

Τα Άστρα και η Εξέλιξή τους

Δρ. Παναγιώτης Χάντζιος, Μάρτιος 2003

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΕΑΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ
2. Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ
3. Η ΓΕΝΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ
4. ΑΣΤΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ
5. Ο ΘΑΝΑΤΟΣ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

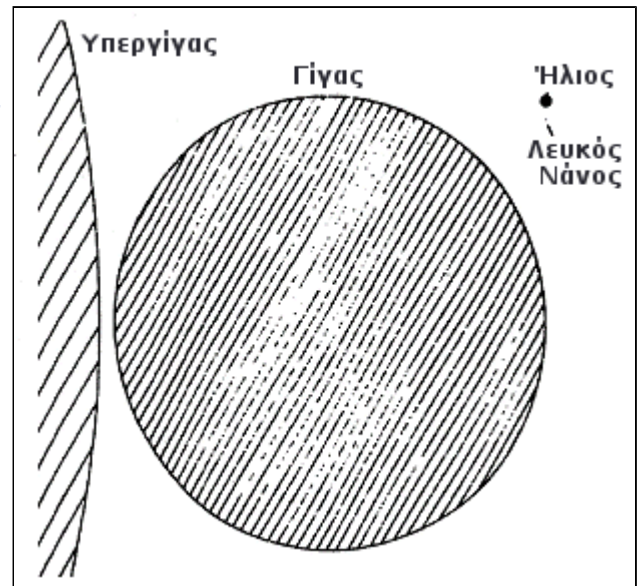


1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανέκαθεν τα άστρα μαγνήτιζαν και σαγήνευαν τον άνθρωπο. Οι πρώτες προσπάθειες του ανθρώπου να μελετήσει και να εξηγήσει τα του ουρανού και των άστρων ανάγεται στο μακρινό παρελθόν, πολλές χιλιάδες χρόνια πίσω. Η ίδια άλλωστε η αστρονομία, η οποία πήρε και το όνομά της από τα άστρα, είναι η αρχαιότερη παρατηρησιακή επιστήμη. Οι πρώτες φυσικά παρατηρήσεις των άστρων γίνονταν δια γυμνού οφθαλμού. Εάν κάποιος καθίσει έξω μία καθαρή βραδιά κάτω από καλές καιρικές συνθήκες και έχει αρκετή υπομονή, μπορεί να μετρήσει μερικές χιλιάδες αστέρια. Όπως γνωρίζουμε σήμερα, στον ουρανό υπάρχουν πολύ περισσότερα άστρα, εκατοντάδες δισεκατομμύρια, τα οποία όμως είναι τόσο αμυδρά που δεν φαίνονται με γυμνό μάτι. Αυτά που εμείς βλέπουμε είναι τα φαινομενικά λαμπρότερα, και κατά τεκμήριο κοντινότερα προς το ηλιακό μας σύστημα, διότι όσο πιο μακριά από εμάς βρίσκεται μία φωτεινή πηγή τόσο πιο αμυδρή φαίνεται. Στην πραγματικότητα, όλο αυτό το πλήθος των αστεριών δεν είναι τίποτα άλλο παρά δισεκατομμύρια ήλιοι όπως είναι ο δικός μας ο Ήλιος. Υπάρχουν αστέρια που είναι μεγαλύτερα από τον Ήλιο και άλλα που είναι μικρότερα από αυτόν. Ο ίδιος ο Ήλιος είναι ένα μέσο άστρο του Γαλαξία μας.

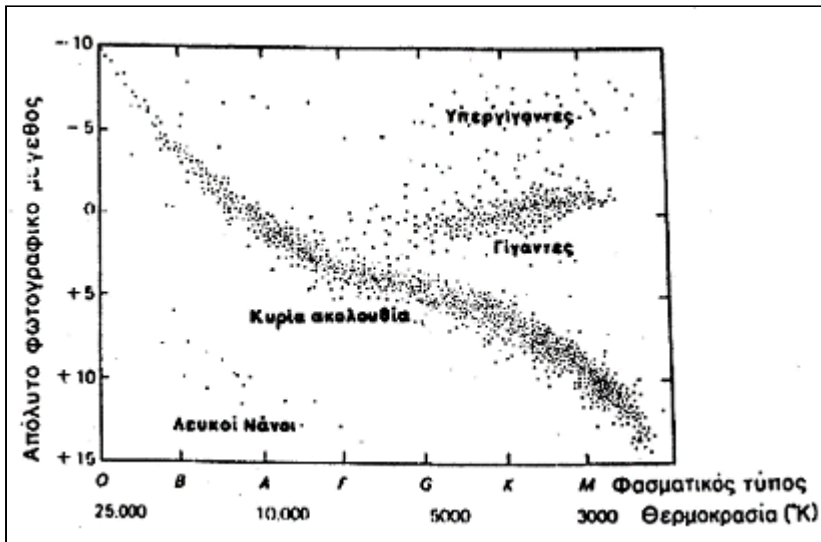
Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση των μεγεθών των διαφόρων αστρικών κατηγοριών.

Τα άστρα, ανάλογα με το μέγεθός τους, χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες. Μία συγκεκριμένη κατηγορία αστεριών, που είναι μικρότερα από τον Ήλιο, είναι οι λευκοί νάνοι. Όπως μαρτυράει και το όνομά τους, αυτά τα αστέρια είναι πολύ μικρότερα από τον Ήλιο και το μέγεθός τους είναι συγκρίσιμο με αυτό της Γης, η ακτίνα της οποίας είναι περίπου εκατό φορές μικρότερη από την ακτίνα του Ηλίου. Λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας τους (περίπου 10000 βαθμοί Κελσίου) εκπέμπουν έντονο λευκό φως και γι' αυτό ονομάζονται λευκοί νάνοι. Μία άλλη κατηγορία αστεριών, προς την αντίθετη κατεύθυνση από πλευράς μεγέθους, είναι οι γίγαντες που, όπως λέει και το όνομά τους, είναι πολύ μεγάλα άστρα, δεκάδες φορές μεγαλύτερα από τον Ήλιο. Για να πάρουμε μία ιδέα του μεγέθους τους, αν φανταστούμε ότι στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος αντί για τον Ήλιο είχαμε ένα γίγαντα αστέρα, τότε ο φωτεινός του δίσκος θα κάλυπτε το μισό περίπου ουρανό! Τέλος, υπάρχει μία ακόμα πιο ακραία κατηγορία αστεριών, οι λεγόμενοι υπεργίγαντες, που η ακτίνα τους είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα του Ηλίου. Στο προηγούμενο παράδειγμα, αν στο κέντρο του ηλιακού συστήματος είχαμε έναν υπεργίγαντα, τότε η επιφάνειά του θα είχε υπερκαλύψει και αυτήν ακόμα την τροχιά της Γης! Τα συγκριτικά μεγέθη των διαφόρων αυτών αστρικών κατηγοριών φαίνονται στο σχήμα 1.



Οι διάφορες αστρικές κατηγορίες αντιπροσωπεύουν διαφορετικά στάδια στην εξέλιξη των αστεριών. Εδώ θα πρέπει να πούμε ότι τα αστέρια δεν είναι παντοτινά, αλλά έχουν κάποιο συγκεκριμένο χρόνο ζωής. Γεννιούνται κάποια στιγμή, κατόπιν διανύουν τη ζωή τους, και στο τέλος πεθαίνουν. Στη διάρκεια της ζωής τους περνούν από διάφορες φάσεις, που εξαρτώνται από τις φυσικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό τους. Οι διάφορες κατηγορίες των αστεριών, καθώς και η εξέλιξή τους όπως θα δούμε αργότερα, απεικονίζονται στο περίφημο διάγραμμα των Hertzsprung και Russell. Στις αρχές του αιώνα μας οι δύο αυτοί αστρονόμοι, δουλεύοντας ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, έφτιαξαν τα πρώτα δυσδιάστατα διαγράμματα των παρατηρηθέντων αστεριών. Σ' αυτά τα διαγράμματα, που έκτοτε αποκαλούνται διαγράμματα H-R (από τα αρχικά των ονομάτων τους), στον κάθετο άξονα τοποθετούνται τα απόλυτα φωτογραφικά μεγέθη των αστεριών (δηλαδή η λαμπρότητα) και στον

οριζόντιο άξονα οι φασματικοί τύποι τους (που αντιπροσωπεύουν τη θερμοκρασία).



Γρήγορα διαπιστώθηκε ότι τα αστέρια δεν ακολουθούν μία τυχαία κατανομή στα διαγράμματα H-R, αλλά δημιουργούν συγκεκριμένους σχηματισμούς που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές αστρικές κατηγορίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Αυτά λοιπόν τα διαγράμματα αποδείχθηκαν σπουδαίο μέσον για τη μελέτη της αστρικής εξέλιξης. Στα επόμενα μέρη θα μιλήσουμε λεπτομερέστερα για τη δομή και την εξέλιξη των αστεριών.

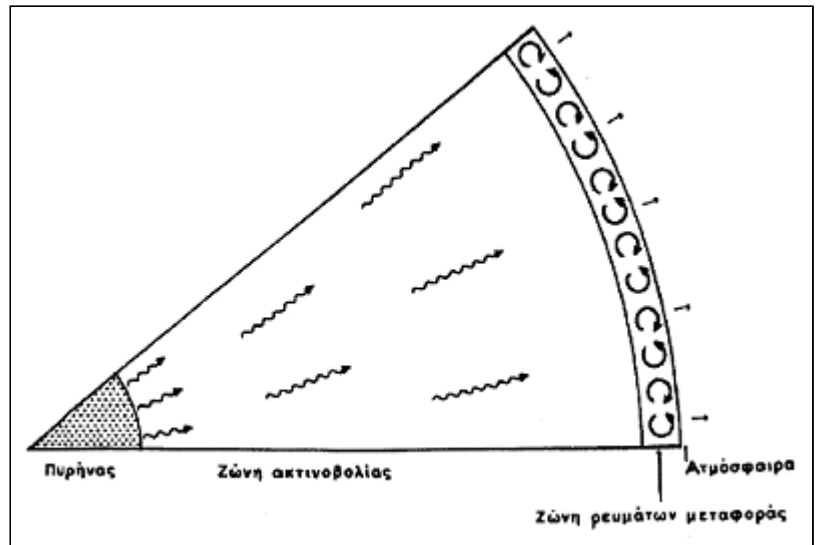
Σχήμα 2. Το διάγραμμα Hertzsprung - Russell. Στον οριζόντιο άξονα μετράμε τις θερμοκρασίες και στον κάθετο άξονα την λαμπρότητα (όσο πιο αρνητικό είναι το απόλυτο μέγεθος, τόσο πιο λαμπρό είναι το άστρο). Φαίνονται καθαρά οι κατανομές που ακολουθούν οι διάφορες αστρικές κατηγορίες.

2. Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ

Τα αστέρια είναι τεράστιες διάπυρες αεριώδεις σφαίρες. Το γεγονός ότι η ύλη τους είναι σε αεριώδη κατάσταση οφείλεται στις πολύ μεγάλες θερμοκρασίες τους, που φθάνουν τις χιλιάδες ή και δεκάδες χιλιάδες βαθμούς στην επιφάνειά τους και αυξάνονται πολύ περισσότερο καθώς πλησιάζει κανείς προς το κέντρο τους. Οι τεράστιες αυτές αεριώδεις σφαίρες βρίσκονται σε υδροστατική ισορροπία, καθώς σε κάθε σημείο στο εσωτερικό τους η βαρυτική δύναμη (που έχει διεύθυνση προς το κέντρο) εξισορροπείται από τη δύναμη των τεραστίων πιέσεων που επικρατούν εκεί. Η πίεση και η θερμοκρασία σε κάθε σημείο στο εσωτερικό ενός αστεριού είναι άμεση συνάρτηση της απόστασης του σημείου αυτού από το κέντρο. Στον Ήλιο, για παράδειγμα, η θερμοκρασία στην επιφάνειά του είναι γύρω στους 5700 βαθμούς Kelvin (η κλίμακα Kelvin είναι ίδια με την κλίμακα του Κελσίου, με τη διαφορά ότι το μηδέν της κλίμακας Kelvin αντιστοιχεί σε -273 βαθμούς Κελσίου). Καθώς προχωρούμε προς το εσωτερικό η θερμοκρασία αυξάνει, και στο κέντρο του Ηλίου υπολογίζεται ότι φθάνει τα 15-20 εκατομμύρια βαθμούς, η δε αντίστοιχη πίεση είναι μερικά δισεκατομμύρια ατμόσφαιρες!

Κάτω από αυτές τις συνθήκες λαμβάνουν χώρα πυρηνικές αντιδράσεις, κατά τις οποίες το υδρογόνο μετατρέπεται σε ήλιο, και οι αντιδράσεις αυτές εκλύουν τεράστια ποσά ενέργειας. Έτσι, το εσωτερικό ενός άστρου σαν τον Ήλιο αποτελείται από τρία στρώματα: το εξωτερικό μέρος (ζώνη ρευμάτων μεταφοράς) με την επιφάνειά του, το εσωτερικό στρώμα (ζώνη ακτινοβολίας), και στο κέντρο τον πυρήνα του, όπου παράγεται η ενέργεια που το συντηρεί (σχήμα 3).

Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση του εσωτερικού ενός αστεριού σαν τον Ήλιο. Στο κέντρο είναι ο πυρήνας που παράγει την ενέργεια του αστεριού, και ακολουθεί η ζώνη ακτινοβολίας που καταλαμβάνει τον περισσότερο όγκο του αστεριού. Τέλος στο εξωτερικό μέρος υπάρχει η ζώνη ρευμάτων μεταφοράς η οποία φθάνει μέχρι την επιφάνεια του αστεριού.



Όπως είπαμε προηγουμένως, η πηγή ενέργειας των αστεριών είναι οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στον πυρήνα. Σ' αυτό το πολύ θερμό και πυκνό περιβάλλον, ελαφροί ατομικοί πυρήνες (όπως υδρογόνο, ήλιο, κλπ) συγκρούονται μεταξύ τους βίαια και με μεγάλη συχνότητα, έτσι ώστε συντήκονται και σχηματίζουν βαρύτερους ατομικούς πυρήνες απελευθερώνοντας τεράστια ποσά ενέργειας. Αυτή η τεράστια έκλυση ενέργειας προς τα έξω θα μπορούσε εύκολα να διαλυθεί όλο το άστρο, αν δεν υπήρχε η βαρύτητα η οποία δρα προς τα μέσα. Το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό της εκλυόμενης ενέργειας βρίσκεται αποθηκευμένο στον πυρήνα υπό μορφή θερμότητας, και αντισταθμίζει τη βαρύτητα κρατώντας το άστρο σε υδροστατική ισορροπία. Ένα πολύ μικρό ποσοστό της αποθηκευμένης θερμότητας κατορθώνει με διάφορους τρόπους να διαφεύγει κάθε χρονική στιγμή και φθάνει μέχρι την επιφάνεια του αστεριού (φωτόσφαιρα), από όπου και εκπέμπεται στο διάστημα υπό μορφή ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα δηλαδή, η τεράστια λαμπρότητα του Ηλίου δεν είναι παρά μία πολύ μικρή

διαρροή ενέργειας από τα τεράστια αποθέματα του πυρήνα του.

Για να έχουμε μία ολοκληρωμένη εικόνα της εσωτερικής δομής των αστεριών, θα πρέπει να πούμε λίγα λόγια για τους τρόπους με τους οποίους η ενέργεια που απελευθερώνεται στον πυρήνα τους κατορθώνει σταδιακά να φθάσει μέχρι την επιφάνειά τους. Η διάδοση ενέργειας στο εσωτερικό των αστεριών συντελείται με τρεις κυρίως τρόπους: δι' αγωγής, δια μεταφοράς, και δι' ακτινοβολίας. Η διάδοση ενέργειας δι' αγωγής συμβαίνει όταν ενεργητικά άτομα ή πυρήνες συγκρούονται με άλλα άτομα ή πυρήνες που έχουν χαμηλότερη ενέργεια και τους μεταδίδουν έτσι κάποιο ποσοστό από την ενέργειά τους. Αυτός ο μηχανισμός είναι πολύ αποδοτικός σε στερεές καταστάσεις (ιδίως μέταλλα) ή σε "εκφυλισμένες" καταστάσεις της ύλης, όπως συμβαίνει στα τελικά στάδια της αστρικής εξέλιξης (λευκοί νάνοι και άστρα νετρονίων). Σε συνηθισμένα άστρα όμως όπου η ύλη είναι σε αεριώδη μορφή, ο τρόπος αυτός είναι αναποτελεσματικός. Η διάδοση ενέργειας δια μεταφοράς επιτυγχάνεται μέσω μαζικών κινήσεων σε υγρά ή αέρια σώματα. Κλασικό παράδειγμα αυτού του τρόπου στην καθημερινή μας ζωή είναι όταν ζεσταίνουμε νερό σε σημείο που να βράζει. Σε συγκεκριμένες ζώνες στο εσωτερικό των αστεριών, όπου η θερμοκρασία ελαττώνεται πολύ γρήγορα προς τα έξω, η αεριώδης μάζα γίνεται ασταθής και "βράζει": θερμές αέριες μάζες ανεβαίνουν προς τα πάνω, απελευθερώνουν την θερμική τους ενέργεια, και ξαναβυθίζονται για να πάρουν καινούρια ενέργεια και ούτω καθ' εξής. Τέλος, ο πιο σημαντικός τρόπος ροής ενέργειας στο εσωτερικό των αστεριών είναι η διάδοση ενέργειας δι' ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει στη ζώνη ακτινοβολίας όπου ακτίνες φωτός με μεγάλη ενέργεια οδεύουν προς τα έξω και, μέσω διαδοχικών συγκρούσεων και απορροφήσεων - επανεκπομπών, μεταδίδουν την ενέργειά τους στο αεριώδες υλικό αυτής της ζώνης. Σε αστέρια σαν τον Ήλιο αυτό χαρακτηρίζει το μεγαλύτερο μέρος της δομής τους (σχήμα 3). Άλλα όμως αστέρια με μεγαλύτερη μάζα από τον Ήλιο, αμέσως μετά τον πυρήνα έχουν ένα εκτεταμένο στρώμα ρευμάτων μεταφοράς και σε πολλές περιπτώσεις ένα στενότερο εξωτερικό στρώμα ακτινοβολίας μόλις κάτω από την επιφάνειά τους.



3. Η ΓΕΝΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ

Τα άστρα δημιουργούνται από τη μεσοαστρική ύλη που υπάρχει στους γαλαξίες και η οποία αποτελείται κατά κύριο λόγο από υδρογόνο, ήλιο, και "σκόνη" (συνθετότερα μόρια). Η ύλη αυτή συχνά σχηματίζει τεράστια νέφη, τα οποία έχουν παρατηρηθεί στον γαλαξία μας καθώς επίσης και σε άλλους γαλαξίες. 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 και την αντίστοιχη 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.



Σχήμα 4. Σκοτεινοί σφαιρωτοί σχηματισμοί, όπως φαίνονται μπροστά στο λαμπρό νεφέλωμα Rosette. Οι σχηματισμοί αυτοί ανήκουν στο νεφέλωμα και είναι καθ' οδόν για να δημιουργήσουν νέα αστέρια. Το λαμπρό μέρος του νεφελώματος φωτίζεται από άλλα νέα αστέρια, τα οποία έχουν ήδη σχηματισθεί.

Για να αρχίσει η συστολή απαιτείται ένας αρχικός μηχανισμός συμπίεσης. Η φύση προσφέρει διάφορους τέτοιους μηχανισμούς ικανούς να ξεκινήσουν την αρχική συμπύκνωση. Ένας τρόπος είναι όταν δύο ή περισσότερα νέφη συγκρούονται μεταξύ τους. Τότε, λόγω της σύγκρουσης τα νέφη συμπιέζονται και η πυκνότητά τους αυξάνει. Άλλος τρόπος είναι όταν κοντά σε κάποιο ή κάποια νέφη γίνεται έκρηξη ενός υπερκαινοφανούς αστέρα (supernova). Οι supernova είναι τεράστιες εκρήξεις αστεριών που βρίσκονται στα τελευταία στάδια της ζωής τους. Σε μία τέτοια έκρηξη το μεγαλύτερο μέρος ενός αστεριού (ή και ολόκληρο το αστέρι) διαλύεται και η ύλη του εκσφενδονίζεται βίαια στο διάστημα. Το ωστικό κύμα αυτής της έκρηξης συμπιέζει τα γειτονικά νέφη και δίνει το έναυσμα για τη βαρυτική συστολή. Ένας τρίτος τρόπος είναι όταν στην περιοχή των νεφών έχουν ήδη σχηματισθεί νέα μεγάλα αστέρια. Αυτά τα αστέρια εκπέμπουν τεράστια ποσά ακτινοβολίας, η πίεση της οποίας πάνω στην ύλη των γειτονικών νεφών μπορεί να τα συμπίεσει. Αυτοί οι τρεις τρόποι είναι

μερικοί από τους πολλούς που έχουν προταθεί για την αρχική συμπίεση των νεφών. 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 ξετυλιγόνται 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, όπως είπαμε προηγουμένως, 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. Η συστολή αυτή έχει για συνέπεια την αύξηση της πυκνότητας, καθώς ο όγκος του νέφους όλο και μικραίνει. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου η πυκνότητα να αυξηθεί τόσο, ώστε να πλησιάζει την πυκνότητα των αστεριών. Τα σωματίδια του νέφους βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο και συγκρούονται συνεχώς μεταξύ τους με μεγάλες ταχύτητες, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Το νέφος έχει γίνει πια πολύ μικρό σε σύγκριση με τον αρχικό του όγκο και αρχίζει να ακτινοβολεί. Σ' αυτό το στάδιο ένα πρωτο-άστρο έχει δημιουργηθεί.



Σχήμα 5. Οι Πλειάδες. Πρόκειται για μία ομάδα "νεογέννητων" αστεριών. Γύρω από τα νεαρά αστέρια φαίνεται ακόμα ύλη από το αρχικό νεφέλωμα.

Η συστολή συνεχίζεται με αργότερους ρυθμούς, διότι η αυξανόμενη πίεση στο εσωτερικό αρχίζει να αντιστέκεται στη βαρύτητα. Όταν η πίεση και η θερμοκρασία στο κέντρο του πρωτο-άστρου γίνουν συγκρίσιμες με αυτές στο κέντρο των αστεριών, τότε κάτω από αυτές τις συνθήκες αρχίζουν οι πυρηνικές αντιδράσεις κατά τις οποίες πυρήνες υδρογόνου ενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν πυρήνες ηλίου. Αυτές οι πυρηνικές αντιδράσεις απελευθερώνουν τεράστια ποσά ενέργειας προς τα έξω, που αντισταθμίζουν την βαρύτητα η οποία ενεργεί προς τα μέσα, με αποτέλεσμα να έχουμε μία κατάσταση υδροστατικής ισορροπίας. Ένα αστέρι έχει πια γεννηθεί. Τα μεγάλα νέφη μεσοαστρικής ύλης συνήθως δημιουργούν περισσότερα από ένα αστέρια, ανάλογα με τη μάζα τους. Τότε, μετά την αρχική συμπίεση, δημιουργούνται επί μέρους συμπυκνώσεις που ονομάζονται σφαιροειδείς

σχηματισμοί (globules) όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Ακολούθως, αυτοί οι σχηματισμοί συστέλλονται βαρυτικά και σχηματίζουν ξεχωριστά αστέρια. Έτσι, πολλά αστέρια βρίσκονται σε ομάδες (σχήμα 5). Οι μεγαλύτεροι από αυτούς τους σχηματισμούς ονομάζονται σμήνη και έχουν παρατηρηθεί στον γαλαξία μας και σε άλλους γαλαξίες. Τα μεγαλύτερα από αυτά τα σμήνη είναι δυνατόν να περιέχουν εκατοντάδες χιλιάδες αστέρια.



4. ΑΣΤΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

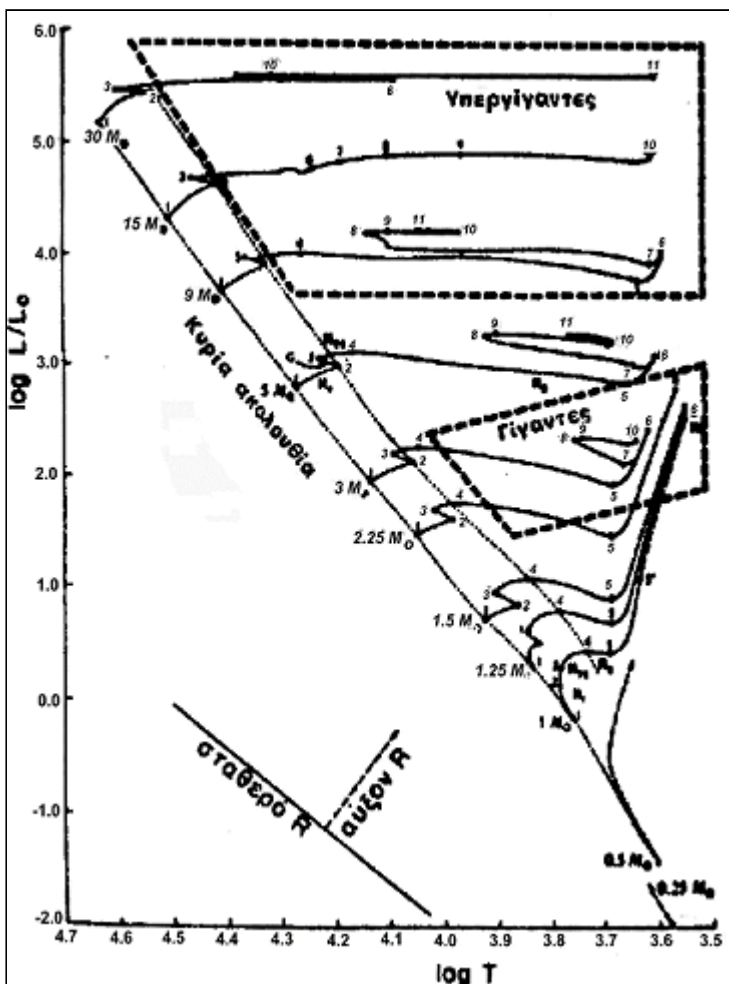
Από τη στιγμή που ένα αστέρι δημιουργεί πυρηνικές αντιδράσεις στον πυρήνα του, αρχίζει να ακτινοβολεί έντονα και ξεκινάει τη ζωή του. Ένα τέτοιο αστέρι βρίσκεται στην κύρια ακολουθία του διαγράμματος H-R (σχήμα 2). Η θέση που έχει ένα αστέρι στην κύρια ακολουθία εξαρτάται από τη μάζα του. Αστέρια με μεγάλη μάζα έχουν μεγάλη βαρύτητα και, άρα, μεγάλη πίεση και θερμοκρασία στον πυρήνα τους. Έτσι οι συγκρούσεις μεταξύ των πυρήνων υδρογόνου είναι συχνότερες και πιο ενεργητικές, με αποτέλεσμα ο ρυθμός μεταστοιχείωσης του υδρογόνου να είναι μεγάλος. Επομένως η παραγωγή και η ακτινοβολία ενέργειας είναι επίσης μεγάλες, έτσι ώστε τα αστέρια με μεγάλη μάζα να έχουν μεγάλη επιφανειακή θερμοκρασία και λαμπρότητα και να βρίσκονται στο επάνω αριστερό μέρος της κύριας ακολουθίας του σχήματος 2. Αντιθέτως, αστέρια με μικρή μάζα ακτινοβολούν λιγότερο και βρίσκονται στο κάτω δεξιό μέρος του διαγράμματος, όπου έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες και λαμπρότητες. Οι μάζες των αστεριών ποικίλουν αλλά εντός συγκεκριμένων ορίων. Υπάρχουν αστέρια με μάζα δεκάδες φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του Ηλίου. Θεωρητικά, ένα αστέρι μπορεί να έχει μάζα μέχρι 70-80 φορές τη μάζα του Ηλίου. Το ανώτερο αυτό όριο επιβάλλεται από την οριακή "λαμπρότητα Eddington". Ο Eddington υπολόγισε ότι αστέρια με μεγαλύτερη από αυτήν την οριακή μάζα θα εξέπεμπαν τόσο έντονη ακτινοβολία, που η πίεσή της επί της ύλης θα έδωχε μακριά τα εξωτερικά στρώματα του αστεριού υπό μορφή ανέμου σωματιδίων. Έτσι, η τελική μάζα του σχηματιζόμενου αστεριού θα ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Στο αντίθετο άκρο, η μικρότερη επιτρεπόμενη αστρική μάζα είναι γύρω στο ένα δέκατο με ένα εικοστό της μάζας του Ηλίου. Αστέρια με μικρότερη μάζα δεν μπορούν να αποκτήσουν αρκετή θερμοκρασία και πίεση στο κέντρο τους για να ξεκινήσουν πυρηνικές αντιδράσεις και καταλήγουν ως "φαιοί νάνοι" και στο τέλος ως "μελανοί νάνοι".

Η μάζα ενός αστεριού δεν καθορίζει μόνο τη θέση του επί της κύριας ακολουθίας, αλλά και την μετέπειτα εξέλιξη του καθώς επίσης και τη διάρκεια της ζωής του και το τέλος του. Λεπτομερείς υπολογισμοί (κατά χρονική ακολουθία) της δομής αστεριών με διαφορετικές μάζες μας δίνουν την εξέλιξη τους στο διάγραμμα H-R (σχήμα 6). Σε γενικές γραμμές η εξέλιξη ενός αστεριού έχει ως ακολούθως: Στην αρχή το άστρο "καίει" με πυρηνικές αντιδράσεις το υδρογόνο στον πυρήνα του και το μετατρέπει σε ήλιο. Αυτή η διαδικασία χαρακτηρίζει το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του και διαρκεί εκατομμύρια ή και δισεκατομμύρια χρόνια (διάστημα 1-2 στις καμπύλες

του σχήματος 6). Στο τέλος αυτής της περιόδου το υδρογόνο του πυρήνα εξαντλείται διότι έχει σχεδόν εξ ολοκλήρου μετατραπεί σε ήλιο. Με την εξάντληση των αποθεμάτων υδρογόνου στον πυρήνα, ο ρυθμός των πυρηνικών αντιδράσεων ελαττώνεται συνεχώς, όπως και η απελευθέρωση θερμοπυρηνικής ενέργειας. Ξαν συνέπεια η βαρύτητα, που είναι συνεχώς παρούσα, αρχίζει πάλι να υπερνικά την εσωτερική πίεση, με αποτέλεσμα τη σταδιακή συστολή του πυρήνα (διάστημα 2-3 στις καμπύλες του σχήματος 6). Εξ'ατίας αυτής της βαρυτικής συστολής, το γειτονικό προς τον πυρήνα στρώμα του αστεριού πλησιάζει προς τα μέσα σε περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας, με συνέπεια οι πυρηνικές καύσεις υδρογόνου να συνεχίζονται σ' αυτόν τον φλοιό που περιβάλλει τον πυρήνα (σημείο 4 στις καμπύλες του σχήματος 6) ο οποίος πια αποτελείται από ήλιο και συνεχίζει να συστέλλεται. Όσο συστέλλεται ο πυρήνας, τόσο η παραγωγή ενέργειας στον φλοιό επιταχύνεται και τα εξωτερικά στρώματα διαστέλλονται με αντίστοιχη ελάττωση της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια του αστεριού (διάστημα 4-5 στις καμπύλες του σχήματος 6).

Σχήμα 6. Η εξέλιξη αστεριών με διαφορετικές μάζες στο διάγραμμα Hertzsprung - Russell. Στον οριζόντιο άξονα είναι η θερμοκρασία και στον κάθετο η λαμπρότητα, με μονάδα την λαμπρότητα του Ηλίου (και οι δύο άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα). Η διαγώνια γραμμή κάτω αριστερά αντιπροσωπεύει αστέρια με ίση ακτίνα. Όσο προχωράει κανείς κατά την διεύθυνση του βέλους αυξάνει η ακτίνα των αστεριών.

Στα τελευταία στάδια αυτής της διαστολής, αέρια ρεύματα μεταφοράς αναπτύσσονται στο μεγαλύτερο μέρος του όγκου του αστεριού έξω από τον πυρήνα, τα οποία μεταφέρουν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας προς τα έξω στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα την αύξηση της λαμπρότητας (διάστημα 5-6 στις καμπύλες του σχήματος 6). Το αστέρι έχει γίνει πια ένας ερυθρός γίγαντας. Αυτό ισχύει για αστέρια με μάζα μέχρι 5-6 ηλιακές μάζες. Στη συνέχεια, με την περαιτέρω συστολή του πυρήνα, η θερμοκρασία αυξάνει τόσο πολύ ώστε το ήλιο στο κέντρο αρχίζει πυρηνικές αντιδράσεις μετατρέπόμενο σε άνθρακα και βαρύτερα στοιχεία. Αυτές οι αντιδράσεις παράγουν περισσότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα το άστρο να γίνεται θερμότερο και λαμπρότερο (διάστημα 6-9 στις καμπύλες του σχήματος 6). Σ' αυτό το στάδιο τα εξωτερικά στρώματα γίνονται αρκετά ασταθή και μπορούν να διαστέλλονται και να συστέλλονται διαδοχικά, με αποτέλεσμα η λαμπρότητα να αυξομειώνεται περιοδικά. Το αστέρι σ' αυτήν τη φάση είναι ένα παλλόμενο μεταβλητό αστέρι. Όταν το ήλιο εξαντληθεί στον πυρήνα, αστέρια με μάζα μεγαλύτερη από τρεις περίπου ηλιακές μάζες μπορούν να αρχίσουν καύση του ηλίου στον φλοιό αμέσως έξω από τον πυρήνα, με συνέπεια περαιτέρω διαστολή, και ενδεχομένως να γίνουν υπεργίγαντες (διάστημα 9-11 στις καμπύλες του σχήματος 6).



Αστέρια με μάζα μεγαλύτερη από 9-10 ηλιακές μάζες μόλις φύγουν απ' την κύρια ακολουθία περνούν απευθείας στην κατηγορία των υπεργίγαντων, λόγω της μεγάλης λαμπρότητάς τους. Απεναντίας, αστέρια με μάζα μικρότερη από 3-4 ηλιακές μάζες δεν φθάνουν ποτέ στο στάδιο του υπεργίγαντα. Η διάρκεια της ζωής των αστεριών εξαρτάται άμεσα από τη μάζα τους. Ένα αστέρι σαν τον Ήλιο ζει περίπου 10 δισεκατομμύρια χρόνια στην κύρια ακολουθία και άλλο ένα περίπου δισεκατομμύριο χρόνια στο στάδιο του ερυθρού γίγαντα. Η ηλικία του δικού μας Ηλίου υπολογίζεται γύρω στα 5 δισεκατομμύρια χρόνια, πράγμα που σημαίνει ότι ο Ήλιος είναι περίπου στα μισά της ζωής του. Από την άλλη πλευρά, ένα αστέρι με μάζα δεκαπλάσια του Ηλίου ζει μόνο 20-30 εκατομμύρια χρόνια συνολικά διότι, λόγω της μεγαλύτερης βαρύτητας, οι πυρηνικές καύσεις γίνονται με πολύ γρηγορότερους ρυθμούς. Η μετέπειτα εξέλιξη των αστεριών, πέρα από τα στάδια που ήδη αναφέραμε, έχει και αυτή άμεση σχέση με τη μάζα τους αν και είναι πιο αβέβαιη.

5. Ο ΘΑΝΑΤΟΣ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΙΩΝ

Μετά το στάδιο του ερυθρού γίγαντα, σε αστέρια σαν τον Ήλιο η περαιτέρω βαρυτική συστολή του πυρήνα, που αποτελείται πια από άνθρακα, δεν μπορεί να δημιουργήσει θερμοκρασίες ικανές να αρχίσουν νέο κύκλο πυρηνικών αντιδράσεων στο κέντρο. Παρόλα αυτά ο πυρήνας συστέλλεται σε μία πολύ συμπιεσμένη κατάσταση και η αύξηση της θερμοκρασίας, παρ' ό,τι δεν μπορεί να προκαλέσει καύση του άνθρακα, εν τούτοις προκαλεί έντονη καύση του

ηλίου στο γειτονικό προς τον πυρήνα στρώμα. Αποτέλεσμα αυτής της έντονης παραγωγής ενέργειας είναι η μεγάλη διαστολή και βαθμιαία ψύξη των εξωτερικών στρωμάτων. Αυτή τη φορά η διαστολή είναι τόσο μεγάλη, ώστε τα εξωτερικά στρώματα διαχωρίζονται από τον πυρήνα και σταδιακά γίνονται ένα διαφανές πλανητικό νεφέλωμα (σχήμα 7). Ο πυρήνας, έχοντας χάσει το περίβλημά του, είναι ορατός σαν ένας θερμός (10.000 βαθμούς ή και περισσότερο) και πολύ πυκνός λευκός νάνος. Αστέρια με μάζα μικρότερη από το ένα τρίτο περίπου της μάζας του Ηλίου δεν φθάνουν καν στο στάδιο της καύσης ηλίου προς άνθρακα, λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών στο κέντρο τους. Αυτά συνεχίζουν τη βαρυτική συστολή προς το στάδιο του λευκού νάνου χωρίς να διώξουν το περίβλημα του πυρήνα τους.

Όπως είπαμε και στην εισαγωγή, οι λευκοί νάνοι είναι πολύ μικρά αστέρια με μέγεθος σαν της Γης ή και μικρότερο, ενώ η μάζα τους είναι συγκρίσιμη με τη μάζα του Ηλίου. Σαν συνέπεια, η πυκνότητά τους φθάνει τα 10 με 100 εκατομμύρια γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό.



Σχήμα 7. Το πλανητικό νεφέλωμα Dumbbell. Στο κέντρο φαίνεται το αστέρι που το δημιούργησε. Τα εξωτερικά στρώματα του αστεριού έχουν διασταλεί και είναι ήδη διαφανή.

Αν μπορούσαμε να ζυγίσουμε ποσότητα από το κέντρο ενός λευκού νάνου ίση με μία μικρή κουταλιά, αυτή θα ζύγιζε εκατό τόνους! Σε τέτοιες πυκνότητες η ύλη παύει να συμπεριφέρεται ως συνήθως. Σε αντίθεση με τα συνηθισμένα αέρια, τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να κινούνται τελείως τυχαία αλλά υπόκεινται σε περιορισμούς λόγω της πυκνής παρουσίας άλλων ηλεκτρονίων σε πολύ περιορισμένο χώρο. Εξ αιτίας αυτής της πυκνής παρουσίας, πολύ λιγότερος χώρος είναι διαθέσιμος για κάθε ηλεκτρόνιο και σ' αυτήν την περίπτωση οι αρχές της κβαντομηχανικής επιβάλλουν ότι ο επιτρεπόμενος αριθμός ταχυτήτων και ενεργειών ενός ηλεκτρονίου ελαττώνεται. Ένα τέτοιο υλικό ονομάζεται εκφυλισμένο αέριο ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια κατανέμονται ομοιογενώς στο χώρο ανάμεσα στους ατομικούς πυρήνες, οι οποίοι βρίσκονται σε τακτές σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους ώστε μάλλον θυμίζουν ένα κρυσταλλικό στερεό (ονομαζόμενο κβαντικό στερεό). Η πίεση του εκφυλισμένου αερίου ηλεκτρονίων είναι

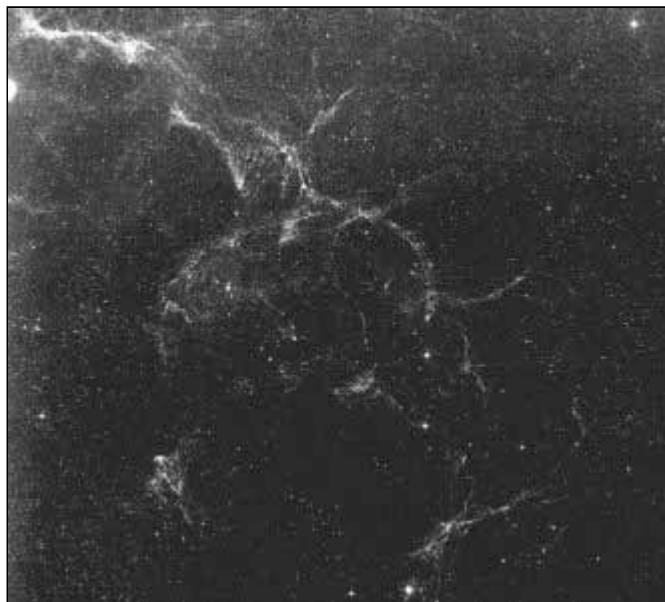
τόσο ισχυρή, που εμποδίζει την περαιτέρω βαρυτική συστολή. Έτσι, αστέρια που στο τελικό τους στάδιο έχουν μάζα μικρότερη από 1.4 ηλιακές μάζες (όριο του Chandrasekhar), παραμένουν σταθεροί λευκοί νάνοι. Από τη στιγμή που η βαρυτική συστολή σταματάει, δεν υπάρχει πια παραγωγή εσωτερικής ενέργειας και το άστρο βαθμιαία ψύχεται. Αυτή η ψύξη είναι τόσο αργή, που παίρνει 10 δισεκατομμύρια χρόνια για να πέσει η θερμοκρασία στους 3.000 βαθμούς. Στο τέλος το άστρο θα ακτινοβολήσει σταδιακά όλα τα ενεργειακά αποθέματα ακτινοβολίας του και θα γίνει ένας μελανός νάνος. Το αστέρι έχει πια πεθάνει.

Αστέρια με μεγαλύτερες μάζες, μετά το στάδιο του ερυθρού γίγαντα αναπτύσσουν τόσο μεγάλες θερμοκρασίες στο κέντρο τους (3 δισεκατομμύρια βαθμούς ή και περισσότερο) ώστε ο άνθρακας και τα άλλα προϊόντα της καύσης του ηλίου αντιδρούν και σχηματίζουν βαρύτερα στοιχεία, με αποτέλεσμα στο τέλος ο αστρικός πυρήνας να περιέχει ένα μίγμα από βαρύτερα στοιχεία προεξάρχοντος του σιδήρου. Η παραγωγή ενέργειας είναι τόσο έντονη και η επιφανειακή θερμοκρασία τόσο υψηλή, που τα επιφανειακά στρώματα "εξατμίζονται" στο διάστημα υπό μορφή αστρικού ανέμου. Όταν το μεγαλύτερο ποσοστό της ύλης στον πυρήνα έχει μετατραπεί σε σίδηρο, τότε οι πυρηνικές αντιδράσεις μειώνονται, επειδή ο σίδηρος για να αντιδράσει και να σχηματίσει βαρύτερα στοιχεία δεν απελευθερώνει αλλά αντιθέτως απορροφά ενέργεια. Από αυτό το σημείο και μετά ο πυρήνας συστέλλεται συνεχώς λόγω της βαρύτητας. Εάν σ' αυτό το στάδιο η μάζα του πυρήνα είναι μεγαλύτερη από 1.4 ηλιακές μάζες, τότε η πίεση του εκφυλισμένου αερίου ηλεκτρονίων δεν επαρκεί για να σταματήσει τη συστολή και να σχηματίσει ένα λευκό νάνο. Ο ρυθμός συστολής επιταχύνεται συνεχώς και τα εξωτερικά στρώματα πέφτουν επίσης προς το κέντρο. Αυτό το στάδιο ονομάζεται βαρυτική κατάρρευση του αστεριού. Στο κέντρο του τα ηλεκτρόνια ενώνονται με τα πρωτόνια στους πυρήνες των ατόμων και σχηματίζουν νετρόνια με ραγδαίους ρυθμούς, και έτσι δεν υπάρχει πια εκφυλισμένο αέριο για να στηρίξει με την πίεσή του τα ανώτερα στρώματα. Τελικά, όλη η ύλη του αστεριού καταρρέει προς το κέντρο εκτελώντας σχεδόν ελεύθερη πτώση! Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου τα νετρόνια στον πυρήνα πλησιάσουν τόσο κοντά το ένα με το άλλο, ώστε να σχηματίσουν ένα ασυμπίεστο εκφυλισμένο αέριο νετρονίων. Εάν η μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από περίπου 2.5 ηλιακές μάζες, η πίεση αυτού του εκφυλισμένου αερίου σταματάει απότομα την κατάρρευση. Ο αστρικός πυρήνας θυμίζει ένα γιγαντιαίο ατομικό πυρήνα. Επειδή λόγω αρχικής ταχύτητας ο πυρήνας συμπιέζεται στιγμιαία λίγο περισσότερο από τις συνήθεις πυρηνικές πυκνότητες στα άτομα, ακολουθεί μία εκτίναξη προς τα έξω που επαναφέρει τον πυρήνα στην κανονική πυρηνική πυκνότητα (κάτι ανάλογο με μία λαστιχένια μπάλα που "γκελάρει"). Τα εξωτερικά στρώματα όμως συνεχίζουν την πτώση προς τα μέσα. Στο σημείο που αυτά τα δύο αντιθέτως κινούμενα "κύματα ύλης" συγκρούονται, η πίεση αυξάνει ακαριαία. Η πυκνότητα του πυρήνα που "γκελάρει" είναι τρομακτικά μεγαλύτερη από την πυκνότητα των προσπιπόντων εξωτερικών στρωμάτων, με αποτέλεσμα όλη η τεράστια ενέργεια αυτής της σύγκρουσης να μεταδίδεται στα εξωτερικά στρώματα, τα οποία εκτινάσσονται προς τα έξω. Η εκτίναξη αυτή

επιταχύνεται περαιτέρω από τεράστιο αριθμό σωματιδίων που εκσφενδονίζονται από τον πυρήνα προς τα έξω. Πρόκειται για στοιχειώδη σωματίδια που ονομάζονται νετρίνα και απελευθερώνονται κατά την ένωση πρωτονίων και ηλεκτρονίων προς σχηματισμό νετρονίων. Η τελική έκρηξη είναι τόσο σφοδρή και βίαιη, που διαλύει τελείως το μεγαλύτερο μέρος του αστεριού και ονομάζεται έκρηξη *supernova*. Τέτοιες αστρικές εκρήξεις είναι σπάνιες αλλά έχουν παρατηρηθεί τόσο στο δικό μας όσο και σε άλλους γαλαξίες. Προσωρινά το αστέρι που εκρήγνυται μπορεί να γίνει λαμπρότερο από όλον τον υπόλοιπο γαλαξία στον οποίο ανήκει! Κατά την έκρηξη, λόγω της τεράστιας ενέργειας που απελευθερώνεται, τα άτομα του αστρικού περιβλήματος που εκτινάσσεται αντιδρούν μεταξύ τους και σχηματίζουν στοιχεία βαρύτερα και από τον σίδηρο, εμπλουτίζοντας έτσι τον γύρω διαστημικό χώρο. Διαστελλόμενα σφαιρικά "κελύφη" ύλης από εκρήξεις του παρελθόντος έχουν παρατηρηθεί στον γαλαξία μας και έχουν φωτογραφηθεί, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8. Αυτά τα εμπλουτισμένα κύματα ύλης, με τη σειρά τους, όταν συναντήσουν γειτονικά νέφη θα προκαλέσουν την γέννηση νέων αστεριών με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε βαρέα στοιχεία και ούτω καθ' εξής. Έτσι, κάθε καινούρια γενιά αστεριών περιέχει συγκριτικά μεγαλύτερο ποσοστό βαρέων στοιχείων από την προηγούμενή της.

Σχήμα 8. Διαστελλόμενο κέλυφος ενός *supernova* στον αστερισμό του Κύκνου. Το κέλυφος είναι το υπόλειμμα ενός αστεριού που εξερράγη κατά την προϊστορική εποχή.

Το αστρικό υπόλειμμα που παραμένει μετά από μία έκρηξη *supernova* έχει δύο πιθανές καταλήξεις. Εάν η μάζα του είναι μικρότερη από 2.5 ηλιακές μάζες περίπου, όπως είπαμε και προηγουμένως, τότε σχηματίζεται ένα άστρο νετρονίων. Τέτοια άστρα έχουν παρατηρηθεί και είναι τα λεγόμενα *pulsars* (παλλόμενες ραδιοπηγές). Τα άστρα αυτά περιστρέφονται με πολύ μεγάλη ταχύτητα λόγω του μικρού μεγέθους τους και εκπέμπουν παλμούς ακτινοβολίας από τους περιστρεφόμενους μαγνητικούς πόλους τους, επειδή ο άξονας περιστροφής τους συνήθως δεν συμπίπτει με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου τους. Πρόκειται για μία πολύ πυκνή κατάσταση της ύλης, όπου μπορεί να έχουμε μάζα ίση με τη μάζα του Ηλίου και ακτίνα μόλις 10 χιλιόμετρα (περίπου σαν την Αθήνα!). Στο αντίστοιχο με την ύλη του λευκού νάνου παράδειγμα, εάν είχαμε μία μικρή κουταλιά από την ύλη ενός άστρου νετρονίων, τότε αυτή θα ζύγιζε 5 δισεκατομμύρια τόνους! Εάν όμως η μάζα του υπολείμματος μετά την έκρηξη είναι



μεγαλύτερη από 2.5 ηλιακές μάζες, τότε ούτε αυτή ακόμα η πίεση του εκφυλισμένου αερίου νετρονίων δεν μπορεί να σταματήσει την κατάρρευση. Σ' αυτή την περίπτωση θεωρητικά η κατάρρευση καταλήγει σε ένα μαθηματικό σημείο στο κέντρο του αστεριού. Όλη η ύλη συγκεντρώνεται σ' αυτό το σημείο και η πυκνότητα γίνεται άπειρη. Τότε λέμε ότι σχηματίστηκε μία μαύρη τρύπα. Στην πραγματικότητα δεν ξέρουμε τι ακριβώς συμβαίνει, διότι δεν υπάρχει τρόπος να πάρουμε πληροφορίες μέσα από μία οριακή επιφάνεια, που ονομάζεται ορίζοντας γεγονότων. Η βαρύτητα μιας μαύρης τρύπας είναι τόσο ισχυρή, που στην απόσταση του ορίζοντα γεγονότων ούτε το φως δεν μπορεί να υπερνικήσει τη βαρύτητα. Επομένως, τίποτα απολύτως δεν μπορεί να βγει έξω από μία μαύρη τρύπα (γι' αυτό και ονομάζεται έτσι). Έμμεσες παρατηρήσεις μας επιτρέπουν να συμπεράνουμε εάν κάποιο ουράνιο σώμα είναι μαύρη τρύπα. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν αστέρια που από την φασματοσκοπία έχει βρεθεί ότι είναι διπλά και το ένα περιφέρεται γύρω από το άλλο, λόγω της αμοιβαίας έλξης τους. Από τα φάσματά τους μπορούμε να μετρήσουμε τις ταχύτητες περιφοράς τους και από εκεί, μέσω των νόμων της δυναμικής του Kepler, να συμπεράνουμε τις μάζες τους. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις παρατηρούμε το φάσμα μόνο ενός αστεριού, που μεταβάλλεται κατά τρόπο που αποδεικνύει περιφορά γύρω από άλλο σώμα το οποίο όμως δεν είναι ορατό. Μετρήσεις της μάζας του "αόρατου" σώματος μέσω των νόμων του Kepler, μας δίνουν μάζες μεγαλύτερες από 2.5 ηλιακές μάζες. Τότε έχουμε μία σοβαρή ένδειξη ότι πρόκειται για μαύρη τρύπα. Επί πλέον, εάν σε τέτοιου είδους διπλά συστήματα τα δύο σώματα είναι πολύ κοντά το ένα με το άλλο, τότε η μαύρη τρύπα, λόγω της ισχυρής βαρύτητάς της, βαθμιαία απορροφά ύλη από τα εξωτερικά στρώματα του άλλου αστεριού υπό μορφή αερίου ρεύματος. Το ρεύμα αυτό, λόγω της περιστροφής, σχηματίζει έναν αέριο δίσκο γύρω από τη μαύρη τρύπα. Ακολούθως, η ύλη του δίσκου συγκλίνει σπειροειδώς προς το κέντρο και τελικά πέφτει μέσα στη μαύρη τρύπα. Στο εσωτερικό μέρος του δίσκου, λίγο πριν η ύλη πέσει στη μαύρη τρύπα, αναπτύσσονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες από τις "τριβές" μεταξύ των ατόμων, με αποτέλεσμα η ύλη να εκπέμπει έντονες ακτίνες - X. Εάν λοιπόν έχουμε ένα αστρικό ζεύγος όπου το ένα μέλος είναι "αόρατο" αλλά η μετρούμενη μάζα του είναι μεγαλύτερη από 2.5 ηλιακές μάζες, και επί πλέον έχουμε έντονη εκπομπή ακτίνων - X, τότε όλα αυτά είναι ισχυρές ενδείξεις ότι πρόκειται για μαύρη τρύπα. Σήμερα είμαστε σχεδόν σίγουροι για τέσσερις τουλάχιστον τέτοιες περιπτώσεις στο γαλαξία μας και σε ένα γειτονικό γαλαξία, ενώ έχουμε σοβαρές υποψίες για τουλάχιστον άλλα είκοσι τέτοια αντικείμενα.

Οι τρεις προαναφερθείσες αστρικές κατηγορίες, δηλαδή λευκοί νάνοι (μετέπειτα μελανοί νάνοι), άστρα νετρονίων, και μαύρες τρύπες αποτελούν το τελευταίο στάδιο της εξέλιξης των αστεριών. Με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας που σχετίζεται με τις αστρονομικές παρατηρήσεις, είναι βέβαιο ότι θα μαθαίνουμε όλο και περισσότερες λεπτομέρειες για τη γέννηση, τη ζωή και το θάνατο των αστεριών. Η ζωή των αστεριών δεν είναι

τίποτα άλλο παρά διάφορες καταστάσεις συνεχούς πάλης και ισορροπίας μεταξύ της βαρύτητας, από τη μια πλευρά, και των πυρηνικών και ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων από την άλλη. Τι είδους αστρικό "πτώμα" θα αφήσει πίσω του ένα αστέρι εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μάζα του. Είναι χαρακτηριστικό ότι η δύναμη που προκαλεί την γέννηση των αστεριών από τη μεσοαστρική ύλη, δηλαδή η βαρύτητα, είναι η ίδια η οποία στο τέλος επιφέρει και το θάνατό τους.



6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γενική βιβλιογραφία

- * Abell, G.O.: Realm of the Universe, 3rd ed., Philadelphia, Saunders College Publishing, 1984.
- * Κωτσάκης, Δ.: Νέοι Ορίζοντες στην Αστρονομία, Αθήνα, 1976.
- * Pasachoff, J.M.: Contemporary Astronomy, Philadelphia, W.B. Saunders, 1977.
- * Protheroe, W.M., Capriotti, E.R., and Newsom, G.H.: Exploring the Universe, 3rd ed., Ohio State University, Columbus, C.E. Merrill Publishing Co., 1984.
- * Smith, E.v.P. and Jacobs, K.C.: Introductory Astronomy and Astrophysics, Philadelphia, W.B. Saunders Co., 1973.

Ειδική βιβλιογραφία

- * Chandrasekhar, S.: An Introduction to the Study of Stellar Structure, Chicago, University of Chicago Press, Reprinted by Dover, New York, 1967.
- * Clayton, D.D.: Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, Chicago, The University of Chicago Press, 1983.
- * Κωτσάκης, Δ.: Αστέρες, 6η έκδ., Αθήνα, 1980.
- * Novotny, E.: Introduction to stellar atmospheres and interiors, Oxford, Oxford University Press, 1973.
- * Schwarzschild, M.: Structure and Evolution of the Stars, Princeton, Princeton University Press, Reprinted by Dover, New York, 1965.