

Διάλεξη 10: Πυρηνοσύνθεση

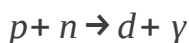
Εισαγωγή

Ένας από τους πλέον ενδιαφέροντες κλάδους της πυρηνικής φυσικής είναι ο τομέας της **πυρηνικής αστροφυσικής**. Πρόκειται για τον τομέα έρευνας όπου οι ιδιότητες των πυρήνων μελετώνται με στόχο την **καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών παραγωγής ενέργειας στα άστρα, των γενικών ιδιοτήτων τους, αλλά και της παρατηρούμενης περιεκτικότητας των πυρήνων στο ηλιακό μας σύστημα**. Δηλαδή, πρόκειται για την μελέτη με στόχο την κατανόηση της διαδικασίας δημιουργίας και αποθήκευσης των πυρήνων μέσα στα διάφορα "εργαστήρια" της φύσης.

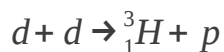
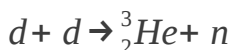
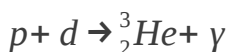
Οι διαδικασίες πυρηνοσύνθεσης μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Την πυρηνοσύνθεση της μεγάλης έκρηξης. Δηλαδή την πυρηνοσύνθεση που έλαβε χώρα τα πρώτα λεπτά της ζωής του σύμπαντος. **Την πυρηνοσύνθεση που συμβαίνει στα διάφορα άστρα μέσω αντιδράσεων σύντηξης.** Σε αυτή την περίπτωση παράγονται πυρήνες μέχρι την **μάζα 60** – εκεί δηλαδή που παρουσιάζει μέγιστο η ενέργεια σύνδεσης. **Και μια άλλη μεγάλη κατηγορία πυρηνοσύνθεσης είναι αυτή που οδηγεί στη δημιουργία των βαρύτερων ισotόπων με μάζες μεγαλύτερη από αυτή του σιδήρου.**

Πυρηνοσύνθεση Μεγάλης Έκρηξης

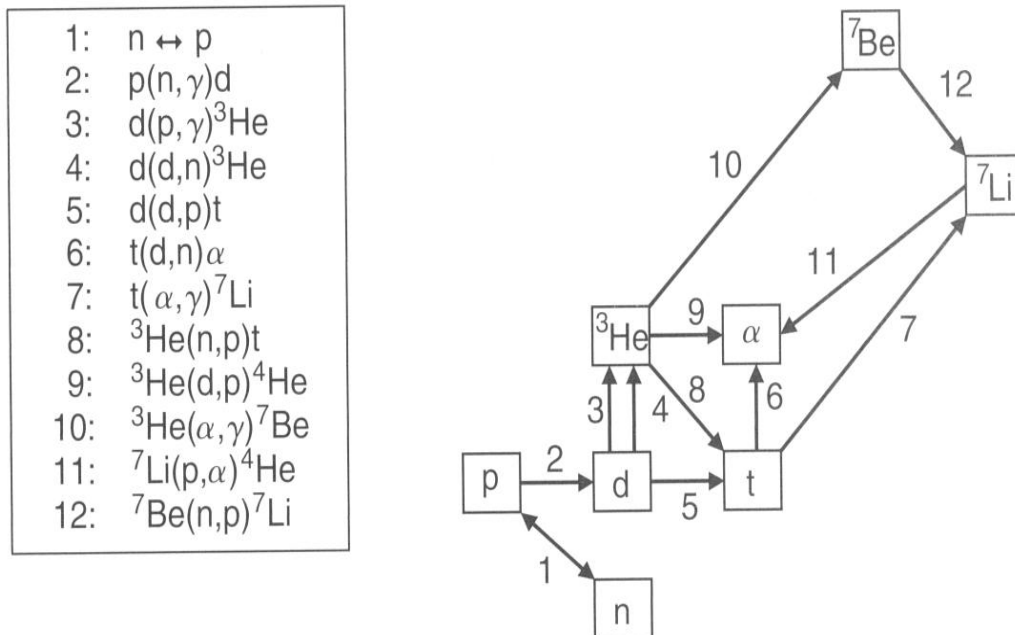
Μετά από τα 3 πρώτα λεπτά μετά την μεγάλη έκρηξη η θερμοκρασία ήταν αρκετά χαμηλή ($T=10^9\text{K}$) ώστε να έχουν ήδη σχηματιστεί πρωτόνια και νετρόνια ενώ ταυτόχρονα η ενέργεια τους ήταν αρκετή ώστε να ξεκινήσουν οι πρώτες πυρηνικές αντιδράσεις. Η πρώτη (εξαιρετικά σημαντική) αντίδραση ήταν αυτή της σύντηξης ενός πρωτονίου και ενός νετρονίου προς σχηματισμού του δευτερίου:



Στην συνέχεια το παραγόμενο δευτέριο συμμετείχε σε μια σειρά αντιδράσεων όπως:



όπου δημιουργήθηκαν πυρήνες με μάζα (A) = 3. Η διαθέσιμη κινητική ενέργεια λόγω της ακόμα αρκετά υψηλής θερμοκρασίας ήταν αρκετή ώστε να ακολουθήσουν διάφορες ακόμα αντιδράσεις όπου βαρύτεροι πυρήνες σχηματίζονται, όπως για παράδειγμα το ${}^4\text{He}$. Σε αυτή την διαδρομή προς τον σχηματισμό βαρύτερων πυρήνων σημαντικό εμπόδιο υπήρξε η απουσία σταθερού πυρηνικού συστήματος με μαζικό αριθμό $A=5$.



Σχήμα 1: Διάγραμμα των πυρηνικών αντιδράσεων που έλαβα χώρα κατά τις πρώτες στιγμές ζωής του σύμπαντος μετά την μεγάλη έκρηξη.

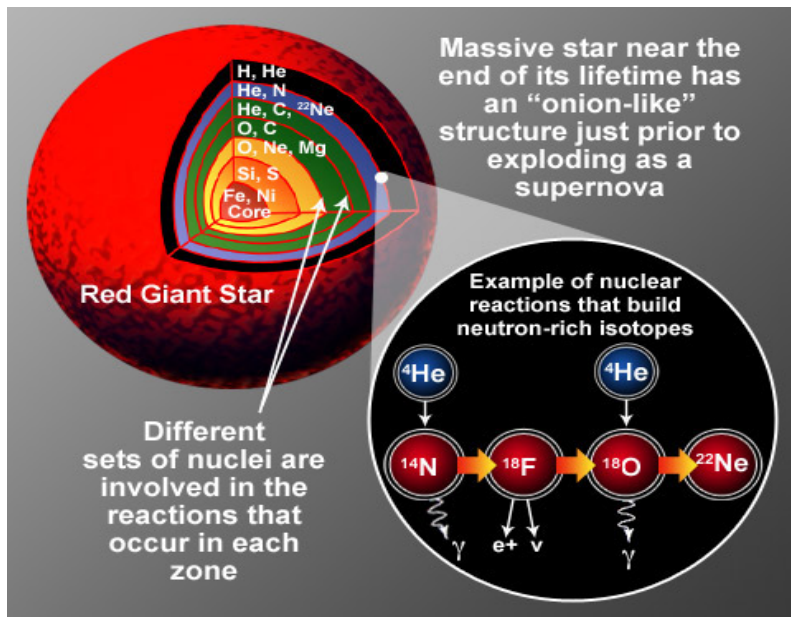
Παρόλα αυτά μέσα από το πιο πάνω δίκτυο αντιδράσεων τελικώς σχηματίζεται μικρή ποσότητα ^7Li η οποία όμως σε μεγάλο ποσοστό αναλώνεται μέσα από αντιδράσεις (p, α) . Βαρύτερα πυρηνικά συστήματα δεν σχηματίζονται λόγω της απώσης Coulomb. Τελικά από αυτήν την διαδικασία και μετά τα πρώτα 30 min της ηλικίας του σύμπαντος επί του συνόλου των παραγόμενων πυρήνων είναι 76 % πρωτόνια, 24 % ^4He και κάποια ίχνη ^3He και ^7Li . Όσον αφορά στα νετρόνια το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών έχουν αποδιεγερθεί.

Το εντυπωσιακό γεγονός, όσον αφορά στην πυρηνοσύνθεση, είναι ότι μετά τα πρώτα 30 λεπτά της ζωής του σύμπαντος και μέχρι τον σχηματισμό των πρώτων αστέρων υπήρχε μια στάσιμη κατάσταση όπου κανένας πυρήνας δεν δημιουργήθηκε. Αυτό οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία του σύμπαντος είχε πλέον πέσει αρκετά και η απώση Coulomb εμπόδιζε στο να υπάρχουν νέες αντιδράσεις. Έτσι μετά από τα πρώτα 30 min και μέχρι αρκετά εκατομμύρια χρόνια δεν είχαμε κανένα γεγονός πυρηνοσύνθεσης.

Πυρηνοσύνθεση στα άστρα

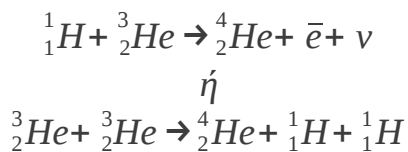
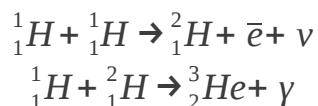
Όταν σχηματίστηκαν τα πρώτα άστρα εκατομμύρια χρόνια μετά την μεγάλη έκρηξη ξεκίνησε η δεύτερη φάση πυρηνοσύνθεσης. Ως τότε δεν υπήρχε σχεδόν τίποτα άλλο εκτός από H και ^4He . Δεν υπήρχε καν ο ^{12}C . Η παραγωγή βαρύτερων στοιχείων όπως ο άνθρακας που αποτελεί το βασικό συστατικό της ζωής και των οργανισμών όπως τα γνωρίζουμε μέχρι σήμερα ξεκίνησε μετά τον σχηματισμό των πρώτων αστέρων.

Στα άστρα λοιπόν παράγονται όλα εκείνα τα ισότοπα μέχρι και τον σίδηρο όπου έχουμε και το μέγιστο της ενέργειας σύνδεσης οπότε οι αντιδράσεις σύντηξης είναι εξώθερμες. Σε διάφορα στάδια της ηλικίας ενός άστρου αλλά και αναλόγως με την μάζα του υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί και δίκτυα αντιδράσεων.

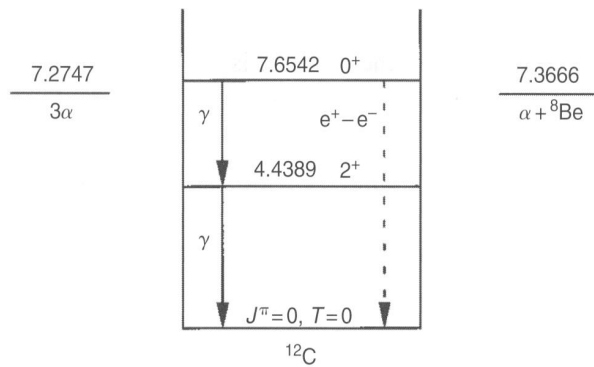


Σχήμα 2: Δομή ενός αστέρα μεγάλης μάζας στο τελικό στάδιο της ζωής του (πριν δηλαδή εκραγεί ως υπερκαινοφανής). Σε ένα τόσο μεγάλο άστρο πολλοί και διαφορετικοί μηχανισμοί πυρηνοσύνθεσης λαμβάνουν χώρα σε διάφορες αποστάσεις από το κέντρο του.

Ο πιο απλός μηχανισμός παραγωγής ενέργειας, όπου μάλιστα αποτελεί και τον αρχικό τρόπο δημιουργίας ενέργειας στη ζωή ενός άστρου, είναι η αλυσίδα αντιδράσεων πρωτονίου-πρωτονίου (p-p) όπου ουσιαστικά μέσα από διαδοχικές αντιδράσεις 4 πρωτόνια (p) ενώνονται για να σχηματίσουν έναν πυρήνα ηλίου (${}^4\text{He}$).

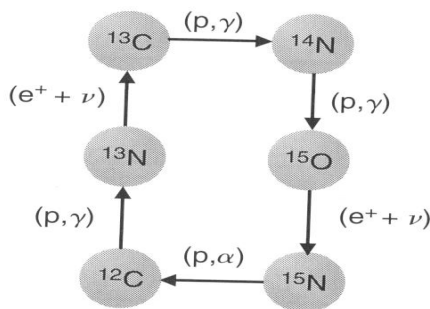


Η λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων μηχανισμών πυρηνοσύνθεσης αποτελεί ένα ξεχωριστό αντικείμενο πέρα από τους σκοπούς του μαθήματος αυτού, οπότε δεν είναι δυνατόν να γίνει πλήρης ανάλυση. Θα αναφερθεί απλώς ένα εντυπωσιακό παράδειγμα όπου η γνώση και η μελέτη πάνω στην πυρηνική φυσική μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην κατανόηση του κόσμου μας.



Σχήμα 3: Ο συντονισμός 0^+ στην ενέργεια των 7.65 MeV (κατάσταση Hoyle) ο οποίος βρίσκεται μόλις 379.4 keV πάνω από την ενέργεια κατωφλίου για την τριπλή αντίδραση $\alpha + \alpha + \alpha$.

Το παράδειγμα αυτό αφορά στον σχηματισμό του άνθρακα. Επί πολλά έτη δεν μπορούσε να εξηγηθεί η μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα στο ηλιακό μας σύστημα (αλλά και αλλού). Όσπου μέσα από πολλά πειράματα αντιδράσεων, αλλά και εκτεταμένες θεωρητικές μελέτες παρατηρήθηκαν δύο συντονισμοί - (συντονισμός = μια ενεργειακή κατάσταση με ελάχιστο χρόνο ζωής) - όπου μπορούσε πλέον να εξηγηθεί με απλό και φυσικό τρόπο το μεγάλο ποσοστό δημιουργίας του ^{12}C . Καταλαβαίνουμε, ότι διαφορετικά θα έπρεπε κανείς να υπολογίζει στην αμελητέα πιθανότητα 3 πυρήνες ^4He να βρεθούν στον ίδιο τόπο και χρόνο και να **γίνει μια αντίδραση τριπλής σύντηξης. Αυτό είναι τελείως απίθανο να γίνει.** Στην πραγματικότητα λοιπόν **βρέθηκε ότι υπάρχει ένας συντονισμός 2 σωματίων α όπου σχηματίζουν ^8Be** (συντονισμός $E_r = 91.89 \text{ keV}$, πλάτους $\Gamma = 6.8 \text{ eV}$, $T_{1/2} = 67 \cdot 10^{-18} \text{ s}$). Ο ελάχιστος αυτός χρόνος που “ζει” αυτή η δέσμια κατάσταση είναι αρκετός για να σχηματιστεί η παρατηρούμενη ποσότητα ^{12}C μόνο και μόνο γιατί υπάρχει ένας επιπλέον συντονισμός 0^+ του συστήματος $\alpha + ^8\text{Be}$ (βλ. Σχήμα 3) ο οποίος ενεργειακά βρίσκεται πολύ κοντά σε ένα ζεύγος σωματιδίου α και ενός πυρήνα ^8Be . Έτσι το αρχικά τελείως απίθανο σενάριο ταυτόχρονης σύντηξης τριών πυρήνων ^4He προς σχηματισμό ^{12}C γίνεται κατανοητό μέσω ενός διαδοχικού μηχανισμού σύντηξης όπου βέβαια απαραίτητη προϋπόθεση είναι ή ύπαρξη των δύο παρατηρούμενων συντονισμών.

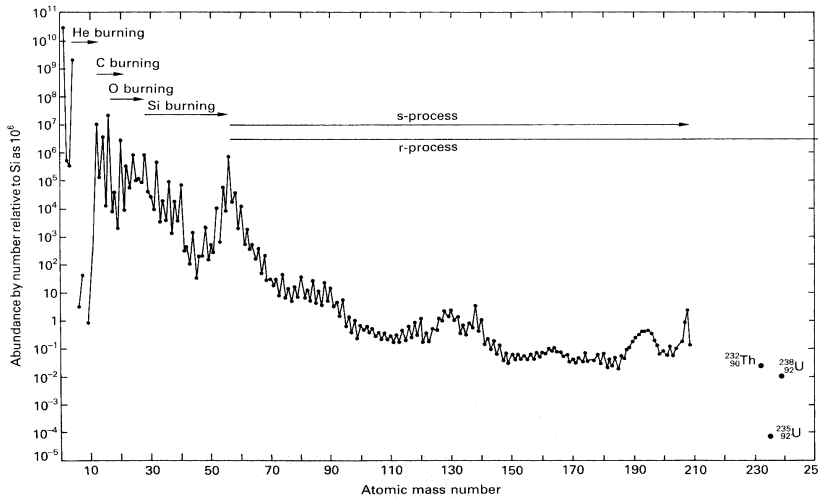


Σχήμα 4: Γραφική αναπαράσταση του δικτύου αντιδράσεων παραγωγής ενέργειας στα άστρα σύμφωνα με τον κύκλο CNO.

Πριν κλείσει το θέμα της πυρηνοσύνθεσης που συμβαίνει στο κύριο μέρος της ζωής ενός άστρου θα πρέπει ίσως να αναφερθεί ο **κύκλος CNO** ο οποίος αποτελεί έναν επίσης εξαιρετικά σημαντικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας στα άστρα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4 πρόκειται για διαδοχικές αντιδράσεις φορτισμένων σωματιδίων όπου ο **άνθρακας, το οξυγόνο και το άζωτο δημιουργούν έναν κύκλο καύσης του υδρογόνου.**

Πυρηνοσύνθεση για $A > 60$

Μέχρι στιγμής περιγράφηκε η διαδικασία πυρηνοσύνθεσης για πυρήνες με $A < 60$ (μέχρι και τον Fe). Βαρύτεροι πυρήνες δεν είναι δυνατόν να σχηματιστούν από αντιδράσεις σύντηξης δεδομένου της άπωσης Coulomb αλλά και λόγω του μεγίστου στην ενέργεια σύνδεσης γύρω από το $A=60$. Αυτό σημαίνει ότι **οποιαδήποτε αντίδραση σύντηξης που θα οδηγούσε στον σχηματισμό πυρήνα με $A > 60$ θα είναι ενδόθερμη**. Δεδομένου ότι οι ενέργειες που απαιτούνται για την πραγματοποίηση αυτών των ενδόθερμων αντιδράσεων είναι της τάξης των MeV ενώ οι θερμικές ενέργειες σε αστρικά περιβάλλοντα είναι της τάξης των 10-100 keV. Επομένως οποιαδήποτε τέτοια διαδικασία είναι ενεργειακά αδύνατη. Στο ερώτημα βέβαια πως δημιουργήθηκαν τα βαρύτερα χημικά στοιχεία από τον σίδηρο μέχρι το ουράνιο υπάρχουν διάφορες διαδικασίες που συμμετέχουν. Δυο από τις βασικότερες **είναι διαδικασίες “s” και “r”**. **Και οι δυο διαδικασίες περιλαμβάνουν αντιδράσεις σύλληψης νετρονίου**. Στην διαδικασία “s” τα νετρόνια παράγονται από αντιδράσεις (α,n) σε θερμικά παλλόμενους ερυθρούς γίγαντες. Η ροή των νετρονίων είναι αρκετή ώστε να σχηματιστούν πυρήνες μέχρι το Bi-209. Η διαδικασία “r” περιλαμβάνει πολύ ισχυρότερες ροές νετρονίων οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε τελικά στάδια της ζωής μεγάλων αστερών τα οποία περιλαμβάνουν βίαιες εκρήξεις supernovae. Ακριβώς επειδή η διαδικασία “s” περιλαμβάνει μικρότερες ροές νετρονίων εξελίσσεται κοντά στην κοιλάδα σταθερότητας ενώ η πιο βίαιη διαδικασία “r” περιλαμβάνει πυρήνες πιο μακριά από την κοιλάδα σταθερότητας. Για τον λόγο αυτό η πειραματική πρόσβαση στους πυρήνες αυτούς στο εργαστήριο είναι πολύ πολύ δύσκολη και μόνο τα τελευταία 10-15 χρόνια έχει ξεκινήσει μια νέα προσπάθεια μέσω ραδιενεργών δεσμών να προσεγγιστούν οι πυρήνες αυτοί. Υπάρχει βέβαια πολύ δουλειά να γίνει ακόμα με μεγάλες τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν.



Σχήμα 5: Η περιεκτικότητα των στοιχείων στο ηλιακό μας σύστημα συναρτῆσει του μαζικού αριθμού. Παρουσιάζονται επίσης και οι βασικοί μηχανισμοί πυρηνοσύνθεσης.

Παράδειγμα

Σύμφωνα με κάποια από τα σενάρια της πυρηνοσύνθεσης "r" που ἔλαβε χώρα στην περιοχή του ηλιακού μας συστήματος πριν αυτό σχηματιστεί η αναλογία $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ήταν 0.65. Αν θεωρήσουμε ότι ο ηλιακό μας σύστημα σχηματίστηκε 10^9 y μετά το πέρας της διαδικασίας "r" καθώς επίσης ότι η ηλικία του ηλιακού μας συστήματος είναι $4.5 \cdot 10^9$ y. Είναι συμβατή η παρατηρούμενη σήμερα αναλογία των δύο ισοτόπων με το πιο πάνω σενάριο.

Δεδομένα: $T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 7.04 \cdot 10^8$ y, $T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4.47 \cdot 10^9$ y

Λύση:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \Rightarrow \lambda_{235} = 9.846 \cdot 10^{-10} \text{ y}^{-1}, \quad \lambda_{238} = 1.551 \cdot 10^{-10} \text{ y}^{-1}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{N_{235}}{N_{238}} = \frac{N_0(235) e^{-\lambda_{235} t}}{N_0(238) e^{-\lambda_{238} t}}$$

$$\frac{N_{235}}{N_{238}} = 0.65 \cdot e^{(\lambda_{238} - \lambda_{235}) t} = 0.65 \cdot 0.0104 = 0.007$$

Οπότε ὄντως το σενάριο που περιγράφει το πρόβλημα είναι συμβατό με την παρατηρούμενη αναλογία των δύο ισοτόπων του Ουρανίου.