



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Γεωχημεία

Ενότητα 1: Γεωχημικές διεργασίες στο εσωτερικό  
της γης

Χριστίνα Στουραϊτη

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

# Γεωχημικές διεργασίες στο εσωτερικό της γης

## ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΠΥΡΙΓΕΝΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

-Κύρια Στοιχεία

-Ιχνοστοιχεία

# Εισαγωγή

## Χημική σύσταση

Από όλες τις περίπλοκες ταξινομήσεις των πυριγενών πετρωμάτων η **χημική σύσταση** αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό στοιχείο (**ταυτότητα**) για την ταξινόμηση ενός πυριγενούς πετρώματος.

### Γιατί;

- 1) Η **σύσταση** του πετρώματος, συνήθως, αντιπροσωπεύει τη σύσταση του μάγματος, έτσι μας δίνει **πληροφορίες** για την πηγή του μάγματος, δηλαδή το πέτρωμα από το οποίο προήρθε το μάγμα, μέσω της διεργασίας της μερικής τήξης.
- 2) Η χημική **σύσταση** του μάγματος καθορίζει, ποιά **ορυκτά** θα σχηματιστούν και σε ποιές αναλογίες.
- 3) Το σύνολο των **ορυκτών** που κρυσταλλώνονται από ένα μάγμα ίδιας χημικής σύστασης με το πέτρωμα, λέγεται **Norm** (*normalisation – κανονικοποίηση της χημικής σύστασης με βάση την τυπική σύσταση των ορυκτών*). Η Norm είναι η **υπολογισμένη δυνητική ορυκτολογική σύσταση ενός πετρώματος**. Μας βοηθά να συγκρίνουμε πετρώματα μεταξύ τους.
- 4) Επειδή η μεταβολή στη χημική σύσταση των πετρωμάτων δίνει ένα **συνεχές εύρος**, δεν είναι εύκολο, στη πράξη, να ξεχωρίσουμε διαφορετικά πετρώματα.
- 5) Η χημική **σύσταση** δεν μπορεί να προσδιορισθεί στο ύπαιθρο, έτσι οι χημικές ταξινομήσεις προϋποθέτουν αναλύσεις στο εργαστήριο και δεν μας βοηθούν στην εργασία υπαίθρου.



# Απλή ταξινόμηση ηφαιστειακών πετρωμάτων στο ύπαιθρο

Ονοματολογία	Βασικά ορυκτά (+ υαλώδης κύρια μάζα)	Άλλα ορυκτά (παρόντα ή όχι)
<b>Βασάλτης</b>	<b>Ολιβίνη</b> (Olivine)	Κλινοπυρόξενος (Cpx), Ορθοπυρόξενος (Opx), Πλαγιόκλαστο (Plag.)
Βασανίτης	Ολιβίνη + Αστριοειδή (Nepheline/Leucite)	Cpx, Plag
<b>Ανδεσίτης</b>	(χωρίς ολιβίνη) <b>άφθονο Πλαγιόκλαστο</b> (Plag.)	Κλινοπυρόξενος (Cpx), Ορθοπυρόξενος (Opx), Κεροσίλβη (Hbl.)
Τραχύτης	Κ-Άστρο (Sanidine) + Πλαγιόκλαστο (Plag.)	Na-Cpx, Hornblende, Biotite
<b>Δακίτης</b>	Πλαγιόκλαστο (Plag.) + Κεροσίλβη (Hbl)	Cpx, Opx, Biotite
Ρυόλιθος	Χαλαζία (Quartz)	Sanidine, Biotite, Plag., Hornblende, Cpx, Opx

+ υαλώδης κύρια μάζα αυξάνει συνήθως από Βασάλτη → ρυόλιθο



# Περιεχόμενα

- **Μαγματικές διεργασίες και μαγματική διαφοροποίηση**  
(ανασκόπηση γνώσεων Πετρολογίας Πυριγενών)
- **Κύρια Στοιχεία**
- **Ιχνοστοχεία**



# 1. Μαγματική Διαφοροποίηση

- Οι φυσικές διεργασίες που προκαλούν **μεταβολή** στη **σύσταση** του μάγματος, από τη στιγμή που σχηματίζεται (τήγμα - ρευστή φάση) έως ότου ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του (πέτρωμα – στερεά φάση) **μαγματική διαφοροποίηση**.



- Το σύνολο των πετρωμάτων που προέρχονται από διαφοροποίηση της σύστασης **ενός** αρχικού (μητρικού) μάγματος, ονομάζεται **μαγματική σειρά**.



## 2. Μαγματική Σειρά

Παράδειγματα:

- **γρανοδιοριτικής σύστασης μάγμα** θα μας δώσει την εξής ακολουθία πετρωμάτων:

Γρανοδιορίτη – Γρανίτη - Απλίτη & Πηγματίτη  
μαγματική σειρά

- **Βασαλτικής σύστασης μάγμα** θα μας δώσει την εξής ακολουθία πετρωμάτων:

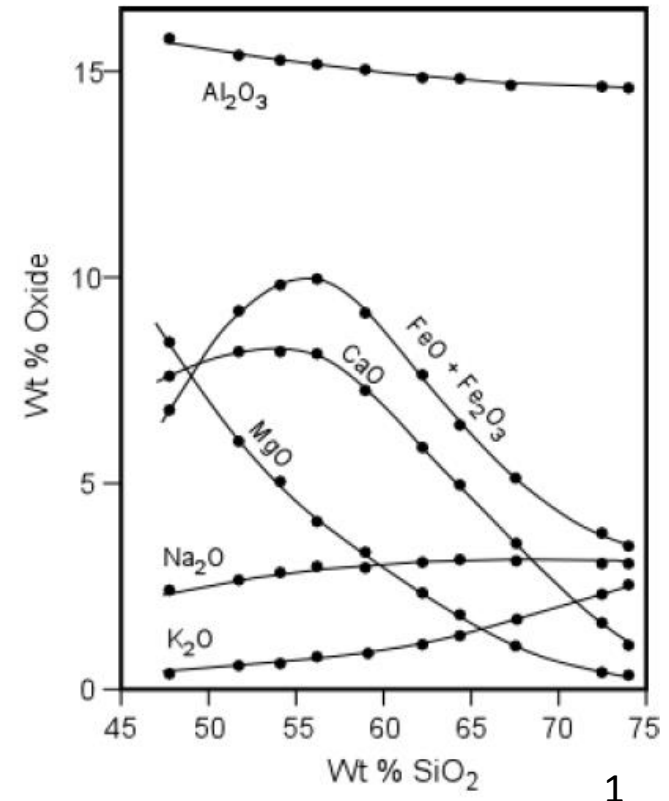
Βασάλτη – Βασαλτ. Ανδεσίτη – Ανδεσίτη – Δακίτη – Ρυόλιθο  
μαγματική σειρά



# Μαγματική Σειρά - Κύρια Στοιχεία

Μεταβολή στη σύσταση (%) των κύριων στοιχείων σε σχέση με το  $\text{SiO}_2$ , είναι γραμμική:

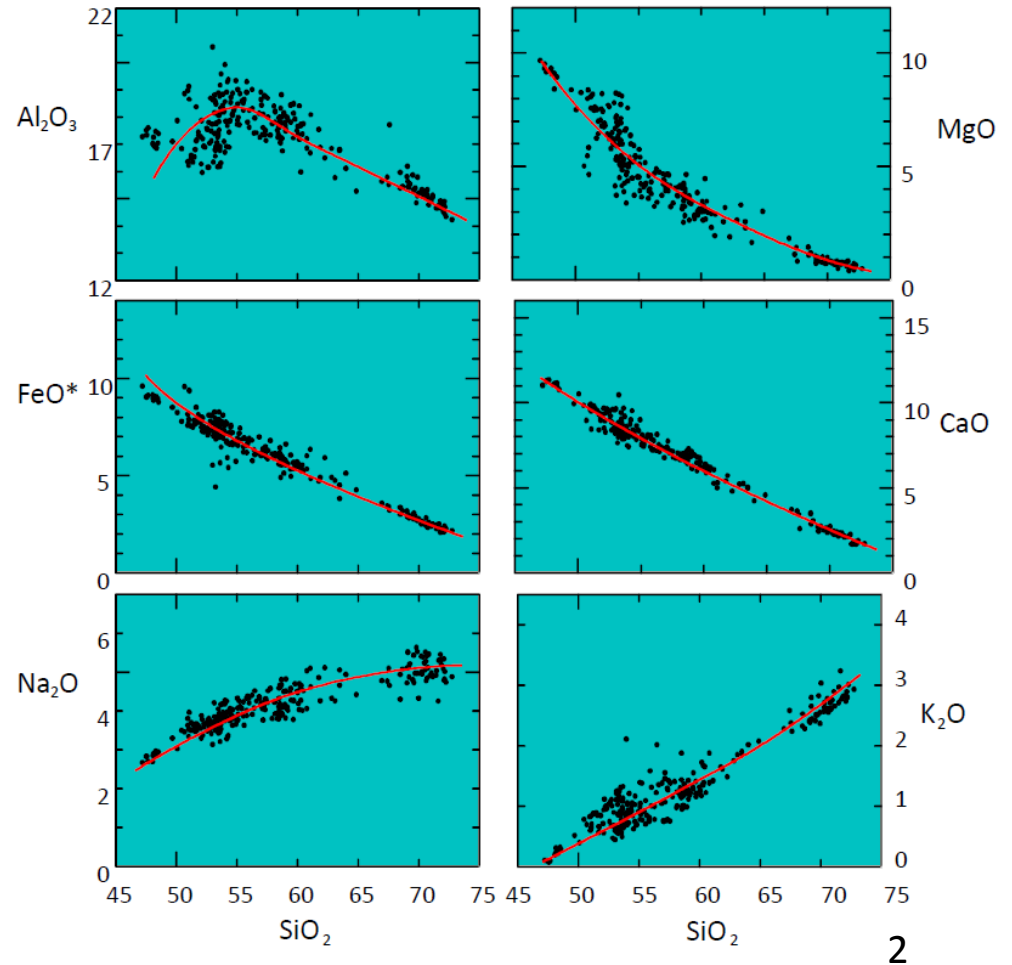
- γραμμική συσχέτιση – τάση (trendline)
- συνεχής ευθεία
- Καμπύλη ή τμήματα με διαφορετική κλίση (θετική ή αρνητική)
- Αλλαγή κλίσης στη γραμμή τάσης → ένδειξη για το ορυκτο/ορυκτά που κρυσταλλώνονται από το αρχικό μάγμα



1



Στην πραγματικότητα παρατηρούμε μια μικρή διασπορά των τιμών, εκατέρωθεν της γραμμής τάσης (trendline)



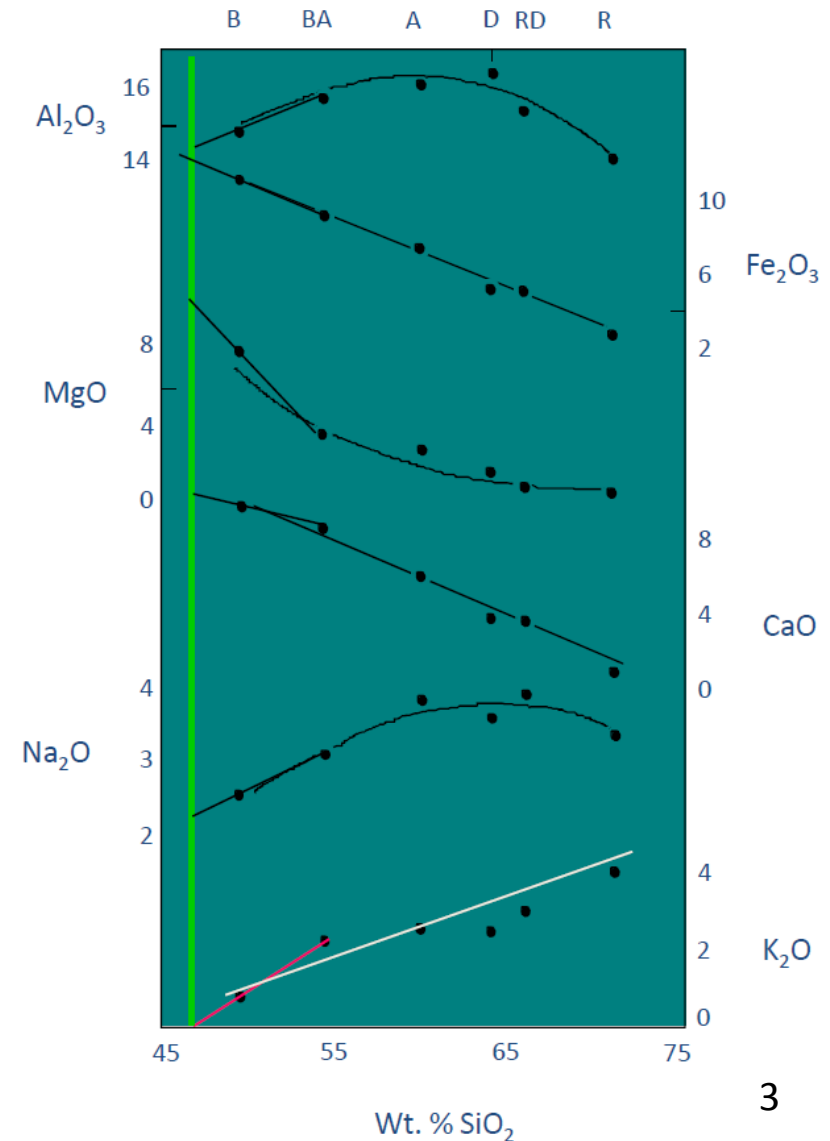
**Διαγράμματα Harker για 310 αναλύσεις δειγμάτων ηφαιστειακών πετρωμάτων, (ηπειρωτικού περιθωρίου Β. Αμερικής, (Crater Lake (Mt. Mazama), Oregon Cascades).**

Προσομοίωση κλασματικής  
κρυστάλλωσης: BA → B →  
πράσινη γραμμή.

Αποτελέσματα:  
απομάκρυνση πλαγιοκλάστου,  
ολιβίνη, πυροξένου και Fe-Ti  
οξειδίων

Oxide	Wt%	Cation Norm	
SiO <sub>2</sub>	46.5	ab	18.3
TiO <sub>2</sub>	1.4	an	30.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.2	di	23.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	11.5	hy	4.7
MgO	10.8	ol	19.3
CaO	11.5	mt	1.7
Na <sub>2</sub> O	2.1	il	2.7
K <sub>2</sub> O	0		
Total	98.1		100

4



3

Then repeat for each increment BA → A etc.



# Εξέλιξη Βασαλτικού μάγματος

**Χρήσιμοι ορισμοί (τα 3 Π):**

**Πρωταρχικό μάγμα (Primary magma):** πηγή προέλευσης, ο **μανδύας**, λόγω μερικής τήξης. Κύριες διεργασίες που προκαλούν διαφοροποίηση στη σύσταση των πρωταρχικών μαγμάτων:

- A) διαφορετικές αρχικές συστάσεις, δηλ. διαφορετικά υλικά στον μανδύα υφίσταται μερική τήξη (ετερογένεια στην πηγή του μάγματος).
- B) διαφορετικός βαθμός μερικής τήξης.
- Γ) η μερική τήξη συντελείται υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης – θερμοκρασίας (μεταβολή τεκτονικό καθεστώος).

**Ελάχιστα διαφοροποιημένο μάγμα (Πρωτογενές ή Primitive magma).**

**Μητρικό μάγμα (Parental magma):** το λιγότερο διαφοροποιημένο μάγμα σε μια μαγματική σειρά, από το οποίο, θεωρούμε ότι, προέρχεται μια σειρά πετρωμάτων.

Η γραμμή μεταβολής σύστασης του τήγματος (**Liquid line of descent**): η γραμμή που συσχετίζει τη σύσταση του μητρικού μάγματος με τα μάγματα που προέρχονται από αυτό (μαγματική σειρά).

**Μαγματική Διαφοροποίηση (Differentiation):** η διεργασία που επιφέρει μεταβολή στη σύσταση του μητρικού μάγματος δημιουργώντας μια σειρά συστάσεων.



# Μαγματικές Σειρές

## (συστάσεις πρωταρχικών μαγμάτων)

### Κύριες Μαγματικές Σειρές:

- **Αλκαλικές σειρές** (κύρια πυριτική φάση - νεφελίνης στην κανονικοποιημένη ορυκτολογική σύσταση - Ne-normative)
  - **Υποαλκαλικές σειρές** (κύρια πυριτική φάση χαλαζία non Ne-normative)
  - **Θολεϊτικές σειρές (Tholeiitic series)**
  - **Ασβεσταλκαλικές σειρές (Calc-alkaline series)**
  - Με βάση το διάγραμμα AFM, γίνεται πιο αναλυτικός διαχωρισμός σε **Θολεϊτικές σειρές (Tholeiitic series)** και **Ασβεσταλκαλικές σειρές (Calc-alkaline series)**
- $A = K_2O + Na_2O$
  - $F = FeO$  in wt. %
  - $M = MgO$



# Μαγματική Διαφοροποίηση

1. Κλασματική κρυστάλλωση.
2. Διαφορετικοί βαθμοί μερικής τήξης της ίδιας πηγής μάγματος.
3. Αφομοίωση («contamination») πετρωμάτων των φλοιού.
4. Ανάμειξη δύο ή περισσότερων τύπων μαγμάτων.
5. Αδυναμία ανάμειξης τηγμάτων (πχ. Πυριτικά – ανθρακικά τήγματα, πυριτικά – θειούχα τήγματα).



# Μαγματική Διαφοροποίηση

## 1. Κλασματική κρυστάλλωση

Μηχανισμός διαχωρισμού κρυστάλλων από το μάγμα:

→ βαρυτομετρικός διαχωρισμός ή επίπλευση ελαφρών κρυστάλλων

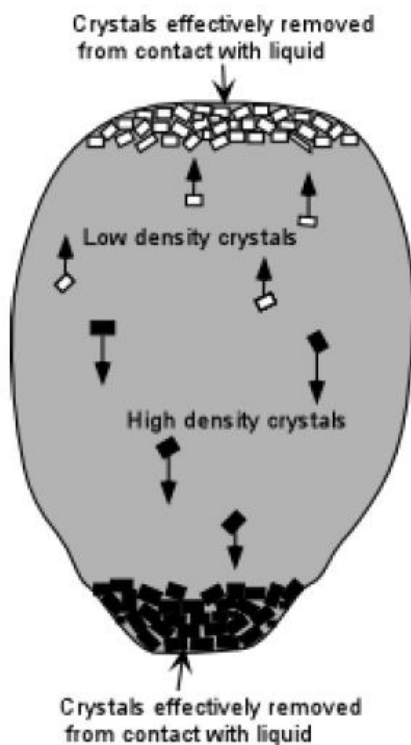
→ Μέγεθος κρυστάλλου, ταχύτητα στερεοποίησης

→ Θερμά ρεύματα στο μαγματικό θάλαμο

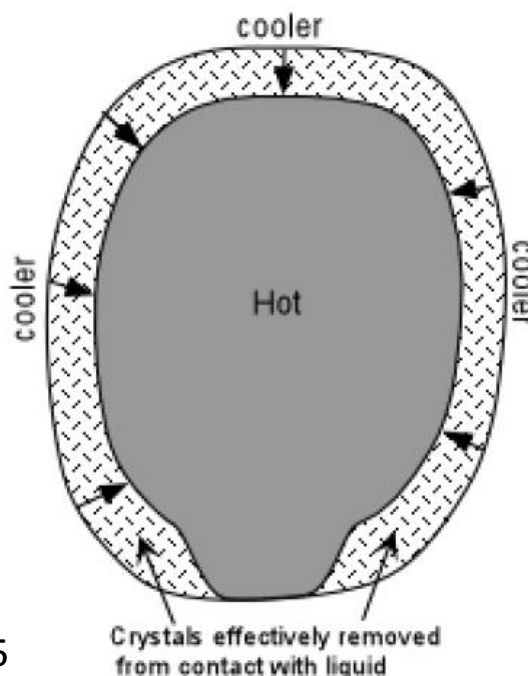


-Σειρά τηγμάτων διαφορετικής σύστασης.

-Στρώσεις από συγκέντρωση κρυστάλλων (cumulates)



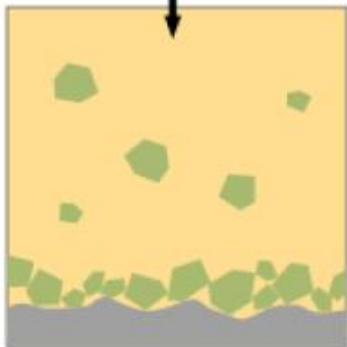
5



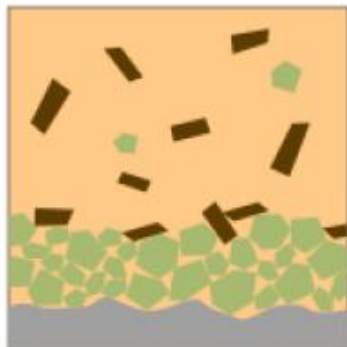
Magma has composition A



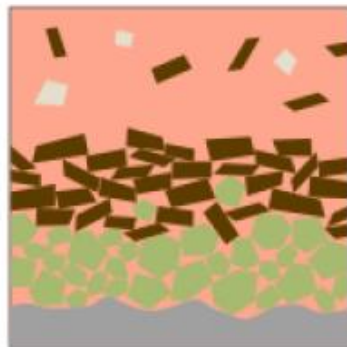
Magma has composition B



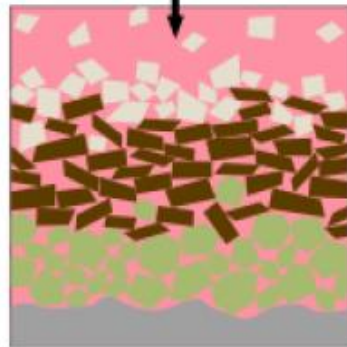
1



2



3

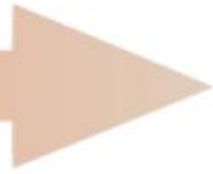


4

1200°C

600°C

Cooling

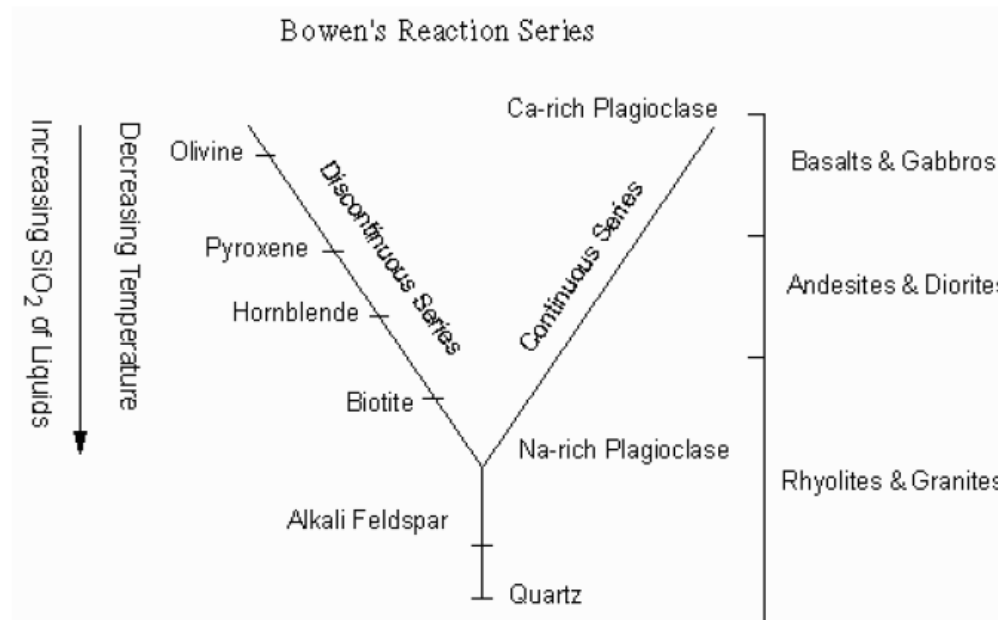


6



# 1. Κλασματική κρυστάλλωση

## Σειρά κρυστάλλωσης ορυκτών



7

Σειρές αντίδρασης του **Bowen**: συνεχής και ασυνεχής σειρές.

Συνέπεια της κλασματικής κρυστάλλωσης ➡ Ζώνωση κρυστάλλων πχ. πλαγιοκλάστου, ολιβίνη κλπ.





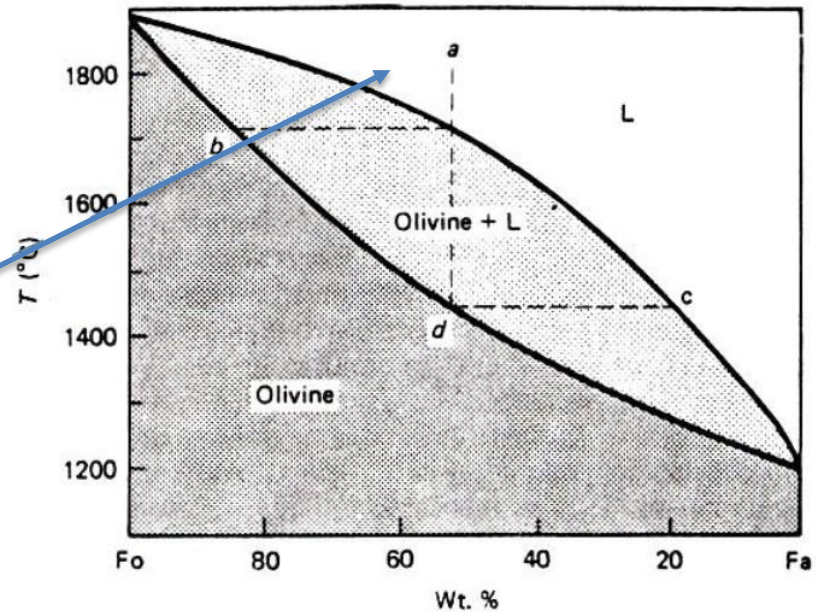
# 1. Κλασματική κρυστάλλωση

Σύστημα: Ολιβίνης – τήγμα

Κρύσταλλοι ολιβίνη αποτελούν στερεό διάλυμα, δηλ. συνεχή σειρά συστάσεων μεταξύ δύο ακραίων συστάσεων

Ολιβίνης -  $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$   
 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  – Φοστερίτης (Fo)  
 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  – Φαϋαλίτης (Fa)

Μάγμα σύστασης **a**, όταν φτάσει σε  $T$  1700 C, δώσει τους πρώτους κρυστάλλους ολιβίνη. Οι κρύσταλλοι αυτοί θα έχουν σύσταση (**b**): 80% Fo ενώ το τήγμα που συνυπάρχει με τους πρώτους κρυστάλλους έχει σύσταση 50% Fo.



**Figure 11.14** Phase diagram for the system forsterite ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )-fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), illustrating how fractional crystallization affects a solid solution series. Olivine crystals forming from a melt with initial composition **a** will range in composition from **b** to some point past **d**.

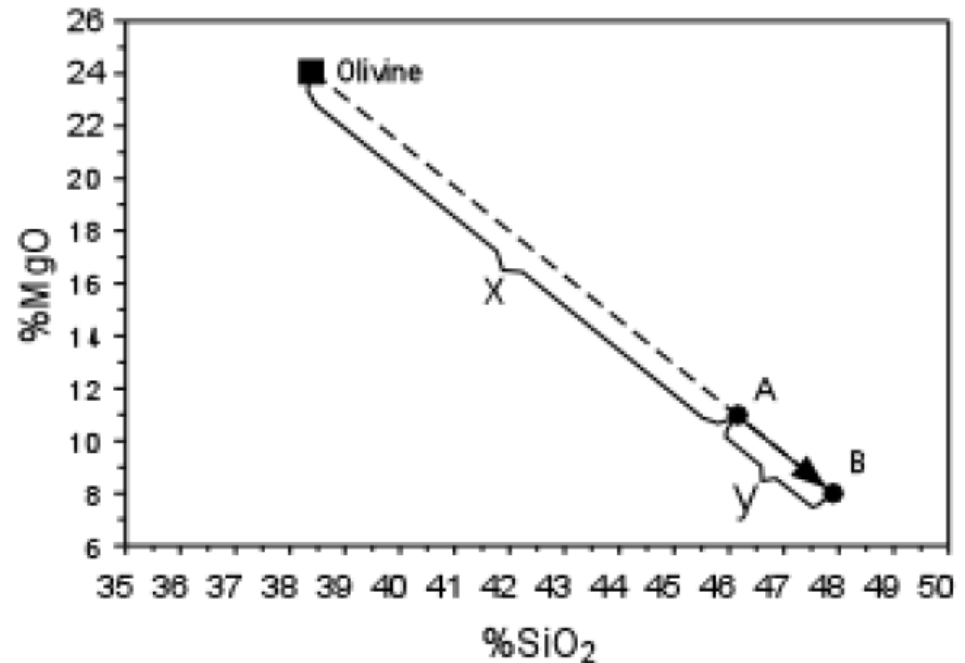
# 1. Κλασματική κρυστάλλωση

1) Απλή περίπτωση:

Κλασματική κρυστάλλωση μόνο **Ολιβίνη** από ένα αρχικό μάγμα με σύσταση (A) → αποχωρισμός κρυστάλλων ολιβίνη θα οδηγήσει τη σύσταση του μάγματος στο (B)

## Κανόνας του Lever

Ποσοστό (%) κλασματικής κρυστάλλωσης **Ολιβίνη**  
 $= [\gamma / (x + \gamma)] * 100$



9



# 1. Κλασματική κρυστάλλωση

2) Περίπλοκη περίπτωση:

Κλασματική κρυστάλλωση

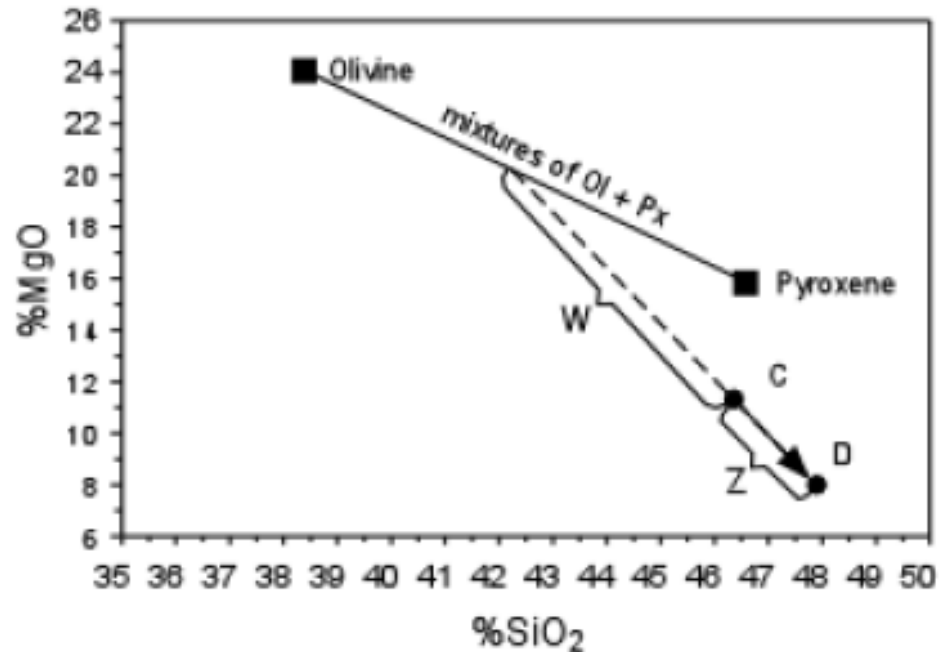
**Ολιβίνη (50%) + Πυροξένου (50%)**

από ένα αρχικό μάγμα με σύσταση (C) → αποχωρισμός κρυστάλλων θα οδηγήσει τη σύσταση του μάγματος στο (D).

Κανόνας του Lever

Ποσοστό (%) κλασματικής κρυστάλλωσης

$$= [z/(w + z)] * 100$$



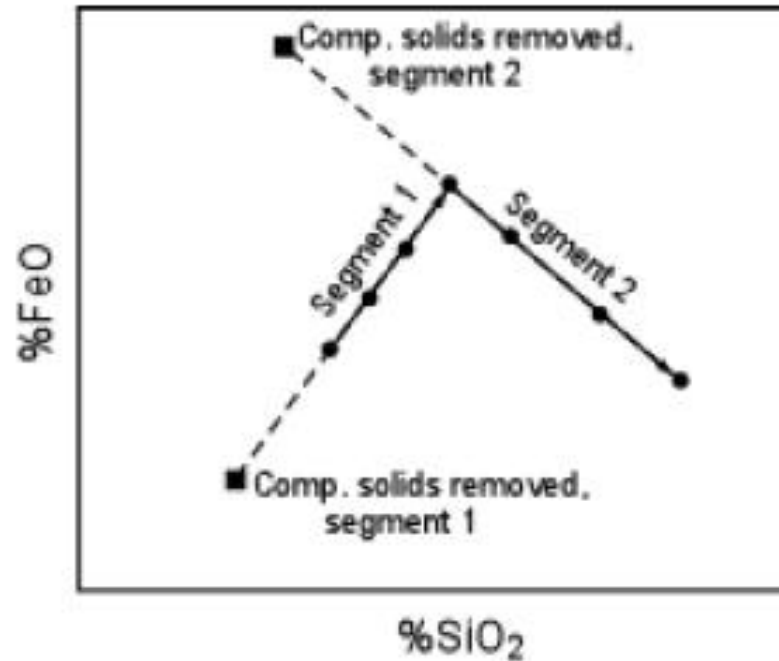
10



# 1. Κλασματική κρυστάλλωση

3) Ακόμα πιο περίπλοκη περίπτωση:

αλλαγή στο συνδιασμό των ορυκτών που αποχωρίζονται από το μάγμα, προκαλεί **αλλαγή στη κλίση** της γραμμής.



11



## 2. Διαφορετικοί βαθμοί μερικής τήξης της ίδιας πηγής μάγματος

Παράδειγμα: Μερική τήξη μανδουακού υλικού  $\Leftrightarrow$  **Περιδοτίτη**  
(Ολιβίνη+Ορθοπυρόξενος+Κλινοπυρόξενος)

**Προϋπόθεση** για να τηχθεί το υλικό του ανώτερου μανδύα είναι, να έχει τη σύσταση του **ευτηκτικού σημείου**: μίγμα 35 % Ολιβίνη (Fo) – 45% Κλινοπυρόξενου (Di) – 20 % Χαλαζία (Q)

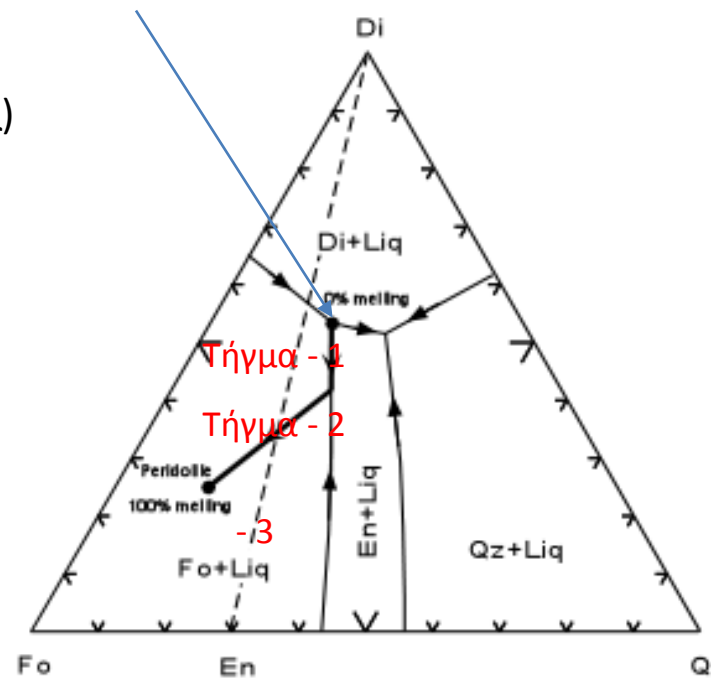
Όσο αυξάνει ο βαθμός μερικής τήξης, η σύσταση του τήγματος μετατοπίζεται: 1  $\rightarrow$  2  $\rightarrow$  3 (πιο Ολιβινικό)

**Συμπέρασμα:** Από την ίδια πηγή μάγματος, όσο αυξάνει ο βαθμός μερικής τήξης, προκύπτουν τήγματα (μάγματα) διαφορετικής σύστασης.

Σειρά μερικής τήξης των ορυκτών, όσο αυξάνει ο βαθμός μερικής τήξης:

1. Διοψίδιος (εξαφάνιση διοψιδίου, β.μ.τ > 23%)
2. εξαφάνιση Ενστατίτης: (2)  $\rightarrow$  (3)
3. 100% τήξη = περιδοτίτη (3)

Ευτηκτικό σημείο (1)  
Di + En + Ol + Liquid



Διάγραμμα Φάσεων του συστήματος: Di – Fo – Q

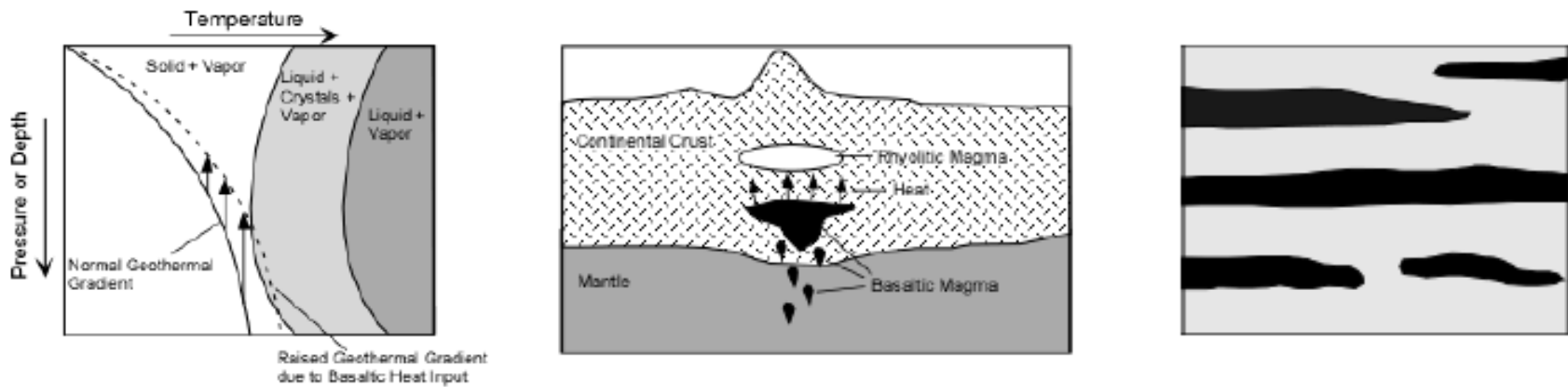
# Μοντέλα μερικής τήξης

- (α) Σε ισορροπία (Equilibrium partial melting ή batch melting)  $\leftrightarrow$  κλασματικής κρυστάλλωσης
- (β) Μερική τήξη κατά κλάσματα (Fractional melting or incremental batch melting)
- (γ) Τήξη ζώνης (Zone melting)



# 3. Ανάμειξη μαγμάτων (magma mixing)

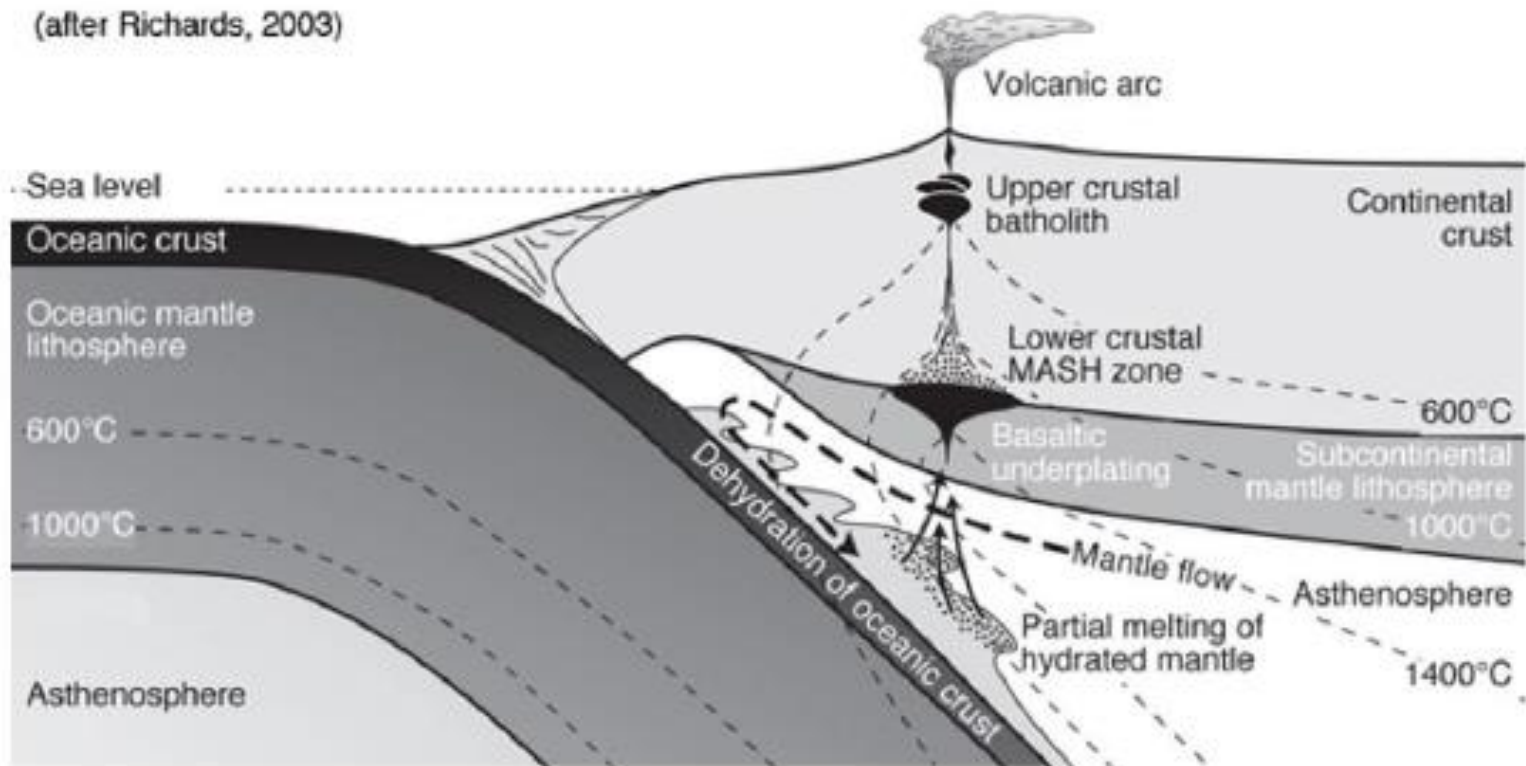
Ανάμειξη δύο διαφορετικών μαγμάτων που σχηματίζουν ένα μάγμα ενδιάμεσης σύστασης.



Magma Type	Solidified Rock	Chemical Composition	Temperature	Viscosity	Gas Content
Basaltic	Basalt	45-55 SiO <sub>2</sub> %, high in Fe, Mg, Ca, low in K, Na	1000 - 1200 °C	Low	Low
Andesitic	Andesite	55-65 SiO <sub>2</sub> %, intermediate in Fe, Mg, Ca, Na, K	800 - 1000 °C	Intermediate	Intermediate
Rhyolitic	Rhyolite	65-75 SiO <sub>2</sub> %, low in Fe, Mg, Ca, high in K, Na.	650 - 800 °C	High	High



# Ανάμειξη μαγμάτων σε περιβάλλον σύγκλισης πλακών



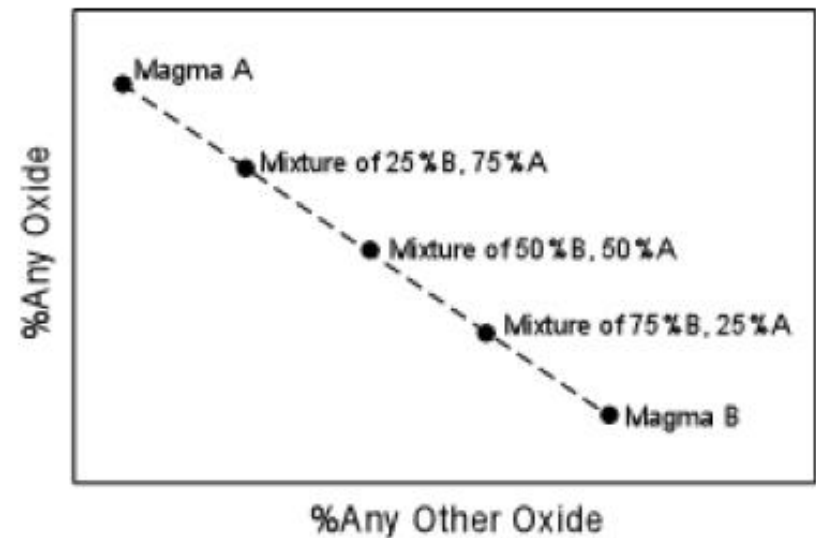
14





# 3. Ανάμειξη μαγμάτων

- Ενδείξεις στη χημική σύσταση.
- Στα διαδυκά διαγράμματα οξειδίου – οξειδίου η διεργασία της ανάμειξης μας δίνει ευθείες γραμμές.
- Οι αναλογίες μίξης θα πρέπει να είναι ίδιες σε όλα τα διαγράμματα οξειδίων



15



# ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Πως οι διεργασίες μαγματικής διαφοροποίησης οδηγούν στην κατανομή (χημική κλασμάτωση) των ιχνοστοιχείων στα πετρώματα?



- Συντελεστής Κατανομής (Partition coefficient)  
 $K_d = C_s / C_l$
- ανταγωνιστικό, μη ανταγωνιστικό (σε σχέση με κάποιο ορυκτό)
- Ολικό Συντελεστή Κατανομής (Bulk repartition coefficient)  $D = S K_d X_i$ , όπου,  $X_i$  είναι η % αναλογία του κάθε ορυκτού (i) στο πέτρωμα.



# Κατανομή των ιχνοστοιχείων

- Οι τιμές των  $K_d$  και  $D_A$  μας δείχνουν την τάση ενός στοιχείου να προτιμά, λιγότερο ή περισσότερο, τη στερεά φάση από το τήγμα
  - $D_A > 1$  Το στοιχείο είναι **ανταγωνιστικό** - *compatible* (συλλαμβάνεται - "captured").
  - Ni, Cr, Co, etc.
  - $D_A = 1$  The element is **ουδέτερο** - *neutral* ("camouflaged").
  - $D_A \ll 1$  Το στοιχείο είναι **μη ανταγωνιστικό** - *incompatible* (ελεύθερο - "released")
- Large Ion Lithophile Elements (LILE): K, Rb, Sr, Ba,
- Zr, U, Th, REE,
- High field strength elements (Nb, Ta, Ti, Zr, Hf)



# Συνοψίζοντας...

Συμπέρασμα:

Τα μη Ανταγωνιστικά στοιχεία (**incompatible**) έχουν  $k_d < 1$  για **όλα τα κοινά ορυκτά** στο μανδύα.

Έτσι, τα μη Ανταγωνιστικά στοιχεία έχουν και το  $D < 1$ , στα μανδυακά πετρώματα (περιδοτίτες), γιατί οι ενέργειες που απαιτούνται για τις υποκαταστάσεις τους είναι πολύ υψηλές, σε όλα τα μανδυακά ορυκτά.



# Περιοδικός Πίνακας- Γεωχημική Θεώρηση

LILE (μικρό σθένος / μεγάλη ακτίνα)

V · T · E

**Goldschmidt classification in the periodic table**

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
			+3				+2, +3											
* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Legend: Lithophile Siderophile Chalcophile Atmophile Synthetic



Η ανταγωνιστικότητα εξαρτάται από τα είδη των ορυκτών και των μαγμάτων που μελετάμε.

Ποιά στοιχεία είναι ανταγωνιστικά σε ένα βασαλτικό πέτρωμα? Γιατί?

**Table 9-1.** Partition Coefficients ( $C_S/C_L$ ) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	<i>0.01</i>	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	<i>0.01</i>	2.00	7.4
La	0.007	<i>0.03</i>	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.582	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	6.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993).

\*  $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$  *Italics* are estimated

17



# Παράδειγμα

- Υπολογίζουμε το  $D$  του  $Y_b$  για ένα...
  - Λερζόλιθο (80% Ol, 10% Orx, 10% Cpx)
  - Λερζόλιθο που περιέχει γρανάτη (70% Ol, 10% Orx-Cpx-Gt)
- Υπολογίζουμε το  $D$  του  $Sr$  για ...
  - Στρώσεις συσώρευσης κρυστάλλων Cpx-Plag (cumulate) (50/50)
  - Στρώσεις συσώρευσης κρυστάλλων Cpx-Orx (cumulate) (50/50)
- Πως θα εξελιχθεί η σύσταση του υπολειμματικού τήγματος?





# Εξιχνίαση συγκεκριμένων ορυκτών:

- Ni μεγάλη κλασμάτωση → ολιβίνη > πυρόξενο.
- Cr και Sc → πυροξένους » ολιβίνη.
- Με βάση το λόγο Ni/Cr ή Ni/Sc μπορούμε να διακρίνουμε την επίδραση του ολιβίνης ή αυγίτη σε ένα μάγμα ή σε μια μαγματική σειρά πετρωμάτων που προήρθαν από μερική τήξη ή κλασματική κρυστάλλωση.

**Table 9-1. Partition Coefficients ( $C_S/C_L$ ) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks**

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4

18



# Υπόθεση εργασίας:

κλασματική κρυστάλλωση καθαρών φάσεων Ολιβίνη ή Κλινοπυρόξενου

**Table 9-1.** Partition Coefficients ( $C_D/C_L$ ) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4
La	0.007	0.03	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.582	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	6.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993).

\*  $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$  *Italics* are estimated

19



# Sr και Ba (μη ανταγωνιστικά στοιχεία)

- **Sr** αποκλείεται από τα περισσότερα κοινά ορυκτά, εκτός από το **πλαγιόκλαστο (plagioclase)**
- **Ba** ομοίως, αποκλείεται από τα περισσότερα κοινά ορυκτά εκτός από τον **αλκαλικό άστριο (alkali feldspar)**
- ο λόγος **Ba/Sr** μας βοηθά να διακρίνουμε εάν κρυσταλλώνεται K-ουχος άστριος (Kspar) ή Πλαγιόκλαστο (Plag)



# Λόγος δύο ιχνοστοιχείων

- Sr και Ba είναι **μη ανταγωνιστικά** στοιχεία: → εισέρχονται στα πρώτα τήγματα κατά τη διεργασία της μερικής τήξης, ή εμπλουτίζονται συνεχώς στα υπολειματικά ρευστά της κλασματικής κρυστάλλωσης.
- Μεταβολή της τάσης αυτής συμβαίνει όταν στα ορυκτά της κ.κ συμπεριλαμβάνεται το **Πλαγιόκλαστο** ή/και K-άστριος.
- Επειδή η σειρά κρυστάλλωσης είναι **Πλαγιόκλαστο** > **Ορθόκλαστο**, ο λόγος **Ba/Sr** θα αυξάνεται όσο διαρκεί η κρυστάλλωση του πλαγιόκλαστου και εν συνεχεία όταν αρχίζει να κρυσταλλώνεται ορθόκλαστο θα αρχίζει να μειώνεται.



# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:

- Υπολογισμός του συντελεστή κατανομής ενός στοιχείου σε ένα μαγματικό σύστημα.
- Ολικός συντελεστής κατανομής “**bulk Kd**”, ή **D**.
- Πχ. για ένα βασαλτικό πέτρωμα, με σύσταση: 45% olivine, 35% opx and 20% cpx πως υπολογίζουμε το **D** του **Rb** και του **Co**.
- Χρησιμοποιώντας δεδομένα του **Kd** από ένα Πίνακα δεδομένων.
- $D = k^{ol/l} \cdot x^{ol} + k^{opx/l} \cdot x^{opx} + k^{cpx/l} \cdot x^{cpx} \dots\dots\dots$



# Υπολογισμός:

	$K_d$ ol	$K_d$ opx	$K_d$ cpx	Bulk $K_d$ or D
<b>Rb</b>	0,006	0,03	0,14	$0,45*0,006 + 0,35*0,03 + 0,2*0,04 = \mathbf{0.021}$
<b>Co</b>	3,8	3	1,2	$0,45*3,8 + 0,35*3 + 0,2*1,2 = \mathbf{3,0}$

Συμπέρασμα:

για το σύστημα που μελετάμε

**Rb**  $D < 0.01 \Rightarrow$  **μη-ανταγωνιστικό (incompatible)**

**Co**  $D > 1 \Rightarrow$  **ανταγωνιστικό (compatible)**

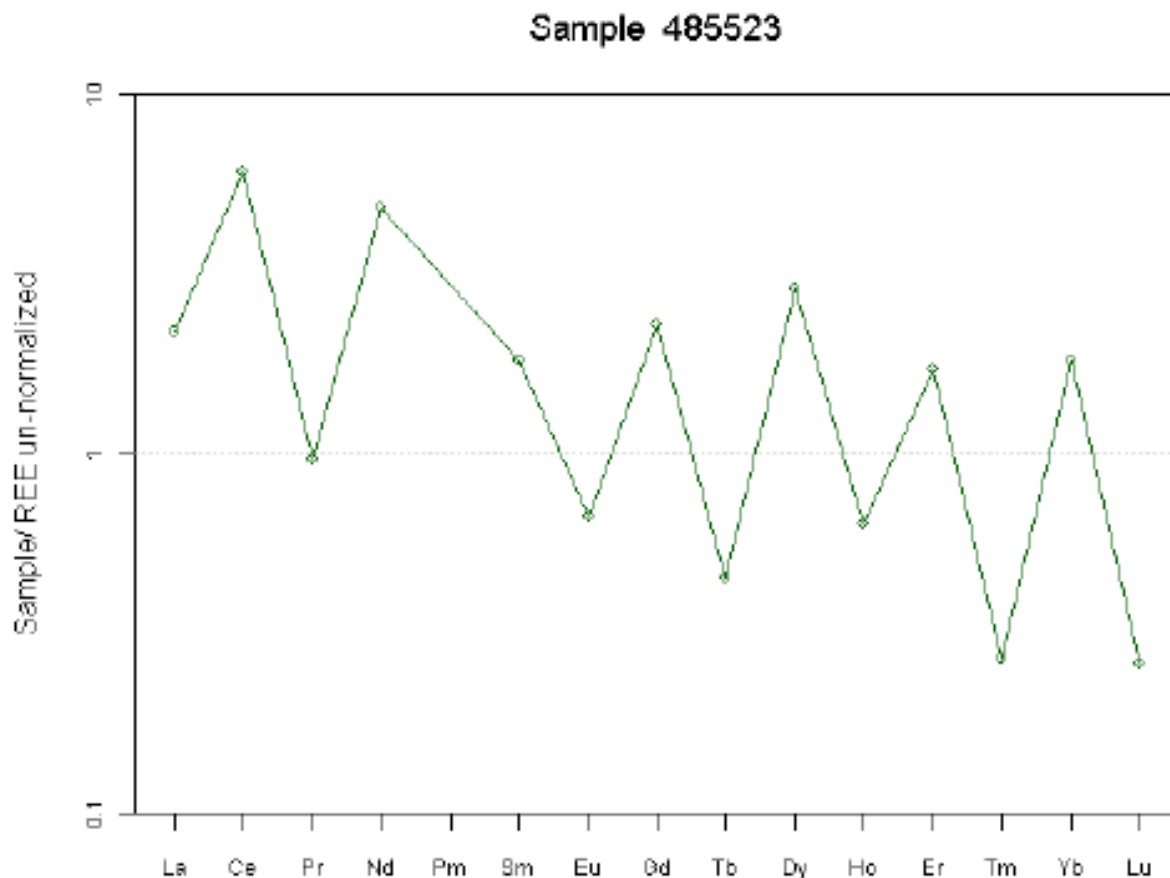


# Κανονικοποίηση συστάσεων στα διαγράμματα

- Για λόγους εξομάλυνσης των τιμών.
- Διαιρώντας όλες τις συστάσεις με μια κοινή σύσταση, μπορούμε να κάνουμε συγκρίσεις.
- Η σύσταση του χονδρίτη μετεωρίτη θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την πρωταρχική σύσταση της γης πριν υποστεί διαφοροποίηση (φλοιό-μανδύα-πυρήνα).
- Σε μια μαγματική σειρά, το λιγότερο διαφοροποιημένο δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση των υπολοίπων δειγμάτων.



# Συγκέντρωση REE στο δείγμα



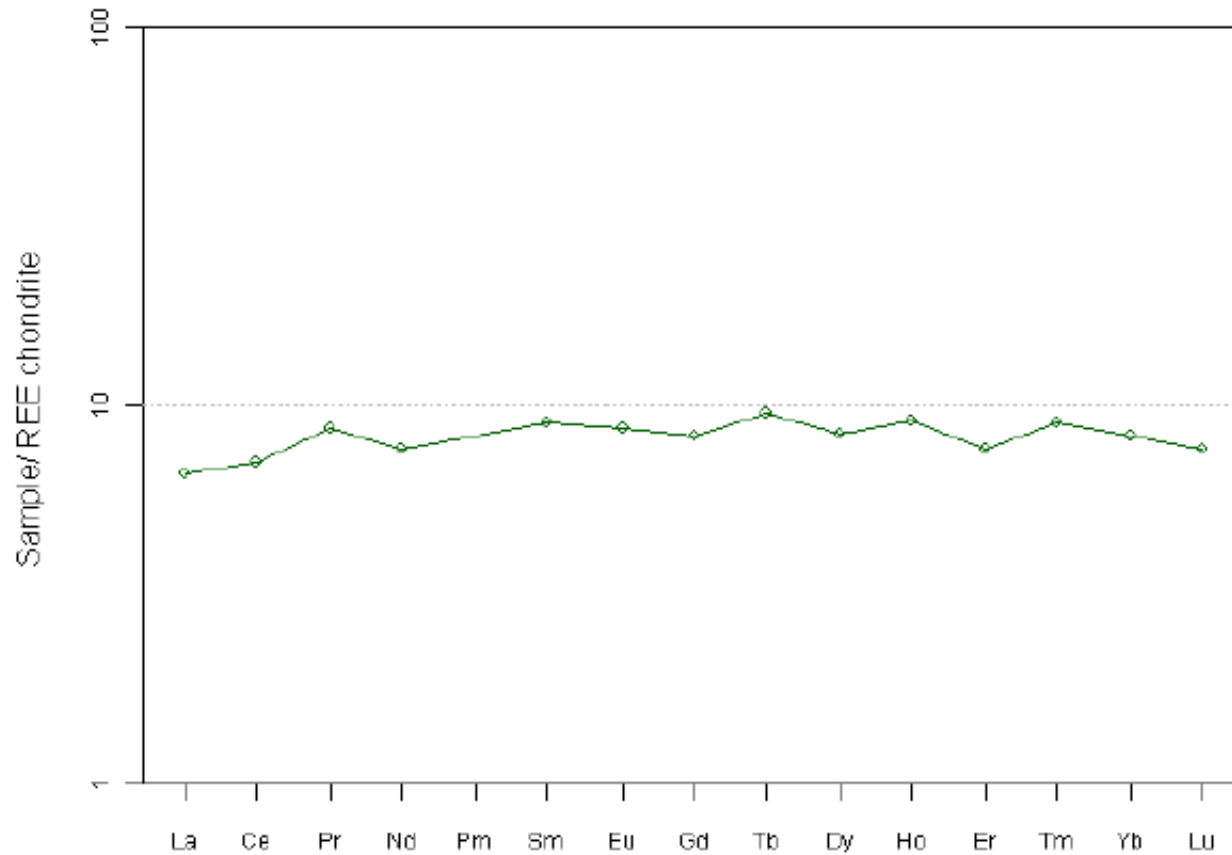
20





# ..κανονικοποιημένη σύσταση

Sample 485523



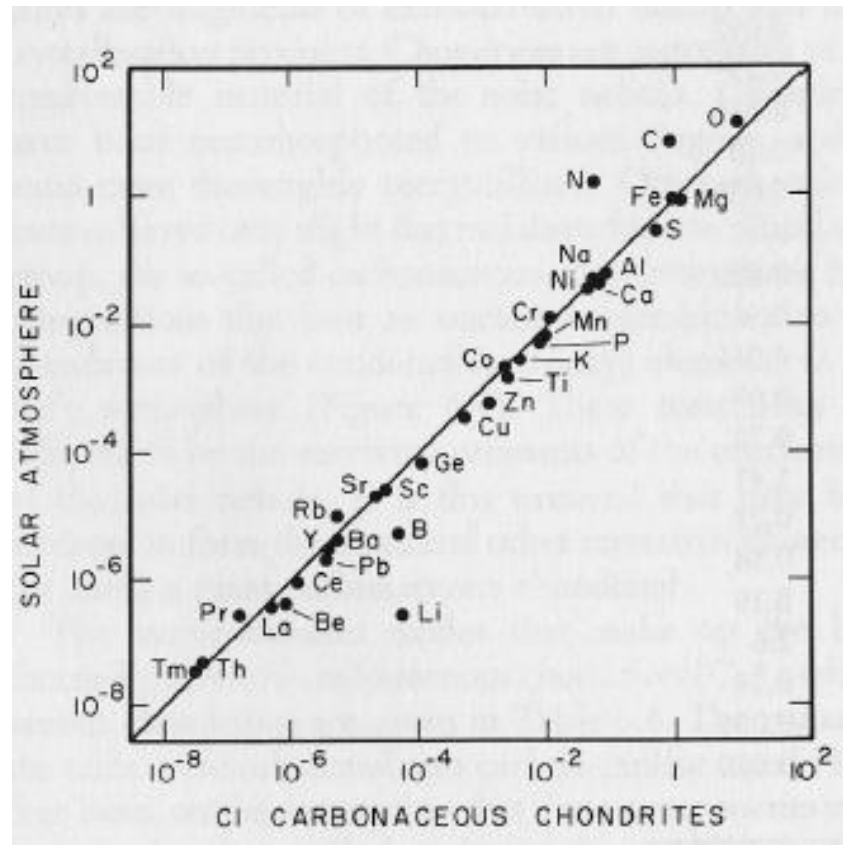
21



# Σύσταση των Χονδριτών (C1 Carbonaceous Chondrites) vs. Ηλιακού συστήματος

**Table 6.3.** Estimated abundances (atoms per  $10^6$  Si atoms) of elements in the sun's atmosphere. (BVTP, 1981.)

Atomic number	Element	Abundance	Atomic number	Element	Abundance
1	H	$2.66 \times 10^{24}$	44	Ru	1.9
2	He	$1.9 \times 10^7$	45	Rh	0.40
3	Li	60	46	Pd	1.3
4	Be	1.2	47	Ag	0.46
5	B	45	48	Cd	1.55
6	C	$1.11 \times 10^7$	49	In	0.19
7	N	$2.31 \times 10^4$	50	Sn	3.7
8	O	$1.84 \times 10^7$	51	Sb	0.31
9	F	780	52	Te	6.5
10	Ne	$2.4 \times 10^5$	53	I	1.27
11	Na	$6.0 \times 10^4$	54	Xe	5.84
12	Mg	$1.06 \times 10^6$	55	Cs	0.39
13	Al	$8.5 \times 10^4$	56	Ba	4.8
14	Si	$1.00 \times 10^6$	57	La	0.37
15	P	6,500	58	Ce	1.2
16	S	$5.0 \times 10^5$	59	Pr	0.18
17	Cl	4,740	60	Nd	0.79
18	Ar	$1.06 \times 10^5$	62	Sm	0.24
19	K	3,500	63	Eu	0.094
20	Ca	$6.25 \times 10^4$	64	Gd	0.42
21	Sc	31	65	Tb	0.076
22	Ti	2,400	66	Dy	0.37
23	V	254	67	Ho	0.092
24	Cr	$1.27 \times 10^4$	68	Er	0.23
25	Mn	9,300	69	Tm	0.035
26	Fe	$9.0 \times 10^5$	70	Yb	0.20
27	Co	2,200	71	Lu	0.035
28	Ni	$4.78 \times 10^4$	72	Hf	0.17
29	Cu	540	73	Ta	0.020
30	Zn	1,260	74	W	0.30
31	Ga	38	75	Re	0.051
32	Ge	117	76	Os	0.69
33	As	6.2	77	Ir	0.72
34	Se	67	78	Pt	1.41
35	Br	9.2	79	Au	0.21
36	Kr	41.3	80	Hg	0.14
37	Rb	6.1	81	Tl	0.19
38	Sr	22.9	82	Pb	2.6
39	Y	4.8	83	Bi	0.14
40	Zr	12	90	Th	0.036
41	Nb	0.9	92	U	0.010
42	Mo	4.0			

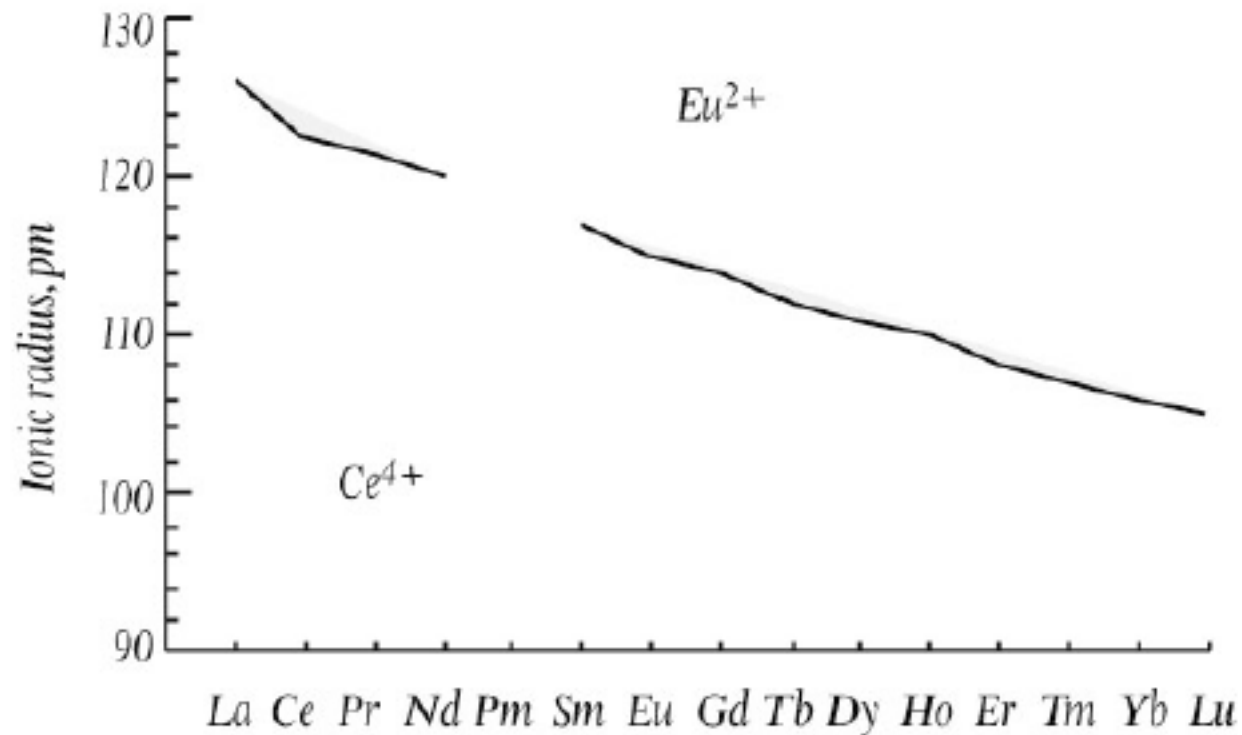


22

23



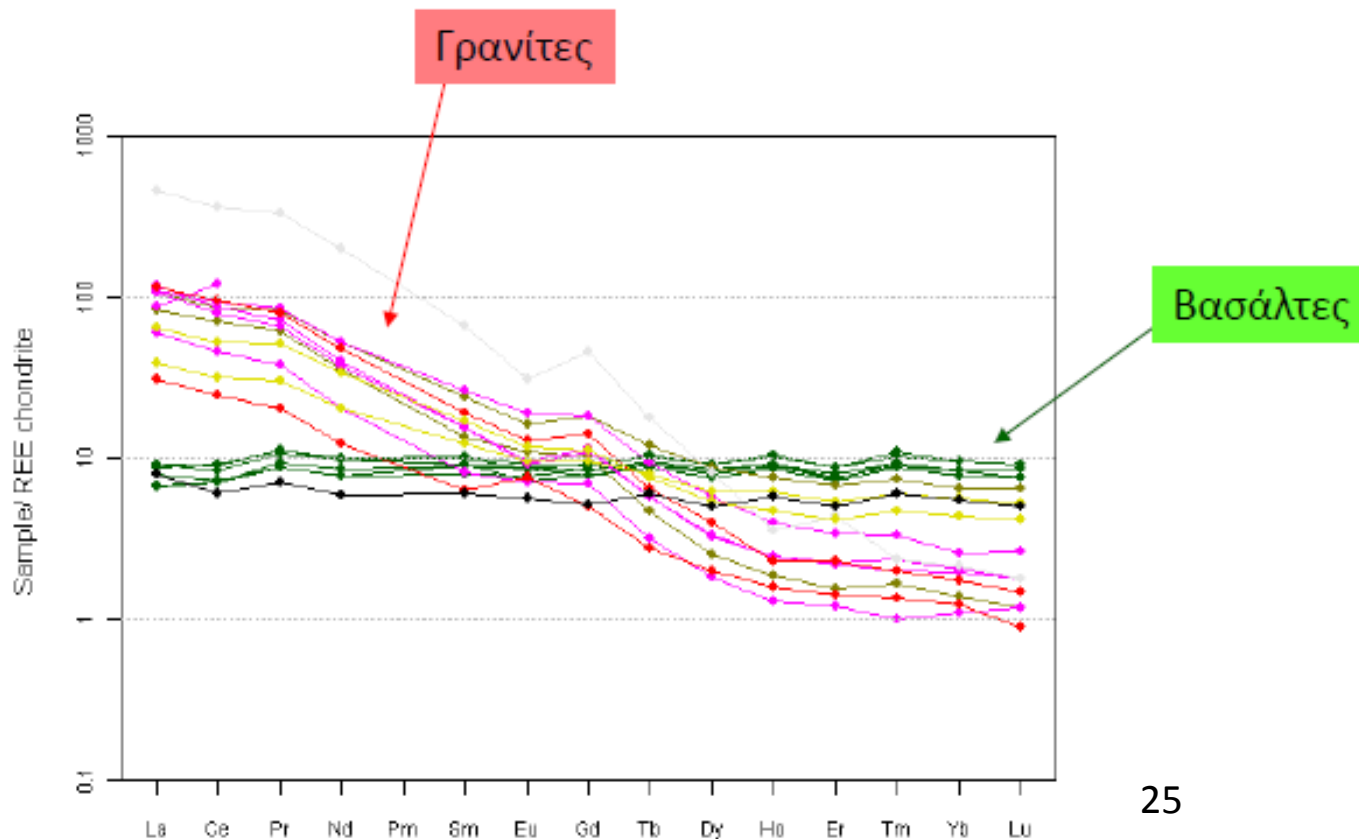
# Ιοντική Ακτίνα των REE



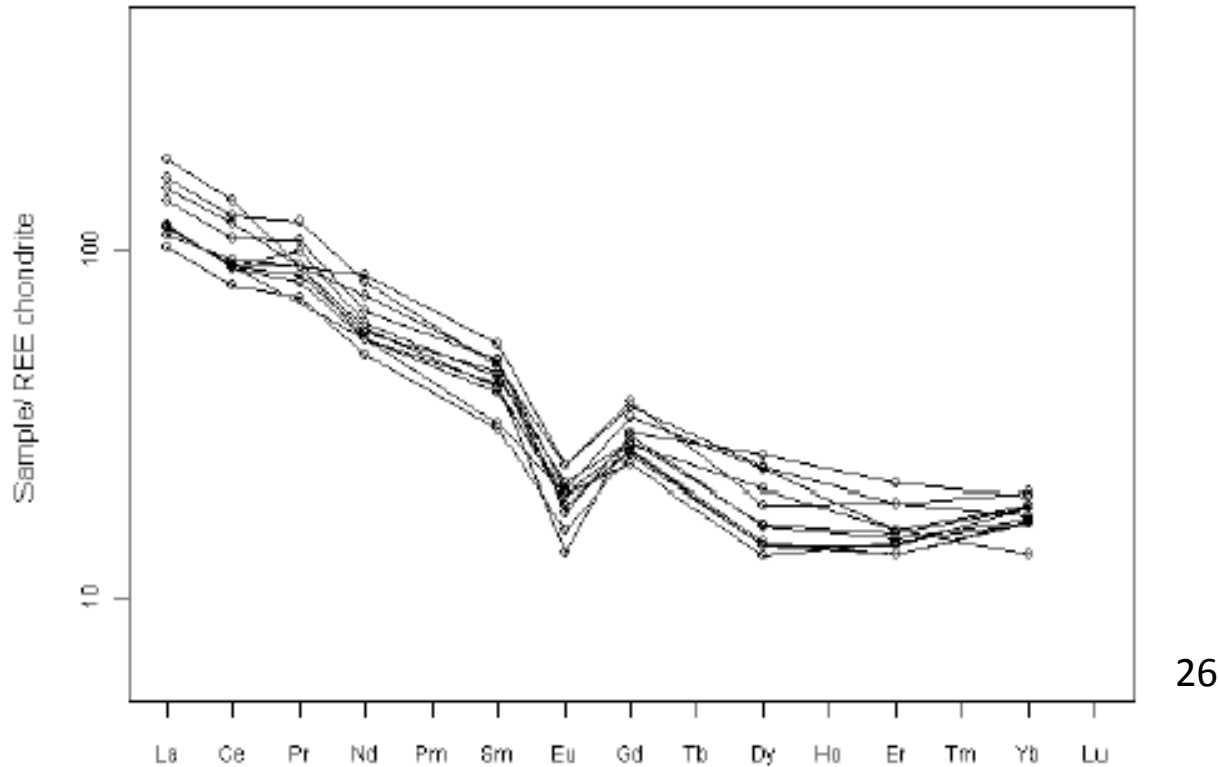
24



# Συγκρίσεις στα REE “patterns”



# “ανωμαλία” στο Eu

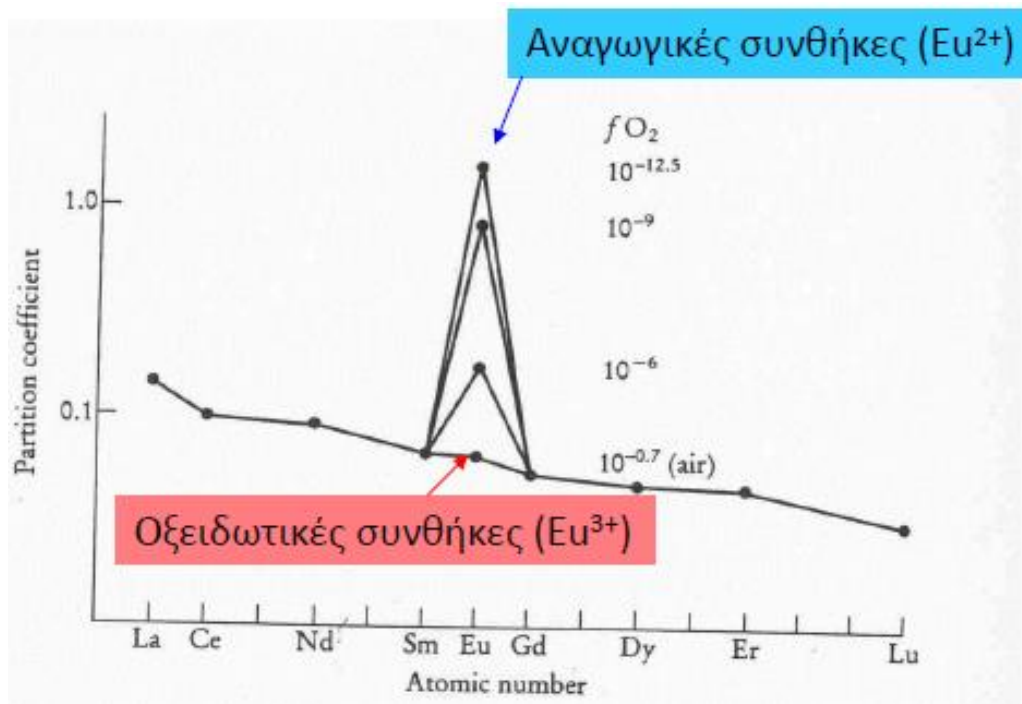


Granites from the Cape Granite Suite  
Darling-Vredenburg area



# Κd's για το Πλαγιόκλαστο

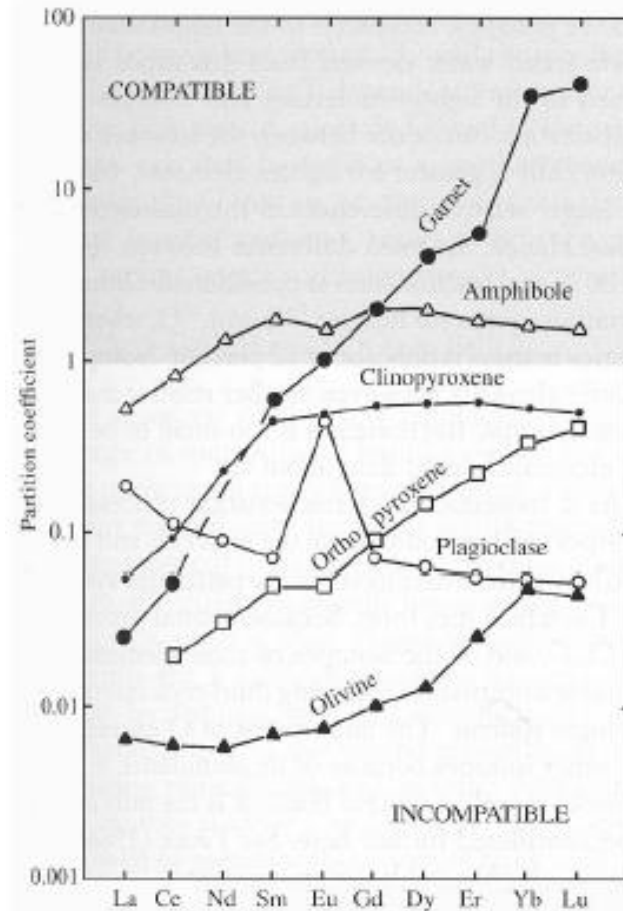
- REEs συνήθως έχουν σθένος  $3^+$  ( $\text{La}^{3+}$ , etc.)
- Eu: μπορεί να είναι ως  $\text{Eu}^{3+}$  ή  $\text{Eu}^{2+}$
- $\text{Eu}^{2+}$  πολύ ανταγωνιστικό



27

# Συντελεστές Κατανομής για τις REEs

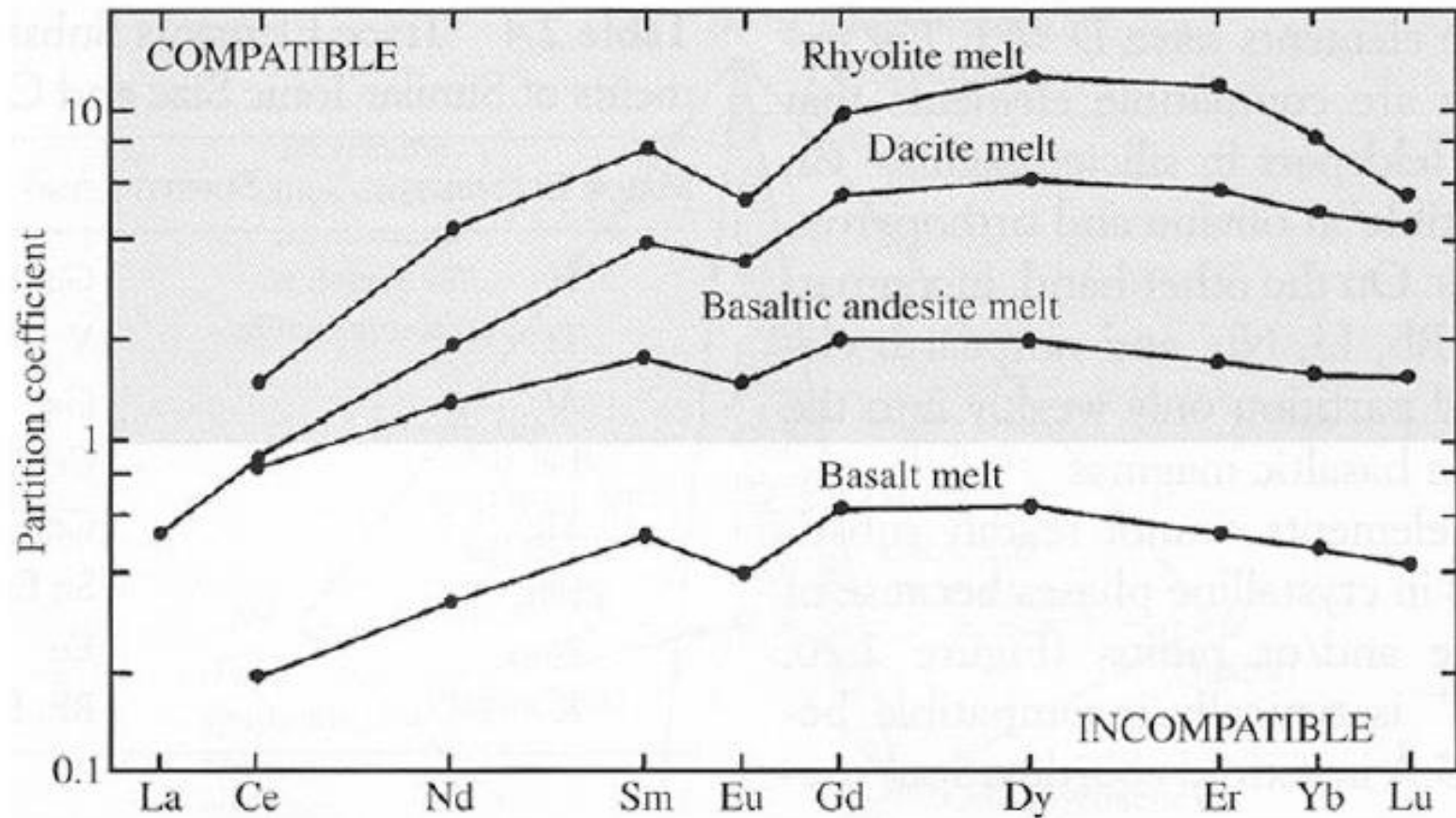
$K_d = C_s/C_l = \text{concentration in mineral}/\text{concentration in melt}$



28



# Συντελεστές Κατανομής των REE στα τήγματα

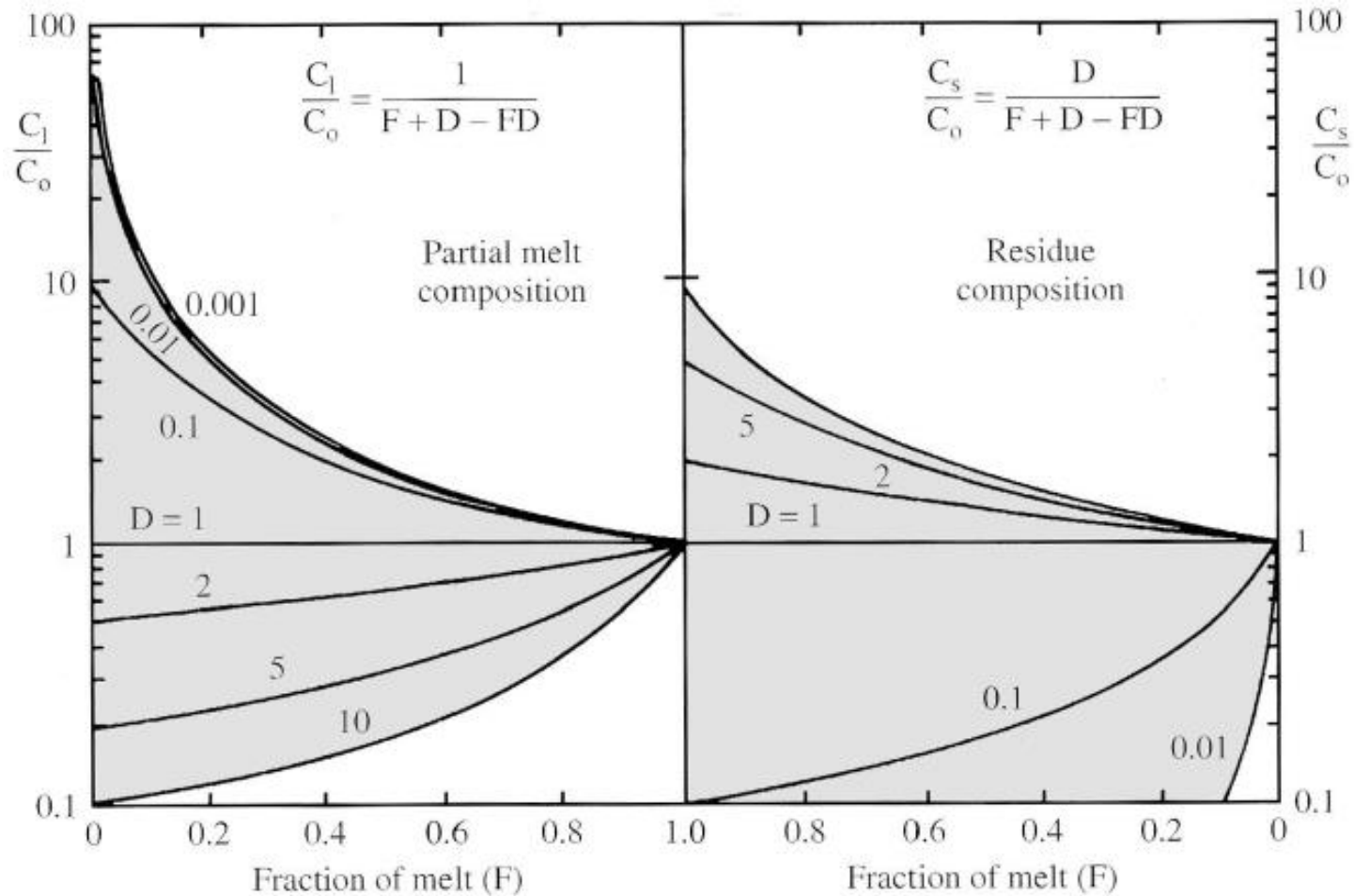


29





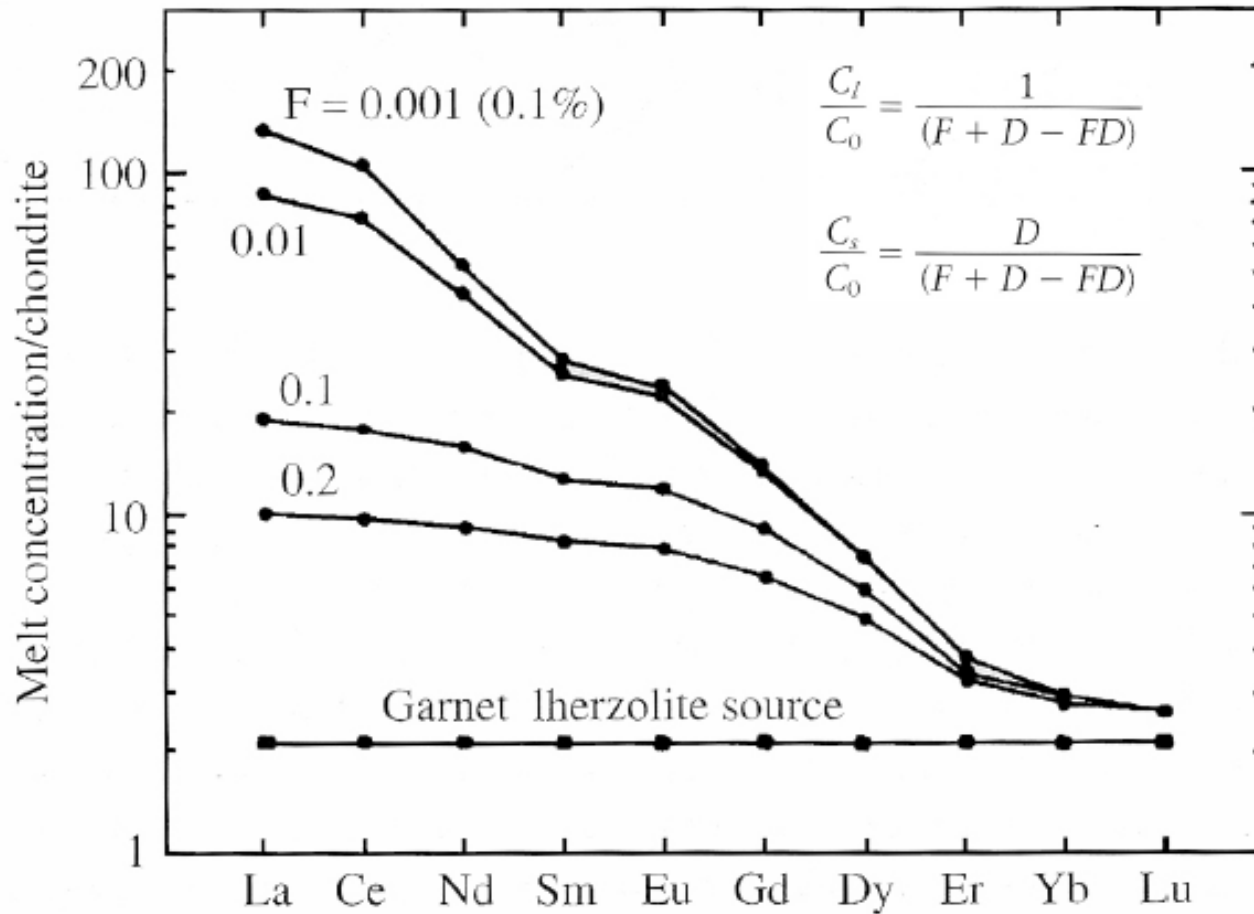
# Κλασμάτωση ιχνοστοιχείων



30

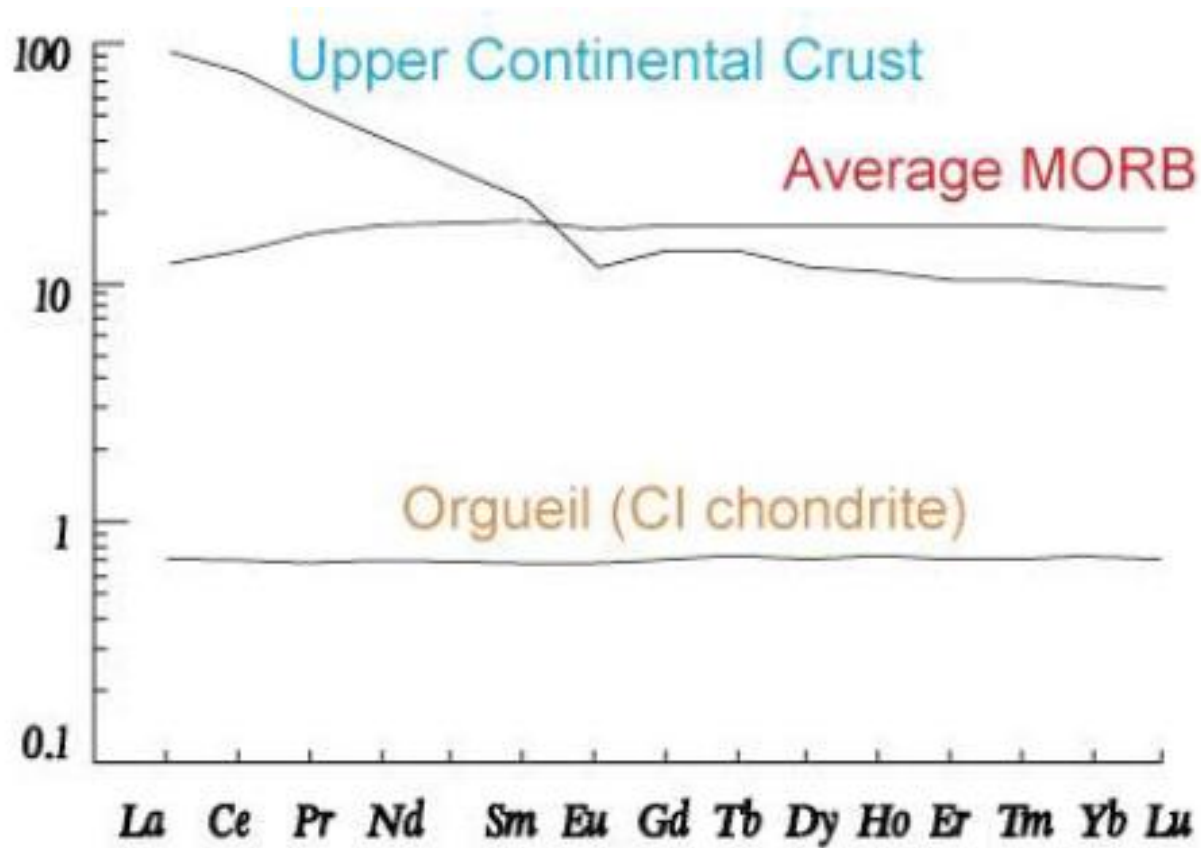


# Κλασμάτωση ιχνοστοιχείων (μικρό βαθμό μερικής τήξης)



31

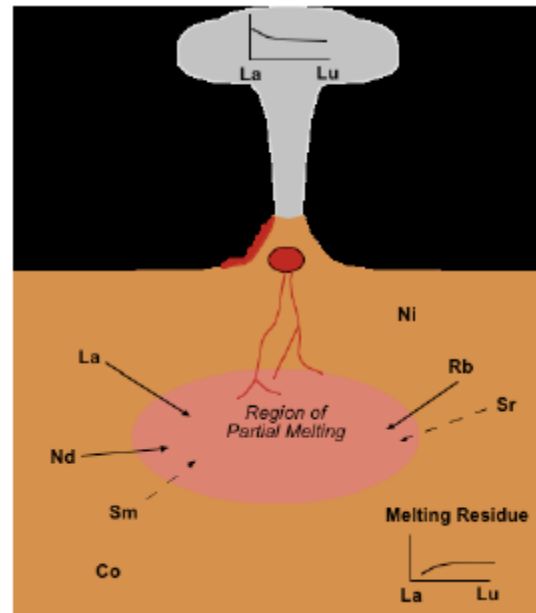
# Κανονικοποιημένα διαγράμματα REE (ως προς τη σύσταση του Chondrite)



32



# Κλασμάτωση Ιχνοστοιχείων κατά τη διεργασία της μερικής τήξης



33

From: <http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/geo302>



# 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.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Χριστίνα Στουραϊτή 2015. Χριστίνα Στουραϊτή. «Γεωχημεία. Γεωχημικές διεργασίες στο εσωτερικό της γης». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL2/>.





# 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: Διάγραμμα Wt% Oxide-Wt% SiO<sub>2</sub>. Copyright Tulane University.

Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: [www.tulane.edu](http://www.tulane.edu)

Εικόνα 2: Διαγράμματα Harker - Copyrighted

Εικόνα 3: Προσομοίωση κλασματικής κρυστάλλωσης - Copyrighted

Εικόνα 4: Mechanisms of Crystal Fractionation. Copyright Tulane University.

Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: [www.tulane.edu](http://www.tulane.edu)

Εικόνα 5: Κλασματική κρυστάλλωση. Copyright wikimedia.org. Σύνδεσμος:

[http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Petrology\\_diagrams](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Petrology_diagrams). Πηγή: [commons.wikimedia.org](http://commons.wikimedia.org)



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/3)

Εικόνα 6: Fractional crystallization. CC BY-SA Wikimedia Commons. Σύνδεσμος: [http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Petrology\\_diagrams](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Petrology_diagrams). Πηγή: commons.wikimedia.org

Εικόνα 7: Bown's Reaction series. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/igneous.htm>. Πηγή: www.tulane.edu

Εικόνα 8: Phase diagram for the system fosterite-fayalite. Copyright University of HAWAII, SOEST. Σύνδεσμος: <http://www.soest.hawaii.edu/krubin/GG325/lect36.pdf>. Πηγή: www.soest.hawaii.edu.

Εικόνα 9: Κλασματική κρυστάλλωση. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: www.tulane.edu

Εικόνα 10: Κλασματική κρυστάλλωση. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: www.tulane.edu



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/3)

Εικόνα 11: Κλασματική κρυστάλλωση. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: [www.tulane.edu](http://www.tulane.edu)

Εικόνα 12: Διαφορετικοί βαθμοί μερικής τήξης. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: [www.tulane.edu](http://www.tulane.edu)

Εικόνα 13: Ανάμειξη μαγμάτων. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/igneous.htm>. Πηγή: [www.tulane.edu](http://www.tulane.edu)

Εικόνα 14: Location of the MASH zone under a volcanic arc. Copyrighted. Richards 2003. Σύνδεσμος: <http://bigthink.com/eruptions/what-might-control-the-width-of-volcanic-arcs>

Εικόνα 15: Chemical Evidence. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος: <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: [www.tulane.edu](http://www.tulane.edu)

Εικόνα 16: Περιοδικός Πίνακας. Copyrighted.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/3)

Εικόνες 17, 18, 19: Partition Coefficients for some commonly used trace elements in Basaltic and Andestic Rocks. Data from Rollinson (1993).

Εικόνα 20: Συγκέντρωση REE στο δείγμα. Copyrighted.

Εικόνα 21: Κανονικοποιημένη σύσταση. Copyrighted.

Εικόνες 22, 23: Estimated abundancies of elements in the sun's atmosphere - Carbonaceous Chondrites. Copyright: Basaltic Volcanism Study Project (1981)

Εικόνα 24: Ιοντική Ακτίνα των REE. Copyrighted.

Εικόνα 25: Συγκρίσεις στα REE “patterns”. Copyrighted.

Εικόνα 26: Granites from the Cape Granite Suite Darling-Vredenburg area. Copyrighted.

Εικόνα 27: Kd's για το Πλαγιόκλαστο. Copyrighted.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/3)

Εικόνα 28: Συντελεστές Κατανομής για τις REEs. Copyrighted.

Εικόνα 29: Συντελεστές Κατανομής των REE στα τήγματα. Copyrighted.

Εικόνα 30: Κλασμάτωση ιχνοστοιχείων. Copyrighted.

Εικόνα 31: Κλασμάτωση ιχνοστοιχείων (μικρό βαθμό μερικής τήξης). Copyrighted.

Εικόνα 32: Κανονικοποιημένα διαγράμματα REE (ως προς τη σύσταση του Chondrite). Copyrighted.

Εικόνα 33: <http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/geo302>

