

ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Γενικά

Από τη στιγμή που αρχίζουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις συντήξεως στο εσωτερικό ενός Αστήρα, (εισέρχεται στην **Κύρια Ακολουθία** στο διάγραμμα H-R ¹) (Εικόνα 1) ουσιαστικά από τότε είναι που μετράμε την ηλικία του.

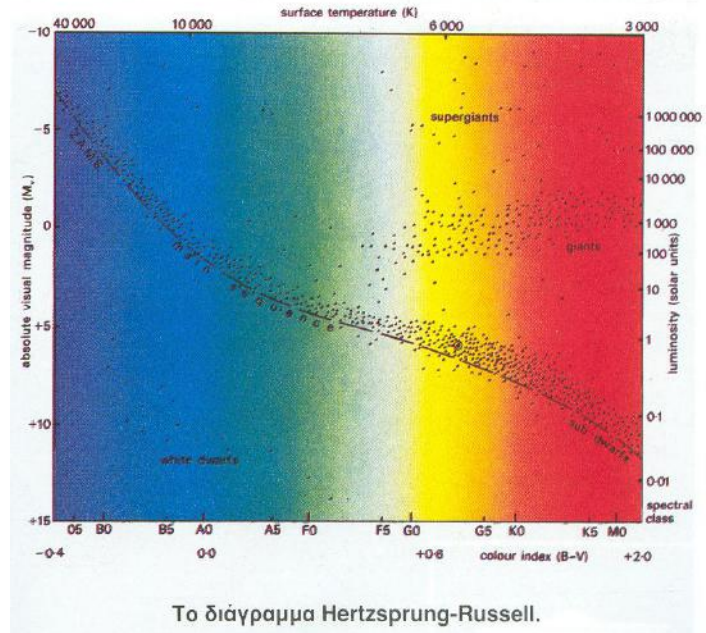
Η διάρκεια ζωής του Αστήρα θα εξαρτηθεί από τη μάζα του, η οποία θα καθορίσει και τον ρυθμό παραγωγής ενέργειας από τις **θερμοπυρηνικές αντιδράσεις συντήξεως H₂**.

Συγκεκριμένα η βαρύτητα πιέζει τα εσωτερικά στρώματα του Αστήρα με αποτέλεσμα την ελάττωση του όγκου του. Η ελάττωση του όγκου συνεπάγεται την αύξηση της

θερμοκρασίας στο εσωτερικό. Με τη σειρά της η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του πυρήνα θα αυξήσει τον ρυθμό των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων συντήξεως. Τέλος η αύξηση του ρυθμού των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων συντήξεως σημαίνει μεγαλύτερη κατανάλωση «καυσίμων», δηλαδή H₂, του Αστήρα.

Επομένως όσο μεγαλύτερος είναι ο Αστήρας (μεγαλύτερης μάζας) τόσο η βαρυτική πίεση θα είναι μεγαλύτερη και, σύμφωνα με τα παραπάνω, τόσο γρηγορότερα θα καταναλώνει άρα και θα εξαντλήσει γρηγορότερα το «καύσιμο» H₂. Δηλαδή η διάρκεια ζωής του θα είναι μικρότερη.

Άρα οι αστέρες γίγαντες «ζουν» λιγότερο από τους μέσους και μικρούς αστέρες.²



Το διάγραμμα Hertzsprung-Russell.

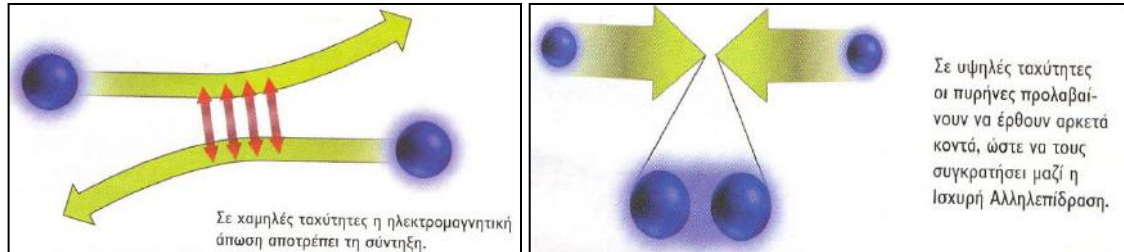
¹ Ο Δανός αστρονόμος **Ejnar Hertzsprung** και ο Αμερικανός **Henry Norris Russell**, είχαν σχεδόν ταυτόχρονα και ανεξάρτητα την ιδέα να τοποθετήσουν τους αστέρες με γνωστά φάσματα σε ένα διδιάστατο διάγραμμα με τεμημένη τον φασματικό τύπο S_p και τεταγμένη το απόλυτο φωτογραφικό μέγεθος M_{pg} . Διαπίστωσαν έτσι ότι τα σημεία που αντιστοιχούσαν στους αστέρες δεν παρουσιαζόταν διασκορπισμένα τυχαία στο διάγραμμα αυτό, αλλά βρισκόταν συγκεντρωμένα σε ορισμένες περιοχές του, σχηματίζοντας στενές ζώνες. Οι περισσότεροι αστέρες μάλιστα βρισκόταν συγκεντρωμένοι σε μια ζώνη, που διατρέχει το διάγραμμα διαγώνια, από το σημείο ($M_{pg}=-6$, $S_p=O5$) στο σημείο ($M_{pg}=12$, $S_p=M9$). Η ζώνη αυτή ονομάζεται σήμερα «**Κύρια Ακολουθία**». Εδώ κρίνεται απαραίτητο να τονιστεί ότι στην κύρια ακολουθία ο αστέρας περνά το μεγαλύτερο μέρος της ζωής του μιας και εισέρχεται σ' αυτήν από τη στιγμή που ξεκινούν στο εσωτερικό του οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις συντήξεως και εξέρχεται απ' αυτήν όταν, εξαντλώντας τα καύσιμά του, αρχίζει να καταρρέει υπό την πίεση της βαρύτητας.

² Τα περισσότερα αστέρια έχουν ηλικία μεταξύ 1 δισ. και 10 δισεκατομμύρια χρόνια. Μερικά αστέρια μπορεί ακόμη και να έχουν ηλικία κοντά στα 13,7 δισεκατομμύρια έτη - την παρατηρούμενη ηλικία του σύμπαντος. (Ο παλαιότερος αστέρας που έχει ανακαλυφθεί, ο HE 1523-0901, είναι περίπου 13.200 εκατομμυρίων ετών).

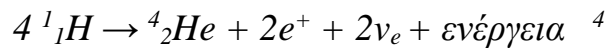
Όσο πιο ογκώδες το αστέρι, τόσο μικρότερος ο χρόνος ζωής του, κυρίως επειδή τα ογκώδη αστέρια έχουν μεγαλύτερη πίεση στους πυρήνες τους, αναγκάζοντάς τους να καίνε υδρογόνο πιο γρήγορα. Τα πιο μεγάλα αστέρια ζουν κατά μέσο όρο περίπου ένα εκατομμύριο χρόνια, ενώ αστέρια της ελάχιστης μάζας καίνε τα καύσιμά τους πολύ αργά και ζουν δεκάδες έως εκατοντάδες δισεκατομμύρια χρόνια.

Υπολογισμός της διάρκειας ζωής του Ηλίου

Οι αντιδράσεις συντήξεως H_2 ξεκινούν όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό φθάσει στους 10^7 K. Στη θερμοκρασία αυτήν οι πυρήνες H κινούνται με τεράστιες ταχύτητες και οι συγκρούσεις μεταξύ τους είναι τόσο ορμητικές και βίαιες ώστε να υπερνικούν τις τεράστιες απωστικές δυνάμεις³ (Εικόνες 2 και 3).



Οι πυρήνες H έχοντας τεράστια κινητική ενέργεια έρχονται τόσο κοντά μεταξύ τους όπου παγιδεύονται στην «εμβέλεια» της Ισχυρής Αλληλεπίδρασης και λαμβάνει χώρα η σύντηξη του H σύμφωνα με την αντίδραση:



Στην παραπάνω αντίδραση, η ενέργεια που απελευθερώνεται υπολογίζεται από τη διαφορά της μάζας (έλλειμμα μάζας) των τεσσάρων αρχικών πυρήνων H από τη μάζα του σχηματιζόμενου πυρήνα He . Συγκεκριμένα, αν παραστήσουμε m_p τη μάζα του πυρήνα H (ο πυρήνας H αποτελείται από ένα πρωτόνιο), τότε η μάζα των τεσσάρων πυρήνων H , που συμμετέχουν στην θερμοπυρηνική αντίδραση, θα είναι $m_{αρχ}=4m_p$. Από την άλλη, η μάζα του πυρήνα He που σχηματίζεται, έχει βρεθεί πειραματικά ότι ισούται $m_{τελ}=3,97m_p$.

Έτσι η διαφορά (έλλειμμα) μάζας που προκύπτει κατά την αντίδραση είναι:

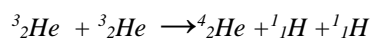
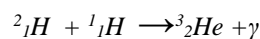
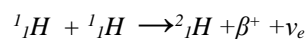
$$\Delta m = m_{τελ} - m_{αρχ} = 3,97m_p - 4m_p$$

δηλαδή

$$\Delta m = -0,03 m_p \quad 5$$

³ Οι πυρήνες H_2 ουσιαστικά είναι θετικά φορτισμένα πρωτόνια που απωθούνται μεταξύ τους και η άπωση αυτή αυξάνεται όσο πλησιάζουν μεταξύ τους. (αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της αποστάσεως) Στη μισή απόσταση απωθούνται τέσσερις (2^2) φορές περισσότερο, στο ένα τρίτο της αποστάσεως απωθούνται εννέα φορές (3^2) περισσότερο, στο ένα τέταρτο δεκαέξι φορές (4^2) κ.ο.κ

⁴ Στην πραγματικότητα οι πυρηνικές αντιδράσεις που συνθέτουν την σύντηξη H_2 είναι οι ακόλουθες:



όπου $\text{}^1_1\text{H}$ ο πυρήνας Υδρογόνου, $\text{}^2_1\text{H}$ ο πυρήνας Δευτερίου, $\text{}^3_2\text{He}$ το ελαφρύ ισότοπο του ηλίου, $\text{}^4_2\text{He}$ το ισότοπο (4 2) του ηλίου, το πιο διαδεδομένο στη φύση ισότοπο του He . Επίσης β^+ είναι το σωματίδιο β (ποζιτρόνιο), γ είναι η ακτινοβολία γ και ν_e είναι το νεutrino του ηλεκτρονίου.

⁵ Το αρνητικό πρόσημο δε σημαίνει αρνητική μάζα, αφού όπως γνωρίζουμε ότι αρνητική μάζα (όπως και αρνητική ενέργεια) δεν υπάρχει. Δηλώνει το έλλειμμα μάζας που προκύπτει μετά την θερμοπυρηνική αντίδραση και που μετατρέπεται, σύμφωνα με τη σχέση $E=mc^2$, σε θερμική ενέργεια.

Η μάζα αυτή δε χάνεται αλλά μετατρέπεται σε ενέργεια, η οποία δίδεται από τη γνωστή **σχέση ισοδυναμίας μάζας – ενέργειας** του Einstein, $E=mc^2$.

Έτσι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη σύντηξη 4 πυρήνων H_2 σε έναν πυρήνα He είναι:

$$E=\Delta m \cdot c^2$$

ή ισοδύναμα:

$$E=0,03 m_p \cdot c^2$$

Ποσοστιαία το έλλειμμα της μάζας αντιστοιχεί στο $\frac{0,03}{4} = 0,75\%$ των υπό

σύντηξη ατόμων H_2 του Ήλιου.

Αν υποθεθεί ότι ο Ήλιος αποτελείται αποκλειστικά από H_2 , τότε η σύντηξη ολόκληρης της μάζας του ($M_\odot = 1,989 \cdot 10^{33} \text{kg}$) θα παράγαγε ενέργεια:

$$E=0,0075 \cdot M_\odot \cdot c^2$$

ή ισοδύναμα:

$$E=13,4 \cdot 10^{51} \text{ erg} \quad 6$$

Η ενέργεια αυτή θα του επέτρεπε να ακτινοβολεί επί $t = \frac{E}{L_\odot}$ ⁷

Με άλλα λόγια η διάρκεια ζωής του Ήλιου θα ήταν:

$$t = \frac{E}{L_\odot} = \frac{13,4 \cdot 10^{51} \text{ erg}}{3,862 \cdot 10^{33} \text{ erg / sec}} = 3,47 \cdot 10^{18} \text{ sec} = 110032978183 \text{ έτη} \approx 110 \cdot 10^9 \text{ έτη}$$

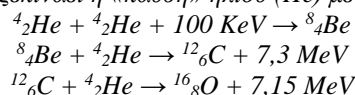
Ο Ήλιος όμως δεν αποτελείται αποκλειστικά από H_2 . Η περιεκτικότητα του Ήλιου σε H_2 είναι περίπου 70%.

Επίσης δεν μετατρέπεται ολόκληρη η ποσότητα του H_2 του πυρήνα σε He χωρίς να συμβεί σημαντική αλλοίωση στη σύστασή του. Συγκεκριμένα όταν το 13% του υδρογόνου μετασχηματισθεί, τότε σταματούν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις συντήξεως H_2 . ⁸

⁶ Η τιμή αυτή προέκυψε από την αντικατάσταση της μάζας $M_\odot = 1,989 \cdot 10^{33} \text{kg}$ του Ηλίου και της ταχύτητας του φωτός $c = 2,9979 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}$, στην εξίσωση της ενέργειας. Όλες οι μονάδες μετρήσεως λαμβάνονται από το **Σύστημα Μονάδων cgs** (από τα αρχικά των χρησιμοποιούμενων σ' αυτό μονάδων centimeter, gram, second) σύστημα που χρησιμοποιείται επί το πλείστον στην Αστροφυσική. Στο σύστημα αυτό η μονάδα μετρήσεως για την ενέργεια είναι το **1erg**. Η αντίστοιχη μονάδα μετρήσεως ενέργειας, στο **Διεθνές Σύστημα (SI)**, είναι το **1Joule** και η σχέση που συνδέει τις δύο προαναφερόμενες μονάδες μετρήσεως ενέργειας είναι: $1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ erg}$.

⁷ Αυτό προκύπτει από τη σχέση που συνδέει τη φωτεινότητα ενός σώματος που ακτινοβολεί, με την ενέργεια και τον χρόνο που ακτινοβολεί και η οποία είναι: $E=L \cdot t$. Στην παραπάνω σχέση όπου L_\odot είναι η φωτεινότητα του Ήλιου και έχει την τιμή: $L_\odot = 3,862 \cdot 10^{33} \text{ erg/sec}$

⁸ Όταν συμβαίνει αυτό η βαρυτική πίεση των εξωτερικών στρωμάτων του Ηλίου υπερτερεί της θερμικής από το εσωτερικό του, με αποτέλεσμα να τον συμπιέζει τόσο ώστε να ανεβάσει τη θερμοκρασία του στο εσωτερικό στους $T = 2 \cdot 10^8 \text{K}$, τότε ξεκινάει η «καύση» ηλίου (He) με τις αντιδράσεις:



Αυτό όμως διαρκεί για λίγα σχετικά χρόνια (της τάξεως των 10^6 έτη) προς το τέλος της ζωής του Ήλιου και δεν λαμβάνονται υπ' όψη στη συνολική διάρκεια ζωής του. (Εκτός Κύριας Ακολουθίας)

Επομένως, λαμβάνοντας υπ' όψη τα δύο παραπάνω στοιχεία, καταλήγουμε ότι η ενέργεια που θα παράξει ο Ήλιος σε ολόκληρη τη διάρκεια της παραμονής του στην Κύρια Ακολουθία, θα είναι:

$$E = 0,0075 \cdot m_p \cdot c^2 \cdot 0,7 \cdot 0,13 = 13,4 \cdot 10^{51} \text{ erg} \cdot 0,7 \cdot 0,13 = 1,22 \cdot 10^{51} \text{ erg}$$

και επομένως η διάρκεια παραμονής του στην Κύρια Ακολουθία θα είναι:

$$t = \frac{E}{L_{\odot}} = \frac{1,22 \cdot 10^{51} \text{ erg}}{3,862 \cdot 10^{33} \text{ erg / sec}} = 0,316 \cdot 10^{18} \text{ sec} = 10.020.294.266 \text{ έτη} \approx 10^{10} \text{ έτη}$$

Με τους παραπάνω υπολογισμούς καταλήξαμε ότι η διάρκεια παραμονής του Ήλιου στην Κύρια Ακολουθία είναι γύρω στα 10^{10} έτη.

Όπως έχουμε τονίσει στην υποσημείωση 5, η «ζωή» του Ήλιου δεν θα τερματίσει εδώ. Εδώ θα σταματήσουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις συντήξεως H_2 . Ο Ήλιος θα συνεχίσει να ζει με θερμοπυρηνικές αντιδράσεις συντήξεως He για μερικά ακόμη εκατομμύρια έτη (οι αντιδράσεις αυτές αναφέρονται στην υποσημείωση 5), ώσπου να εξαντληθούν (σύντομα) τα αποθέματα He . (Στην ουσία η περιεκτικότητα του πυρήνα σε He θα πέσει σε ποσοστά που δεν θα επιτρέπουν πια τις αντιδράσεις αυτές - κάτι ανάλογο που είχε συμβεί και με το ποσοστό του H_2 -)



Καταλήξαμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ο Ήλιος συμπεριφέρεται ως ένα τεράστιο θερμοπυρηνικό αντιδραστήριο. Θα συνεχίσει να ζει ξοδεύοντας τα αποθέματα H_2 προσφέροντάς μας την ευεργετική ενέργεια που ακτινοβολεί, η οποία κρατά ζωντανή τη Γη, τον μικρό μας παράδεισο, ο οποίος περιστρέφεται γύρω του σε απόσταση 149.000.000 Km, απόσταση προσεκτικά επιλεγμένη από τον **Δημιουργό**, ώστε να μας κρατά ζεστούς χωρίς να μας καίει.

Ο Ήλιος για να το κάνει αυτό μεταστοιχειώνει κάθε δευτερόλεπτο 700.000.000 τόνους υδρογόνου σε 695.000.000 περίπου τόνους ηλίου, μετατρέποντας 5.000.000 τόνους ύλης σε ενέργεια κατά τη διαδικασία της συντήξεως H_2 , όπως την περιγράψαμε παραπάνω. Αυτό σημαίνει ότι **κάθε δευτερόλεπτο χάνει 5 εκατομμύρια τόνους από τη μάζα του!** Παρόλα αυτά όμως, τα αποθέματα του σε υδρογόνο επαρκούν για να διατηρήσουν αυτή τη διαδικασία για αρκετά δισεκατομμύρια χρόνια!!!

Γνωρίζουμε σήμερα ότι ο Ήλιος βρίσκεται στο μέσο της παραγωγικής ηλικίας του. Εκτιμάται ότι η ηλικία του είναι μεταξύ 4,5 και 5 δισεκατομμύρια έτη. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μπροστά μας τουλάχιστον άλλα 5 δισεκατομμύρια χρόνια

μέχρι να εξαντληθούν τα αποθέματα και η «στάθμη» του υδρογόνου να πέσει τόσο ώστε την θέση της συντήξεως του υδρογόνου να πάρουν οι αντιδράσεις συντήξεως ηλίου (He) οι οποίες, όπως αναφέραμε στην υποσημείωση 5, θα σηματοδοτήσουν το τέλος της ζωής του ζωοδότη Αστέρα μας.

Τότε αναπόφευκτα θα έλθει και το τέλος του μικρού μας πλανήτη, αλλά και ολόκληρου του Ηλιακού μας συστήματος, το οποίο μπορεί να μην καταστραφεί από το «σβήσιμο» του Ήλιου, αλλά θα χαθεί μέσα σε ένα παγωμένο σκότος, στην αφάνεια και στην ανυπαρξία, όπως ακριβώς όταν σβήνουν τα φώτα σ' ένα σκοτεινό δωμάτιο και αυτομάτως χάνονται όλες οι εικόνες και πληροφορίες που αντλούμε απ' αυτό!!!

Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης