

Το Άτομο και η Δομή του

Δυνάμεις Coulomb: $F = \frac{m \cdot \vec{V}^2}{r} = \frac{Ze^2}{r^2}$

Συνθήκες του Bohr:

1. μηχανική συνθήκη $L = m \cdot \vec{V} \cdot r = \hbar \cdot n$ όπου $\hbar = \frac{h}{2\pi}$
2. οπτική συνθήκη $E_{in} - E_{fin} = \hbar \cdot \nu$

Ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου: $E_{tot} = \frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot m}{2 \cdot n^2 \cdot \hbar^2}$

Συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα εκπέμψει το άτομο όταν γίνει ένα άλμα του ηλεκτρονίου από μια επιτρεπτή εξωτερική τροχιά n_{in} σε μια επιτρεπτή εσωτερική τροχιά n_{fin} :

$$\nu_{fin,in} = \frac{E_{in} - E_{fin}}{h} = \frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot m}{4 \cdot \pi \cdot \hbar^3} \left(\frac{1}{n_{fin}^2} - \frac{1}{n_{in}^2} \right)$$

Αριθμός κύματος (ή κυματάριθμος) $1/\lambda$: $c = \nu \cdot \lambda$

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, αποδιηγείρονται 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^{ου} αιώνα 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 περισσότερων 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.

Ο Πυρήνας του Ατόμου

Συμβολισμός στοιχείου (Σ): ${}^A_Z\Sigma$ ${}_Z\Sigma^A$ $\Sigma-A$

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 αριθμού των πρωτονίων και των νετρονίων που περιέχει, δηλαδή του μαζικού αριθμού A

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

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

Ισότοπα Στοιχεία

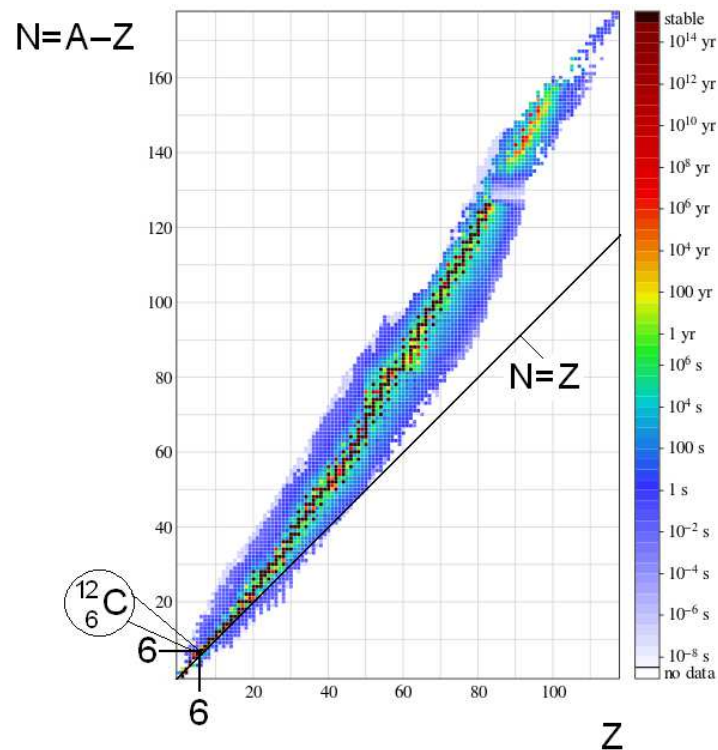
Ισότοπα ή νουκλίδια στοιχεία: Τα στοιχεία στα οποία ανήκουν οι πυρήνες αυτοί, καλούνται.

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

Ισοβαρείς: Πυρήνες με τον ίδιο μαζικό αριθμό A , αλλά διαφορετικούς ατομικούς αριθμούς Z ,

Ισότονοι: Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νετρονίων ονομάζονται

Χάρτης του Segre ή χάρτης των πυρήνων



Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια Σύνδεσης

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

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

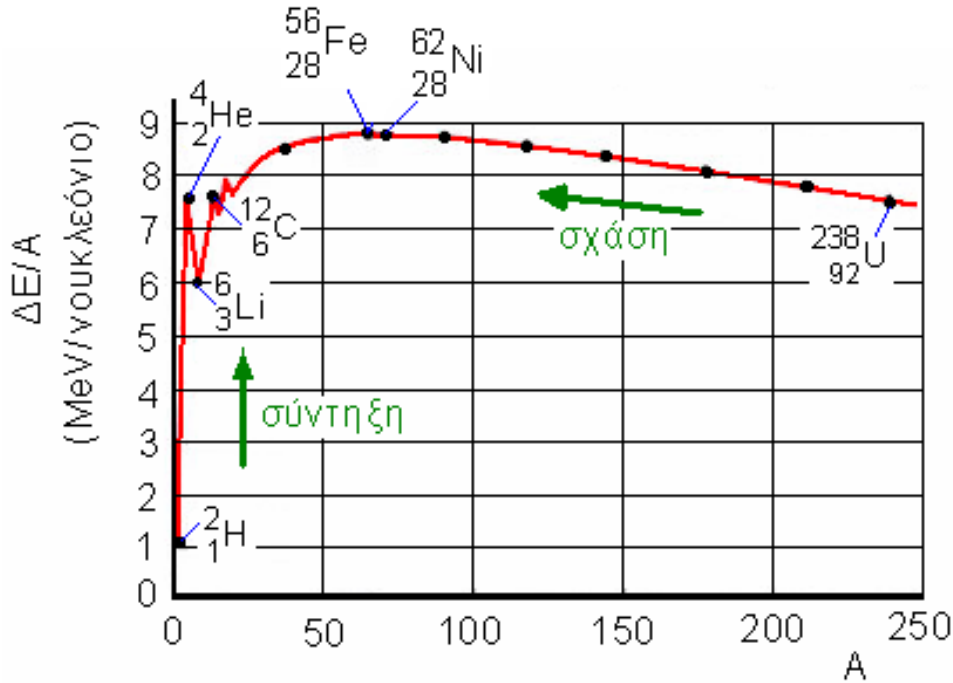
Το μεγαλύτερο έλλειμμα μάζας το έχει το στοιχείο του σιδήρου

Ενέργεια σύνδεσης (binding energy) του πυρήνα: Η ενέργεια ΔE 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.

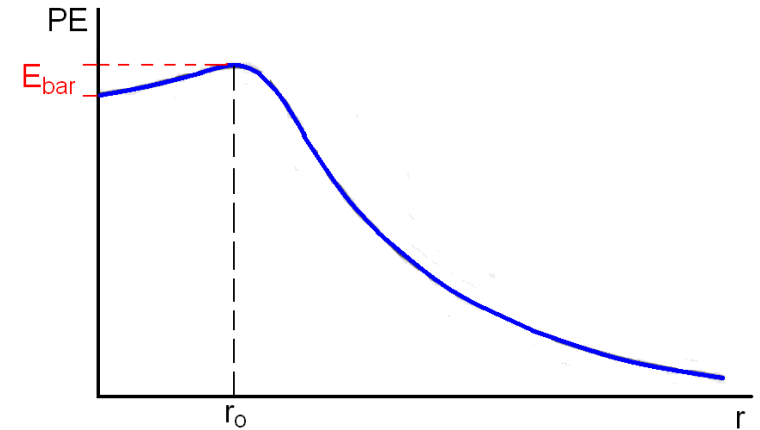
Προφανώς, το έλλειμμα μάζας και η ενέργεια σύνδεσης είναι όροι που εκφράζουν το ίδιο μέγεθος με διαφορετικές μονάδες.

Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια Σύνδεσης

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



Ερώτημα: Γιατί δεν έχουν ακόμα εξαφανιστεί οι βαρείς πυρήνες π.χ. του ουρανίου. Ας θεωρήσουμε τα A νουκλεόνια του πυρήνα σε δύο συστήματα, καθένα με $A/2$ νουκλεόνια κι ας κοιτάξουμε τη δυναμική ενέργεια του συστήματος των δύο αυτών συγκροτημάτων ως συνάρτηση της μεταξύ των απόστασης



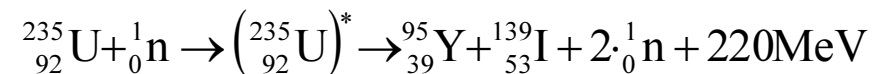
Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια Σύνδεσης

Φωτοσχάση: Διέγερση του πυρήνα σε ενέργειες μεγαλύτερες από το κατώφλι σχάσης μπορεί να γίνει με φωτόνια γ . Η αντίστοιχη σχάση.

Η ενέργεια όμως των φωτονίων γ που παράγονται στους αντιδραστήρες, πολύ σπάνια είναι μεγαλύτερη από 4MeV κι έτσι η φωτοσχάση δεν αποτελεί σημαντικό φαινόμενο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

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. Για τη σχάση άλλων ισοτόπων, όπως το Th-232 και το U-238, το νετρόνιο πρέπει να έχει κινητική ενέργεια μεγαλύτερη κάποιας τιμής, της τάξης των 1.5MeV.

Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια Σύνδεσης

Σύντηξη (fusion) ελαφρών πυρήνων: $2 \cdot {}^2_1\text{H} = {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{H} + 4.02\text{MeV}$

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 κολοσσιαία ενέργεια, ώστε να υπερνικήσουν τη δύναμη Coulomb.

Τέτοιες κινητικές ενέργειες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία της τάξης των 10^8K .

Ελεγχόμενη αντίδραση σύντηξης από τον άνθρωπο δεν έχει ακόμα πραγματοποιηθεί ούτε έχει αποδειχθεί ότι είναι πραγματοποιήσιμη.

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 ποσό ενέργειας, της τάξης των 4eV !

Πυρηνικές Δυνάμεις

Πυρηνικές δυνάμεις: Οι δυνάμεις που εξασκούνται μέσα στον πυρήνα μεταξύ των σωματιδίων όταν βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους $<10^{-15}\text{m}$ και είναι υπεύθυνες για την συγκρότησή του.

Η πυρηνική δύναμη μεταξύ δύο πρωτονίων ή δύο νετρονίων ή μεταξύ πρωτονίου-νετρονίου είναι ίδια.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πυρηνικών δυνάμεων είναι:

1. Είναι ισχυρές. Δύο επαπτόμενα πρωτόνια απωθούνται με δύναμη περίπου $6 \cdot 10^7 \text{N} = 6 \cdot 10^3$ τόνων. Είναι τόσο ισχυρές, ώστε να υπερνικούν τις ηλεκτροστατικές και να συγκρατούν τα νουκλεόνια στο μικρό χώρο του πυρήνα. Καλούνται ισχυρές λόγω του πολύ μικρού χρόνου δράσης τους, που είναι της τάξης του 10^{-23}s .

2. Είναι κορέσιμες. Οι κλασσικές δυνάμεις (δυνάμεις Coulomb και δυνάμεις βαρύτητας) είναι ακόρεστες δυνάμεις. Κάθε σωματίο του πυρήνα, πρωτόνιο ή νετρόνιο, δρα με περιορισμένο αριθμό γειτονικών του σωματίων, καθόσον πρόσθεση σωματίων, δηλαδή πρωτονίων ή νετρονίων, στον πυρήνα αυξάνει την ενέργεια σύνδεσης, ΔE , του πυρήνα σαν σύνολο, αλλά η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά σωματίο (νουκλεόνιο) του πυρήνα, $\Delta E/A$, παραμένει σταθερή, περίπου 8MeV για τους περισσότερους πυρήνες από $A=50$ μέχρι $A=130$. Η σταθερή πυρηνική πυκνότητα και η εξάρτηση της πυρηνικής ακτίνας (διάσταση του πυρήνα) από την κυβική ρίζα του μαζικού αριθμού A ($R=R_0 A^{1/3}$) αποτελούν μια ακόμη απόδειξη ότι οι πυρηνικές δυνάμεις είναι κορέσιμες.

Πυρηνικές Δυνάμεις

3. Είναι μικρής εμβέλειας. Η εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων φθάνει μέχρι λίγα fm. Η πυρηνική ακτίνα είναι της τάξης των 10fm. Έτσι, ένα νετρόνιο που ταξιδεύει μέσα σε ένα υλικό δεν αισθάνεται την παρουσία του πυρήνα παρά μόνο όταν βρεθεί πολύ κοντά του, θα συνεχίσει να ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή μέχρις ότου πέσει πάνω στον πυρήνα. Αντίθετα, ένα πρωτόνιο απωθείται από το θετικό φορτίο του πυρήνα αμέσως μόλις διαπεράσει το σύννεφο των ηλεκτρονίων του ατόμου. Σε αποστάσεις σημαντικά μεγαλύτερες από την ακτίνα του πυρήνα η μόνη δύναμη που ασκείται στο πρωτόνιο είναι η ηλεκτροστατική.

4. Είναι ανεξάρτητες του φορτίου. Τα σωματίδια του πυρήνα, πρωτόνια και νετρόνια κινούνται μέσα στον πυρηνικό όγκο, χωρίς να επηρεάζει το ένα το άλλο, ανεξάρτητα από το αν φέρουν φορτίο (πρωτόνια) ή όχι (νετρόνια). Η ενέργεια που απαιτείται για να εξαχθεί ένα πρωτόνιο από τον πυρήνα είναι περίπου η ίδια που απαιτείται για να εξαχθεί ένα νετρόνιο ($\sim 8\text{MeV}$).

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 ${}^4_2\text{He}$
- **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 αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β⁻ συνοδεύεται από εκπομπή ενός αντινετρίνιου.

Ραδιενέργεια

- Είναι σωματίδιο μηδενικού ηλεκτρικού φορτίου και αμελητέας μάζας σε σχέση με το ηλεκτρόνιο. Το διάνυσμα του spin του αντινετρίνο είναι αντιπαράλληλο του διανύσματος της ορμής του.
- **Εκπομπή ποζιτρονίου β^+** . Το ποζιτρόνιο έχει μάζα ίση με αυτήν του ηλεκτρονίου και ηλεκτρικό φορτίο e^+ , όπου e^- το φορτίο του ηλεκτρονίου. Εκπέμπεται κατά τη μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός νετρίνου. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 1 σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το μητρικό) και ο μαζικός αριθμός του παραμένει αναλλοίωτος. Η εκπομπή β^+ συνοδεύεται από εκπομπή ενός νετρίνου.
- **Νετρίνο** (Έχει τις ίδιες ιδιότητες με το αντινετρίνο, αλλά το διάνυσμα του spin είναι παράλληλο του διανύσματος της ορμής του).
- **Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, (Ακτινοβολία γ)**. Είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερση σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δύο σταθμών ($\approx 0.1-10\text{MeV}$).

Ραδιενέργεια

Σήμερα είναι γνωστό ότι από τα 2,500 γνωστά νουκλίδια, το 90% είναι ραδιενεργά

Τα ραδιενεργά στοιχεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα **φυσικά ραδιενεργά** απαντούν στη φύση και τέτοια είναι τα ισότοπα του ουρανίου (U-238, U-235), του θορίου (Th-232) και τα ραδιενεργά ισότοπα των στοιχείων: κάλιο (K-40), ρουβίδιο (Rb-87), σαμάριο (Sm-147, Sm-148, Sm-149) κ.ά.
- Τα **τεχνητά ραδιενεργά** παράγονται είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου και παράγονται κατά το βομβαρδισμό των στοιχείων με σωμάτια, όπως τα πρωτόνια, τα σωμάτια άλφα, τα νετρόνια, κ.λπ. και τέτοια είναι τα ραδιενεργά ισότοπα των στοιχείων: νάτριο (Na-22, Na-24), φωσφόρος (P-32), στρόντιο (Sr-90), κοβάλτιο (Co-60), τεχνητίο (Tc-99), καίσιο (Cs-137), κ.ά.

Εκτός από τον πυρήνα του υδρογόνου H-1 όλοι οι πυρήνες έχουν $N \geq Z$. Εξαιρώντας και πάλι το H-1, μόνο τα ισότοπα με $Z < N \leq 1.6Z$ είναι ευσταθή και από αυτά όχι όλα. Όλοι οι άλλοι πυρήνες (N, Z) είναι ασταθείς.

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: λ

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 Becquerel $1\text{Bq}=1\text{διάσπαση/s}$. 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) τ των πυρήνων ορισμένου είδους. Από τον ορισμό της μέσης τιμής:

$$\tau = \int_0^{\infty} t p(t) dt$$

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

$p(t)dt$ Η πιθανότητα να επιβιώσει ο πυρήνας επί χρόνο t και να διασπαστεί στο διάστημα από t σε $t+dt$

$$T = 0.693\tau$$

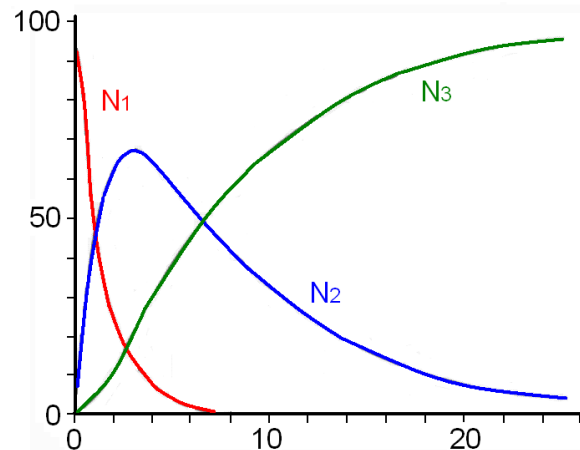
Ραδιενέργεια

Αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg:

Η μέση ζωή $\tau=1/\lambda$ είναι ο μέσος χρόνος παραμονής του μητρικού πυρήνα στη στάθμη αυτή. Η σχέση ανάμεσα στη ΔE και την τ δίνεται από την, όπου h η σταθερά του Planck: $\lambda \cdot \hbar = S$

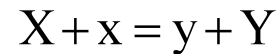
S : πλάτος της στάθμης E

Λέμε τότε ότι ο Π_2 βρίσκεται σε **ραδιενεργό ισορροπία**. Στην περίπτωση αυτή βλέπουμε ότι ο ρυθμός καταστροφής των πυρήνων Π_2 είναι ίσος με το ρυθμό παραγωγής τους: $\lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_1(t)$



Πυρηνικές Αντιδράσεις

Πυρηνική αντίδραση: κάθε διαδικασία με την οποία μεταβάλλεται το ζεύγος $(Z, A-Z)$ ή/και η ενεργειακή κατάσταση ενός πυρήνα



x είναι το σωματίδιο που αντιδρά με τον πυρήνα X , ενώ y και Y είναι τα προϊόντα της αντίδρασης

- Στις πυρηνικές αντιδράσεις ισχύουν διατήρηση αριθμού νουκλεονίων και ηλεκτρικών φορτίων πριν και μετά την αντίδραση.
- Στις πυρηνικές αντιδράσεις ισχύουν βέβαια οι αρχές διατήρησης ορμής της στροφορμής (διανυσματικό άθροισμα των ορμών, των στροφορμών των σωματιδίων πριν και μετά την αντίδραση να είναι το ίδιο) και ενέργειας, όπου στην ενέργεια συμπεριλαμβάνεται και η ενέργεια μάζας $E=mc^2$.

Ο συμβολισμός: $X(x, y)Y$

- ερμηνεύεται ως εξής: το σωματίδιο (βλήμα) x συγκρούεται με τον πυρήνα (στόχο) X , δίνοντας στα προϊόντα το νέο πυρήνα Y και το σωματίδιο y .
- Η ενέργεια Q που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση ή που πρέπει να προσδοθεί για την πραγματοποίηση της αντίδρασης.

$$Q = [(m_x + m_X) - (m_y + m_Y)] \cdot c^2$$

Πυρηνικές Αντιδράσεις

Μοντέλο του Bohr

Το **μοντέλο του Bohr** ερμηνεύει τις περισσότερες από τις πυρηνικές αντιδράσεις και το σύνολο σχεδόν από τις αντιδράσεις με νετρόνια στον αντιδραστήρα. Σύμφωνα με αυτό η αντίδραση πραγματοποιείται σε δύο βήματα:

1^ο βήμα: το σωματίδιο βλήμα (π.χ. n, α) ενσωματώνεται (απορροφάται) στον αρχικό πυρήνα και σχηματίζεται έτσι νέος πυρήνας, ο σύνθετος πυρήνας, σε κατάσταση διέγερσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της αντίδρασης: ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ στο πρώτο βήμα σχηματίζεται ο σύνθετος (*διεργεμένος) πυρήνας: ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\alpha \rightarrow {}^{13}\text{C}^*$

2^ο βήμα: Ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται (αποσυντίθεται) με διάσπαση στα τελικά προϊόντα της αντίδρασης. Στο παράδειγμα: ${}^{13}\text{C}^* \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^{12}_6\text{C}$

Πυρηνικές Αντιδράσεις

- 1. Ραδιενεργός σύλληψη (n, γ):** Ο σύνθετος πυρήνας (πυρήνας που προκύπτει μετά από α ή β διάσπαση και συνήθως βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση) αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια (ακτινοβολία ή ακτίνες γ), δηλαδή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος 0.01-0.001Å (συχνότητα $2 \cdot 10^{20}$ Hz). Συχνά, μετά την εκπομπή της ακτινοβολίας γ, ο πυρήνας εξακολουθεί να βρίσκεται σε διέγερση και εκπέμπει ακτινοβολία β. Η εκπομπή της ενέργειας σύνδεσης ενός νετρονίου ως ακτίνα γ, της πιο κοινής αντίδρασης σύλληψης που ονομάζεται σύλληψη ακτινοβολίας ή ραδιενεργός σύλληψη (radiative capture): ${}_{49}^{115}\text{In} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{56}^{116}\text{In} + \gamma$
- 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 α ${}_{1}^2\text{H}$ ή (δευτέριο) ή β⁻.
- 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 άλλο προϊόν της αντίδρασης έχει το ίδιο ζεύγος (Z, A-Z) όπως ο αρχικός πυρήνας της αντίδρασης. Μακροσκοπικά λοιπόν η αντίδραση εμφανίζεται ως σκέδαση.

Πυρηνικές Αντιδράσεις

6. 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^{-12} s 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^{-22} s) αποδίδει στον πυρήνα ένα μέρος από την κινητική του ενέργεια και ορμή και κινείται στη συνέχεια σε κάποια κατεύθυνση διαφορετική από την αρχική.

7. 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 διέγερση και αποδιηγείρονται με σειρές εκπομπής σωματιδίων β^- και γ .

Πυρηνικές Αντιδράσεις

Τα νετρόνια ως προς την ενέργειά τους διακρίνονται:

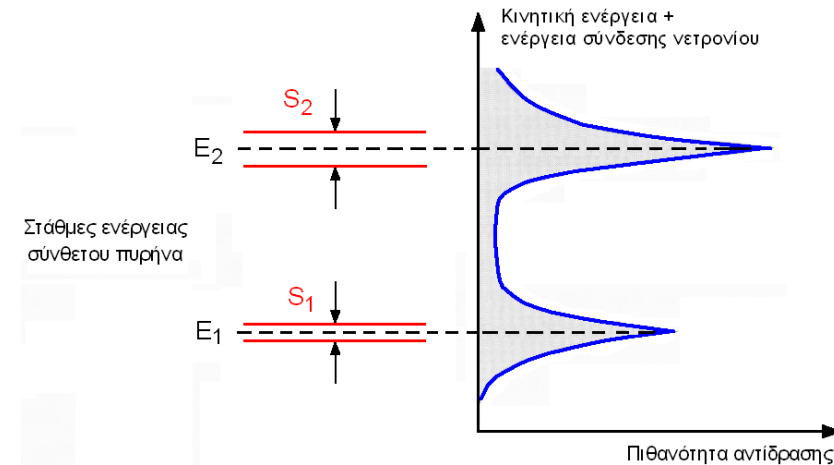
Κατηγορία	Ενεργειακή Περιοχή
θερμικά	$\leq 1\text{eV}$ (0.025eV μέση)
αργά	1eV - 100eV
ενδιάμεσα	0.01MeV - 0.1MeV
ταχεία	$\geq 0.1\text{MeV}$

Για θερμοκρασία 20°C (293K) έχει μέση κινητική ενέργεια ~0.025eV, που αντιστοιχεί σε μέση ταχύτητα των νετρονίων

Μοντέλο του σύνθετου πυρήνα:

Ο σύνθετος πυρήνας είναι ένα κβαντισμένο σύστημα κι έχει τις συγκεκριμένες χαρακτηριστικές του στάθμες ενέργειας, κάθε μια με το πλάτος της ΔΕ. Το νετρόνιο που απορροφάται έχει κάποια κινητική ενέργεια η οποία μαζί με την ενέργεια σύνδεσης του νετρονίου δίνουν την **ενέργεια διέγερσης**. Αν λοιπόν η κινητική ενέργεια του νετρονίου είναι τέτοια, ώστε η ενέργεια διέγερσης (του σύνθετου πυρήνα) να μη βρίσκεται στη γειτονιά κάποιας από τις ενεργειακές στάθμες του σύνθετου πυρήνα, αναμένεται μικρή πιθανότητα πραγματοποίησης της αντίδρασης. Αντίθετα, αν η κινητική ενέργεια του νετρονίου δίνει ενέργεια διέγερσης (του σύνθετου πυρήνα) στη γειτονιά κάποιας στάθμης διέγερσης, η πιθανότητα γίνεται μεγάλη και τότε έχουμε για **ενεργειακό συντονισμό**. Το σκεπτικό για τη διάσπαση του πυρήνα ισχύει και για την αποδιέγερσή του: Κάθε κατάσταση διέγερσης του σύνθετου πυρήνα έχει κι αυτή μια μέση ζωή που μπορεί να προσδιοριστεί από την αντίστοιχη σταθερά διάσπασης:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$



$$S = \hbar \cdot \lambda$$

Πυρηνικές Αντιδράσεις

Όρια ισχύος του μοντέλου του σύνθετου πυρήνα:

A. Στους πολύ ελαφρούς πυρήνες (με ακραία περίπτωση το ${}^1_1\text{H}$) δεν υπάρχουν αρκετά νουκλεόνια για να πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός ανακατανομών της ενέργειας, ώστε να ξεχάσει ο σύνθετος πυρήνας τον τρόπο σχηματισμού του.

B. Όσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια διέγερσης, τόσο πιο πυκνές είναι οι ενεργειακές στάθμες. Αν λοιπόν η ενέργεια του νετρονίου είναι σχετικά μικρή, η αντίδραση δίδει μια μόνο ενεργειακή κατάσταση του σύνθετου πυρήνα και η αποδιέγερση είναι ανεξάρτητη του τρόπου σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα. Αν όμως η ενέργεια του νετρονίου είναι αρκετά μεγάλη, η απροσδιοριστία ΔE μπορεί να απλώνεται σε περισσότερες από μια στάθμες. Τότε η σχετική αποδιέγερση των σταθμών μπορεί να εξαρτάται από τον τρόπο σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα.

Πυρηνικές Αντιδράσεις

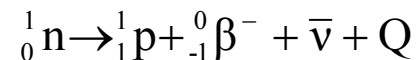
Ηλεκτρόνιο είναι ένα σωματίδιο που μεταφέρει μία απλή μονάδα αρνητικού (${}_{-1}^0e$) ή θετικού φορτίου ${}_{1}^0e$

Νεγκατρόνια: Τα αρνητικά ηλεκτρόνια είναι τα κοινά ηλεκτρόνια η ενώ

Ποζιτρόνια: τα θετικά ηλεκτρόνια είναι τα λεγόμενα.

Όταν ένα νεγκατρόνιο συγκρούεται μ' ένα ποζιτρόνιο τότε τα δύο ηλεκτρόνια εξαφανίζονται και στη θέση τους εμφανίζονται δύο ή περισσότερα φωτόνια (σωματίδια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που έχουν μάζα ηρεμίας μηδέν, φορτίο μηδέν και κινούνται με την ταχύτητα του φωτός),

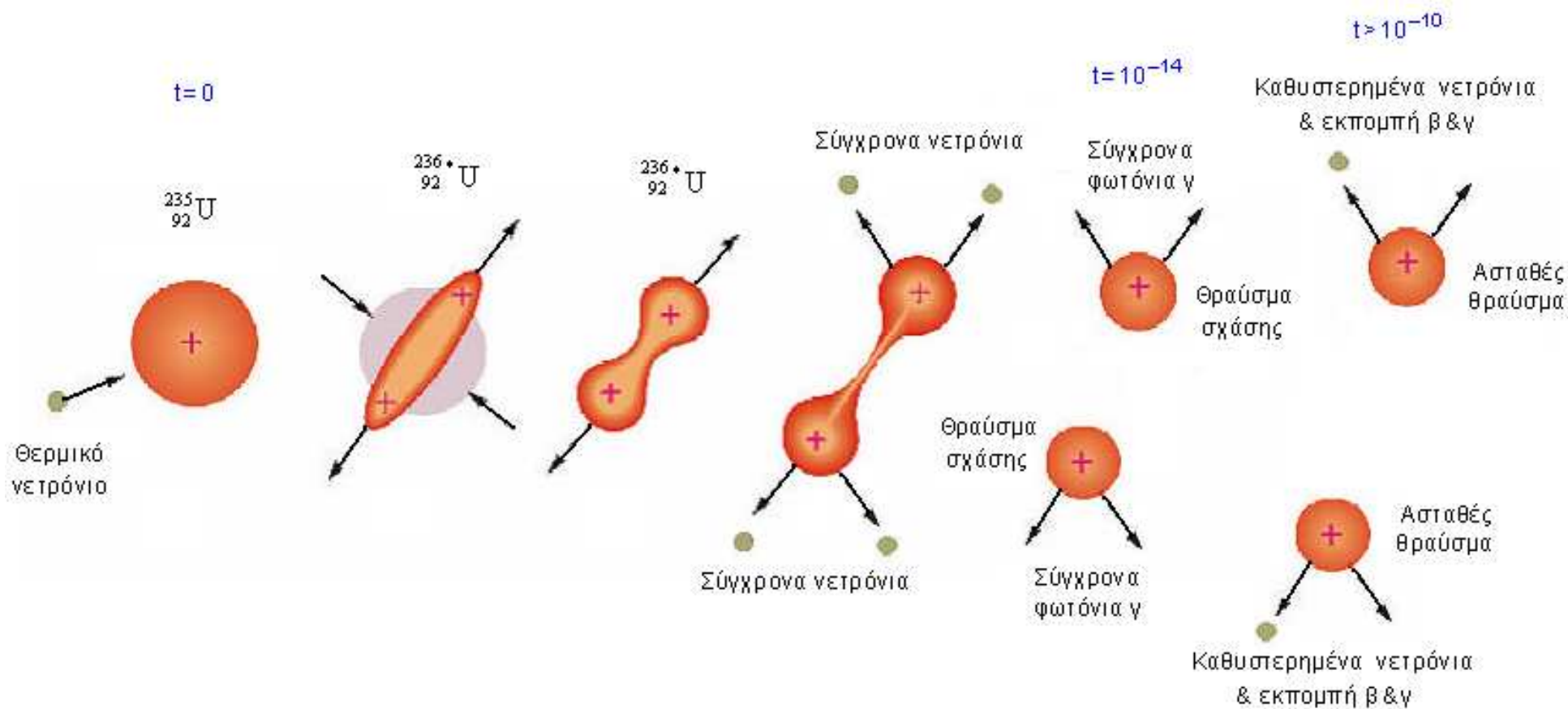
Νετρίνο και **αντινετρίνο** είναι σωματίδια με μάζα ηρεμίας και φορτίο μηδέν, ενώ έχουν σπιν 1/2. Η παραδοχή τους έγινε για να εξηγηθεί η διατήρηση της στροφορμής και ενέργειας. Έτσι εάν θεωρήσουμε την αντίδραση μεταστοιχίωσης του νετρονίου:



Πρωτόνιο, νετρόνιο και ηλεκτρόνιο έχουν από 1/2 σπιν. Χωρίς το αντινετρίνο στο δεξιό μέρος της εξίσωσης η στροφορμή δεν μπορεί να διατηρηθεί, διότι η πιθανή στροφορμή της τροχιάς του ηλεκτρονίου σχετικά με το πρωτόνιο πρέπει να έχει ακέραιο κβαντικό αριθμό.

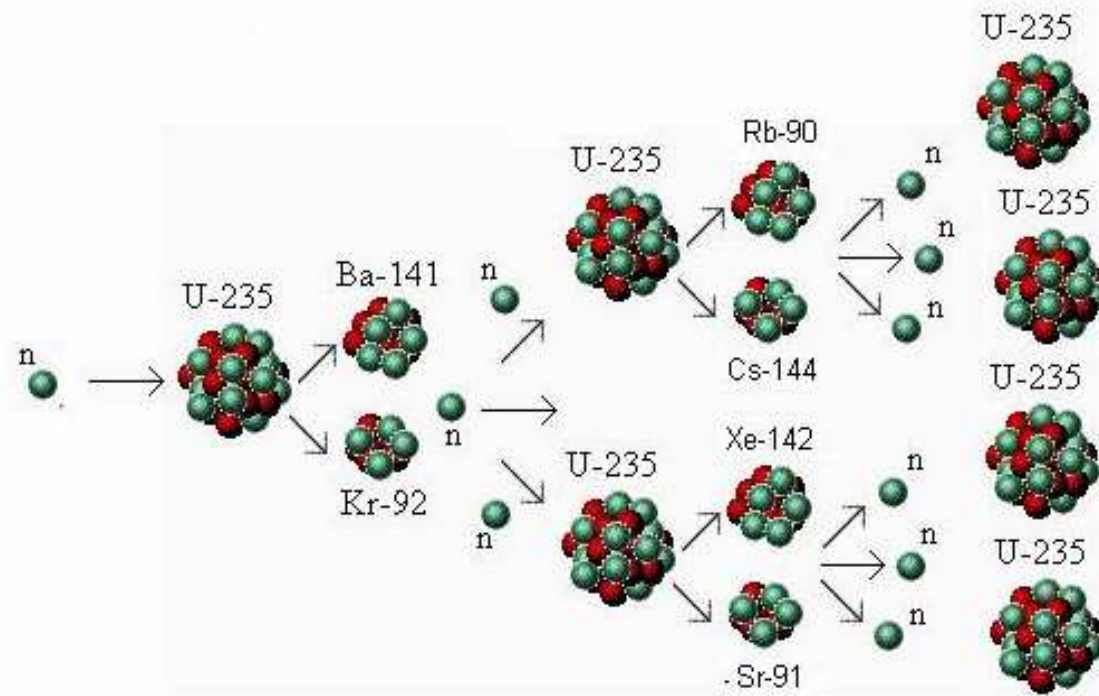
Σχάση

Μοντέλο σχάσης της υγρής σταγόνας:

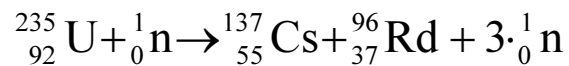
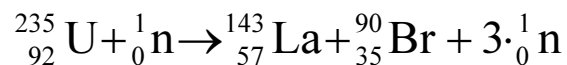
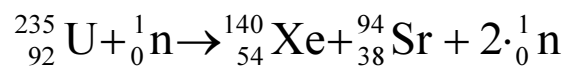
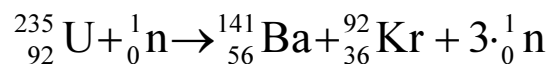


Σχάση

Αλυσιδωτή ή αλυσωτή αντίδραση:



Οι τυπικές αντιδράσεις σχάσης είναι:



Σχάση

Η συνολική ενέργεια που εκλύεται από την πυρηνική αντίδραση της σχάσης είναι $\sim 200\text{MeV}$ 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 β και γ και από τη διάσπαση των προϊόντων (θραυσμάτων) της σχάσης απάγουν 8 και 7MeV , αντίστοιχα.

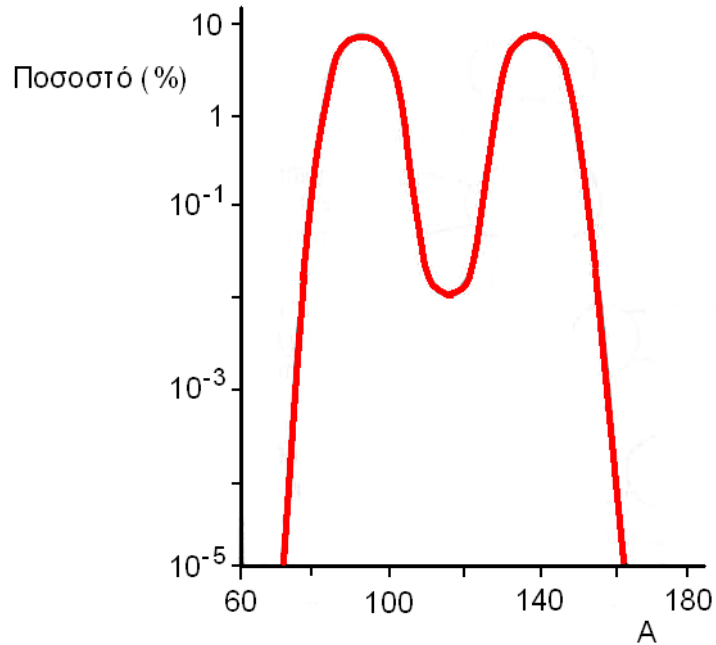
Τα νετρίνο στις β^- διασπάσεις των προϊόντων της σχάσης που είναι κατά κανόνα β^- ραδιενεργά απάγουν περίπου 12MeV (η ενέργεια αυτή δεν απορροφάται τοπικά λόγω της πολύ μεγάλης εμβέλειας-μερικές ακτίνες Γης, των νετρίνο).

Οι σύγχρονες γάμμα, απάγουν $\sim 7\text{MeV}$, ενώ τα νετρόνια της σχάσης (σύγχρονα και καθυστερημένα) υπό μορφήν κινητικής ενέργειας απάγουν $\sim 5\text{MeV}$.

Η ενέργεια που εκλύεται στη σχάση είναι η λεγόμενη **πυρηνική ενέργεια** ή **θερμοπυρηνική ενέργεια** λόγω μετατροπής της σε πρώτη φάση σε θερμική ενέργεια.

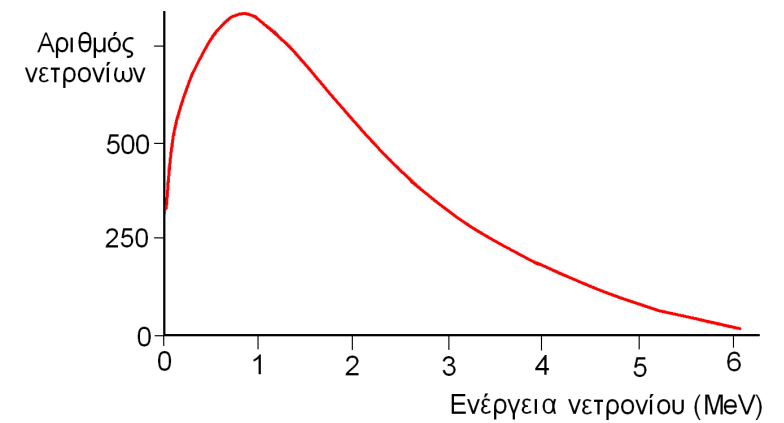
Πρόκειται για τεράστια ποσότητα ενέργειας, ένα εκατομμύριο περίπου φορές περισσότερη από την ενέργεια που εκλύεται κατά τις εξώθερμες χημικές αντιδράσεις.

Προϊόντα Σχάσης



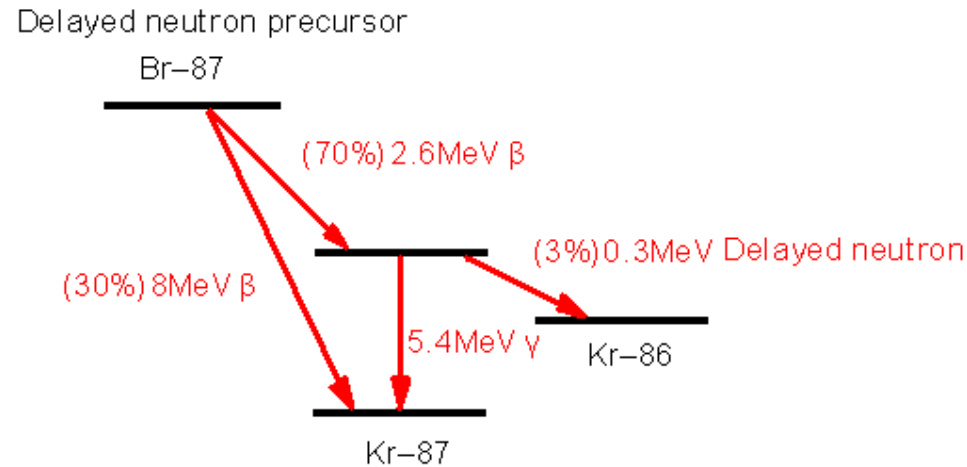
Σχάση του μητρικού U-235, το πιο πιθανό για τους θυγατρικούς πυρήνες είναι να έχουν, ο ένας A~90 και ο άλλος το υπόλοιπο (A~140)

Ενέργεια των άμεσων νετρονίων που εκπέμπονται από τη σχάση



Προϊόντα Σχάσης

Τρόποι αποδιέγερσης Br-87



Η εκπομπή των νετρονίων αυτών γίνεται με καθυστέρηση σε σχέση με τη σχάση. Η καθυστέρηση αυτή είναι κατά μέσο όρο ίση με το μέσο χρόνο ζωής του αρχικού θραύσματος (55s στην περίπτωση του Br-87).

Ονομάζονται **καθυστερημένα νετρόνια** (delayed) και οι αρχικοί πυρήνες στην κορυφή της αλυσίδας διασπάσεων ονομάζονται **πρόδρομοι** ή **προάγγελοι πυρήνες** των καθυστερημένων νετρονίων (delayed neutron precursor).

Ο αριθμός των προδρόμων πυρήνων είναι μεγάλος (περίπου 45) και κάθε πρόδρομος πυρήνας έχει τον ιδιαίτερο χρόνο ημιζωής του για διάσπαση β^- .

Ενέργεια Σχάσης

Φορείς ενέργειας	Απελευθέρωση ενέργειας σχάσης (MeV)	Ποσοστό ενέργειας σχάσης (%)	Σύνολο (MeV)
Στιγμιαίοι			
Κινητική ενέργεια των θραυσμάτων	168	80%	180
Κινητική ενέργεια των νετρονίων σχάσης	5	3%	
Άμεση ακτινοβολία γ	7	4%	
Καθυστερημένοι			
Σωματίδια β από την αποσύνθεση των θραυσμάτων	7	4%	23
Ακτίνες γ από την αποσύνθεση των θραυσμάτων	6	4%	
Νετρίνα	10	5%	

Επιφάνειες Αντίδρασης

Ρυθμός αντίδρασης $r = \sigma \cdot N \cdot \phi = \sigma \cdot N \cdot n \cdot \vec{V}$ μονάδες barns όπου $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

ϕ ροή νετρονίων

\vec{V} μέση ταχύτητα των νετρονίων

n είναι ο αριθμός των νετρονίων αυτών ανά m^3

Η τιμή της σ για κάθε τύπο πυρηνικής αντίδρασης είναι εξαρτωμένη από το υλικό του στόχου και την ταχύτητα του νετρονίου.

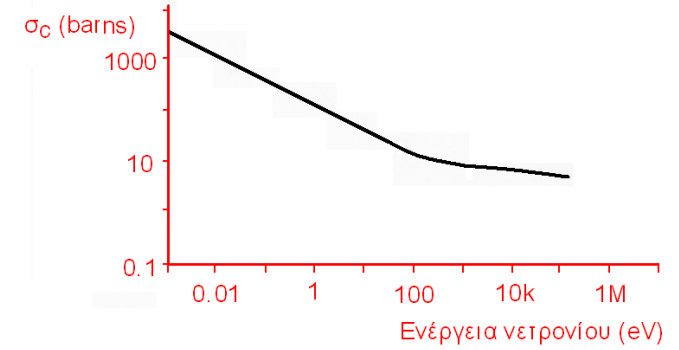
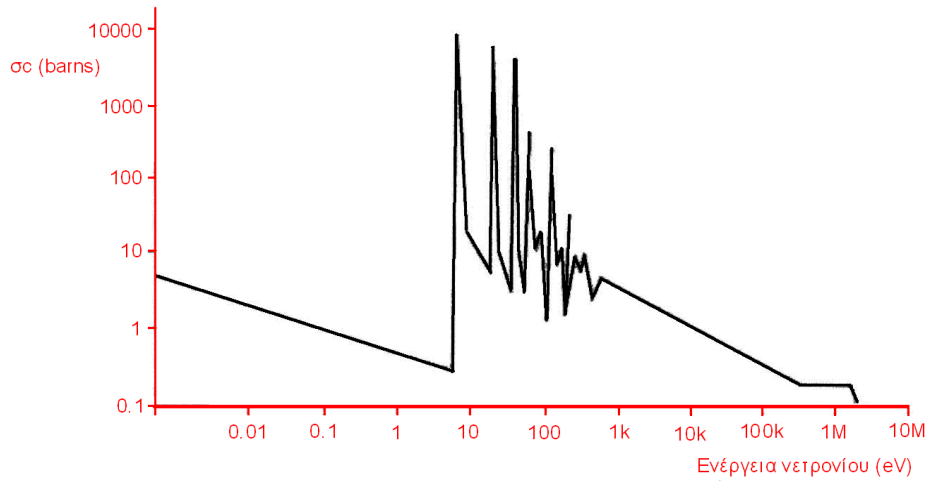
Η σ έχει διαστάσεις επιφάνειας και ονομάζεται **μικροσκοπική επιφάνεια-διατομή** του συγκεκριμένου νουκλιδίου, με νετρόνια της συγκεκριμένης ενέργειας, για συγκεκριμένη αντίδραση π.χ. μικροσκοπική διατομή σχάσης U-235 με νετρόνια ενέργειας 0.025 eV.

Η σ είναι χαρακτηριστική του νουκλιδίου στο οποίο αναφέρεται η αντίδραση και εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων. Η *microscopic cross section* μπορεί να θεωρηθεί ως η ουσιαστική επιφάνεια την οποία ένας πυρήνας «παρουσιάζει» προς το νετρόνιο για μια συγκεκριμένη αλληλεπίδραση.

Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα αλληλεπίδρασης.

Επιφάνειες Αντίδρασης

Επιφάνεια αλληλεπίδρασης της σύλληψης νετρονίων του B-10



Επιφάνεια αλληλεπίδρασης της σύλληψης νετρονίων του U-238



Επιφάνεια αλληλεπίδρασης της σχάσης του U-235 και U-238

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:
 $k_{\infty} = (\text{αριθμός νετρονίων που δημιουργούνται από την αλυσιδωτή αντίδραση μιας γενιάς}) / (\text{τον αριθμό των νετρονίων που δημιουργήθηκαν στην προηγούμενη γενιά})$.

Το σύμβολο k_{∞} θα χρησιμοποιηθεί σαν σταθερά πολλαπλασιασμού. Από τον ορισμό είναι ξεκάθαρο ότι:

- Εάν $k_{\infty} > 1$ η αλυσιδωτή αντίδραση είναι αποκλίνουσα και ο αντιδραστήρας θα είναι υπερκρίσιμος (supercritical). Καθώς η ισχύς που παράγεται σχετίζεται με τον αριθμό των σχάσεων, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της σταθερά τόσο γρηγορότερος θα είναι ο ρυθμός αύξησης της ισχύος.
- Εάν $k_{\infty} = 1$, 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 $k_{\infty} < 1$ 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.

Επιβραδυντές

Ο **επιβραδυντής (moderator)** πρέπει να μετατρέψει ταχέα νετρόνια με ενέργεια 2MeV σε χαμηλής ενέργειας θερμικά νετρόνια 0.025eV.

Ρυθμός της πυρηνικής αντίδρασης μεταξύ του επιβραδυντή και του νετρονίου: $R = \sigma_s \cdot N \cdot \varphi$

όπου R ο αριθμός των συγκρουόμενων νετρονίων, m²/s

σ_s η μικροσκοπική επιφάνεια αλληλεπίδρασης για σκέδαση, (ελαστική σκέδαση εφόσον δεν υπάρχει μη ελαστική σκέδαση σε αυτήν την περίπτωση),

φ η ροή νετρονίων, m²/s και

N ο αριθμός πυρήνων για το υλικό στόχο πυρήνες/m³

Οι προϋποθέσεις για έναν καλό επιβραδυντή (μεγάλη μεταφορά ενέργειας και μεγάλος ρυθμός συγκρούσεων) συνδυάζονται στον όρο της **ισχύος (ή ικανότητα) επιβράδυνσης** που ορίζεται ως:

$$\text{Ισχύς επιβράδυνσης} = \xi \cdot N \cdot \sigma_s = \xi \cdot \Sigma_s \quad (6-80)$$

όπου Σ_s είναι μια μακροσκοπική επιφάνεια αλληλεπίδρασης σκέδασης.

Ο **λόγος επιβράδυνσης** ενσωματώνει την ισχύ επιβράδυνσης και μια τρίτη απαίτηση που είναι η χαμηλή απορρόφηση νετρονίων. Ορίζεται ως:

$$\text{Λόγος επιβράδυνσης} = \frac{\xi \cdot \Sigma_s}{\Sigma_a}$$

όπου ξ είναι το **λογαριθμικό ενεργειακό ποσοστό μείωσης** (ή μέση λογαριθμική μείωση ενέργειας ανά σκέδαση)

Επιβραδυντές

Χαρακτηριστικά επιβραδυντή

Επιβραδυντής	Ισχύς επιβράδυνσης (m ⁻¹) ¹⁾	Λόγος επιβράδυνσης
H ₂ O	153	70
D ₂ O	17	12.000
Γραφίτης	6.4	170

Ο **γραφίτης** είναι φθηνός, εύκολα κατεργάσιμος, σχετικά αδρανής, με χαμηλό μαζικό αριθμό (12.1), χαμηλή $\sigma_c=0.004\text{barns}$ και ικανοποιητική $\sigma_s=4.8\text{barns}$.

Το **ελαφρύ (κοινό) νερό** είναι φθηνό υγρό, έχει αποδεκτή χημική δραστηριότητα και υψηλή δυνατότητα σκέδασης νετρονίων (-100barns). Δυστυχώς όμως έχει σχετικά μεγάλη τάση απορρόφησης νετρονίων (0.66barns) με αποτέλεσμα οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν ελαφρύ νερό να πρέπει να έχουν ελαφρά εμπλουτισμένο U-235 (3% τουλάχιστον).

Το **βαρύ νερό** έχει παρόμοιες ιδιότητες με το ελαφρύ νερό και μολονότι η τάση για σκέδαση είναι χαμηλότερη (13barns) η τάση για απορρόφηση νετρονίων είναι εξαιρετικά χαμηλή (0.001barns). Όμως το βαρύ νερό είναι πανάκριβο, διότι είναι σπάνιο στη φύση (0.015% στο νερό της φύσης) και δύσκολα διαχωρίζεται από το ελαφρύ νερό. Η απόφαση για το εάν θα χρησιμοποιηθεί είναι καθαρό οικονομοτεχνικό θέμα.

Πυρηνική Σύντηξη

Στην **πυρηνική σύντηξη (nuclear fusion)**, δύο ξεχωριστοί πολύ ελαφρύς πυρήνες ($A \leq 8$) πυρήνες με σχετικά χαλαρή σύνδεση, όπως δύο ισότοπα του υδρογόνου, δηλαδή το δευτέριο (^2H), ένα νετρόνιο και ένα πρωτόνιο συνδεδεμένα χαλαρά μεταξύ τους) ή τρίτιο (^3H), δύο νετρόνια και ένα πρωτόνιο συνδεδεμένα χαλαρά μεταξύ τους) ενώνονται για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο πυρήνα το ήλιο (He) στο οποίο τα νουκλεόνια συνδέονται μεταξύ τους στενότερα.

Η ενέργεια σύνδεσης του σχηματισθέντος μ' αυτόν τον τρόπο πυρήνα είναι μεγαλύτερη από τις ενέργειες σύνδεσης των ελαφρύτερων πυρήνων και αυτό γιατί μέρος της μάζας ηρεμίας των ελαφών πυρήνων μετατράπηκε σε ενέργεια.

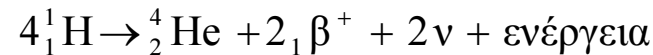
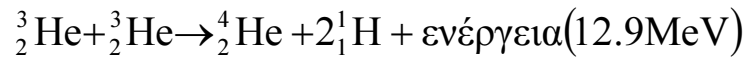
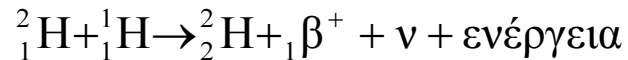
Η σύντηξη λοιπόν απελευθερώνει ενέργεια γιατί χάνεται μάζα. Ο πυρήνας ηλίου έχει σημαντικά μικρότερη μάζα από τους αρχικούς πυρήνες υδρογόνου. Συνεπώς, η πυρηνική σύντηξη είναι ουσιαστικά το αντίθετο της πυρηνικής διάσπασης. Ελαφρύς πυρήνες ενώνονται ώστε να απελευθερώσουν την περίσσεια ενέργεια σύνδεσης 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**.

Πυρηνική Σύντηξη

Τι συμβαίνει στον Ήλιο?

Ένας τρόπος για να εκβιάσουμε τους πυρήνες του δευτέρου και να έρθουν σχετικά κοντό 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 $20 \cdot 10^6$ °C

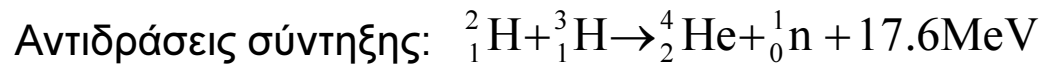
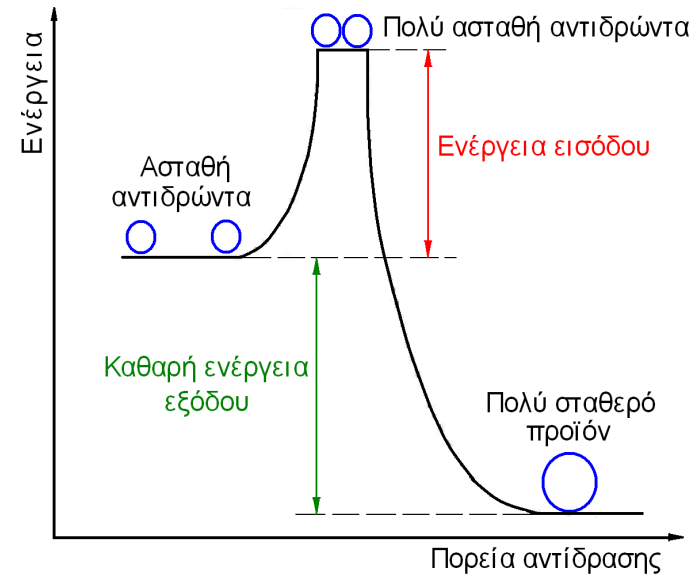


Βλέπουμε ότι τέσσερα πρωτόνια έχουν συνενωθεί για να δώσουν ένα σωματίδιο άλφα (α), μερικά ελαφρύτερα προϊόντα και ενέργεια.

Έτσι κάποιος μπορεί να υποθέσει ότι το καύσιμο στον Ήλιο είναι τα πρωτόνια και η τέφρα είναι το Ήλιο. Αυτό είναι γνωστό ως ο **κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου**.

Πυρηνική Σύντηξη

Η ιδέα της σύντηξης



Το έλλειμμα μάζας από τη σύντηξη δύο πυρήνων δευτέρου προκύπτει ότι είναι:

$$\Delta m = \text{Μάζα προϊόντων} - \text{Μάζα αντιδρώντων} = 5.011268 - 5.030152 = 0.018884 \text{ a.m.u.}$$

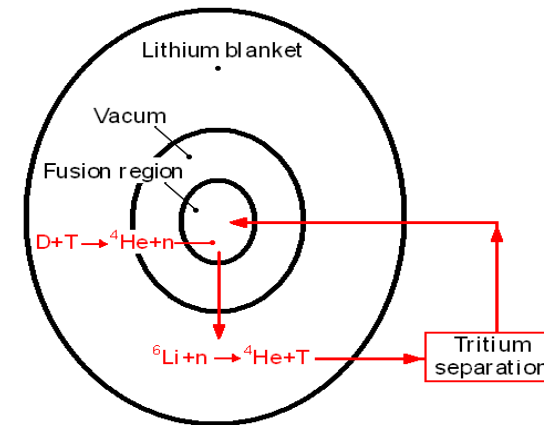
Η ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα αυτή είναι:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \Rightarrow \Delta E = 17.6\text{MeV}/\text{πυρήνα}$$

Πυρηνική Σύντηξη

Οι κύκλοι καυσίμου:

1. Κύκλος δευτέρου-τρίτιου: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} (3.5\text{MeV}) + {}^1_0\text{n} (14.1\text{MeV})$



2. Κύκλος δευτέρου-δευτέρου: ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_1\text{p} + 4.0\text{MeV}$ ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 3.3\text{MeV}$

3. Κύκλος πρωτονίου-βορίου 11: ${}^2_1\text{p} + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow 3 {}^4_2\text{He} + 8.7\text{MeV}$

Πυρηνική Σύντηξη

Αντίδραση σύντηξης	Κατώτερο όριο θερμοκρασίας (°C)
$D+D = \frac{3}{2}\text{He} + \frac{1}{0}\text{n} + 3.3\text{MeV}(79\text{MJ/g})$	400,000,000
$D+D = T + p + 4.0\text{MeV}(97\text{MJ/g})$	400,000,000
$D+T = \frac{4}{2}\text{He} + \frac{1}{0}\text{n} + 17.6\text{MeV}(331\text{MJ/g})$	45,000,000
$D+\frac{3}{2}\text{He} = \frac{3}{2}\text{He} + p + 18.3\text{MeV}(353\text{MJ/g})$	350,000,000

Οι ερευνητικές προσπάθειες στην ανάπτυξη της Πυρηνικής Τεχνολογίας εστιάζονται στην επίτευξη του σημείου εξισορρόπησης (breakeven point). Η παραγωγή πλάσματος σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία και σωματοδιακή πυκνότητα που να παραμένει σε μια κατάσταση επί αρκετό διάστημα για να παράγεται τόση ενέργεια όση δαπανάται βρίσκεται στο επίκεντρο των ερευνητών.

Εκτός από την απαίτηση για υψηλή θερμοκρασία, πρέπει να εφαρμόζεται και το **κριτήριο Lawson**, που σημαίνει ότι το γινόμενο της σωματοδιακής πυκνότητας (σε πυρήνες ανά cm^3) επί το χρόνο επαφής (confinement time) σε s πρέπει να υπερβαίνει το 10^{14} . Αυτό το κριτήριο μπορεί να ισχύσει εάν έχουμε π.χ. πυκνότητα $10^{14}\text{nuclei/cm}^3$ που να βρίσκονται μαζί για ένα s η εάν έχουμε π.χ. πυκνότητα $10^{25}\text{nuclei/cm}^3$ και οι πυρήνες βρεθούν μαζί για 10^{-11}s (αδρανειακή συνένωση).

Σύγκριση Μεταξύ Πυρηνικής Διάσπασης 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: $\frac{\text{σύντηξη}}{\text{σχάση}} = \frac{1.4 \cdot 10^8}{1.9 \cdot 10^7} = 7.4$

Ανιχνευτές Πυρηνικών Ακτινοβολιών

Οι ακτινοβολίες αυτές μπορούν να ανιχνευτούν με βάση:
γνωστά φαινόμενα αλληλεπίδρασης των πυρηνικών ακτινοβολιών και της ύλης,
και να διαπιστωθεί χωριστά κάθε σωματίδιο ή φωτόνιο των ακτινοβολιών.

Οι μετρητικές μέθοδοι στηρίζονται:
στον ιονισμό ή τη διέγερση ατόμων και μορίων.

Τα **φορτισμένα** σωματίδια δρουν **άμεσα** και διαπιστώνεται εύκολα η ύπαρξη τους. Αποβάλλουν την κινητική τους ενέργεια, που καταναλώνεται για τον ιονισμό ή τη διέγερση.

Τα **αφόρτιστα** όμως δρουν **έμμεσα** προκαλώντας δευτερογενείς δράσεις.

Η μορφή και το μέγεθος των ανιχνευτών εξαρτάται κύρια από τη γεωμετρία με την οποία ο ανιχνευτής «βλέπει» την ακτινοβολία μικρή ή μεγάλη στερεά γωνία (μεγάλη ή μικρή απόσταση πηγής ακτινοβολίας απαριθμητή), την ενέργεια που μεταφέρει η ακτινοβολία ή άλλως την εμβέλειά της και πολλές φορές την ένταση και τον χρόνο μέτρησης της ακτινοβολίας που συνεπάγονται την καλύτερη στατιστική στις μετρήσεις που τις περισσότερες φορές επιζητείται.

Ανιχνευτές Πυρηνικών Ακτινοβολιών

Ένα σύστημα ανίχνευσης ακτινοβολίας αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

τον **ανιχνευτή**, πάνω στον οποίο γίνεται η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη και τη **μετρητική συσκευή**, που δέχεται το σήμα εξόδου του ανιχνευτή και εκτελεί τις απαραίτητες λειτουργίες για την λήψη των τελικών μετρήσεων.

Τα **είδη** ανιχνευτών μπορούν να χαρακτηριστούν:

με κριτήριο τη φύση της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τον ανιχνευτή: λειτουργούν με βάση τον **άμεσο ιονισμό** που προκαλείται σε αυτούς από το πέρασμα φορτισμένων σωματίων (είτε πρωτογενών, είτε δευτερογενών).

Όπως:

θάλαμος ιονισμού (ionisation chamber), αναλογικός απαριθμητής (Proportional counter) και οα παριθμητής Geiger-Muller (G-M counter). Στους ανιχνευτές στερεής κατάστασης ή ανιχνευτές ημιαγωγού (semiconductor diode detectors or solid state detectors), οι φορείς της πληροφορίας είναι τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται κατά μήκος της τροχιάς του φορτισμένου σωματίου μέσα στον ανιχνευτή. Άλλοι τύποι ανιχνευτών, οι σπινθηριστές (scintillation detectors) λειτουργούν με βάση κυρίως τη διέγερση των ατόμων τους και τον επακόλουθο φθορισμό.

με κριτήριο το είδος της πληροφορίας που δίνουν:

Τη μέτρηση του χρόνου ή του τόπου όπου έγινε το γεγονός, ή της ενέργειας που εκλύεται στον ανιχνευτή.

με κριτήριο την απόδοση:

Την πιθανότητα δηλαδή να ανιχνευτεί ένα σωματίο που διαπερνά την ύλη του ανιχνευτή. Η απόδοση εξαρτάται κατά πολύ από την ενέργεια των σωματιδίων.

με κριτήριο το νεκρό χρόνο:

Τον ελάχιστο χρόνο δηλαδή που πρέπει να περάσει μετά από την διέγερση από ένα σωματίδιο, για να επανέλθει ο ανιχνευτής στις αρχικές συνθήκες και να μπορέσει να ανιχνεύσει το επόμενο σωματίδιο ως ξεχωριστό γεγονός.

Η Σχέση των Τεσσάρων Παραγόντων

Ο κύκλος ζωής του νετρονίου μπορεί να θεωρηθεί ότι συνίσταται από τέσσερις διαφορετικές φάσεις. Ένα μέτρο της απόδοσης του κάθε φάσης είναι χρήσιμο και αυτό μπορεί να γίνει διαιρώντας τον αριθμό των νετρονίων στο τέλος κάθε φάσης με τον αριθμό των νετρονίων στην αρχή της ίδιας φάσης.

παράγοντας θερμικής χρησιμοποίησης: $f = \frac{\text{αριθμός θερμικών νετρονίων που απορροφούνται από το καύσιμο}}{\text{συνολικός αριθμός απορροφούμενων θερμικών νετρονίων στην καρδιά}}$

παράγοντας θερμικής σχάσης: $\eta = \frac{\text{αριθμός νετρονίων που παράγονται από σχάση με θερμικά νετρόνια}}{\text{αριθμός θερμικών νετρονίων που απορροφούνται από το καύσιμο}}$

παράγοντας σχάσης U-238: $\varepsilon = \frac{\text{συνολικό αριθμός νετρονίων που παράγονται από όλες τις σχάσεις}}{\text{αριθμός νετρονίων που παράγονται από σχάσεις με θερμικά νετρόνια}}$

παράγοντας πιθανότητας διαφυγής λόγω του συντονισμού:

$$p = \frac{\text{αριθμός θερμικών νετρονίων που προκύπτουν από τη διεργασία επιβράδυνσης}}{\text{αριθμός νετρονίων που εισέρχονται στη διεργασία επιβράδυνσης}}$$

Τα αρχικά θερμικά νετρόνια, n_1 σε αριθμό κατέληξαν να είναι $p \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot f \cdot n_1$ και σε σύνολο 1,010.

Σχέση των τεσσάρων παραγόντων (4-factor formula): $k_{\infty} = \frac{p \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot f \cdot n_1}{n_1} \Rightarrow k_{\infty} = p \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot f$

Μετατροπή Μάζας σε Ενέργεια

Πως όμως αρχίζει η σχάση;

Η αντίδραση αυτή «αρχίζει» με βομβαρδισμό του ${}^{235}_{92}\text{U}$ με νετρόνια που προέρχονται από βηρύλλιο που είναι αναμεμιγμένο με κάποιο πομπό ακτινοβολίας α π.χ. πολώνιο ή ράδιο.

Το 85% περίπου της ενέργειας που απελευθερώνεται είναι η κινητική ενέργεια των δυο θραυσμάτων του ${}^{235}_{92}\text{U}$. Στο στερεό καύσιμο τα θραύσματα αυτά μπορούν να κινηθούν μόνο ελάχιστα και έτσι η ενέργεια τους γίνεται θερμότητα. Το υπόλοιπο 15% είναι ενέργεια ακτίνων γ και η κινητική ενέργεια των νετρονίων. Τα δυο θραύσματα σπάνια είναι όμοια διότι η σχάση είναι τυχαία και η πιθανότητα να δημιουργηθούν δυο θραυσμάτων με μαζικό αριθμό $A=118$ είναι ελάχιστη. Οι δυο πυρήνες που προκύπτουν συνήθως, δεν είναι του ιδίου μαζικού αριθμού, δηλαδή παλλάδιο (η βύθιση της καμπύλης), αλλά είναι πιο πιθανό να είναι Kr και Xe (οι δυο κορυφές της καμπύλης). Εάν θεωρήσουμε τώρα έναν πυρήνα με μαζικό αριθμό A (νετρόνια και πρωτόνια), τότε το σύστημα του πυρήνα είναι ευσταθέστερο από την κατάσταση να είχαμε A νουκλεόνια σε άπειρη απόσταση μεταξύ των. Πάντα η μάζα ενός πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των συστατικών του.

Το έλλειμμα αυτό μάζας Δm είναι ισοδύναμο με την ενεργειακή διαφορά ΔE που δίδεται από τον παρακάτω πασίγνωστο τύπο της Φυσικής: $E = m \cdot c^2$

Κάθε σχάση απελευθερώνει περίπου 200MeV, ή $3.2 \cdot 10^{-11}\text{J}$ (σε σύγκριση με τα 4eV ή $6.5 \cdot 10^{-19}\text{J}$ ανά μόριο CO_2 που απελευθερώνεται κατά την καύση του άνθρακα).

Αναπαραγωγή

Το κατώφλι ενέργειας του νετρονίου ώστε να προκληθεί σχάση των πυρήνων Th-232, U-238, Pu-240 και Pu-242 της τάξης του 1MeV. Αν και ένα ποσοστό των νετρονίων που προκύπτουν από τη σχάση των πυρήνων αυτών έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το κατώφλι, τα περισσότερα επιβραδύνονται με σκεδάσεις σε ενέργειες χαμηλότερες από το κατώφλι.

Το γεγονός αυτό καθώς και οι μεγάλες τιμές του **λόγου σύλληψης ή ενσωμάτωσης** $\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$

που εκφράζει τη σχετική πιθανότητα σύλληψης- ενσωμάτωσης νετρονίου προς σχάση, που τους χαρακτηρίζουν, κάνει αδύνατη τη σχεδίαση κρίσιμης διάταξης με πυρηνικό καύσιμο οποιονδήποτε από τους πυρήνες αυτούς. Έτσι οι μόνοι που μπορούν να δώσουν αυτοσυντήρητη αλυσωτή αντίδραση είναι οι σχάσιμοι πυρήνες: U-233, U-235, Pu-239 και Pu-241.

Το U-235 βρίσκεται στη φύση σε αξιόλογες ποσότητες, ως συστατικό του φυσικού ουρανίου σε ποσοστό 0.7%κ.β. Οι πυρήνες U-233 και Pu-239 δεν απαντώνται στη φύση σε σημαντικές ποσότητες, είναι κατασκευάσματα του ανθρώπου και προκύπτουν από τις αντιδράσεις:



Λόγος μετατροπής (conversion ratio, CR):

$$CR = \frac{\text{μέσος ρυθμός παραγωγής σχάσιμων πυρήνων}}{\text{μέσος ρυθμός καταστροφής σχάσιμων πυρήνων}}$$

Αναπαραγωγή

εάν A νετρόνια απορροφηθούν από άλλους πυρήνες ή θα διαφύγουν από το σύστημα, οπότε:

$$\eta_{235} = 1 + CR + A \Rightarrow CR = \eta_{235} - 1 - A$$

CR είναι ο αρχικός λόγος μετατροπής, γιατί με τη λειτουργία του αντιδραστήρα πραγματοποιείται αλλαγή της ισοτοπική σύστασης του καυσίμου, άρα και αλλαγή του λόγου μετατροπής. Στους αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου τα υλικά επιλέγονται και η καρδιά σχεδιάζεται έτσι, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες A . Τυπική τιμή είναι $A \approx 0.25$, οπότε, χρησιμοποιώντας την τιμή $\eta_{235} = 2.08$ προκύπτει για αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου $CR \approx 0.83$. Στους αντιδραστήρες εμπλουτισμένου ουρανίου ο εμπλουτισμός γίνεται ακριβώς για να αντισταθμιστούν αυξημένες απορροφήσεις στα υλικά της καρδιάς του αντιδραστήρα. Τυπική τιμή του λόγου μετατροπής αντιδραστήρες εμπλουτισμένου ουρανίου είναι $CR \leq 0.65$.

Στους θερμικούς αντιδραστήρες όπου $CR < 1$, θα είναι: $N_{th} = N_{235} / (1 - CR)$
 οπότε το ποσοστό του φυσικού ουρανίου που μπορεί θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί είναι:

$$\text{θεωρητική κατανάλωση φυσικού } U = \frac{N_{th}}{N_{235} + N_{238}} = \frac{0.007}{1 - CR}$$

Με ή χωρίς εμπλουτισμό, στους θερμικούς αντιδραστήρες ουρανίου χρησιμοποιείται ελάχιστο ποσοστό του φυσικού ουρανίου. Προφανές είναι το ενδιαφέρον για αντιδραστήρες με $CR > 1$. Στην περίπτωση αυτή ο αντιδραστήρας παράγει περισσότερο σχάσιμο υλικό από όσο καταναλώνει, οπότε ονομάζεται αναπαραγωγικός αντιδραστήρας και ο λόγος μετατροπής ονομάζεται λόγος αναπαραγωγής. Για να είναι δυνατή η αναπαραγωγή πρέπει προφανώς ο παράγοντας η του σχάσιμου υλικού να είναι $\eta > 2$.

Αναπαραγωγή

Ο χρόνος διπλασιασμού στον αντιδραστήρα D_R **αναπαραγωγικών αντιδραστήρων:** .

ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται ο αντιδραστήρας για να παράγει ποσότητα σχασίμου υλικού, επί πλέον αυτής που χρειάζεται ο ίδιος για τη συνεχή λειτουργία του, ίση προς την αρχική ποσότητα σχασίμου υλικού του αντιδραστήρα. Ποσότητα δηλαδή ικανή για την συνέχιση της λειτουργίας του και, επί πλέον αυτής, για την παραγωγή του σχασίμου υλικού που χρειάζεται για να αρχίσει η λειτουργία ενός άλλου ίδιου αντιδραστήρα.

Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες θα έχουν αξιόλογη συμβολή στη λύση του ενεργειακού προβλήματος, αν ο χρόνος DR είναι περίπου ο ίδιος με το χρόνο διπλασιασμού της ζήτησης ενέργειας στη σύγχρονη κοινωνία ο τελευταίος είναι της τάξης των 10 με 15y. Ο D_R εξαρτάται από τον λόγο αναπαραγωγής και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι η ισχύς του αντιδραστήρα, η θερμική απόδοση κ.λπ.

Για θερμικό αντιδραστήρα με U-233 και Th-232, ακόμα και με $CR=1.05$, υπολογίζεται ότι $DR \approx 46$ έτη. Η αναπαραγωγή με καύσιμο U-235 ή Pu-239 σε θερμικό αντιδραστήρα δεν είναι δυνατή. Συμπεραίνεται δηλαδή ότι η κατασκευή αναπαραγωγικού θερμικού αντιδραστήρα δεν αποτελεί πρακτική πρόταση.

Αναπαραγωγή

Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ονομάζονται εκείνοι οι αντιδραστήρες στους οποίους το μέγιστο ποσοστό των σχάσεων πραγματοποιείται με ταχέα νετρόνια, δηλαδή νετρόνια ενέργειας από 100keV έως ~15MeV.

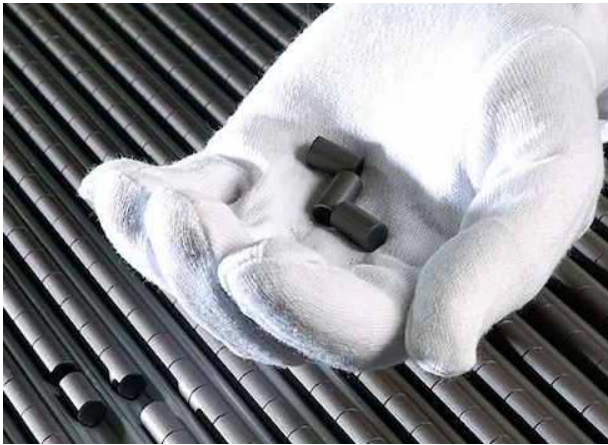
Στην περιοχή αυτή ο $\eta > 2$, οπότε αναπαραγωγή είναι πράγματι δυνατή. Επειδή όμως οι διατομές σχάσης σ_f με ταχέα νετρόνια είναι της τάξης μερικών barns, ενώ με θερμικά νετρόνια η σ_f είναι μερικές εκατοντάδες barns, χρειάζεται εμπλουτισμένο καύσιμο (~20%).

Χρειάζεται ακόμα η χρησιμοποίηση υλικών με μεγάλο μαζικό αριθμό για να περιοριστεί, όσο γίνεται, η επιβράδυνση των νετρονίων. Στους σύγχρονους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων, που ψύχονται με υγρό νάτριο, υπολογίζεται ότι είναι πραγματοποιήσιμος λόγος αναπαραγωγής περίπου ίσος με 1.2. Ο χρόνος διπλασιασμού σε τέτοιο αντιδραστήρα εκτιμάται ότι είναι περίπου 10-15y.

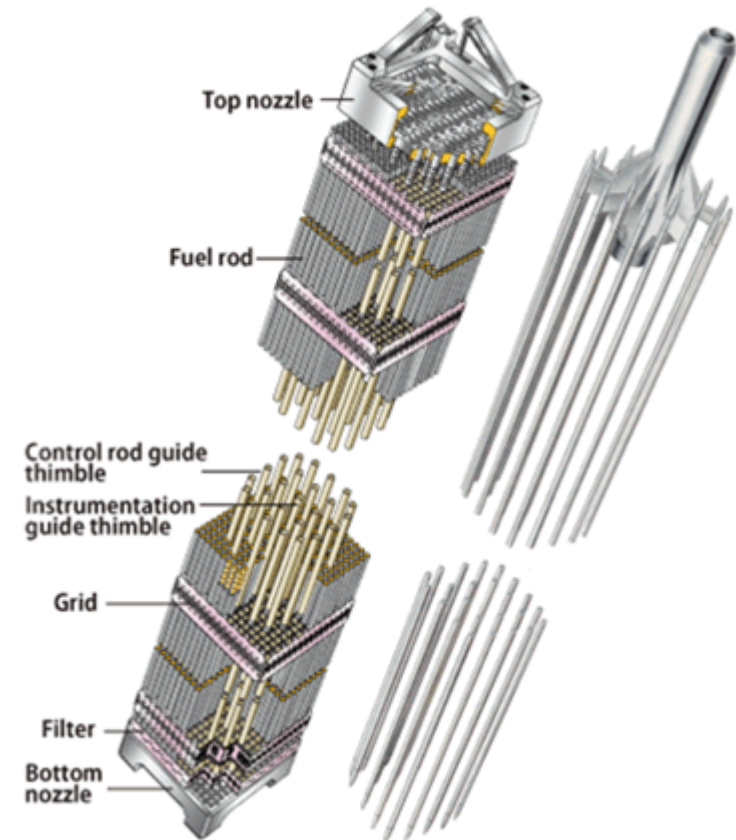
Σε αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων με καύσιμο U-233 και ψυκτικό αέριο ήλιο, το ήλιο επιβραδύνει πολύ λιγότερο και απορροφά πολύ λιγότερα νετρόνια απ' ό,τι το υγρό νάτριο, οπότε υπολογίζεται ότι σε αυτούς ο λόγος αναπαραγωγής μπορεί να είναι ίσος με 1.4.

Συγκρότηση Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

Πυρηνικό καύσιμο ή απλώς **καύσιμο** (fuel) ονομάζεται το σχάσιμο υλικό (U^{233} , U^{235} , Pu^{239} ή Pu^{241}) μαζί με τα αντίστοιχα ισότοπα που το συνοδεύουν και στη χημική μορφή με την οποία τοποθετείται στον αντιδραστήρα

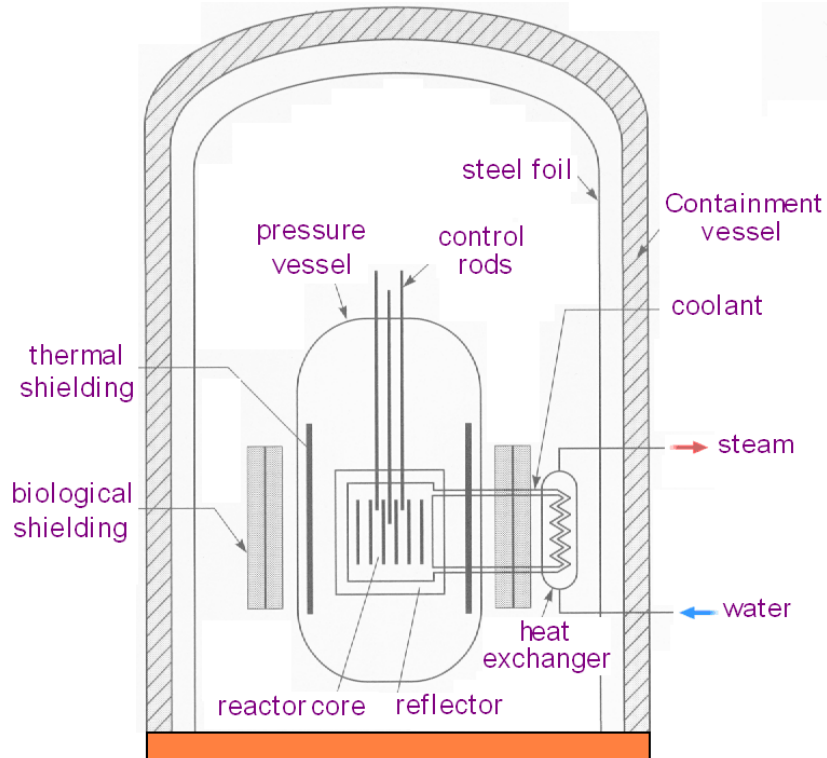


Δισκία καυσίμου



Ράβδοι και συστάδα καυσίμου

Συγκρότηση Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης



Υπάρχουν δύο δυνατότητες κυκλωμάτων του αντιδραστήρα. Τα κυκλώματα αυτά καθορίζουν τη δυναμική συμπεριφορά, τον αυτόματο έλεγχο, την ασφάλεια, το ισοζύγιο νετρονίων και γενικά για το σχεδιασμό του αντιδραστήρα και του σταθμού γενικότερα:

A. Έμμεσου κύκλου (Indirect) Το ψυκτικό ρέει γύρω από τις ράβδους καυσίμου και απάγει τη θερμότητα που παράγεται στο καύσιμο από τις σχάσεις. Εξέρχεται από την έξοδο της καρδιάς σε μεγάλη θερμοκρασία και πίεση. Από εκεί οδηγείται στο πρωτεύον εναλλάκτη θερμότητας, όπου μεταφέρει θερμική ενέργεια σε νερό που ρέει στο δευτερεύον του εναλλάκτη, με αποτέλεσμα την παραγωγή ατμού στο δευτερεύον.

B. Άμεσου κύκλου (Direct). Δεν μεσολαβεί εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ της καρδιάς του αντιδραστήρα και του ατμοστρόβιλου. Στους αντιδραστήρες άμεσου κύκλου το ψυκτικό είναι νερό και η παραγωγή ατμού γίνεται με βρασμό του ίδιου του ψυκτικού στην καρδιά του αντιδραστήρα. Ο ατμός οδηγείται από την έξοδο της καρδιάς κατ' ευθείαν στην είσοδο του ατμοστροβίλου.

Ασφάλεια Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

Υπαρξη πολλαπλών διαδοχικών φραγμάτων εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαρροής των στο περιβάλλον:

- A.** Το πρώτο φράγμα είναι το ίδιο το καύσιμο.
- B.** 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

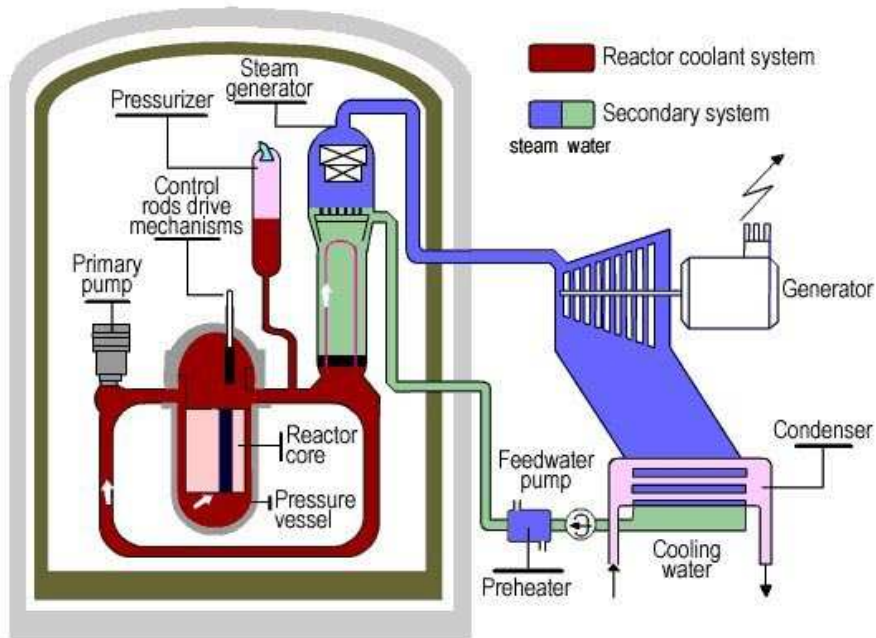
Το ατύχημα απώλειας του ψυκτικού (Loss of Coolant Accident, LOCA)

Τύποι Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

Θερμικοί (Thermal Reactors)			Ταχείς (Fast Reactors)
1. Επιβραδυντή και ψυκτικού ελαφρού ύδατος, (Light Water moderator Reactors, LWR)	2. Επιβραδυντή βαρέος ύδατος, (Heavy Water moderator Reactors, HWR)	3. Επιβραδυντή γραφίτη (Graphite moderator)	4. Αναπαραγωγής, (Breeder Reactors)
1A. Ψυκτικού ελαφρού ύδατος υπό πίεση, (Pressurised Water Reactors, PWR)	2A. Επιβραδυντή και ψυκτικού βαρέος ύδατος υπό πίεση, (Pressurised Heavy Water Reactors, PHWR/CANDU)	3A. Επιβραδυντή γραφίτη και αερόψυκτου, (Gas Cooled Reactor, GCR)	4A. Αναπαραγωγής ταχέων νετρονίων, (Fast Breeder Reactors, FBR)
1B. Ψυκτικού ελαφρού ζέοντος ύδατος, (Boiling Water Reactors, BWR)	2B. Επιβραδυντή και ψυκτικού βαρέος / ελαφρού ύδατος, (Heavy Water /Light Water Reactors, HWLWR/SGHWR)	3B. Επιβραδυντή γραφίτη και ψυκτικού ελαφρού ύδατος (Light Water Cooled Reactor, LWCR)	4B. Αναπαραγωγής, ταχέων νετρονίων, και ψυκτικού υγρού μετάλλου (Liquid Metal Cooled, Fast Breeder Reactor, LMFBR)
	2Γ. Επιβραδυντή βαρέος ύδατος και αερόψυκτου, (Heavy Water Gas Cooled Reactors, HWGCR)		

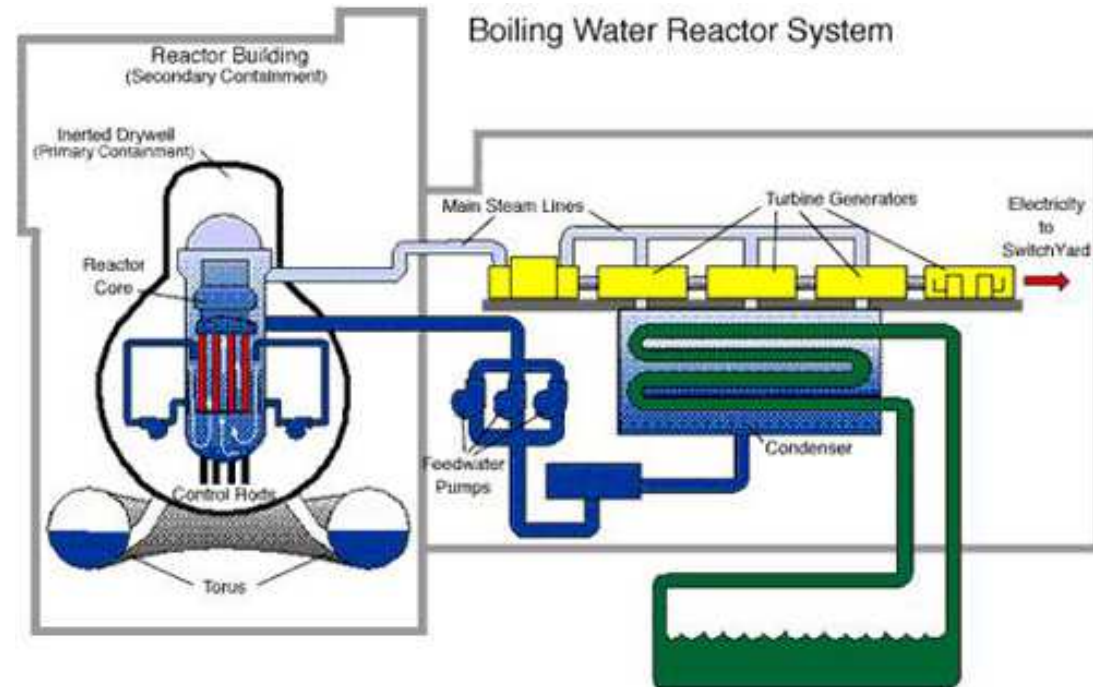
Τύποι Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

1A. Ψυκτικού ελαφρού ύδατος υπό πίεση,
(Pressurised Water Reactors, **PWR**)



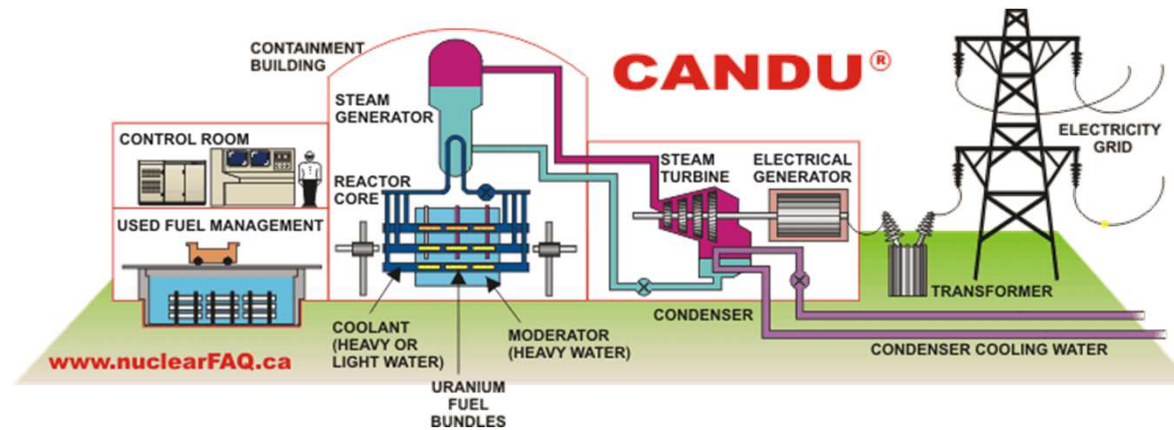
Source: areva-np.com

1B. Ψυκτικού ελαφρού ζέοντος ύδατος,
(Boiling Water Reactors, **BWR**)

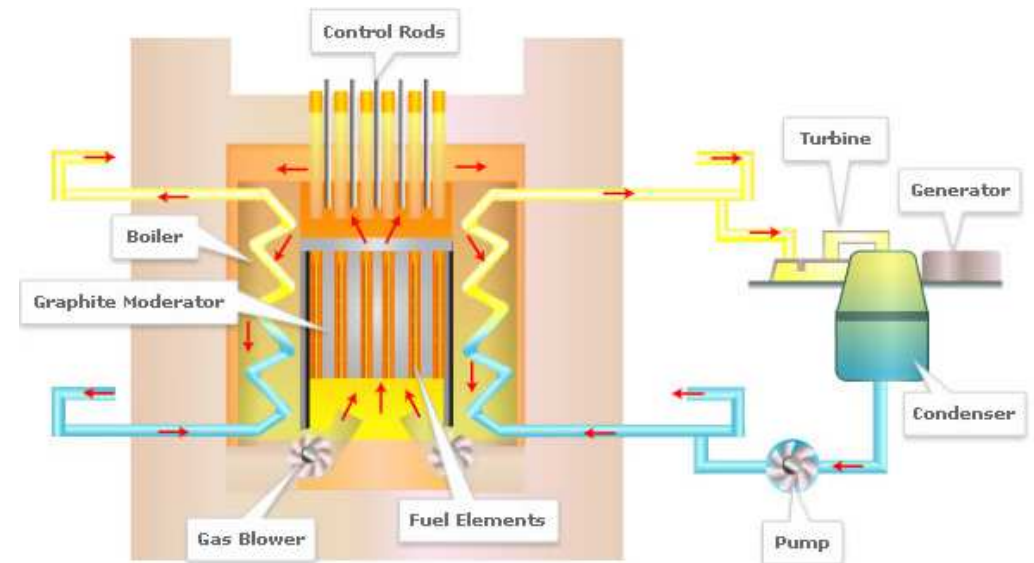


Τύποι Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

2A. Επιβραδυντή και ψυκτικού βαρέος ύδατος υπό πίεση, (Pressurised Heavy Water Reactors, **PHWR/CANDU**)

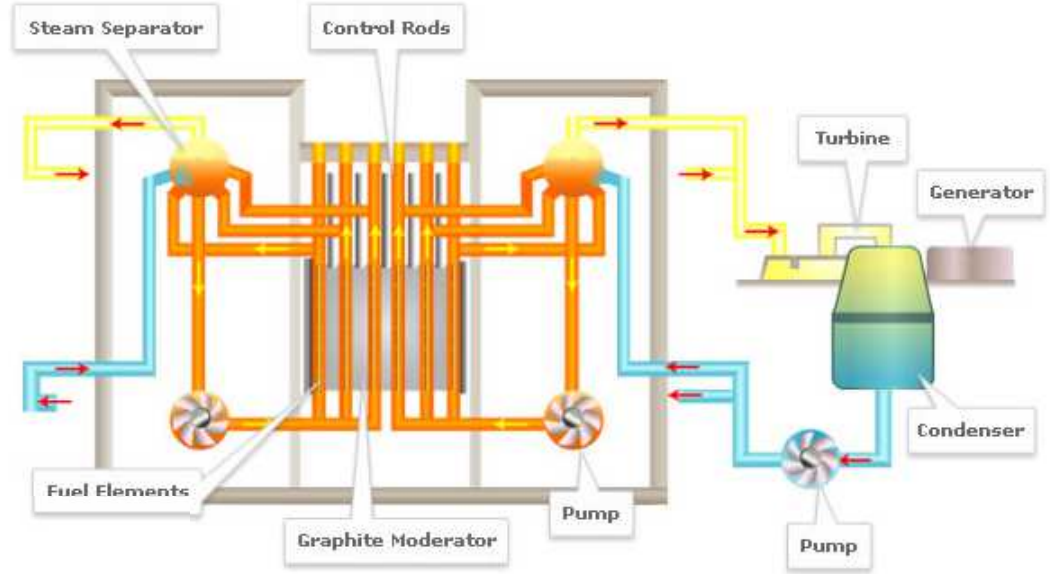


3A. Επιβραδυντή γραφίτη και αερόψυκτου, (Gas Cooled Reactor, **GCR**)

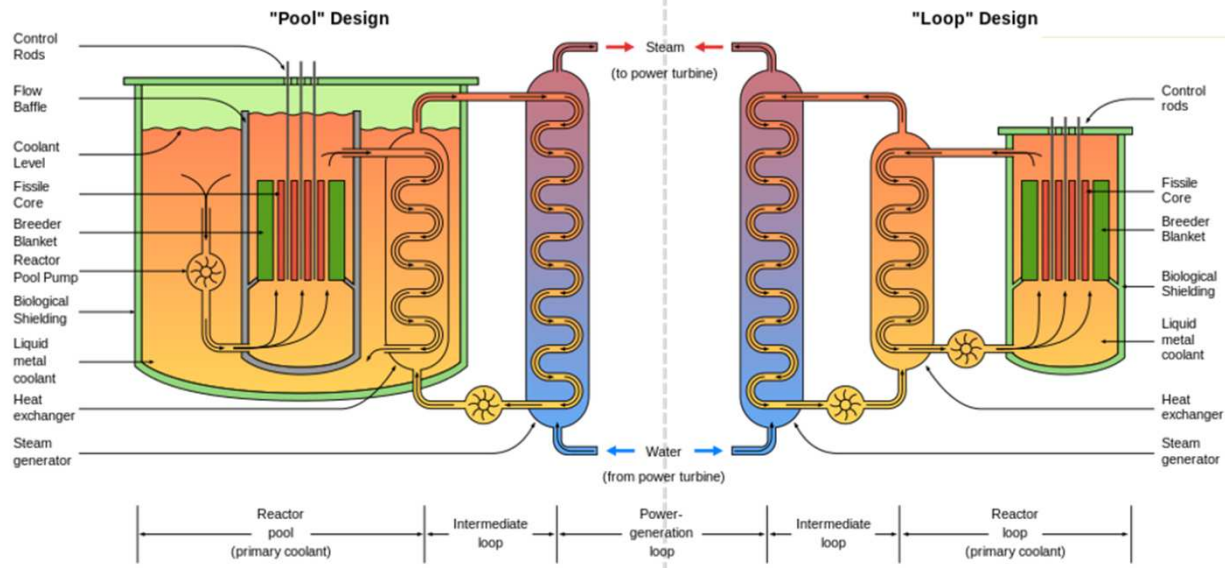


Τύποι Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

3B. Επιβραδυντή γραφίτη και ψυκτικού φυσικού ύδατος (Light Water Cooled Reactor, LWCR)



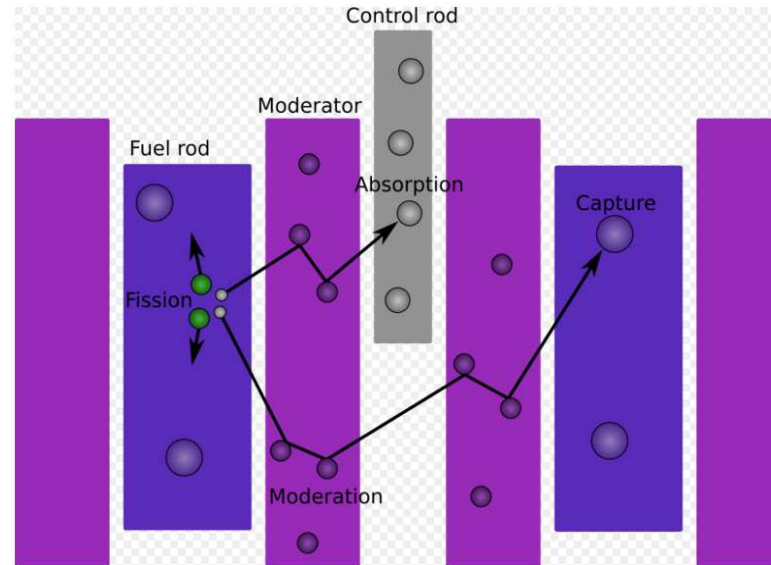
Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactors (LMFBR)



4B. Αναπαραγωγής, (Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor, LMFBR)

Σχεδιαστικές Απαιτήσεις και Τεχνικά Θέματα

Βασικός κύκλος του νετρονίου



Πιθανά καύσιμα είναι:

U-233 (ένα σχάσιμο υλικό που μπορεί να σχηματιστεί από το Th-232 με βομβαρδισμό νετρονίου) και Pu-239 (επίσης σχάσιμο και παραγόμενο από το U-238 με βομβαρδισμό νετρονίων).

Το μόνο καύσιμο που ευρίσκεται στη φύση σε σημαντικές ποσότητες είναι το U-235 και επομένως είναι αυτό που κατά κόρο χρησιμοποιούν οι πυρηνικοί αντιδραστήρες. Το φυσικό ουράνιο αποτελείται από 0.7% U-235. Το υπόλοιπο είναι U-238. Αυτό το ποσοστό είναι πολύ μικρό για να διατηρηθεί η αλυσιδωτή αντίδραση. Επομένως για να υπάρξει κρισιμότητα, είτε πρέπει να ενισχυθεί η πιθανότητα της σχάσης, είτε πρέπει να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του επιβραδυντή. Μια ομάδα αντιδραστήρων (PWR, BWR, HTGR) απαιτούν εμπλουτισμένο καύσιμο, (μια ανάγκη που είναι υψηλού κόστους) αλλά χρησιμοποιούν φθινό επιβραδυντή (γραφίτη ή ελαφρύ νερό). Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσικό ουράνιο (σχετικά φθινό) αλλά εξαιρετικός και φυσικά πανάκριβος επιβραδυντής (βαρύ νερό). Η δεύτερη λύση χρησιμοποιεί από τους αντιδραστήρες CANDU.

Σχεδιαστικές Απαιτήσεις και Τεχνικά Θέματα

Διασπαστό υλικό (fissile) είναι το υλικό που μπορεί να διατηρήσει μια αλυσιδωτή αντίδραση.

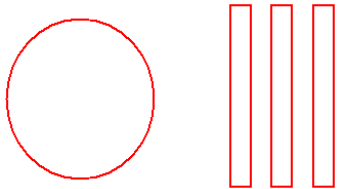
Παρότι όλα τα διασπαστά (fissile) υλικά είναι **σχάσιμα (fissionable)**, όλα τα σχάσιμα υλικά δεν είναι διασπαστά!

Παράδειγμα είναι το U-238: Η ταχεία σχάση του U-238 συνεισφέρει στην παραγωγή ισχύος σε κάποιους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Όμως το U-238 από μόνο του δεν μπορεί να επιτύχει κρισιμότητα επομένως η χρήση του εξαρτάται από την ύπαρξη αλλού υλικού για να διατηρηθεί η αντίδραση. Τα τρία πιο σημαντικά υλικά που διατηρούν την αλυσιδωτή αντίδραση είναι: U-233, U-235 και Pu-239. Όλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί από μόνα τους ως πυρηνικά καύσιμα.

Γόνιμα (fertile) δηλαδή μπορούν να μεταστοιχειωθούν σ' ένα άλλο κατάλληλο ισότοπο με ακτινοβόληση νετρονίων. Τα πιο σημαντικά γόνιμα υλικά είναι το U-238 που παράγει Pu-239 και το Th-232 που παράγει U-233.

Σχεδιαστικές Απαιτήσεις και Τεχνικά Θέματα

Θέματα μεταφοράς θερμότητας



- A. Pin type fuel (μικρή παράπλευρη επιφάνεια → μικρές απώλειες απορρόφησης, μικρός λόγος επιφάνειας/όγκο → χαμηλός ρυθμός μεταφορά θερμότητας)
- B. Plate type fuel (μεγάλη παράπλευρη επιφάνεια → μεγάλες απώλειες απορρόφησης, μεγάλος λόγος επιφάνειας/όγκο → υψηλός ρυθμός μεταφορά θερμότητας)

Ψυκτικά μέσα

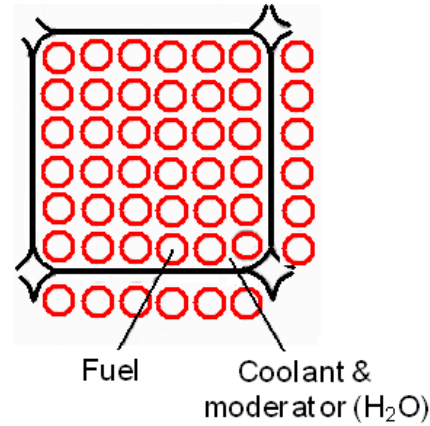
Ο σκοπός του ψυκτικού νερού είναι να απάγει τη θερμότητα που παράγεται στον πυρήνα και να τη μεταφέρει έξω από αυτόν για περαιτέρω χρήση. Τα ψυκτικά μέσα μπορεί να είναι υγρά, διφασικό μίγμα ή αέριο. Τα διάφορα ψυκτικά μέσα είναι: CO₂, ήλιο, ελαφρύ (κοινό) νερό, βαρύ νερό, οργανικό ρευστό ή υγρό μέταλλο.

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ψυκτικού μέσου είναι:

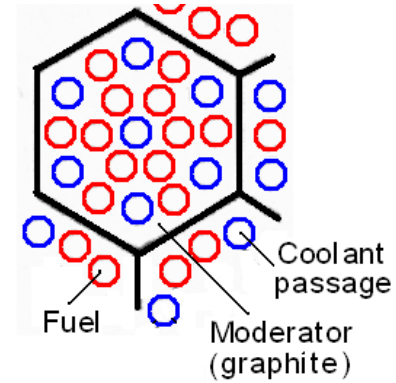
- Υψηλή θερμοχωρητικότητα.
- Καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας.
- Χαμηλή απορρόφηση νετρονίων.
- Χαμηλή ενεργοποίηση νετρονίων.
- Χαμηλή πίεση λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Μη διαθρωτικό σε σχέση με τη επικάλυψη και τα υλικά κατασκευής το ψυκτικού κυκλώματος.
- Χαμηλό κόστος.

Σχεδιαστικές Απαιτήσεις και Τεχνικά Θέματα

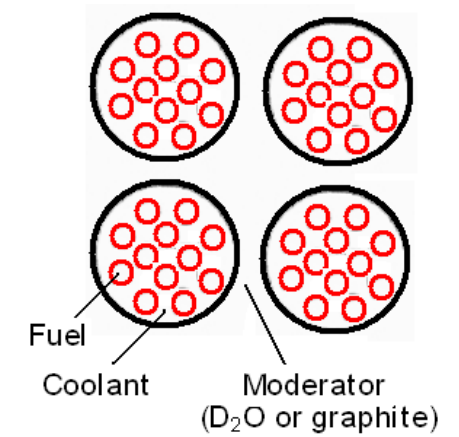
Επιβραδυντές νετρονίων



Integral with coolant



Integral with fuel



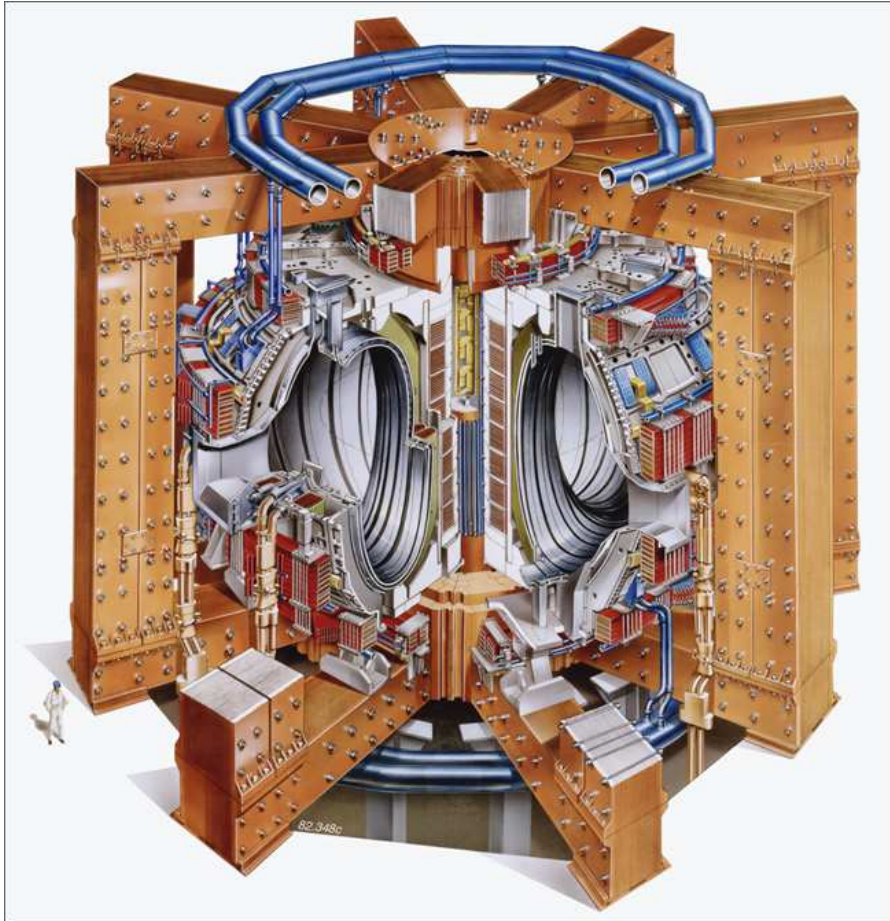
Seperate

Διατάξεις επιβραδυντή:

Ρύθμιση Λειτουργίας Πυρηνικών Αντιδραστήρων Σχάσης

- Εκκίνηση αντιδραστήρα. Αντιδραστήρας εκτός λειτουργίας, σημαίνει ότι ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε κατάσταση υποκρισιμότητας και χωρίς να υπάρχουν σ' αυτόν νετρόνια. Για να τεθεί σε λειτουργία, θα πρέπει ο αντιδραστήρας να καταστεί υπερκρισιμος με απόσυρση των ράβδων του και να τροφοδοτηθεί παροδικά με νετρόνια, ώστε να αρχίσει η αλυσωτή αντίδραση σχάσεων με αύξοντα ρυθμό. Η παροδική τροφοδοσία του αντιδραστήρα με νετρόνια επιτυγχάνεται με χρήση εξωτερικής πηγής νετρονίων, η οποία στη συνέχεια, αφού δηλαδή τεθεί σε λειτουργία ο αντιδραστήρας, αποσύρεται.
- Κράτηση αντιδραστήρα σε σταθερή τιμή ισχύος. Κατά την εκκίνηση του αντιδραστήρα, η θερμική του ισχύς θα αυξάνει από την τιμή μηδέν, με την πάροδο του χρόνου και όταν φθάσει στα επιθυμητά επίπεδα, με ορισμένου μεγέθους εισαγωγή των ράβδων ελέγχου και ρύθμισης, αποκαθίσταται ισοζύγιο παραγωγής-απωλειών, δηλαδή κατάσταση κρισιμότητας στο σύστημα.
- Αυξομείωση της ισχύος. Η πραγματοποίηση αύξηση ή μείωσης της ισχύος του αντιδραστήρα, από την προηγούμενη κατάσταση της σταθερής ισχύος, σ' ένα άλλο επίπεδο ισχύος, επιτυγχάνεται με ελαφρά απόσυρση (αύξηση της ισχύος) ή ελαφρά βύθιση (μείωση της ισχύος) των ράβδων ελέγχου και ρύθμισης. Πράγματι, αν αποσύρει κανείς κατά τι, ράβδο ή ράβδους ελέγχου και ρύθμισης από την καρδιά του αντιδραστήρα, ο ρυθμός σχάσεων αυξάνει και όταν η αντίστοιχη ισχύς φθάσει το νέο επιθυμούμενο επίπεδο, εισάγονται οι ράβδοι μέχρι εκείνου του βάθους, που αποκαθίσταται εκ νέου κατάσταση κρισιμότητας στο σύστημα. Ανάλογοι χειρισμοί πραγματοποιούνται και στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μείωση της ισχύος του αντιδραστήρα.
- Για να διακοπεί η λειτουργία του αντιδραστήρα που βρίσκεται σε σταθερό επίπεδο ισχύος, αρκεί να βυθιστούν πλήρως σ' αυτόν οι ράβδοι ελέγχου και ρύθμισης. Για μια ταχύτερη διακοπή της λειτουργίας του, όπως π.χ. σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, χρησιμοποιούνται οι ράβδοι διακοπής της λειτουργίας του. Οι ράβδοι αυτοί διατηρούνται κατά την ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα έξω από την καρδιά του.

Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Σύντηξης



Τρισδιάστατη παράσταση του αντιδραστήρα Tokamak.
Το μαγνητικό πεδίο περιορίζει το πλάσμα μέσα σε ντόνατ
(torus)

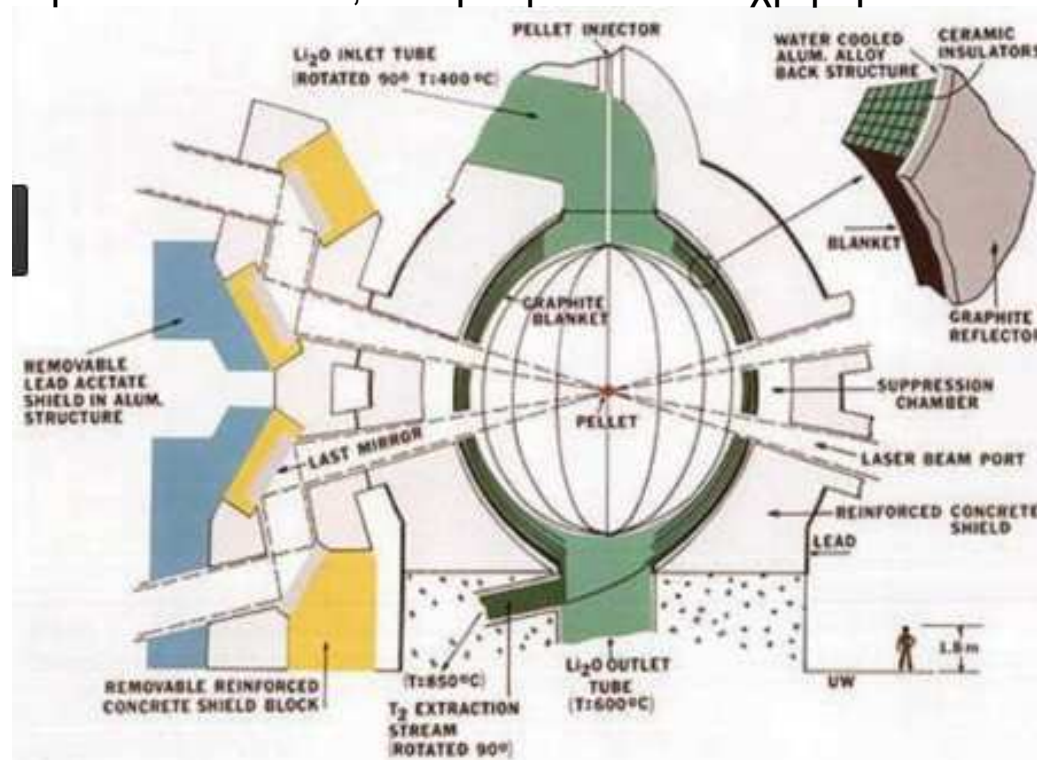
Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Σύντηξης

Τομή του προταθέντος αντιδραστήρα με ακτίνες laser. Μια μικροσκοπική πελέτα δευτερίου-τριτίου εισάγεται στον αντιδραστήρα πολλές φορές ανά δευτερόλεπτο.

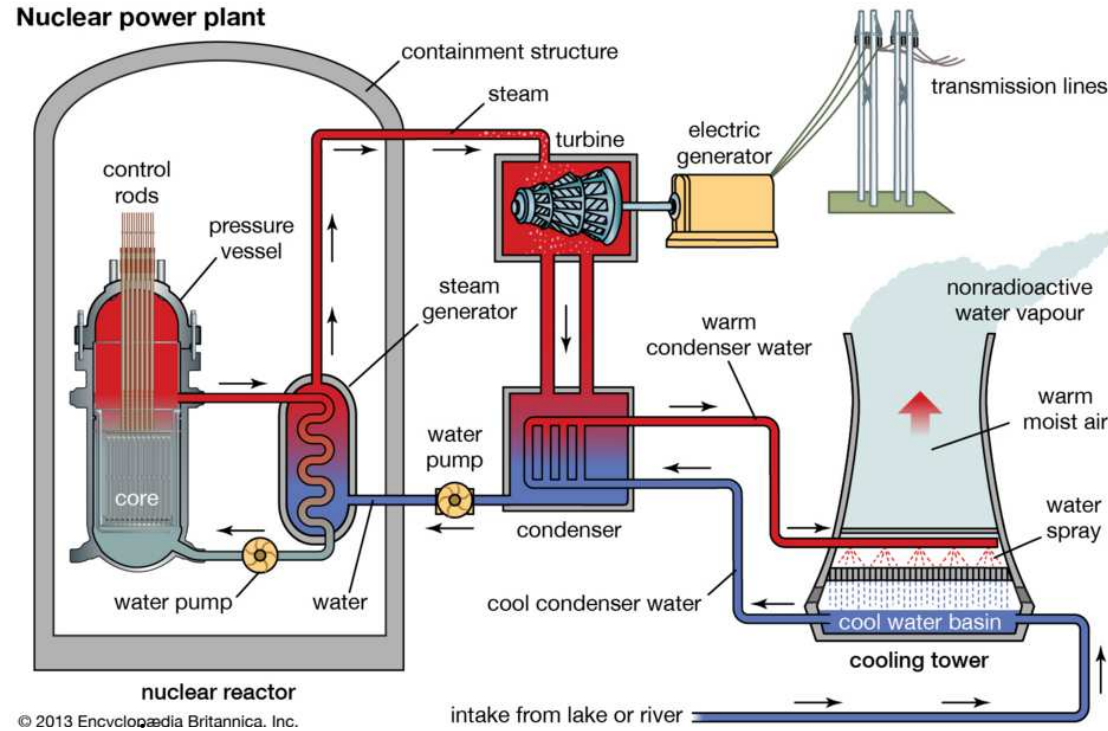
Συγχρονισμένες χρονικά και εξαιρετικά εστιασμένες ακτίνες laser υψηλής έντασης συγκλίνουν στον αντιδραστήρα δημιουργώντας τις απαραίτητες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης για να αρχίσει η σύντηξη.

Όπως και στα σχήματα μαγνητικής συνένωσης, 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.



Συγκρότηση Πυρηνικών Σταθμών Ισχύος



Ολική απόδοση του ΠΣΗΙ: $\eta_{NU} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{W}_t}$

Αν θεωρήσουμε π.χ., δύο σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την ίδια ισχύ, έναν με συμβατικό καύσιμο, απόδοσης η_{ST} , και έναν με πυρηνικό καύσιμο, απόδοσης η_{NU} , αποδεικνύεται ότι ο λόγος των ρυθμών αποβολής θερμικής ενέργειας: $\dot{W}_{C,ST} / \dot{W}_{C,NU} = 1.35$

Επιλογή Θέσης Εγκατάστασης

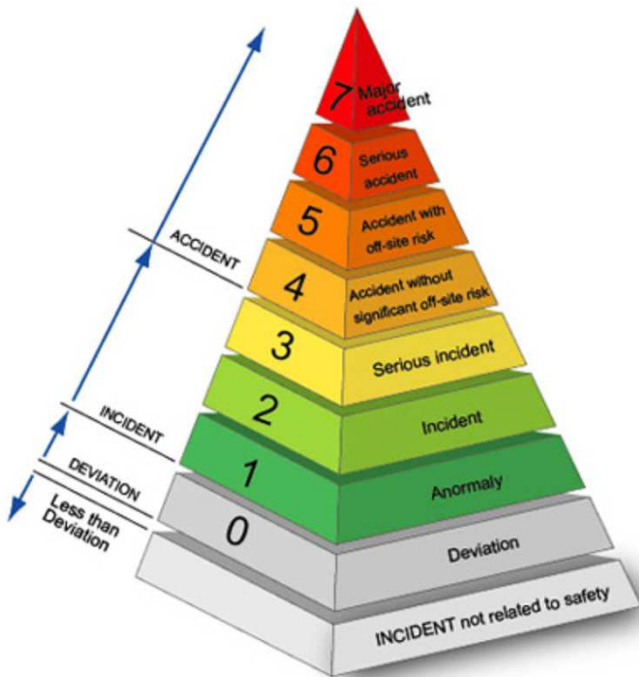
Η επιλογή της θέσεως ενός ΠΣΗΙ εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες:

1. Όρια κατοικημένων περιοχών.
2. Φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Γεωλογία, σεισμολογία, μετεωρολογία, υδρολογία.

Πυρηνικά Ατυχήματα

Κύριες αιτίες των ατυχημάτων είναι:

- Ανθρώπινο λάθος (σχεδιαστικό-μελετητικό, κατασκευαστικό, συντήρησης, δημιουργία τεχνικού υποτίθεται ελεγχόμενου προβλήματος για άσκηση ασφαλείας).
 - Φυσικές καταστροφές (σεισμοί, τσουνάμι, κ.λπ.).
 - Δυσλειτουργία των συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου.
- ενώ αιτίες που προκαλούν την συνέχιση και την διόγκωση του προβλήματος:
- Ελλιπής εκπαίδευση του προσωπικού ελέγχου του σταθμού, που οδηγεί σε λάθος εκτίμηση των ενδείξεων σφάλματος και λάθος χειρισμούς αποτροπής.
 - Ελλιπής παιδεία ασφάλειας, με αποτέλεσμα να μην ακολουθηθούν οι προδιαγεγραμμένες διαδικασίες ασφάλειας.
 - Αδυναμία περιορισμού του προβλήματος από τα συστήματα ασφαλείας.



Πυρηνικά Ατυχήματα

Αντιδραστήρας	Έτος ατυχ.	Αριθ. άμεσων θανάτων	Επίπτωση στο περιβάλλον	Ακόλουθες ενέργειες
NRX, Καναδάς (πειραματικός) 40MW _{th}	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 χ 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)
Chemobyl-4, Ουκρανία (εμπορικός, 950MWe)	1986	31	μείζων εκροή ($11 \cdot 10^{18}$ Bq)	εγκλωβίστηκε (σαρκοφάγος)
Vandelos-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.