

Ενεργειακά συστήματα

Κεφάλαιο 8

Πυρηνική ενέργεια

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ

λείπει επίπτωση ραδιενέργειας

Ιωάννης Γκιάλας

Βασισμένες σε σημειώσεις Πολυζάκη

# Το άτομο και η δομή του

- **Κβάντωση** = κατακερματισμός σε στοιχειώδη τμήματα ή πακέτα, ασυνέχεια  
**Απαγορευτική αρχή του Pauli:** Τα ηλεκτρόνια ενός οποιουδήποτε ατόμου, κινούνται κατανεμημένα σε τροχιές διαφόρων ακτίνων. Ηλεκτρόνια που κινούνται σε τροχιές της ίδιας ακτίνας λέμε ότι ανήκουν στον ίδιο φλοιό. Η κατάσταση του ατόμου με τη μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι η μόνη ευσταθής και ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Υπό συνήθεις συνθήκες το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Οι άλλες επιτρεπόμενες καταστάσεις είναι μη ευσταθείς και ονομάζονται, και είναι, **καταστάσεις διέγερσης**, οι δε αντίστοιχες ενεργειακές στάθμες ονομάζονται στάθμες διέγερσης. Ηλεκτρόνια των ατόμων στοιχείων με μεγάλο ατομικό αριθμό  $Z$ , μετά από κατάλληλη διέγερση, αποδιεγείρονται εκπέμποντας φωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από αυτές του ορατού φάσματος και της υπεριώδους ακτινοβολίας, δηλαδή ενέργειες από 1-100keV. Όταν ο Roentgen ανακάλυψε αυτήν την ακτινοβολία πριν από το τέλος του 20 ουαίωνα την ονόμασε **ακτίνες X**

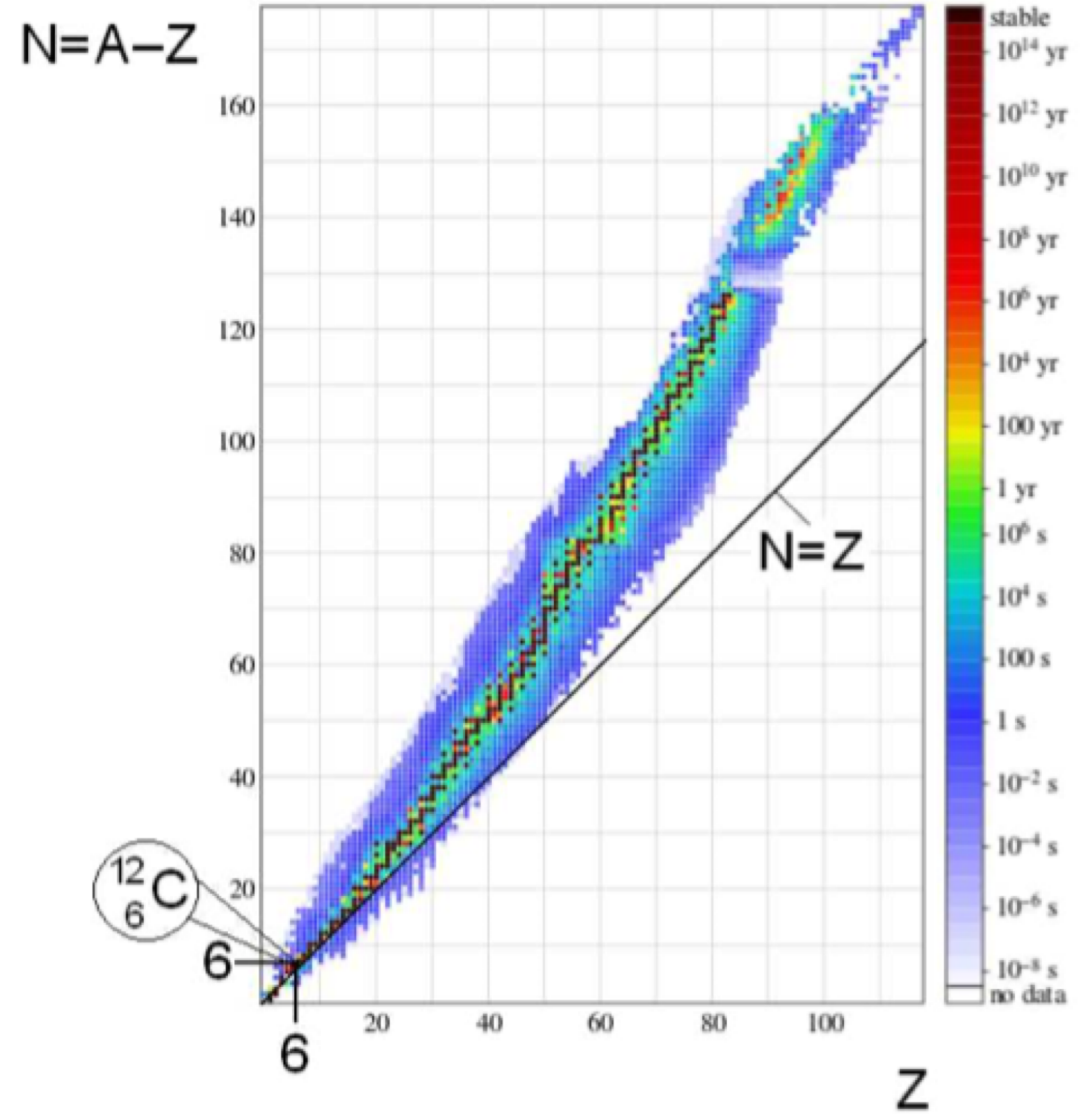
# Το άτομο και η δομή του

Αν τώρα σε ηλεκτρόνιο ατόμου προσδοθεί ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια τιμή, τότε το ηλεκτρόνιο αυτό είναι δυνατόν να αποσπασθεί από το άτομο, να καταστεί ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Κάτι τέτοιο μπορεί π.χ. να γίνει με σύγκρουση του ατόμου με σωματίδιο κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα. Όταν ένα ηλεκτρόνιο αποσπασθεί από το άτομο, τότε το άτομο έχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο από όσα χρειάζεται για να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, οπότε είναι φορτισμένο με το κβάντο του θετικού ηλεκτρικού φορτίου. Στην κατάσταση αυτή το άτομο είναι ιόν Η απόσπαση ενός ή περισσοτέρων ηλεκτρονίων από ένα άτομο ονομάζεται ιοντισμός του ατόμου, η δε ενέργεια που απαιτείται να προσδοθεί στο ηλεκτρόνιο για τον ιοντισμό ενός συγκεκριμένου ατόμου ονομάζεται ενέργεια ιοντισμού του ατόμου αυτού. Τα ιόντα είναι εξαιρετικά επιρρεπή στην πρόκληση χημικών αντιδράσεων λόγω ακριβώς των ηλεκτρονίων που τους λείπουν.

# Ισότοπα

**Ισότοπα** ή νουκλίδια στοιχεία: Τα στοιχεία στα οποία ανήκουν οι πυρήνες αυτοί έχουν ίδιο  $Z$  (αρ. πρωτονίων) αλλά διαφορετικό  $A$  (διαφορετικό αριθμό νετρονίων).

Ο αριθμός  $Z$  των πρωτονίων στον πυρήνα καθορίζει τις χημικές ιδιότητες, είναι η χημικι ταυτότητα του ατόμου. Διαφορετικά ισότοπο ενός στοιχείου έχουν κάπως διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως σημείο τήξης, σημείο βρασμού, ρυθμό διάχυσης, που παρουσιάζουν όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη βιομηχανία.



# Ο πυρήνας του ατόμου

Ο πυρήνας συνίσταται από στοιχειώδη σωματίδια τα πρωτόνια και τα νετρόνια που μαζί ονομάζονται νουκλεόνια. Ο πυρήνας περιέχει  $Z$  και  $N$  σε αριθμό πρωτόνια και νετρόνια, αντίστοιχα. Ισάριθμα προς τα πρωτόνια, δηλαδή  $Z$  ηλεκτρόνια του ατόμου περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα.  **$Z$  καλείται ατομικός αριθμός**,  $N$  αριθμός νετρονίων ή νετρονικός αριθμός. Το άθροισμα  **$A=Z+N$  καλείται μαζικός αριθμός** ή αριθμός μάζας και συμβολίζεται με το  $A$ . Η μάζα του πυρήνα είναι ανάλογη του μαζικού αριθμού

$$M = Zm_p + Nm_n \approx (Z + N)m_p = Am_p$$

$$m_p = m_n = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

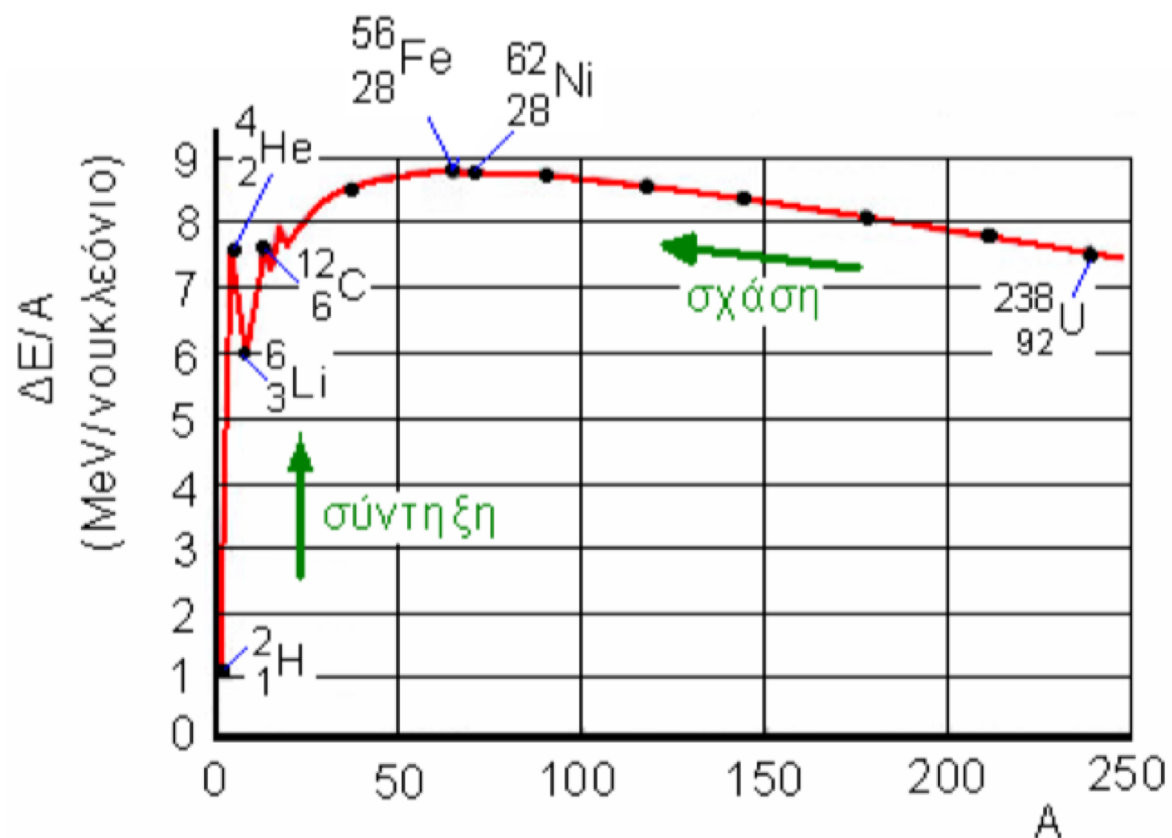
# Έλλειμμα μάζας – Ενέργεια σύνδεσης

**Έλλειμμα μάζας:** η μάζα του πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα αυτό, παρατηρείται δηλαδή μια διαφορά  $\Delta m$ . Η διαφορά αυτή είναι ισοδύναμη με την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στις δύο καταστάσεις:

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

Το μεγαλύτερο έλλειμμα μάζας το έχει το στοιχείο του σιδήρου **Ενέργεια σύνδεσης** (binding energy) του πυρήνα: Η ενέργεια  $\Delta E$  ελευθερώνεται κατά το σχηματισμό του πυρήνα από τα συστατικά του νουκλεόνια με αποτέλεσμα τη μειωμένη μάζα του πυρήνα. Η ίδια ενέργεια πρέπει να προσδοθεί στον πυρήνα για να αποσυντεθεί στα συστατικά του νουκλεόνια.

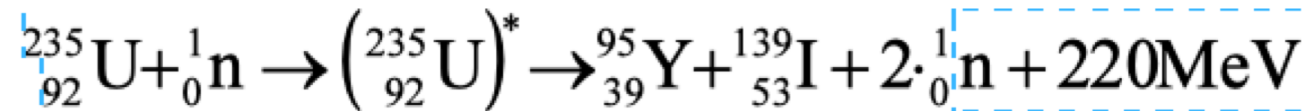
# Έλλειμμα μάζας – Ενέργεια σύνδεσης



$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{Z,A} \Rightarrow \Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_{Z,A}$$

# Έλλειμμα μάζας – Ενέργεια σύνδεσης

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να βρεθεί βαρύς πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης με μεγάλη πιθανότητα σχάσης είναι να απορροφήσει ένα νετρόνιο στον πυρήνα. Προκύπτει έτσι από τον αρχικό πυρήνα μαζικού αριθμού  $A$  ένας καινούργιος πυρήνας, ο «σύνθετος πυρήνας» μαζικού αριθμού  $A+1$ , με ενέργεια διέγερσης ίση με το άθροισμα της κινητικής ενέργειας και της ενέργειας σύνδεσης του νετρονίου βλήματος. Αυτός, ο σύνθετος πυρήνας, είναι που παθαίνει τη σχάση, (fission):



Για ορισμένα ισότοπα (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241) η ενέργεια σύνδεσης του νετρονίου είναι αρκετή μόνη της, χωρίς την κινητική ενέργεια του νετρονίου, για να προκαλέσει σχάση. Είναι έτσι δυνατή η σχάση με νετρόνια ασήμαντης κινητικής ενέργειας.

Τα ισότοπα αυτά ονομάζονται σχάσιμα και από αυτά μόνο το U-235 βρίσκεται στη φύση σε αξιόλογες ποσότητες, τα υπόλοιπα τρία είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου.



# Έλλειμμα μάζας – Ενέργεια σύνδεσης

**Σύντηξη (fusion)** ελαφρών πυρήνων:



Αυτή είναι η πηγή της ενέργειας στα αστέρια, όπως ο ήλιος και η βόμβα υδρογόνου. Για να πραγματοποιηθεί όμως η σύντηξη πρέπει οι ελαφροί πυρήνες να συγκρουστούν με κολοσιαία ενέργεια, ώστε να υπερνικήσουν τη δύναμη Coulomb. Τέτοιες κινητικές ενέργειες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία της τάξης των  $10^8\text{K}$ .

Ελεγχόμενη αντίδραση σύντηξης από τον άνθρωπο έχει πραγματοποιηθεί αλλά δεν έχει αποδειχθεί ότι είναι ενεργειακά βιώσιμη ακόμα. Οι μεγάλοι πυρήνες με μαζικό αριθμό  $>200$  και ατομικό αριθμό  $>90$  είναι ευκολότερο να υποστούν σχάση από ότι οι ελαφροί πυρήνες να υποστούν σύντηξη διότι η ενέργεια ενεργοποίησης των είναι πολύ χαμηλότερη.

Κατά τη καύση ενός ατόμου άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  εκλύεται ποσόν ενέργειας της τάξης των  $4\text{eV}$ .

# Πυρηνικές δυνάμεις

# Ραδιενέργεια

- Ραδιενεργός διάσπαση του ασταθούς πυρήνα: Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθείς δηλαδή από μόνοι τους -χωρίς καμιά εξωτερική διέγερση- είτε μετατρέπονται σε κάποιο άλλο πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια, ή κάποια νουκλεόνια τους μεταβαίνουν από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη εκπέμποντας φωτόνια. Ο αρχικός (διασπώμενος) πυρήνας ονομάζεται μητρικός ενώ τελικός πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση ονομάζεται θυγατρικός. Τα σωματίδια εκπέμπονται με σημαντική ενέργεια και η εκπομπή τους χαρακτηρίζεται ραδιενεργός ακτινοβολία. Ραδιενέργεια ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης και τυχαίας διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών.
- Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες, κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων, είναι:
- Εκπομπή σωματιδίων α, (ακτινοβολία α). Το σωματίδιο α συγκροτείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, είναι δηλαδή πυρήνας ηλίου  ${}_2^4\text{He}$
- Εκπομπή σωματιδίου β-, (ακτινοβολία β). Είναι ένα ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα κατά τη μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι αυξημένος κατά 1 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός ν αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β -συνοδεύεται από εκπομπή ενός αντινετρίνιου.

# Ραδιενέργεια

- Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, (Ακτινοβολία  $\gamma$ ). Είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δύο σταθμών ( $\approx 0.1-10\text{MeV}$ ).

# Ραδιενέργεια

Θεμελιώδης εξίσωση των ραδιενεργών διασπάσεων:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Ρυθμός διάσπασης ή ένταση του ραδιενεργού, **R**:

$$R = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow R = R_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

**σταθερά διάσπασης:  $\lambda$**

**ενεργότητα (R) ή απλά ραδιενέργεια**

$$R_0 = R(0) = \lambda \cdot N_0$$

$N_0$  είναι ο αριθμός των μητρικών πυρήνων τη στιγμή  $t=0$

$N(t)$  ο αριθμός των μητρικών πυρήνων που επιβιώνουν μέχρι τη στιγμή  $t$

# Ραδιενέργεια

- Μονάδα (μικρή) ενεργότητας (ραδιενέργειας) στο σύστημα μονάδων SI: είναι το Bequerel  $1\text{Bq}=1\text{διάσπαση/s}$ . Παλαιότερη (μεγάλη) μονάδα ενεργότητας, η οποία όμως συνεχίζει να χρησιμοποιείται, είναι το Curie (σύμβολο Ci), και ορίζεται ως:  **$1\text{Ci}=3.7\cdot 10^{10}\text{διάσπαση/s}=3.7\cdot 10^{10}\text{Bq}$**  Το Ci είναι προφανώς μεγάλη μονάδα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του:  $1\text{mCi}=10^{-3}\text{Ci}$  και  $1\mu\text{Ci}=10^{-6}\text{Ci}$ .
- Η ενεργότητα μιας ποσότητας υλικού εκφρασμένη σε Ci ή Bq δίνει το συνολικό ρυθμό διασπάσεων, δεν περιέχει όμως καμιά πληροφορία σχετικά με το είδος ακτινοβολιών που εκπέμπονται ή τις πιθανές βιολογικές ή άλλες επιπτώσεις.
- Χρόνος ημίσειας ζωής ή χρόνος υποδιπλασιασμού ( $T$  ή  $T_{1/2}$ ): χαρακτηριστική σταθερά των ραδιενεργών στοιχείων. Επειδή το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης είναι όπως είπαμε στατιστικό, δεν μπορούμε να προβλέψουμε πότε θα διασπαστεί ένας πυρήνας, δηλαδή δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί εάν θα διασπαστεί εντός μηδενικού χρόνου ή θα ζήσει άπειρο χρόνο, μπορούμε όμως να υπολογίσουμε τη μέση ζωή (μέσος χρόνος ζωής)  $\tau$  των πυρήνων ορισμένου είδους. Από τον ορισμό της μέσης τιμής:

$$\tau = \int t p(t) dt$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Όπου  $p(t)dt$  είναι η πιθανότητα να επιβιώσει ο πυρήνας επί χρόνο  $t$  και να διασπαστεί στο διάστημα  $t$  σε  $t+dt$

$$T=0.693\tau$$

# Πυρηνικές αντιδράσεις

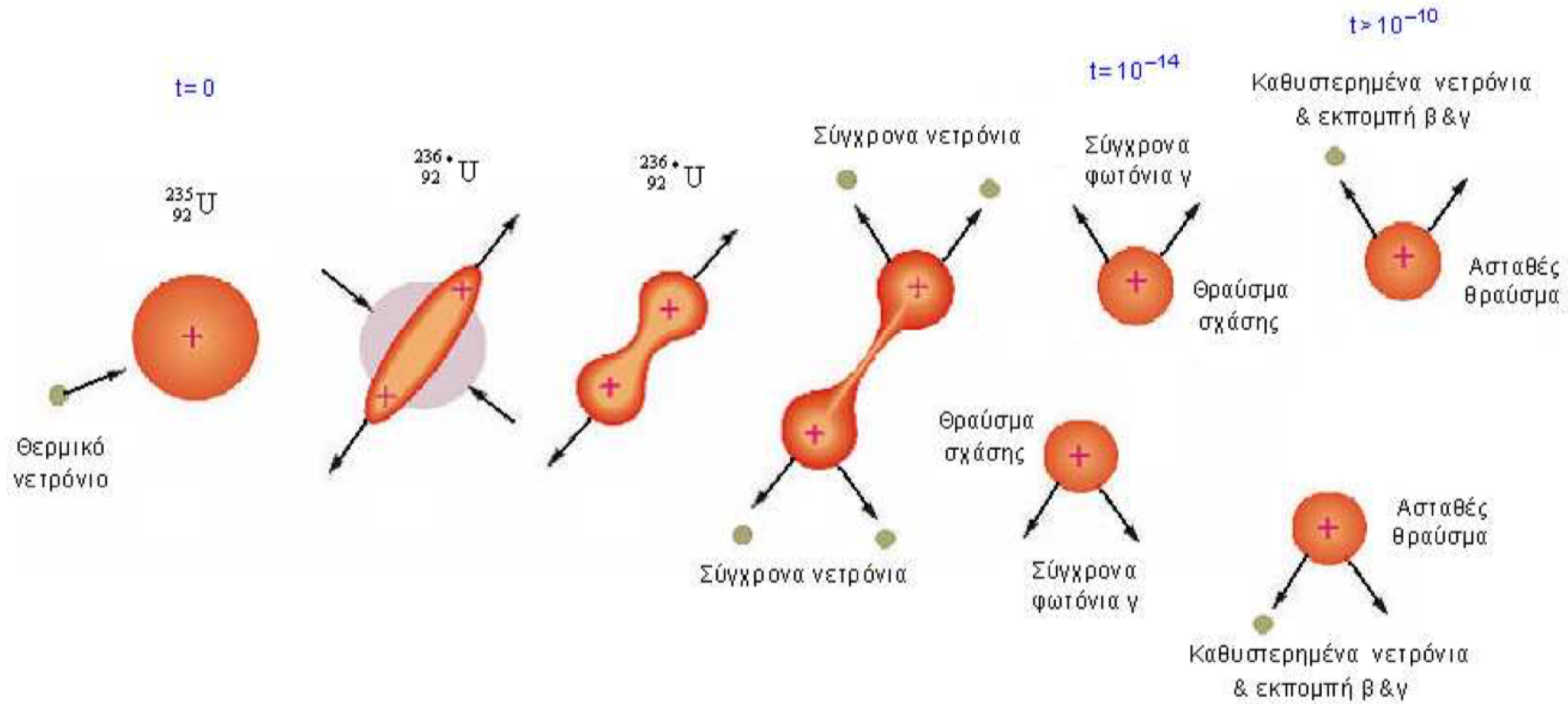
- Ραδιενεργός σύλληψη ( $n, \gamma$ ): Ο σύνθετος πυρήνας (πυρήνας που προκύπτει μετά από  $\alpha$  ή  $\beta$  διάσπαση και συνήθως βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση) αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια (ακτινοβολία ή ακτίνες  $\gamma$ ), δηλαδή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος  $0.01-0.001\text{\AA}$  (συχνότητα  $2 \cdot 10^{20}\text{Hz}$ ). Συχνά, μετά την εκπομπή της ακτινοβολίας  $\gamma$ , ο πυρήνας εξακολουθεί να βρίσκεται σε διεγερση και εκπέμπει ακτινοβολία  $\beta$ . Η εκπομπή της ενέργειας σύνδεσης ενός νετρονίου ως ακτίνα  $\gamma$ , της πιο κοινής αντίδρασης σύλληψης που ονομάζεται σύλληψη ακτινοβολίας ή ραδιενεργός σύλληψη (radiative capture), πχ:  ${}_{49}^{115}\text{In} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{56}^{116}\text{In} + \gamma$
- 2. Αντίδραση ( $n, p$ ):  ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{6}^{14}\text{C} + {}_1^1\text{p}$
- 3. Εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων: Ο πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας ένα πρωτόνιο ή σωματίδιο  $\alpha$  ή (δευτέριο) ή  $\beta^-$ .
- 4. Αντίδραση ( $n, 2n$ ): Ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας δύο νετρόνια. Για την αντίδραση αυτή πρέπει το αρχικό νετρόνιο να έχει εξαιρετικά μεγάλη ενέργεια (υπάρχει κατώφλι ενέργειας). Η αντίδραση αυτή είναι σπάνια.
- 5. Ανελαστική σκέδαση. Ο σύνθετος πυρήνας εκπέμπει ένα νετρόνιο (όχι αναγκαστικά το ίδιο με το βλήμα), οπότε το λοιπόν η αντίδραση εμφανίζεται ως σκέδαση.

# Πυρηνικές αντιδράσεις

- Ελαστική σκέδαση ( $n, n$ ): Εκπέμπεται και πάλι νετρόνιο (όχι αναγκαστικά το ίδιο με το αρχικό) και ο πυρήνας επανέρχεται στην αρχική του θεμελιώδη κατάσταση. Ο χρόνος ζωής του σύνθετου πυρήνα είναι της τάξης των 10-12s και η συνολική κινητική ενέργεια νετρονίου και πυρήνα είναι η ίδια πριν και μετά την αντίδραση. Έτσι η «ελαστική σκέδαση συντονισμού», όπως ονομάζεται αυτή η (σχετικά σπάνια) αντίδραση, είναι πρακτικά ισοδύναμη με τη δυναμική ελαστική σκέδαση. Στη δυναμική ελαστική σκέδαση το νετρόνιο συγκρούεται με τον πυρήνα χωρίς σχηματισμό σύνθετου πυρήνα, το νετρόνιο βλέπει τον πυρήνα-στόχο ως μία μεγάλη ενιαία μάζα, κατά τη σύγκρουση (που διαρκεί περίπου 10-22s) αποδίδει στον πυρήνα ένα μέρος από την κινητική του ενέργεια και ορμή και κινείται στη συνέχεια σε κάποια κατεύθυνση διαφορετική από την αρχική.
- Σχάση: Η αντίδραση απορρόφησης νετρονίου που δεν είναι σύλληψη είναι σχάση. Ο σύνθετος πυρήνας τεμαχίζεται σε δύο μεγάλα θραύσματα και εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα δύο ως τρία νετρόνια και πολλά φωτόνια. Τα δύο θραύσματα της σχάσης είναι πυρήνες ασταθείς, εξακολουθούν να βρίσκονται σε διεγερση και αποδιεγείρονται με σειρές εκπομπής σωματιδίων  $\beta$  -και  $\gamma$ .

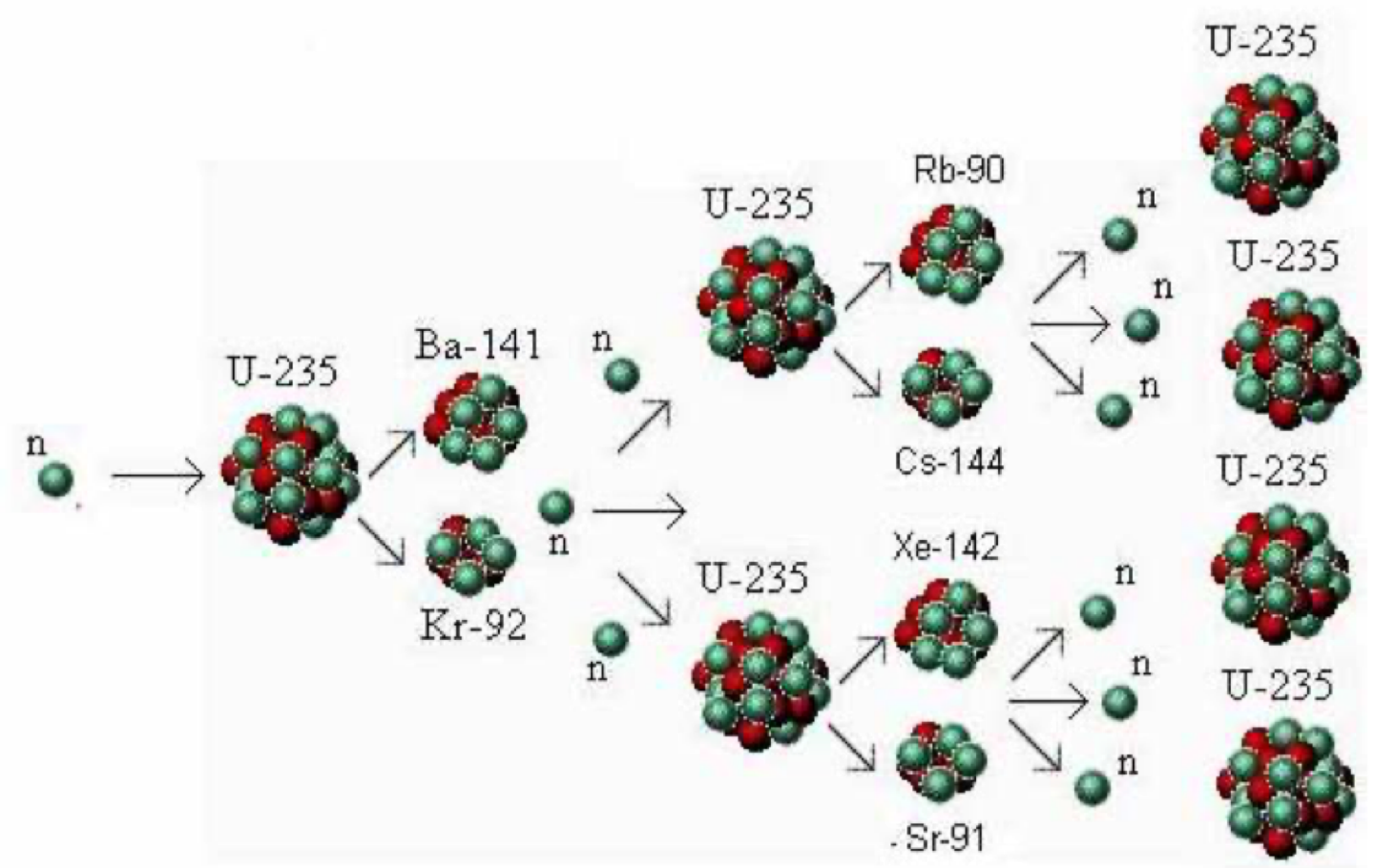


# Σχάση

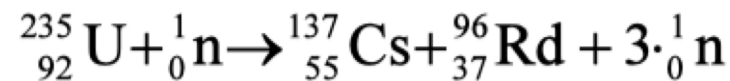
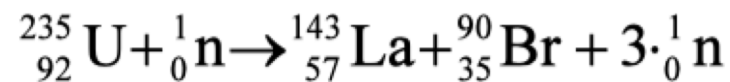
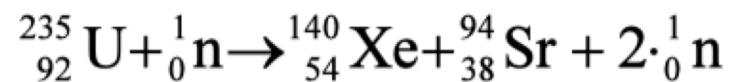
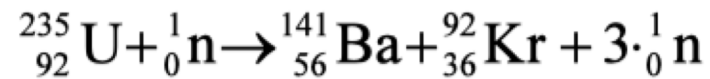


# Αλυσιδωτή ή αλυσωτή αντίδραση:

## Σχάση



Οι τυπικές αντιδράσεις σχάσης είναι:



# Σχάση

- Η συνολική ενέργεια που εκλύεται από την πυρηνική αντίδραση της σχάσης είναι **~200MeV** και οφείλεται στο γεγονός ότι τα θραύσματα της σχάσης και τα άλλα σωματίδια που λέγονται προϊόντα σχάσης, έχουν λιγότερη μάζα από τον αρχικό στόχο μαζί με το νετρόνιο βομβαρδισμού. Η συνολική αυτή ενέργεια κατανέμεται στα προϊόντα της σχάσης, Το μεγαλύτερο μέρος, 168MeV απάγουν τα θραύσματα υπό μορφή κινητικής ενέργειας, ενώ τα σωματίδια  $\beta$  και  $\gamma$  και από τη διάσπαση των προϊόντων (θραυσμάτων) της σχάσης απάγουν 8 και 7MeV, αντίστοιχα. Τα νετρίνο στις  $\beta$ -διασπάσεις των προϊόντων της σχάσης που είναι κατά κανόνα  $\beta$ -ραδιενεργά απάγουν περίπου 12MeV (η ενέργεια αυτή δεν απορροφάται τοπικά λόγω της πολύ μεγάλης εμβέλειας-μερικές ακτίνες  $\Gamma$ ης, των νετρίνο). Οι σύγχρονες γάμμα, απάγουν  $\sim 7$ MeV, ενώ τα νετρόνια της σχάσης (σύγχρονα και καθυστερημένα) υπό μορφήν κινητικής ενέργειας απάγουν  $\sim 5$ MeV. Η ενέργεια που εκλύεται στη σχάση είναι η λεγόμενη πυρηνική ενέργεια ή θερμοπυρηνική ενέργεια λόγω μετατροπής της σε πρώτη φάση σε θερμική ενέργεια. Πρόκειται για τεράστια ποσότητα ενέργειας, ένα εκατομμύριο περίπου φορές περισσότερη από την ενέργεια που εκλύεται κατά τις εξώθερμες χημικές αντιδράσεις

# Αλυσιδωτή πυρηνική αντίδραση

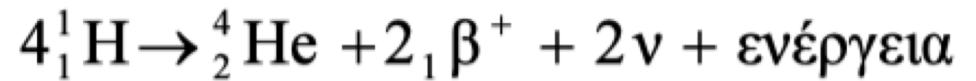
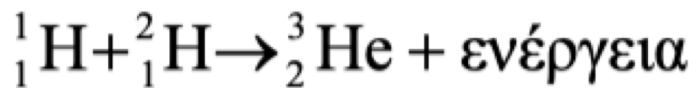
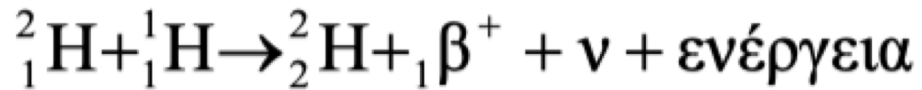
Αν και η σχάση ενός πυρήνα σε δυο θραύσματα από ένα εισβάλλον νετρόνιο έχει ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, δεν θα είχε καμία πρακτική εφαρμογή εάν η σχάση δεν συνοδευόταν από την απελευθέρωση νετρονίων. Αυτή η απελευθέρωση νετρονίων είναι που κάνει την παραγωγή ισχύος δυνατή επειδή τα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν ακόμα περισσότερες σχάσεις και επομένως να οδηγήσουν σε μια αλυσιδωτή ή αλυσωτή αντίδραση. Η ανάπτυξη μια αλυσιδωτής αντίδρασης μπορεί να μετρηθεί με την σταθερά πολλαπλασιασμού ( $k$ ) που ορίζεται ως:  $k$  (αριθμός νετρονίων που δημιουργούνται από την αλυσιδωτή αντίδραση μιας γενιάς) / (τον αριθμό των νετρονίων που δημιουργήθηκαν στην προηγούμενη γενιά). Το σύμβολο  $k$  θα χρησιμοποιηθεί σαν σταθερά πολλαπλασιασμού. Από τον ορισμό είναι ξεκάθαρο ότι: Εάν  $k > 1$  η αλυσιδωτή αντίδραση είναι αποκλίνουσα και ο αντιδραστήρας θα είναι υπερκρίσιμος (supercritical). γρηγορότερος θα είναι ο ρυθμός αύξησης της ισχύος. Καθώς η ισχύς που παράγεται σχετίζεται με τον αριθμό των σχάσεων, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της σταθεράς  $k$  τόσο μεγαλύτερη είναι και αλυσιδωτή αντίδραση. Εάν  $k = 1$ , η αντίδραση είναι αυτοδιατηρούμενη και ο αντιδραστήρας είναι σε κρίσιμη κατάσταση. Ένας αντιδραστήρας λοιπόν που βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση (σταθερή ισχύς) για μήνες ή και χρόνια (μονάδα βάσης) είναι επομένως σε κρίσιμη κατάσταση. Εάν  $k < 1$  η αντίδραση συγκλίνει και η ισχύς του αντιδραστήρα ελαττώνεται. Όπως πριν, ο ρυθμός ελάττωσης της ισχύος σχετίζεται με το πόσο χαμηλότερη από την μονάδα είναι η σταθερά.

# Πυρηνική σύντηξη

Στην πυρηνική σύντηξη (nuclear fusion), δύο ξεχωριστοί πολύ ελαφρείς πυρήνες ( $A \leq 8$ ) με σχετικά χαλαρή σύνδεση, όπως δύο ισότοπα του υδρογόνου, δηλαδή το δευτέριο ( $2\text{H}$ ), ένα νετρόνιο και ένα πρωτόνιο συνδεδεμένα χαλαρά μεταξύ τους) ή τρίτιο ( $3\text{H}$ ), δύο νετρόνια και ένα πρωτόνιο συνδεδεμένα χαλαρά μεταξύ τους) ενώνονται για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο πυρήνα το ήλιο ( $\text{He}$ ) στο οποίο τα νουκλεόνια συνδέονται μεταξύ τους στενότερα. Η ενέργεια σύνδεσης του σχηματισθέντος με αυτόν τον τρόπο πυρήνα είναι μεγαλύτερη από τις ενέργειες σύνδεσης των ελαφρύτερων πυρήνων και αυτό γιατί μέρος της μάζας ηρεμίας των ελαφρών πυρήνων μετατράπηκε σε ενέργεια. Η σύντηξη λοιπόν απελευθερώνει ενέργεια γιατί χάνεται μάζα. Ο πυρήνας ηλίου έχει σημαντικά μικρότερη μάζα από τους αρχικούς πυρήνες υδρογόνου. Συνεπώς, η πυρηνική σύντηξη είναι ουσιαστικά το αντίθετο της πυρηνικής διάσπασης. Ελαφρύς πυρήνες ενώνονται ώστε να απελευθερώσουν την περίσσεια ενέργεια σύνδεσης και να δημιουργήσουν μεγαλύτερους πυρήνες. Η σύντηξη δύο ελαφρών πυρήνων είναι δυνατή, εάν οι δύο πυρήνες αποκτήσουν τόσο μεγάλη κινητική ενέργεια, ώστε να υπερνικηθεί η μεταξύ τους ηλεκτροστατική άπωση. Τέτοια αύξηση της κινητικής ενέργειας των ελαφρών πυρήνων μπορούμε να πετύχουμε θερμικά, γι' αυτό και οι αντιδράσεις αυτές λέγονται και θερμοπυρηνικές αντιδράσεις.

# Τι συμβαίνει στον Ήλιο -- Σύντηξη

Ένας τρόπος για να εκβιάσουμε τους πυρήνες του δευτέρου και να έρθουν σχετικά κοντά ώστε να γίνει σύντηξη είναι να ανεβάσουμε τη θερμοκρασία σε πολύ υψηλά επίπεδα ώστε οι θερμικές ταχύτητες των δευτερίων να υπερπηδήσουν τις απωστικές δυνάμεις. Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι αντιδράσεις σύντηξης που συμβαίνουν στον πυρήνα του Ήλιου μας παράγοντας ηλιακή ενέργεια, είναι της τάξης των  $20 \times 10^6^\circ\text{C}$



# Σύγκριση μεταξύ σχάσης και σύντηξης

Τυπική σχάση ουρανίου:  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{60}^{143}\text{Nd} + {}_{40}^{90}\text{Zr} + 3 \cdot {}_0^1\text{n} + 8 \cdot {}_{-1}^0\beta$

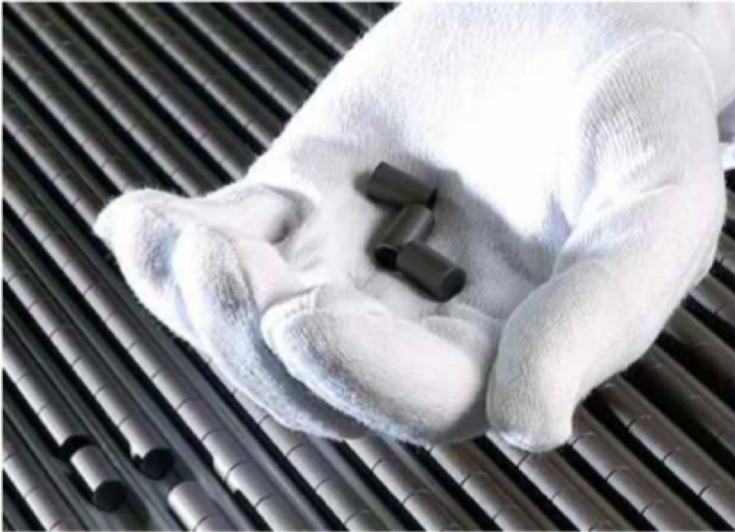
Ελάττωση μάζας:  $= 1.9459 \cdot 10^7 \text{cal}$  ανά g U-235

Τυπική σύντηξη πυρήνων δευτέρου:  ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He}$

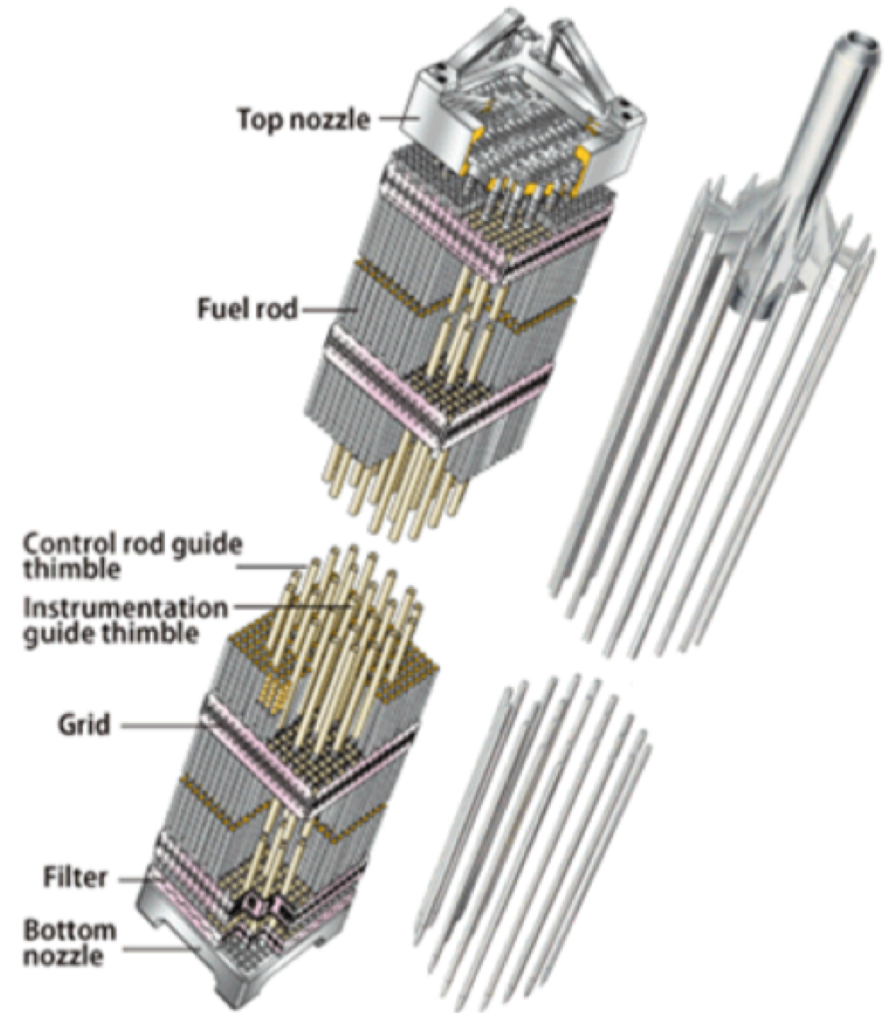
Ελάττωση μάζας:  $= 1,3676 \cdot 10^8 \text{cal}$  ανά g δευτέρου

Λόγος της παραγόμενης από τη σύντηξη σε σχέση με τη σχάση, είναι:  $\frac{\text{σύντηξη}}{\text{σχάση}} = \frac{1.4 \cdot 10^8}{1.9 \cdot 10^7} = 7.4$

# Πυρηνικοί αντιδραστήρες Σχάσης - Καύσιμο



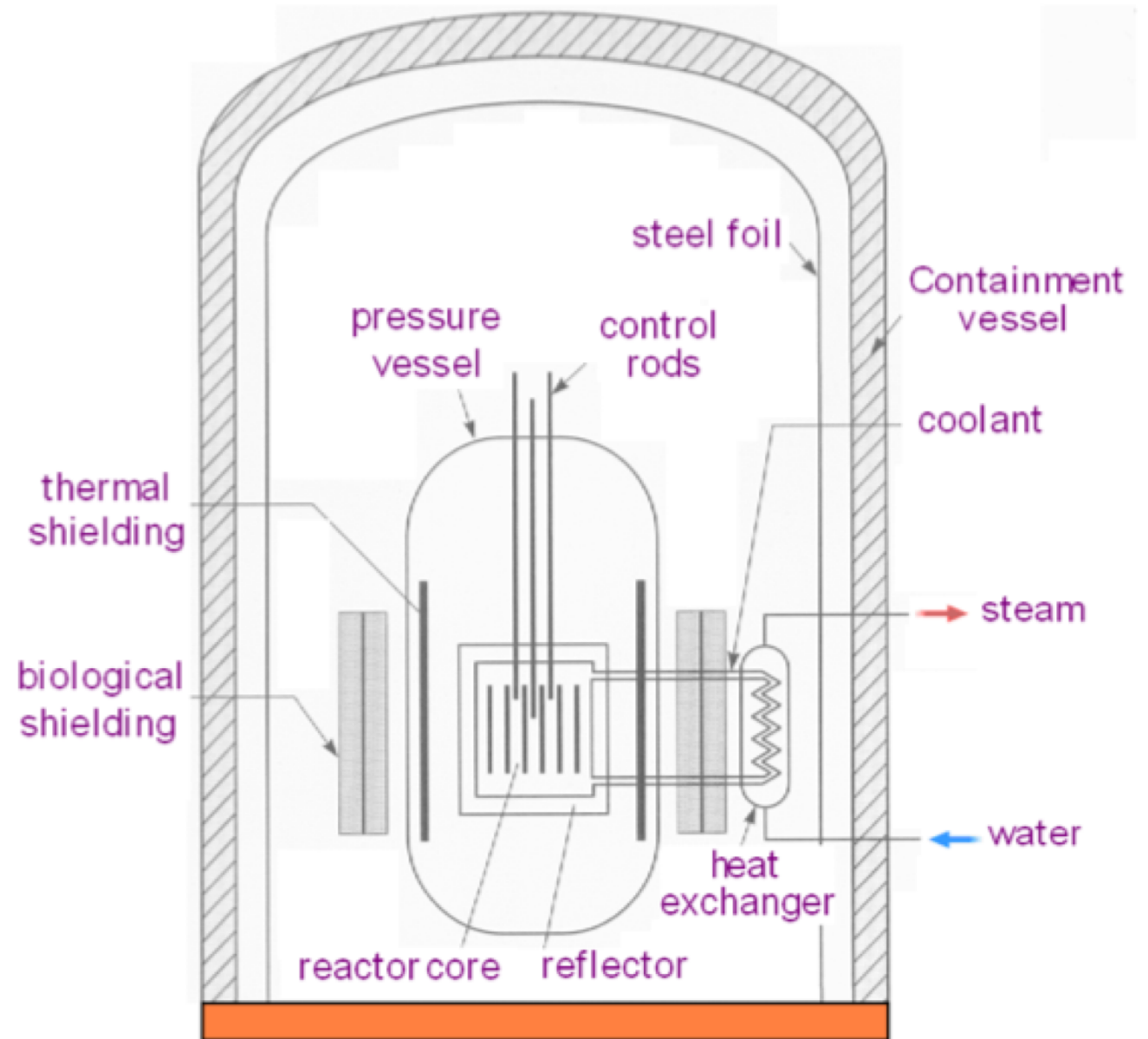
Δισκία καυσίμου



Ράβδοι και συστάδα καυσίμου



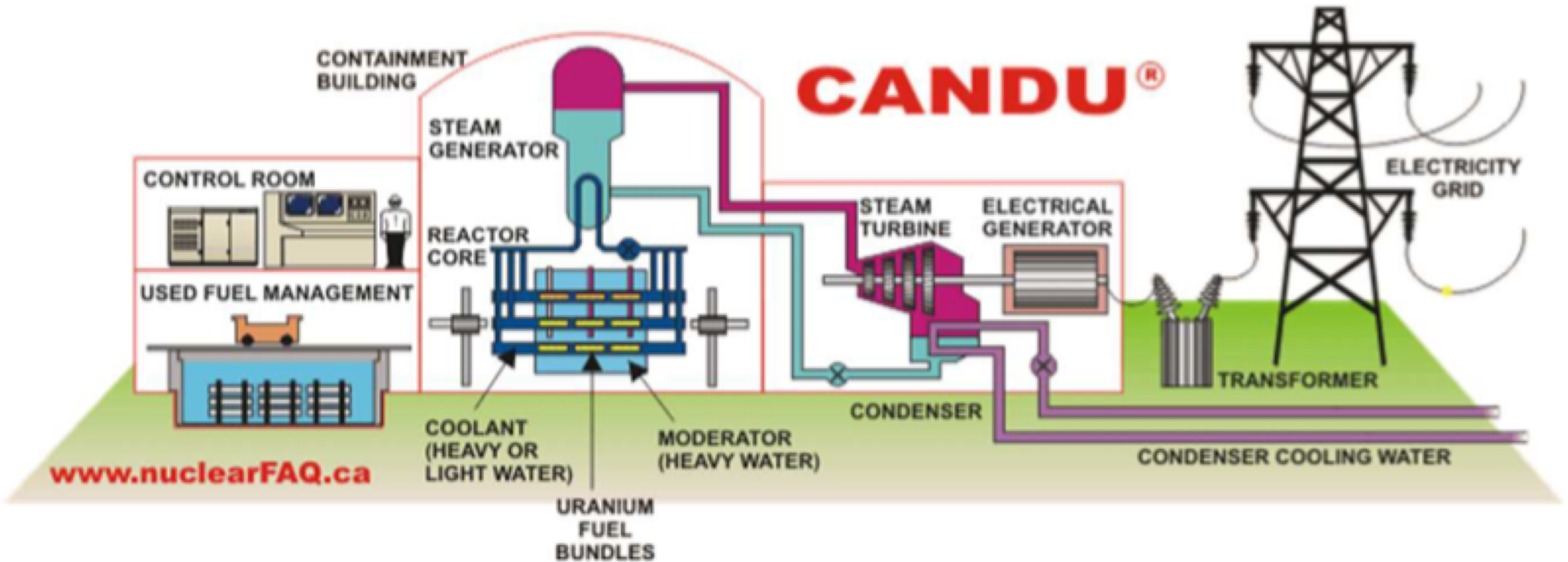
Σχηματική  
αναπαράσταση  
πυρηνικού  
αντιδραστήρα  
σχάσης



# Ασφάλεια

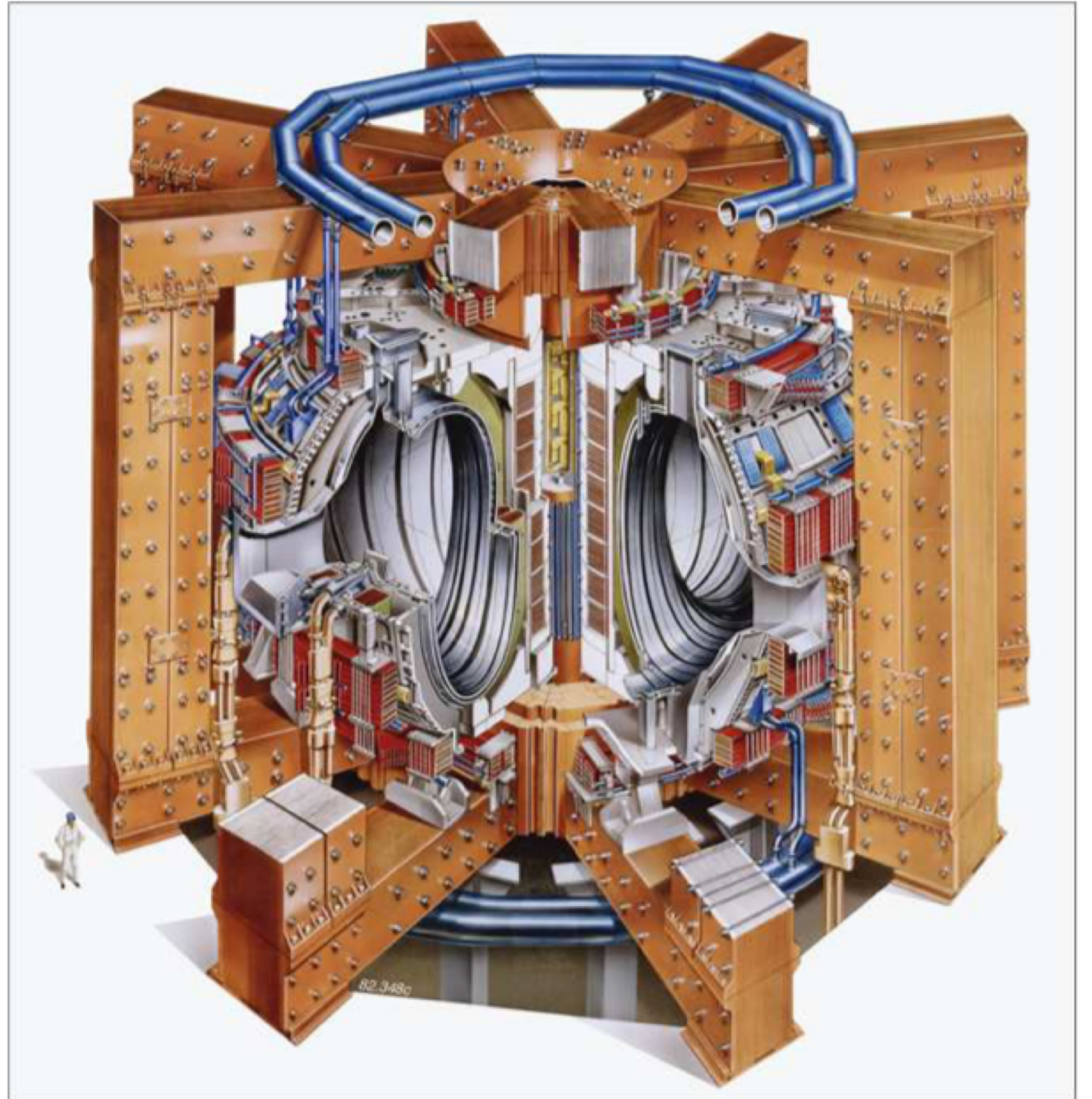
Υπαρξη πολλαπλών διαδοχικών φραγμάτων εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαρροής των στο περιβάλλον: Α. Το πρώτο φράγμα είναι το ίδιο το καύσιμο. Β. Το δεύτερο φράγμα είναι το ερμητικά κλεισμένο περίβλημα της ράβδου καυσίμου, το οποίο εγκλωβίζει τα αέρια προϊόντα της σχάσης, Γ. Το τρίτο φράγμα εγκλωβισμού των προϊόντων της σχάσης είναι το δοχείο πίεσης και το κύκλωμα του ψυκτικού, Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και οι διαδικασίες λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων χαρακτηρίζεται από τη λεγόμενη πολυεπίπεδη προστασία: **A.** Πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να συμβεί οποιοδήποτε πιθανό ατύχημα. Η πιθανότητα να συμβεί μεγάλο ατύχημα πρέπει να είναι μικρότερη από τιμή προδιαγεγραμμένη από τους κανονισμούς της χώρας στην οποία εγκαθίσταται ο αντιδραστήρας. **B.** Επιβάλλεται το σύστημα να έχει σχεδιαστεί και να λειτουργεί έτσι ώστε, αν το ατύχημα αρχίσει, να αποτρέψει την ανάπτυξη του ατυχήματος και να επαναφέρει τον αντιδραστήρα σε ασφαλή κατάσταση. **Γ.** Εάν παρ'όλα αυτά το ατύχημα συμβεί, επιβάλλεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή να είναι τέτοιες, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειες στο περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού. **Δ.** Κατασκευή δοχείου εγκλωβισμού ή μανδύας (Containment vessel). Αυτό είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον 1m και επενδεδυμένο εσωτερικά με στεγανό χαλύβδινο έλασμα. Το πιθανότερο ατύχημα Το ατύχημα απώλειας του ψυκτικού (Loss of Coolant Accident, LOCA)

# Με επιβραδυντή και ψυκτικό βαρύ ύδωρ



Πυρηνικός  
αντιδραστήρας  
σύντηξης τύπου  
ΤΟΚΑΜΑΚ

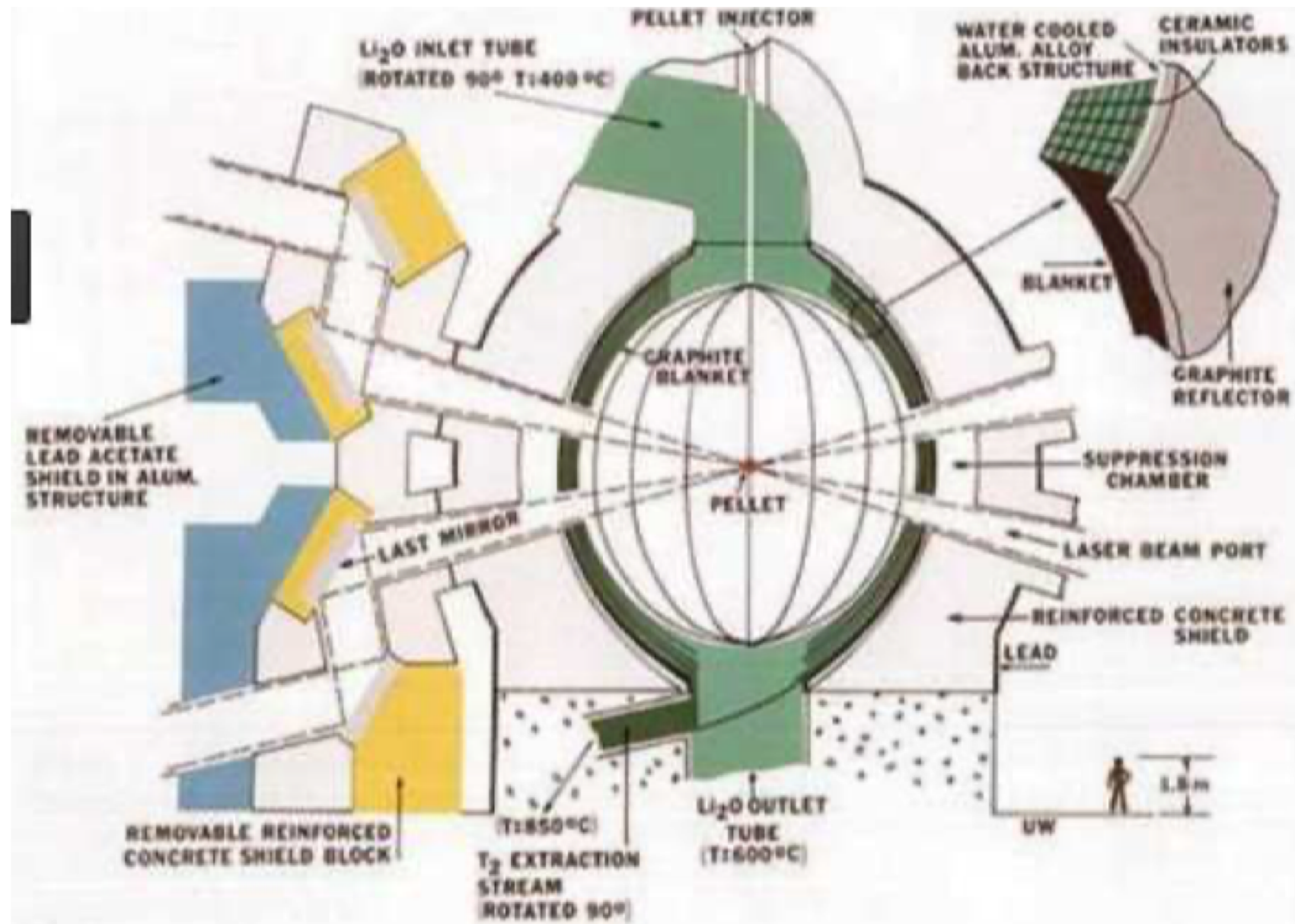
ITER στη Γαλλία



# Πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης με laser

Προταθείς αντιδραστήρας με ακτίνες laser. Μια μικροσκοπική πελέτα δευτερίου-τριτίου εισάγεται στον θάλαμο. Συγχρονισμένες χρονικά και εξαιρετικά εστιασμένες ακτίνες laser υψηλής έντασης συγκλίνουν στον αντιδραστήρα πολλές φορές ανά δευτερόλεπτο δημιουργώντας τις απαραίτητες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης για να αρχίσει η σύντηξη. Τα παραγόμενα ενεργειακά νετρόνια απορροφούνται από τον περιβάλλοντα φλοιό υγρού λιθίου, το οποίο κυκλοφορεί για να τους αφαιρεθεί η θερμική ενέργεια. Το τρίτιο που παράγεται στον φλοιό του λιθίου, απομακρύνεται και χρησιμοποιείται στην παρασκευή νέων πελετών δευτερίου-τριτίου.

Πυρηνικοί  
αντιδραστήρ  
ες σύντηξης  
με laser

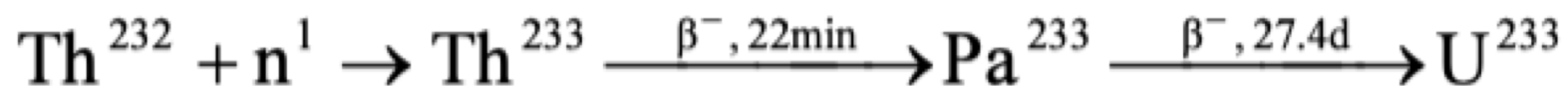
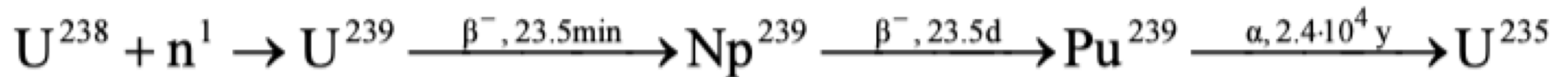


# Πυρηνικά καύσιμα

Μετά το 2ο παγκόσμιο πόλεμο, άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και τα πυρηνικά καύσιμα, όπως π.χ. το ουράνιο (U-235) και το πλουτώνιο (Pu-239). Τα πλέον πλούσια σε ουράνιο ορυκτά περιέχουν 65-90% διοξείδιο του ουρανίου (UO<sub>2</sub>), στο οποίο εμπεριέχεται μόνο 0.72% το ραδιενεργό ισότοπο U-235, ενώ το υπόλοιπο είναι κυρίως το μη ραδιενεργό U-238. Το πρωταρχικό ορυκτό επεξεργάζεται κατάλληλα και εμπλουτίζεται σε U-235 έως 1.5-3.5%, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο στους αντιδραστήρες των θερμοπυρηνικών σταθμών.

# Υλικά Δυνάμενα να υποστούν Σχάση

Τα υλικά όπως το U-235 που μπορούν να υποστούν σχάση αφού ακολουθήσουν απορρόφηση ταχέως κινούμενων νετρονίων με ενέργεια μερικών MeV ονομάζονται υλικά δυνάμενα να υποστούν σχάση (fissionable). Υλικά σαν το U-235, τα οποία μπορούν να υποστούν σχάση με την απελευθέρωση της ενέργειας σύνδεσης και μόνον ονομάζονται σχάσιμα ή διασπαστά υλικά (fissile). Το U-235 είναι το μόνο σχάσιμο υλικό που βρίσκεται στη φύση. Pu-239 είναι σχάσιμο υλικό. Το U-238 ονομάζεται γόνιμο υλικό (fertile material) διότι η απορρόφηση νετρονίων (που όπως είδαμε συμβαίνει εύκολα στις συντονισμένες αιχμές σύλληψης, [Παράγραφος 6.4.4]) οδηγεί στο σχηματισμό του σχάσιμου Pu-239. Με παρόμοιο τρόπο το Th-232 είναι επίσης γόνιμο υλικό διότι η απορρόφηση νετρονίων μέσω Pa233 οδηγεί στο σχάσιμο U-233 ως εξής:





Τα γόνιμα υλικά U-238 και Th-232 αποδίδουν τα σχάσιμα υλικά Pu-239 και U-233. Δηλαδή, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν είτε σχάσιμο U-235 που υπάρχει σε μικρές αναλογίες ελεύθερο στο φυσικό ουράνιο, είτε τα σχάσιμα επίσης ισότοπα Pu-239 και U-233 τα οποία δεν υπάρχουν ελεύθερα στη φύση, αλλά παράγονται τεχνητά το μεν πρώτο από το U-238, το δε δεύτερο από το Th-232.

# Σύγκριση υδρογονανθράκων και Πυρηνικού καυσίμου

1. ΑΗΣ: Ο περιοριστικός παράγοντας είναι ο ρυθμός διάχυσης του οξυγόνου προς την επιφάνεια του καυσίμου και ο ρυθμός απομάκρυνσης των καυσαερίων από την επιφάνεια του καυσίμου. Έτσι σε κάθε ατμοπαραγωγό υπάρχει ανώτερο όριο στην ισχύ του ανά μονάδα όγκου του. Αν προσθέσουμε παραπάνω καύσιμο ή οξυγόνο, τότε δεν θα καεί. Πυρηνικός αντιδραστήρας: θεωρητικά δεν υπάρχει τέτοιο εμπόδιο στη θερμική ισχύ που μπορεί να παραχθεί. Περιορίζεται όμως από τη μέγιστη ικανότητα απαγωγής του από τον αντιδραστήρα.

2. η ασφάλεια των δύο συστημάτων που σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας. Η θερμοκρασία της φλόγας είναι γνωστή από τη θερμοχημεία και εύκολα υπολογίσιμη. Τα υλικά κατασκευής έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα με πιέσεις ή θερμοκρασίες. Εάν το νερό μέσα στους αγωγούς του ατμοπαραγωγού δεν κινείται για να απάγεται η θερμότητα τότε το πολύ-πολύ να υπάρξει υπερθέρμανση και διαρροή αυλού με συνεπεία κάποια οικονομική ζημιά από την κράτηση της μονάδας και μόνο. Στον πυρηνικό αντιδραστήρα εάν αυξηθεί η θερμοκρασία λόγω μη σωστού ελέγχου της αντίδρασης ή λόγω προβλήματος στη ροή του ψυκτικού νερού, υπάρχει περίπτωση να λιώσει το περίβλημα των ραβδών καυσίμου με αποτέλεσμα την εισαγωγή ραδιενεργού υλικού και στο ψυκτικό νερό. Ακόμα και στη διακοπή λειτουργίας του αντιδραστήρα τα πυρηνικά φαινόμενα συνεχίζονται και οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές ακόμα και εάν δεν έχουμε μόλυνση του περιβάλλοντος

- 3. εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία που πρέπει να έχει ένας πυρηνικός σταθμός ώστε η ψύξη, η ασφάλεια και τα συστήματα ελέγχου να μην είναι διαβλητά. Αυτό σημαίνει υψηλό κόστος επένδυσης. Η συμβολή του κόστους επένδυσης στο κόστος της kWh αγγίζει το 65% ενώ σε ανθρακική μονάδα είναι το 35% της kWh. Το κόστος του καυσίμου είναι βέβαια ελάχιστο σε σχέση με την παραγόμενη ενέργεια διότι 1kg U-235 δίδει 20.106kWh ενώ 1kg ανθρακίτη δίδει 10kWh. Σε μονάδες πυρηνικής Φυσικής η ενέργεια μιας χημικής αντίδρασης (π.χ. καύσης) είναι 3-4eV ενώ της πυρηνικής σχάσης περίπου 200MeV. Αλλιώς μπορούμε να πούμε ότι η σχάση του U235 αποδίδει 2.5 εκατομμύρια φορές περισσότερη ενέργεια από την καύση ίσης μάζας άνθρακα.

# Καύσιμα Πυρηνικών Αντδραστήρων Σχάσης

## Χρήση ουρανίου:

Απαιτούνται 30-70kg μεταλλεύματος ουρανίου για να παραχθούν 230gr  $U_3O_8$ . Το φυσικό ουράνιο σε αυτά τα 230gr είναι το 0.7% U-235 και εμπλουτίζεται ώστε να δώσει 3.5% U-235 δηλαδή 30gr εμπλουτίσματος. Όταν «καεί» αυτό το καύσιμο μετά από έναν χρόνο θα γίνει επεξεργασία και θα καταλήξει σε 20ml υγρών αποβλήτων υψηλού επιπέδου. Αυτή η ποσότητα θα υαλοποιηθεί σε 1cm ύαλου pyrex βάρους 6gr σαν ένα νόμισμα αλλά πολύ ραδιενεργό.

Χρήση Άνθρακα: Απαιτούνται 3.5tn λιθάνθρακα ή 9tn λιγνίτη για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας σε ένα θερμικό σταθμό. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρξει τέφρα που θα κυμαίνεται από 30kg έως 0.5tn. Θα παραχθούν όμως και 8tn  $CO_2$  που σε ατμοσφαιρικές συνθήκες θα γέμιζαν με τον όγκο τους 3 ολυμπιακών διαστάσεων πισίνες. Όμως ανάλογα με το κάρβουνο, θα δημιουργηθούν και 100kg  $SO_x$  που θα κόστιζαν πολλά για να απομακρυνθούν. Επιπλέον, οι επιδράσεις αυτών των αέριων παραπροϊόντων είναι πολύ γνωστές στο βόρειο ημισφαίριο. Πριν χρόνια, οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής ενέργειας εξέπεμπαν ραδιενέργεια πολλή περισσότερη από ότι οποιοσδήποτε πυρηνικός σταθμός εξαιτίας των ραδιενεργών υλικών (π.χ. έως 17ppm) αλλά τώρα όλη σχεδόν αυτή η ραδιενέργεια θάβεται με τη συλλεγμένη ιπτάμενη τέφρα.

# Καύσιμα Πυρηνικών αντιδραστήρων **Σύντηξης**

Το **δευτέριο** και το τρίτιο είναι και τα κύρια συστατικά στις περισσότερες αντιδράσεις σύντηξης. Το δευτέριο είναι μια σταθερή μορφή υδρογόνου, δηλαδή υπάρχει στη φύση (στο κοινό νερό). Το δευτέριο υπάρχει ελεύθερο αλλά σε αναλογία 1/6500 σε σχέση με το υδρογόνο. Μια απλή αριθμητική πράξη δείχνει ότι από 65.000kg νερού μπορούμε να πάρουμε ένα κιλό δευτέριο.

Το **τρίτιο** είναι μια ραδιενεργή μορφή του υδρογόνου και δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση. Σε αντίθεση με τη διάσπαση όπου το τρίτιο παράγεται (και επομένως συνεισφέρει στη ραδιενέργεια), εδώ καταναλώνεται. Μπορεί να ληφθεί από το Li-6, ένα σχετικά άφθονο μέταλλο που υπάρχει σε ορυκτά μεταλλεύματα. Ένας απλός υπολογισμός δείχνει ότι εάν μόνον το 1 % του δευτέρου που υπάρχει στο νερό των ωκεανών (ισοδύναμο με 1,040 άτομα δευτέρου) χρησιμοποιείται για να παραχθεί τρίτιο, αυτό θα ήταν ισοδύναμο με το να χρησιμοποιούσαμε (ενεργειακά) όλα τα αποθέματα των άλλων ορυκτών καυσίμων 500,000 φορές!!!

# Πυρηνικά ατυχήματα

Αντιδραστήρας	Έτος ατυχ.	Αριθ. άμεσων θανάτων	Επίπτωση στο περιβάλλον	Ακόλουθες ενέργειες
NRX, Καναδάς (πειραματικός) 40MW <sub>th</sub>	1952	0	ουδεμία	επισκευάστηκε (νέα καρδιά) έκλεισε 1992
Windscale1, Ηνωμ. Βασίλειο (στρατιωτικός, παραγωγή Pu-239)	1957	0	ευρεία διασπορά (εκροή $1.5 \cdot 10^{15}$ Bq), επηρεάστηκαν αγροκτήματα	διαλύθηκε, εγκλωβίστηκε, γέμισε με μπετόν
SL-1 ΗΠΑ (πειραματικός)	1961	3 χειριστές	ουδεμία	σταμάτησε λειτουργία
Fermi- I, ΗΠΑ (πειραματικός αναγεννητικός, 7.5MWe)	1966	0	ουδεμία	επισκευάστηκε, 1972 επαναλειτούργησε
Lucens, Ελβετία (πειραματικός, 7.5MWe)	1969	0	εκροή ήσσονος σημασίας	σταμάτησε λειτουργία
Browns Ferry, ΗΠΑ (εμπορικός, 2 x 1090 MWe)	1975	0	ουδεμία	επισκευάστηκε
Three Mile Island-2, ΗΠΑ (εμπορικός, 880MWe)	1979	0	μικρές δόσεις (εντός ορίων) στο κοινό, εκροή $2 \cdot 10^{14}$ Bq	σταμάτησε λειτουργία, πρόγραμμα καθαρισμού
Saint- Laurent-A2, Γαλλία (εμπορικός, 880MWe)	1980	0	εκροή ήσσονος σημασίας ( $8 \cdot 10^{10}$ Bq)	επισκευάστηκε (1992 έκλεισε)
Chernobyl-4, Ουκρανία (εμπορικός, 950MWe)	1986	31	μείζων εκροή ( $11 \cdot 10^{18}$ Bq)	εγκλωβίστηκε (σαρκοφάγος)
Vandell-1, Ισπανία (εμπορικός, 480MWe)	1989	0	ουδεμία	έκλεισε
Fukushima (Ιαπωνία)	2011	190 κάτοικοι της περιοχής εκτέθηκαν σε ραδιενέργεια	μείζων εκροή ( $2.7 \cdot 10^{16}$ Bq)	επισκευή, απορρύπανσης του μολυσμένου, επαναλειτουργία

# Προοπτικές Πυρηνικής ενέργειας

Χρήση της πυρηνικής ενέργειας, για ειρηνικούς σκοπούς. Αντισυμβατική γιατί: είναι ουσιαστικά ανεξάντλητη και οικονομικά συμφέρουσα, εξαιτίας των ζητημάτων ασφάλειας (ατυχήματα, ανάπτυξη πυρηνικών όπλων) και των πυρηνικών αποβλήτων που εν τέλει μπορεί να αποδειχθεί πολύ ακριβή...

Η ονομαστική ισχύς των ΠΣΗΙ αυξάνει σταθερά όσο νέες μονάδες εισέρχονται στο σύστημα, αλλά και όσο οι υπάρχουσες μονάδες αναβαθμίζονται. Επίσης, η διαθεσιμότητα και η φόρτιση των μονάδων αυξάνονται παντού, έτσι ώστε περισσότερες kWh παράγονται από την εγκατεστημένη ισχύ. Οι περισσότερες χώρες σήμερα έχουν φόρτιση >80% από 67% που ήταν ο μέσος όρος παλιά. Η διάρκεια ζωής (service life) έχει επεκταθεί: Οι περισσότεροι ΠΣΗΙ αρχικά είχαν χρόνο λειτουργίας 30-40 χρόνια, αλλά οι τεχνικές επιθεωρήσεις έχουν αναθεωρήσει την διάρκεια ζωής των σταθμών και μπορούν να λειτουργούν 50-60 χρόνια. Η παράταση της ζωής ενός ΠΣΗΙ με αντικατάσταση κύριων συστατικών της μονάδας είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος για να βελτιώσουν τη θέση τους οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας.

# Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα πυρηνικής ενέργειας

## Πλεονεκτήματα

- Δίνει ενέργεια χωρίς εκπομπή CO<sub>2</sub>.

## Μειονεκτήματα

- Σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα στον χώρο του αντιδραστήρα και πολύ εκτεταμένα σε περίπτωση σε περίπτωση ατυχήματος
- Εξάρτηση από 2-3 εταιρείες παγκοσμίως που φτιάχνουν Πυρηνικούς αντιδραστήρες και καύσιμο.
- Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες πρέπει να συντηρούνται και να ελέγχονται ακόμα και μετά την απενεργοποίηση τους. Απαιτεί πολύ προηγμένες τεχνολογικά κοινωνίες για χιλιάδες χρόνια.
- Τα πυρηνικά απόβλητα παραμένουν για δεκάδες χιλιάδες χρόνια.



# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

- Οι ανάγκες σε ενέργεια αυξάνονται
- Οι εναλλακτικές είναι περιορισμένες
- Τα ορυκτά καύσιμα θα εξαντληθούν σε 50 χρόνια ακόμα και αν δεν συνυπολογίσουμε το κόστος στην κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση της βιόσφαιρας.
- Η πυρηνική ενέργεια στην παρούσα μορφή (σχάση) έχει πολλά μειονεκτήματα
- Η χρήση ΑΠΕ είναι προς το παρόν μονόδρομος αλλά απαιτούνται τεράστια ποσά σε νέες επενδύσεις

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Μακροπρόθεσμα η πυρηνική ενέργεια από σύντηξη θα μπορούσε να δώσει άφθονη και καθαρή ενέργεια (Τότε θα πρέπει να μας απασχολήσει η έννοια της θερμικής μόλυνσης και, ξανά, της υπερθέρμανσης).
- Η προϊούσα ψηφιοποίηση στην καλύτερη περίπτωση ΔΕΝ βελτιώνει την κατανάλωση ενέργειας ενώ μπορεί και να την επιδεινώνει (πρέπει να έχουμε το νού μας, μπορεί να είναι σημαντικό πρόβλημα στο όχι πολύ μακρινό μέλλον).
- **Είναι κρίσιμο να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας (πχ. εξοικονόμηση, περικοπές παροχής, αύξηση κόστους, κλπ.). Όχι ιδιαίτερα ευχάριστες προοπτικές αλλά μάλλον θα καταστούν αναγκαίες.**