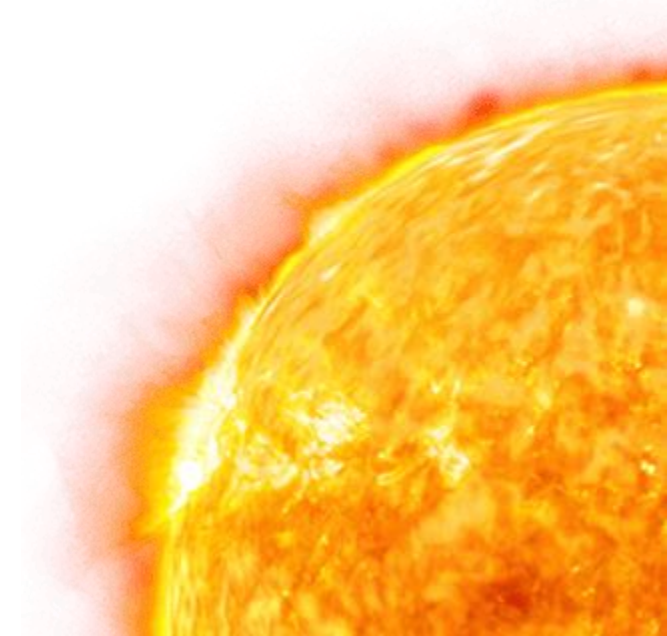
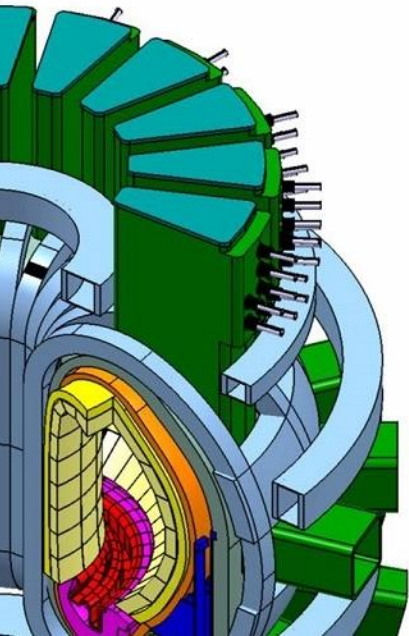


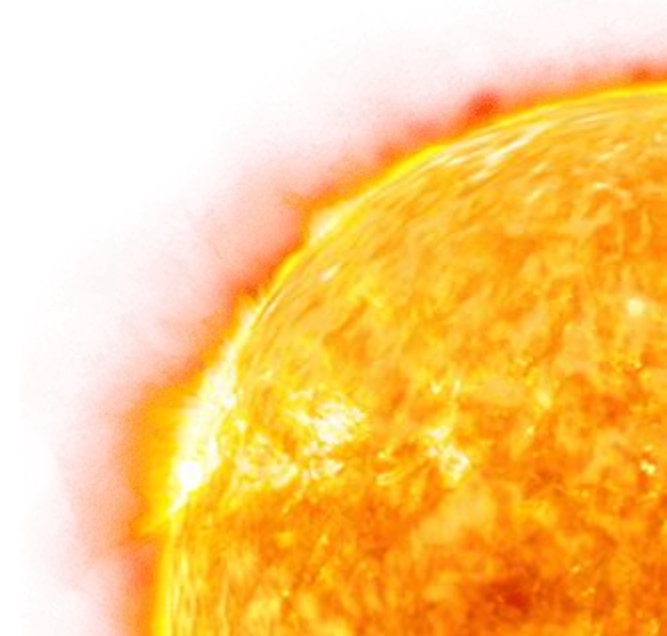
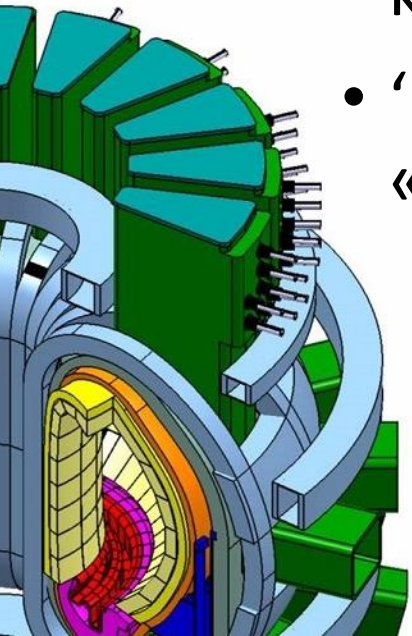
Υλικά για παραγωγή ενέργειας από τη Σύντηξη

Γ. Αποστολόπουλος
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»



Περιεχόμενα

- Πυρηνική Σύντηξη και το πρόβλημα των Υλικών
- Η επίδραση της ακτινοβολίας στα Υλικά – *Radiation Damage*
 - Ατομικές μετατοπίσεις
 - Μεταστοιχειώσεις
- Προκλήσεις για τα Υλικά Σύντηξης και οι επικρατέστερες κατηγορίες υλικών που τις καλύπτουν
- Έρευνα για Υλικά Σύντηξης στην Ευρώπη και στο «Δημόκριτο»



Πυρηνική Σύντηξη: Το πρόβλημα των Υλικών

Δευτέριο (D)

Νετρόνιο (n) – 14 MeV

Η ενέργεια παράγεται με τη μορφή κινητικής

Τα ταχέα νετρόνια έχουν την ιδιότητα να διεισδύουν βαθιά μέσα στα υλικά και να προξενούν μια σειρά από δομικές βλάβες στο εσωτερικό τους.

Στον μελλοντικό αντιδραστήρα DEMO τα υλικά κατασκευής θα εκτίθενται σε πρωτόγνωρα επίπεδα ακτινοβολίας νετρονίων.

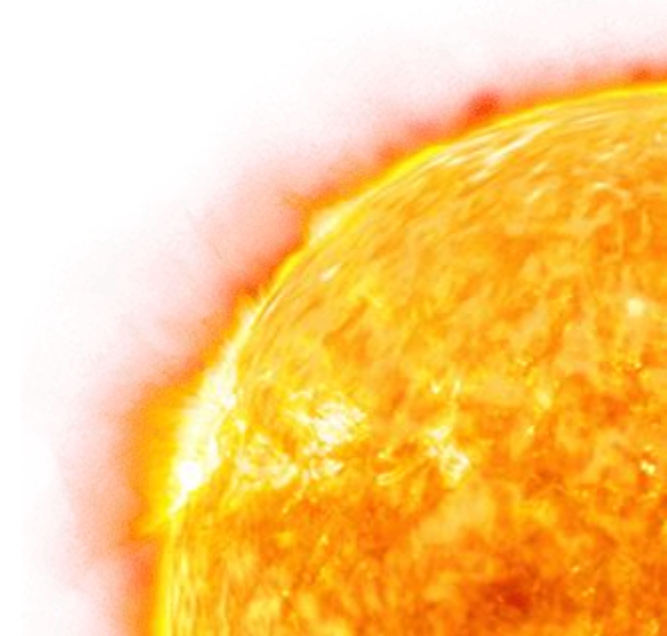
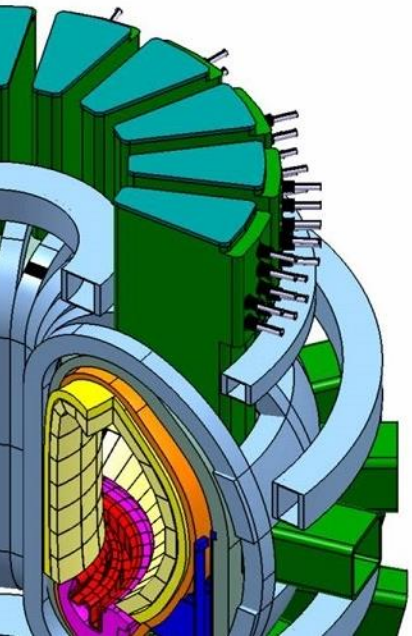
Σήμερα δεν έχουμε ακόμα τα κατάλληλα υλικά για να αντεπεξεχθούν σε αυτές τις συνθήκες διατηρώντας την αξιοπιστία τους



Επίδραση των νετρονίων στα Υλικά

1. Ατομικές Μετατοπίσεις

2. Πυρηνικές αντιδράσεις μεταστοιχείωσης



1. Ατομικές Μετατοπίσεις

- Μεταφορά ενέργειας κατά την **ελαστική κρούση** των νετρονίων με τα άτομα του υλικού

Εφαρμογή: Νετρόνια 14 MeV σε ασάλι (κυρίως Fe, Cr)

$$m=1, M\sim 56$$

$$E=14\text{MeV}$$

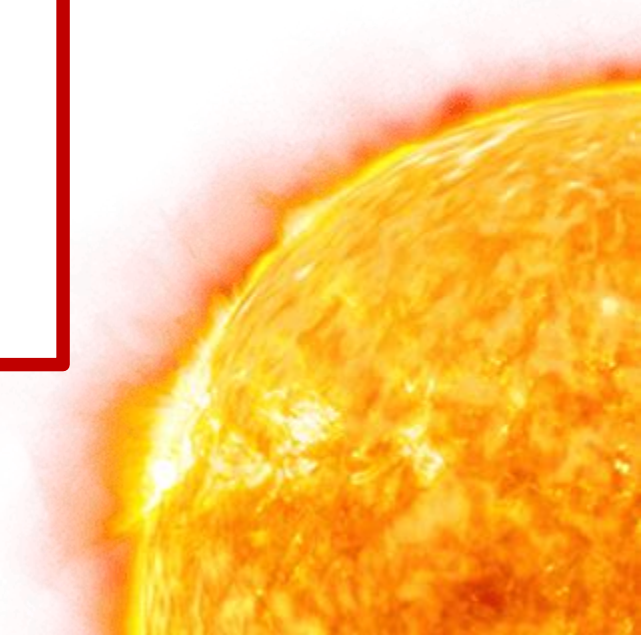
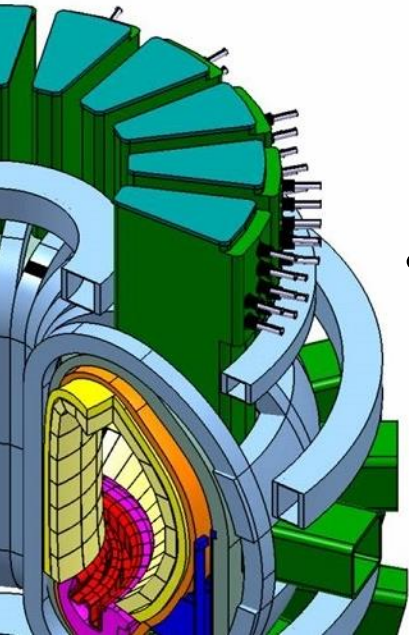
$$T_{\max} \sim 900 \text{ keV}, \langle T \rangle = \frac{1}{2} T_{\max} \sim 450 \text{ keV}$$

Η ενέργεια ανάκρουσης αντιστοιχεί σε θερμοκρασία $\sim 10^9 \text{ }^\circ\text{C}$

- Η **μέγιστη**

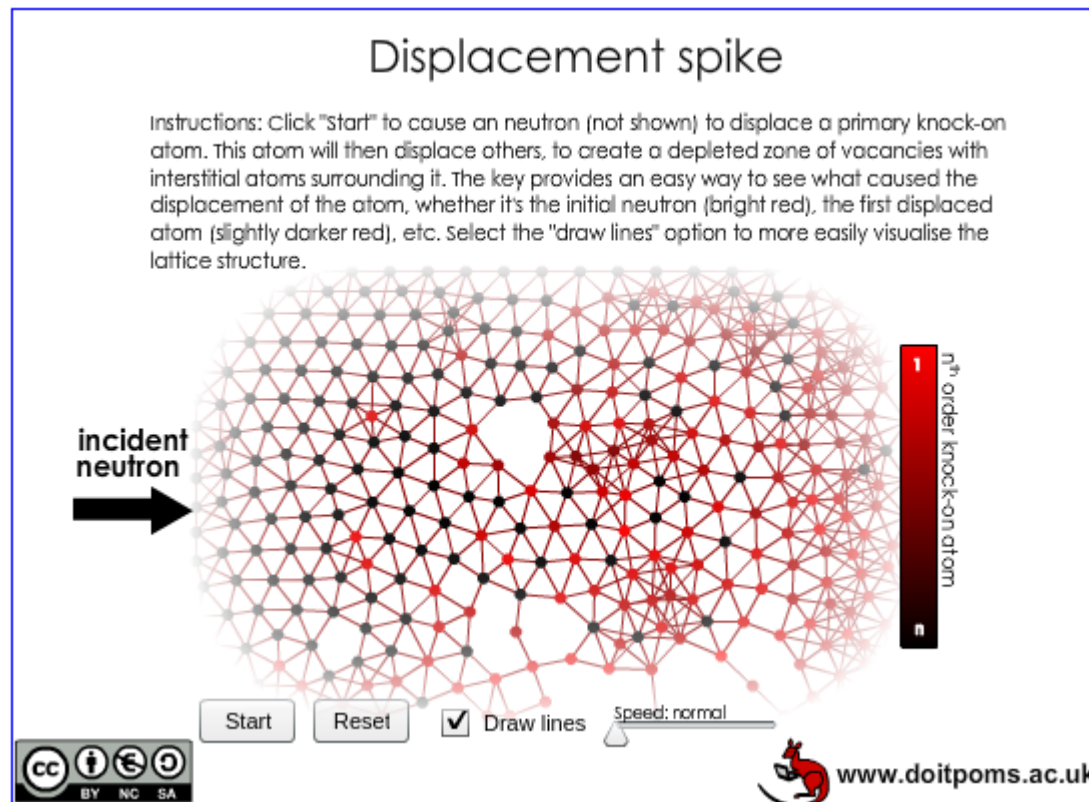
⇒ Στο σημείο κρούσης έχουμε **τοπική τήξη**
 ⇒ μεγάλος αριθμός ατόμων μετατοπίζονται από τις θέσεις ισορροπίας

$$T_{\max} = \frac{4 M m}{(M + m)^2} E$$



1. Ατομικές μετατοπίσεις

Σχηματική αναπαράσταση της κρούσης ενός νετρονίου και της προκαλούμενης αλληλουχίας ατομικών μετατοπίσεων – **Displacement Cascade**



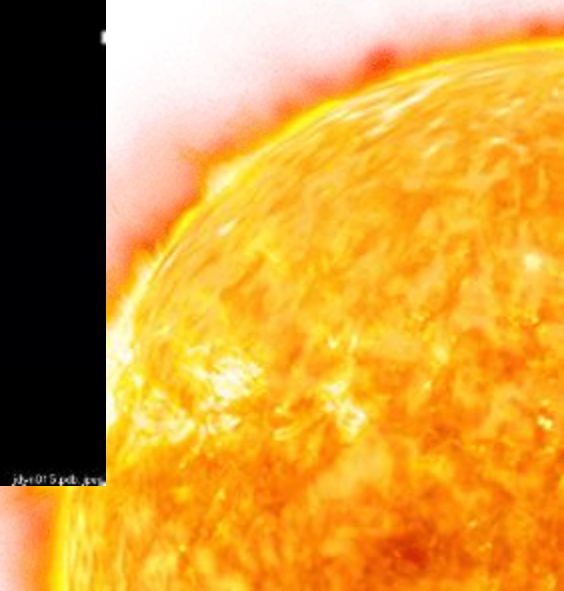
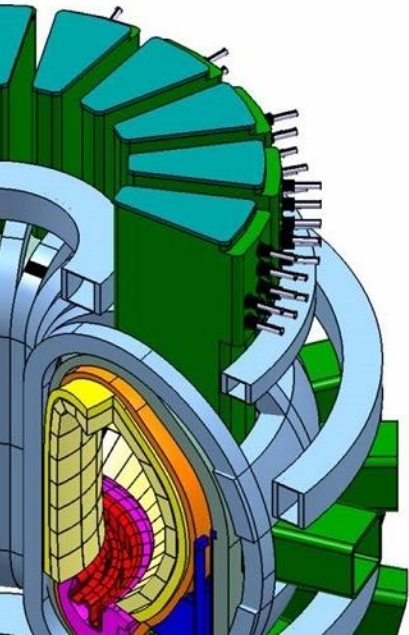
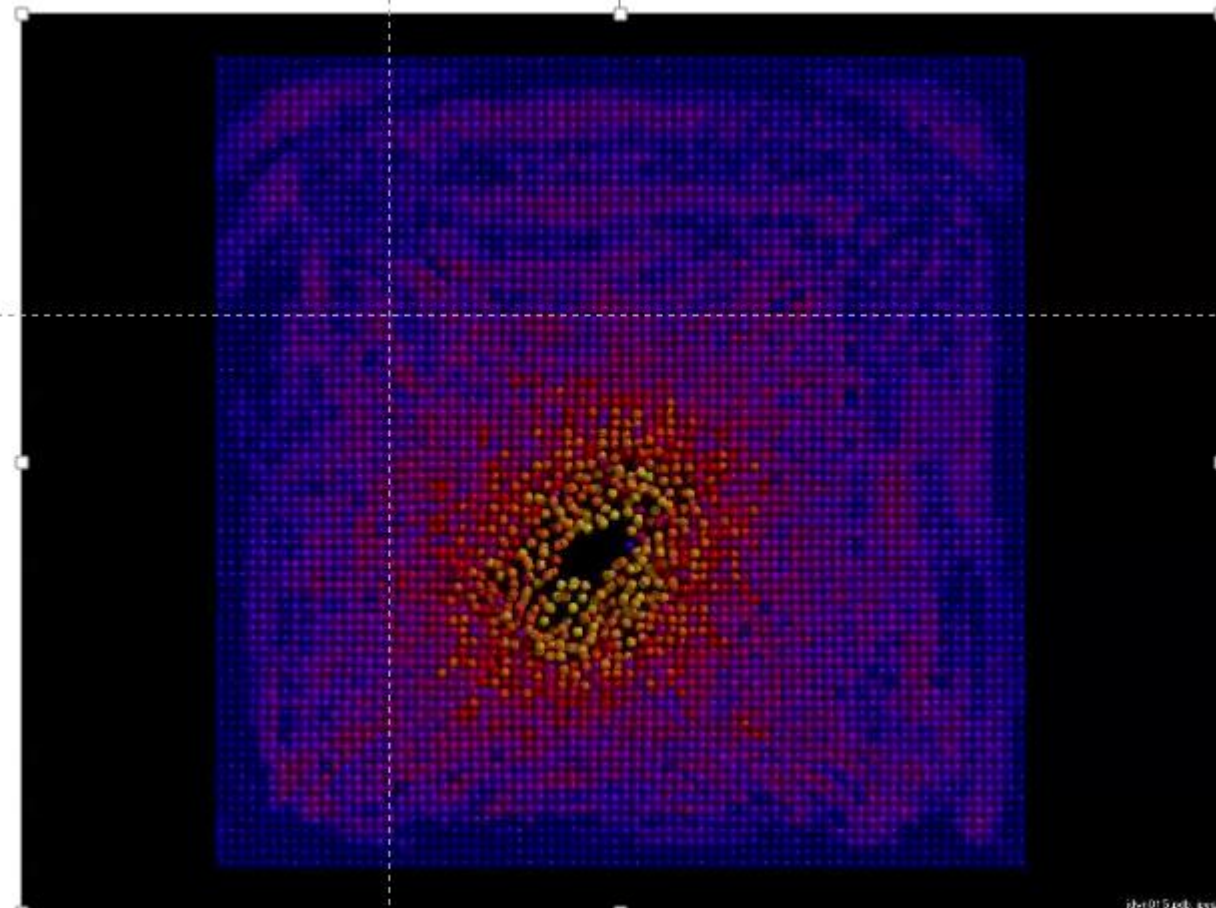
Πηγή: University of Cambridge

https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/nuclear_materials/damage_mechanism.php

1. Ατομικές μετατοπίσεις

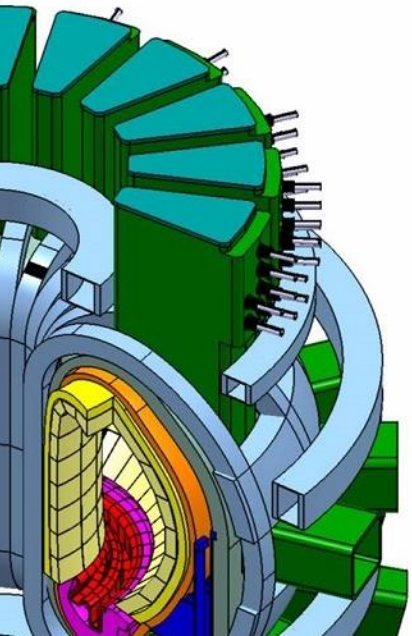
Ρεαλιστική προσομοίωση μια αλληλουχίας ατομικών μετατοπίσεων

Molecular Dynamics Simulation
Dr. R. Schaublin, EPFL



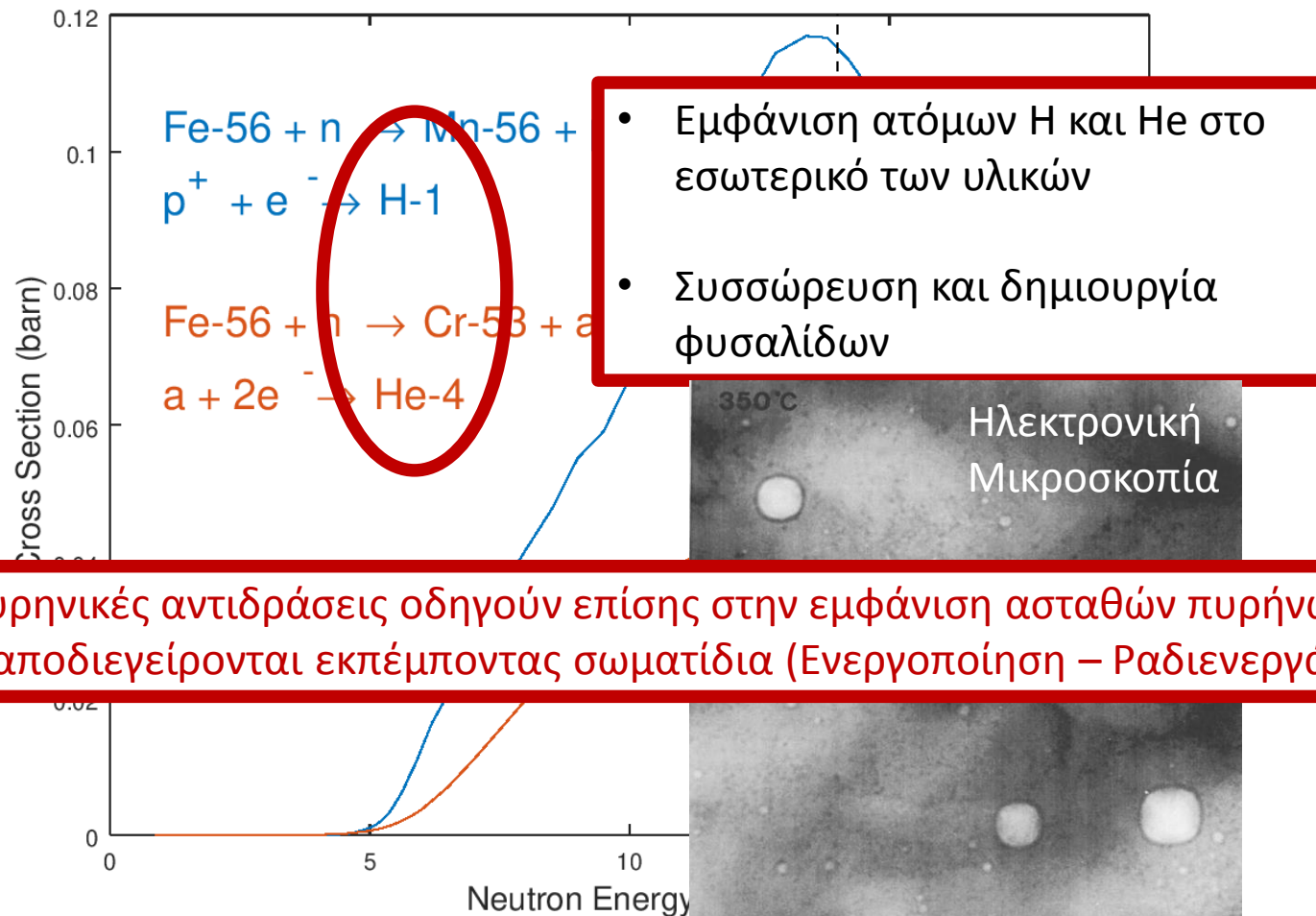
Μονάδα μέτρησης μετατοπίσεων: dpa

- 1 displacement per atom (dpa) =
1 μόνιμη μετατόπιση όλων των ατόμων από την αρχική τους θέση
- Τα περισσότερα μετατοπισμένα άτομα επιστρέφουν σε κρυσταλλικές θέσεις μέσω **θερμικής διάχυσης**
- Σε συμβατικά υλικά το ποσοστό των ατόμων που επιστρέφουν είναι **90-99%**
 - Αυτό αρκεί για τους **αντιδραστήρες σχάσης** όπου έχουμε έκθεση σε **~10 dpa**
- Για τα υλικά στον μελλοντικό αντιδραστήρα Σύντηξης DEMO αυτό το ποσοστό πρέπει να ανέλθει στο **99.9%**
 - Προβλεπόμενη **έκθεση ~100 dpa**
 - ~99.9% των μετατοπίσεων πρέπει να επανέλθουν

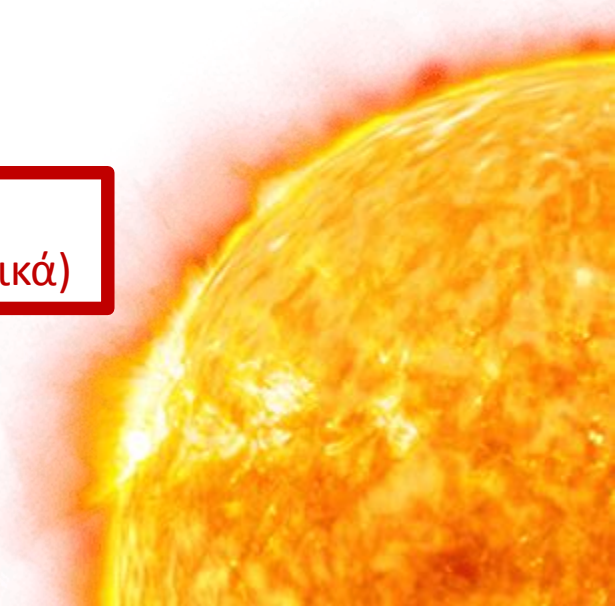
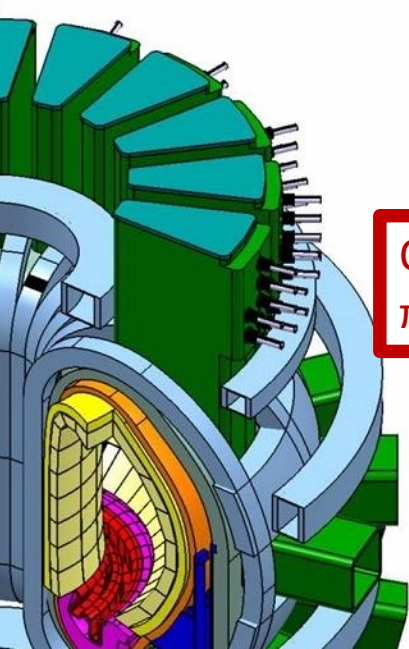


2. Αντιδράσεις Μεταστοιχείωσης

Τα ταχέα νετρόνια προκαλούν σειρά από πυρηνικές αντιδράσεις



Οι πυρηνικές αντιδράσεις οδηγούν επίσης στην εμφάνιση ασταθών πυρήνων που αποδιεγείρονται εκπέμποντας σωματίδια (Ενεργοποίηση – Ραδιενεργά υλικά)



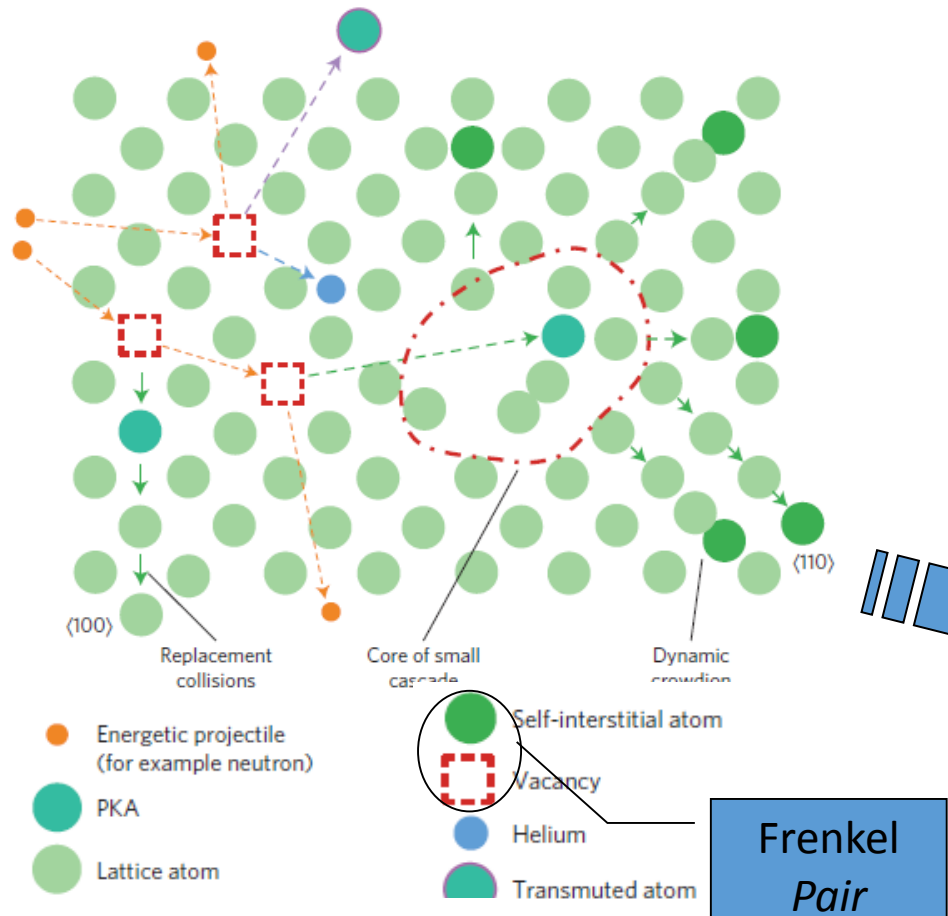
Επίδραση της ακτινοβολίας στα υλικά

Ένα φαινόμενο που εξελίσσεται σε πολλαπλές κλίμακες χώρου και χρόνου

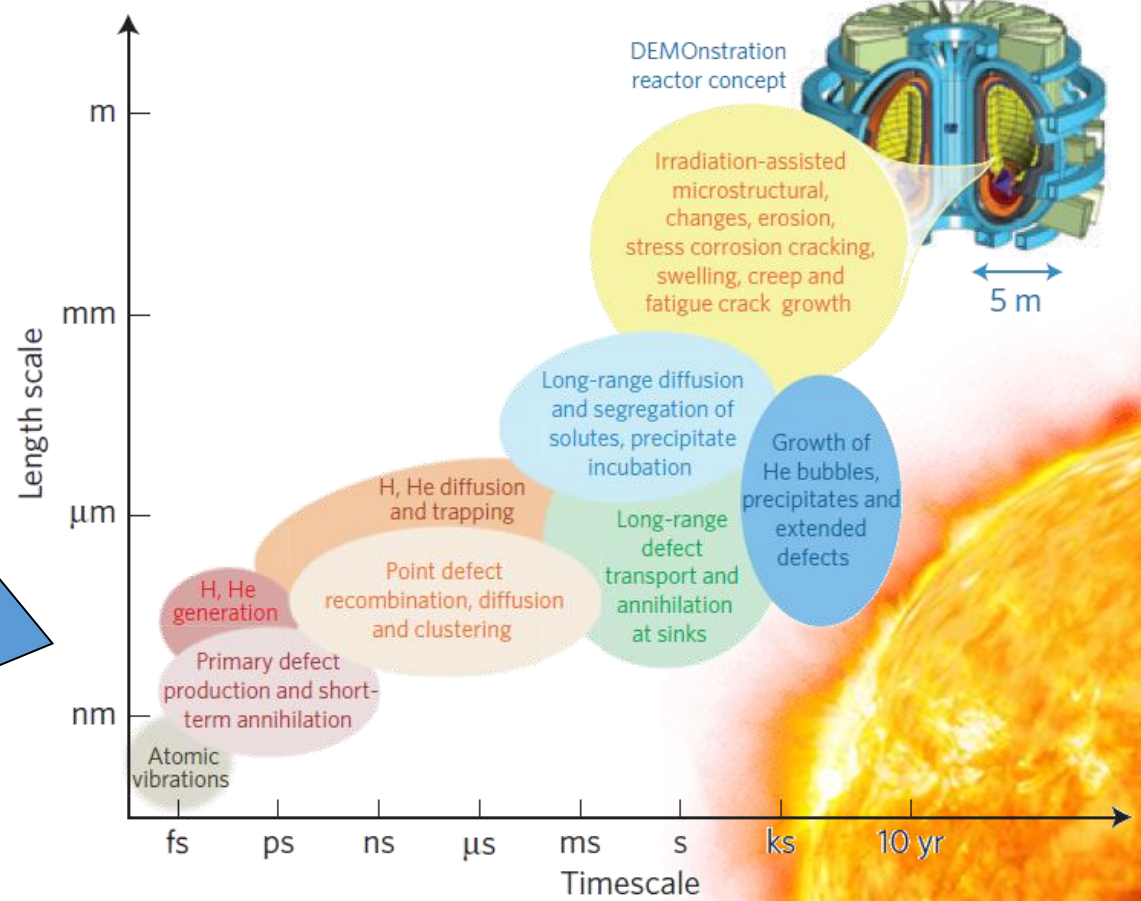
Ατομικές μετατοπίσεις και πυρηνικές αντιδράσεις σε μικροσκοπική κλίμακα....



Οδηγούν σε αλλαγές των μακροσκοπικών ιδιοτήτων

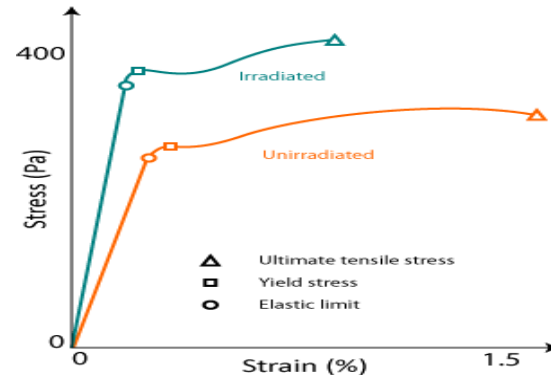


Knaster et al. Nature Materials 2016

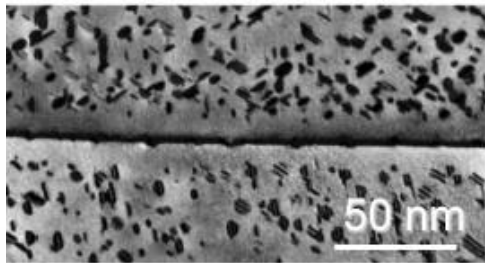


Μακροσκοπικές επιπτώσεις της ακτινοβόλησης

Μείωση θερμικής, ηλεκτρικής αγωγιμότητας
Αύξηση σκληρότητας, ευθραυστότητα



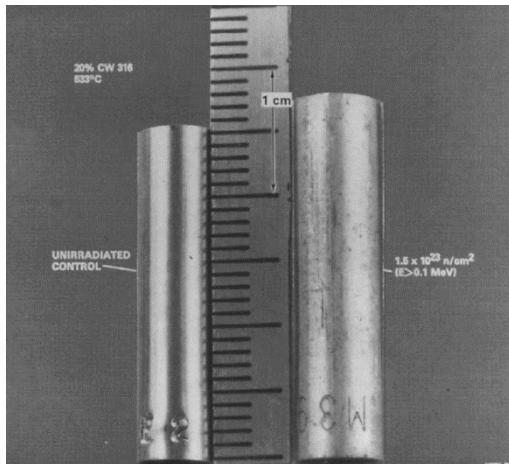
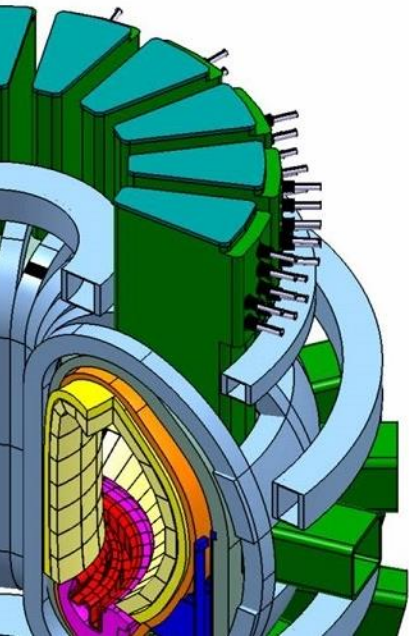
Zinkle, *Materials Today* 2009



Διαχωρισμός φάσεων, συσσωματώσεις



Ερπυσμός → θραύση



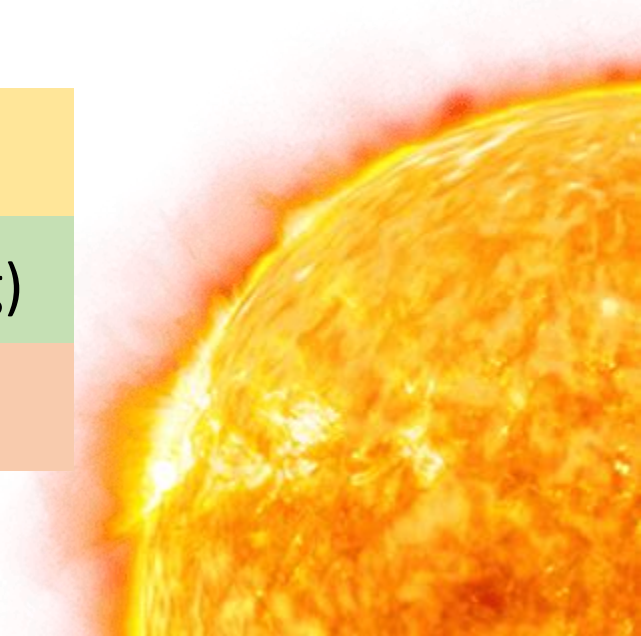
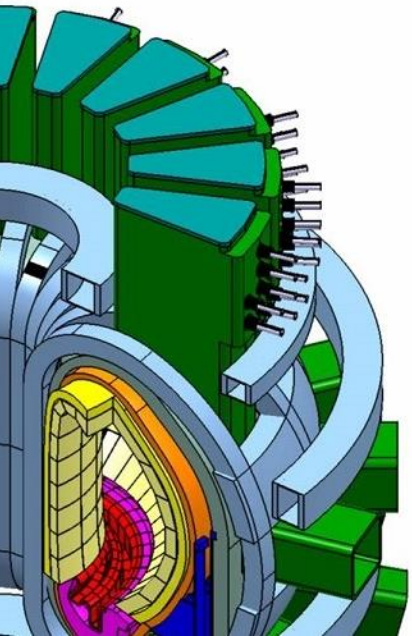
Ελλάτωση πυκνότητας («πρήξιμο»)

Συσσώρευση H, He → θραύση



Υλικά για τους Αντιδραστήρες Σύντηξης

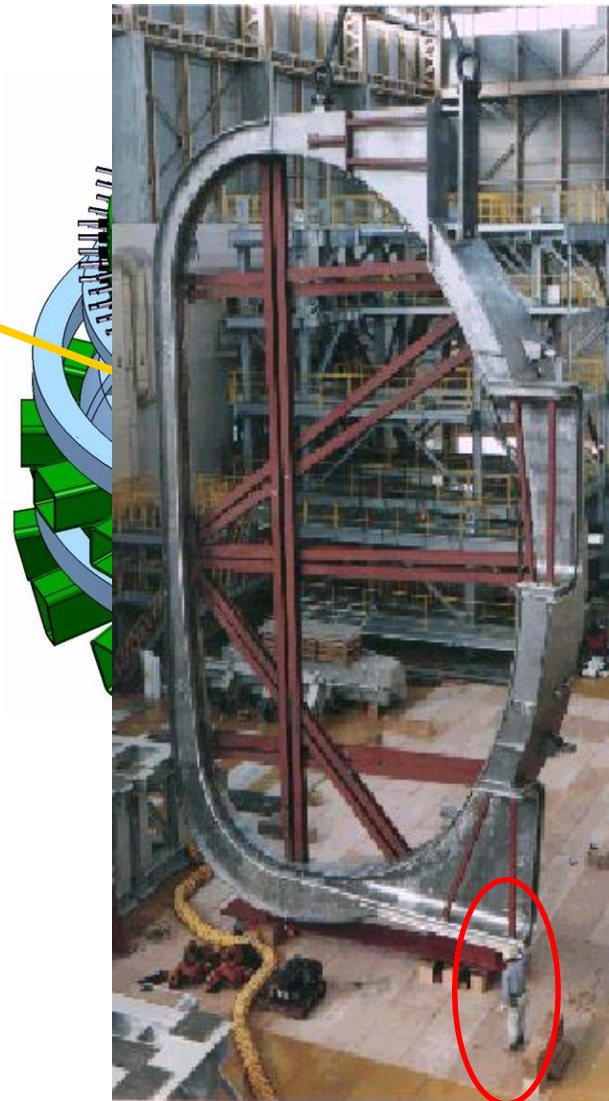
- Η ανάπτυξη Υλικών ικανών να αντεπεξέλθουν στις συνθήκες λειτουργίας του DEMO αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις για τη Σύντηξη
- Οι σημαντικότερες κατηγορίες υλικών είναι
 - Δομικά Υλικά (Structural)
 - Υλικά σε άμεση επαφή με το πλάσμα (Plasma-Facing)
 - Υλικά για υψηλές θερμικές ροές (High Heat Flux)



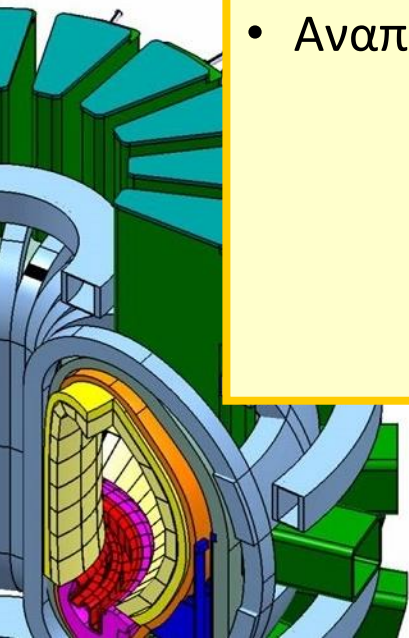
Μανδύας (20 dpa/yr, 2 MW-yr/m²)

Λειτουργίες:

- Κύριο **δομικό στοιχείο** του αντιδραστήρα
- Είναι ο **θάλαμος κενού**
- Επιβράδυνση των νετρονίων
- **Απαγωγή θερμότητας** για παραγωγή ενέργειας
- Αναπαραγωγή του **καυσίμου Τριτίου** (breeding)



ITER
Vacuum Vessel
Sector



Μανδύας (20 dpa/yr, 2 MW-yr/m²)

Δομικά Υλικά - Απαιτήσεις:

- Δομική σταθερότητα
- Αντοχή στις τάσεις κατά τη λειτουργία
 - κενό, μαγνητικά πεδία κλπ
- Υψηλή αντοχή στην ακτινοβόληση
- Χαμηλή ενεργοποίηση

Οικογένειες Υλικών

- Φερριτικά Ατσάλια Χαμηλής Ενεργοποίησης
 - EUROFER
- Κεραμικά σύνθετα υλικά
 - SiCf / SiC

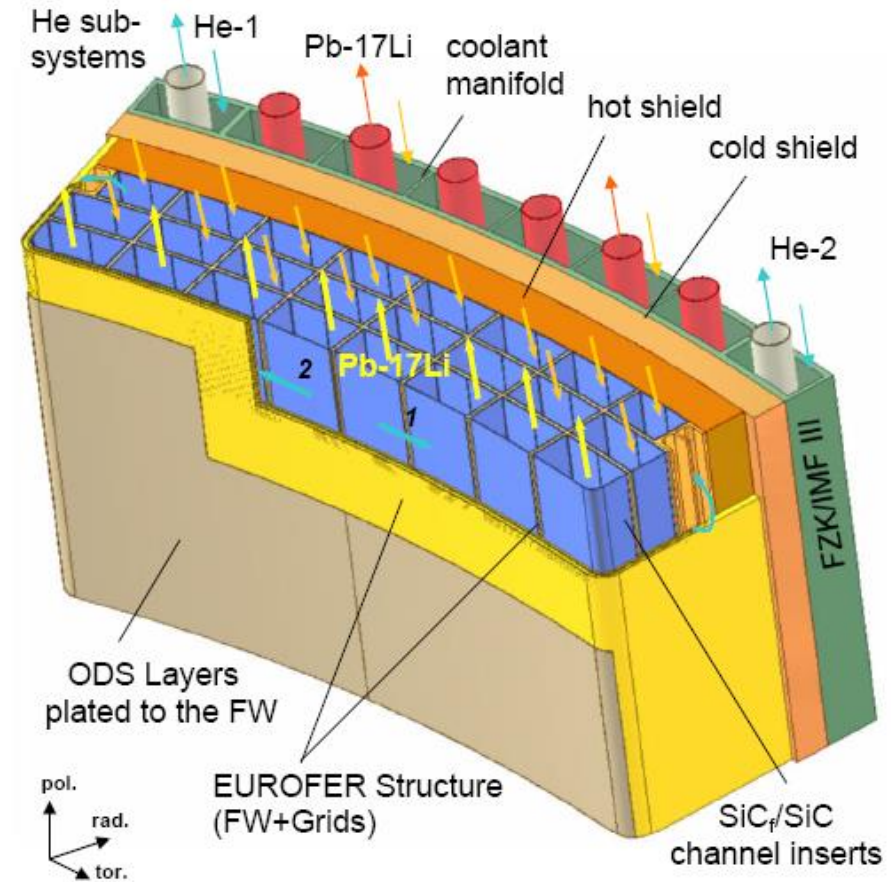


Fig. 3.1-4: Dual-coolant blanket (model C), equatorial outboard blanket module (1.5 x

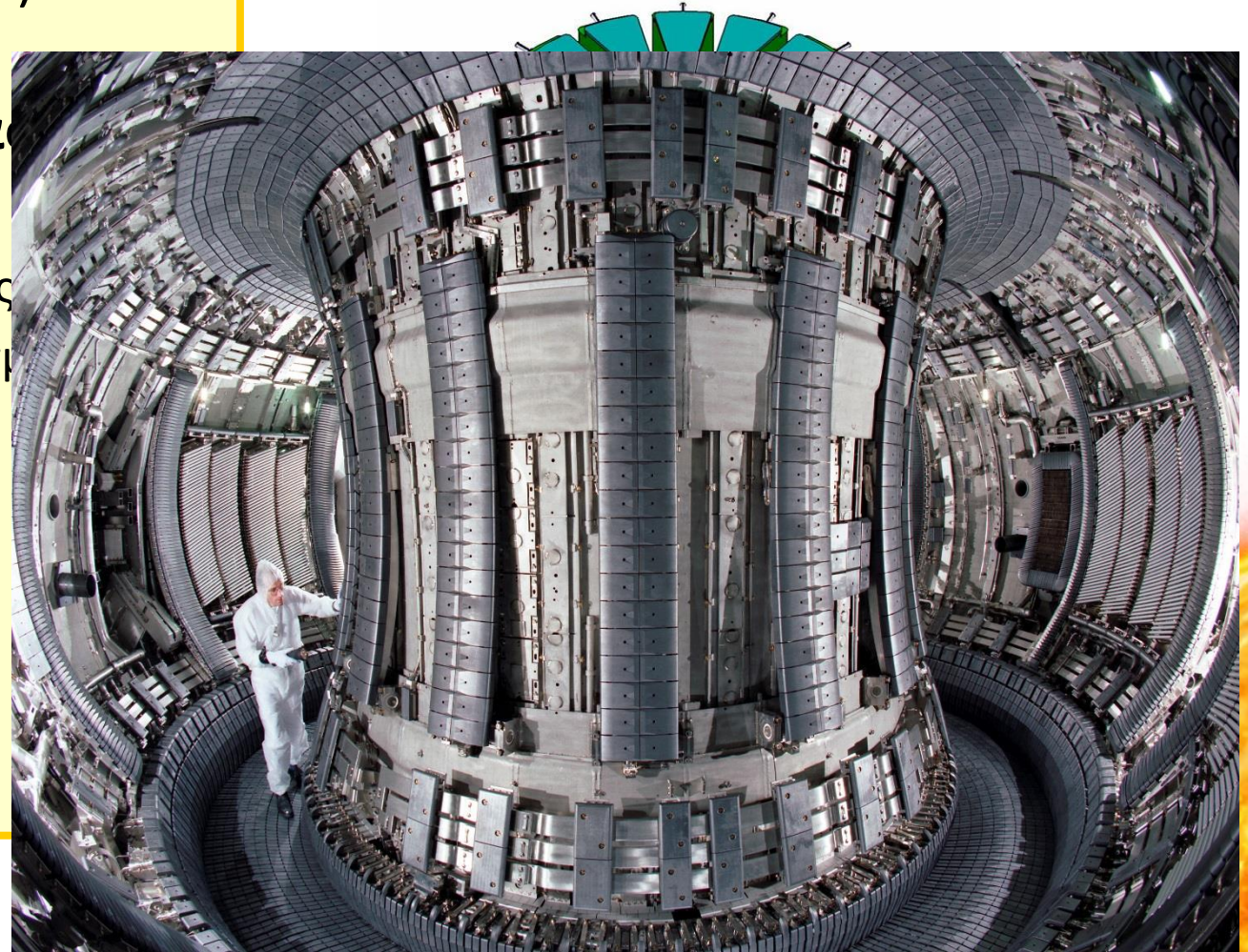
Μανδύας (20 dpa/yr, 2 MW-yr/m²)

Υλικά σε άμεση επαφή με το πλάσμα (Plasma-Facing)

- Σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες
- Μη εισαγωγή ξένων ατόμων στο πλάσμα
- Χαμηλή απορρόφηση Τριτίου

Επικρατέστερα Υλικά

- Υλικά με βάση το Βολφράμιο
 - W, W alloys, W composites



ITER Divertor cassette

Εκτροπέας (10 dpa/yr, 10 MW yr/m²)

Divertor

Λειτουργία:

- Απαγωγή των προϊόντων της αντίδρασης (He)
- Απαγωγή μεγάλου ποσού ενέργειας

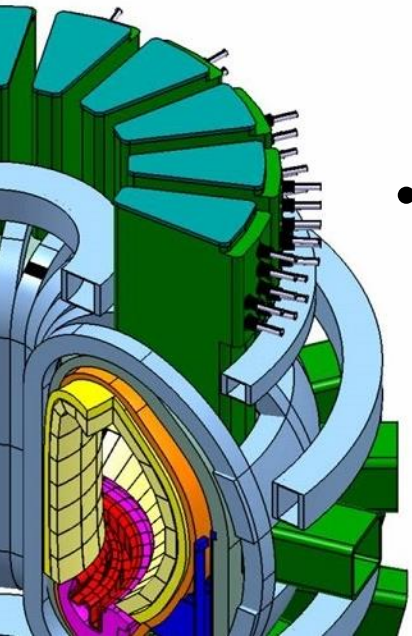
Υλικά Υψηλής Θερμικής ροής (High Heat Flux)

- Θερμική Αγωγιμότητα
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Armor: Refractory alloys (W-based)
- Cooling: Cu-based alloys (CuCrZr)



Έρευνα για τα Υλικά Σύντηξης

- Γνωρίζουμε τις βασικές οικογένειες υλικών (EUROFER, W, ...)
- Έχουμε λύσει όλα τα προβλήματα; - **ΌΧΙ**
- Δομικά Υλικά
 - Ευθραυστότητα μετά από ακτινοβόληση, H & He επιδεινώνουν το πρόβλημα
 - Μηχανική Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Plasma Facing & High Heat Flux – Βολφράμιο
 - Επιφανειακή οξείδωση
 - Μειωμένη ελατότητα, ευθραυστότητα
 - Αστάθεια στη μικροδομή
- Έρευνα στην Ευρώπη και διεθνώς
 - Βελτίωση υπαρχόντων και ανάπτυξη νέων υλικών
 - Ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων για την επίδραση της ακτινοβολίας
 - Επιβεβαίωση με ακτινοβολήσεις σε επιταχυντές & συμβατικούς αντιδραστήρες
 - **Έλεγχος & Πιστοποίηση σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας**

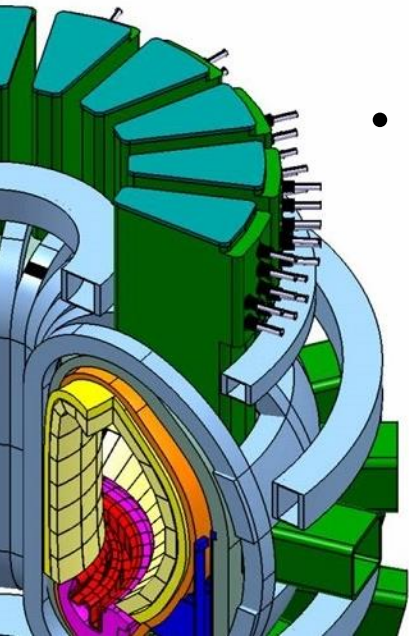
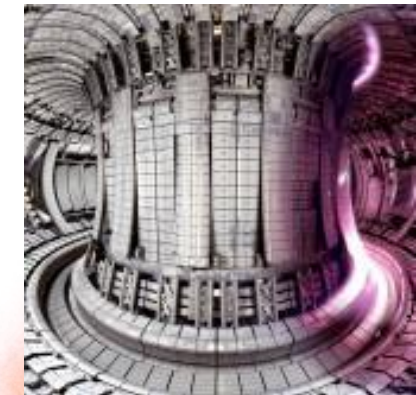
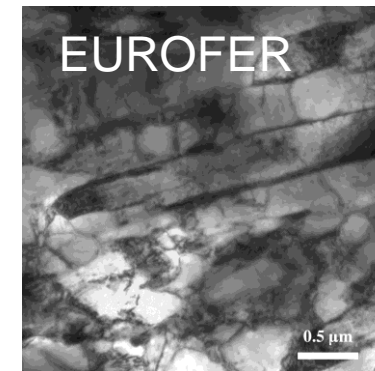


Έρευνα για Υλικά Σύντηξης στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

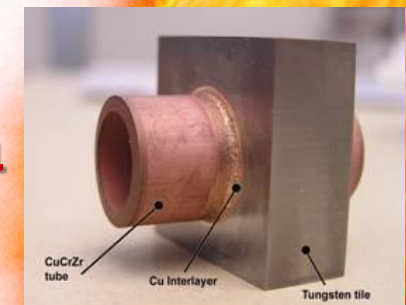
- Χαρακτηρισμός Δομικών Υλικών
 - Μικροδομή
 - Μετρήσεις ηλεκτρικής & θερμικής αγωγιμότητας
 - Μετρήσεις μαγνητικών ιδιοτήτων

- Επίδραση της ακτινοβολίας στα Υλικά
 - Ακτινοβολήσεις υλικών σε ιοντικούς επιταχυντές
 - Αποκατάσταση ηλεκτρικής αντίστασης σε κράματα Fe-Cr και EUROFER
 - Ακτινοβόληση και μαγνητικές ιδιότητες σε λεπτά υμένια Fe-Cr

- Υλικά σε επαφή με το πλάσμα (Plasma Facing)
 - Χαρακτηρισμός ακτινοβολημένων ITER-like tiles
 - Μηχανικές και δομικές ιδιότητες ακτινοβολημένων υλικών με βάση το Βολφράμιο (W)
 - Μηχανικές ιδιότητες ενώσεων (W/CuCrZr)



Το Ερευνητικό πρόγραμμα εντάσσεται και χρηματοδοτείται από το EUROfusion Concorium, HORIZON2020



Δομικά Υλικά χαμηλής ενεργοποίησης

EUROFER: Ferritic/Martensitic Steel

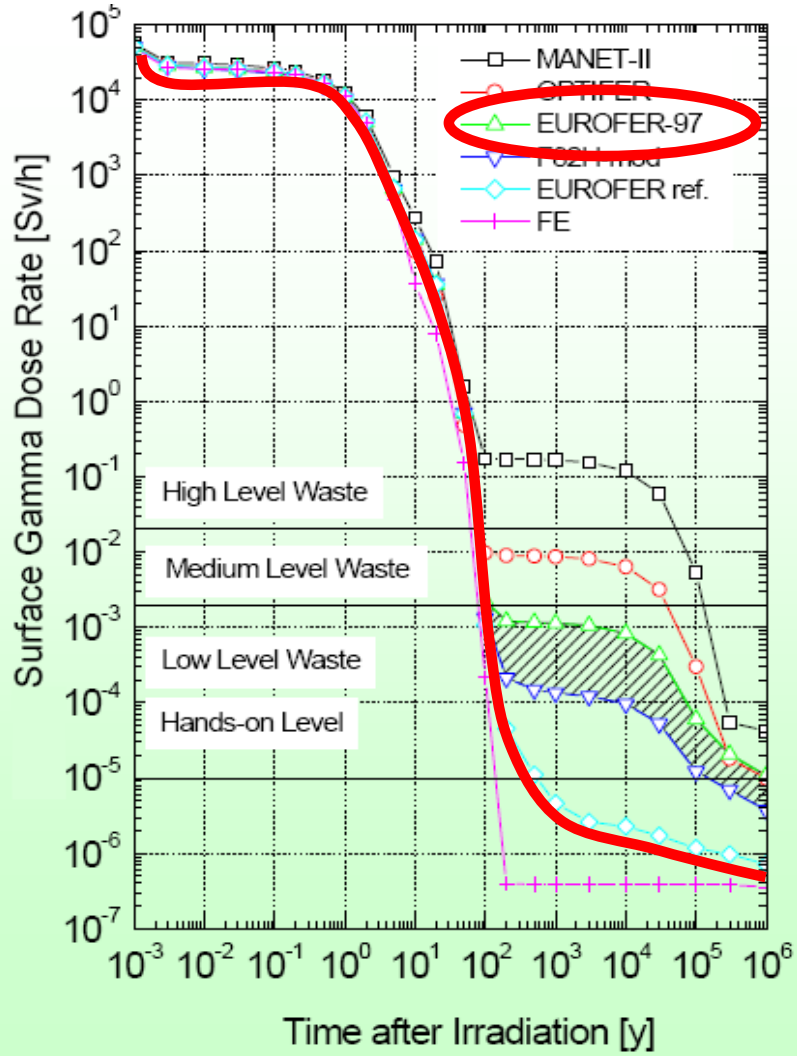
Composition (%) : Fe, 9 Cr, C 0.12, Mn 0.4, Cr 9, V 0.2, W 1.1, Ta 0.1

no Mo, Nb → **reduced activation**

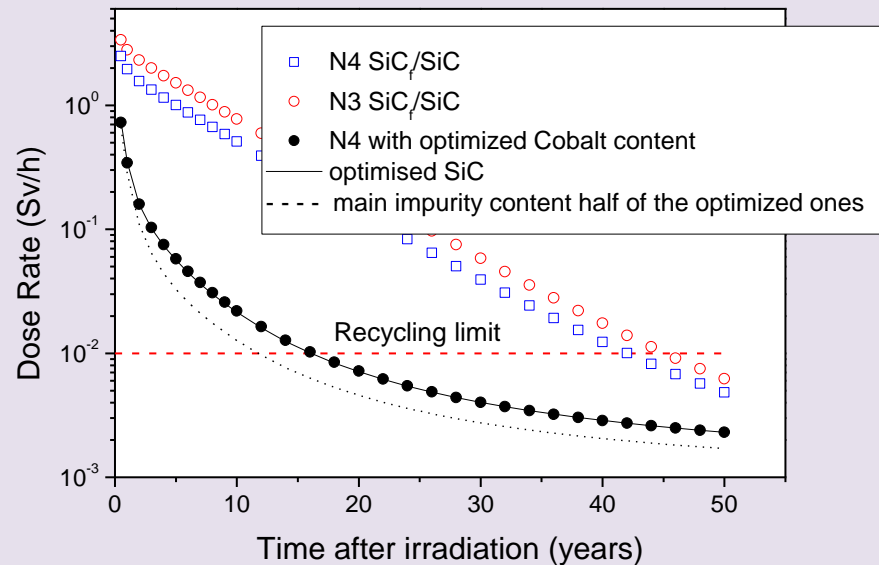
neutron irradiation:

- No swelling

but: low temperature embrittlement



Σύνθετα υλικά με βάση το SiC



- Determination of active impurities by Neutron Activation Analysis
- Recommendations of optimized SiC for achieving less than 10 years storage

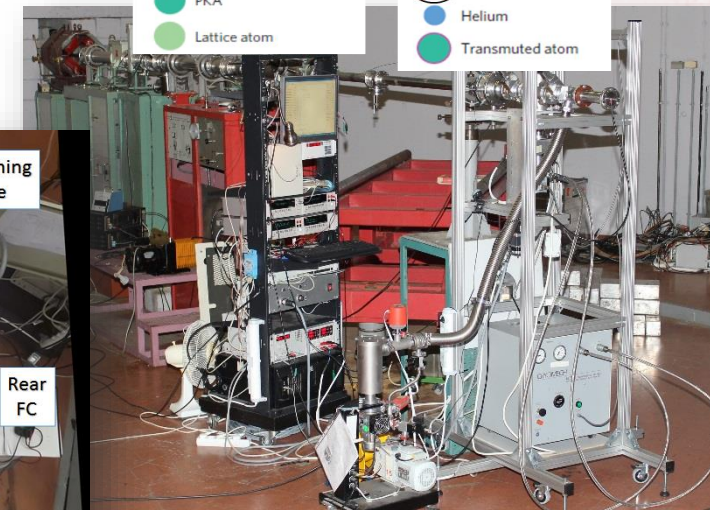
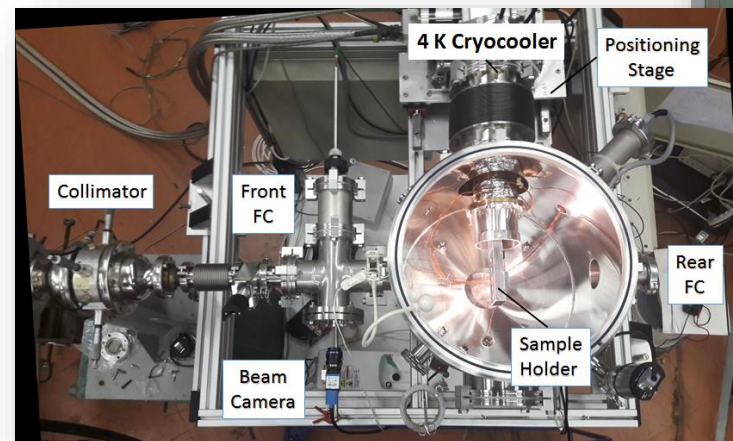
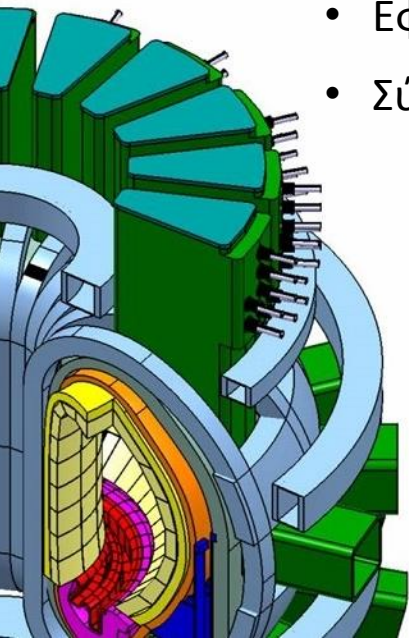
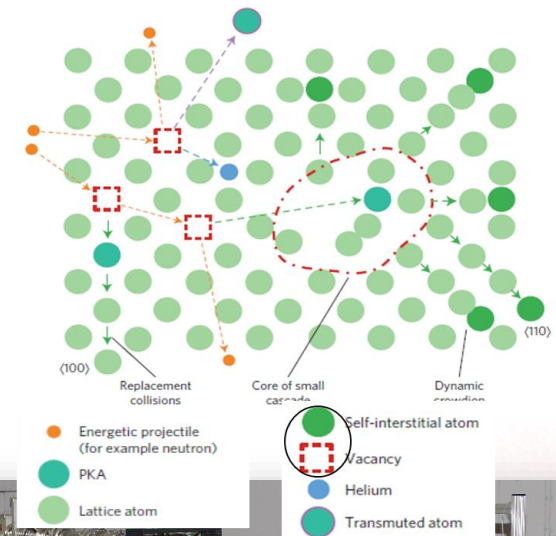
Μελέτες αποκατάστασης ατελειών σε Φερριτικά υλικά

Οι ιδιότητες των μικροσκοπικών ατελειών (μετανάστευση, αλληλεπίδραση, αποκατάσταση) καθορίζει τη μακροσκοπική συμπεριφορά των υλικών

Πειράματα στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

- Ακτινοβολήση στον επιταχυντή TANDEM του «Δημόκριτου»
- Ειδική συσκευή για ακτινοβολήση σε κρυογενική θερμοκρασία (4 K) και μελέτη αποκατάστασης βλαβών σε υλικά
- Μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης για παρακολούθηση της αποκατάστασης ατελειών σε real-time
- Εφαρμογή σε μελέτες αποκατάστασης σε Fe-Cr, EUROFER, W
- Σύγκριση με θεωρητικά μοντέλα

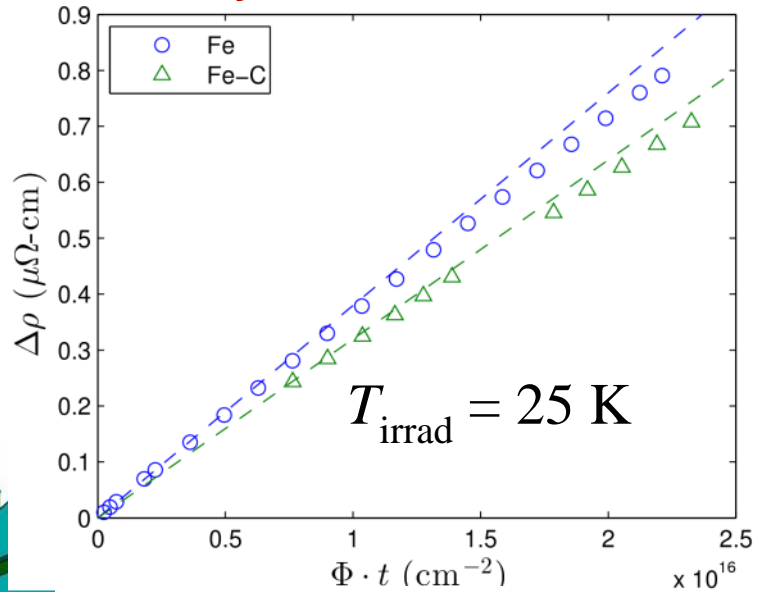
Ατομικές μετατοπίσεις και πυρηνικές αντιδράσεις σε μικροσκοπική κλίμακα....



Δημιουργία & Αποκατάσταση ατελειών στο Fe-C

Αποκατάσταση ατελειών – στάδια

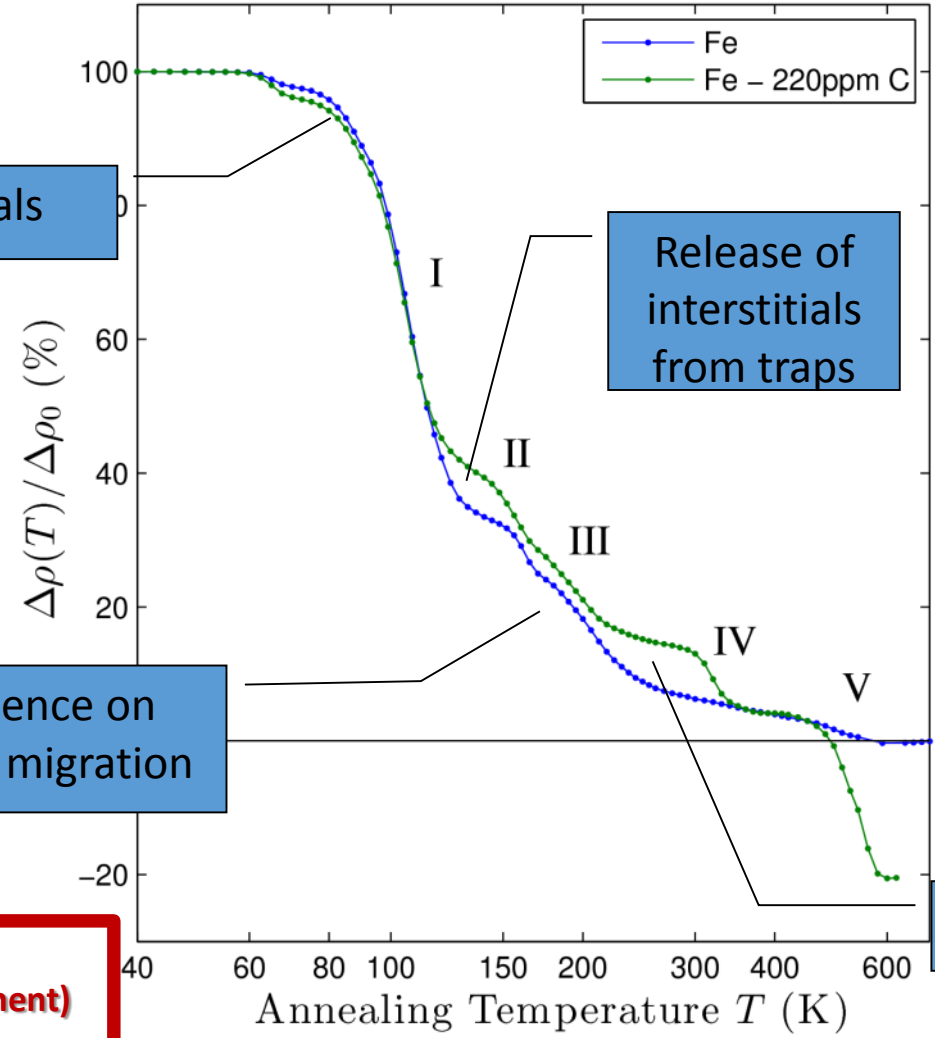
Resistivity Increase vs Proton Dose



$$\Delta \rho = \rho_F N_F = \rho_F \sigma_D \Phi$$

ρ_F : Frenkel pair resistivity
 σ_D : Damage cross-section
 Φ : particle fluence

Interstitials



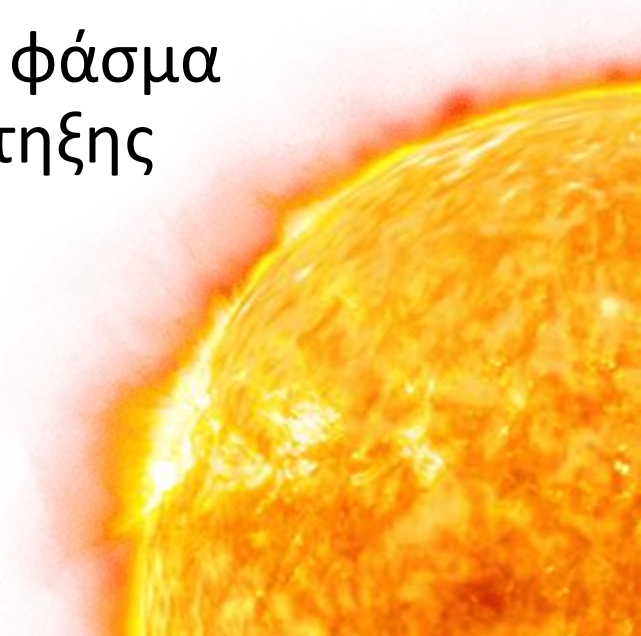
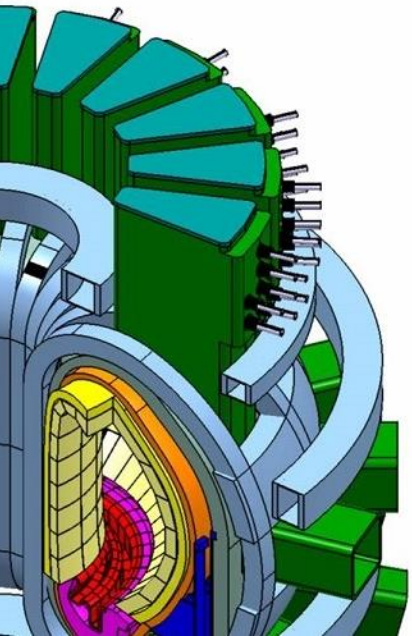
C influence on vacancy migration

C reactions

Interaction of C + radiation defects → influence on mechanical prop. (embrittlement)

Συνοψίζοντας

- Τα βασικά προβλήματα για τα Υλικά Σύντηξης είναι:
- Δομικά Υλικά = Φερριτικά ατσάλια
 - Ευθραυστότητα κατά την ακτινοβόληση νετρονίων
- Plasma-Facing & High heat flux = Βολφράμιο
 - Συμβατότητα με το πλάσμα και αντοχή σε θερμικά φορτία & ακτινοβολία
- Στο «Δημόκριτο» διεξάγεται έρευνα σε όλο το φάσμα των προβλημάτων που αφορούν τα Υλικά Σύντηξης



Ευχαριστώ για την προσοχή σας

