

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται στην άδεια χρήσης **Creative Commons** και ειδικότερα

*Αναφορά – Μη εμπορική Χρήση – Όχι Παράγωγο Έργο 3.0 Ελλάδα*

*(Attribution – Non Commercial – Non-derivatives 3.0 Greece)*



CC BY-NC-ND 3.0 GR

*[ή επιλογή ενός άλλου από τους έξι συνδυασμούς]*

*[και αντικατάσταση λογότυπου άδειας όπου αυτό έχει μπει (σελ. 1, σελ. 2 και τελευταία)]*

- Εξαιρείται από την ως άνω άδεια υλικό που περιλαμβάνεται στις διαφάνειες του μαθήματος, και υπόκειται σε άλλου τύπου άδεια χρήσης. Η άδεια χρήσης στην οποία υπόκειται το υλικό αυτό αναφέρεται ρητώς.

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



## ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΩΣ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΑΣΤΕΡΙΑ

Η ενέργεια στον Ήλιο (και στα άλλα αστέρια της “Κύριας Ακολουθίας”) παράγεται μέσω αντιδράσεων σύντηξης.

Σύντηξη: πυρηνική αντίδραση μέσω της οποίας βαρείς πυρήνες παράγονται από ελφρότερου.

Οι σημαντικότερες αντιδράσεις σε αστέρες κύριας ακολουθίας είναι αντιδράσεις κατά τις οποίες πυρήνες Υδρογόνου (πρωτόνια) αντιδρούν και μας δίνουν ένα πυρήνα Ηλίου:

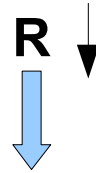


Ωστόσο, μάζα πυρήνα Ηλίου  $\sim 3.97$  μάζα πρωτονίου, άρα, κατά τη διάρκεια της αντίδρασης εμφανίζεται έλλειμα μάζας  $\sim 0.028$  μάζας πρωτονίου, και αυτή η μάζα είναι “διαθέσιμη” για τη θέρμανση του εσωτερικού του Ήλιου.

Για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις σύντηξης και δημιουργίας πυρήνων Ηλίου στο εσωτερικό του Ήλιου, θα πρέπει η θερμοκρασία να είναι “αρκετά υψηλή”.

## ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ/ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

ΣΥΣΤΟΛΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΗΛΙΟΥ. ΛΟΓΩ ΙΔΙΟΒΑΡΥΤΗΤΑΣ,



### ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΝΕΤΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

(η βαρυτική συστολή δρα ως πηγή ενέργειας – θεώρημα Virial)

Η ΜΙΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΕΙΤΑΙ, Η ΑΛΛΗ ΜΙΣΗ ΑΥΞΑΝΕΙ ΤΗΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

(ΑΡΑ:  $T \uparrow$  και  $P \uparrow$ ).

Η ΣΥΣΤΟΛΗ ΣΥΝΕΧΙΖΕΤΑΙ, Η ΑΚΤΙΝΑ ΜΙΚΡΑΙΝΕΙ, Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ  
(ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ) ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ, ΕΩΣ ΟΤΟΥ

$$T_c \sim 1.5 \times 10^6 \text{ K},$$

ΟΠΟΤΕ ΑΡΧΙΖΟΥΝ Η ΘΕΡΜΟΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ:



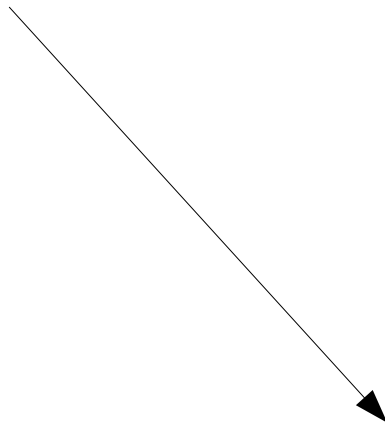
Κατά τη διάρκεια αυτών των αντιδράσεων απελευθερώνεται ενέργεια  
ίση με:  $0.007 \times m_p c^2$  (ανά πρωτόνιο)

Τώρα στο αστέρι υπάρχει μία επιπλέον πηγή παραγωγής ενέργειας. Οπότε η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνονται κι άλλο.

Είναι η πίεση ικανή να αντισταθμίσει την ιδιοβαρύτητα;

**ΝΑΙ:**

Αστέρας σταθερός.



**ΟΧΙ:**

Η συστολή συνεχίζεται.  
Η θερμοκρασία αυξάνεται.  
Ο ρυθμός των πυρηνικών αντιδράσεων αυξάνεται, και άρα και η θερμοκρασία, έως ότου η πίεση αερίου είναι ικανή να αντισταθμίσει την ιδιοβαρύτητα του αστέρα.



ΝΑΙ, ΑΛΛΑ ΓΙΑΤΙ Η ΠΙΕΣΗ ΔΕΝ ΑΥΞΑΝΕΙ ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΑ ΣΤΟ ΑΣΤΕΡΙ;

**ΕΠΕΙΔΗ Ο ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

**ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ προκαλεί ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ και άρα ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΑΣΤΕΡΙΟΥ οπότε Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΛΑΤΤΩΝΕΤΑΙ και άρα και Η ΠΙΕΣΗ, και αυτή η ελάττωση προκαλεί ΣΥΣΤΟΛΗ ΑΣΤΕΡΙΟΥ.**

Από κει και πέρα ο Ήλιος (το αστέρι) βρίσκεται σε:

**1) ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ (ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ) ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ:**

**ΠΙΕΣΗ (στο εσωτερικό του αστέρα) = ΒΑΡΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΑΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ,  
ΠΟΥ ΕΚΤΕΙΝΕΤΑΙ ΕΩΣ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ.**

**ΚΑΙ 2) ΣΕ ΘΕΡΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ:**

**ΠΟΣΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΕΤΑΙ ΠΡΟΣ ΤΑ ΕΞΩ ΜΕ ΔΙΑΧΥΣΗ  
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ=ΕΚΛΥΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ.**

ΦΩΤΟΝΙΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΣΤΡΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΥΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ (ΕΝΕΡΓΕΙΑ)  
ΠΡΟΣ ΤΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ (ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΥΨΗΛΗΣ  
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ) ΜΕΣΩ “ΔΙΑΧΥΣΗΣ  
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ” (ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΧΑΙΟΥ ΒΗΜΑΤΙΣΜΟΥ).

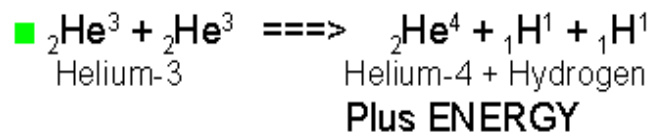
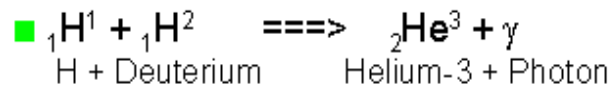
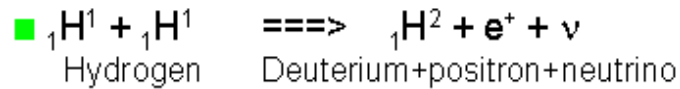
ΒΕΒΑΙΑ, ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΑΣΤΕΡΑ, Ο “ΒΗΜΑΤΙΣΜΟΣ” ΜΕΤΑΤΡΕΠΕΤΑΙ ΣΕ “ΠΤΗΣΗ”:  
ΤΟ ΑΣΤΕΡΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΕΙ (1ος ΝΟΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ).

ΤΑ ΦΩΤΟΝΙΑ ΑΡΧΙΚΑ ΗΤΑΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Ακτινες  $\gamma, X$ ) ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΑΚΑ  
ΜΕΤΑΤΡΕΠΟΝΤΑΙ ΣΕ ΦΩΤΟΝΙΑ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (οπτικού φωτός στην  
επιφάνεια).

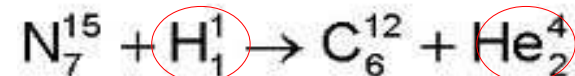
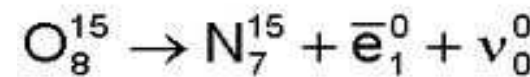
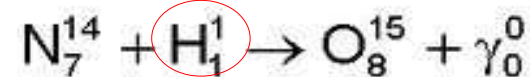
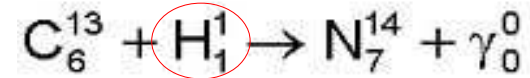
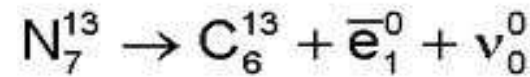
Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ “ΧΑΘΗΚΕ” ΚΑΤΑΝΑΛΩΘΗΚΕ ΣΤΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ  
ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΑΣΤΕΡΙΟΥ.

# Πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης στο εσωτερικό των αστέρων για την παραγωγή Ηλίου.

## Αλυσίδα πρωτονίου-πρωτονίου



## Αλυσίδα CNO



Πραγματοποιείται σε αστέρια με μεγαλύτερη  $T_c$  απ' ότι στον Ήλιο.

## Αστρική πυρηνοσύνθεση στοιχείων βαρύτερων από He

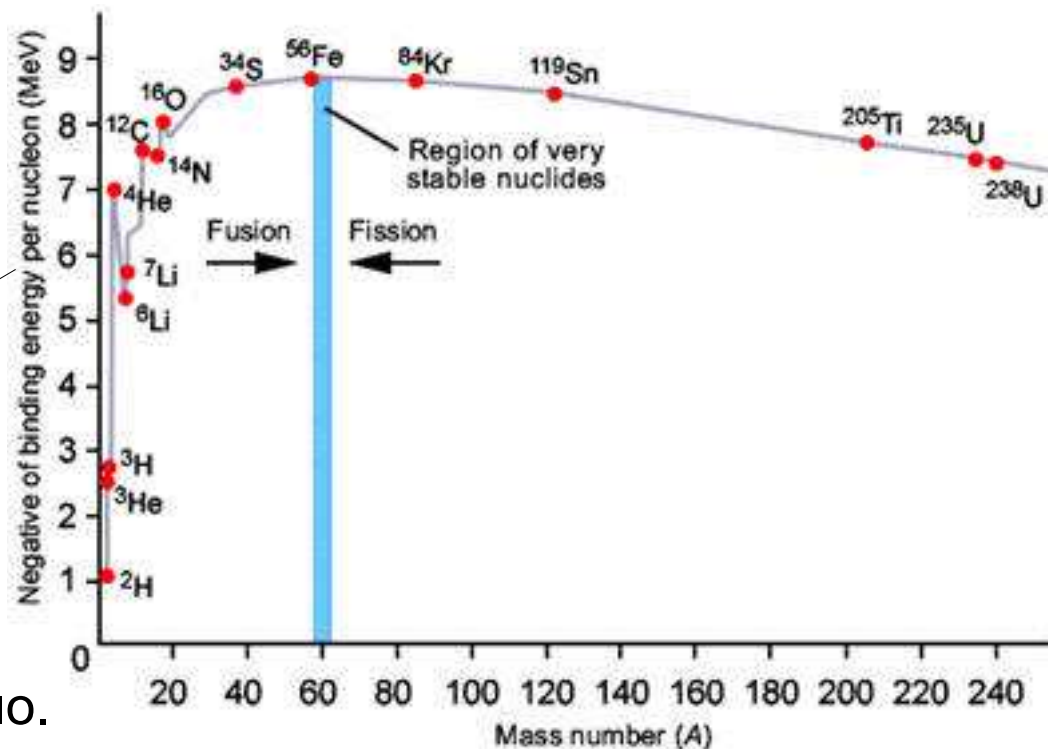
Στοιχεία με ατομικό βάρος < από εκείνου του σιδήρου συνθέτονται στο εσωτερικό των αστέρων μέσω πυρηνικής σύντηξης.

Γι' αυτά τα στοιχεία,  $\Delta m > 0$ , όπου  $\Delta m$ =διαφορά μάζας μεταξύ πυρήνων που αντιδρούν και τελικού πυρήνα. Και έτσι εμφανίζεται πλεόνασμα ενέργειας.

Για βαρύτερα όμως στοιχεία:

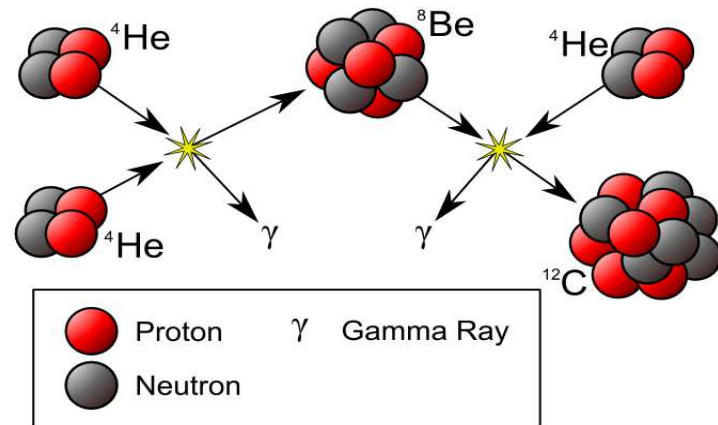
$\Delta m < 0$ , άρα δεν μπορεί να γίνει παραγωγή στοιχείων βαρύτερων από το σίδηρο στο εσωτερικό των αστέρων (παράγονται κατά τις εκρήξεις υπερκαινοφανών).

Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο.





## Η αντίδραση “3-άλφα”



α) Δύο πυρήνες Ηλίου αντιδρούν και δίνουν πυρήνα Be: ασταθής πυρήνας, που διασπάτε γρήγορα σε δύο πυρήνες ηλίου.

β) σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από  $\sim 10^8$  K, παρατηρείται πλεόνασμα πυρήνων βηρυλλίου.

γ) πυρήνας βηρυλλίου + άλφα σωματίδιο μας δίνει άνθρακα-12 (αλλά σε διεργεμένη κατάσταση).

# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ