

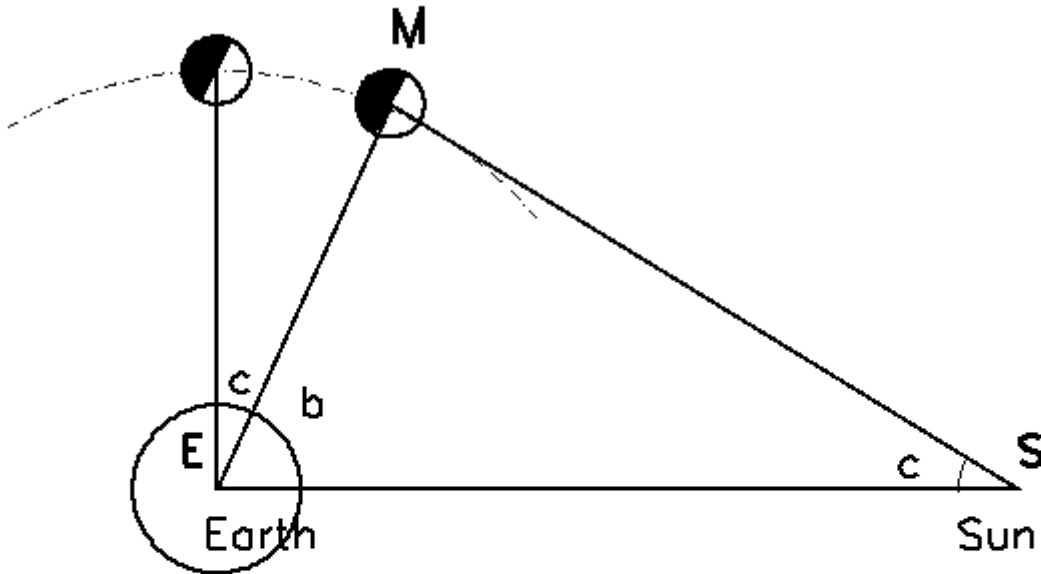
# Ηλιακή Φυσική

A large, bright sun in a cloudy sky, with the silhouette of ancient ruins in the foreground. The sun is the central focus, appearing as a large, glowing orb with a bright yellow and white core. The sky is filled with soft, orange and yellow clouds. In the foreground, the dark silhouettes of ancient ruins, including several columns and walls, are visible against the bright sky. The overall scene is a dramatic sunset or sunrise.

Διδάσκοντες:  
Ιωάννης Δαγκλής  
Αλέξανδρος Χείλαρης  
Κωστής Γοντικάκης

# Μέτρηση της Αστρονομικής μονάδας

Αρίσταρχος ο Σάμιος 310-230 π.Χ.



$$EM/ES = \eta \mu c \quad \mathbf{1/18 > \eta \mu c > 1/20}$$

$$b = 87^\circ \text{ πραγματικό } b = 89^\circ 51' 11''$$

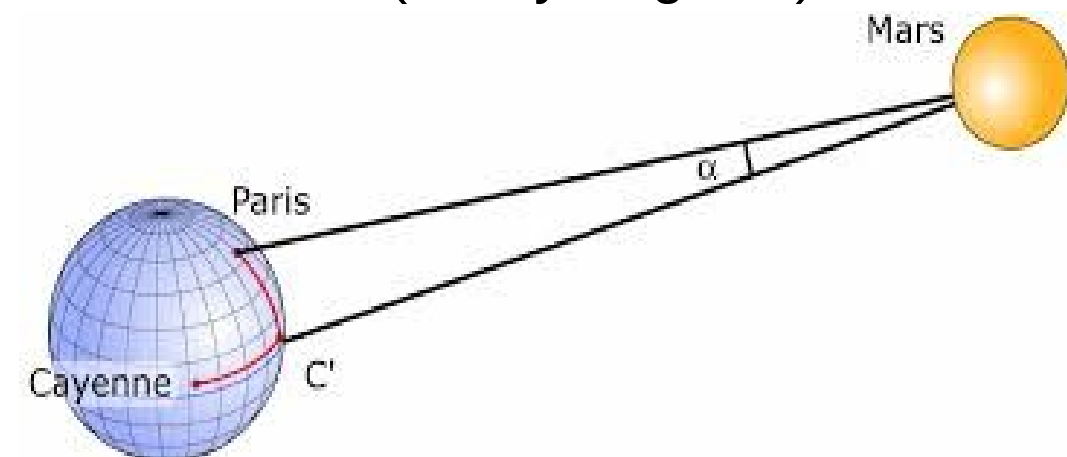
$$\tan 87^\circ = SM/ME = 19 \quad \tan(89^\circ 51' 11'') = 390$$

Ψαμμίτης (Αρχιμήδης 287-212 π.Χ.) '..ο Αρίσταρχος λέει πως ο πραγματικός κόσμος είναι πολύ μεγαλύτερος....απλανείς αστέρες και Ήλιος είναι ακίνητοι, ότι η Γη κινείται γύρο από τον Ήλιο σε κυκλική τροχιά, που στο κέντρο της βρίσκεται ο Ήλιος....

# Μέτρηση της Αστρονομικής μονάδας παράλλαξη του Άρη

D. Cassini, J. Richer (Paris, Cayenne) 9 Σεπ. 1672  $\pi_A = 24''$

J. Flamsteed (Derby England)



Παράλλαξη του Ήλιου  $\pi_{\odot} = 3/8 \pi_M$

$$AU = R / \tan(\pi_{\odot})$$

J. Kepler 3ος νόμος

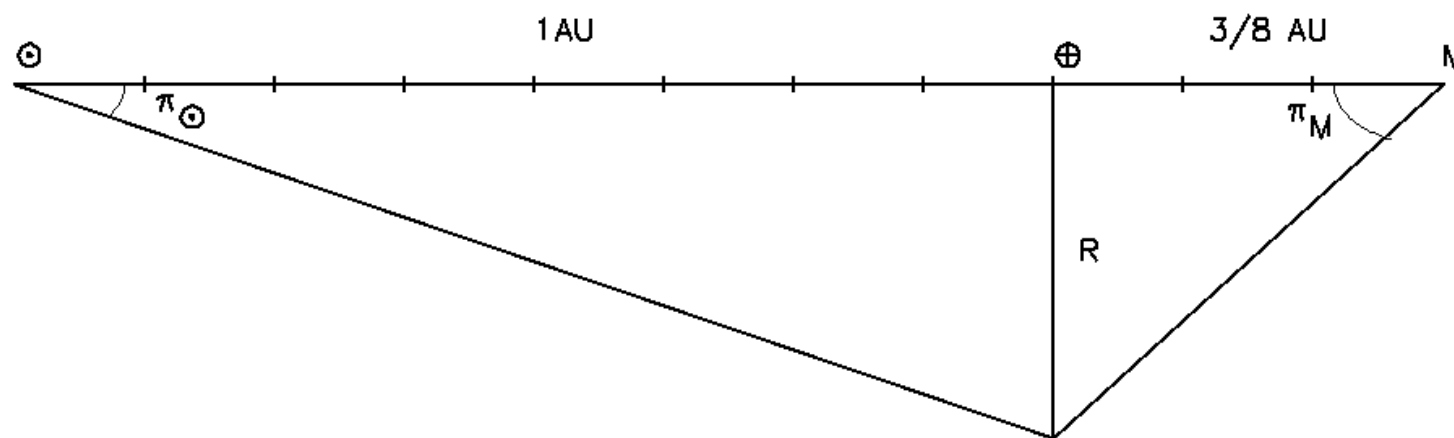
$$d^3/T^2 = GM_{\odot} / 4\pi^2 \quad (1619)$$

$$T_M = 687 \text{ μέρες}$$

$$d_M/d_E = 1.52$$

αντίθεση Άρη-Γη = 3/8 AU

$$1AU = 149.6 \times 10^6 \text{ km}$$



# Χαρακτηριστικά του Ήλιου

Φαινόμενη διάμετρος ~ 32λεπτά

Ακτίνα= 696000 km

1" αντιστοιχεί σε 725 km στην επιφάνεια

## Ηλιακή μάζα

3ος νόμος Kepler:  $a^3/T^2 = Gm_{\odot} / 4\pi^2$

$T = 3.15 \times 10^7$  s

$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  Πείραμα Cavendish (1797)

$M_{\odot} = 1.9 \times 10^{30} \text{ kg}$

Μέση πυκνότητα  $1410 \text{ kg/m}^3$

## Χαρακτηριστικά του Ήλιου

Ηλιακή σταθερά  $f = 2 \text{ cal/cm}^2/\text{min} = 1.3 \text{ kW/m}^2$

$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ Joule}$

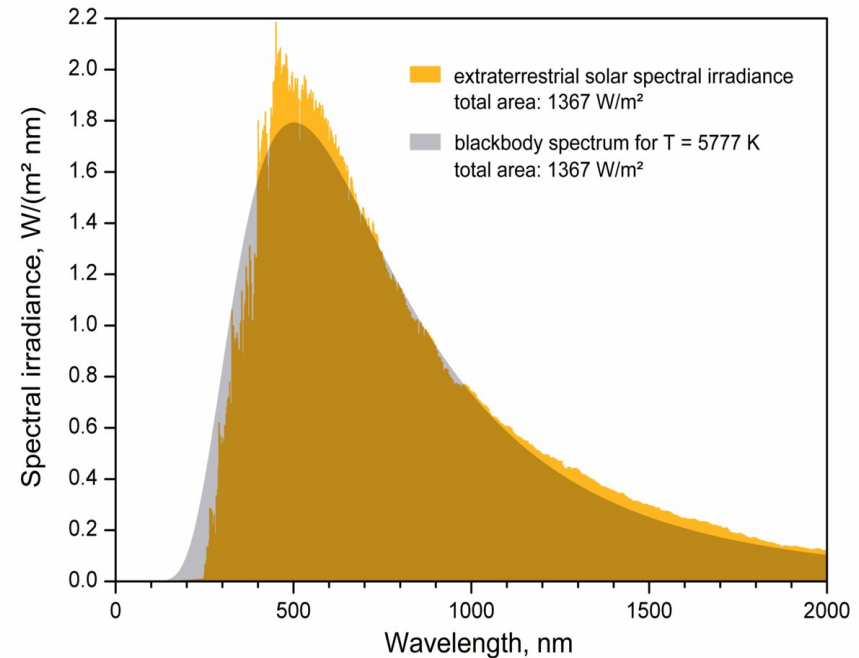
Λαμπρότητα  $L_{\odot} = 1300 * 4 \pi \text{ AU}^2 = 3.8 \times 10^{26} \text{ J/s}$   
 $= 3.8 \times 10^{33} \text{ erg/s}$

Ενεργός Θερμοκρασία  
(effective temperature)

$$L_{\odot} = 4 \pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2}/\text{s K}^{-4}$$

$$T_{\text{eff}} = 5785 \text{ K}$$



Wikipedia

**Φαινόμενο μέγεθος**  $m = -2.5 \log_{10}(f) + C = -26.73$  (C σταθ.)

(παρσέκ, η απόσταση όπου αστέρας έχει παράλλαξη 1")

Απόλυτο μέγεθος  $M = m - 2.5 \log_{10}(\text{AUpc}/10)^2 = 4.84$

# Χαρακτηριστικά του Ήλιου

## Χημική σύσταση (μάζα):

υδρογόνο	73.46%
ήλιο	24.85%
οξυγόνο	0.77%
άνθρακας	0.29%
Σίδηρο	0.16%

Μεταλλικότητα:

**X=0.73 Y=0.2485 Z=0.0134**

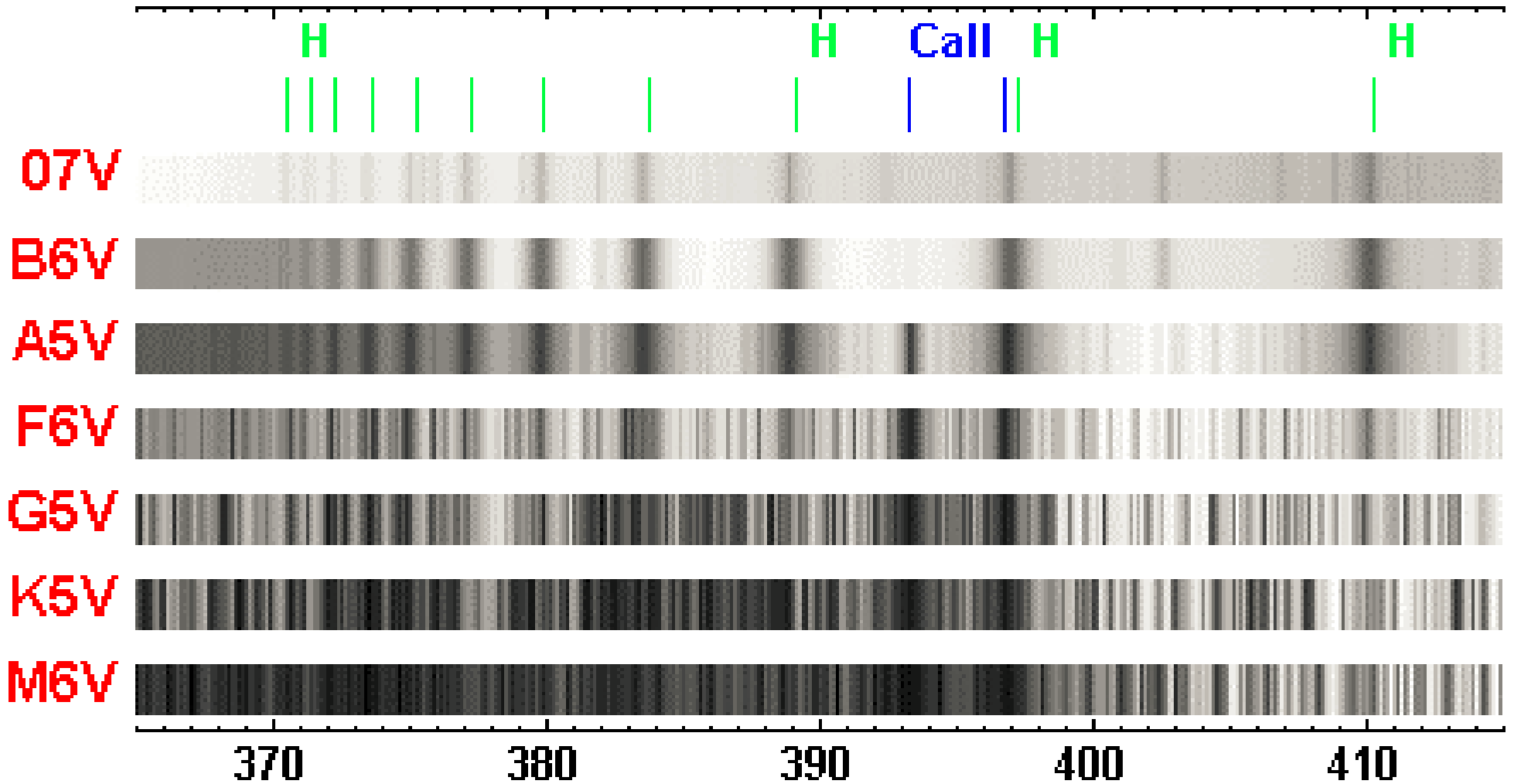
Μέτρηση από φάσμα φωτόσφαιρας, μετεωρίτες.

Το λίθιο παρουσιάζει 150 μικρότερη αφθονία στον Ήλιο απο ότι στους μετεωρίτες.

**Διαφορική περιστροφή**

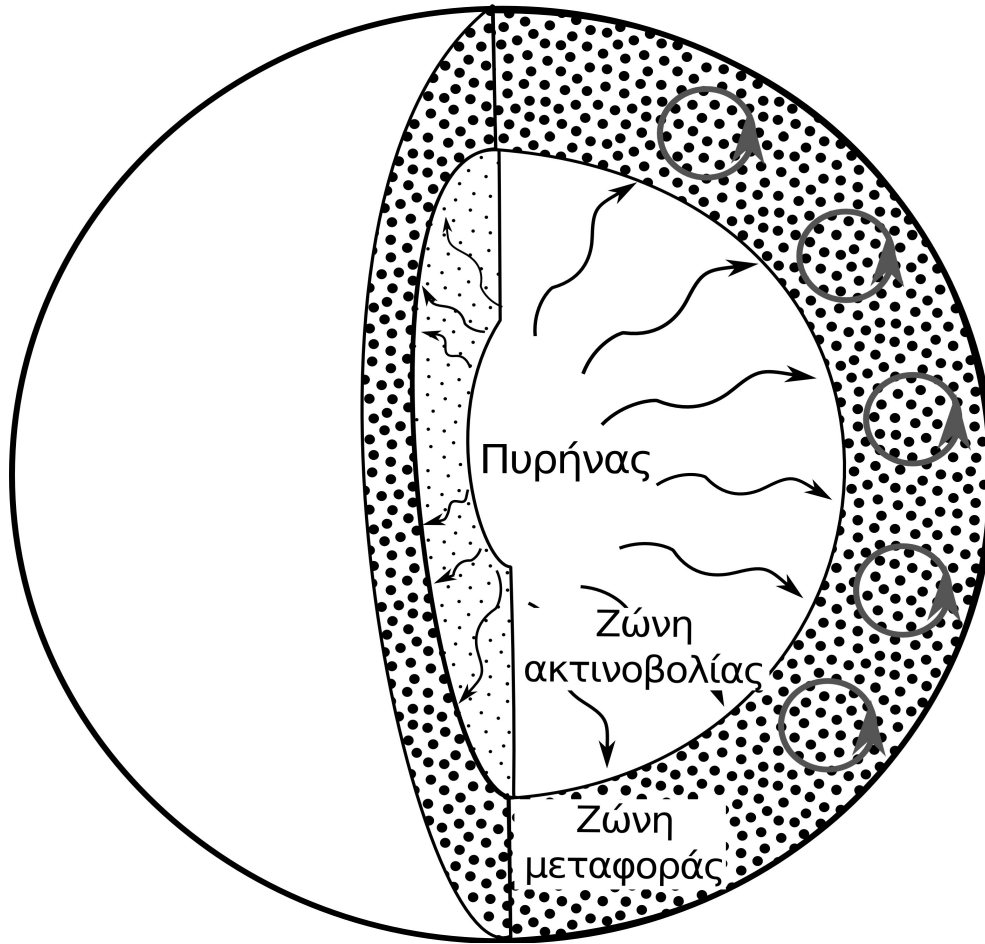
Μέση περίοδος: 26 μέρες

# Φασματική ταξινόμηση Ηλίου και Αστέρων



O	B	A	F	G	K	M ...
Φάσμα από:				ιονισ. μέταλλα	Ουδέτ. μέταλλα	μόρια
He+	He	H	H	Ca II		
30000 K			->			2500 K

# Στρώματα του Ηλιακού εσωτερικού



Αλυσσανδράκης, Νίντος, Πατσουράκος



**Εξισώσεις στο ηλιακό εσωτερικό**

**Υδροστατική πίεση**

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G M(r)}{r^2} \rho(r)$$

**Διατήρηση μάζας**

$$dM(r) = 4\pi r^2 \rho(r) dr$$

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

**Βαθμίδα θερμοκρασίας  
Λόγω ακτινοβολίας**

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_R = -\frac{3}{16\sigma} \frac{k(r) L(r)}{T^3 4\pi r^2}$$

Εξισώσεις στο ηλιακό εσωτερικό

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G M(r)}{r^2} \rho(r)$$

Υδροστατική πίεση

$$dM(r) = 4\pi r^2 \rho(r) dr$$

Διατήρηση μάζας

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

Μεταφορά ενέργειας

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \epsilon(r)$$

Εξίσωση τέλειου αερίου  
μ: μέσο μοριακό βάρος.  
 $\mu = n_p / (n_p + n_e)$

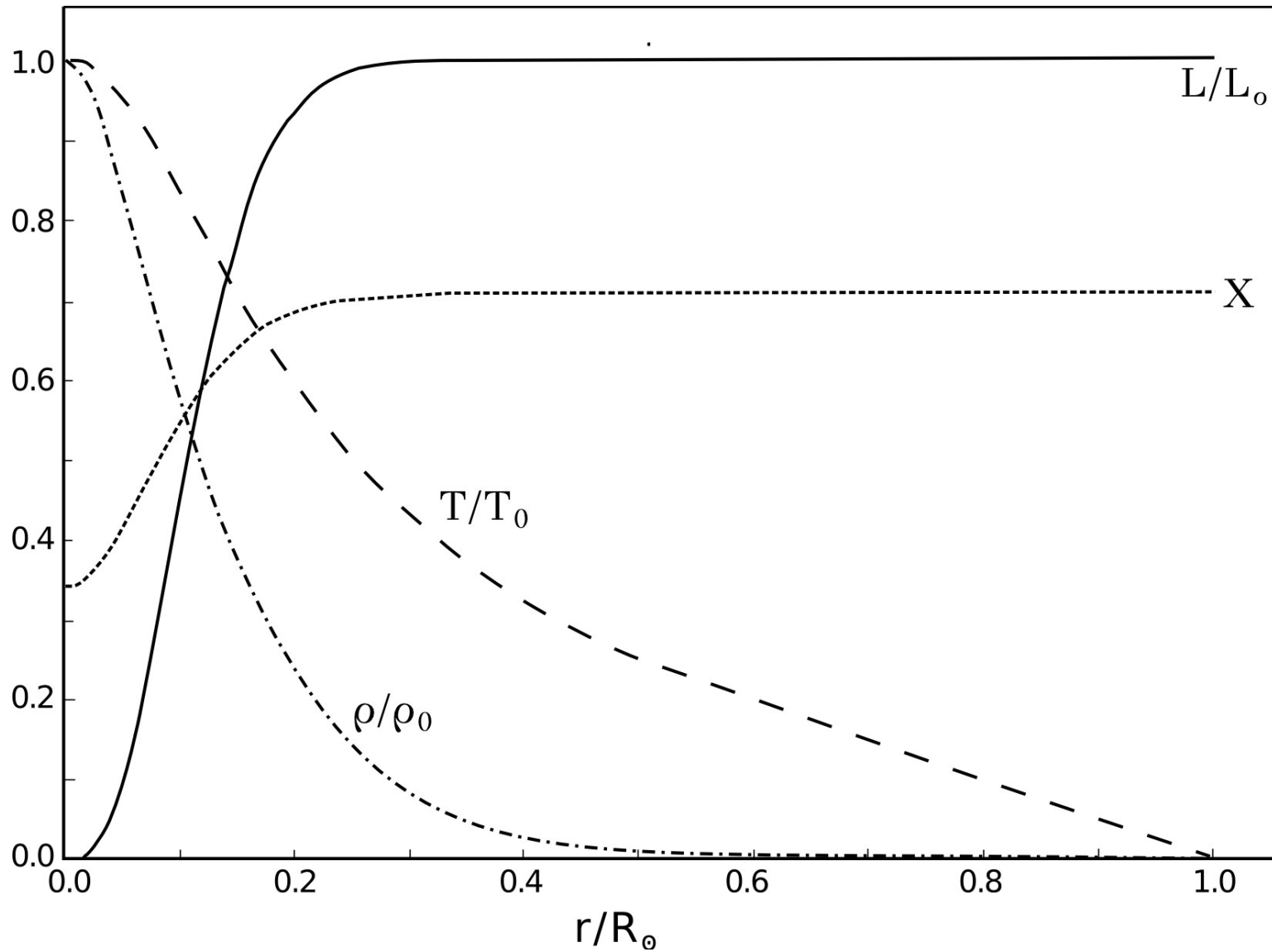
$$T = \frac{\mu m_H P}{k \rho}$$

$P = n k T$

$$\frac{P}{R_\odot} \approx g \rho \quad \frac{P}{\rho} \approx g R_\odot$$

Εκτίμηση κεντρικής θερμοκρασίας

$$T \approx \frac{\mu m_H}{k} g R_\odot \approx 1.15 \times 10^7 K$$



Αλυσσανδράκης, Νίντος, Πατσουράκος

## Τυχαίος βηματισμός φωτονίων

Ένα μονοδιάστατο αστέρι.

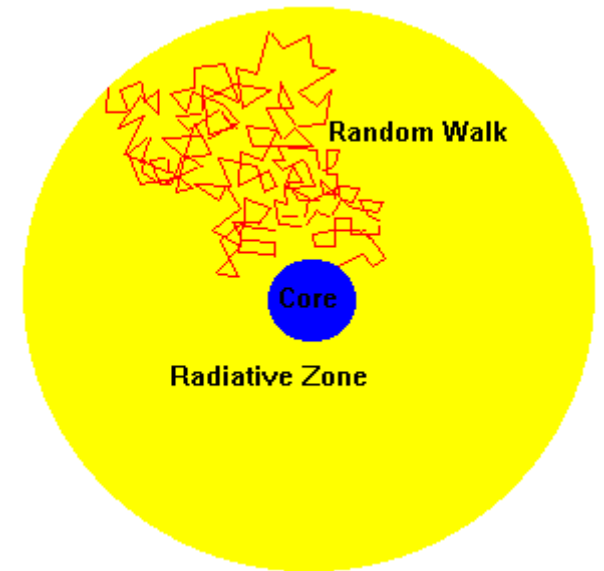
50% δεξιά και 50% αριστερά.

Μετά από  $N$  βήματα  $\langle X_N \rangle = 0$

Η τυπική απόκλιση  $\sigma^2 = \langle X_N^2 \rangle - \langle X_N \rangle^2 = \langle X_N^2 \rangle$

$$\langle X_N^2 \rangle = 0.5 \cdot \langle (X_{N-1} + L)^2 \rangle + 0.5 \cdot \langle (X_{N-1} - L)^2 \rangle = \langle X_{N-1}^2 \rangle + L^2 = N L^2$$

$L$  η μέση ελεύθερη διαδρομή (mean free path).



## Τυχαίος βηματισμός φωτονίων

$$\langle X_N^2 \rangle = 0.5 \langle (X_{N-1} + L)^2 \rangle + 0.5 \langle (X_{N-1} - L)^2 \rangle = \langle X_{N-1}^2 \rangle + L^2 = N L^2$$

Ο αριθμός βημάτων  $N$  για να καλυφθεί το μήκος  $\langle X_N^2 \rangle^{1/2}$

$$N = \langle X_N^2 \rangle / L^2 \rightarrow N = 3R_{\odot}^2 / L^2$$

$$L = 0.5 \text{ cm} \quad N = 6 \cdot 10^{22}$$

Χρόνος διαδρομής έως την επιφάνεια:  $t = N L / c = 3 R_{\odot}^2 / L c$

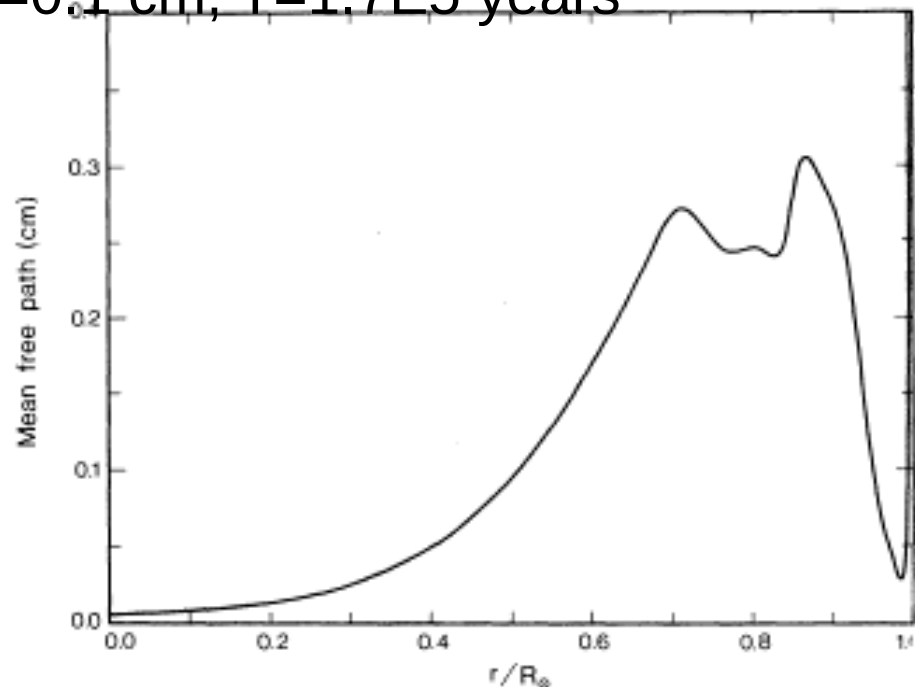
$T = 30000$  years (F. Shu 1982),  $L = 0.1$  cm,  $T = 1.7 \cdot 10^5$  years (Mitalas & Sills 1992)

Ένα φωτόνιο χρειάζεται  $\sim 1 \cdot 10^5$  χρ.  
Να εγκαταλείψει τον Ήλιο.

Για να 'αδειάσει' ο Ήλιος από ενέργεια:

$$(3/2) P c / a T^4 = 1000$$

$1000 \times 1 \cdot 10^5$  χρόνια για να σβήσει.



Πηγή ενέργειας του Ήλιου.

Ο μηχανισμός Kelvin Helmholtz (1854)

Θεώρημα Virial  $E = E_G + E_T = E_G / 2$

$$E_T = -E_G / 2$$

$$E_G = 2 GM_{\odot}^2 / R_{\odot} = 7.5E48 \text{ erg}$$

$$t_{KH} = E_G / 2L_{\odot} = 3.E7 \text{ χρόνια}$$

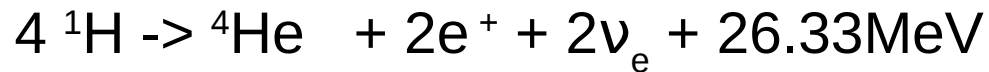
Charles Darwin 'Η προέλευση των ειδών με φυσική επιλογή'  
(1859)

Ο χρόνος για την 'απογύμνωση του Weald, νότια Αγγλία  
3.E8 χρόνια

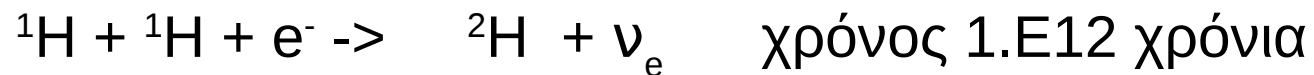
## Πυρηνικές αντιδράσεις στο κέντρο ( $<0.25 R_{\odot}$ )

H. Bethe, Critchfield 1938 Physical Review

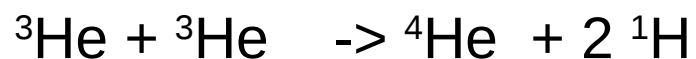
Κύκλος πρωτονίου πρωτονίου (99% της ενέργειας στον Ήλιο)



Σε ποσοστό 0.25%



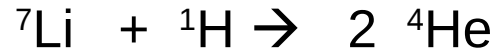
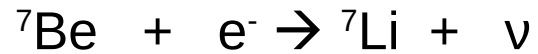
Πιο πιθανή πορεία του κύκλου (85% )



Άλλη σπάνια δυνατότητα



Τρίτη δυνατότητα



Άλλος κλάδος περιλαμβάνει Be, B, και καταλήγει στην παραγωγή  ${}^4\text{He}$

Ο κύκλος άνθρακα, Αζώτου Οξυγόνου (CNO) συμμετέχει σε 1.2%

$$\varepsilon \sim 1. \text{ mW/kg} \quad r < 1.E8 \text{ m}$$



## Απόδοση της ενέργειας

Ο πυρήνας ηλίου έχει μικρότερη ενέργεια από τα 4 πρωτόνια που το σχημάτισαν. Η διαφορά αυτή εκφράζεται:

$$m_{\text{He}} = 3.97m_p$$

$$E = 0.03m_p c^2$$

$$\text{Ο αριθμός } (4m_p - m_{\text{He}})/4/m_p = 0.007$$

Για πόσο χρόνο ο Ήλιος θα μπορούσε να 'καίει' υδρογόνο;

$$1 \text{ χρόνος} = 3.E7 \text{ sec}$$

$$\text{Χρόνος} = 0.007M_{\odot} c^2 / L_{\odot} / 3.E7 = 9E10 \text{ χρόνια}$$

## Πρωτο-αστέρας

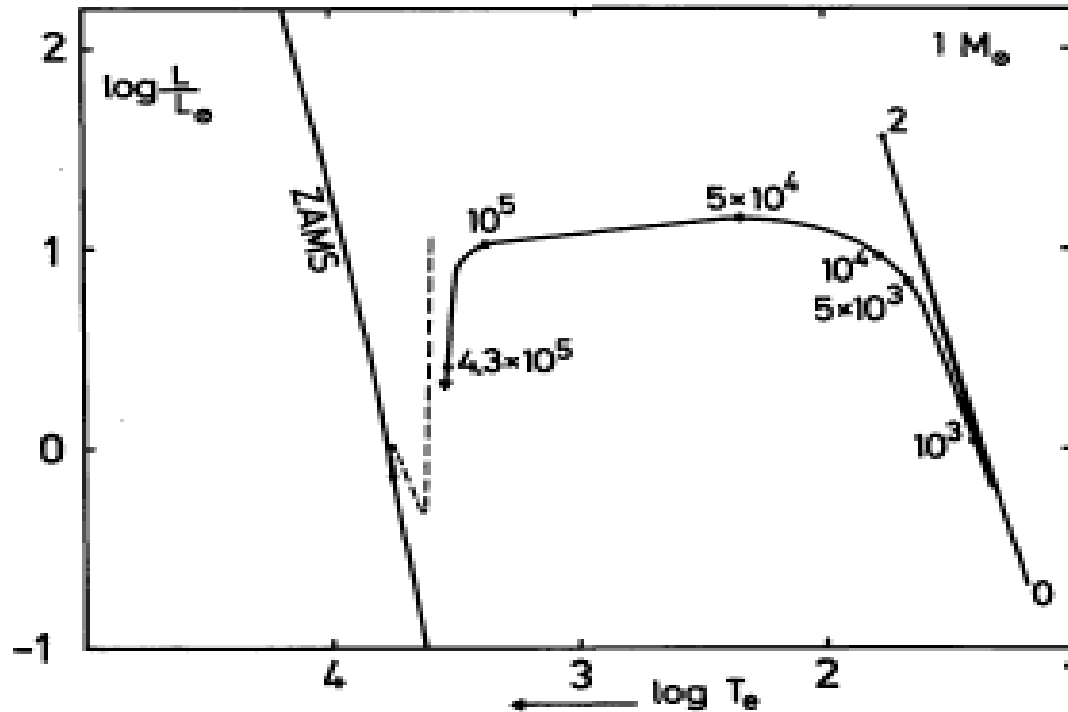


Fig. 1. Evolutionary path of a  $1 M_{\odot}$  protostar in an infrared HR diagram (solid line). The numbers indicate the time (in years) since the formation of the (final) hydrostatic core. For comparison, the evolutionary path of a conventional fully hydrostatic  $1 M_{\odot}$  pre-main sequence star is also included (broken line)

Διαταραχή προκαλεί κατάρρευση του αρχικού νέφους.

Μετατροπή βαρυτικής σε εσωτερική ενέργεια (Kelvin-Helmoltz)

$T=0$  σχηματισμός πυρήνα (όταν το αέριο γίνεται αδιαφανές)

διάρκεια της διαδικασίας  $\sim 3.E7$  χρόνια.

ZAMS Zero Age Main Sequence

Από το <https://web.njit.edu/~gary/321/Lecture13.html>

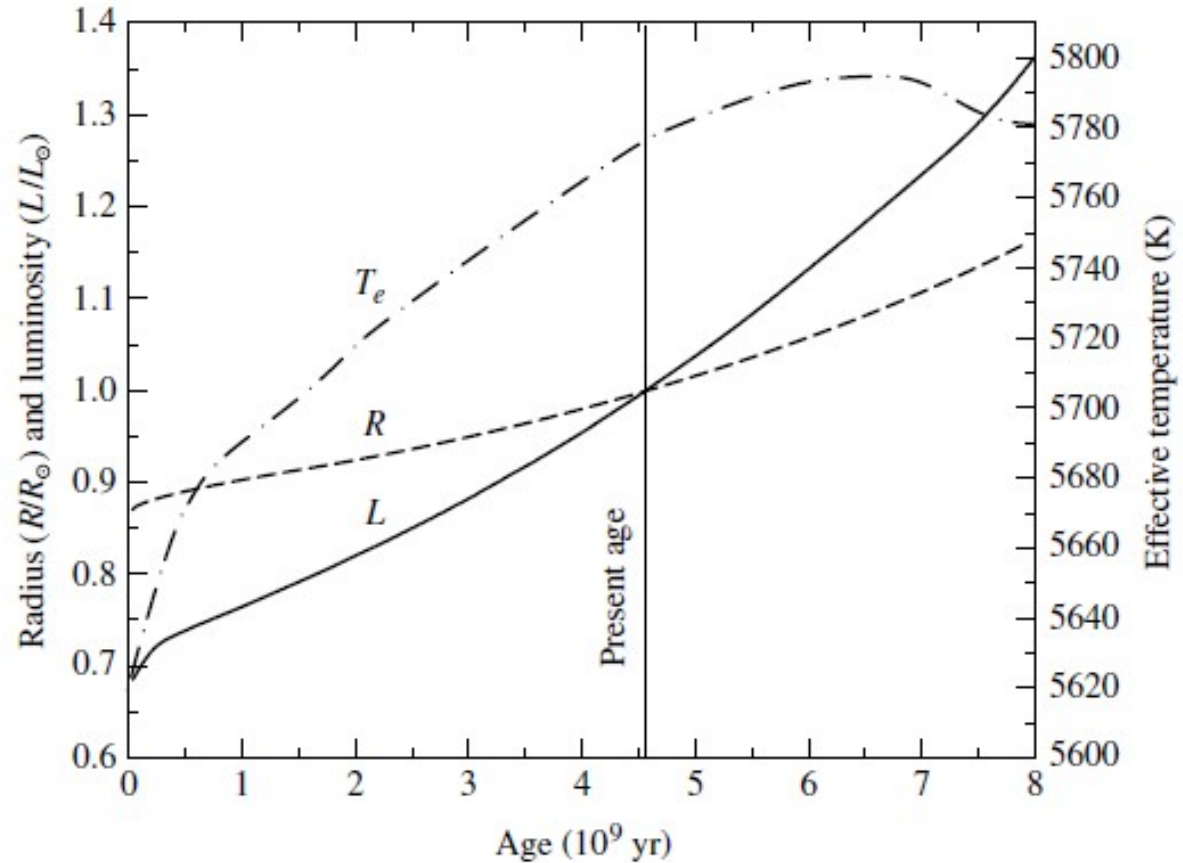
## Χρονική Εξέλιξη

Ηλικία  $4.57 \times 10^9$  χρόνια

Από τότε που είναι  
στην κύρια ακολουθία  
Αυξήθηκαν:

Λαμπρότητα 48%  
(αρχικά  $0.7L_{\odot}$ )

Ακτίνα 15%  
(αρχικά  $0.86R_{\odot}$ )



**FIGURE 11.1** The evolution of the Sun on the main sequence. As a result of changes in its internal composition, the Sun has become larger and brighter. The solid line indicates its luminosity, the dashed line its radius, and the dash-dot line its effective temperature. The luminosity and radius curves are relative to present-day values. (Data from Bahcall, Pinsonneault, and Basu, *Ap. J.*, 555, 990, 2001.)

Carrol and Ostlie An introduction to modern Astrophysics  
(2014)

# Ηλιακά νετρίνα

Νετρίνα από την μετατροπή σε νετρόνια από τα 2 πρωτόνια.

Ροή νετρίνων στην Γη  $1.E10/cm^2/s$

Ανίχνευση νετρίνων

Davis 1965 St. Dakota



1 Solar Neutrino Unit =  
1 αντίδραση/1.E36 άτομα Cl/s.

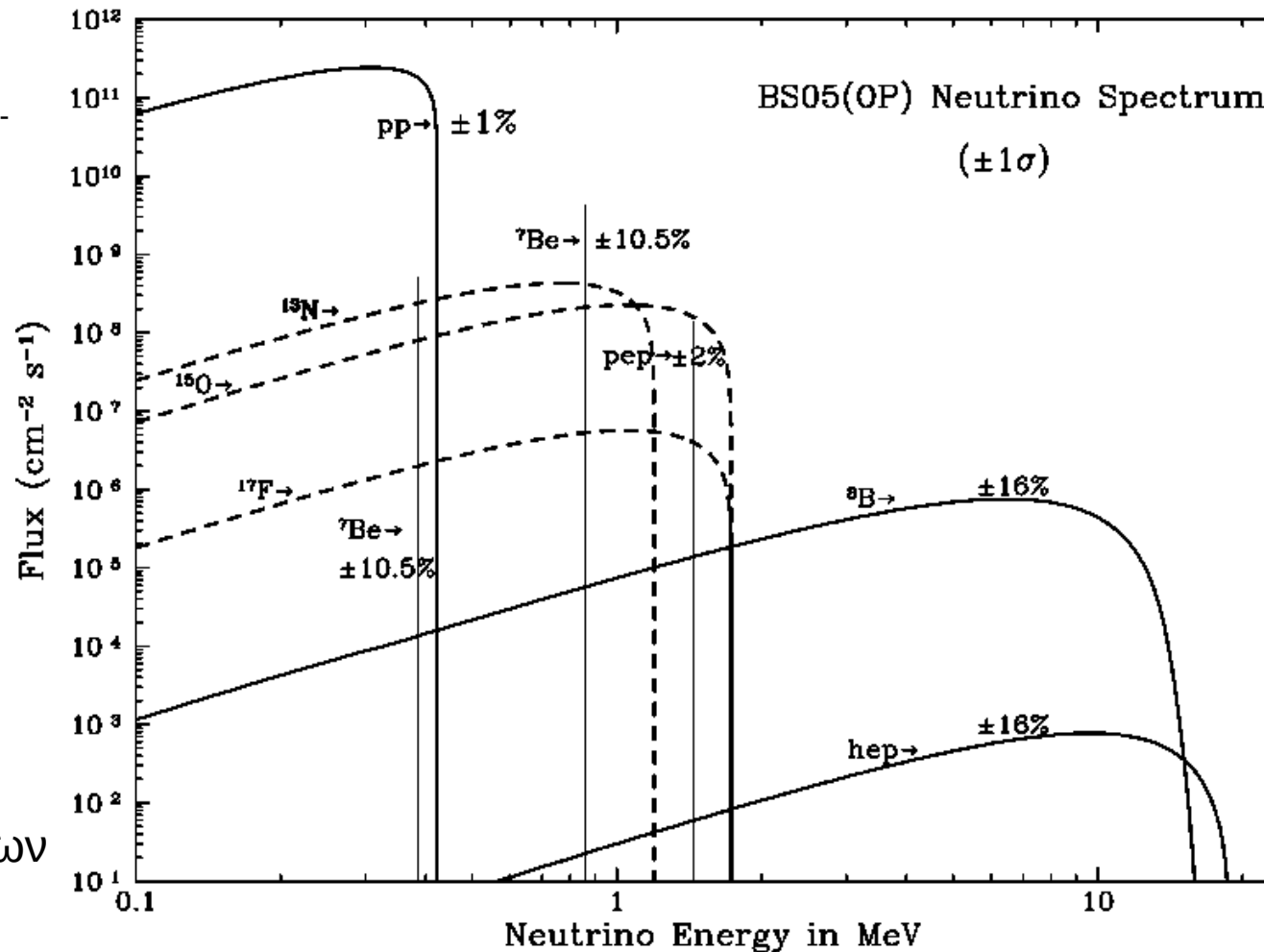
2 SNU +/-0.3

Θεωρητική τιμή 7.9 SNU

2) Kamiokande (1986-95)

Ακτινοβολία Cerenkov,  
(σκέδαση νετρίνων και  
ηλεκτρονίων)

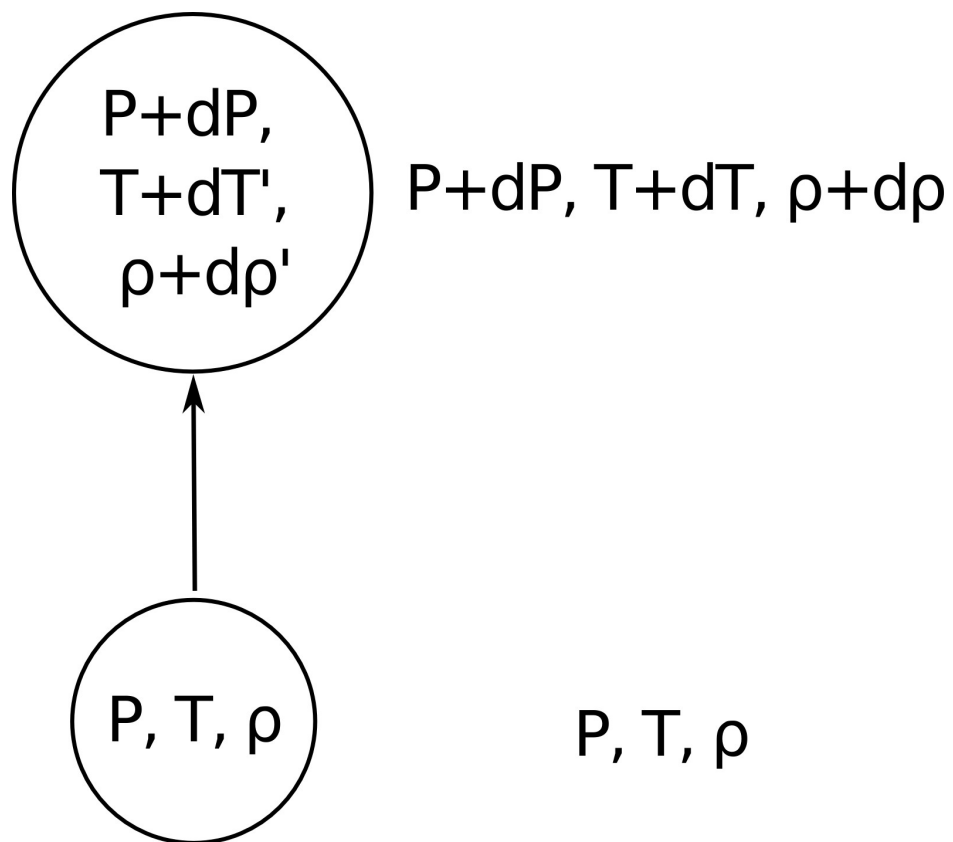
Μετάπτωση ηλεκτρονικών νετρίνων  
σε νετρίνα  $\tau$  και νετρίνα  $\mu$ .



# Ρεύματα μεταφοράς (δινορεύματα)

Συνθήκη του Schwarzschild 1906

$$d\rho' < d\rho$$



$$T = \frac{\mu m_H P}{k \rho}$$

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T}$$

$$\frac{dP'}{P} = \frac{d\rho'}{\rho} + \frac{dT'}{T}$$

Αλυσσανδράκης, Νίντος, Πατσουράκος

Ρεύματα μεταφοράς (δινορεύματα)  
Εξίσωση πιέσεων μέσα-έξω από τον όγκο

$$\frac{d\rho'}{\rho} + \frac{dT'}{T} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T}$$

Καθώς  $d\rho' < d\rho$

Το διαφορικό της θερμοκρασίας θα είναι  
μεγαλύτερο μέσα στον όγκο.

$$\frac{dT'}{T} > \frac{dT}{T}$$

Ο όγκος κινήθηκε σε χρόνο ώστε δεν έγινε  
Ανταλλαγή θερμότητας, αδιαβατικά.

$$dT' > dT$$

Η βαθμίδα θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα  
Ελέγχεται από την ακτινοβολία.

$$-\frac{dT'}{dr} < -\frac{dT}{dr}$$

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

Η σχέση πίεσης πυκνότητας για αδιαβατικό αέριο.

$$P V^\gamma = c \Rightarrow P \propto \rho^\gamma$$

Διαφορίζοντας παίρνουμε την σχέση  $dT/T \sim dP/P$

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

Με χρήση του νόμου τελείων αερίων προκύπτει η αδιαβατική βαθμίδα.

Υποθέτουμε πως το αέριο είναι υδροστατικό.

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

Στον Ήλιο η βαθμίδα ακτινοβολίας  $\gamma = (N+2)/N$  N: βαθμοί ελευθερίας

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g$$

Ιονισμός: αλλαγή του N.

Ζώνη μεταφοράς για  $r > 0.7R_\odot$

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{ad} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\mu m_H}{k} g$$

Εμφάνιση ζώνης μεταφοράς:

$\gamma = (N+2)/N$  N βαθμοί ελευθερίας.

Μονοατομικά αέρια N=3,  $\gamma = 5/3$ ,  $\gamma - 1/\gamma = 0.4$

# Ηλιοσεισμολογία

Ταλαντώσεις στην ηλιακή επιφάνεια, μέτρηση φαινομένου Doppler ( $v \sim 100 \text{ m/s}$   $T=5\text{min}$ ), πρώτη δημοσίευση Leighton 1960

Ήλιος αντηχείο, όπου δημιουργούνται στάσιμα κύματα.

Δύναμη επαναφοράς: πίεση και βαρύτητα (άνωση)

Σχέση διασποράς κυμάτων  $\omega = \omega(k)$

Ιδιοταλαντώσεις modes  
σφαιρικών αρμονικών  
Ακέραιοι αριθμοί  
 $n, l, m$  χαρακτηρίζουν  
τον αριθμό δεσμών  
nodes

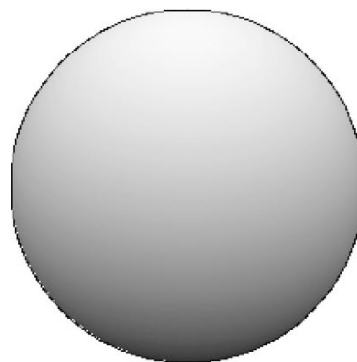
$m$ : δεσμοί στον ισημερινό

$l$ : δεσμοί στην περιφέρεια

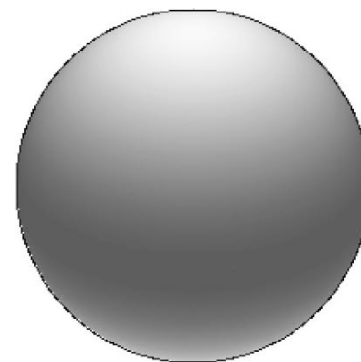
$m = \pm l$

Ταχύτητα ενός mode

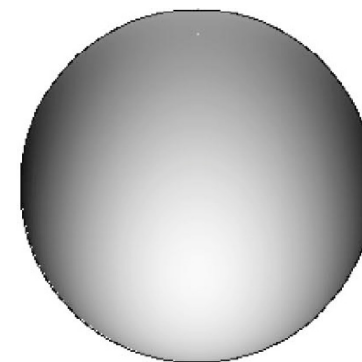
$\sim \text{mm/s}$



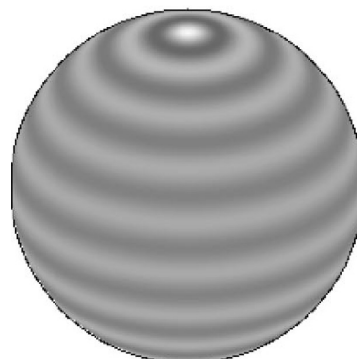
$l = 1, m = 0$



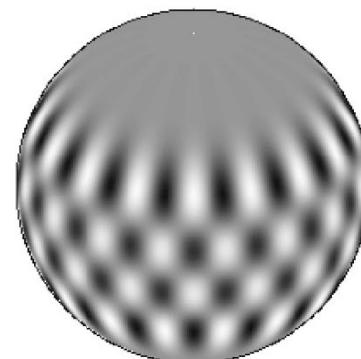
$l = 2, m = 0$



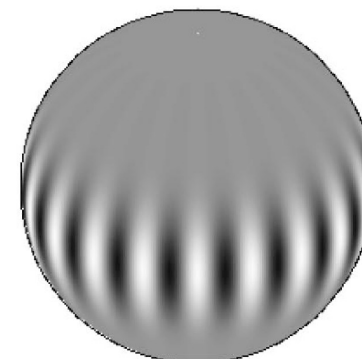
$l = 2, m = 2$



$l = 20, m = 0$



$l = 20, m = 17$



$l = 20, m = 20$

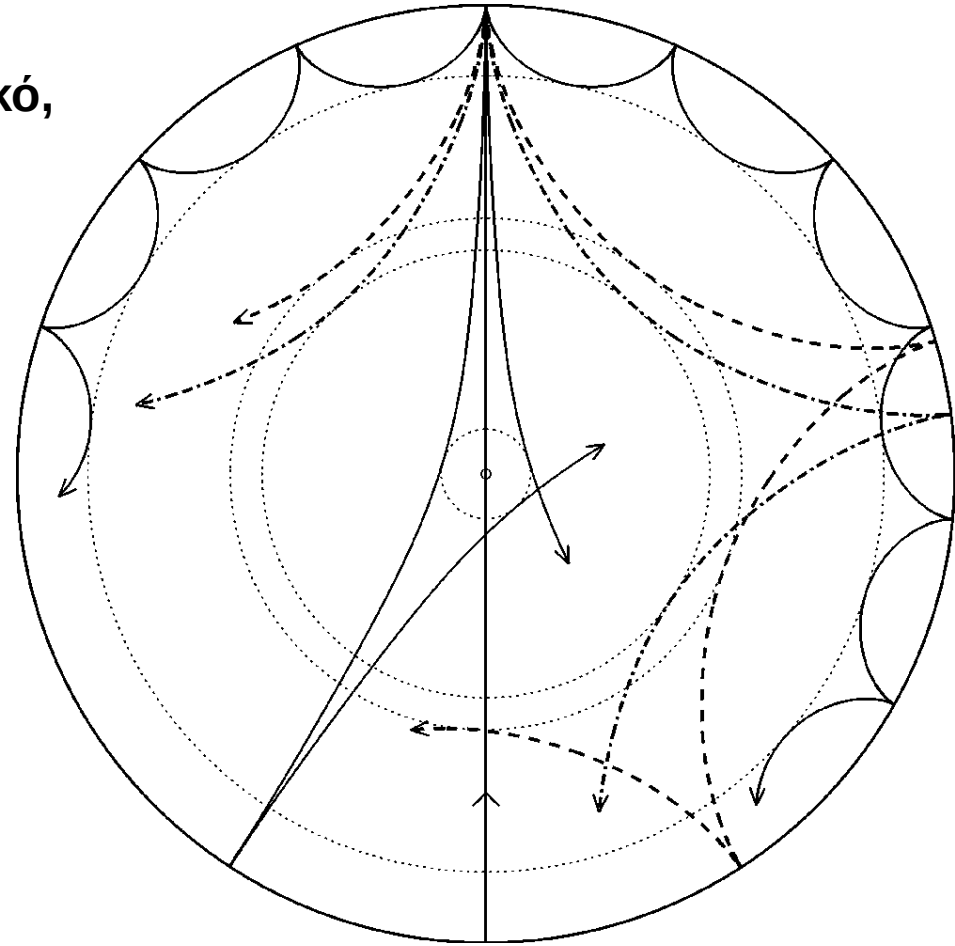
Αλυσσανδράκης, Νίντος, Πατσουράκος



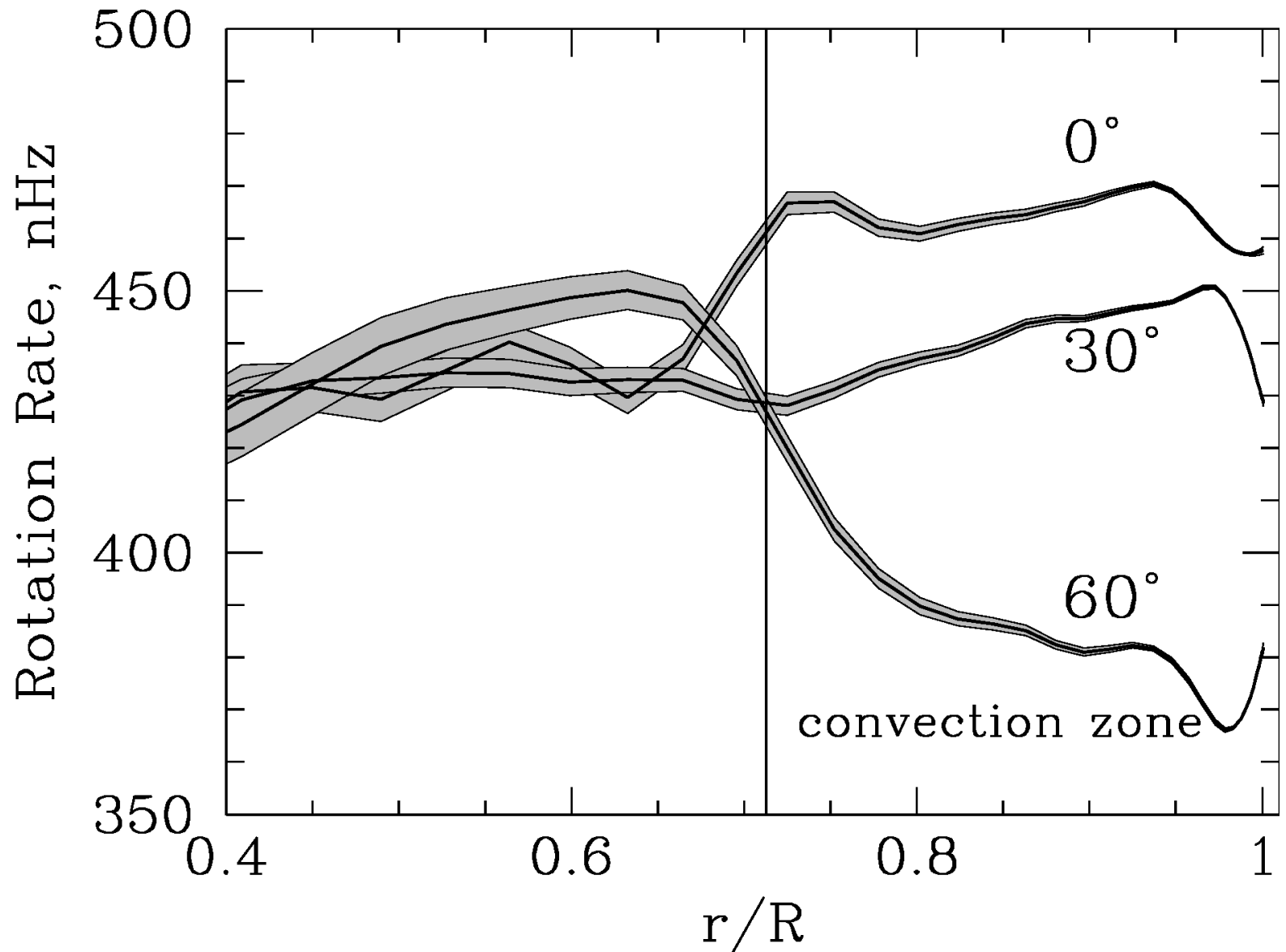
Η ταχύτητα του ήχου αλλάζει στο εσωτερικό,  
Διάθλαση κυμάτων

$$v_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma k T}{\mu m_H}}$$

Κύματα βαρύτητας αναπτύσσονται κάτω  
από την ζώνη μεταφοράς



Αλυσσανδράκης, Νίντος, Πατσουράκος



Αλυσσανδράκης, Νίντος, Πατσουράκος

Ανάλυση της διαφορικής περιστροφής στο ηλιακό εσωτερικό.  
 Η διαφορική περιστροφή περιορίζεται στην ζώνη μεταφοράς  
 Δεν υπάρχουν μετρήσεις για τον πυρήνα.



