

ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΑΣΤΕΡΩΝ 2024-25

ΕΡΓΑΣΙΑ 2

1. Εξηγήστε γιατί το Tip of the Red Giant Branch χρησιμοποιείται σαν standard candle. Ωστόσο υπάρχουν περιορισμοί στη χρήση αυτού του δείκτη απόστασης. Για μία πολύ πρόσφατη σχετική συζήτηση δείτε την εργασία

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ad284d> και προσπαθείστε να περιγράψετε συνοπτικά τα συμπεράσματά της.

2. «Dredge-up» συμβαίνει σε ένα άστρο όταν μια επιφανειακή ζώνη μεταφοράς (convection zone) εκτείνεται προς τα κάτω σε περιοχές όπου το υλικό έχει υποστεί πυρηνική σύντηξη, και ως αποτέλεσμα, τα προϊόντα της σύντηξης αναμιγνύονται με τα εξωτερικά στρώματα της ατμόσφαιρας του άστρου. Ένα άστρο ενδιάμεσης μάζας ($2M_{\odot} \leq M \leq 8M_{\odot}$) πιστεύεται ότι βιώνει τρία επεισόδια dredge-up κατά την εξέλιξή του. Για κάθε τέτοιο επεισόδιο περιγράψτε συνοπτικά:

- (i) την εξελικτική κατάσταση του άστρου,
- (ii) τη δομή του, και
- (iii) τα προϊόντα που φέρνονται στην επιφάνεια.

Ειδικά για το τρίτο και σημαντικότερο dredge up μπορείτε να δείτε τη πρόσφατη εργασία <https://academic.oup.com/mnras/article/527/4/9643/7491079> και να αναφερθείτε πολύ συνοπτικά στα κύρια συμπεράσματά της.

3. Σε μια προσπάθεια να ταυτοποιήσουν τα σημαντικά χαρακτηριστικά της απώλειας μάζας στον ασυμπτωτικό κλάδο των γιγάντων (ΑΚΓ), πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει παραμετροποιήσεις του ρυθμού απώλειας μάζας οι οποίοι βασίζονται στην προσαρμογή των παρατηρούμενων ρυθμών για ένα συγκεκριμένα σύνολο άστρων με κάποια γενική εξίσωση που περιλαμβάνει μετρήσιμες ποσότητες που σχετίζονται με τα άστρα στο δείγμα. Μία από τις πιο δημοφιλείς, που αναπτύχθηκε από τον D. Reimers, δίνεται από την σχέση

$$\dot{M} = -4 \times 10^{-13} \eta \frac{L}{gR} M_{\odot} \text{yr}^{-1} \quad (1)$$

όπου L , g και R είναι η φωτεινότητα, η επιφανειακή βαρύτητα και η ακτίνα του άστρου αντίστοιχα (όλες οι ποσότητες δίνονται σε ηλιακές μονάδες. Δίνεται ότι $g_{\odot} = 274 \text{ms}^{-2}$). Το η είναι μία ελεύθερη παράμετρος της οποίας η τιμή είναι κοντά στη μονάδα. Σημειώστε ότι το αρνητικό πρόσημο έχει συμπεριληφθεί ρητά εδώ, υποδηλώνοντας ότι η μάζα του άστρου μειώνεται.

(α) Εξηγήστε ποιοτικά γιατί οι ποσότητες L , g και R εισέρχονται στην Εξ. (1) με αυτό τον τρόπο.

(β) Εκτιμήστε τον ρυθμό απώλειας μάζας για ένα άστρο $1M_{\odot}$ στον ΑΚΓ το οποίο έχει φωτεινότητα $7000 L_{\odot}$ και θερμοκρασία 3000 K .

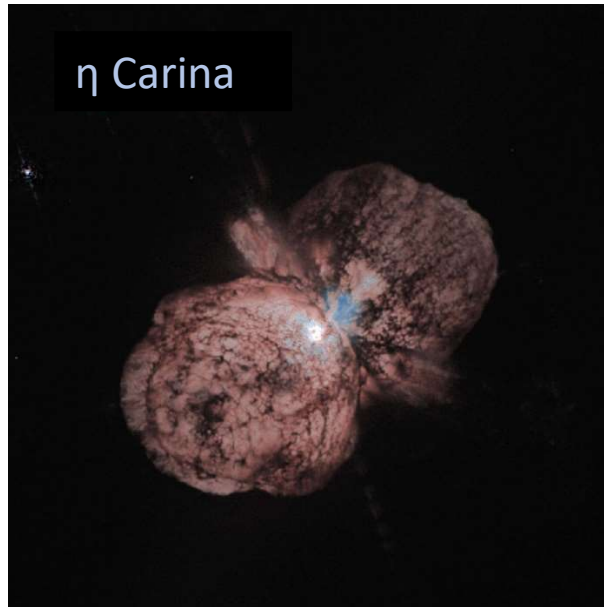
(γ) Γράψτε την εξίσωση (1) συναρτήσει των L , M και R (πάντα σε ηλιακές μονάδες). Υποθέτοντας ότι οι ποσότητες L , R και η παραμένουν σταθερές για ένα άστρο στον ΑΚΓ (που βέβαια δεν ισχύει) βρείτε μία έκφραση για τη μάζα του άστρου συναρτήσει του χρόνου, αν η αρχική μάζα του άστρου στη φάση αυτή είναι M_0 .

Για το άστρο του ερωτήματος (β) κάντε μια γραφική παράσταση της μάζας του άστρου συναρτήσει του χρόνου. Πόσο χρόνο θα χρειαζόταν ένα άστρο με $M_0 = 1M_{\odot}$ να χάσει όλο του το περίβλημα και να καταλύξει σε ένα εκφυλισμένο πυρήνα άνθρακα οξυγόνου ($0.6M_{\odot}$)

4. (α) Εκτιμήστε το όριο Eddington για τον αστέρα η Carina και συγκρίνετε την απάντησή σας με τη φωτεινότητα του συγκεκριμένου αστέρα. Είναι η απάντηση, στην οποία καταλήξατε, συμβατή με τη συμπεριφορά του αστέρα; Ναι ή όχι και γιατί;

(β) Κατά τη διάρκεια της φάσης της μεγάλης αύξησης της φωτεινότητας του η Carina, το φαινόμενο οπτικό μέγεθος του αστέρα έφθασε σε μια χαρακτηριστική τιμή που ήταν $m_V \sim 0$. Υποθέστε ότι η μεσοαστρική απορρόφηση είναι ίση με 1.7 mag και ότι η βολομετρική διόρθωση είναι πρακτικά ίση με το μηδέν. Εκτιμήστε τη φωτεινότητα του η Carina κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης και προσδιορίστε τη συνολική ποσότητα της ενέργειας των φωτονίων που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια των είκοσι χρόνων διάρκειας της φάσης αυτής. Αν μια ποσότητα ύλης ίση με $3M_{\odot}$ εκτοξεύθηκε με ταχύτητα της τάξης των 650 km/s , πόση κινητική ενέργεια έφερε αυτό το τμήμα της ύλης;

(γ) Η γωνιακή έκταση ενός από τους λοβούς του η Carina είναι κατά προσέγγιση ίση με $8.5''$. Υποθέτοντας ότι οι λοβοί διαστέλλονται με σταθερό ρυθμό ίσο με 650 km/s , εκτιμήστε πόσος χρόνος έχει περάσει από τη φάση της μεγάλης αύξησης της φωτεινότητας η οποία παρήγαγε τους λοβούς. Πιστεύετε ότι το αποτέλεσμα στο οποίο καταλήξατε υπερεκτιμά ή υποεκτιμά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

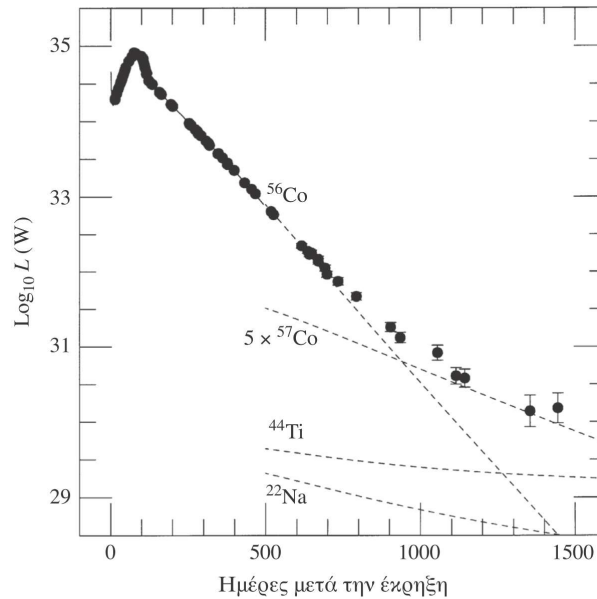


Μπορείτε να συμβουλευτείτε τη βιβλιογραφία για επιπλέον στοιχεία που μπορεί να χρειαστείτε για τη λύση της άσκησης.

5. (α) Υποθέτοντας ότι στην καμπύλη φωτός ενός υπερκαινοφανούς κυριαρχεί η ενέργεια που απελευθερώνεται μέσω της ραδιενεργού διάσπασης ενός ισοτόπου που έχει σταθερά διάσπασης ίση με λ , δείξτε ότι η κλίση της καμπύλης φωτός δίνεται από τη σχέση $\frac{d \log_{10} L}{dt} = -0.434\lambda$, ή ισοδύναμα από την $\frac{dM_{\text{bol}}}{dt} = 1.086\lambda$.

(β) Αν η γραμμική ελάττωση της καμπύλης φωτός ενός υπερκαινοφανούς αστέρα τροφοδοτείται από τη ραδιενεργό διάσπαση της εκτινασσόμενης ύλης, υπολογίστε αυτόν το ρυθμό μείωσης (σε mag/d) που οφείλεται στη διάσπαση ${}^{56}_{27}\text{Co}$ σε ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ που γίνεται με χρόνο υποδιπλασιασμού ίσο με 77.7 ημέρες.

(γ) Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα ${}^{56}_{27}\text{Co}$ είναι ίση με 3.72 MeV. Αν η ποσότητα κοβαλτίου που παράγεται από τη διάσπαση ${}^{56}_{28}\text{Ni}$ στον υπερκαινοφανή είναι ίση με $0.075M_{\odot}$ SN1987A, εκτιμήστε την ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται ανά δευτερόλεπτο μέσω της ραδιενεργού διάσπασης του κοβαλτίου αμέσως μετά από τον σχηματισμό του κοβαλτίου και έναν χρόνο μετά την έκρηξη. Συγκρίνετε τις απαντήσεις σας με την καμπύλη φωτός του υπερκαινοφανούς SN 1987A που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



(δ) Η ροή των νετρίων από τον υπερκαινοφανή SN 1987A στη θέση που βρίσκεται η Γη εκτιμάται ότι είναι της τάξης των $1.3 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$. Αν η μέση ενέργεια ανά νεutrίνο ήταν κατά προσέγγιση ίση με 4.2 MeV, εκτιμήστε την ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώθηκε μέσω των νετρίων κατά τη διάρκεια της έκρηξης του υπερκαινοφανούς. (ε) Εκτιμήστε τη βαρυτική ενέργεια σύνδεσης ενός αστέρα νετρονίων με μάζα ίση με $1.4M_{\odot}$ και ακτίνα ίση με 10 km. Συγκρίνετε την απάντησή σας με την ενέργεια που απελευθερώνεται μέσω των νετρίων κατά την κατάρρευση του πυρήνα από σίδηρο του Sk -69 202 (που ήταν ο προγεννήτορας του SN 1987A) που εκτιμήσατε στο (δ).

6. Όπως είδαμε στη θεωρία, το εσωτερικό ενός ΛN είναι σχεδόν ισόθερμο (χάρη στη πολύ αποδοτική μεταφορά ενέργειας δια αγωγής ηλεκτρονίων) και περιβάλλεται από ένα λεπτό φλοιό με εκφυλισμένο (όπου η μεταφορά ενέργειας γίνεται κυρίως με ρεύματα μεταφοράς, λόγω της απότομης βαθμίδας της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια. Υποθέτοντας παρόλα αυτά ότι το εξωτερικό κέλυφος βρίσκεται σε ακτινοβολική ισορροπία, μπορούμε να προσεγγίσουμε την πίεση στο εξωτερικό κέλυφος με τη σχέση $P = \left(\frac{4}{17} \frac{16\pi ac}{3} \frac{GM_{\text{wd}}}{L_{\text{wd}}} \frac{k}{\kappa_0 \mu m_H} \right)^{1/2} T^{17/4}$, όπου κ_0 είναι ο συντελεστής αδιαφάνειας Kramers (για μεταβάσεις bound-free) δηλ. $\kappa_0 = 4.34 \times 10^{21} Z(1 + X) \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ (υπενθύμιση $\kappa_{\text{Kramers}} = \kappa_0 \rho / T^{3.5}$).

(α) Υποθέτοντας ότι η ύλη στο εξωτερικό κέλυφος περιγράφεται από τη καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου, βρείτε μία σχέση μεταξύ πυκνότητας και θερμοκρασίας στο εξωτερικό κέλυφος.

(β) Παίρνοντας στη συνθήκη εκφυλισμού ηλεκτρονίων ίσα τα δύο μέλη, $\frac{T_c}{\rho^{2/3}} = \frac{\hbar^2}{3m_e k} \left[\frac{3\pi^2}{m_H} \left(\frac{Z}{A} \right) \right]^{2/3}$ μπορούμε να βρούμε μία οριακή σχέση για τη πυκνότητα (προσοχή η θερμοκρασία είναι η χαρακτηριστική θερμοκρασία στο εκφυλισμένο εσωτερικό του ΛΝ). Από αυτή και τη σχέση που βρήκατε στο (α) βρείτε μία σχέση μεταξύ της φωτεινότητας του ΛΝ και της T_c . Βρείτε την T_c για ένα ΛΝ μάζας $0.6M_\odot$. Υποθέστε ότι το κέλυφος αποτελείται κατά 95% από He και 5% από βαρύτερα στοιχεία. Πόση είναι η πυκνότητα στη βάση του μη εκφυλισμένου εξωτερικού κελύφους;

7. Σε ένα ψυχόμενο λευκό νάνο, η κρυστάλλωση θα συμβεί όταν η ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια ανάμεσα σε γειτονικούς πυρήνες, $Z^2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 r$, κυριαρχήσει της χαρακτηριστικής θερμικής ενέργειας kT . Ο λόγος των δύο ορίζεται ως $\Gamma = \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r kT}$. Σε αυτή την έκφραση, η απόσταση r ανάμεσα στους γειτονικούς πυρήνες ορίζεται ως η ακτίνα της σφαίρας της οποίας ο όγκος είναι ίσος με τον όγκο ενός πυρήνα, τον οποίο προσεγγίζουμε με τον μέσο όγκο ανά πυρήνα, $A m_H / \rho$, όπου A ο μαζικός αριθμός του πυρήνα και ρ η μέση πυκνότητά του ΛΝ.

(α) Υπολογίστε την τιμή της μέσης απόστασης r για έναν λευκό νάνο καθαρού άνθρακα $0.6 M_\odot$ και με ακτίνα $0.012R_\odot$.

(β) Έχει καταβληθεί αρκετή προσπάθεια για τον ακριβή υπολογισμό του λόγου Γ ώστε να ληφθούν όλο και πιο ρεαλιστικές καμπύλες ψύξης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μία τιμή $\Gamma = 160$ περίπου, στην αρχή της κρυστάλλωσης. Εκτιμήστε την εσωτερική θερμοκρασία T_c στην οποία συμβαίνει αυτό.

(γ) Εκτιμήστε τη φωτεινότητα ενός λευκού νάνου καθαρού άνθρακα ως συνάρτηση της εσωτερικής του θερμοκρασίας. Υποθέστε μια σύνθεση σαν αυτή του β6 για το μη εκφυλισμένο κέλυφος.

(δ) Για πόσα περίπου χρόνια θα μπορούσε ένας λευκός νάνος να διατηρήσει τη φωτεινότητα που βρέθηκε στο ερώτημα (γ), χρησιμοποιώντας μόνο τη λανθάνουσα θερμότητα kT ανά πυρήνα που απελευθερώνεται κατά την κρυστάλλωση;

8. Ένας τρόπος ποιοτικής κατανόησης της ροής φορτισμένων σωματιδίων μέσα στη μαγνητόσφαιρα ενός pulsar είναι να φανταστείτε ότι ένα φορτισμένο σωματίδιο μάζας m και φορτίου e , στον ισημερινό ενός αστέρα νετρονίων. Υποθέστε για ευκολία ότι η περιστροφή του άστρου μεταφέρει το φορτίο υποχρεώνοντάς το να κινηθεί κάθετα στο μαγνητικό πεδίο του πάλσαρ. Το κινούμενο φορτίο δέχεται τη μαγνητική δύναμη Lorentz και τη βαρυτική δύναμη. Βρείτε τον λόγο των μέτρων των δύο δυνάμεων συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου, B , της επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας, g , της ακτίνας του αστέρα νετρονίων, R , και της περιόδου του pulsar P . Υπολογίστε αριθμητικά τον

λόγο αυτό για ένα πρωτόνιο στην επιφάνεια ενός pulsar με $R = 10\text{km}$, $B = 10^{12}\text{Gauss}$, $P = 30\text{ms}$.