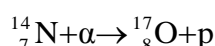


5. ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ, ΤΕΧΝΗΤΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ

Η παρατήρηση και μελέτη των πυρηνικών διασπάσεων οδήγησε στην ιδέα ότι και οι σταθεροί πυρήνες θα μπορούσαν να διασπασθούν αν βομβαρδιστούν με σωματίδια. Τα σωματίδια θα μπορούσαν να εισέλθουν στον πυρήνα και να προκαλέσουν τη διάσπασή του. Ως πηγές σωματιδίων θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ακόμα και φυσικά ραδιονουκλίδια.

Έτσι η πρώτη πυρηνική αντίδραση στο εργαστήριο παρατηρήθηκε το 1919 από τον E. Rutherford. Ο Rutherford διαπίστωσε ότι κατά το βομβαρδισμό του αζώτου με σωματίδια-α, που προέρχονταν από το φυσικό ραδιονουκλίδιο ^{214}Po , εκπέμπονται πρωτόνια. Τα πρωτόνια αυτά εκπέμπονται από την πυρηνική αντίδραση



Με τον όρο **πυρηνική αντίδραση** χαρακτηρίζεται η μετατροπή ενός πυρήνα σ' έναν άλλο μετά από την επίδραση σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι πυρηνικές αντιδράσεις, που σύντομα απέκτησαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη μελέτη της πυρηνικής δομής, την παραγωγή ραδιονουκλιδίων και την πυρηνική μικροανάλυση, αποτελούν ένα από τα σπουδαιότερα κεφάλαια της πυρηνικής φυσικής και χημείας.

Η γενική μορφή μίας πυρηνικής αντίδρασης είναι



Έξω από την παρένθεση αριστερά αναγράφεται ο **στόχος πυρήνας** και δεξιά το **προϊόν της πυρηνικής αντίδρασης**. Μέσα στην παρένθεση αναγράφονται χωριζόμενα από ένα κόμμα το βλήμα, δηλαδή το σωματίδιο που προκαλεί την πυρηνική αντίδραση, και το ελαφρύ σωματίδια ή ελαφρά σωματίδια που εκπέμπονται συγχρόνως με την παραγωγή του προϊόντος της αντίδρασης.

Συγκρίνοντας τις πυρηνικές αντιδράσεις με τις χημικές μπορεί κανείς να διακρίνει τόσον ομοιότητες όσο και διαφορές. Οι σπουδαιότερες από τις διαφορές είναι οι παρακάτω:

1. Στις χημικές αντιδράσεις διατηρείται το είδος των ατόμων που λαμβάνουν μέρος σ' αυτές. Στις πυρηνικές αντιδράσεις προκύπτουν διαφορετικά νουκλίδια, που δεν ανήκουν υποχρεωτικά στο ίδιο στοιχείο.
2. Οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι αντιδράσεις μεταξύ πυρήνων. Το χημικό περιβάλλον και η μορφή του στόχου δεν επηρεάζουν την αντίδραση.
3. Στις πυρηνικές αντιδράσεις συμβαίνουν, τις περισσότερες φορές, μετατροπές μεμονωμένων ατόμων και, σπανιότερα, μεταξύ ποσοτήτων, που μπορούν να ζυγιστούν.
4. Οι ενέργειες που απελευθερώνονται στις πυρηνικές αντιδράσεις είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές των χημικών αντιδράσεων, δηλαδή υπάρχει μετατροπή μάζας σε ενέργεια. Έτσι κατά την καύση ενός γραμμαρίου άνθρακα απελευθερώνονται 33.9 kJ ενέργειας, ενώ κατά τη σχάση ενός γραμμαρίου ^{235}U με θερμικά νετρόνια 8.4×10^7 kJ.

5.1 Η ενέργεια των πυρηνικών αντιδράσεων

Οι περισσότερες πυρηνικές αντιδράσεις προϋποθέτουν το σχηματισμό ενός ενδιάμεσου πυρήνα, που ονομάζεται **σύνθετος πυρήνας**. Η μεταβατική αυτή κατάσταση έχει διάρκεια ζωής περίπου 10^{-13} s και διασπάται με σχηματισμό των προϊόντων της αντίδρασης. Έτσι η πιθανότητα πραγματοποίησης μίας συγκεκριμένης πυρηνικής αντίδρασης αποτελείται από δύο ανεξάρτητους μεταξύ τους όρους, που δίνουν την πιθανότητα σχηματισμού του σύνθετου πυρήνα και την πιθανότητα διασπασεώς του κατά τρόπο ώστε να σχηματισθούν συγκεκριμένα προϊόντα αντίδρασης. Ο ίδιος σύνθετος πυρήνας μπορεί

να σχηματισθεί με διαφόρους συνδυασμούς στόχου πυρήνα και βλήματος και να διασπασθεί δίνοντας διαφορετικά προϊόντα αντίδρασης. Για παράδειγμα, ο σύνθετος πυρήνας [^{51}Cr] μπορεί να σχηματισθεί από πυρηνικές αντιδράσεις όπως [$^{50}\text{Cr} + n$], [$^{50}\text{V} + p$], [$^{49}\text{V} + d$] και [$^{49}\text{Ti} + \alpha$] και να διασπασθεί παράγοντας, ανάλογα με τις παραμέτρους της πυρηνικής αντίδρασης ^{49}Ti , ^{49}V , ^{49}Cr , ^{50}V , ^{50}Cr , ^{51}Cr κλπ.

Κατά τη διάρκεια των πυρηνικών αντιδράσεων υπάρχει, μεταξύ άλλων, διατήρηση της ενέργειας, του αριθμού των νουκλεονίων, της ορμής, της στροφορμής, του ηλεκτρικού φορτίου.

Ως προς την ενέργεια, οι πυρηνικές αντιδράσεις μπορούν να αντιμετωπισθούν με τον ίδιο τρόπο όπως και οι χημικές αντιδράσεις. Η ενθαλπία (ΔH) των χημικών αντιδράσεων αντιστοιχεί στην ενέργεια ΔE , που απελευθερώνεται στις πυρηνικές αντιδράσεις (τιμή-Q). Όπως η ενθαλπία μίας χημικής αντίδρασης προκύπτει από τη διαφορά της ενθαλπίας σχηματισμού των μελών της, έτσι και στην περίπτωση των πυρηνικών αντιδράσεων η ενέργεια ΔE μπορεί να υπολογισθεί από τη διαφορά της μάζας του στόχου πυρήνα και του βλήματος από τη μία πλευρά και των προϊόντων της αντίδρασης από την άλλη

$$\Delta E = (m_A + m_x - m_B - m_y) c^2$$

ή χρησιμοποιώντας ατομικές μονάδες μάζας

$$\Delta E = (m_A + m_x - m_B - m_y) \times 931.5 \text{ MeV}$$

Όταν η διαφορά ενέργειας ΔE μίας πυρηνικής αντίδρασης είναι θετική τότε πρόκειται για μία εξωενεργειακή αντίδραση ενώ στην αντίθετη περίπτωση για μία ενδοενεργειακή. Στη δεύτερη περίπτωση η διαφορά ενέργειας, που λείπει, πρέπει να προσφερθεί στο σύστημα με τη μορφή κινητικής ενέργειας των σωματιδίων, που προκαλούν την αντίδραση.

Στην περίπτωση των αντιδράσεων που προϋποθέτουν το σχηματισμό ενός σύνθετου πυρήνα μόνο ένα τμήμα της κινητικής ενέργειας του βλήματος μεταφέρεται σ' αυτόν ως ενέργεια διεγέρσεως E^*

$$E^* = E_x \frac{m_A}{m_A + m_x}$$

Η ενέργεια αυτή μεταδίδεται περαιτέρω, με τη μορφή ορμής, στα προϊόντα της αντίδρασης με αναλογία αντιστρόφως ανάλογη της μάζας τους. Η συνολική ενέργεια διεγέρσεως του σύνθετου πυρήνα ισούται με το άθροισμα της ενέργειας διεγέρσεως E^* και της ενέργειας συνδέσεως E_B του σωματιδίου x στον πυρήνα. Έτσι για να πραγματοποιηθεί μία πυρηνική αντίδραση πρέπει η ενέργεια διεγέρσεως του σύνθετου πυρήνα να είναι τουλάχιστον ίση με την ενέργεια, $-\Delta E$, που απαιτείται για την πραγματοποίηση της πυρηνικής αντίδρασης (το αρνητικό σύμβολο δηλώνει ότι στις ενδοενεργειακές αντιδράσεις υπάρχει έλλειμμα ενέργειας)

$$E^* \geq -\Delta E$$

Το βλήμα, σ' αυτή την περίπτωση πρέπει να έχει ενέργεια τουλάχιστον

$$E_{x(k)} = -\Delta E \left(1 + \frac{m_x}{m_A}\right)$$

Η ενέργεια $E_{x(k)}$ ονομάζεται **ενέργεια κατωφλίου** της πυρηνικής αντίδρασης. Μόνο σωματίδια με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη της ενέργειας κατωφλίου μπορούν να προκαλέσουν τη συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση.

5.2 Η ενεργός διατομή

Η ενεργός διατομή μίας πυρηνικής αντιδράσεως μπορεί να συγκριθεί με τη σταθερά ισορροπίας μίας χημικής του τύπου $A + B \rightarrow C$. Στην περίπτωση της χημικής αντιδράσεως ισχύει η σχέση

$$\frac{dC_C}{dt} = k C_A C_B$$

όπου C_A , C_B , C_C οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις των A, B και C και k η σταθερά ισορροπίας. Μία παρόμοια σχέση ισχύει και για την περίπτωση των πυρηνικών αντιδράσεων του τύπου $A(x,\gamma)B$

$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma \Phi N_A$$

όπου N_A και N_B οι αριθμοί των πυρήνων των νουκλιδίων A και B στη μονάδα του όγκου (cm^3), Φ η πυκνότητα ροής των βλημάτων ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) και σ η ενεργός διατομή της πυρηνικής αντίδρασης σε μονάδες επιφάνειας (cm^2).

Η ενεργός διατομή είναι ένα μέτρο της πιθανότητας πραγματοποίησης μίας συγκεκριμένης πυρηνικής αντιδράσεως. Στην πράξη κατά τον βομβαρδισμό πυρήνων του τύπου A με σωματίδια x μπορούν να λάβουν χώρα συγχρόνως περισσότερες από μία αντιδράσεις, που οδηγούν σε διαφορετικά προϊόντα. Η ολική ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων x με τους πυρήνες του τύπου A ισούται με το άθροισμα όλων των ενεργών διατομών των επιμέρους αντιδράσεων

$$\sigma_{ol} = \sum_{j=1}^{j=n} \sigma_j$$

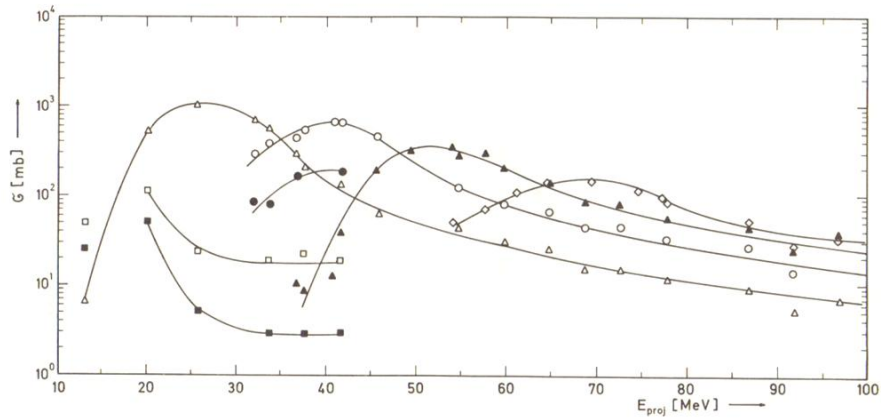
Έτσι, σε απλουστευμένη μορφή, μπορεί να θεωρήσει κανείς τον πυρήνα A σαν ένα στόχο σκοποβολής και τις ενεργές διατομές των επιμέρους αντιδράσεων να δίνουν το τμήμα της επιφάνειάς του, που είναι διαθέσιμο για κάθε μία από αυτές.

Οι μονάδες της ενεργού διατομής είναι μονάδες επιφάνειας. Έτσι για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται το cm^2 . Στην πράξη, για λόγους σύγκρισης αλλά όχι για υπολογισμούς, χρησιμοποιείται μία άλλη παραδοσιακή μονάδα το **barn (b)**, που ισούται με 10^{-24}cm^2 .

Η ενεργός διατομή των πυρηνικών αντιδράσεων δείχνει ισχυρή εξάρτηση από την κινητική ενέργεια των σωματιδίων, που τις προκαλούν. Η εξάρτηση αυτή χαρακτηρίζεται με τον όρο **συνάρτηση διεγέρσεως** της πυρηνικής αντίδρασης. Στο *Σχήμα 5-1* δίνονται οι συναρτήσεις διεγέρσεως μίας σειράς πυρηνικών αντιδράσεων του ^{107}Ag με σωματίδια-α.

Οι τιμές της ενεργού διατομής μπορούν να υπολογισθούν κβαντομηχανικά ή να προσδιορισθούν πειραματικά. Για την πειραματική μέτρηση της ενεργού διατομής μίας αντίδρασης χρησιμοποιούνται λεπτοί ή παχείς στόχοι υλικών συγκεκριμένης σύστασης.

Ως λεπτοί στόχοι χαρακτηρίζονται αυτοί οι οποίοι δεν προκαλούν σημαντική μείωση του αριθμού των σωματιδίων της δέσμης, που τους διασχίζει. Στην περίπτωση αυτή γίνεται επίσης η παραδοχή ότι δε μειώνεται



Σχήμα 5-1: Πειραματικές τιμές ενεργών διατομών αντιδράσεων του ^{107}Ag με σωματίδια-α (■ $^{107}\text{Ag}(\alpha, n)^{110g}\text{In}$, □ $^{107}\text{Ag}(\alpha, n)^{110m}\text{In}$, Δ $^{107}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{109m+g}\text{In}$, ● $^{107}\text{Ag}(\alpha, 3n)^{108g}\text{In}$, ○ $^{107}\text{Ag}(\alpha, 3n)^{108m}\text{In}$, ▲ $^{107}\text{Ag}(\alpha, 4n)^{107m+g}\text{In}$, ◇ $^{107}\text{Ag}(\alpha, 5n)^{106m}\text{In}$)¹

σημαντικά ο αριθμός των ατόμων των στόχων κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσεώς τους με σωματίδια και ότι η ενεργός διατομή της αντιδράσεως παραμένει σταθερή ή η ενέργεια των σωματιδίων καθώς τους διασχίζουν δε μεταβάλλεται σημαντικά.

Ο αριθμός των πυρηνικών αντιδράσεων (R) ανά μονάδα χρόνου, που προκαλούνται από την πρόσπτωση μίας δέσμης σωματιδίων σ' ένα λεπτό στόχο δίνεται από τη σχέση

$$R = I x N \sigma$$

όπου I : η ροή των σωματιδίων που προσπίπτουν στο στόχο στη μονάδα του χρόνου (s^{-1})

x : το πάχος του στόχου (cm)

N : ο αριθμός των πυρήνων του στόχου ανά μονάδα όγκου (cm^{-3})

σ : η ενεργός διατομή της πυρηνικής αντίδρασης (cm^2)

Στην περίπτωση, που ο στόχος εμβαπτίζεται σε μία ομογενή ροή σωματιδίων, όπως π.χ. σε μία ροή νετρονίων ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, τότε η παραπάνω σχέση μπορεί να μετατραπεί σε

$$R = N \Phi \sigma$$

όπου Φ είναι η πυκνότητα ροής των σωματιδίων σε ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Άλλη μία μορφή της παραπάνω εξίσωσης είναι η

$$N_{\text{προϊόντων}} = N_{\text{στόχου}} \Phi \sigma t$$

όπου το $N_{\text{προϊόντων}}$ δίνει τον αριθμό των πυρήνων του προϊόντος της αντίδρασης, που παράγεται από την έκθεση επί χρόνο t των $N_{\text{στόχου}}$ πυρήνων του στόχου στη συγκεκριμένη ροή σωματιδίων.

Από τις σχέσεις αυτές μπορεί εύκολα να υπολογισθεί η ενεργός διατομή της πυρηνικής αντίδρασης για συγκεκριμένη ενέργεια των σωματιδίων.

Στην περίπτωση χρησιμοποίησης παχέων στόχων για τη μέτρηση της ενεργού διατομής μίας πυρηνικής αντίδρασης πρέπει να ληφθεί υπόψη η απώλεια ενέργειας των σωματιδίων κατά τη διέλευσή τους μέσα από το στόχο καθώς επίσης η μείωση της ροής τους (dI). Η μείωση αυτή της ροής

¹ P. Misaelides, Untersuchung der Anregungsfunktionen für ^3He - und α -Reaktionen mit ^{107}Ag und ^{109}Ag , Διδακτορική διατριβή, Universität Karlsruhe, 1976.

εξαρτάται από το πάχος του στόχου (x), τον αριθμό των πυρήνων του (N), την ροή των σωματιδίων στη μονάδα του χρόνου (I) και από την ενεργό διατομή (σ).

$$-dI = I N \sigma dx$$

Από την ολοκλήρωση αυτής της σχέσεως προκύπτει η

$$I_x = I_0 e^{-N\sigma x}$$

που ισχύει με την προϋπόθεση ότι η ενεργός διατομή της αντιδράσεως δε μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διέλευση των σωματιδίων μέσα από το στόχο, δηλαδή δεν υπάρχει σημαντική μείωση της κινητικής τους ενέργειας.

5.3 Υπολογισμός της απόδοσης μίας πυρηνικής αντιδράσεως

Η απόδοση μίας πυρηνικής αντιδράσεως $A + x \rightarrow B + \gamma$ μπορεί να υπολογισθεί γνωρίζοντας την ενεργό διατομή της σ και την πυκνότητα ροής των σωματιδίων, που την προκαλούν, χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma \Phi N_A$$

Η σχέση αυτή ισχύει για μονοενεργειακές δέσμες βλημάτων με σταθερή πυκνότητα ροής Φ και λεπτούς στόχους.

Αν το προϊόν της αντιδράσεως B είναι ασταθές και διασπάται κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσεως, τότε για τον υπολογισμό της απόδοσεως πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο ρυθμός διασπάσεώς του

$$\frac{dN_B}{dt} = \sigma \Phi N_A - \lambda_B N_B$$

Η ολοκλήρωση αυτής της σχέσεως ως προς το χρόνο δίνει τον ρυθμό διασπάσεως του νουκλιδίου B στο τέλος μίας ακτινοβολήσεως διάρκειας t

$$-\frac{dN_B(t)}{dt} = \lambda_B N_B = \sigma \Phi N_A (1 - e^{-\lambda_B t})$$

Παρατηρώντας αυτή τη σχέση μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι μετά από ακτινοβολήση διάρκειας ενός χρόνου υποδιπλασιασμού του προϊόντος της αντιδράσεως B επιτυγχάνεται ο σχηματισμός του 50% της μέγιστης αναμενόμενης ποσότητάς του κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες πυκνότητας ροής Φ . Η απόδοση αυξάνεται στο 75% μετά από ακτινοβολήση διάρκειας δύο χρόνων υποδιπλασιασμού του νουκλιδίου B και, αυξανόμενου του χρόνου ακτινοβολήσεως, η απόδοση πλησιάζει τη μέγιστη αναμενόμενη.

Αν η μέτρηση ή χρησιμοποίηση του προϊόντος της αντίδρασης B πραγματοποιηθεί μετά χρόνο t' από το τέλος της ακτινοβολήσεως, το επιπλέον αυτό χρονικό διάστημα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς

$$A = -\frac{dN_B(t)}{dt} = \lambda_B N_B = \sigma \Phi N_A (1 - e^{-\lambda_B t}) e^{-\lambda_B t'}$$

Η τελευταία αυτή σχέση, που ονομάζεται και **σχέση ενεργοποίησης**, παρουσιάζει μεγάλη

σπουδαιότητα στον υπολογισμό της αποδόσεως παραγωγής ραδιονουκλιδίων σε αντιδραστήρες και επιταχυντές σωματιδίων καθώς επίσης στην ανάλυση με πυρηνική ενεργοποίηση.

5.4 Είδη πυρηνικών αντιδράσεων

Για την πληρέστερη μελέτη τους οι πυρηνικές αντιδράσεις μπορούν να διακριθούν τους σε αντιδράσεις χαμηλών, μέσων και υψηλών ενεργειών, χωρίς τα όρια των ενεργειακών αυτών ομάδων να είναι απόλυτα καθορισμένα και σαφή. Κάθε μία από αυτές τις ομάδες περιλαμβάνει αντιδράσεις, που ακολουθούν διάφορους μηχανισμούς, όπως αντιδράσεις σύνθετου πυρήνα, άμεσες αντιδράσεις, σκεδασμούς, σχάση. Από πρακτική άποψη οι πιο ενδιαφέρουσες αντιδράσεις είναι αυτές των χαμηλών ενεργειών. Τόσο η παραγωγή ραδιονουκλιδίων σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ή επιταχυντές όσο η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας βασίζονται σε αντιδράσεις αυτής της περιοχής.

Στην ενεργειακή περιοχή των χαμηλών ενεργειών μπορούν να παρατηρηθούν αντιδράσεις με νετρόνια, φορτισμένα σωματίδια και φωτόνια.

Η κύρια διαφορά των πυρηνικών αντιδράσεων με νετρόνια και φορτισμένα σωματίδια (π.χ. πρωτόνια, δευτερόνια, σωματίδια-α κλπ) ως βλήματα είναι η έλλειψη της απωστικής δυνάμεως μεταξύ του θετικά φορτισμένου στόχου πυρήνα και του βλήματος. Η ενέργεια που απαιτείται, στην περίπτωση των αντιδράσεων με φορτισμένα σωματίδια ως βλήματα, για την υπερνίκηση αυτής της απώσεως και την επίτευξη της συνένωσης (σύντηξης) του στόχου πυρήνα με το βλήμα μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας τη σχέση του Coulomb για την άπωση ηλεκτρικών φορτίων

$$E_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_A Z_x e^2}{r}$$

Στη σχέση αυτή, που δίνει καλά αποτελέσματα μόνο για απόλυτα σφαιρικούς πυρήνες, Z_A και Z_x είναι τα φορτία του στόχου πυρήνα και του βλήματος, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά και r η απόσταση δραστηκότητας των πυρηνικών δυνάμεων. Το r μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση

$$r = r_0 \left[(A_A^{1/3}) + (A_x^{1/3}) \right]$$

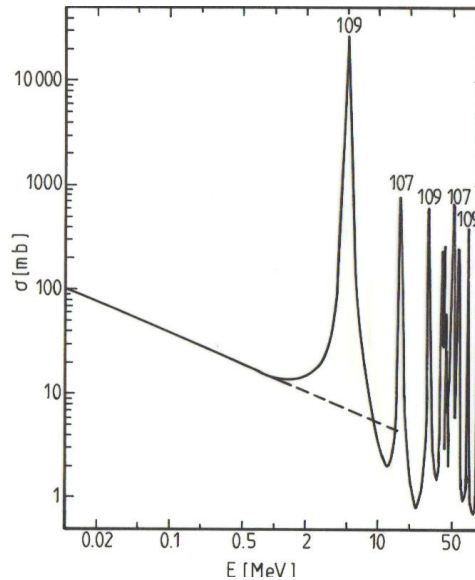
όπου A_A και A_x οι μαζικοί αριθμοί του στόχου πυρήνα και του βλήματος και $r_0 = 1.4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Οι περισσότερες πυρηνικές αντιδράσεις στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών ακολουθούν το μηχανισμό του σύνθετου πυρήνα, που προτάθηκε από τον N. Bohr το 1936. Σύμφωνα με τη θεωρία του Bohr η πυρηνική αντίδραση πραγματοποιείται σε δύο διακριτά χρονικά στάδια. Στο πρώτο από αυτά, το βλήμα x ενώνεται με τον στόχο πυρήνα και σχηματίζει μία ισχυρά διεγερμένη κατάσταση, τον **σύνθετο πυρήνα**, που χαρακτηρίζεται από μία, κατά προσέγγιση, ισοκατανομή της ενέργειας συνδέσεως και της κινητικής του ενέργειας σ' όλα τα νουκλεόνια. Ο σύνθετος πυρήνας έχει πολύ μικρή διάρκεια ζωής ($< 10^{-15} \text{ s}$) και διασπάται, στο δεύτερο στάδιο της αντίδρασης, όπως κάθε ασταθής πυρήνας με εκπομπή σωματιδίων ή και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα δύο στάδια της πραγματοποίησης μίας πυρηνικής αντιδράσεως δεν παρουσιάζουν εξάρτηση μεταξύ τους.

Οι αντιδράσεις, που πραγματοποιούνται με το μηχανισμό του σύνθετου πυρήνα, μπορούν να διακριθούν σε **αντιδράσεις συντονισμού** και σε **στατιστικές αντιδράσεις**. Το χαρακτηριστικό των πρώτων είναι η ύπαρξη στην καμπύλη της συναρτήσεως διεγέρσεως χαρακτηριστικών κορυφών, που προέρχονται από την κατάληψη συγκεκριμένων ενεργειακών καταστάσεων στο σύνθετο πυρήνα. Στο **Σχήμα 5-2** δίνεται η καμπύλη της συνάρτησης διεγέρσεως της αντιδράσεως του φυσικού αργύρου με νετρόνια, στο οποίο είναι εμφανής η ύπαρξη κορυφών συντονισμού στην περιοχή ενεργειών μεταξύ 1 και 100 eV. Στην περιοχή συντονισμού η ενέργεια διεγέρσεως του σύνθετου πυρήνα είναι μικρή και κατά συνέπεια ο αριθμός των διασπάσεων του περιορισμένος. Στην περίπτωση των αντιδράσεων με νετρόνια μπορεί κυρίως να παρατηρηθεί εκπομπή νετρονίων και φωτονίων. Για ενέργειες νετρονίων

μικρότερες της πρώτης κορυφής συντονισμού η ενεργός διατομή της αντιδράσεως είναι ανάλογος του αντιστρόφου της ταχύτητας των νετρονίων και κατά συνέπεια του αντιστρόφου της τετραγωνικής ρίζας της ενέργειάς τους.

$$\sigma_{(n,\gamma)} \sim 1/v_n \sim 1/E^{1/2}$$



Σχήμα 5-2: Συνάρτηση διεγέρσεως της αντιδράσεως φυσικού αργύρου με νετρόνια. Οι κύριες κορυφές συντονισμού χαρακτηρίζονται και με τον μαζικό αριθμό του ισότοπου του αργύρου (107 ή 109) στο οποίο ανήκουν²

Όταν αυξηθεί η ενέργεια των βλημάτων καταλαμβάνονται διεγερμένες καταστάσεις του σύνθετου πυρήνα, που επικαλύπτονται ενεργειακά μεταξύ τους. Στις περιπτώσεις αυτές η περιγραφή του σχηματισμού και διάσπασης του σύνθετου πυρήνα γίνεται με βάση τη στατιστική θεωρία και οι αντιδράσεις ονομάζονται **στατιστικές αντιδράσεις**. Στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών παρατηρούνται επίσης αντιδράσεις, που δεν ακολουθούν το μηχανισμό του σύνθετου πυρήνα. Οι αντιδράσεις αυτές, που ονομάζονται **άμεσες αντιδράσεις**, δεν χαρακτηρίζονται από ισοκατανομή της ενέργειας διεγέρσεως σ' όλα τα νουκλεόνια ούτε από συμμετρία εκπομπής των προϊόντων τους. Τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών εκπέμπονται κυρίως σε πρόσθια κατεύθυνση ως προς τη διεύθυνση της δέσμης των σωματιδίων, που προκαλούν την αντίδραση (των βλημάτων). Οι συναρτήσεις διεγέρσεως των πυρηνικών αντιδράσεων δεν εμφανίζουν κορυφές συντονισμού.

5.4.1 Ο ελαστικός και ο μη-ελαστικός σκεδασμός

Μαζί με τις πυρηνικές αντιδράσεις, συνήθως, εξετάζονται και ο **ελαστικός** και **μη-ελαστικός σκεδασμός**.

Ο γενικός συμβολισμός του ελαστικού σκεδασμού είναι

$$A(x,x)A$$

Σ' αυτό το είδος του σκεδασμού δεν υπάρχει μεταβίβαση ενέργεια διεγέρσεως παρά μόνον κινητική

² US AEC Neutron Cross Section Advisory Group, "Neutron Cross Sections", Report AECU-2040 (May 1952).

ενέργεια από το βλήμα στον στόχο πυρήνα.

Η μέση ενέργεια, που μεταφέρεται ανά ελαστική σκέδαση στον στόχο πυρήνα μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση

$$\ln \frac{E_{\text{προ}}}{E_{\text{μετά}}} = 1 - \frac{(m' + 1)^2}{2m'} \ln \left(\frac{m' + 1}{m' - 1} \right)$$

όπου $m' = m_A/m_x$

Με τη βοήθεια του ελαστικού σκεδασμού ο Rutherford κατόρθωσε να υπολογίσει το μέγεθος του ατομικού πυρήνα. Ο ελαστικός σκεδασμός είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικός στην πυρηνική τεχνολογία αλλά και στην ανάλυση.

Στην πυρηνική τεχνολογία με ελαστικές κρούσεις πραγματοποιείται η μείωση της ενεργειας των νετρονίων, που παράγονται στην πυρηνική σχάση (μέση ενέργεια νετρονίων στη σχάση του ^{235}U : 1.5 MeV), σε ενέργειες κατάλληλες για τη διατήρηση της αλυσωτής αντίδρασης (0.025 eV).

Στην πράξη ο ελαστικός οπισωσκεδασμός φορτισμένων σωματιδίων (οπισωσκεδασμός *Rutherford*) επιτρέπει την ποσοτική ανάλυση επιφανειακών στοιβάδων υλικών.

Στον μη-ελαστικό σκεδαστή πυρήνα A λαμβάνει από το σκεδαζόμενο σωματίδιο x ένα ποσό ενέργειας ΔE, που τον φέρει σε μία διεγερμένη κατάσταση

$$A(x, x')A'$$

Με τον μη-ελαστικό σκεδασμό μπορούν να παραχθούν μετασταθή ισομερή διαφόρων νουκλιδίων. Η μελέτη του μη-ελαστικού σκεδασμού συνεισφέρει ακόμα και στη διευκρίνιση της δομής των ατομικών πυρήνων.

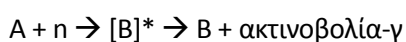
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, πρακτικά, ο μη-ελαστικός σκεδασμός είναι μία αλληλεπίδραση ενός σωματιδίου μ' έναν πυρήνα που έχει μία ενέργεια κατωφλίου.

5.4.2 Η τεχνητή πυρηνική σχάση

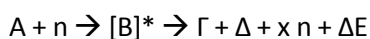
Ανάμεσα στις πυρηνικές αντιδράσεις η **τεχνητή πυρηνική σχάση** βαρέων πυρήνων παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σπουδαιότητα.

Το 1938 οι O. Hahn και F. Strassmann κατόρθωσαν να σχάσουν με τη βοήθεια νετρονίων πυρήνες ουρανίου-235 σε δύο κυρίως θραύσματα ανοίγοντας ένα ιδιαίτερα σημαντικό κεφάλαιο της πυρηνικής τεχνολογίας αλλά και της παγκόσμιας ιστορίας. Παρ' όλον ότι, όπως ανακαλύφθηκε αργότερα, σχάση πυρήνων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ως βλήματα και διάφορα άλλα σωματίδια (π.χ. p, d, α), η σχάση με νετρόνια παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή ενέργειας. Αυτός είναι ο λόγος γιατί, στα πλαίσια αυτού του διδακτικού βιβλίου, θα περιορισθούμε αποκλειστικά σ' αυτό το είδος σχάσεως.

Η τεχνητή πυρηνική σχάση μπορεί να θεωρηθεί ως μία αντίδραση σύνθετου πυρήνα. Ο διεγερμένος σύνθετος πυρήνας, που σχηματίζεται, μπορεί να αποδιεγερθεί με εκπομπή φωτονίων



ή να σπάσει σε δύο κυρίως θραύσματα.



Όπως φαίνεται και στην παραπάνω σχέση η σχάση συνοδεύεται από την εκπομπή ενός αριθμού νετρονίων και την απελευθέρωση μίας ποσότητας ενέργειας. Σύμφωνα και με το διάγραμμα, που

παρουσιάζει τη μετάβολή της ενέργειας συνδέσεως ανά νουκλεόνιο ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού (Σχήμα 1-4), σχάση με ενεργειακή ωφέλεια είναι δυνατή μόνο στην περίπτωση πυρήνων με $A > 130$. Η σχάση ελαφρύτερων πυρήνων είναι δυνατή χρησιμοποιώντας σωματίδια υψηλής ενέργειας. Στην περίπτωση πυρήνων με $A > 230$ το **κατώφλιο σχάσεως**, δηλαδή η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την πραγματοποίηση της σχάσεως, είναι χαμηλότερη των 10 MeV . Ιδιαίτερο τεχνολογικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχάση με θερμικά νετρόνια. Εδώ είναι σκόπιμο να παρατηρήσουμε, ότι νουκλίδια που με τη σύλληψη ενός νετρονίου σχηματίζουν ένα σύνθετο πυρήνα με άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων παρουσιάζουν ένα χαμηλότερο κατώφλιο σχάσεως από την ενέργεια συνδέσεως του τελευταίου νετρονίου (Πίνακας 5-1).

Πίνακας 5-1: Ενέργεια συνδέσεως του τελευταίου νετρονίου και κατώφλιο σχάσεως για μερικά βαρέα νουκλίδια.

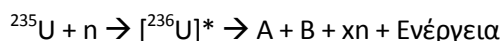
Νουκλίδιο (A_Z)	Σύνθετος πυρήνας ($^{A+1}_Z$)	Ενέργεια συνδέσεως* [MeV]	Κατώφλιο σχάσεως του $^{A+1}_Z$ [MeV]	Σχασιμότητα με θερμικά νετρόνια**
^{232}Th	^{233}Th	5.4	5.9	όχι
^{233}U	^{234}U	7.0	5.5	ναί
^{234}U	^{235}U	5.0	5.4	όχι
^{235}U	^{236}U	6.8	5.75	ναί
^{238}U	^{239}U	5.2	5.9	όχι
^{239}Pu	^{240}Pu	6.6	5.5	ναί

* Ενέργεια συνδέσεως ενός νετρονίου από το πυρήνα A_Z .

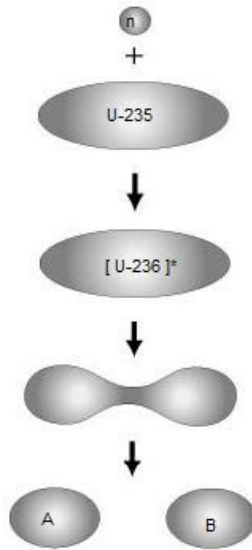
** Ενέργεια θερμικών νετρονίων 0.025 eV .

Από τον Πίνακα 5-1 μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι στην περίπτωση του ^{233}U , ^{235}U και του ^{239}Pu η ενέργεια συνδέσεως, που απελευθερώνεται κατά τη σύλληψη του θερμικού νετρονίου, είναι επαρκής για τη υπερπήδηση του κατωφλίου της σχάσεως του σύνθετου πυρήνα, ενώ σ' αυτή του ^{232}Th , του ^{234}U και του ^{238}U το νετρόνιο πρέπει να προσδώσει στο σύνθετο πυρήνα επιπλέον ενέργεια για να μπορέσει να σχασθεί. Η ενέργεια αυτή προσδίνεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας, Έτσι, το ^{232}Th , το ^{234}U και το ^{238}U δε μπορούν να σχασθούν βομβαρδιζόμενα με θερμικά νετρόνια αλλά μόνο με ταχεία.

Όταν ένας πυρήνας του ^{235}U συλλάβει ένα θερμικό νετρόνιο σχηματίζεται ένας σύνθετος πυρήνας [^{236}U]* σε διεγερμένη κατάσταση, που μπορεί να αποδιεγερθεί εκπέμποντας φωτόνια (ακτινοβολία- γ) ή να σχασθεί σε δύο ή τρία θραύσματα. Η ενέργεια διεγέρσεως του σύνθετου πυρήνα ισούται την ενέργεια συνδέσεως του νετρονίου, που απελευθερώνεται κατά τη σύλληψή του από τον στόχο πυρήνα. Η κινητική ενέργεια του θερμικού νετρονίου είναι πολύ μικρή και μπορεί να αγνοηθεί. Η διάρκεια ζωής του σύνθετου πυρήνα [^{236}U]*, που σχηματίζεται, είναι της τάξεως των 10^{-14} s . Η σχάση συνοδεύεται από εκπομπή ενός αριθμού νετρονίων από τα πρωτογενή θραύσματα και από απελευθέρωση ενέργειας.



Η ενεργός διατομή των παραπάνω δύο αντιδράσεων είναι αντίστοιχα 101 και 582 b. Αυτό σημαίνει ότι από τους επτά πυρήνες ^{235}U που συλλαμβάνουν θερμικά νετρόνια οι έξι σχάζονται ενώ μόνον ο ένας οδηγεί με αντίδραση του τύπου (n, γ) στο σχηματισμό του μακρόβιου ^{236}U .



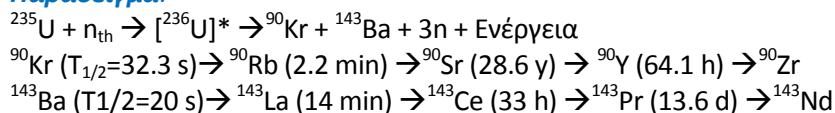
Σχήμα 5-3: Γραφική παράσταση της σχάσεως του ^{235}U με θερμικά νετρόνια.

Ο μηχανισμός της σχάσεως μπορεί να εξηγηθεί με βάση της **θεωρίας της σταγόνας υγρού**, που αναφέρθηκε ήδη στο Κεφ. 1. Όταν ο πυρήνας του ^{235}U , που έχει στη βασική του κατάσταση ελλειψοειδές σχήμα, συλλάβει ένα νετρόνιο, αρχίζει να παρουσιάζει ταλαντώσεις και υφίσταται περαιτέρω παραμορφώσεις (Σχήμα 5-3). Όταν η ενέργεια διεγέρσεως είναι μεγάλη, ο παραμορφωμένος σύνθετος πυρήνας του $^{236}\text{U}^*$ λεπταίνει στο μέσον του και η άπωση Coulomb οδηγεί στο σπάσιμό του σε δύο θραύσματα, δηλαδή στη σχάση του. Αν πάλι η ενέργεια διεγέρσεως του $^{236}\text{U}^*$ δεν είναι αρκετά μεγάλη, το σχήμα του αποκαθίσταται και η ενέργεια διεγέρσεως εκπέμπεται με τη μορφή ακτινοβολίας-γ, δηλαδή έχουμε μία αντίδραση του τύπου (n,γ) με σχηματισμό ^{236}U στη βασική του κατάσταση.

Η τεχνητή πυρηνική σχάση είναι κι αυτή ένα στατιστικό φαινόμενο. Τα δύο θραύσματα, που σχηματίζονται, παρουσιάζουν, όπως και στην αυθόρμητη σχάση (Κεφ. 2), μία κατανομή μάζας γύρω από δύο μέγιστα. Το ένα από αυτά βρίσκεται στην περιοχή του $A = 95$ και το άλλο του $A = 135$. Στο Σχήμα 5.4 δίνεται η καμπύλη της της πιθανότητας σχηματισμού των προϊόντων της σχάσεως του ^{235}U με θερμικά νετρόνια, δηλαδή της **απόδοσης σχάσεως**. Στο ίδιο σχήμα δίνεται επίσης η καμπύλη απόδοσης σχάσεως του ^{235}U με ταχέα νετρόνια ενέργειας 14 MeV . Σχάση του σύνθετου πυρήνα του $^{236}\text{U}^*$ σε περισσότερα από δύο θραύσματα λαμβάνει επίσης χώρα αλλά με πολύ μικρότερη πιθανότητα. Το τρίτο θραύσμα είναι πάντοτε ένα ένα ελαφρύ νουκλίδιο (π.χ. ^3H , ^4He , ^6Li , ^{10}Be).

Τα προϊόντα της σχάσεως, μετά την εκπομπή των νετρονίων, διασπώνται με διαδοχικές β^- διασπάσεις μέχρι οι ισοβαρείς σειρές να καταλήξουν σε ένα σταθερό νουκλίδιο.

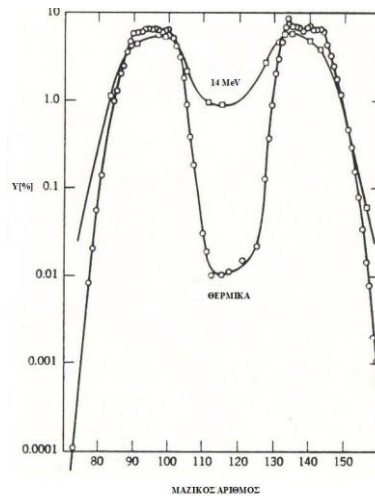
Παράδειγμα:



Τα νουκλίδια ^{90}Zr και ^{143}Nd είναι σταθερά και δε διασπώνται περαιτέρω.

Ο αριθμός των νετρονίων, που εκπέμπονται από τα πρωτογενή θραύσματα του $^{236}\text{U}^*$, λαμβάνει τιμές μέχρι και μεγαλύτερες από 6 ανά σχάση. Η μέση τιμή των νετρονίων, που εκπέμπονται στην περίπτωση της σχάσεως του ^{235}U από θερμικά νετρόνια, είναι 2.47 ανά σχάση. Ο αριθμός αυτός αυξάνει στην περίπτωση της σχάσεως με ταχέα νετρόνια (π.χ. σε 2.64 ανά σχάση για νετρόνια ενέργειας 1.25 MeV). Η ενέργεια αυτών των νετρονίων παρουσιάζει μία κατανομή από 0.5 μέχρι και πάνω από 4 MeV με πιθανότερη τιμή 0.75 MeV και μέση τιμή 1.94 MeV . Παράλληλα με τα άμεσα

εκπεμπόμενα νετρόνια, ορισμένα προϊόντα της σχάσεως εκπέμπουν με μετρήσιμο χρόνο υποδιπλασιασμού και **καθυστερημένα νετρόνια**, που κι αυτά συντελούν στη μείωση της περιόδου νετρονίων τους.



Σχήμα 5-4: Απόδοση σχάσεως του ^{235}U με θερμικά νετρόνια και με νετρόνια ενέργειας 14 MeV.

Η ενέργεια, που απελευθερώνεται στην τεχνητή πυρηνική σχάση μπορεί να υπολογισθεί από την ενέργεια συνδέσεως των νουκλεονίων στον πυρήνα. Αν λάβουμε υπ' όψη ότι η μέση ενέργεια συνδέσεως για βαρείς πυρήνες είναι περίπου 7.6 MeV και αυτή για μέσους περίπου 8.5 MeV, τότε κατά τη σχάση ενός πυρήνα με 235 νουκλεόνια (^{235}U) απελευθερώνονται περίπου $235 \times 0.9 = 210$ MeV. Η κατανομή αυτής της ενέργειας δίνεται στον Πίνακα 5-2.

Πίνακας 5-2: Κατανομή της ενέργειας, που απελευθερώνεται κατά τη σχάση του ^{235}U με θερμικά νετρόνια.

Κινητική ενέργεια των προϊόντων της σχάσεως	175 MeV
Κινητική ενέργεια των νετρονίων	5 MeV
Ενέργεια άμεσα εκπεμπόμενων φωτονίων (ακτινοβολίας-γ)	7 MeV
Ενέργεια ακτινοβολίας-β των προϊόντων της σχάσεως	7 MeV
Ενέργεια ακτινοβολίας-γ των προϊόντων της σχάσεως	6 MeV
Ενέργεια των νετρονίων	10 MeV
Σύνολο	210 MeV

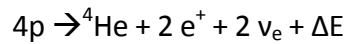
Στον Πίνακα 5-2 είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της σχάσεως αποδίδεται στα προϊόντα της σχάσεως. Η παραλαβή αυτής της ενέργειας με θερμική μορφή επιτρέπει και τη χρησιμοποίησή της σχάσεως για ενεργειακούς σκοπούς.

5.4.3 Η πυρηνική σύντηξη

Με το όρο **πυρηνική σύντηξη** χαρακτηρίζεται η συνένωση ελαφρών πυρήνων (π.χ. υδρογόνο, δευτέριο, τρίτιο, ήλιο, άνθρακας) για σχηματισμό βαρύτερων. Οι αντιδράσεις αυτού του είδους, που είναι εξωενεργειακές και συνοδεύονται από απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας

ενέργειας (βλ. επίσης Σχήμα 1-4), παρουσιάζουν ιδιαίτερο θεωρητικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον. Η αξιοποίηση της ενέργειας, που απελευθερώνεται από αντιδράσεις πυρηνικής συντήξεως, θα λύσει για πάρα πολλά χρόνια σε μεγάλο βαθμό τα ενεργειακά προβλήματα του πλανήτη μας.

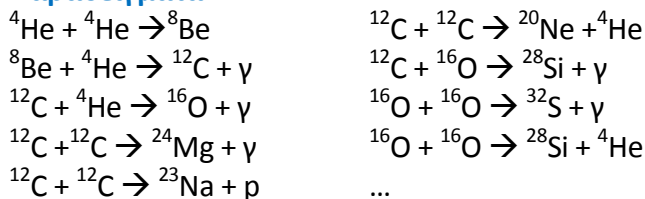
Ένα κλασικό παράδειγμα αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης είναι ο σχηματισμός ενός πυρήνα ηλίου από τη συνένωση τεσσάρων πρωτονίων.



Η ενέργεια, που απελευθερώνεται από την αντίδραση αυτή ισούται με 24.69 MeV. Αν σ' αυτή την ενέργεια συνυπολογισθεί η ενέργεια εξαΐλωσης των δύο ποζιτρονίων ($2 \times 1.022 = 2.044$ MeV) και η ενέργεια που λαμβάνουν τα νεutrino (περ. 2% της ΔΕ) τότε η συνολική ενέργεια που εκλύεται ισούται με 26.2 MeV ή περίπου 6.5 MeV/u. Η ενέργεια αυτή είναι επτά φορές μεγαλύτερη από αυτή, που απελευθερώνεται κατά τη σχάση βαρέων πυρήνων (περ. 0.8 MeV/u).

Η σύντηξη των πυρήνων του υδρογόνου θεωρείται η κύρια πηγή ενέργειας στον Ήλιο και στους σταθερούς αστέρες. Με αντιδράσεις συντήξεως πραγματοποιήθηκε και ο σχηματισμός των διαφορών στοιχείων μέχρι την περιοχή του σιδήρου στο σύμπαν.

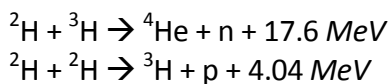
Παραδείγματα:



Για την πραγματοποίηση όλων αυτών πυρηνικών αντιδράσεων απαιτούνται μεγάλες ενέργειες για την υπερπήδηση της απώσεως Coulomb.

Η σύνθεση των στοιχείων πέραν της περιοχής του σιδήρου πραγματοποιείται με άλλους μηχανισμούς (κυρίως συλλήψεις νετρονίων) γιατί οι αντιδράσεις συντήξεως σ' αυτή την περιοχή είναι ενδοενεργειακές.

Η δέσμευση της ενέργειας της πυρηνικής συντήξεως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρά τη συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας, δεν έχει πλήρως επιτευχθεί. Ίδιαίτερο ενδιαφέρον γ' αυτό το σκοπό παρουσιάζουν δύο κυρίως αντιδράσεις

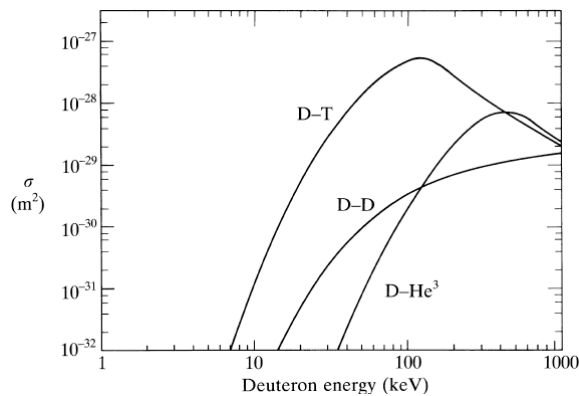


Η πρώτη από τις δύο αυτές αντιδράσεις παρουσιάζει μεγαλύτερες πιθανότητες χρησιμοποίησης λόγω των υψηλότερων ενεργών διατομών της (Σχήμα 5-5).

Η κατανομή της ενέργειας των 17.6 MeV στα προϊόντα της αντιδράσεως γίνεται ανάλογα με τη μάζα τους. Έτσι, τα νετρόνια λαμβάνουν ως κινητική ενέργεια 14.1 και οι πυρήνες ${}^4\text{He}$ 3.5 MeV.

Η αντίδραση του δευτερίου με τρίτιο αρχικά δεν έχει θετικό ισοζύγιο λόγω της μεγάλης πιθανότητας σκεδασμού ($\sigma_{\text{σκεδ}} / \sigma_{\text{D-T}} = \text{περ. } 100$). Η πραγματοποίηση της σύντηξης των πυρήνων του δευτερίου με το τρίτιο μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνον όταν οι πυρήνες έχουν

αρκετή κινητική ενέργεια για να προκληθεί και σύντηξη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί όταν οι πυρήνες είναι απαλλαγμένοι από τα ηλεκτρόνια τους

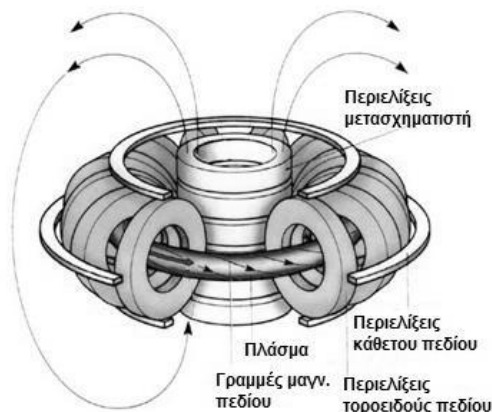


Σχήμα 5-5: Ενεργός διατομή διαφόρων αντιδράσεων σύντηξης.

και με αυξημένη πυκνότητα μπορέσουν να αντιδράσουν μεταξύ τους. Οι συνθήκες αυτές υφίστανται μόνο σε κατάσταση **πλάσματος**, δηλαδή ενός πλήρως ιονισμένου αερίου σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, για την πραγματοποίηση της σύντηξης του δευτερίου με το τρίτιο απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξεως των 50 εκατομμυρίων βαθμών. Επειδή το ελεύθερο πλάσμα διαστέλλεται τάχιστα και ψύχεται, η διατήρηση του πλάσματος σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις και πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία που παράγονται από υπεραγωγίσιμους μαγνήτες. Τα υψηλά αυτά μαγνητικά πεδία αποκλείουν επίσης την επαφή του πλάσματος με τα υλικά της συσκευής (Σχήμα 5-6).

Για την αντίδραση δευτερίου με τρίτιο, το δευτέριο είναι διαθέσιμο σε απεριόριστες ποσότητες, ως συστατικό του νερού, ενώ το τρίτιο μπορεί να παραχθεί στον αντιδραστήρα σύντηξης μέσω της πυρηνικής αντίδρασης ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$. Η αφθονία του ${}^6\text{Li}$ στο φυσικό λίθιο είναι 7.42%. Η επίτευξη της αντίδρασης σύντηξης ${}^2\text{H} + {}^2\text{H}$ απαιτεί πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η παραγωγή ενέργειας από πυρηνική σύντηξη δεν έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής. Το επιτυχέστερο πείραμα παραγωγής ενέργειας από



Σχήμα 5-6: Σχηματική παράσταση διατήρησης πλάσματος σε αντιδραστήρα σύντηξης τύπου Tokamak.

πυρηνική σύντηξη πραγματοποιήθηκε το 1997 στο Joint European Torus (JET), στο οποίο

παράχθηκε ένα μέγιστο ισχύος 16.1 MW (65% της δαπανηθείσας ισχύος) με διατήρηση παραγωγής 10 MW για 0.5 sec³.

Τον Ιούνιο του 2005 ανακοινώθηκε η απόφαση κατασκευής ενός πειραματικού αντιδραστήρα συντήξεως του ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) στο Cadarache της Γαλλίας⁴. Ο αντιδραστήρας αυτός σχεδιάζεται να παράγει πολύ μεγαλύτερη ισχύ (500 MW) και διατήρηση της παραγωγής μέχρι 1000 s χρησιμοποιώντας 0.5 g μείγματος δευτερίου/τριτίου σε έναν αντιδραστήρα όγκου περίπου 840 m³.

Παρ' όλον ότι ο αντισταστήρας αυτός θα δώσει 5 ως 10 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτή που θα καταναλώσει για τη θέρμανση του πλάσματος, η ενέργεια αυτή δε θα χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρισμού. Η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική σύντηξη προγραμματίζεται να πραγματοποιηθεί στον αντιδραστήρα DEMO (DEMONstration Power Plant) μετά τουλάχιστον 30 χρόνια⁵.

³ <http://www.jet.efda.org>

⁴ <http://iter.rma.ac.be/en>

⁵ http://fusionforenergy.europa.eu/3_4_demo_en.htm