

“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова

# Динамические процессы в авроральной области магнитосферы Земли: результаты и перспективы

М.М. Могилевский  
ИКИ РАН

Он создал первый университет; он, лучше сказать,  
сам был первым нашим университетом.

А.С. Пушкин

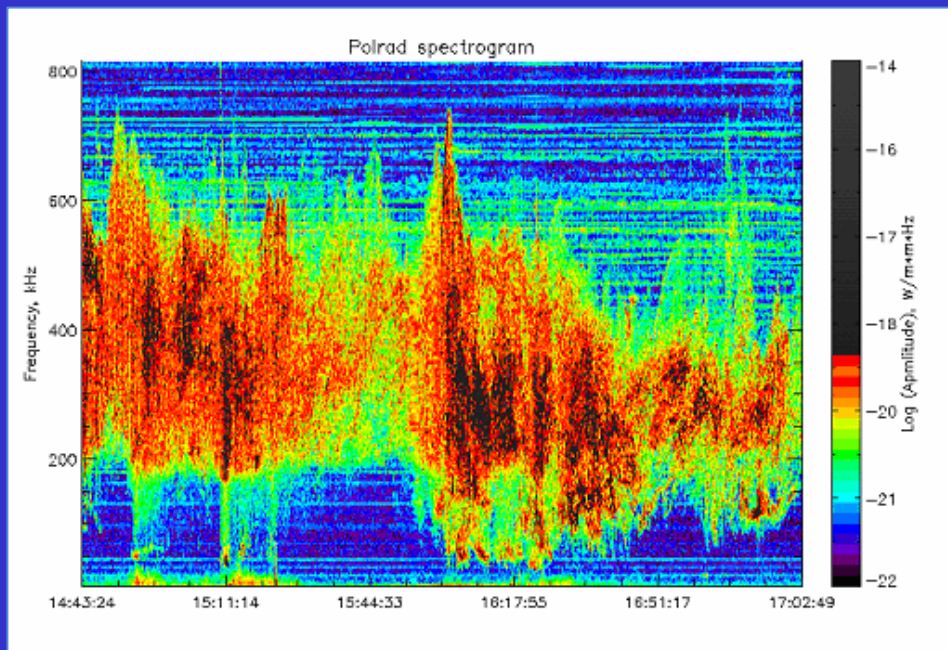
Ода «Вечернее размышление о Божием величестве при случае великого северного сияния» (1743), напечатана в 1747 году в «Риторике».

В своём письме академику А. Н. Гиршову, который, в числе других, указывал на приоритет Б. Франклина, М.В. Ломоносов пишет: «...δ) Мнение Франклина о северном сиянии совершенно расходится с моим. Ведь электрическую материю, необходимую для образования северного сияния, он старается привлечь с тропиков к полюсам; я же нахожу её в изобилии на месте; он не излагает, каким образом это происходит, а мимоходом в нескольких словах намечает свою догадку, а я подробнейшим образом изъясняю свою теорию; он не обосновал никакими аргументами, а я подкрепляю не только аргументами, но и объяснением явления».

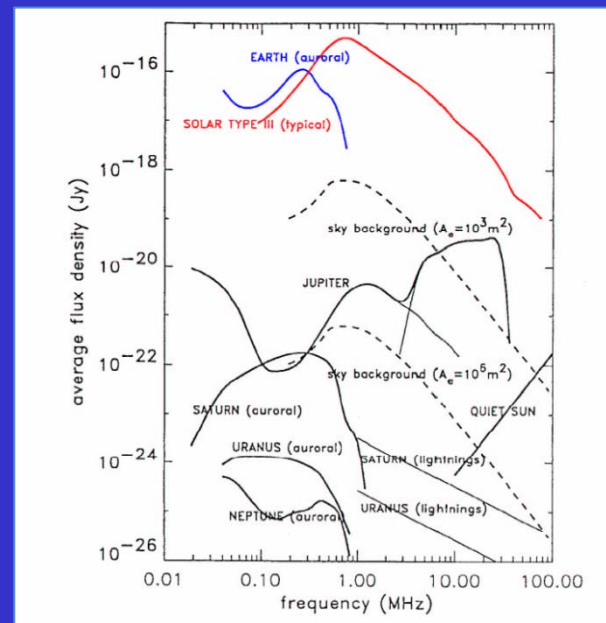
*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Авроральное Километровое Радиоизлучение

Впервые АКР было зарегистрировано на спутнике ЭЛЕКТРОН в 1967 году (Бенедиктов и др. Космические исследования 1968)



Пример спектрограммы АКР, зарегистрированного на спутнике ИНТЕРБОЛ-2



Сравнение интенсивностей мазерного излучения (из работы P.Zarka)

*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Механизм генерации АКР

После обнаружения АКР более десятилетия продолжался поиск механизма его генерации, до выхода статьи Ву и Ли, в которой был предложен механизм циклотронной мазерной неустойчивости, развивающейся в кавернах низкой плотности:  $f_{ce} \gg f_{pe}$  (Wu C.S. and L.C. Lee, Astrophys. J., 1979)

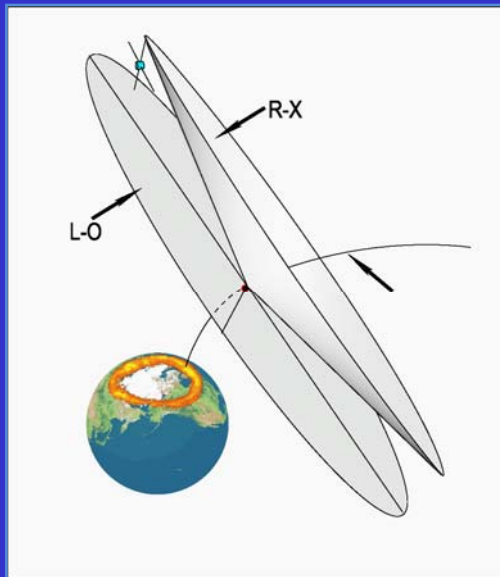


Диаграмма излучения АКР согласно механизму Ву и Ли.

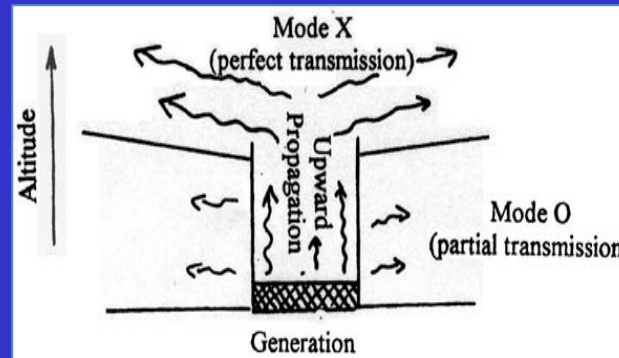
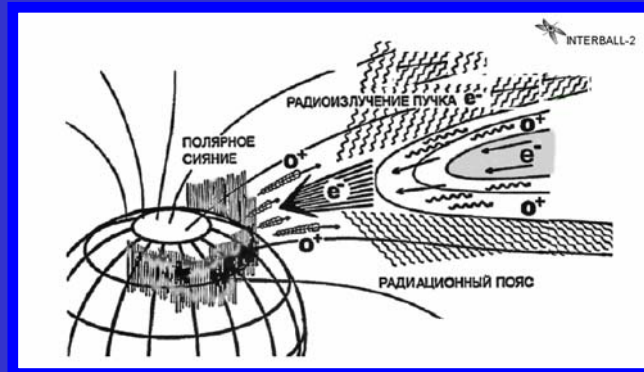


Схема генерации АКР в ограниченном источнике (Louarn and Le Queau, Planet. Space Sci, 1996)



Схематическое изображение процессов в авроральной магнитосфере Земли.

*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Измерения на спутнике ИНТЕРБОЛ-2

Низкоэнергичные ионы ( $0.1 < E < 80$  эВ)

Эксперимент ГИПЕРБОЛОИД

Высокоэнергичные потоки частиц ( $0.005 < E < 20$  кэВ)

Эксперимент ИОН

Электромагнитные поля в диапазоне частот ДС – 10 Гц

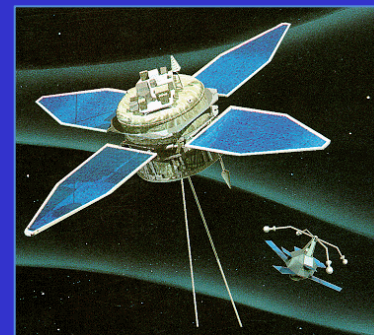
Эксперимент ИЭСП

Электромагнитные поля в диапазоне частот 20 Гц – 20 кГц

Эксперимент НВК-ОНЧ

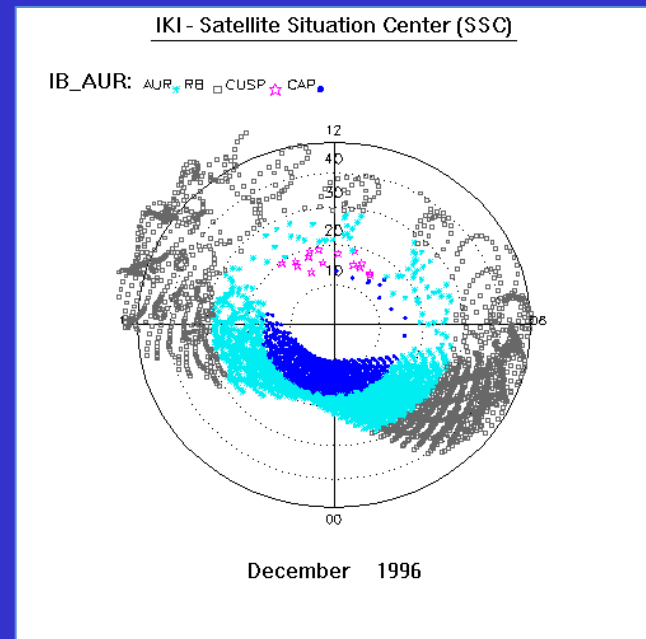
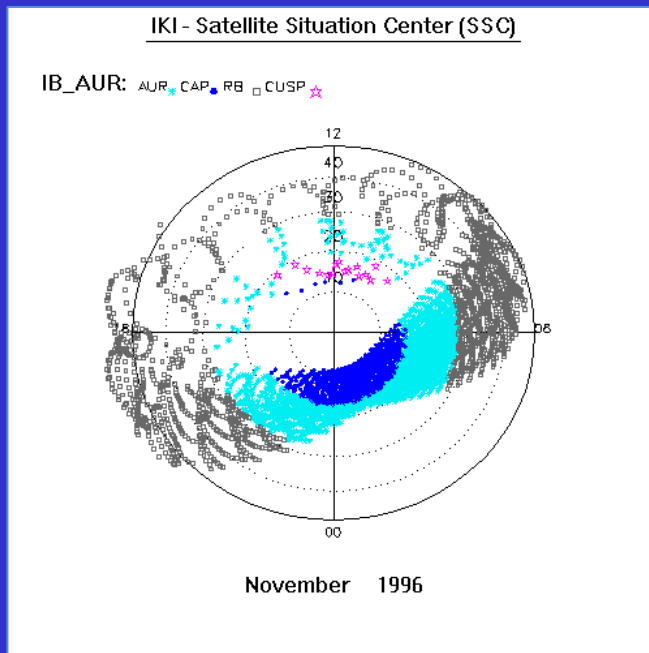
Электромагнитные поля в диапазоне частот 4 кГц – 2 МГц

Эксперимент ПОЛЬРАД



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Эволюция орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-2



Проекция орбит АЗ на полярную диаграмму

*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

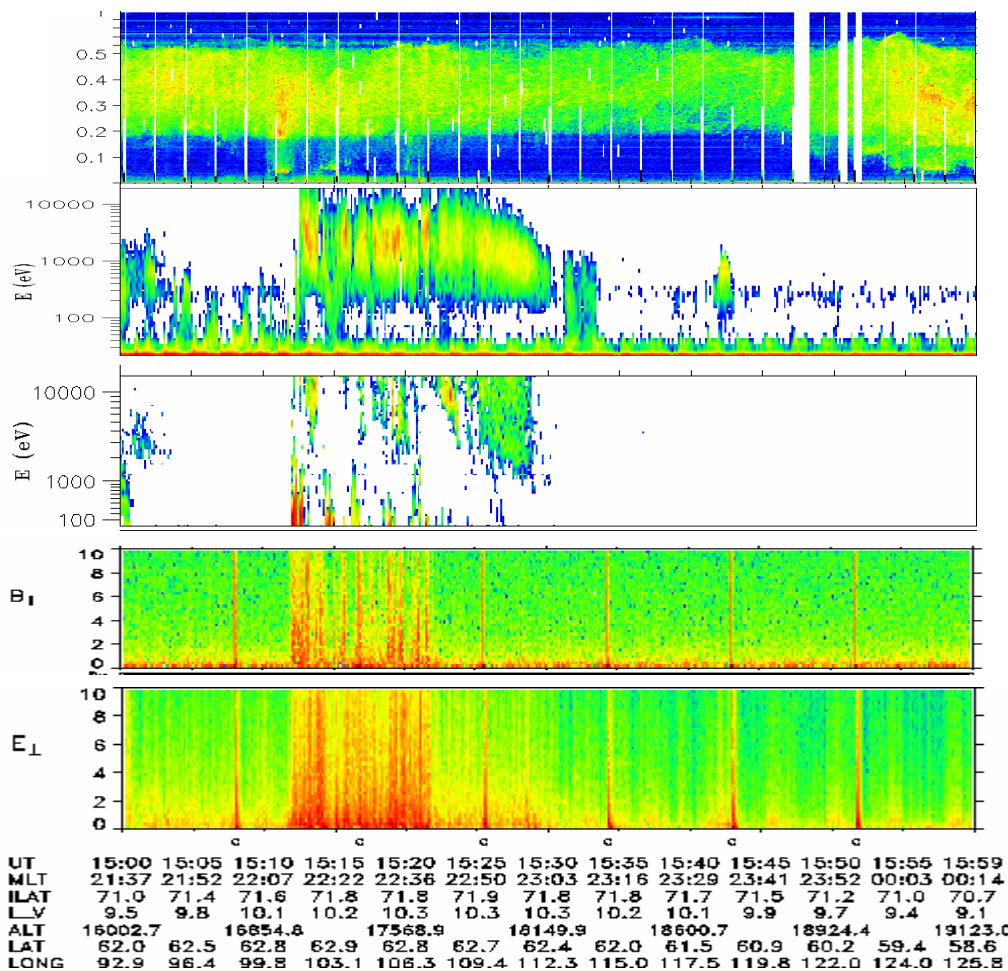
# Результаты одновременных измерений параметров плазмы и электромагнитного поля на спутнике ИНТЕРБОЛ-2

Интенсивность АКР

Потоки энергичных электронов в диапазоне энергий до 20 кэВ

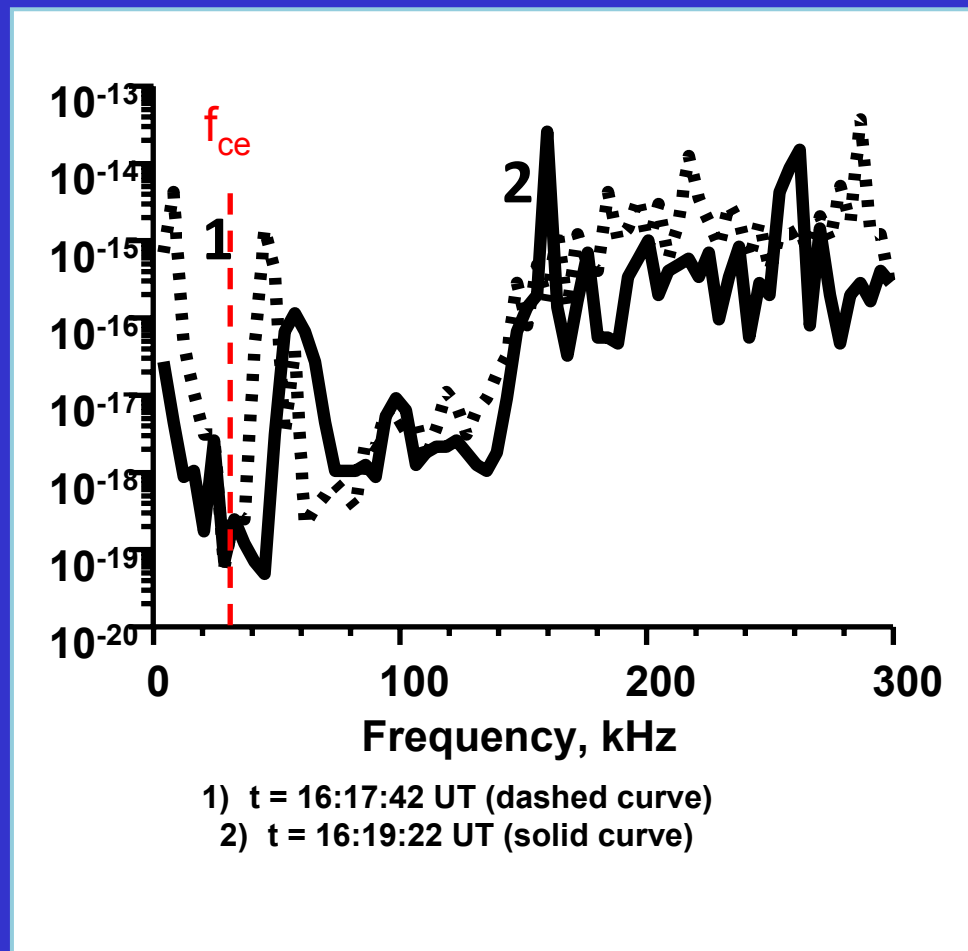
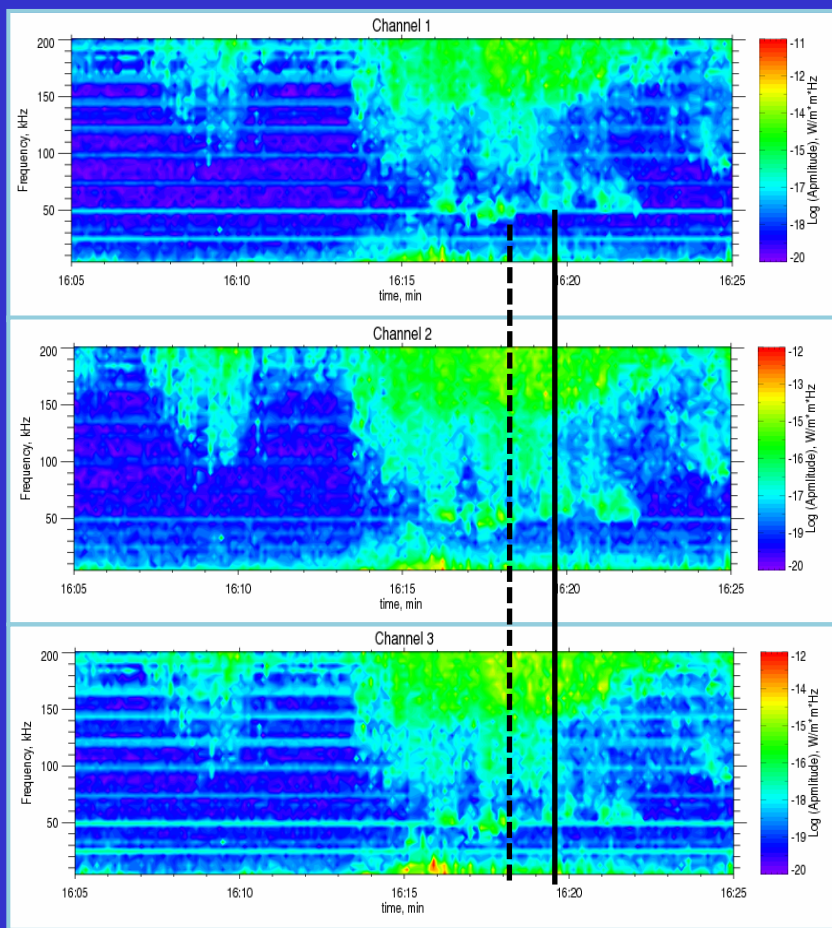
Потоки энергичных протонов в диапазоне энергий до 20 кэВ

Интенсивность магнитной (верхняя панель) и электрической (нижняя панель) компонент ЭМ поля в диапазоне частот до 10 Гц



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

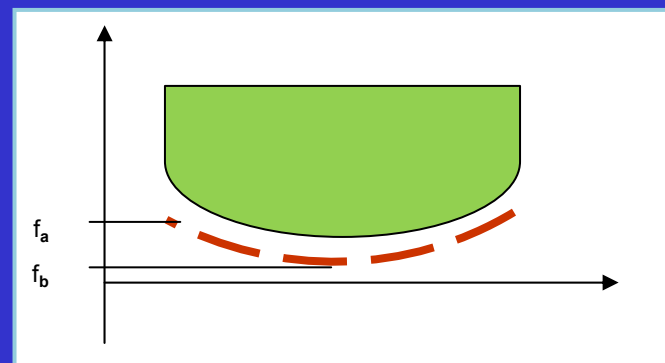
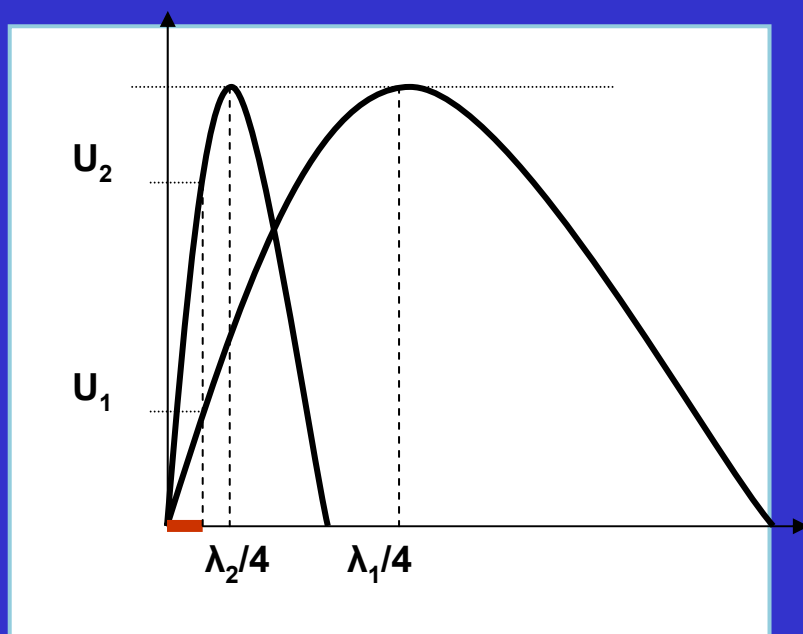
# Динамика низкочастотного АКР



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*



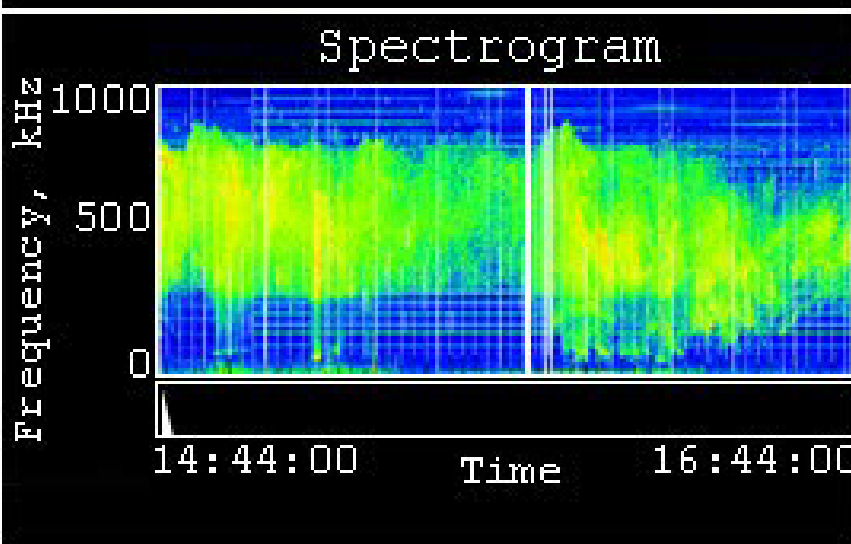
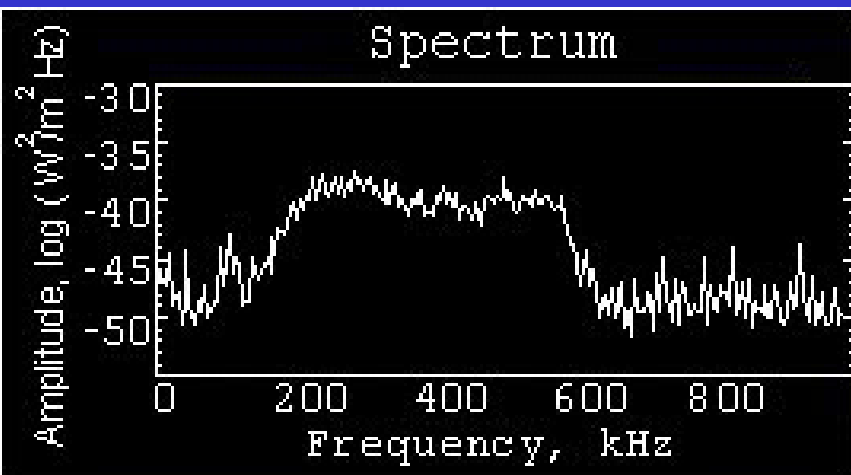
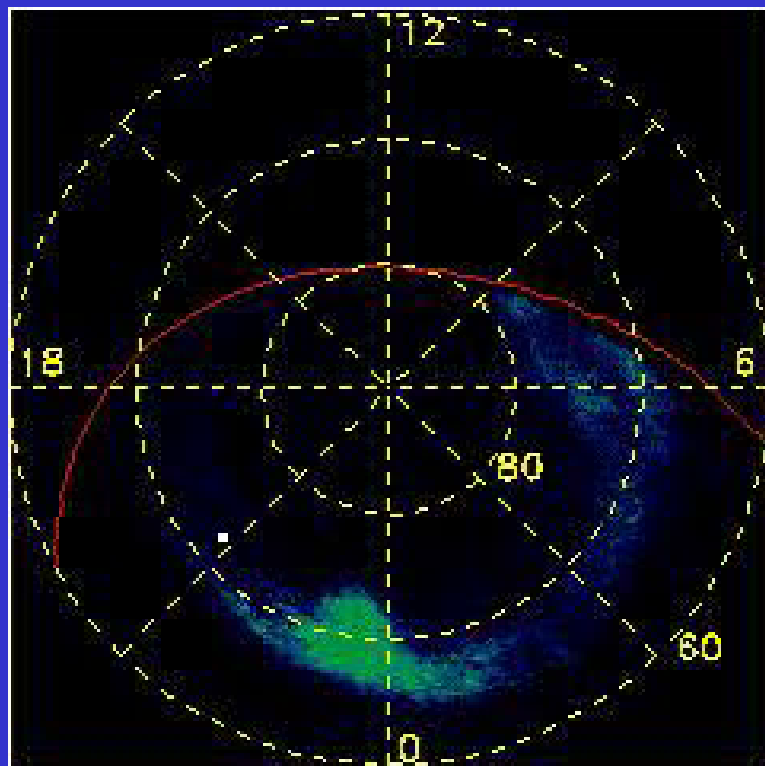
# Изменение интенсивности АКР вблизи нижней частоты обрезания и центральной частоты низкочастотного АКР



$$f_a - f_b \sim 10\text{-}20 \text{ kHz} \rightarrow \Delta h \sim 1,5 - 3 \cdot 10^3 \text{ km}$$

Длина антенны на борту (отмечена красным цветом) много меньше длины волны излучения ( $l < \lambda_2/4 < \lambda_1/4$ ). Поэтому эффективность антенны увеличивается для коротковолнового излучения по сравнению с длинноволновым ( $U_2 > U_1$ ).

# Динамическое сравнение АКР и авроральной светимости

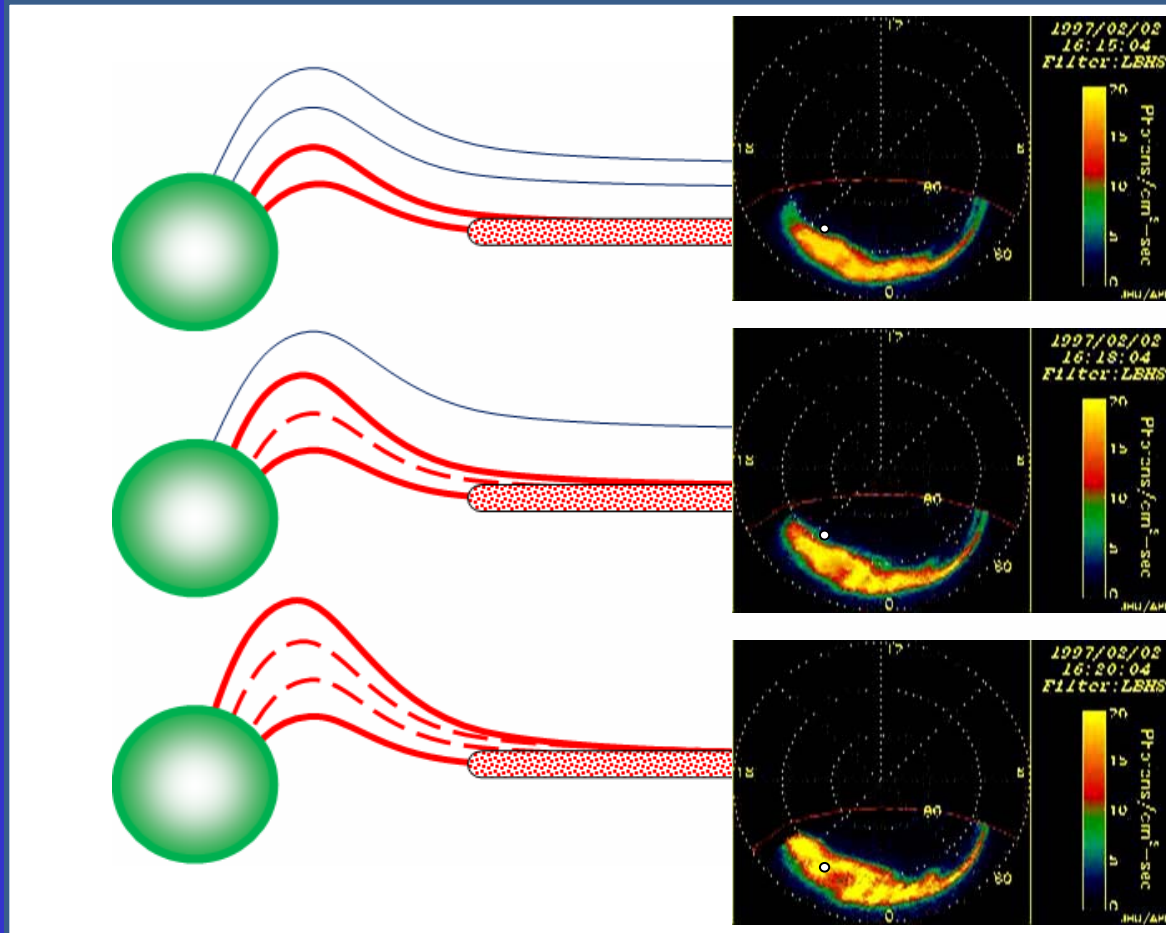


Спутник POLAR, эксперимент UVI

Спутник ИНТЕРБОЛ-2, эксперимент ПОЛЬРАД

*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Изменение положения полярной границы авроральной области при развитии геомагнитной активности



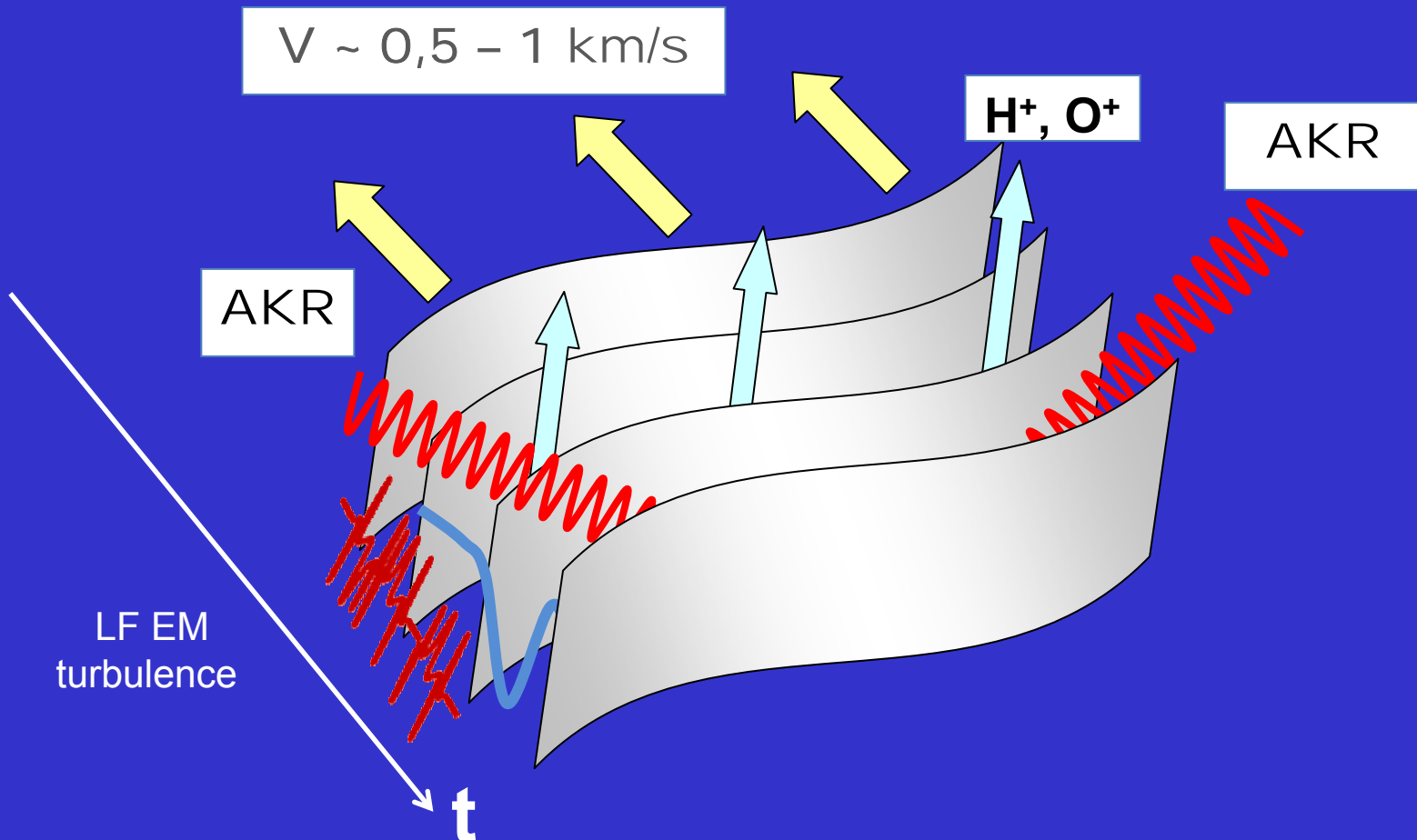
T1

T2

T3

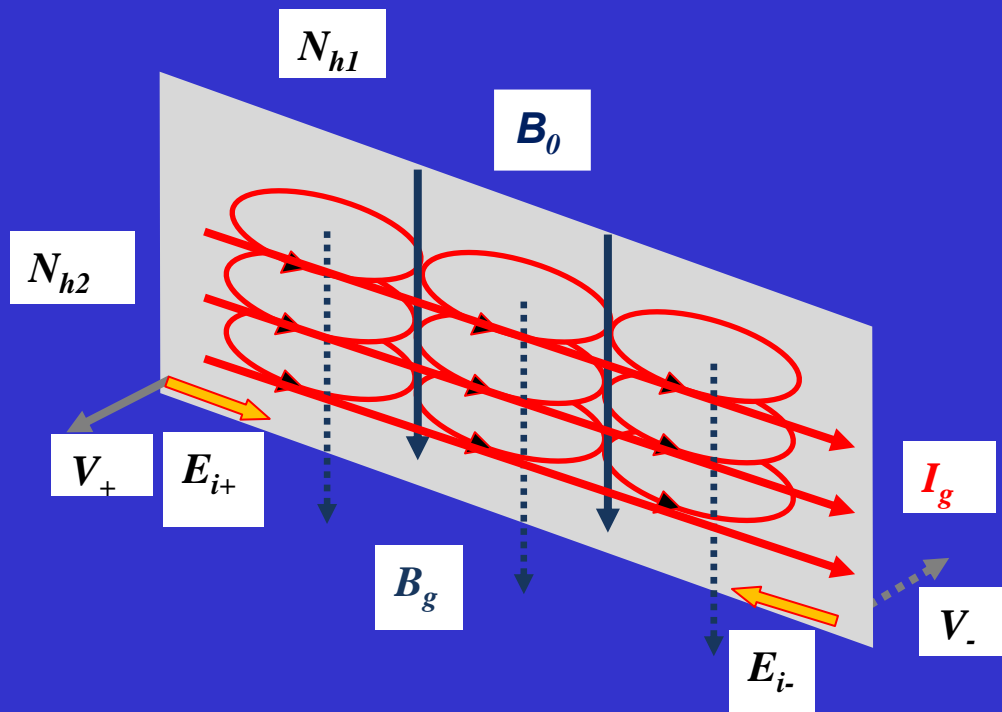
*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Последовательность наблюдаемых явлений



“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова

# Механизм ускорения/разогрева ионов на полярной границе авроральной области



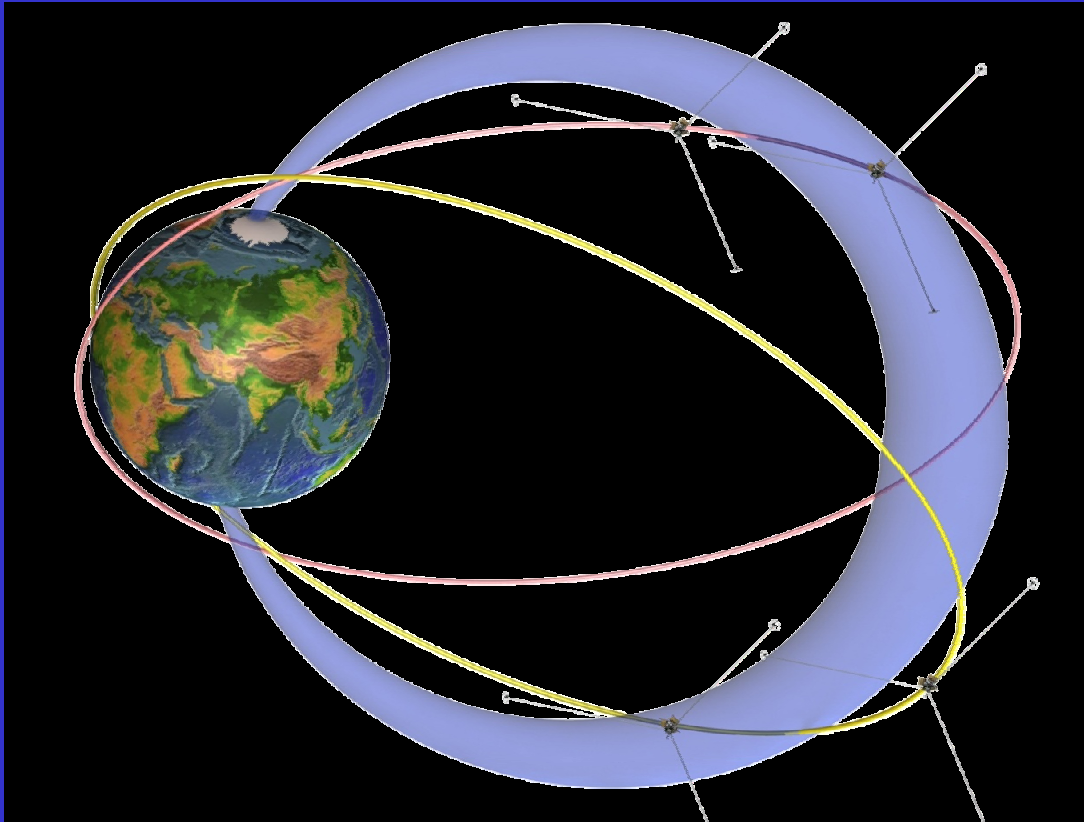
$$R_e \ll R_i$$

$$B \sim j / R^n$$

где  $n$  зависит от геометрии тока и его внутренней структуры

$$E = [vB] \sim 0.1 - 1 \text{ мВ/м}$$

# Проект РЕЗОНАНС



В рамках проекта будут запущены две пары спутников на специально подобранные, магнитосинхронные орбиты, что позволит проводить долговременные измерения параметров плазмы и электромагнитного поля в выбранной силовой трубке магнитного поля.



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ  
ЗЕМЛИ”*

# Комплекс научной аппаратуры РЕЗОНАНС

Измерение электромагнитных полей и волн	
Магнитометр	3 компоненты магнитного поля в диапазоне частот DC – 10 Гц
УНЧ приемник	3 компоненты электрического поля в диапазоне частот DC – 10 Гц
ОНЧ приемник	3 электрические и три магнитные компоненты поля в диапазоне частот 10 Гц – 20 кГц
ВЧ приемник	3 электрические и 3 магнитные компоненты поля в диапазоне частот 5кГц – 10 МГц
Радиоинтерферометр	5 и 10 МГц



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Комплекс научной аппаратуры РЕЗОНАНС

## Измерение параметров плазмы и энергичных частиц

Холодная (фооновая) плазма	0 – 20 эВ
Сверхтепловая плазма – 3D электроны	10 эВ – 15 кэВ
Сверхтепловая плазма – 3D ионы и их состав	10 эВ – 15 кэВ
Быстрый анализатор электронов	5 кэВ – 50 кэВ
Анализатор частиц кольцевого тока	20 кэВ – 1 МэВ
Анализатор частиц радиационного пояса	100 кэВ – 10 МэВ

*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ  
ЗЕМЛИ”*

*в рамках празднования 300-летия со дня рождения*





# Основные научные задачи

## 1. Приэкваториальная область

- Динамика магнитосферных циклотронных мазеров,
- Формирование кольцевого тока,
- Заполнение магнитосферы после магнитных возмущений.

## 2. Авроральная область

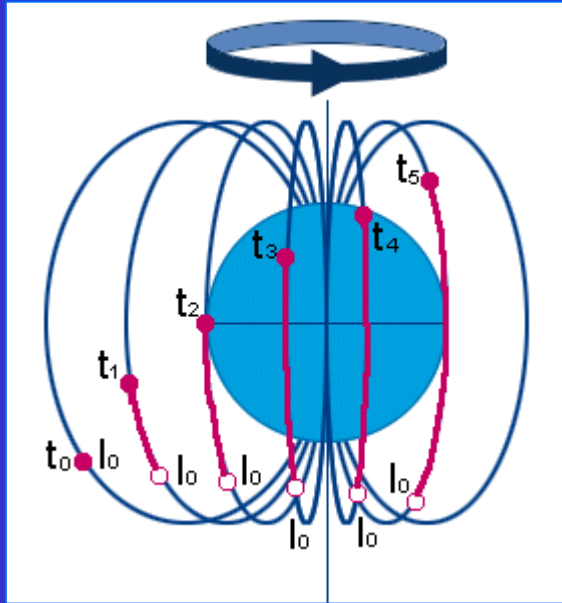
- Глобальные явления (АКР: источник и распространение; генерация и распространение ОНЧ/КНЧ излучений),
- Роль мелкомасштабных явлений в глобальной динамике плазмы (Область ускорения).

## 3. Совместный эксперимент с HAARP



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”  
в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*

# Орбиты спутников РЕЗОНАНС

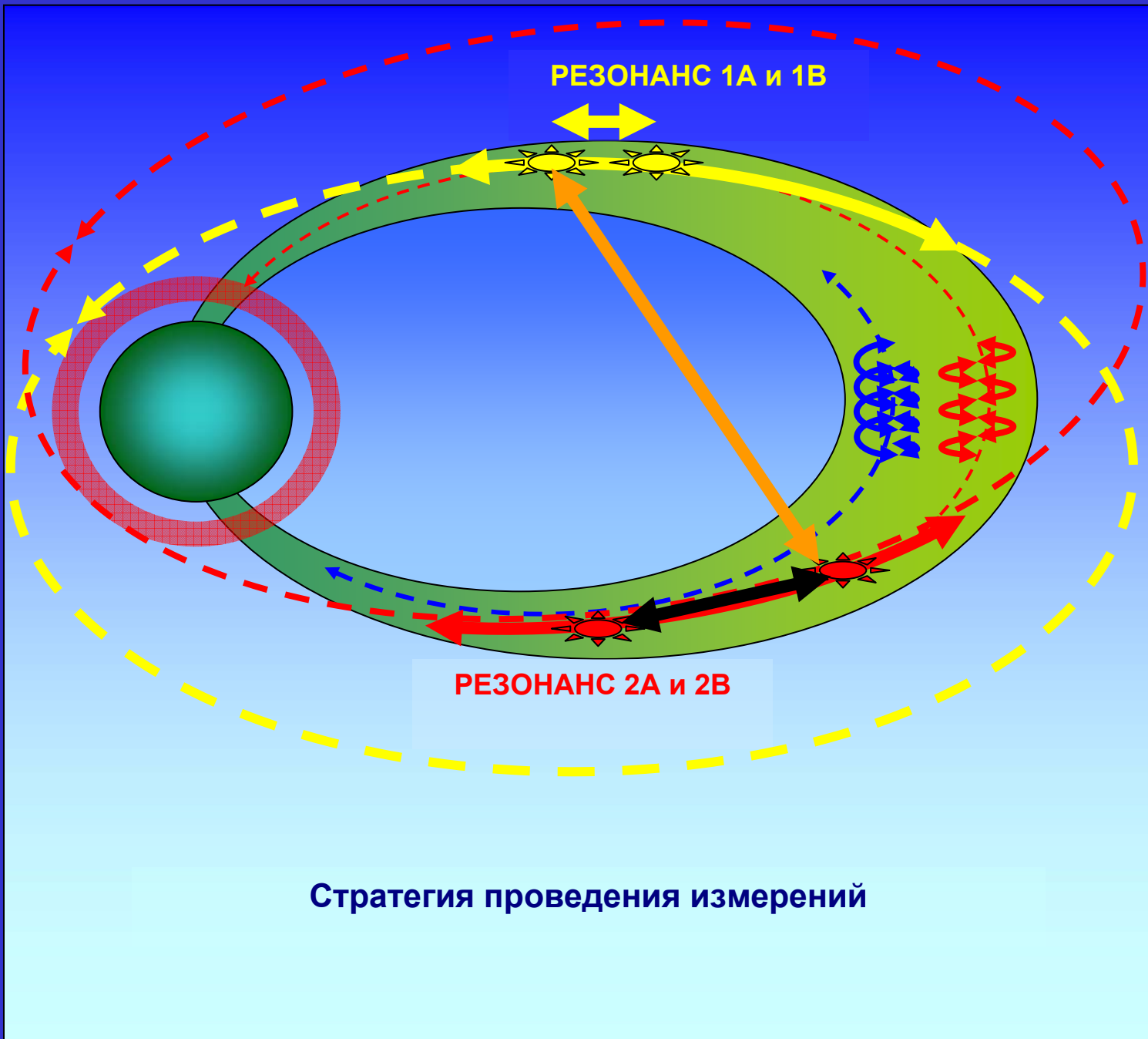


$$\begin{aligned} T &= 8 \text{ h} \\ h_{\text{ap}} &= 28\,000 \text{ km} \\ h_{\text{per}} &= 500 \text{ km} \\ i &= \pm 63,4^\circ \end{aligned}$$

Одним из основных условий выбора орбит спутников проекта является возможность проведения долговременных измерений в выбранной силовой трубке.

Такому условию удовлетворяет «магнитосинхронная орбита» – спутник коротирует с Землей и движется вдоль выбранной силовой линии.

Для выбранных орбит время пребывания в «тонкой» трубке ~ 40 минут, в «толстой» трубке - до 2,5 часов.



~ 1-10 km

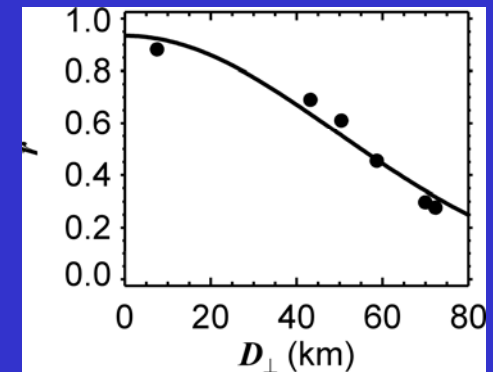
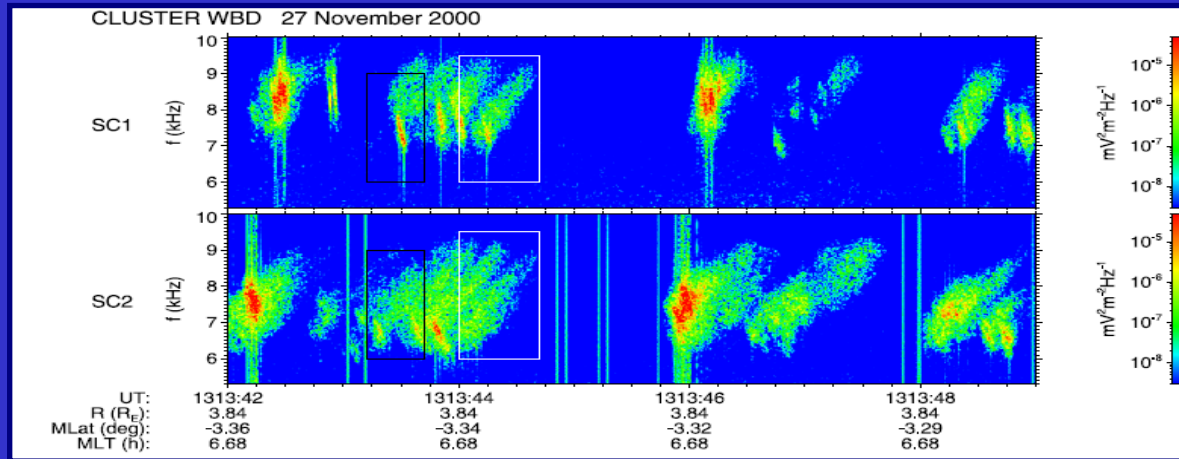
~1- 5 • 10<sup>3</sup> km

~ 5-15 • 10<sup>3</sup> km

## Предварительная программа разделения спутников в парах

	Первая пара (1А/1В)	Вторая пара (2А/2В)
1 фаза : 6-9 месяцев после запуска.	<b>1-10 км</b>	<b>1-10 км</b>
2 фаза: 9-18 месяцев после запуска.	<b>1-10 км</b>	<b>10-100 км</b>
3 фаза: 18-27 месяцев после запуска.	<b>10-100 км</b>	<b>100-1000 км</b>
4 фаза: 27-36 месяцев после запуска.	<b>100-1000 км</b>	<b><u>1000-9600 км</u></b>

# Предпосылки многомасштабных измерений



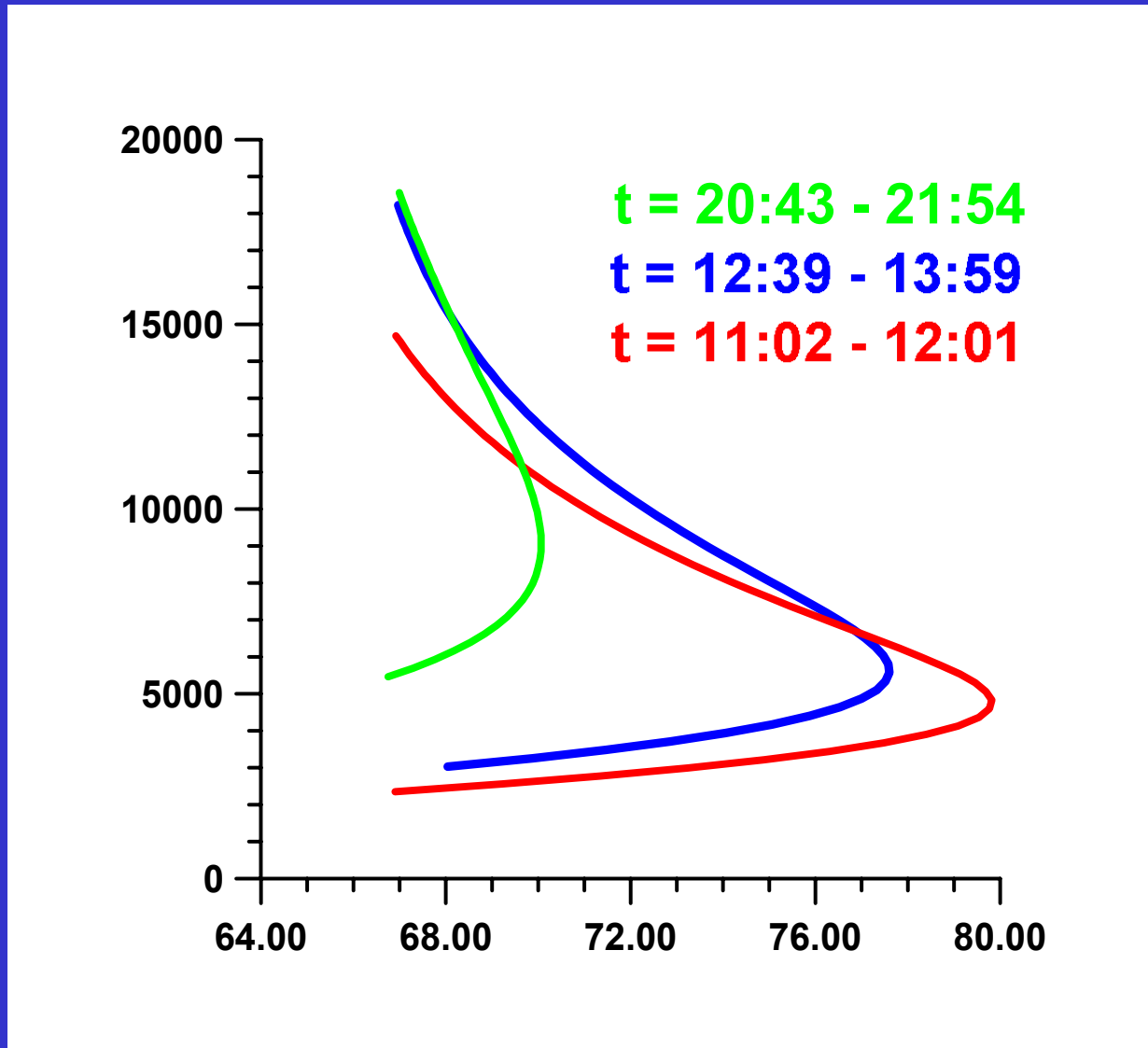
Коэффициенты корреляции между отдельными элементами хорových излучений на двух спутниках.

(O.Santolik and al. 2007)

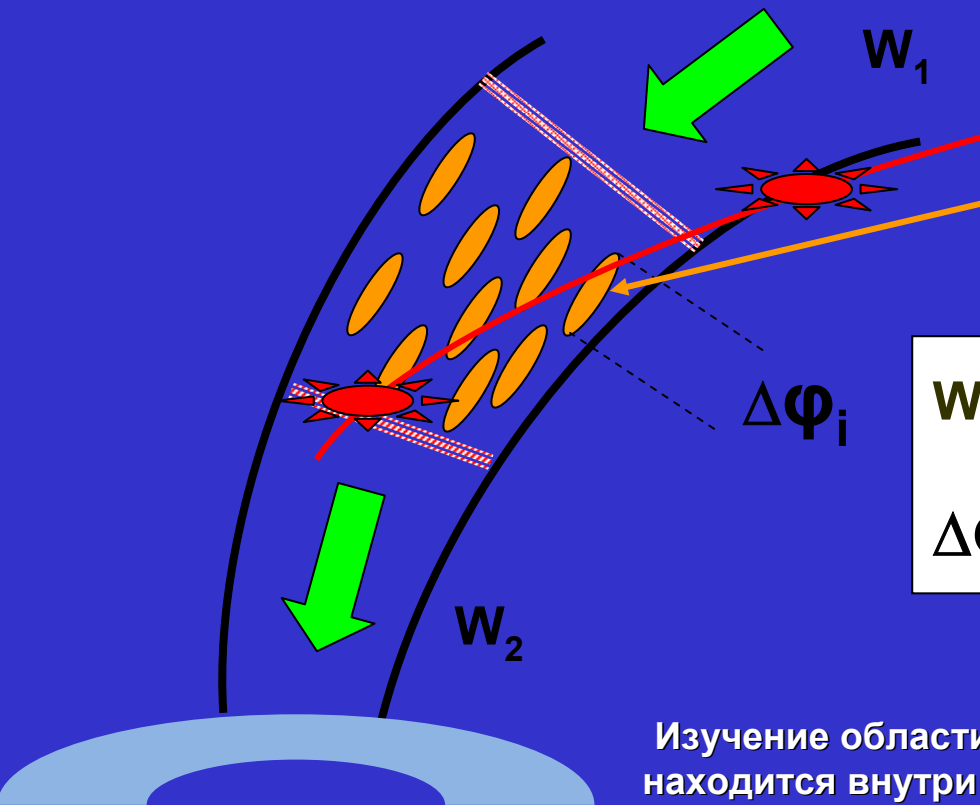
**По результатам измерений в проекте КЛАСТЕР было установлено, что часть хорových излучений имеет заметное отличие на уже коротких расстояниях. Такое отличие трудно объяснить в рамках общепринятых механизмов и требует детальных измерений, в том числе, и долговременных, для определения динамических характеристик.**



# Спутники проекта РЕЗОНАНС в авроральной области

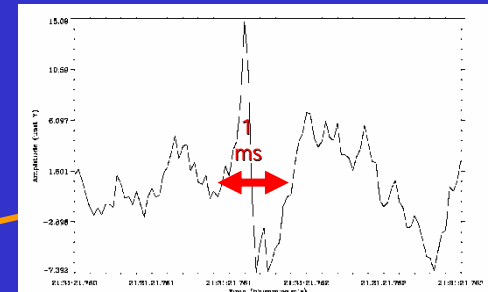


# Измерения в авроральной области

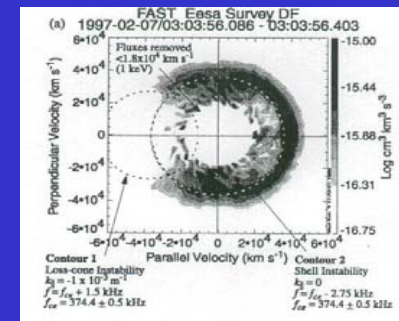


$$W_2 = W_1 + \Delta\phi$$

$$\Delta\phi = \sum \Delta\phi_i$$



Electrodynamics structure measured onboard of INTERBALL-2 satellite.

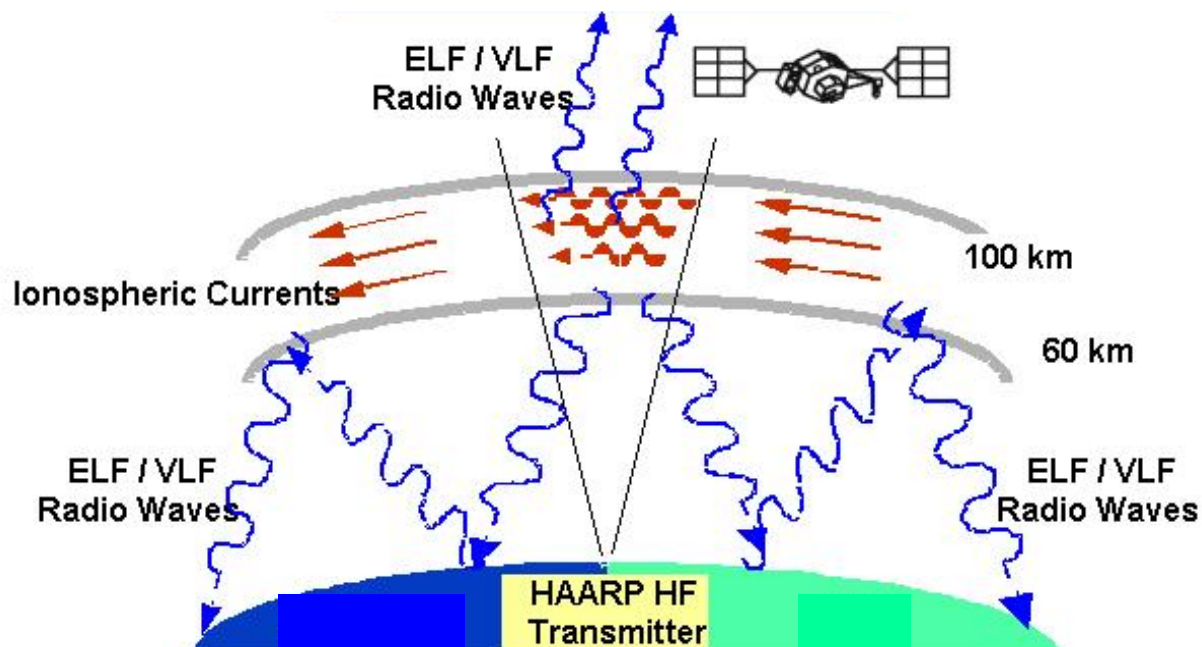


"Deformed" distribution function of electrons measured onboard FAST satellite.

Изучение области ускорения: один из спутников пары будет находится внутри этой области, а второй – вне ее. Сравнение одновременных измерений позволят определить величину и характер ускорения.

*"АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ"*

# RESONANCE-HAARP JOINT EXPERIMENT



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ  
ЗЕМЛИ”*

*в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*



# Области исследований совместного эксперимента

- Генерация УНЧ/КНЧ/ОНЧ волн в результате модуляции ионосферного тока
  - Инжекция в магнитосферу – Искусственно стимулированные излучения (ASE)
- Генерация УНЧ магнитозвуковых волн в F области ионосферы и их воздействие на альвеновский резонатор – триггерирование Pc1
- Ленгмюровская турбулентность – Параметрическая неустойчивость
- Создание искусственных дактов и инжекция в них волн
- Возбуждение волн на верхней гибридной частоте и трансформация НГР в свистовые волны

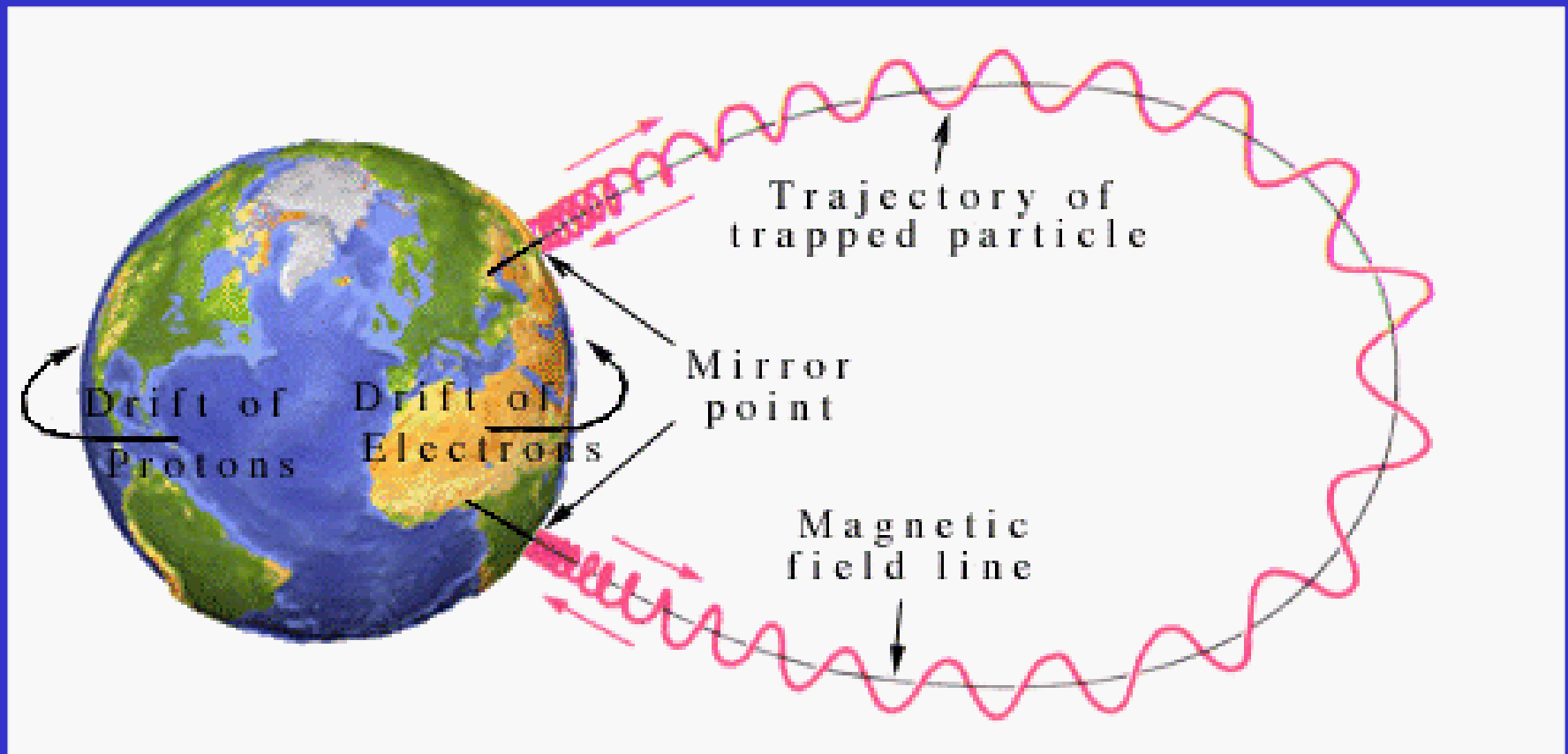
*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ”*

*в рамках празднования 300-летия со дня рождения М.В.Ломоносова*



# Совместный эксперимент РЕЗОНАНС/НААРР

ОНЧ волны взаимодействуют с захваченными в магнитосфере частицами, что приводит к изменению их питч-углового распределения и высыпанию в ионосферу.



# Возможности нагревного стенда НААРР



- 180 элементов (12x15) фазированной решетки
- 360 диполей
  - НЧ диполи – от 2.8 до 8.4 МГц
  - ВЧ диполи- от 7 до 10 МГц
- 10 МВт излучения от независимых 10 кВт передатчиков
- Возможная полоса излучаемого сигнала
  - 200 кГц (2.8 МГц)
  - 500 кГц (10 МГц)

Раствор конуса излучения

**20°x16° (2.8 МГц)**

**5.7°x4.5° (10 МГц)**

- Направление излучения может изменяться на 30° от зенита по любому азимуту в диапазоне частот от 2.8 до 8 MHz (15° на 10 МГц)
- Быстрое сканирование +/- 15°
- ЧМ, АМ и импульсная модуляция 30 кГц
- Излучение на двух частотах (Split Array)
- Линейна, левая и правая поляризация излучения

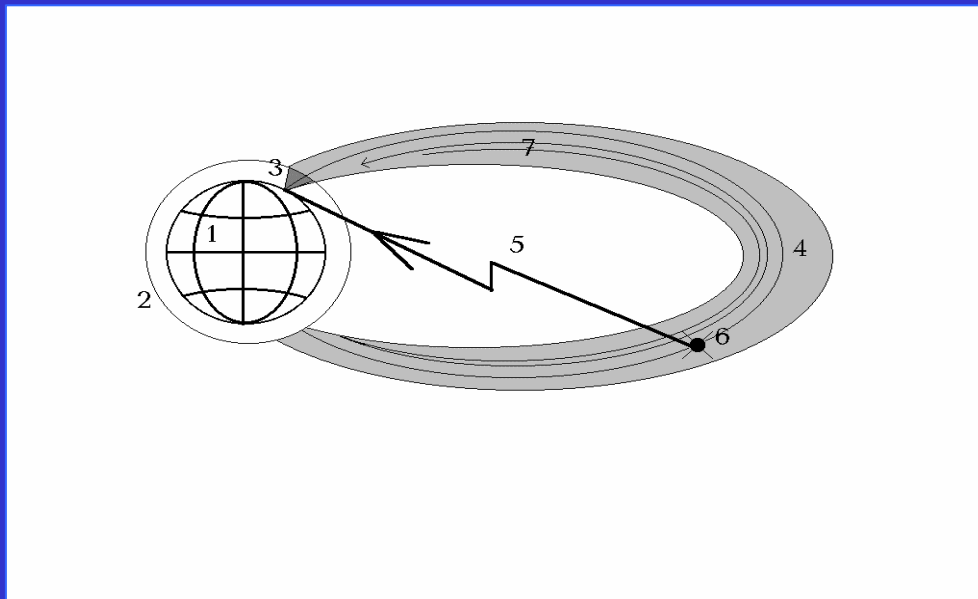
# Антенна нагревного стенда HAARP



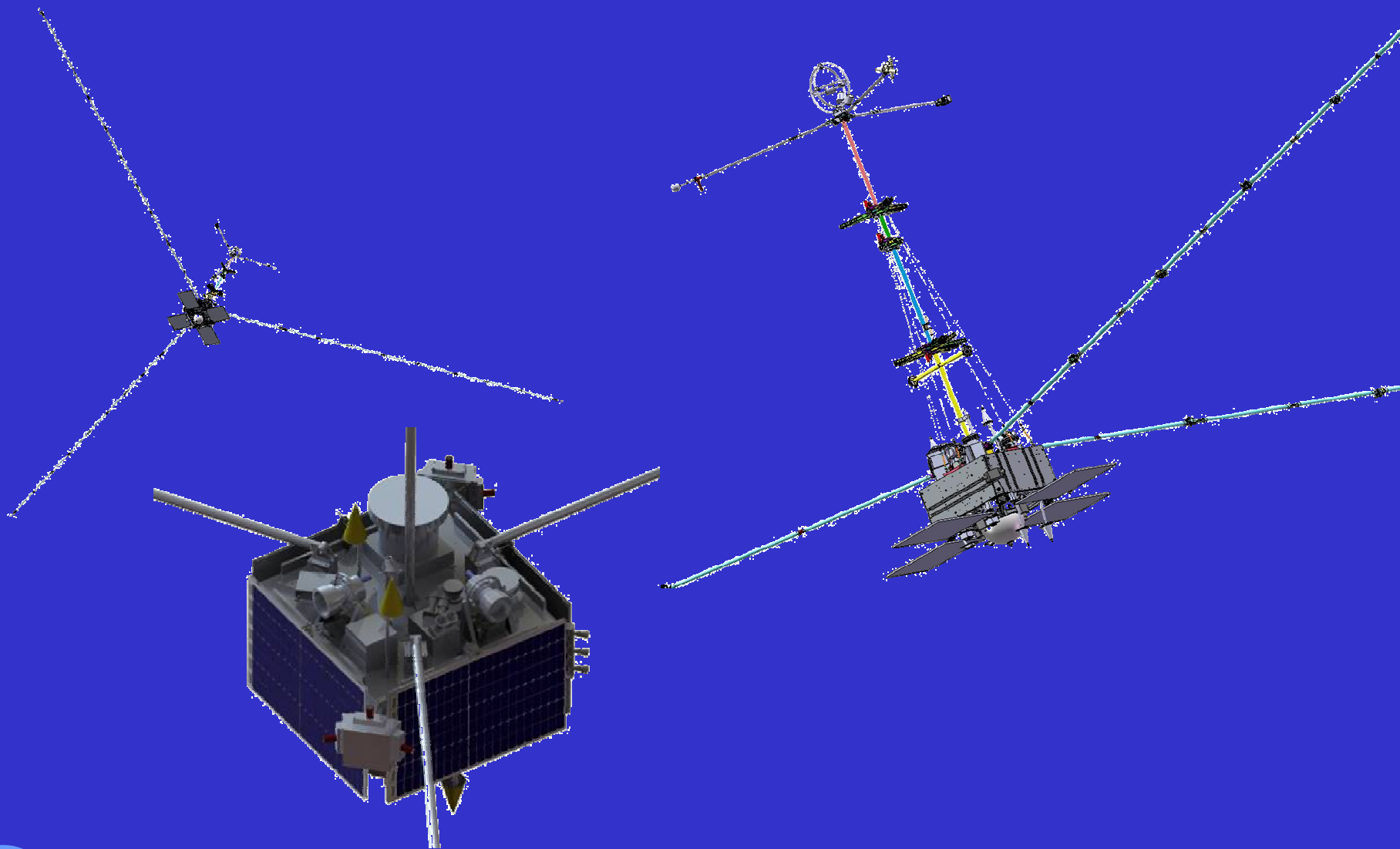
30.6 acres

# РЕЗОНАНС-НААРР активный эксперимент

Управляемая обратная связь в естественной колебательной системе



1 – Земля, 2 – ионосфера, 3 – область искусственно нагретой ионосферы, 4 – силовая трубка магнитного поля, сопряженная с нагретой ионосферой, 5 – телеметрическая линия, 6 – спутник, 7 – траектория частиц и захваченных волн



*“АВРОРАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В МАГНИТОСФЕРЕ  
ЗЕМЛИ”*

# Участники проекта РЕЗОНАНС

Россия – ИКИ РАН, НПОЛ, ИПФ РАН, ИЗМИРАН, НИРФИ, ПГИ  
КНЦ РАН

Австрия – ИКИ ААН

Болгария – ИКИ БАН

Чехия – IAF CAS

Финляндия – Oulu university

Франция – LPCE/CNRS, CESR CNRS

Германия – IMP Lindau

Греция – Thrace Univ.

Польша - CBK PAN

Словакия – IEP SAS

Украина – ЛФ ИКИ НАНУ/НКАУ, ИРА НАНУ

USA – Mariland University

