

# Φυσική των αστέρων

## Μάθημα 19

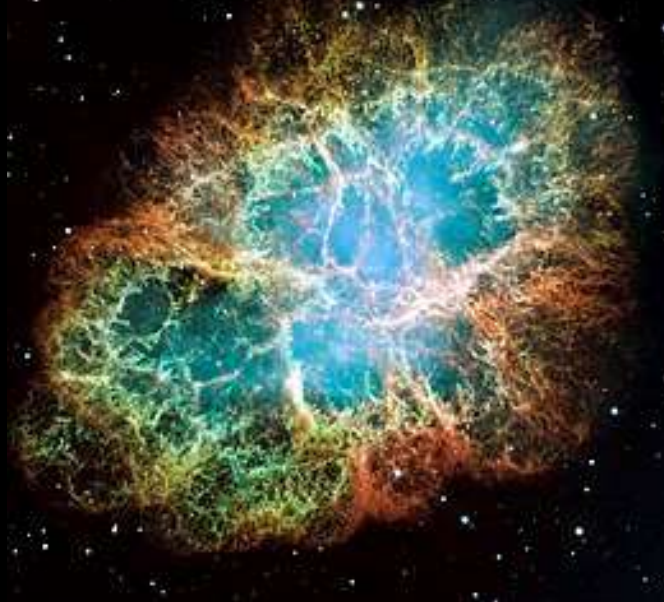
Υπερκαινοφανείς - Supernovae  
Carroll & Ostlie Κεφ. 10 (15 στην αγγλική έκδοση)

α.ε. 2024-25

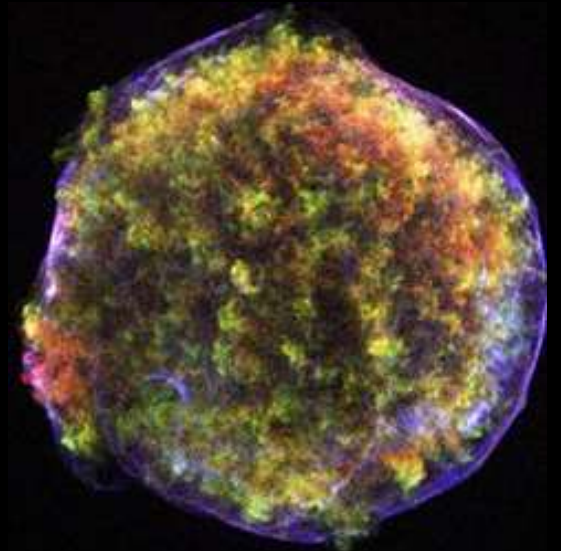


Ιστορικοί  
υπερκαινοφανείς  
στον Γαλαξία μας,  
και το LMC

SNR Crab nebula, SN1054



SNR, SN1572 (Tycho)



SNR SN1006

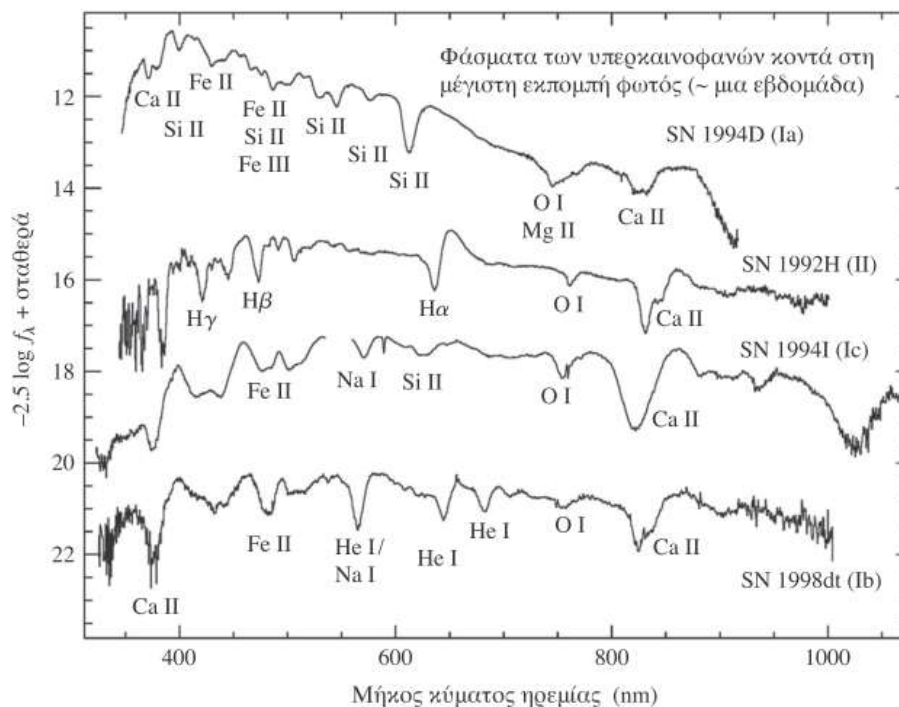


SNR SN1604 (Kepler)



SNR - SN1987a (LMC)

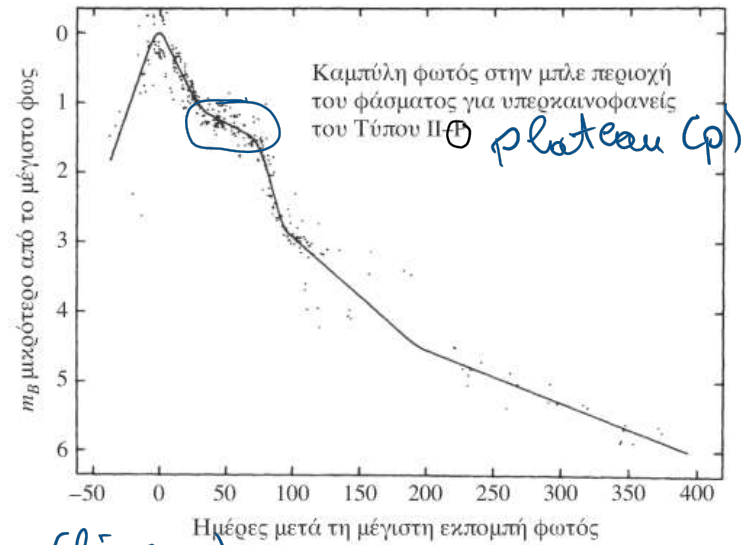
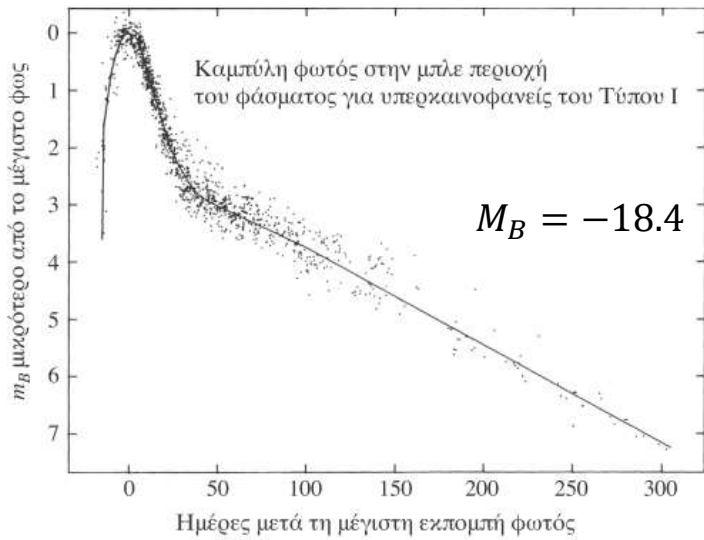
# Φάσματα διαφορετικών τύπων SN



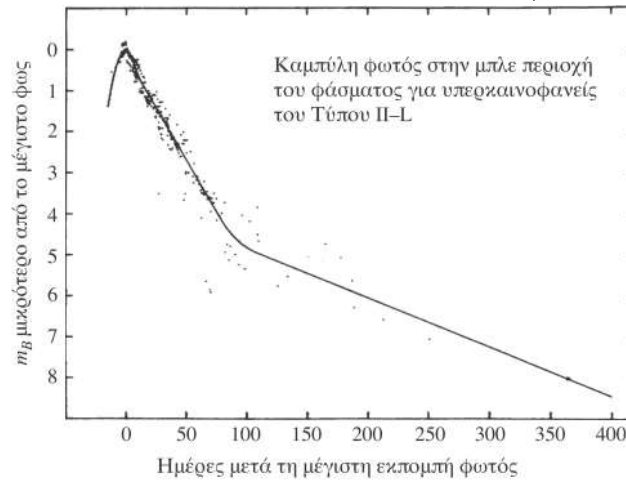
Σχήμα 10.6

Αντιπροσωπευτικά φάσματα των τεσσάρων τύπων, Ia, Ib, Ic και II, υπερκαινοφανών αστέρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και ο υπερκαινοφανής SN 1987A (που είναι Τύπου Ic) εμφανίζει μια ασθενή γραμμή απορρόφησης Si II, αυτή είναι πολύ λιγότερο εμφανής σε σχέση με τις γραμμές Si που υπάρχουν στα φάσματα των υπερκαινοφανών του Τύπου Ia. Η λαμπρότητα σημειώνεται σε αυθαίρετες μονάδες ροής. (Τα φάσματα είναι προσφορά του Thomas Matheson από το National Optical Astronomy Observatory)

# Καμπύλες φωτός διαφορετικών τύπων SN I II-P

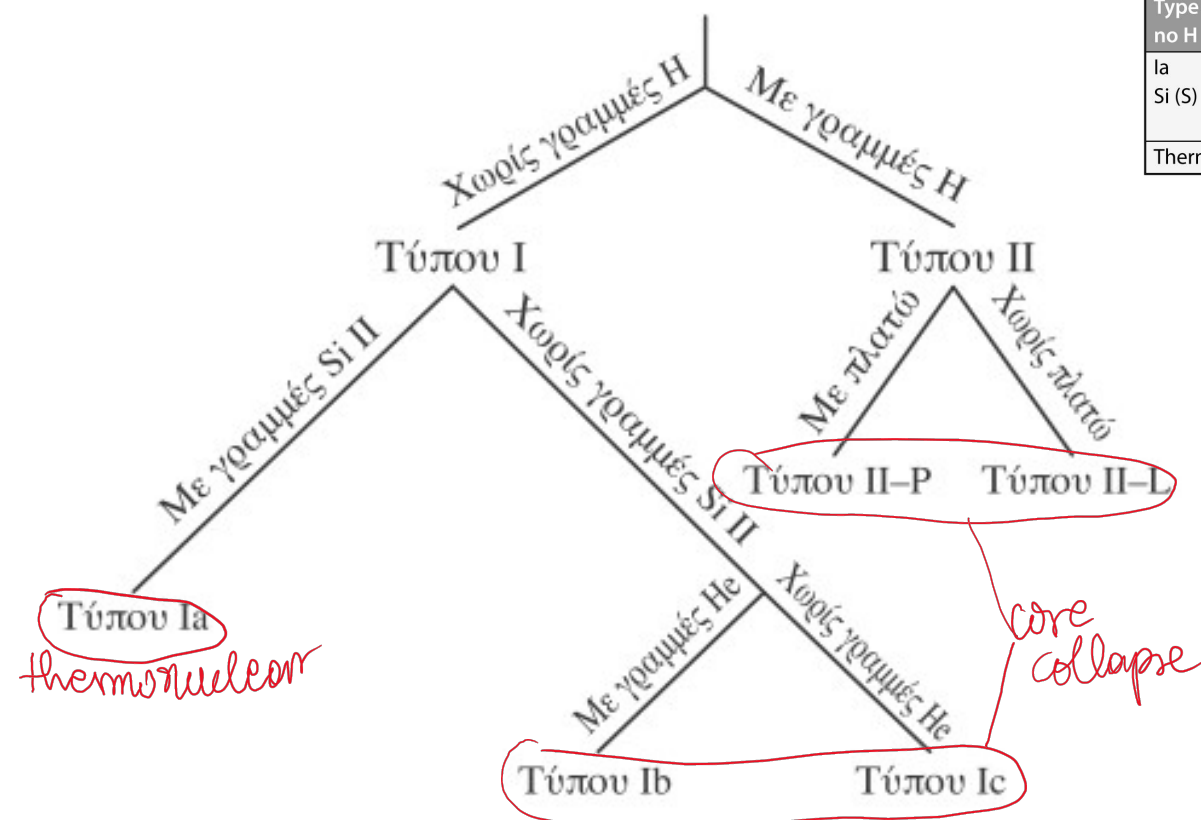


II-L (lineari)



## Σχήμα ταξινόμησης Υπερκαινοφανών με βάση το φάσμα στη μέγιστη φωτεινότητα

Type I no H			Type II H		
Ia Si (S) lines	Ib No Si, but He	Ic No Si, no He	II-P Plateau lightcurve	II-L Linear lightcurve	IIb Change type II → Ib
Thermonuclear			Core collapse		



Σχήμα 10.9

Η ταξινόμηση των υπερκαινοφανών με βάση τα φάσματά τους που παρατηρούνται στη μέγιστη εκπομπή φωτός και την παρουσία ή απουσία πλατώ στις καμπύλες φωτός των υπερκαινοφανών του Τύπου II.

# 1. Υπερκαινοφανείς τύπου I

## Περίληψη των παρατηρησιακών χαρακτηριστικών

- Οι υπερκαινοφανείς τύπου I δεν εμφανίζουν καμία γραμμή υδρογόνου στα φάσματά τους.
- Οι υπερκαινοφανείς του Τύπου I μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σύμφωνα με τα φάσματά τους.
  - Ia: έντονη γραμμή Si III στα 615 nm
  - Ib: έντονες γραμμές He
  - Ic: δεν έχουν έντονες γραμμές He
- Οι τύπου Ia έχουν με κάποιο μηχανισμό απογυμνωθεί τελείως από το περίβλημα υδρογόνου
- Οι τύπου Ib και Ic προκύπτουν με διαφορετικούς μηχανισμούς
- Οι Ia βρίσκονται σε όλους τους τύπους γαλαξιών  
Οι Ib και Ic μόνο σε γαλαξίες με πρόσφατη αστρική δημιουργία (σπειροειδείς και ακανόνιστους)
- Απόλυτο μέγεθος Ia στο μέγιστο  $M_B = -18.4$   
Ib και Ic 1.5-2mag αμυδρότεροι (στο B)
- Ρυθμός μείωσης φωτεινότητας μετά το μέγιστο  $\sim 0.065 \text{ mag/d}$  (για 20d). Μετά διαφοροποιείται ο ρυθμός αυτός με τις Ia να φθίνουν γρηγορότερα.

## 2. Υπερκαινοφανείς τύπου II

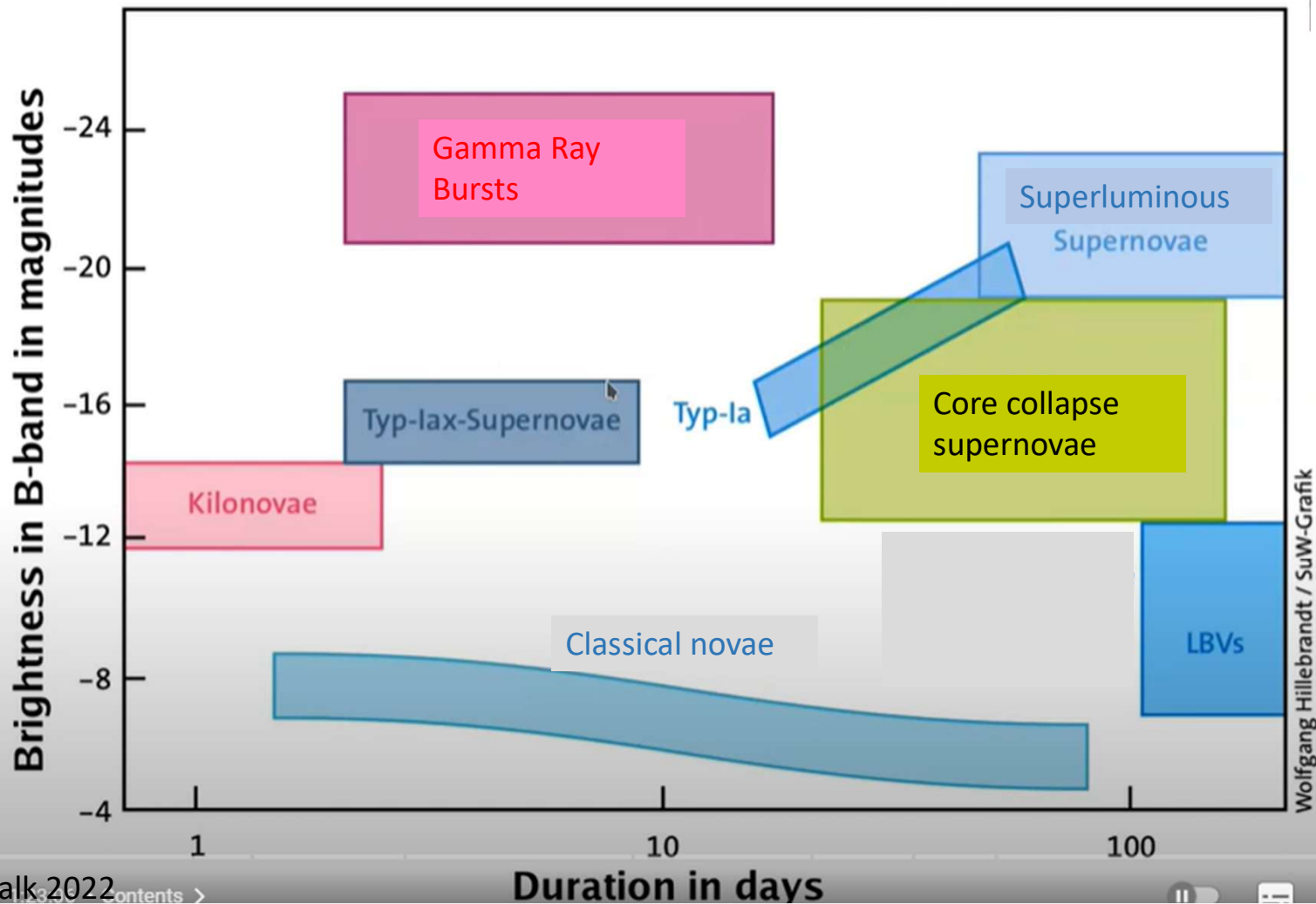
### Περίληψη των παρατηρησιακών χαρακτηριστικών

- Οι Τύπου II περιέχουν έντονες γραμμές υδρογόνου
- Δυο υποκατηγορίες ανάλογα με το αν εμφανίζεται plateau στην καμπύλη φωτός
  - Τύπου II-P (plateau) εμφανίζεται Plateau μεταξύ 30d και 80d μετά το μέγιστο
  - Τύπου II-L (Linear) δεν υπάρχει plateau
  - Οι Τύπου II-P 10 φορές πιο συχνοί από του Τύπου II-L

Υπάρχουν παρατηρήσεις που δείχνουν ότι οι τυπου II και Ib συνδέονται (II → Ib)



# Growing Diversity in the Zoo of "Transients"





## Φυσικές διεργασίες

- Στις SN Ia ο μηχανισμός είναι θεμελιωδώς διαφορετικός από τις άλλες SN. Συμβαίνει σε διπλά συστήματα με τουλάχιστον το ένα αντικείμενο να είναι λευκός νάνος. Θα ασχοληθούμε με αυτή τη πολύ σημαντική κατηγορία στο Κεφ. των διπλών συστημάτων
- Οι υπόλοιποι τύποι σχετίζονται με την κατάρρευση του αστρικού πυρήνα Fe. Με αυτές τις περιπτώσεις θα ασχοληθούμε εδώ.

## Εκλυόμενη ενέργεια

- Το συνολικό ποσό της εκλυόμενης ενέργειας από τυπικό SN Τύπου  $\sim 10^{46}$  J
  - $\sim 1\%$  αυτής της ενέργειας  $\rightarrow$  κινητική ενέργεια του εκτινασσόμενου υλικού
  - $< \sim 0.01\%$  της ενέργειας  $\rightarrow$  φωτόνια
  - $\sim 99\%$  της ενέργειας  $\rightarrow$  νετρίνα

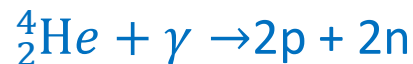
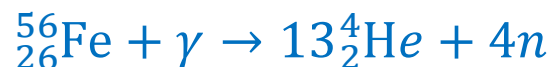
(Παρόμοια ποσοστά εμφανίζονται και στις εκρήξεις των υπερκαινοφανών των Τύπων Ib και Ic.)

## Μηχανισμός κατάρρευσης του πυρήνα σε αστέρες μεγάλης μάζας → core collapse SNe

### 1. Φωτο-διάσπαση των πυρήνων :

Με την ολοκλήρωση της καύσης του Si σε Fe στον πυρήνα, οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές → ακτίνες  $\gamma$  → φωτοδιάσπαση (photodisintegration)

Οι σπουδαιότερες αντιδράσεις φωτοδιάσπασης είναι οι:



Αποδόμηση της πυρηνosύνθεσης που έχει επιτευχθεί στη διάρκεια της ζωής του άστρου

Οι αντιδράσεις αυτές είναι **ενδόθερμες**, δηλ. ο πυρήνας του άστρου **χάνει ενέργεια** (δηλ. δίνει ενέργεια για να γίνουν οι παραπάνω αντιδράσεις), οπότε η πίεση μειώνεται και συνεχίζει η κατάρρευση.

Για μάζες πυρήνων από  $1.3 - 2.5 M_{\odot}$  που προέρχονται από άστρα με αρχικές μάζες από  $10-50 M_{\odot}$  αντίστοιχα

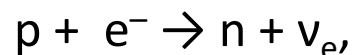
Core-collapse SNe - που προκύπτουν από την εξέλιξη αστέρων μεγάλης μάζας- Τι γίνεται με την κατάρρευση του πυρήνα Fe

## 2. Παραγωγή νετρίνων – επιτάχυνση κατάρρευσης

➤ Τυπικές συνθήκες που επικρατούν στον πυρήνα

$$T \sim 8 \times 10^9 \text{K}, \quad \rho \sim 10^{13} \text{kg m}^{-3}$$

➤ Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βοηθούσαν στην υποστήριξη του άστρου μέσω της πίεσης εκφυλισμού, συλλαμβάνονται από τους βαρείς πυρήνες και από τα πρωτόνια που παράγονται μέσω της φωτοδιάσπασης



➤ Τα παραγόμενα **νετρίνα**, απομακρύνουν ενέργεια πολύ αποτελεσματικά από τον πυρήνα.

➤ Ο πυρήνας, χάνει κι άλλη ενέργεια και επιταχύνεται κι άλλο η κατάρρευση.




Core-collapse SNe - που προκύπτουν από την εξέλιξη αστέρων μεγάλης μάζας- Τι γίνεται με την κατάρρευση του πυρήνα Fe

### 3. Υπερηχητική κατάρρευση

- Αρχικά, η κατάρρευση του πυρήνα είναι **ομόλογη** και η ταχύτητα της κατάρρευσης είναι ανάλογη με την απόσταση από το κέντρο του αστήρα.
- Σε μεγαλύτερες πυκνότητες, η κατάρρευση εξακολουθεί να είναι ομόλογη στο εσωτερικό του πυρήνα. Όμως, στην περίβλημα του πυρήνα η ταχύτητα είναι πλέον υπερηχητική.
- Στην τιμή της ακτίνας του πυρήνα στην οποία η ταχύτητα υπερβαίνει την τοπική ταχύτητα του ήχου, η κατάρρευση παύει πλέον να είναι ομόλογη και **ο εσωτερικός πυρήνας διαχωρίζεται από τον υπερηχητικό εξωτερικό πυρήνα, που εκτελεί σχεδόν ελεύθερη πτώση.**  
(ταχύτητα του εξωτερικού πυρήνα  $\sim 70,000\text{km/s}$ )

Θυμηθείτε: Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα τόσο μειώνεται ο χαρακτηριστικός χρόνος free fall ( $t_{ff} \propto \rho^{-\frac{1}{2}}$ )

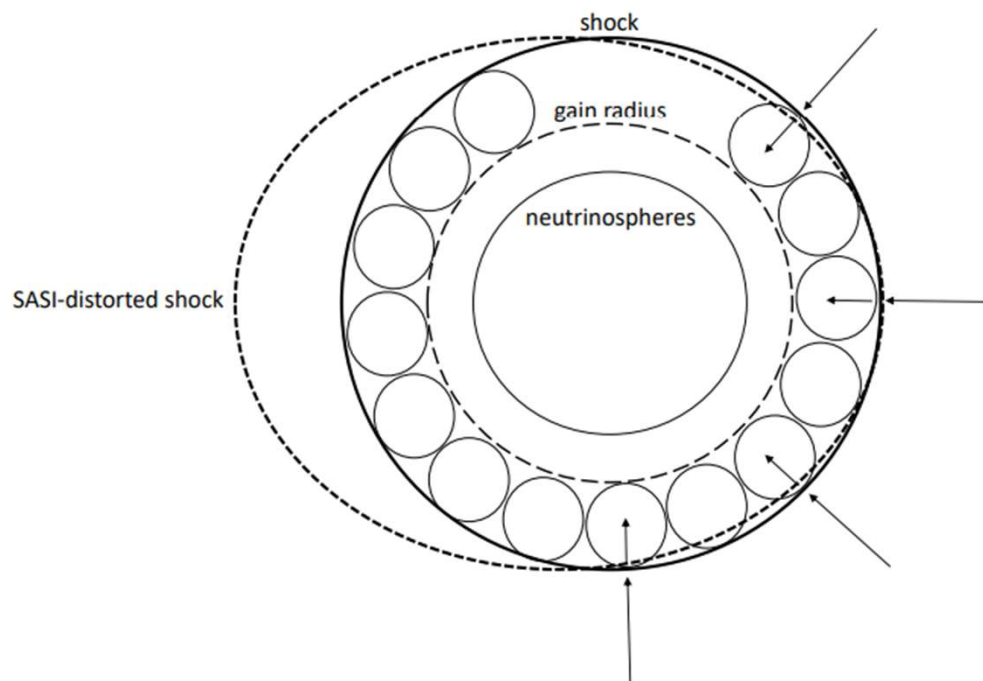
- Η «μηχανική πληροφορία» στα ρευστά μεταδίδεται με τη ταχύτητα του ήχου. Ο πυρήνας καταρρέει υπερηχητικά, οπότε τα ανώτερα στρώματα του άστρου «αργούν να το καταλάβουν» και είναι σαν να αιωρούνται πάνω από τον πυρήνα που καταρρέει.
- Η ομόλογη κατάρρευση του εσωτερικού πυρήνα συνεχίζεται έως ότου η πυκνότητα να υπερβεί την τιμή των  $8 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ , που είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του πυρήνα των ατόμων.
- Τότε, το πυρηνικό υλικό από το οποίο αποτελείται τώρα ο εσωτερικός πυρήνας του αστέρα γίνεται πιο δύσκαμπτο εξαιτίας της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, που, ενώ είναι συνήθως ελκτική, ξαφνικά γίνεται απωστική λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli για τα νετρόνια.
- Το αποτέλεσμα είναι ότι ο εσωτερικός πυρήνας “αναπηδά” στέλνοντας έτσι κύματα πίεσης με κατεύθυνση προς τα έξω, τα οποία θα συναντήσουν την ύλη του εξωτερικού πυρήνα που πέφτει προς το κέντρο. Όταν η ταχύτητα αυτών των κυμάτων πίεσης φθάσει την ταχύτητα του ήχου, τότε αναπτύσσεται **ένα κρουστικό κύμα** το οποίο ξεκινά να κινείται προς τα έξω.

- Καθώς αυτό το κρουστικό κύμα συναντά τον εξωτερικό πυρήνα από σίδηρο που πέφτει προς το κέντρο, οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται προκαλούν περαιτέρω φωτοδιάσπαση, αφαιρώντας έτσι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του κρουστικού κύματος.
- Δηλ. το κρουστικό κύμα σχεδόν ακινητοποιείται, με το υλικό που πέφτει από έξω να συσσωρεύεται πάνω του → κρουστικό κύμα προσαύξησης.
- Κάτω (πίσω) από το κρουστικό κύμα αναπτύσσεται μια νετρινόσφαιρα μέσω των μηχανισμών της φωτοδιάσπασης και της σύλληψης ηλεκτρονίων. Επειδή το υπερκείμενο υλικό είναι πολύ πυκνό, μέρος της ενέργειας των νετρίνων ( ~ 5%) **θα αποτεθεί στην ύλη** που βρίσκεται ακριβώς πίσω από το κρουστικό κύμα.  

- Αυτή η επιπλέον ενέργεια **θερμαίνει** την ύλη και επιτρέπει στο κρουστικό κύμα να ξεκινήσει και πάλι την πορεία του προς την επιφάνεια του αστέρα → **έκρηξη με εκτίναξη του εξωτερικού περιβλήματος**
- Αν το φαινόμενο αυτό δεν συμβεί αρκετά γρήγορα, το υλικό που αρχικά κινείται προς τα έξω θα ξαναπέσει στον πυρήνα, γεγονός που σημαίνει ότι δεν θα συμβεί η έκρηξη. → **προσομοιώσεις**

## Toward Realistic Models of Core Collapse Supernovae: A Brief Review

Anthony Mezzacappa<sup>1</sup>

1D

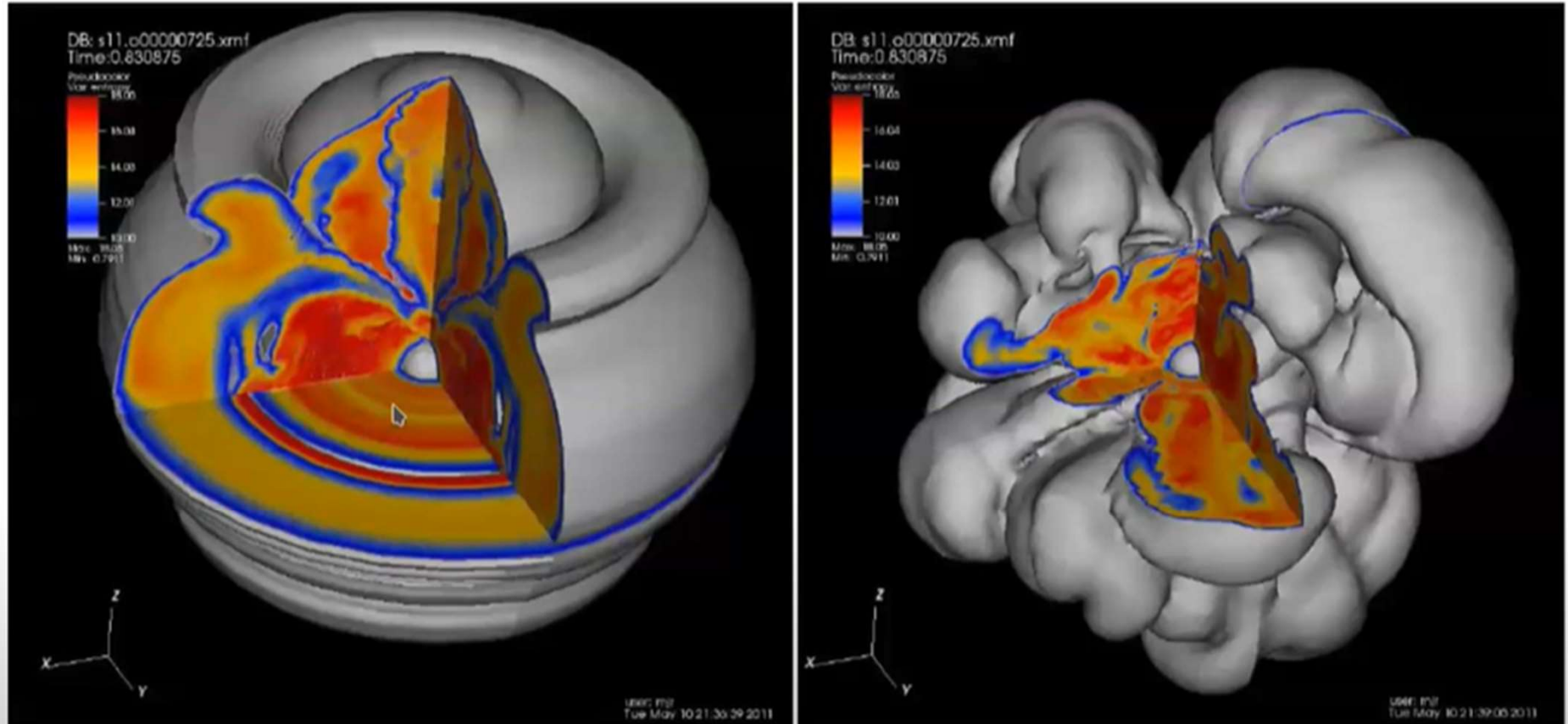


**Figure 1.** After stellar core bounce and shock formation, the core is stratified into regions defined by the proto-neutrino star surface (neutrinospheres), the gain radius, and the stalled shock. The region between the neutrinospheres and the gain radius is a net neutrino cooling region. The region between the gain radius and the shock is a net neutrino heating region, also known as the gain region. Shown also, schematically, are convection in the gain region resulting from neutrino heating by the proto-neutron star below it, and the distortion of the shock due to the Standing Accretion Shock Instability (SASI).



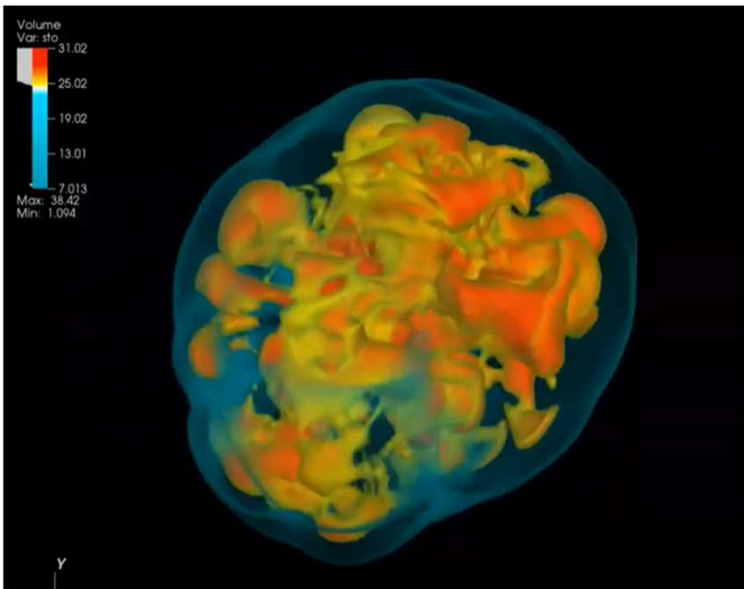


# 2D and 3D Morphology



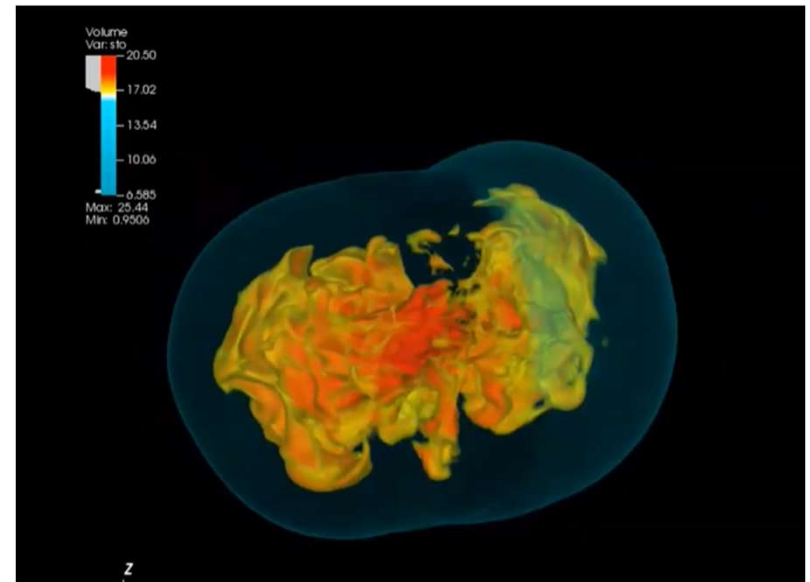
(Images from Markus Rampp, RZG)

## 3D core collapse SNe



Χωρίς περιστροφή.

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=ySxJa0YLJ0c>

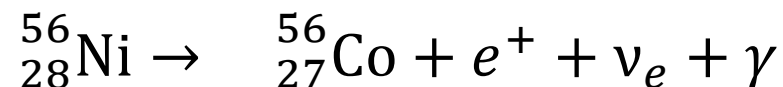


Με περιστροφή. Η έκρηξη γίνεται στο ισημερινό επίπεδο και όχι στους πόλους

## Οι Καμπύλες Φωτός και η Ραδιενεργός Διάσπαση της Εκτινασσομένης Ύλης

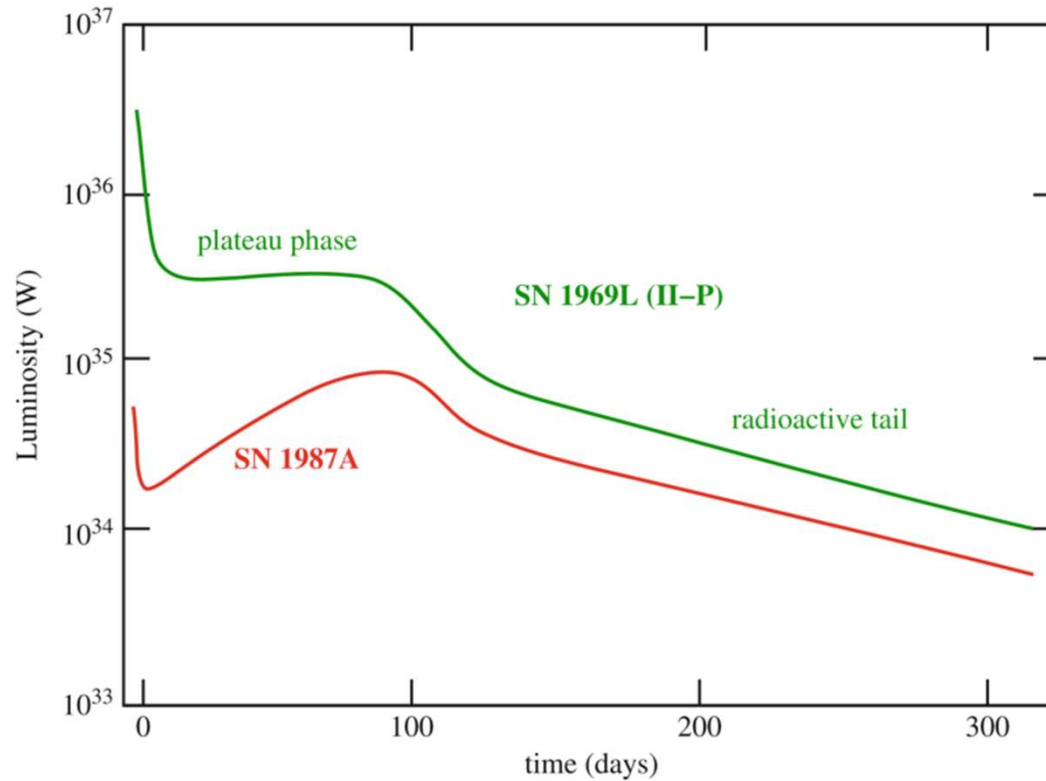
Το παράδειγμα των SN τύπου II-P (που είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος)

- Το πλατώ στις καμπύλες φωτός τους οφείλεται, κυρίως, στην ενέργεια που αποτίθεται από το κρουστικό κύμα στο πλούσιο σε υδρογόνο περίβλημα του αστέρα.
- Το αέριο, που έχει ιονιστεί από το κρουστικό κύμα, εισέρχεται σε μια παρατεταμένη περίοδο επανασύνδεσης, απελευθερώνοντας έτσι ενέργεια σε μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία περίπου ίση με 5000 K.
- Το πλατώ μπορεί να «υποστηρίζεται» επιπλέον από την ενέργεια που αποτίθεται στο περίβλημα μέσω του μηχανισμού της ραδιενεργού διάσπασης του  $^{56}_{28}\text{Ni}$  που παρήχθη από το μέτωπο του κρουστικού κύματος κατά τη διέλευσή του μέσα από τον αστέρα.
- Το Ni διασπάται με διάσπαση  $\beta$  σε Co ( $\tau_{1/2}=6.1\text{d}$ )





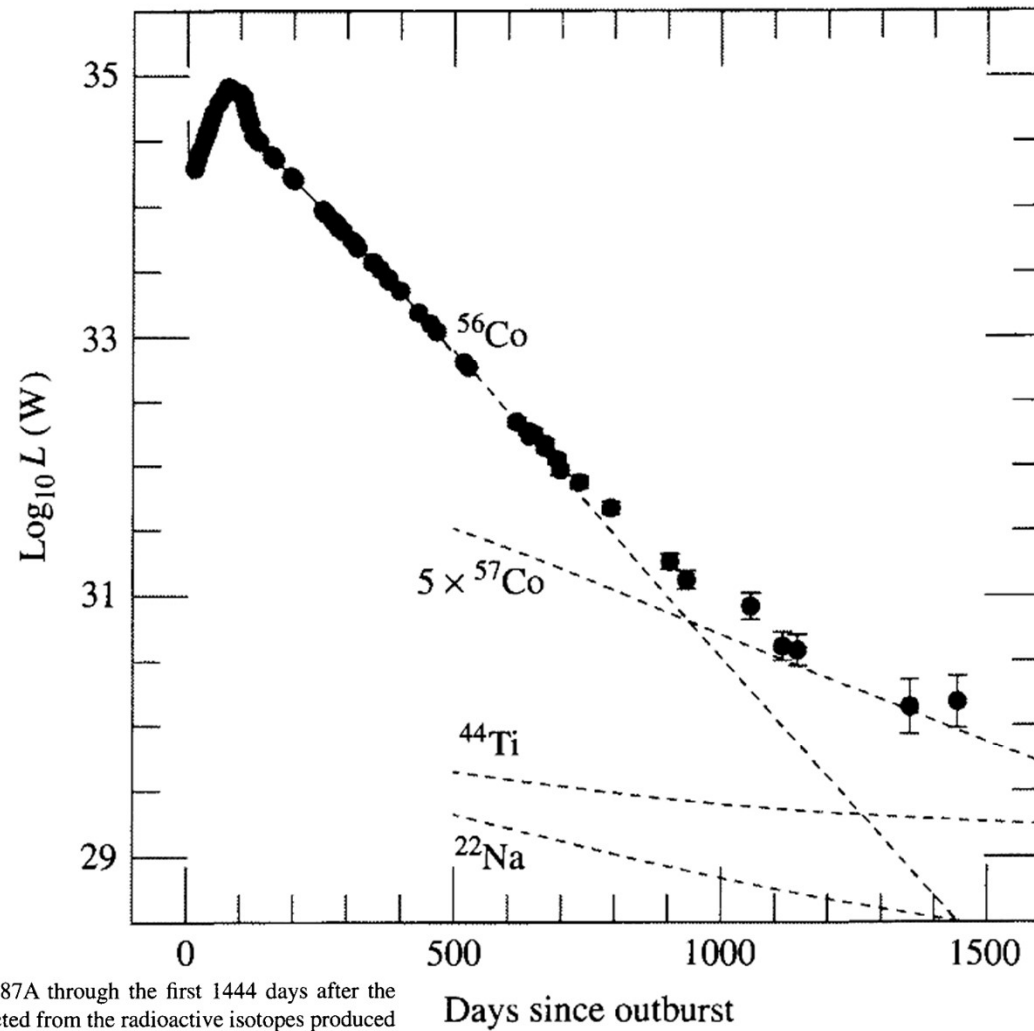
- Η ενέργεια που απελευθερώνεται από αυτή τη διάσπαση αποτίθεται στο οπτικά πυκνό διαστελλόμενο κέλυφος και στη συνέχεια ακτινοβολείται φεύγοντας από τη φωτόσφαιρα του υπολείμματος του υπερκαινοφανούς αστέρα.
- Με τον τρόπο αυτό συντηρείται η καμπύλη φωτός για κάποιο χρονικό διάστημα επεκτείνοντας έτσι το παρατηρούμενο πλατώ.
- Τελικά, το διαστελλόμενο νέφος αερίου θα γίνει οπτικά διαφανές, αφήνοντας εκτεθειμένο το κεντρικό αντικείμενο (αστέρα νετρονίων ή μελανή οπή)



■ Fig. 14-3

Bolometric supernova lightcurves for two Type II supernovae. In both cases, the progenitor was a star with a massive hydrogen envelope, but in the case of SN 1969L, the progenitor was a red supergiant, while for SN 1987A, it was a blue supergiant with  $R \simeq 40 R_{\odot}$

Από Terry D. Oswalt and M.A. Barstow, Planets, stars and stellar systems, volume 4, 2013



**FIGURE 15.12** The bolometric light curve of SN 1987A through the first 1444 days after the explosion. The dashed lines show the contributions expected from the radioactive isotopes produced by the shock wave. The initial masses are estimated to be  $^{56}\text{Ni}$  (and later  $^{56}\text{Co}$ ),  $0.075 M_{\odot}$ ;  $^{57}\text{Co}$ ,  $0.009 M_{\odot}$  (five times the solar abundance);  $^{44}\text{Ti}$ ,  $1 \times 10^{-4} M_{\odot}$ ; and  $^{22}\text{Na}$ ,  $2 \times 10^{-6} M_{\odot}$ . (Figure adapted from Suntzeff et al., *Ap. J. Lett.*, 384, L33, 1992.)

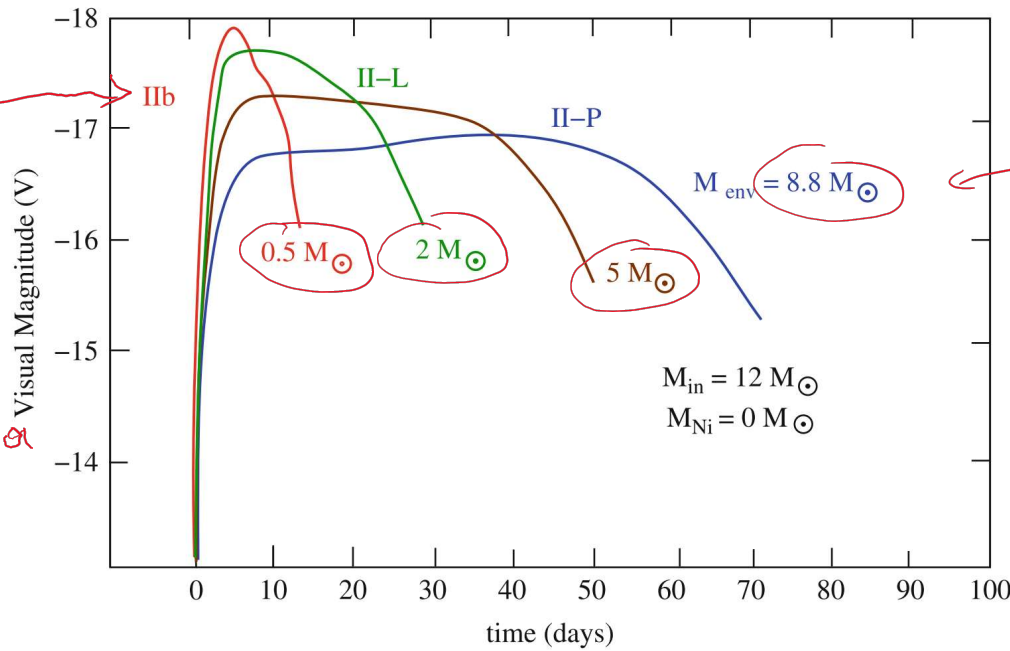
## Που οφείλονται οι διαφορές στις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός CCSN

- Για να είναι παρατηρήσιμη μία CCSN απαιτείται η εκτίναξη υλικού που ψύχεται και ακτινοβολεί χάνοντας συνεχώς ενέργεια.
- Όπως είδαμε υπάρχουν δύο πηγές της παρατηρούμενης ακτινοβολίας:
  - Η ενέργεια του αρχικού ωστικού κύματος που εναποτίθεται στο εκτινασόμενο υλικό
  - Ραδιενέργεια από τη διάσπαση του ραδιενεργού  $^{56}\text{Ni}$  που παράγεται κατά την έκρηξη και διασπάται πρώτα σε  $^{56}\text{Co}$  ( $\tau_{1/2}=6.1\text{d}$ ) και ύστερα σε  $^{56}\text{Fe}$  ( $\tau_{1/2}=77.3\text{d}$ )
- Στις SN type II η καμπύλη φωτός κυριαρχείται από τη εναπόθεση της ωστικής ενέργειας στην εκτινασόμενη ύλη τουλάχιστον στην αρχή, ενώ αργότερα χαρακτηρίζεται από τη ραδιενεργό διάσπαση του  $^{56}\text{Ni}$ .
- Στις SN type I (CCSN, δηλ. εκτός Ia), που έχουν γενικά πολύ συμπαγείς προ-γεννήτορες, η ενέργεια του ωστικού κύματος φεύγει πολύ γρήγορα και η καμπύλη φωτός κυριαρχείται από τη ραδιενεργό διάσπαση  $^{56}\text{Ni}$ .

- Η ακριβής μορφή της καμπύλης φωτός επηρεάζεται
  - από το πόσο συμπαγής είναι ο προγεννήτορας,
  - από τη συνολική μάζα του περιβλήματος

$^{56}\text{Ni}$  παράγεται από την εκρηκτική «καύση» πυριτίου κατά τη διάδοση του ωστικού κύματος μέσα από τα στρώματα Si και O που περιβάλλουν τον πυρήνα

Θεωρητικές καμπύλες φωτός CCSN για ένα άστρο  $12M_{\odot}$ , που έχει χάσει διαφορετικά ποσά μάζας κατά την εξέλιξή του, οπότε έχει διαφορετική μάζα στο περίβλημα



■ Fig. 14-4

Theoretical visual lightcurves for red-supergiant progenitors with varying masses of hydrogen (as indicated) in the red-supergiant envelope, illustrating the dependence of the lightcurves on envelope mass (Adapted from Hsu (1991))

μέχρι εδώ  
υπάρχει ακόμα H  
στο περίβλημα  
(SN type II)  
Για μεγαλύτερη απώλεια  
μάζας στο  
περίβλημα του  
προγεννητήρα, όπως  
έχει καθότι έχω το  
υδρογόνο,  
→ SN Ib,c.  
↓

← μάζα περιβλήματος

Γιατί να έχουμε  
διαφορετικά  $M$   
για ίδιο αρχικό  
άστρο; Ο ραβδ  
των αλληλεπιδράσεων  
με ωτοδότης!

SN II-P → SN II-L → SN IIb → SN Ib → SN Ic.

Από Terry D. Oswalt and M.A. Barstow, Planets, stars and stellar systems, volume 4, 2013

## Αστρικά Υπολείμματα των CCSN

- Αν  $M_{\text{ZAMS}} < 25 M_{\text{solar}}$  το υπόλειμμα του εσωτερικού πυρήνα θα σταθεροποιηθεί και θα μετατραπεί σε έναν αστέρα νετρονίων, ο οποίος υποστηρίζεται από την πίεση που προκαλούν τα εκφυλισμένα νετρόνια.
- Αν όμως η αρχική μάζα του αστέρα είναι πολύ μεγαλύτερη, ακόμα και η πίεση που ασκούν τα εκφυλισμένα νετρόνια δεν μπορεί να υποστηρίξει το υπόλειμμα ενάντια στην έλξη της βαρύτητας, οπότε η τελική κατάρρευση που θα επέλθει θα οδηγήσει στον σχηματισμό μιας **μελανής οπής**
- Και στις δύο περιπτώσεις παράγεται τεράστια ροή **νετρίνων**, η πλειονότητα των οποίων διαφεύγει στο διάστημα παίρνοντας μαζί τους μια συνολική ενέργεια που είναι, συγκρίσιμη με την ενέργεια σύνδεσης του αστέρα νετρονίων ( $\sim 3 \times 10^{46} \text{J}$ )