

Διάλεξη 9: Αντιδραστήρες σύντηξης

Αντιδραστήρες σύντηξης

Δεδομένου ότι η πυρηνική σύντηξη αποτελεί μια σχεδόν ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τα αστέρια (τουλάχιστον για ανθρώπινες κλίμακες χρόνου). Αυτό ήταν λογικό να στρέψει ένα μεγάλο μέρος της έρευνας της φυσικής προς την κατεύθυνση εκμετάλλευσης αυτού του είδους της ενέργειας. Τα βασικά **πλεονεκτήματα** από την εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας μέσω αντιδράσεων σύντηξης προέρχονται από τα εξής γεγονότα: Πρώτον **το καύσιμο μπορεί να είναι το δευτέριο το οποίο υπάρχει σε αφθονία** στην φύση και επομένως είναι κατά πολύ φθηνότερο. Το υδρογόνο στην πραγματικότητα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί διότι **η σύντηξη 2 πυρήνων ^1H προς έναν πυρήνα ^2H συμβαίνει μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης και επομένως η πιθανότητα να συμβεί είναι πάρα πολύ μικρή**. Αντίθετα αντιδράσεις σύντηξης του δευτερίου είναι περισσότερο πιθανές και επομένως προσφέρονται για την παραγωγή ενέργειας. Ένας επιπλέον λόγος που η χρήση της πυρηνικής σύντηξης ως τρόπο παραγωγής ενέργειας είναι η **παραγωγή σαφώς λιγότερων πυρηνικών αποβλήτων**. Τα δύο αυτά επιχειρήματα δεν είναι φυσικά και τα μόνα τα οποία συνηγορούν προς την χρήση της πυρηνικής ενέργειας σύντηξης αλλά υπάρχουν πολλοί ακόμα λόγοι.

Το ερώτημα τώρα είναι το εξής: Αφού δουλεύει μια χαρά στον ήλιο και αφού ξέρουμε πως έχει και τόσα πλεονεκτήματα γιατί λοιπόν δεν την χρησιμοποιούμε; Ο λόγος είναι ο πολύ απλός. Στον ήλιο αλλά και σε κάθε αστέρι οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι τέτοιες που η άπωση Coulomb υπερνικάται ενώ στην γη οι συνθήκες αυτές δεν υπάρχουν οπότε το να φέρουμε δύο πυρήνες κοντά ώστε να "νιώσουν" την μικρής εμβέλειας ισχυρή αλληλεπίδραση και να γίνει οποιαδήποτε μορφή αντίδρασης θα πρέπει να προσφέρουμε εμείς αυτή την ενέργεια. Αυτό γίνεται καθημερινά σε όλες τις επιταχυντικές διατάξεις του κόσμου όπου λαμβάνει χώρα η μελέτη των πυρηνικών αντιδράσεων. Προς την **παραγωγή λοιπόν ενέργειας απαιτείται η θέρμανση των πυρήνων σε τέτοιες θερμοκρασίες όπου η (θερμική) κινητική ενέργεια των πυρήνων να είναι μεγαλύτερη από την άπωση Coulomb**.

Παράδειγμα

Υπολογισμός θερμοκρασίας πλάσματος ώστε δύο πυρήνες δευτερίου να έρθουν σε απόσταση 10 fm

$$U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$a = e^2 / [\hbar c (4\pi\epsilon_0)] = 1/137$$

$$\hbar c = 197.3 \text{ MeV fm}$$

$$U = \frac{a \hbar c}{r} = \frac{197.3 \text{ MeV fm}}{137 \cdot 10 \text{ fm}} = 0.144 \text{ MeV} = 144 \text{ keV}$$

Αυτή είναι η ολική κινητική ενέργεια που πρέπει να έχουν 2 πυρήνες δευτερίου προκειμένου να πλησιάσουν σε απόσταση 10 fm. Άρα η ενέργεια του κάθε πυρήνα θα είναι:

$$U_d = 0.144 \text{ MeV} / 2 = 0.072 \text{ MeV}$$

$$U_d = (3/2) kT$$

$$k = 8.617 \cdot 10^{-11} \text{ MeV/K}$$

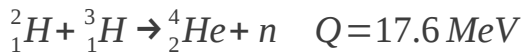
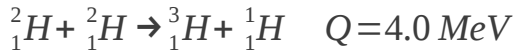
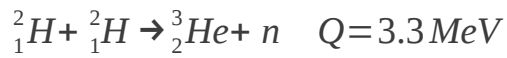
$$T = (2/3) \cdot (1/k) \cdot U = (2/3) \cdot 1.16 \cdot 10^{10} (\text{K/MeV}) \cdot 0.072 \text{ MeV}$$

$$T = 5.6 \cdot 10^8 \text{ K}$$

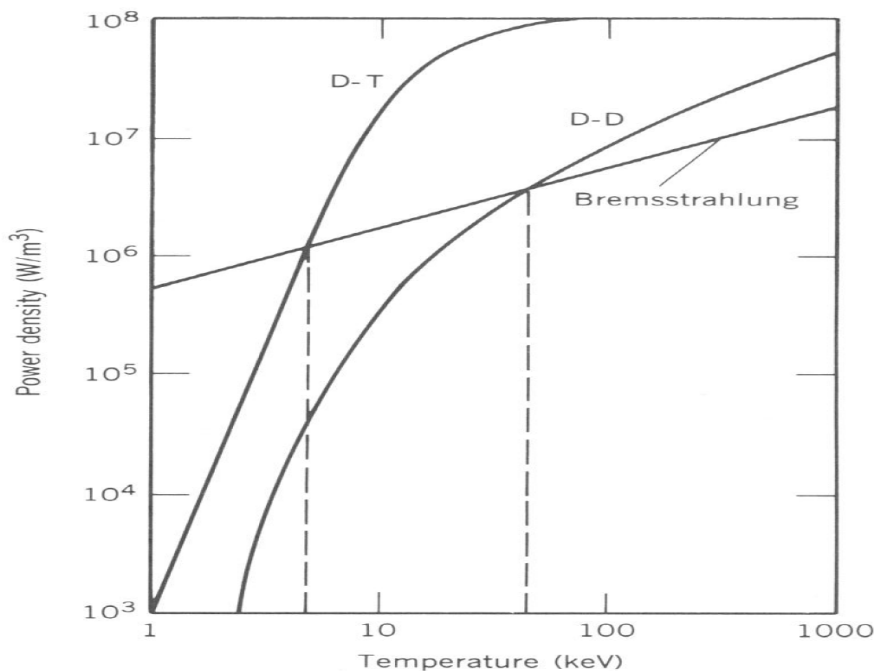
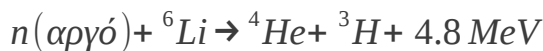
Πρόκειται λοιπόν για θερμοκρασίες πλάσματος όπου οι πυρήνες έχουν αποκοπεί από τα ηλεκτρόνια που τους περιβάλλουν.

Αυτή η θερμοκρασία βέβαια είναι μάλλον "απαισιόδοξη" δεδομένου ότι τα δευτέρια ακολουθούν την κατανομή ταχυτήτων Maxwell-Boltzmann οπότε ένα μικρό μέρος της κατανομής – εκείνο προς την "ουρά" των υψηλών ενεργειών θα έχει ακόμα μεγαλύτερες ενέργειες. Από μια πιο προσεκτική θεώρηση λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή ενεργειών των σωματιδίων του πλάσματος **βρέθηκε ότι μια θερμοκρασία της τάξης των $4 \times 10^8 \text{ K}$ είναι αρκετή για να επιτευχθεί σύντηξη.**

Επικρατέστερες αντιδράσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντιδραστήρες σύντηξης είναι οι εξής:



Όπου οι δύο πρώτες συχνά συμβολίζονται ως D-D και η τελευταία ως D-T. Η τελευταία περιλαμβάνει την αντίδραση σύντηξης ενός πυρήνα δευτερίου με ένα πυρήνα τριτίου. Η αντίδραση αυτή μάλιστα αποδίδει μακράν και την περισσότερη ενέργεια. Το μειονέκτημα για την χρήση της αντίδρασης αυτής είναι ότι το τρίτιο λόγω του μικρού χρόνου ζωής του ($T_{1/2} = 12.3\text{ y}$) δεν υπάρχει στη φύση σε μεγάλες ποσότητες και πρέπει να παραχθεί τεχνητά. Δυο αντιδράσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τριτίου μέσα στον ίδιο τον αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης είναι:



Σχήμα 1: Ρυθμός παραγωγής και απώλειας ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας για τις δύο πιθανές αντιδράσεις σύντηξης (D-D, D-T)

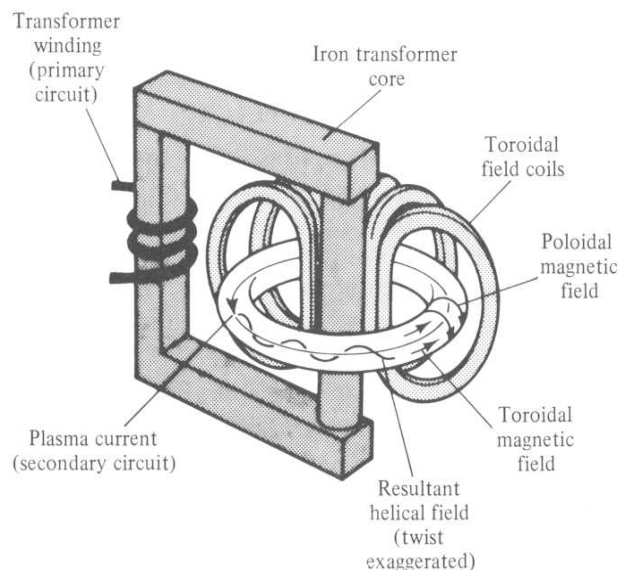
Υπάρχει μια θερμοκρασία όπου ο γενικότερος ρυθμός απώλειας ενέργειας γίνεται μικρότερος από τον ρυθμό παραγωγής ενέργειας. Αυτή η θερμοκρασία λέγεται θερμοκρασία ανάφλεξης. Από το παραπάνω σχήμα διακρίνουμε δύο περιπτώσεις: αυτή όπου χρησιμοποιείται η αντίδραση σύντηξης D-D και αυτή που χρησιμοποιείται η

αντίδραση σύντηξης D-T. Η γραμμή απώλειας ενέργειας αντιστοιχεί στην απώλεια λόγω της ακτινοβολίας πέδησης η οποία εκπέμπεται από ένα οποιοδήποτε φορτισμένο σωματίο που επιβραδύνεται (η γενικότερα μεταβάλλεται η κινητική του κατάσταση). Βλέπουμε λοιπόν ότι η χρήση της αντίδρασης D-T είναι κατά πολύ αποδοτικότερη από την χρήση D-D δεδομένου ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης σε μονάδες ενέργειας είναι κατά μία τάξη μεγέθους μικρότερη. Δηλαδή με άλλα λόγια το να φτάσουμε σε **εκείνη την θερμοκρασία όπου η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από αυτή που χάνεται είναι (ενεργειακά μιλώντας) δέκα φορές πιο εύκολο χρησιμοποιώντας την αντίδραση D-T**. Αυτό οφείλεται τόσο στο μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που παράγεται όσο και στην μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνει αυτή η αντίδραση έναντι της αντίδρασης D-D.

Πέρα από την θερμοκρασία πλάσματος η οποία παίζει καίριο ρόλο στον ρυθμό των παρατηρούμενων αντιδράσεων σημαντικό ρόλο παίζει η πυκνότητα των πυρήνων στο πλάσμα αλλά και ο χρόνος περιορισμού του. Δηλαδή ο χρόνος για τον οποίο τα αλληλεπιδρώντα ιόντα διατηρούνται σε θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη από την θερμοκρασία ανάφλεξης. Μάλιστα ανάλογα με την αντίδραση υπάρχει το **κριτήριο Lawson** το οποίο θέτει ένα κάτω όριο για το γινόμενο συγκέντρωσης ιόντων επί του χρόνου περιορισμού.

$$n \cdot \tau \geq 10^{14} \text{s/cm}^3 \text{ (D-T)}$$

$$n \cdot \tau \geq 10^{16} \text{s/cm}^3 \text{ (D-D)}$$



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση μαγνητικού περιορισμού του πλάσματος μέσω της διάταξης Tokamak.

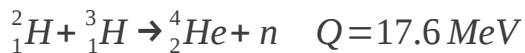
Πέρα από την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας (η οποία είναι της τάξης 10^8 K) ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα είναι πως να συγκρατήσει κανείς ένα τόσο θερμό υλικό για χρονικά διαστήματα της τάξης του ενός sec. Προς αυτή την κατεύθυνση δύο τεχνικές αναπτύχθηκαν: ο αδρανειακός περιορισμός και ο μαγνητικός περιορισμός. Σήμερα φαίνεται να κερδίζει περισσότερο έδαφος ο μαγνητικός περιορισμός. Η πλέον διαδεδομένη και επικρατέστερη διάταξη μαγνητικού περιορισμού πλάσματος είναι το tokamak. Πρόκειται για έναν συνδυασμό μαγνητικών πεδίων όπου περιορίζουν το

πλάσμα εντός ενός δακτυλιοειδούς (μιας “κουλούρας” δηλαδή). Πιο συγκεκριμένα ένα ισχυρό δακτυλιοειδές μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από κυκλικά τοποθετημένους ισχυρούς ηλεκτρομαγνήτες συνδυάζεται με ένα πολοειδές μαγνητικό πεδίο το οποίο μάλιστα πρέπει να είναι ασθενέστερο του πρώτου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα ελικοειδές μαγνητικό πεδίο το οποίο περιορίζει το πλάσμα και δεν το αφήνει να έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του Tokamak. Εύκολα φαντάζεται κανείς πως στην περίπτωση που το πλάσμα έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα η θερμοκρασία του πλάσματος θα μειωθεί ενώ μέρος του υλικού των τοιχωμάτων θα λιώσει με αποτέλεσμα ανεπιθύμητες προσμίξεις να εισέλθουν στο πλάσμα.

Σήμερα το πρώτο πρωτότυπο παραγωγής ενέργειας μέσω αντιδράσεων σύντηξης κατασκευάζεται σε ευρωπαϊκό επίπεδο στο Cadarache της Γαλλίας με την κωδική ονομασία ITER. Περισσότερες πληροφορίες στο url: www.iter.org

Παράδειγμα

Θεωρώντας την αντίδραση



και επιπλέον υποθέτοντας αρχική ενέργεια των δύο πυρήνων ίση με 1 MeV και αρχική ολική ορμή του συστήματος ίση με το 0 να υπολογιστούν οι κινητικές ενέργειες του πυρήνα He και του νετρονίου.

$$K = Q + 1 \text{ MeV} = 18.6 \text{ MeV}$$

$$AΔΕ: (1/2)m_n u_n^2 + (1/2)m_a u_a^2 = K_a + K_n = K$$

$$AΔΟ: m_a u_a = m_n u_n \Rightarrow u_a = \frac{m_n u_n}{m_a}$$

$$(1/2)m_n u_n^2 + (1/2)m_a \left(\frac{m_n u_n}{m_a}\right)^2 = K \Rightarrow K_n (1 + m_n/m_a) = K$$

$$K_n = (18.6 \text{ MeV}) / (1 + 0.25) = 14.88 \text{ MeV}$$

$$K_a = K - K_n = (18.6 - 14.88) \text{ MeV} = 3.72 \text{ MeV}$$