



Конвективна зона

СОНЦЯ

Криводубський Валерій

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

протуберанец

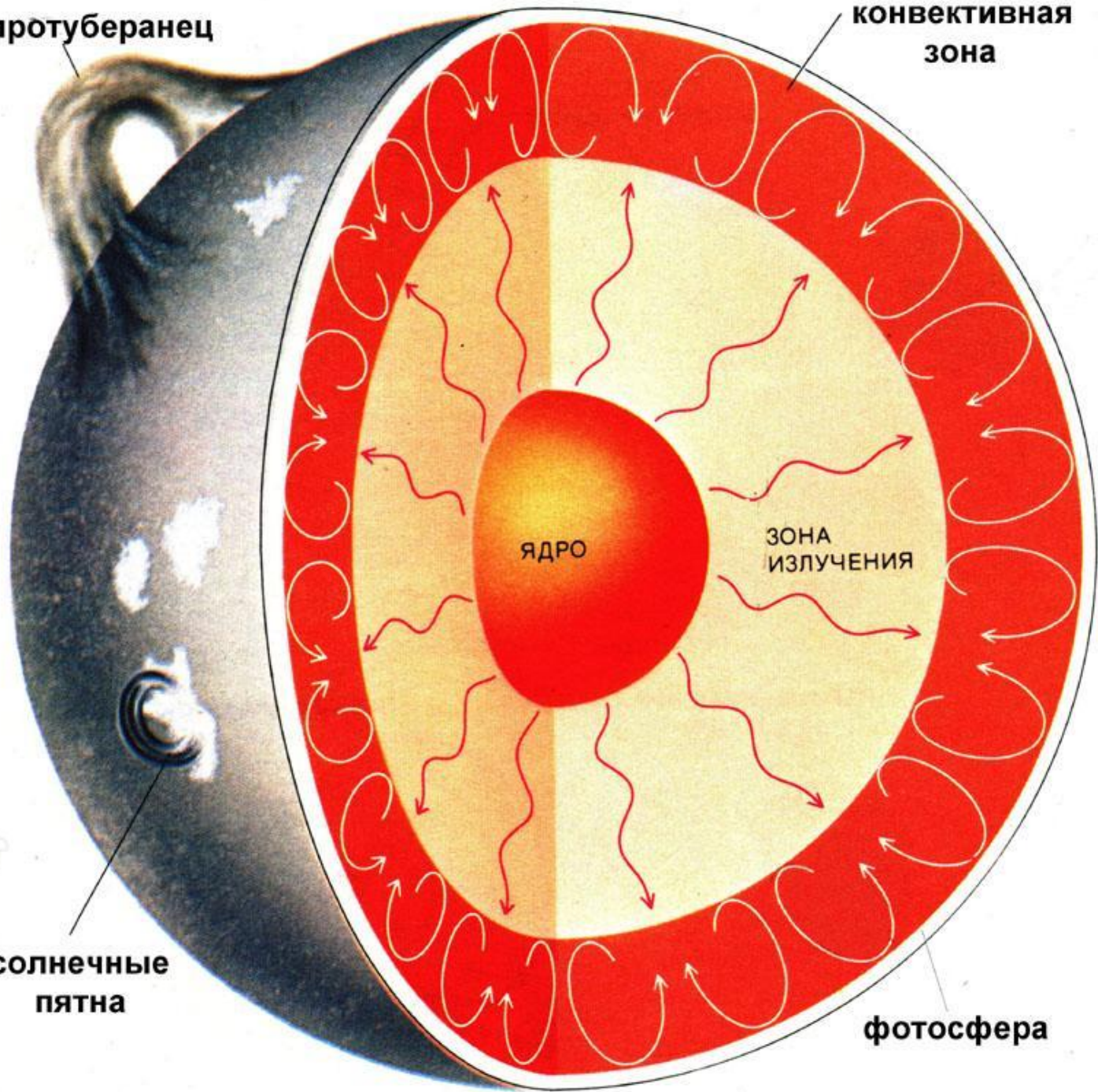
конвективная зона

солнечные пятна

ядро

зона излучения

фотосфера



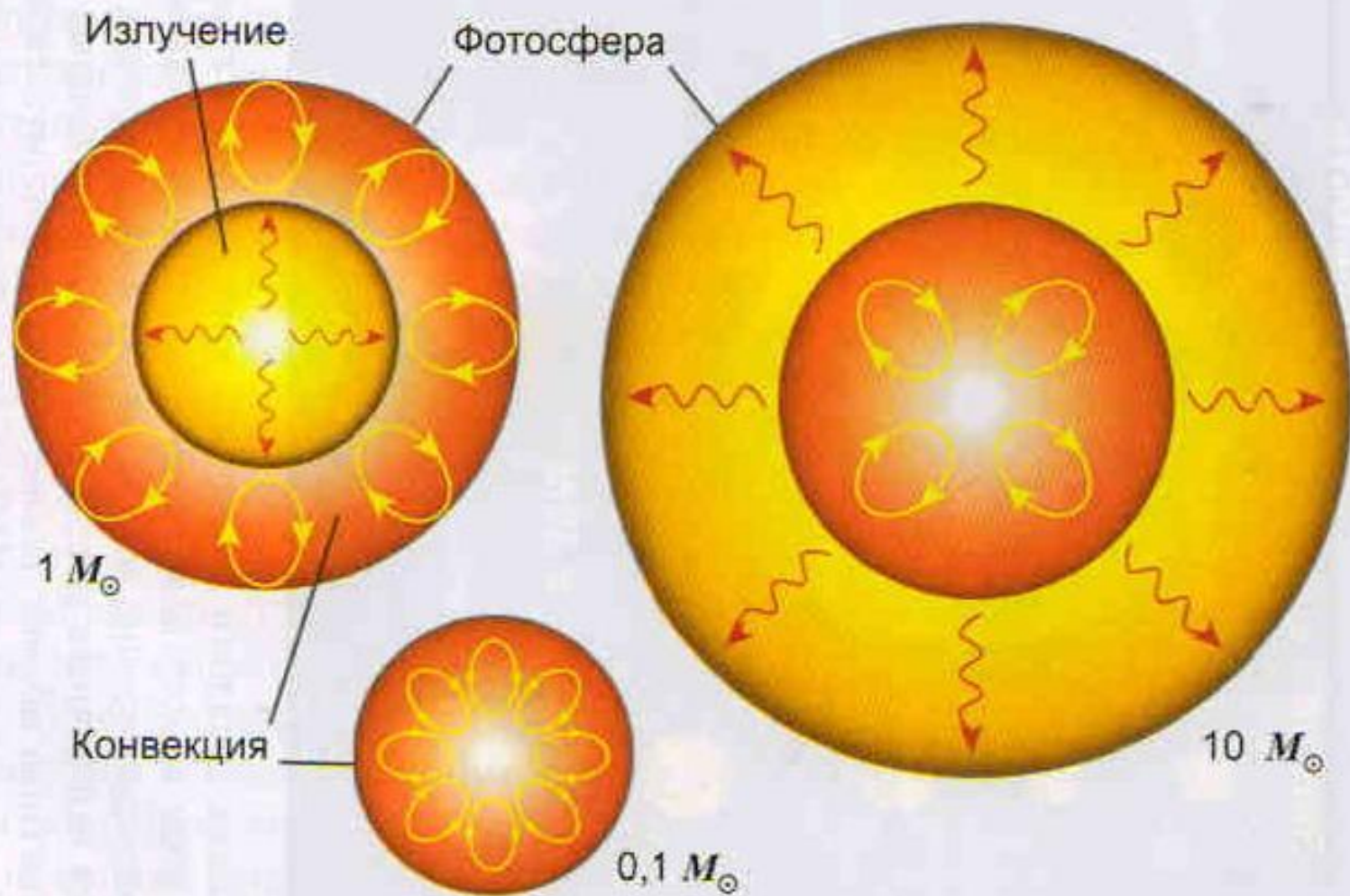
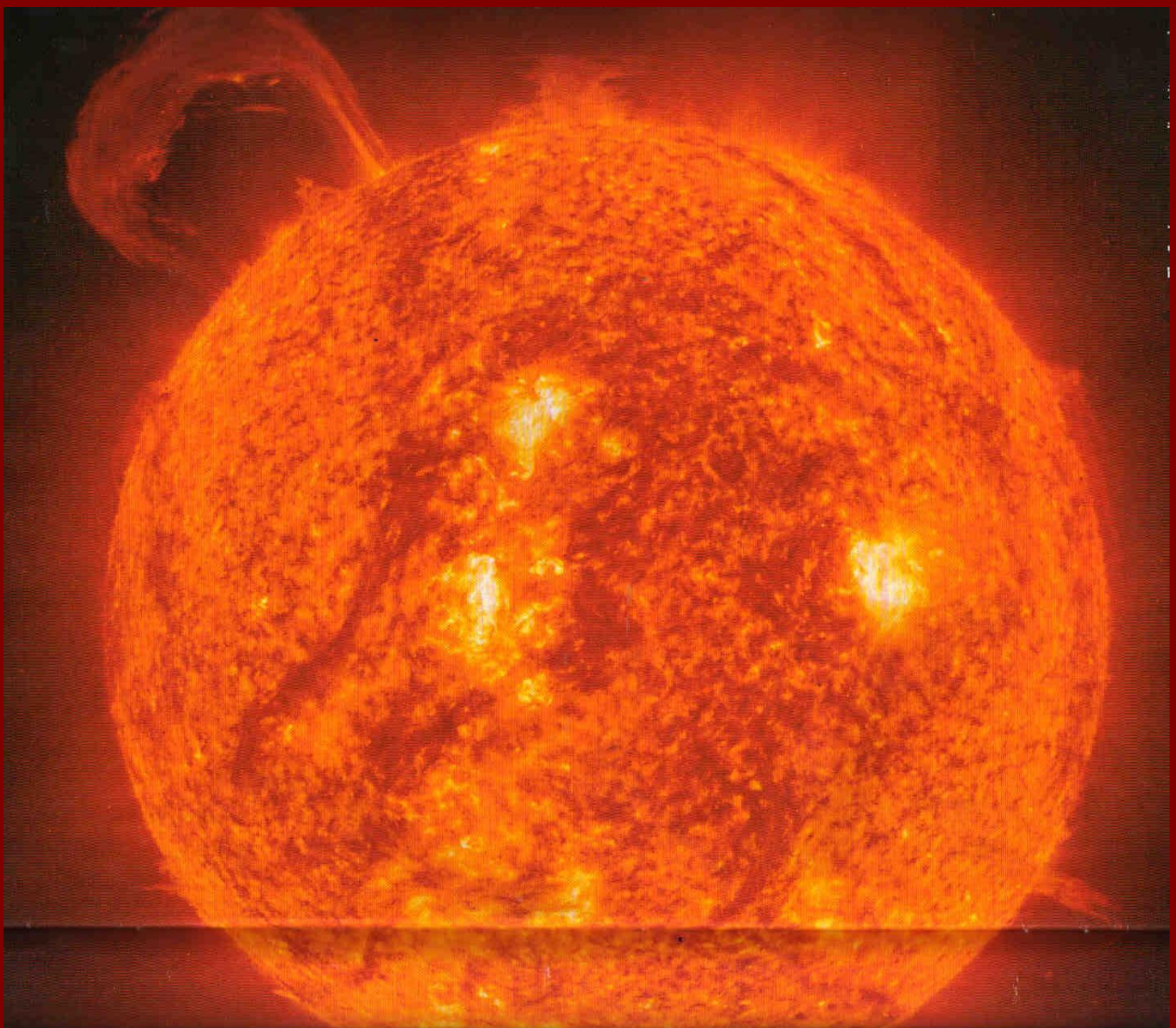


Рис. 155. Механизмы переноса энергии в звездах главной последовательности [392]



$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

зміна маси з радіусом

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{MG}{r^2} \rho = -\rho g$$

рівняння балансу сил: вага об'єму газу врівноважується градієнтом тиску в цьому об'ємі

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon$$

зміна світимості:
 $L(r)$ – потік випромінювання;
 ε – швидкість генерації ядерної енергії

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{rad} = -\frac{L}{4\pi r^2 \bar{\kappa}_r} = -\frac{3}{16\sigma T^3} \frac{L}{4\pi r^2} \bar{\kappa} \rho$$

зміна температури в променистій зоні:
 κ – коеф. непрозорості (поглинання випромінювання), розрахованого на одиницю маси;
 $\bar{\kappa}_r = 16\sigma T^3 / 3\rho k$ – коеф. променистої теплопровідності;
 σ – стала Стефана-Больцмана

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{ad} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}$$

зміна температури в КЗ:
 $\gamma = 5/3 = c_p / c_v$ – показник адиабати: відношення питомих теплоємностей c_p (при сталому тиску) до c_v (при сталому об'ємі)

$$P = nkT = \frac{\rho}{m_p} kT$$

рівняння газового стану:
 k – стала Больцмана
 m_p – маса протона

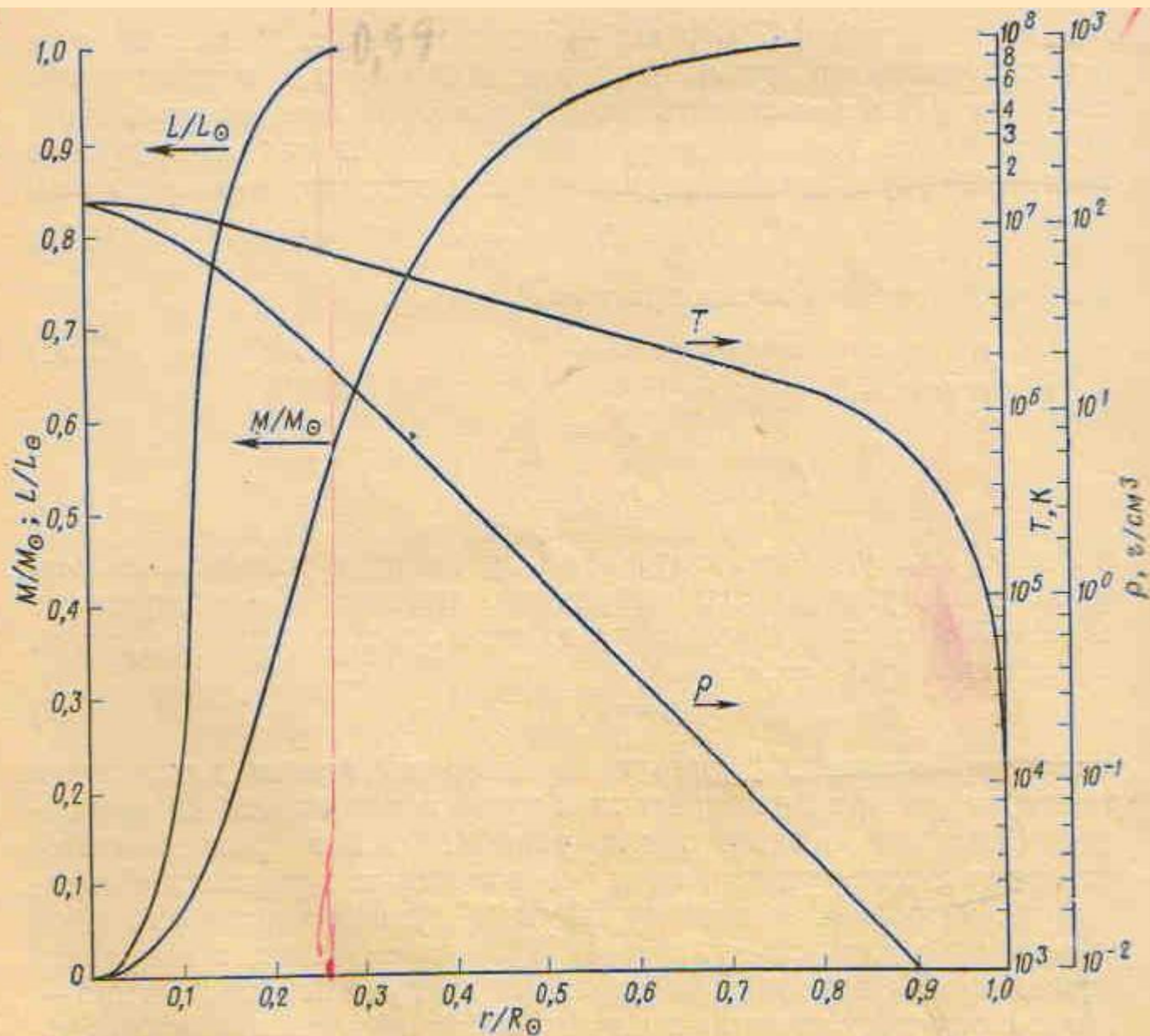


РИС. 3.5. Модель внутреннего строения современного Солнца.
 $X=0,708$, $Y=0,272$, $Z=0,020$, $\rho_c=158 \text{ г/см}^3$, $T_c=1,57 \cdot 10^7 \text{ К}$. (По Сирсу [23].)

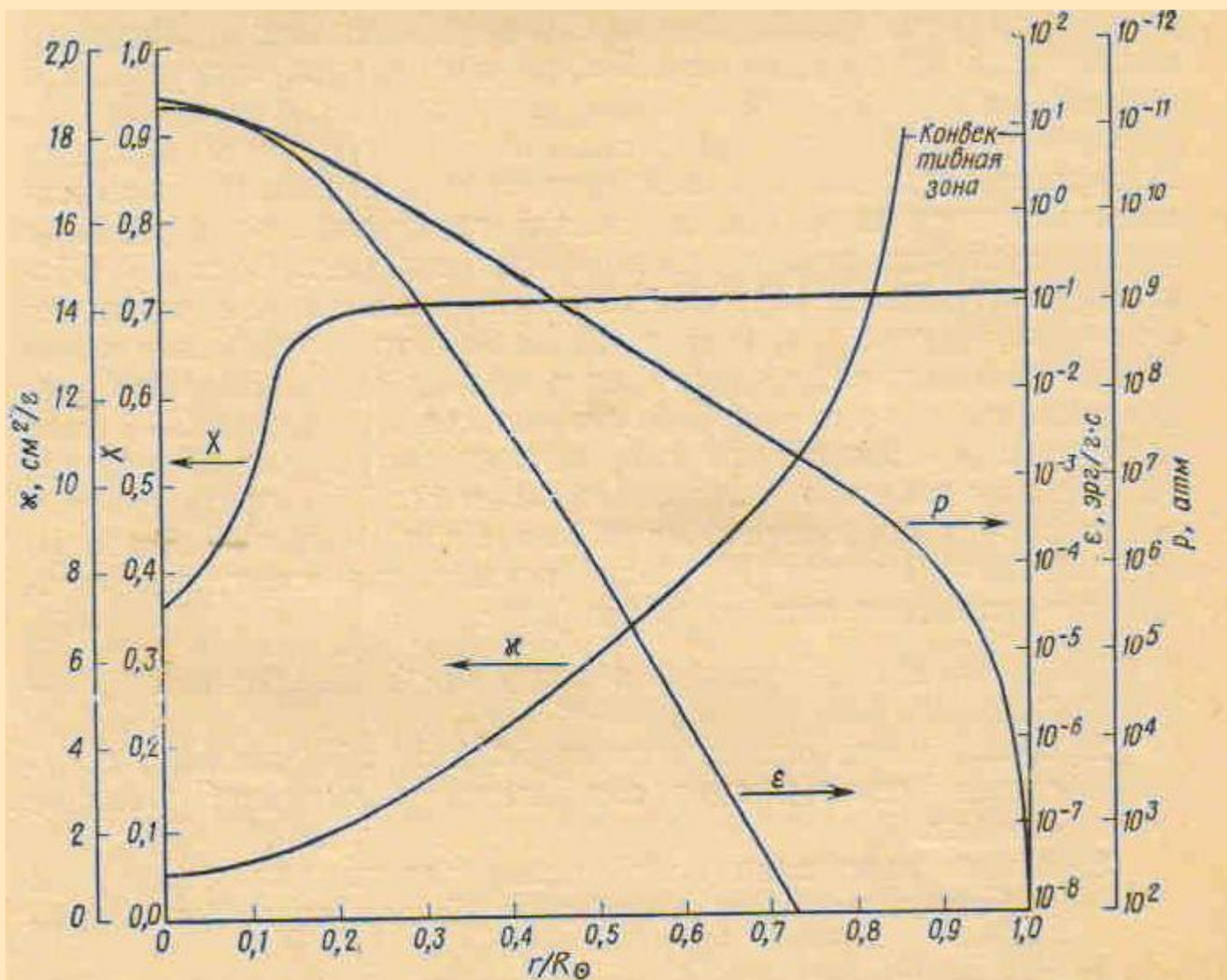


РИС. 3.6. Свойства солнечного вещества, определяемые локальными значениями основных параметров, и доля водорода по массе.

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

При переході до все більш зовнішніх шарів сонячної оболонки коефіц. непрозорості $\bar{\kappa}$ починає різко зростати. Це відбувається тому, що в результаті рекомбінацій електронів з іншими частками починають з'являтися нові іони і фотони поглинаються все більш легко.

Ріст $\bar{\kappa}$ зменшує променисту теплопровідність

$$\kappa_r = 165 T^3 / 3 \rho \bar{\kappa}$$

- зменшується (позначено над формулою)
зростає (позначено праворуч від формули)

і тому згідно з рівнянням

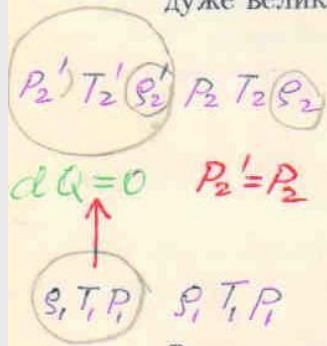
$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \kappa_r \frac{dT}{dr} \right) + \rho \epsilon = 0$$

зростає (позначено під формулою, вказуючи на κ_r)

балансу енергії збільшує температурний градієнт.

В кінцевому підсумку на відстані приблизно $0,7 R_{\odot}$ від центра \odot темп. ($\sim 10^6$ К) зменшується так різко, що виникає конвективна нестійкість, а вище цієї межі лежить область конвективної турбулентності, що називається **КЗ**.

Розглянемо детальніше, як виникає конвективна нестійкість. Початок нестійкості, коли градієнт температури (ГТ) вздовж вертикалі $(-\frac{dT}{dr})$ стає дуже великим, можна пояснити так.



$dQ = 0$
 вважається, що процес відбувається не відразу, а повільно, так що $P_2' = P_2$.
 Якщо $\rho_2' < \rho_2$, то елемент підніметься далі і це дієто висхідного сили. В цьому випадку атмосфера нестійка.



Розгл. вертикальностратифіковану плазму з $\rho(r), T(r)$ і $P(r)$, що знаходиться в гідростатичній рівновазі. Припустимо, що елементарний об'єм речовини переміщується вздовж вертикалі так повільно, що зберігається горизонтальний баланс тиску з навколишнім середовищем.

В цьому випадку на елент. об'єм буде діяти сила плавучості і він буде підніматися, якщо

(1) $\delta \rho_i < \delta \rho$

Згідно рівняння газного стану $\rho = \frac{k_B \rho T}{m}$ зміна тиску, густини і темп. зв'язані між собою співвідношеннями $\rho_{sup} = \rho_i \frac{k_B}{m} + \rho_i g + \rho_i T'$

(2) $\frac{\delta \rho_i}{\rho} = \frac{\delta \rho_i}{\rho} + \frac{\delta T_i}{T} \Leftrightarrow \frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{\delta T}{T}$

Але горизонтальний баланс тиску означає, що $\delta \rho_i \equiv \delta \rho$, внаслідок чого із рівнянь (1) і (2) випливає

$-\delta T_i < -\delta T$

іншими словами, елемент об'єму нестійкий і буде продовжувати підніматися вверх, якщо

$-\frac{dT}{dr} > -\frac{dT_i}{dr}$

$|\frac{dT}{dr}| > |\frac{dT_i}{dr}|$

Найдем среднюю

-объем

$$\left| \frac{dT}{dr} \right| > \left| \frac{dT_i}{dr} \right|$$

променно
градиент

→ отрицательный
градиент

$$\boxed{dQ=0}$$

$$\rho = \rho_0 \sigma$$

Земля сама по себе, если
задействовать дифференциал
 $\rho = \rho_0 \sigma$ и адиабатический
градиент и рассмотреть
т.е. что об'ем τ и ρ ,
если выровняются, и
не выровняются и не выров-
нятся ($dQ=0$).

$$\frac{dT_i}{dr} = \left(\frac{dT}{dr} \right)_{ag} = \left(\frac{\sigma-1}{\sigma} \right) \frac{g_m}{k} = \Gamma_a$$

$$\left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{зем}} > \left| \frac{dT}{dr} \right|_{ag} = \Gamma_a \quad \left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{зем}} > \Gamma_a$$

$$\nabla_p > \nabla_a$$

$$\left| \frac{d\ln T}{d\ln P} \right|_{ag} = \frac{\sigma-1}{\sigma}$$

$$\boxed{\nabla_a = \frac{\sigma-1}{\sigma}}$$

$$\boxed{Ra = \frac{\alpha g \Delta T l^3}{\nu \epsilon}}$$

число Рейнольдса

$$Ra > Ra_{cr} = 1700$$

$$\nu = \frac{\alpha g \Delta T l^2}{\nu} \Rightarrow Ra = \frac{\nu \epsilon}{\alpha}$$

$$Ra = \frac{\nu \epsilon}{\alpha} \Rightarrow Re \left(\frac{\nu}{\alpha} \right) = Pr = Re Pr$$

→ выносятся за скобки

$$\Delta T = \left[\left(\frac{dT}{dr} \right)_{ag} - \left(\frac{dT}{dr} \right) \right]$$

α - коэф. температурного расширения

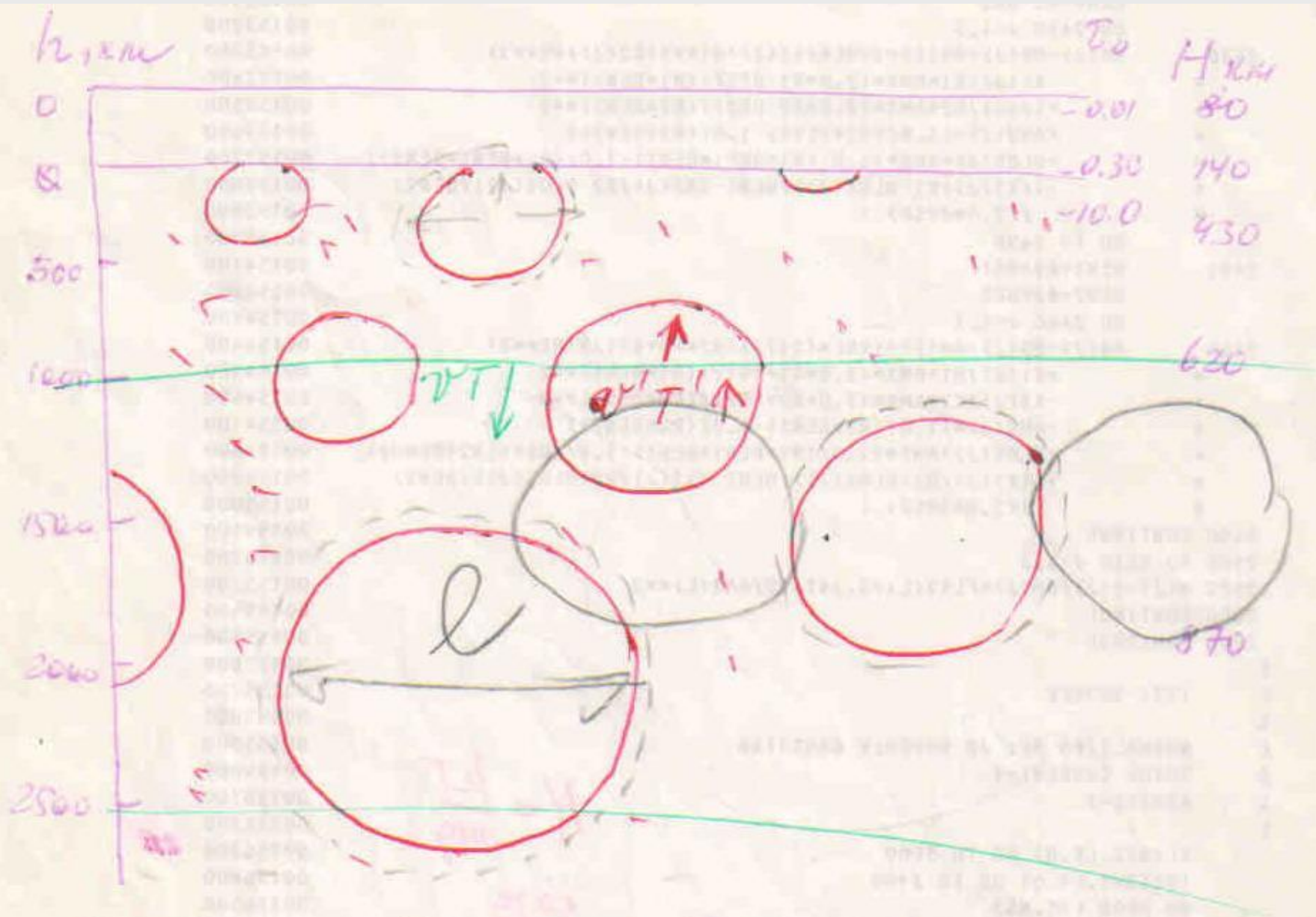
$$Re = \frac{\nu \epsilon}{\nu}$$

$$\boxed{Pr = \frac{\nu}{\alpha}}$$
 число Прандтля

$$l \approx (1,5 \div 2) H$$

$$\mu = \frac{kT}{mg}$$

$$Pr \approx 100 \quad Ra \approx 100 Re.$$



Схематичне зображення верхньої частини КЗ

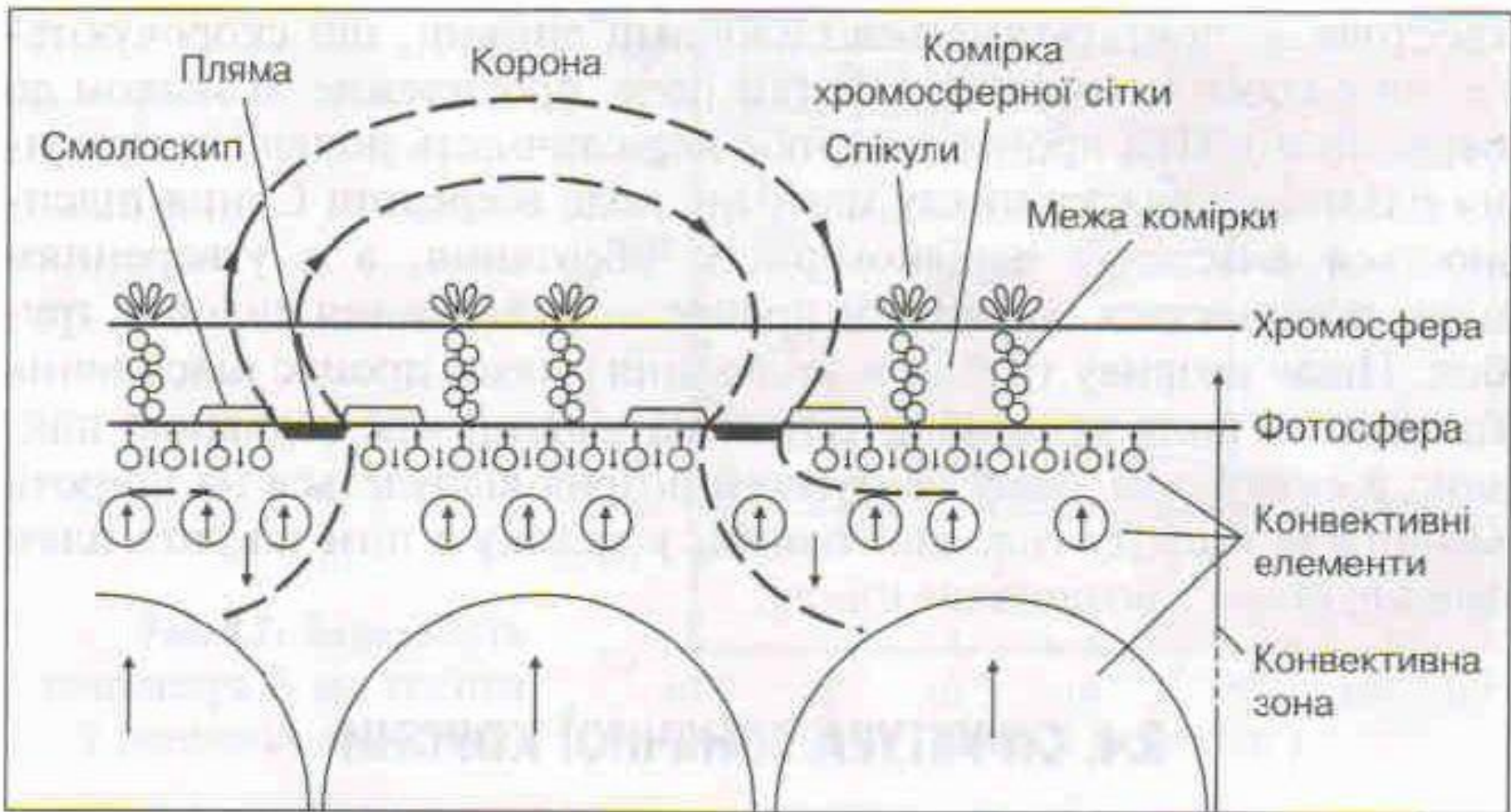


Рис. 2.6. Схема конвективних шарів у сонячній атмосфері

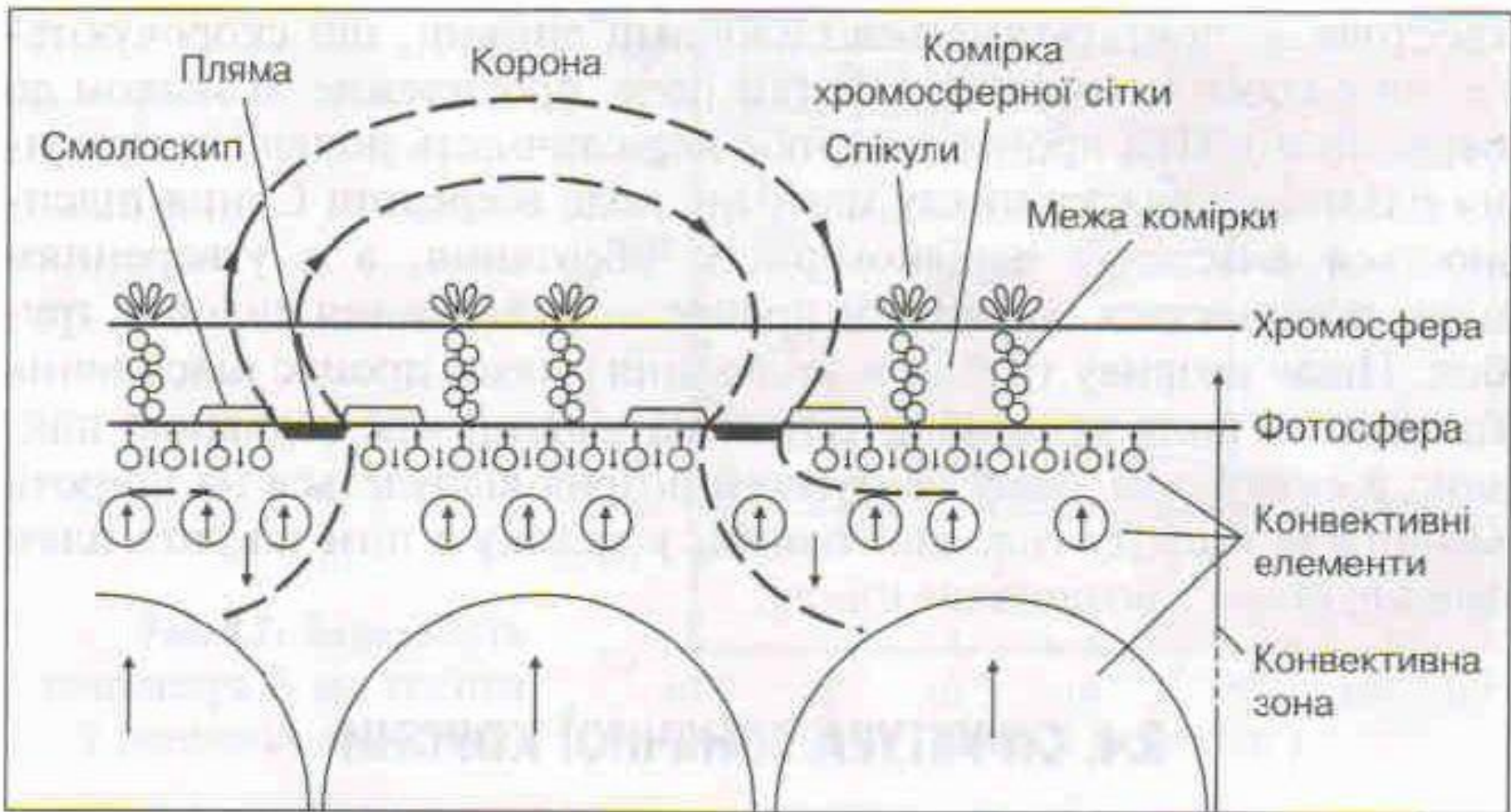
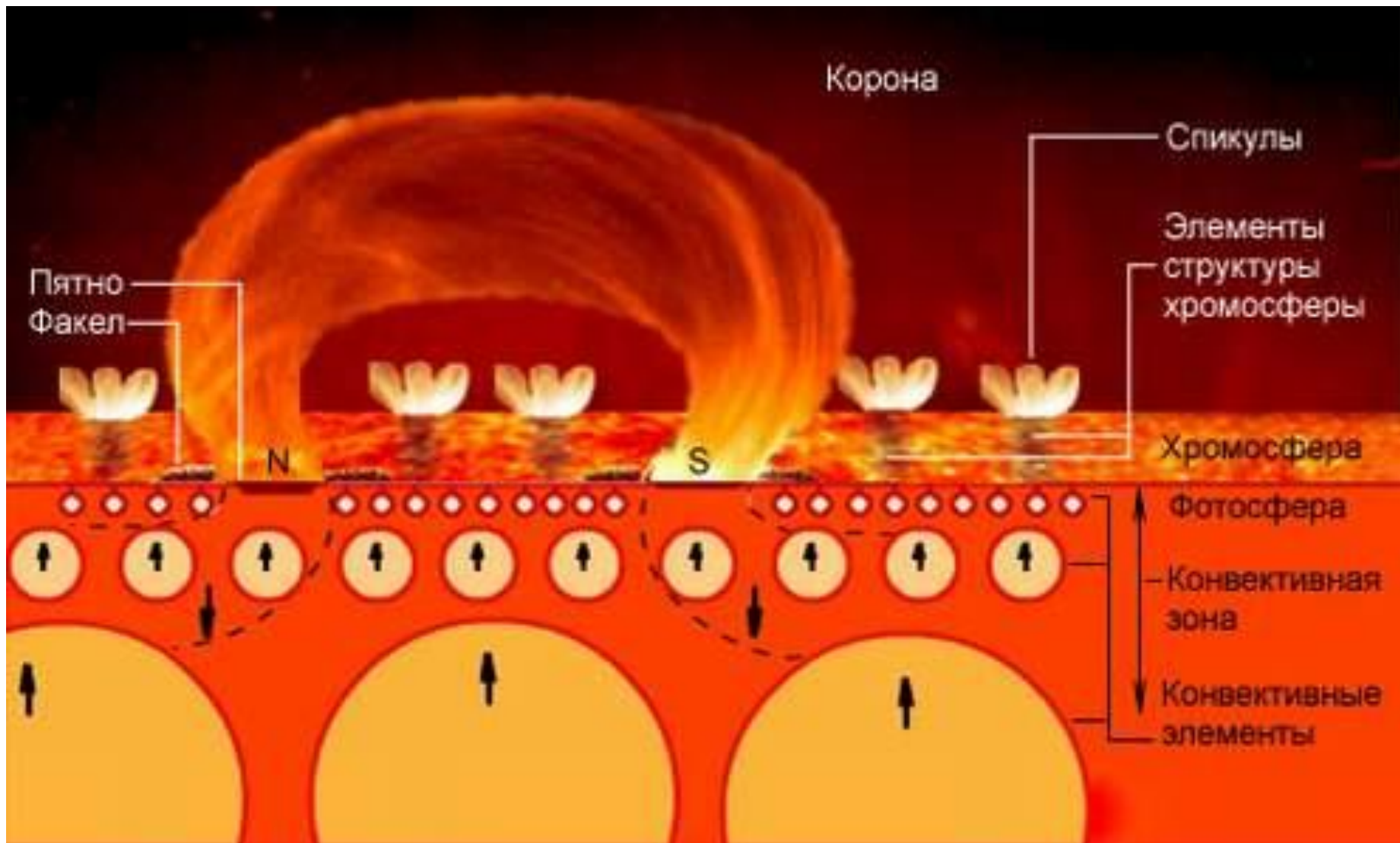
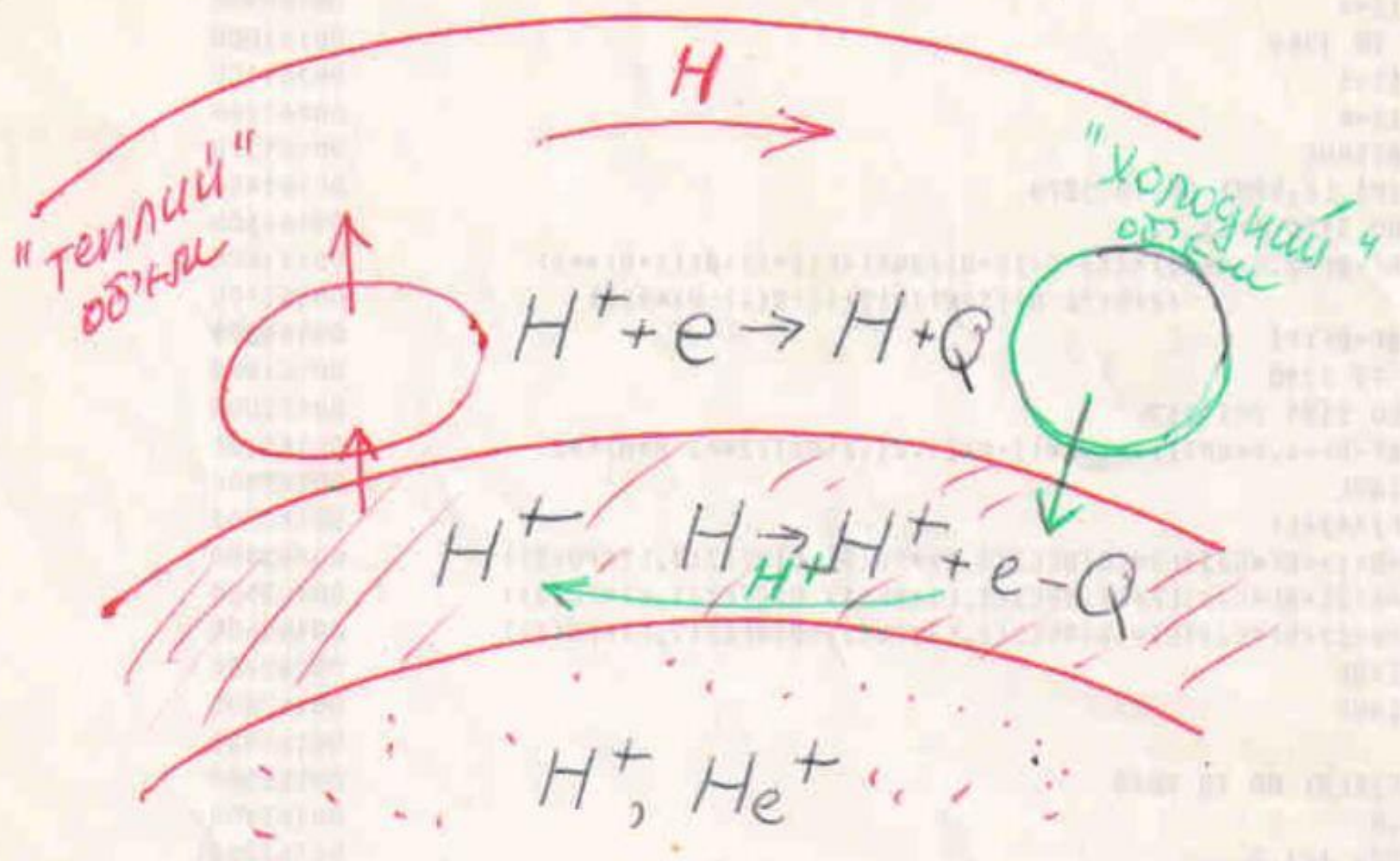
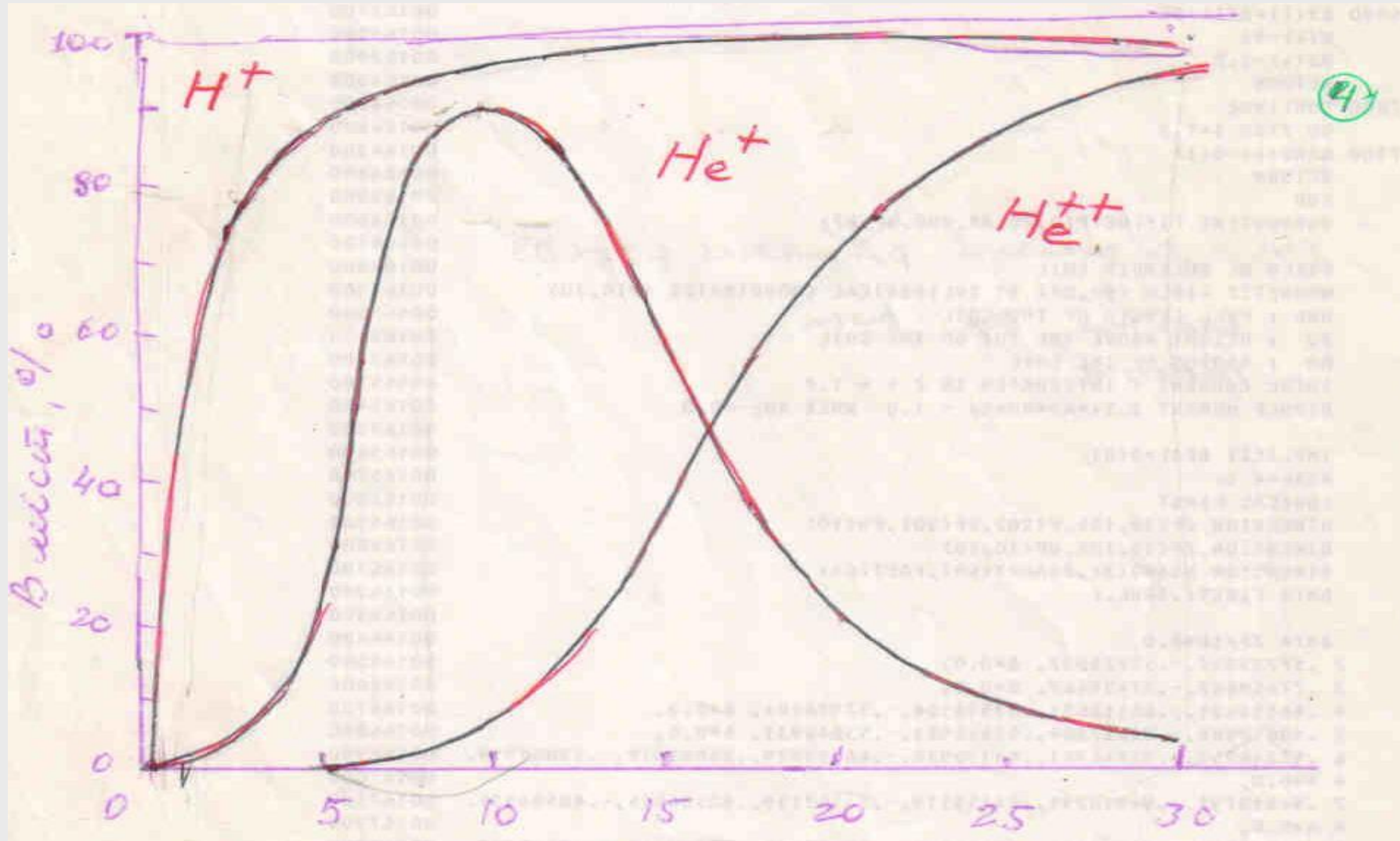


Рис. 2.6. Схема конвективних шарів у сонячній атмосфері





зона ионизации в центре + конвекция в *



Глибина, 103 км

Іонізація водню і гелію уз сферосфера

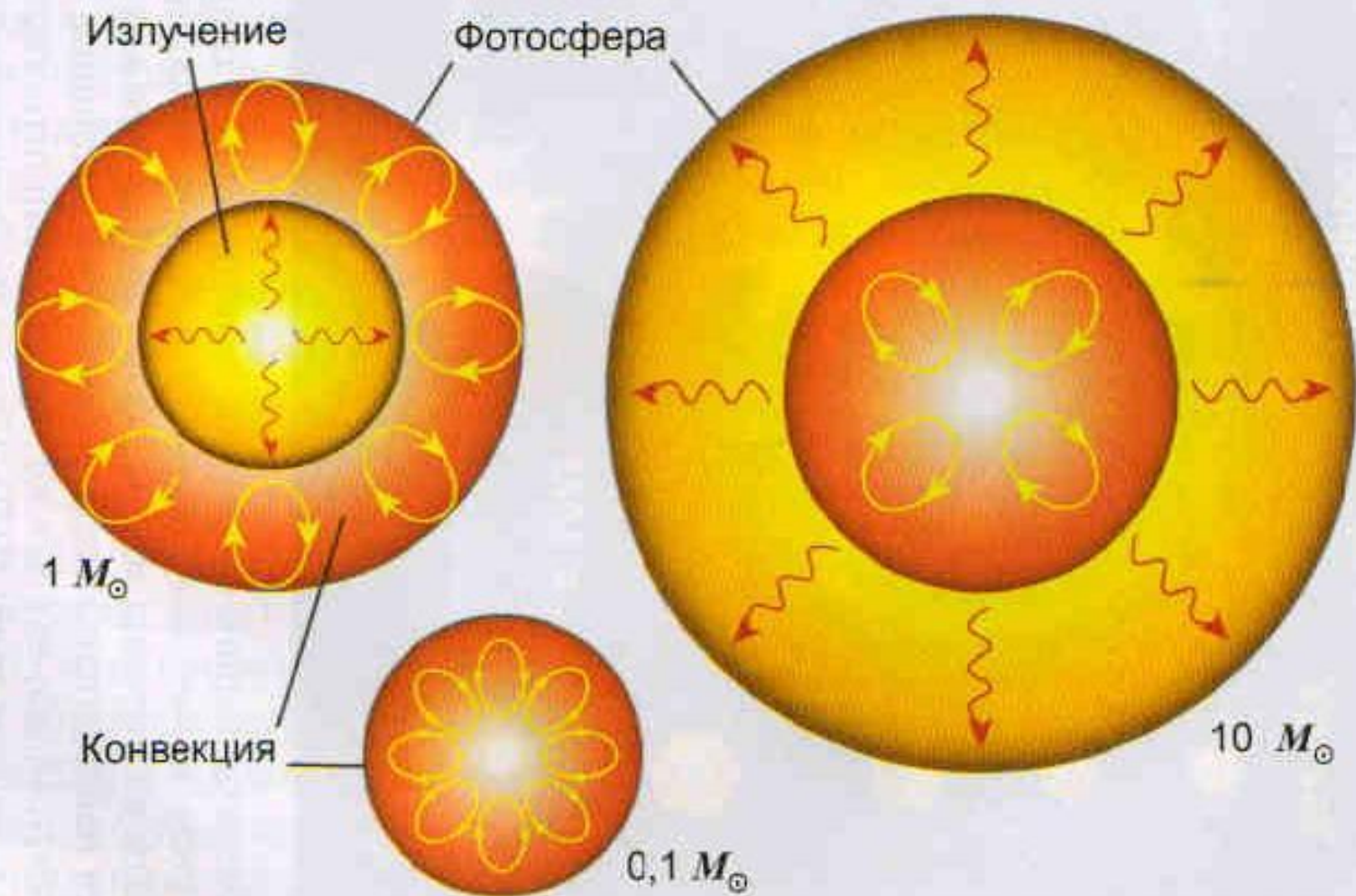


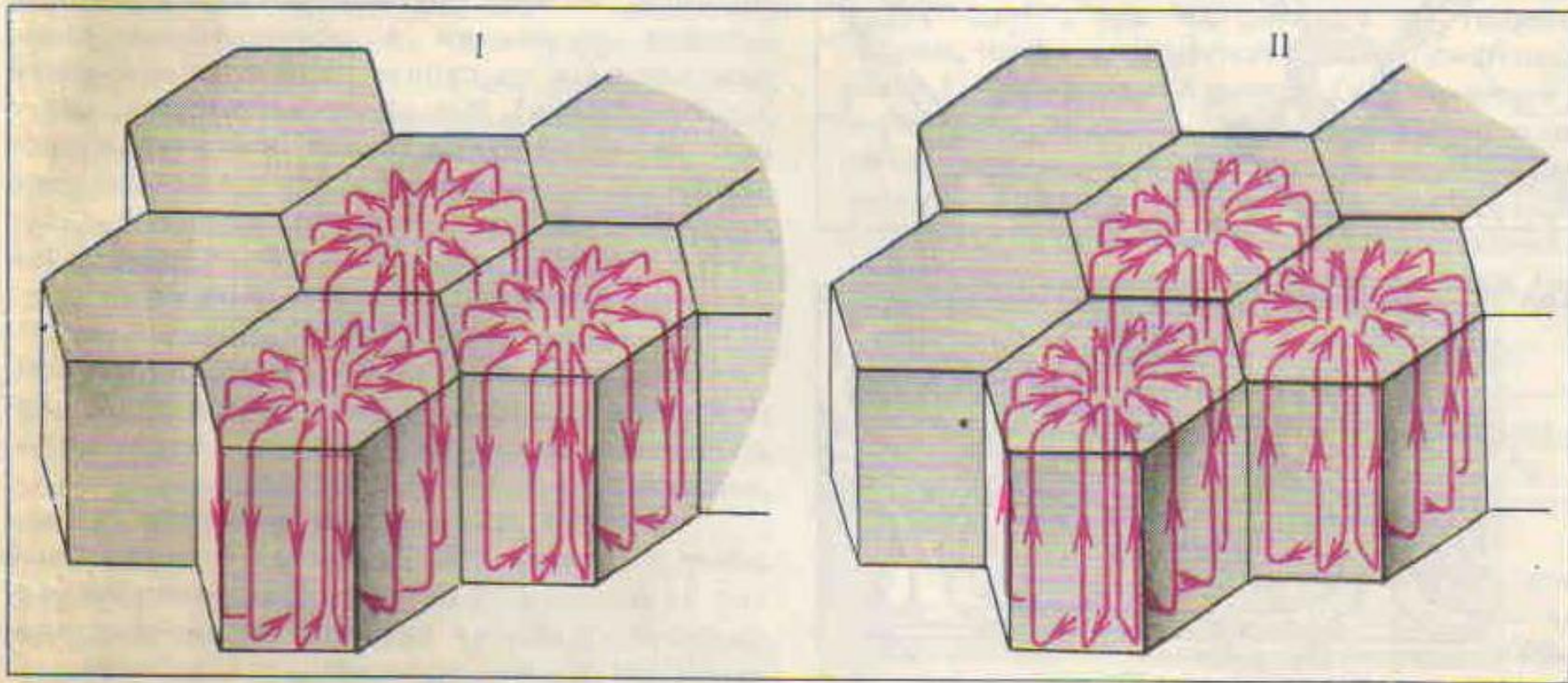
Рис. 155. Механизмы переноса энергии в звездах главной последовательности [392]

Грануляція на поверхні Сонця
має структуру комірок Бенара

a



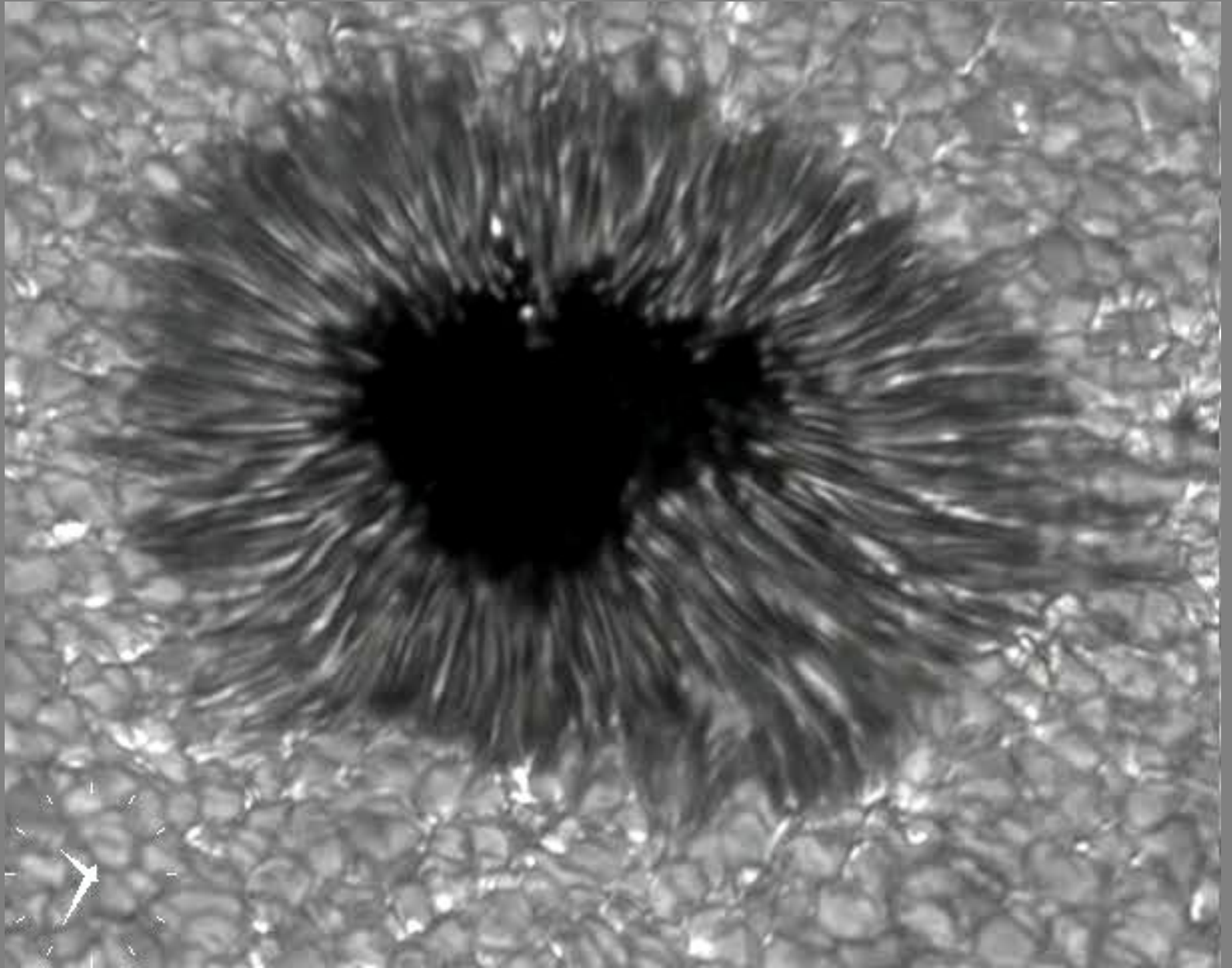
**Грануляція на поверхні Сонця
має структуру комірок Бенара
(гексагональна структура)**

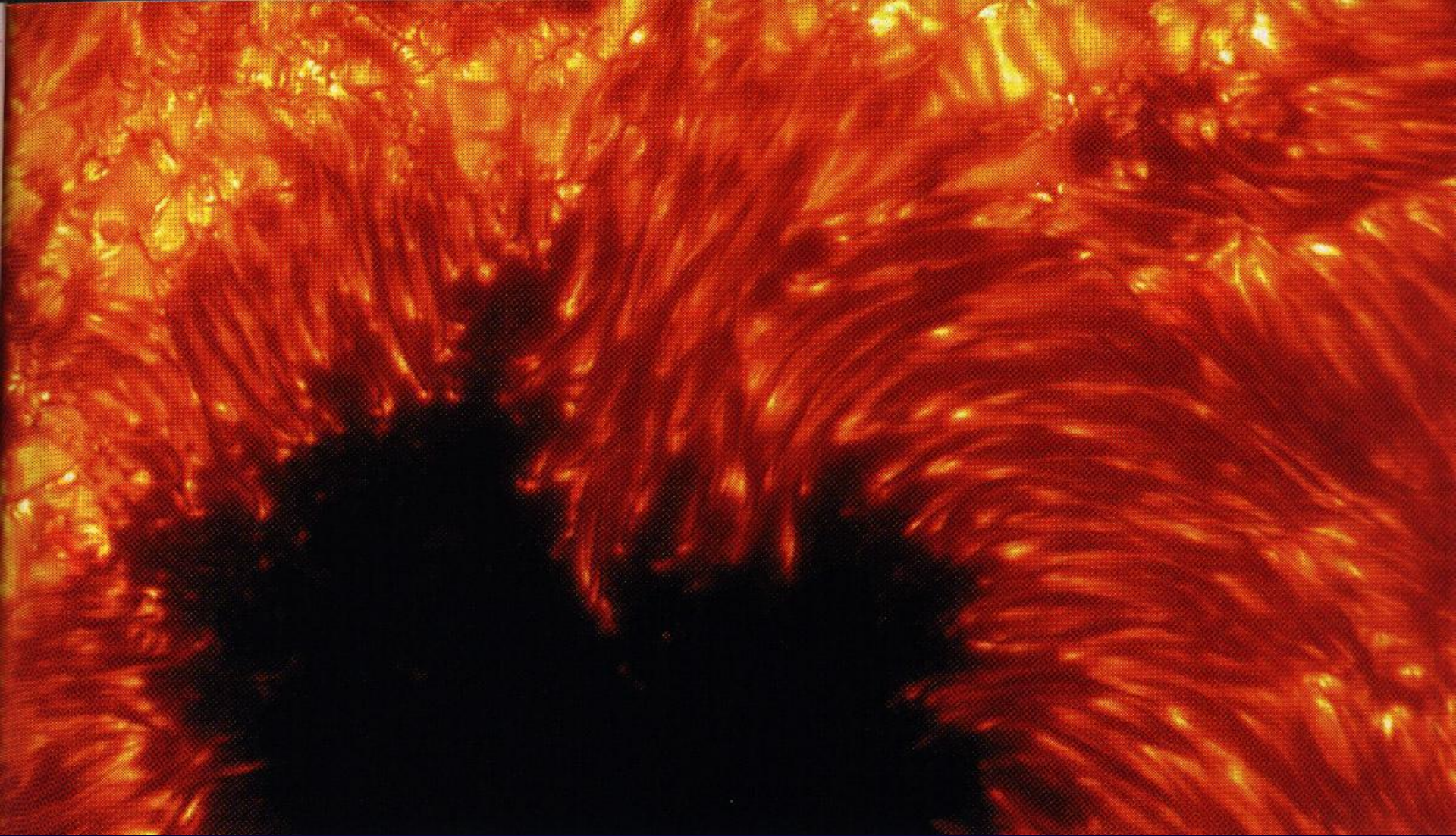


Два варианта течений в модели конвекции Рэлея—Бенара (I — прямой, II — инверсионный), неразличимые при численном моделировании на ЭВМ. В первом случае восходящий поток находится в центре, а нисходящие — по периферии конвективных ячеек; во втором — нисходящий поток — в центре, а восходящие — по периферии.

**Конвективні комірки Бенара
(гексагональна структура)**

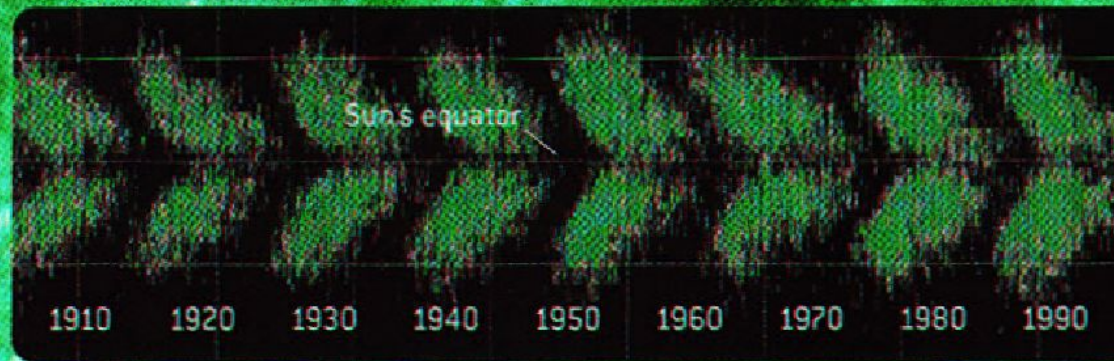
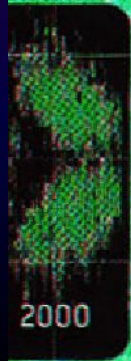
Шведский солнечный телескоп
Ла Палма, 20 сентября, 1999

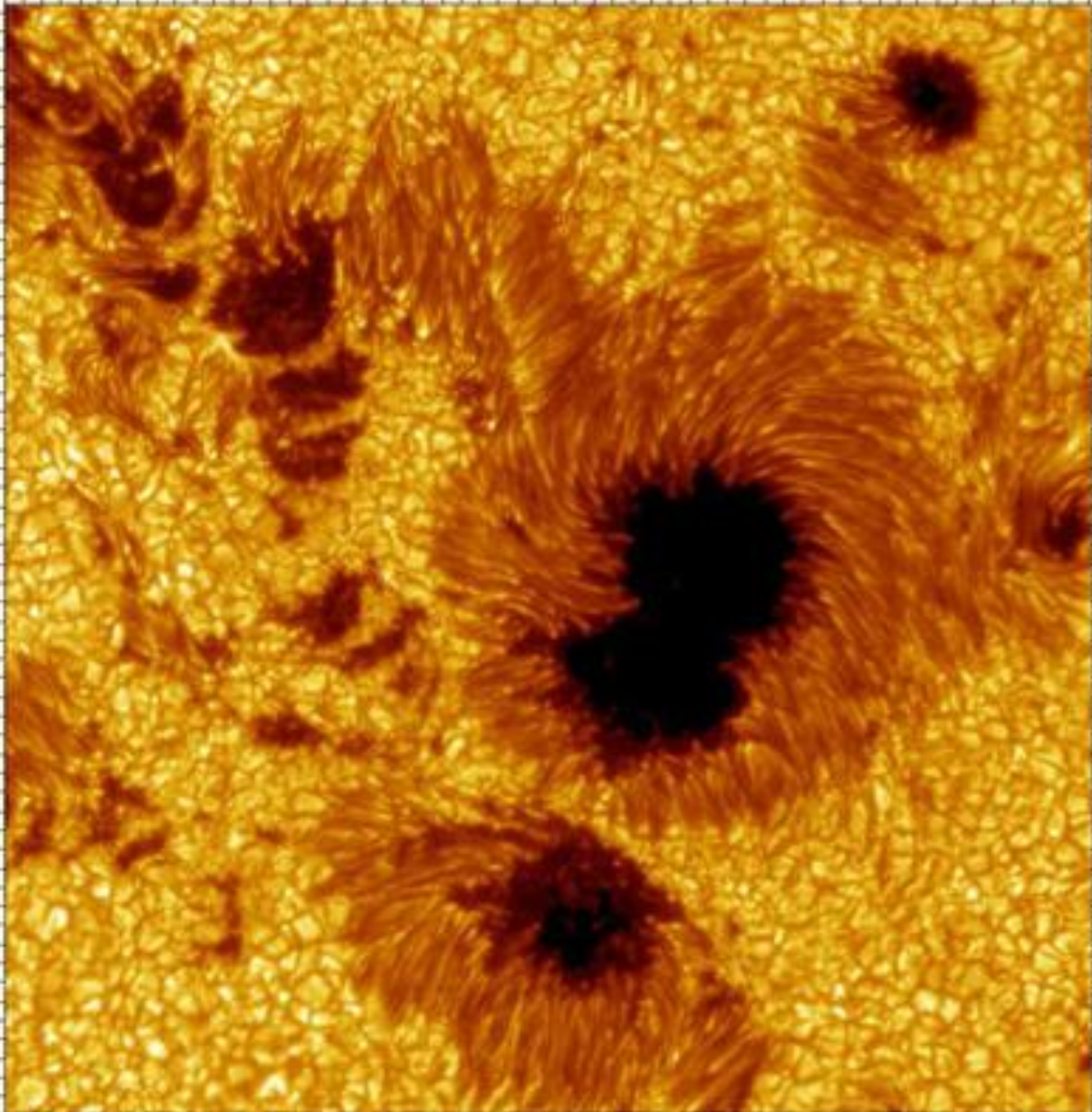




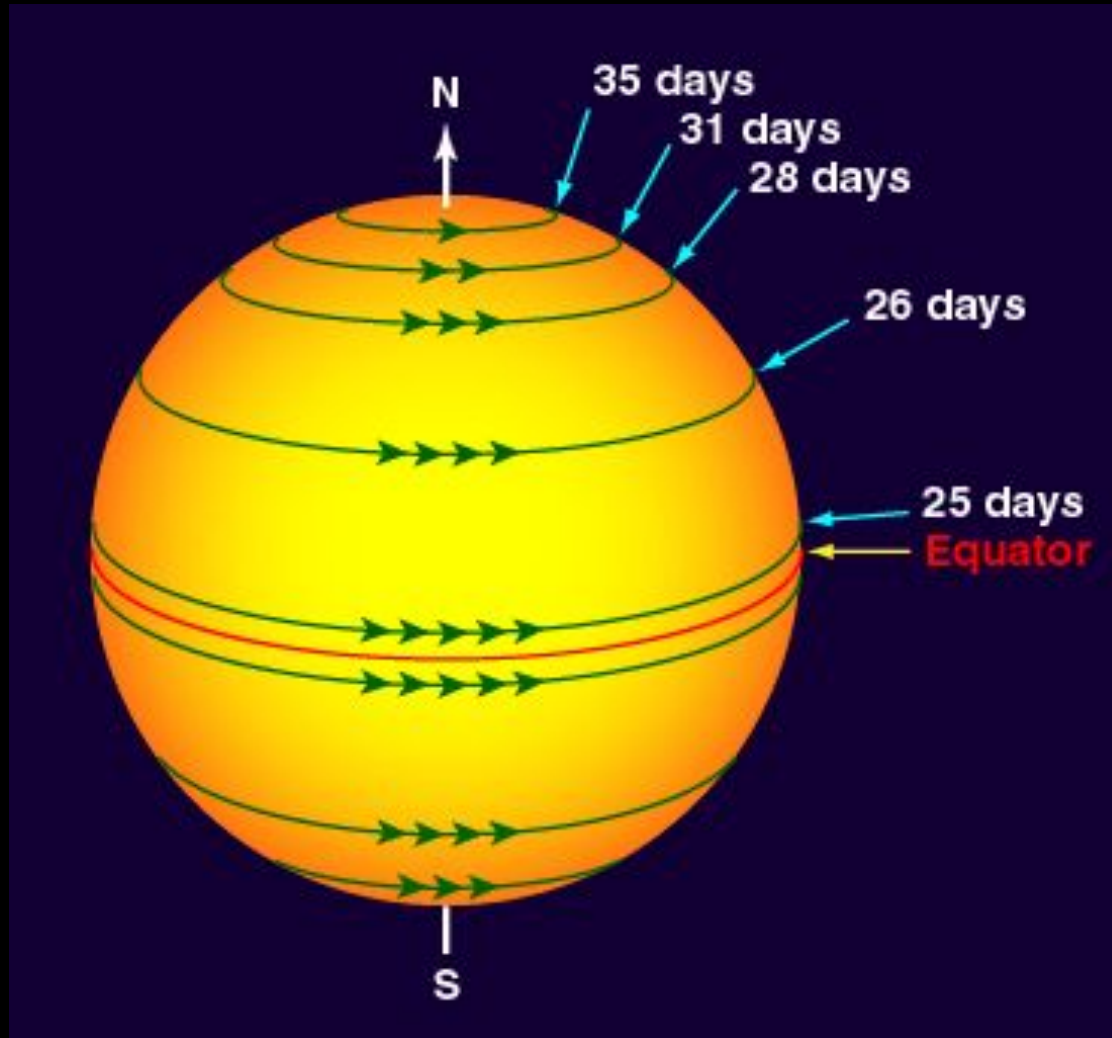
Тонка структура сонячної плями

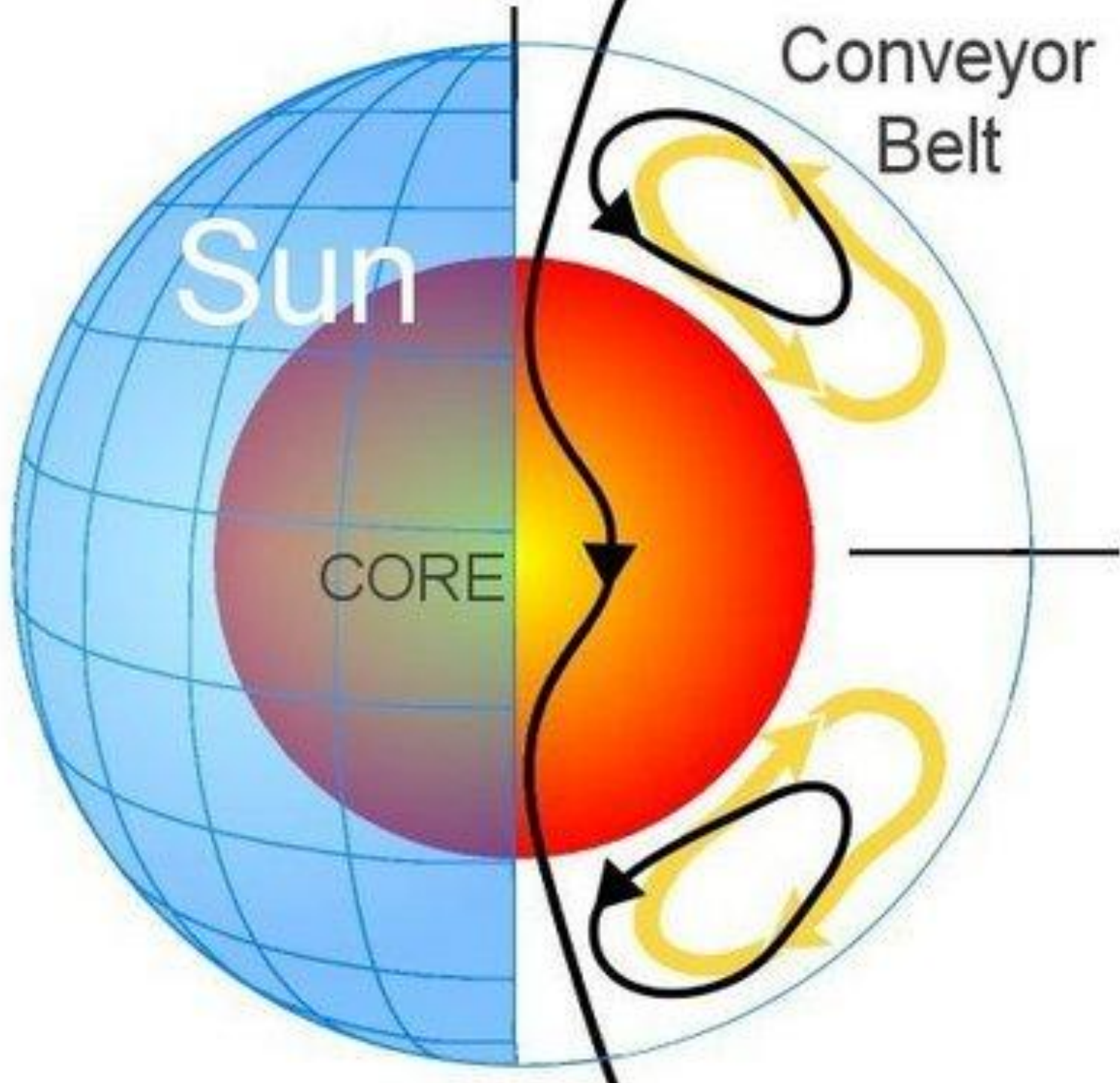
Тонка структура сонячних плям

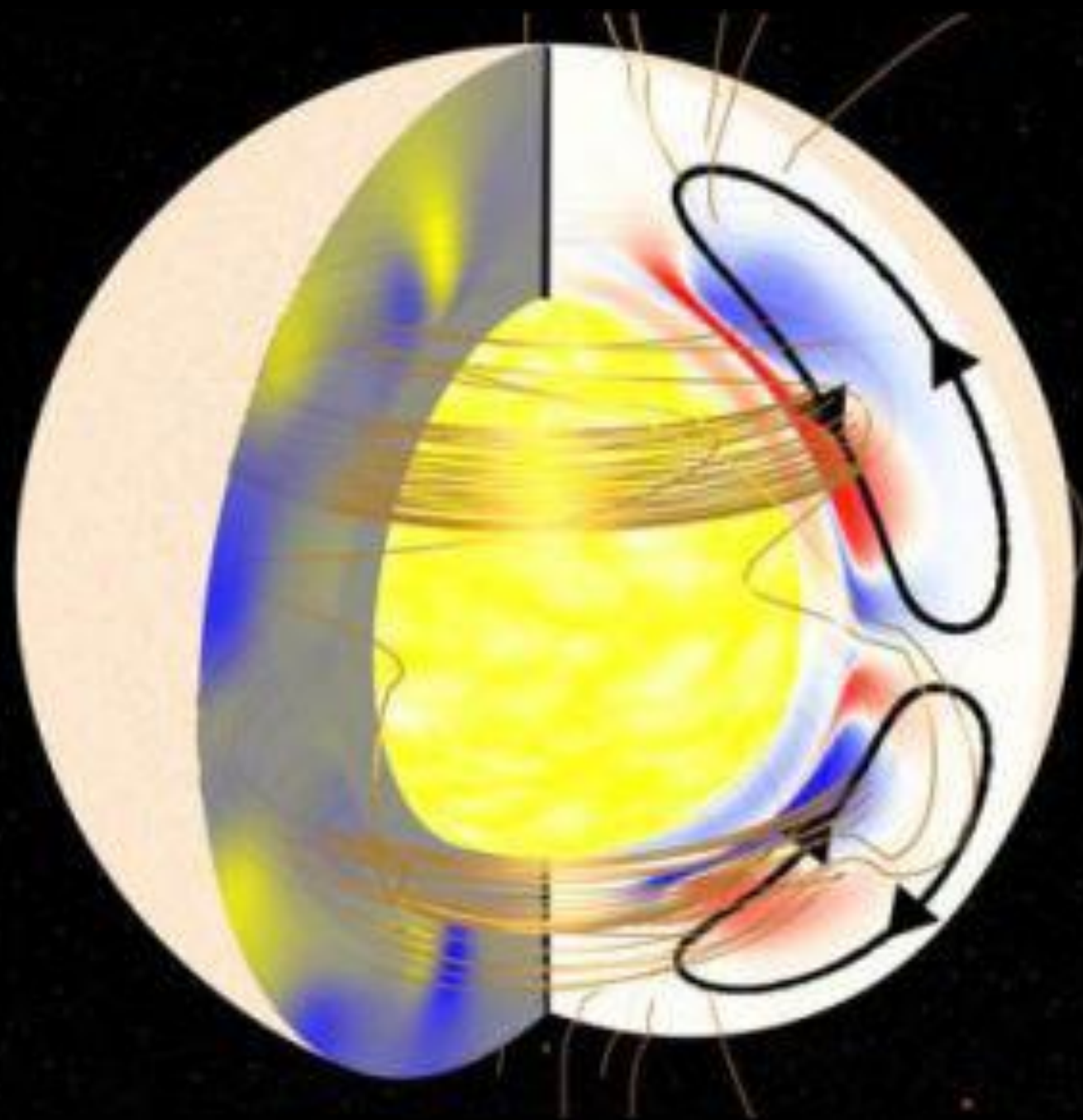




Диференційне обертання і СОНЯЧНИЙ ЦИКЛ







Моделі КЗ

SPRUIT (1974). [*Spruit H.C. A model of the solar convection zone // Solar Phys. 1974. Vol.34. P.277-290.*]

SPRUIT (1977). *A convection zone model.* [*Spruit H.C. Magnetic Flux Tubes and Transport of Heat in the Convection Zone of the Sun. Utrecht, 1977. Thesis. P.17-34.*]

Ця модель побудована так, щоб оптимально узгодити такі дані:

i) Модель внутрішньої будови \odot Abraham and Iben (1971).

ii) Модель атмосфери VAL [Vernazza et al. (1976)].

iii) Спостережні вертикальні швидкості в фотосфері.

Модель має довжину змішування $l + z_0$, тобто l дорівнює відстані до фіксованого рівня $-z_0$ ($z = 0$ при $\tau = 1$, $z_0 = 459$ км).

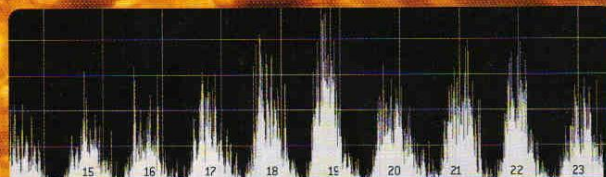
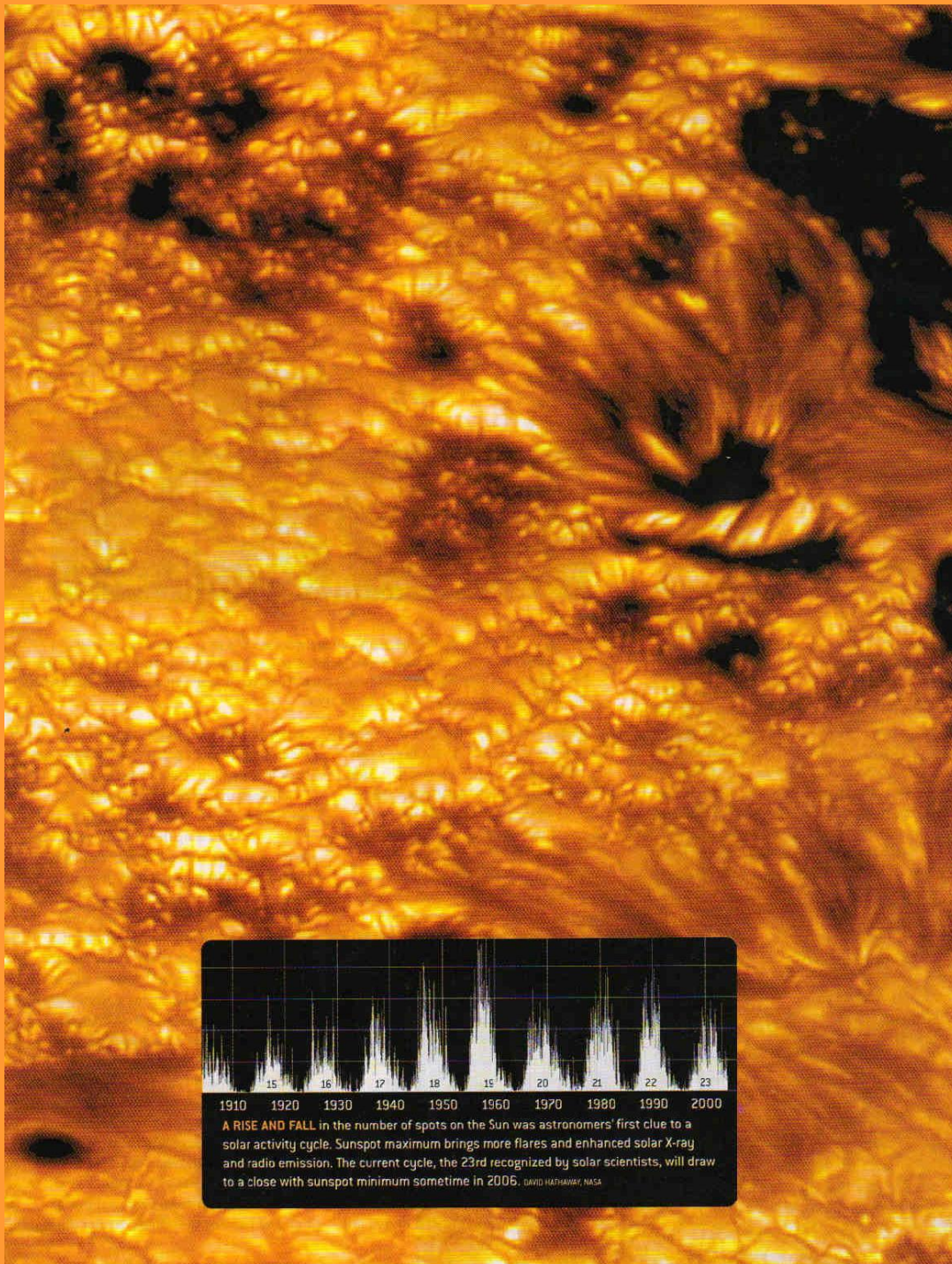
UNNO, KONDO and XIONG (1985). [*Unno W., Kondo M. and Xiong D. Solar Convection Zone Given by Nonlocal Mixing-Length Theory // Publ. Astron. Soc. Japan. 1985. Vol.37. P.235-244.*]

Для побудови моделі використана нелокальна теорія довжини змішування **Xiong (1979)**. З фізично розумним вибором довжини змішування модель дає спостережну швидкість грануляції та глибоке дно зони, яке вимагає геліосейсмологія. Основна відмінність нелокальної теорії довжини змішування від стандартної моделі полягає в присутності більшого температурного градієнту в області проникаючої конвекції на краю конвективної області.

Для визначення довжини змішування прийнято формулу:

$$l = \max [c, H_0, c_2 \min (r_1 - r_0, r_0)]$$

c_1, c_2 – константи, H_0 – шкала висот за тиском, r_0 і r_1 – радіуси низу та верху КЗ, які визначаються зникненням градієнту ентропії ($c_1=1, c_2=1$).



A RISE AND FALL in the number of spots on the Sun was astronomers' first clue to a solar activity cycle. Sunspot maximum brings more flares and enhanced solar X-ray and radio emission. The current cycle, the 23rd recognized by solar scientists, will draw to a close with sunspot minimum sometime in 2006. DAVID HATHAWAY, NASA

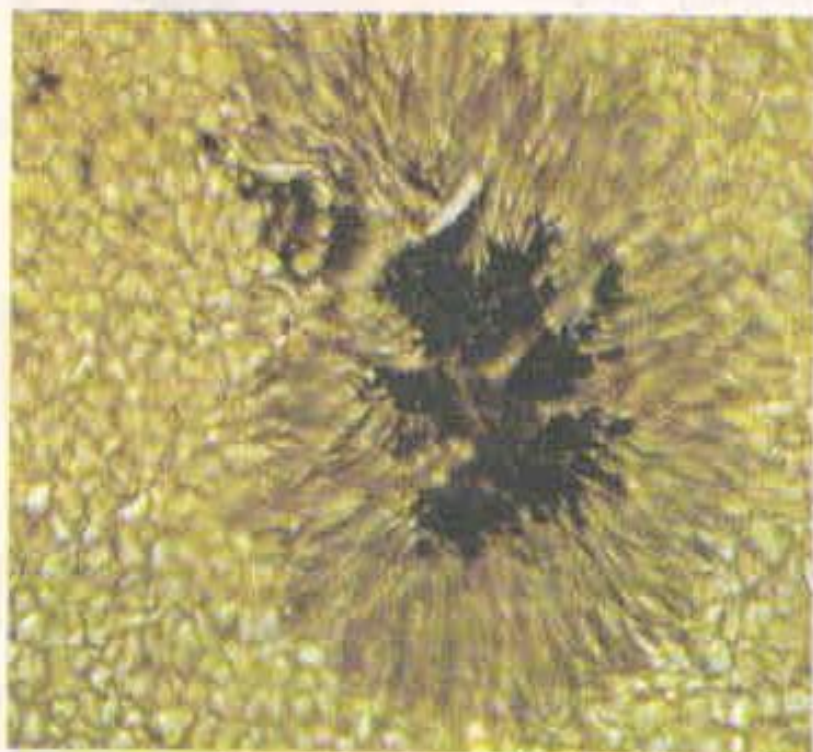


Рис. 12.5. Сонячна пляма — це область фотосфери, де знижується температура, бо сильне магнітне поле у плямі зупиняє конвекцію

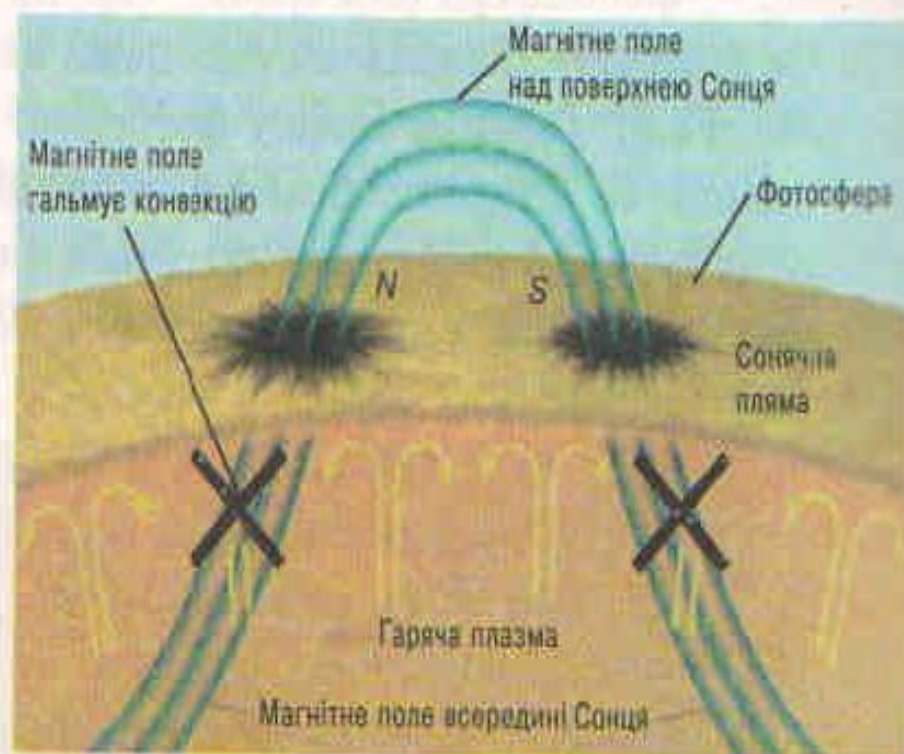
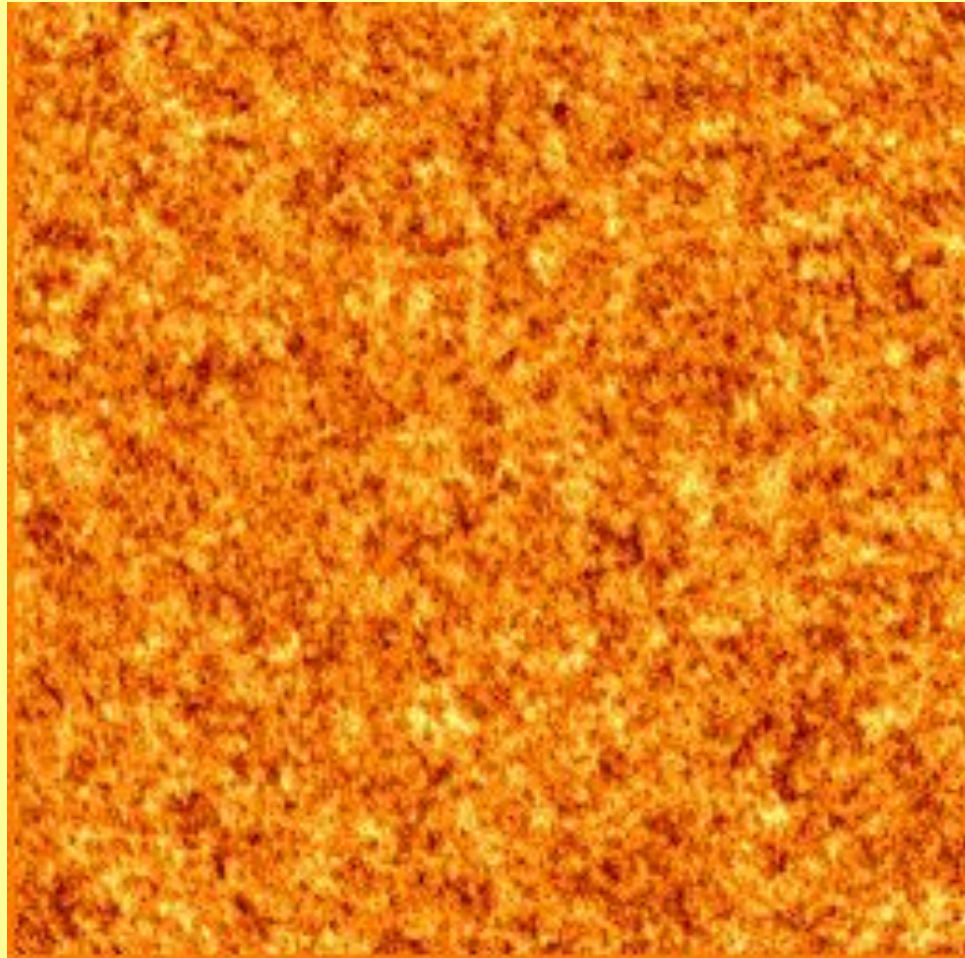


Рис. 12.6. Кожна пляма має свою магнітну полярність, тому плями з'єднані між собою попарно, як полюси у магніті

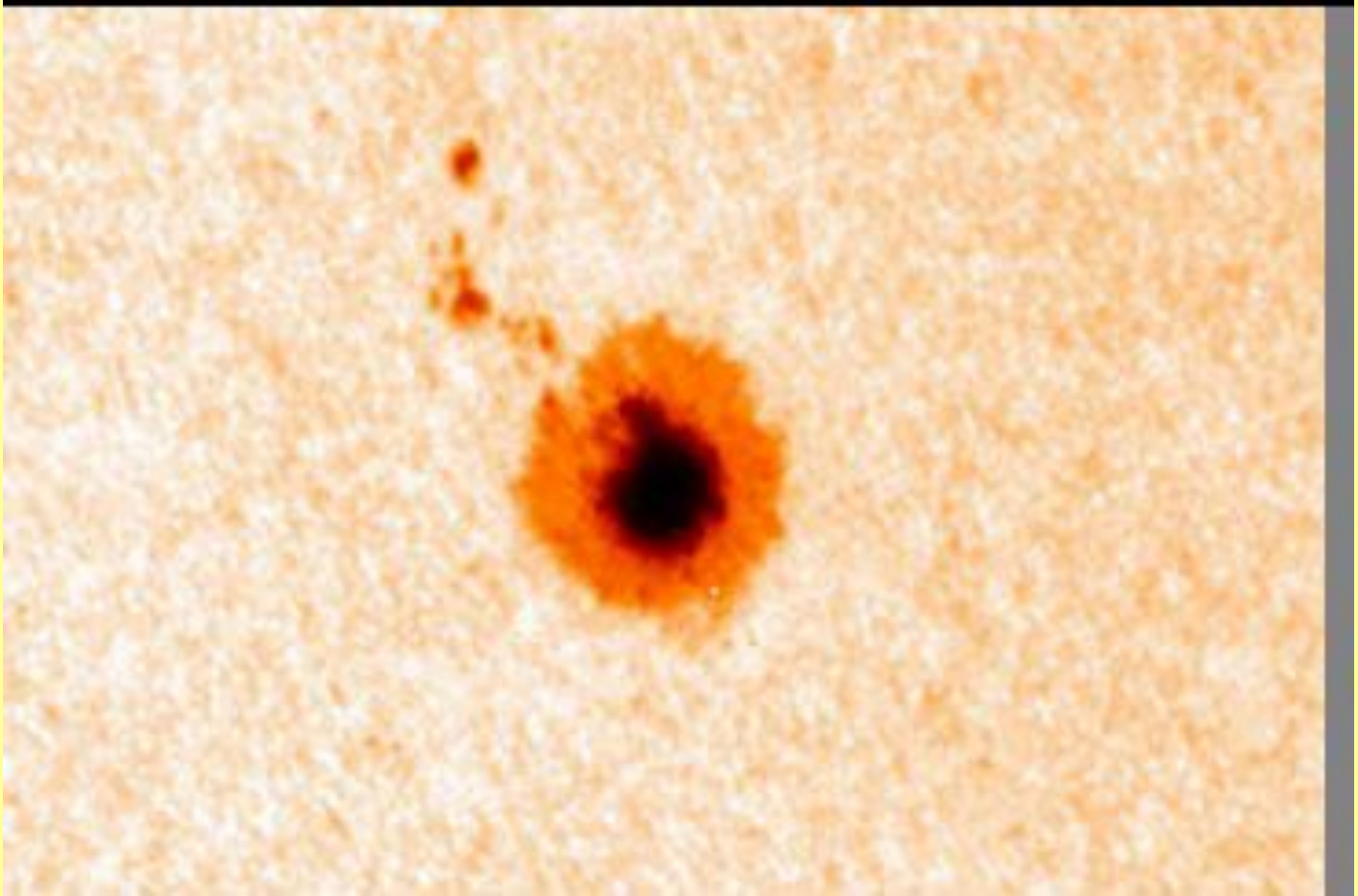
Рухи плазми на поверхні Сонця з високою простровою роздільністю

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

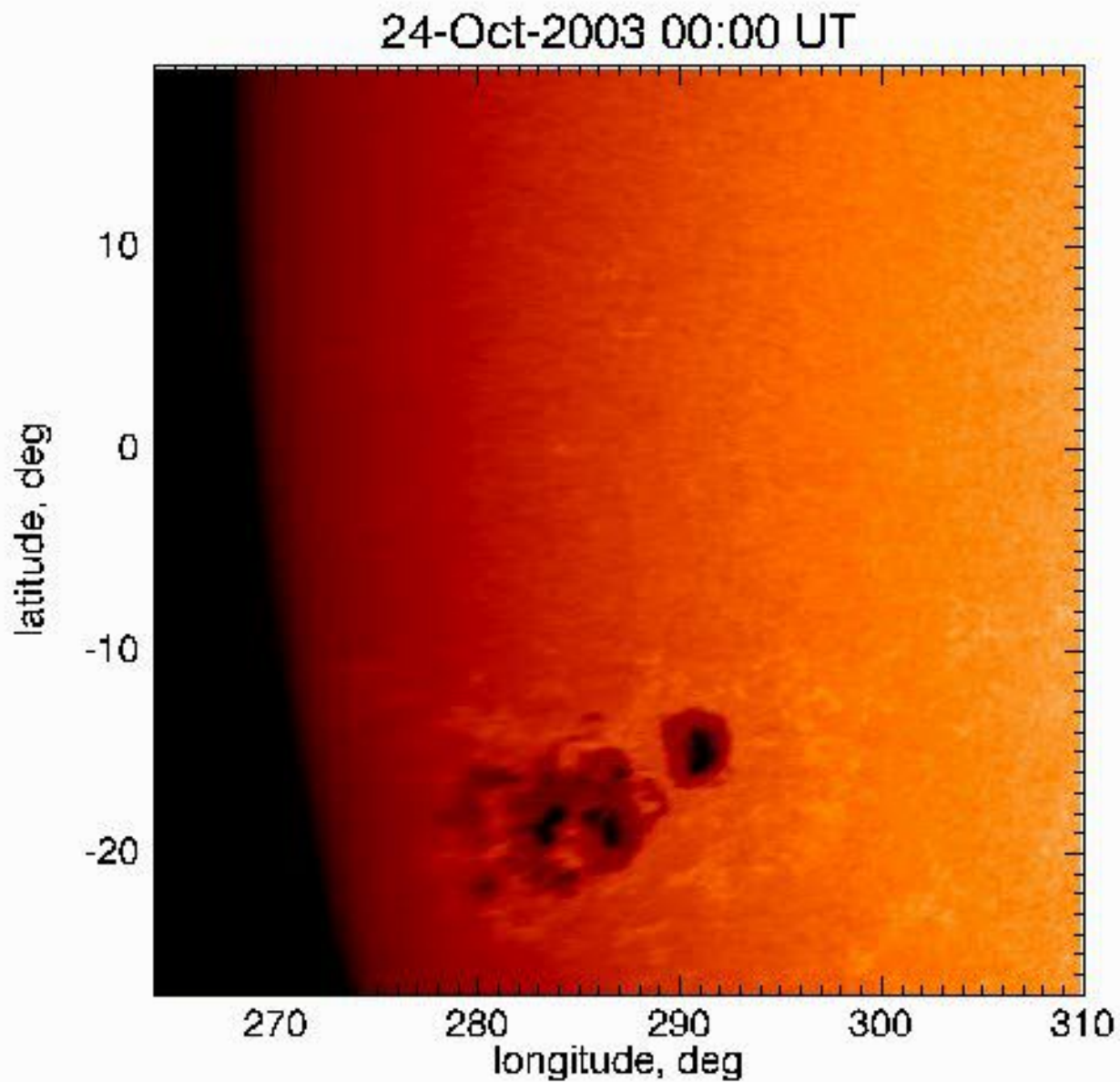


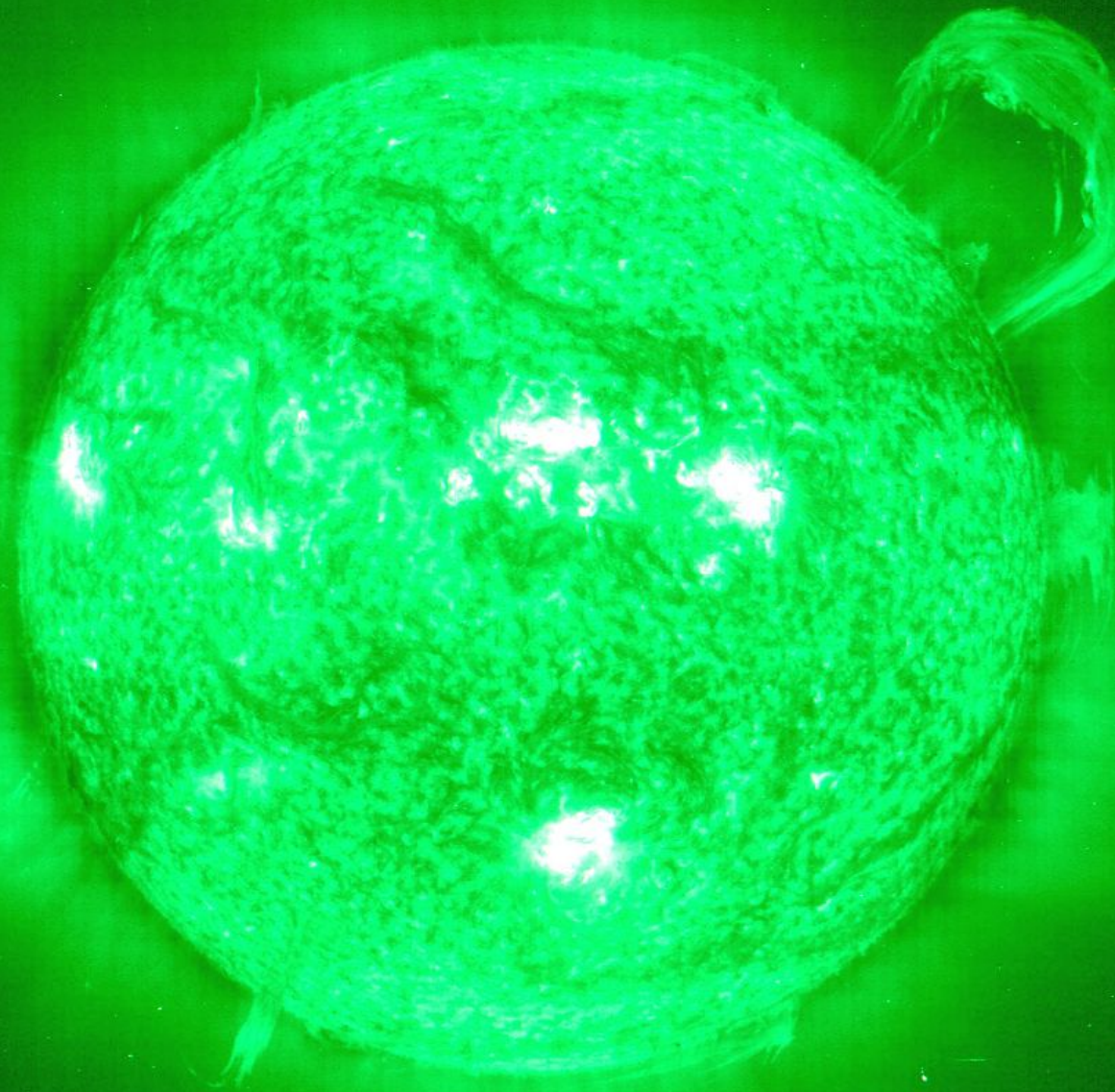
Яскраві деталі відповідають рухам
плазми всередину Сонця,
темні – показують рухи зовні

Результати акустичної томографії



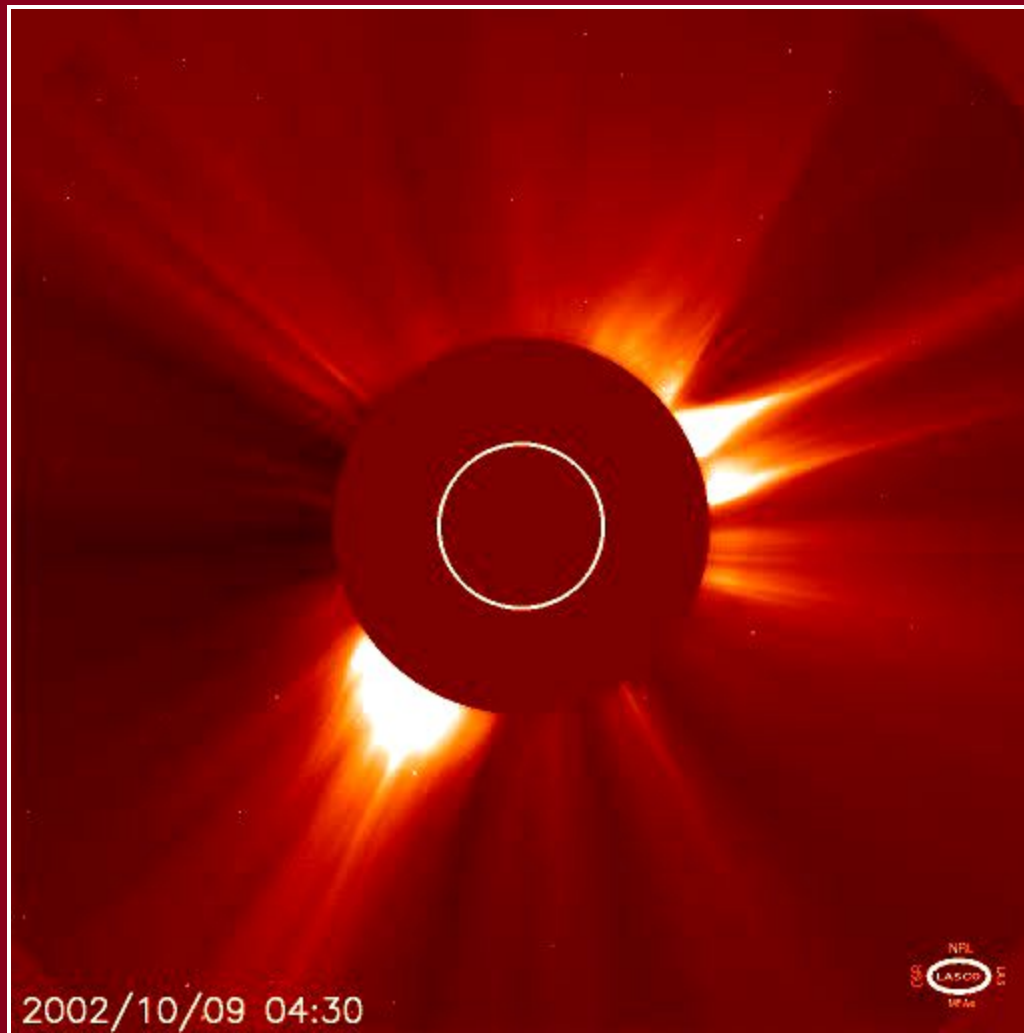
Evolution of AR 10486-488: October 24 – November 2, 2003



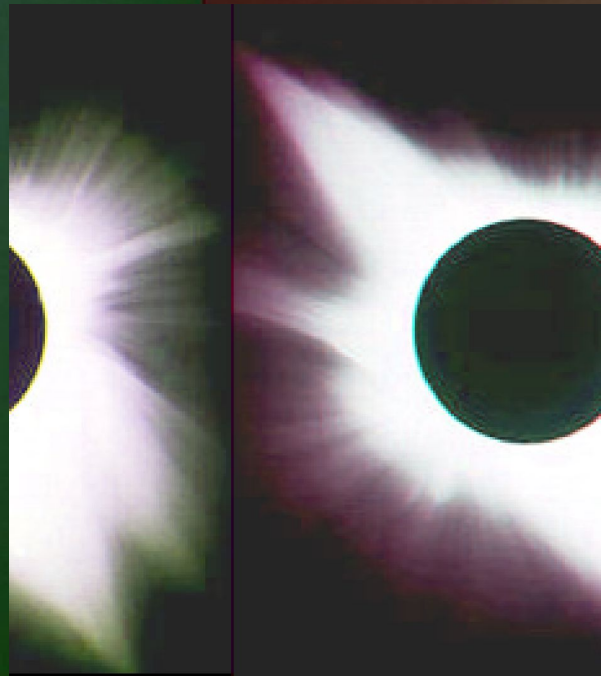


Сонячні протуберанці

Сонячна корона

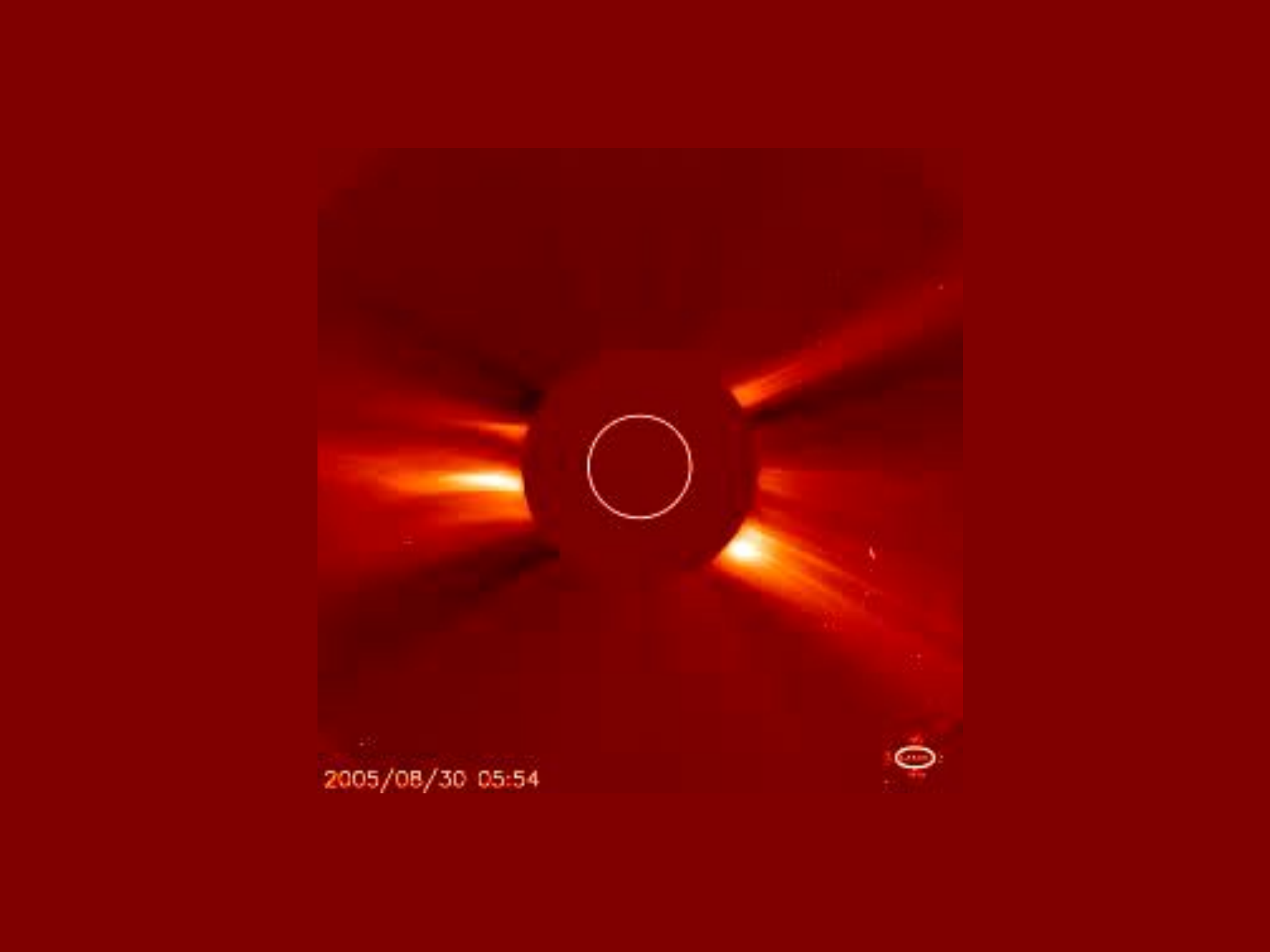


Структура сонячної корони –
епоха мінімуму
сонячної активності



Структура сонячної корони –
епоха максимуму
сонячної активності

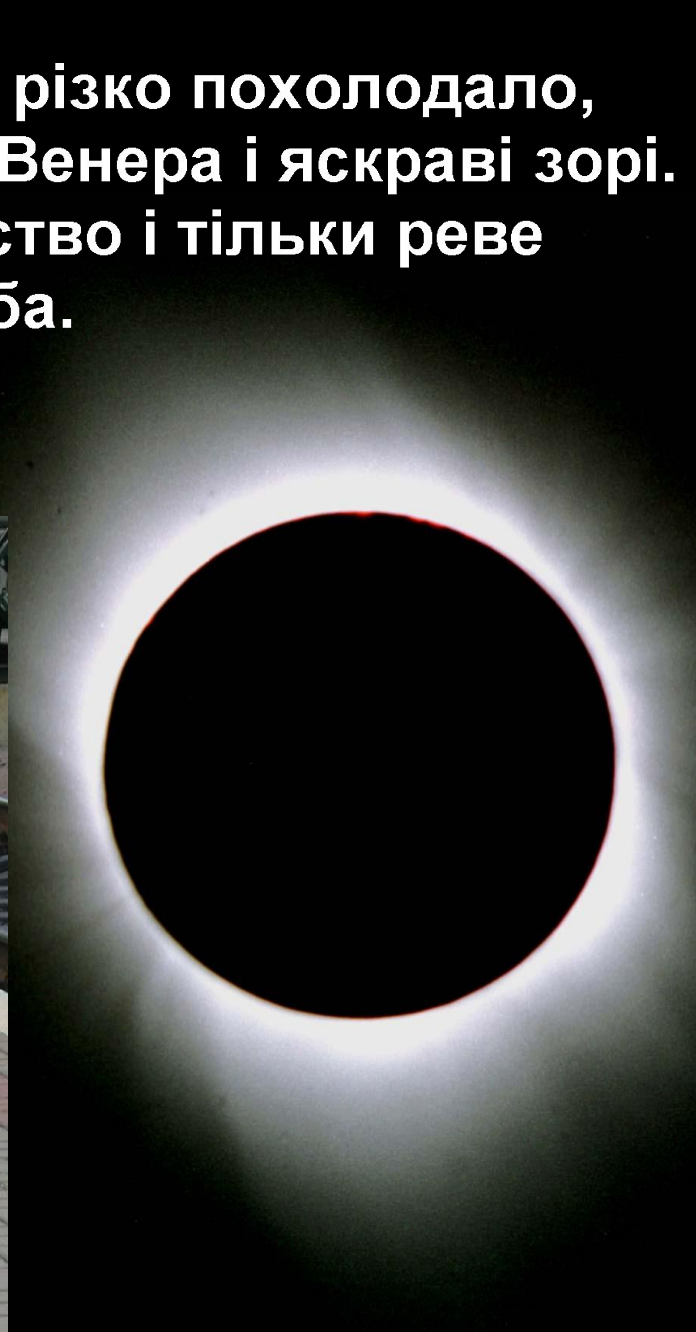





2005/08/30 05:54

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?



**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



