



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Μικροτεκτονική - Τεκτονική Ανάλυση

Ενότητα 1: Μηχανισμοί παραμόρφωσης

Στυλιανός Λόζιος

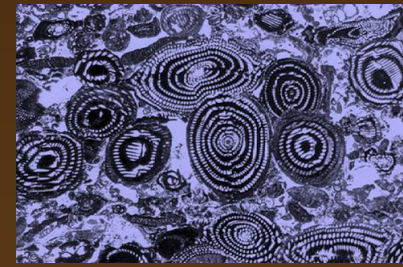
Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος



Παρουσίαση

2



# Μηχανισμοί Παραμόρφωσης

## Deformation Mechanisms



# ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

## Deformation Mechanisms

Κλίμακα μηχανισμών και διαδικασιών σε επίπεδο ορυκτών και κόκκων

ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Ορυκτολογική σύσταση  
Σύσταση ρευστών των πόρων  
Μέγεθος κόκκων  
Προτιμητέος προσανατολισμός σε επίπεδο πλέγματος  
Πορώδες  
Περατότητα

ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Θερμοκρασία  
Λιθοστατική πίεση  
Προκύπτουσες διαφορικές τάσεις  
Πίεση ρευστών των πόρων  
Εξωτερικά ασκούμενο ποσοστό παραμόρφωσης (strain rate)

LT

υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης

Ανάπτυξη μηχανισμών παραμόρφωσης

HT

χαμηλός ρυθμός παραμόρφωσης

Για τη μελέτη και κατανόηση των μηχανισμών παραμόρφωσης → Χρήση των μικροδομών σε επίπεδο ορυκτών και κόκκων (grain scale microstructures), που αποκαλούνται.....

ΕΝΔΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ – INTRACRYSTALLINE DEFORMATION STRUCTURES  
π.χ. ελάσματα παραμόρφωσης (deformation lamellae).

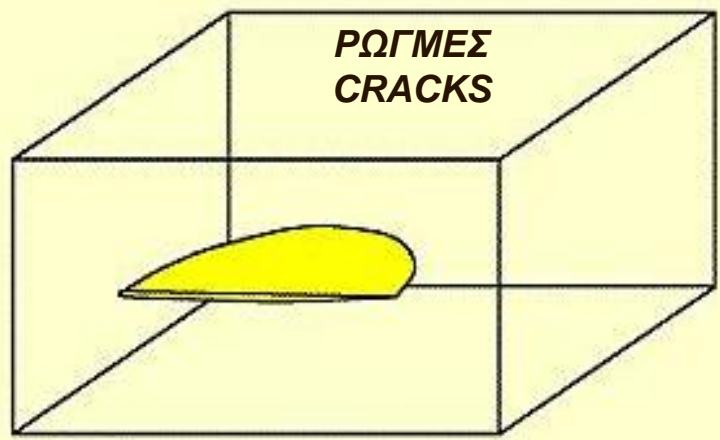
- 1) Θραυσιγενής Διάρρηξη – Κατάκλαση (Brittle Fracturing - Cataclasis)
- 2) Διαλυτοποίηση – Καθίζηση ή Επανα-απόθεση (Dissolution – Precipitation)
- 3) Ενδοκρυσταλλική Παραμόρφωση (Intracrystalline Deformation)
- 4) Ανάπτυξη Διδυμιών & Λοξοζωνικών Κάμψεων (Twinning & Kinking)
- 5) Ανάκτηση ή Ανάπλαση (Recovery)
- 6) Ανακρυστάλλωση (Recrystallisation)
- 7) Διάχυση σε Στερεά Κατάσταση από Ολισθήσεις Πλέγματος (Solid-State Diffusion Creep), Κρυσταλλική Ροή (Granular Flow) και Υπερπλαστικότητα (Superplasticity).
- 8) Μείωση Ορίων Κρυστάλλων (Grain Boundary Area Reduction – GBAR)
- 9) Στατική Ανακρυστάλλωση (Static Recrystallisation)



# 1. Θραυσιγενής Διάρρηξη - Κατάκλαση (Brittle Fracturing - Cataclasis)

**ΔΙΑΡΡΗΞΕΙΣ (FRACTURES):**

- Ρωγμές (Cracks)
- Διακλάσεις (Joints)  
(>>> cracks)
- Ρήγματα (Faults)

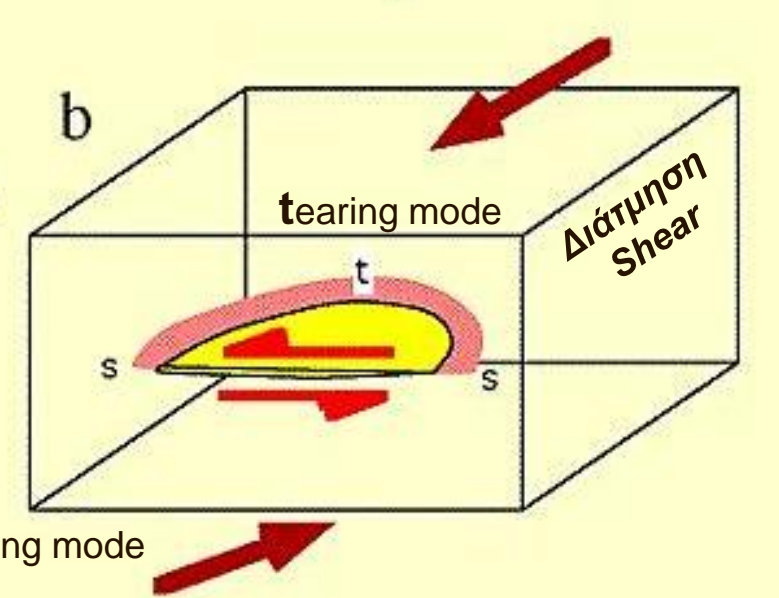
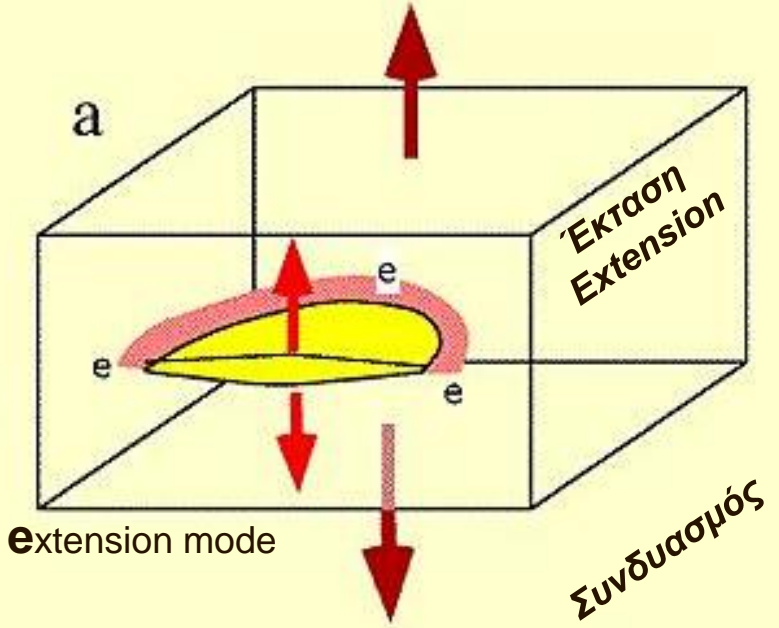


**ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ:**

- Μικρορωγμές (Microcracks)  
(// κρ. πλέγμα, εγκλείσματα, όρια κρυστάλλων)
- Μικροδιαρρήξεις (Microfractures)  
(+ συνιστώσα διάτμησης)

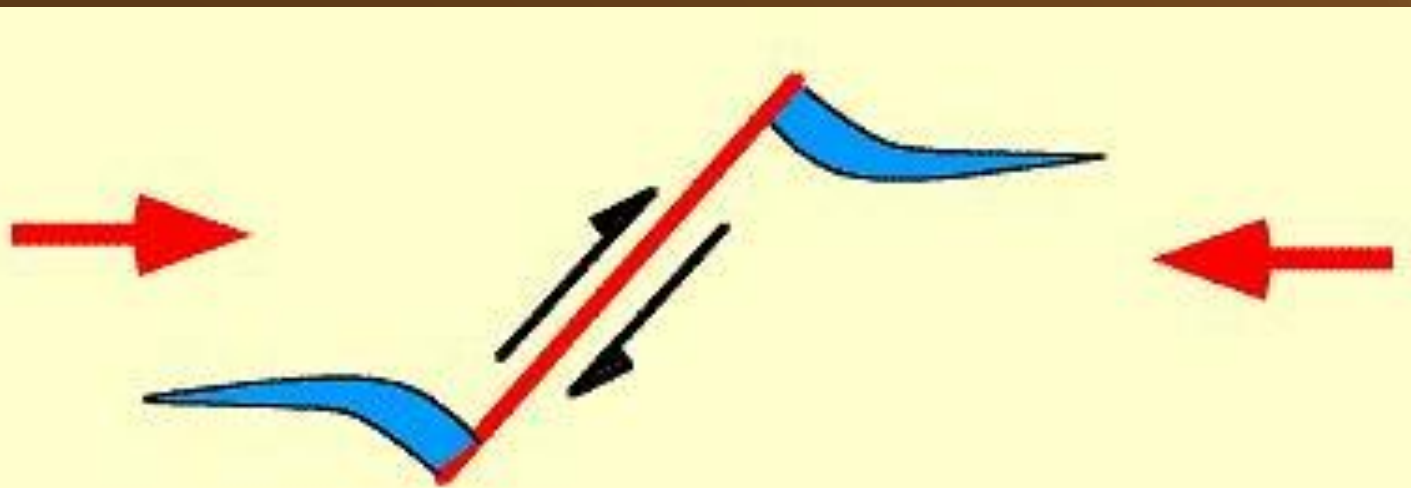
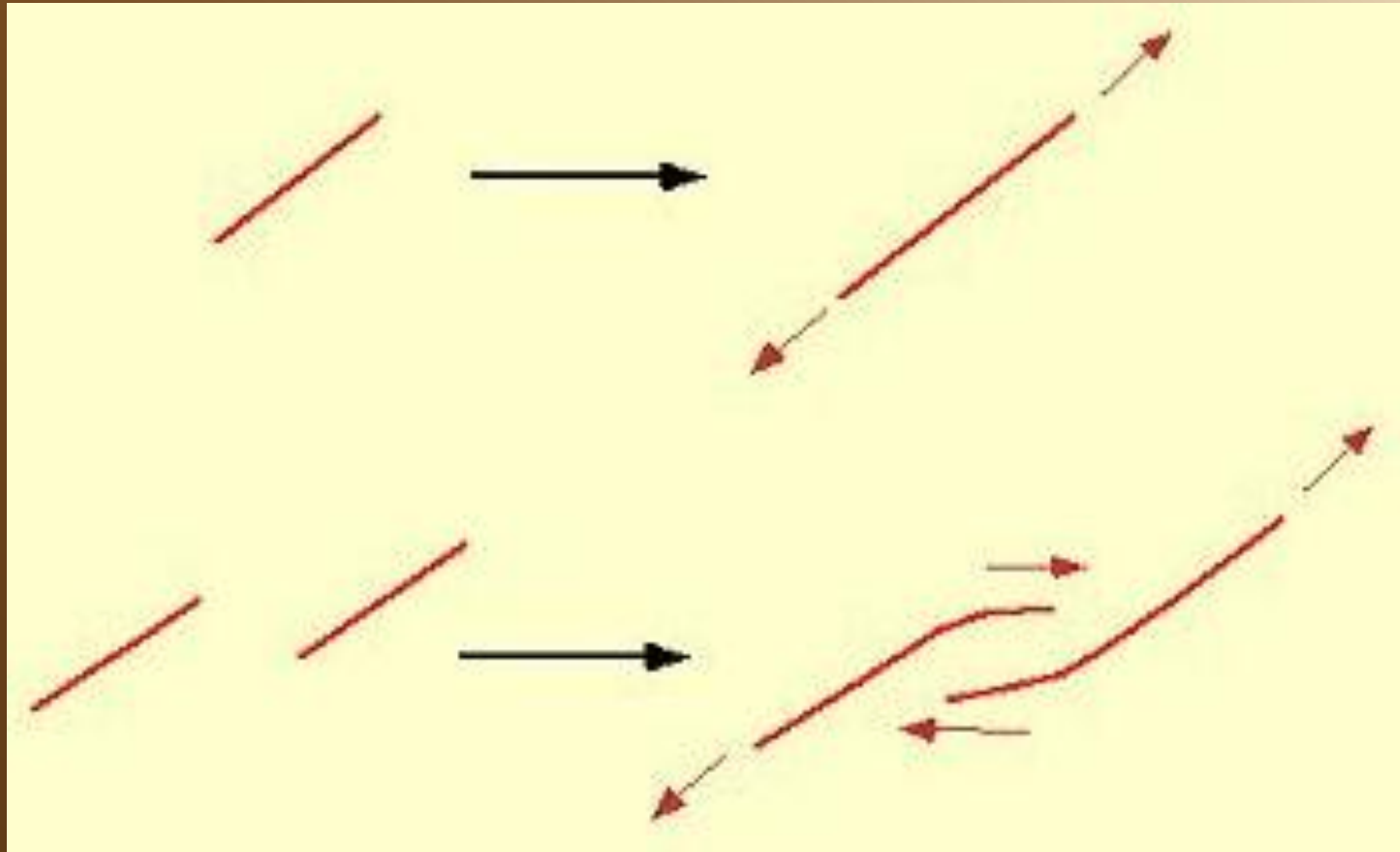


**FAULT (Brittle Fault Rock)**

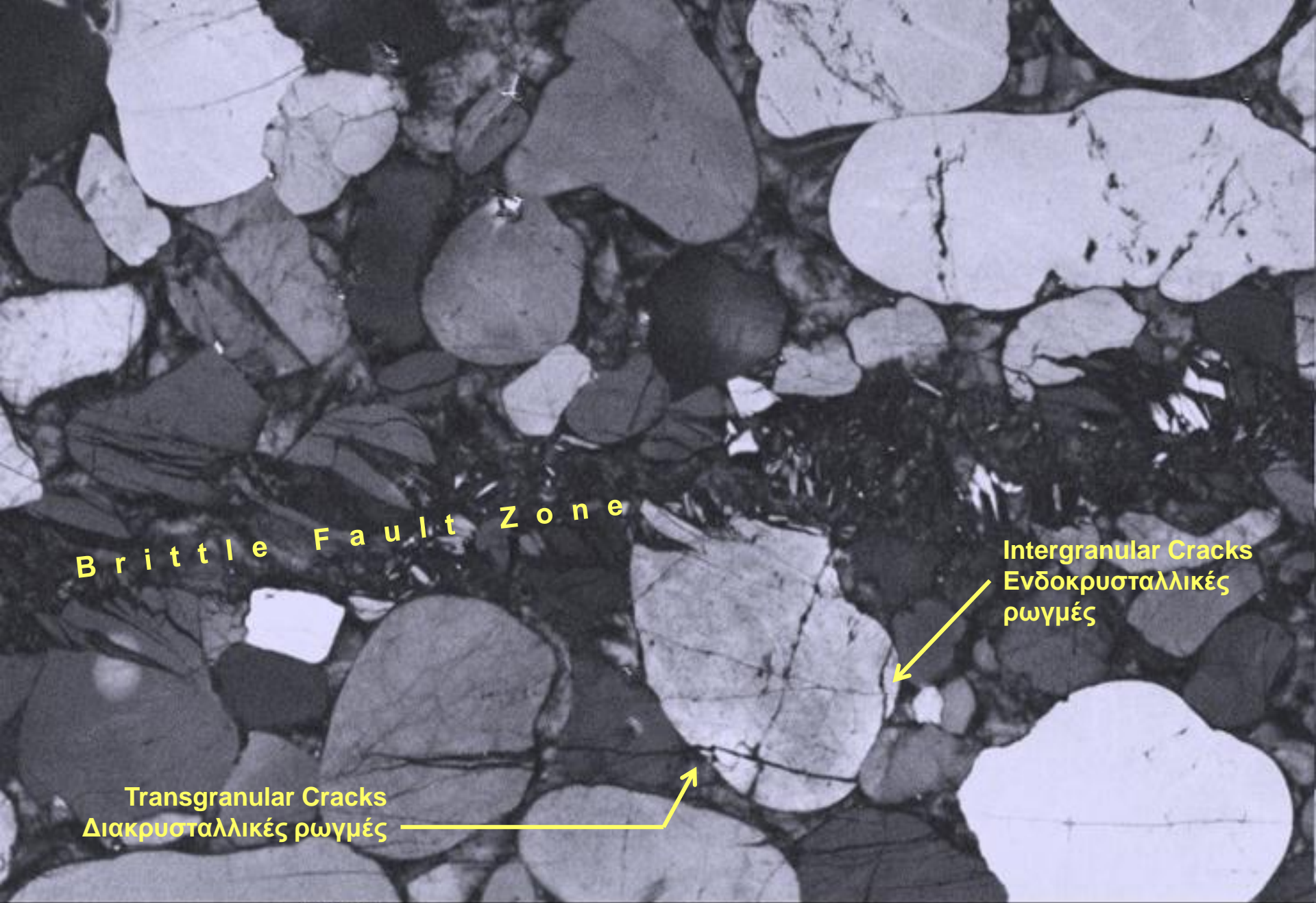


Οι απομονωμένες  
ρωγμές επεκτείνονται  
προς όλες τις  
διευθύνσεις.

Όταν γειτνιάζουν και  
επικαλύπτονται  
αλληλεπιδρούν και τα  
άκρα τους  
κάμπτονται.



Οι διατμητικές  
ρωγμές όταν  
σταματούν να  
επεκτείνονται,  
αποκτούν, στα άκρα  
τους φτερά (wings).



**B r i t t l e F a u l t Z o n e**

**Intergranular Cracks**  
Ενδοκρυσταλλικές  
ρωγμές

**Transgranular Cracks**  
Διακρυσταλλικές ρωγμές

Mag = 200 X

100µm  
|-----|

WD = 15 mm

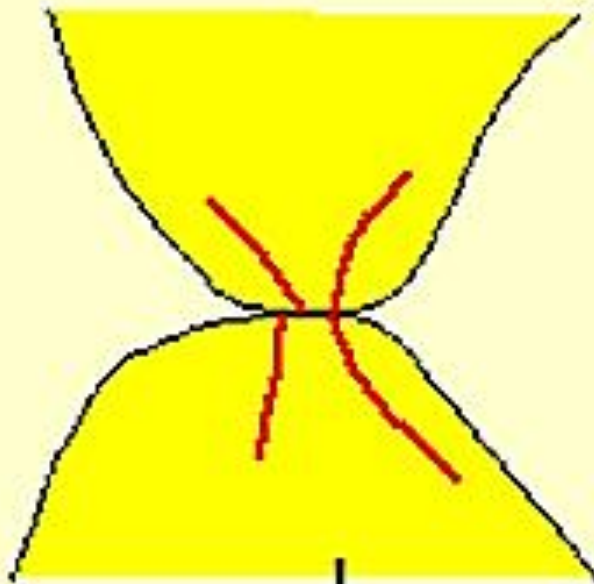
EHT = 29.86 kV

Signal A = KL



**ΣΥΝΕΧΗ ΜΕΣΑ:**

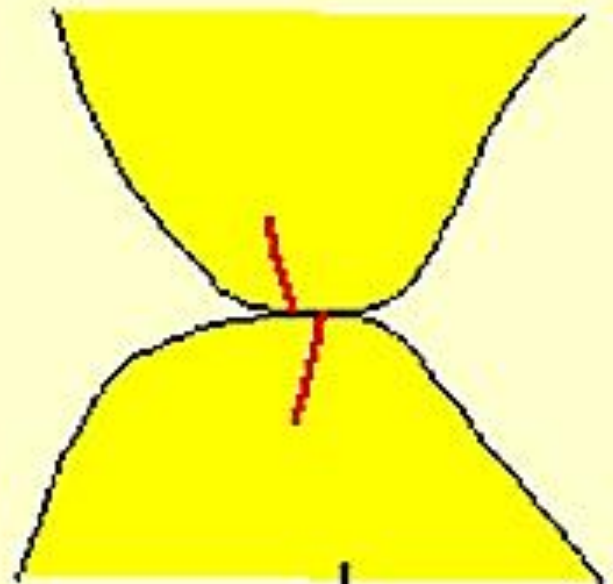
- Εσωτερικά στους κρυστάλλους.
- Μη πορώδη πολυκρυσταλλικά πετρώματα.



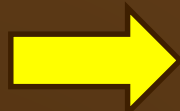
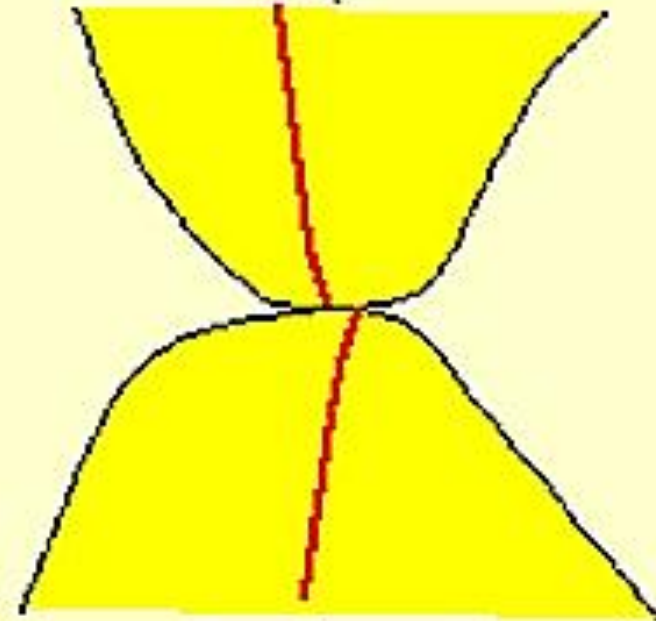
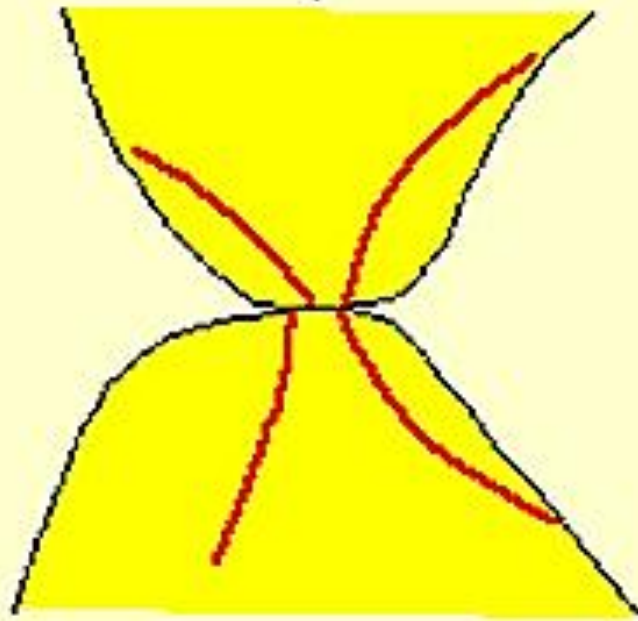
Hertzian



Ανάπτυξη μικρορωγμών  
στα πορώδη πετρώματα.



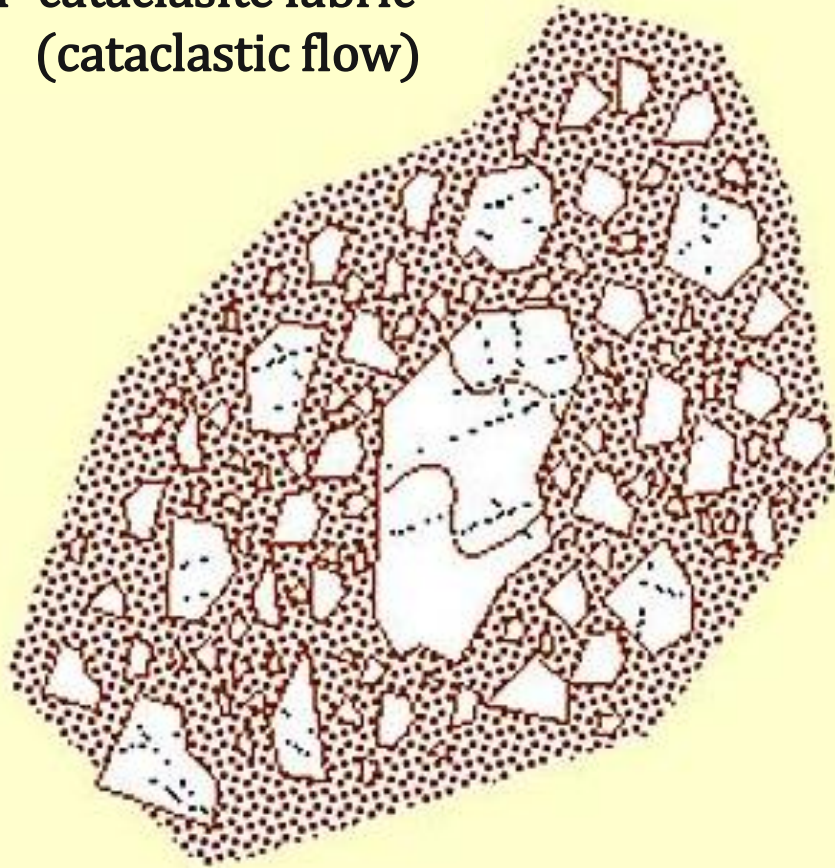
diagonal



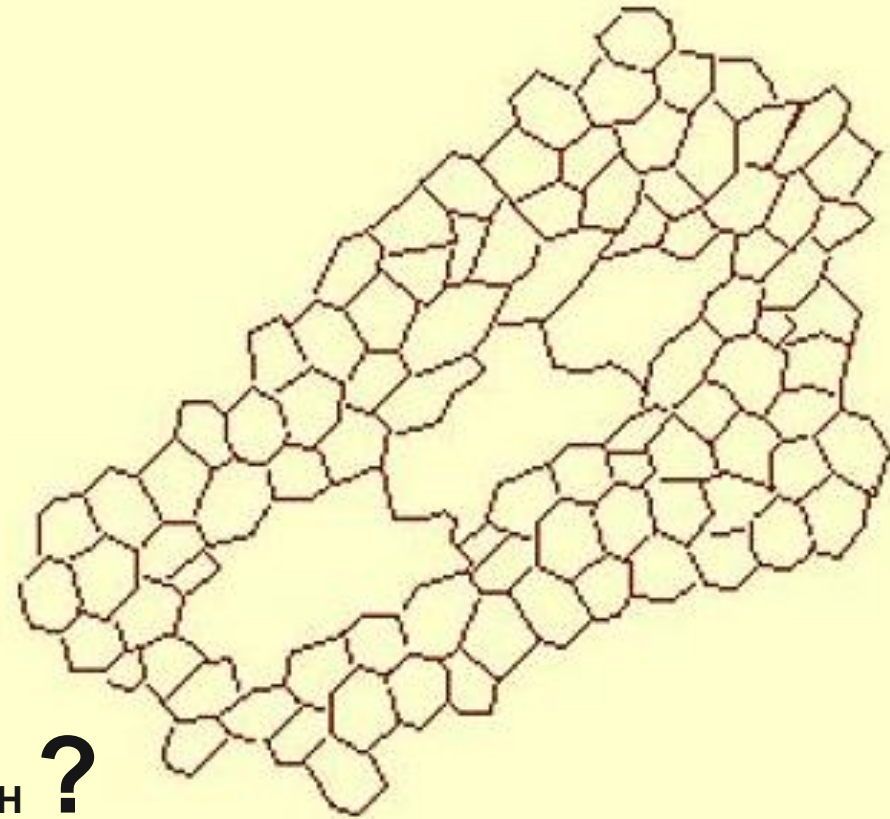
**ΠΟΡΩΔΗ  
ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ:**



a- cataclasite fabric  
(cataclastic flow)



b- recrystallised fabric



ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΗ ΡΟΗ + ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ

?

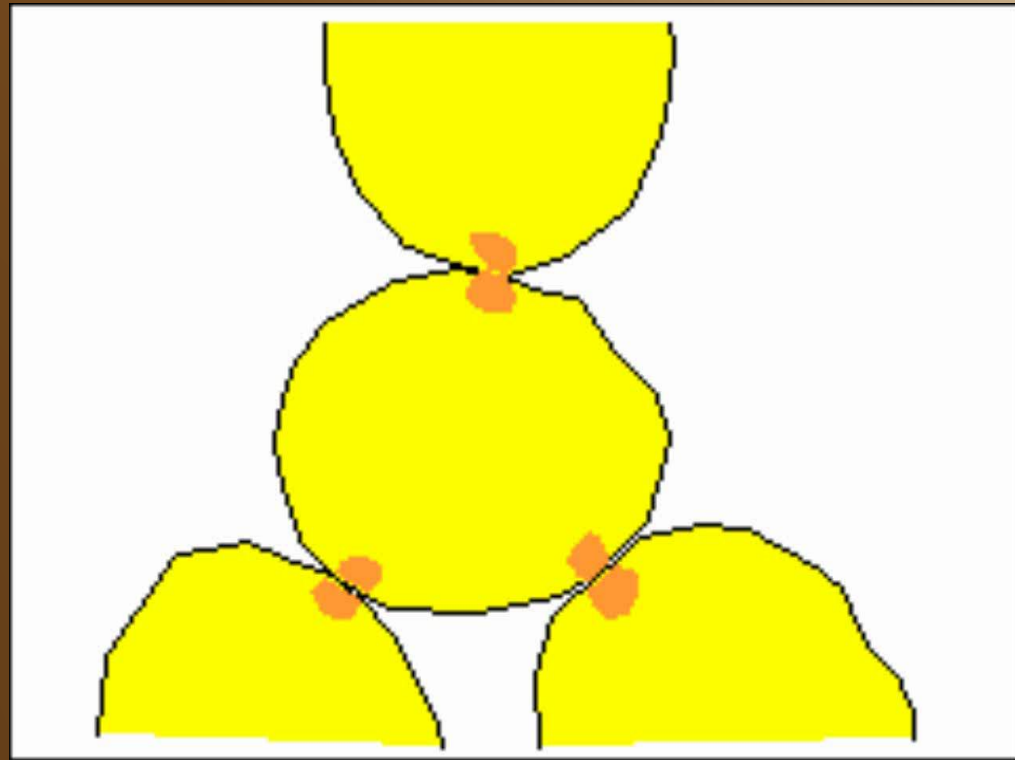
- Μηχανικός θρυμματισμός (ορυκτών ή αθροισμάτων ορυκτών) με ολισθήσεις και περιστροφές των θραυσμάτων.
- Συνθήκες μη-μεταμόρφωσης ή χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης και υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης.
- Παράγοντες: i) ορυκτολογική σύσταση και ii) πίεση των ρευστών των πόρων.

#### ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΚΛΑΣΤΙΚΗ ΡΟΗ

- Μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο μέγεθος των κόκκων.
- Κόκκοι με γωνιώδες περίγραμμα και ευθύγραμμα και οξύληκτα όρια.
- Πολυκρυσταλλικά θραύσματα (εξαίρεση παραμορφ. ψαμμίτες, κροκαλοπαγή κλπ.).
- Χωρίς προτιμητέο προσανατολισμό.

## 2. Διαλυτοποίηση – Επανα-απόθεση (ή Καθίζηση?) (Dissolution – Precipitation)

- Πετρώματα με **ρευστά των πόρων** (pore fluid ή intergranular fluid). **Αύξηση της διαλυτότητας** όταν το **κρυσταλλικό πλέγμα** βρίσκεται **υπό πίεση** (**pressure solution – διάλυση υπό πίεση**).
- Τοπική **διάλυση** στα **όρια** που είναι **εγκάρσια στη βράχυνση** (shortening), δηλ. >>> **υψηλές διαφορικές τάσεις**.
- Επανατοποθέτηση του υλικού στις περιοχές με <<< **διαφορικές τάσεις** (**μηχανισμός solution transfer**).
- **Αλλαγή σχήματος κόκκων χωρίς εσωτερική παραμόρφωση**.
- Κυρίαρχος μηχανισμός στη **διαγένεση** και σε πετρώματα **χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης**, όπου υπάρχουν **άφθονα ρευστά**.
- Συχνή εμφάνιση στον **πτυχοσχισμό** (crenulation cleavage).



stress  
concentration



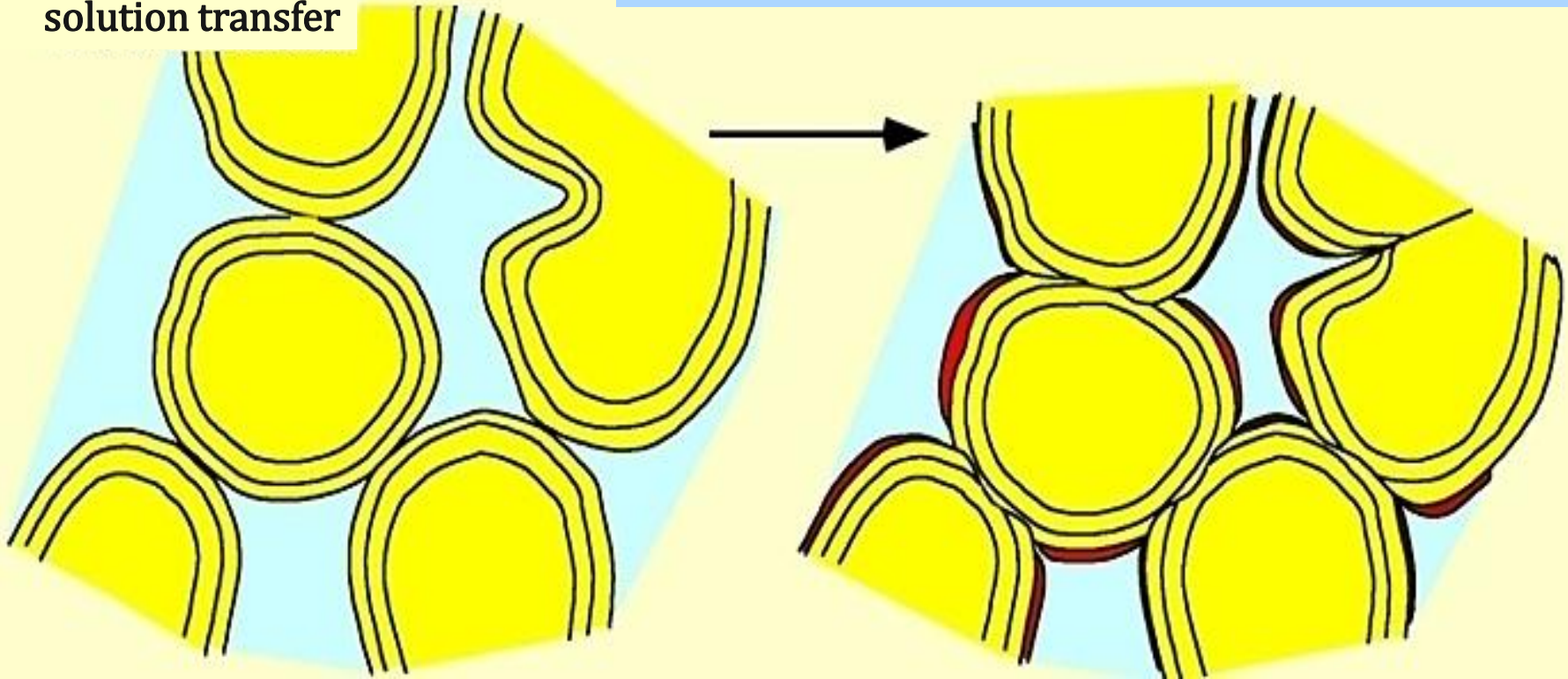
### ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΔΙΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ

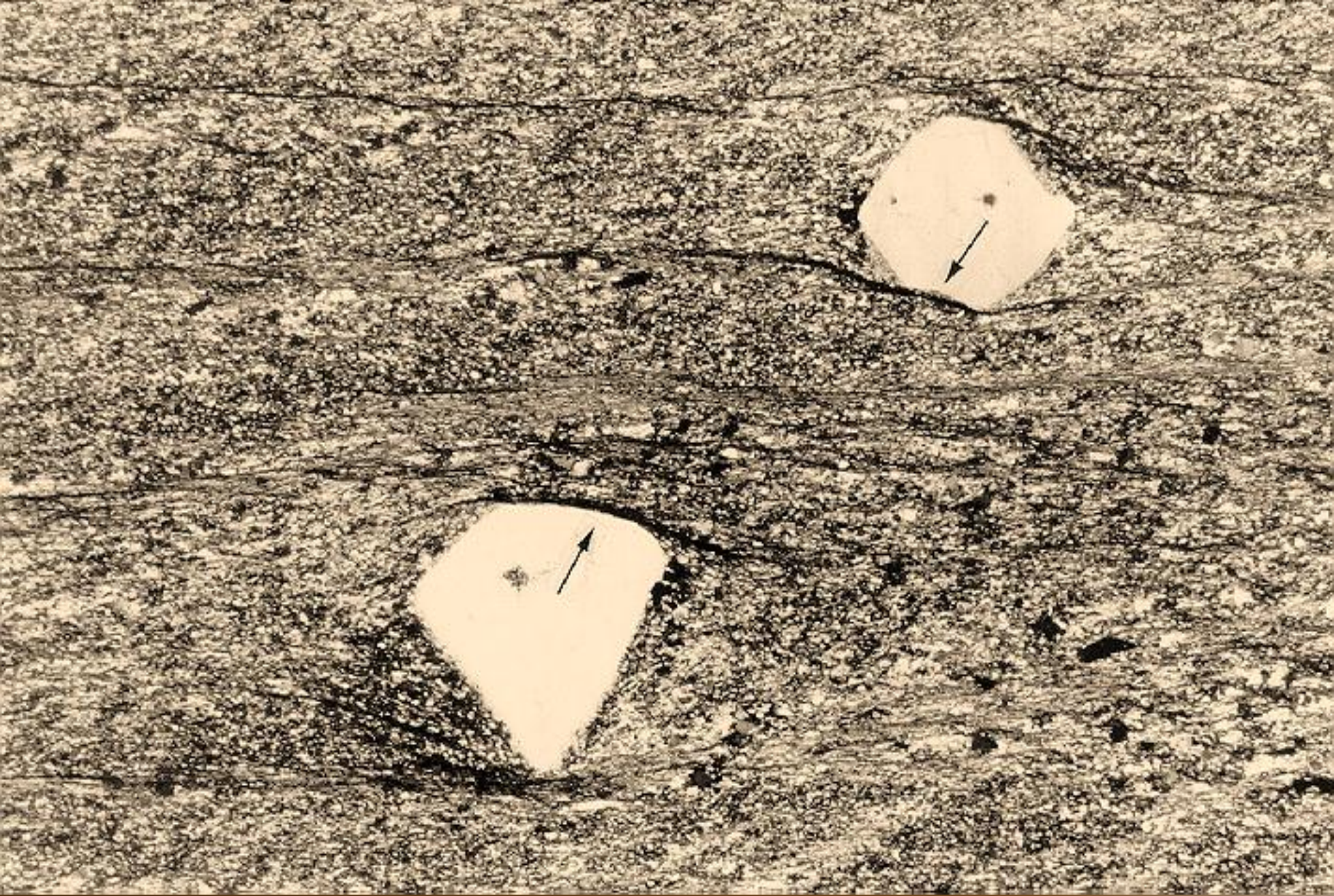
- **Ελλειψοειδή ή κόλoura** αντικείμενα (απολιθώματα, κλαστικό υλικό, κροκάλες, ιδιόμορφοι φαινοκρύσταλλοι) και **παραμόρφωση** (μετακίνηση) της **στρωμάτωσης**.
- Οδοντωτές επιφάνειες – **Στυλόλιθοι (Styrolites)**. Παρουσία αδιαφανούς και micaceous material.

### ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΑΠΟΘΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΣΗΣ

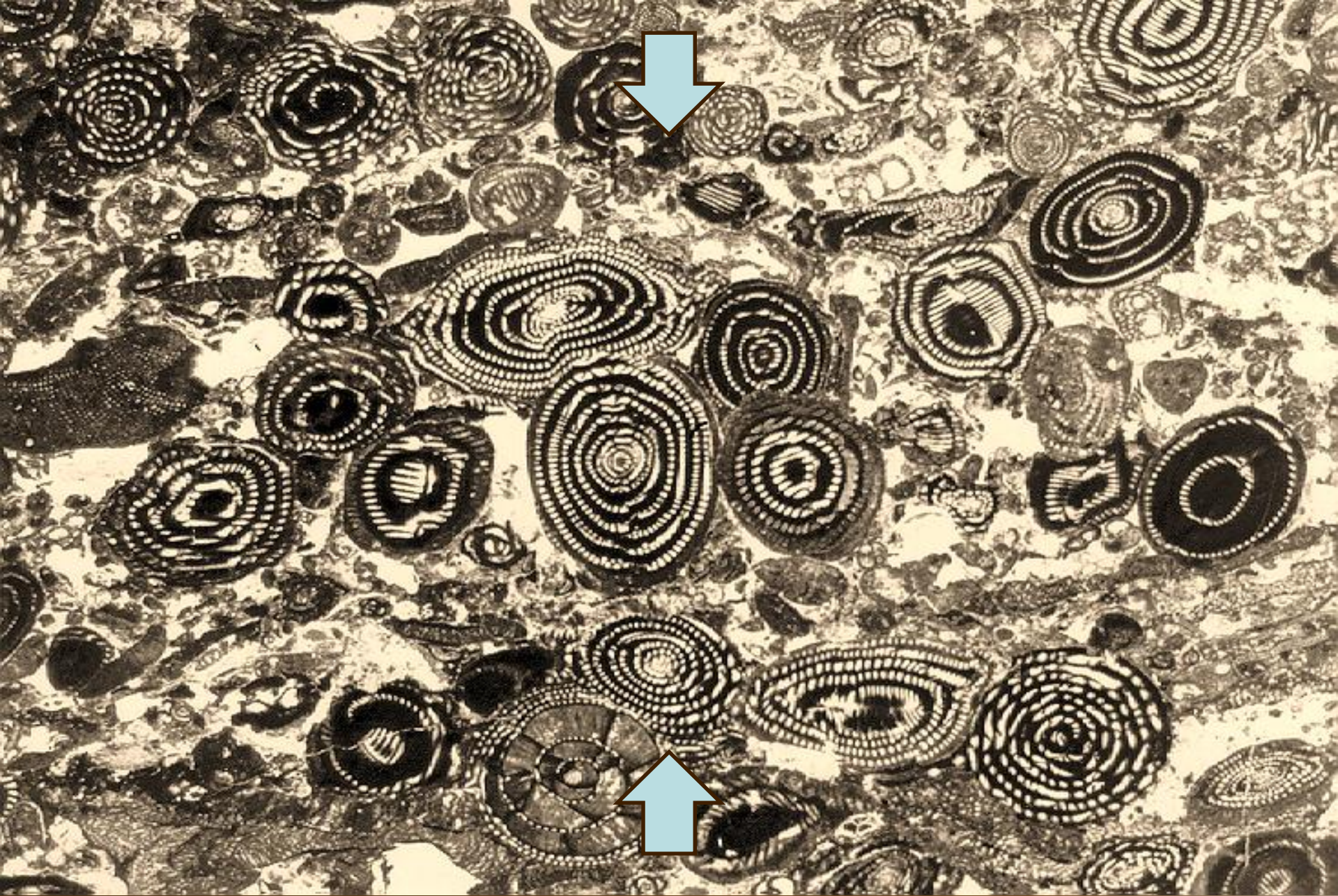
- Νέα ορυκτά **χωρίς ενδοκρυσταλλική παραμόρφωση** με καλό κρυσταλλογραφικό προσδιορισμό των εδρών και διδυμίες.
- Πλήρωση **fibrous veins** (ινώδεις φλέβες).
- **Pressure shadows** (πιεζοσκιές).

pressure solution/  
solution transfer





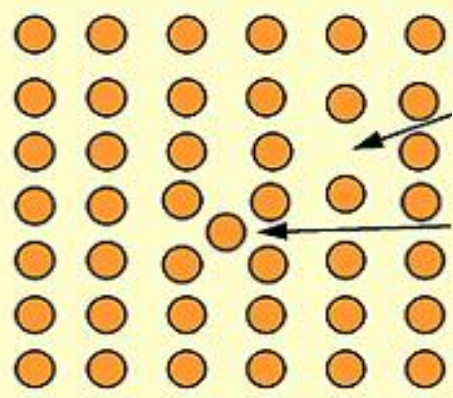
Διάλυση υπό πίεση σε ιδιόμορφους κρυστάλλους χαλαζία (ιγκνιμβρίτης). Οι σκουρόχρωμες λεπτές ζώνες αποτελούνται από αδιάλυτο υλικό που συγκεντρώθηκε από τη διάλυση υπό πίεση.



Ασβεστόλιθοι με Alveolina που έχουν υποστεί διάλυση υπό πίεση (και ελάχιστη πλαστική παραμόρφωση) κατά τη διάρκεια της διαγένεσης και της επακόλουθης εγκάρσιας βράχυνσης (shortening, βέλη).

# 3. Ενδοκρυσταλλική Παραμόρφωση (Intracrystalline Deformation)

δηλ. ... μετακίνηση ατελειών του πλέγματος (lattice defects) ή εκτοπίσεις (dislocations), ΧΩΡΙΣ ΘΡΑΥΣΗ

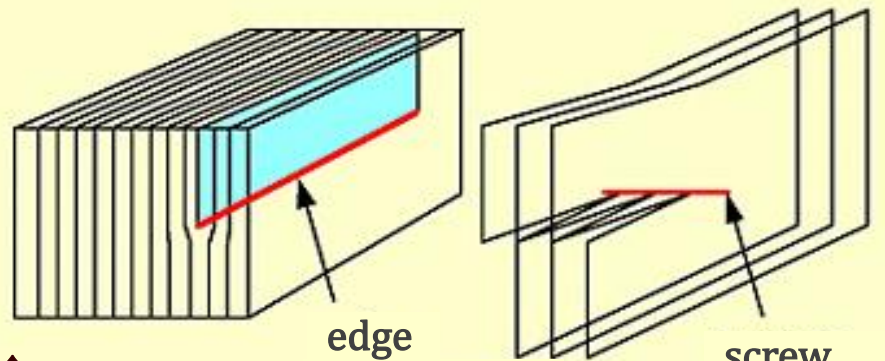


**Point defects dislocations:**

Vacancy (τύπου "Κενής θέσης")

Interstitial (τύπου "Ενδιάμεσης τοποθέτησης")

**Line defects dislocations:**

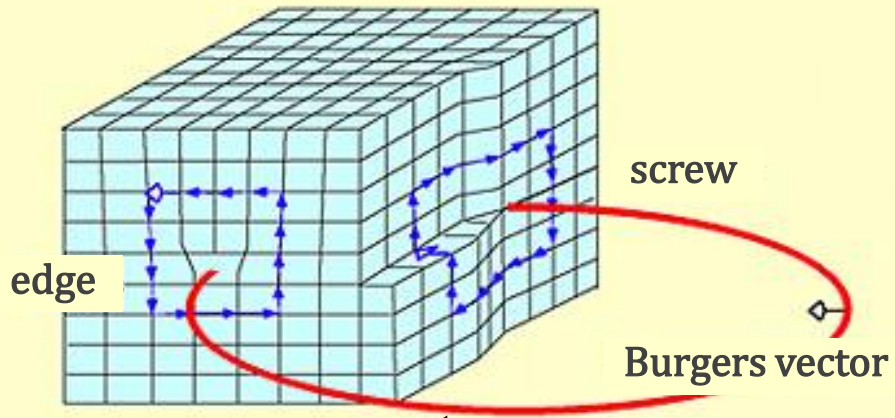


↑ Παρεμβολή μισού επιπέδου στο πλέγμα.

edge dislocation (εκτοπίσεις τύπου "παρεμβολής επιπέδου"?)

screw dislocation (εκτοπίσεις τύπου "περιστροφικής μετάθεσης γραμμής"?)

**Ανυσμα Burger (Burgers vector)**  
Δείχνει τη διεύθυνση και τη min μετακίνηση του πλέγματος λόγω της εκτόπισης.

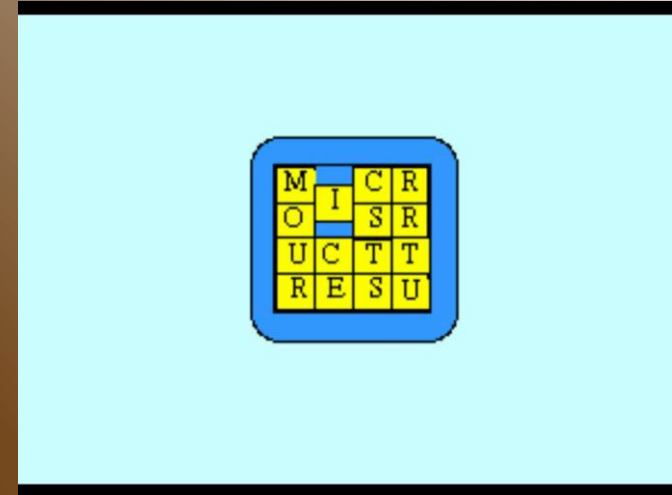
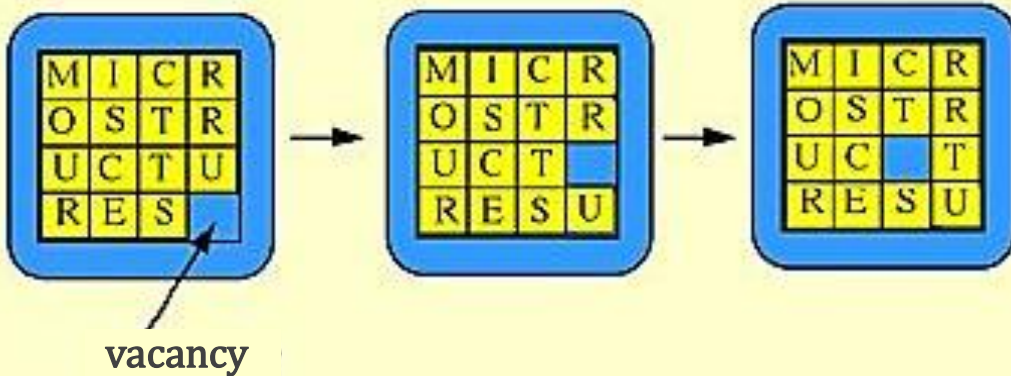


← Τμήμα του πλέγματος περιστρέφεται.

**Βρόχος εκτοπίσεων (Dislocation loop)**  
Από διασύνδεση edge & screw dislocations

Οι εκτοπίσεις γίνονται ορατές στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (TEM) ή με χρήση άλλων τεχνικών.

# Το πρότυπο μετακίνησης μιας εκτόπισης τύπου "κενής θέσης" (vacancy)



## Οργάνωση των εκτοπίσεων (dislocations)

Lattice-preferred orientation (LPO)

Οι **εκτοπίσεις (dislocations)** έχουν **συγκεκριμένο προσανατολισμό** μέσα στο πλέγμα και η ολίσθησή τους (**dislocation glide**) γίνεται μόνο σε συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα και διευθύνσεις, γνωστά σαν **συστήματα ολίσθησης πλέγματος (slip systems)**.

Μπορεί να είναι ενεργά slip systems με **διαφορετικές διευθύνσεις** και αυτό εξαρτάται από τις **συνθήκες μεταμόρφωσης** και **παραμόρφωσης** και πιο συγκεκριμένα από:

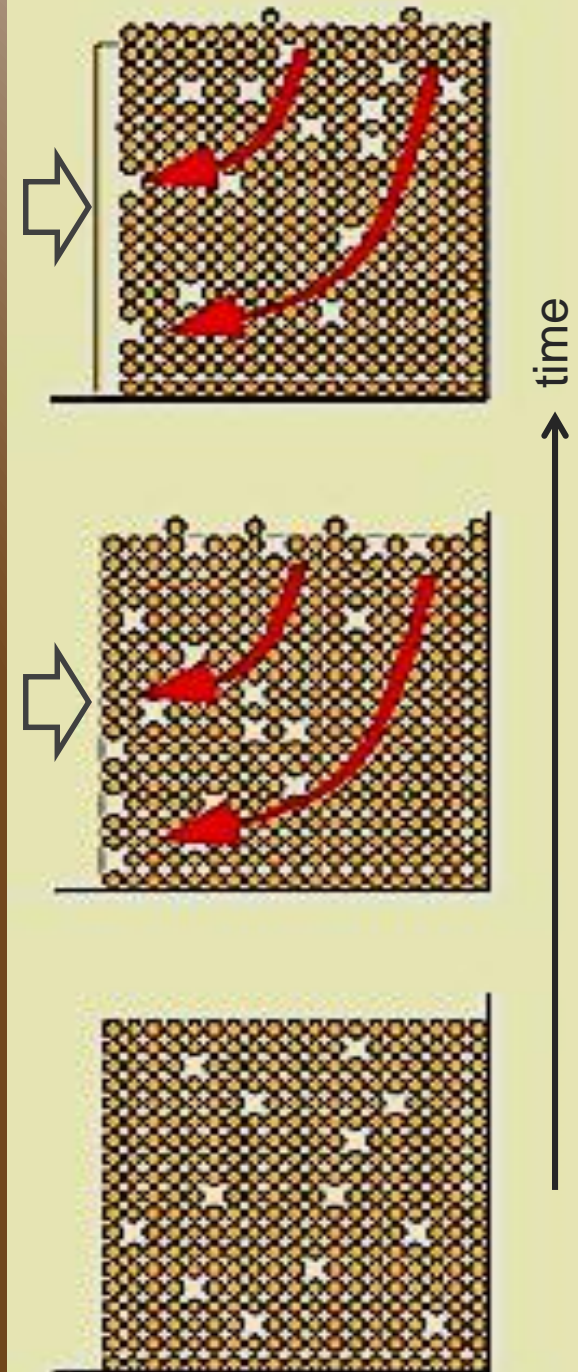
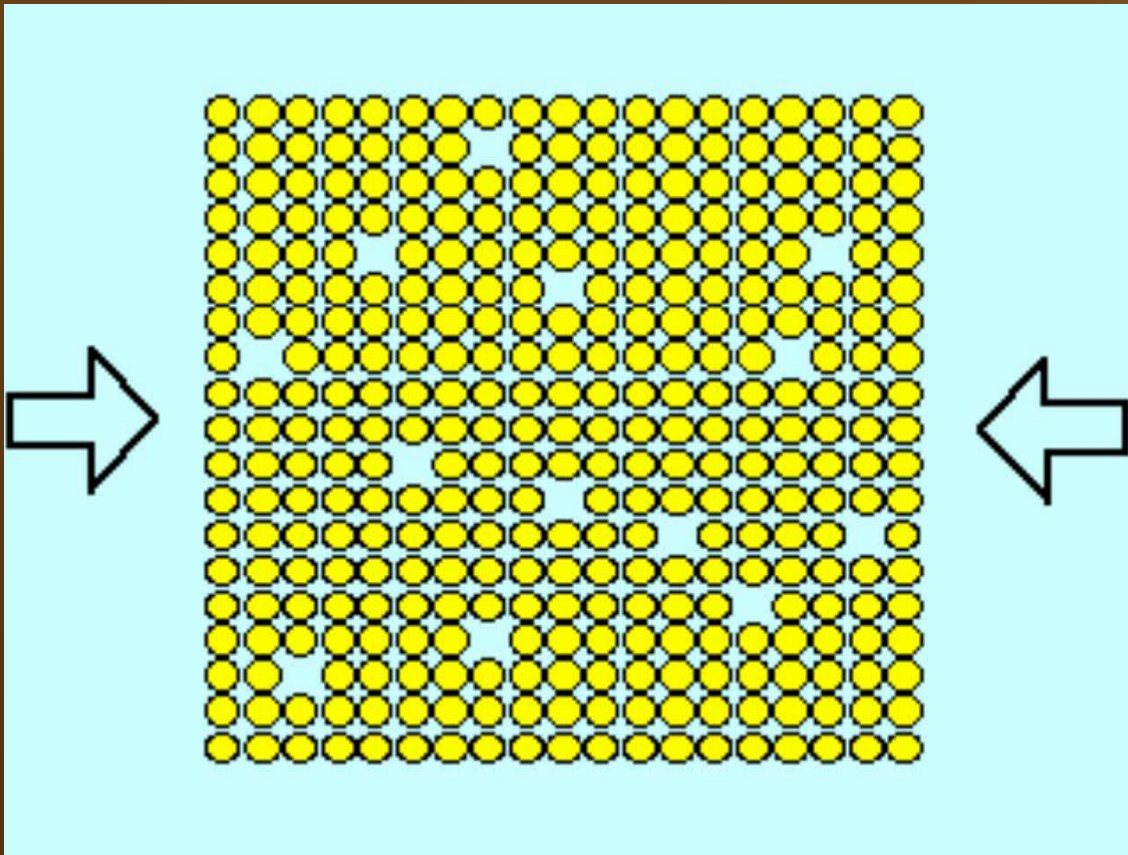
- τον **προσανατολισμό** και την **ένταση** του **εντατικού πεδίου** σε επίπεδο κρυστάλλου και
- την κρίσιμη τιμή της **διατμητικής τάσης**, που με τη σειρά της εξαρτάται κυρίως από:

- την **T** κυρίως και λιγότερο από
- τον **ρυθμό της παραμόρφωσης (strain rate)**,
- τις **διαφορετικές τάσεις** και
- τη **χημική δράση** των συστατικών.

... διατεμνόμενα slip systems, κράτυνση (strain hardening) και dislocation creep

# ΑΛΛΑΓΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ

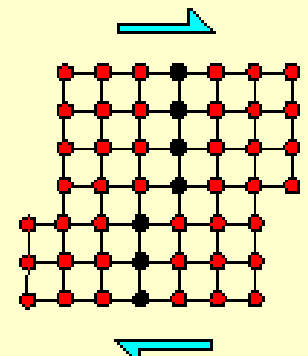
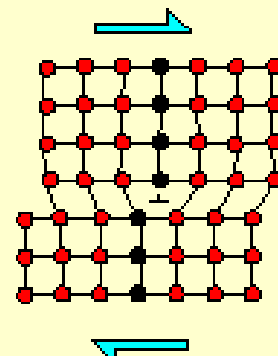
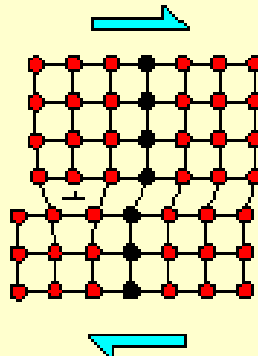
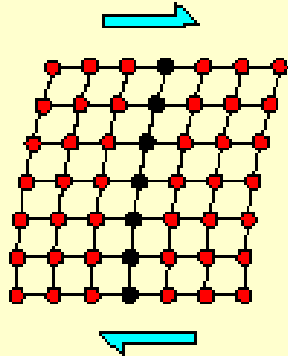
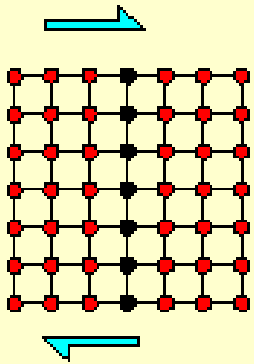
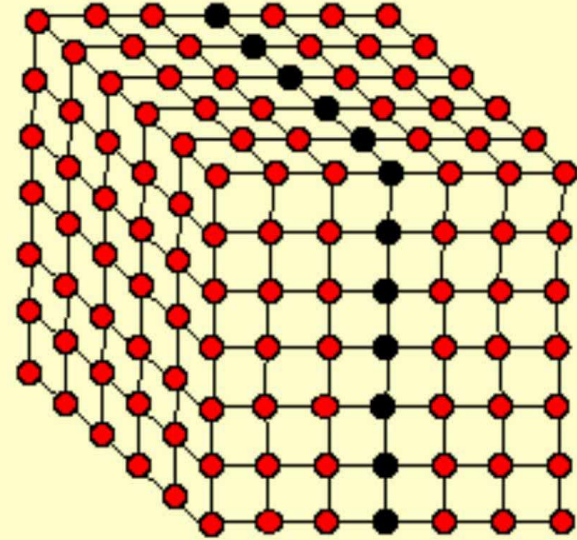
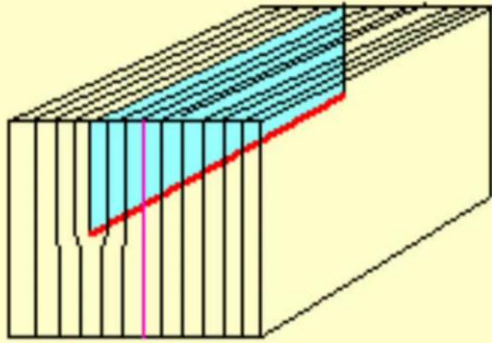
Βράχυνση (shortening) ενός κρυστάλλου λόγω μετακίνησης των εκτοπίσεων (τύπου "κενής θέσης" – vacancies).





# ΑΛΛΑΓΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ

## Μετακίνηση edge dislocations

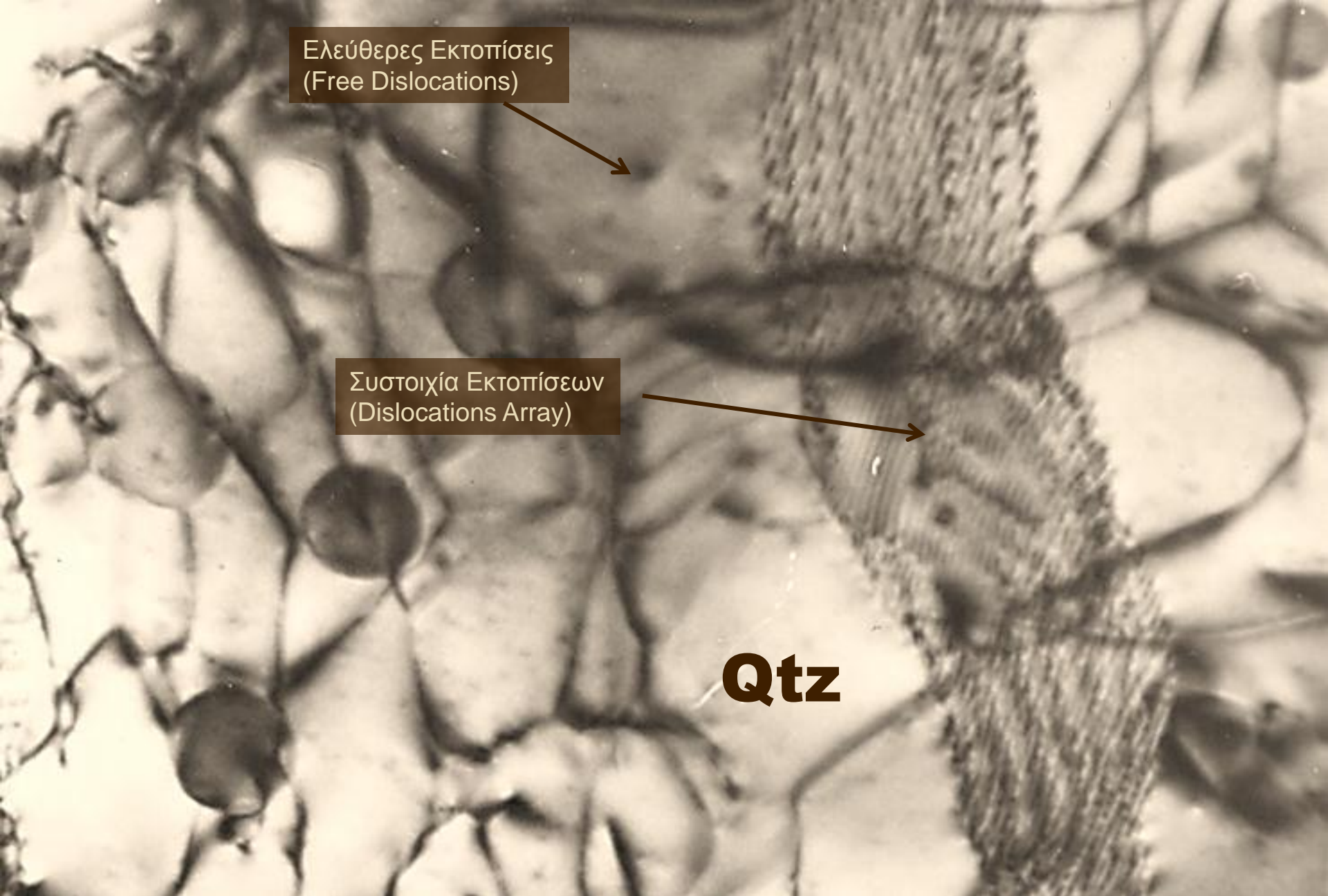


elastic deformation

introduction of dislocation

migration of dislocation

crystal shape has changed without mechanical fracturing or loss of crystal structure

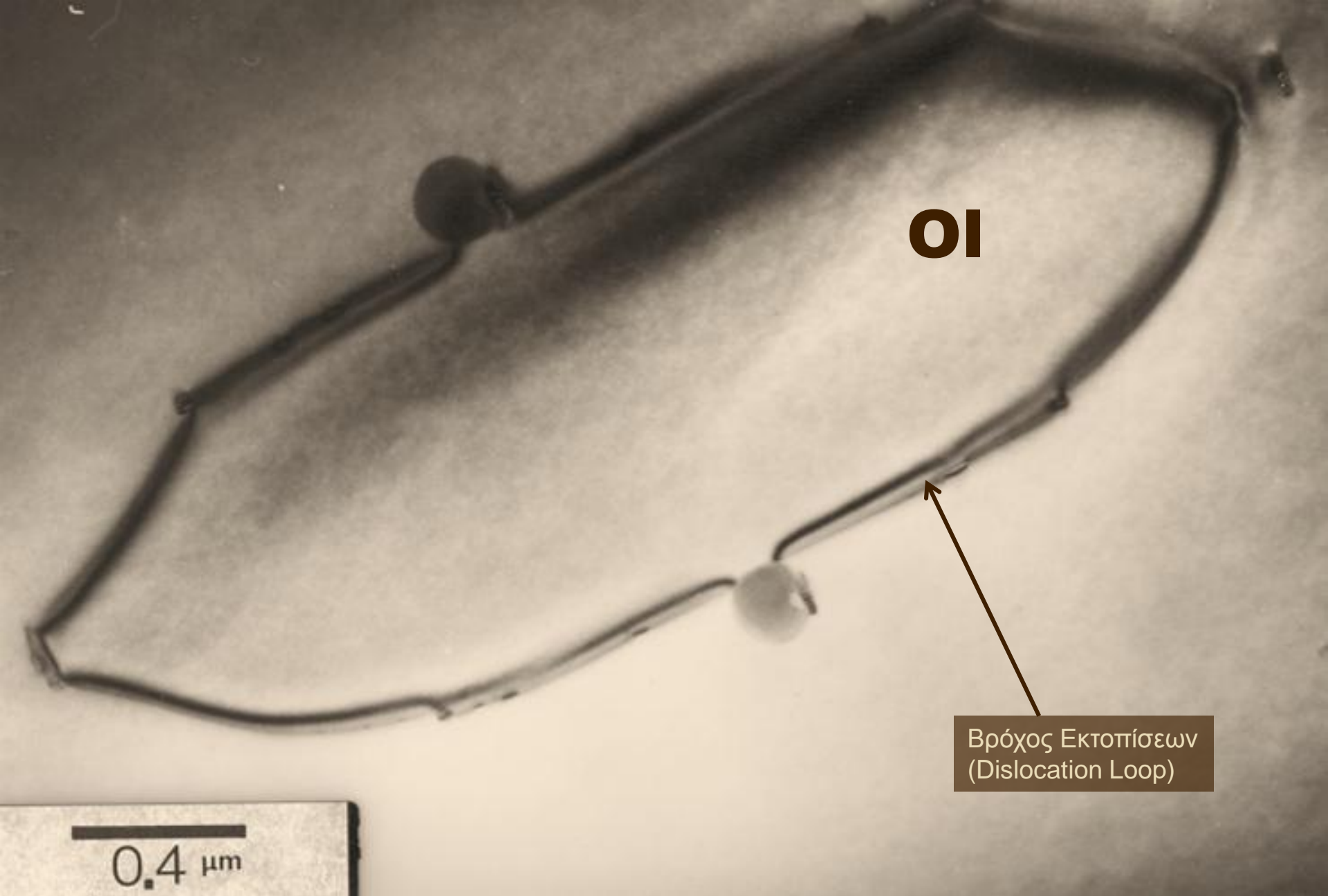


Ελεύθερες Εκτοπίσεις  
(Free Dislocations)

Συστοιχία Εκτοπίσεων  
(Dislocations Array)

**Qtz**

Εικόνα όπου διακρίνεται το πώς φαίνονται στο TEM οι μεμονωμένες ελεύθερες εκτοπίσεις και οι συστοιχίες εκτοπίσεων, που προϋποθέτουν άλλους μηχανισμούς (ανάκτηση – recovery).



**Ol**

Βρόχος Εκτοπίσεων  
(Dislocation Loop)

0.4  $\mu\text{m}$

Εικόνα από TEM. Τυπική μορφή βρόχου εκτοπίσεων (dislocation loop) σε ολιβίνη (Ol).

## ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΕΝΔΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

**Μεμονωμένα dislocations** δεν μπορούν να προσδιορισθούν στο μικροσκόπιο (μόνο στο TEM).

Προσδιορίζονται όμως τα αποτελέσματα ενός **αριθμού ομοειδών dislocations**, που δημιουργούν δομές όπως:

- **Κυματοειδής κατάσβεση (undulose extinction)**,
- **Microkinks** (Qtz, Fsp),
- **Ελασματοειδής παραμόρφωση (deformation lamellae)**,
- **Προτιμητέος προσανατολισμός σε επίπεδο πλέγματος (lattice-preferred orientation – LPO)**.

Αντιπροσωπεύουν μηχανισμούς σε συνθήκες **χαμηλών θερμοκρασιών**, δεδομένου ότι με την **άνοδο** της **θερμοκρασίας** επικρατούν οι μηχανισμοί της **ανακρυστάλλωσης** και **ανάκτησης**.

Κυματοειδής Κατάσβεση – Undulose Extinction



Ελασματοειδής Παραμόρφωση – Deformation Lamellae



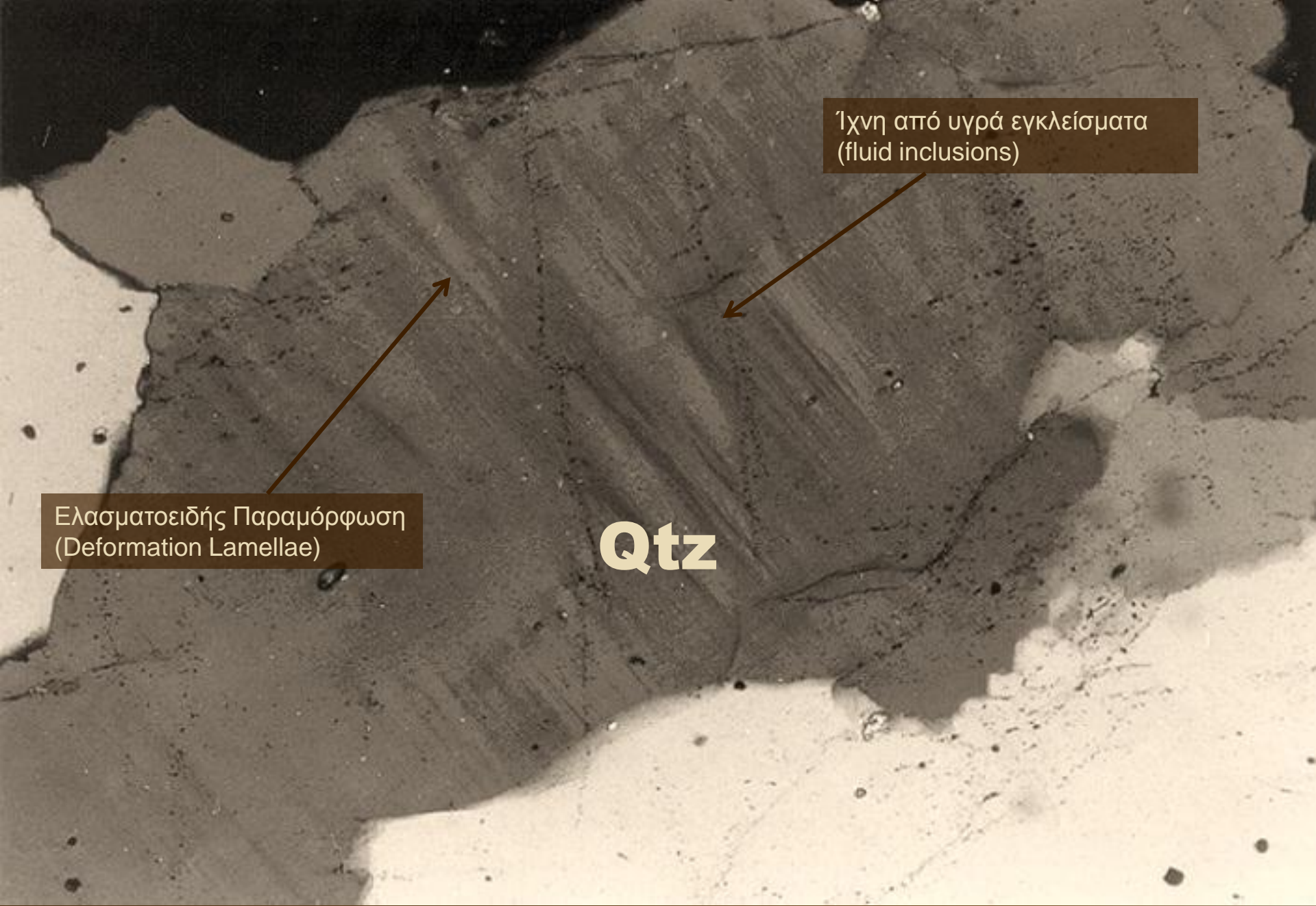
Κυματοιδής Κατάσβεση  
(Undulose Extinction)

Qtz

Ελασματοειδής Παραμόρφωση  
(Deformation Lamellae)

Ακανόνιστα όρια κρυστάλλων λόγω  
μηχανισμού Grain Boundary Migration

Κυματοιδής κατάσβεση (undulose extinction) σε χαλαζία.



Ίχνη από υγρά εγκλείσματα  
(fluid inclusions)

Ελασματοειδής Παραμόρφωση  
(Deformation Lamellae)

**Qtz**

Ελασματοειδής παραμόρφωση (deformation lamellae) σε κρυστάλλους χαλαζία.



Κυματοιδής Κατάσβεση  
(Undulose Extinction)

Boudinage

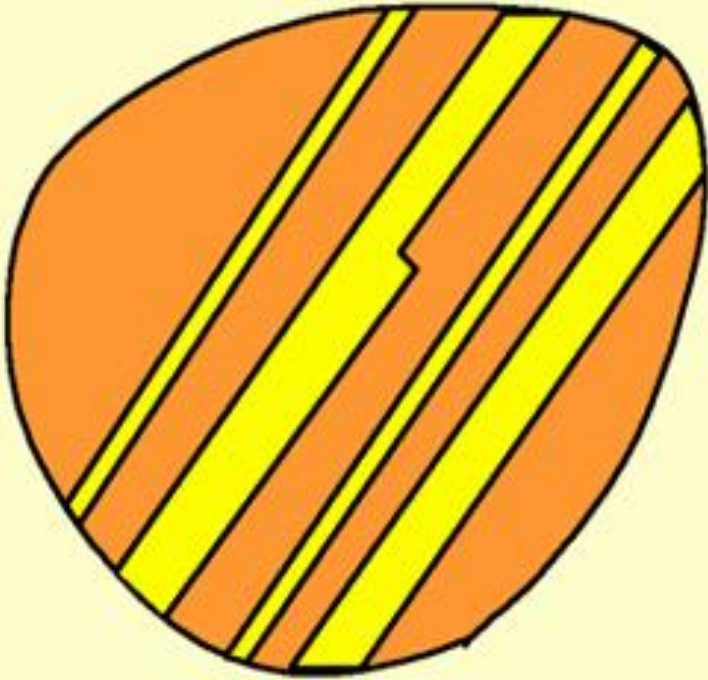
Qtz

Ελασματοειδής Παραμόρφωση  
(Deformation Lamellae)

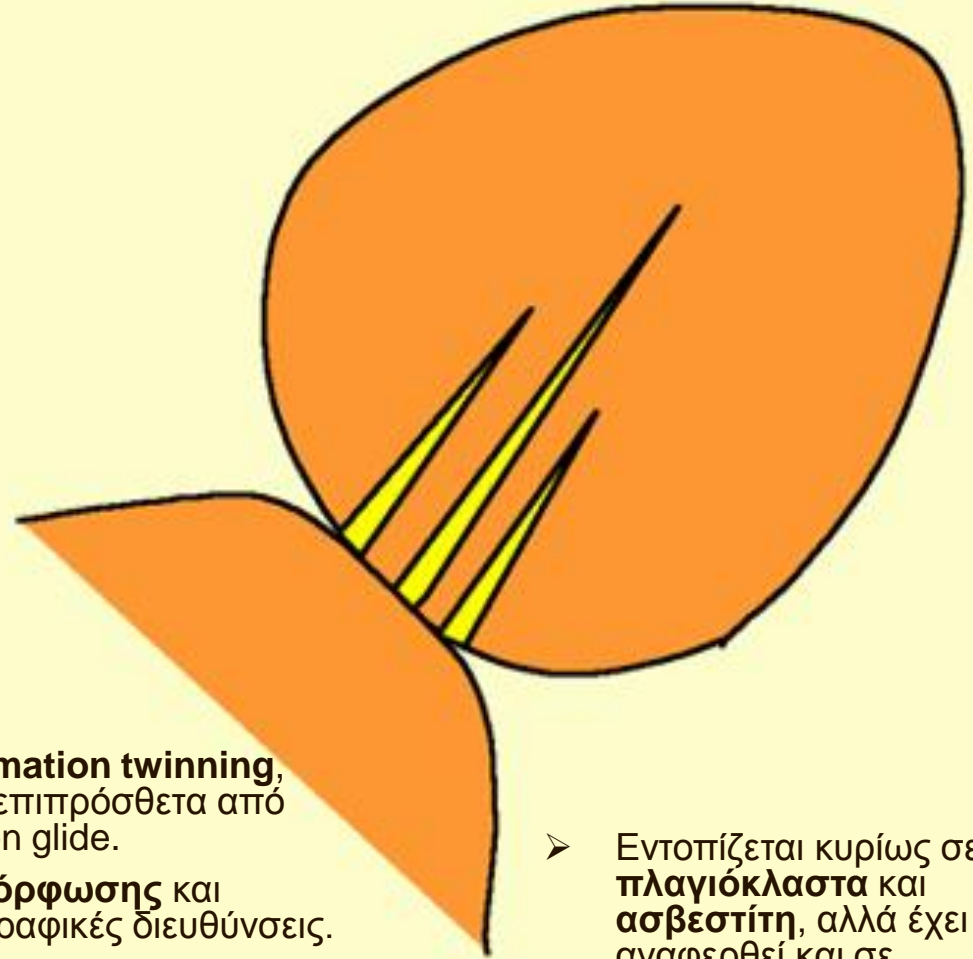
Κρύσταλλος χαλαζία (Qtz), που έχει πεπλατυνθεί (flattening) λόγω ενδοκρυσταλλικής παραμόρφωσης.

## 4. Διδυμίες & Λοξοζωνικές Κάμψεις (Twinning & Kinking)

Growth twins



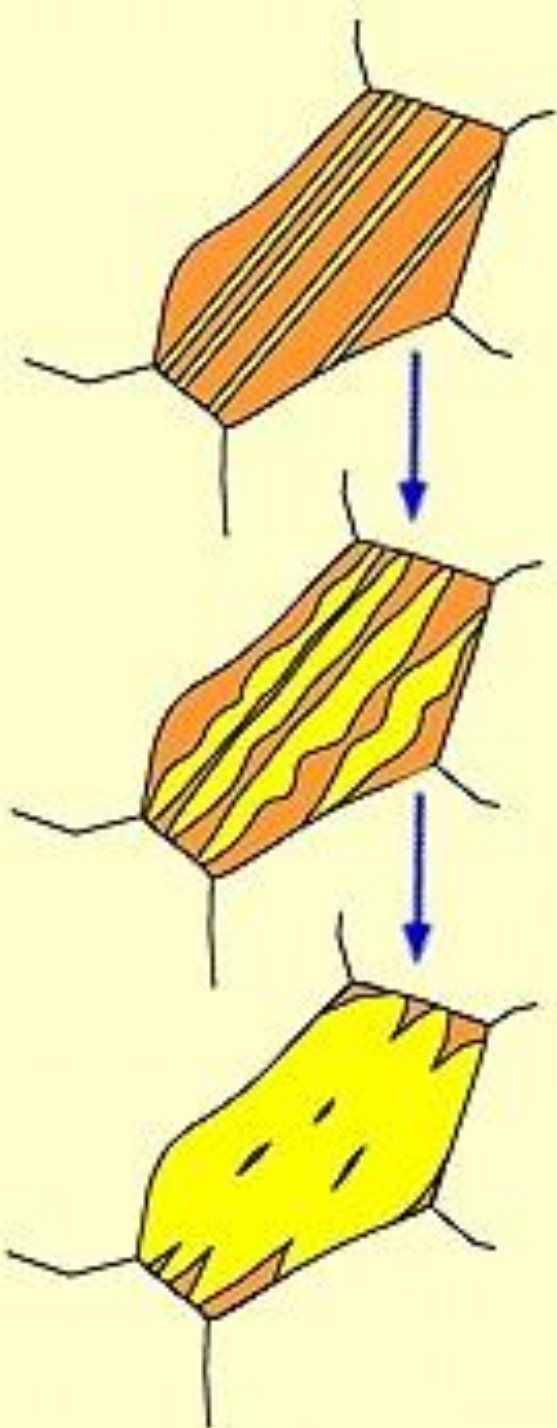
Deformation twins



- Ανάπτυξη διδυμιών από παραμόρφωση (**deformation twinning**, ή μηχανικές διδυμίες – **mechanical twinning**), επιπρόσθετα από τους μηχανισμούς dislocation creep & dislocation glide.
- Απορροφούν **περιορισμένο ποσοστό παραμόρφωσης** και δημιουργούνται σε **συγκεκριμένες** κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις.
- Για την απορρόφηση μεγαλύτερου ποσοστού παραμόρφωσης χρειάζονται επιπρόσθετα μηχανισμοί όπως pressure solution, dislocation creep, recrystallisation.
- Παρατηρείται σε συνθήκες **χαμηλών θερμοκρασιών** κατά την παραμόρφωση.

- Εντοπίζεται κυρίως σε **πλαγιόκλαστα** και **ασβεστίτη**, αλλά έχει αναφερθεί και σε άλλα ορυκτά, όπως ο δολομίτης, ο κυανίτης, ο μικροκλινής, ο βιοτίτης κλπ.





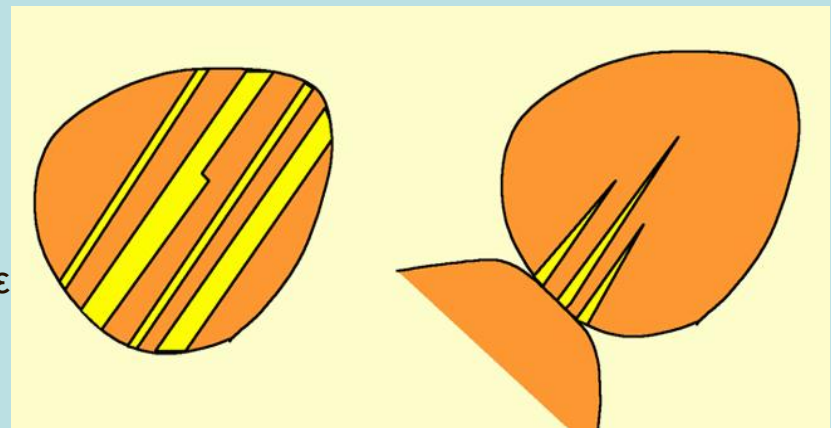
Σε **υψηλότερες θερμοκρασίες** τα **όρια** των διδυμιών μπορούν να **επεκταθούν** με προεξοχές (bulging) προς τα τμήματα του κρυστάλλου που δεν έχουν επηρεασθεί από διδυμίες.

Ο μηχανισμός αυτός, που καλείται **ανακρυστάλλωση από μετανάστευση ορίων διδυμιών (twin boundary migration recrystallization)**, μπορεί να επηρεάσει το σύνολο σχεδόν του κρυστάλλου.

Παρατηρείται **μόνο εντός των ορίων** των κρυστάλλων, δεν επηρεάζει τα όριά τους και άρα δεν προκαλεί ανάπτυξη κρυστάλλων.

### ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΔΙΔΥΜΙΕΣ ΑΠΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

- Οι διδυμίες από παραμόρφωση (deformation twins) διακρίνονται από τις διδυμίες ανάπτυξης (growth twins) από το **κωνικό σχήμα** σε αντίθεση με τις δευτερες που είναι ευθύγραμμες και σε κλιμακωτή διάταξη.
- Εντοπίζονται σε **συγκεκριμένες περιοχές** του κρυστάλλου, που συνήθως χαρακτηρίζονται από **υψηλή καταπόνηση** (π.χ. **σημεία επαφής**).
- Στα **πλαγιόκλαστα** παρατηρούνται και διδυμίες ανάπτυξης και διδυμίες παραμόρφωσης. Αντίθετα στον **ασβεστίτη** οι περισσότερες διδυμίες είναι από παραμόρφωση.



## και οι ..... Λοξοζωνικές Κάμψεις (Kinking) ?

- Οι **λοξοζωνικές κάμψεις** σε επίπεδο ορυκτών (**kinking**), μοιάζουν με τις διδυμίες, αλλά δεν παραλληλίζονται τόσο στενά με συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα ή διευθύνσεις.
- Δημιουργούνται από επίδραση **διαφορικών τάσεων** στον κρύσταλλο, με κυρίαρχο μηχανισμό την **ολίσθηση των εκτοπίσεων (dislocation gliding)** σε συνδυασμό με **εξωτερική περιστροφή** του πλέγματος.
- Είναι συνήθεις στα ορυκτά με **ένα σύστημα ολίσθησης** στο πλέγμα (**slip system**), όπως οι **μαρμαρυγίες**, αλλά απαντώνται και σε χαλαζία, άστριους, αμφιβόλους, κυανίτη και πυρόξενο, σε **χαμηλές θερμοκρασίες**.





Qtz

A micrograph showing a large, dark, elongated quartz (Qtz) crystal. The crystal exhibits a prominent cleavage plane that is slightly curved or kinked. The surrounding matrix is a fine-grained, light-colored material. A red arrow points to the kinked region of the cleavage plane.

Κinking σε χαλαζία



Qtz

The image shows a detailed micrograph of a quartz (Qtz) crystal. The crystal exhibits two distinct deformation features: deformation lamellae and kinking. The deformation lamellae are visible as fine, parallel lines oriented diagonally from the top-left towards the bottom-right. The kinking is characterized by a sharp, localized bend in the crystal's internal structure, where the lamellae change orientation abruptly. Two brown arrows point from text labels at the bottom to these specific features. The overall texture is highly textured and shows signs of plastic deformation.

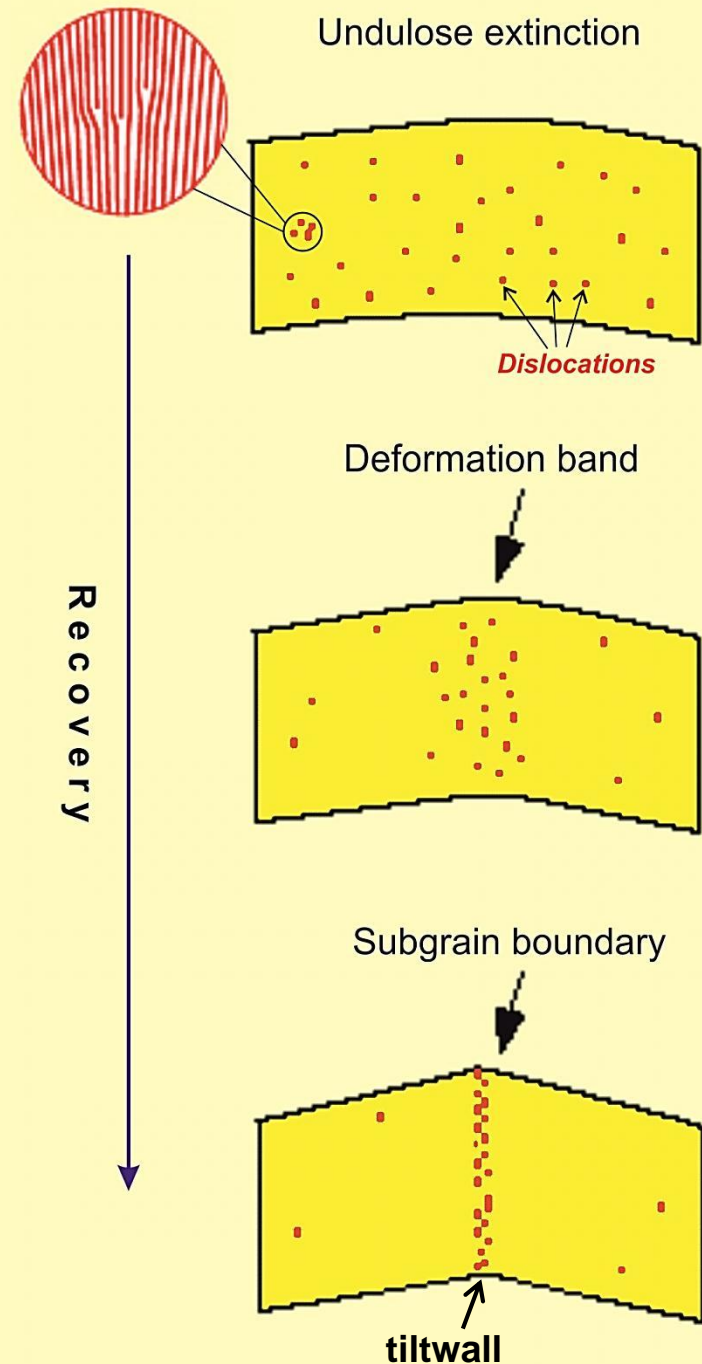
Ελασματοειδής Παραμόρφωση  
(Deformation Lamellae)

Λοξοζωνικές Κάμψεις  
(Kinking)

Λοξοζωνικές κάμψεις (kinking, οι δομές με διεύθυνση πάνω – κάτω) και ελασματοειδής παραμόρφωση (deformation lamellae, οι δομές με διεύθυνση πάνω αριστερά – κάτω δεξιά) σε κρύσταλλο χαλαζία (Qtz).

## 4. Ανάκτηση (Recovery)

- **Internal strain energy** → min όταν δεν υπάρχουν dislocations.
- **Παραμόρφωση** (άρα διαφορετικές τάσεις) → **αύξηση των dislocations** → αύξηση της **internal energy** (με τοπικές αλλαγές στην απόσταση των ατόμων).
- **Dislocation density** = Total length of dislocations / volume of crystalline material.
- Υπάρχουν όμως και άλλοι μηχανισμοί (γνωστοί με το όνομα **recovery**) που τείνουν να **ταξινομήσουν, μειώσουν ή καταστρέψουν τα dislocations** με **μείωση του συνολικού μήκους** των dislocations και άρα **μείωση του internal strain energy**.
- Οργάνωση των dislocations λόγω recovery σε δίκτυα επιπέδων που καλούνται **subgrain walls** ή **subgrain boundaries** και χωρίζουν τον κρύσταλλο σε επιμέρους τμήματα (**crystal fragments** ή **subgrains**) με ελαφρά περιστροφή των επιμέρους τμημάτων και προσανατολισμό που εξαρτάται από αυτόν των **slip systems** των dislocations.
- Αν ο άξονας της περιστροφής είναι  $\parallel$ ,  $\perp$  ή  $\neq$  με τα subgrain boundaries, ονομάζονται **tiltwalls**, **twistwalls** ή **complex walls**.



Ελεύθερες Εκτοπίσεις  
(Free Dislocations)

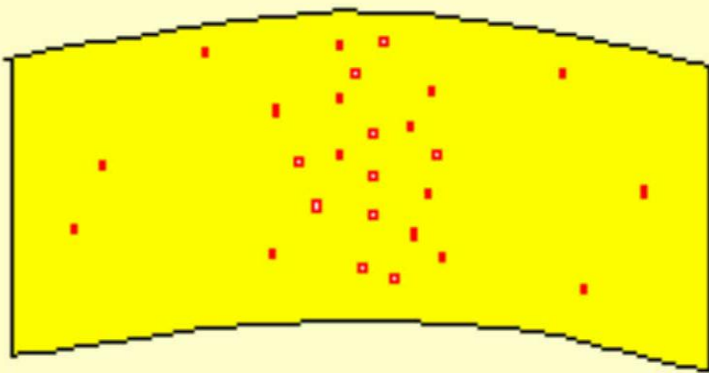
Συστοιχία Εκτοπίσεων  
(Dislocations Array)

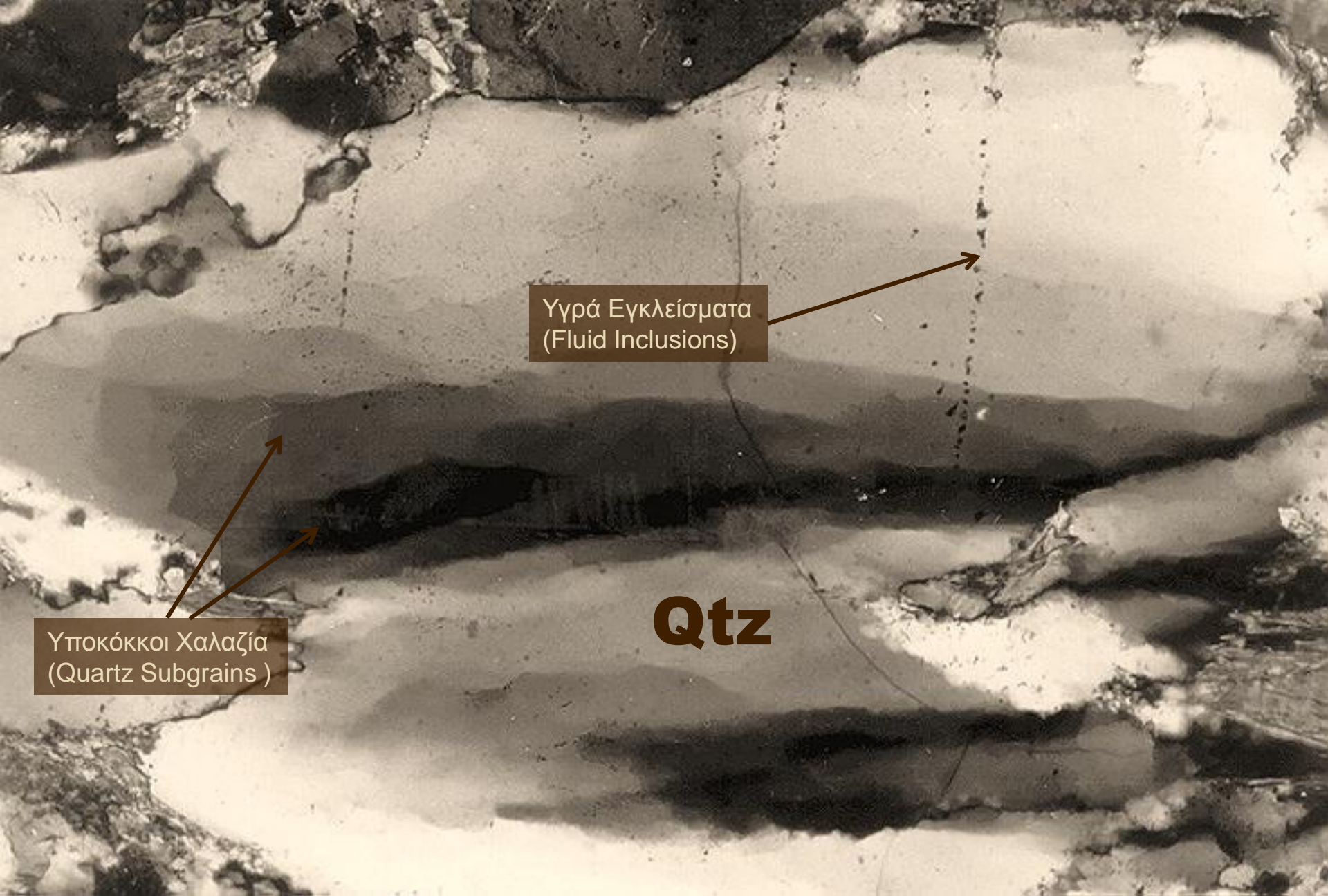
**Qtz**

Εικόνα από TEM. Η συστοιχία εκτοπίσεων αποτελεί το όριο δύο υποκόκκων (subgrain wall) και αποτελεί τυπική δομή μηχανισμού dislocation creep για το χαλαζία.

## ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ (RECOVERY)

- Λόγω recovery τα dislocations **συγκεντρώνονται** σε **συγκεκριμένα επίπεδα** και έτσι η **συχνότητά τους μειώνεται** σε άλλες περιοχές. Στις λεπτές τομές αυτό φαίνεται σαν **ζώνες με μη ομοιόμορφη κατάσβεση** ή με **μικρή διαφορά** στον **προσανατολισμό**. Οι ζώνες αυτές είναι γνωστές σαν **deformation bands**.
- **Subgrains** = τμήματα κρυστάλλου με **διακριτά, επίπεδα όρια** με **χαμηλό ανάγλυφο** και μικρή αλλαγή στον προσανατολισμό του πλέγματος, όχι μεγαλύτερη από  $5^\circ$ . Σε πολλές περιπτώσεις τα subgrain walls πλευρικά συγχωνεύονται σε deformation bands ή high-angle grain boundaries.
- Το recovery δεν είναι ο μόνος μηχανισμός δημιουργίας subgrains, αλλά υπάρχουν και άλλοι συνήθεις μηχανισμοί (sideways migration of kink band boundaries, reduction of misorientation of grain boundaries, impingement of migrating grain boundaries κλπ.).
- Μηχανισμοί fracturing, rotation & sealing by growth from solution, δημιουργούν subgrains σε Qtz. Subgrains με έντονα κυματοειδείς δομές, μικρή διαφορά στον προσανατολισμό, ασαφή όρια και μικρορωγμές σε επίπεδο κρυστάλλου, φανερώνουν υπομικροσκοπική κατάκλαση των κόκκων.





Υγρά Εγκλείσματα  
(Fluid Inclusions)

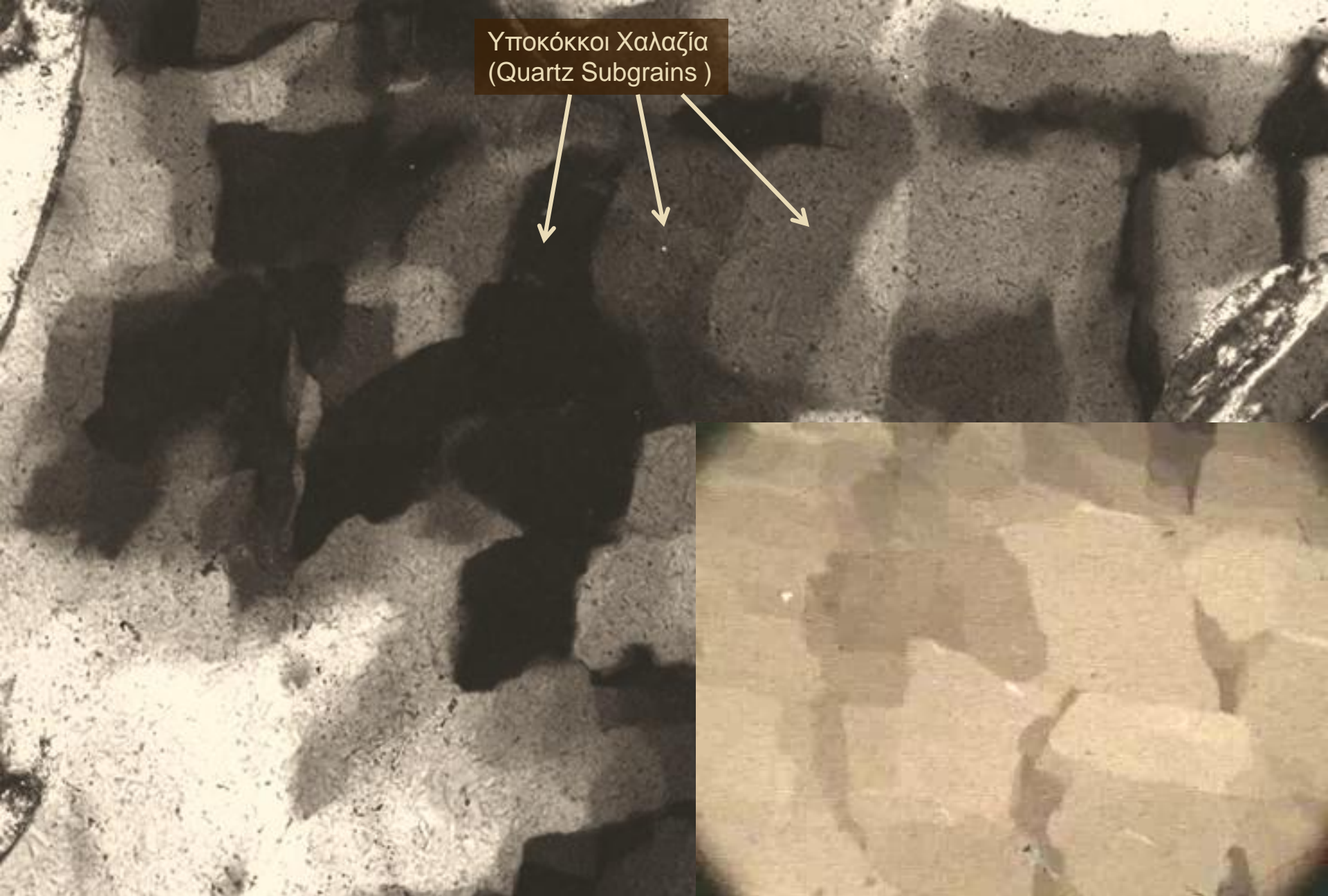
Υποκόκκοι Χαλαζία  
(Quartz Subgrains )

**Qtz**

Subgrains σε χαλαζία με αιχμηρά διακριτά, επίπεδα όρια με χαμηλό ανάγλυφο . Αναπτύσσονται εγκάρσια , στα, περίπου κατακόρυφα, ίχνη των υγρών εγκλεισμάτων.



Υποκόκκοι Χαλαζία  
(Quartz Subgrains)



Τυπική μορφή subgrains σε χαλαζία, με τη μορφή "σκακιέρας" (chessboard).

## 5. Δυναμική Ανακρυστάλλωση (Dynamic Recrystallisation)

Γενικός μηχανισμός: **Κινητικότητα Ορίων των Κόκκων (Grain Boundary Mobility)** → μείωση dislocations (<<< εσωτερικής ελεύθερης ενέργειας) → αύξηση μήκους ορίων (> εσωτερικής ελεύθερης ενέργειας) → νέοι μικροί κρύσταλλοι αντικαθιστούν τους παλιούς (άρα τελικά μείωση της εσωτερικής ενέργειας).

**ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ** → αναδιοργάνωση της ύλης με αλλαγές σε μέγεθος, σχήμα & προσανατολισμό των κόκκων (+ αλλαγή στη σύσταση σε κάποιες περιπτώσεις π.χ. άστριοι).

A micrograph showing a grain with a high density of dislocations, appearing as a complex network of dark lines. The grain is roughly circular and occupies the right side of the image. The surrounding matrix consists of smaller grains with lower dislocation density.

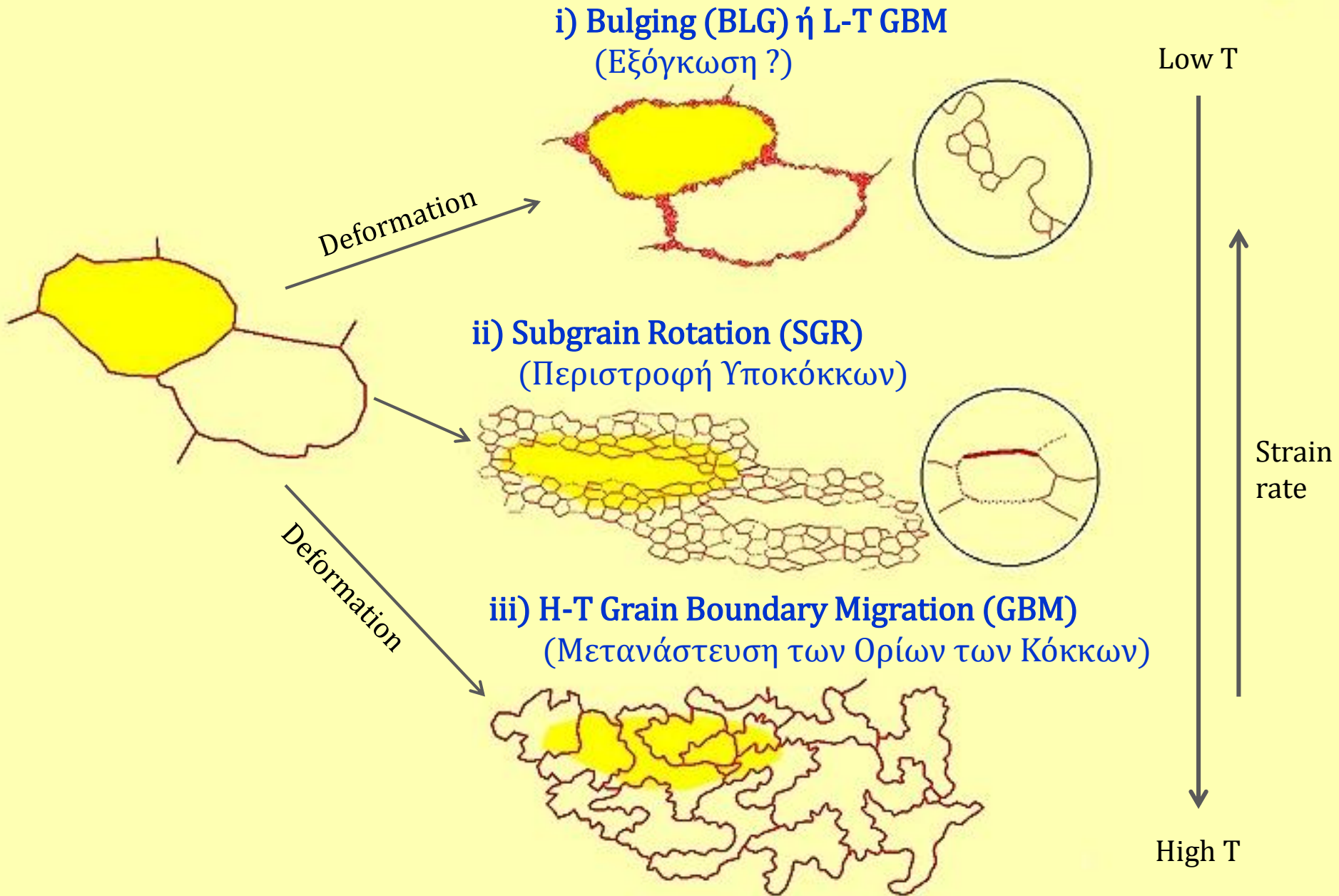
**Amb**

Κρύσταλλος με υψηλή πυκνότητα εκτοπίσεων (dislocations)

Κρύσταλλος χωρίς εκτοπίσεις (dislocations)

**Amb**

# Μηχανισμοί Ανακρυστάλλωσης (Recrystallisation)



# L-T Grain Boundary Migration ← i) Bulging (BLG) Recrystallisation

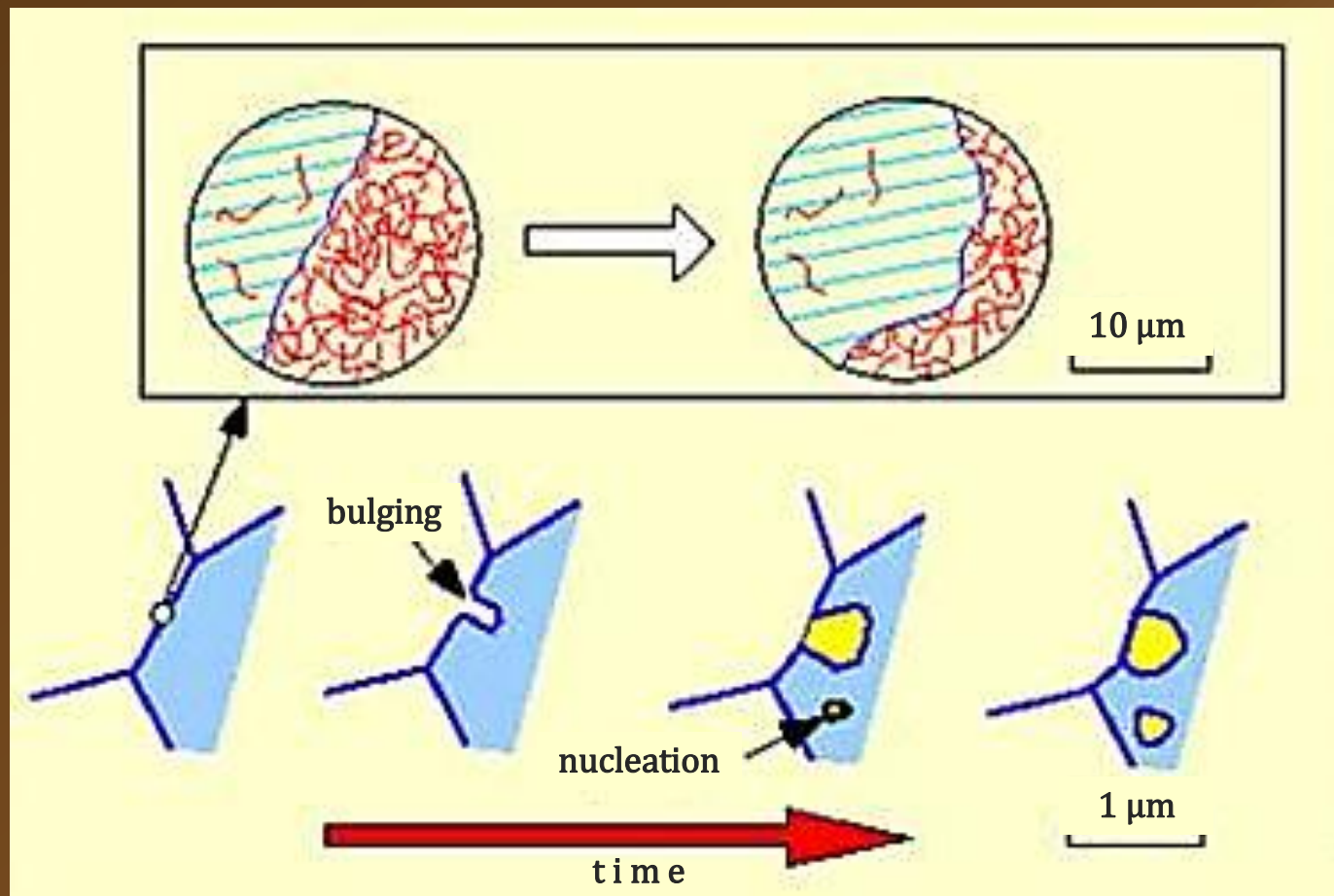
- **Μείωση πυκνότητας των dislocations** στους παραμορφωμένους κρυστάλλους (όπως στο Recovery).
- Σε δύο γειτονικούς κρυστάλλους με υψηλή και χαμηλή πυκνότητα dislocations, παρατηρείται **μεταφορά ατόμων** από το ένα πλέγμα στο άλλο (υψηλή → χαμηλή) και άρα μετατόπιση των ορίων των κρυστάλλων σε τοπικό επίπεδο και **ανάπτυξη του λιγότερο παραμορφωμένου κρυστάλλου**.
- Επιτυγχάνεται ταυτόχρονα **μείωση της ελεύθερης ενέργειας** στο εσωτερικό του αθροίσματος των κρυστάλλων (internal free energy).

➤ **Bulging.** Επέκταση προς την μεριά του κρυστάλλου με υψηλή πυκνότητα dislocations και δημιουργία ανεξάρτητων κρυστάλλων.

➤ **Nucleation.** Δημιουργία ανεξάρτητων κρυστάλλων από την ύπαρξη ενός μικρού πυρήνα χωρίς dislocations μέσα σε ένα κρύσταλλο με υψηλή πυκνότητα dislocations.

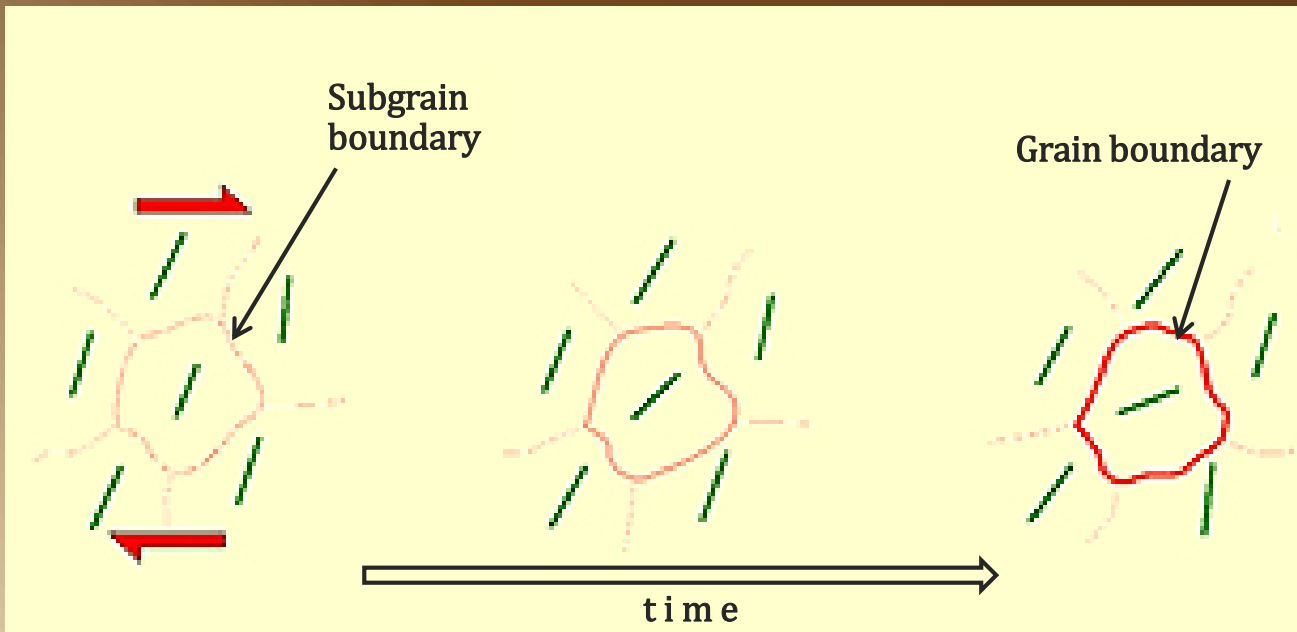
➤ Ο μηχανισμός αυτός **δεν απαιτεί αλλαγές στη χημική σύσταση** (?  $F_{sp}$ ).

➤ **Core-and-Mantle Structures.**



## ii) Subgrain Rotation (SGR) Recrystallisation

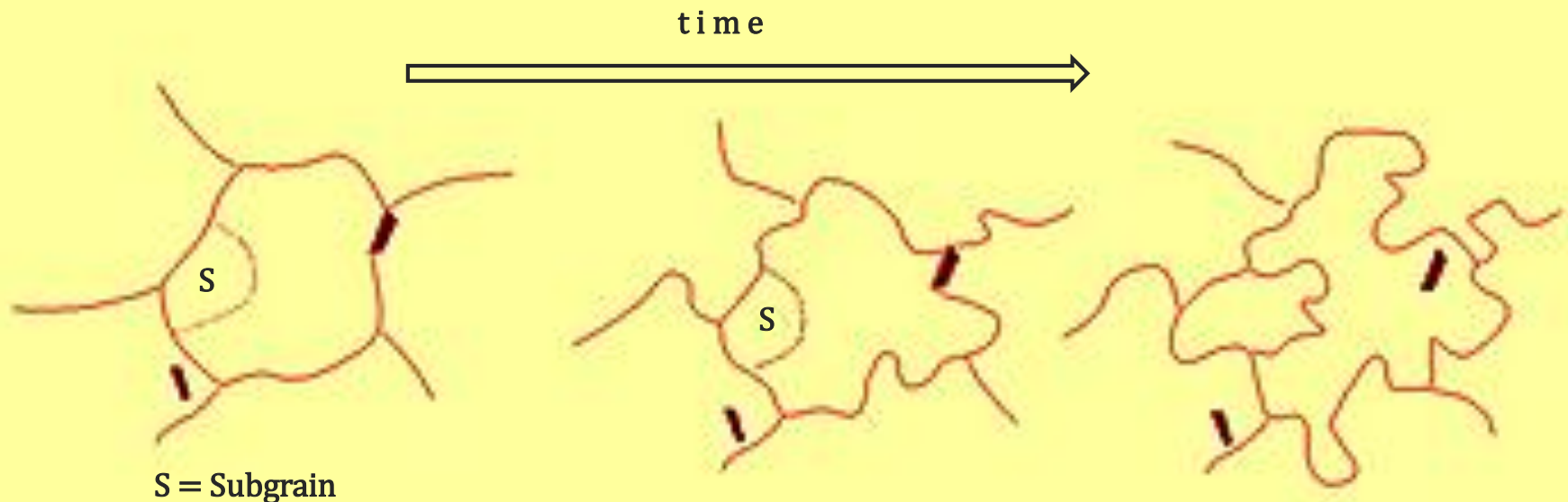
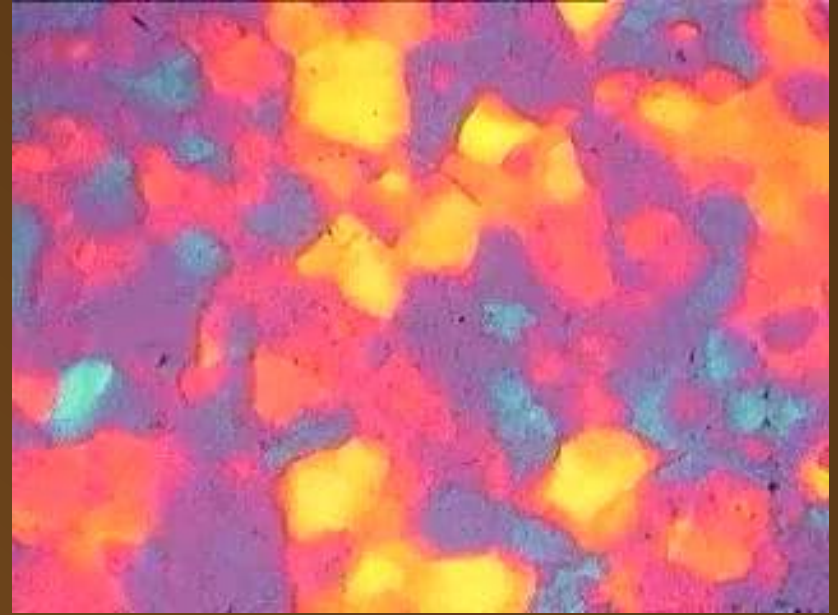
- Ειδικού τύπου ανακρυστάλλωση με συνεχή **προσθήκη dislocations στα όρια** των επιμέρους τμημάτων των κόκκων.
- Η διαδικασία αυτή, γνωστή με το όνομα **climb-accommodated dislocation creep**, λαμβάνει χώρα μόνο όταν τα dislocations είναι **ελεύθερα** να "**αναρριχώνται**" από το ένα επίπεδο του πλέγματος στο άλλο.
- Ο μηχανισμός αυτός προϋποθέτει προοδευτική **αύξηση της γωνίας του κρυσταλλικού πλέγματος** και στις δύο πλευρές των ορίων των επιμέρους τμημάτων των κόκκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το επιμέρους αυτό τμήμα (subgrain) **να μην μπορεί πλέον να θεωρηθεί σαν τμήμα του ίδιου κόκκου**.
- Παρατηρείται δηλαδή μια προοδευτική **περιστροφή** των επιμέρους τμημάτων των κόκκων (**subgrain rotation**) που τελικά οδηγεί στη **δημιουργία** (ανακρυστάλλωση newcrystallisation) **ανεξάρτητων κόκκων**.
- Οι παλιοί κρύσταλλοι τείνουν να παραμορφωθούν πλαστικά και **επιμηκύνονται** ή αποκτούν σχήμα ταινίας (**ribbon shaped**) με πολλούς υποκόκκους.



- Η συνήθης εικόνα, εκτός από **core-and-mantle structures**, είναι **εναλλαγές στρωματιδίων** από νέους μικρούς κόκκους με στρωματίδια από υπολείμματα παλαιών κόκκων.
- Σε γενικές γραμμές λαμβάνει χώρα σε **υψηλότερες θερμοκρασίες** απ' ότι ο προηγούμενος μηχανισμός (bulging).

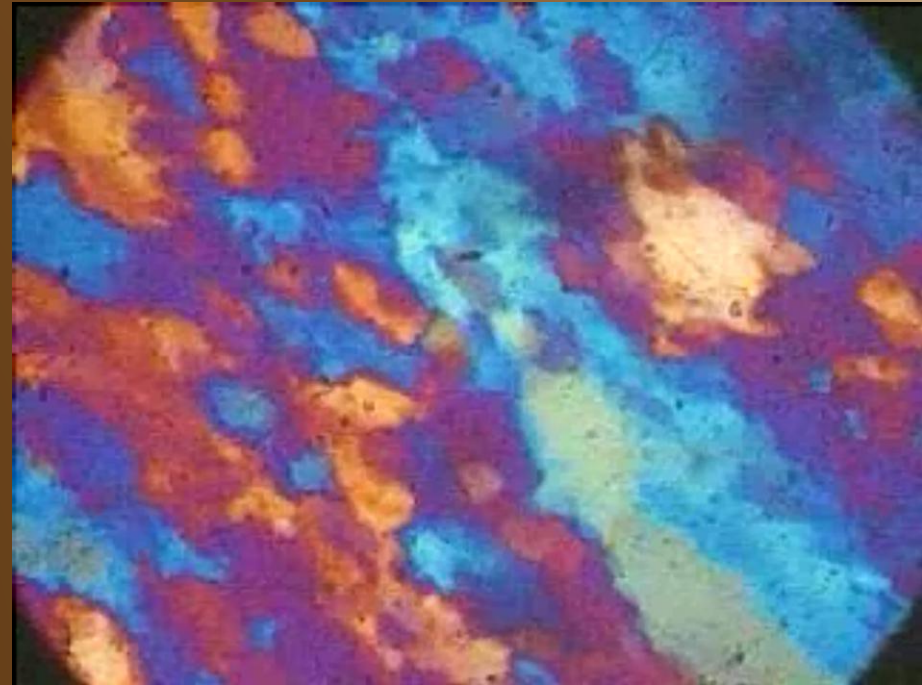
### iii) H-T Grain Boundary Migration (GBM) Recrystallisation

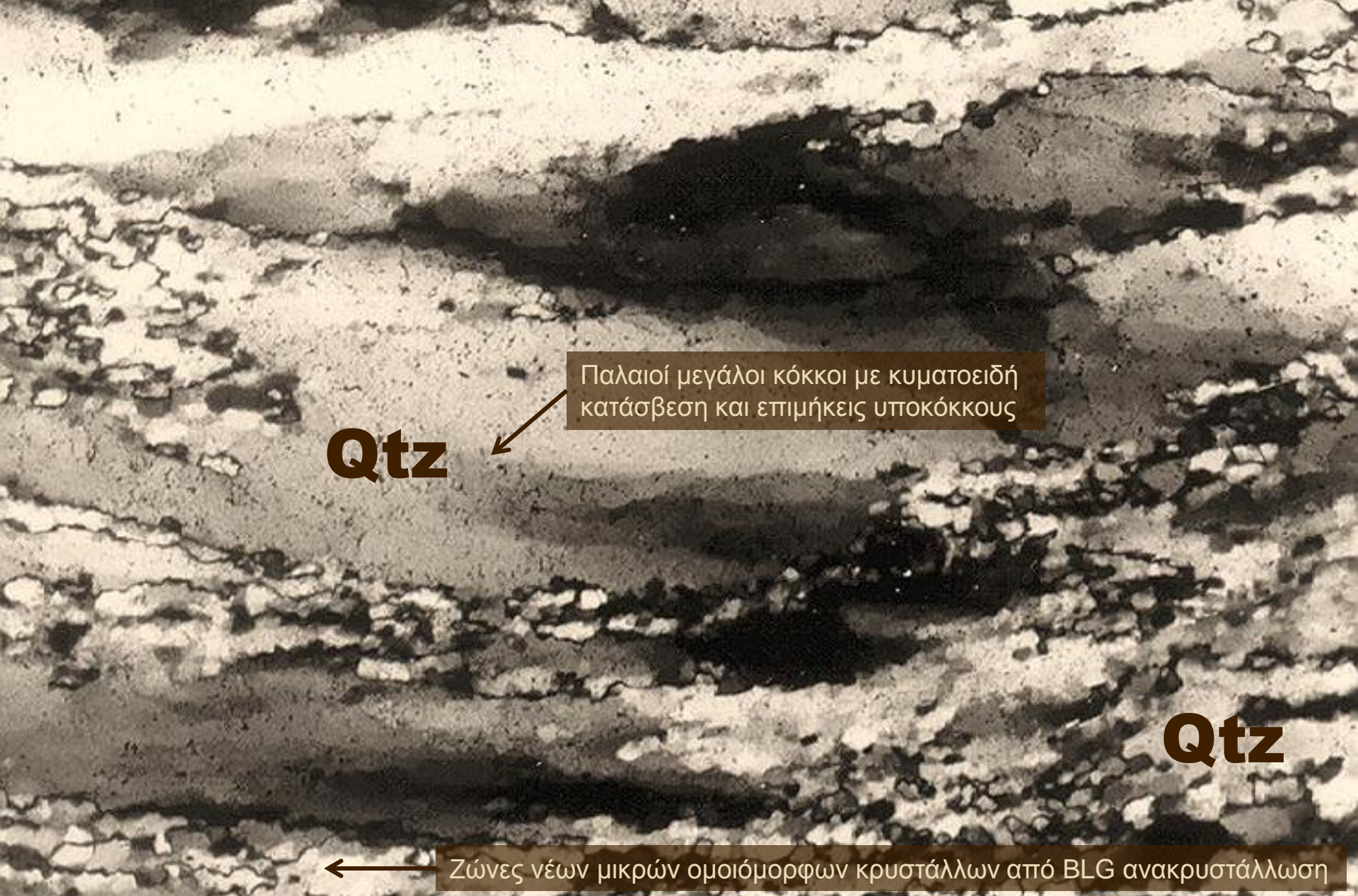
- Υψηλές θερμοκρασίες.
- Κινητικότητα ορίων πολύ υψηλή, επηρεάζει όλο τον κρύσταλλο (με στόχο την απομάκρυνση των dislocations).
- Λοβοειδή όρια κρυστάλλων και ποικιλία στα μεγέθη.
- Οι νέοι κρύσταλλοι τείνουν να είναι μεγαλύτεροι.
- Δυσκολία διαχωρισμού παλιών και νέων κρυστάλλων.
- Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες αμοιβαδοειδή όρια, με χαρακτήρα **strain free** (δηλ. απουσία undulose extinction και subgrains).



## ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ (DYNAMIC RECRYSTALLISATION)

- Πιο **δύσκολη** "πιστοποίηση" απ' ότι στην ανάκτηση (recovery).
- Δύο τύποι χαρακτηριστικών μικροδομών: α) τεκτονικός ιστός από **μερική** δυναμική **ανακρυστάλλωση** και → β) τεκτονικός ιστός από **ολική ανακρυστάλλωση**.
- Στη μερική ανακρυστάλλωση διπτός χαρακτήρας κόκκων, με συγκεντρώσεις των **νέων μικρών κρυστάλλων** με ομοιόμορφο μέγεθος ανάμεσα στους **παλιούς μεγάλους κρυστάλλους** με κυματοειδή κατάσβεση.
- Η παραπάνω εικόνα είναι χαρακτηριστική της **BLG ανακρυστάλλωσης**, όπου επίσης οι παλιοί κρύσταλλοι, εκτός από κυματοειδή κατάσβεση μπορεί να παρουσιάζουν **kinks, deformation lamellae, brittle fracturing** και **ακανόνιστα λοβοειδή** όρια με τους λοβούς στο μέγεθος των νέων ανακρυσταλλωμένων κόκκων. ....→





**Qtz**

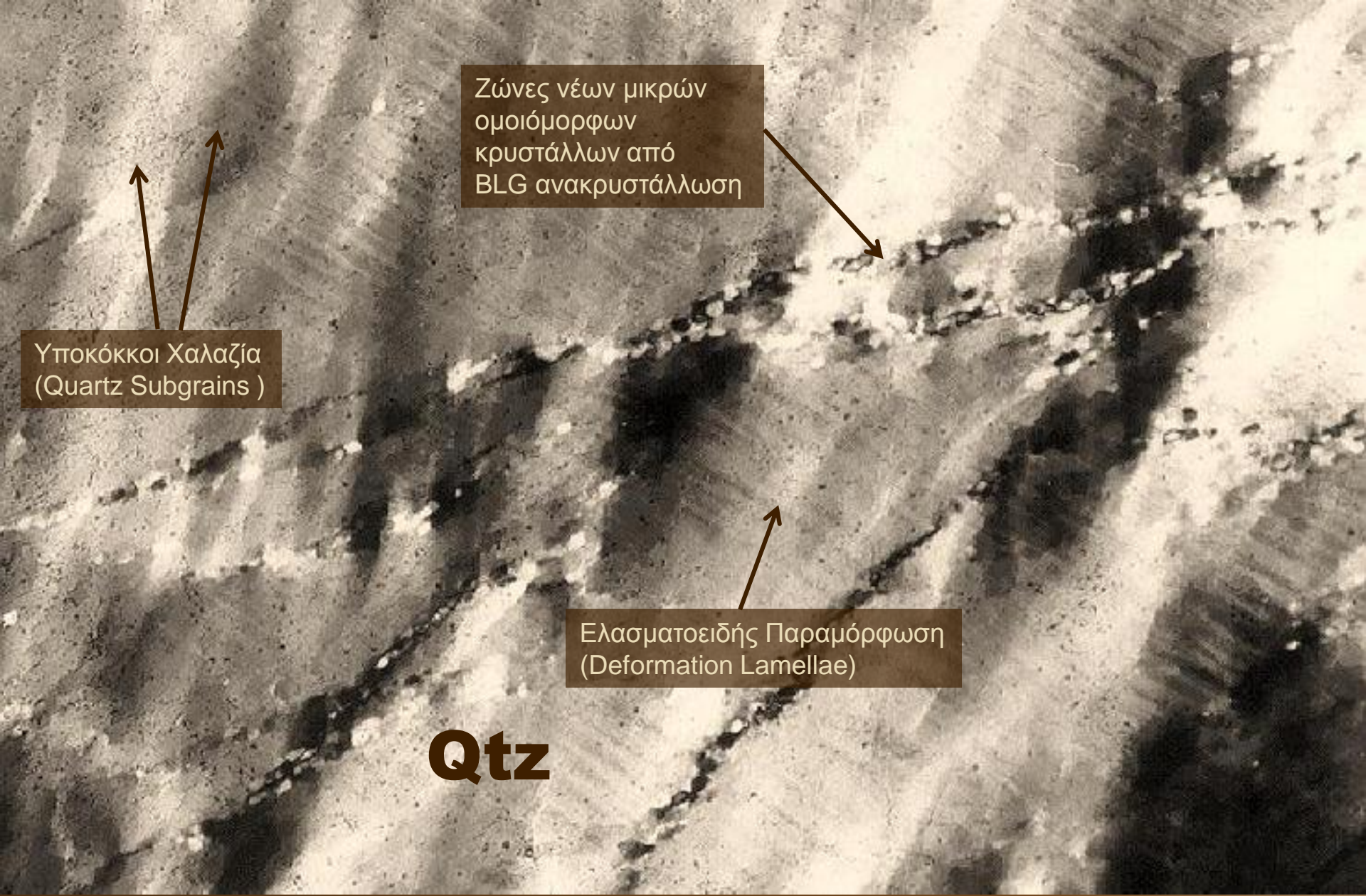
Παλαιοί μεγάλοι κόκκοι με κυματοειδή κατάσβεση και επιμήκεις υποκόκκους

**Qtz**

← Ζώνες νέων μικρών ομοιόμορφων κρυστάλλων από BLG ανακρυστάλλωση

Τυπικός ιστός μερικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης στο χαλαζία. Υπολείμματα παλιών μεγάλων κρυστάλλων με κυματοειδή κατάσβεση και επιμήκεις υποκόκκους, περνούν πλευρικά σε πεδία νέων μικρών ομοιόμορφων κόκκων από BLG ανακρυστάλλωση.





Υποκόκκοι Χαλαζία  
(Quartz Subgrains)

Ζώνες νέων μικρών  
ομοιόμορφων  
κρυστάλλων από  
BLG ανακρυστάλλωση

Ελασματοειδής Παραμόρφωση  
(Deformation Lamellae)

**Qtz**

Κόκκοι χαλαζία με ελασματοειδή παραμόρφωση (οι δομές με διεύθυνση πάνω αριστερά – κάτω δεξιά) και επιμήκεις υποκόκκους (οι δομές με διεύθυνση περίπου πάνω – κάτω), τέμνονται από ζώνες μικρών ομοιόμορφων νέων κρυστάλλων, που δημιουργήθηκαν από BLG μερική ανακρυστάλλωση.

**Qtz**

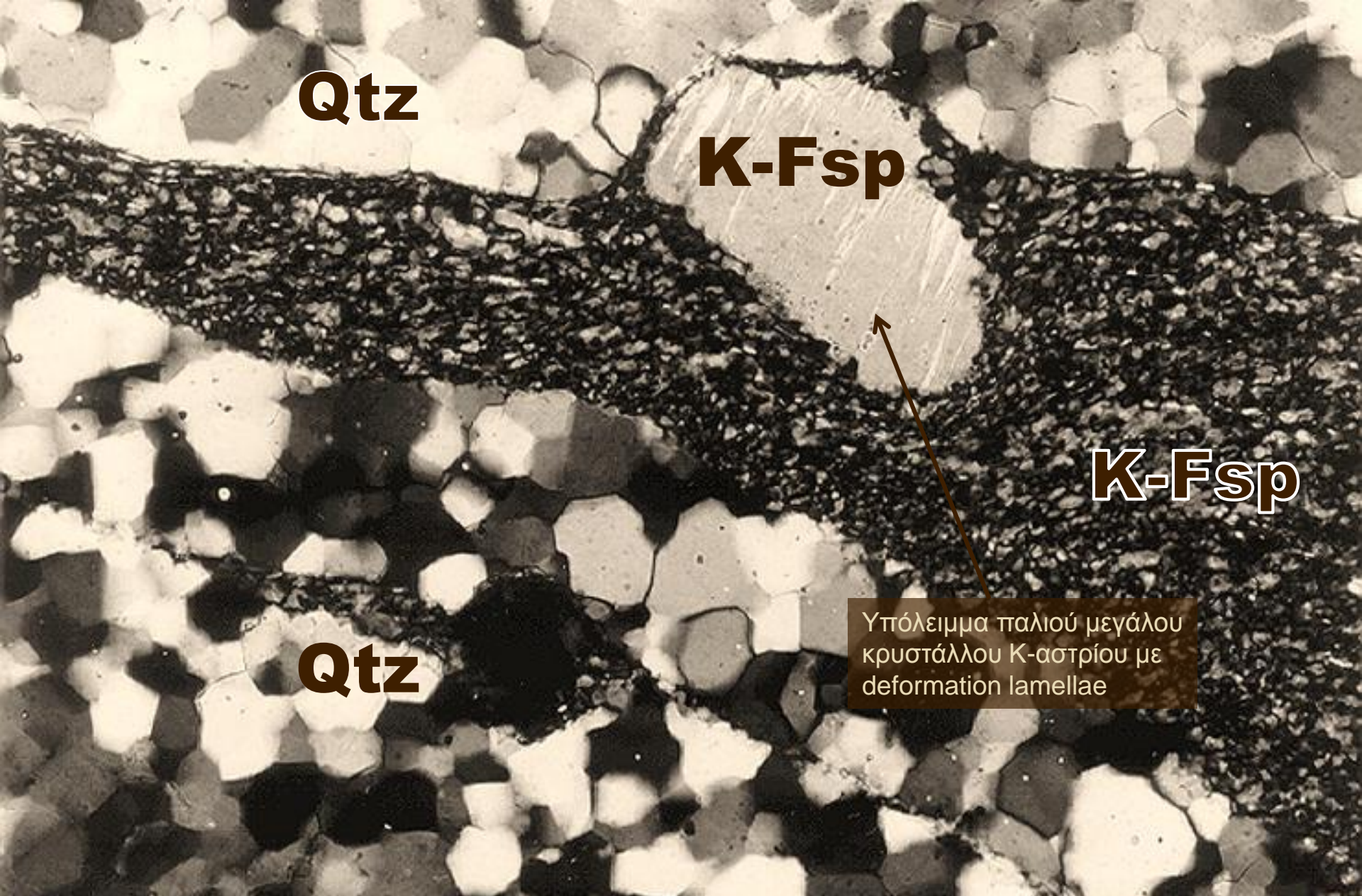
Νέοι μικροί ομοιόμορφοι  
κρύσταλλοι από  
BLG ανακρυστάλλωση

Core-and-mantle  
structure

Υπολείμματα παλιών  
πτυχωμένων  
κρυστάλλων χαλαζία

**Qtz**

Υπολείμματα παλιών πτυχωμένων κρυστάλλων χαλαζία που έχουν σχεδόν ολοκληρωτικά αντικατασταθεί από νέους μικρούς ομοιόμορφους κρυστάλλους, από BLG μερική δυναμική ανακρυστάλλωση. Στις περιπτώσεις που ο παλιός κρύσταλλος περιβάλλεται αποκλειστικά από νέους, ίδιας σύστασης, κρυστάλλους η δομή αποκαλείται core-and-mantle structure.



**Qtz**

**K-Fsp**

**K-Fsp**

**Qtz**

Υπόλειμμα παλιού μεγάλου  
κρυστάλλου Κ-αστρίου με  
deformation lamellae

Στρωματίδιο από λεπτόκκοκους Κ-άστριους σε αδρόκοκκο χαλαζία, που προέρχονται (και οι δύο) από δυναμική ανακρυστάλλωση. Διακρίνεται ένα υπόλειμμα παλιού μεγάλου κρυστάλλου Κ-αστρίου (επάνω – κέντρο) με δομές deformation lamellae.

- .....
- Στην **ανακρυστάλλωση** τύπου **SGR** παρατηρείται πιο **απότομη μετάβαση** από τους παλιούς στους νέους κόκκους, οι παλιοί κόκκοι είναι **πεπλατυσμένοι με κυματοειδή κατάσβεση** και υποκόκκους στο **μέγεθος των νέων** κόκκων, με προοδευτική **αλλαγή του προσανατολισμού** ανάμεσά τους. Τα **όρια των υποκόκκων** πλευρικά αλλάζουν σε **όρια νέων** κόκκων.
  - Στο **TEM** στην **SGR** ανακρυστάλλωση όλοι οι κόκκοι έχουν περίπου **ίδια πυκνότητα εκτοπίσεων**, σε αντίθεση με την **BLG** όπου παρατηρούνται **έντονες διαφοροποιήσεις**.
  - Εμφάνιση **ειδικού τύπου LPO**, όπου παρατηρείται μια "οικογένεια" προσανατολισμένων κόκκων (orientation family of grains) που είναι το αποτέλεσμα της δυναμικής SR ανακρυστάλλωσης ενός μεγάλου "γονικού" κρυστάλλου. .... →



Τυπική μορφή SGR ολικής δυναμικής ανακρυστάλλωσης χαλαζία. Οι ανακρυσταλλωμένοι κόκκοι έχουν πολύ έντονο προσανατολισμό, που διαμορφώνει μια συνεχή φύλλωση (continuous foliation).

Υποκόκκοι Χαλαζία  
(Quartz Subgrains)

**Qtz**

Παλιός κρύσταλλος  
χαλαζία

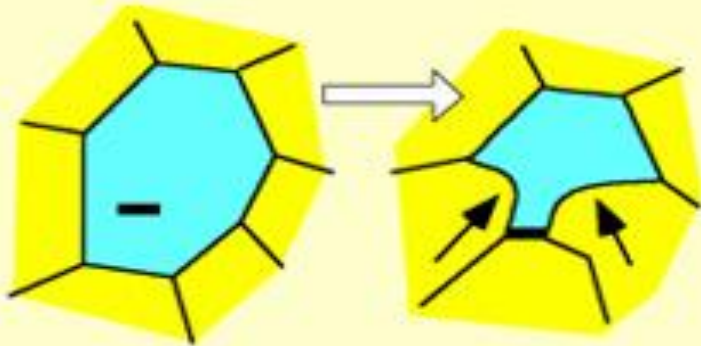
**Qtz**

Νέοι κόκκοι από SGR  
ανακρυστάλλωση

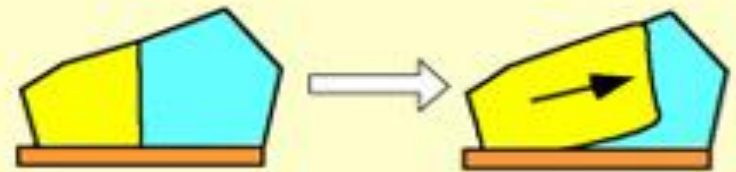
Πολυκρυσταλλικό συσσωμάτωμα χαλαζία από SGR μερική δυναμική ανακρυστάλλωση. Ένα υπόλειμμα παλιού κόκκου πάνω αριστερά, με υποκόκκους στο μέγεθος των νέων κόκκων και πλευρική μετάβαση από όρια υποκόκκων σε όρια νέων κόκκων.

- .....
- Στην ΗΤ ανακρυστάλλωση τύπου **GBM** η διάκριση ανάμεσα σε παλιούς και νέους κόκκους είναι δύσκολη. Οι νέοι κρύσταλλοι είναι μεγάλοι με **λοβοειδή** και **αμοιβαδοειδή** όρια, που εσωτερικά χωρίζονται σε επιμέρους υποκόκκους.
  - Εμφανίζονται **χαρακτηριστικές μικροδομές**, που μας δείχνουν τη **διεύθυνση** και **φορά** της **μετανάστευσης των ορίων** (βλπ. Εικ.) ..... →

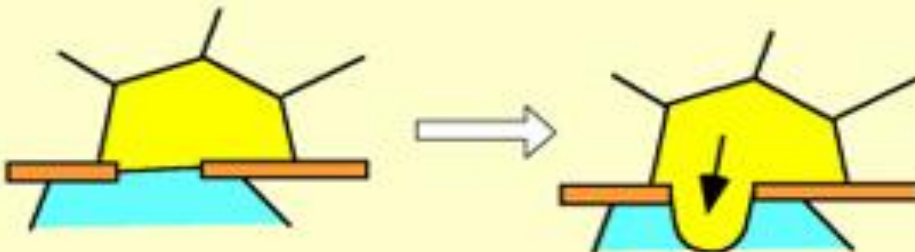
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΚΙΤΡΙΝΟΥ  
ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ ΕΙΣ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΚΥΑΝΟΥ



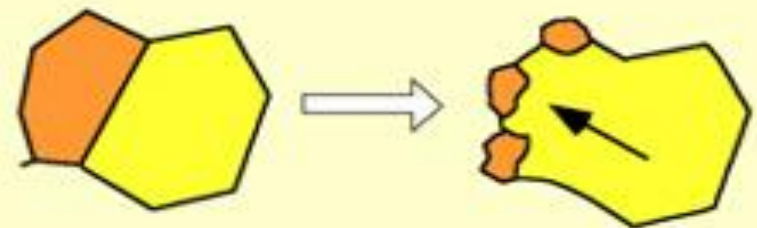
"pinning" microstructure



"dragging" microstructure



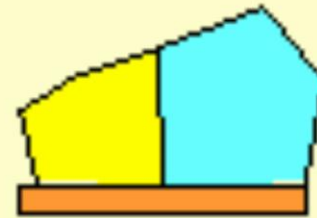
"window" microstructure



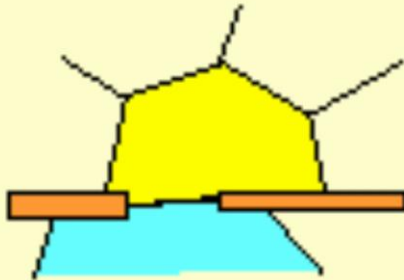
"left-over" grains



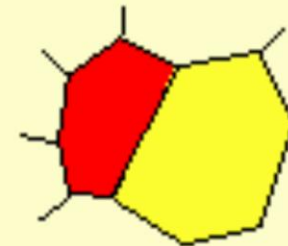
"pinning" microstructure



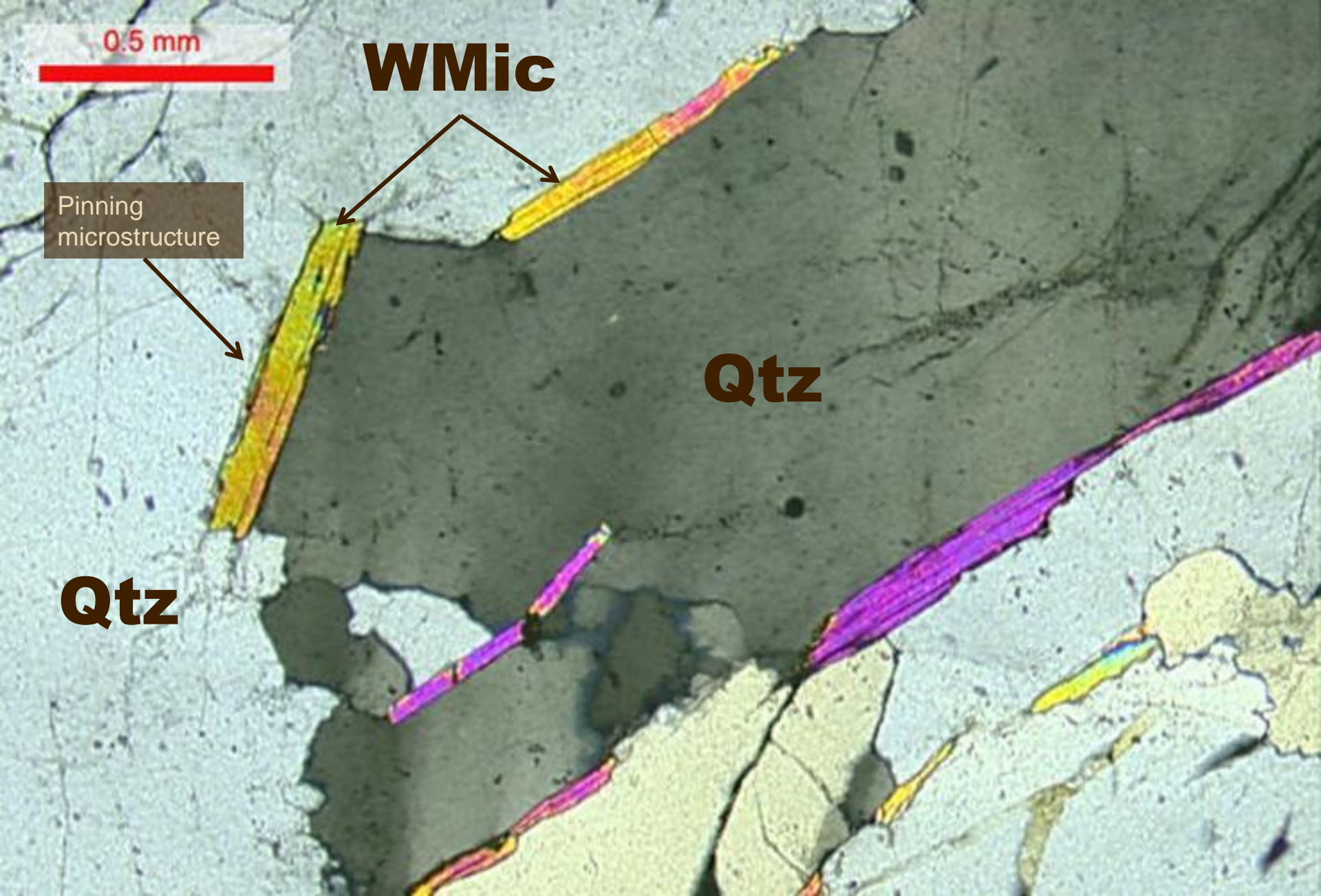
"dragging" microstructure



"window" microstructure



"left-over" grains



0.5 mm

**WMic**

Pinning  
microstructure

**Qtz**

**Qtz**

Δομή "pinning" των ορίων των κόκκων του χαλαζία, σε λευκό μαρμαρυγία (white mica).





**Qtz**

Διόγκωση (Bulging)

Πολυκρυσταλλικός χαλαζίας με έντονα ακανόνιστα όρια κόκκων, που σχηματίστηκαν λόγω της H-T GBM ανακρυστάλλωσης. Ο ανοικτού γκρι χρώματος κρύσταλλος (κέντρο) δημιουργεί διογκώσεις (bulging) προς τη μεριά του σκούρου γκρι κρυστάλλου (κάτω δεξιά).

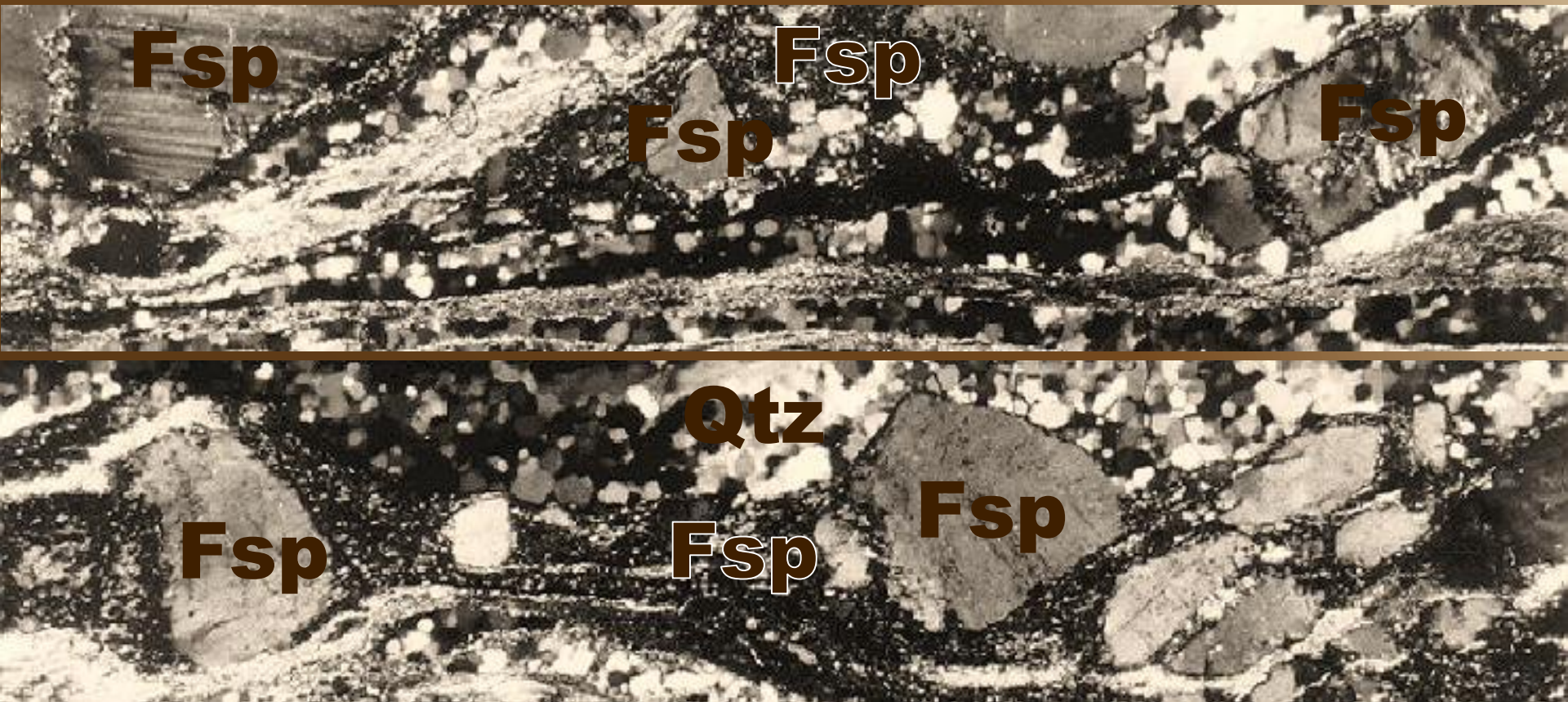


**Fsp**

**Qtz**

Γνεύσιος με λοβοειδή όρια κρυστάλλων (ιδίως ανάμεσα σε χαλαζία και αστρίους), που σηματοδοτούν την παραμόρφωση σε συνθήκες υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης και GBM ανακρυστάλλωση.

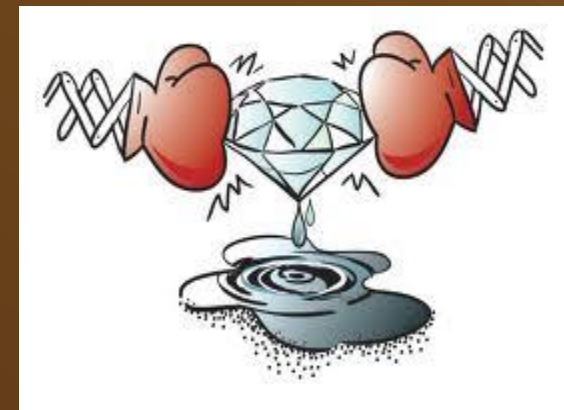
- .....
- Μια συγκέντρωση από μικρούς δυναμικά ανακρυσταλλωμένους κόκκους γύρω από έναν κρυσταλλικό πυρήνα με την ίδια χημική σύσταση, είναι γνωστή με το όνομα "**δομή πυρήνα-και-μανδύα**" (**core-and-mantle structure**).
  - Οι ιστοί από **ολική ανακρυστάλλωση** είναι **δύσκολο** να διακριθούν από τους **μη-ανακρυσταλλωμένους** ιστούς που απλά χαρακτηρίζονται από σχετικά ομοιόμορφο μέγεθος κόκκων. Ενδείξεις αποτελούν **i**) η εσωτερική παραμόρφωση, **ii**) ο προτιμητέος προσανατολισμός του πλέγματος (Lattice Preferred Orientation – LPO) και **iii**) το ομοιόμορφο μέγεθος.



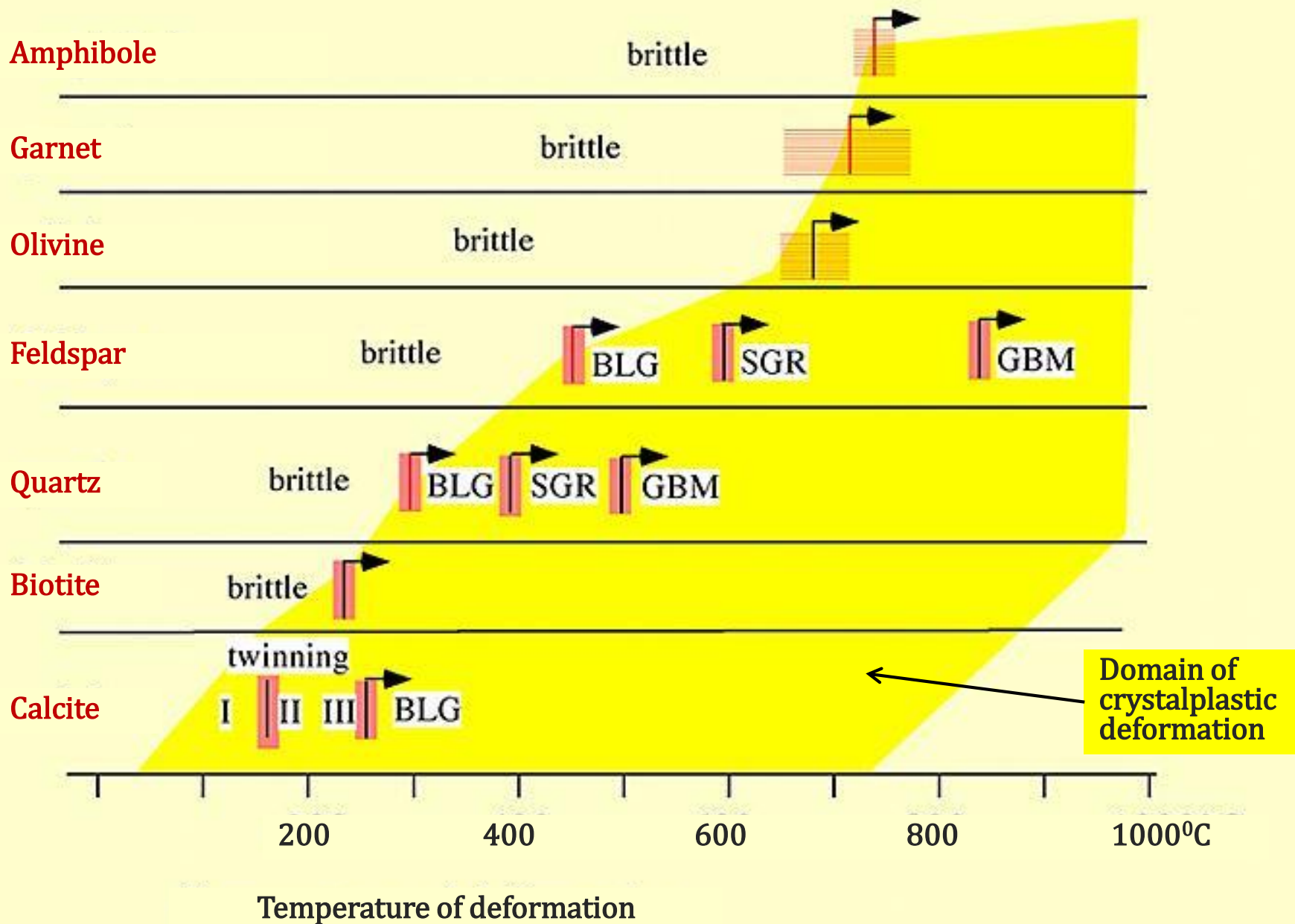
Πορφυροκλάστες αστρίων περιβάλλονται από λεπτόκοκκους δυναμικά ανακρυσταλλωμένους αστρίους, δομή που αποκαλείται core-and-mantle structure.

# Ανταγωνιστικές διαδικασίες κατά την παραμόρφωση

- Στην παραμόρφωση σε χαμηλούς βαθμούς μεταμόρφωσης επικρατεί ο μηχανισμός της θραύσης, αλλά και μηχανισμοί **pressure solution**, **twinning** και **kinking**.
- Σε πιο ψηλές **T** αρχίζει η κρυσταλλοπλαστική παραμόρφωση (**crystalplastic deformation**) που δεν εξαρτάται μόνο από **T**, αλλά και από **strain rate** και **πίεση ρευστών**.
- Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης ενός πετρώματος υφίσταται ένας **διαρκής ανταγωνισμός** ανάμεσα σε διαδικασίες **παραμόρφωσης** του κρυσταλλικού πλέγματος από τη μια και διαδικασίες **μείωσης της πυκνότητας των εκτοπίσεων**, όπως η **ανάκτηση** και η **δυναμική ανακρυστάλλωση (recovery & dynamic recrystallisation)**.
- Οι **μηχανισμοί δυναμικής ανακρυστάλλωσης**, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μπορούν να **δρουν και ταυτόχρονα**.
- Στα **solid solution ορυκτά** ( $F_{sp}$ ,  $A_{mph}$ ,  $P_{yx}$ ) οι μηχανισμοί **BLG** & **GBM** δεν κινητοποιούνται μόνο από την **εσωτερική ενέργεια** των κρυστάλλων αλλά και από τις **διαφορές στη χημική σύσταση** ανάμεσα στους παλιούς και νέους κρυστάλλους.
- Σε γενικές γραμμές **HT + υγρή φάση = ανάκτηση + ανακρυστάλλωση**.
- **Υψηλός ρυθμός διαστρωφικής παραμόρφωσης (strain rate) = αύξηση της διαστρωφικής παραμόρφωσης του κρυστάλλου**.
- Το **μικροσκόπιο** δίνει την εικόνα των ανταγωνιστικών διαδικασιών των **τελευταίων σταδίων** της παραμόρφωσης, όταν τα **T** και **strain rate** πάρουν εκείνη την **κρίσιμη τιμή** που οι δομές "**παγώνουν**".



# Η επίδραση της θερμοκρασίας στους μηχανισμούς παραμόρφωσης για διάφορα ορυκτά

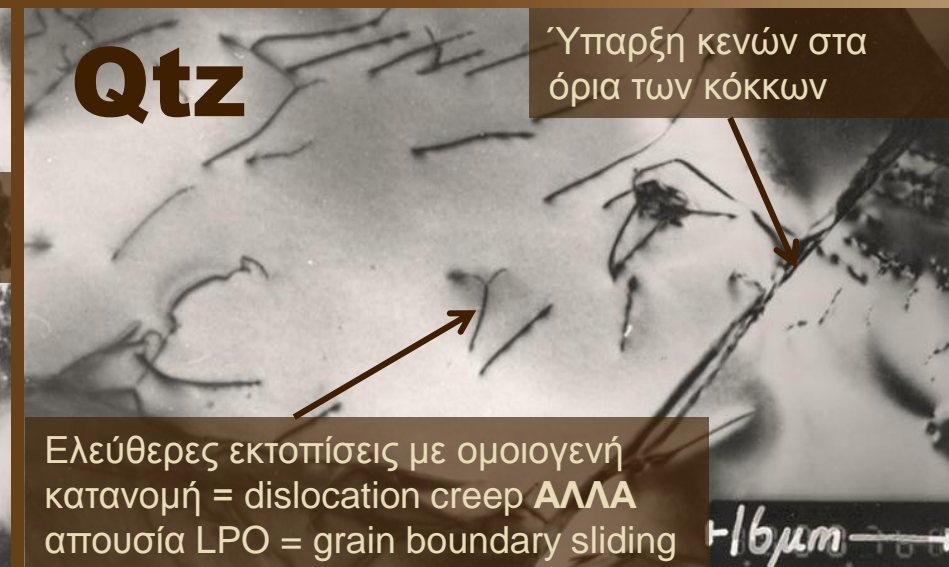


## 6. Solid-State Diffusion Creep, Granular Flow & Superplasticity

- Όταν η  $T$  σε ένα παραμορφωμένο πέτρωμα είναι **υψηλή**, οι κρύσταλλοι μπορεί να παραμορφώνονται **αποκλειστικά** με τη **μετανάστευση των κενών θέσεων** (vacancies) **διαμέσου του πλέγματος**. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός με το όνομα **grain-scale diffusive mass transfer** ή **solid-state diffusion creep** και υπάρχουν δύο βασικοί τύποι:
  - **Coble creep** → Διάχυση των κενών θέσεων (vacancies) στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά μήκος των ορίων των κόκκων.
  - **Nabarro-Herring creep** → Διάχυση των κενών θέσεων διαμέσου (από άκρη σε άκρη) του πλέγματος.
- Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος **crystalplastic deformation**, που αναφέρεται στην παραμόρφωση από dislocation creep ή diffusion creep, όταν δεν μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα στους δύο τύπους.
- Στα πολύ λεπτόκοκκα αθροίσματα κρυστάλλων, οι κρύσταλλοι μπορούν να ολισθαίνουν μεταξύ τους, δεδομένου ότι η ανάπτυξη κενών ανάμεσά τους αποτρέπεται από μηχανισμούς όπως **solid state diffusion creep** ή διάλυση και καθίζηση μέσω των ρευστών στα όρια των κόκκων. Ο μηχανισμός αυτός καλείται **grain boundary sliding** ή **granular flow**.
- Ο όρος **υπερπλαστικότητα – superplasticity** (δάνειο από τη μεταλλουργία) αναφέρεται σε **εξαιρετικά λεπτόκοκκα αθροίσματα ισομεγέθων** κόκκων (1-10  $\mu\text{m}$ ) που σε **πολύ υψηλή καταπόνηση** παραμορφώνονται **χωρίς** να αναπτύσσουν κάποιον **προσανατολισμένο ιστό** ή προτιμητέο προσανατολισμό στο πλέγμα (**LPO**). Ο μηχανισμός της ολίσθησης ορίων κόκκων, φαίνεται ότι παίζει καθοριστικό ρόλο στην περίπτωση αυτή.
- Το **μέγεθος των κόκκων** είναι η κύρια παράμετρος που καθορίζει αν ένα άθροισμα κρυστάλλων ή κόκκων θα παραμορφωθεί με dislocation creep ή solid state diffusion creep και grain boundary sliding.

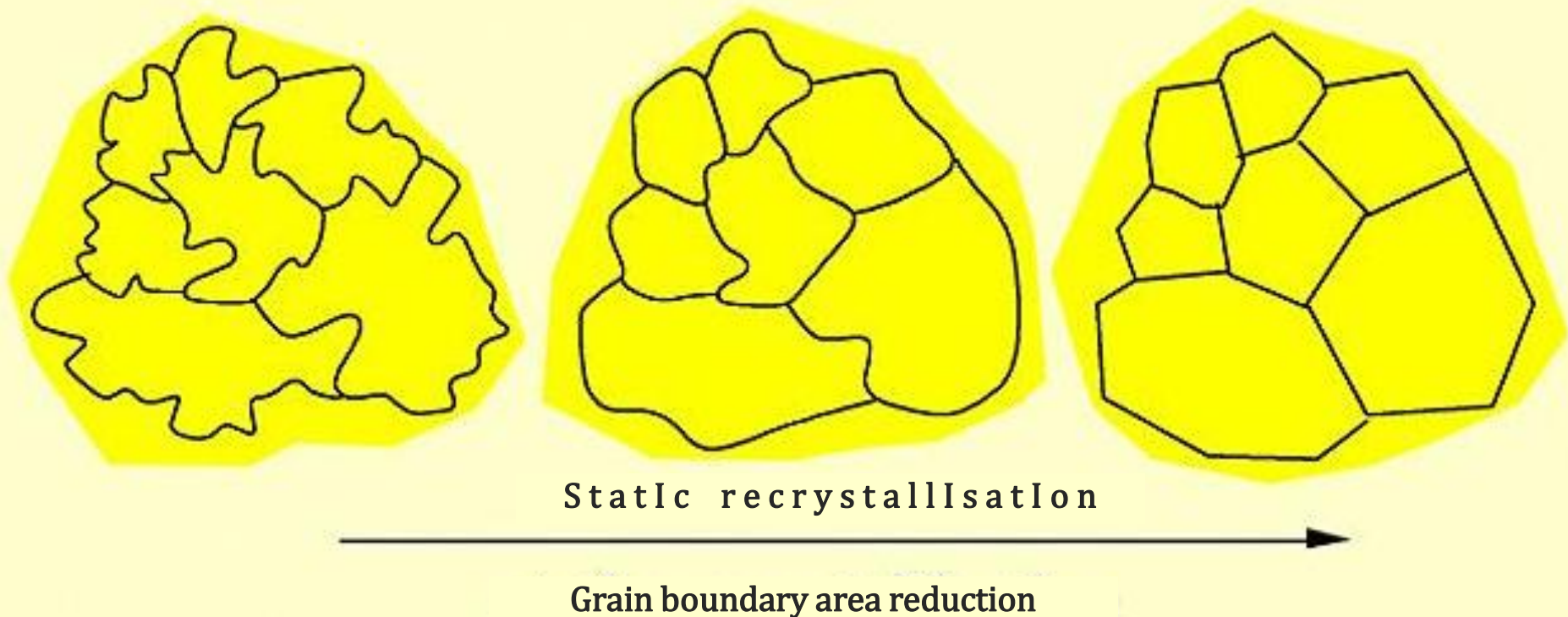
## ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ SOLID STATE DIFFUSION CREEP & GRAIN BOUNDARY SLIDING

- Πολύ λίγες είναι οι δομές που πιστοποιούν το diffusion creep. Συνήθως είναι τα πολύ **καμπύλα** και με **λοβώδες** σχήμα όρια των κόκκων, ανάμεσα σε δύο **διαφορετικά ορυκτά**, σε **υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης** πετρώματα.
- Και οι δύο μηχανισμοί συνδυαζόμενοι **απαγορεύουν** ή και **καταστρέφουν την ανάπτυξη LPO**. Άρα η παρουσία πολύ λεπτόκοκκων και ισομεγέθων κόκκων χωρίς καθαρό LPO σε συνθήκες υψηλής καταπόνησης αποτελεί μια έμμεση απόδειξη της λειτουργίας των μηχανισμών αυτών.
- Επισημαίνεται ότι η παρουσία LPO δεν αποτελεί απόδειξη για την μη ύπαρξη grain boundary sliding. **Ευθύγραμμα** και **παράλληλα τμήματα** των ορίων των κόκκων, συχνά παρατηρούμενα σε **δύο διευθύνσεις** στο δείγμα, μπορεί να οφείλονται στο μηχανισμό αυτό. Τα όρια αυτά διακρίνονται καλά σε μονο-ορυκτολογικά αθροίσματα Qtz ή Cal, στα οποία η δομή αυτή δεν είναι συνήθης.
- Η παρουσία **ασαφών ορίων**, ανάμεσα σε **ισχυρά πεπλατυσμένα λεπτόκοκκα μονοκρυσταλλικά αθροίσματα** από **δύο** ορυκτά, μπορεί να είναι ένα επακόλουθο ανάμιξης λόγω grain boundary sliding.
- Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πιθανοί δείκτες για το μηχανισμό αυτό είναι η **μικρή πυκνότητα dislocations**, το παραλληλόγραμμο σχήμα των κόκκων και η παρουσία **κενών** ανάμεσα στα όρια των κόκκων.

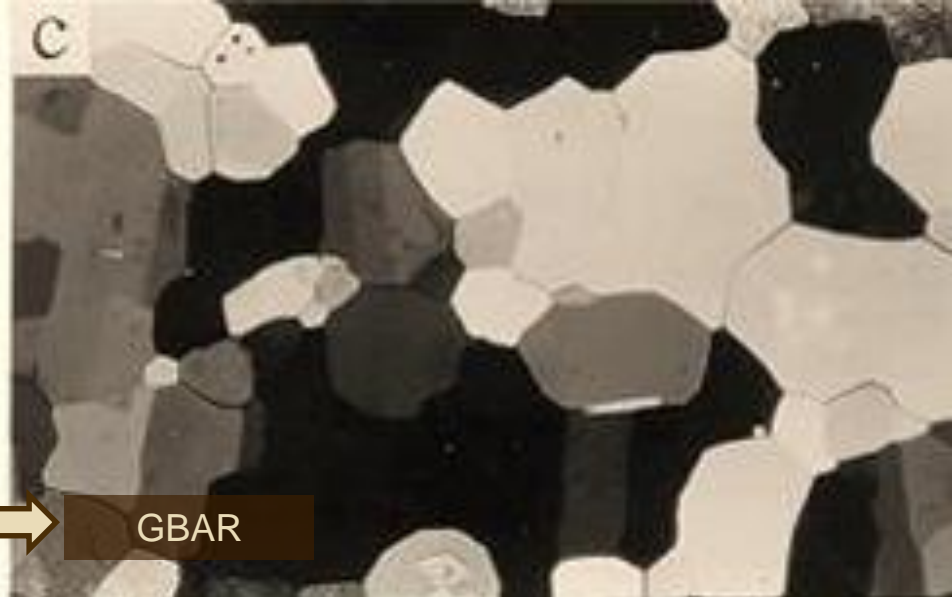
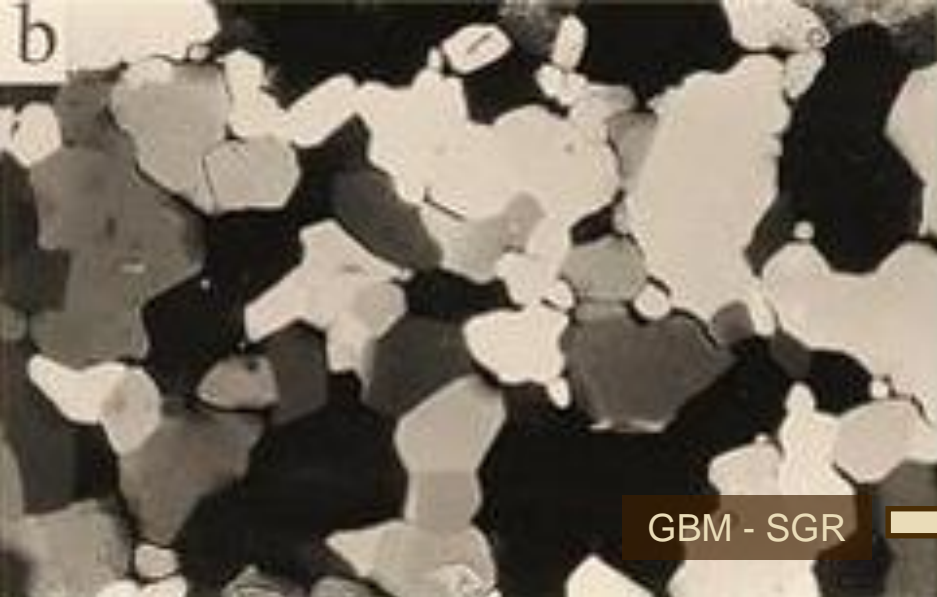


## 7. Μείωση των Ορίων των Κόκκων (Grain Boundary Area Reduction – GBAR)

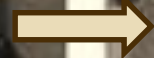
- Εκτός από τα dislocations και τα όρια των κόκκων είναι δομές με υψηλή ελεύθερη εσωτερική ενέργεια. Μείωση της επιφάνειας των ορίων επιφέρει και μείωση της ενέργειας αυτής. Αποτέλεσμα η δημιουργία μεγάλων πολυγωνικών κόκκων με ευθύγραμμα όρια και η εξαφάνιση των μικρών κόκκων με τα λοβοειδή όρια της δυναμικής ανακρυστάλλωσης.
- Μηχανισμός που οδηγεί σε αρκετά μικρότερη μείωση της ενέργειας απ' ότι το GBM & SR. Λαμβάνει χώρα κυρίως μετά το σταμάτημα της παραμόρφωσης και με την αύξηση της θερμοκρασίας.



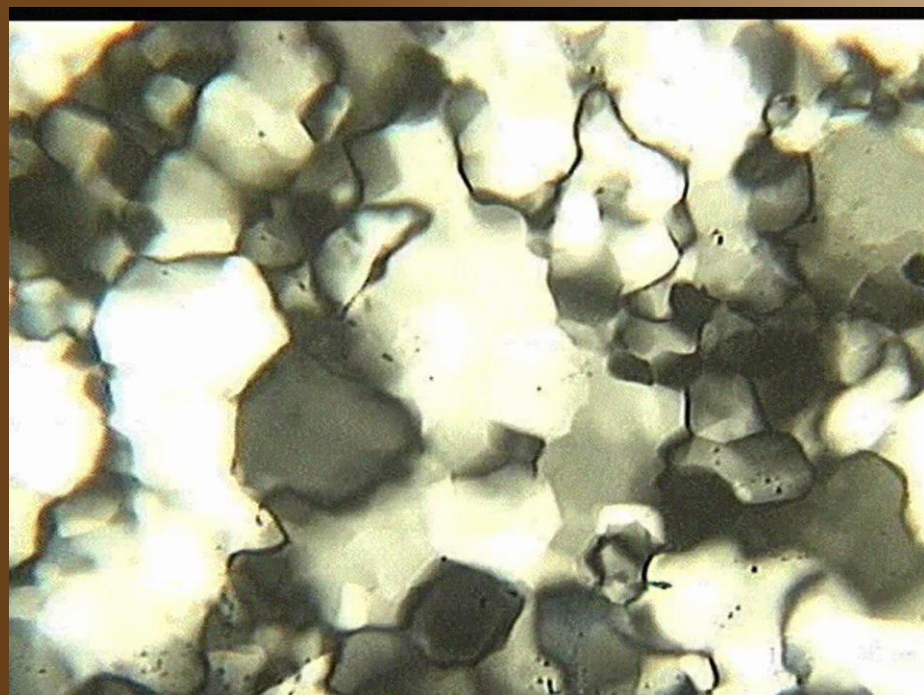
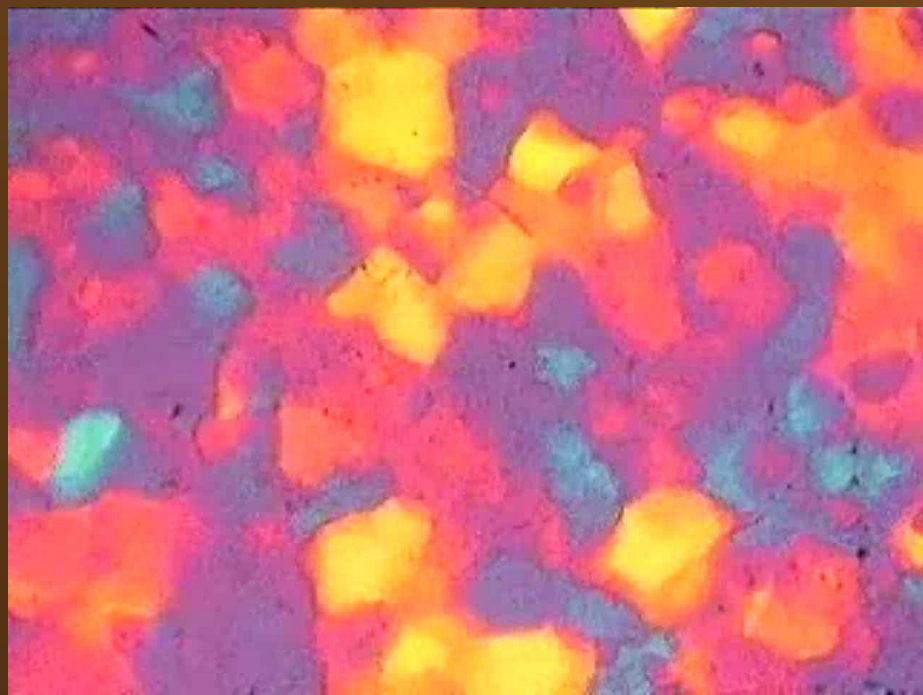




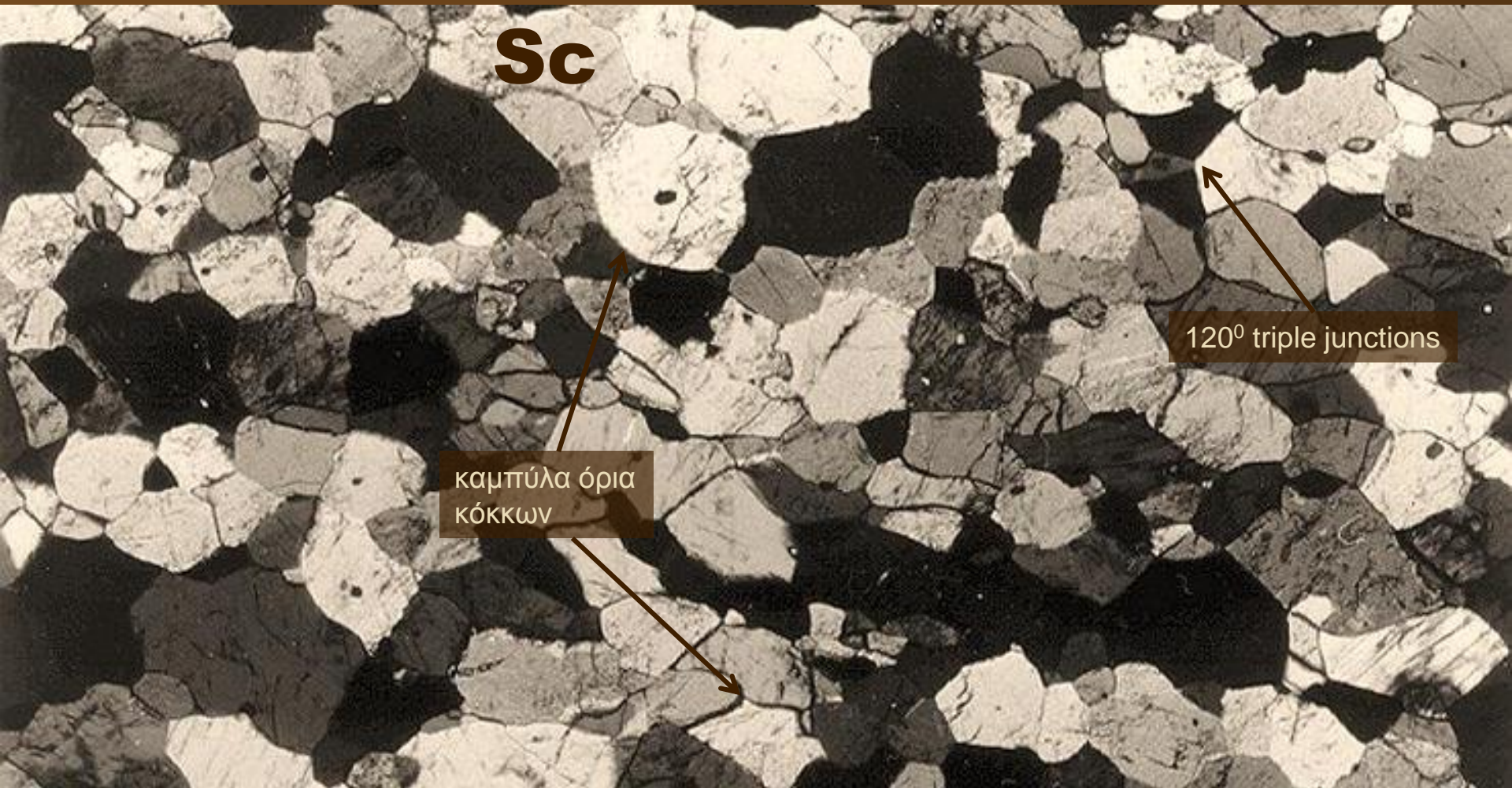
GBM - SGR



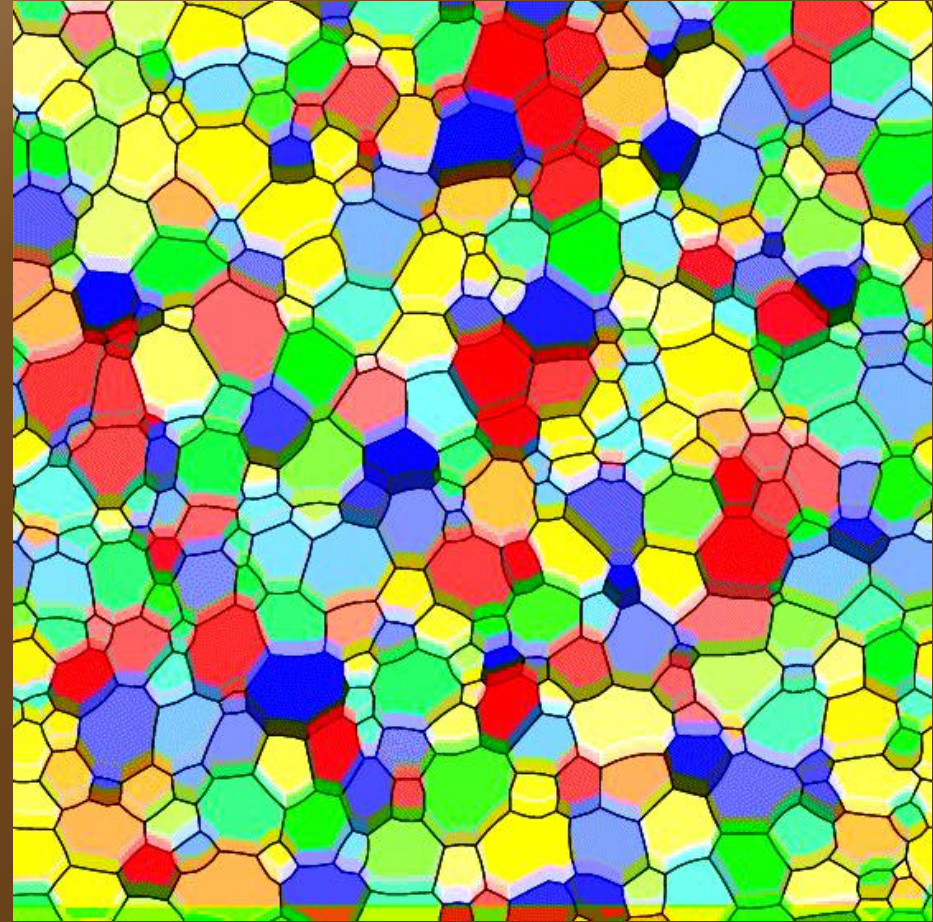
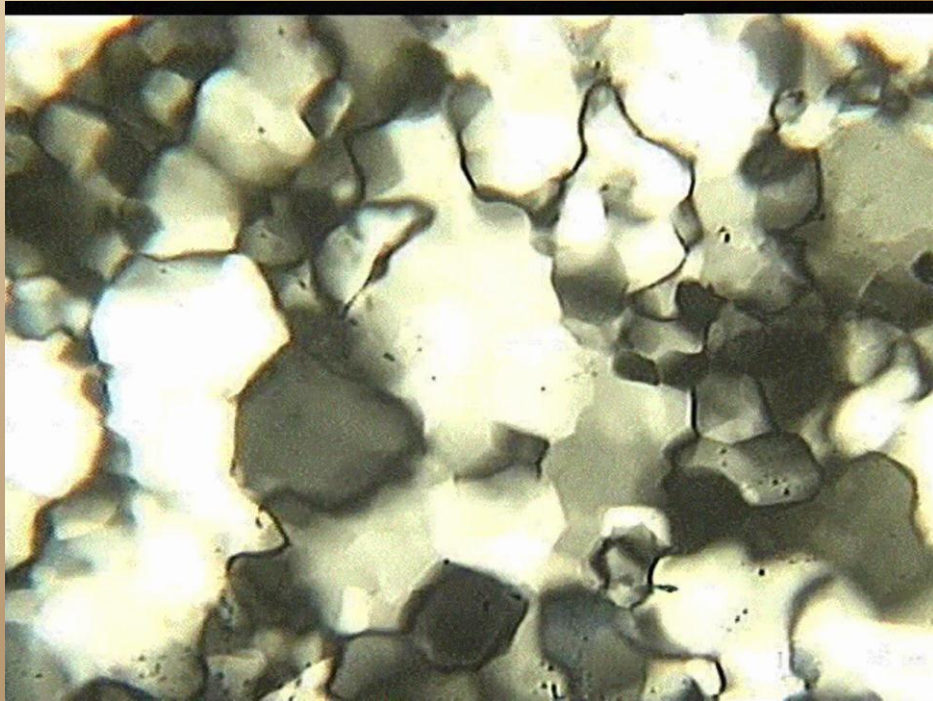
GBAR



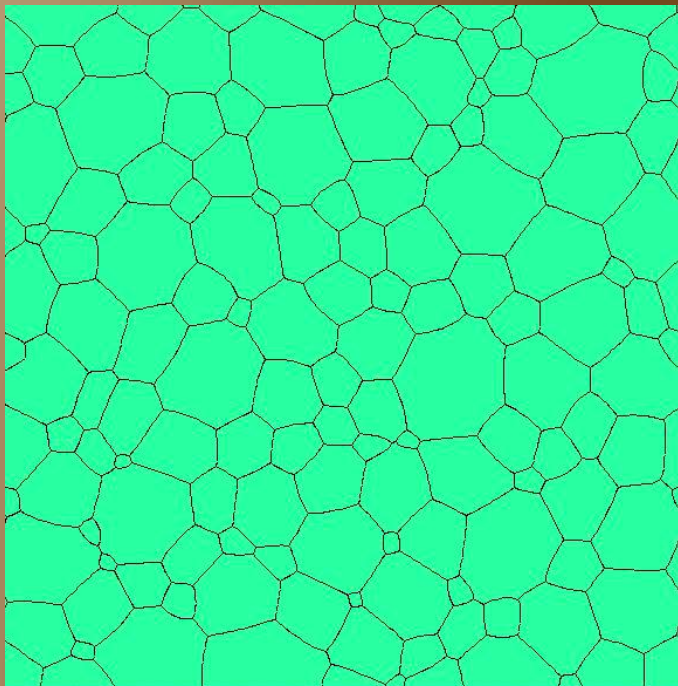
- Στα μονοκρυσταλλικά πετρώματα υπάρχει η τάση δημιουργίας ιστού ομοιόμορφων πολυγωνικών κρυστάλλων (δομή αφρού – foam structure , σημεία συμβολής – triple junctions $120^\circ$ ).
- Σε ορισμένα συσσωματώματα κρυστάλλων (ιδίως εκεί που ο μηχανισμός GBAR είναι ενεργός) παρατηρούνται ελαφρά καμπύλα όρια. Στους μικρού μεγέθους κρυστάλλους το φαινόμενο μπορεί να είναι πιο έντονο. Επισημαίνεται ότι τέτοιου τύπου καμπυλότητα μπορεί να παρατηρείται και στους μηχανισμούς GBM & SGR.



Πολυγωνικός ιστός κόκκων σκαπολίθου, που σχηματίσθηκαν από στατική ανακρυστάλλωση.

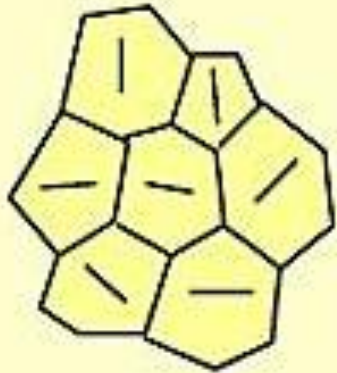


foam  
structure

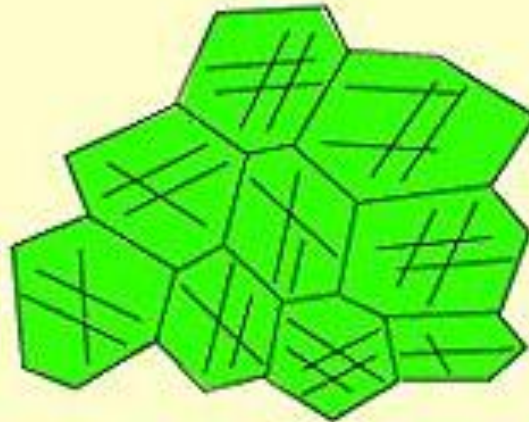


- Οι μεγάλοι μεγέθους κόκκοι με πολλές πλευρές τείνουν να αυξήσουν το μέγεθός τους, ενώ οι μικρού μεγέθους κρύσταλλοι με λίγες πλευρές, τείνουν να συρρικνωθούν μέχρι την ολοκληρωτική εξαφάνισή τους, κατά την εξέλιξη του μηχανισμού GBAR.

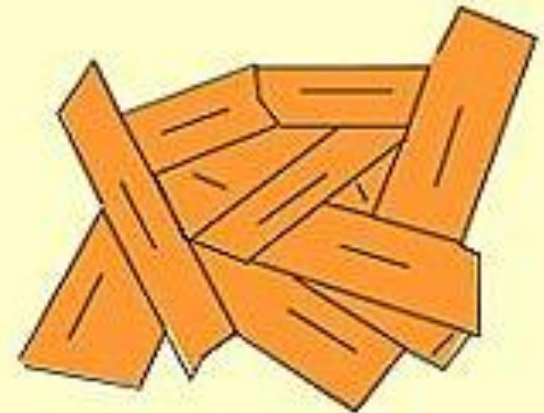
- Υφίσταται ένας έντονος συσχετισμός ανάμεσα στην ενέργεια των ορίων και τον προσανατολισμό του κρυσταλλικού πλέγματος, με άλλα λόγια με την ανισοτροπία των ορυκτών.
- Ορυκτά όπως χαλαζίας, άστριοι, ολιβίνης, κορδιερίτης, γρανάτης, ανθρακικά, ανυδρίτης και σουλφίδια είναι ασθενώς ανισοτροπικά, όλα τα όρια έχουν την ίδια περίπου εσωτερική ελεύθερη ενέργεια και άρα δημιουργούνται ισομεγέθεις κόκκοι (οι γωνίες στα triple junction συνήθως αποκλίνουν από τις  $120^\circ$ ), με όρια χωρίς σαφή προτίμηση σε κάποιο κρυσταλλογραφικό επίπεδο.
- Ορυκτά όπως η κεροσίλβη και ο πυρόξενος παρουσιάζουν μέση ανισοτροπία και πολλά όρια κόκκων με τη σχετικά μικρότερη ελεύθερη εσωτερική ενέργεια, προσανατολίζονται παράλληλα με τα επίπεδα  $\{1,1,0\}$ .
- Οι μαρμαρυγίες, ο σιλιμανίτης και ο τουρμαλίνης είναι έντονα ανισοτροπικά και παρουσιάζουν μια έντονη ταύτιση των ορίων με συγκεκριμένα κρυσταλλογραφικά επίπεδα, π.χ. για τους μαρμαρυγίες τα (001) είναι κυρίαρχα.



Quartz

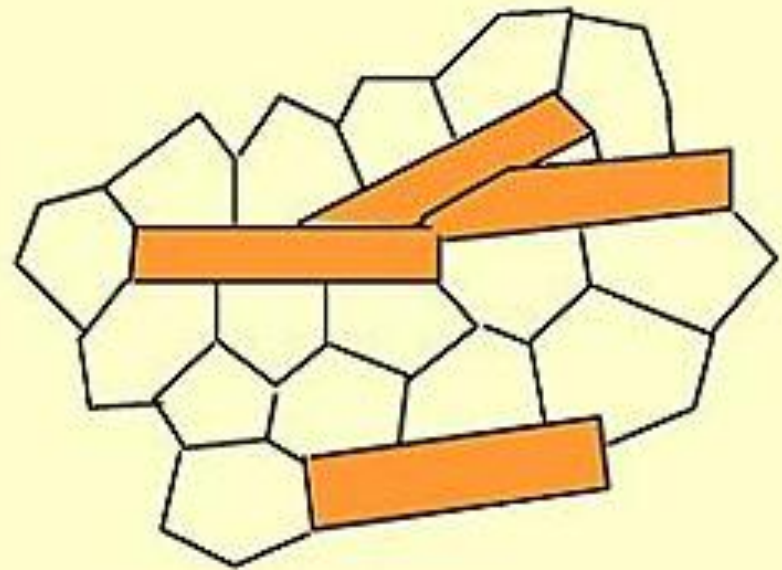


Hornblende

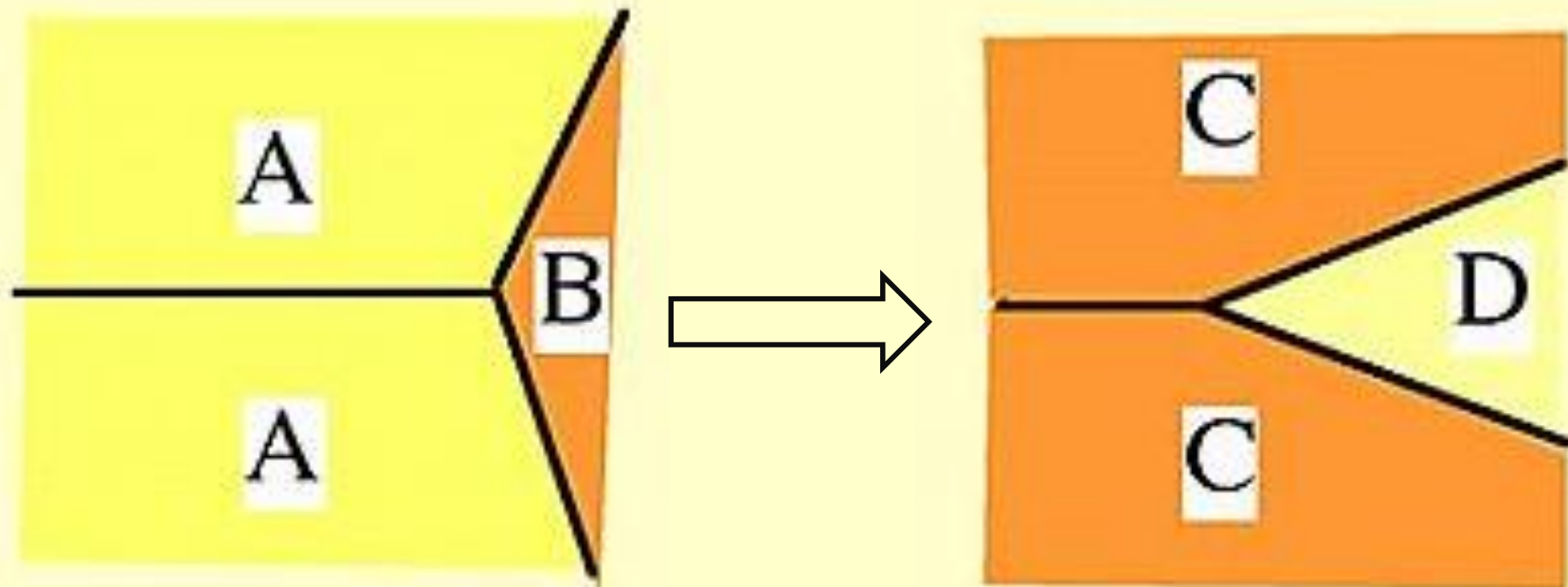


Micas

- Στην περίπτωση που **ελαφρώς** και **ισχυρώς ανισοτροπικά ορυκτά** έρχονται σε **επαφή** (π.χ. χαλαζίας και μαρμαρυγίες) τα **όρια** των κόκκων τείνουν να καθορίζονται από τη φάση με την **πιο ισχυρή ανισοτροπία**.
- Στα συσσωματώματα ορυκτών με **χαμηλή ανισοτροπία** παρατηρείται ένα άλλο φαινόμενο. Τα όρια ανάμεσα στα **ίδια ορυκτά** (π.χ. A/A) έχουν συνήθως **μεγαλύτερη** ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε σχέση με τα όρια ανάμεσα σε **διαφορετικά ορυκτά** (π.χ. A/B). Άρα εμφανίζεται η τάση τα **υψηλής ενέργειας** όρια να **μειώνονται** και τα **χαμηλής** να **αυξάνονται** και έτσι οι **δίεδρες γωνίες** αποκλίνουν από τις  $120^\circ$ .



Quartz - Mica



- Το **τελικό μέγεθος** των κόκκων, με το πέρας του μηχανισμού GBAR, **εξαρτάται** από:
  - τη **θερμοκρασία**,
  - την παρουσία άλλων **στερεών ή υγρών φάσεων** στους κόκκους ή τα όρια των κόκκων,
  - στις **διακυμάνσεις** στο **χημισμό** των ορυκτών και
  - στον **κρυσταλλογραφικό προτιμητέο προσανατολισμό (LPO)**.
- Ο μηχανισμός GBAR, στα πετρώματα με **στρωμάτωση**, οδηγεί σε:
  - **μεγάλου μεγέθους** κρυστάλλους στα **μονοκρυσταλλικά** ή **μεγάλου πάχους** στρωματίδια και
  - **μικρού μεγέθους** κρυστάλλους στα **πολυκρυσταλλικά** ή **μικρού πάχους** στρωματίδια.

- Η παρουσία **μικρών κρυστάλλων γραφίτη** στο πέτρωμα μπορεί να **παρεμποδίζει** την **ανάπτυξη** των άλλων κρυστάλλων. Γι' αυτό και πολλοί γραφιτικοί σχιστόλιθοι υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης είναι συνήθως **λεπτόκοκκοι**.

- Για τον ίδιο λόγο στους **χαλαζίτες με μαρμαρυγίες**, τα καθαρά χαλαζιτικά στρωματίδια είναι πιο **αδρόκοκκα** από αυτά που περιέχουν μαρμαρυγίες.





Qtz

Fsp

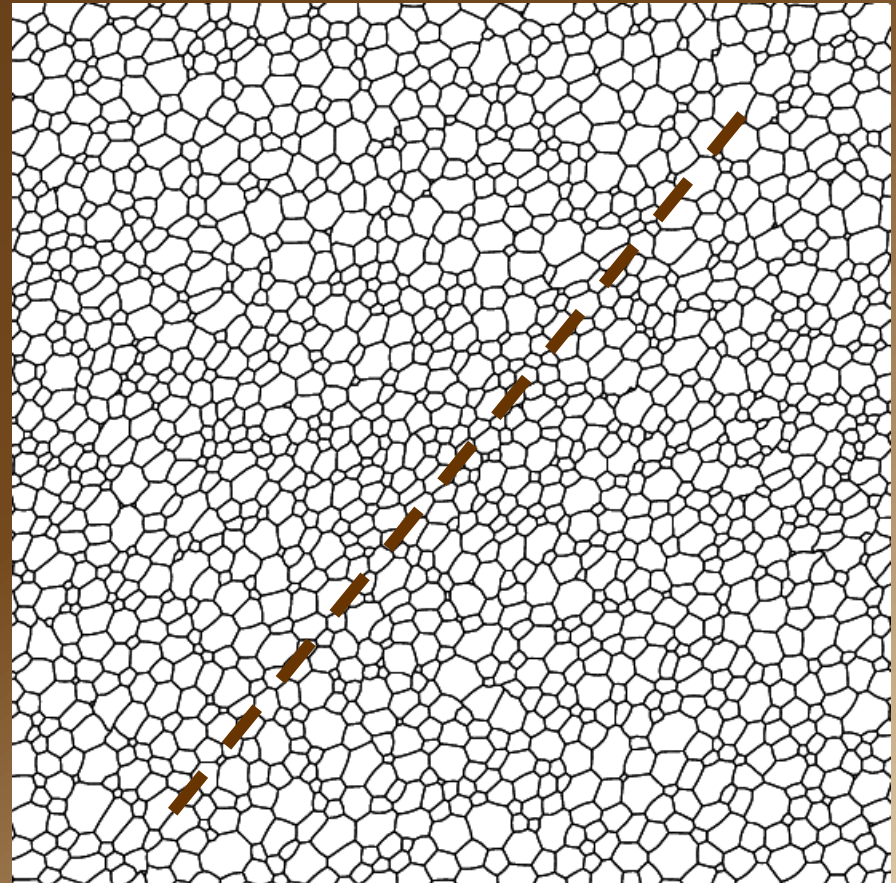
Qtz

Fsp

Χαρακτηριστικός ιστός στατικής ανακρυστάλλωσης με εναλλαγές στρωματιδίων από χαλαζία και αστρίους. Το μέγεθος των κρυστάλλων βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το πάχος των στρωματιδίων.

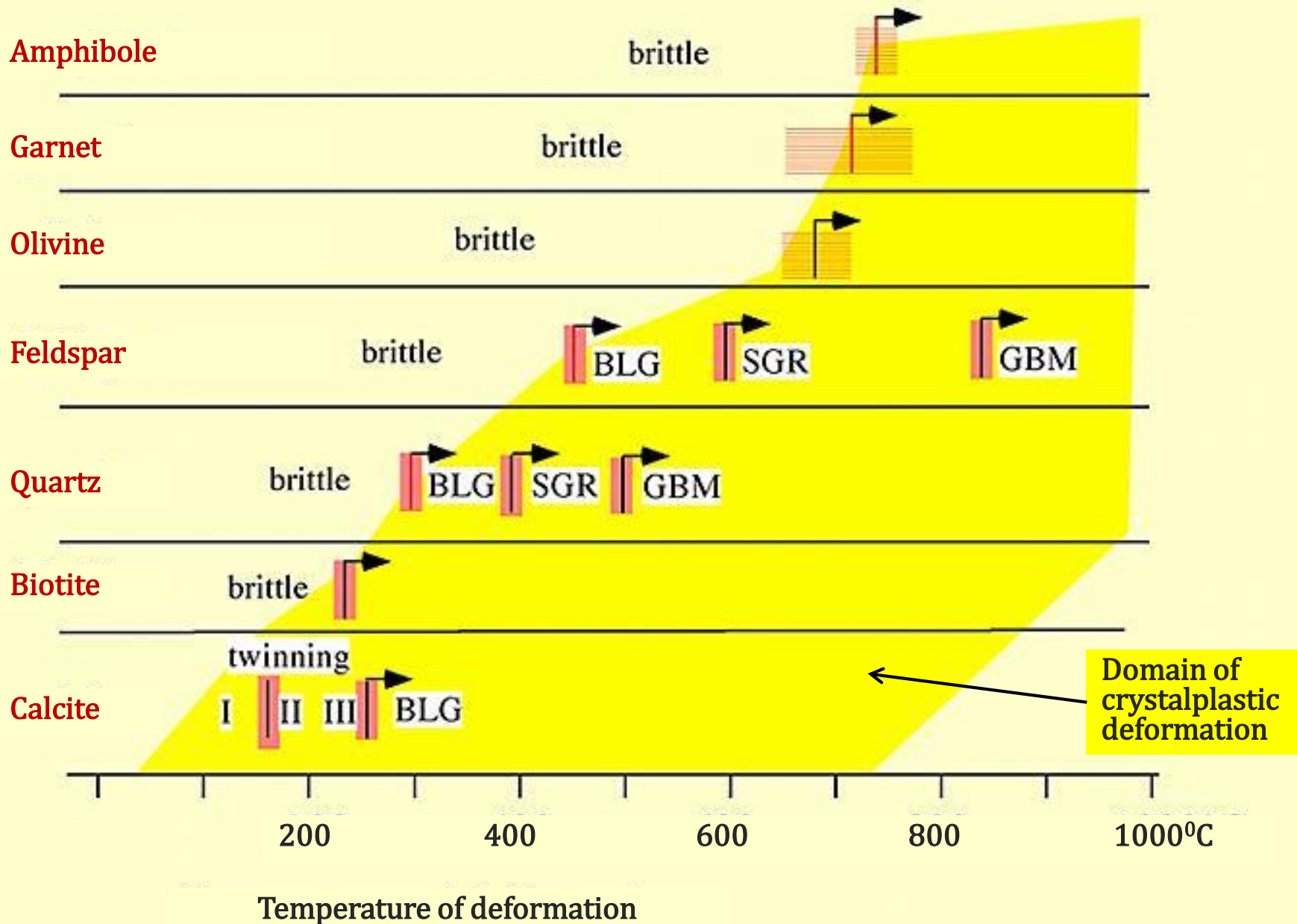
## 8. Στατική Ανακρυστάλλωση (Static Recrystallisation)

- Με την **επιβράδυνση** ή το **σταμάτημα** της παραμόρφωσης τα ορυκτά δεν έχουν **μην εσωτερική ενέργεια**, έστω και αν οι μηχανισμοί **recovery & recrystallisation** ήταν πολύ σημαντικοί κατά την παραμόρφωση. **Υπάρχουν** ακόμα **dislocations, dislocation tangles & subgrain boundaries**. Τα όρια των κόκκων έχουν ένα **ακανόνιστο** κυματοειδές σχήμα και ορισμένα ορυκτά μπορεί να είναι ακόμα **ασταθή**.
- Αν η **T** ήταν **υψηλή**, όταν σταμάτησε η παραμόρφωση, ή αν υπήρχε **αρκετό νερό** ανάμεσα στους κόκκους, οι μηχανισμοί **recovery, recrystallisation & GBAR** συνεχίζουν να λειτουργούν (παρά την απουσία παραμόρφωσης), μέχρι να **ελαχιστοποιηθεί** η εσωτερική ενέργεια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **στατική ανακρυστάλλωση**.
- Κατά τη διάρκειά της τα **ασταθή** ορυκτά αντικαθίστανται από **σταθερά**, τα **dislocation tangles απομακρύνονται**, τα **όρια των κόκκων γίνονται ευθύγραμμα** και οι **κόκκοι αυξάνονται** σε μέγεθος λόγω GBAR.
- Η στατική ανακρυστάλλωση **μετασχηματίζει** σημαντικά τη **γεωμετρία των ορίων** των κόκκων και των υποκόκκων και μπορεί να **καταστρέψει** έναν **ορυκτολογικό προσανατολισμό (shape-preffered orientation)**. Μπορεί όμως να **διατηρήσει** τον κρυσταλλογραφικό προτιμητέο προσανατολισμό (**LPO**).





# Παραμόρφωση των ορυκτών (που σχηματίζουν πετρώματα)

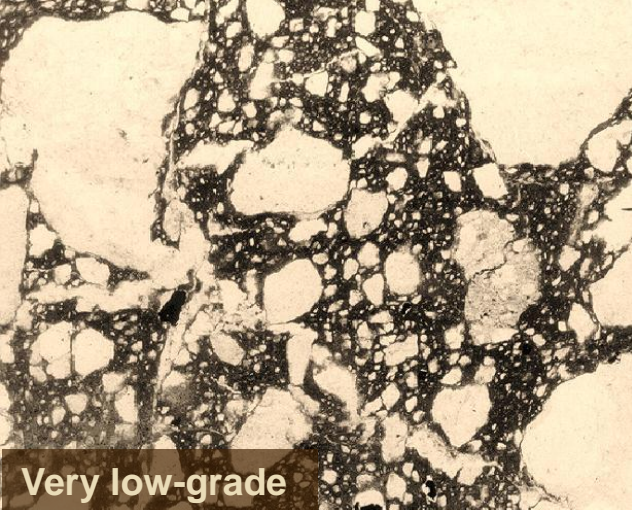


# Παραμόρφωση πολυκρυσταλλικών πετρωμάτων

## ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ → ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΙ ΙΣΤΟΙ

- Είδος ορυκτού
- Εξωτερικές συνθήκες (P, T, Strain rate)
- Μονο- ή πολυ- κρυσταλλικό
- Είδος & μέγεθος ορυκτών που επικρατούν

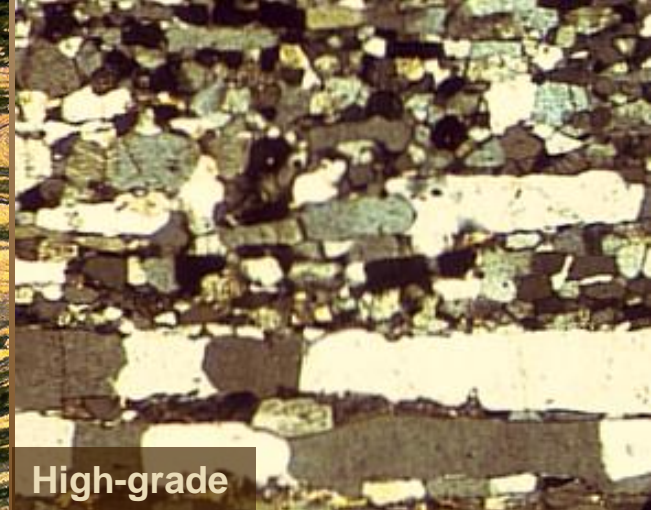
- Συμπεριφορά ορυκτών σε σχέση με T & strain rate διαφέρει σε μονο- & πολύ-κρυσταλλικά πετρώματα.
- Η συμπεριφορά στα πολυκρυσταλλικά αξιοσημείωτα πολύπλοκη.
- Όταν "σκληρά" και "μαλακά" ορυκτά συνυπάρχουν, η αντοχή (strength) του πετρώματος δεν αυξάνει γραμμικά με το ποσοστό συμμετοχής "σκληρών" ορυκτών.
- Όταν το % ποσοστό σε "σκληρά"  $\ll$  "μαλακά"  $\Rightarrow$  συμπεριφορά σαν μονοκρυσταλλικό από "μαλακά"  $\rightarrow$  περιστροφές "σκληρών" και δομές core-and-mantle με ανακρυστάλλωση εξωτερικά.
- Αύξηση αντοχής όταν αυξάνει % & μέγεθος "σκληρών", ιδίως όταν αυτά ακουμπούν μεταξύ τους για υποστήριξη των επιβαλλόμενων διαφορικών τάσεων.
- Όταν το % ποσοστό σε "σκληρά"  $\gg$  "μαλακά"  $\Rightarrow$  συμπεριφορά σαν μονοκρυσταλλικό από "σκληρά"  $\rightarrow$  σε υψηλές παραμορφώσεις (high strain) τα πακέτα των "μαλακών" μπορεί να διασυνδεθούν σχηματίζοντας ζώνες διάτμησης (shear zones) από "μαλακά".



Very low-grade



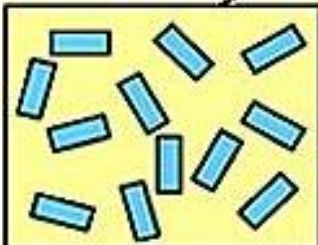
Low/medium-grade



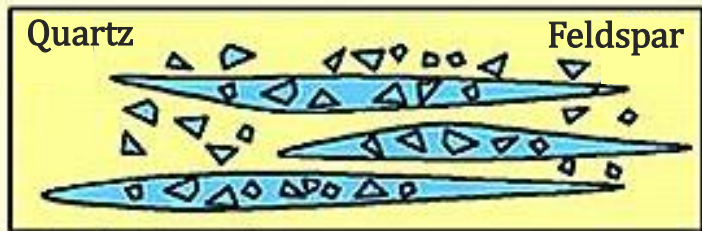
High-grade

Χαλαζιοαστριούχα πετρώματα

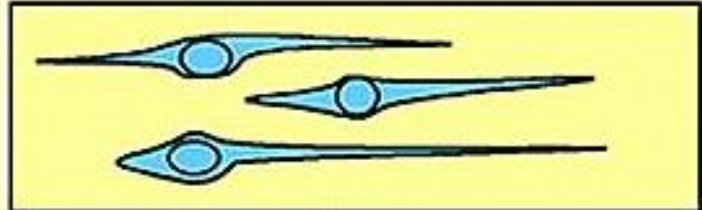
Granite



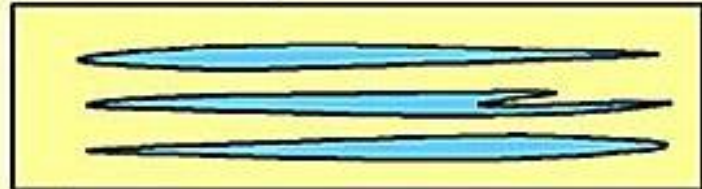
Καλοί δείκτες δομών και βαθμού μεταμόρφωσης



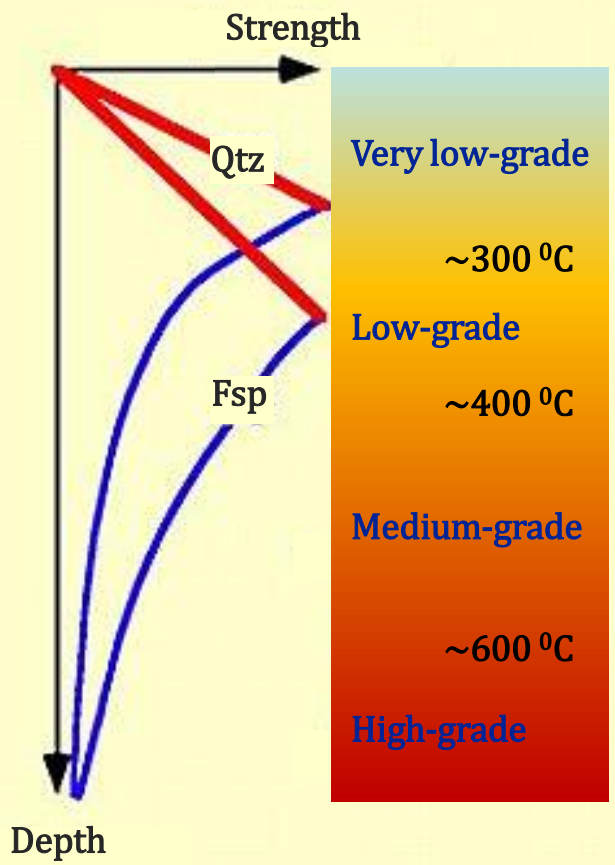
Very low-grade

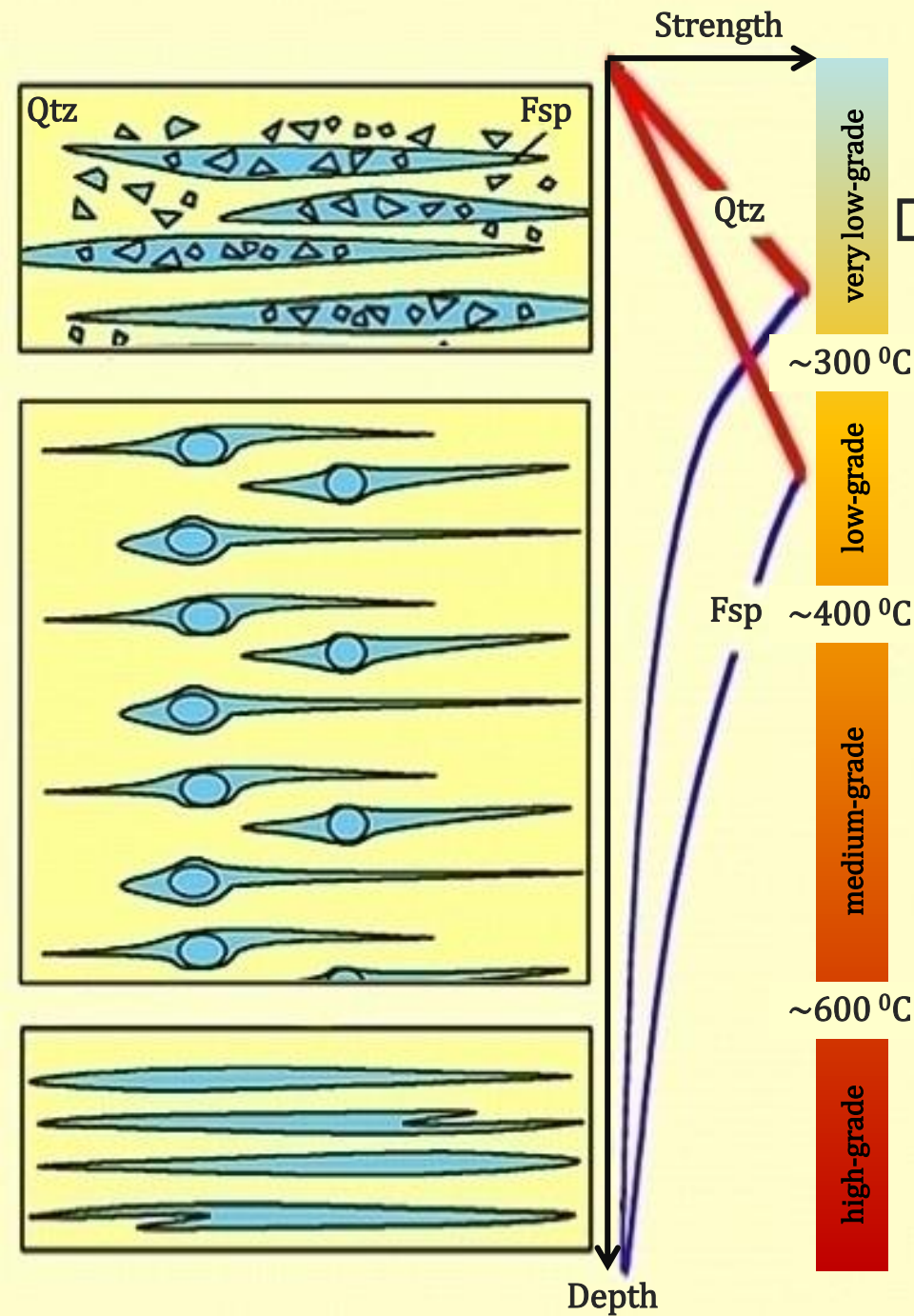


Low/medium-grade

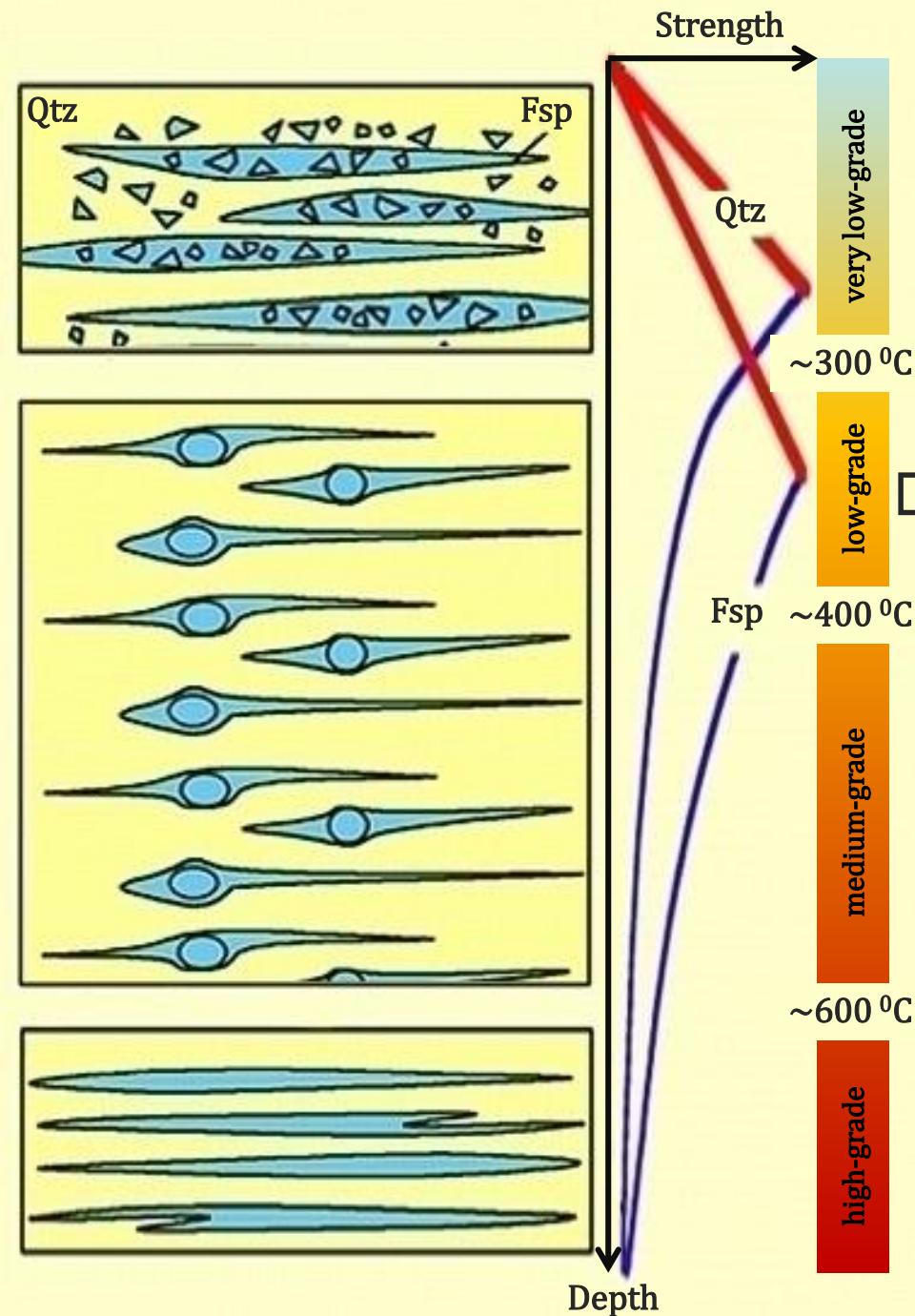


High-grade

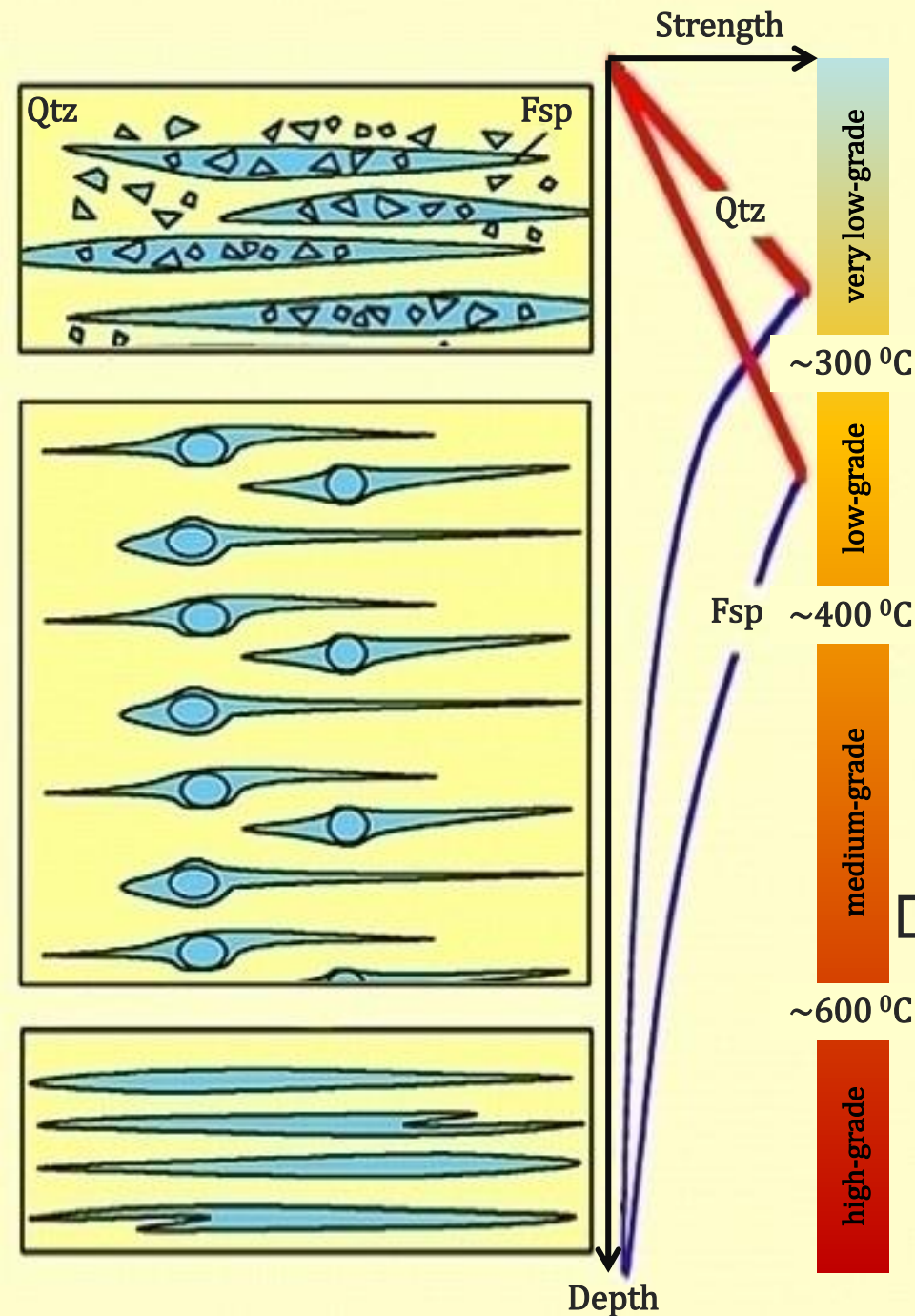




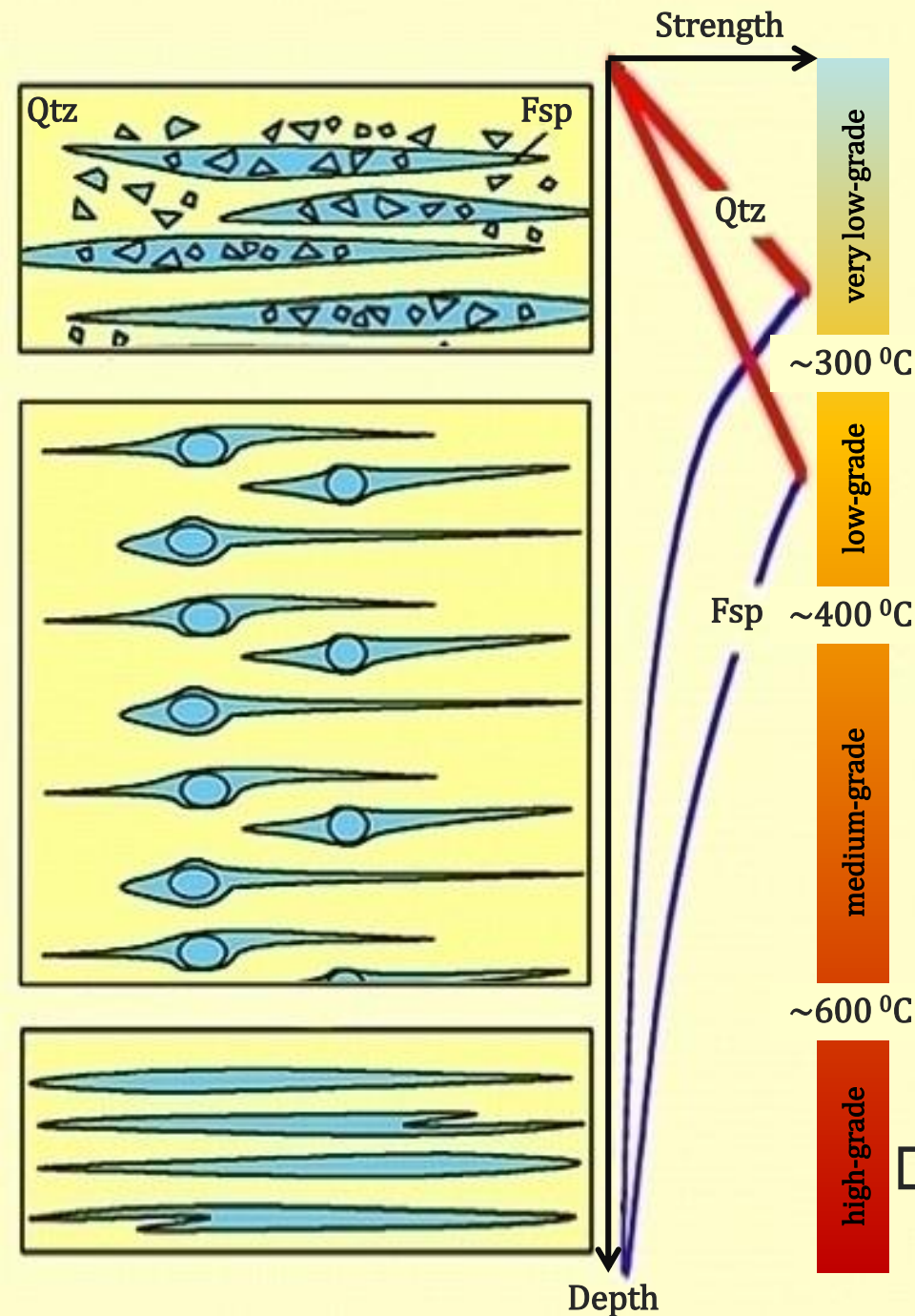
- Qtz & Fsp παραμορφώνονται με **brittle fracturing**.
- **Fsp** το "ασθενέστερο" ορυκτό (λόγω **σχισμού** που μειώνει την αντοχή του).
- Αναπτύσσονται **συσσωματώματα** από **επιμηκυμένα θραύσματα Fsp & Qtz**.
- Αθροίσματα από θραύσματα κόκκων, μαζί με **διαρρήξεις** δημιουργούν μια **κατακλαστική φύλλωση (cataclastic foliation)**.



- Οι πορφυροκλάστες **Fsp brittle fracturing + κυματοειδής κατάσβεση. Core-and-mantle structures** από νεοκρυστάλλωση λόγω χημικής ανισορροπίας, δημιουργούν επιμηκυμένες δομές και **compositional layering**.
- Ο **Qtz ductile deformation** με **dislocation glide & dislocation creep**.
- Τώρα ο **Qtz** είναι το "ασθενέστερο" ορυκτό.
- Δημιουργία **επιμηκυμένων συσσωματωμάτων Qtz (δομές ribbon)** με πτυχωμένους και **μερικά ανακρυσταλλωμένους** κόκκους και υποκόκκους με **όρια // στα ribbons. Περιβάλλουν τους Fsp**.
- Οι **πυρήνες** των παλιών κόκκων Qtz **πολλά subgrains** που περνούν σε νέους ανακρυσταλλωμένους κόκκους.
- Σε **υψηλές παραμορφώσεις**, δημιουργία "**augen**" Fsp που διαχωρίζονται από συσσωματώματα λεπτοκρυσταλλικού ανακρυσταλλωμένου Qtz & Fsp.



- **Qtz & Fsp** όλκιμη (ductile) παραμόρφωση με **dislocation creep, diffusion & recrystallization**.
- Σχηματίζονται **μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά ribbons** (ταινίες), που δίνουν στο πέτρωμα **ταινιωτή δομή**.
- **Όρια** κόκκων και υποκόκκων **πλάγια** στον άξονα των **ribbons** (διαφορά με low-grade ribbons).
- **Subgrains** στους πυρήνες των παλιών κόκκων, με **μετάβαση** από τον πυρήνα στο ανακρυσταλλωμένο περίβλημα.
- Τα "augen" είναι **σπάνια**.
- Τώρα πια **Qtz & Fsp** ίδια αντοχή.



- Όρια κόκκων έντονα καμπυλωτά, με λοβοειδές ή και αμοιβαδοειδές σχήμα.
- Γεωμετρία που οφείλεται στην παραμόρφωση σε **high-grade συνθήκες**, με μεγάλη συνιστώσα μηχανισμών **solid-state diffusive mass transfer** (ή **solid-state diffusion creep**) και των δύο τύπων (**Coble & Nabarro-Herring creep**).

# Τέλος





# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σημειώματα



# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.

Έχουν προηγηθεί οι κάτωθι εκδόσεις:

- Έκδοση διαθέσιμη εδώ <http://eclass.uoa.gr/courses/GEOL143/>



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών,  
Στυλιανός Λόζιος 2015, Στυλιανός Λόζιος. «Μικροτεκτονική - Τεκτονική  
Ανάλυση. Ενότητα 1: Μηχανισμοί παραμόρφωσης». Έκδοση: 1.0.  
Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
<http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL102/>



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/3)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

**Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 1: Copyrighted.

Εικόνα 2: A-cataclasite fabric and b- recrystallised fabric. "Microtectonics", C. W. Passchier, R. A. J. Trouw. Copyrighted.

Εικόνες 3-4: Περιπτώσεις διαλυτοποίησης. "Microtectonics", C. W. Passchier, R. A. J. Trouw. Copyrighted.

Εικόνα 5: Ιγκνιμβρίτης. Copyrighted.

Εικόνα 6: Ασβεστόλιθοι με Alveolina. Copyrighted.

Εικόνα 7: Ενδοκρυσταλλική Παραμόρφωση. Copyrighted.

Εικόνα 8: Kinking σε μαρμαρυγία (μοσχοβίτη). Copyrighted.

<http://www.meteorite-craters.impact-structures.com/gloss/kinked%20mica.jpg>



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/3)

Εικόνα 9: Kinking σε χαλαζία. Copyrighted. <http://www.impactstrukturen.de/wp-content/uploads/2011/11/47-kink-bands-quartz-rubielos-21.jpg>

Εικόνα 10: Kink bands and deformation lamellae in quartz. Copyrighted. <http://www.impact-structures.com/wp-content/uploads/2011/12/kink-bands-quartz-lamellae1.jpg>

Εικόνα 11: Subgrains σε χαλαζία. Copyrighted. [https://lifeinplanelight.files.wordpress.com/2011/02/3\\_22.jpg](https://lifeinplanelight.files.wordpress.com/2011/02/3_22.jpg)

Εικόνα 12: Μηχανισμοί ανακρυστάλλωσης. "Microtectonics", C. W. Passchier, R. A. J. Trouw. Copyrighted.

Εικόνα 13: Δομή "pinning" των ορίων των κόκκων του χαλαζία, σε λευκό μαρμαρυγία. Copyrighted. <http://geo.mff.cuni.cz/seminar/G-141210-Maierova.pdf>

Εικόνα 14: Σκίτσο για την πίεση. Copyrighted. <https://kalakaneis.files.wordpress.com/2010/03/cebcb1cebdcebf83.jpg>





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/3)

Εικόνα 15: Σκίτσο για την πίεση (2). Copyrighted.

<https://jelenakalderon.files.wordpress.com/2012/05/pritisak21.jpg>

Εικόνα 16: Deformation variation with depth in quartz feldspar aggregates.

Copyrighted. <https://veritasestinputeo.files.wordpress.com/2014/11/3-42.png>

