

# Геліосейсмологія



**Криводубський Валерій**

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

протуберанец

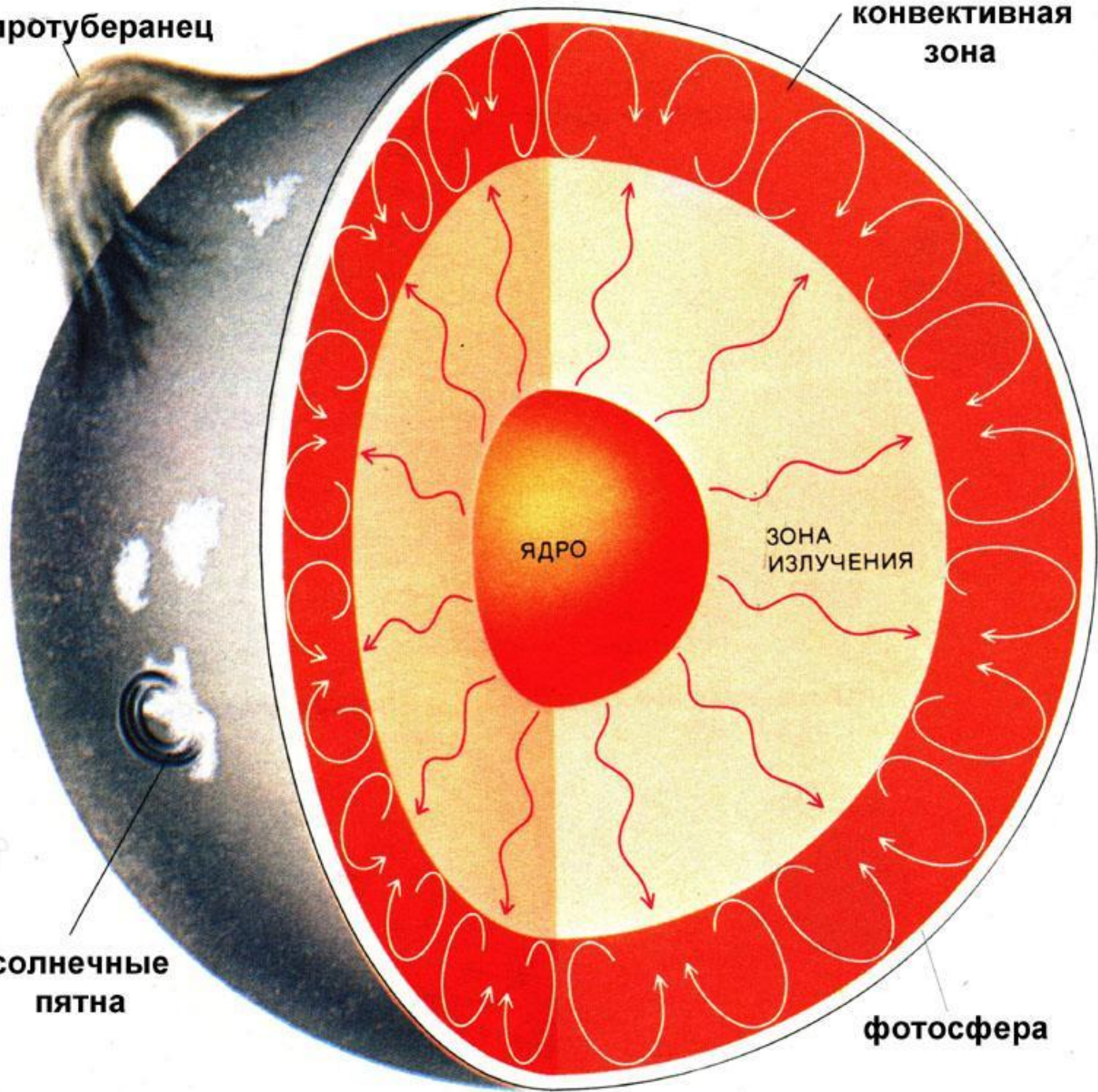
конвективная зона

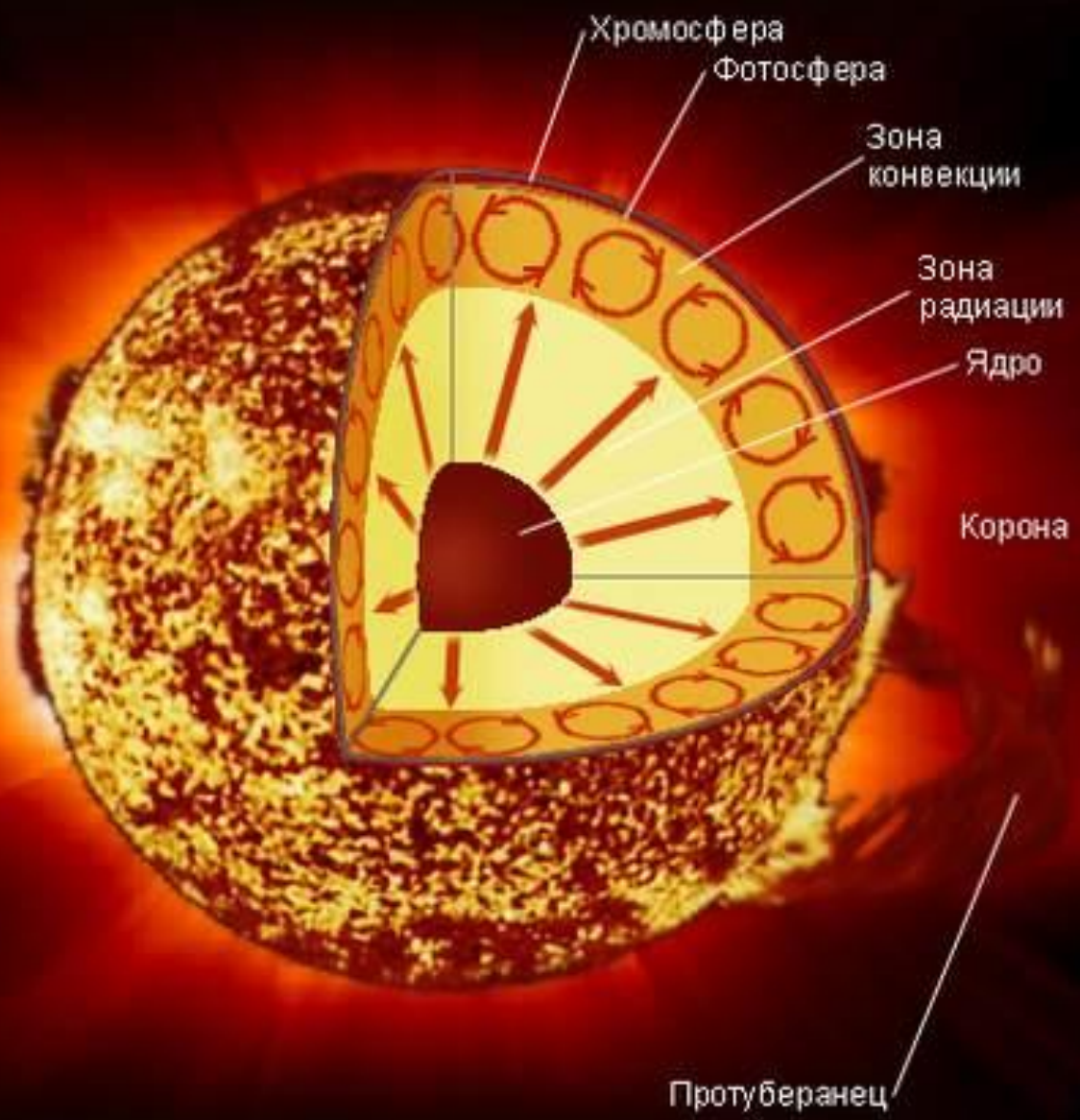
солнечные пятна

ядро

зона излучения

фотосфера





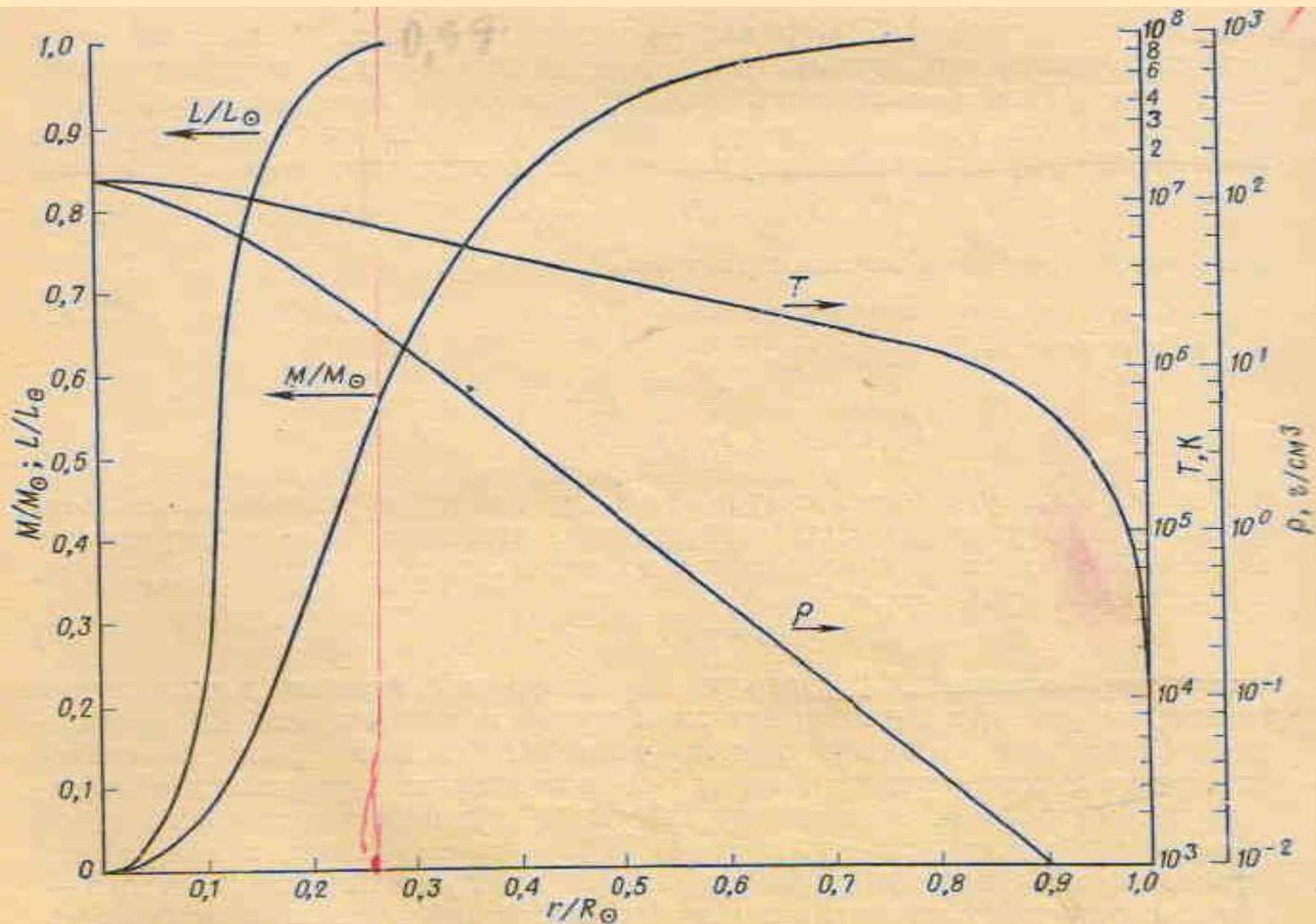


РИС. 3.5. Модель внутреннего строения современного Солнца.  
 $X=0,708$ ,  $Y=0,272$ ,  $Z=0,020$ ,  $\rho_c=158 \text{ г/см}^3$ ,  $T_c=1,57 \cdot 10^7 \text{ К}$ . (По Сирсу [23].)

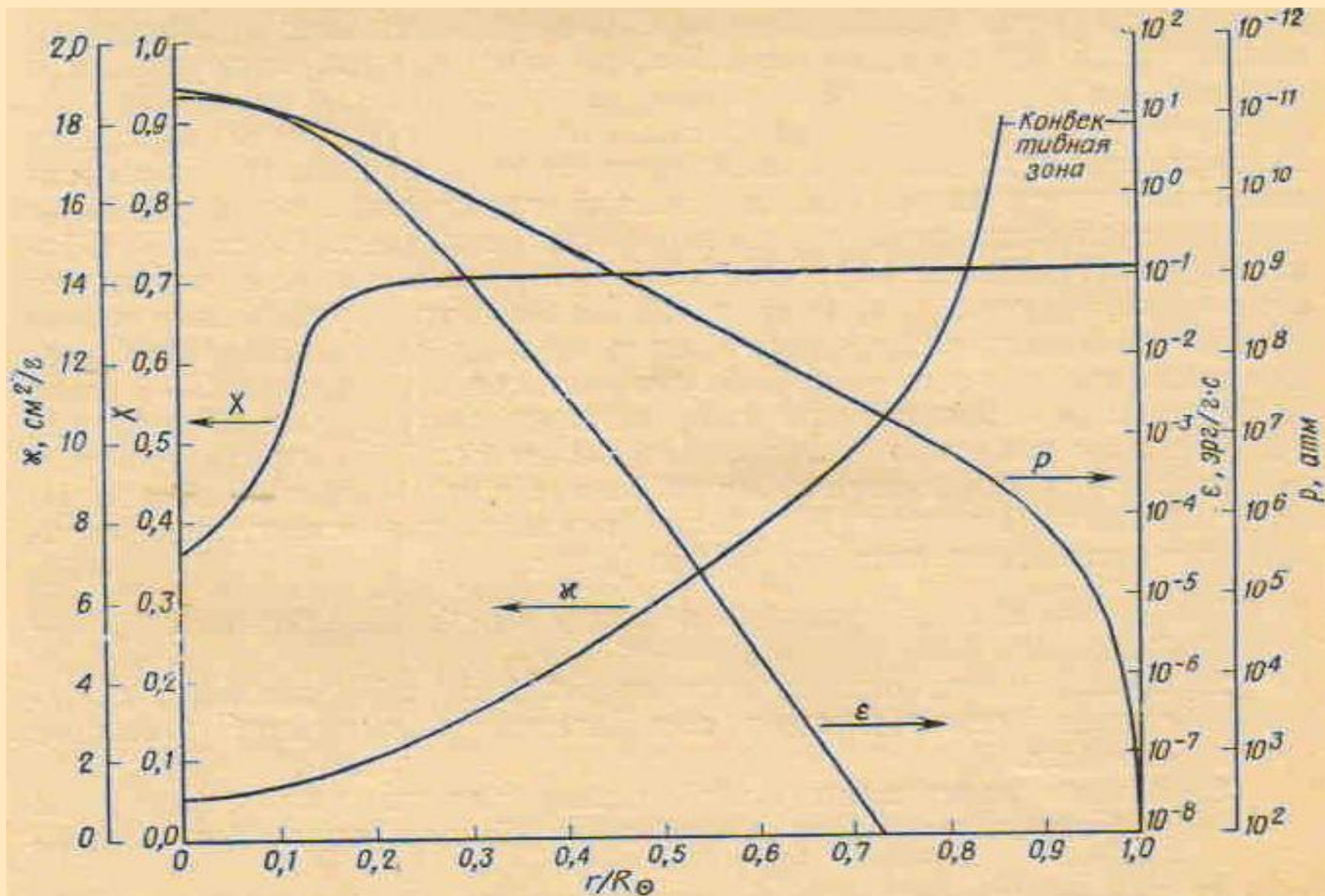


РИС. 3.6. Свойства солнечного вещества, определяемые локальными значениями основных параметров, и доля водорода по массе.

Значения  $X$  и  $\rho$  заимствованы у Сирса [23], значения  $\kappa$  — у Веймана [26], значения  $\epsilon$  вычислены по формулам (3.19), (3.21), (3.22).

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

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.

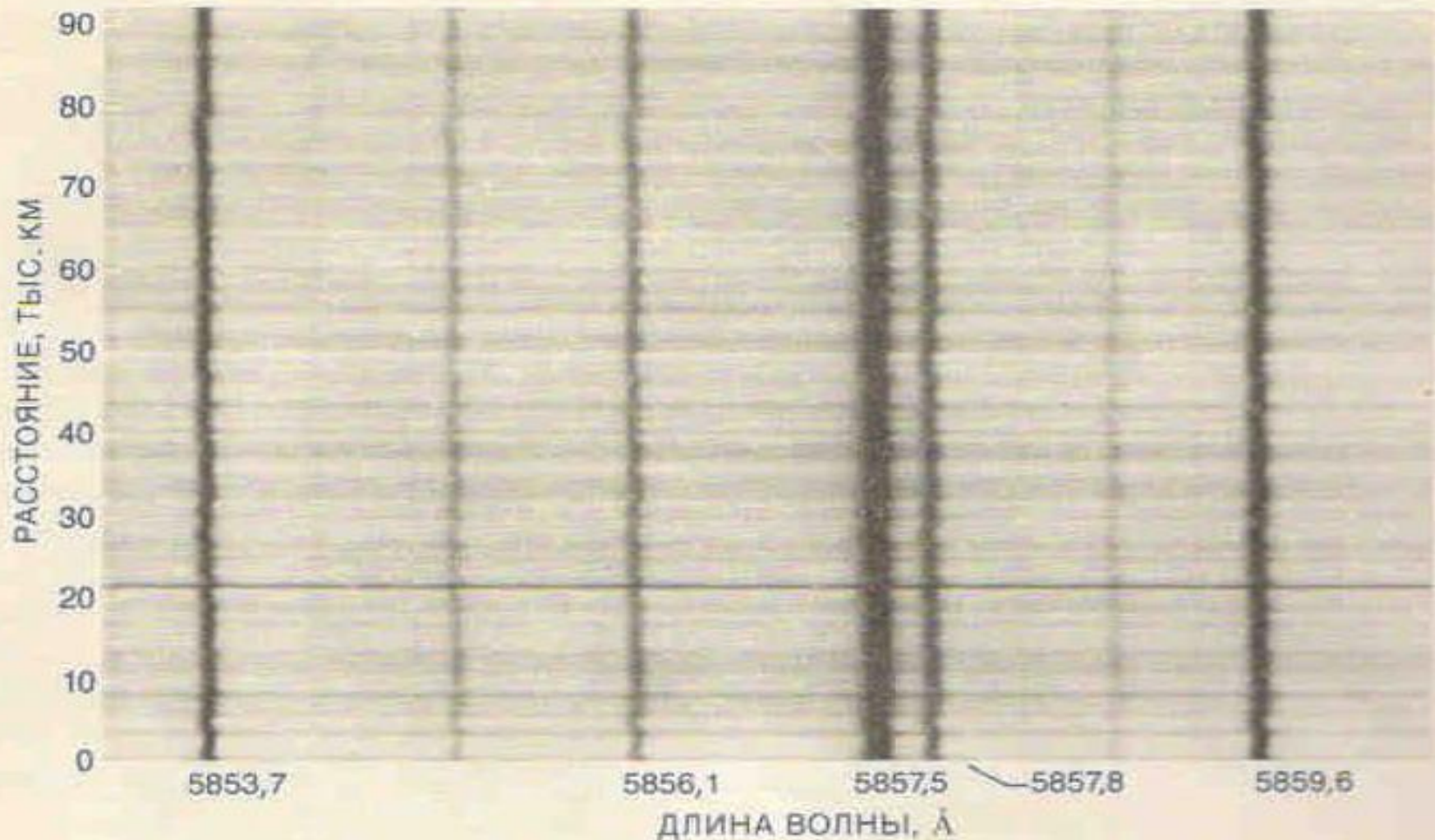
Спеціалісти з фізики Сонця спостерігають на сонячній поверхні ці коливання для отримання інформації про його внутрішню структуру, зокрема,

**про внутрішнє обертання Сонця.**

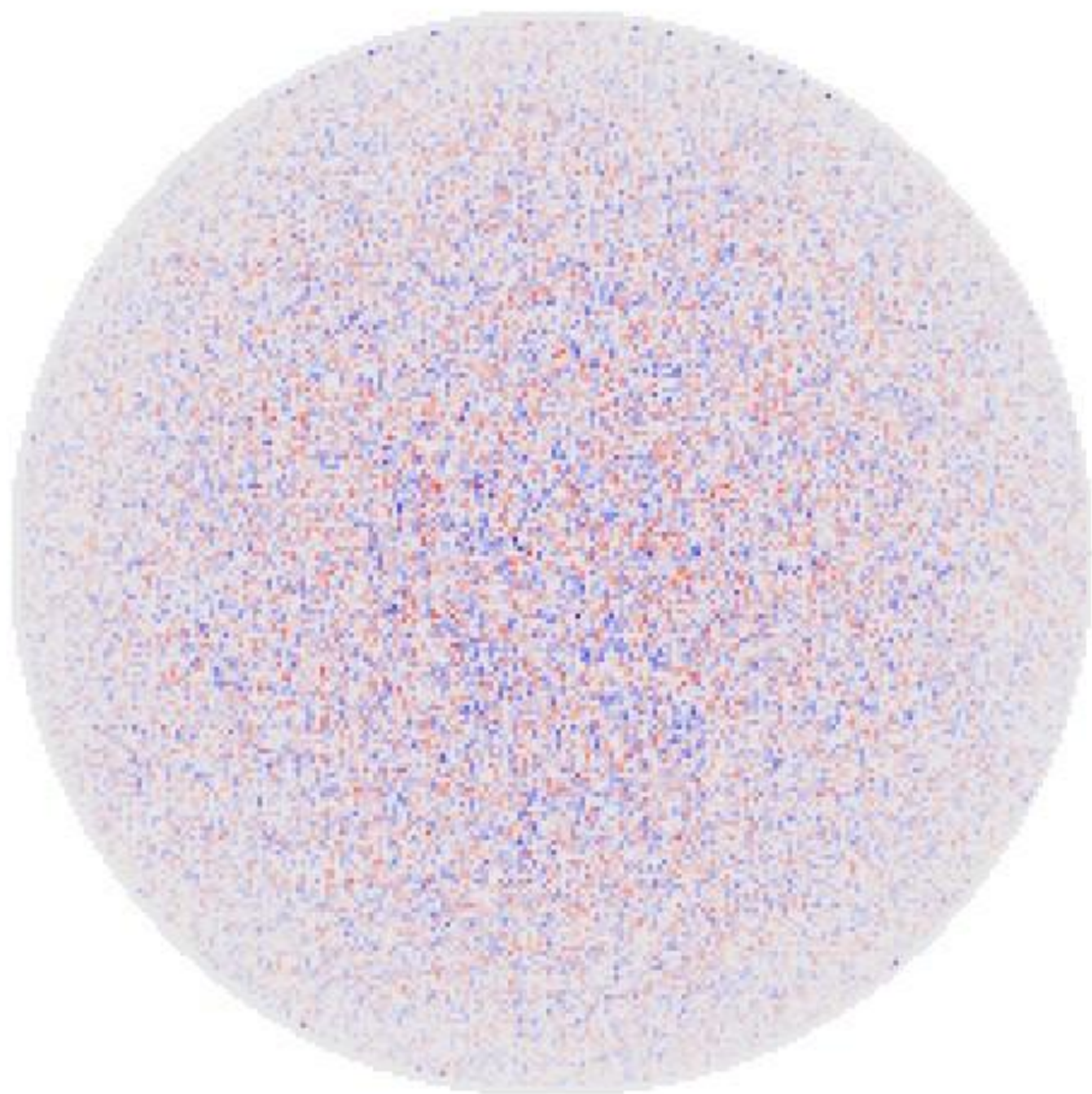
## Спостережні дані

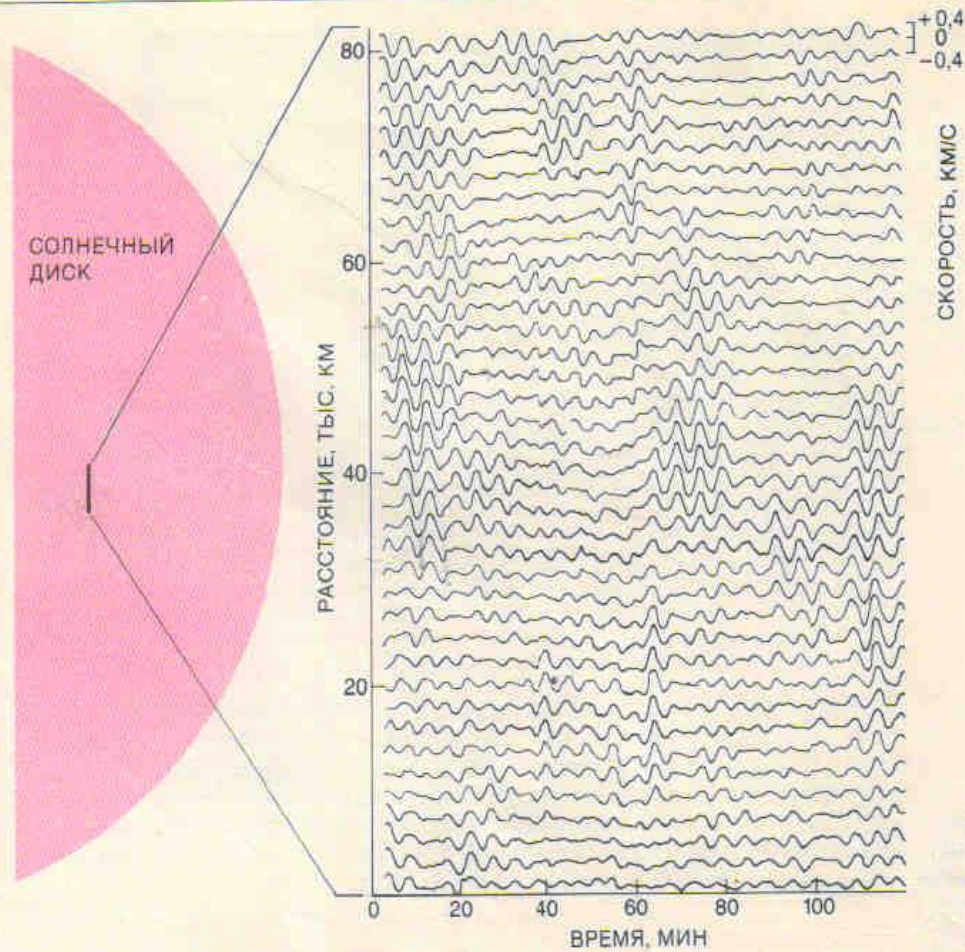
Вивчення коливань <sup>⊙</sup> розпочалося в 1960 р. в Каліфорнійському технологічному інституті, коли *Лейтон, Нойс і Саймон* розпочали аналізувати розподіл швидкостей газу на поверхні <sup>⊙</sup>. Метод базувався на *вимірюванні доплерівського зміщення* (зміна частоти випромінювання при русі джерела відносно спостерігача) *ліній поглинання* – темних ліній в сонячному спектрі. Зменшення, або *голубе зміщення*, довжини хвиль ліній поглинання від окремих областей <sup>⊙</sup> означає, що ця область *рухається у напрямку до спостерігача*, збільшення довжини хвилі, або *червоне зміщення*, означає, що область *відділяється від спостерігача*. Дослідники розраховували, що розподіл швидкостей газу, отриманий із доплерівських зміщень, *буде хаотичним у відповідності до хаотичних змін яскравості сонячної грануляції*. На свій подив, вони виявили, *що швидкості газу в атмосфері <sup>⊙</sup> зазнають коливання: на даній ділянці газ піднімається і опускається з періодом близько 5 хвилин*. Такі коливання тривали неперервно: вони являли собою *хвильовий пакет тривалістю близько півгодини*.





НА СПЕКТРОГРАММЕ можно увидеть доплеровское смещение спектральных линий газа, находящегося на поверхности Солнца. По оси абсцисс отложена длина волны, по оси ординат — координата области на солнечном диске, которая «просматривается» спектрографом. Темные вертикальные линии, приходящиеся на те длины волн, на которых газ у поверхности поглощает свет, излученный недрами Солнца, состоят из смещенных относительно друг друга отрезков. Смещения вызваны радиальными движениями газа.





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.

Отже, *Лейтон* виявив, що поверхня  $\odot$  покрита областями, що коливаються по вертикалі з періодом близько 5 хв. Ці області відмінні від гранул, а коливання явл. собою синусоїдальні хвильові цуги тривалістю в 4-5 циклів (часом до 9). Хвильові цуги розділені шумовими інтервалами малої амплітуди. На початку і в кінці цугів коливання мають малу амплітуду. Слідуючі один за одним цуги, мабуть, не зв'язані між собою. Середня тривалість цуга  $t_{cp} = 23$  хв., хоча часом  $t \rightarrow 50$  хв. Области, що коливаються, рівномірно розподілені по сонячному диску, в кожний даний момент часу  $2/3$  поверхні  $\odot$  беруть участь в коливаннях. Амплітуда коливань: 0,1-0,6 км/с,  $v_{cp} \cong 0,4$  км/с. З висотою амплітуда повільно зростає по закону  $\rho - 0,3$ , але енергія хвиль з висотою падає. З наближенням до краю диску ампл. швидкостей зменшується, вказуючи на переважно вертикальні коливання. Частотний спектр коливань досить широкий (інтервал періодів 150-400 с), але максимум спектру відповідає період 300 с = 5 хв.

*Горизонтальна довжина хвилі, що розглядаються, міститься в інтервалі 5-10 тис. км, і значно перевищує поперечні розміри гранул. Із малюнка добре видно, що багато коливань синфазні: мабуть, площадка розміром в супергрануляційну комірку, коливається когерентно. Ці коливання модульовані за амплітудою. Горизонтальний масштаб амплітудної когерентності лежить в межах 5-10 тис. км, тоді як фазова когерентність зберігається до відстаней 30 тис. км.*

*Спостерігаються також **коливання яскравості** (а, значить, і **температури**). Максимум яскравості випереджає по фазі максимум направленої уверх швидкості на  $\pi/2$ , що явл. одним із аргументів проти наявності біжучих хвиль. Крім того, коливання швидкості на різних висотах, принаймі, в фотосфері, синфазні; ці хвилі стоячі (такі, що не розповсюджуються), а не бігучі.*

## *Захоплення хвиль.*

Найбільш ймовірне пояснення 5-хв коливань полягає в тому, що вони явл. хвилями, які захоплені резонансною порожниною. Така порожнина явл. собою шар соняч. атмосфери, всередині якого хвилі можуть розповсюджуватися, але зверху і знизу він обмежений шарами, в яких хвилі не можуть розповсюджуватися. Тому на верхній і нижній границях відбувається відбивання хвиль всередину порожнини, що приводить до утворення в ній стоячих хвиль. Р.Ульріх і незалежно від нього Дж.Лейбахер і Р.Стейн, використавши теоретичні моделі <sup>⊙</sup>, показали, що внутрішні області <sup>⊙</sup> можуть служити акустичним резонатором. Вони припустили, що звукові хвилі генеруються і утримуються в надрах <sup>⊙</sup>. У внутрішніх шарах <sup>⊙</sup>, де обмежуючі поверхні відсутні, відбивання і заломлення акустичних хвиль (АХ) може відбуватися за рахунок градієнтів густини і температури.

Фізичним параметром середовища, який визначає акустичні коливання, явл. **адіабатична швидкість звуку**

$$c_{\zeta} = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma \frac{k_B T_0}{m_p}}, \quad \gamma \equiv \left( \frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho} \right)_{\text{àä}}$$

де  $P_0$ ,  $\rho_0$  і  $T_0$  означають незбурені тиск, густину і температуру.

**Частоти акустичних коливань** називають ***p*-модами**.

Вони зростають зі збільшенням радіального хвильового числа.

Верхня межа відбивання в сонячному акустичному резонаторі лежить як раз під видимою поверхнею ☉, де *густина різко падає* зі збільшенням відстані від центру. Звукова хвиля, відбита від верхньої границі, поширюється вниз і досягає нижньої границі, яка *обумовлена підвищенням температури*. Градієнт температури приводить до збільшення швидкості звуку з глибиною. Отже більш глибока частина хвильового фронту, що *похило поширюється* в глибину ☉, намагається догнати ту частину фронту, що знаходиться ближче до поверхні. Фронт хвилі поступово вигинається, поки хвиля не поверне в зворотному напрямку до поверхні ☉.

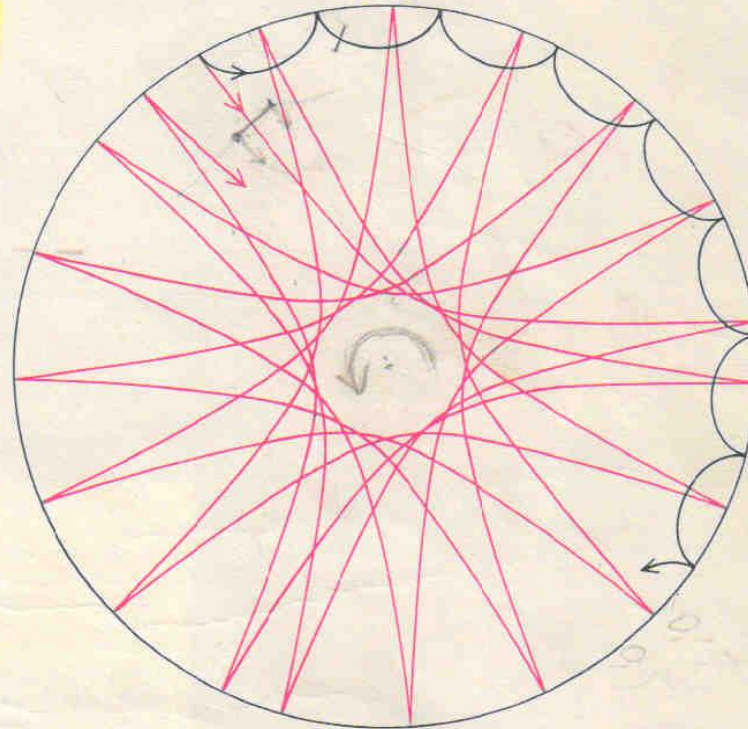
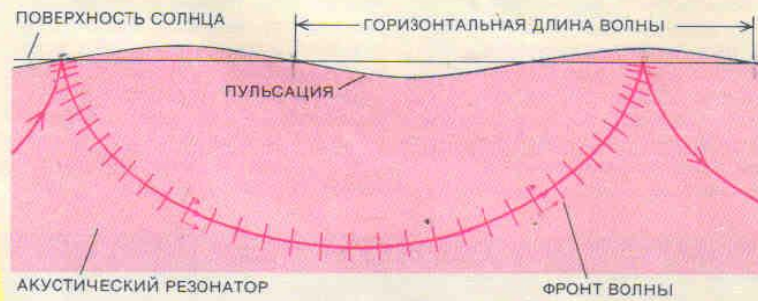


Захоплені хвилі, таким чином, поширюються вздовж дугоподібних траєкторій під поверхнею ☉. Нижня частина дуги, де хвиля поширюється горизонтально, приходиться/припадає на нижню границю резонатора. В цьому місці відношення горизонтальної довжини хвилі  $L$  (відстань між двома послідовними хвильовими фронтами, виміряна в горизонтальному напрямку) до її періоду  $T$ : величині, відомій як *горизонтальна фазова швидкість*, дорівнює локальній швидкості звуку

$C_z(r) = L/T = v\phi(r)$ . Ясно (т.ч.), що глибина резонатора різна/відмінна для хвиль з різними горизонтальними довжинами або періодами. На верхній межі резонатора біля поверхні хвилі генерують коливання, спостереження яких дають змогу визначити період  $T$  і горизонтальну довжину  $L$  хвилі. Із цих величин можна отримати швидкість звуку біля нижньої основи резонатора  $v\phi(r) = L/T = C_z(r)$ .

## *Генерація акустичних хвиль*

Вважається, що 5-хв коливання в фотосфері являються, мабуть, акустичними модами, захопленими в шарі нижче температурного мінімуму. *Аналіз властивостей акустичних резонаторів підтвердив, що спостережені на  $\odot$  пульсації являють собою АХ. В акустичному резонаторі хвилі з визначеним періодом інтерферують зі своїми відбитими від стінок хвилями, в результаті чого виникає **резонансна стояча хвиля**. Всякий акустичний резонатор має основний період резонансу, приблизно рівний часу, за який звук проходить від верхньої межі до нижньої і назад. На  $\odot$  основний період зв'язаний з хвилею, яка має визначену горизонтальну довжину  $L$ . Хвилі з більш короткими періодами ( $T/2$ ) і такою ж горизонтальною довжиною  $L$  (обертони) також можуть резонувати в надрах  $\odot$ . Однак для них резонатор буде більш глибоким, тому що їх горизонтальна фазова швидкість  $L/(T/2) = v\phi$  більша і, таким чином, більше глибина, на якій фазова швидкість  $v\phi$  рівна локальній швидкості звуку  $C_z$ . Для резонування моди необхідно, щоб на дузі, що протягнулася від поверхні  $\odot$  до нижньої границі акустичного резонатора і назад, вкладалося/розміщувалося ціле число довжин хвиль.*

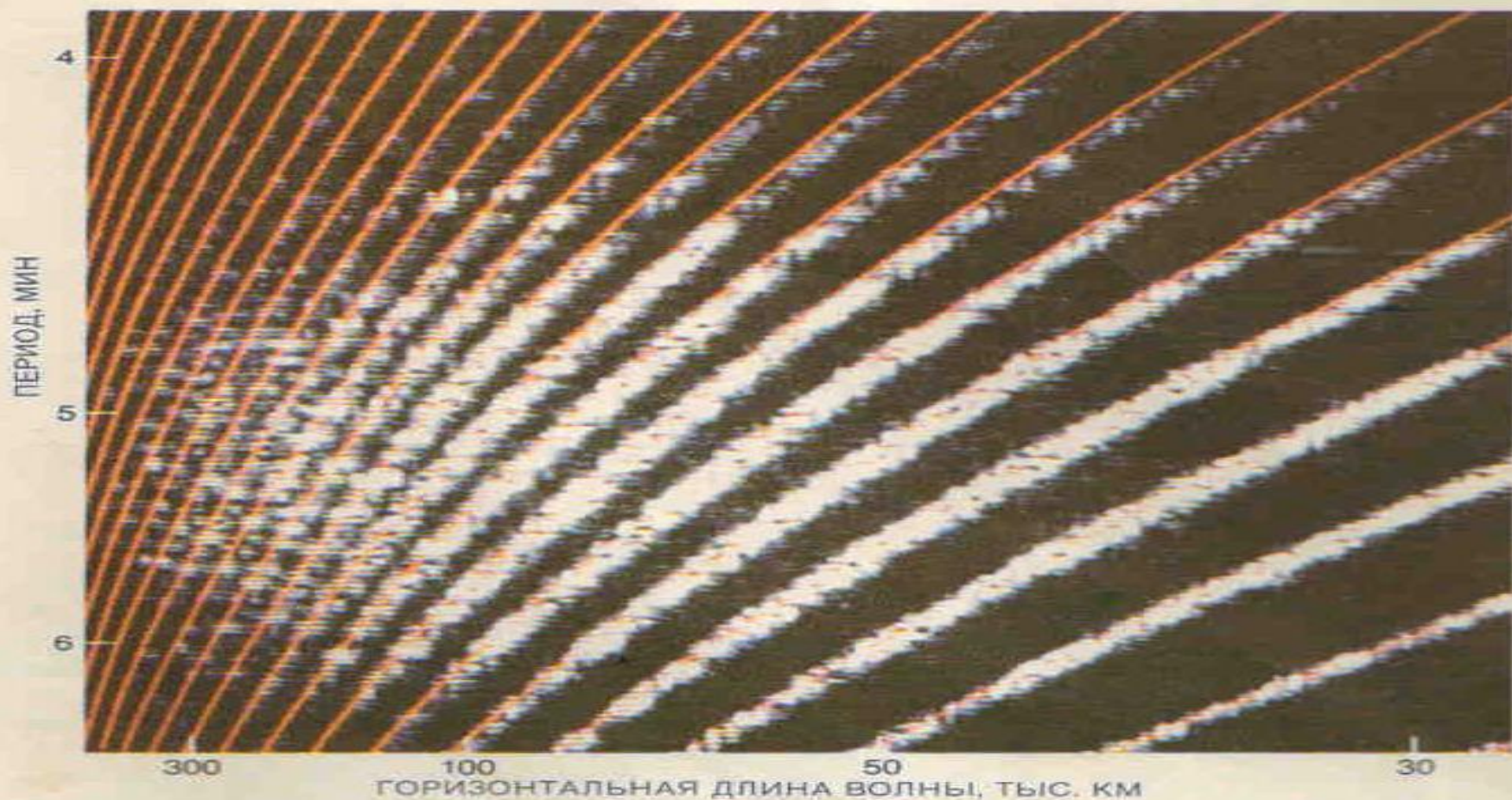


ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ волн под поверхностью Солнца приводит к удержанию акустических волн внутри резонатора. Волна, распространяющаяся из недр Солнца, отражается за счет резкого уменьшения плотности у солнечной поверхности (*вверху*). Отраженная волна, проникая в глубь Солнца, преломляется за счет 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.

При заданій горизонтальній довжині хвилі резонатори з підходящою для резонансу глибиною будуть існувати тільки для хвиль з певними періодами. На двомірній діаграмі енергетичного спектру (період – довжина хвилі:  $T - L$ ), де *амплітуда* подана як функція горизонтальної довжини хвилі  $L$  і періоду  $T$ , найбільш сильні пульсації  $\odot$  утворюють ряд/низку вузьких смуг/полосок (в трьохмірному зображенні “хребтів” або “гребнів”), які відповідають значенням періоду і горизонтальної довжини хвилі для резонансних мод.

В 1975 р. Дойбнер провів перші точні вимірювання періоду і довжини хвилі 5-хв коливань. В амплітудному спектрі, побудованому за його даними, були присутні гребні великої амплітуди, що

**підтверджує зроблені теоретичні передбачення.**



**СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И НАБЛЮДАЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ**, выполненное с помощью ЭВМ, показало, что наблюдаемые на солнечной поверхности пульсации обусловлены резонансными акустическими волнами в недрах Солнца. Резонировать могут только волны с определенными соотношениями между периодом и горизонтальной длиной. Цветные кривые соответствуют резонансным модам, предсказываемым «стандартной солнечной моделью», в которой предполагается, что в момент образования Солнце содержало 25% гелия. Яркие участки соответствуют модам, выявленным в ходе шестидневных измерений скорости газа на солнечной поверхности, которые были проведены Т. Дьювеллом-младшим и Дж. Гарвеем из Национальной солнечной обсерватории. Согласие между наблюдениями и теорией в целом подтверждает тот факт, что Солнце является акустическим резонатором. В то же время некоторое расхождение говорит о необходимости усовершенствования теоретических моделей.

Однаке між комбінаціями частот і довжин хвиль, виміряними *Дойбнером*, і розрахунками в рамках СМ<sup>⊙</sup> *Х. Андо* і *Л.Осаки* із Токійського ун-ту, виявилось **невелике, але систематичне розходження.**

Воно вказувало на необхідність зміни деяких параметрів сонячної моделі, в першу чергу *ефективності конвективних процесів поблизу поверхні* <sup>⊙</sup>.

Більш ефективна конвекція приводить до зменшення *градієнту температури* і, таким чином, до *більш повільного зростання швидкості звуку з глибиною*. Очікувалося, що з такою попракою резонансні моди, які отримуються в СМ<sup>⊙</sup>, будуть краще узгоджуватися з експериментальними даними.

Удосконалені експерименти *Родеса-молодшого, Ульріха і Саймона* по вимірюванню 5-х коливань дали змогу отримати досить надійні дані для визначення *ефективної конвекції*, а, таким чином, і *глибини КЗ*. Вони, а також *Гаф* із Кембріджського університету, зробили висновок про те, що

***КЗ має більшу глибину, ніж вважалося до цього часу.***

***Однак з більш глибокою КЗ не могло мати спостережний радіус, якщо тільки вміст He в його ядрі не був вищим, чим вважалося раніше.***

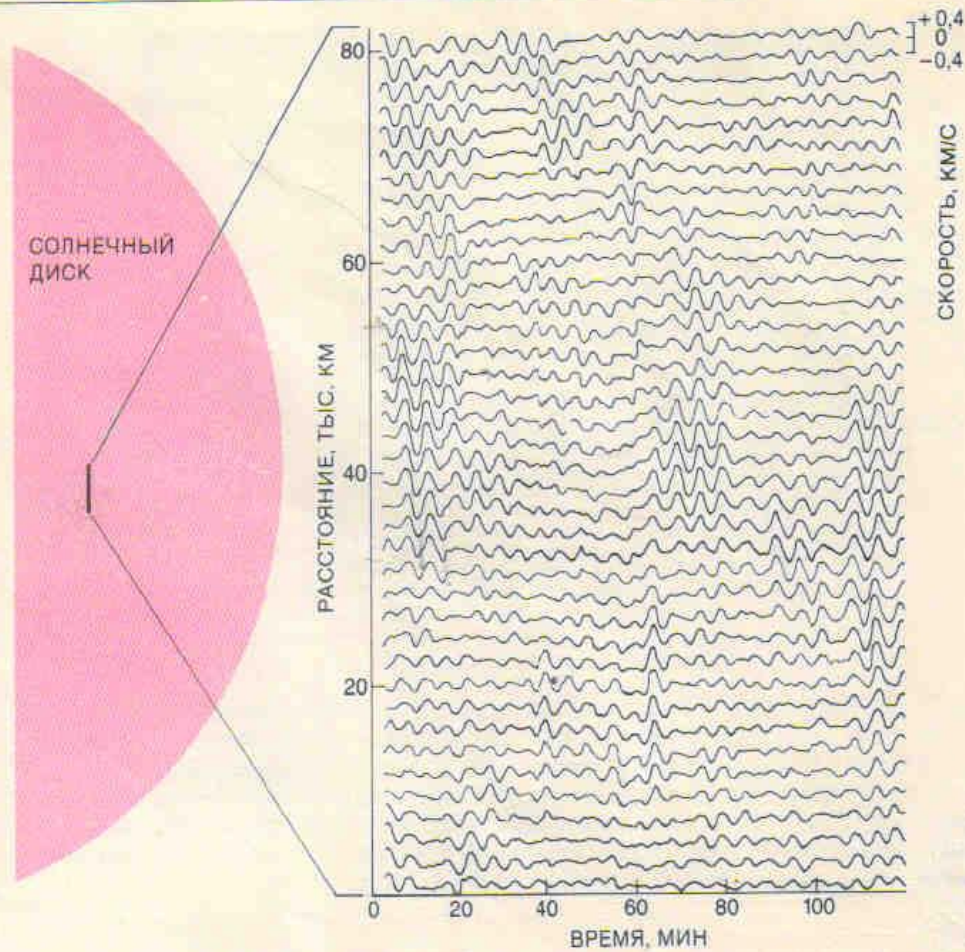
А це веде до збільшення потоку нейтрино.

Але в той же час збільшений нейтринний потік від ядра з високим вмістом He ускладнював би проблему сонячних нейтрино.



**РАСХОЖДЕНИЕ МЕЖДУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И ТЕОРИЕЙ** зависит от того, какая величина содержания гелия в недрах Солнца принята в модели. Кривые показывают расхождение между измеренными и рассчитанными частотами солнечных колебаний в зависимости от степени моды ( $l$ ) при постоянном радиальном порядке ( $n = 13$ ). Кривые соответствуют частотам, предсказанным различными моделями; при этом предполагается, что содержание гелия на поверхности равно наблюдаемому, а содержание его в недрах Солнца может быть таким, как указано на рисунке. Модель 1 (26% гелия) предполагает, что гелий был равномерно распределен в газовом облаке, из которого образовалось Солнце. Модель 2 (17%) и модель 3 (29%) допускают неоднородность газового облака. Ширина каждой кривой отражает неопределенность в расчете колебаний на поверхности Солнца; горизонтальная серая полоса обозначает ошибки измерений. Модель с высоким содержанием гелия лучше согласуется с данными по колебаниям, но дает гораздо больший по сравнению с измеренным поток солнечных нейтрино. Модель с низким содержанием гелия решает нейтринную проблему, но противоречит наблюдениям пульсаций. Для расчетов использовались теоретические работы Р. Ульриха и наблюдения Т. Дьювелла и Дж. Гарвея.





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.

## ***Математичний опис коливань***

Не дивлячись на труднощі, які виникають при розгляді сукупності коливань, окремі резонансні моди описати досить просто.

Оскільки резонатори розміщені всередині сферичного  $\odot$ , то математичний опис просторової структури резонансу повинен включати *функції, що залежать від широти, довготи і радіусу.*

Для опису **поверхневих конфігурацій коливань**

**використовують дві величини – степінь і азимутальний порядок.**

**Степінь моди  $l$**  – це число поверхневих вузлових ліній, тобто кіл на поверхні сфери, де швидкість, обумовлена хвилею, дорівнює нулеві. Відстань між двома сусідніми вузлами складає близько половини горизонтальної довжини хвилі. Таким чином, хвилі з малим  $l$  мають більшу горизонтальну довжину.

**Азимутальний порядок  $m$**  рівний числу вузлових ліній, що пересікають екватор.

Глибинна структура коливань визначається його  
**радіальним порядком  $n$** , відомим також як **обертонне число**. Воно відповідає числу вертикальних довжин хвиль або, іншими словами, числу вузлових ліній вздовж радіусу сфери.

В общем случае произвольное возмущение, например лучевой скорости  $v$  в зависимости от времени  $t$ , может быть представлено в сферических координатах  $(r, \theta, \varphi)$  суперпозицией радиального и сферического возмущений

$$v(r, \theta, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{\infty} R_n \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l Y_l^m(\theta, \varphi) e^{-i\omega t},$$

разложенных по ортогональным сферическим функциям, образующим полную нормированную систему

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = (-1)^m \left[ \frac{2l+1}{4\pi} \cdot \frac{(l-|m|)!}{(l+|m|)!} \right]^{1/2} P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi},$$

где

$$P_l^m(z) = \frac{(1-z^2)^{m/2}}{l! 2^l} \frac{d^{l+m}}{dz^{l+m}} (z^2-1)^l -$$

присоединенные полиномы Лежандра.

При  $l=0$  имеем чисто радиальные колебания, при  $l=1$  — дипольные и при  $l=2$  — квадрупольные и т. д.

Возможный дискретный характер колебаний Солнца связан с числами  $n$ ,  $l$  и  $m$ . Число узлов радиальной волновой функции  $R_n$  при больших  $n$  равно  $n$ . Степень  $l$  и порядок  $m$  характеризуют колебание на сфере  $r = \text{const}$ , причем  $l$  дает полное число пересечений окружностей, являющихся линиями узлов на сфере, а  $m$  — число таких линий, пересекающихся на полюсе. При отсутствии физи-

$$c_3 = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma k \frac{T_0}{m_p}}$$

$$\gamma \equiv \left( \frac{\partial \ln p}{\partial \ln \rho} \right)_{ad}$$

$$v_{\varphi}(r) = L/T \Rightarrow c_3(r)$$

Сферические поверхностные функции (тессераевы гармоники)

$$Y_e^m(\theta, \varphi) = P_e^m(\cos \theta) \exp(\pm i m \varphi)$$

→ цилиндрические функции Лежандра

Степень [модуль] мультипольности

→  $k_{ne}$  - радиальный характер волны

$$V = \sum_{m, l} a_e^m Y_e^m(\theta, \varphi) J_{e+1/2} \left( k_{ne} \frac{r}{R} \right)$$

→ цилиндрические функции Бесселя

модуль

Степень мультипольности  $l$  — целое число, характеризующее угловую структуру, то есть как она поведет себя, ее зависимость от угла, зависимость от  $r$ .

Угловая структура зависит от того, какой характер имеет волна, что происходит с ее фазой.

Радиальный характер  $n$  — определяет, какой характер имеет зависимость от  $r$  (какой характер имеет зависимость от радиуса сферы).

## Математичний опис коливань

Для математичного опису поверхневих конфігурацій коливань використовують дві величини – **ступінь** і **азимутальний порядок**.

**Ступінь моди  $l$**  – це число поверхневих вузлових ліній, тобто кіл на поверхні сфери, де швидкість, обумовлена хвилею, дорівнює нулеві. Відстань між двома сусідніми вузлами складає близько половини горизонтальної довжини хвилі. Таким чином, хвилі з малим  $l$  мають більшу горизонтальну довжину.

**Азимутальний порядок  $m$**  рівний числу вузлових ліній, що пересікають екватор.

Глибинна структура коливань визначається його **радіальним порядком  $n$** , відомим також як **обертонне число**. Воно відповідає числу вертикальних довжин хвиль або, іншими словами, числу вузлових ліній вздовж радіусу сфери.

Для кожної поверхневої конфігурації з певними значеннями  $l$  і  $m$  існує набір значень  $n$ , що характеризують основну резонансну частоту ( $n = 1$ ) і її обертони з меншими періодами. Кожна мода, що характеризується конкретним набором  $l, m$  і  $n$ , має визначену частоту коливань.

Оскільки в  $\odot$  глибина акустичного резонатора росте зі збільшенням горизонтальної довжини хвилі  $L$  і зі зменшенням періоду  $T$  ( $C_s = L/T$ ), то моди з великим відношенням  $n/l$  проникають глибоко в надра  $\odot$ . Якщо  $l = 0$ , що відповідає резонансній моді, в якій вся сфера розширюється і стискається як ціле, то відношення  $n/l = \infty$  – це значить, що така хвиля стискування проникає в самий центр  $\odot$ .

$l=2, m=0$



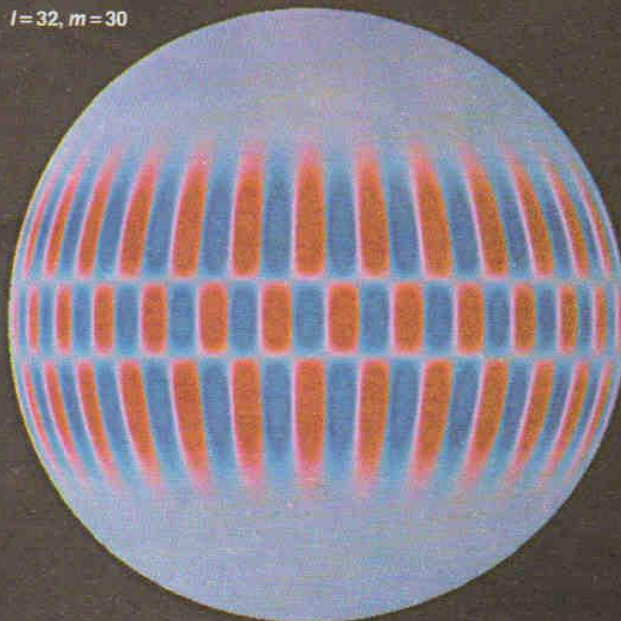
$l=10, m=0$



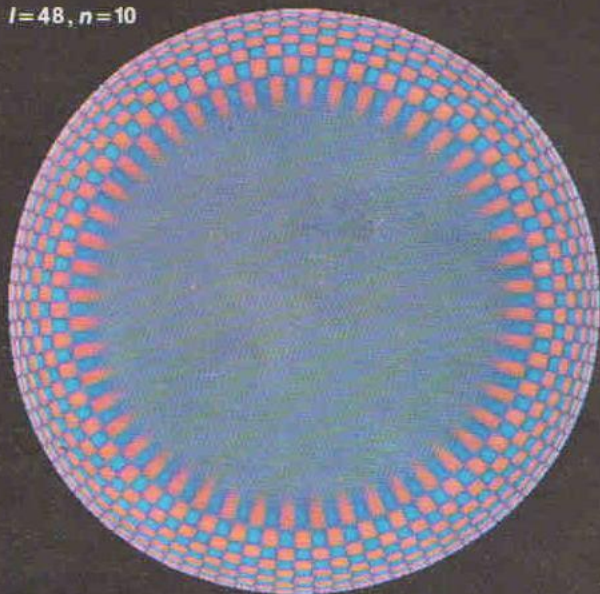
$l=30, m=30$



$l=32, m=30$



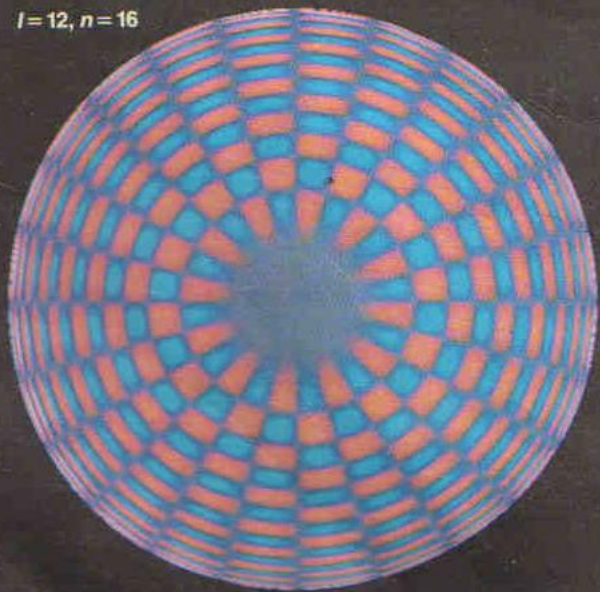
$l=48, n=10$



$l=24, n=13$



$l=12, n=16$



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  $lk/l$  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.



Для описания поверхностных конфигураций колебаний используются две величины — степень и азимутальный порядок. Степень моды, обозначаемая  $l$ , — это число поверхностных узловых линий, т.е. окружностей на поверхности сферы, где скорость, обусловленная волной, равна нулю. Расстояние между двумя соседними узлами составляет около половины горизонтальной длины волны. Таким образом, волны с малой  $l$  имеют большую горизонтальную длину. Азимутальный порядок, обозначаемый  $m$ , равен числу узловых линий, пересекающих экватор.

Глубинная структура колебания определяется его радиальным порядком ( $n$ ), известным также как оберточное число. Он соответствует числу вертикальных длин волн или, иными словами, числу узловых линий вдоль радиуса сферы. Для каждой поверхностной конфигурации с определенными значениями  $l$  и  $m$  существует набор значений  $n$ , представляющих основную резонансную частоту ( $n = 1$ ) и ее обертоны с меньшими периодами. Каждая мода, характеризуемая конкретным набором  $l$ ,  $m$  и  $n$ , имеет определенную частоту колебаний.

$l=2, m=0$



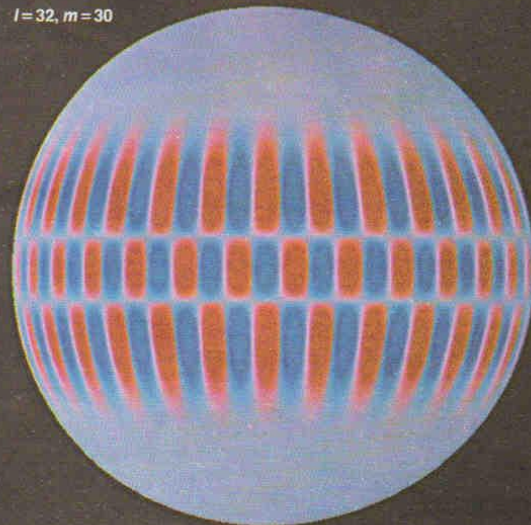
$l=10, m=0$

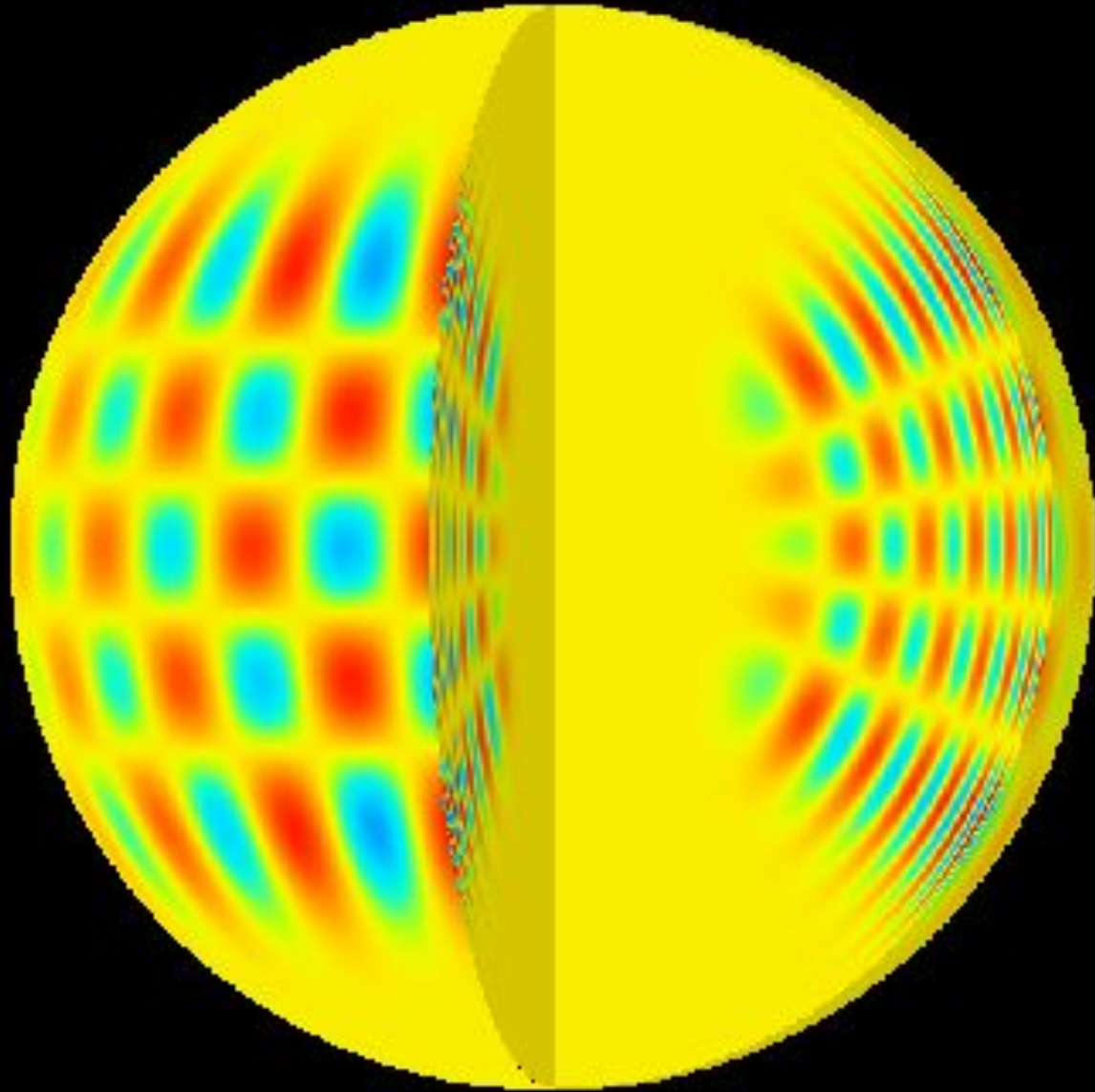


$l=30, m=30$



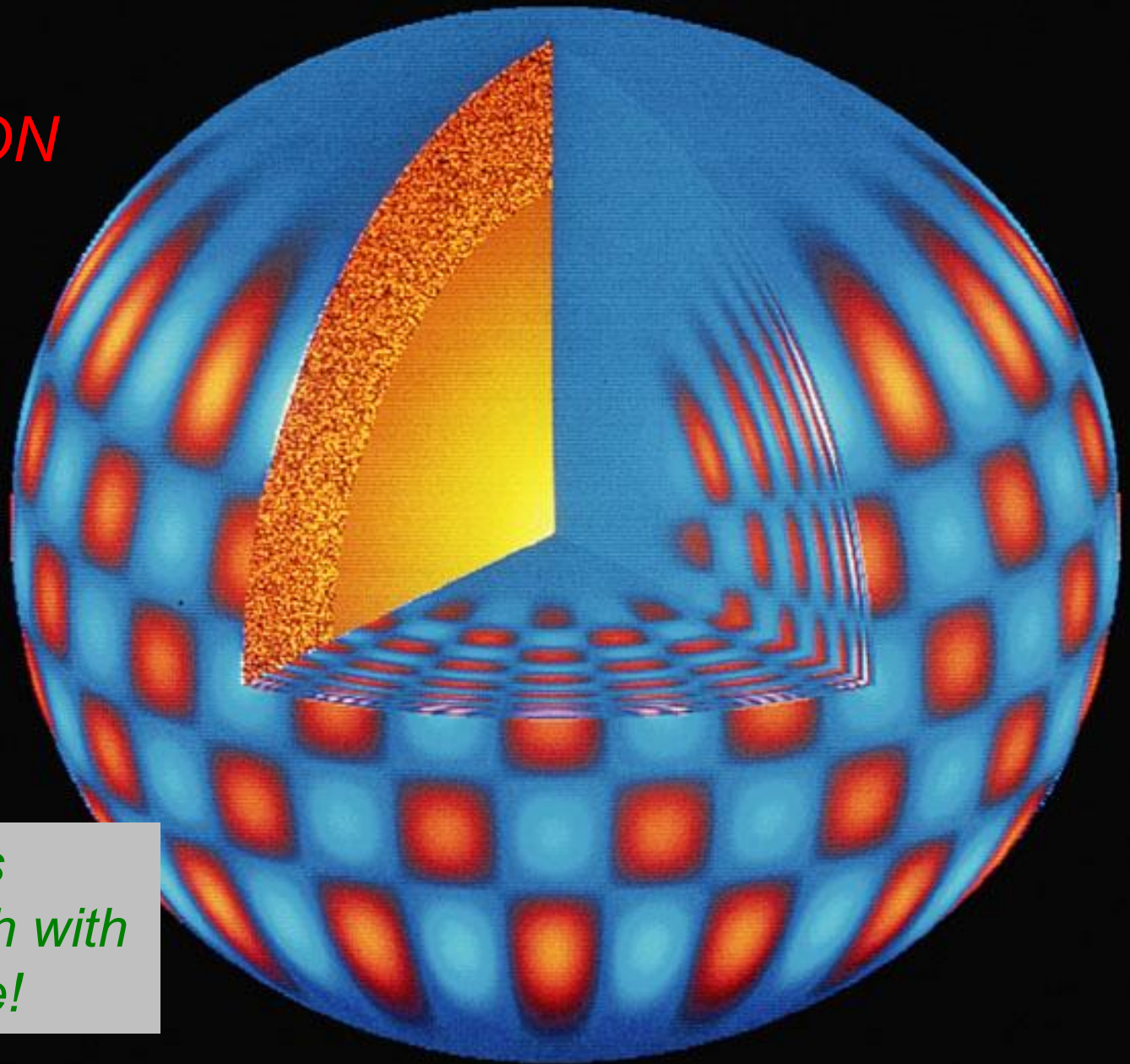
$l=32, m=30$





**Геліосейсмологічні експерименти**

*SOLAR  
OSCILLATION  
MODE*



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

Для реєстрації доплерівського зміщення, викликаного окремою модою, необхідний дуже точний і стабільний спектрометр. Найбільш достовірні результати дають спеціальні газові спектрометри, в яких порівнюються лінії поглинання в спектрі лабораторного газоподібного натрію або калію з лініями поглинання, обумовленими рухом на поверхні

- атомів цих елементів.

АХ чутливі до горизонтальних рухів газу під поверхнею ☉ просто тому, що газ, який рухається, намагається захопити хвилі за собою. Хвилі, які поширюються в напрямку підповерхневого руху, будуть рухатися швидше, ніж в непорушному середовищі. Отже, гребні хвиль пройдуть через фіксовану точку швидше, ніж в непорушному середовищі.

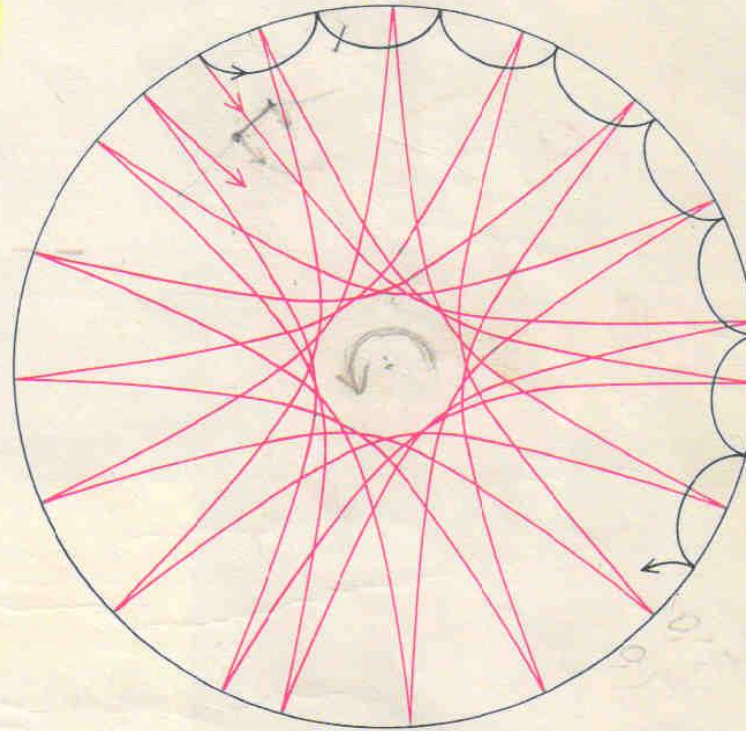
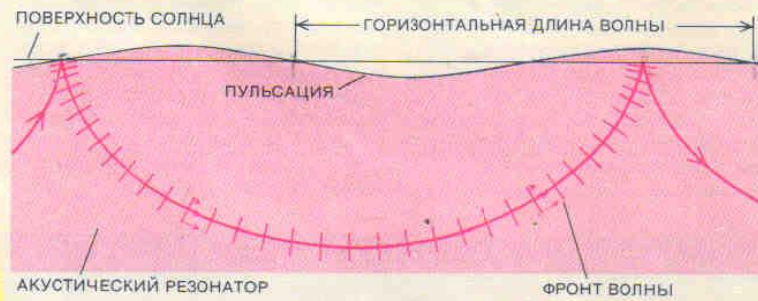
Аналогічно у хвиль, які поширюються проти руху газу, виміряна частота буде меншою. Таким чином, частоти двох ідентичних мод, які поширюються в протилежних напрямках через підповерхневий потік, будуть розщеплені.

*Із величини розщеплення можна отримати швидкість потоку, усереднену по тій області глибин і широт, де зосереджені ці моди.* Одночасно розглядаючи розщеплення частот для багатьох мод,

*можна отримати картину диференціального обертання ☉*

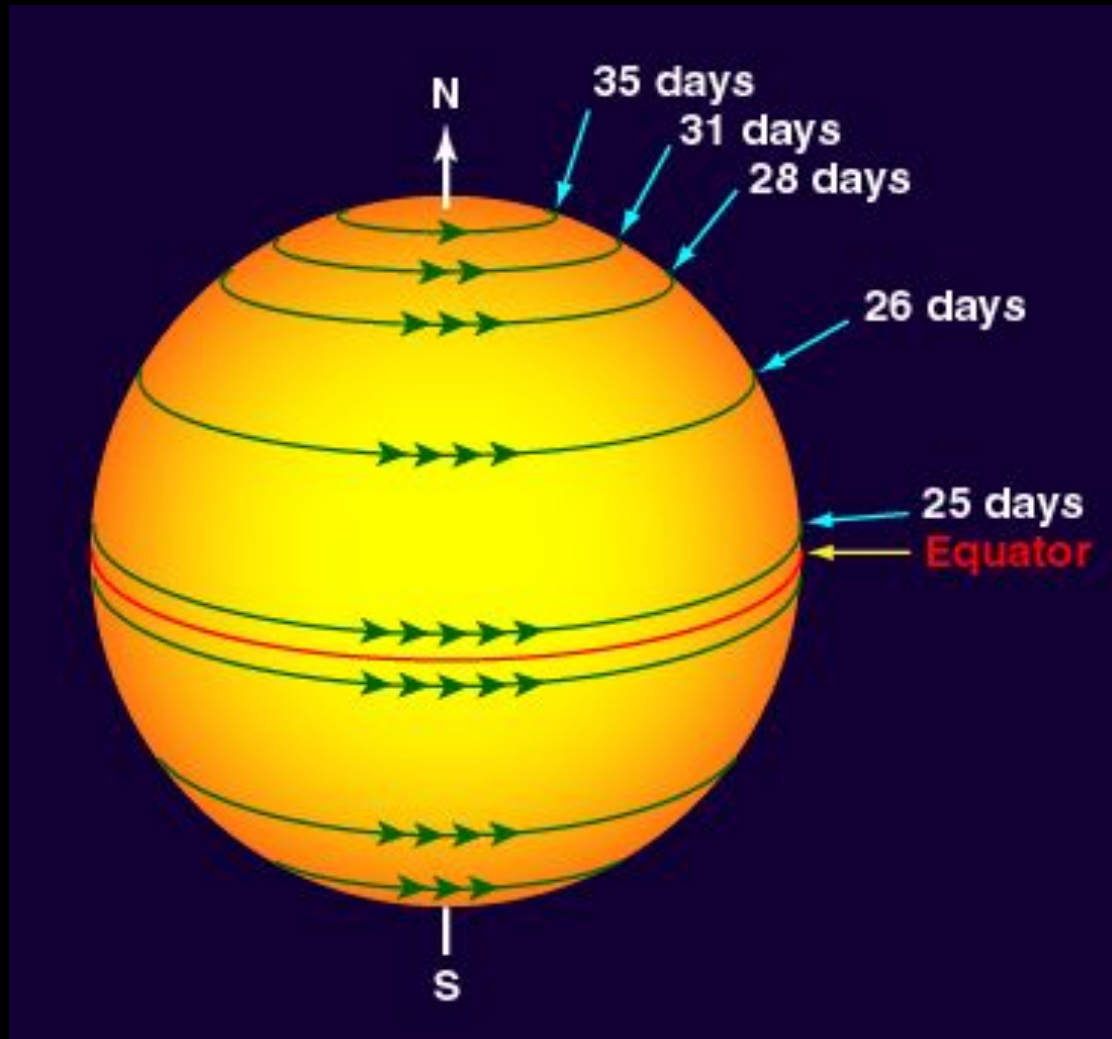
і його великомасштабних конвективних рухів.



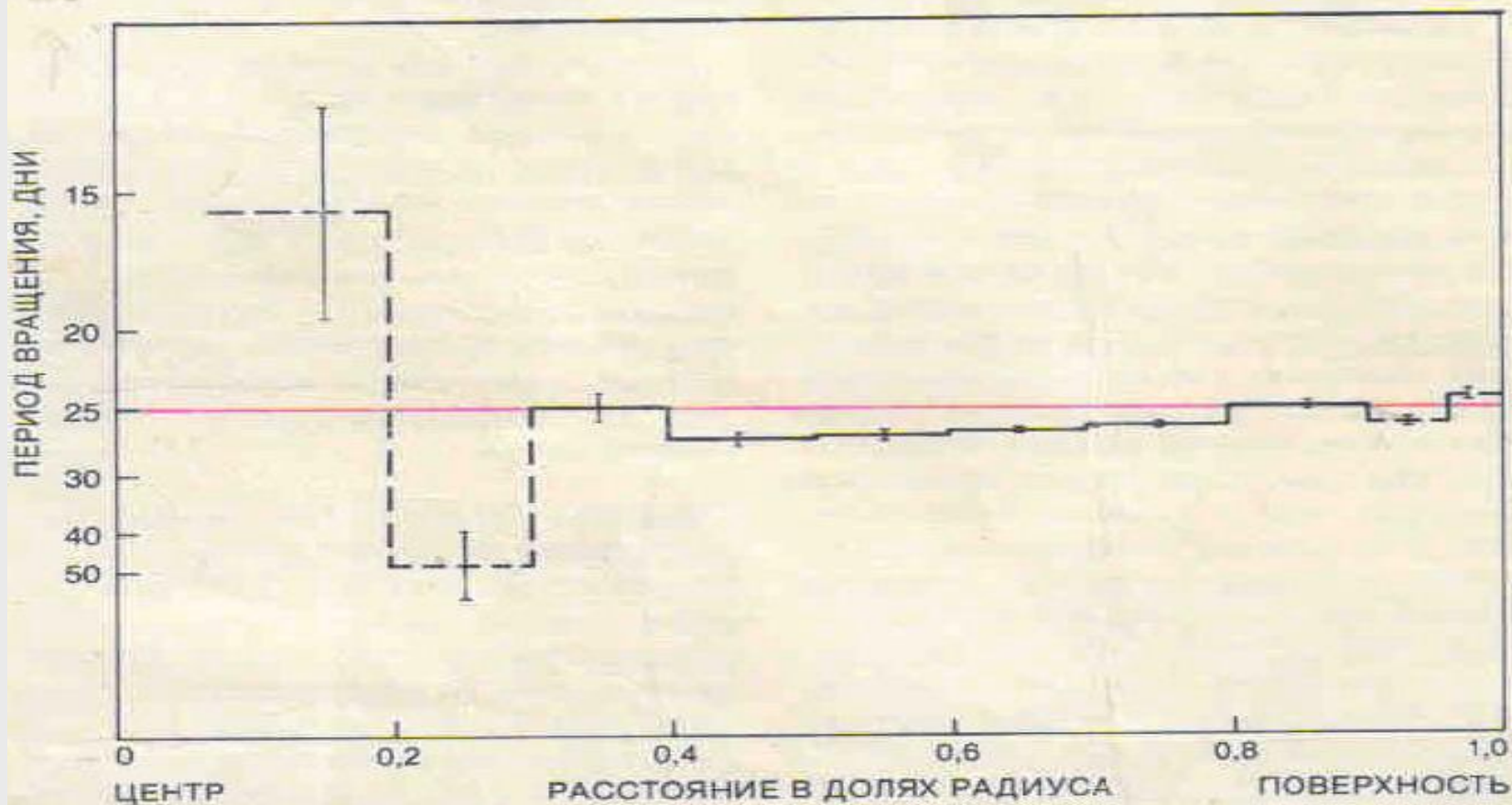


ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ волн под поверхностью Солнца приводит к удержанию акустических волн внутри резонатора. Волна, распространяющаяся из недр Солнца, отражается за счет резкого уменьшения плотности у солнечной поверхности (*вверху*). Отраженная волна, проникая в глубь Солнца, преломляется за счет 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.

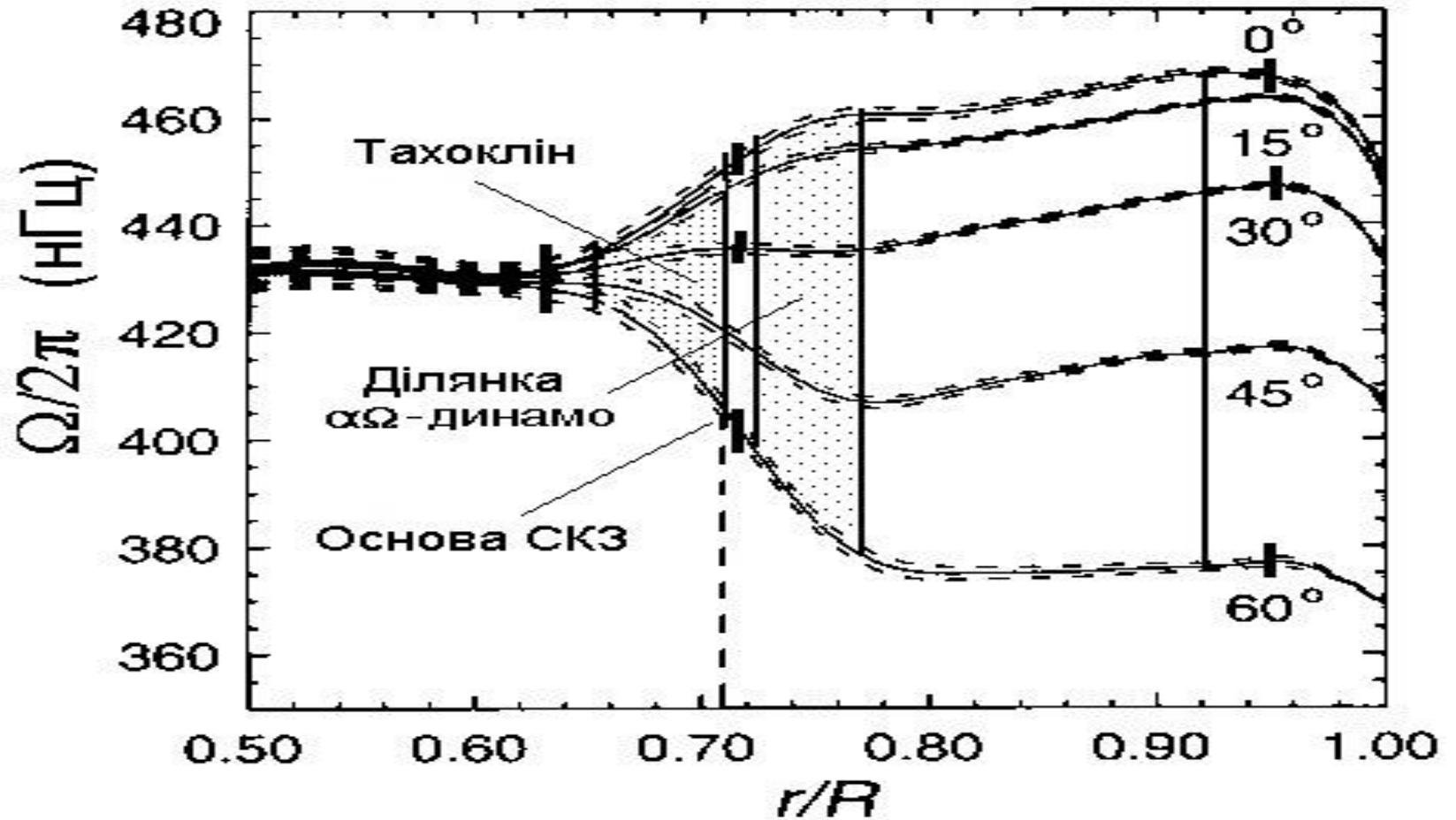
# Диференційне обертання і СОНЯЧНИЙ ЦИКЛ



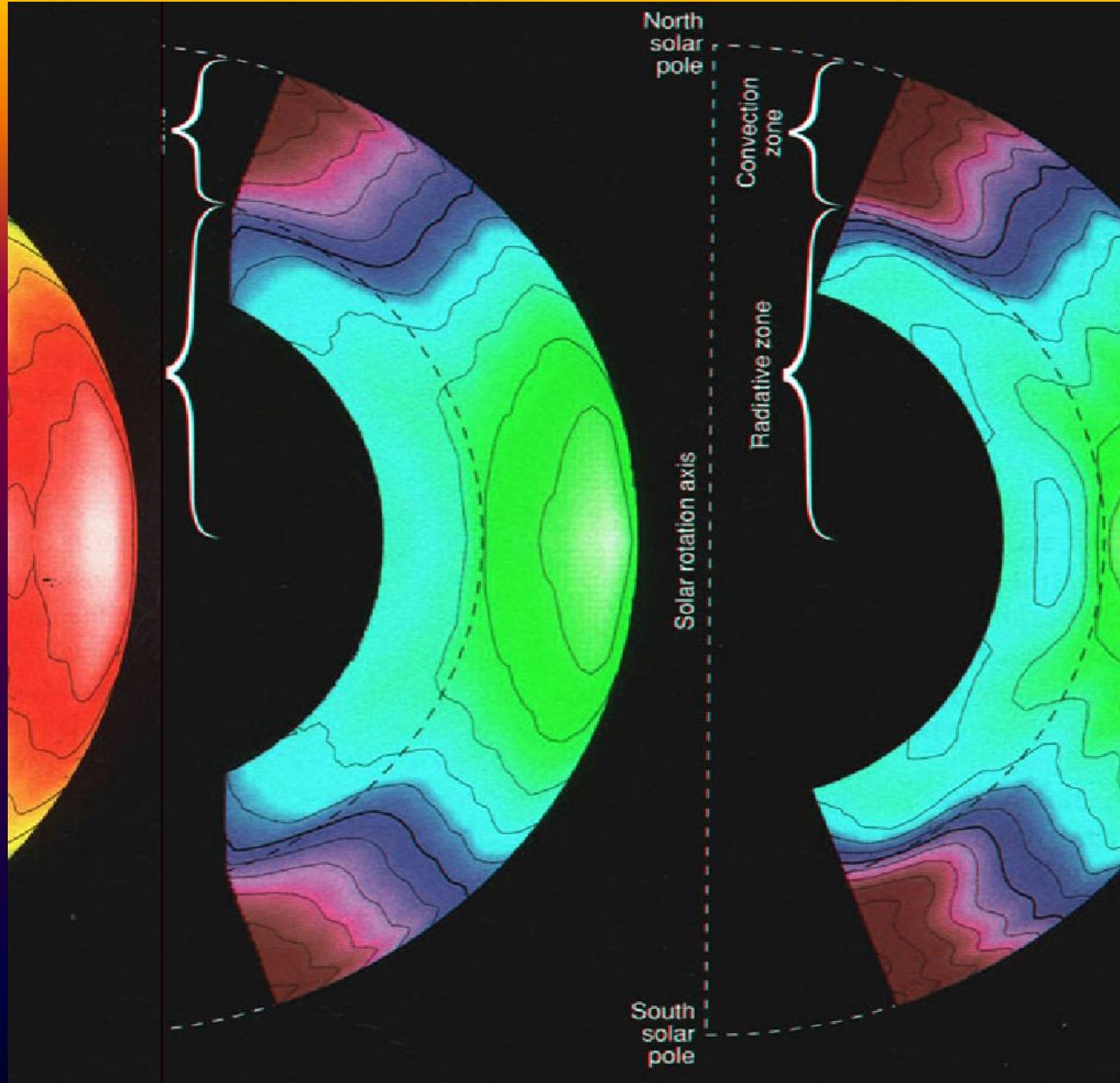




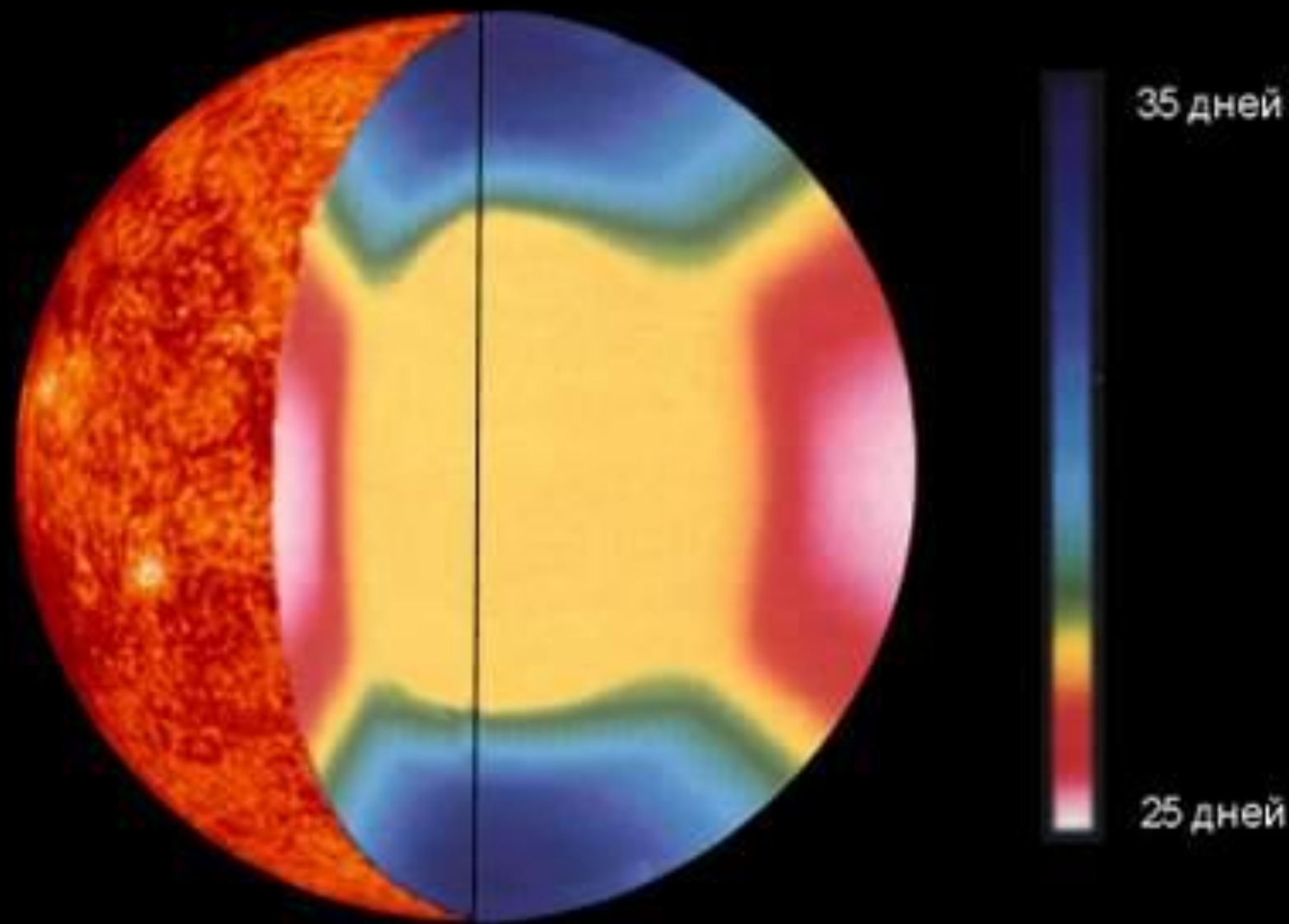
**ВНУТРЕННЕЕ ВРАЩЕНИЕ** Солнца определялось по разности частот идентичных мод, распространяющихся в противоположных направлениях. Моды наименее чувствительны к вращению вблизи ядра и вблизи поверхности. Штриховая линия указывает на большую неопределенность анализа, а вертикальные отрезки обозначают ошибки измерений. Красная линия отвечает периоду вращения поверхности на экваторе. Данные свидетельствуют о том, что вдоль большей части солнечного радиуса скорость вращения медленно падает с глубиной, а не растет, как считалось ранее. Однако ядро может вращаться быстрее, чем остальная часть Солнца. Наблюдения были проведены Т. Дьювеллом и Дж. Гарвеем и проанализированы ими же в сотрудничестве с В. Джембовским из Астрономического центра им. Коперника (Польша). Ф. Гудом из Технологического института шт. Нью-Джерси, Д. Гафом и Дж. Лейбахером.



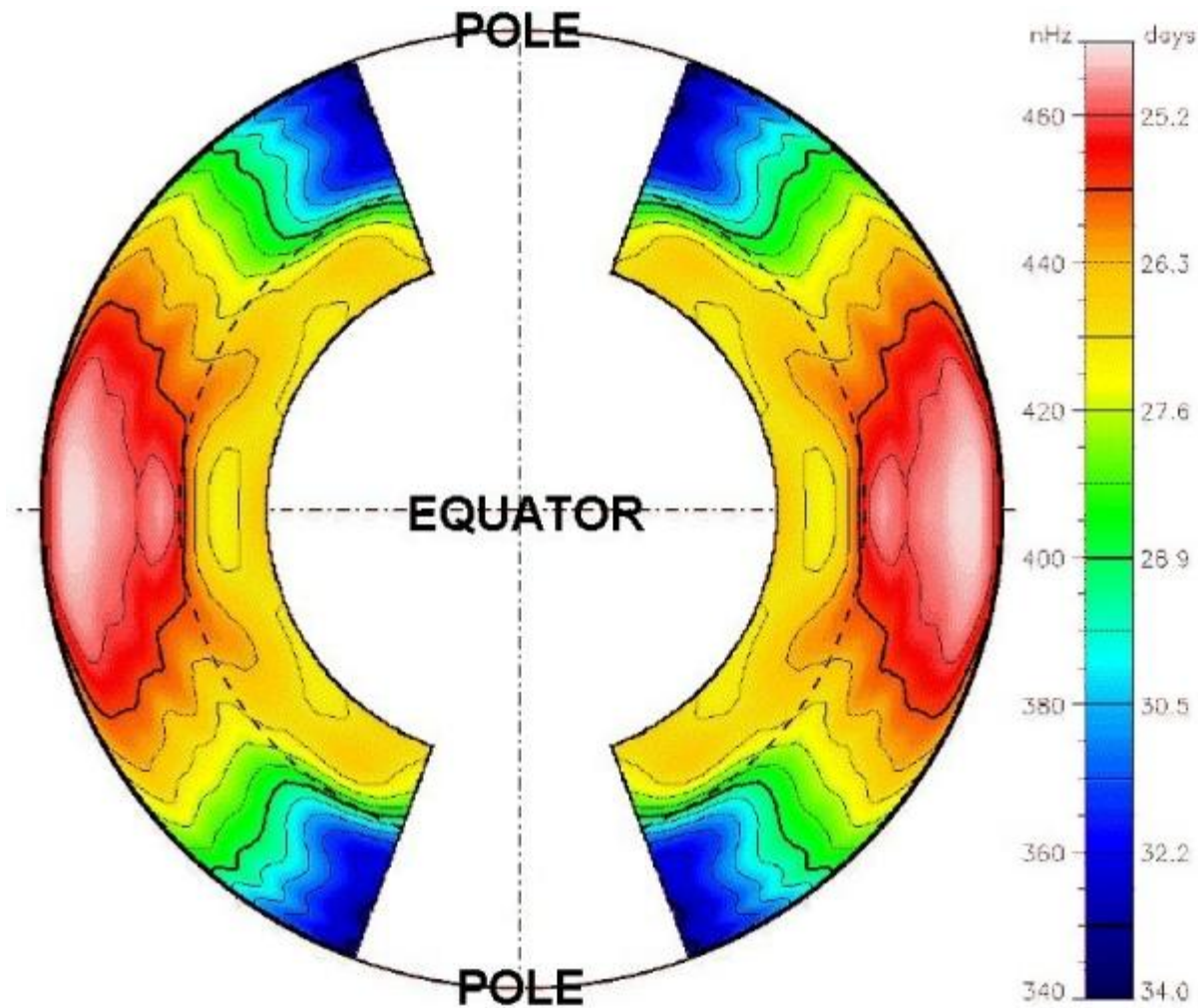
Розподіл за радіусом усереднених за часом (за 1995 – 1999 рр.) швидкостей внутрішнього обертання Сонця для різних широт (дані геліосейсмічних ви (Howe, Christensen-Dalsgaard, Hill et al. 2000a [260])). Під нижньою основою СКЗ (вертикальна пунктирна лінія на відстані  $r \approx 0,71R$ ) в променистому тахоклі різкий перехід від широтного диференційного обертання до майже однорідного обертання променистої зони. Вертикальними рисками (для широт  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  і варіацій кутової швидкості, які відбуваються в протифазі в фіксованих точках вище ( $r = 0,72R$ ) і нижче ( $r = 0,63R$ ) тахокліну. Штриховкою в діапазоні відстані в якій зберігається структура торсійних коливань. Вертикальними рисками на відстані  $0,95R$  позначено діапазон часової еволюції цих коливань за чотир мережі GONG та з допомогою інструмента MDI на борту космічної станції SOHO [Howe, Christensen-Dalsgaard, Hill et al. 2000b[261])). В діапазі знаходиться досліджувана нами ділянка  $\alpha\Omega$ -динамо.



**Внутрішнє обертання Сонця  
(меридіональний розріз)**



**Внутрішнє обертання Сонця  
(меридіональний розріз)**



**Внутрішнє обертання Сонця  
(меридіональний розріз)**

протуберанец

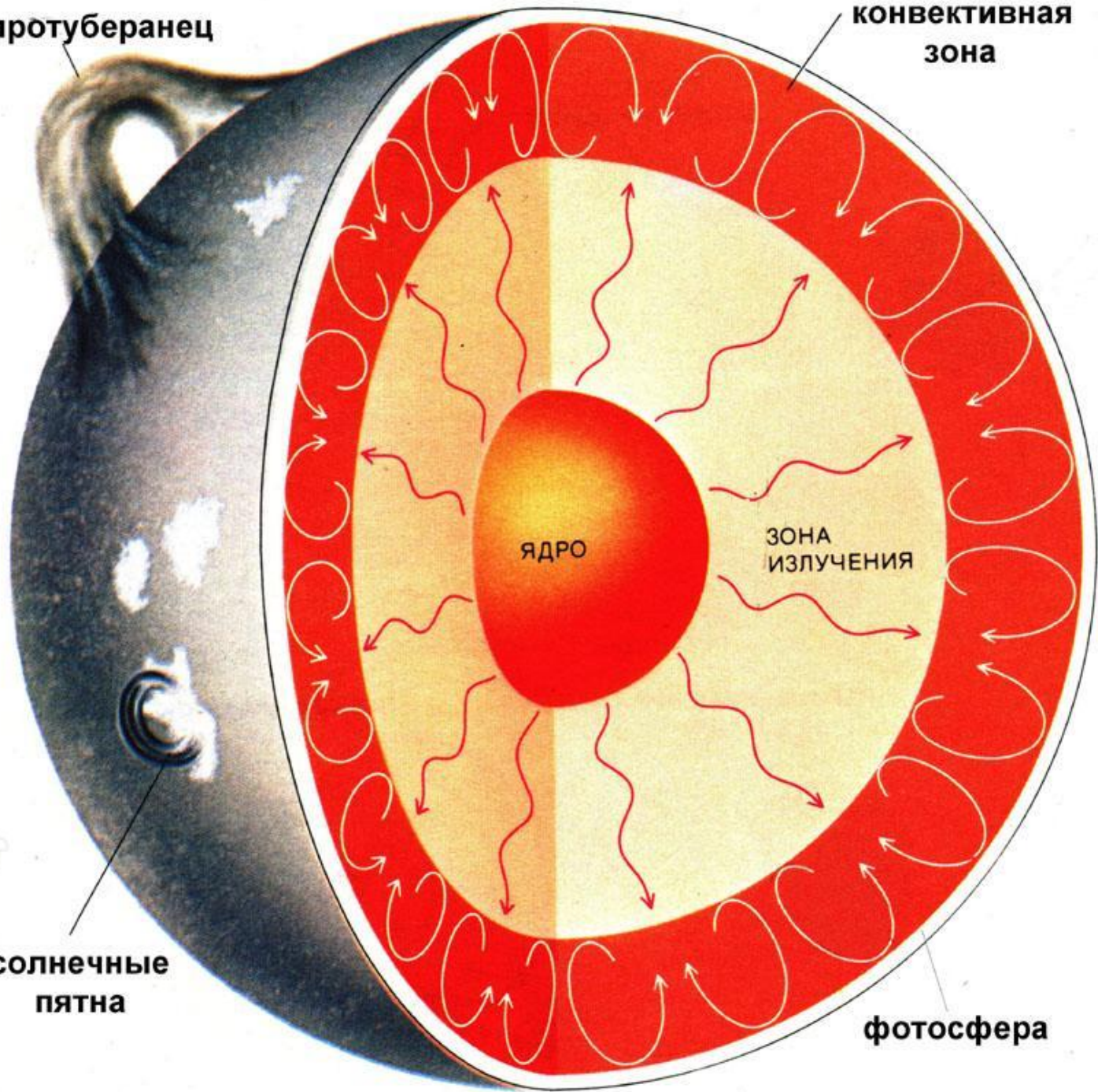
конвективная зона

солнечные пятна

ядро

зона излучения

фотосфера



## *Гравітаційні хвилі (ГХ)*

*ГХ – коливання частинок газоподібного середовища вгору і вниз відносно положення рівноваги.*

Існування АХ обумовлено тиском (ефекти стискування), а ГХ – силою тяжіння (ефекти плавучості). ГХ можуть розповсюджуватися тільки в областях з стійкою стратифікацією речовини. Тому вони в значній мірі зосереджені (“захоплені”) глибоко в надрах <sup>⊙</sup> під нестабільною конвективною зоною.

Резонансний період ГХвиль визначаються їх проходженням через область захоплення.

Час проходження в свою чергу залежить від власної частоти коливань, зв'язаних з виштовхуючою силою, тобто від частоти, з якою коливаються частки середовища, початково зміщеного у вертикальному напрямку.

Ця частота визначається значеннями вертикальних градієнтів густини і тиску

**(частота Брунта – Вяйсяля)**

$$N^2 = -g_0 \left( \frac{d \ln \rho_0}{dr} - \frac{1}{\gamma} \frac{d \ln p_0}{dr} \right).$$

$$N^2 = -\frac{g_0}{T_0} \left[ \frac{dT_0}{dz} - \left( \frac{dT}{dz} \right)_{ad} \right], \quad \left( \frac{dT}{dz} \right)_{ad} = -(\gamma - 1) \frac{T_0 g_0}{c_{\zeta}^2}$$

де  $g_0(r)$  – прискорення сили тяжіння.



*Це та частота, з якою здійснював би вертикальні коливання якийсь елемент рідини або газу, знаходячись у рівновазі за тиском з нерухомим навколишнім середовищем і без теплообміну з ним, якщо вивести його з положення рівноваги.*

Термін **“внутрішні”** часом використовується для того, щоб підкреслити відміну цих хвиль від *поверхневих гравітаційних хвиль, які поширюються вздовж поверхні розділення двох рідин.*

Якщо єдиною суттєвою силою, яка діє на елемент плазми, є сила плавучості  $g(\delta\rho_0 - \delta\rho) = -N^2\rho_0\delta z$ , то рівняння руху набуває такого вигляду

$$\rho_0 \frac{d^2(\delta z)}{dt^2} = -N^2 \rho_0 \delta z.$$

Отже, такий елемент бере участь у простому гармонічному коливанні з частотою  $\omega = N$ , якщо тільки  $N^2 > 0$  ( $N$  – дійсне число). В цьому випадку температура зменшується з висотою повільніше, ніж під час адіабатичних змін:

$$-\left(\frac{dT}{dr}\right) < -\left(\frac{dT}{dr}\right)_{ad}.$$

**Умова  $N^2 > 0$  називається критерієм конвективної стійкості Шварцшільда.**

$$N^2 = -g_0 \left( \frac{d \ln \rho_0}{dz} - \frac{1}{\sigma} \frac{d \ln P_0}{dz} \right)$$

закон Бунзена-Вансена

$$H_0 = \frac{P}{\rho g} = \frac{kT}{m_p g}$$

$$N^2 = -\frac{g_0}{T_0} \left[ \frac{dT_0}{dz} - \left( \frac{dT}{dz} \right)_{ad} \right]$$

$$P_0 = \frac{k_B \rho_0 T_0}{m_p}$$

$$\frac{P_0}{\rho_0^\sigma} = \text{const}$$

$$\left( \frac{dT}{dz} \right)_{ad} = -(\sigma - 1) \frac{T_0 g_0}{c_3^2}$$

$$g(\delta \rho_0 - \delta \rho) = -N^2 \rho_0 \delta z - \text{сила тяжести}$$

$$\rho_0 \frac{d^2(\delta z)}{dt^2} = -N^2 \rho_0 \delta z$$

$N^2 > 0$  - критерий конвективной устойчивости

Стрем. змешивания з виссого повлитие, или за адвекция

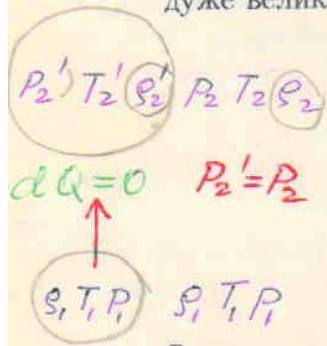
$$\left| \frac{dT}{dz} \right| < \left| \frac{dT}{dz} \right|_{ad}$$

з едн/закон

Навкани  $N^2 < 0$  - видога конвективне неустойчивост.

$$\left| \frac{dT}{dz} \right| > \left| \frac{dT}{dz} \right|_{ad} - \text{неустойчиве}$$

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 відбувається процесу теплої теплообміну з середовищем, тобто  $P_2' = P_2$ .  
 Якщо  $\rho_2' < \rho_2$ , то елемент підніметься далі і відійде від гравітаційної 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 газового стану  $\rho = \frac{k_B \rho T}{m}$  зміна тиску, густини і темп. зв'язані між собою співвідношеннями

(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

$$\boxed{dQ=0}$$

$$p = \rho r^\sigma$$

Значит, если температура  
зависит от радиуса, то  
 $p = \rho r^\sigma$  и наоборот  
отрицательный градиент  
температуры, что означает  
то, что объект не  
имеет температуры, и  
не существует не  
температуры ( $dQ=0$ ).

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

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

$$\nabla_p > \nabla_{ag}$$

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

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

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

число Рейнольдса

$$Ra > Ra_{кр} = 1700$$

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

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

→ коэффициент  
показателя

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

$\alpha$  - коэффициент температурного расширения

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

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

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

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

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

Якщо температура зменшується з висотою швидше, ніж за адіабатичним законом, умова  $N^2 > 0$  порушується, розв'язок рівняння експоненціально росте:

***ми маємо випадок конвективної нестійкості.***

Область всередині  $\odot$ , де цей процес відбувається, називається **КОНВЕКТИВНОЮ ЗОНОЮ** ( $N^2 < 0$ ).

Коливання гравітаційного типу можна розглядати як результат захоплення внутрішніх гравітаційних хвиль в глибоких конвективно стійких областях  $\odot$ .

Це низькочастотні коливання, верхнє значення частоти для них визначається частотою *Брунта – Вяйсяля*.

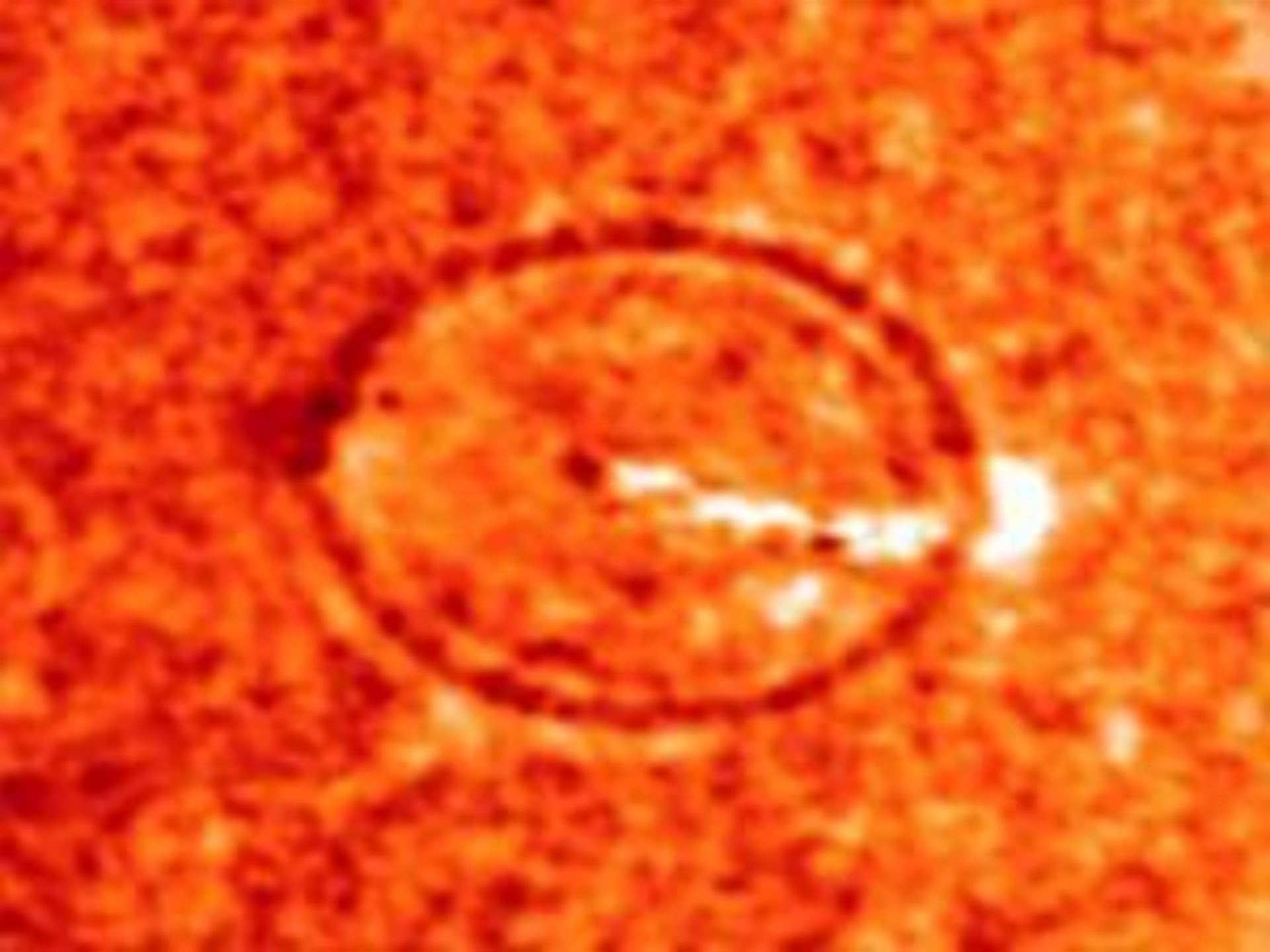
На відміну від АК, частоти ГК, що називаються ***g-модами***, зменшуються зі збільшенням радіального хвильового числа.

Геліосейсмологія вже дала суттєву інформацію про внутрішню структуру  $\odot$ , однак для ефективного використання цього методу необхідні більш точні спостереження. Щоб розділити моди коливань з дуже близькими частотами, потрібні неперервні спостереження протягом кількох місяців чи років. На перших порах спостереження велись на Південному полюсі в Антарктиді.

Для цього необхідно розмістити мережу обсерваторій на різних довготах по всій земній кулі так, щоб в кожний момент у всякому разі хоча б одна з цих обсерваторій могла стежити за Сонцем в умовах доброї видимості.

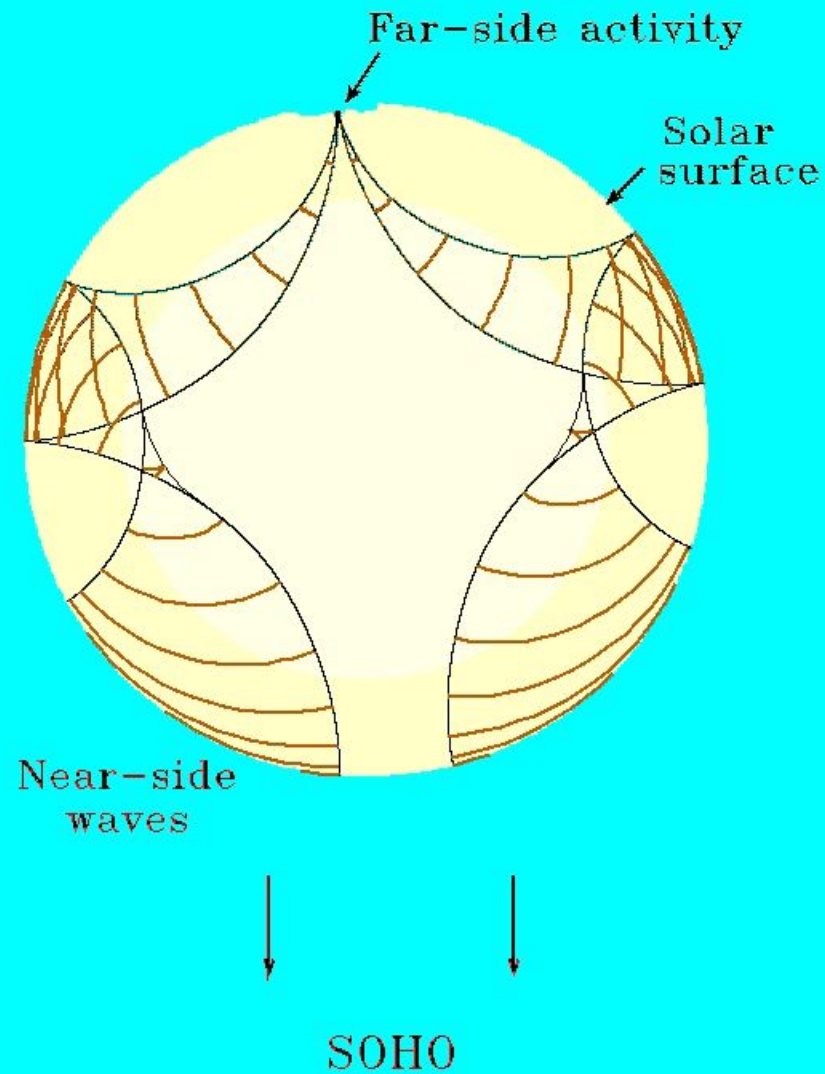
На перших порах спостереження велись на Південному полюсі в Антарктиді.

Пізніше геліосейсмологи (групи з Бірмінгама і Ніцци) об'єднали свої зусилля організувавши наземну мережу із 6-ти обсерваторій для дослідження  $\odot$  як зірки - **Global Oscillation Network Group (GONG).**

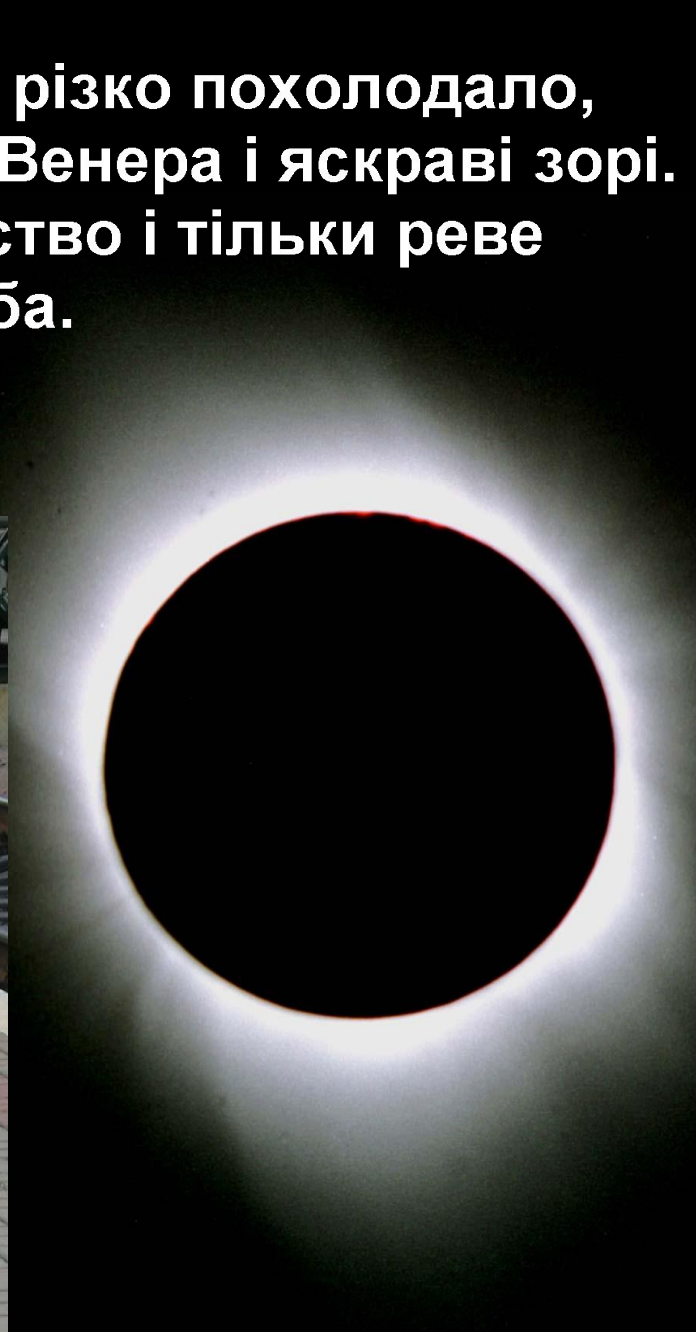





# Спостереження плям на зворотньому боці Сонця



**“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 сталося з світом?



**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!

