

Ανάλυση Δεδομένων - Εφαρμογή στην Αστροφυσική

1. Δομή και εξέλιξη αστέρων

Σε αυτό το project θα μελετήσουμε την εξέλιξη αστέρων μικρής και μεγάλης μάζας. Συγκεκριμένα, σας έχουν δωθεί δύο σύνολα δεδομένων (`1msun.csv` και `30msun.csv`) τα οποία περιέχουν διάφορα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και του εσωτερικού δύο αστέρων. Το πρώτο σύνολο δεδομένων αφορά έναν αστέρα παρόμοιο με τον Ήλιο, και έχει μάζα $1 M_{\odot}$. Το δεύτερο σύνολο δεδομένων αφορά έναν πιο μαζικό αστέρα με μάζα $30 M_{\odot}$.

Τα δεδομένα αυτά δημιουργήθηκαν μέσω λογισμικού προσομείωσης αστρικών μοντέλων όπου οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δομή και την εξέλιξη του αστέρα λύνονται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Για περισσότερες πληροφορίες δείτε [εδώ \(https://docs.mesastar.org/en/release-r22.05.1/\)](https://docs.mesastar.org/en/release-r22.05.1/).

Το ζητούμενο είναι να διαβάσετε τα αρχεία που σας δίνονται και να τα **επεξεργαστείτε κατάλληλα** εστιάζοντας σε διάφορα εξελικτικά στάδια (π.χ. κύρια ακολουθία, κλάδος γιγάντων κτλ). Δώστε μεγάλη προσοχή στο στάδιο της προεπεξεργασίας και του καθαρισμού των δεδομένων καθώς μπορεί να υπάρχουν έκτοπες ή μη-έγκυρες τιμές.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Δημιουργία πρωτοαστέρων

Οι αστέρες δημιουργούνται κατά κανόνα από τη μεσοαστρική ύλη που υπάρχει στους γαλαξίες και η οποία αποτελείται κυρίως από υδρογόνο, ήλιο και μοριακή σκόνη. Η ύλη αυτή συχνά σχηματίζει νεφελώματα πολύ μεγάλων διαστάσεων και χαμηλής πυκνότητας (μοριακά νέφη υδρογόνου-HII). Είναι γενικά παραδεκτό ότι διαταραχές (π.χ. από σύγκρουση νεφών, εκρήξεις υπερκαινοφανών κτλ) μπορούν να προκαλέσουν συμπίεση και να επιφέρουν βαρυτική κατάρρευση σε μέρη του νέφους, δημιουργώντας έτσι περιοχές αστρογέννησης.

Αυτή η βαρυτική κατάρρευση του νέφους έχει ως επακόλουθο την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πρωτοαστέρα έως ότου ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή ($\sim 10^7$ K) όπου και ξεκινάει η εξώθερμη σύντηξη του υδρογόνου. Όταν συμβεί αυτό έχουμε ανάσχεση της βαρυτικής κατάρρευσης καθώς επιτυγχάνεται θερμική και υδροστατική ισορροπία και ο αστέρας αρχίζει τη σταδιοδρομία του στην **κύρια ακολουθία** (main sequence). Όσο πιο μεγάλη μάζα έχει ένας αστέρας όταν φτάσει στην κύρια ακολουθία, τόσο πιο θερμός και πιο φωτεινός είναι. Επομένως, οι αστέρες μεγάλης μάζας εγκαθίστανται στο πάνω αριστερό τμήμα της κύριας ακολουθίας όπως αυτή φαίνεται στο διάγραμμα Hertzsprung-Russell (HR, δεξ παρακάτω), ενώ οι αστέρες μικρής μάζας στο κάτω δεξιό τμήμα.

Η στιγμή της έναρξης της μεταστοιχείωσης του υδρογόνου στον πυρήνα του αστέρα, που συμπίπτει με την εγκατάστασή του στην κύρια ακολουθία, θεωρείται η αρχή της ζωής του, αντιστοιχεί δηλαδή σε μηδενική ηλικία. Η πορεία, στο διάγραμμα HR, που ακολούθησε ο πρωτοαστέρας από τη στιγμή της δημιουργίας του μέχρι να φτάσει στη φάση ενός άστερα μηδενικής ηλικίας ονομάζεται **πορεία Hayashi** (Hayashi track).

Ο γεωμετρικός τόπος των θέσεων όλων των αστέρων μηδενικής ηλικίας στο διάγραμμα HR ονομάζεται **κύρια ακολουθία μηδενικής ηλικίας** (zero age main sequence - ZAMS).

Εξέλιξη μετά την κύρια ακολουθία

Στο μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους, οι αστέρες "καίνε" το υδρογόνο τους μετατρέποντάς το σε ήλιο σύμφωνα με τον κύκλο πρωτονίου-πρωτονίου ([pp-chain](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain) (https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain)) ή με τον κύκλο άνθρακα ([CNO-cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle) (https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle)). Όταν ένα σημαντικό ποσοστό του υδρογόνου μετασχηματισθεί σε ήλιο, ο ρυθμός των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων ελαττώνεται και γίνεται μικρότερος από το ρυθμό με τον οποίο ακτινοβολείται η ενέργεια από την επιφάνεια του άστρου. Έτσι, υπό την επίδραση της βαρύτητας και μέσω του μηχανισμού Kelvin-Helmholtz (δες θεώρημα virial), η θερμοκρασία αυξάνεται και ξεκινά η καύση του ηλίου σε άνθρακα ([triple-alpha-process](https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process) (https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process)) με τη προϋπόθεση ότι η μάζα του αστέρα δεν είναι εξαιρετικά μικρή ($< 0.4 M_{\odot}$).

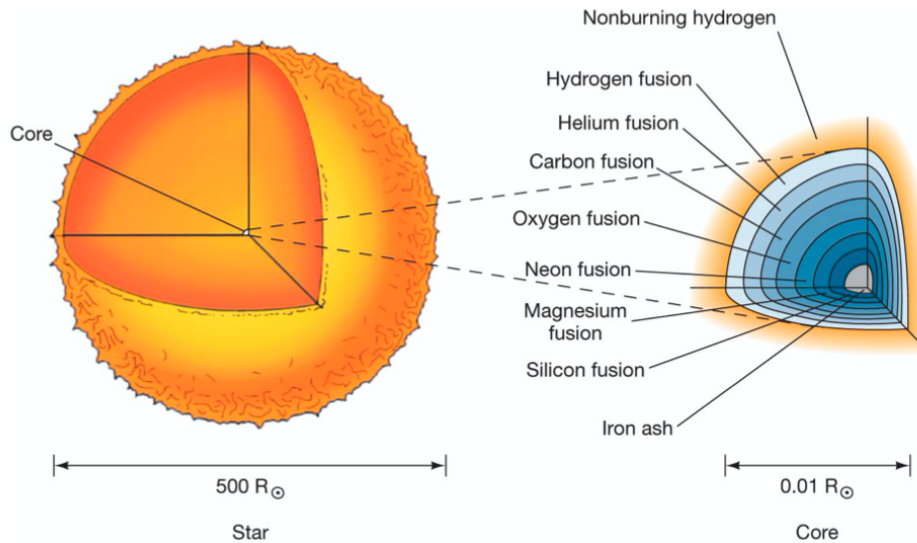
Η ενέργεια που παράγεται στον πυρήνα εξωθεί τα υπερκείμενα στρώματα με αποτέλεσμα την τεράστια διόγκωση του αστέρα και τη μετατροπή του σε **ερυθρό γίγαντα**. Από τη φάση του ερυθρού γίγαντα και μετά, ανάλογα με τη μάζα ενός αστέρα διαφοροποιείται και η εξέλιξή του.

- **Αστέρες μικρής μάζας.** Όταν όλο το ήλιο που βρίσκεται στον πυρήνα εξαντληθεί έχοντας μετατραπεί σε άνθρακα και οξυγόνο, ξεκινά η καύση του ηλίου που εντοπίζεται στον *εξωτερικό φλοιό* του αστρικού πυρήνα, ενώ υπάρχει ακόμα και ένας φλοιός που "καίει" υδρογόνο και περιβάλλει τον προηγούμενο φλοιό. Σε αυτό το στάδιο, με τα δύο κέντρα καύσης να βρίσκονται εκτός του κέντρου του αστέρα, ο αστέρας φαίνεται να κινείται ασυμπτωτικά στο HR και να ξαναμπαίνει στον κλάδο των γιγάντων. Γι' αυτό ονομάζεται και **ασυμπτωτικός κλάδος γιγάντων** (asymptotic giant branch - AGB).

Αυτοί οι αστέρες αναπτύσσουν εξαιρετικά δυνατούς αστρικούς ανέμους όταν φτάσουν στη φάση του ερυθρού (υπερ)γίγαντα και χάνουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ένα μεγάλο ποσοστό της μάζας τους. Λόγω των μεγάλων διαστάσεων του αστέρα (και άρα χαμηλής επιφανειακής βαρύτητας) και του ισχυρού αστρικού ανέμου, τα εξωτερικά στρώματα διασκορπίζονται στο διάστημα σχηματίζοντας ένα **πλανητικό νεφέλωμα**, ενώ ταυτόχρονα αρχίζει να φαίνεται ο απογυμνωμένος, θερμός πυρήνας του άστρου. Τελικά, ο απογυμνωμένος πυρήνας θα ακτινοβολήσει την εναπομείνουσα ενέργειά του και θα είναι ορατός ως **λευκός νάνος** που αποτελείται κυρίως από άνθρακα και οξυγόνο.

- **Αστέρες μεγάλης μάζας.** Μέχρι το στάδιο του ερυθρού γίγαντα, η εξέλιξη των αστέρων μεγάλης μάζας θυμίζει ποιοτικά την εξέλιξη αστέρων μικρότερης μάζας με μόνο μικρές (αλλά σημαντικές) διαφορές. Η χαρακτηριστική διαφορά είναι ότι, μετά την εξάντληση των αποθεμάτων άνθρακα και οξυγόνου η θερμοκρασία του πυρήνα είναι πολύ υψηλή και ξεκινάει η μετασχηματισμός τους στο επόμενο βαρύτερο στοιχείο, το πυρίτιο. Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του πυρήνα, οι διαδοχικές μετασχηματισμοί προχωρούν μέχρι το σχηματισμό σιδήρου. Σε αυτό το σημείο, η διαδικασία της πυρηνοσύνθεσης μέσω σύντηξης διακόπτεται καθώς η θερμοπυρηνική σύντηξη πυρήνων σιδήρου είναι μία ενδόθερμη αντίδραση. Σε αυτό το στάδιο, η δομή ενός αστέρα θυμίζει αυτή ενός κρεμμυδιού καθώς αποτελείται από πολλά διαφορετικά στρώματα-φλοιούς.

Η συνέχεια είναι σε κάθε περίπτωση, κυριολεκτικά, καταστροφική για τον αστέρα, καθώς αυτός θα καταρρεύσει και θα εκραγεί σε μία έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova) ενώ το τελικό αστρικό κατάλοιπο από αυτή την έκρηξη θα είναι είτε ένας **αστέρας νετρονίων** είτε μία **μελανή οπή**.



1.1 Αστέρες μεγάλης μάζας

Ένα από τα βασικότερα εργαλεία στη θεωρία της αστρικής εξέλιξης είναι το διάγραμμα Hertzsprung-Russell (HR). Το HR είναι ουσιαστικά ένα γράφημα με την ενεργό θερμοκρασία του αστέρα στον x -άξονα (παραδοσιακά αυξάνεται από δεξιά προς τα αριστερά) και την φωτεινότητα του αστέρα στον y -άξονα.

Στόχος μας είναι να κατασκευάσουμε το HR διάγραμμα για έναν αστέρα με μάζα $M = 30 M_{\odot}$, και να αναγνωρίσουμε σε αυτό **τρία εξελεκτικά στάδια**: τη πορεία Hayashi, τη κύρια ακολουθία και τον κλάδο των γιγάντων.

Αρχικά, αφού επεξεργαστείτε κατάλληλα τα δεδομένα σας προσέχοντας για μη-έγκυρες τιμές, **φτιάξτε ένα γράφημα** που θα δείχνει την εξέλιξη του χημικού προφίλ του πυρήνα του αστέρα. Αυτό είναι ένα διάγραμμα διάφορων χημικών στοιχείων (υδρογόνο, ήλιο, άνθρακας κτλ) ως συνάρτηση της ηλικίας (χρόνου) του αστέρα. Μπορείτε να ερμηνεύσετε τη σημασία του;

Στη συνέχεια **φιλτράρετε** τα δεδομένα σας ώστε να τα χωρίσετε σε αυτά που περιγράφουν την εξέλιξη του αστέρα από την γέννηση μέχρι την κύρια ακολουθία, σε αυτά που περιγράφουν την παραμονή του στην κύρια ακολουθία, και σε αυτά που περιγράφουν την εξέλιξη του αστέρα μετά την κύρια ακολουθία. Για την τελευταία περίπτωση, μία καλή υπόθεση που μπορείτε να κάνετε για να φιλτράρετε τα δεδομένα σας είναι ότι η κορυφή του κλάδου του γιγάντων είναι εκεί όπου ο αστέρας φτάνει τη μέγιστη φωτεινότητά του για πρώτη φορά.

Έχοντας φιλτράρει με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα σας, βρείτε **πόσο διαρκεί η φάση της κύριας ακολουθίας** καθώς και τι επιφανειακή θερμοκρασία, φωτεινότητα και ακτίνα έχει ο αστέρας όταν εξέρχεται από αυτήν. Συγκρίνετε αυτές τις τιμές με τη μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία, φωτεινότητα και ακτίνα που φτάνει ο αστέρας κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Τέλος, κατασκευάστε το διάγραμμα HR του αστέρα με τα τρία διαφορετικά στάδια να παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα. Μπορείτε να το ερμηνεύσετε;

1.2 Αστέρες μικρής μάζας

Απαντήστε στα ίδια ερωτήματα με αυτά της ενότητας 1.1, αλλά χρησιμοποιώντας δεδομένα για αστέρα με μάζα $M = 1 M_{\odot}$.

Πλέον, όμως, θα πρέπει να αναγνωρίσετε **τέσσερα εξελεκτικά στάδια**, διαχωρίζοντας τον **κλάδο των γιγάντων** από τον **ασυμπτωτικό κλάδο των γιγάντων**.

Συγκρίνετε όλα τα αποτελέσματά σας με τα αντίστοιχα που υπολογίσατε για τον πιο μαζικό αστέρα. Τι συμπεράσματα μπορείτε να βγάλετε;

Δεδομένου ότι αυτό το αστρικό μοντέλο είναι αντιπροσωπευτικό για το πως θα εξελιχθεί ο Ήλιος, βρείτε βάσει αυτού του μοντέλου, την τωρινή ηλικία και επιφανειακή θερμοκρασία του Ήλιου.
