



# Αστρονομία

## Ενότητα # 9: Εξέλιξη των Αστέρων

Νικόλαος Στεργιούλας  
Τμήμα Φυσικής



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



# Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.

Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

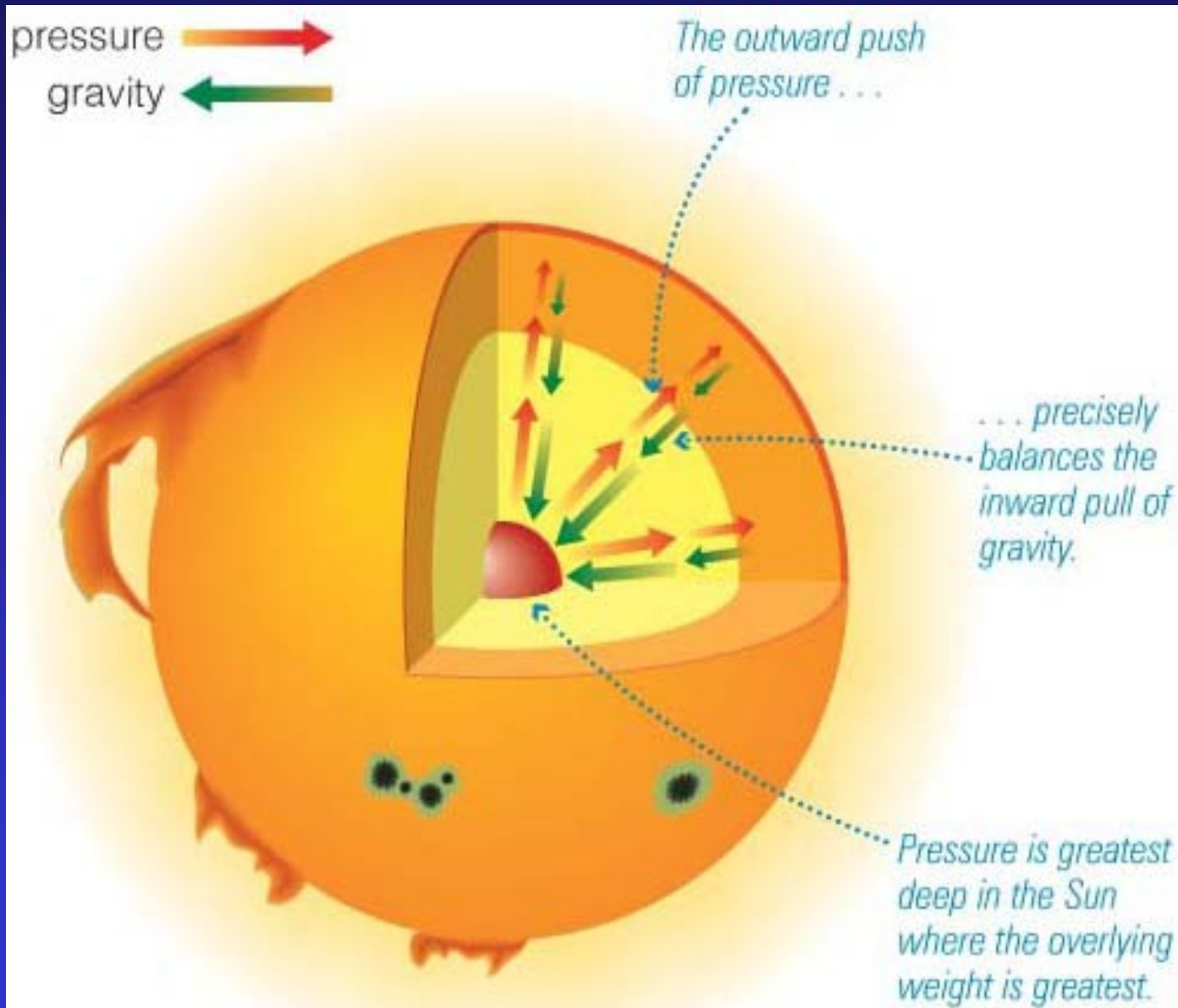


# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ

- *Ήλιος - Εξέλιξη των αστέρων*

*Ν. Στεργιούλας*

# ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ



**Εικόνα 1:**  
Υδροστατική  
ισορροπία σε έναν  
αστέρα. Η πίεση  
αντισταθμίζει τη  
βαρυτική δύναμη [1].

# ΦΩΤΟΣΦΑΙΡΑ

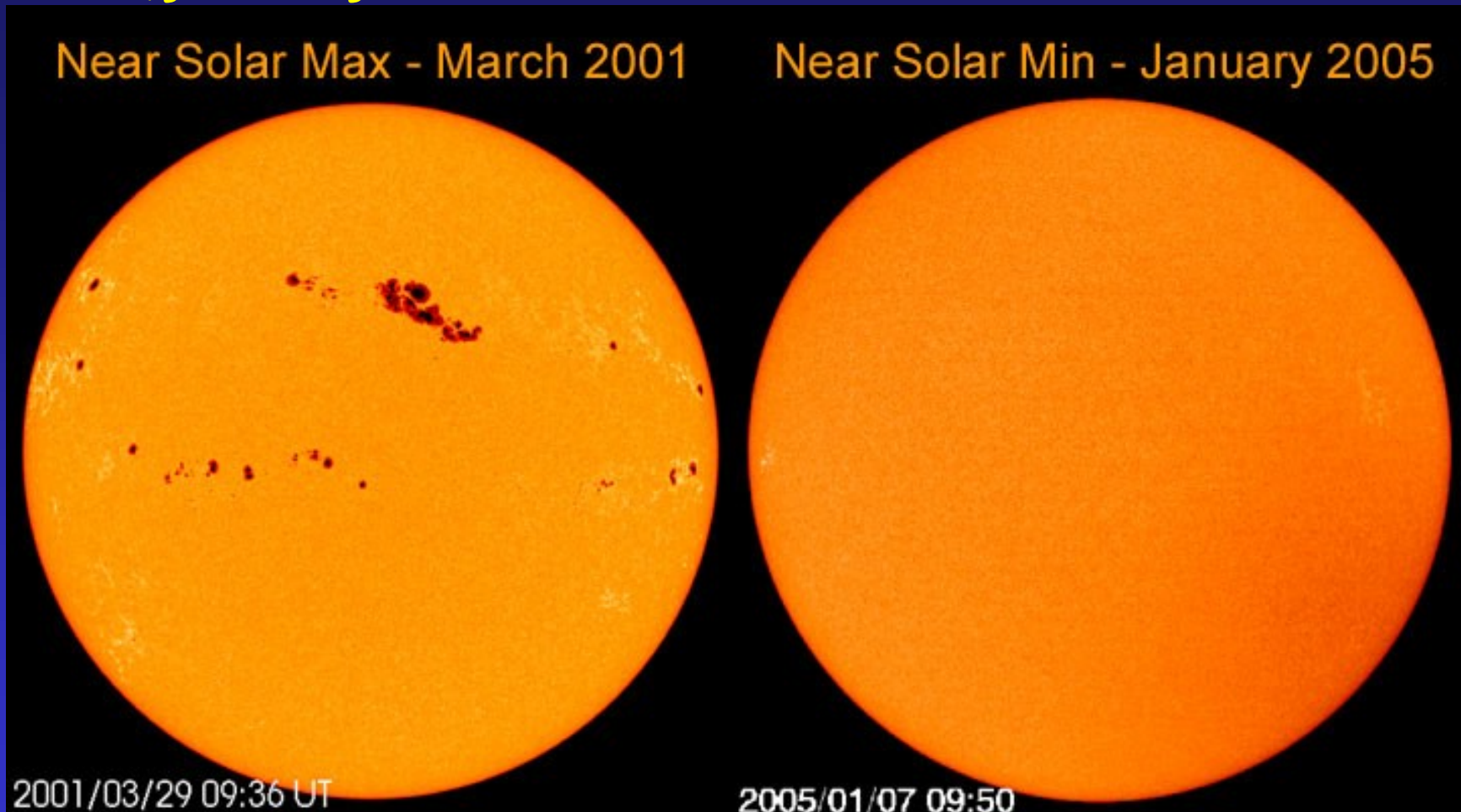
Επιφάνεια του Ήλιου με θερμοκρασία: 5800K



**Εικόνα 2:** Η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του Ήλιου είναι 5800 K. Οι κηλίδες είναι περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας (περίπου 4500 K), οι οποίες φαίνονται πιο σκούρες από την υπόλοιπη επιφάνεια του Ήλιου [2].

# ΗΛΙΑΚΕΣ ΚΗΛΙΔΕΣ

## 11-ετής κύκλος



**Εικόνα 3:** Η μεταβολή του αριθμού των κηλίδων στην επιφάνεια του Ήλιου κατά τη διάρκεια του 11-ετούς κύκλου της ηλιακής δραστηριότητας. Αριστερά, φαίνεται ο μεγάλος αριθμός κηλίδων κατά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας. Δεξιά, φαίνεται η απουσία κηλίδων κατά το ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας [3].

# ΧΡΩΜΟΣΦΑΙΡΑ

Λεπτό στρώμα με εκπομπή στη γραμμή  $H_{\alpha}$

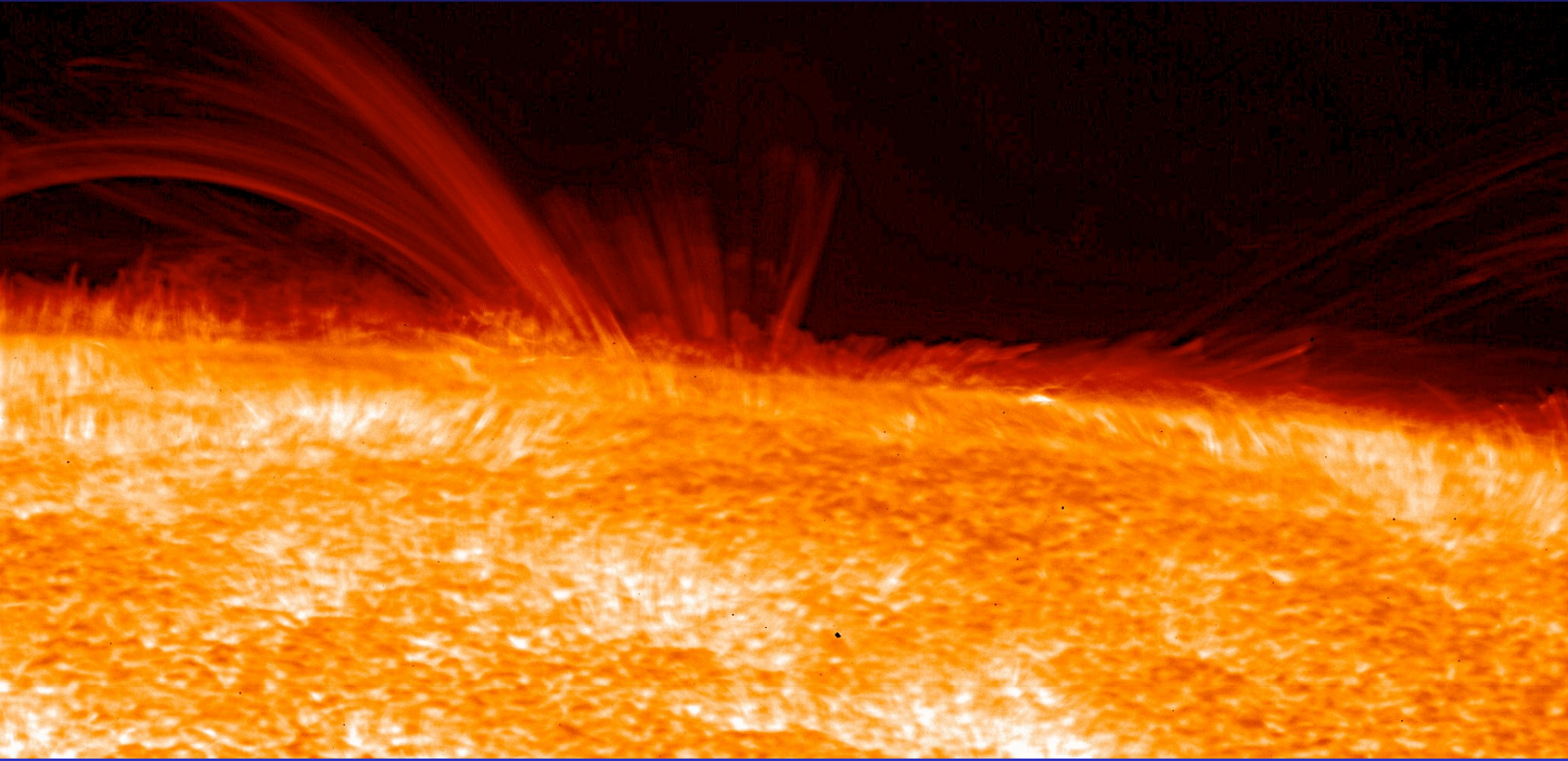
Θερμοκρασία: 10,000 K



**Εικόνα 4:** Εικόνα του Ήλιου στο υπεριώδες φως (30.4 nm). Οι ανοιχτόχρωμες περιοχές δείχνουν υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι σκούρες χαμηλές [4].



# ΧΡΩΜΟΣΦΑΙΡΑ



**Εικόνα 5:** Η χρωμόσφαιρα του Ήλιου, από εικόνα του οπτικού ηλιακού τηλεσκοπίου Hinode. Φαίνεται η δομή της χρωμόσφαιρας, που εκτείνεται πέραν της επιφάνειας κοκκίδωσης του Ήλιου, η οποία προκαλείται από την αλληλεπίδραση του πλάσματος με το μαγνητικό πεδίο [5].

# ΣΤΕΜΜΑ

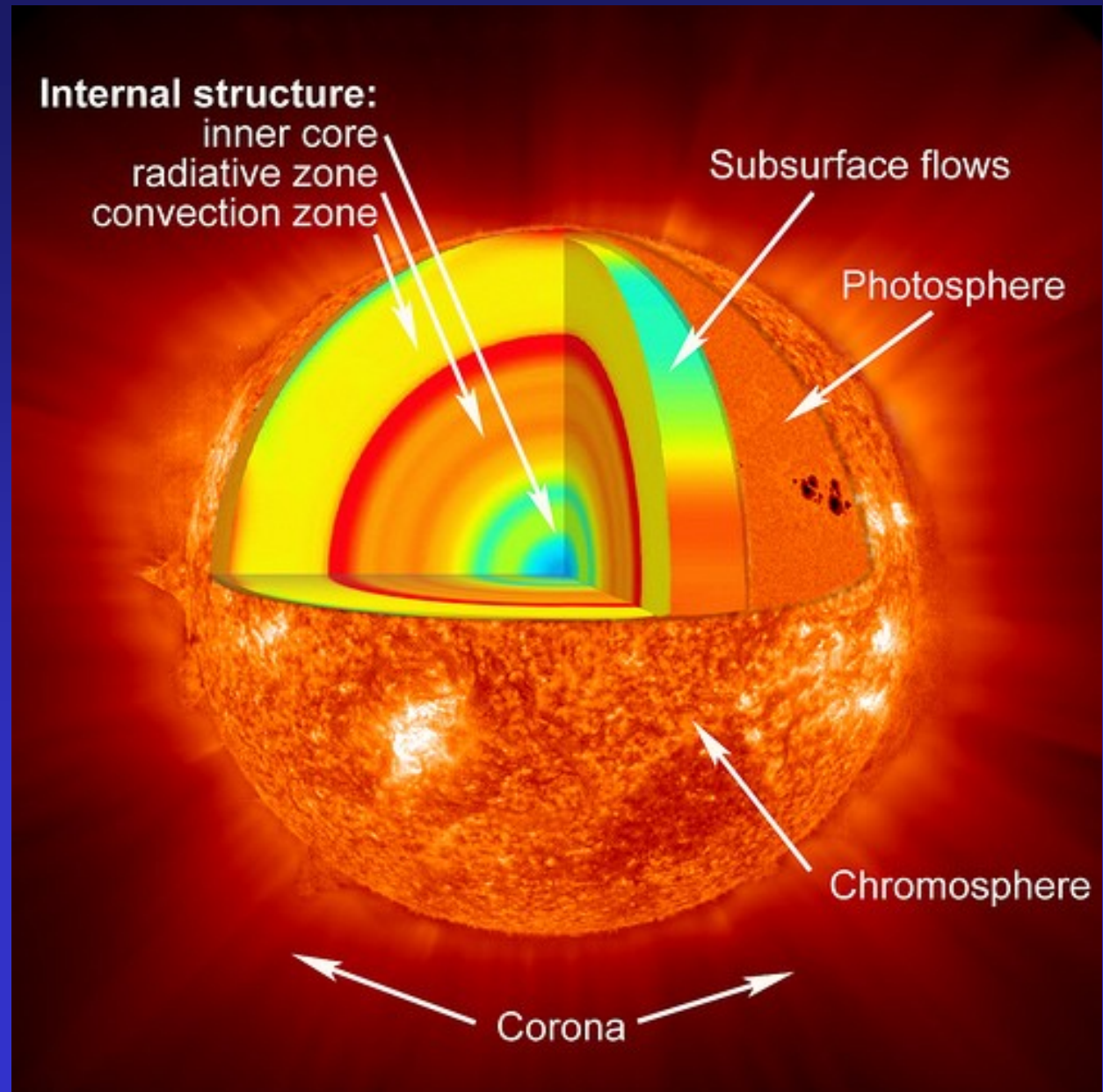
Εξωτερική περιοχή με προεξοχές

Θερμοκρασία: 2,000,000 Κ



Εικόνα 6: Το στέμμα του Ήλιου, που φτάνει σε θερμοκρασίες της τάξεως του ενός εκατομμυρίου Kelvin [6].

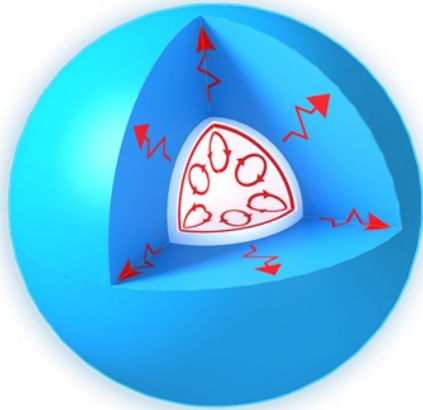
# ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ



Εικόνα 7: Η δομή του Ήλιου [7].

# ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΑΣΤΕΡΩΝ

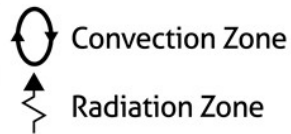
> 1.5 solar masses



0.5 - 1.5 solar masses



< 0.5 solar masses



Εικόνα 8: Μεταφορά θερμότητας σε αστέρες διαφορετικών μεγεθών. Σε αστέρες με μέγεθος της τάξης του Ήλιου γίνεται σύντηξη υδρογόνου σε ήλιο μέσω του κύκλου πρωτονίου-πρωτονίου, που δεν προκαλεί απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, η ακτινοβολία κυριαρχεί στο εσωτερικό του αστέρα, ενώ στα εξωτερικά στρώματα η θερμότητα μεταφέρεται με συναγωγή. Σε μεγαλύτερους αστέρες, ο κύκλος σύντηξης CNO δημιουργεί απότομη αύξηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους, κι έτσι υπάρχει συναγωγή στα εσωτερικά τους στρώματα και ακτινοβολία στα εξωτερικά [8].

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ

$M_{\odot}$	$2 \times 10^{33}$ g
$R_{\odot}$	700.000 km
$T_{\text{eff}}$	5800 K
$L_{\odot}$	$4 \times 10^{33}$ erg/s
t	$5 \times 10^9$ y

$$10^{-1} M_{\odot} < M < 150 M_{\odot}$$

$$10^{-2} R_{\odot} < R < 10^3 R_{\odot}$$

$$2 \times 10^3 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 10^5 \text{ K}$$

$$10^{-4} L_{\odot} < L < 10^6 L_{\odot}$$

# ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΜΑΖΑ

Κατώτερο όριο ( $0.08 M_{\odot}$ ):

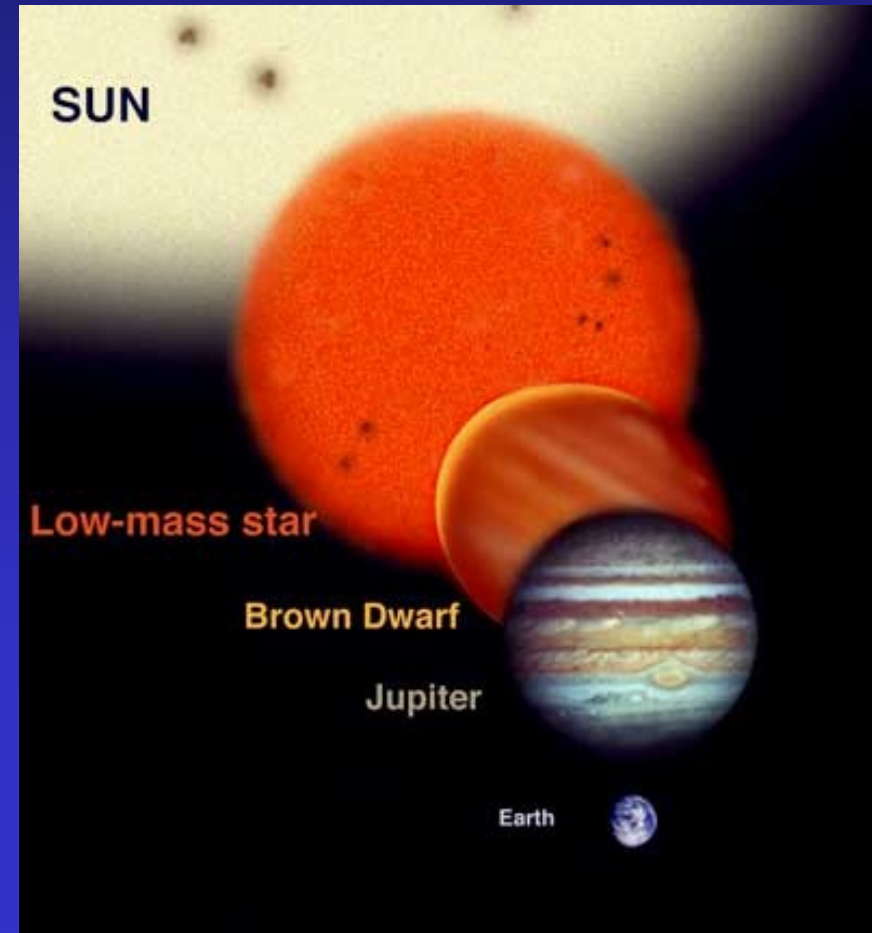
Η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει την κρίσιμη θερμοκρασία για έναρξη των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων.

Η ισορροπία διατηρείται αρχικά λόγω θερμικής πίεσης.

Όταν ψυχθεί αρκετά:

-> πίεση αερίου εκφυλισμένων ηλεκτρονίων

-> Καφέ νάνοι.



Εικόνα 9: Σχετικό μέγεθος καφέ νάνου, σε σύγκριση με το Δία, τον Ήλιο και τη Γη [9].

# ΑΝΩΤΕΡΗ ΜΑΖΑ

Ανώτερο όριο ( $\sim 150 M_{\odot}$ ):

Η πίεση της παραγόμενης ακτινοβολίας υπερβαίνει τη βαρύτητα και τα εξωτερικά στρώματα αποτινάσσονται.

Η **οριακή φωτεινότητα Eddington** για έναν αστέρα είναι

$$L_{\text{ed}} = 4\pi GMc / (0.2(1+X)) = 2.5 \cdot 10^{38} / (1+X) M/M_{\odot} \text{ erg/s}$$

όπου  $X$  = περιεκτικότητα σε υδρογόνο.

Η σχέση μάζας-φωτεινότητας για βαρείς αστέρες είναι

$$L = 3 (M/M_{\odot})^{2.91} L_{\odot}$$

οπότε για την οριακή φωτεινότητα βρίσκουμε

$$M_{\text{max}} \sim (2 \times 10^4 / (1+X))^{0.52} M_{\odot}.$$

$$\text{Με } X=0.7 \rightarrow M_{\text{max}} \sim 140 M_{\odot}$$

# ΔΥΟ ΠΛΗΘΥΣΜΟΙ ΑΣΤΕΡΩΝ

	Πληθυσμός I	Πληθυσμός II
Χημική σύσταση	70% H 28% He 2% μέταλλα	70% H 29.9% He <0.1% μέταλλα
Ηλικία	νεότεροι	παλαιότεροι
Κατανομή στο γαλαξία μας	Σπείρες, δίσκος, μη ομογενής	Σφαιρική, ομογενής



# ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΣΤΕΡΩΝ



**Star-Birth Clouds · M16**

HST · WFPC2

PRC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

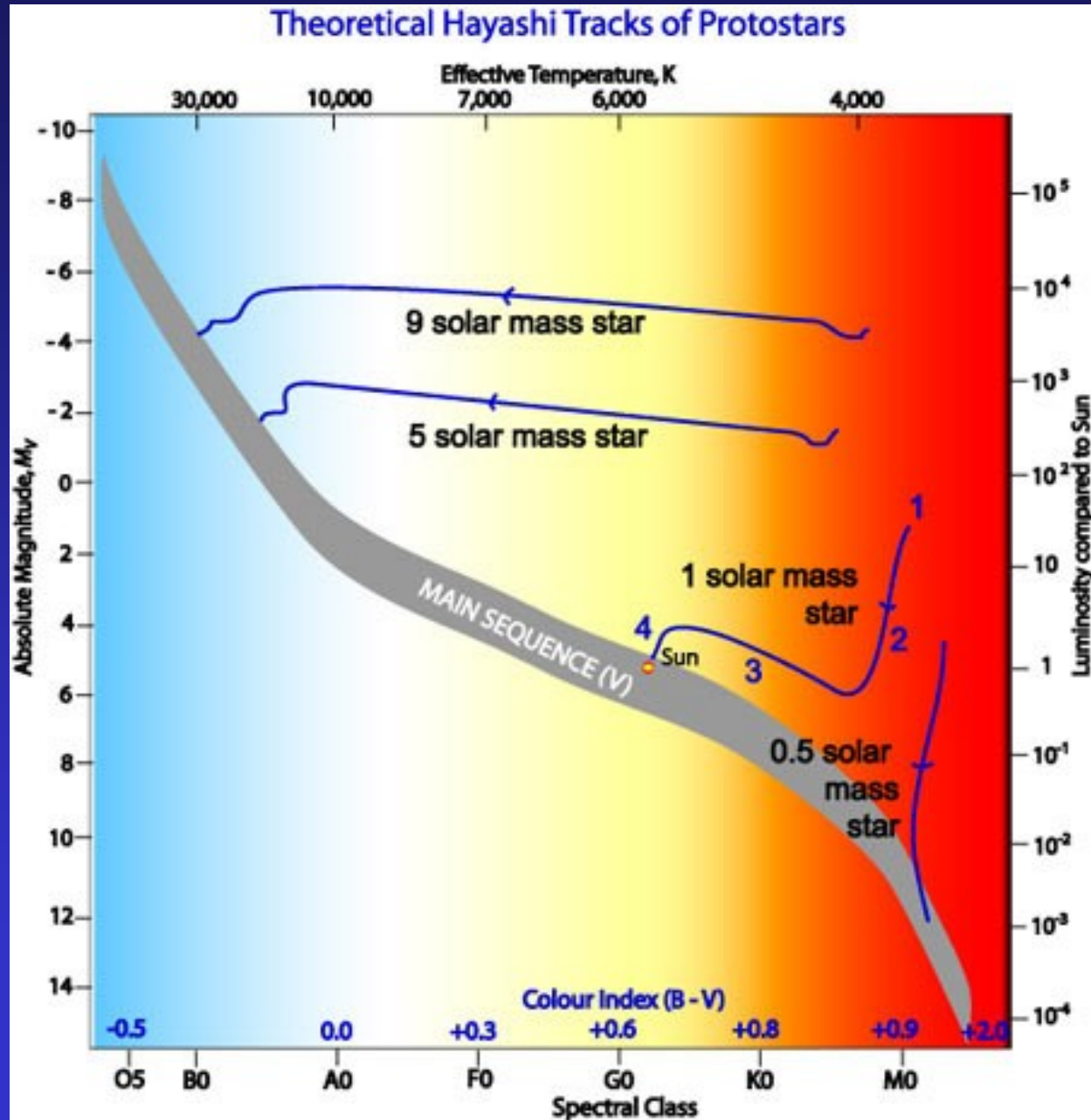
**Εικόνα 10:** Το νεφέλωμα του Αετού, μια περιοχή δημιουργίας νέων αστέρων, σε απόσταση 7000 ετών φωτός [10].

# ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΣΤΕΡΩΝ



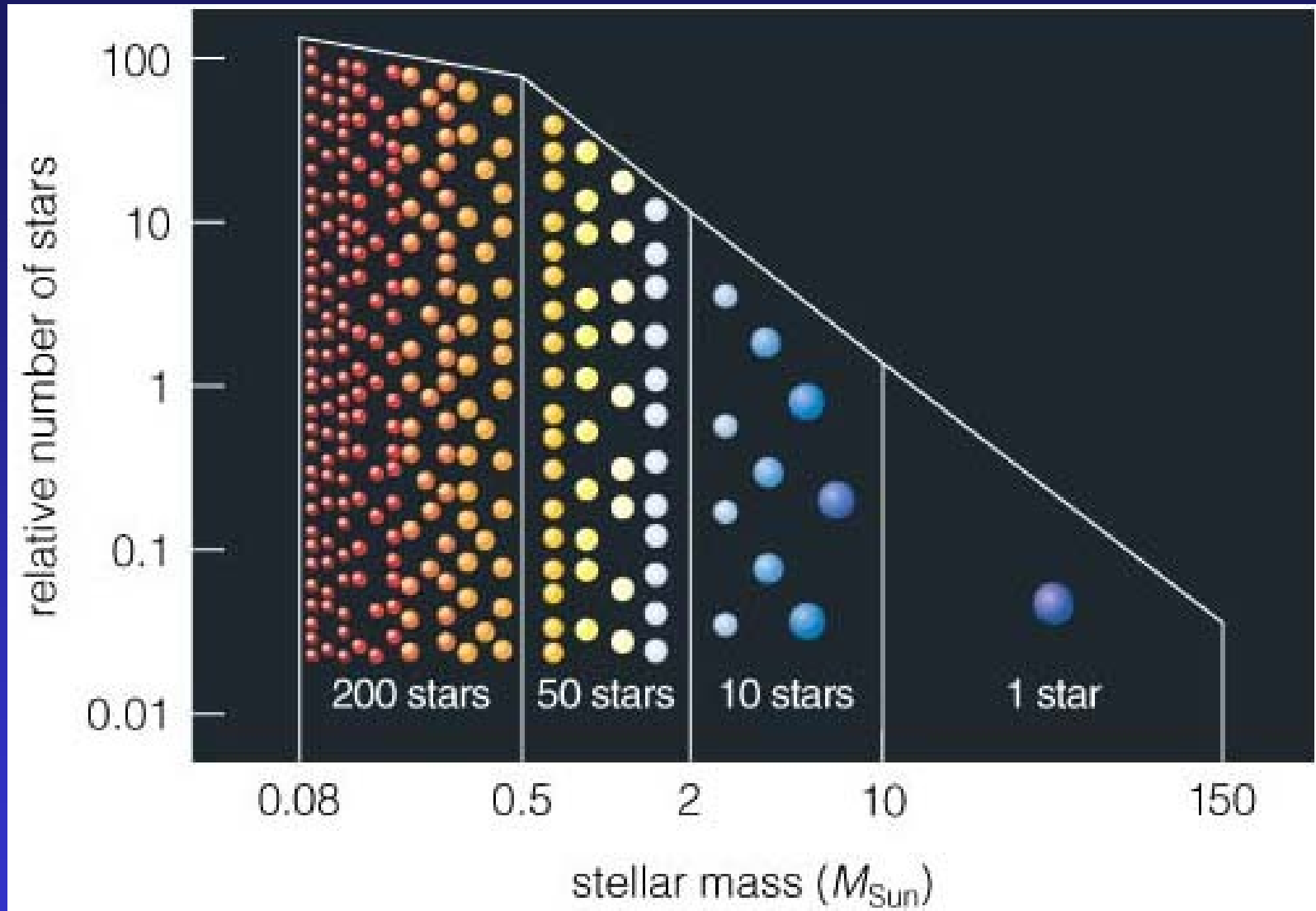
Εικόνα 11: Εικόνα της περιοχής M17, τύπου H II. Η εικόνα αποτελεί σύνθεση τριών διαφορετικών εικόνων [11].

# ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΩΤΟ-ΑΣΤΕΡΩΝ



Εικόνα 12: Εξέλιξη πρωταστέρων, από την αρχή του σχηματισμού του μέχρι την κύρια ακολουθία, στο διάγραμμα HR [12].

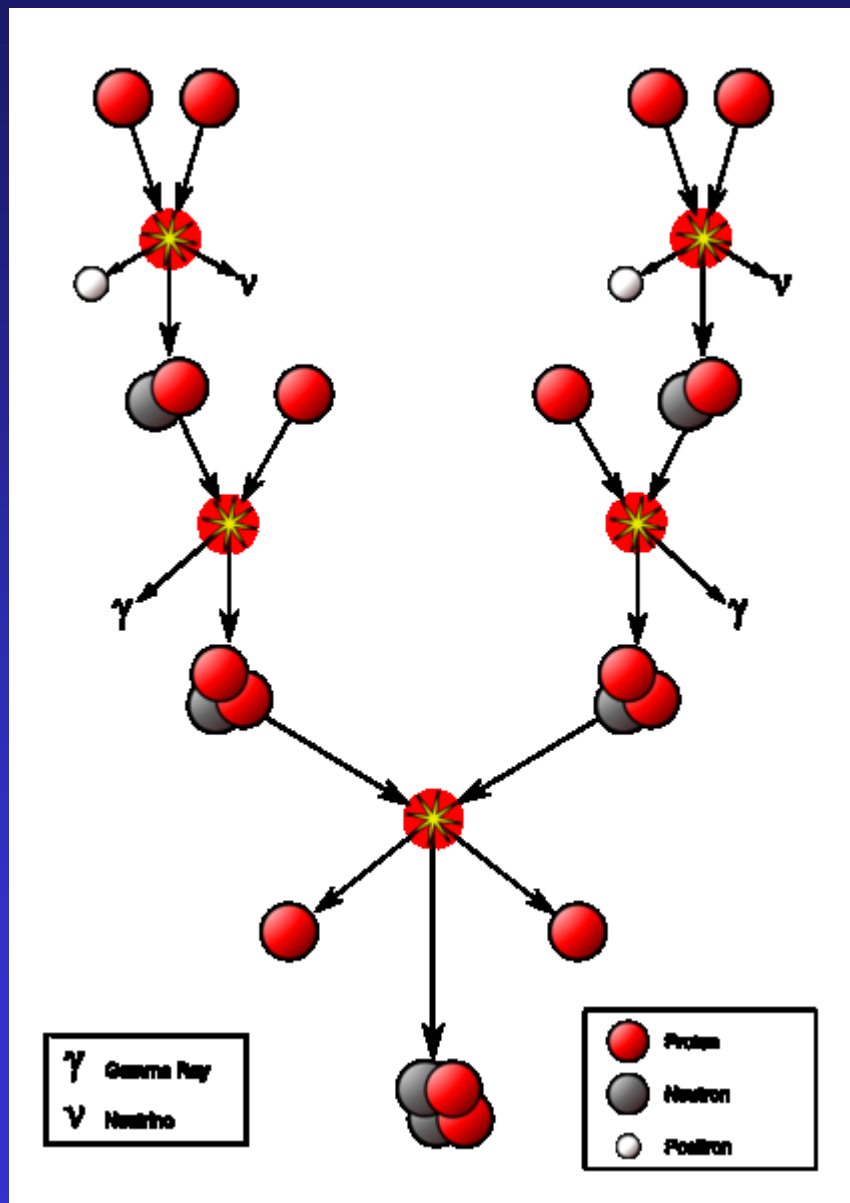
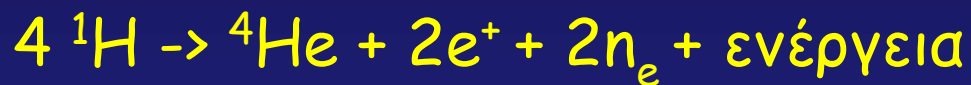
# ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΑΖΩΝ



Εικόνα 13: Σχετικός αριθμός αστέρων διαφορετικών μαζών, για κάθε αστέρα μάζας 150 φορές μεγαλύτερης του Ηλίου [13].

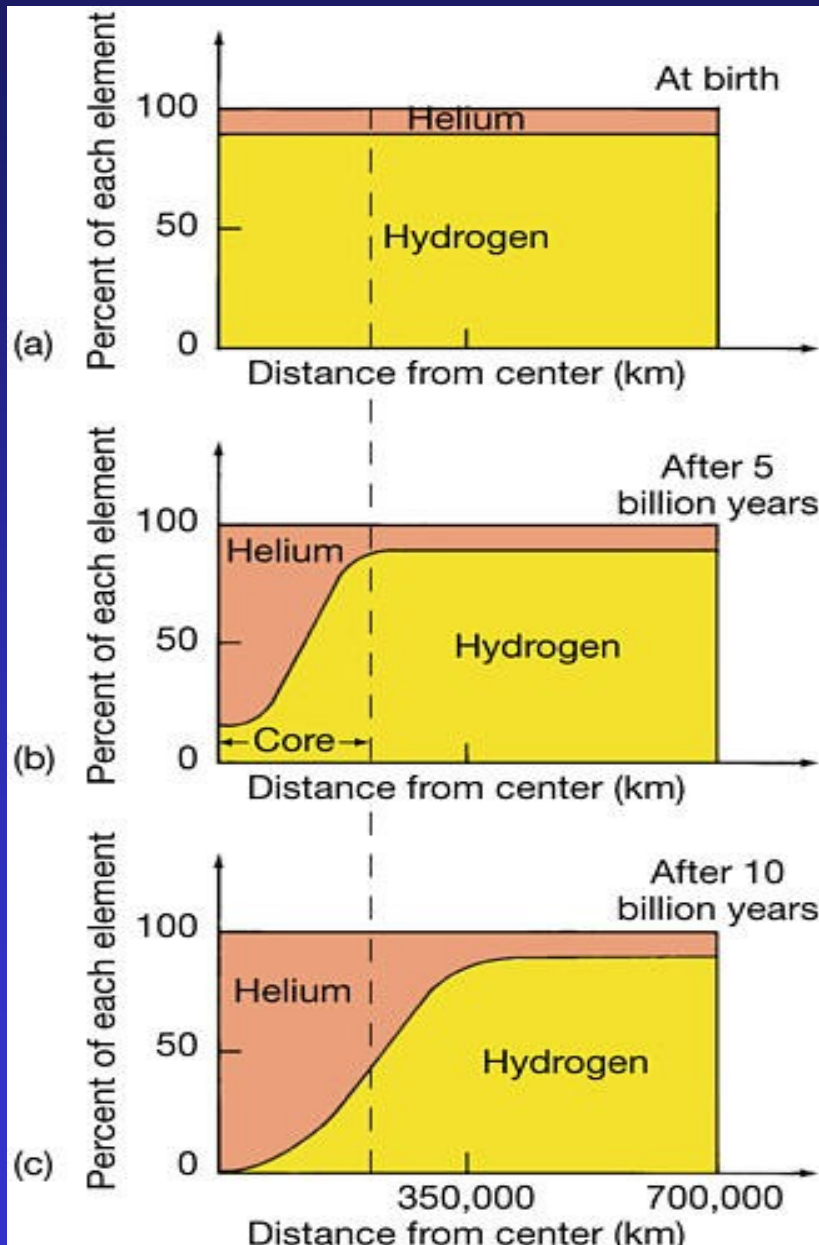
# ΣΥΝΤΗΞΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΑΛΥΣΙΔΑ p-p)

Αν  $T > 10$  εκ. Κ



Εικόνα 14: Σύντηξη υδρογόνου σε ήλιο και έκλυση ενέργειας, με την αλυσίδα πρωτονίου - πρωτονίου (p-p) [14].

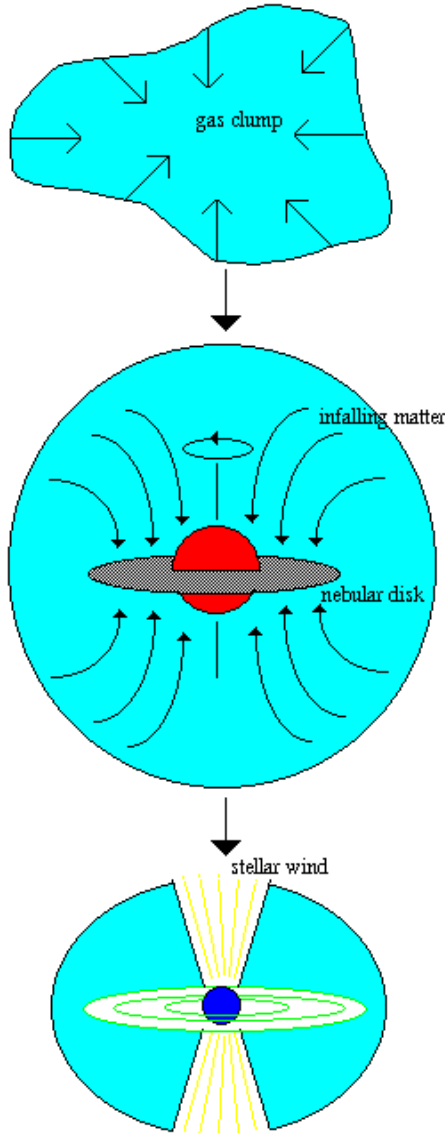
# ΣΥΝΤΗΞΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΑΛΥΣΙΔΑ p-p)



Εικόνα 15: Θεωρητικές τιμές ποσοτήτων υδρογόνου και ηλίου στο εσωτερικό ενός αστέρα ομοίου μεγέθους με τον Ήλιο, σε διαφορετικά στάδια της ζωής του [15].

# Δημιουργία Πρωτο-αστέρα

## Protostar Formation



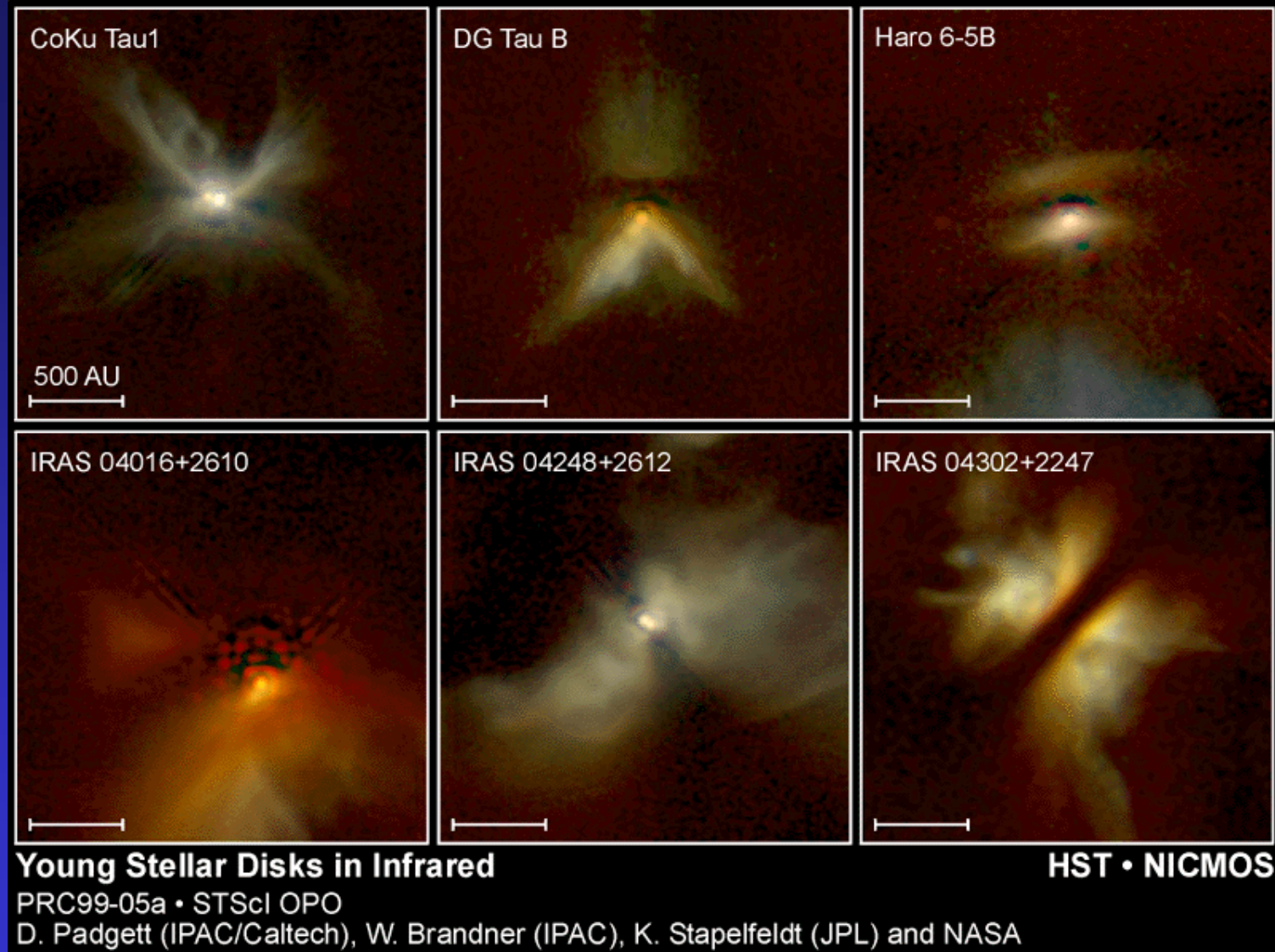
A dense gas clump breaks off from molecular cloud and collapses. Angular momentum turns the irregular clump into a rotating disk.

The central region is denser and forms into a protostar, the nebular disk forms slower to become a planetary system. Infalling matter increases the size of the protostar by a factor of 100.

Infall is stopped when the protostar begins thermonuclear fusion and produces a strong stellar wind.

**Εικόνα 16:** Δημιουργία αστέρα από μοριακό νέφος. Λόγω διατήρησης της στροφορμής και των συγκρούσεων, το νέφος συμπιέζεται σε περιστρεφόμενο δίσκο. Η μάζα του πρωτοαστέρα αυξάνεται από ύλη που συνεχίζει να πέφτει επάνω του, μέχρι να ξεκινήσει η πυρηνική σύντηξη στο εσωτερικό του, οπότε και σταματά λόγω του δυνατού αστρικού ανέμου [16].

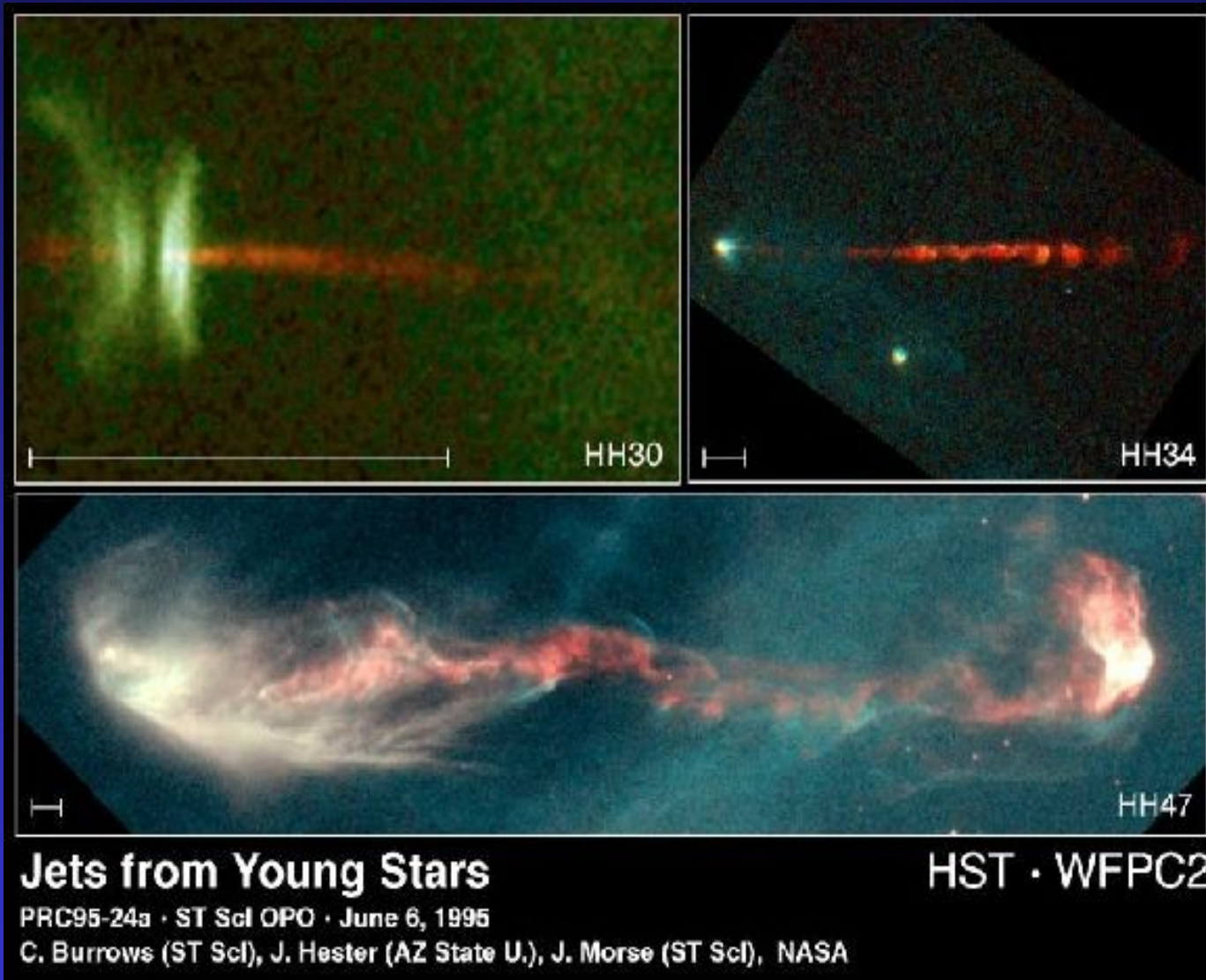
# ΑΣΤΕΡΕΣ Τ ΤΑΥΡΙ



**Εικόνα 17:** Πρωταστέρες στον αστερισμό του Ταύρου (απόσταση 450 ετών φωτός), στο υπέρυθρο φως. Τα νεφελώματα που φαίνονται αποτελούνται από σκόνη που ανακλά το φως των αστέρων [17].

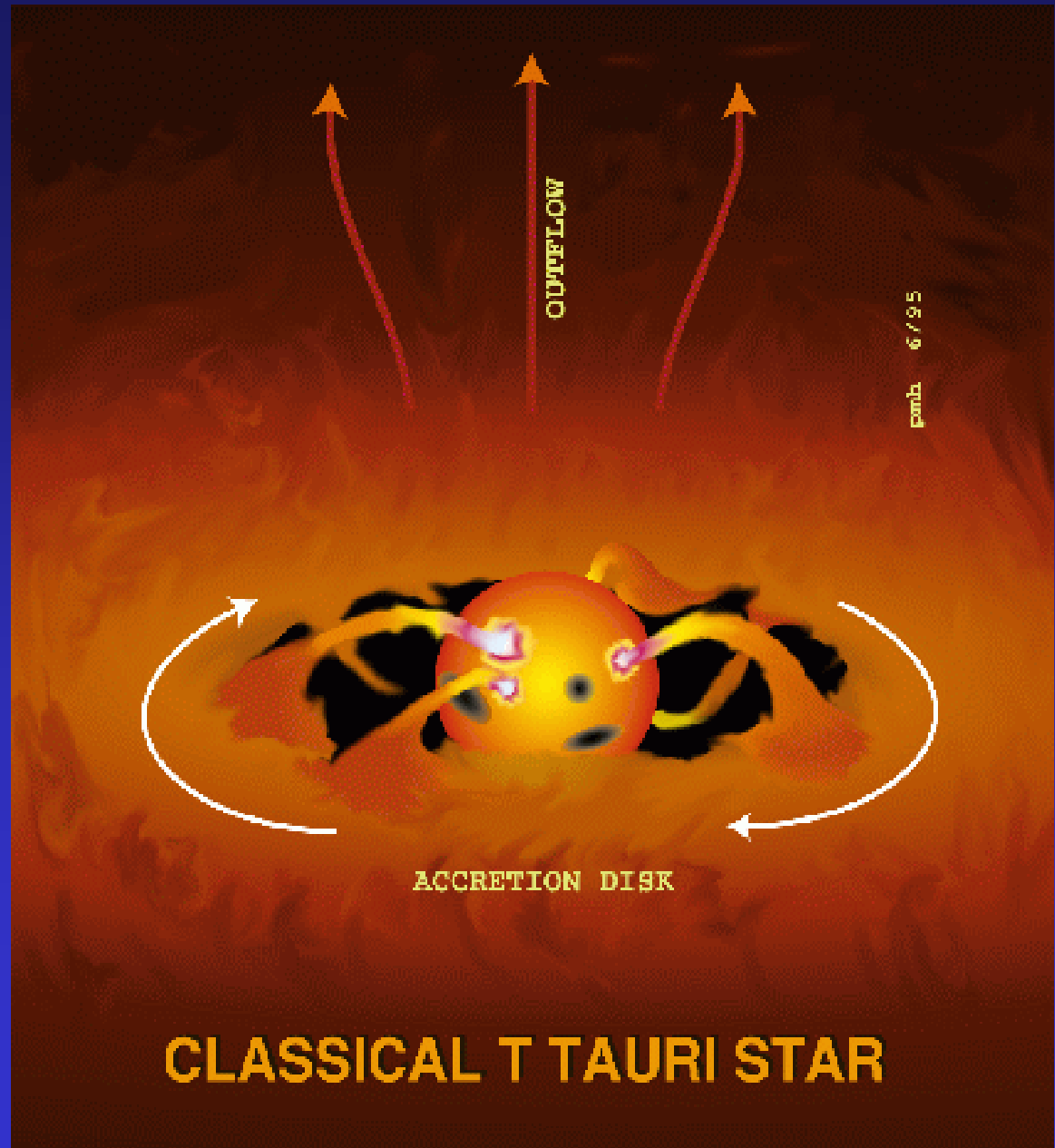


# ΠΙΔΑΚΕΣ ΣΕ ΠΡΩΤΟ-ΑΣΤΕΡΕΣ Τ ΤΑΥΡΙ



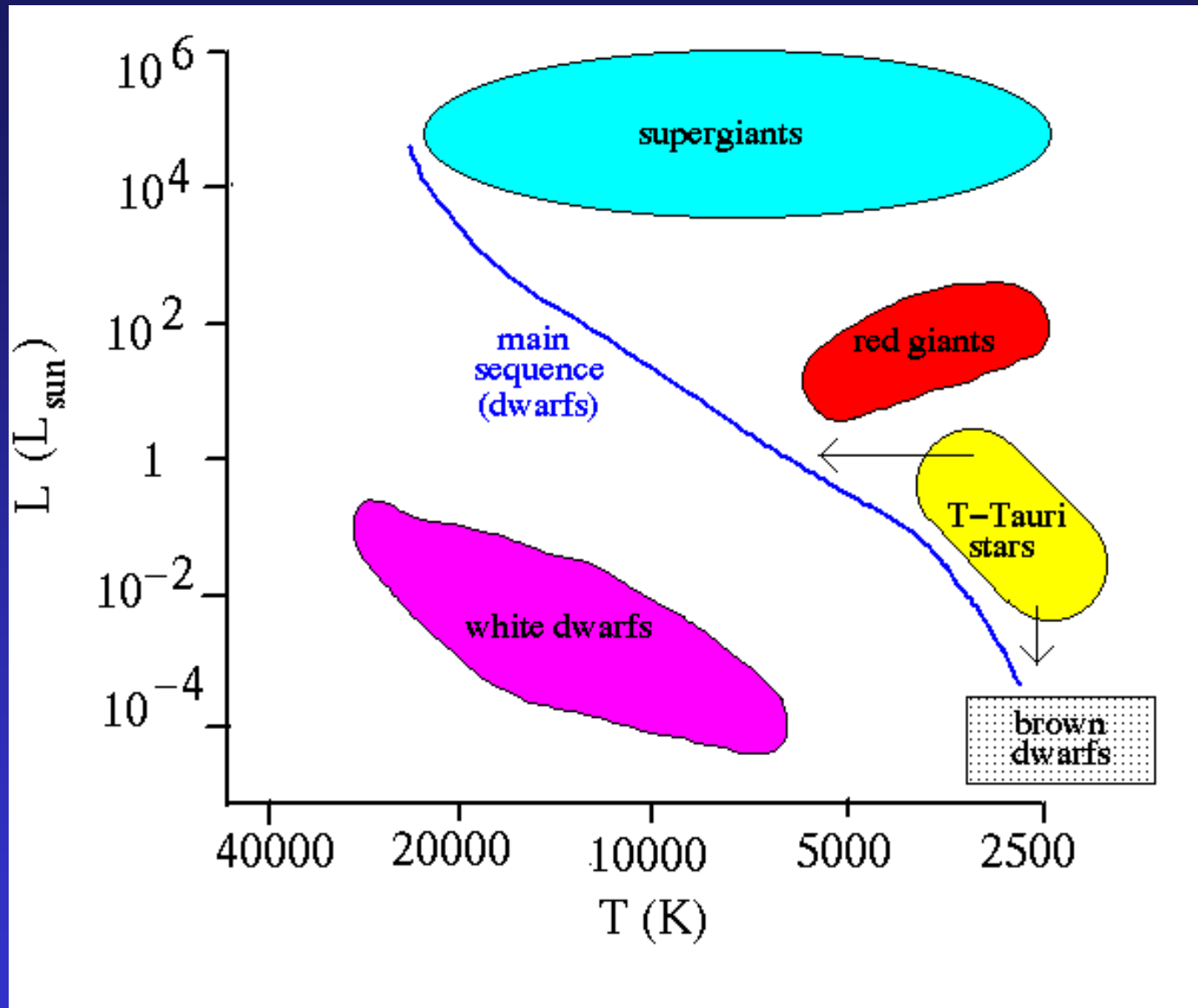
Εικόνα 18: Εικόνες πιδάκων κατά τη δημιουργία αστέρων [18].

# ΑΣΤΕΡΕΣ Τ ΤΑΥΡΙ



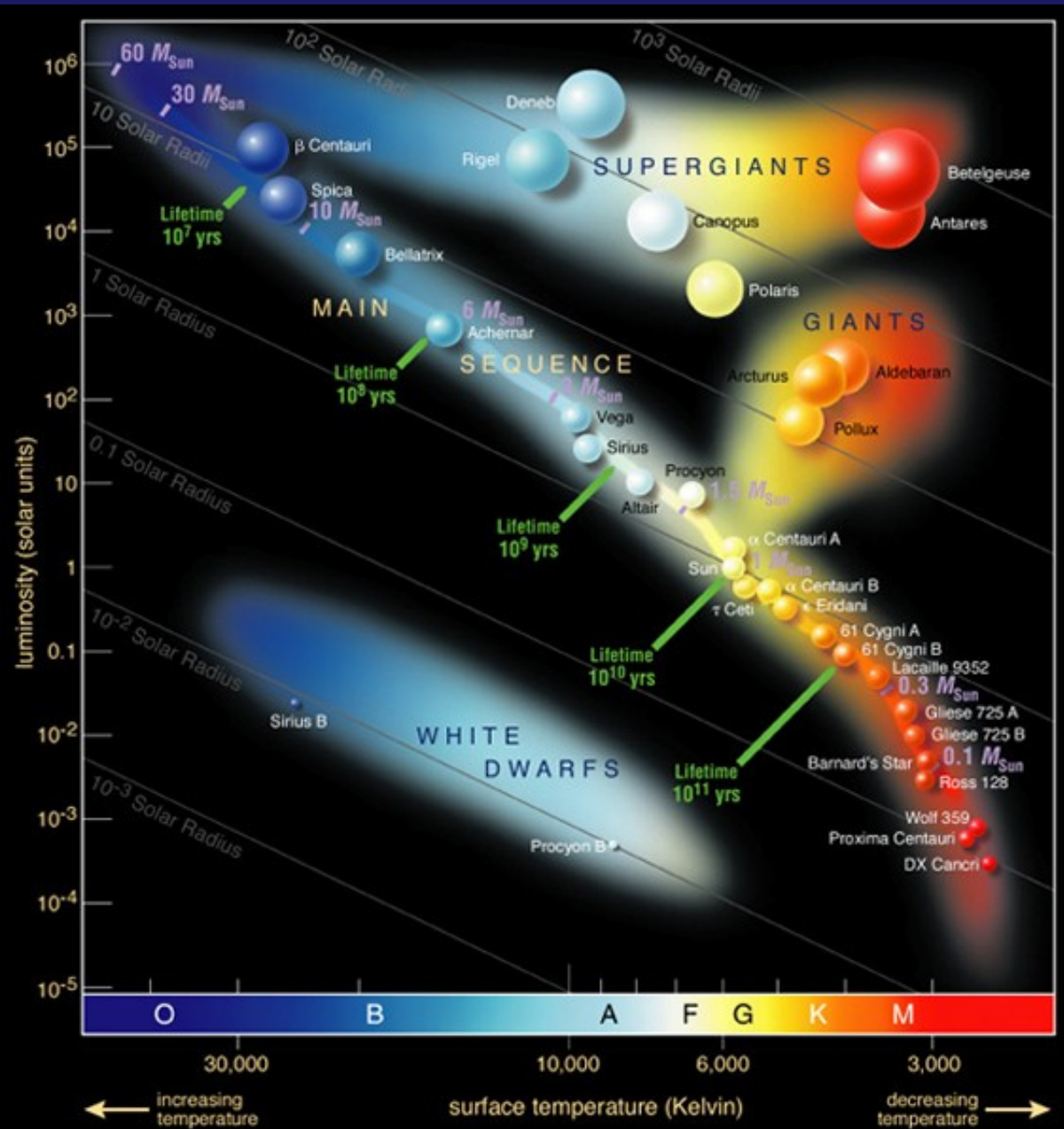
Εικόνα 19: Προσαύξηση ύλης σε αστέρα Τ-Ταυρι [19].

# ΑΣΤΕΡΕΣ Τ ΤΑΥΡΙ



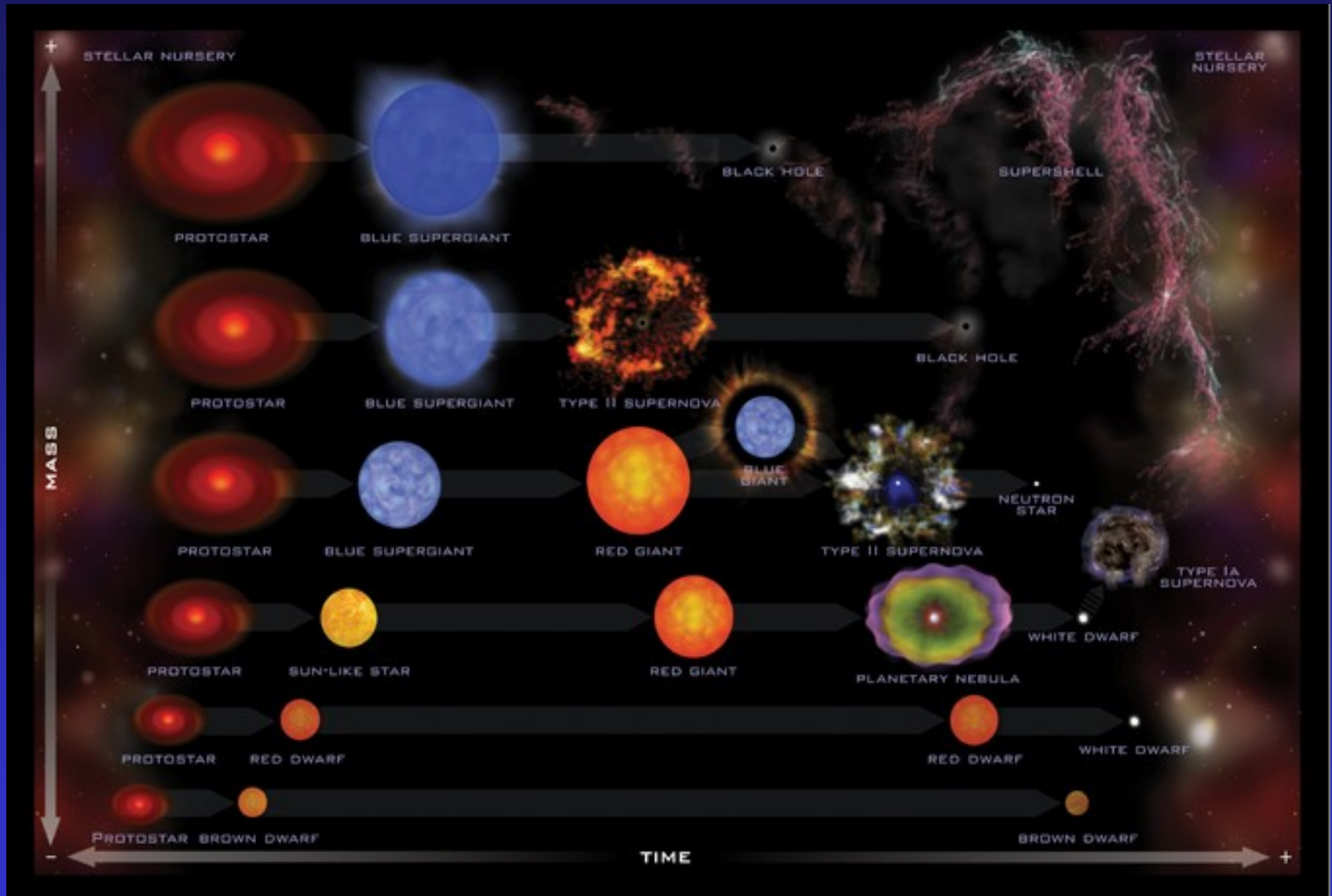
Εικόνα 20: Θέση και εξέλιξη των αστέρων T-Tauri στο διάγραμμα HR.

# ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ HERTZSPRUNG-RUSSELL (H-R)



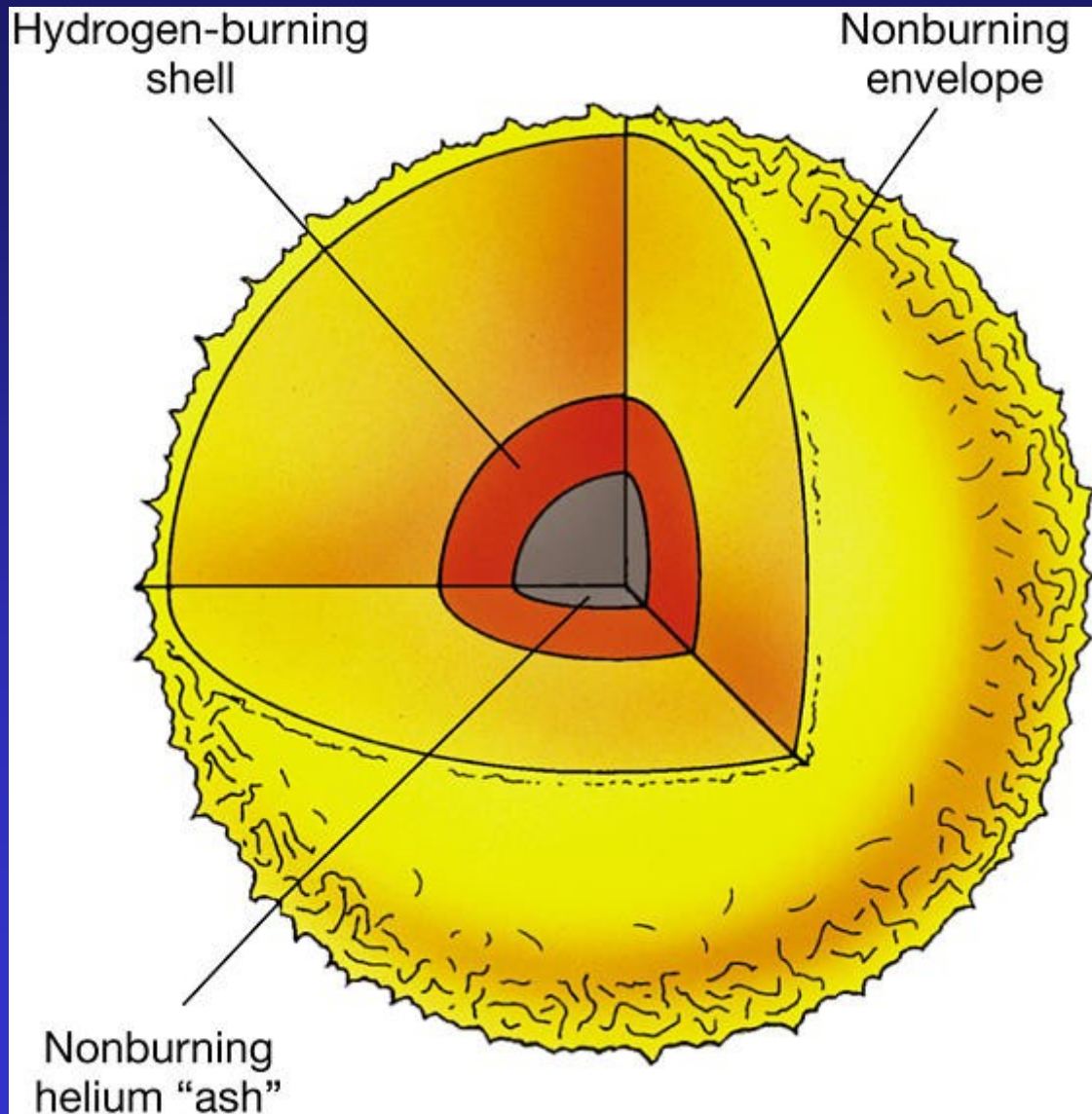
Εικόνα 21: Το διάγραμμα Hertzsprung-Russell [21].

# ΤΕΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ



Εικόνα 22: Εξέλιξη και τελικές καταστάσεις αστέρων διαφορετικής μάζας [22].

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $M < 0.8 M_{\odot}$



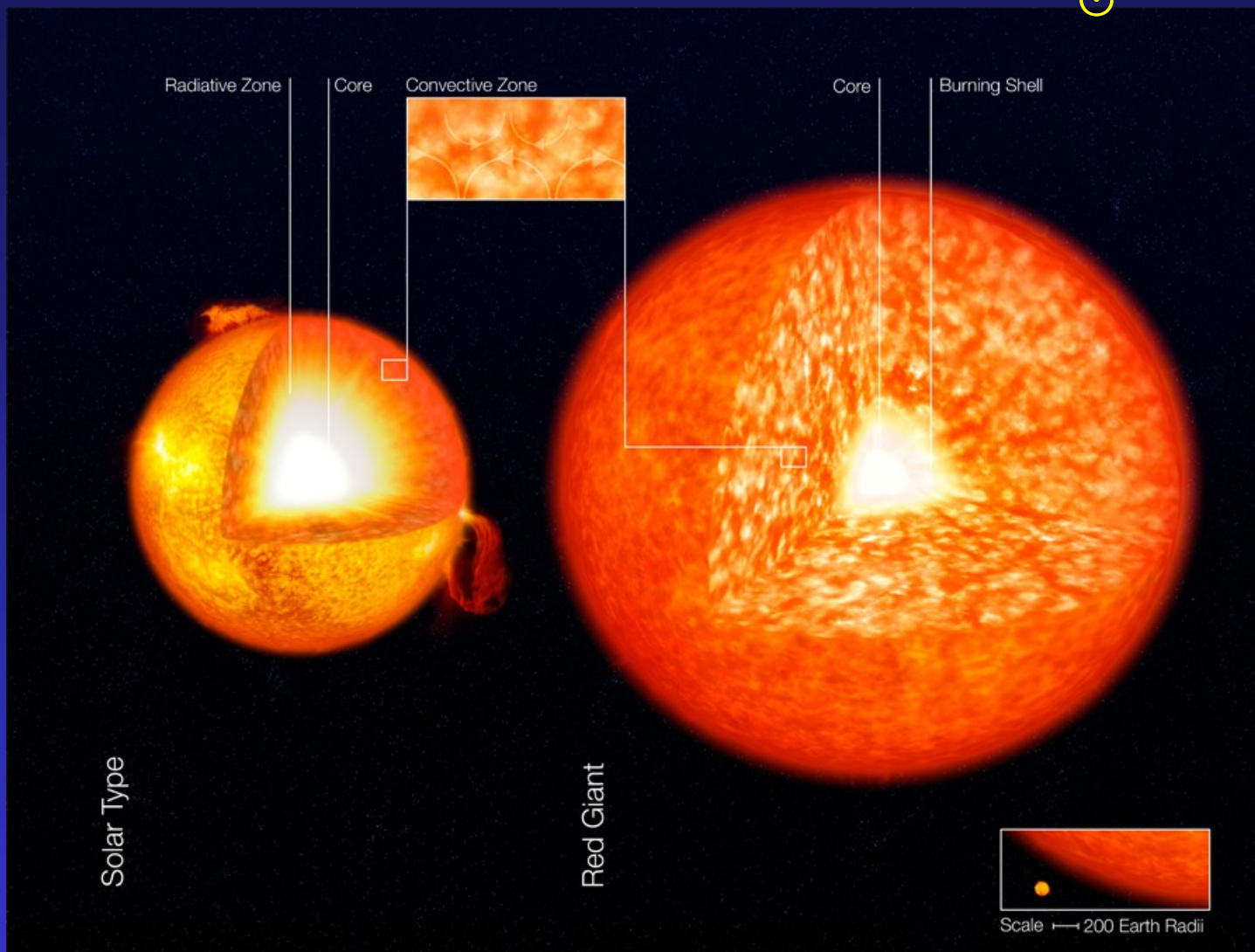
**Εικόνα 23:** Δομή αστέρα μικρής μάζας ( $M < 0.8 M_{\odot}$ ). Η σύντηξη υδρογόνου λαμβάνει χώρα μόνο στο στρώμα εξωτερικά του πυρήνα [23].

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $M < 0.8 M_{\odot}$

## Εξάντληση καυσίμων

- > Ψύξη του πυρήνα και συστολή του
- > Παραγωγή θερμότητας (μηχανισμός Kelvin-Helmholtz)
- > Αρχίζει η καύση στα στρώματα Η πάνω από τον πυρήνα με αδρανές He
- > Εκτόνωση της ατμόσφαιρας
- > **Ερυθρός υπογίγαντας** (red subgiant)
- > Ελάττωση θερμοκρασίας εξωτερικών στρωμάτων
- > Αύξηση αδιαφάνειας
- > δημιουργία ζώνης μεταφοράς
- > **Ερυθρός γίγαντας.**

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $M < 0.8 M_{\odot}$



**Εικόνα 24:** Καλλιτεχνική απεικόνιση αστέρα μεγέθους όμοιου με του Ήλιου, σε σύγκριση με ερυθρό γίγαντα. Φαίνεται χαρακτηριστικά το κατά πολύ μεγαλύτερο μέγεθος της ζώνης συναγωγής θερμότητας (convection zone) στον ερυθρό γίγαντα [24].



# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $M < 0.8 M_{\odot}$

Ο πυρήνας εξακολουθεί και συρρικνώνεται και με το μηχανισμό Kelvin-Helmholtz παράγεται ενέργεια.

Η θερμοκρασία όμως παραμένει κάτω από το όριο ανάφλεξης του He ( $2 \times 10^8$  K) και τελικά η πυκνότητα των  $e^-$  γίνεται αρκετά μεγάλη ώστε να δημιουργήσουν ένα εκφυλισμένο αέριο.

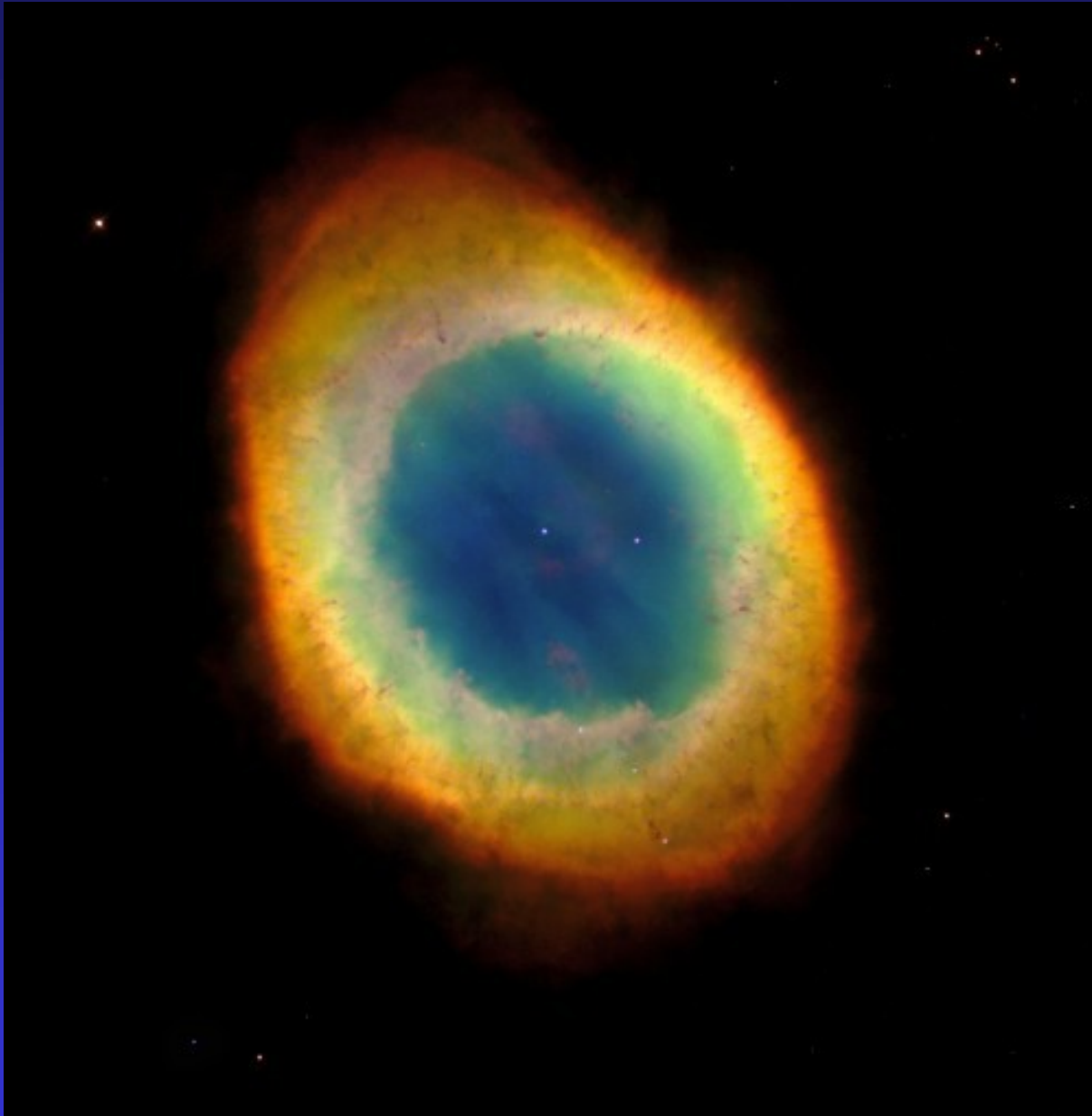
Ο πυρήνας σταθεροποιείται στην κατάσταση ενός **λευκού νάνου He**.

Τα εξωτερικά στρώματα εξακολουθούν να καίγονται και να διαστέλονται.

Έντονος αστρικός άνεμος, απώλεια μάζας μέχρι 50%

**Πλανητικό νεφέλωμα  $\rightarrow$  λευκός νάνος.**

# "ΠΛΑΝΗΤΙΚΟ ΝΕΦΕΛΩΜΑ"



Εικόνα 25: Το Δακτυλιοειδές Νεφέλωμα (Ring Nebula - Messier 57), σε απόσταση 2000 ετών φωτός. Το νεφέλωμα αυτό φωτίζεται από έναν λευκό νάνο στο κέντρο του, μάζας περίπου  $1.2 M_{\odot}$ . Η οπτική ομοιότητα των πλανητικών νεφελωμάτων με πλανήτες όπως ο Ουρανός και Ποσειδώνας, κατά την παρατήρηση από τα παλαιότερα τηλεσκόπια, οδήγησε στην ονομασία τους αυτή [25].

# "ΠΛΑΝΗΤΙΚΟ ΝΕΦΕΛΩΜΑ"



**Εικόνα 26:** Το πλανητικό νεφέλωμα Abell 39, με χαρακτηριστική σφαιρική συμμετρία. Το νεφέλωμα έχει διάμετρο περίπου πέντε ετών φωτός και βρίσκεται σε απόσταση 7000 ετών φωτός [26].

# ΤΕΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

**Εικόνα 27:** Το νεφέλωμα «Εσκιμώος» (NGC 2392), σε απόσταση 3000 ετών φωτός. Οι εσωτερικοί σχηματισμοί προκαλούνται από δυνατούς ανέμους σωματιδίων από το κεντρικό αστέρι. Οι εξωτερικοί σχηματισμοί, μήκους της τάξεως του ενός έτους φωτός, είναι ασυνήθιστοι και δεν έχει δωθεί κάποια εξήγηση για τη δημιουργία τους ακόμη [27].



# ΤΕΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ



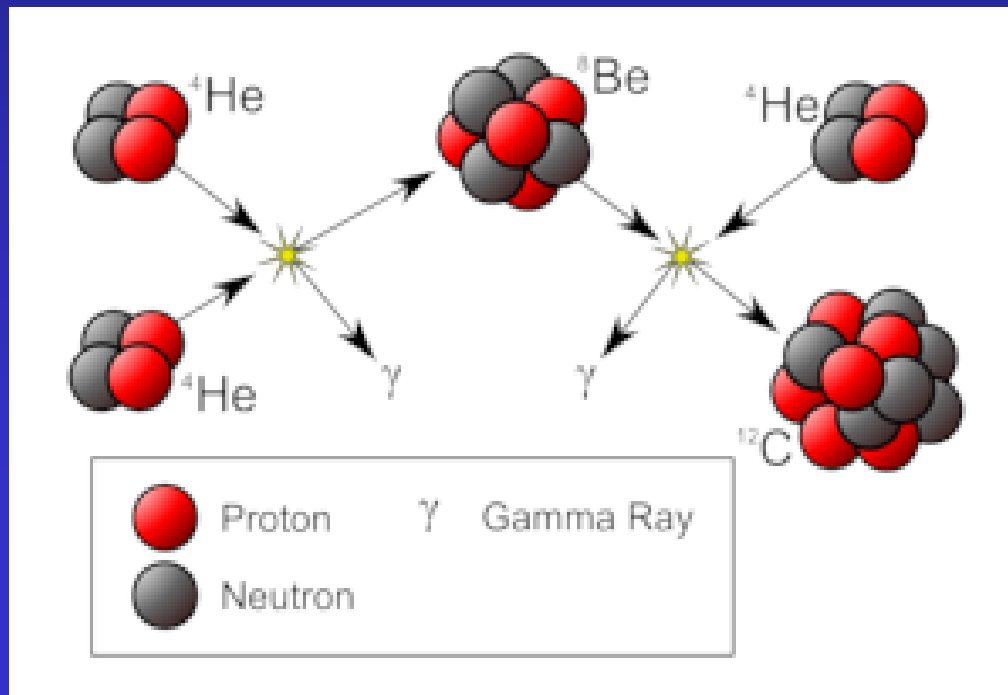
Εικόνα 28: Το πλανητικό νεφέλωμα NGC 2440, σε απόσταση 4000 φωτός [28].

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $0.8 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$

Μέχρι το στάδιο του ερυθρού γίγαντα  $\rightarrow$  όμοια εξέλιξη με  $M < 0.8 M_{\odot}$ .

Όμως η θερμοκρασία στον αδρανή πυρήνα **He ξεπερνά τη θερμοκρασία ανάφλεξης He ( $2 \cdot 10^8 \text{K}$ )**.

$\rightarrow$  αντίδραση τριών πυρήνων ηλίου (triple alpha reaction)



Εικόνα 29: Σύντηξη τριών πυρήνων ηλίου σε άνθρακα [29].

# ΛΑΜΨΗ ΗΛΙΟΥ

Στην κύρια ακολουθία μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα προκαλεί αδιαβατική εκτόνωση → επαναφορά της θερμοκρασίας στην αρχική της τιμή.

Στους γίγαντες → ο πυρήνας υποστηρίζεται κυρίως από την πίεση του αερίου εκφυλισμένων  $e^-$  (ανεξάρτητη της θερμοκρασίας) → αύξηση  $T_c$  δε συνοδεύεται από αδιαβατική εκτόνωση αλλά από αύξηση ρυθμού παραγωγής ενέργειας ( $L$ )

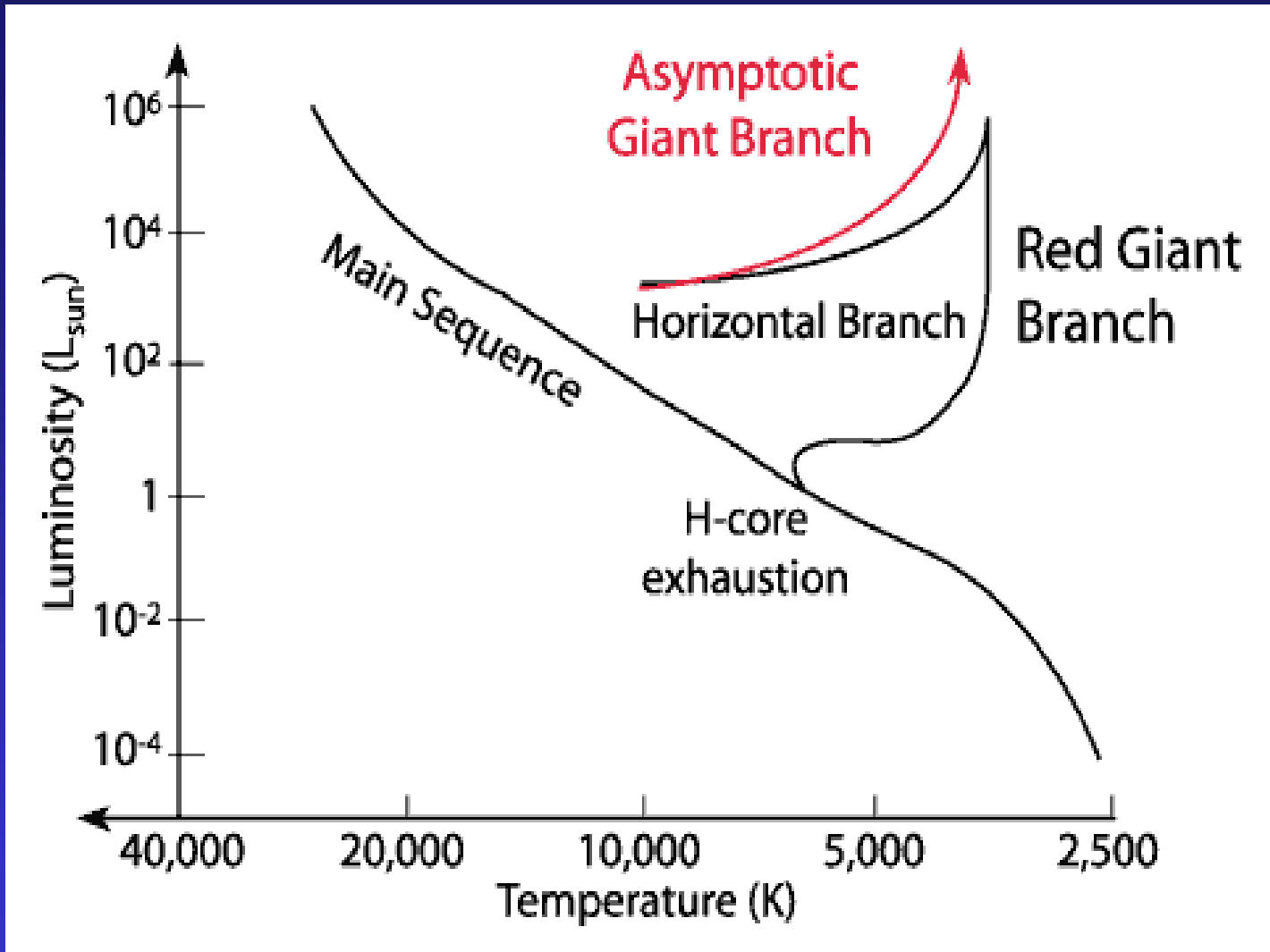
→ εκρηκτικός ρυθμός καύσης του He (λάμψη ηλίου) με στιγμιαία τιμή μέχρι  $10^{11} L_{\odot} \gg L_{\text{Eddington}}$ .

→ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας

→ η θερμική πίεση υπερिशύει πάλι της εκφυλισμένης πίεσης

→ ισορρόπηση στον οριζόντιο κλάδο (horizontal branch)

# ΑΣΥΜΠΤΩΤΙΚΟΣ ΚΛΑΔΟΣ ΓΙΓΑΝΤΩΝ



Εικόνα 30: Ο ασυμπτωτικός κλάδος γιγάντων (AGB) στο διάγραμμα HR [30].



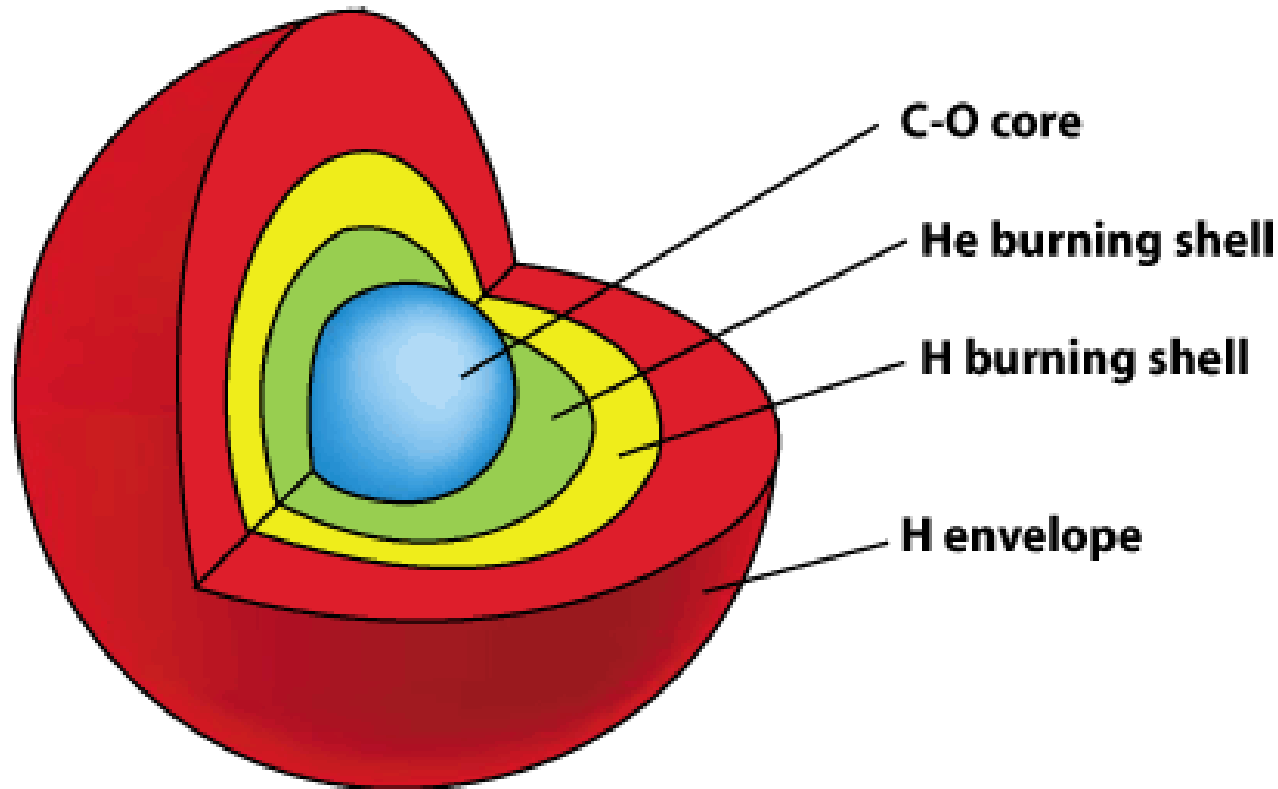
# ΕΡΥΘΡΟΣ ΥΠΕΡΓΙΓΑΝΤΑΣ

Εξάντληση του He στον πυρήνα

- > καύση συνεχίζεται σε φλοιό He και φλοιό H
- > θερμοκρασία πυρήνα C,O αυξάνεται ραγδαία
- > αύξηση και θερμοκρασίας εξωτερικών στρωμάτων
- > αύξηση ακτίνας
- > ασυμπτωτικός κλάδος γιγάντων
- > υπεργίγαντας ( $R \sim 1 \text{ AU}$ ,  $T \sim 3000 \text{ K}$ ,  $L \sim 10^4 L_{\odot}$ )

# ΔΟΜΗ ΥΠΕΡΓΙΓΑΝΤΑ

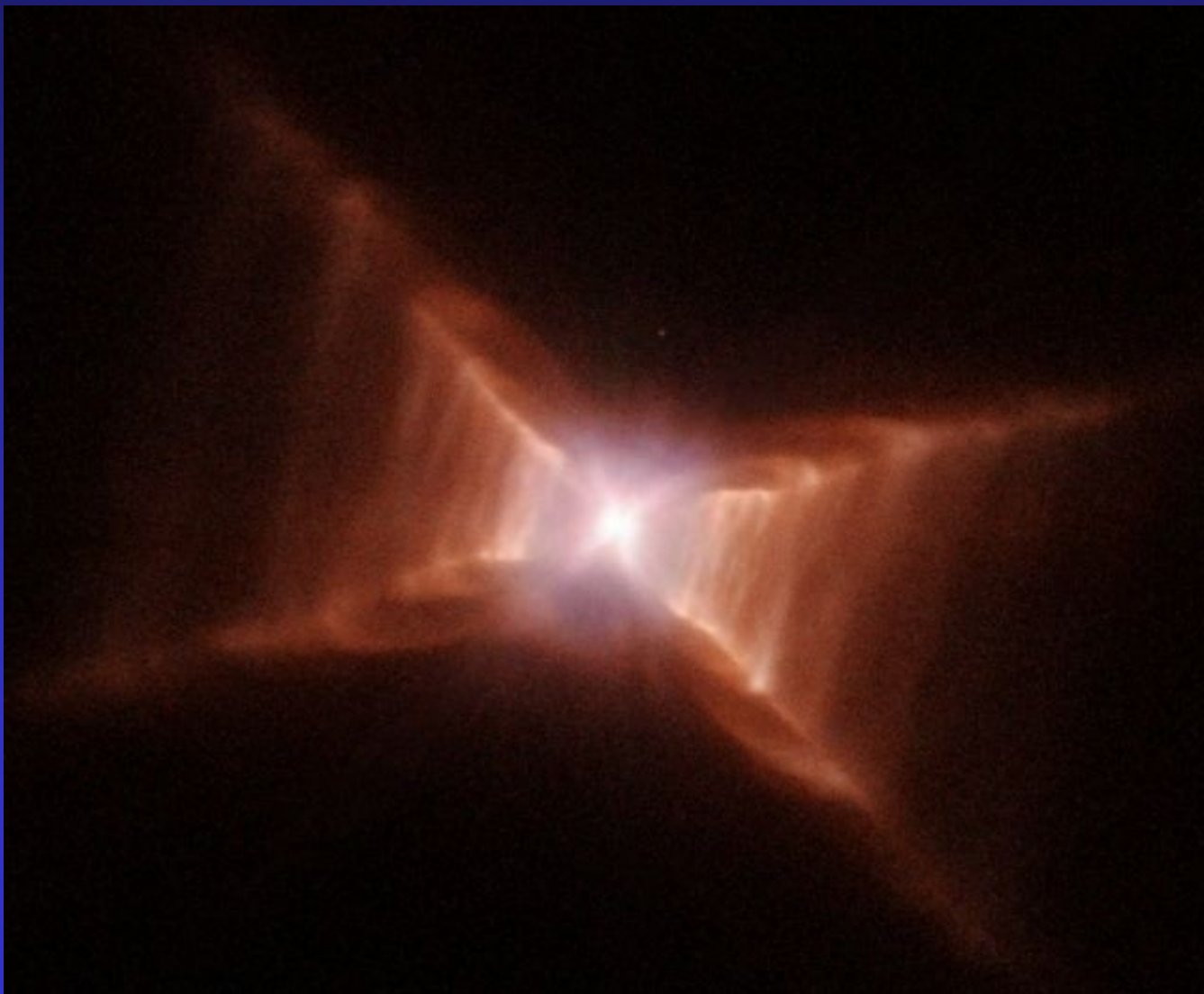
Διαδοχική καύση φλοιών H, He  $\rightarrow$  μεταβλητός αστέρας μακράς περιόδου (τύπου Mira).



Εικόνα 31: Ο πυρήνας άνθρακα - οξυγόνου ενός υπεργίγαντα, που περιβάλλεται από ένα κέλυφος ηλίου και ένα κέλυφος υδρογόνου. Στο εξωτερικό υπάρχει «φάκελος» υδρογόνου, όπου κυριαρχεί η συναγωγή θερμότητας [31].

# ΑΣΤΡΙΚΟΣ ΑΝΕΜΟΣ

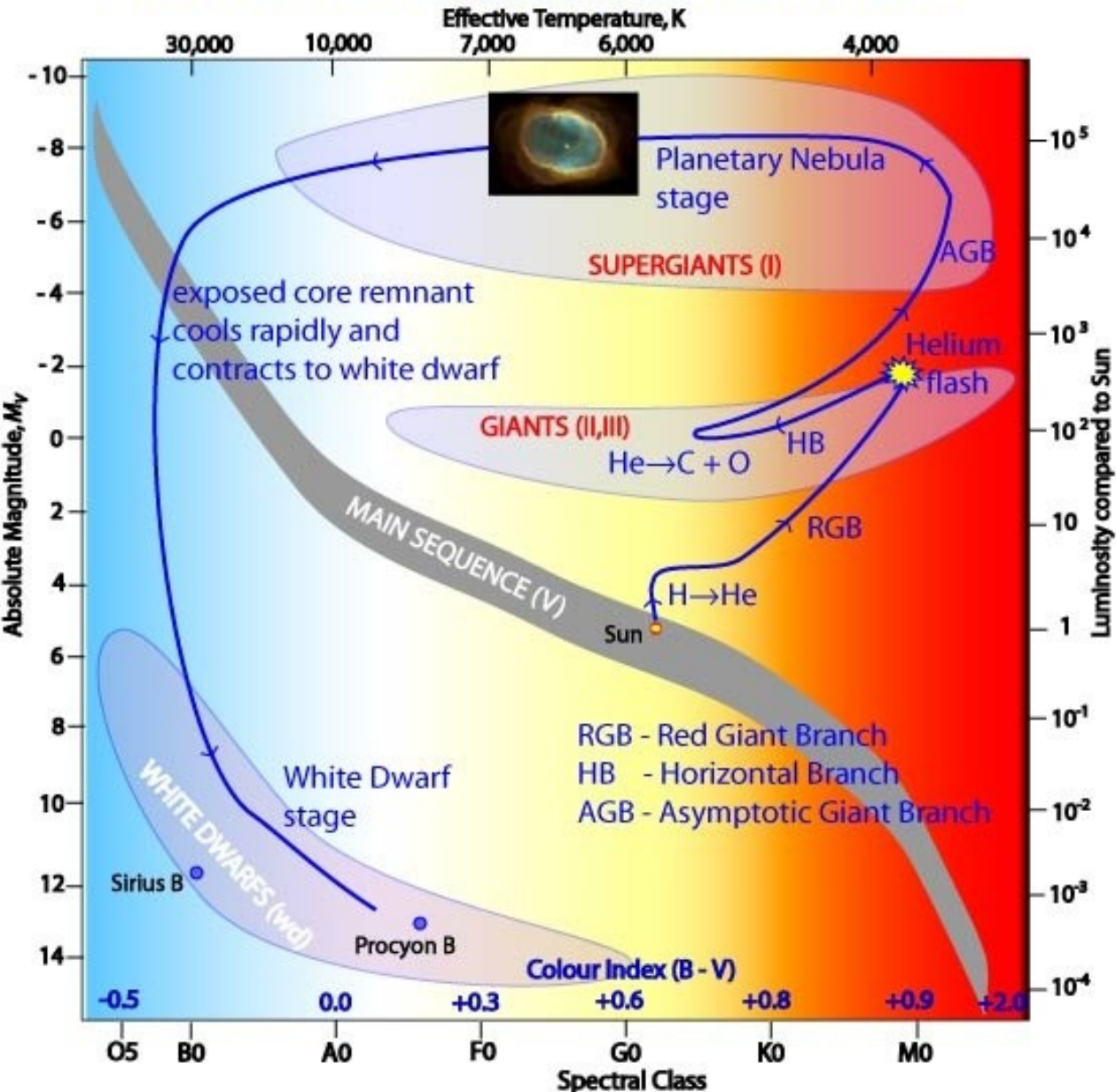
Στον ασυμπτωτικό κλάδο γιγάντων, δημιουργείται έντονος αστρικός άνεμος.



**Εικόνα 32:** Ο αστέρας HD 44179, που βρίσκεται στα τελευταία στάδια της ζωής του, με το ασυνήθιστο σχήμα νεφελώματος. Το σχήμα αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση ενός τόρου σκόνης που περιβάλλει το διπλό σύστημα αστέρων στο εσωτερικό του [32].

# ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΛΗΞΗ: ΛΕΥΚΟΣ ΝΑΝΟΣ

## Sun's Post-Main Sequence Evolutionary Track



Εικόνα 33: Η πορεία ενός αστέρα όμοιου μεγέθους με τον Ήλιο, κατά την εξέλιξη του σε λευκό νάνο, στο διάγραμμα HR [33].

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $3 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$

Πιο γρήγορη εξέλιξη

Βαρύτερος πυρήνας  $\sim 1.4 M_{\odot}$  (όριο Chandrasekhar)

Μέχρι το στάδιο του γίγαντα όμοια εξέλιξη με  $M < 3 M_{\odot}$

Αλλά δε δημιουργείται λάμψη ηλίου (η καύση He ξεκινά χωρίς να υπάρχει πίεση εκφυλισμένου αερίου)

Διαδοχικές καύσεις και συσσώρευση στον πυρήνα C, O.

Για  $M < 5 M_{\odot}$  -> δεν αναφλέγεται ο άνθρακας

-> τελική κατάσταση: λευκός νάνος C, O.

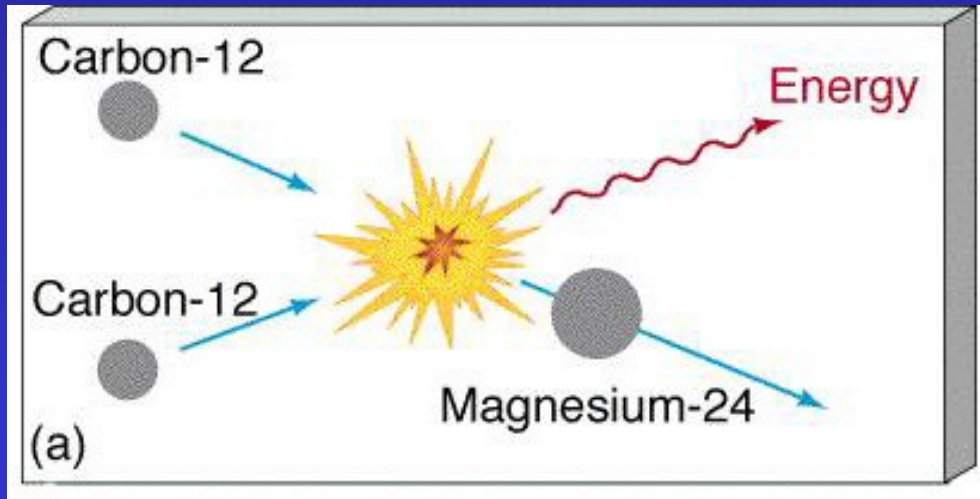
# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $3 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$

Για  $5 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$  -> ανάφλεξη άνθρακα υπό εκφυλισμένες συνθήκες

-> λάμψη άνθρακα

-> παραγωγή  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{16}\text{O}$

-> υπερκαινοφανής τύπου II -> αστέρας νετρονίων



Εικόνα 34: Σύντηξη δύο ατόμων άνθρακα σε άτομο μαγνησίου και έκλυση ενέργειας [34].

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ $M > 10 M_{\odot}$

Διαδοχικές συστολές

-> καύσεις βαρύτερων στοιχείων

-> σταθεροποίηση

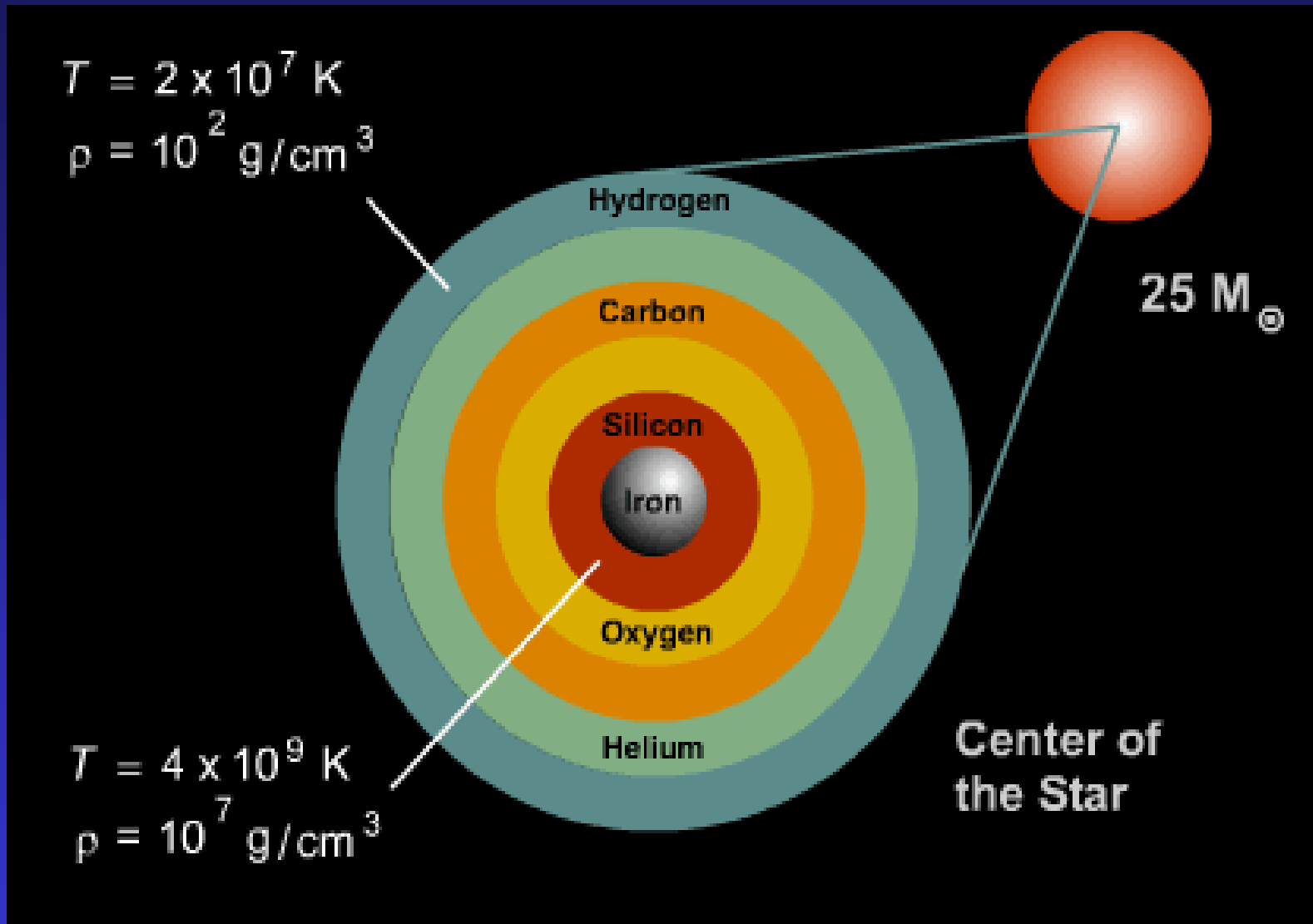
-> μπορεί να φτάσει μέχρι την παραγωγή σιδήρου  $^{56}\text{Fe}$

-> έκρηξη υπερκαινοφανούς τύπου II

-> αστέρας νετρονίων ή μελανή σπή

-> παραγωγή βαρύτερων στοιχείων ( $> 56$ )

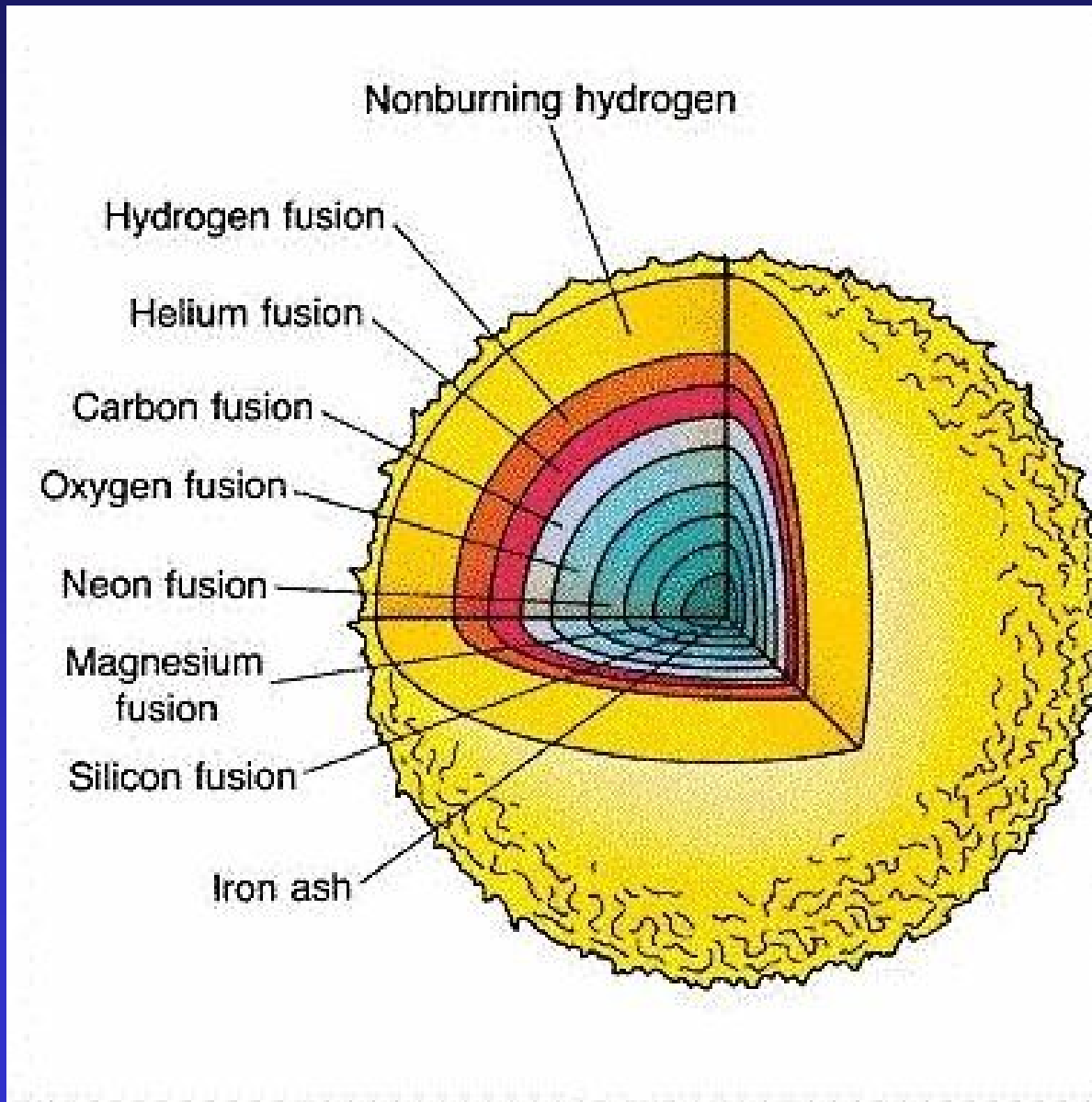
# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΜΑΖΑΣ



**Εικόνα 35:** Λόγω των μεγάλων βαρυτικών δυνάμεων σε έναν αστέρα μεγάλης μάζας, μπορούν να υπάρξουν πολλά στρώματα σύντηξης όλο και βαρύτερων στοιχείων [35].

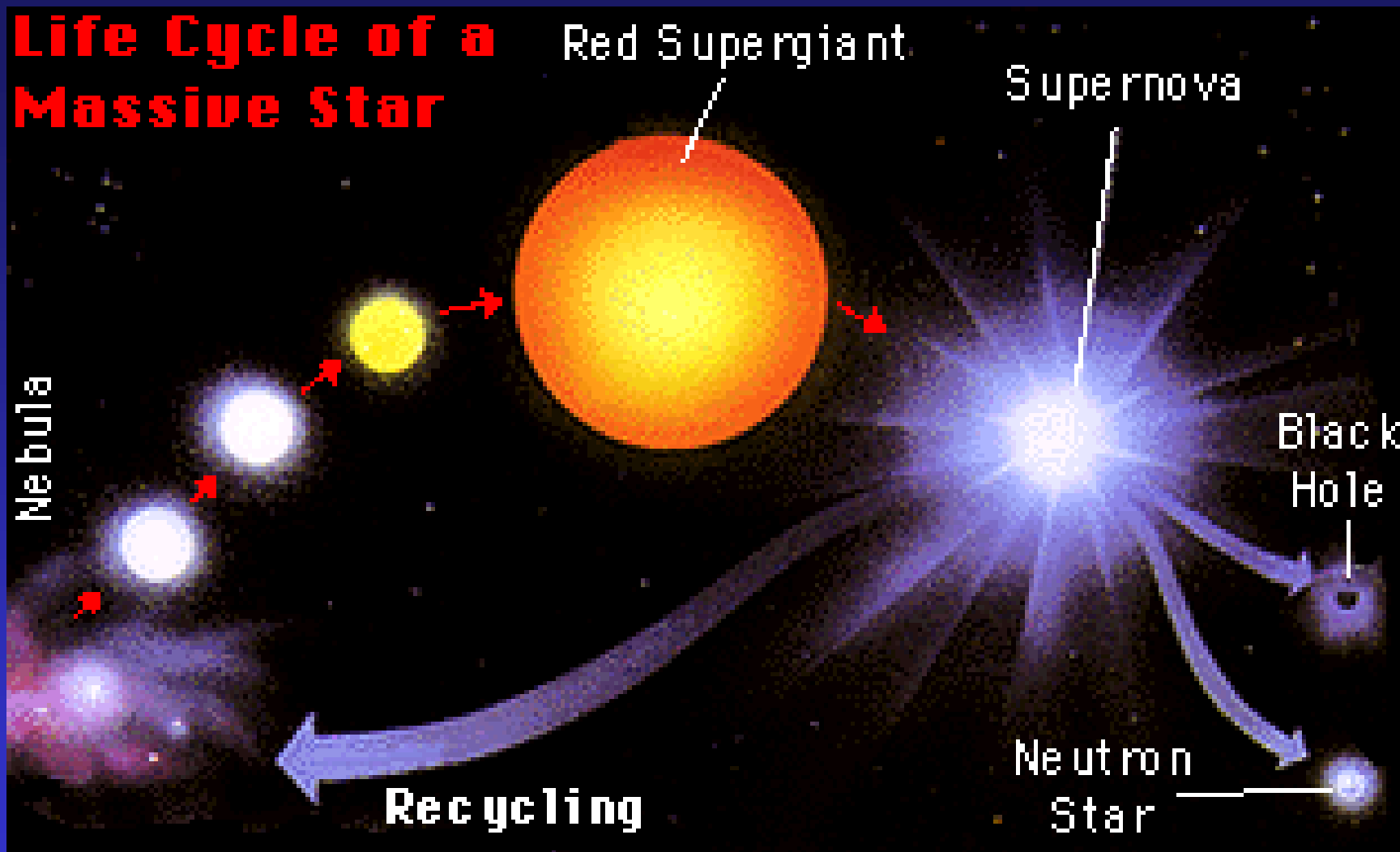


# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΜΑΖΑΣ



**Εικόνα 36:** Δομή αστέρα μεγάλης μάζας. Γύρω από τον πυρήνα σιδήρου υπάρχουν στρώματα σύντηξης πυριτίου, μαγνησίου κοκ. Δε συμβαίνει σύντηξη σιδήρου, καθώς ο σίδηρος έχει την υψηλότερη ενέργεια σύνδεσης πυρήνα [36].

# ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΣΤΕΡΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΜΑΖΑΣ



**Εικόνα 37:** Ο κύκλος ζωής ενός αστέρα μεγάλης μάζας, από πλανητικό νεφέλωμα σε ερυθρό υπεργίγαντα και υπερκαινοφανή, μέχρι την κατάληξη του σε μελανή οπή ή αστέρα νετρονίων [37].

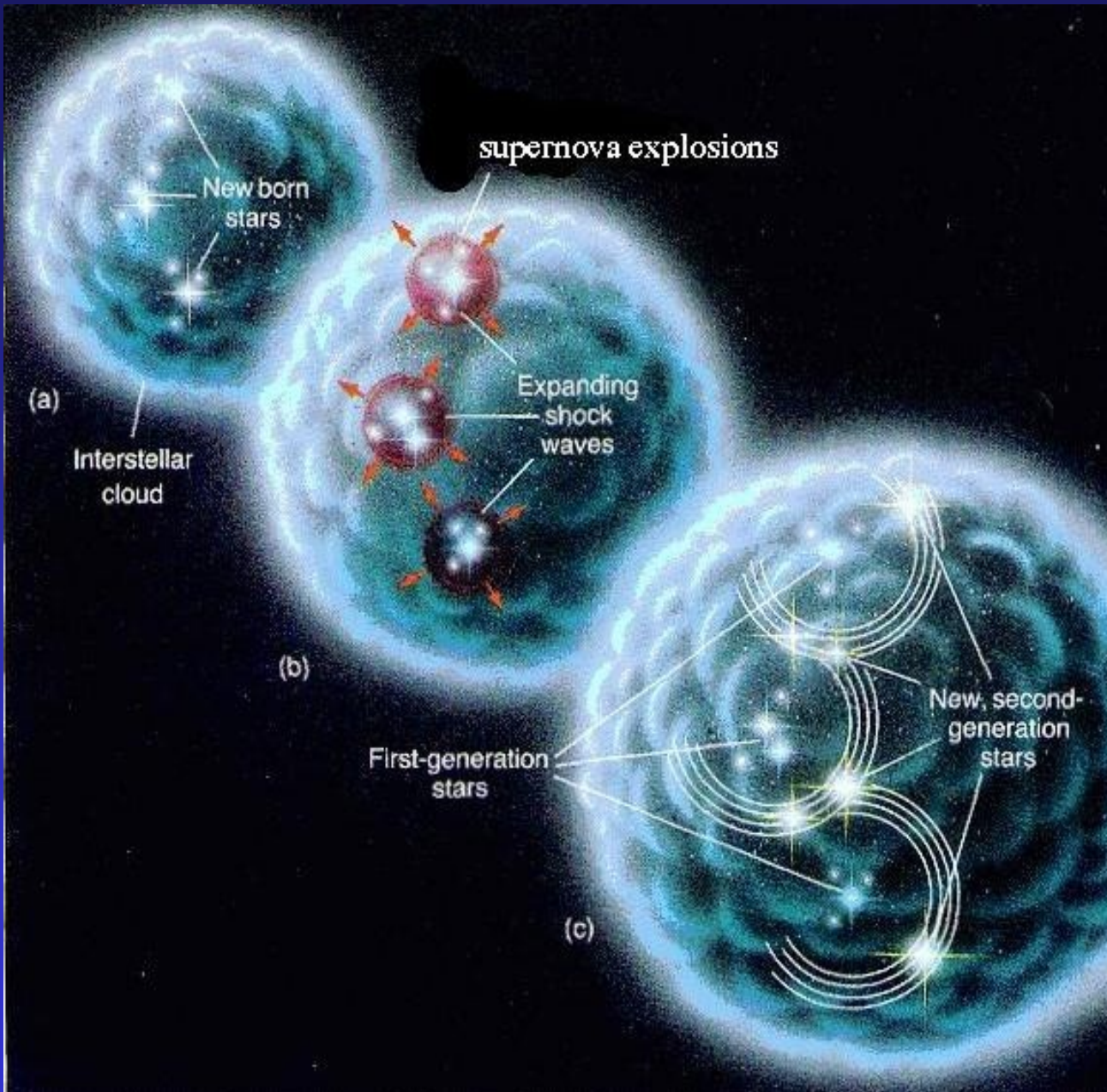
# ΑΣΤΡΙΚΟΣ ΑΝΕΜΟΣ

Απώλεια μέχρι και 50% της αρχικής μάζας.



**Εικόνα 38:** Το νεφέλωμα Boomerang, σε απόσταση 5000 ετών φωτός. Οι δύο συμμετρικοί λοβοί ύλης είναι σύννεφο αερίων και σκόνης που εκτινάσσονται από τον κεντρικό αστέρα [38].

# ΑΣΤΕΡΕΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ



**Εικόνα 39:** Σχηματισμός ομάδων νέων αστέρων, από κοντινούς υπερκαινοφανείς. Οι εκρήξεις προκαλούν συμπίεση των αερίων των κοντινών μοριακών νεφών, με αποτέλεσμα το σχηματισμό νέων αστέρων (δεύτερης γενιάς) [39].

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. Equilibrium of the Sun,  
The Outer Planets, Laboratory of Atmospheric and Space Physics, UCB  
(Funding by NASA)  
[http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/solsys\\_star.php](http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/solsys_star.php)
2. Sunspots,  
James N. Imamura Lecture Notes, ASTR 122: Birth, Life and Death of Stars  
University of Oregon  
[http://jersey.uoregon.edu/~imamura/122/lecture-3/stellar\\_spectra.html](http://jersey.uoregon.edu/~imamura/122/lecture-3/stellar_spectra.html)
3. Sunspots, max, min  
Credit: SOHO (NASA/ESA)  
From "Windows To The Universe" Website  
[www.windows2universe.org/sun/images/sunspots\\_max\\_min\\_big\\_jpg\\_image.html](http://www.windows2universe.org/sun/images/sunspots_max_min_big_jpg_image.html)
4. Handle on the Sun  
Credit: NASA/European Space Agency  
[http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM\\_ID=2166](http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=2166)
5. The Sun's Chromosphere  
Image credit: Hinode JAXA/NASA  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hinode/solar\\_019.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_019.html)

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

6. The million-degree solar corona, showing dark 'holes'  
Credit: Yohkoh Solar Observatory  
NASA Website  
[http://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt\\_corona.php](http://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_corona.php)
7. Layers of the Sun  
Image credit: NASA  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hinode/solar\\_020.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_020.html)
8. Types of heat transfer for different stars  
Credit: [www.sun.org](http://www.sun.org)  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heat\\_Transfer\\_in\\_Stars.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heat_Transfer_in_Stars.png)
9. The relative size of a brown dwarf star compared with Jupiter, the Sun and Earth  
Credit: Jon Lomberg/Gemini Observatory  
<http://www.astronomynow.com/news/n1007/30browndwarf/>
10. Star-Birth Clouds, M16  
Jeff Hester and Paul Scowen (Arizona State University), and NASA  
<http://www.psrhawaii.edu/Mar00/m16.html>  
(from <http://outreachoffice.stsci.edu/>)

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

11. Star Forming Region  
European Southern Observatory, Creative Commons Attribution 3.0 Unported  
<http://www.eso.org/public/images/eso0416a/>
12. Theoretical Hayashi Tracks of Protostars  
Australia Telescope National Facility, CSIRO Australia  
[www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution\\_formation.html](http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution_formation.html)
13. Demographics of a 1-solar-mass Star  
Copyright Pearson Education  
From the Outer Planets Website (NASA funded)  
[http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/solsys\\_star.php](http://lasp.colorado.edu/education/outerplanets/solsys_star.php)
14. Fusion in the Sun  
Credit: Borb (Wikimedia Commons User)  
Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license.  
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FusionintheSun.png>
15. Change In Sun like Star's Composition  
Astro 105 Lecture Notes, Adam Frank, University of Rochester  
<http://www.pas.rochester.edu/~afrank/A105/LectureX/LectureX.html>

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

16. Protostar Formation,  
Lecture Notes, Astronomy 122, James Schombert, University of Oregon  
<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec13.html>
17. NICMOS Peers Through Dust to Reveal Young Stellar Disks  
D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL),  
NASA/ESA  
<http://www.spacetelescope.org/images/opo9905b/>
18. Hubble Observes the Fire and Fury of a Stellar Birth  
Credit: C. Burrows (STScI & ESA), the WFPC 2 Investigation Definition Team,  
J. Hester (Arizona State University), J. Morse/STScI, NASA  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/24/image/a/>
19. Schematic view of a T Tauri star  
STSCI (NASA)  
<http://www.stsci.edu/~inr/thisweek1/2011/thisweek318.html>
21. Hertzsprung-Russel Diagram  
European Southern Observatory (via Wikimedia Commons)  
Creative Commons Attribution 3.0 Unported licence  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hertzsprung-Russel\\_StarData.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hertzsprung-Russel_StarData.png)



# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

22. Stellar Evolution (from Flash application)  
Chandra X-Ray Observatory, NASA  
[http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar\\_ev/story/index13.html](http://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/story/index13.html)
23. Small star structure  
Astro 10 Lecture Notes, Professor Caryl Gronwall, Penn State University  
[http://www2.astro.psu.edu/users/caryl/a10/lec9\\_2d.html](http://www2.astro.psu.edu/users/caryl/a10/lec9_2d.html)
24. Artist's impression of the structure of a solar-like star and a red giant  
ESO, Creative Commons Attribution 3.0 Unported license  
<http://www.eso.org/public/images/eso0729a/>
25. M57 -The Ring Nebula  
The Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA) - Public Domain  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1999/01/image/a/>
26. Planetary nebula Abell 39  
Credit: NOAO/AURA/NSF (Non-Commercial, Educational Use)  
[https://www.noao.edu/image\\_gallery/html/im0636.html](https://www.noao.edu/image_gallery/html/im0636.html)
27. The Eskimo Nebula  
NASA, ESA, Andrew Fruchter (STScI), and the ERO team (STScI + ST-ECF)  
<http://www.spacetelescope.org/images/heic9910a/>

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

28. The planetary nebula NGC 2440  
NASA, ESA, and K. Noll (STScI) - Public domain  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NGC\\_2440\\_by\\_HST.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NGC_2440_by_HST.jpg)
29. Diagram of the Triple-Alpha Process  
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triple-Alpha\\_Process.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triple-Alpha_Process.png)
30. Asymptotic Giant Branch (AGB) Stars - figure 1  
NOAO (Non-Commercial, Educational Use)  
<https://www.noao.edu/outreach/press/pr03/sb0307.html>
31. Asymptotic Giant Branch (AGB) Stars - figure 2  
NOAO (Non-Commercial, Educational Use)  
<https://www.noao.edu/outreach/press/pr03/sb0307.html>
32. Dying Star Sculpts Rungs of Gas and Dust  
Credit: NASA; ESA; Hans Van Winckel (Catholic University of Leuven, Belgium);  
and Martin Cohen (University of California, Berkeley)  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2004/11/image/a/>
33. Hertzsprung - Russell Diagram  
Leibniz Institute for Astrophysics, Potsdam  
[www.aip.de/en/research/research-area-ea/research-groups-and-projects/4most/science](http://www.aip.de/en/research/research-area-ea/research-groups-and-projects/4most/science)

# ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

34. Carbon Fusion,  
General Astronomy Lecture Notes, Dr Xiang - Dong Li, Nanjing University  
<http://astronomy.nju.edu.cn/~lixd/GA/AT4/AT421/HTML/AT42104.htm>
35. Massive Star Burning Stages  
Image credit: Brooks/Cole Thomson Learning  
<http://astronomyonline.org/Stars/HighMassEvolution.asp>
36. Massive Star Structure,  
Astronomy 170B1 Lecture Notes, M. Rieke, G. Rieke, The University of Arizona  
<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec16.html>
37. The Life Cycle of a Massive Star  
NASA, Imagine the Universe  
[http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_l1/supernovae.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_l1/supernovae.html)
38. Image of Boomerang nebula taken by Hubble Space Telescope  
NASA, Hubblesite  
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2005/25/>
39. Second generation stars,  
Astronomy 122 Lecture Notes, Prof. Schombert, University of Oregon  
<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec13.html>



# Τέλος Ενότητας

Επεξεργασία: Νικόλαος Τρυφωνίδης  
Θεσσαλονίκη, 31 Μαρτίου 2014



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

