



Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

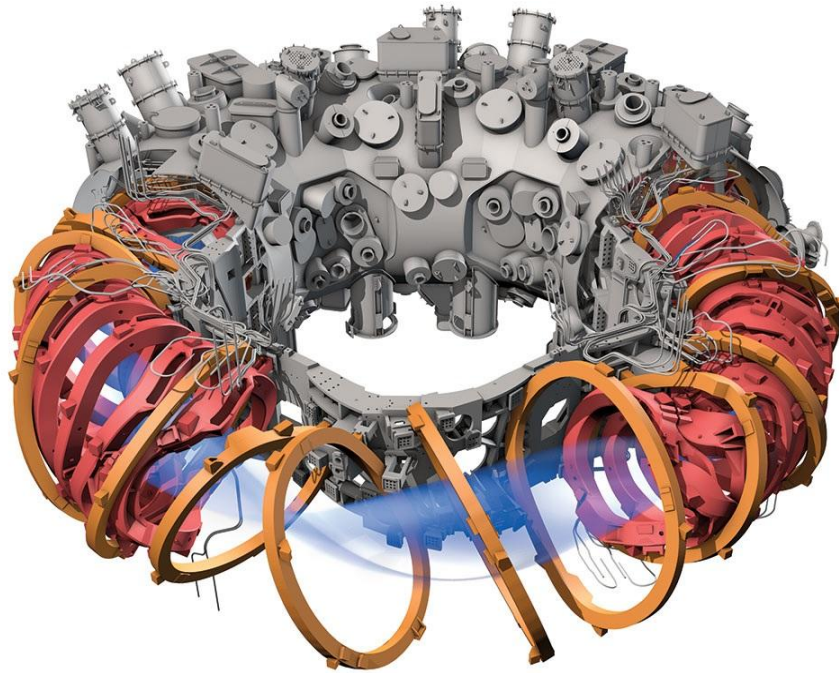
National and Kapodistrian
University of Athens

Πτυχιακή Εργασία:

Σύντηξη Ελαφρών Πυρήνων και Παραγωγή Ενέργειας σε Αντιδραστήρες Σύντηξης

Light Nuclei Fusion and Power Production in Fusion Reactors

Ντάσης Ιωάννης
Χρήστου Εμμανουήλ
Επιβλέπων Καθηγητής: κ. Γ.Α. Σουλιώτης



ΑΘΗΝΑ 2016

Περιεχόμενα:

1. Πρόλογος
2. Πυρηνική Σχάση
3. Πυρηνική Σύντηξη
 - 3.1. Τι είναι η Σύντηξη
 - 3.2. Πλεονεκτήματα Σύντηξης
 - 3.3. Προβλήματα Εφαρμογής Σύντηξης
 - 3.4. Αξιοποίηση Σύντηξης
4. Νουκλεοσύνθεση
 - 4.1. Σύντηξη στον Ήλιο και στα Άστρα
 - 4.2. Γέννηση Ενός Αστρου
 - 4.3. Ωριμα Άστρα
 - 4.4. Θάνατος Άστρου
5. Γενικές Αρχές Σύντηξης
 - 5.1. Φράγματα Σύντηξης
 - 5.2. Q-Value Πυρηνικής Αντίδρασης
 - 5.3. Ενεργός Διατομή
 - 5.3.1. Μέση Δραστικότητα
 - 5.3.2. Ρυθμός Αντίδρασης
 - 5.4. Φράγμα-Δυναμικό Coulomb
 - 5.5. Φαινόμενο Σήραγγος και Ενεργός Διατομή
 - 5.5.1. Παράγοντας Gamow
 - 5.5.2. Χαρακτηριστικά Αντίδρασης
 - 5.5.3. Αστροφυσικός Παράγοντας
6. Αντιδράσεις Σύντηξης
 - 6.1. Μελέτη Αντιδράσεων
 - 6.2. Βασικές Αντιδράσεις Σύντηξης
 - 6.2.1. Αντίδραση D-T
 - 6.2.2. Αντίδραση D-D
 - 6.2.3. Αντίδραση T-T
 - 6.3. Ανετρονική Σύντηξη
 - 6.3.1. Βασικές Αρχές
 - 6.3.2. Μετατροπής Ενέργειας
 - 6.3.3. Ανετρονικές Αντιδράσεις
7. Αντιδραστήρες Σύντηξης
 - 7.1. Κύρια Είδη Αντιδραστήρων Σύντηξης
 - 7.2. Αδρανειακός Περιορισμός
 - 7.2.1. Ιστορικά-Πρώτες Μελέτες
 - 7.2.2. Αρχές Λειτουργίας

- 7.2.3. Δέσμη Laser
- 7.2.4. Ψύξη Θαλάμου
- 7.2.5. Θέρμανση και Έκρηξη Καυσίμου
- 7.2.6. Υπολογισμός Ενέργειας
- 7.2.7. Τεχνικές Ακτινοβολήσης
- 7.2.8. Δυσκολίες Επίτευξης ICF
- 7.2.9. Χρήση ICF για Αστροφυσικές Μελέτες
- 7.3. Μαγνητικός Περιορισμός
- 7.4. Αρχές Λειτουργίας
 - 7.4.1. Θέρμανση και Συμπύεση Πλάσματος
 - 7.4.2. Αναπαραγωγή Τριτίου
 - 7.4.3. Τοιχώματα Αντιδραστήρα
- 7.5. Διαφορές
- 7.6. Stellarator
- 7.7. Tokamak
 - 7.7.1. Λειτουργία Tokamak

8. Ασφάλεια-Πυρηνικά Απόβλητα

9. Υβριδική Σύντηξη

- 9.1. Κεντρική Ιδέα
- 9.2. Αρχές Λειτουργίας
- 9.3. Κύκλος Καυσίμου

10. Επίλογος

Βιβλιογραφία

1. Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στον τομέα της Φυσικοχημείας του τμήματος Χημείας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Στο κείμενο αυτό παρουσιάζεται η σύντηξη ελαφρών πυρήνων προς παραγωγή ενέργειας σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σύντηξης, οι αρχές λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης και ορισμένοι τύποι αυτών των αντιδραστήρων. Αρχικά αναλύονται οι αρχές και οι ιδιότητες που διέπουν την πυρηνική σύντηξη και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα των αντιδραστήρων και τελικά θέματα ασφάλειας και προβληματισμοί.

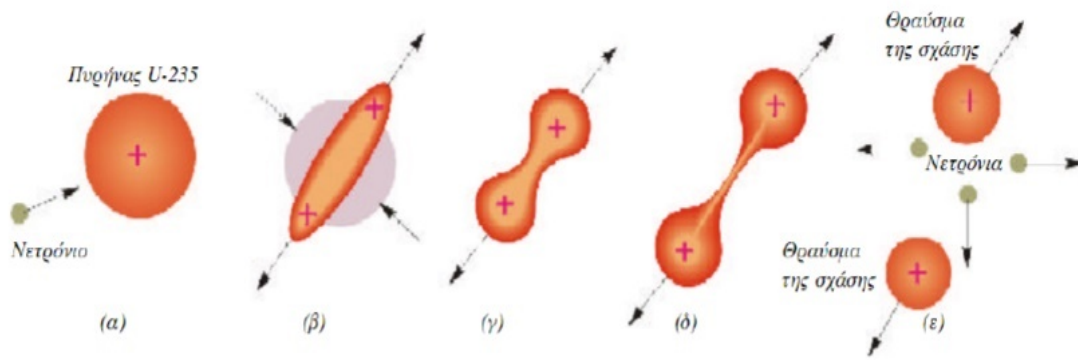
Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα μας καθηγητή κ. Γεώργιο Σουλιώτη για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη βοήθειά του και την στοχευμένη καθοδήγησή του. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ο ένας τον άλλο για την άποψη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας αλλά και καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μας.

2. Πυρηνική Σχάση

Στην πυρηνική φυσική και πυρηνική χημεία, πυρηνική σχάση είναι είτε μια αντίδραση ή ραδιενεργός διαδικασία αποσύνθεσης στην οποία ο πυρήνας ενός ατόμου χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα (ελαφρύτεροι πυρήνες). Η διαδικασία της σχάσης συχνά παράγει ελεύθερα νετρόνια και ακτινοβολία γ , ενώ απελευθερώνει ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, ακόμη και για τα ενεργειακά πρότυπα της ραδιενεργού διάσπασης.

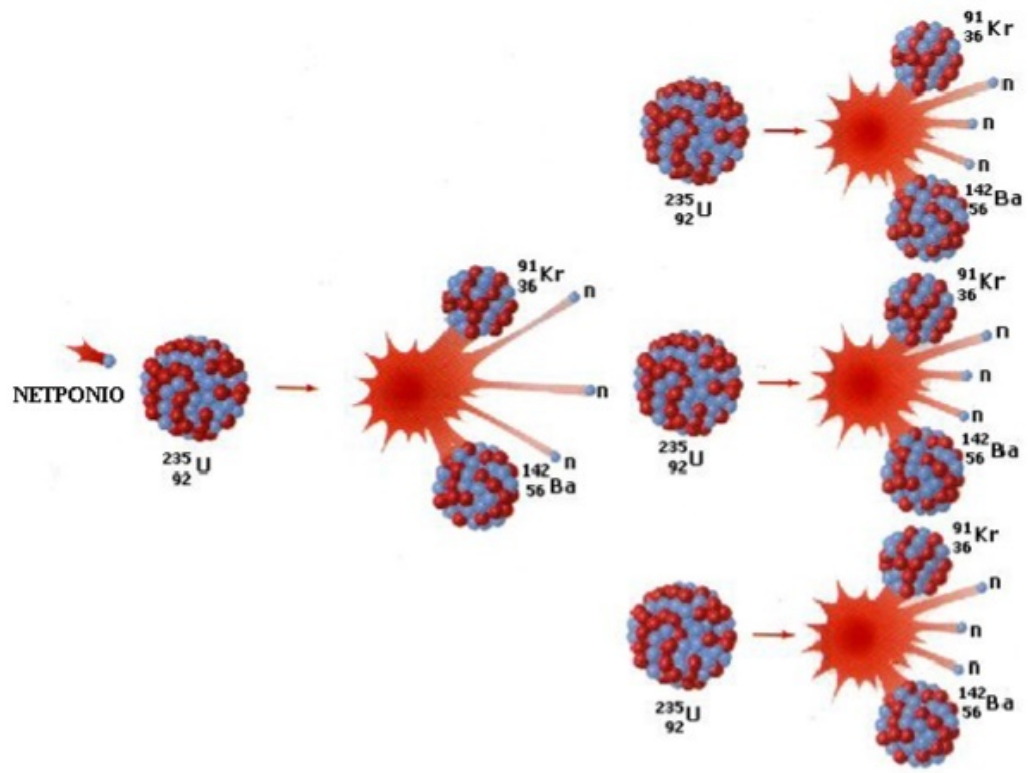
Η πυρηνική σχάση είναι πολύ σημαντική ανάμεσα στις πυρηνικές διεργασίες. Αν και θεωρείται φυσικό φαινόμενο, οι χημικοί έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στη μελέτη της σχάσης. Η ανακάλυψη της έγινε από τους χημικούς Otto Hahn και Fritz Strassman το 1938. Αυτοί έδειξαν ότι η ακτινοβόληση Ουρανίου με νετρόνια οδηγεί, όχι σε πολλά νέα στοιχεία όπως πιστευόταν, αλλά σε προϊόντα όπως το Βάριο και το Λανθάνιο. Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας Ουρανίου κόβεται στα δύο.

Ο μηχανισμός της σχάσης μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με βάση το πρότυπο υγρής σταγόνας (Liquid Drop Model), που παρομοιάζει τον πυρήνα με σφαίρα. Όταν ο πυρήνας συλλάβει ένα νετρόνιο αρχίζει και παρουσιάζει έντονες ταλαντώσεις λόγω της πρόσθετης ενέργειας (ενέργεια διέγερσης). Οι ταλαντώσεις αυτές οδηγούν σε παραμόρφωση του σφαιρικού σχήματος του πυρήνα με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα στένεμα (λαιμός) που ενώνει τους δύο λοβούς. Με την άπωση Coulomb μεταξύ πρωτονίων, οι λοβοί οδηγούνται σε αποκόλληση δημιουργώντας δύο θραύσματα, τα προϊόντα της σχάσης. Σε αυτό το σημείο έχουν παραχθεί δύο υψηλώς φορτισμένα και παραμορφωμένα θραύσματα που βρίσκονται σε επαφή το ένα με το άλλο. Η δύναμη Coulomb μεταξύ τους τα επιταχύνει και αυτά φτάνουν το 90% της τελικής κινητικής τους ενέργειας μέσα σε 10^{-20} sec. Όσο τα θραύσματα επιταχύνονται, αποκτούν πιο σφαιρικό σχήμα μετατρέποντας τη δυναμική ενέργεια παραμόρφωσης σε εσωτερική ενέργεια διέγερσης (θερμαίνονται).



Εικόνα 1: Τα στάδια της πυρηνικής σχάσης

Αυτή η ενέργεια διέγερσης αποβάλλεται με δύο τρόπους που δρουν ανταγωνιστικά: είτε με την εκπομπή νετρονίων από τα θραύσματα είτε με την εκπομπή ακτίνων γ. Τα νετρόνια που αποδεσμεύονται κατά τη σχάση ενός πυρήνα μπορούν στη συνέχεια να προκαλέσουν νέα σχάση με άλλους πυρήνες και να έχουμε μια αλυσιδωτή αντίδραση. Αυτή είναι και η βασική αρχή λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης.



Εικόνα 2: Αλυσιδωτή αντίδραση ^{235}U

3. Πυρηνική Σύντηξη

3.1. Τι είναι η Σύντηξη

Με τον όρο πυρηνική σύντηξη χαρακτηρίζεται η συνένωση πυρήνων (π.χ. Υδρογόνο, Δευτέριο, Τρίτιο, Ήλιο) προς σχηματισμό βαρύτερων.

Αντιδράσεις αυτού του είδους είναι κατά κύριο λόγο εξωενεργειακές, απελευθερώνοντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας. [1]

3.2. Πλεονεκτήματα Σύντηξης

Υπάρχουν δυο σοβαροί λόγοι που επιβάλλουν την έρευνα για την εφαρμοσμένη χρήση της σύντηξης σε ανάλογους αντιδραστήρες. Σε αντίθεση με το καύσιμο των αντιδραστήρων σχάσης, που χρειάζεται επίπονες και δαπανηρές διαδικασίες προετοιμασίας και είναι σπάνιο υλικό, το καύσιμο των πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης, δηλαδή τα ισότοπα του Υδρογόνου, το Δευτέριο και το Τρίτιο, υπάρχουν σε σχετικά άφθονες ποσότητες με προσιτό κόστος προμήθειας. Επιπλέον, η σύντηξη είναι καθαρότερη από τη σχάση από την άποψη της ραδιενέργειας καθώς τα κατάλοιπά της έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής.

Σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες σχάσης, οι αντιδραστήρες σύντηξης δεν αφήνουν πρακτικώς κατάλοιπα. Έτσι δεν υπάρχει το πρόβλημα της αποθήκευσής τους επί χιλιάδες χρόνια, πρόβλημα που επηρεάζει το μέλλον των αντιδραστήρων σχάσης, στο σημερινό τουλάχιστο επίπεδο γνώσεων. Όμως, κι ο αντιδραστήρας σύντηξης δεν είναι «καθαρός». Τα υλικά του περιβλήματος του αντιδραστήρα καθώς βάλονται από νετρόνια υψηλής κινητικής ενέργειας μετατρέπονται σε ραδιενεργά. Έτσι μελετάται μια ολόκληρη σειρά υλικών, όπως το Βανάδιο, το Αλουμίνιο, Γραφίτης, οι ανοξείδωτοι χάλυβες κ.α., για να επιλεγεί εκείνο που θα είναι τελικά το λιγότερο ραδιενεργό.

Όσο για την τύχη των αντιδραστήρων, όταν πια ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους, τα προβλήματα είναι τα ίδια στη σχάση και τη σύντηξη. Ή θα αποσυναρμολογηθούν πολύ προσεκτικά και θα αποθηκευτούν όπως τα άλλα ραδιενεργά κατάλοιπα, λύση το ίδιο δαπανηρή με τη κατασκευή, ή θα πληρωθούν με κατάλληλο σκυρόδεμα και θα μείνουν για πάντα στη θέση τους. Αν επιλεγεί μια τέτοια λύση, οι αντιδραστήρες σύντηξης έχουν ένα πραγματικά μεγάλο προσόν. Η ραδιενέργειά τους διαρκεί πολύ λιγότερο, το πολύ λίγους αιώνες κι όχι χιλιάδες χρόνια.

3.3. Προβλήματα εφαρμογής της Σύντηξης

Αν και η πυρηνική σύντηξη θεωρείται γενικώς πιο ασφαλής από τη σχάση, παραμένουν προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικό επίπεδο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικά τέτοια θέματα είναι η διαφυγή νετρονίων υψηλής ενέργειας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αποθήκευση ή

κατάργηση των ίδιων των αντιδραστήρων, το μεγάλο κόστος για τη κατασκευή τους, καθώς και θέματα που προκύπτουν σχετικά με το καύσιμο των αντιδραστήρων.

Επιπλέον, όπως και σε κάθε τομέα της Πυρηνικής Επιστήμης, υπάρχει πάντα ο φόβος για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τέτοια τεχνολογία, για παράδειγμα η χρήση της για ανάπτυξη νέων όπλων, τα οποία έχουν αποδειχθεί δυστυχώς και στην πράξη να είναι πλήρως καταστροφικά για την ανθρωπότητα.

3.4. Αξιοποίηση της Σύντηξης

Τέτοιες αντιδράσεις συνένωσης ελαφρών πυρήνων παρουσιάζουν τεράστιο θεωρητικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον, καθώς η αξιοποίηση της ενέργειας αυτής δύναται να λύσει σε μεγάλο βαθμό τα ενεργειακά προβλήματα του πλανήτη.

Παρόλα αυτά, η δέσμευση της ενέργειας της σύντηξης προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει επιτευχθεί πλήρως, παρά τη συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας στον τομέα των αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης.

Αν και μπορεί να αποτελέσει ένα από τα μεγαλύτερα τεχνολογικά και επιστημονικά επιτεύγματα του 22^{ου} αιώνα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σύντηξη απαιτούνται πολύπλοκοι αντιδραστήρες, μεγάλου κόστους, που αποτελούν μια τεράστια πρόκληση για τους επιστήμονες που τους μελετούν και τους σχεδιάζουν.

Προγράμματα όπως το HiPER, ITER, JET, καθώς και αντιδραστήρες όπως ο DEMO προσπαθούν να επιβεβαιώσουν τη βιωσιμότητα της πυρηνικής σύντηξης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

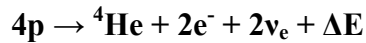
Πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η σύντηξη αποτελεί πεδίο μελέτης της Αστροφυσικής, προσφέροντας περεταίρω γνώση για τη δομή του σύμπαντος και τις διεργασίες πυρηνοσύνθεσης.

4. Νουκλεοσύνθεση

4.1. Σύντηξη στον Ήλιο και στα Άστρα

Πηγή έμπνευσης των πρωτεργατών της σύντηξης αποτελούν οι διεργασίες νουκλεοσύνθεσης που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο και στα άστρα κατά τη διάρκεια ζωής τους.

Ένα τυπικό παράδειγμα πυρηνοσύνθεσης είναι ο σχηματισμός ενός πυρήνα Ηλίου από συνένωση τεσσάρων πρωτονίων.



Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση αυτή είναι 24,69 MeV και είναι περίπου 7 φορές μεγαλύτερη από αυτή που απελευθερώνεται κατά την σχάση βαρέων πυρήνων, καθώς και πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από μια κλασσική εξώθερμη αντίδραση.

Η σύντηξη των πυρήνων Υδρογόνου θεωρείται η κύρια πηγή ενέργειας στον Ήλιο και στους σταθερούς αστέρες, ενώ με τέτοιου είδους αντιδράσεις σχηματίστηκαν και τα διάφορα στοιχεία μέχρι τη περιοχή του Σιδήρου στο σύμπαν.

Η σύνθεση των στοιχείων πέραν της περιοχής του Σιδήρου πραγματοποιείται με άλλους μηχανισμούς (κυρίως συλλήψεις νετρονίων), καθώς οι αντιδράσεις σύντηξης σε αυτή τη περιοχή είναι ενδοενεργειακές. [1]

Σε ένα αστέρι όπως ο Ήλιος μας, οι ελαφροί πυρήνες συντήκονται για να σχηματίσουν βαρύτερους πυρήνες με την απελευθέρωση αρκετών MeV ενέργειας ανά αντίδραση σύντηξης. Ο Ήλιος έχει παράξει ενέργεια ακτινοβολίας σε ποσοστό περίπου 4×10^{26} W για τα τελευταία περίπου 5 δισεκατομμύρια χρόνια. Όλη αυτή η ενέργεια προέρχεται από τις αντιδράσεις σύντηξης που συμβαίνουν στο θερμό, πυκνό πυρήνα του Ηλίου.

Τα άστρα αποτελούνται κυρίως από πρωταρχική ύλη που δημιουργήθηκε στα πρώτα λίγα λεπτά μετά το "Big Bang". Αυτή η πρωταρχική ύλη είναι πάνω από 90% Υδρογόνο, ένα μικρό ποσοστό Ήλιο και λιγότερο από 1% των βαρύτερων στοιχείων.

Στα αστέρια το Υδρογόνο «καίγεται» σε Ήλιο, το οποίο, όπως υπάρχει το άστρο, μετατρέπεται σε όλο και βαρύτερα νουκλίδια έως $A \sim 56$ (Σίδηρος και Νικέλιο), μετά το οποίο οι αντιδράσεις σύντηξης δεν είναι εξώθερμες

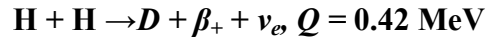
4.2. Γέννηση ενός Άστρου

Η γέννηση ενός άστρου αρχίζει με τη βαρύτητα να έλκει μαζί διαστρικό αέριο, που αποτελείται κυρίως από Υδρογόνο με μικρές ποσότητες Ηλίου και ίχνη από τα βαρύτερα νουκλίδια, για να σχηματίσουν ένα πυκνό σύννεφο ύλης. Καθώς η βαρύτητα

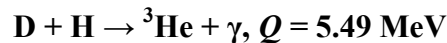
τραβά τα άτομα μαζί, βαρυτική δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, θερμαίνοντας έτσι το καταρρέον νέφος αερίου. Σε κάποιο σημείο, η θερμοκρασία και η πυκνότητα πυρήνων στο κέντρο της καταρρέουσας μάζας γίνονται αρκετά υψηλές ώστε αρχίζουν να συμβαίνουν αντιδράσεις σύντηξης.

Τελικά, η πίεση του θερμού αερίου, που θερμαίνεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, εξισορροπείται με τις βαρυτικές δυνάμεις και μια προσωρινή κατάσταση ισορροπίας καθιερώνεται καθώς το Υδρογόνο μετατρέπεται σε Ήλιο. Αυτή η κατάσταση, στην οποία βρίσκεται και ο Ήλιος, μπορεί να υπάρχει για αρκετά δισεκατομμύρια χρόνια. Κατά τη διάρκεια αυτής της αρχικής ζωής ενός άστρου, το Υδρογόνο συντήκεται για να παράξει ${}^4\text{He}$.

Η κύρια ακολουθία των αντιδράσεων σύντηξης που μετατρέπει τα ιόντα Υδρογόνου σε πυρήνες ηλίου αρχίζει με



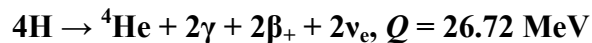
Το παραγόμενο Δευτέριο ταχύτατα απορροφά ένα πρωτόνιο



Το ${}^3\text{He}$ δεν μετατρέπεται απορροφώντας ένα πρωτόνιο, δεδομένου ότι το προϊόν ${}^4\text{Li}$ σπάει γρήγορα σε ${}^3\text{He}$ και ένα πρωτόνιο. Αντίθετα το ${}^3\text{He}$ μεταναστεύει μέσα στο πυρήνα μέχρι να συναντήσει έναν άλλο πυρήνα ${}^3\text{He}$, όπου



Το καθαρό αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας τριών σταδίων είναι η μετατροπή των τεσσάρων πρωτονίων σε ${}^4\text{He}$, δηλαδή

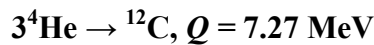


4.3. Ωριμα Άστρα

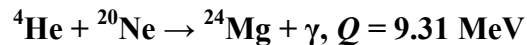
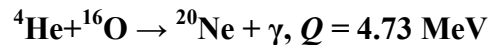
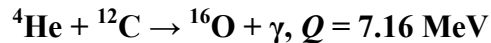
Μόλις το Υδρογόνο στον πυρήνα ενός άστρου έχει σχεδόν καταναλωθεί, αφήνοντας κυρίως ${}^4\text{He}$, η φάση καύσης Ηλίου στη ζωή ενός άστρου αρχίζει. Με συρρίκνωση της παραγωγής ενέργειας από τη σύντηξη Υδρογόνου, η πίεση του αερίου στον πυρήνα μειώνεται και η βαρύτητα προκαλεί την συρρίκνωση του πυρήνα. Καθώς ο πυρήνας συρρικνώνεται, η θερμοκρασία αυξάνεται καθώς βαρυτική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Τελικά, η θερμοκρασία φτάνει στο σημείο όπου η αυξημένη θερμική κίνηση των πυρήνων Ηλίου υπερνικά τις απωθητικές δυνάμεις Coulomb μεταξύ αυτών, και η σύντηξη Ηλίου ξεκινά.

Η εξωτερική πίεση του αερίου που παράγεται από αυτή τη νέα πηγή ενέργειας σύντηξης θεσπίζει μια νέα ισορροπία με την εσωτερική δύναμη της βαρύτητας κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης της ζωής ενός άστρου. Η νέα υψηλότερη θερμοκρασία πυρήνα

θερμαίνει το αέριο που περιβάλλει τον πυρήνα και προκαλεί το εξωτερικό στρώμα του αερίου να επεκταθεί και να αυξήσει το μέγεθος του άστρου. Καθώς το αστέρι διαστέλλεται, μειώνεται η θερμοκρασία της επιφάνειας και το αστέρι γίνεται ένας κόκκινος γίγαντας. Αν και η θερμοκρασία της επιφάνειας μειώνεται, η μεγαλύτερη επιφάνεια επιτρέπει σε περισσότερη ενέργεια ακτινοβολίας να διαφύγει στο διάστημα όπως απαιτείται για να ισορροπήσει την υψηλότερη παραγωγή ενέργειας στον πυρήνα. Το πρώτο βήμα για το σχηματισμό βαρύτερων στοιχείων από το ${}^4\text{He}$ δεν είναι, όπως θα ήταν αναμενόμενο, η συγχώνευση των δύο πυρήνων ${}^4\text{He}$ για να σχηματίσουν ${}^8\text{Be}$. Η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο στο ${}^8\text{Be}$ είναι μικρότερη από εκείνη για δυο ${}^4\text{He}$. Η σύντηξη των δύο πυρήνων ${}^4\text{He}$ θα μπορούσε να παράγει ${}^8\text{Be}$ σε μια διεγερμένη κατάσταση συντονισμού που θα είχε μια αρκετά μεγάλη (αν και ακόμα σύντομη) ζωή, μέσα στον πλούσιο σε ${}^4\text{He}$ πυρήνα, ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για ένα τρίτο πυρήνα ${}^4\text{He}$ να απορροφηθεί από ένα τέτοιο διεγερμένο άτομο ${}^8\text{Be}$ για να σχηματίσουν ${}^{12}\text{C}$. Στην πραγματικότητα, η διαδρομή προς βαρύτερους πυρήνες αρχίζει με την τριμερή αντίδραση



Με την παραγωγή ${}^{12}\text{C}$ βαρύτερα στοιχεία σχηματίζονται μέσω σύντηξης με ${}^4\text{He}$



Όταν το καύσιμο ${}^4\text{He}$ έχει εξαντληθεί, το αστέρι και πάλι συρρικνώνεται και αυξάνει τη θερμοκρασία του πυρήνα του από τη μετατροπή της βαρυτικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια. Όταν ο πυρήνας γίνεται αρκετά θερμός, τα βαρύτερα στοιχεία αρχίζουν να συντήκονται, σχηματίζοντας ακόμα βαρύτερα στοιχεία και δημιουργώντας πρόσθετη πίεση για να αντισταθμίσει τις αυξημένες δυνάμεις βαρύτητας.

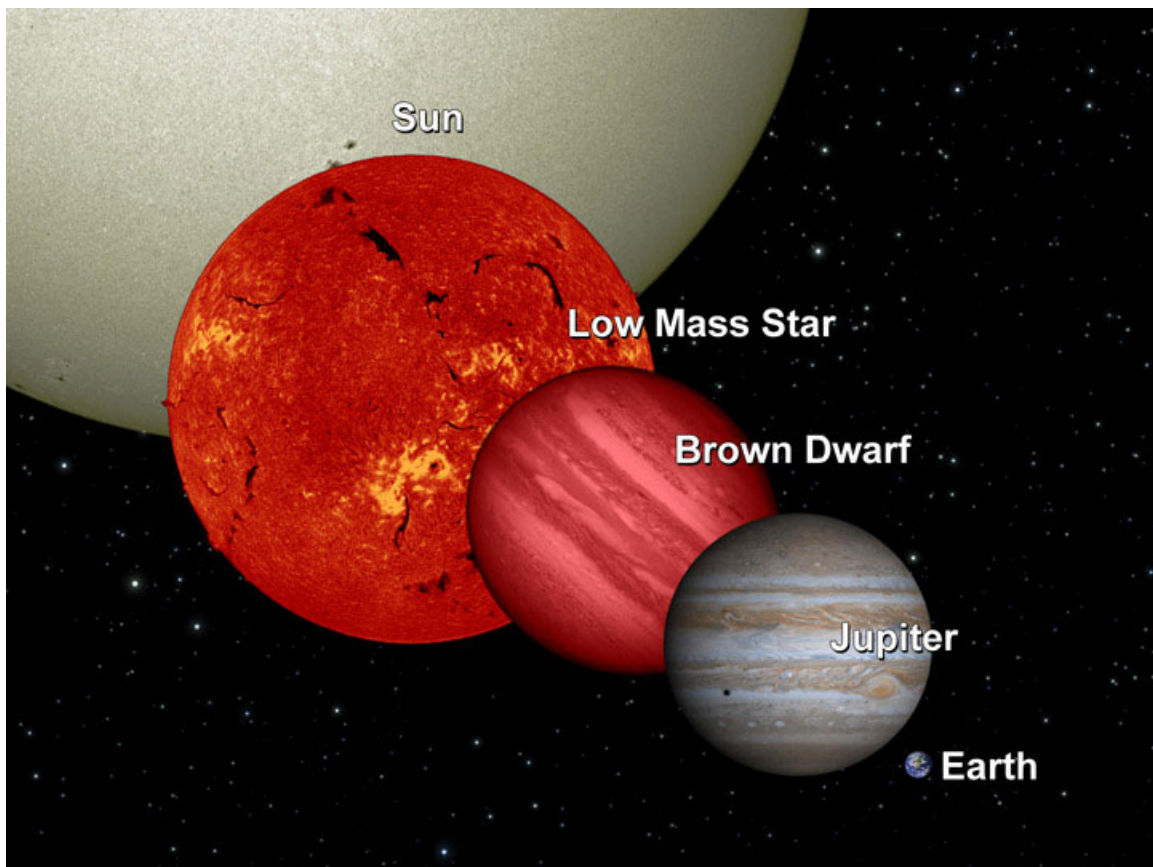
Όπως ένα αστέρι γεννά δημιουργεί βαρύτερους πυρήνες και το αστέρι συρρικνώνεται για να δημιουργήσει συνεχώς αυξανόμενες θερμοκρασίες πυρήνα για να διατηρηθεί η σύντηξη των βαρύτερων πυρήνων. Συχνά, η γήρανση αστερών αποκτά δομή κρεμμυδιού, μετά τη φάση καύσης του Ηλίου έχει ένα πυρήνα Οξυγόνο- Νέον, που περιβάλλεται από ένα στρώμα Άνθρακα, και αυτό από ένα Ηλίου, με το σύνολο να περιβάλλεται από ένα παχύ δέρμα Υδρογόνου. Καθώς η θερμοκρασία του πυρήνα αυξάνει, βαρύτερα στοιχεία δημιουργούνται. Το Νέον συνδυάζεται για να σχηματίσει Μαγνήσιο, το οποίο με τη σειρά του για να σχηματίσει Πυρίτιο, και στη συνέχεια, με τη σειρά του, το Σίδηρο και Νικέλιο.

4.4. Θάνατος Άστρου

Η παραγωγή της ενέργειας σύντηξης παύει σε ένα αστέρι, όταν οι περισσότεροι από τους πυρήνες έχουν μετατραπεί σε νουκλίδια κοντά στην κορυφή της BE/A ($A \sim$

56). Σε αυτό το σημείο, η παραγωγή ενέργειας αρχίζει να μειώνεται, και δεν υπάρχουν πλέον δυνατές συντήξεις ώστε να αντισταθούν στην περαιτέρω βαρυτική κατάρρευση. Το αποτέλεσμα είναι ένα πολύ ασταθές αστέρι. Τι θα συμβεί στη συνέχεια, εξαρτάται από τη μάζα του άστρου. Ένα λιγότερο βαρύ αστέρι, όπως ο Ήλιος, συρρικνώνεται αργά, μετατρέποντας περισσότερη βαρυτική ενέργεια σε θερμική ενέργεια, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του μέχρι να γίνει ένας λευκός νάνος. Η συρρίκνωση λαμβάνει χώρα όταν τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να έλθουν πιο κοντά από τις βαρυτικές δυνάμεις. Το αστέρι εξακολουθεί να ακτινοβολεί τη θερμική ενέργεια του και τελικά γίνεται ένας καφέ νάνος.

Περισσότερο ογκώδη αστέρια, ωστόσο, δύναται να υποβληθούν σε πολύ πιο δραματικό τέλος. Όταν η ακτινοβολία και η πίεση των αερίων δεν μπορούν πλέον να εξουδετερώσουν τις δυνάμεις βαρύτητας, το αστέρι, μέσα σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου, καταρρέει δημιουργώντας έντονα κρουστικά κύματα πίεσης που παράγουν τεράστιες θερμοκρασίες. Σε μια τελευταία έκρηξη παραγωγής ενέργειας από την ταχεία τήξη των άκαυστων καυσίμων σε εξωτερικά στρώματα του άστρου, το αστέρι καταρρέει και γίνεται ένα σουπερνόβα, του οποίου η παραγωγή ακτινοβολίας μπορεί να είναι μεγαλύτερη από εκείνη ενός ολόκληρου γαλαξία.



Εικόνα 3: Σύγκριση μεγέθους των σταδίων ζωής ενός άστρου

5. Γενικές Αρχές Σύντηξης [3]

5.1. Φράγματα της Σύντηξης

Για να επιτύχουμε σύντηξη δυο πυρήνων, πρέπει να ξεπεράσουμε την απωστική δύναμη Coulomb που ασκείται ανάμεσά τους και να τους φέρουμε σε τέτοια απόσταση r ώστε να υπερσχύσει η πυρηνική δύναμη και να γίνει η σύντηξη. Δηλαδή πρέπει να ξεπεράσουμε το λεγόμενο Φράγμα Coulomb, το οποίο θα μελετήσουμε παρακάτω.

5.2. Q-value Πυρηνικής Αντίδρασης

Σύμφωνα με την γνωστή εξίσωση του Einstein, μπορούμε να υπολογίσουμε τη Θερμότητα που παράγεται σε μια πυρηνική αντίδραση όπου η ολική μάζα των προϊόντων είναι χαμηλότερη αυτής των αντιδρώντων

$$Q = (\Sigma m_i - \Sigma m_f)c^2$$

Μπορούμε να ταυτοποιήσουμε τις εξώθερμες αντιδράσεις γνωρίζοντας τις Ενέργειες Συνδέσεως (Binding Energy, B.E) των πυρήνων που συμμετέχουν, καθώς για σταθερούς πυρήνες (Δέσμια Συστήματα) υπάρχει διαφορά μάζας μεταξύ των διαχωρισμένων συστατικών του και του δέσμιου πυρήνα

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - m(A,Z)$$

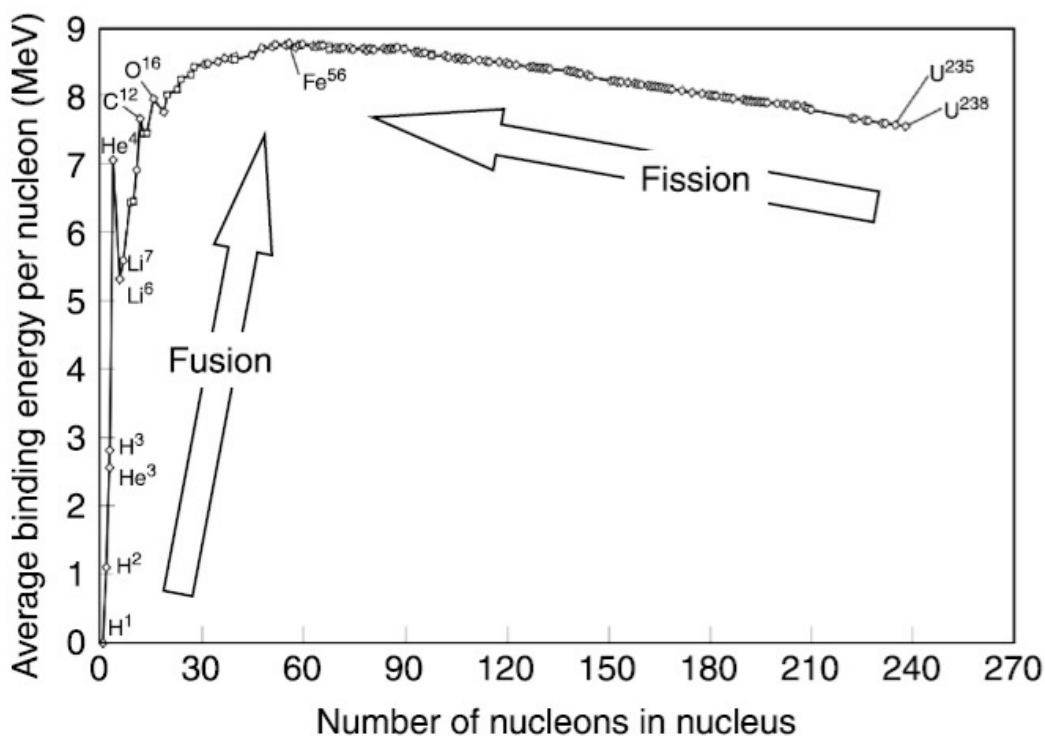
Οπότε υπολογίζεται B.E

$$B.E = \Delta mc^2$$

Επομένως και η Q

$$Q = \Sigma(B.E_f) - \Sigma(B.E_i)$$

Η πηγή της πυρηνικής ενέργειας βασίζεται σε αυτό το έλλειμμα μάζας. Ελαφροί πυρήνες συντήκονται προς βαρύτερους απελευθερώνοντας ενέργεια, ενώ βαρύτεροι πυρήνες διασπώνται προς ελαφρύτερους.



Εικόνα 4: Γραφική παράσταση Ενέργειας Συνδέσεως συναρτήσει ατομικού αριθμού

5.3. Ενεργός Διατομή

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη μελέτη των αντιδράσεων σύντηξης είναι η Ενεργός Διατομή σ , η οποία εκφράζει την πιθανότητα της αντίδρασης για το ζεύγος των σωματιδίων-πυρήνων που συμμετέχουν.

Για δυο σωματίδια (1) και (2) με σχετική ταχύτητα u , το $\sigma_{12}(u)$ εκφράζει τον αριθμό των αντιδράσεων ανά πυρήνα ανά μονάδα χρόνου. Για πυκνότητα «στόχου» n_2 , το γινόμενο $n_2\sigma(u)u$ εκφράζει την πιθανότητα αντίδρασης ανά μονάδα χρόνου

5.3.1. Μέση Δραστικότητα $\langle\sigma u\rangle$

Ομοίως, η $\langle\sigma u\rangle = \int_0^\infty \sigma(u)uf(u)du$, όπου $f(u)$ η κατανομή ταχυτήτων αποτελεί σημαντικό παράγοντα μελέτης της σύντηξης, καθώς εκφράζει τη πιθανότητα αντίδρασης ανά μονάδα χρόνου ανά πυκνότητα

5.3.2. Ρυθμός Αντίδρασης

Επειδή στις αντιδράσεις σύντηξης χρησιμοποιούμε μίγματα των δυο σωματιδίων, είναι χρήσιμη η έννοια του Ρυθμού Αντίδρασης ανά μονάδα όγκου, που δίνεται μέσω της εξίσωσης

$$R_{12} = \langle \sigma v \rangle n_1 n_2 / (1 + \delta_{12})$$

Το δ του Kronecker εισάγεται για να καλυφθούν αντιδράσεις μεταξύ παρόμοιων σωματιδίων, καθώς για $l \neq 2$, $\delta_{12} = 0$, ενώ για $l = 2$, $\delta_{12} = 1$.

5.4. Φράγμα-Δυναμικό Coulomb

Το δυναμικό Coulomb που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να έρθουν σε επαφή οι πυρήνες δίνεται από την εξίσωση

$$V_C = k_c Z_1 Z_2 e^2 / r$$

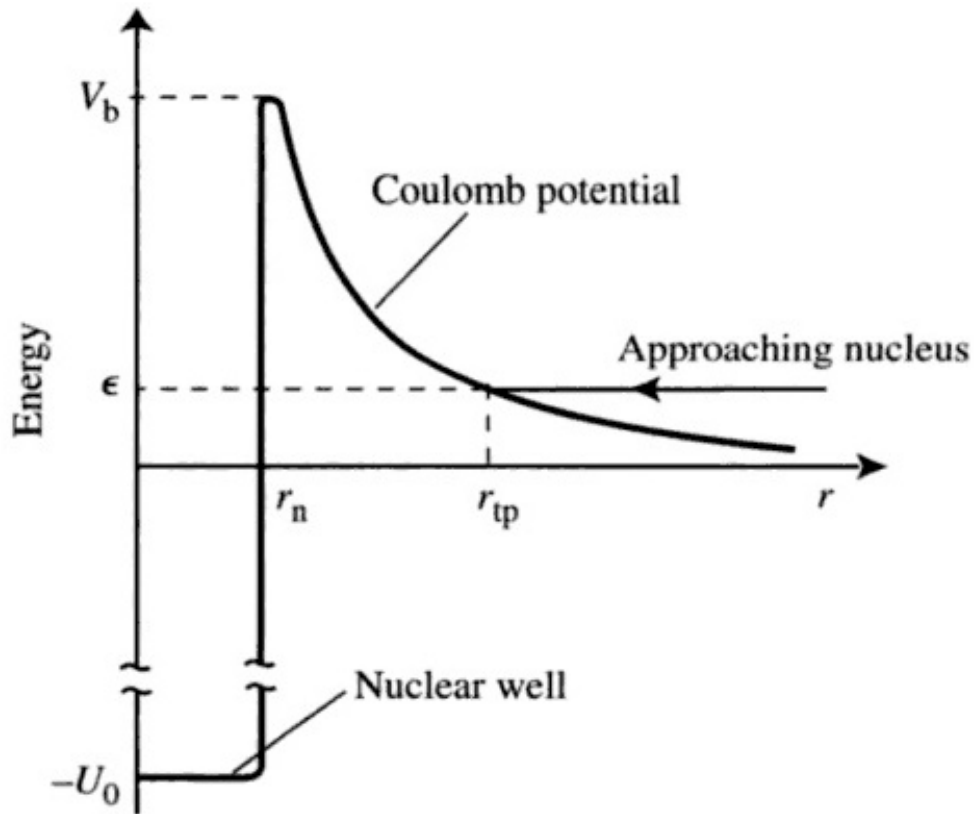
όπου k_c η σταθερά Coulomb, Z_1 και Z_2 οι ατομικοί αριθμοί των πυρήνων, e το φορτίο ηλεκτρονίου και r η απόσταση των δύο πυρήνων.

Το δυναμικό Coulomb είναι απωστικό για τιμές

$$r > r_n = 1,44 * 10^{-13} (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \text{cm}$$

Επομένως μπορούμε να υπολογίσουμε το Ύψος του φράγματος $V_b = V_C(r_n)$.

Σύμφωνα με την κλασική μηχανική, πρέπει να ξεπεράσουμε το φράγμα Coulomb ώστε οι δυο πυρήνες να έρθουν σε επαφή. Στην πραγματικότητα, όμως, μέσω φαινόμενου σήραγγος είναι δυνατό να βρεθούμε στο φρέαρ δυναμικού όπου ο νέος πυρήνας είναι σταθερός, με ενέργεια $E < V_C$.



Εικόνα 5: Γραφική παράσταση του Δυναμικού μεταξύ δυο φορτισμένων σωματιδίων συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης. Διακρίνονται το φράγμα Coulomb, το φρέαρ δυναμικού και το Turning Point μεταξύ κλασσικής και κβαντικής μηχανικής

5.5. Φαινόμενο Σήραγγος και Ενεργός Διατομή

Η πιθανότητα του φαινομένου σήραγγος εκφράζεται ως

$$\sigma_t = \sigma_{\text{geom}} * T * R$$

όπου $\sigma_{\text{geom}} = \lambda^2 = (h/\mu v)^2$, με λ το μήκος κύματος de-Broglie και μ η ανηγμένη μάζα, T η διαπερατότητα του φράγματος και R η πιθανότητα σύντηξης με την επαφή των πυρήνων.

5.5.1. Παράγοντας Gamow

Όσον αφορά τη διαπερατότητα του φράγματος T , συχνά προσεγγίζεται ως T_G , γνωστή ως παράγοντας Gamow

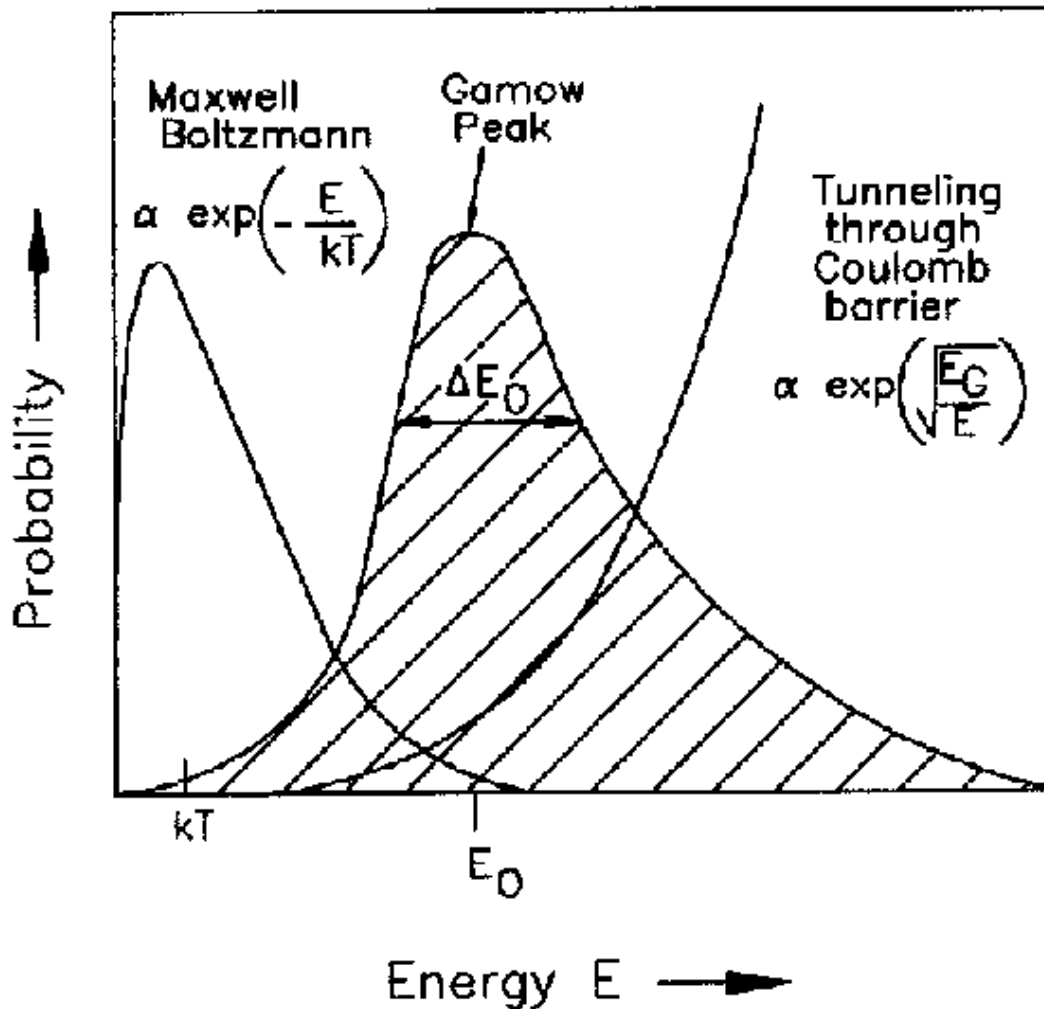
$$T_G = \exp[-(E_G/E)^{1/2}]$$

όπου E_G η ενέργεια Gamow, ίση με

$$E_G = (\pi \alpha_f Z_1 Z_2)^2 2\mu c^2$$

Από την έκφραση της διαπερατότητας και της E_G είναι φανερό ότι η πιθανότητα tunneling μειώνεται με τον ατομικό αριθμό (και φυσικά με τη μάζα). Έτσι εξηγείται το γεγονός ότι η μελέτη αντιδράσεων σύντηξης για μελλοντική παραγωγή ενέργειας αφορά ελαφρούς πυρήνες.

Επιπλέον, η πιθανότητα tunneling αυξάνεται με την E του πυρήνα. Παρόλα αυτά, επειδή η πιθανότητα ένα σωματίδιο να έχει μεγάλη ενέργεια μετά από κάποια θερμοκρασία μειώνεται, σύμφωνα με τη κατανομή Maxwell-Boltzmann, μελέτες του Gamow έδειξαν ότι πυρήνες που όντως υπόκεινται σύντηξη βρίσκονται σε ένα στενό παράθυρο ενεργειών/θερμοκρασίας, το λεγόμενο παράθυρο Gamow. [4]



Εικόνα 5: Γραφική παράσταση του Παράγοντα Gamow. Παρατηρείται μέγιστη πιθανότητα tunneling σε συγκεκριμένο εύρος ενεργειών. [5]

5.5.2. Χαρακτηριστικά Αντίδρασης R

Ο παράγοντας R περιέχει ουσιαστικά όλη τη φυσική πίσω από μια συγκεκριμένη αντίδραση, ενώ η τάξη μεγέθους του επηρεάζεται σημαντικά από το είδος της αλληλεπίδρασης της αντίδρασης. Στις περισσότερες αντιδράσεις, όμως, η διαφοροποίηση του R είναι πολύ μικρή σε σχέση με το εύρος τιμών του παράγοντα Gamow.

5.5.3. Αστροφυσικός Παράγοντας S

Τελικώς, η ενεργός διατομή του φαινομένου σήραγγος μπορεί να γραφεί ως

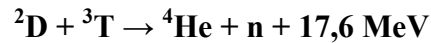
$$\sigma(E)=[S(E)/E]\exp[-(E_G/E)^2]$$

όπου S(E) ο λεγόμενος αστροφυσικός παράγοντας S, ο οποίος εξαρτάται ελαφρώς από την ενέργεια.

6. Αντιδράσεις Σύντηξης

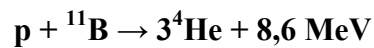
6.1. Μελέτη Αντιδράσεων

Η κύρια αντίδραση που μελετάται για παραγωγή ενέργειας από σύντηξη είναι η



επειδή είναι η πιο εύκολα πραγματοποιήσιμη, οπότε και η πιο πιθανή για μελλοντική παραγωγή ενέργειας.

Στον τομέα των αντιδράσεων υπάρχει μελέτη προς αναζήτηση αξιοποιήσιμων, εύκολα πραγματοποιήσιμων αντιδράσεων που μπορούν να συντηρήσουν θετική απόδοση ενέργειας στον αντιδραστήρα. Επιπλέον, μελετώνται ανετρονικές αντιδράσεις οι οποίες λύνουν το κύριο πρόβλημα των αντιδραστήρων σύντηξης, το οποίο είναι η «διαρροή» νετρονίων υψηλής ενέργειας, όπως το νετρόνιο της παραπάνω αντίδρασης. Παράδειγμα τέτοιας αντίδρασης είναι η



Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης αντιδράσεις αστροφυσικής σημασίας όπως ο κύκλος p-p, ο κύκλος CNO και αντιδράσεις C-C καθώς αποτελούν αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ζωής ενός άστρου.

	Q (MeV)	$\langle Q_\nu \rangle$ (MeV)	$S(0)$ (keV barn)	$\epsilon_G^{1/2}$ (keV ^{1/2})
<i>Main controlled fusion fuels</i>				
$D + T \rightarrow \alpha + n$	17.59		1.2×10^4	34.38
$D + D \rightarrow \begin{cases} T + p \\ {}^3\text{He} + n \\ \alpha + \gamma \end{cases}$	4.04 3.27 23.85		56 54 4.2×10^{-3}	31.40 31.40 31.40
$T + T \rightarrow \alpha + 2n$	11.33		138	38.45
<i>Advanced fusion fuels</i>				
$D + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + p$	18.35		5.9×10^3	68.75
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He}$	4.02		5.5×10^3	87.20
$p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2\alpha$	17.35		80	88.11
$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$	8.68		2×10^5	150.3
<i>The p-p cycle</i>				
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	1.44	0.27	4.0×10^{-22}	22.20
$D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.49		2.5×10^{-4}	25.64
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + 2p$	12.86		5.4×10^3	153.8
<i>CNO cycle</i>				
$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	1.94		1.34	181.0
$[{}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu + \gamma]$	2.22	0.71	—	—
$p + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	7.55		7.6	181.5
$p + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	7.29		3.5	212.3
$[{}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu + \gamma]$	2.76	1.00	—	—
$p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \alpha$	4.97		6.75×10^4	212.8
<i>Carbon burn</i>				
${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow \begin{cases} {}^{23}\text{Na} + p \\ {}^{20}\text{Ne} + \alpha \\ {}^{24}\text{Mg} + \gamma \end{cases}$	2.24 4.62 13.93		8.83×10^{19}	2769

The Q value includes both positron disintegration energy and neutrino energy, when relevant. The quantity $\langle Q_\nu \rangle$ is the average neutrino energy. As usual in nuclear physics, cross sections are expressed in barn; 1 barn = 10^{-24} cm².

Εικόνα 6: Διάφορες αντιδράσεις σύντηξης και τιμές Q -Value, S και E_G

6.2. Βασικές Αντιδράσεις Σύντηξης

Οι αντιδράσεις που μελετώνται κατά κύριο λόγο σε πολλές από τις εγκαταστάσεις για τη μελέτη της σύντηξης, όπως ITER, NIF, JET κ.α, αφορούν την ένωση ισοτόπων του Υδρογόνου.

Επειδή ο ατομικός αριθμός αυτών των ισοτόπων είναι $Z=1$, οι αντιδράσεις του παρουσιάζουν χαμηλές τιμές E_G , οπότε παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα διαπέρασης του φράγματος Coulomb μέσω tunneling. Επιπλέον, έχουν σχετικά υψηλές τιμές S , που μεταφράζεται σε υψηλές τιμές σ για ενέργειες 10 keV, ειδικά για την αντίδραση D-T.

6.2.1 Αντίδραση D-T

Η σύντηξη D-T παρουσιάζει την μεγαλύτερη ενεργό διατομή, η οποία μεγιστοποιείται στα 64 keV, μια σχετικά μέτρια ενέργεια συγκριτικά με άλλες αντιδράσεις, με τιμή 5 barn.



Έχοντας $Q=17.6$ MeV βρίσκεται πρώτη στην οικογένεια των αντιδράσεων σύντηξης ισοτόπων του Υδρογόνου, ενώ η διαθεσιμότητα Δευτερίου και Τριτίου στη Γη, καθώς και οι προηγούμενοι παράγοντες την καθιστούν την υπ' αριθμόν ένα αντίδραση σύντηξης για μελλοντική παραγωγή ενέργειας.

6.2.2. Αντίδραση D-D

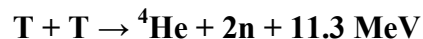
Οι δύο αντιδράσεις D-D είναι ισοπίθανες, ενώ η μία δεν περιέχει νετρόνια στα προϊόντα της.



Στο εύρος ενεργειών 10-100 KeV, και οι δύο αντιδράσεις παρουσιάζουν ενεργό διατομή περίπου 100 φορές μικρότερη από αυτή της αντίδρασης D-T. Λόγω χαμηλής ενεργού διατομής και χαμηλής ενεργειακής απόδοσης, αυτές οι αντιδράσεις υστερούν των αντίστοιχων βέλτιστων αντιδράσεων της κατηγορίας τους.

6.2.3. Αντίδραση T-T

Με ενεργό διατομή συγκρίσιμη με αυτή των αντιδράσεων D-D, η αντίδραση T-T



φαίνεται αρχικά να αποτελεί μία καλή εναλλακτική λύση, όμως με μια πιο προσεκτική ματιά συνειδητοποιεί κανείς ότι τα τρία προϊόντα της αντίδρασης δεν έχουν συγκεκριμένες ενέργειες συσχετισμένες με αυτά, καθώς οι ενέργειες αυτές δεν καθορίζονται μόνο από νόμους διατήρησης. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα Τριτίου είναι μικρότερη αυτής του Δευτερίου, ενώ η παραγωγή του αρκετά πιο δαπανηρή.

6.3. Ανετρονική Σύντηξη

6.3.1. Βασικές Αρχές

Η Ανετρονική Σύντηξη αποτελεί είδος σύντηξης όπου νετρόνια μεταφέρουν λιγότερο από 1% της συνολικά παραγόμενης ενέργειας, όταν οι πιο συχνές αντιδράσεις σύντηξης ελευθερώνουν μέχρι και το 80% της ενέργειάς τους υπό μορφή νετρονίων. [6]

Ο λόγος μελέτης της βιωσιμότητας της ανετρονικής σύντηξης είναι διότι μπορεί να μειώσει τα προβλήματα που σχετίζονται με τα νετρόνια που εκπέμπονται κατά τη σύντηξη, όπως ο ιοντισμός και η νετρονική ενεργοποίηση, τα οποία καθιστούν το περιβάλλον του αντιδραστήρα επικίνδυνα ραδιενεργό.

Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα μείωσης του κόστους παραγωγής ενέργειας από σύντηξη μετατρέποντας την ενέργεια της αντίδρασης κατευθείαν σε ηλεκτρική, αν και οι συνθήκες της ανετρονικής σύντηξης είναι πολύ πιο απαιτητικές από τη σύντηξη D-T.

6.3.2. Μετατροπή Ενέργειας

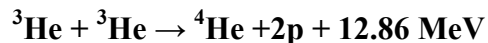
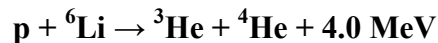
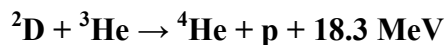
Κατά την ανετρονική σύντηξη εκπέμπεται ενέργεια υπό τη μορφή φορτισμένων σωματιδίων, γεγονός που καθιστά δυνατή την άμεση μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι δύο μέθοδοι μετατροπής είναι η Ηλεκτροστατική Μετατροπή και η Φωτοηλεκτρική Μετατροπή.

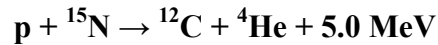
Η Ηλεκτροστατική Μετατροπή χρησιμοποιεί την κίνηση αυτών των φορτισμένων σωματιδίων ώστε να παράγει δυναμικό.

Η Φωτοηλεκτρική Μετατροπή βασίζεται στο γεγονός ότι κατά την ανετρονική σύντηξη, μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε φωτόνια από την επιτάχυνση και επιβράδυνση των φορτισμένων σωματιδίων. Τα φωτόνια αυτά μπορούν να βρίσκονται στο φάσμα ορατού, UV, IR και στο φάσμα ακτινών X. Η ενέργεια των ακτινών X μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου, παράγοντας ηλεκτρόνια κατά τη διέλευσή τους μέσα από μια διάταξη αγώγιμων υλικών. [7]

6.3.3. Ανετρονικές Αντιδράσεις

Από τις αντιδράσεις σύντηξης χωρίς νετρόνια ως προϊόντα, αυτές με τη μεγαλύτερη ενεργό διατομή είναι οι





και συχνά αποκαλούνται Προχωρημένα Καύσιμα (Advanced Fuel), σε σύγκριση με τις κλασσικές αντιδράσεις σύντηξης που μελετώνται, οι οποίες ονομάζονται Καύσιμα Πρώτης Γενιάς (First Gen Fuel).

Παρόλο την υψηλή τους ενεργό διατομή, συναντούμε προβλήματα σε πολλές από αυτές τις αντιδράσεις. Όπως είδαμε, κυρίως μελετώνται οι αντιδράσεις D- ${}^3\text{He}$, p- ${}^6\text{Li}$, p- ${}^7\text{Li}$ και κυρίως η p- ${}^{11}\text{B}$, το οποίο βέβαια δεν σημαίνει ότι για αυτές δεν συναντάμε δυσκολίες στην πραγματοποίησή τους.

Το κύριο πρόβλημα των ανετρονικών αντιδράσεων έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται ενέργεια της τάξης των 100 keV για να επιτύχουμε ενεργό διατομή η οποία να πλησιάζει αυτή της αντίδρασης D-T στα 10 keV!

Επιπλέον, όσον αφορά την αντίδραση D- ${}^3\text{He}$, την οποία αρκετοί μέχρι πρόσφατα θεωρούσαν την πιο πιθανή να αποτελέσει μελλοντικό καύσιμο της σύντηξης [8], συναντάμε δύο προβλήματα. Το πρώτο αφορά την διαθεσιμότητα του ${}^3\text{He}$ στη Γη, καθώς ως πρωτόγονο νουκλίδιο αποτελεί μόλις το 0.000137% του συνολικού He στη Γη, ενώ θα χρειαζόταν τεράστιες ποσότητες ετησίως για να συντηρήσουν παραγωγή ενέργειας. [9]

Το δεύτερο αφορά την παραγωγή μερικών νετρονίων μέσω αναπόφευκτων παράπλευρων αντιδράσεων D-D και D-T, οι οποίες μπορούν βέβαια να ελαχιστοποιηθούν αυξάνοντας την αναλογία ${}^3\text{He}$ στο καύσιμο, αλλά οδηγεί σε κατανάλωση περισσότερου ${}^3\text{He}$ και απαιτεί θερμοκρασία μεγαλύτερη των 50 keV στις οποίες μελετάται η αντίδραση, η οποία είναι ήδη υψηλή συγκριτικά με τα καύσιμα πρώτης γενιάς. [10]

Το ${}^6\text{Li}$ και ${}^7\text{Li}$ είναι τα δύο κύρια ισότοπα του Li στη Γη, απαντώνται σε μεγάλες ποσότητες και αποτελούν σταθερούς πυρήνες, οπότε μελετάται έντονα η χρήση τους ως ανετρονικά καύσιμα. Η αντίδραση p- ${}^6\text{Li}$, αν και δεν φαίνεται να παράγει μεγάλη ενέργεια, μπορεί σε συνδυασμό με την αντίδραση ${}^3\text{He}$ - ${}^6\text{Li}$ να δώσει σημαντικά ποσά ενέργειας όταν αντιμετωπιστούν ως κύκλος. Το παραγόμενο ${}^3\text{He}$ δύναται να αντιδράσει με το ${}^6\text{Li}$, ενώ το παραγόμενο p επίσης μπορεί να συνεχίσει την αρχική αντίδραση. Η αντίδραση p- ${}^7\text{Li}$, αν και παρουσιάζει μεγαλύτερο ενεργειακό κέρδος σε σχέση με τη p- ${}^{11}\text{B}$, έχει σημαντικά μικρότερη ενεργό διατομή.

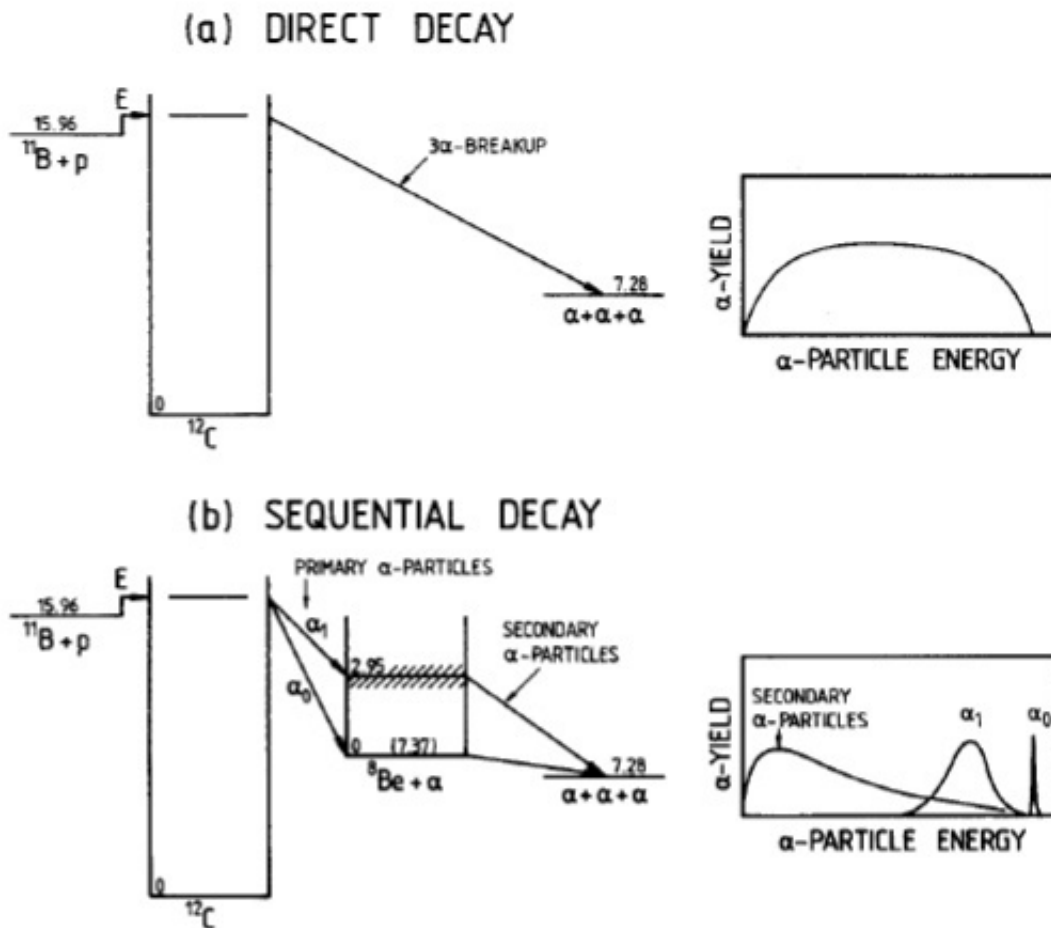
Reaction	σ (10 keV) (barn)	σ (100 keV) (barn)	σ_{\max} (barn)	ϵ_{\max} (keV)
$D + T \rightarrow \alpha + n$	2.72×10^{-2}	3.43	5.0	64
$D + D \rightarrow T + p$	2.81×10^{-4}	3.3×10^{-2}	0.096	1250
$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	2.78×10^{-4}	3.7×10^{-2}	0.11	1750
$T + T \rightarrow \alpha + 2n$	7.90×10^{-4}	3.4×10^{-2}	0.16	1000
$D + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + p$	2.2×10^{-7}	0.1	0.9	250
$p + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He}$	6×10^{-10}	7×10^{-3}	0.22	1500
$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$	(4.6×10^{-17})	3×10^{-4}	1.2	550
$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu$	(3.6×10^{-26})	(4.4×10^{-25})		
$p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	(1.9×10^{-26})	2.0×10^{-10}	1.0×10^{-4}	400
${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ (all branches)		(5.0×10^{-103})		

Εικόνα 7: Τιμές ενεργού διατομής σε ενέργειες 10 KeV, 100 KeV, καθώς και μέγιστη τιμή ενεργού διατομής και μέγιστης αντίστοιχης ενέργειας. Οι τιμές σε παρένθεση υπολογίζονται θεωρητικά.

Τελικώς, για όλους τους παραπάνω λόγους προτιμάται η αντίδραση $p-{}^{11}\text{B}$.

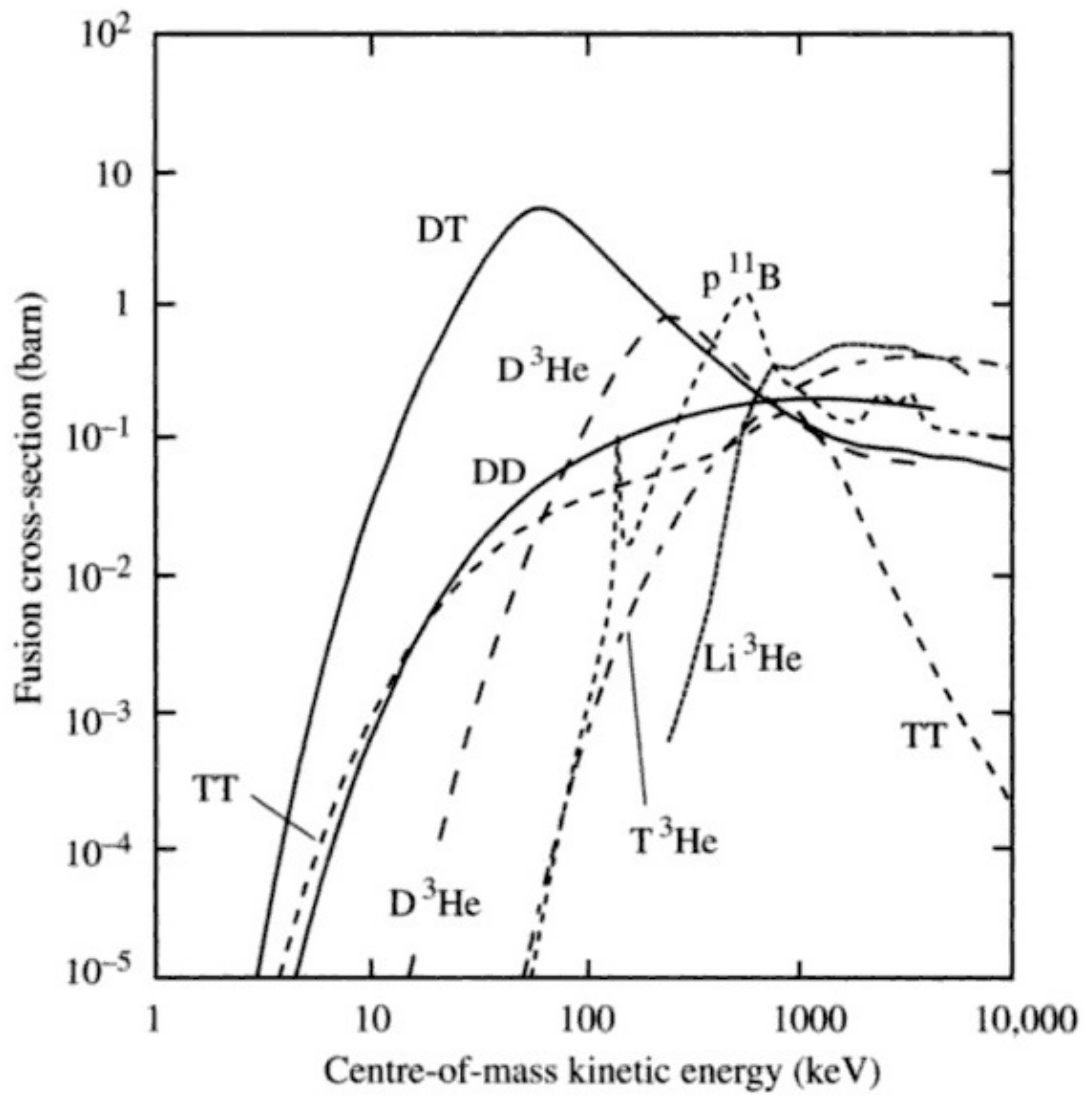
Η αντίδραση αυτή επιτυγχάνεται με σύγκρουση πλάσματος ${}^{11}\text{B}$ με πλάσμα πρωτονίων, τα οποία πρέπει να συγχρονιστούν κατάλληλα λόγω διαφορετικού χρόνου ζωής. Παράλληλα, εξασφαλίζεται μεγαλύτερο ποσοστό σύντηξης από την κλασική μέθοδο βομβαρδισμού στερεού ${}^{11}\text{B}$ με πρωτόνια, καθώς σε αυτή τη περίπτωση το Βόριο προστατεύεται από τα ηλεκτρόνιά του. [20]

Εκτός από τις απαιτητικές συνθήκες, παρουσιάζεται και ένα πρόβλημα που αφορά τις ενέργειες των τριών α -σωματιδίων της αντίδρασης. Υπάρχουν δύο «μηχανισμοί» για τη σύντηξη $p-{}^{11}\text{B}$.



Εικόνα 8: Διάγραμμα άμεσου και έμμεσου μηχανισμού της αντίδρασης $p\text{-}^{11}\text{B}$ και τα αντίστοιχα φάσματα ενέργειας των παραγόμενων α -σωματιδίων

Ο πρώτος ακολουθεί ένα βήμα, κατά το οποίο έχουμε απευθείας παραγωγή των τριών α -σωματιδίων όπου λαμβάνουμε ένα συνεχές φάσμα ενέργειας. Ο δεύτερος αφορά την περαιτέρω αντίδραση $\alpha\text{-}^8\text{Be}$ προς δύο α -σωματίδια, τα οποία δίνουν και αυτά ένα συνεχές φάσμα. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί δημιουργούν πρόβλημα στη μελέτη της ενεργούς διατομής της αντίδρασης, καθώς πρακτικά το φάσμα των ενεργειών αποτελεί συνδυασμό των δύο μηχανισμών.



Εικόνα 9: Διάγραμμα ενεργού διατομής συναρτήσει ενέργειας διάφορων αντιδράσεων υπό μελέτη για παραγωγή ενέργειας. Η καμπύλη της αντίδρασης D-D αποτελεί άθροισμα των διαφόρων κλάδων της αντίδρασης.

7. Αντιδραστήρες Σύντηξης

7.1. Κύρια είδη Αντιδραστήρων Σύντηξης

Δύο είναι τα κύρια είδη Αντιδραστήρων Σύντηξης, οι Αντιδραστήρες Αδρανειακού Περιορισμού (Inertial Confinement Reactors, ICR) και οι Αντιδραστήρες Μαγνητικού Περιορισμού (Magnetic Confinement Reactors, MCR). Οι τελευταίοι χωρίζονται σε Tokamaks και Stellarators, οι οποίοι βασίζονται στην ίδια αρχή αλλά διαφέρουν σε κρίσιμα σημεία, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια γίνεται πρόοδος στο τομέα της Υβριδικής Σύντηξης, ένα συνδυασμό ICR/MCR και Πυρηνικής Σχάσης, που μπορεί να δώσει λύση στα προβλήματα που σχετίζονται με τη σύντηξη αλλά και με τη σχάση.

7.2. Αδρανειακός Περιορισμός

Η Σύντηξη Αδρανειακού Περιορισμού (Inertial Confinement Fusion, ICF) αποτελεί είδος σύντηξης κατά την οποία πυρηνικό καύσιμο (συνήθως μίγμα D και T) υπό τη μορφή pellet θερμαίνεται και συμπιέζεται σε μεγάλο βαθμό.

7.2.1. Ιστορικά-Πρώτες Μελέτες

Αν και η πρόταση και μελέτη για παραγωγή ενέργειας μέσω ICF ξεκίνησε τη δεκαετία του '70, απ'ότι φαίνεται η τεχνολογία ήταν γνωστή και εφαρμοζόταν μια δεκαετία πριν, αν και ήταν εφαρμοσμένη μόνο στις βόμβες Υδρογόνου. Πάνω στις αρχές λειτουργίας της βόμβας Υδρογόνου βασίστηκε ο σύγχρονος τρόπος λειτουργίας της ICF, σε συνδυασμό με την τότε σύγχρονη τεχνολογία Laser.

Η πρώτη μελέτη της ICF ξεκίνησε τη δεκαετία του '50, με τον εφευρέτη της σύγχρονης τηλεόρασης, Dr. Philo Hansworth, να προσπαθεί να αναπαράγει τη δημιουργία πλάσματος υψηλής ενέργειας που παρατήρησε σε μία προηγούμενη εφεύρεσή του.

Η έρευνα της ICF μελετήθηκε έπειτα από τον Edward Teller το 1957, σε μία συνάντηση στην οποία μελετήθηκε η χρήση βομβών Υδρογόνου για θέρμανση νερού, μέσω πυροδότησής τους σε υπόγεια σπήλαια, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Το πρόγραμμα PACER, όπως ονομάστηκε, για την ειρηνική χρήση πυρηνικών όπλων, δεν τέθηκε ποτέ, ευτυχώς, σε εφαρμογή. [11]

Την ίδια περίοδο, στο Ινστιτούτο Plank, σε μία συνάντηση υπό τον πρωτοπόρο της σύντηξης Carl Friedrich von Weizsacker προτάθηκε η σύντηξη πυρηνικού καυσίμου μέσω ωστικών κυμάτων από ελεγχόμενες εκρήξεις. [12]

7.2.2. Αρχές Λειτουργίας [13]

Όπως είδαμε, για να επιτύχουμε τη σύντηξη ελαφρών πυρήνων απαιτείται να ξεπεράσουμε το φράγμα Coulomb. Σε έναν ICR, για να επιτύχουμε σύντηξη απαιτείται να επιτύχουμε συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης στο θάλαμο του αντιδραστήρα. Αυτές οι τιμές εκφράζονται μέσω του κριτηρίου Lawson, το οποίο αποτελεί συνάρτηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του αντιδραστήρα.

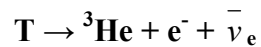
Σε γενικές γραμμές, η συμπίεση και η θέρμανση του καυσίμου γίνεται σε έναν σφαιρικό θάλαμο με τη χρήση Laser υψηλής ισχύος.

7.2.3. Δέσμη Laser

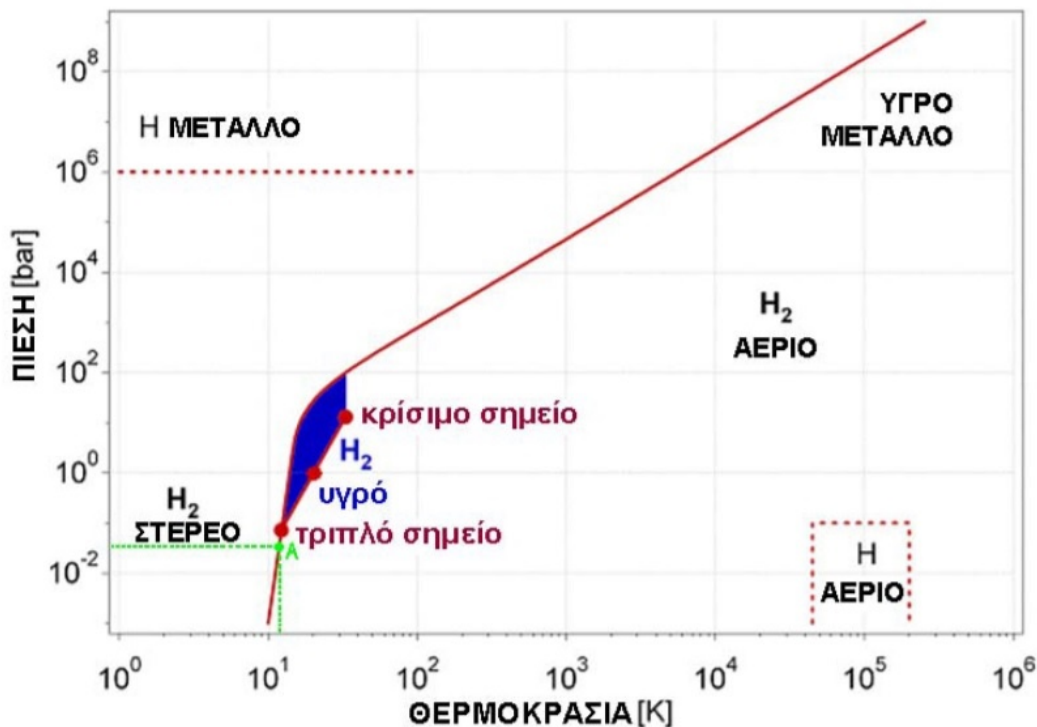
Το Laser δημιουργείται από μία πηγή, τον οδηγητή (Driver). Στη συνέχεια χωρίζεται σε επιμέρους δέσμες, οι οποίες ενισχύονται πολλές φορές και μέσω καθρεφτών επικεντρώνονται και καλύπτουν ομοιόμορφα το θάλαμο του καυσίμου, ο οποίος διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία για την επίτευξη ομοιόμορφης θέρμανσης.

7.2.4. Ψύξη Θαλάμου [2]

Ο θάλαμος ψύχεται σε θερμοκρασία η οποία επιλέγεται λίγο χαμηλότερα από το τριπλό σημείο του μίγματος καυσίμου D-T. Έτσι το αέριο μίγμα βρίσκεται σε ισορροπία με τη στερεά φάση χωρίς τη παρουσία υγρής φάσης. Ένα λεπτό στρώμα πάγου D-T σχηματίζεται στην εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου, στο οποίο η αυθόρμητη διάσπαση β που υφίσταται το T προκαλεί τήξη στην επιφάνεια του στρώματος μεταξύ πάγου και αέριου μίγματος



Η τήξη αυτή οδηγεί σε εξομάλυνση της επιφάνειας και επιτρέπει την απόλυτη εστίαση των δέσμων, η οποία είναι από τα κρισιμότερα ζητήματα για την επίτευξη της τεχνικής.



Εικόνα 10: Το διάγραμμα φάσεων του Υδρογόνου. Στο σημείο A, το οποίο βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή του τριπλού σημείου, συναντάται σε ισορροπία η στερεή και η αέρια φάση του Υδρογόνου

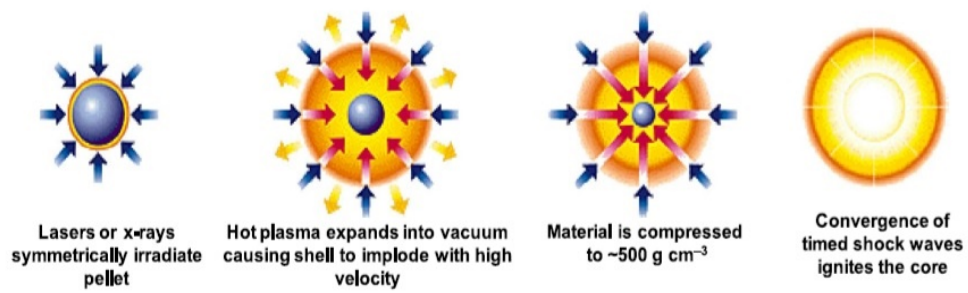
7.2.5. Θέρμανση και Έκρηξη Καυσίμου

Καθώς οι δέσμες θερμαίνουν το θάλαμο, το καύσιμο στο εσωτερικό του εκρήγνυται, προκαλώντας τη συμπίεσή του στο κέντρο του θαλάμου. Η έκρηξη αυτή οδηγεί το καύσιμο σε τεράστια πυκνότητα και παράλληλα θερμοκρασία. Η πυκνότητα αυτή στους μοντέρνους ICR φτάνει τα 1000 gr/cm^3 .

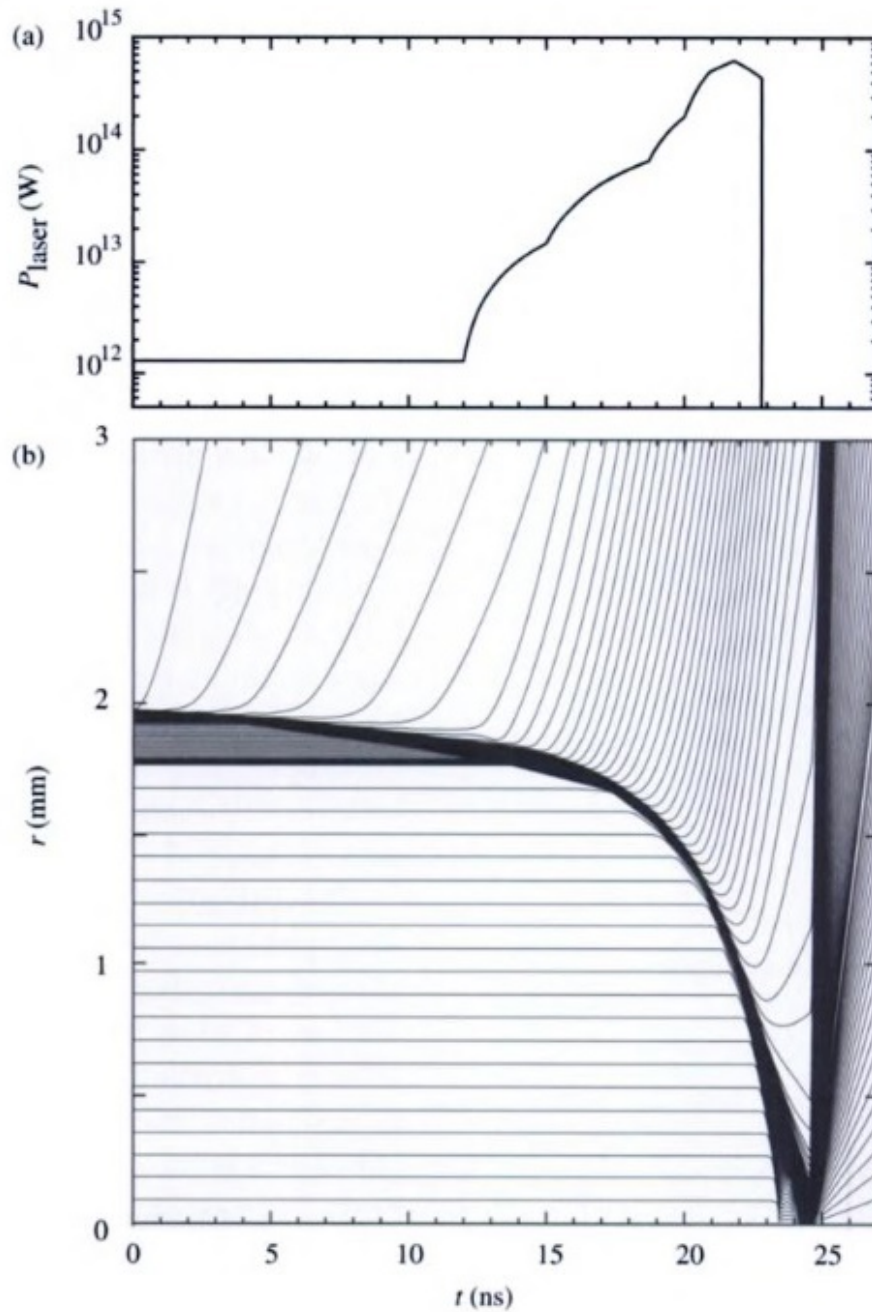
Αν και η τιμή αυτή δεν επαρκεί για την επίτευξη σύντηξης, τα φωστικά κύματα της έκρηξης ταξιδεύουν συμμετρικά προς το κέντρο του θαλάμου, οδηγώντας έτσι τη πυκνότητα και τη θερμοκρασία σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές, που αγγίζουν τους $10^8 \text{ }^\circ\text{C}$. Παρόλο που το ύψος του φράγματος Coulomb για D και T είναι 1 MeV, το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασία $10^{10} \text{ }^\circ\text{C}$, η σύντηξη είναι εφικτή στη θερμοκρασία του κέντρου του θαλάμου λόγω του φαινομένου σήραγγος.

Έτσι, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, η σύντηξη στο σημείο της συμπίεσης από τα φωστικά κύματα παράγει σωματίδια α υψηλής ενέργειας. Τα σωματίδια αυτά ταξιδεύουν μικρή απόσταση προτού εναποθέσουν την ενέργειά τους ως θερμότητα, λόγω της μεγάλης πυκνότητας του σημείου αυτού. Αυτή η επιπλέον ενέργεια προκαλεί περαιτέρω σύντηξη του καυσίμου γύρω από το συμπιεσμένο κέντρο, ταξιδεύοντας προς τα

τοιχώματα του θαλάμου. Η συντήρηση της διαδικασίας σύντηξης είναι γνωστή ως Ανάφλεξη (Ignition).



Εικόνα 10: Στάδια συμπίεσης, θέρμανσης, ανάφλεξης και έκρηξης του καυσίμου D-T



Εικόνα 11: Διάγραμμα ισχύος Laser και ακτίνας καυσίμου D-T συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείται ότι τη χρονική στιγμή μέγιστης ισχύος του Laser, το καύσιμο φτάνει σε ελάχιστη ακτίνα και έπειτα εκρήγνυται.

7.2.6. Υπολογισμός Ενέργειας

Εφόσον η πιθανότητα να έχουμε εναπόθεση ενέργειας από το σωματίδιο α εξαρτάται από την πυκνότητα του μίγματος στο hotspot, μπορούμε να την εκφράσουμε ως ρ^*r , όπου ρ η πυκνότητα του καυσίμου και r η ακτίνα του καυσίμου στο hotspot.

Για σωματίδια α ενέργειας 3,5 MeV τα οποία παράγονται από τη σύντηξη D-T, η προϋπόθεση εναπόθεσης είναι $\rho \cdot r \approx 0,3 \text{ gcm}^{-2}$.

Μπορούμε πλέον να προσδιορίσουμε την ενέργεια που απαιτείται για να επιτευχθεί σύντηξη. Αν για το hotspot χρειαζόμαστε θερμοκρασία T_f στην οποία γίνεται σύντηξη, τότε

$$E = (4/3)\pi r^3 \rho T_f C_v$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί και ως

$$E = [(4/3)\pi T_f C_v (\rho r)^3] \rho^{-2}$$

Επειδή το γινόμενο $\rho \cdot r$ έχει οριστεί ίσο με $0,3 \text{ gcm}^{-2}$ από την προϋπόθεση εναπόθεσης της ενέργειας του σωματιδίου α, συμπεραίνουμε ότι

$$E = (\text{constant})/\rho^2$$

Αυτή η αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της πυκνότητας εξάρτηση της ενέργειας είναι ο λόγος που μπορούμε να επιτύχουμε τη σύντηξη με σχετική ευκολία.

7.2.7. Τεχνικές Ακτινοβόλησης

Ο παραπάνω τρόπος ακτινοβόλησης με δέσμες Laser είναι άμεσος, σε αντίθεση με τον έμμεσο τρόπο ακτινοβόλησης, κατά τον οποίο ο σφαιρικός κρυογονικός θάλαμος θερμαίνεται με Ακτίνες X (μέσω Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου). Οι δέσμες αυτές δημιουργούνται από την απορρόφηση των φωτονίων του Laser από ένα περίβλημα Au που περιέχει τον κρυογονικό θάλαμο. [14]

Τα έπειτα στάδια της σύντηξης είναι ίδια και για τις δυο τεχνικές θέρμανσης.

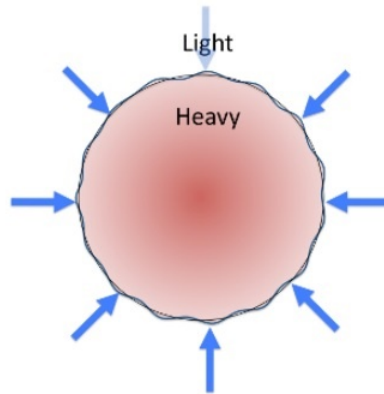
7.2.8. Δυσκολίες Επίτευξης ICF

Η χρήση της ICF για παραγωγή ενέργειας συναντά εμπόδια πριν το στάδιο της εμπορικής χρήσης, κυρίως με τη μορφή τεχνικών δυσκολιών.

Για να επιτευχθεί η συγκέντρωση του ωστικού κύματος στο κέντρο του θαλάμου απαιτείται μεγάλη σφαιρικότητα του θαλάμου σύντηξης με αποκλίσεις μικρότερες του ενός μm . Παρομοίως, οι δέσμες Laser απαιτείται να προσκρούσουν ταυτόχρονα και ομοιόμορφα στον θάλαμο. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω γραμμών καθυστέρησης (Delay Lines) στις οπτικές διαδρομές των δέσμων, δίνοντας ακρίβεια στο συγχρονισμό τάξης ps.

Πέρα από τα προβλήματα συμμετρίας και συγχρονισμού, τα οποία έχουν εξαλειφθεί σε μεγάλο βαθμό την τελευταία εικοσαετία, σημαντικό ζήτημα αποτελεί

ακόμα η αστάθεια Rayleigh-Taylor, η οποία αφορά την επιτάχυνση ρευστών με διαφορετικές πυκνότητες. Κατά το φαινόμενο αυτό δημιουργούνται «κύματα» του ρευστού, τα οποία αυξάνονται γραμμικά όσο το ρευστό επιταχύνεται. [15]



Εικόνα 12: Απεικόνιση της αστάθειας Rayleigh-Taylor στην κάψουλα καυσίμου ICF. [16]

7.2.9. Χρήση ICF για Αστροφυσικές Μελέτες

Μελέτη της ICF δίνει την ευκαιρία στους αστροφυσικούς να λάβουν δεδομένα για διεργασίες όπως η νουκλεοσύνθεση, οι εκρήξεις Supernova και την αλληλεπίδραση στοιχειωδών σωματιδίων στο εσωτερικό των Άστρων, καθώς κατά τη ICF δημιουργείται μια μικρογραφία ενός Άστρου επί της Γης. Τέτοια μελέτη γίνεται κατά κύριο λόγο, καθώς και μελέτες της ICF για παραγωγή ενέργειας, στο National Ignition Facility στην California, Η.Π.Α. [17], [18]



Εικόνα 13: Μία εκ των δυο μονάδων Laser στο National Ignition Facility



Εικόνα 14: Οι εγκαταστάσεις του National Ignition Facility στην California, Η.Π.Α.

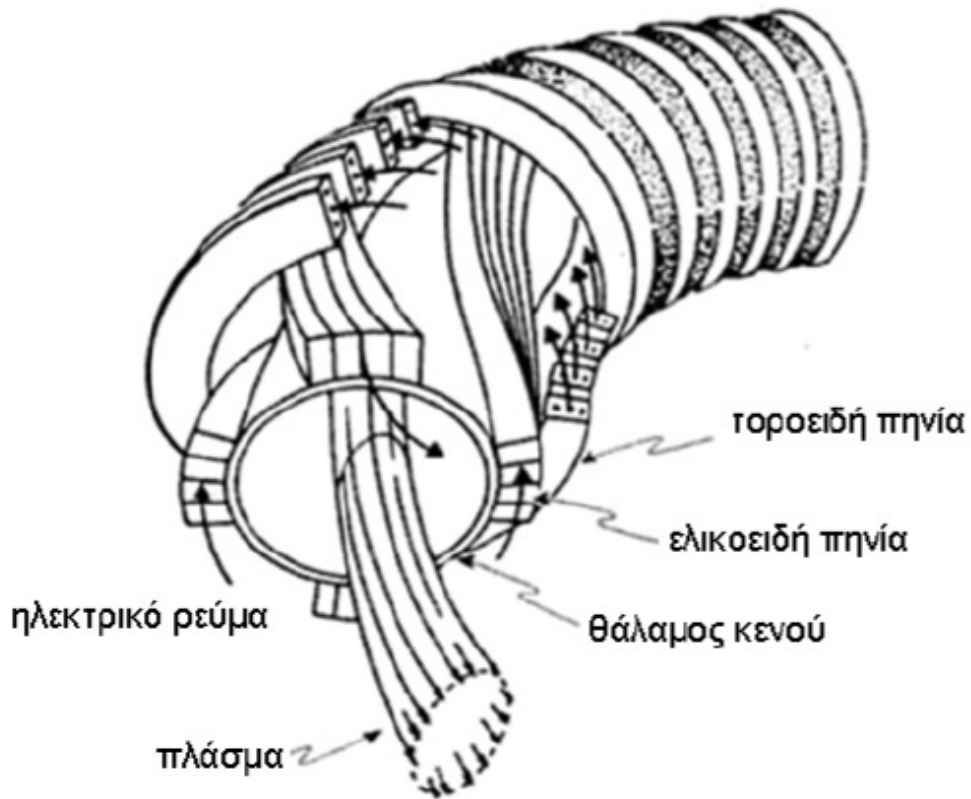
7.3. Μαγνητικός Περιορισμός

Η σύντηξη μαγνητικού περιορισμού είναι μια προσέγγιση για την παραγωγή ενέργειας σύντηξης που χρησιμοποιεί μαγνητικά πεδία (που είναι μια μαγνητική επίδραση των ηλεκτρικών ρευμάτων και μαγνητικών υλικών) για τον περιορισμό του ζεστού καυσίμου, με τη μορφή πλάσματος. Είναι ένας από τους δύο κύριους κλάδους της έρευνας για την ενέργεια σύντηξης, ο άλλος είναι η σύντηξη αδρανειακού περιορισμού, όπως περιγράφουμε παραπάνω.

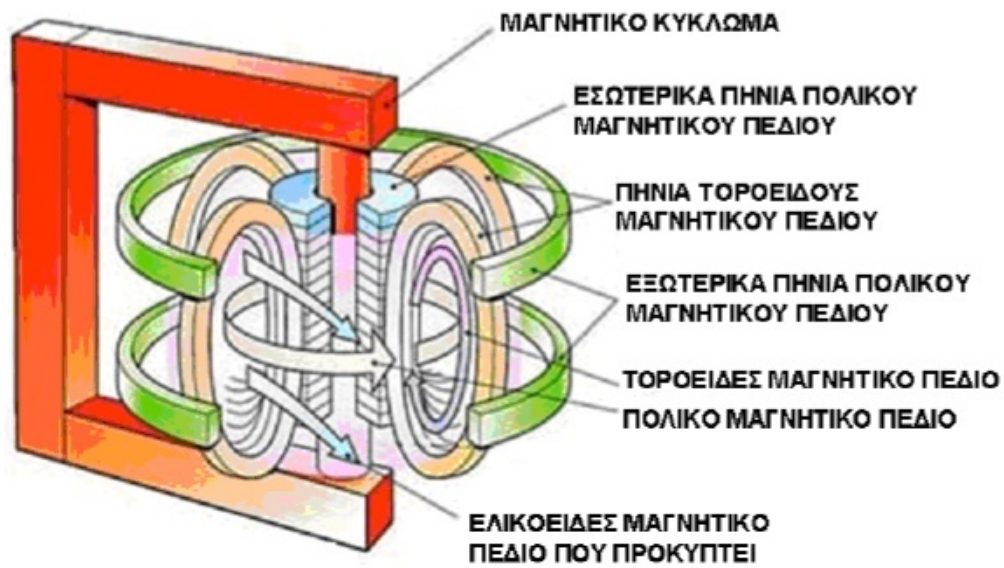
Η μαγνητική προσέγγιση είναι πιο ανεπτυγμένη και θεωρείται συνήθως πιο ελπιδοφόρα για την παραγωγή ενέργειας. Σε συντήξεις μαγνητικού περιορισμού, εκατοντάδες κυβικά μέτρα πλάσματος D-T σε πυκνότητα μικρότερη από ένα χιλιοστόγραμμα ανά κυβικό μέτρο περιορίζονται από ένα μαγνητικό πεδίο σε πίεση μερικών ατμόσφαιρων και θερμαίνεται σε θερμοκρασία σύντηξης.

Όταν ένα αέριο θερμανθεί σε θερμοκρασία πάνω από 1000 °C, οι πυρήνες διαχωρίζονται από τα ηλεκτρόνια τους λόγω της μεγάλης κινητικής ενέργειας που αποκτούν. Έτσι προκύπτει ένα θετικά φορτισμένο πλάσμα αερίου, το οποίο περιέχει θετικά ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αφού το πλάσμα αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια μπορεί να ελεγχθεί με ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.

Τα μαγνητικά πεδία είναι ιδανικά για τον περιορισμό του πλάσματος καθώς τα διαχωριζόμενα ιόντα και τα ηλεκτρόνια ακολουθούν τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Ο στόχος των μαγνητικών πεδίων είναι να αποτρέψουν τα σωματίδια από το να έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα του αντιδραστήρα, καθώς αυτό θα απομακρύνει τη θερμότητα τους και θα τα επιβραδύνει. Η πιο αποτελεσματική μαγνητική διαμόρφωση είναι η σπειροειδής, σε σχήμα ντόνατ, στην οποία το μαγνητικό πεδίο καμπυλώνεται για να σχηματίσει ένα κλειστό βρόχο. Για τη σωστή συγκράτηση, αυτός ο σπειροειδής τομέας πρέπει να έχει πάνω του μια κατακόρυφη συνιστώσα πεδίου (ένα πολοειδές πεδίο). Το αποτέλεσμα είναι ένα μαγνητικό πεδίο με τις δυναμικές γραμμές να ακολουθούν μια σπείρα (ελικοειδή μονοπάτια) που περιορίζουν και ελέγχουν το πλάσμα.



Εικόνα 14: Η διάταξη των πηνίων στον αντιδραστήρα Stellarator



Εικόνα 15: Η χρήση των μαγνητικών πεδίων στον αντιδραστήρα Tokamak

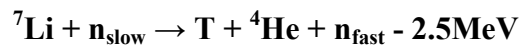
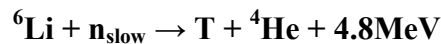
7.4. Αρχή Λειτουργίας

7.4.1. Θέρμανση και Συμπύεση Πλάσματος

Ο μαγνητικός περιορισμός χρησιμοποιείται για να συγκρατήσει το πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας ώστε να μην έρθει σε επαφή με τα τοιχώματα του θαλάμου. Αφού το πλάσμα αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια, η θέση του μπορεί να καθοριστεί από δύο εξωτερικά μαγνητικά πεδία τα οποία ρυθμίζουν κατάλληλα την κίνηση των σωματιδίων κατά την περιστροφή τους στον τόρο. Η θέρμανση του πλάσματος παρέχεται από την “μαγνητική συμπίεση” του αερίου πλάσματος και είναι απαραίτητη για την δημιουργία συνθηκών σύντηξης. Η συμπίεση ενός αερίου υπό σταθερό όγκο προκαλεί άνοδο της θερμοκρασίας του σύμφωνα με το νόμο των αερίων. Αυξάνοντας την ένταση των μαγνητικών πεδίων αυξάνεται η πίεση που ασκείται στο αέριο με αποτέλεσμα την θέρμανση του. Η αύξηση της πίεσης προκαλεί και αύξηση της πυκνότητας του αερίου με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η πιθανότητα για σύντηξη. Από τη στιγμή που ξεκινάει η σύντηξη, η ενέργεια που εκλύεται με τα προϊόντα της συνεισφέρει στην περαιτέρω θέρμανση του πλάσματος.

7.4.2. Αναπαραγωγή Τριτίου

Το πλάσμα τροφοδοτείται για αυτό το λόγο, επιπλέον (εκτός από Δευτέριο και Τρίτιο), με Λίθιο. Έτσι πραγματοποιούνται οι παρακάτω αντιδράσεις.



Η παραπάνω αντίδραση βοηθάει στην αναπαραγωγή Τριτίου και είναι άκρως σημαντική αφού το Τρίτιο δεν υπάρχει σε αρκετή αφθονία στη φύση, καθώς απαντάται σε ποσοστό $4 \cdot 10^{-15}\%$ του συνολικού Υδρογόνου [19]. Επιπλέον παράγει πρόσθετη ενέργεια που συνεισφέρει στην απόδοση του αντιδραστήρα.

7.4.3. Τοιχώματα αντιδραστήρα

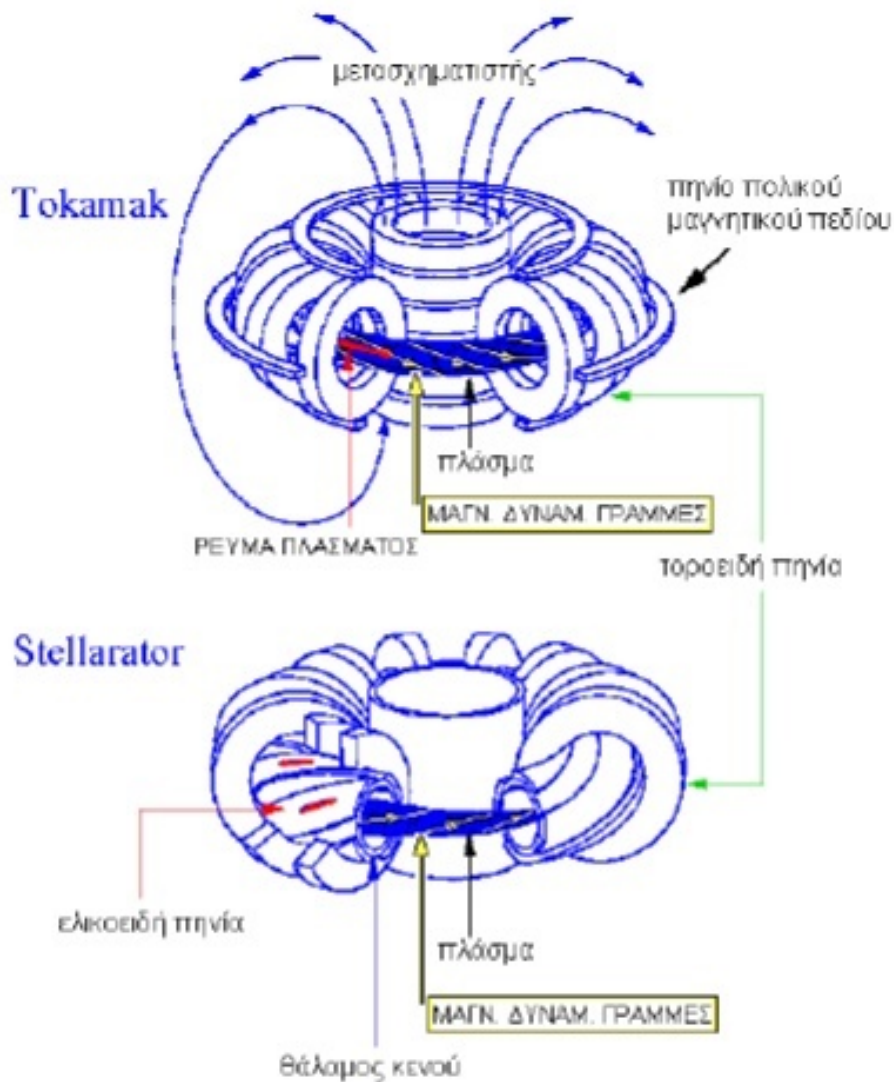
Ο γραφίτης είναι υλικό ανθεκτικό σε μεγάλες θερμοκρασίες και χρησιμοποιείται συνήθως, υπό μορφή πλακιδίων, στο εσωτερικό των αντιδραστήρων. Η υπερθέρμανση του παγιδευμένου πλάσματος προκαλεί τα σωματίδια να κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και πολλές φορές αυτά συγκρούονται με την επιφάνεια του γραφίτη. Η πρόσκρουση του ατομικού Δευτερίου (D) και του μοριακού Δευτερίου (D₂) προκαλεί αποσάρθρωση των πλακών γραφίτη μιας και σχηματίζονται χημικές ενώσεις στην επιφάνεια των πλακών, όπως C₂D₂, CD₃, CD₂, CD, C₂D, CD₄ οι οποίες στη συνέχεια απομακρύνονται. Επίσης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, ένα ποσοστό του γραφίτη εξαχνώνεται. Στην περίπτωση του γραφίτη η εξάχνωση ξεκινά από τους 1200 °C.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι του σπειροειδούς συστήματος εγκλεισμού, τα πιο σημαντικά είναι tokamaks, stellarators.

7.5. Διαφορές

Ο πρώτος αντιδραστήρας σύντηξης μαγνητικού περιορισμού ήταν ο Stellarator. Στηριζόταν στην ίδια βασική ιδέα με τον Tokamak, στην εφαρμογή δηλαδή ελικοειδούς μαγνητικού πεδίου για τον περιορισμό του πλάσματος, αλλά είχε ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία. Ακόμα, στον Stellarator το πλάσμα δεν απαιτείται να περιστρέφεται στον τόρο ώστε να παράγει επιπλέον μαγνητικό πεδίο, όπως στην περίπτωση του Tokamak. Έτσι ο Stellarator παρέχει δύο μεγάλα και ελκυστικά πλεονεκτήματα απέναντι στον Tokamak. Πρώτον, είναι σταθερός επειδή δεν απαιτείται κάποιο ρεύμα για να τον διαρρέει. Δεύτερον, λόγω της απουσίας ρεύματος, ελαττώνεται σημαντικά η πιθανότητα για διακοπή στη λειτουργία του. Το μαγνητικό πεδίο σε ένα Stellarator παράγεται από ελικοειδή πηνία που σχηματίζουν τόρο σε συνδυασμό με κυκλικά πηνία. Το κύριο μειονέκτημα του Stellarator είναι ότι η κατασκευή του είναι πολύ πιο πολύπλοκη από του Tokamak.

Στον Stellarator το μαγνητικό πεδίο που απαιτείται οφείλεται μόνο στα εξωτερικά πηνία, ενώ στον Tokamak το πλάσμα περιστρέφεται ώστε να δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα και συνεπώς μαγνητικό πεδίο λόγω αυτού του ρεύματος. Το πεδίο αυτό είναι απαραίτητο ώστε μαζί με τα μαγνητικά πεδία που παράγουν τα εξωτερικά πηνία να παράγεται το συνολικό μαγνητικό πεδίο που συγκρατεί και συμπιέζει το πλάσμα.



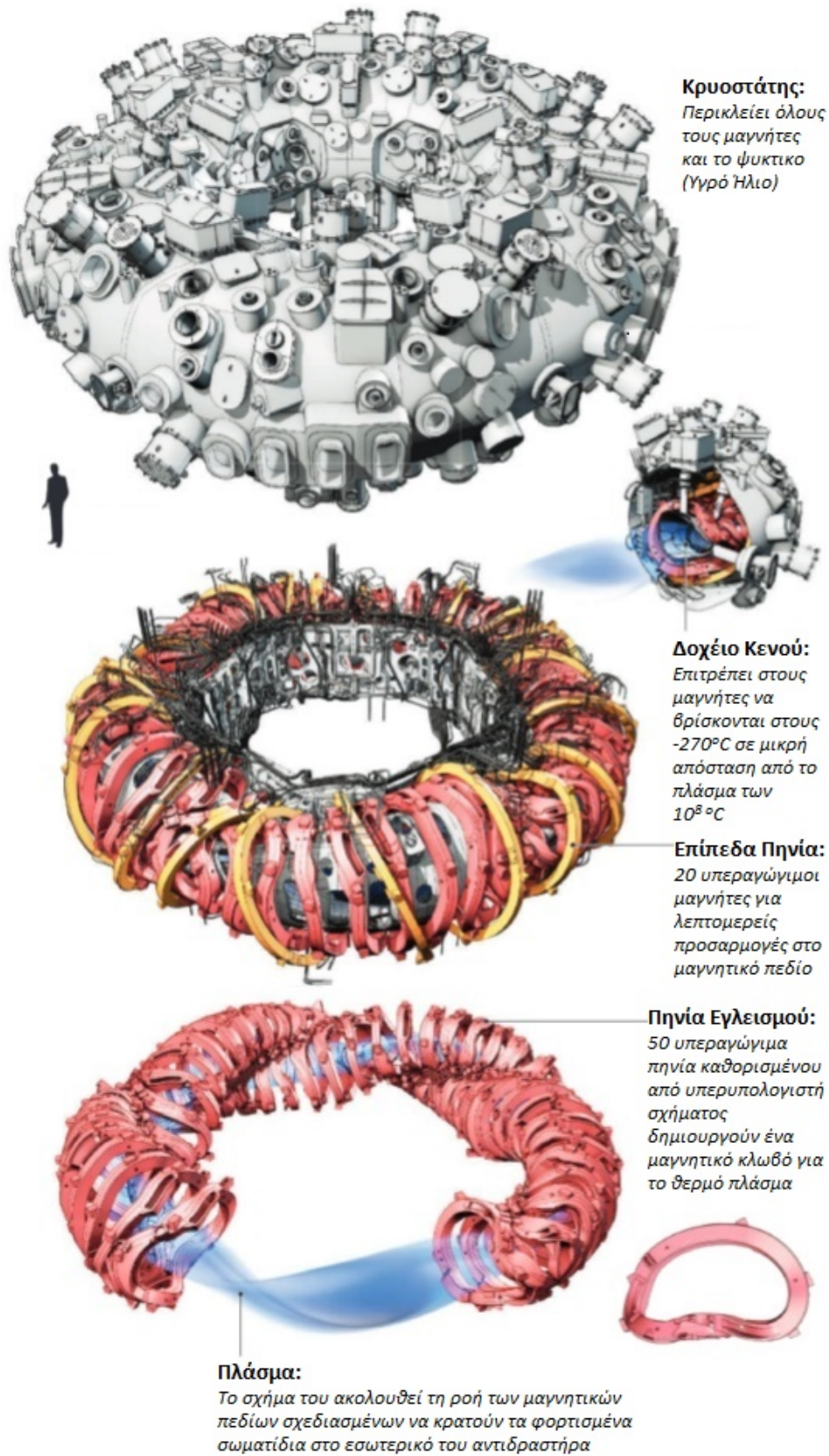
Εικόνα 16: Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στον Tokamak και Stellarator. Ο Tokamak συμπεριλαμβάνει τον μετασχηματιστή ο οποίος θέτει σε κίνηση το πλάσμα.

7.6. Stellarator

Ο Lyman Spitzer επινόησε και άρχισε την εργασία για την πρώτη συσκευή σύντηξης - έναν Stellarator - στο Εργαστήριο Φυσικής Πλάσματος του Princeton το 1951. Λόγω της δυσκολίας στο να περιορίζουν το πλάσμα, οι Stellarators έπεσαν σε δυσμένεια, μέχρις ότου τεχνικές μοντελοποίησης σε υπολογιστή επέτρεψαν την ακριβή γεωμετρία να υπολογιστεί. Επειδή οι Stellarators δεν έχουν σπειροειδούς μορφή ροή πλάσματος, η σταθερότητα του πλάσματος είναι αυξημένη σε σύγκριση με τους Tokamaks. Δεδομένου ότι η καύση του πλάσματος μπορεί να ελέγχεται πιο εύκολα και

να παρακολουθείται, οι Stellarators έχουν μια εγγενή δυνατότητα για σταθερή κατάσταση και συνεχή λειτουργία.

Σε έναν Stellarator, οι ελικοειδείς δυναμικές γραμμές παράγονται από μια σειρά πηνίων που μπορούν και αυτά να έχουν ελικοειδές σχήμα. Σε αντίθεση με τους Tokamaks, οι Stellarators δεν απαιτούν ένα τοροειδές ρεύμα να επάγεται στο πλάσμα. Στους Stellarators, τα συστήματα θέρμανσης πρέπει να παρέχουν όλη την ενέργεια που χρειάζεται λόγω της έλλειψης αυτής του επαγόμενου ρεύματος.



Εικόνα 17: Απεικόνιση της δομής και λειτουργίας ενός Stellarator

7.7. Tokamak

Ο Tokamak σχεδιάστηκε το 1951 από τους σοβιετικούς φυσικούς Αντρέι Ζαχάρωφ και Ίγκορ Ταμ. Tokamaks λειτουργούν εντός περιορισμένων παραμέτρων έξω των οποίων μπορεί να συμβεί μια ξαφνική απώλεια ενέργειας (διαταραχή), προκαλώντας μεγάλες θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις στη δομή και τους τοίχους. Παρ'όλα αυτά, θεωρείται ο πιο πολλά υποσχόμενος σχεδιασμός, και η έρευνα συνεχίζεται σε διάφορους Tokamaks σε όλο τον κόσμο. Ο γιγαντιαίος αντιδραστήρας Tokamak είναι σχεδιασμένος ώστε να παράγει ισχύ της τάξης των MW από πλάσμα μόλις λίγων γραμμαρίων Δευτερίου και Τριτίου τα οποία περιστρέφονται μέσα σε ένα τόρο. Το πλάσμα D-T σε ένα αντιδραστήρα Tokamak έχει θερμοκρασία άνω των 100 εκατομμυρίων °C.

Σε έναν Tokamak, το τοροειδές πεδίο δημιουργείται από μία σειρά πηνίων ομοιόμορφα κατανομημένα γύρω από το σπειροειδές σχήμα του αντιδραστήρα, και το πολοειδές πεδίο δημιουργείται από ένα σύστημα οριζόντιων πηνίων εκτός της σπειροειδούς δομής του μαγνήτη. Ένα ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα επάγεται στο πλάσμα χρησιμοποιώντας ένα κεντρικό σωλήνα, και αυτό το επαγωγικό ρεύμα συμβάλλει επίσης στο πολοειδές πεδίο. Σε συσκευές Tokamak, το ρεύμα που ρέει μέσω του πλάσματος χρησιμεύει επίσης για να το θερμάνει σε μία θερμοκρασία περίπου 10 εκατομμύρια °C. Υπάρχουν επίσης, τα πρόσθετα συστήματα θέρμανσης που απαιτούνται για την επίτευξη των αναγκαίων για τη σύντηξη θερμοκρασιών (100 εκατομμύρια °C).

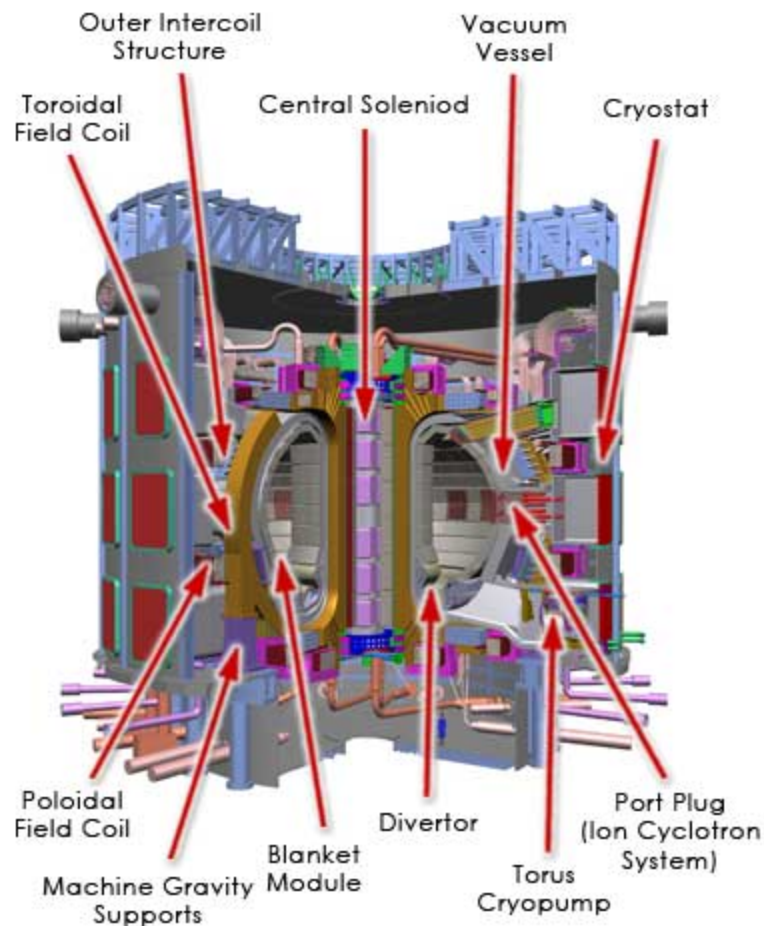
7.7.1. Λειτουργία Tokamak

Αρχικά, απομακρύνονται από το θάλαμο κενού ο αέρας και οι ακαθαρσίες. Έπειτα τα συστήματα μαγνητών που περιορίζουν και ελέγχουν την κίνηση του πλάσματος ενεργοποιούνται και το αέριο καύσιμο εισάγεται στον θάλαμο. Καθώς το ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά τον θάλαμο, το αέριο αναλύεται ηλεκτρικά, ιονίζεται και σχηματίζει πλάσμα. Καθώς τα σωματίδια του πλάσματος ενεργοποιούνται και συγκρούονται, αρχίζουν επίσης να ζεσταίνονται με βοηθητικές μεθόδους θέρμανσης, οπότε το πλάσμα φτάνει σε θερμοκρασίες σύντηξης. Σωματίδια «ενεργοποιούνται» σε τέτοιο βαθμό που μπορούν να ξεπεράσουν την φυσική τους ηλεκτρομαγνητική άπωση στην σύγκρουση τους προς σύντηξη, απελευθερώνοντας τεράστια ποσά ενέργειας.

Τα κύρια μέρη του Tokamak είναι:

- Δοχείο κενού: συγκρατεί το πλάσμα και κρατά το θάλαμο αντιδράσεως σε κενό
- Παροχέας ουδέτερης δέσμης: εγγείι δέσμες σωματιδίων από τον επιταχυντή στο πλάσμα για να βοηθήσει τη θέρμανση του πλάσματος στην κρίσιμη θερμοκρασία
- Πηνία μαγνητικού πεδίου (πολοειδούς, σπειροειδούς): υπεραγώγιμοι μαγνήτες που περιορίζουν, δίνουν σχήμα και περιέχουν το πλάσμα, χρησιμοποιώντας μαγνητικά πεδία

- Μετασχηματιστές: παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις σπείρες του μαγνητικού πεδίου
- Εξοπλισμός ψύξης (κρυοστάτης, αντλία κρύου): ψύξη των μαγνητών
- Ενότητες κουβερτών: από Λίθιο, απορροφούν την θερμότητα και τα νετρόνια υψηλής ενέργειας από την αντίδραση σύντηξης
- Εκτροπείς: εξαντλούν τα προϊόντα ηλίου της αντίδρασης σύντηξης



Εικόνα 18: Η εσωτερική διάταξη του αντιδραστήρα Tokamak

1. Ο αντιδραστήρας σύντηξης θα θερμάνει το ρεύμα καυσίμου Δευτερίου και Τριτίου για να σχηματιστεί πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας. Θα συμπιέσει το πλάσμα, έτσι ώστε η σύντηξη να μπορεί να λάβει χώρα. Η ισχύς που απαιτείται για να ξεκινήσει η αντίδραση σύντηξης θα είναι περίπου 70 MW, αλλά η απόδοση ισχύος από την αντίδραση θα είναι περίπου 500 MW. Η αντίδραση σύντηξης θα διαρκέσει από 300 έως 500 δευτερόλεπτα. (Τελικά, θα υπάρξει μια διαρκής αντίδραση σύντηξης.)

2. Οι κουβέρτες Λιθίου έξω από το θάλαμο αντιδράσεως θα απορροφούν νετρόνια υψηλής ενέργειας από την αντίδραση σύντηξης προς παραγωγή περισσότερου Τριτίου, θα θερμαίνονται επίσης από τα νετρόνια
3. Η θερμότητα θα μεταφερθεί μέσω ροής νερού για την παραγωγή ατμού
4. Ο ατμός θα οδηγήσει ηλεκτρικές τουρμπίνες για την παραγωγή ηλεκτρισμού
5. Ο ατμός θα συμπυκνώνεται πάλι σε νερό για να απορροφήσει περισσότερη θερμότητα από τον αντιδραστήρα στον εναλλάκτη θερμότητας.

8. Ασφάλεια-Πυρηνικά Απόβλητα

Εναπόθεση των πυρηνικών αποβλήτων είναι συχνά η αχίλλειος πτέρνα της βιομηχανίας. Επί του παρόντος, τα απόβλητα αποθηκεύονται κυρίως σε επιμέρους τόπους σε όλο τον κόσμο, όπου ραδιενεργό υλικό συνεχίζει να συσσωρεύεται. Μερικοί εμπειρογνώμονες προτείνουν ότι η συγκέντρωση σε υπόγειες αποθήκες που είναι καλά διαχειριζόμενες, φυλασσόμενες και παρακολουθούνται, θα ήταν μια τεράστια βελτίωση.

Οι υποστηρικτές της πυρηνικής ενέργειας θεωρούν ότι είναι μια βιώσιμη πηγή ενέργειας που μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αυξάνει την ενεργειακή ασφάλεια με τη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενες πηγές ενέργειας. Οι υποστηρικτές ισχυρίζονται ότι η πυρηνική ενέργεια δεν παράγει σχεδόν καμία συμβατική ρύπανση του αέρα, όπως τα αέρια του θερμοκηπίου και νέφος, σε αντίθεση με την επικεφαλής βιώσιμη εναλλακτική λύση των ορυκτών καυσίμων. Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να παράγει ενέργεια βασικού φορτίου σε αντίθεση με πολλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι διαλείπουσες και δεν μπορούν να γίνουν σε μεγάλη κλίμακα και δεν έχουν φθηνούς τρόπους για την αποθήκευση της ενέργειας αυτής. Ισχυρίζονται δε ότι οι κίνδυνοι για την αποθήκευση αποβλήτων είναι μικροί και μπορούν να μειωθούν περαιτέρω με τη χρήση της τελευταίας τεχνολογίας σε νεότερους αντιδραστήρες.

Οι κριτικοί πιστεύουν ότι η πυρηνική ενέργεια ενέχει πολλές απειλές για τους ανθρώπους και το περιβάλλον. Οι απειλές αυτές περιλαμβάνουν τα προβλήματα της μεταποίησης, μεταφοράς και αποθήκευσης των ραδιενεργών πυρηνικών αποβλήτων, τον κίνδυνο της διάδοσης των πυρηνικών όπλων και την τρομοκρατία, καθώς και κινδύνους για την υγεία και την περιβαλλοντική ζημία από την εξόρυξη σχάσιμων υλικών. Επίσης, ισχυρίζονται ότι οι ίδιοι οι αντιδραστήρες είναι εξαιρετικά πολύπλοκες μηχανές, όπου πολλά πράγματα μπορούν να πάνε στραβά όπως διάφορα σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα του παρελθόντος. Οι κριτικοί δεν πιστεύουν ότι οι κίνδυνοι από τη χρήση πυρηνικής σχάσης ως πηγή ενέργειας μπορεί να αντισταθμιστούν πλήρως με την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών. Υποστηρίζουν επίσης ότι αν ληφθούν υπόψη όλα τα ενεργοβόρα στάδια της αλυσίδας του πυρηνικού καυσίμου, από την εξόρυξη υλικών έως τον παροπλισμό των πυρηνικών εγκαταστάσεων, η πυρηνική ενέργεια δεν είναι ούτε χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ούτε οικονομική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης έχουν τη δυνατότητα να είναι ασφαλέστερες και να παράγουν λιγότερα ραδιενεργά απόβλητα από τη σχάση. Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει τον ενδεχόμενο αντίκτυπο της ενέργειας από σύντηξη για το περιβάλλον και τους πιθανούς κινδύνους που συνδέονται με τη λειτουργία μεγάλης κλίμακας μονάδων παραγωγής ενέργειας από σύντηξη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σύντηξη μπορεί να είναι μια πολύ ασφαλής και αειφόρος ενεργειακή πηγή.

Η European Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP) κοίταξε τον εννοιολογικό σχεδιασμό των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από σύντηξη και την ασφάλειά τους καθώς και τις περιβαλλοντικές εκτιμήσεις, συμπεριλαμβανομένου του προσδιορισμού και της διαμόρφωσης κάθε πιθανού ατυχήματος. Η SEAFP κατέληξε στο

συμπέρασμα ότι η σύντηξη έχει πολύ καλά εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας, μεταξύ των οποίων απουσία «αλυσιδωτής αντίδρασης» και δεν παράγει μακράς ζωής, ιδιαίτερα ραδιοτοξικά προϊόντα.

Το χειρότερο πιθανό ατύχημα δεν θα είναι σε θέση να παραβιάσει τους φραγμούς. Ακόμα και όταν υποθετικά οι φραγμοί παραβιάζονται, οποιαδήποτε τυχαία διαρροή ραδιενεργών υλικών από έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας από σύντηξη σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να φτάσει στο επίπεδο που θα απαιτείται εκκένωση της τοπικής κοινότητας.

Τα εγγενή χαρακτηριστικά ασφάλειας ενός αντιδραστήρα σύντηξης οφείλονται στα πολύ χαμηλά αποθέματα καυσίμου στον αντιδραστήρα κατά τη λειτουργία καθώς και στην ταχεία ψύξη που σβήνει τις αντιδράσεις σύντηξης αν τύχει να συμβεί μία δυσλειτουργία. Εκ των καυσίμων, το Λίθιο και το Δευτέριο δεν είναι ραδιενεργά ωστόσο το Τρίτιο είναι ραδιενεργό με σύντομη ημιζωή των 12,6 ετών. Όμως το Τρίτιο παράγεται και χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, οπότε δεν απαιτείται μεταφορά ραδιενεργών καυσίμων. Στο τέλος της ωφέλιμης ζωής ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας σύντηξης η ραδιοτοξικότητα στο θάλαμο του αντιδραστήρα και των άλλων δομικών υλικών και απορριμμάτων θα αποσυντεθεί γρήγορα. Σε λιγότερο από 100 χρόνια η υπολειμματική δράση αυτών των υλικών θα είναι μικρότερη από την ραδιοτοξικότητα στα απόβλητα από ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας με καύση άνθρακα.

Η παραγωγή ενέργειας από σύντηξη δεν παράγει αέρια του θερμοκηπίου ή άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους κατά τη λειτουργία. Προσφέρει μια διαδρομή μεγάλης κλίμακας παραγωγής βασικού φορτίου ενέργειας χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στο κλίμα. Η κατανάλωση καυσίμου σε ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας από σύντηξη είναι εξαιρετικά χαμηλή. Για να δημιουργηθούν $7 \cdot 10^9$ κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας σύντηξης (1000 MW) θα καταναλώσει περίπου 100 κιλά Δευτερίου και τρεις τόνους Λιθίου ετησίως. Αυτό συγκρίνεται με 1,5 εκατομμύρια τόνους άνθρακα σε ισοδύναμο εργοστάσιο ορυκτών καυσίμων. Η σύντηξη προσφέρει μια σχεδόν απεριόριστη παροχή καυσίμου με τα καύσιμα να βρίσκονται σε όλα τα μέρη του κόσμου, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

9. Υβριδική Σύντηξη-Σχάση

9.1. Κεντρική Ιδέα [21]

Υβριδική πυρηνική σύντηξη-σχάση είναι ένα προτεινόμενο μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ενός συνδυασμού των διαδικασιών πυρηνικής σύντηξης και σχάσης. Η βασική ιδέα έγκειται στην χρήση των υψηλής ενέργειας γρήγορων νετρονίων από έναν αντιδραστήρα σύντηξης για να προκαλέσουν σχάση σε μη σχάσιμα καύσιμα όπως το ^{238}U ή ^{232}Th . Κάθε νετρόνιο μπορεί να προκαλέσει πολλές σχάσεις πολλαπλασιάζοντας έτσι την ενέργεια κάθε αντίδρασης σύντηξης εκατοντάδες φορές. Αυτό όχι μόνο θα κάνει την σύντηξη πιο οικονομική σε θέμα απόδοσης αλλά θα μπορούμε να χρησιμοποιούμε καύσιμα που δεν είναι κατάλληλα σε συμβατικούς αντιδραστήρες σχάσης.

Η ιδέα χρονολογείται στη δεκαετία του 1950, και υποστηριζόταν έντονα από τον Hans Bethe κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970. Εκείνη την εποχή χιζόντουσαν οι πρώτοι ισχυροί αντιδραστήρες σύντηξης, αλλά θα ακολουθήσουν πολλά χρόνια πριν να μπορούσαν να είναι οικονομικά ανταγωνιστικοί. Η ιδέα εγκαταλείφθηκε και παρέμεινε αδρανής μέχρι τη δεκαετία του 2000.

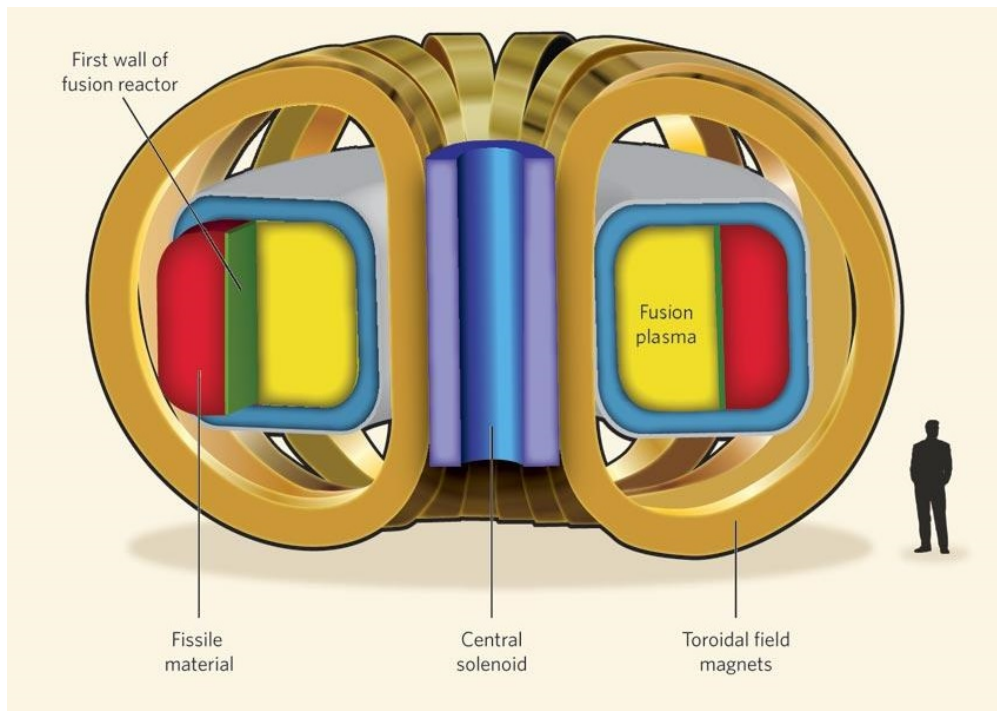


Εικόνα 19: Οι εγκαταστάσεις του Kurchatov Institute National Research Center στη Μόσχα, Ρωσία όπου βρίσκεται υπό κατασκευή Υβριδικός αντιδραστήρας με σύμπραξη Ρωσίας-Κίνας.

9.2. Αρχές Λειτουργίας

Ουσιαστικά σε ένα σύστημα σύντηξης-σχάσης αντικαθιστούμε την κουβέρτα Λιθίου με μια άλλη σχάσιμου υλικού όπως μετάλλευμα φυσικού Ουρανίου ή πυρηνικά απόβλητα. Τα παραγόμενα νετρόνια σύντηξης έχουν αρκετή ενέργεια για να προκαλέσουν σχάση στο ^{238}U όπως και σε πολλά άλλα στοιχεία του καυσίμου συμπεριλαμβανομένων ορισμένων από τα υπερουράνια στοιχεία που περιέχονται στα απόβλητα. Η αντίδραση μπορεί να συνεχιστεί ακόμη και όταν το σύνολο του ^{235}U έχει καταναλωθεί καθώς το ποσοστό ελέγχεται από τα νετρόνια που προσφέρει η σύντηξη και όχι η σχάση.

Η σχάση συμβαίνει φυσικά καθώς κάθε γεγονός δίνει περισσότερα του ενός νετρόνια ικανά να πυροδοτήσουν την συνέχιση της αλυσίδας γεγονότων. Η σύντηξη, τουλάχιστον για Δευτέριο-Τρίτιο, δίνει μόνο ένα νετρόνιο το οποίο δεν είναι ικανό να παράξει περαιτέρω γεγονότα σύντηξης. Όταν ένα νετρόνιο χτυπά την κουβέρτα σχάσιμου υλικού μπορεί να προκύψει μια εκ' των δύο αντιδράσεων, Σε πολλές περιπτώσεις, η κινητική ενέργεια του νετρονίου θα προκαλέσει ένα ή δύο νετρόνια για να απομακρυνθεί από τον πυρήνα χωρίς να προκαλεί σχάση. Αυτά τα νετρόνια έχουν ακόμα αρκετή ενέργεια για να προκαλέσουν άλλα γεγονότα σχάσης. Σε άλλες περιπτώσεις, το νετρόνιο θα συλληφθεί και θα προκαλέσει σχάση, το οποίο θα απελευθερώσει δύο ή τρία νετρόνια. Αυτό σημαίνει ότι κάθε νετρόνιο σύντηξης στο σχεδιασμό σύντηξης σχάσης μπορεί να οδηγήσει μεταξύ δύο και τεσσάρων νετρονίων στο καύσιμο σχάσης.



Εικόνα 20: Η ανατομία ενός υβριδικού Tokamak αντιδραστήρα. Θεωρητικά, με την τοποθέτηση πυρηνικών αποβλήτων στην «κουβέρτα» μεταξύ του πλάσματος και του σχάσιμου υλικού αποικοδομούνται ραδιενεργά προϊόντα της διαδικασίας της σχάσης

Αυτή είναι η βασική ιδέα στην υβριδική έννοια, για κάθε συμβάν σύντηξης, διάφορα γεγονότα σχάσης μπορεί να συμβούν, καθένα από τα οποία εκλύει πολύ περισσότερη ενέργεια από ό, τι το αρχικό συμβάν σύντηξης. Αυτό αυξάνει κατακόρυφα την συνολική απόδοση του αντιδραστήρα. Αυτό έχει προταθεί ως ένας τρόπος για να παραχθούν πρακτικοί αντιδραστήρες σύντηξης πολλαπλασιάζοντας την απόδοση χρησιμοποιώντας φθηνά καύσιμα ή απόβλητα.

Αυτές οι διαδικασίες έχουν την παρενέργεια αναπαραγωγής ^{239}Pu ή ^{233}U , τα οποία μπορούν να αφαιρεθούν και να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε συμβατικούς αντιδραστήρες σχάσης. Αυτό οδηγεί σε μια εναλλακτική σχεδίαση, όπου ο πρωταρχικός σκοπός του αντιδραστήρα σύντηξης-σχάσης είναι επανεπεξεργασίας αποβλήτων σε νέο καύσιμο. Αν και πολύ λιγότερο οικονομική από την χημική επεξεργασία, η διαδικασία αυτή καταστρέφει πολλά επικίνδυνα παράγωγα αντί απλώς να τα απομακρύνει. Αυτό έχει επίσης πλεονεκτήματα για τη μη διάδοση των πυρηνικών όπλων καθώς οι τεχνολογίες εμπλουτισμού και επανεπεξεργασίας συνδέονται με την παραγωγή πυρηνικών όπλων. Ωστόσο, το κόστος του πυρηνικού καυσίμου που παράγεται είναι πολύ υψηλό, και είναι απίθανο να είναι σε θέση να ανταγωνιστεί με τις συμβατικές πηγές.

9.3. Κύκλος Καυσίμων

Υπάρχουν τρία βασικά συστατικά για τον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου στον υβριδισμό: Δευτέριο, Τρίτιο, και σχάσιμα στοιχεία. Το Δευτέριο μπορεί να προέρχεται από διαχωρισμό των ισotόπων του Υδρογόνου στο νερό της θάλασσας. Το Τρίτιο μπορεί να παράγεται στην ίδια την υβριδική διαδικασία με απορρόφηση των νετρονίων σε ενώσεις που φέρουν Λίθιο. Αυτό συνεπάγεται μία επιπλέον κουβέρτα Λιθίου και ένα μέσο συλλογής. Η τρίτη συνιστώσα είναι εξωτερικά προερχόμενα σχάσιμα υλικά από αποστρατικοποιημένες προμήθειες ή εμπορικές ροές των πυρηνικών καυσίμων και αποβλήτων. Σχάση οδηγούμενη από σύντηξη προσφέρει επίσης τη δυνατότητα χρησιμοποίησης Θορίου ως καύσιμο, το οποίο θα αυξήσει σημαντικά τα αποθέματα σχάσιμου υλικού. Ο εξαιρετικά ενεργητικός χαρακτήρας των ταχέων νετρονίων που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια των εκδηλώσεων σύντηξης (μέχρι 0.17 η ταχύτητα του φωτός) μπορεί να επιτρέψει κανονικά μη-σχάσιμο ^{238}U να υποβληθεί σε σχάση απευθείας (χωρίς μετατροπή πρώτα σε ^{239}Pu), επιτρέποντας την χρήση φυσικού Ουρανίου με πολύ χαμηλό εμπλουτισμό.

9.4. Ασφάλεια

Σε αντίθεση με τους τωρινούς εμπορικούς αντιδραστήρες σχάσης, οι υβριδικοί αντιδραστήρες μπορούν να θεωρηθούν εγγενώς ασφαλείς, καθώς παραμένουν σε υποκρίσιμο σημείο υπό όλες τις συνθήκες και η θερμότητα μπορεί να απομακρυνθεί μέσω παθητικών μηχανισμών. Η σχάση οδηγείται από νετρόνια που παρέχονται από γεγονότα σύντηξης, και κατά συνέπεια, δεν είναι αυτοτροφοδοτούμενη. Εάν η διαδικασία της σύντηξης διακοπεί σκόπιμα ή διαταραχθεί από μια μηχανική βλάβη, η σχάση αποσβένει και σταματά σχεδόν αμέσως. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την

αναγκαστική απόσβεση σε ένα συμβατικό αντιδραστήρα με χρήση ράβδων ελέγχου που απορροφούν νετρόνια για να μειωθεί η ροή νετρονίων κάτω από την κρίσιμη κατάσταση.

Ο εγγενής κίνδυνος ενός συμβατικού αντιδραστήρα σχάσης έγκειται στο ότι κάθε κατάσταση μπορεί οδηγεί σε μια θετική ανατροφοδότηση, και κατά συνέπεια, σε μια αλυσιδωτή αντίδραση, όπως συνέβη κατά τη διάρκεια της καταστροφής του Τσερνομπίλ.

Σε μία υβριδική διαμόρφωση οι αντιδράσεις σχάσης και σύντηξης είναι αποσυνδεδεμένες, δηλαδή ενώ η παραγωγή νετρονίων σύντηξης οδηγεί τη σχάση, η ίδια η σχάση δεν έχει καμία επίδραση στην αντίδραση σύντηξης, εξαλείφοντας εντελώς οποιαδήποτε πιθανότητα μιας θετικής ανάδρασης.

10. Επίλογος

Συμπερασματικά, η Σύντηξη αποτελεί μία διεργασία η οποία δύναται να αλλάξει και να εμπλουτίσει τον τρόπο σκέψης όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας και την κατανόηση του σύμπαντος. Με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη νέων σύγχρονων τεχνικών και τεχνολογιών δημιουργούνται νέες ευκαιρίες και προοπτικές ώστε να ξεπεράσει σε ασφάλεια και απόδοση τις προσδοκίες του επιστημονικού χώρου.

Τα είδη των αντιδράσεων και αντιδραστήρων προσδίδουν μεγάλη ευελιξία στην λύση των εμποδίων που σχετίζονται με τη σύντηξη, καθώς μπορούν να συνδυαστούν κατάλληλα για εξουδετέρωση των προβλημάτων αυτών. Για παράδειγμα, η εκπομπή νετρονίων από τις αντιδράσεις 1ης γενιάς μπορεί να αντιμετωπιστεί με εφαρμογή υβριδικών εγκαταστάσεων, η οποία ταυτόχρονα καθιστά ασφαλέστερη τη σχέση και παρέχει δυνατότητες ανακύκλωσης ραδιενεργών αποβλήτων. Αντίστοιχα, το θέμα των νετρονίων μπορεί να λυθεί με χρήση ανετρονικών αντιδράσεων σε σύγχρονους αντιδραστήρες. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει περιθώριο περαιτέρω έρευνας και μελέτης.

Όσον αφορά τα είδη των αντιδραστήρων, αποτελούν τις δύο όψεις του ίδιου νομίσματος, καθώς το κάθε είδος έχει κάτι ξεχωριστό να προσφέρει. Σε γενικές γραμμές έχουμε υψηλότερες προσδοκίες από τον τομέα της Σύντηξης Μαγνητικού περιορισμού καθώς βρίσκεται ένα βήμα μπροστά από τη σύντηξη αδρανειακού περιορισμού σε ερευνητικό επίπεδο, χωρίς όμως να την καθιστά απαρχαιωμένη.

Βιβλιογραφία

- [1]: Π. Μισαηλίδης, Δ. Χαριστός, Εισαγωγή στη Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία: Θεωρία και Εργαστηριακές Ασκήσεις, 1992
- [2]: Κωνσταντίνος Φανούριος Τσάκαλος, “Πυρηνικοί Αντιδραστήρες”, 2011
- [3]: Stefano Atzeni, OP, “The Physics of Inertial Fusion”, 2004
- [4]: <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/energy/temp-press.html>
- [5]: http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-10352-0_5 Alak Ray, “Massive Stars as Thermonuclear Reactors and Their Explosions Following Core Collapse”, Principles and Perspectives in Cosmochemistry, Astrophysics and Space Science Proceedings pp 209-275, March 2010
- [6]: http://www.njleg.state.nj.us/2006/Bills/A3000/2731_11.HTM Assembly No 2731, State of New Jersey, 212th Legislature, “Aneutronic Fusion as Class I Renewable Energy as defined for purposes of “Electric discount and Energy competition Act””, March 2006
- [7]: Quimby, D.C., High Thermal Efficiency X-ray energy conversion scheme for advanced fusion reactors, ASTM Special technical Publication, v.2, 1977, pp. 1161–1165
- [8]: Rand McNally, J., 1971. For an early survey of advanced fuel cycles. Nucl. Fusion 11, 187
- [9]: T. Honda, Y. Nakao, Y. Honda, K. Kudo, Nucl. Fusion 31 (1991) 851
- [10]: J. Dawson, Fusion, vol. 2, Academic Press, New York, 1981
- [11]: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/658936> Nuckolls, J. H., LLNL, “Early Steps Towards Inertial Fusion Energy”, 1998
- [12]: Archives of Library University of Stuttgart, Konvolut 7, Estate of Professor Dr. Hoecker, 1956 von Weizsäcker, Meeting in Göttingen
- [13]: ICF Review
- [14]: <http://www.springer.com/jp/book/9783642164644> Fortor, Vladimir E., Extreme States of Matter on Earth and in the Cosmos, 2011
- [15]: <http://arxiv.org/abs/physics/0408057> A.C. Hayes, G. Jungman, J.C. Solem, P.A. Bradley, R.S. Rundberg, “Prompt Beta Spectroscopy as a Diagnostic for Mix in Ignited NIF Capsules”, August 2004

[16]: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/olson2/> Britton Olson, “Rayleigh-Taylor Instability and Fusion”, Submitted as coursework for Physics 241, Stanford University, 2011

[17]: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/239830.pdf> H. T. Powell, E. M. Campbell, W.J. Hogan and C.D. Orth, “Research in Inertial Sciences: Now and Fusion in the Future”, 3rd Symposium Current Trends in International Fusion Research: Review and Assessment, Washington, D.C., March 8-12, 1999

[18]:
https://books.google.gr/books/about/Current_Trends_in_International_Fusion_R.html?id=Vq8MEB8sJGoC&redir_esc=y Emilio Panarella, NRCC, “Current Trends in International Fusion Research: Proceedings of the Third Symposium”, 2002

[19]: John R. de Laeter / John Karl Böhlke / P. De Bièvre / H. Hidaka / H. S. Peiser / K. J. R. Rosman / P. D. P. Taylor, “Atomic weights of the elements. Review 2000 (IUPAC Technical Report)”, Pure and Applied Chemistry, Volume 75, Issue 6, January 2003

[20]: Cowen, R., "Two-laser boron fusion lights the way to radiation-free energy". Nature, 2003

[21]: Hans A. Bethe, “The Fusion Hybrid”, Physics Today, May 1979