



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

SUPERNOVA:
Υπερκαινοφανείς Αστέρες

ΛΙΑΣΚΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ
ΠΑΠΑΚΩΣΤΑΚΗΣ ΙΑΣΩΝ

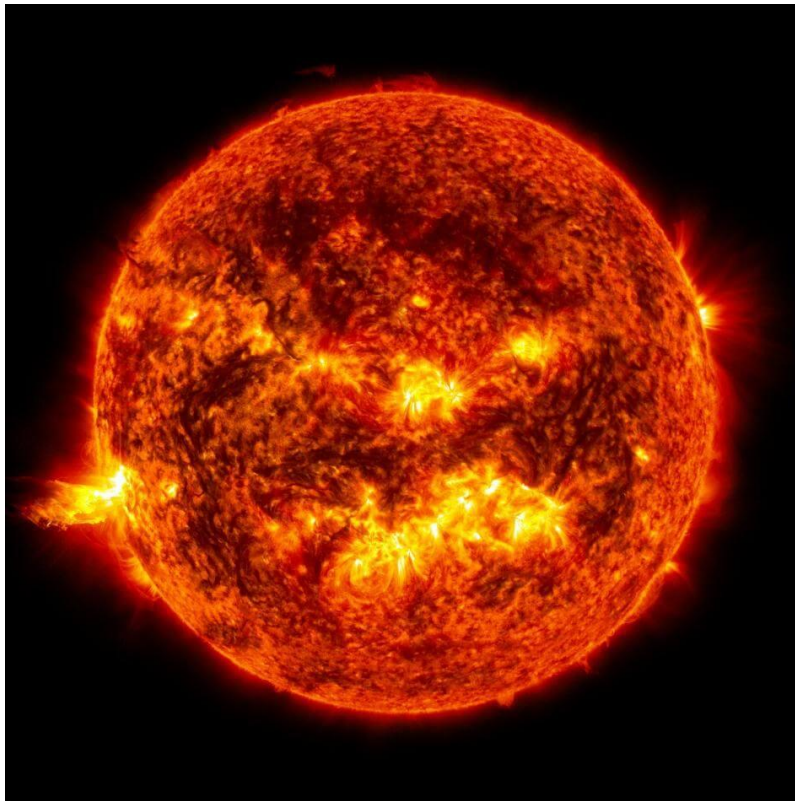
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

Σύνοψη	3
1) Αστέρας	4
1.1 Η Γέννηση των Άστρων	5
1.1.1 Το Νεφέλωμα	5
1.1.2 Πρωτοάστρο	6
1.1.3 Τα Νέα Αστέρια	7
1.2 Αστέρες Κύριας Ακολουθίας	8
1.3 Ερυθροί Γίγαντες	10
1.4 Λευκοί Νάνοι	11
2) Υπερκαινοφανείς Αστέρες	13
2.1 Δημιουργία Υπερκαινοφανούς Αστέρα	13
2.2 Η Έκρηξη	15
2.3 Το Επακόλουθο	17
Βιβλιογραφία	19

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στη ζωή και ιδιαίτερα στον θάνατο των αστέρων. Από τη δημιουργία τους, ως πρωτοάστρα μέχρι την ωρίμανση τους σε άστρα κύριας ακολουθίας και την τελμάτωσή τους στο στάδιο του ερυθρού γίγαντα ή του λευκού νάνου, διανύουν μία πληθώρα φάσεων, η κάθε μία περίπλοκη και ξεχωριστή, καταλήγοντας αναπόφευκτα στον θάνατο τους. Για κάποια υπερμεγέθη άστρα ο θάνατος αυτός είναι ένα από τα πιο θεαματικά φαινόμενα στο σύμπαν, το λεγόμενο *supernova* ή υπερκαινοφανής αστέρας. Αυτό το μοναδικό υπερθέαμα έχει απασχολήσει επιστήμονες ανά τους αιώνες, αλλά πρόσφατες ανακαλύψεις έχουν αποκαλύψει, πώς, αυτή η επίδειξη κοσμικής καταστροφής μπορεί να είναι η γενέτειρα της ζωής όπως τη γνωρίζουμε.

ΑΣΤΕΡΑΣ



Ο **αστέρας** είναι ένα λαμπερό ουράνιο σώμα το οποίο αποτελείται από υπερθερμενόμενα αέρια και παράγει ενέργεια από πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης που συμβαίνουν στον πυρήνα του. Απαραίτητα προϋπόθεση της ύπαρξης αυτών των αντιδράσεων είναι η μάζα του σώματος να είναι μεγαλύτερη από 0,08 φορές αυτή του Ηλίου.

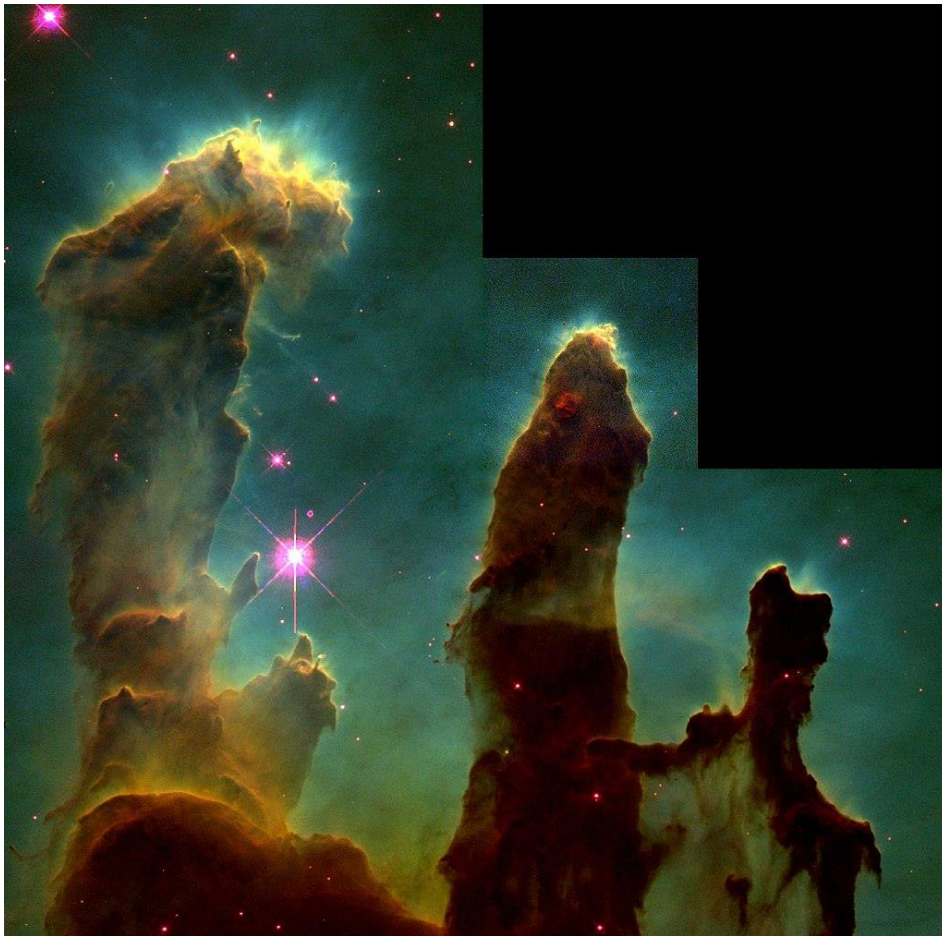
Παρατηρώντας κυρίως τη νύκτα, στον Ουράνιο θόλο, τους αστέρες διαπιστώνεται ότι αυτοί δεν κατανέμονται ομοιόμορφα σ' αυτόν, ενώ παρουσιάζουν κάποια ευδιάκριτα συμπλέγματα τα οποία και ονομάζονται αστερισμοί. Οι αστέρες βρίσκονται καταχωρημένοι σε καταλόγους. Από την παρατήρηση των αστερών αυτοί διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Αειφανείς αστέρες**, που παρατηρούνται όλο το 24ωρο, πάνω από τον ορίζοντα.
- **Αφανείς αστέρες**, που παραμένουν όλο το 24ωρο υπό τον ορίζοντα και η παρατήρησή τους δεν είναι εφικτή.
- **Αμφιφανείς αστέρες**, που άλλοτε παρατηρούνται υπέρ τον ορίζοντα και άλλοτε όχι.

Η Γέννηση των Άστρων

Το Νεφέλωμα

Τα άστρα δημιουργούνται μέσα σε τεράστια νέφη αερίου και σκόνης που λέγονται **νεφελώματα** και που βρίσκονται στους γαλαξίες. Το υλικό των νεφελωμάτων αποτελείται κατά κύριο λόγο από υδρογόνο, ήλιο και σκόνη (συνθετότερα μόρια). Οι διαστάσεις τους είναι πάρα πολύ μεγαλύτερες από το ηλιακό μας σύστημα αλλά η πυκνότητά τους πολύ χαμηλή. Αυτά τα νέφη λόγω της πολύ μεγάλης μάζας τους έχουν κάποια βαρύτητα η οποία όμως, λόγω της χαμηλής πυκνότητας, **δεν** είναι ικανή να υπερνικήσει τις θερμικές κινήσεις των μορίων και να προκαλέσει τη βαρυτική συστολή και συμπύκνωση.



Το Νεφέλωμα "Πυλώνες της Δημιουργίας"

Στην αρχή υπάρχει στο διάστημα μόνο ένα τεράστιο σκοτεινό νέφος αερίων και σκόνης, δηλαδή ένα νεφέλωμα. Για να αρχίσει η συστολή του απαιτείται ένας **αρχικός μηχανισμός συμπίεσης**. Υπάρχουν τέσσερις τέτοιοι μηχανισμοί για να ξεκινήσουν την αρχική συμπύκνωση.

Ο πρώτος είναι όταν **δύο ή περισσότερα νέφη συγκρούονται μεταξύ τους**. Τότε, λόγω της σύγκρουσης τα νέφη συμπιέζονται και η πυκνότητά τους αυξάνεται.

Ο δεύτερος τρόπος είναι όταν κοντά σε κάποιο ή κάποια νέφη γίνεται **έκρηξη ενός υπερκαινοφανούς αστέρα**, κάτι που θα αναλυθεί λεπτομερώς αργότερα.

Ο τρίτος τρόπος είναι όταν **στην περιοχή των νεφών έχουν ήδη σχηματισθεί νέα μεγάλα άστρα**. Αυτά τα άστρα εκπέμπουν τεράστια ποσά ακτινοβολίας, η πίεση της οποίας πάνω στην ύλη των γειτονικών νεφών μπορεί να τα συμπίεσει.

Ο σημαντικότερος όμως τρόπος σχηματισμού αστεριών στο Γαλαξία μας είναι τα "**σπειροειδή κύματα πυκνότητας**". Αυτά είναι κύματα πίεσης τα οποία ξεκινούν από τον πυρήνα του Γαλαξία και ξετυλίγονται προς τα έξω σπειροειδώς στον δίσκο του γαλαξία. Καθώς αυτά τα κύματα περιφέρονται δια μέσου της μεσοαστρικής ύλης με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα από αυτή, συμπιέζουν όσα νέφη συναντούν και προκαλούν τη δημιουργία αστεριών.

Σ' αυτού του είδους τα κύματα οφείλεται η μορφολογία των σπειροειδών γαλαξιών όπως είναι και ο δικός μας Γαλαξίας.

Ο λόγος για τον οποίο χρειάζεται η αρχική συμπίεση ενός νέφους είναι για να υπερνικηθούν οι τυχαίες θερμικές κινήσεις των μορίων. Αυτό γίνεται όταν η πυκνότητα του νέφους ξεπεράσει κάποιο όριο που ονομάζεται **όριο του Jeans**. Όταν η πυκνότητα λόγω της αρχικής συμπίεσης γίνει μεγαλύτερη από την κρίσιμη πυκνότητα Jeans, τότε η βαρύτητα του νέφους γίνεται αρκετά ισχυρή και έλκει τα μόρια προς το κέντρο με συνέπεια το νέφος να αρχίσει να συστέλλεται. Τότε λέμε ότι το νέφος βρίσκεται σε **βαρυτική αστάθεια**, διότι όσο αυτό συστέλλεται τόσο η βαρύτητά του γίνεται ισχυρότερη, με αποτέλεσμα η συστολή να επιταχύνεται συνέχεια.

Πρωτοάστρο

Όταν το υλικό μέσα σε ένα διαγαλαξιακό νεφέλωμα φθάσει σε μια συγκεκριμένη πυκνότητα, τότε οι **ισχυρές δυνάμεις της βαρύτητας** το αναγκάζουν να καταρρεύσει προς το εσωτερικό του. Σχηματίζεται τότε ένα μεγάλο σφαιροειδές αντικείμενο που περιστρέφεται αργά.

Το αρχικό σφαιροειδές αντικείμενο ψύχεται γιατί εκπέμπονται ραδιοκύματα και υπέρυθρη ακτινοβολία. Εν συνεχεία **συμπιέζεται** από τις δυνάμεις βαρύτητας καθώς επίσης από τα κύματα κλονισμού της πίεσης του υπερκαινοφανή αστέρα ή το καυτό αέριο που απελευθερώνεται από τα κοντινά φωτεινά αστέρια. Αυτές οι δυνάμεις αναγκάζουν το κατά προσέγγιση σφαιρικό αντικείμενο να καταρρεύσει και να περιστραφεί. Η διαδικασία της κατάρρευσης διαρκεί από 10.000 έως 1.000.000 χρόνια.

Καθώς η κατάρρευση του αρχικού σφαιροειδούς αντικειμένου προχωρά, η θερμοκρασία και η πίεση μέσα του αυξάνει, δεδομένου ότι τα άτομα είναι πιο κοντά μεταξύ τους. Επίσης, το σφαιροειδές αντικείμενο περιστρέφεται ολοένα γρηγορότερα. Αυτή η περιστροφή προκαλεί μια αύξηση στις **φυγόκεντρες δυνάμεις** που αναγκάζει το αντικείμενο να έχει έναν κεντρικό πυρήνα και έναν δίσκο σκόνης που τον περιβάλλει (που λέγεται είτε πρωτοπλανητικός δίσκος ή δίσκος συσσώρευσης). Ο κεντρικός πυρήνας γίνεται το **πρωτοάστρο**, ενώ ο πρωτοπλανητικός δίσκος μπορεί τελικά να σχηματίσει πλανήτες, αστεροειδείς, κ.λ.π.

Αυτό το στάδιο διαρκεί κατά προσέγγιση 50 εκατομμύρια χρόνια.

Αν το πρωτοάστρο έχει πολύ υλικό τότε η βαρυτική κατάρρευση και η θέρμανση του συνεχίζεται. Αν δεν υπάρχει αρκετό υλικό στο πρωτοαστέρι, το πιο πιθανό είναι να γίνει ένας **καφές νάνος** (ένα μεγάλο άφωτο ουράνιο σώμα που έχει μάζα μεταξύ 10^{28} kg και 84×10^{28} kg).

Όταν η θερμοκρασία του πρωτοάστρου γίνει περίπου 10.000.000 C°, αρχίζει η πυρηνική σύντηξη του υδρογόνου, που μετατρέπεται σε ήλιο συν ενέργεια. Αυτή η παραγωγή της ακτινοβολίας **αποτρέπει την περαιτέρω συστολή του αστεριού**. Επίσης, το πρωτοάστρο απελευθερώνει αστρικούς ανέμους που αναγκάζει το νεφέλωμα να διαλυθεί και τελικά να εξαφανιστεί.

Τα Νέα Αστέρια

Τα νέα αστέρια εκπέμπουν πίδακες **πυκνής ακτινοβολίας** που θερμαίνουν το περιβάλλον υλικό στο σημείο στο οποίο λάμπει έντονα. Αυτοί οι στενοί στο πλάτος πίδακες μπορούν να έχουν μήκος τρισεκατομμύρια χιλιόμετρα ενώ μπορούν να ταξιδέψουν με ταχύτητες 800.000 km/h. Όμως επειδή περιέχουν ιονισμένο υλικό μπορούν να εστιαστούν από το μαγνητικό πεδίο του αστεριού.

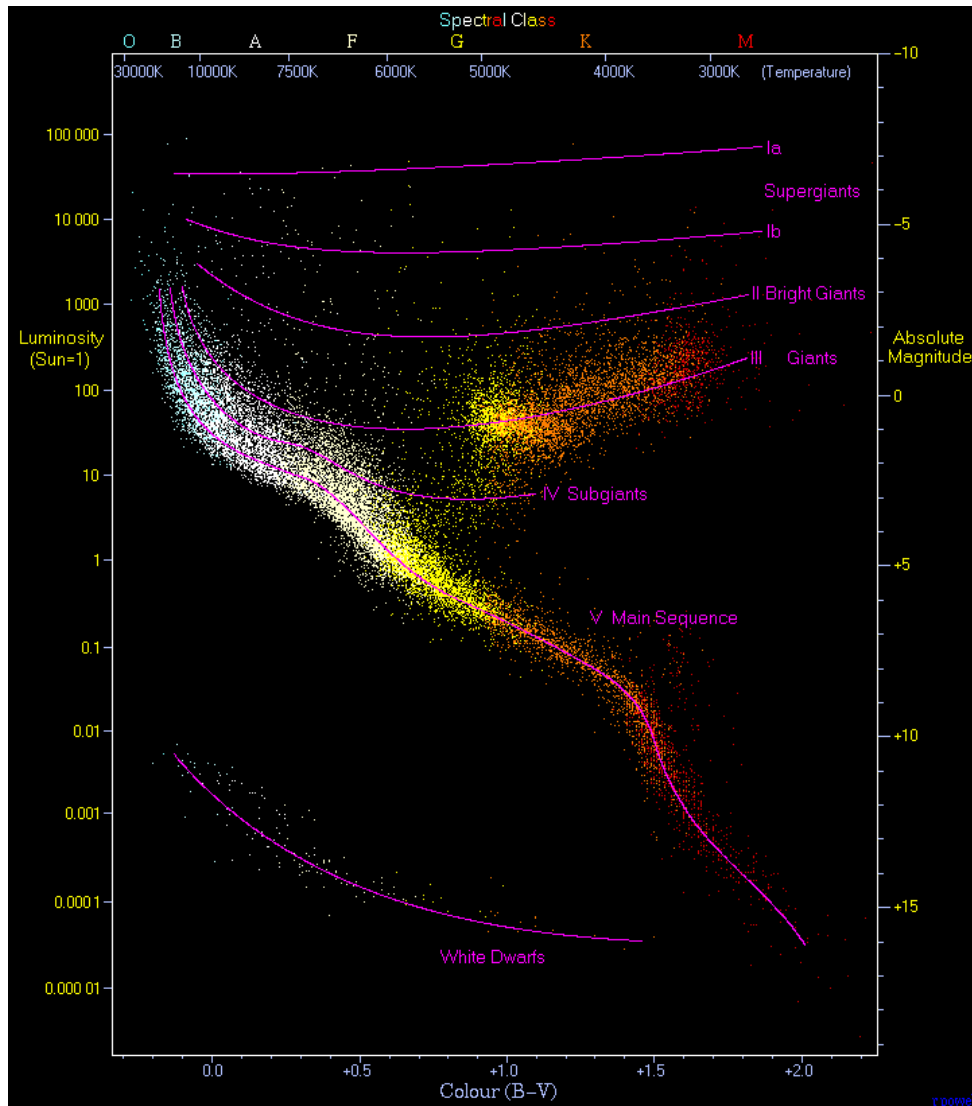
Το πρωτοάστρο είναι τώρα πια ένα σταθερό άστρο της **κύριας ακολουθίας** που θα παραμείνει σε αυτή την κατάσταση (στην περίπτωση του δικού μας ήλιου) για περίπου 10 δισεκατομμύρια χρόνια.



Περιοχή Δημιουργίας Αστέρων S106, όπως φωτογραφήθηκε από το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble

Αστέρες Κύριας Ακολουθίας

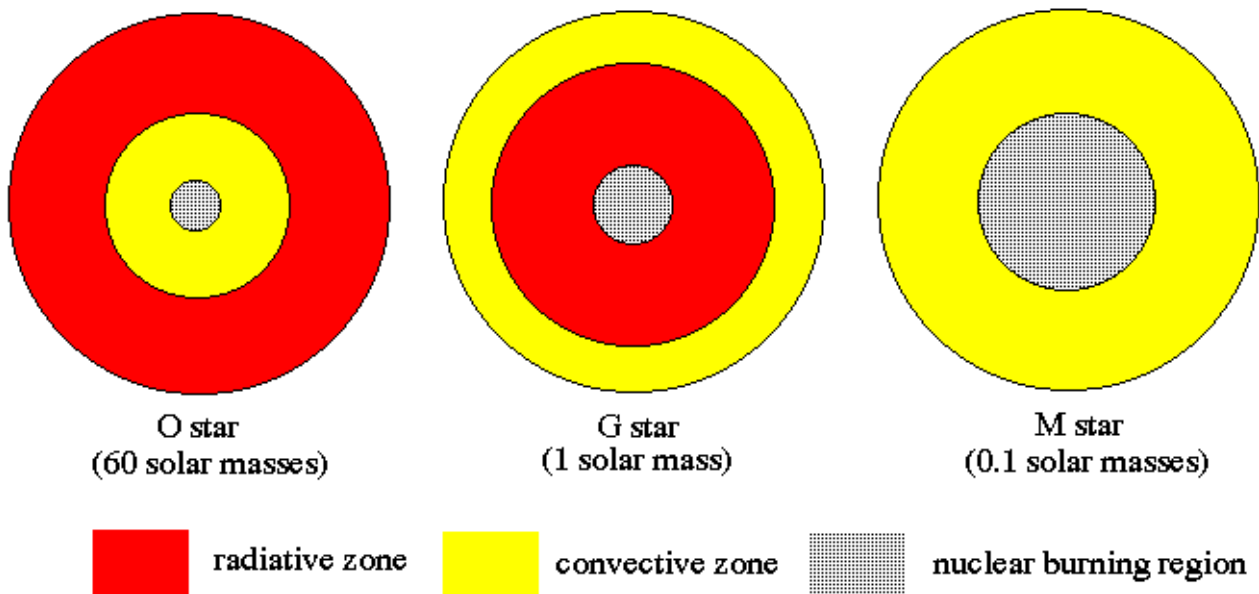
Μετά τη δημιουργία του το άστρο παράγει θερμική ενέργεια στο πυκνό κέντρο του μέσω πυρηνικής σύντηξης. Όσο βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση μπορεί να ταξινομηθεί στην λεγόμενη **κύρια ακολουθία**, η οποία είναι ένα συνεχές και διακριτό φάσμα αστερών τα οποία εμφανίζονται σε διαγράμματα χρώματος – φωτεινότητας ή αλλιώς **διαγράμματα Hertzsprung-Russel**.



Διάγραμμα Hertzsprung-Russel

Το εσωτερικό του αστεριού χωρίζεται σε τρεις ζώνες: το καυτό πυρηνικό **κέντρο**, την **συγκλίνουσα ζώνη** και την **ζώνη ακτινοβολίας**.

Internal Structure for Main Sequence Stars



Εσωτερική Δομή Αστέρων Κύριας Ακολουθίας

Όπως παρατηρείται, η περιοχές πυρηνικής σύντηξης καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο σε αστέρια χαμηλότερης μάζας.

Η ενέργεια που παράγει ο πυρήνας θερμαίνει το εσωτερικό του αστεριού, δημιουργώντας πίεση που αντισταθεί στις βαρυτικές δυνάμεις και διατηρεί το άστρο ακέραιο. Κατά την πάροδο του χρόνου το **υδρογόνο** στον πυρήνα του αστεριού μετατρέπεται μέσω σύντηξης σε **ήλιο**, γεμίζοντας το κέντρο με «στάχτη» ηλίου. Όσο το ήλιο αυξάνεται, η παραγωγή ενέργειας σταματά στον πυρήνα, και άρα η διαδικασία σύντηξης μεταφέρεται στο «κέλυφος» που τον περιβάλλει, κάτι που καθιστά τον πυρήνα των μικρότερων αστεριών ανενεργό.

Τα αστέρια ξεκινούν την ζωή τους αποτελούμενα από **74% υδρογόνο, 25% ήλιο και 1% από τα υπόλοιπα στοιχεία στον περιοδικό πίνακα (κατά μάζα)**. Ο Ήλιος μας, πραγματοποιεί σύντηξη εδώ και 5 δισεκατομμύρια χρόνια, και έτσι αποτελείται από **29% υδρογόνο, 70% ήλιο και 1% υπόλοιπα**.

Η συνολική ενέργεια που απελευθερώνει ένα αστέρι στην διάρκεια ζωής του μπορεί να εκφραστεί από την σχέση $E^* = Lt$, όπου L η φωτεινότητα του αστεριού (ενέργεια ανά δευτερόλεπτο) και t ο χρόνος ζωής του. Η συνολική ενέργεια που παράγεται από το αστέρι ισούται με τη μάζα του που μετατρέπεται σε ενέργεια. Αν υποθέσουμε ότι το $\frac{1}{2}$ του αστεριού θα εκτελέσει σύντηξη στον πυρήνα που μετατρέπει το 0,71% της μάζας τεσσάρων πρωτονίων σε ενέργεια, χρησιμοποιώντας το γνωστό $E=mc^2$ λαμβάνουμε την σχέση $Lt = (0.0071/4)(M/2)c^2$, όπου M η μάζα του αστεριού. Άρα η διάρκεια ζωής του αστεριού σε δευτερόλεπτα είναι $t = 8.9 \times 10^{-4} Mc^2 / L$. Γνωρίζουμε πως $L \propto M^{3.5}$, άρα: $t \propto Mc^2 / M^{3.5} \Rightarrow t \propto c^2 / M^{2.5}$. Σε αστρικές μονάδες έχουμε $t/t_0 = 1/(M/M_0)^{2.5}$ όπου M_0 η μάζα του Ήλιου και t_0 η διάρκεια ζωής του, 10^{10} χρόνια. Μέσω αυτών των συσχετισμών μπορούμε να

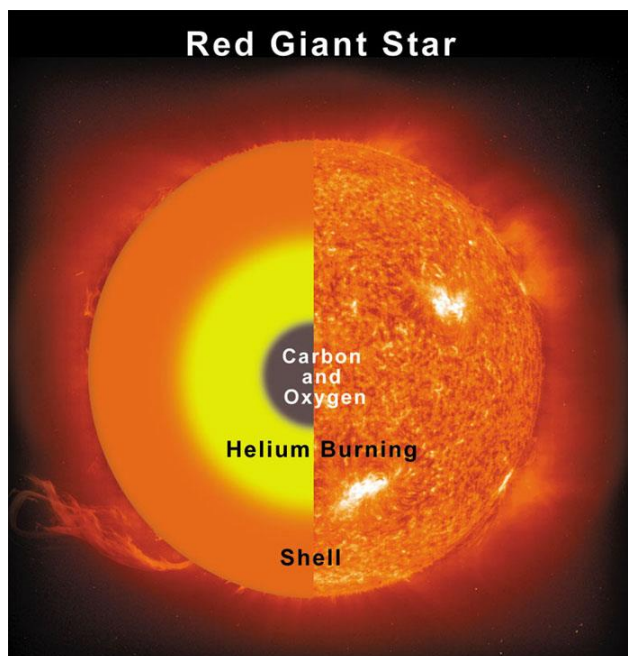
συμπεράνουμε πως **τα μεγαλύτερα και θερμότερα άστρα καταναλώνονται ταχύτατα, ενώ τα μικρότερα και ψυχρότερα «ζουν» πολύ περισσότερο.**

Ερυθροί Γίγαντες

Ερυθρός γίγαντας ονομάζεται κάθε μεγάλος ψυχρός **αστέρας φασματικού τύπου K ή M** που έχει εξελιχθεί τόσο ώστε να μη συγκαταλέγεται πλέον στους αστέρες της κύριας ακολουθίας.

Ο ερυθρός γίγαντας δημιουργείται όταν ένας αστέρας **μάζας 0,4 ως 10 φορές από εκείνη του Ήλιου** μας εξαντλεί το υδρογόνο που μετέτρεπε σε ήλιο στον πυρήνα του με θερμοπυρηνική σύντηξη. Όταν αυτό συμβεί έχει σχηματιστεί ένας πυρήνας με διαστάσεις περίπου **μισής αστρικής ακτίνας**, που αποτελείται από το αδρανές ήλιο. Κι ενώ το Υδρογόνο αρχίζει να καίγεται στα υπερκείμενα στρώματα, στον πυρήνα δεν πραγματοποιούνται θερμοπυρηνικές αντιδράσεις. Η χρονική στιγμή κατά την οποία οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις καύσης του υδρογόνου στον υπερκείμενο του πυρήνα φλοιό αρχίζουν, **εξαρτάται από τη μάζα του άστρου.**

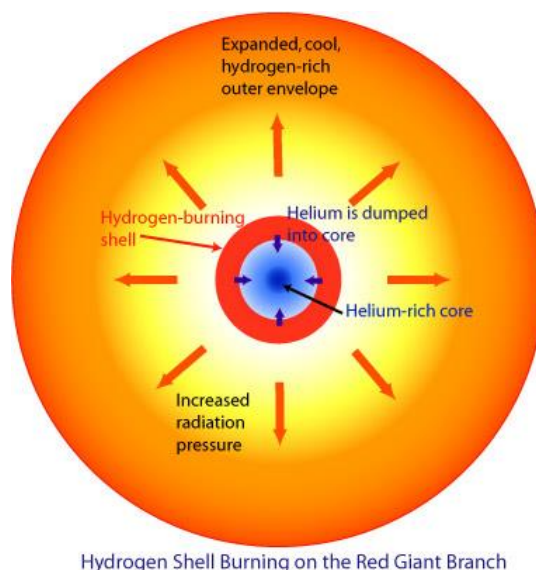
Από αυτό το σημείο και καθώς η **πίεση** στο κέντρο του Αστέρα ελαττώνεται τόσο, ώστε να μην μπορεί να **υπερνικήσει** την βαρύτητα των εξωτερικών στρωμάτων του αστεριού, η βαρυτική κατάρρευση αρχίζει έναν νέο κύκλο. Ο πυρήνας του αστεριού συστέλλεται, η θερμοκρασία του ανεβαίνει και ταυτόχρονα ακτινοβολεί, θερμαίνοντας τα υπερκείμενα στρώματα του Υδρογόνου. Καθώς η θερμοκρασία αυτών υπερβαίνει το όριο των **$2 \cdot 10^7$ K**, η καύση του Υδρογόνου δεν γίνεται πλέον με τον κύκλο πρωτονίου – πρωτονίου αλλά με τον κύκλο άνθρακα – αζώτου ο οποίος παράγει πολύ περισσότερη ενέργεια.



Ερυθρός Γίγαντας

Τα εξωτερικά στρώματα του αστέρα διαστέλλονται πράγμα που σημαίνει ότι ενώ ο πυρήνας του συστέλλεται, ο ίδιος στο σύνολό του διαστέλλεται. Στον πυρήνα συμβαίνει μία διαρκής επισυσσώρευση υλικού καθώς τα προϊόντα της καύσης του υδρογόνου σε ήλιο στους υπερκείμενους φλοιούς, επιρρίπτονται διαρκώς σε αυτόν. **Η φωτεινότητα του αστέρα**

παραμένει περίπου σταθερή, αλλά εφ' όσον διαστέλλεται, η ενεργός του θερμοκρασία ελαττώνεται. Ο αστέρας μετακινείται από την κύρια ακολουθία και γίνεται ερυθρός υπογίγαντας.



Η συρρίκνωση του κεντρικού πυρήνα συνεχίζεται και τοιούτοτρόπως η θερμοκρασία σύντομα φτάνει στους $2 \cdot 10^8 \text{ K}$, ικανή ώστε να αρχίσουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις του Ηλίου που καίγεται προς βηρύλλιο και κατόπιν άνθρακα.

Ο αστέρας αρχίζει να παράγει ενέργεια με ταχύτερο ρυθμό έτσι ώστε η εσωτερική του θερμοκρασία να αυξάνεται, η αργή βαρυτική συστολή να σταματά και ο αστέρας να διαστέλλεται και να γίνεται γίγαντας.

Καθώς ακτινοβολεί από μεγαλύτερη επιφάνεια εξακολουθώντας να διαστέλλεται, η δυναμική του ενέργεια αυξάνεται, οπότε για να αποκατασταθεί η **θερμική ισορροπία**, ελαττώνεται η επιφανειακή του θερμοκρασία.

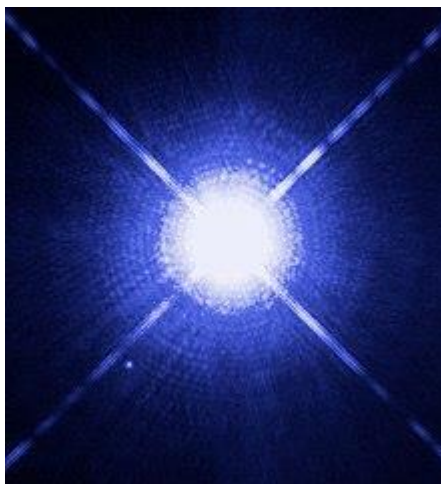
Σύμφωνα λοιπόν με τον **νόμο του Wien** ($\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{σταθ}$) το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μετατοπίζεται προς μεγαλύτερες τιμές, δηλαδή προς το ερυθρό χρώμα. Έτσι λοιπόν το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολούμενης ισχύος εκπέμπεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και ο αστέρας φαίνεται ερυθρότερος, γίνεται δηλαδή ερυθρός γίγαντας.

Λευκοί Νάνοι

Λευκός νάνος χαρακτηρίζεται το **υπόλειμμα του πυρήνα ενός αστέρα μικρής ή μεσαίας μάζας που απομένει μετά τον θάνατο του.**

Σύμφωνα με την πρότυπη αστρική εξέλιξη, οι αστέρες **μικρής** σχετικής μάζας δεν ασκούν αρκετή βαρυτική πίεση στην κεντρική τους περιοχή ώστε να συνεχίσουν πυρηνικές αντιδράσεις μετά την εκεί μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο ικανές να συγκρατήσουν τη δομή του. Αφού τότε ο αστέρας μετατραπεί σε ερυθρό γίγαντα, απωθεί τα αραιότερα εξωτερικά του στρώματα, που μετατρέπονται σε πλανητικό νεφέλωμα, αφήνοντας έναν αδρανή αστρικό πυρήνα που καταρρέει βαρυτικά σε ένα σώμα **δεκάδες φορές μικρότερο**. Αυτός

αποτελείται συνήθως από πυρήνες κυρίως άνθρακα και οξυγόνου, οι οποίοι δημιουργήθηκαν κατά την τελική κατάρρευση εξαιτίας της συμπίεσης.

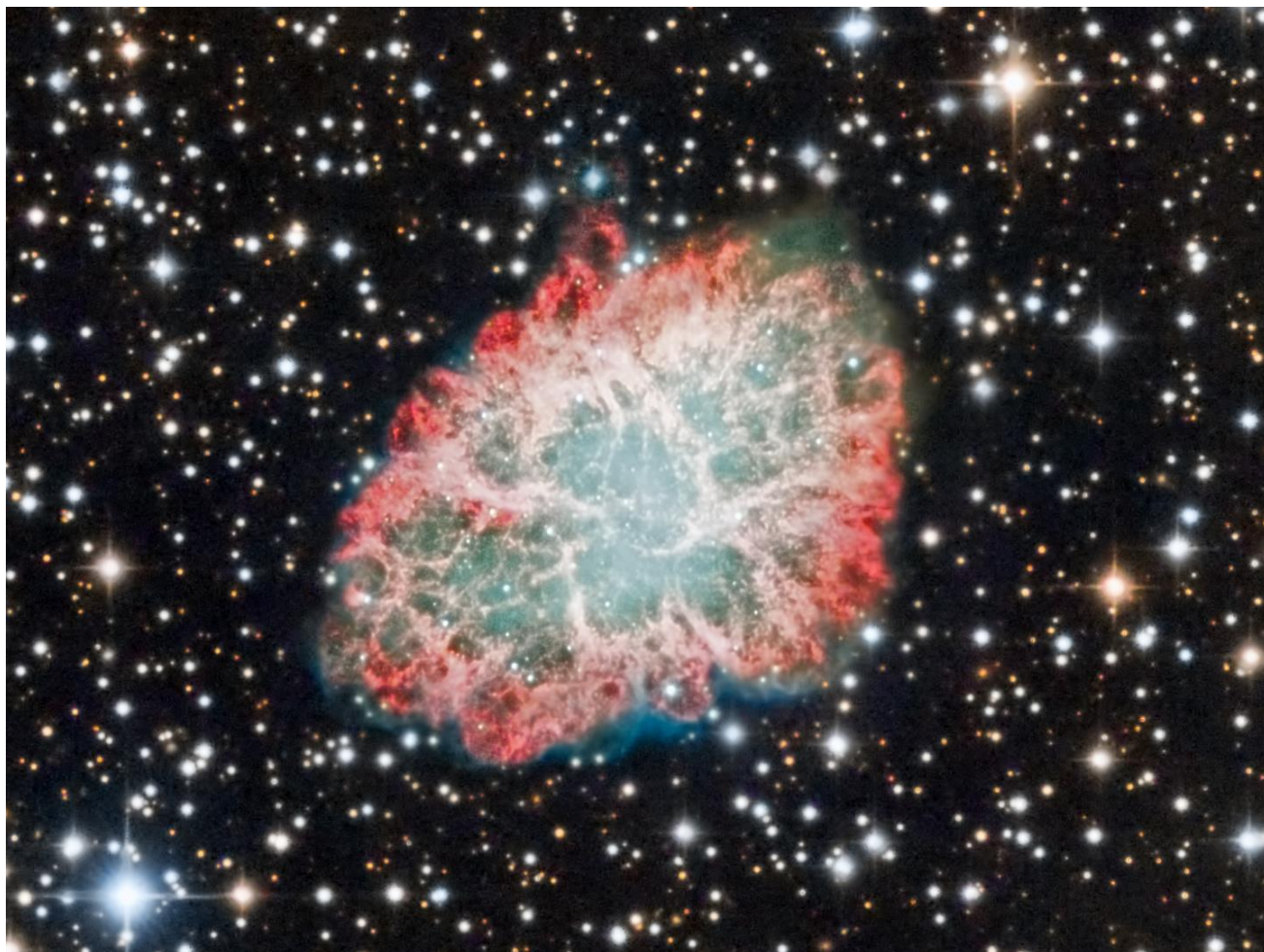


Διπλό Σύστημα του Σείριου όπως φωτογραφήθηκε από το Διαστημικό Τηλεσκόπιο Hubble

Στους λευκούς νάνους **δεν συμβαίνουν πυρηνικές αντιδράσεις, ούτε άλλη διαδικασία που να παράγει ενέργεια**. Συνεπώς βαθμιαία ακτινοβολεί τη θερμική του ενέργεια ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ψύχεται. Ωστόσο, είναι τόσο πυκνό και θερμό ώστε η ψύξη του από τις τυπικές αστρικές θερμοκρασίες να χρειάζεται πολλές δεκάδες δισεκατομμύρια γήινα χρόνια, διάρκεια μεγαλύτερη από την ηλικία του σύμπαντος. Για τον λόγο αυτό, όλα τα παραχθέντα μέχρι τώρα τέτοια αστρικά πτώματα ακτινοβολούν έντονα σε υψηλές σχετικά θερμοκρασίες, συνεπώς εκπέμπουν άφθονο ορατό φως και έτσι παρατηρούνται ως μικροί **λευκοί αστέρες**.

Οι συνήθεις **διαστάσεις ενός λευκού νάνου είναι συγκρίσιμες με τις διαστάσεις της Γης**, δηλαδή η διάμετρός του είναι περίπου εκατό φορές μικρότερη από τη διάμετρο του Ήλιου. Η συγκράτηση της ύλης από περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση οφείλεται σε μία καθαρώς κβαντομηχανική ιδιότητά της, που ονομάζεται **πίεση των εκφυλισμένων ηλεκτρονίων** (η πίεση δηλαδή που ασκούν τα ηλεκτρόνια όταν βρεθούν σε περιορισμένο όγκο ακριβώς όπως και τα μόρια του αέρα ασκούν πίεση στα τοιχώματα ενός δοχείου). Η πίεση αυτή ωστόσο διαφέρει από τις συνήθεις θερμικές πιέσεις (των αερίων) στο ότι δεν απαιτείται η συνεχής τροφοδοσία της ύλης με ενέργεια για την συντήρηση της.

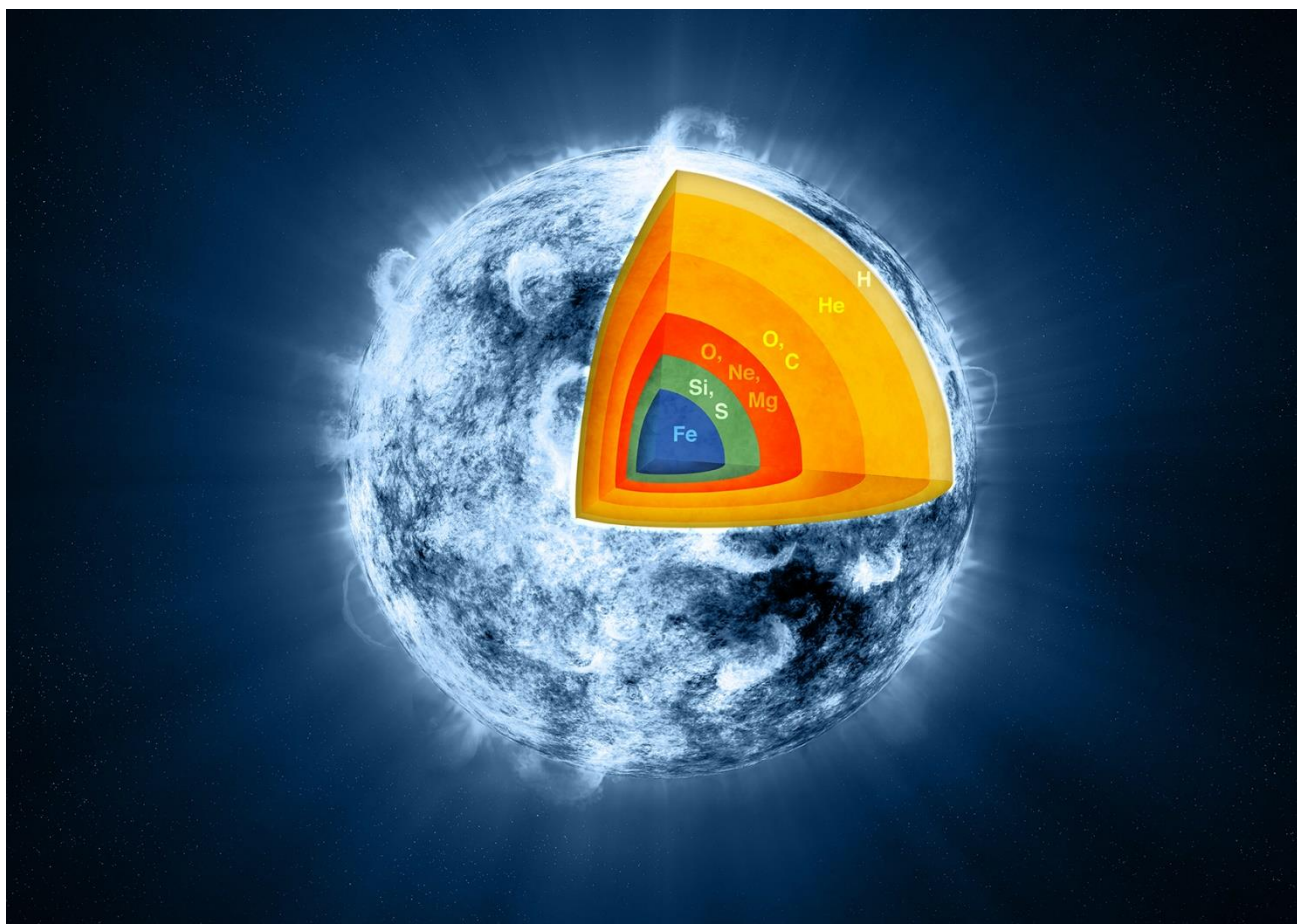
ΥΠΕΡΚΑΙΝΟΦΑΝΕΙΣ ΑΣΤΕΡΕΣ



Δημιουργία Υπερκαινοφανούς Αστέρρα

Άστρα με μάζα σαν του Ήλιου μας και **μέχρι τέσσερις ηλιακές μάζες**, θα τελειώσουν τη ζωή τους ως άσπροι νάνοι. Ο θάνατος όμως των άστρων με μεγαλύτερη ποσότητα υλικών είναι πολύ πιο θεαματικός. Άστρα με **πέντε ηλιακές μάζες και πάνω** καταναλώνουν το καύσιμο υδρογόνο τους, φτάνοντας στο στάδιο του ερυθρού γίγαντα μέσα σε μερικά εκατομμύρια χρόνια. Τα άστρα αυτά εξογκώνονται σε πραγματικούς **ερυθρούς υπεργίγαντες**, με διάμετρο 500-1.000 φορές τη σημερινή διάμετρο του Ήλιου.

Σε ένα άστρο με υλικά 25 ηλιακών μαζών, για παράδειγμα, τα αποθέματα του υδρογόνου στον πυρήνα του εξαντλούνται μέσα σε 3 εκατομμύρια χρόνια, και το καύσιμο ήλιο σε μερικές χιλιάδες. Από εκεί και έπειτα τα πάντα γίνονται σχεδόν **αστραπιαία**, σε σύγκριση με τη συνολική διάρκεια ζωής του. Ο άνθρακας εξαντλείται σε 200 χρόνια, το νέον σε ένα χρόνο, και μερικοί μόνο μήνες είναι αρκετοί για να «καεί» και το οξυγόνο, σχηματίζοντας πυρίτιο και θείο. Τελικά το πυρίτιο μέσα σε μία μόνο μέρα μεταστοιχειώνεται σε σίδηρο. Σε αυτό το σημείο η ήρεμη ζωή του άστρου σταματάει και αρχίζει η διαδικασία της μετατροπής του σε **υπερκαινοφανή αστέρα ή αλλιώς supernova**.



Με κάθε μετατροπή απελευθερώνεται ενέργεια κι έτσι η προς τα έξω εσωτερική του πίεση **αντισταθμίζει** τη βαρυτική δύναμη των εξωτερικών του αέριων στρωμάτων. Όταν όμως το άστρο αυτό έχει δημιουργήσει όλα τα χημικά στοιχεία μέχρι και το σίδηρο, έχει φτάσει πια στο **κρίσιμο** εκείνο σημείο, όπου **αντί να απελευθερώνεται** ενέργεια, **αντίθετα απορροφάται**. Με αυτό τον τρόπο η πίεση που συγκρατούσε το τεράστιο αυτό άστρο, ενάντια στην αδυσώπητη δύναμη της ίδιας της βαρύτητας, ξαφνικά σταματάει να υπάρχει, και η **κατάρρευση** του άστρου είναι **απότομη** και **ραγδαία**.

Όταν στον πυρήνα ενός άστρου η θερμοκρασία φτάσει τους 3 δισεκατομμύριους βαθμούς Κελσίου, το πυρίτιο που έχει συγκεντρωθεί εκεί αρχίζει να μετατρέπεται σε σίδηρο, κι έτσι μέσα σε μερικές ώρες η ποσότητα του σιδήρου στο κέντρο αρχίζει να μεγαλώνει. Όταν η σιδερένια καρδιά του υπεργίγαντα αρχίσει να **συμπιέζεται από τη βαρύτητα** των ανώτερων στρωμάτων του, η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή για να αρχίσει η καύση του σιδήρου. Κάτι τέτοιο, όμως, ανοίγει την πόρτα σε πραγματικά απόκοσμες καταστροφικές διαδικασίες.

Αυτό συμβαίνει, γιατί ο σίδηρος διαθέτει τον πιο **σταθερό** ατομικό πυρήνα, πράγμα που σημαίνει ότι όταν το χημικό αυτό στοιχείο εμπλέκεται σε πυρηνικές αντιδράσεις διάσπασης ή σύντηξης, όχι μόνο δεν παράγει **ενέργεια**, αλλά αντίθετα την **απορροφάει**, γιατί η «φωτοαποσύνθεση» του σιδήρου είναι μια ενδόθερμη διαδικασία. Για να μετατραπεί, δηλαδή, ο σίδηρος σε βαρύτερα ή ελαφρότερα χημικά στοιχεία, χρειάζεται ενέργεια, που σημαίνει ότι δεν είναι διαθέσιμη για να συγκρατήσει το τεράστιο βάρος των ανώτερων στρωμάτων του άστρου, με αποτέλεσμα την ακόμη μεγαλύτερη συμπίεση του σιδερένιου αστρικού πυρήνα και την ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτόν.



Τμήμα του Νεφελώματος των Ιστίων (Gum), λείψανα με συνολική έκταση 2.000 ετών φωτός από το θάνατο ενός γιγάντιου άστρου

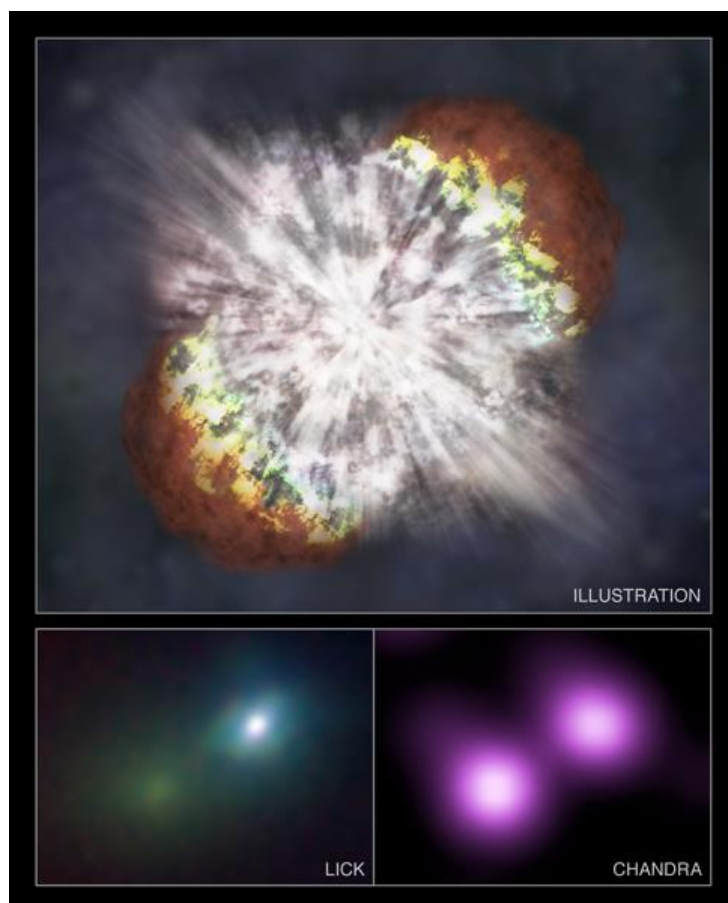
Η Έκρηξη

Έτσι, όταν ο συγκεντρωμένος σίδηρος στην καρδιά του άστρου φτάσει το **όριο Chandrasekhar** (1,4 ηλιακές μάζες), η συμπίεση είναι τόσο μεγάλη, ώστε η θερμοκρασία στο σιδερένιο πυρήνα του άστρου ξεπερνάει τους 4 δισεκατομμύριους βαθμούς Κελσίου. Τα υψηλής ενέργειας φωτόνια που παράγονται διασπούν το σίδηρο σε ελαφρότερα χημικά στοιχεία, με αποτέλεσμα την όλα και μεγαλύτερη **απορρόφηση ενέργειας από την καρδιά του άστρου**.

Στο επόμενο δευτερόλεπτο τα πάντα γίνονται με αστραπιαία ταχύτητα. Ο πυρήνας του άστρου **διασπάται σε δύο τμήματα**. Το **εσωτερικό τμήμα** του πυρήνα καταρρέει ανεμπόδιστο προς το κέντρο, με ταχύτητα που φτάνει τα 80.000 km/s (πάνω από το 25% της ταχύτητας του φωτός).

Η κατάρρευση αυτή συμπιέζει τα υλικά του τόσο πολύ, ώστε η διάμετρος του **συρρικνώνεται** από 6.000 σε μόνο 6 χιλιόμετρα. Έτσι, η ύλη του κεντρικού αστρικού πυρήνα διασπάται σε θετικά φορτισμένα πρωτόνια, αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και νετρόνια χωρίς καμιά ηλεκτρική φόρτιση.

Επειδή η πίεση είναι τεράστια, τα ηλεκτρόνια συγχωνεύονται με τα πρωτόνια δημιουργώντας **νετρόνια και νετρίνα**. Σε χιλιοστά του δευτερολέπτου η ύλη του πυρήνα αποτελείται μόνο από νετρόνια και τεράστιες ποσότητες νετρίνων, που λόγω της μεγάλης πυκνότητας της ύλης δεν μπορούν να δραπετεύσουν.



Η πιο φωτεινή supernova που έχει παρατηρηθεί από το Παρατηρητήριο Ακτινών Χ της NASA

Σε δέκα χιλιοστά του δευτερολέπτου η πυκνότητα της αστρικής καρδιάς φτάνει να είναι **τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα ενός ατομικού πυρήνα, ενώ η θερμοκρασία έχει φτάσει του 100 C°**. Πυκνότητα δηλαδή τόσο μεγάλη, που αναγκάζει όλα αυτά τα υλικά (τα νετρόνια και τα νετρόνια) να εξοστρακιστούν με δύναμη προς τα έξω, σχηματίζοντας μια σφαίρα 20 περίπου χιλιομέτρων, όπου η πυκνότητα των υλικών είναι παρόμοια με την πυκνότητα ενός ατομικού πυρήνα (200 εκατομμύρια τόνοι περίπου ανά κυβικό εκατοστό).

Η εκτίναξη αυτή του εσωτερικού πυρήνα τον κάνει να συγκρουστεί βίαια με τον καταρρέοντα ακόμη εξωτερικό πυρήνα, δημιουργώντας έτσι ένα κρουστικό κύμα με **περισσότερη ενέργεια από αυτήν που ελκύει ένας ολόκληρος γαλαξίας σε δέκα περίπου χρόνια**. Η δημιουργία του κρουστικού αυτού κύματος σηματοδοτεί τη γέννηση της supernova. Κι έτσι, καθώς το κύμα αυτό μαζί με τα νετρόνια διαστέλλεται μέσα στον καταρρέοντα εξωτερικό αστρικό πυρήνα, επιτρέπει στα νετρόνια να διαφύγουν στο διάστημα. Με την ταχύτητα του φωτός τα νετρόνια αυτά διαδίδουν πλέον στο Σύμπαν τα πρώτα μηνύματα του αστρικού θανάτου.

Ένα δευτερόλεπτο μετά την αρχή της δραματικής αυτής κατάρρευσης, το κρουστικό κύμα με ταχύτητα που φτάνει τα **30.000 km/s**, ξεκινάει προς τα εξωτερικά στρώματα του άστρου, το οποίο δεν έχει προφτάσει ακόμη να <<συνειδητοποιήσει>> τι συμβαίνει στον πυρήνα του. Το κρουστικό αυτό κύμα παρασύρει στο διάβα του και συντριβεί τα αστροϋλικά που συναντάει. Η **σύγκρουση αυτή παράγει αρκετές ποσότητες όλων των βαρέων χημικών στοιχείων**, όπως το ασβέστιο, ο μόλυβδος και το ουράνιο. Ο αστρικός πυρήνας εκπέμπει

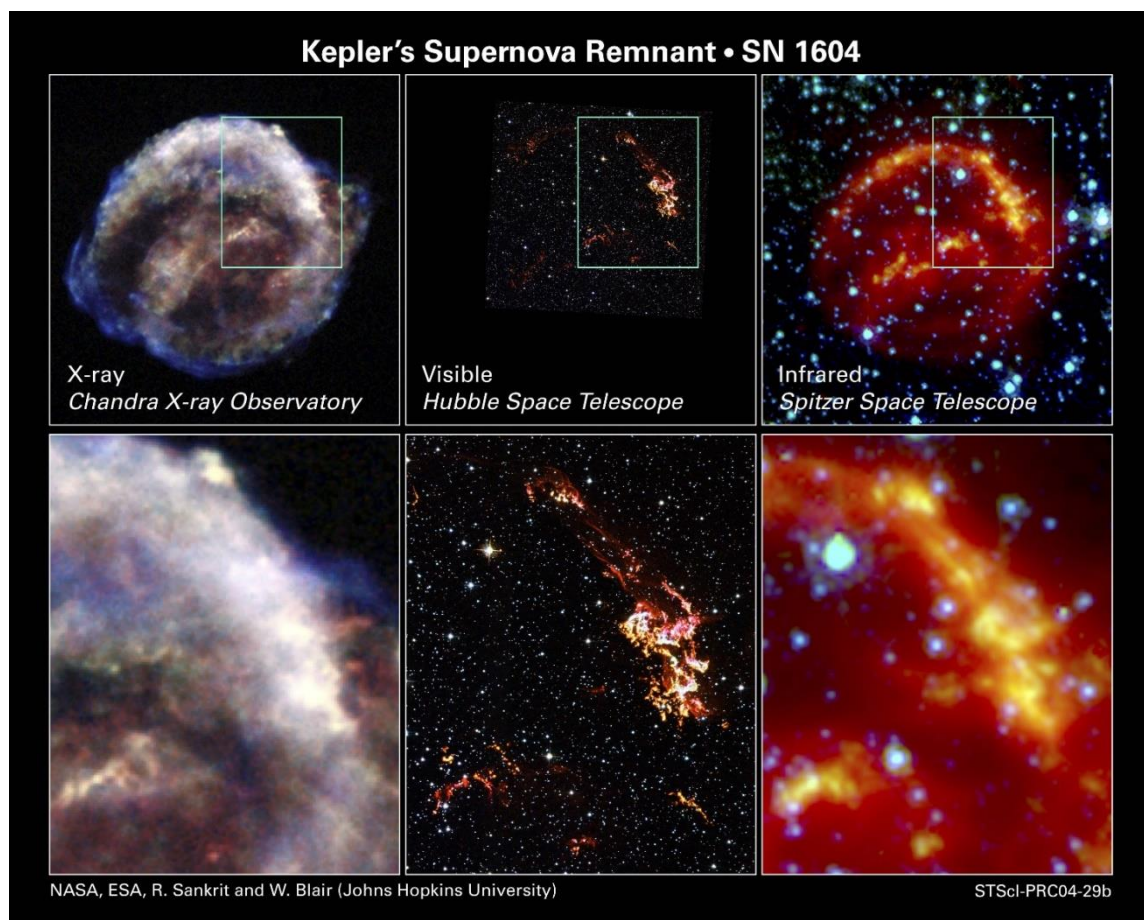
πλέον τεράστιες ποσότητες **νετρίνων**, τα οποία με την αναχώρησή τους **μεταφέρουν μαζί τους τεράστιες ποσότητες ενέργειας από την καρδιά του άστρου**.

Το **κρουστικό κύμα** διασχίζει το άστρο μέσα σε μερικές ώρες, και η τεράστια έκρηξη που επακολουθεί **παράγει ενέργεια ίση με 3×10^{53} W, την ενέργεια δηλαδή που παράγει ο Ήλιος σε δέκα τρισεκατομμύρια χρόνια, αν μπορούσε να ζήσει τόσο πολύ**. Και όλη αυτή η ενέργεια ελκύεται σε μερικά μόνο δευτερόλεπτα. Τέτοιου είδους εκρήξεις μπορούν να συγκριθούν μόνο με την Μεγάλη Έκρηξη, που δημιούργησε το σύμπαν στο οποίο ζούμε, πριν από 15 δισεκατομμύρια χρόνια.

Με την κυριολεκτική αυτή διάλυση του άστρου, η πρώτη φωτεινή του αναλαμπή ανακοινώνεται στο Σύμπαν. Η **αναλαμπή αυτή αποτελείται κυρίως από υπεριώδη ακτινοβολία**, που είναι αόρατη στα ανθρώπινα μάτια. Μια ώρα όμως **αργότερα** τα εκτοξευόμενα υλικά έχουν χάσει αρκετή από την ταχύτητά τους και η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι **ορατή**.

Το Επακόλουθο

Μετά από μια έκρηξη supernova, και ενώ το μεγαλύτερο μέρος του άστρου καταστρέφεται εκτοξευόμενο στο διάστημα, **ο πυρήνας του παραμένει στη θέση του ανέπαφος μεν αλλά σε φοβερά ασταθή κατάσταση**. Αν η μάζα του πυρήνα δεν ξεπερνάει περίπου τις 3 ηλιακές μάζες, τότε οποιαδήποτε περαιτέρω συμπίεσή του σταματάει.



Αυτό που **απομένει**, όταν η κατάρρευση και ο εξοστρακισμός σταματήσουν, είναι ένας **γιγάντιος ατομικός πυρήνας νετρονίων με διάμετρο περίπου 20 χιλιομέτρων**, που περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του εκατοντάδες φορές κάθε δευτερόλεπτο. Είναι ένα

άστρο νετρονίων, γνωστότερο με την ονομασία **πάλσαρ**, γιατί εξαιτίας της γρήγορης περιστροφής του εκπέμπει περιοδικά ραδιοκύματα, που δημιουργούνται από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια στο στροβιλιζόμενο μαγνητικό του πεδίο.



Παρατήρηση με ακτίνες Χ του πάλσαρ στο Νεφέλωμα του Ανέμου G11.2-0.3

Όλα τα υπόλοιπα υλικά του άστρου εκτοξεύονται στο διάστημα εμπλουτίζοντας έτσι το Σύμπαν με όλα τα χημικά στοιχεία της φύσης. Χωρίς τις εκρήξεις των σουπερνόβα, δηλαδή, δε θα υπήρχαν πλανήτες και δορυφόροι. Χωρίς τις σουπερνόβα δε θα υπήρχε η Γη, δε θα υπήρχαν βράχια και βότσαλα, δε θα υπήρχαν φυτά και ζώα. **Χωρίς τις εκρήξεις των *supernova*, δεν θα υπήρχε ο άνθρωπος.**

Ολόκληρη η ύλη στο σώμα μας, όλα τα χημικά στοιχεία που το αποτελούν φτιάχτηκαν στην <<κόλαση>> τέτοιων αστρικών θανάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec14.html>

http://www.physics4u.gr/articles/2007/star_formation.html

https://el.wikipedia.org/wiki/Υπερκαινοφανής_αστέρας

https://science.fandom.com/el/wiki/Ερυθρός_Γίγας_Αστέρας

https://el.wikipedia.org/wiki/Ερυθρός_γίγαντας

https://el.wikipedia.org/wiki/Λευκός_νάνος

https://www.astronomia.gr/wiki/index.php?title=Πίεση_των_Εκφυλισμένων_Ηλεκτρονίων

«Ο Θάνατος των Αστρων», Διονύσης Π. Σιμόπουλος

https://el.wikipedia.org/wiki/Υπερκαινοφανής_αστέρας

<https://www.jpl.nasa.gov/images/pia06908-keplers-supernova-remnant-a-view-from-chandra-x-ray-observatory>

<https://chandra.harvard.edu/photo/2012/casa/more.html>

<https://chandra.harvard.edu/photo/2007/sn2006gy/index.html>