

## Πληροφορίες για τον Ήλιο:

1) Ηλιακή σταθερά:  $F_{\odot} = 1.37 \text{ kW m}^{-2} = 1.37 \times 10^6 \text{ erg sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

2) Απόσταση Γης – Ήλιου:  $1 \text{ AU} (\sim 150 \times 10^6 \text{ km})$

3)  $L_{\odot} = 3.839 \times 10^{26} \text{ W} = 3.839 \times 10^{33} \text{ erg sec}^{-1}$

4) Διαστάσεις: Η διάμετρος του Ήλιου είναι  $32 \text{ arcmin}$ , άρα:  
 $R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ m} \approx 700000 \text{ km}.$

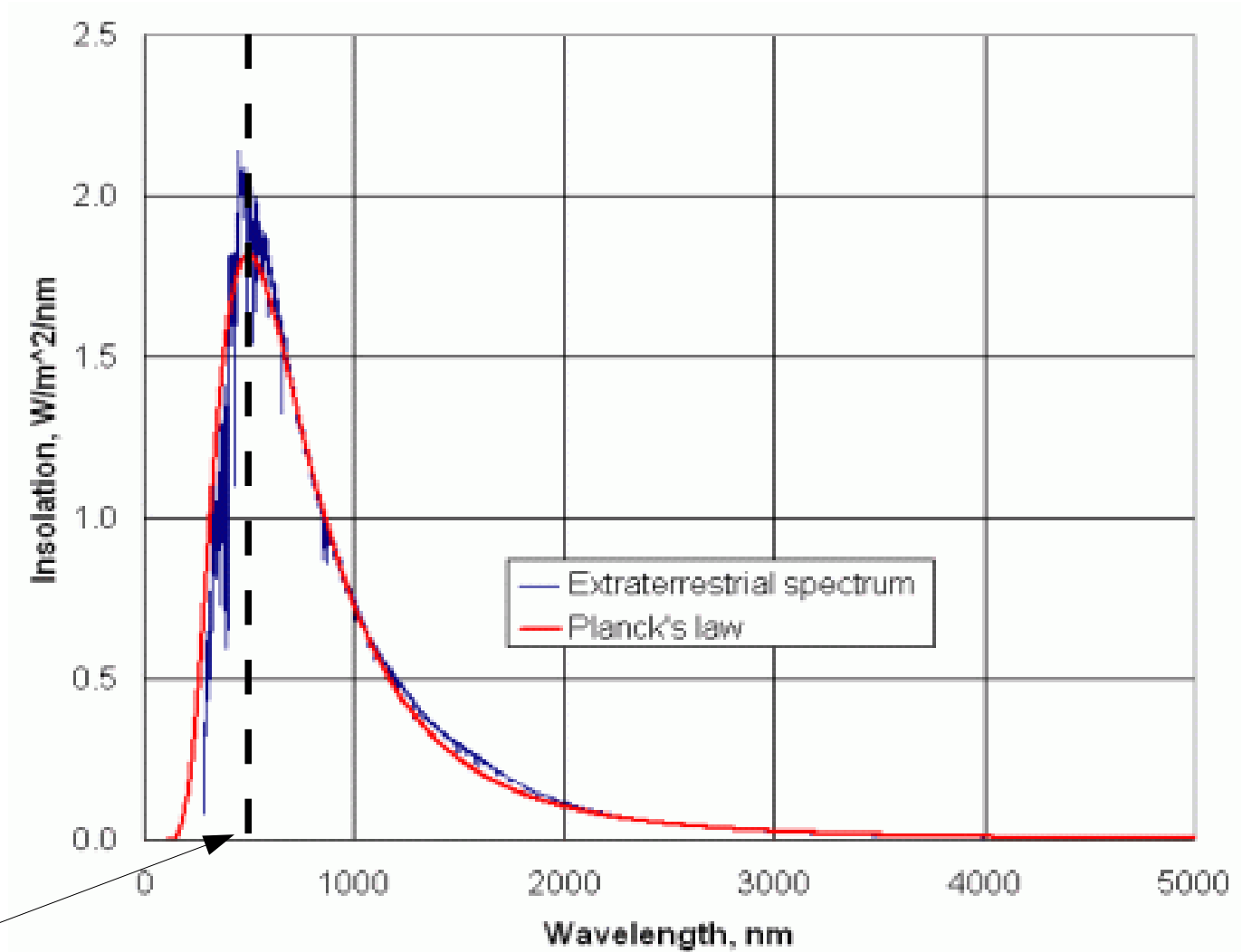
$R_{\odot} \sim 108 R_{\text{Γης}}$ , και  $1 \text{ AU} \sim 215 R_{\odot}$

5) Αν ο Ήλιος ακτινοβολεί ως μέλαν σώμα, τότε:

$$T_e = [L_{\odot} / (4\pi R_{\odot}^2 \sigma)]^{1/4}, \text{ δηλαδή: } T_e = 5800 \text{ K}.$$

# ΗΛΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ

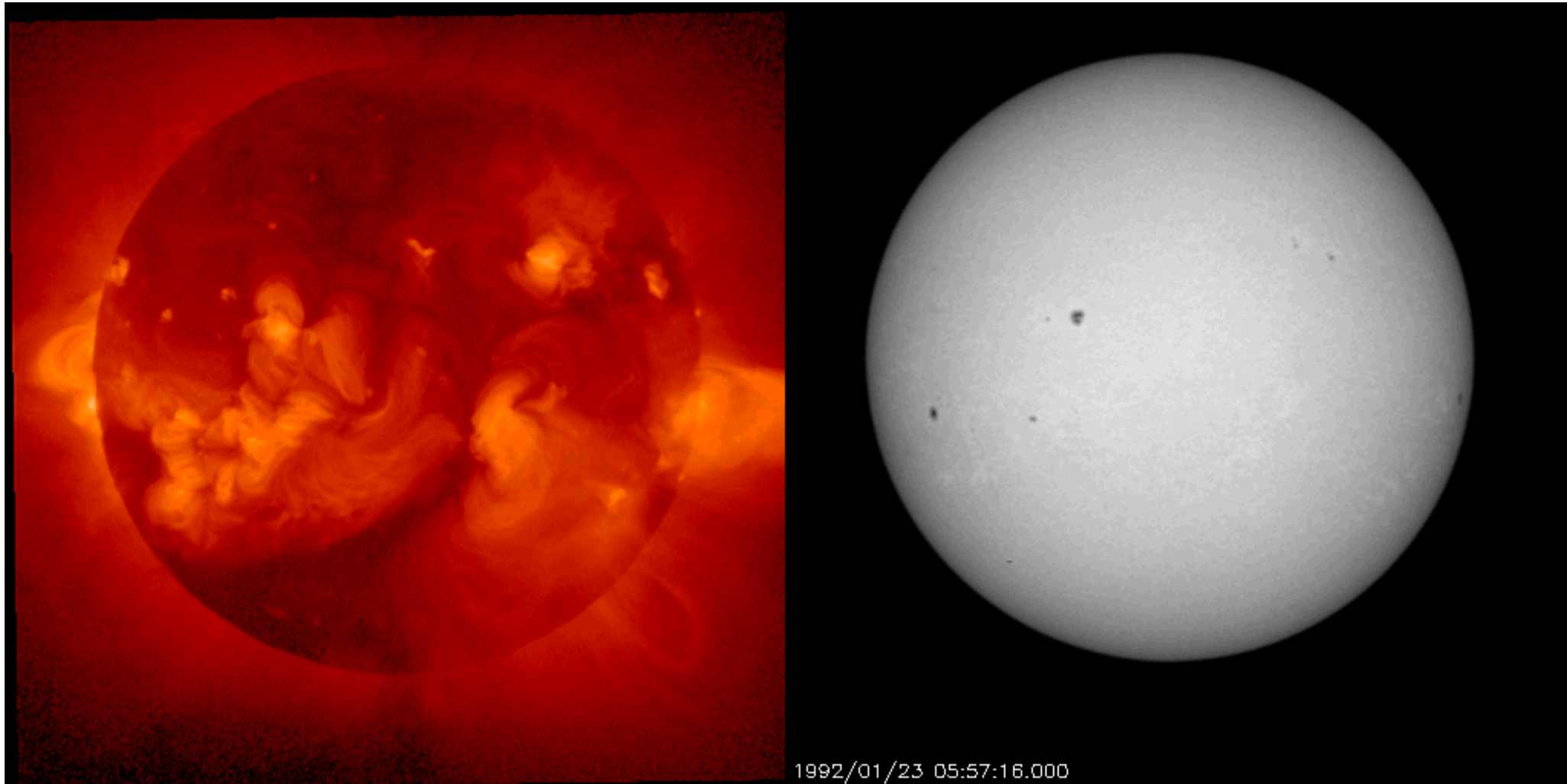
Ικανοποιητική συμφωνία Ηλιακού φάσματος και φάσματος μέλανος σώματος ( $T \sim 5800 \text{ K}$ ) στα οπτικά/υπέρυθρα μήκη κύματος – ΑΛΛΑ όχι τέλεια.



$\lambda_{\text{max}} \sim 5000 \text{ \AA}$

Ακτίνες Χ

Οπτικά μήκη κύματος



Στα οπτικά μήκη κύματος:

Γιατί το περίγραμμα του Ήλιου είναι σαφώς καθορισμένο (“καθαρό”);  
Γιατί ο Ήλιος φαίνεται πιο σκοτεινός στα άκρα του?

## Ο Ήλιος στα οπτικά μήκη κύματος.

1) Το περίγραμμα του Ήλιου στα οπτικά μήκη κύματος είναι σαφώς καθορισμένο.

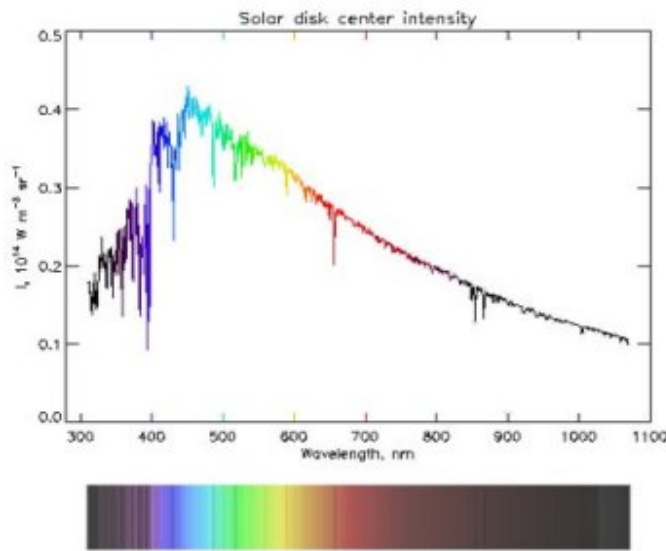
Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτόνια μήκους κύματος  $\sim 5000 \text{ \AA}$  που παρατηρούμε προέρχονται από ένα φλοιό πάχους μόνο  $\sim 600 \text{ km}$ . Αυτό το φλοιό τον ονομάζουμε “φωτόσφαιρα”.

Ως βάση της φωτόσφαιρας του Ήλιου ορίζουμε εκείνη την επιφάνεια του Ήλιου που βρίσκεται  $100 \text{ km}$  κάτω από το στρώμα όπου  $\tau_{5000\text{\AA}} = 1$ .

2) Η ένταση ακτινοβολίας από το κέντρο του Ηλιακού δίσκου είναι ισχυρότερη από εκείνη που προέρχεται από το χείλος του δίσκου (φαινόμενο “συσκότισης χείλους”).

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία αυξάνεται από την επιφάνεια προς το κέντρο του Ήλιου και το γεγονός ότι τα φωτόνια οπτικού φωτός από το κέντρο του Ηλιακού δίσκου προέρχονται από στρώματα που βρίσκονται πιο βαθιά προς στο εσωτερικό του Ήλιου.

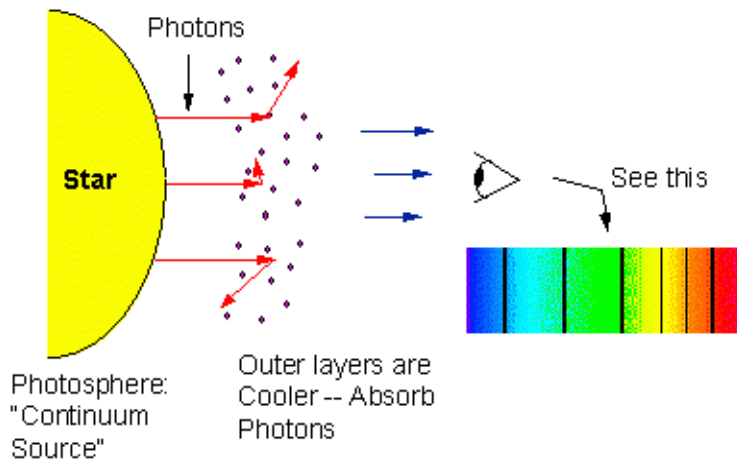
Το γεγονός ότι η θερμοκρασία δεν είναι η ίδια στο σύνολο της μάζας του Ήλιου εξηγεί και γιατί η προσαρμογή μέλανος σώματος στο παρατηρούμενο φάσμα δεν είναι τέλεια.



3) Στο φάσμα του Ήλιου (οπτικά μήκη κύματος) παρατηρούνται γραμμές απορρόφησης.

Η ύπαρξη τους είναι μία ακόμα απόδειξη ότι η θερμοκρασία στον Ήλιο:

ελλατώνεται από τα “μέσα” προς τα “έξω”



Λόγω “αληθινής απορρόφησης” και “σκέδασης (συντονισμού)” έχουμε συνολική απώλεια φωτονίων, σε συγκεκριμένα  $\lambda$ , που κινούνται κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης, σε σχέση με τα φωτόνια συνεχούς φάσματος σε γειτονικά μήκη κύματος. Άρα:

Δημιουργία γραμμών απορρόφησης

## Το εσωτερικό του Ήλιου

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία της τροχιάς της Γης μπορούμε να υπολογίσουμε τη μάζα του Ήλιου:  $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30}$  kg. Οπότε, η μέση πυκνότητα του Ήλιου είναι:

$$\rho_{\odot} \sim 1.4 \text{ gr/cm}^3$$

Όμως, 4) ο Ήλιος βρίσκεται σε κατάσταση υδροστατικής ισορροπίας (η ακτίνα του παραμένει αμετάβλητη).

Αυτό συνεπάγεται ότι η πυκνότητα και η πίεση ΔΕΝ παραμένουν σταθερές σε όλη τη μάζα του (πρέπει να αυξάνονται από τα εξωτερικά προς τα εσωτερικά στρώματα, όπως και η θερμοκρασία).

Στον Ήλιο (και για κάθε αστέρι που βρίσκεται σε κατάσταση υδροστατικής ισορροπίας) ισχύει:

$$\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{M(r)\rho(r)}{r^2} \quad (1) \text{ Εξίσωση υδροστατικής ισορροπίας.}$$

Η πίεση στο κέντρο του Ήλιου:  $P_c \sim 2.3 \times 10^{16} \text{ N m}^{-2} \sim 2.3 \times 10^{11} \text{ atm.}$

Η εξίσωση (1) μας δίνει πως αλλάζουν τα:  $P$ ,  $\rho$  και  $M$  ως συνάρτηση του  $r$  στο εσωτερικό του Ήλιου. Για να τη λύσουμε, χρειαζόμαστε τουλάχιστον 2 ακόμα εξισώσεις.

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (2) \text{ Εξίσωση "συνέχειας της μάζας"}$$

$$P(r) = nkT(r) \quad (3) \text{ Εξίσωση του ιδανικού αερίου}$$

$n_c \sim 10^{26}$  σωματίδια  $\text{cm}^{-3}$ . Οπότε, χρησιμοποιώντας την τιμή του  $P_c$  που βρήκαμε προηγουμένως:  $T_c \sim 1.5 \times 10^7 \text{ K}$ ! Άρα  $T_c \gg T_e$ , και η θερμοκρασία πρέπει αν ελαττώνεται καθώς προχωράμε από τον πυρήνα στην επιφάνεια του Ήλιου.

### ΠΩΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΕΤΑΙ Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ;

$T_e$  έχει παραμείνει  $\sim$  σταθερή για μεγάλα χρονικά διαστήματα: Λέμε ότι ο Ήλιος είναι σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Όμως ο Ήλιος ακτινοβολεί, άρα χάνει συνεχώς ενέργεια, οπότε για να παραμείνει η επιφανειακή του θερμοκρασία σταθερή θα πρέπει να παράγει ενέργεια:

Ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας = ρυθμός διαφυγής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας από την επιφάνειά του

Θα δούμε ότι η ενέργεια παράγεται στο κέντρο του Ήλιου. Επομένως, όχι μόνο θα πρέπει να παράγεται ενέργεια, αλλά θα πρέπει να μεταφέρεται κιόλας από το εσωτερικό στην επιφάνεια.

Η μεταφορά ενέργεια στο εσωτερικό του Ήλιου ( $r < 0.7R_{\odot}$ ) γίνεται μέσω ακτινοβολίας.

Τα φωτόνια μεταφέρουν ορμή ( $p = E/c$ ). Για μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $T$ , η πίεση ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$P = (\alpha/3)T^4, \text{ όπου } \alpha \equiv \text{σταθερά ακτινοβολίας} = 4\sigma/c.$$

(ΣΗΜΕΙΩΣΗ: για τον Ήλιο, και τα περισσότερα αστερια στην “Κύρια Ακολουθία”,  $P_{\text{rad}}(r) \ll P_{\text{gas}}(r)$ . Ωστόσο για στέλια μεγάλης μάζας, η πίεση ακτινοβολίας γίνεται σημαντική).

Στο εσωτερικό του Ήλιου, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, παράγονται φωτόνια υψηλής ενέργειας (ακτίνων  $X$ ), τα οποία απορροφούνται σε μικρές αποστάσεις, και επανεκπέμπονται ως φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας  $\rightarrow$  απορρόφηση ενέργειας. Αποδεικνύεται ότι:

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{3\rho(r)\kappa(r)L(r)}{16\pi ac T^3(r)r^2},$$

Χοντρικά:

$$\frac{dT}{dr} \approx \frac{\Delta T}{\Delta R} \approx \frac{(T_e - T_c)}{(R - 0)} \approx \frac{(5880\text{ K} - 1.5 \times 10^7\text{ K})}{7 \times 10^5\text{ km}} \approx \frac{20\text{ K}}{\text{km}}$$



## ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

$$\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{M(r) \rho(r)}{r^2} \quad (1) \text{ Εξίσωση υδροστατικής ισορροπίας}$$

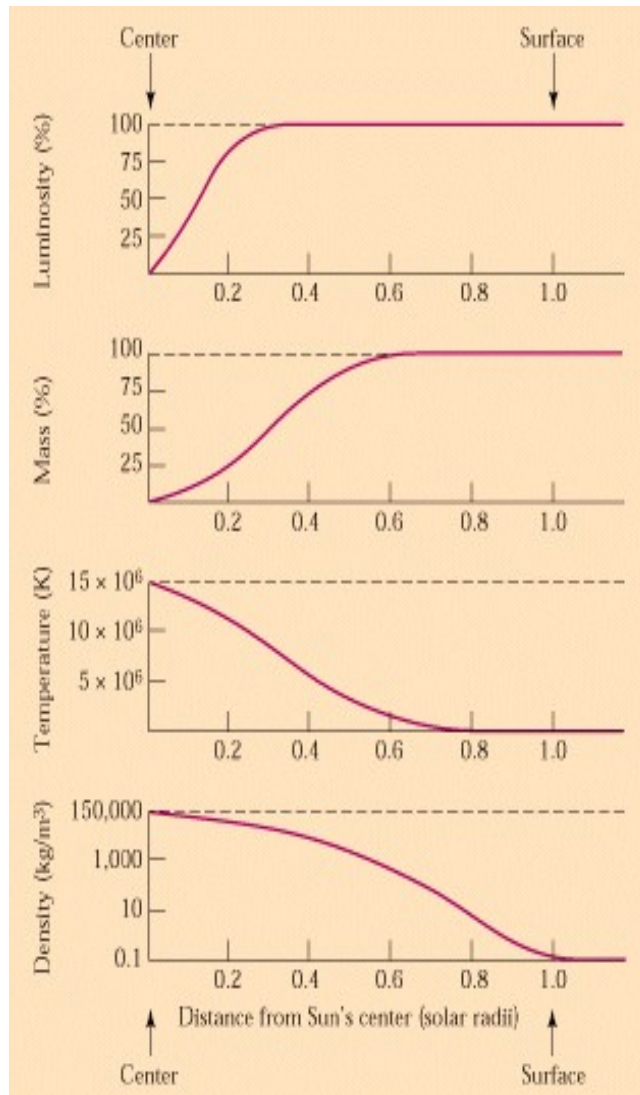
$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (2) \text{ Εξίσωση "συνέχειας της μάζας"}$$

$$P(r) = nkT(r) \quad (3) \text{ Εξίσωση του ιδανικού αερίου}$$

$$\frac{dT(r)}{dr} = \frac{-3 \rho(r) \kappa(r) L(r)}{16 \pi a c T^3(r) r^2} \quad (4) \text{ Εξίσωση μεταβολής θερμοκρασίας με την απόσταση από τον πυρήνα}$$

Και:  $\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \varepsilon(r)$ , (5) Εξίσωση παραγωγής ενέργειας στο εσωτερικό των άστρων

$\varepsilon(T)$ =ρυθμός παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα μάζας,  $\kappa(\rho, T)$ =συντελεστής απορρόφησης,  
 $\mu(T)$ =μέση μάζα σωματιδίων



Η κατανομή της λαμπρότητας, μάζας, θερμοκρασίας και πυκνότητας στο εσωτερικό του Ήλιου, ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο.