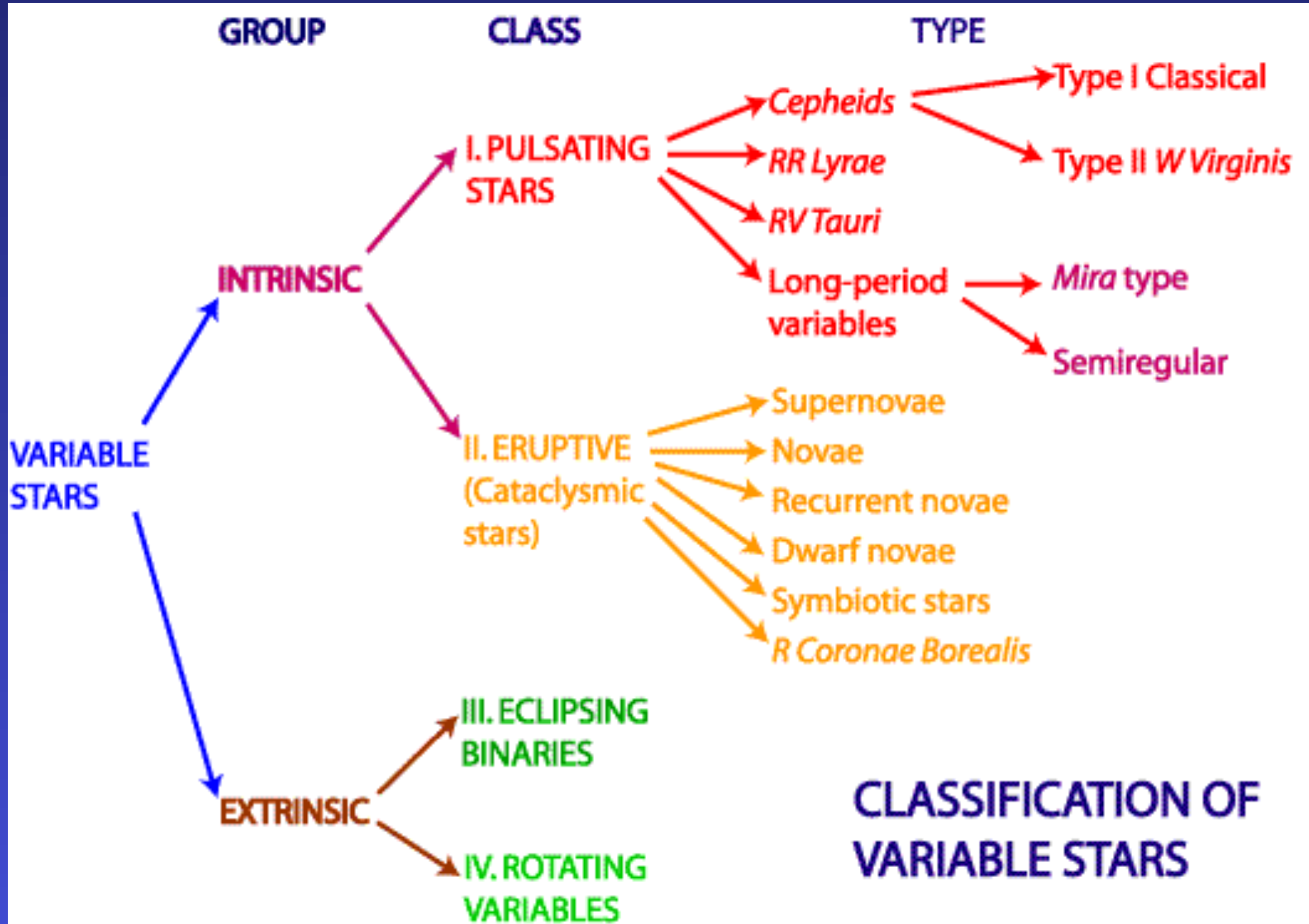


Μεταβλητοί Αστέρες

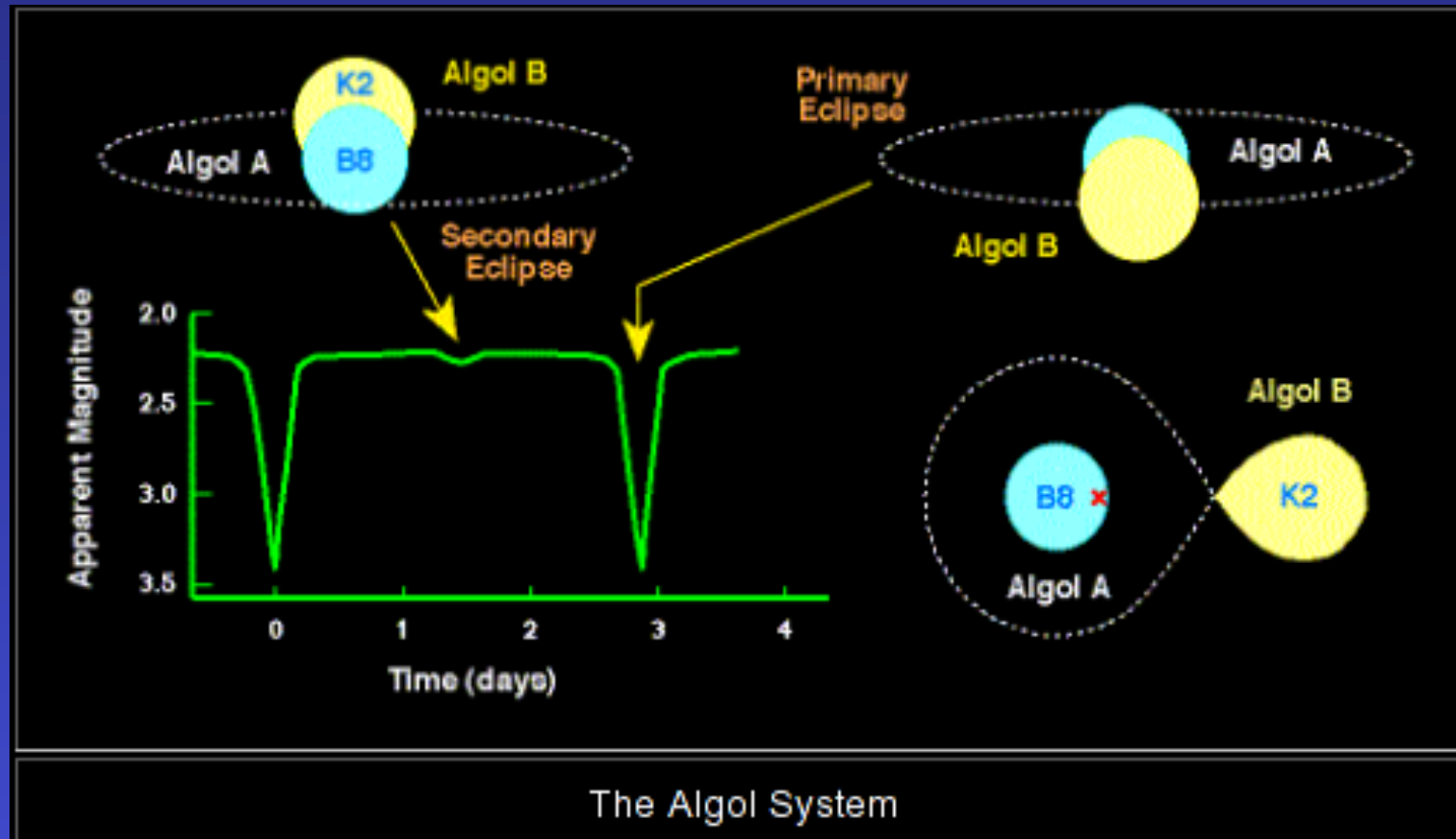
Ν. Στεργιούλας & Μ. Πλειώνης



CLASSIFICATION OF VARIABLE STARS

ΔΙΠΛΟΙ ΕΚΛΕΙΠΤΙΚΟΙ

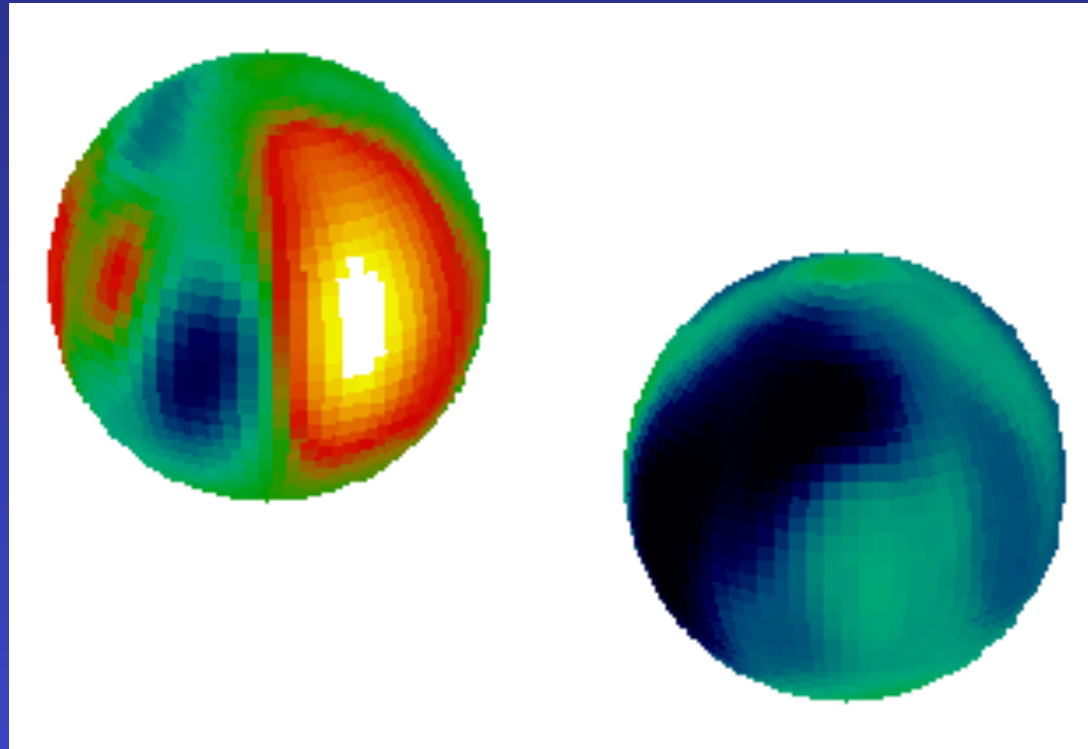
Διπλά εκλειπτικά συστήματα φαίνονται ως μεταβλητός αστέρας, π.χ. ο μεταβλητός Algol που ανακαλύφθηκε το 1669 και ερμηνεύτηκε αργότερα ως διπλό σύστημα.



Το διπλό σύστημα Algol. Φαίνεται η διαφορά στο φαινόμενο μέγεθος που προκαλείται από τις κύριες και δευτερεύουσες εκλείψεις

ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ:

Περιστρεφόμενοι αστέρες με μεγάλες ανομοιογένειες στην επιφανειακή εκπομπή ακτινοβολίας (μεγάλες αστρικές κηλίδες).



Αστέρας με μεγάλη ανομοιογένεια στην επιφανειακή εκπομπή ακτινοβολίας.

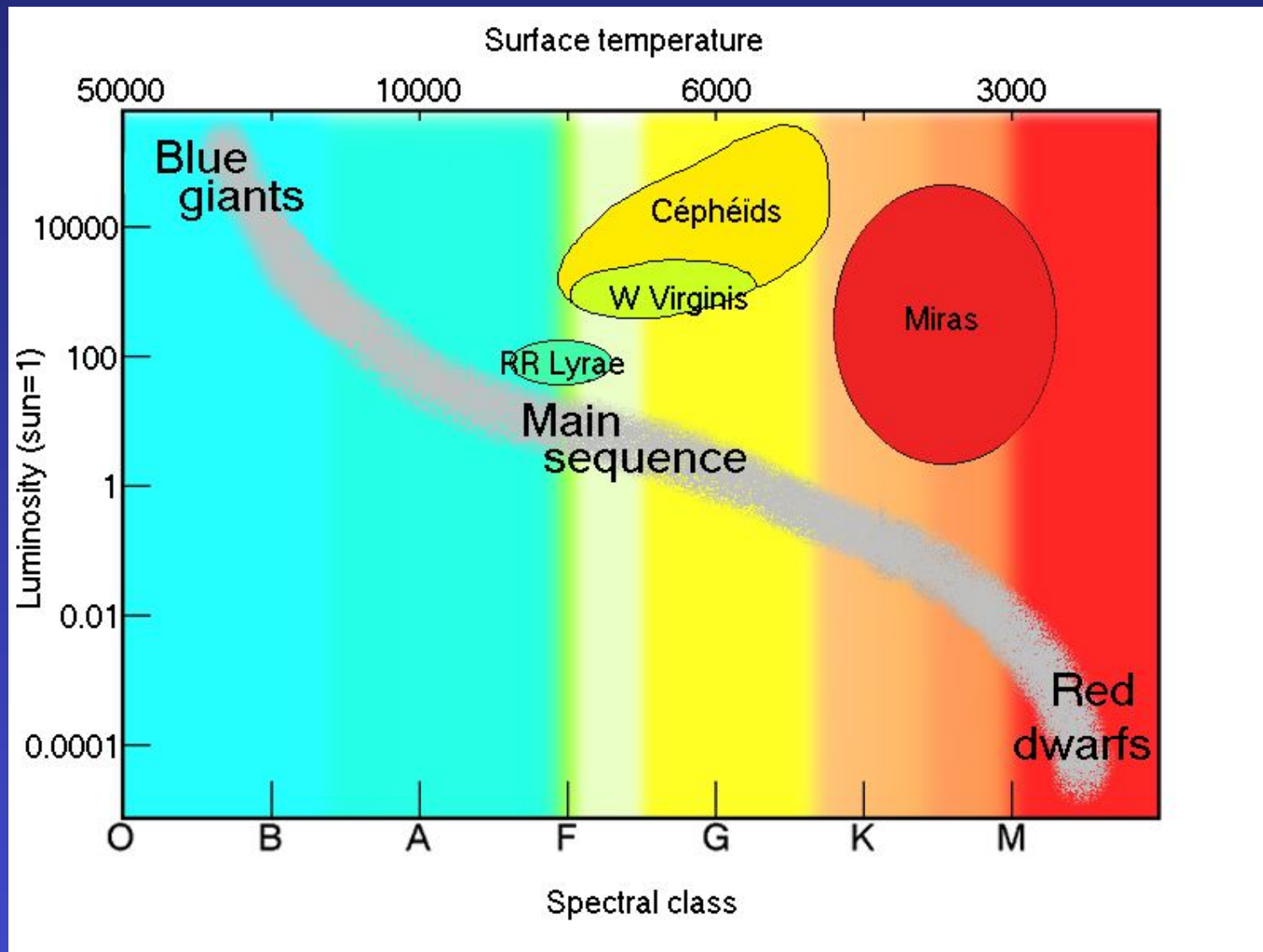
ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΙ

Κηφείδες (πληθυσμού I / πληθυσμού II)

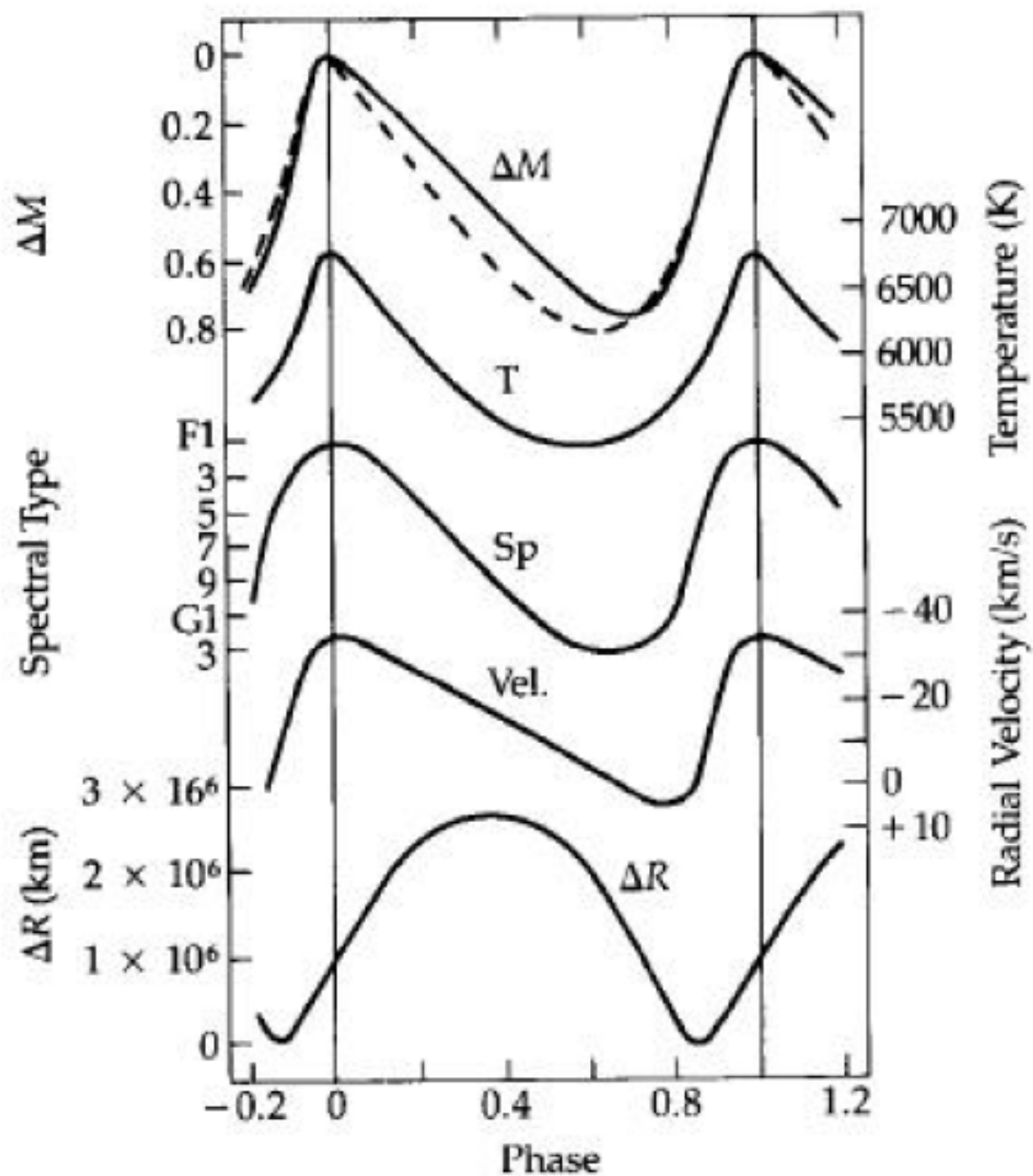
RR Lyrae

ΜΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΙ

Μακροπερίοδοι μεταβλητοί (τύπου Mira)



Περιοδικοί μεταβλητοί αστέρες και οι μεταβολές τους στο διάγραμμα HR



Εικόνα: Μεταβολή χαρακτηριστικών μεγεθών των μεταβλητών αστερών κατά τις διάφορες φάσεις μιας περιόδου.

Πρώτος αστέρας που παρατηρήθηκε: δ -Κηφέως

Γίγαντες αστέρες με περίοδο: 1 - 50 ημέρες

Μεταβολή μεγέθους: $\Delta m \sim 1$

Μεταβολή φασματικού τύπου: F - G

Μεταβολή θερμοκρασίας: 5500 - 6500 K

Κλειστή "τροχιά" στο διάγραμμα H-R

Χρησιμοποιώντας το νόμο Stefan-Boltzmann

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

δε δικαιολογείται η παρατηρούμενη μεταβολή στη φωτεινότητα από την παρατηρούμενη μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας μόνο.

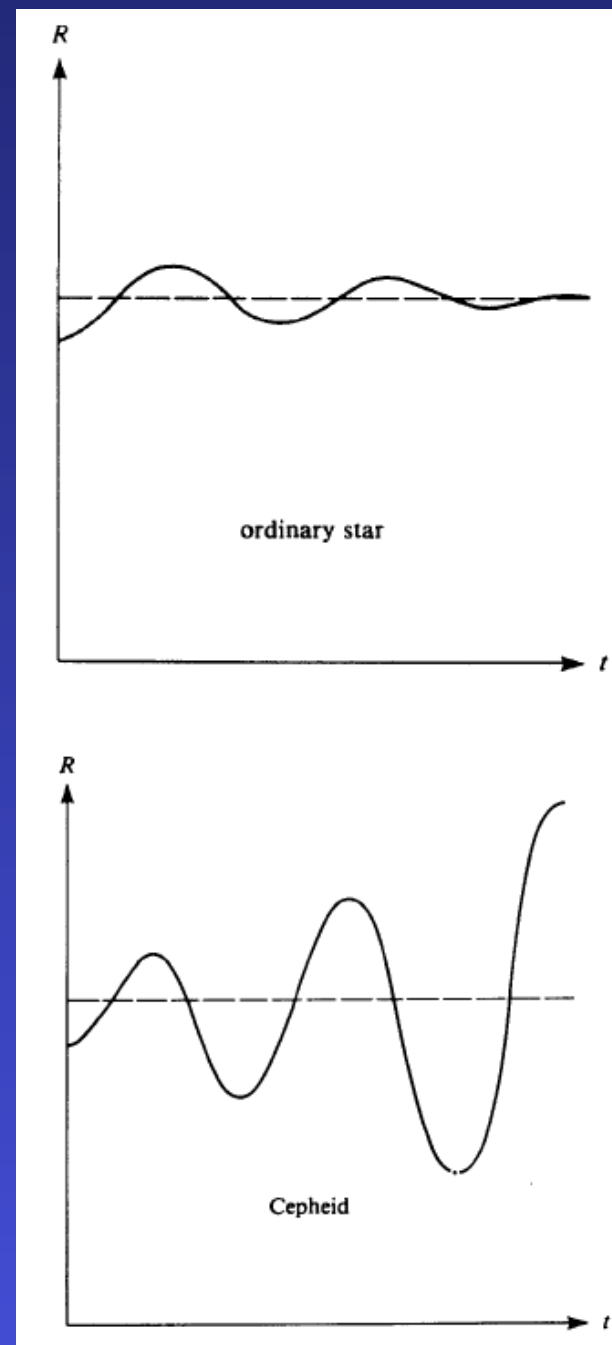
Εξήγηση: και η ακτίνα R πρέπει να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου!

Οι αστέρες αυτοί είναι παλλόμενοι.

Οι αναπάλσεις συμβαίνουν στα **εξωτερικά στρώματα** και δεν οφείλονται σε μεταβολές του ρυθμού παραγωγής ενέργειας στον πυρήνα του αστέρα.

Εάν υπάρχουν κατάλληλες **ζώνες ιονισμού H και He** κοντά στην επιφάνεια, στις οποίες **η αδιαφάνεια αυξάνει με τη θερμοκρασία**, τότε παράγονται **υπερευσταθείς ταλαντώσεις**.

Μεταβολή της ακτίνας ως συνάρτηση του χρόνου.



Στους τυπικούς αστέρες έχουμε όταν:

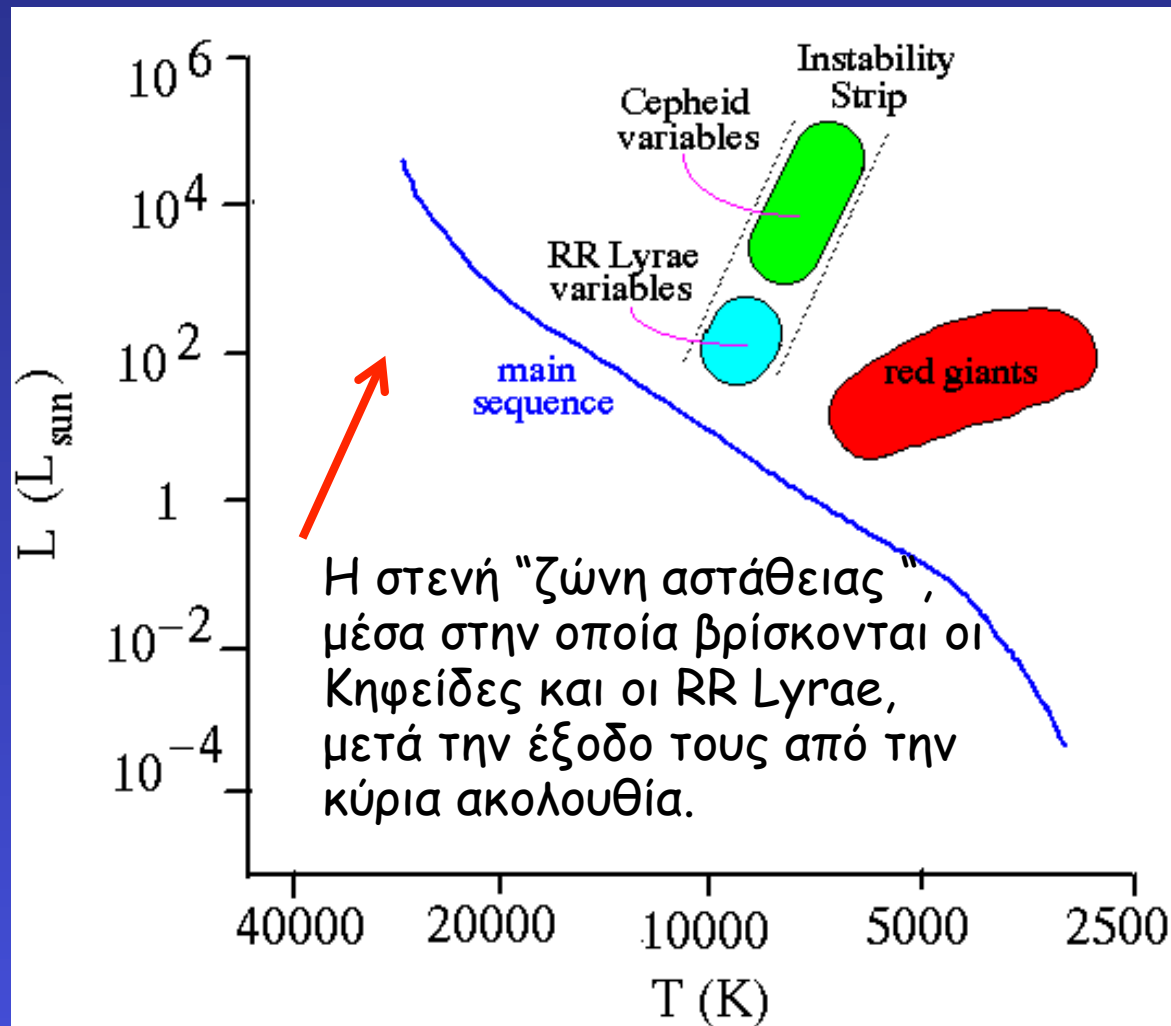
- (a) Συμπιέζονται αδιαβατικά, αύξηση T και ρ , μείωση κ (όπου κατά Κράμερ $\kappa \sim \rho T^{-3.5}$), αύξηση ροής γ , απώλεια ενέργειας, μείωση T και P εξωτερικών στοιβάδων \rightarrow αύξηση δύναμης επαναφοράς ($F_p - F_G$), που ισοδυναμεί με τριβή
- (b) Εκτόνωση αδιαβατική: μείωση T και ρ , αύξηση κ , συσσώρευση γ άρα αύξηση $P \rightarrow$ αύξηση δύναμης επαναφοράς ($F_G - F_p$).

Άρα αποσβενόμενη ταλάντωση και ευστάθεια των τυπικών αστέρων

Το αντίστροφο πρότεινε ο Eddington ότι συμβαίνει στους Κηφείδες. Με αποτέλεσμα να αυξάνει διαρκώς το πλάτος ταλάντωσης μέχρι να φτάσει η τιμή της «αρνητικής τριβής» την τιμή της «θετικής τριβής» που οφείλεται στα χαρακτηριστικά του ρευστού (ιξώδες) και έτσι να πάλλεται ο αστέρας με σταθερό πλάτος («υπερευσταθής» κατάσταση)

Οφείλεται δε στα φυσικά χαρακτηριστικά του ιονισμένου He.

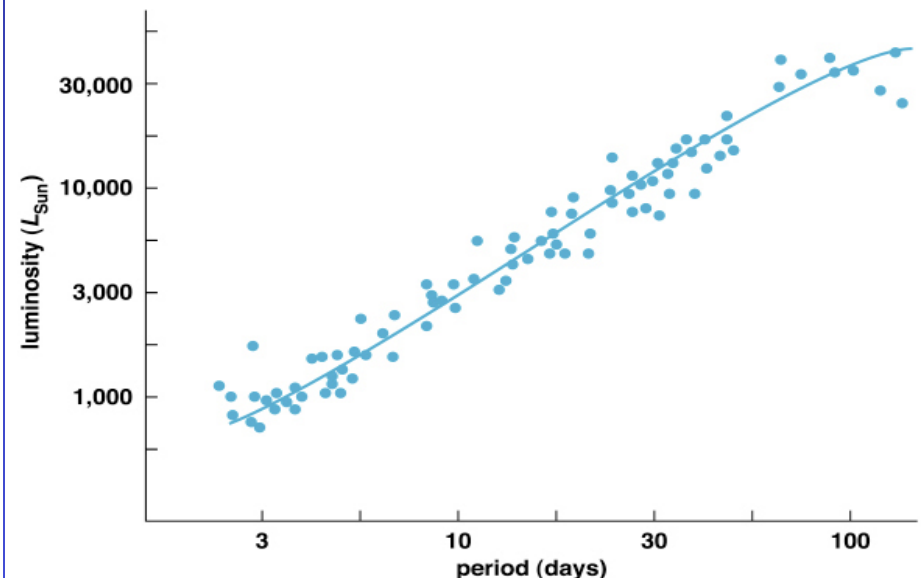
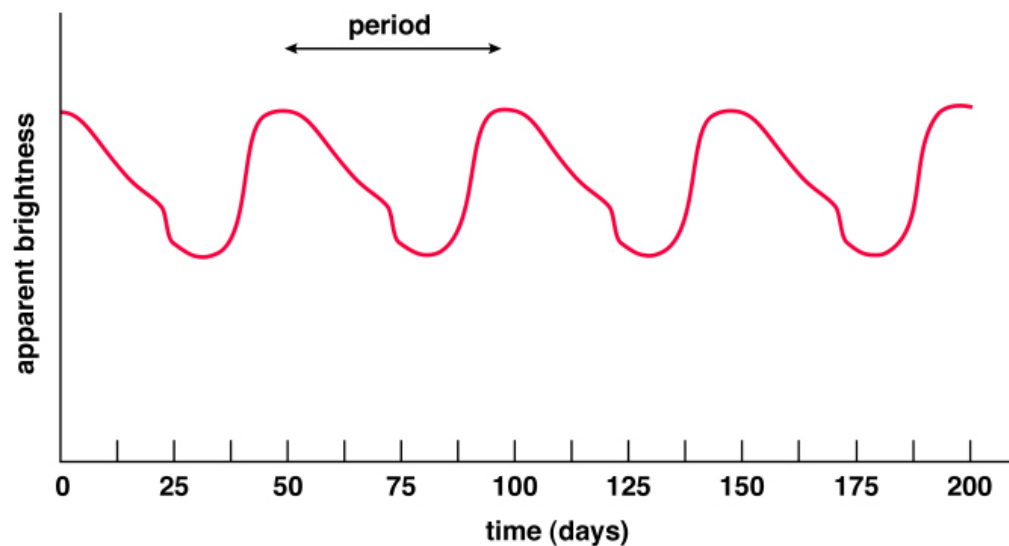
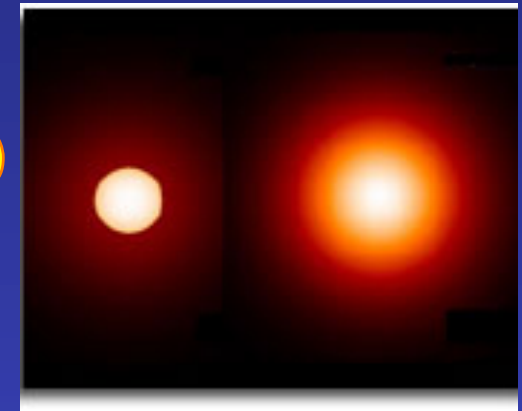
Όπως αυξάνεται η θερμοκρασία το $\text{HeII} \rightarrow \text{HeIII}$ (πιο αδιαφανές), όταν οι εξωτερικές στοιβάδες γίνουν αδιαφανείς, δεν διαφεύγει πολύ ακτινοβολία το άστρο διαστέλλεται, ψύχεται, λιγότερος ιονισμός HeIII, ξανά διαφανές, ακτινοβολία διαφεύγει, σταματά διαστολή, αρχίζει συστολή λόγω βαρύτητας, και επανάληψη.



Η Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) παρατήρησε στους Κηφείδες ταλαντώνεται η φωτεινότητα τους περιοδικά και με συγκεκριμένη σχέση περιόδου-φωτεινότητας :



$$L = C P^{1.33} \text{ (στη μπάντα V)}$$

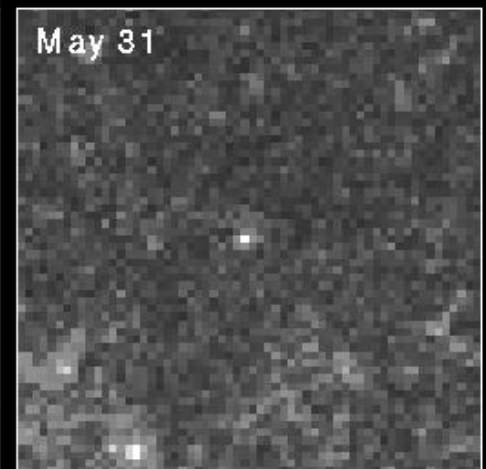
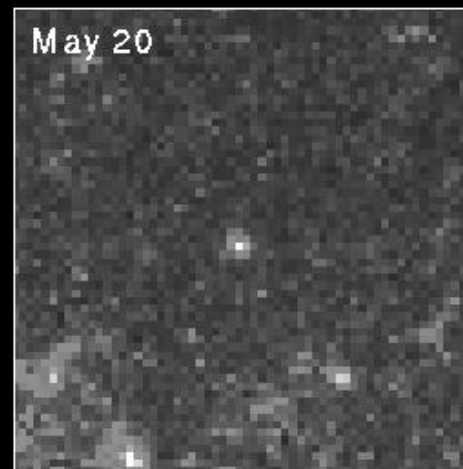
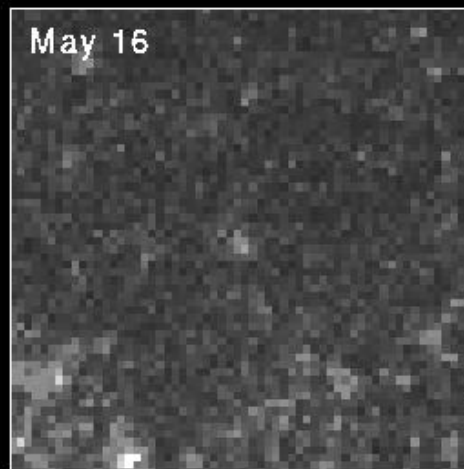
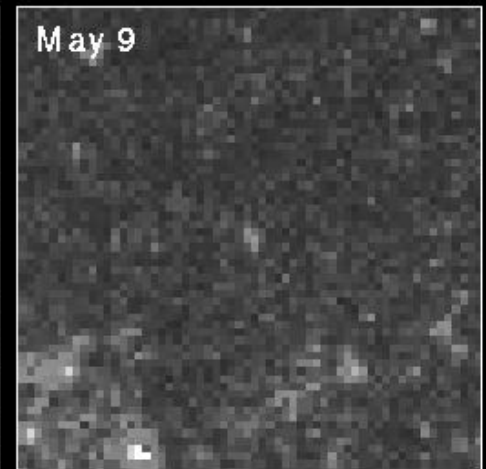
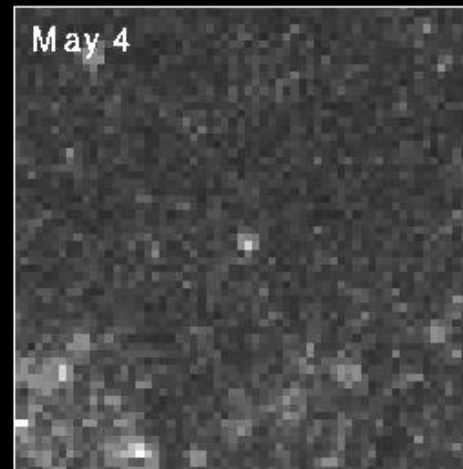
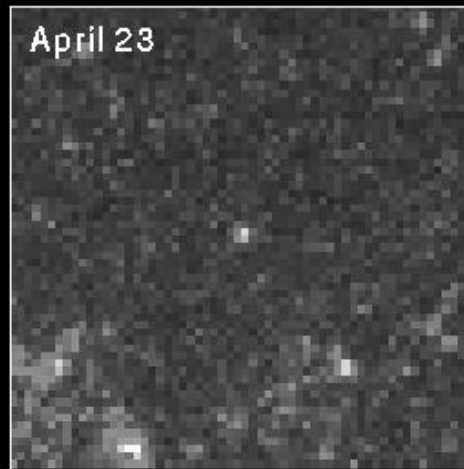


Κηφείδες φαίνονται και σε κοντινούς γαλαξίες, όπως στο M100 στο σμήνος γαλαξιών της Παρθένου

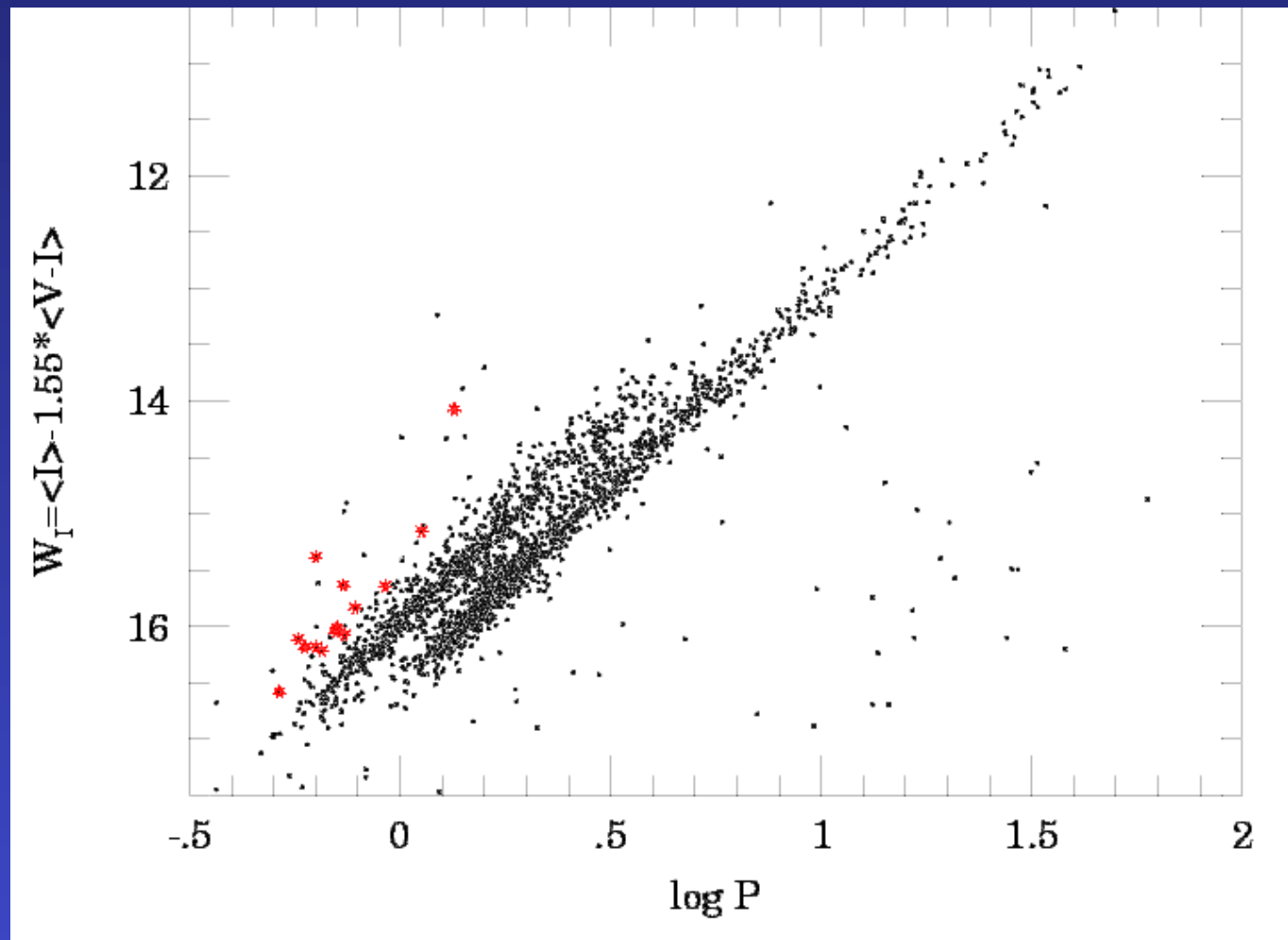


Cepheid Variable Star in Galaxy M100

HST-WFPC2



Όμως έχουν βρεθεί 2 τύποι ταλαντούμενων Κηφείδων (I, II)



Η τελική μετρική σχέση των Κηφείδων I δίδεται από την:

$$M_V = - 3.37(0.08) \log P + 2.55(0.10) (V-I) - 2.48(0.08)$$

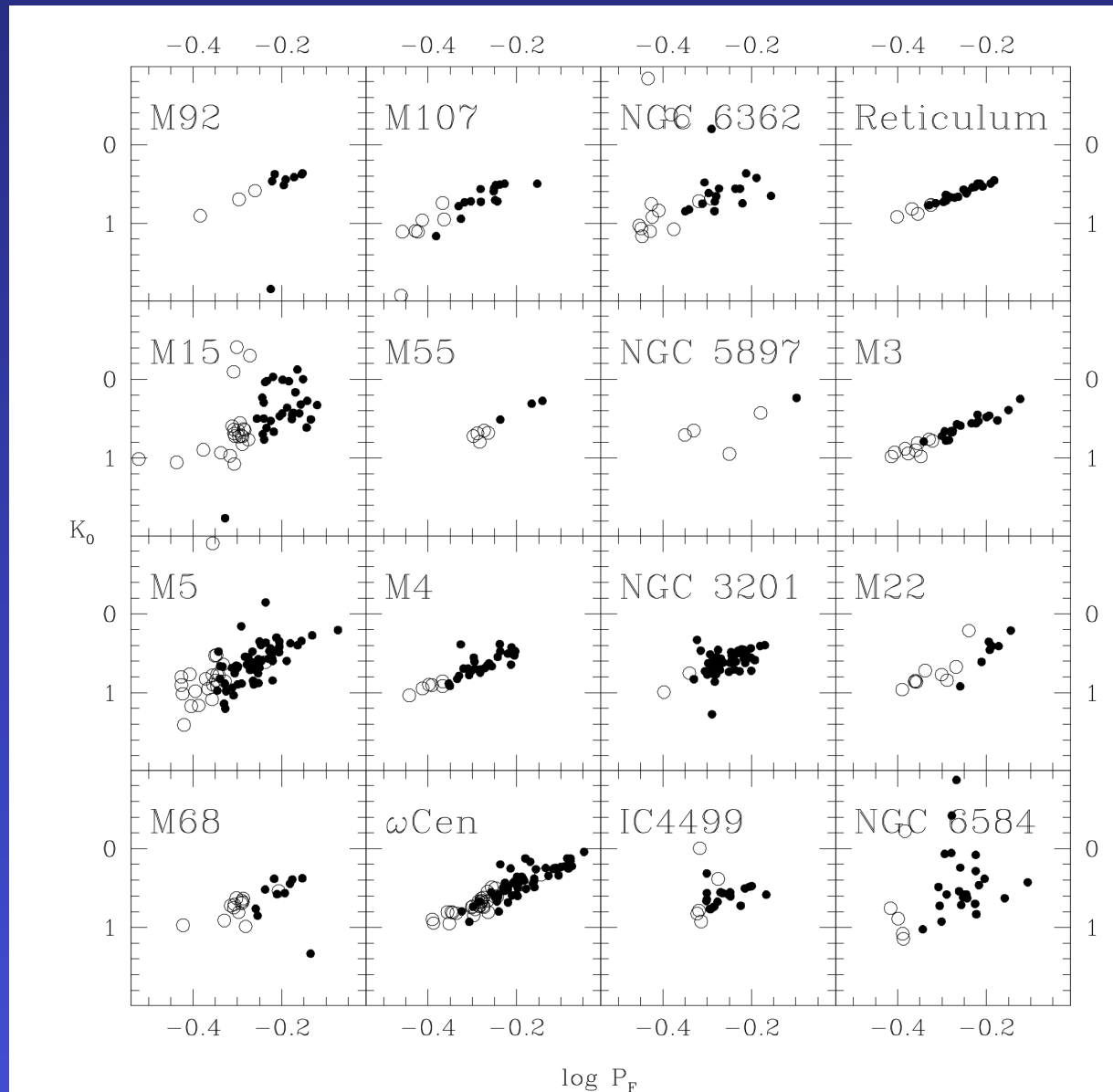
Διαφορές των 2 πληθυσμών Κηφείδων και των μεταβλητών αστέρων τύπου RR-Λύρας

| Κηφείδες I | Κηφείδες II | RR-Λύρας |
|---|--|--|
| Πολύ Λαμπρά ($10^6 L_{\odot}$) | | $\sim 40 L_{\odot}$ |
| 4-20 M_{\odot} | 1/2 M_{\odot} | 1/2 M_{\odot} |
| Pop I (F6-K2): Κίτρινοι Υπεργίγαντες. Υψηλή μεταλλικότητα | Pop II: Γηραιά άστρα, χαμηλή μεταλλικότητα | Pop II (A2-F6): Γηραιά άστρα (οριζόντιου Κλάδου - δεν είναι Ερυθροί αλλά Κιτρινόλευκοι Γίγαντες), χαμηλή μεταλλικότητα |
| Περίοδος: ημερες - μήνες | Περίοδος: 1-50 ημερες | Περίοδος: ώρες |
| Σπάνια | Σπάνια | Αρκετά κοινά άστρα σε Σφαιρωτά Σμήνη |



Προσοχή: Στο βιβλίο λέει ότι η περίοδος μεταβολής φωτεινότητας είναι ανεξάρτητη της φωτεινότητας τους. Αυτό δεν ισχύει πλέον.

RR-Λύρας: σχέση περιόδου Απόλυτου Μεγέθους σε διαφορετικά Σφαιρωτά Σμήνη (στο κοντινό υπέρυθρο - μπάντα-K)

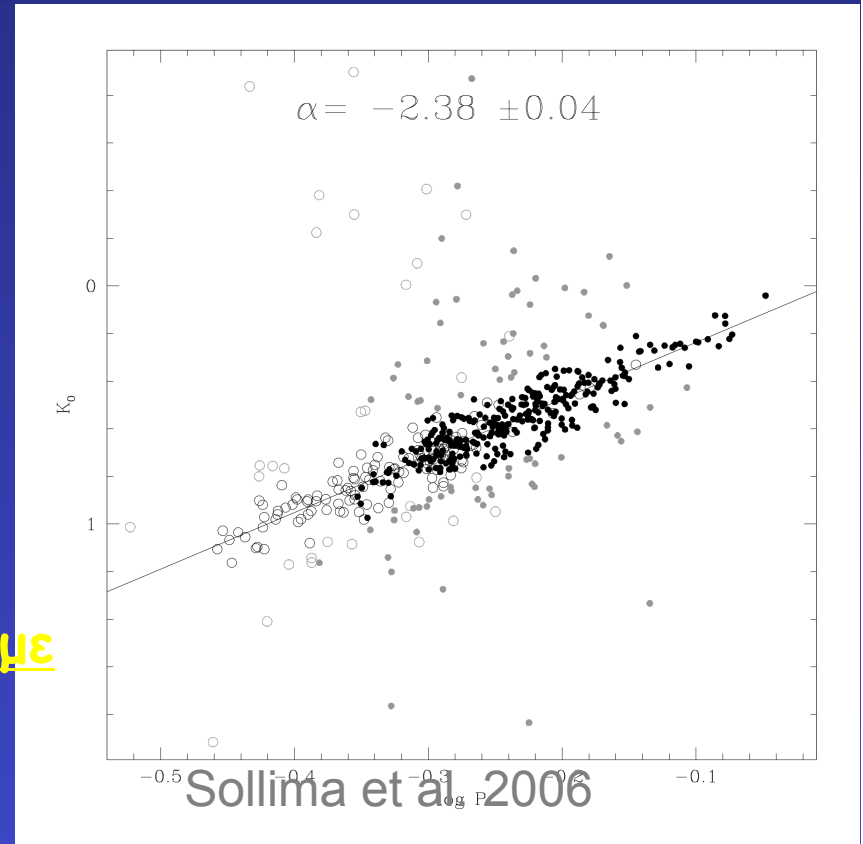


$$L = C P^{0.92}$$

RR-Λύρας: σχέσηη περιόδου Απόλυτου Μεγέθους σε διαφορετικά Σφαιρωτά Σμήνη (στο κοντινό υπέρυθρο - μπάντα-K)

Η βαθμονόμηση της σχέσης επετεύχθη με παρατηρήσεις του τηλεσκοπίου Hubble και υπολογισμό της τριγωνομετρικής παράλλαξης του αρχέτυπου RR-Lyrae

Στο οπτικό έχουμε $L \sim T^4$ ενώ στο IR έχουμε $L \sim T^{1.6}$ και επομένως λιγότερο θόρυβο



$$M_K = -2.38(0.04) \log P + 0.08(0.11) [\text{Fe}/\text{H}] - 1.05(0.13)$$

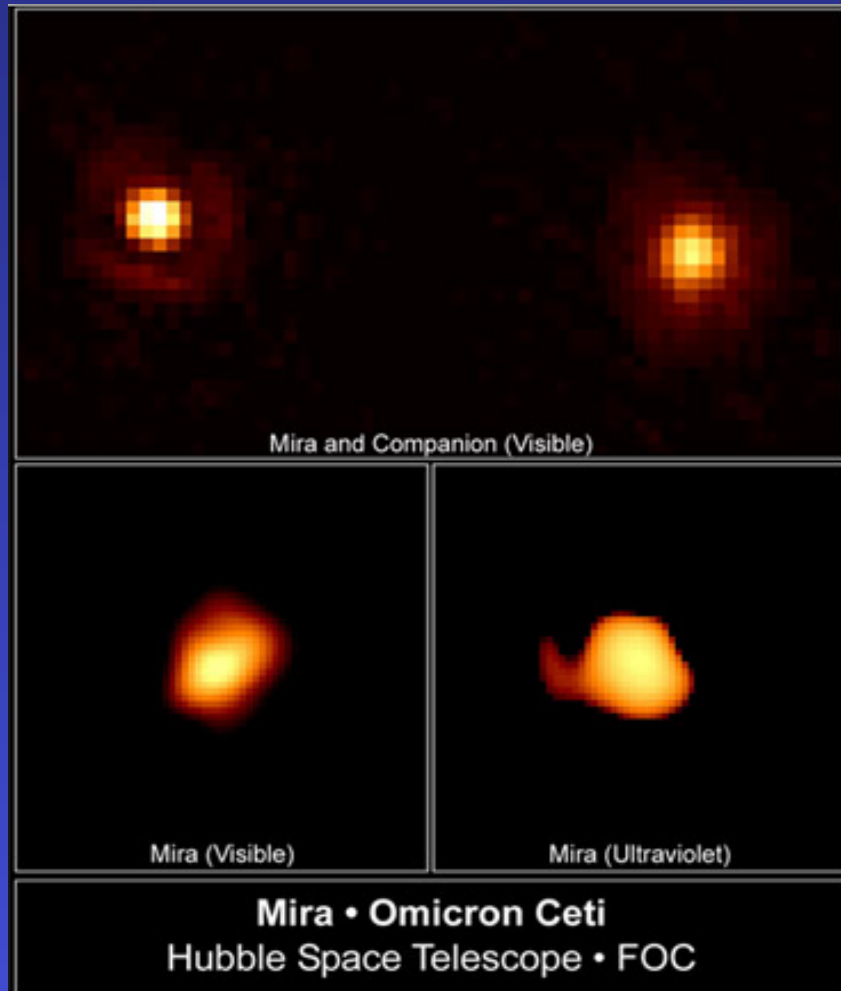
Μακροπερίοδοι μεταβλητοί (τύπου Mira)

ο Ceti (Mira): διπλό σύστημα.

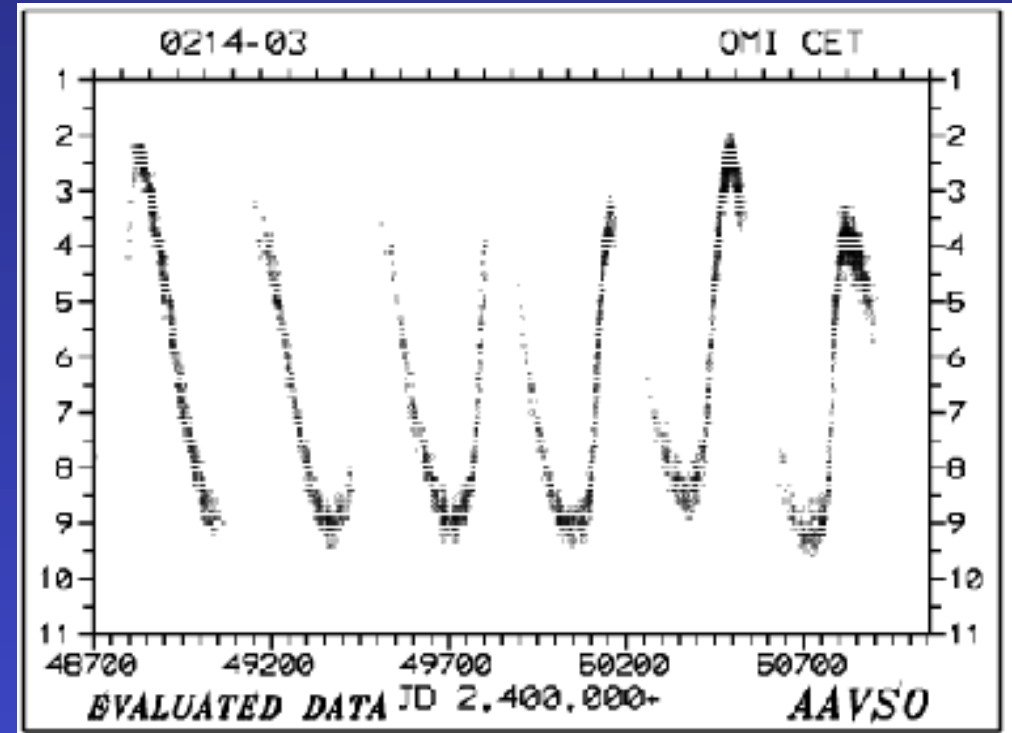
Mira A (μεταβλητός): ακτίνα $\sim 100 R_{\odot}$

έντονος αστρικός άνεμος, μή-συμμετρικό σχήμα

(β)



(α)



(α) Ο ερυθρός γίγαντας Mira (δεξιά) και ο θερμός συνοδός του (αριστερά).

(β) Η μεταβολή στην ένταση του φωτός από το διπλό σύστημα Mira

Μακροπερίοδοι μεταβλητοί (τύπου Mira)

Περίοδος: 100 - 1000 ημέρες

Ψυχροί ερυθροί γίγαντες μικρής μάζας. Κατά τα τελευταία της εξέλιξης γίνεται διαδοχική καύση H και He στα εξωτερικά στρώματα. Αυτές οι εναλλαγές έχουν αποτέλεσμα την περιοδική μεταβολή της φωτεινότητας.

Θερμοκρασία: 2500 - 3500 K

Η μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί μεγάλη διαφορά στην απορρόφηση φωτός.

$\Delta m_V \sim 6 !$

ΑΝΩΜΑΛΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ

T-Tauri

Αστέρες Εκλάμψεων

Τύπου R Coronae Borealis

ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ

Καινοφανείς

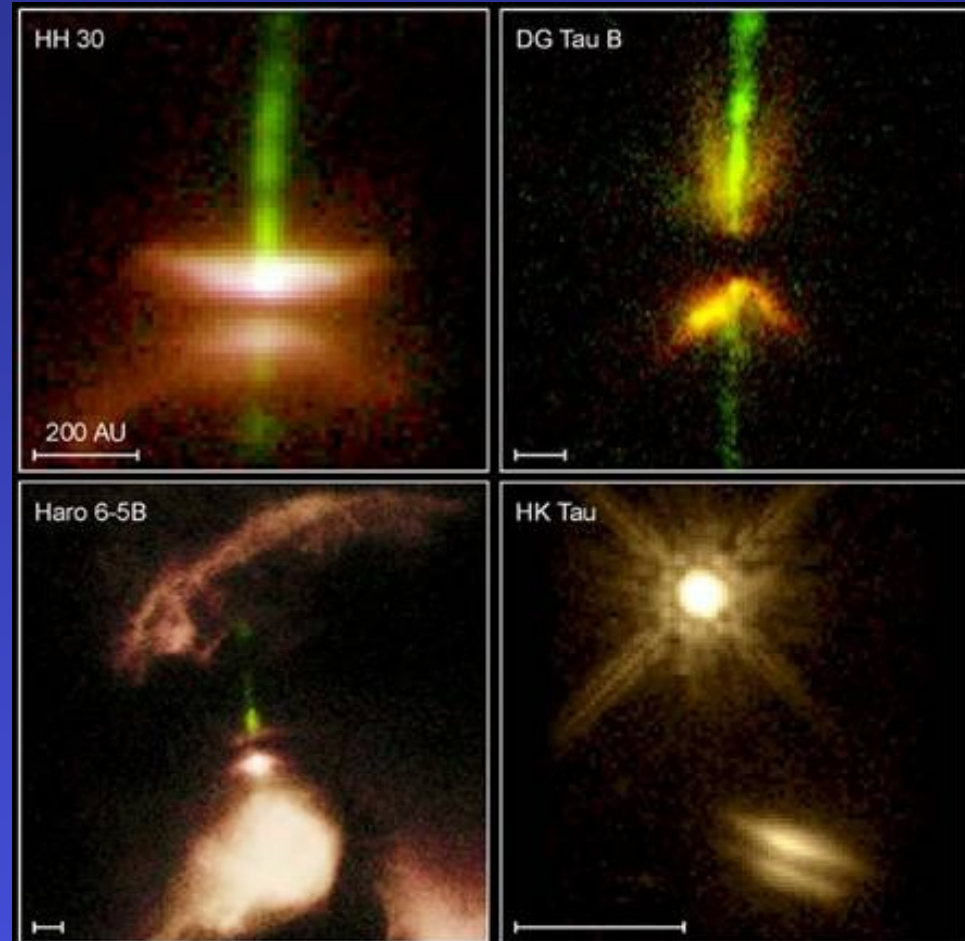
Υπερκαινοφανείς I

Υπερκαινοφανείς II

T-Tauri ανώμαλοι μεταβλητοί

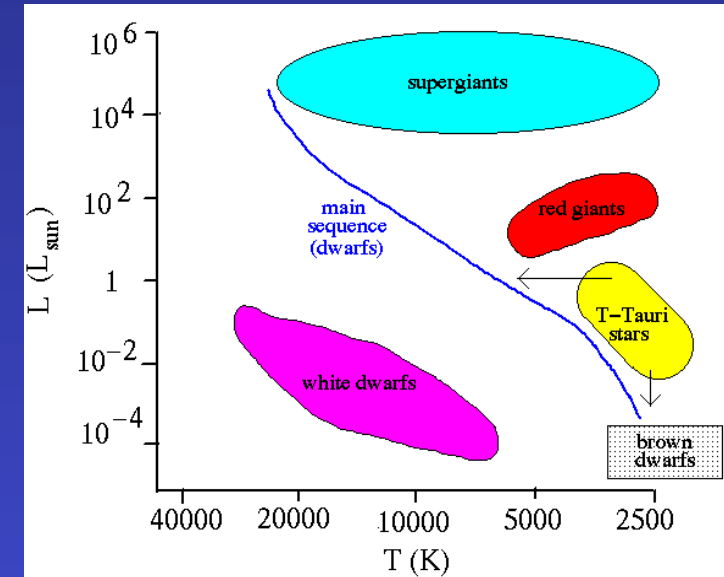
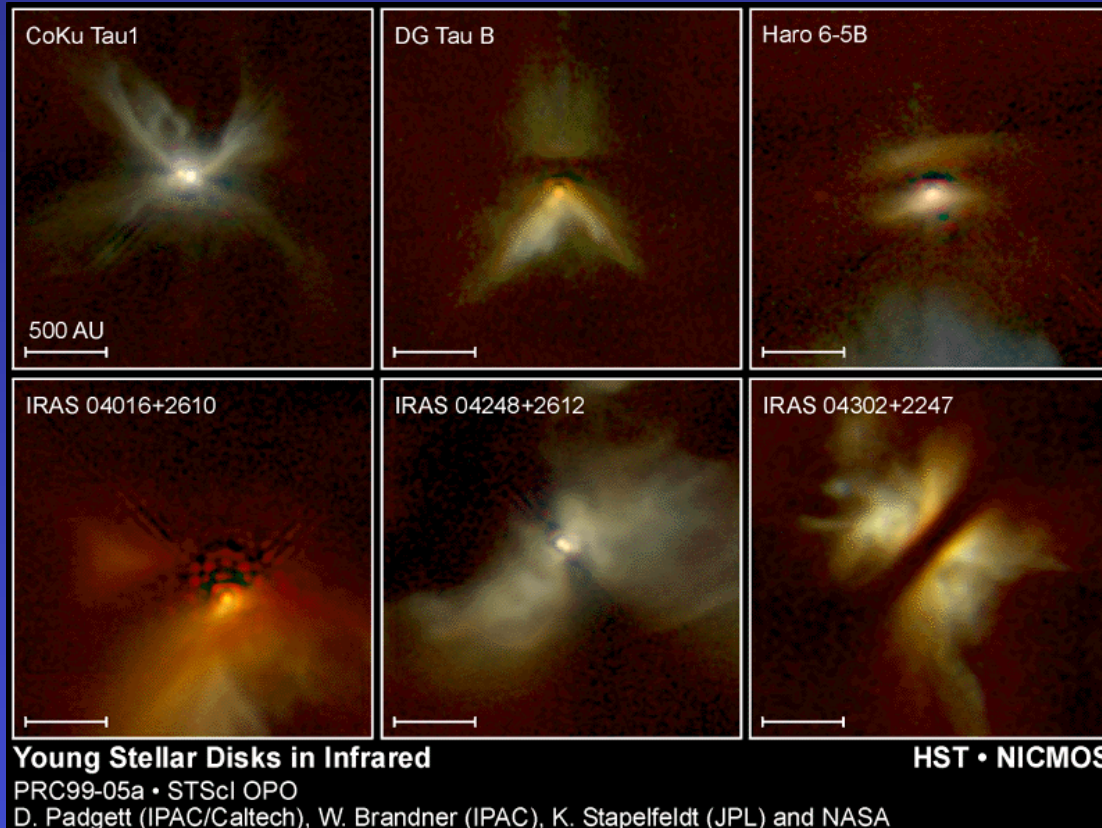
- Απότομες, βραχυχρόνιες αυξήσεις στην λαμπρότητα $\Delta m \sim 0.3-4$
- Διαστήματα ηρεμίας μέχρι 100 ημέρες
- Φασματικές γραμμές λιθίου (που δεν εμφανίζονται σε άλλους αστέρες - το λίθιο εξαντλείται γρήγορα)
- Ισχυροί αστρικοί άνεμοι
- Αστέρες "εν τη γενέσει τους".

Αστέρες τύπου T Tauri. Δίσκοι σκόνης και αερίων «κρύβουν» τους νεογέννητους αστέρες. Πίδακες αερίων φαίνονται να εκτινάσσονται (πράσινο) κάθετα στο επίπεδο των δίσκων.

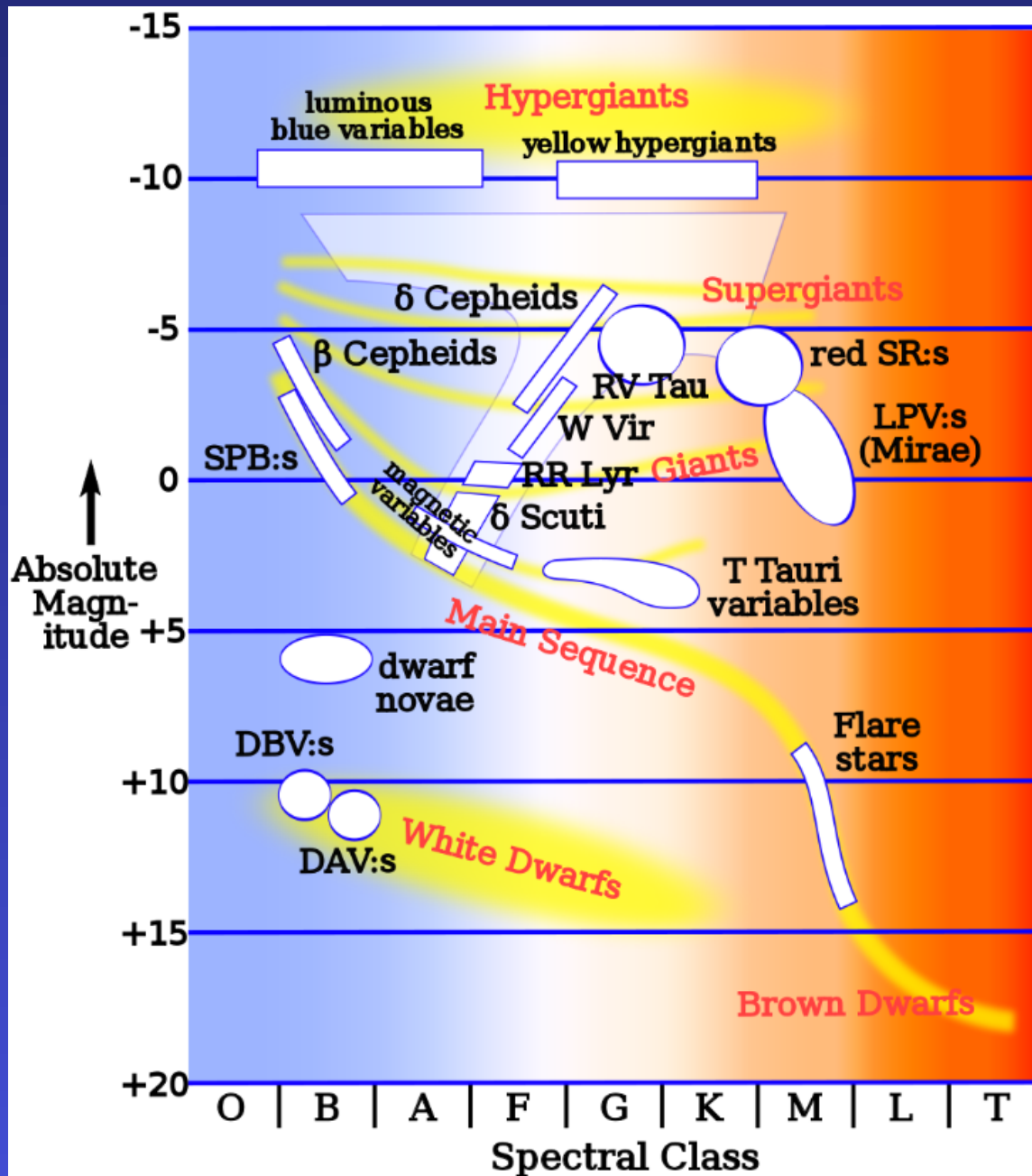


T-Tauri ανώμαλοι μεταβλητοί

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).**



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



Περιοχές των μεταβλητών
αστέρων στο διάγραμμα HR

Αστέρες Εκλάμψεων

Ψυχροί ερυθροί νάνοι της κύριας ακολουθίας (M4-M9)

Απότομες και σύντομες εκλάμψεις (σε B, U) με $\Delta m \sim 6$

Μεγάλη ζώνη μεταφοράς (απουσία ζώνης ακτινοβολίας)

-> Έντονο μαγνητικό πεδίο

-> Ισχυρές εκλάμψεις (πολύ πιο ισχυρές από ότι στον Ήλιο).

Μεταβλητοί τύπου R Coronae Borealis

Υπεργίγαντες τύπου F ("αντίστροφοι Καινοφανείς" λόγω απότομη πτώση φωτεινότητας $\Delta m = -9$ μέσα σε λίγες 2 μέρες ! Διατήρηση για ~ 1 έτος και μετά επαναφορά στο αρχικό μέγεθος.

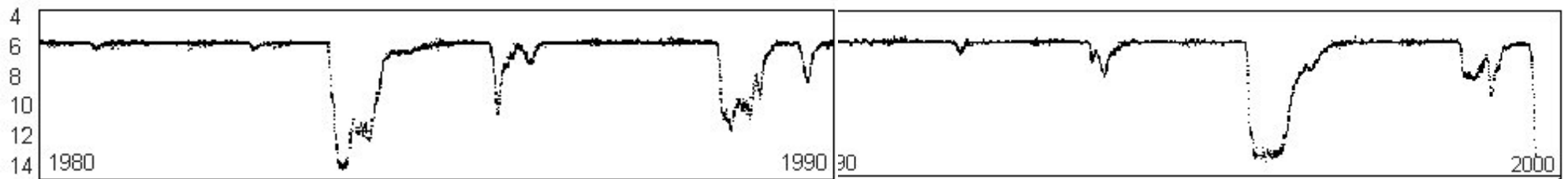
Φάσμα χωρίς γραμμές Υδρογόνου αλλά πλούσιο σε άνθρακα: Έχουν αποβληθεί οι φλοιοί H και He και με μεταφορά εξάγει υλικό από πυρήνα C.

-> Έντονος αστρικός άνεμος που δημιουργεί ψυχρό νέφος με σκόνη ενώσεων άνθρακα που απορροφά το φως.

-> Θέρμανση νέφους και εξάχνωση

-> επαναφορά στην αρχική λαμπρότητα.



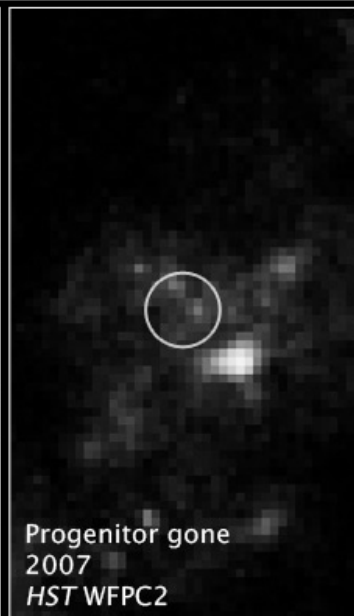
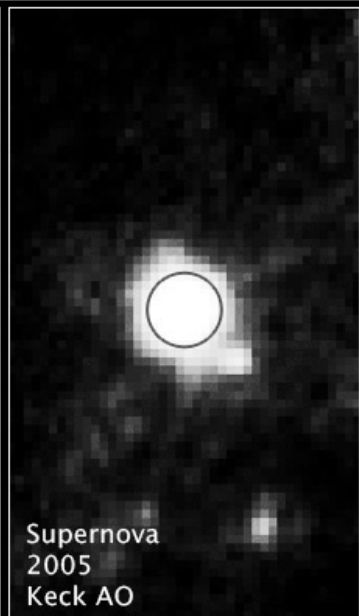
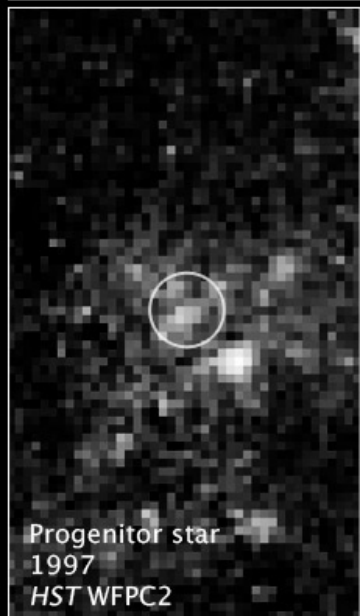


Μεταβολή του μεγέθους του R Coronae Borealis με το χρόνο

Καταστροφικοί μεταβλητοί: Novae, Supernovae

Supernova 2005gl in Galaxy NGC 266

HST ■ WFPC2



Έκρηξη supernova στον γαλαξία NGC 266. Η έκρηξη προήλθε από αστέρα με μάζα 100 φορές μεγαλύτερη του Ηλίου

Καταστροφικοί μεταβλητοί: *Novae, Supernovae*

Καινοφανείς: προσαύξηση ύλης πάνω σε λευκό νάνο σε διπλό σύστημα - συσσώρευση H (κυρίως) αλλά και He οδηγεί σταδιακά σε αύξηση της θερμοκρασίας του λόγω συμπίεσης στην επιφάνεια Λ.Ν. Και απότομη ανάφλεξη που παράγει απότομη αύξηση της λαμπρότητας και εκτίναξη του αερίου. Επαναλαμβανόμενο φαινόμενο μιας και ο λευκός νάνος δεν διαλύεται.

Υπερκαινοφανείς τύπου I προσαύξηση ύλης πάνω σε λευκό νάνο σε διπλό σύστημα - συσσώρευση ύλης οδηγεί σε έκρηξη και απότομη αύξηση της λαμπρότητας. Σε αυτή την περίπτωση όμως ο λευκός νάνος βρίσκεται στο μέγιστο όριο της μάζας και η έκρηξη τον διαλύει.

Υπερκαινοφανείς τύπου II πρόκειται για την έκρηξη ενός αστέρα μεγάλης μάζας, στο τέλος της εξέλιξής του και οδηγεί στη δημιουργία αστέρα νετρονίων ή μελανής οπής.

Αστέρας με $M > 10 M_{\odot}$

Διαδοχικές συστολές μετά από εξάντληση στοιχείων αυξανόμενου ατομικού αριθμού.

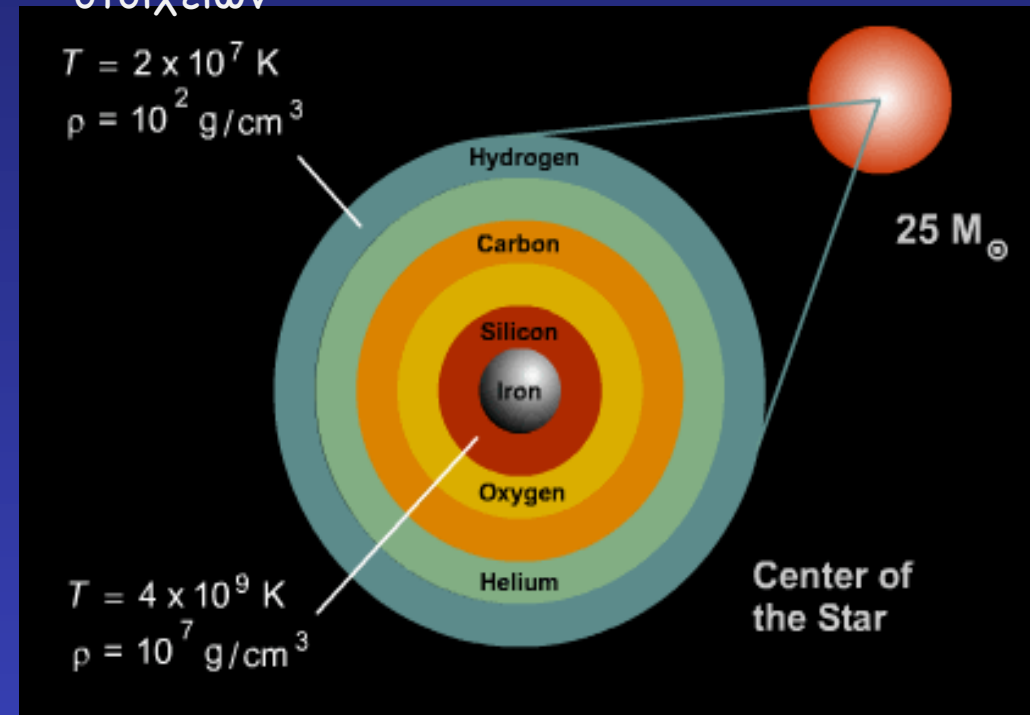
-> καύσεις βαρύτερων στοιχείων

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

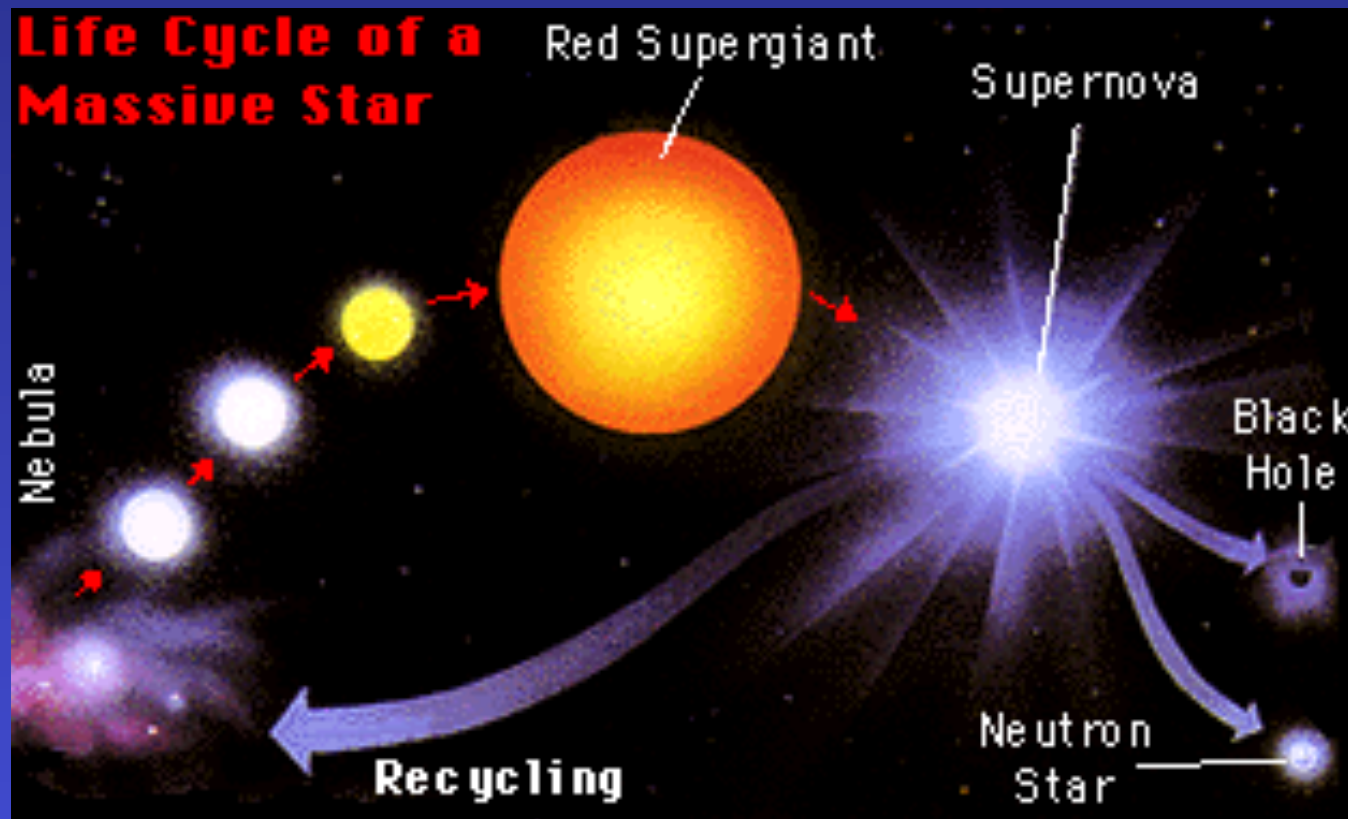
-> Ο αδρανής πυρήνας σιδήρου οδηγεί σε καταστροφική συστολή και έκρηξη υπερκαινοφανούς τύπου II & εμπλουτισμός μεσοαστρικού χώρου με Z .

-> Ο πυρήνας έχει μάζα μεγαλύτερη από το όριο Chandrasekhar και επομένως καταρρέει σε μεγαλύτερες πυκνότητες. Ο ^{56}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} gr/cm^3 οπότε πλέον ούτε τα ν_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