



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ ΦΥΣΙΚΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΥΡΗΝΙΚΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

ΜΙΧΑΗΛ ΙΩΑΝΝΟΥ ΚΑΤΣΙΠΗΣ

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ευάγγελος Π. Χίνης

Ε.Μ.Π.

2013

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε με την υποστήριξη τριών επιστημόνων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου.

Έτσι, αρχικά οφείλω ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη και ευχαριστίες στον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. **Ευάγγελο Π. Χίνη**, όχι μόνο γιατί ανέλαβε την επίβλεψη αυτής της εργασίας μου, αλλά και γιατί με την καθοδήγησή του επετεύχθη η ποιοτική αναβάθμιση της δουλειάς μου.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. **Μάριο Αναγνωστάκη** και Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. **Νικόλαο Πετρόπουλο**, οι οποίοι ως μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της παρούσης εργασίας, με βοήθησαν καθοριστικά στην τελειοποίηση αυτής .

Επίσης, νιώθω βαθιά ευγνωμοσύνη και θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Κ. Παρασκευαΐδη Αν. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και τα μέλη της επιτροπής που καθώς με έκαναν δεκτό για μεταπτυχιακές σπουδές στο Ε.Μ.Π., με τίμησαν και μου έδωσαν την ευκαιρία να πραγματοποιήσω ένα σπουδαίο όνειρό μου.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στους Καθηγητές μου του Μεταπτυχιακού τμήματος κυρίου Κ. Παπατριανταφύλλου, Μ. Αναγνωστάκη, Μ. Πίσσα, Δ. Μπονάτσο, Ε. Χίνη, Λ. Τσέτσερη, και Α. Θεοφίλου, οι οποίοι υπήρξαν για μένα μυητές σε τόσο σπουδαία και ενδιαφέροντα επιστημονικά πεδία. Στο πλαίσιο της συνεργασίας μας, η θετική τους στάση, η ενθάρρυνση, οι συμβουλές και η καθοδήγησή τους τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο ήταν πολύτιμες για την ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.

Με την ευκαιρία, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου (τον Σωτήρη, τη Φιλοθέη, τον Κωνσταντίνο και την Αντιγόνη), για τη συνεργασία μας και ιδιαίτερα τον συμφοιτητή, συνάδελφο και φίλο μου κ. Νίκο Θεοδώρου, για την αλληλεγγύη του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αν. Καθηγήτρια Π. Αθηνών κα Χ. - Α. Μητσοπούλου και τον Καθηγητή Π. Αιγαίου κ. Ιωάννη Γκιάλα, που με τίμησαν με την υποστήριξή τους δείχνοντας ενδιαφέρον και εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ε.Μ.Π. το οποίο αποτέλεσε ένα γόνιμο χώρο μόρφωσης, γνώσεων, εργασίας, έρευνας, ανταλλαγής και ζύμωσης ιδεών, τόσο στην αφετηρία των σπουδών μου (πτυχιακές προ 30ετίας), όσο και των μεταπτυχιακών μου σπουδών σήμερα. Με την ευκαιρία αυτή, ευχαριστώ θερμά, και τους τότε δασκάλους μου για την τόσο εποικοδομητική συνεργασία και την προσφορά τους σε όλα τα επίπεδα (επιστημονικής μου κατάρτισης και κοινωνικής μου μόρφωσης).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου, την σύζυγό μου Νίκη και τους γιούς μου Ιωάννη και Γεώργιο, οι οποίοι στην προσπάθειά μου αυτή ήταν πάντα διαθέσιμοι, για στήριξη και κατανόηση, καθώς η δική μου πίεση και η μόνιμη αγωνία μου για την εξοικονόμηση χρόνου σίγουρα δεν ήταν η πιο ηρεμιστική συνθήκη γι' αυτούς. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον γιό μου Ιωάννη, ο οποίος παρά το νεαρό της ηλικίας του, μόλις 15 ετών, με βοήθησε «δείχνοντας μεγάλη αγάπη και σε μένα και στη Φυσική».

Αφιερώνω αυτήν την μεταπτυχιακή διπλωματική μου εργασία στην Ιερή Μνήμη των γονιών μου Ιωάννη και Βαρβάρας Κατσίπη._

Μιχαήλ Ιωάννου Κατσίπης

Ε.Μ.Π. 2013

Περιοχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή	σελ. 7
---------------	--------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2. Θεωρία της ελεγχόμενης σύντηξης.

2.1. Γενικά	σελ. 15
2.1.1. Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια σύνδεσης	σελ. 16
2.2. Η σύντηξη στη φύση	σελ. 23
2.2.1. Αυτοσυντηρούμενη σύντηξη.	σελ. 23
2.2.2. Κύκλος άνθρακα	σελ. 23
2.2.3. Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες	σελ. 25
2.2.4. Σίδηρος: Ο βαρύτερος πυρήνας	σελ. 25
2.3. Αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης	σελ. 26
2.3.1. Γενικά	σελ. 26
2.3.2. Κρίσιμη θερμοκρασία αναφλέξεως	σελ. 31
2.3.3. Χρόνος περιορισμού – Πυκνότητα ιόντων	σελ. 32
2.3.4. Συνθήκες επωφελούς λειτουργίας αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης.	σελ. 34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3. Σύντομο Τεχνολογικό Ιστορικό.

3.1. Γενικά	σελ. 35
3.1.1. Σύντομο ιστορικό μαγνητικής σύντηξης	σελ. 36
3.1.1.1. Σύντηξη: Προϊστορία 1920 – 1938	σελ. 36

3.1.1.2.Οι πρώτες πετυχημένες προσπάθειες 1946 – 1958	σελ. 37
3.1.1.3. Διεθνείς συνεργασίες 1958 – 1968	σελ. 37
3.1.1.4. Τα Tokamak – μετά το 1968	σελ. 38
3.2. Περιορισμός με μαγνητικό πεδίο	σελ. 39
3.3. Αδρανειακός περιορισμός	σελ. 50
3.4. Διαγνωστικά και μοντελοποίηση του πλάσματος	σελ. 53
3.5. Πρόοδοι στην έρευνα για τη μαγνητική σύντηξη	σελ. 53
3.6. Πειραματικές διατάξεις μαγνητικής σύντηξης στην Ευρώπη και το μελλοντικό ITER	σελ. 54
3.7. Πειραματικά Tokamak	σελ. 57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

4. Η σύγχρονη κατάσταση. Τα άλυτα ακόμα προβλήματα.

4.1. Το ενεργειακό πρόβλημα	σελ. 61
4.2. Η Ευρωπαϊκή ένωση εξαρτάται από τρίτες χώρες, αφού οι ενεργειακοί πόροι που διαθέτει δεν της επαρκούν	σελ. 62
4.3. Ασφαλής ενέργεια	σελ. 63
4.4. Μακροπρόθεσμη τεχνολογία – προβλήματα	σελ. 64
4.5. Επιπτώσεις στο περιβάλλον	σελ. 65
4.6. Οικονομοτεχνικά θέματα στην πυρηνική σύντηξη	σελ. 67
4.7. Ο ITER και η Ευρώπη	σελ. 67
4.8. Διεθνείς οργανισμοί σύντηξης	σελ. 69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

5. Εκτιμώμενη μελλοντική πορεία.

5.1. Γενικά	σελ. 71
5.2. Βήματα ...	σελ. 72
5.3. Έρευνα	σελ. 75
5.4. Αντιδράσεις	σελ. 77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

6. Συμπεράσματα.

6.1. Τα πλεονεκτήματα της σύντηξης	σελ. 79
6.2. Τα μειονεκτήματα της σύντηξης	σελ. 82
6.3. Εκπαίδευση και έρευνα	σελ. 83
6.4. EIROforum	σελ. 83
6.5. Συμπεράσματα	σελ. 84

ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Λεξιλόγιο	σελ. 85
B. Βιβλιογραφία – Πηγές	σελ. 95
B.1. Βιβλιογραφία	σελ. 95
B.2. Ιστότοποι	σελ. 97
B.3. Άλλες Πηγές	σελ. 100
B.4. Διευθύνσεις για περαιτέρω πληροφορίες	σελ. 102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

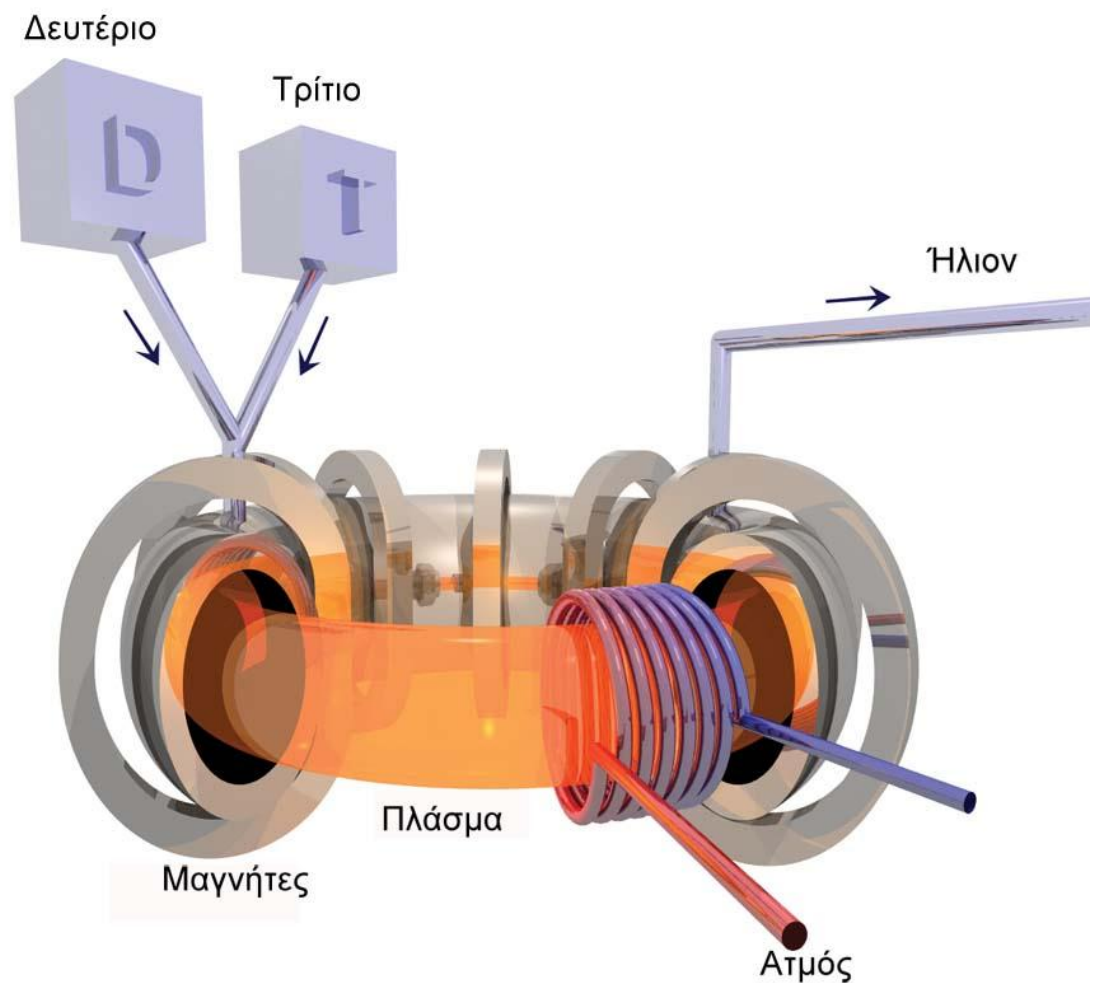
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Σχήμα 1.1 Έκρηξη πυρηνικής βόμβας [B1.13, διαφ. 3]

“ Μέχρι το πρόσφατο παρελθόν χρησιμοποιούσαμε τη σύντηξη για καταστροφικούς σκοπούς (Πυρηνικά Όπλα) ” [B.1.13., διαφ. 3]

Οι ελπίδες ότι θα δοθεί ένα τέλος στο ενεργειακό πρόβλημα είναι πια βάσιμες. Τις τελευταίες δεκαετίες μία μεγάλη ανακάλυψη, που αντιγράφει τον τρόπο παροχής ενέργειας του Ηλίου στο διάστημα και δηλώνει μία διαφορετική μορφή πυρηνικής ενέργειας, βρίσκεται στον δρόμο της πειραματικής εφαρμογής της.



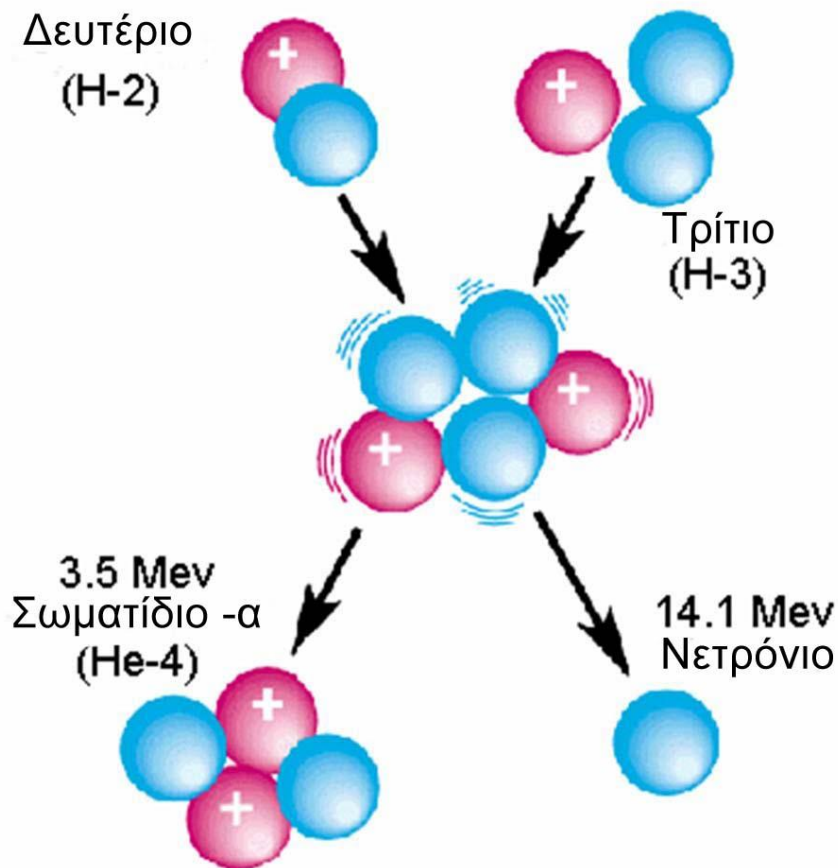
Σχήμα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση πυρηνικού αντιδραστήρα DT [B.2.14.]

Για την ανάπτυξη ενός αντιδραστήρα σύντηξης στηρίζομαστε στις αντιδράσεις σύντηξης μεταξύ δύο ισοτόπων του Υδρογόνου (του Δευτερίου D και του Τριτίου T). Οι αντιδράσεις σύντηξης χρειάζονται εξαιρετικά δύσκολες να επιτευχθούν θερμοκρασίες.

Στη φύση το Δευτέριο (μη ραδιενεργό) υπάρχει άφθονο στο νερό (35 γραμμάρια Δευτερίου ανά κυβικό μέτρο νερού).

Στη γη υπάρχει άφθονο Λίθιο (ελαφρύ μέταλλο) από το οποίο μπορεί να παραχθεί Τρίτιο (ραδιενεργό ισότοπο του Υδρογόνου με χρόνο ημίσειας ζωής 12,3 περίπου χρόνια) στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα σύντηξης.

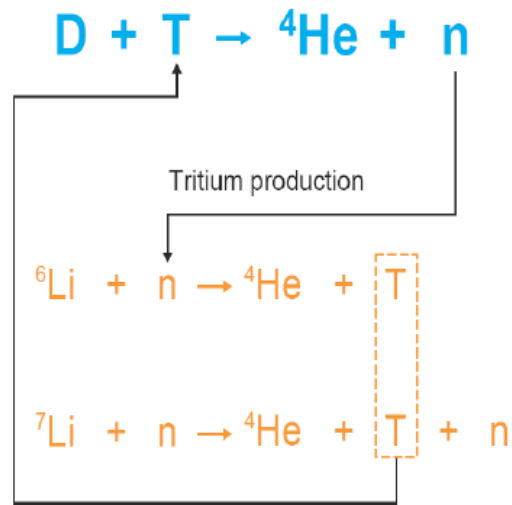
Έτσι έχουμε παραγωγή ενός σωματιδίου α (πυρήνας Ηλίου) και ενός Νετρονίου μεγάλης ενέργειας.



Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση πυρηνικής αντίδρασης DT [B.2.14.]

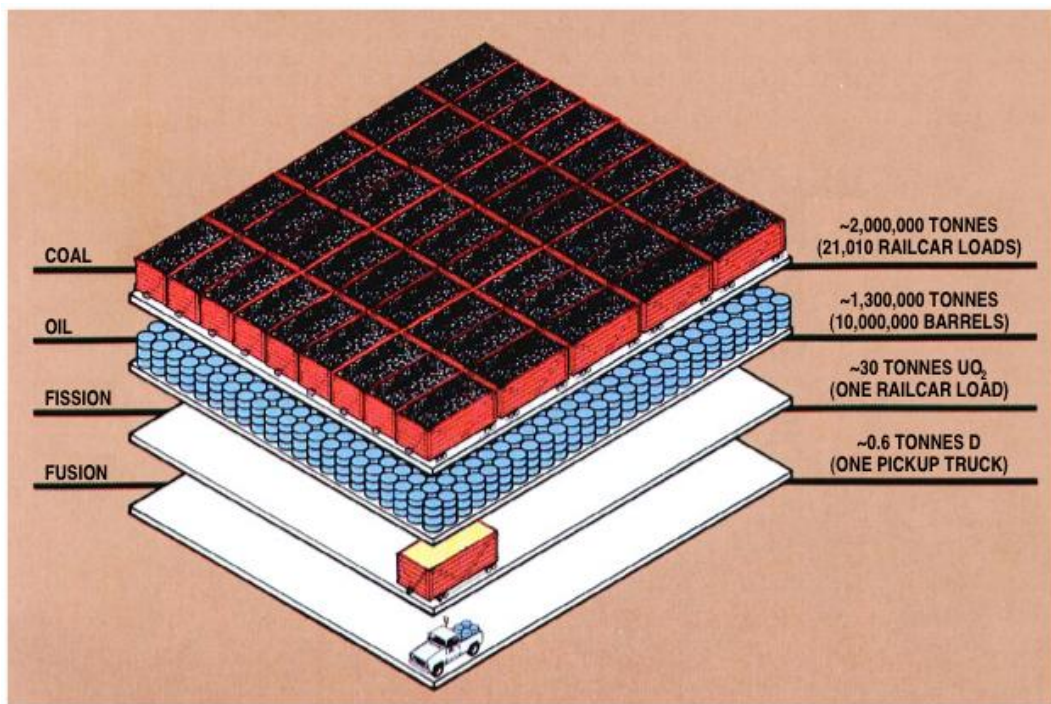
Τα Νετρόνια διαφεύγουν από το πλάσμα και καθώς επιβραδύνονται πάνω στο μανδύα Λιθίου που περιβάλλει το πλάσμα μετατρέπουν το Λίθιο σε Τρίτιο. Το Τρίτιο ξαναμπαίνει στο θάλαμο κενού σαν καύσιμο κι η θερμότητα που παράγεται χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός θέτει σε κίνηση στροβίλους που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια.

Ο βασικός κύκλος αντιδράσεων για την παραγωγή ενέργειας με τον οποίο πειραματιζόμαστε είναι:



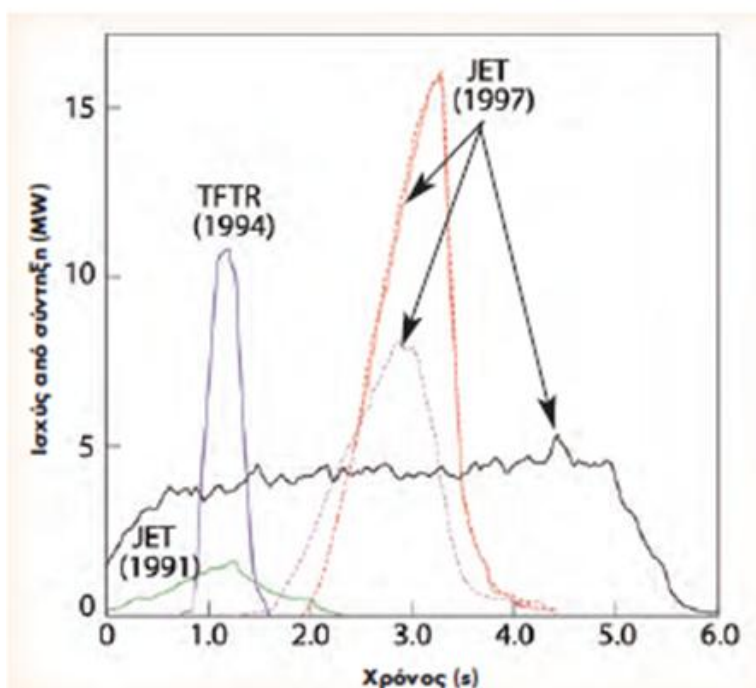
Σχήμα 1.4

Το καύσιμο που μπορεί να μεταφερθεί με ένα μικρό φορτηγό μπορεί να θέσει σε λειτουργία μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία τροφοδοτεί μια πόλη ενός εκατομμυρίου κατοίκων για ένα έτος.



Σχήμα 1.5 Σύγκριση καυσίμων

Σήμερα η μεγαλύτερη και η μόνη ικανή να λειτουργήσει με καύσιμο από μείγμα D-T προς το παρόν, εγκατάσταση σύντηξης στον κόσμο είναι το Ευρωπαϊκό Τόκαμακ JET (Joint European Torus), το οποίο βρίσκεται στο Culham του Ηνωμένου Βασιλείου. Τα αποτελέσματα ξεπέρασαν κάθε προσδοκία και το 1997 πέτυχε το παγκόσμιο ρεκόρ των 16 MW στην παραγωγή ισχύος από σύντηξη.



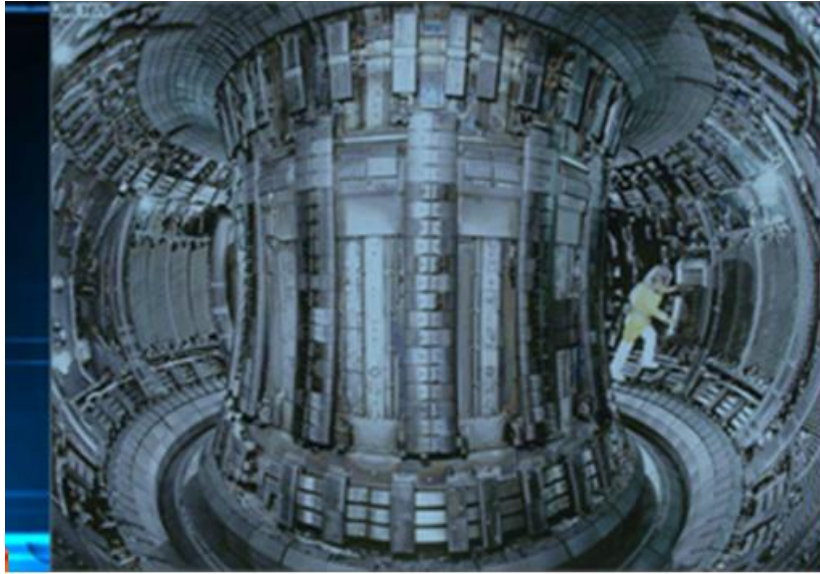
Σχήμα 1.6 Επιτεύγματα σε ισχύ από σύντηξη διάφορων εγκαταστάσεων παγκοσμίως[Β.1.8., σελ. 14]



Σχήμα 1.7 Αεροφωτογραφία του Culham Science Centre (Oxfordshire 2008) JET 2007 (Λειτουργεί από το 1983) [B.2.25.]



Σχήμα 1.8 Αίθουσα ελέγχου JET [B.2.25.]

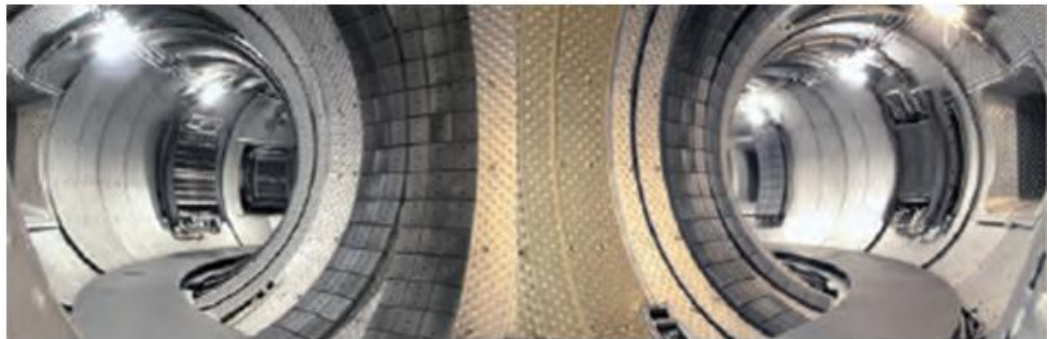


Σχήμα 1.9 Εσωτερικός θάλαμος πλάσματος JET [B.2.25.]



Σχήμα 1.10 Εξωτερική όψη των εγκαταστάσεων JET [B.2.25.]

Για την πρόοδο στην έρευνα της σύντηξης φιλοξενούνται στον ευρωπαϊκό χώρο πολλές και μεγάλες πειραματικές εγκαταστάσεις. Έτσι έχουμε το πρόσφατο (2003) μεγάλο επίτευγμα στη Γαλλία, τη μεγάλη τύπου Tokamak (TORE SUPRA), εγκατάσταση όπου παρήχθη μια υψηλών επιδόσεων εκκένωση πλάσματος με ρεκόρ διάρκειας 6,5 λεπτά και η συνολική ποσότητα εξωτερικής ενέργειας η οποία απαιτήθηκε για τη διατήρηση του πλάσματος στη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου και η οποία έπρεπε επίσης να απαχθεί ως θερμότητα, ήταν μεγαλύτερη από 1 GJoule (ικανή να βράσει τρεις τόνους νερό).



Σχήμα 1.11 Υψηλής ποιότητας εκκένωση πλάσματος με διάρκεια ρεκόρ στη διάταξη Tore Supra (Cadarache, Γαλλία) [B.1.8., σελ. 14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο Ήλιος μας και οι άλλοι αστέρες τροφοδοτούνται με ενέργεια μέσω μιας διεργασίας που ονομάζεται σύντηξη. Κατά την διεργασία αυτή πυρήνες ατόμων μικρής μάζας συντήκονται και απελευθερώνουν ταυτόχρονα ενέργεια.

Στον πυρήνα του Ήλιου, η τεράστια πίεση λόγω της βαρύτητας επιτρέπει τη σύντηξη σε θερμοκρασίες περίπου 10 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου. Σε αυτές τις θερμοκρασίες ένα αέριο μετατρέπεται σε πλάσμα, του οποίου τα ηλεκτρόνια έχουν πλήρως διαχωριστεί από τους ατομικούς πυρήνες (ιόντα). Το πλάσμα είναι η τέταρτη κατάσταση της ύλης και χαρακτηρίζεται από τις δικές του, ξεχωριστές, ιδιότητες. Η έρευνα στη φυσική πλάσματος εστιάζεται στη μελέτη αυτών των ιδιοτήτων.

Παρότι η κατάσταση του πλάσματος δεν είναι πολύ συνηθισμένη στη Γη, περισσότερο από το 99% του Σύμπαντος αποτελείται από πλάσμα. Στη γη μπορούμε να παράγουμε πολύ χαμηλότερες πιέσεις, στις οποίες οι επιθυμητοί ρυθμοί παραγωγής ενέργειας από σύντηξη απαιτούν θερμοκρασίες πάνω από 100 εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου. Για να πετύχουμε τέτοιες θερμοκρασίες απαιτείται με τη σειρά της η ισχυρή θέρμανση του πλάσματος και οι θερμικές απώλειες να ελαχιστοποιηθούν μέσω της διατήρησης του θερμού πλάσματος σε ικανή απόσταση από τα τοιχώματα του δοχείου που το περιέχει. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του πλάσματος μέσα σε έναν δημιουργημένο από ισχυρά μαγνητικά πεδία τοροειδή κλωβό. Αυτά τα μαγνητικά πεδία εμποδίζουν τη διαφυγή των ηλεκτρικά φορισμένων σωματιδίων του πλάσματος: πρόκειται για την πλέον

προηγμένη τεχνολογία, με την οποία ασχολούνται και στην οποία βασίζονται τα σύγχρονα προγράμματα σύντηξης.

2.1.1. Έλλειμμα Μάζας - Ενέργεια σύνδεσης

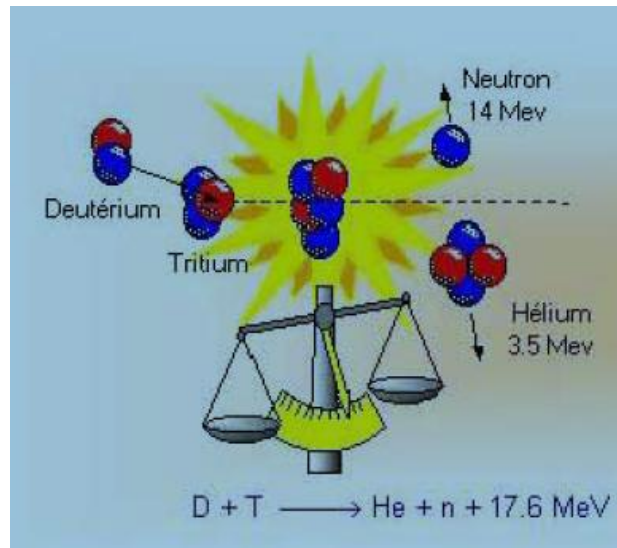
Όπως για να χωρίσουμε μια σταγόνα υγρού σε μικρότερες σταγόνες πρέπει να καταβάλλουμε έργο, ομοίως για να αποσπάσουμε ένα σωματίδιο από τον πυρήνα ενός ατόμου πρέπει να προσφέρουμε ενέργεια.

Αντίστροφα η ενσωμάτωση ενός σωματιδίου στον πυρήνα μας προσφέρει ενέργεια. Με την εφαρμογή αυτής της αρχής θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία μας .

Πράγματι, έστω ότι έχουμε ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο σε ηρεμία και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Οι μάζες τους είναι αντίστοιχα 1,007825 u για το πρωτόνιο και 1,008665 u για το νετρόνιο. Φέρνουμε σε τόσο μικρή απόσταση αυτά μεταξύ τους, ώστε να δρουν μεταξύ τους οι πυρηνικές δυνάμεις και σχηματίζουμε έτσι το Δευτέριο που έχει μάζα το άθροισμα το δύο παραπάνω μαζών, δηλαδή 2,016490 u. Όμως οι μετρήσεις δείχνουν ότι το Δευτέριο έχει μάζα 2,014102 u. Αυτή η διαφορά μάζας $2,016490 \text{ u} - 2,014102 \text{ u} = 0,002388 \text{ u}$ «έχει χαθεί», διότι κατά την παραπάνω συσσωμάτωση νετρονίου και πρωτονίου, έχουμε έκκλυση ενέργειας.

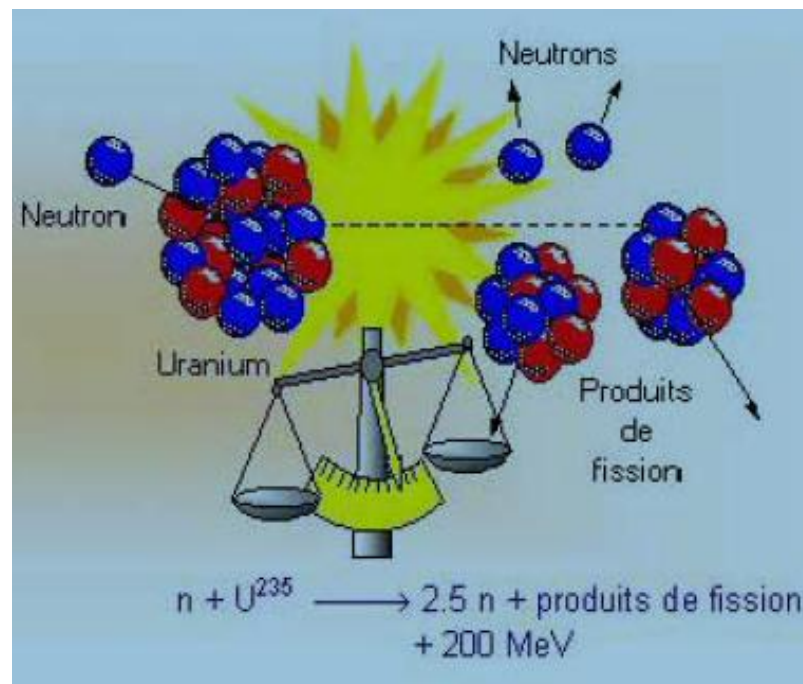
Έτσι μπορούμε να μιλήσουμε για «έλλειμμα μάζας του πυρήνα» και για την ισοδύναμη της μάζας αυτής «ενέργεια σύνδεσης» του πυρήνα.

Επειδή το 1 u, ισοδυναμεί με ενέργεια 931,50 MeV, η παραπάνω ενέργεια σύνδεσης είναι ίση με $0,002388 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV} = 2,224 \text{ MeV}$, ενέργεια διόλου ευκαταφρόνητη.



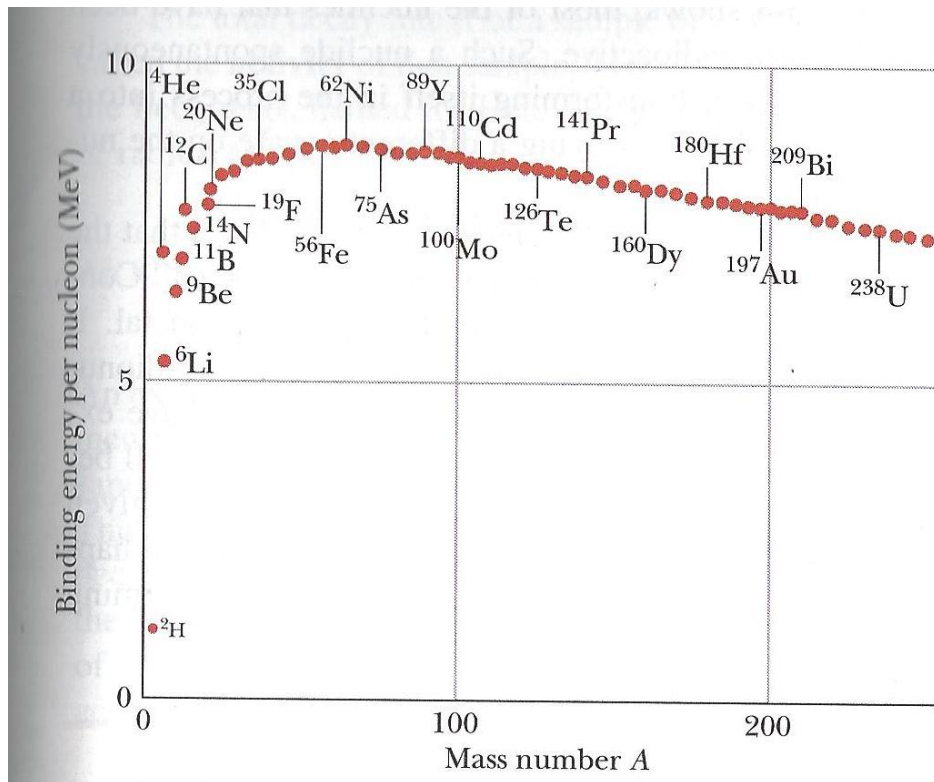
Σχήμα 2.1 Αντίδραση DT [B.1.7.]

Η μάζα των πυρήνων που προκύπτουν είναι μικρότερη από την μάζα των αντιδρώντων πυρήνων (Einstein, $E=mc^2$).



Σχήμα 2.2 Σχάση βαρέων πυρήνων Ουρανίου [B.1.7.]

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο σαν συνάρτηση του μαζικού αριθμού.



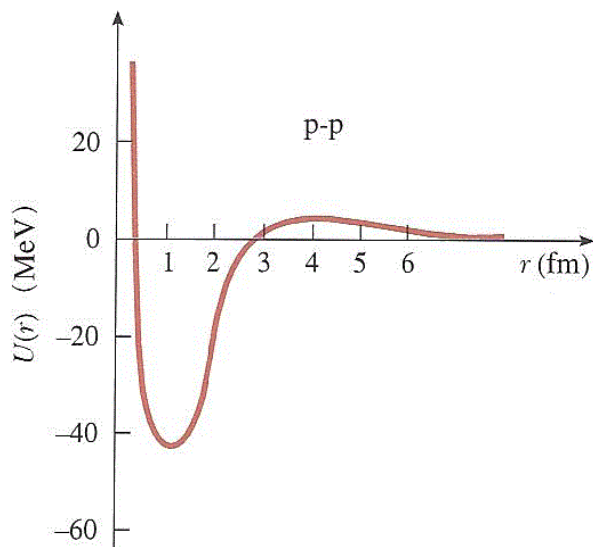
Σχήμα 2.3 Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του μαζικού αριθμού
[B.1.5., σελ. 1079]

Η παραπάνω καμπύλη είναι σημαντική στη λήψη ενέργειας από σύντηξη πυρήνων ελαφρών προς βαρύτερους και από σχάση βαρύτερων πυρήνων σε ελαφρότερους, και μάλιστα σε κείνους που έχουν τη μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (μεσαία στοιχεία περιοδικού πίνακα, A περίπου 60).

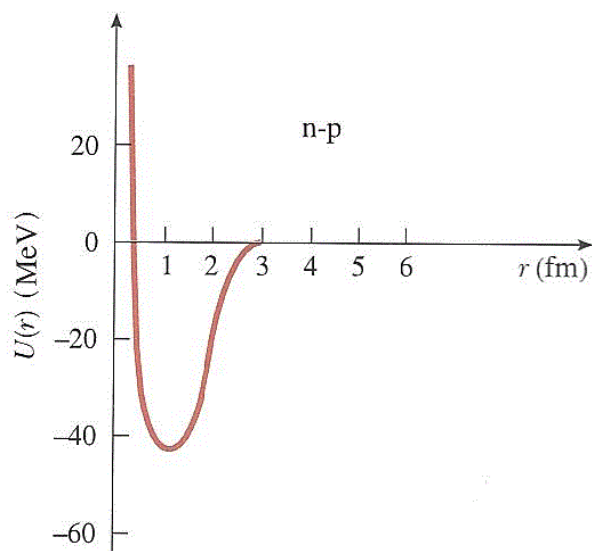
Ειδικότερα η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι περίπου 8 MeV. Για το δευτέριο η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι $(2,224/2)$ 1,112 MeV.

Η καμπύλη για $A > 40$ μεταβάλλεται αργά, δηλαδή επέρχεται κορεσμός της πυρηνικής δύναμης, καθώς ένα συγκεκριμένο νουκλεόνιο αλληλεπιδρά μόνο με ένα περιορισμένο αριθμό άλλων νουκλεονίων που θεωρούνται «κοντινότεροι γείτονες» στην δομή της πυκνής διάταξης των νουκλεονίων στον πυρήνα τους.

Η απωστική δύναμη Coulomb μέσα στον πυρήνα σε μικρές αποστάσεις αδυνατεί έναντι της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Σε άλλη περίπτωση δεν θα είχαμε σταθερούς πυρήνες. Το φορτίο δεν επηρεάζει την ισχυρή πυρηνική δύναμη δηλαδή οι πυρηνικές δυνάμεις που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση πρωτονίου – πρωτονίου, νετρονίου – νετρονίου και πρωτονίου - νετρονίου, είναι περίπου ίδιες, εκτός από την πρόσθετη απωστική δύναμη Coulomb για την αλληλεπίδραση πρωτονίου-πρωτονίου, όπως αυτό φαίνεται στα παρακάτω δύο σχήματα που δείχνουν την δυναμική ενέργεια σαν συνάρτηση της απόστασης των σωματιδίων p - p και n - p .



(α)



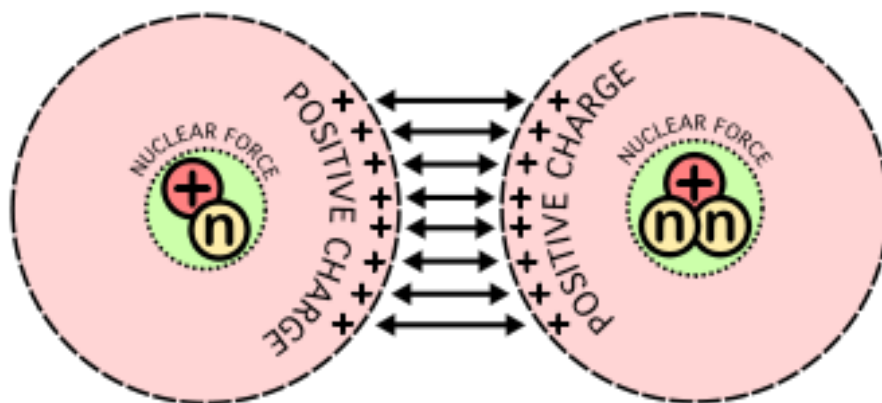
(β)

Σχήμα 2.4 (α) Δυναμική ενέργεια συναρτήσεως της απόστασης των σωματιδίων για το σύστημα πρωτόνιο – πρωτόνιο. (β) Δυναμική ενέργεια συναρτήσεως της απόστασης των σωματιδίων για το σύστημα νετρόνιο – πρωτόνιο. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο καμπύλες οφείλεται κυρίως στην μεγάλη άπωση Coulomb στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης πρωτονίου – πρωτονίου.

[B.1.4., σελ. 445]

Παρατηρούμε ότι για μεγάλες τιμές του r έχουμε την απωστική δύναμη Coulomb και θετική δυναμική ενέργεια στην περίπτωση του p-p, ενώ στην περίπτωση του n-p δεν υπάρχει δύναμη Coulomb, ούτε δυναμική ενέργεια.

Όταν η απόσταση πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή περίπου 3fm (πυρηνική ακτίνα), τότε αρχίζει απότομη κάμψη της καμπύλης, παίρνει αρνητικές τιμές (έχουμε ισχυρή πυρηνική ελκτική δύναμη και στις δύο περιπτώσεις) και φτάνει και στις δύο περιπτώσεις στο ίδιο ελάχιστο αφού όπως είπαμε οι αλληλεπιδράσεις είναι σχεδόν ανεξάρτητες από το φορτίο.

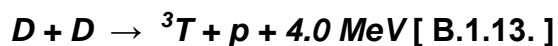
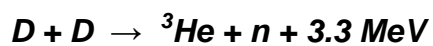
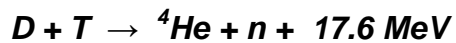
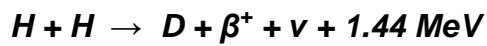


Σχήμα 2.5 Ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις [B.2.16.]

Για αποστάσεις της τάξεως των ακτινών του νουκλεονίου η ελκτική πυρηνική δύναμη είναι μεγαλύτερη από την απωστική ηλεκτρική δύναμη . Γι' αυτό η κυριότερη τεχνική δυσκολία για την σύντηξη είναι το πλησίασμα των νουκλεονίων σε αρκετά μικρές αποστάσεις ώστε να πραγματοποιηθεί η σύντηξη των νουκλεονίων.

Άρα θεωρητικά, μπορούμε να λάβουμε ενέργεια κάνοντας σύντηξη ελαφρών πυρήνων π.χ. υδρογόνου και φτιάχνοντας έτσι πυρήνες He ή αντίθετα κάνοντας σχάση πυρήνων μεγάλου μαζικού αριθμού, π.χ. μεγαλύτερου από 200 και φτιάχνοντας έτσι 2 πυρήνες μαζικών αριθμών περίπου 100.

Συνηθισμένες αντιδράσεις σύντηξης ισοτόπων του Υδρογόνου τις οποίες μελετάμε:



Οι προσπάθειες της σύγχρονης παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας αφιερώνονται εδώ και αρκετά χρόνια στην ανεύρεση μεθόδων εκμετάλλευσης των δύο παραπάνω φαινομένων για την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή της σύντηξης που θα δούμε εκτενέστερα στην παρούσα εργασία και της σχάσης η οποία εδώ και χρόνια είναι γνωστή και χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας.

2.2. Η σύντηξη στη φύση

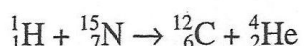
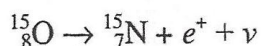
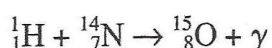
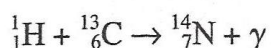
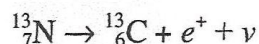
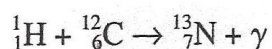
2.2.1. Αυτοσυντηρούμενη σύντηξη.

Αυτοσυντηρούμενες αντιδράσεις σύντηξης πραγματοποιούνται κάτω από συνθήκες ακραίων θερμοκρασιών και πυκνότητας. Η υψηλή θερμοκρασία δίνει στους πυρήνες ενέργεια για να υπερνικήσουν την ηλεκτρική άπωση και να έρθουν κοντά, η δε υψηλή πυκνότητα εξασφαλίζει την υψηλή συχνότητα συγκρούσεων.

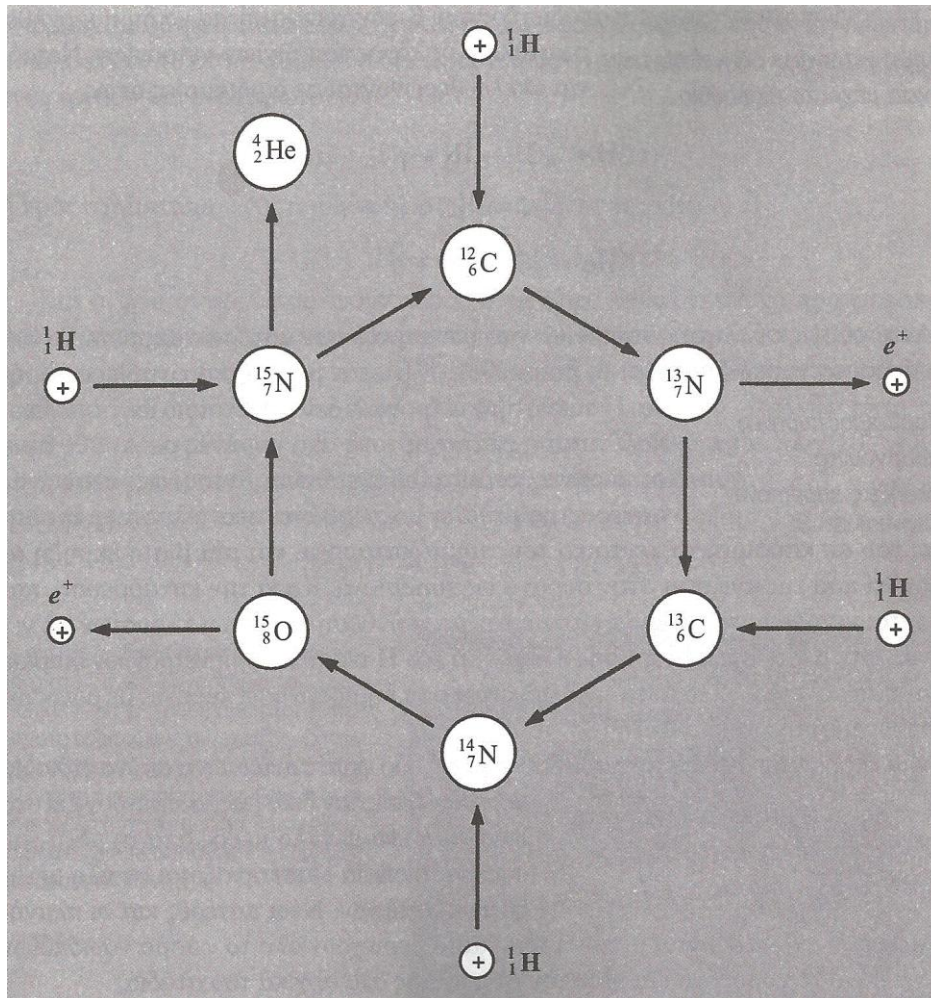
Τέλος επειδή μπορεί να χρειαστεί αρκετός χρόνος για την σύντηξη πρωτονίων μέχρι το σχηματισμό ηλίου απαιτείται και απαιτείται η ύπαρξη μεγάλης αλληλεπιδρώσας μάζας π.χ. ήλιος.

2.2.2. Κύκλος άνθρακα

Ο πυρήνας του ήλιου έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία (περίπου $1,5 \times 10^7$ K), ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί ο κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου. Υπάρχουν όμως και αστέρια με υψηλότερες θερμοκρασίες στο εσωτερικό τους και σ'αυτά κυριαρχεί ο κύκλος του άνθρακα, όπως αυτός περιγράφεται στις παρακάτω αντιδράσεις.



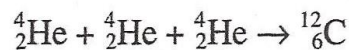
Εδώ ο αρχικός πυρήνας του άνθρακα (C) που μοιάζει με καταλύτη παρουσιάζεται πάλι στο τέλος εκτός φυσικά από τα τέσσερα πρωτόνια, το ένα σωματίο α, τα δύο ποζιτρόνια και τα 24,7 MeV ενέργειας.



Σχήμα 2.6 Ο κύκλος του άνθρακα επίσης συμπεριλαμβάνει τέσσερα υδρογόνα τα οποία τελικά θα σχηματίσουν έναν πυρήνα ηλίου. Ο πυρήνας ${}^{12}_6\text{C}$ δεν μεταβάλλεται στην διαδικασία. Ο κύκλος συμβαίνει σε αστέρια θερμότερα από τον ήλιο. [B.1.9., σελ. 611]

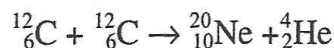
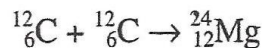
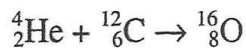
2.2.3. Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες

Εκτός από τις αντιδράσεις σύντηξης που παράγουν ήλιο (He) έχουμε κι άλλες αντιδράσεις στον ήλιο και τ' αστέρια. Καθώς το υδρογόνο γίνεται ήλιο, η βαρυτική συστολή συμπιέζει τον πυρήνα και ανεβάζει τη θερμοκρασία του σε 10^8 K, με συνέπεια να δημιουργείται σύντηξη του ηλίου, κατά την οποία σχηματίζεται πυρήνας άνθρακα και απελευθερώνεται ενέργεια $7,5 \text{ MeV}$:



2.2.4. Σίδηρος : Ο σταθερότερος πυρήνας.

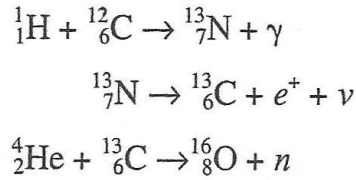
Σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες βλέπουμε τον άνθρακα να συμμετέχει σε πολλές αντιδράσεις σύντηξης όπως τις παρακάτω .



Όσο μεγαλύτερο είναι το αστέρι, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του και τόσο μεγαλύτεροι οι πυρήνες που μπορεί να σχηματιστούν, ώστε σε αστέρια με μάζα δεκαπλάσια της μάζας του ήλιου να σχηματίζεται ο πυρήνας του σιδήρου ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ που είναι ο σταθερότερος πυρήνας, δηλαδή με τη μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο. Έτσι κάθε σύγκρουση μεταξύ ενός πυρήνα σιδήρου και ενός άλλου πυρήνα με αρκετή ενέργεια οδηγεί σε αντίδραση, κατά την οποία σπάει ο πυρήνας του σιδήρου και δεν σχηματίζεται βαρύτερος πυρήνας.

Βαρύτεροι πυρήνες από αυτούς του σιδήρου μπορούν να δημιουργηθούν μέσω της διαδοχικής σύλληψης νετρονίων και στη συνέχεια αποδιεγέρσεων β αν

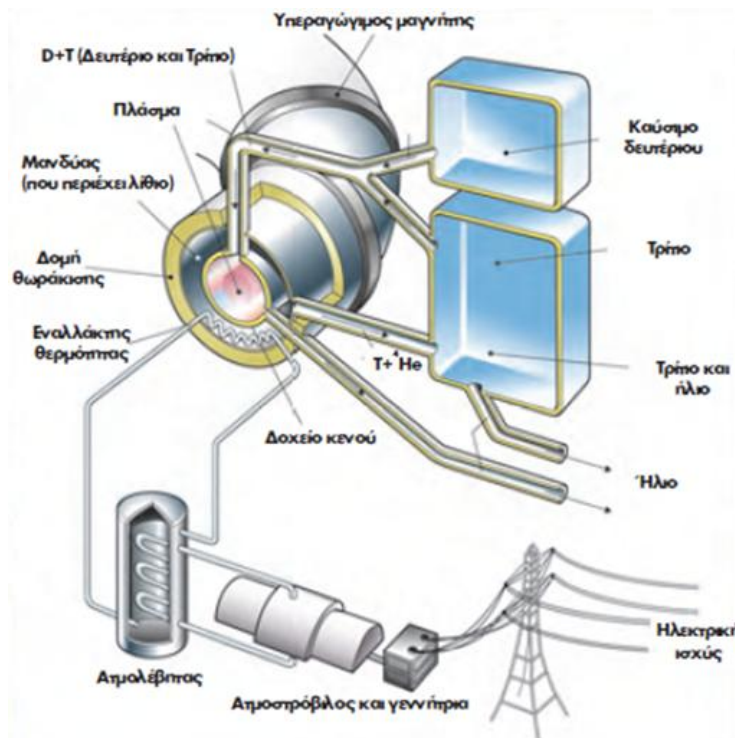
χρειαστεί για να δημιουργηθεί ο κατάλληλος λόγος πρωτονίων-νετρονίων. Απελευθέρωση νετρονίων έχουμε:



2.3. Αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης

2.3.1. Γενικά

Το μεγάλο ερώτημα είναι πώς μπορούμε με τη βοήθεια της πυρηνικής σύντηξης να παράγουμε ενέργεια στη γη;



Σχήμα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση ενός μελλοντικού αντιδραστήρα σύντηξης [B.1.8., σελ. 11]

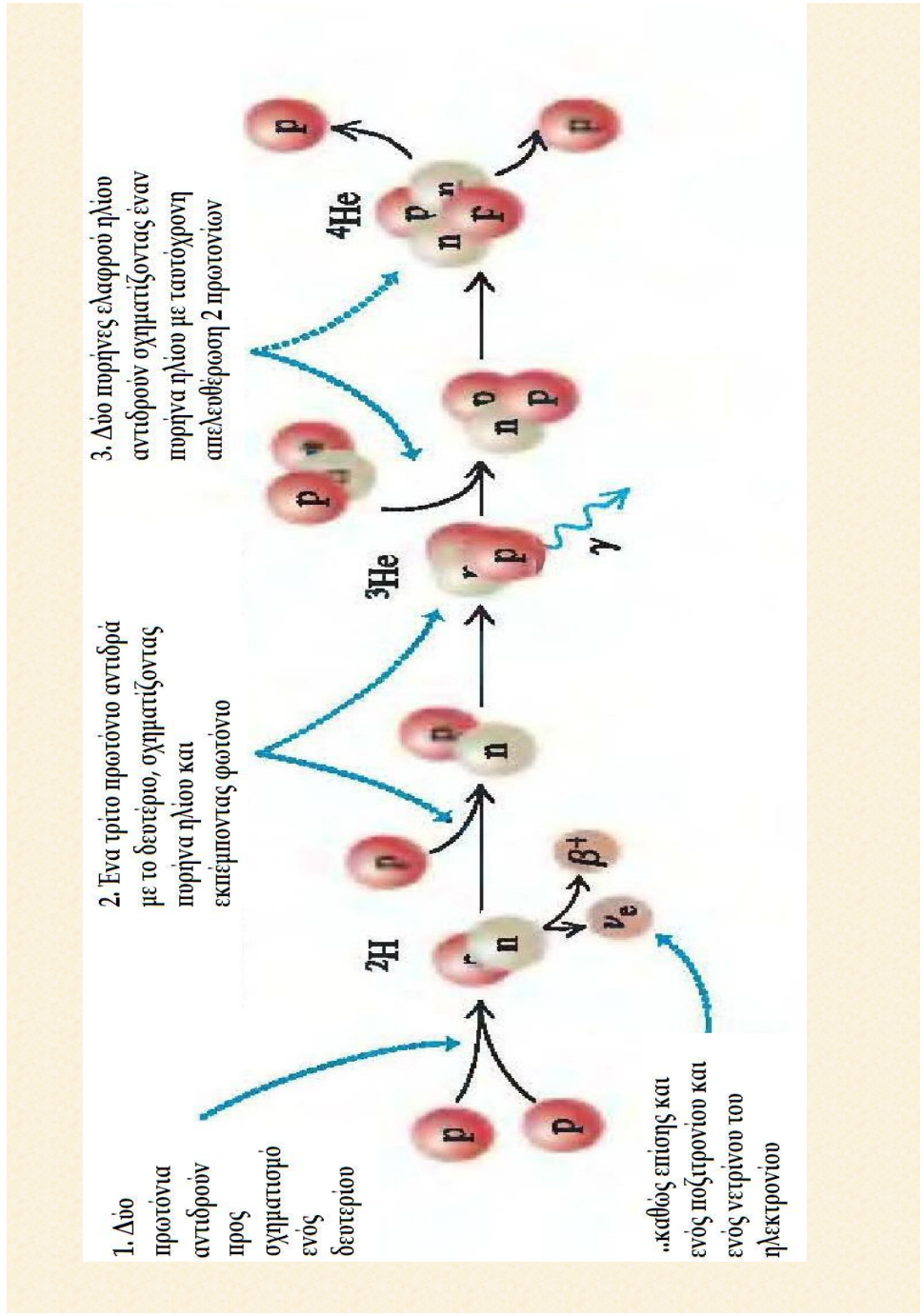
Η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει ρίξει όλο το βάρος της έρευνάς της στη χαλιναγώγηση της ενέργειας της πυρηνικής σύντηξης. Αν καταφέρουμε και ελέγξουμε πλήρως την αντίδραση της πυρηνικής σύντηξης θα λύσουμε οριστικά το ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη μας. Διότι:

1°. Το καύσιμό μας στην προκειμένη περίπτωση είναι το νερό. Με ελάχιστο κόστος έχουμε 12 γραμμάρια δευτερίου σε κάθε 100 γαλόνια θαλασσινού νερού.

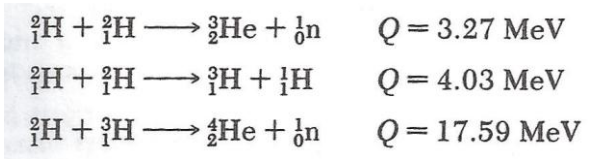
2°. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φθηνή, ακόμα και όταν ο αντιδραστήρας έχει πολύ χαμηλή αποδοτικότητα .

3°. Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι αμελητέα.

Για να θέσει σε λειτουργία παραγωγική τον θερμοπυρηνικό αντιδραστήρα ο άνθρωπος έχει πολλά προβλήματα ακόμα να λύσει, ώστε να μπορεί να υπάρχει απόδοση έστω και για μικρό χρονικό διάστημα. Ο κύκλος του πρωτονίου-πρωτονίου μπορεί να έχει ιδιαίτερα υψηλή απόδοση στον ήλιο αφού εκεί υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες και πυκνότητες, στη γη όμως η κατάσταση είναι δύσκολη. Οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σε ένα θερμοπυρηνικό αντιδραστήρα που βασίζονται στους πυρήνες του Δευτερίου και στους πυρήνες του Τρίτιου, συνοδεύονται με περίπου 25 MeV ενέργεια σε κάθε αντίδραση.

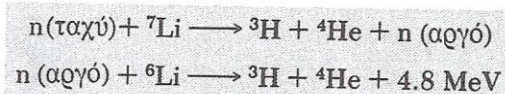


Σχήμα 2.8.

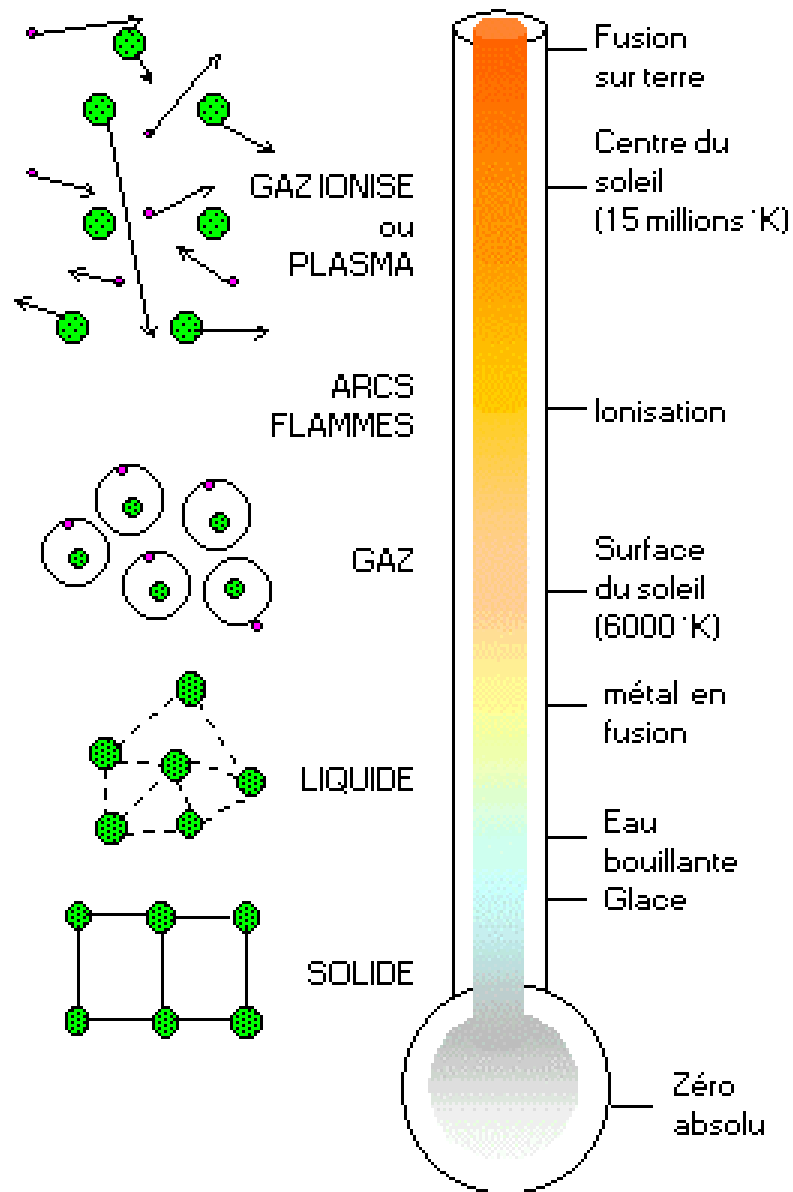


Όπως προαναφέραμε και στην εισαγωγή μας, ενώ για το δευτέριο που υπάρχει άφθονο (θάλασσα) δεν έχουμε πρόβλημα, για το τρίτιο όμως απαιτείται η παραγωγή του στο εργαστήριο, μιας και στη φύση υπάρχει σε πολύ μικρές ποσότητες. Ας λάβουμε δε υπόψη μας ότι το τρίτιο δεν είναι σταθερό, αλλά ραδιενεργό διασπώμενο σε ήλιο και με χρόνο υποδιπλασιασμού τα 12,3 χρόνια.

Όσον αφορά την εξαγωγή της ενέργειας από τον θερμοπυρηνικό αντιδραστήρα, αυτό επιτυγχάνεται με το να καλύψουμε την καρδιά του με ένα στρώμα λιθίου, το οποίο απορροφά τα υψηλής ενέργειας σωματίδια π.χ. νετρόνια και έτσι θερμαίνεται. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται με χρήση εναλλάκτη θερμότητας για παραγωγή υδρατμού. Το σπουδαίο σ' αυτή τη μέθοδο είναι επίσης η παραγωγή τριτίου που προκαλείται από τα νετρόνια που αντιδρούν στο στρώμα του λιθίου (όπως φαίνεται στις παρακάτω αντιδράσεις). Το τρίτιο αυτό συλλέγεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.



Το μεγάλο πρόβλημα που πρέπει να λυθεί για να αξιοποιηθεί η ενέργεια από μια θερμοπυρηνική σύντηξη, είναι το πώς θα κατορθώσουμε να πλησιάσουμε δύο πυρήνες πάρα πολύ κοντά τον έναν στον άλλο υπερνικώντας την απωστική δύναμη Coulomb, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενή μας παράγραφο. Πρέπει λοιπόν να προσδώσουμε τόση κινητική ενέργεια (για τη σύντηξη δύο πυρήνων Δευτερίου απαιτείται πλησίασμα μεταξύ τους σε απόσταση 10^{-4} μέτρα ώστε να υπερνικηθεί το φράγμα δυναμικού που δημιουργεί η απωστική δύναμη και ισούται με $U = k e^2/r = 0,14 \text{ MeV}$) στους δύο αυτούς πυρήνες ώστε να υπερνικήσουν την απωστική δύναμη, και αυτό μπορεί να γίνει θερμαίνοντας το πυρηνικό καύσιμο σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες (ο κάθε πυρήνας Δευτερίου έχει κατά μέσον όρο κινητική ενέργεια $3kT/2$ ίση με τη μέση θερμική ενέργεια ανά πυρήνα Δευτερίου $0,07 \text{ MeV}$, πράγμα που σημαίνει ότι η θερμοκρασία T ισούται με $5,8 \times 10^8 \text{ K}$), στις οποίες τα άτομα ιοντίζονται και δημιουργείται έτσι ένα σύστημα από ηλεκτρόνια και πυρήνες που το ονομάζουμε **πλάσμα**.



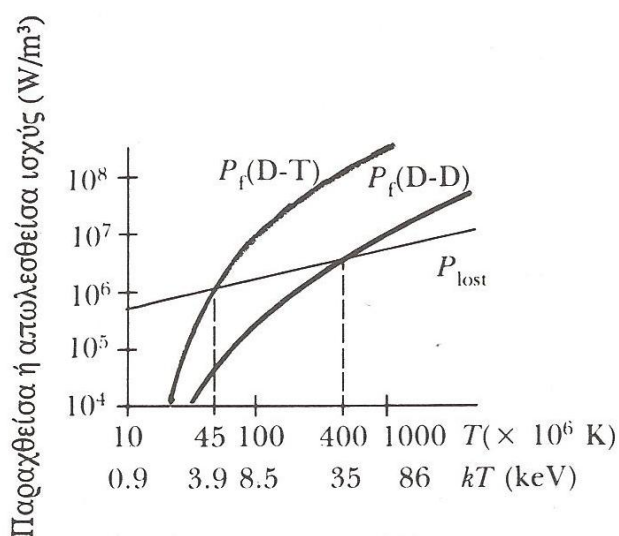
Σχήμα 2.9. Καταστάσεις της ύλης - θερμοκρασία [B.1.7.]

Η παραπάνω εκτίμηση ($5,8 \times 10^8 \text{K}$) όμως της ελάχιστης θερμοκρασίας είναι σχετικά υψηλή, πράγμα προφανώς πολύ δύσκολο να επιτευχθεί στο εργαστήριο.

2.3.2. Κρίσιμη θερμοκρασία αναφλέξεως

Όταν έχουμε θερμοκρασία στην οποία ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας κατά τη σύντηξη ξεπερνά τον ρυθμό αποβολής ενέργειας από του πυρήνες και τα ηλεκτρόνια υπό μορφή ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία αυτή την ονομάζουμε κρίσιμη θερμοκρασία ανάφλεξης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ισχύς που παράγεται από σύντηξη ως προς τη θερμοκρασία για τις δύο αντιδράσεις, δευτερίου – δευτερίου και δευτερίου – τρίτιου αντίστοιχα. Η ευθεία γραμμή δείχνει την απώλεια στην ενέργεια που οφείλεται στο μηχανισμό ακτινοβολίας (ακτινοβολία πέδησης), ο οποίος αποτελεί τον κύριο μηχανισμό απώλειας ενέργειας κατά τον οποίο εκπέμπεται ακτινοβολία (κυρίως ακτίνες X), σαν αποτέλεσμα των συγκρούσεων ηλεκτρονίων – ιόντων μέσα στο πλάσμα.



Σχήμα 2.10 Η ισχύς που παράγεται ή χάνεται, ως προς την θερμοκρασία στις αντιδράσεις σύντηξης D – D και D – T. Όταν ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας P_f υπερβαίνει τον ρυθμό απώλειας, επέρχεται ανάφλεξη. [B.1.4., σελ. 495]

2.3.3. Χρόνος περιορισμού – Πυκνότητα ιόντων

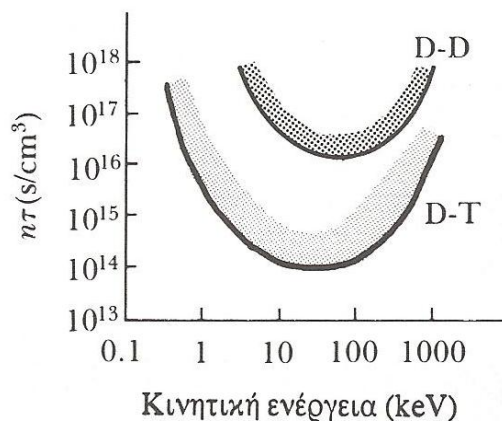
Καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχή λειτουργία ενός θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα (εκτός από την απαίτηση για υψηλές θερμοκρασίες), είναι ο χρόνος περιορισμού (ο χρόνος δηλαδή κατά τον οποίο το πλάσμα διατηρείται σε μια θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη από την κρίσιμη θερμοκρασία ανάφλεξης) t και η πυκνότητα ιόντων n . Ο Lawson έχει αποδείξει ότι η πυκνότητα ιόντων και ο χρόνος περιορισμού πρέπει να είναι τόσο μεγάλα, ώστε να μπορεί να παράγεται περισσότερη ενέργεια σύντηξης από αυτή που απαιτείται για τη θέρμανση του πλάσματος. Έτσι έχουμε την παρακάτω λεγόμενη συνθήκη ή κριτήριο του Lawson.

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

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

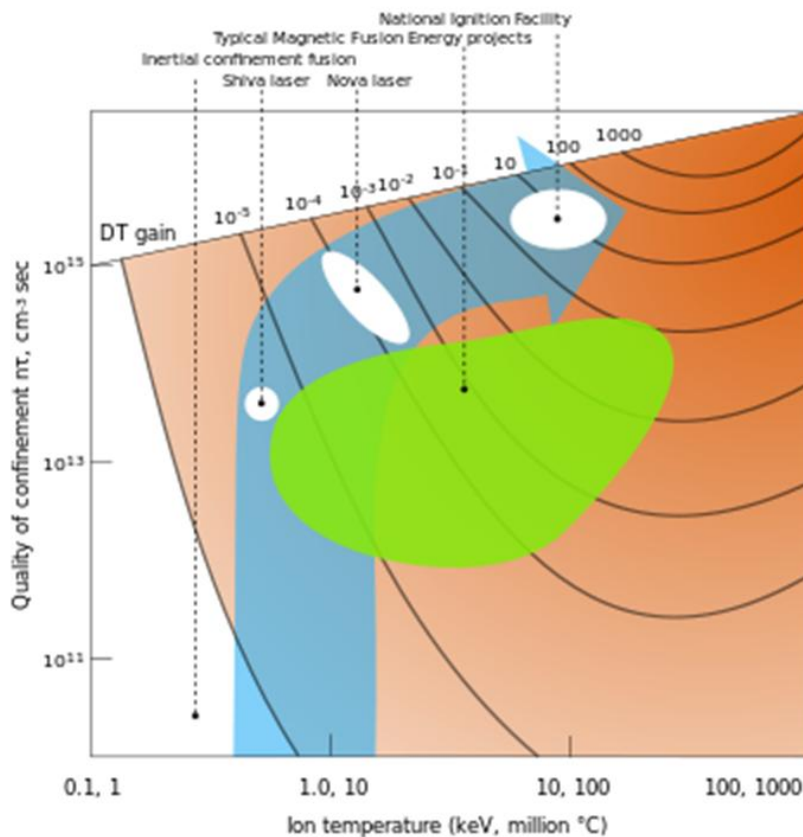
Σχήμα 2.11 Συνθήκες κριτηρίου του Lawson [B.1.4., σελ. 495]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πώς μεταβάλλεται η ποσότητα $n\tau$ σαν συνάρτηση της κινητικής ενέργειας στις συντήσεις δευτερίου – δευτερίου και δευτερίου – τρίτιου.



Σχήμα 2.12 Ο αριθμός του Lawson $n\tau$ ως προς την κινητική θερμοκρασία, για τις αντιδράσεις σύντηξης D – T και D – D. [B.1.4., σελ. 496]

Αν υποθέσουμε ότι E_h είναι η ενέργεια που απαιτείται για να θερμανθεί το πλάσμα, τότε αυτή είναι ανάλογη προς την πυκνότητα n . Αντίστοιχα αν E_f είναι η ενέργεια που «κερδίζουμε» με την θερμοπυρηνική σύντηξη, τότε αυτή είναι ανάλογη προς το γινόμενο $n^2 \times t$. Η προσδοκία μας – επιθυμία μας, η δεύτερη αυτή ενέργεια E_f να είναι μεγαλύτερη από την πρώτη E_h , οδηγεί στο κριτήριο Lawson, το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη του την κατά 20 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια θέρμανσης του πλάσματος, την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου που είναι απαραίτητο να δημιουργήσουμε (γι' αυτό το λόγο πρέπει να μπορούμε να διατηρούμε την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου ή να κάνουμε χρήση υπεραγωγίμων μαγνητών). Τέλος «βαφτίζουμε» ως σημείο εξίσωσης όταν καταφέρνουμε να έχουμε $E_h = E_f$.



Σχήμα 2.13 [B.2.16.]

2.3.4. Συνθήκες επωφελούς λειτουργίας αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης.

Συμπερασματικά για την επωφελή λειτουργία ενός θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να έχουν εξασφαλιστεί τα παρακάτω:

- 1) Θερμοκρασία πλάσματος όχι μικρότερη από μια πολύ υψηλή συγκεκριμένη θερμοκρασία.
- 2) Ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα ιόντων.
- 3) Μεγάλο χρόνο περιορισμού του πλάσματος και μάλιστα τέτοιος ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη Lawson.

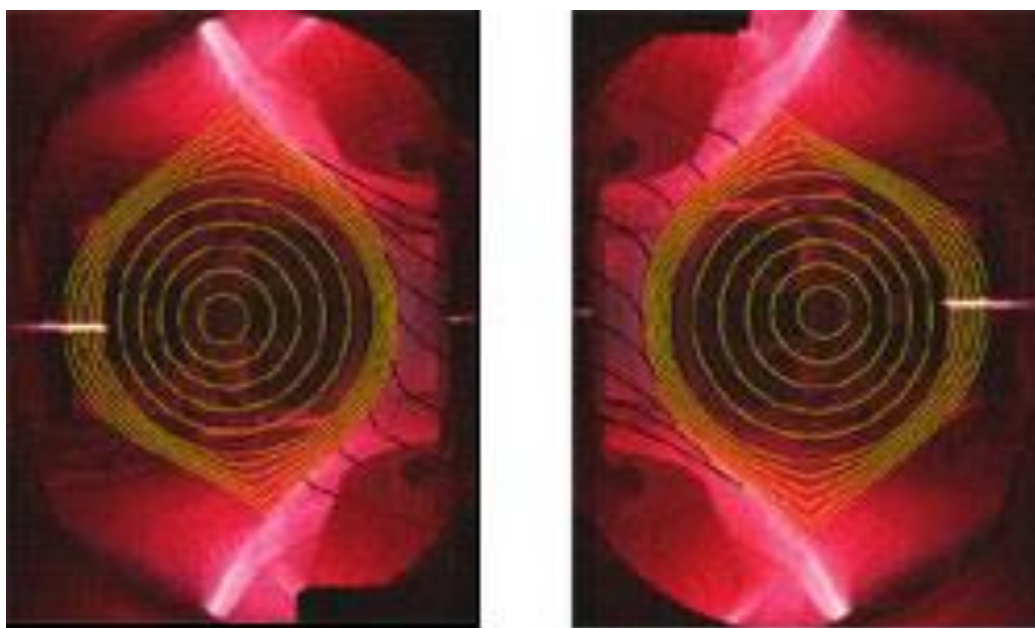
Σήμερα συνεχίζεται η προσπάθεια κατασκευής θερμοπυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης όπου να εξασφαλίζονται οι παραπάνω συνθήκες που αναφέραμε. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας έχουμε μέχρι σήμερα οδηγηθεί σε δύο τύπους θερμοπυρηνικών αντιδραστήρων που χρησιμοποιούν ο μιν ένας την τεχνική του περιορισμού του πλάσματος με μαγνητικό πεδίο, ο δε άλλος την τεχνική του αδρανειακού περιορισμού του πλάσματος. Την εν λόγω προσπάθεια θα αναλύσουμε – παρουσιάσουμε σε επόμενα κεφάλαια της παρούσης εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΣΥΝΤΟΜΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ

3.1. Γενικά

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι αντιδράσεις θερμοπυρηνικής σύντηξης εμφανίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες, όταν συγκρούονται οι πυρήνες με ικανοποιητική ενέργεια ώστε να υπερνικήσουν τις φυσικές απωστικές δυνάμεις των ηλεκτρικών φορτίων τους. Ένα αέριο γίνεται κατάλληλο προς χρήση στη σύντηξη σε θερμοκρασία 100 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου με τη μορφή πλάσματος της 4^{ης} κατάστασης της ύλης. Όπως τα μόρια σε ένα αέριο, έτσι και οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες και τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια των ατόμων μέσα σ' ένα ιονισμένο πλάσμα, είναι χωρισμένα και κινούνται ελεύθερα. Περισσότερο από το 99% του σύμπαντος έχει τη μορφή πλάσματος.



Σχήμα 3.1 Τροχιές σωματιδίων

Για να πετύχουμε τέτοιες θερμοκρασίες, χρειαζόμαστε ισχυρή θέρμανση, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε την απώλεια θερμότητας ή μέρους του θερμού πλάσματος, με συγκράτηση (περιορισμό) του θερμού πλάσματος, είτε με κατάλληλα ισχυρά μαγνητικά πεδία, είτε αδρανειακά.

Αυτό είναι μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία, τόσο από την άποψη της κατανόησης των σύνθετων φυσικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε τόσο ψηλές θερμοκρασίες, όσο και από την ανάγκη για περίπλοκες τεχνολογίες.

Έτσι η φυσική επιστήμη μέσω της έρευνας πάνω στη θερμοπυρηνική σύντηξη έχει αναπτύξει δύο διαφορετικές τεχνολογίες: το μαγνητικό περιορισμό και τον αδρανειακό περιορισμό.

Ο μαγνητικός περιορισμός για να απομονώσει το πλάσμα χρησιμοποιεί ισχυρά μαγνητικά πεδία, έτσι ώστε να είναι εφικτή η λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση, ενώ ο αδρανειακός περιορισμός για να θερμάνει και να συμπιέσει μικροσκοπικές κάψουλες με καύσιμο σε πολύ υψηλή πυκνότητα, χρησιμοποιεί υψηλής ισχύος ακτίνες λέιζερ ή ιόντων, ώστε να επιτευχθεί ταχεία ανάφλεξη.

3.1.1. Σύντομο ιστορικό μαγνητικής σύντηξης

3.1.1.1. Σύντηξη: προϊστορία 1920 – 1938

Η αρχή της έρευνας για ενέργεια σύντηξης τοποθετείται χρονικά το 1920. Περίπου το 1920 έχουμε την έναρξη της έρευνας για την ενέργεια σύντηξης καθώς ο φυσικός Einstein είχε μετρήσει το «έλλειμμα μάζας» στο στοιχείο ήλιο, το οποίο συνιστούσε την πιθανότητα ανάπτυξης μεγάλου ποσού ενέργειας με την δημιουργία ενός πυρήνα ηλίου (He) από ελαφρύτερα στοιχεία.

Πειράματα σχεδιάστηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες από το 1938, που αποτελούσαν προσπάθειες να περιορίσουν το υπέρθερμο πλάσμα με μαγνητικά πεδία.

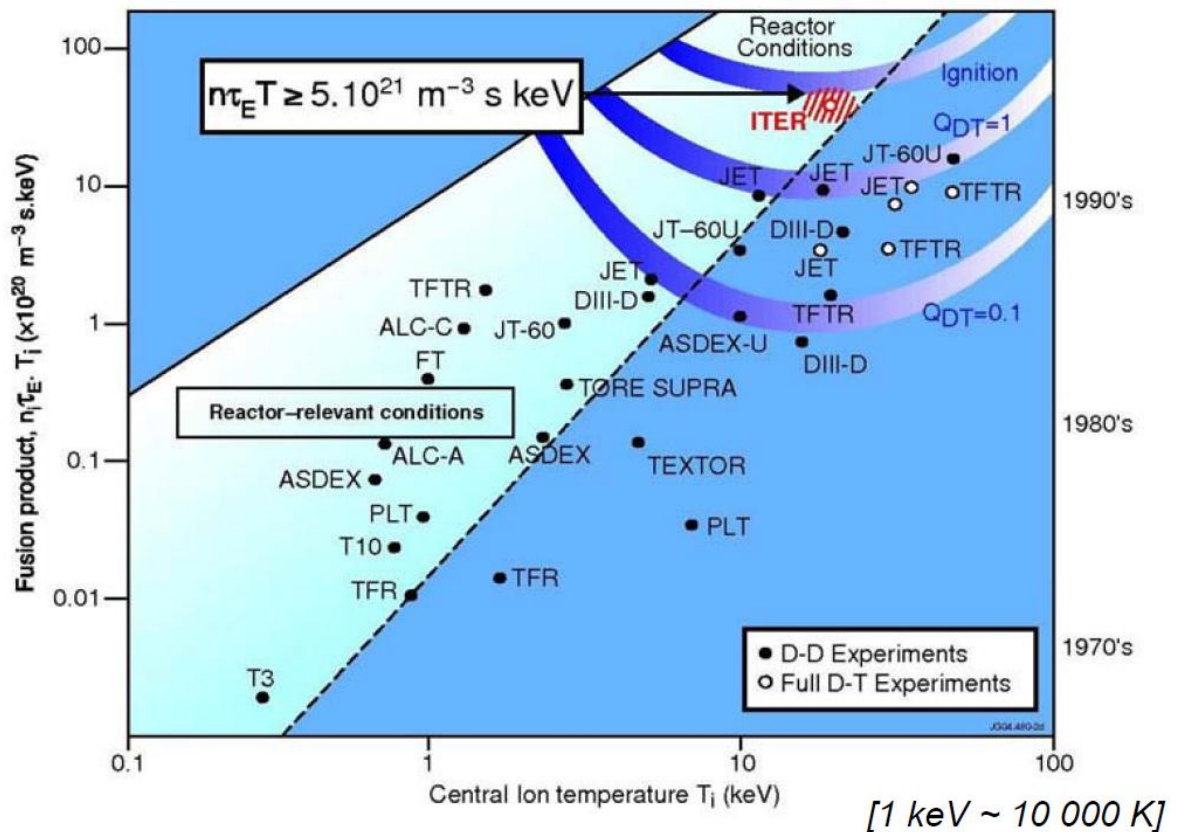
3.1.1.2. Οι πρώτες πετυχημένες προσπάθειες 1946 – 1958

Μετά το τέλος του τελευταίου μεγάλου πολέμου η διεθνής επιστημονική κοινότητα στρέφει σχεδόν όλο της το ενδιαφέρον στην θερμοπυρηνική σύντηξη. Στην Αγγλία έχουμε μια πρώτη πετυχημένη απόπειρα από τους Thompson και Blackman, του Πανεπιστημίου του Λονδίνου, οι οποίοι σχεδιάζουν μια πατέντα ενός αντιδραστήρα σύντηξης, ο οποίος διέθετε έναν θάλαμο κενού με τοροειδές σχήμα και η παραγωγή ρεύματος γινόταν με κύματα ραδιοσυχνοτήτων (δύο πολύ σημαντικά κομμάτια που βρίσκουμε μέχρι και σήμερα στα τοκαμάκ). Κατά το 1950, κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου, η σύντηξη χαρακτηρίστηκε ως άκρως απόρρητη. Στο κυνήγι της έρευνας στη δεκαετία του 1950 συμμετέχουν Αμερικανοί, Ρώσοι, Βρετανοί, Γάλλοι, Γερμανοί και Ιάπωνες.

3.1.1.3 Διεθνείς συνεργασίες 1958 – 1968

Στο συνέδριο «Atoms for peace» της Γενεύης το έτος 1958 αποκαλύφθηκαν πολλά από τα μυστήρια γύρω από το φαινόμενο της ελεγχόμενης σύντηξης. Άρχισε να γίνεται γνωστό ότι για την χαλιναγωγή της δύναμης της σύντηξης λόγω της αστάθειας του πλάσματος, τις απώλειες σε μαγνητικές μεταβολές κ.λ.π. ο δρόμος θα είναι μεγάλος και δύσβατος, και μόνο μέσα από διεθνείς συνεργασίες θα μπορούσε να αντιμετωπισθεί με ελπίδα η κατάσταση. Έτσι στον Ευρωπαϊκό χώρο παρουσιάζονται σημαντικές συνεργασίες (EURATOM, EURATON-CEA) και δημιουργούνται διεθνείς οργανισμοί ερευνών (EFDA, πρόγραμμα ITER).

Σύντηξη: Πρόοδος 1960-2005



Σχήμα 3.2 Σύντηξη: Πρόοδος 1960 - 2005 [B.1.7.]

3.1.1.4. Τα Tokamak - μετά το 1968

Το 1968 Ρώσοι επιστήμονες καταφέρνουν να πετύχουν πολύ μεγαλύτερες αποδόσεις από αυτές που υπήρχαν μέχρι τότε. (Tokamak T3). Αργότερα τα stellarators είναι εναλλακτική λύση μετά τα Tokamak, με τη διαφορά ότι η τρέχουσα απόδοσή τους είναι σημαντικά χαμηλότερη.

Από το 1973 έως το 1976 κυριαρχεί το Γαλλικό tokamak TFR, φτάνοντας θερμοκρασίες των 2 keV και πετυχαίνοντας εξαιρετικά αποτελέσματα στον περιορισμό και την θέρμανση πλάσματος. Η κατασκευή των μεγάλων και

μοντέρνων tokamak (πρόγραμμα JET: JT60, TFTR) ξεκίνησαν στα μέσα της δεκαετίας του '70 και τα δύο λόγω πολύ ενθαρρυντικών αποτελεσμάτων και σημαντικής αύξησης κονδυλίων που διατέθηκαν για έρευνα στην ελεγχόμενη σύντηξη. Η Γαλλία από την δεκαετία του '80, με την κατασκευή ενός μεγάλου (supra) tokamak επαγωγικού, τοροειδούς πυρήνα του λεγόμενου TORE SUPRA ο οποίος μπήκε σε λειτουργία το 1988, βοηθάει την Ευρώπη να εισέλθει στην εποχή των tokamak με την μηχανή TFR δημιουργώντας τεχνολογία και φυσική με επανειλημμένες δοκιμές λειτουργίας των αντιδραστήρων σύντηξης.

Η πρόοδος είναι μεγάλη καθώς η ενεργειακή ισορροπία του πλάσματος, η οποία μετρήθηκε με το τριπλό παράγωγο nTt , της πυκνότητας, θερμοκρασίας και χρόνου περιορισμού, αυξάνεται κατά 1000. Αυτό το τεράστιο άλμα προς τα εμπρός είναι συγκρίσιμο με (και ελαφρώς σημαντικότερο από) την ανάπτυξη της απόδοσης των μικροεπεξεργαστών (Νόμος του Moore).

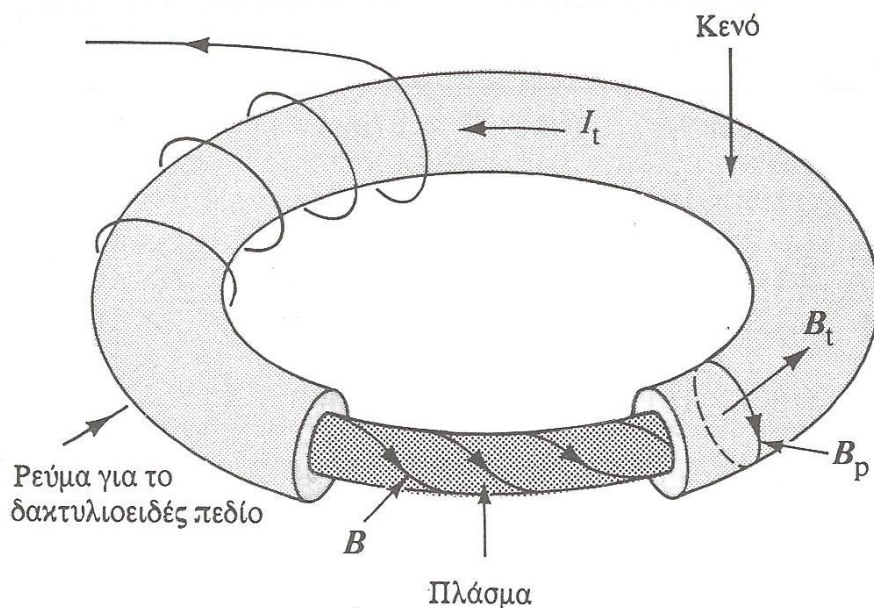
Στα τέλη της δεκαετίας του '90, στα tokamak JET και JT60-U, αναπτύχθηκε πλάσμα Δευτερίου, στο οποίο η ενεργειακή ισορροπία ήταν κοντά στο equilibrium, όπου μπορούμε να πούμε ότι η ενέργεια σύντηξης που ελευθερώθηκε από μείγμα Δευτερίου και Τριτίου ήταν σχεδόν ίση με την ενέργεια που εισήχθη στο πλάσμα για να το θερμάνει. Παράλληλα με αυτήν την διαδικασία σε απόδοση, η διάρκεια των παλμών στα μεγάλα tokamak επεκτάθηκε κατά δύο λεπτά (TORE SUPRA), ανοίγοντας έτσι τον δρόμο για συνεχείς πειραματισμούς και λειτουργία σε έναν μελλοντικό αντιδραστήρα.

Ακόμη ένα μεγάλο επίτευγμα, ήταν η παραγωγή 17MW ενέργειας σύντηξης, από πλάσμα μείγματος Δευτερίου - Τριτίου το 1997 στο JET.

3.2. Περιορισμός με μαγνητικό πεδίο.

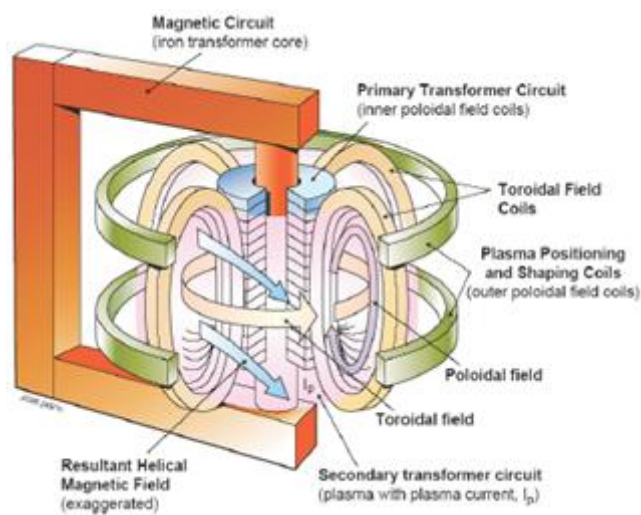
Η τεχνική του περιορισμού του πλάσματος σε μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιείται στα περισσότερα πειράματα επίτευξης θερμοπυρηνικής σύντηξης. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την πειραματική συσκευή tokamak (ρώσικο αρκτικόλεξο από το «δακτυλιοειδής μαγνητικός θάλαμος») που

κατασκευάστηκε για πρώτη φορά στην ΕΣΣΔ, για να συγκρατήσει και να θερμάνει το πλάσμα σαν συνδυασμός μαγνητικής φιάλης συγκράτησης και επιταχυντή. Το tokamak έχει σχήμα δακτυλίου. Το πλάσμα περιορίζεται από την υπέρθεση δύο μαγνητικών πεδίων (1) του κλασικού μαγνητικού πεδίου των δακτυλίων (π.χ. δακτυλίου του Rowland) και (2) ενός ασθενέστερου μαγνητικού πεδίου που ονομάζεται πολοειδές (poloidal) και παράγεται από το ρεύμα I_t το οποίο επάγεται στο ίδιο το πλάσμα του δακτυλίου. Το ρεύμα αυτό θερμαίνει επίσης το πλάσμα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από την υπέρθεση των δύο προηγούμενων είναι ελικοειδές και οι γραμμές του περιορίζουν σαν «σπείρωμα» το πλάσμα και το εμποδίζουν να αγγίξει τα τοιχώματα του δακτυλίου.

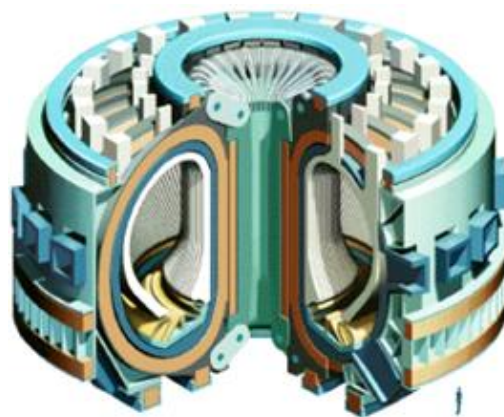


Σχήμα 3.3 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός tokamak. Να σημειωθεί ότι το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο B είναι υπέρθεση του μαγνητικού πεδίου B_t του δακτυλίου και του πολοειδούς πεδίου B_p . Το πλάσμα παγιδεύεται ανάμεσα στις ελικοειδείς γραμμές του συνιστάμενου πεδίου. [B.1.2., σελ. 301]

Υπάρχει ο κίνδυνος το πλάσμα να αγγίξει τα τοιχώματα του δακτυλίου με συνέπεια να ψυχθεί και να αποσπάσει διάφορα υλικά από τα τοιχώματα, με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί και να χάσει μεγάλο μέρος της ισχύς του.



Σχήμα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση κύριων μερών αντιδραστήρα tokamak. [B.2.4.]



Σχήμα 3.5 Ο αντιδραστήρας JET (Joint European Torus, κόστος κτήσης 750 ΜΕΥΡΩ, Λειτουργίας: 75 ΜΕΥΡΩ/γ), ήταν το αποτέλεσμα επίπονων και μακροχρόνιων ερευνών από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα πάνω στους ΤΟΚΑΜΑΚ. [B.1.13.]



Σχήμα 3.6 Φωτογραφία του JET. [B.2.26.]

Ο αντιδραστήρας JET είναι ένας αντιδραστήρας ΤΟΚΑΜΑΚ με:

Ακτίνα δακτυλιδιού 3.1 m

Διαστάσεις θαλάμου κενού 3.96m high X 2.4 m wide

Όγκος πλάσματος 80 m³

Ρεύμα πλάσματος 5MA

Ένταση πεδίου 4 Tesla



Σχήμα 3.7 Σχηματική αναπαράσταση ενός JET ο οποίος είναι ένας tokamak. [B.1.13.]

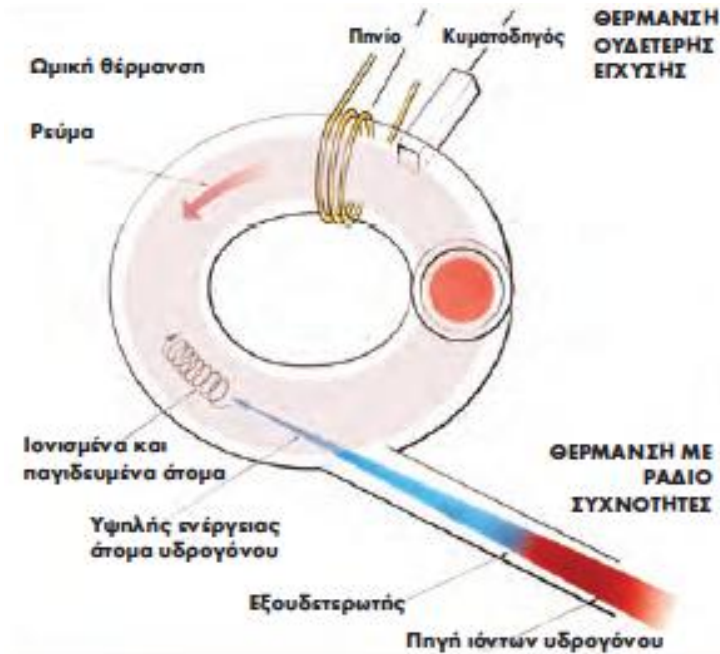
Η Θέρμανση του πλάσματος: Το ρεύμα που διαρρέει το πλάσμα του tokamak συμβάλλει στη θέρμανσή του. Καθώς η θερμοκρασία του πλάσματος αυξάνεται, αυτή η ωμική θέρμανση γίνεται λιγότερο αποτελεσματική και αυξάνει τη θερμοκρασία του πλάσματος μόνο κατά λίγα εκατομμύρια βαθμούς, δηλαδή θερμοκρασία περίπου 10 φορές χαμηλότερη από την απαιτούμενη για την πραγματοποίηση ικανού αριθμού αντιδράσεων σύντηξης.

Έτσι χρειάστηκε να γίνει και έγινε βοηθητική θέρμανση του πλάσματος ώστε αυτό να φθάσει σε θερμοκρασία αναφλέξεως. Για να θερμανθεί το πλάσμα σε θερμοκρασία αναφλέξεως (5 έως 10 keV) χρειάστηκε η έγχυση ουδέτερων σωματίων μεγάλης ενέργειας μέσα σε αυτό.

Δέσμες ουδέτερων σωματιδίων μεγάλης ενέργειας εγχύονται στο πλάσμα, το διαπερνούν, και μεταδίδουν την κινητική τους ενέργεια σε αυτό μέσω συγκρούσεων με τα σωματίδια του πλάσματος. Για να αυξηθεί η θερμοκρασία ακόμη περισσότερο, απαιτείται περαιτέρω θέρμανση η οποία παρέχεται από εξωτερικές πηγές.

Έτσι έχουμε, το πλάσμα θερμοπυρηνικών αντιδραστήρων να θερμαίνεται και με RF (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας).

Η υψίσυχη θέρμανση χρησιμοποιεί μεγάλης ισχύος ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαφορετικών συχνοτήτων, τα οποία μεταδίδουν στο πλάσμα την ενέργειά τους μέσω απορρόφησης συντονισμού. Έχουμε αναπτύξει για το σκοπό αυτό, τρία συστήματα: 1) τη Θέρμανση μέσω Κυκλοτρονικού Συντονισμού Ιόντων (ICRH, 20–55 MHz), 2) τη Θέρμανση μέσω Κυκλοτρονικού Συντονισμού Ηλεκτρονίων (ECRH, 100–200 GHz, κυρίως μικροκύματα), και 3) τη Θέρμανση μέσω κυμάτων της Κατώτερης Υβριδικής Συχνότητας (LHH, 1–8 GHz).



Σχήμα 3.8 Σχηματική διάταξη υψίσυχνης θέρμανσης [B.1.8., σελ. 24]

Περιγραφή των διαφόρων παραμέτρων των tokamak των ΗΠΑ ^a				
	$n(\text{cm}^{-3})$	$T(\text{keV})$	$\tau(\text{ms})$	$n\tau(\text{s/cm}^3)$
PLT (Princeton)	1.5×10^{14}	7.3	100	1.5×10^{13}
PDX (Princeton)	7×10^{13}	6	90	$\approx 4 \times 10^{12}$
ISX-B (Oak Ridge)	1.3×10^{14}	1.8	40	2×10^{12}
Doublet III (General Atomic)	1.2×10^{14}	≈ 0.7	≈ 70	1×10^{13}
Alcator C (MIT)	7×10^{14}	1.5	35	$> 3 \times 10^{13}$
TFTR (Princeton) ^b	$\leq 6.5 \times 10^{14}$	10	300–500	$\leq 1.5 \times 10^{14}$

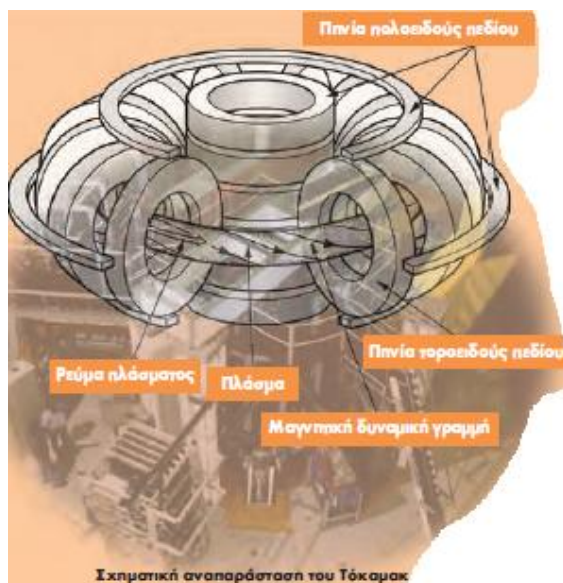
(a) Δεδομένα από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, Έκθεση No. DOE/ER-0122.
 (b) Δεδομένα Αυγούστου 1986.

Σχήμα 3.9 Παράμετροι των tokamak των ΗΠΑ^a [B.1.2., σελ. 302]

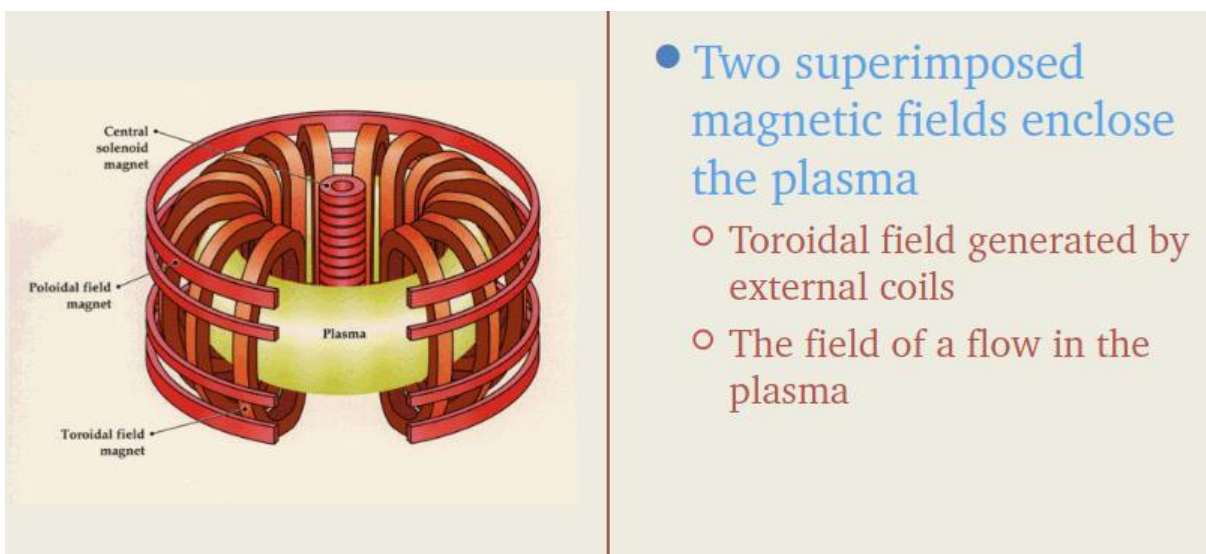
Στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται οι κύριες παράμετροι των tokamak που λειτουργούν στις ΗΠΑ, περιλαμβανόμενης και της νέας μεγάλης διάταξης στο Εργαστήριο Φυσικής Πλάσματος του Princeton. Στον πίνακα περιέχονται οι

καλύτερες τιμές των παραμέτρων που επιτεύχθηκαν σε κάθε πειραματική διάταξη.

Η τιμή του $n\tau$ που κατόρθωσαν να φτάσουν οι ερευνητές στο πολυτεχνείο (MIT) είναι μόλις τρεις φορές κάτω από την τιμή της συνθήκης Lawson. Η μεγαλύτερη πειραματική διάταξη στις ΗΠΑ είναι το tokamak του Πανεπιστημίου Princeton. Η διάταξη αυτή είναι σχεδιασμένη για αντιδράσεις D-T.

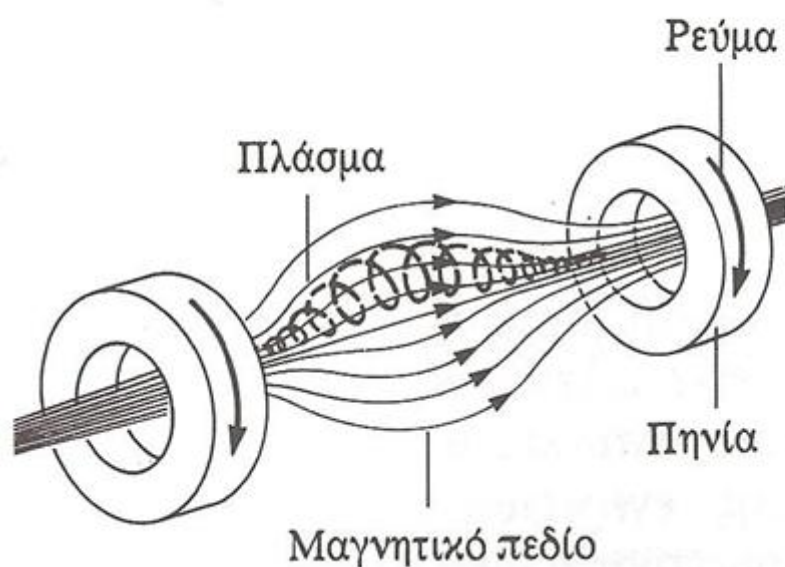


Σχήμα 3.10 Σχηματική αναπαράσταση του tokamak [B.1.8., σελ. 21]



Σχήμα 3.11 Πηνία - Πλάσμα [B.1.9.]

Κατά τη χρησιμοποίηση του μαγνητικού πεδίου εφαρμόζουμε την λεγόμενη τεχνική περιορισμού με μαγνητικά κάτοπτρα. Η ιδέα έγκειται στο να παγιδευτεί το πλάσμα σε έναν κυλινδρικό- δακτυλιοειδή χώρο με την τοποθέτηση πρόσθετων πηνίων στα δύο άκρα .

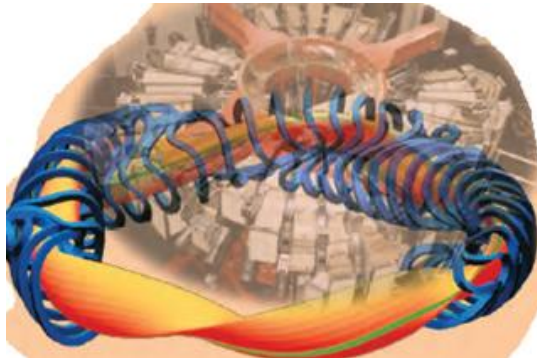


Σχήμα 3.12 Περιορισμός πλάσματος με μαγνητικά κάτοπτρα. [Β.1.2., σελ. 302]

Η μαγνητική εμφιάλωση επιτυγχάνεται, καθώς τα πρόσθετα πηνία στα δύο άκρα κάνουν το πεδίο τόσο ανομοιογενές, ώστε να αποτελούν μαγνητικά «κάτοπτρα», όπου ανακλώνται τα σωματίδια του πλάσματος που εκτελούν ελικοειδή κίνηση γύρω από τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου και αυξάνουν την πυκνότητα πηγαίνοντας μπρός – πίσω.

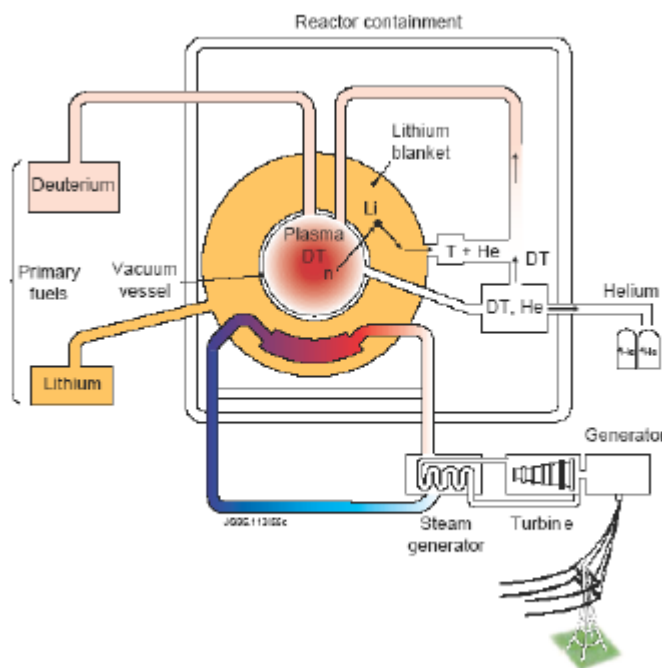
Υπάρχει επίσης το είδος της μηχανής που ονομάζεται «stellarator» (αστρική γεννήτρια), που χρησιμοποιεί την ίδια αρχή μαγνητικής συγκράτησης, αλλά με εξωτερικά πηνία περίπλοκου σχήματος, και χωρίς να στηρίζεται στο φαινόμενο του μετασχηματιστή για την παραγωγή ρεύματος στο πλάσμα. Διαθέτει μια εγγενή

δυνατότητα για συνεχή λειτουργία. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση που σήμερα βρίσκεται στο στάδιο της κατασκευής είναι ο stellarator W7-X στο Greifswald της Γερμανίας.



Σχήμα 3.13 Σχηματική αναπαράσταση stellarator [B.1.8., σελ. 21]

Και ο **ITER** ...

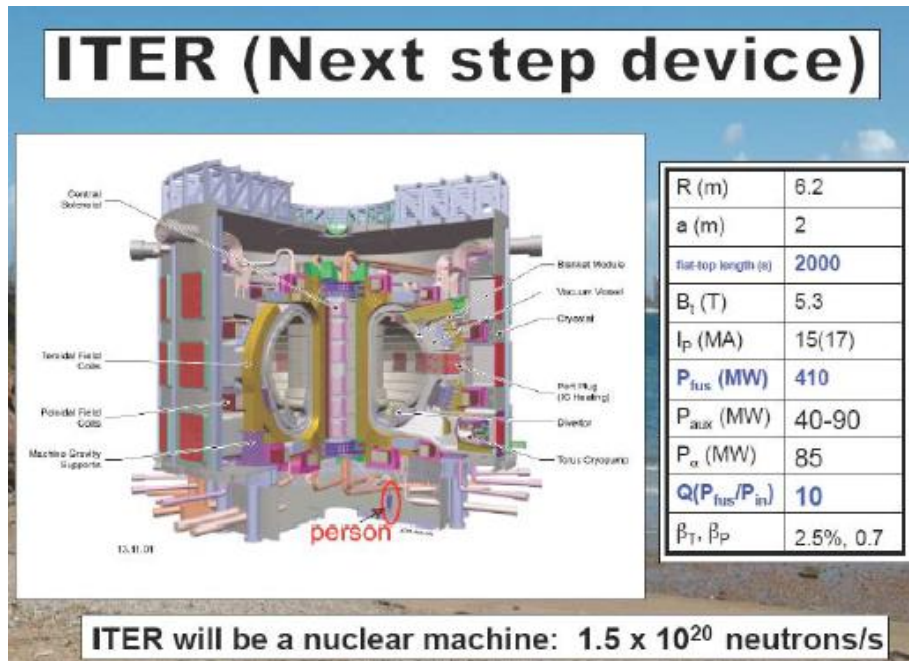


Σχήμα 3.14 Σχηματική αναπαράσταση αντιδραστήρα σύντηξης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. [B.1.7.]

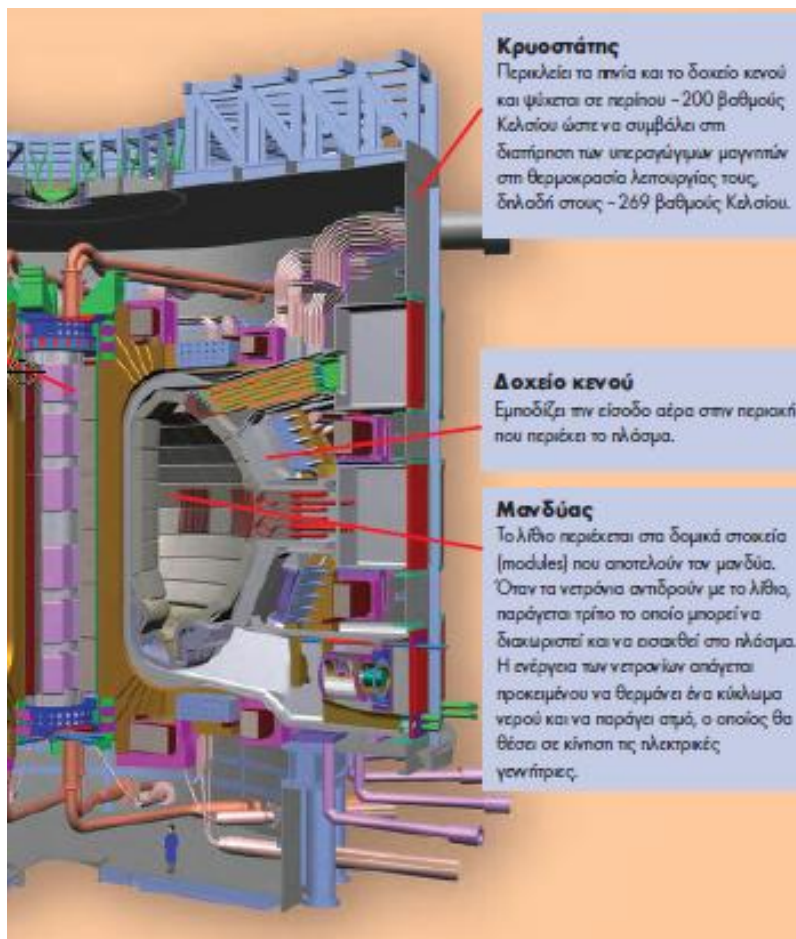
ITER

Total fusion power	500 MW (700MW)
$Q = \text{fusion power/auxiliary heating power}$	≥ 10 (inductive)
Average neutron wall loading	0.57 MW/m ² (0.8 MW/m ²)
Plasma inductive burn time	≥ 300 s
Plasma major radius	6.2 m
Plasma minor radius	2.0 m
Plasma current (inductive, I_p)	15 MA (17.4 MA)
Vertical elongation @95% flux surface/separatrix	1.70/1.85
Triangularity @95% flux surface/separatrix	0.33/0.49
Safety factor @95% flux surface	3.0
Toroidal field @ 6.2 m radius	5.3 T
Plasma volume	837 m ³
Plasma surface	678 m ²
Installed auxiliary heating/current drive power	73 MW (100 MW)

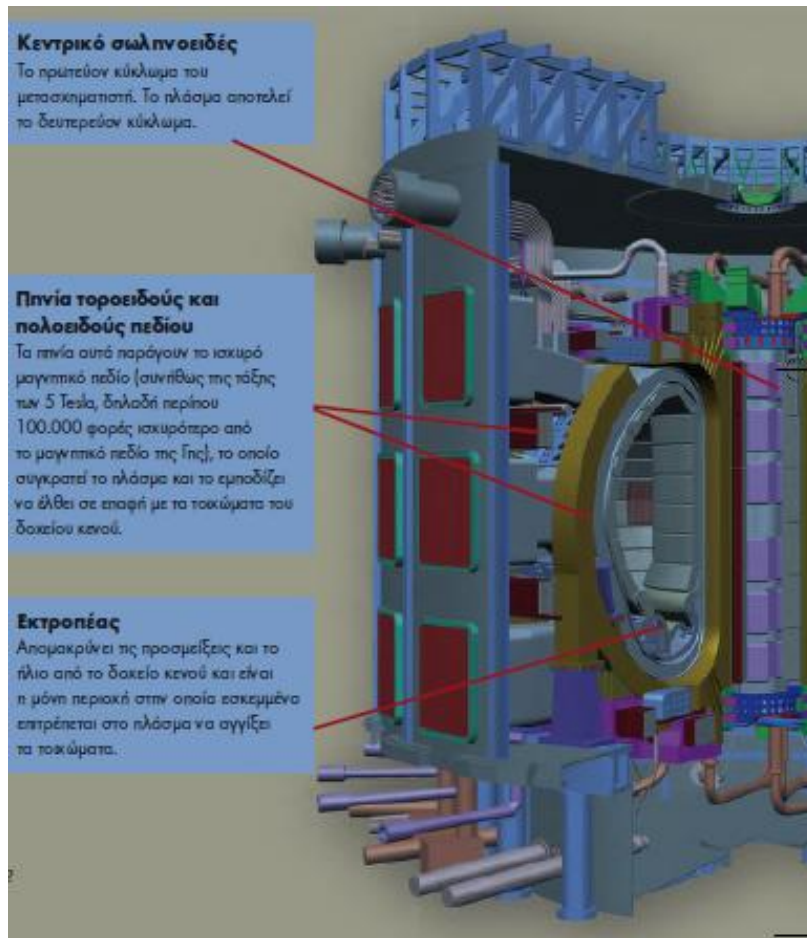
Σχήμα 3.15 Χαρακτηριστικά ITER. [B.1.13.]



Σχήμα 3.16 Τα επόμενα βήματα του ITER. [B.1.13.]



Σχήμα 3.17 Βασικά χαρακτηριστικά του tokamak. (α) [Β.1.8., σελ. 23]



Σχήμα 3.18 Βασικά χαρακτηριστικά του tokamak. (β) [Β.1.8., σελ. 22]

Κατασκευάστριες χώρες: Ευρώπη, Ιαπωνία, Αμερική, Κορέα, Κίνα,

Παραγόμενη ισχύς: 500 MW

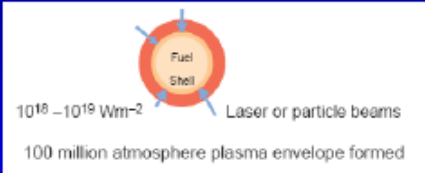

Συνολικό κόστος: 15 δισεκατομμύρια δολάρια.

3.3. Αδρανειακός περιορισμός

Η τεχνική του αδρανειακού περιορισμού είναι η δεύτερη τεχνική περιορισμού του πλάσματος μετά την πρώτη του μαγνητικού περιορισμού. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ένας στόχος με πολύ μεγάλη πυκνότητα. Ο χρόνος περιορισμού είναι πάρα πολύ μικρός (συνήθως 10^{-11} έως 10^{-9} s). Έτσι, λόγω της

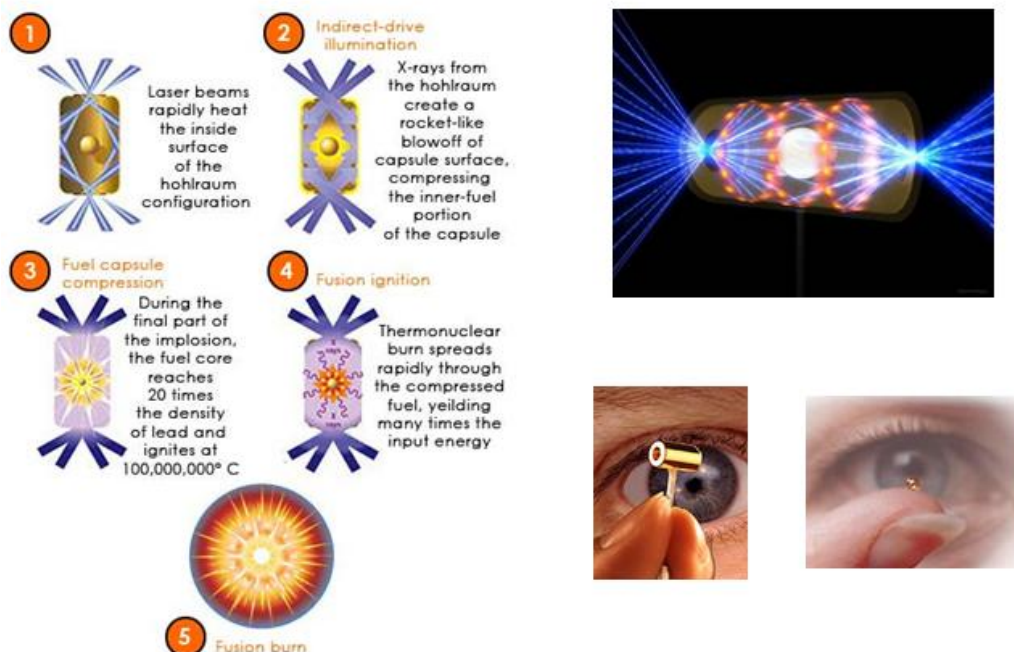
ίδιας, της δικής τους αδράνειας, τα σωματρία δεν προλαβαίνουν να απομακρυνθούν από τις αρχικές τους θέσεις.

•ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER:

- Εκπομπή Laser εξαιρετικά υψηλής ισχύος πάνω σε στερεό σφαιρίδιο δευτερίου τριτίου (διαμέτρου 3mm) προκαλεί:
- Αρχική Συμπύεση:
 
- Υπερπίεση
το καύσιμο συμπιέζεται με ροές από χάνες εκτόνωσης πυραύλων
200,000 million atmospheres in core
- Εκτόνωση και καύση
 

•Peak compression fuel reaches 1000-10000 times liquid density for extremely short time (10^{-11} seconds)

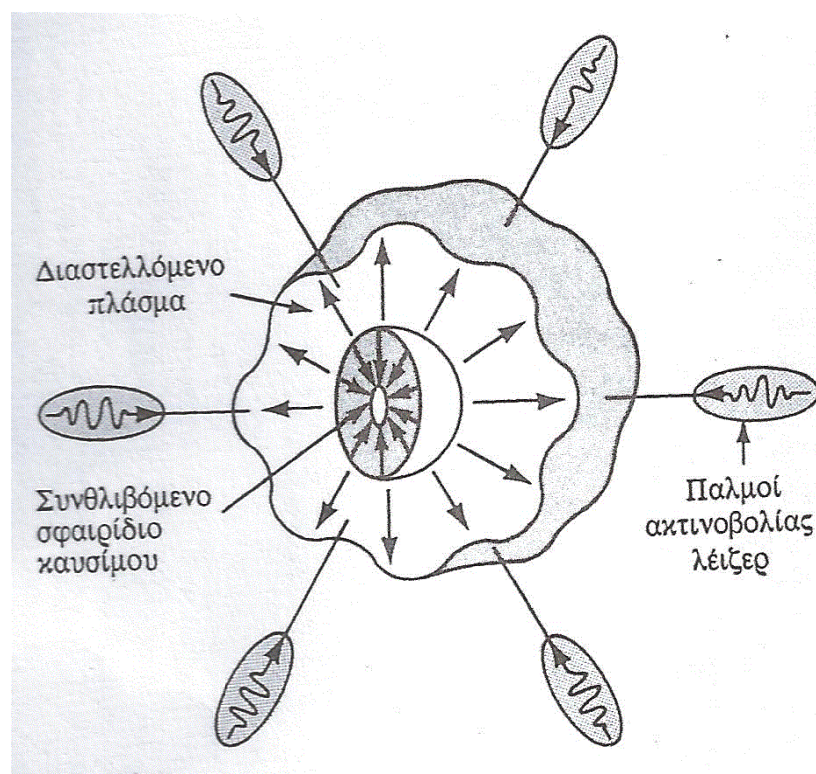
Σχήμα 3.19 Στάδια της τεχνικής με χρήση laser. [B.1.13.]



- 1** Laser beams rapidly heat the inside surface of the hohlraum configuration
- 2** Indirect-drive illumination
X-rays from the hohlraum create a rocket-like blowoff of capsule surface, compressing the inner-fuel portion of the capsule
- 3** Fuel capsule compression
During the final part of the implosion, the fuel core reaches 20 times the density of lead and ignites at $100,000,000^\circ\text{C}$
- 4** Fusion ignition
Thermonuclear burn spreads rapidly through the compressed fuel, yielding many times the input energy
- 5** Fusion burn

Σχήμα 3.20 Αδρανειακός περιορισμός ICF. [B.2.26.]

Εδώ στην τεχνική του αδρανειακού περιορισμού χρησιμοποιούμε ακτίνες λέιζερ. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η τεχνική αυτή.



Σχήμα 3.21 Στη μέθοδο του αδρανειακού περιορισμού, ένα σφαιρίδιο καυσίμων D – T υφίσταται θερμοπυρηνική σύντηξη όταν ταυτόχρονα προσπίπτουν επάνω του οι δέσμες πολλών λέιζερ. [B.1.2., σελ. 303]

Το προς σύντηξη υλικό είναι συνήθως ένα σφαιρίδιο D-T (δευτερίου-τριτίου), διαμέτρου 1mm περίπου. Το σφαιρίδιο βάλλεται ταυτόχρονα από πολλές ακτίνες λέιζερ ισχύος, δηλαδή από ένα μεγάλο παλμό ενέργειας. Αυτός ο παλμός ενέργειας εξατμίζει στην κυριολεξία την επιφάνεια του σφαιριδίου. Τα σωματίδια της επιφάνειας, καθώς απομακρύνονται από το σφαιρίδιο προκαλούν (σύμφωνα με το νόμο της δράσης – αντίδρασης) ένα ισχυρό ωστικό κρουστικό κύμα, το οποίο κατευθύνεται

προς τα έσω. Το ωστικό αυτό κύμα αυξάνει την πίεση και επομένως την πυκνότητα της καρδιάς του σφαιριδίου, και αυτό έχει σαν συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας της καρδιάς. Όταν η θερμοκρασία στην καρδιά γίνει ίση με τη θερμοκρασία ανάφλεξης, τότε προκαλούνται αντιδράσεις θερμοπυρηνικής σύντηξης και το σφαιρίδιο εκρήγνυται. Το φαινόμενο αυτό μοιάζει με έκρηξη βόμβας υδρογόνου σε μικρογραφία. Το πείραμα SHIVA στο Lawrence Livermore Laboratory του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας, χρησιμοποιεί 20 συγχρονισμένους παλμούς λέιζερ που προσδίδουν 200 kJ ενέργειας σε ένα σφαιρίδιο σε χρόνο μικρότερο από 10^{-9} s. Η αντίστοιχη ισχύς είναι 2×10^{14} W !

3.4. Διαγνωστικά και μοντελοποίηση του πλάσματος

Πριν καν σχεδιάσουμε έναν αντιδραστήρα σύντηξης, οφείλουμε να κατανοήσουμε πλήρως όλα τα φαινόμενα που συμβαίνουν στο πλάσμα. Για να πετύχουμε αυτό απαιτούνται εξελιγμένα και πολύπλοκα συστήματα μέτρησης, γνωστά ως διαγνωστικά. Διαγνωστικά σχεδιάζονται σε Ευρωπαϊκά εργαστήρια και αποσκοπούν στην παρακολούθηση κάθε χαρακτηριστικού του πλάσματος, από τη θερμοκρασία στο κέντρο του, χρησιμοποιώντας ισχυρές δέσμες λέιζερ, μέχρι την ποσότητα προσμείξεων στο πλάσμα και το σημείο παραγωγής τους. Τα στοιχεία που παίρνουμε από αυτά τα διαγνωστικά συστήματα, αξιολογούνται και καθορίζουν αντίστοιχα την ανάπτυξη νέων υπολογιστικών κωδίκων, οι οποίοι τελικά θα μας βοηθήσουν να είμαστε σε θέση να προβλέψουμε τη λειτουργία της διάταξης και να είναι αυτή που πραγματικά εμείς επιθυμούμε.

3.5. Πρόοδοι στην έρευνα για μαγνητική σύντηξη

Ένα στοιχείο ελέγχου για τη λειτουργία διατάξεων σύντηξης είναι ο λόγος της παραγόμενης ισχύος από σύντηξη προς την ισχύ που απαιτείται για τη θέρμανση του πλάσματος, ο οποίος συμβολίζεται με Q. Ένα πλάσμα σύντηξης φθάνει στη

συνθήκη αυτοσυντηρούμενης καύσης ($Q = 1$) όταν η απώλεια ενέργειας από το πλάσμα αντισταθμίζεται από την αυτοθέρμανση του πλάσματος λόγω αντιδράσεων σύντηξης.

Τη στιγμή που θα ικανοποιηθεί αυτή η συνθήκη, δεν θα απαιτείται πλέον εξωτερική θέρμανση για τη διατήρηση των συνθηκών υψηλής θερμοκρασίας που είναι απαραίτητες για τη σύντηξη. Όπως συμβαίνει με τη φωτιά, το πλάσμα θα συνεχίσει να καίει για όσο διάστημα τροφοδοτείται με καύσιμο.

Στους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης δεν θα είναι πλέον απαραίτητο να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη και θα αρκεί να σχεδιάσουμε ενισχυτές ισχύος.

Η διάταξη του JET έχει παραγάγει 16 MW ισχύος από σύντηξη με $Q = 0,65$. Η επόμενη μηχανή, ο ITER (Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας), στοχεύει σε $Q = 10$.

Τέλος οι μελλοντικοί αντιδραστήρες σύντηξης ίσως έχουν τιμές του Q μέχρι το 40 ή το 50.

3.6. Πειραματικές διατάξεις μαγνητικής σύντηξης στην Ευρώπη και το μελλοντικό ITER

Έχουν αρχίσει οι εργασίες για την κατασκευή στο Cadarache (Γαλλία) διάταξης 'τοκαμάκ' στην οποία να παράγεται παλμός διάρκειας 300-500 s και ισχύος 400-500 MW με προοπτική συνεχούς λειτουργίας με ισχύ 200 MW.

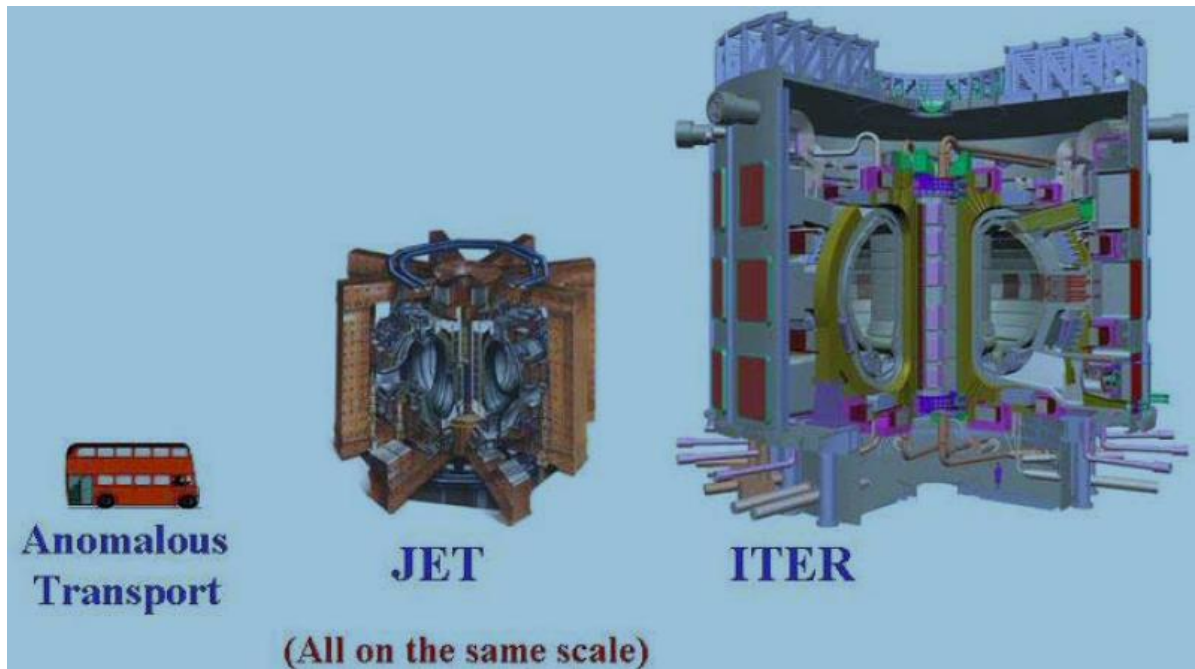
Το Νοέμβριο του 2006 υπογράφηκε διεθνής συμφωνία με εταίρους:

Ευρωπαϊκή Ένωση, Ιαπωνία, Κίνα, ΗΠΑ, Ρωσία, Ν. Κορέα, Ινδία.

Κόστος Κατασκευής: 5 δισ.€ [σε 10 χρόνια].

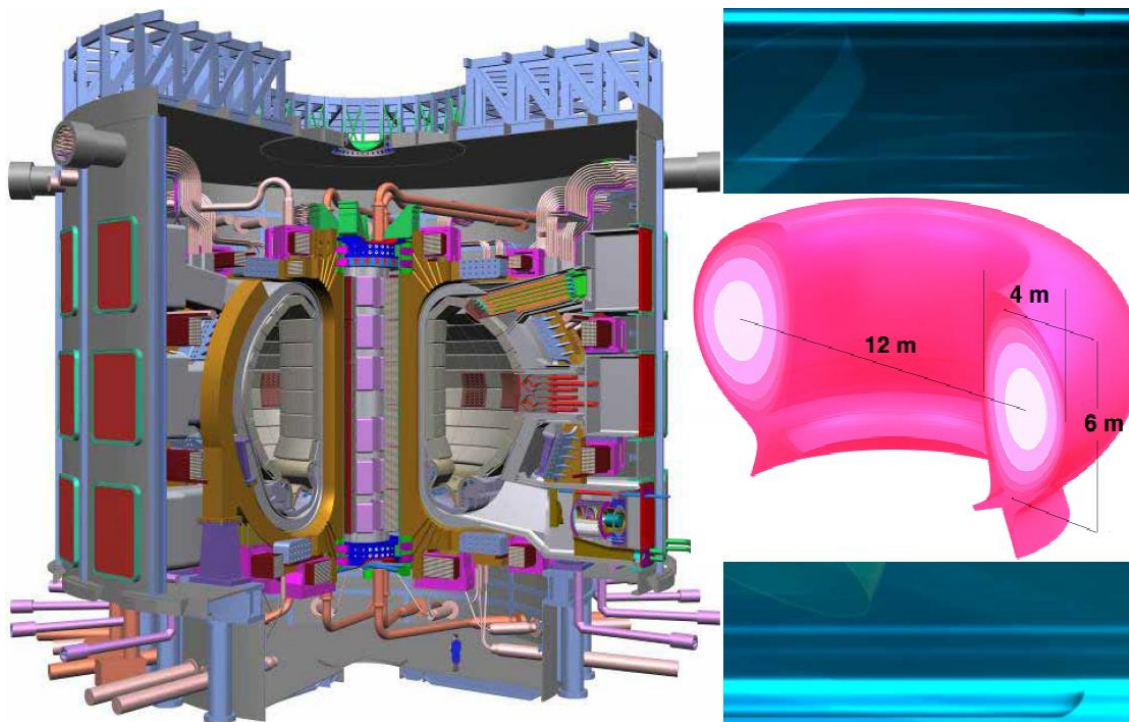
Κόστος Λειτουργίας για 10 χρόνια: 5 δισ. €

Η συμφωνία αυτή αναμενόταν να επικυρωθεί μέχρι τέλος του έτους.



Σχήμα 3.22 Σύγκριση ως προς το μέγεθος. [B.1.7.]

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor



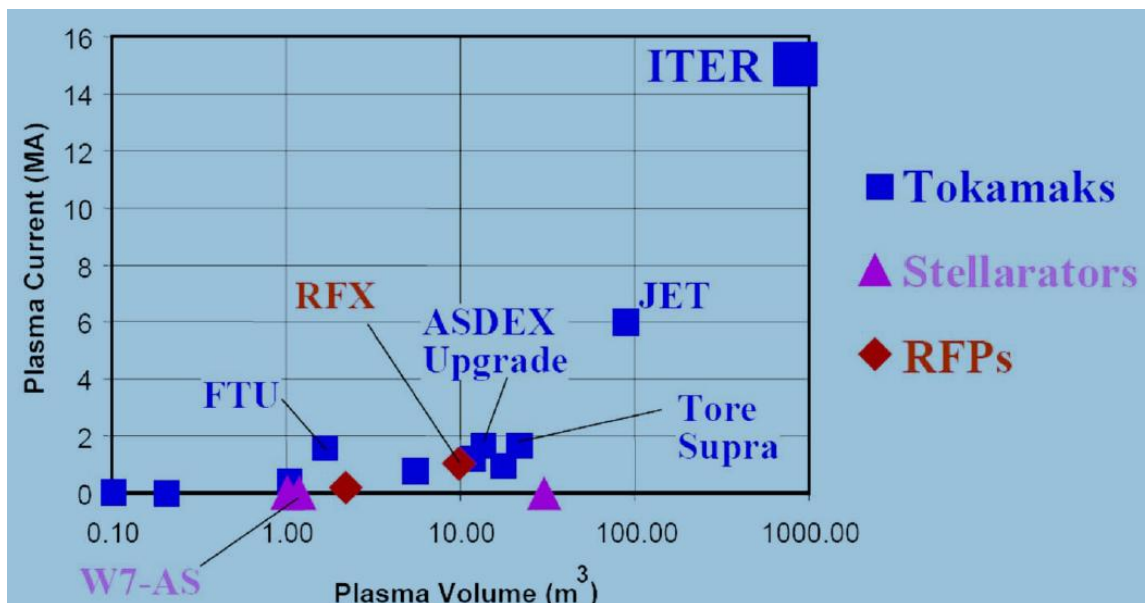
Σχήμα 3.23 Μερικές ενδεικτικές διαστάσεις του ITER. [B.1.7.]

Total Fusion Power	500MW (700MIV)
Q — fusion power/additional heating power	> 10
Average 14MeV neutron wall loading	0.57 MW/m² (0.8MW/m²)
Plasma inductive burn time	>400s
Plasma major radius (R)	6.2 m
Plasma minor radius (a)	2.0 m
Plasma current (I_p)	15 MA (17 MA⁽¹⁾)
Vertical elongation @95% flux surface/separatrix (K₉₅)	1.70/1.85
Triangularity (@95% flux surface separatrix (δ₉₅))	0.33 / 0.49
Safely factor @95% flux surface (q₉₅)	3.0
Toroidal field @6.2 m radius (B_T)	5.3 T
Plasma volume	837 m³
Plasma surface	678 m²
Installed auxiliary heating/current drive power	73 MW ⁽²⁾

(1) The machine is capable of a plasma current up to 17MA with the parameters shown in parentheses) within some limitations over some other parameters (e.g.. pulse length).

(2) A total plasma heating power up to 110MW may be installed in subsequent operation phases.

Σχήμα 3.24 Παράμετροι και διαστάσεις του πλάσματος. [B.1.7.]



Σχήμα 3.25 Πειραματικές διατάξεις μαγνητικής σύντηξης στην Ευρώπη και το μελλοντικό ITER. [B.1.7.]

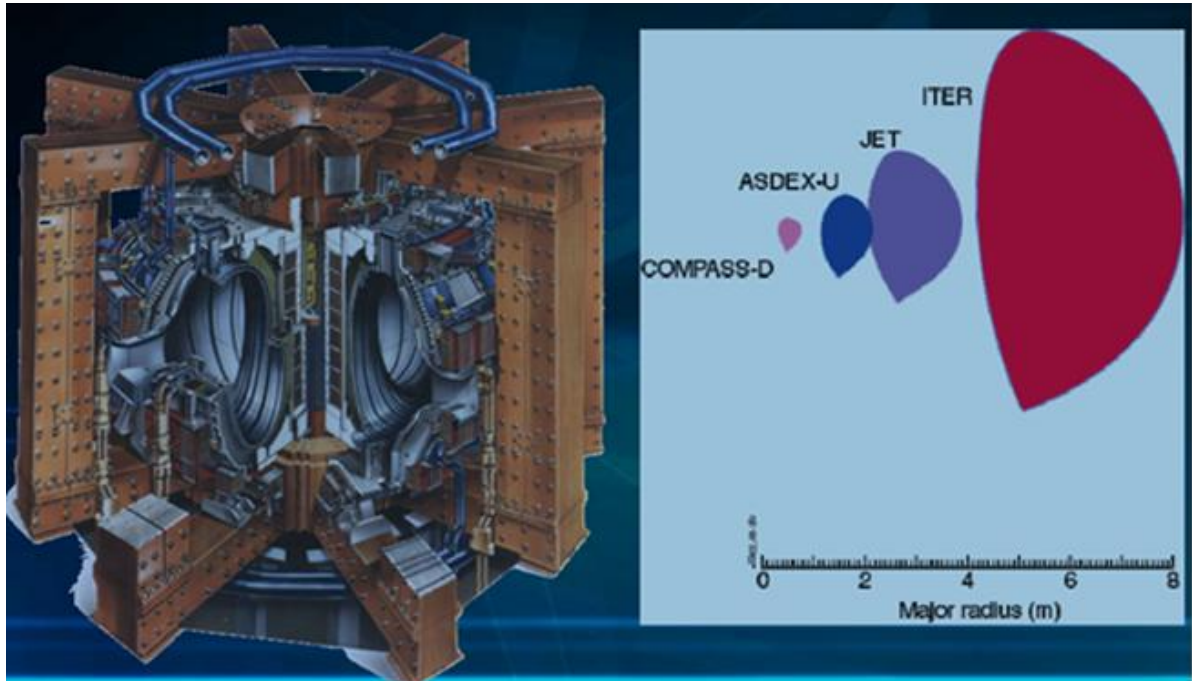
3.7. Πειραματικά Τοκαμακ



Σχήμα 3.26 Γενική άποψη της μηχανής JET. [Β.1.7.]

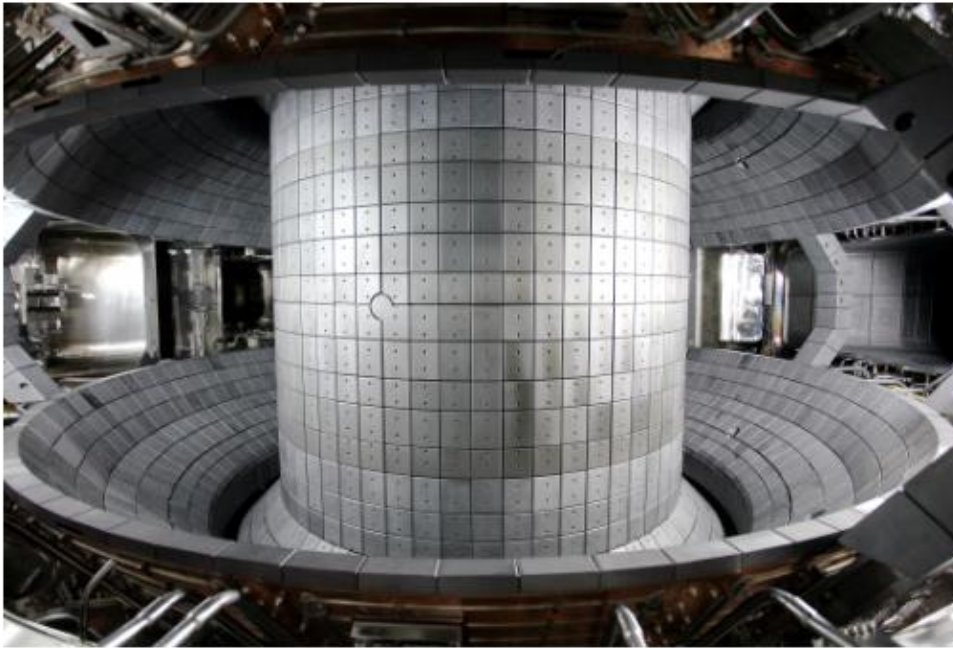
Τα όργανα έξω από το θάλαμο είναι τροφοδοτικά και διαγνωστικά. Με D – T το 1997 παρήχθη παλμός ισχύος 5MW και διάρκειες 5s καθώς και παλμός (μέγιστης) ισχύος 12 - 15 MW.

- Alcator A and Alcator C, MIT, USA; 1975 – 1988
- TFTR, Princeton University, USA; 1982 - 1997
- T-15, in Russia; 10 MW; 1988 - 2005
- Tokamak de Varennes; Varennes, Canada; 1987 - 1999
- START in Culham, United Kingdom; 1991 - 1998
- T-10, in Russia; 2 MW; 1975
- **Joint European Torus (JET), in Culham, United Kingdom; 16 MW; 1983**

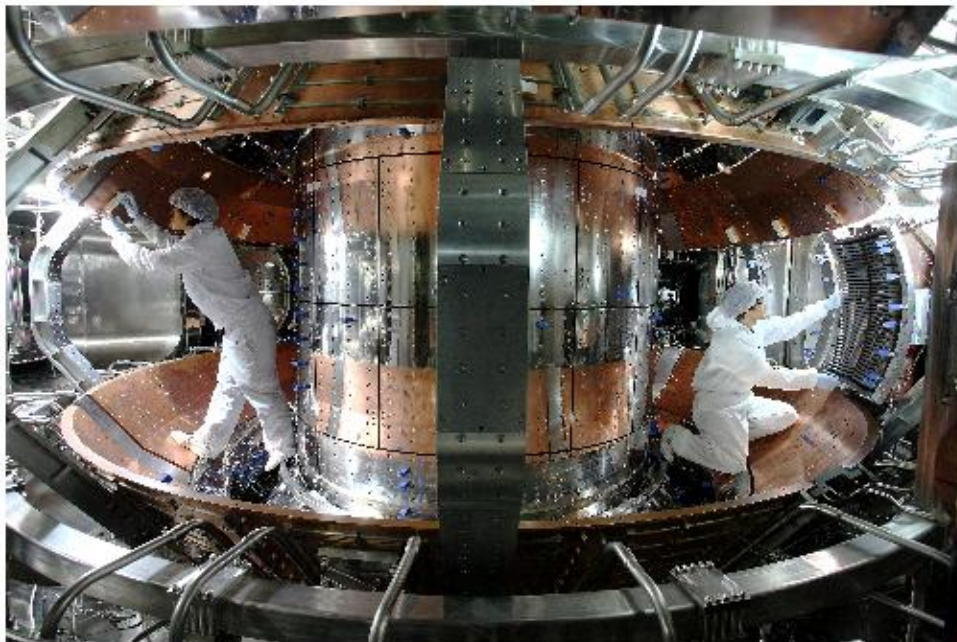


Σχήμα 3.27 Η μεγαλύτερη λειτουργούσα διάταξη είναι το JET Joint European Torus. [B.1.7.]

- CASTOR [1], in Prague, Czech Republic; 1983
- JT-60, in Naka, Ibaraki Prefecture, Japan; 1985
- STOR-M, University of Saskatchewan; Canada 1987
- Tore Supra [2], at the CEA, Cadarache, France; 1988
- Aditya, at Institute for Plasma Research (IPR) in Gujarat, India; 1989
- DIII-D, in San Diego, USA; χειριζόμενο από την General Atomics 1990.
- FTU, in Frascati, Italy; 1990
- ASDEX Upgrade, in Garching, Germany; 1991
- Alcator C-Mod, MIT, Cambridge, USA [3]; 1992
- Tokamak à configuration variable (TCV), at the EPFL, Switzerland; 1992
- HT-7, in Hefei, China; 1995
- MAST, in Culham, United Kingdom; 1999
- EAST (HT-7U), in Hefei, China; 2006
- KSTAR, in Daejeon, South Korea; 2008



Σχήμα 3.28 Φωτογραφία του KSTAR. [Β.2.28.]



Σχήμα 3.29 Φωτογραφία του KSTAR. [Β.2.28.]



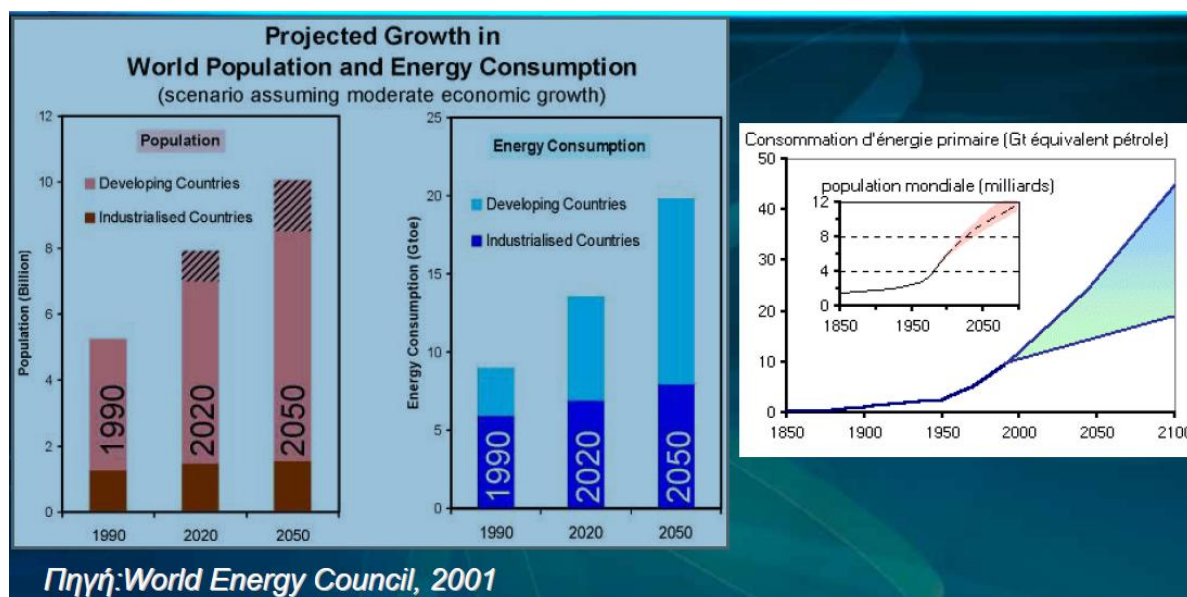
Σχήμα 3.30 Φωτογραφία του KSTAR. [Β.2.28.]

- ITER, in Cadarache, France; 500 MW;
- SST-1, in Gandhinagar, India;

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

Η σύγχρονη κατάσταση. Τα άλυτα ακόμα προβλήματα.

4.1. Το ενεργειακό πρόβλημα

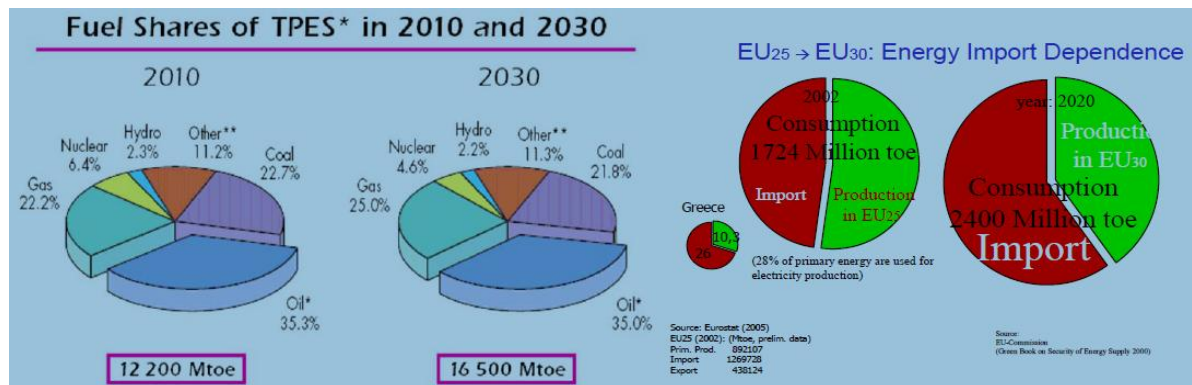


Σχήμα 4.1 Εξέλιξη πληθυσμού και ενέργειας. [B.1.7.]

Η οικονομία εξαρτάται από τα ασφαλή και επαρκή αποθέματα ενέργειας. Σήμερα η απαίτηση αυτή ικανοποιείται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, λιθάνθρακας και φυσικό αέριο), τα οποία καλύπτουν τη μεγαλύτερη κατανάλωση σε ενέργεια. (π.χ. σχεδόν το 67% των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιεί η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι εισαγόμενα). Συνολικά, τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα καλύπτουν σήμερα περί το 50% των ενεργειακών αναγκών της Ε.Ε., ενώ μέχρι το

2030 το ποσοστό αναμένεται να αυξηθεί σε περίπου 70%, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά το πετρέλαιο).

4.2. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εξαρτάται από τρίτες χώρες αφού οι ενεργειακοί πόροι που διαθέτει δεν της επαρκούν.



Σχήμα 4.2 Ευρώπη και ενέργεια (TPES: Σύνολο πρωτογενούς παρεχόμενης ενέργειας). [B.1.7.]

Για τη διατήρηση του βιοτικού επιπέδου μας απαιτούνται πηγές ασφαλούς και αιεφόρου ενέργειας. Ερευνητές αναπτύσσουν μια σειρά από περιβαλλοντικά αποδεκτές, ασφαλείς και αιεφόρες τεχνολογίες σχετικές με την ενέργεια. Η σύντηξη είναι μία από αυτές. Μακροπρόθεσμα, η σύντηξη θα αποτελέσει μια επιλογή για μια μεγάλης κλίμακας πηγή ενέργειας, η οποία έχει μικρή επίπτωση στο περιβάλλον και είναι ασφαλής, με τεράστια και ευρέως καταμελημένα αποθέματα καυσίμων. Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από σύντηξη θα είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για την παραγωγή ενέργειας βασικού φορτίου ώστε να εξυπηρετούν τις ενεργειακές ανάγκες πυκνοκατοικημένων περιοχών και βιομηχανικών ζωνών.

Παρακάτω θα δούμε περιληπτικά το έργο που διεξάγουν κυρίως Ευρωπαίοι ερευνητές με στόχο να καταστήσουν την ενέργεια από σύντηξη διαθέσιμη προς όφελος της κοινωνίας.

4.3. Ασφαλής ενέργεια

Με έναν απλό καυστήρα θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε τον αντιδραστήρα σύντηξης. Και εδώ το καύσιμο που εγχύεται στο σύστημα καίγεται. Κάθε στιγμή η ποσότητα καυσίμου στον θάλαμο αντίδρασης είναι ελάχιστη (περίπου 1 g D-T σε όγκο 1000 m³) και, αν η παροχή καυσίμου διακοπεί, οι αντιδράσεις σύντηξης διαρκούν μόνο λίγα δευτερόλεπτα. Οποιαδήποτε δυσλειτουργία της διάταξης έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του πλάσματος και τη διακοπή των αντιδράσεων.

Τα κύρια καύσιμα της σύντηξης, το δευτέριο και το λίθιο, καθώς και το προϊόν της, το ήλιο, είναι μη ραδιενεργά. Το ραδιενεργό ενδιάμεσο παραγόμενο προϊόν – καύσιμο (δεν απαιτείται η μεταφορά του στη μονάδα παραγωγής ενέργειας από σύντηξη, αφού παράγεται στο θάλαμο του αντιδραστήρα), το τρίτιο, διασπάται αρκετά γρήγορα (έχει χρόνο ημιζωής 12,3 χρόνια) και η διάσπασή του παράγει ένα ηλεκτρόνιο (ακτινοβολία β) πολύ χαμηλής ενέργειας, που μπορεί να διανύσει στον αέρα ελάχιστα χιλιοστά και με δυσκολία να περάσει ένα φύλλο χαρτιού. Παρ' όλα αυτά, το τρίτιο είναι επιβλαβές αν εισχωρήσει στο ανθρώπινο σώμα. Έτσι, έχουν σχεδιασθεί και εγκατασταθεί στη διάταξη διάφορες δικλείδες ασφαλείας για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος (τρίτιο).

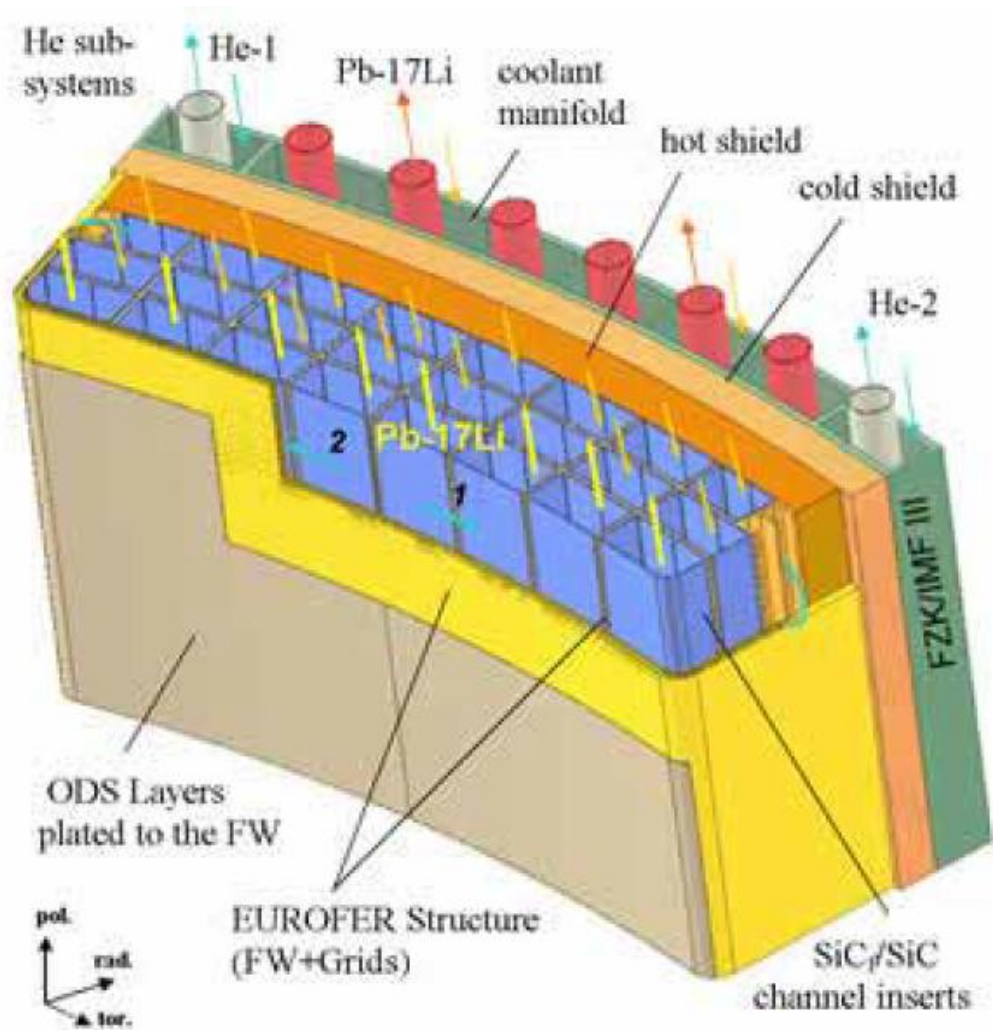


Σχήμα 4.3 Εγκατάσταση χειρισμού τρίτου. [Β.1.8., σελ. 12]

4.4. Μακροπρόθεσμη τεχνολογία- προβλήματα

Παράλληλα με τις εργασίες για την ολοκλήρωση του ITER, διεξάγεται αρκετή έρευνα και ανάπτυξη στην τεχνολογία σύντηξης για την κατασκευή του DEMO.

Η Ευρώπη ασχολείται με μελέτες σχετικά με τον αναπαραγωγικό μανδύα (breeding blanket) εστιάζουν στη χρήση κραμάτων λιθίου-μολύβδου ψυχόμενων με ήλιο και κεραμικών ψηφίδων (pebbles) του αναγεννητή (breeder), επίσης ψυχομένων με ήλιο. Η έρευνα αυτή είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη του κύκλου του τρίτου στον αντιδραστήρα σύντηξης.



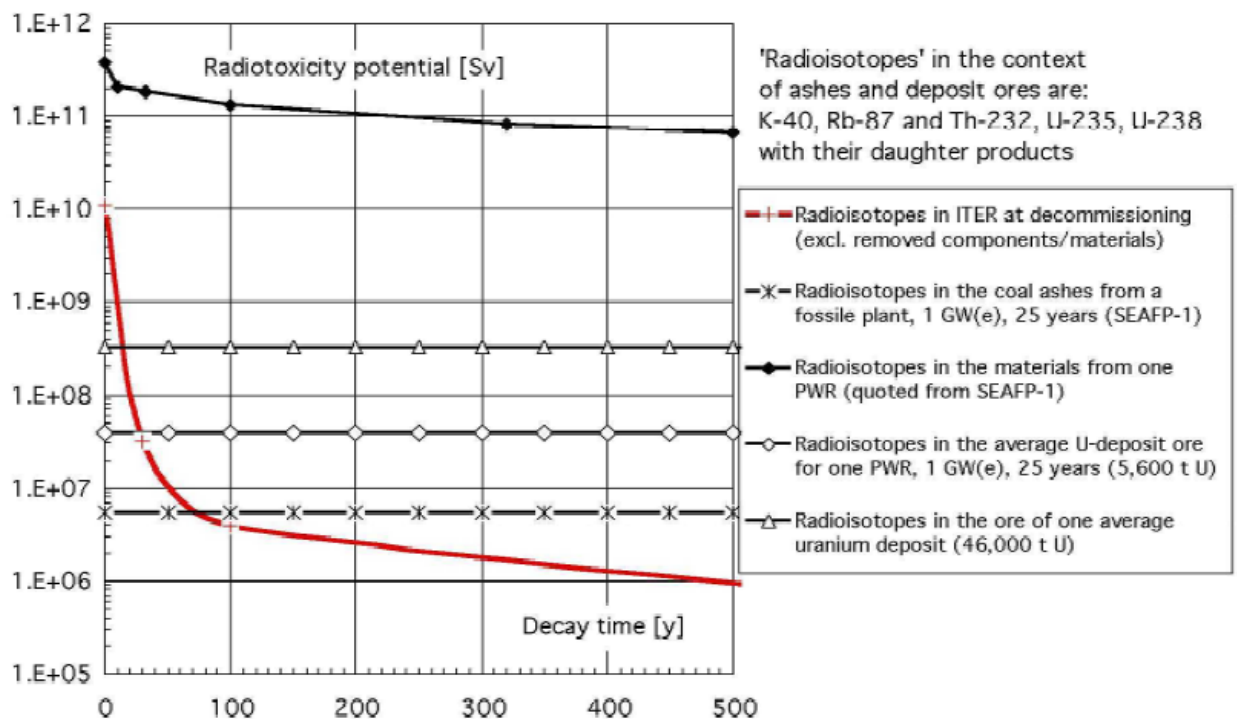
Σχήμα 4.4 Σχεδιασμός μανδύα (blanket) [B.1.7.]

Φυσική Ευστάθεια πλάσματος – Αλληλεπίδραση πλάσματος τοιχωμάτων - Συνεχής Λειτουργία [Stellarators] Τεχνολογία Υλικών Αντοχή σε ακτινοβολία – Χαμηλή ενεργοποίηση (ημιζωή < 100 χρόνια)

4.5. Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η Ευρώπη αναπτύσσει δομικά υλικά με την προσοχή της να επικεντρώνεται σε φερρικούς και μαρτενσιτικούς χάλυβες μειωμένης ραδιενεργού δραστικότητας

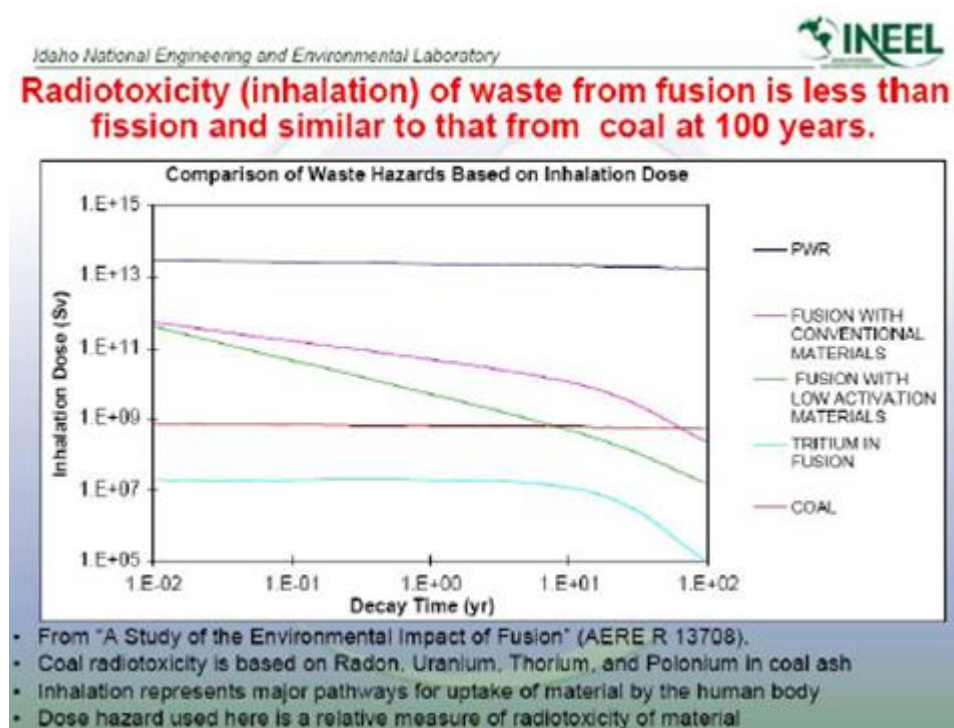
(EUROFER) και, με το βλέμμα στο μέλλον, ερευνά σύνθετα υλικά από ανθρακοπυρίτιο. Επίσης, αντιμετωπίζονται ζητήματα ασφάλειας και προστασίας περιβάλλοντος. Κάθε αντιδραστήρας σύντηξης πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε οποιοδήποτε ατύχημα στη μονάδα του να μην απαιτεί την εκκένωση των κοντινών κατοικημένων περιοχών. Τα ζητήματα αυτά, οδηγούν κυρίως σε βελτιωμένες διατάξεις και στην ελαχιστοποίηση των ενεργοποιημένων υλικών.



Σχήμα 4.5 Σύγκριση εξέλιξης ακτινοβολιών. [B.1.7.]

4.6. Οικονομοτεχνικά θέματα στην πυρηνική σύντηξη

Κοινωνικοοικονομικές μελέτες αναλύουν οικονομικές πτυχές και μακροπρόθεσμα σενάρια σύντηξης



Σχήμα 4.6 Σύγκριση εξέλιξης ακτινοβολιών. [B.1.13.]

4.7. Ο ITER και η Ευρώπη

Το κύριο μέλημα E&A στη σύντηξη στα Κράτη-Μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (μαζί με χώρες που συνδέονται με το Πρόγραμμα- Πλαίσιο της Ευρατόμ) είναι «η από κοινού δημιουργία πρωτοτύπων αντιδραστήρων για σταθμούς παραγωγής ενέργειας ικανούς να καλύψουν τις ανάγκες της κοινωνίας: λειτουργική ασφάλεια, περιβαλλοντική συμβατότητα, οικονομική βιωσιμότητα».

Ο σχεδιασμός - πολιτική για την επίτευξη αυτού του μακροπρόθεσμου στόχου συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη ενός πειραματικού αντιδραστήρα, του οποίου η κατασκευή επιδιώκεται στο πλαίσιο της διεθνούς συνεργασίας «ITER». Ο συνολικός προγραμματικός στόχος του Τόκαμακ ITER είναι να καταδείξει το επιστημονικά και τεχνολογικά εφικτό της παραγωγής ενέργειας από σύντηξη για ειρηνικούς σκοπούς. Ο ITER θα φέρει σε πέρας αυτόν τον στόχο επιτυγχάνοντας την ελεγχόμενη καύση πλάσματος από δευτέριο και τρίτιο, με απώτερο σκοπό τη μόνιμη λειτουργία.

Το επόμενο βήμα θα είναι ένας αντιδραστήρας επίδειξης («DEMO»), ο οποίος, για πρώτη φορά, θα είναι σε θέση να παράγει σημαντικές ποσότητες ηλεκτρισμού και θα είναι αυτόνομος σε ό,τι αφορά το τρίτιο. Η κατασκευή του ITER και, αργότερα, του DEMO, θα απαιτήσει τη σημαντική συμμετοχή της Ευρωπαϊκής βιομηχανίας και θα συνοδεύεται από συμπληρωματικές δραστηριότητες E&A στη φυσική και την τεχνολογία σε εργαστήρια σύντηξης και πανεπιστήμια.

Σημαντικό στοιχείο του Ευρωπαϊκού προγράμματος σύντηξης τα τελευταία χρόνια υπήρξε η συμμετοχή (με διεθνείς εταίρους) στη σχεδίαση της διάταξης του ITER. Το βασικό περίγραμμα αυτής της σχεδίασης ακολουθεί εκείνο της Ευρωπαϊκής διάταξης JET (Κοινός Ευρωπαϊκός Τόρος, Culham, HB), στην οποία το 1997 η παραγωγή ισχύος από σύντηξη έκανε παγκόσμιο ρεκόρ με 16 MW. Η προέκταση του αποτελέσματος αυτού στον ITER επιχειρείται μέσω εκτεταμένης μοντελοποίησης με χρήση της εκτενούς βάσης πειραματικών δεδομένων, η οποία προκύπτει από Ευρωπαϊκά και διεθνή πειράματα σύντηξης. Η συνεργασία ITER πραγματοποιείται υπό την αιγίδα του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA, Βιέννη, Αυστρία). Ο συνολικός στρατηγικός στόχος του ITER είναι να καταδείξει το επιστημονικά και τεχνολογικά εφικτό της παραγωγής ενέργειας από σύντηξη για ειρηνικούς σκοπούς.

Ταυτόχρονα με τον ITER πραγματοποιούνται εργασίες για τον αντιδραστήρα DEMO σε θέματα E&A, για τα οποία χρειάζεται μεγάλος χρόνος μεταξύ σχεδίασης και κατασκευής. Ένας σημαντικός στόχος είναι η ανάπτυξη προωθημένων δομικών υλικών (ιδιαίτερα με χαμηλή ραδιενεργό δραστηριότητα), με την ασφαλέστερη συμπεριφορά υπό συνθήκες λειτουργίας αντιδραστήρα σύντηξης.

Με βάση τη συνθήκη Ευρατόμ, το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα Έρευνας και Ανάπτυξης στη σύντηξη συντονίστηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τέθηκε σε εφαρμογή μέσω:

- Συμφωνιών για συγκρότηση Ενώσεων με ερευνητικά ινστιτούτα ή οργανισμούς στα Κράτη-Μέλη και σε χώρες που συνδέονται με το Πρόγραμμα-Πλαίσιο της Ευρατόμ
- Της Συμφωνίας EFDA η οποία εξασφαλίζει
 - δραστηριότητες σχετικές με την τεχνολογία σύντηξης μέσω των Ενώσεων και της βιομηχανίας,
 - τη συλλογική χρήση των εγκαταστάσεων του JET, και
 - τις Ευρωπαϊκές συνεισφορές σε διεθνείς συνεργασίες όπως ο ITER.
- Συμβολαίων περιορισμένης διάρκειας σε χώρες που δεν διαθέτουν δική τους Ένωση για την έρευνα στη σύντηξη.
- Μιας συμφωνίας για την προώθηση της κινητικότητας ερευνητών, και Υποτροφιών της Ευρατόμ.

Στο 6ο Πρόγραμμα-Πλαίσιο της Ε.Ε. (2002– 2006) η Έρευνα στην Ενέργεια από Σύντηξη αποτελεί Θεματική Περιοχή Προτεραιότητας με Κοινοτικό προϋπολογισμό

750 εκατομμυρίων ευρώ.

Πίσω από την επιτυχία της Ευρωπαϊκής έρευνας στη σύντηξη βρίσκεται το έργο μερικών χιλιάδων φυσικών και μηχανικών που εργάζονται σε Ευρωπαϊκά εργαστήρια και Ευρωπαϊκές βιομηχανίες.

4.8. Διεθνείς οργανισμοί σύντηξης

- ITER
International Thermonuclear Experimental Reactor

Ασχολείται με την εξέλιξη των αντιδραστήρων ΤΟΚΑΜΑΚ και συμμετέχουν ΗΠΑ, Ευρωπαϊκή Ένωση, Ιαπωνία, Κίνα, Ινδία, Κορέα και Ρωσία.

- NIF

National Ignition Facility

Ασχολείται με τους αντιδραστήρες Αδρανειακού Περιορισμού

Laser Megajoule (LMJ),

Hiper, LLe.

Rochester Laser Lab

- Only inertial confinement fusion (ICF) research lab of type in U.S.
- Supported by the National Nuclear Security
- Fast ignition/advanced fusion schemes are being investigated at LLE
- OMEGA laser (can create fusion)
- National Inertial Confinement Fusion Program
- <http://www.hiper-laser.org/fus>



Σχήμα 4.7 ICF. [B.3.9.]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

Εκτιμώμενη μελλοντική πορεία

5.1 Γενικά

Για να υλοποιηθούν όλα τα στάδια της έρευνας σχετικά με την ελεγχόμενη σύντηξη, ώστε να φτάσουμε στο τελικό αποτέλεσμα, πρέπει να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο θα μετατρέψουμε την αστείρευτη αυτή ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα ακόμη ζητούμενο είναι με ποιόν τρόπο θα αυξηθεί ο χρόνος συνεχούς λειτουργίας του εργοστασίου σύντηξης, που σήμερα διαρκεί μόλις λίγα δευτερόλεπτα.

Επίσης υπάρχει το πρόβλημα του κόστους κατασκευής των σταθμών πυρηνικής σύντηξης που με τα σημερινά δεδομένα είναι πολύ υψηλό. Έτσι, η κατασκευή ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας με πυρηνική σύντηξη είναι ακόμη πολύ δαπανηρή και ελάχιστες χώρες θα έχουν την δυνατότητα να την υλοποιήσουν. Τα μεγαλύτερα προγράμματα πειραμάτων σύντηξης γίνονται σήμερα από την Ε.Ε., τις ΗΠΑ, την Ρωσία και την Ιαπωνία.

Πρόσφατα, η Γαλλία «κέρδισε» την υποψηφιότητά της να κατασκευαστεί εκ μέρους της Ε.Ε. ένας πειραματικός σταθμός ελεγχόμενης σύντηξης για παραγωγή ενέργειας (τεύχος 22 της έντυπης «Πεμπτουσίας» , Δεκ. 2006 – Μαρ. 2007)

Στόχος μας πρέπει να είναι η ενέργεια που παράγεται από τις αντιδράσεις σύντηξης να χρησιμοποιείται όπως σήμερα, π.χ. για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ως θερμότητα για βιομηχανική χρήση, ή ενδεχομένως για την παραγωγή υδρογόνου. Η κατανάλωση καυσίμου σε ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας από σύντηξη πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλή. Για την ετήσια λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής (ηλεκτρικής) ενέργειας από σύντηξη ισχύος 1 GW θα χρειάζονται περίπου 100 kg δευτέρου και 3 τόνοι φυσικού λίθου, ενώ θα παράγονται περίπου

7 δισεκατομμύρια kWh. Μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από άνθρακα – χωρίς τις διεργασίες απομόνωσης του άνθρακα– απαιτεί περίπου 1,5 εκατομμύριο τόνους καυσίμου για να παραγάγει την ίδια ενέργεια!

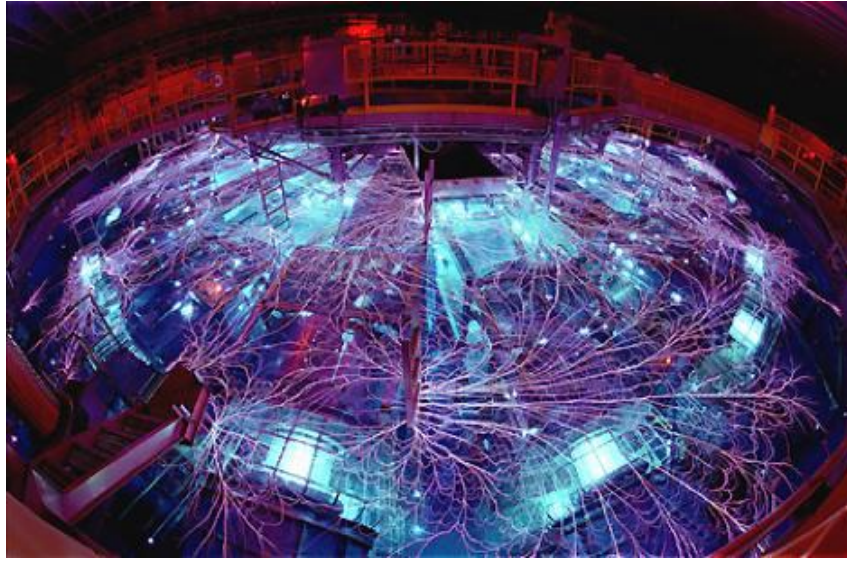
Οι αντιδραστήρες σύντηξης δεν παράγουν αέρια θερμοκηπίου και άλλες ρυπογόνες ουσίες που έχουν ζημιογόνες επιπτώσεις στο περιβάλλον ή/και προκαλούν κλιματικές αλλαγές. Τα νετρόνια που παράγονται κατά την αντίδραση σύντηξης ενεργοποιούν τα υλικά γύρω από το πλάσμα. Έτσι χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών αυτών ώστε να επιτρέψει την απαλλαγή τους από τον τακτικό έλεγχο (και πιθανώς να καταστήσει δυνατή την ανακύκλωσή τους) περίπου 100 χρόνια μετά τη διακοπή λειτουργίας της μονάδας παραγωγής ενέργειας.

Άρα, τα απόβλητα από μονάδες παραγωγής ενέργειας από σύντηξη δεν θα επιβαρύνουν μακροπρόθεσμα τον άνθρωπο του μέλλοντος.

5.2. Βήματα ...

Η προσπάθεια της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας για την αξιοποίηση της πυρηνικής σύντηξης συνεχίζεται αδιάκοπα μέχρι σήμερα. Ερευνητές από όλο τον πλανήτη μας προσπαθούν να κατασκευάσουν σύγχρονους αντιδραστήρες που θα καταστήσουν την πυρηνική σύντηξη εφικτή και εμπορικά εκμεταλλεύσιμη.

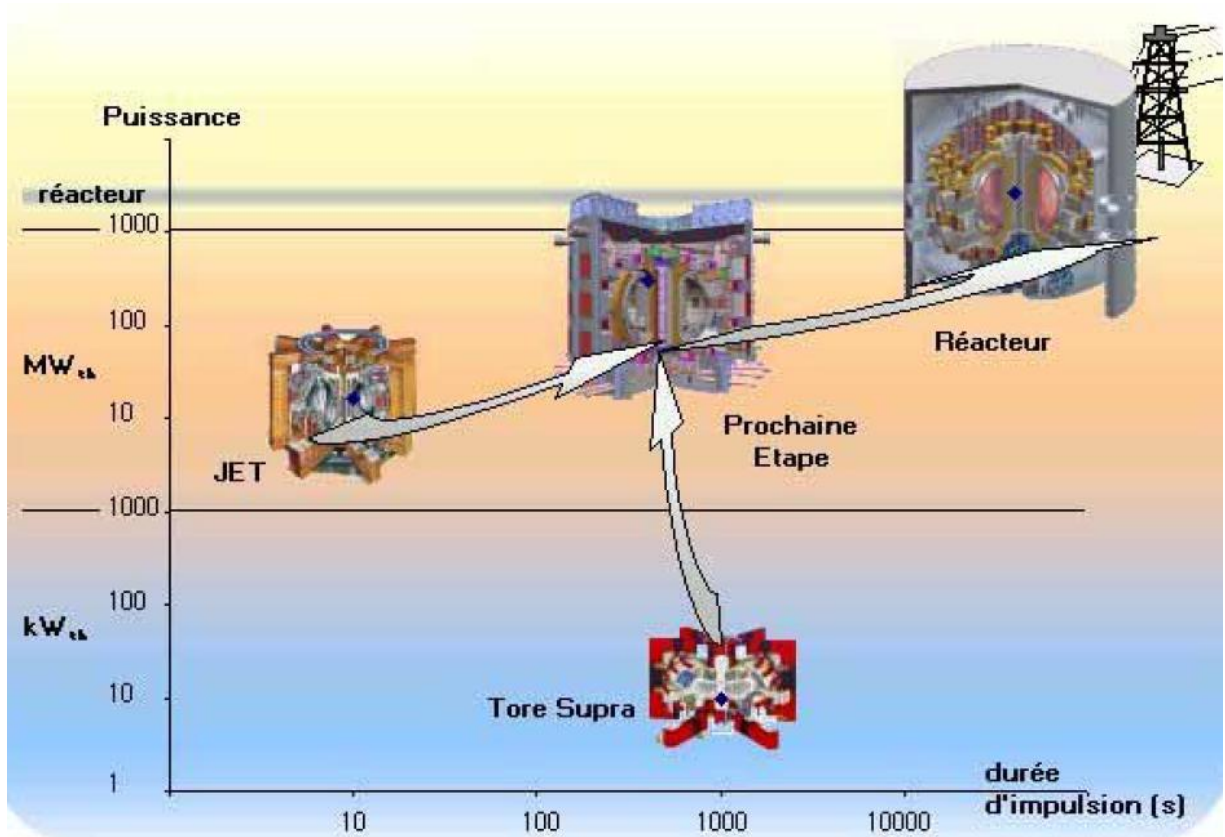
Όπως ήδη έχουμε αναφέρει πρόσφατη εξέλιξη είναι οι μηχανές αδρανειακής συγκράτησης πλάσματος. Εδώ το δευτέριο και το τρίτιο βρίσκονται μέσα σε μια κάψουλα και βομβαρδίζονται ακατάπαυστα από μια δέσμη επιταχυνόμενων σωματιδίων ή από μια δέσμη ακτίνων λέιζερ. Πρωτοπόρο ίδρυμα είναι το Εργαστήριο Λόρενς Λίβερμορ, στην Καλιφόρνια, και το γαλλικό πρόγραμμα Laser Megajoule, στην Ευρώπη. Μέσα σε κλάσματα δευτερολέπτου η πυκνότητα του υλικού στην κάψουλα αυξάνεται κατά 10.000 φορές, επιτρέποντας την ανάφλεξη του υλικού και τη σύντηξη των πυρήνων. Το πρόβλημα είναι ότι αυτή η αντίδραση σβήνει σχεδόν αμέσως και δεν καταφέρνει να αυτοσυντηρηθεί.



Σχήμα 5.1 Μηχανή – Z. [B.2.29.]

Στο Εργαστήριο Σάντια του Νέου Μεξικού, οι λεγόμενες Μηχανές-Z δοκιμάζονται υπό τη σκέπη ενός άλλου ενδιαφέροντος ερευνητικού προγράμματος. Εκεί οι ερευνητές ελπίζουν να επιτύχουν τη σύντηξη χρησιμοποιώντας μια ηλεκτρική ώση μεγέθους πενήντα χιλιάδων δισεκατομμυρίων Βατ, η οποία διατρέχει έναν αγωγό σχήματος Z και καταλήγει σ' ένα μεταλλικό θάλαμο μέσα στον οποίο βρίσκεται το πλάσμα.

Η Ευρώπη ενωμένη γερά πραγματοποιεί κοινά μεγάλα προγράμματα, με κορυφαίο την JET (Joint European Torus) που βρίσκεται στο Abingdon (HB). Η μηχανή αυτή, που εξακολουθεί να θεωρείται η πιο ισχυρή στον κόσμο, είναι τόσο μεγάλη που δεν θα ήταν δυνατόν κανένα κράτος μέλος να έχει αναλάβει μόνο του την ανάπτυξή της. Επί του παρόντος η μοναδική μηχανή που δύναται να λειτουργήσει με το μείγμα καυσίμων δευτερίου – τρίτιου που θα χρησιμοποιείται στους μελλοντικούς εμπορικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με σύντηξη είναι η JET .



Σχήμα 5.2 « Προσδοκίες » [B.1.7.]

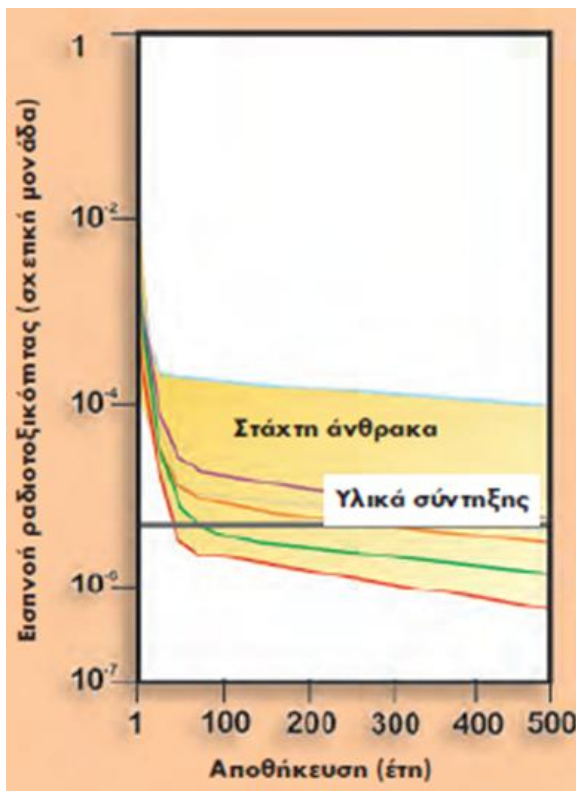
Σημαντικό επόμενο βήμα στη σχεδίαση και κατασκευή ενός αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης είναι ο ITER, του οποίου το πρόγραμμα στηρίζεται στην επιτυχή διεθνή συνεργασία που υλοποιείται με τη βοήθεια μιας πλατιάς ποικιλίας προγραμμάτων E&A στην τεχνολογία και την επιστήμη.

Ο ITER θα παράγει 400 MW ισχύος από σύντηξη για περίοδο 6 λεπτών, με απώτερο σκοπό την επέκτασή του σε μόνιμη λειτουργία. Το κόστος κεφαλαίου του ITER ανέρχεται σε περίπου 4,6 δισεκατομμύρια ευρώ (σε τιμές του έτους 2000). Διάρκεια κατασκευής του ITER περίπου 10 χρόνια και εικοσαετής περίοδος λειτουργίας του.

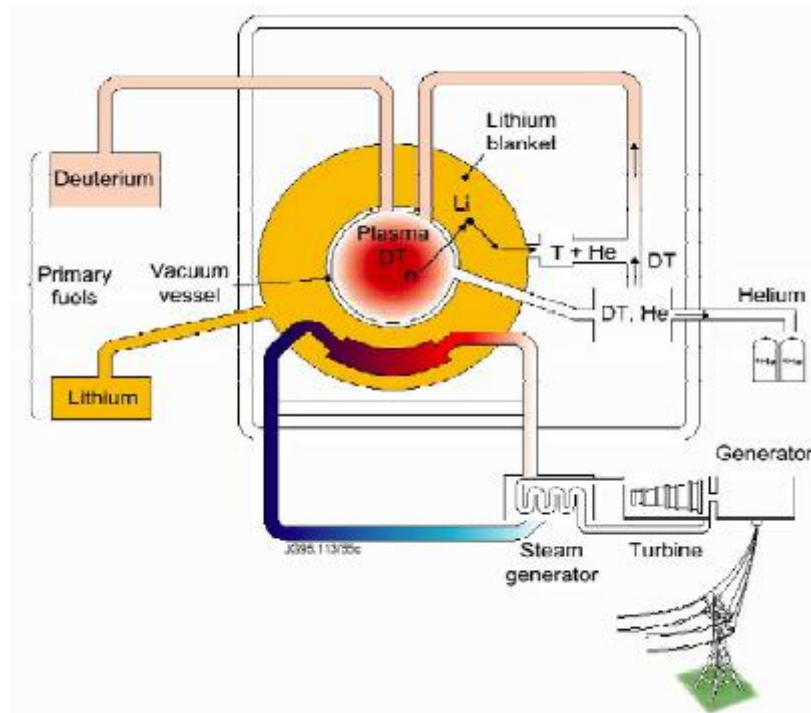
5.3. Έρευνα

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο εκτός από τις εργασίες για την ολοκλήρωση του ITER, διεξάγεται αρκετή έρευνα και ανάπτυξη στην τεχνολογία σύντηξης για την κατασκευή του DEMO. Ευρωπαϊκές μελέτες σχετικά με τον αναπαραγωγικό μανδύα (breeding blanket) εστιάζουν στη χρήση κραμάτων λιθίου-μολύβδου ψυχόμενων με ήλιο και κεραμικών ψηφίδων (pebbles) του αναγεννητή (breeder), επίσης ψυχομένων με ήλιο. Η έρευνα αυτή είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη του κύκλου του τρίτου στον αντιδραστήρα σύντηξης.

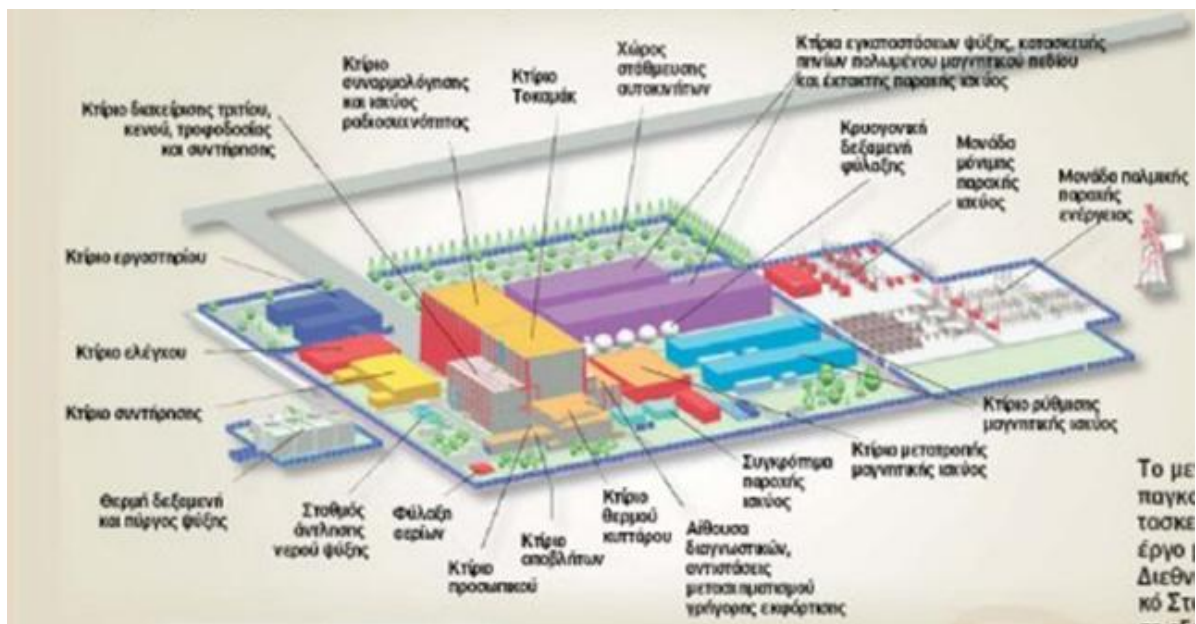
Συνοψίζοντας επαναλαμβάνουμε ότι κοινωνικοοικονομικές μελέτες αναλύουν οικονομικές πτυχές και μακροπρόθεσμα σενάρια σύντηξης.



Σχήμα 5.3 Υπολογισμένη μείωση της ραδιοτοξικότητας από διαφορετικά μοντέλα μονάδας παραγωγής ενέργειας από σύντηξη σε σύγκριση με την ραδιοτοξικότητα της στάχτης άνθρακα. [B.2.29.]



Σχήμα 5.4 (Επανάληψη σχήματος 3.14) Σχηματική παράσταση μελλοντικού αντιδραστήρα σύντηξης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Ισχύς περίπου 1.5 GW). Η κατασκευή του δύναται να πραγματοποιηθεί σε 20-40 χρόνια. [B.1.7.]



Σχήμα 5.5 Μακέτα συγκροτήματος αντιδραστήρα σύντηξης.[B.2.27.]

Οικονομικά της ενέργειας από Σύντηξη

[Εκτιμήσεις, βασισμένες στο ITER, από μελέτες παράλληλες με τις κυρίως έρευνες].

Κόστος κατασκευής DEMO: 7 δις. €, δηλαδή 14 € ανά watt.

Αμτοηλεκτρικοί Σταθμοί (Ανθρακας) [*] 1.5 €/W

Αντιδραστήρες Πυρηνικής Σχάσης 3 €/W

Εμπορικοί Αντιδραστήρες (Ωρίμανση) 4 €/W

Εμπορικοί Αντιδραστήρες (Αρχικά) 8 €/W

5.4. Αντιδράσεις

«Αβέβαιο το πείραμα που δεσμεύει πολύτιμα κονδύλια»

Άλλες απόψεις - ανησυχίες - σκέψεις - αντιδράσεις εκφράζονται από περιβαλλοντικές οργανώσεις για το πείραμα της πυρηνικής σύντηξης: «Η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα συμφωνεί ότι χρειάζεται να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 80% έως το 2050. Οι πιο αισιόδοξοι υπέρμαχοι της πυρηνικής σύντηξης προβλέπουν ότι ο πρώτος αντιδραστήρας θα παράσχει ηλεκτρικό ρεύμα το 2050.

Το κόστος όλου αυτού του εγχειρήματος με αβέβαια αποτελέσματα, δεσμεύει χρήματα από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και την εξοικονόμηση ενέργειας, οι οποίες αποτελούν τις πραγματικές λύσεις στο πρόβλημα των κλιματικών αλλαγών και της ενεργειακής αυτάρκειας. Το κοστολόγιο ενός «ITER» ανέρχεται στα 10 δις. ευρώ. Αν το ίδιο ποσό επενδυόταν στην κατασκευή αιολικών πάρκων, η ενέργεια που θα παραγόταν θα επαρκούσε για την ηλεκτροδότηση 7.500.000 ευρωπαϊκών νοικοκυριών. Το κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης είναι ακόμα μεγαλύτερο από το ήδη εξωφρενικό κόστος της κατασκευής ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης. Η πυρηνική σύντηξη δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστική. Η

πυρηνική σύντηξη χρησιμοποιήθηκε πρώτα για στρατιωτικούς σκοπούς. Αν λειτουργήσει ποτέ, θα δημιουργήσει σοβαρό πρόβλημα διαχείρισης αποβλήτων, ενώ θα παραγάγει ραδιενεργά στοιχεία.»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

Συμπεράσματα

6.1. Τα πλεονεκτήματα της Σύντηξης

Μια ασφαλής και φιλική προς το περιβάλλον ενεργειακή επιλογή που προσφέρει τη δυνατότητα ενός καθαρού, σταθερού και μακροπρόθεσμα ανεξάντλητου ενεργειακού εφοδιασμού, είναι η θερμοπυρηνική σύντηξη. Για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική.

Σχεδόν απεριόριστη διαθεσιμότητα καυσίμων, τα οποία κατανέμονται ευρέως σε όλο τον κόσμο. Το Δευτέριο είναι άφθονο και μπορεί να εξαχθεί εύκολα, π.χ. από το θαλασσινό νερό. Το Τρίτιο μπορεί να παραχθεί από το Λίθιο, ένα ελαφρύ μέταλλο, ευρύτατα διαθέσιμο στη γήινη λιθόσφαιρα.

Καμία εκπομπή αερίου θερμοκηπίου. Η διαδικασία της θερμοπυρηνικής σύντηξης δε συνδέεται με την παραγωγή αερίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα, που προκαλούν αυξανόμενη ανησυχία για τη θέρμανση του πλανήτη και άλλες καταστρεπτικές επιδράσεις στο περιβάλλον.

Κατάλληλη για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτείται για τις αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες των σύγχρονων πόλεων. Ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με θερμοπυρηνική σύντηξη θα έχει ισχύ της τάξης του 1 GW, δηλαδή θα είναι σε θέση να παράγει μεγάλο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας εικοσιτέσσερις ώρες το εικοσιτετράωρο.

Οι μελλοντικές γενιές δεν θα επιβαρύνονται με τα απόβλητα από τη θερμοπυρηνική σύντηξη. Η ραδιενέργεια που σχετίζεται με τον μηχανισμό της θερμοπυρηνικής σύντηξης είναι πολύ βραχύβια και δεν αντιπροσωπεύει καμία επιβάρυνση. Στα δομικά στοιχεία των αντιδραστήρων κοντά στο πλάσμα της

θερμοπυρηνικής σύντηξης θα μπορούσε να επαχθεί ραδιενέργεια. Όμως, με κατάλληλη επιλογή των δομικών υλικών είναι εφικτό, τα ραδιενεργά απόβλητα που έτσι θα παραχθούν να έχουν μικρό όγκο, και η ραδιενέργειά τους πρακτικά να μηδενίζεται κατά τη διάρκεια λίγων δεκαετιών.

Η λειτουργία ενός αντιδραστήρα σύντηξης δεν προκαλεί κανένα κίνδυνο. Η διαδικασία της σύντηξης είναι έμφυτα ευσταθής. Απομακρύνσεις (προς οποιαδήποτε κατεύθυνση) από το σχεδιασμένο σημείο λειτουργίας οδηγεί είτε σε επιστροφή στο σημείο λειτουργίας, είτε σε σβήσιμο του αντιδραστήρα. (Σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες σχάσης, η σύντηξη δεν εμπλέκει καμία αλυσιδωτή αντίδραση, συνεπώς είναι έμφυτα αδύνατο να προκύψουν ανεξέλεγκτες συνθήκες που οδηγούν σε ατυχήματα διαρροής ή ρευστοποίησης.) Επίσης, οποιαδήποτε χρονική στιγμή ένας αντιδραστήρας σύντηξης θα περιέχει μόνο πολύ μικρές ποσότητες ραδιενεργών καυσίμων, συνεπώς ακόμα και το ενδεχόμενο ολικής διαρροής του πλάσματος αντιπροσωπεύει αμελητέα επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Η τροφοδοσία ενός αντιδραστήρα σύντηξης δεν προκαλεί κανένα κίνδυνο. Η καθημερινή λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με θερμοπυρηνική σύντηξη δεν απαιτεί μεταφορά των ραδιενεργών υλικών. Το ραδιενεργό τρίτιο θα παράγεται και θα καταναλώνεται αυστηρά μέσα στον αντιδραστήρα.

Οι ραδιενεργές εκπομπές αποτελούν πολύ μικρό κίνδυνο για το περιβάλλον. Εκτενείς μελέτες ασφάλειας έχουν δείξει, ότι ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με θερμοπυρηνική σύντηξη μπορεί να χρησιμοποιείται χωρίς κίνδυνο σημαντικών ραδιενεργών εκπομπών.

Επίσης ένας αντιδραστήρας σύντηξης δεν μπορεί να υποστεί τήξη. Η ποσότητα καύσιμου υλικού είναι τόσο μικρή, ώστε σύντομα εξαντλείται. Τέλος, στην περίπτωση διαφυγής του τριτίου αυτό ανεβαίνει αμέσως στα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Άρα, ακόμη και στο δυσμενέστερο σενάριο ατυχήματος, δεν θα υπήρχε καμία ανάγκη να απομακρυνθεί ο τοπικός πληθυσμός.

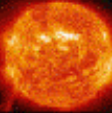
Άρα ο έλεγχος της εκλυόμενης ενέργειας στη θερμοπυρηνική σύντηξη θα αποτελέσει σημαντικό κατόρθωμα, καθώς θα ωφεληθούμε πάρα πολύ, αφού: α) ο καύσιμο υλικό (το Δευτέριο) υπάρχει άφθονο στη φύση και είναι πολύ φθινό. "Καύσιμο" (D και Li): Σε αφθονία και με μεγάλη απόδοση - 1 γραμμάριο D-T \Rightarrow 26000 kW·hr ηλεκτρικής ενέργειας (~10 τόνοι άνθρακα). Έτσι η ενέργεια που παράγεται από τη σύντηξη είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική συγκριτικά με όλες τις άλλες πηγές ενέργειας, ως προς το κόστος (απόδοση).

β) Δεν υπάρχει κίνδυνος κλοπής με σκοπό την κατασκευή πυρηνικών όπλων.

γ) Δεν υπάρχει περίπτωση ατυχημάτων τήξης πυρήνα όπως σε αντιδραστήρα σχάσης. Ασφαλής λειτουργία, αφού στη μηχανή δεν αποθηκεύεται μεγάλη ποσότητα καυσίμου και δ) Έχουμε πολύ μικρές εκπομπές ακτινοβολίας σε σύγκριση με την πυρηνική σχάση καθόλου εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και λίγα απόβλητα χαμηλής ραδιοτοξικότητας.

Επανάσταση στην ενέργεια

Ο πρωτοποριακός αντιδραστήρας πυρηνικής σύντηξης θα εγκατασταθεί στη Γαλλία και θα φέρει επανάσταση στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



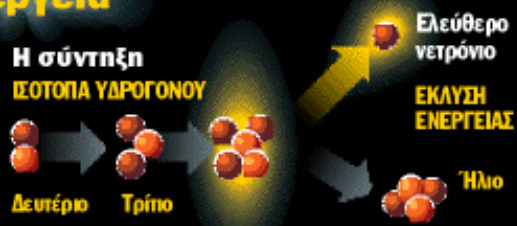
• **Ο ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ** θα παράγει ενέργεια με τον ίδιο τρόπο που παράγει ενέργεια ο Ήλιος

• **ΟΙ ΠΗΓΕΣ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΤΟΥ** θα είναι ανεξάντλητες και τα ραδιενεργά κατάλοιπα ελάχιστα

• **ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ** κατασκευής είναι πολύ μεγάλο – απαγορευτικό, όπως λένε οι αντίπαλοι του προγράμματος

• **ΤΟ ΟΦΕΛΟΣ** όμως θα είναι πολύ μεγαλύτερο για το περιβάλλον, αφού θα αχρηστευτεί ο ρυπογόνος άνθρακας

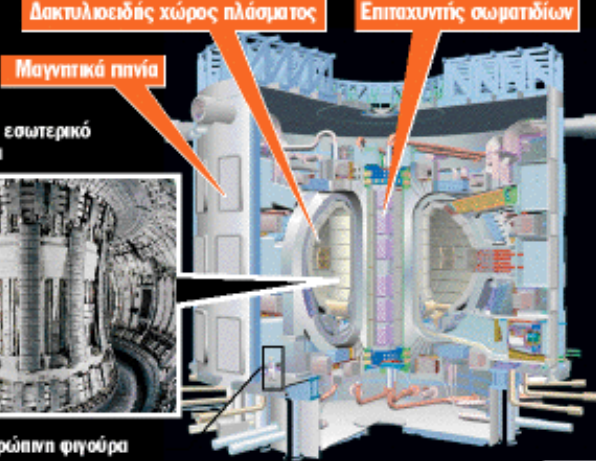
Η σύντηξη ΙΣΟΤΟΠΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ



Δευτέριο + Τρίτιο \rightarrow Ήλιο + Ελεύθερο νετρόνιο

ΕΚΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο αντιδραστήρας
Η αντίδραση θα τελειάσει σε θερμοκρασία **1.000.000 °C**

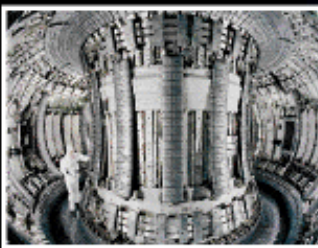


Δακτυλιοειδής χώρος πλάσματος

Επιταχυντής σωματιδίων

Μαγνητικά πηνία

Το δακτυλιοειδές εσωτερικό του αντιδραστήρα



Ανθρώπινη φιγούρα

Σχήμα 6.1 Η σύντηξη στον τύπο. [B.2.30.]

6.2. Τα μειονεκτήματα της Σύντηξης

Η μεγάλη ροή νετρονίων που παράγονται ως προϊόν κάθε αντίδρασης σύντηξης προκαλεί μεγάλη ανησυχία στην επιστημονική κοινότητα, διότι αυτά (τα νετρόνια) καθιστούν με το πέρασμα του χρόνου ραδιενεργά τα εσωτερικά τοιχώματα του αντιδραστήρα. Η μεγαλύτερη πρόκληση όμως για τους επιστήμονες είναι το πώς θα ελέγξουν αποτελεσματικά τις τεράστιες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στους αντιδραστήρες.

Η παραγόμενη ενέργεια από θερμοπυρηνική σύντηξη παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα, αφού: α) Δεν είναι προφανής και απόλυτα βέβαιη η εφικτότητά της (αλυσιδωτή αντίδραση, αφού είναι ένα τεχνολογικά εξαιρετικά δύσκολο εγχείρημα), β) Είναι τεράστιο το κόστος κατασκευής του εργοστασίου παραγωγής της, απαιτούνται μονάδες πολύ μεγάλης ισχύος (>1.5 GW), θερμοηλεκτρικές μονάδες περίπου 800 MW, γ) Υπάρχει περιορισμένη παραγωγή υγρού ηλίου και υπεραγώγιμων υλικών που χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες τύπου tokamak. δ) Δεν είναι ασήμαντες οι βλάβες στις εγκαταστάσεις από τα Νετρόνια καθώς και από τη ραδιενέργεια που προκαλούν τα Νετρόνια, ε) Αναμένεται υψηλή θερμική ρύπανση, στ) είναι δύσκολη η λήψη αποφάσεων για δαπανηρή έρευνα και ζ) ίσως να αποδειχθεί ότι θα είναι, αργότερα στην πράξη, μεγαλύτερο το κόστος της απαιτούμενης ενέργειας για τη σύντηξη από το κόστος της παραγόμενης ενέργειας από αυτή τη σύντηξη.

Μετά από 20-40 έτη, όταν θα έχουν λυθεί όλα τα προηγούμενα προβλήματα, τότε η παραγωγή ενέργειας από τη θερμοπυρηνική σύντηξη θα γίνει πραγματικότητα.

6.3. Εκπαίδευση και έρευνα

Κύριο μέλημα πολλών ενώσεων που ασχολούνται με την ενέργεια διεθνώς αποτελεί η εκπαίδευση και η κατάρτιση νέων ερευνητών. Πολλοί από τους επαγγελματίες ερευνητές των Ενώσεων έχουν διδακτικά καθήκοντα σε ακαδημαϊκά ιδρύματα, κυρίως πανεπιστήμια, και περίπου 250–350 μεταπτυχιακοί φοιτητές και υποψήφιοι διδάκτορες διεξάγουν την έρευνά τους σε εργαστήρια των Ενώσεων. Αρκετές Ενώσεις διοργανώνουν μεταπτυχιακά μαθήματα και θερινά σχολεία σχετικά με τη σύντηξη και τη φυσική πλάσματος, τα οποία απευθύνονται σε μεταπτυχιακούς φοιτητές και ερευνητές που μόλις ολοκλήρωσαν τη διδακτορική διατριβή τους.

6.4. EIROforum

Μέσω της EFDA, το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα σύντηξης μετέχει στο EIROforum, μια συνεργασία μεταξύ επτά Ευρωπαϊκών Διακυβερνητικών Ερευνητικών Οργανισμών (EIRO), υπεύθυνων για υποδομές και εργαστήρια. Ένας από τους πρωτεύοντες στόχους του EIROforum είναι να διαδραματίσει ενεργό και εποικοδομητικό ρόλο στην προώθηση της ποιότητας και της απήχησης της Ευρωπαϊκής Έρευνας. Ένας ειδικός στόχος του EIROforum είναι να συντονίζει τις δραστηριότητες των επί μέρους οργανισμών για το ευρύ κοινό, στις οποίες περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η μεταφορά τεχνολογίας και η εκπαίδευση.

Τα επτά μέλη του EIROforum είναι:

- **CERN** Ευρωπαϊκός Οργανισμός Πυρηνικής Έρευνας (Ελβετία)
- **EFDA** Ευρωπαϊκή Συμφωνία για την Ανάπτυξη της Σύντηξης (Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία)
- **EMBL** Ευρωπαϊκό Εργαστήριο Μοριακής Βιολογίας (Γερμανία)
- **ESA** Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (Ε.Ε.)
- **ESO** Ευρωπαϊκό Νότιο Αστεροσκοπείο (Γερμανία, Χιλή)

•*ESRF* Ευρωπαϊκή Εγκατάσταση Ακτινοβολίας Συγχροτρονίου (Γαλλία)

•*ILL* Ινστιτούτο Laue–Langevin (Γαλλία)

6.5. Συμπέρασμα

Τα αποθέματα των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξαντλούνται γρήγορα ή γίνονται ολοένα και πιο απαγορευτικά στη χρήση λόγω περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν αναμένεται να μπορέσουν να καλύψουν τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για ενέργεια παγκοσμίως. Η μόνη «φιλική» προς το περιβάλλον και διαθέσιμη για χιλιάδες χρόνια ενέργεια είναι εκείνη που μπορεί να προέλθει από τη σύντηξη. Αυτό που χρειάζεται για να γίνει το όνειρο πραγματικότητα είναι ακόμα λίγος χρόνος και διεθνής συνεργασία και χρηματοδότηση. Αξίζει η συνέχιση και εντατικοποίηση της προσπάθειας_

ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Λεξιλόγιο

[B.1.12. , σελ. 316]

Ακτινοβολία: Η εκπομπή ενέργειας υπό μορφή σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος όταν πρόκειται για πυρηνική ακτινοβολία. Τέτοιες ακτινοβολίες οφείλονται σε διεργασίες που γίνονται στο εσωτερικό των πυρήνων. Στοιχεία, όπως το ουράνιο και το πλουτώνιο, εκπέμπουν ενέργεια λόγω της αυτόματης διάσπασης των πυρήνων τους και γι' αυτό ονομάζονται ραδιενεργά υλικά

Αλυσιδωτή αντίδραση: Αυτοσυντηρούμενη σειρά πυρηνικών αντιδράσεων, κατά την οποία τα προϊόντα της αντίδρασης συνεισφέρουν άμεσα στη διατήρησή της. Στην αντίδραση της σχάσης ένα νετρόνιο χτυπά τον πυρήνα ενός ατόμου ουρανίου, τον διασπά σε δύο μέρη, εκλύοντας τρομερά ποσά ενέργειας και περισσότερα του ενός νετρόνια. Τα νετρόνια, με τη σειρά τους, χτυπούν άλλους πυρήνες ουρανίου, απελευθερώνοντας μεγαλύτερη ενέργεια και ακόμη περισσότερα νετρόνια, τροφοδοτώντας έτσι μια συνεχή αντίδραση μέχρι να εξαντληθεί το καύσιμο του ουρανίου.

Alcator: Οικογένεια συσκευών μαγνητικής συγκράτησης τύπου tokamak, που χαρακτηρίζονται από μικρές διαμέτρους και ισχυρά μαγνητικά πεδία. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT). Το πλάσμα που δημιουργείται σ' αυτές τις συσκευές έχει σχετικώς μεγάλα ρεύματα και υψηλές πυκνότητες σωματιδίων.

Αμπέρ (Ampere, Kiloampere, megampere): Μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού ρεύματος. Αντιστοιχεί στη ροή ηλεκτρικού φορτίου ενός Κουλόμπ ανά δευτερόλεπτο.

Kiloampere = 1000 Amper Megampere = 1.000.000 Amper.

Ανακοπή, αποκοπή, διάρρηξη (disruption): Μεγάλη αστάθεια που προκαλεί μια απότομη πτώση θερμοκρασίας και σβήσιμο του πλάσματος.

Αναπαραγωγικός αντιδραστήρας (Breeder reactor): είδος αντιδραστήρα που παράγει περισσότερο σχάσιμο υλικό απ'όσο καταναλώνει. Ο «ταχύς αναπαραγωγικός» αντιδραστήρας υγρού-μετάλλου, για τον οποίο υπάρχουν πολλές ελπίδες, διασπά πλουτώνιο – 239, προκαλώντας έντονη ροή νετρονίων και αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση.

Ανάφλεξη: Το σημείο στο οποίο παράγεται τόση ενέργεια από τις αντιδράσεις σύντηξης του πλάσματος, ώστε δεν απαιτείται πρόσθετη ενέργεια για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του.

Αντιδραστήρας: Δες αντιδραστήρας σχάσης

Αντιδραστήρας σχάσης: συσκευή στην οποία μπορούν να δημιουργηθούν και να ελεγχθεί αυτοσυντηρούμενη αντίδραση σχάσης με παραγωγή ενέργειας.

Αστάθεια: Μια κατάσταση του πλάσματος, όπου οι μικρές διαταραχές ενισχύονται, καταλύουν την ισορροπία του πλάσματος και οδηγούν σε ανακοπή (σβήσιμο).

ASDEX: (Axially Symmetric Divertor Experiment) Αξονοσυμμετρικό πείραμα εκτροπής (Garching, Γερμανία). Πρόκειται για μεγάλο αντιδραστήρα τύπου tokamak, σχεδιασμένο για τη μελέτη και έλεγχο των ξένων (ανεπιθύμητων) προσμείξεων μέσω ενός μαγνητικού εκτροπέα. Η υψηλή φάση λειτουργίας (H-mode) με εισροή ουδέτερων σωματιδίων παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε συσκευή ASDEX.

Ατομική Βόμβα (A-bomb): Βόμβα μεγάλης εκρηκτικής ισχύος που οφείλεται στην απότομη έκλυση ενέργειας όταν διασπώνται πυρήνες βαρέων ατόμων, π.χ. του πλουτωνίου -239, ή του ουρανίου -235. Η σχάση επιτυγχάνεται με βομβαρδισμό του σχάσιμου υλικού από νετρόνια, ξεκινώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση. Με την έκρηξη της βόμβας εκλύονται: ωστικό κύμα, θερμότητα, φως και θανατηφόρα ραδιενέργεια.

Ατομο: Η μικρότερη μονάδα ενός στοιχείου που διατηρεί τα χαρακτηριστικά του στοιχείου αυτού. Στο κέντρο του ατόμου βρίσκεται ο πυρήνας, ο οποίος αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια, ενώ γύρω του περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια. Το άτομο του υδρογόνου – που είναι το ελαφρύτερο στοιχείο –

συγκροτείται από έναν πυρήνα ενός πρωτονίου γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ένα ηλεκτρόνιο.

Ατομο Δευτέρου: Ισότοπο του υδρογόνου με ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο στον πυρήνα του, και ένα ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται γύρω από τον πυρήνα.

Βόμβα σχάσης: Δες ατομική βόμβα

Διαγνωστικά: Διαδικασίες για τον προσδιορισμό (διάγνωση) της κατάστασης του πλάσματος σε ένα πείραμα. Επίσης, έτσι ονομάζονται και τα εργαλεία διάγνωσης.

Διατάξεις μαγνητικού κατόπτρου: Γενικά, γραμμικές διατάξεις σύντηξης όπου τα μαγνητικά πεδία γίνονται ισχυρότερα στα άκρα, προκαλώντας την ανάκλαση, ξανά προς το κύριο σώμα του πλάσματος των σωματιδίων που διαφεύγουν.

Διάχυση του Bohm: Ταχεία απώλεια πλάσματος κάθετα προς τις μαγνητικές γραμμές, η οποία προκαλείται από μικροαστάθειες. Η σχετική θεωρία διατυπώθηκε από τον David Bohm.

Δίδυμες συσκευές – διπλές (Doublet Devices): Σειρά συσκευών tokamak σχεδιασμένες από την εταιρεία GAT – πρώην General Atomics – που μπορούσαν να δημιουργήσουν πλάσμα μη κυκλικής διατομής – όπως σχήματος νεφρών και – γράμματος D.

Εκτόξευση ουδέτερης δέσμης: Μέθοδος θέρμανσης του πλάσματος από ουδέτερα άτομα υψηλής ενέργειας, τα άτομα – υπό μορφή δέσμης – εκτοξεύονται μέσα στο πλάσμα, όπου αμέσως ιονίζονται, μεταφέροντας την ενέργειά τους στο πλάσμα ύστερα από επανειλημμένες συγκρούσεις.

Εκτοξευτής σφαιριδίων: Συσκευή που εκτοξεύει με μεγάλη ταχύτητα μικρές ποσότητες υδρογόνου, υπό μορφή πάγου, στο εσωτερικό του πλάσματος. Αυτή η μέθοδος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα διείσδυσης σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Εκτροπέας: Συνιστώσα τοροειδούς συσκευής πλάσματος που αποτρέπει φορτισμένα σωματίδια προς την εξωτερική άκρη του πλάσματος, όπου γίνονται ηλεκτρικά ουδέτερα. Μ'αυτόν τον τρόπο, τα σωματίδια εμποδίζονται να χτυπήσουν τα τοιχώματα του θαλάμου και να εκτινάξουν δευτερεύοντα σωματίδια που θα μπορούσαν να κρυσώσουν το πλάσμα.

Ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη: Φαινόμενο, κατά το οποίο πολύ ελαφροί πυρήνες, θερμαινόμενοι σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε περιορισμένο χώρο, υφίστανται αντιδράσεις σύντηξης κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, με ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας που είναι δυνατόν να δαμασθεί επωφελώς.

Επιστημονική εφικτότητα (scientific Feasibility): Για την περίπτωση του πλάσματος σημαίνει την επιτυχή διεξαγωγή πειραμάτων που κατορθώνουν να δώσουν συνθήκες ισοστάθμισης “breakeven” (ελάχιστες τιμές πυκνότητας, θερμοκρασία και χρόνο συγκράτησης του πλάσματος) σε εργαστηριακές εγκαταστάσεις. Η επιτυχία των πειραμάτων σημαίνει προώθηση κατασκευής εργοστασίων παραγωγής ενέργειας. Στα πειράματα αυτά δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν πυρηνικά καύσιμα.

Euratom (European Atomic Energy Community): Οργανισμός που συστάθηκε το 1958 από χώρες μέλη της ΕΕ, με σκοπό τη δημιουργία κοινής αγοράς για την ανάπτυξη των ειρηνικών χρήσεων της ατομικής ενέργειας.

ZETA (Zero Energy Thermonuclear assembly): Θερμοπυρηνική Διάταξη Μηδενικής Ενέργειας. Βρετανική συσκευή σύντηξης, στην οποία το 1958 οι επιστήμονες θεώρησαν ότι πέτυχαν αρχικά την ελεγχόμενη θερμοπυρηνική σύντηξη, κάτι που τελικά δεν επιβεβαιώθηκε.

Ηλεκτρονιοβόλτ (eV): Μονάδα ενέργειας ίση με αυτή που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν περνάει από δύο σημεία διαφοράς δυναμικού ενός βόλτ. Το ηλεκτρονιοβόλτ χρησιμοποιείται και σαν μονάδα θερμοκρασίας του πλάσματος.

Ηλεκτρόνια δραπέτες: Τα ηλεκτρόνια του πλάσματος που παίρνουν ενέργεια από εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο με μεγαλύτερο ρυθμό απ’όσο χάνουν, λόγω των συγκρούσεων με άλλα σωματίδια. Αυτά τα ηλεκτρόνια τείνουν να ξεφύγουν ενεργειακά από το υπόλοιπο πλάσμα.

Ηλεκτρόνιο: Στοιχειώδες σωματίδιο με αρνητικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια στο άτομο περιστρέφονται γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα.

Ημιζωή, Χρόνος ημιζωής: Ο χρόνος μέσα στον οποίο διασπώνται οι μισοί ατομικοί πυρήνες μιας ραδιενεργού ουσίας. Οι χρόνοι αυτοί κυμαίνονται ανάλογα με το είδος του πυρήνα, από εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου σε εκατομμύρια χρόνια.

Θερμοκρασία πλάσματος: Είναι μέτρο της κινητικής ενέργειας των ιόντων, ή των ηλεκτρονίων του πλάσματος.

Θερμοπυρηνική σύντηξη: Σύντηξη σε υψηλή θερμοκρασία με μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας.

Ιόν: Ατομο, το οποίο φορτίστηκε, λόγω του ότι έδωσε ή πήρε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Πλήρως ιονισμένο άτομο λέγεται εκείνο που έχει χάσει όλα τα ηλεκτρόνια του.

Ιονισμός: Η προσθήκη ή αφαίρεση ηλεκτρονίων από το ουδέτερο άτομο, δηλαδή η δημιουργία ιόντος.

Ισότοπο: Μια από τις πολλές μορφές του ίδιου στοιχείου, κατά τις οποίες οι πυρήνες τους έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων, αλλά τον ίδιο αριθμό πρωτονίων.

Ισοστάθμιση (breakeven): Το σημείο στο οποίο η παραγόμενη ισχύς από τις αντιδράσεις του πλάσματος, ισούται με την ενέργεια εισροής που απαιτείται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Για την παραγωγή θετικού ισοζυγίου ενέργειας, σύμφωνα με το κριτήριο του Lawson, για πλάσμα περίπου 70 εκατομμυρίων βαθμών, με πυκνότητα σωματιδίων 10^{16} ανά κυβικό εκατοστό, το πλάσμα πρέπει να συγκρατηθεί για τουλάχιστον ένα δευτερόλεπτο.

IAEA (International Atomic Energy Agency): Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας. Αυτόνομος διακρατικός οργανισμός που ιδρύθηκε το 1959 με σκοπό την προώθηση των ειρηνικών εφαρμογών της ατομικής ενέργειας. Έχει έδρα τη Βιέννη.

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor): Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας. Αντιδραστήρας σύντηξης που σχεδιάζουν από κοινού οι ΗΠΑ, η ΕΕ, η Σοβιετική Ένωση και η Ιαπωνία.

JET (Joint European Torus): Κοινό Ευρωπαϊκό Τοροειδές. Εργαστήριο της ΕΕ, που διαθέτει μεγάλη συσκευή σύντηξης τύπου tokamak και βρίσκεται στην περιοχή της Οξφόρδης στην Αγγλία.

JT-60: Μεγάλη ιαπωνική συσκευή τύπου tokamak που βρίσκεται βόρεια του Τόκιο.

κουβέρτα (blanket): η περιοχή που περιβάλλει τον αντιδραστήρα σύντηξης, μέσα στον οποίο επιβραδύνονται τα νετρόνια της σύντηξης. Η Θερμότητα μεταφέρεται στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης και επωάζεται τρίτο από το λίθιο. Σε υβριδικές εφαρμογές τα υλικά (U-238 ή Pu-239) τοποθετούνται στην κουβέρτα για να μεταστοιχειωθούν σε σχάσιμα.

Λείζερ: ενίσχυση φωτός που στηρίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Οπτική συσκευή που ενισχύει και συγκεντρώνει κύματα φωτός, εκπέμποντάς τα σε λεπτή έντονη δέσμη.

Λίθιο: Μαλακό ασημί μέταλλο. Είναι το ελαφρότερο μέταλλο το οποίο τήκεται στους 180 βαθμούς Κελσίου και χρησιμοποιείται για την παραγωγή τριτίου και ως ψυκτικό υγρό στους αντιδραστήρες σύντηξης.

Μαγνητική σύντηξη: Η χρήση μαγνητικών πεδίων για τον εγκλωβισμό του πλάσματος που υφίσταται σύντηξη.

Μαγνητική φιάλη: Το μαγνητικό πεδίο που χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση του πλάσματος στα πείραματα ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης.

MIT: Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης.

NOVA: Η μεγαλύτερη εγκατάσταση σύντηξης με λείζερ των ΗΠΑ. Βρίσκεται στο εργαστήριο Lawrence Livermore στην Καλιφόρνια.

Ξένες προσμήξεις (ακαθαρσίες): Ανεπιθύμητα άτομα στο πλάσμα, που εμποδίζουν την σύντηξη.

Οριοθέτες (limiters): Κατασκευές που βρίσκονται σε επαφή με την άκρη του πλάσματος και χρησιμεύουν για τον καθορισμό του σχήματος της ακραίας εξωτερικής μαγνητικής επιφάνειας.

Ουράνιο: Ραδιενεργό μέταλλο. Το ισότοπό του, ουράνιο U-235, είναι πυρηνικό καύσιμο για αντιδραστήρες σχάσης.

Πρωτόνιο: Στοιχειώδες σωματίδιο που βρίσκεται στους πυρήνες όλων των ατόμων και φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο.

Πρόγραμμα Matterhorn: Το κωδικό όνομα του πρώτου μυστικού προγράμματος ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης των ΗΠΑ, που άρχισε από τον Lyman Spitzer στο Πανεπιστήμιο του Princeton το 1951.

Πλουτώνιο: Ραδιενεργό μέταλλο. Το ισότοπό του, πλουτώνιο-239 χρησιμοποιείται στα πυρηνικά όπλα και σαν καύσιμο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

PLT (Princeton Large Torus): Μεγάλη τοροειδής συσκευή τύπου tokamak που βρίσκεται στο εργαστήριο πλάσματος του Princeton.

Πλάσμα: Ιονισμένο αέριο. Στην περίπτωση μας, πρόκειται για αέριο, τα άτομα του οποίου διασπώνται σε θετικά ιόντα και ισάριθμα ηλεκτρόνια και κινούνται σαν ελεύθερα σωματίδια στο χώρο του πλάσματος, Ο Ήλιος αποτελείται από πλάσμα.

Πλάσμα σχήματος D: Τοροειδές πλάσμα, η διατομή του οποίου έχει σχήμα γράμματος D.

Πυρήνας: Το κεντρικό μέρος ενός ατόμου. Συγκροτείται από πρωτόνια και νετρόνια.

Ραδιενεργά κατάλοιπα (άχρηστα): Αχρηστα υλικά και συσκευές πυρηνικών εργασιών που είναι ραδιενεργά.

Σύντηξη: Η συγχώνευση δύο ατομικών πυρήνων σε ένα μεγαλύτερο με απώλεια μάζας. Η σύντηξη συνοδεύεται με έκλυση ενέργειας. Δες επίσης θερμοπυρηνική σύντηξη.

Συμπαγής δακτυλιοειδής κύλινδρος (συμπαγής τόρος): Πείραμα που περιλαμβάνει τοροειδείς μαγνητικές διατάξεις, στις οποίες ο λόγος της ακτίνας του τόρου προς εκείνη του πλάσματος είναι σχεδόν ένα.

Σύντηξη με λέιζερ: Μέθοδος σύντηξης στην οποία μια ριπή φωτός λέιζερ εστιάζει πάνω σε ένα σφαιρίδιο υλικού σύντηξης, το οποίο έτσι πιέζεται και θερμαίνεται.

Συσκευή σκέδασης λέιζερ: γνωστή και σαν συσκευή σκέδασης Thomson. Διαγνωστική συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των ηλεκτρονίων κατευθύνοντας μια δέσμη φωτός λέιζερ στο πλάσμα. Τα φωτόνια του λέιζερ υφίστανται σκέδαση από τα ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα τη διασπορά της εξερχόμενης δέσμης των φωτονίων, ανάλογα με τη θερμοκρασία των ηλεκτρονίων.

Σχάση: Η διαίρεση ενός βαρέος ατομικού πυρήνα, για παράδειγμα ουρανίου, σε δύο σχεδόν ίσα μέρη συνοδευόμενη από έκλυση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και ένα ή περισσότερα νετρόνια.

Stellarator: Συσκευή πλάσματος που αποτελείται από σωλήνα με ενωμένα τα δύο άκρα του (σχήματος αγωνιστικής πίστας), που εφεύρε ο *Lyman Spitzer*. Το πλάσμα συγκρατείται από μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από ελικοειδή περιέλιξη γύρω από το σωλήνα.

T-3: Σοβιετική συσκευή τύπου tokamak στην οποία η θερμοκρασία του πλάσματος έφτασε για πρώτη φορά τους 200 εκατομμύρια βαθμούς και έτσι αποδείχθηκε ότι οι συνθήκες σύντηξης ήταν κατορθωτές. Η T-3 κατασκευάστηκε στο Ινστιτούτο Kurchatov της Μόσχας.

T-10: Μεταγενέστερος σοβιετικός tokamak του Ινστιτούτου Kurchatov, όμοιος με τον PLT του Princeton, αλλά χωρίς ουδέτερες δέσμες.

T-15: Σοβιετικός tokamak με υπεραγωγίσιμους μαγνήτες, (υπό κατασκευή).

T-20: Μεγάλος σοβιετικός tokamak που επρόκειτο να λειτουργήσει σε συνθήκες πραγματικού αντιδραστήρα, αλλά εγκαταλείφθηκε για λόγους προϋπολογισμού.

Τήξη αντιδραστήρα: Τήξη των στοιχείων καυσίμου στον πυρήνα ενός αντιδραστήρα σχάσης, λόγω της συσσώρευσης θερμότητας από τα ραδιενεργά υλικά που παράγονται υπό ανεξέλεγκτες σχάσεις.

Tokamak: Συσκευή πλάσματος βασισμένη στο σοβιετικό πρότυπο. Το πλάσμα στο θάλαμο – που έχει σχήμα δακτυλιοειδούς κυλίνδρου (τορου) – συγκρατείται με συνδυασμό δύο μαγνητικών πεδίων: αυτό που προέρχεται από τα γύρω από τον τόρο πηνία, και αυτό που προέρχεται από το ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα του πλάσματος, το οποίο επιπλέον χρησιμεύει για την θέρμανση του πλάσματος. Ο TFTR και ο JET είναι συσκευές tokamak.

Τοροειδές σύστημα: Έτσι ονομάζεται η οικογένεια των μαγνητικών συσκευών που οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές, όπως για παράδειγμα στους tokamak και στους Stellarator.

Τρίτιο: Ραδιενεργό ισότοπο του υδρογόνου με ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια στον πυρήνα του γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ένα ηλεκτρόνιο. Μαζί με το δευτέριο αποτελεί το καύσιμο του αντιδραστήρα σύντηξης.

TFTR: (Tokamak Fusion Test Reactor). Δοκιμαστικός Αντιδραστήρας Σύντηξης τύπου Tokamak: Ο πιο μεγάλος tokamak των ΗΠΑ. Βρίσκεται στο εργαστήριο φυσικής πλάσματος του Princeton έχει τη δυνατότητα εκτόξευσης ουδέτερων δεσμών σωματιδίων σε πλάσμα δευτερίου – τριτίου, σε συνθήκες όμοιες με ενός πραγματικού αντιδραστήρα.

Υβρίδιο σύντηξης – σχάσης: Σχέδιο πυρηνικού αντιδραστήρα που στηρίζεται στις αντιδράσεις σχάσης και στις αντιδράσεις σύντηξης. Από έναν κεντρικό θάλαμο σύντηξης παράγονται νετρόνια που προκαλούν σχάσεις σε ένα περίβλημα σχάσιμου υλικού. Ως πηγή νετρονίων θα μπορούσε να μετατρέψει άλλα υλικά σε σχάσιμα.

Υβριδικός αντιδραστήρας: Δες υβρίδιο σύντηξης – σχάσης.

Υδρογόνο: Το ελαφρότερο στοιχείο, τα άτομα του οποίου αποτελούνται από έναν πυρήνα με ένα πρωτόνιο. Τα ισότοπά του είναι το δευτέριο (που ο πυρήνας του έχει ένα επιπλέον νετρόνιο) και το τρίτιο (με δύο νετρόνια στον πυρήνα).

Υδρογονοβόμβα (H-Bomb): Εξαιρετικά ισχυρή ατομική βόμβα, η κατασκευή της οποίας βασίζεται στη σύντηξη. Οι πυρήνες των ατόμων του δευτερίου και του τριτίου, που είναι ισότοπα του υδρογόνου, υφίστανται σύντηξη, λόγω υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που αναπτύσσονται από την έκρηξη μιας βόμβας σχάσης, η οποία αποτελεί μονάδα της εκρηκτικής συσκευής της υδρογονοβόμβας.

Υπεραγωγός: Αγωγός που προβάλλει μηδενική αντίσταση στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Υψηλή φάση (High Mode ή H-Mode): Καθεστώς λειτουργίας που επιτυγχάνεται μετά από βοηθητική θέρμανση του πλάσματος σε έναν tokamak, όταν η εκτοξευόμενη ενέργεια στο πλάσμα είναι αρκετά μεγάλη. Μια ξαφνική βελτίωση στο χρόνο συγκράτησης οδηγεί στην αύξηση της πυκνότητας και της θερμοκρασίας των σωματιδίων – γεγονός που διακρίνει αυτήν την κατάσταση από την κανονική «χαμηλή φάση».

Φαινόμενο θερμοκηπίου: Η θέρμανση της γης που οφείλεται στην αυξανόμενη παρουσία διοξειδίου του άνθρακα στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Κυρίως οφείλεται στην καύση των ορυκτών καυσίμων. Η θερμότητα που ακτινοβολείται από την επιφάνεια της γης, παγιδεύεται από την ατμόσφαιρα όπως γίνεται με τα τζάμια ενός θερμοκηπίου.

Φαινόμενο περίσφιξης (Λαβίδας) Pinch: Η σύσφιξη του πλάσματος που προκαλείται από την αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος του πλάσματος με το δικό του περιβάλλον μαγνητικό πεδίο.

Χαμηλή φάση (Low Mode): Η κανονική συμπεριφορά του πλάσματος όταν θερμαίνεται: δηλαδή όταν ανεβαίνει η θερμοκρασία, η συγκράτηση του πλάσματος χειροτερεύει.

Χρόνος συγκράτησης: Χρονικό διάστημα στο οποίο τα μαγνητικά πεδία συγκρατούν το πλάσμα πριν χάσει την ενέργειά του.

Ωμική θέρμανση: Θέρμανση που προκαλείται από την αντίσταση που προβάλλει κάποιο μέσο στη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Στην περίπτωση του πλάσματος, τα ιόντα θερμαίνονται αποκλειστικά από την μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια, τα οποία έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία.

B. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

B.1. Βιβλιογραφία

B.1.1.

Tony Hey & Patrick Walters, “The new Quantum Universe” , Cambridge University Press, 2003

B.1.2.

Raymond A. Serway, “Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics” , Third Edition, 1990

(Απόδοση στα Ελληνικά **Λεωνίδα Κ. Ρεσβάνη**, 1990).

B.1.3.

Hugh D. Young & Roger A. Freedman, “University Physics with modern Physics”, Tenth Edition by Addison Wesley Longman, 2000

B.1.4.

Raymond A. Serway & Clement J. Moses & Curt A. Moyer, “Modern Physics”, Saunders College Publishing, 1989

(Απόδοση στα Ελληνικά: **Ζουπάνος Γεώργιος, Λιαροκάκης Ευθύμιος, Παπαδόπουλος Σωφρόνιος, Ράπτης Κωνσταντίνος**, “Σύγχρονη Φυσική”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1992).

B.1.5.

Halliday & Resnick & Walker, “Fundamentals of Physics Extended”, Fifth Edition by John Wiley & Sons, 1997

B.1.6.

Kenneth W. Fod, "Classical and Modern Physics", *Mentals of Physics* by John Wiley & Sons, 1974

(Απόδοση στα Ελληνικά: **Γ. Θεοδώρου – Α. Θεοδώρου**, από Γ. Πνευματικού, 1980)

B.1.7.

Αλκης Π. Γραικός – Δημήτριος Κ. Φείδαρος, «Η έρευνα για παραγωγή ενέργειας από σύντηξη», ΤΕΕ Λάρισας, 2007

B.1.8.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Έρευνα για την Ελεγχόμενη Σύντηξη — Μια ενεργειακή επιλογή για το μέλλον της Ευρώπης, Λουξεμβούργο: Γραφείο Επισήμων Εκδόσεων των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2007

B.1.9.

Arthur Beiser, "Consepts of Modern Physics", McGraw-Hill, 1987

(Μετάφραση **Αθηνά Πάκου - Νικόλαος Νίκολης**, "Σύγχρονη Φυσική", 2002).

B.1.10.

"Ohanian Physics", W. W. Norton & Company, 1989

(Μετάφραση **Α. ΦΙΛΙΠΠΑ - ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΕΜΠ**, "Φυσική ΟΗΑΝΙΑΝ", Συμμετρία, 1991).

B.1.11.

Paul A. Tipler & Ralph A. Llewellyn, "Modern Physics", Third Edition by W.H. Freeman and Company, 1999

B.1.12.

John Graham, "Fusion: The Search for Endless Energy", Cambridge University Press, 1990 (Μετάφραση **Κατερίνα Ροντογιάννη**, Εκδόσεις Κωσταράκη, 1993)

B.1.13.

Ευάγγελος Π. Χίνης, "Εξελιγμένοι τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος", Παραδόσεις ΔΠΜΣ «Φυσική και τεχνολογικές εφαρμογές», 2010

B.2. Ιστότοποι

B.2.1.

- Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply, Green

B.2.2.

- Paper, European Commission, COM (2000)769

B.2.3.

- http://ec.europa.eu/comm/energy_transport/en/lpi_lv_en1.html

B.2.4.

- http://ec.europa.eu/research/energy/fu/article_1122_en.htm

B.2.5.

- <http://www.efda.org>

B.2.6.

- <http://www.jet.efda.org>

B.2.7.

- <http://www.iter.org>

B.2.8.

- <http://www.fusion-eur.org>

B.2.9.

- <http://www.eiroforum.org>

B.2.10.

- <http://www.hellasfusion.gr>

B.2.11.

- <http://psfcwww2.psfc.mit.edu/idx/>

B.2.12.

- <http://www.infinite-energy.com/>

B.2.13.

- <http://www.igi.cnr.it/>

B.2.14.

- <http://www.pemptousia.gr>

B.2.15.

- <http://www.iop.org/EJ/abstract/0741-3335/39/11/010/>

B.2.16.

- https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion

B.2.17.

- <http://www.iter.org/>

B.2.18.

- <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/cea/ts/ts.htm>

B.2.19.

- <http://www.jet.efda.org/>

B.2.20.

- <http://www.agrinioart.gr>

B.2.21.

- <http://www.iea.org/>

B.2.22.

- <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/>

B.2.23.

- <http://www.hellasfusion.gr>

B.2.24.

http://www.physicstoday.org/daily_edition/politics_and_policy/inertial_fusion_energy_gets_a_nod

B.2.25.

<http://www.ccfе.ac.uk/images.aspx>

B.2.26.

<http://science.howstuffworks.com/fusion-reactor5.htm>

B.2.27.

<http://www.ethnos.gr>

B.2.28.

<http://www.fusenet.eu>

B.2.29.

www.treehugger.com

B.2.30.

www.ellinovretaniko.gr

B.3. Άλλες πηγές

B.3.1.

PHYSICAL REVIEW C

VOLUME 34, NUMBER 1

JULY 1986

Fusion cross section of the $^{16}\text{O} + ^{13}\text{C}$ reaction

C. T. Papadopoulos, R. Vlastou, and E. N. Gazis
National Technical University of Athens, Athens 157 73, Greece

P. A. Assimakopoulos
The University of Ioannina, Ioannina 453 32, Greece

C. A. Kalfas, S. Kossionides, and A. C. Xenoulis
Nuclear Research Centre Demokritos, Aghia Paraskevi Attikis 153 10, Greece
(Received 2 December 1985)

B.3.2.

Physica Scripta. Vol. T88, 131–134, 2000

Fusion Cross Section Limitation of the ${}^7\text{Li} + {}^{11}\text{B}$ Reaction

C. Tsabaris¹, C. T. Papadopoulos¹, R. Vlastou¹, A. A. Pakou², P. A. Assimakopoulos², E. Adamides³, C. A. Kalfas³ and A. C. Xenoulis³

B.3.3.

Fusion and Technology: An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion - Weston M. Stacey

B.3.4.

Nuclear Fusion: Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research - C.M. Braams and P.E. Stott

B.3.5.

The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices - P.C Stangeby

B.3.6.

Encyclopedia of Applied Physics Volume 6: Electronic Circuits to Fusion, Magnetic Confinement - George L. Trigg & Edmund H. Immergut

B.3.7.

New Ideas in Tokamak Confinement - M. N. Rosenbluth

B.3.8.

Theory of Tokamak Plasmas - R. B. White

B.3.9.

Controlled Nuclear Fusion - HANNAH SILVER, SPENCER LUKE, PETER TING, ADAM BARRETT, TORY TILTON, GABE KARP, TIMOTHY BERWIND

B.4. Διευθύνσεις για περαιτέρω πληροφορίες

B.4.1.

R. Antidormi

European Commission

Directorate General RTD J4 Fusion Association Agreements

CDMA 5/234

B-1049 Bruksela

tel: +32 229 98899

faks: +32 229 64252

email: rosa.antidormi@ec.europa.eu

http://ec.europa.eu/comm/research/energy/fu/fu_en.html

B.4.2.

Ors Benedekfi

EFDA CSU Garching

Boltzmannstr., 2 D-85748 Garching bei Muenchen – Germany

Tel: +49 89 3299 4223 – Fax: +49 89 3299 4197

E-mail: oers.benedekfi@efda.org

<http://www.efda.org>

B.4.3.

M.T.Orlando

Consorzio RFX,

Management of Fusion

Corso Stati Uniti, 4, 35127 Padova – Italy

Tel: +39 049 829 5990 – Fax: +39 049 829 5051

E-mail: mariateresa.orlando@igi.cnr.it

<http://www.igi.pd.cnr.it>

**« Και πάλι μεγάλη ευγνωμοσύνη και θερμές
ευχαριστίες στον επιβλέποντα Αναπληρωτή
Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ευάγγελο Π. Χίνη. »**

τ έ λ ο ς