

# Как Солнце воздействует на электромагнитную «погоду» на Земле?

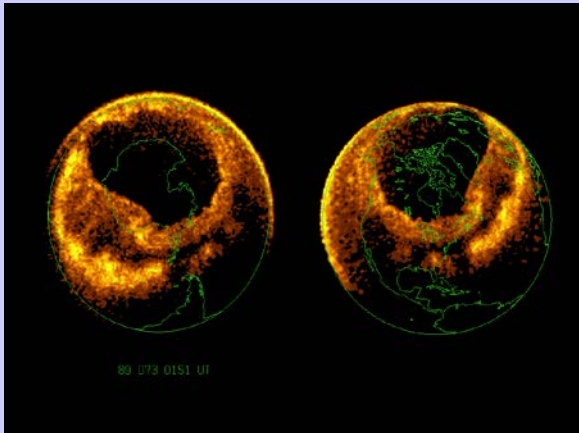
**Пилипенко Вячеслав Анатольевич**

[pilipenko\\_va@mail.ru](mailto:pilipenko_va@mail.ru)



Любая сложная проблема имеет простое, наглядное, дешевое, и неправильное решение

Как упрощенное представление о солнечно-земных связях казалось бы, подтвердилось экспериментами с «тереллой»?



Казалось бы, этот эксперимент наглядно объяснил природу солнечно-земных связей?! На самом деле, солнечно-земные связи включают цепь фундаментальных физических явлений, понимание которых потребовало немало усилий, и многие из которых до конца так и не выяснены.

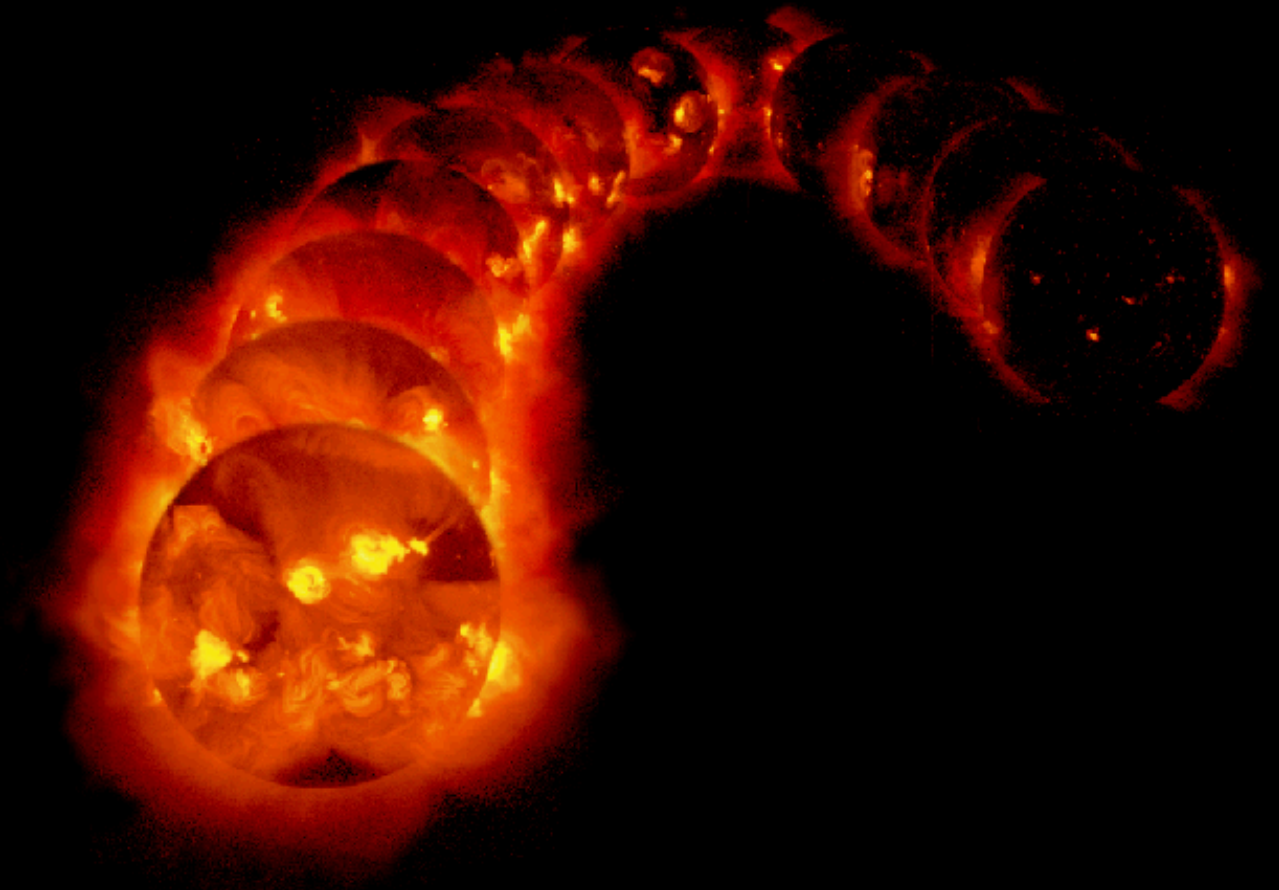
## Могут ли возникать «сбои» в С-З связях?

Изменчивость солнечной постоянной – в оптическом диапазоне ~0.01%. Как же 11-летний солнечный цикл?

Диапазон солнечного излучения очень широк – от космических лучей, гамма-вспышек, радиоизлучения F10.7 (общепринятая характеристика солнечной активности) до **потоков низкоэнергичных частиц**.

Эти потоки мы видим при солнечных затмениях – они образуют солнечную корону. Как далеко расширяется солнечная корона? Оптические наблюдения помочь не могут, но есть такая практическая вещь как хорошая теория.





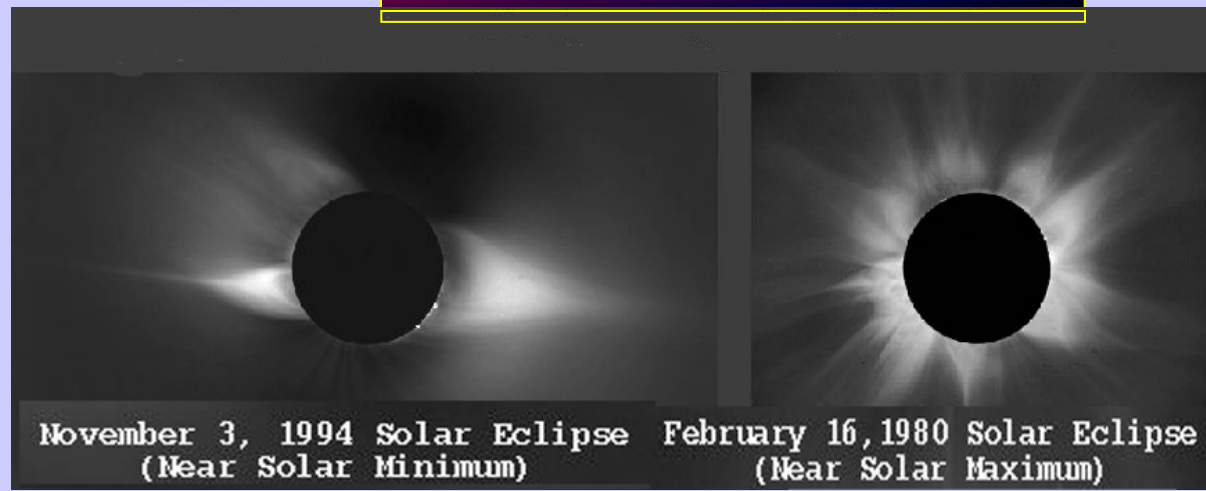
Бурная плазменная жизнь  
нашей звезды

плазменные процессы и э/м  
излучения – вариации на  
порядки!

Minimum ▼

Maximum ▼

Solar cycle



November 3, 1994 Solar Eclipse  
(Near Solar Minimum)

February 16, 1980 Solar Eclipse  
(Near Solar Maximum)

# Солнечный ветер

- Задача о равновесном состоянии нагретого газового шара ( $\sim 10^6$  K).
- Проблема со стационарным решением – ненулевое давление на бесконечности?

учет гравитации  $\dots + \rho \gamma \frac{m_i M_{\odot}}{R}$

Ищем равновесное состояние при  $\mathbf{V}(R) = 0$

Если пренебречь изменением гравитации с удалением

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{r}{H}\right) \quad \text{где } H = \frac{2T}{m_i g} \quad \text{высота атмосферы}$$

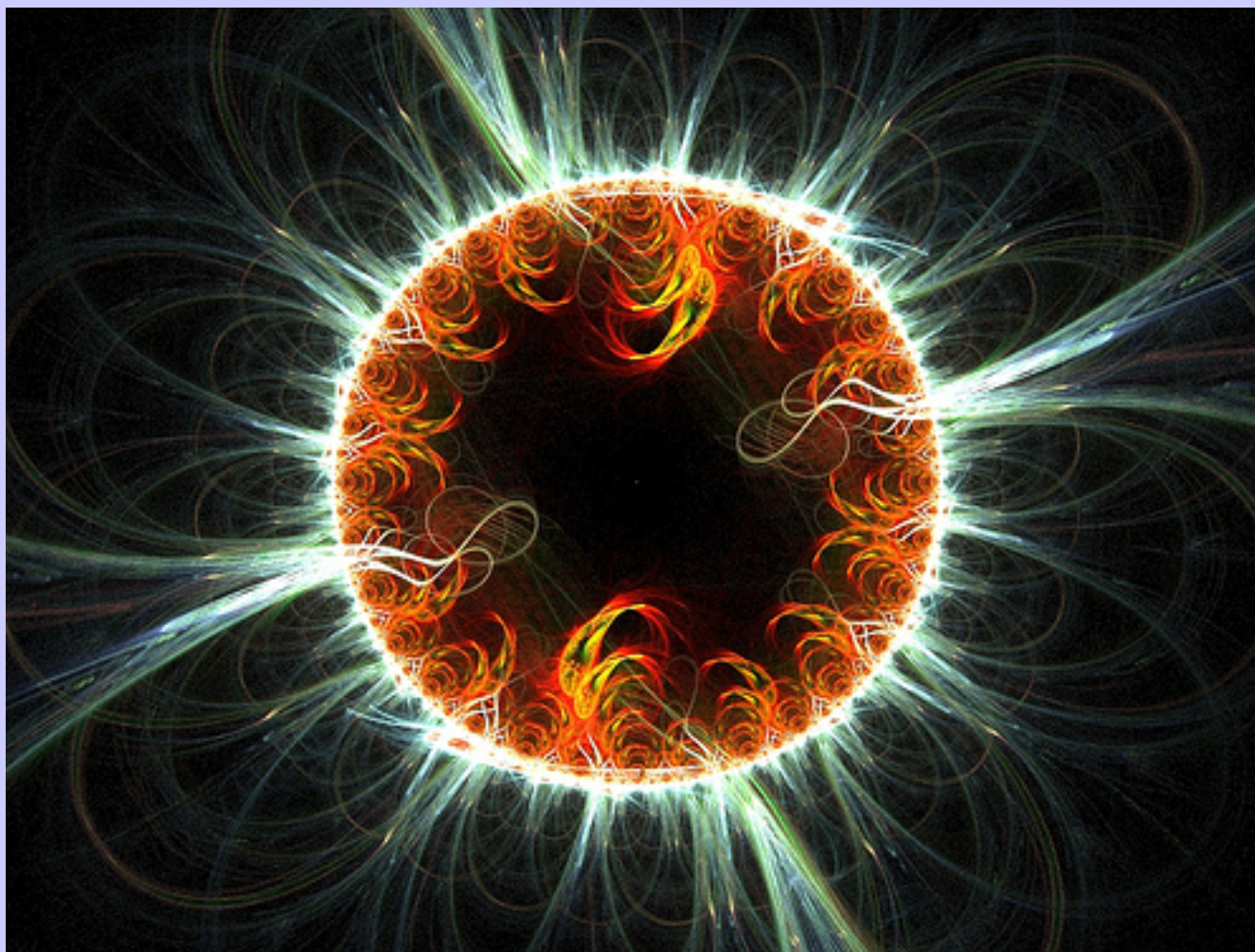
But :  $F_g \propto R^{-1}$

решение  $p(R) \Rightarrow p(\infty) \neq 0!$

Решение Паркера – стационарное состояние возможно только при постоянном истечении вещества! Причем это истечение становится сверхзвуковым – солнечный ветер.

Статья 1958 г в AJ была отвергнута рецензентами, а сейчас именем Паркера назван последний спутниковый эксперимент.

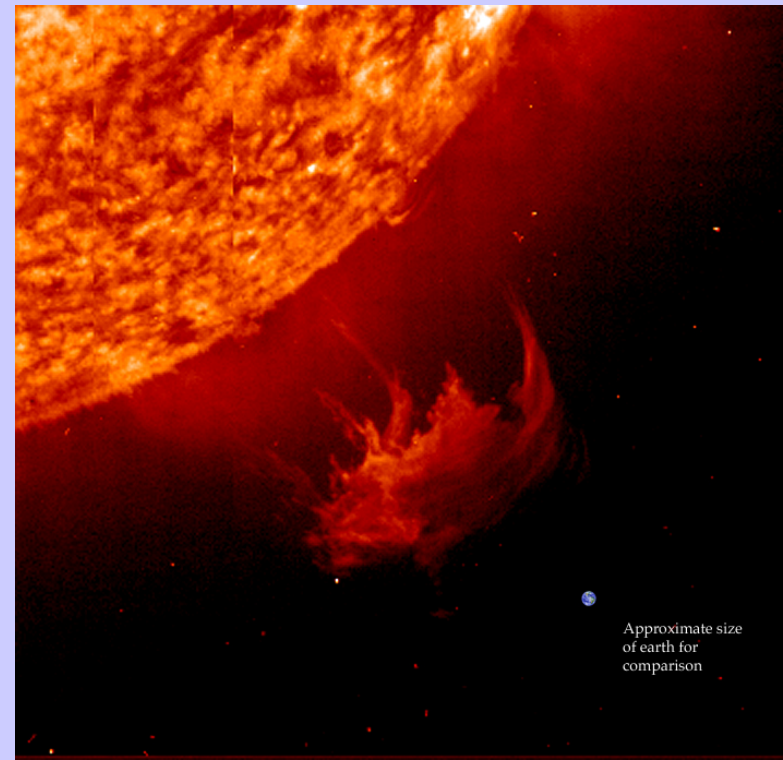
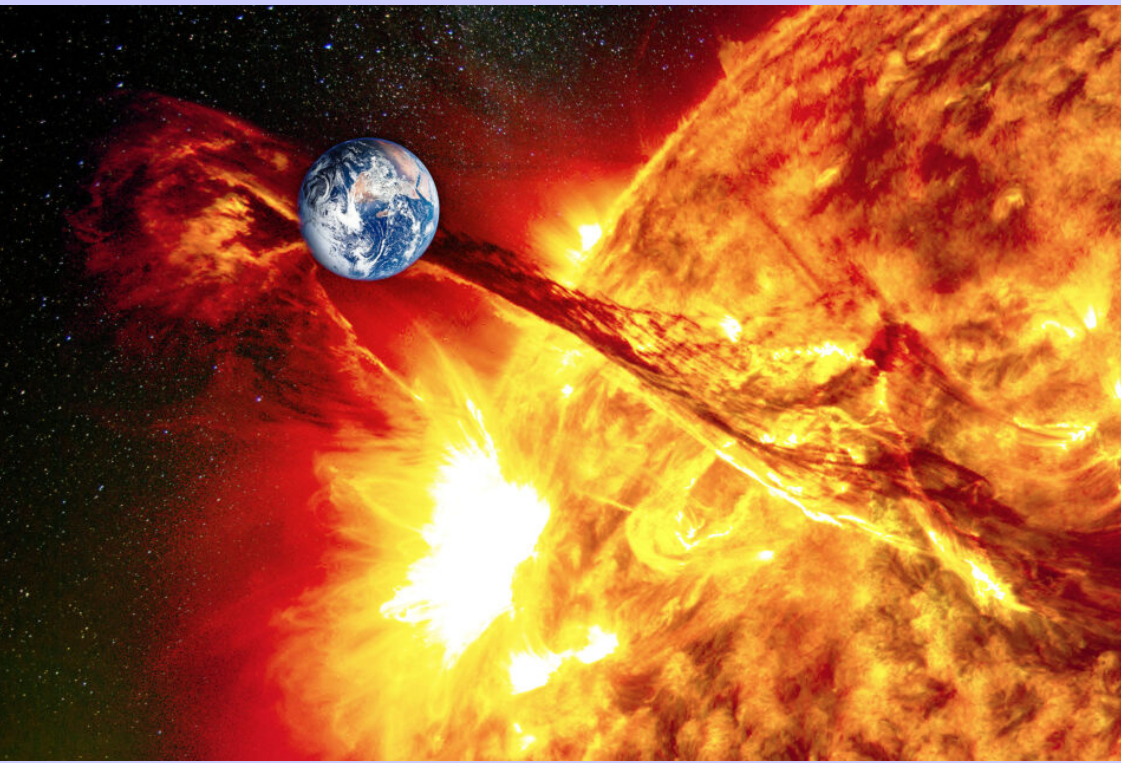
Решение Паркера описывает фоновый спокойный солнечный ветер ( $10^6$  тонн/с).



***Мы живем в короне Солнца***

На фоне постоянного солнечного ветра возникают **высокоскоростные потоки**:

- **корональные дыры** (рекуррентные 27 дневные потоки) – *рекуррентные бури*
- **корональные выбросы массы** (не то же самое, что солнечные вспышки!) – *сильные бури*



Почему этот поток заряженных частиц не расталкиваются и поток не расплывается при движении от Солнца?

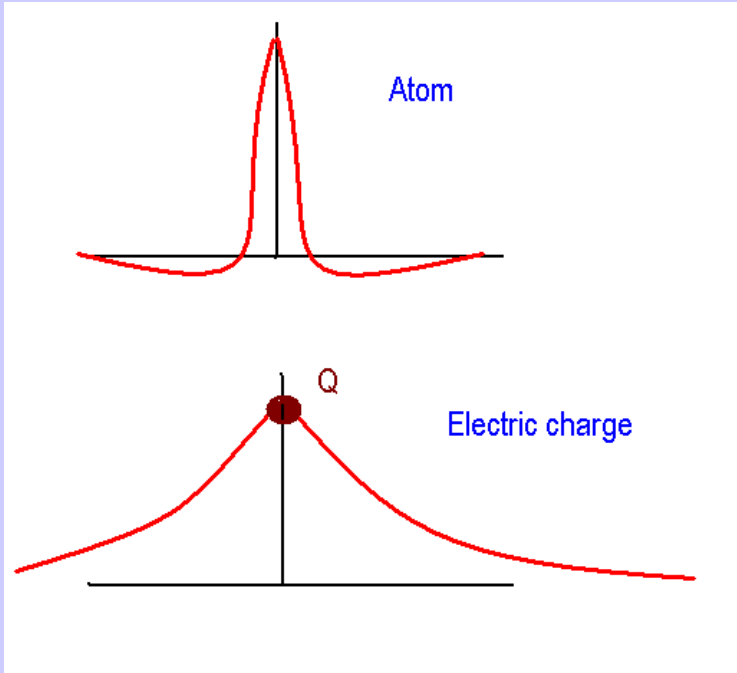
Солнечное вещество в качественно ином состоянии – **плазма**

Чем плазма отличается от ионизированного газа (как воздух в зале)?

Движение частиц в плазме управляется не столкновениями, а э/м силами.

Поведение газа определяется коротко-действующими силами при столкновениях

Коллективное поведение частиц плазмы определяется длинно-действующими э/м силами



Как газ превратить в плазму?

Thermodynamic balance (Saha formula)

$$\frac{N_e N_i}{N_n} \propto T^{3/2} \exp\left(-\frac{I}{T}\right)$$

$I$  is the ionization potential ( $O \sim 10 \text{ eV}$ )

Чтобы воздух в этом зале превратить в плазму, согласно формуле Саха его надо нагреть до температуры  $\sim$  потенциала ионизации | В нашем случае  $>100\ 000 \text{ K}$



# Квази-нейтральность

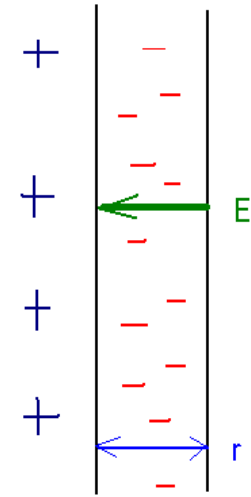
Плазма поддерживает электрическую квази-нейтральность

$$W \simeq eEr \simeq e \frac{eNr}{\varepsilon_0} r$$

$$W \simeq kT$$

$$r_D \simeq \sqrt{\frac{\varepsilon_0 T}{Ne^2}} - \text{Debye radius}$$

If  $N_D \simeq Nr_D^3 \gg 1$  - it is plasma!



- Разодрать электронную и ионную компоненты плазмы можно не более, чем на  $r_D$
- Если  $r_D \ll L$  то газ ведет себя как плазма.
- В солнечном ветре  $r_D \sim 10$  м, в ионосфере  $r_D \sim 0.1$  см

## Особенности плазмы солнечного ветра

- бесстолкновительная
- низкоэнергичная с энергией частиц ~сотни эВ
- разреженная  $N \sim 10 \text{ см}^{-3}$ . Но  $\sim 10^6$  тонн/с
- поток сверхзвуковой  $V \sim$ несколько сотен км/м. До Земли такой поток доходит  $1 \text{ ае} = 150$  млн. км за 2-3 суток.
- перед облаком плазмы приходит ударная волна (в бесстолкновительной среде?)

Пока не появилось понятие плазмы, понять механизм СЗ связей было невозможно

Кстати:  $1 \text{ эВ} = 11600 \text{ К}$

$T$  солнечного ветра  $\gg T$  плавления металла. Почему спутники не плавятся?

# Магнитогидродинамика

Как описывать динамику плазмы?

**Кинетический подход:** Рассчитать движение отдельной частицы в заданных  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  полях, и просуммировать  $\Rightarrow$  кинетическое уравнение Власова

**МГД подход:** частицы не движутся независимо, а как единое целое

Рассматриваем плазму как проводящую жидкость, которая описывается

- уравнениями Максвелла (с учетом массовой скорости)
- уравнениями гидродинамики (с силой Лоренца)

Замыкает эти системы – закон Ома

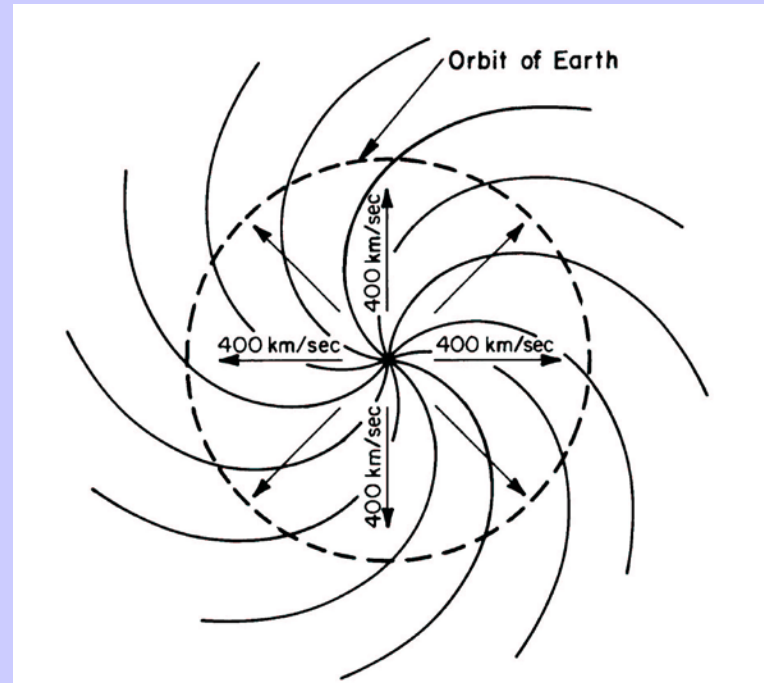
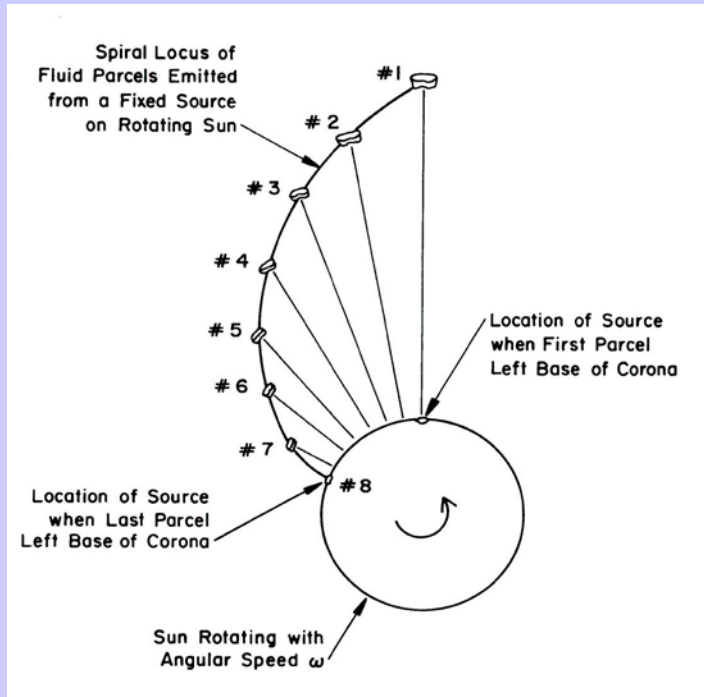
$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}])$$

# Особенность МГД течений

Благодаря высокой проводимости космической плазмы, диффузия идет очень медленно

Магнитные силовые линии как бы заморожены в плазму и движутся вместе с ней.

**Образование спиральной структуры ММП** – силовые линии заморожены как в поток плазмы так и в основание на Солнце



## Что будет когда солнечный ветер достигнет Земли?

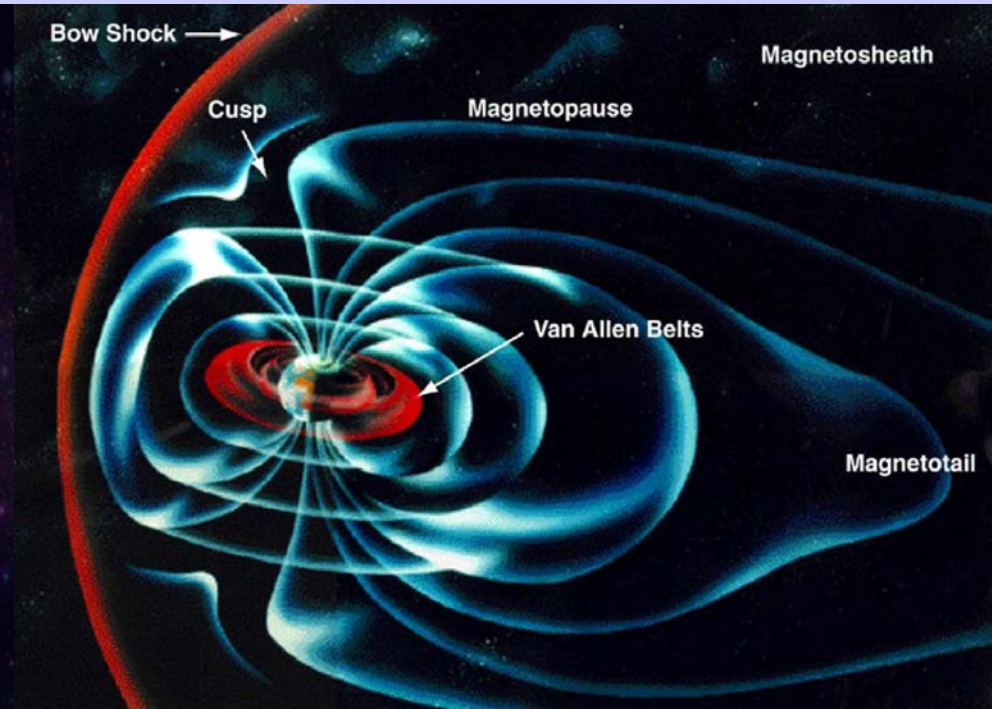
Постепенное сдувание атмосферы, как на Марсе

Почему это не грозит Земле? Магнитное поле!

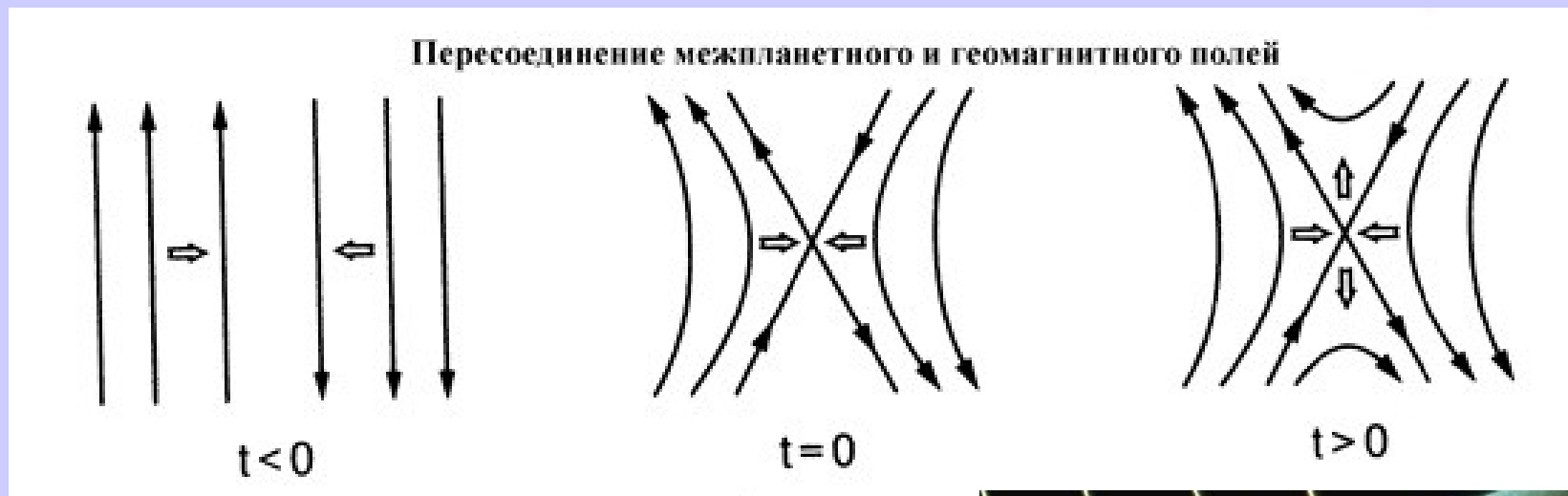
Гидромагнитное динамо, создающее квази-дипольное поле: 30 000 нТл на экваторе, и 60 000 нТл на полюсе.

Магнитное поле не проникает в высокопроводящую среду (плазму)

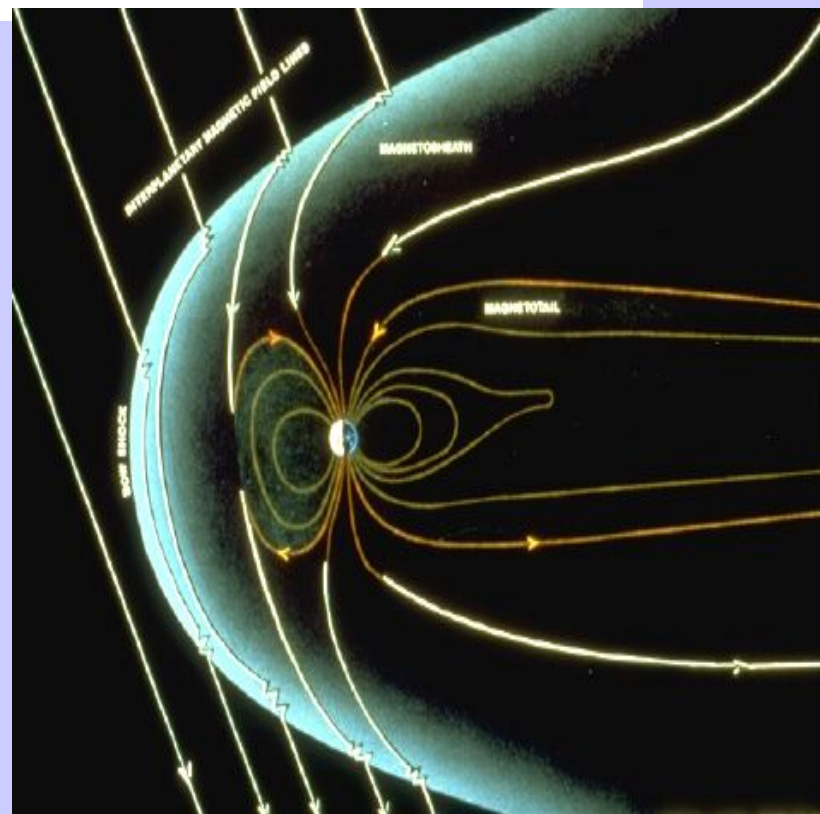
Взаимодействие потока плазмы с геомагнитным полем – образование магнитосферы

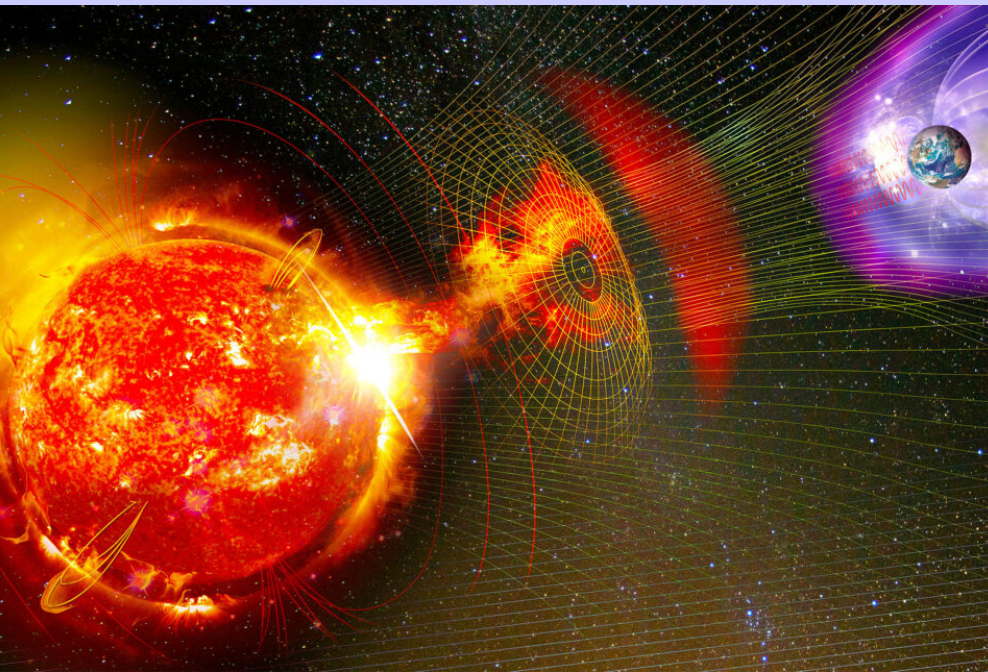


# Как энергия потока и ММП может передаться внутрь магнитной полости?



Диффузия? Более быстрый процесс (открыт в геофизике!) – **пересоединение магнитных полей** (не-МГД процесс!)

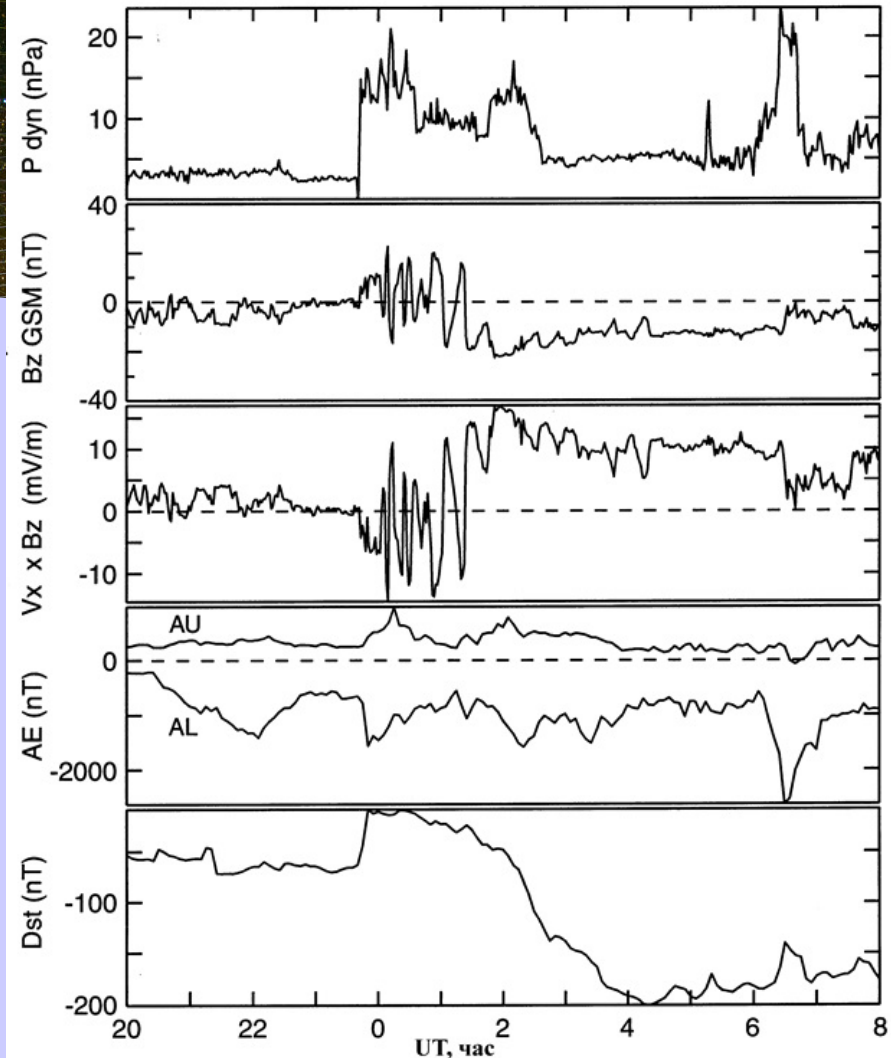




Как сделать ММП и геомагнитное поле антипараллельными?

Возмущения СВ – КВМ!  
Источник магнитных бурь!

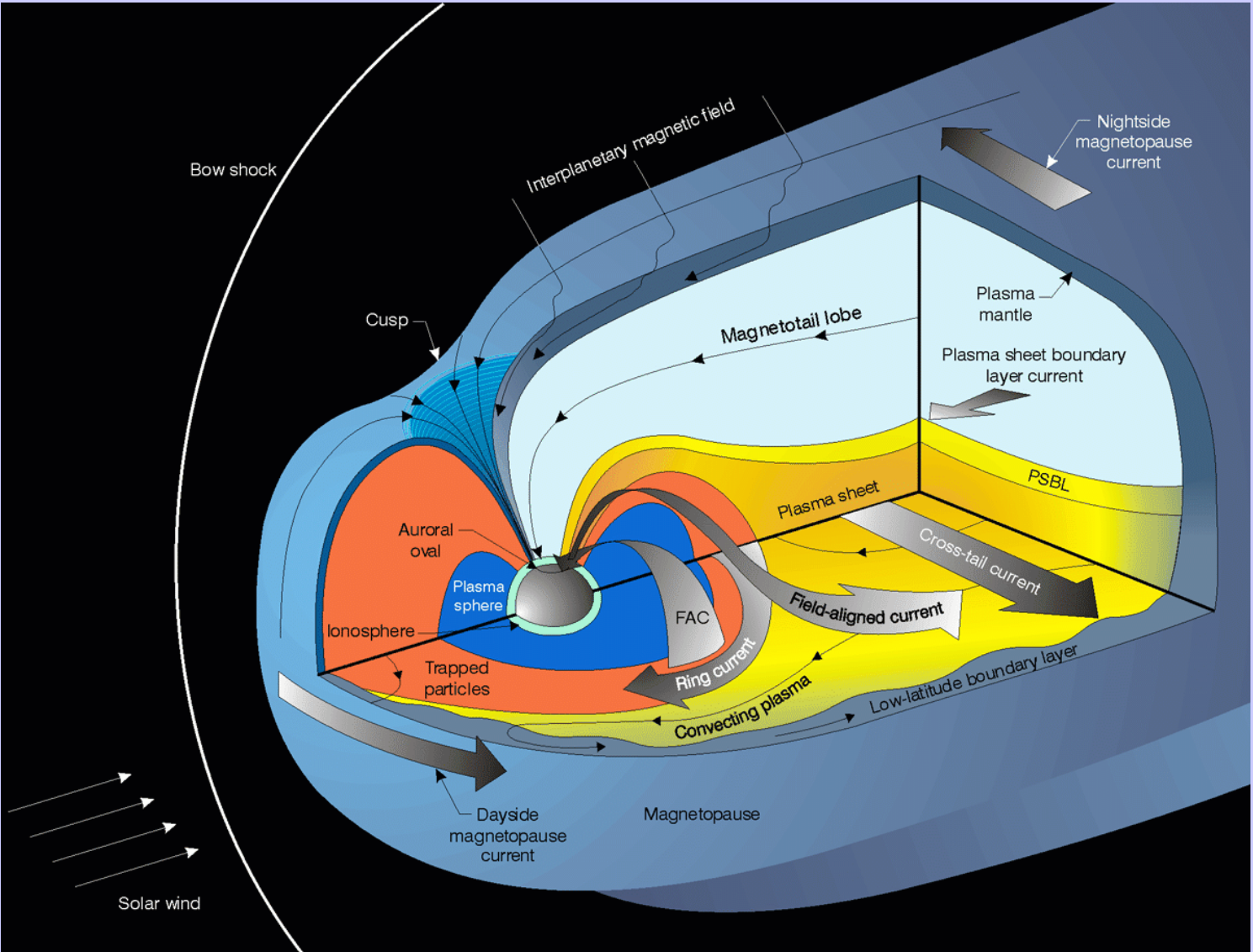
Пример триггерного (транзисторного) поведения природных систем: Изменение ММП на  $\sim 10$  нТл вызывает возмущение поля  $>2000$  нТл на Земле!



В магнитосфере самосогласованно работает система из токов, тепловой плазмы, горячих частиц, и волн широкого диапазона частот

Бесстолкновительная плазма → взаимодействие различных элементов за счет э/м полей

Вся динамическая система резко усиливается во время магнитных бурь

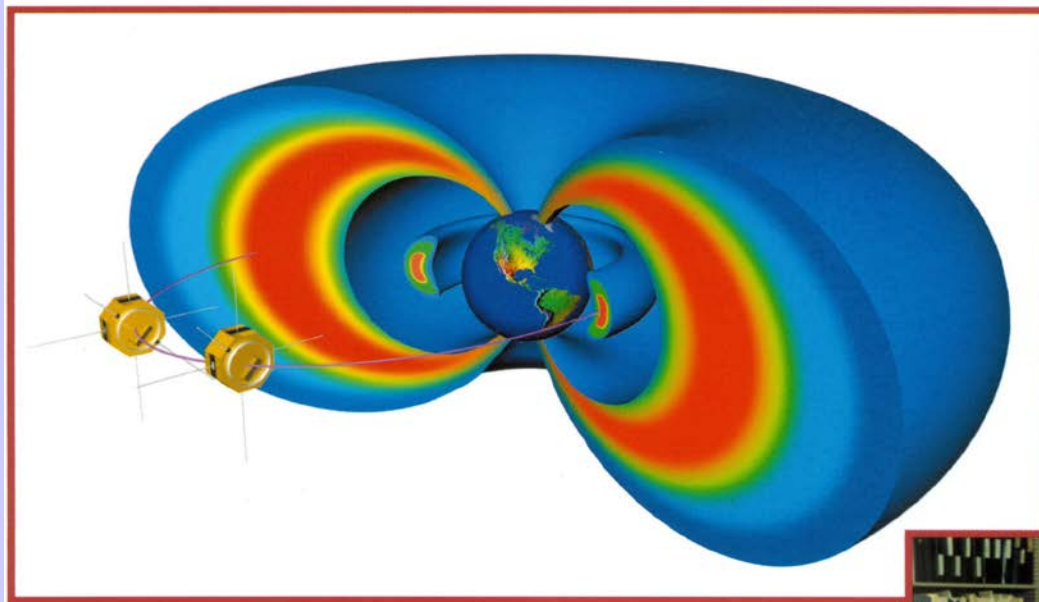
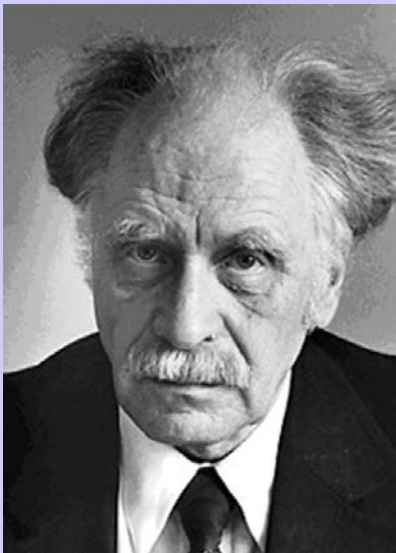




# Магнитосфера как ускоритель и ловушка для захвата и удержания энергичных частиц

До запуска спутников полагали, что в космосе только низкоэнергичная плазма и КЛ, т.к. солнечный ветер – низкоэнергичная плазма.

Оказалось, что космос радиоактивен! Он заполнен постоянно существующей высокоэнергичной радиацией!



Радиационные пояса **Ван-Аллена**, открытые **Верновым**

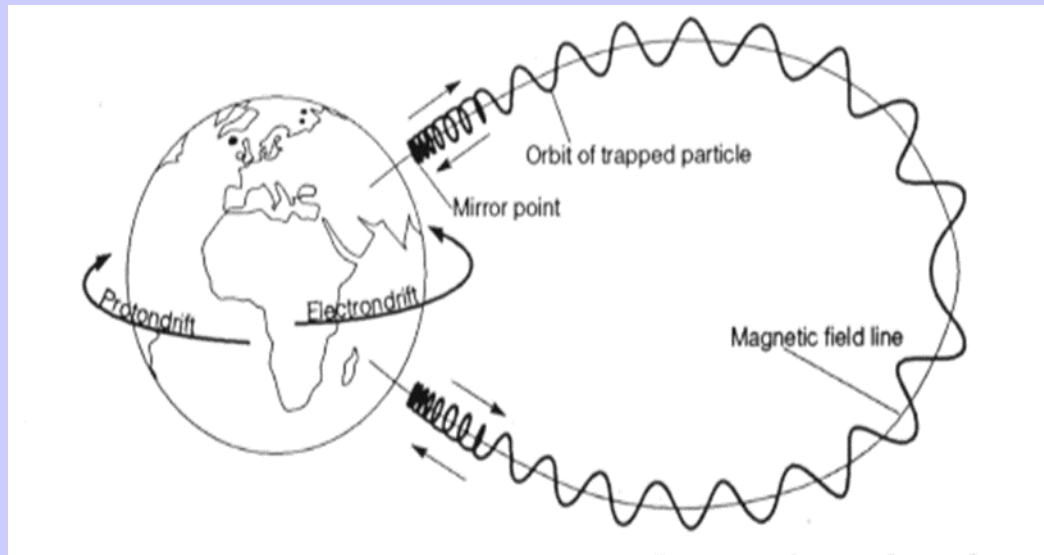
Поучительная история



# Чтобы понять, как это работает – дрейфовая теория!

Вращение с циклотронной частотой (гирочастота) с Ларморовским радиусом  $\rho$

$$\Omega_{e,i} = \pm \frac{eB}{m} \quad \rho_{e,i} = \frac{V_{\perp}}{\Omega_{e,i}}$$

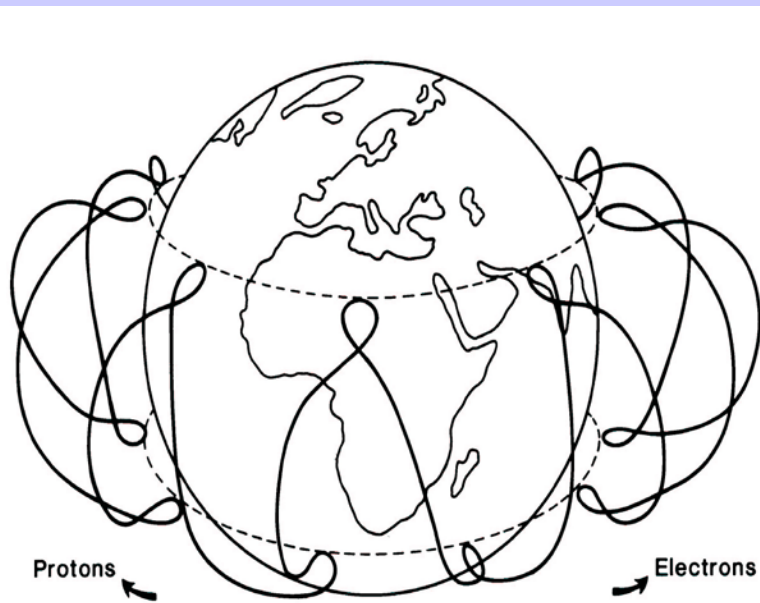


**Characteristic times:**

$$\tau_c \approx \Omega_i^{-1} \quad (\sim 1\text{s})$$

$$\tau_b \approx \frac{LR_E}{u_i} \quad (\sim 1\text{min})$$

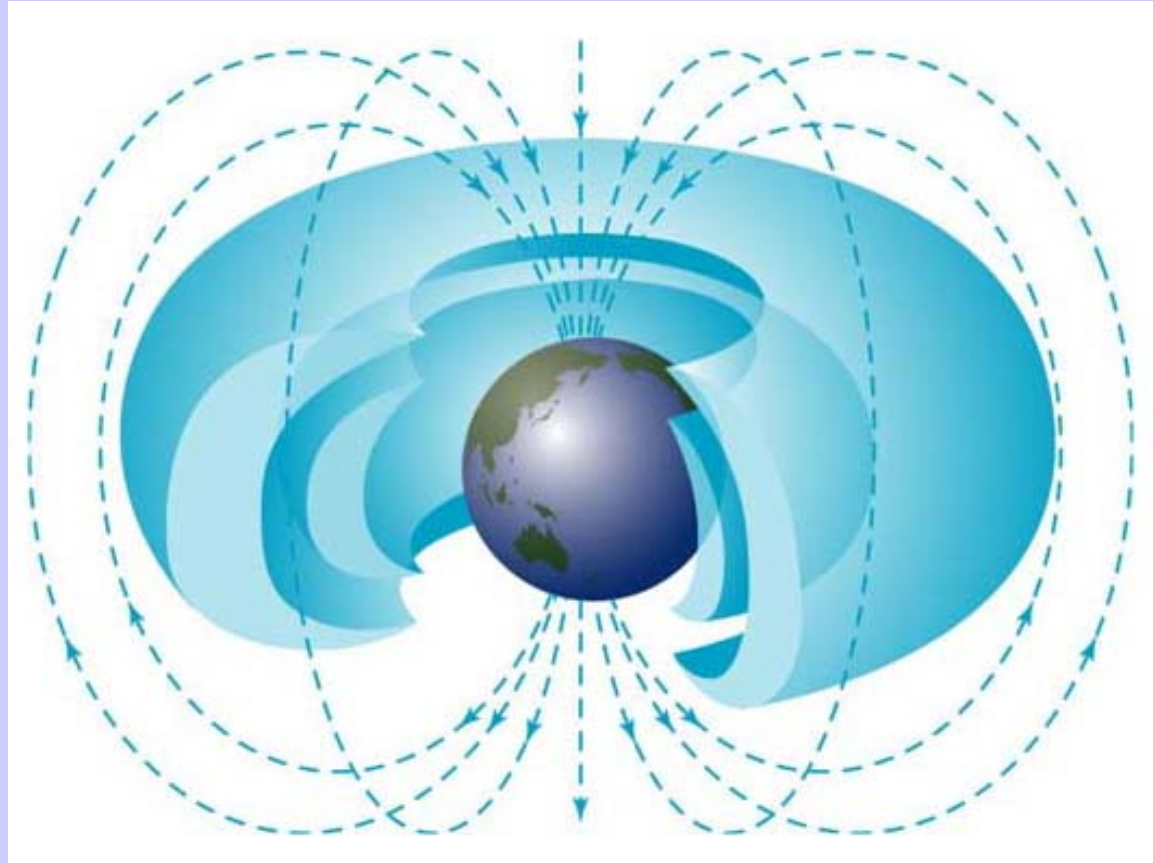
$$\tau_c \approx \frac{2\pi LR_E}{V_M} \quad (\sim 10\text{min})$$



Благодаря периодическим орбитам происходит удержание частиц в магнитной ловушке

При резонансном воздействии происходит высыпание частиц из ловушки, ускорение и радиальная диффузия

## Образование радиационных поясов и кольцевого тока

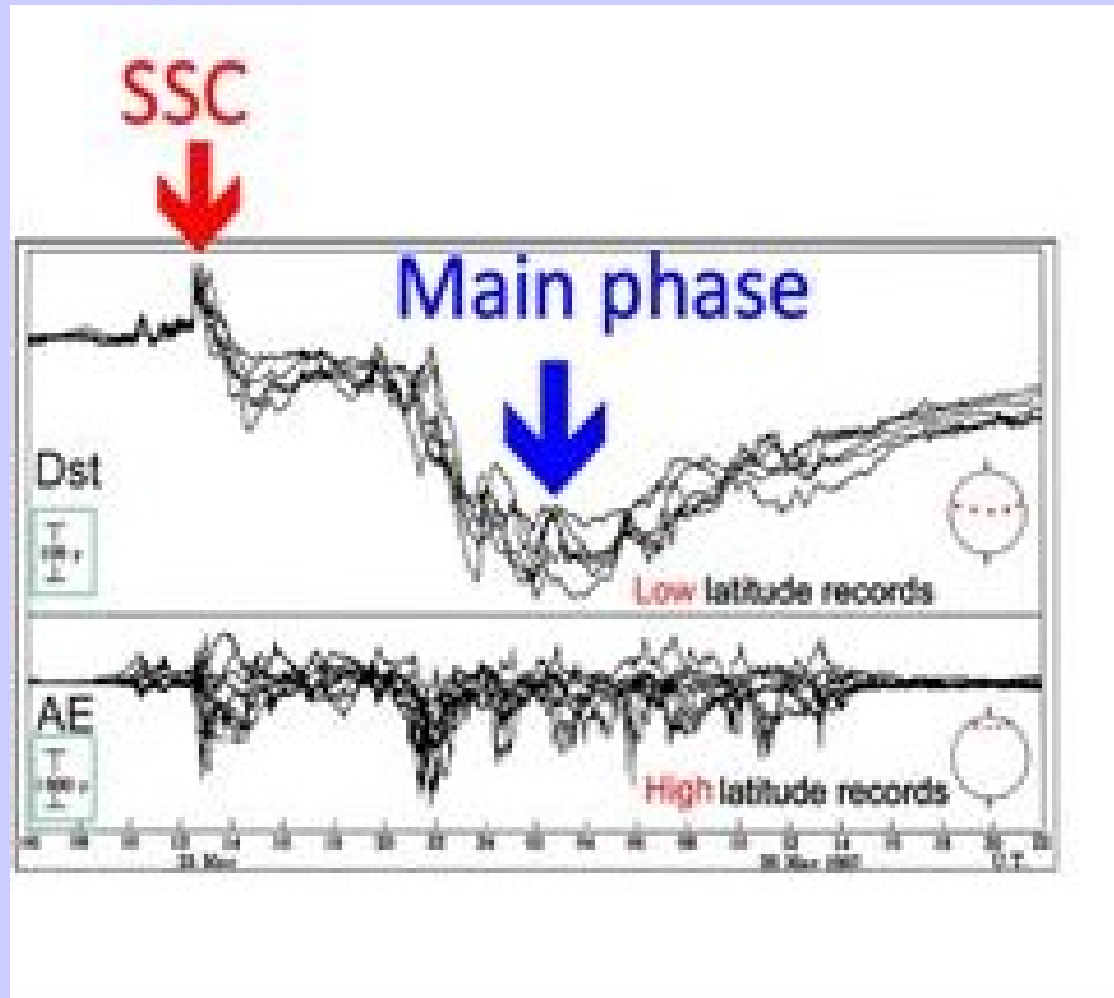


Околоземное пространство – природная ловушка и ускоритель энергичных частиц:

- внутренний рад. пояс – МэВ протоны
- внешний радиационный пояс – релятивистские электроны ( $>0.5$  МэВ) – «убийцы» спутниковой электроники
- кольцевой ток во время магнитной бури – энергичные протоны и электроны (десятки-сотни кэВ)

Надо не только удерживать частицы, но и ускорить их до наблюдаемых энергий?

# Формирование кольцевого тока во время магнитной бури

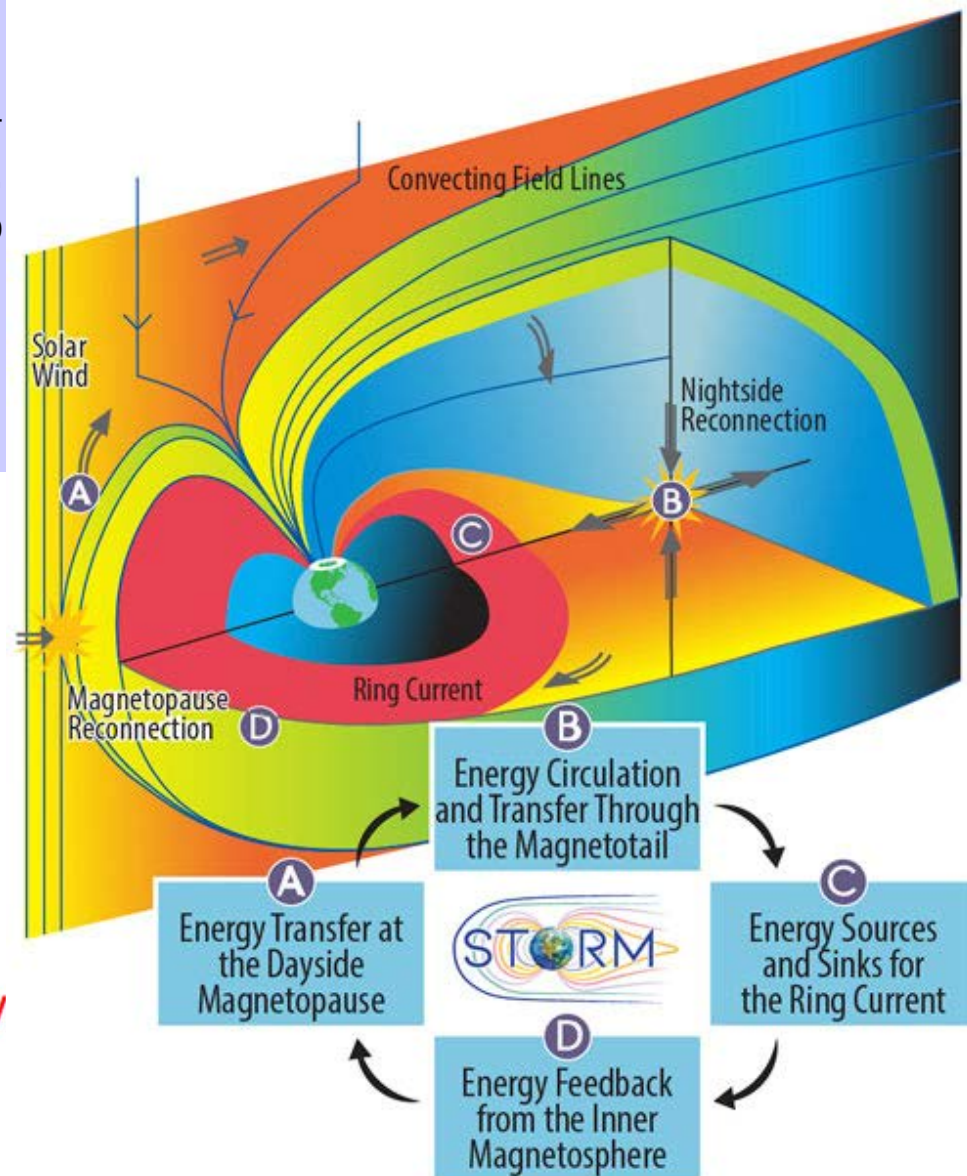
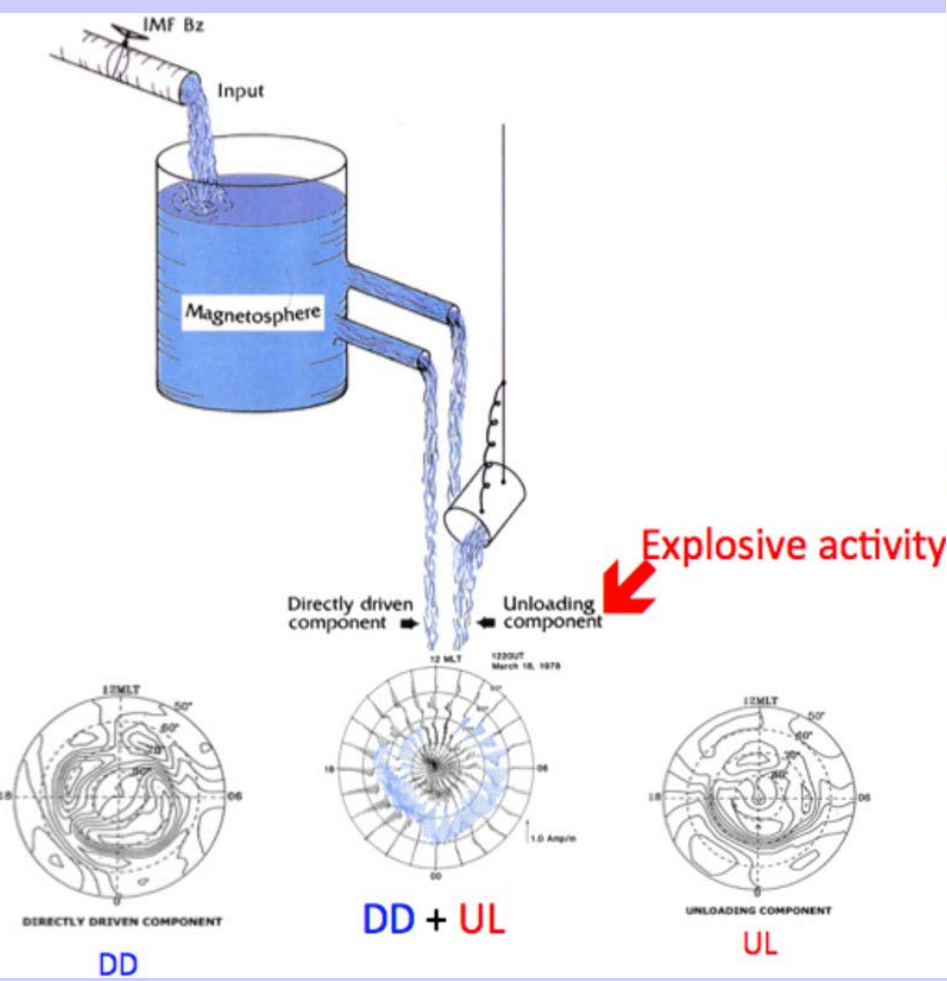


Как измеряется интенсивность магнитной бури? Общепланетарные геомагнитные индексы:

**Dst – индекс** – магнитное поле, создаваемое кольцевым током

**AE-индекс** – интенсивность аврорального электроджета

Удивительная особенность геофизических процессов – накопление и спонтанное взрывное выделение энергии, а не регулярное выделение энергии от внешнего драйвера?

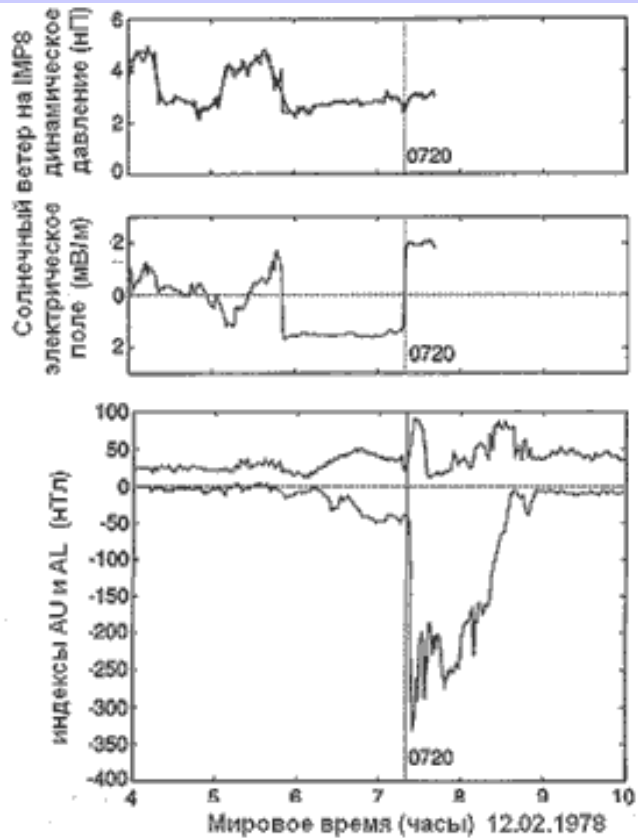
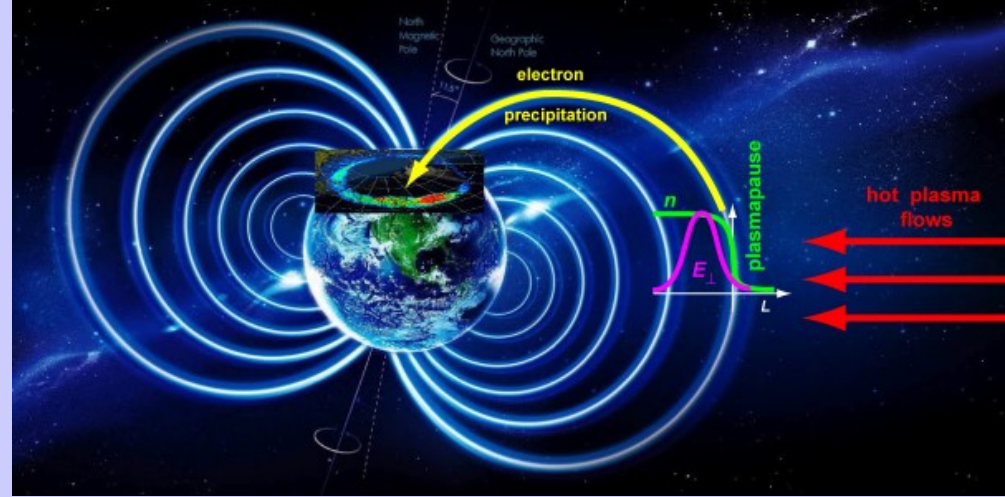


Космофизика – суббури (космотрясения)

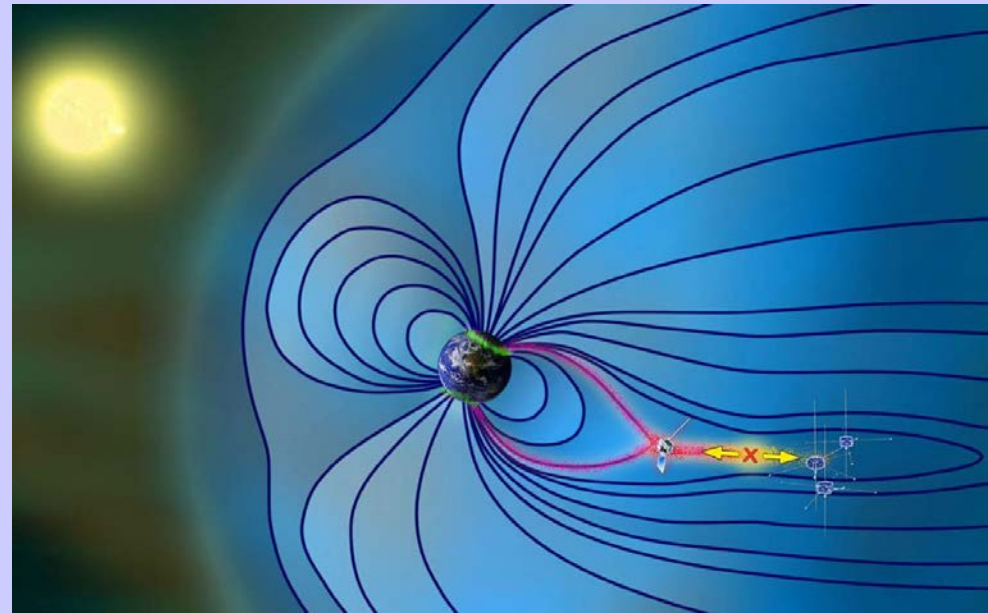
Возникают как на фоне магнитной бури (наиболее интенсивные), так и изолированно.

# Суббури

В отличие от магнитных бурь охватывают только ночной сектор и авроральные широты  
Возбуждаются как триггером, так и спонтанно



Возможный механизм – пересоединение магнитных полей в хвосте магнитосферы





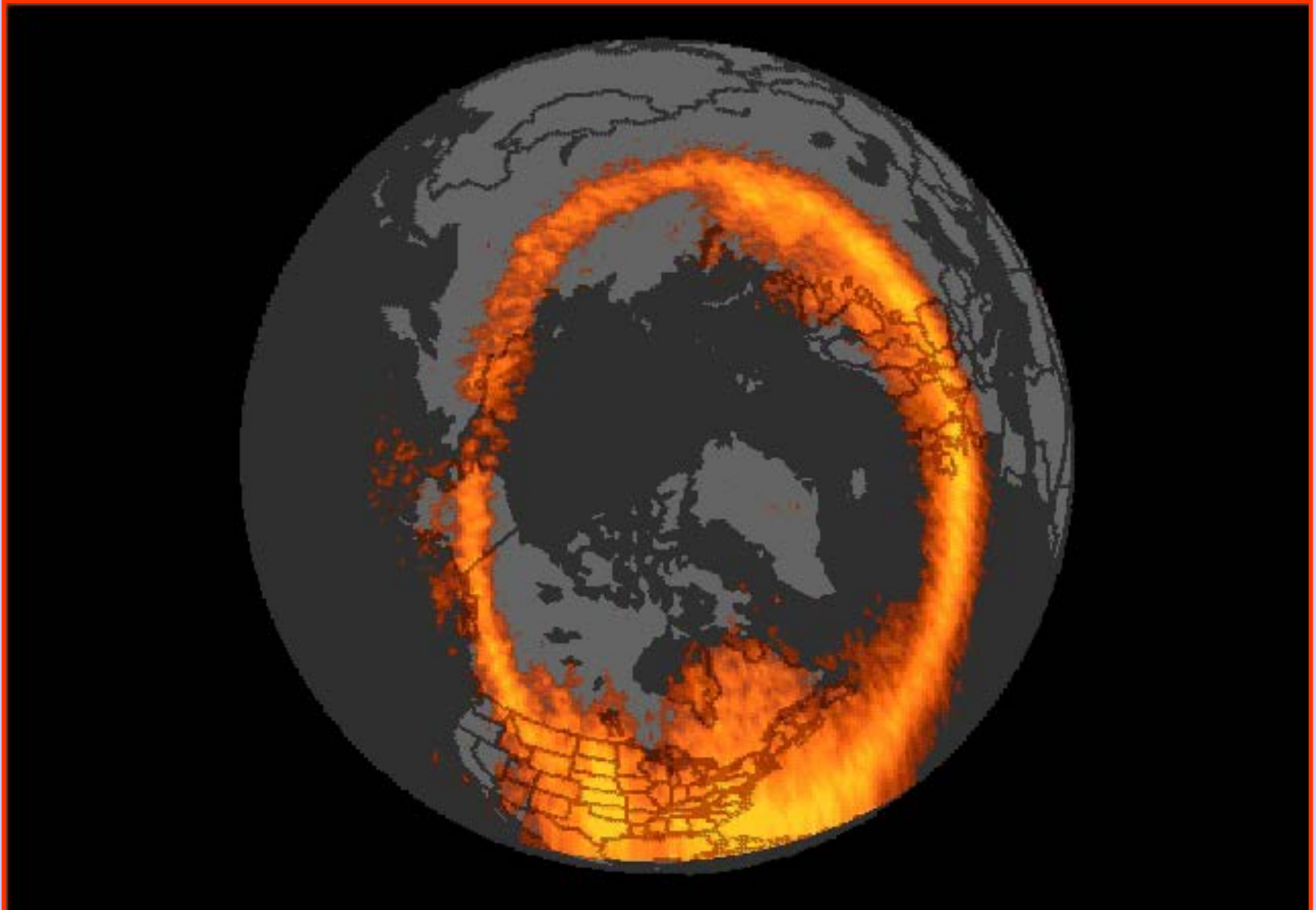
Полярные сияния = результат работы гигантского ускорителя электронов продольным E-полем в ночной магнитосфере

Атмосфера как газоразрядная трубка (цвет зависит от энергии)

При мощной суббуре выделяется ~100 Twh. Для сравнения потребление электроэнергии во всей РФ ~900 Twh.

## Авроральный овал

полярные сияния и высыпание электронов – растет ионизация и турбулентность ионосферы.





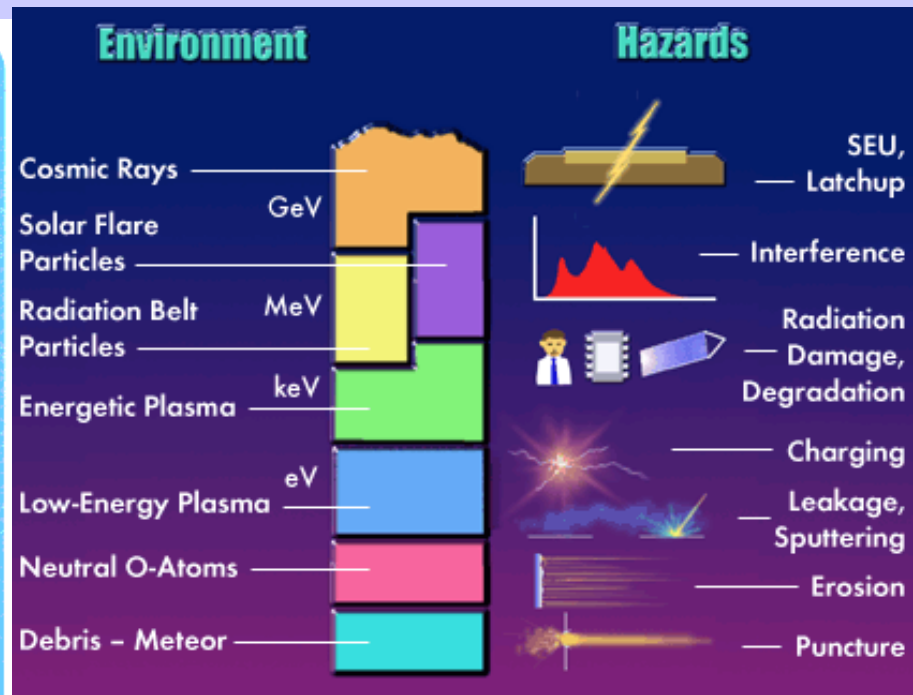
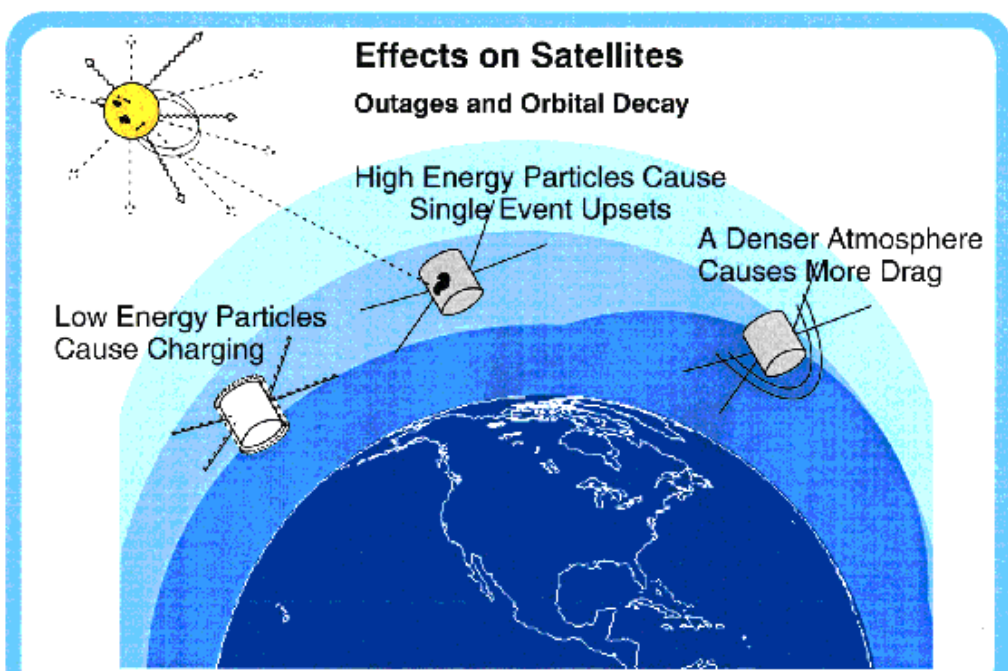
# Уязвимость технологических систем воздействию космической погоды

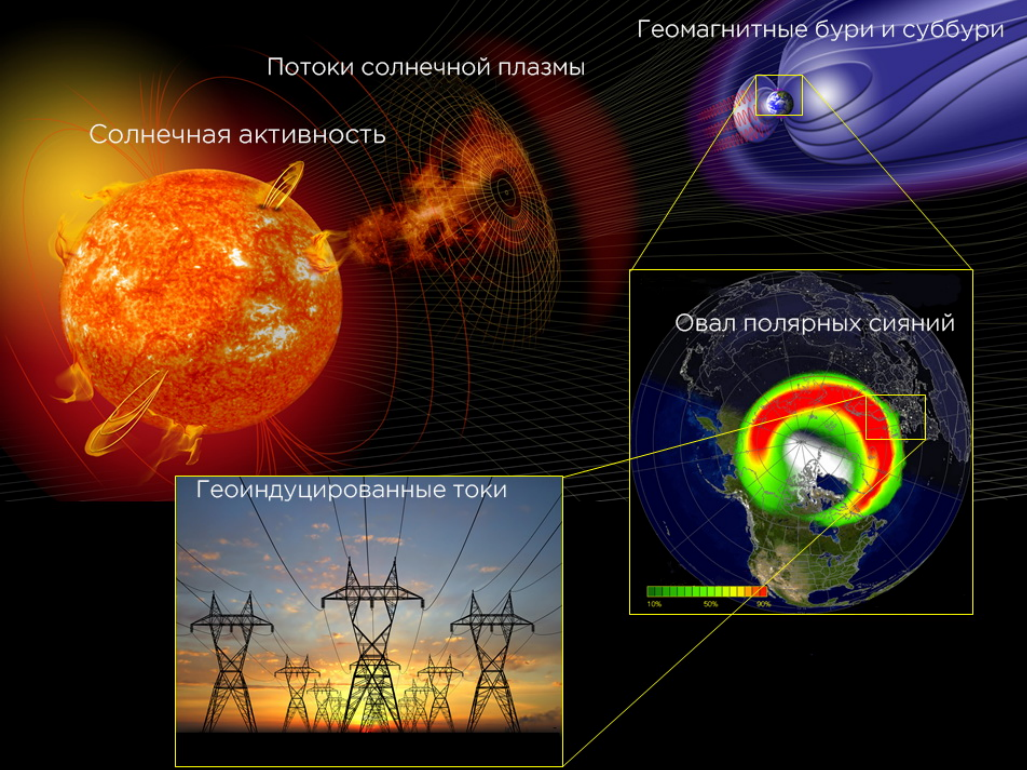


# Электроны-убийцы (killer) спутниковой электроники

Потоки релятивистских электронов ( $>0.5$  МэВ) возрастают на 2-3 порядка через 1-2 дня после начала магнитной бури. Вызывают сбои в электронике (БИС).

Вплоть до полной потери спутников!



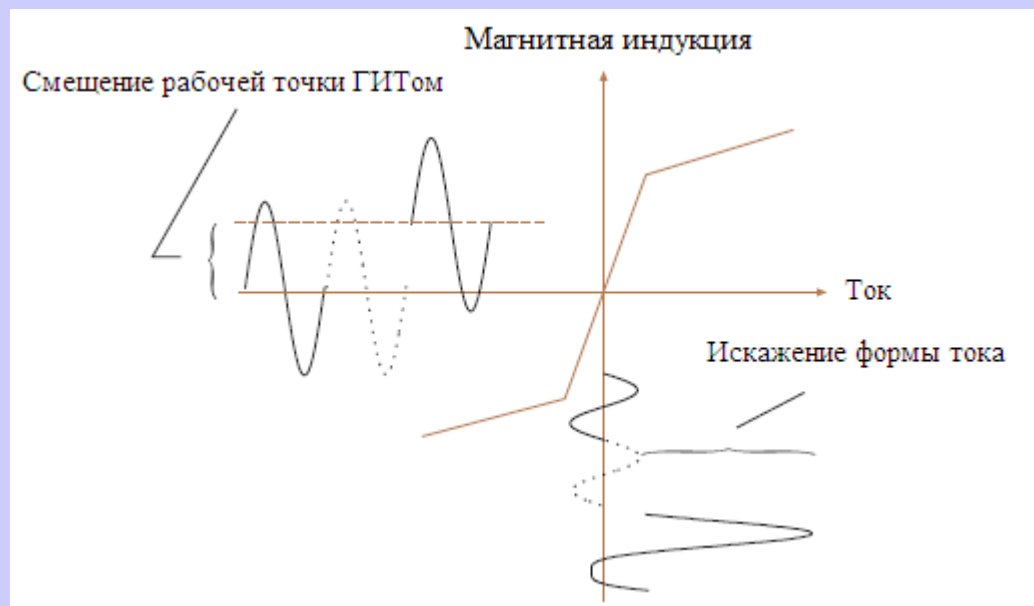


Геоиндуцированные токи (ГИТ) - **Geomagnetically Induced Currents (GIC)**, индуцируемые в проводящих заземленных технологических системах при резких изменениях геомагнитного поля, опасны для:

- протяженных трубопроводов
- ЛЭП (особенно высоковольтные и низко-резистивные)
- железнодорожного сигнального оборудования (особенно цифрового)



Почему трансформаторы так чувствительны к ГИТ?



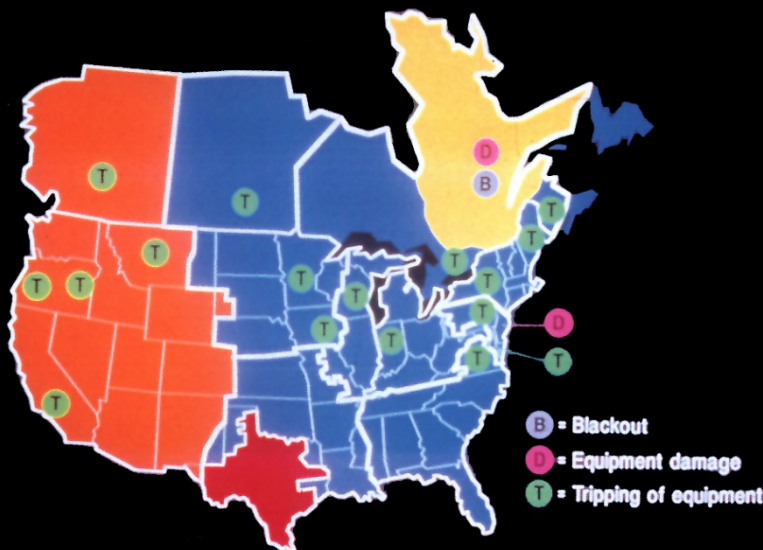
# Geomagnetic Storm Effects March 1989

## Hydro Quebec Loses Electric Power for 9 Hours



Electric Power  
Transformer

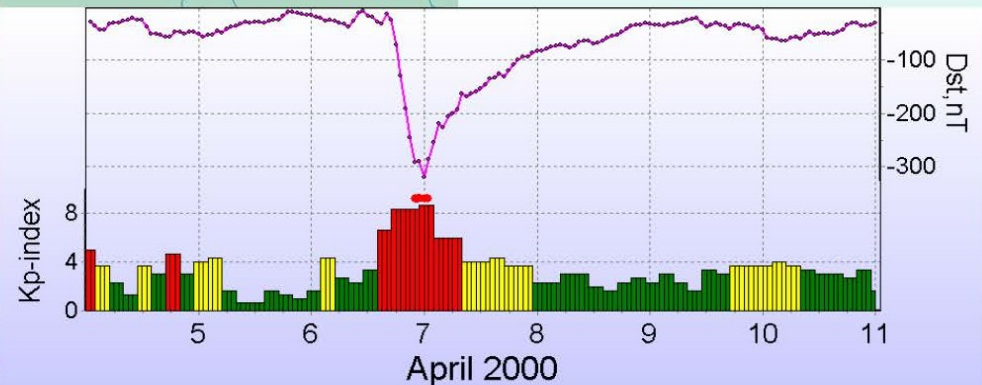
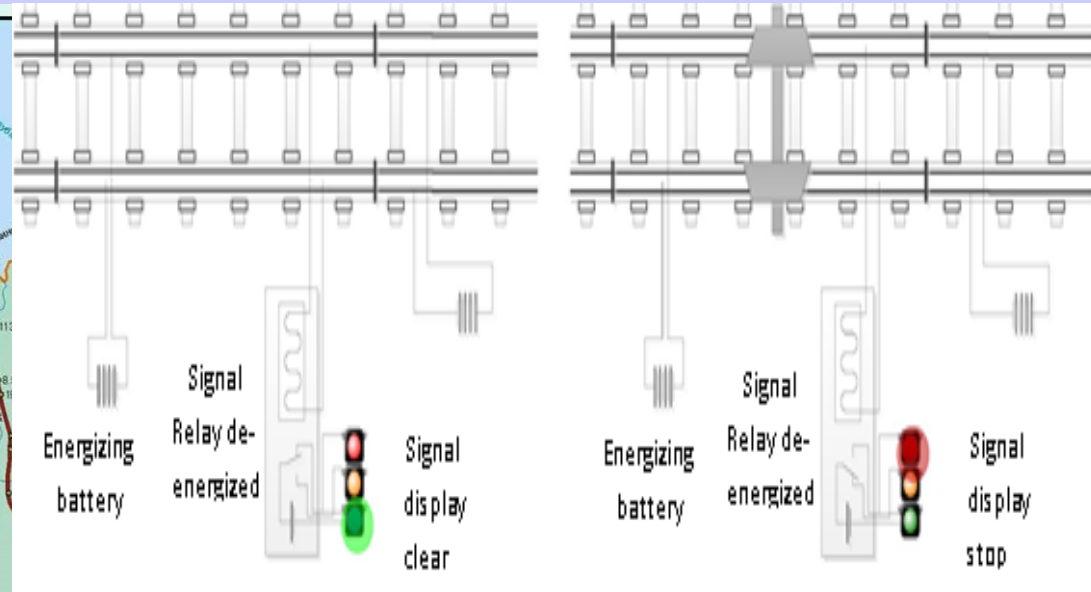
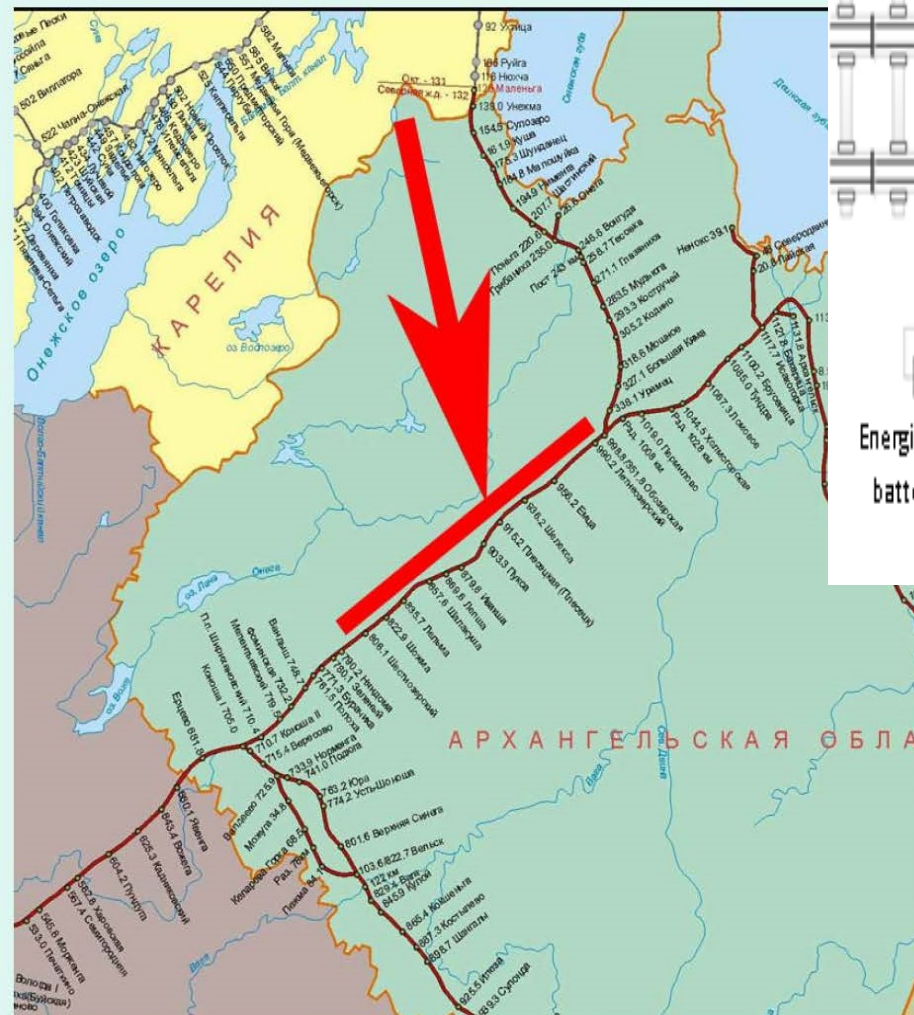
POWER SYSTEM EVENTS DUE TO SMD MARCH 13, 1989



Transformer Damage

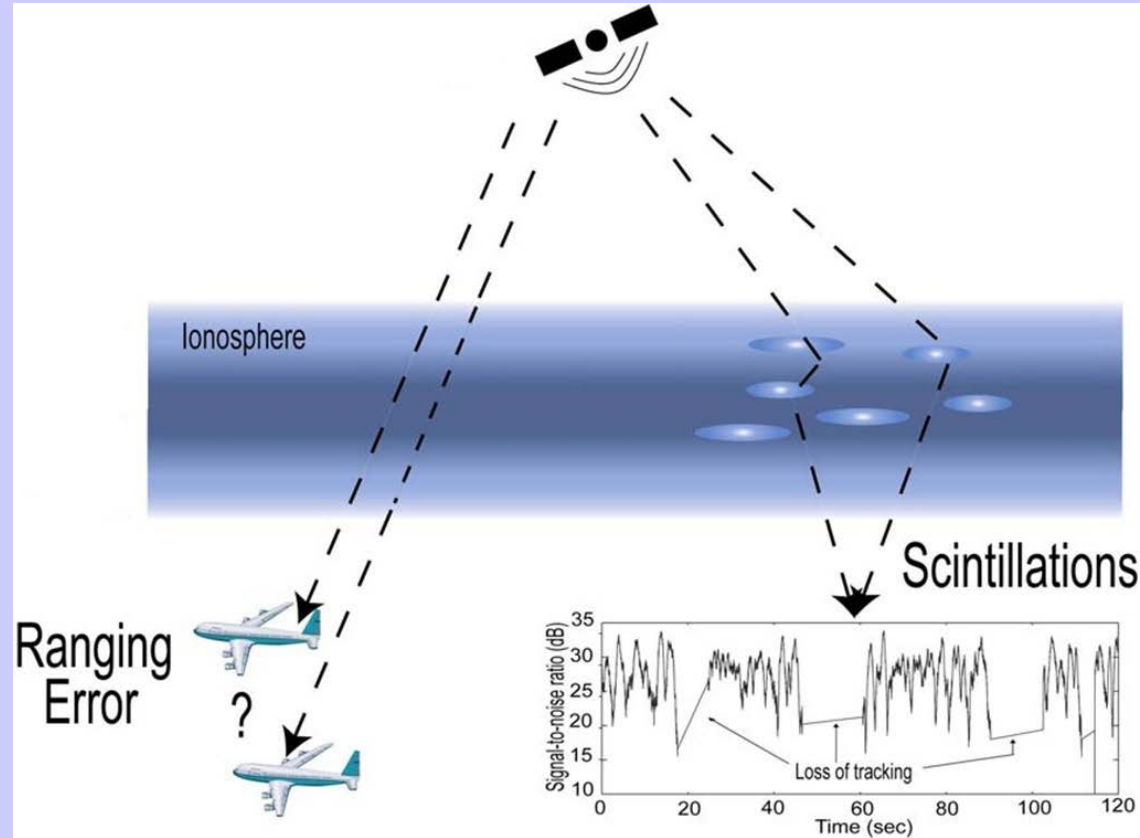
# Сбои в работе ж-д сигнализации во время сильных магнитных бурь

Воздействие теллурических полей на рельсовую автоматику. Хаотическое чередование запрещающего и разрешающего сигналов семафора. Работа участка оказывается парализованной.



## О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА СИСТЕМЫ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

Высыпания частиц в ионосферу во время магнитных бурь приводят к сильным флуктуациям навигационных сигналов за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях и даже потери сигналов



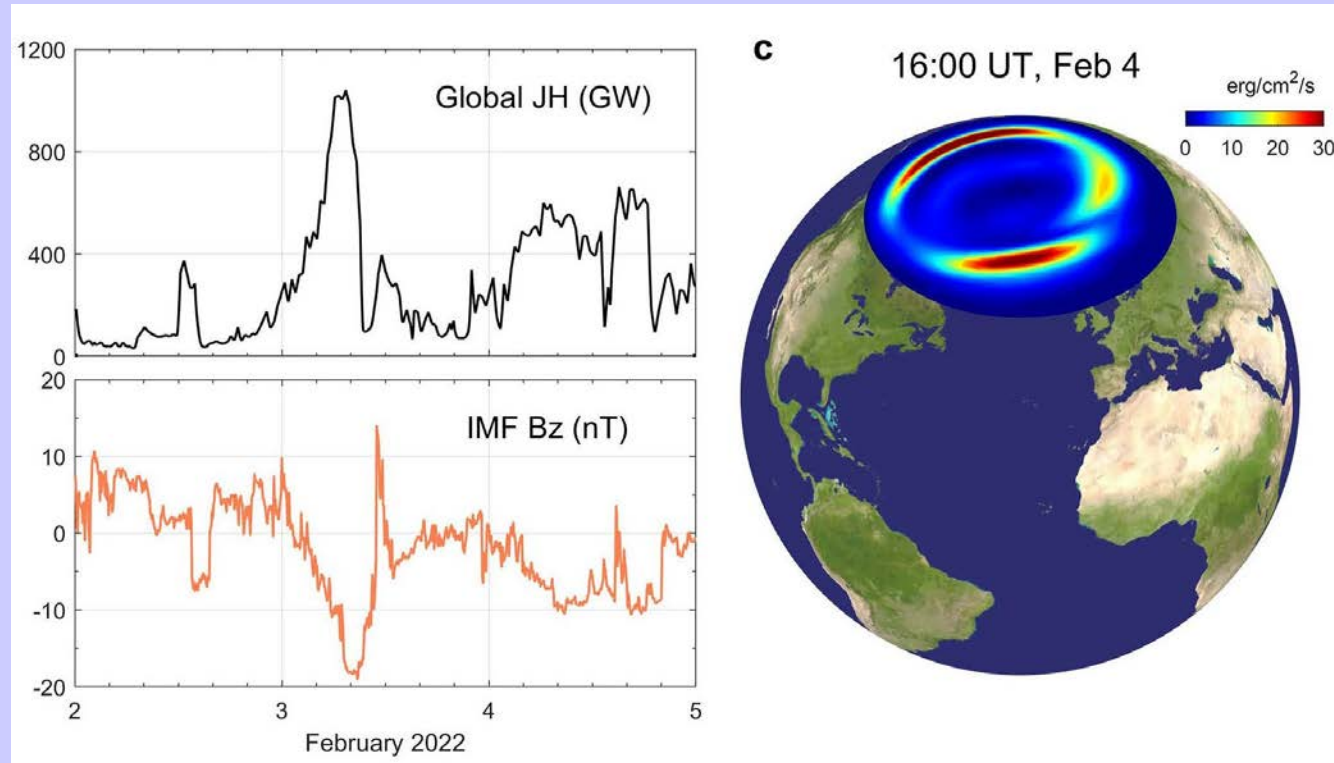
В СМИ появились сообщения о том, что при наступлении войск РФ на Харьковском направлении (началось 10 мая 2024) системы связи ВСУ, использующие сигналы спутников Starlink, выходили из строя.

[starlink-https://www.reuters.com/technology/space/starlink-exp...](https://www.reuters.com/technology/space/starlink-exp...)

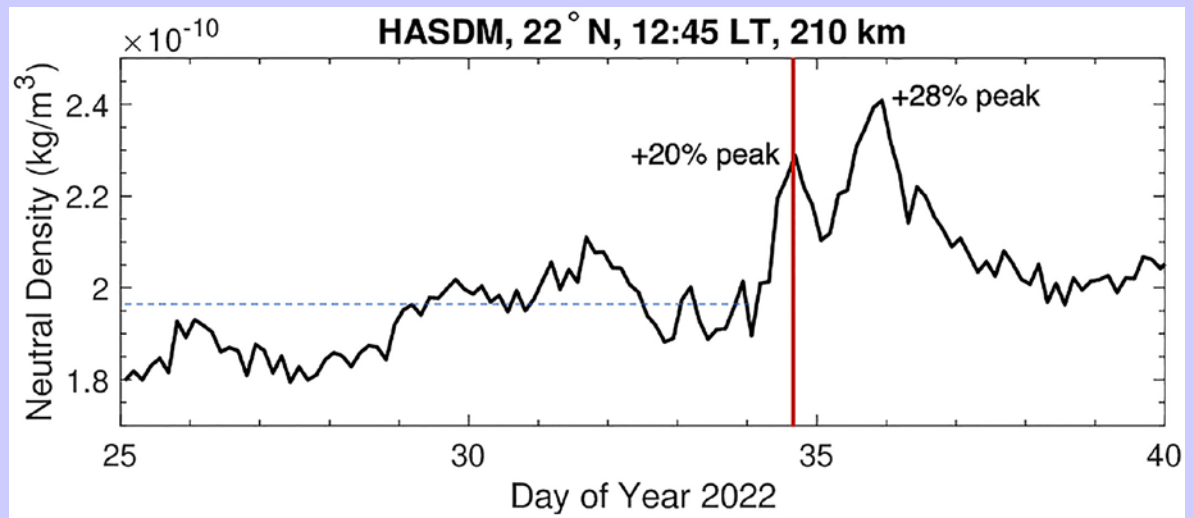
Не исключено, что причиной сбоя в работе спутниковой группировки Starlink стала сильнейшая за последние 20 лет магнитная буря, начавшаяся также 10 мая 2024?

# Расширение термосферы (>100 км) нагревом ионосферными токами при магнитных бурях

Джоулев нагрев верхней атмосферы авроральными токами (до нескольких  $10^6$  А) вызывает расширение термосферы и увеличение плотности на спутниковых высотах.

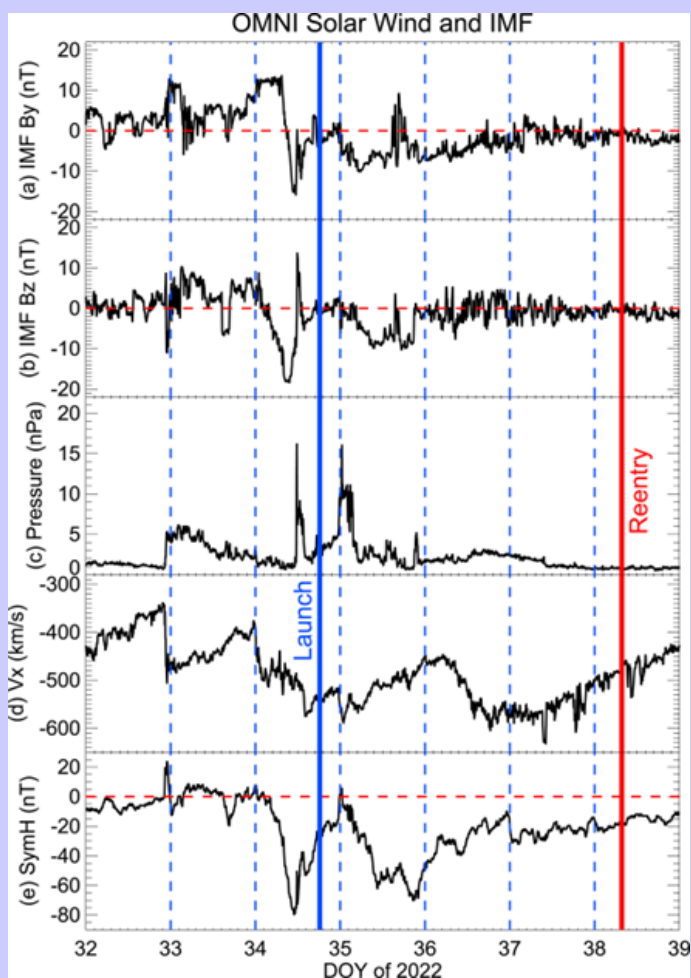


Результат: торможение спутников и сокращение их времени жизни

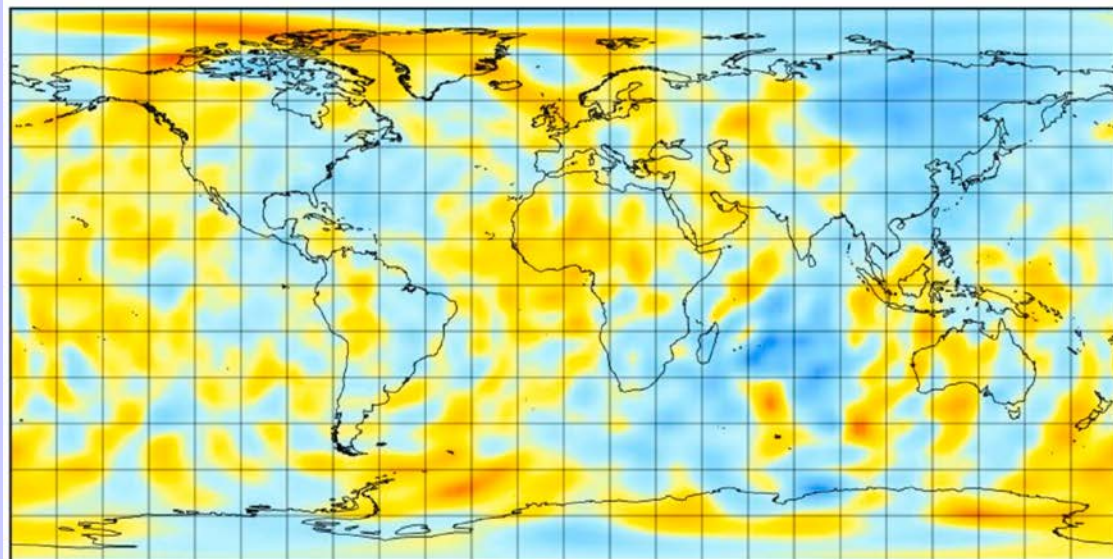




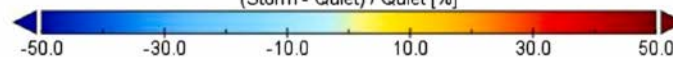
# Потеря 40 спутников Starlink во время магнитной бури



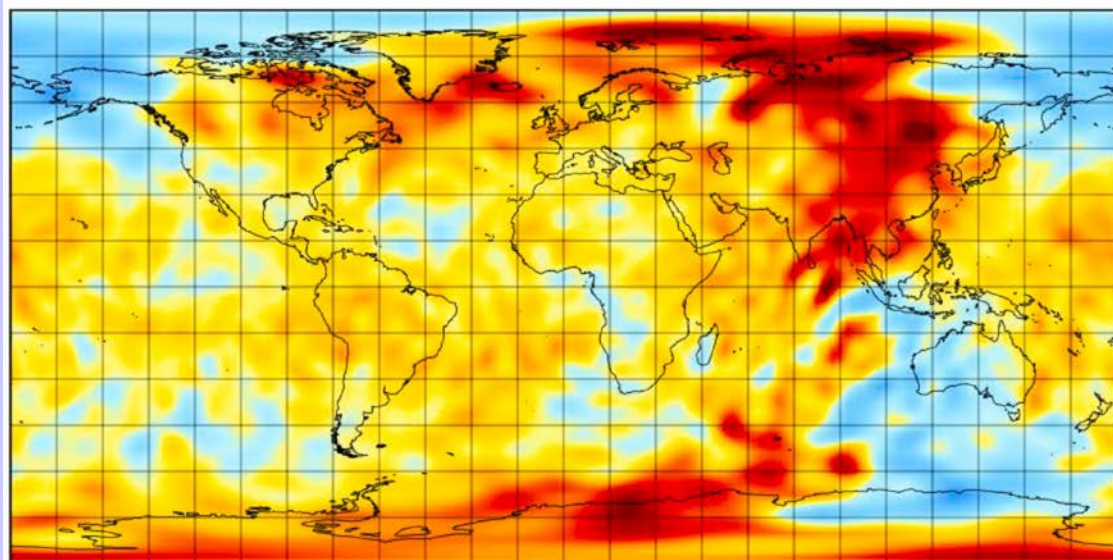
Neutral Mass Density at 200km Height (2022/2/4 0:00 UT)



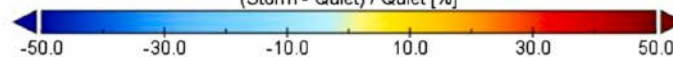
(Storm - Quiet) / Quiet [%]



Neutral Mass Density at 200km Height (2022/2/4 21:00 UT)

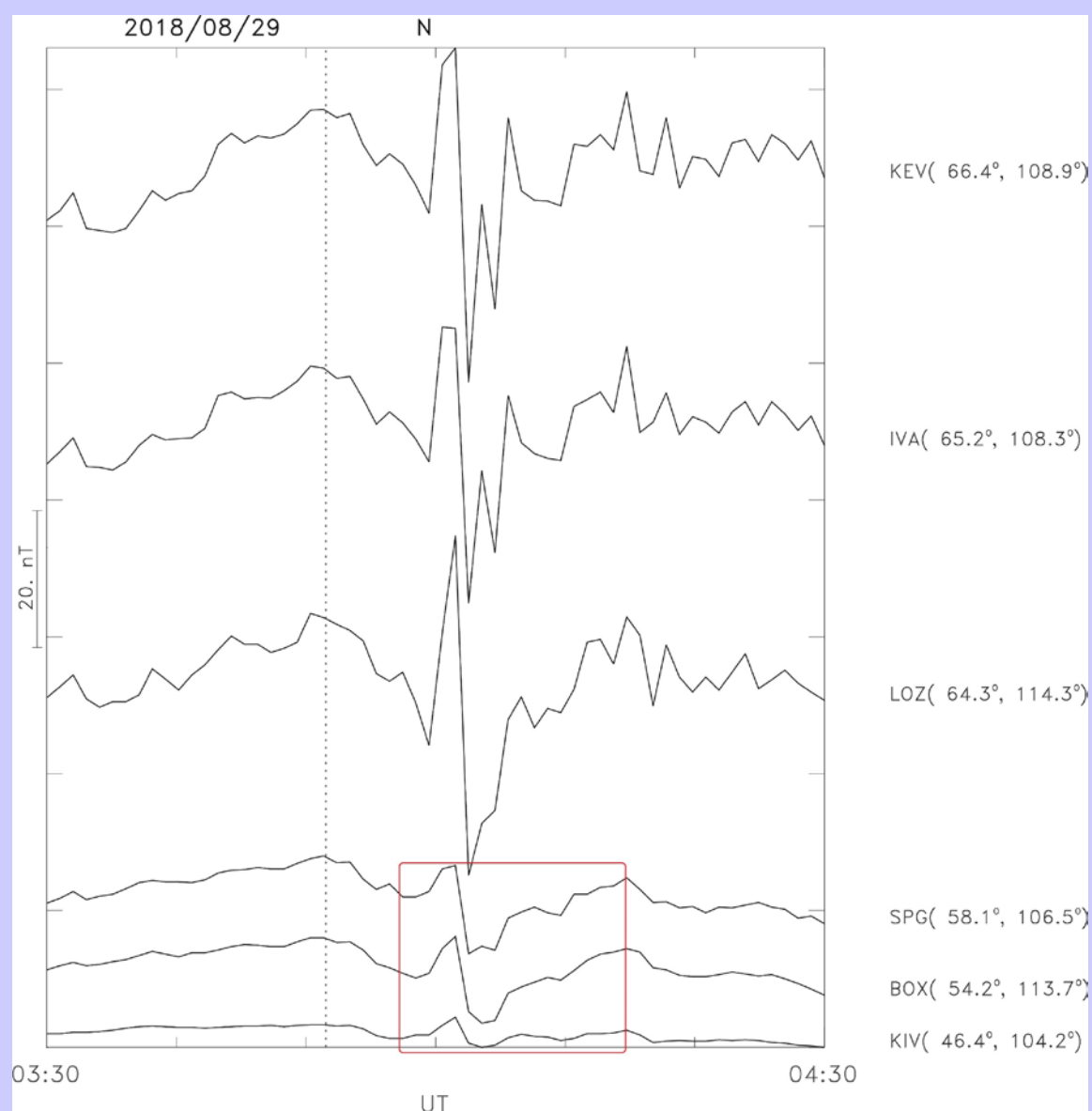


(Storm - Quiet) / Quiet [%]



**Ну а нам то что?  
Мы изучаем з/т и их эффекты!**

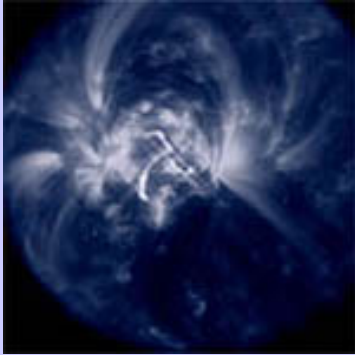
*Пример:* Гипотетический сигнал,  
возбуждаемый при з/т



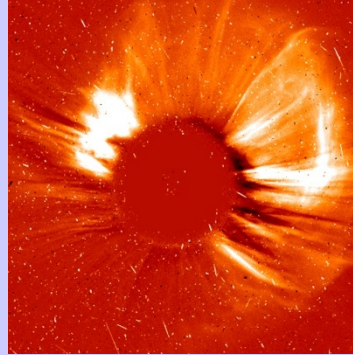
*Другой пример* - сообщения об осуществлении холодного термояда. При попытках воспроизвести результаты выяснялось, что Solar Proton Events были приняты за выход высокоэнергичных частиц.

# Нерешенная задача: проследить космическую погоду "from cradle to grave"

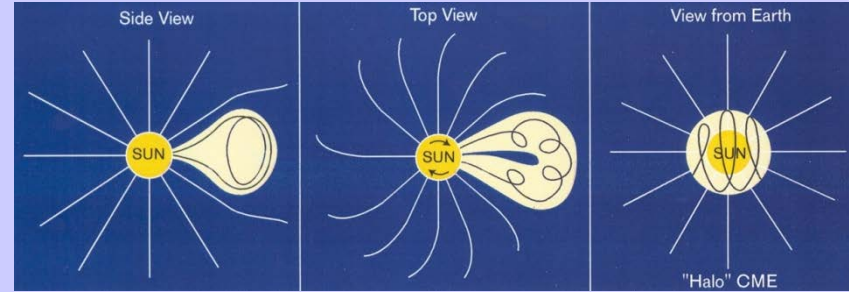
Космическая погода = не просто инженерное приложение, а большая фундаментальная проблема



Detailed Observations of Sun



Extension into Space



Coronal Mass Ejections



Possible Human Technology Consequences

Magnetospheric Interactions

Radiation Belt Enhancement

