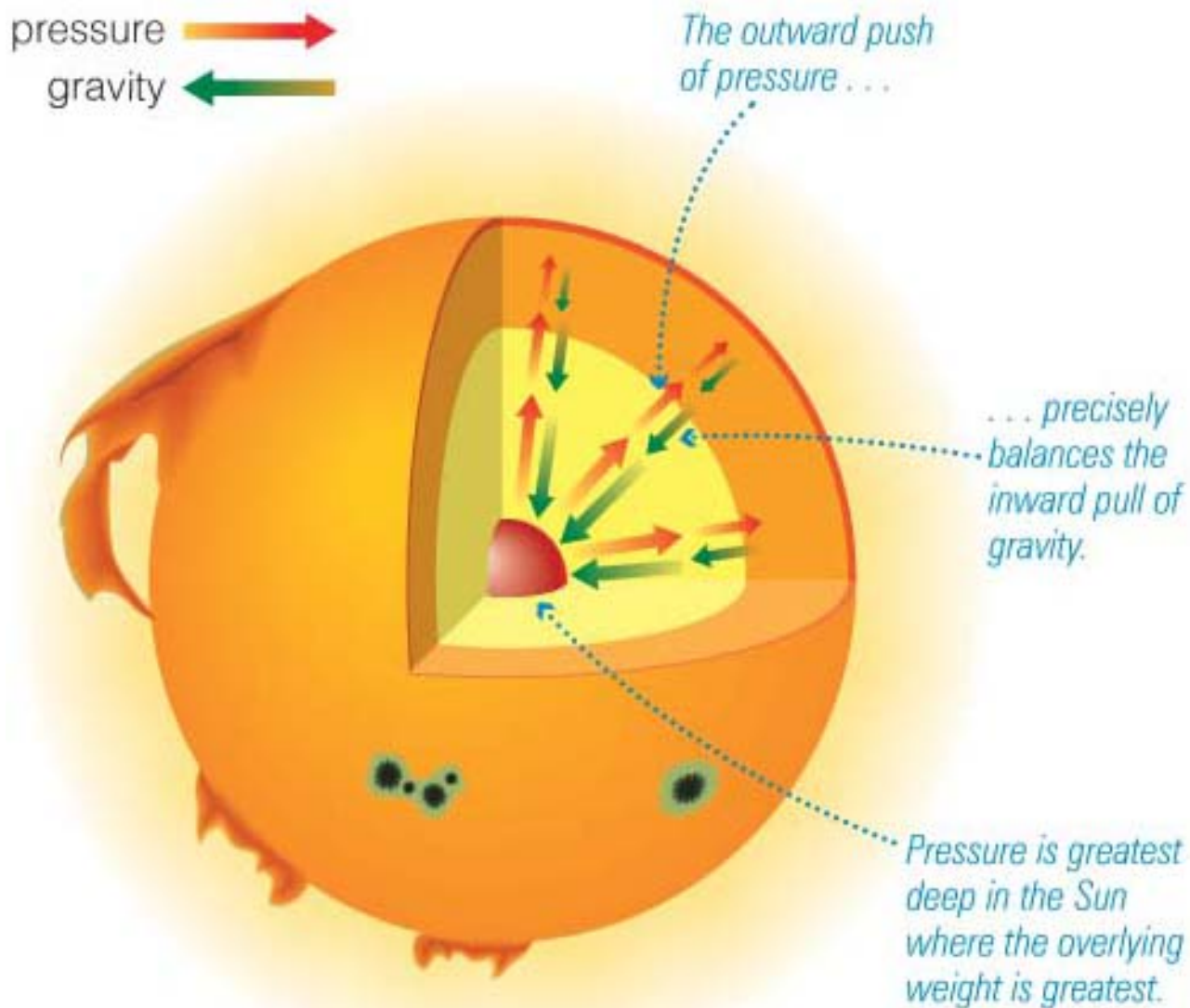


# *Εξέλιξη & Τελικές καταστάσεις αστέρων:*

*Βασικά στοιχεία αναγκαία για την μελέτη της εξέλιξης τους και τις τελικές τους καταστάσεις*

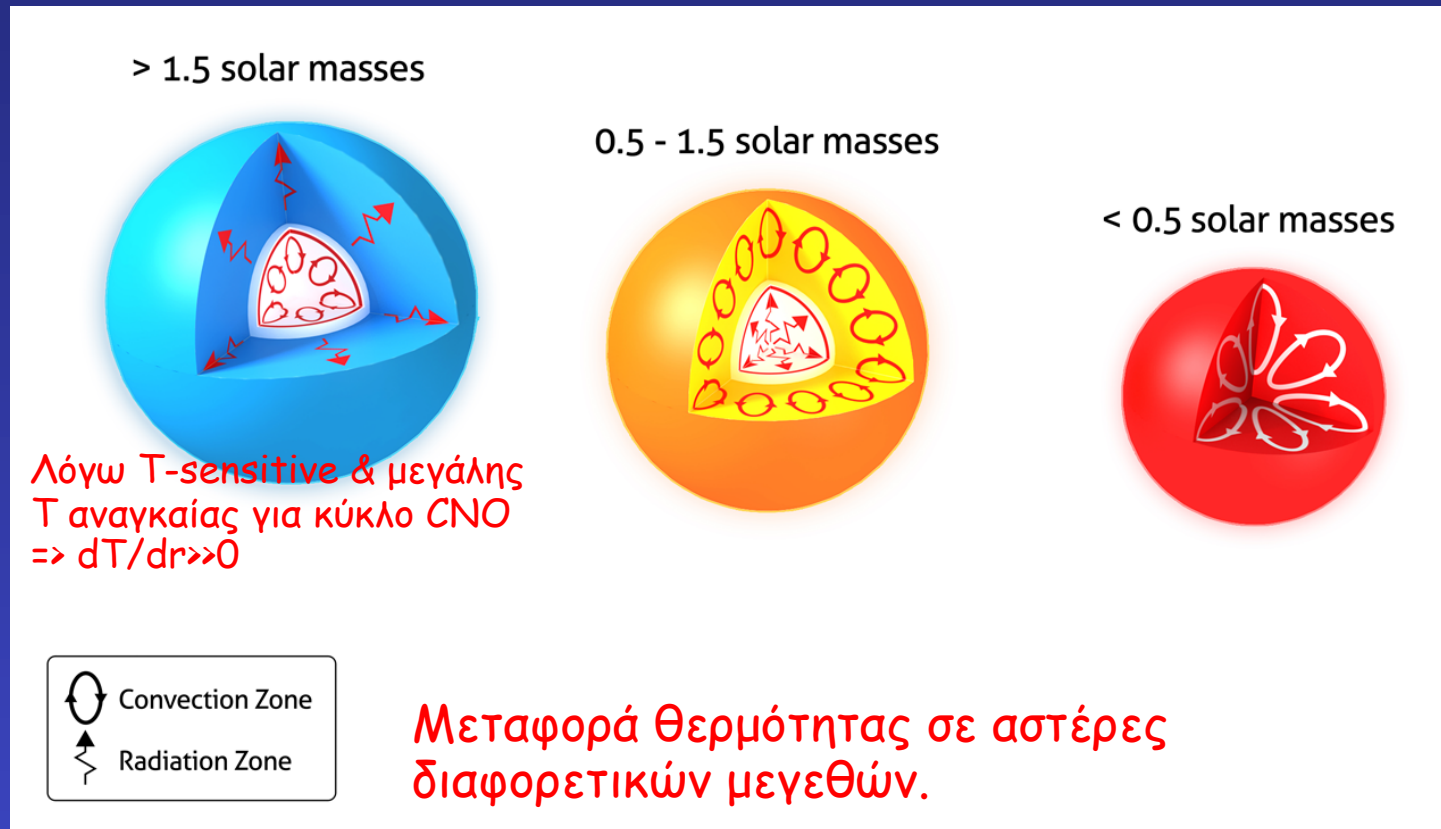
Η ΕΠΙΤΟΜΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ:  
ΒΑΡΥΤΙΚΗΣ - ΘΕΡΜΙΚΗΣ (ή ΕΚΦΥΛΙΣΜΟΥ) ΠΙΕΣΗΣ

1. Η υδροστατική ισορροπία των αστέρων βασίζεται στην αλληλεπίδραση δύο αντισταθμιζόμενων δυνάμεων, της βαρυτικής πίεσης και της εσωτερικής πίεσης του ρευστού (θερμική πίεσης ή πίεση εκφυλισμού).



**Υδροστατική ισορροπία** όπου η πίεση αντισταθμίζει τη βαρυτική δύναμη

2. Το 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα επιβάλλει τη συνεχή εκπομπή ακτινοβολίας από την επιφάνεια αστέρων προς το μεσοαστρικό χώρο (που έχει  $T \sim 3K$ ).



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

3. Η μέση απόσταση αστέρων είναι μεγαλύτερη από  $10^6$  διαμέτρους αστέρων, και έτσι μπορούν αν ειδωθούν ως απομονομένα συστήματα (ο εγγύτερος του Κενταύρου βρίσκεται σε απόσταση 1.3pc ( $\sim 3 \times 10^7 R_{\odot}$ )).

4. Κατά την διάρκεια της ζωής τους οι αστέρες χάνουν ένα  $\sim 50\%$  της αρχικής τους μάζας είτε μέσω αστρικών ανέμων είτε εκρηκτικά (ως καινοφανείς ή υπερκαινοφανείς).

5. Η παραμονή των αστέρων στην Κύρια Ακολουθία διαρκεί για το μεγαλύτερο διάστημα της ζωής τους και σαν αποτέλεσμα της ισορροπίας των 2 αντισταθμιζόμενων δυνάμεων (όσο δηλαδή μεταστοιχειώνουν H σε He).

6. Αν για κάποιο λόγο σταματήσουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα αστέρων, αρχίζει η ψύξη του, πτώση θερμικής πίεσης και συστολή λόγω βαρυτικής πίεσης υπερκείμενων φλοιών και ανάλογα με την αρχική μάζα του αστέρα υπάρχουν 3 πιθανές τελικές καταστάσεις: **Λευκός Νάνος, Αστέρας Νετρονίων και Μελανή Οπή.**

Το εύρος των τιμών Μάζας, Ακτίνας, Θερμοκρασίας και Φωτεινότητας των αστέρων

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

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

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

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

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

Κατώτερο όριο ( $0.08 M_{\odot}$ ):

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

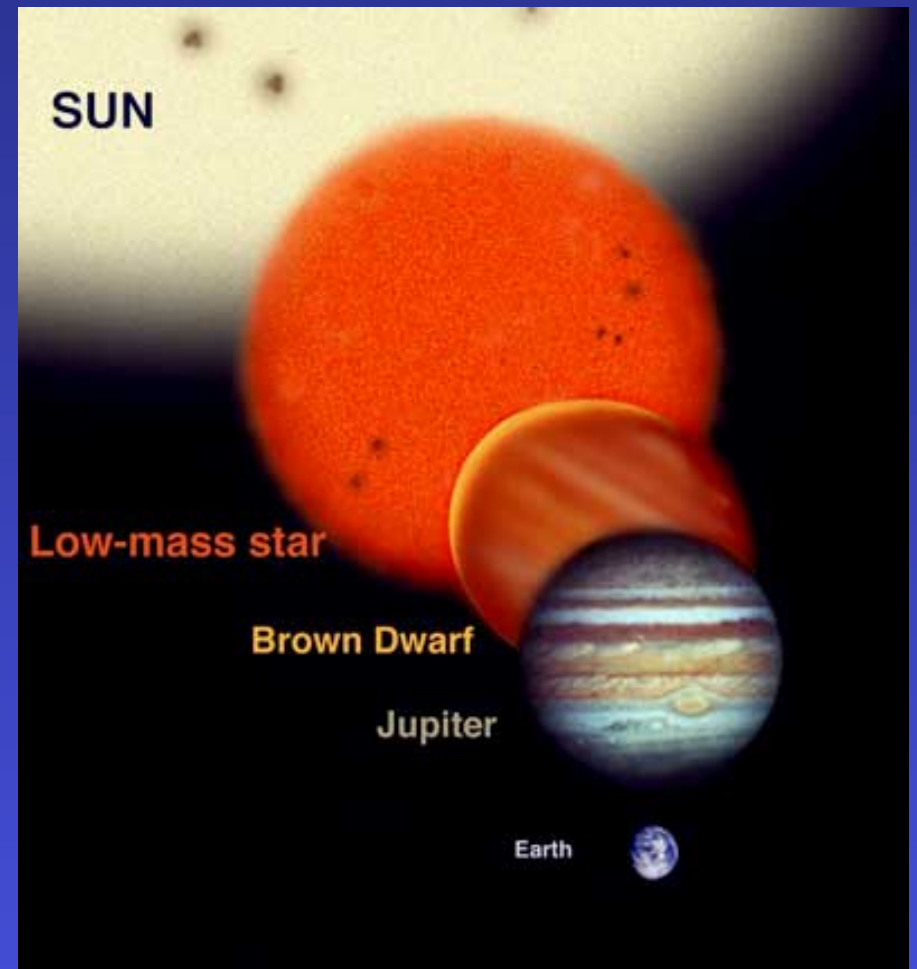
Η ισορροπία διατηρείται αρχικά λόγω θερμικής πίεσης.

Όταν ψυχθεί αρκετά:

-> πίεση αερίου εκφυλισμένων ηλεκτρονίων

-> Καφέ νάνοι.

Σχετικό μέγεθος καφέ νάνου, σε σύγκριση με το Δία, τον Ήλιο και τη Γη



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

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

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

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

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

Υπάρχουν **2 πληθυσμοί** αστέρων στον Γαλαξία: Ο πληθυσμός I και II (κυρίως οι αστέρες των σφαιρωτών σμηνών) με τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

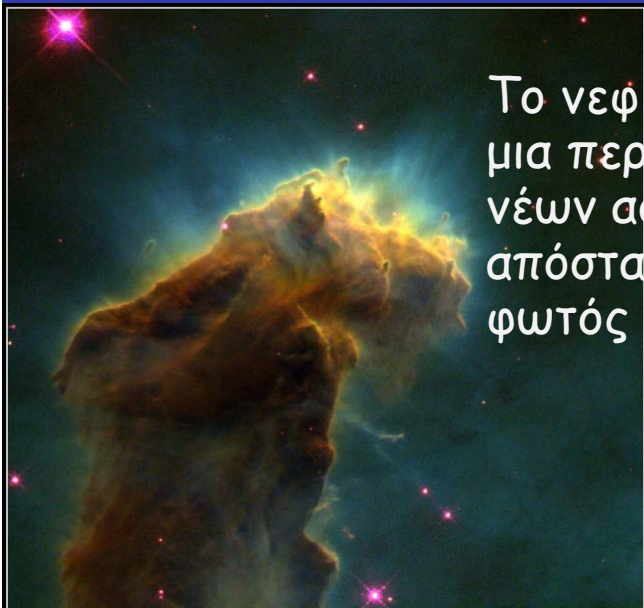
	Πληθυσμός I	Πληθυσμός II
Χημική σύσταση	70% H 28% He 2% μέταλλα	70% H 29.9% He <0.1% μέταλλα
Ηλικία	νεότεροι	παλαιότεροι
Κατανομή στο γαλαξία μας	Σπείρες, δίσκος, μη ομογενής	Σφαιρική, ομογενής

Η δημιουργία των αστέρων ξεκινά από διαταραχές της πυκνότητας της ύλης. Εάν νέφος αερίου είναι μεγαλύτερο από μια οριακή τιμή (όριο Jeans):

$$\frac{M_J}{M_\odot} \propto \left( \frac{T}{\mu} \right)^{3/2} \rho^{-1/2}$$

Τότε η πίεση της θερμικής κίνησης των μορίων δεν μπορεί να αντισταθμίσει την βαρυτική πίεση και αρχίζει να καταρρέει δημιουργώντας πρωταστέρες.

Στα νέφη μοριακού υδρογόνου έχουμε:  $T \sim 10\text{K}$ ,  $\rho \sim 10^{-20} \text{ gr/cm}^3$  και  $\mu=2$ , παίρνουμε  $M_J=10 M_\odot$  οπότε αστέρες με μάζα μεγαλύτερη από αυτο το όριο δημιουργούνται. Με μικρότερη μάζα όμως (που είναι και οι πιο πολυπληθείς στον Γαλαξία;



Το νεφέλωμα του Αετού, μια περιοχή δημιουργίας νέων αστέρων, σε απόσταση 7000 ετών φωτός

Star-Birth Clouds · M16

HST · WFPC2

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



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

Επομένως η δημιουργία των αστέρων με την απλή διαδικασία της βαρυτικής κατάρρευσης δεν είναι απολύτως ικανοποιητική για όλο το εύρος των παρατηρούμενων αστέρων.

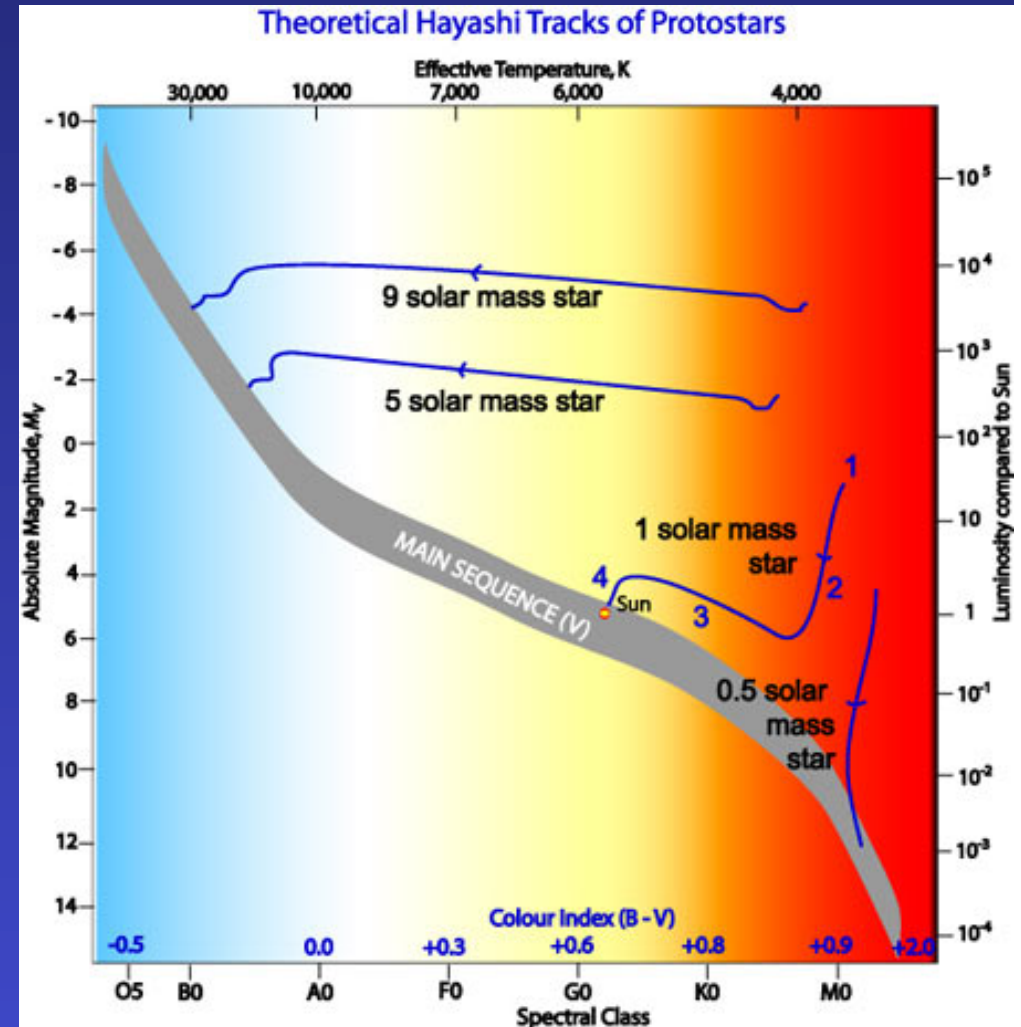
Όμως παίρνοντας υπόψιν μας όμως και τις επιπλέον δυνάμεις που ασκούνται από:

- Την πίεση ακτινοβολίας που ασκούν στην μεσοαστρική ύλη τα μαζικά και ιδιαίτερα θερμά άστρα ενισχύει την βαρυτική κατάρρευση άλλων νεφών
- Η πίεση που ασκούν τα κρουστικά κύματα που προέρχονται από τις εκρήξεις υπερκαινοφανών αστέρων
- Η ίδια η ύπαρξη μεσοαστρικής ύλης επιτείνει την βαρυτική κατάρρευση.

δημιουργία των μικρών σε μέγεθος αστέρων ερμηνεύεται ικανοποιητικά

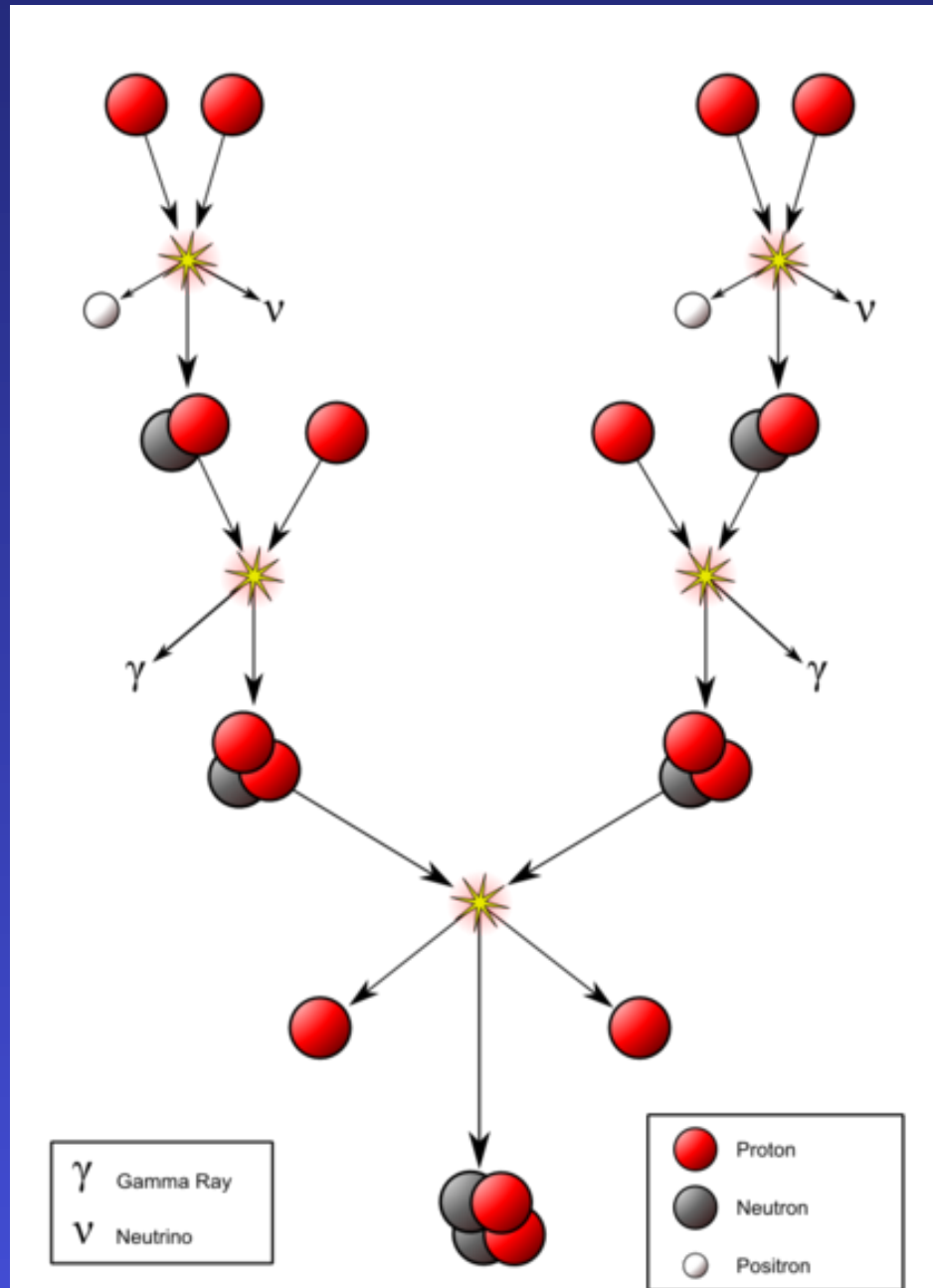
## Εξέλιξη πρωταστέρα, από την αρχή του σχηματισμού του μέχρι την κύρια ακολουθία, στο διάγραμμα HR

Αρχικά το άμορφο νέφος είναι διαφανές ( $\tau \ll 1$ ) λόγω μικρής πυκνότητας, ενέργεια λόγω βαρυτικής συστολής, θερμοκρασία σταθερή γιατί η ενέργεια διαφεύγει ελεύθερα. Η πυκνότητα αυξάνει σιγά-σιγά και λόγω διατήρησης αρχικής στροφορμής η καταρρέουσα ύλη οργανώνεται σε δίσκο. Τελικά η πυκνότητα μεγαλώνει έως  $\tau \sim 1$ , οπότε  $T$  αυξάνει μιας μιας και δεν διαφεύγει πια ενέργεια και αρχίζει να φωτοβολεί ο αστέρας ενόσω ακόμα είναι μεγάλος και ψυχρός σχετικά (επάνω δεξί μέρος διαγράμματος HR). Καθώς συστέλλεται το νέφος μειώνεται η φωτεινότητα του (μικραίνει η επιφάνεια εκπομπής). Η συνεχιζόμενη βαρυτική κατάρρευση όμως θα αυξήσει εν τέλει την  $T$  και την  $L$  αρχίζει μια ανοδική πορεία στο διάγραμμα μέχρι να φτάσει την Κ.Α. Όπου η θερμοκρασία έχει αυξηθεί σε  $10^7$  K και αρχίσουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις μεταστοιχείωσης  $H \rightarrow He$  (αρχίζει η «ζωή» του αστέρα).



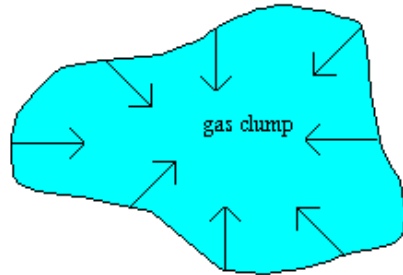
Η πορεία πρωταστέρα τελικής μάζας  $= 1M_{\odot}$  παίρνει  $\sim 2 \times 10^6$  έτη για να φτάσει στην Κ.Α. = ZAMS

Αν  $T > 10$  εκ. Κ ΤΟΤΕ  $4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{}^4\text{He} + 2 \text{ } ^1\text{H} + \text{ενέργεια (p-p chain)}$

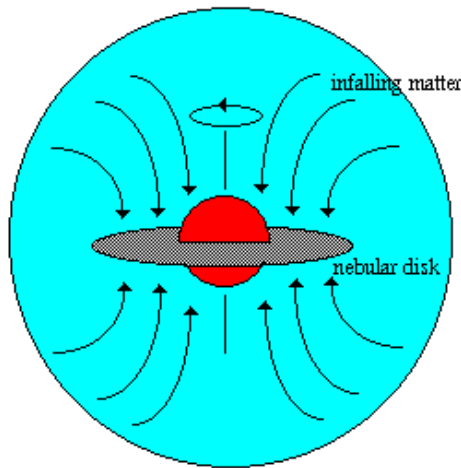


# Η διατήρηση της αρχικής στροφορμής κατά την συστολή δημιουργεί ένα δίσκο γύρω από τον πρωταστέρα.

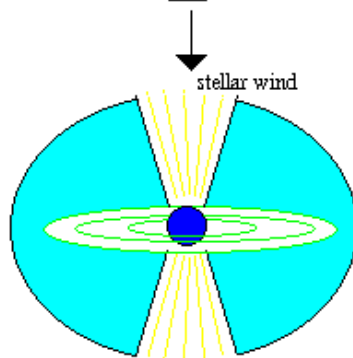
## Protostar Formation



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



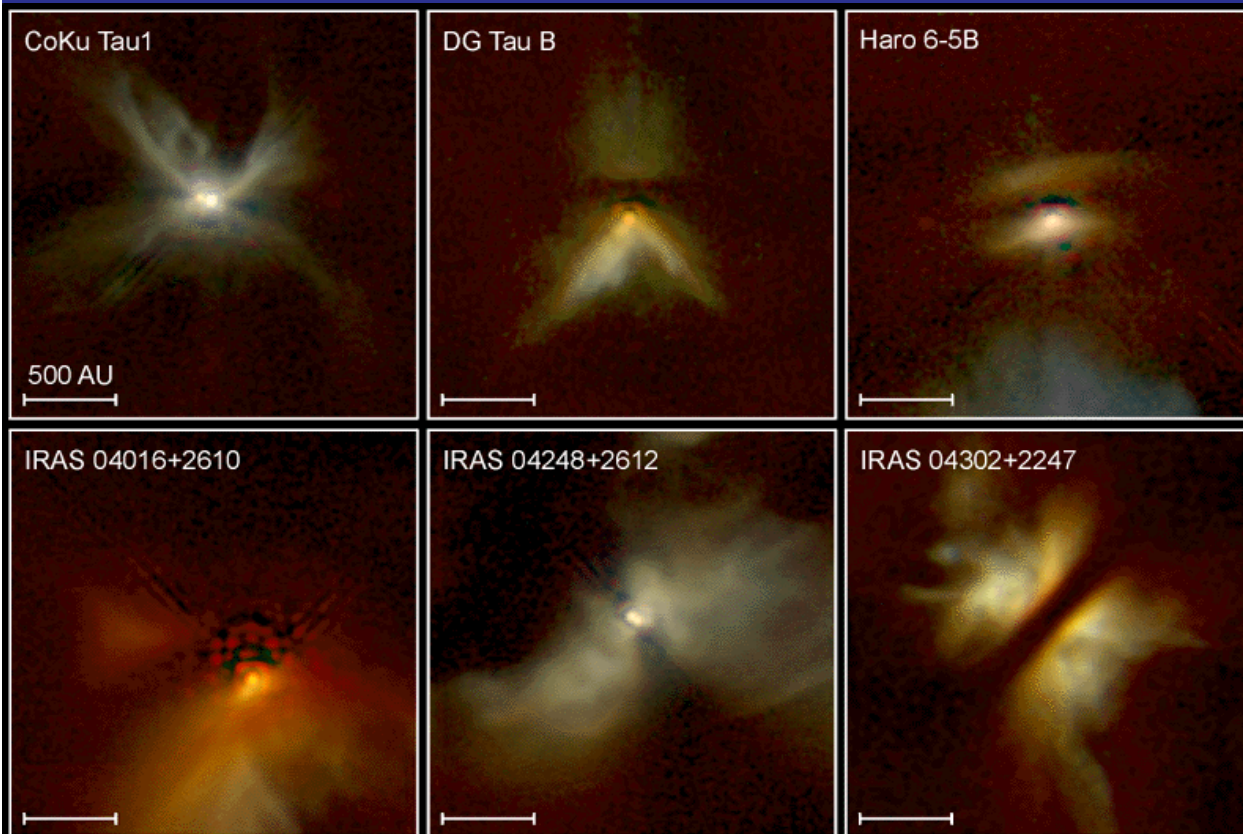
The central region is denser and forms into a protostar, the nebular disk forms slower to become a planetary system. Infalling matter increases the size of the protostar by a factor of 100.



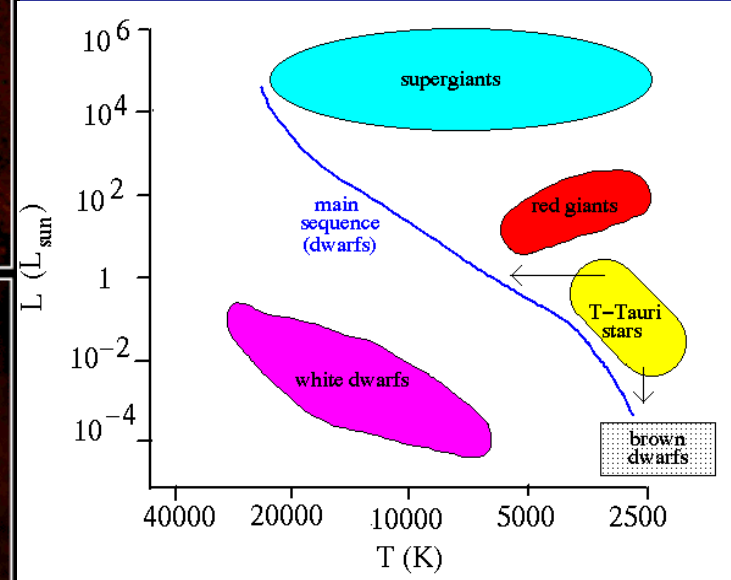
Infall is stopped when the protostar begins thermonuclear fusion and produces a strong stellar wind.

Δημιουργία αστέρα από μοριακό νέφος. Λόγω διατήρησης της στροφορμής και των συγκρούσεων, το νέφος συμπιέζεται σε περιστρεφόμενο δίσκο. Η μάζα του πρωταστέρα 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.

Η ύπαρξη της πυκνής μεσοαστρικής ύλης από την οποία γεννιούνται οι πρωταστέρες δεν μας επιτρέπει να τα δούμε στο οπτικό μέρος του φάσματος. Στο υπέρυθρο όμως ναι. Οι Αστέρες **T-Tauri** θεωρούνται πρωταστέρες και εντοπίζονται στη αναμενόμενη θέση στο διάγραμμα HR σύμφωνα με Hayashi. Έχουν ισχυρούς ανέμους (παρατηρούνται μέσω Ντόπλερ γραμμών εκπομπής). Επίσης παρατηρείται Li που συναρτάται με τις χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, μιας και το πρωτογενές αυτό Li καίγεται σε  $T \sim 10^6$  K (πριν αρχίσει το p-p chain).

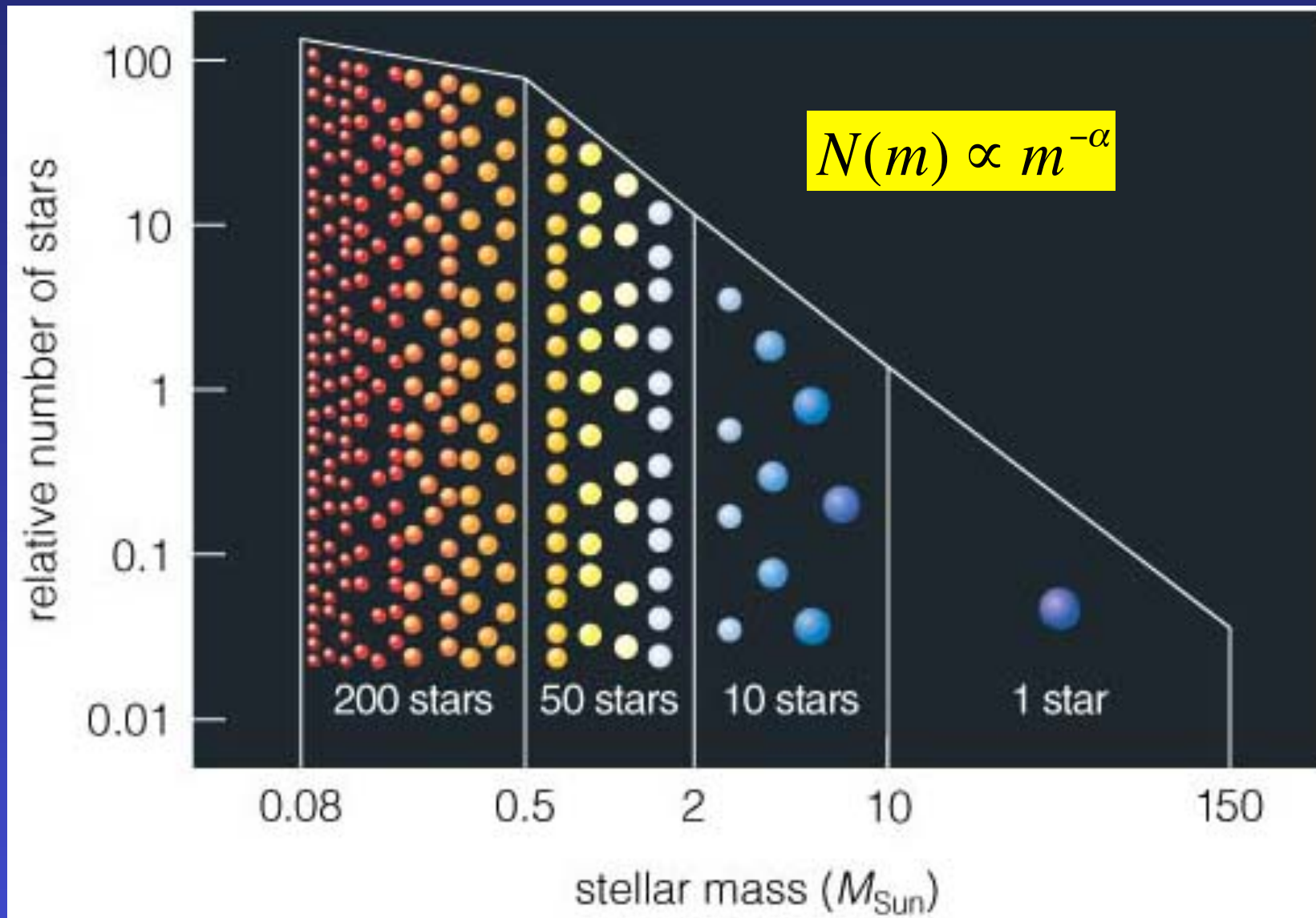


**Young Stellar Disks in Infrared**  
 PRC99-05a • STScI OPO  
 D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA  
**HST • NICMOS**



Πρωταστέρες στον αστερισμό του Ταύρου (απόσταση 450 ετών φωτός), στο υπέρυθρο φως. Τα νεφελώματα αποτελούνται από σκόνη που ανακλά το αστρικό φως

# Αρχική Συνάρτηση Μάζας Αστέρων



Σχετικός αριθμός αστέρων διαφορετικών μαζών, για κάθε αστέρα μάζας 150 φορές μεγαλύτερης του Ηλίου.

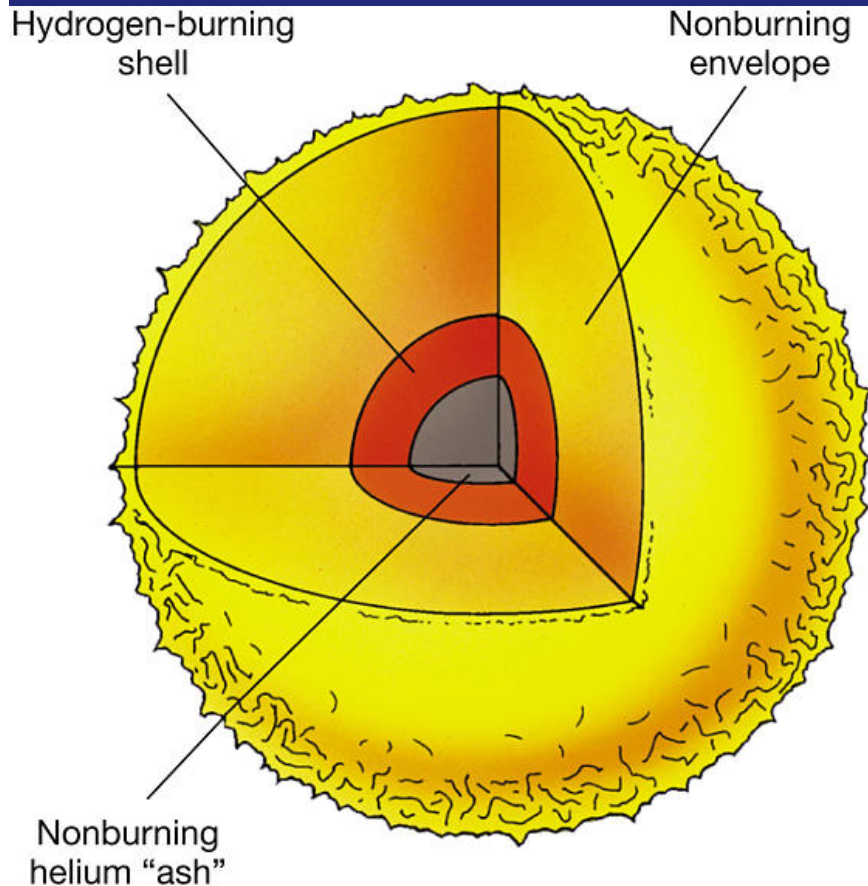
## ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΑΣΤΕΡΩΝ

- Η παραμονή στην Κύρια Ακολουθία διαρκεί για το μεγαλύτερο διάστημα της ζωής τους και για όσο δηλαδή μεταστοιχειώνουν Η σε He.

$$E = L_* t_*, E = M_* c^2 \Rightarrow t_* = t_o \frac{M_*}{M_o} \frac{L_o}{L_*} = t \left( \frac{M_*}{M_o} \right)^{2.5}$$

- Ανάλογα με την αρχική  $M$  του αστέρα υπάρχουν 4 διαδρομές εξέλιξης πέραν της Κύριας Ακολουθίας.
- Η βασική παράμετρος που καθορίζει την εξελικτική τους πορεία πέραν της Κ.Α. είναι η ισορροπία μεταξύ βαρύτητας και 2 ειδών πίεσεως συναρτήσει των διαφορετικών στοιχείων που μεταστοιχειώνονται.
- Κάθε φορά που σταματούν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα (λόγω κατανάλωσης του κύριου στοιχείου που «καίγεται»), αρχίζει η ψύξη του, πτώση θερμικής πίεσης και συστολή λόγω βαρυτικής πίεσης υπερκείμενων φλοιών και διάφορα δραματικά συνεπακόλουθα (αστρικοί άνεμοι, Πλαν.Ν., έκρηξη SN), που εξαρτώνται από την αρχική  $M$  αστέρα. **Εμπλουτισμός μεσοαστρικού χώρου με στοιχεία βαρύτερα από Η.**
- Ανάλογα με την αρχική μάζα του αστέρα, οι πιθανές τρεις τελικές καταστάσεις είναι: **Λευκός Νάνος, Αστέρας Νετρονίων και Μελανή Οπή.**

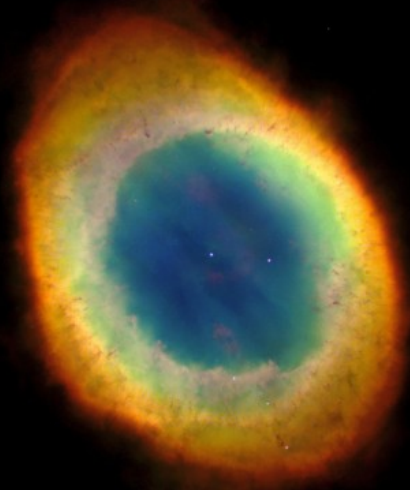
## Αστέρας με $M < 0.8 M_{\odot}$



Όταν  $H \rightarrow He$  στον πυρήνα, ρυθμός θερμοπυρηνικών αντιδράσεων μειώνεται, **μειώνεται  $T$  και η θερμική  $P$  αερίου**  $\Rightarrow$  Βαρύτητα υπερισχύει πίεσης. **Συστολή πυρήνα**, Kelvin-Helmholtz παραγωγή ενέργειας που θερμαίνει και υπερκείμενα στρώματα, αρχίζει σε αυτά  $H \rightarrow He$ , ενώ ο πυρήνας  $He$  παραμένει αδρανής και συστέλλεται. Η **επιπλέον αυτή ενέργεια βαρυτικής συστολής εκτινάσσει τα εξωτερικά στρώματα αστέρα** (επειδή τώρα τα υπερκείμενα στρώματα είναι λιγότερα βαριά από όταν η καύση  $H$  γινόταν στον πυρήνα  $\rightarrow$  φάση **Ερυθρού Υπογίγαντα**).

Λόγω μείωσης  $T$  στα εξωτερικά στρώματα, αυξάνει η αδιαφάνεια  $\tau$  και εμποδίζεται η διαφυγή ενέργειας μέσω ακτινοβολίας, αλλά μεταφέρεται μέσω ζωνών μεταφοράς  $\Rightarrow$  αυξάνει φωτεινότητα με σταθερή  $T$  (φάση **Ερυθρού Γίγαντα**).

Συνεχίζει η συρρίκνωση αδρανούς πυρήνα  $He$ , **αυξάνει η πυκνότητα έως να εκφυλιστούν τα  $e^-$** . Αυτό συμβαίνει πριν φτάσει  $T = 2 \times 10^8$  K, αναγκαία για καύση  $He$ . Ο πυρήνας σταθεροποιείται σε Λ.Ν. Η βαρυτική έλξη πυρήνα γίνεται πιο ασθενής λόγω πίεσης εκφυλισμού και μαζί με πίεση ακτινοβολίας υπερκείμενων φλοιών εκτινάσσουν τα εξωτερικά κελύφη ως ισχυρούς αστρικούς ανέμους  $\rightarrow$  φάση **Ερυθρού Υπεργίγαντα**. Οι άνεμοι έχουν  $u \sim 30$  km/sec. **Τελική κατάσταση Λευκός Νάνος  $He$**  με  $T \sim 30000$  K που φωτίζει τα υπολείμματα της αραιής ατμόσφαιρας (φάση **Πλαν. Νεφελώματος**).



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



Το πλανητικό νεφέλωμα Abell 39, με χαρακτηριστική σφαιρική συμμετρία. Το νεφέλωμα έχει διάμετρο περίπου πέντε ετών φωτός και βρίσκεται σε απόσταση 7000 ετών φωτός



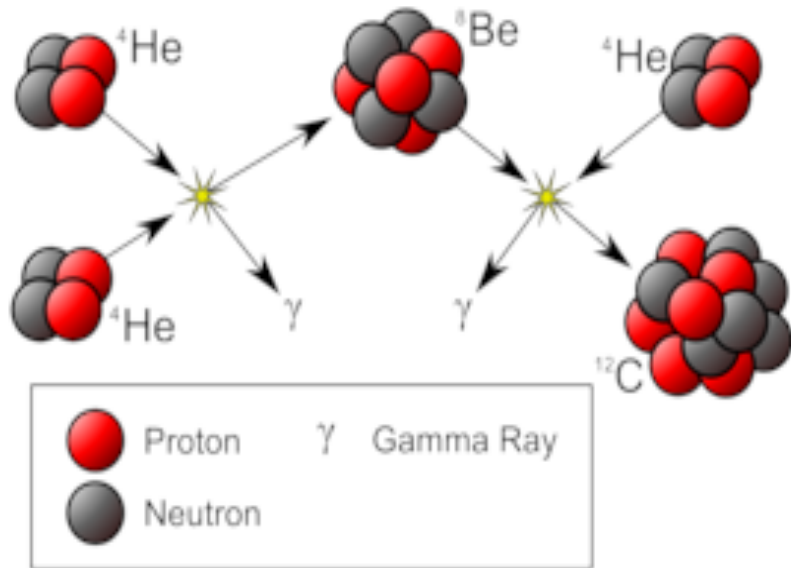
Το νεφέλωμα «Εσκιμώος» (NGC 2392), σε απόσταση 3000 ετών φωτός. Οι εσωτερικοί σχηματισμοί προκαλούνται από δυνατούς ανέμους σωματιδίων από το κεντρικό αστέρι. Οι εξωτερικοί σχηματισμοί, μήκους της τάξεως του ενός έτους φωτός, είναι ασυνήθιστοι και δεν έχει δωθεί κάποια εξήγηση για τη δημιουργία τους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

# Πλανητικό Νεφέλωμα Helix

Βρίσκεται σε απόσταση 650 ετών φωτός στον αστερισμό του Υδροχόου.



## Αστέρας με $0.8M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$



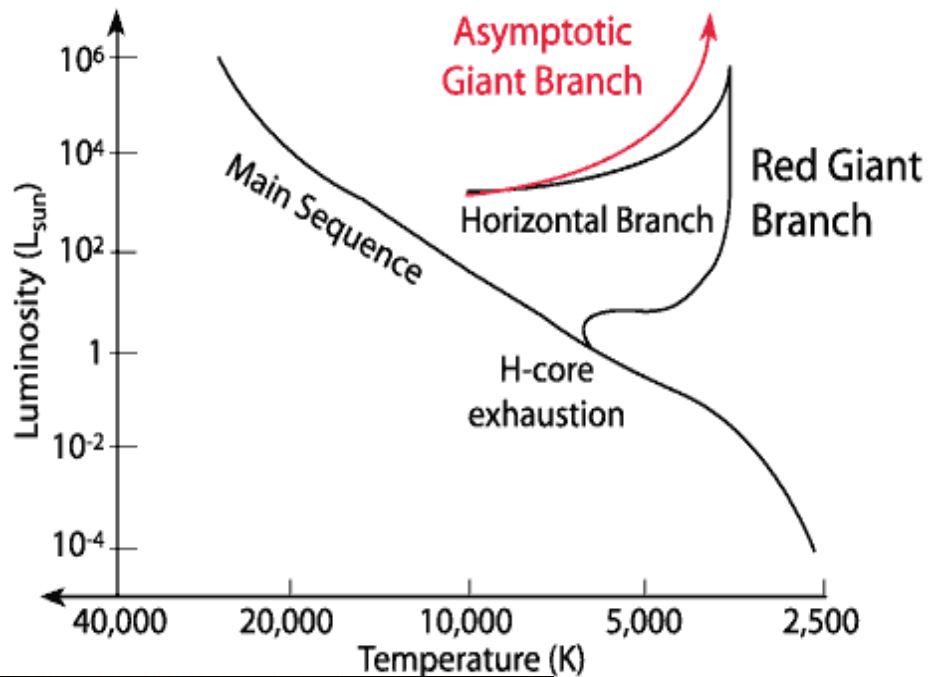
Μέχρι το στάδιο του ερυθρού γίγαντα  $\rightarrow$  όμοια εξέλιξη με  $M < 0.8M_{\odot}$ .

Όμως η θερμοκρασία στον αδρανή πυρήνα **He ξεπερνά αυτή της ανάφλεξης He ( $2 \times 10^8\text{K}$ )**  $\rightarrow$  αντίδραση τριών πυρήνων ηλίου (triple alpha reaction)

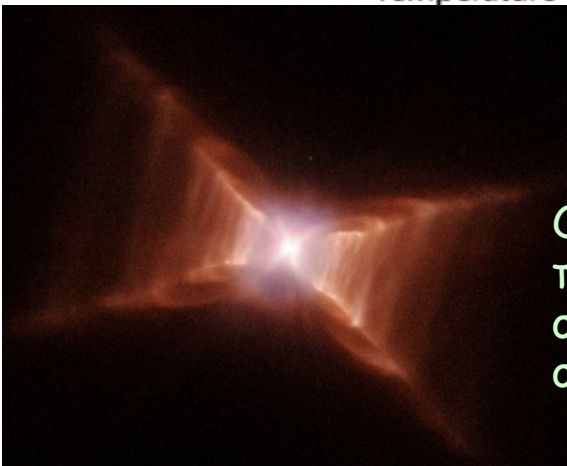
Παρόλη την καύση He η πίεση που εξισορροπεί βαρύτητα είναι του εκφυλισμένου αερίου  $e^-$ .

Η αύξηση της  $T$  πυρήνα **δεν** συνεπάγεται και αδιαβατική της εκτόνωση (όπως συμβαίνει στους μη-εκφυλισμένους πυρήνες)  $\Rightarrow$  επιφέρει εκρηκτικό ρυθμό καύσης He  $\Rightarrow$  **στιγμιαία λάμψη He με  $10^{11} L_{\odot} \gg L_{\text{Edding}}$**

Η ραγδαία αύξηση  $T$  κατά την λάμψη επιφέρει την κυριαρχία της θερμικής πίεσης έναντι της πίεσης εκφυλισμού  $\Rightarrow$  επαναφορά αδιαβατικής εκτόνωσης της  $T$  και εξισορρόπηση παραγωγής ενέργειας. Ο πυρήνας διαστέλλεται, εκτονώνεται και η  $T$  πέφτει, οπότε ελαττώνεται και η θερμική πίεση, ελαττώνεται η  $L$  και η ακτίνα  $R \sim 5 R_{\odot} \Rightarrow$  **οριζόντιος κλάδος HR**.



Όταν εξαντληθεί το He ( $\rightarrow$  C&O), ο αδρανής πυρήνας συστέλλεται, αυξάνει  $T$  &  $P$  του πυρήνα αλλά και των υπερκείμενων φλοιών (σε διαδοχικούς φλοιούς μεταστοιχειώνονται He και H)  $\rightarrow$  **αυξάνει  $L$  επιφανείας ενώ συνεχίζει συρρικνώνεται ο πυρήνας λόγω βαρυτικής συστολής**. Η θερμική πίεση είναι τώρα τεράστια, αυξάνει η ακτίνα  $R=1AU$ , η φωτεινότητα  $L=10^4 L_{\odot}$  και μειώνεται η  $T \sim 3000K$  και ανέρχεται στο HR διάγραμμα (**Ερυθρός Υπεργίγαντας, AGB φάση**). Καθώς διαστέλλεται εξωτερικός φλοιός, πέφτει η  $T$ , σταματά η καύση H στον εξωτερικό φλοιό και έχουμε μόνο καύση He βαθύτερα.

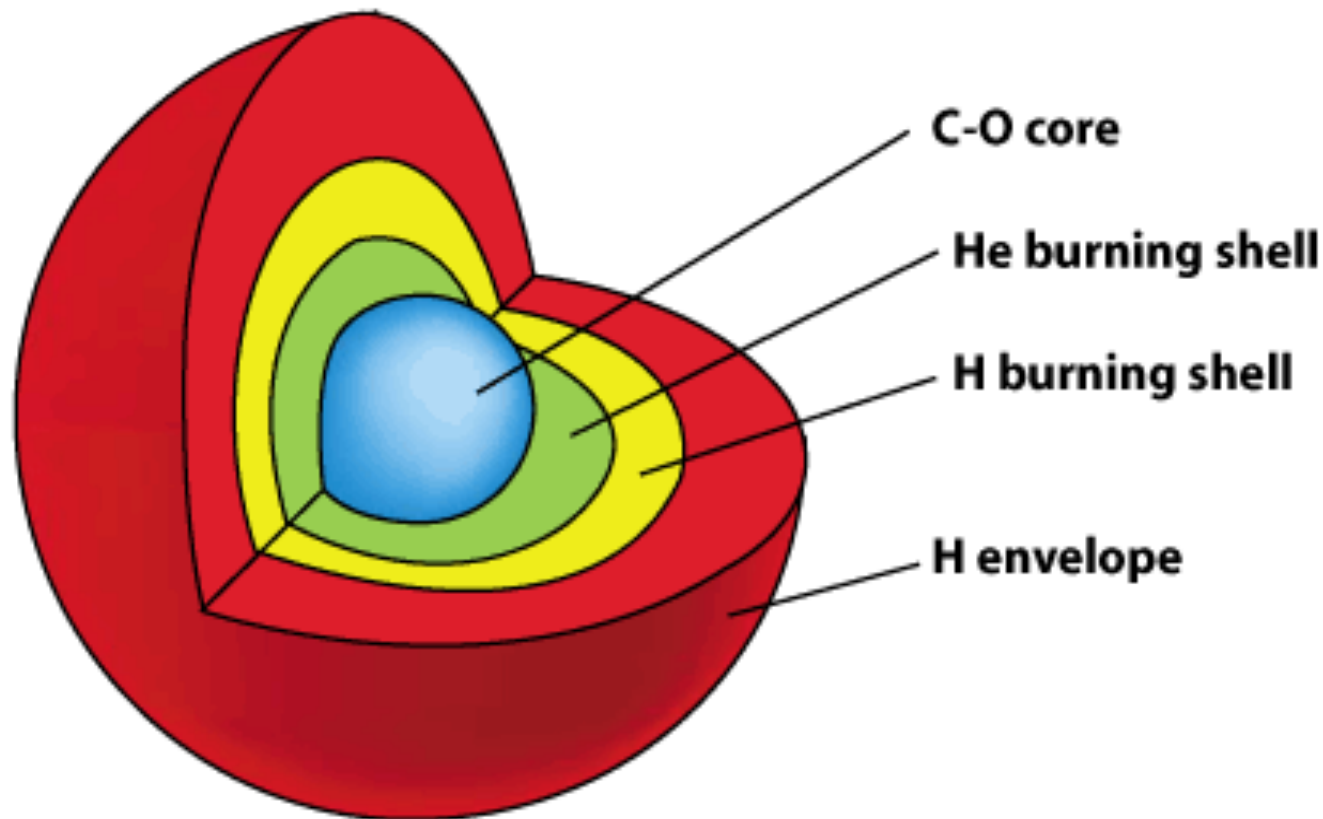


Ο αστέρας HD 44179, που βρίσκεται στα τελευταία στάδια της ζωής του, με το ασυνήθιστο σχήμα νεφελώματος. Το σχήμα αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση ενός τόρου σκόνης που περιβάλλει το διπλό σύστημα αστέρων στο εσωτερικό του

Όταν εξαντληθεί το  $H$ , ο εξωτερικός φλοιός  $H$  ξανασυστέλλεται, αυξάνει η  $T$  και ξαναρχίζει να μεταστοιχειώνεται σε  $He$ . Όταν παραχθεί αρκετό  $He$  ξαναρχίζει η καύση του σε υποφλοιό και επαναλαμβάνεται αυτή τη διαδικασία με αυξανόμενη συχνότητα.

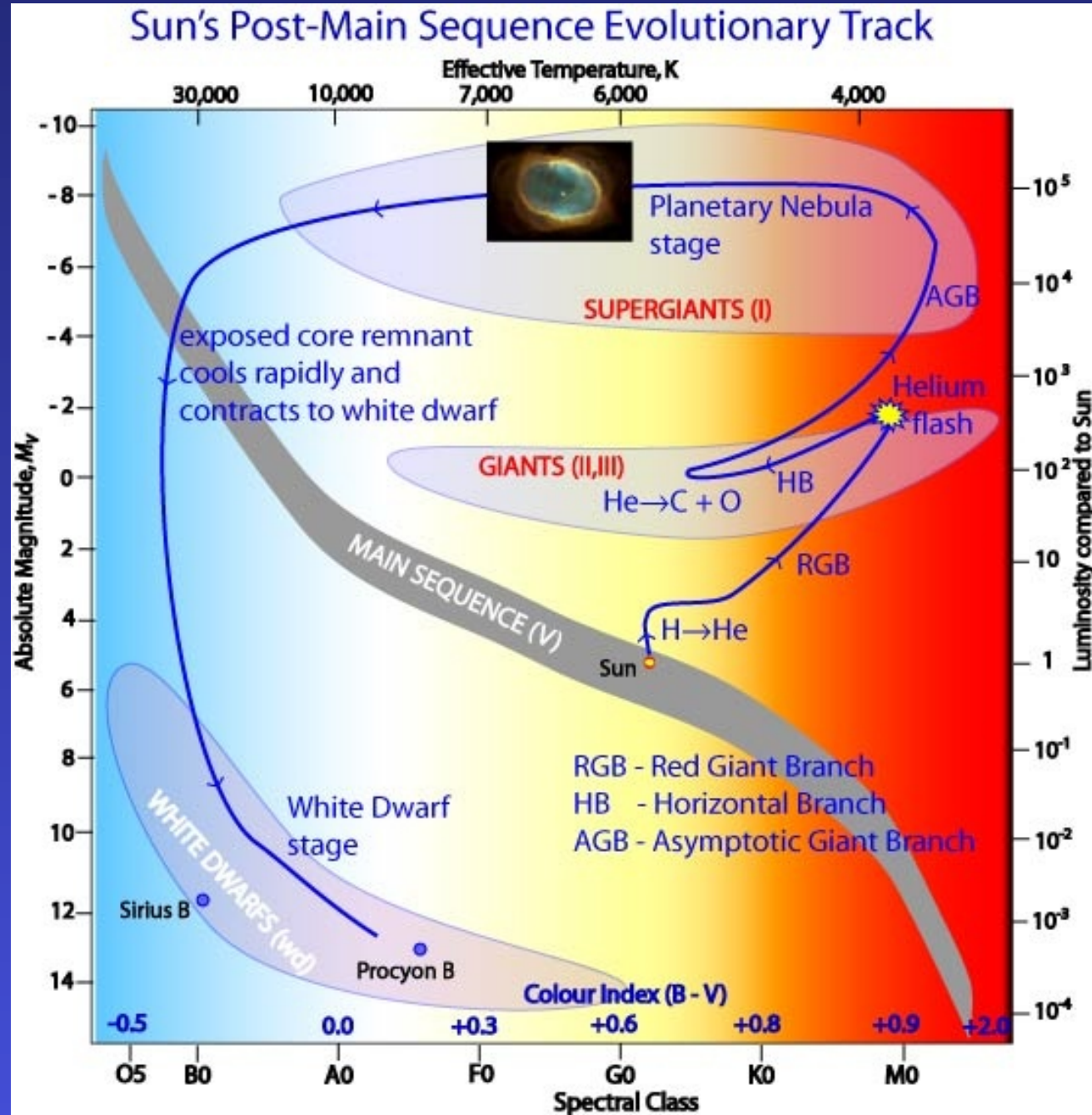
→ **ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: Λευκός Νάνος  $C \& O$  + πλανητικό νεφέλωμα από φάση AGB**

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



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

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



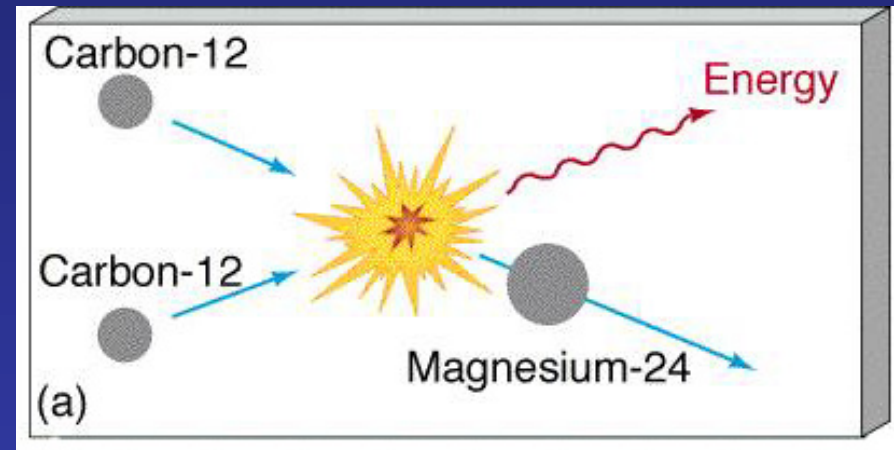
**AGB φάση:** Ο αδρανής πυρήνας C&O συστέλλεται, αυξάνει T & P του πυρήνα και των υπερκείμενων φλοιών (σε διαδοχικούς φλοιούς «καίει» He και H) => αυξάνει L επιφανείας ενώ συνεχίζει συρρικνώνεται ο πυρήνας λόγω βαρυτικής συστολής. Η θερμική πίεση είναι τώρα τεράστια, αυξάνει η R και L και μειώνεται η T και ανέρχεται στο HR διάγραμμα

## Αστέρας με $3 < M < 10 M_{\odot}$

### Πιο γρήγορη εξέλιξη

Ο πυρήνας μετά την εξάντληση πυρηνικών αποθεμάτων είναι βαρύτερος από  $\sim 1.4 M_{\odot}$  (όριο Chandrasekhar)

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



Αλλά δε δημιουργείται λάμψη He (η καύση He ξεκινά χωρίς να υπάρχει πίεση εκφυλισμένου αερίου), δεν περνά από φάση AGB

Διαδοχικές καύσεις και συσσώρευση στον πυρήνα C, O.

- Για  $M < 5 M_{\odot}$  δεν αναφλέγεται ο C  $\rightarrow$  ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: λευκός νάνος C,O.
- Για  $5 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$   $\rightarrow$  ανάφλεξη C υπό εκφυλισμένες συνθήκες, λάμψη άνθρακα και παραγωγή  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{16}\text{O}$

$\rightarrow$  Η λάμψη C εκλύει τεράστια ενέργεια  $\Rightarrow$  ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: SNI & Αστέρας Νετρονίων

## Αστέρας με $M > 10 M_{\odot}$

Διαδοχικές συστολές μετά από εξάντληση στοιχείων αυξανόμενου ατομικού αριθμού.

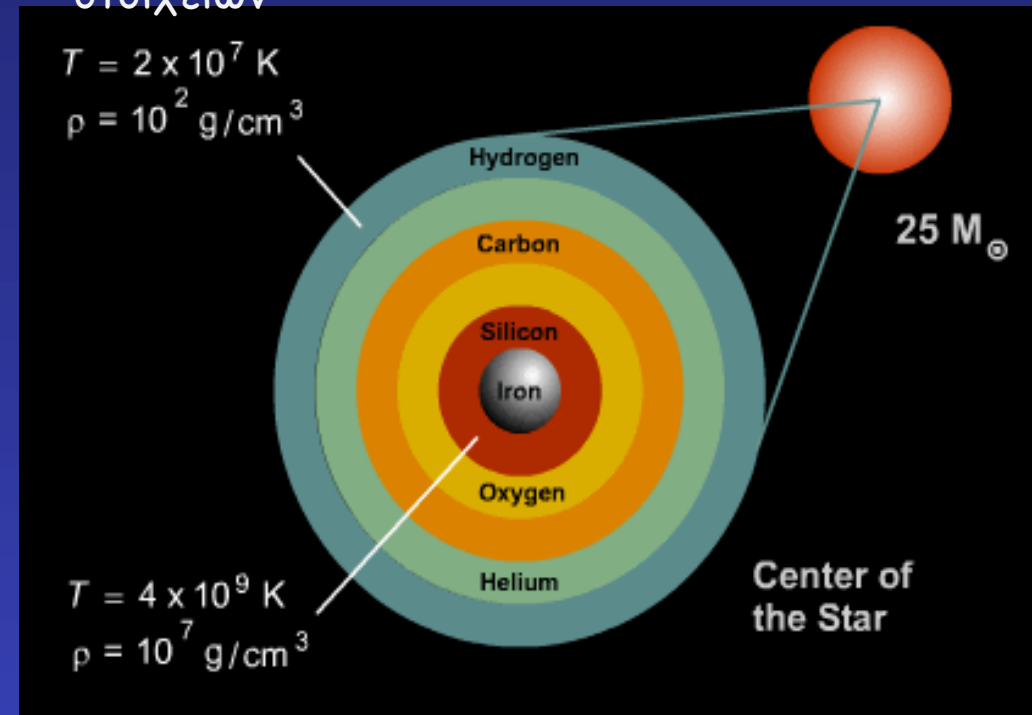
-> καύσεις βαρύτερων στοιχείων

-> σταθεροποίηση είτε όταν (1) η  $T$  πυρήνα δεν είναι αρκετά μεγάλη για «καύση» επόμενου στοιχείου, είτε (2) φτάσει μέχρι την παραγωγή σιδήρου  $^{56}\text{Fe}$  (και σταματά λόγω του ότι η καύση  $^{56}\text{Fe}$  είναι ενδόθερμη).

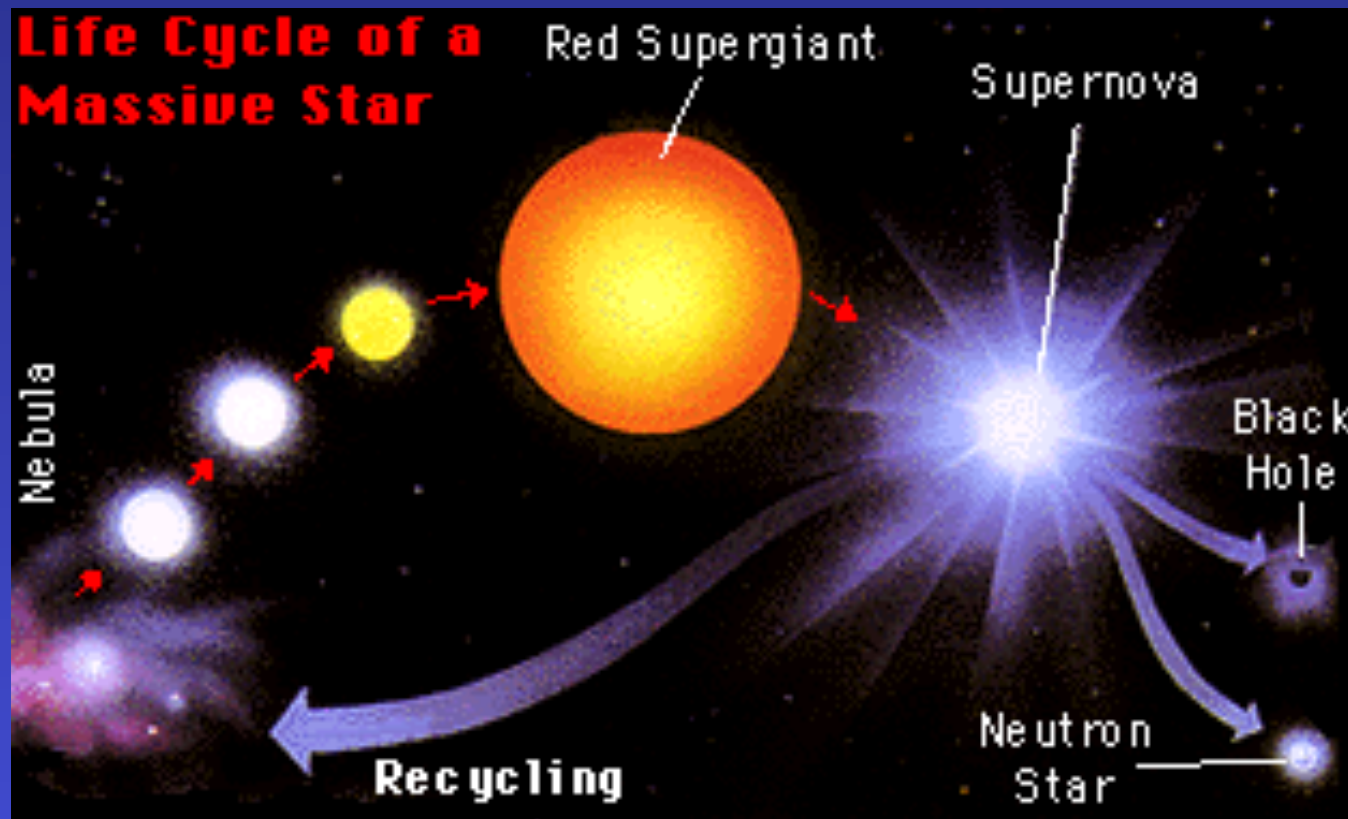
-> Ο αδρανής πυρήνας σιδήρου οδηγεί σε καταστροφική συστολή και έκρηξη υπερκαινοφανούς τύπου II & εμπλουτισμός μεσοαστρικού χώρου με  $Z$ .

-> Ο πυρήνας έχει μάζα μεγαλύτερη από το όριο Chandrasekhar και επομένως καταρρέει σε μεγαλύτερες πυκνότητες. Ο  $^{56}\text{Fe}$  φωτοδιασπάται:  $^{56}\text{Fe} + h\nu \rightarrow 13\ ^4\text{He} + 4n$  και  $^{56}\text{Fe} + h\nu \rightarrow 2p + 2n + 2e^-$ , αντιδράσεις που απαιτούν ενέργεια, ανακόπουν  $T$  και  $P$  και επιταχύνουν κατάρρευση του πυρήνα. Στην συνέχεια  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$  και η διαφυγή των νετρίνων ρίχνει ακόμα περισσότερο την  $T$  &  $P \Rightarrow$  ελεύθερη πτώση των φλοιών διάρκειας  $\sim 10\text{sec}$ . Η πυκνότητα πυρήνα φτάνει  $10^{14}\text{ gr/cm}^3$  οπότε πλέον ούτε τα  $\nu_e$  διαφεύγουν  $\Rightarrow$  αύξηση  $T$  και συνεπακόλουθη αλματώδης αύξηση πίεσης αερίου  $\sim nkT$  + πίεση ακτινοβολίας  $\sim T^4 \Rightarrow$  2 εκδοχές τελικής κατάστασης ανάλογα με την αρχική μάζα.

Λόγω των μεγάλων βαρυτικών δυνάμεων σε έναν αστέρα μεγάλης μάζας, μπορούν να συνυπάρξουν πολλά στρώματα σύντηξης όλο και βαρύτερων στοιχείων



- $M > 25 M_{\odot}$ :  $F_G \gg F_p$  ολοκληρωτική βαρυτική καταστροφική κατάρρευση -> **ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: SNII + Μελανή Οπή**
- $15 < M < 25 M_{\odot}$ : Σε κάποια στιγμή  $F_p > F_G \Rightarrow$  τα εξωτερικά στρώματα αναπηδούν στο στερεό πυρήνα και διαστέλλονται με υπερηχητική ταχύτητα θερμαίνοντας τα υπερκείμενα στρώματα. Ταυτόχρονα τα άφθονα νετρόνια προερχόμενα από την φωτοδιάσπαση σιδήρου και ηλίου) απορροφώνται από πυρήνες μέσου ατομικού αριθμού  $\rightarrow$  σχηματίζονται βαρύτερα στοιχεία από σίδηρο (που με εξώθερμες θερμοπυρηνικές αντιδράσεις δεν σχηματίζονται). -> **ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: SNII + Αστéρας Νετρονίων.**



Ο κύκλος ζωής ενός αστέρα μεγάλης μάζας, από πλανητικό νεφέλωμα σε ερυθρό υπεργίγαντα και υπερκαινοφανή, και κατάληξη του σε μελανή οπή ή αστέρα νετρονίων

# ΤΕΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

**Sirius B:** ανακαλύφθηκε το

$$L \sim 0.03 L_{\text{sun}}$$

$$M \sim 1 M_{\text{sun}}$$

$$T \sim 27,000 \text{ K}$$

Από τον νόμο  
Stefan-Boltzmann  
βρίσκουμε άμεσα:

$$\Rightarrow R \sim R_{\text{Γης}} !$$

Ο Λευκός Νάνος Sirius B  
(κάτω αριστερά), δίπλα στον  
αστέρα Sirius A



# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΥΚΩΝ ΝΑΝΩΝ

Αρχική μάζα αστέρα  $< 5 M_{\odot}$  (~90% των αστέρων του Γαλαξία)

Μάζα:  $0.15 - 1.4 M_{\text{sun}}$  με μέγιστο της κατανομής στο  $0.6 M_{\text{sun}}$

Ακτίνα:  $5,000 - 15,000 \text{ km}$

Εσωτερική θερμοκρασία:  $10^6 - 10^7 \text{ K}$  (αλλιώς θα είχαμε καύση  $\text{He} \rightarrow \text{C}$ )

Επιφανειακή θερμοκρασία:  $4,000 - 150,000 \text{ K}$

Υλικό πυρήνα είτε  $\text{He}$  είτε  $\text{C\&O}$

Τυπική απόσταση μεταξύ πυρήνων  $C$ . Θεωρώ σφαίρα ακτίνας  $r_c$  που περιέχει 1 άτομο (παίρνοντας  $\rho = n_c m_H \mu_c = 3 \times 10^6 \text{ gr/cm}^3$ ) δηλαδή

$$\frac{4\pi}{3} r_c^3 n_c = 1 \Rightarrow r_c = \left( \frac{3n_c}{4\pi} \right)^{1/3} \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}$$

Ενώ η ακτίνα ηλεκτρονικού φλοιού του  $\text{H}$  (ακτίνα Bohr) είναι 2 τάξεις μεγαλύτερη.

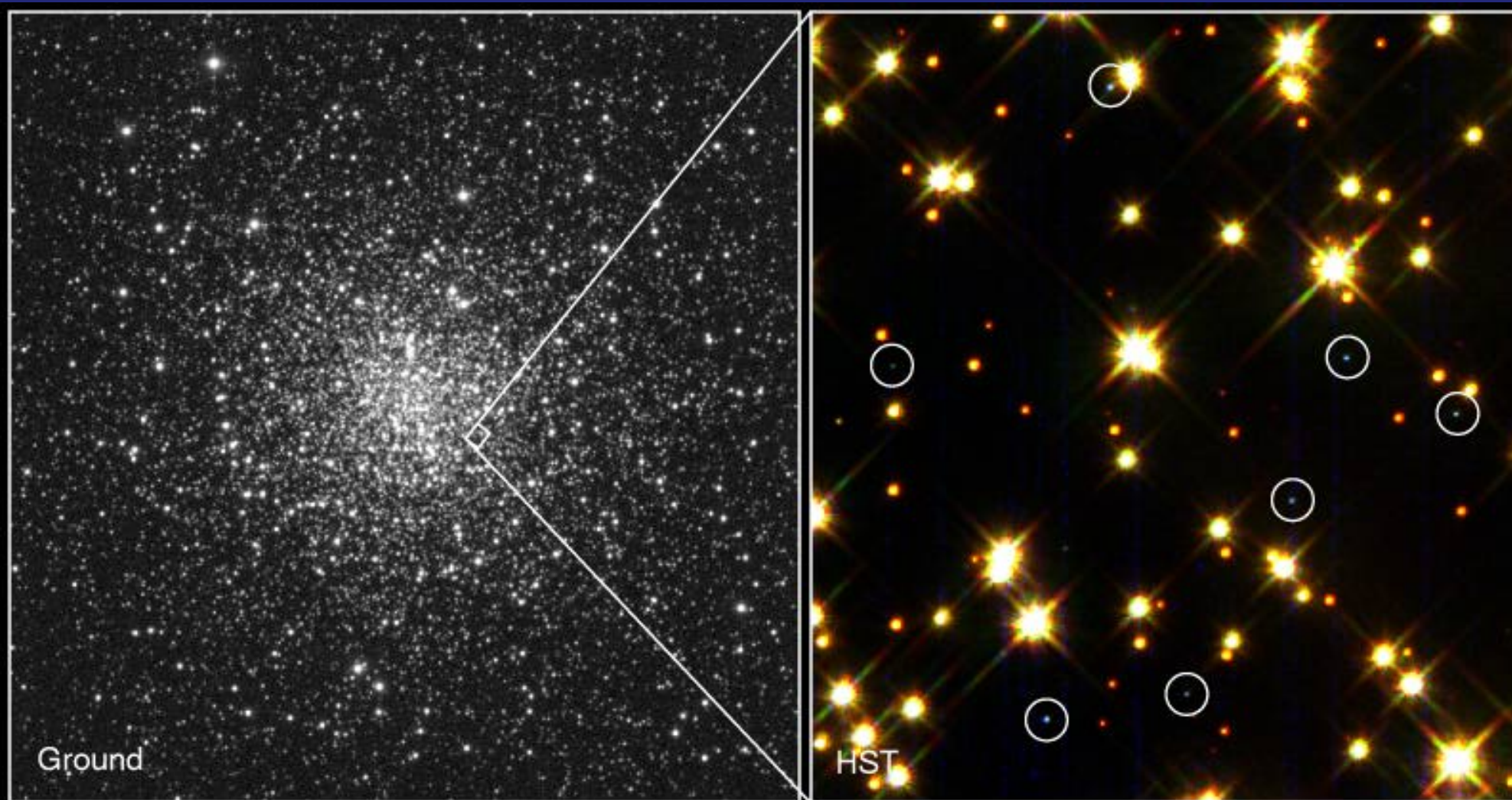
Παρουσιάζουν γραμμές απορρόφησης είτε  $\text{H}$  είτε  $\text{He}$  (από λεπτό επιφανειακό στρώμα)

Ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο  $\sim 10^6 \text{ G}$  (λόγω διατήρησης της επιφανειακής μαγνητικής ροής κατά την συστολή ( $BR^2 \sim \text{constant}$ ))

Σε διπλά συστήματα λόγω εισροής μάζας από συνοδό γίνονται ασταθής => **SNIa**



Λευκός νάνος εντός του πλανητικού νεφελώματος NGC 2440, ένας από τους θερμότερους λευκούς νάνους που έχουν παρατηρηθεί

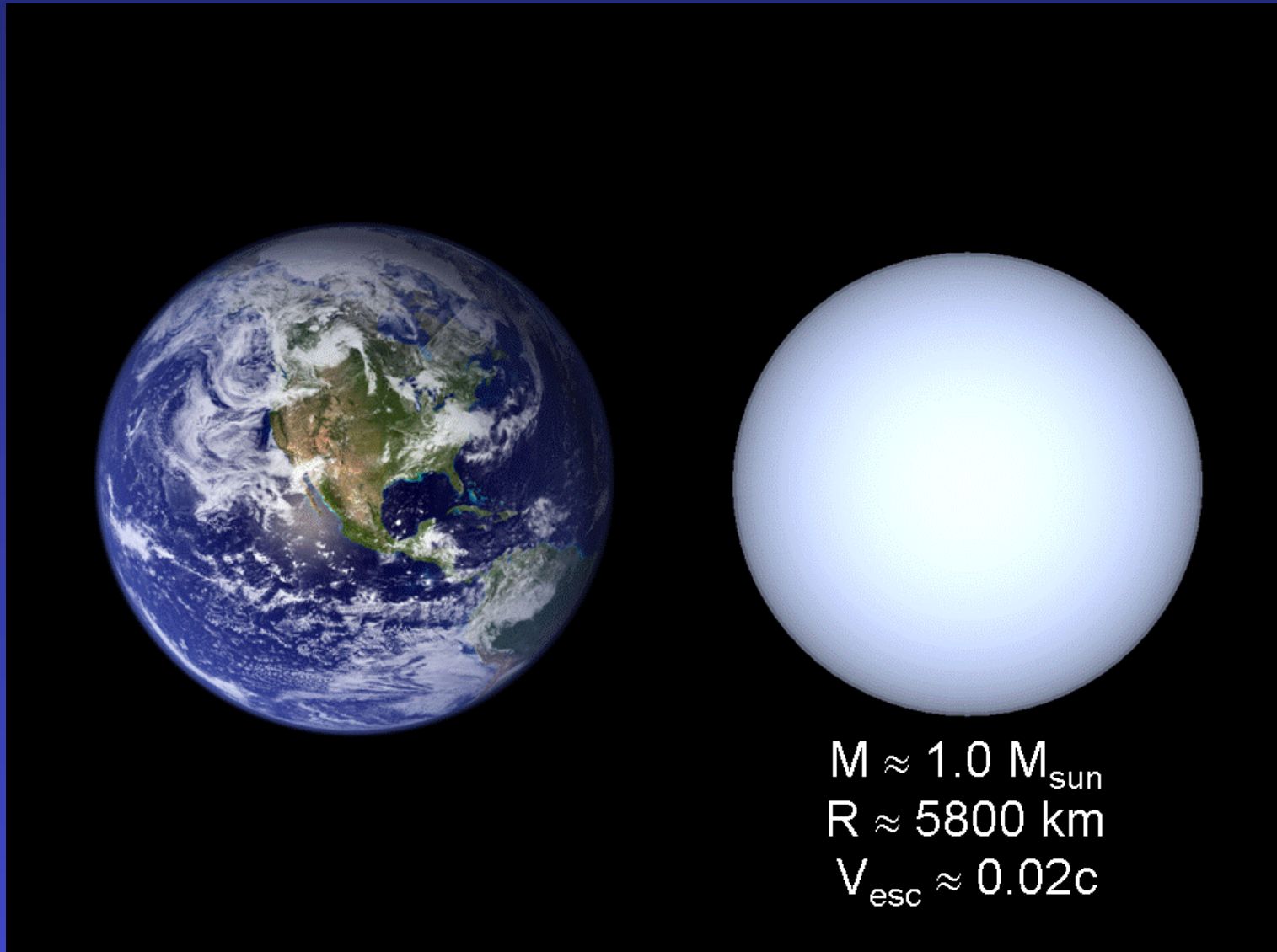


## White Dwarf Stars in M4

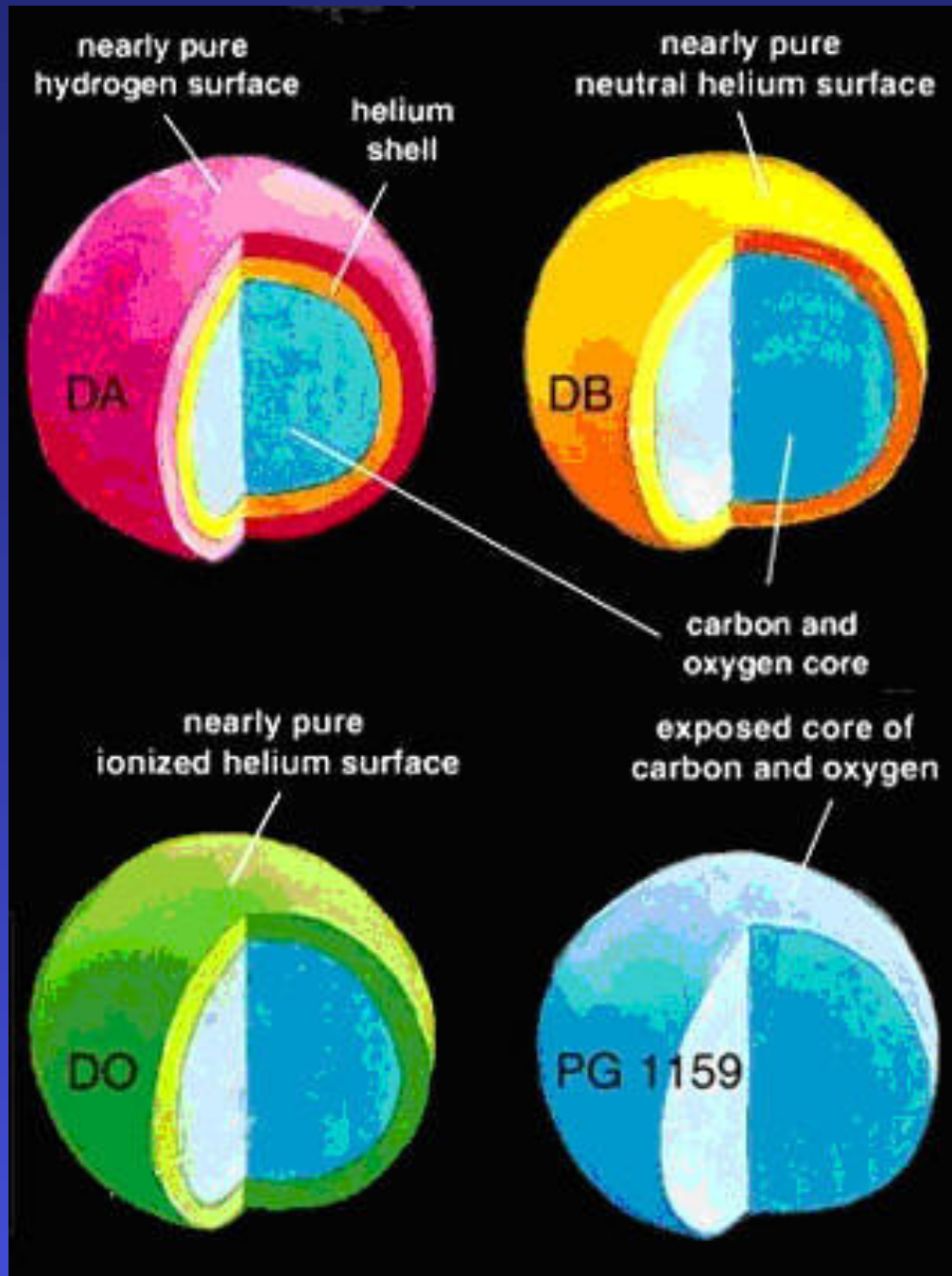
PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

Οπτική εικόνα (αριστερά) και τμήμα της εικόνας από το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble (δεξιά), στο σμήνος M4. Οι λευκοί νάνοι είναι κυκλωμένοι

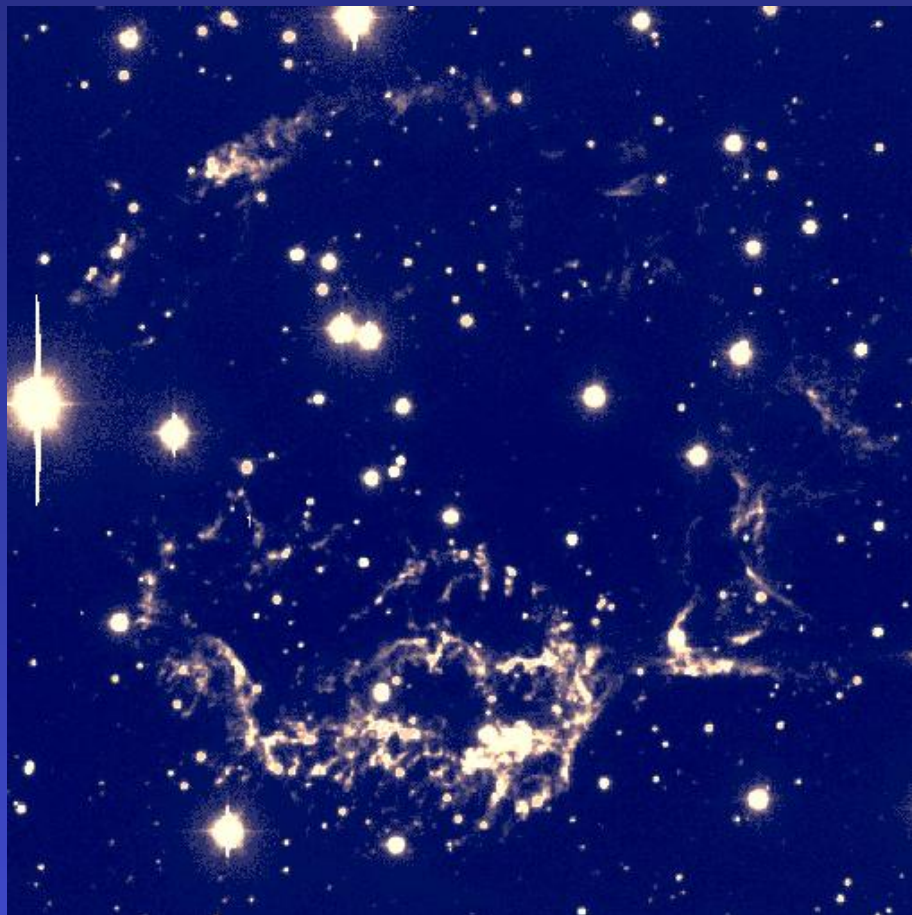


Σύγκριση μεγέθους της Γης με λευκό νάνο

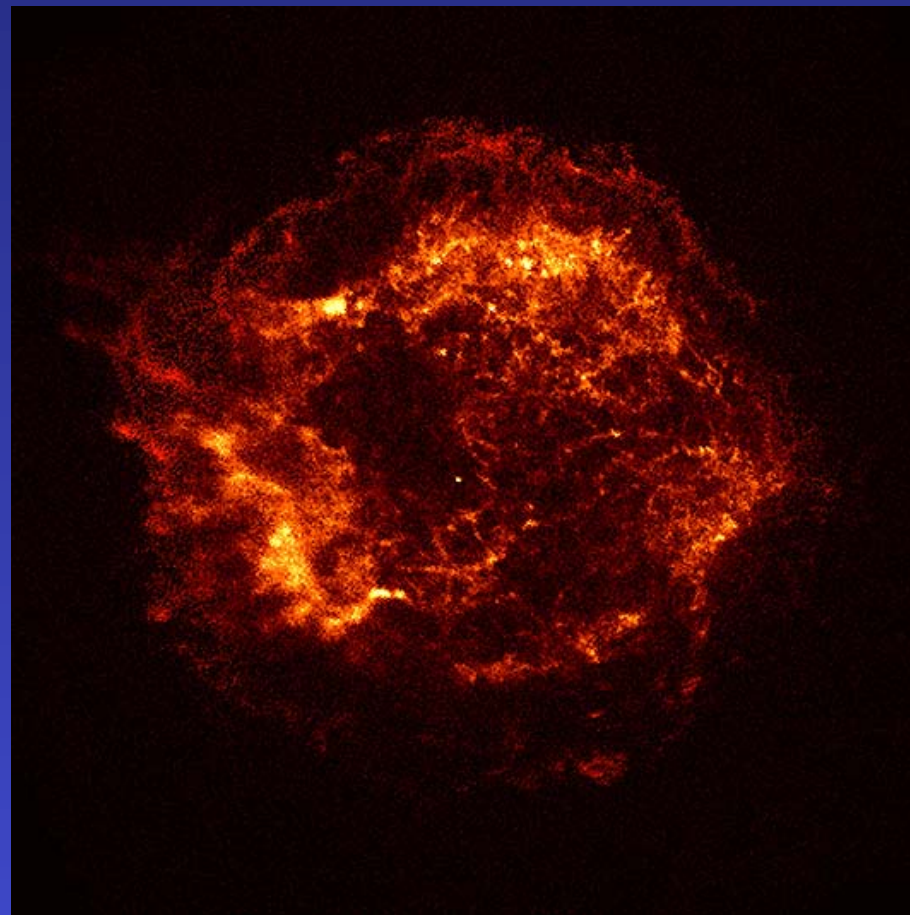


Εσωτερική Δομή διαφόρων τύπων  
Λευκών Νάνων

ΟΠΤΙΚΑ



ΑΚΤΙΝΕΣ-Χ  
Αστέρας Νετρονίων !

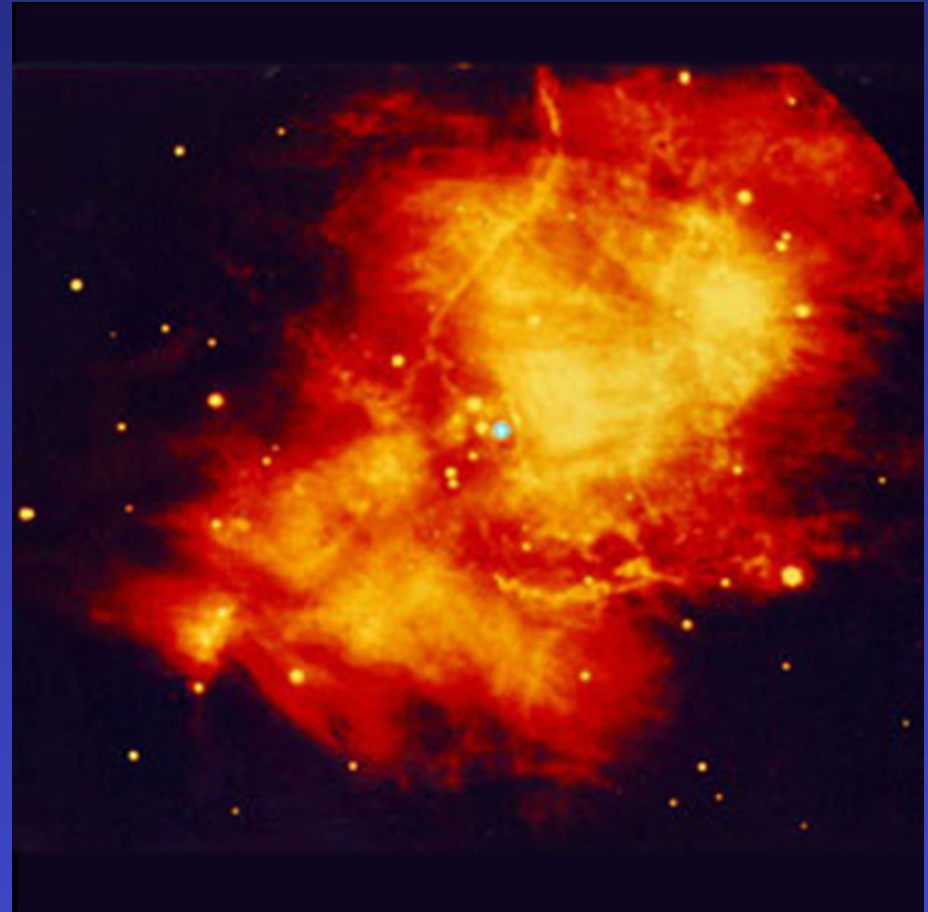


Το υπόλειμμα του υπερκαινοφανούς Cassiopeia A στο οπτικό (αριστερά) και σε ακτίνες Χ (δεξιά)

## ΟΠΤΙΚΟ (Ενδιάμεσες ενέργειες)



## ΥΠΕΡΥΘΡΟ (Ενέργειες < Οπτικού)



Ο Υπερκαινοφανής στο νεφέλωμα του Καρκίνου (Crab Nebula) στο οπτικό (αριστερά) και στο υπέρυθρο (δεξιά). Το νεφέλωμα του Καρκίνου αποτελείται από ένα Pulsar περικυκλωμένο από νέφος. Έχει διάμετρο 6 ετών φωτός και επεκτείνεται με ρυθμό 3.000.000 μιλίων την ώρα [

# ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΤΡΩΝ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

Αρχική μάζα αστέρα  $5 M_{\odot} < M < 20 M_{\odot}$

Μάζα:  $0.5 - 2.5 M_{\text{sun}}$  με μέγιστο της κατανομής στο  $1.4 M_{\text{sun}}$

Ακτίνα:  $9 - 14 \text{ km}$

Τυπική πυκνότητα:  $10^{14} \text{ g/cm}^3$

Εσωτερική θερμοκρασία:  $10^7 - 10^{10} \text{ K}$

Επιφανειακή θερμοκρασία:  $10^6 - 10^9 \text{ K}$

Πίεση: αέριο εκφυλισμένων νετρονίων

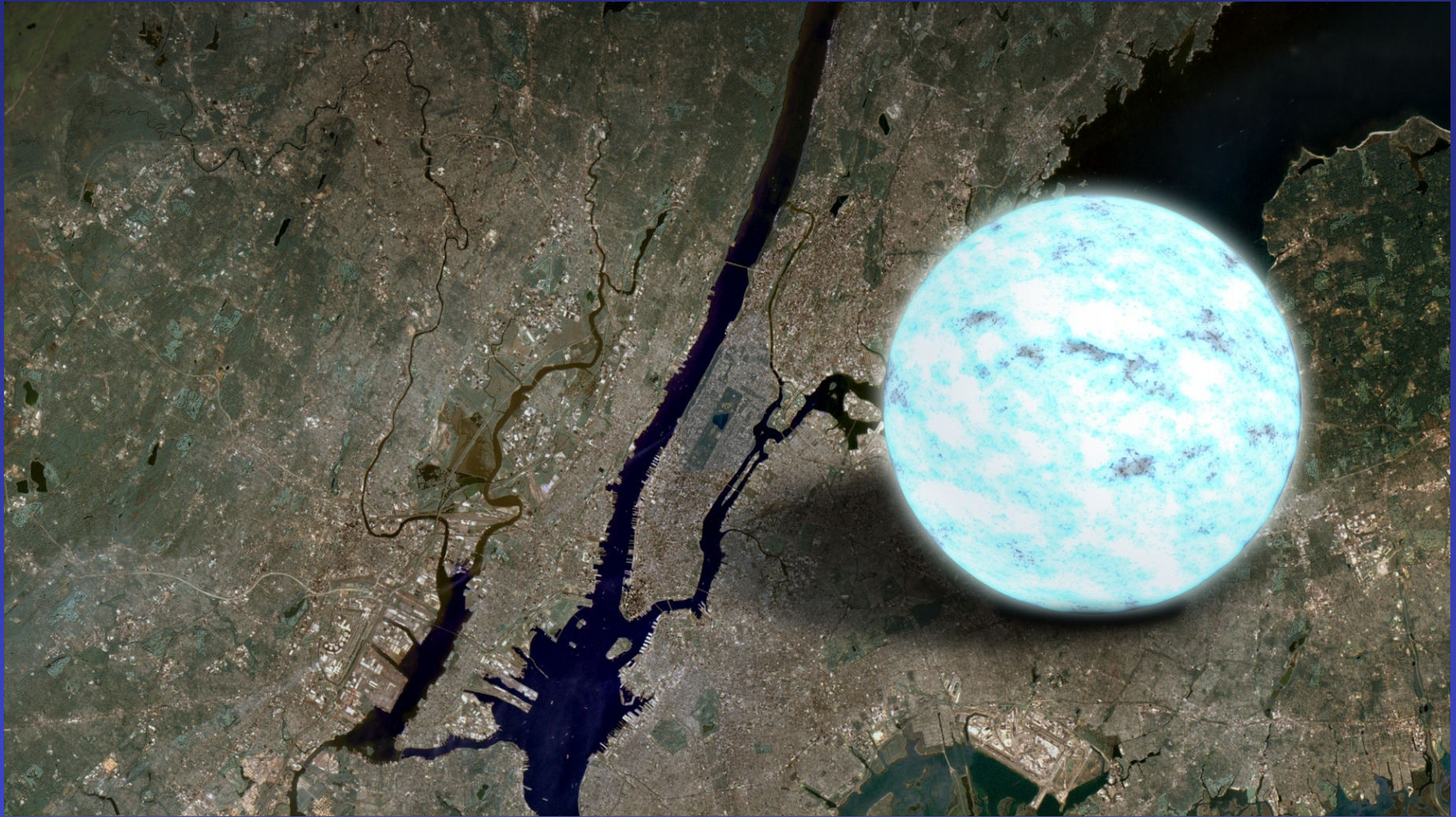
Εκπομπή ραδιοκυμάτων (**Pulsars**). Έχουν εντοπιστεί μέχρι σήμερα  $\sim 1800$  με  $10^{-3} < T < 10 \text{ sec}$

Η περιοδικότητα δεν μπορεί να είναι από λόγω περιφοράς μελών διπλού συστήματος γιατί λόγω εκπομπής βαρυτικών κυμάτων θα έπρεπε η περίοδος να μειώνεται ενώ παρατηρείται το αντίθετο.

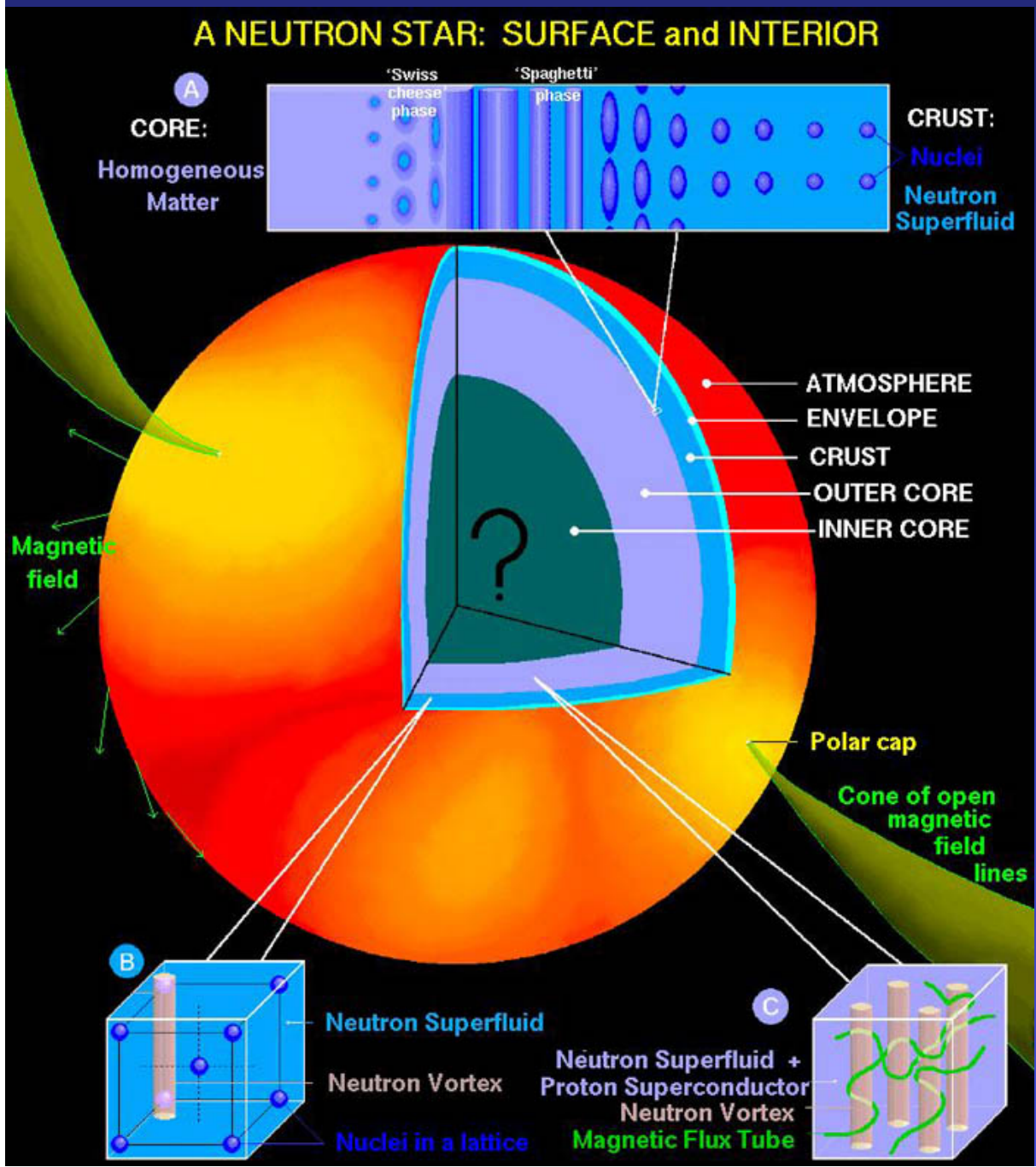
Αποκλείστηκε και η περίπτωση περιστροφής Λ.Ν. Λόγω μικρών τιμών περιόδου. Η γραμμική  $v$  στον Ίσημερινό αστέρα ακτίνας  $R$ , είναι:

αν  $R=6000 \text{ km}$ .  $T=1,5 \text{ msec} \Rightarrow$  έχουμε  $v < c$  για  $R < 75 \text{ km}$

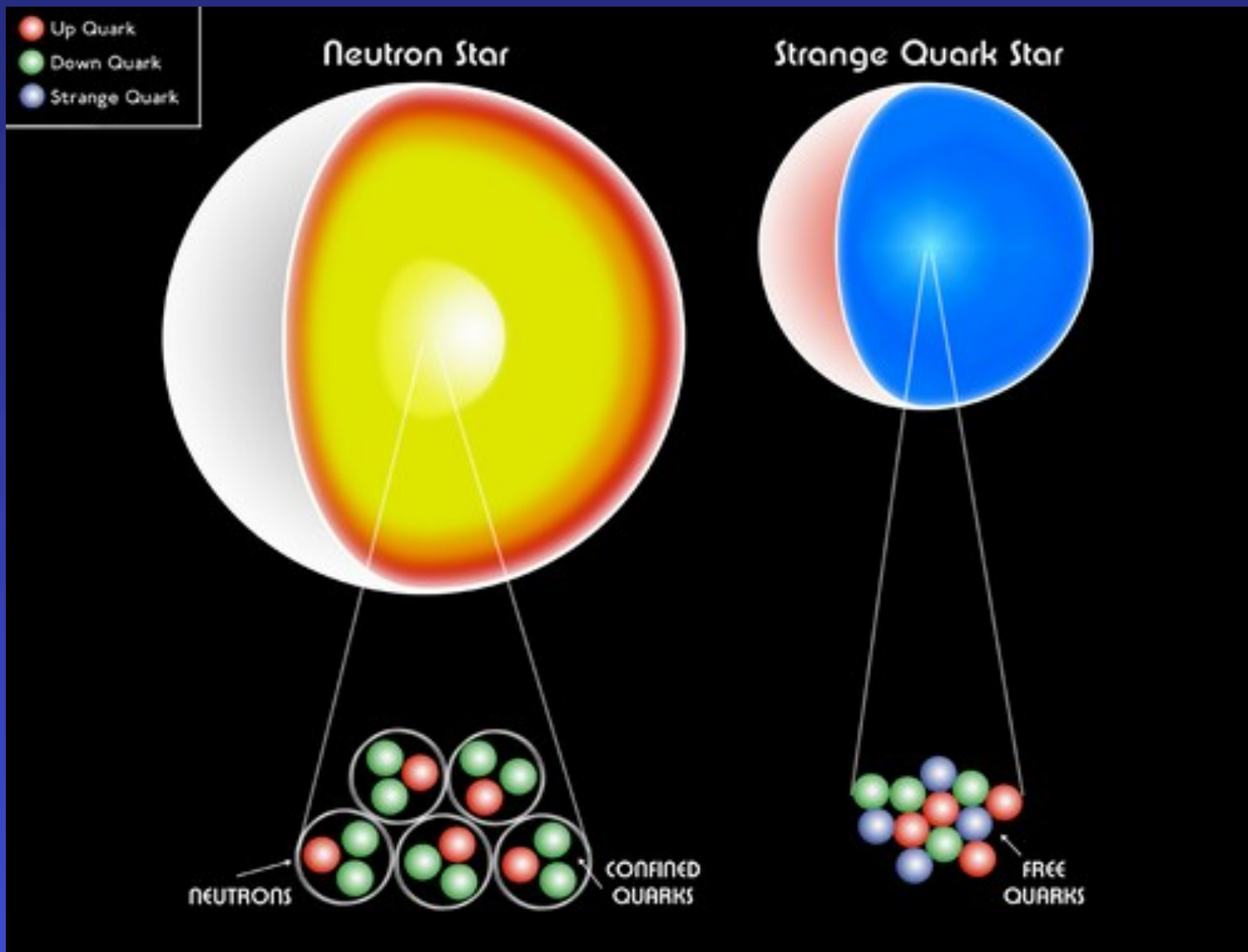
$$u = \frac{2\pi R}{T} \Rightarrow u \gg c$$



Καλλιτεχνική αναπαράσταση ενός αστέρα νετρονίων, σε σύγκριση με το μέγεθος του Μανχάτταν



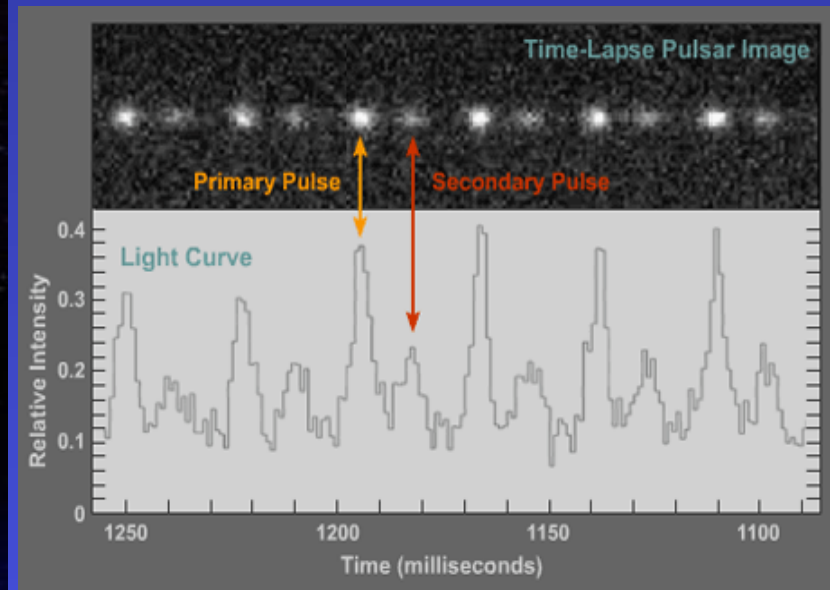
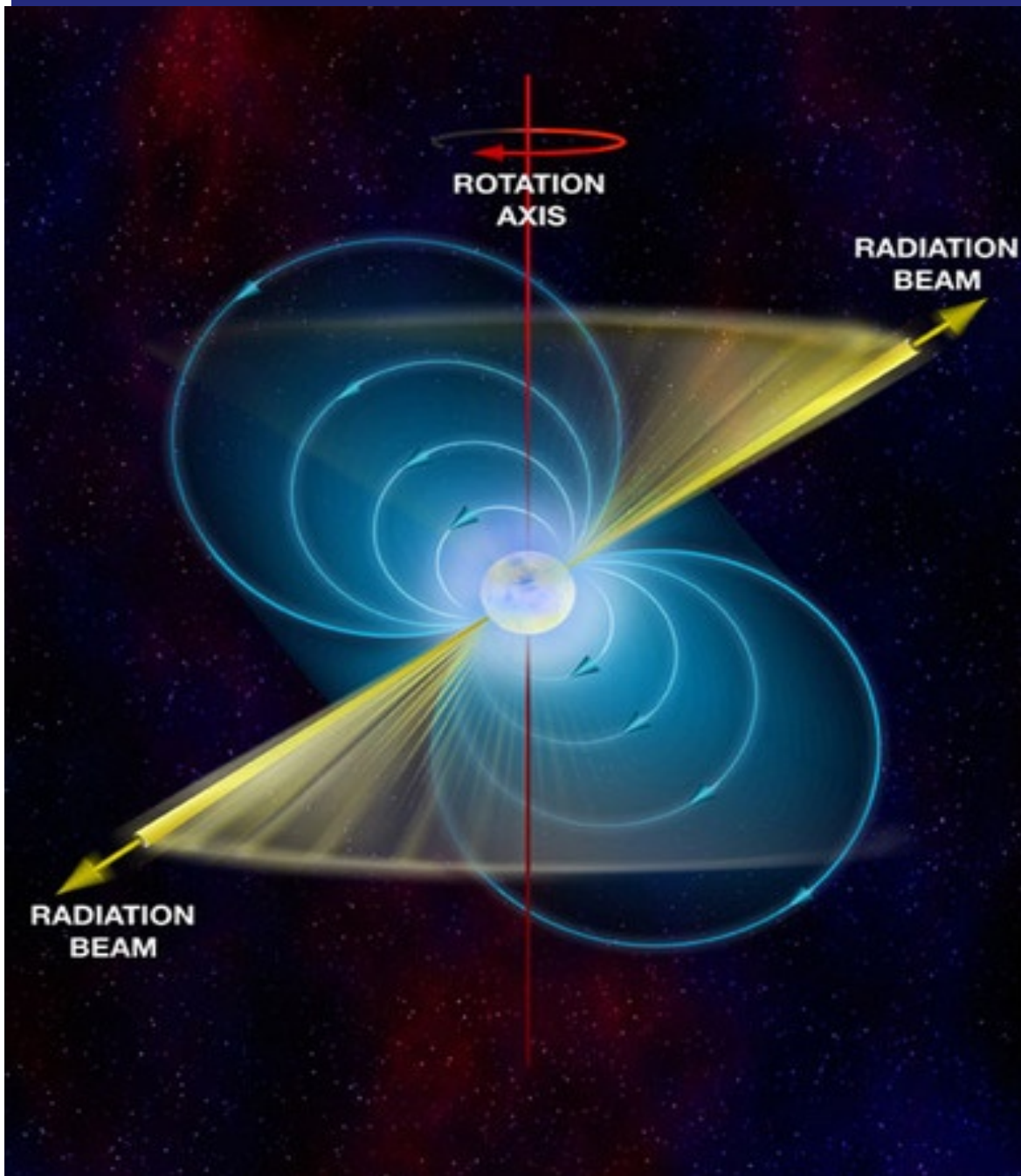
Εικόνα 13: Εσωτερική Δομή Αστέρα Νετρονίων [13].



Αστέρας Νετρονίων και Αστέρας Παράξενων Quark

Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με άξονα σε κλίση με τον πολικό άξονα του αστέρα νετρονίων.

Για όσο υπάρχει αυτή η διαφορά κλίσης βλέπουμε παλμούς. Αν ευθυγραμμιστούν οι άξονες ή εξασθενήσει το μαγνητικό πεδίο τότε εξαφανίζονται οι παλμοί και παύει να εμφανίζεται ως Pulsar το άστρο νετρονίων.



# Μελανές Οπές

*Ακτίνα Schwarzschild: Η ακτίνα μέσα από την οποία η ταχύτητα διαφυγής > ταχύτητα του φωτός*

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

*Για  $M=1M_{\odot} \Rightarrow R_s=2.96\text{km}$*

*Για  $M=1M_{\oplus} \Rightarrow R_s=0.89\text{cm}$*

*Βασισμένες σε διαφάνειες του Ν. Στεργιούλας*

Η ταχύτητα διαφυγής κλασσικά υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της Ενέργειας , όταν  $K=W$ .

$$\frac{1}{2}mu^2 = \frac{GMm}{R} \Rightarrow u = \left( \frac{2GM}{R} \right)^{1/2}$$

Αν  $u=c$  τότε  $R$ =Ακτίνα *Schwarzschild*: Η ακτίνα μέσα από την οποία η ταχύτητα διαφυγής > ταχύτητα του φωτός. Αυτή η απόδειξη (*Laplace*) αν και καταλήγει στη σωστή σχέση, δεν είναι ορθή.

Στα πλαίσια της ΓΘΣ την απέδειξε ο *Schwarzschild*

$$\frac{\lambda_o}{\lambda} = \left( 1 - \frac{2GM}{r_o c^2} \right)^{1/2} \Rightarrow \lambda \rightarrow \infty, r_o = R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Όπου  $\lambda_o$  το μήκος κύματος  $\gamma$  που εκπέμπεται σε απόσταση  $r_o$  από την Μ.Ο. και  $\lambda$  το μήκος κύματος του σε μεγάλη απόσταση. Όταν  $\lambda \rightarrow \infty$  τότε η συχνότητα και ενέργεια φωτονίου μηδενίζεται => δεν γίνεται αντιληπτό.

Για να υπολογίσουμε την ενέργεια που χρειάζεται ένα φωτόνιο για να διαφύγει από το βαρυτικό δυναμικό της Μ.Ο. αναπτύσσουμε σε Taylor (για  $r_o \gg R_s$ ) την

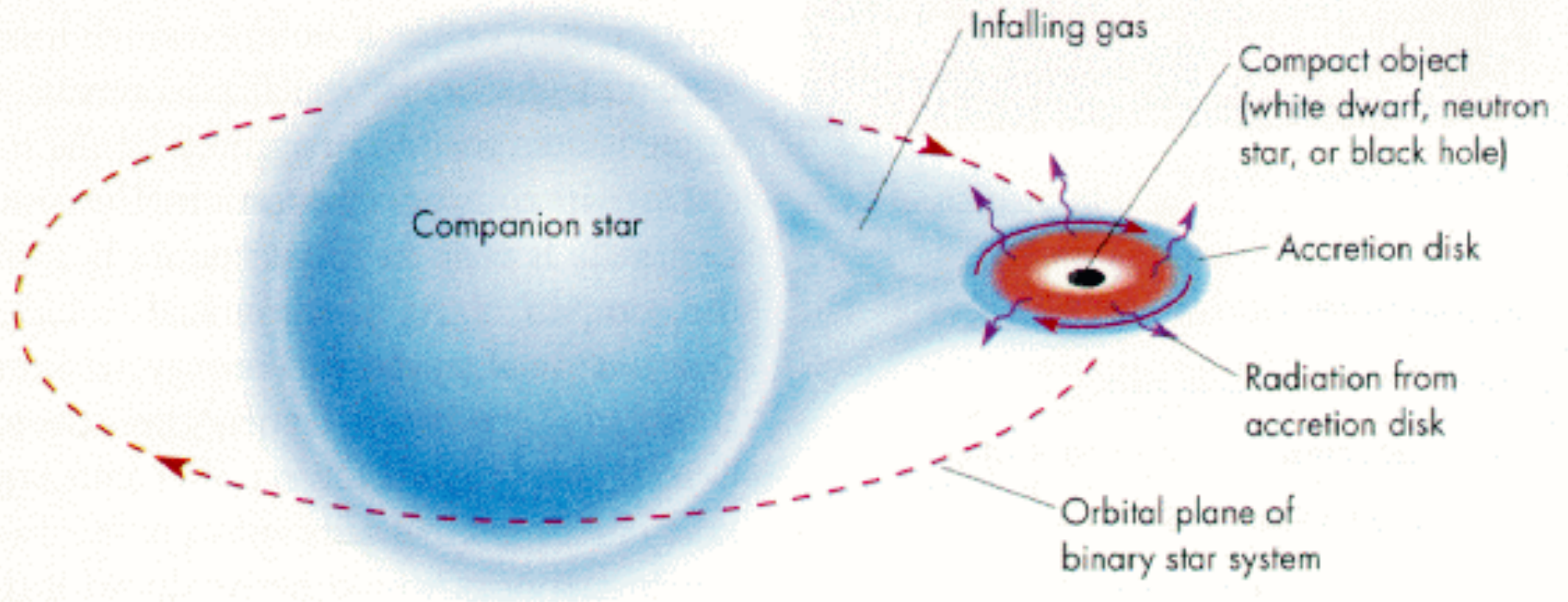
$$\frac{\lambda_o}{\lambda} = \left(1 - \frac{2GM}{r_o c^2}\right)^{1/2} \Rightarrow \frac{\lambda_o}{\lambda} = \left(1 - \frac{GM}{r_o c^2}\right)$$

Πολλαπλασιάζω και διαιρώ και τα δύο μέλη με:  $E_o = hc/\lambda_o$  και έχω

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_o} - \left(\frac{GM}{r_o c^2} \frac{hc}{\lambda_o}\right) \Rightarrow E_\infty = E_o - \frac{GMm}{r_o}$$

Όπου  $c^2 = E_o/m$  (του φωτονίου που προσπαθεί να διαφύγει). Άρα η ενέργεια που χρειάζεται να καταναλώσει ένα φωτόνιο σε απόσταση  $r_o$  από την Μ.Ο. Για να διαφύγει στο άπειρο είναι  $GMm/r_o$ .

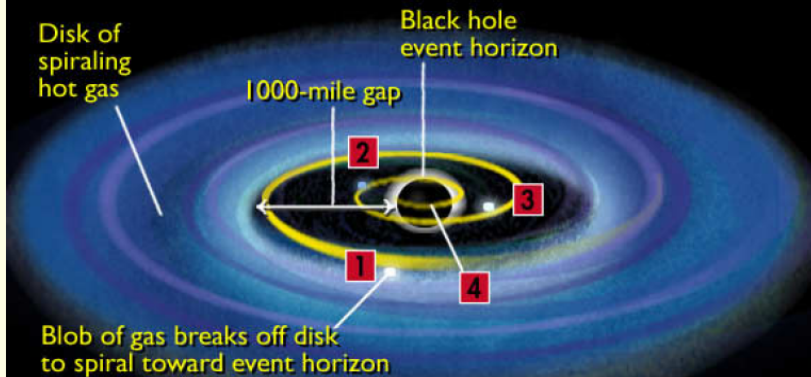
## Αστέρες νετρονίων που δημιουργούνται μετά από έκρηξη SNII σε διπλά συστήματα μπορούν να εξελιχθούν σε Μελανές οπές



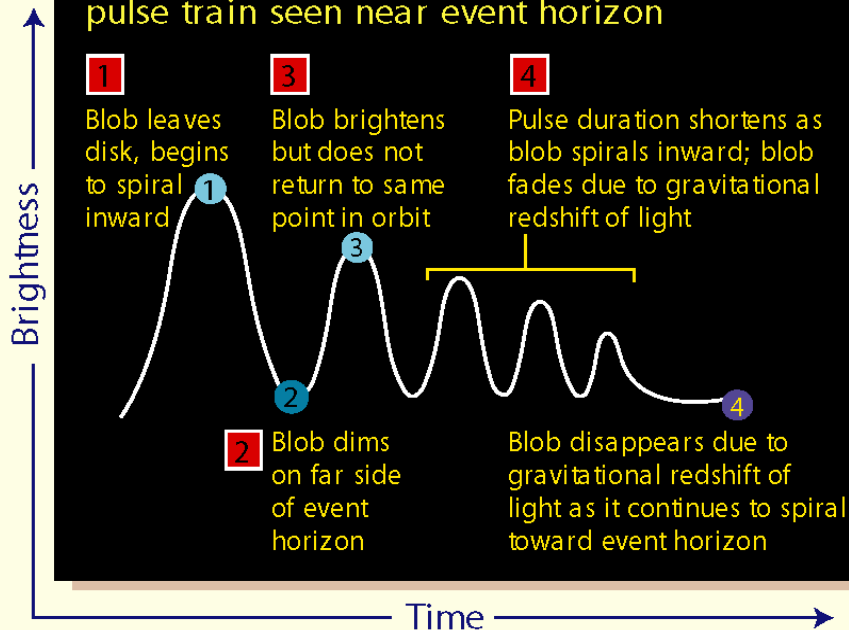
Στην περίπτωση ύπαρξης υπερκαινοφανούς σε διπλό σύστημα, ο συνοδεύων αστέρας θα επιβιώσει, χάνοντας μόνο μικρό μέρος της ύλης του. Κατά την εξέλιξη του συνοδεύοντα αστέρα σε ερυθρό γίγαντα, ο αστέρας νετρονίων που παρέμεινε από την έκρηξη θα αρχίσει να προσαυξάνει ύλη από τον συνοδεύοντα. Αν η πίεση εκφυλισμένων νετρονίων δεν μπορεί να αντισταθμίσει την βαρυτική πίεση → **μελανή οπή**.

# Μ. Ο. ΣΕ ΔΙΠΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ

Signature of piece of matter falling into black hole Cygnus XR-1



Ultra violet light signature of dying pulse train seen near event horizon



Εκπομπή φωτός από ύλη σε δίσκο προσαύξησης γύρω από μελανή οπή. Η λαμπρότητα εμφανίζει μέγιστα και ελάχιστα κατά την κίνηση της γύρω από τη μελανή οπή, και τελικά εξαφανίζεται λόγω της μεγάλης μετατόπισης προς το ερυθρό

# ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΥΛΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΣΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ΣΤΗ ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ

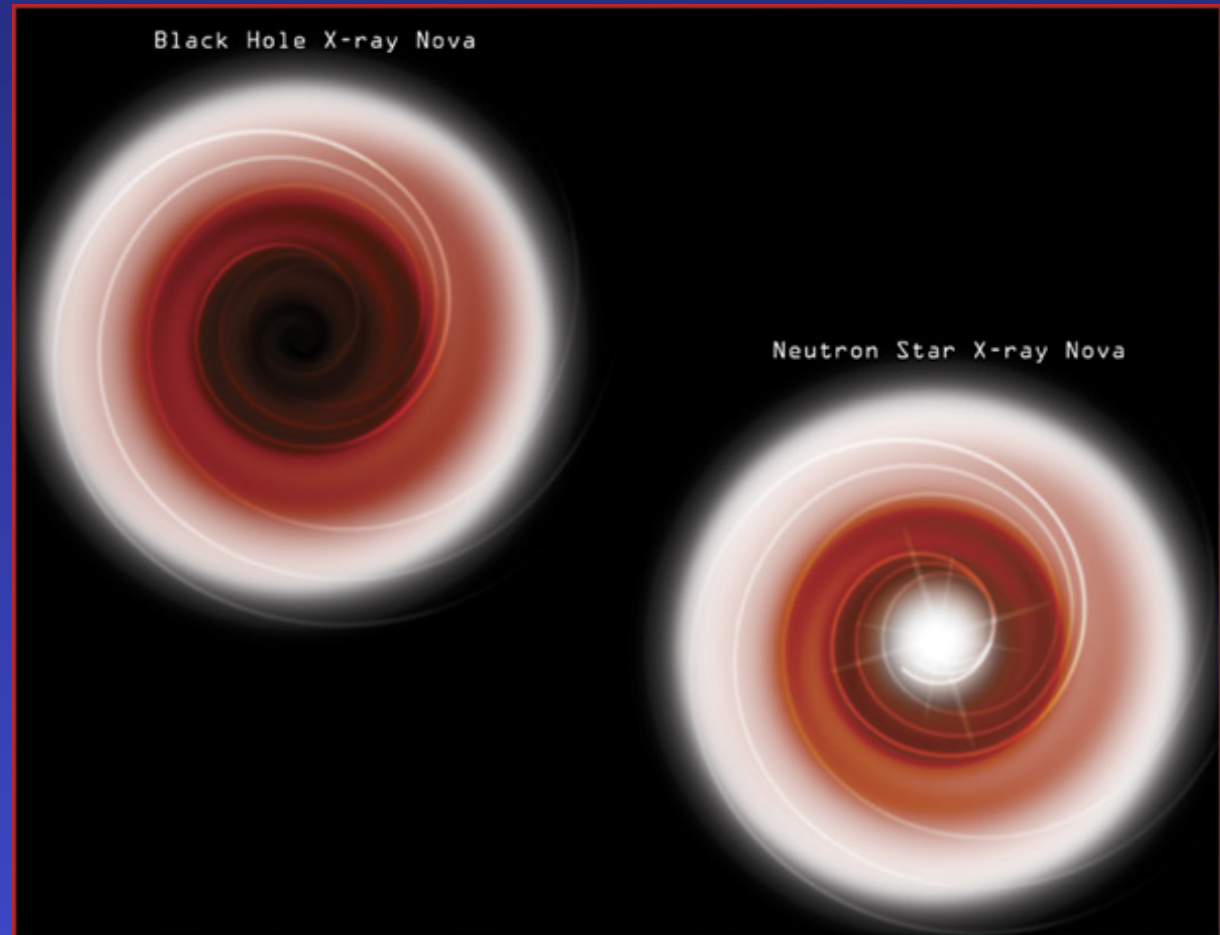
## ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ:

Η ύλη περνά τον  
ορίζοντα γεγονότων  
χωρίς έκλαμψη.

## ΑΣΤΕΡΑΣ

## ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ:

Η ύλη συγκρούεται  
με την επιφάνεια του  
αστέρα: έκλαμψη!

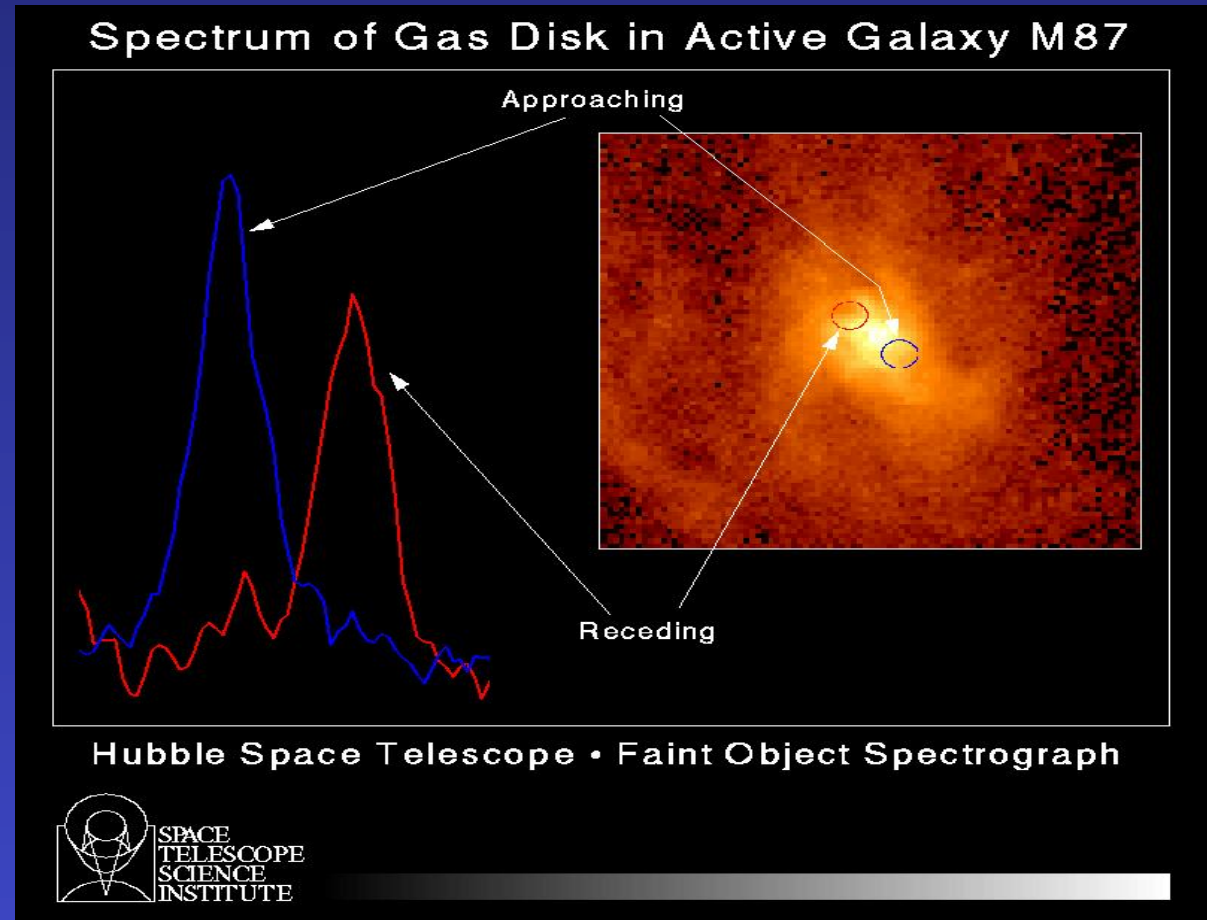


Εικόνα 3: Η βαρυτική μετατόπιση προκαλεί εξασθένηση της έντασης του φωτός, καθώς η ύλη πλησιάζει μια μελανή οπή (αριστερά) ή έναν αστέρα νετρονίων (δεξιά). Στην περίπτωση της μελανής οπής η ύλη διαπερνά τον ορίζοντα γεγονότων, ενώ στην περίπτωση του αστέρα νετρονίων παρατηρείται έκλαμψη όταν η ύλη προσκρούει στην επιφάνειά του [3].

# ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΟΝΤΑ ΣΤΗ ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ

Μέσω του φαινομένου της μετάθεσης Doppler γνωστών φασματικών γραμμών μετρήθηκαν ταχύτητες  $\sim 550$  km/s σε απόσταση 18.5pc από κέντρο.

Με χρήση 3<sup>ου</sup> νόμου Κέπλερ η μάζα που δημιουργεί το βαρυτικό πεδίο στη περιοχή  $0 < r < 18.5$  pc βρέθηκε να είναι 3 δισεκατομμύρια ηλιακές μάζες.

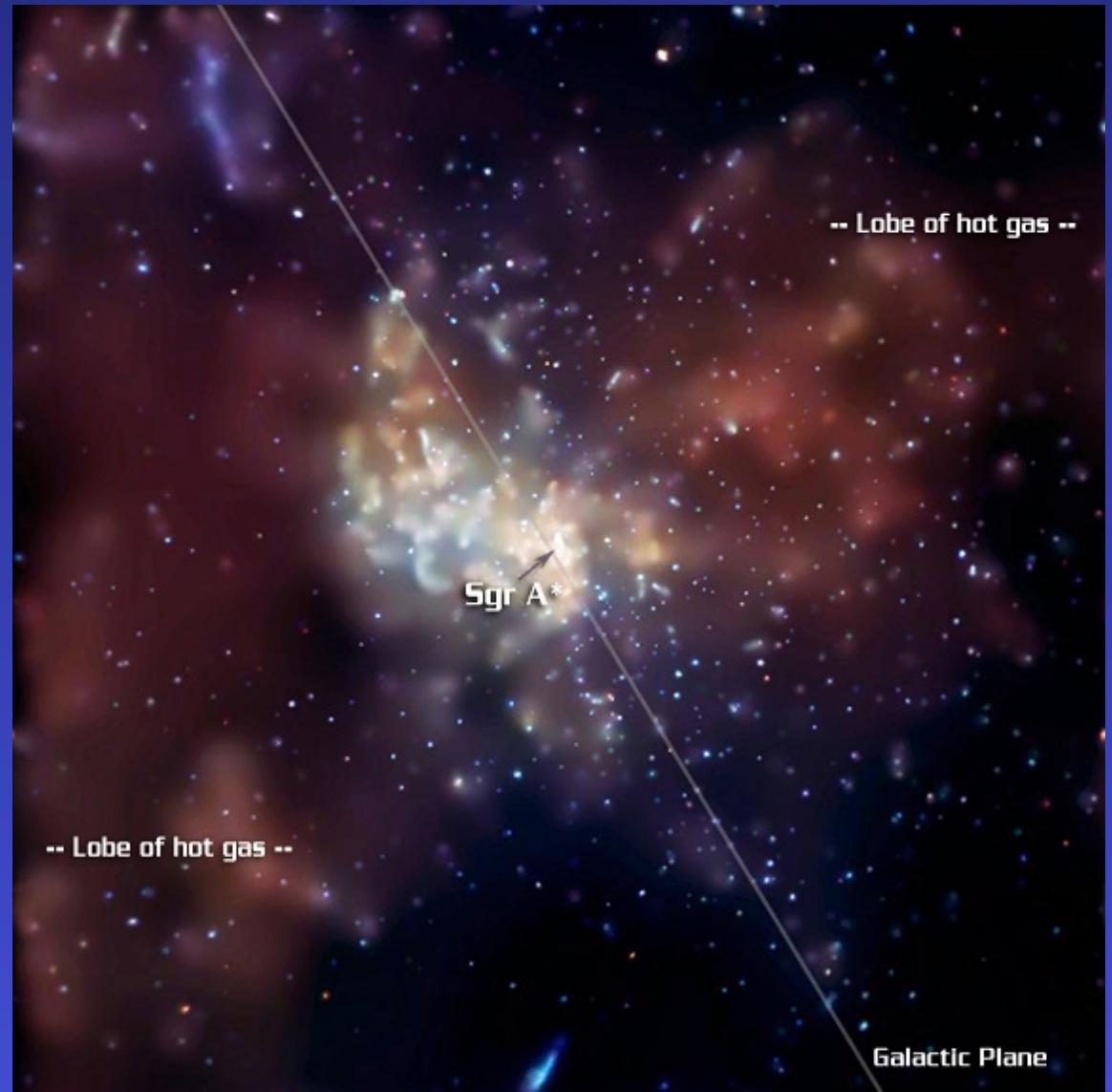


Διάγραμμα των ταχυτήτων που μετρήθηκαν σε περιστρεφόμενο δίσκο θερμού αερίου στο κέντρο του ενεργού γαλαξία M87

# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

Πρόσφατες παρατηρήσεις στις ακτίνες-Χ αποκαλύπτουν την ύπαρξη πίδακα και λοβών θερμού αερίου.

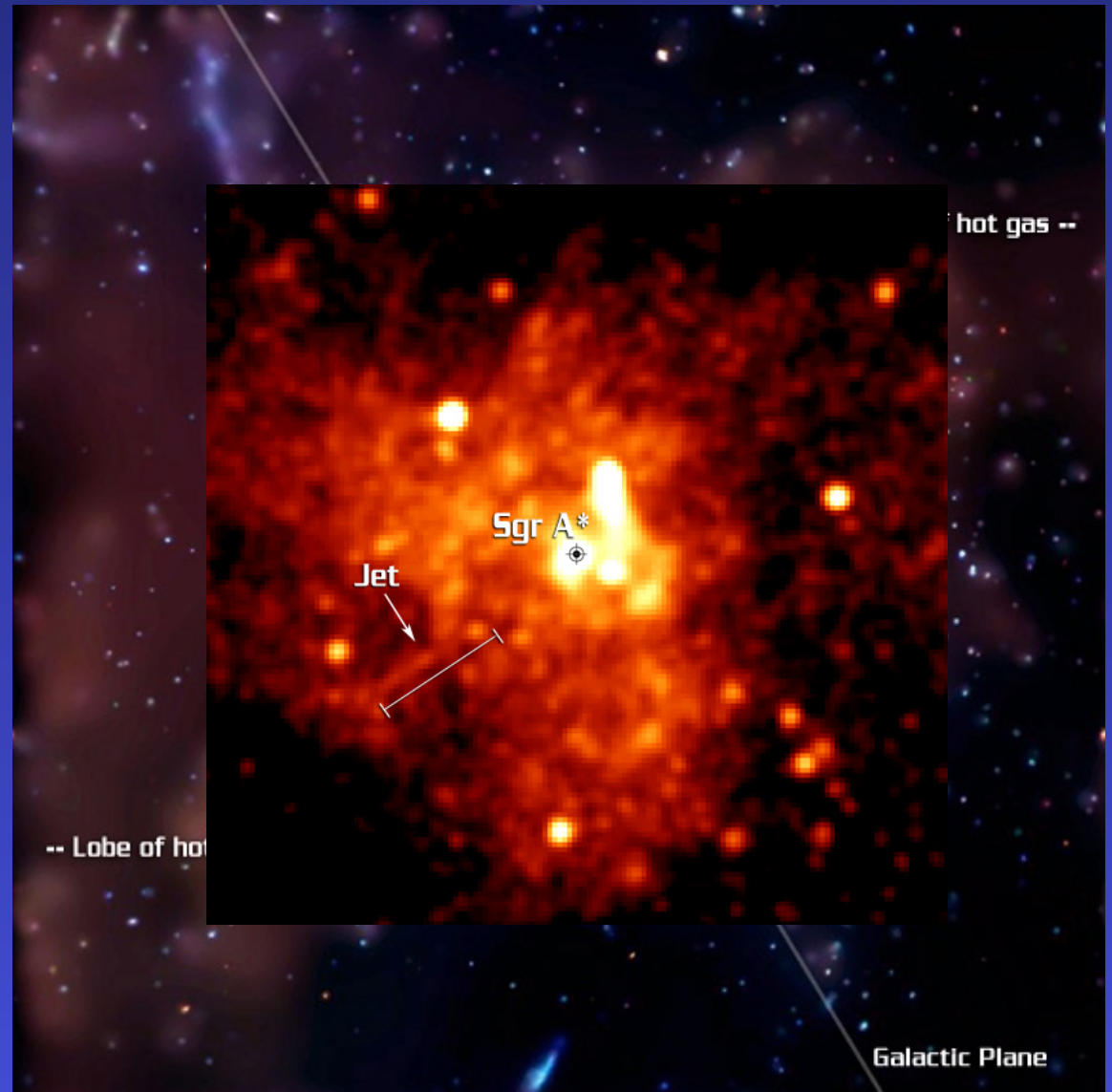
Η θέση της μελανής οπής Sgr A\* στο κέντρο του Γαλαξία. Φαίνονται λοβοί θερμού αερίου που εκτείνονται σε δεκάδες έτη φωτός στις δύο πλευρές της μελανής οπής



# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

Πρόσφατες παρατηρήσεις στις ακτίνες-Χ αποκαλύπτουν την ύπαρξη πίδακα και λοβών θερμού αερίου.

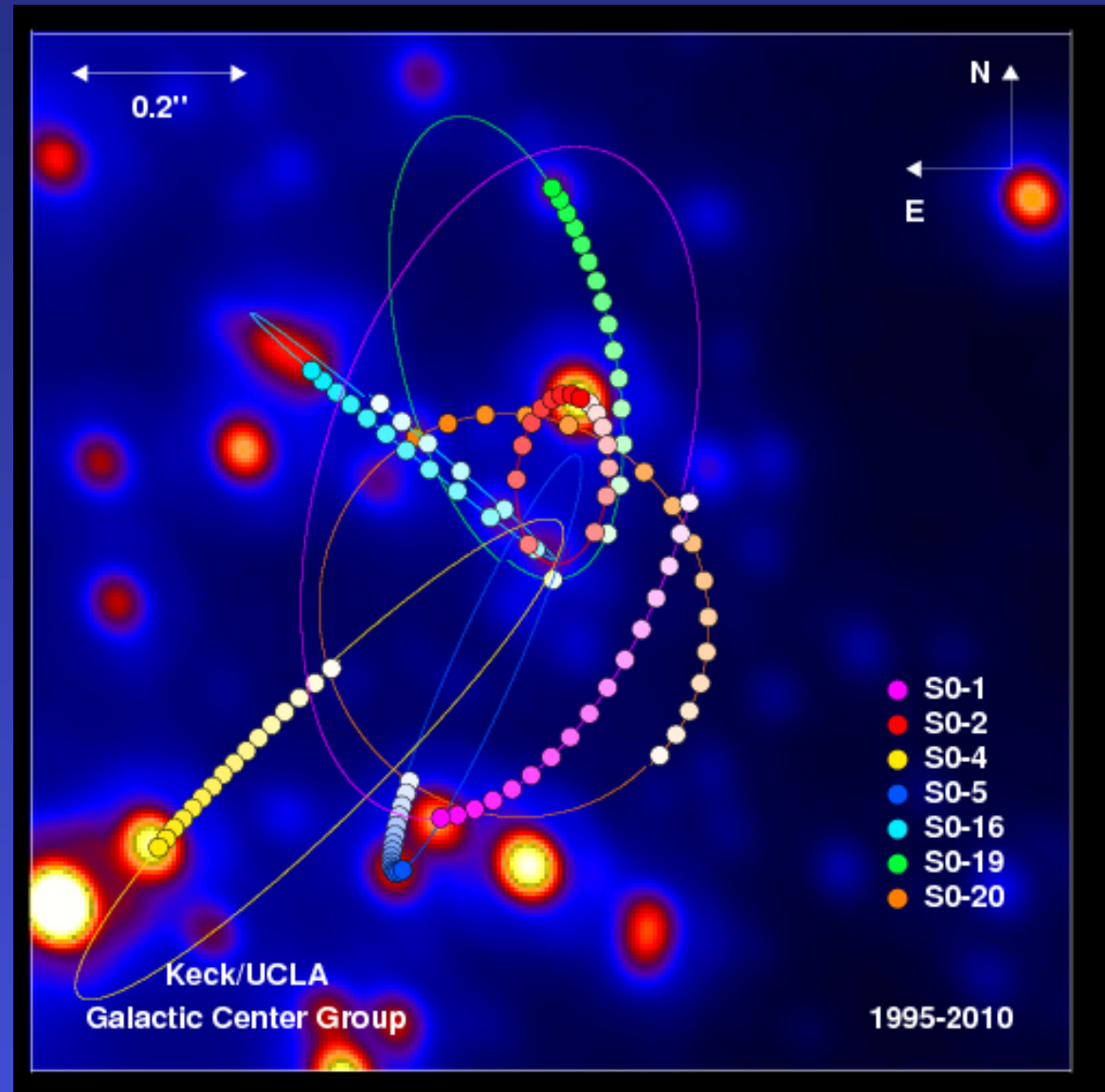
Εικόνα 6: Η μελανή οπή Sgr A\* και πίδακας ακτίνων-Χ, μήκους 1.5 έτους φωτός [6].



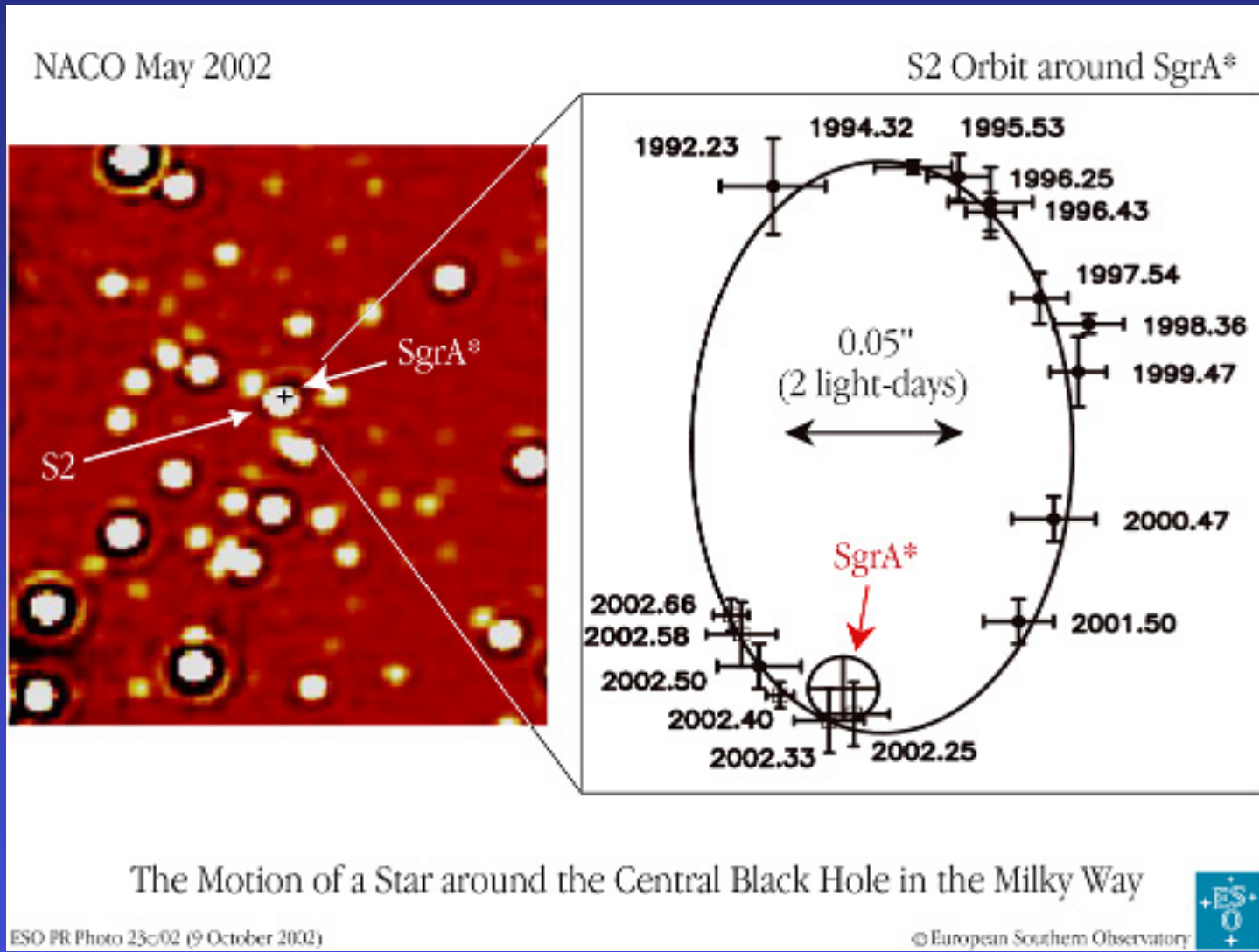
# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

Από μακροχρόνιες παρατηρήσεις της κίνησης των άστρων γύρω από τον Sgr A\* υπολογίστηκε η μάζα της μαύρης τρύπας ίση με 3.7 εκατομμύρια ηλιακές μάζες.

Εικόνα 8: Τροχιές αστέρων στην περιοχή των κεντρικών 1.0 x 1.0 δεύτερων λεπτών του τόξου του Γαλαξία [8].



# Η ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΓΑΛΑΞΙΑ

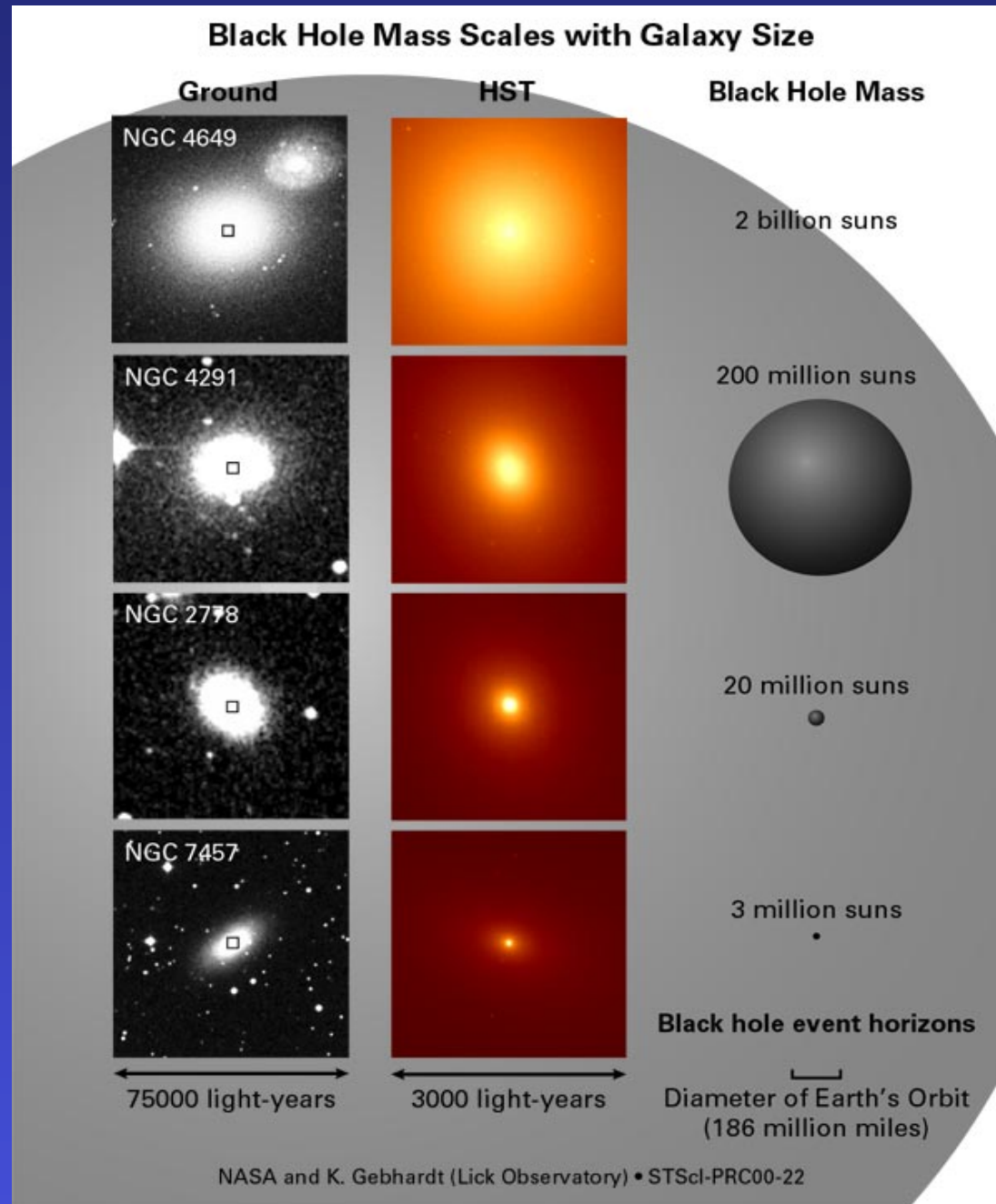


Εικόνα 9: Η τροχιά του αστέρα S2 γύρω από τον SgrA\*. Από αυτές τις παρατηρήσεις φαίνεται ότι μια μελανή οπή υπάρχει στο κέντρο του Γαλαξία [9].

# ΜΑΖΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ ΜΕΛΑΝΗΣ ΟΠΗΣ

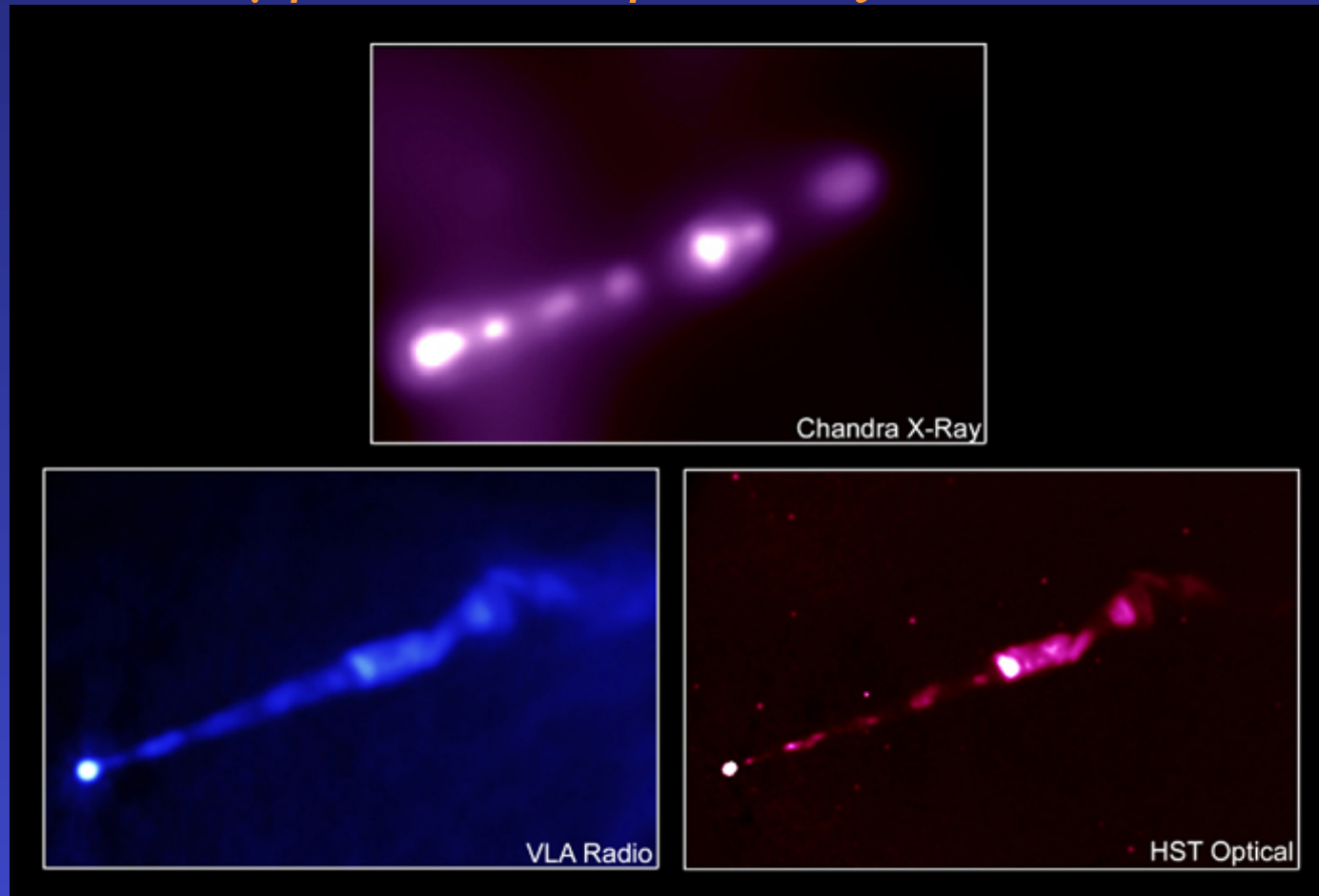
Η μάζα μιας γαλαξιακής μελανής οπής βρέθηκε ότι είναι ανάλογη του μεγέθους του γαλαξία στον οποίο υπάρχει.

Εικόνα 10: Σύγκριση τεσσάρων ελλειπτικών γαλαξιών και των μαζών των μελανών οπών τους. Η αριστερή στήλη δείχνει τους Γαλαξίες. Η μεσαία στήλη απεικονίζει την κεντρική τους περιοχή. Στη δεξιά στήλη φαίνονται οι μάζες των μελανών οπών και οι αντίστοιχες διάμετροι των οριζόντων γεγονότων τους [10].



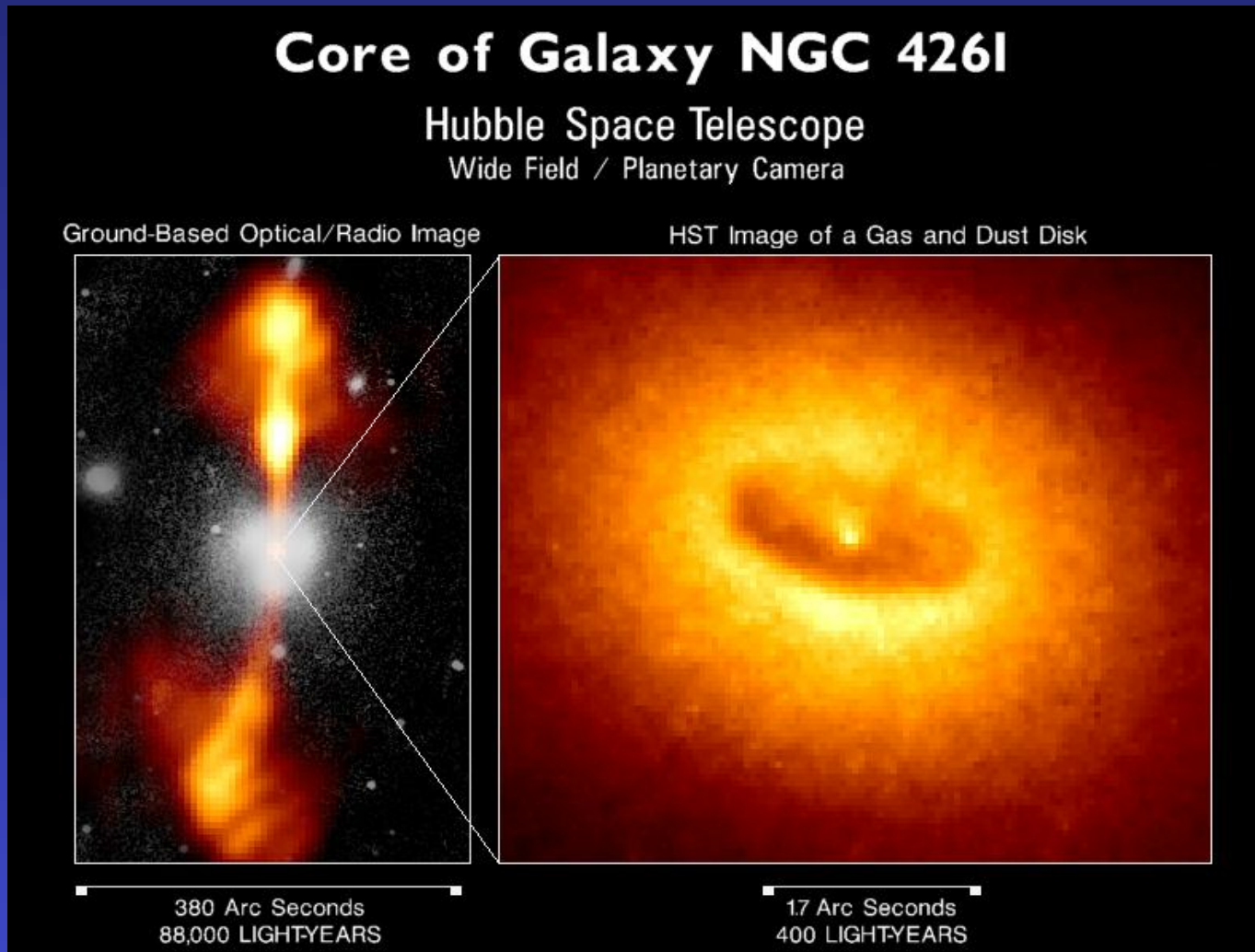
# ΠΙΔΑΚΑΣ ΤΗΣ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ ΜΕΛΑΝΗΣ ΟΠΗΣ M87

## Κόμβοι: Ακτινοβολία Synchrotron



Εικόνα 22: Πίδακας από τη γαλαξιακή μελανή οπή M87, σε ακτίνες-Χ, ραδιοκύματα και οπτικό. Φαίνεται η μη-ομαλή μορφή του πίδακα, που σχηματίζει κόμβους. Οι κόμβοι προέρχονται από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας στους πίδακες, που κινούνται γύρω από τις μαγνητικές γραμμές και ακτινοβολούν λόγω της επιτάχυνσής τους [22].

# ΓΑΛΑΞΙΑΚΗ ΜΕΛΑΝΗ ΟΠΗ NGC 4261



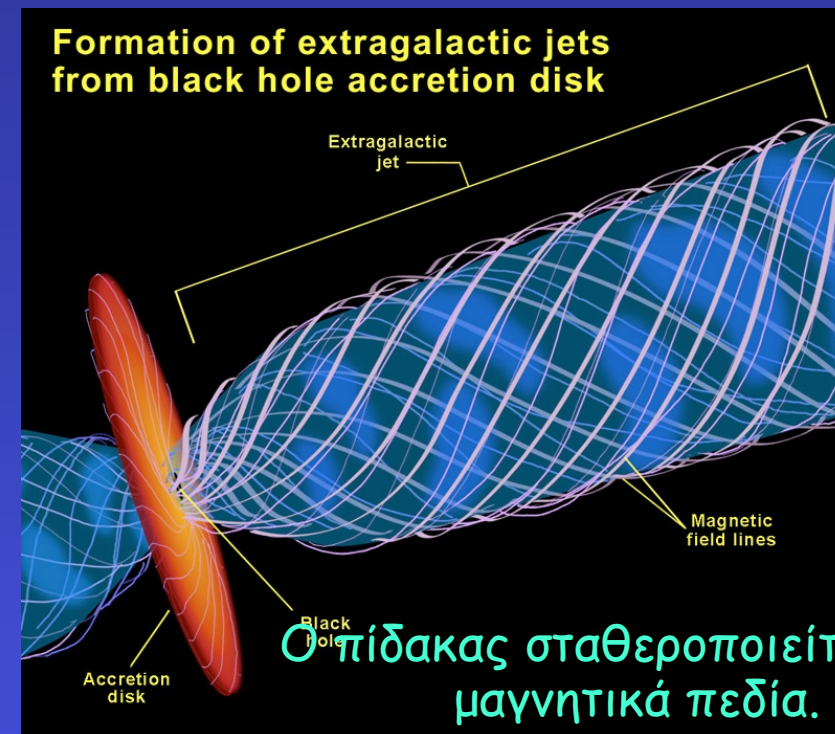
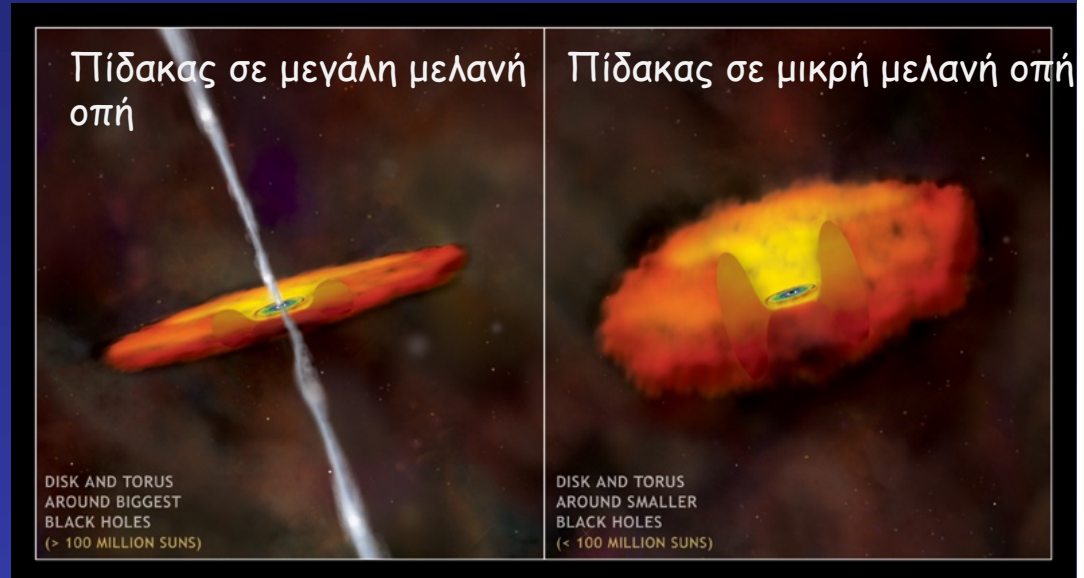
Αριστερά: Εικόνα του γαλαξία NGC 4261 από επίγειο τηλεσκόπιο στο οπτικό (λευκό) και στα ραδιοκύματα (πορτοκαλί), όπου και φαινονται οι πίδακες, μήκους 88.000 ετών φωτός. Δεξιά: Εικόνα από το Hubble Space Telescope αποκαλύπτει δίσκο αερίου και σκόνης που πιθανότατα τροφοδοτεί μελανή οπή στο κέντρο του γαλαξία

# ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΟΙ ΠΙΔΑΚΕΣ

Ισχυρός πίδακας υπάρχει γύρω από τις βαρύτερες μελανές οπές.

Εάν κινητική ενέργεια προσπίπτουσας σε μελανή οπή ύλη είναι μικρή τότε θερμαίνεται πολύ, ακτινοβολεί Χ και γ έως ότου χαθεί πίσω από οριζοντα γεγονότων. Αν έχει μεγάλη κινητική ενέργεια διαφεύγει της έλξης της Μ.Ο. κατά μήκος κωνικών δεσμών κάθετων στο δίσκο προσαύξεσης-πίδακες

Καλλιτεχνική αναπαράσταση των μαγνητικών πεδίων του πίδακα μελανής οπής



Ο πίδακας σταθεροποιείται από μαγνητικά πεδία.