

Перспективные плазменные спектрометры и методики восстановления функции распределения параметров космической плазмы

1.3.2.Приборы и методы экспериментальной физики

Аспирант гр. А24-101 Петух А.И.

Научный руководитель

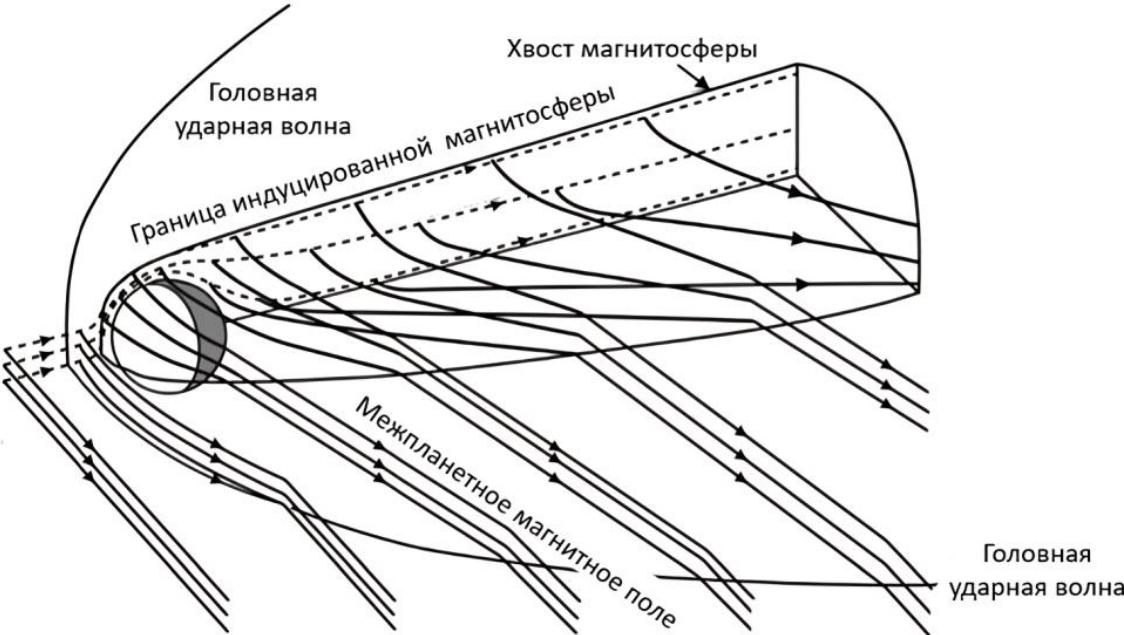
к.ф.-м.н., Наумов П.Ю.

Научный консультант

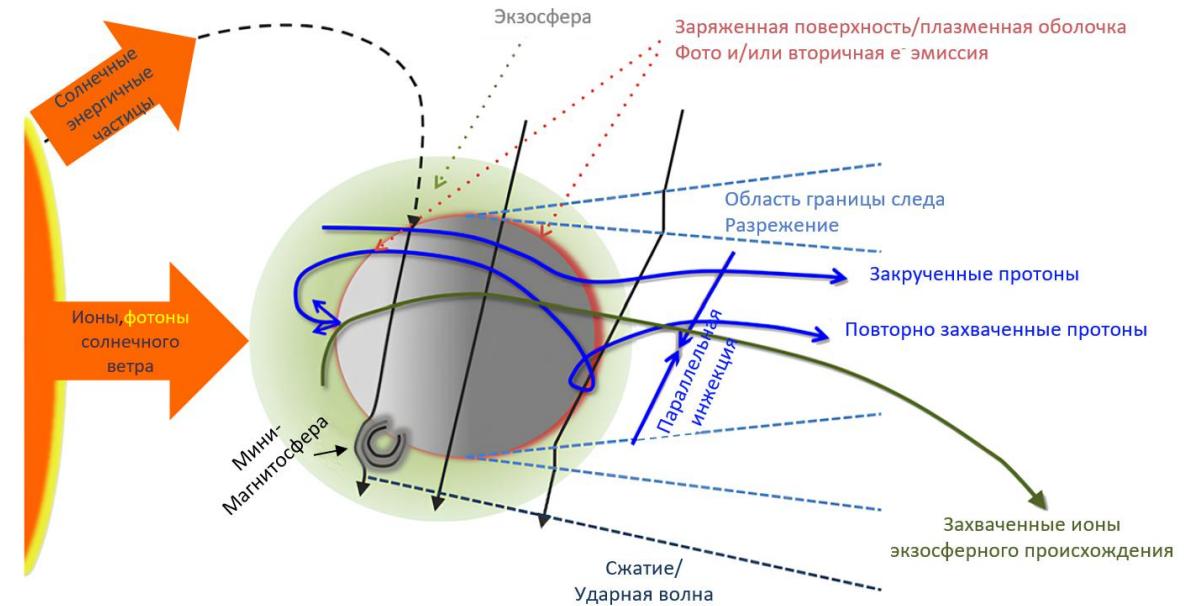
к.ф.-м.н., Моисеенко А.А.

2026

Введение

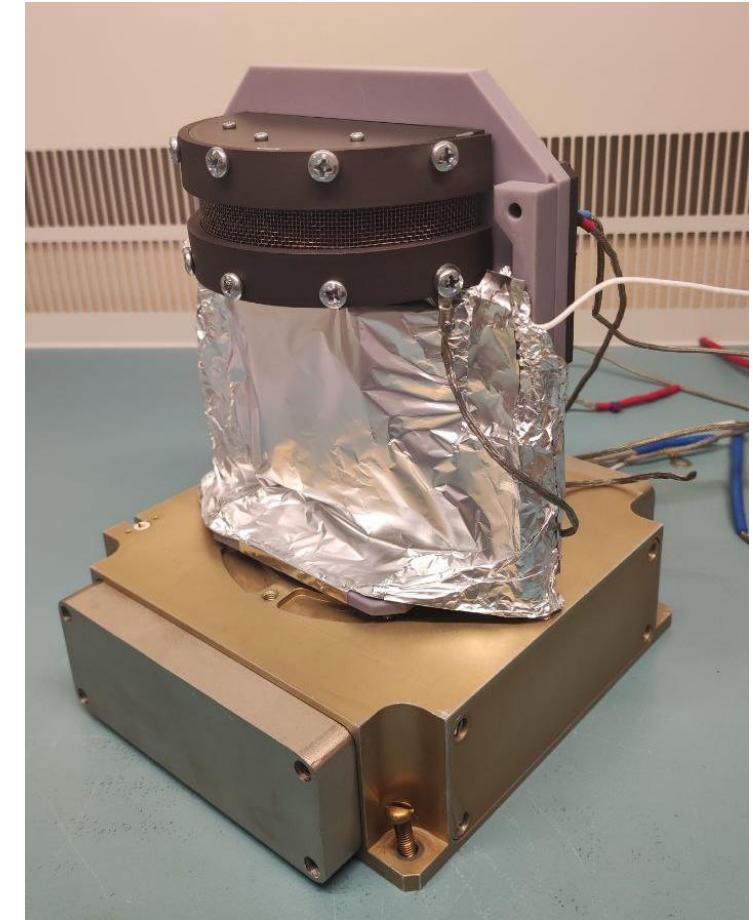
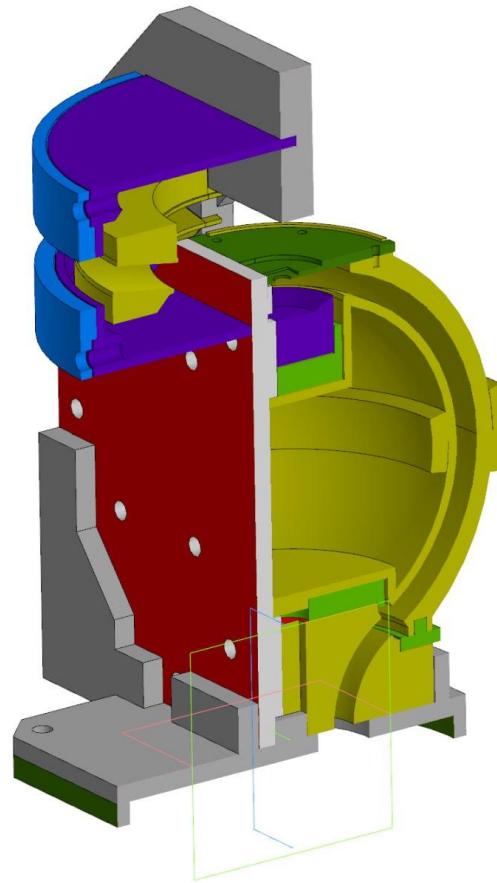
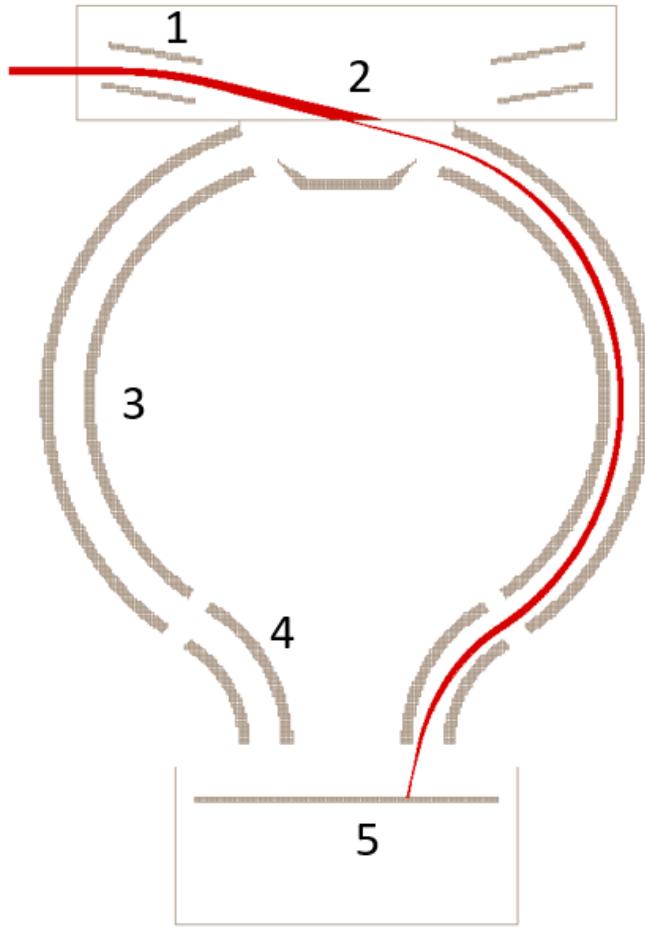


[Futaana Y. et al. Solar wind interaction and impact on the Venus atmosphere]



[Halekas J. S. et al. New views of the lunar plasma environment]

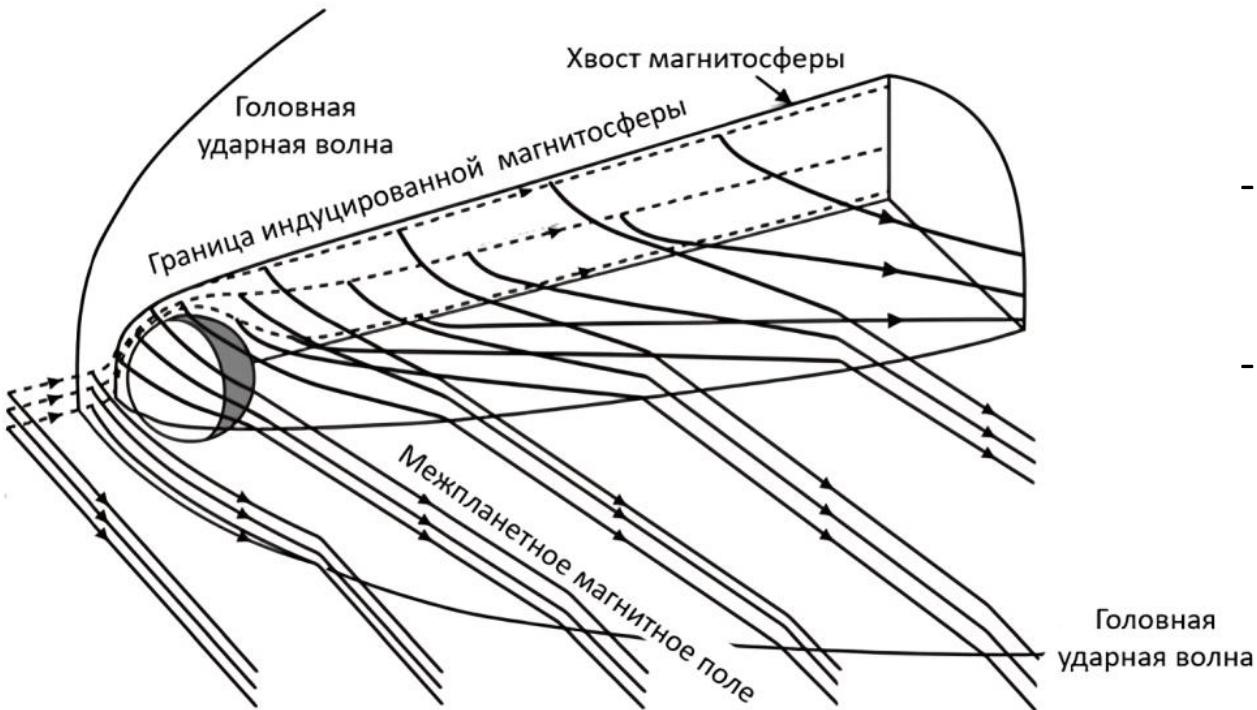
Моделирование и испытание прототипа ЭЛСПЕК



Область применения

- Измерения высыпаний электронов в авроральном овале
- Исследование параметров плазмы в магнитосфере Земли
- Мониторинг электронной составляющей солнечного ветра
- Исследования параметров электронов на орбите Луны и на ее поверхности
- Изучение взаимодействия солнечного ветра с плазменными оболочками планет солнечной системы

Магнитосфера Венеры

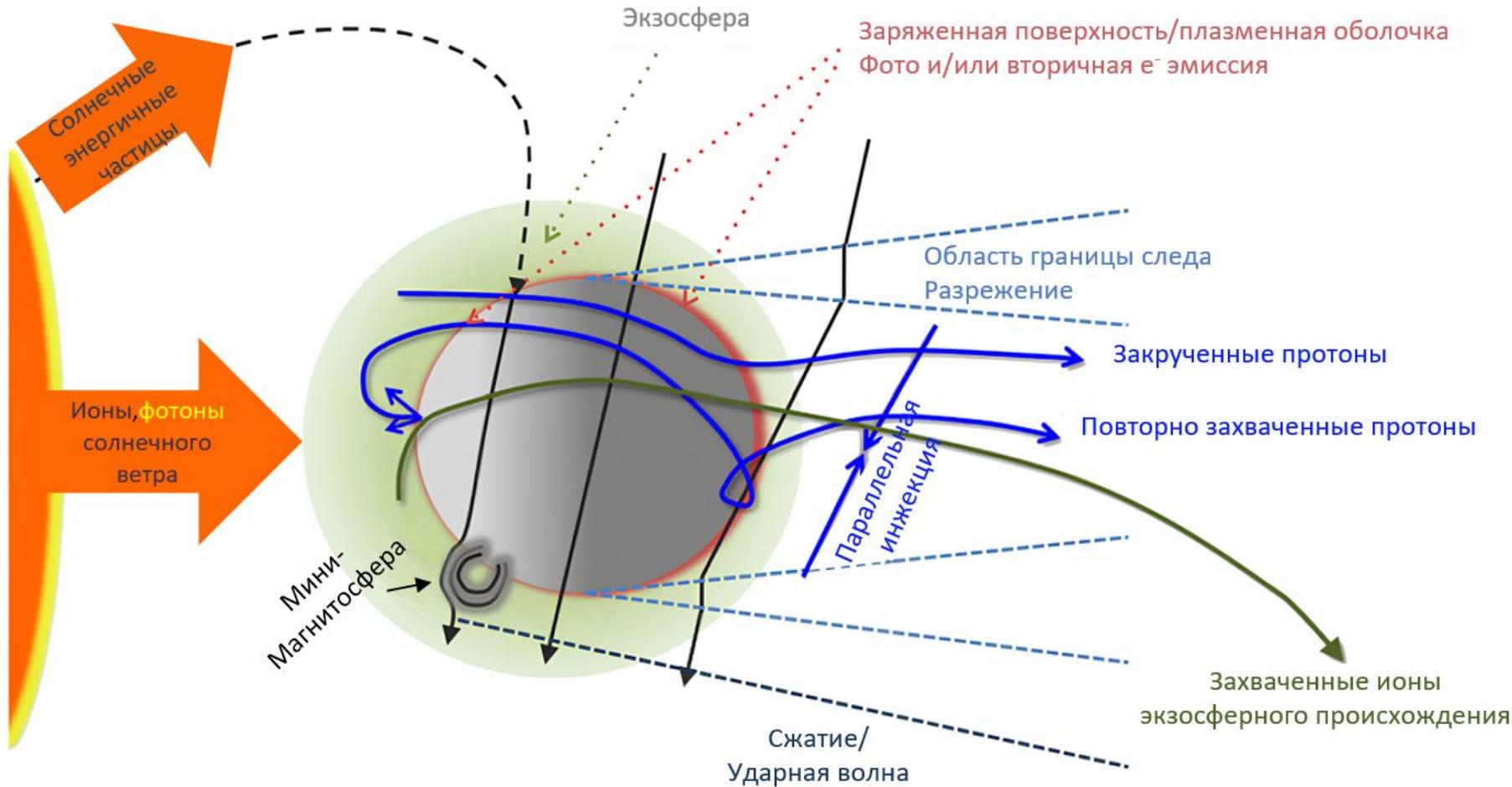


[Futaana Y. et al. Solar wind interaction and impact on the Venus atmosphere]

Актуальные научные задачи:

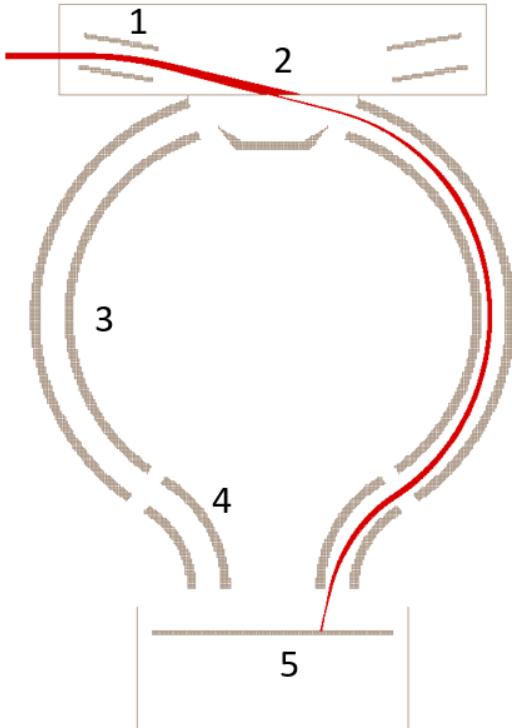
- Исследование изменения характера взаимодействия солнечного ветра с Венерой в зависимости от флюктуаций солнечного ветра
- Изучение влияния солнечного ветра на характеристики ионосферы Венеры
- Измерение параметров плазмы и магнитного поля для исследования тонких структур на границах магнитосферы

Взаимодействие солнечного ветра с Луной



[Halekas J. S. et al. New views of the lunar plasma environment]

Назначение спектрометра и его структура



Структура
электростатической
оптики

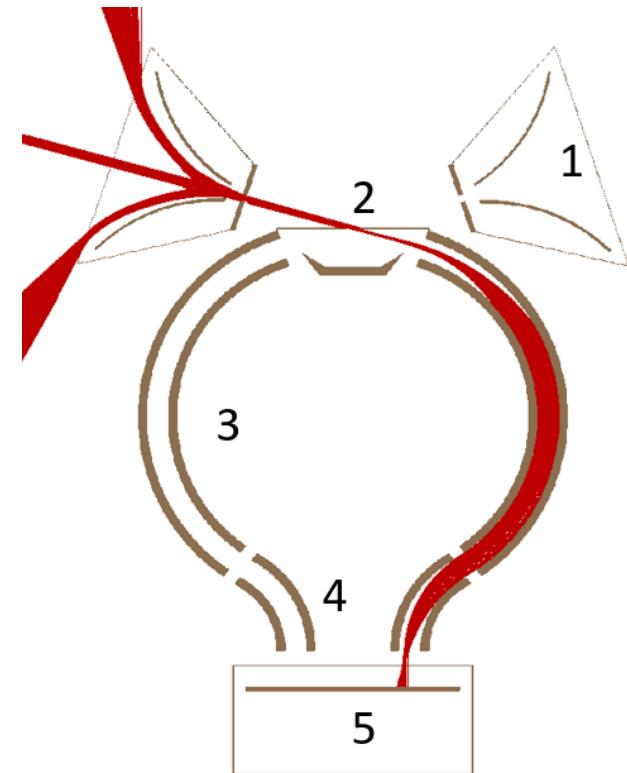
ЭЛСПЕК предназначен для регистрации параметров электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 15 кэВ

Максимальное поле зрения спектрометра 360 градусов по азимутальному углу, 160 – по полярному

Поля зрения легко адаптируются под специфику измерений конкретного космического эксперимента путем замены сканирующего устройства

Структура электростатической оптики:

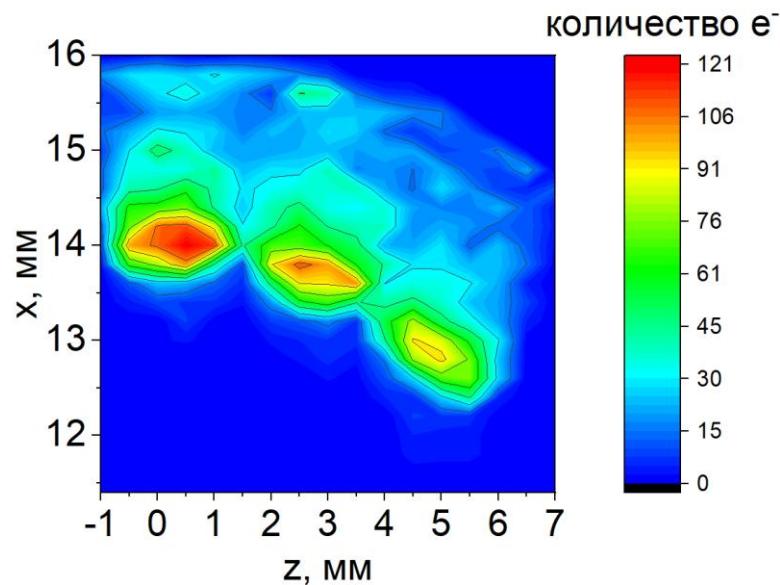
- 1 – сканирующее устройство;
- 2 – центральная диафрагма;
- 3 – тороидальный электростатический анализатор;
- 4 – корректирующий электрод;
- 5 – координатно-чувствительный детектор.



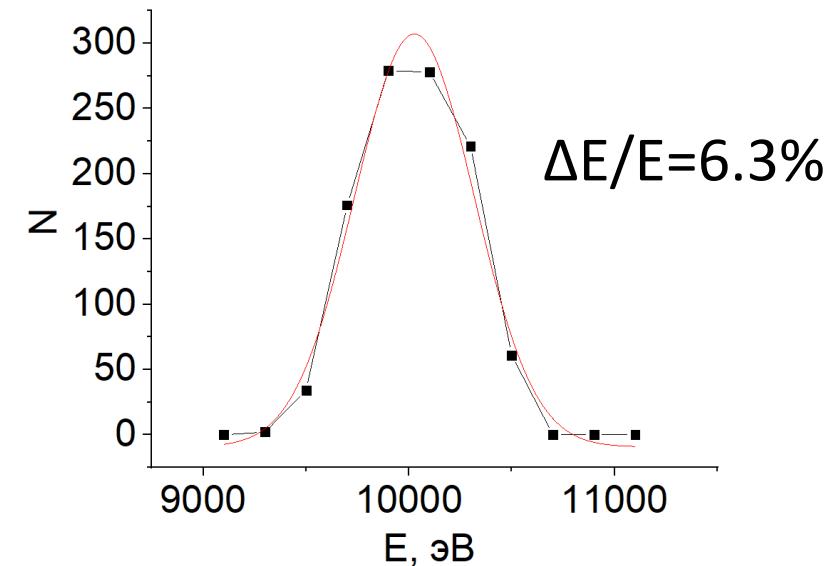
Структура
электростатической
оптики с другим
сканером

Расчетные характеристики спектрометра

- Диапазон энергий: 10 эВ – 15 кэВ
- Поле зрения 160° по азимутальному углу и 2° по полярному
- Угловое разрешение по азимутальному углу: 10°



Разрешение по азимутальному углу: 10°

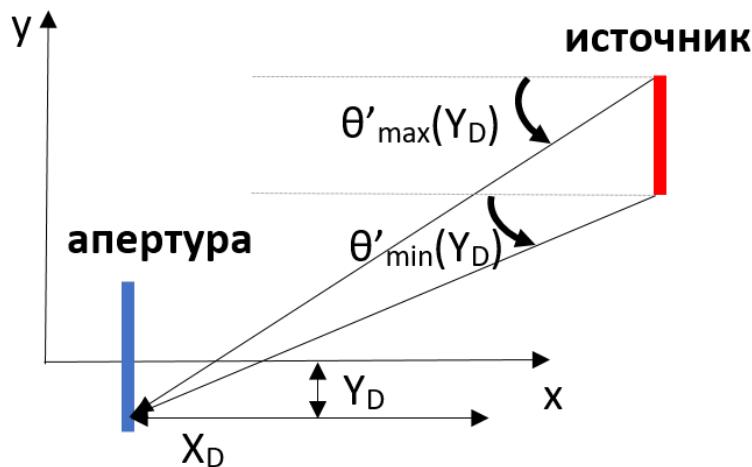


Энергетическое распределение электронов

Расчетные характеристики спектрометра

Геометрический фактор

$5,91 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ср (эВ/эВ)}$



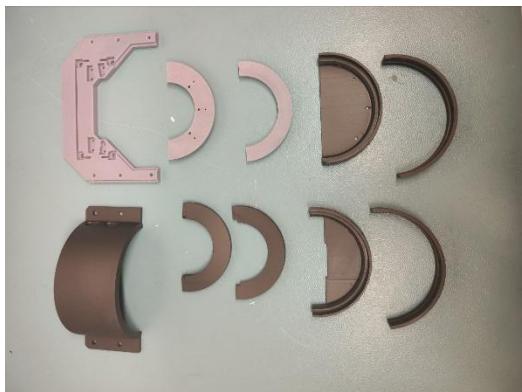
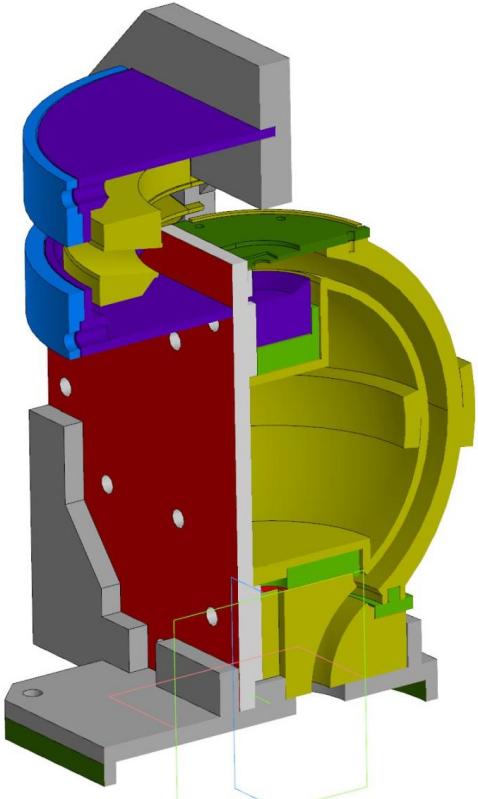
Схематичное изображение расположения источника электронов и апертуры детектора

$$GF = \frac{C \Delta Y_B \Delta Z_B \overline{E_B} \cos^2 \overline{\theta_B} \Delta E_B \Delta \theta_B \Delta \varphi}{N_{in} E_0^2}$$

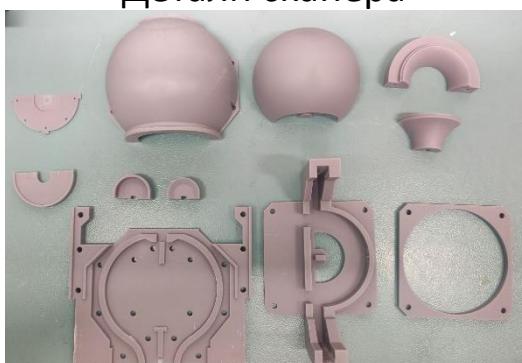
где C – число электронов, зарегистрированных детектором, $\Delta Y_B \Delta Z_B$ – площадь источника, E_B – энергия падающих электронов на детектор, θ_B – полярные углы падающих электронов, ϕ – азимутальный угол электронов, N_{in} – число падающих электронов на детектор, E_0 – энергия, соответствующая максимуму отклика

Прототип спектрометра

- Для ускорения процесса производства детали электростатической оптики были изготовлены на фотополимерном принтере.
- Детали электродов, формирующие электростатические линзы покрашены токопроводящей краской.



Детали сканера



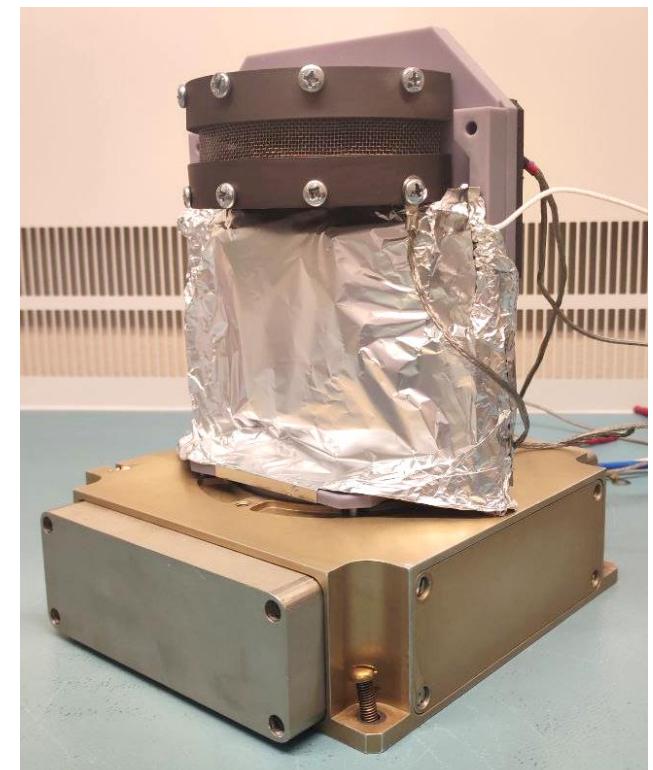
Детали анализатора



Узел сканера

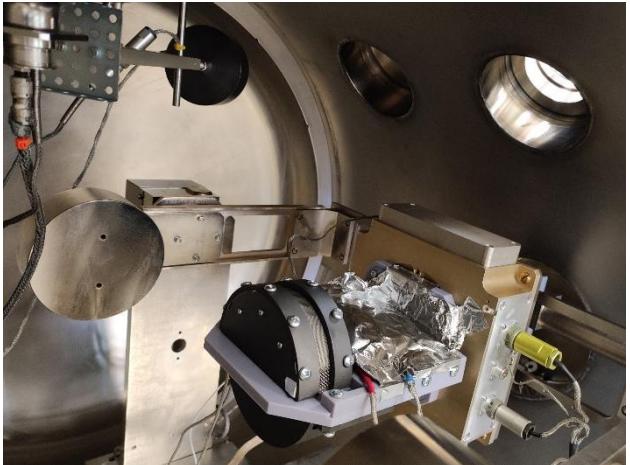


Узел анализатора



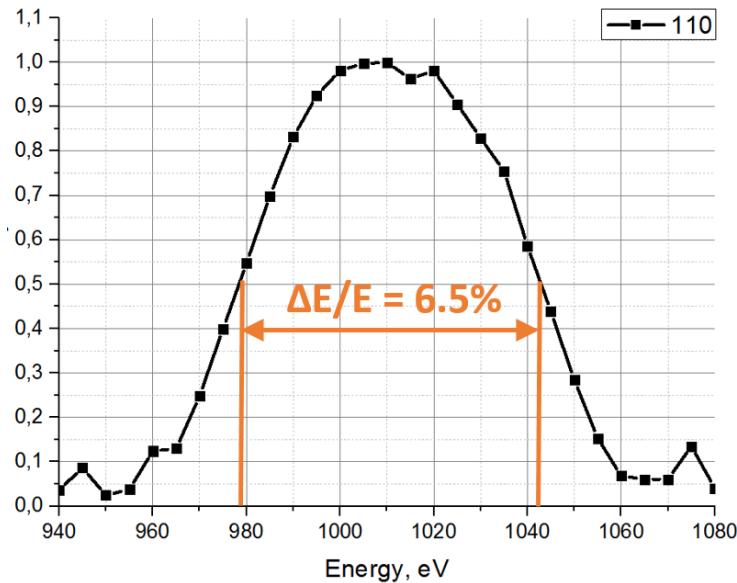
Собранный модуль оптики

Испытания прототипа спектрометра

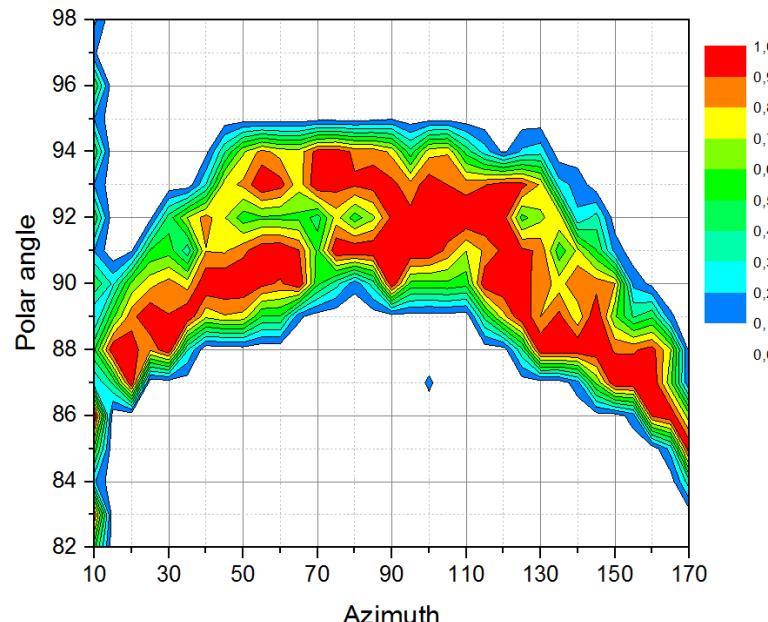


Для прототипа спектрометра определены характеристики:

- Поле зрения – 160 градусов по азимутальному углу, $\pm 3^\circ$ по полярному
- Угловое разрешение по азимутальному углу: от 10° до 20° , зависит от используемой диафрагмы.
- Энергетическое разрешение $\Delta E/E = 6.5\%$.

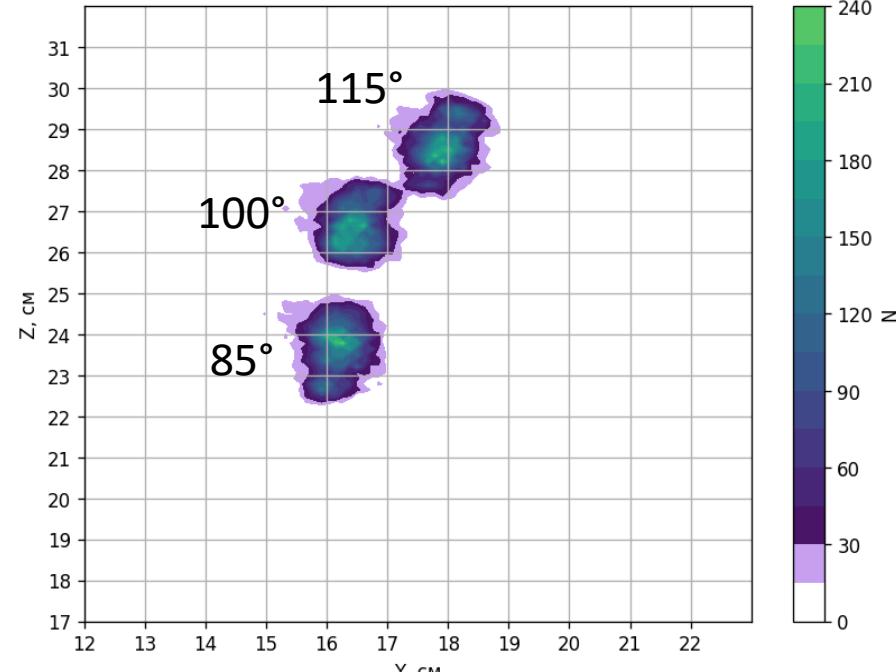


Энергетическое разрешение
(пример для азимута 110 градусов)

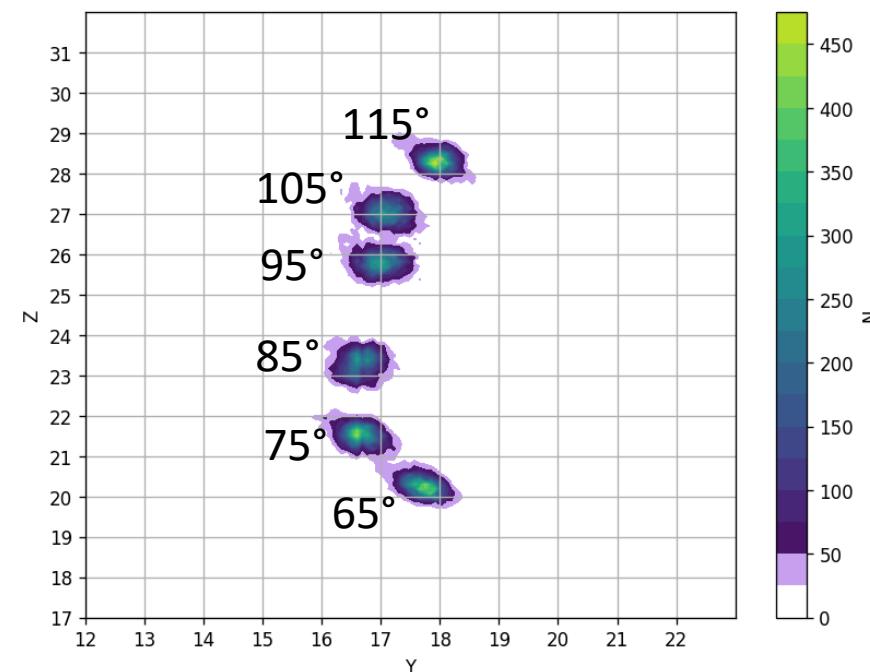


Поле зрения
(нормированный счет детектора в зависимости от полярного и азимутального углов)

Угловое разрешение для разных диафрагм:



$d_1 = 1.6 \text{ mm} - 15^\circ$



$d_1 = 1 \text{ mm} - 10^\circ$

Сравнение результатов моделирования и результатов испытания

- Модель:
- Энергетическое разрешение: 6.3%
- Поле зрения – 160 градусов по азимутальному углу, $\pm 1^\circ$ по полярному
- Угловое разрешение по азимутальному углу: 10°
- Прототип
- $\Delta E/E = 6.5\%$
- Поле зрения – 160 градусов по азимутальному углу, $\pm 3^\circ$ по полярному
- Угловое разрешение по азимутальному углу: от 10° до 20° , зависит от используемой диафрагмы.

Расчетные и экспериментальные характеристики совпадают с хорошей точностью

Заключение

- Разработан и испытан прототип спектрометра электронов ЭЛСПЕК.
- Продемонстрирована достижимость заявленных аналитических характеристик: азимутальное поле зрения 160° , угловое разрешение до 10° , энергетическое разрешение $\Delta E/E = 6.5\%$.
- Полученные характеристики совпадают с расчетными значениями.
- Продемонстрирована возможность применения аддитивных технологий для быстрогоprotотипирования модулей изображающей электростатической оптики.

Апробация: конференции

- XXII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Выступление с докладом «Спектрометр электронов ЭЛСПЕК», 21-23.04.2025, Москва

Апробация: публикации

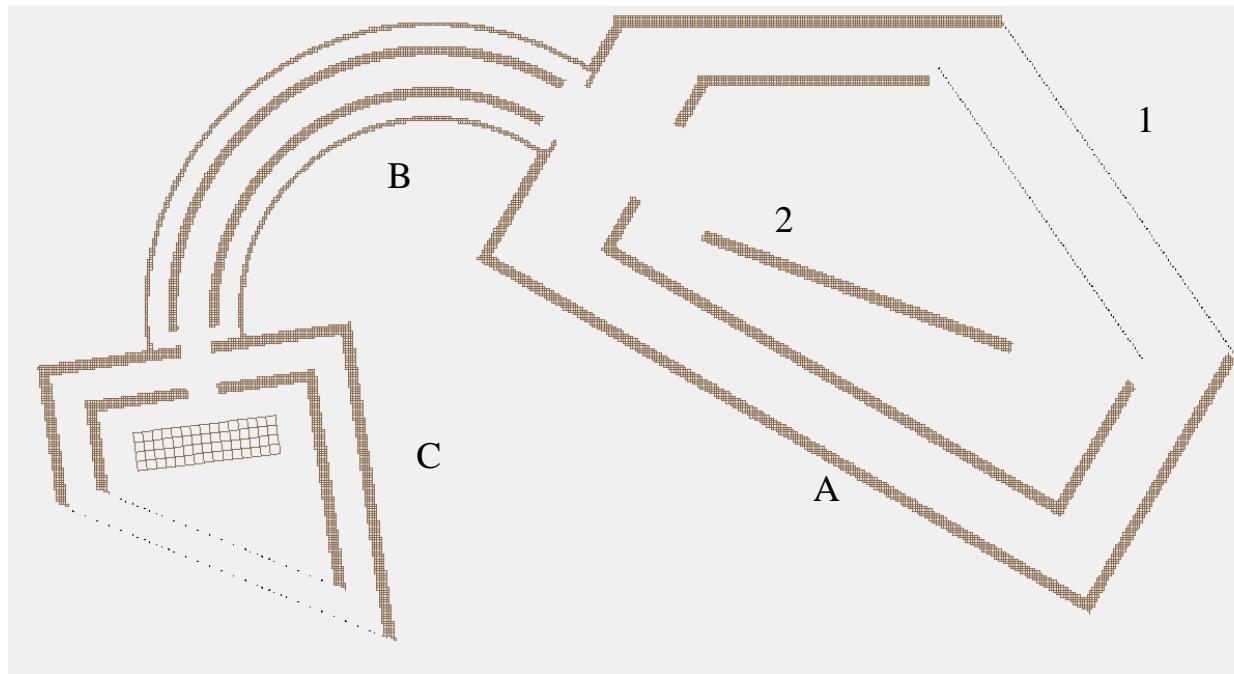
- Moiseenko D. A., Vaisberg O.L., **Petukh A.I.**, Zhuravlev R.N. Scientific Goals and Perspectives of the Plasma-Instrument Complex in the Venera-D Space Mission // Cosmic Research. – 2024. – Т. 62. – №. 6. – С. 616-622.
- **Петух А.И.**, Моисеенко Д. А., Матюхин А. А., Журавлев Р. Н., Шестаков А. Ю., Вайсберг О. Л. Электронный спектрометр ЭЛСПЕК для перспективных космических миссий // Приборы и техника эксперимента. - 2026. - в печати

Планы

- Продолжение лабораторных испытаний прототипа электронного спектрометра ЭЛСПЕК.
- Доклад «Перспективы изучения плазменного окружения Венеры» на Двадцать первую конференцию «Физика плазмы в солнечной системе» .

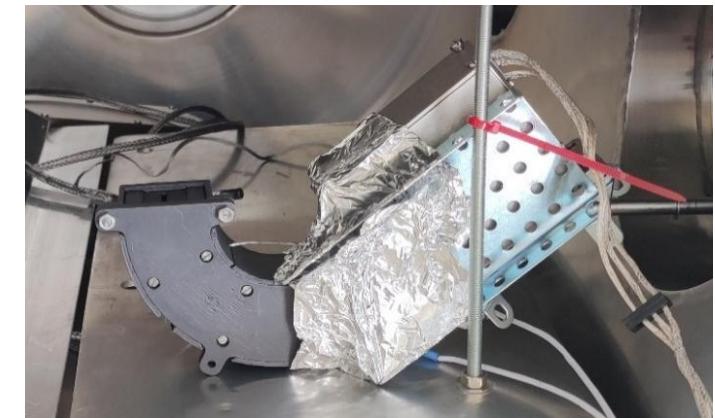
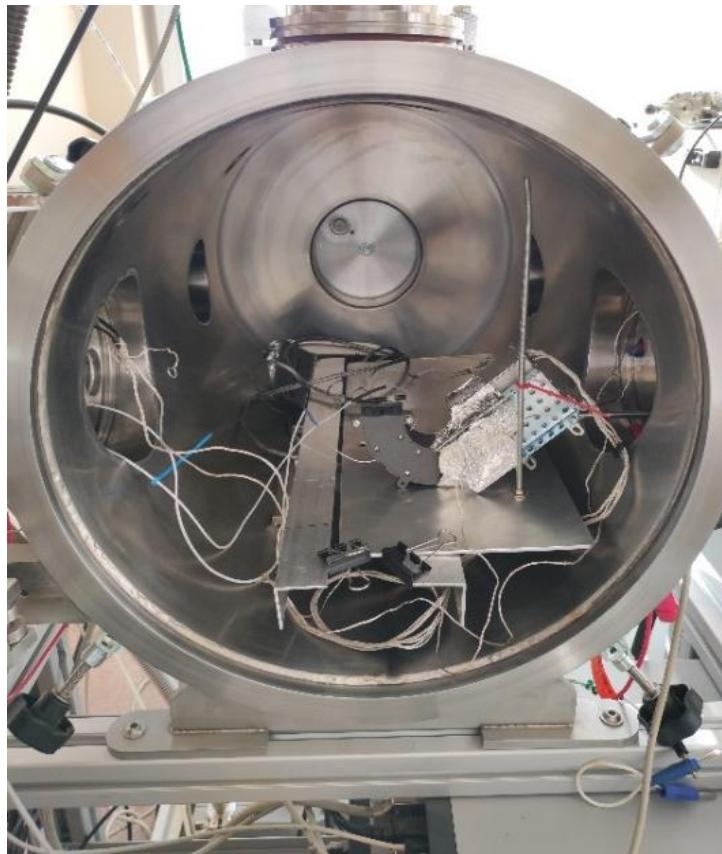
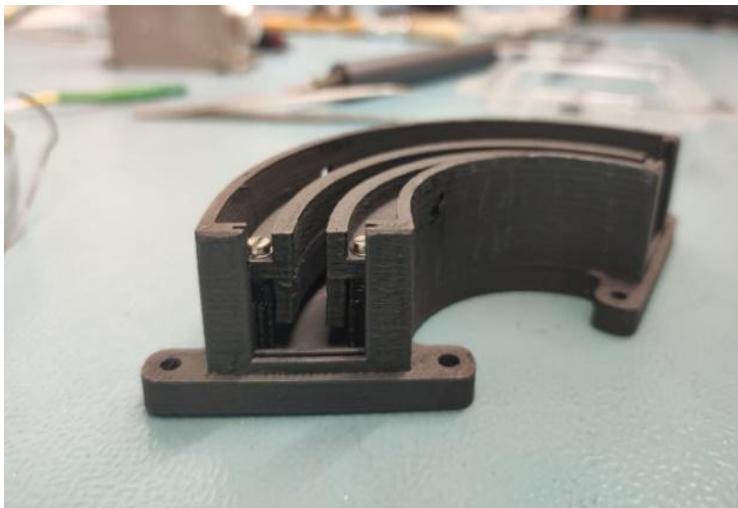
Спасибо за внимание!

Исследование процессов взаимодействия ионов и энергичных нейтральных атомов с различными материалами



Структура энерго-масс-анализатора

Исследование процессов взаимодействия ионов и энергичных нейтральных атомов с различными материалами



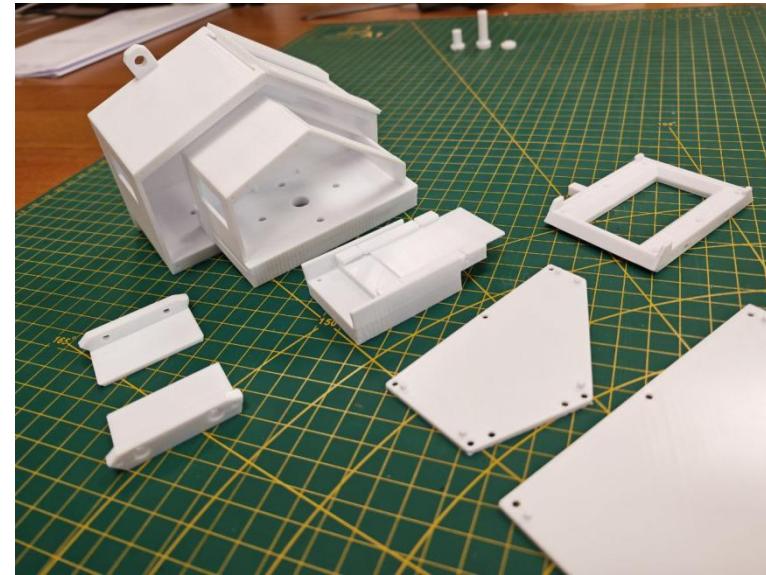
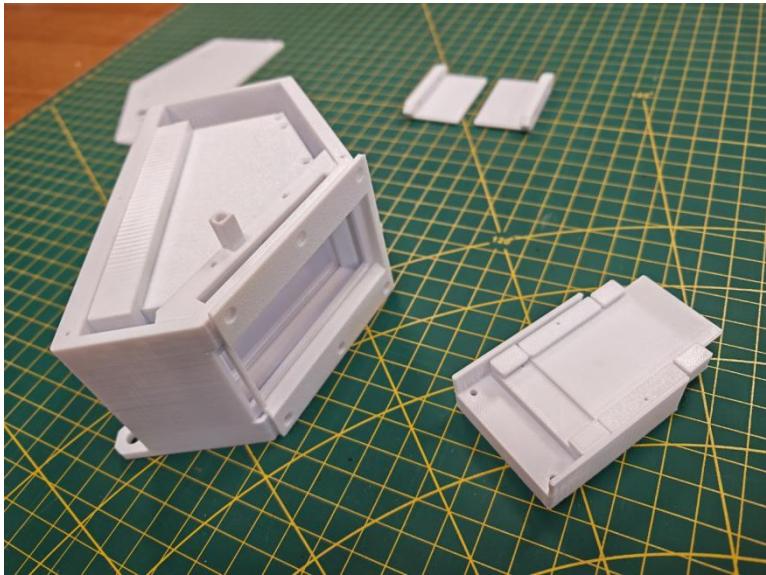
Энергоанализатор

Исследование процессов взаимодействия ионов и энергичных нейтральных атомов с различными материалами

Оптимальный потенциал на обкладке электростатического анализатора составил 94 В, 194 В и 292 В соответственно для заданного напряжения на ионном источнике в 500 В, 1000 В и 1500 В.

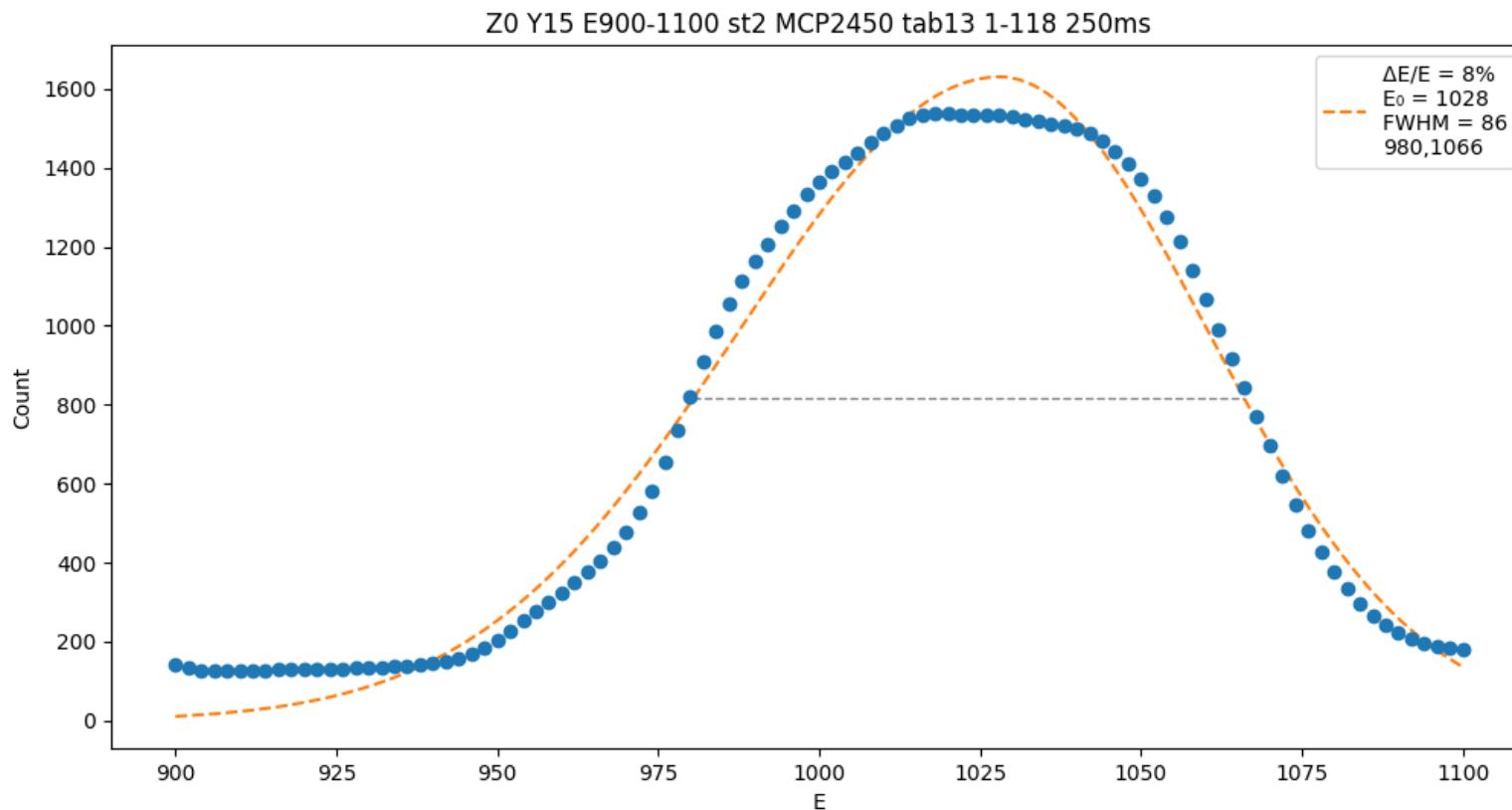
Энергетическое разрешение анализатора по результатам измерений – 9%.

Исследование процессов взаимодействия ионов и энергичных нейтральных атомов с различными материалами



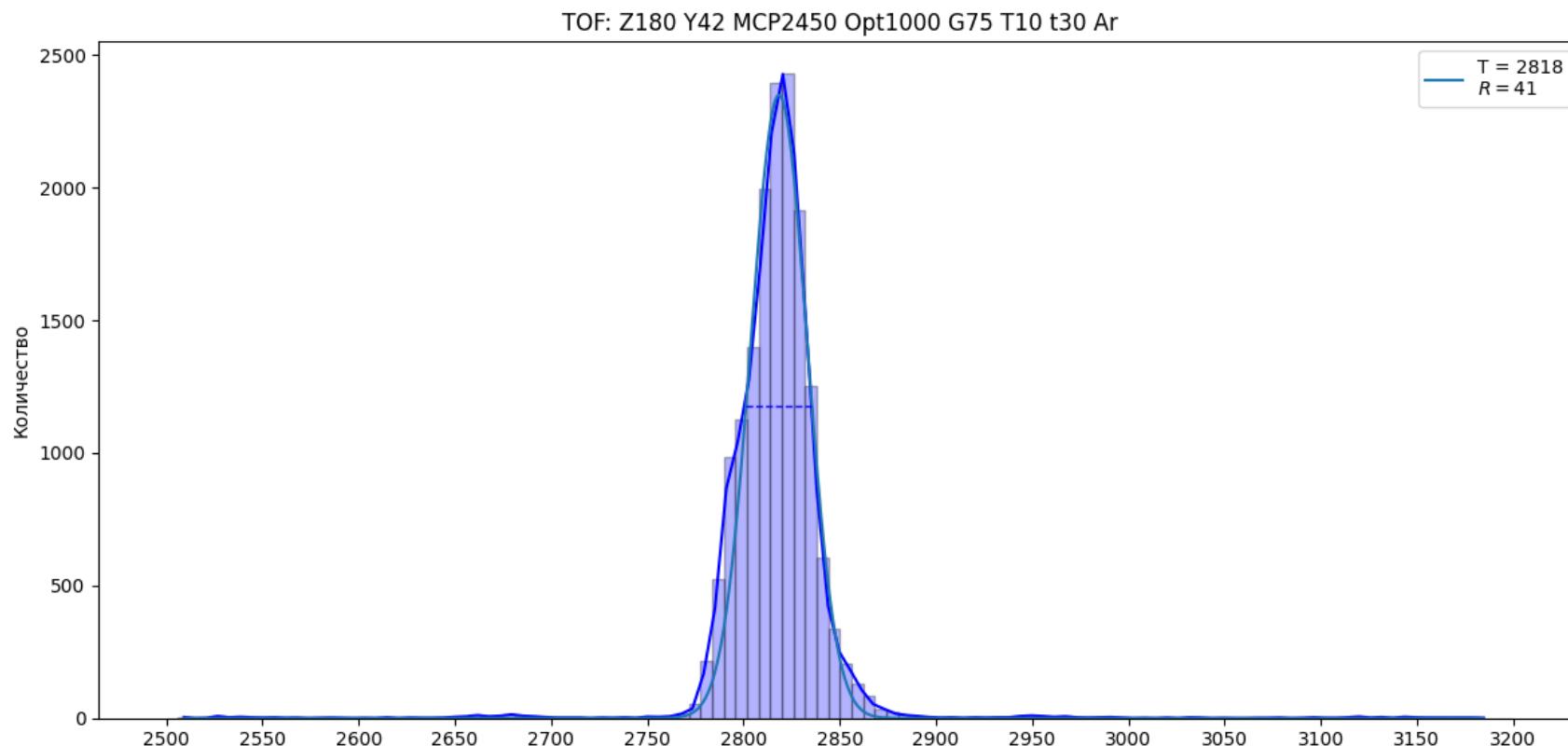
Напечатанная ионизационная ячейка

Обработка данных ФИ ШО



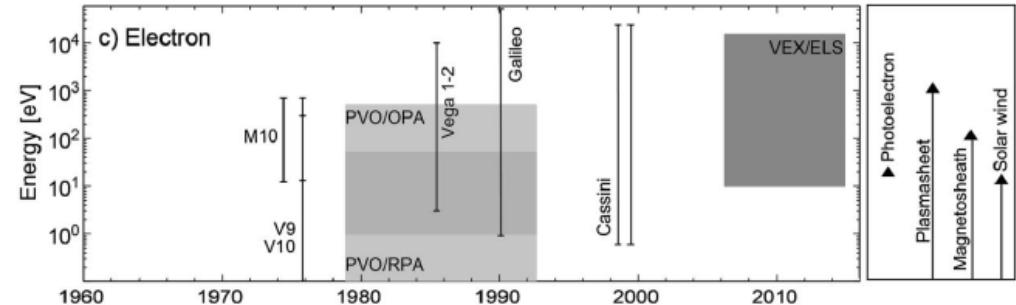
Энергетическое распределение ионов прибора Лина Р1

Обработка данных ФИ ШО



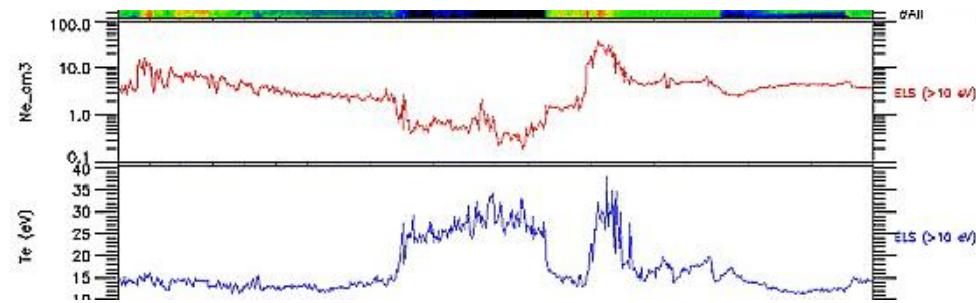
Времяпролетный спектр прибора Лина Р2

Диапазоны физических характеристик популяций электронов в магнитосфере Венеры и солнечном ветре вблизи планеты, которые должен измерять разрабатываемый спектрометр (потоки, угловые распределения и пр.)

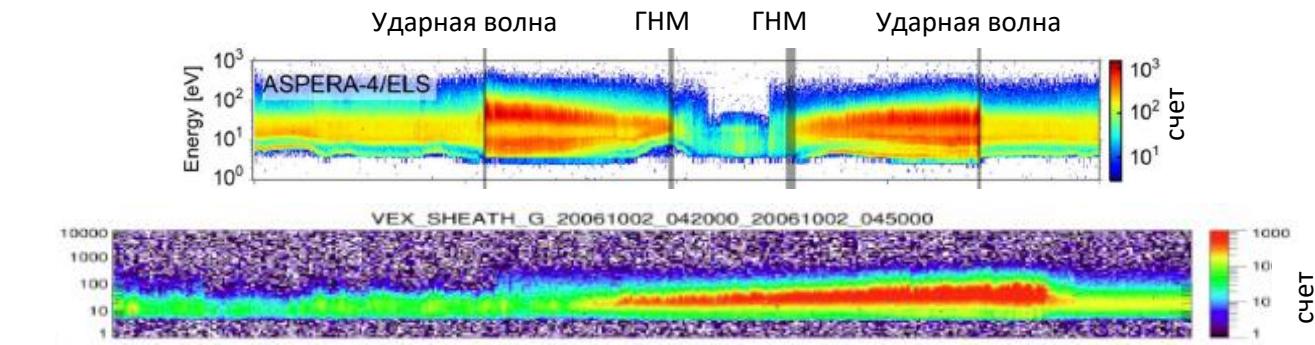


Энергии электронов по данным различных миссий.

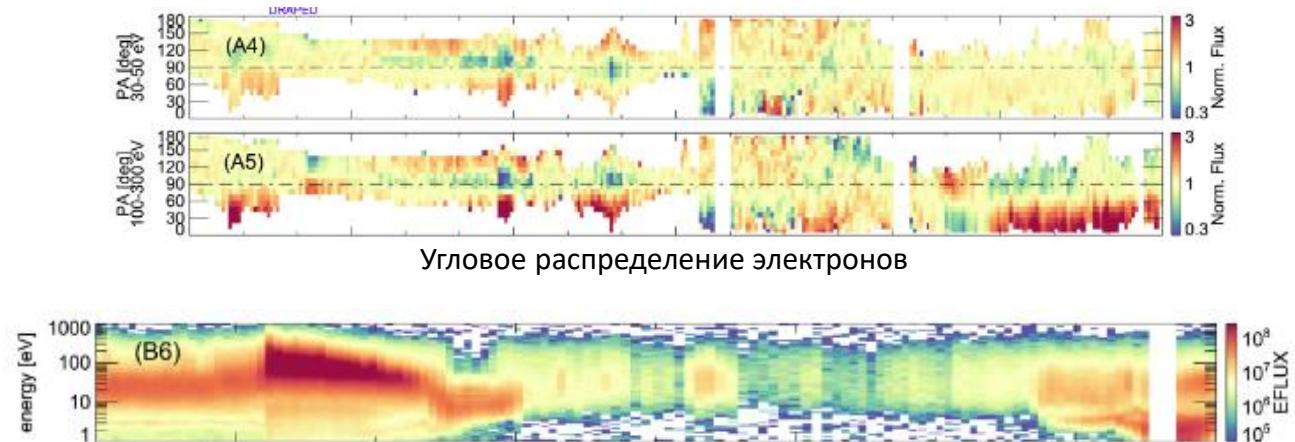
«М» относится к серии «Маринер», а «В» — к серии «Венера». В прямоугольниках справа от панелей указаны типичные энергетические диапазоны для различных областей плазмы в среде Венеры.



профили электронной плотности и температуры, измеренные в магнитосферном хвосте Венеры и над северным полюсом

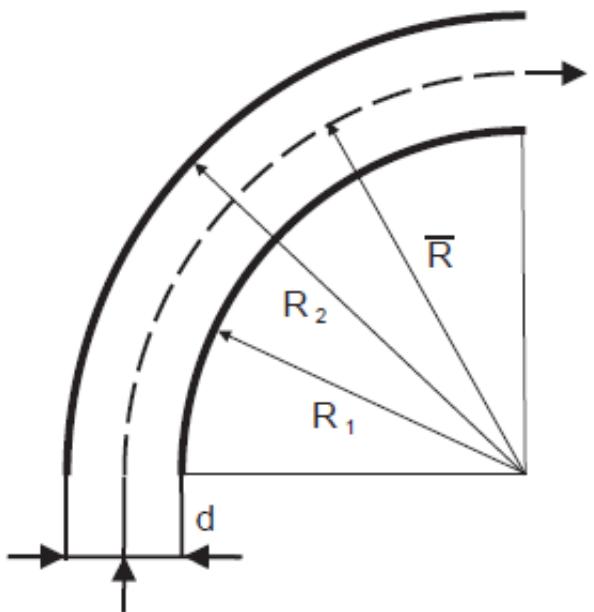


Электронные спектры, полученные спектрометром миссии «VEX». ГНМ — граница наведенной магнитосферы



усредненный дифференциальный поток энергии электрононо $eVs^{-1}cm^{-2}eV^{-1}sr^{-1}$

Расчет напряжений



Электростатический анализатор

$$E = \frac{q(V_2 - V_1)}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

где R1 - радиус внутреннего электрода, R2 - радиус внешнего электрода, а V1 и V2 - потенциалы на внутреннем и внешнем электродах соответственно, а q - заряд электрона