



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

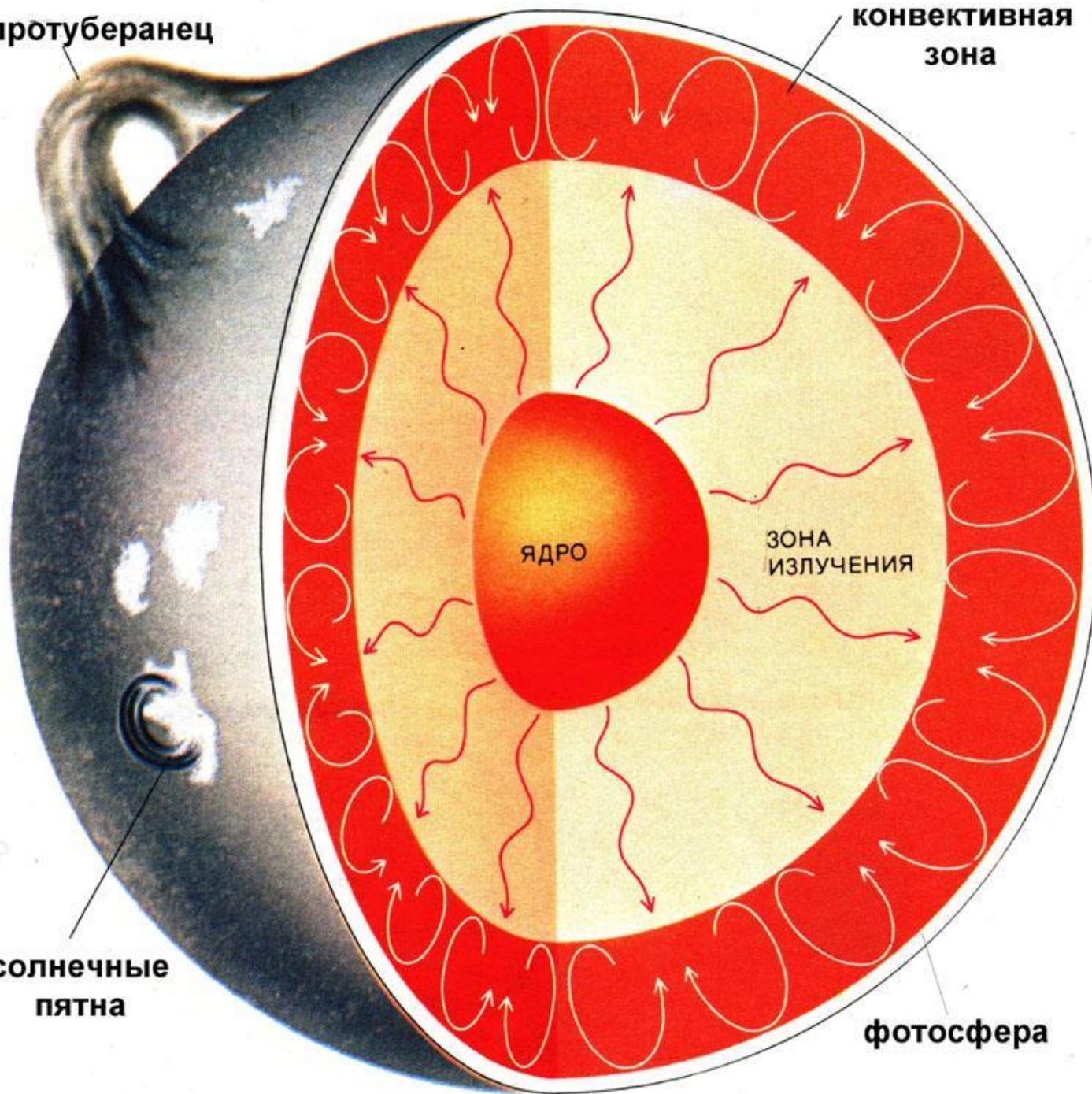
конвективная
зона

солнечные
пятна

ядро

зона
излучения

фотосфера



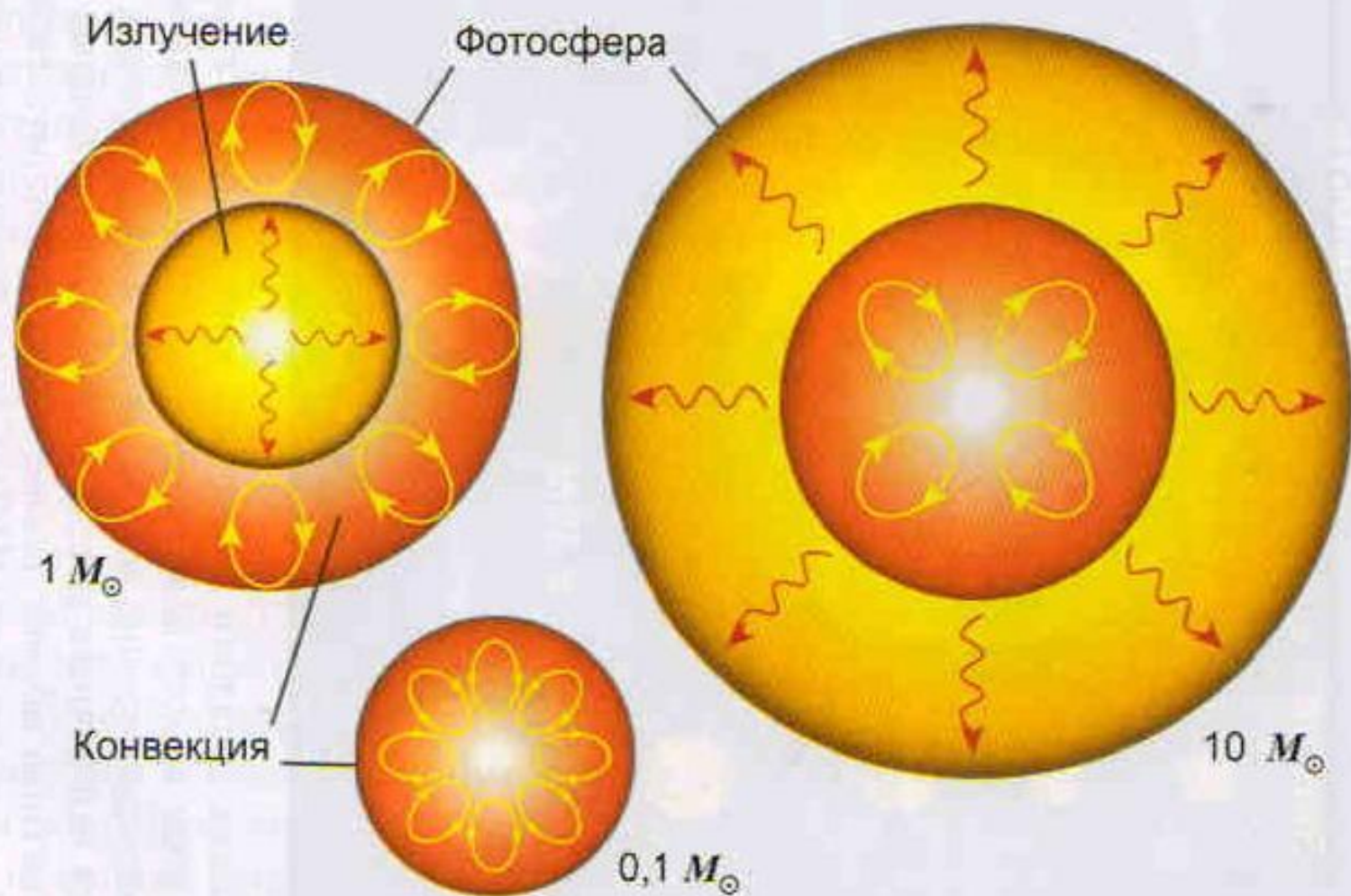
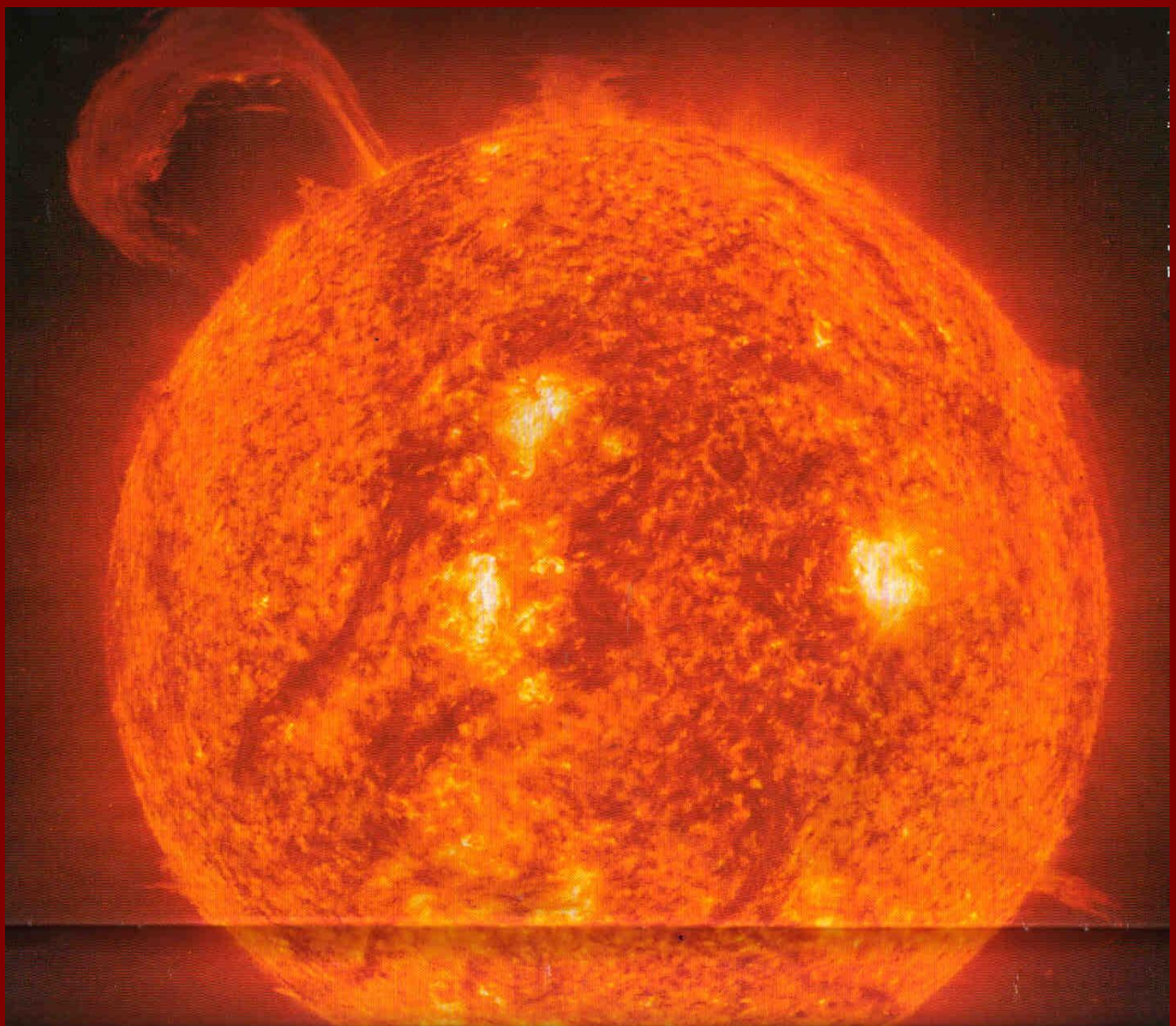


Рис. 155. Механизмы переноса энергии в звездах главной последовательности [392]



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

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;
 $\bar{\kappa}_r = 16\sigma T^3 / 3\rho\kappa$ – 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 адіабіти: 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

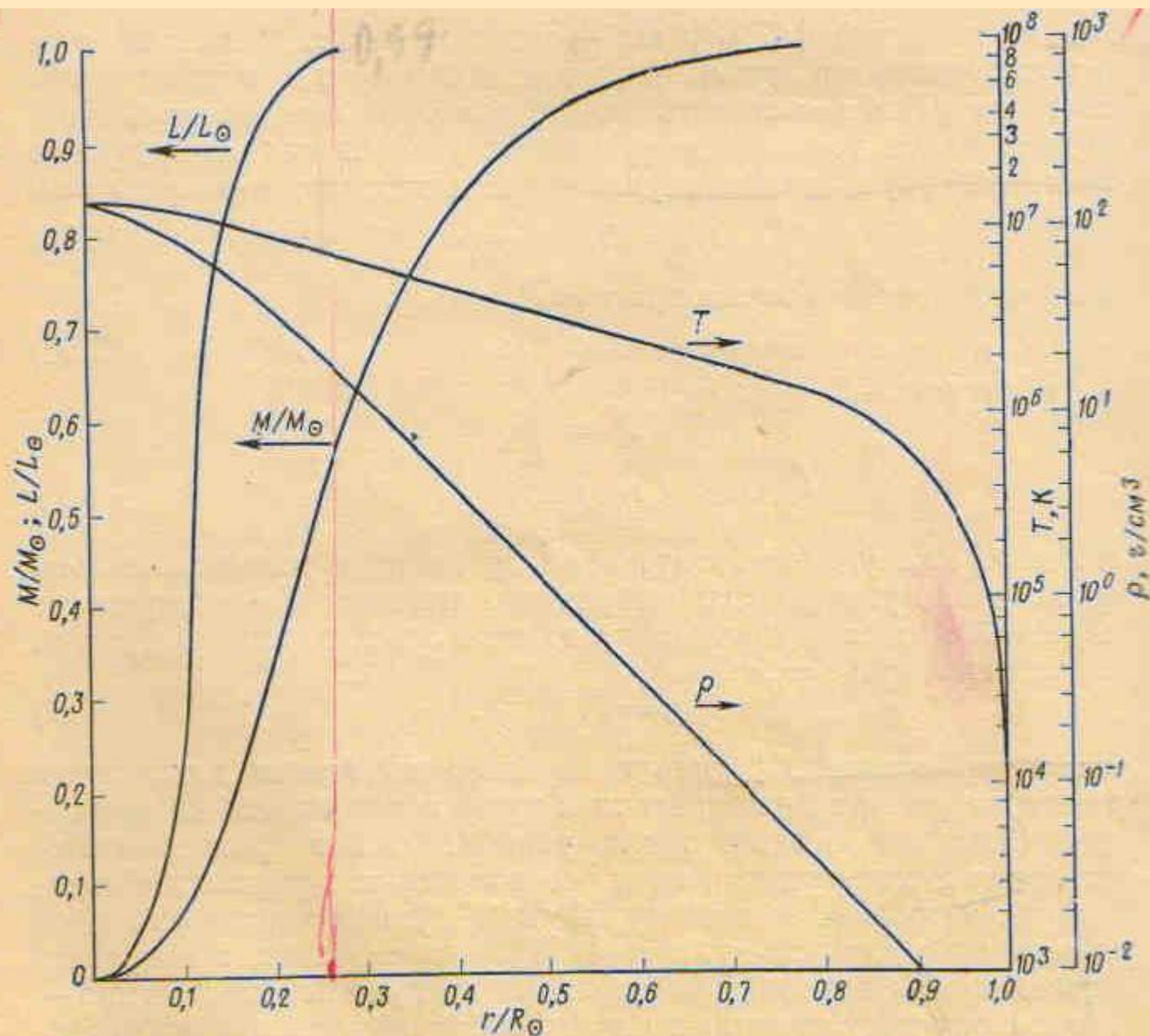


РИС. 3.5. Модель внутреннего строения современного Солнца.
 $X=0,708$, $Y=0,272$, $Z=0,020$, $\rho_c=158 \text{ г/см}^3$, $T_c=1,57 \cdot 10^7 \text{ К}$. (По Сирсу [23].)

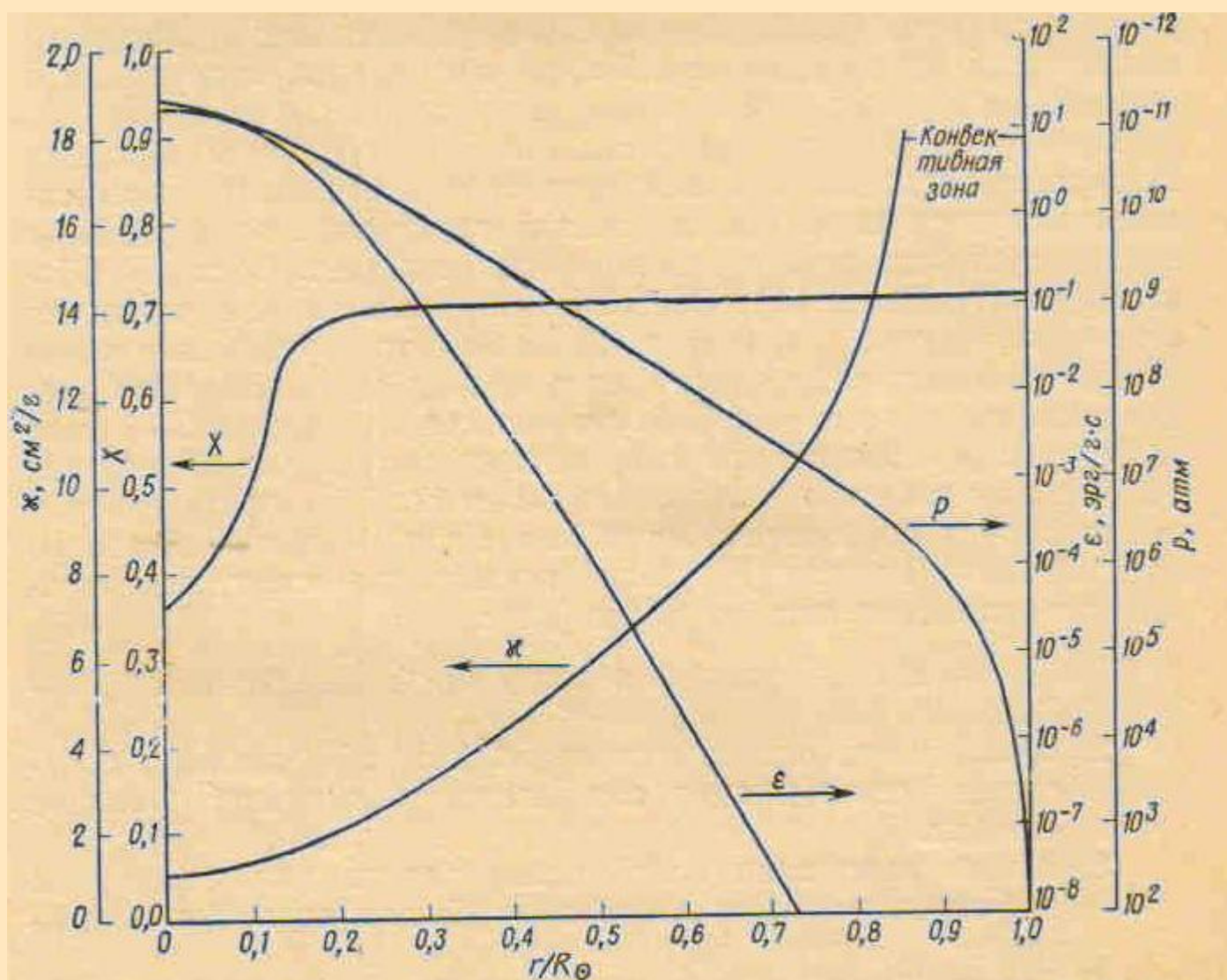


РИС. 3.6. Свойства солнечного вещества, определяемые локальными значениями основных параметров, и доля водорода по массе. Значения X и p заимствованы у Сирса [23], значения κ — у Веймана [26], значения ϵ вычислены по формулам (3.19), (3.21), (3.22).

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 зростає

і тому згідно з рівнянням

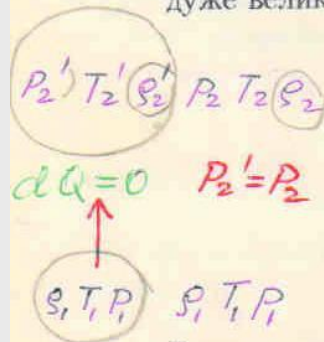
$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \kappa_r \frac{dT}{dr} \right) + \rho \epsilon = 0$$

зростає

балансу енергії збільшує температурний градієнт.

В кінцевому підсумку на відстані приблизно $0,7 R_\odot$ від центра $\odot$ темп. ($\sim 10^6$ K) 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.



$dQ = 0$
 Вважаємо, що газ не встигав встигати нагрітися, тому $P_2' = P_2$.
 Якщо $P_2' < P_2$, то менше тиску, ніж навколо, і він підніметься. В цьому випадку атмосфера нестійка.



Розгл. вертикальностратифіковану плазму з $\rho(r), T(r) \text{ і } P(r)$, 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

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

Згідно рівняння газового стану $\rho = \frac{k_B n T}{m}$ зміна тиску, густини і темп. зв'язані між собою співвідношеннями

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

Але горизонтальний баланс тиску означає, що $\delta P_i = \delta P$, 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

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

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

Наблюд.
середовища

- об'єкт

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

↓
променює
градієнт

→ адіабатичний
процес

$$\boxed{dQ=0}$$

$$p = c p^{\sigma}$$

Зміна стану газу, який
здійснює адіабатичний процес
 $p = c p^{\sigma}$ нагрівається
адіабатично і характеризується
тим, що об'єкт $T dV$,
який виконується, не
дорівнює і не відрізняється
від нуля ($dQ=0$).

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

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

$$\nabla p > \nabla_{ag}$$

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

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

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

число Рейнольдса

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

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

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

$$l \approx (1.5 \div 2) H$$

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

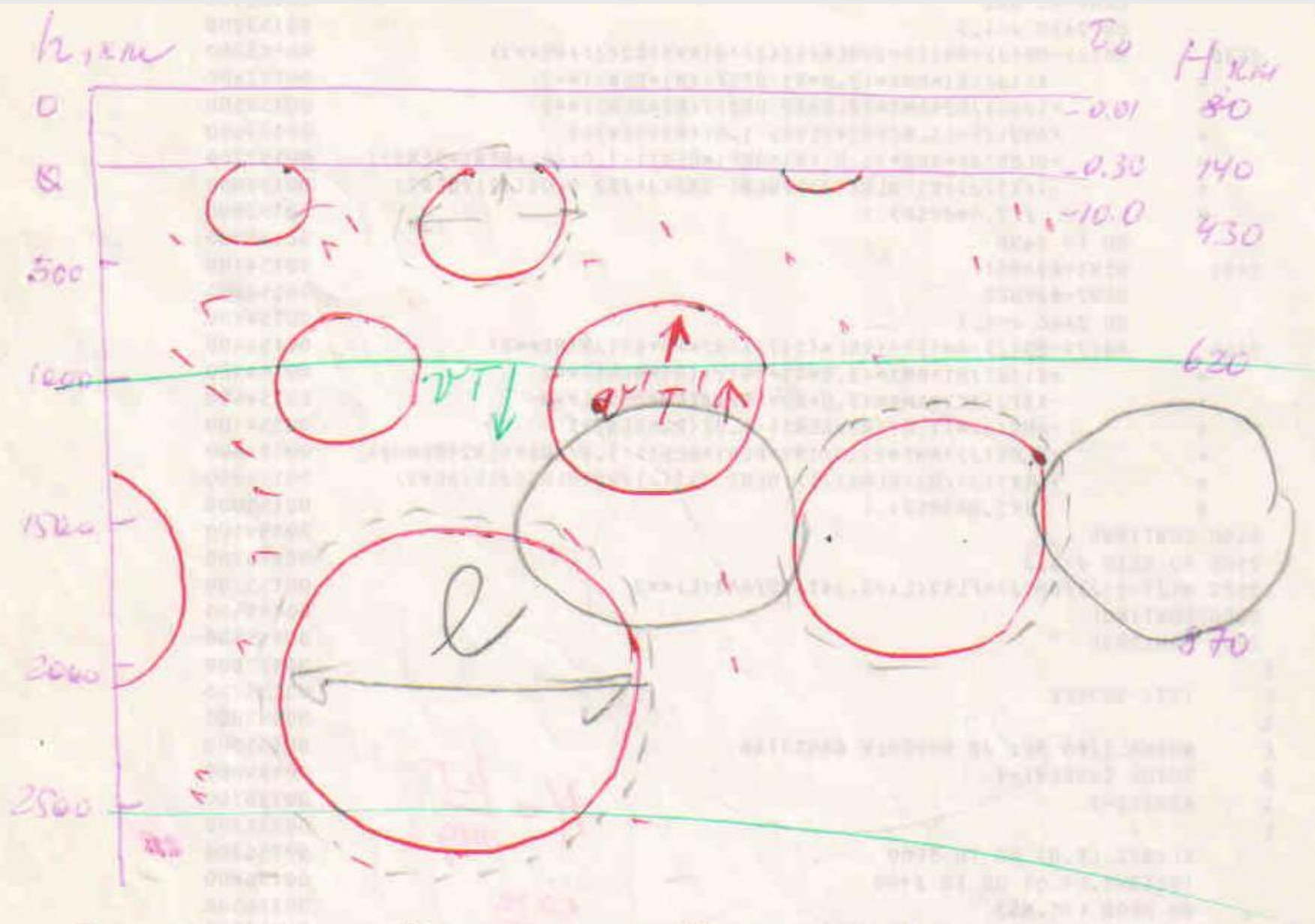
$$Pr \approx 100 \quad Ra \approx 100 Re.$$

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

α - коэф. температурного розширення

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

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



Схематичное изображение верхней части КЗ

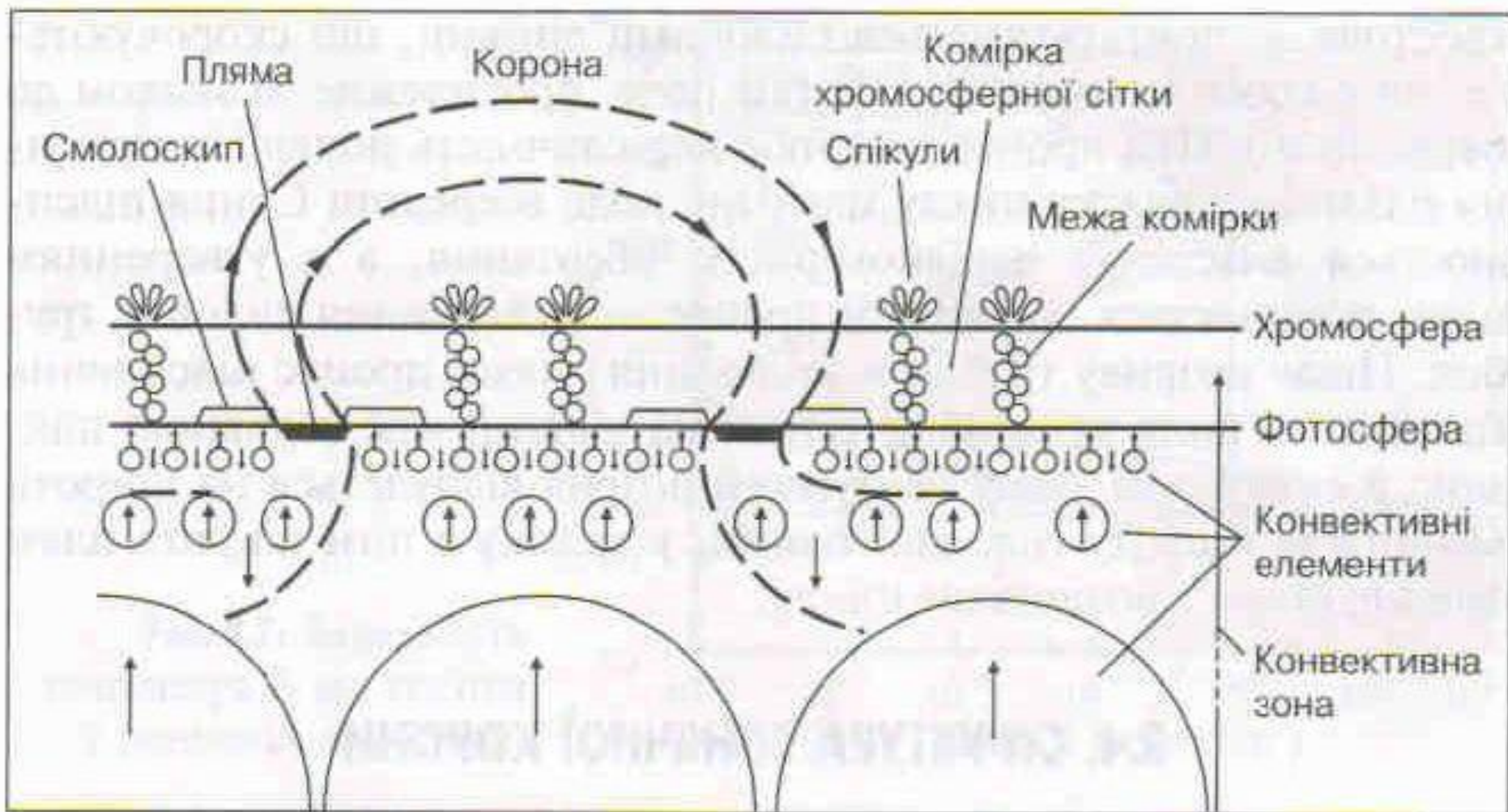


Рис. 2.6. Схема конвективних шарів у сонячній атмосфері

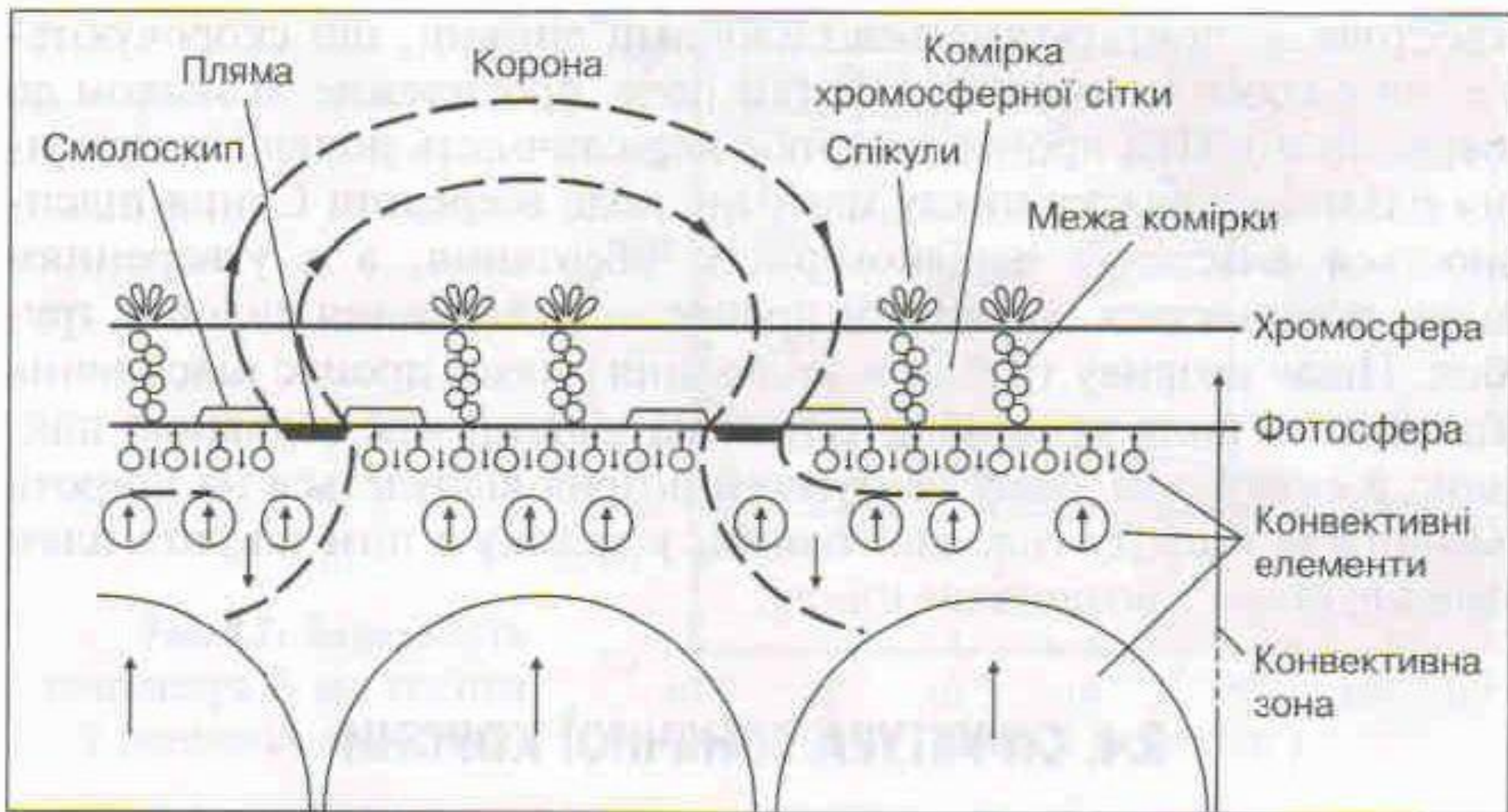
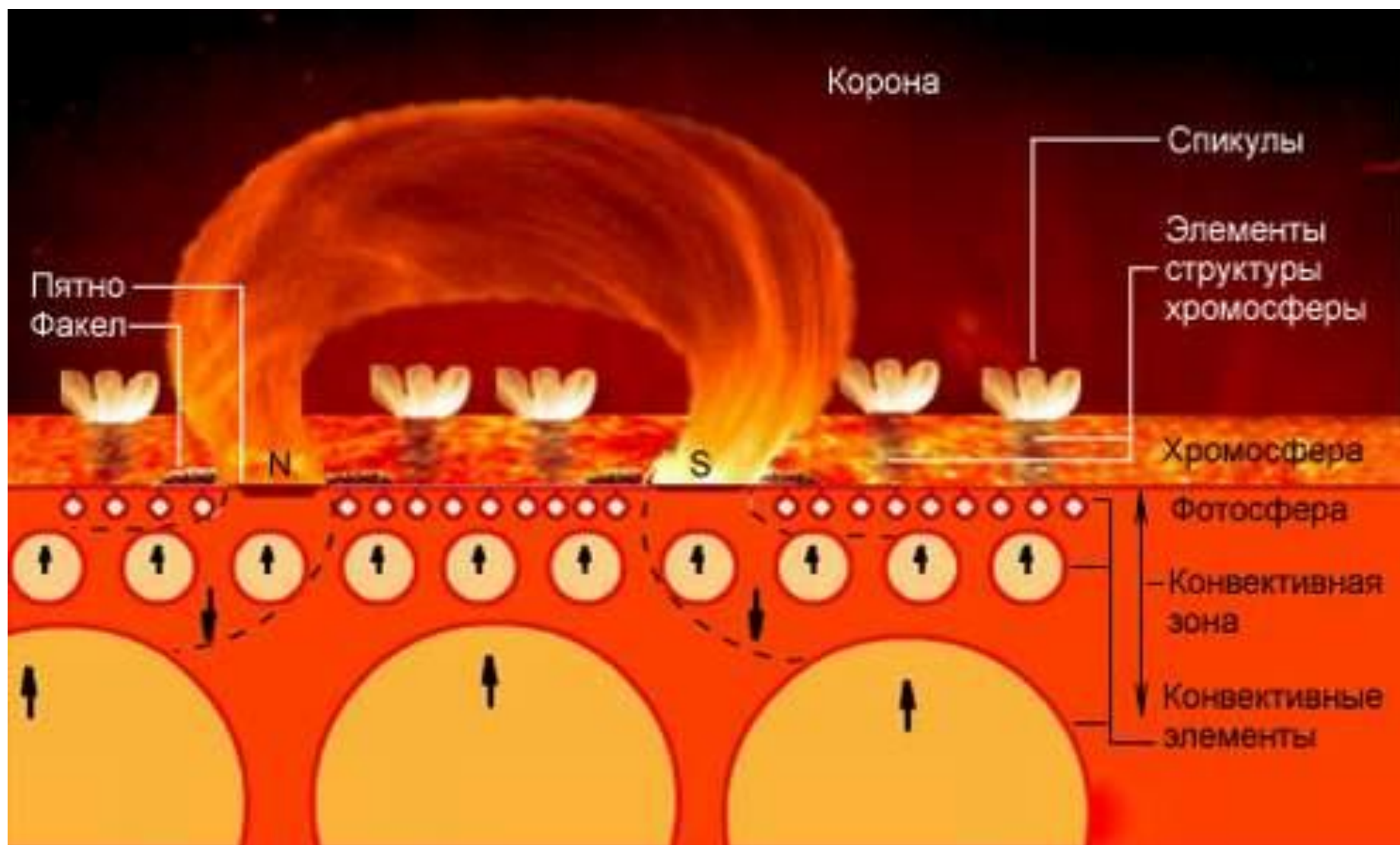
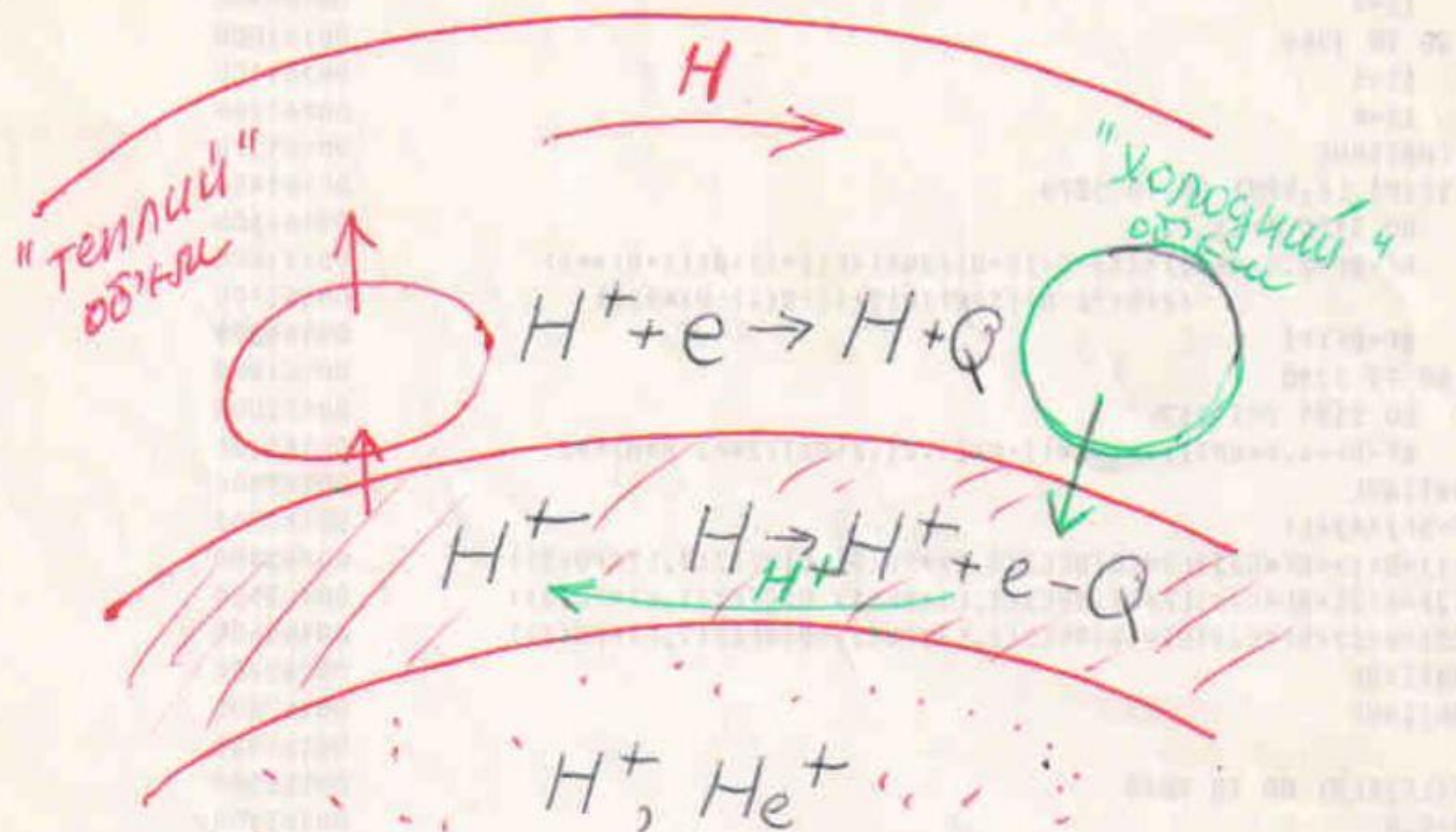


Рис. 2.6. Схема конвективних шарів у сонячній атмосфері





зона "горячей" зоны + конвекция
в *

Із спостережень на поверхні $\odot$ витікає, що в конвекції переважають, мабуть, комірки/елементи чотирьох цілком чітко виділених масштабів, що відповідають грануляції, мезогрануляції, супергрануляції і гігантським коміркам/елементам.

Вважається, що перші три типи КЕ виникають як наслідок іонізації атомів водню і гелію, і що ці елементи мають масштаби порівнянні з глибинами, на яких відбуваються процеси іонізації.

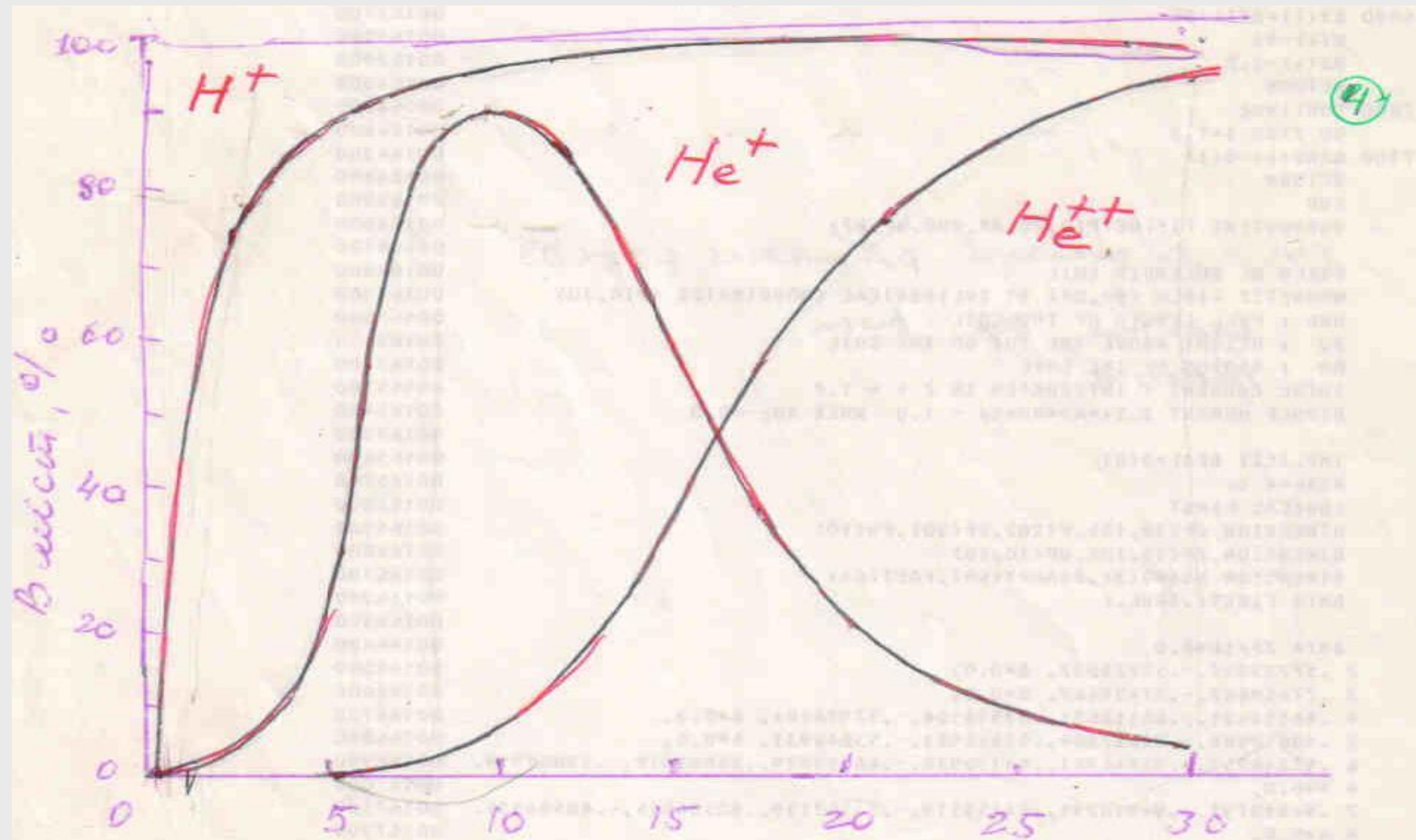
Водень стає сильно іонізованим на глибині **1000 км** під фотосферою, а гелій стає на 90% однократно і двократно іонізованим на глибинах **5000-10000** і **30000 км** відповідно, що відповідає горизонтальним розмірам гранул, мезогранул та супергранул.

В іонізованому стані вказані елементи можуть поглинати енергію за рахунок більшого числа ступенів свободи, а саме за рахунок іонізації і збудження. Це зменшує величину γ і таким чином зменшується адіабатичний градієнт темп., що полегшує умови виникнення К. $[N$ – число степенів свободи в плазмі і для повністю іонізованого водню $N = 3$ і $\gamma = 5/3$, але в більшості випадків значення γ заключено в інтервалі між 1 і 5/3]

Існування гігантських комірок встановлено менш надійно. Як вважають, їх типічні розміри **300000 км** (що порівнянно з глибиною КЗ), швидкість на поверхні всього біля **0,03-0,1 км/с**, а час життя дорівнює **14 місяцям**. Вони можуть визначати великомасштабну структуру слабких магнітних полів на поверхні і розподіл волокон.

Значно сильнішим глобальним рухом явл. сонячне обертання, при цьому $\odot$ обертається не як тверде тіло, а для нього характерне диференційне обертання: екваторіальні області здійснюють один оберт за **26 днів**, що відповідає екваторіальній швидкості ~ 2 км/с, тоді як полярні області здійснюють оберт за **37 днів**. Сонячні плями обертаються трохи швидше, оскільки їх основа, як вважають, закріплені десь під фотосферою. Це значить, що кутова швидкість трохи зростає з глибиною. На відміну від сон. плям корональні діри – характеризуються дуже малим диф. обертанням.

Само диф.обертання, мабуть, явл. наслідком взаємодії обертання і конвекції, однак його моделювання викликає певні труднощі. Справа в тому, що важко адекватно врахувати ефекти стискування в конвекції, відтворити незначні широтні зміни потоку тепла і отримати правильну дію механізму динамо для пояснення сонячного циклу.



Глибина, 103 км

Іонізація водню і гелію уз сферосфера

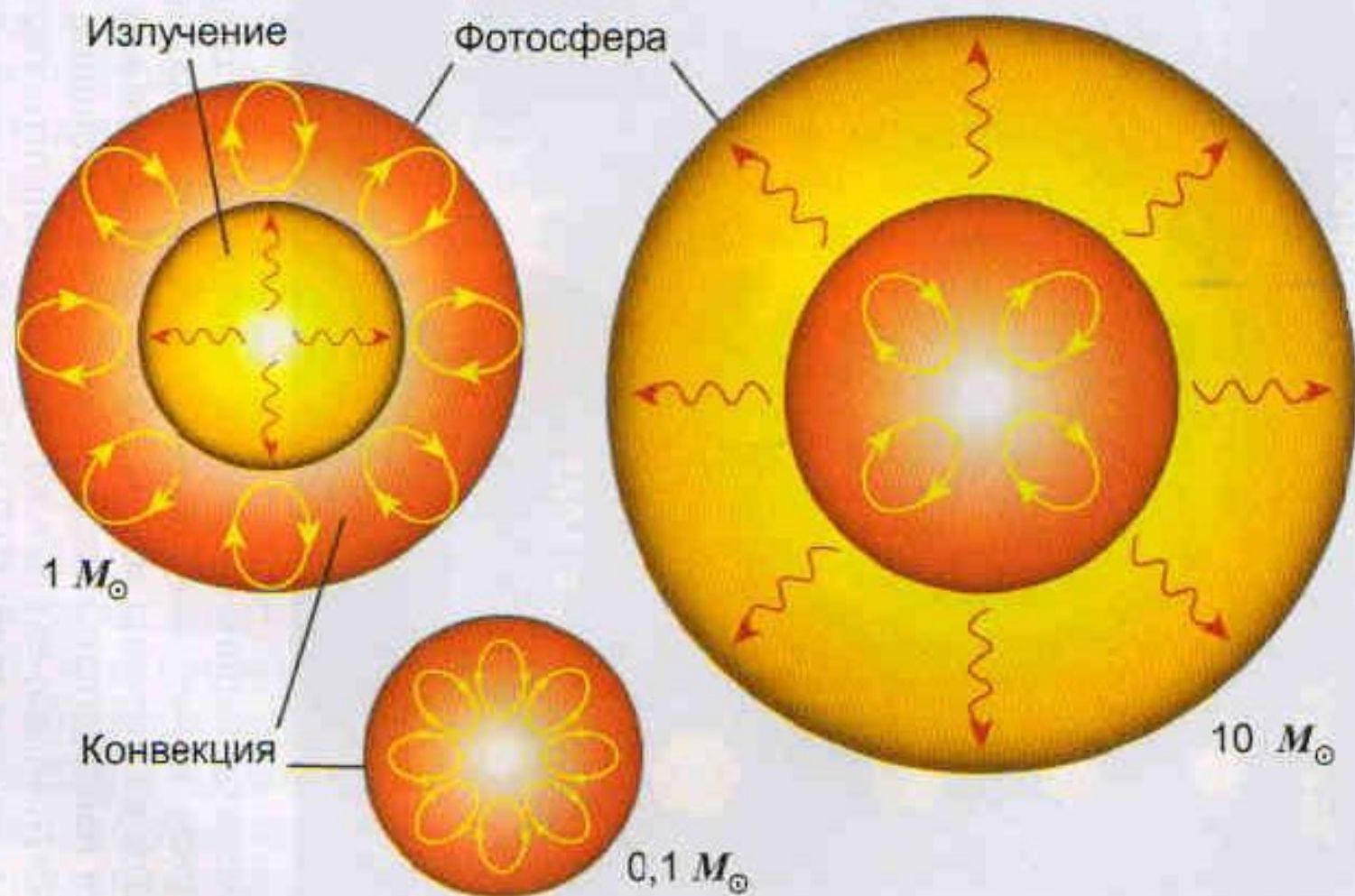
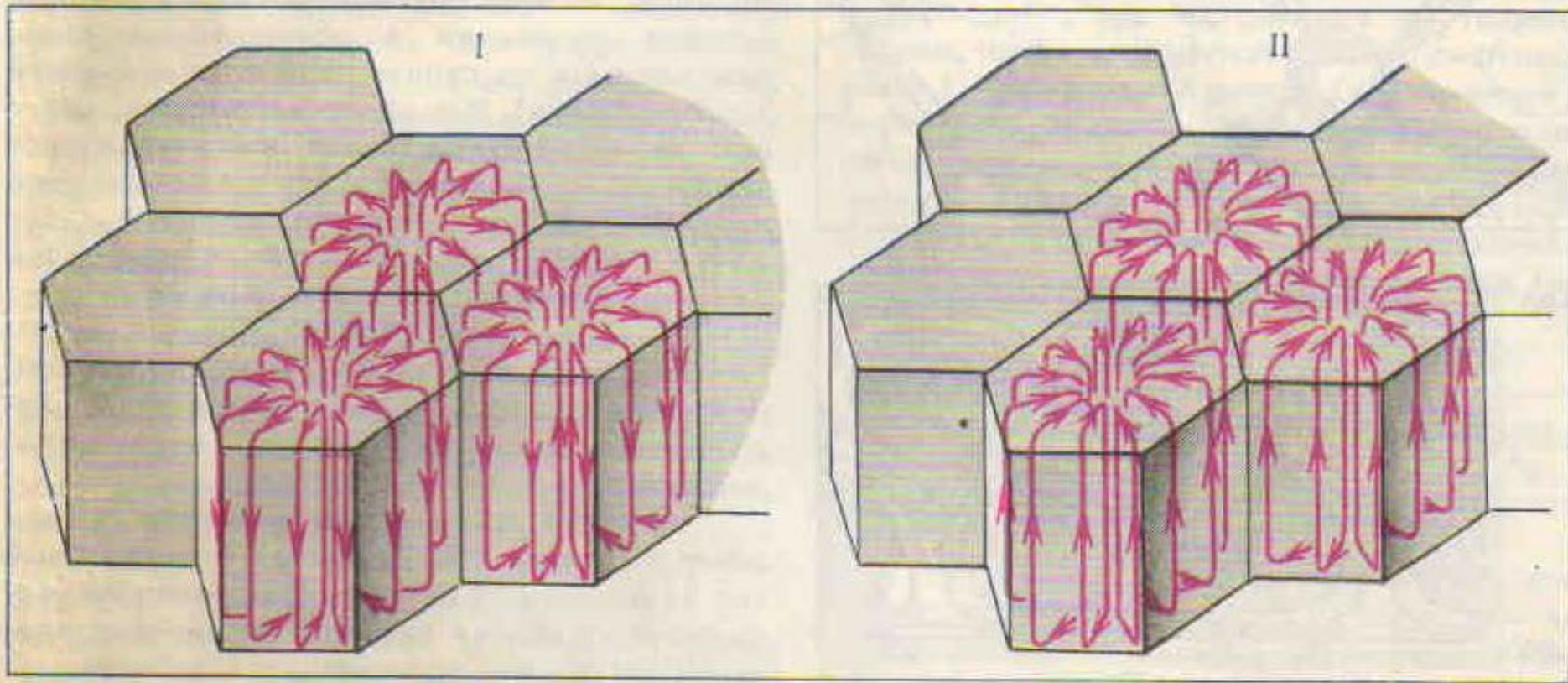


Рис. 155. Механизмы переноса энергии в звездах главной последовательности [392]

Грануляція на поверхні Сонця
має структуру комірок Бенара

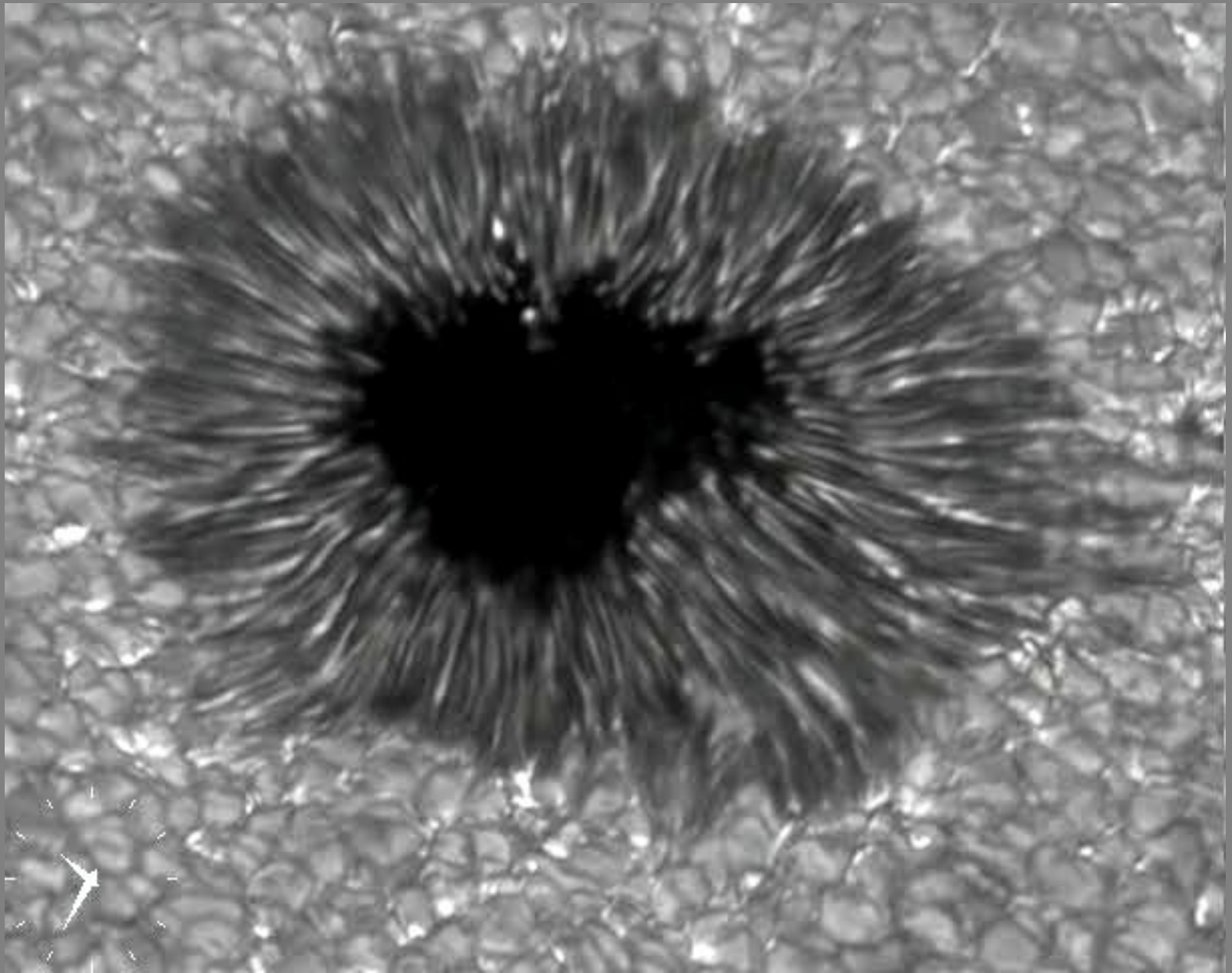
**Грануляція на поверхні Сонця
має структуру комірок Бенара
(гексагональна структура)**

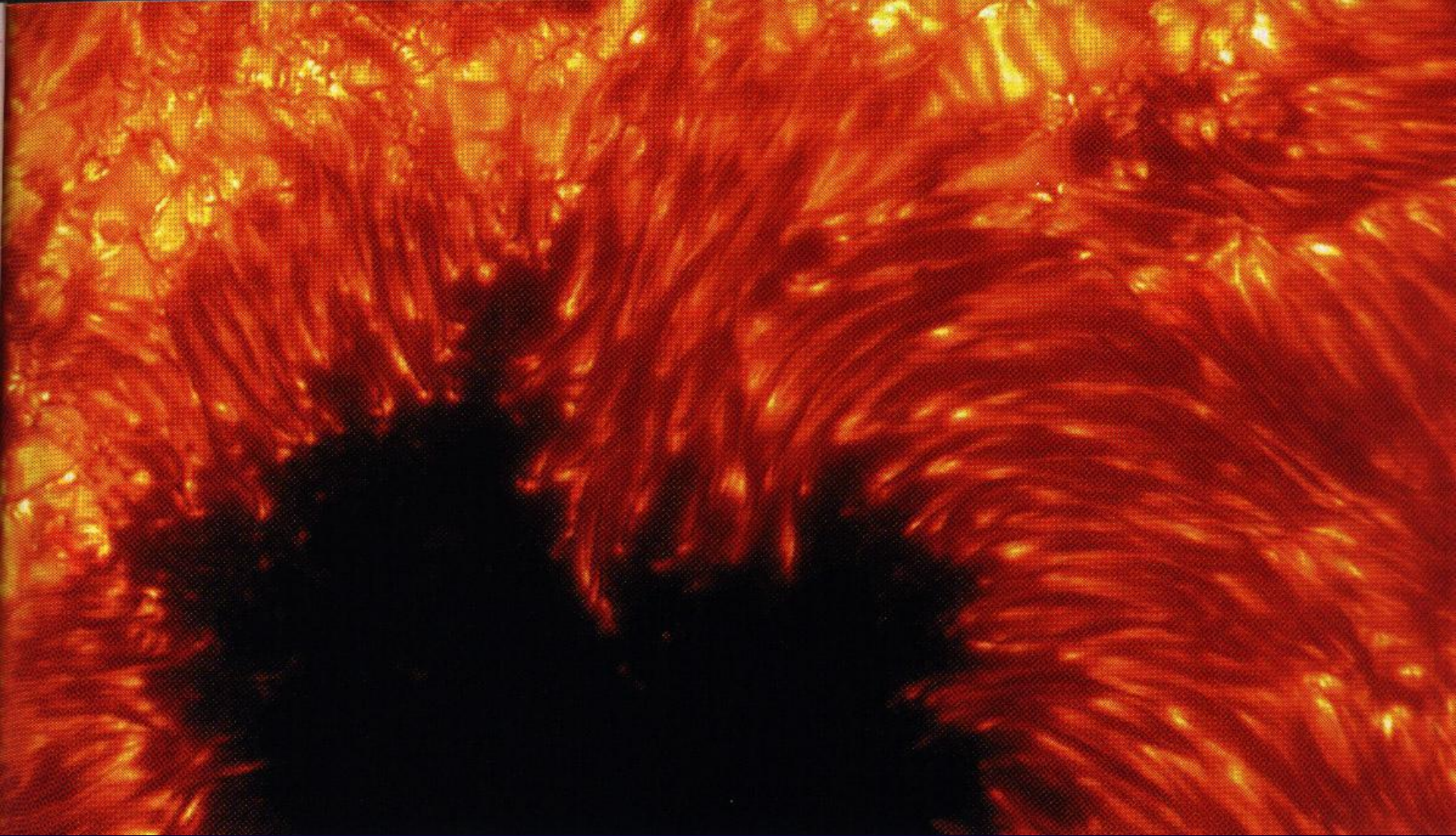


Два варианта течений в модели конвекции Рэлея—Бенара (I — прямой, II — инверсионный), неразличимые при численном моделировании на ЭВМ. В первом случае восходящий поток находится в центре, а нисходящие — по периферии конвективных ячеек; во втором — нисходящий поток — в центре, а восходящие — по периферии.

**Конвективні комірки Бенара
(гексагональна структура)**

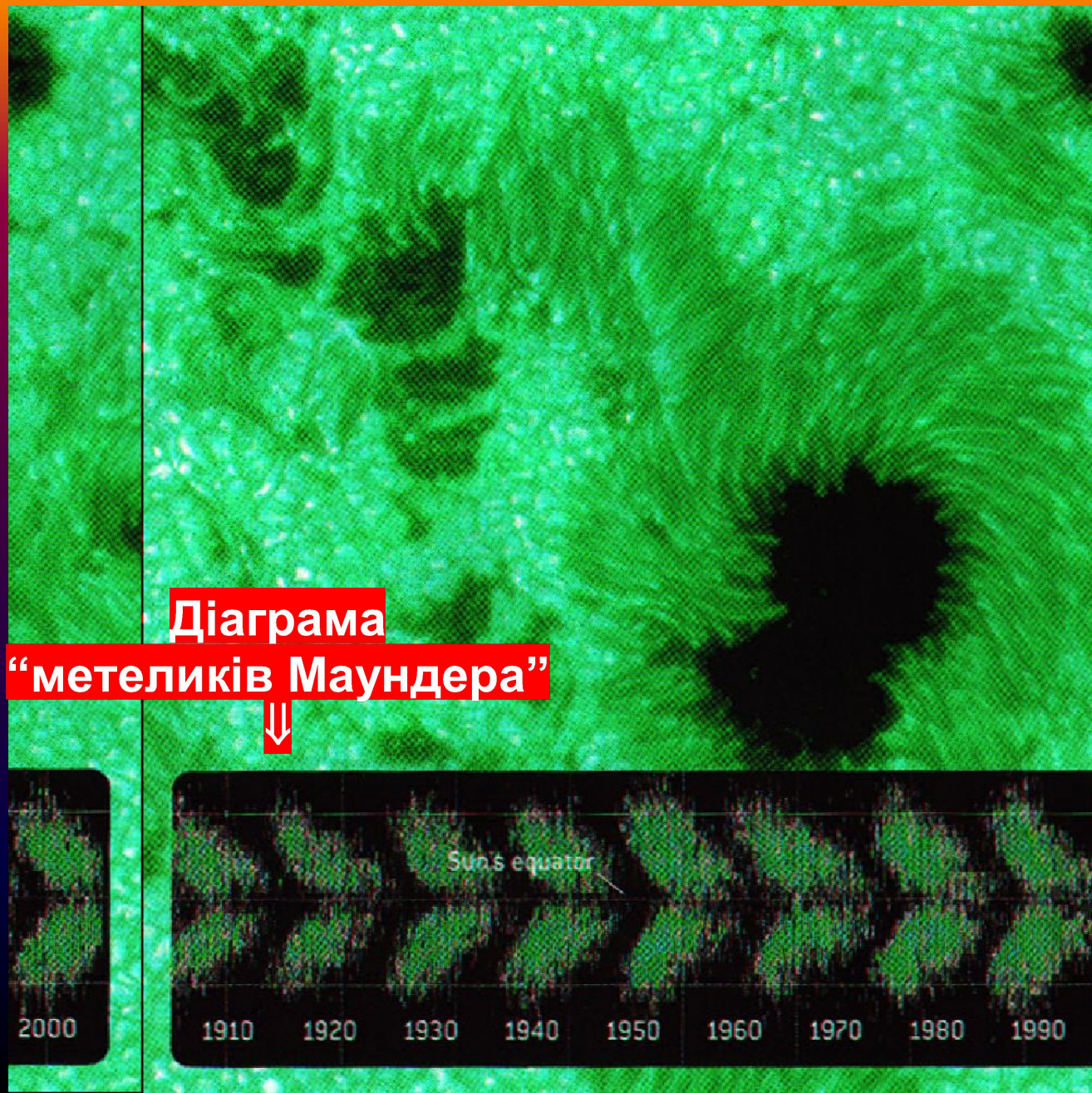
Шведский солнечный телескоп Ла Палма, 20 сентября, 1999

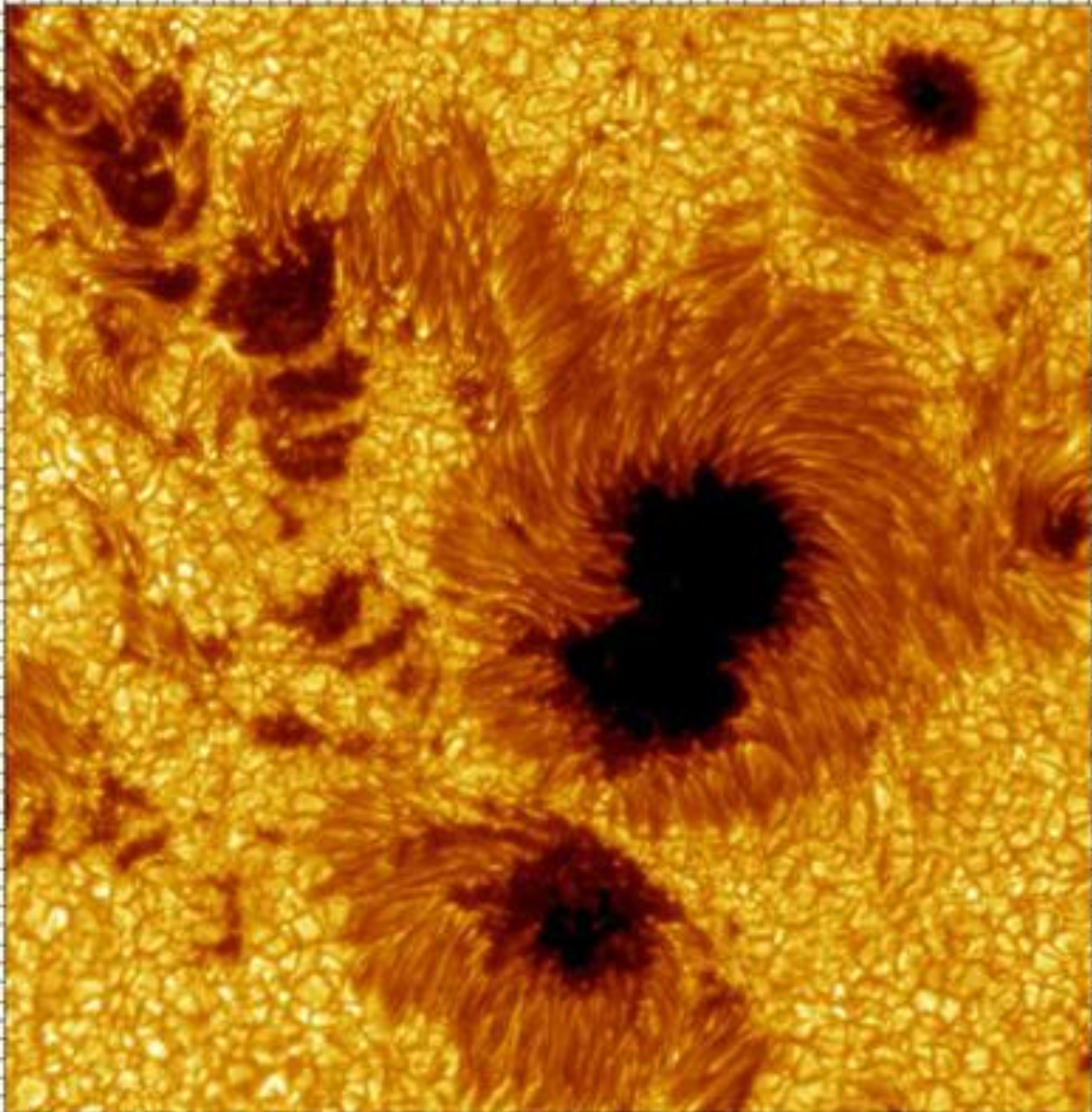




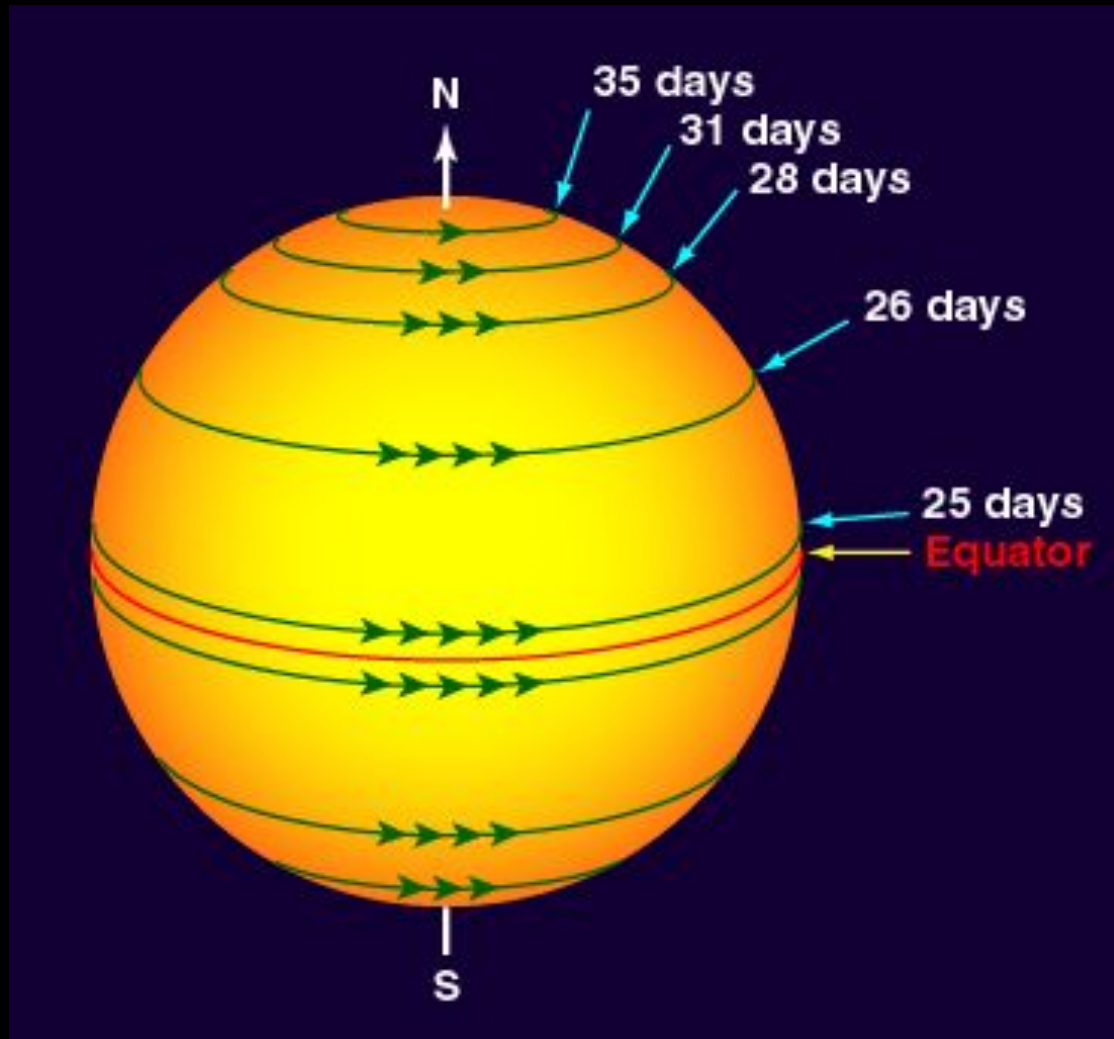
Тонка структура сонячної плями

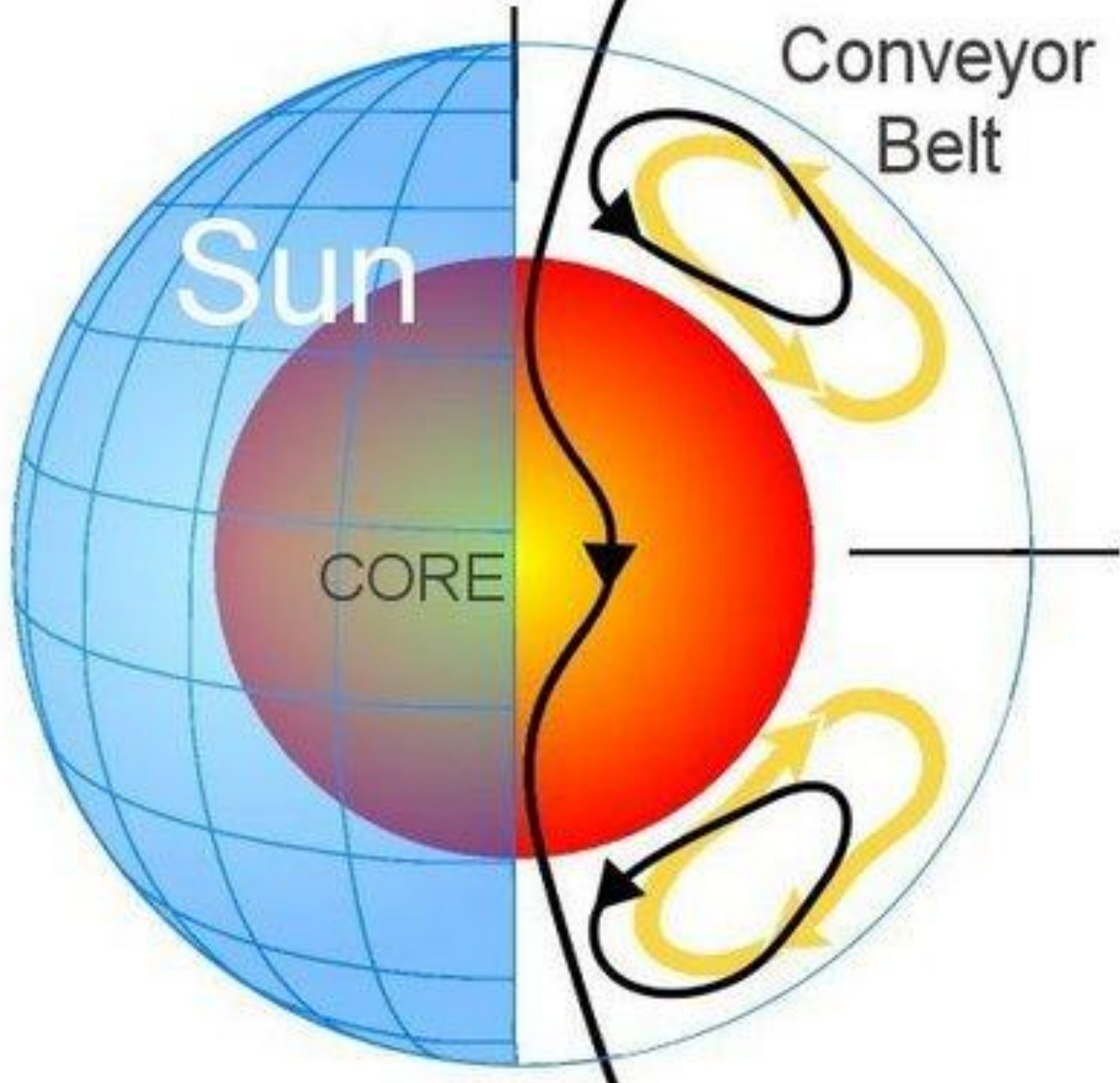
Тонка структура сонячних плям

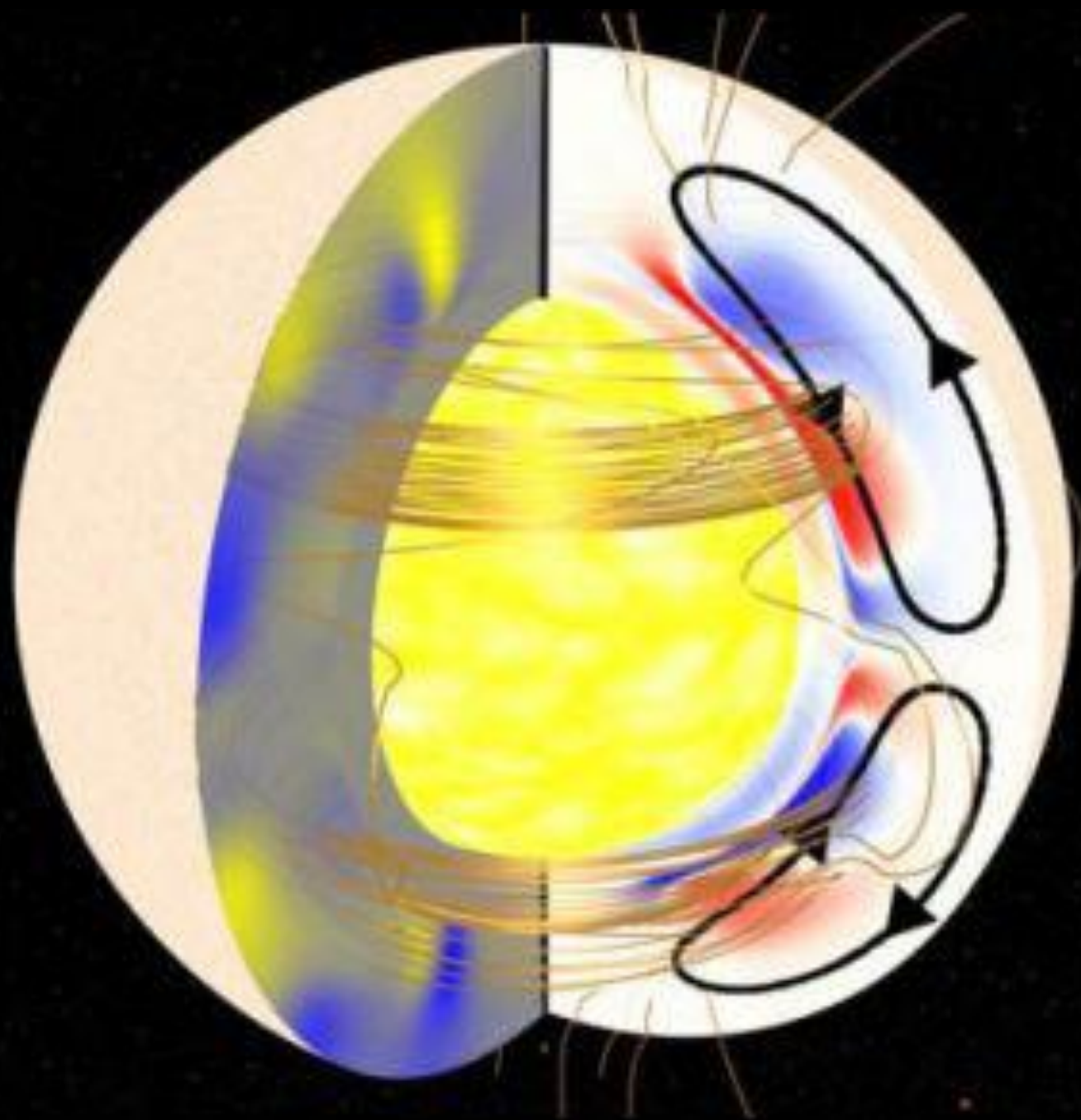




Диференційне обертання і СОНЯЧНИЙ ЦИКЛ







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) Спостережені 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).

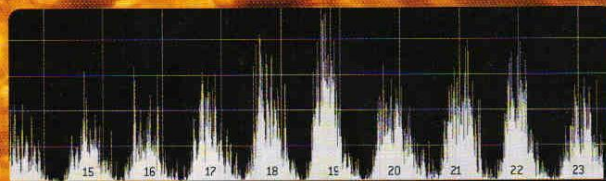
UNNO, KONDO and XIONG (1985). [Unno W., Kondo M. and Xiong D. Solar Convection Zone Given by Nonlocal Mixing-Length Theory//Publ. Astron. Soc. Japan. 1985. Vol.37. P.235-244.]

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:

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

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

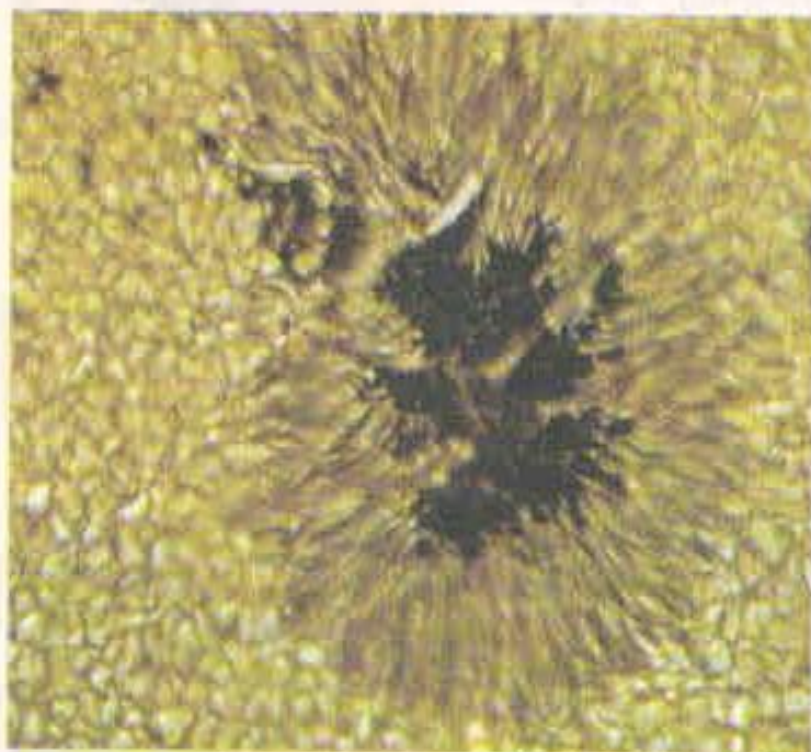


Рис. 12.5. Сонячна пляма — це область фотосфери, де знижується температура, бо сильне магнітне поле у плямі зупиняє конvekцію

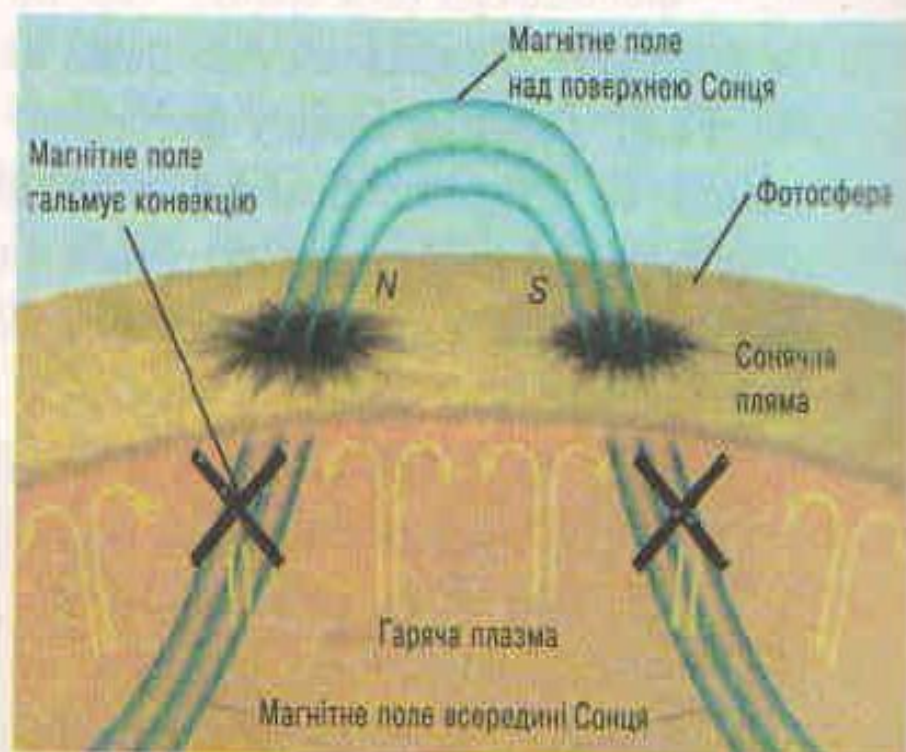
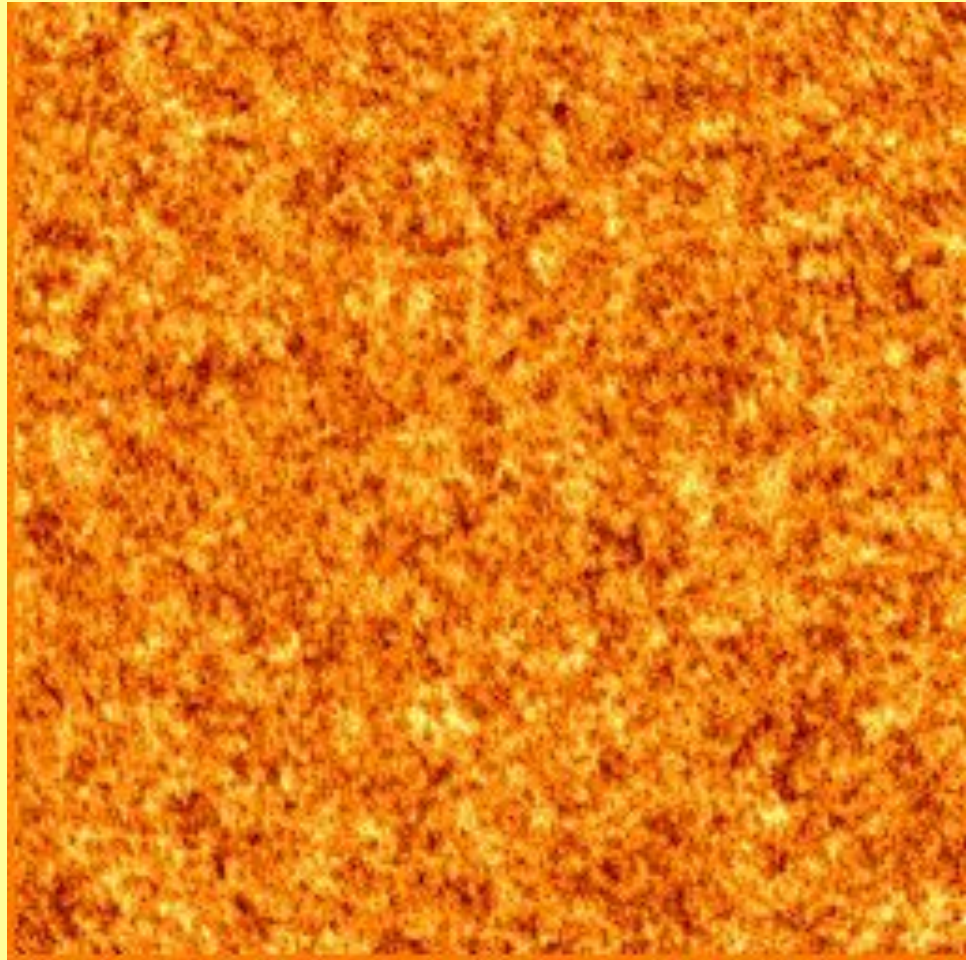


Рис. 12.6. Кожна пляма має свою магнітну полярність, тому плями з'єднані між собою попарно, як полюси у магніті

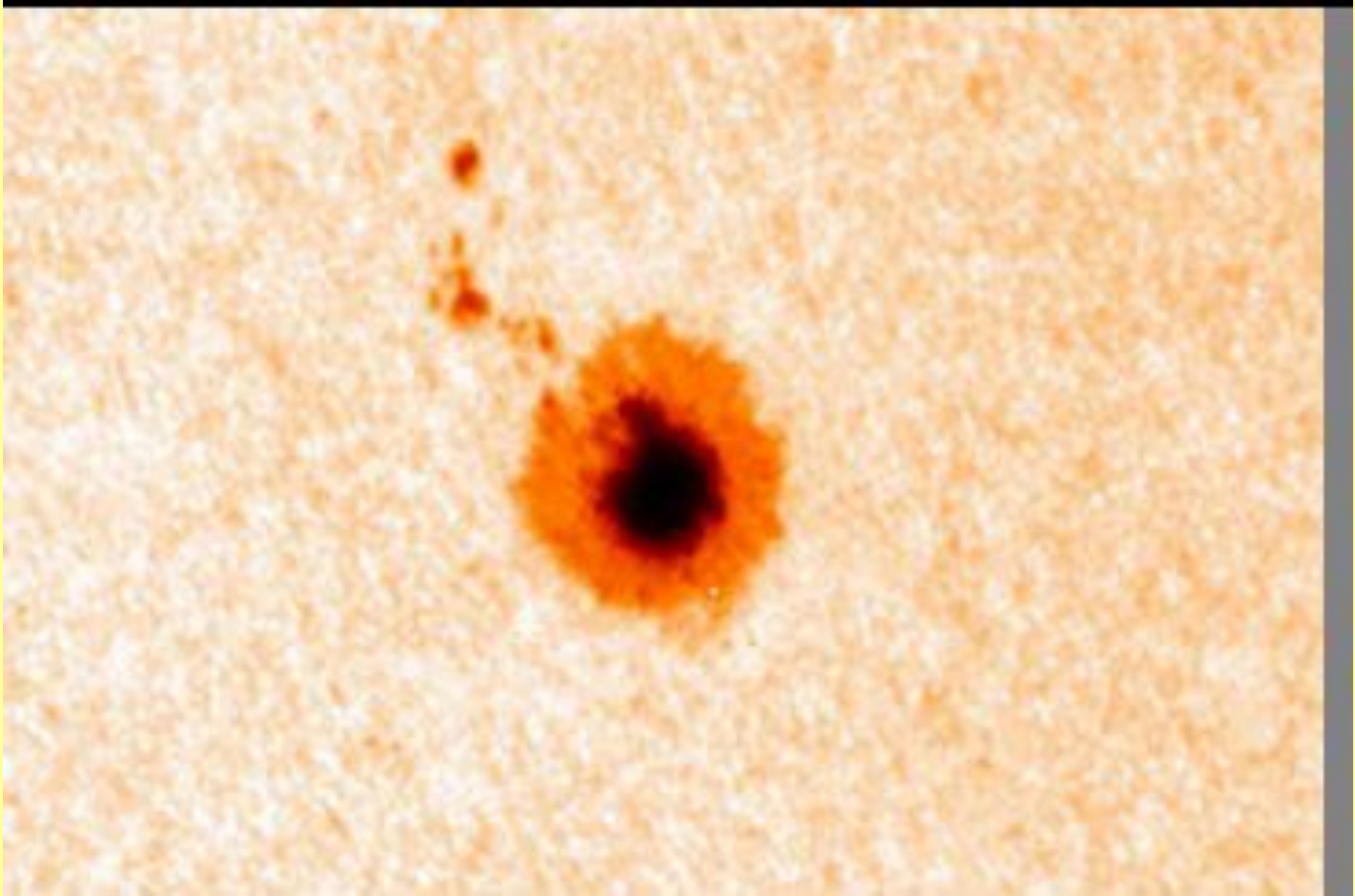
Рухи плазми на поверхні Сонця з високою простровою роздільністю

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

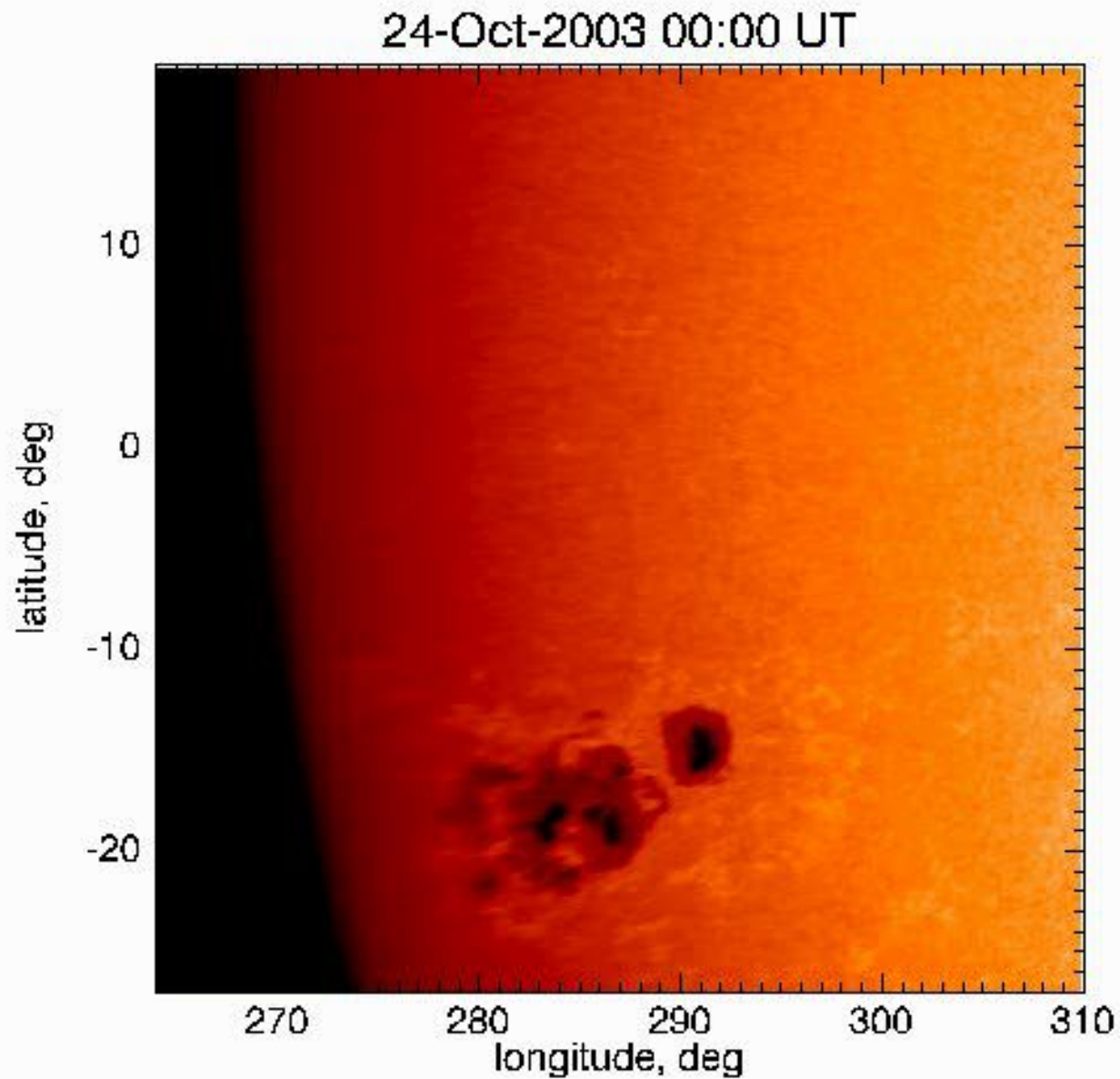


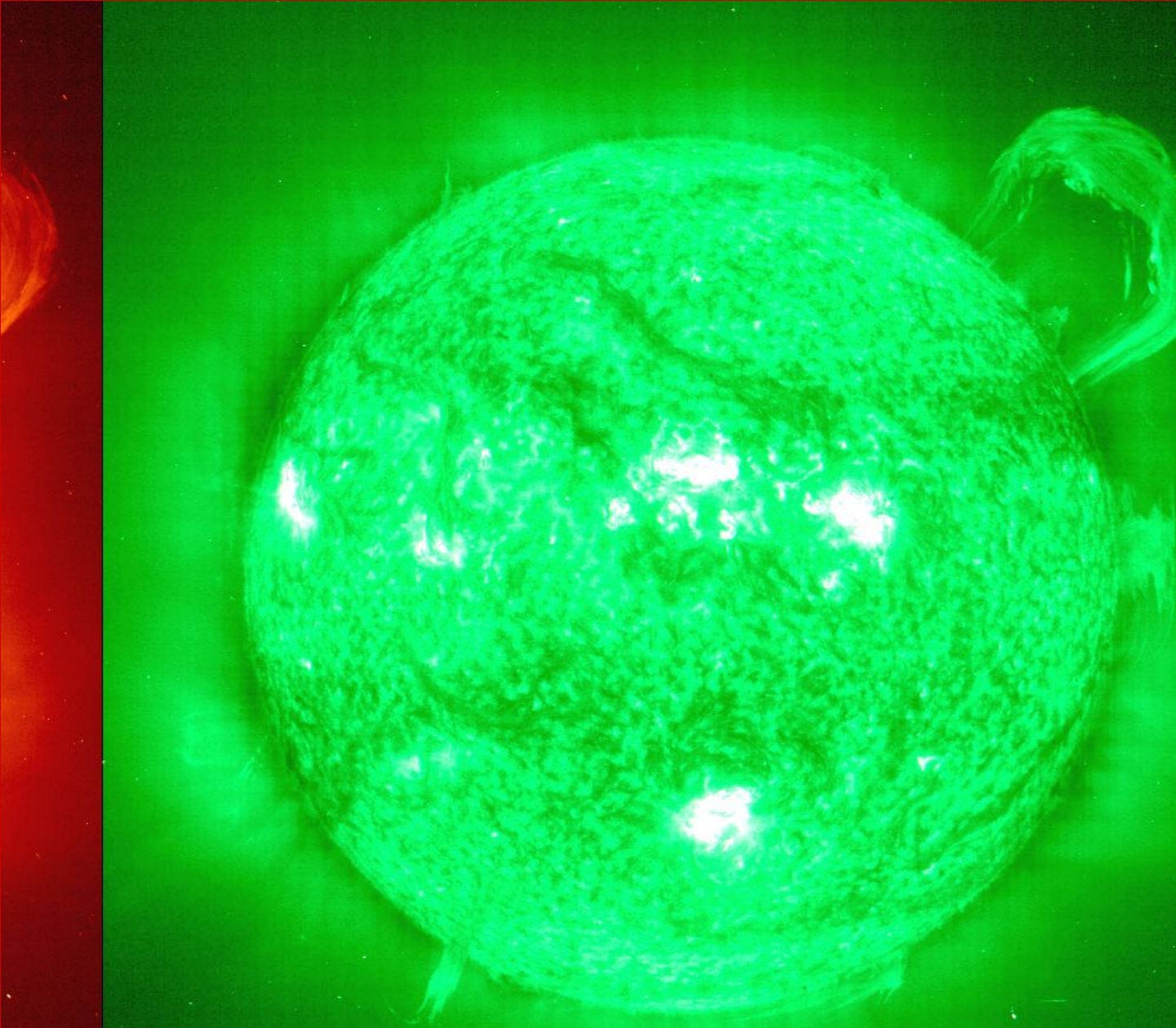
Яскраві деталі відповідають рухам
плазми всередину Сонця,
темні – показують рухи зовні

Результати акустичної томографії



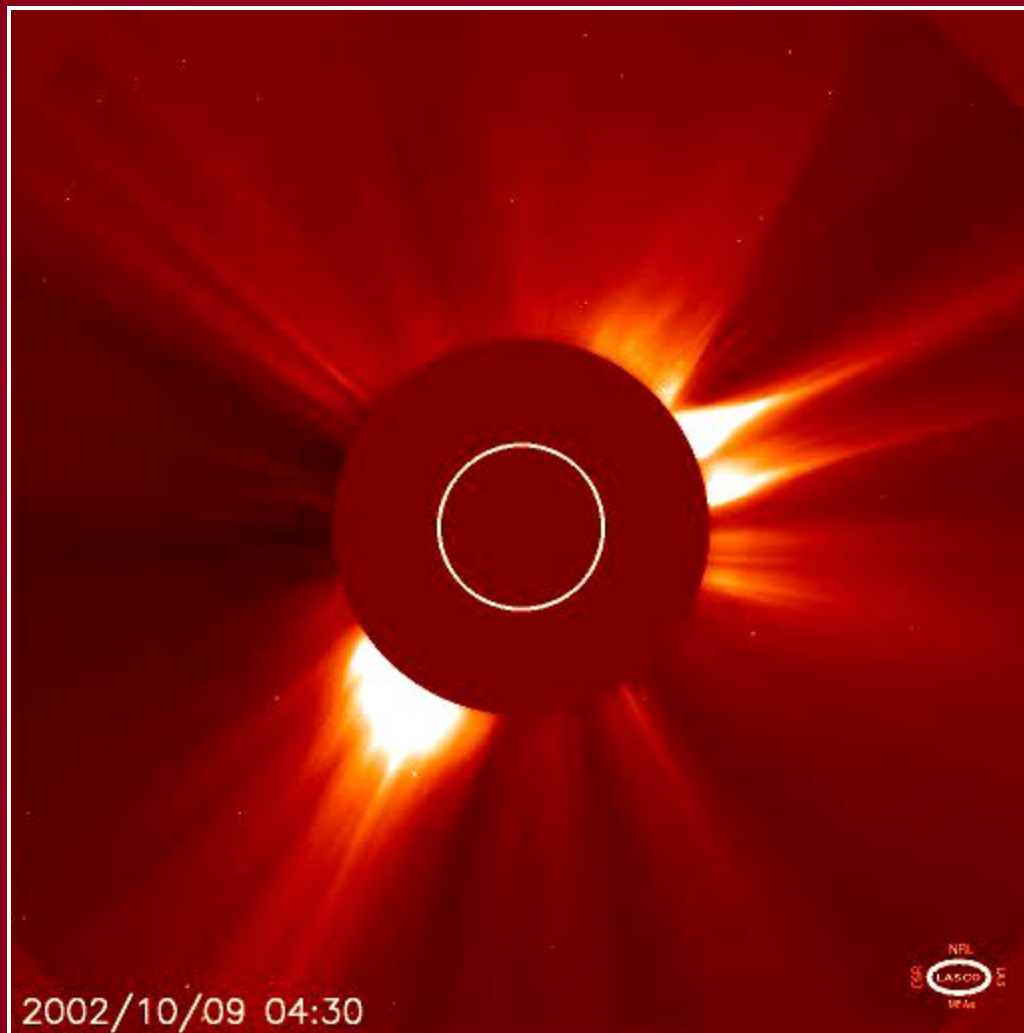
Evolution of AR 10486-488: October 24 – November 2, 2003



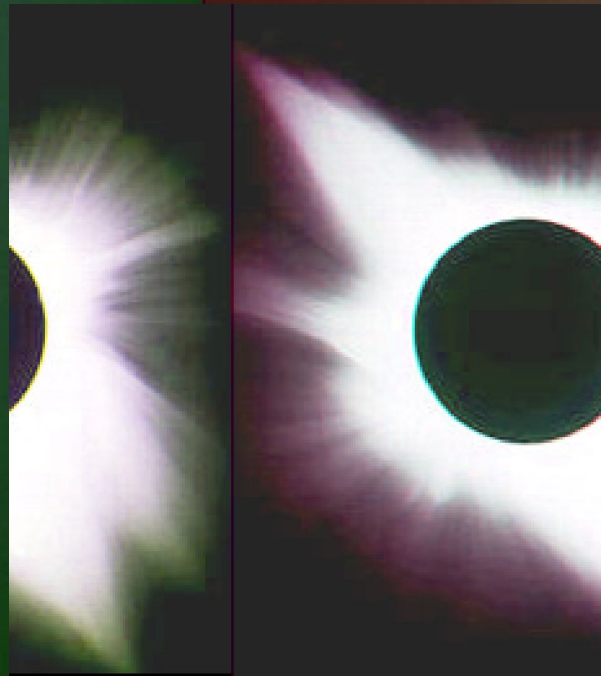


Сонячні протуберанці

Сонячна корона

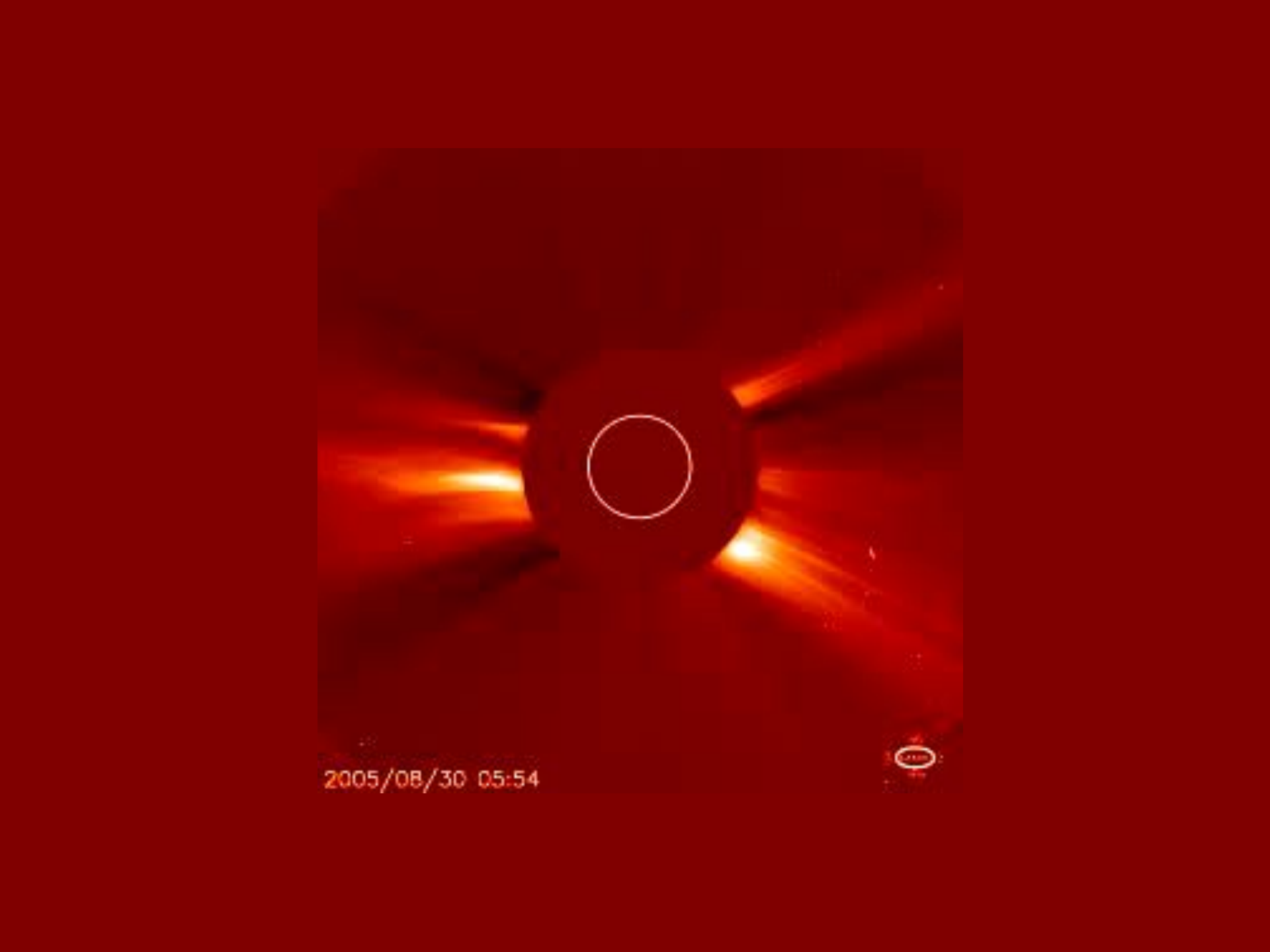


Структура сонячної корони – епоха мінімуму сонячної активності



Структура сонячної корони – епоха максимуму сонячної активності

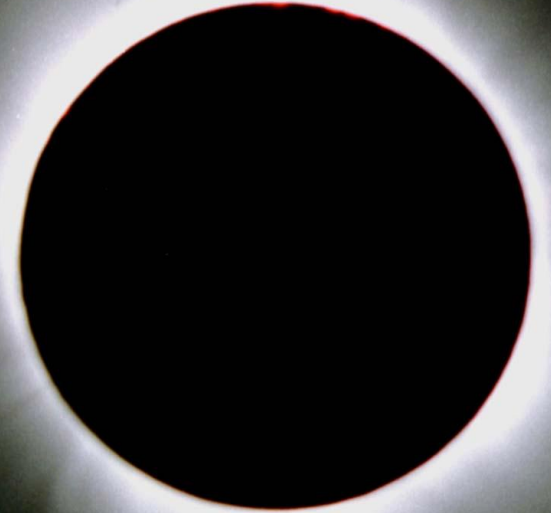


A dark, blurry image of a fan with a white circle in the center. The fan blades are visible as bright, curved streaks against a dark background. The overall image is very dark and has a low resolution.

2005/08/30 05:54



**“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 це означає, світлих?



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



