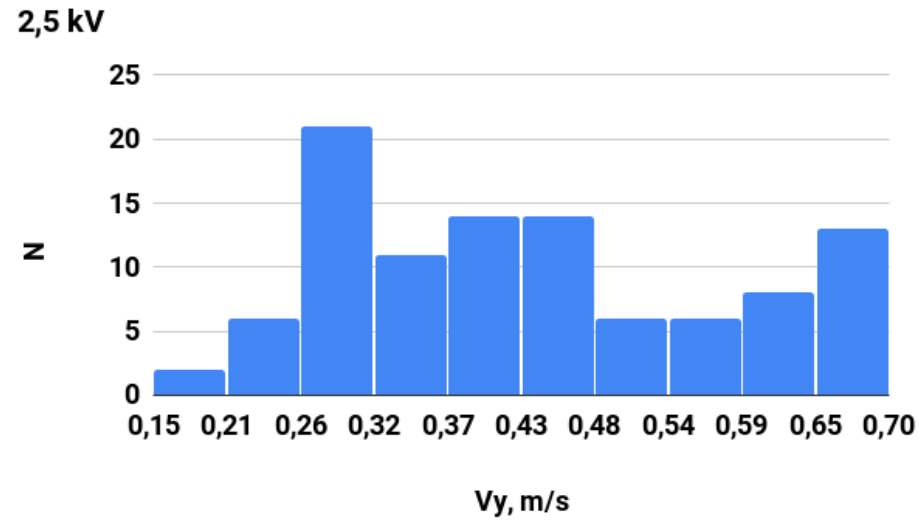
Этапы обработки: восстановление треков полета частиц



**Анимация полёта частиц для эксперимента:
2,5 кВ, 50 мкм SiO₂**

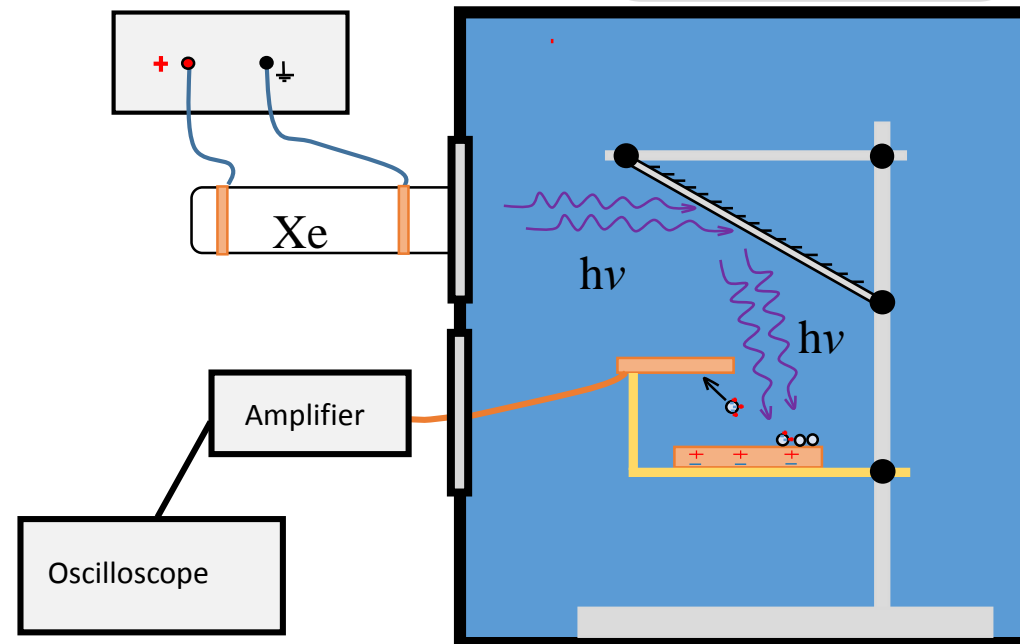
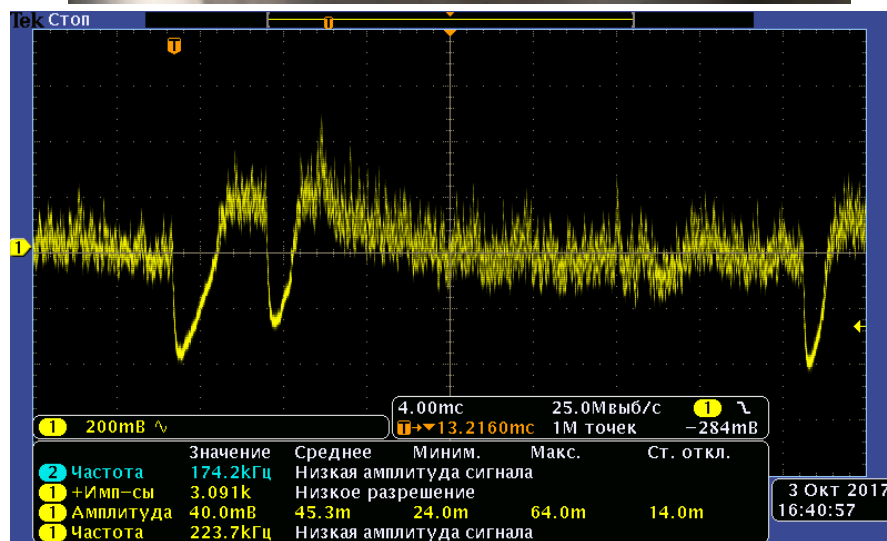
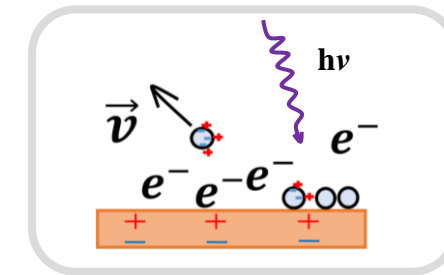
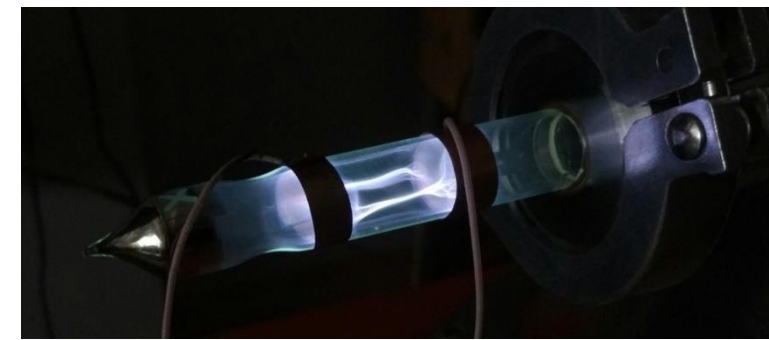


Распределение зарядов и скоростей частиц (40÷100 мкм, SiO₂)



Воздействие UV

Идея – воссоздать в лабораторных условиях взаимодействие частиц с УФ-излучением. Предполагается, что частицы будут приобретать заряд и преодолевать таким образом силы гравитации и адгезии.



Результаты

- Таким образом мы частично воссоздаем в лабораторных условиях эффекты, присущие безатмосферным телам:
 - Микрометеоритную бомбардировку
 - Облучение УФ
 - Разгон и левитация частиц в электрическом поле
 - Взаимодействие с потоком электронов
- Задачи:
 - Совмещать воздействия
 - Оценить воздействия количественно, насколько релевантно воздействие в лабораторных условиях с условиями вблизи поверхностей безатмосферных тел

Спасибо!