



# ОСНОВЫ КОСМОФИЗИ КИ

Сергей Анатольевич Красоткин

Физический факультет и НИИЯФ

МГУ

# SPACE TRAGEDIES

## Apollo 1

## Challenger

## Columbia



Jan 27, 1967

Jan 28, 1986

Feb 1, 2003



# LOCV

## *Loss Of Vehicle and Crew*

**NASA**

(1986) :

**1**

**in**

**100,000**



Challenger

**R.P. Feynman**

(1986):

**1**

**in**

**200**

January 28, 1986

«For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for nature cannot be fooled.»



*Richard P. Feynman*

«For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for nature cannot be fooled.»



*Richard P. Feynman*

# LOCV

*Loss Of Vehicle and Crew*

**Today** (2001, empirical):

**1**

in

**57**

In fact, today, the empirical  
LOCV rate is 1 in 57.

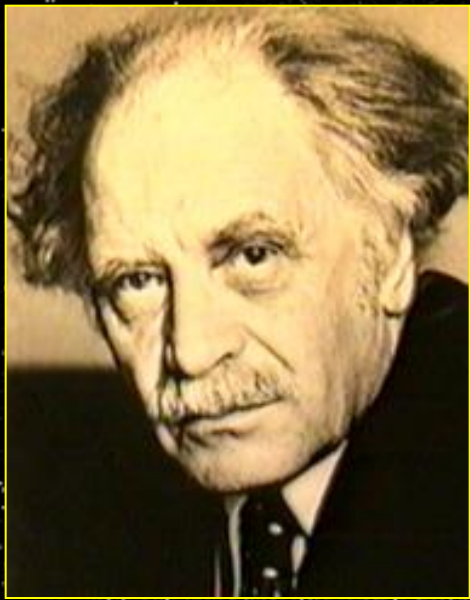
# Физические условия в космосе

- невесомость, гравитационные поля;
- глубокий вакуум;
- метеорные потоки, космический мусор;
- тепловые потки;
- электромагнитное и корпускулярное излучение.

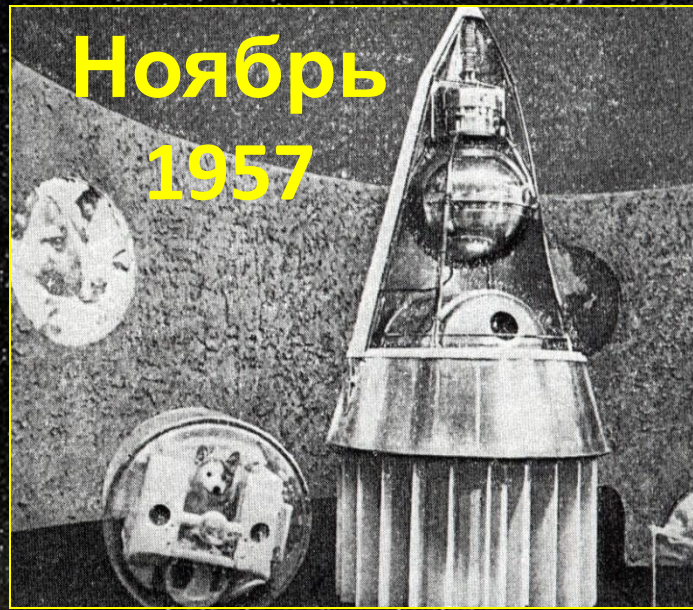
# Физические условия в космосе

- невесомость, гравитационные поля;
- глубокий вакуум;
- метеорные потоки, космический мусор;
- тепловые потки;
- электромагнитное и корпускулярное излучение.

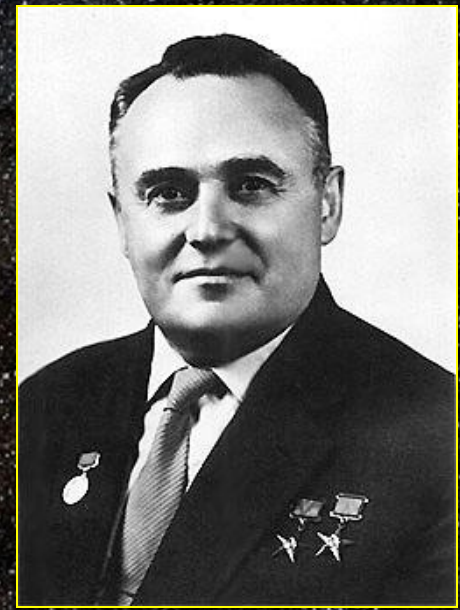




Сергей  
Вернов



Ноябрь  
1957



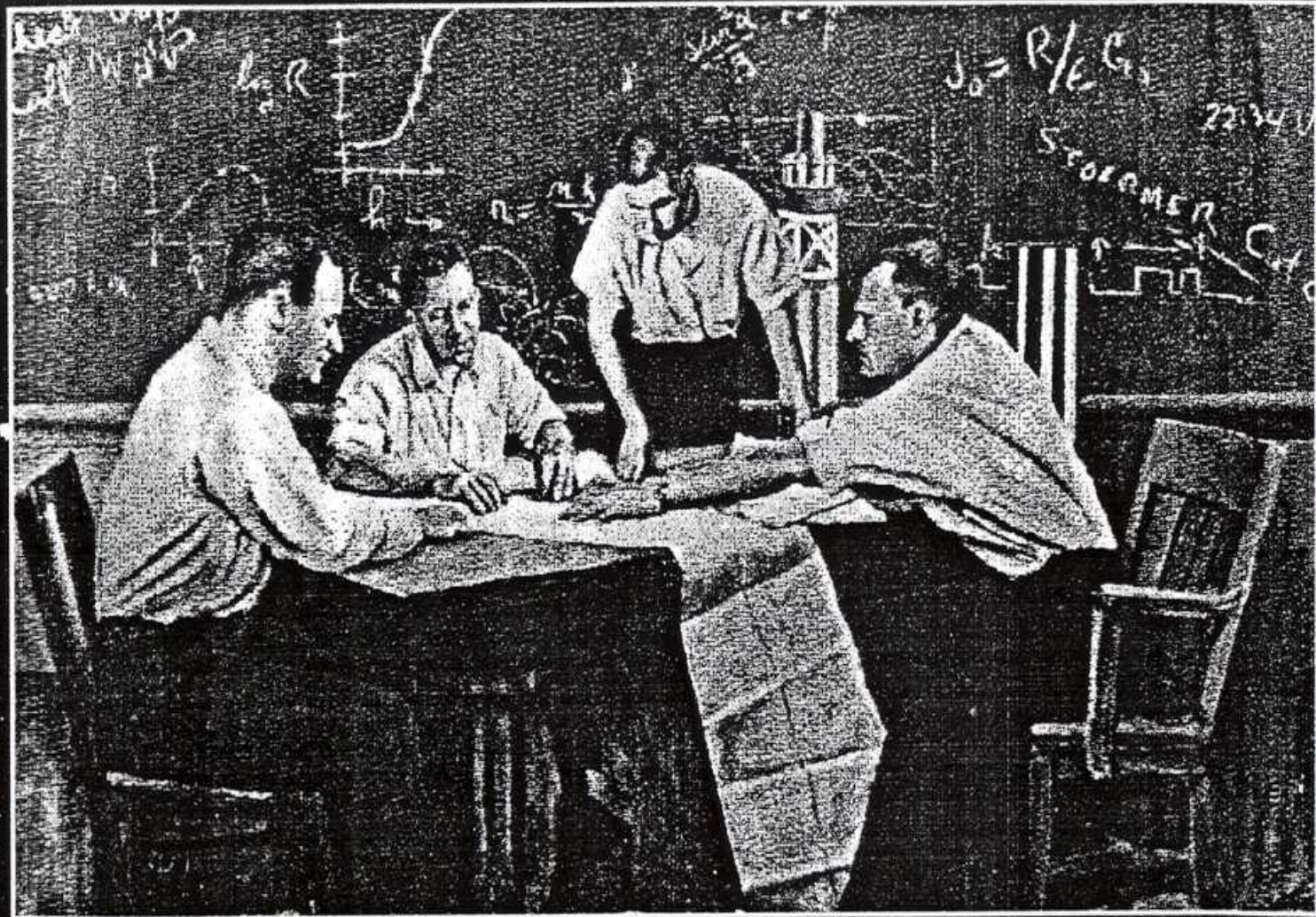
Сергей  
Королев



February,  
1958  
*Explorer-1*



J. Van Allen



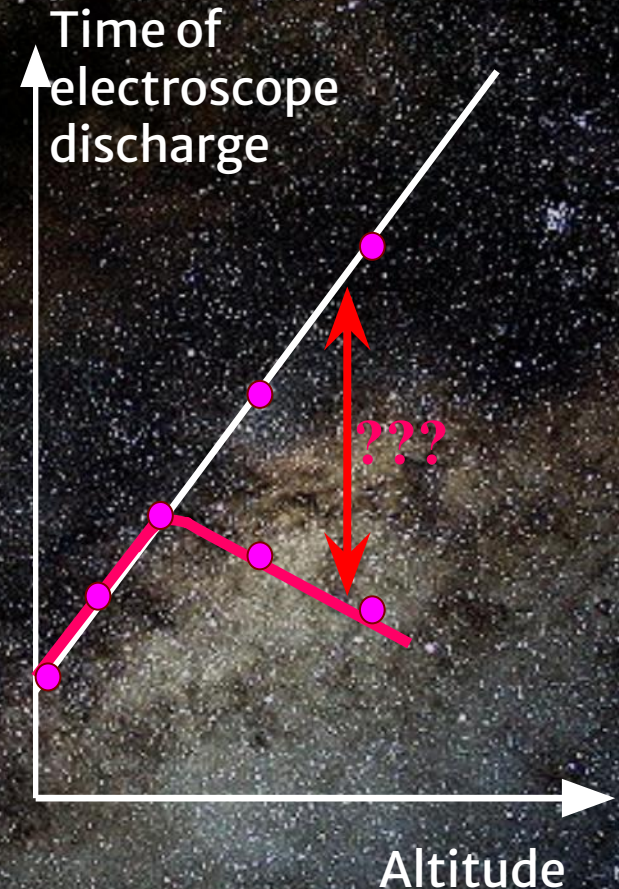
"My God, space is  
radioactive!"

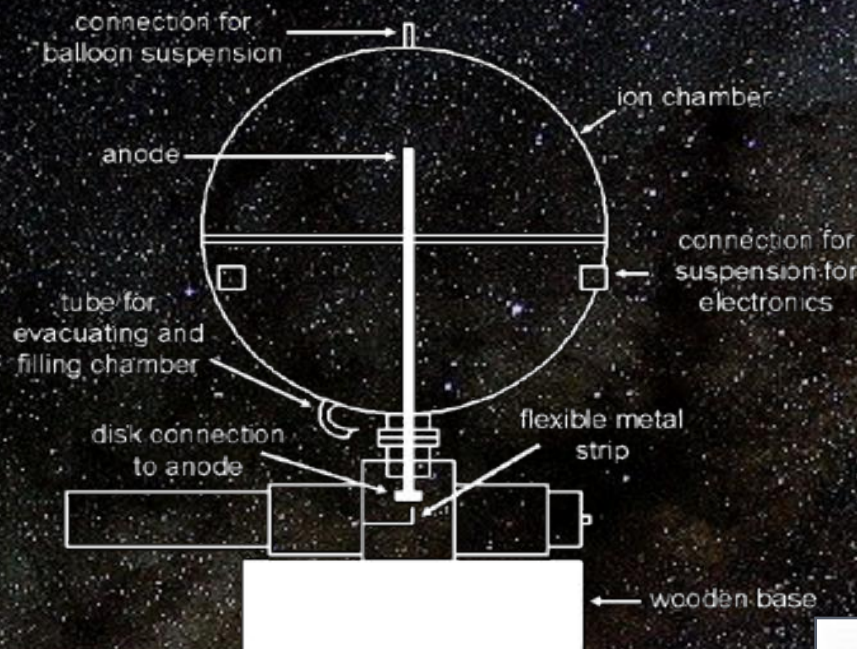
Dr. Ernest C. Ray  
March 28, 1958

# Ионизирующая радиация – из космоса ???



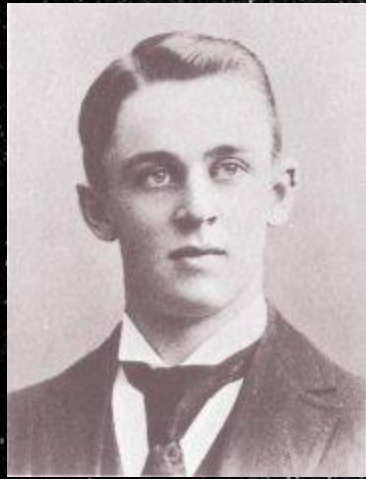
*Victor Franz Hess*  
balloon flight, 1912





## Ионизационная камера на воздушных шарах (1925-27) Высота 15-20 км.

Внеземное происхождение,  
хим. состав ( $\alpha$ -частицы,  
энергичные электроны,  
протоны, нейтроны,  $\gamma$ -  
кванты).



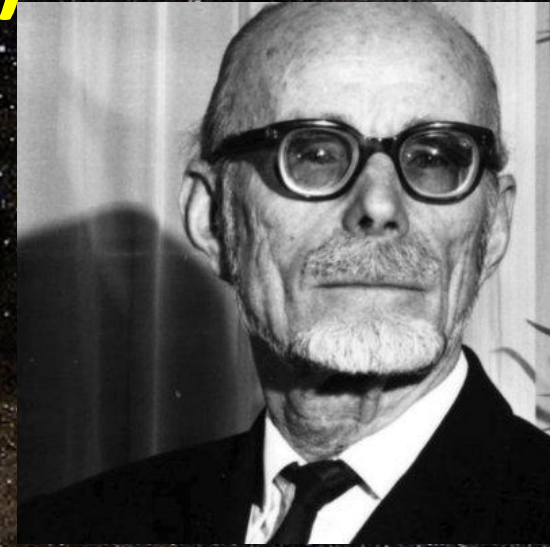
*Robert Andrews  
Millikan*



# Широкие атмосферные ливни (ШАЛ)

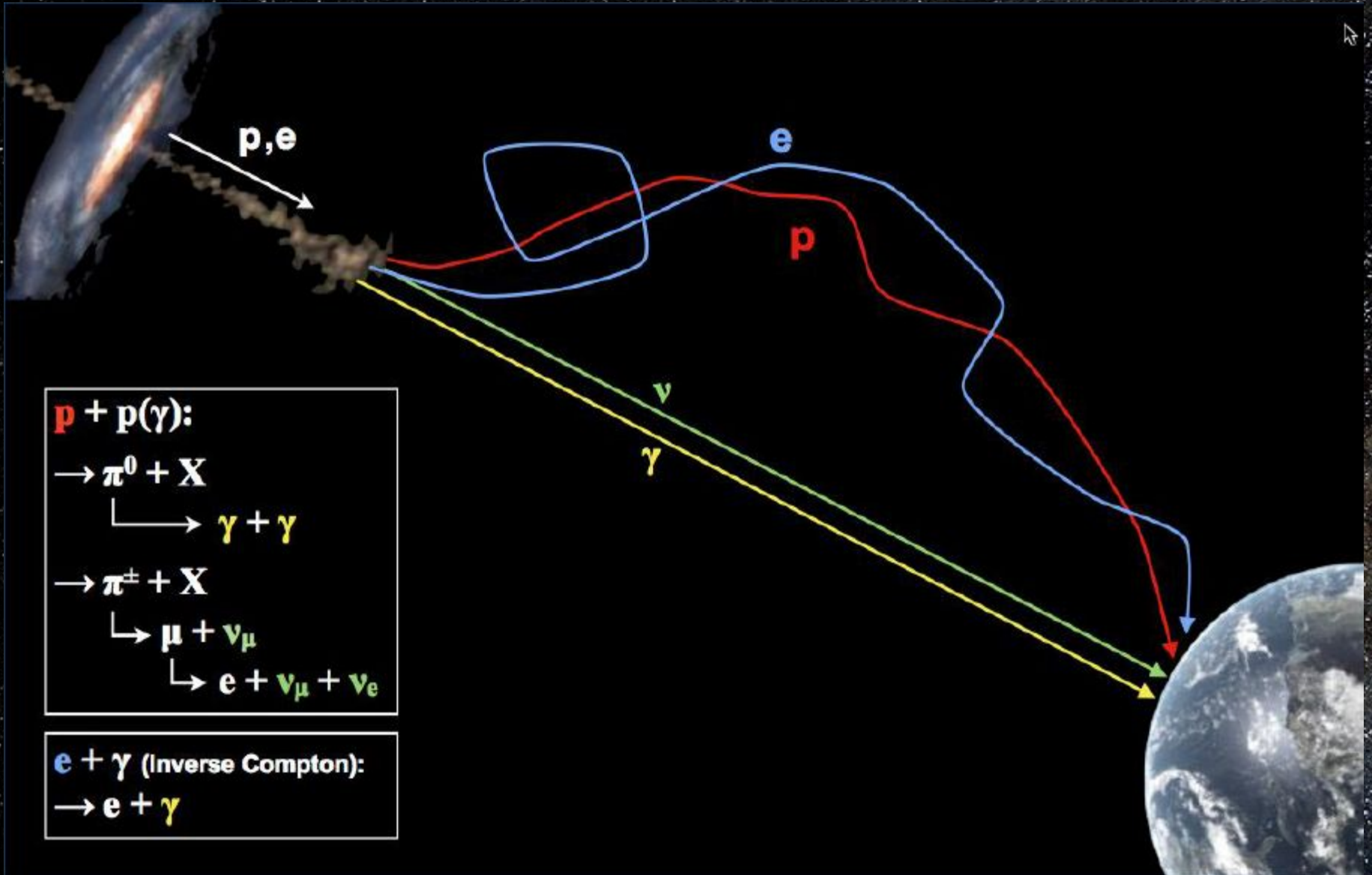


*Bruno Benedetto Rossi, 1934:*  
Два независимых счетчика Гейгера регистрировали заряженные частицы одновременно



*Pierre Victor Auger, 1937:*  
тот же результат на расстоянии 100 м.  
Вывод: ливень частиц появляется от первичной частицы сверхвысокой энергии, входящей в атмосферу Земли





**$p + p(\gamma)$ :**

$\rightarrow \pi^0 + X$

$\quad \quad \quad \hookrightarrow \gamma + \gamma$

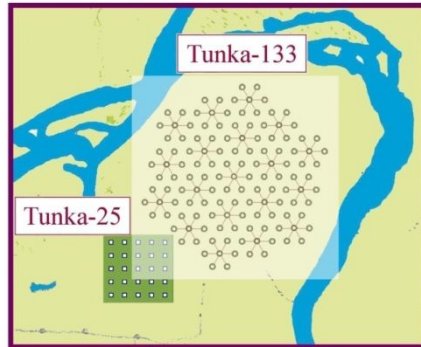
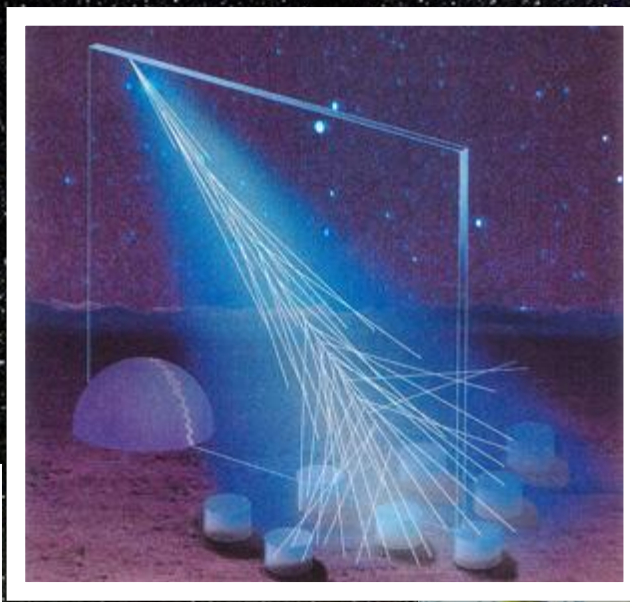
$\rightarrow \pi^\pm + X$

$\quad \quad \quad \hookrightarrow \mu + \nu_\mu$

$\quad \quad \quad \quad \quad \hookrightarrow e + \nu_\mu + \nu_e$

**$e + \gamma$  (Inverse Compton):**

$\rightarrow e + \gamma$



51° 48' 35" N  
103° 04' 02" E  
675m a.s.l.



TUNKA-133 (Baikal, Russia)  
133 optic detectors, 1 sq. km

Pierre Auger (Argentina)  
1600 detectors, 3 000 sq.km



# Auger detector



Из презентации Г.А.Шелкова (ОИЯИ, г. Дубна)

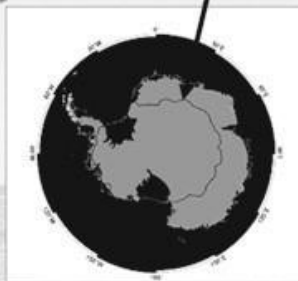
# TUNKA-133



# Atmospheric measurements (Antarctica)



Траектория вокруг  
Атарктиды



# Космическая погода

Характеризует состояние околоземного космического пространства (в целом или в конкретной области) на характерных временных масштабах от нескольких секунд до отдельных суток.



# Основные составляющие космической погоды

- магнитосфера Земли;
- межпланетное магнитное поле и солнечный ветер;
- потоки заряженных частиц различных энергий:
  - в окрестностях Земли, но вне её магнитосферы,
  - в различных областях в пределах магнитосферы Земли

# **Космическая погода** *включает*

## **Ионизирующая радиация**

- Галактические космические лучи (ГКЛ)  
до  $10^{19}$  эВ
- Солнечные космические лучи (СКЛ)  
до  $10^9$  эВ
- Радиационные пояса Земли (РПЗ)  
электроны до  $10^7$  эВ,  
протоны и ионы до  $0.5 \cdot 10^9$  эВ
- Гамма и рентгеновское излучение
- Гелиосферная плазма и магнитные поля (вкл. солнечный ветер)

**Космическая погода** *влияет на*

## Геомагнитные эффекты

- Магнитные бури
- Суббури

## Геоиндуцированные электрические токи

- Электрические токи в магнитосфере и ионосфере;
- Вариации магнитного и электрического полей Земли

**Космическая погода** *влияет на*

Состояние ионосферы и распространение радиоволн;

Характеристики верхней атмосферы;

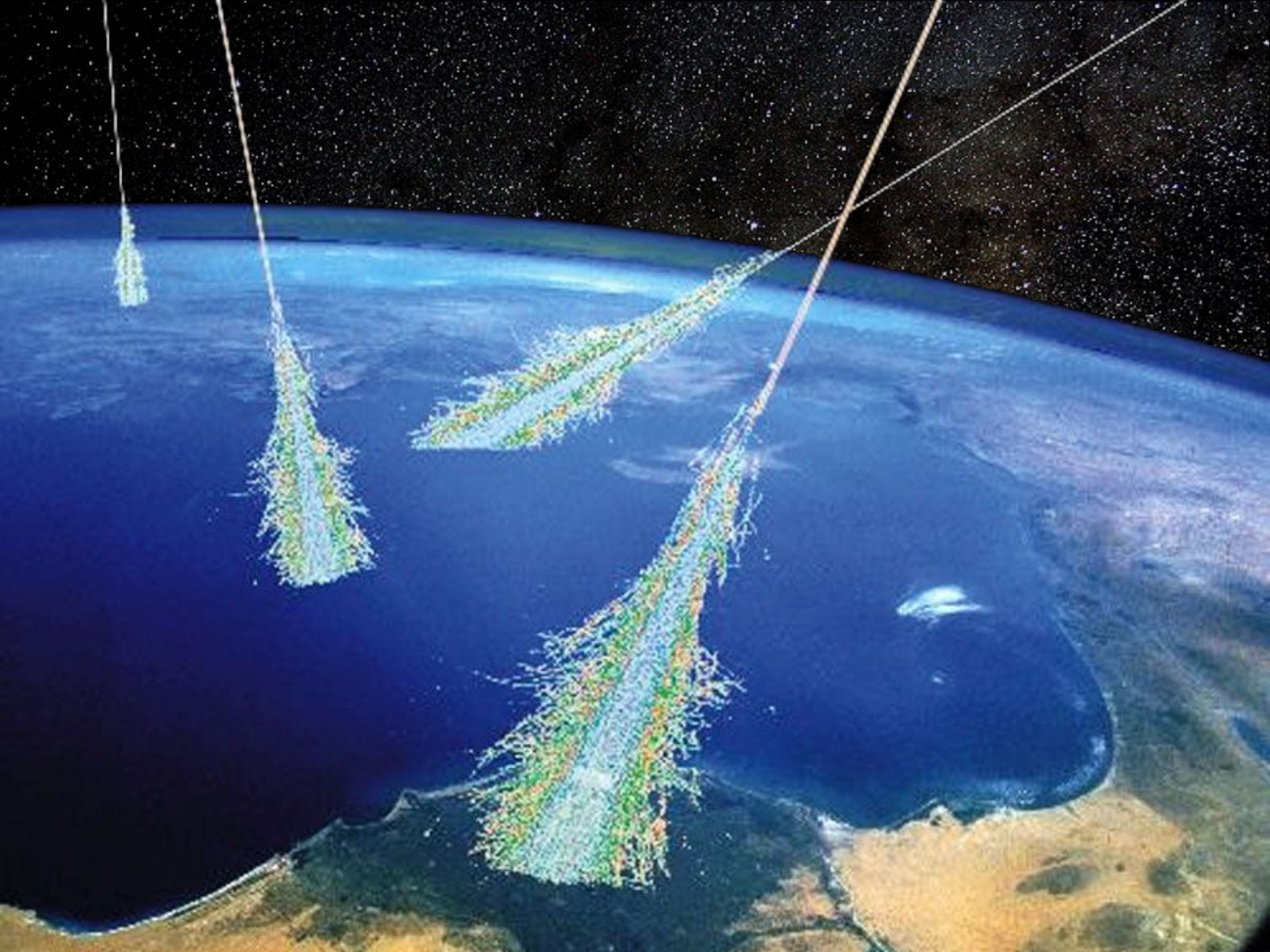
Биологические эффекты;

Геофизические условия (включая

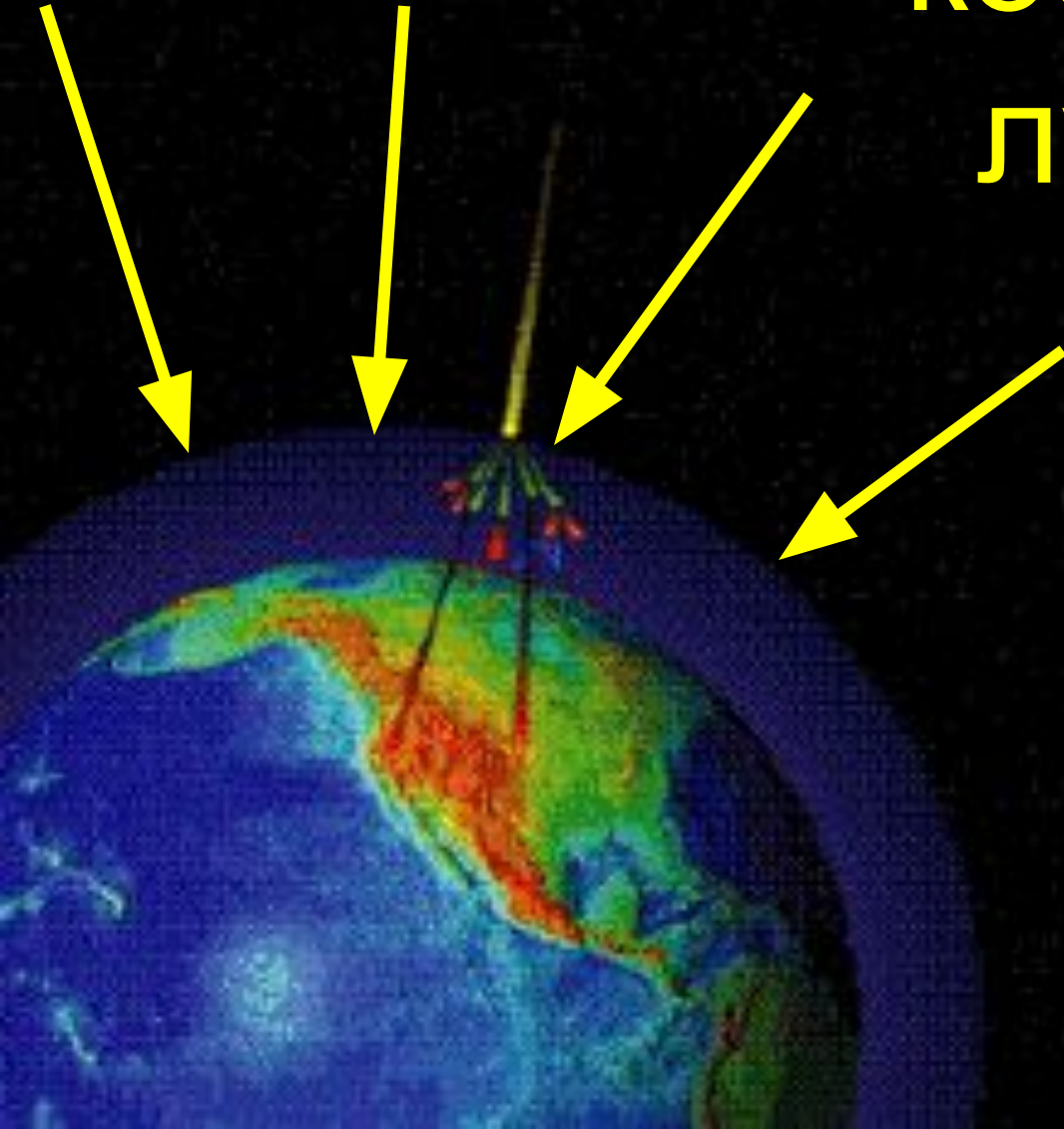
теллурические токи), **ПОГОДУ** и

**климатические условия на Земле.**



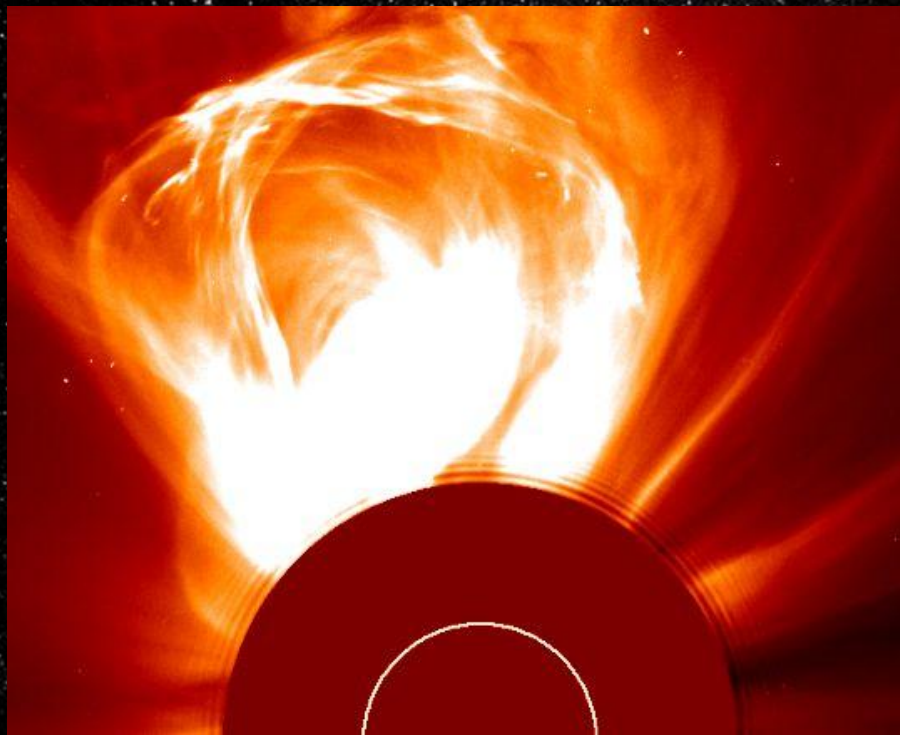


# Галактические космические лучи (ГКЛ)



Энергия:  
до  $10^{19}$  эВ (~10 Дж);  
Химический состав:  
все элементы, в  
основном водород;  
пространственное  
распределение  
изотропное

# Солнечные космические лучи (СКЛ)



Энергия до  $10^9$   
эВ

Ускоренные частицы солнечного вещества появляются в результате локальных взрывных процессов в солнечных активных областях и ускоряются в процессе распространения в межпланетном пространстве.

# Космические

Взрывы  
сверхновых

# лучи

Ядерные реакции  
в солнечном ядре

Ускоряются  
магнитными  
полями

Солнечная  
активности

## Галлактическ

## Солнечны

ие  $\sim 1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

поток

Up to e  $\sim 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

### Nuclei

$\sim 90\%$  protons,  $\sim 10\%$  He nuclei,  
 $\sim 1\%$  hard nuclei

состав

98-99% protons,  
 $\sim 1.5\%$  He nuclei

Electrons ( $\sim 1\%$  of nuclei)

Positrons ( $\sim 0.1\%$  of nuclei)

Antihadrons  $< 1\%$

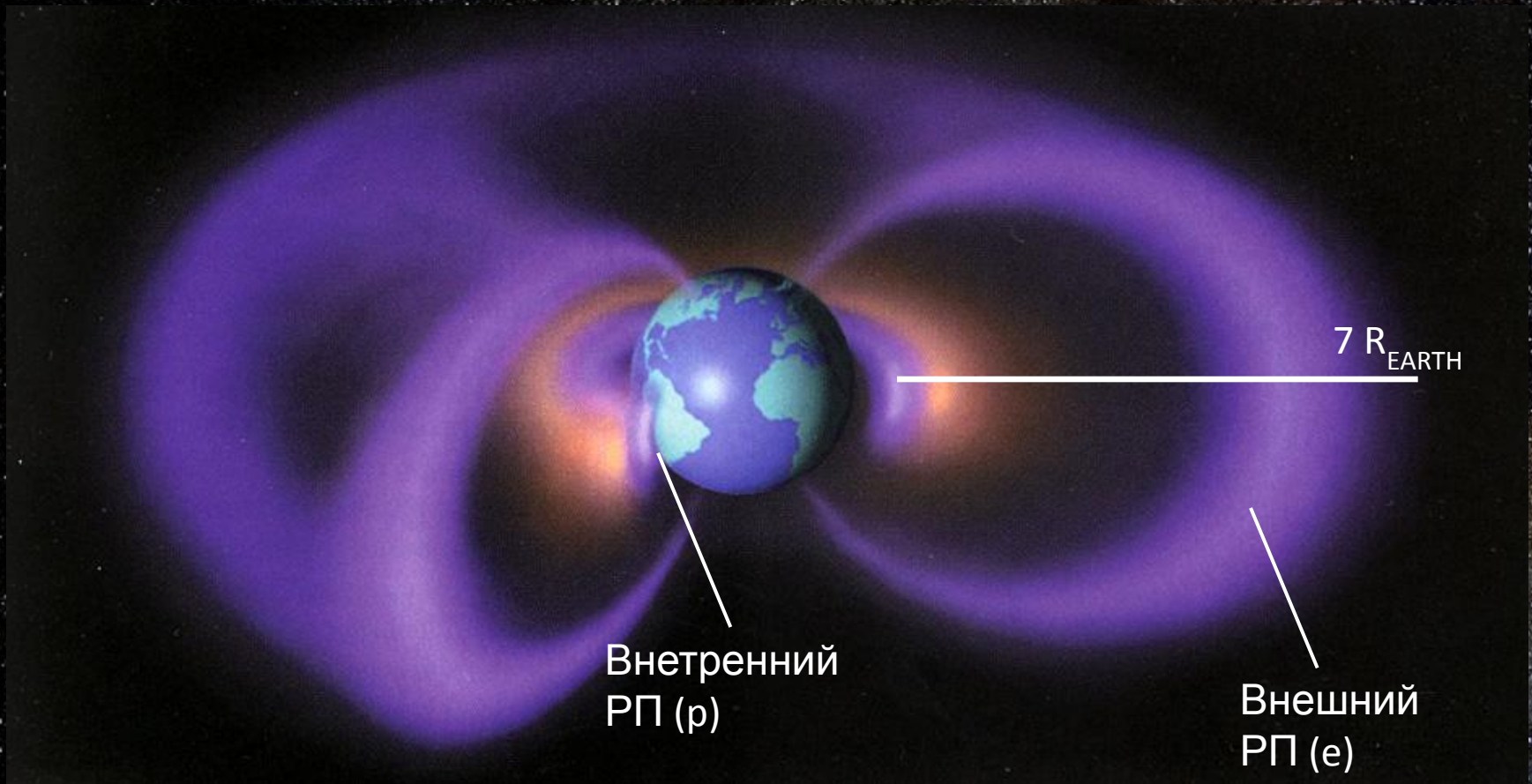
$10^6 - 10^{19} \text{ eV}$

up to  $10^{21} \text{ eV}$  for HEGCR

энергия

$10^5 - 10^{11} \text{ eV}$

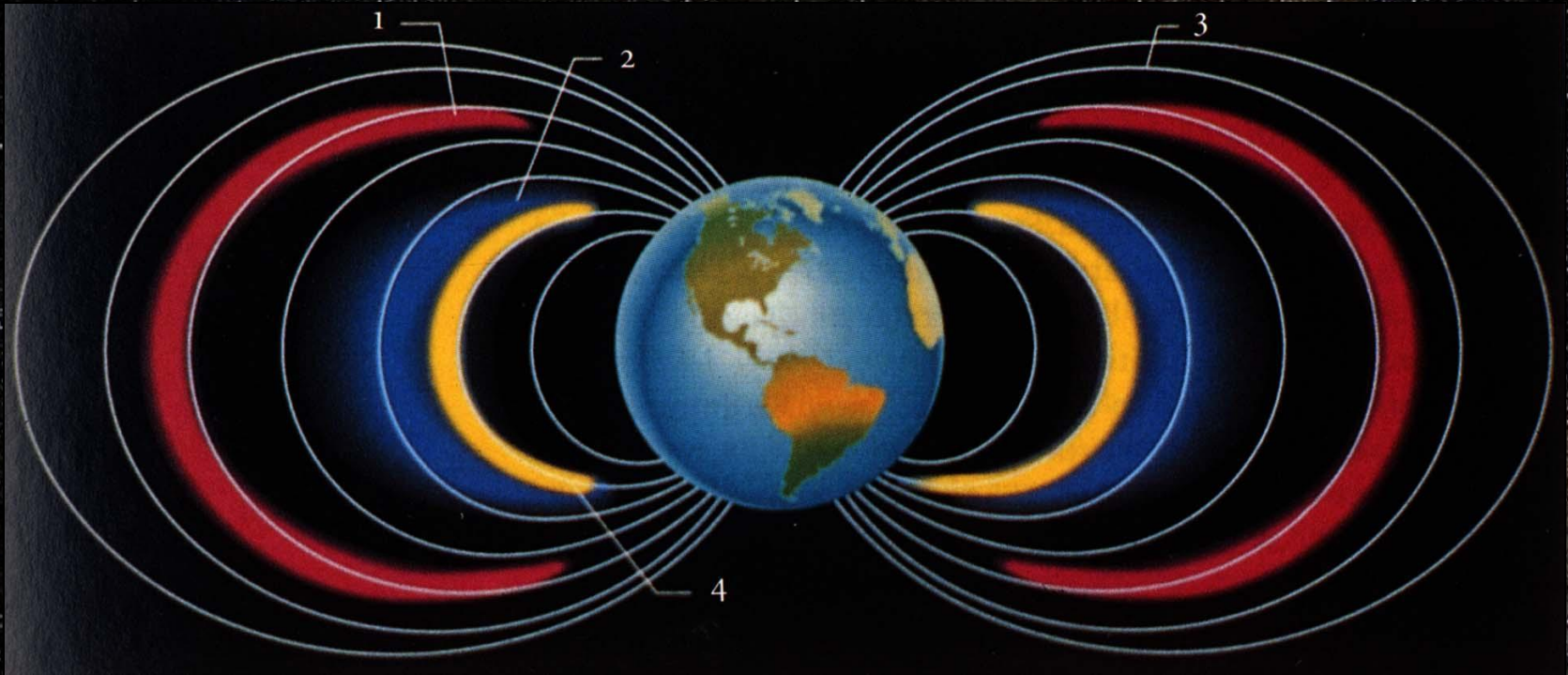
# Радиационные пояса Земли



электроны до  $10^7$  эВ, протоны и ионы до  $0.5 \cdot 10^9$  эВ

# Earth Radiation Belts

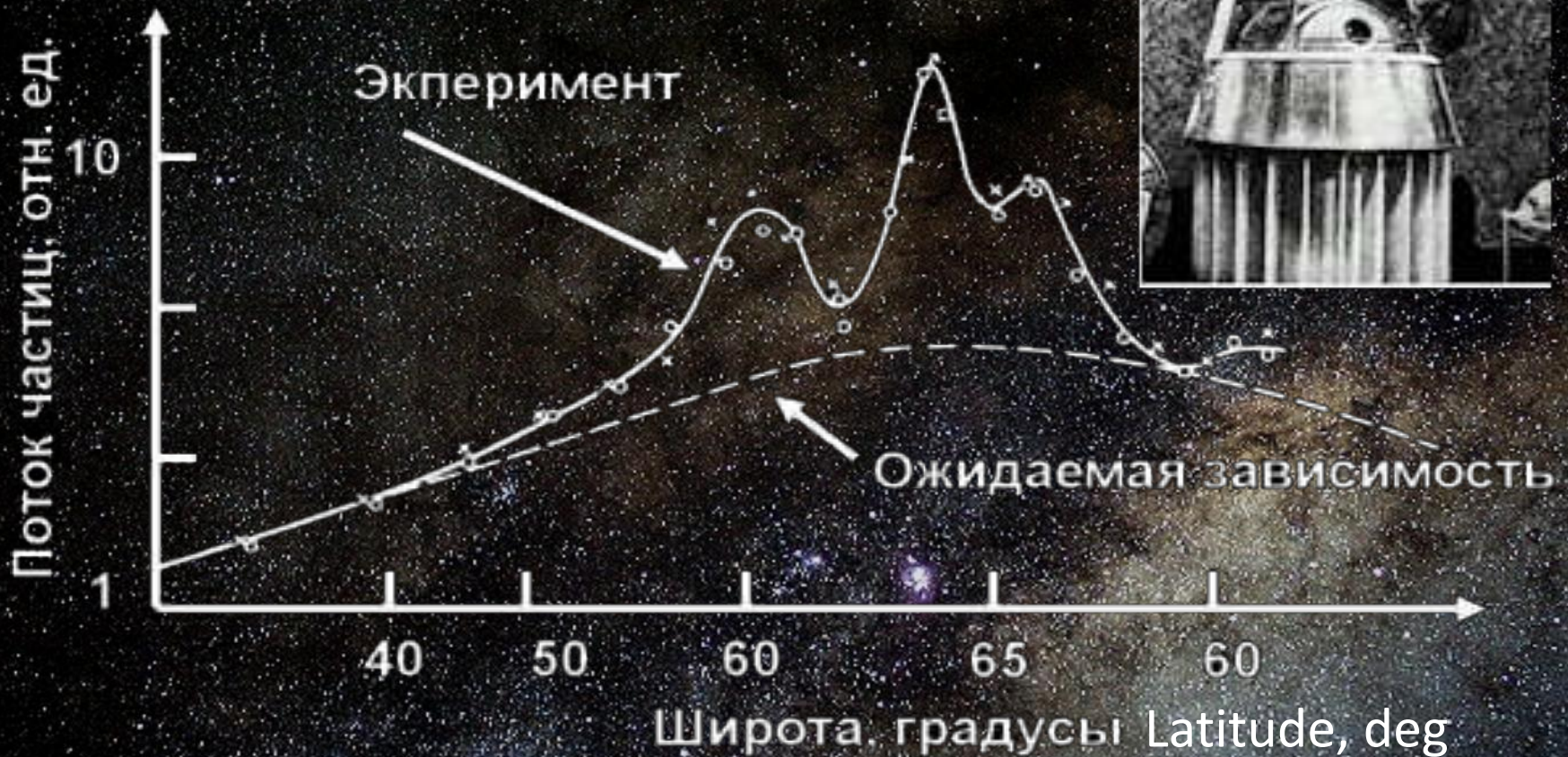
(Vernov - van Allen Belts)



- 1 – Outer RB (up to 40 000 km).
- 2 – Inner RB (up to 30 000 km).
- 3 – Lines of magnetic force.
- 4 – Third RB formed from ExtraGalactic CR.

# РПЗ

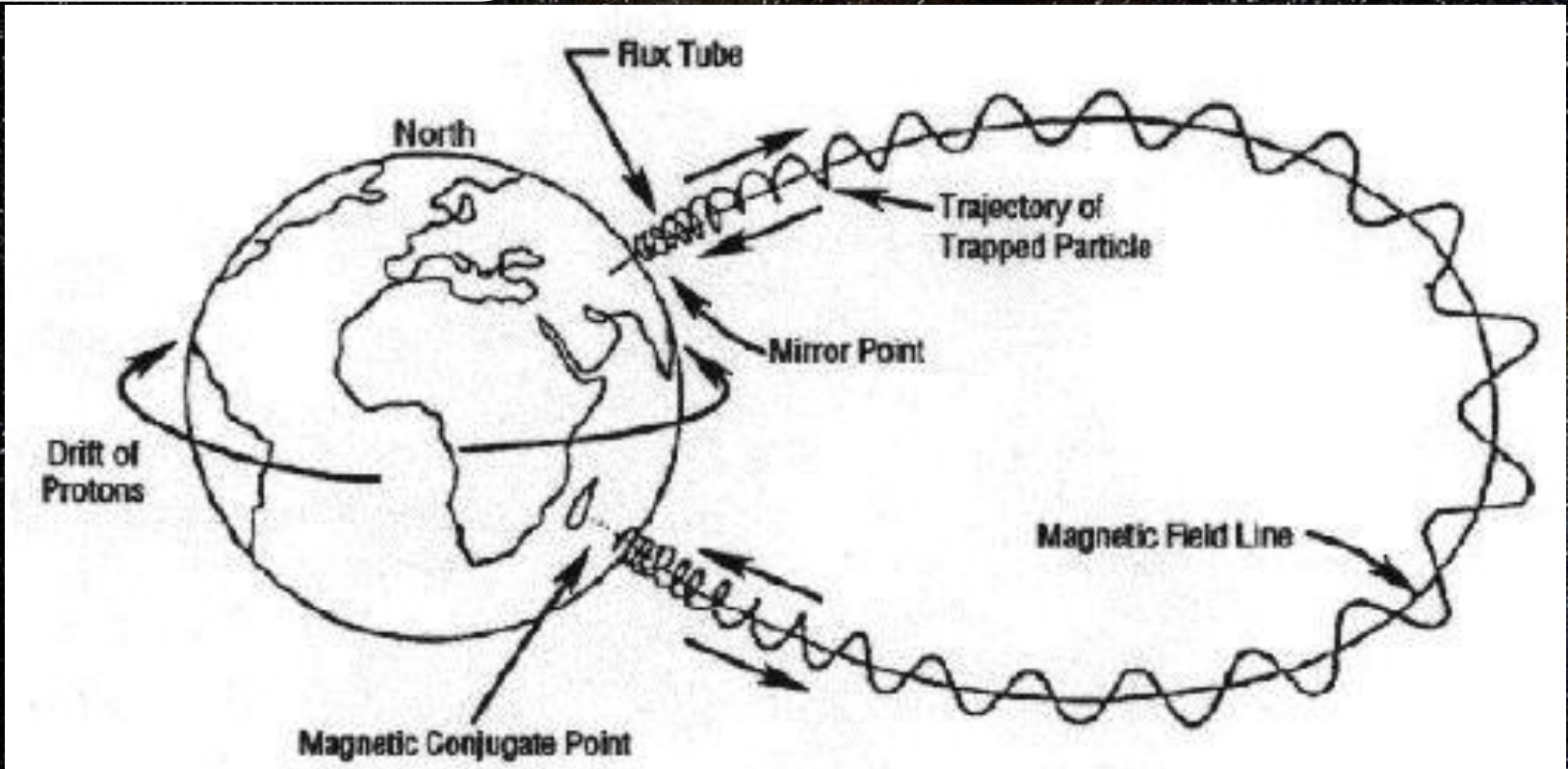
(пояса Вернова – ван Аллена)



# Earth Radiation Belts (Vernov - van Allen Belts)



Larmor magnetic precession  
of particles (e & p)

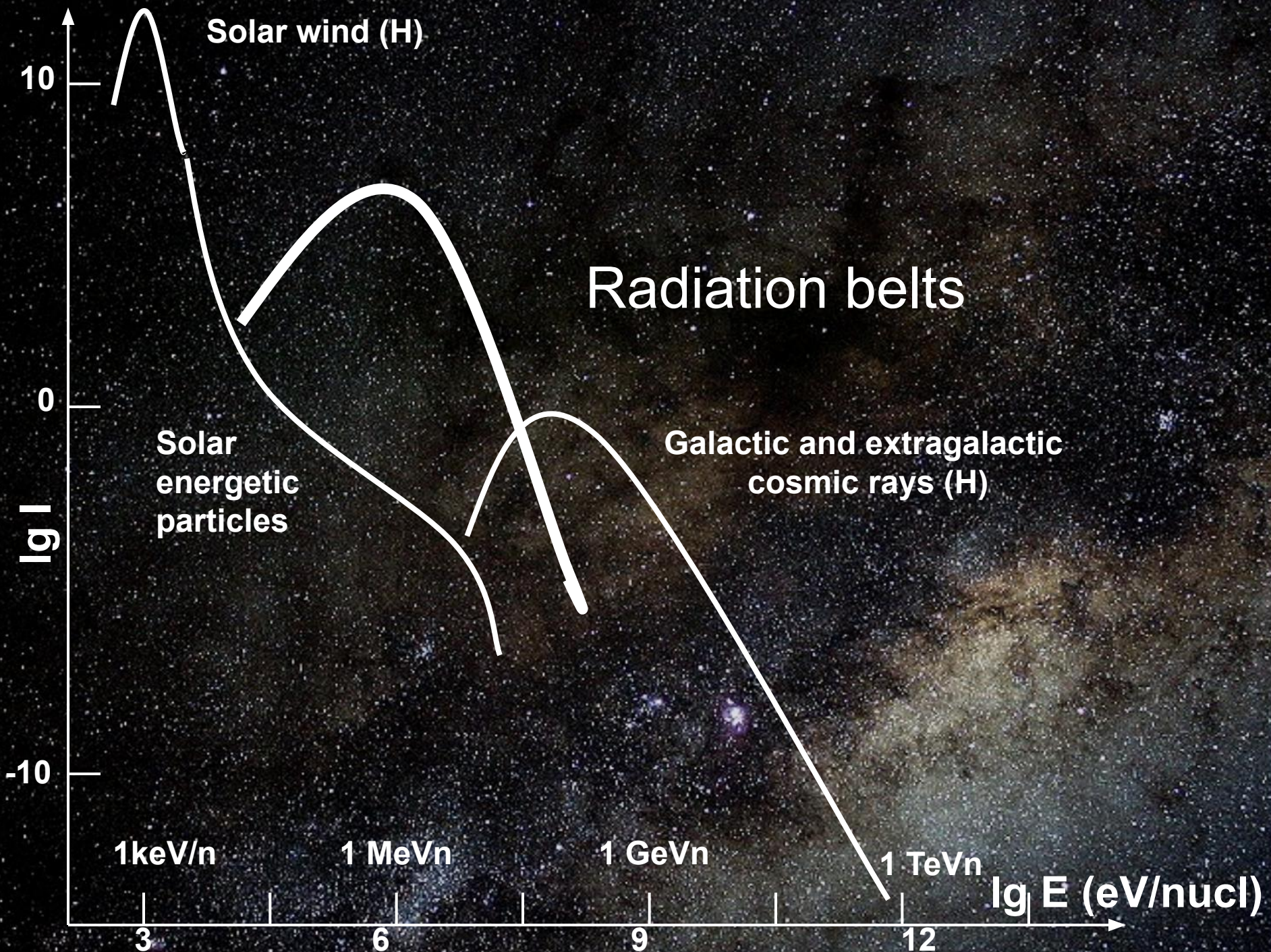




# Earth Radiation Belts

(Vernov - van Allen Belts)





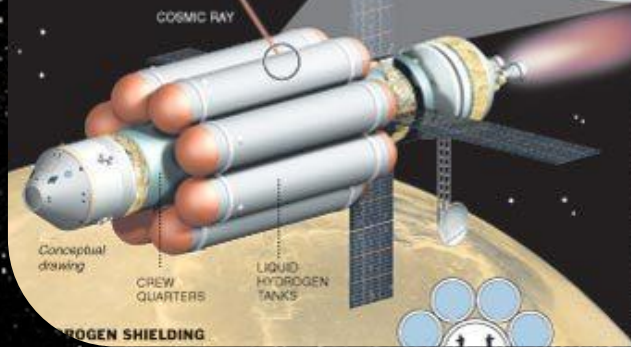
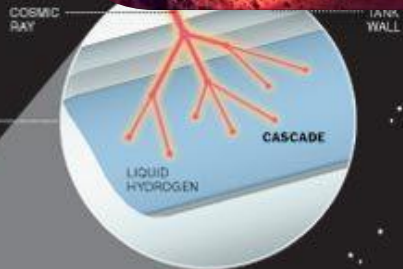


**γ RADIATION**

Over millions of years, distant, exploding stars eject matter at high speeds.

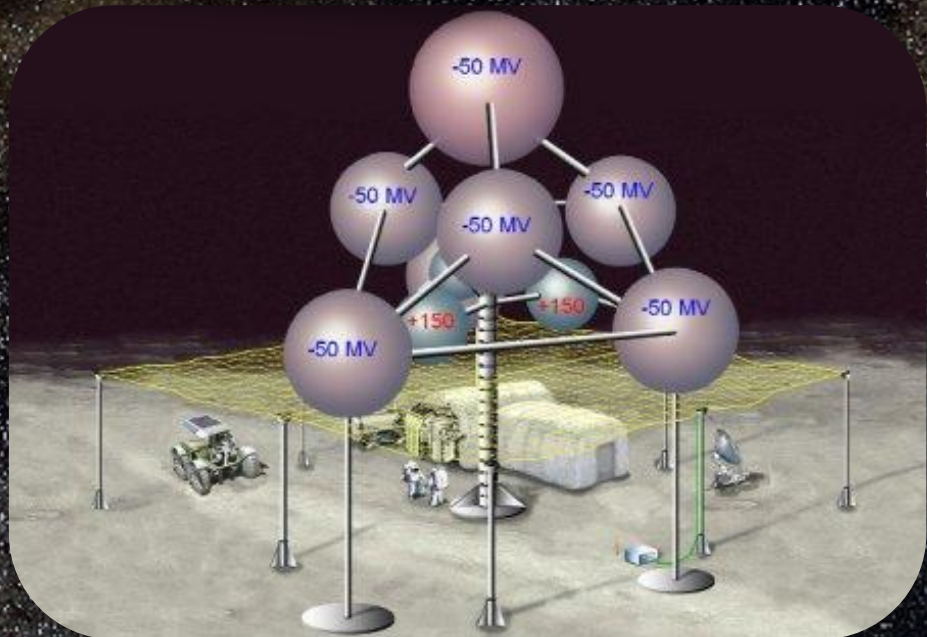
Some ions in this matter are accelerated to nearly the speed of light, moving so fast they are stripped of their electrons.

When these cosmic rays, mostly protons, hit a standing nucleus, they produce a shower of fast secondary particles, which may in turn produce further cascades of particles.



**LIGHTER IS BETTER**

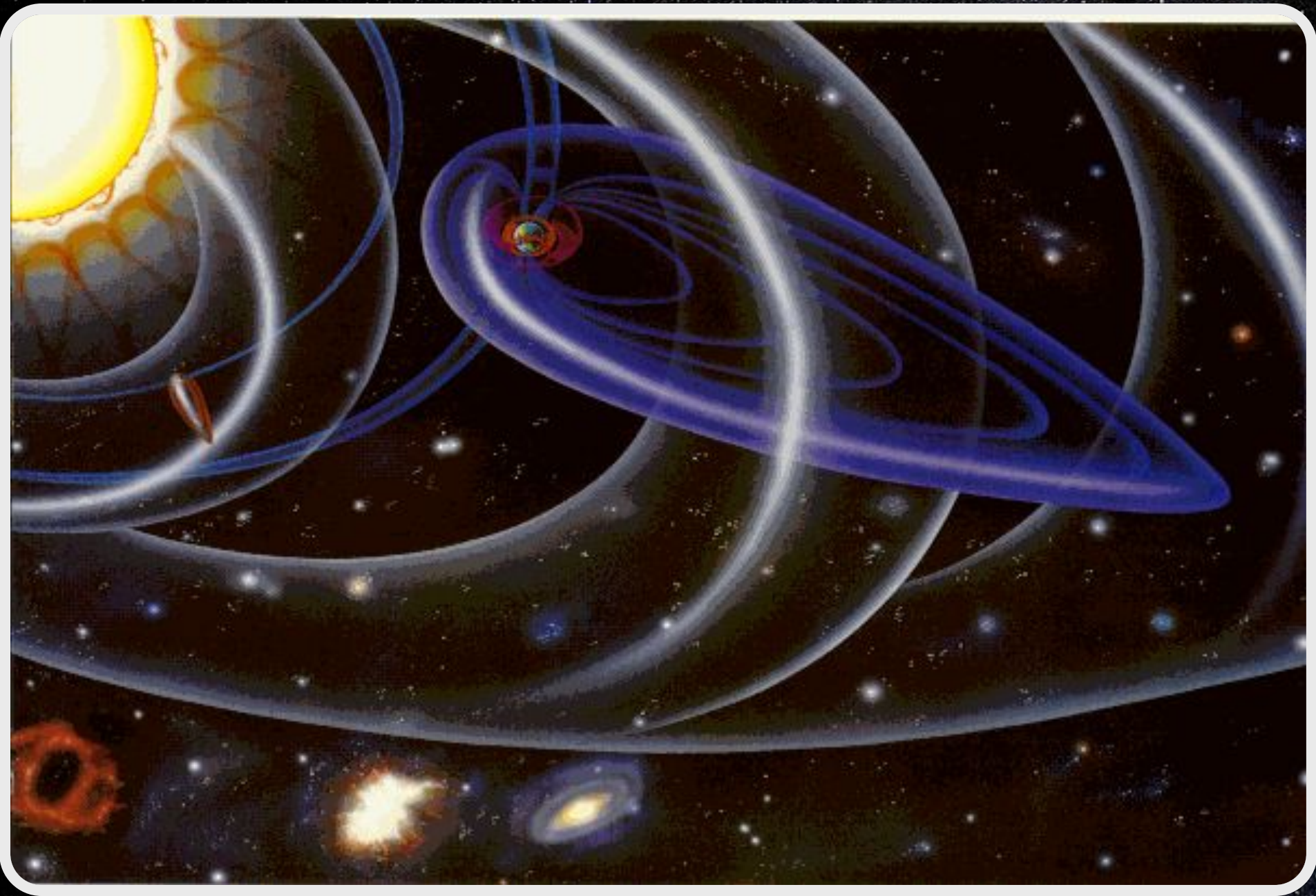
Cosmic rays lose some energy when they collide with a proton of another atom. Because hydrogen has one proton in its nucleus, each proton has the potential to stop incoming radiation. In elements with a heavier nucleus, some protons are hidden behind others in clumps and cannot be hit by cosmic rays.

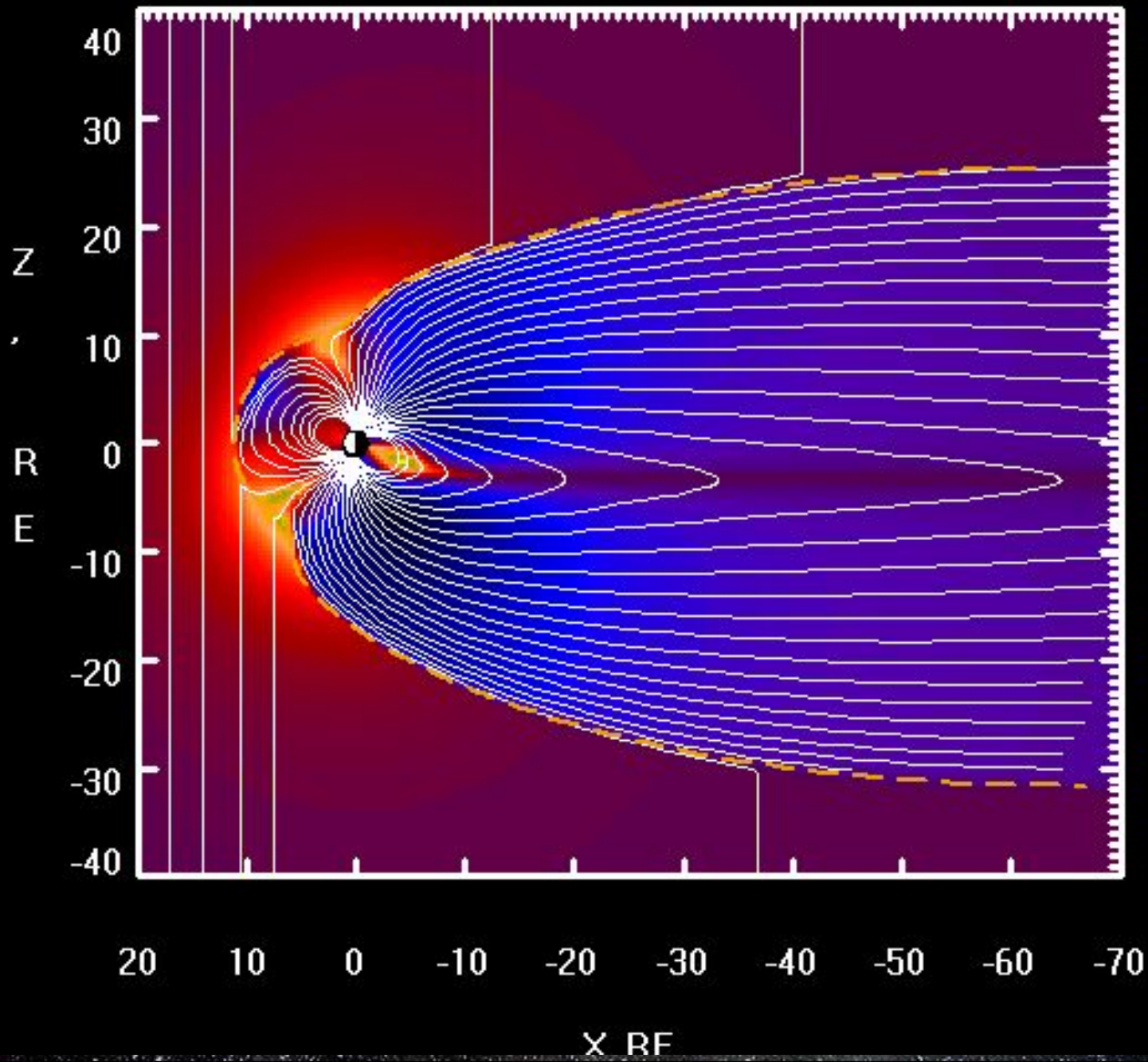




**ЧТО  
защищает нас на  
Земле?**

**ЧТО**  
**защищает нас на**  
**Магнитосфера**  
**и атмосфера**  
**Земли**





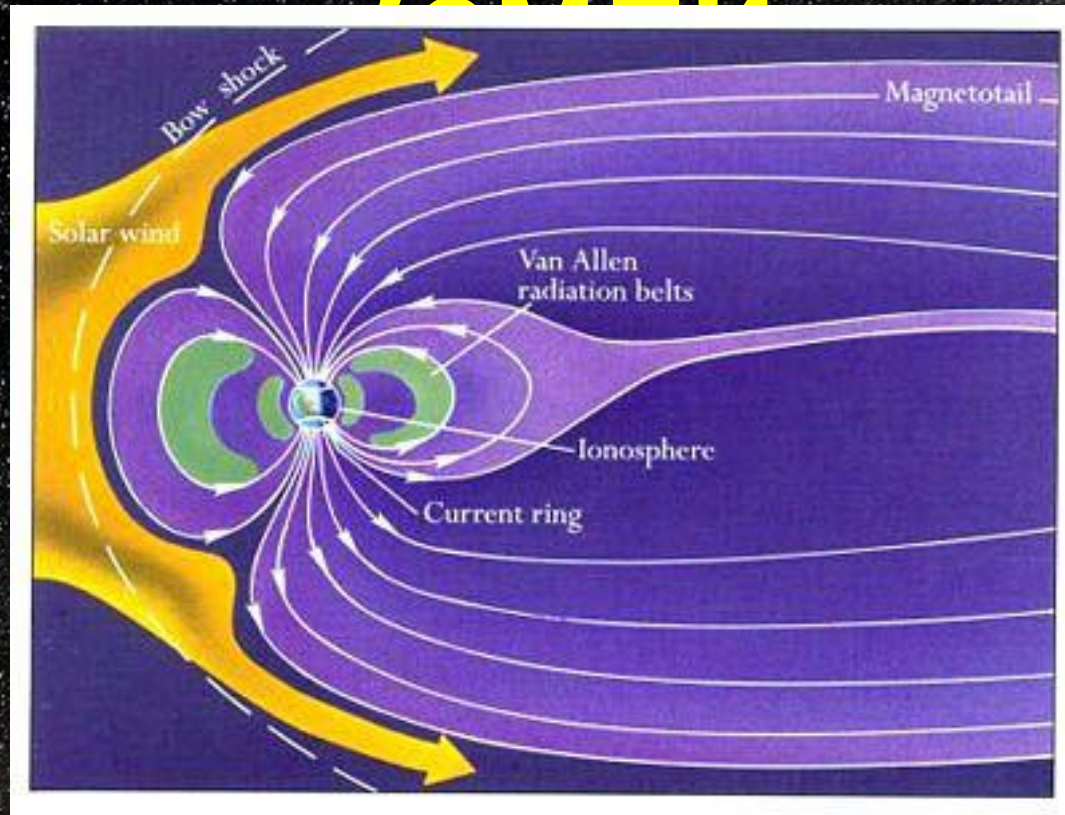






# Магнитосфера

## Земля



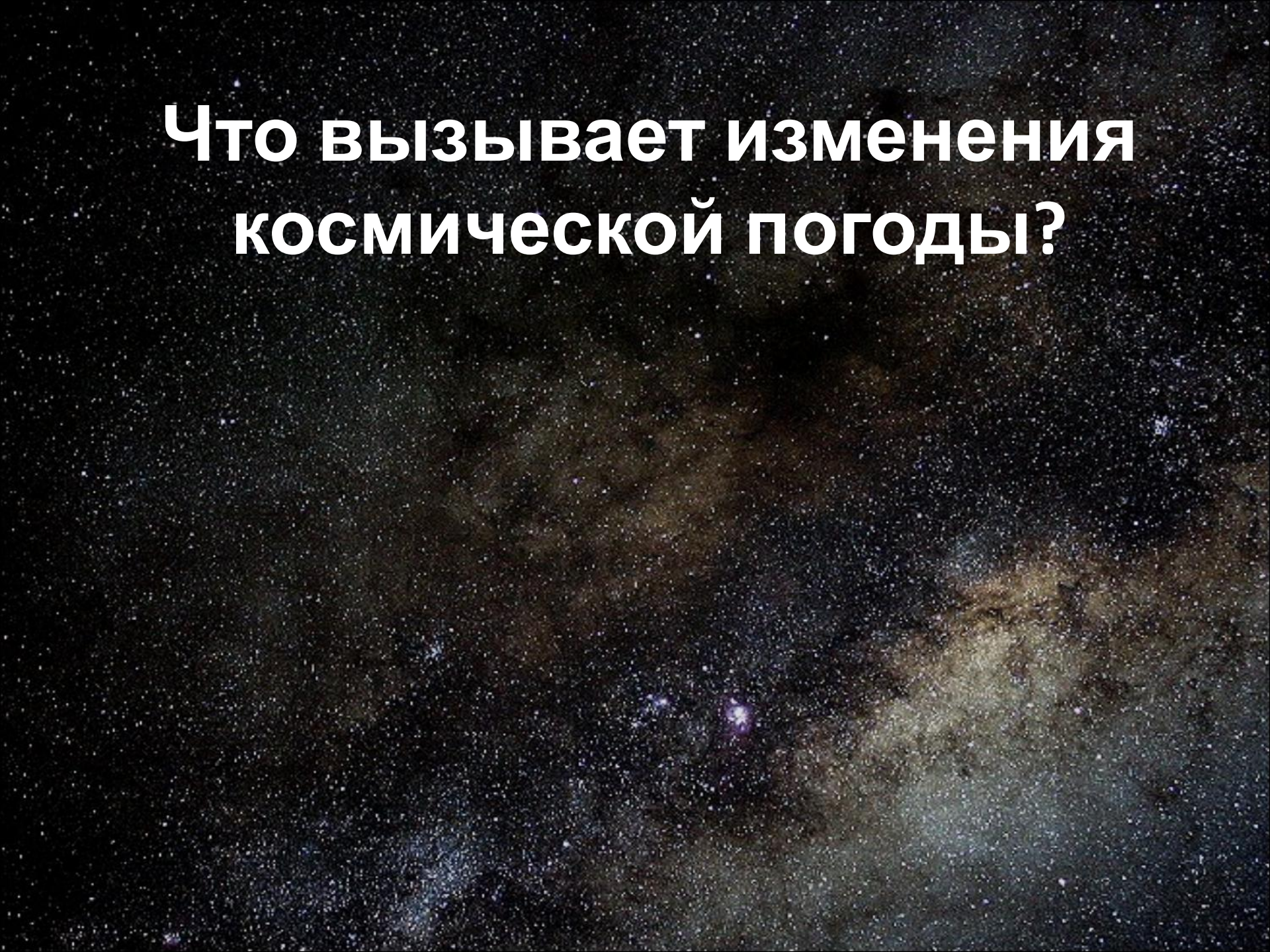
Область ОКП, условия в которой определяются наличием геомагнитного поля: балансом динамического давления солнечного ветра и геомагнитного поля.

Граница магнитосферы:  $10-13 R_{\oplus}$  на дневной стороне и  $10^3 R_{\oplus}$  на ночной (хвост магнитосферы), диаметр  $\approx 40 R_{\oplus}$ .

# Каковы источники:

- солнечных космических лучей;
- изменений геомагнитного поля;
- модуляции галактических космических лучей

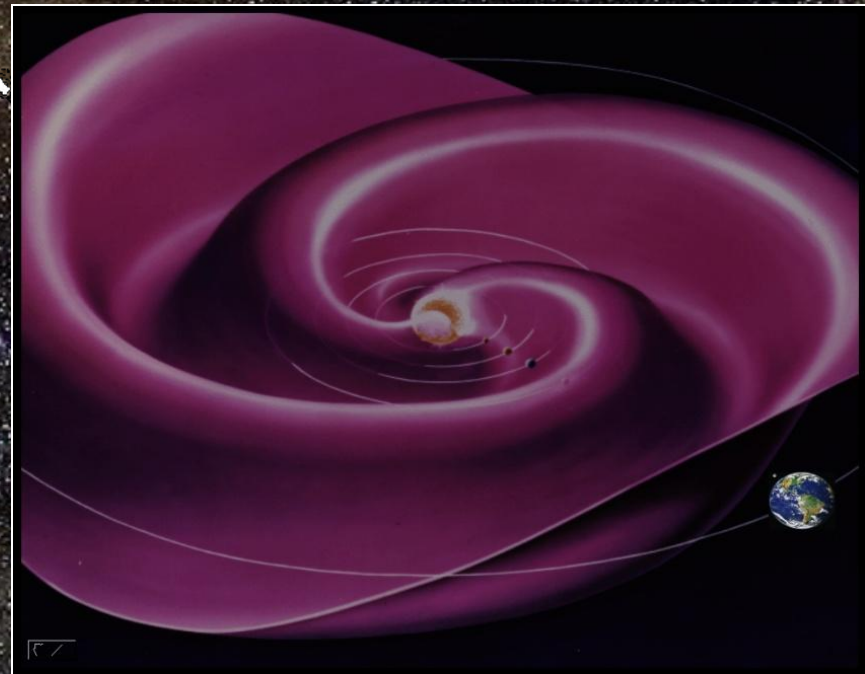
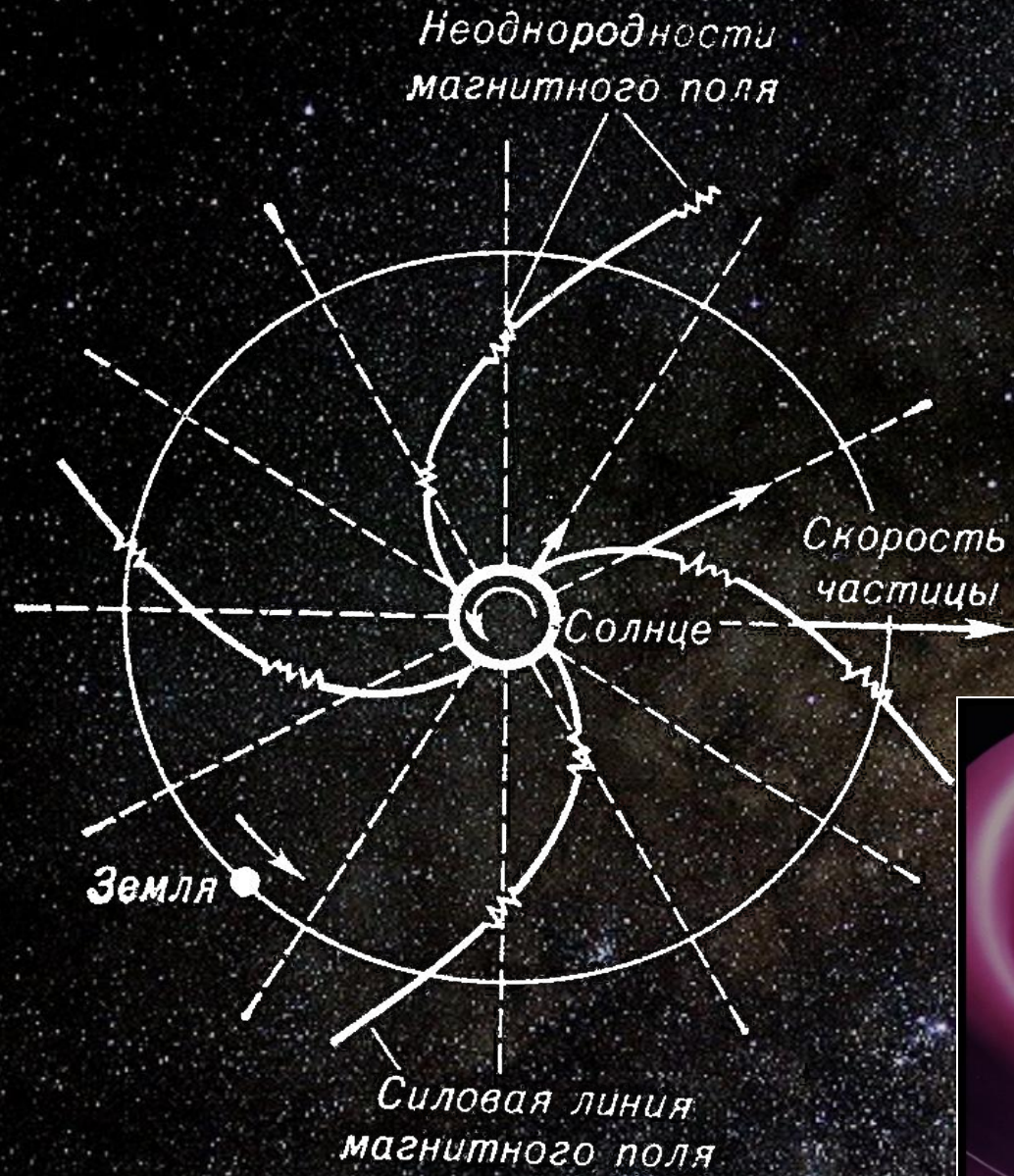
**Что вызывает изменения  
космической погоды?**

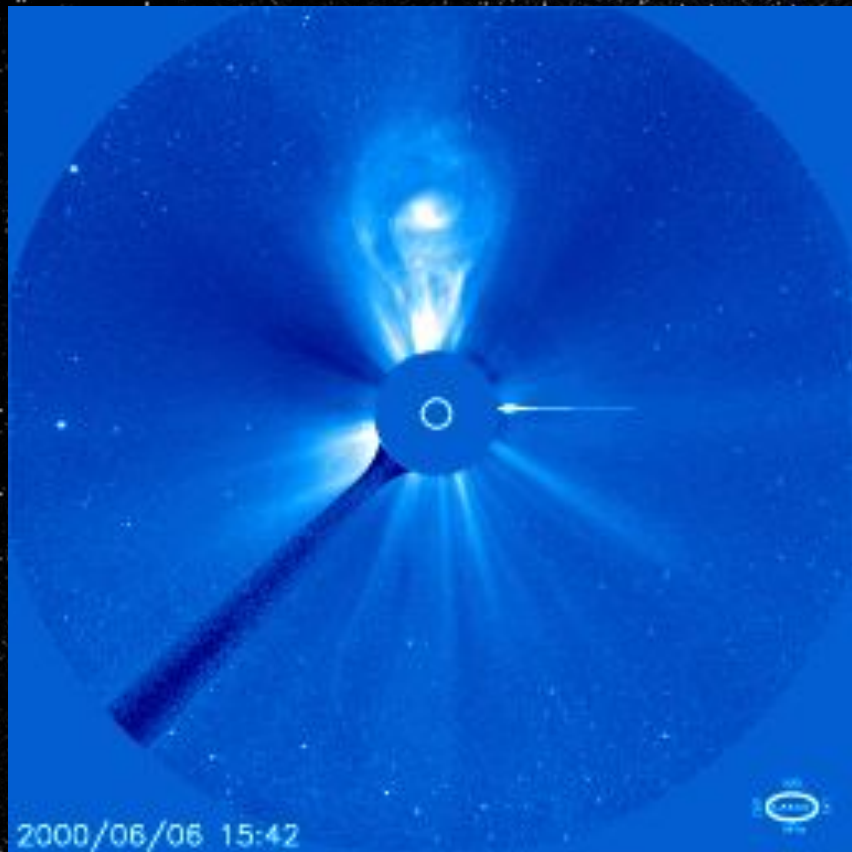


**Что вызывает изменения  
космической погоды?**

**СОЛНЦЕ  
И  
СОЛНЕЧНАЯ  
АКТИВНОСТЬ**



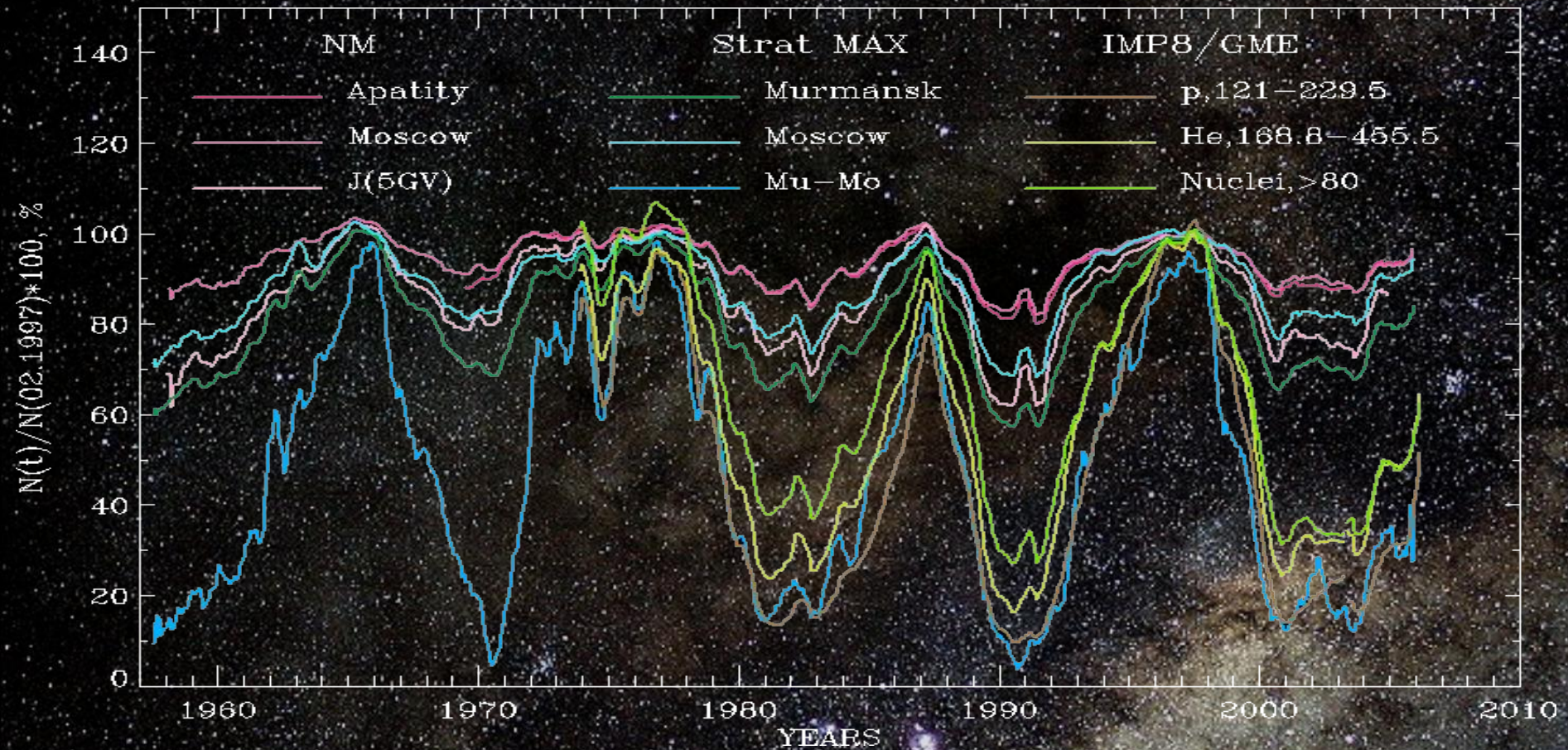




Корональные выбросы массы (КВМ, СМЕ) – струи и облака солнечной плазмы, движущиеся со скоростью до 1000 км/с и обычно наблюдаемые после мощных солнечных вспышек

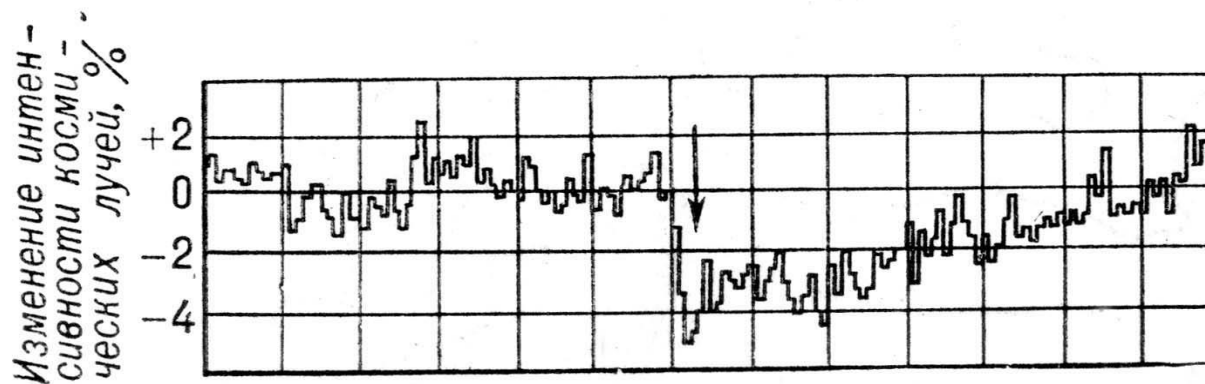
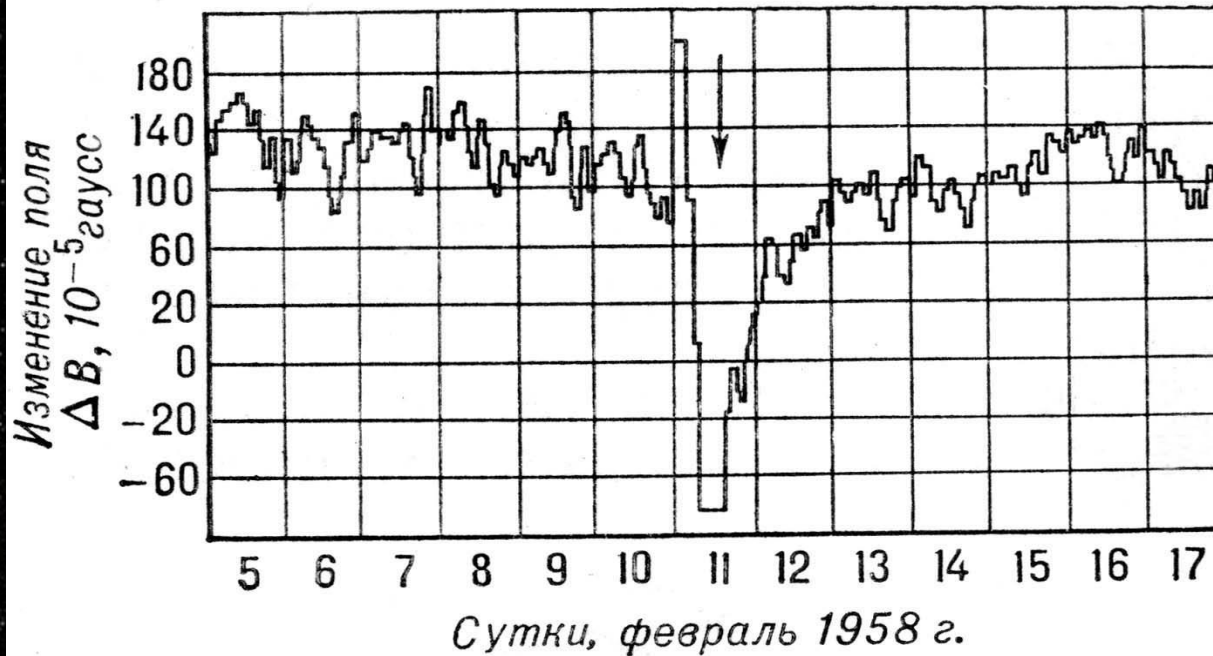


# Forbush-effect



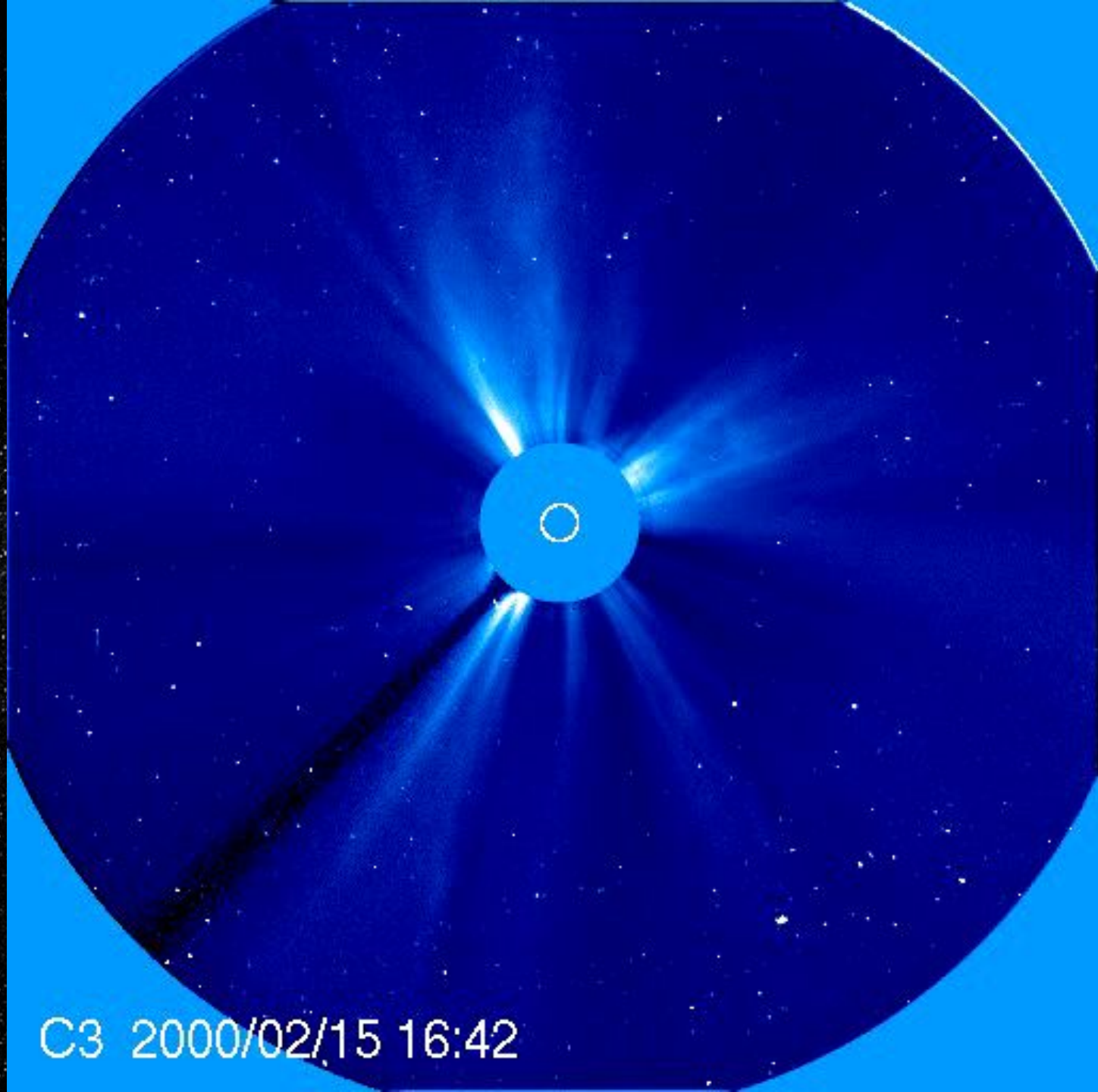
Уменьшение потока ГКЛ в результате увеличения рассеяния (отклонения) ГКЛ на неоднородностях ММП, уносимого солнечным ветром от Солнца

# Forbush-effect



Solar plasma flow influences the Earth magnetosphere.

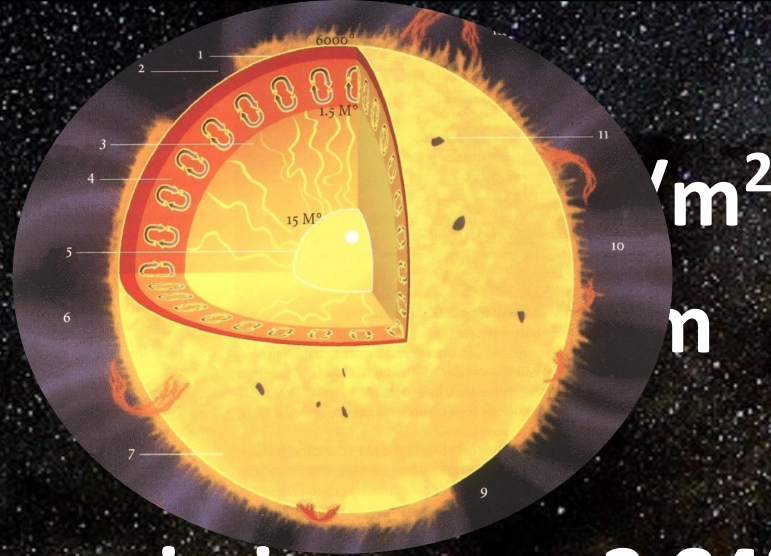
Simultaneously, the intensity of GCR decreases.



C3 2000/02/15 16:42

**Solar constant:**

**Radius of 1 a.u.:**



**Total solar energy emission:**  $3.84 * 10^{26}$  Wt

**Solar radius:**  $6.96 * 10^8$  m

**Solar nucleus radius (0.2 solar radius):**  $1.39 * 10^8$  m

**Solar nucleus volume:**  $1.13 * 10^{25}$  m<sup>3</sup>

**Average energy emission**

**of 1 m<sup>3</sup> of the solar nucleus matter:** **34.10**

**Wt/m<sup>3</sup>**



# Galileo Galilei (1564 - 1642)



ISTORIA  
E DIMOSTRAZIONI  
INTORNO ALLE MACCHIE SOLARI  
E LORO ACCIDENTI  
COMPRESSE IN TRE LETTERE SCRITTE  
ALL'ILLVSTRISSIMO SIGNOR  
MARCO VELSERI LINCEO  
DVVMVIRO D'AVGVSTA  
CONSIGLIERO DI SVA MAIESTA CESAREA  
DAL SIGNOR  
GALILEO GALILEI LINCEO

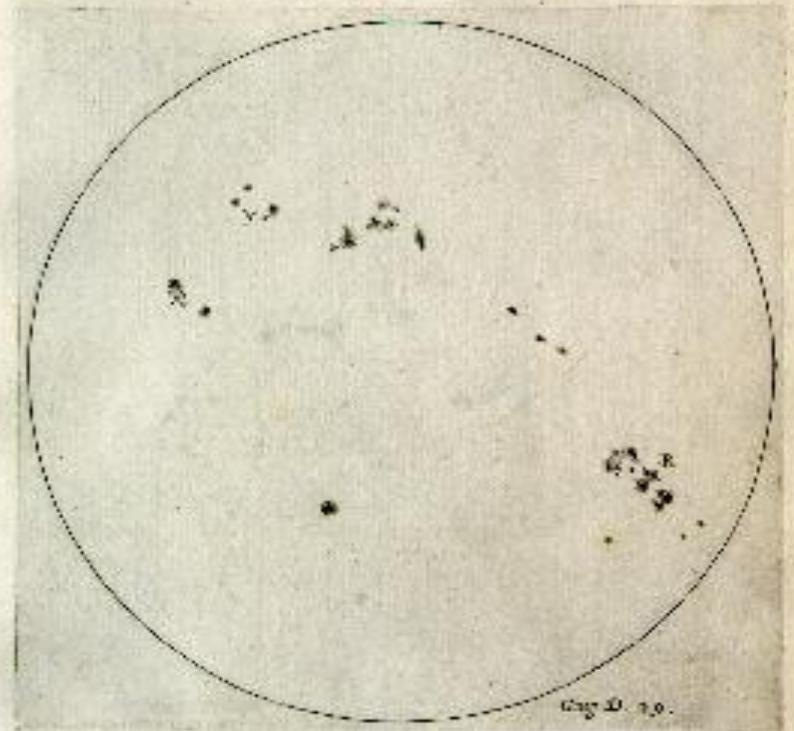
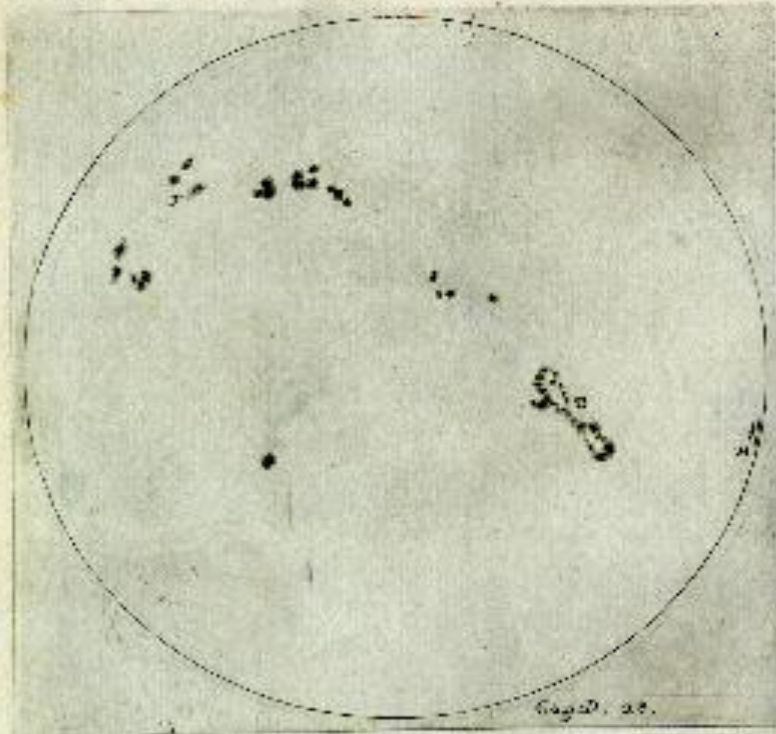
*Nobil Fiorentino, Filosofo e Matematico Primario del Serenissi.  
D. COSIMO II. GRAN DVCA DI TOSCANA.*

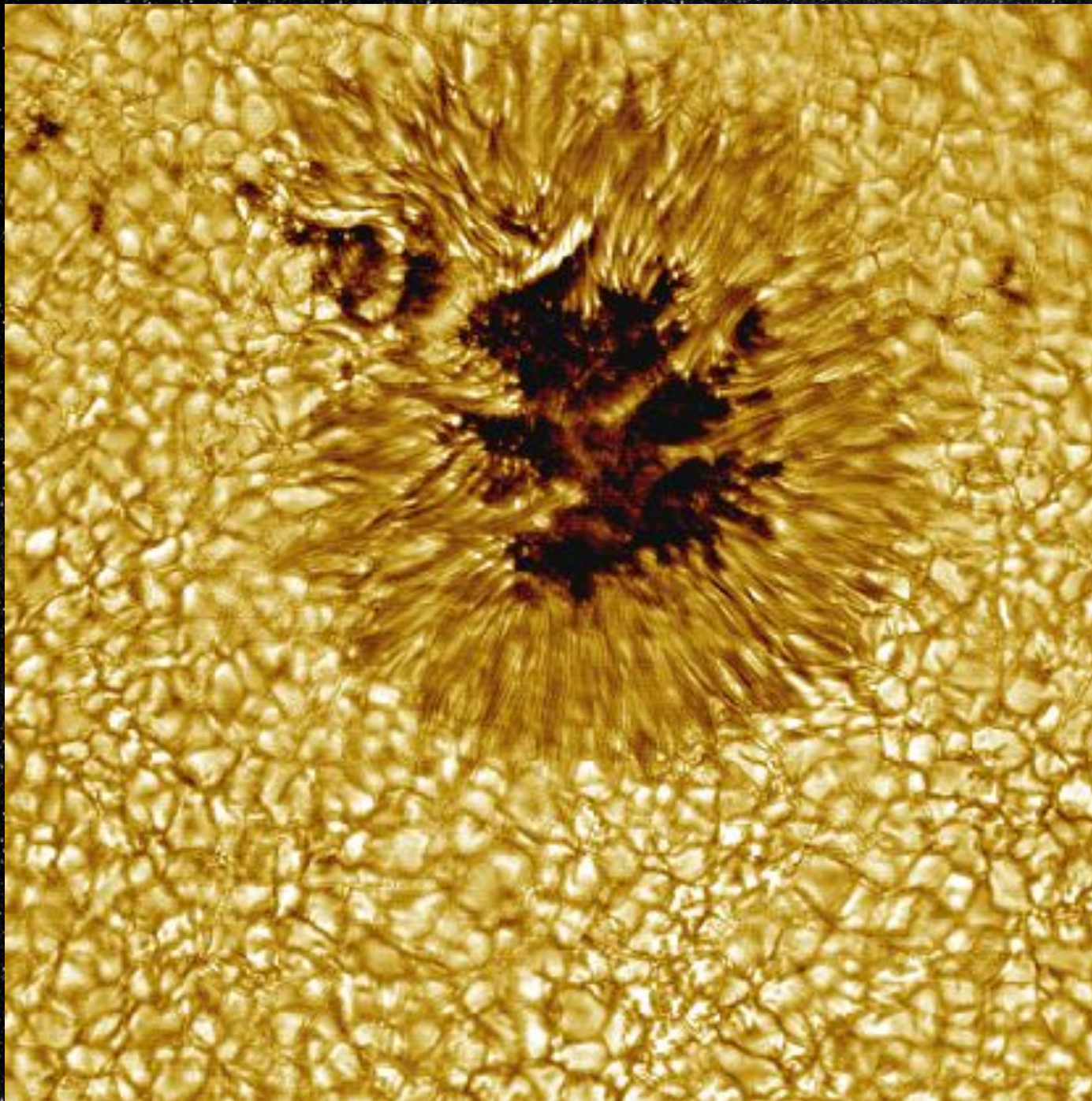
Si aggiungono nel fine le Lettere, e Diquisizioni del Suito Apelle.



IN ROMA, Appresso Giacomo Mascardi. MDCXIII.  
CON LICENZA DE SVPERIORI.

# Sunspot group sketches by Galileo (Aug, 1611)





The relative number of sunspots –

# Wolf number

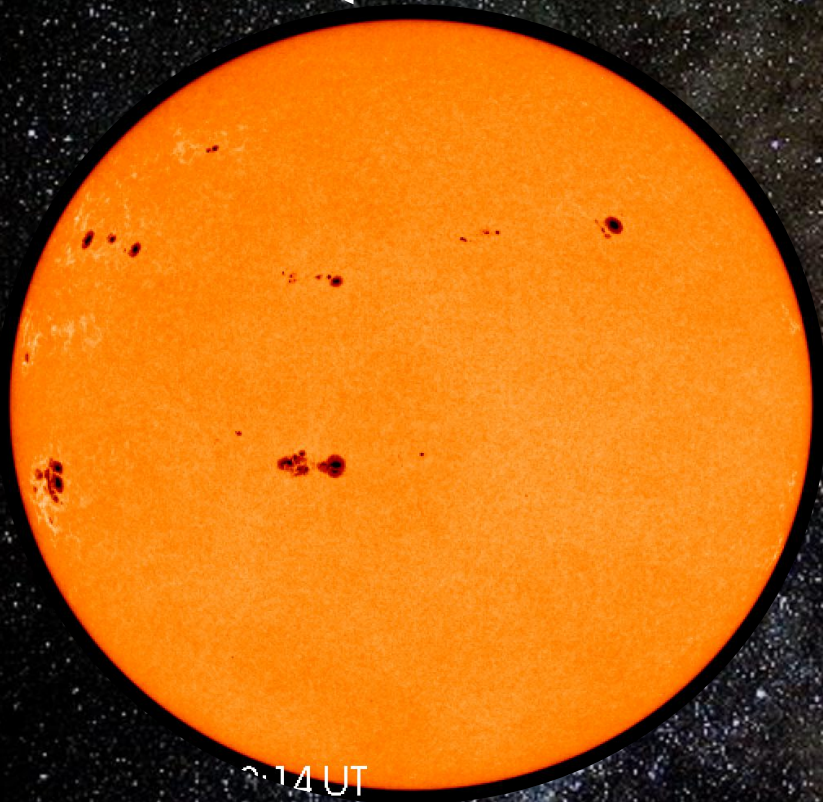
is the main index of solar activity

$$W = k(f + 10g)$$

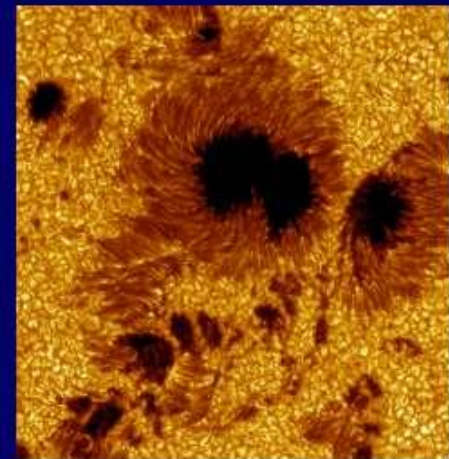
**f** – number of individual sunspots observed by particular observer,

**g** – number of sunspot groups in which the sunspots are grouped,

**k** – the standardizing coefficient for unification of particular observers observations



0:14 UT





The relative number of sunspots –

# Wolf number

is the main index of solar activity

$$W = k(f + 10g)$$

**f** – number of individual sunspots observed by particular observer,

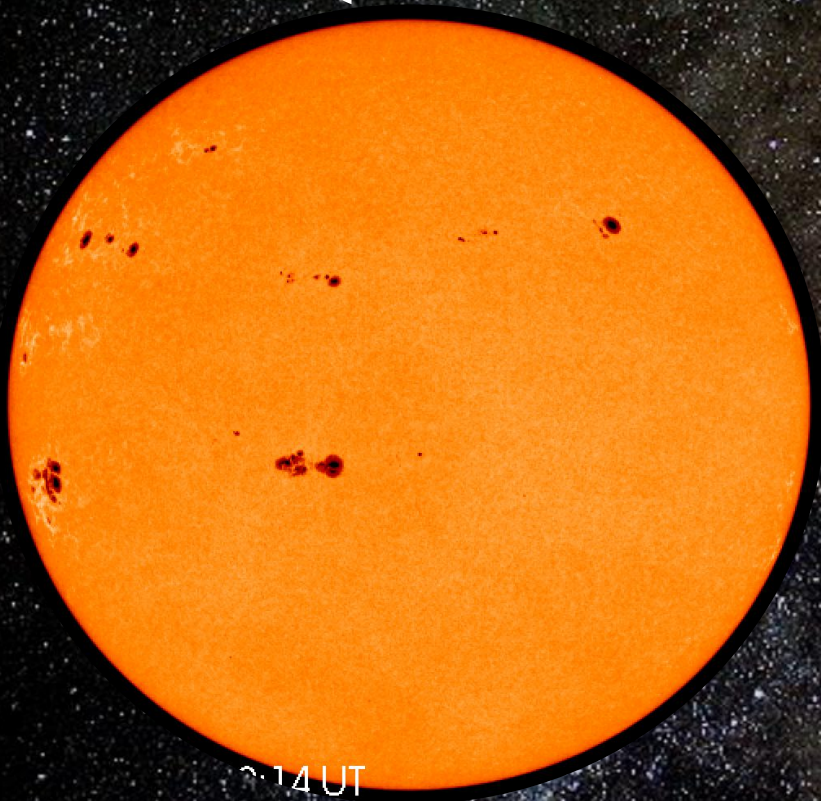
**g** – number of sunspot groups in which the sunspots are grouped,

**k** – the standardizing coefficient for unification of particular observers observations

**Looks strange?**

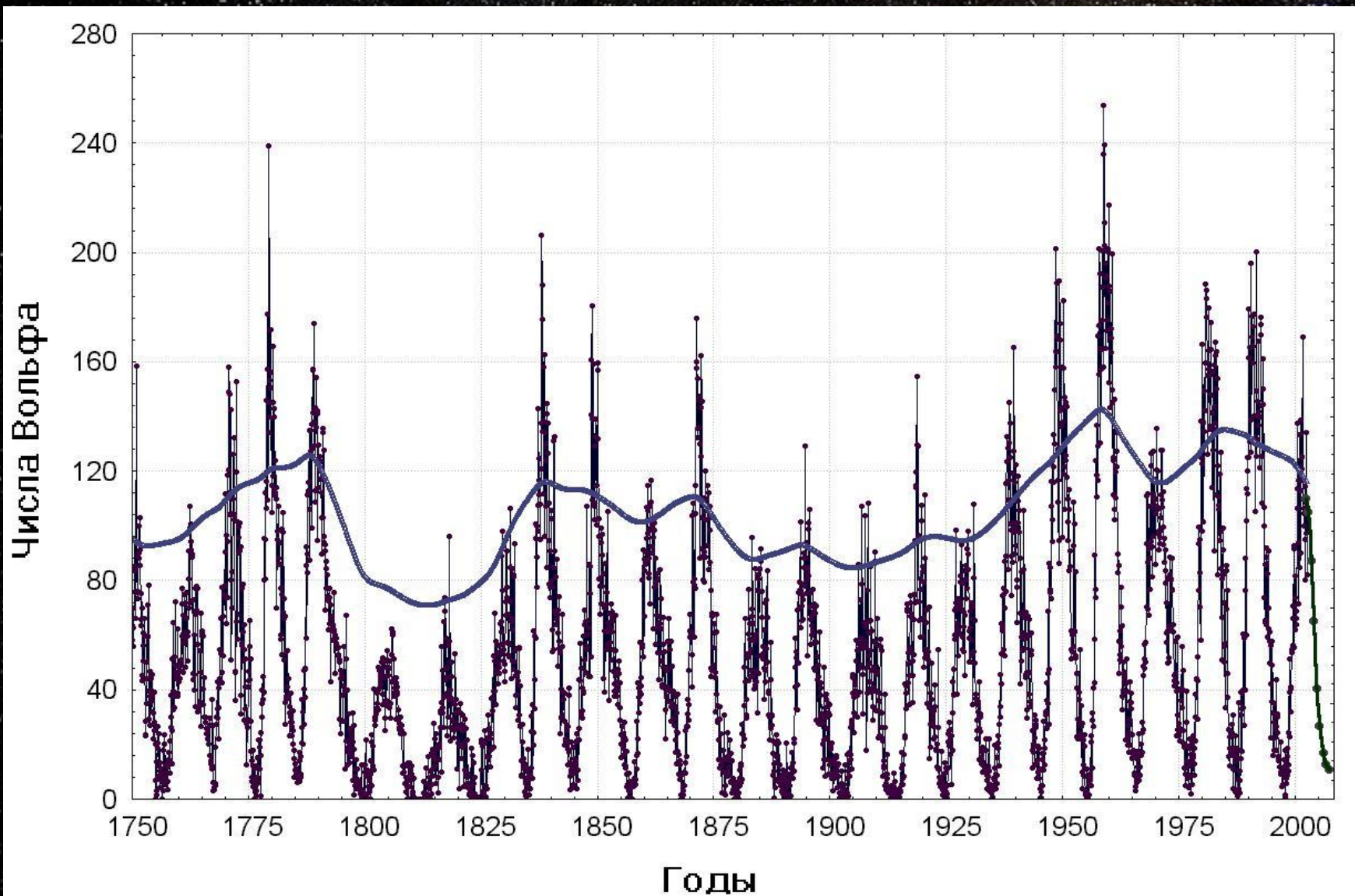
**But long!**

*(since 1749)*

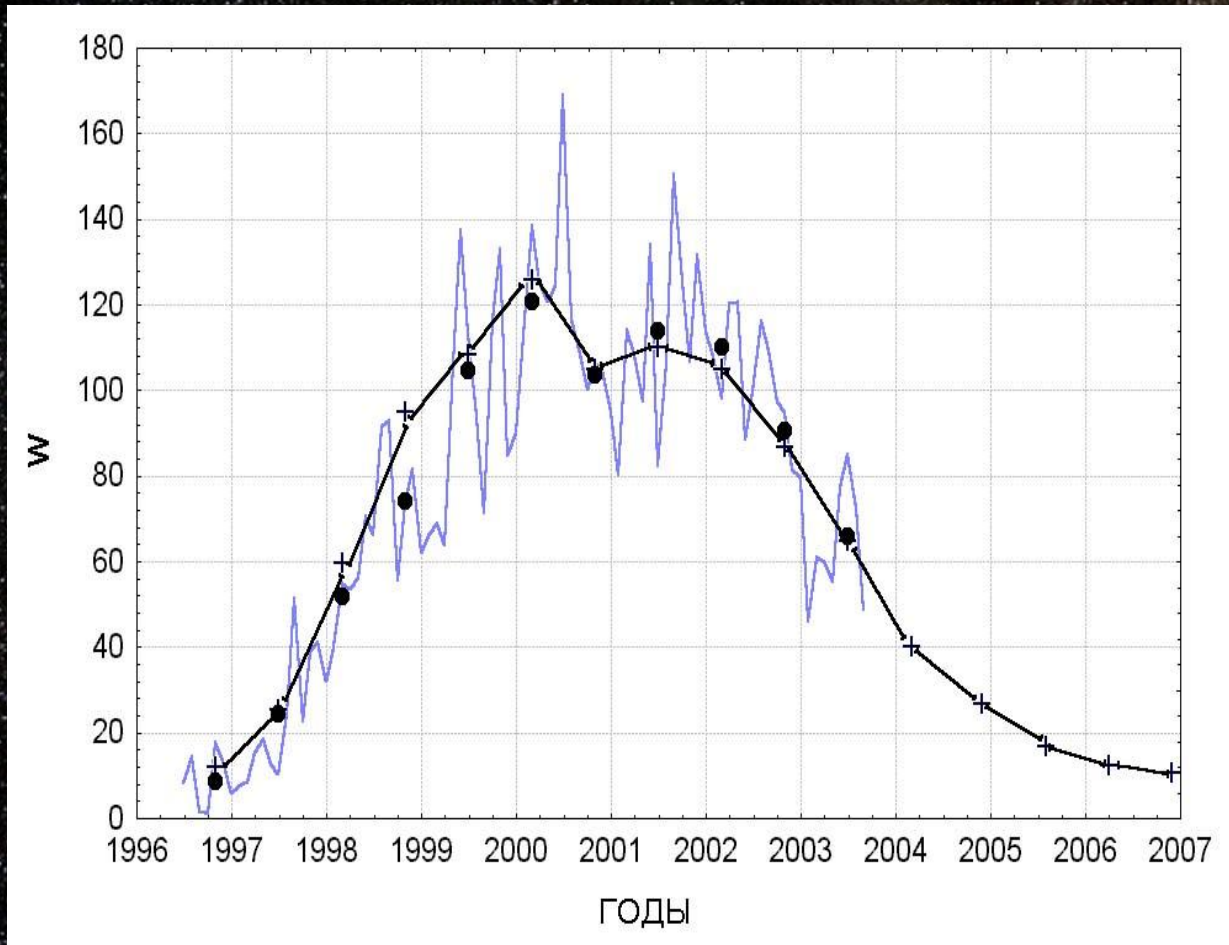


2014 UT

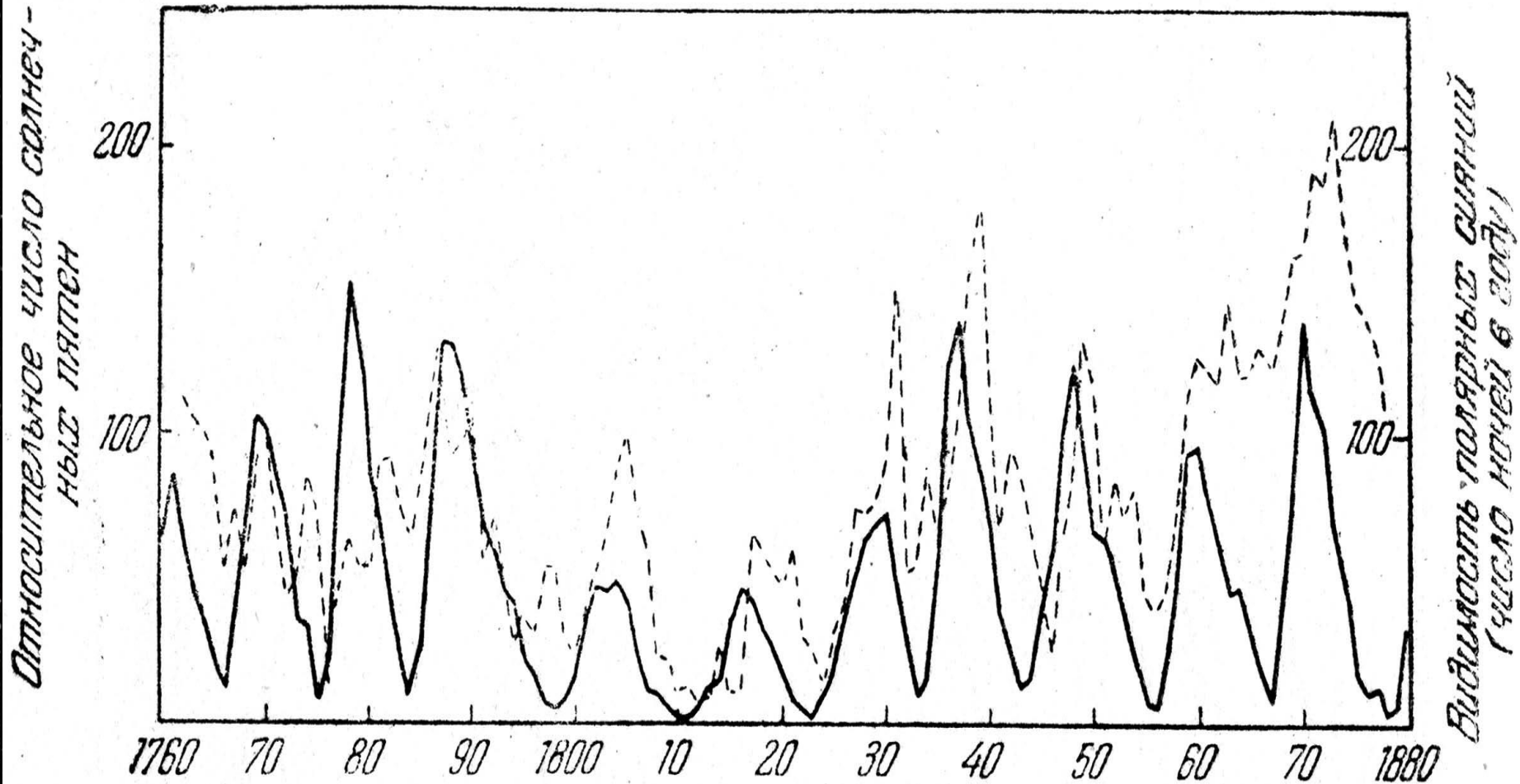
# Solar activity cyclicality



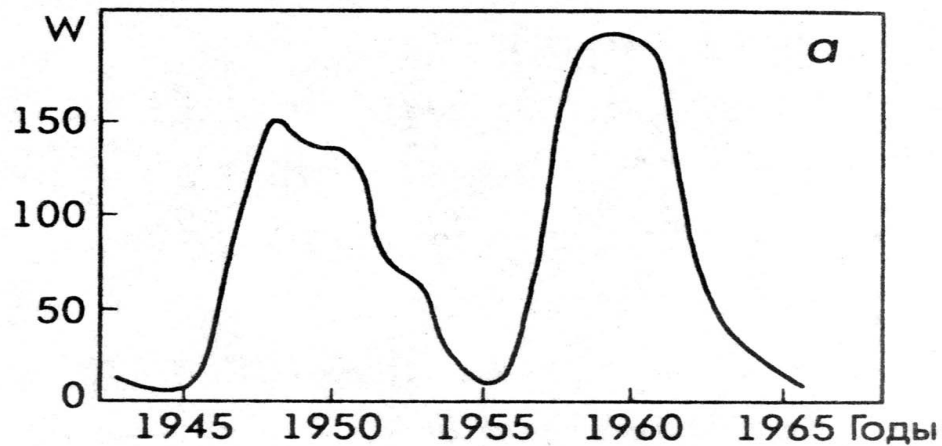
# Typical structure of solar cycle



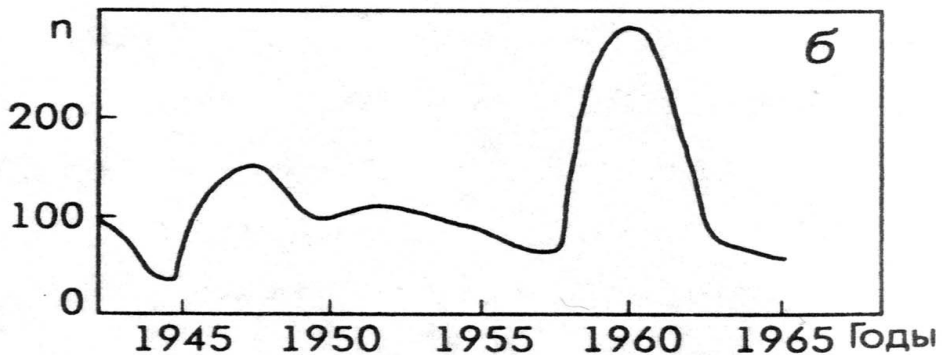
# Solar activity and Aurora borealis



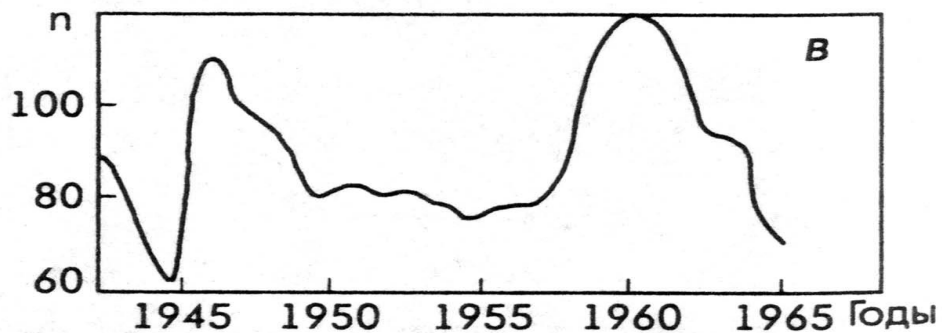
# Solar activity and traffic accidents



Wolf numbers for Solar activity.

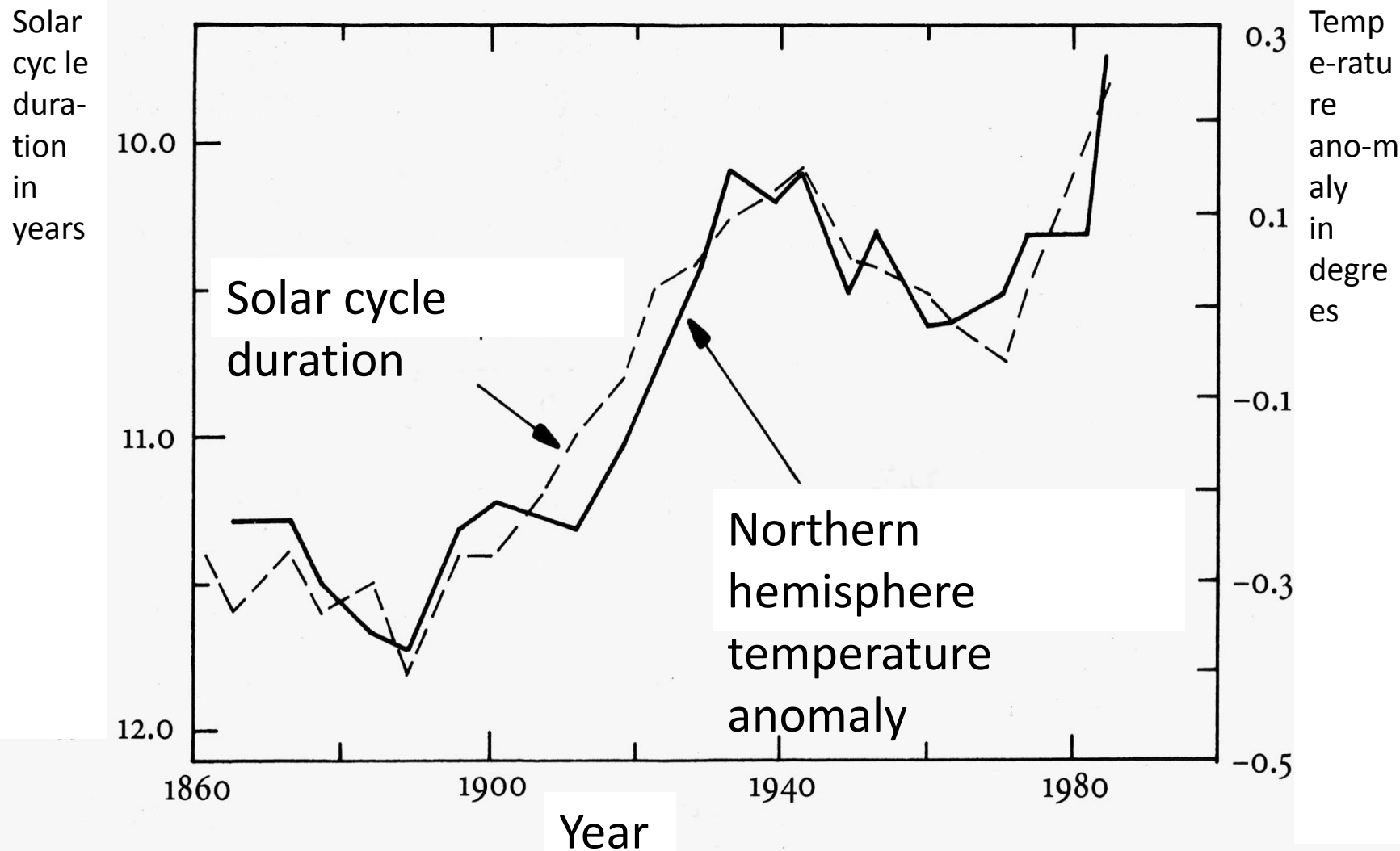


Number of traffic accidents per 100 auto all around Japan.

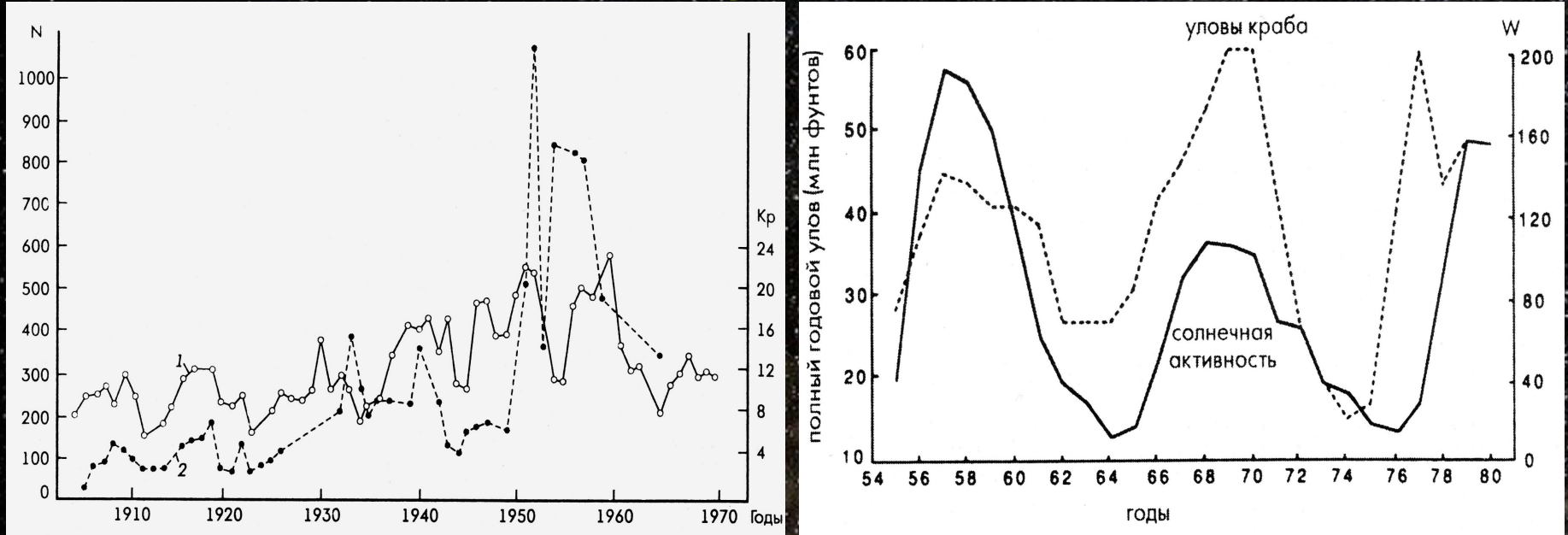


Number of traffic accidents per 100 auto for Tokyo city only.

# Solar activity and Earth temperature variations

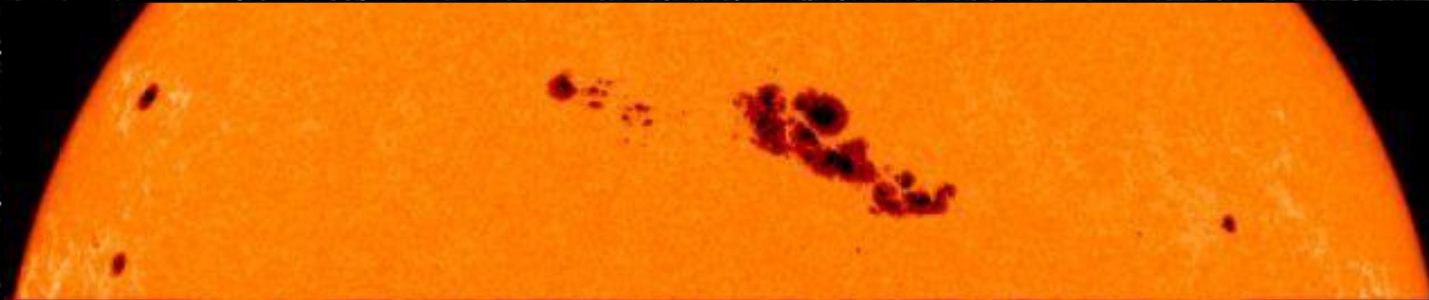


# Solar activity and fish catch

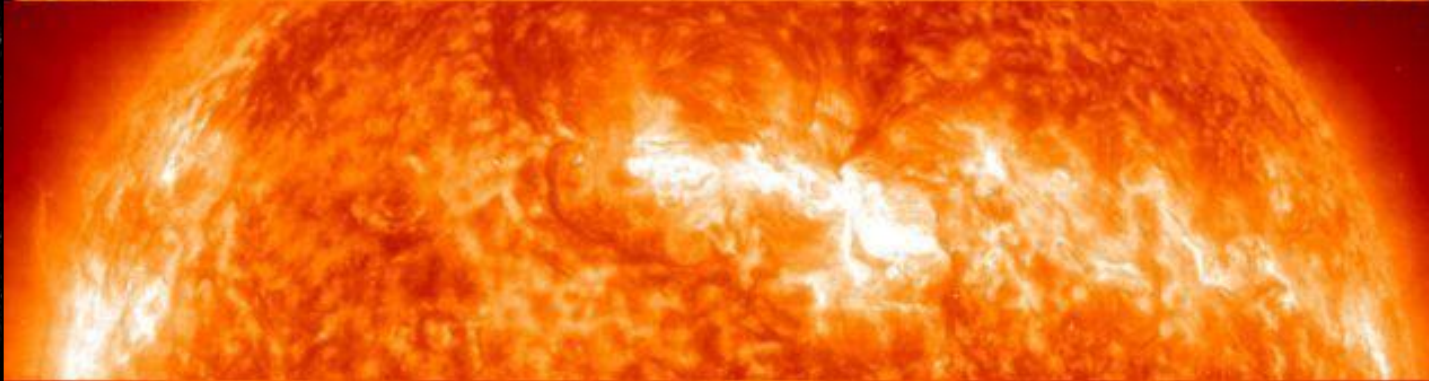


Left panel – comparison of annual herring catches in the Norwegian Sea (black dots, left scale) with  $Kp$  index of geomagnetic activity (open circles, right scale). Right panel – comparison of catches of crabs on USA west coast (dotted line, left scale) and Wolf numbers ( $W$ , solid line, right scale). Years are on the x-axis.

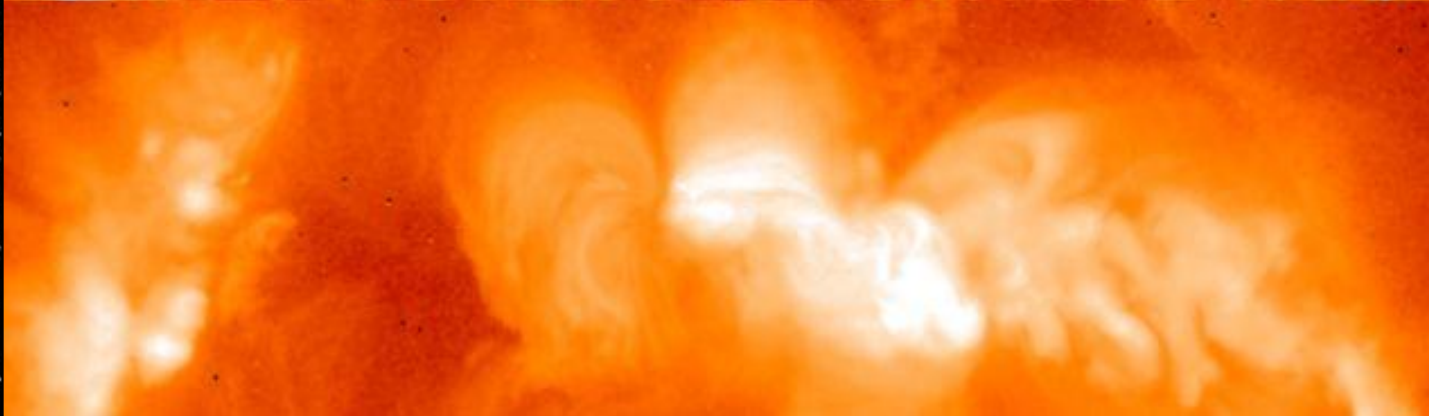
# Magnetic field inhomogeneities are manifested in all levels of the atmosphere



photosphere



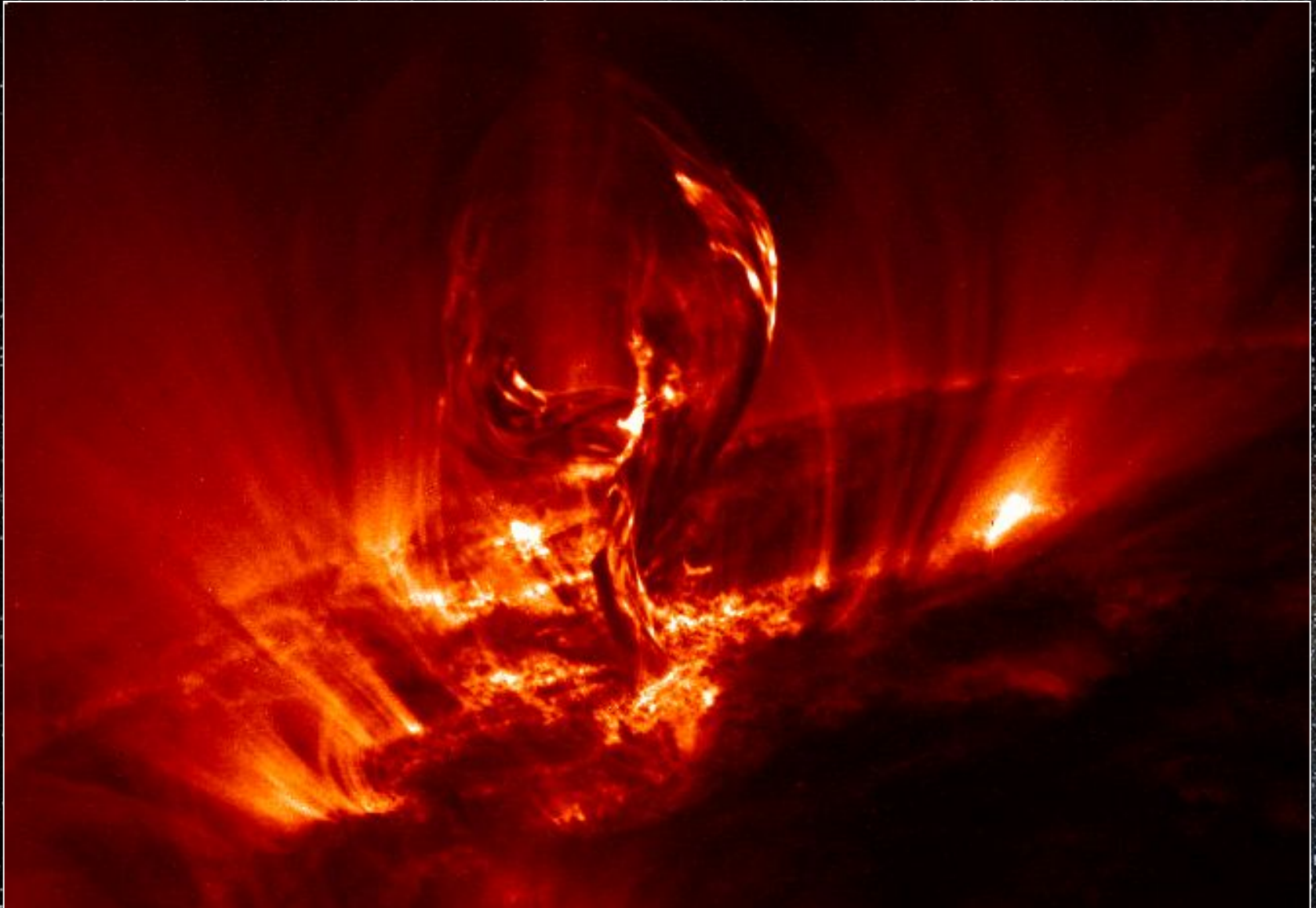
chromosphere

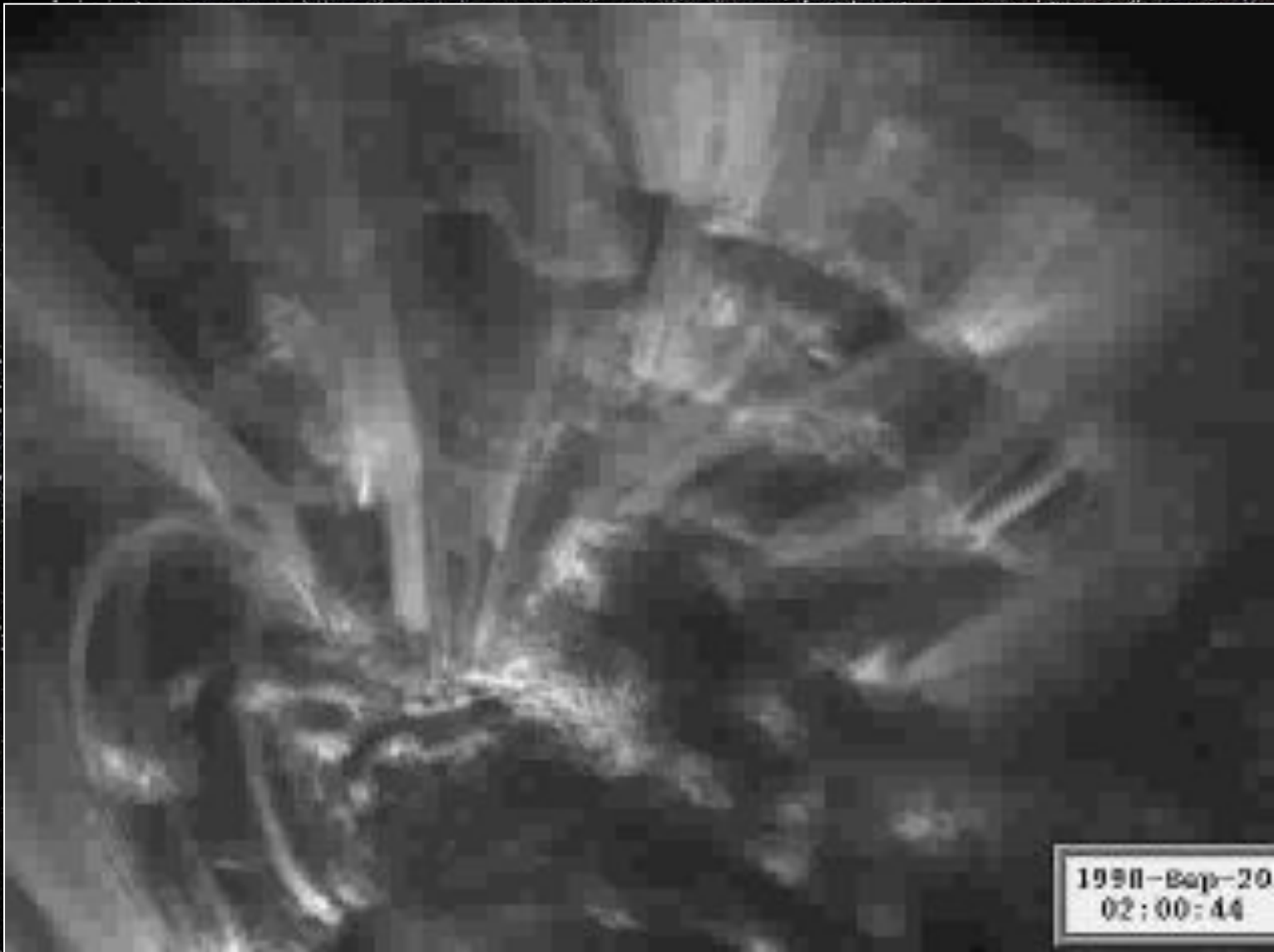


corona



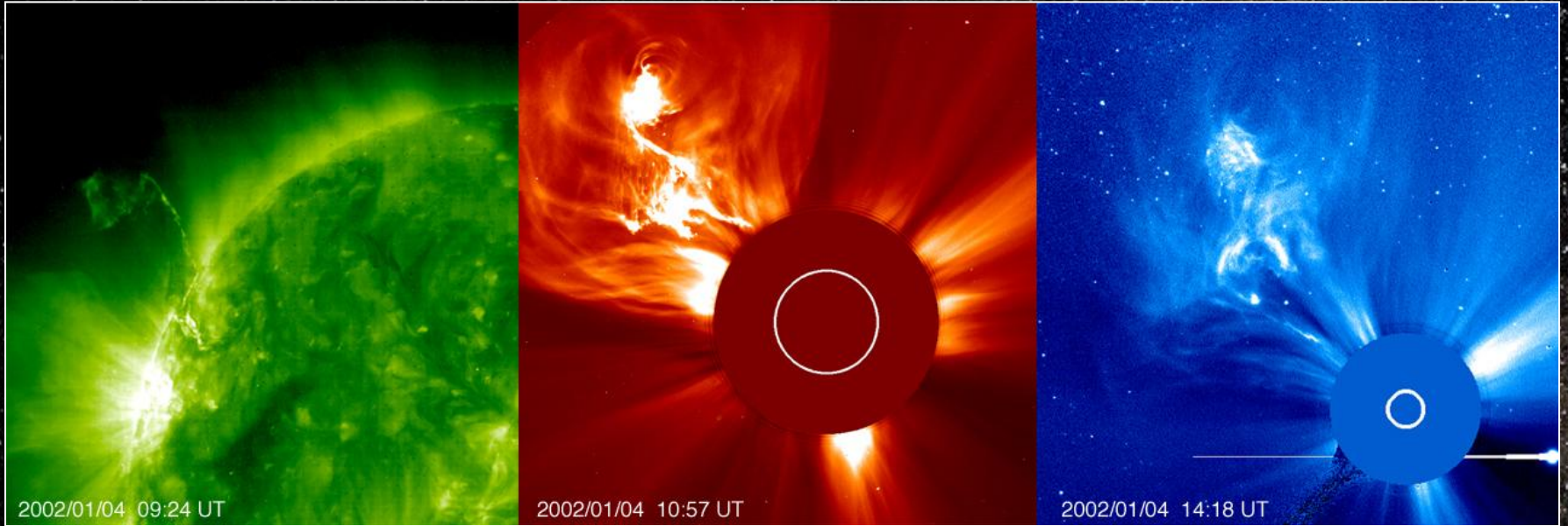
# Solar flares and Coronal Mass Ejections

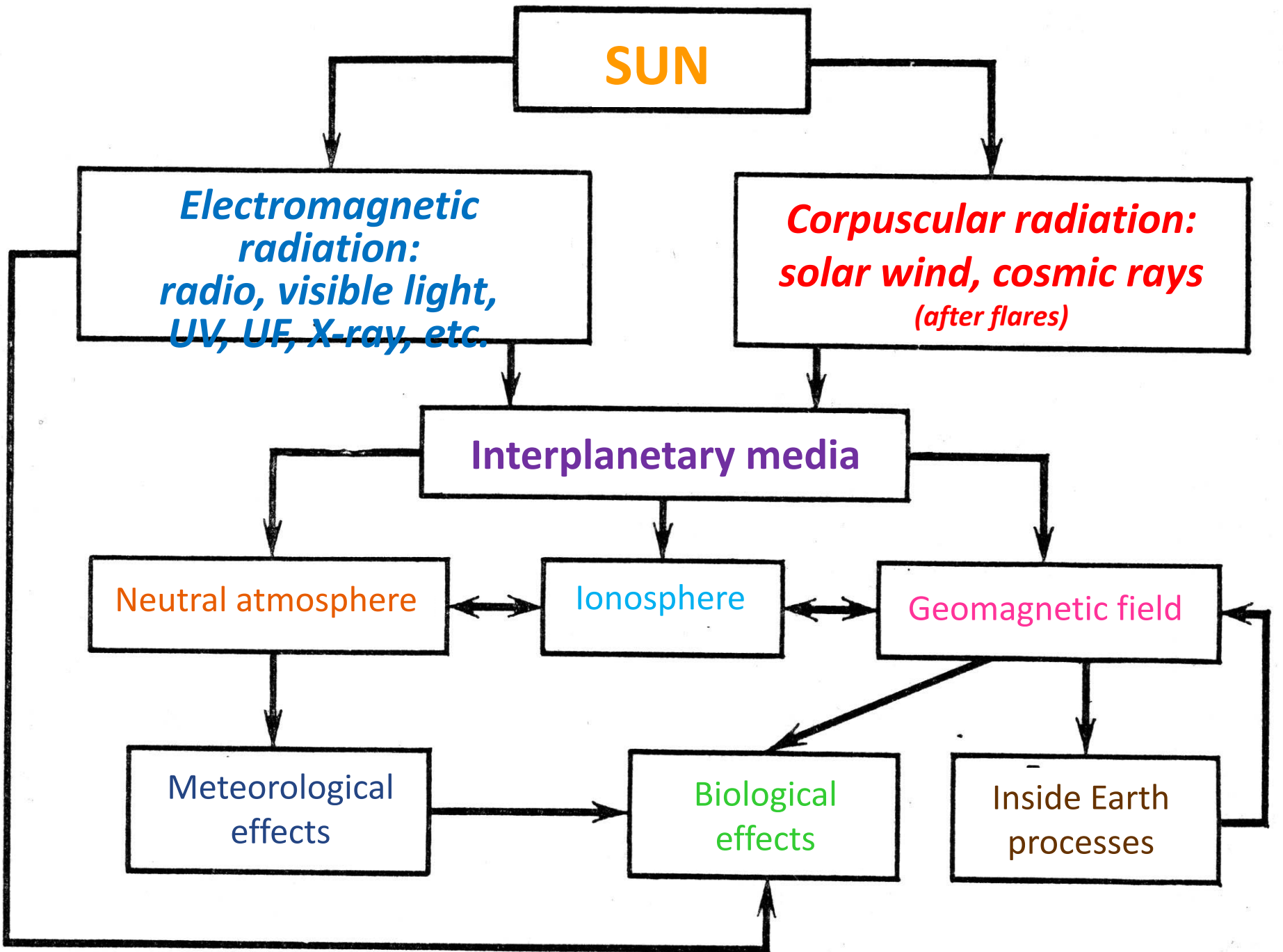




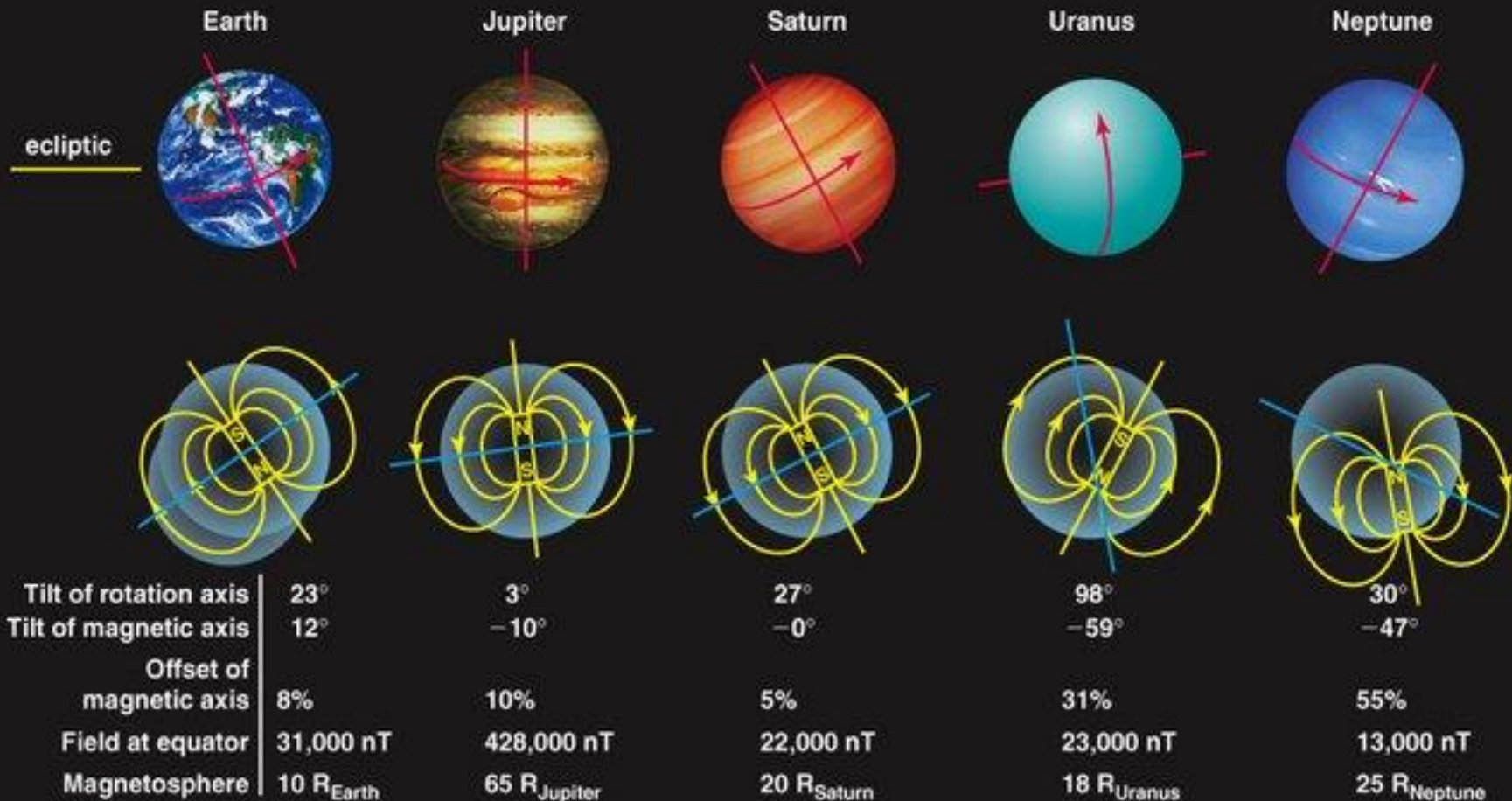
1998-Sep-20  
02:00:44

# Limb flares and CME





# Solar system celestial bodies magnetic fields



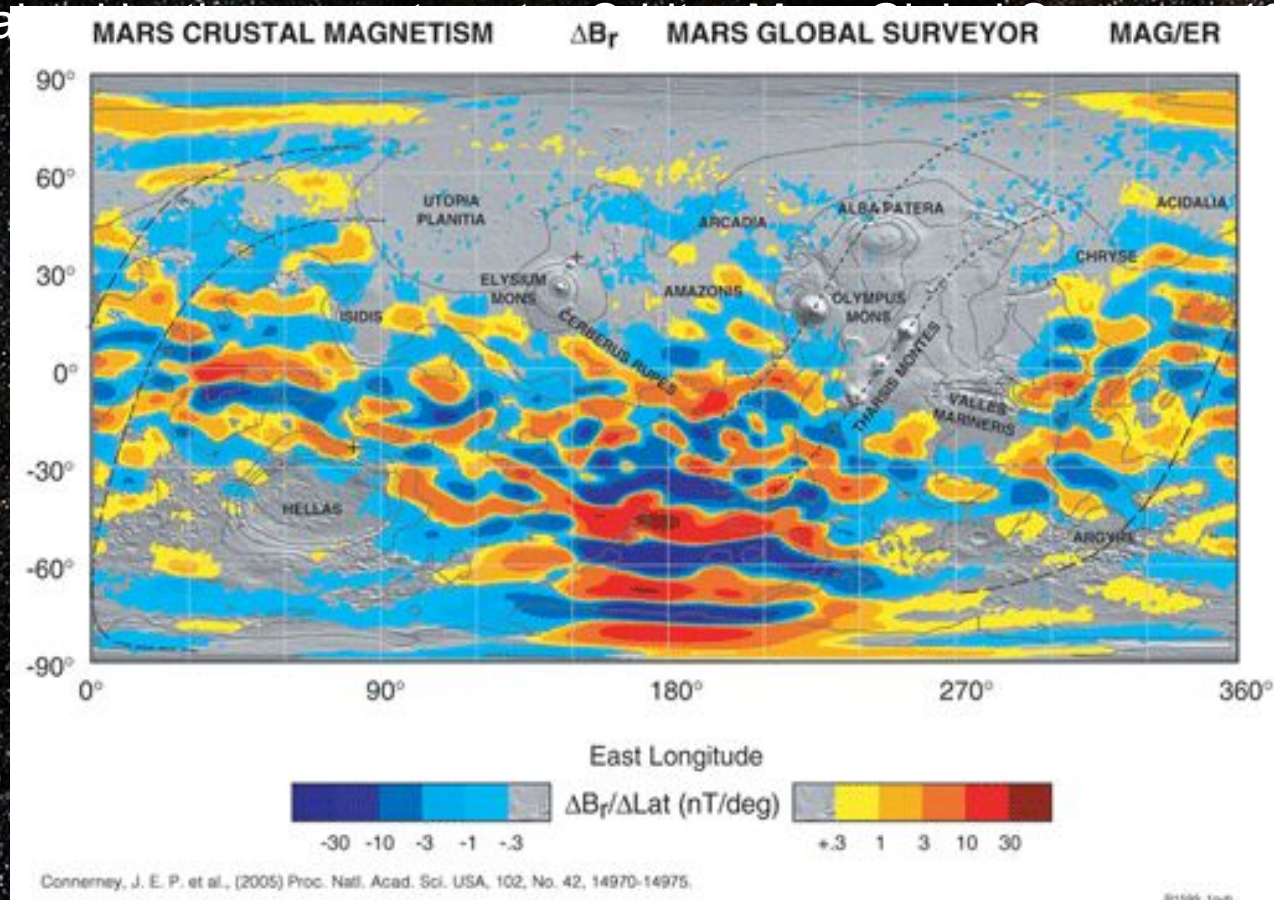
# Mars magnetic field

No global magnetic field (dipole) that could protect the planet from the solar wind.

However, there are localized areas with strong magnetic fields

(data obtained

1999-2006)



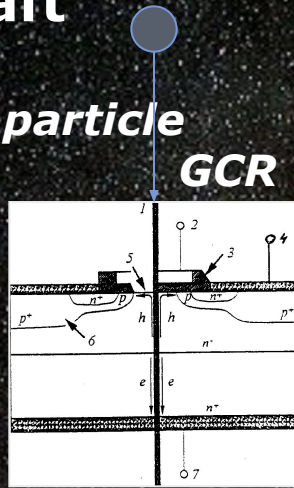
# Spacecraft effects of space radiation

- One of the main cause of the spacecraft systems failures is the exposure to cosmic radiation. The radiation conditions in space are determined by a combination of charged particles and photons flows (energy range  $\sim 10^3 - 10^{21}$  eV).
- Reversible and irreversible effects appear as a result of radiation influence on materials and equipment :
  - due to the total absorbed dose of cosmic radiation (in some cases, should be seen as effects related to the absorbed dose rate);
  - caused by hitting the hardware elements of single charged particles.
- Dose effects are manifested in a gradual degradation of materials.
- The effects caused by individual charged particles are dangerous first of all for the elements of modern microelectronics, and occur immediately after exposure.

# Spacecraft interaction with environment

## Space factors effects on spacecraft

*individual particle effects*

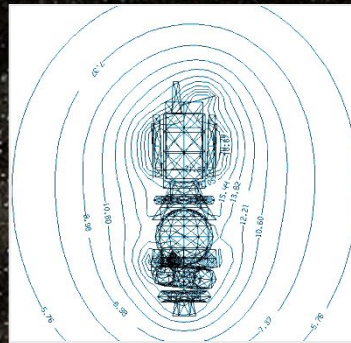


**SCR, RB radiation danger and damage**

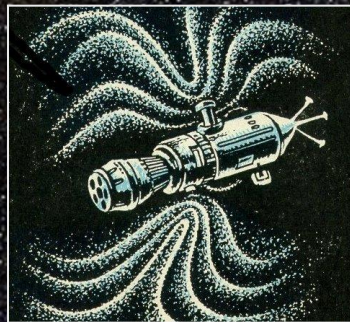


## Local effects

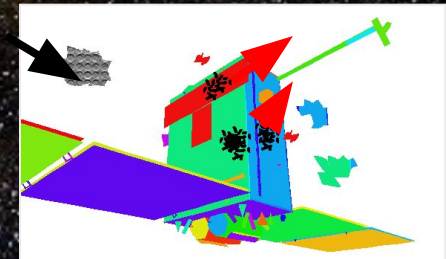
*Electrization*



*Spacecraft own external atmosphere*



## Effects of spacecraft on Space debris



*Effects of rocket engine on Earth upper atmosphere and ionosphere*





*What for*  
would man fly  
to Moon, Mars, etc.

? ? ?

**YANKEE GO HOME!**

**MARS  
FOR  
MARTIANS**



**EVERYBODY  
SPIRIT!**

Your mobile phone has more  
computing power than all of  
NASA in 1969.



NASA launched a  
man to the moon.  
We launch a bird  
into pigs.

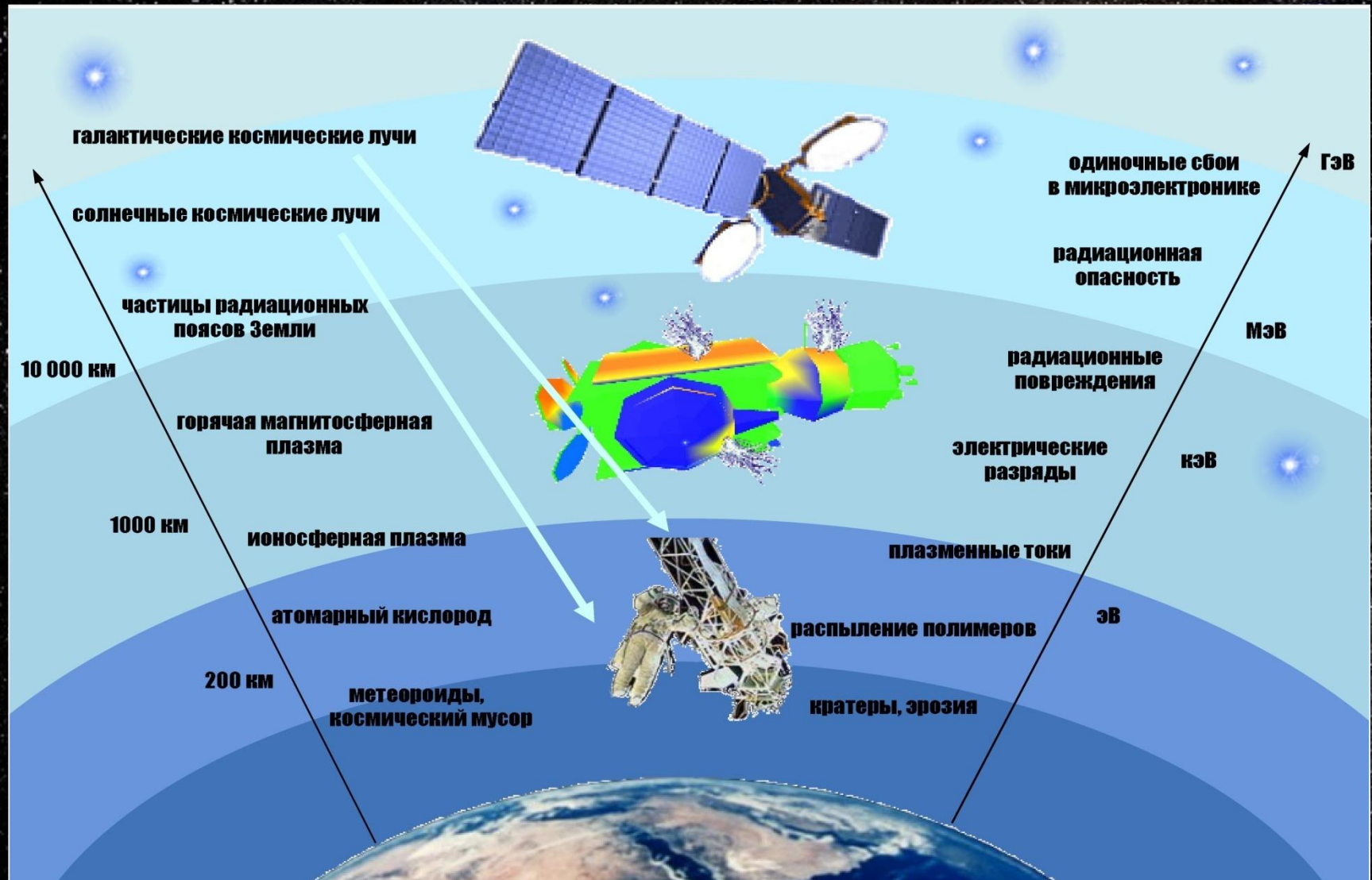


«For a successful technology, reality must take precedence over public relations, for nature cannot be fooled.»



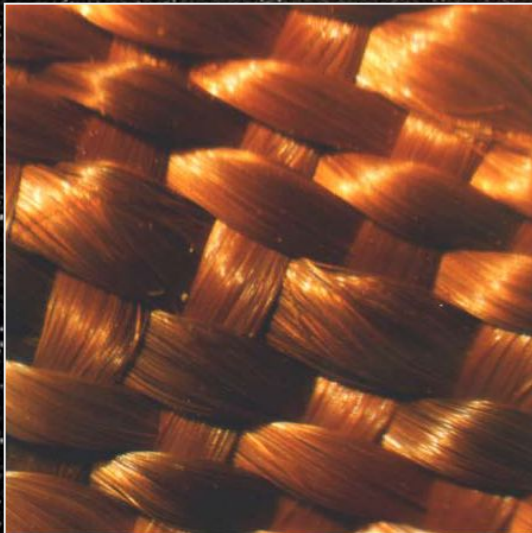
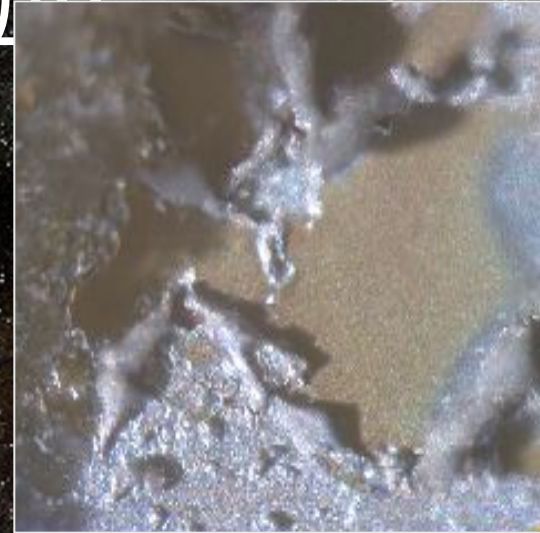
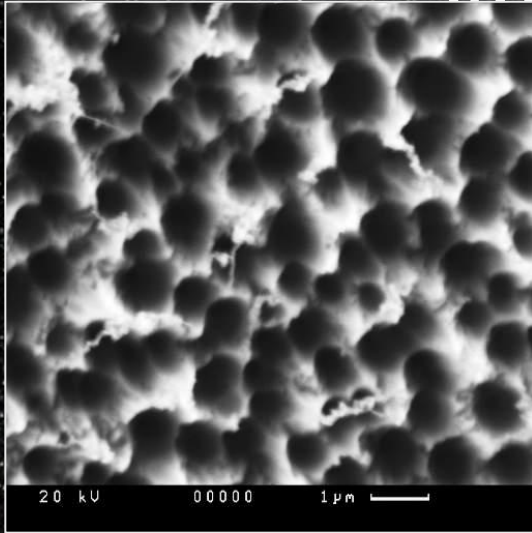
*Richard P. Feynman*

# Outer space factors

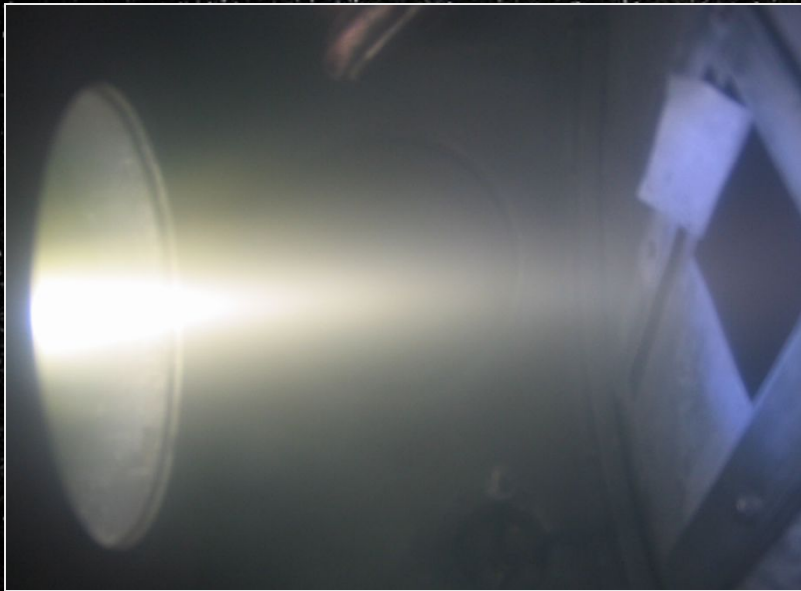




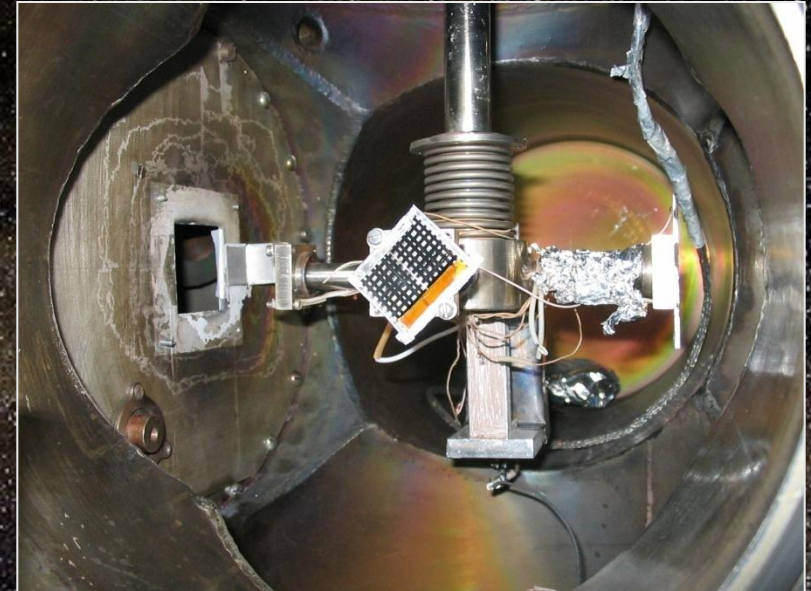
# Структура материалов до и после воздействия атомарного кислорода



# Плазменная струя и исследуемый образец в вакуумной камере



Струя плазмы, выходящая из ускорителя, фокусируется на поверхность исследуемого образца. Свечение струи зависит от состава и степени ионизации плазмы

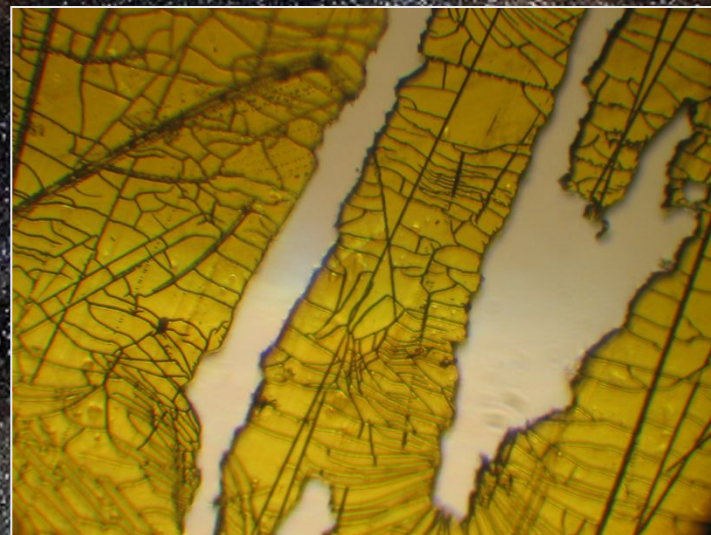
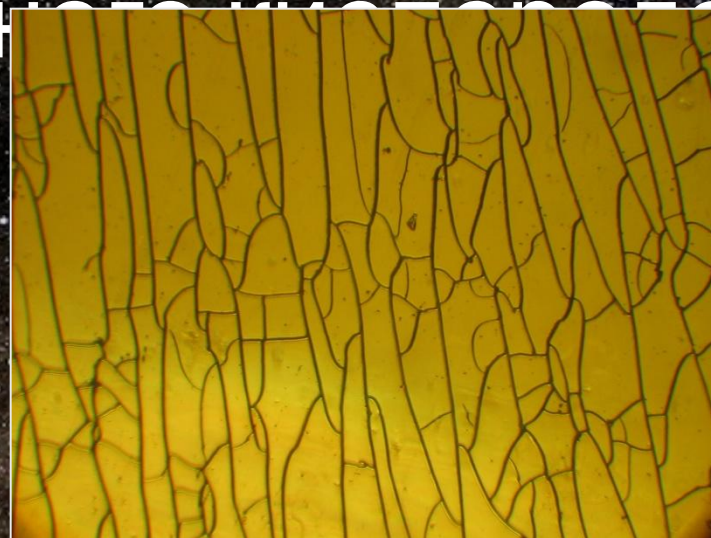


Исследуемый образец крепится на специальном держателе, обеспечивающем возможность его вращения в разных плоскостях и термостатирование

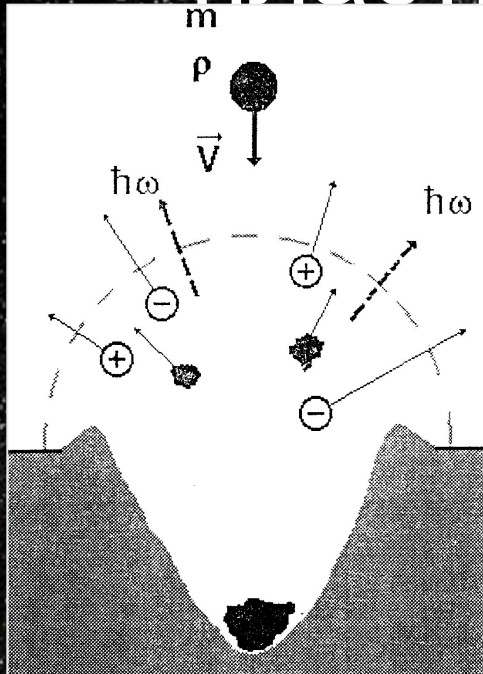


# Характер повреждений тонкопленочного покрытия под действием атомарного кислорода

The oxygen plasma processing causes the substrate film etching under defect of protection and microcracks formation in silica layer. 200 micron field of vision



# Образование кратеров в пластичных мишенях



$$\frac{H}{d} = k \rho_{\text{ч}}^{\alpha} v^{\beta}$$

$$k = 0,3 - 0,6;$$

$$\alpha = 1/3 - 1/2;$$

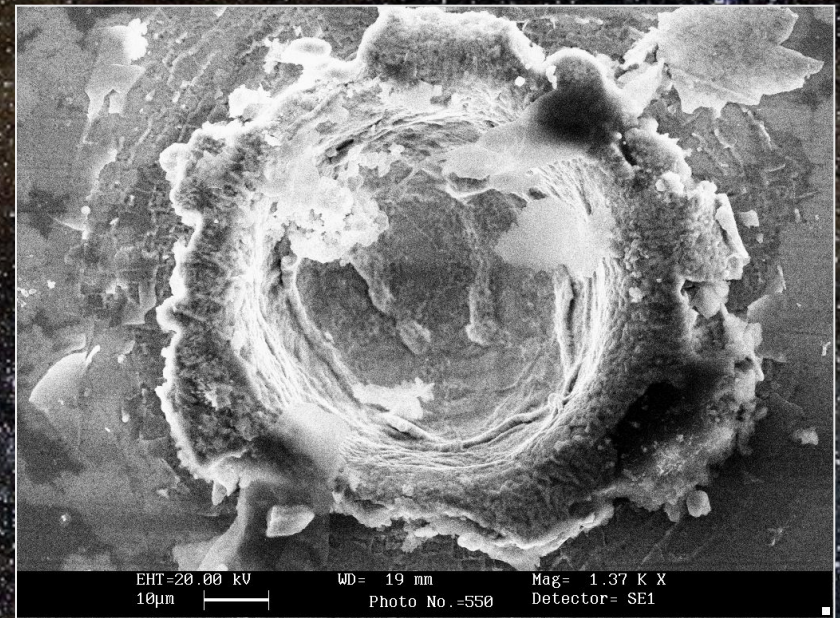
$$\beta \approx 2/3.$$

Формирование кратера, выброс плазмы  
и электромагнитное излучение из зоны  
удара

Глубина кратера –  $H$

Диаметр частицы –  $d$

Плотность материала частицы –  $\rho_{\text{ч}}$



Кратер в металлическом образце  
от удара космической частицы 82

# Кратеры в элементах солнечной батареи, возвращенной из космоса

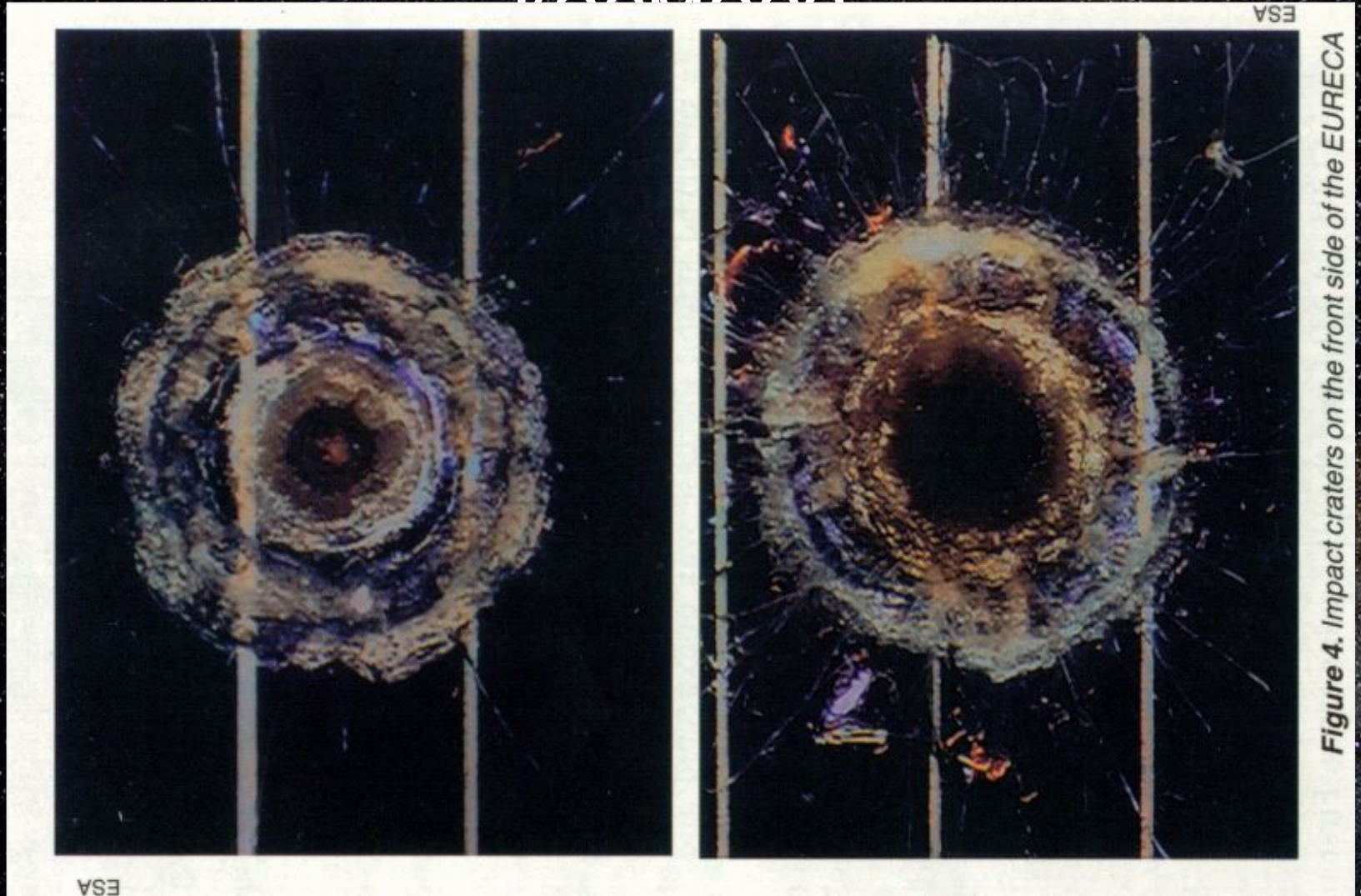
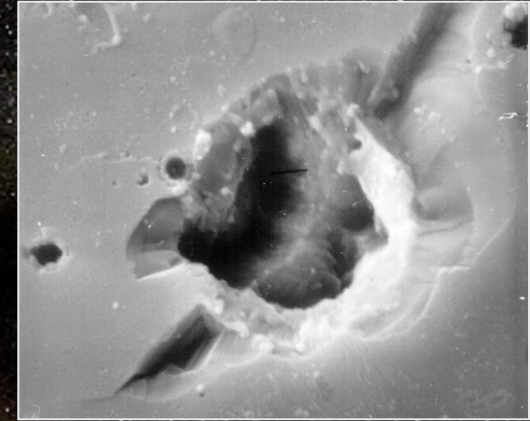
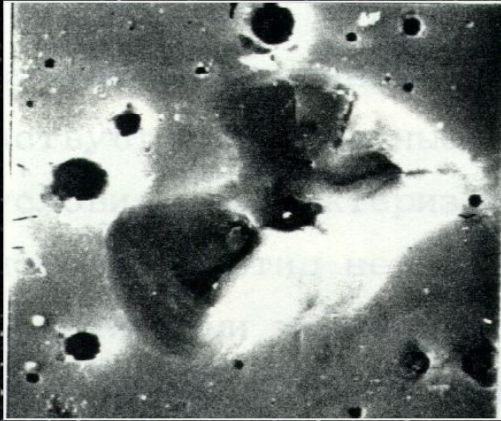


Figure 4. Impact craters on the front side of the EURECA

# Кратеры в хрупких материалах



Удары частиц Ti ( $d \sim 0,5-1,5$  мкм;  $v \sim 4-6$  км/с) по пластинам Ge



Кратер в стекле от удара частицы Al с  $v \sim 8$  км/с

$$D_{\text{пл}} = 0,1 d \rho^{2/3} \rho^{-1/2} v^{2/3}$$

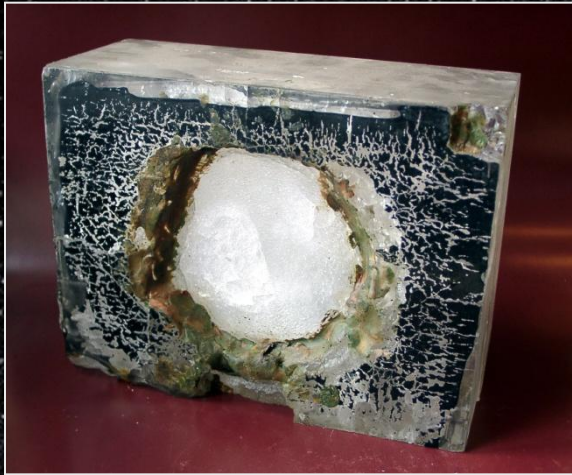
$$D_c = (2 - 5) D_p, \quad d - \text{диаметр частицы,}$$

Глубина кратера

$$H = 0,6 d \left( \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{м}}} \right)^{1/2} v^{2/3}$$



# Разрушение мишеней при ударах массивных частиц



Кратеры в толстой мишени из полиметилметакрилата

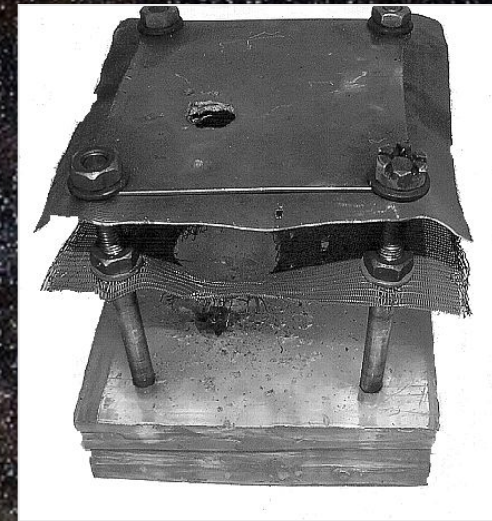
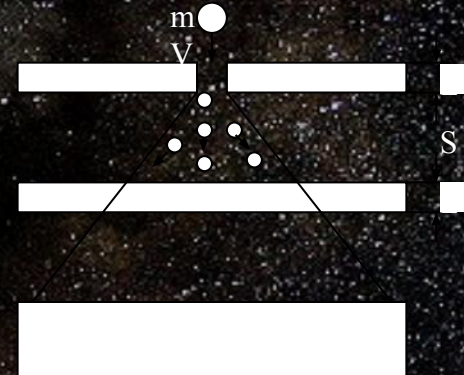
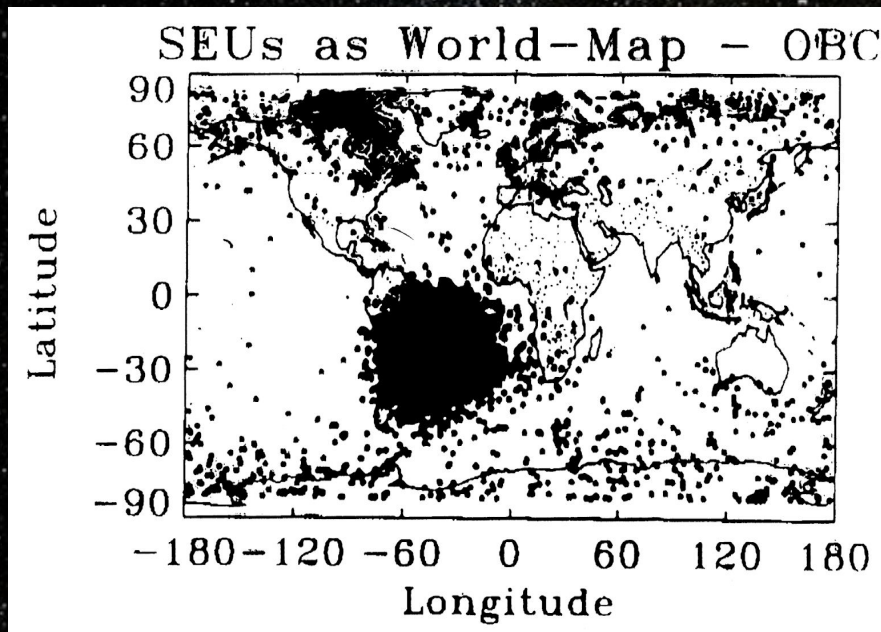
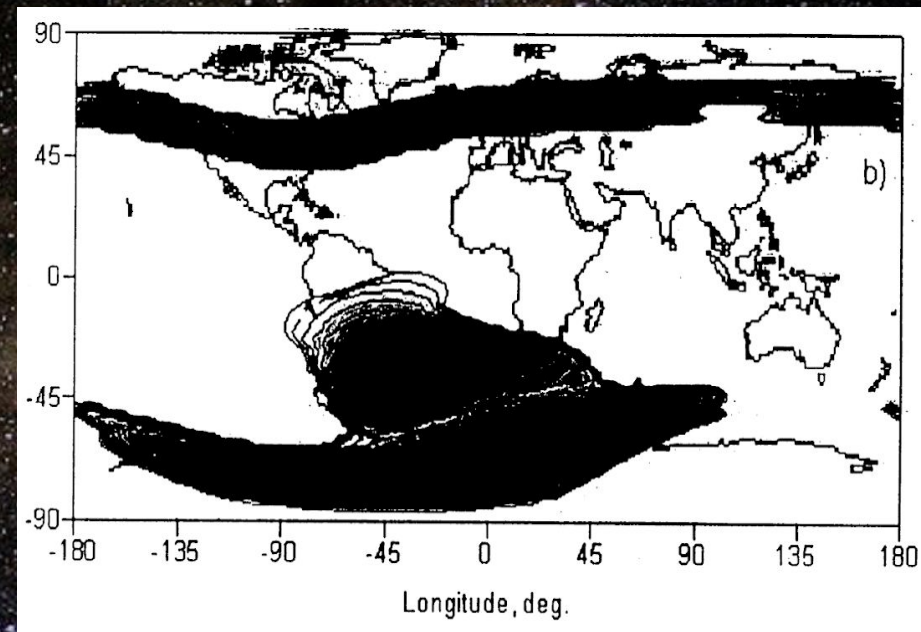


Схема и результат испытаний многослойного защитного экрана

# Локализация сбоев в работе электронного оборудования низкоорбитального КА

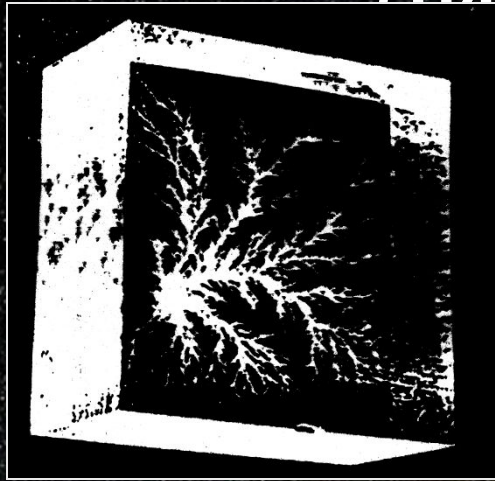


Локализация сбоев в области Южно-Атлантической магнитной аномалии и высокоширотных зонах проникновения частиц РПЗ

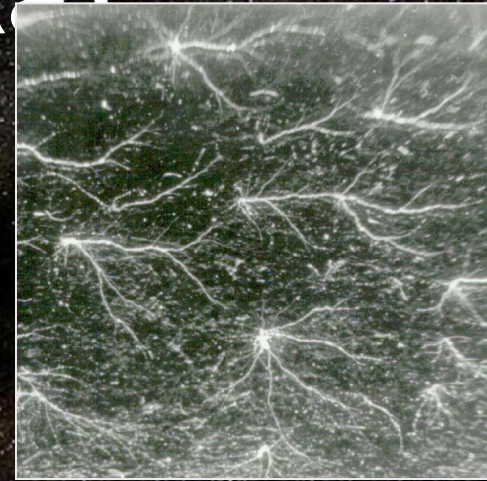


Пространственное распределение потока частиц РПЗ на высоте орбиты КА (700 км)

# Объемный заряд в диэлектриках



а



б

Фигуры разрядных каналов в стеклянных образцах, облученных электронами высокой энергии:  
а – при самопроизвольном возникновении разряда; б – при инициировании локальных разрядов ударами высокоскоростных твердых частиц



Структура разрядного канала в стекле, облученном протонами с энергией 100 МэВ: канал выходит на нижнюю облучавшуюся плоскость образца; в верхней части рисунка видна воронкообразная область, через которую заряд при пробое стекает в канал



## Излучения:

энергия в эргах

гамма  $\lambda < 0.01$  нм

$10^{25}$

$\lambda < 0.01 - 10$  нм

$10^{24} - 10^{26}$

$\lambda < 10 - 300$  нм

$10^{29} - 10^{31}$

видимое

$10^{26} - 10^{31}$

радио

$10^{22} - 10^{24}$

## Быстрые частицы:

электроны ( $> 20$  кэВ)

$10^{27} - 10^{31}$

протоны ( $> 20$  МэВ)

$10^{31}$

движения и выбросы СМЕ

$10^{29} - 10^{32}$