

Καθαρή και Άφθονη Ενέργεια για την Ανθρωπότητα: Ο Δρόμος της Σύντηξης

Ίων Σταματελάτος

ΙΠΡΕΤΕΑ

ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

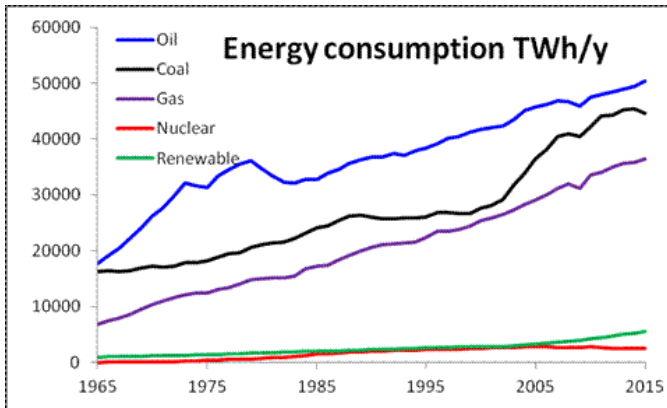
ion@ipta.demokritos.gr



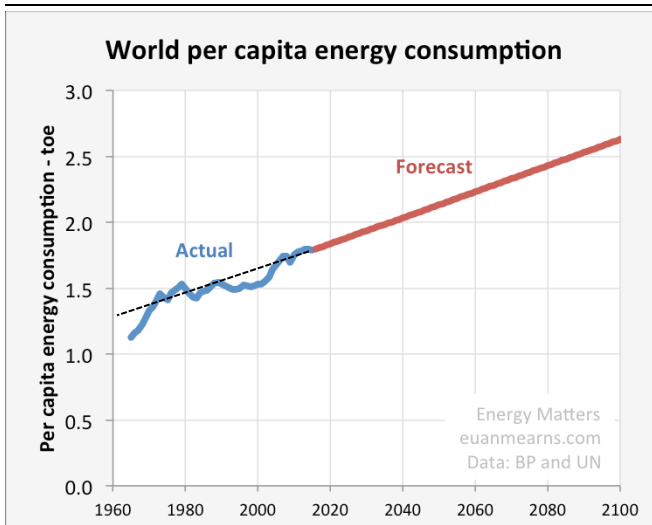
Περιεχόμενα

- Οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες και τα προβλήματα που συνεπάγονται
- Πως παράγεται ενέργεια μέσω των πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης
- Η θέση της σύντηξης μεταξύ των άλλων πηγών ενέργειας
- Το όραμα της κατασκευής μονάδας παραγωγής άφθονης και «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σύντηξης
- Ο οδικός χάρτης του ευρωπαϊκού προγράμματος τεχνολογίας σύντηξης
- Η συμμετοχή του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος σε αυτή την προσπάθεια

Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας



Πηγή: BP 2016



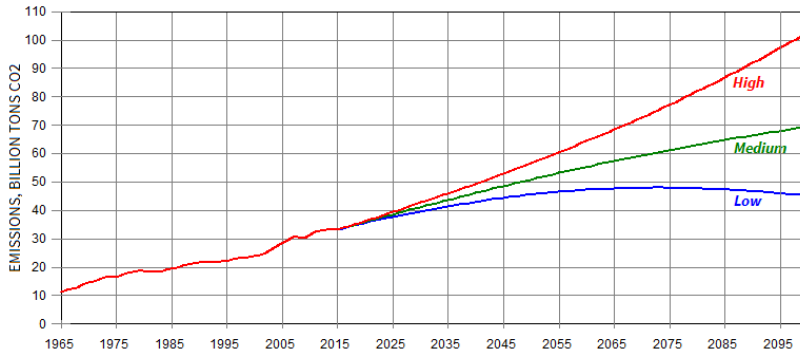
Πηγή: <http://euanmearns.com/>

- Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας 157.481 TWh (ΕΙΑ, 2016)
- Κυρίαρχη πηγή παραγωγής ενέργειας τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο,...)
- Πρόβλεψη αύξησης της παγκόσμιας ανάγκης σε ενέργεια κατά 125% μέχρι το 2100
- Αύξηση του πληθυσμού της γης αλλά και του βιοτικού επιπέδου

1 TWh = 10^{12} Wh,
1 toe = 1 ton oil equivalent

Εκπομπές CO₂

Πηγή: <http://euanmearns.com/>



Παγκόσμια έκλυση CO₂

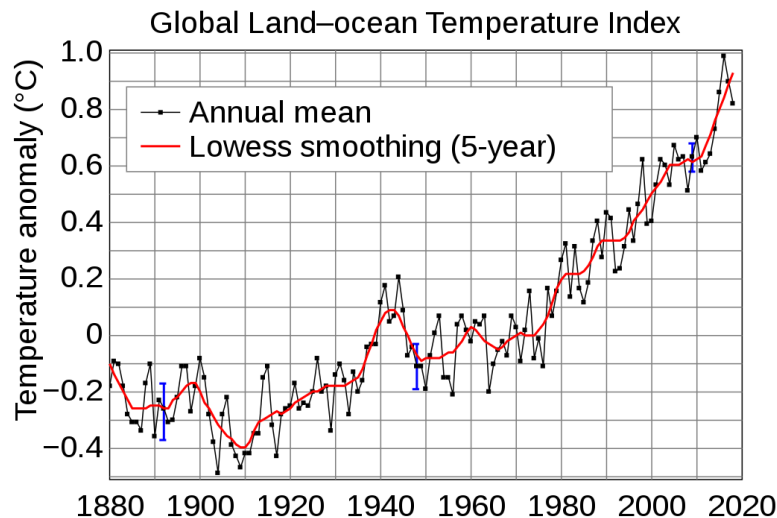
1970 → 15 εκατ. τόνοι

2000 → 25 εκατ. τόνοι

2015 → 35 εκατ. Τόνοι

2100 → ∴

Πρόγνωση παγκόσμιας εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα για διαφορετικά μοντέλα ανάπτυξης του πληθυσμού της γης



Σημαντική και ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας της γης τα τελευταία χρόνια (φαινόμενο θερμοκηπίου)

Συσχέτιση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων

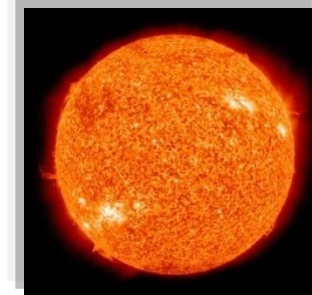
Η «ιδανική» πηγή ενέργειας

- Αειφόρος και ασφαλής εφοδιασμός σε καύσιμα: τα καύσιμα πρέπει να είναι ευρέως διαθέσιμα και ουσιαστικά απεριόριστα
- Μη παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου
- Άφθονη ενέργεια, διαθέσιμη όταν και όπου υπάρχει η ζήτηση
- Εγγενής ασφάλεια - η παραγωγή δεν βασίζεται σε αλυσιδωτή αντίδραση
- Περιβαλλοντικά φιλική – χωρίς την παραγωγή ραδιενεργών ή/και άλλων τοξικών αποβλήτων

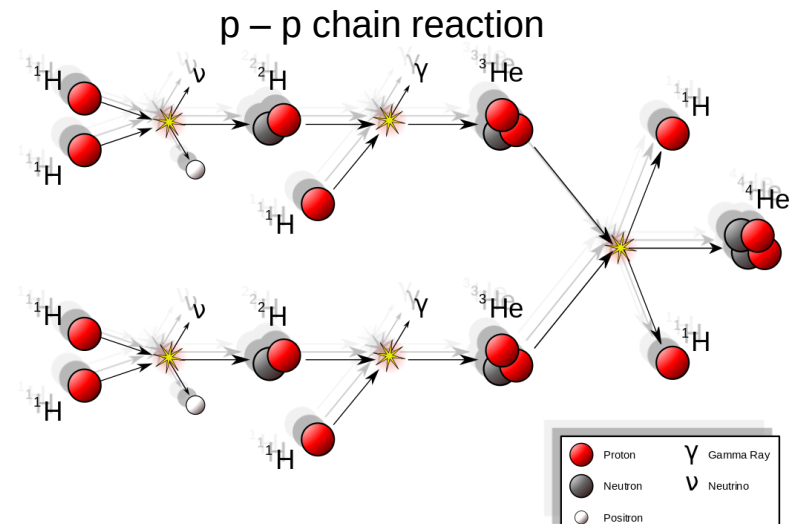
Παραγωγή Ενέργειας στον Ήλιο

- Θερμοκρασία στο πυρήνα $\sim 15 \times 10^6$ °K
- Το υδρογόνο μετατρέπεται σε πλάσμα
- Το βαρυτικό πεδίο του Ήλιου «συμπιέζει» τους πυρήνες υδρογόνου
- Η υψηλή θερμοκρασιών δίνει την κινητική ενέργεια για να υπερνικηθούν οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις ανάμεσα στα θετικά φορτία
- Σύντηξη 4 πυρήνων υδρογόνου παράγοντας το βαρύτερο ήλιο και εκλύοντας ενέργεια (**p-p chain reaction**)
- Η σύντηξη αποτελεί μια από τις ελπιδοφόρες επιλογές για την παραγωγή άφθονης και καθαρής ενέργειας στη γη

Πηγή: NASA

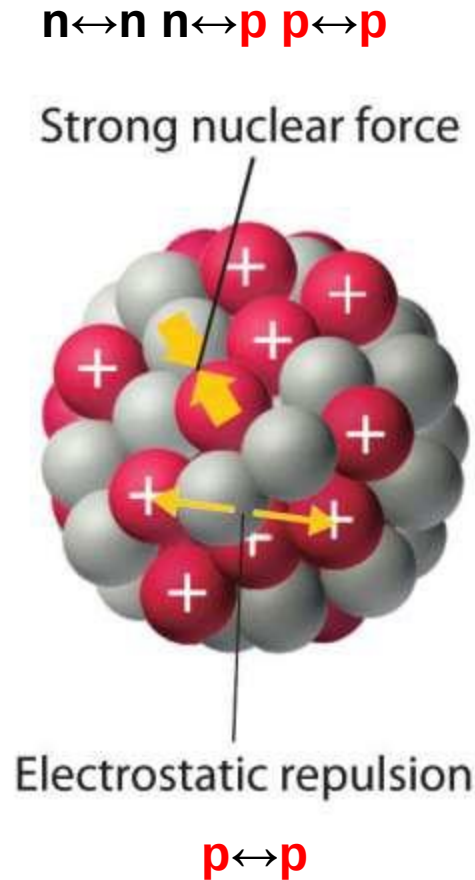


Arthur Eddington
(1882-1944)



Πηγή: EUROfusion

Δυνάμεις στον πυρήνα



- Ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια
- Συγκρατούνται μεταξύ τους με την ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση
- Απωθούνται με δυνάμεις Coulomb

Ενέργεια Σύνδεσης

<http://www.schoolphysics.co.uk/>

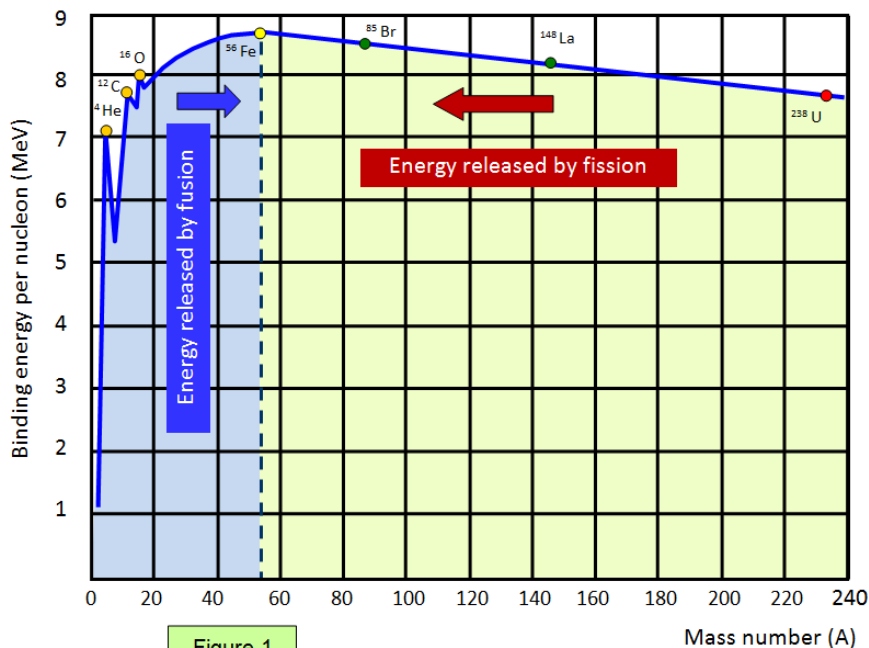


Figure 1

Η ενέργεια που χρειάζεται για να διασπαστεί ένας πυρήνας στα συστατικά του

Εξαρτάται από τον μαζικό αριθμό (A) του ισοτόπου

Τη μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο έχει το ^{56}Fe

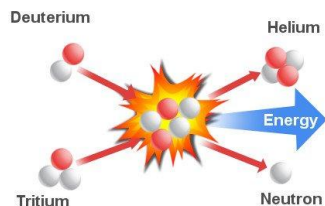
Πυρήνες με μεγαλύτερο A ή μικρότερο A έχουν μικρότερη ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο

Ενέργεια Σύνδεσης

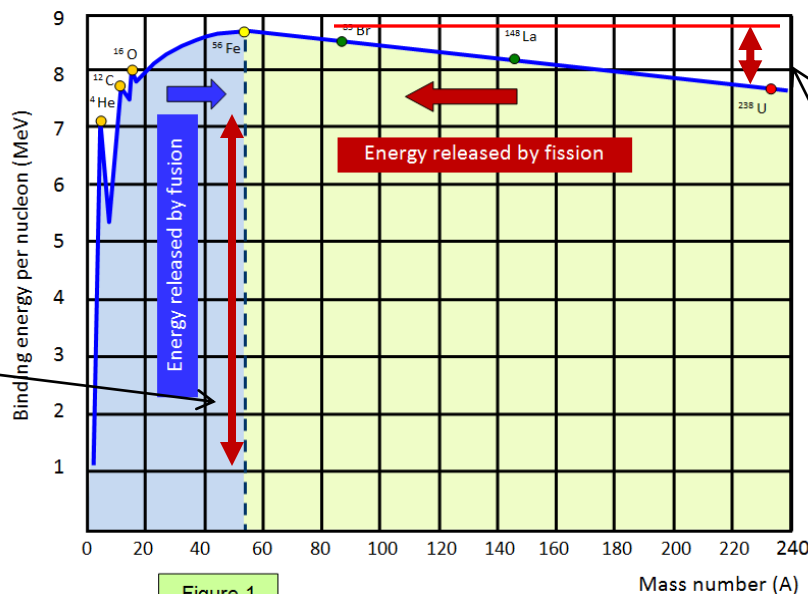
Σύντηξη:

«Συνένωση» δύο πυρήνων με μικρό μαζικό αριθμό σε ένα μεγαλύτερο (π.χ. ^2H και ^3H σε ήλιο)

Έκλυση ενέργειας :
~7 MeV/νουκλεόνιο



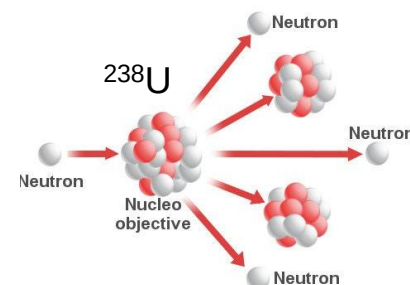
Fusion



Σχάση:

«Διαχωρισμός» ενός πυρήνα με μεγάλο μαζικό αριθμό σε δύο προϊόντα σχάσης (π.χ. σχάση ^{238}U)

Έκλυση ενέργειας :
~0.9 MeV/νουκλεόνιο

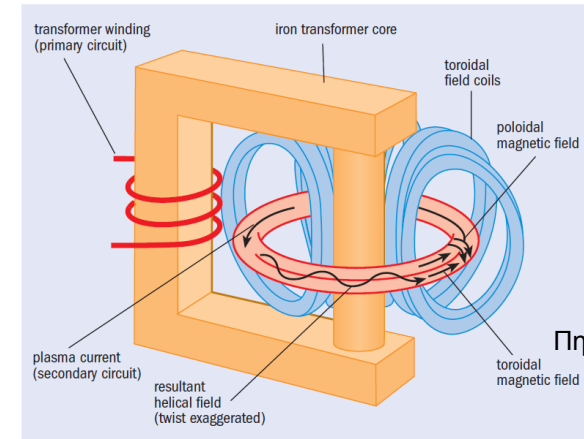


Fission

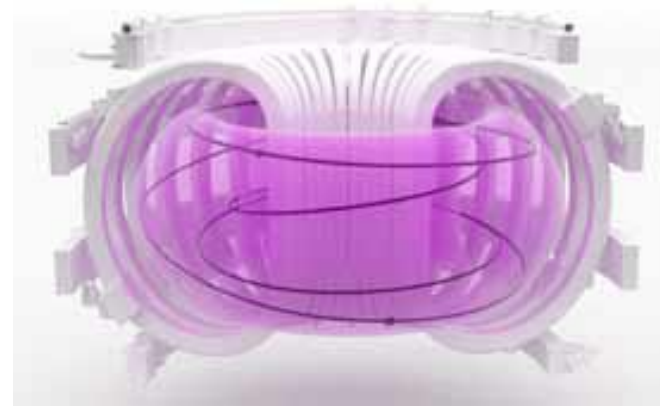
Η ενέργεια που εκλύεται οφείλεται στη διαφορά στην ενέργεια σύνδεσης μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων της πυρηνικής αντίδρασης

Από τον Ήλιο στη Γη

- Στη γη, η προσπάθεια για την παραγωγή ενέργειας μέσω σύντηξης επικεντρώνεται κυρίως σε δύο ισότοπα του υδρογόνου, το **δευτέριο** και το **τρίτιο**.
- Το βασικό τεχνολογικό πρόβλημα είναι η διατήρηση του πλάσματος περιορισμένου στην κατάλληλη πυκνότητα και θερμοκρασία για αρκετό χρόνο ώστε να συμβεί η αντίδραση
- Το πρόβλημα λύθηκε στη Ρωσία στα τέλη της δεκαετίας το 60 (**tokamak**)
- Στο tokamak (τοροειδής θάλαμος) ισχυρά μαγνητικά πεδία περιορίζουν και ελέγχουν τη ροή του πλάσματος



Πηγή: EUROfusion

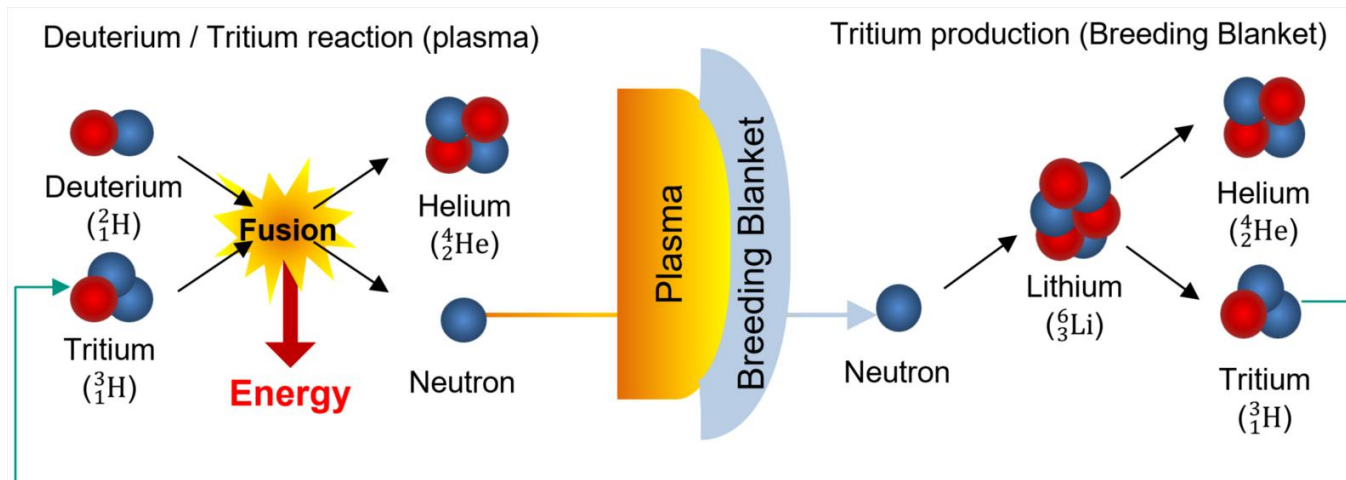


tokamak

Ανατροφοδότηση Τριτίου

- Το δευτέριο είναι άφθονο στη φύση (0.02% στο νερό). Το τρίτιο όμως υπάρχει σε πολύ μικρές ποσότητες.
- Ωστόσο, το τρίτιο μπορεί να παραχθεί μέσω πυρηνικής αντίδρασης νετρονίου με το λίθιο-6, που είναι άφθονο στη φύση

Πηγή: EUROfusion

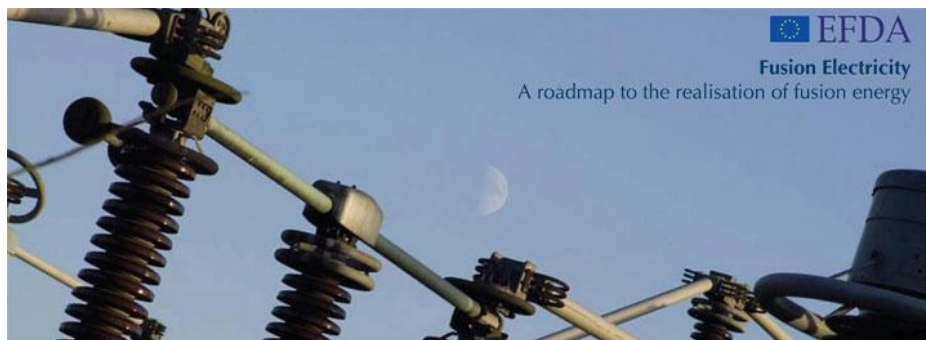
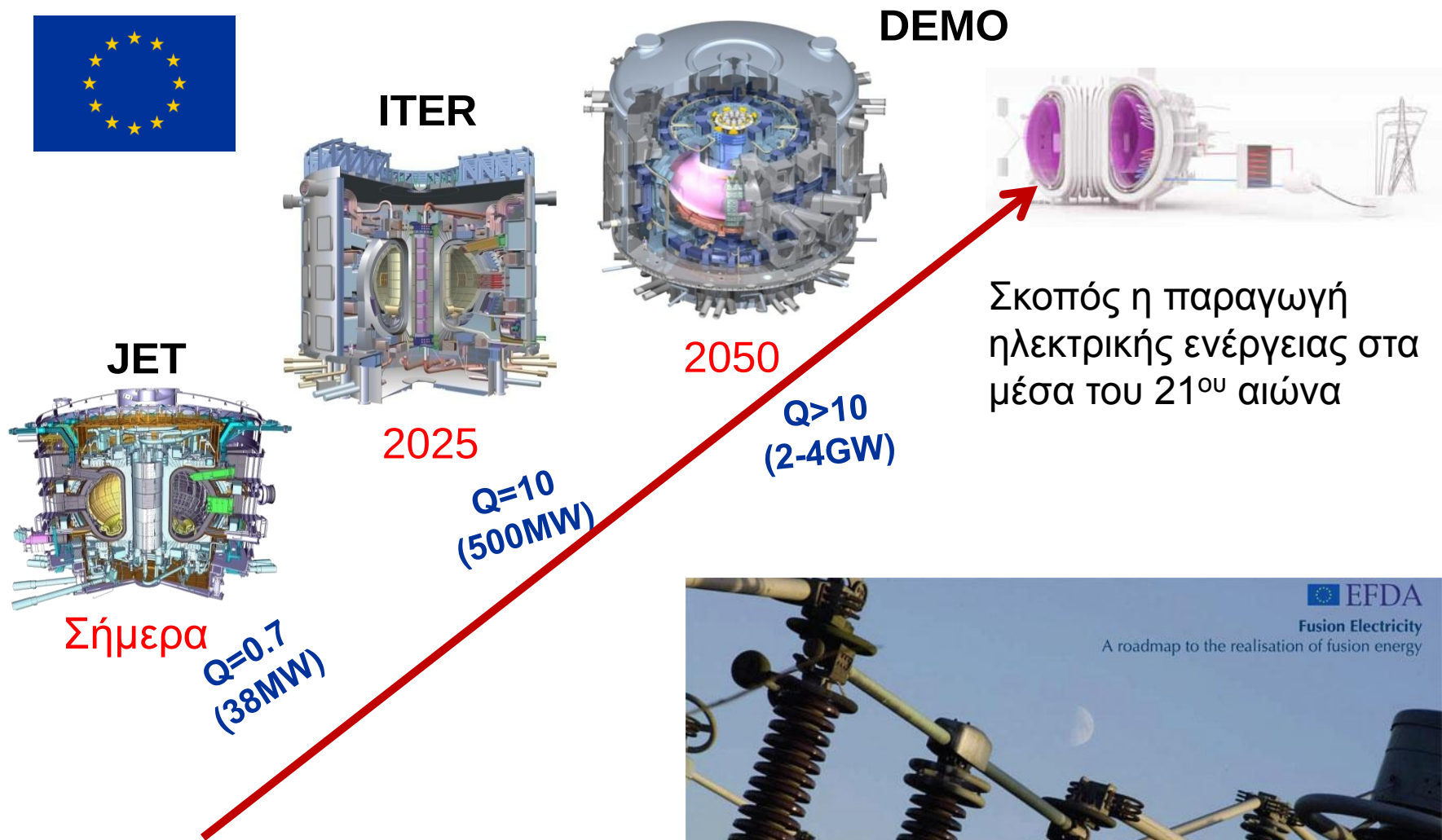


Τα πλεονεκτήματα της σύντηξης

- **Αειφόρος και ασφαλής εφοδιασμός σε καύσιμα**
 - Τα παγκόσμια αποθέματα δευτέρου και λίθιου είναι ικανά να καλύψουν τις ανάγκες της ανθρωπότητας για εκατομμύρια έτη
- **Μηδενική παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου**
 - Δεν εξαρτάται από κάυση υδρογονανθράκων
- **Άφθονη ενέργεια (500 -1000 MW)**
 - Δεν εξαρτάται από την ηλιοφάνεια ή τον άνεμο, διαθέσιμη όπου υπάρχει ζήτηση
- **Εγγενής ασφάλεια**
 - Η παραγωγή δεν βασίζεται σε αλυσιδωτή αντίδραση, δεν υπάρχει ο κίνδυνος τήξης του πυρήνα όπως για παράδειγμα στους αντιδραστήρες σχάσης
- **Περιβαλλοντικά φιλική**
 - Τα ραδιενεργά απόβλητα που παράγονται είναι βραχύβια και τα υλικά μετά από μερικές δεκάδες χρόνια μπορούν να ανακυκλωθούν
- **Ελάχιστες απαιτήσεις πυρηνικής διασφάλισης**
 - Δεν χρησιμοποιείται U ή Pu

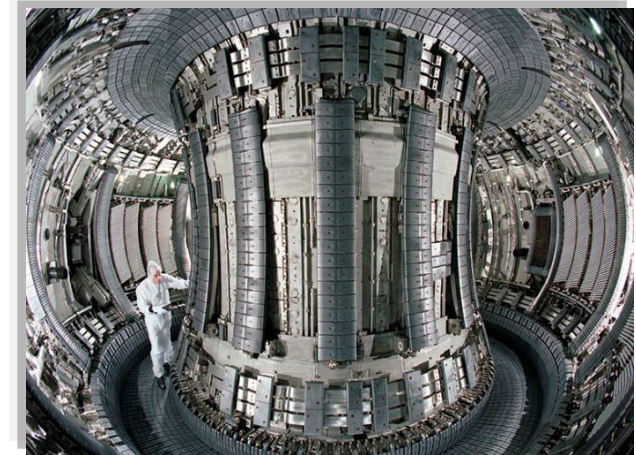
Ιδανική πηγή
ενέργειας ;

Οδικός χάρτης για την υλοποίηση της ενέργειας σύντηξης



Joint European Torus (JET)

- Το μεγαλύτερο σε λειτουργία tokamak ($R=3\text{ m}$, $V=90\text{ m}^3$)
- Παγκόσμιο ρεκόρ παραγωγής ενέργειας από σύντηξη
- Το 1997 παρήγαγε ισχύ 16 MW από εισαγόμενη ισχύ 24 MW ($Q=0.67$)
- Αποτέλεσε το υπόδειγμα για το σχεδιασμό του ITER
- Σκοπός της λειτουργίας σήμερα είναι η προετοιμασία για την λειτουργία του ITER
- Περίπου 100 ευρωπαϊκά και διεθνή εργαστήρια σύντηξης συμμετέχουν στο επιστημονικό πρόγραμμα του JET

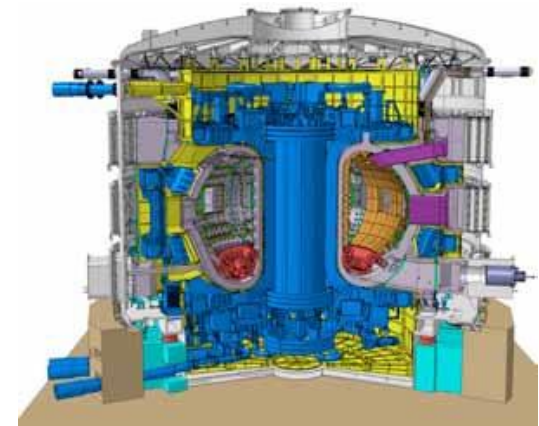


Joint European Torus at Culham U.K.

ITER

- Το μεγαλύτερο tokamak στον κόσμο ($R=6.2\text{ m}$, $V=840\text{ m}^3$)
- Ισχύς 500 MW ($Q=10$)
- Πρόβλεψη για το πρώτο πλάσμα το 2025
- Θα αποδείξει ότι είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί η σύντηξη σαν πηγή ενέργειας (θετικό ισοζύγιο ενέργειας)
- Θα δοκιμασθούν διάφοροι σχεδιασμοί του τοιχώματος ανατροφοδότησης τριτίου
- Θα αναπτυχθεί ολοκληρωμένη τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί στη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης
- Κόστος 20,000 M€ (EU 46%, US 9%, Russia 9%, China 9%, India 9%, South Korea 9%, Japan 9%)

ITER = λατιν. ο δρόμος, το μονοπάτι



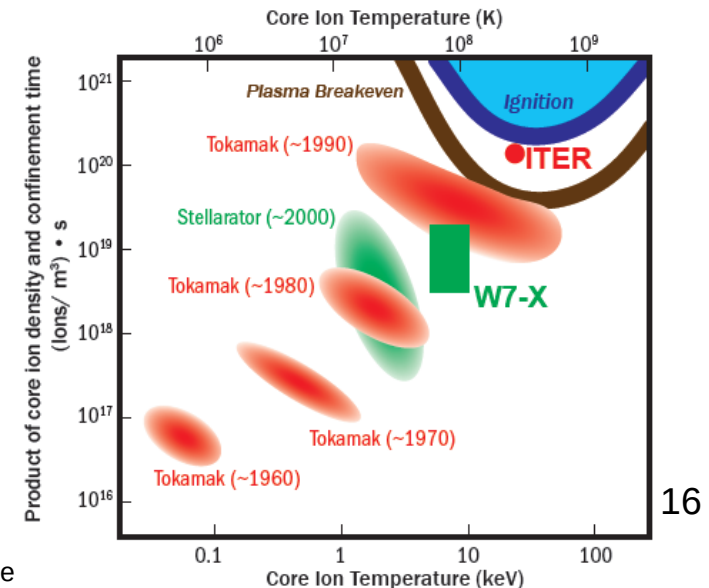
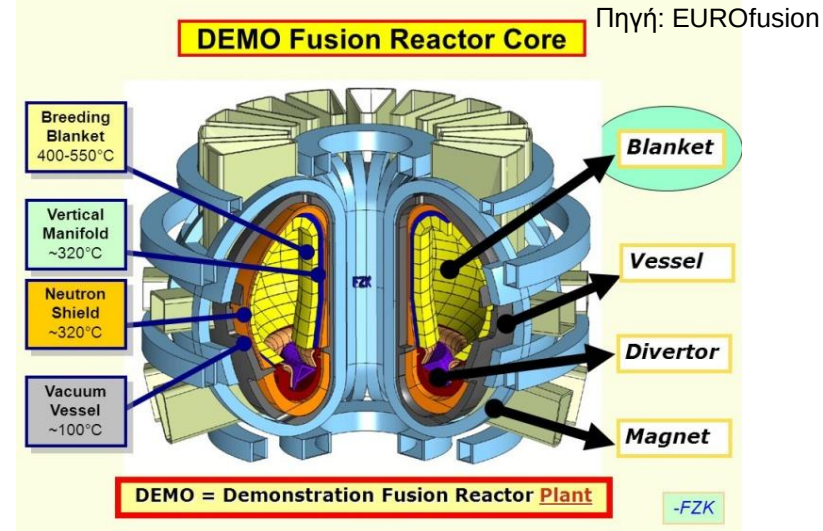
Πηγή: EUROfusion



Υπό κατασκευή στο Cadarache, Saint-Paul-lès-Durance, Γαλλία 15

DEMO (Demonstration Fusion Reactor)

- Το τελικό ορόσημο στον οδικό χάρτη της ενέργειας σύντηξης (2050)
- Θα κατασκευαστεί πάνω στην εμπειρία του ITER
- Θα αποδείξει τη δυνατότητα αυτό-συντηρούμενου πλάσματος
- Θα αποδείξει τη δυνατότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο
- Τεχνολογική πρόκληση (θερμοκρασία, ροή νετρονίων, νέα υλικά)
- Μετά το DEMO, η κατασκευή των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας σύντηξης θα περάσει στη βιομηχανία



Συγκριτικό Κόστος

Capital Investment

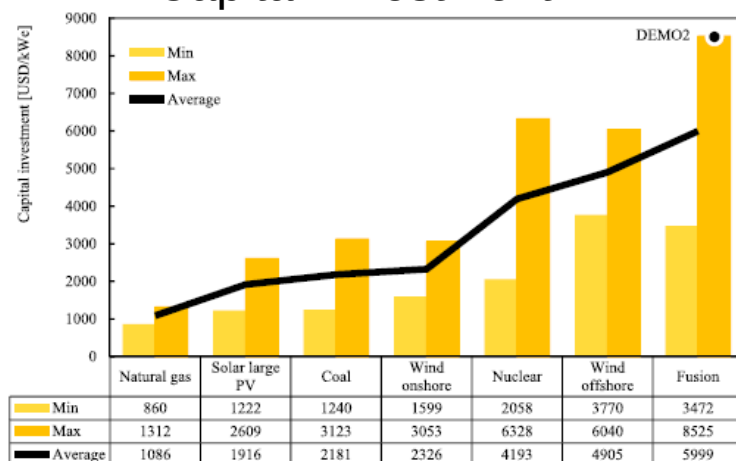


Fig. 10. Capital investment comparison.

Levelized Cost of Electricity

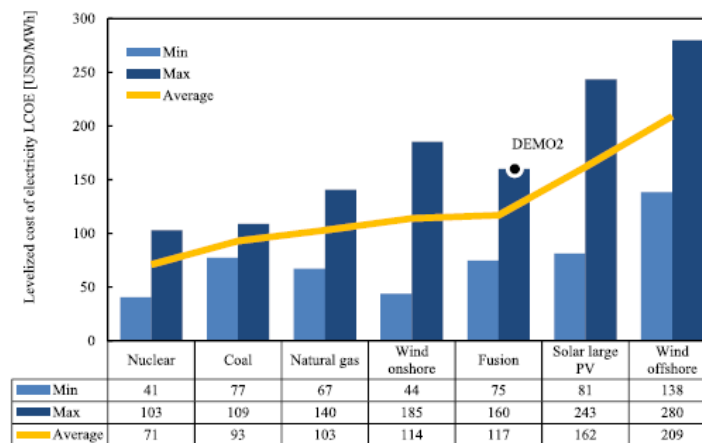


Fig. 11. Levelized cost of electricity LCOE comparison.

Total Levelized Cost of Electricity

S. Entler et al. / Energy 152 (2018) 489–497

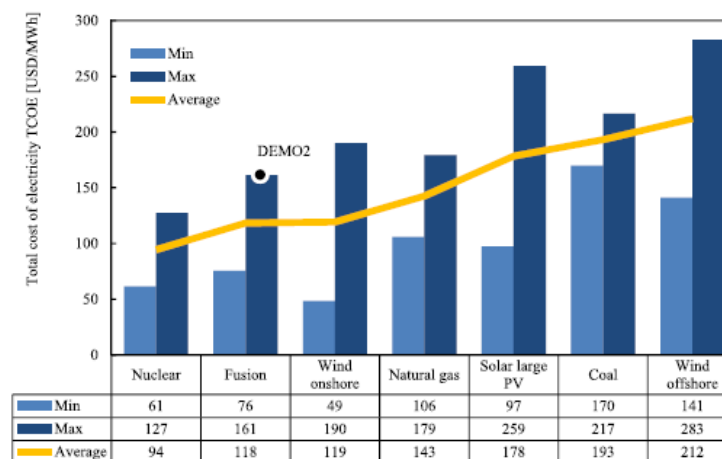
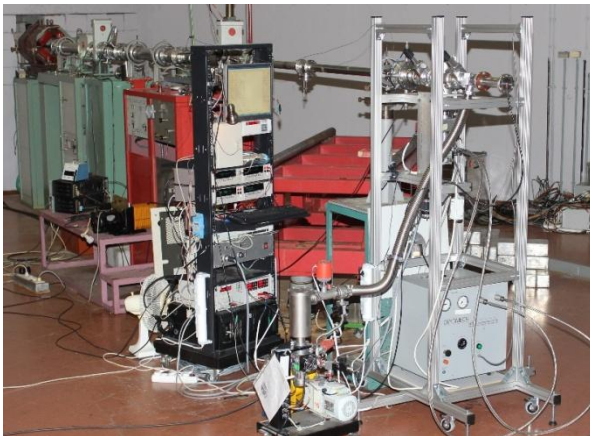


Fig. 12. Total levelized cost of electricity including external costs TCOE.

Η Σύντηξη στο Δημόκριτο



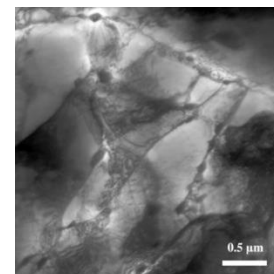
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»



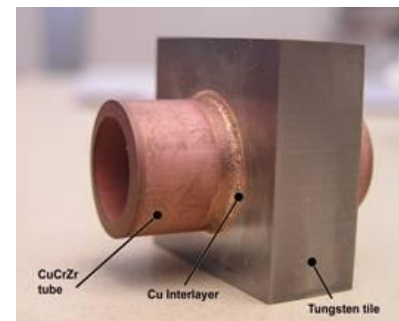
Διάταξη ακτινοβόλησης υλικών
σύντηξης στην TANDEM

- Συμμετοχή στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Σύντηξης από το 1999
 - Τρία Ινστιτούτα (ΙΠΡΕΤΕΑ, ΙΠΣΦ, INN)
 - 6 ερευνητές, 6 post-doc, 4 υποψήφιοι διδάκτορες
- Συνεργασίες με ευρωπαϊκά ερευνητικά κέντρα :
 - CCFE (UK), ENEA (Italy), SCK-CEN (Belgium), KTH (Sweden), IPPLM (Poland), KIT (Germany), FZJ (Germany)
- Συμμετοχή στο Governing Board του F4E
- Συντονιστής του Εθνικού Προγράμματος Σύντηξης

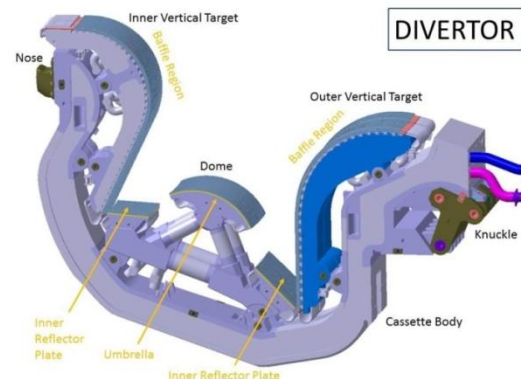
- Μελέτη φυσικών, δομικών, μηχανικών ιδιοτήτων υλικών με εφαρμογές στην τεχνολογία σύντηξης
- Μελέτη της επίδρασης ακτινοβολίας νετρονίων και ιόντων στις ιδιότητες των υλικών με εφαρμογή στο μελλοντικό αντιδραστήρα DEMO
- Μελέτη των εσωτερικών τοιχωμάτων (κύριος θάλαμος και εκτροπέας) του JET tokamak
- Πειραματική επιβεβαίωση θεωρητικών μοντέλων των βλαβών στα υλικά της σύντηξης



EUROFER97

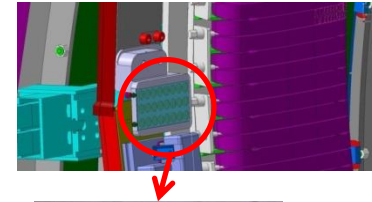


Tungsten tile

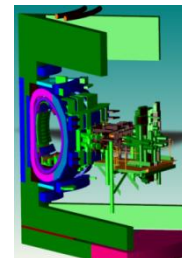


DIVERTOR

- Μελέτη ιδιοτήτων συστημάτων αντιμέτωπων με το πλάσμα (plasma facing components)
- Διαγνωστικά πλάσματος
- Ραδιολογικός χαρακτηρισμός υλικών
- Μετρήσεις και υπολογισμοί ροής νετρονίων στο JET για την επιβεβαίωση των μοντέλων και των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ITER
- Ανάπτυξη καινοτόμου ανιχνευτή νετρονίων με εφαρμογή στους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης



ITER materials irradiation at JET

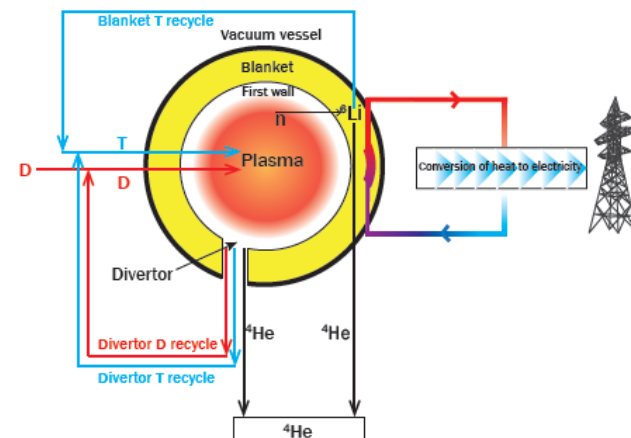


JET Octant 2 activation study



VERDI neutron detector

- Τα τελευταία χρόνια έχει επιτευχθεί **σημαντική πρόοδος** στην τεχνολογία σύντηξης
- Το μεγάλο βήμα είναι η κατασκευή του **ITER**
- Ο ευρωπαϊκός οδικός χάρτης για την **επίτευξη ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης** έχει θέσει σαν ημερομηνία ορόσημο το **2050**
- Η σύντηξη μπορεί να προσφέρει άφθονη και εγγενώς ασφαλή ενέργεια, χωρίς εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και μακρόβια ραδιενεργά κατάλοιπα
- Ο δρόμος της σύντηξης από το 1930 μέχρι σήμερα ήταν μακρύς και δύσκολος
- **Ωστόσο, τα καλύτερα χρόνια για την επιστήμη και τεχνολογία σύντηξης είναι ίσως αυτά που έρχονται!**



**Σας ευχαριστώ
για την προσοχή σας!**