

Οι εκρήξεις σουπερνόβα

Αστρική εξέλιξη και κατάρρευση.

Η πηγή ενέργειας των σουπερνόβα τύπου II είναι η βαρυτική ενέργεια που απελευθερώνεται όταν καταρρέει ένα αστέρι μεγάλης μάζας. Η κατάρρευση είναι αποτέλεσμα αποτυχίας της κεντρικής προμήθειας ενέργειας του αστεριού, που στην κανονική διάρκεια ζωής ενός αστέρα αντισταθμίζει την βαρύτητα (η καύση υδρογόνου σε ήλιον στην κύρια ακολουθία και των βαρύτερων στοιχείων, ως το σίδηρο, μετά την κυρία ακολουθία). Τα μεγάλης μάζας αστέρια καίνε πιο γρήγορα το υδρογόνο στον πυρήνα τους (10 εκ. έτη για ένα αστέρι 10 ηλιακών μαζών). Τα μεγάλα αυτά αστέρια συνεχίζουν τις καύσεις μέχρι τον σίδηρο. Σχηματίζουν ένα μεγάλο κουκούλι γύρω τους, που αποτελείται από τα εξωτερικά στρώματα του αστέρα (ερυθρός ή κυανός γίγαντας). Η καύση των στοιχείων στον πυρήνα γίνεται σε στρώματα. Όταν ο πυρήνας γεμίσει σίδηρο, η ύλη γίνεται γρήγορα εκφυλισμένη. Έτσι δεν μπορεί να σημειωθεί άλλη θερμοπυρηνική σύντηξη, και ακολουθεί κατάρρευση του πυρήνα. Αν ο πυρήνας που κατάρρευσε ήταν 1,9 -2,5 ηλιακές μάζες θα δημιουργηθεί ένας αστέρας νετρονίων, που θα χάσει 1 ηλιακή μάζα περίπου κατά την έκρηξη σουπερνόβα. Η εκφυλιστική πίεση των νετρονίων θα σταματήσει τελικά την κατάρρευση. Για να μείνει ένας πυρήνας 1,9 ηλιακών μαζών πρέπει το αστέρι να είχε αρχική μάζα τουλάχιστον 8 ηλιακές. Ένα αστέρι 15 ηλιακών μαζών και άνω θα δημιουργήσει μαύρη τρύπα.

Συνοψίζοντας

.Πυρήνες από αστέρια με μάζα από 8 ως 15 ηλιακές θα καταρρεύσουν σε αστέρες νετρονίων.

.Όταν εξαντληθούν τα πυρηνικά καύσιμα, τα μεγάλης μάζας αστέρια καταρρέουν υπό την βαρύτητά τους. Η κατάρρευση αυτή είναι η πηγή ενέργειας της σουπερνόβα.

.Η κατάρρευση, από την πυκνότητα του αστρικού πυρήνα σε πυκνότητα ατομικού πυρήνα, γίνεται μέσα σε δευτερόλεπτα. Την ακολουθεί μια αναπήδηση της εξωτερικής του πυρήνα ύλης (που επίσης καταρρέει βαρυτικά) κοντά στον υπέρ-πυκνό πυρήνα, με αποτέλεσμα την εξώθηση μέρος του πυρήνα (που δεν διαλύθηκε σε νετρόνια) και όλων των εξωτερικών στρωμάτων. Δημιουργείται ένα νεφέλωμα γύρω από το αστέρι πλούσιο σε βαρέα στοιχεία. Η ορατή σουπερνόβα είναι αποτέλεσμα της εκρηκτικής αυτής ώθησης της ύλης και ραδιενεργών διασπάσεων ισοτόπων με μικρή διάρκεια ημιζωής, που δημιουργήθηκαν κατά την εξώθηση (όπως δημιουργήθηκαν και όλα τα στοιχεία που είναι βαρύτερα του σιδήρου). Υπάρχει η εκτίμηση ότι το μαγνητικό πεδίο, που πλέον στον νεογέννητο αστέρα νετρονίων είναι πανίσχυρο, να έχει σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της δημιουργίας του νεφελώματος και στην ισχύ της λαμπρότητας του φαινομένου.

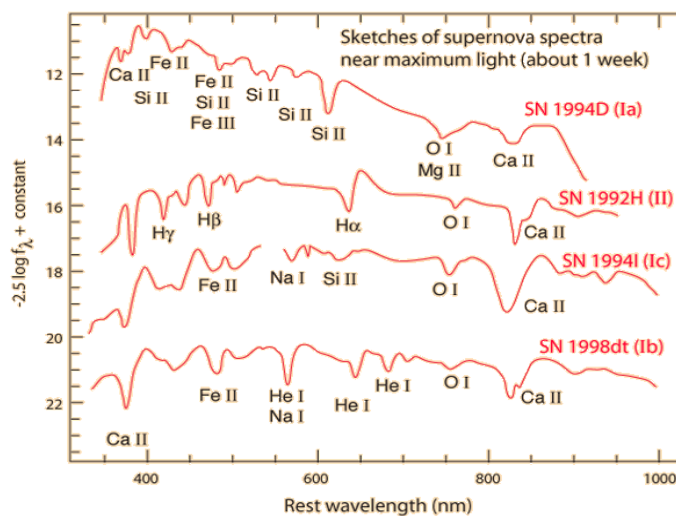
Οι υπό- κατηγορίες Ib, Ic (φασματικές κατηγορίες) σουπερνόβα προέρχονται από αστέρια μεγάλης μάζας που έχουν απολέσει τα εξωτερικά στρώματα υδρογόνου πριν την κατάρρευση. Οι πληθυσμοί των αστέρων ελαττώνονται ραγδαία με την αύξηση της μάζας τους, έτσι οι περισσότεροι αστέρες νετρονίων πρέπει να προήλθαν από αστέρια 8 ηλιακών μαζών και λίγοι από αστέρια 15 ηλ μαζών. Από την άλλη, τα πιο μεγάλης μάζας αστέρια εξελίσσονται πιο γρήγορα σε αστέρες νετρονίων. Έτσι η μέση μάζα προέλευσης, αλλά και η αναλογία των κατηγοριών και των αστρικών υπολειμμάτων εξαρτάται από τον γαλαξία ή το τμήμα του που εξετάζουμε. Έτσι οι τύπου II βρίσκονται μόνο σε σπείρες όπου έχουμε

αστρογέννηση, αφού είναι αποτελέσματα γρήγορης αστρικής εξέλιξης, ενώ οι τύπου Ia σε όλους τους τύπους γαλαξιών.

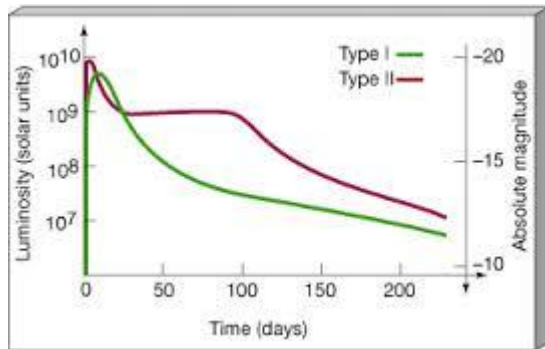
Καταρρεύσεις σουπερνόβα από συσσώρευση.

Οι τύπου Ia προέρχονται από λευκό νάνο (αστέρας από εκφυλισμένη ύλη, συνήθως άνθρακα και οξυγόνο) που συσσωρεύει υλικό από έναν συνοδό του αστέρα. Λευκοί νάνοι υπάρχουν αρκετοί στο σύμπαν, και ο τύπος αυτός των σουπερνόβα είναι αρκετά συνηθισμένος. Η μάζα του λευκού νάνου είναι κάτω από το όριο Chandrasekhar (1,4 ηλιακές μάζες), αλλιώς θα είχε καταρρεύσει σε αστέρι νετρονίων. Μέσω της συσσώρευσης, ο λευκός νάνος ξεπερνάει αυτό το όριο. Συνήθως στα διπλά αστέρια (περίπου τα μισά αστέρια είναι σε συστήματα) η εξέλιξη του συστήματος είναι το ένα να γίνει λευκός νάνος και κάποτε το άλλο να εξελιχτεί σε ερυθρό γίγαντα. Σε κοντινά διπλά θα μεταφερθεί μάζα από τον ερυθρό γίγαντα στον λευκό νάνο και θα ακολουθήσει έκρηξη Νόβα (εκρηκτική σύντηξη υδρογόνου σε ήλιον στο εξωτερικό στρώμα του λευκού νάνου). Μια συνεχή όμως συσσώρευση χωρίς έκρηξη θα κάνει τον λευκό νάνο να ξεπεράσει τις 1,4 ηλιακές μάζες και θα έχουμε μια έκρηξη σουπερνόβα Ia. Επίσης, μετά από κάποιον αριθμό Νόβα ακολουθεί πάλι έκρηξη σουπερνόβα Ia. (σημείωση 1).

Ένας λευκός νάνος με μάζα κοντά στις 1,4 ηλιακές έχει καταναλώσει το υδρογόνο και το ήλιον και λέγεται λευκός νάνος άνθρακα- οξυγόνου. Κοντά στην κρίσιμη μάζα ανεβαίνει η θερμοκρασία και αρχίζει η καύση άνθρακα. Αυτό γίνεται για μερικές εκατοντάδες χρόνια, αλλά περαιτέρω πυρηνικές συντήξεις είναι εκρηκτικές και καταστροφικές. Το αστέρι αποκτάει πυρήνα (O)- (Ne)- (Mg) που συλλαμβάνει ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα ο πυρήνας που αποτελείται κυρίως από (Mg) να καταρρεύσει (καθοριστική ελάττωση της πίεσης ηλεκτρονίων). Έτσι οι σουπερνόβα Ia ονομάζονται και σουπερνόβα σύλληψης ηλεκτρονίων (electron- capture supernova). Η συνολική ενέργεια που εκρέει κατά την έκρηξη είναι 10 στη 51 erg και δημιουργείται περισσότερο από πυρηνική σύνθεση βαρύτερων στοιχείων παρά από την βαρυτική κατάρρευση. Αυτές οι σουπερνόβα έχουν καλά καθορισμένο φάσμα και λαμπρότητα (περίπου -19,2 mag) και χρησιμοποιούνται ως κεριά μέτρησης αποστάσεων (λόγω μεγάλης λαμπρότητας είναι πολύ χρήσιμες για κοσμολογικές αποστάσεις).



Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.



Η αποσύνθεση της λαμπρότητας.

Το μεγαλύτερο μέρος της βαρυτικής ενέργειας που απελευθερώνεται κατά μια σουπερνόβα διαφεύγει ως ακτινοβολία νετρίνων. Αυτά έχουν ελάχιστη αλληλεπίδραση με την μάζα και δεν ασκούν πίεση στο υλικό που καταρρέει. Στην σουπερνόβα του 1987 τα νετρίνα ανιχνεύτηκαν ώρες πριν γίνει ορατό το διαστελλόμενο νέφος της έκρηξης. Το φάσμα των Ia περιέχει ίχνη από βαρέα στοιχεία που συντέθηκαν κατά την διαταραχή του πυρήνα και δεν ανιχνεύουμε υδρογόνο σε αυτό, ενώ στις τύπου II βλέπουμε υδρογόνο από το προ-έκρηξης εξωτερικό κέλυφος του αστέρα. Εκεί το μεγαλύτερο μέρος από τα βαρέα στοιχεία κατέρρευσαν στο αστέρι νετρονίων ή στην μαύρη τρύπα. Είδαμε πριν πόσο μοιάζουν οι καμπύλες φωτός των 2 κατηγοριών. Και στις δύο περιπτώσεις τα συμβάντα μέσα στον πυρήνα καθόρισαν την απελευθέρωση της ενέργειας. Μετά την κατέρρευση του πυρήνα, η κύρια πηγή ενέργειας της έκρηξης είναι η καταρρέουσα ύλη που αναπηδά στον πυρήνα. Η αποσύνθεση της ακτινοβολίας που εκπέμπει αυτή η ύλη έχει απλή εξέλιξη, εξαρτάται από την ραδιενεργό διάσπαση του νικελίου σε σίδηρο. Το ισότοπο (^{56}Ni) σχηματίζεται εύκολα επειδή έχει ατομικό αριθμό Z ίσο με των νετρονίων N και διαιρείται με το 4. Έτσι μπορεί να συντεθεί κατευθείαν από το (^4He) και είναι η μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης προς νουκλεόνιο για $Z=N$. Η διάσπασή του γίνεται ως εξής. (^{56}Ni) 6,1 ημέρες - (^{56}Co) 77 ημέρες - (^{56}Fe). Η ενέργεια δέσμευσης απελευθερώνεται κυρίως ως ακτίνες γ και νετρίνα, που μεταφέρουν ενέργεια στο κέλυφος. Αυτή είναι η πηγή λαμπρότητας και των δύο τύπων. Βλέπουμε ότι η αποσύνθεση της λαμπρότητας ακολουθεί την σταθερά διάσπασης των 77 ημερών του (^{56}Co). Το μέγιστο της λαμπρότητας και η εκθετική αποσύνθεση όλων των Ia έχει μικρό εύρος, επειδή ο πυρήνας που καταρρέει είναι μόλις λίγο μικρότερης μάζας από το όριο των 1,4 ηλιακών μαζών. Το μέγιστο της λαμπρότητας για τις τύπου II έχει μεγάλη διακύμανση, είναι συνήθως 4 mag ή περισσότερο αμυδρότερο από τις Ia.

Σημείωση 1

Νόβα και σουπερνόβα

Μια έκρηξη Νόβα συμβαίνει με παρόμοιο τρόπο με μια **σουπερνόβα Ia**, δηλαδή σε ένα διπλό σύστημα με λευκό νάνο. Αυτός απορροφάει αργά υλικό από τον συνοδό του. Ενώ κατά την σουπερνόβα εκρήγνυται όλος ο λευκός νάνος, επειδή ξεπερνάει το όριο Chandrasekhar (1,4 ηλ. μάζες), η Νόβα είναι ένα προηγούμενο στάδιο. Σε αυτήν καίγεται εκρηκτικά το υδρογόνο που έχει συσσωρευτεί από την απορρόφηση ύλης λίγων αιώνων. Ο λ. νάνος συγκρατεί το ήλιο που παράγεται κατά αυτή την καύση και αυξάνει έτσι την μάζα του.

Η Νόβα έχει απόλυτη λαμπρότητα μέχρι $-8,5 \text{ mag}$, ενώ η σουπερνόβα Ia 10000 φορές περισσότερη, $-19,2 \text{ mag}$. Μετά την Νόβα το διπλό σύστημα αστέρων εξακολουθεί να υπάρχει. Παρόλη την 100000 φορές μεγαλύτερη λαμπρότητα από τον Ήλιο μας, κατά την Νόβα καίγεται υδρογόνο μάζας μόνο ένα χιλιοστό της ηλιακής μάζας! Το κέλυφος από αυτή την έκρηξη είναι πολύ αραιό, με μάζα ένα χιλιοστό της

ηλιακής μάζας (περιλαμβάνει το υλικό που συσσωρεύεται γύρω από τον λ. νάνο). Συγκριτικά, ένα κέλυφος από έκρηξη σουπερνόβα περιέχει μερικές ηλιακές μάζες. Έτσι το κέλυφος της Νόβα γίνεται γρήγορα διαπερατό στο φως, κάτι που φαίνεται από την μετάβαση από φάσμα υδρογόνου προφίλ P Κύκνου (ερυθρή εκπομπή, μπλε απορρόφηση), σε καθαρή εκπομπή.

Στις αργές Νόβα τύπου DQ Ηρακλή έχουμε να κάνουμε με έναν μικρής ακόμα μάζας λ. νάνο. Αυτές είναι πιο σπάνιες, γιατί αργεί να μαζευτεί αρκετό υδρογόνο από τον λ. νάνο, ώστε να ακολουθήσει η επόμενη έκρηξη. Η απόλυτη λαμπρότητα του DQ Ηρακλή (το 1934) ήταν μόνο $-7,5$ mag, αλλά κράτησε μεγάλη λαμπρότητα για μήνες.

Οι γρήγορες Νόβα είναι πιο συνήθεις, όπως πρόσφατα η Νόβα στο Δελφίνι (2013). Σε αυτήν την κατηγορία οι λ. νάνοι έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη μάζα και δίνουν εκρήξεις κάθε λίγες δεκαετίες. Όλο και πλησιάζουν το όριο Chandrasekhar. Η λαμπρότητα των εκρήξεών τους μειώνεται γρήγορα.

Σημείωση 2

Η Νόβα Sgr 2015 No2 στον Τοξότη, κοντά στο M22, έφτασε τα 4 mag φαινόμενη λαμπρότητα στις 22-3-15. Μέσα σε λίγες ημέρες η φαινόμενη λαμπρότητα έπεσε στα 6 mag, κάτι που είναι φυσικό για γρήγορες Νόβα. Όμως μετά από 2 εβδομάδες ξανανέβηκε στα 4,5 mag, και τον ίδιο Απρίλιο αύξησε πάλι λαμπρότητα. Τελικά μάλλον πρόκειται για αργή, τύπου DQ Ηρακλή, Νόβα. Η ανωμαλία στην λαμπρότητα οφείλεται στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο του λ. νάνου, που κάνει την ροή ύλης σε αυτόν να μην είναι ομαλή. Έτσι δημιουργείται συσσώρευση σκόνης σε νέφη που σκοτεινιάζουν την Νόβα για κάποιες ημέρες, μέχρι να τα διαλύσει η ακτινοβολία γ και υπεριώδης του λ. νάνου.