



# 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.*

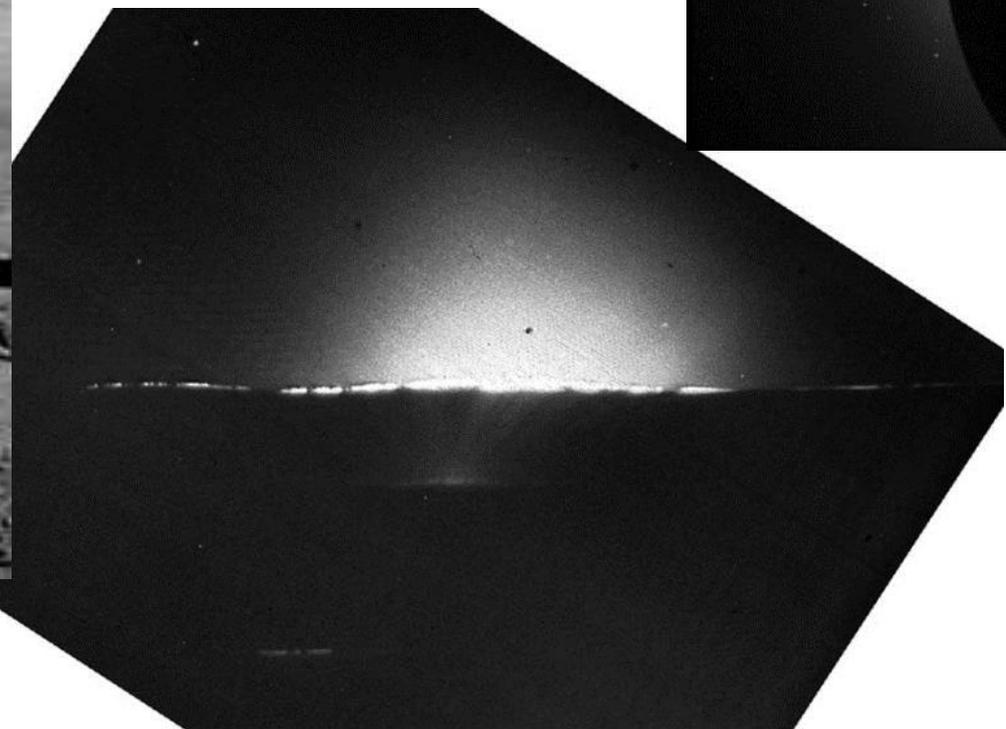
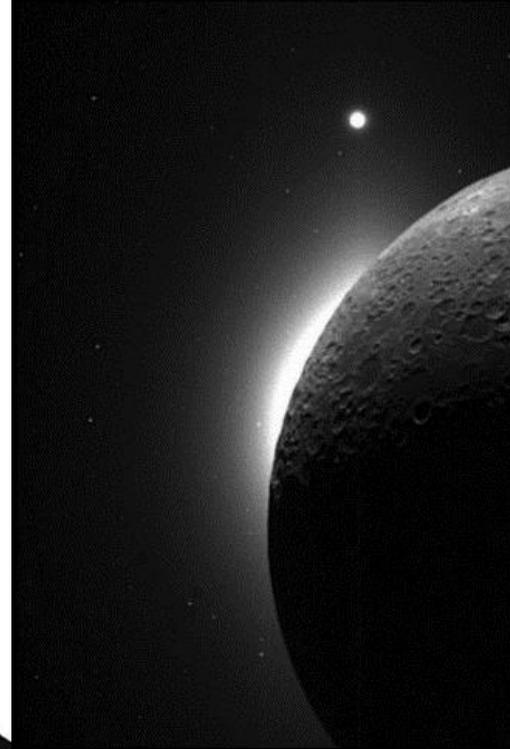
*Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия; [kia@iki.rssi.ru](mailto:kia@iki.rssi.ru)*

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

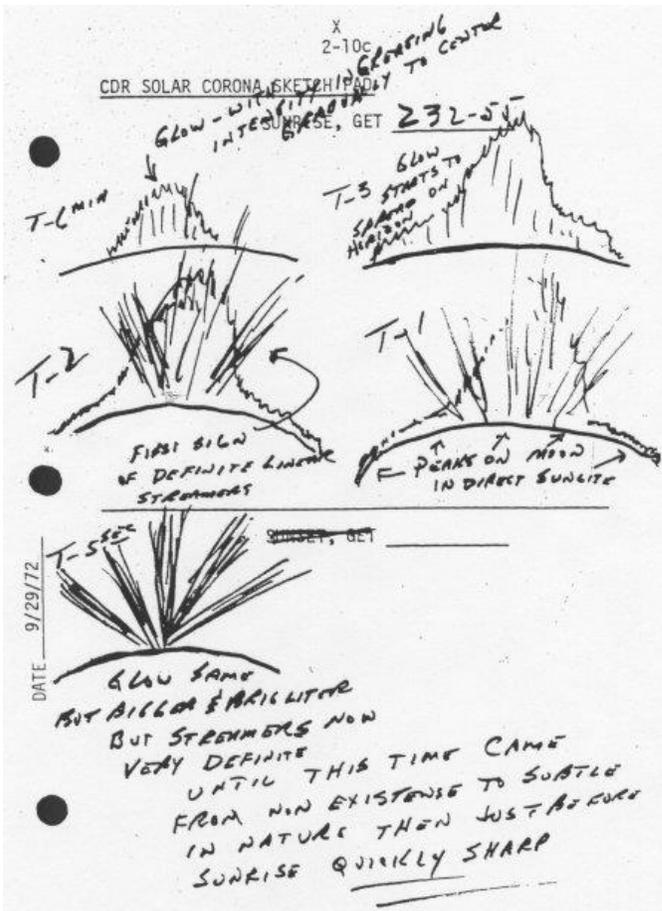
Все безатмосферные небесные тела покрыты слоем пыли, имеющей свойство взлетать и левитировать вблизи поверхности.

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

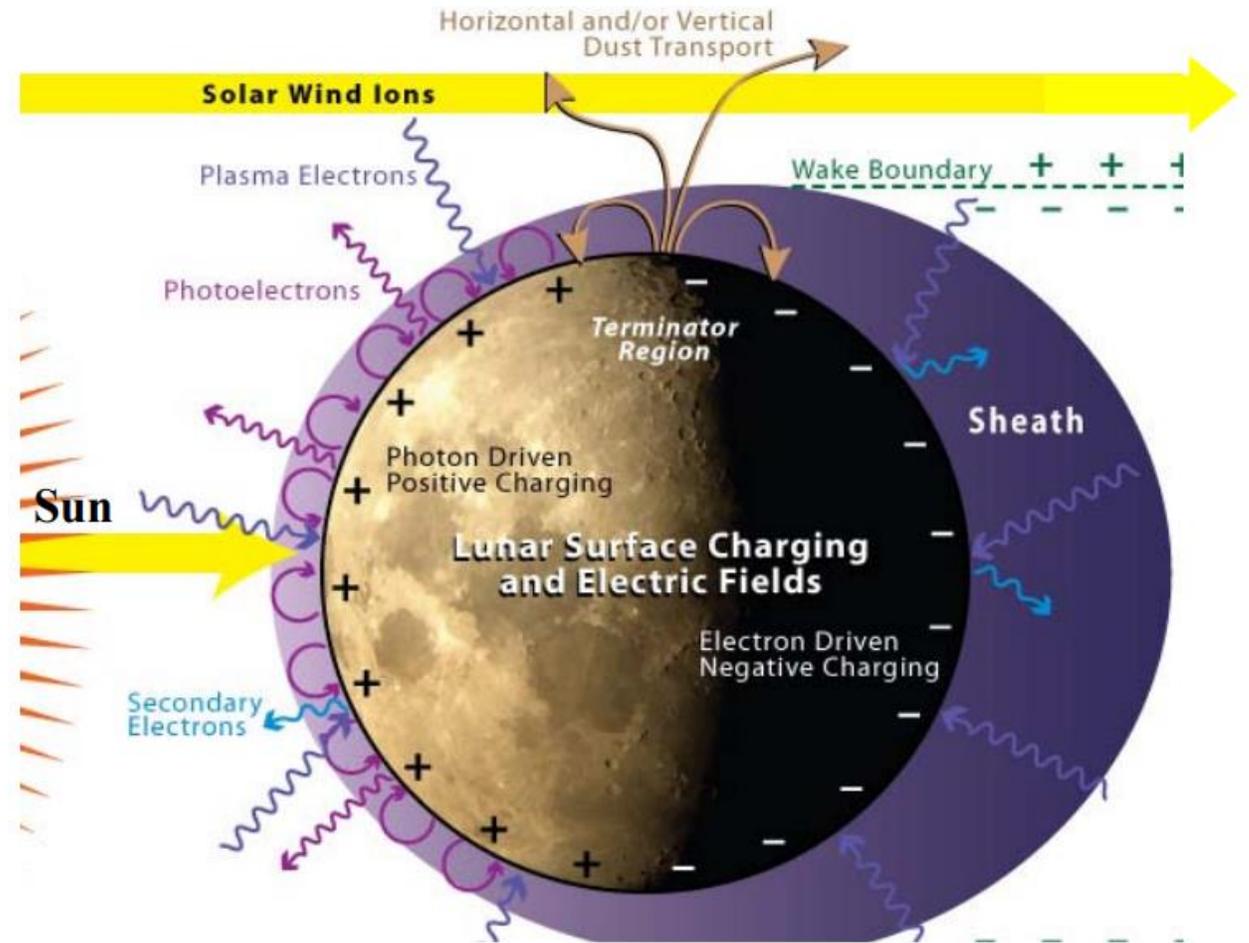


Схема лунной плазменно-пылевой среды [Halekas et al., 2015]

# 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

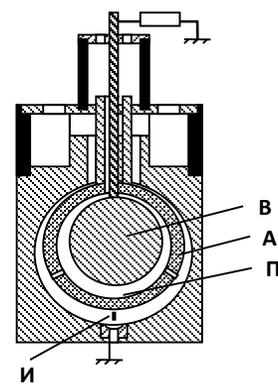
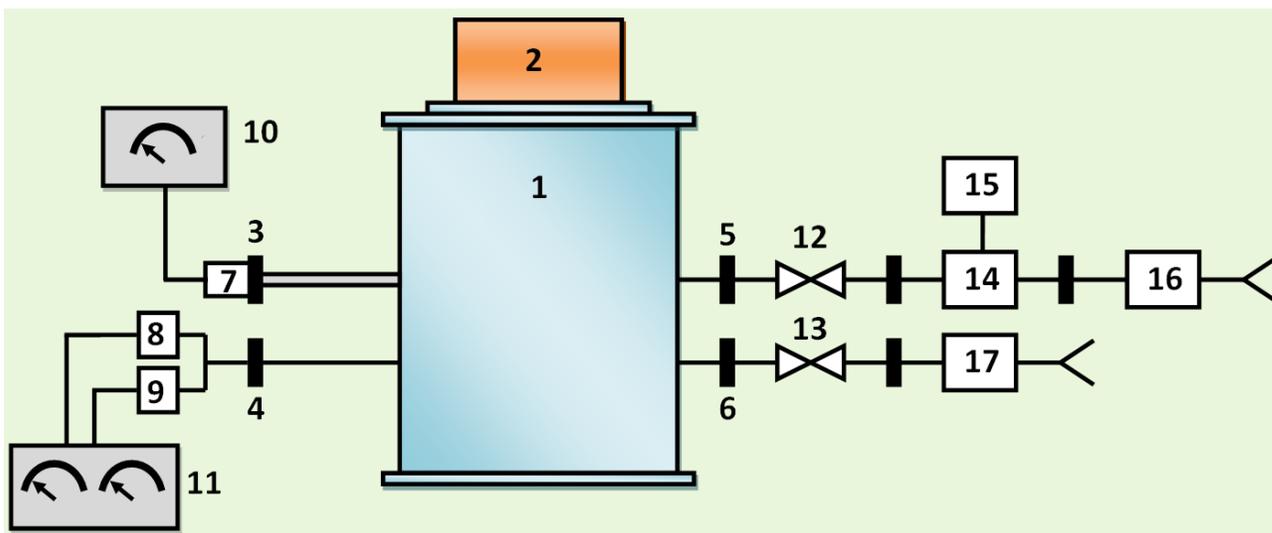
# Микрометеоритная бомбардировка

## Схема эксперимента:

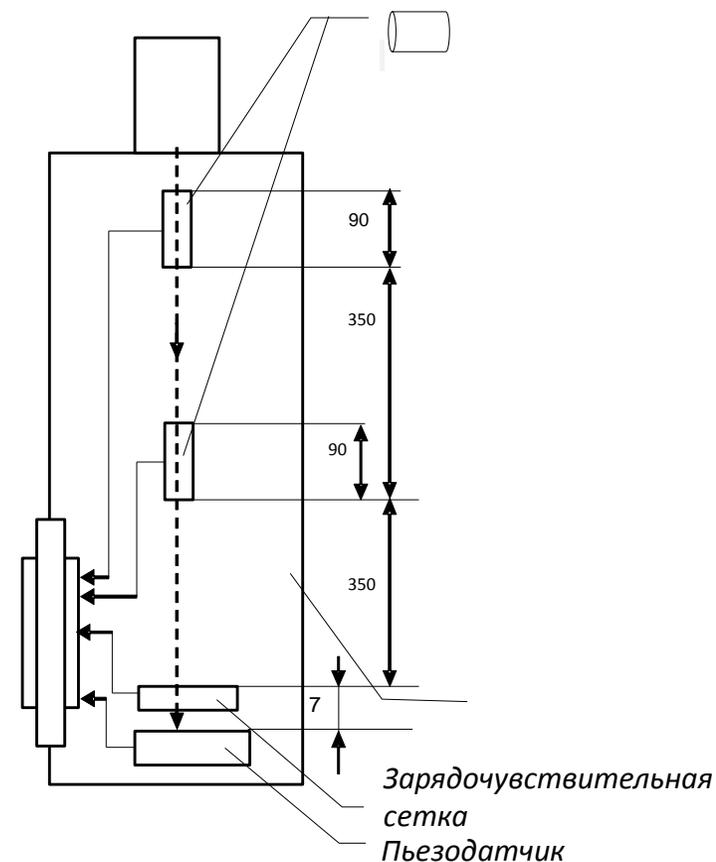
- 1 – Вакуумная камера MSH D400 H600KR;
- 2 – Инжектор заряженных пылевых частиц;
- 3-6 – вакуумная арматура;
- 7, 8 – ПМТ-2 (термопарный датчик давления);
- 9 – ПМИ-2 (ионизационный датчик давления);
- 10 – вакуумметр АВ 3401;
- 11 – вакуумметр ВИТ – 2;
- 12 – впускной клапан;
- 13 – выпускной клапан;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

## Схема инжектора:

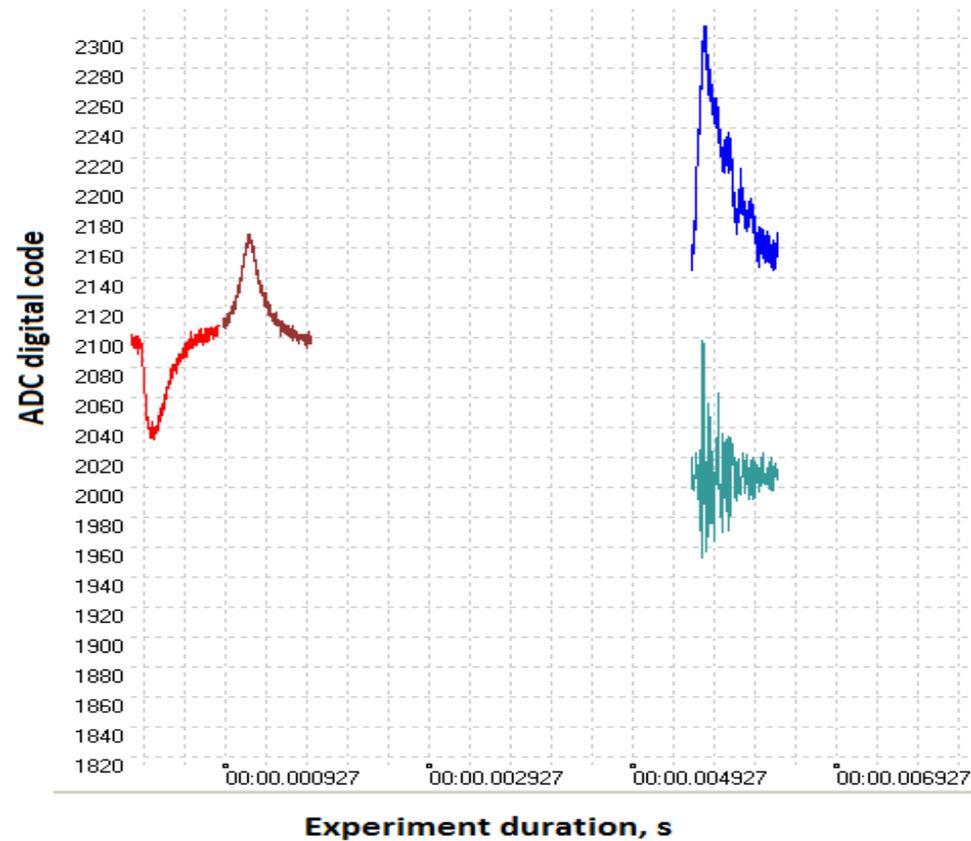
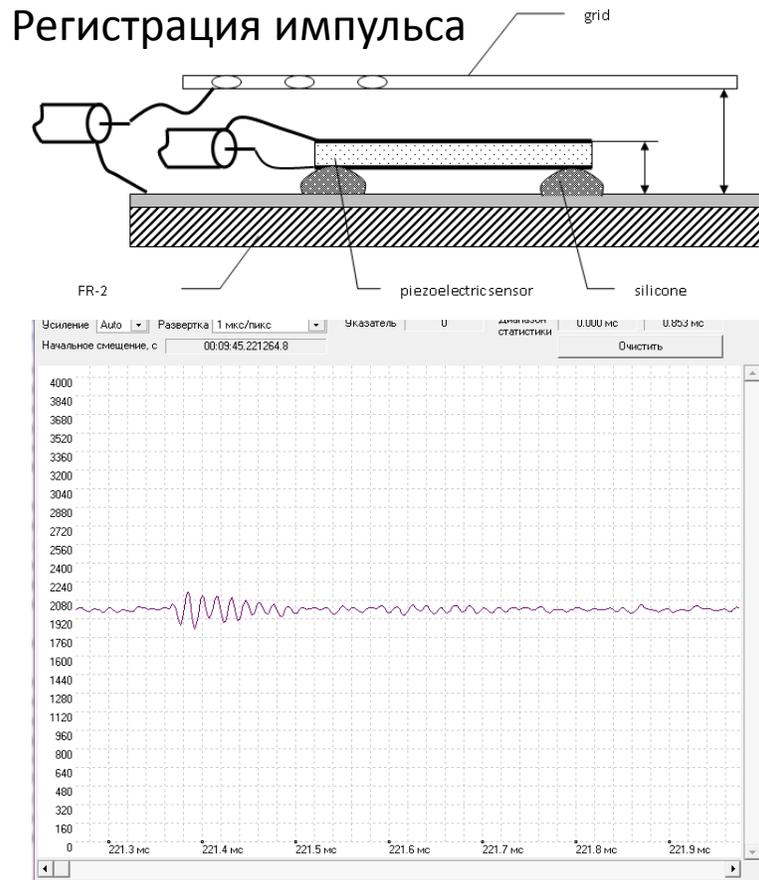
- П – емкость для инжектируемого вещества;
- И – инжекционное отверстие;
- А – внешняя сфера, 0 В;
- В – шар под напряжением



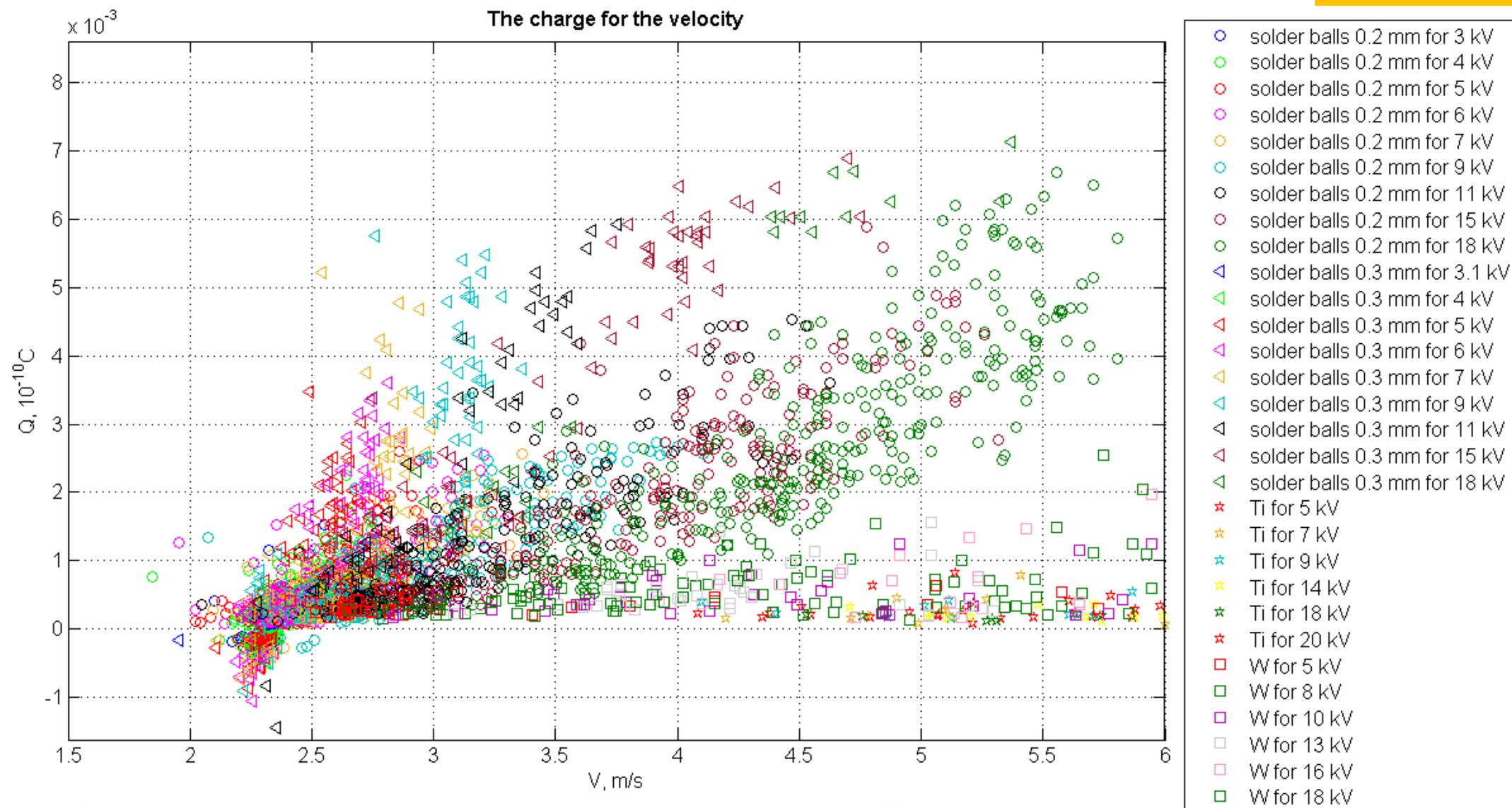
## Зарядочувствительный пролетный датчик



# Микрометеоритная бомбардировка

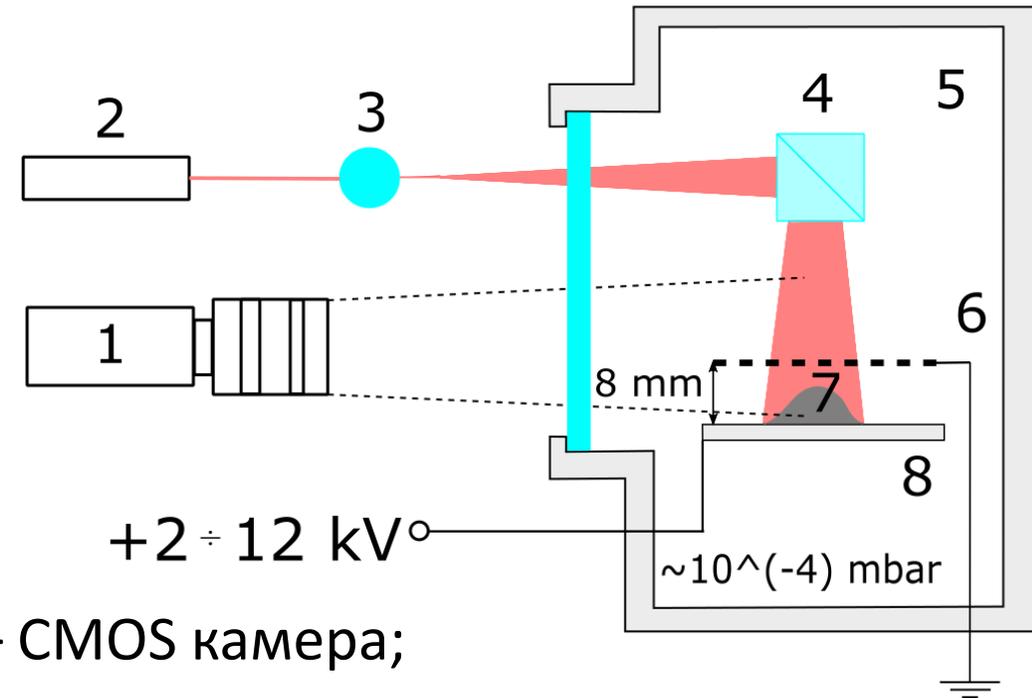
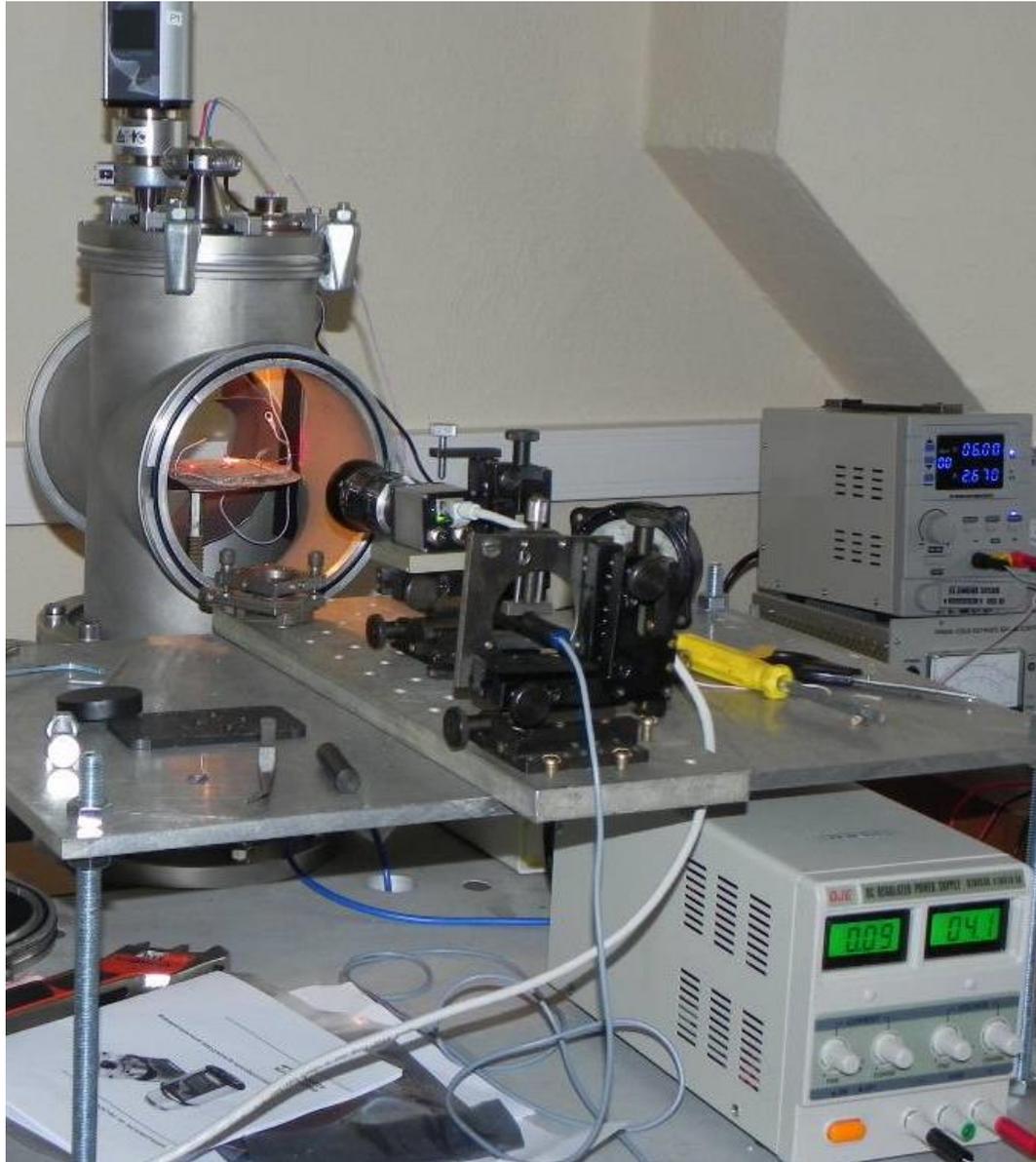


Давление, мм рт. ст.	Масса, кг	Размер частиц, мкм	Проводимость частиц	Скорость частиц, м/с	Импульс, Н·с	Заряд, e <sup>-</sup>
< 10 <sup>-3</sup>	>10 <sup>-12</sup>	1 – 400	Проводящие, < 10 <sup>-6</sup> Ом	2 – 100	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-8</sup>	>1000

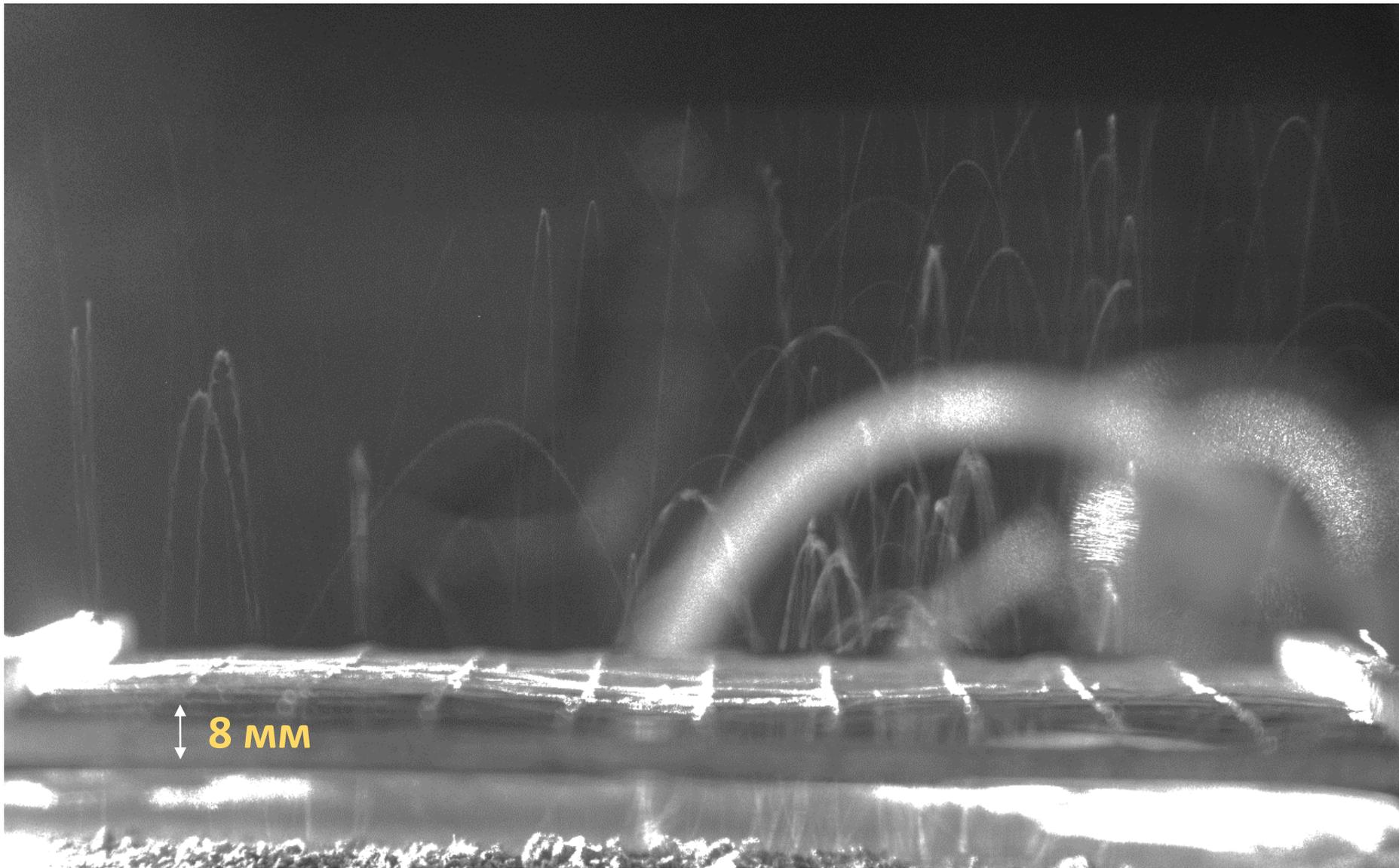


**Наблюдаемые значения зарядов и скоростей частиц в потоке, создаваемом инжектором вакуумной установки для различных значений напряжения инжектора**

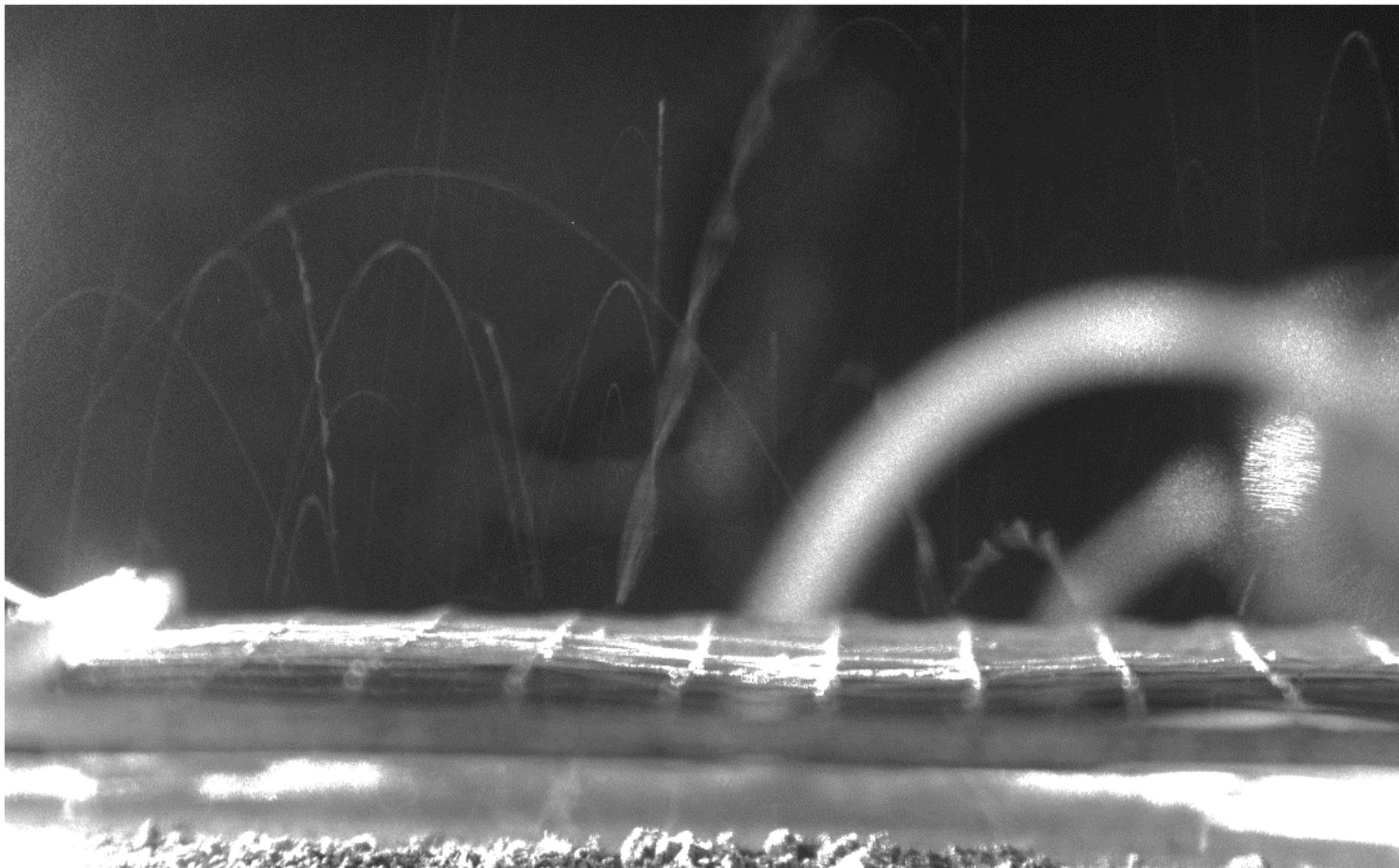
# Левитация частиц в электрическом поле



- 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, SiO<sub>2</sub>);
- 8 – проводящая подложка



**Изображение взлетевших частиц SiO<sub>2</sub> (40 – 100 мкм), 5 кВ - > 625 кВ/м**



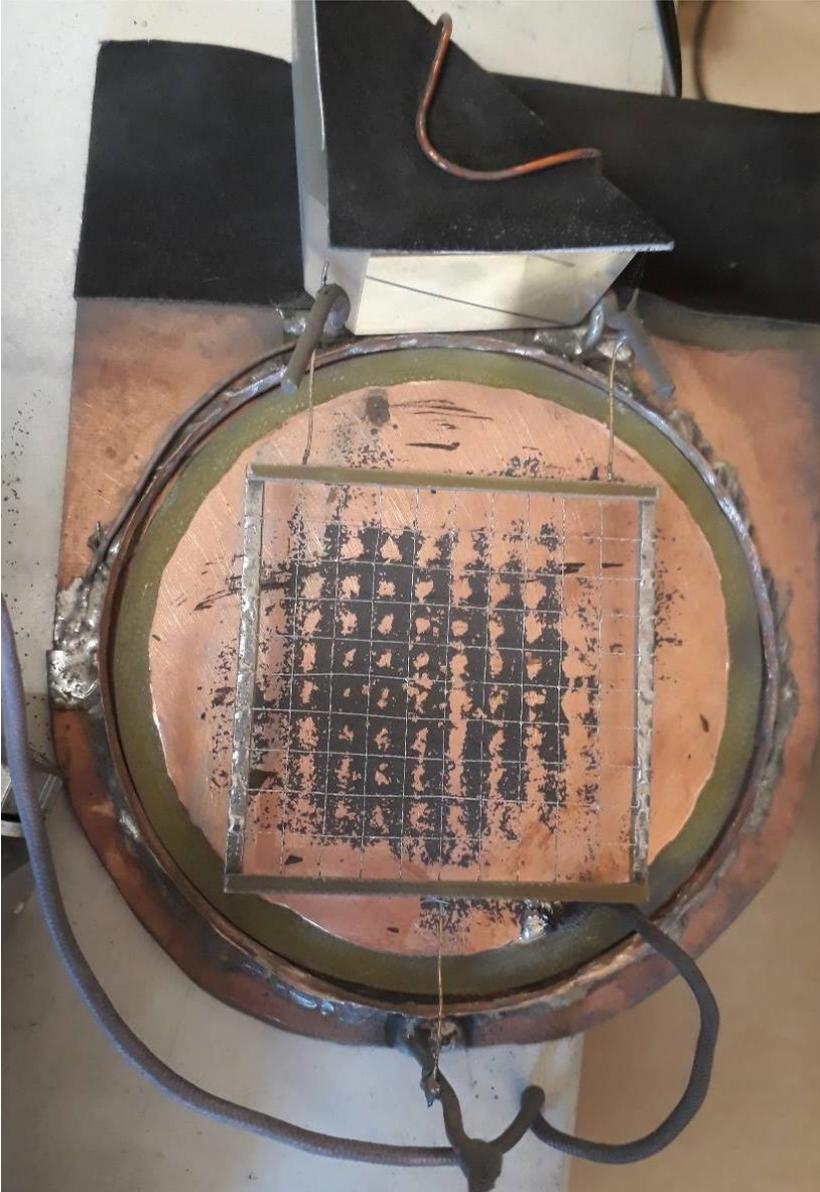
**6 кВ - > 750 кВ/м**

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

до

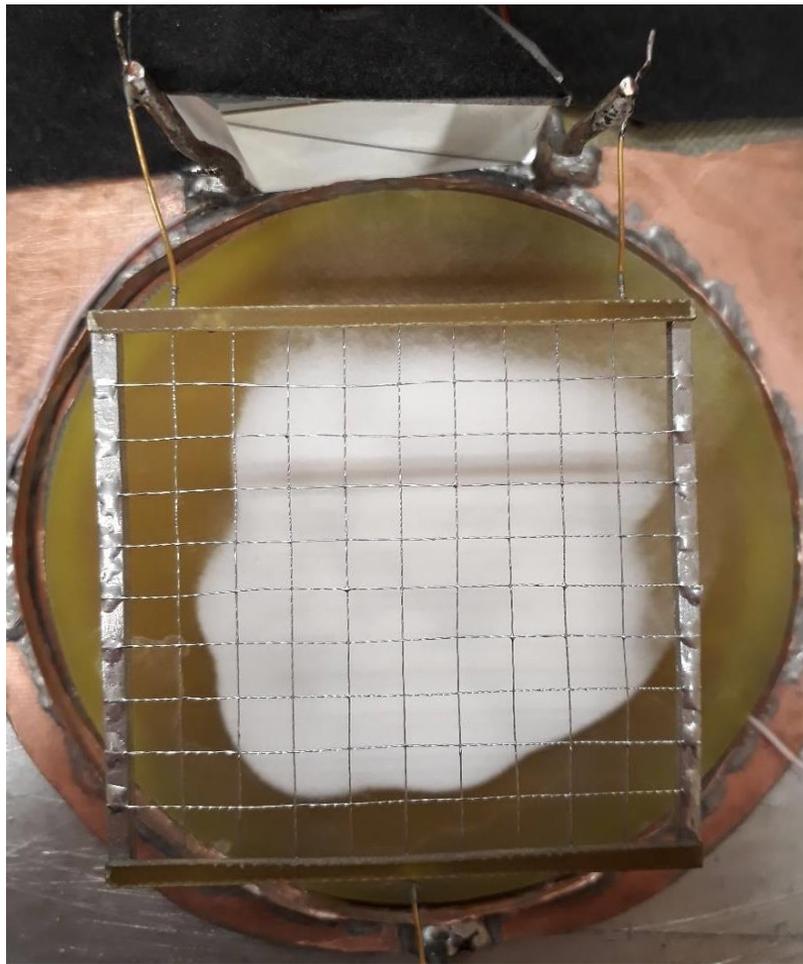


после

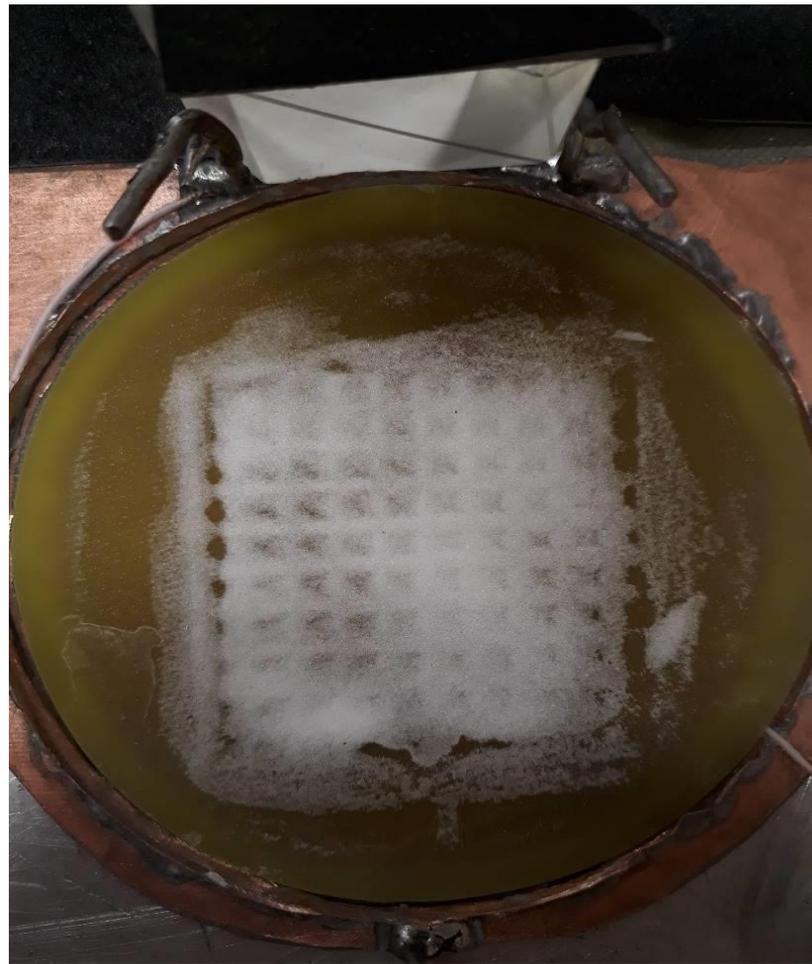


# Распределение частиц пыли на подложке до и после левитации, $40\div 100\ \mu\text{m}$ , $\text{SiO}_2$

до

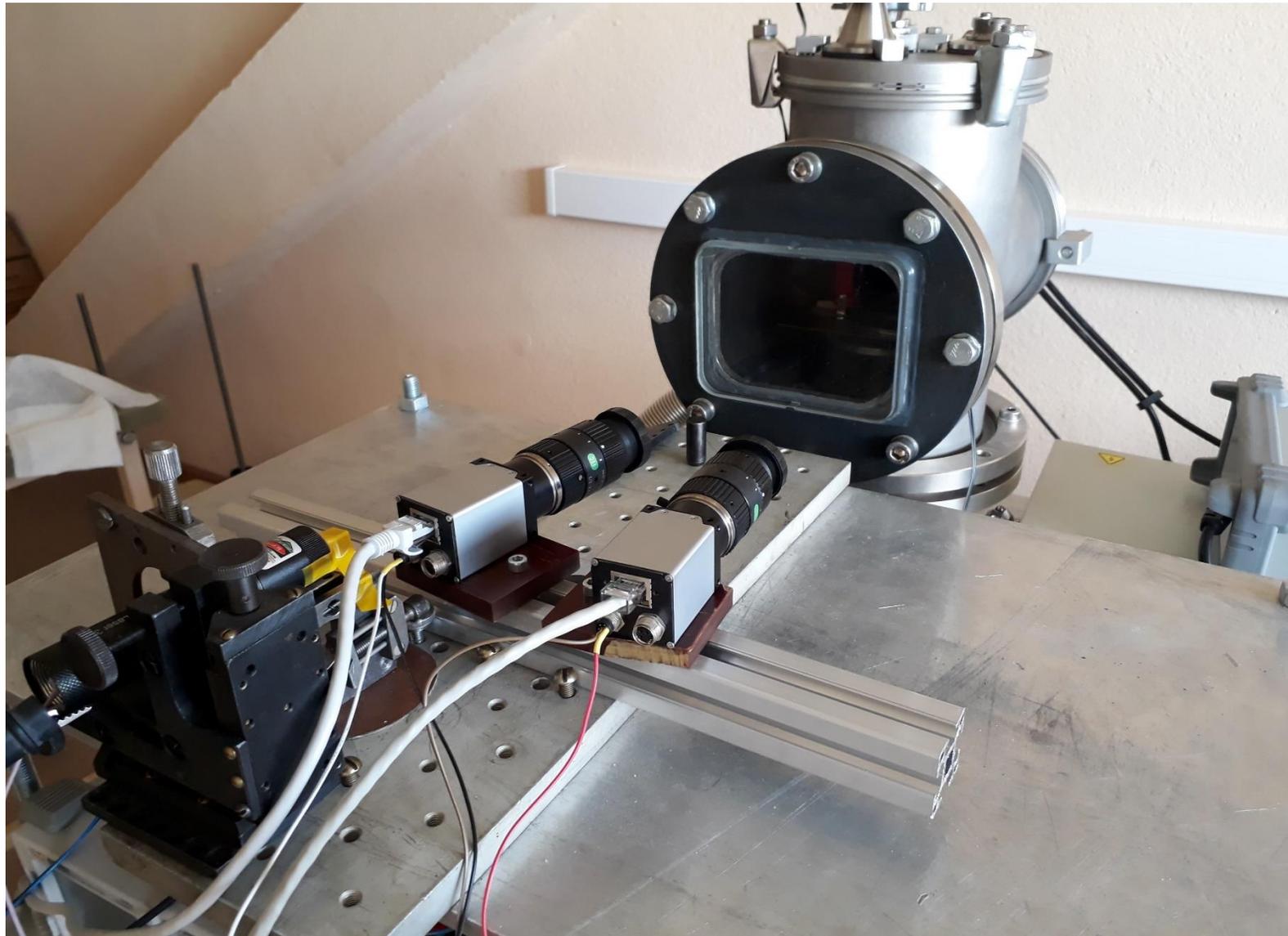


после



$40\div 100\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$

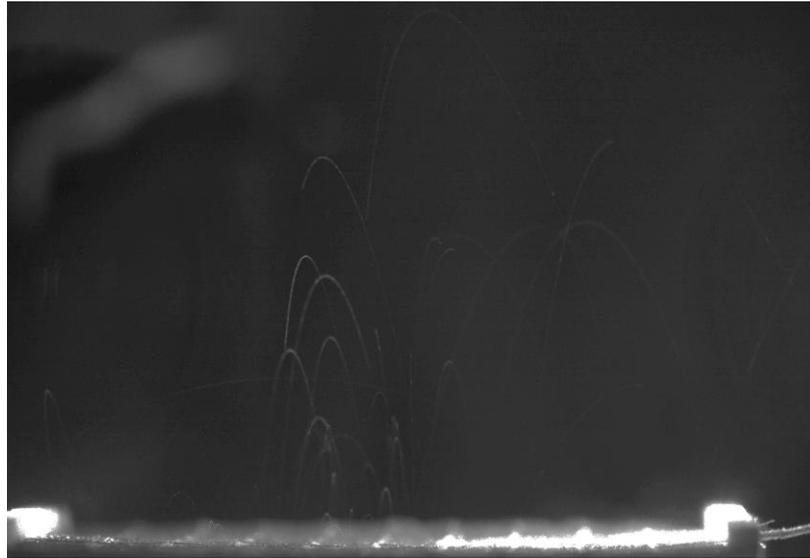
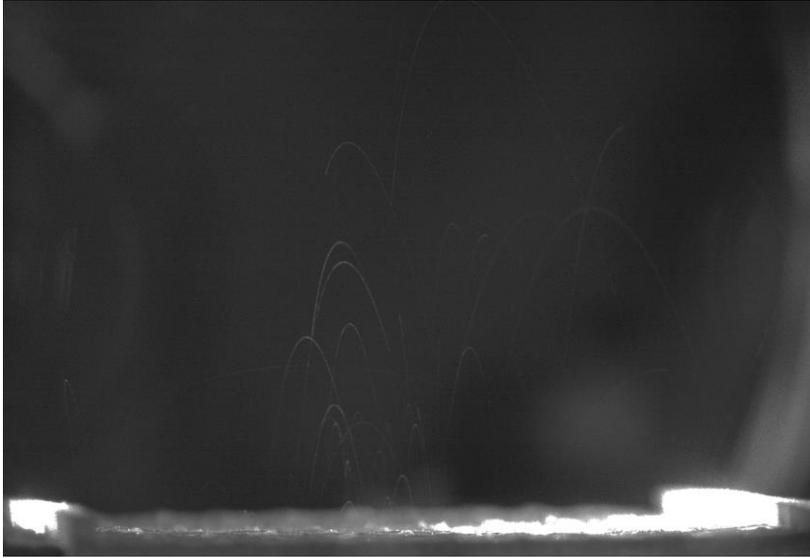
## Стереосистема для определения траектории полета частиц



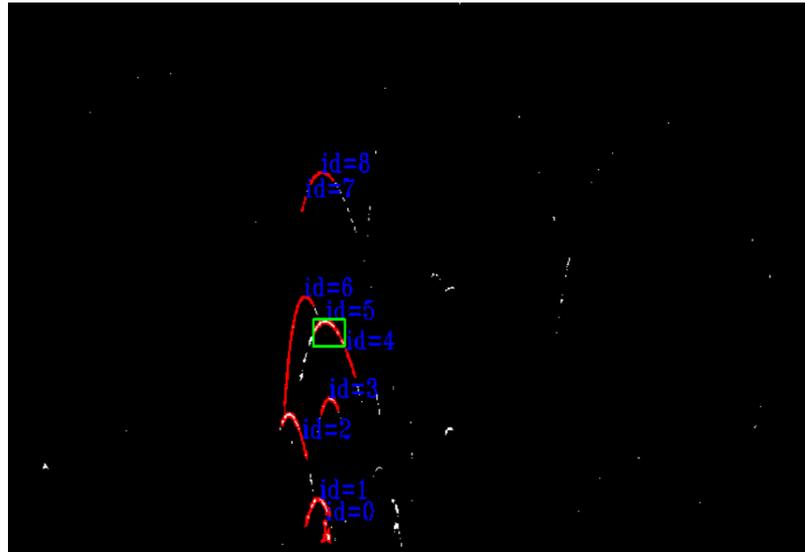
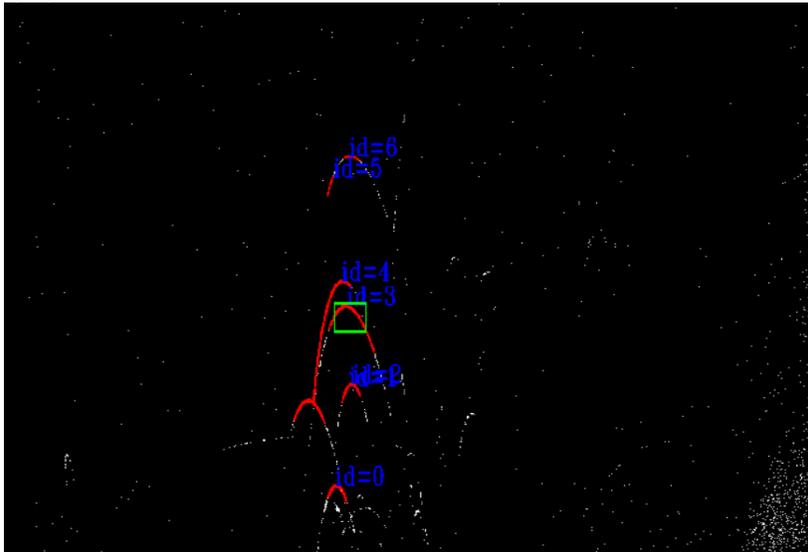
# Обработка

- 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

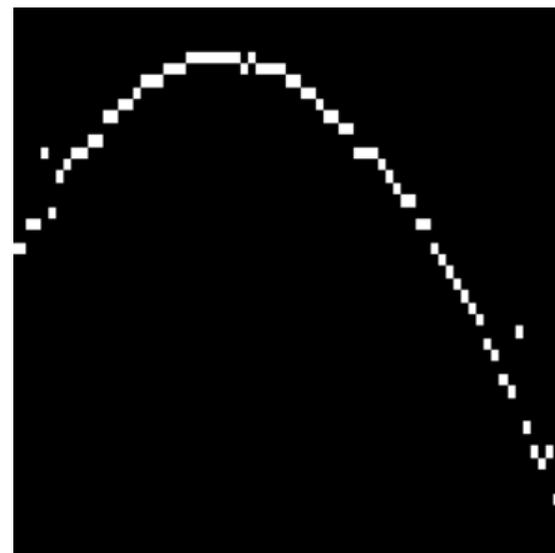
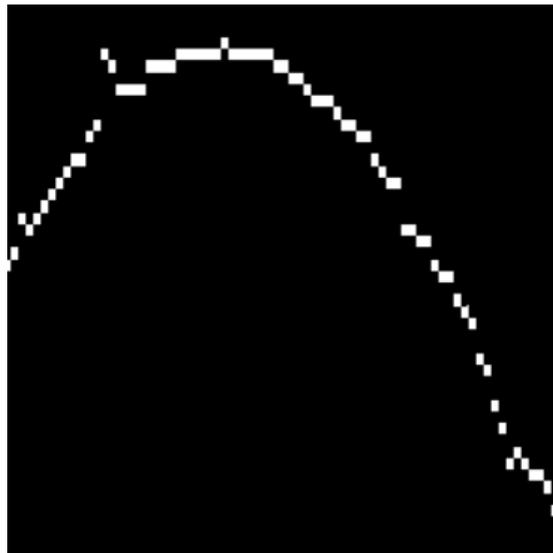
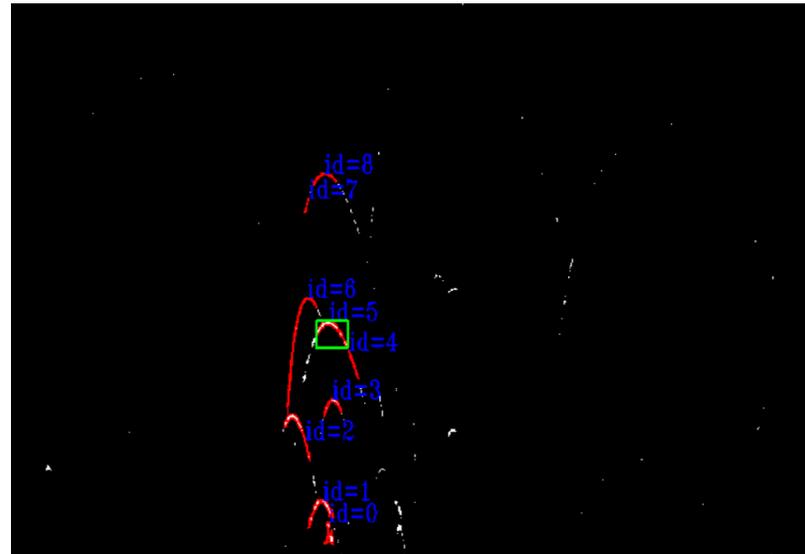
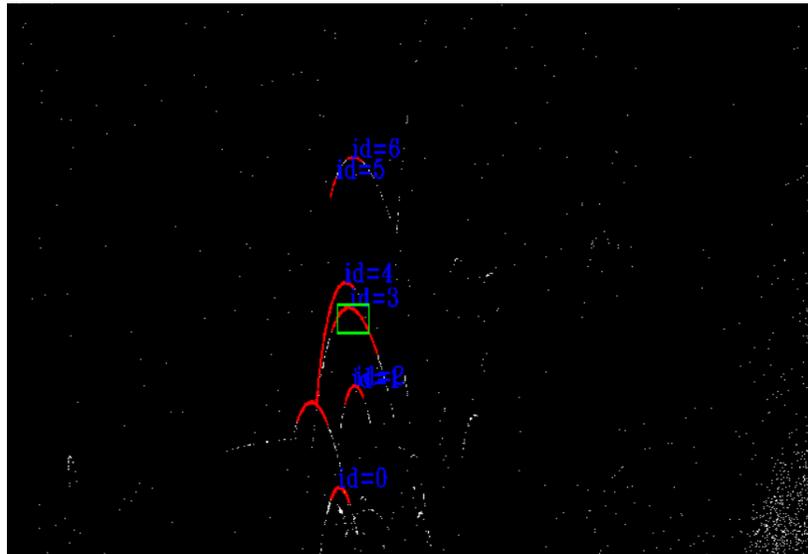
## Этапы обработки: пороговая фильтрация



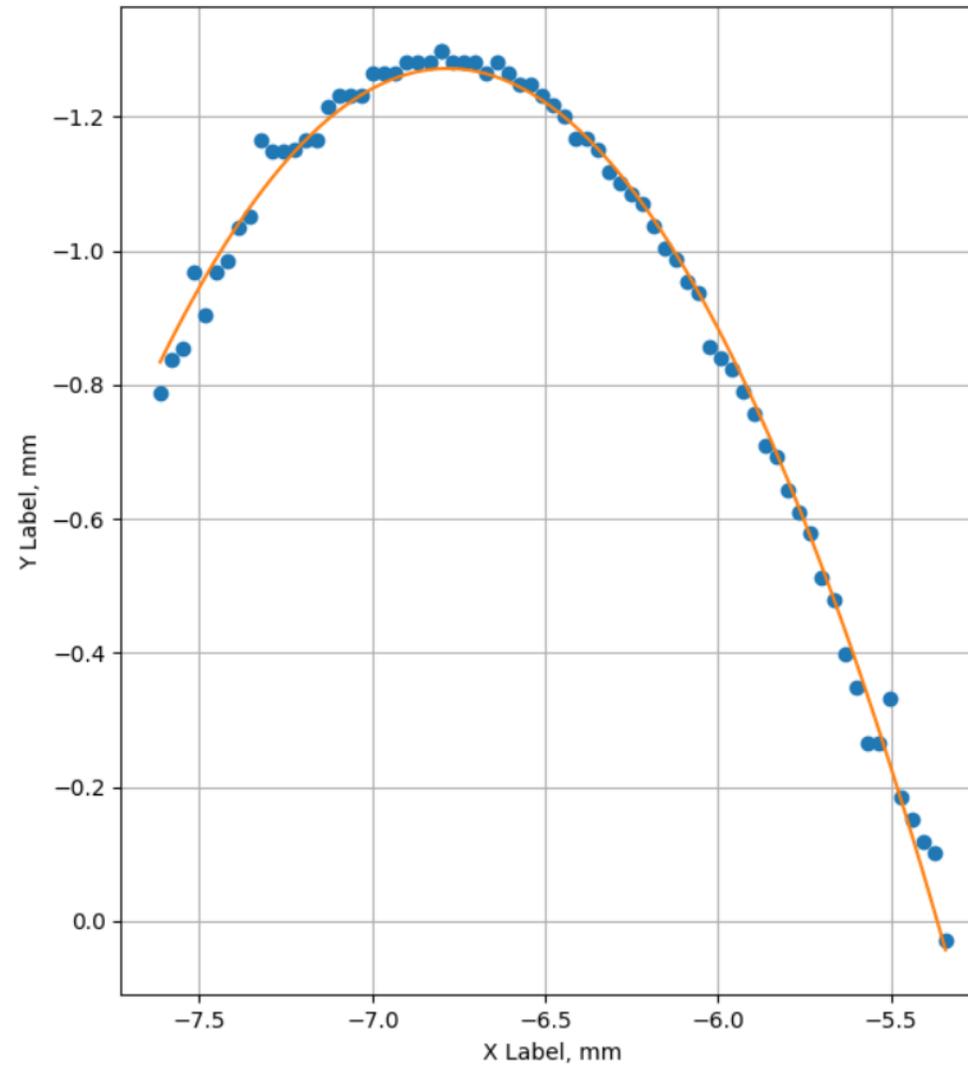
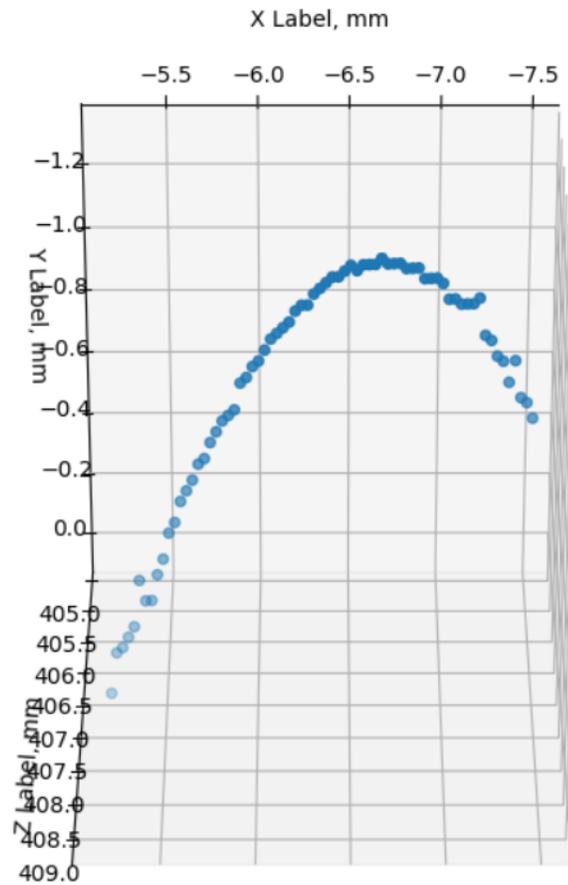
## Этапы обработки: выделение контуров

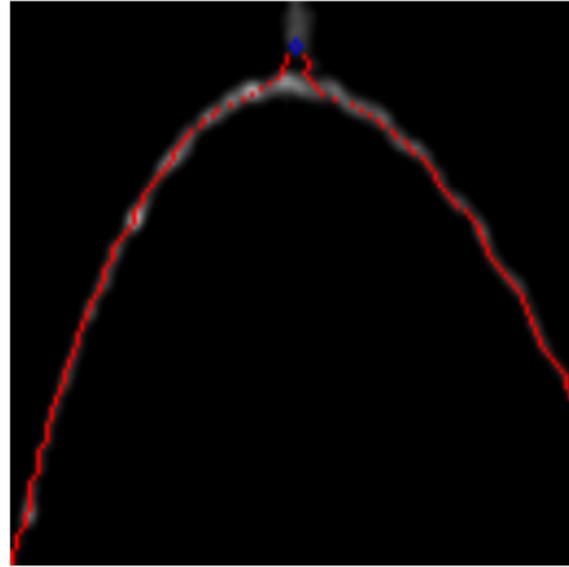
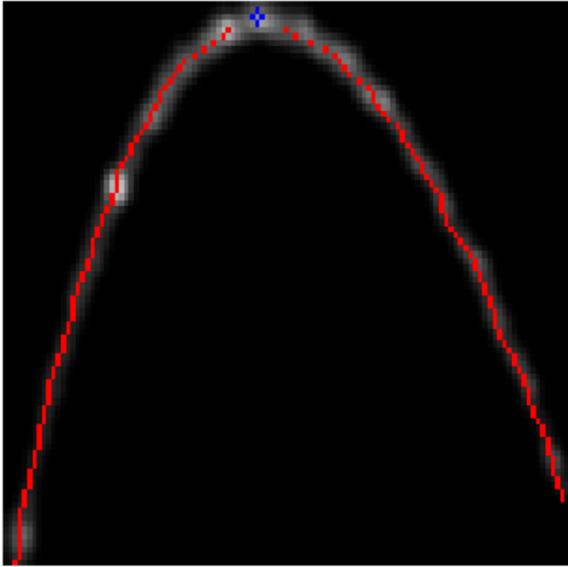


## Этапы обработки: поиск соответствующих контуров



# 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

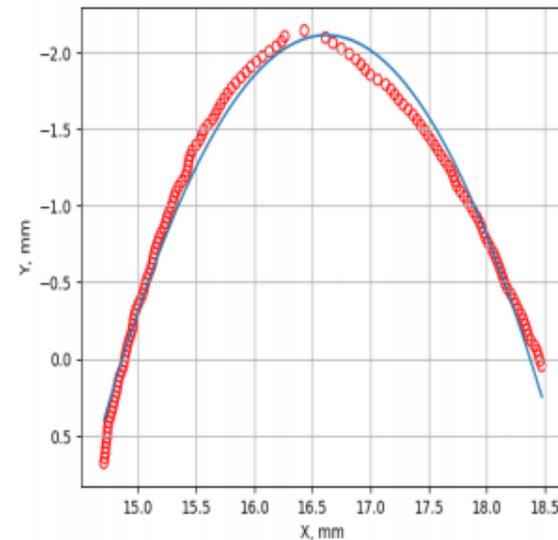
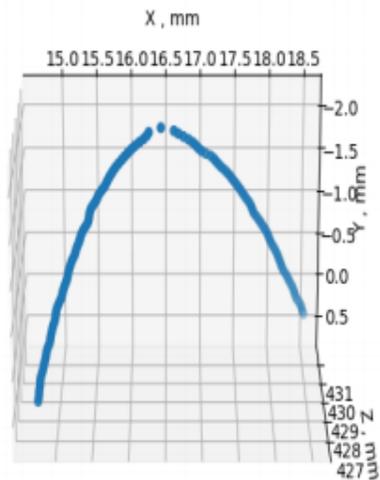
Скорость  $V$  0.6181 м/с

Угол взлета 82.14 градусов

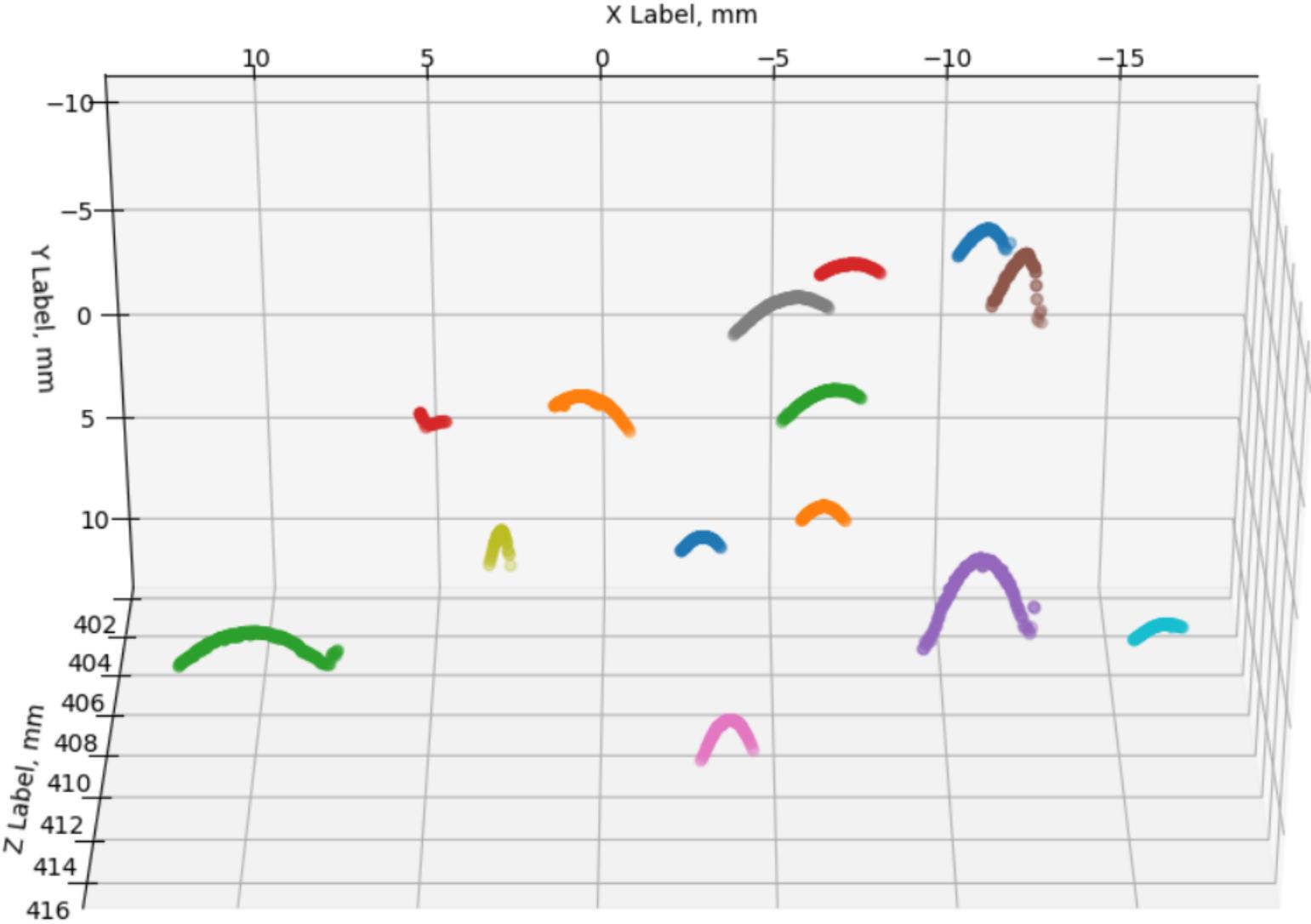
Радиус частицы  $5.000000E-05$  м

Масса частицы  $2.8798E-10$  кг

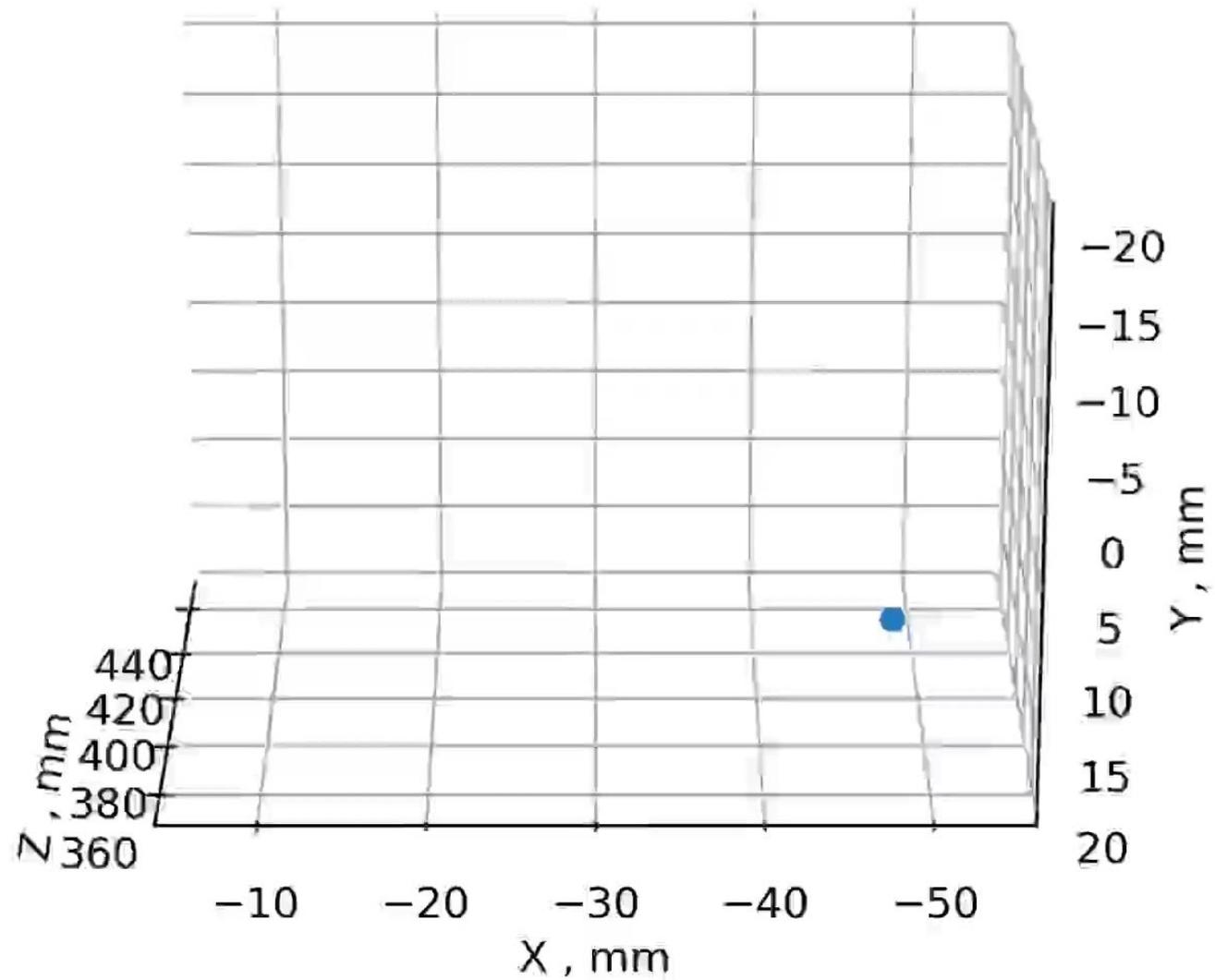
Заряд частицы  $2.7757E-14$  Кл



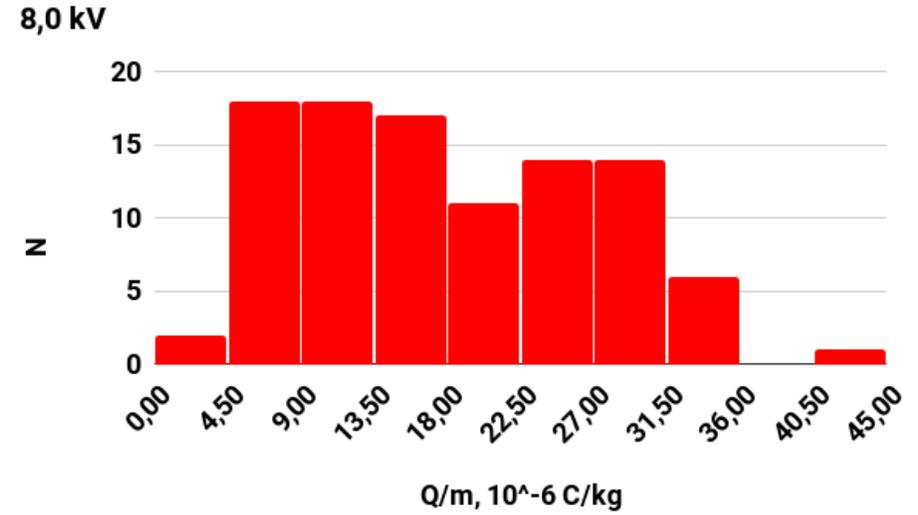
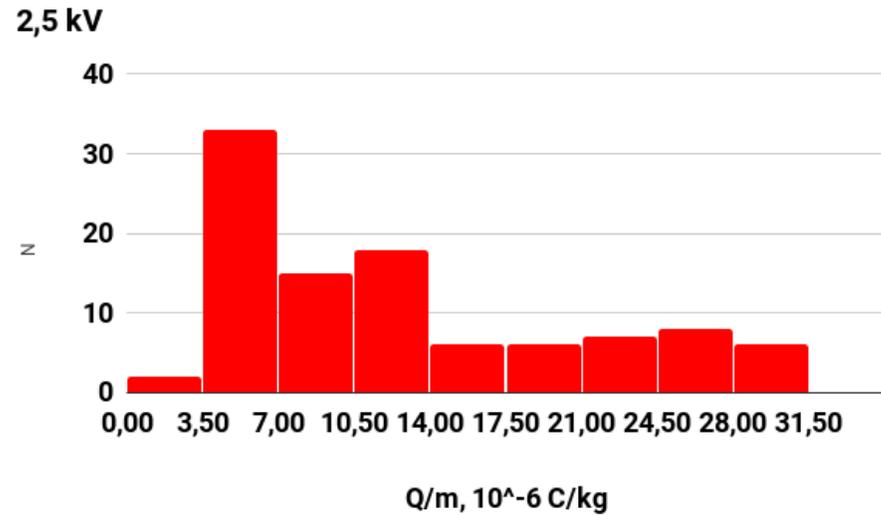
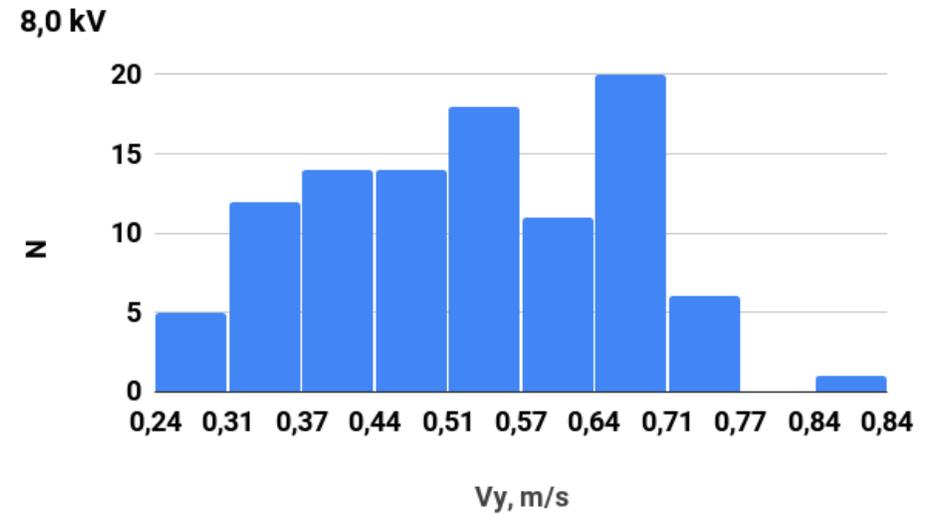
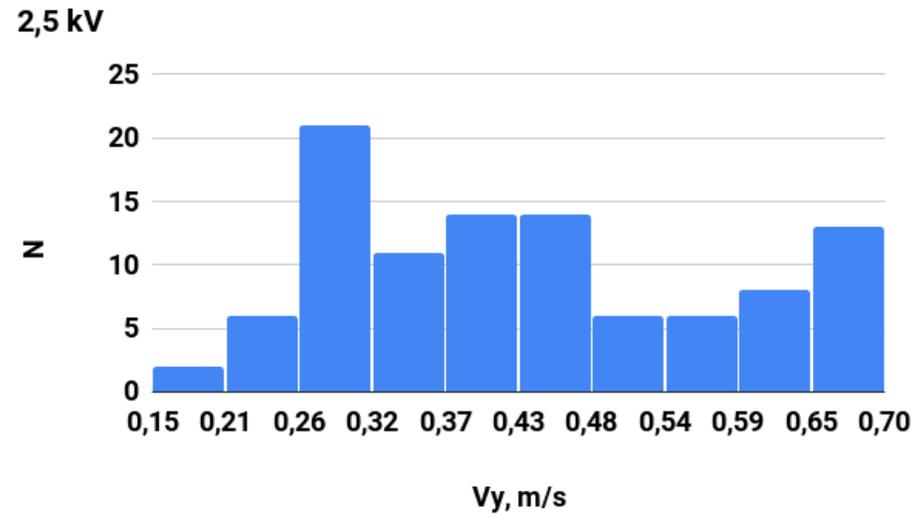
# Этапы обработки: восстановление треков полета частиц



**Анимация полёта частиц для эксперимента:  
2,5 кВ, 50 мкм SiO<sub>2</sub>**

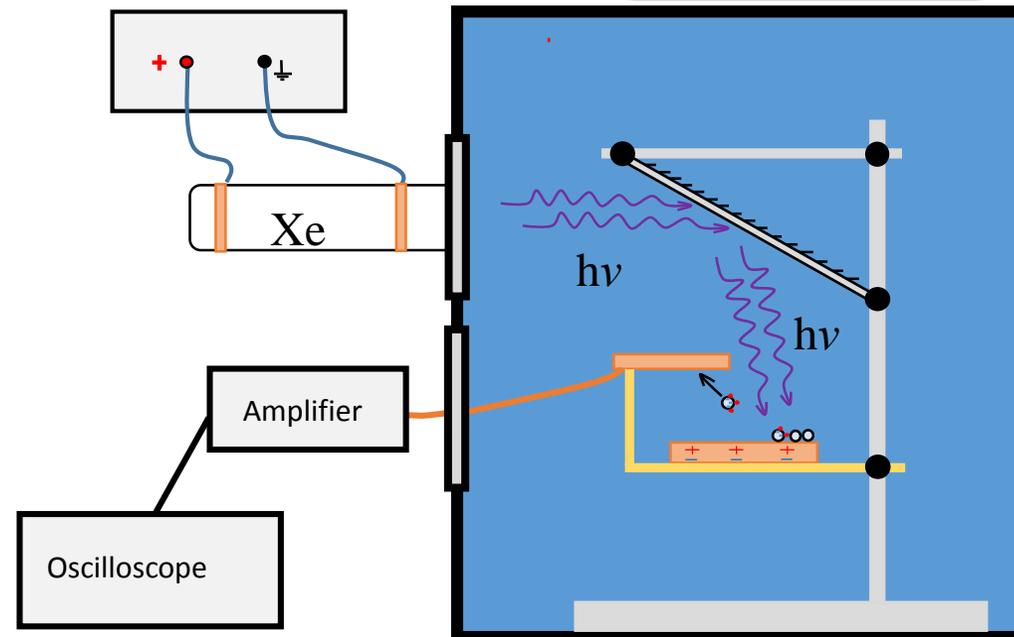
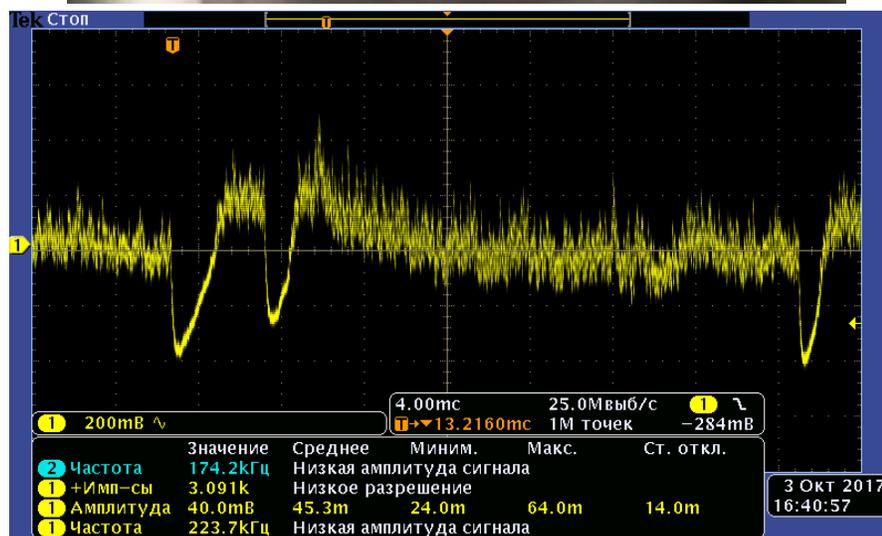
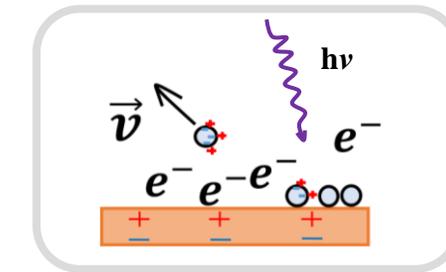
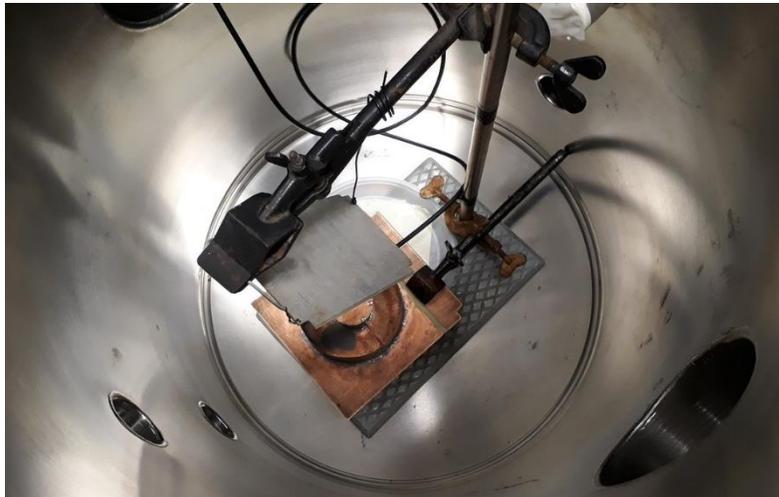
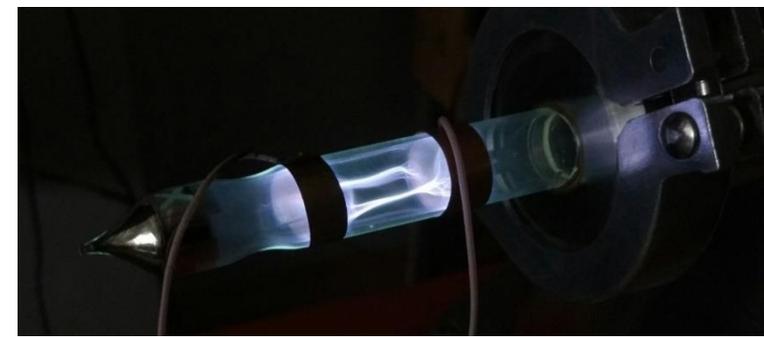


# Распределение зарядов и скоростей частиц (40÷100 мкм, SiO<sub>2</sub>)



# 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!