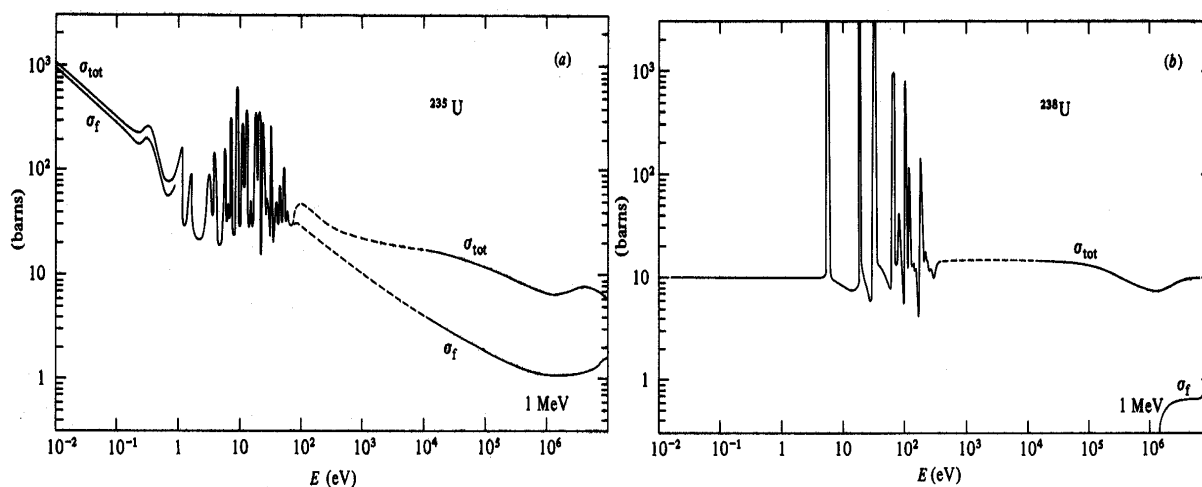


Διάλεξη 8: Πυρηνική ενέργεια από αντιδράσεις σχάσης. Πυρηνική σύντηξη

Πυρηνική ενέργεια

Ο άνθρωπος εδώ και δεκαετίες θέλησε να εκμεταλλευτεί το τεράστιο ποσό ενέργειας που εκλύεται από τις αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης. Προς αυτή την κατεύθυνση έγιναν εκτενείς θεωρητικές αλλά και πειραματικές μελέτες σε δύο από τα βαρύτερα ισότοπα της φύσης. Το ^{235}U και το ^{238}U . Αυτά είναι και τα μόνα ισότοπα ουρανίου στο φυσικό ουράνιο. Το ελαφρύτερο μάλιστα, περιέχεται σε ποσοστό μόλις 0.7 %.



Σχήμα 1: Ολική ενεργός διατομή και ενεργός διατομή σχάσης για τα δύο ισότοπα του ουρανίου (αριστερά ^{235}U και δεξιά ^{238}U)

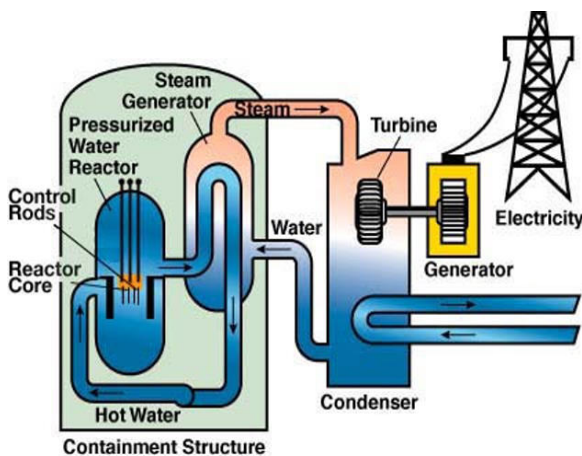
Από τις μετρήσεις που έγιναν ως προς τις ενεργές διατομές διαφόρων αντιδράσεων αλλά ειδικότερα ως προς τις ενεργές διατομές των αντιδράσεων σχάσης παρατηρήθηκε το εξής: Για το ^{235}U η ενεργός διατομή σχάσης αυξάνει όσο μικρότερη γίνεται η ενέργεια του προσπίπτοντος νετρονίου. Μάλιστα, από τις διάφορες πιθανές αντιδράσεις η αντίδραση σχάσης επαγόμενη από νετρόνιο γίνεται ο κυρίαρχος μηχανισμός αλληλεπίδρασης όσο πιο μικρή είναι η ενέργεια του νετρονίου.

Για το ^{238}U η κατάσταση δεν είναι καθόλου η ίδια μια και η ενεργός διατομή σχάσης μειώνεται πολύ γρήγορα όσο μειώνεται η ενέργεια ενώ σχεδόν μηδενίζεται για ενέργειες μικρότερες από 1 MeV. Αυτό σημαίνει ότι το ^{235}U σαφώς προκρίνεται ως ισότοπο προς εκμετάλλευση της πυρηνικής του ενέργειας λόγω της τεράστιας διαφοράς στην πιθανότητα να γίνει μια τέτοια αντίδραση από ένα νετρόνιο. Αυτός λοιπόν είναι και ο κυριότερος λόγος που τα πυρηνικά καύσιμα έχουν υποστεί μια ιδιαίτερη δύσκολη διαδικασία ώστε να εμπλουτιστούν σε ^{235}U . Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι όσο περισσότερο ^{238}U περιέχεται τόσο περισσότερα νετρόνια απορροφώνται τα οποία δεν αποδίδουν ούτε ενέργεια, ούτε επιπλέον νετρόνια που θα δημιουργήσουν νέες αντιδράσεις αλλά ακόμα χειρότερα σχηματίζονται υπερουράνια στοιχεία τα οποία εμφανίζουν υψηλή ραδιοτοξικότητα.

Πέραν της ενεργού διατομής σχάσης επαγόμενης από νετρόνιο μία ακόμη σημαντική

παράμετρος για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση αυτοσυντηρούμενων αλυσίδων αντιδράσεων σύντηξης είναι η σταθερά αναπαραγωγής νετρονίων. Αυτή η σταθερά δεν είναι τίποτα άλλο από τον αριθμό των νετρονίων που παράγονται από κάθε γεγονός σχάσης τα οποία προκαλούν μια επόμενη αντίδραση σχάσης. Σε **αυτοσυντηρούμενες αλυσίδες αντιδράσεων** αυτός ο αριθμός θα πρέπει να είναι **ίσος με την μονάδα**. Τότε λέμε ότι ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε **κρίσιμη κατάσταση**. Αν είναι **μικρότερος της μονάδας** τότε λέμε ότι ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε **υποκρίσιμη κατάσταση** και προφανώς η παραγόμενη ισχύς θα μειώνεται. Σε αντίθετη περίπτωση δηλαδή **για $k > 1$** ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε **υπερκρίσιμη κατάσταση**. Προφανώς προκειμένου να κρατήσουμε μια ελεγχόμενη αλλά και αυτοσυντηρούμενη αλυσίδα αντιδράσεων σύντηξης θα πρέπει ο παράγοντας αναπαραγωγής νετρονίων να είναι ίσος με την μονάδα ή έστω πολύ κοντά στην μονάδα.

Όπως είδαμε προηγουμένως **για το ^{235}U σε κάθε αντίδραση πυρηνικής σχάσης παράγονται περίπου 2.5 νετρόνια**. Από αυτά τα νετρόνια ένα ποσοστό μόνο θα δημιουργήσει μια άλλη αντίδραση σχάσης διότι κάποια από τα παραγόμενα νετρόνια θα απορροφηθούν από τα ίδια τα συστατικά του πυρηνικού καυσίμου ή δομικά στοιχεία του καυσίμου, χωρίς να προκαλέσουν την επόμενη αντίδραση σχάσης, ενώ κάποια άλλα απλώς θα διαφύγουν από την καρδιά του αντιδραστήρα. Για τον λόγο αυτό μεγάλο ρόλο στον σχεδιασμό των αντιδραστήρων παίζουν οι διαστάσεις της καρδιάς του αντιδραστήρα, διότι ούτε πολύ μεγάλη μπορεί να είναι δεδομένου ότι ο έλεγχος γίνεται δυσκολότερος, αλλά ούτε και πολύ μικρή διότι τα νετρόνια που διαφεύγουν θα είναι περισσότερα.

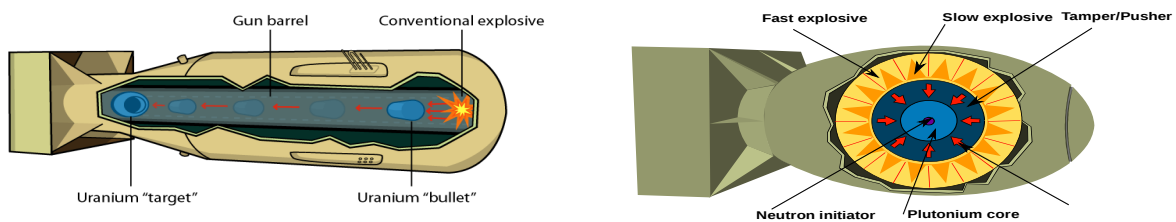


Σχήμα 2: Απλοποιημένο διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικό αντιδραστήρα τύπου BWR.

Σήμερα η χρήση της πυρηνικής ενέργειας είναι ευρέως διαδεδομένη και μια πληθώρα τύπων αντιδραστήρων είναι σε λειτουργία. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένας αντιδραστήρας τύπου BWR. Πέραν του πυρηνικού καυσίμου, ο κάθε αντιδραστήρας περιέχει το κατάλληλο επιβραδυντικό μέσο προκειμένου τα νετρόνια να θερμοποιηθούν ώστε αντίστοιχα να αυξηθεί η πιθανότητα αντίδρασης πυρηνικής σχάσης. Φυσικά καθώς το καύσιμο καταναλώνεται και η δομή του αλλάζει με την χρήση, ο χειριστής του αντιδραστήρα θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να παρέμβει προκειμένου να κρατήσει την αυτοσυντηρούμενη αλυσίδα αντιδράσεων σχάσης σε κρίσιμο επίπεδο λειτουργίας.

Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση κατάλληλων **ράβδων ελέγχου**. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να ξεκαθαριστεί το εξής. **Ένας αντιδραστήρας δεν έχει διακοπή**. Η πυρηνική σχάση είναι φυσικό φαινόμενο και δεν μπορούμε εμείς να το σταματήσουμε. Εμείς απλώς μπορούμε αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα και τις συνθήκες απορρόφησης να ελαττώσουμε τον ρυθμό και την ισχύ. Επιπλέον οι συνεχείς αποδιεγέρσεις των παραγόμενων ασταθών πυρήνων συνεχίζουν να αποδίδουν θερμότητα ακόμη και αν ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε υποκρίσιμη κατάσταση. **Η ψύξη λοιπόν είναι απαραίτητη ακόμη και μετά την “παύση” λειτουργίας του αντιδραστήρα**. Αυτό ίσως είναι και το κυριότερο πρόβλημα και ο μεγάλος κίνδυνος στην μέχρι σήμερα χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Όλα αυτά μαζί (το καύσιμο, οι ράβδοι ελέγχου και το μέσο επιβράδυνσης των νετρονίων) βρίσκονται στην καρδιά του αντιδραστήρα. Επιπλέον της κατάλληλης γεωμετρίας, κάθε καρδιά ενός αντιδραστήρα περιβάλλεται από κατάλληλο υλικό όπου η πιθανότητα ανάκλασης των νετρονίων είναι πολύ μεγαλύτερη από την πιθανότητα απορρόφησης και έτσι ελαχιστοποιείται ο αριθμός των νετρονίων τα οποία χάνονται. Μετά την καρδιά ενός αντιδραστήρα το αμέσως σημαντικότερο στοιχείο είναι τα συστήματα ψύξης τα οποία εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του κάτω από απολύτως ελεγχόμενες συνθήκες αλλά και την παραγωγή ενέργειας. Μη ξεχνάμε ότι στην πραγματικότητα εκμεταλλευόμαστε την θερμική ενέργεια η οποία παράγεται από τις αντιδράσεις πυρηνικής σχάσης. Στον συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρα της πιο πάνω εικόνας υπάρχει ένα κλειστό κύκλωμα ψύξης το οποίο αποδίδει την παραγόμενη θερμότητα σε εξωτερικό κύκλωμα μέσω του οποίου γίνεται τελικά και η εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας. Είναι σημαντικό να μην υπάρχουν διαρροές στο κλειστό κύκλωμα διότι έρχεται σε άμεση επαφή με το πυρηνικό καύσιμο και ως εκ τούτου είναι προφανές ότι θα περιέχει ραδιενεργά στοιχεία. Άλλο ένα βασικό στοιχείο ενός πυρηνικού αντιδραστήρα είναι το εξωτερικό περίβλημα το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να αντέχει αρκετά μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες (με κάποια όρια βέβαια -βλ. Fukushima). Φυσικά υπάρχουν πολλά ακόμη στοιχεία τα οποία είναι σημαντικά όπως τα συστήματα ασφαλείας η θωράκιση του αντιδραστήρα και άλλα τα οποία θα πρέπει να έχουμε υπόψιν ότι αποτελούν πλέον μια ξεχωριστή και επιστήμη την **επιστήμη της πυρηνικής τεχνολογίας**.



Σχήμα 3: Δύο διαφορετικοί τύποι πυρηνικών όπλων. Αριστερά τύπος Α και δεξιά τύπος Β.

Δεδομένου ότι γίνεται αναφορά στην εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας δυστυχώς θα πρέπει να αναφερθούμε και στην χρήση της ως προς την κατασκευή όπλων. Στον σχεδιασμό των όπλων αυτών το βασικό ζήτημα για τους ειδικούς ήταν το πως θα μπορούσαν να συγκεντρώσουν μικρές υποκρίσιμες ποσότητες πυρηνικού καυσίμου την κατάλληλη χρονική στιγμή σε μία μεγάλη υπερκρίσιμη διάταξη. Προς αυτή τη κατεύθυνση δύο τύποι όπλων μπορεί κανείς εύκολα να βρει στην βιβλιογραφία. Το πρώτο αφορά την βόμβα τύπου Α όπου δύο ποσότητες ουρανίου όπου η κάθε μια

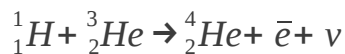
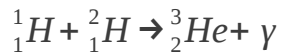
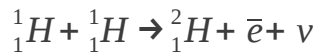
από μόνη της δεν αποτελεί κρίσιμη μάζα μέσω μια έκρηξης έρχονται μαζί σε συνθήκες μεγάλης πίεσης με αποτέλεσμα η αρχικά υποκρίσιμη κατάσταση να μετατρέπεται σε υπερκρίσιμη. Μια τέτοιου τύπου βόμβα χρησιμοποιήθηκε στην Hiroshima. Ένας δεύτερος σχεδιασμός είναι αυτός όπου το πυρηνικό καύσιμο βρίσκεται συγκεντρωμένο στο κέντρο αλλά σε συνθήκες υποκρίσιμης κατάστασης. Με την πυροδότηση μια σειρά εκρηκτικών μηχανισμών στο περίβλημα της διάταξης αυξάνουν την πίεση του πυρηνικού καυσίμου σε τεράστιες τιμές μαζί την ταυτόχρονη εκπομπή νετρονίων από μια κατάλληλη πηγή νετρονίων τοποθετημένη στο κέντρο της διάταξης. Φυσικά η αρχικά υποκρίσιμη κατάσταση λόγω της αυξημένης πίεσης και τον ταυτόχρονο εμπλουτισμό σε νετρόνια με τρέπεται σε υπερκρίσιμη

Πυρηνική σύντηξη

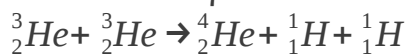
Η ακριβώς αντίθετη διαδικασία από αυτή της πυρηνικής σχάσης είναι αυτή της πυρηνικής σύντηξης. Στην πυρηνική σύντηξη δύο πυρήνες που με κάποιο τρόπο βρεθούν ο ένας πολύ κοντά στον άλλο είναι δυνατόν να σχηματίσουν ένα σύνθετο πυρήνα που αποτελείται από το άθροισμα των νουκλεονίων των δύο αρχικών πυρήνων. Αν επιπλέον έχουμε δύο ελαφρείς πυρήνες στην περιοχή $A < 20$ είναι δυνατόν να έχουμε με την αντίδραση σύντηξης παραγωγή ενέργειας. Η διαδικασία σύντηξης αν και πιο απλή από αυτή της σχάσης λόγω της αλληλεπίδρασης Coulomb δεν αποτελεί μια φυσική διαδικασία στο γήινο περιβάλλον. Αντίθετα στα άστρα όπου οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι τέτοιες δύο πυρήνες μπορούν να πλησιάσουν ο ένας τον άλλο σε τόσο μικρή απόσταση όπου η αντίδραση σύντηξης να λάβει χώρα μαζί μάλιστα με την παραγωγή ενέργειας. Σήμερα γνωρίζουμε αρκετές λεπτομέρειες γύρω από το δίκτυο των αντιδράσεων που παράγουν την ενέργεια σε κάθε τύπο αστεριού αλλά και σε κάθε στάδιο της ζωής του.

Παράδειγμα

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αντιδράσεων σύντηξης είναι η διαδικασία p-p που αποτελεί τον βασικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας στον ήλιο αλλά και σε κάθε άστρο με παρόμοια μάζα και ηλικία. Η αλληλουχία των αντιδράσεων αυτών είναι:



ή



Η πρώτη αντίδραση έχει πολύ μικρή ενεργό διατομή και συμβαίνει μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Να υπολογιστεί ανεξάρτητα από τους πιθανούς δρόμους που μπορεί να ακολουθηθούν η παραγωγή ενέργειας από τις δύο πιθανές αλληλουχίες αντιδράσεων σύντηξης.

Δεδομένα:

Ατομικές μάζες:

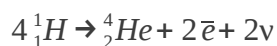
$$M(4\text{He}) = 4.00260325415 \text{ u}$$

$$M(\text{H}) = 1.00782503207 \text{ u}$$

$$m_e = 5.49 \times 10^{-4} \text{ u}$$

Λύση:

Το τελικό αποτέλεσμα και από τους δύο πιθανούς "δρόμους" είναι 4 πρωτόνια αντιδρούν και παράγουν έναν πυρήνα ${}^4_2\text{He}$, δύο ποζιτρόνια και δύο νετρίνα.



$$Q = (4 \times 1.007825 - 4.002603 - 4 \times 5.49 \times 10^{-4}) \times \text{u} = 24.7 \text{ MeV}$$

ΠΡΟΣΟΧΗ:

$$m(p) = M(1\text{H}) - m_e$$

$$m(a) = M(4\text{He}) - 2 m_e$$

$$Q = 4m(p) - m(a) - 2m_e = 4M(1\text{H}) - 4m_e - M(4\text{He}) + 2m_e - 2m_e$$

Στην πραγματικότητα όμως τα 2 ποζιτρόνια μαζί με άλλα δύο ηλεκτρόνια εξαϋλώνονται με αποτέλεσμα την μετατροπή της μάζας τους σε ενέργεια. Οπότε ουσιαστικά η ενέργεια που παράγεται είναι $(24.7 + 2)\text{MeV} = 26.7 \text{ MeV}$