

Сонячна активність

Сонячні плями



Криводубський Валерій

Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна, 3, Київ -53, 04053
e-mail: krivod1@observ.univ.kiev.ua

Загальна характеристика Сонця ☉

Зірка (Сонце) – плазмова куля, рівноважна конфігурація якої обумовлюється взаємодією (балансом) гравітації, спрямованої всередину, і газовим тиском, спрямованим зовні.

$$dP/dr = - (MG/r^2)\rho = - \rho g, \quad dM/dr = 4\pi r^2 \rho, \quad dL/dr = 4\pi r^2 \rho \epsilon, \quad P = nkT$$

☉ – досить звичайна зірка спектрального класу G2V, з абсолютною зоряною величиною 4,8. Максимум енергії випромінювання в планківському спектрі згідно закону Віна $\lambda_m T = 0,288$ приходить на довжину хвилі $\lambda_m = 4978 \text{ \AA}$, тобто максимум енергії Сонце випромінює в **зеленій** ділянці спектру.

Основні параметри Сонця ☉

$$T = 4,5 \cdot 10^9 \text{ років}$$

$$M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33} \text{ г}$$

$$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^{10} \text{ см}$$

$$\rho_{\odot} = 1,4 \text{ г/см}^3, \quad \rho_c = 160 \text{ г/см}^3$$

$$P_{\odot} = 0,14 \text{ атм}, \quad P_c = 250 \cdot 10^9 \text{ атм}$$

$$g_{\odot} = 2,74 \cdot 10^4 \text{ см/с}$$

(прискорення сили тяжіння на поверхні)

$$T^{\text{об/е}} = 26 \text{ днів}$$

$$T_e = 5785 \text{ К}, \quad T_c = 15 \cdot 10^6 \text{ К},$$

$$1 \text{ секунда дуги (1'')} = 726 \text{ км}$$

Хімічний склад:

$$X + Y + Z = 1$$

$$X = 0,784 \text{ (за масою)}$$

$$Y = 0,198$$

$$Z = 0,018 \text{ (C,N,O,Ne, Mg,Si,S,Ar,Ca,Fe,Ni)}$$

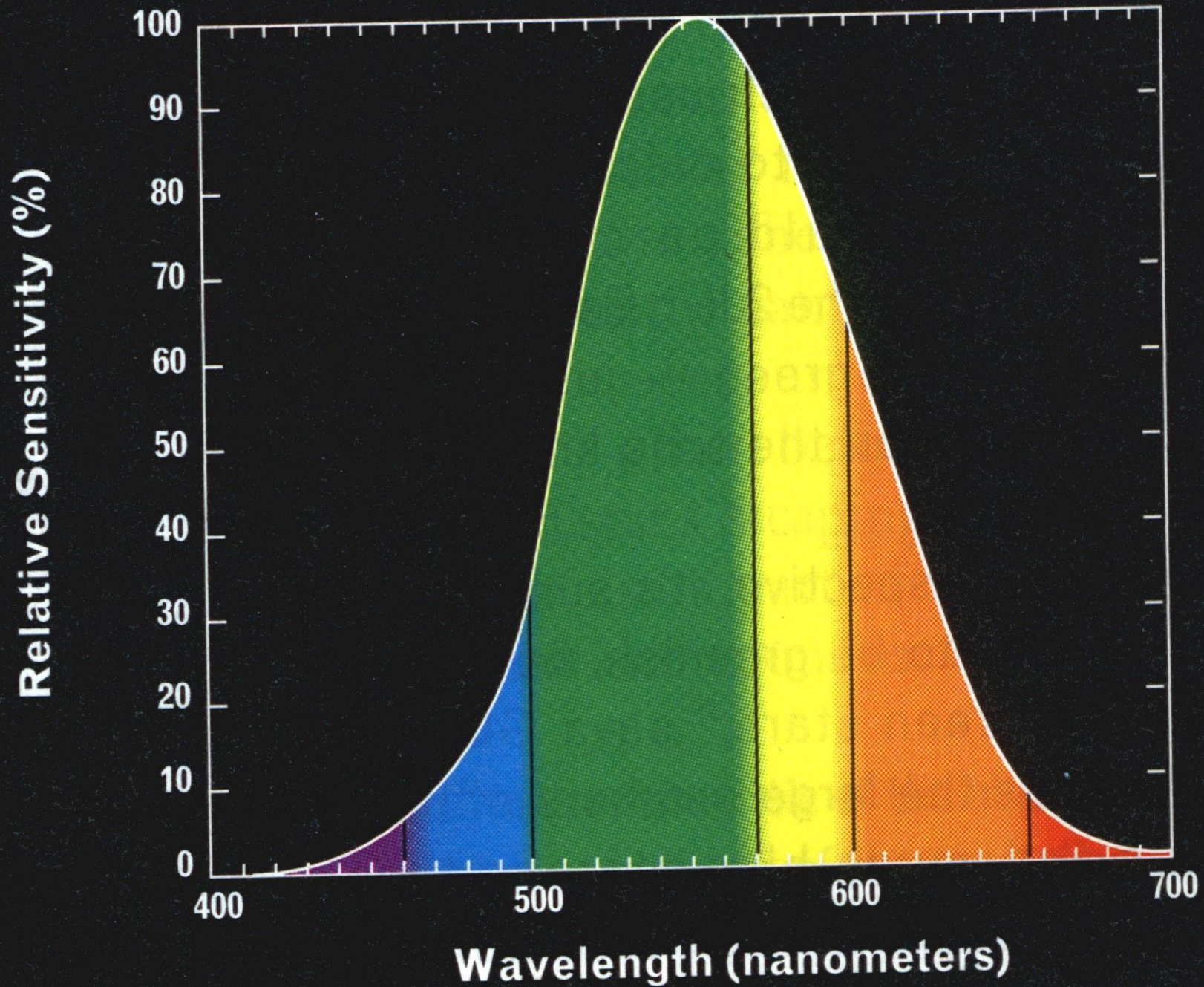
$$L = 3,86 \cdot 10^{33} \text{ ерг/с}$$

Традиційно всі сонячні явища ділять на 2 класи: **спокійні та активні.**

Спокійне Сонце розглядається як статична сферично-симетрична плазмова куля, властивості якої в першому наближенні залежать від радіальної відстані від центра ☉, а МП можна знехтувати.

Активне Сонце включає в себе такі перехідні явища як сонячні плями, протуберанці і спалахи, які виділяються на фоні спокійної атмосфери. Більшість цих явищ зобов'язані своїм існуванням МП.

Luminus Efficiency Peak



протуберанец

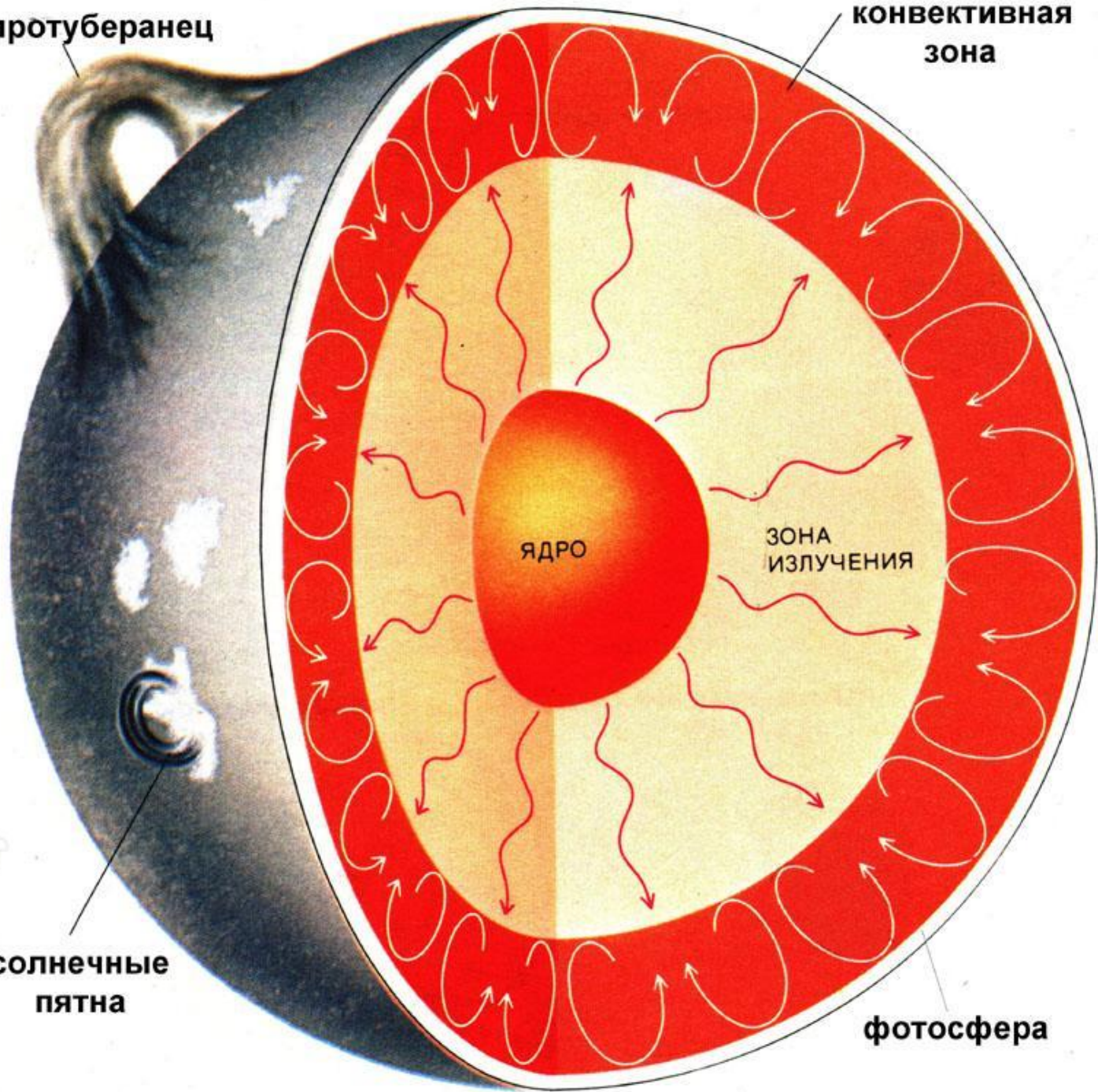
конвективная зона

солнечные пятна

ядро

зона излучения

фотосфера

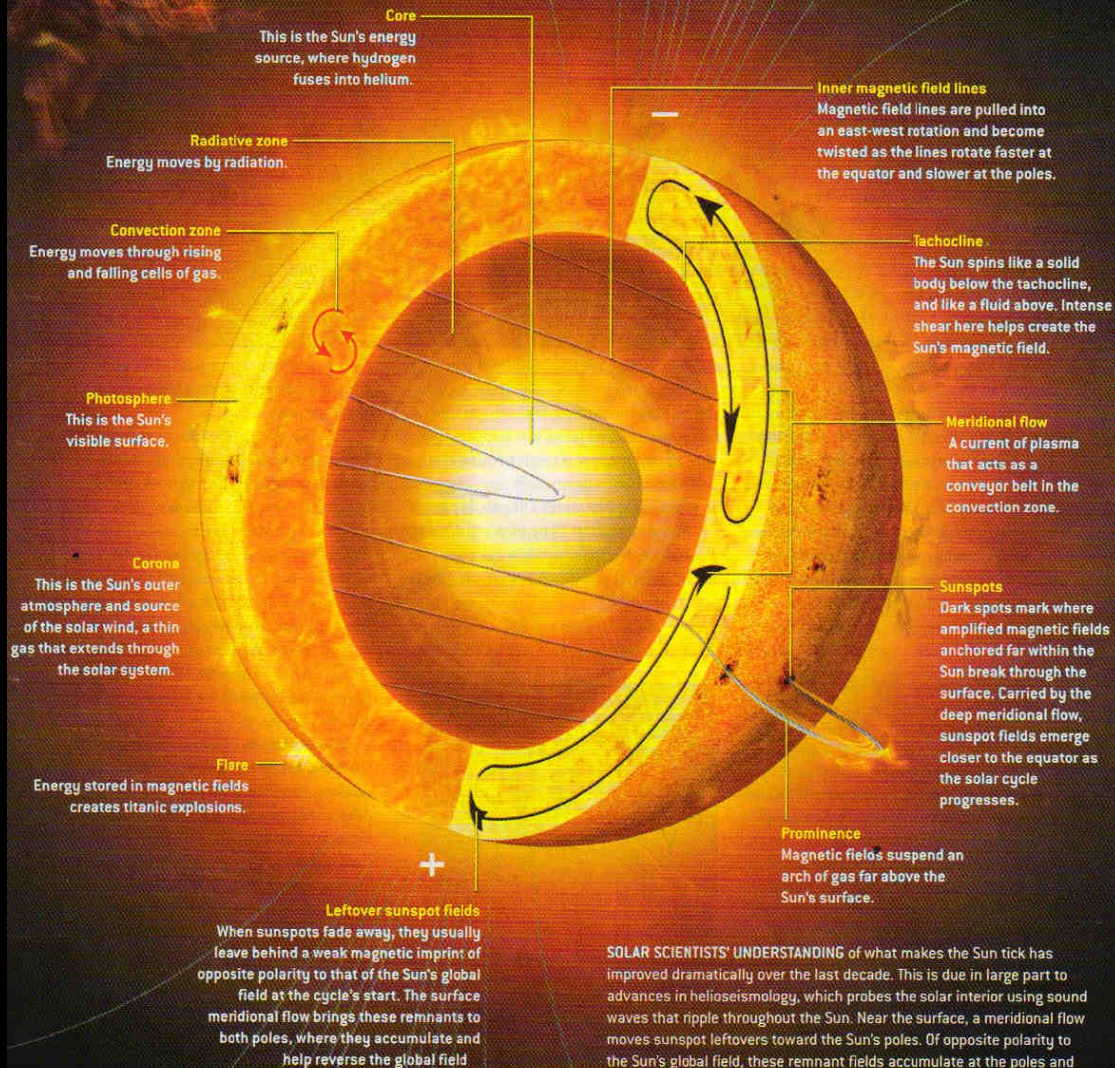


Peeling the Sun's layers

Coronal mass ejection
Billion-ton-clouds of charged particles leave the Sun moving at millions of miles per hour.

Global magnetic field lines

The Sun's global magnetic field is about 10 times more powerful than Earth's. Field lines exit the Sun at the positive pole and enter at the negative pole.



SOLAR SCIENTISTS' UNDERSTANDING of what makes the Sun tick has improved dramatically over the last decade. This is due in large part to advances in helioseismology, which probes the solar interior using sound waves that ripple throughout the Sun. Near the surface, a meridional flow moves sunspot leftovers toward the Sun's poles. Of opposite polarity to the Sun's global field, these remnant fields accumulate at the poles and force our star's magnetic flip. The same flow pulls the fields deep into the Sun — to the tachocline at the base of the convection zone — where they will be amplified to provide sunspots for the following solar cycle.

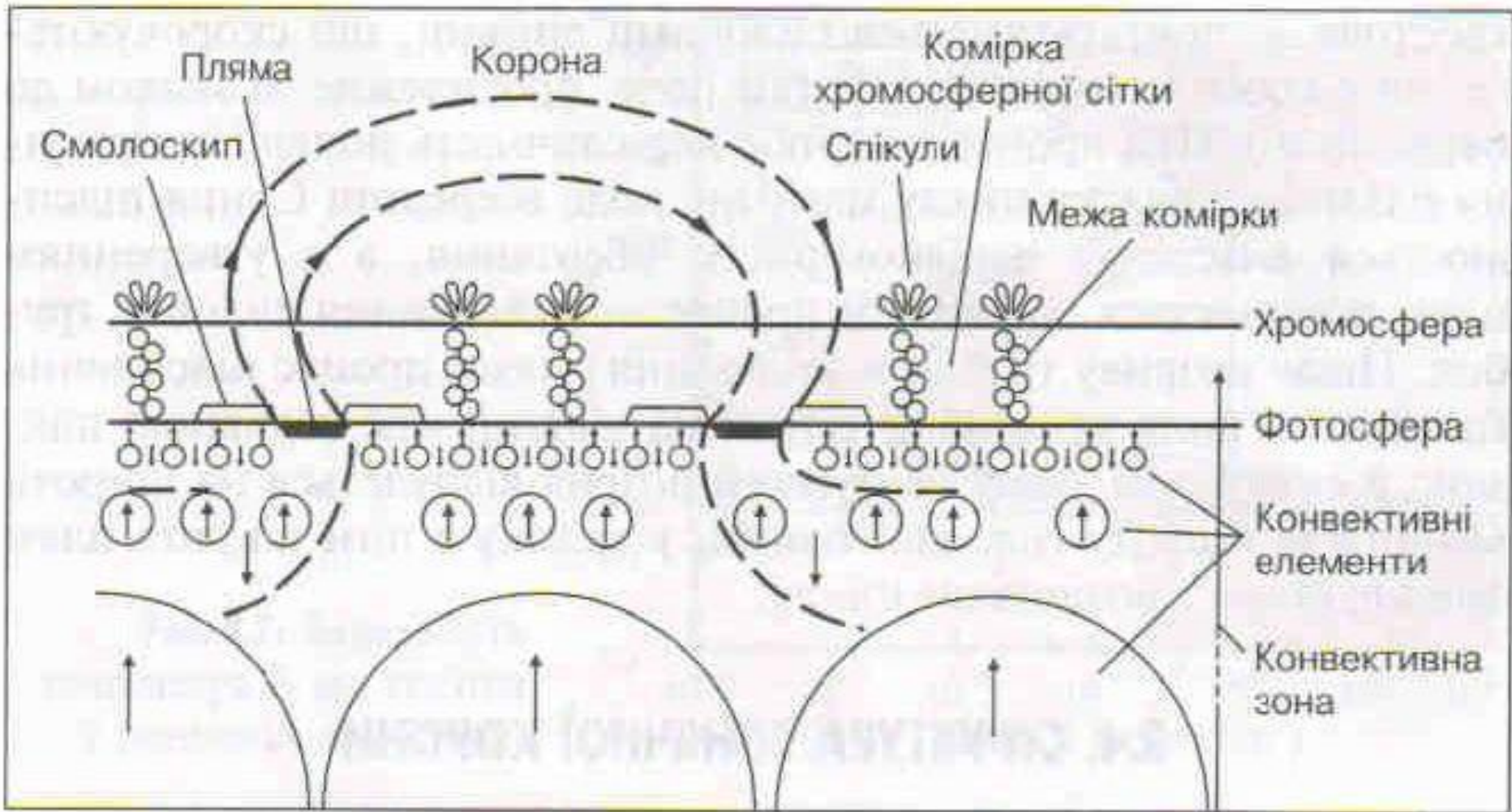
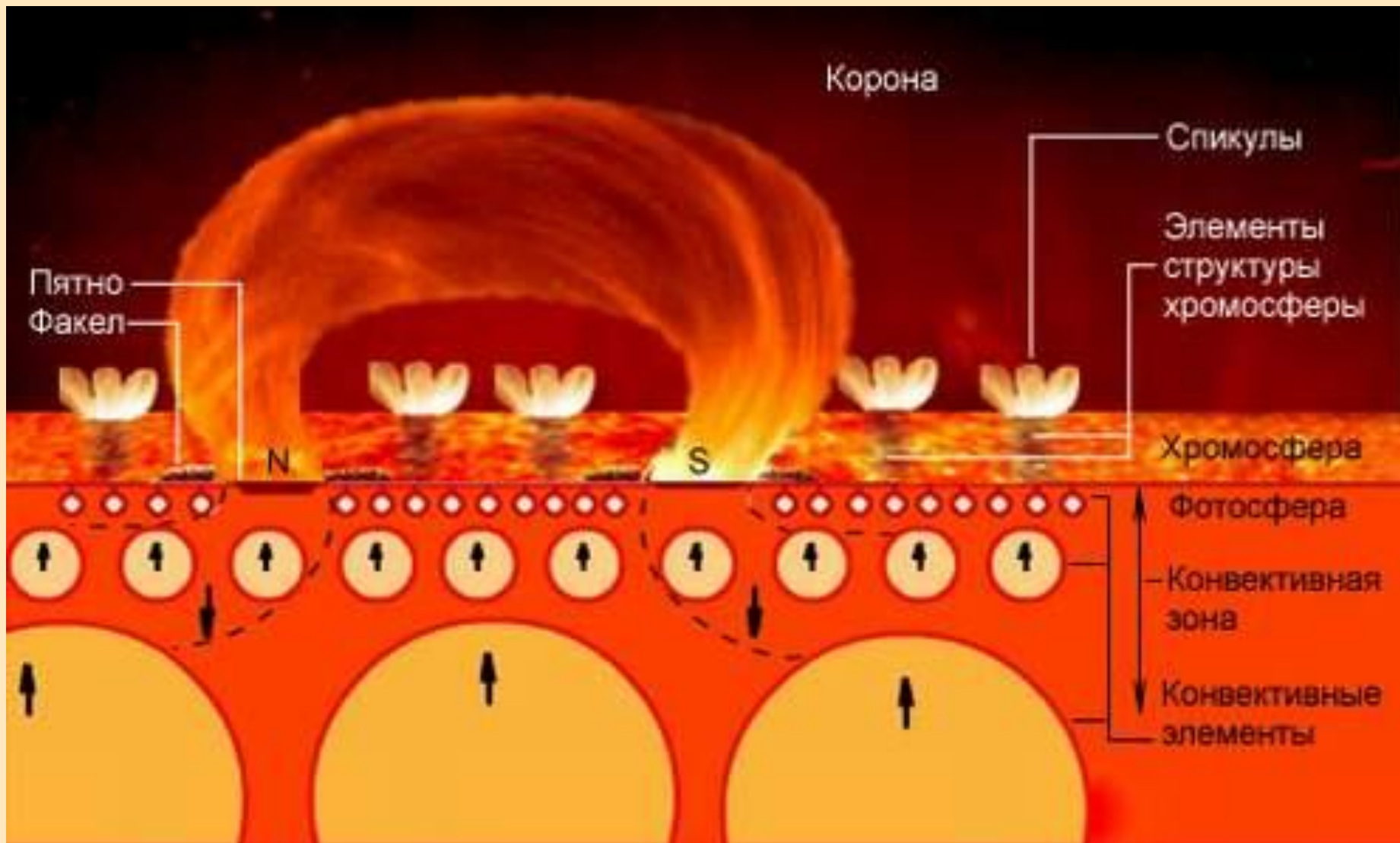


Рис. 2.6. Схема конвективних шарів у сонячній атмосфері



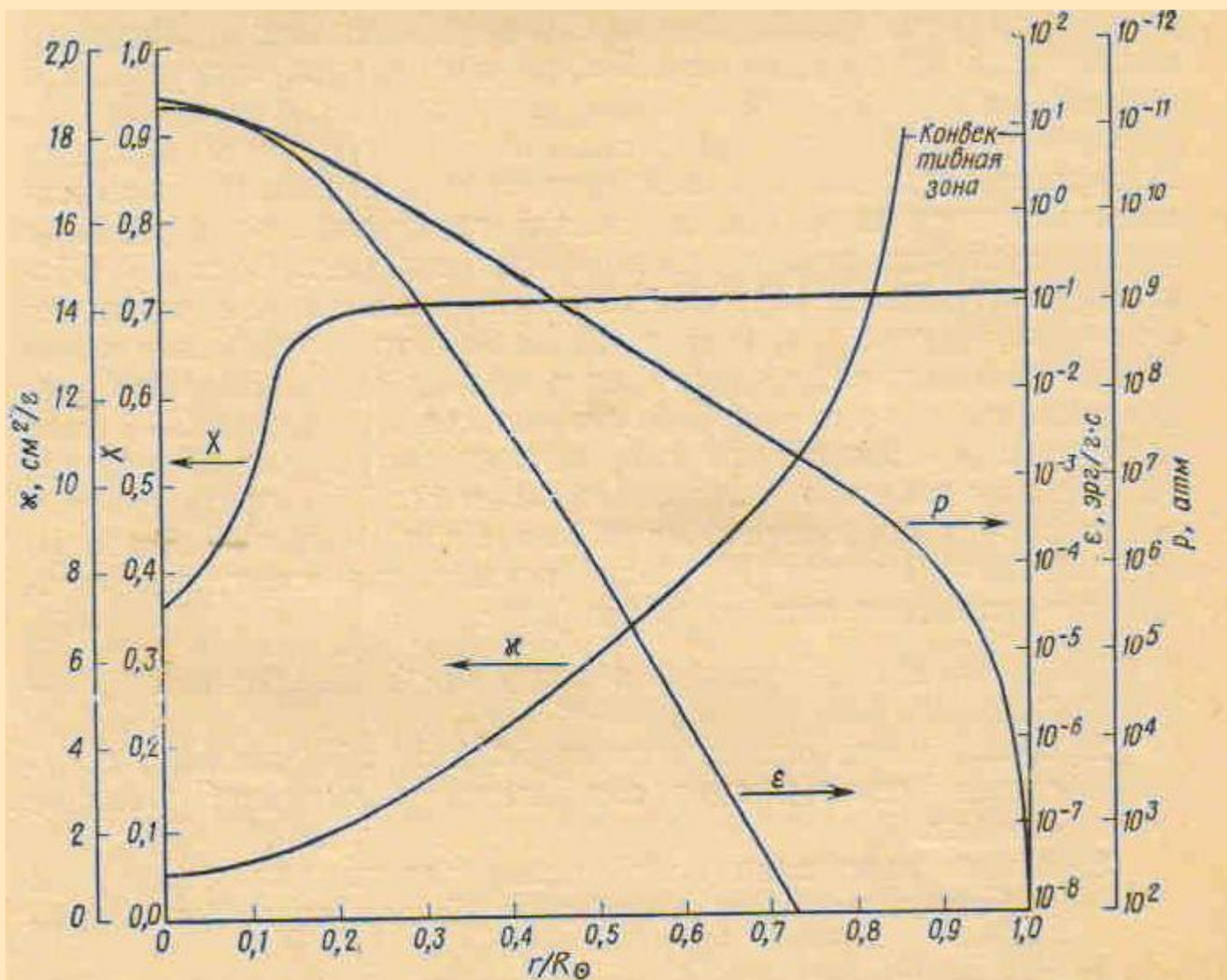


РИС. 3.6. Свойства солнечного вещества, определяемые локальными значениями основных параметров, и доля водорода по массе.

Значения X и ρ заимствованы у Сирса [23], значения κ — у Веймана [26], значения ϵ вычислены по формулам (3.19), (3.21), (3.22).

$$1/\rho \bar{\alpha} = l_0$$

$$\frac{d\rho}{dr} = -\bar{\alpha} \rho$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\left(\frac{r}{H_0}\right)}$$

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{\mu g}{r^2} \rho \quad \rho = \frac{k}{\mu \text{тн}} \rho T$$

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{1}{H_0} \rho \quad H_0 = -\rho / \frac{d\rho}{dr} = \rho \frac{r^2}{\mu g \rho} = \frac{\rho}{\rho g} = \frac{k}{\mu \text{тн}} \frac{T}{\rho g} = \frac{k}{\mu \text{тн} g} T$$

$$H_0 = \frac{\rho}{\rho g} = \frac{k}{\mu \text{тн} g} T$$

$$\frac{1}{\rho \bar{\alpha}} \ll H_0 - \text{поглинання}$$

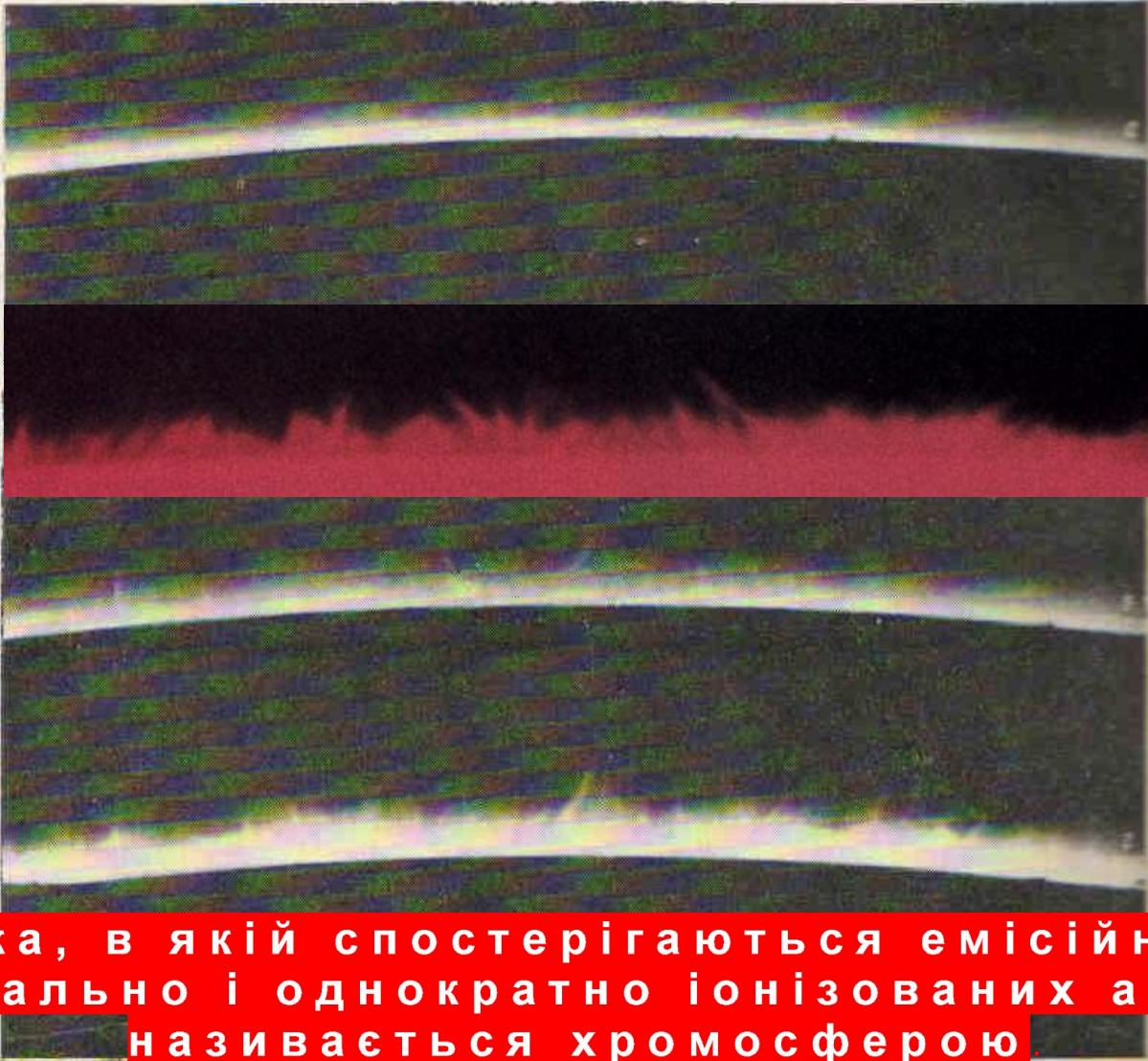
$$\frac{1}{\rho \bar{\alpha}} \gg H_0 - \text{незберешковне прожовання атмосфери } H_0.$$

$$\text{Сон } \frac{1}{\rho \bar{\alpha}} \ll H_0 \text{ фотосфера}$$

Шар, в якому $1/\rho k \cong H_0$ – якраз та область, із якої виходить в зовнішній простір більша частина випромінювання \odot .

Цей шар називається фотосферою.

Ті шари нижньої атмосфери Сонця, де утворюється неперервний спектр, називають фотосферою.



Ділянка, в якій спостерігаються емісійні лінії нейтрально і однократно іонізованих атомів, називається хромосферою.

Фото 10. Край Сонця, сфотографований через фільтр в лінії H_{α} (полоса пропускання $3,4 \text{ \AA}$) (по Данну).
 а — $3,7 \text{ \AA}$ от центра лінії H_{α} ; б — в лінії H_{α} (інтенсивність излучения на снимках а и б составляет 0,1 интенсивности на снимках в и г), в — 3 \AA от центра лінії H_{α} , г — в лінії H_{α} .
 Все снимки получены одновременно.

Грануляція на поверхні Сонця
має структуру комірок Бенара

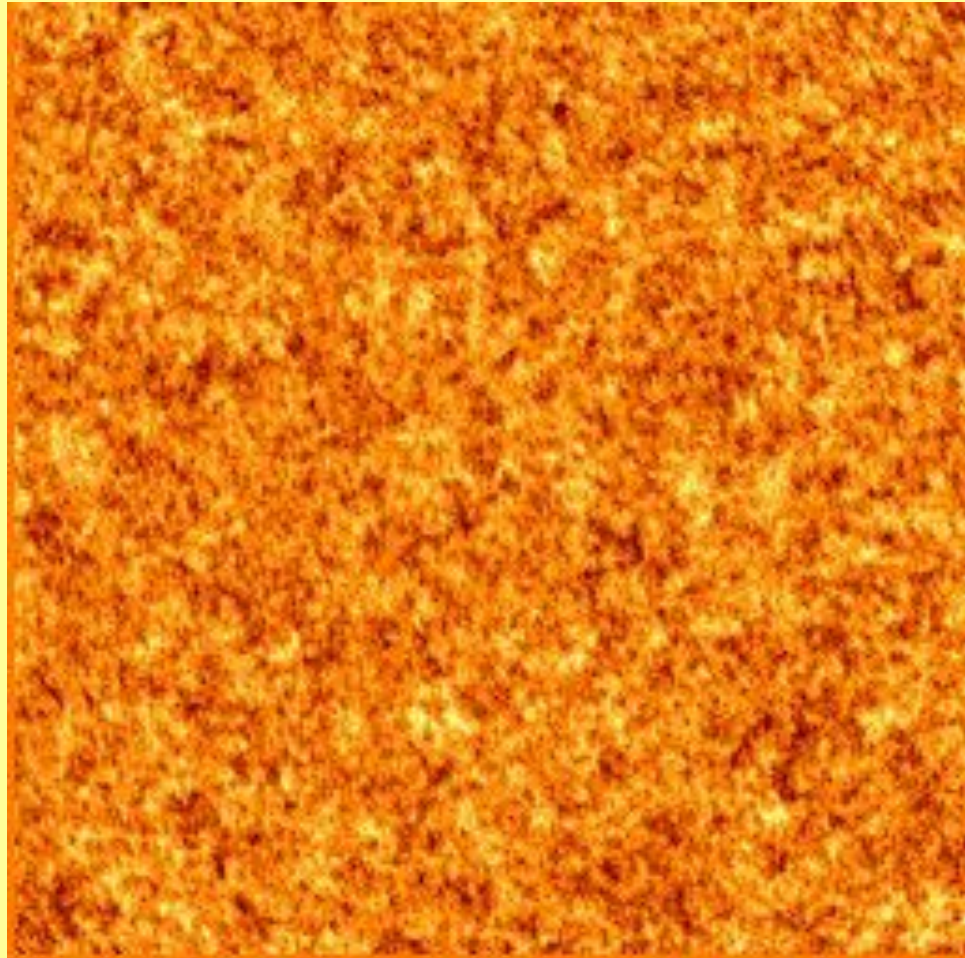
a



**Грануляція на поверхні Сонця
має структуру комірок Бенара
(гексагональна структура)**

Рухи плазми на поверхні Сонця з високою простровою роздільністю

Хвилі на Сонці
збуджуються турбулентною
конвекцією (в темних лініях
грануляціїна глибині біля
100 км) і мають
стохастичний характер



Яскраві деталі відповідають рухам
плазми всередину Сонця,
темні – показують рухи зовні

Ячейка супергрануляции
Грануляция

Спикулы
Вертикальные колебания

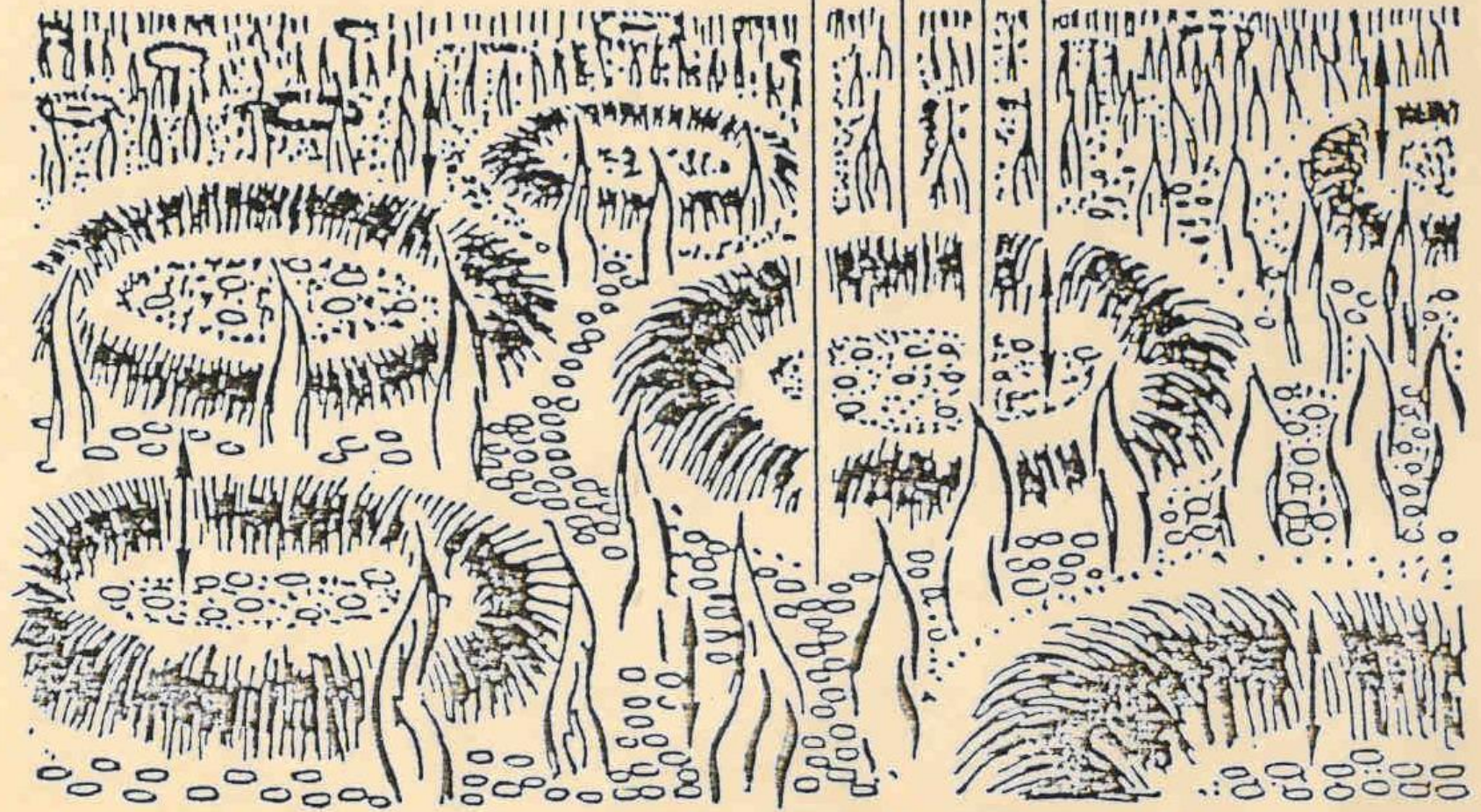


РИС. 2.13. Структура солнечной атмосферы.

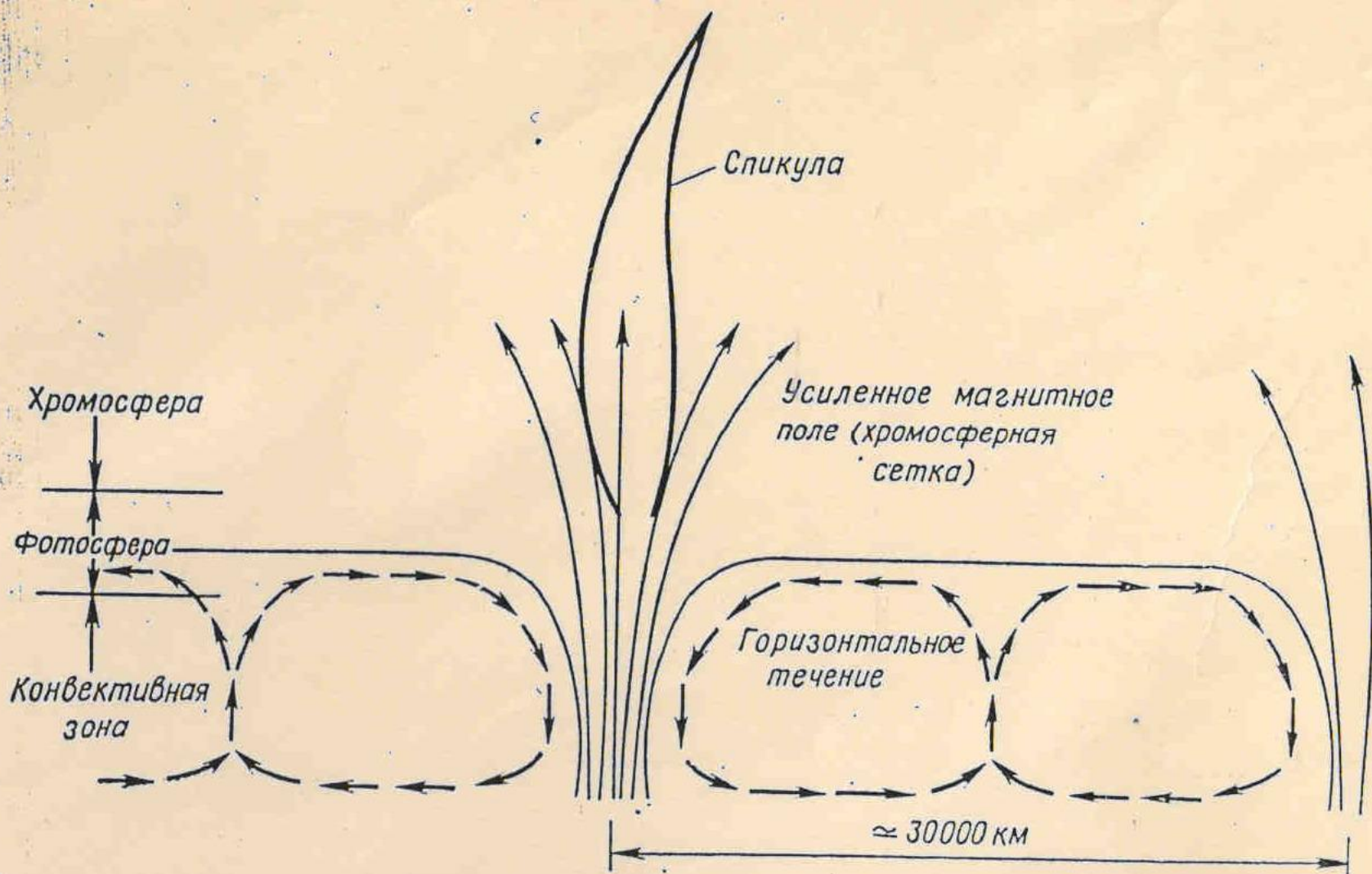
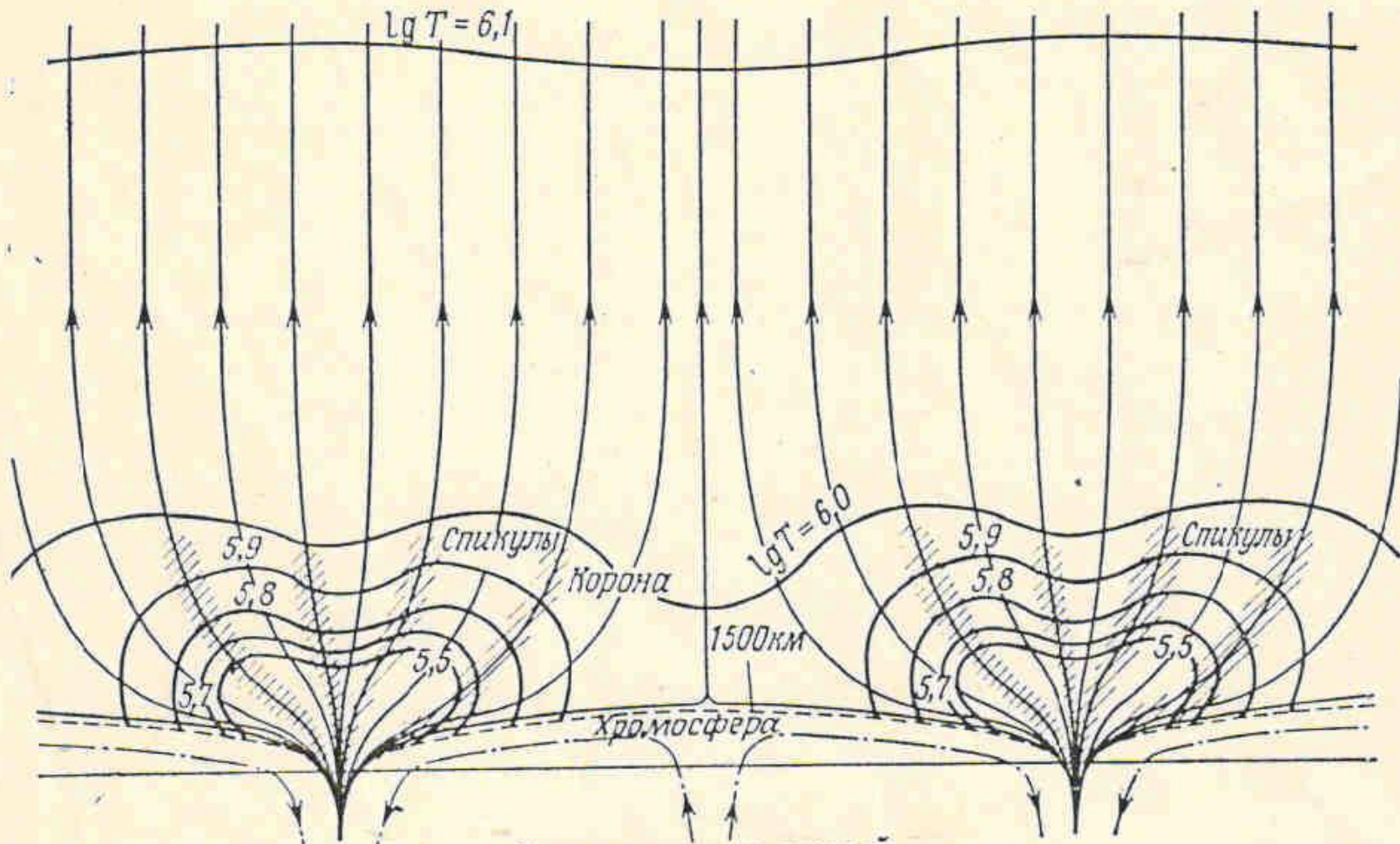


РИС. 2.12. Супергрануляция.

Поток ионизованного газа от центра к краям в ячейках супергрануляции переносит магнитные поля к границам ячеек, и в результате образуется сетка усиленных полей. На этой сетке возникают спикулы.

30000 км

$\lg T = 6,1$



$\lg T = 6,0$

Спиккулы

Корона

1500 км

Хромосфера

Спиккулы

Супергрануляционный
конвективный поток

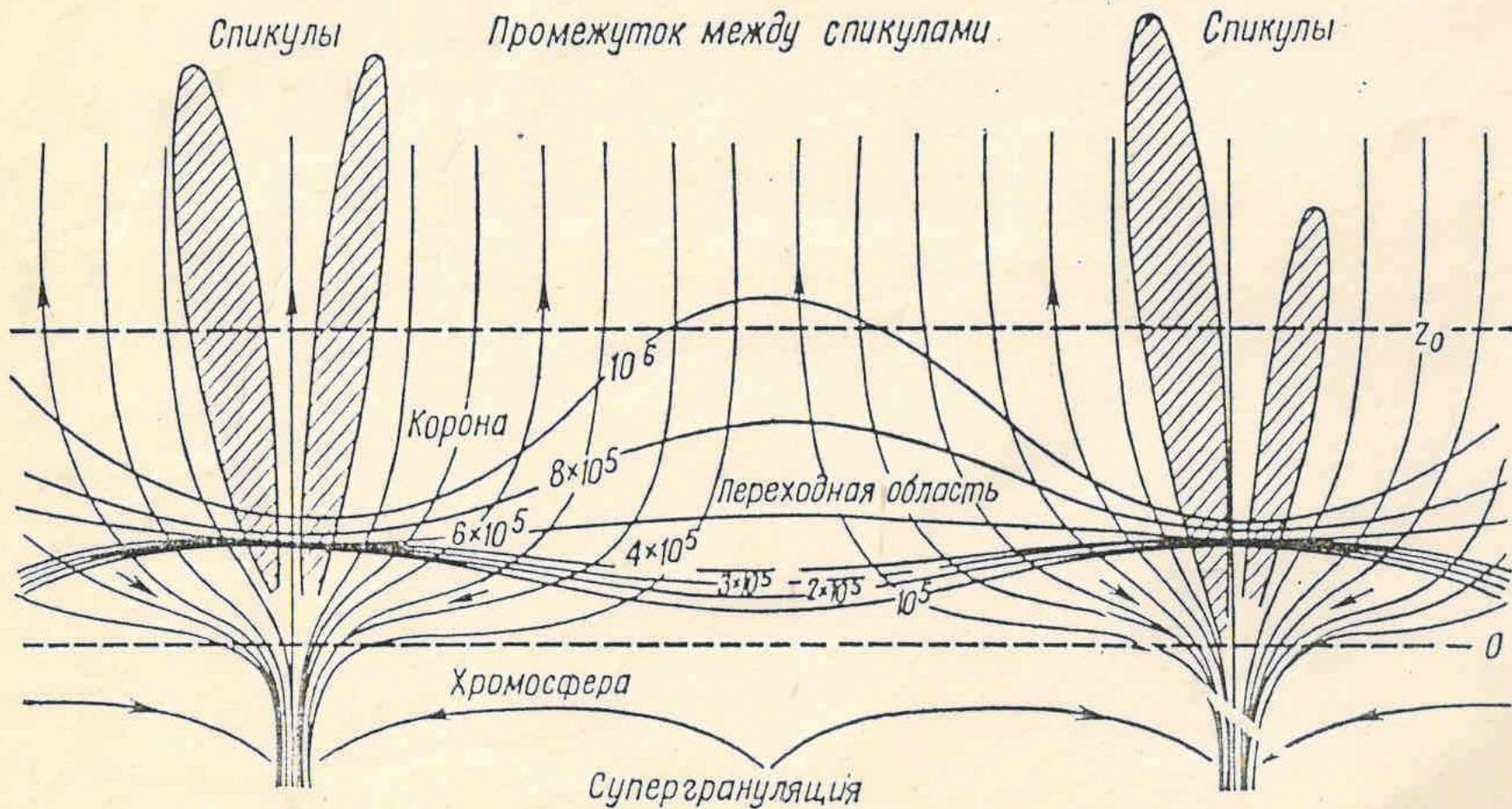
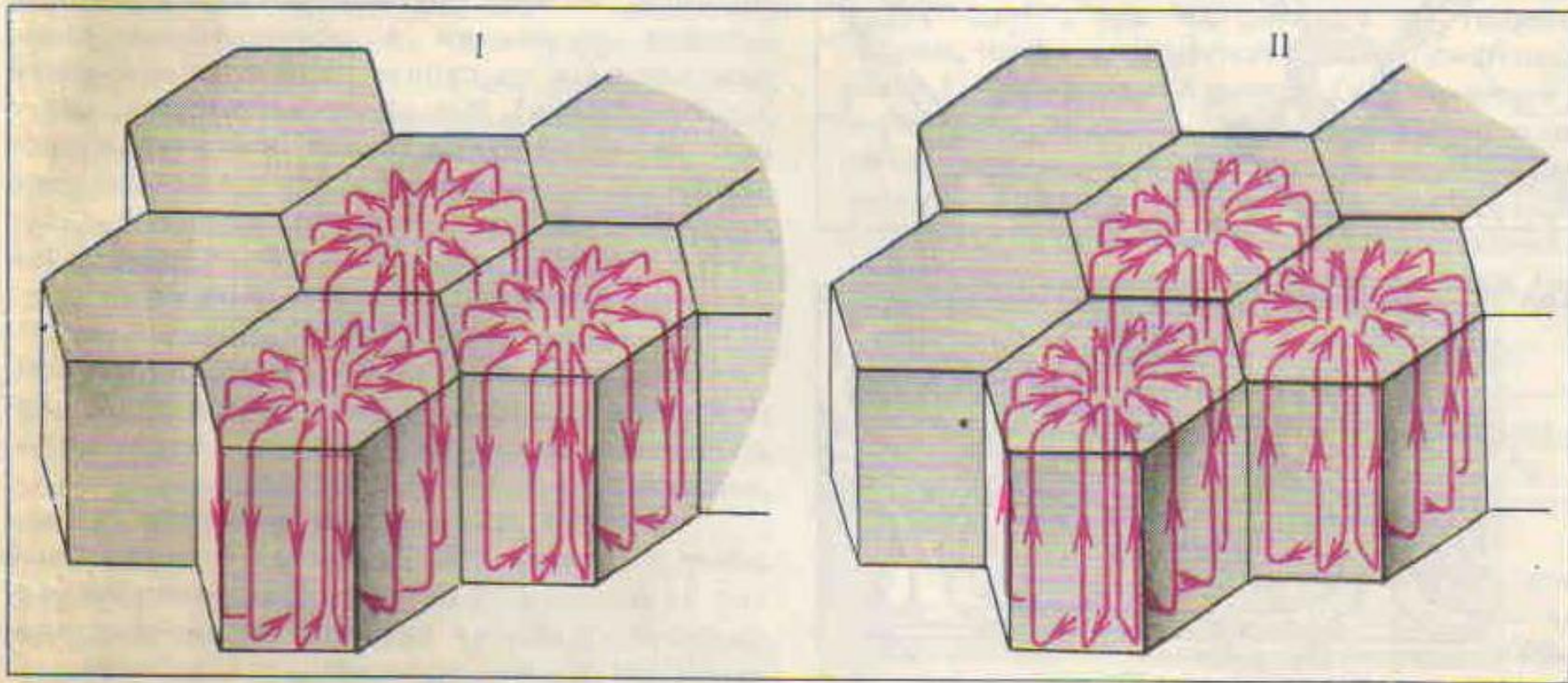


РИС. 5.69. Модель строения хромосферы. (По Колпу и Куперусу [61].)



Два варианта течений в модели конвекции Рэлея—Бенара (I — прямой, II — инверсионный), неразличимые при численном моделировании на ЭВМ. В первом случае восходящий поток находится в центре, а нисходящие — по периферии конвективных ячеек; во втором — нисходящий поток — в центре, а восходящие — по периферии.

**Конвективні комірки Бенара
(гексагональна структура)**

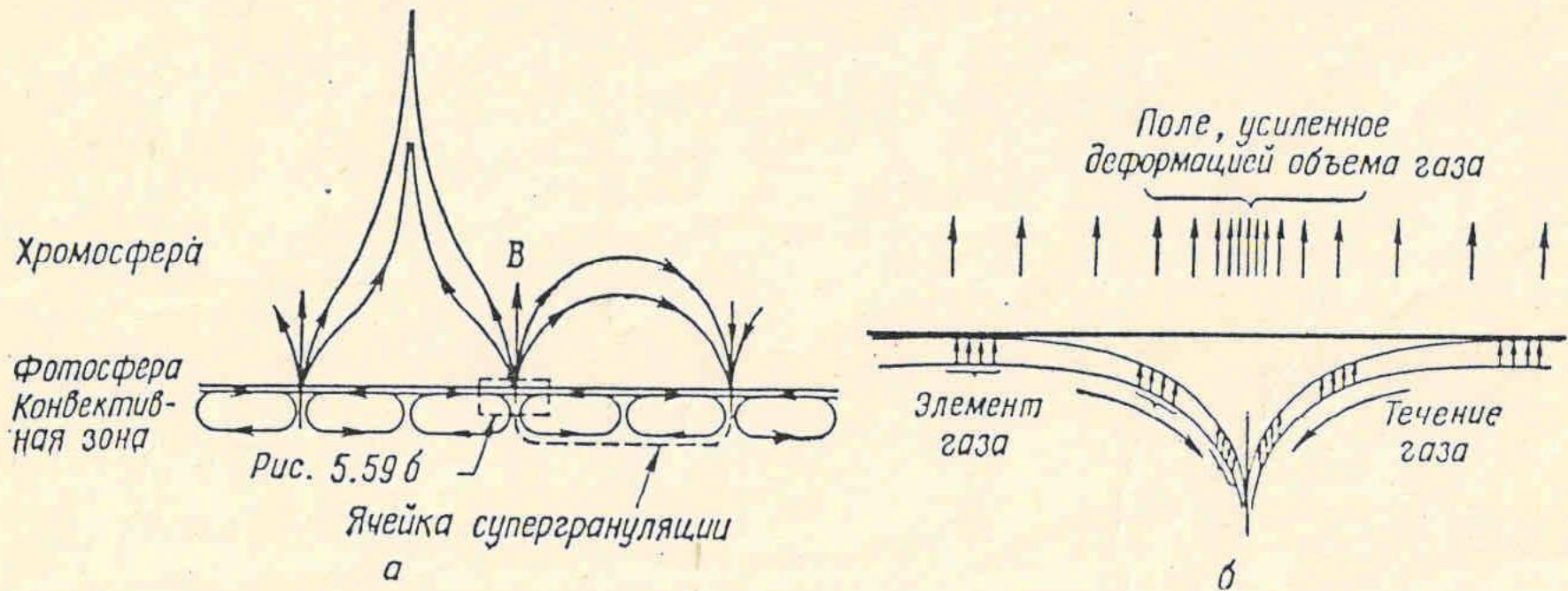
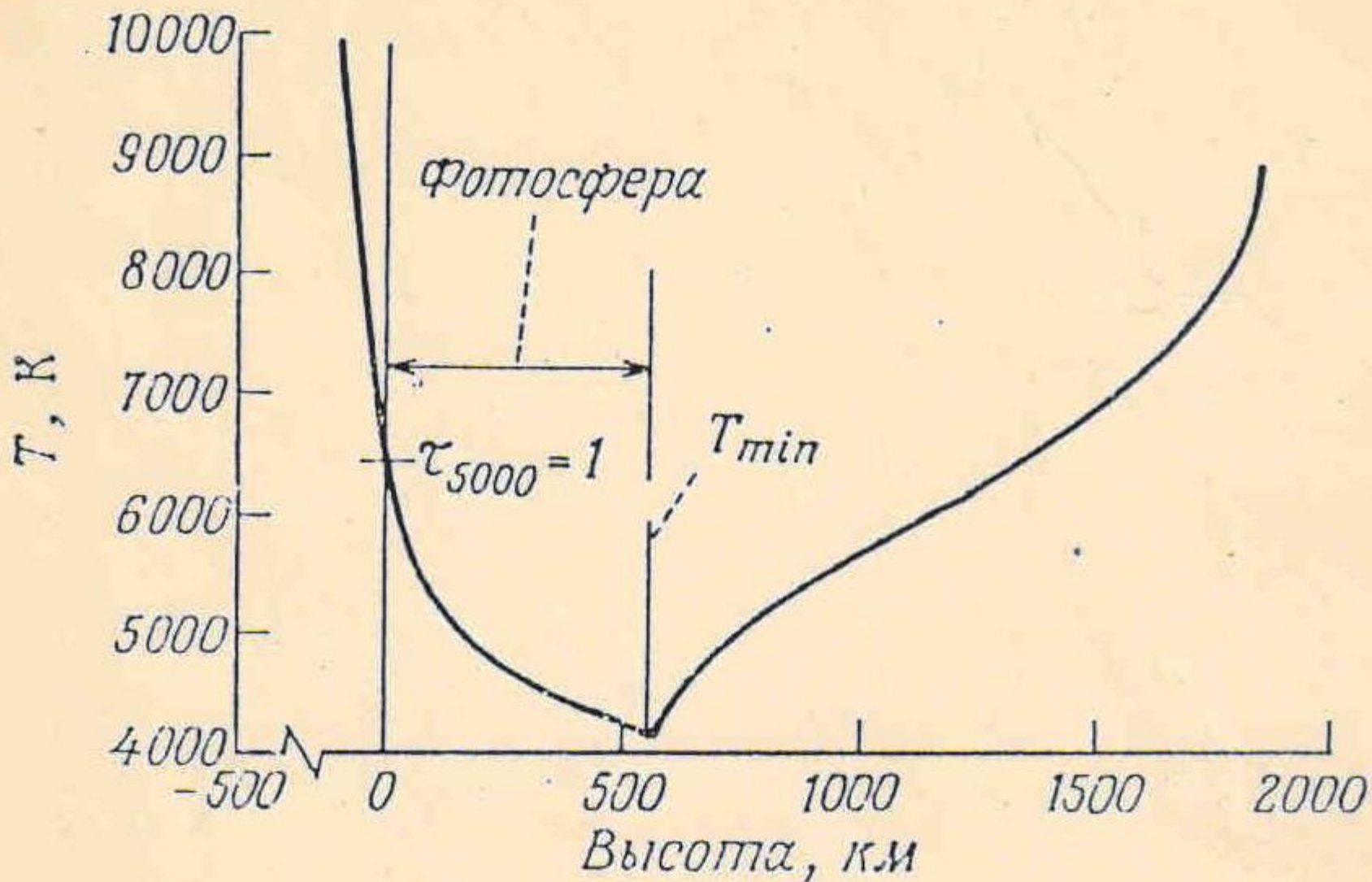
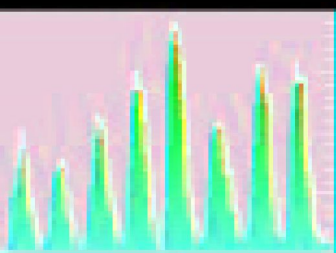


РИС. 5.59. Усиление напряженности магнитного поля на границах ячеек супергрануляции.

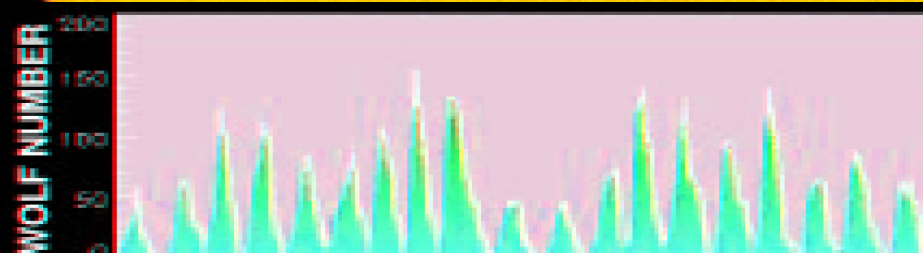
а — крупномасштабная структура, б — деформация элемента опускающегося газа.



Сонячні плями



2000

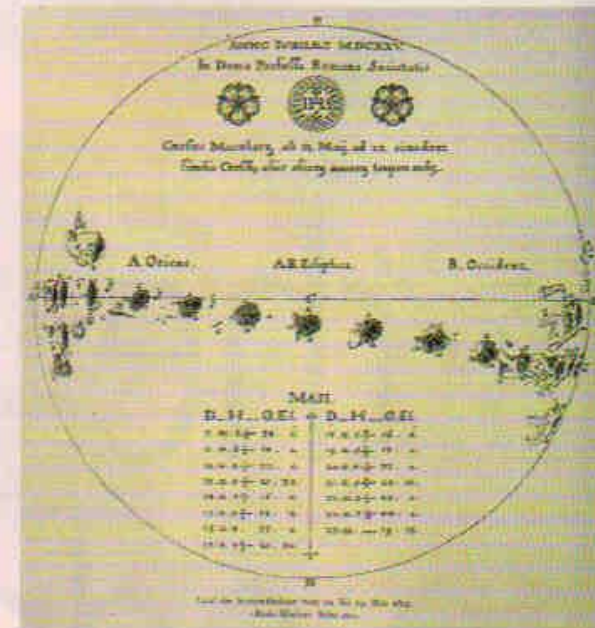
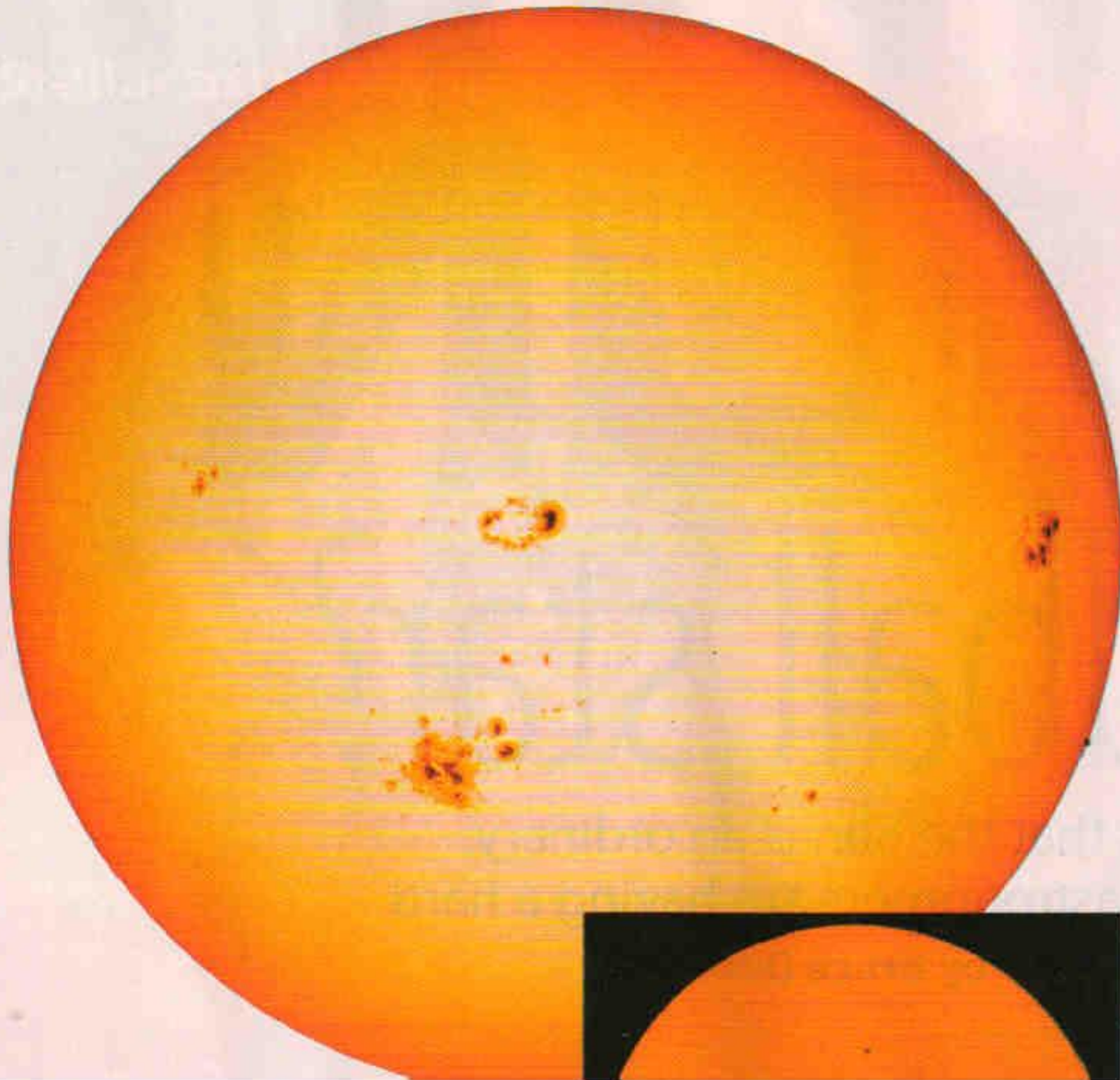


1700

1500

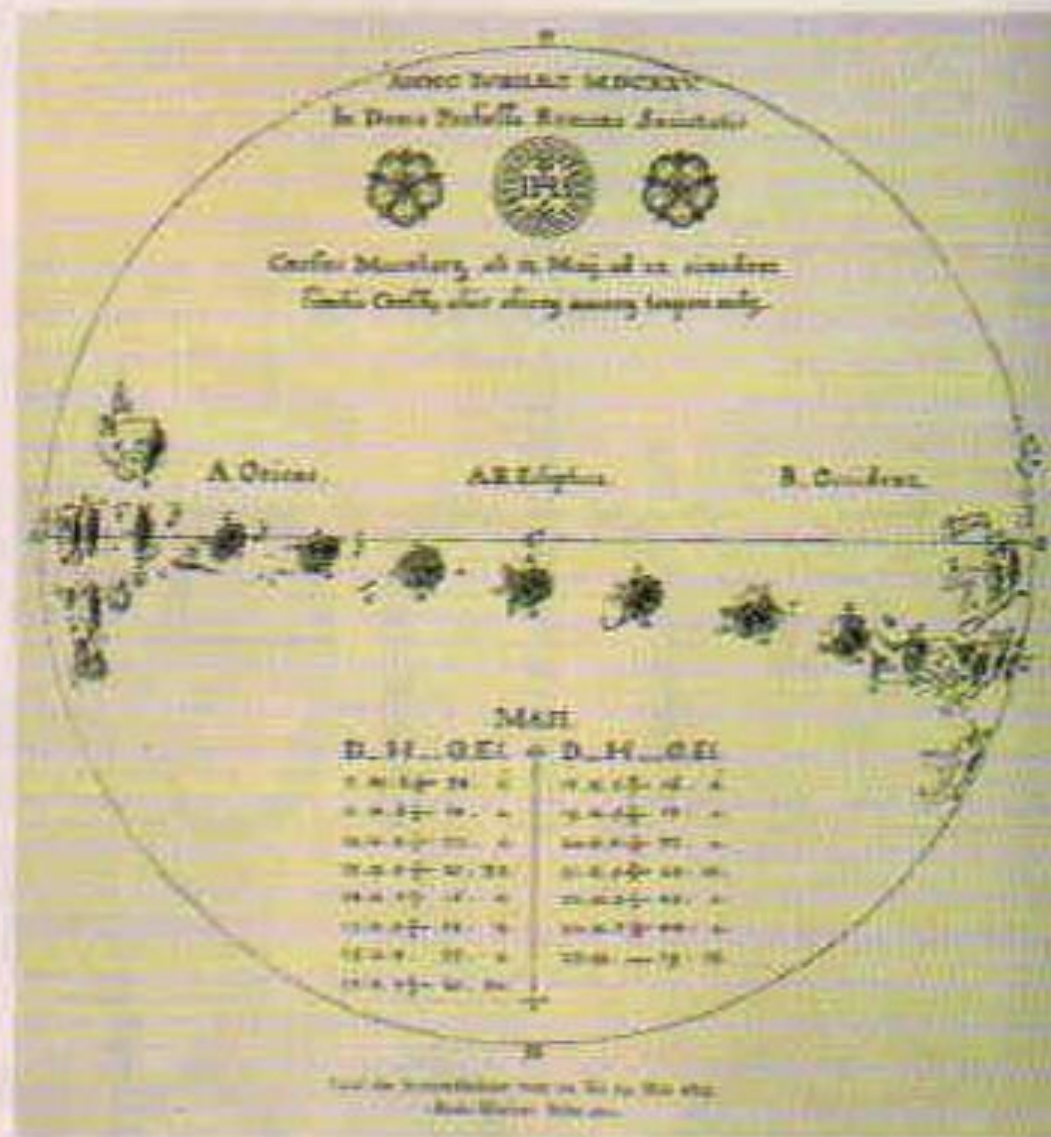
1800

YEAR



Christoph Scheiner observed the Sun starting in 1611, about the same time as Galileo. The two scientists described dark spots moving across our star's surface. Linda Hall Library of Science, Engineering, and Technology

flow migration of the most recent cycle had slowed. "This jet stream is moving down toward the equator at a slower rate than the previous solar cycle," says Hill, "and the extra length of time it's taking is equivalent to the extended solar mini-



Christoph Scheiner observed the Sun starting in 1611, about the same time as Galileo. The two scientists described dark spots moving across our star's surface. Linda Hall Library of Science, Engineering, and Technology

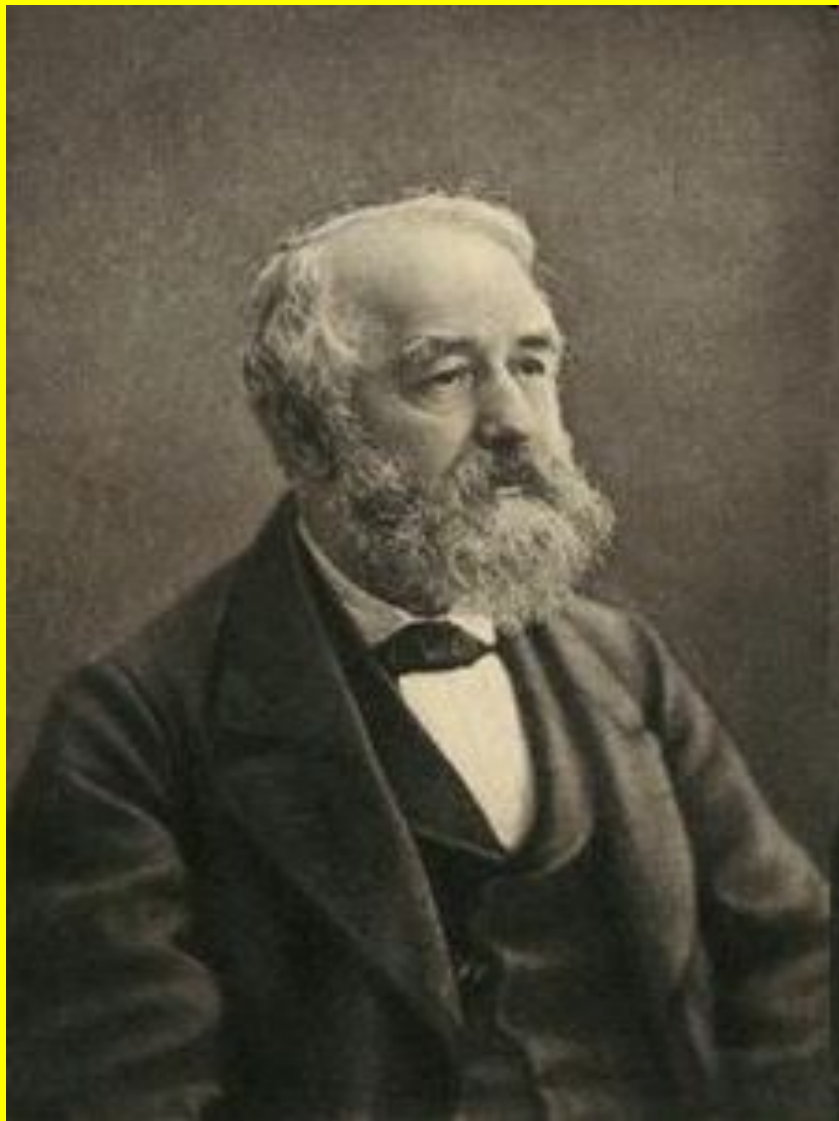


Самуель Швабе

(1789-1875)

**Виявив зміну кількості
сонячних плям в часі
у 1843 р.**

Число Вольфа



Рудольф Вольф

7.07.1816 – 6.12.1893

Запропонував у 1849 р.

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

де

W — відносне число сонячних плям
(число Вольфа),

f — кількість плям,

g — кількість груп плям,

k — коефіцієнт нормування
(характеризує спостерігача,
обсерваторію)

Відносне число сонячних плям (1848 р.) –

Сонячний цикл: основні спостережені закономірності

Число Вольфа W –

це не просто число плям на сонячному диску, а характеристика, яка одночасно відображає і число груп плям, і структуру кожної з них.

W являється мірою плямоутворюючої активності ☉

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

де k – коефіцієнт врахування індивідуальних властивостей спостерігача (звичайно $k=0,6$), f – число плям на видимій півсфері ☉,
 g – число груп плям.

За цією формулою на підставі спостережень отримують щоденні числа W , потім в результаті процедур усереднення визначають тижневі, місячні і річні значення чисел Вольфа.

Відновивши за даними астрономічних спостережень річні числа W з 1749 р. Вольф визначив тривалість середнього періоду зміни числа сонячних плям.

Так з'явився знаменитий

Закон Швабе-Вольфа –

**основний закон сонячної циклічності –
зміна сонячної активності відбувається
з періодом близько 11 років**

Відносне число сонячних плям (1848 р.) –
Сонячний цикл: основні спостережені закономірності

Число Вольфа W –

це не просто число плям на сонячному диску, а характеристика, яка одночасно відображає і число груп плям, і структуру кожної з них.

W являється мірою плямоутворюючої активності ☺

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

Закон Швабе-Вольфа –

основний закон сонячної циклічності –
зміна сонячної активності відбувається
з періодом близько 11 років

Правильніше говорити не про 11-річний період,
а про *11-річний цикл*

(тобто *період із збуреннями, або “прихований” період*).

Зв'язок між площею та числом СП для кожного дня
вельми невизначений, але середньомісячні значення
добре зв'язані таким співвідношенням:

$$A = 16,7 W$$

A – площа в мільйонних частках видимої півсфери

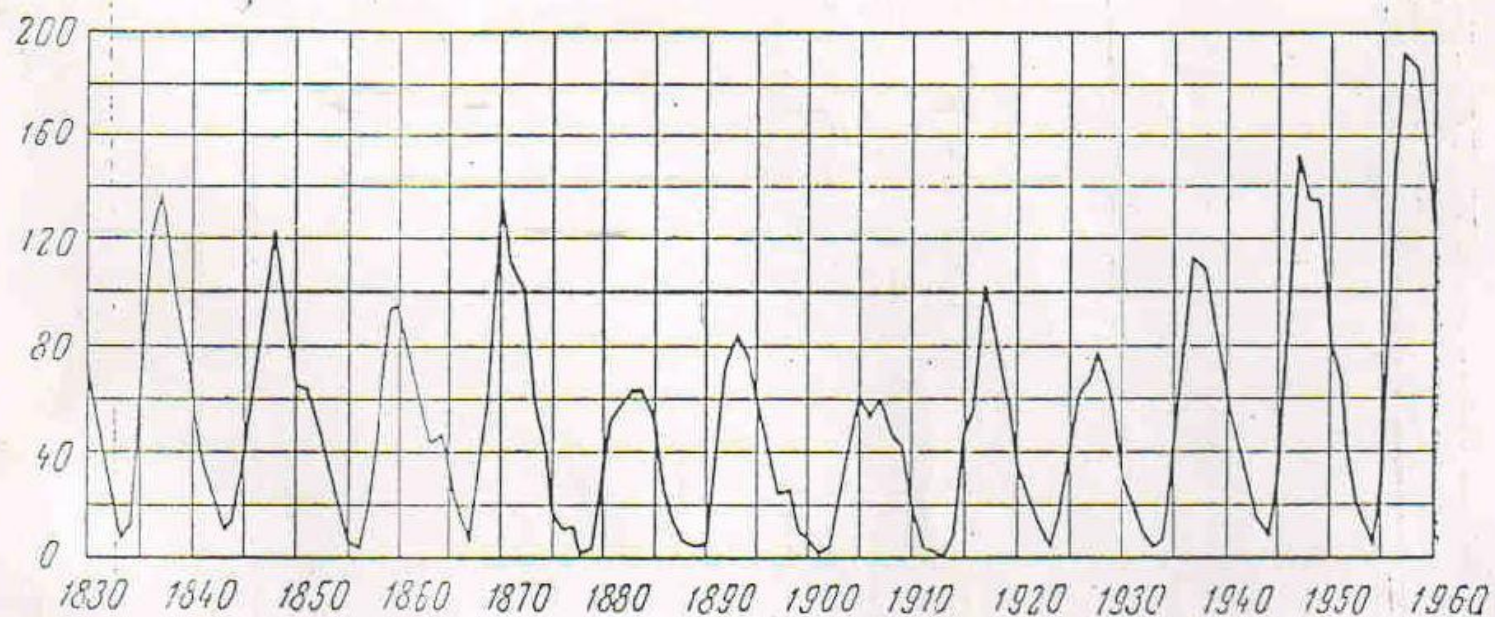
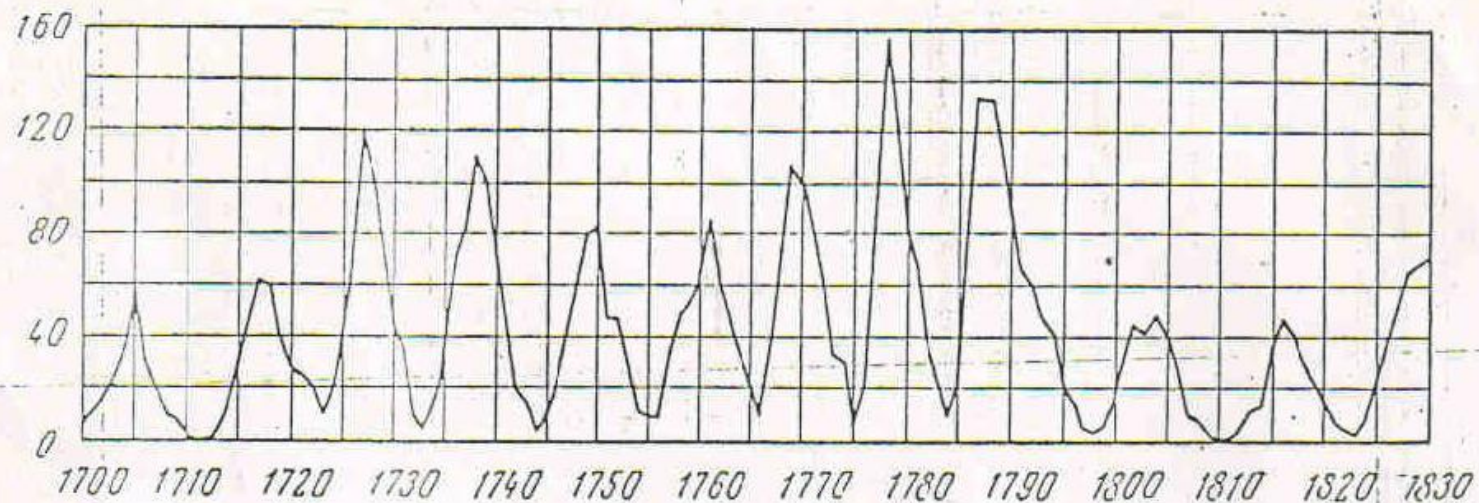
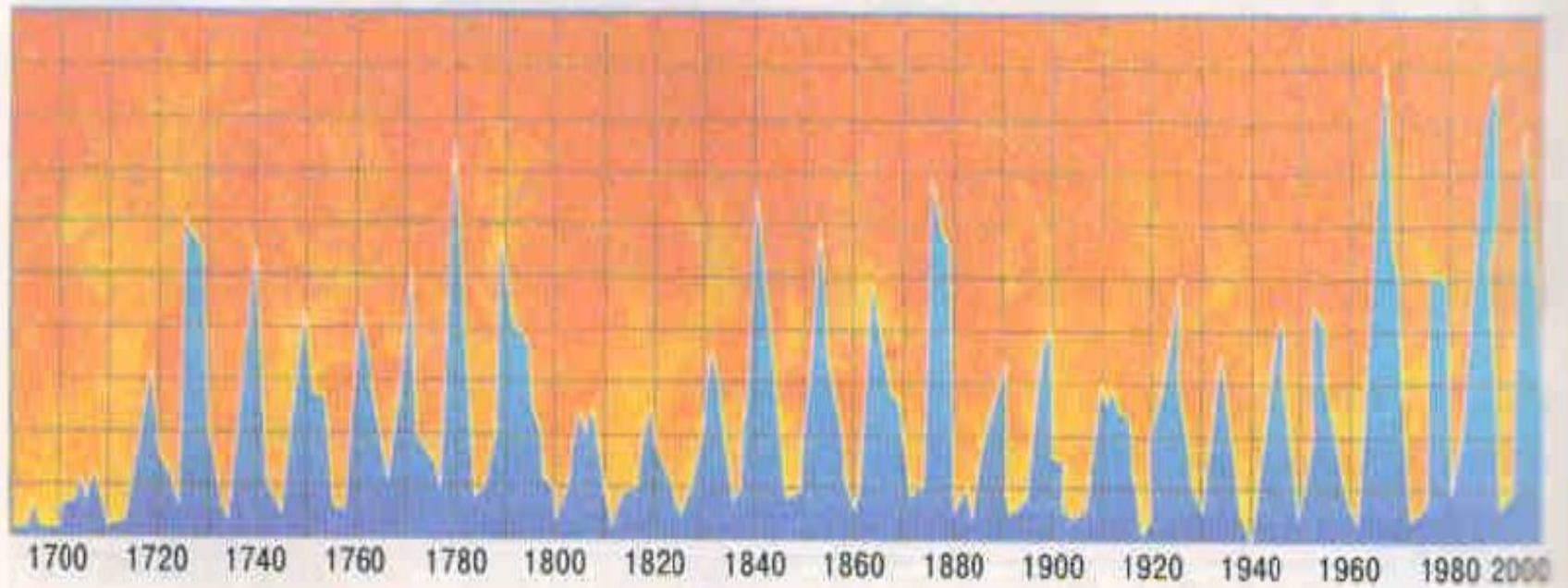
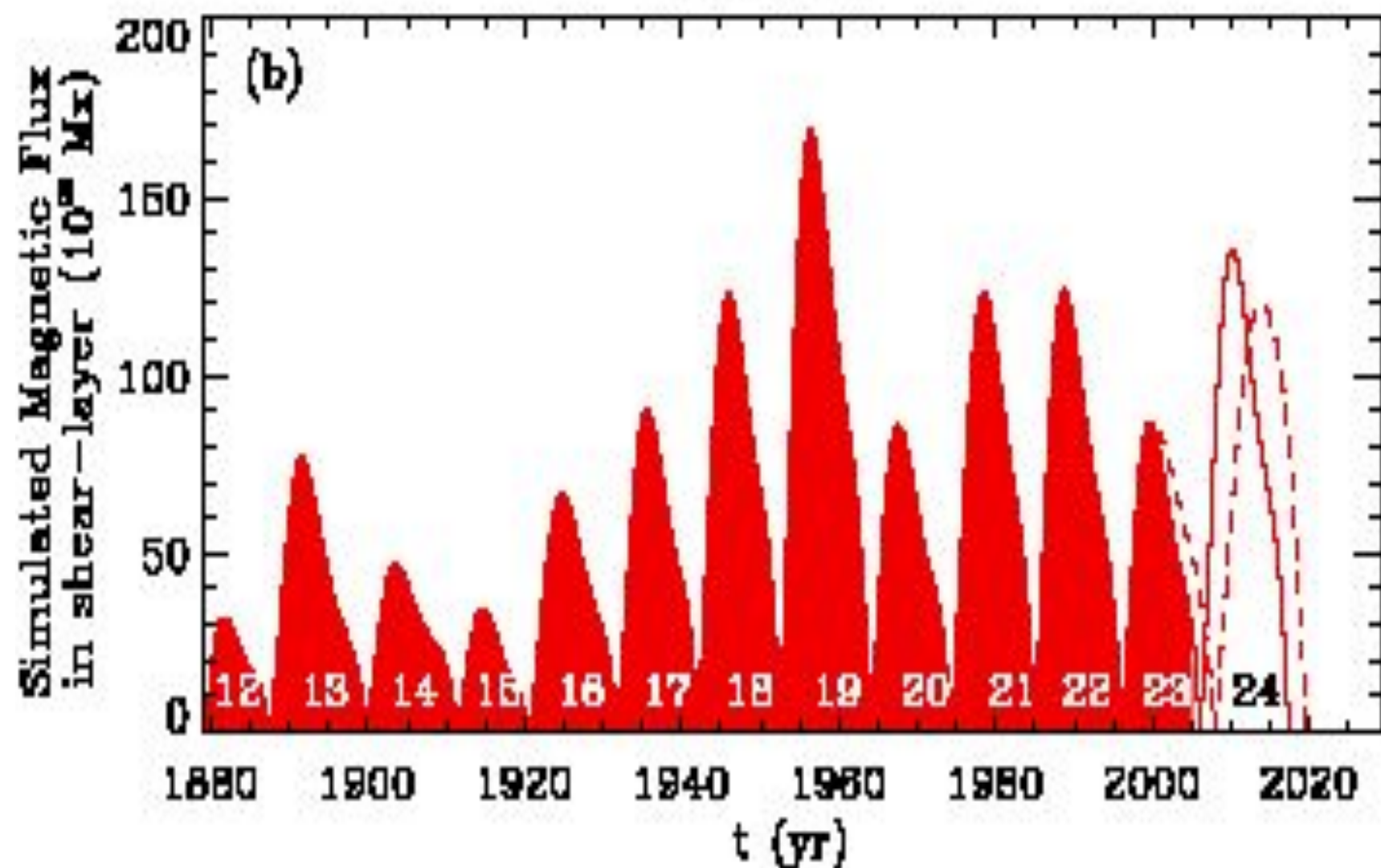


Рис. 49. 11-летний цикл солнечных пятен. Графики показывают вариации среднегодового числа Вольфа за период 1700—1960 гг. [14]. Описание характерных свойств периодичности солнечных пятен см. в тексте.

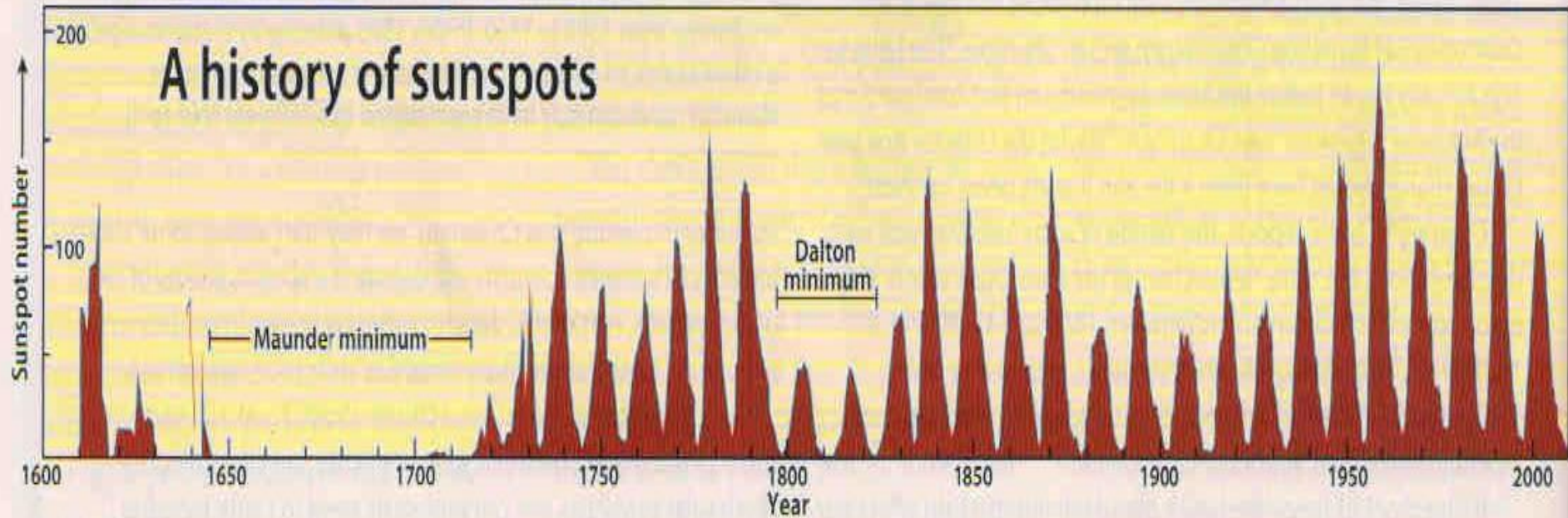


Плями зв'язані між собою магнітними силовими лініями подібно до полюсів магніту — кожна пляма має свою полярність. Так само, як неможливо розділити північний та південний полюси магніту, так і сонячні плями існують тільки парами, які мають різні магнітні полярності.

Time (yr)



A history of sunspots



Typical solar cycles last about 11 years, but the strength of each cycle varies considerably. This illustration plots the yearly average sunspot numbers since 1610, when detailed observations began. During the Maunder minimum from 1645 to 1715, virtually no spots appeared. *Astronomy: Eoen Kelly*

Характерною особливістю відкритої періодичності було те, що інтервали часу між роками максимальних (або мінімальних) чисел W сильно відрізнялися.

Роки, коли числа W мають максимальну або мінімальну величину, називають відповідно епохами максимуму і мінімуму 11-річного циклу, а протяжність циклу прийнято визначати за епохами мінімальних чисел W .

Особливості циклічності:

- 1) періодичність не строга (період може мінятися в інтервалі від 9 до 14 років);
- 2) числа W в максимумі активності можуть досить сильно відрізнятися;
- 3) на протязі циклу зміни кривої носять неправильний характер;
- 4) якщо максимум середній або високий, то підйом кривої крутіший, чим спад.

11 років – це середня довжина сонячного циклу, яку визначив Вольф.

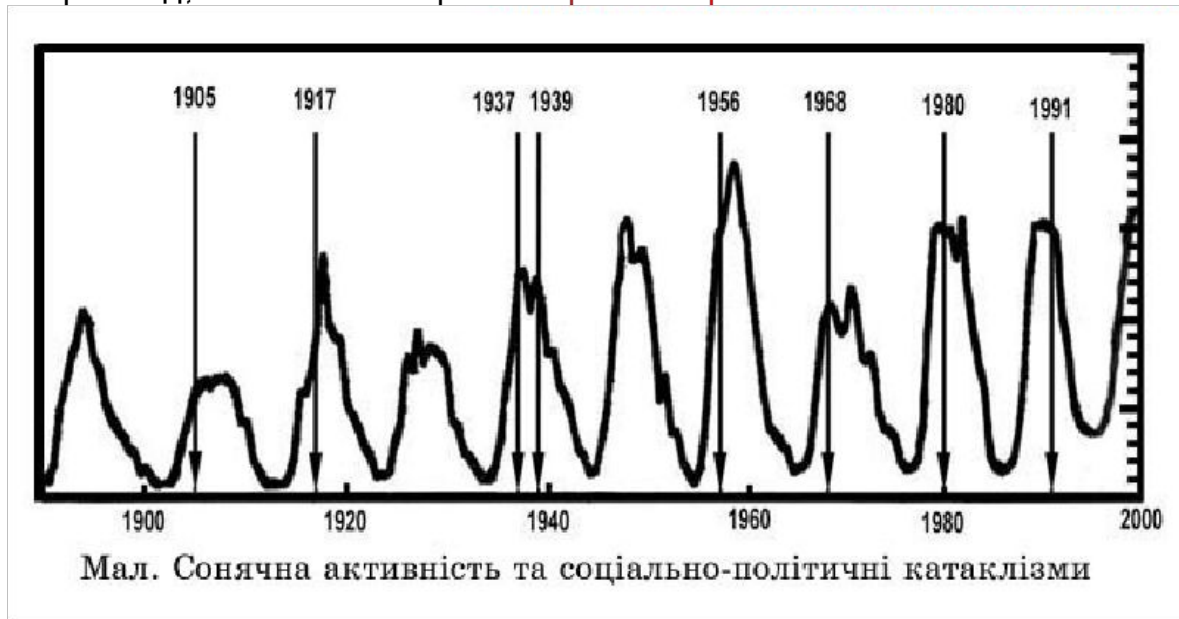
В дійсності ж, 11-річні цикли сонячних плям відрізняються як своєю тривалістю, так і значеннями максимальних чисел W .

Окремої уваги заслуговує **вплив Сонця** через усю сукупність механізмів, які ним контролюються, **на суспільне життя**.

Сонячна активність є однією з центральних зовнішніх причин, яка породжує соціальну циклічність.

Соціальна циклічність (а значить і прогнозованість подій соціально-політичного життя) *потребує подальшого вивчення* на основі кількісних вимірювань і оцінок.

Це яскраво **підкреслюється пов'язаністю соціально-політичних катаклізмів**, наприклад, новітньої історії **з 11-річним циклами сонячної активності**.



Вивченням механізму впливу Сонця на суспільство займалось багато дослідників – Д.О.Святський, В.І.Анучін, А.Л.Чижевський, В.М.Бехтерев, Н.Д.Кондратьєв, П.А.Сорокін, тощо.

Соціальний спалах, очевидно, провокується сонячним впливом **через механізм “модифікації нервової збудженості”**.

Але 11-річний цикл проявляється не тільки в зміні частоти активних утворень, зокрема, СП.

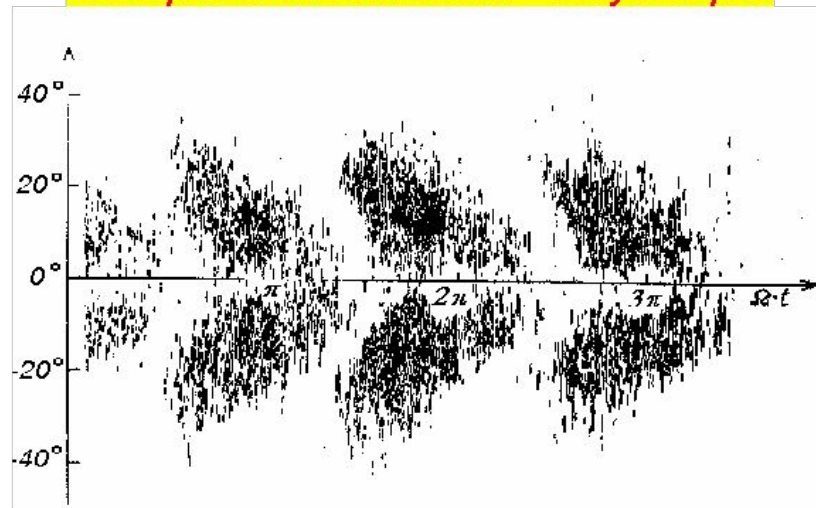
Його можна виявити також по зміні з часом широти груп плям.

Ця обставина привернула увагу відомого англійського дослідника ☉ **Керінгтона** ще в 1859 р., який помітив, що плями воліють з'являтися на сонячній поверхні в широтному діапазоні $\pm 45^\circ$, названому ним **“королівською зоною”**.

Пізніше (1861 р.) це значно переконливіше показав німецький вчений **Г.Шпюрер**. Виявилось, що середню протяжність 11-річного циклу можна визначити значно точніше за змінами широти груп СП, ніж за варіаціями чисел Вольфа.

Тому нині **закон Шпюрера**, який свідчить про зміни широти груп плям з ходом 11-річного циклу, разом із **законом Швабе-Вольфа** виступає як **основний закон Сонячної циклічності**.

Широтний дрейф до екватора (закон Шпюрера) добре помітний на діаграмі розподілу плям за широтами у функції часу, що за прізвищем вченого, який вперше її побудував, отримала назву **“діаграми метеликів” Маундера**.



Діаграма “метелики” Маундера відповідно до спостережень з 1874 по 1913 р., що **показує область існування сонячних плям (“королівська зона” $\pm 45^\circ$)** в залежності від геліографічної широти (вісь ординат) і фази сонячного циклу Ω .



Густав Шперер (Шпьорер)
(1822-1895)

Закон Шперера:

На початку циклу активності плями з'являються на широтах $\pm (20-40)$ градусів ("королівська зона"), поступово наближаються до екватора, але не перетинають його

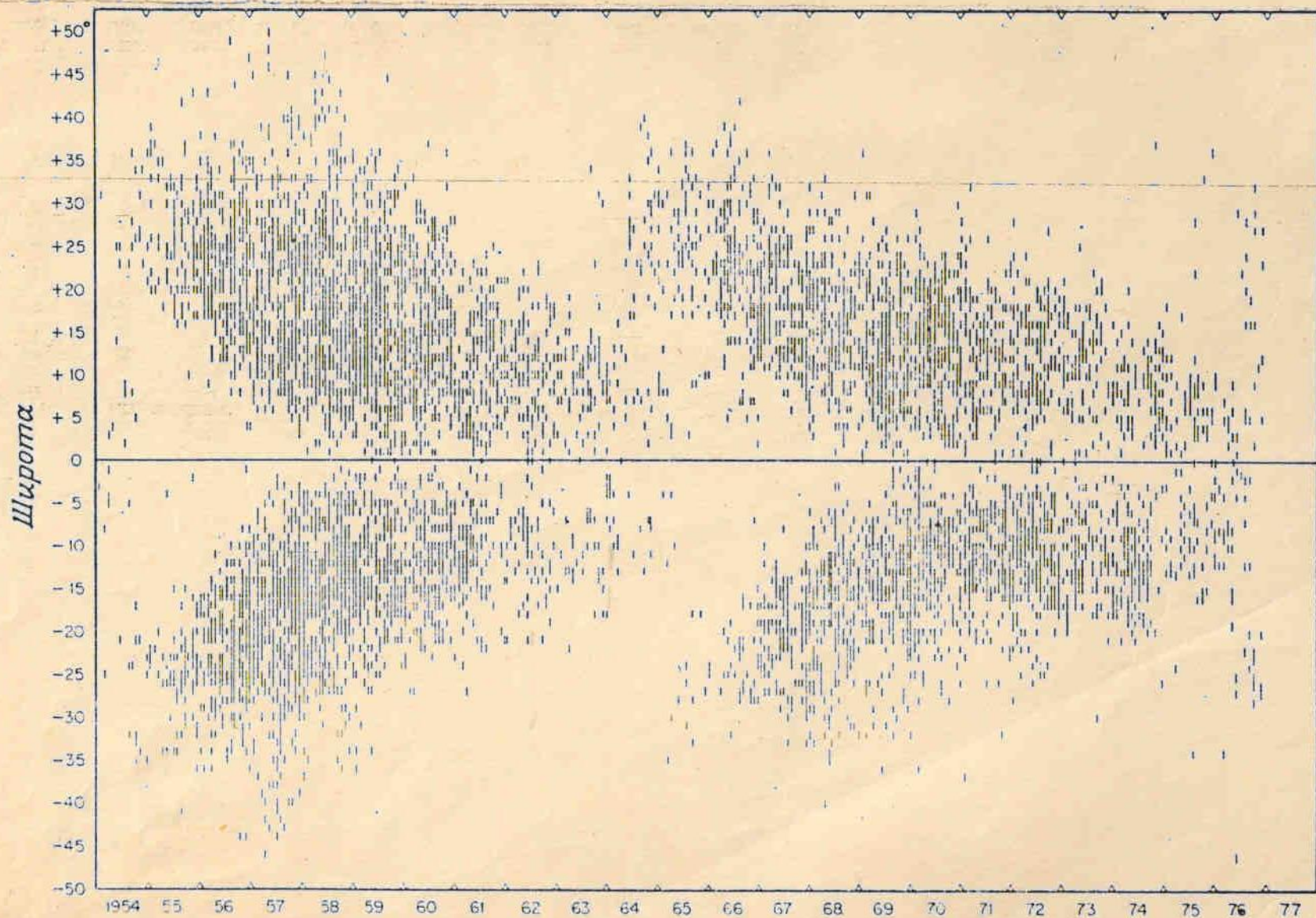
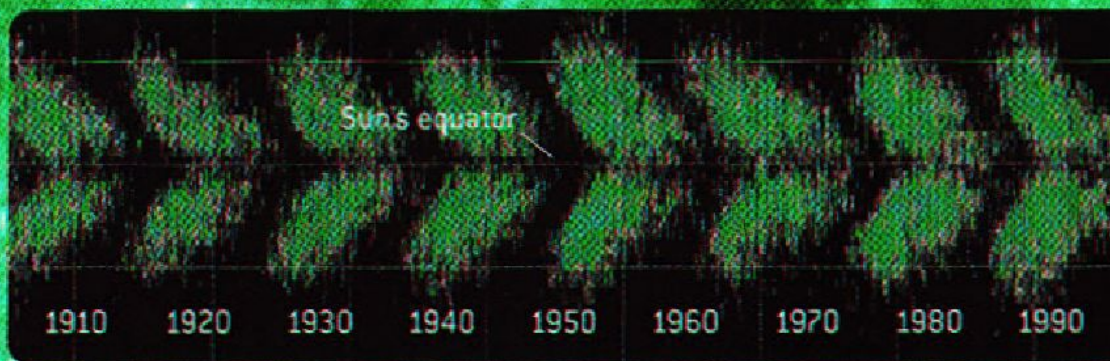
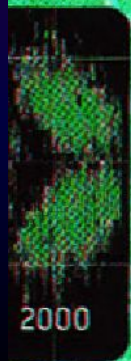


Рис. 1.30. Маундеровские «диаграммы бабочек», демонстрирующие широтный дрейф появления солнечных пятен как функцию времени в течение двух солнечных циклов (с разрешения Р. Говарда).

Тонка структура сонячних плям

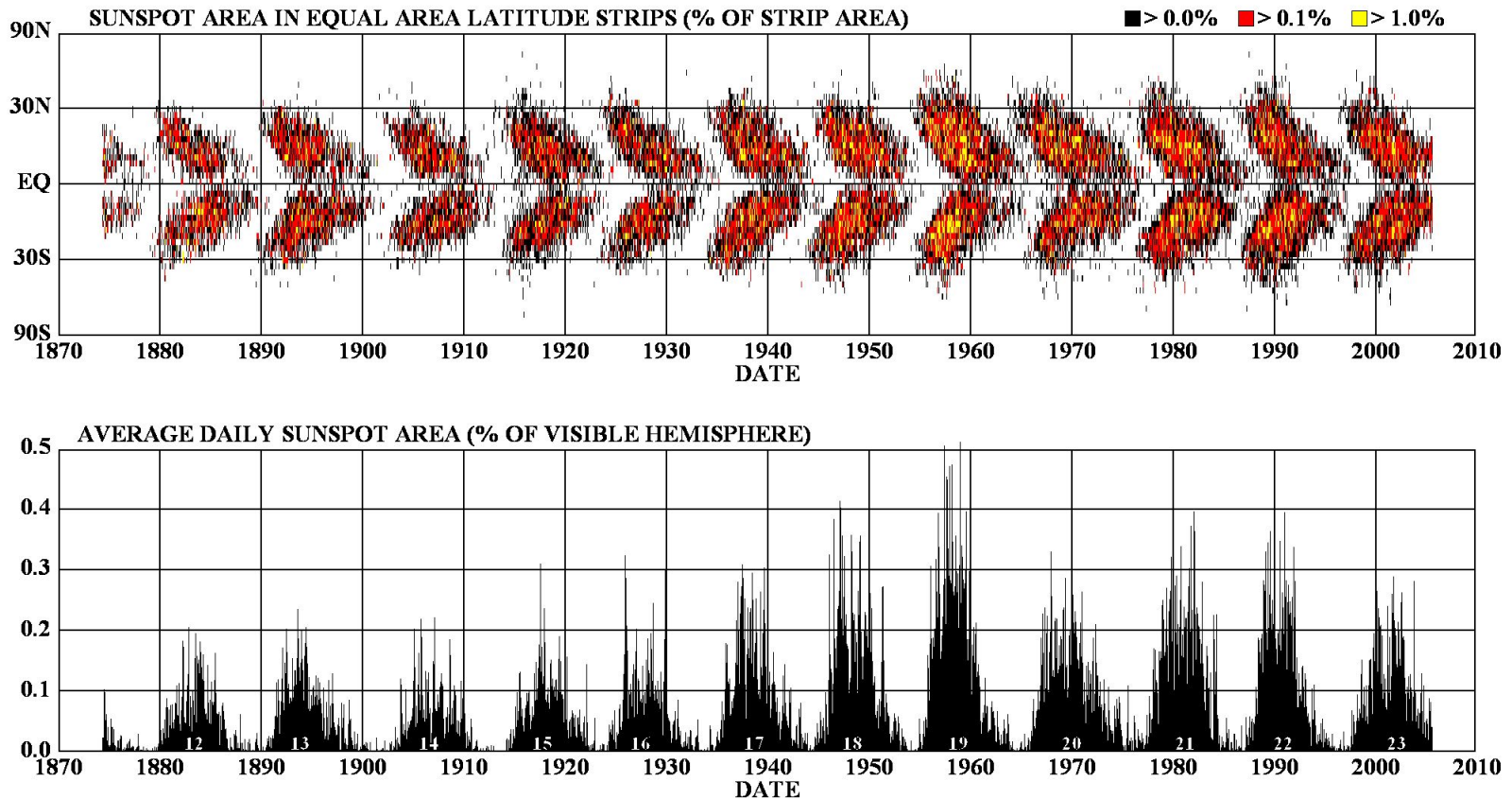


Діаграма
“метеликів Маундера”



Діаграма «метелики Маундера»

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/bfly.gif>

NASA/NSSTC/HATHAWAY 2005/09

В 1858 Керрінгтон виявив, що зони плямоутворення мігрують до низьких широт з розвитком сонячного циклу

Спостережені факти біполярних груп плям
*Протягом 11-річного циклу полярність всіх головних плям
в північній півкулі одна і таж, на початку нового циклу знак
її змінюється на протилежний. Головні плями в північній і
південній півсферах мають протилежні полярності.*

*Це закон Хейла – Нікольсона (1925 р.) –
закон полярності сонячних плям.*

Іншої особливостю явл. те, що магнітна вісь біполярної
групи нахилена (звичайно на 10 градусів) таким чином, що
головна пляма виявляється ближче до екватора.

Полярне поле міняє знак в макс. СА або на 1-2 роки
пізніше, при цьому моменти зміни знаку на різних полюсах
можутьне співпадати.

Закон Хейла-Никольсона (1925) –
ЗАКОН МАГНИТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

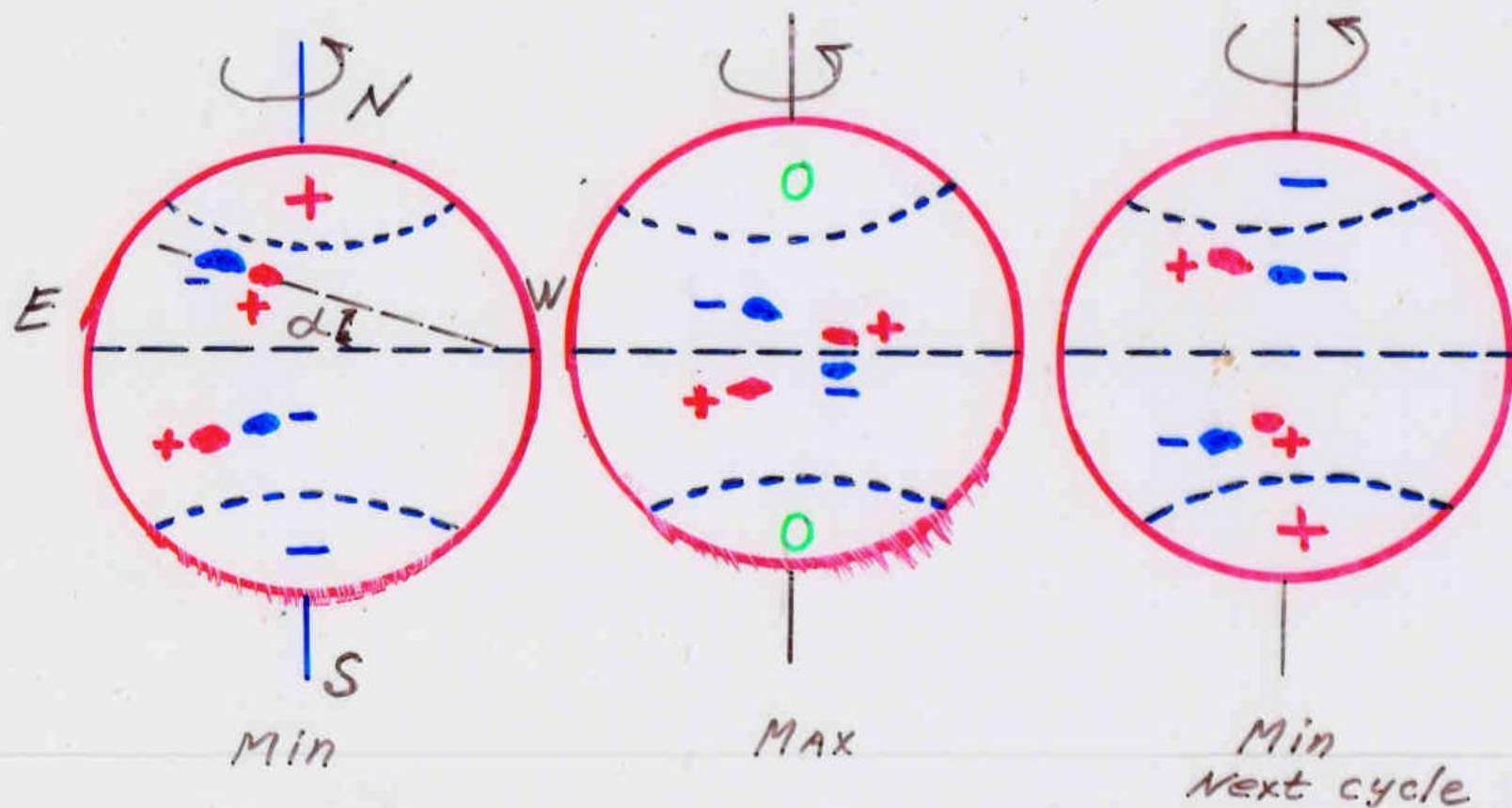


Схема обращения знаков полярных магнитных полей
и полей пятен в ходе цикла солнечной активности

І коли дослідники прогнозують новий сонячний цикл, то, крім інтенсивності, розраховують також початок і протяжність наступаючого циклу.

Магнітна полярність біполярних груп плям протилежна в північній та південній півкулях, зберігається протягом циклу і змінюється кожні 11 років.

Щоб МП☉ повернулося до попереднього стану, повинно пройти два цикли СА. В результаті отримуємо **22-річну періодичність**, що називається **магнітним циклом Хейла**.

Після винайдення **магнітографа** – спеціального фотоелектричного приладу для систематичного картографування **слабких** магнітних полів було встановлено, що магнітні поля, хоча і слабкі, **поширюються майже по всій сонячній поверхні**.

Отже, всі явища СА ніби цементуються сонячними магнітними полями.

Характеристики сонячних циклів

№	Tmin	Wmin	Tmax	Wmax	Trise	Tfall	Ttotal
---	------	------	------	------	-------	-------	--------

0	1745.0	10.0	1750.3	92.6	5.3	4.9	10.2
1	1755.2	8.4	1761.5	86.5	6.3	5.0	11.3
2	1766.5	11.2	1769.7	115.8	3.2	5.8	9.0
3	1775.5	7.2	1778.4	158.5	2.9	6.3	9.2
4	1784.7	9.5	1788.1	141.2	3.4	10.2	13.6
5	1798.3	3.2	1805.2	49.2	6.9	5.4	12.3
6	1810.6	0.0	1816.4	48.7	5.8	6.9	12.7
7	1823.3	0.1	1829.9	71.7	6.6	4.0	10.6
8	1833.9	7.3	1837.2	146.9	3.3	6.3	9.6
9	1843.5	10.5	1848.1	131.6	4.6	7.9	12.5
10	1856.0	3.2	1860.1	97.9	4.1	7.1	11.2
11	1867.2	5.2	1870.6	140.5	3.4	8.3	11.7
12	1878.9	2.2	1883.9	74.6	5.0	5.7	10.7
13	1889.6	5.0	1894.1	87.9	4.5	7.6	12.1
14	1901.7	2.6	1907.0	64.2	5.3	6.6	11.9
15	1913.6	1.5	1917.6	105.4	4.0	6.0	10.0
16	1923.6	5.6	1928.4	78.1	4.8	5.4	10.2
17	1933.8	3.4	1937.4	119.2	3.6	6.8	10.4
18	1944.2	7.7	1947.5	151.8	3.3	6.8	10.1
19	1954.3	3.4	1957.9	201.3	3.6	7.0	10.6
20	1964.9	9.6	1968.9	110.6	4.0	7.6	11.6
21	1976.5	12.2	1979.9	164.5	3.4	6.9	10.3
22	1986.8	12.3	1989.6	158.5	2.8	6.8	9.7
23	1996.4	8.0	2000.4	120.8	4.0	8.6	12.6

	Середнє	6.1		113.2	4.7	6.3	11.0
24	2009.1*	1.8*	2014.1*	88*			11.3*

Характеристики сонячних циклів

№	Tmin	Wmin	Tmax	Wmax	Trise	Tfall	Ttotal
0	1745.0	10.0	1750.3	92.6	5.3	4.9	10.2
1	1755.2	8.4	1761.5	86.5	6.3	5.0	11.3
2	1766.5	11.2	1769.7	115.8	3.2	5.8	9.0
3	1775.5	7.2	1778.4	158.5	2.9	6.3	9.2
4	1784.7	9.5	1788.1	141.2	3.4	10.2	13.6
5	1798.3	3.2	1805.2	49.2	6.9	5.4	12.3
6	1810.6	0.0	1816.4	48.7	5.8	6.9	12.7
7	1823.3	0.1	1829.9	71.7	6.6	4.0	10.6
8	1833.9	7.3	1837.2	146.9	3.3	6.3	9.6
9	1843.5	10.5	1848.1	131.6	4.6	7.9	12.5
10	1856.0	3.2	1860.1	97.9	4.1	7.1	11.2
11	1867.2	5.2	1870.6	140.5	3.4	8.3	11.7
12	1878.9	2.2	1883.9	74.6	5.0	5.7	10.7
13	1889.6	5.0	1894.1	87.9	4.5	7.6	12.1
14	1901.7	2.6	1907.0	64.2	5.3	6.6	11.9
15	1913.6	1.5	1917.6	105.4	4.0	6.0	10.0
16	1923.6	5.6	1928.4	78.1	4.8	5.4	10.2
17	1933.8	3.4	1937.4	119.2	3.6	6.8	10.4
18	1944.2	7.7	1947.5	151.8	3.3	6.8	10.1
19	1954.3	3.4	1957.9	201.3	3.6	7.0	10.6
20	1964.9	9.6	1968.9	110.6	4.0	7.6	11.6
21	1976.5	12.2	1979.9	164.5	3.4	6.9	10.3
22	1986.8	12.3	1989.6	158.5	2.8	6.8	9.7
23	1996.4	8.0	2000.4	120.8	4.0	8.6	12.6
	Середнє	6.1		113.2	4.7	6.3	11.0
24	2009.1*	1.8*	2014.1*	88*			11.3*

Сонячною активністю (СА) називають цілий комплекс різних явищ, що відбуваються в сонячній атмосфері і які охоплюють порівняно великі області, поперечником не менше кілька тисяч км, і які характеризуються досить значними змінами з часом фізичних характеристик відповідних шарів сонячної атмосфери.

Фотосферні факели (ФФ) – області підсиленого МП і руху.

Групи СП поблизу краю видимого диску \odot завжди спостерігаються на рівні фотосфери в оточенні світлих волокнистих утворень. Це ФФ, які були відомі і регулярно спостерігалися ще з середини минулого століття.

ФФ служать як би нижнім поверхом **факельним площадок (ФП)**, які пронизують фотосферу і хромосферу. Нерідко їх називають водневими і кальцієвими флокулами.

Сонячні спалахи (СС). Часом в ФП, які спостерігаються в лінії $H\alpha$, раптово відбувається значне збільшення яскравості в окремих лініях, частіше всього поблизу складних сонячних плям. Це одна із особливостей, пожалуй, самого вражаючого явища активного \odot – сонячні спалахи.

СС – це своєрідний вибух на \odot , в результаті якого відбувається раптове вивільнення енергії, накопиченої в обмеженому об'ємі сонячної атмосфери (частіше всього хромосфери і корони).

Протуберанці (П). Часом СС появляються далеко від СП. В цих випадках вони розміщаються біля утворень дугоподібної форми, які краще всього видно в червоній лінії водню Ha. Це своєрідні хмари, які нібито підвішені над видимою поверхнею ☉. Їх називають протуберанцями.

Магнітні області. Всі явища СА як би цементуються сонячними МП.

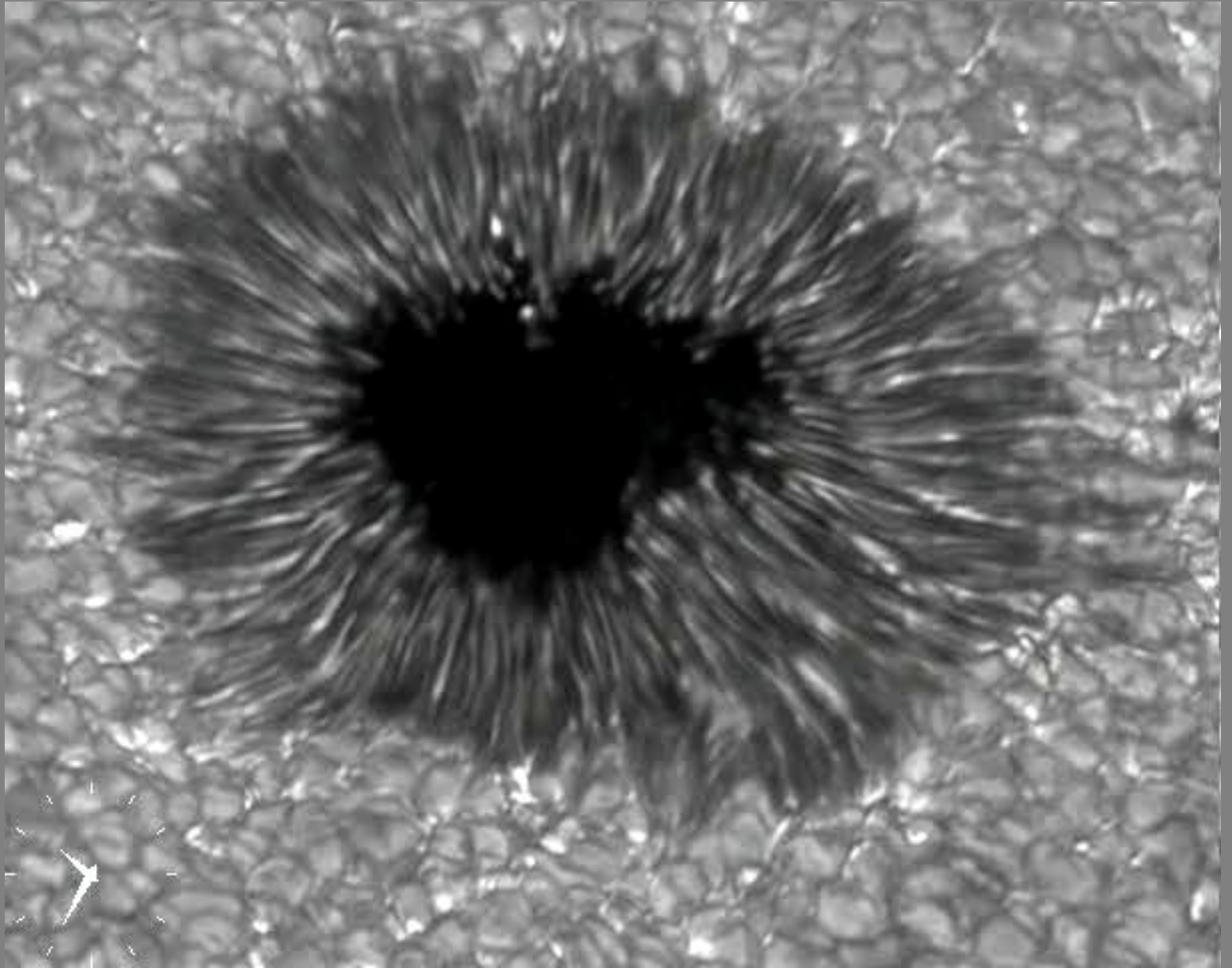
Активні області (АО). Поняття АО одночасно відображає дві сторони активних явищ ☉: їх обмеженість в просторі і багатосторонній зв'язок різних сонячних утворень, що лежать в основі складного процесу, який охоплює всі шари атмосфери ☉.

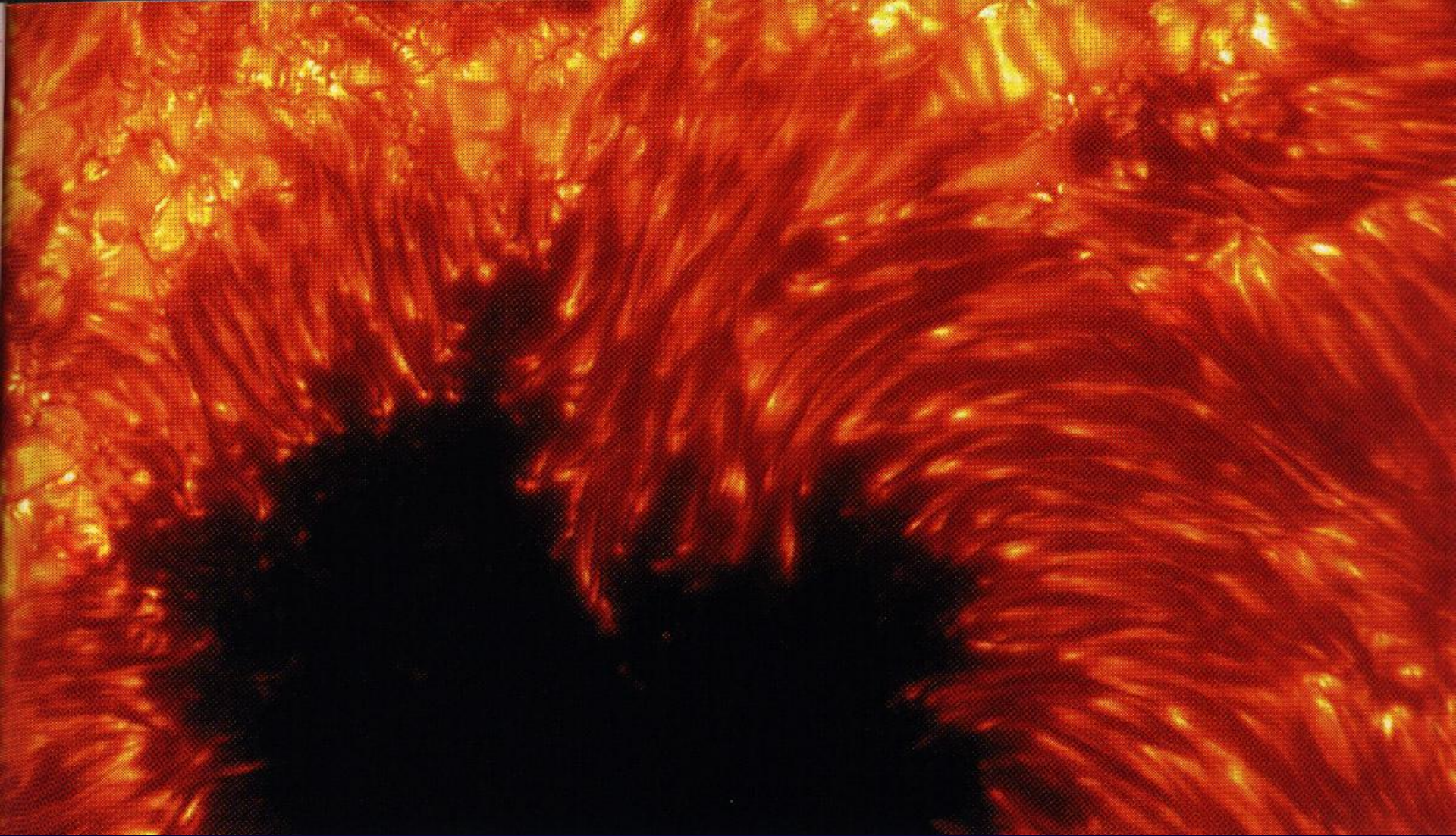
АО – це комплекс різних явищ, що відбуваються в різних шарах атмосфери ☉ і зосереджені в обмеженому об'ємі простору.

Активна довгота (АД) – це довготний інтервал, в якому той чи інший вид СА протягом тривалого часу (кілька років чи більше) проявляється суттєво сильніше, ніж в інших довготних інтервалах. Термін АД має на увазі не довготу, а ділянку видимої поверхні ☉, розтягнутий по паралелі, **довготний інтервал.**

Частіше всього його ширина приблизно 30-40 градусів.

Шведский солнечный телескоп
Ла Палма, 20 сентября, 1999





Тонка структура сонячної плями

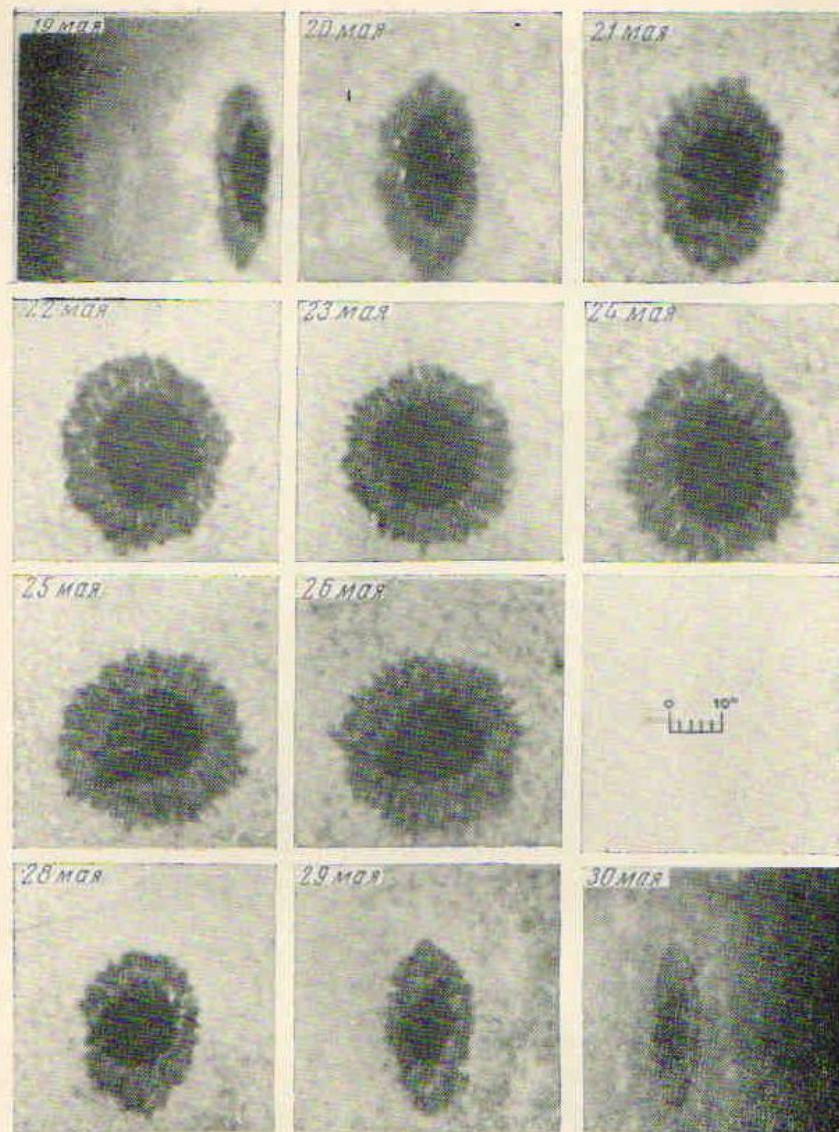


Фото 24. Эффект Вильсона в небольшом пятне правильной формы. Серия фотографий показывает изменение внешнего вида пятна во время его прохождения по диску от восточного до западного лимба (19—30 мая 1957 г.). Каждая фотография ориентирована так, что направление наибольшего сокращения горизонтально. Видно, что вблизи лимба видимая ширина полутени на стороне пятна, удаленной от лимба, меньше, чем на противоположной.

Цюрихська класифікація (ЦК) груп СП

Цюрихська схема, запропонована в 1938 р. Вальдмайером, складається із 9 класів. Вона базується на характерних стадіях, які проходять групи плям за час свого росту і розпаду.

Класи: A – B – C – D – E – F – G – H – J

- ЦК по суті явл. еволюційною. Великі групи плчм при своєму розвитку і розпаді проходять всі вказані стадії.

Згідно з Вальдмайером час існування групи плям пов'язаний з максимальним значенням його площі емпіричним співвідношенням

$$T = 0,1 A_{max}$$

T – час життя в днях, A_{max} – максимальна площа в мільйонних частках видимої сонячної півсфери. Т.ч., група $A_{max} = 400$ м.ч.с.п. (досить велика група) буде існувати приблизно 40 днів.

Магнітна класифікація (МК) груп СП

МК розроблена в 1919 р. Хелом і його колегами в Маунт-Вілсоновській обсерваторії. Хел і його співробітники помітили, що групи плям складаються із 2 членів протилежної полярності, котрі в свою чергу можуть мати як просту, так і складну магнітну структуру:

1. α (уніполярні групи); 46%
2. β (біполярні); 53%
3. γ (складні). 1%

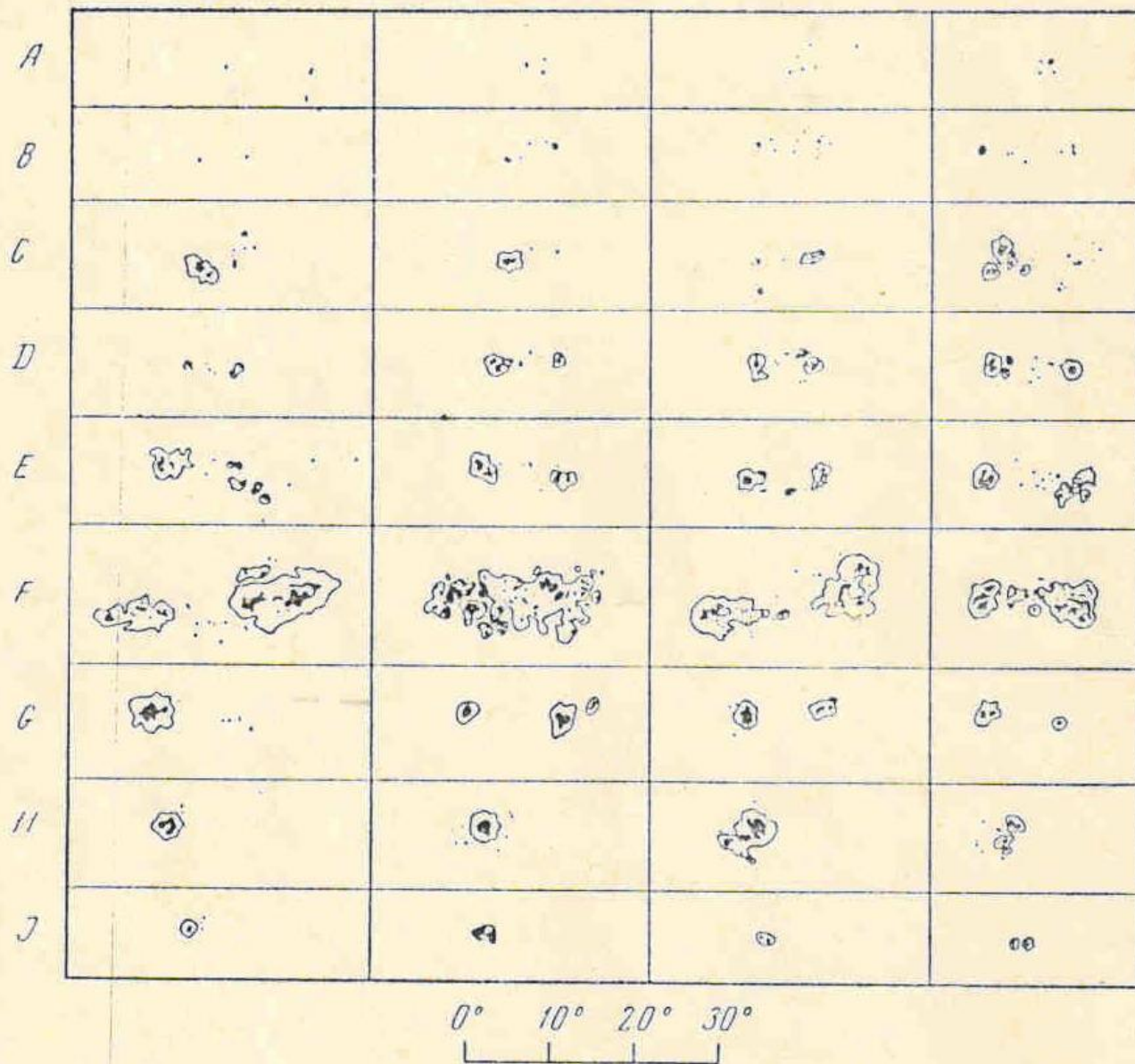


Рис. 45. Цюрихская классификация групп солнечных пятен. Приведены четыре примера каждого класса. Шкала внизу указывает градусы гелиографической долготы.

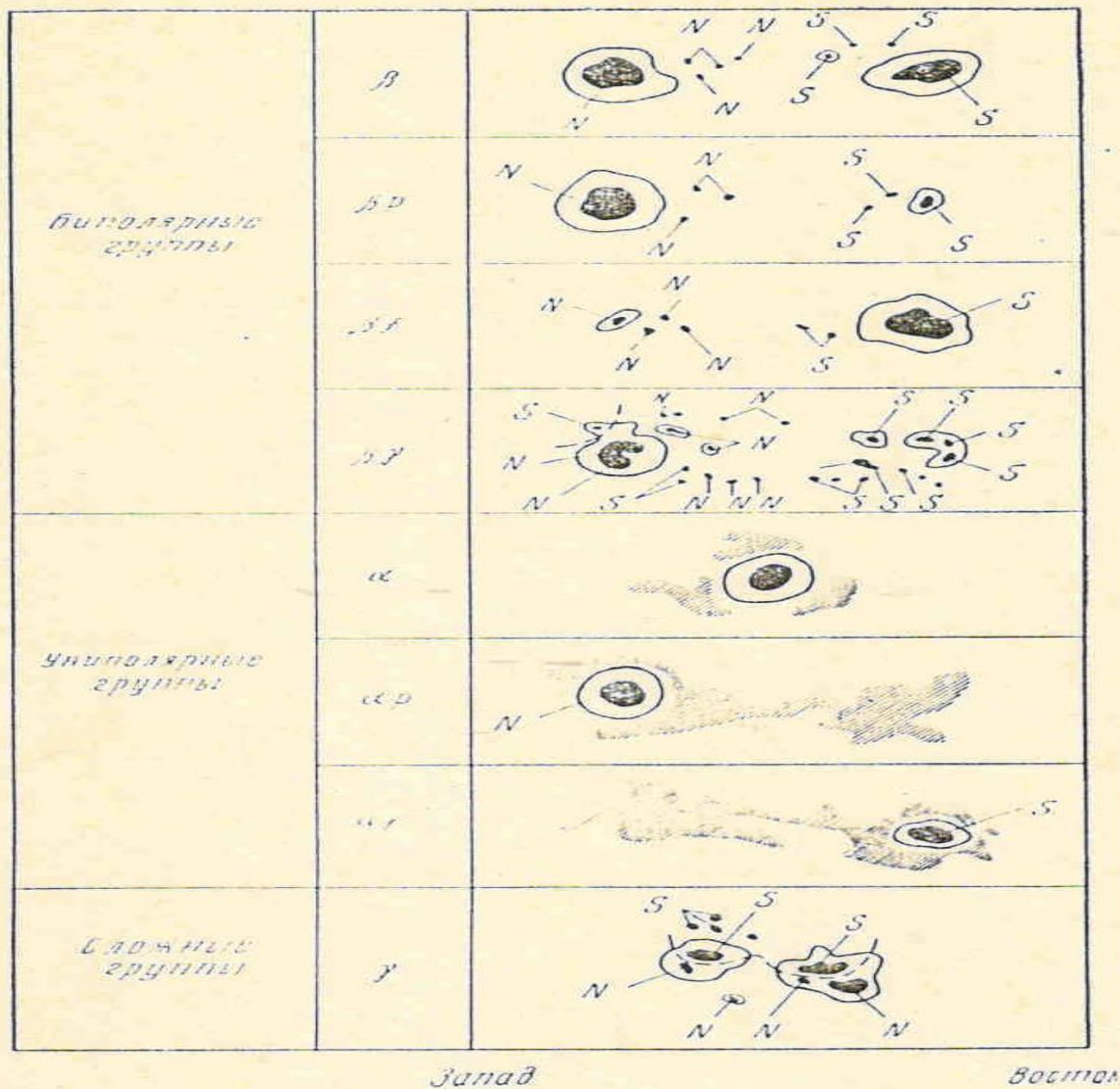
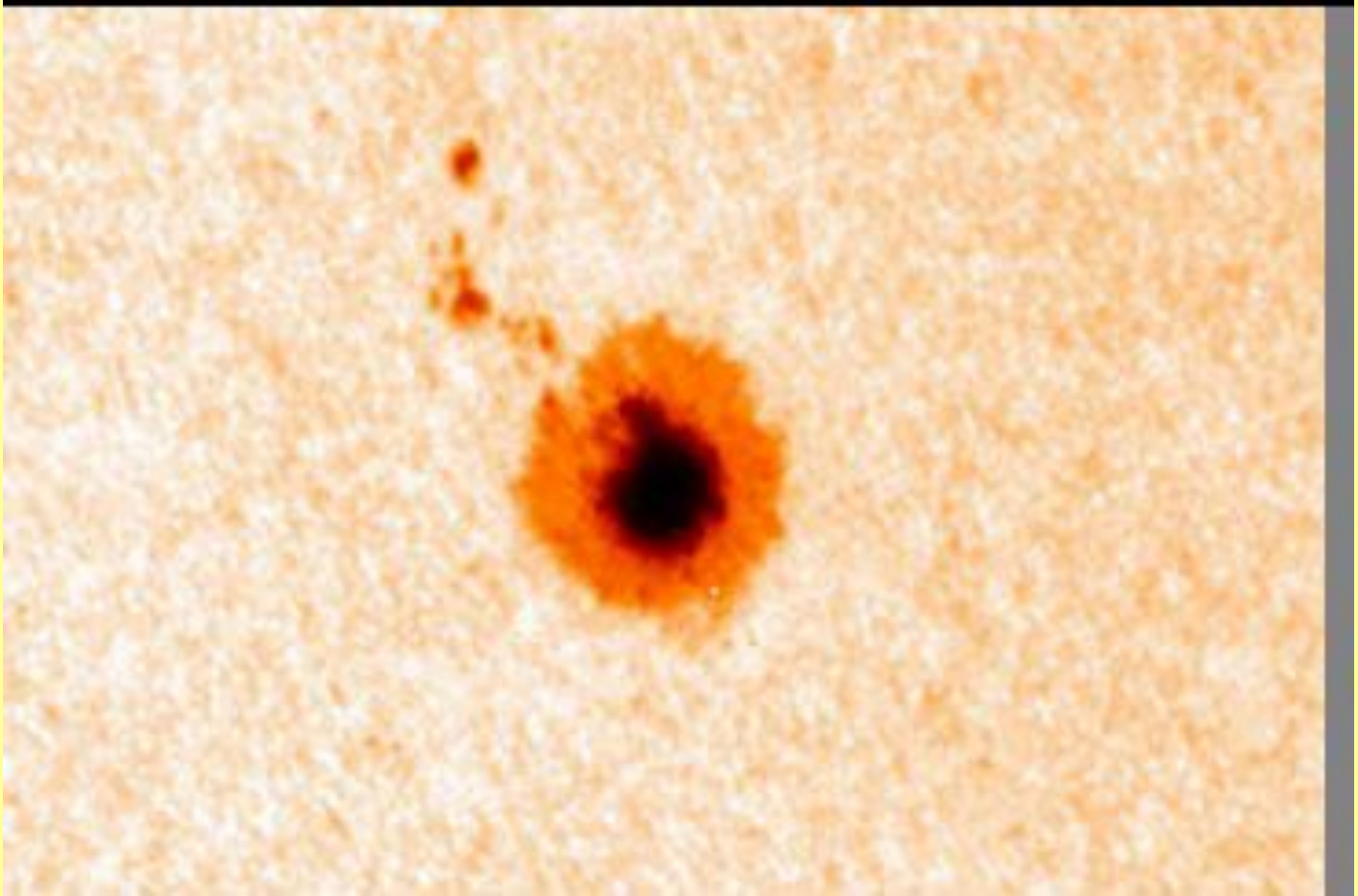
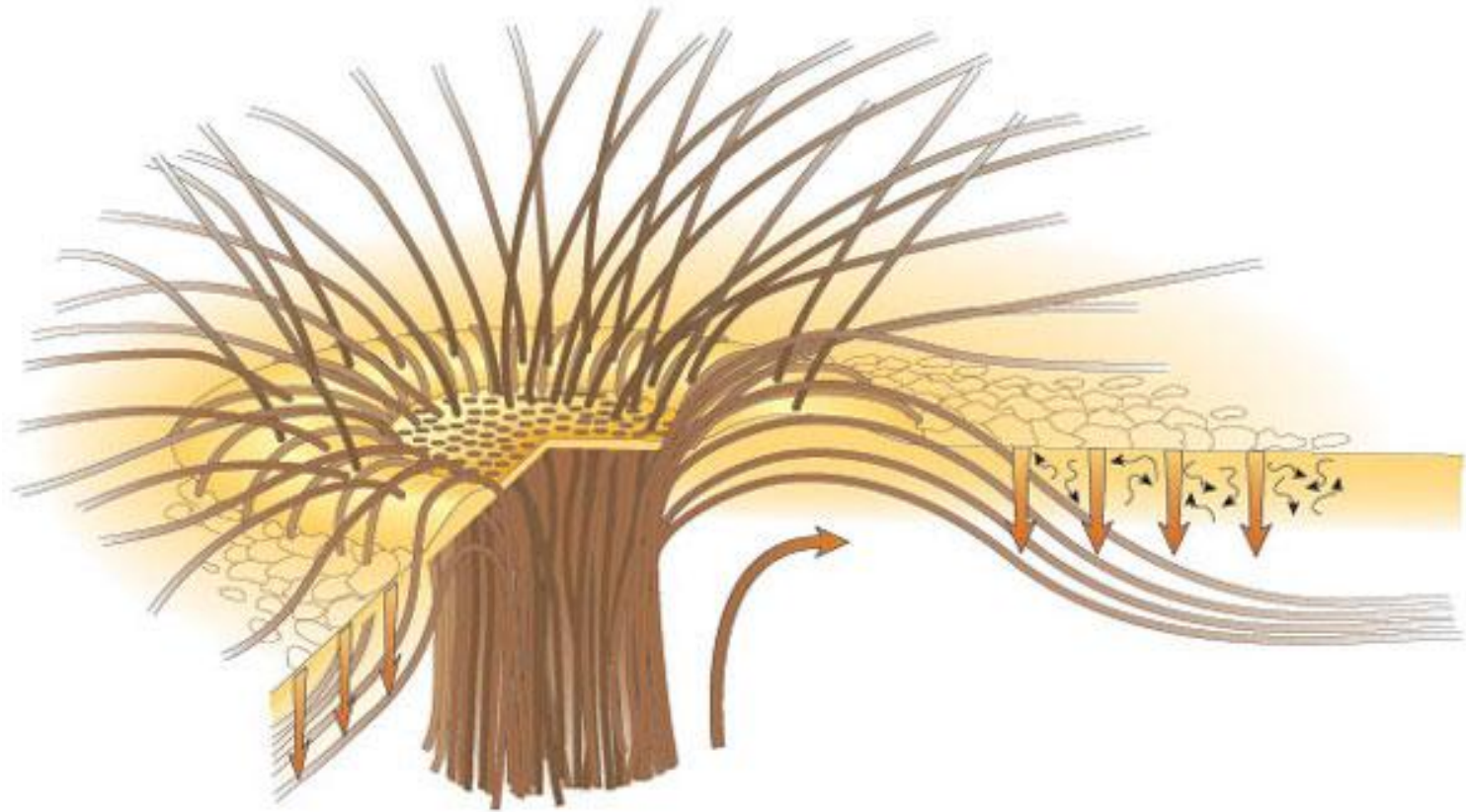


рис. 48. Магнитная классификация групп солнечных пятен. *N* и *S* означают верхнюю и южную полярности соответственно. Заштрихованные площади соответствуют кальциевым факелам.

Результати акустичної томографії



Сучасна модель сонячної плями (Thomas et al 2002)



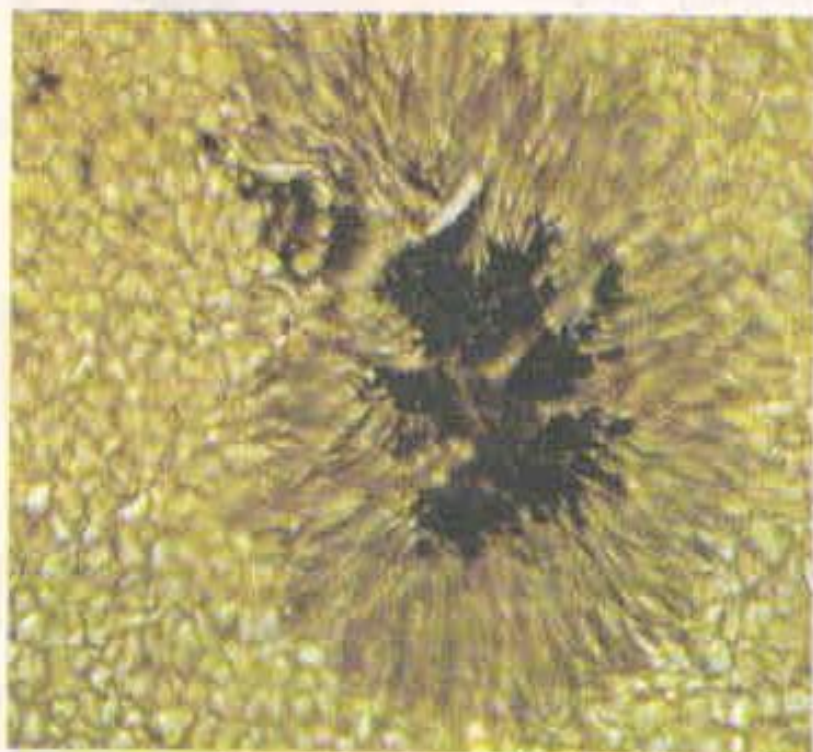


Рис. 12.5. Сонячна пляма — це область фотосфери, де знижується температура, бо сильне магнітне поле у плямі зупиняє конвекцію

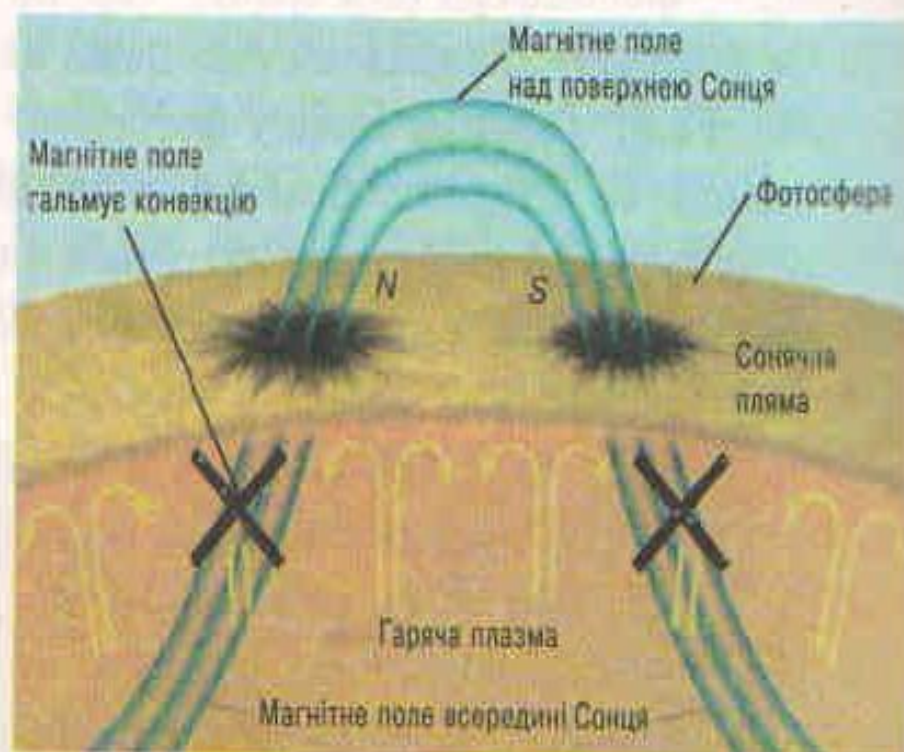
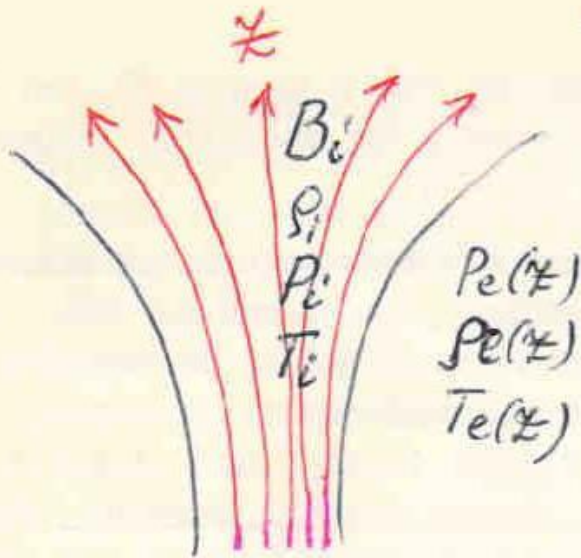


Рис. 12.6. Кожна пляма має свою магнітну полярність, тому плями з'єднані між собою попарно, як полюси у магніті

Рівноважна структура СП



Умова горизонтального балансу тисків по вертикалі

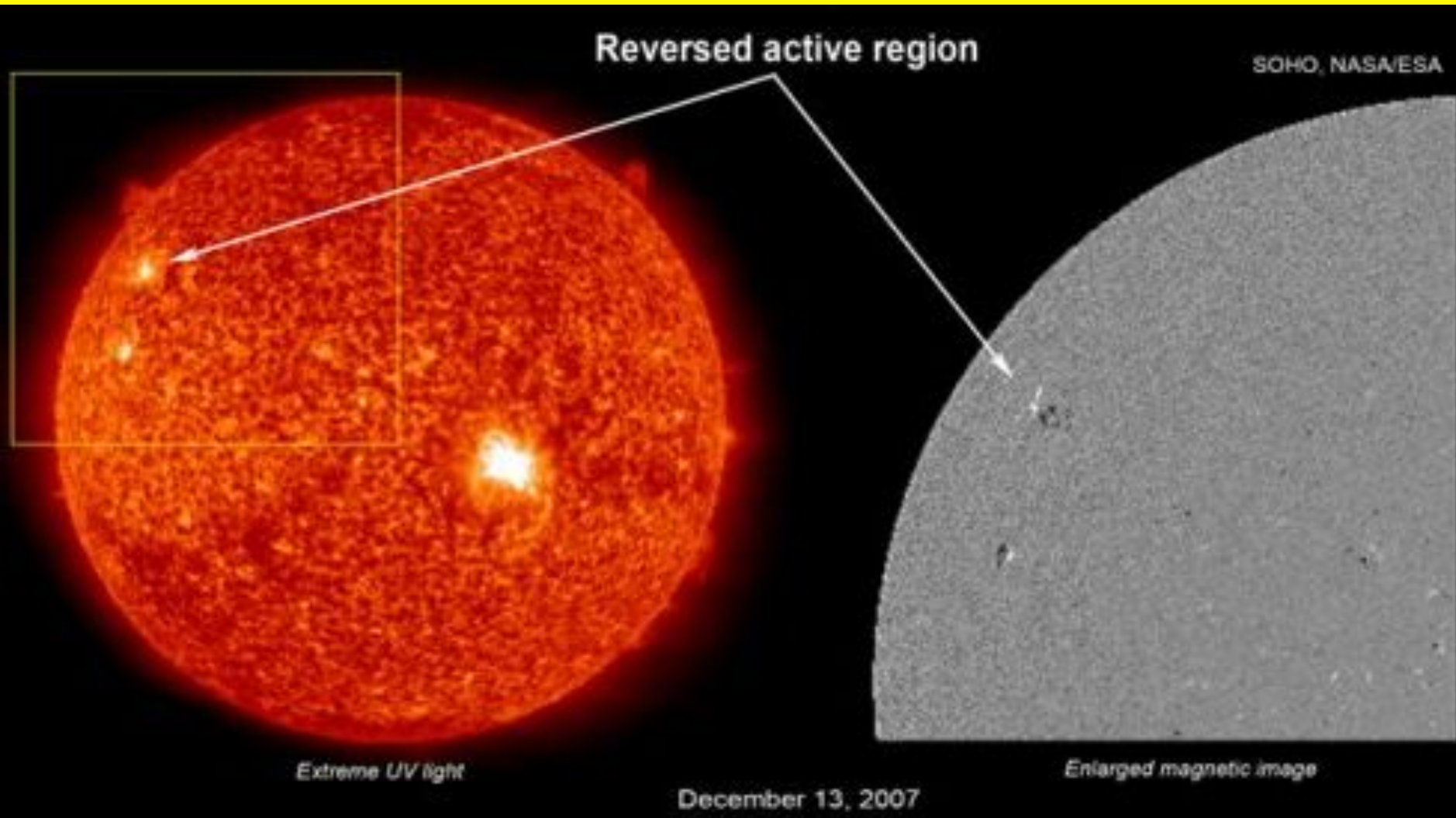
$$P_i(z) + \frac{B_i^2(z)}{8\pi} = P_e(z) \quad (A)$$

$$\frac{dP_e}{dz} = -\rho_e g, \quad \frac{dP_i}{dz} = -\rho_i g \quad (B)$$

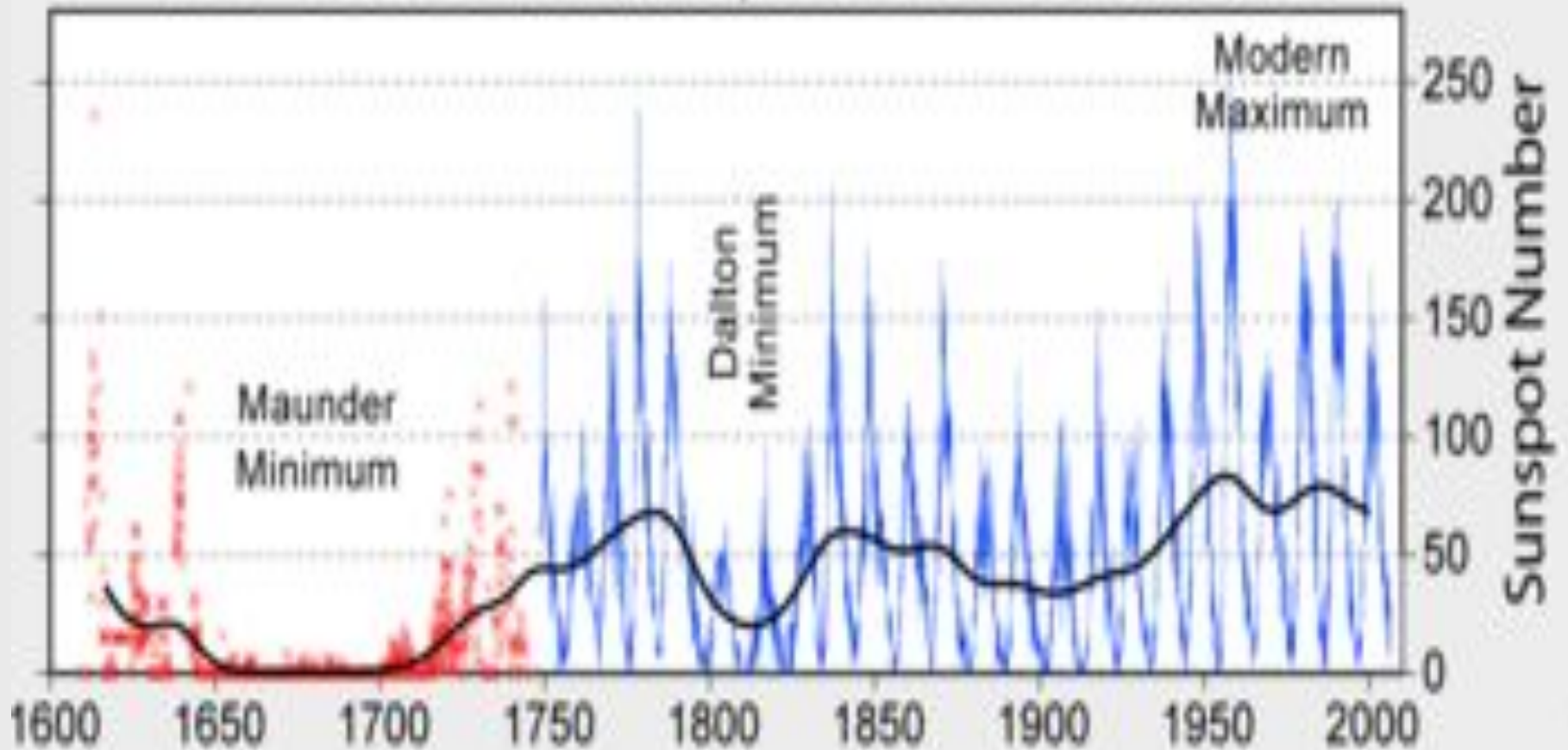
Умова (A)

Глибоко під фотосферою магнітний тиск $B_i^2/8\pi$ у вертикальним магнітним джгуті менше тиску плазми $P_e(z)$. Але на рівні фотосфери магнітний тиск, обумовлений полем 3000 Гс $B_i^2/8\pi \approx 2,4 \cdot 10^5$ дин/см² перевищує тиск оточуючого газу ($T_{5000}=1$) $P_e \approx 1,4 \cdot 10^5$ дин/см². В цьому випадку тиск магнітних силових ліній занадто великий для того, щоб утримати їх разом. Тому вони розходяться вбоки, внаслідок чого величина магнітної індукції B_i зменшується. Отримане зменшення B_i^2 із рівняння (A) дає, що градієнт тиску в плямі $\frac{dP_i}{dz} > \frac{dP_e}{dz}$. Тоді із рівнянь (B) $-\rho_i g > -\rho_e g$ або $\rho_i < \rho_e$. Цей дефіцит густини в СП створює ефект Вільсона.

14 грудня 2007 – з’явилася АО, де пізніше буде
буде видно сонячну пляму 24-го циклу на
високих широтах

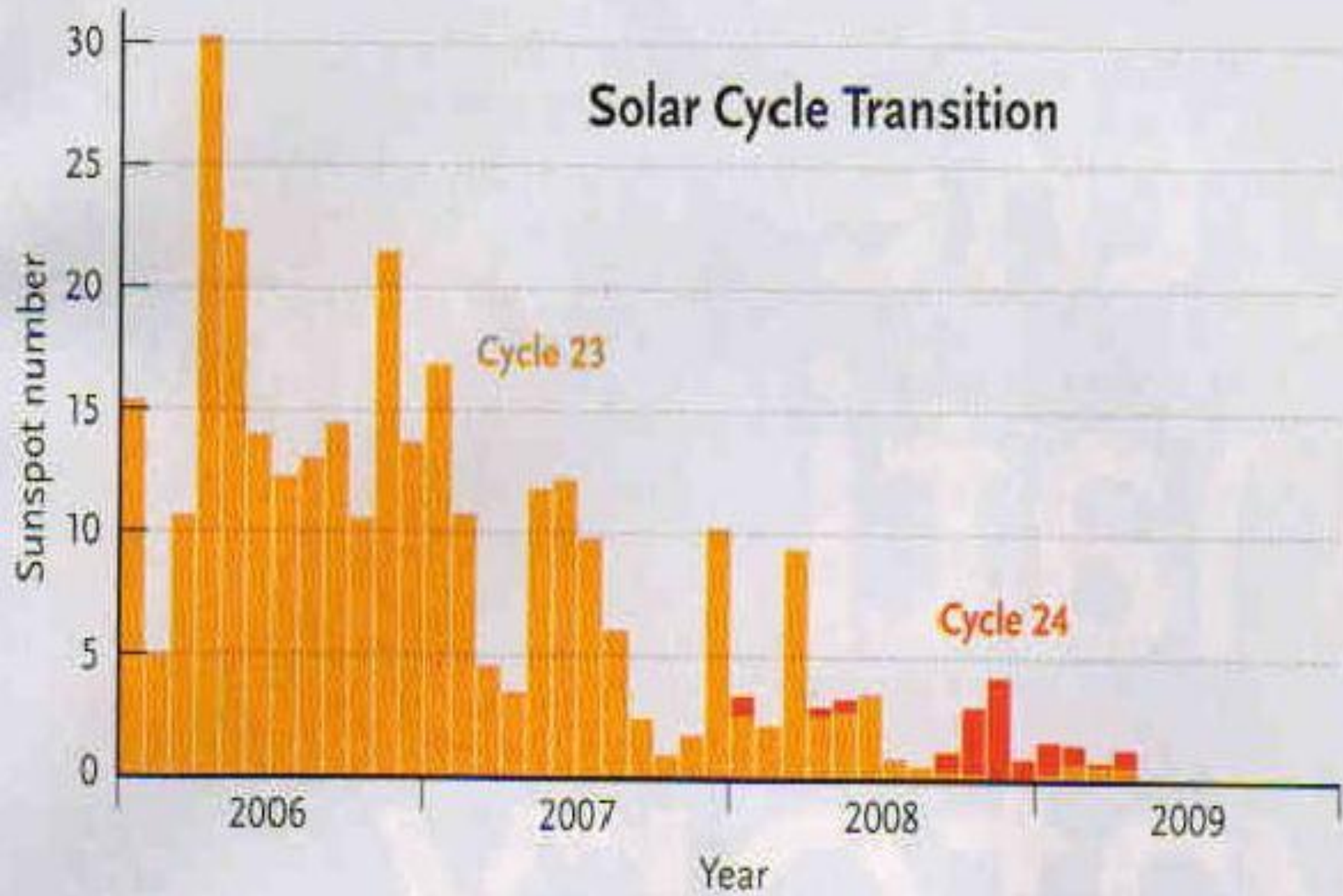


400 Years of Sunspot Observations

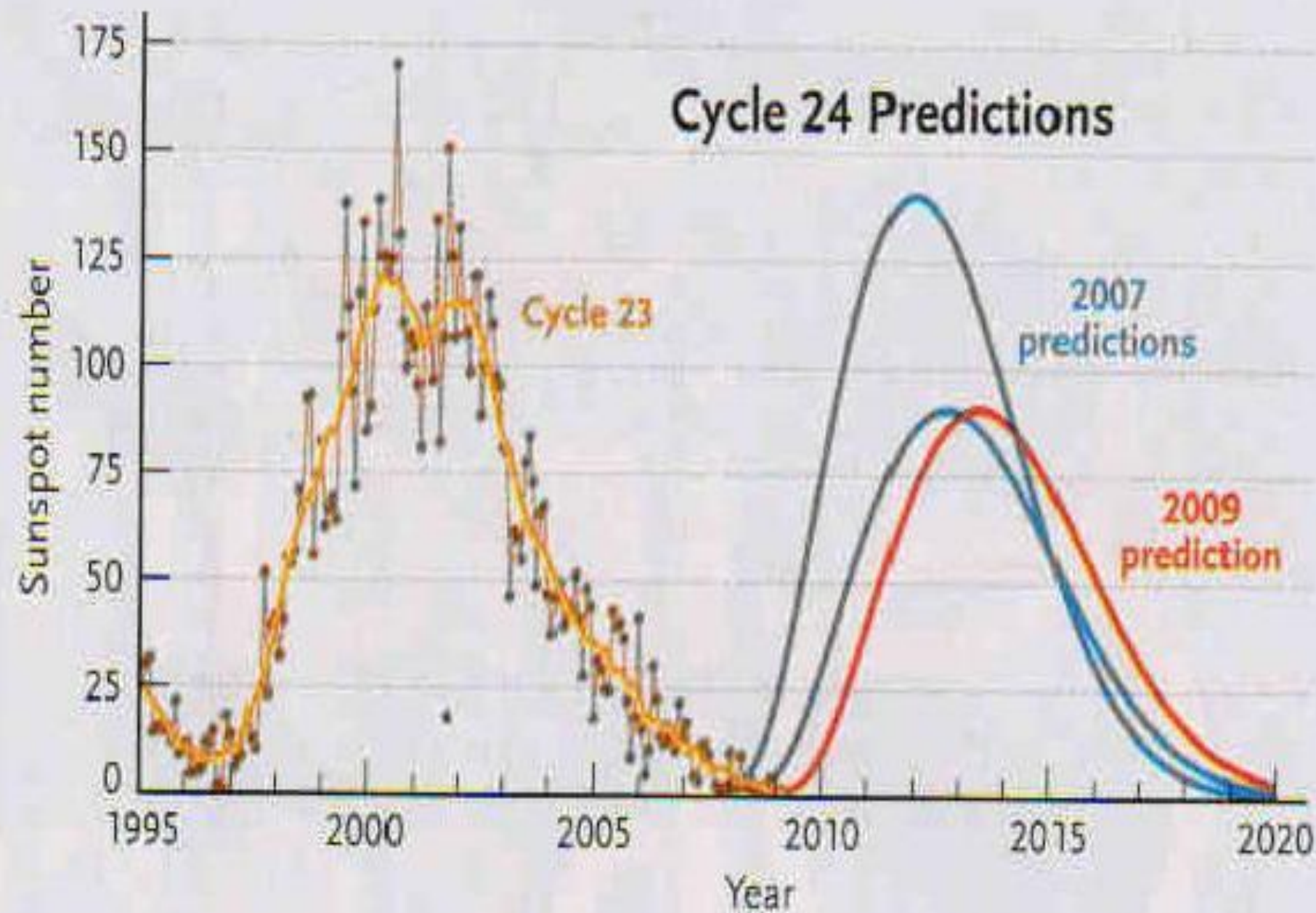


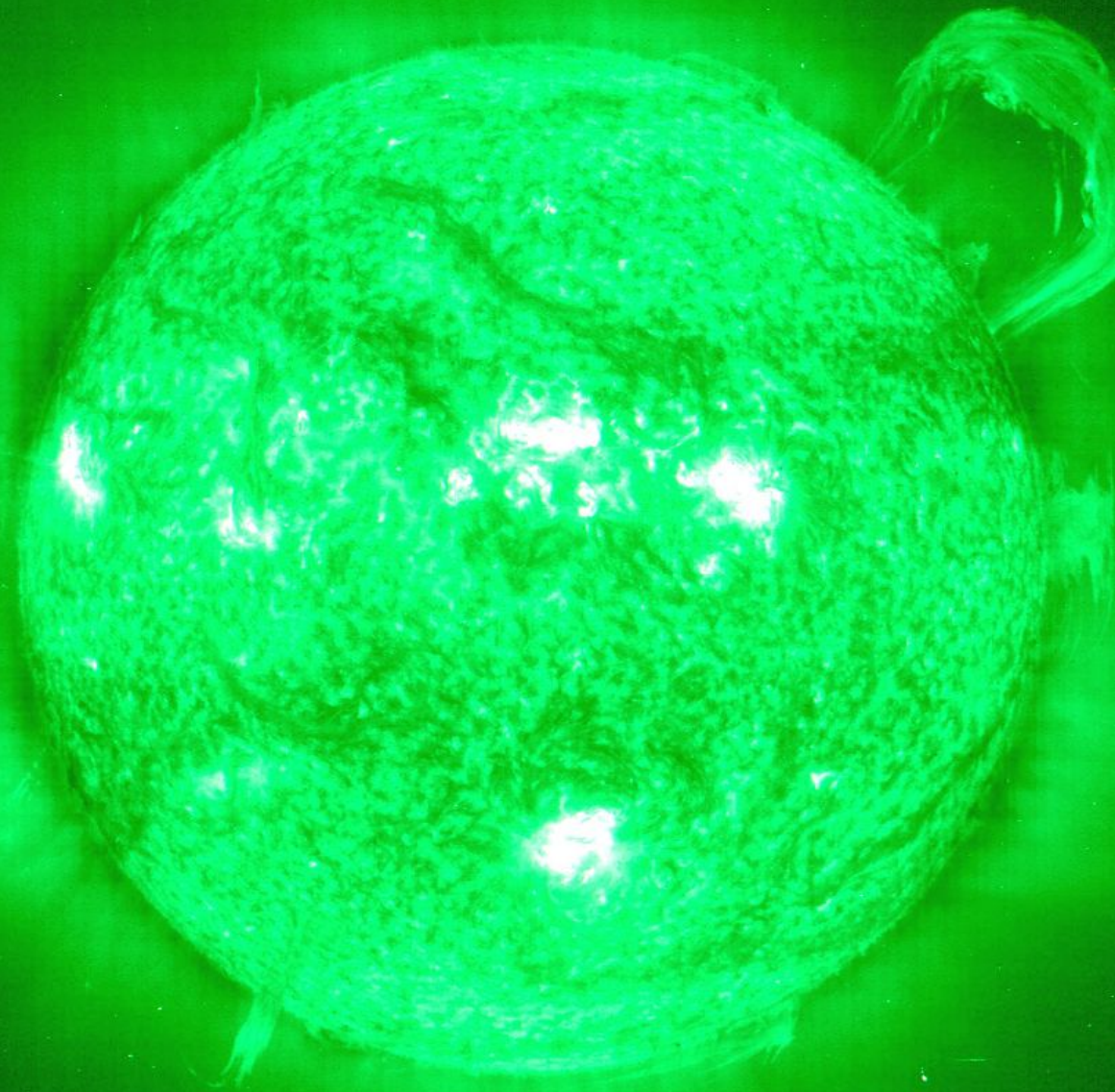
Мінімум Маундера : 1645 – 1715 pp.

Solar Cycle Transition



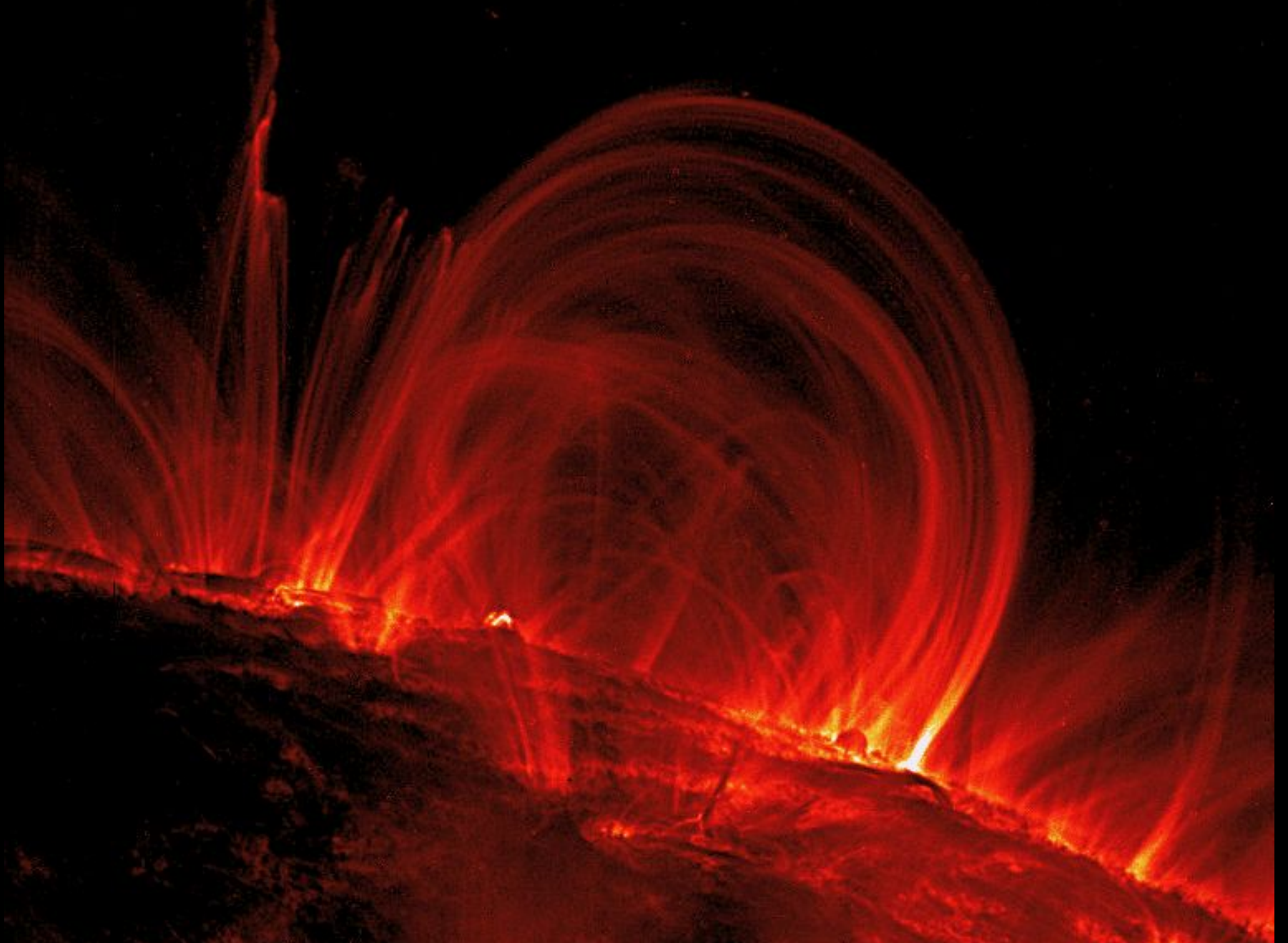
Cycle 24 Predictions



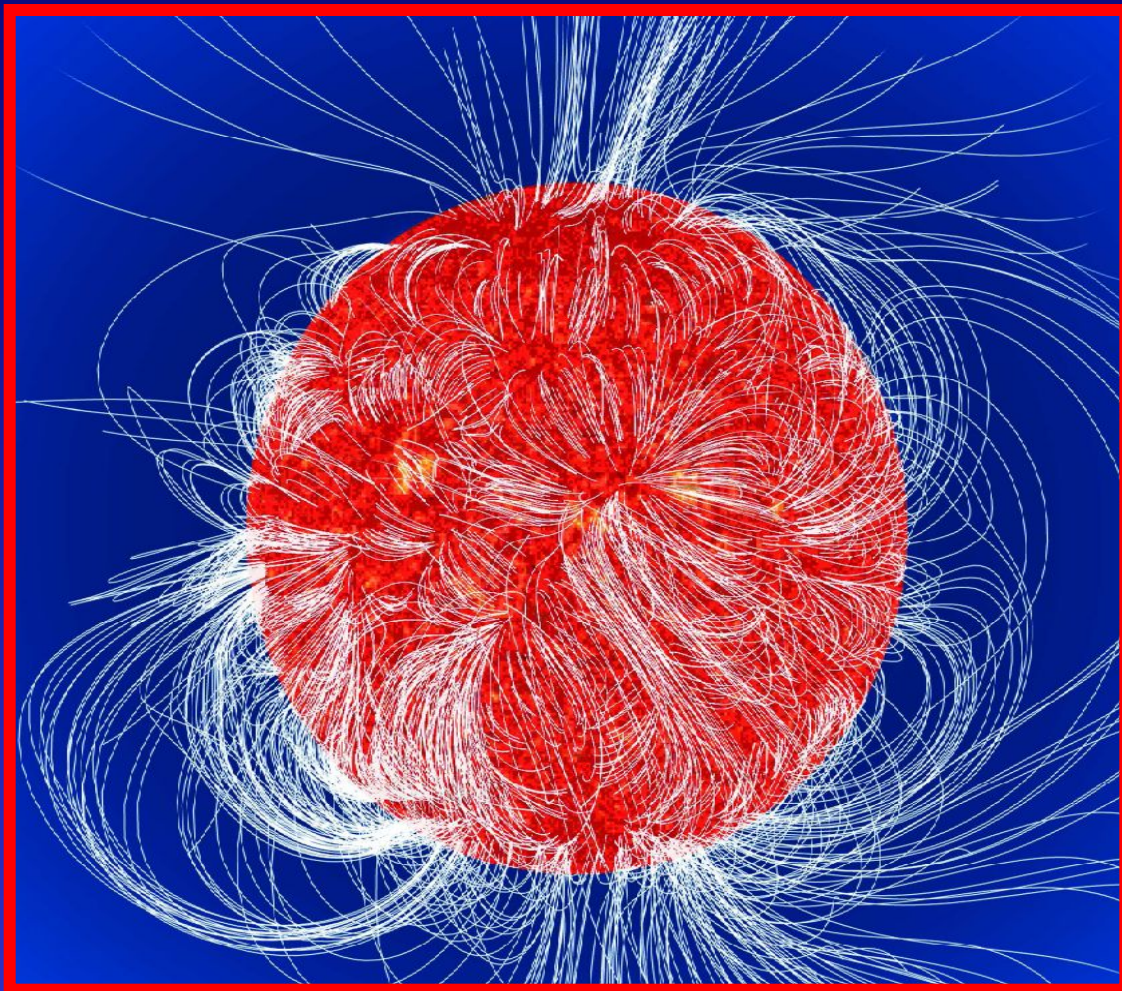


Сонячні протуберанці

Структура магнітного поля



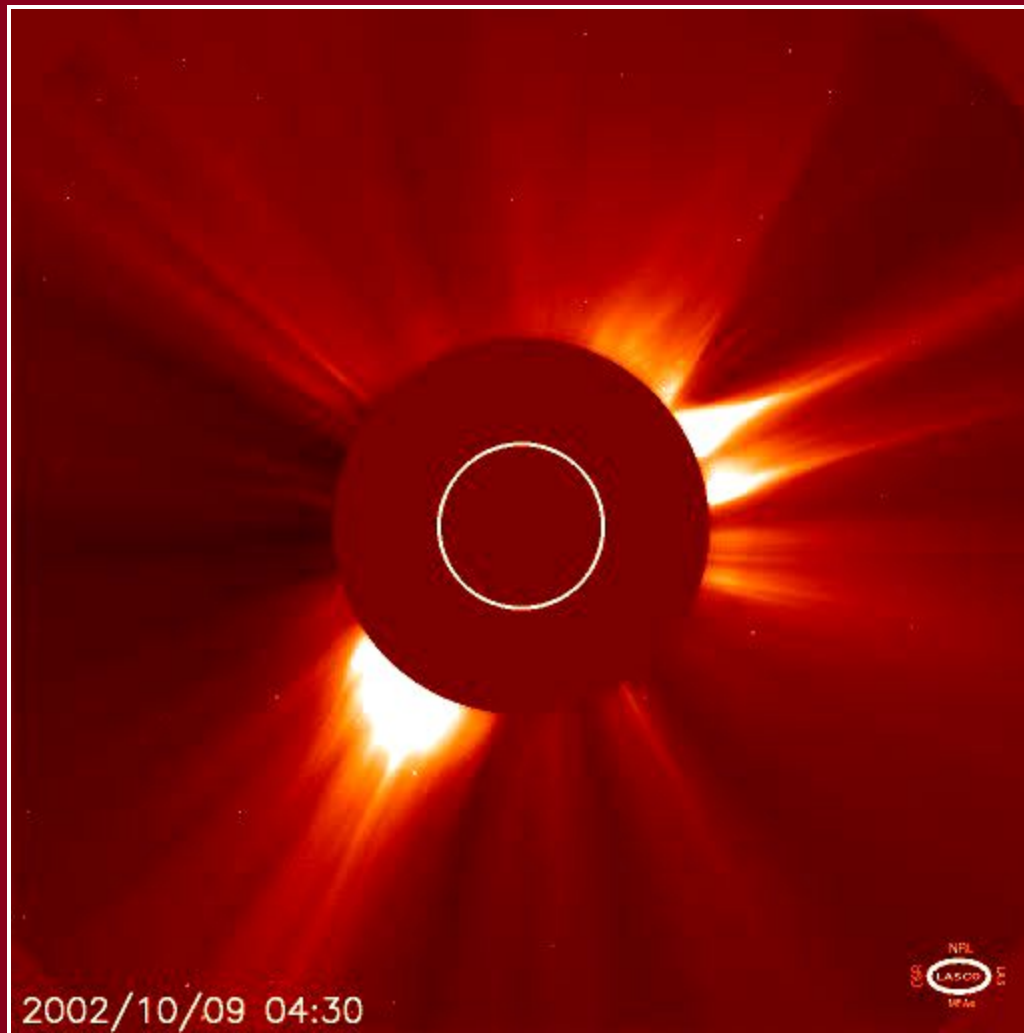
Extrapolations of magnetic field from photospheric magnetograms



Important help for knowing magnetic field in corona

Wiegelmann 2005

Сонячна корона



Принципово новий шлях
до вивчення внутрішньої області Сонця відкрила в останні роки

Геліосейсмологія –

розділ геліофізики, в якому вивчається внутрішня будова Сонця на основі даних про спектр коливань його поверхневих шарів.

Постійні хвильові рухи, подібно до сейсмічних хвиль на Землі, потрясають надра Сонця.

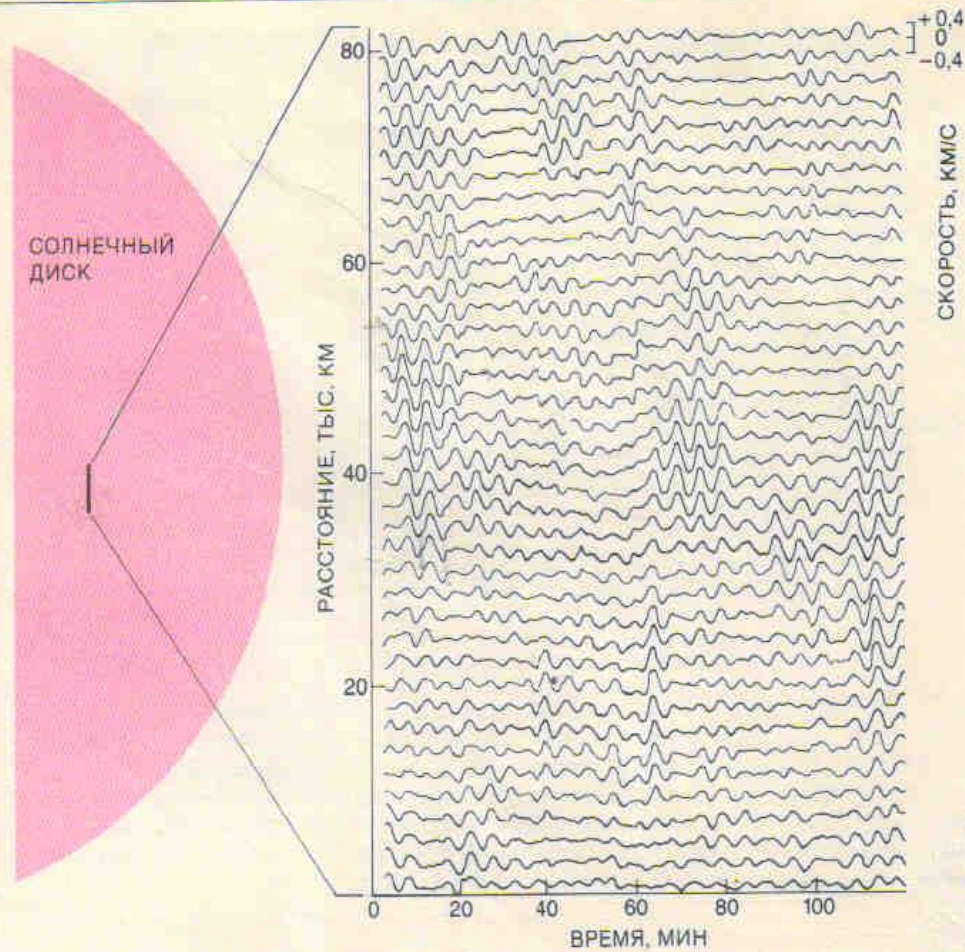
Під впливом хвиль, які досягають поверхні Сонця, зовнішні шари починають підніматися і опускатися.

Це приводить до зміни частоти спектральних ліній у випромінюваному Сонцем світлі.

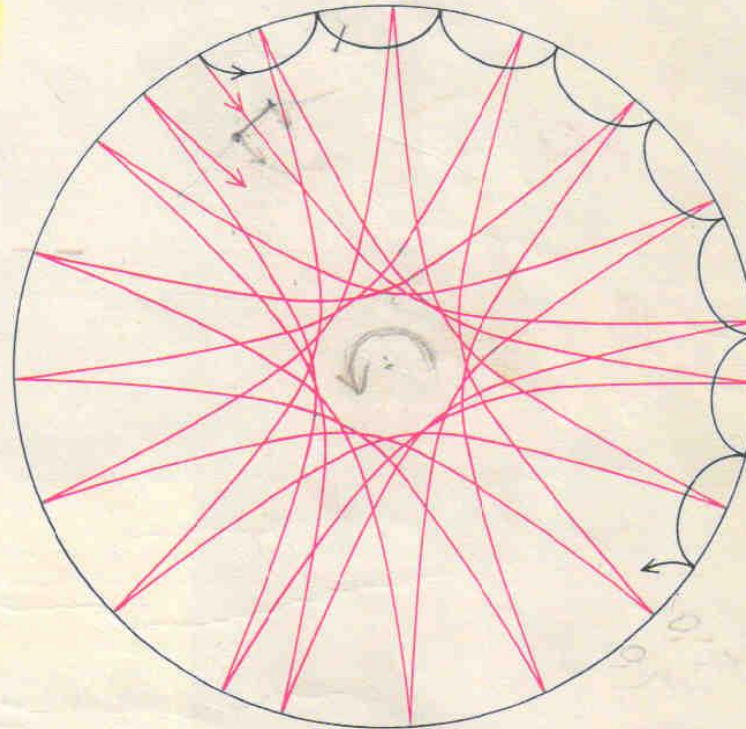
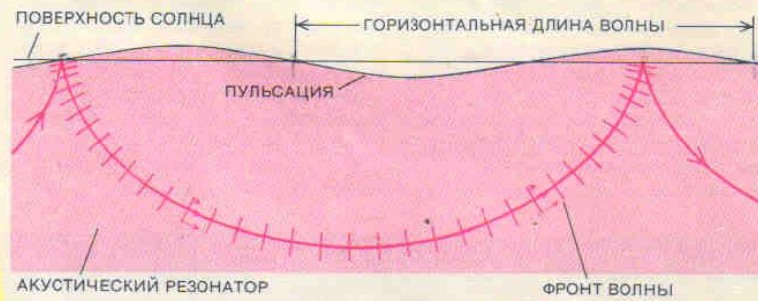
Малюнок демонструє змодельовану на комп'ютері картину коливання сонячної поверхні.

Спеціалісти з фізики Сонця спостерігають на сонячній поверхні ці коливання для отримання інформації про його внутрішню структуру, зокрема,

про внутрішнє обертання Сонця.



ПЯТИМИНУТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ видны на графиках зависимости радиальной скорости от времени для различных точек солнечной поверхности. В каждой точке газ поднимается и опускается с периодом около 5 мин. Максимальное значение радиальной скорости около 0,4 км/с. Движения газа на поверхности вызваны суперпозицией 10 млн. различных акустических резонансных мод. Моды интерферируют друг с другом, что приводит к усилению и ослаблению движений и создает переменное распределение скоростей по поверхности Солнца. С. Масмен и Д. Раст из Обсерватории Сакраменто-Пик составили карту этих движений, основываясь на доплеровском смещении спектральных линий, измеренном в каждой точке.



ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ волн под поверхностью Солнца приводит к удержанию акустических волн внутри резонатора. Волна, распространяющаяся из недр Солнца, отражается за счет резкого уменьшения плотности у солнечной поверхности (*вверху*). Отраженная волна, проникая в глубь Солнца, преломляется за счет увеличения скорости звука с глубиной. В результате фронт волны поворачивается и волна начинает двигаться к поверхности. Захваченные таким образом волны интерферируют сами с собой и создают резонансные моды, которые можно обнаружить по колебаниям газа на поверхности. Горизонтальная длина волны и период поверхностных колебаний зависят от периода волны, вызывающей резонанс, и глубины ее проникновения. Глубина проникновения в свою очередь зависит от ориентации волны в момент ее отражения. Как показано на разрезе Солнца (*внизу*), чем меньше угол между направлением распространения волны и направлением на центр, тем слабее преломляется волна и тем глубже она проникает. Волны, идущие под большими углами, преломляются сильнее и удерживаются в более мелком резонаторе.

$l=2, m=0$



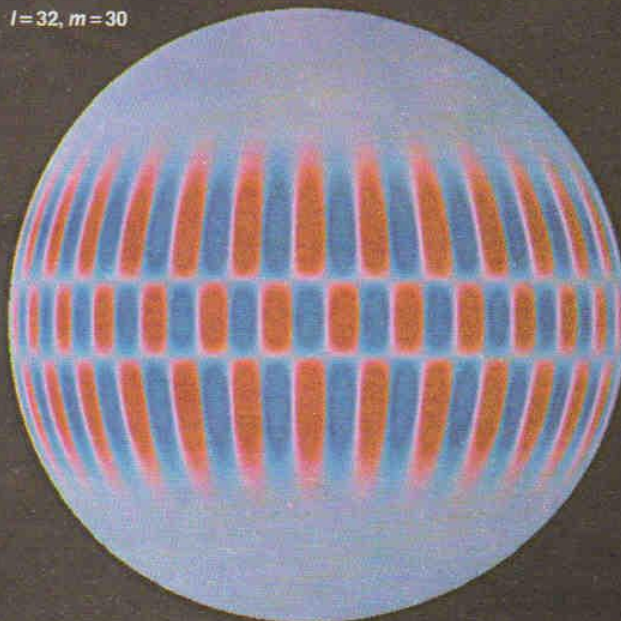
$l=10, m=0$



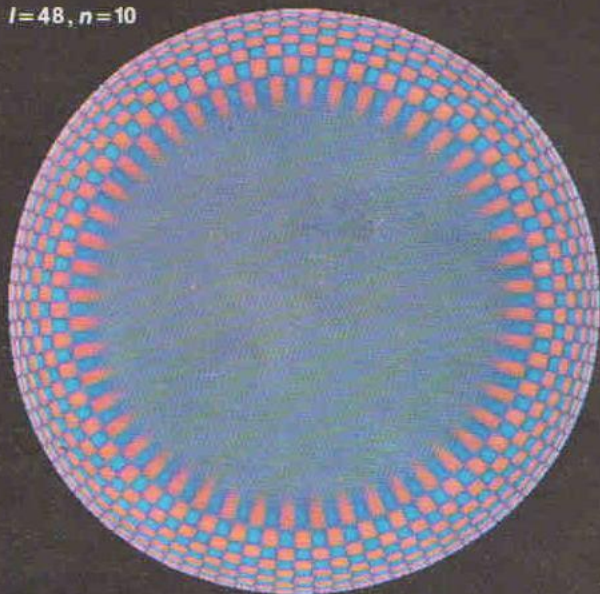
$l=30, m=30$



$l=32, m=30$



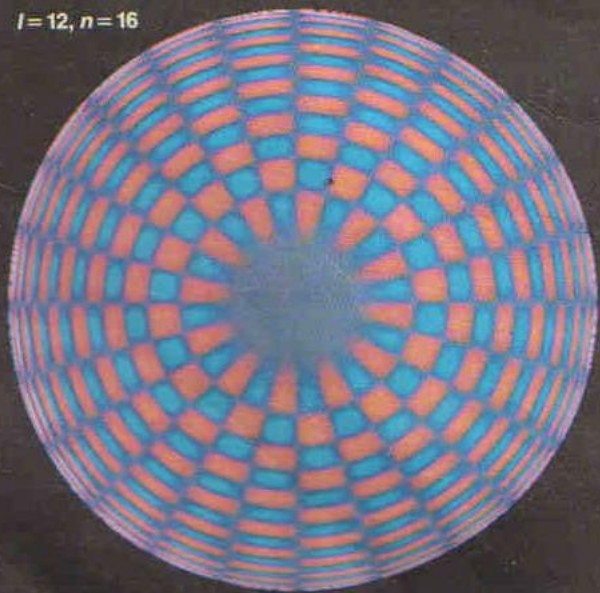
$l=48, n=10$



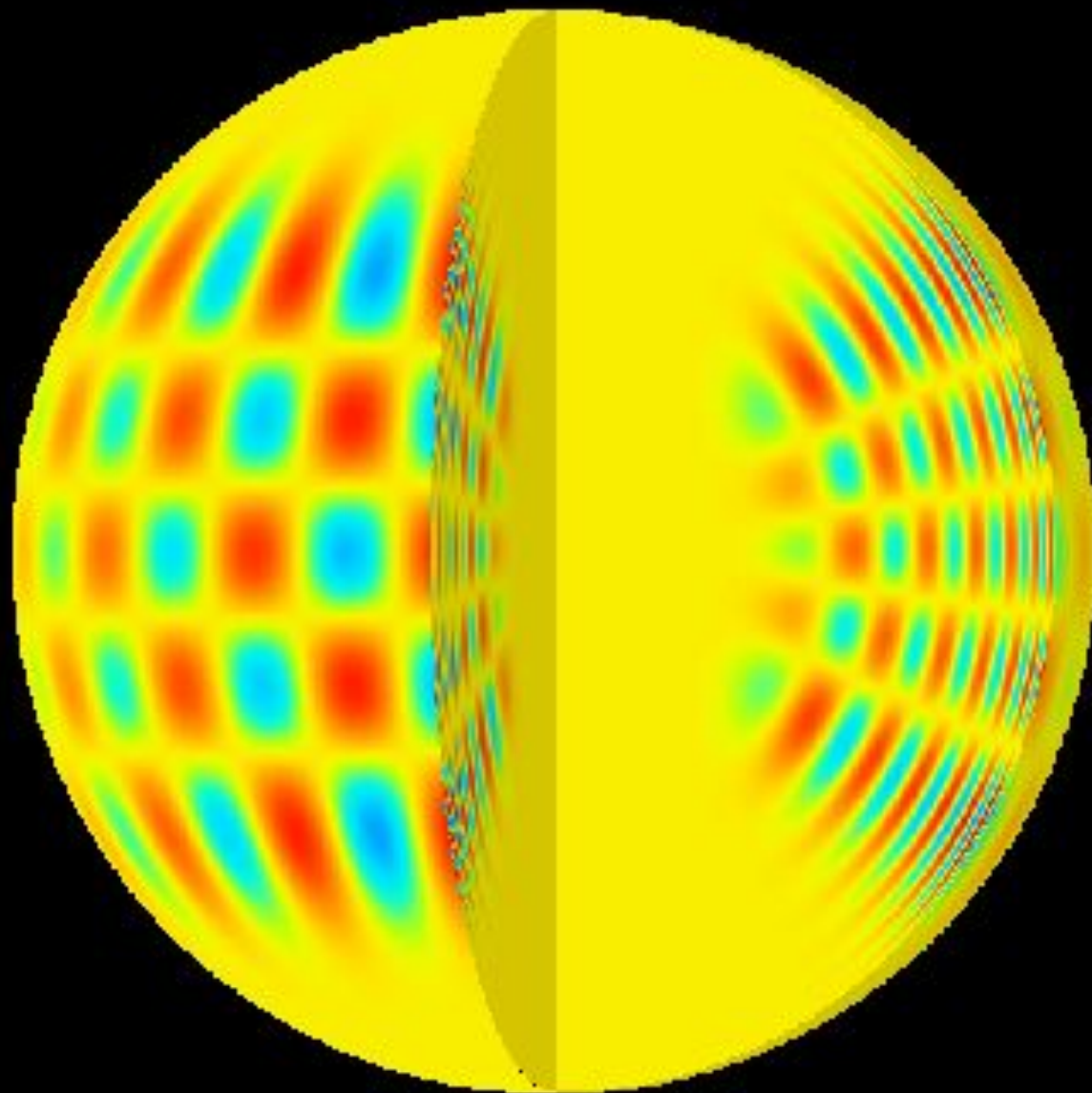
$l=24, n=13$



$l=12, n=16$

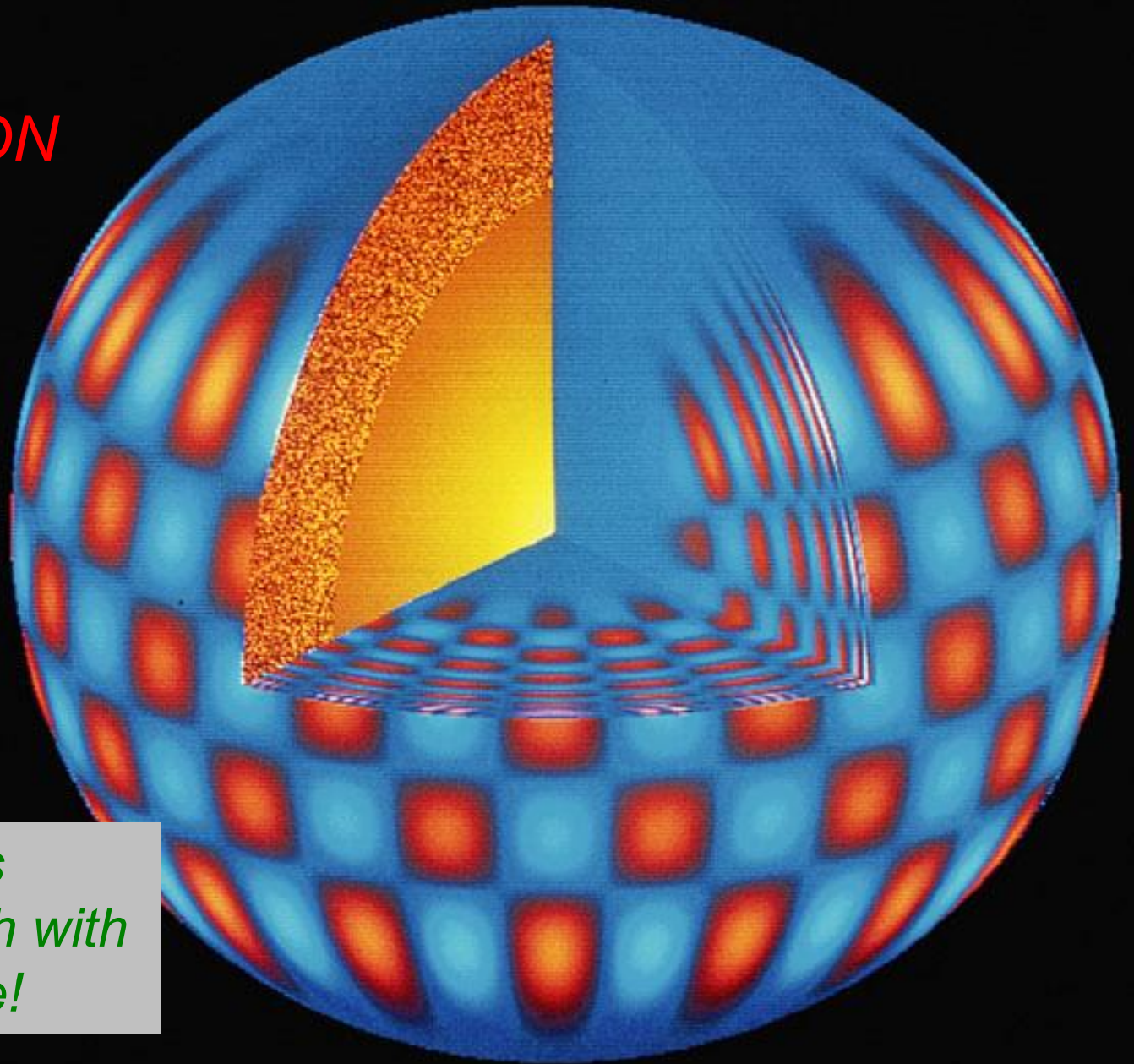


НА РАЗРЕЗЕ СОЛНЦА ПО ЭКВАТОРУ видна радиальная структура различных резонансных мод, смоделированная на ЭВМ. Красным цветом показаны области, в которых газ в данный момент движется к центру Солнца; синим цветом — области с противоположным направлением движения. Чем выше радиальный порядок моды (n), который равен числу узлов, укладываемых вдоль радиуса Солнца, тем короче ее период и тем глубже проникает данная мода. Глубина проникновения зависит также от степени (l), которая обратно пропорциональна горизонтальной длине волны; с уменьшением l увеличивается глубина, которой достигает мода. Волны с большим отношением nk/l проникают глубже. Наблюдая поверхностные колебания, генерируемые волнами, проникающими на различные глубины, можно рассчитать изменение скорости звука с глубиной. Это позволит узнать, как меняются температура и химический состав в недрах Солнца — характеристики, от которых зависит скорость звука.

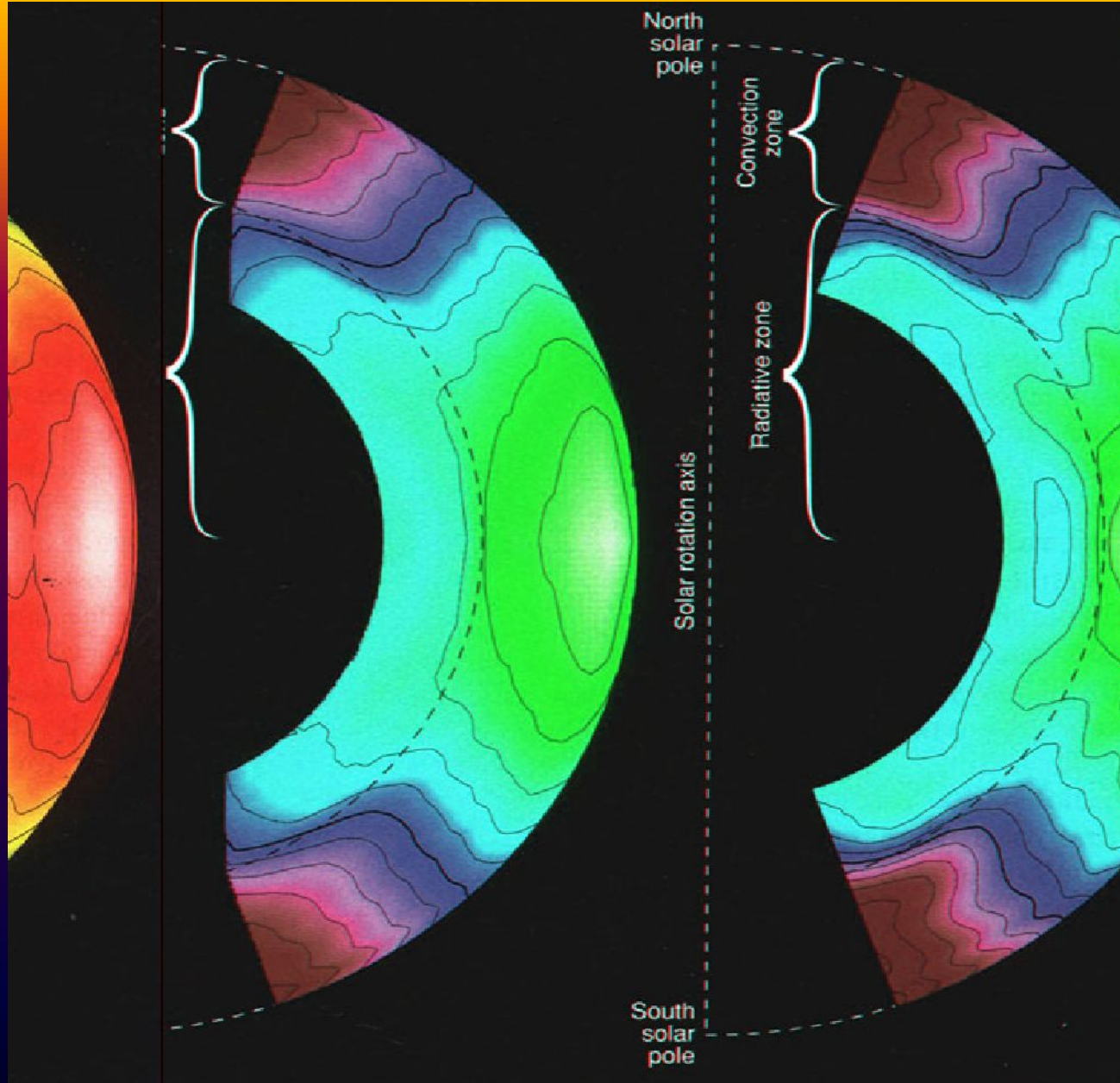


Геліосейсмологічні експерименти

*SOLAR
OSCILLATION
MODE*

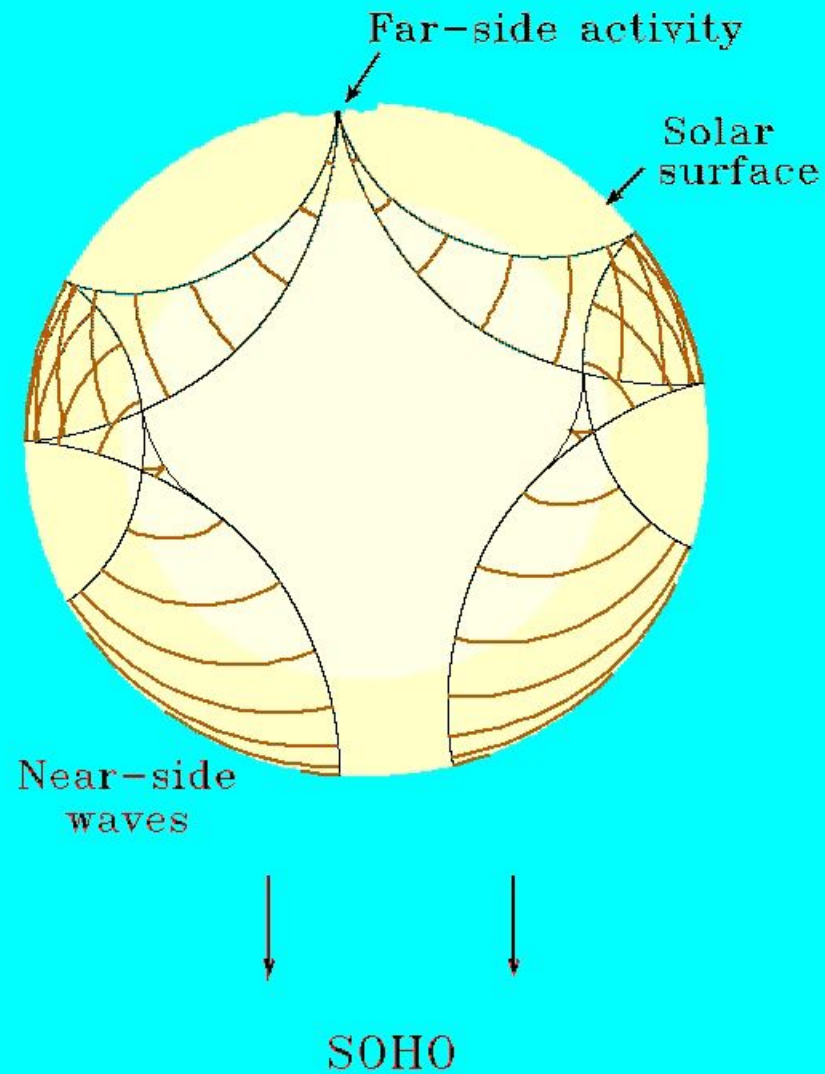


*One of millions
of modes, each with
a different tone!*

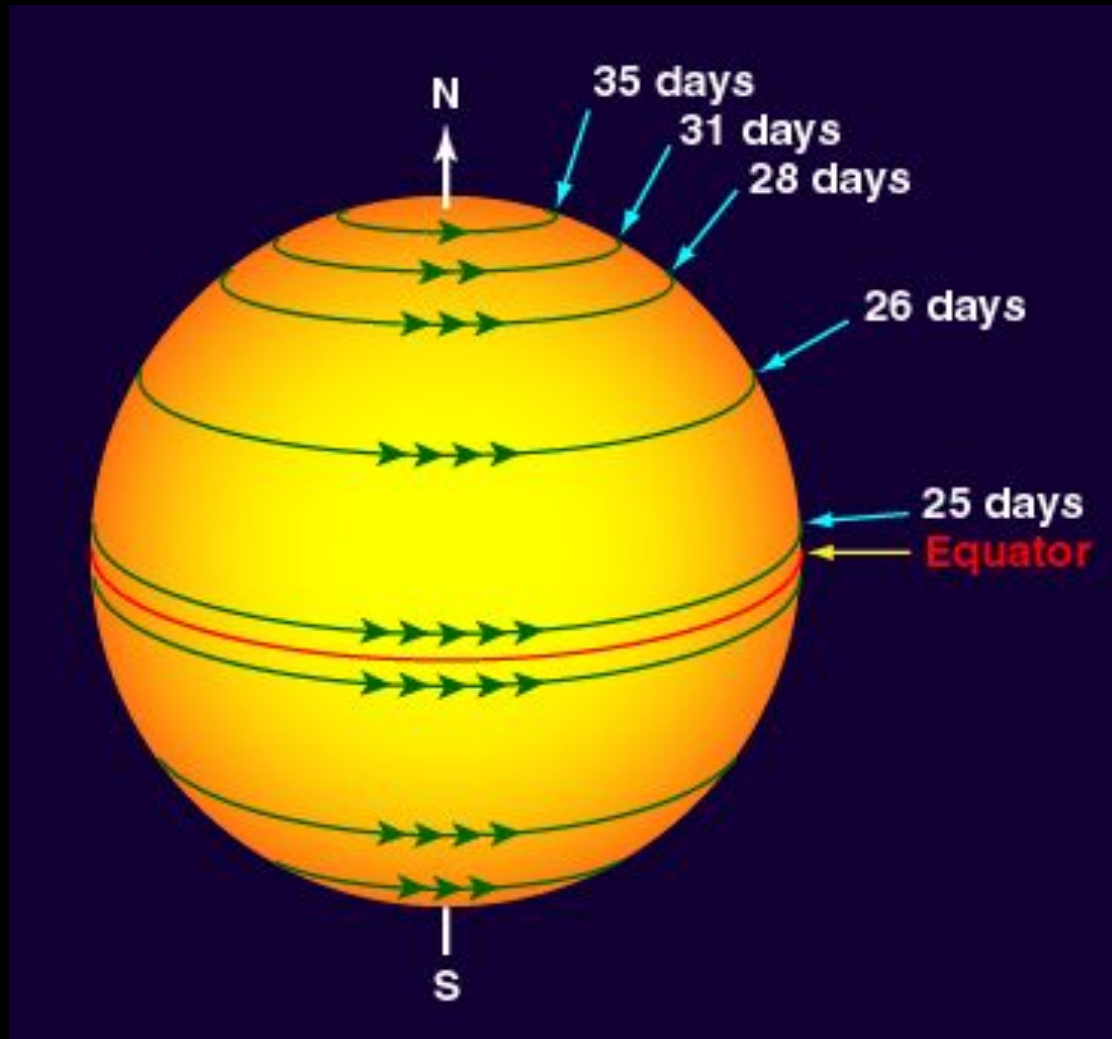


**Внутрішнє обертання Сонця
(меридіональний розріз)**

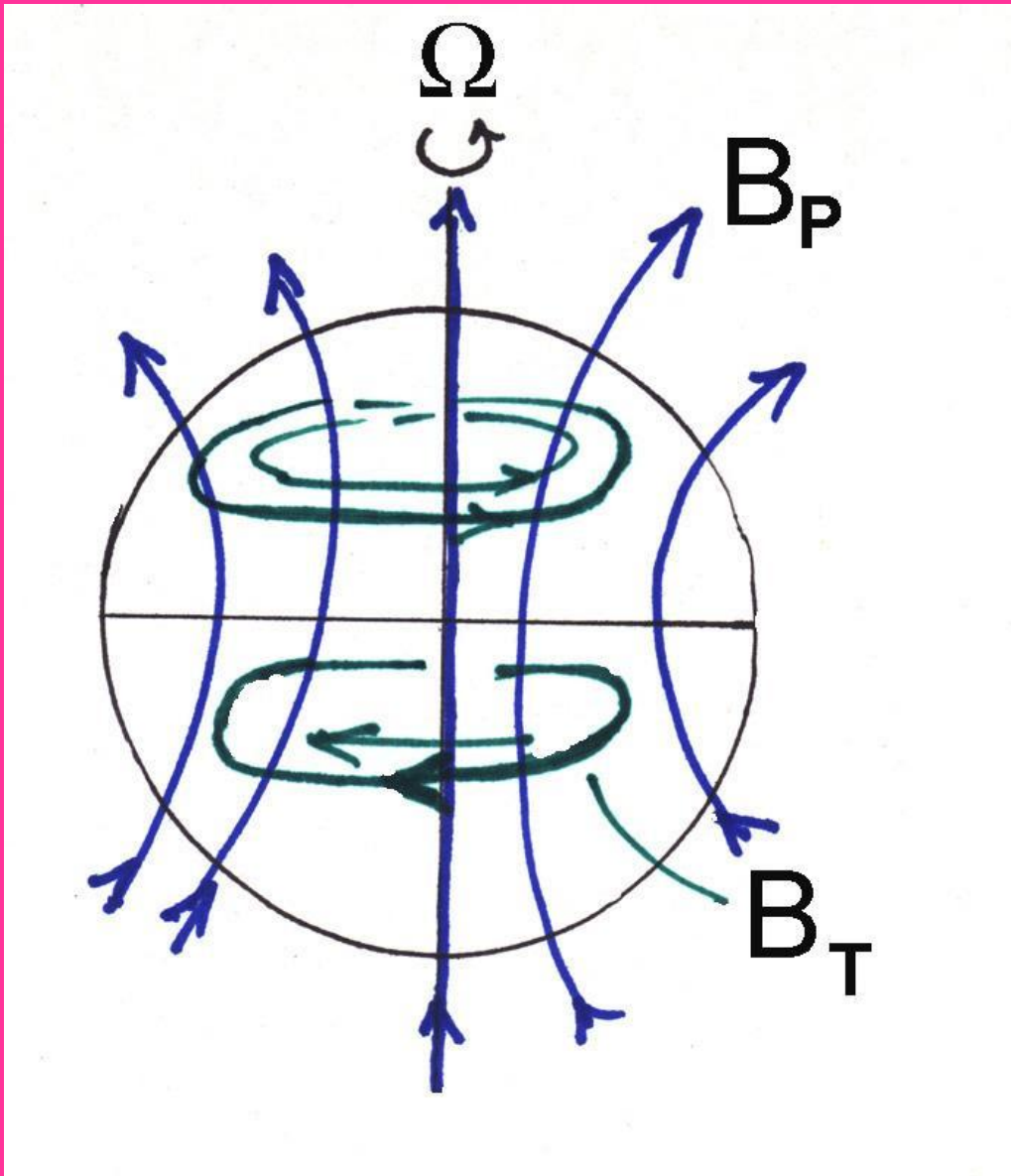
Спостереження плям на зворотньому боці Сонця



Диференційне обертання і СОНЯЧНИЙ ЦИКЛ



Структура загального магнітного поля Сонця



$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_T + \mathbf{B}_P = B_\varphi \mathbf{i}_\varphi + \text{rot} (A \mathbf{i}_\varphi)$$

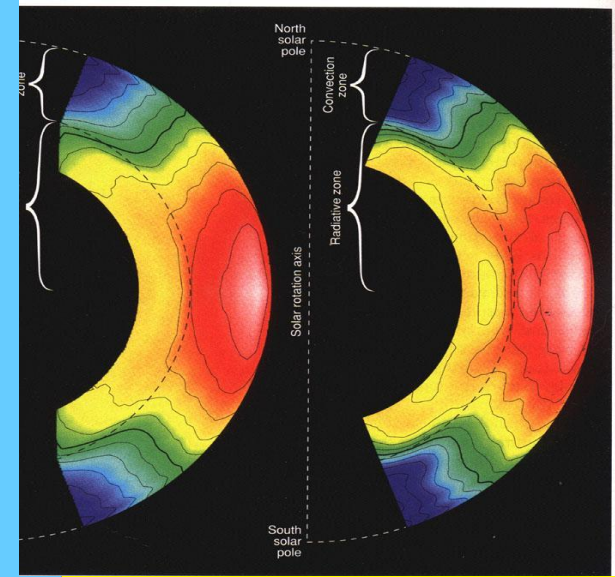
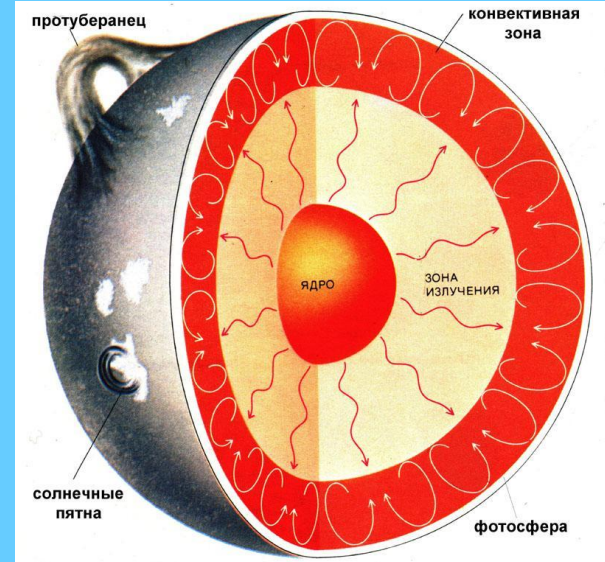
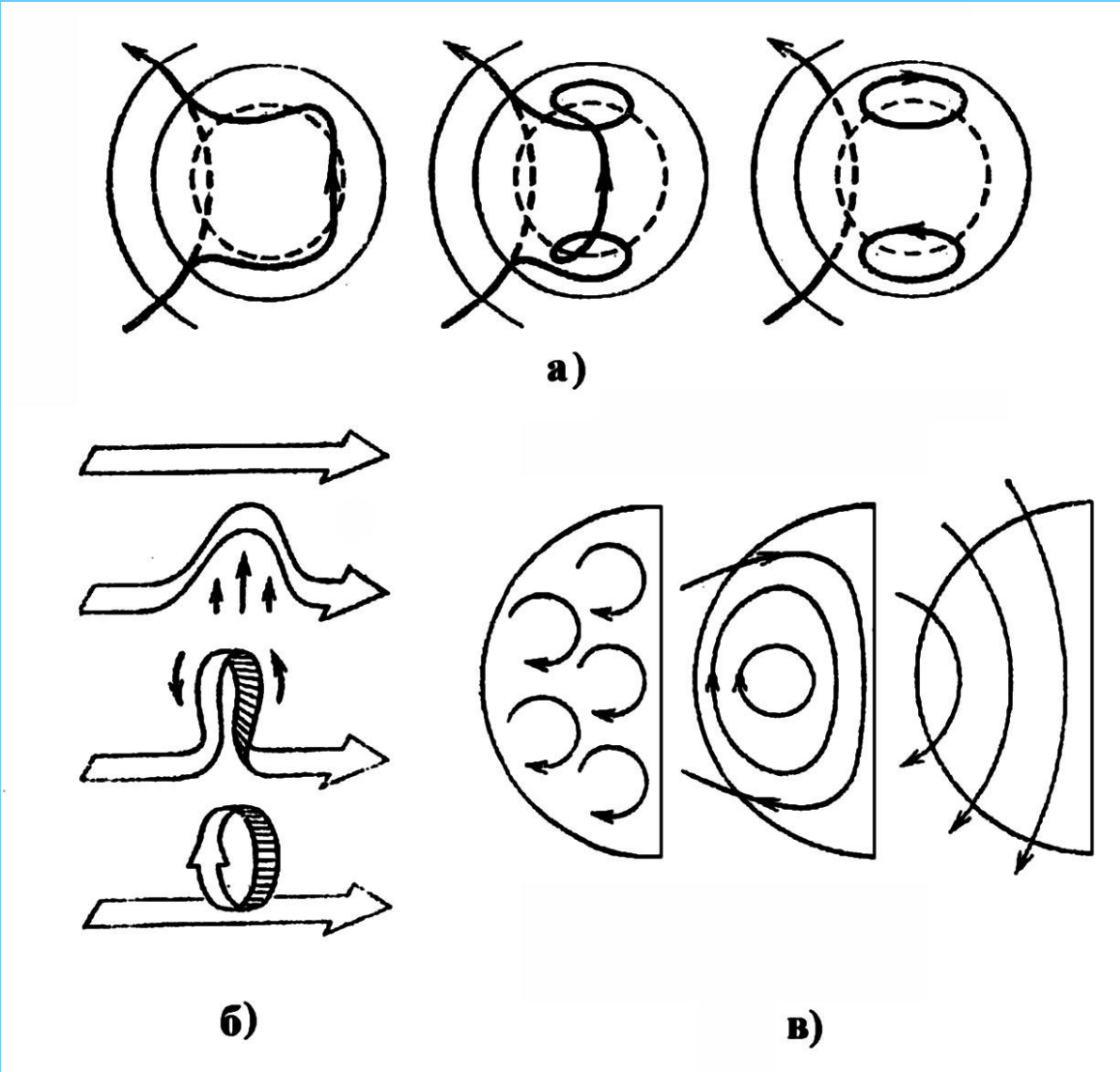
$$\mathbf{B}_T = B_\varphi \mathbf{i}_\varphi$$

$$\mathbf{B}_P = B_r \mathbf{i}_r + B_\theta \mathbf{i}_\theta,$$

$$\mathbf{B}_P = \text{rot} \mathbf{A},$$

$$\mathbf{A} = A \mathbf{i}_\varphi.$$

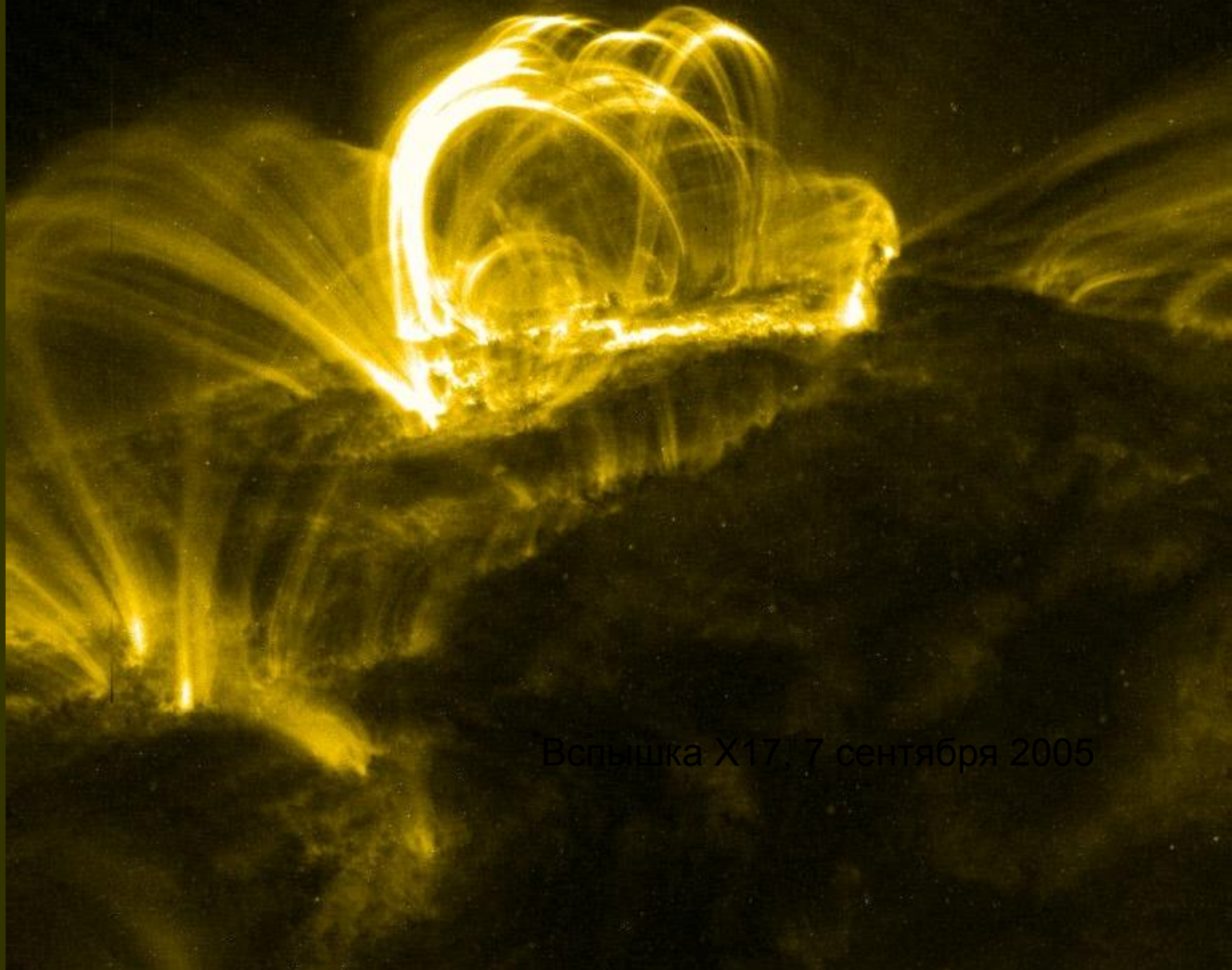
$$\partial \mathbf{B}_T / \partial t = r \sin \theta (\mathbf{B}_P \nabla) \boldsymbol{\Omega} \mathbf{i}_\varphi - \text{rot} [\mathbf{v}_T^{1/2} \text{rot} (\mathbf{v}_T^{1/2} \mathbf{B}_T)] \quad \boldsymbol{\Omega}\text{-эффект}$$



$$\partial \mathbf{A} / \partial t = \alpha \mathbf{B}_T - \text{rot} [\mathbf{v}_T^{1/2} \text{rot} (\mathbf{v}_T^{1/2} \mathbf{A})] \quad \alpha\text{-эффект}$$

“ $\alpha\Omega$ - динамо”

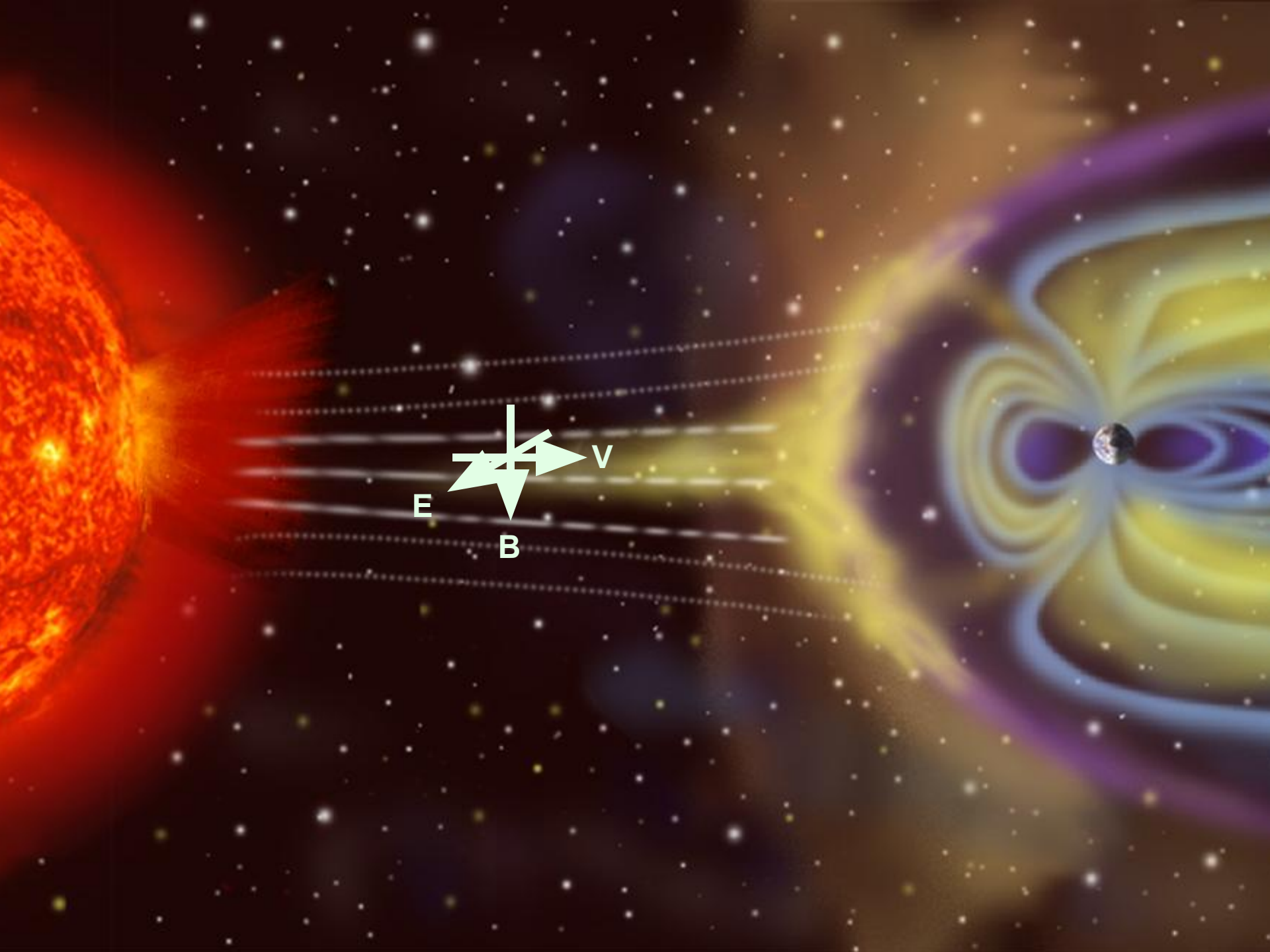
Сонячний спалах



Вспышка X17, 7 сентября 2005

Плазмові кільця в атмосфері Сонця





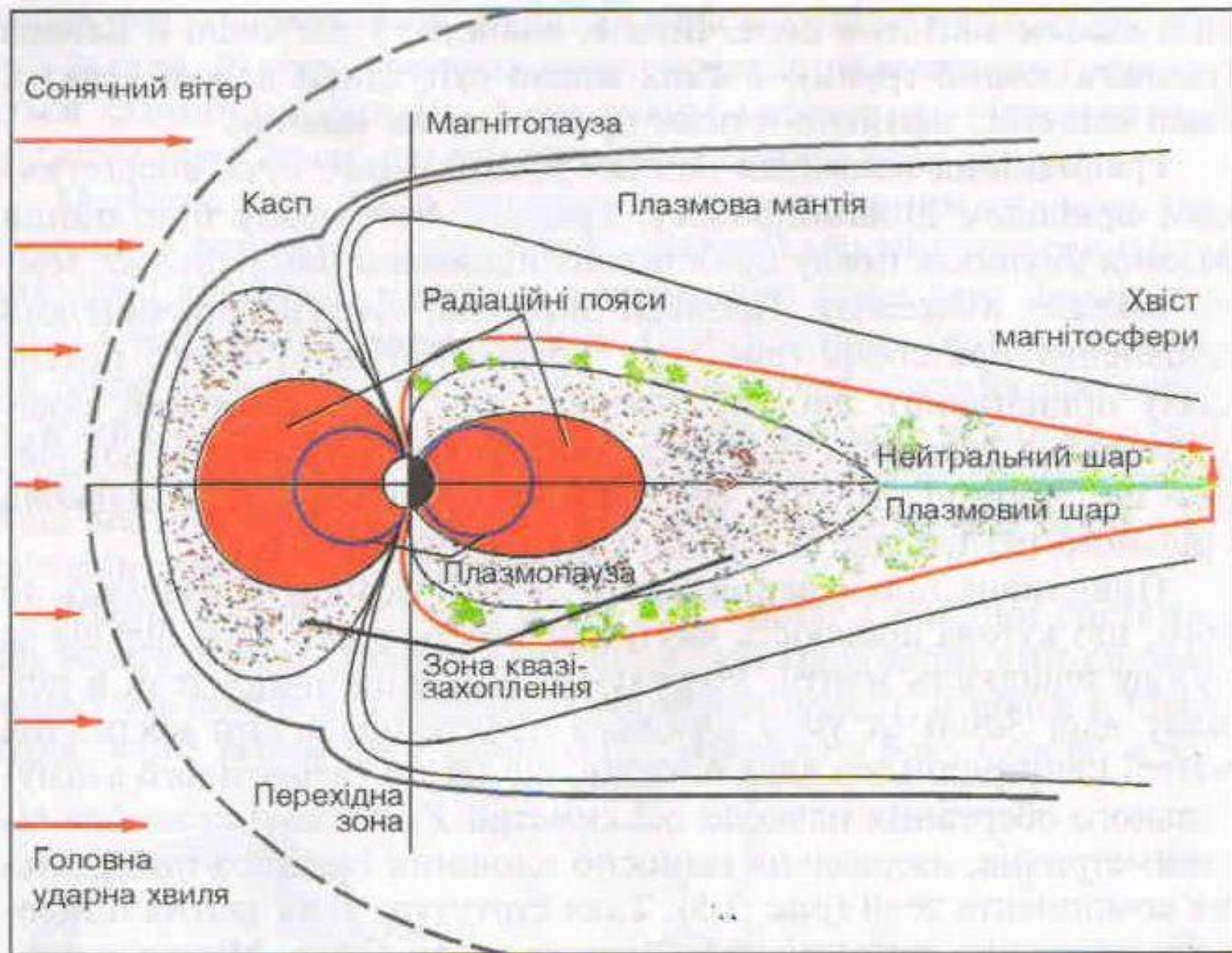


Рис. 3.6. Структура магнітосфери Землі

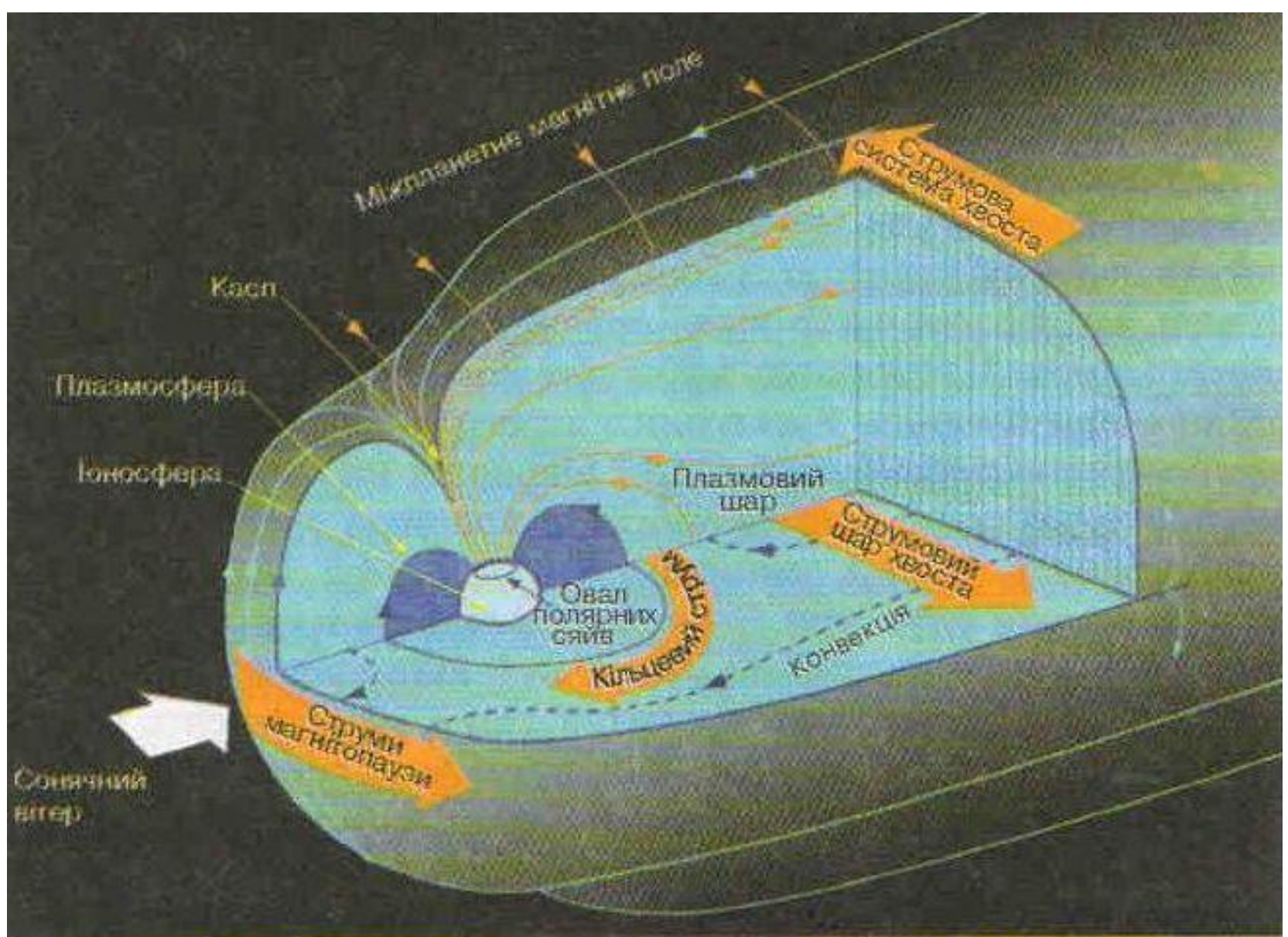
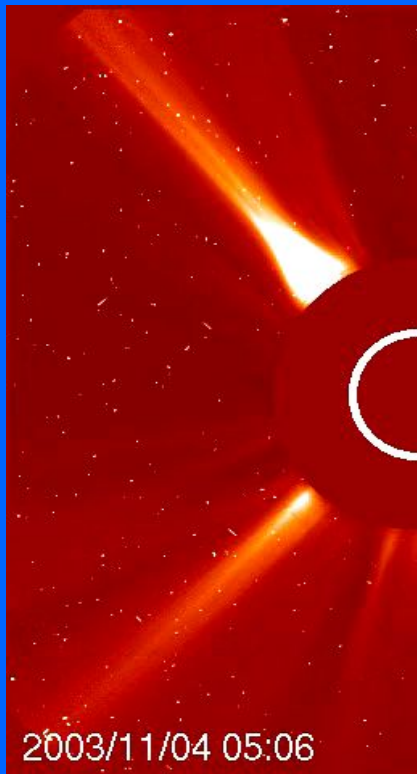


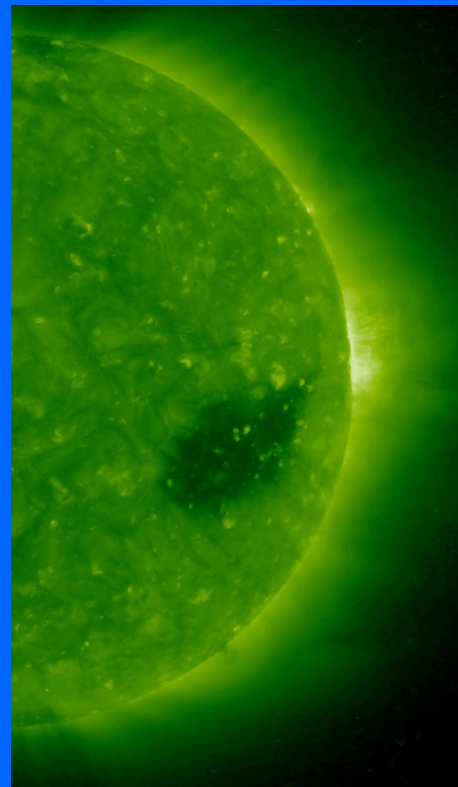
Рис. 3.7. Структура струмів магнітосфери Землі (тонкі лінії — силові лінії регулярного магнітного поля всередині магнітосфери, товсті — напрямки струмів)

Квазістаціонарні плазмові структури

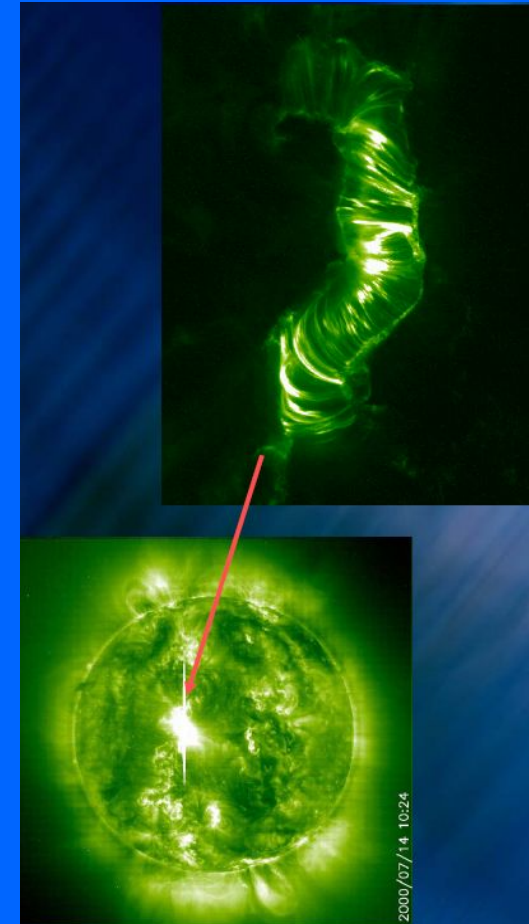
Стример



Корональна діра



Сонячні волокна



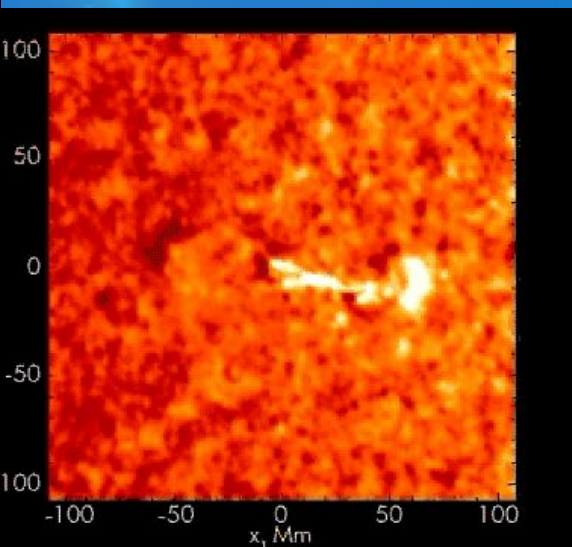
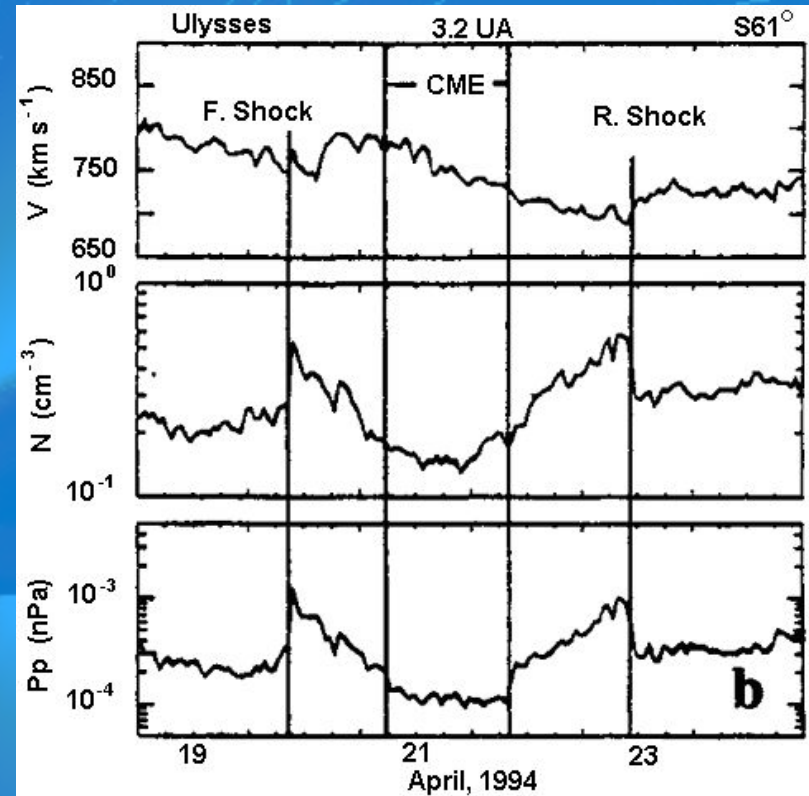


Спалахи

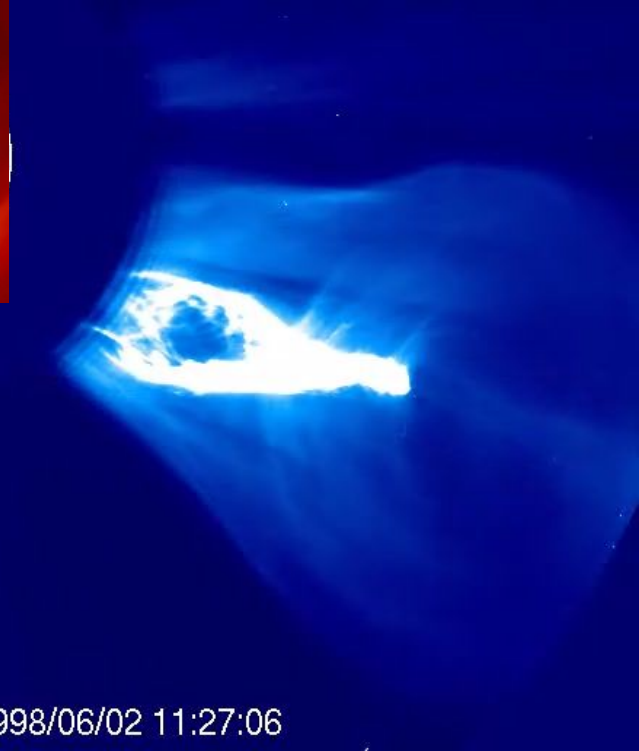
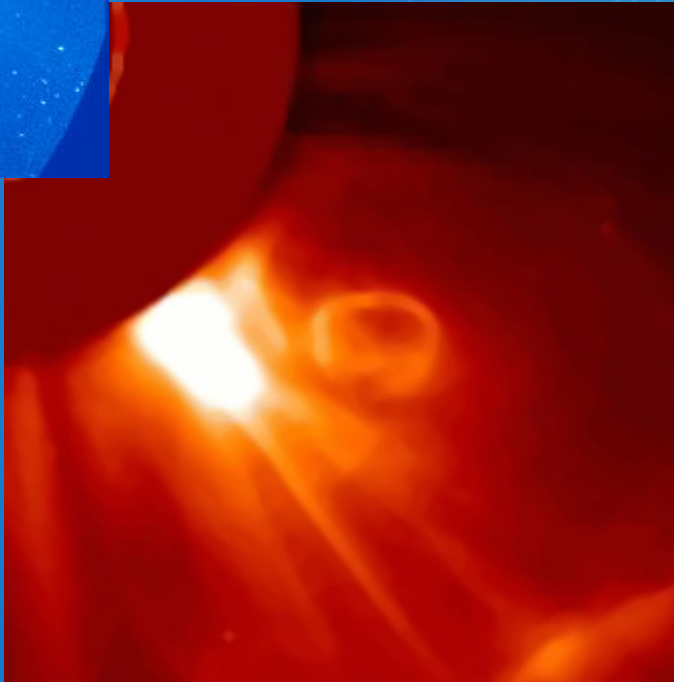
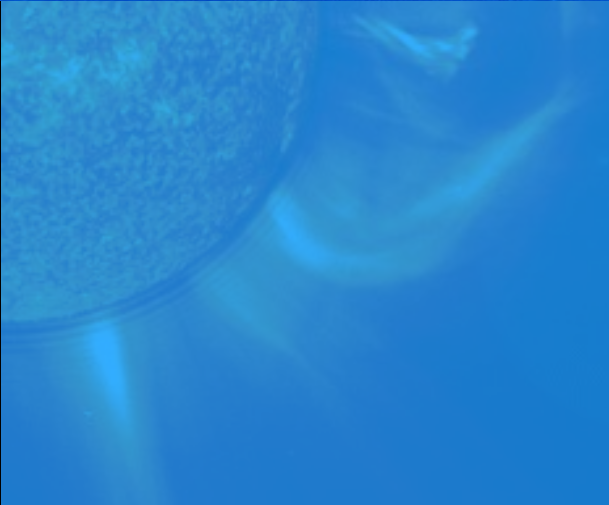
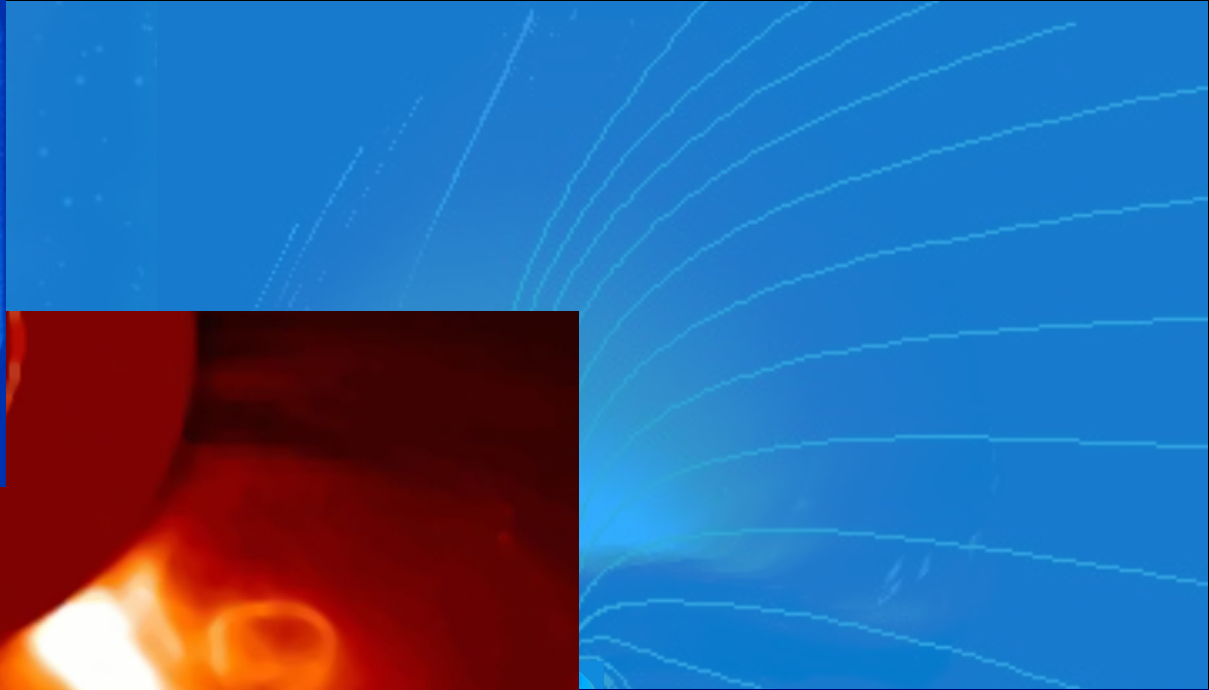


КВМ: особливості динаміки

- Старт КВМ → область старта → крупномасштабные волны Моретона (БМЗ) и бегущие волны плотности (МАГ) ≈ "корональные затемнения" (области с пониженной плотностью)
- Взаимодействие КВМ с СВ:
 - межпланетная ударная волна;
 - изобилие атомов гелия;
 - вариации магнитного поля;
 - понижение температуры ионов и электронов



Хвилі Моретона

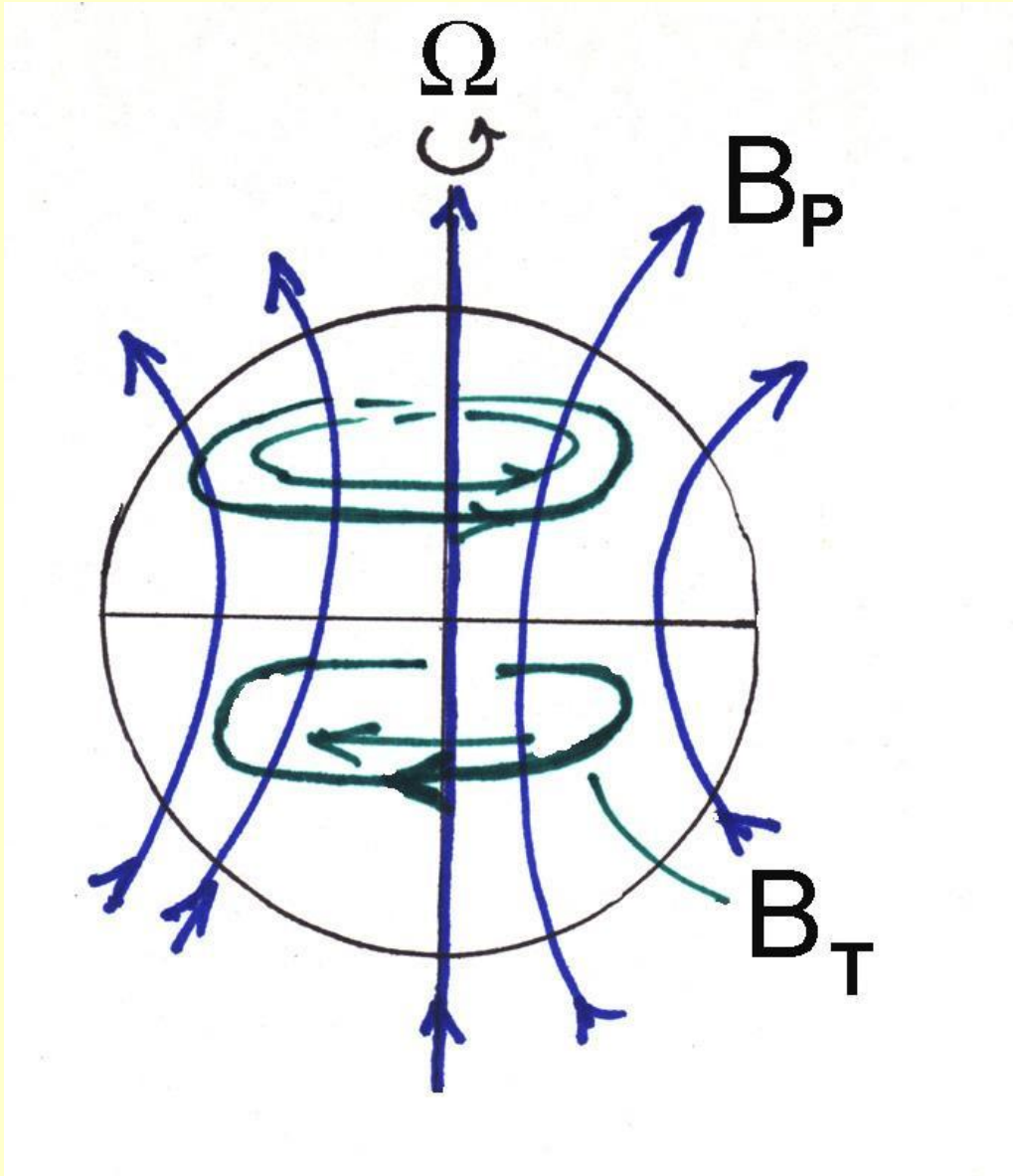


C2 1998/06/02 11:27:06



C3 1997/05/01 01:52

Структура загального магнітного поля Сонця



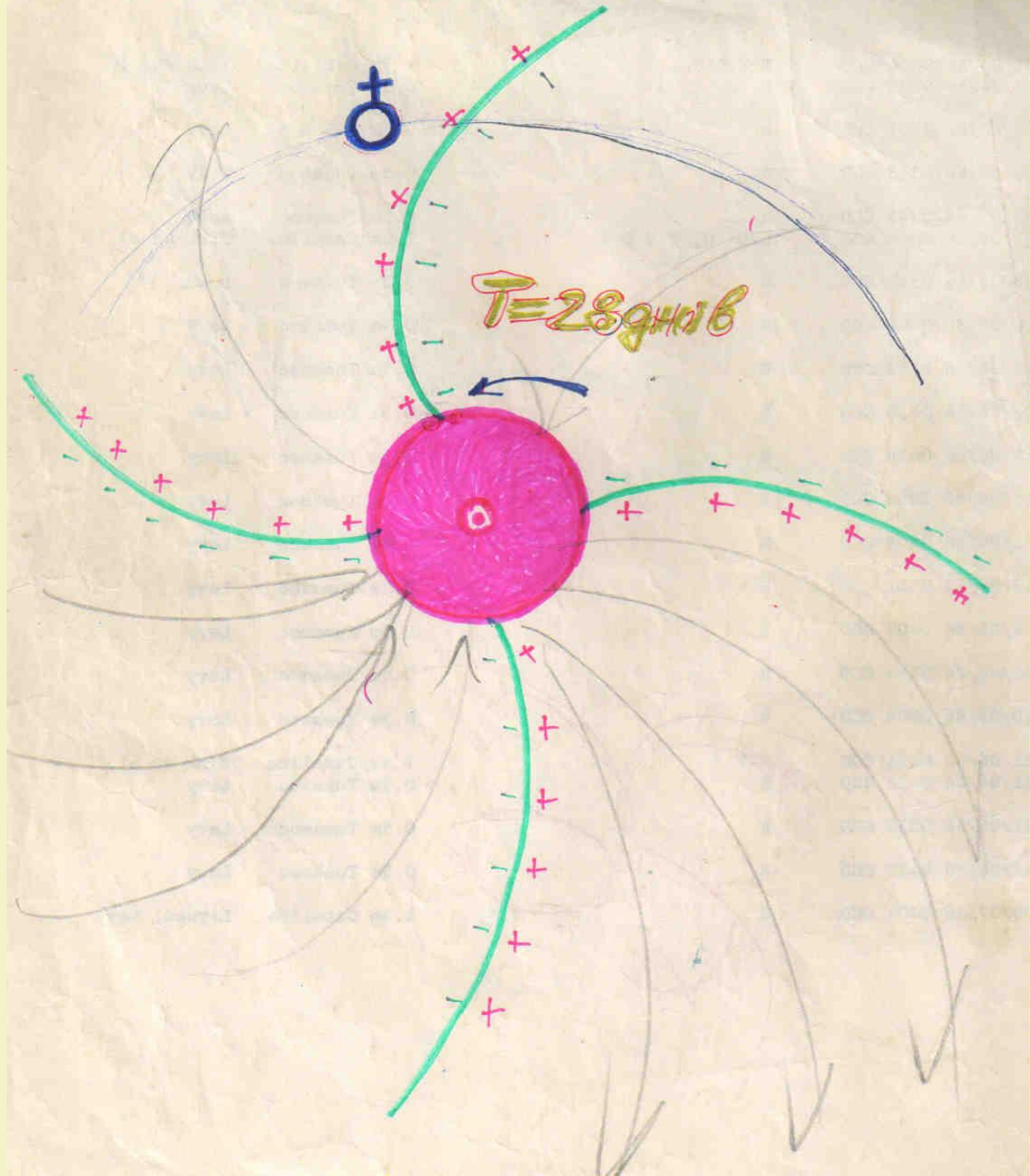
$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_T + \mathbf{B}_P = B_\varphi \mathbf{i}_\varphi + \text{rot} (A \mathbf{i}_\varphi)$$

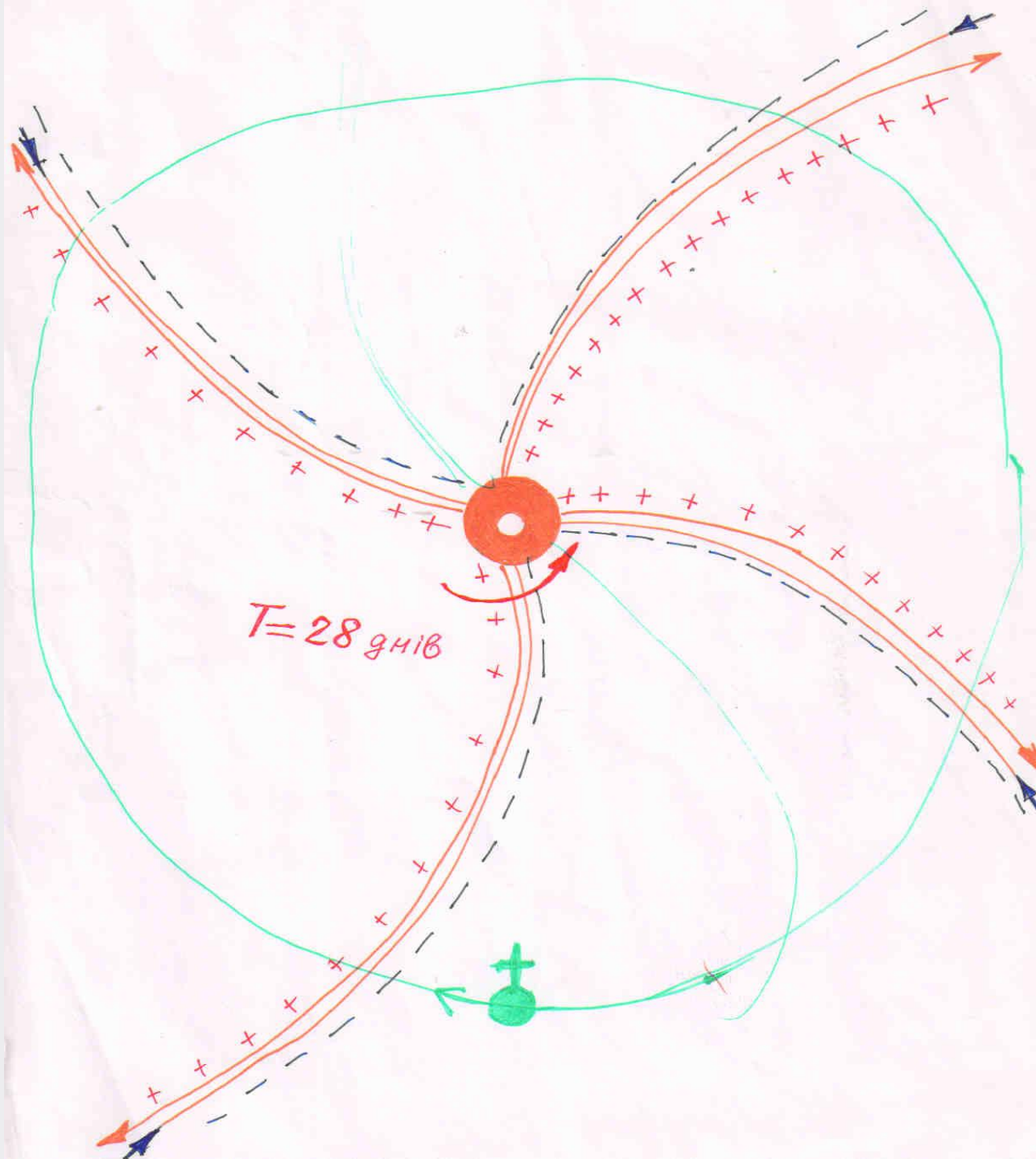
$$\mathbf{B}_T = B_\varphi \mathbf{i}_\varphi$$

$$\mathbf{B}_P = B_r \mathbf{i}_r + B_\theta \mathbf{i}_\theta,$$

$$\mathbf{B}_P = \text{rot} \mathbf{A},$$

$$\mathbf{A} = A \mathbf{i}_\varphi.$$





$T = 28 \text{ днів}$

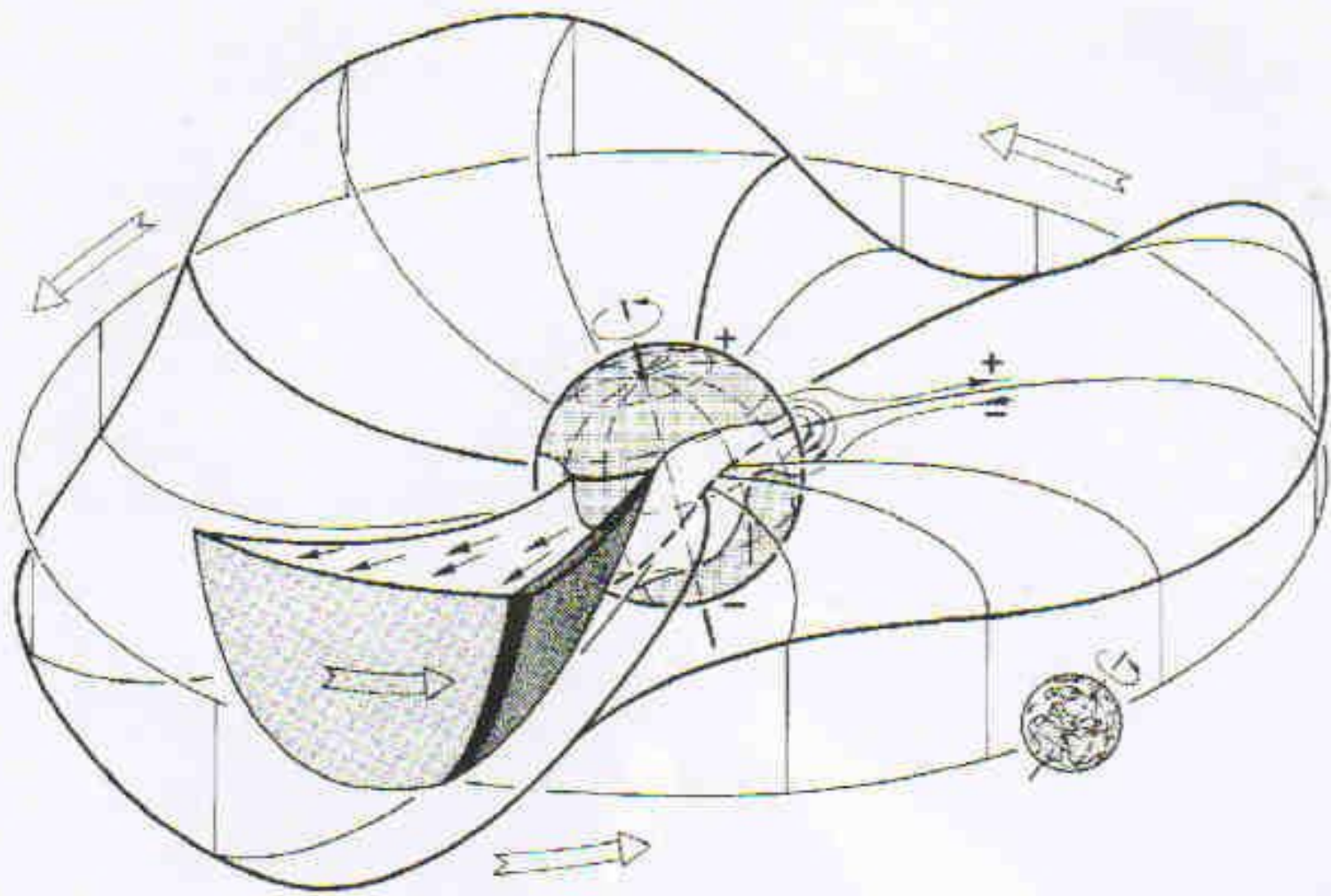


Рис. 6.3. Трехмерная модель гелиосферы, предложенная Х. Альвеном в 1977 г. (Schwenn, 2000). Граница между противоположно направленными полями, гелиосферный токовый слой, изогнута подобно юбке кружащейся балерины

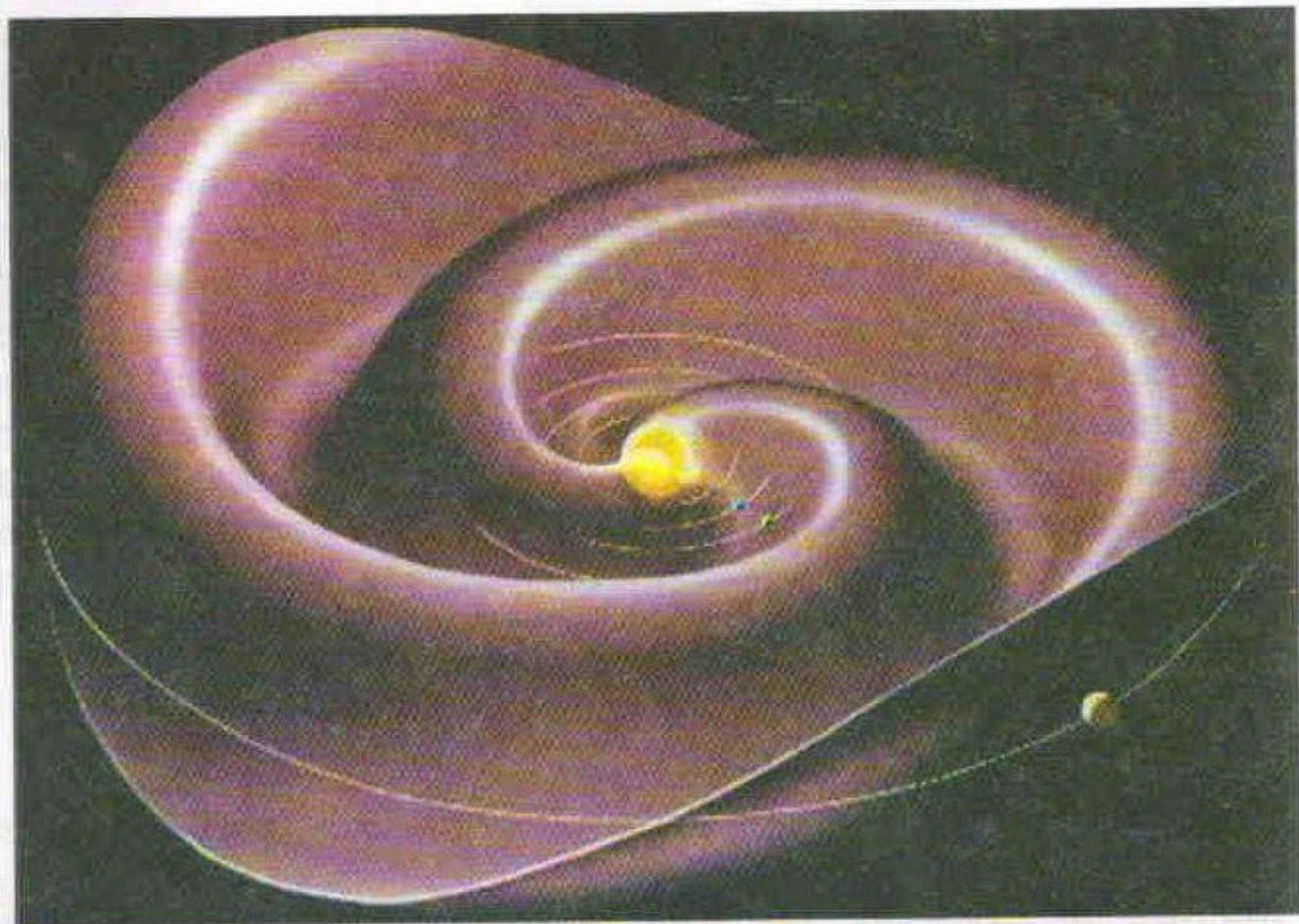


Рис. 2.15. Тривимірна картина глобального магнітного поля сонячного вітру

Как получается затмение



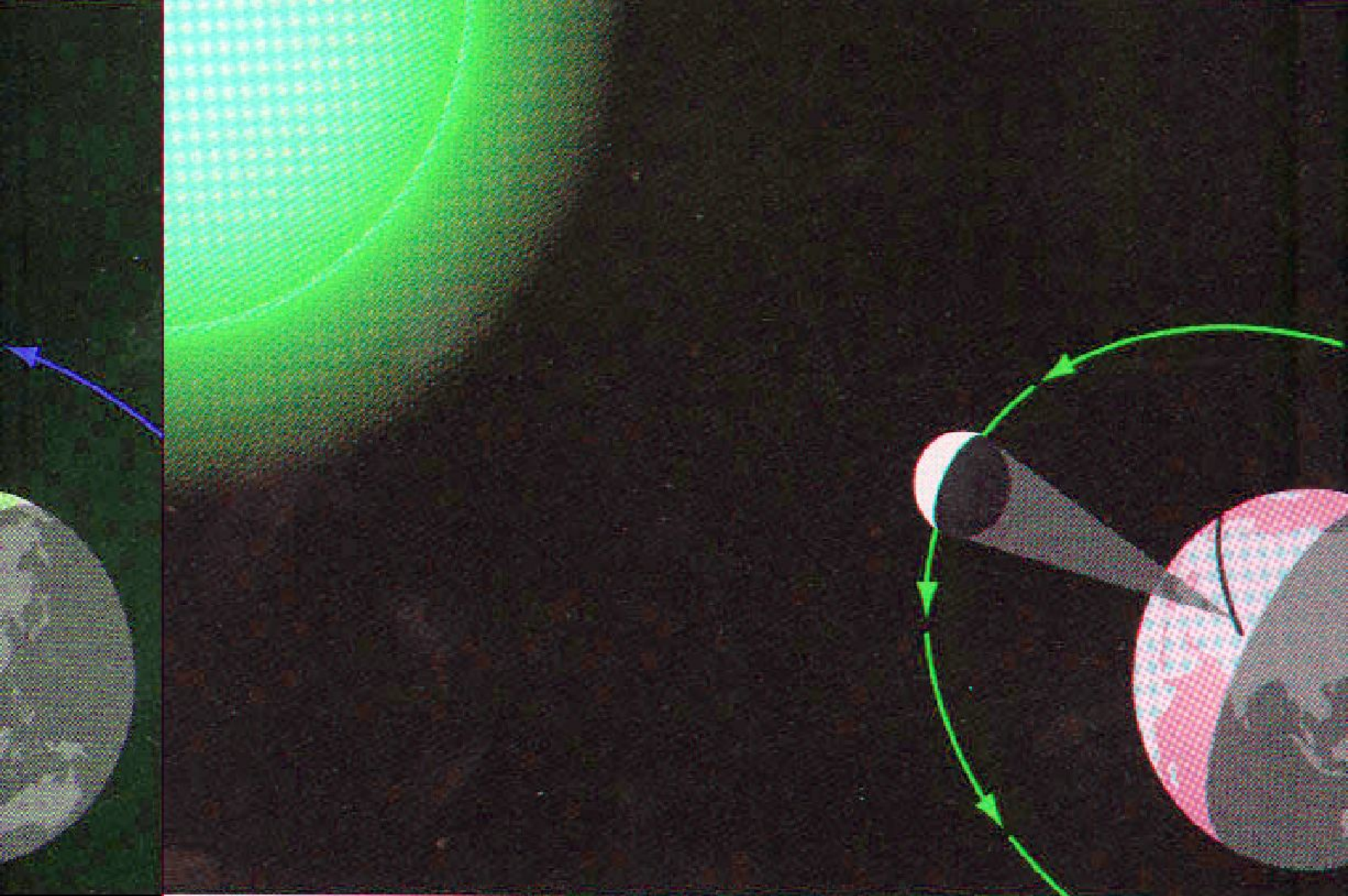
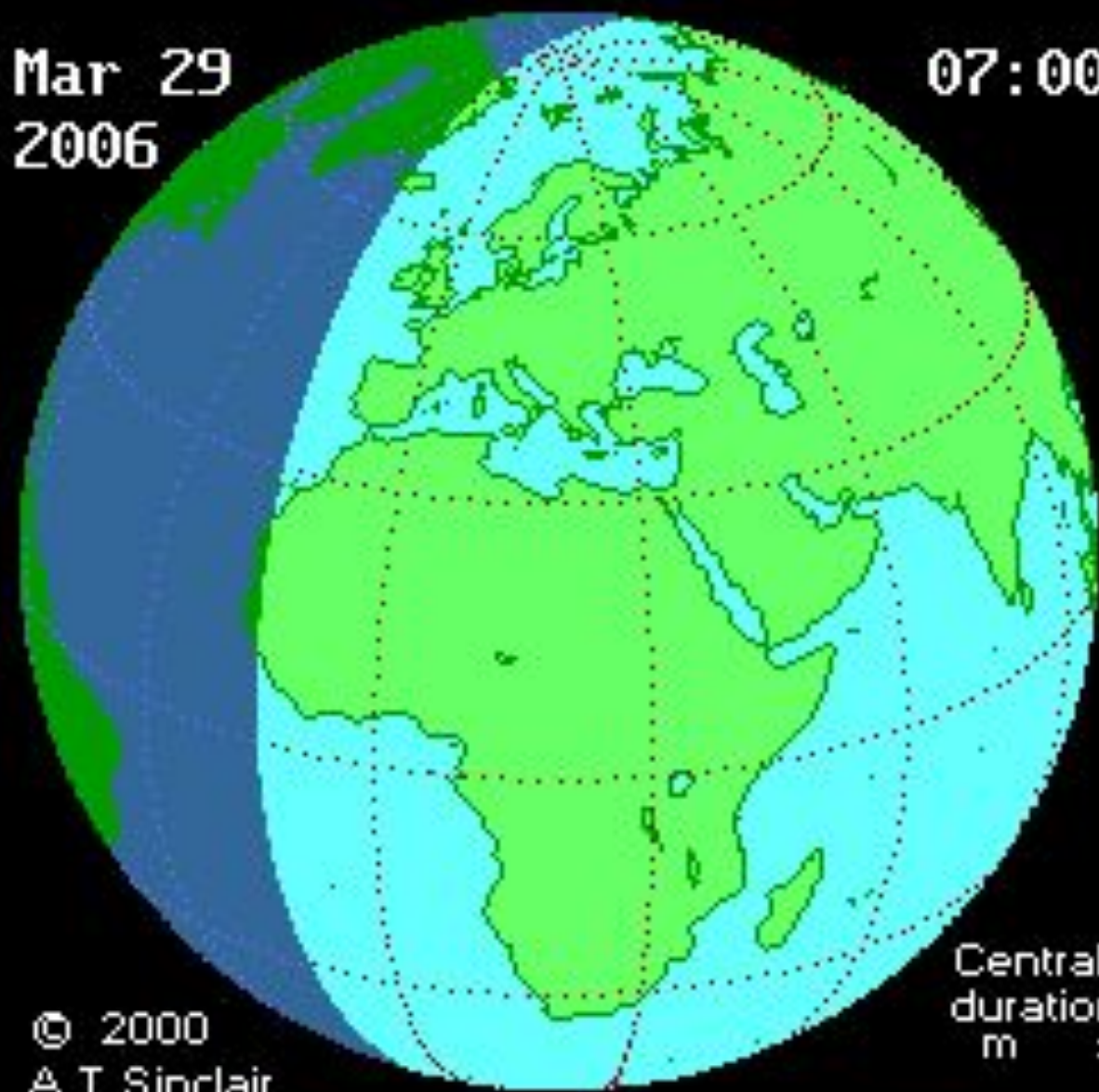


Схема солнечного затмнения

Mar 29
2006

07:00

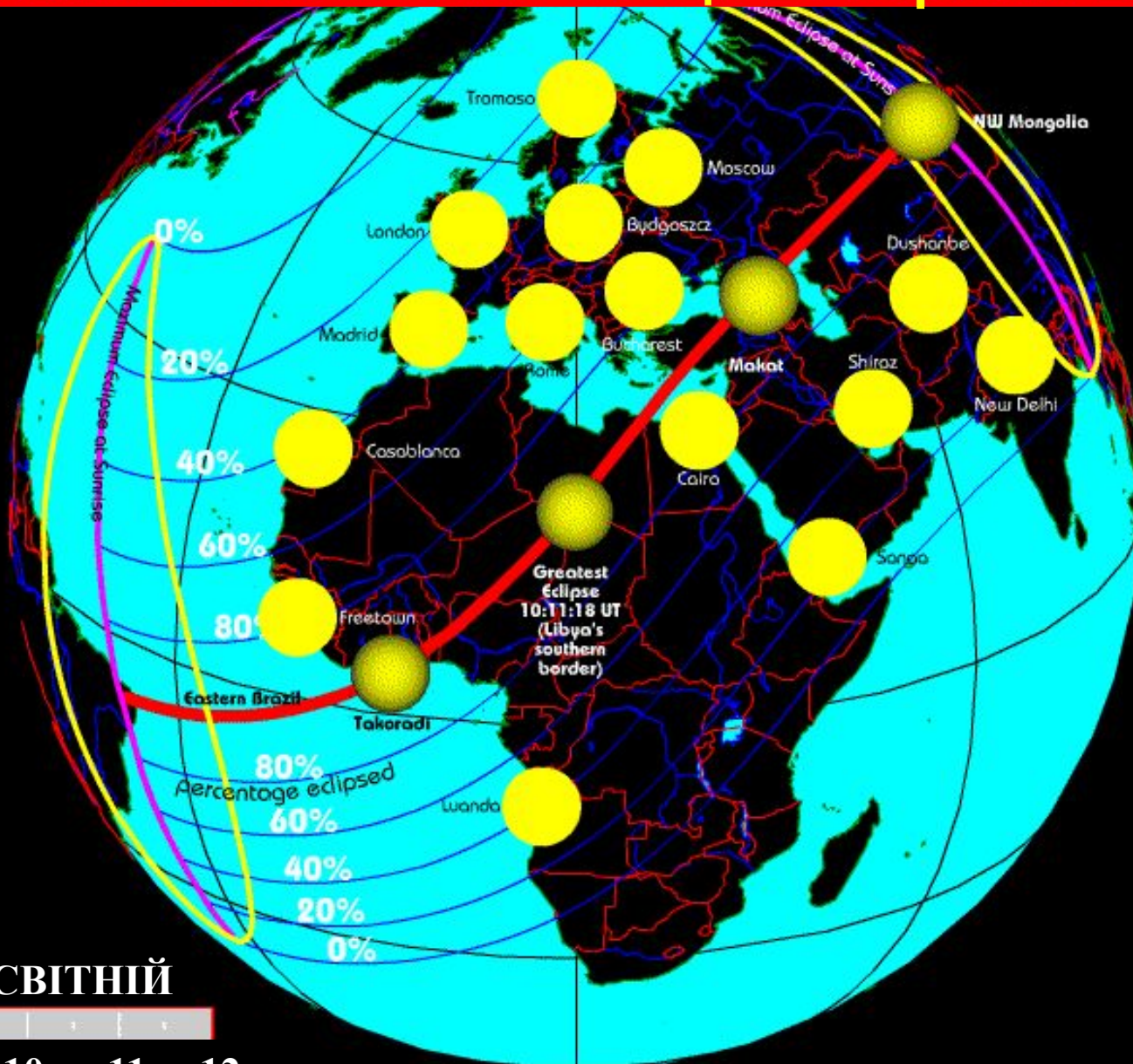


© 2000
A.T. Sinclair

Central
duration
m s

sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse

Смуга повного затемнення Сонця 29 березня 2006 року



ВСЕСВІТНІЙ

ЧАС

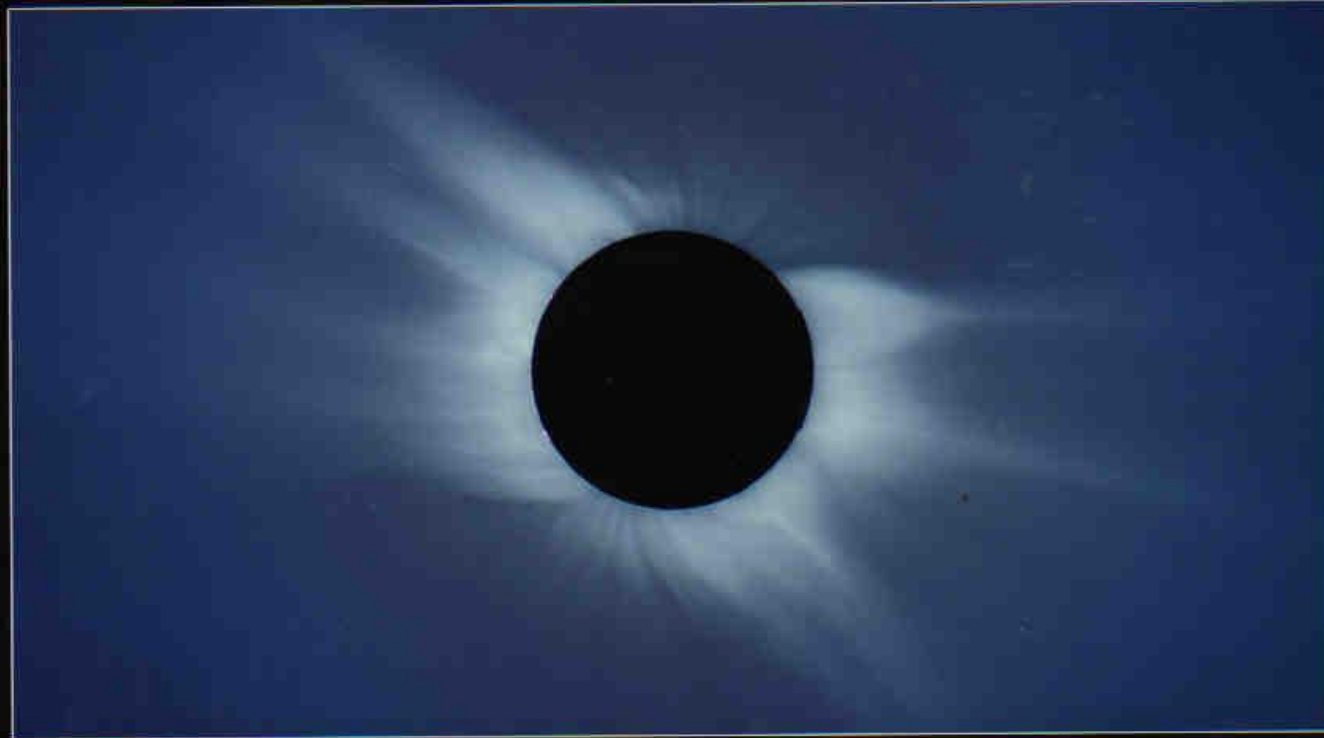
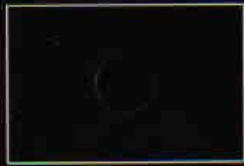
8:00 8 9 10 11 12

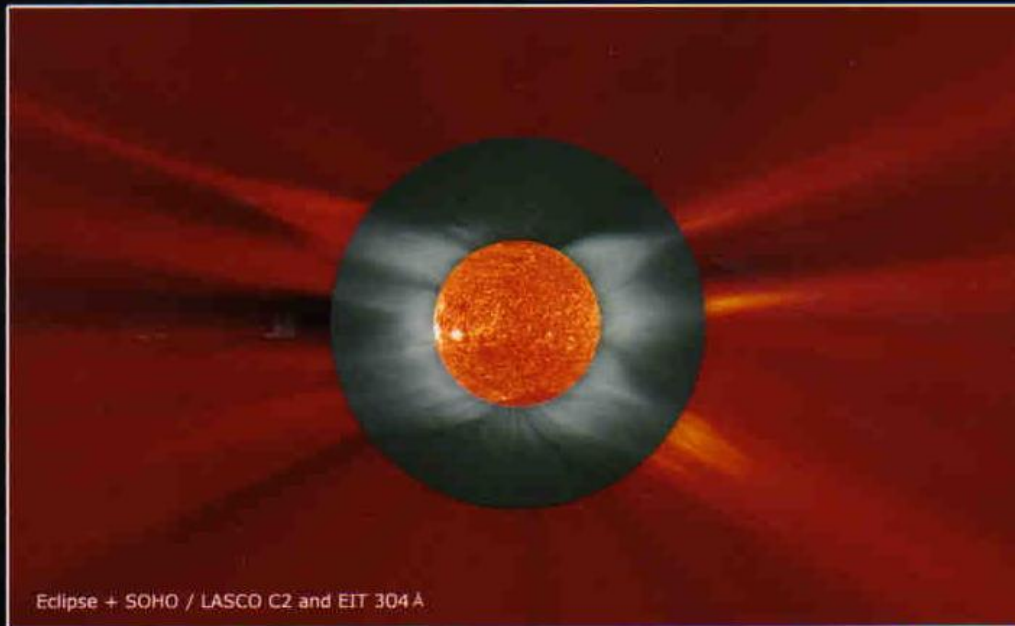


Смуга повного затемнення Сонця, 29 березня 2006 року
Наукова експедиція Київського національного університету
Турція, м. Анталія

Total Solar Eclipse 2006

El Sallum, EGYPT





Eclipse + SOHO / LASCO C2 and EIT 304 A

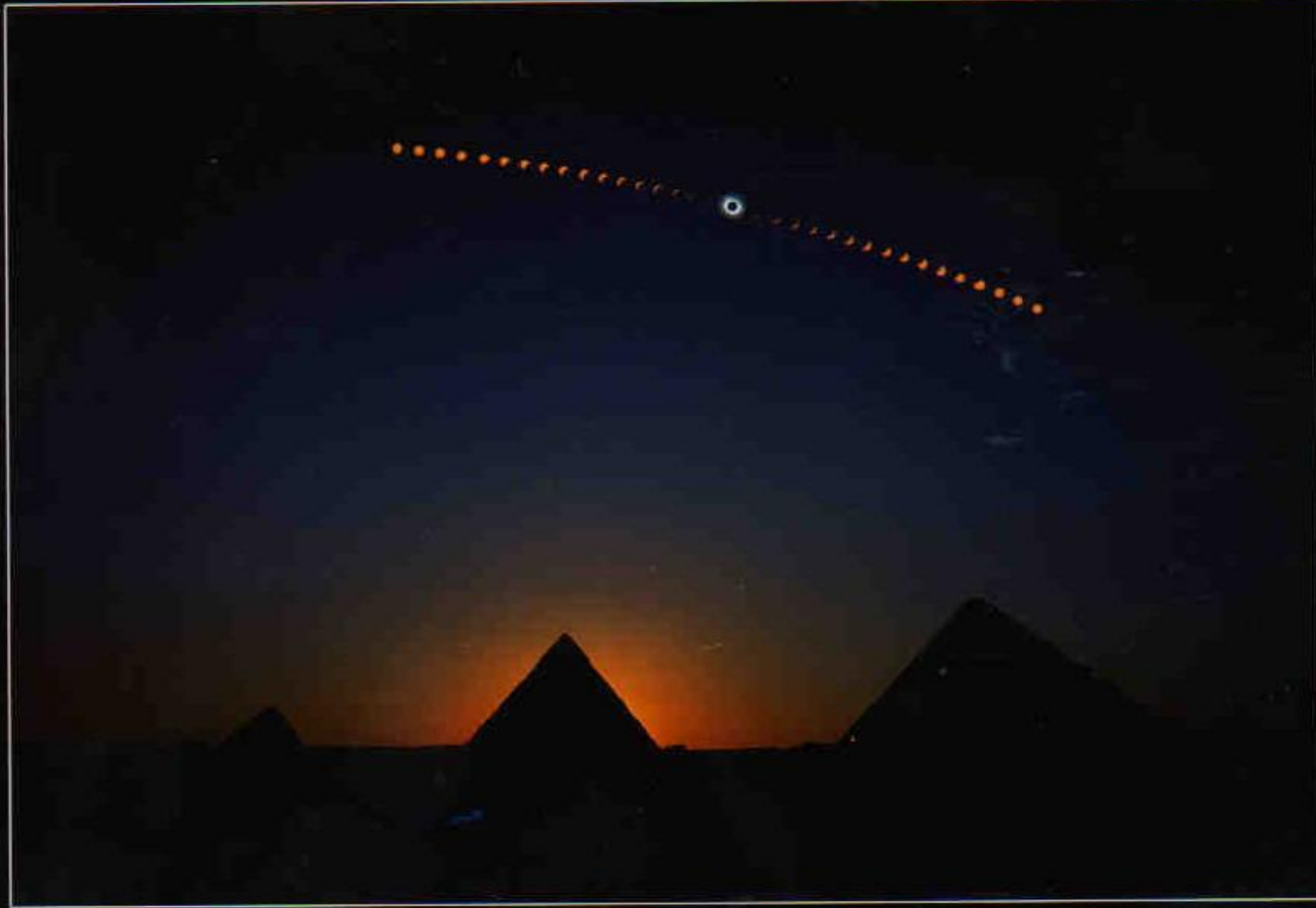
Total Solar Eclipse 2006

El Sallum, EGYPT

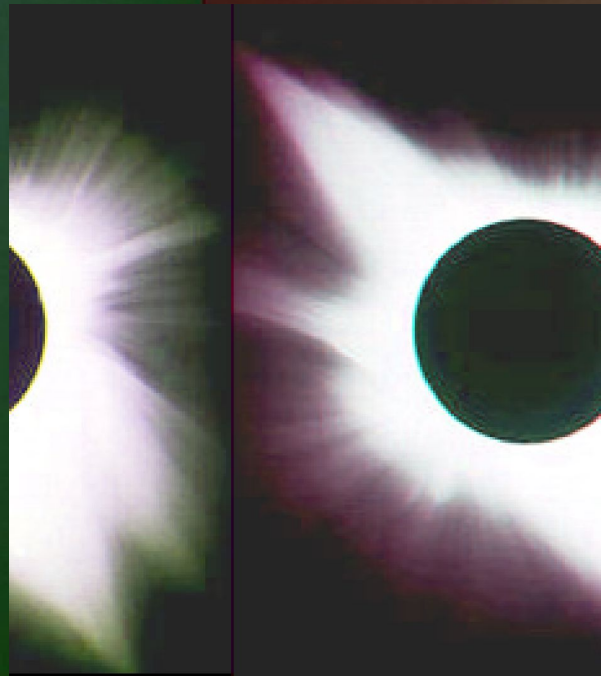


Total Solar Eclipse 2006

El Sallum, EGYPT



Структура сонячної корони –
епоха мінімуму
сонячної активності



Структура сонячної корони –
епоха максимуму
сонячної активності

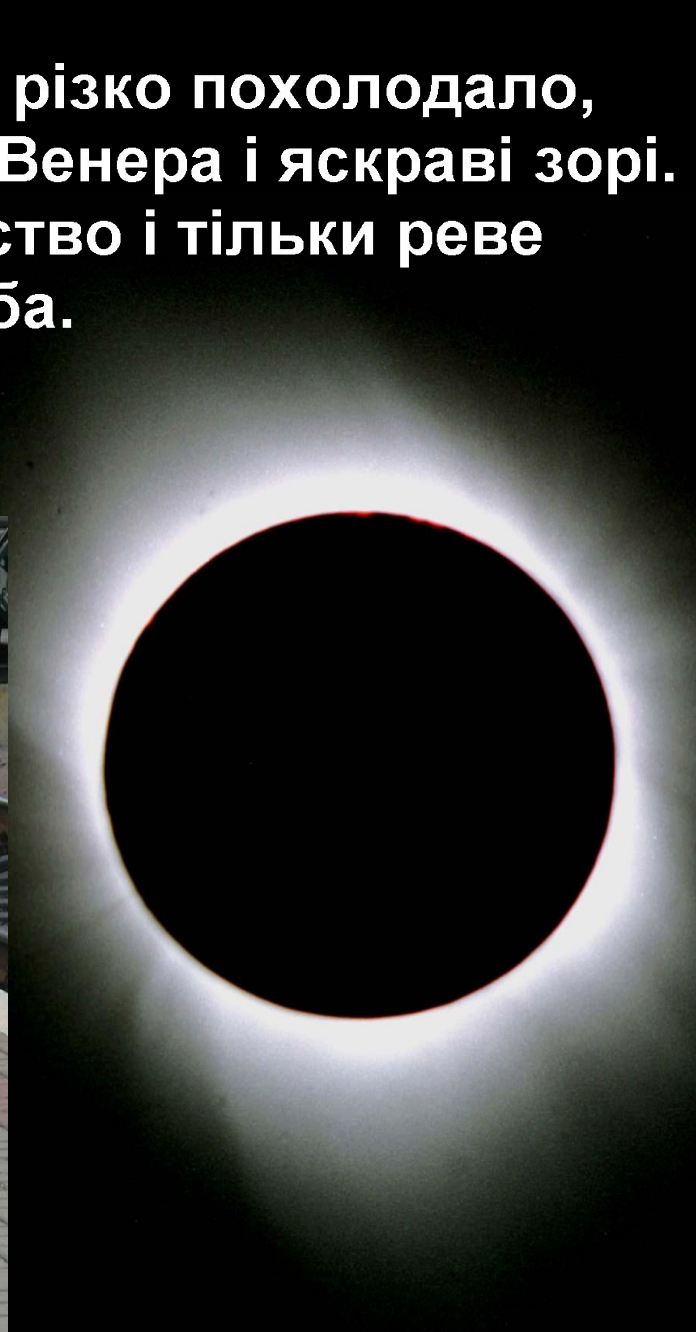





2005/08/30 05:54

0.000

“Погасло” Сонце, настали сутінки, різко похолодало, зникли кольори довкілля, з’явилася Венера і яскраві зорі. Принишкла природа, стихло птаство і тільки реве занепокоєна худоба.



Що саме відбувається сьогодні?

A total solar eclipse is shown against a black background. The sun is completely obscured by the moon, leaving only a thin, bright ring of fire (annulus) at the bottom edge of the moon's shadow. The text is overlaid on the image.

**Спалахнув перший промінь.
За кілька секунд
навколишній світ знову заграє
всіма барвами веселки –**

ЖИТТЯ ПРОДОВЖУЄТЬСЯ!

**Затемнення Сонця –
пересторога
Природи (Всевишнього)**

Дякую
за увагу!



Дякую за увагу



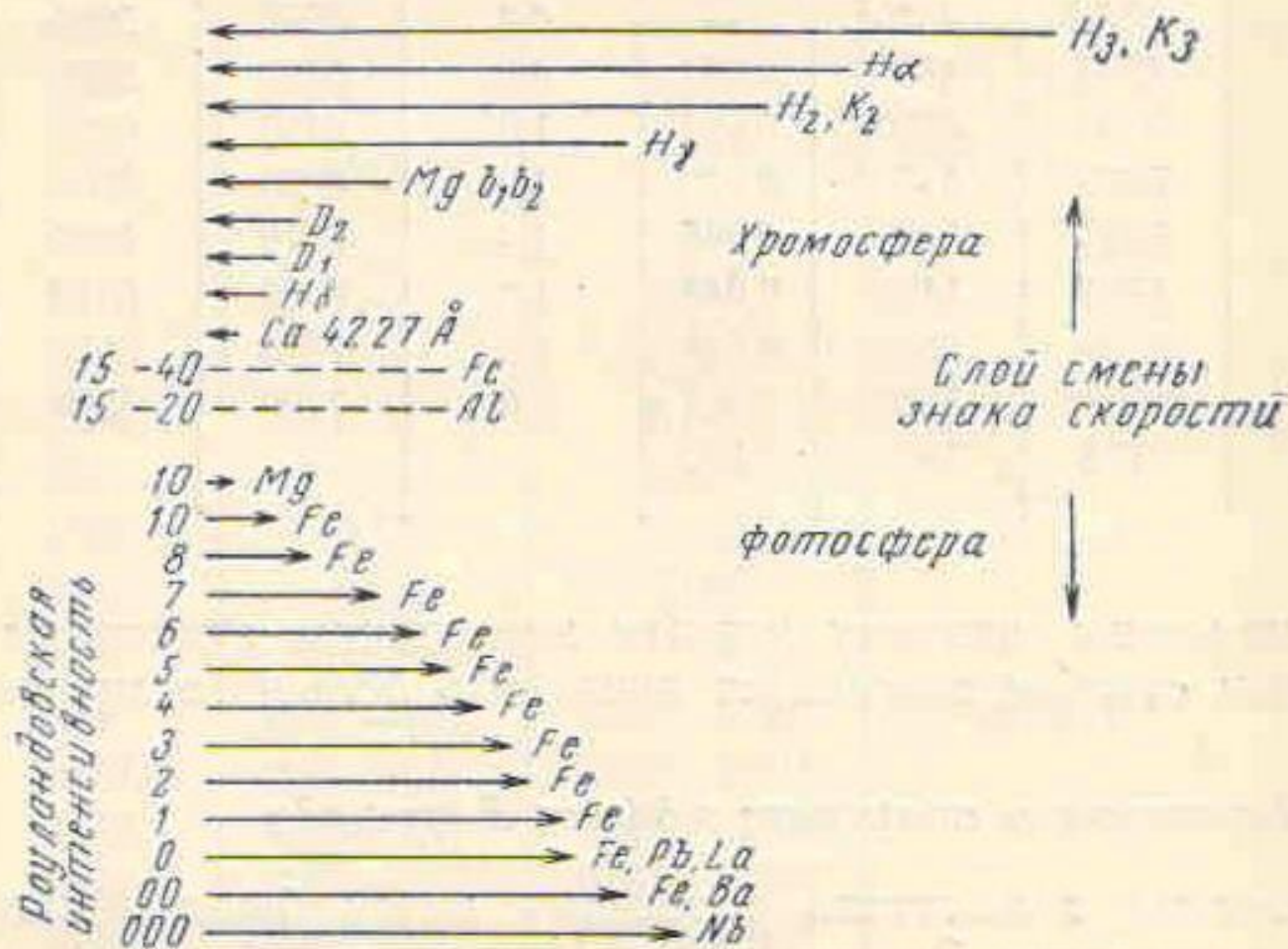


Рис. 22. Скорость Эвершеда как функция силы линии (схематично).

Длина стрелок пропорциональна измеренной скорости. Стрелки, указывающие направо, соответствуют вытеканию вещества из пятна, стрелки, указывающие налево, — втеканию вещества в пятно [79].