



ПРИРОДА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ  
И ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ СТРУКТУРЫ  
АВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ

Б.В. Козелов

Полярный геофизический институт КНЦ РАН

# Содержание

- Исторические свидетельства
- Первые научные исследования
- Основы физики полярных сияний и их наблюдений
- Примеры наблюдений на разных масштабах: наземные, спутниковые
- Полярные сияния на других планетах
- Подходы к описанию структуры полярных сияний





# Апатиты (67.34N, 33.24 E)

лучи во время магнитной бури 26 сентября 2011, 19:45 UT  
поле зрения 67°, вид на запад, ускорено в 25 раз





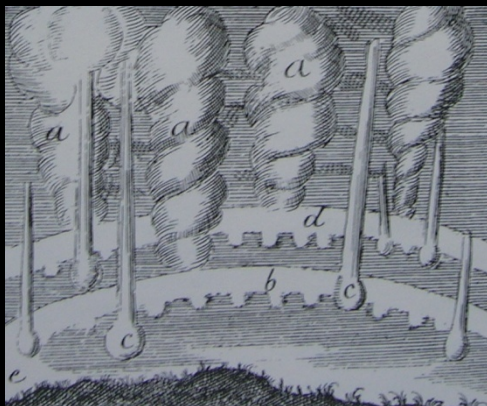
# Мифологический период



Аврора над Нюрембергом в Гемании, 1591.



Норвежский корабль, авроральная дуга и созвездие «Большая медведица».

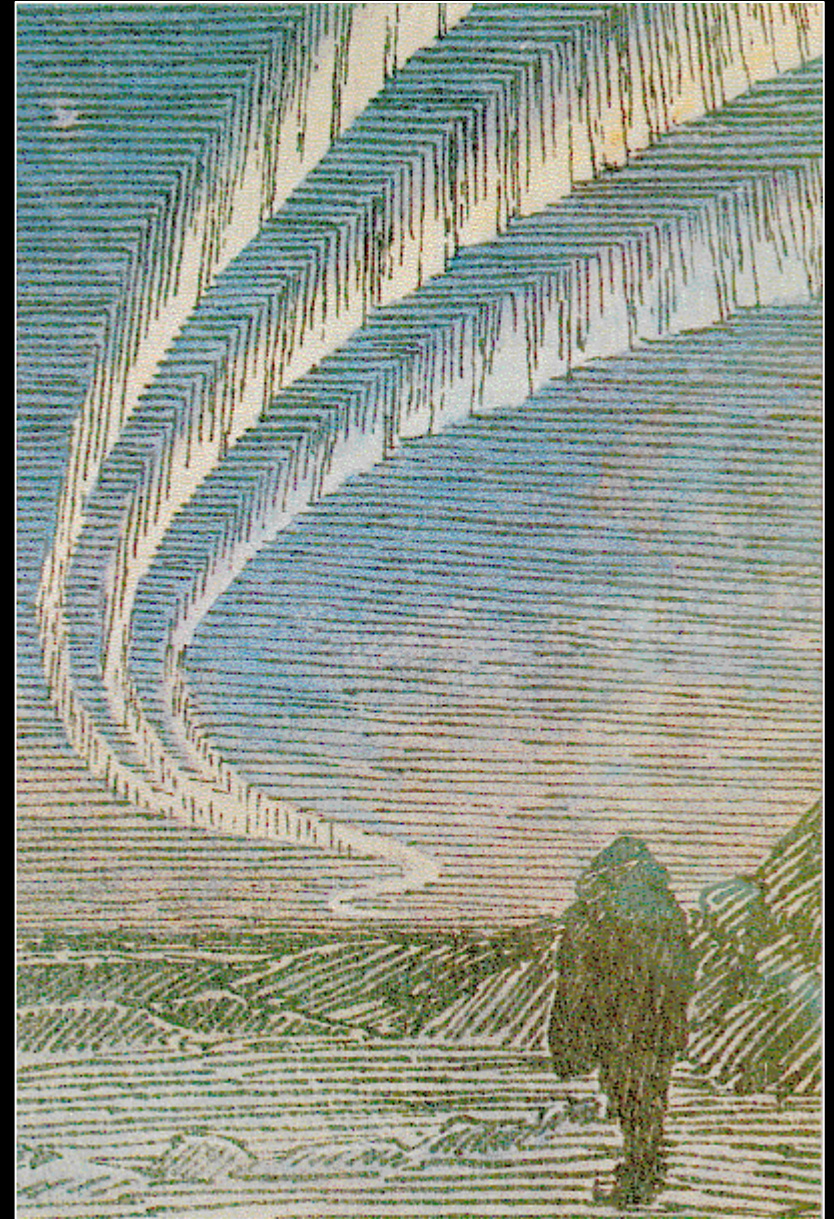


Число документированных наблюдений,  
200 Р.Х.-1500 А.Д.:

Европа ~ 300

Китай ~ 400





Информация об истории:  
Asgeir Brekke and Alv Egeland  
“The Northern Lights”

## Связь с электричеством

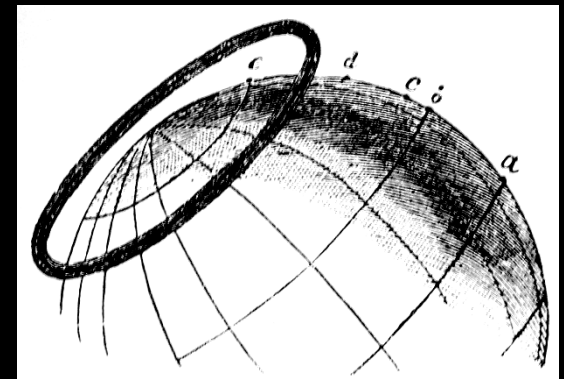
Михаил Ломоносов (1743) считал, что полярные сияния образуются «движением эфира», что в современной терминологии означает движение электрических зарядов.



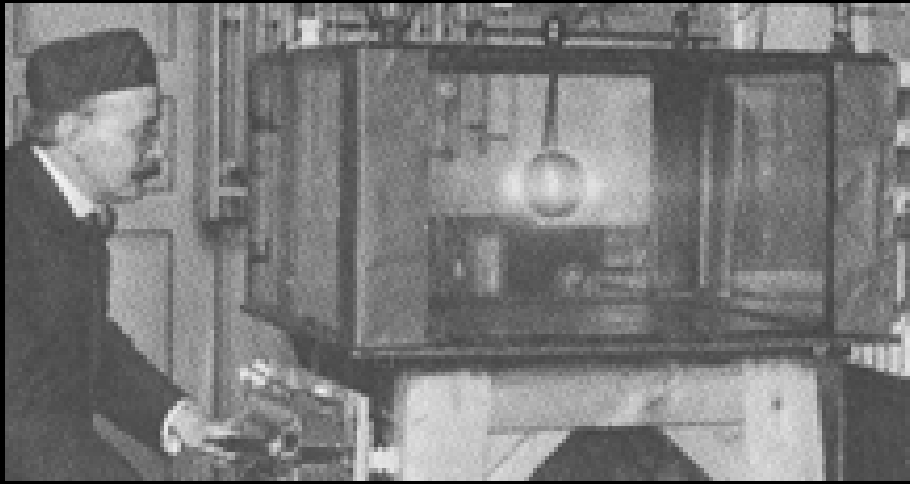


# Свойства полярных сияний, известные к концу XIX века

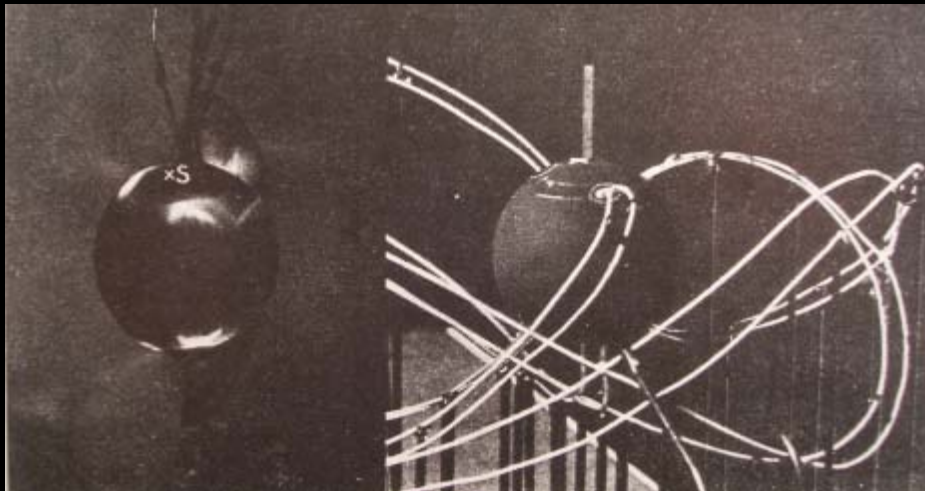
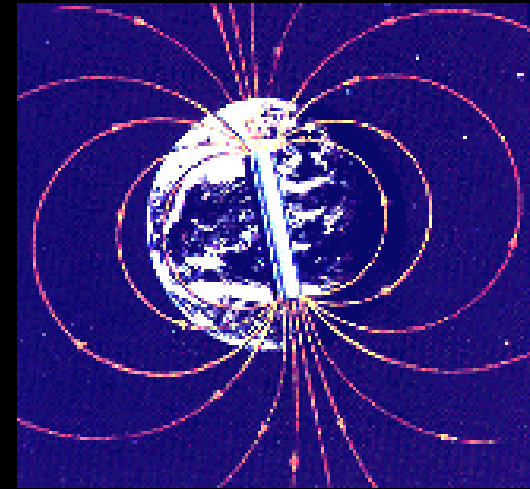
- Обычное явление в высоких широтах
- Наблюдается также в южном полушарии
- Возможно образуют окружность вокруг полюсов (Tromholt, Fritz, ...)
- Сопровождаются магнитными возмущениями
- Связь с активностью Солнца



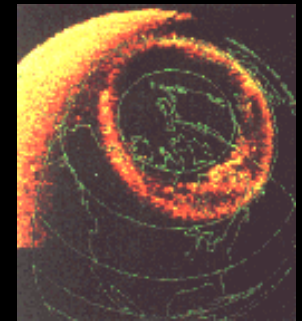
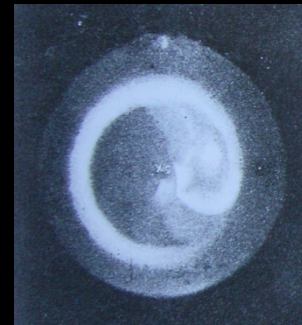
# Выдающиеся норвежцы: Штормер и Биркеланд



К.Биркеланд и его установка «террелла»



Штормеровские траектории заряженных частиц





ISS: ESA - D.Ducros

## XX век



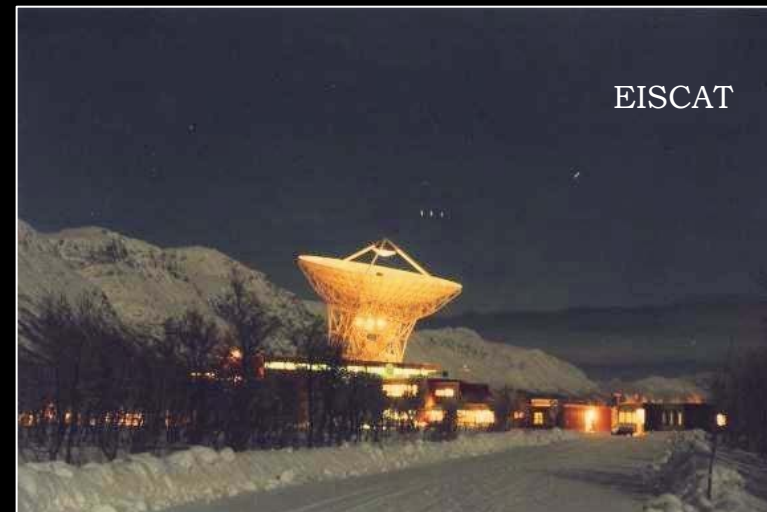
Russian Space Agency

Быстрое развитие оптического оборудования и методов регистрации

Другие методы наблюдений (радары, риометры, КНЧ-ОНЧ приемники и др.)

Одновременные наземные, ракетные и спутниковые наблюдения

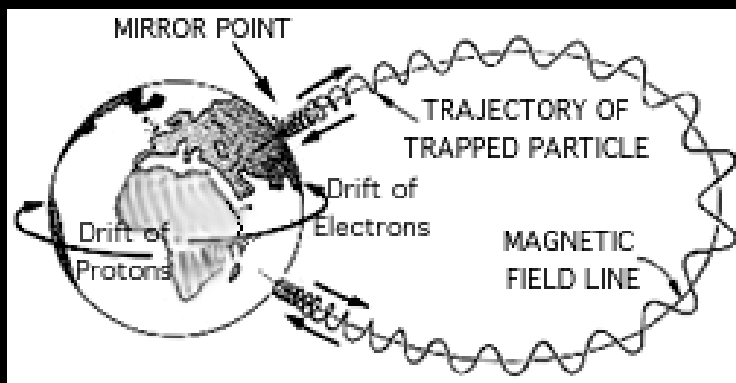
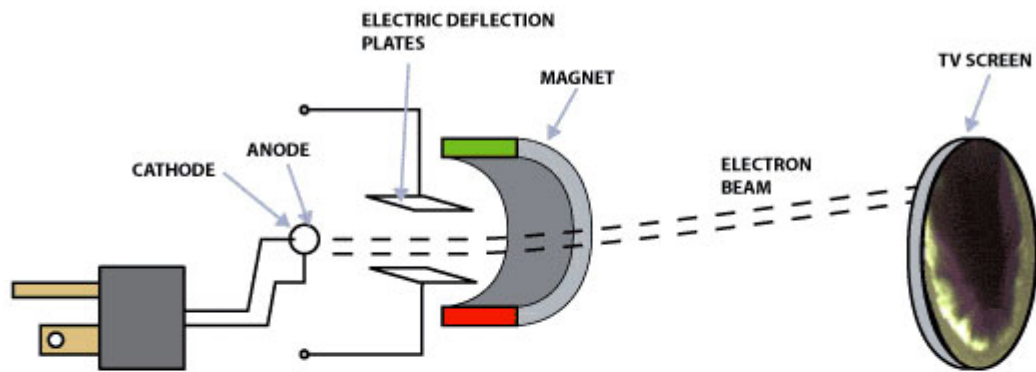
Развитие теории, в различных областях



EISCAT



# Аналогия с электронно-лучевой трубкой

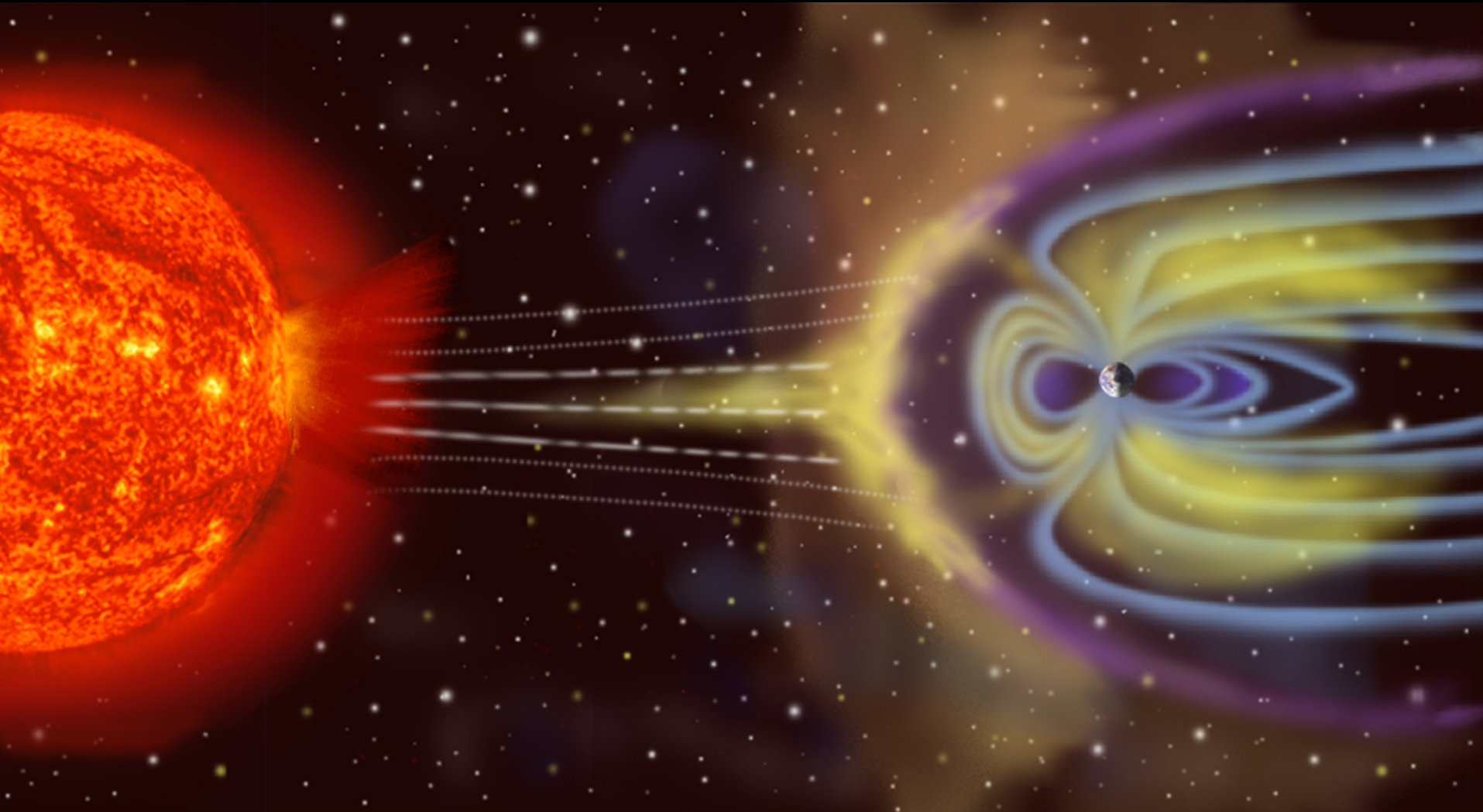


Аналогия не полная: значительная часть частиц попадает из атмосферы!



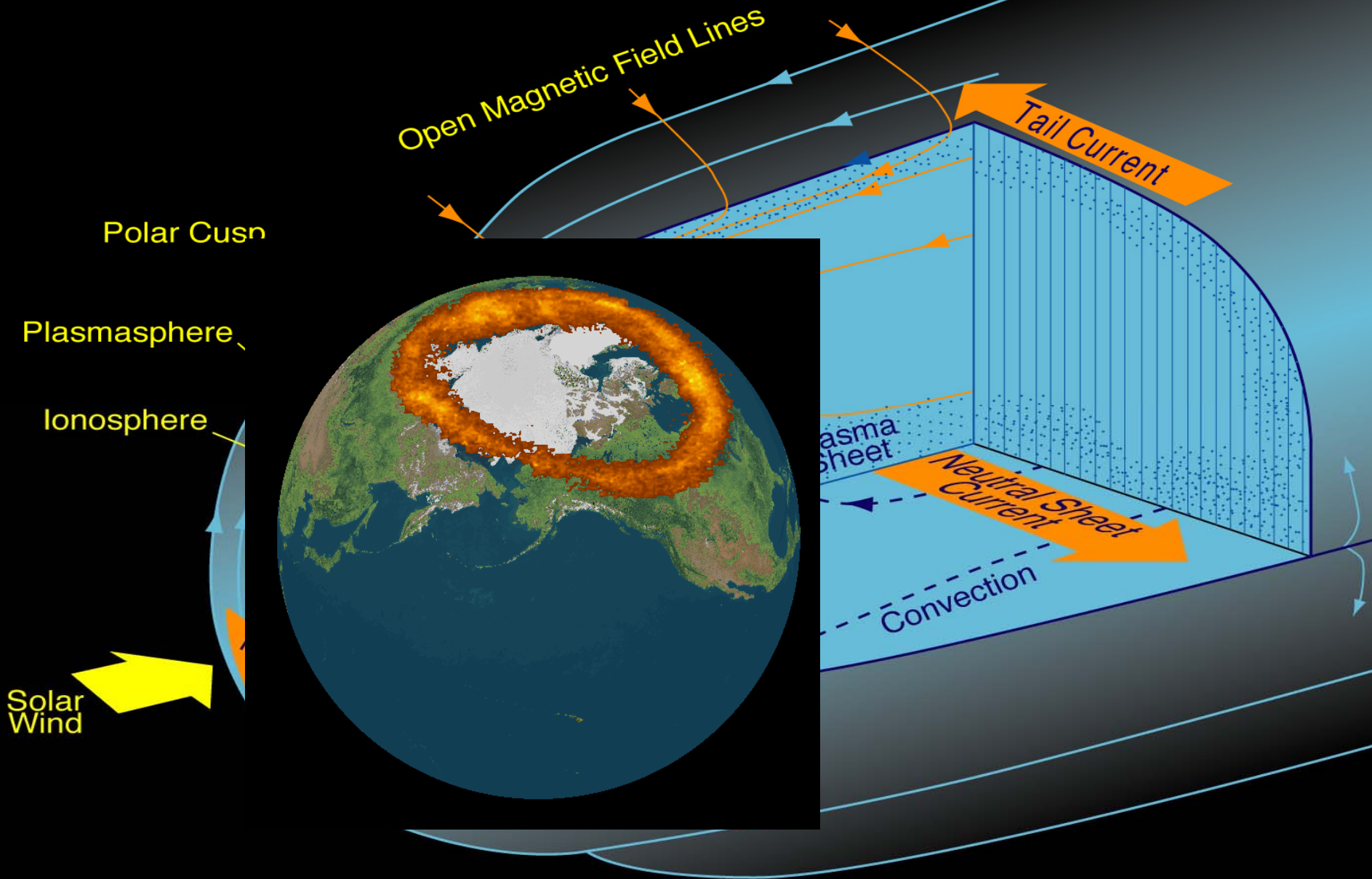
[Marklund et al., NPG, 2004]

**Солнце – основной источник энергии и частиц.  
Термины: солнечный ветер, магнитосфера Земли...**





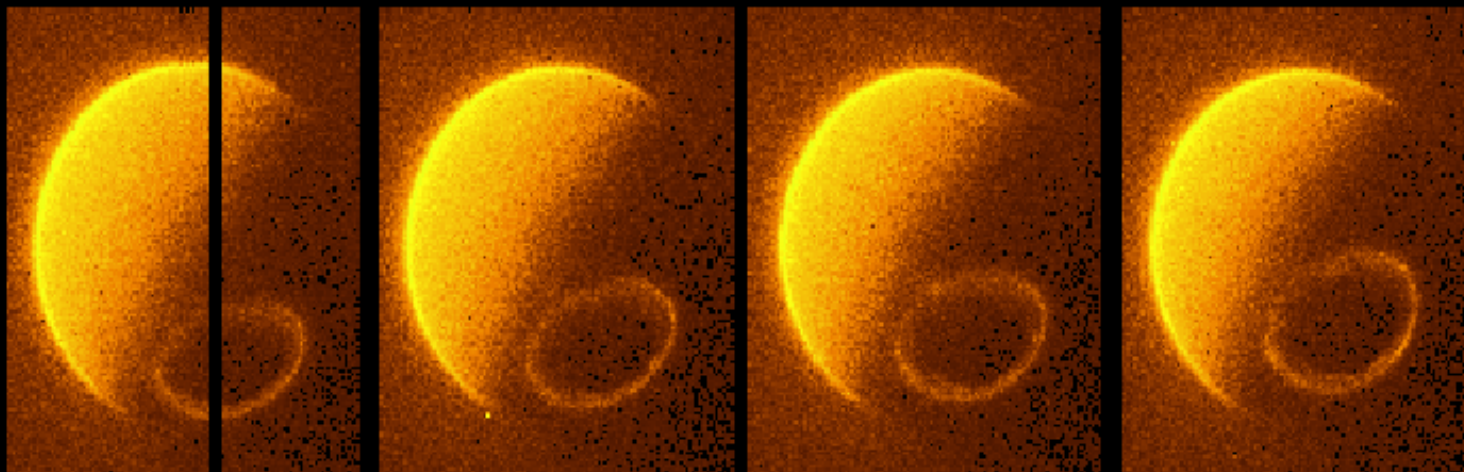
# Крупномасштабная структура магнитосферы



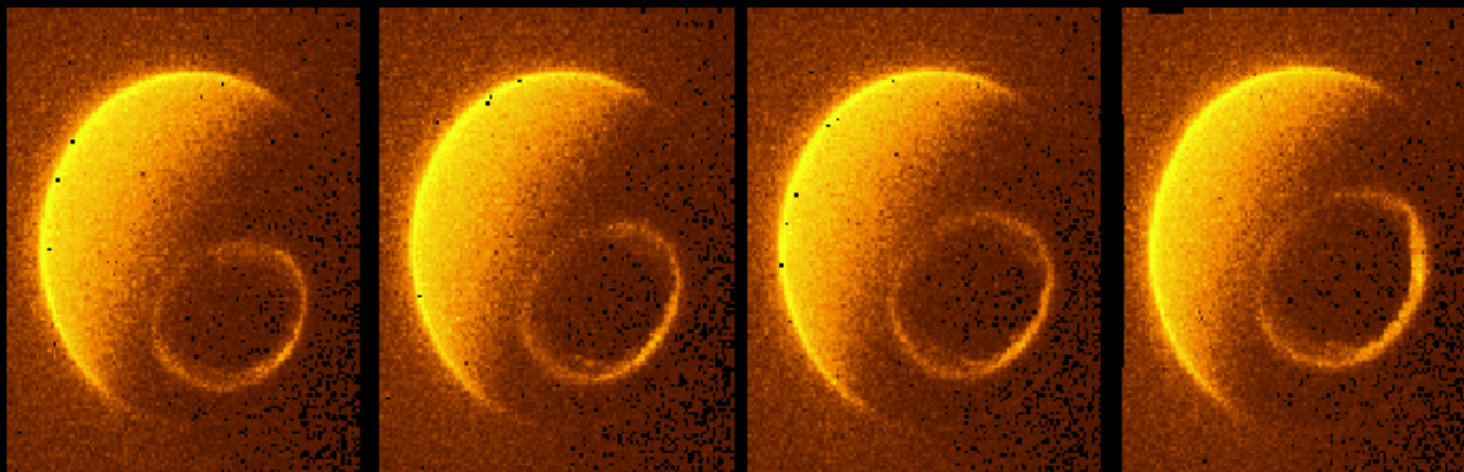


# Спокойный овал полярных сияний

Dynamics Explorer I/Spin-Scan Auroral Imaging  
P.I. – Dr. L. A. Frank, University of Iowa



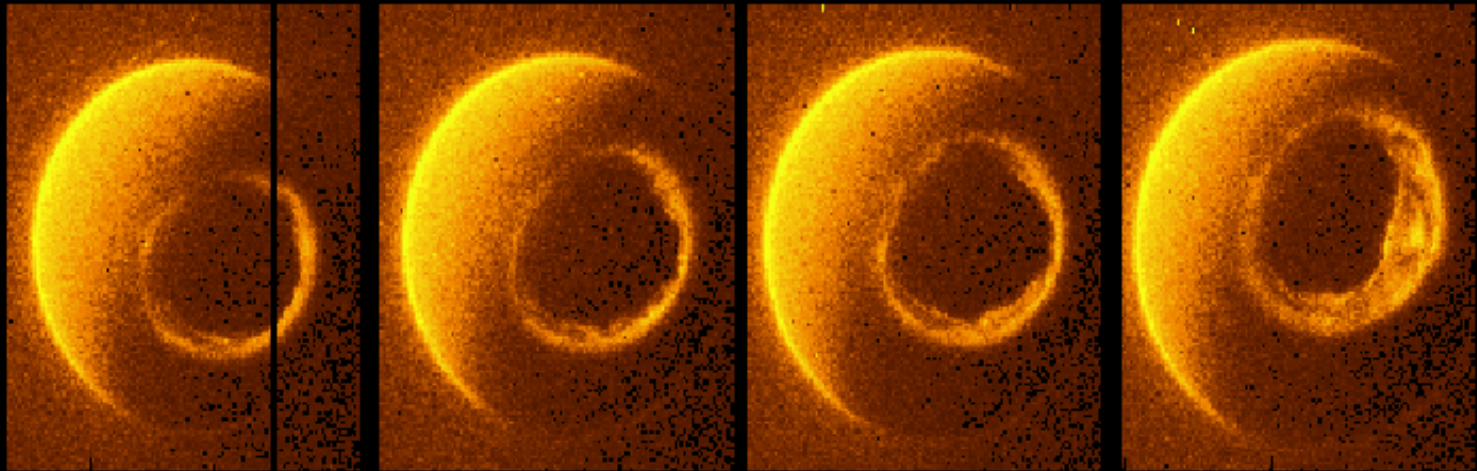
81312063041\_C3F 81312064249\_C3F 81312065457\_C3F 81312070706\_C3F  
YYDDHHMMSS – Photometer "C" – Filter "3" (120W) [2,070]



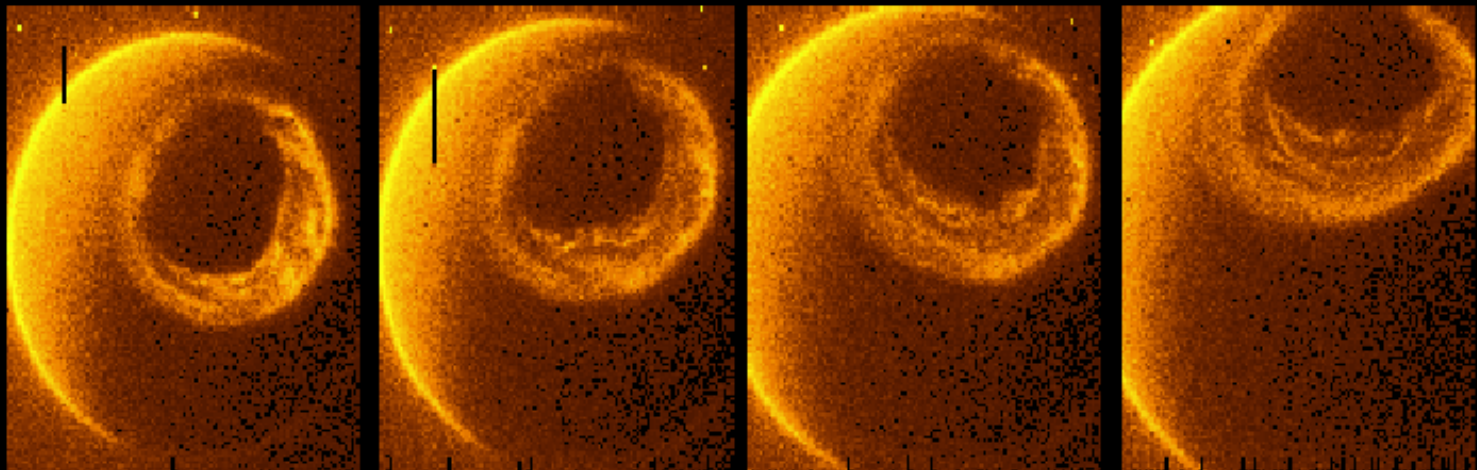
81312071914\_C3F 81312073122\_C3F 81312074331\_C3F 81312075539\_C3F

# Авроральный овал во время магнитосферной суббури

Dynamics Explorer I/Spin-Scan Auroral Imaging  
P.I. – Dr. L. A. Frank, University of Iowa



81312080747\_C3F 81312081956\_C3F 81312083204\_C3F 81312084412\_C3F  
YYDDHHMMSS – Photometer "C" – Filter "3" (120W) [2,070]



81312085620\_C3F 81312090829\_C3F 81312092037\_C3F 81312093245\_C3F

## «Высота» полярных сияний

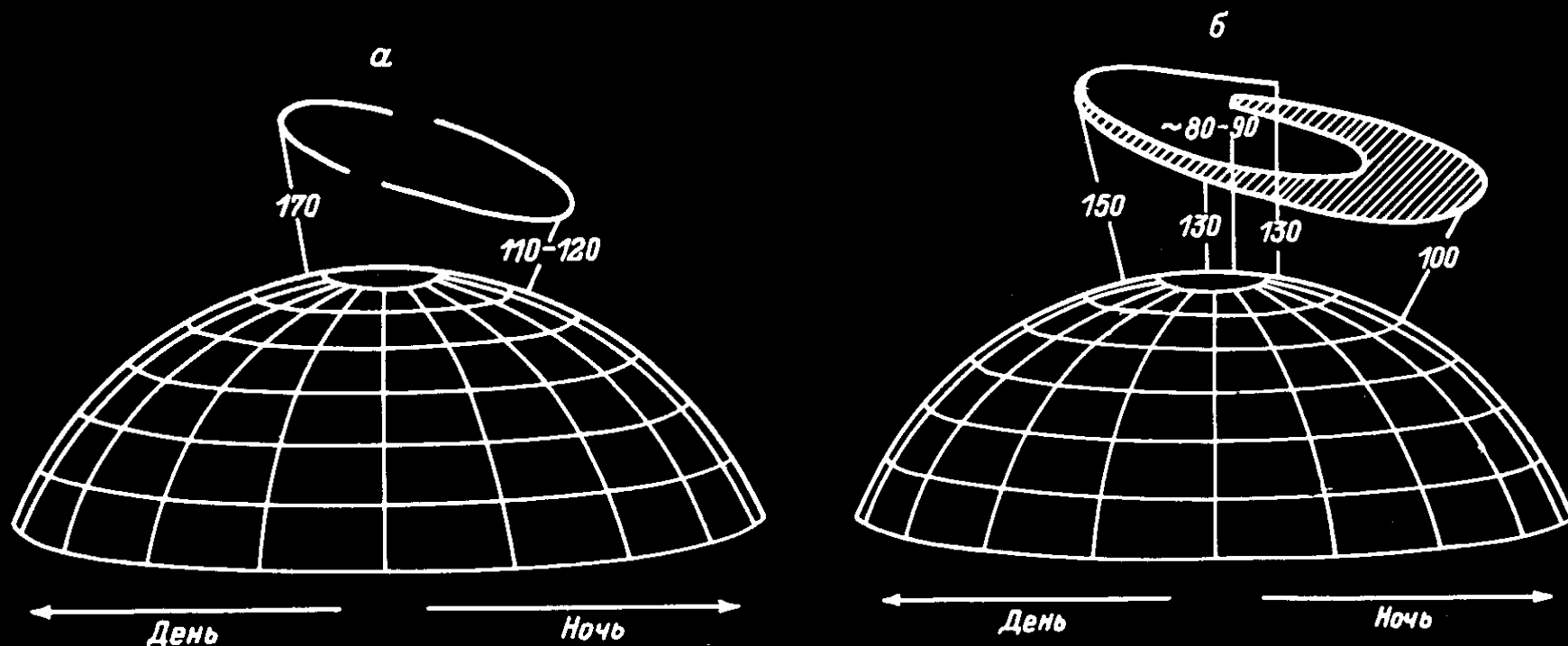


Схема расположения овала сияний над полярной шапкой для спокойных (а) и возмущенных (б) условий [Старков, 1974].



# Классификация интенсивности свечения полярных сияний

| Тип (балл)<br>свечения | Явления, эквивалентные<br>по свечению      | Интенсивность,<br>килорелей | Энергия,<br>вносимая<br>частицами,<br>эрг см <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> |
|------------------------|--|-----------------------------|--|
| I                      | Свечение млечного пути                     | 1                           | 3  |
| II                     | Тонкие освещенные<br>луной перистые облака | 10                          | 30   |
| III                    | Освещенные луной<br>кучевые облака         | 100                         | 300  |
| IV                     | Свечение полной луны                       | 1000                        | 3000   |

Используемая для измерения интенсивности свечения атмосферы единица - «релей» - определена как проинтегрированная по атмосферному столбу скорость излучения, регистрируемая фотометром на поверхности Земли [Харгривс, 1982, с.108], причем: 1 релей =  $10^6$  фотон см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

# Морфологическое описание структуры полярных сияний

Формы полярных сияний при наблюдении с поверхности Земли обычно можно свести к 4 основным структурам и их комбинациям [Омхольт, 1974, с. 11]:

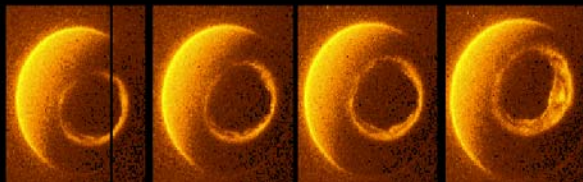
- 1) спокойные однородные дуги и полосы, протянувшиеся через весь небосвод в виде прямой или изогнутой линии,
- 2) лучи, длина которых может существенно меняться,
- 3) диффузные пятна,
- 4) большие однородные поверхности.



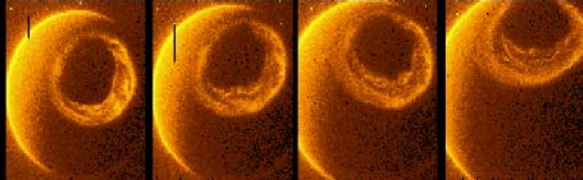


# Схема развития авроральной суббури [Старков и Фельдштейн, 1971]

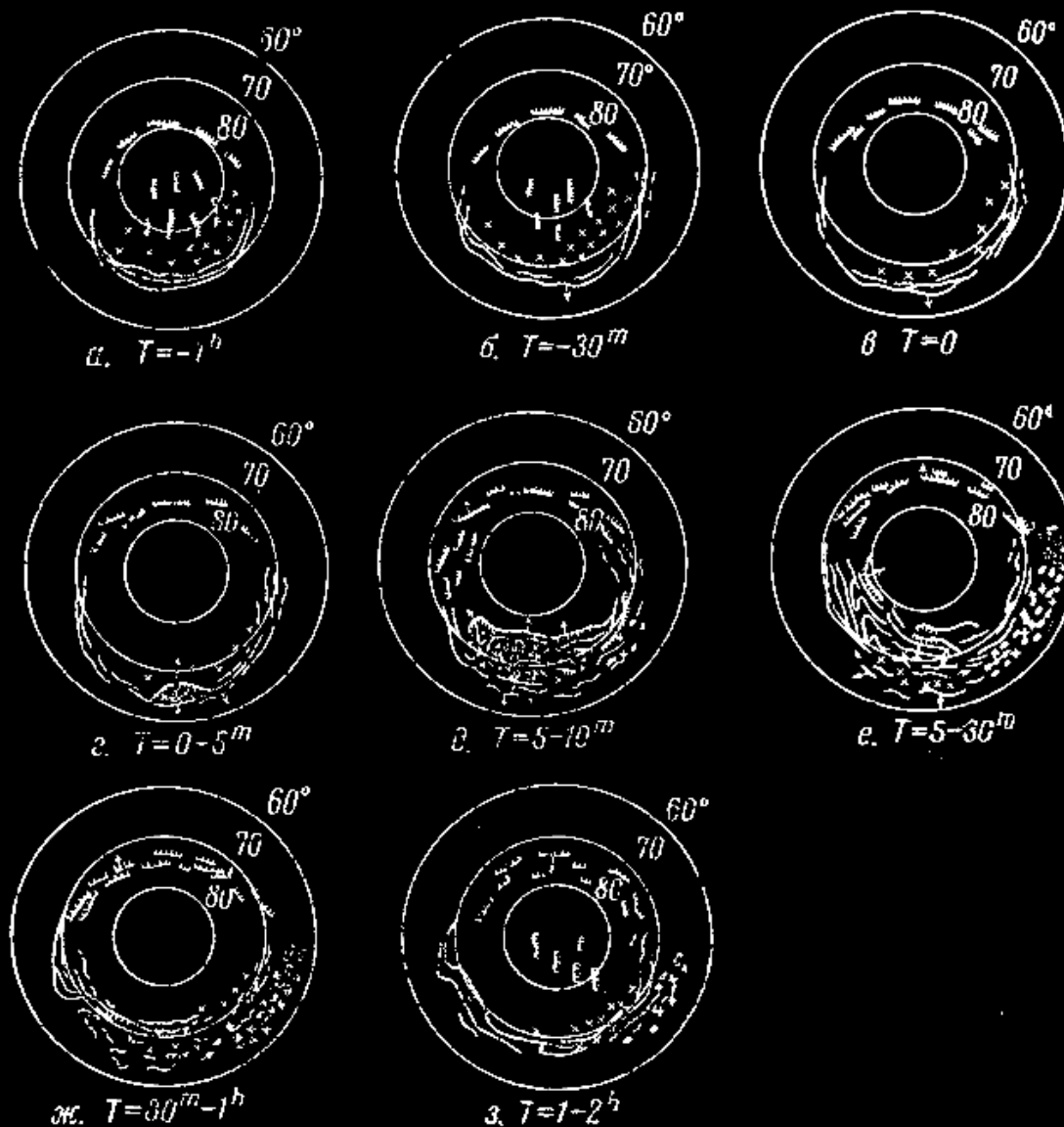
Dynamics Explorer I/Spin-Scan Auroral Imaging  
P.I. - Dr. L. A. Frank, University of Iowa



81312080747\_C3F 81312081956\_C3F 81312083204\_C3F 81312084412\_C3F  
YYDDHHMMSS - Photometer "C" - Filter "8" (120W) [2,070]

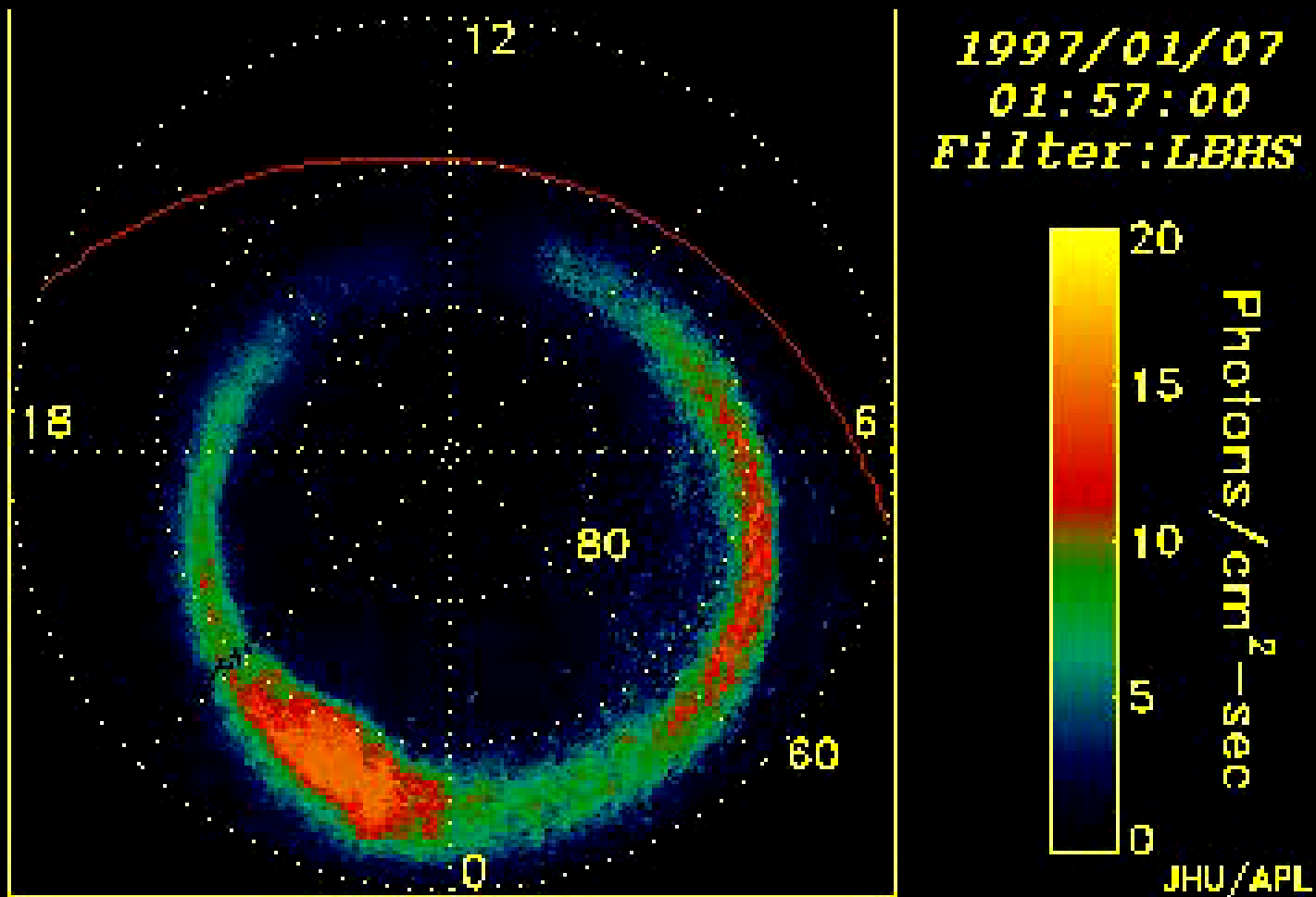


81312085620\_C3F 81312090820\_C3F 81312092037\_C3F 81312093245\_C3F



Сплошные линии - дуги и полосы, сплошные линии с черточками - лучистые формы, черные кружки - пульсирующие сияния, крестики - диффузное свечение.

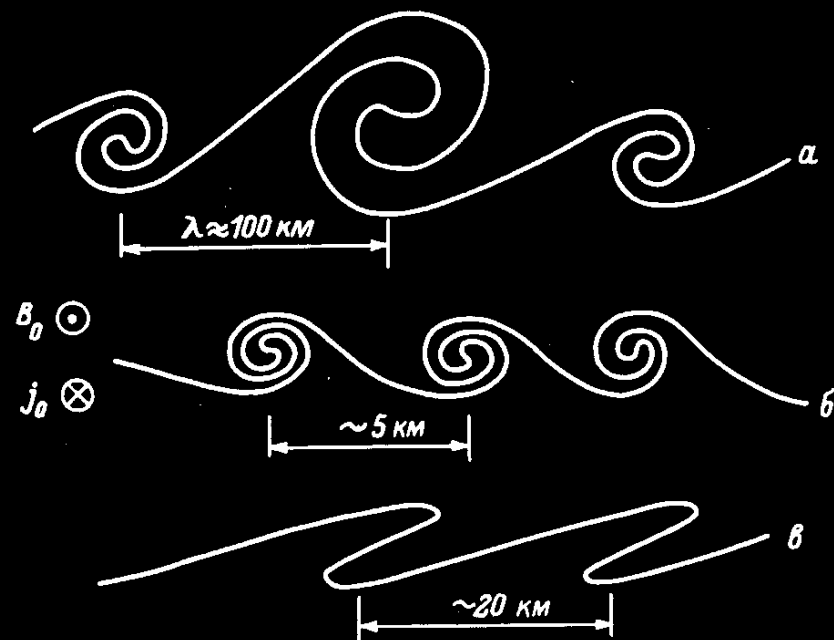
# Суббуревая динамика в солнечно-геомагнитных координатах



Наблюдения спутника ПОЛАР [Newell et al., JGR 1996]

# Классификация Дэвиса и Халлиана

- пространственный масштаб
- время жизни
- направление закручивания
- обратимость

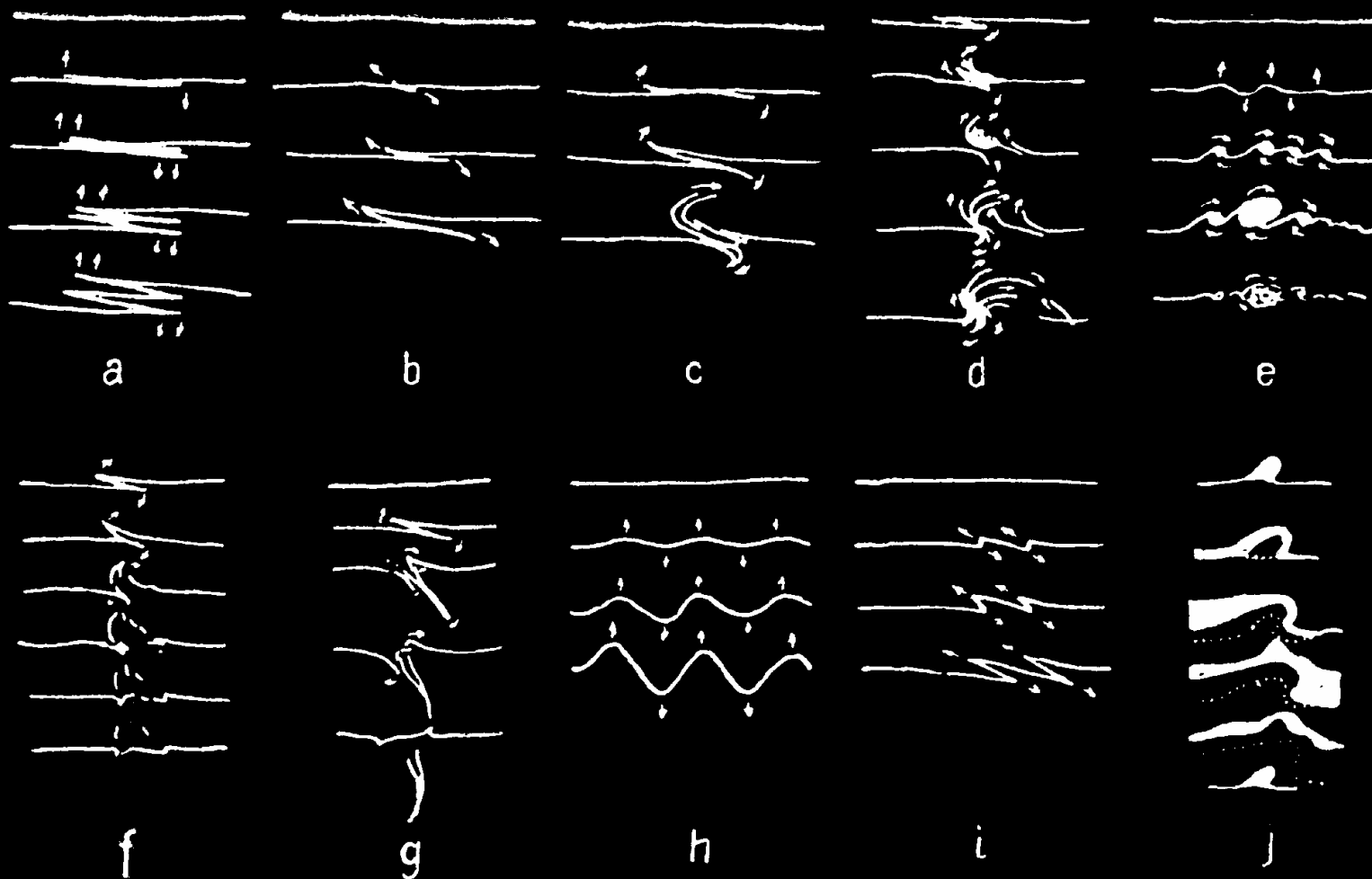


Три типа элементарных деформаций  
авроральных дуг, сверху - вниз:  
спирали, вихри, складки.





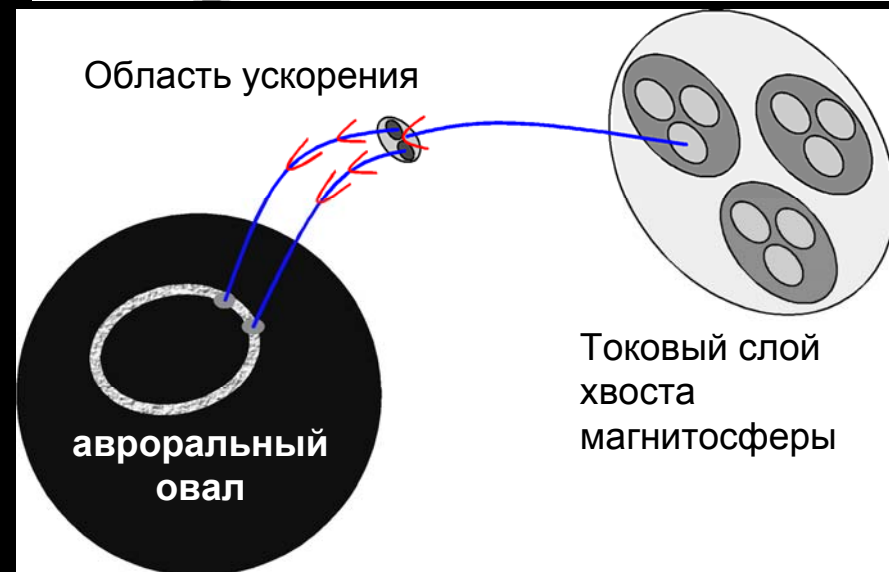
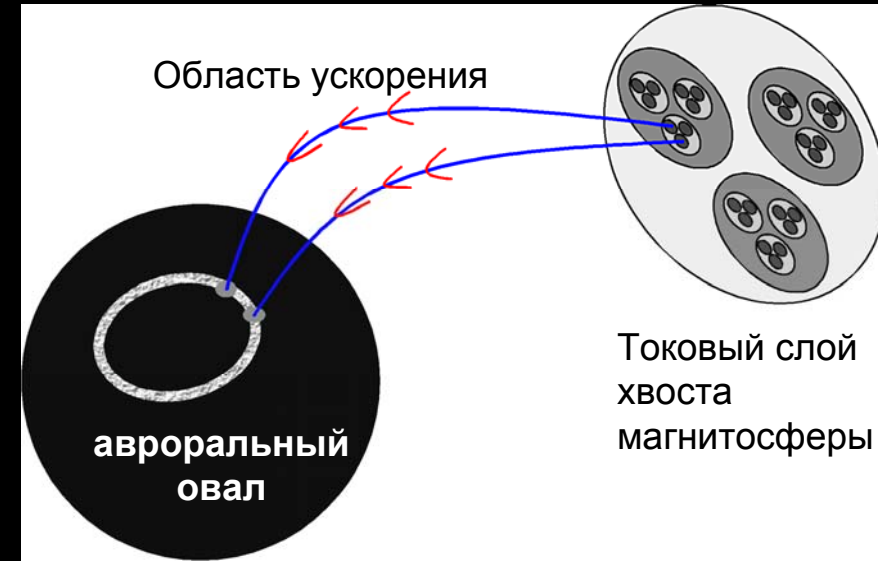
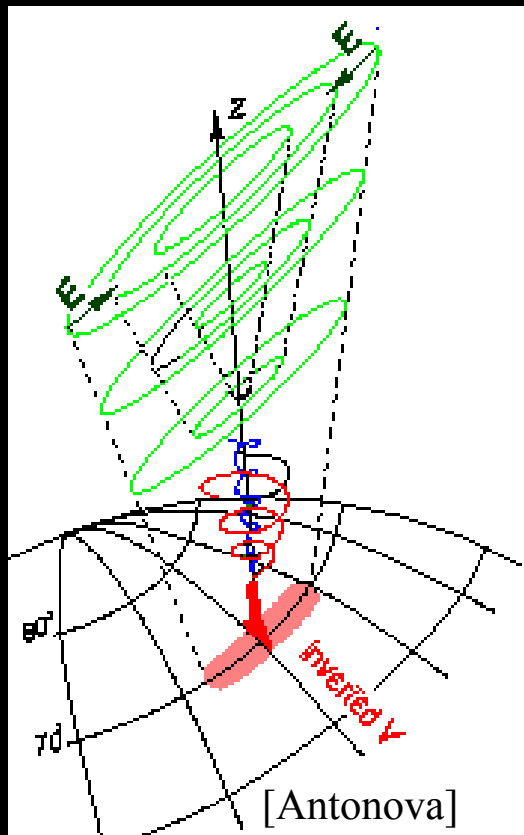
# Основные деформации протяженных форм сияний (по Огути)



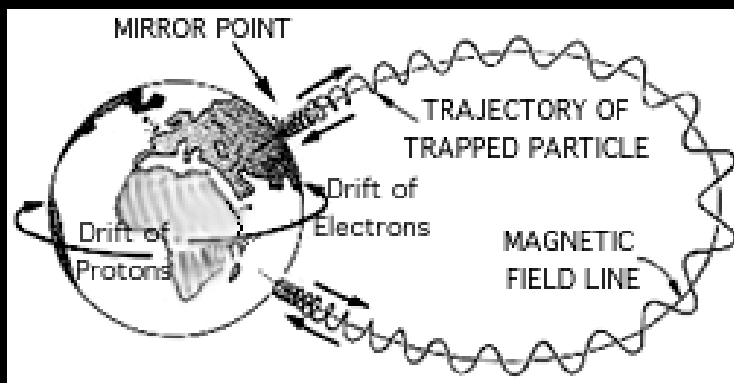
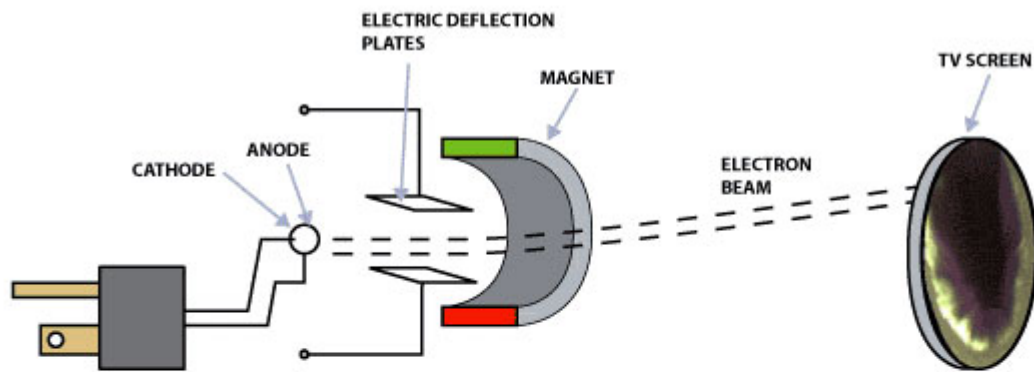
[Oguti, 1974, 1975]

# Структура и положение источника структур

- Крупномасштабная авроральная активность связана с возмущениями в хвосте магнитосферы.
- Мелкомасштабные авроральные структуры возможно связаны с процессами ближе к Земле.
- Отмечено подобие между характеристиками «вихрей» ~1 км и «спиралей» ~100 км [Trondsen and Cogger, 1998].



# Аналогия с электронно-лучевой трубкой



Аналогия не полная: значительная часть частиц попадает из атмосферы!

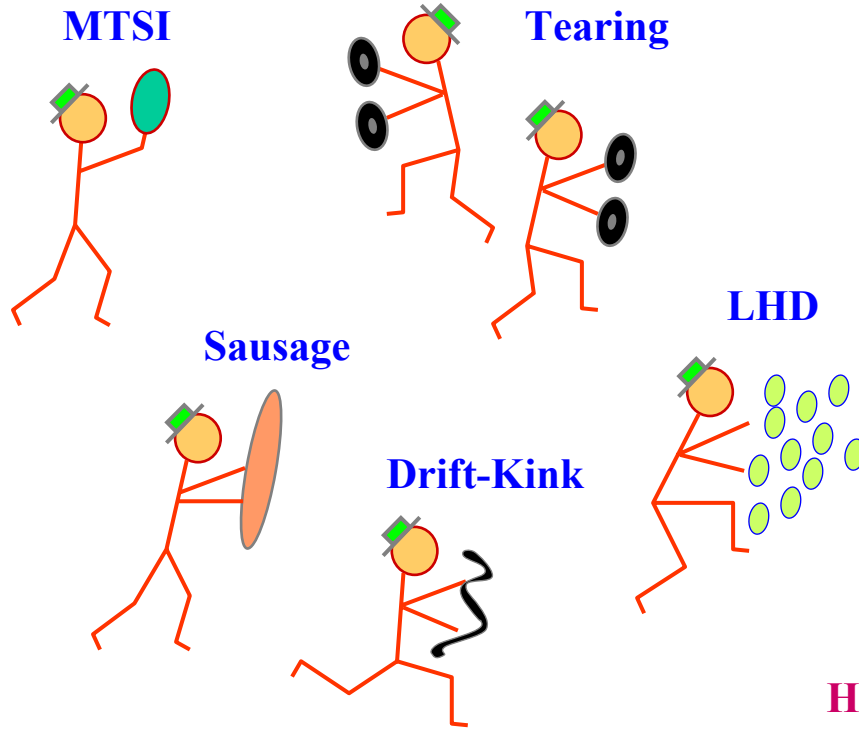


[Marklund et al., NPG, 2004]



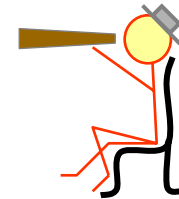
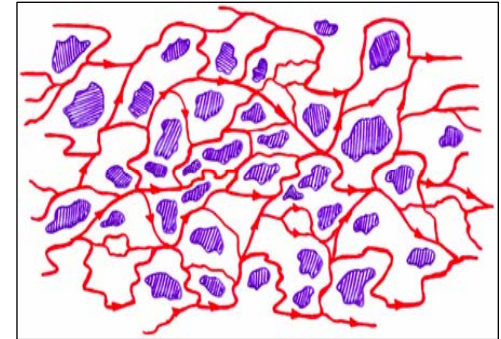
# Концепция неравновесного стационарного состояния (NESS)

(Л.Зелёный и А.Милованов)

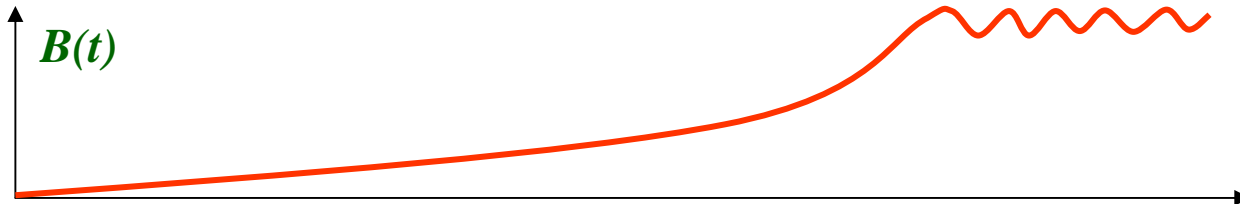


Non-Equilibrium Steady State

NESS  
Non-Stationary  
Steady State

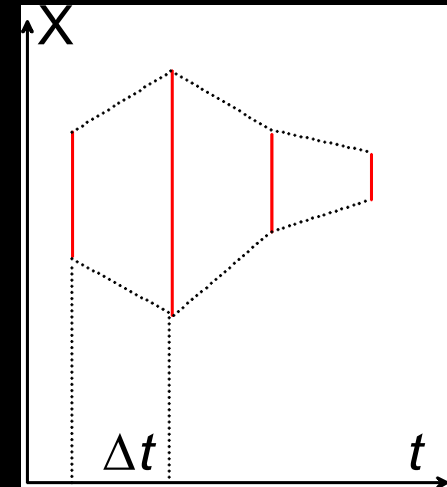
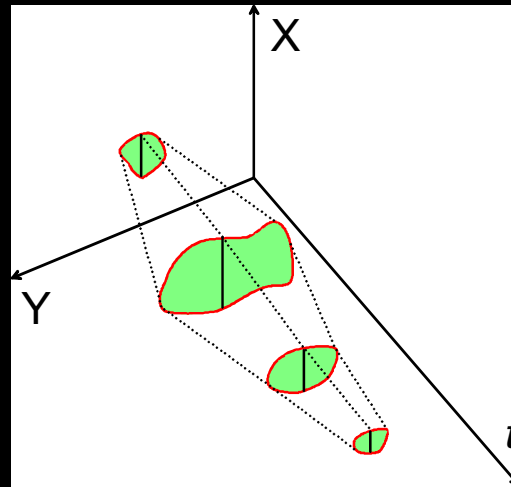
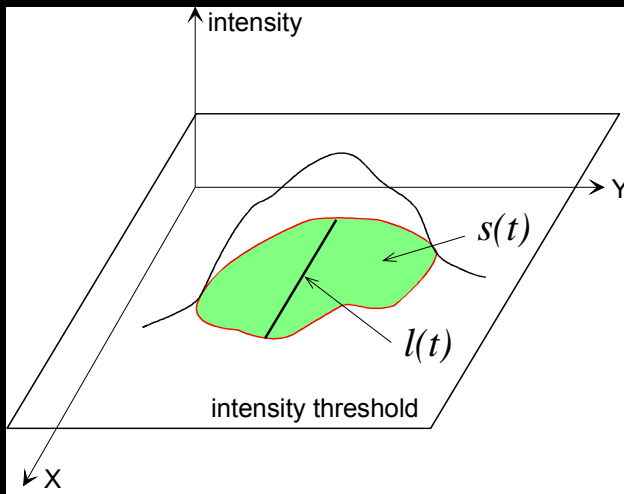


Нелинейное взаимодействие  
многих неустойчивостей плазмы.



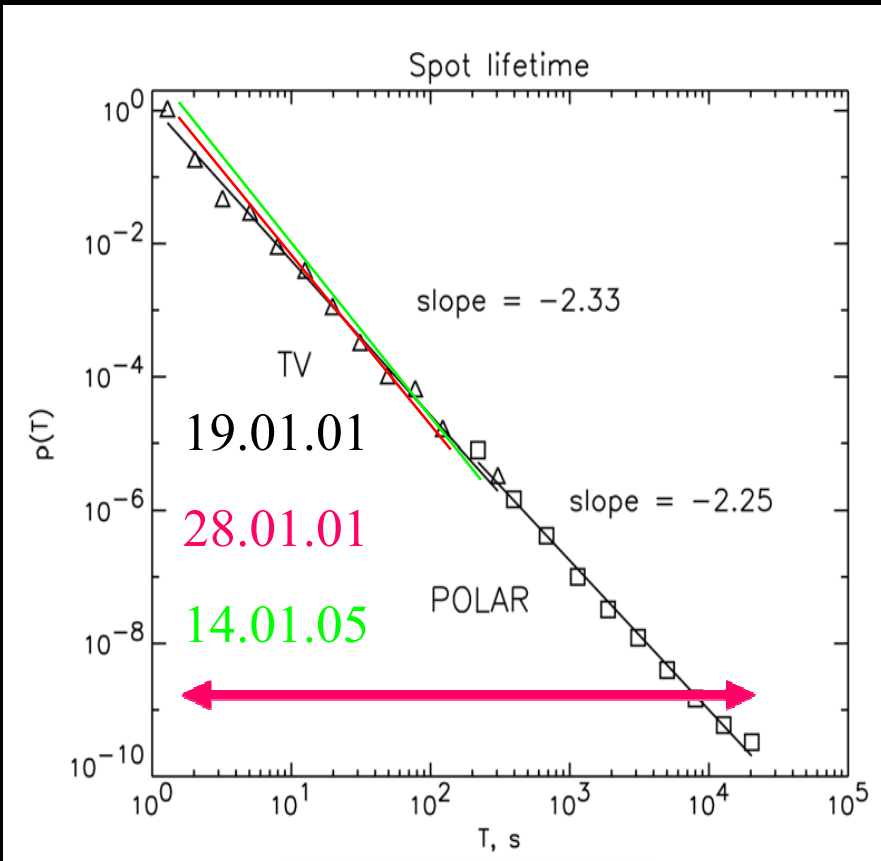
Наложение неустойчивостей

# Характеристики пространственно-временной динамики авроральных пятен

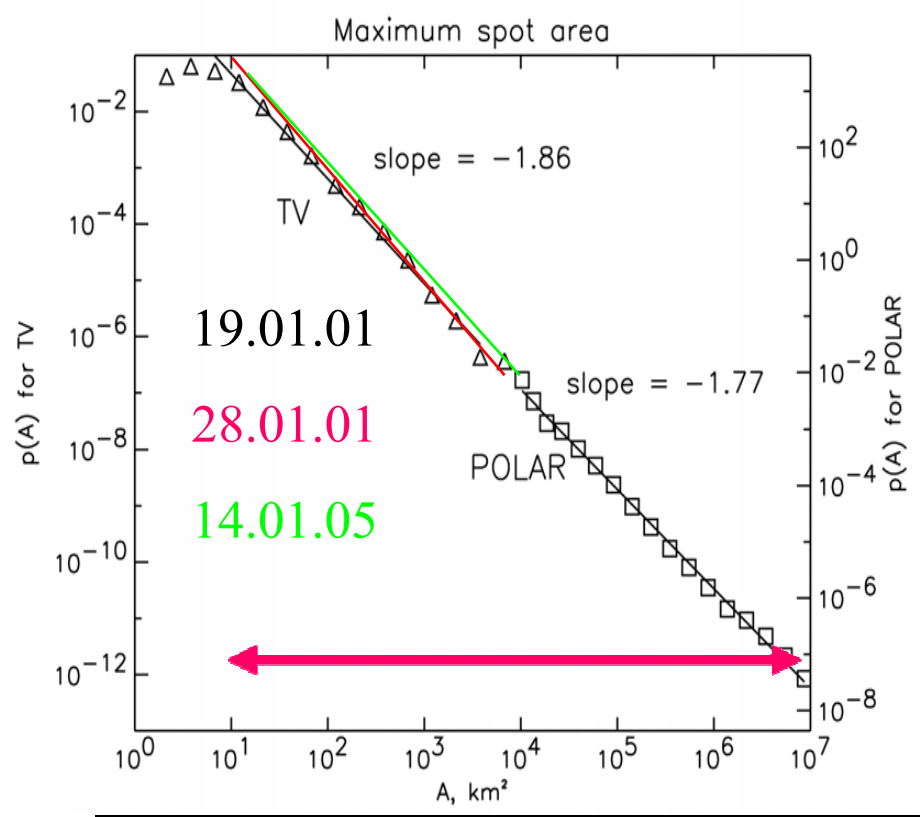


| Характеристика                      | 2-D                        | 1-D                               |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Интегрированный размер              | $S = \int_{\{T\}} s(t) dt$ | $L = \int_{\{T\}} l(t) dt$        |
| Полная диссипируемая энергия        | $E = \int_{\{T\}} w(t) dt$ | $E = \int_{\{T\}} w_l(t) dt$      |
| Максимальных размер                 | $A = \max_{\{T\}} s(t) dt$ | $L_{\max} = \max_{\{T\}} l(t) dt$ |
| Максимальная диссипируемая мощность | $W = \max_{\{T\}} w(t) dt$ | $W = \max_{\{T\}} w_l(t) dt$      |

# Сравнение распределений, полученных по наземным ТВ данным и по данным спутника Polar



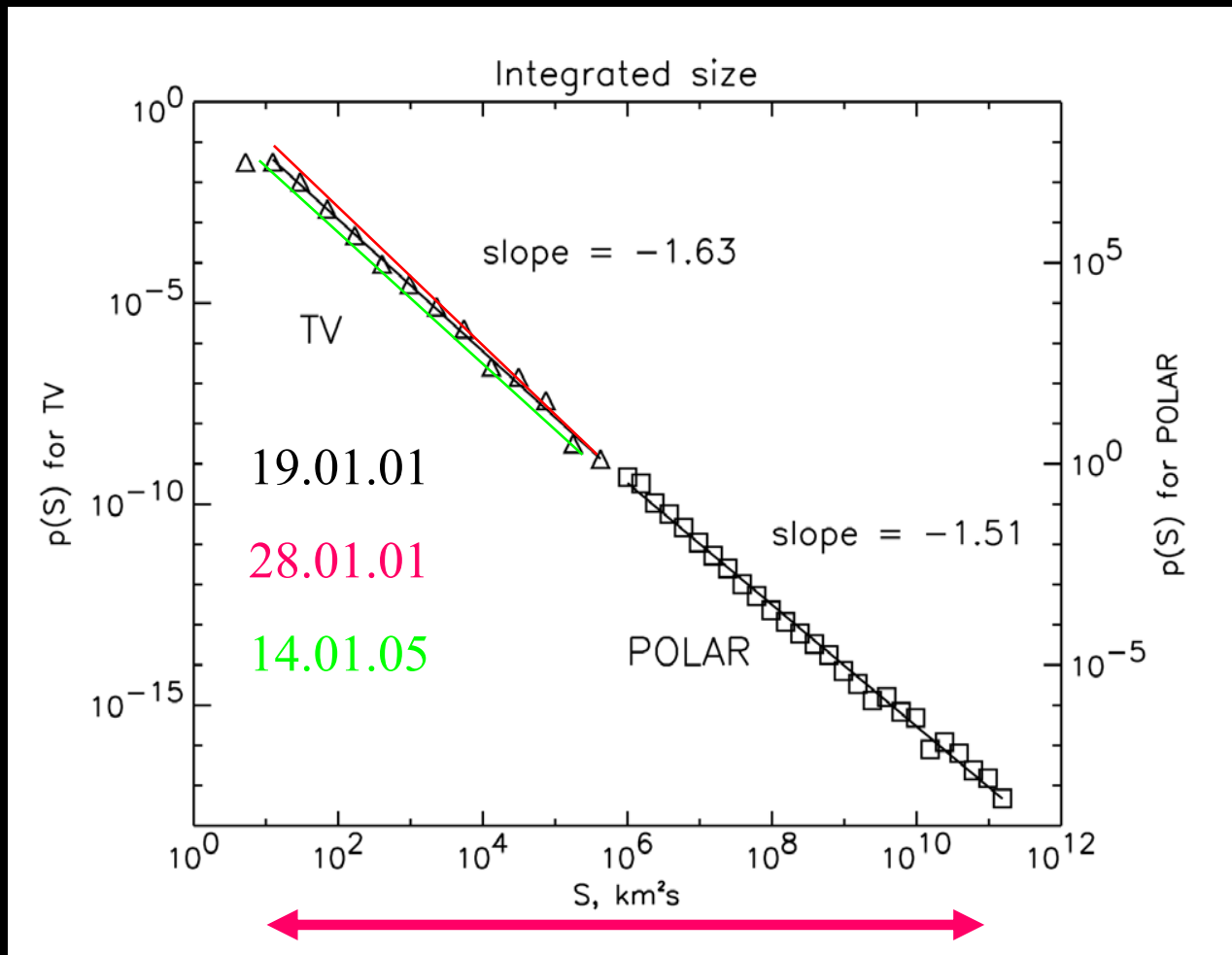
4 порядков



6 порядков



# Сравнение распределений, полученных по наземным ТВ данным и по данным спутника Polar



10

ПОРЯДКОВ

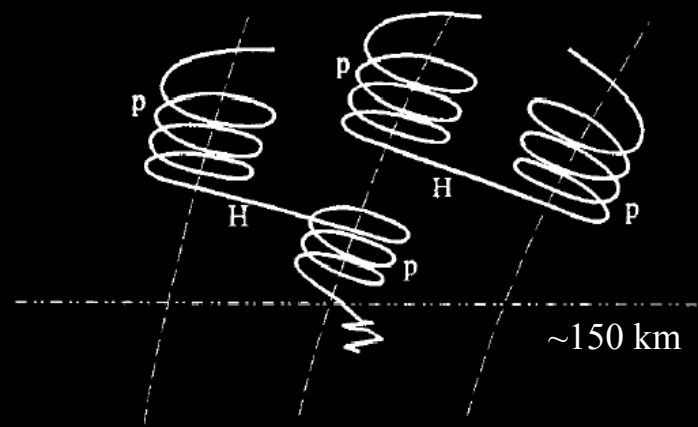
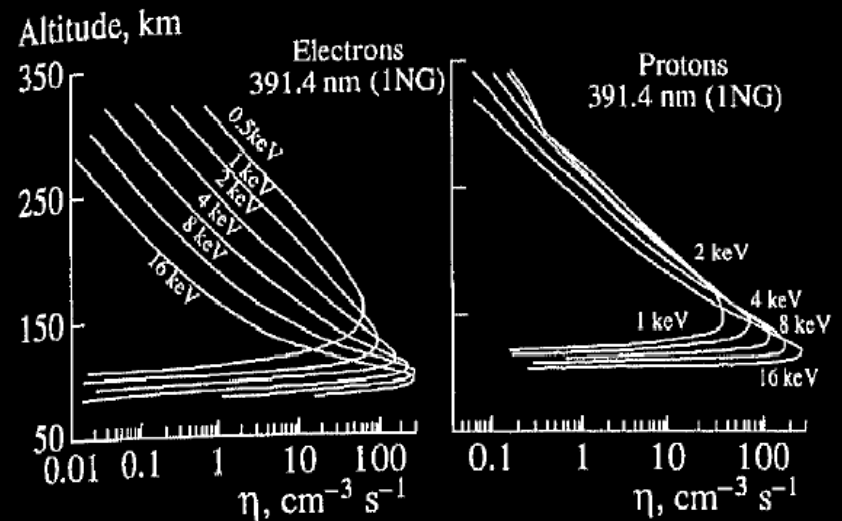
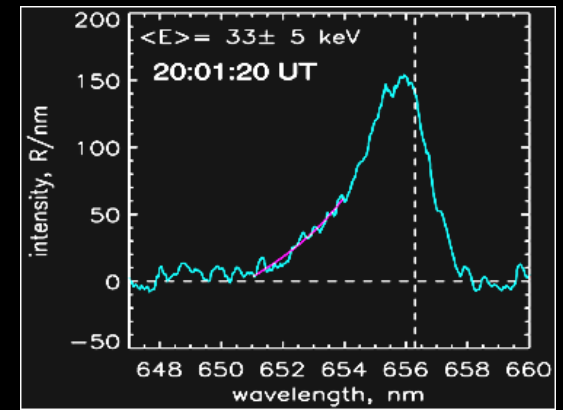
# Атмосферный «экран»: Торможение заряженных частиц в атмосферных газах

Протоны (ионы) или электроны?  
Вегад (1939) наблюдал линии  
водорода с доплеровским  
смещением.

Потери энергии: ионизация,  
возбуждение, передача момента,  
обмен зарядами (для ионов).

Отличия протонных и  
электронных полярных сияний.

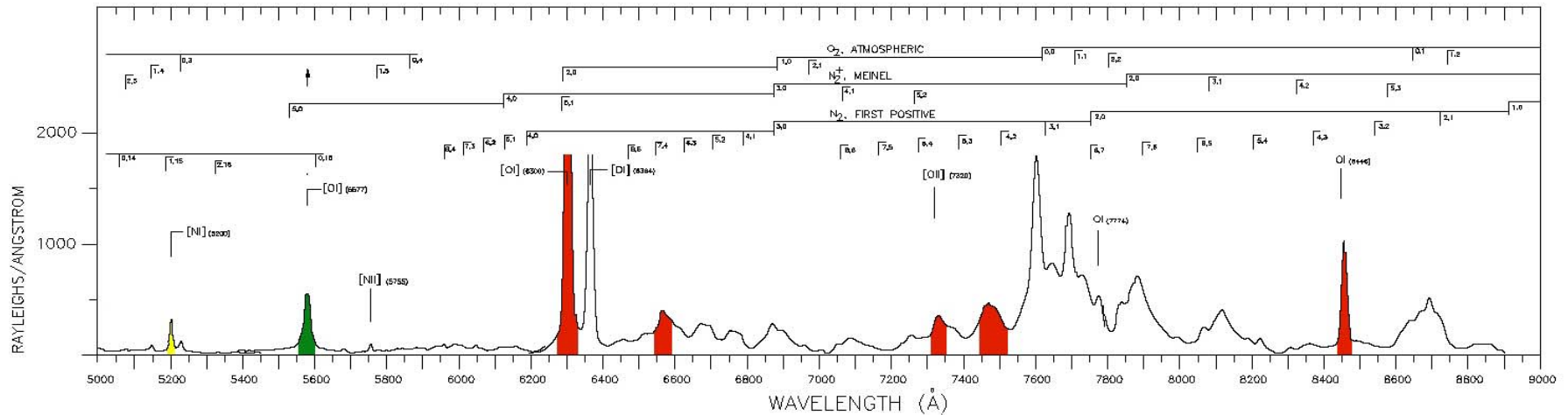
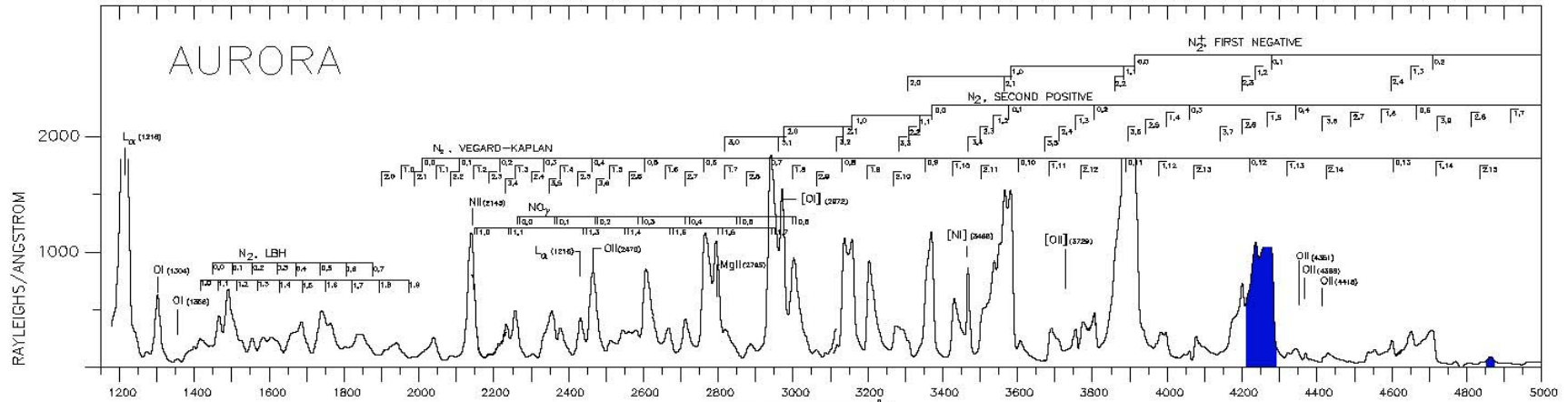
Большая часть видимых полярных  
сияний вызвана высыпаниями  
электронов.



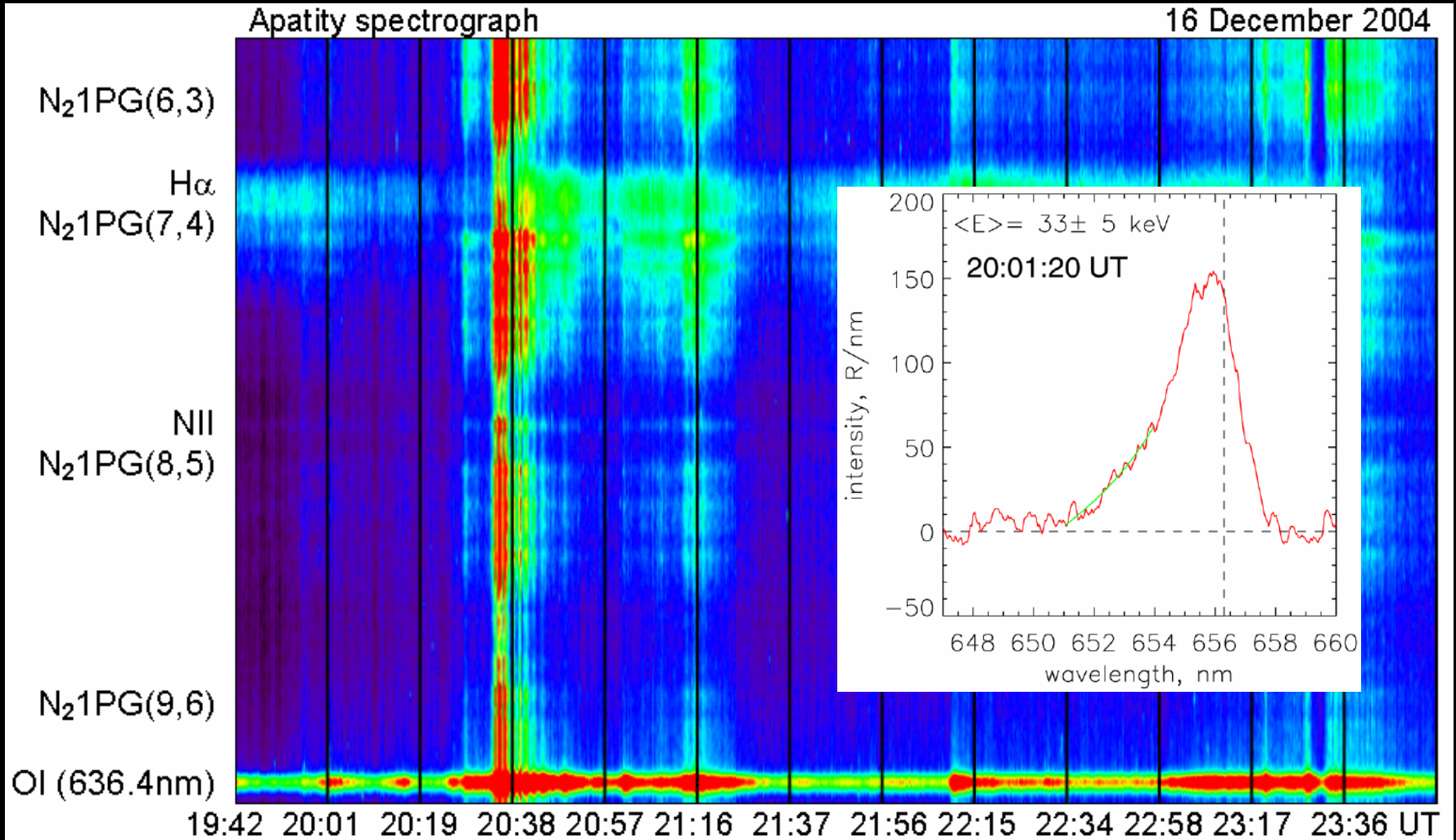




# Спектр полярных сияний (из космоса) [L. Broadfoot]

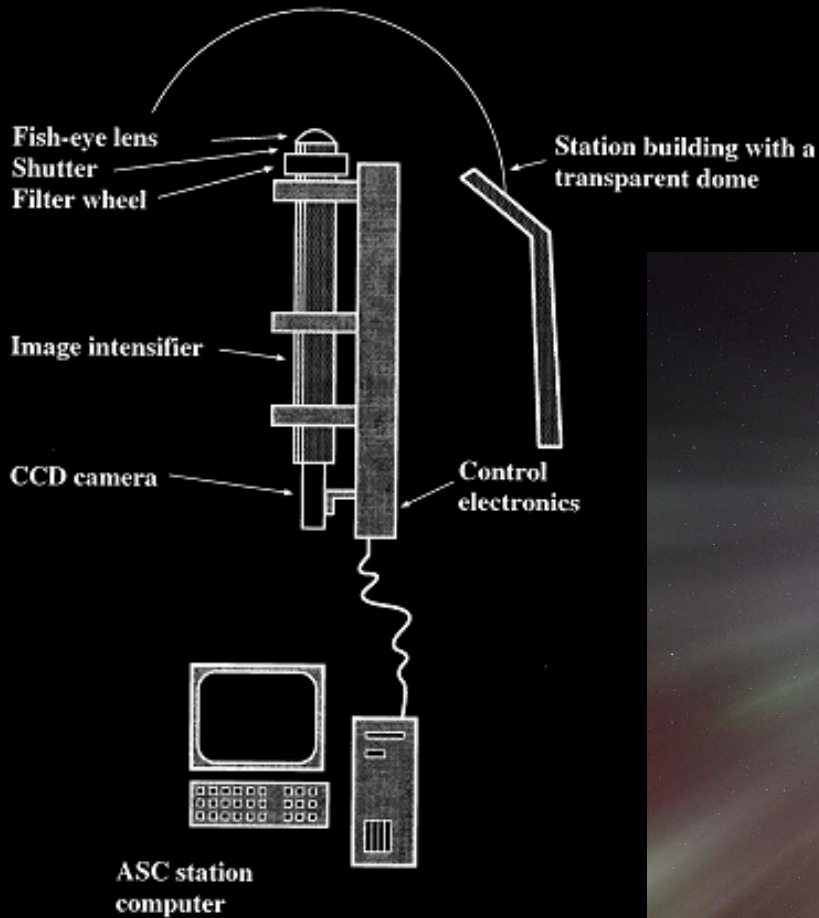


# Эволюция спектра полярных сияний, 16 декабря 2004 г.



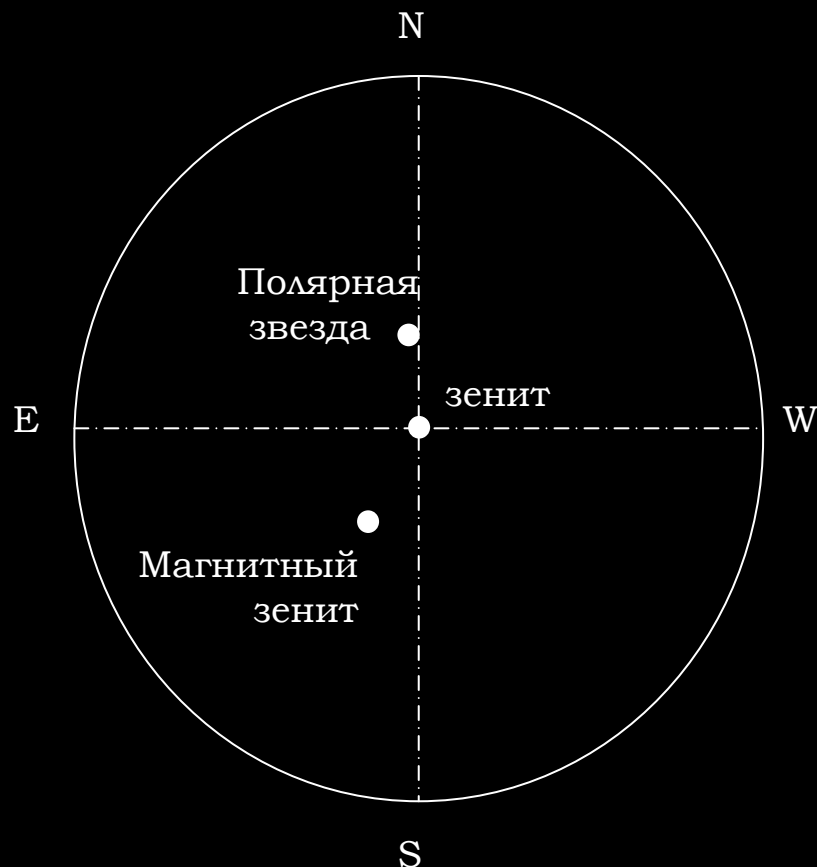
Интенсивность в псевдоцветах, синее - меньше, красное - больше.

# Наземные наблюдения: Почему видны лучи?

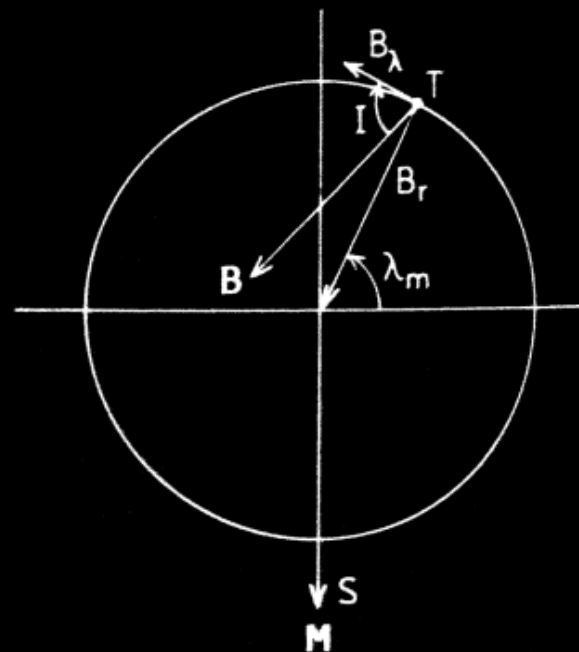


Камера всего неба = «рыбий глаз» = поле зрения 180°

# Три важные точки на небе



Ось вращения Земли ~ направление на Полярную звезду.  
Магнитный зенит  $\neq$  зенит.

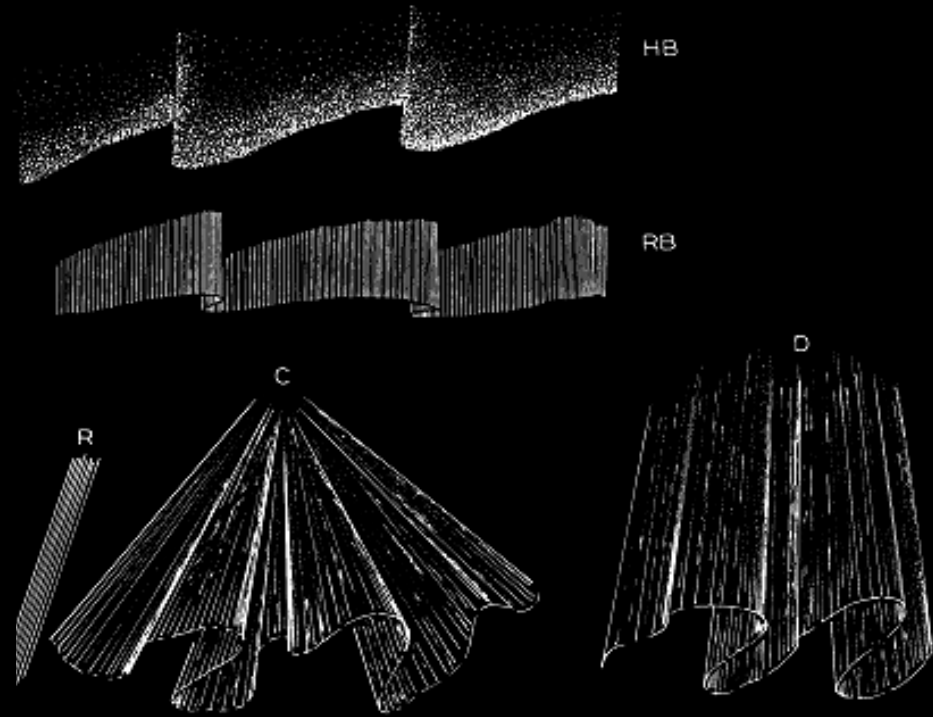
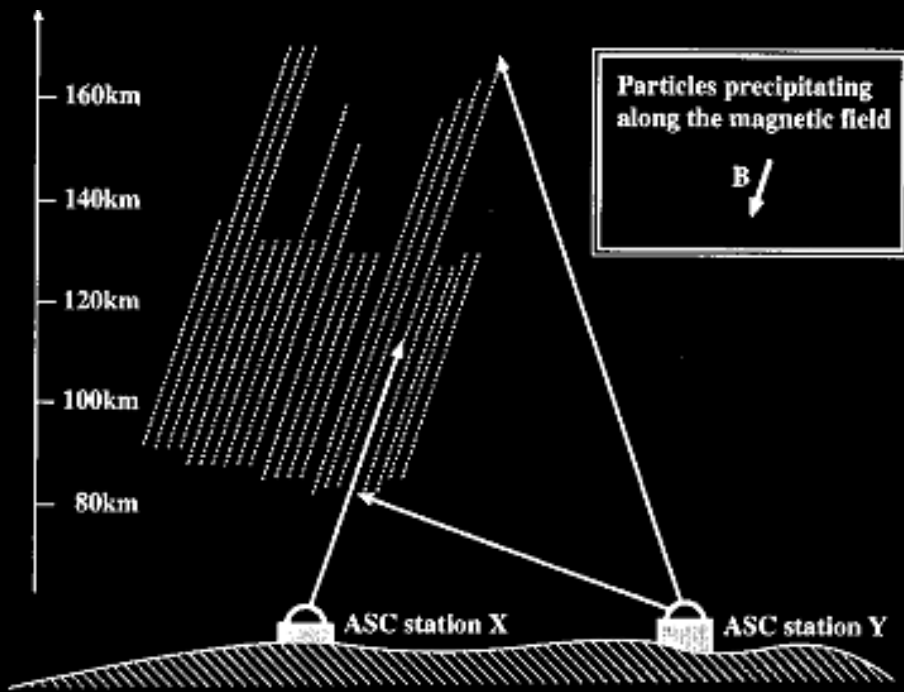


Магнитное наклонение  $I$ ,  
магнитная широта  $\lambda_m$

$$\tan I = 2 \tan \lambda_m$$

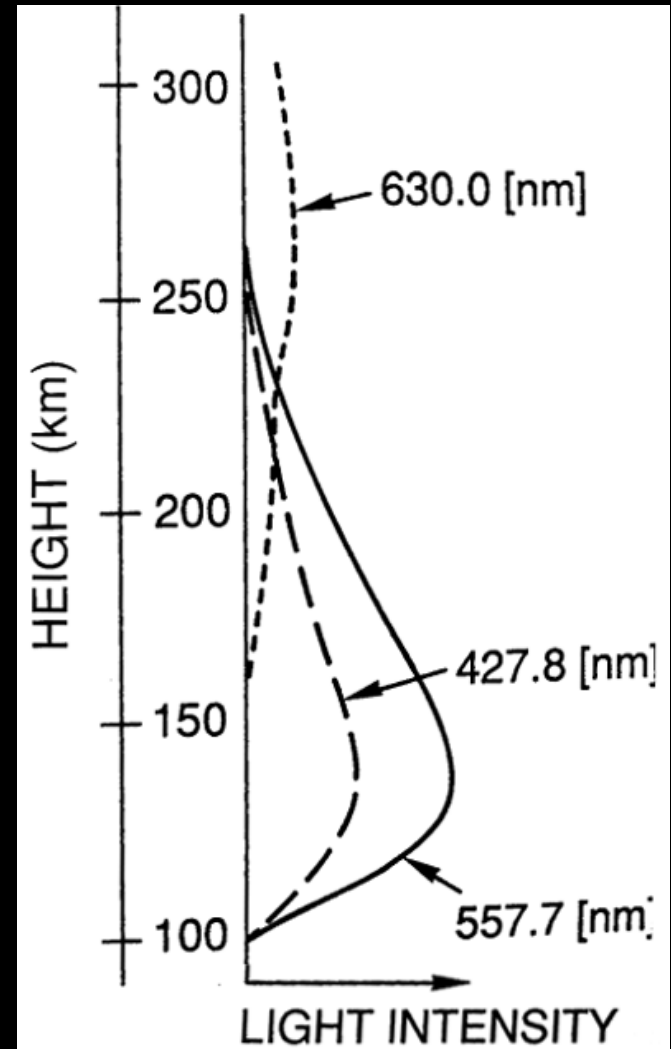
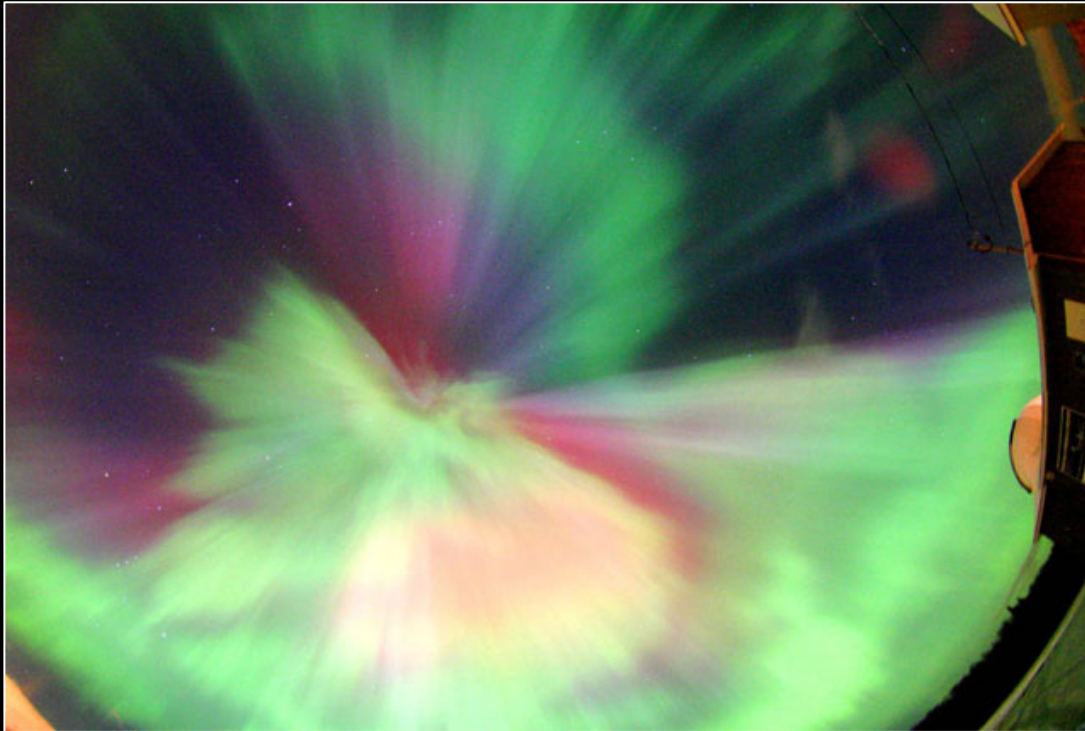


# Камера всего неба: геометрия наблюдений



Если мы имеем набор пучков электронов, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля, то с Земли мы должны видеть лучи, «исходящие» из магнитного зенита.

# Почему разные цвета?



Красная линия (630.0 нм),  $O(^1D)$  - порог  $\sim 1.9$  эВ, время жизни  $\sim 100$  с

Зеленая линия (557.7 нм),  $O(^1S)$  - порог  $\sim 4.17$  эВ, время жизни  $\sim 0.7$  с

Голубая линия (427.8 нм),  $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$  - порог  $\sim 18.8$  эВ, время жизни  $\sim 10^{-4}$  с

Авроральная суббуря, обсерватория Ловозеро (67.97N, 35.02 E)

наблюдения вблизи начала активной фазы



секунды

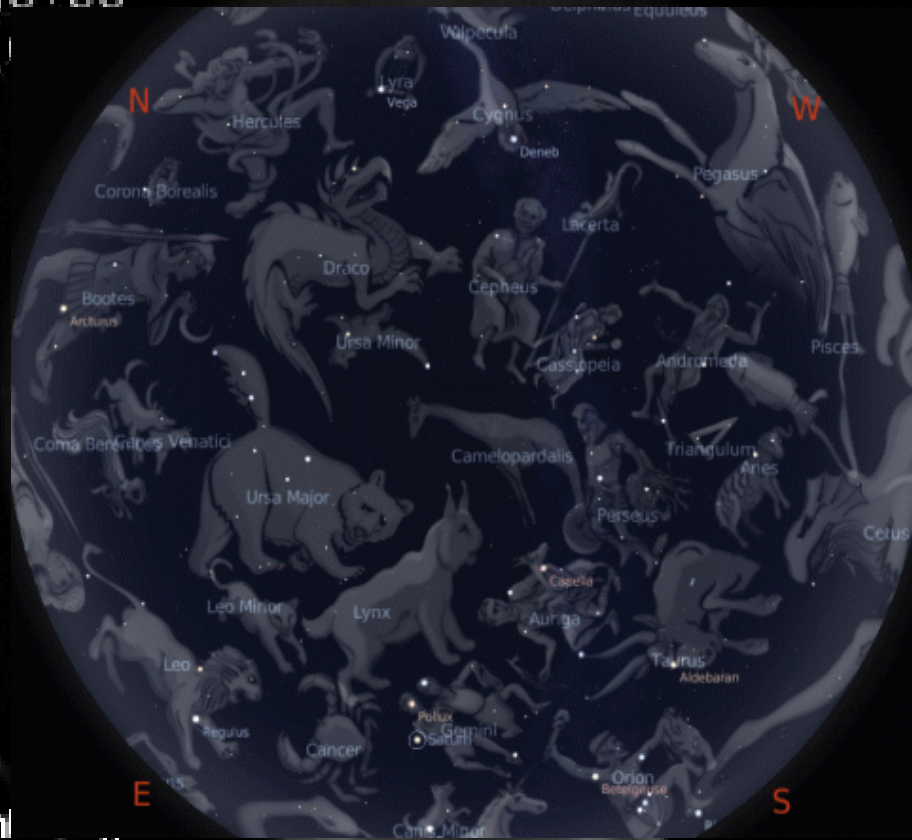




# Распространение суббури, обс. Баренцбург (Шпицберген), 2001

секунды ↓

20:49:58  
01-1



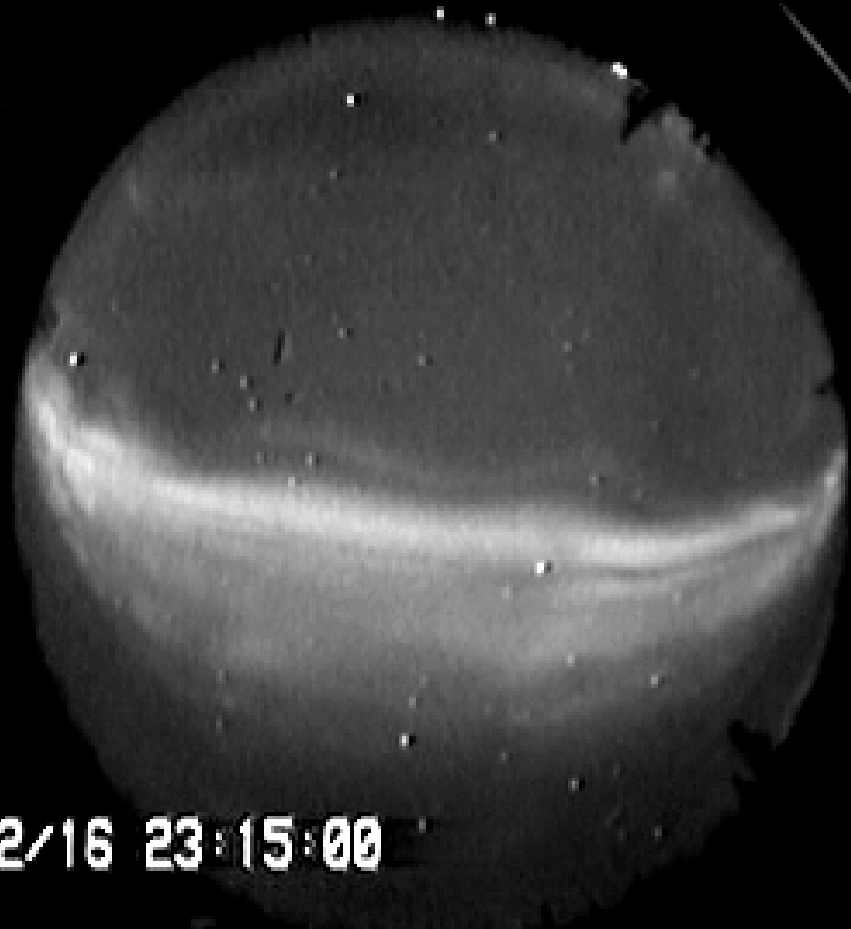
Barani  
(c) PGI KSC RAS

S



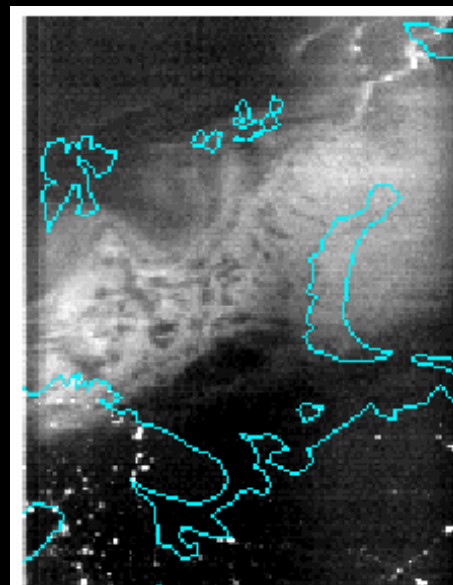


# Пульсирующие и «омега» структуры, Ловозеро (67.97N, 35.02E)



04/12/16 23:15:00

секунды



DMSP F13 satellite



# Авроральные явления – не только оптические свечения!

Возмущения магнитного поля

Ионизация верхней атмосферы

Генерация электро-магнитных волн

Возмущения в прохождении радиоволн

См. также материалы ежегодного семинара

«Физика авроральных явлений», Апатиты:

<http://pgia.ru/seminar>

Время проведения:

февраль-март.



Утренние пульсирующие пятна и ОНЧ «хоры»,  
Пороярви (69.17° N, 21.47° E, Финляндия), 1997



# Тонкая структура, Рамфьорд (69.59° N, 19.23° E), Норвегия



← ~6 km →

Магнитный зенит,  $3 \times 3^\circ$ ,  $\sim 6 \times 6$  км @ 100 км

[H.Dahlgren et al. 2007]





# «Черные» сияния, Рамфьорд (69.59° N, 19.23° E), Норвегия



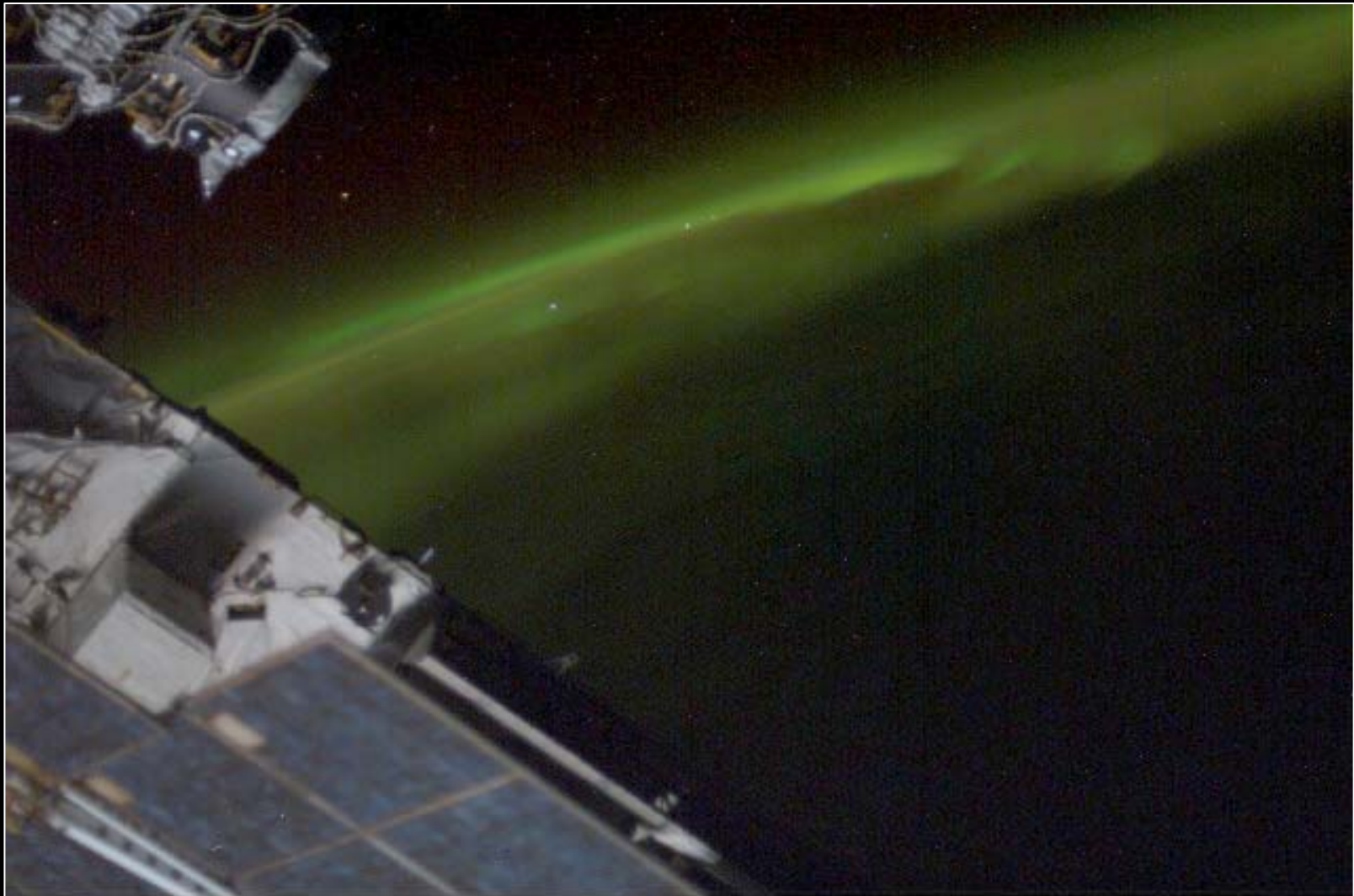
~25 км

Магнитный зенит, ч/б ТВ, 15x10°,  
~25x20 км @ 100 км

[M.J. Kosch et al., 2006]



# Полярные сияния с низковысотных спутников



iss007e06020

<http://eol.jsc.nasa.gov>

# Полярные сияния с МКС, 2003



<http://eol.jsc.nasa.gov>

# Полярные сияния с МКС, 2003

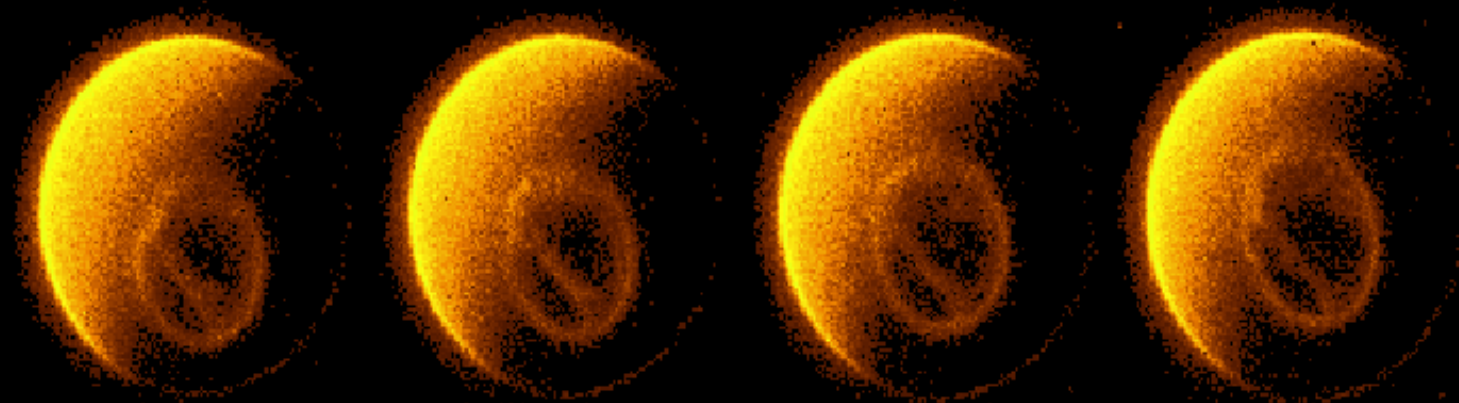


<http://eol.jsc.nasa.gov>

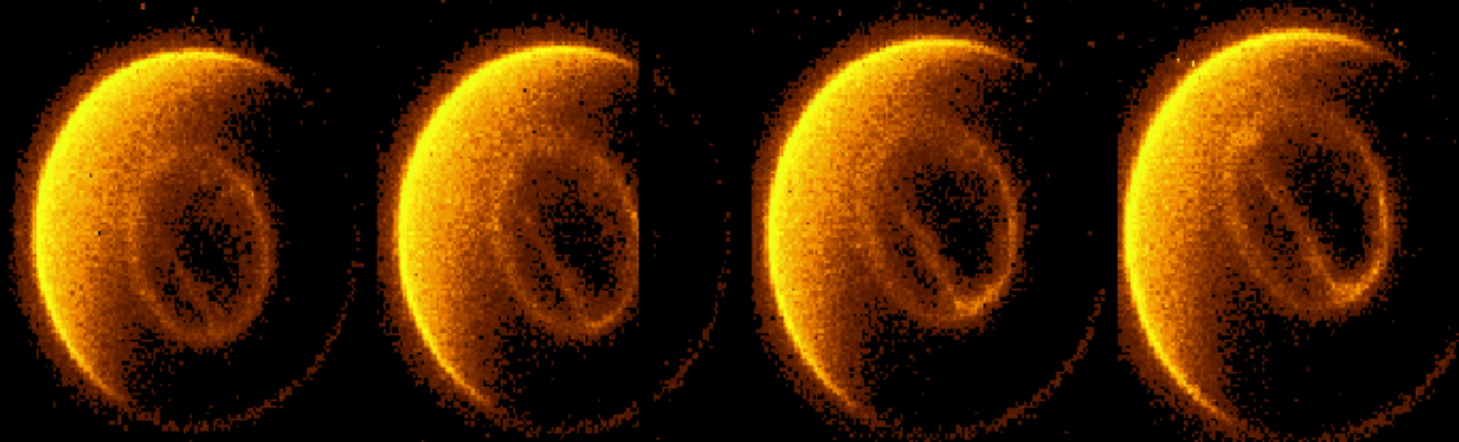


# Тета-аврора

Dynamics Explorer I/Spin-Scan Auroral Imaging  
P.I. – Dr. L. A. Frank, University of Iowa

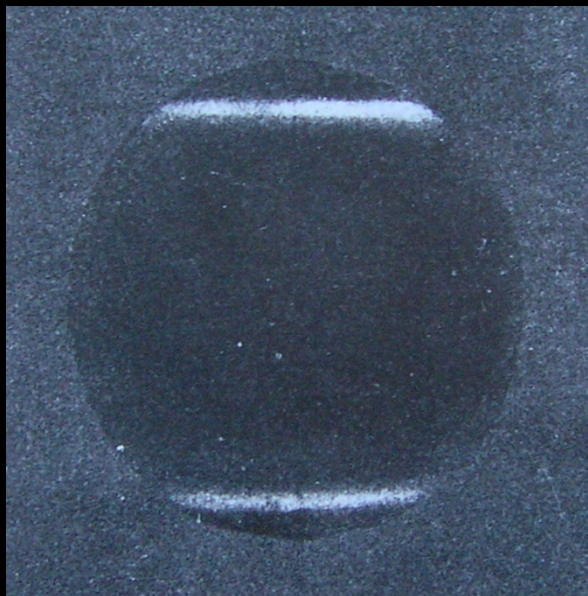


81312141206\_C2F 81312142414\_C2F 81312143623\_C2F 81312144831\_C2F  
YYDDHHMMSS – Photometer "C" – Filter "2" (123W) [2,060]

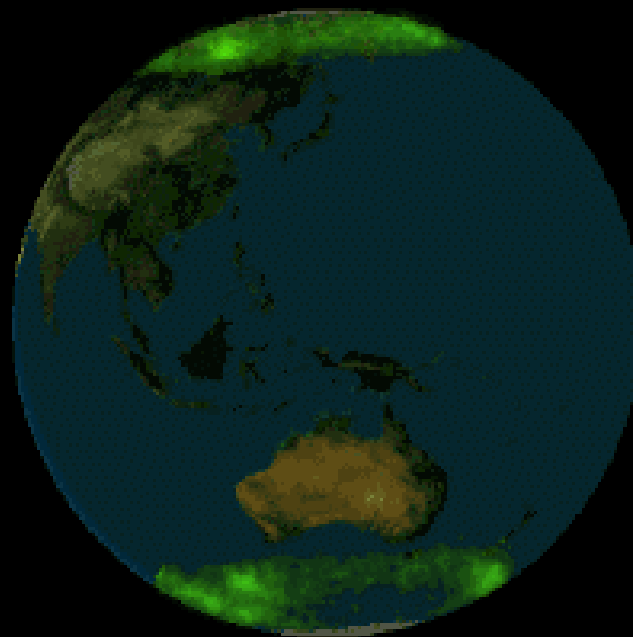


81312150039\_C2F 81312151248\_C2F 81312152456\_C2F 81312153704\_C2F

# Сопряженность северного и южного полушарий



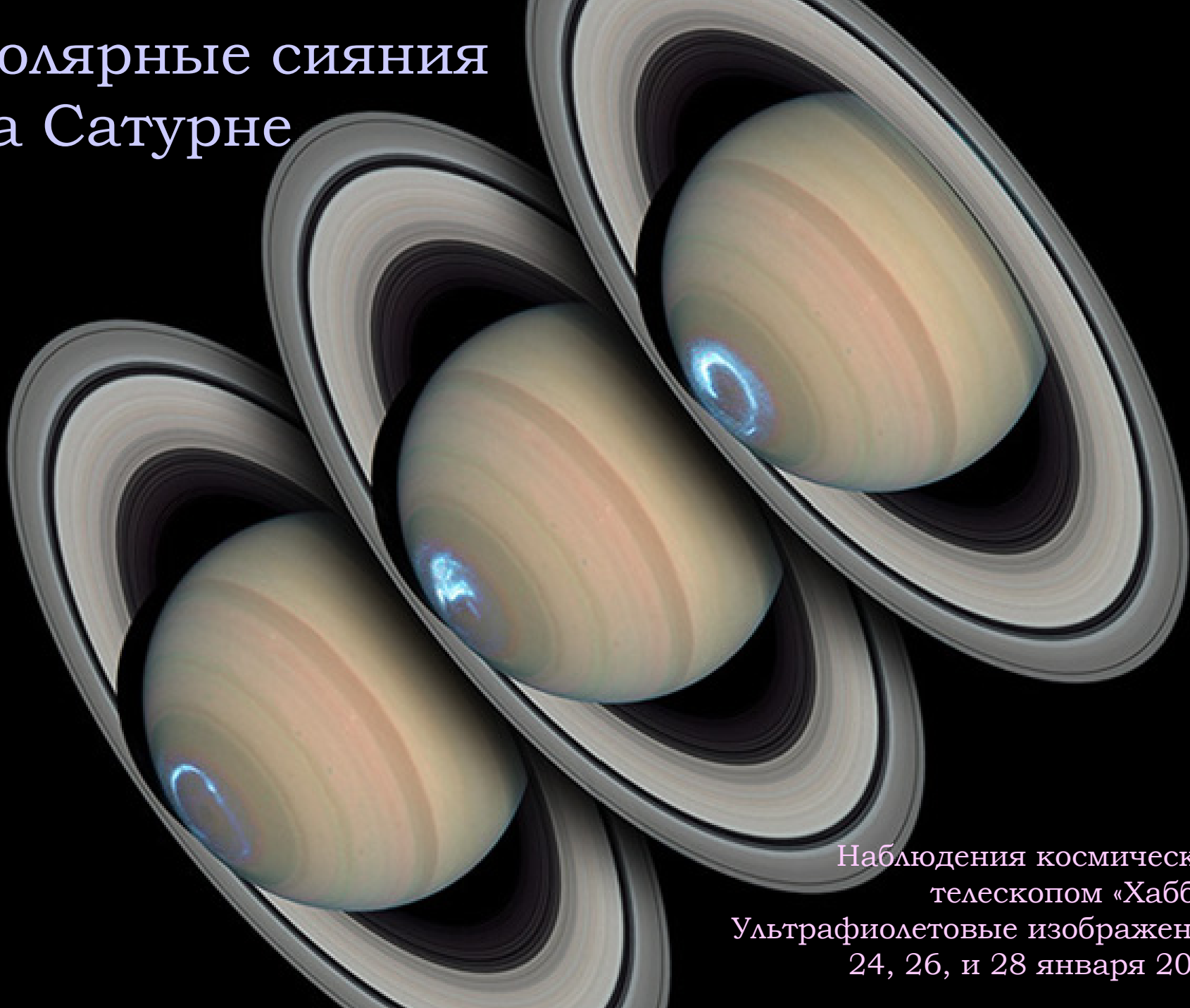
Биркеландовская  
«террелла»



Комбинировано из данных спутника  
ПОЛАР.

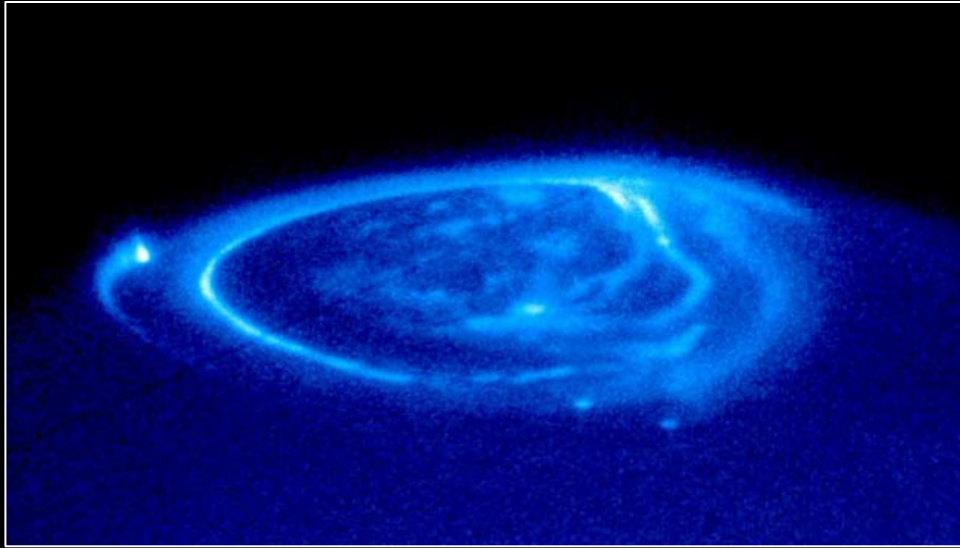
Магнитная буря 22 октября 2001.

# Полярные сияния на Сатурне

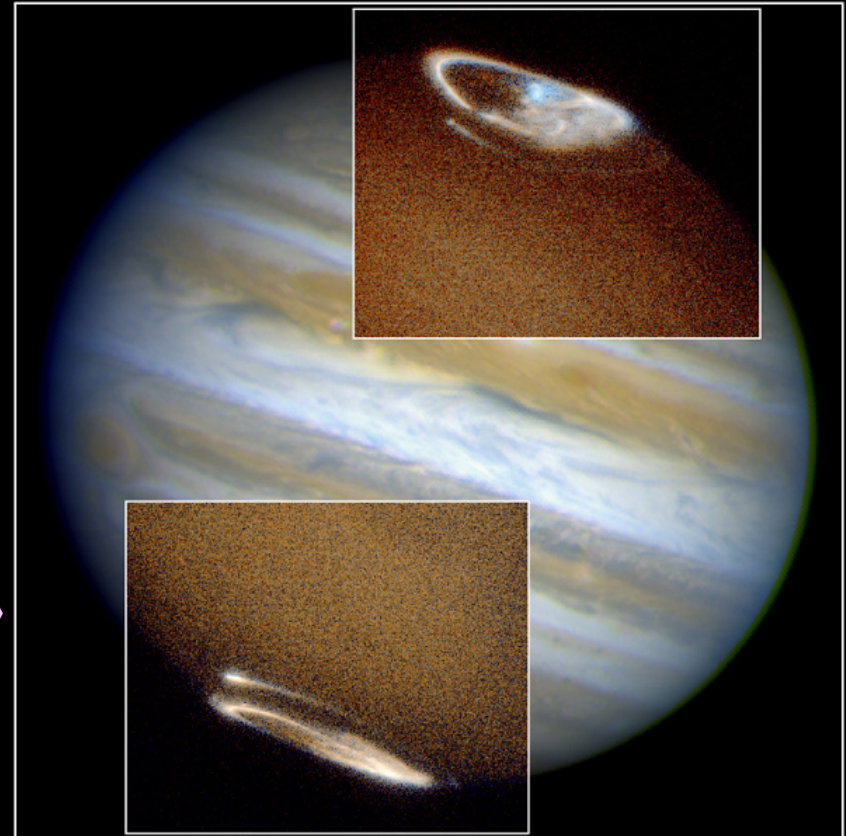


Наблюдения космическим  
телескопом «Хаббл».  
Ультрафиолетовые изображения,  
24, 26, и 28 января 2004.

# Полярные сияния на Юпитере



Наблюдения космическим телескопом «Хаббл»



**Jupiter Aurora**

HST • STIS • WFPC2

PRC98-04 • ST Sci OPO • January 7, 1998  
J. Clarke (University of Michigan) and NASA



# Заключение

Полярные сияния – это свечение атмосферных газов, возбуждаемых энергичными частицами, ускоренными в магнитосфере.

Источник энергии – солнечный ветер.

Видимые полярные сияния вызваны в основном высыпаниями электронов. Высыпания пучков электронов вдоль силовых линий магнитного поля дает лучевую структуру полярных сияний при наблюдении с земли.

Наиболее интенсивные видимые эмиссии в спектре полярных сияний – это линии атомного кислорода: 557.7 нм (зеленая) и 630.0 нм (красная).

Авроральные явления – это не только видимые оптические свечения