

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ – ΣΥΝΤΗΞΗ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η αλματώδης εξέλιξη της πυρηνικής φυσικής τη δεκαετία του 1930 εκτός από τη σχάση βαρέων πυρήνων έφερε στο προσκήνιο και την σύντηξη ελαφρών πυρήνων σε βαρύτερους.

Ας δούμε βήμα-βήμα τη διαδικασία της σχάσης και της σύντηξης.

ΤΑ ΠΑΝΤΑ ΟΦΕΙΛΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΙΣΧΥΡΕΣ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ, ΣΤΙΣ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ, ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ Coulomb ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑ ΜΑΖΑΣ- ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

1. Στους ατομικούς πυρήνες τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται με ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ δυο πρωτονίων ή μεταξύ δύο νετρονίων ή μεταξύ πρωτονίου νετρονίου και είναι **ΠΑΝΤΑ ΕΛΚΤΙΚΕΣ** δυνάμεις μεταξύ των quark που τα αποτελούν.

2. Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις έχουν πολύ μικρή εμβέλεια της τάξης των 10^{-15} m και σε αυτή την ελάχιστη απόσταση είναι **πολύ πιο ισχυρές από τις δυνάμεις Coulomb που τείνουν να διαλύσουν τον πυρήνα**. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δώσουμε ενέργεια στον πυρήνα για να διαλυθεί.

3. Η ελάχιστη ενέργεια **E** που απαιτείται για να διασπάσουμε έναν πυρήνα στα συστατικά του νουκλεόνια ονομάζεται **ενέργεια σύνδεσης** του πυρήνα και εκφράζει την ενέργεια που συγκρατεί τα νουκλεόνια μέσα στον πυρήνα.

4. Στο σημείο αυτό να δώσουμε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ισοδυναμία μάζας – ενέργειας **$E = mc^2$ ή $m = E/c^2$ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ Η ΠΕΜΠΤΟΥΣΙΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ.**

Η περίφημη αυτή εξίσωση οδήγησε με την **ατομική βόμβα** σε εκατόμβη θυμάτων στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι και συνέπειες από τη **ραδιενέργεια** σε τρεις γενιές ανθρώπων, είναι έτοιμη για ακόμα μεγαλύτερες καταστροφές με τη **βόμβα υδρογόνου**, όμως έδωσε και τεράστια ποσά **ηλεκτρικής ενέργειας** στην ανθρωπότητα και είναι έτοιμη να δώσει πολύ – πολύ μεγαλύτερα στο μέλλον.

Η ενέργεια σύνδεσης λοιπόν είναι ισοδύναμη με μάζα. Έτσι:

ΠΥΡΗΝΑΣ ΜΕ ΜΑΖΑ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΩΝ m_α ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ $E \rightarrow$ ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΑ ΜΑΖΑΣ m_τ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΗΔΕΝ. ΑΡΑ:

$$m_\alpha + E/c^2 = m_\tau + 0 \quad (1)$$

ΔΗΛΑΔΗ Η ΜΑΖΑ ΤΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΩΝ m_τ ΕΙΝΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗ ΜΑΖΑ m_α ΤΩΝ ΙΔΙΩΝ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΩΝ ΜΕΣΑ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ. Αυτή η διαφορά μάζας $\Delta m = m_\tau - m_\alpha$ είναι ισοδύναμη με την ενέργεια σύνδεσης των νουκλεονίων του πυρήνα

Από την (1) \Rightarrow $E = \Delta mc^2$

5. Αν διαιρέσουμε την ενέργεια σύνδεσης ενός ατομικού πυρήνα με τον συνολικό αριθμό νουκλεονίων προκύπτει ένα μέγεθος γνωστό ως **ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο.**

Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τόσο πιο σταθερός είναι ο πυρήνας.

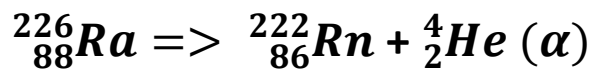
6. Σε έναν πυρήνα με μεγάλο αριθμό νουκλεονίων πχ ${}^{238}_{92}\text{U}$ πολλά νουκλεόνια βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους ώστε να εξασθενεί η ισχυρή αλληλεπίδραση. Η σχετική σταθερότητα αυτών των πυρήνων εξασφαλίζεται από την παρουσία περισσότερων νετρονίων από πρωτόνια **καθώς τα νετρόνια συνεισφέρουν στην ελκτική ισχυρή αλληλεπίδραση αλλά όχι στην απωστική δύναμη Coulomb.** Ο πυρήνας του Ουρανίου – 238 για παράδειγμα αποτελείται από 92 πρωτόνια και 146 νετρόνια.

7. Όσο προχωράμε από τους βαρύτερους πυρήνες στους ελαφρύτερους ο αρχικός μητρικός πυρήνας δίνει θυγατρικούς πυρήνες όλο και πιο σταθερούς. Οι θυγατρικοί πυρήνες μπορεί να είναι πυρήνες του ίδιου στοιχείου (**ισότοπα**) ή διαφορετικού. **Οι θυγατρικοί πυρήνες έχουν πάντα πιο μεγάλη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από τους μητρικούς και ως αποτέλεσμα μικρότερη μάζα από τους μητρικούς.** Θεωρητικά η διάσπαση πυρήνων μπορεί να οδηγήσει μέχρι τον πιο σταθερό πυρήνα που είναι ο ${}^{56}\text{Fe}$.

8. Ένας ασταθής πυρήνας μπορεί από μόνος να δώσει έναν πιο σταθερό με ταυτόχρονη εκπομπή ιονίζουσας ακτινοβολίας α , β ή γ (**ραδιενέργεια**).

Εκπομπή ακτίνων γ συμβαίνει όταν αποδιεγείρεται ένας διεγερμένος πυρήνας.

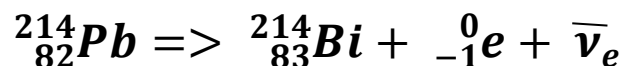
Εκπομπή ακτίνων α ή πυρήνων ${}^4_2\text{He}$. πχ



Κατά τη διάσπαση διατηρούνται, εκτός από την μάζα – ενέργεια, η ορμή, ο ατομικός αριθμός(86+2 =88) και ο μαζικός(222+4 = 226).

Εκπομπή ακτίνων β ή ηλεκτρόνια ${}^0_{-1}e$

Στους πυρήνες των ατόμων δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια. Ηλεκτρόνια εκπέμπονται με μία διαδικασία γνωστή ως β διάσπαση, κατά την οποία **μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης** ένα κουάρκ ενός νετρονίου του πυρήνα αλλάζει γεύση μετατρέποντας το νετρόνιο σε πρωτόνιο(**udd =>udu**) με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και ενός αντινετρίνου ώστε να διατηρηθούν τα μεγέθη που είδαμε παραπάνω. Πχ



Ένας ραδιενεργός πυρήνας υφίσταται διαδοχικές διασπάσεις μέχρι να καταλήξει σε σταθερό πυρήνα. Επειδή κατά τη διαδικασία αυτή παρεμβαίνει η αργή ασθενής αλληλεπίδραση η διάσπαση δε γίνεται ακαριαία. Στην πυρηνική φυσική χρησιμοποιούμε τον λεγόμενο **χρόνο ημίσειας ζωής** που είναι ο χρόνος μέχρις ότου διασπαστούν οι μισοί από τους αρχικούς πυρήνες οπότε αρχίζει να εξασθενεί και η ραδιενέργεια.

Αν N_0 ο αριθμός των αρχικών πυρήνων και N των τελικών τότε σε χρόνο t οι πυρήνες ελαττώνονται εκθετικά και θα ισχύει

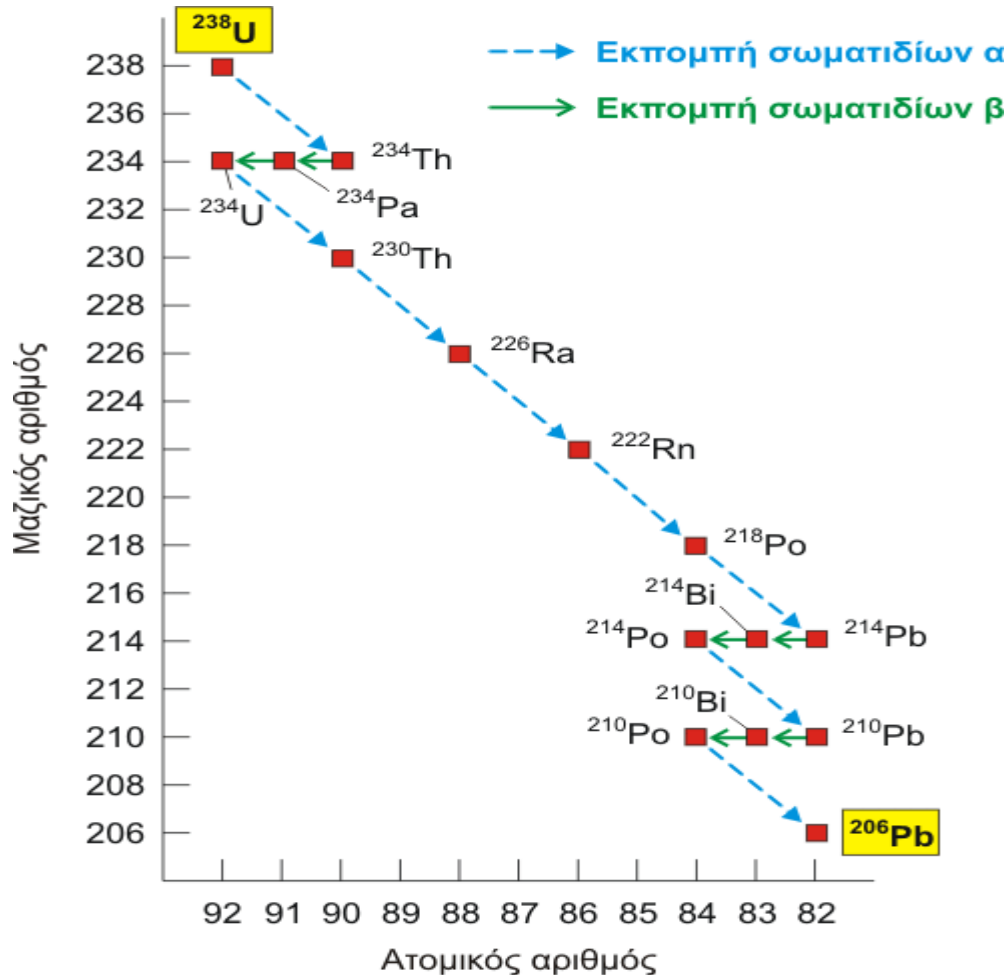
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ όπου } \lambda \text{ σταθερά.}$$

$$\text{Αν } T_{1/2} \text{ ο χρόνος ημίσειας ζωής τότε } N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

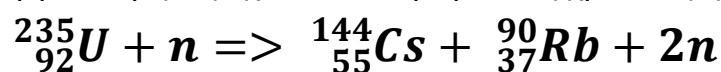
9. Η παραπάνω διάσπαση των ασταθών ραδιενεργών πυρήνων ονομαζόμενη και **σχάση(Fission)** μπορεί να γίνει και τεχνητά με τη χρήση νετρονίων βλημάτων τα οποία ως μη έχοντα φορτίο διεισδύουν στους πυρήνες προκαλώντας αστάθεια και τελικά σχάση. Από τη σχάση προκύπτουν κι άλλα νετρόνια που συνεχίζουν τη διαδικασία της σχάσης δίνοντας εκρηκτικά ένα μεγάλο πλήθος ραδιενεργών πυρήνων(**αλυσιδωτή αντίδραση**) μέχρι να καταλήξουμε σε σταθερό πυρήνα και φυσικά τεράστια ενέργεια με τη μορφή

ωστικού κύματος. Κάπως έτσι φτάσαμε στο **Manhattan project** και στην ατομική βόμβα.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε μία από τις διαδικασίες διάσπασης του $^{238}_{92}\text{U}$



Η διαδικασία της σχάσης όμως μπορεί να γίνει με ελεγχόμενο τρόπο σε πυρηνικούς αντιδραστήρες που επιβραδύνουν τα νετρόνια με κρούση στα άτομα υδρογόνου νερού. Έτσι η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα σε αυτή τη διαδικασία είναι η διάθεση των ραδιενεργών πυρήνων – αποβλήτων, καθώς δεν έχει βρεθεί ασφαλής τρόπος φύλαξής τους με δεδομένο ότι αρκετοί ραδιενεργοί πυρήνες έχουν πολύ μεγάλους χρόνους ημιζωής. Πχ



Τόσο το Cs όσο και το Rb έχουν μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από το U, έτσι κάθε πρωτόνιο και νετρόνιο των θυγατρικών πυρήνων έχει μικρότερη μάζα από τα πρωτόνια και νετρόνια του μητρικού

πυρήνα. Η μάζα των προϊόντων επομένως είναι μικρότερη από αυτήν των αντιδρώντων καθώς η προσθήκη ενός μόνο ελεύθερου νετρονίου στα προϊόντα δεν αντισταθμίζει την μικρότερη μάζα τους.

Τελικά υπάρχει έλλειμμα μάζας Δm όπου:

$$\Delta m = m_{\text{προϊόντων}} - m_{\text{αντιδρώντων}} = m_{\text{Cs}} + m_{\text{Rb}} + m_n - m_U = (239 \times 10^{-27} + 149,3 \times 10^{-27} + 1,675 \times 10^{-27} - 390,3 \times 10^{-27}) \text{ kg} \Rightarrow$$

$$\Delta m = -0,325 \times 10^{-27} \text{ kg και}$$

$$E = \Delta m c^2 \Rightarrow E = 2,925 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Από τα $390,3 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ουρανίου μόνο τα $0,325 \times 10^{-27} \text{ kg}$ δίνουν ενέργεια δηλαδή ένα ποσοστό μόλις 0,08%

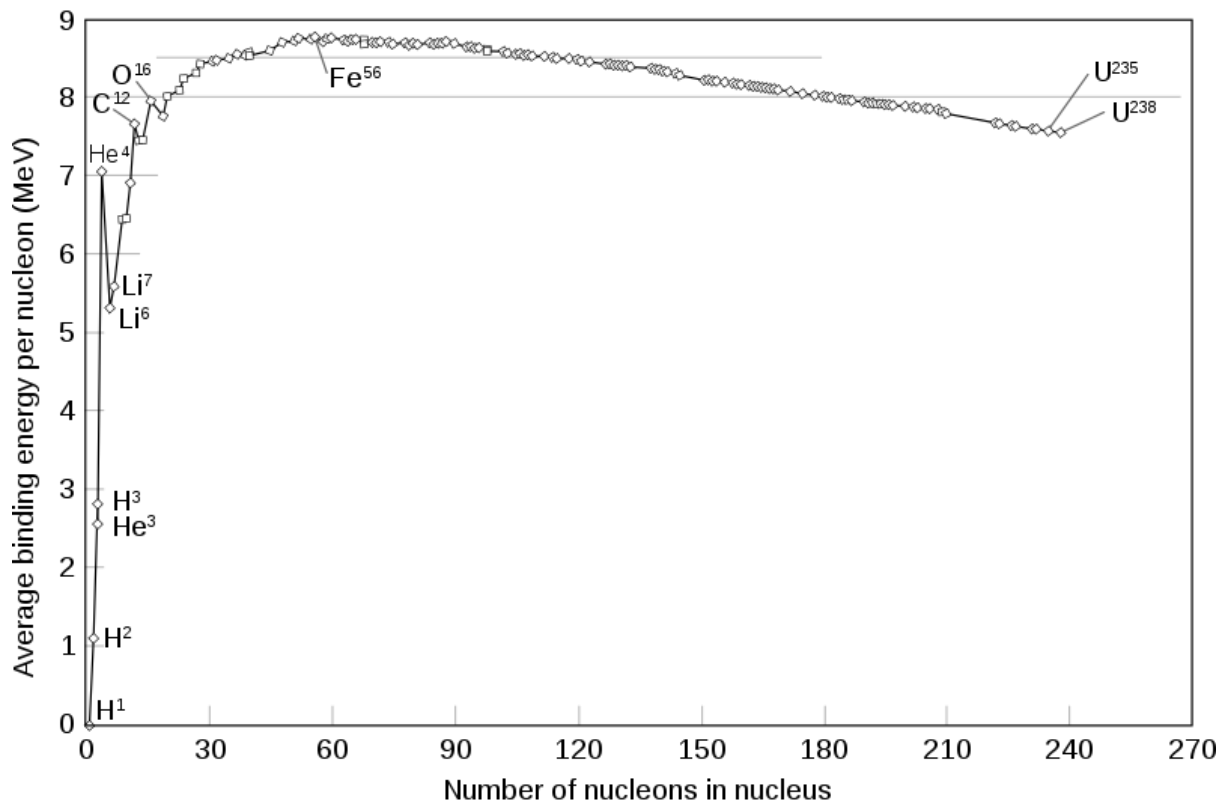
Τα $390,3 \times 10^{-27} \text{ kg } ^{235}\text{U}$ έδωσαν $E_{\text{ολ}} = 2,925 \times 10^{-11} \text{ J}$

Το $1 \text{ Kg } ^{235}\text{U}$ δίνει $E_{\text{ολ}} = 2,925 \times 10^{-11} / 390,3 \times 10^{-27}$

$$\underline{E_{\text{ολ}} = 7,5 \times 10^{13} \text{ J ή } E_{\text{ολ}} = 17.000 \text{ tn TNT}}$$

10. Μετά τον ^{56}Fe που είναι το πιο σταθερό στοιχείο στη φύση με τη μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο και καθώς ο μαζικός αριθμός μειώνεται η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο μειώνεται και η μάζα αυξάνεται. Άρα στοιχεία με ατομικό αριθμό μικρότερο του 56 δεν μπορούν να σχηματιστούν με σχάση. Στο παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των στοιχείων σαν συνάρτηση του μαζικού αριθμού.

Παρατηρούμε ότι ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των βαριών πυρήνων μεγαλώνει μέχρι τον Fe και στη συνέχεια να μικραίνει.

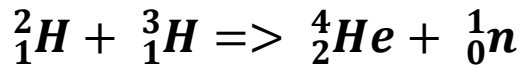


11. Θερμοπυρηνική σύντηξη(fusion)

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση στοιχεία με μαζικό αριθμό μικρότερο του 56 δε μπορούν να διασπαστούν σε απλούστερους. Υπό προϋποθέσεις όμως δύο ελαφροί πυρήνες μπορούν να ενωθούν(**σύντηξη**) και να δώσουν έναν πιο σταθερό.

Για να επιτευχθεί η σύντηξη χρειάζεται τα συντηκόμενα ιόντα να είναι με τη μορφή **πλάσματος σε πολύ υψηλή πίεση και θερμοκρασία**(πχ δύο πρωτόνια συντήκονται στους 15 εκατομμύρια Kelvin), επιπλέον συμβάλει και το **φαινόμενο σήραγγας** της κβαντικής μηχανικής ώστε να υπερνικηθούν οι τεράστιες απωστικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ των συντηκόμενων πυρήνων (**φράγμα Coulomb**).

Ας δούμε το παράδειγμα της σύντηξης δευτερίου - τρίτιου που χρησιμοποιείται στις βόμβες υδρογόνου αλλά και στην ελεγχόμενη παραγωγή ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς.



3,44416x10⁻²⁷ kg ${}^2_1\text{H}$ και 5,00815x10⁻²⁷ kg ${}^3_1\text{H}$ δίνουν 6,644656x10⁻²⁷ kg

${}^4_2\text{He} \Rightarrow \Delta m = - 0,033x10^{-27} \text{ kg}$, άρα ελευθερώνεται ενέργεια $E = \Delta mc^2 \Rightarrow$

$$E = 0,3x10^{-11} \text{ J}$$

Τα 3,44416x10⁻²⁷ kg + 5,00815x10⁻²⁷ kg = 8,352566x10⁻²⁷ kg συντηκόμενης ύλης δίνουν 0,3x10⁻¹¹ J

Το 1 kg συντηκόμενης ύλης θα δώσει 0,3x10⁻¹¹/8,352566x10⁻²⁷= 36x10¹³ J

δηλαδή σχεδόν **5 φορές περισσότερη από ότι ίδια ποσότητα σχάσιμης ύλης.** Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα συνηθέστερα στοιχεία μιας σύντηξης είναι **το ήλιο ο άνθρακας και το οξυγόνο** που όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα είναι **πιο σταθερά** από ότι αντιστοιχεί στον μαζικό τους αριθμό δηλαδή παρουσιάζουν **μεγάλη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο και άρα μικρή μάζα.** Η αιτία, για κάποιο άγνωστο λόγο, είναι ότι **τα στοιχεία αυτά έχουν ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων.**

Η σύντηξη είναι εφικτή μέχρι τον Fe καθώς από τον Fe και μετά η αντίδραση απαιτεί ενέργεια. Στοιχεία βαρύτερα του Fe πχ **χρυσός και λευκόχρυσος** σχηματίζονται κατά την **έκρηξη supernova** κυρίως όμως από πιο βίαια γεγονότα όπως η **σύγκρουση αστέρων νετρονίων.**

Η σύντηξη σαν προοπτική συζητήθηκε και κατά τη διάρκεια του **project Manhattan** πιθανότατα και στα εργαστήρια των ναζί. Τελικά τη δεκαετία του '60 έγινε εφικτή η κατασκευή **βόμβας υδρογόνου με σύντηξη δευτέρου τρίτιου.** Είναι χαρακτηριστικό ότι η ενεργοποίηση μιας βόμβας υδρογόνου απαιτεί αρχικά μία έκρηξη ατομικής βόμβας προκειμένου η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται και το ωστικό κύμα δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες. Με άλλα λόγια, για να κατανοήσουμε το μέγεθος της ισχύος μιας βόμβας υδρογόνου, η ατομική βόμβα χρησιμοποιείται σαν «σπίρτο» που θα την ανάψει.

ΩΦΕΛΙΜΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΣΥΝΤΗΞΗ. Η ΛΥΣΗ ή ΕΝΑ ΑΠΙΑΣΤΟ ΟΝΕΙΡΟ;

Η εντεινόμενη ενεργειακή κρίση με την σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και τις επιπτώσεις στο κλίμα, συνδυαζόμενη με την μη ασφαλή

φύλαξη των ραδιενεργών αποβλήτων της σχάσης, έχουν οδηγήσει εδώ και δεκαετίες την επιστημονική κοινότητα σε έναν αγώνα δρόμου για την παραγωγή ωφέλιμης ενέργειας από σύντηξη.

Η βασική ιδέα είναι να μιμηθούμε τον ήλιο στα γήινα εργαστήρια, που σημαίνει ότι πρέπει να δημιουργήσουμε πλάσμα με όση πίεση ασκεί ο ήλιος στα ιόντα του πυρήνα και θερμοκρασία 15.000.000 K. Η τεράστια πίεση αυξάνει την πυκνότητα του πλάσματος και η τεράστια θερμοκρασία αυξάνει την κινητική ενέργεια των ιόντων **ώστε αυτά να έρθουν τόσο πολύ κοντά μεταξύ τους ώστε το φαινόμενο σήραγγας να υπερνικήσει το φράγμα Coulomb και η ισχυρή αλληλεπίδραση να συγκρατήσει τα ιόντα σε έναν νέο πυρήνα και να ολοκληρωθεί το φαινόμενο που ονομάζουμε πυρηνική σύντηξη**. Όμως στα γήινα εργαστήρια είναι πρακτικά αδύνατον να πετύχουμε την πίεση που ασκεί η τεράστια μάζα του ήλιου στον πυρήνα του. Έτσι πρέπει να αυξήσουμε την θερμοκρασία πολύ πάνω από 100.000.000 K για να αυξήσουμε αρκετά την κινητική ενέργεια των ιόντων.

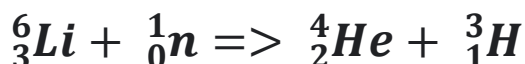
Τα προβλήματα όμως είναι πολλά και μεγάλα.

- 1.** Πρέπει η σύντηξη να είναι **ελεγχόμενη** όπως η σχάση στους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Στη σύντηξη όμως με τις ακραίες συνθήκες ο έλεγχος είναι πολύ πιο δύσκολος.
- 2.** Η ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία των συσκευών που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι μικρότερη από την ενέργεια που θα μας δώσει η σύντηξη.
- 3.** Η υψηλή θερμοκρασία δε μπορεί να διατηρηθεί επί μακρόν ώστε η σύντηξη να καταστεί αυτοσυντηρούμενη όπως στον ήλιο.
- 4.** Το τρίτιο είναι ένα βραχύβιο ισότοπο του υδρογόνου και πρέπει να παρασκευαστεί επιτόπου από Λίθιο.
- 5.** Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος από τεχνολογικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν, κυρίως η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας ή η άμεση μετατροπή της σε ηλεκτρική. Προς το παρόν η παραγόμενη ενέργεια διαχέεται στο περιβάλλον.

Που βρισκόμαστε σήμερα.

Έχει καταστεί σαφές ότι η αντίδραση σύντηξης που θα χρησιμοποιηθεί είναι η DT(σύντηξη δευτέρου – Τρίτιου). Η σύντηξη πρωτονίων είναι μία πάρα πολύ αργή αντίδραση λόγω ασθενούς αλληλεπίδρασης.

Το δευτέριο μπορεί να αποταχθεί από όλες τις μορφές νερού. Είναι ένας ευρέως διαθέσιμος, αβλαβής και ουσιαστικά ανεξάντλητος πόρος. Σε κάθε κυβικό μέτρο θαλασσινού νερού, για παράδειγμα, υπάρχουν 33 γραμμάρια δευτέριο. Όπως είδαμε το τρίτιο είναι ένα ταχέως αποσυντιθέμενο ραδιοϊσότοπο του υδρογόνου που εμφανίζεται μόνο σε ίχνη στη φύση. Μπορεί όμως να παραχθεί ή να αναπαραχθεί κατά τη διάρκεια της αντίδρασης σύντηξης όταν **τα αφόρτιστα νετρόνια υψηλής ενέργειας που διαφεύγουν από το πλάσμα αλληλεπιδρούν με Λίθιο στα τοιχώματα του εκάστοτε αντιδραστήρα σύμφωνα με την αντίδραση:**

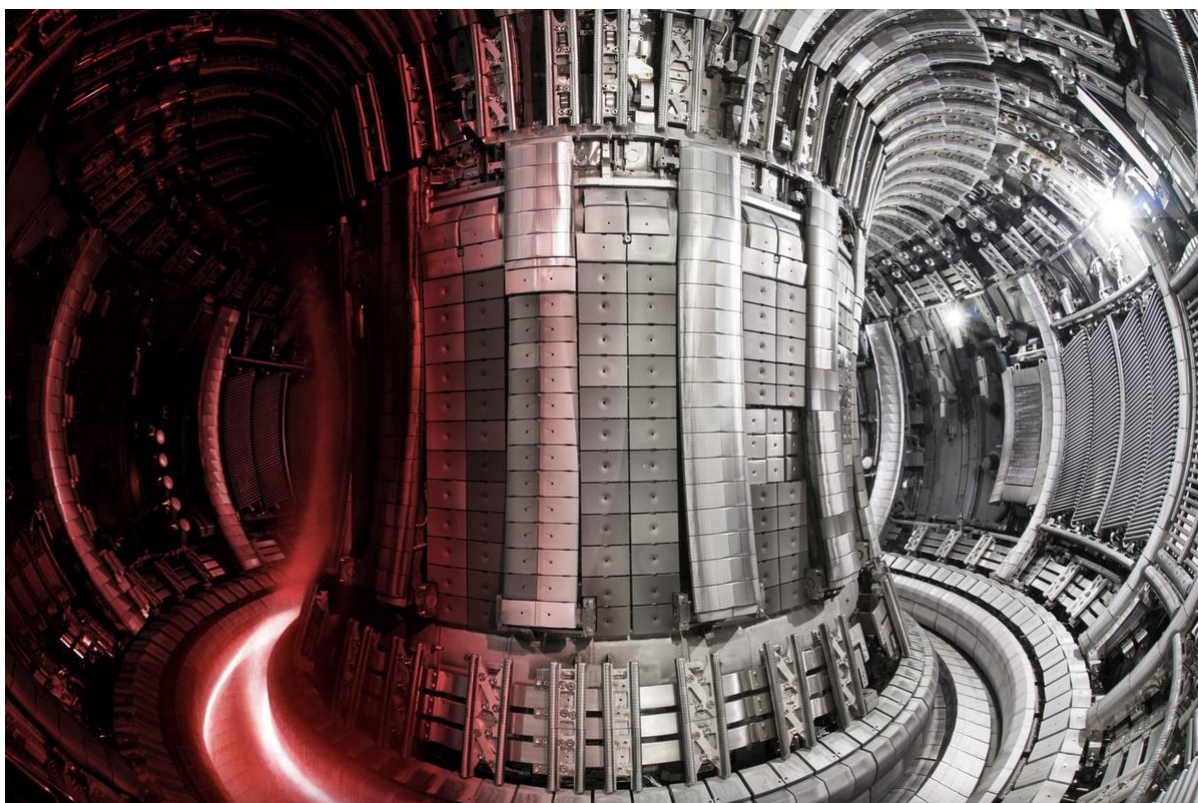


Το λίθιο εξάγεται εύκολα από πόρους της ξηράς και ήδη έχουμε ένα απόθεμα 20 Kg επαρκές για τη λειτουργία σταθμών ηλεκτροπαραγωγής σύντηξης για περισσότερα από 1.000 χρόνια. Επιπλέον, το λίθιο μπορεί να εξαχθεί από το νερό των ωκεανών, όπου τα αποθέματα είναι πρακτικά απεριόριστα (αρκετά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κόσμου για ~ 6 εκατομμύρια χρόνια). **Ας δούμε τώρα τις δύο πειραματικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας από σύντηξη που τρέχουν σήμερα.**

Στη μία προκειμένου να ελέγξουμε την σύντηξη χρησιμοποιούμε τον **μαγνητικό περιορισμό** του κινούμενου και θερμαινόμενου πλάσματος, ενώ η άλλη είναι **αδρανειακή σύντηξη** με το πλάσμα περιορισμένο σε ειδικά μικροσκοπικά σφαιρίδια.

1.ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Καρδιά οποιουδήποτε αντιδραστήρα σύντηξης που χρησιμοποιεί τον μαγνητικό περιορισμό κινούμενου πλάσματος που **αντιστοιχεί σε ρεύμα**, είναι το **tokamak**. Το tokamak είναι μία συσκευή που χρησιμοποιεί ένα πανίσχυρο μαγνητικό πεδίο, ώστε η **δύναμη Lorentz** να περιορίσει το πλάσμα και να **κινείται σε σχήμα ντόνατς χωρίς να έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της συσκευής(εικ. κάτω).**



ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ Tokamak

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ tokamak

Οι ισχυρές δυνάμεις **συμπιέζουν αδιαβατικά το πλάσμα** ώστε να ανέβει η θερμοκρασία και η κινητική ενέργεια των ιόντων. Με βοήθεια από εξωτερικές πηγές θέρμανσης η θερμοκρασία ανεβαίνει σε **θερμοκρασίες σύντηξης περίπου 150.000.000 K**. Τα ιόντα του ταχύτατα κινούμενου καυτού πλάσματος λόγω του περιορισμού τους σε πολύ μικρή διατομή συγκρούονται και οδηγούνται σε σύντηξη.

Η ιδέα του μαγνητικού περιορισμού του πλάσματος πιστώνεται στον μεγάλο Σοβιετικό φυσικό **Αντρέι Ζαχάροφ** τη δεκαετία του '50. Έκτοτε έγιναν πολλές δοκιμές μέχρι τη δεκαετία του '70 οπότε και ανέλαβαν Άγγλοι φυσικοί και μηχανικοί που χρησιμοποίησαν πλάσμα δευτέρου – τρίτιου και πιο εξελιγμένο tokamak. Το σύστημα γνωστό ως **Joint European Torus(JET)** είχε στόχο το **νεκρό σημείο, δηλαδή ίση ενέργεια κατανάλωσης με αυτήν που λαμβάνουμε**. Μετά από πολλές αποτυχημένες προσπάθειες και βελτιώσεις το 2020 το JET έφτασε σε μια ισχύ εξόδου 16 MW έναντι 24 MW ισχύος εισόδου.

Αυτή η σύντομη ιστορική αναδρομή δείχνει τη τεράστια δυσκολία του εγχειρήματος παραγωγής ενέργειας από σύντηξη. Κατέστη σαφές ότι μία

χώρα από μόνη της είναι πρακτικά αδύνατον να κατασκευάσει έναν πανάκριβο αντιδραστήρα που θα είχε απόδοση μεγαλύτερη από 100%. Έτσι το 1985 σε μία συνάντηση Ρίγκαν Γκορμπατσόφ γεννήθηκε η ιδέα ενός **διεθνούς θερμοπυρηνικού πειραματικού αντιδραστήρα σύντηξης(ITER)**. Η ιδέα έγινε πράξη την επόμενη χρονιά οπότε και υπεγράφη συμφωνία μεταξύ ΗΠΑ, Σοβιετικής Ένωσης, Ευρωπαϊκής Ένωσης και Ιαπωνίας.

Ο Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας (ITER) που κατασκευάζεται στη νότια Γαλλία θα είναι ο μεγαλύτερος αντιδραστήρας σύντηξης με επεξεργασία 10πλασιας ποσότητας πλάσματος από κάθε άλλον μέχρι σήμερα. Αναμένεται να δώσει τα πρώτα αποτελέσματα το 2035, με στόχο την παραγωγή δεκαπλάσιας ενέργειας από αυτή που θα χρειαστεί για τη λειτουργία του.

Το σύστημα μαγνητών που χρησιμοποιείται στο tokamak του ITER είναι το μεγαλύτερο **υπεραγώγιμο σύστημα μαγνητών** που έχει κατασκευαστεί ποτέ. Το σύστημα θα χρησιμοποιήσει τρεις τύπους μαγνητών για να επιτύχει περιορισμό του πλάσματος. Έναν **κεντρικό μαγνήτη - σωληνοειδές, πηνία σπειροειδούς πεδίου και πηνία διόρθωσης**. Το κεντρικό σωληνοειδές έχει ύψος 18 μέτρα πλάτος 4,3 μέτρα και βάρος 1000 τόνους. Θα χρησιμοποιηθεί **υπεραγώγιμο νιόβιο-κασσίτερος** για να μεταφέρει **ρεύμα έντασης 45 kA και να δημιουργήσει πανίσχυρο μαγνητικό πεδίο 13 Tesla**.

Τα 18 πηνία σπειροειδούς πεδίου θα χρησιμοποιούν επίσης νιόβιο-κασσίτερο με ονομαστική ένταση πεδίου αιχμής **11,8 Tesla και αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια 41 Gigajoules**.

Οι πυρήνες ηλίου είναι επίσης φορτισμένοι και καθώς κινούνται και αυτοί κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου συγκρούονται με τους πυρήνες του πλάσματος αυξάνοντας την εσωτερική θερμότητα και μειώνοντας την εξωτερικά απαιτούμενη. Αυτό μειώνει την ισχύ εισόδου και αυξάνει την απόδοση. Επιπλέον με συνεχείς βελτιώσεις μπορεί να μηδενιστεί η εξωτερική θέρμανση και να καταστεί η αντίδραση **αυτοσυντηρούμενη**.

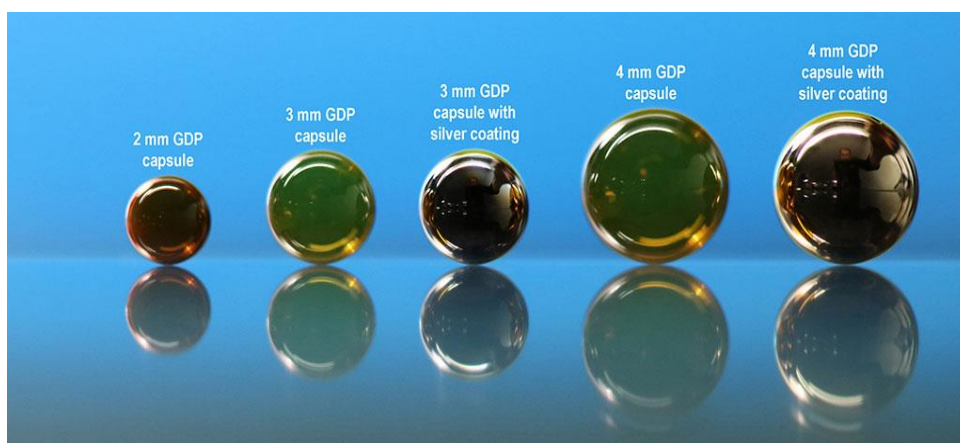
Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι πολλά χρόνια μετά το πέρας της δοκιμής το 2035 θα είμαστε σε θέση να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια από τον ITER, αν φυσικά η δοκιμή στεφτεί από επιτυχία.

2. Μέθοδος NIF

Η εθνική εγκατάσταση ανάφλεξης (National Ignition Facility - NIF) είναι μια ερευνητική εγκατάσταση **αδρανειακής σύντηξης περιορισμού (ICF)** που βασίζεται σε λέιζερ και βρίσκεται στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών. **Η αποστολή του NIF είναι να επιτύχει ανάφλεξη σύντηξης με υψηλό ενεργειακό κέρδος.** Το NIF φιλοξενεί το πιο ισχυρό λέιζερ στον κόσμο. Η κατασκευή του NIF ξεκίνησε το 1997 και ολοκληρώθηκε το 2009. Ακολούθησαν πολλά πειράματα με συνεχείς τεχνικές βελτιώσεις μέχρις ότου στις 5 Δεκεμβρίου 2022 το NIF έφτασε για πρώτη φορά σε ενεργειακή απόδοση 154%.

Πως λειτουργεί το NIF

Το πλάσμα δευτέρου τρίτιου βρίσκεται στο εσωτερικό πολύ μικρής σφαίρας(εικ. κάτω).



Αυτή η σφαίρα τοποθετείται μέσα σε έναν χρυσό **κύλινδρο** - κάψουλα περίπου στο μέγεθος μιας γόμας μολυβιού ο οποίος στη συνέχεια τοποθετείται σε έναν βραχίονα στη μέση ενός μεγάλου θαλάμου που βρίσκονται τα λέιζερ.

Για να πυροδοτήσει τη σύντηξη, το NIF εκτοξεύει 192 δέσμες λέιζερ ταυτόχρονα.

Το ωστικό κύμα της ανάφλεξης φτάνει σε μέγιστη ταχύτητα 350 km/s αυξάνοντας την **πυκνότητα του καυσίμου από περίπου αυτή του νερού σε περίπου 100 φορές αυτή του μολύβδου.** Αυτή η **αδιαβατική συμπίεση** του καυσίμου αυξάνει τη θερμοκρασία του σε εκατοντάδες εκατομμύρια βαθμούς. Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι διεργασίες σύντηξης συμβαίνουν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα της τάξης των μs πριν το καύσιμο εκραγεί.

Παρά την επιτυχία του NIF, η εμπορευματοποίηση αυτού του τύπου αντιδραστήρα σύντηξης δεν θα ήταν εύκολη. Οι υπεύθυνοι του προγράμματος δηλώνουν ότι ένας τέτοιος αντιδραστήρας θα χρειαστεί να παράγει 50 έως 100 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτή που εκπέμπουν τα λέιζερ του για να καλύψει τη δική του χρήση ενέργειας και να τροφοδοτήσει το δίκτυο. Θα πρέπει επίσης να προκαλεί ανάφλεξη σε 10 κάψουλες το δευτερόλεπτο κάθε δευτερόλεπτο για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτή τη στιγμή κάψουλες καυσίμου είναι εξαιρετικά δαπανηρές στην κατασκευή τους.