



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 ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Μέρος Ι

Περιεχόμενα

- **Εισαγωγή:** ορισμοί & ταξινομήσεις ιχνοστοιχείων.
- **Κλασμάτωση ιχνοστοιχείων (Trace element fractionation).**
- **Κανονικοποίηση διαγραμμάτων.**



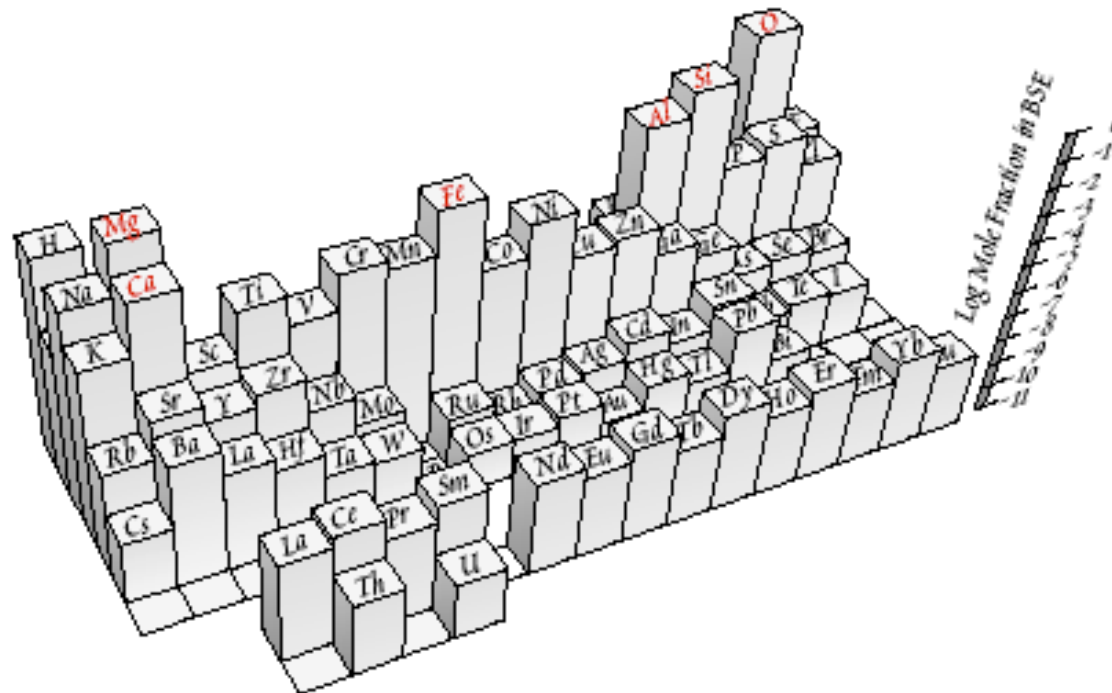
Ιχνοστοιχεία - Ορισμοί

- Στοιχεία που δεν συμμετέχουν (στοιχειομετρικά) στον χημικό τύπο μιας ορυκτής φάσης, στο σύστημα που μελετάμε (σύστημα = μαγματικά πετρώματα)
 - π.χ. τα Πυριγενή/Μεταμορφωμένα πετρ. έχουν άλλα ιχνοστοιχεία απ' ότι τα υδατικά συστήματα
- Δεν επηρεάζουν σημαντικά τις φυσικοχημικές ιδιότητες του συστήματος
- Υπακούουν στο Νόμο του Henry – συμπεριφέρονται όπως τα στοιχεία στα πολύ αραιά υδατικά διαλύματα



Σχετική αφθονία των στοιχείων στη λιθόσφαιρα (Bulk Silicate Earth - BSE)

6 στοιχεία απαρτίζουν το 99.1% του BSE ->



1 (πηγή: W. M. White, 2001)

Γεωχημική ταξινόμηση των στοιχείων (Goldschmidt 1922)

- **Σιδηρόφιλα:** στοιχεία που προτιμούν τη ρευστή μεταλλική φάση (πχ. *Fe*) → συγκεντρώνονται στον πυρήνα της Γης.
- **Χαλκόφιλα:** στοιχεία που προτιμούν τη ρευστή θειούχο φάση; Απεμπλουτισμένα στο BSE και πιθανόν εμπλουτισμένα στον πυρήνα.
- **Λιθόφιλα:** στοιχεία που προτιμούν, τα πυριτικά ορυκτά → συγκεντρωμένα στον φλοιό και τον μανδύα της Γης.
- **Ατμόφιλα:** πολύ πτητικά στοιχεία → συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα και την υδρόσφαιρα της Γης.



Γεωχημική ταξινόμηση στοιχείων

Table 7.1. Goldschmidt's Classification of the Elements

Siderophile	Chalcophile	Lithophile	Atmophile
Fe*, Co*, Ni*	(Cu), Ag	Li, Na, K, Rb, Cs	(H), N, (O)
Ru, Rh, Pd	Zn, Cd, Hg	Be, Mg, Ca, Sr, Ba	He, Ne, Ar, Kr, Xe
Os, Ir, Pt	Ga, In, Tl	B, Al, Sc, Y, REE	
Au, Re [†] , Mo [‡]	(Ge), (Sn), Pb	Si, Ti, Zr, Hf, Th	
Ge*, Sn*, W [‡]	(As), (Sb), Bi	P, V, Nb, Ta	
C [‡] , Cu*, Ga*	S, Se, Te	O, Cr, U	
Ge*, As [†] , Sb [†]	(Fe), Mo, (Os)	H, F, Cl, Br, I	
	(Ru), (Rh), (Pd)	(Fe), Mn, (Zn), (Ga)	

*Chalcophile and lithophile
[†]Chalcophile in the earth's crust
[‡]Lithophile in the earth's crust

Table 7.1. Goldschmidt's Classification of the Elements

Siderophile	Chalcophile	Lithophile	Atmophile
Fe*, Co*, Ni*	(Cu), Ag	Li, Na, K, Rb, Cs	(H), N, (O)
Ru, Rh, Pd	Zn, Cd, Hg	Be, Mg, Ca, Sr, Ba	He, Ne, Ar, Kr, Xe
Os, Ir, Pt	Ga, In, Tl	B, Al, Sc, Y, REE	
Au, Re [†] , Mo [‡]	(Ge), (Sn), Pb	Si, Ti, Zr, Hf, Th	
Ge*, Sn*, W [‡]	(As), (Sb), Bi	P, V, Nb, Ta	
C [‡] , Cu*, Ga*	S, Se, Te	O, Cr, U	
Ge*, As [†] , Sb [†]	(Fe), Mo, (Os)	H, F, Cl, Br, I	
	(Ru), (Rh), (Pd)	(Fe), Mn, (Zn), (Ga)	

*Chalcophile and lithophile in the earth's crust
[†]Chalcophile in the earth's crust
[‡]Lithophile in the earth's crust

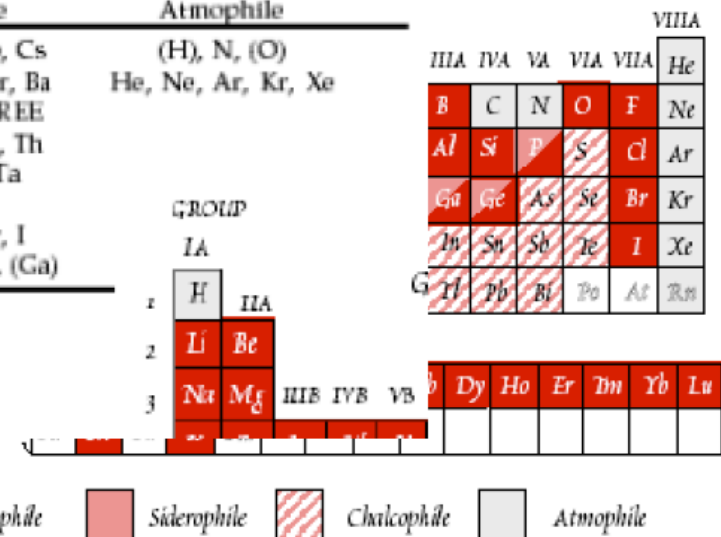


Figure 7.2. Goldschmidt's classification of the elements.

2 (πηγή: W.M. White, 2001)



Υποκατάστασεις Ιχνοστοιχείων

- Επίδραση φορτίου & ιοντικής ακτίνας
- Λιθόφιλα στοιχεία (**lithophile**): προσομοιάζουν με σκληρές σφαίρες και φτιάχνουν δεσμούς κυρίως, **ιοντικού** χαρακτήρα.
- Η γεωχημική συμπεριφορά των λιθόφιλων στοιχείων εξαρτάται από το πόσο εύκολα υποκαθιστούν άλλα ιόντα στην κρυσταλλική τους δομή:
- Αυτές οι υποκαταστάσεις εξαρτώνται κυρίως από δύο παράγοντες:
 - **Ακτίνα ιόντος**
 - **Φορτίο ιόντος**

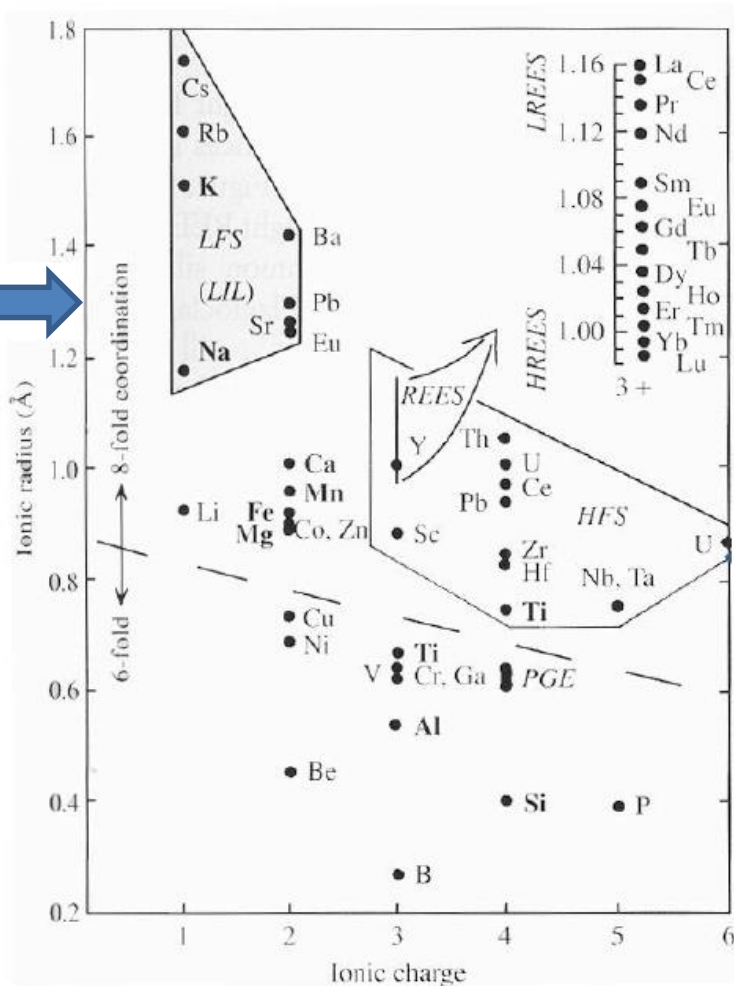


Επίδραση της ακτίνας ιόντος

- Όσο μεγαλύτερη διαφορά ιοντικής ακτίνας ή φορτίου, τόσο πιο δύσκολη η υποκατάσταση.
- Θέσεις στη κρυσταλλική δομή στις οποίες γίνονται οι υποκαταστάσεις είναι αυτές του:
 - Mg,
 - Fe, και
 - Ca,
 - Όλα έχουν φορτίο 2+.
 - Και κάποιες Σπάνιες Γαίες (REE) υποκαθιστούν το Al 3+.



Ταξινόμηση Ιχνοστοιχείων βάση Ακτίνας και φορτίου (z/r)



Ιοντικό δυναμικό – (charge/radius ή z/r)
 Πρόχειρος δείκτης κινητικότητας των στοιχείων
 στα υδατικά διαλύματα:

<3 (χαμηλό) & >12 (υψηλό) → πιο ευδιάλυτα

1) Low Field Strength (LFS) ή Large Ion Lithophile (LIL)

**2) High Field Strength (HFS)
 – REE's**

3) Platinum Group Elements
 NB 1 Å = 10⁻¹⁰ meters = 100 pm

Άλλη Ταξινόμηση

Ανταγωνιστικά – Μη Ανταγωνιστικά

1) Στοιχεία των οποίων το **φορτίο** ή **ιοντική ακτίνα** διαφέρει σημαντικά από αυτά του στοιχείου που υποκαθίσταται, για τα ορυκτά του μανδύα:

- αυτά θα τείνουν να εισέρθουν (να συμμετέχουν ή να κλασματώνονται) στο **τήγμα**, κατά τη διάρκεια της μερικής τήξης.
- Αυτά τα στοιχεία λεγονται **μη ανταγωνιστικά (incompatible)**
- Παραδείγματα: **K, Rb, Sr, Ba, rare earth elements (REE), Ta, Hf, U, Pb**

2) Στοιχεία που εύκολα εισέρχονται στην κρυσταλλική δομή των ορυκτών του μανδύα, θα παραμένουν στη **στερεά φάση**, κατά τη διάρκεια της μερικής τήξης:

- Αυτά τα στοιχεία λέγονται **ανταγωνιστικά (compatible)**
- Παραδείγματα: **Ni, Cr, Co, Os**



Υποκαταστάσεις

MAJOR ELEMENT	SUBSTITUTING TRACE ELEMENT(S)
Si	Ge, P
Ti	V
Al	Ga
Fe	Cr, Co, Ni
Mg	Cr, Co, Ni
Ca	Sr, Eu, REEs
Na	Eu
K	Rb, Ba, Sr, Eu



- Συντελεστής Κατανομής (Partition coefficient)
 $K_d = C_s / C_l$
- ανταγωνιστικό, μη ανταγωνιστικό (σε σχέση με κάποιο ορυκτό)
- Ολικό Συντελεστή Κατανομής (Bulk repartition coefficient) $D = \sum K_d X_i$,
- 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
Period	+1																	
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 Atmosphile Synthetic



Η ανταγωνιστικότητα εξαρτάται από τα είδη των ορυκτών και την κατηγορία πετρωμάτων 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	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).

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

6



Παράδειγμα

- Υπολογίζουμε το D του Yb 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 αυγίτης 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



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	<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

8



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% orx and 20% cpx, πως υπολογίζουμε το **D** του **Rb** και του **Co**.
- Χρησιμοποιώντας δεδομένα του **Kd** από ένα Πίνακα δεδομένων.
- $D = k^{ol/l} \cdot x^{ol} + k^{orx/l} \cdot x^{orx} + k^{cpx/l} \cdot x^{cpx} \dots\dots\dots$



Υπολογισμός:

	K_d ol	K_d opx	K_d cpx	Bulk K_d or D
Rb	0,006	0,03	0,14	$0,45*0,006 + 0,35*0,03 + 0,2*0,04 = \mathbf{0.021}$
Co	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)**

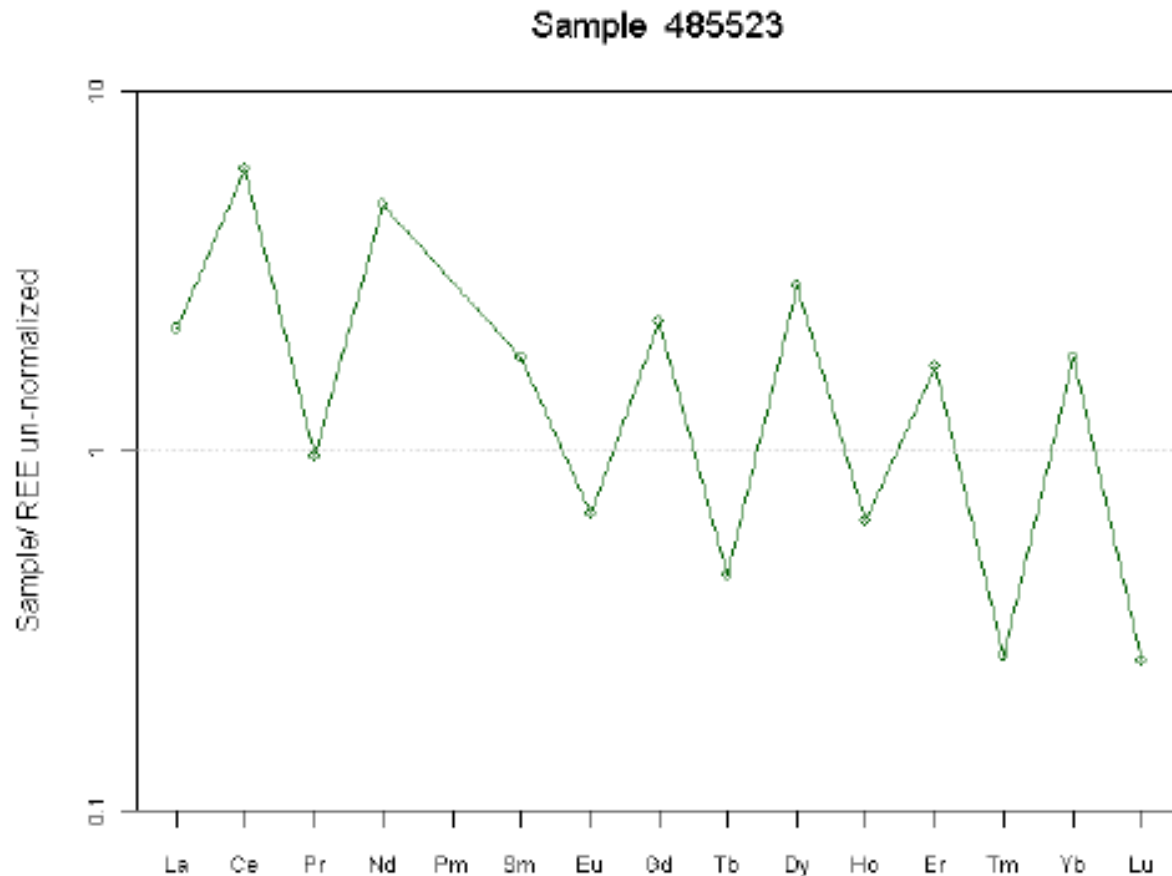


Κανονικοποίηση συστάσεων στα διαγράμματα

- 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

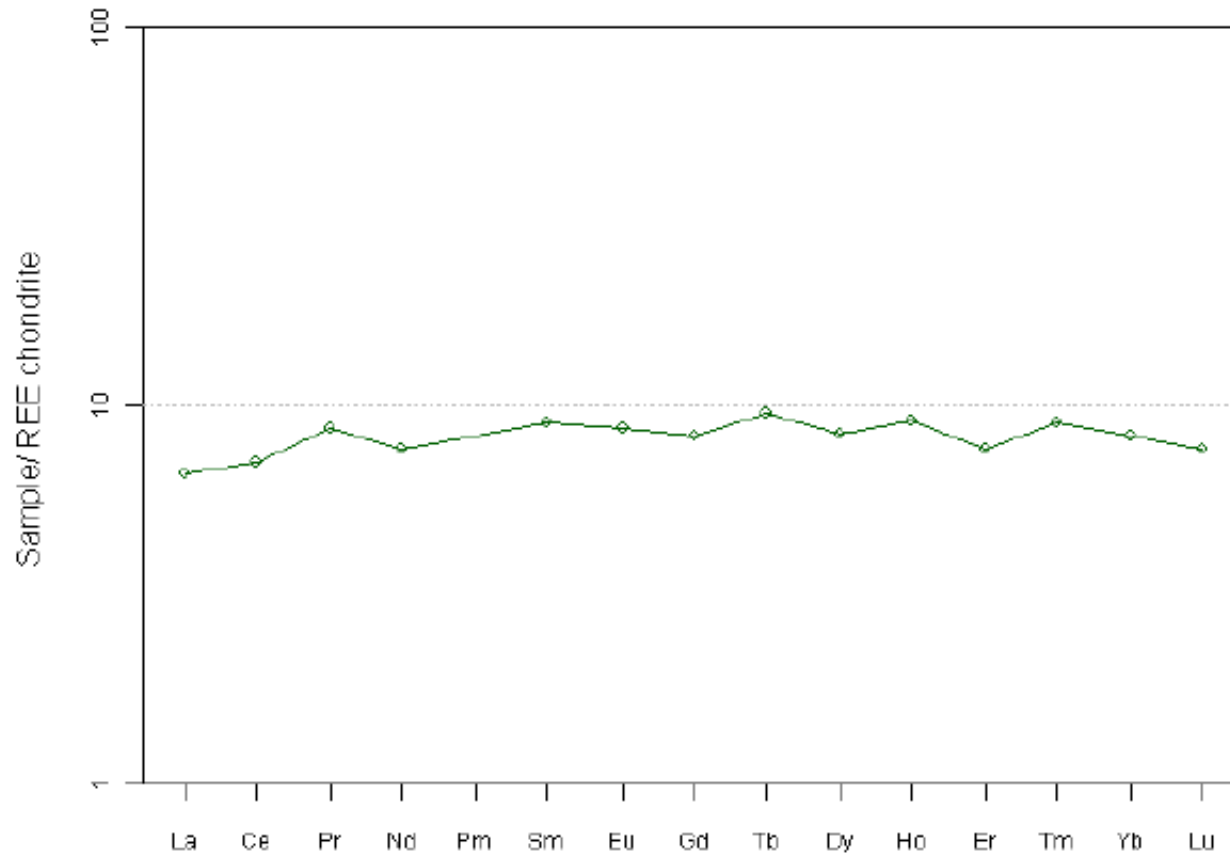


9



..κανονικοποιημένη σύσταση

Sample 485523



10

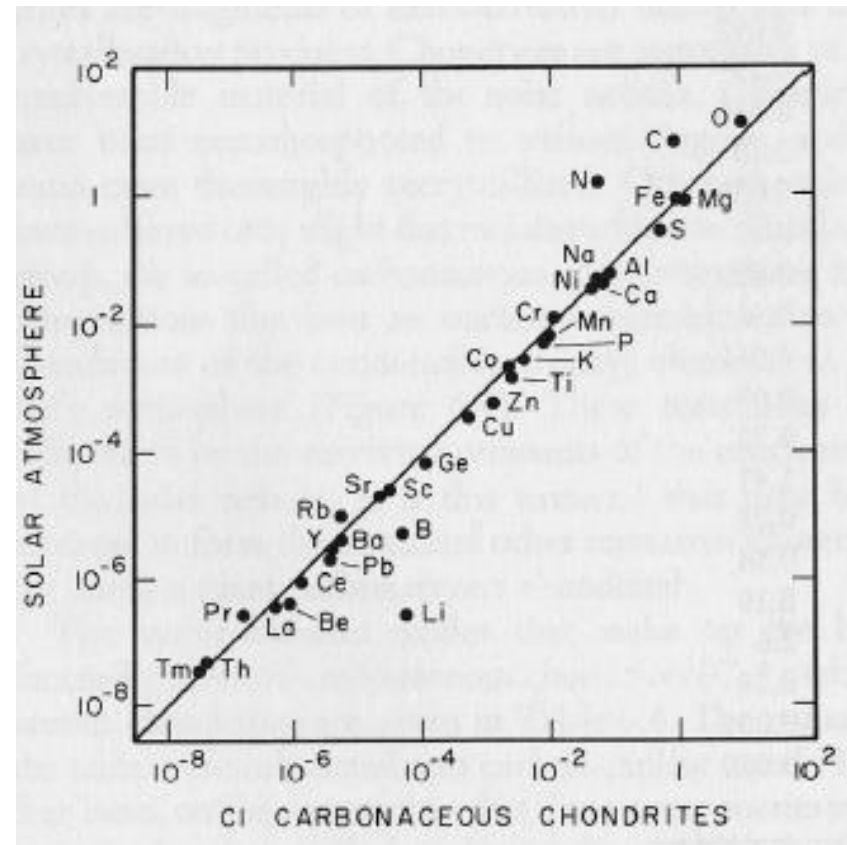


Σύσταση των Χονδριτών (C1 Carbonaceous Chondrites) vs. Ηλιακού συστήματος

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	2.66×10^{24}	44	Ru	1.9
2	He	1.9×10^7	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	1.11×10^7	49	In	0.19
7	N	2.31×10^4	50	Sn	3.7
8	O	1.84×10^7	51	Sb	0.31
9	F	780	52	Te	6.5
10	Ne	2.4×10^5	53	I	1.27
11	Na	6.0×10^4	54	Xe	5.84
12	Mg	1.06×10^6	55	Cs	0.39
13	Al	8.5×10^4	56	Ba	4.8
14	Si	1.00×10^6	57	La	0.37
15	P	6,500	58	Ce	1.2
16	S	5.0×10^5	59	Pr	0.18
17	Cl	4,740	60	Nd	0.79
18	Ar	1.06×10^5	62	Sm	0.24
19	K	3,500	63	Eu	0.094
20	Ca	6.25×10^4	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	1.27×10^4	68	Er	0.23
25	Mn	9,300	69	Tm	0.035
26	Fe	9.0×10^5	70	Yb	0.20
27	Co	2,200	71	Lu	0.035
28	Ni	4.78×10^4	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			

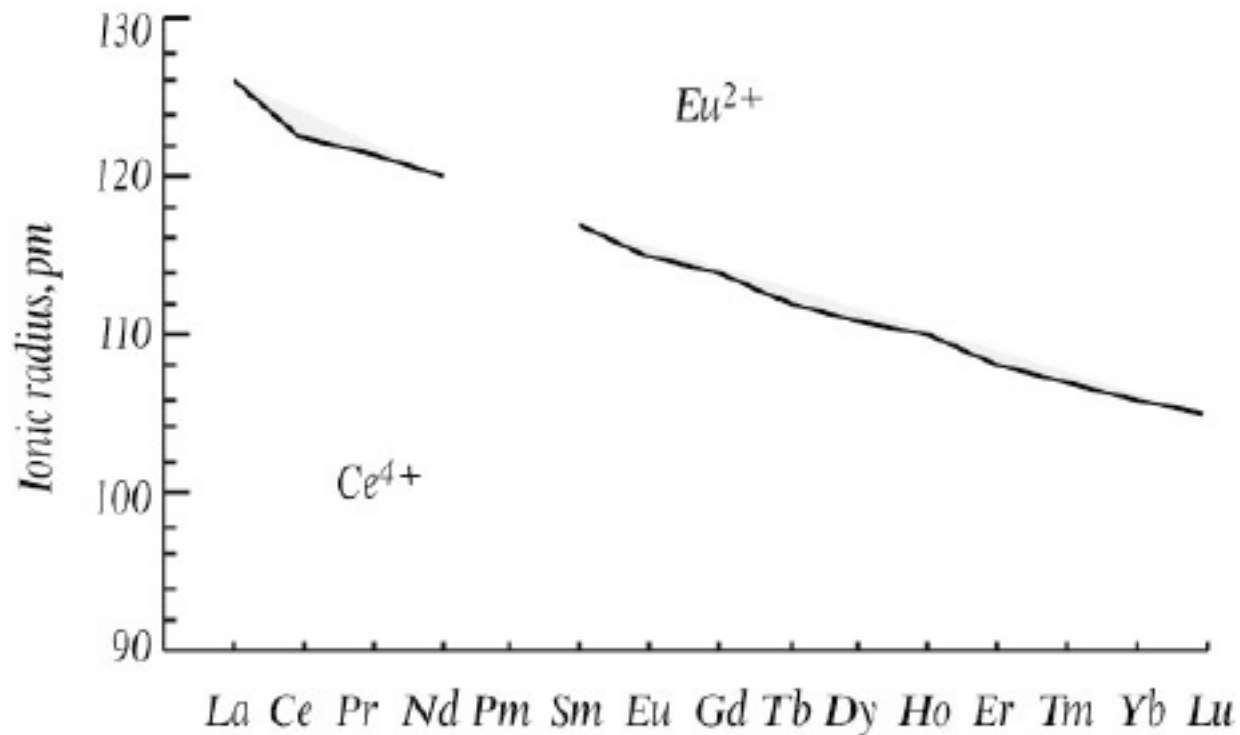
11



12



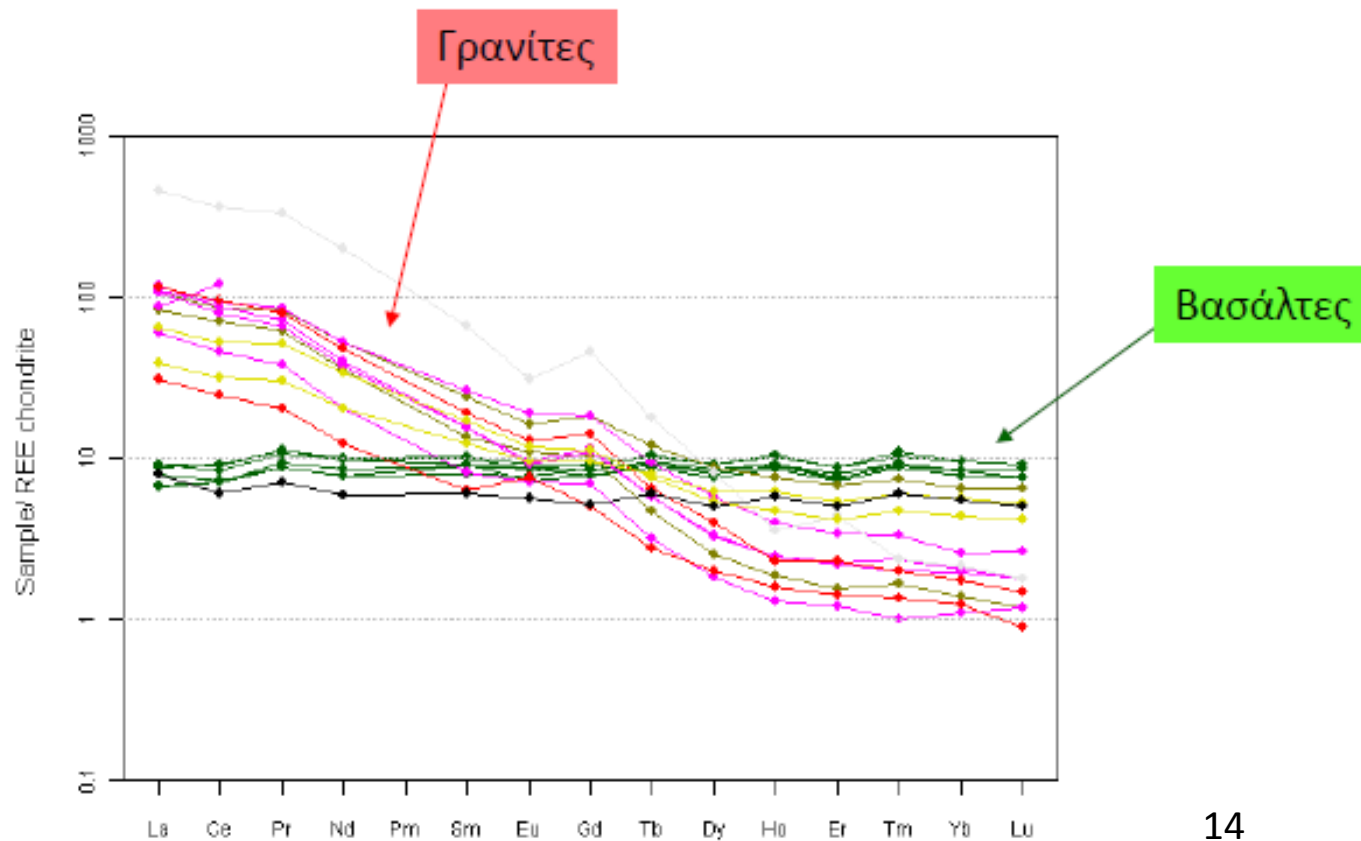
Γεωχημική συμπεριφορά των REE: Ιοντική Ακτίνα των REE



13



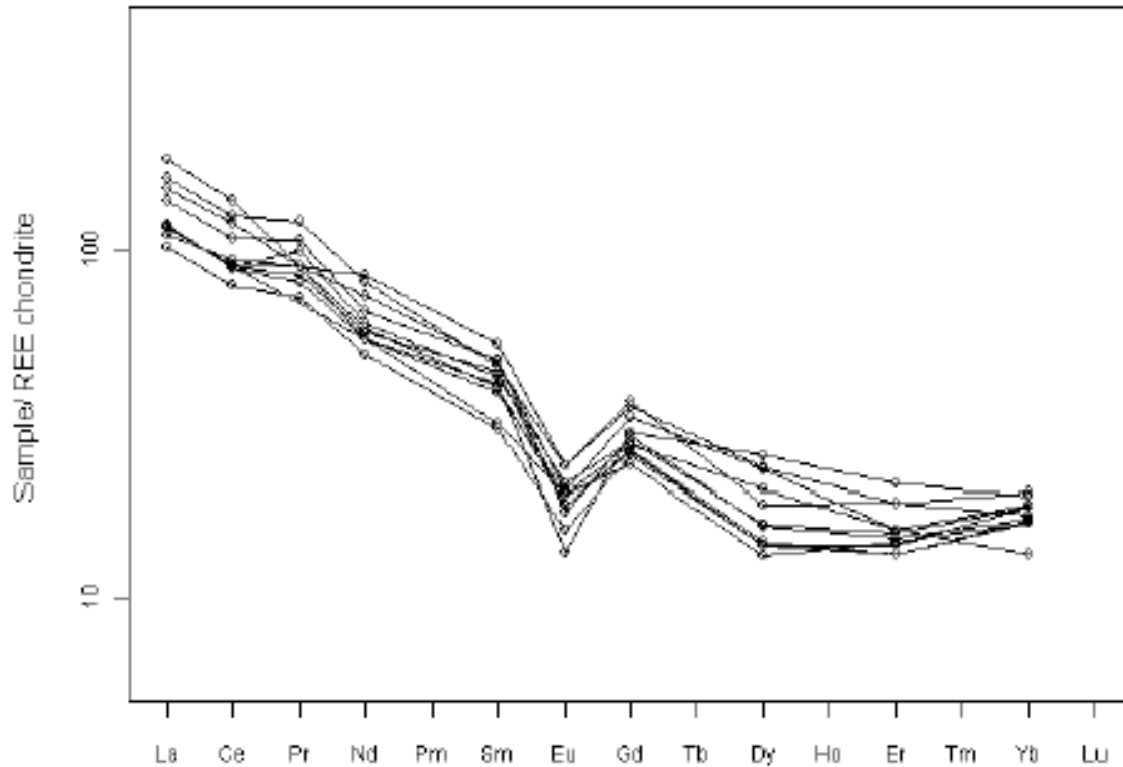
Συγκρίσεις στα REE “patterns”



14



“ανωμαλία” στο Eu



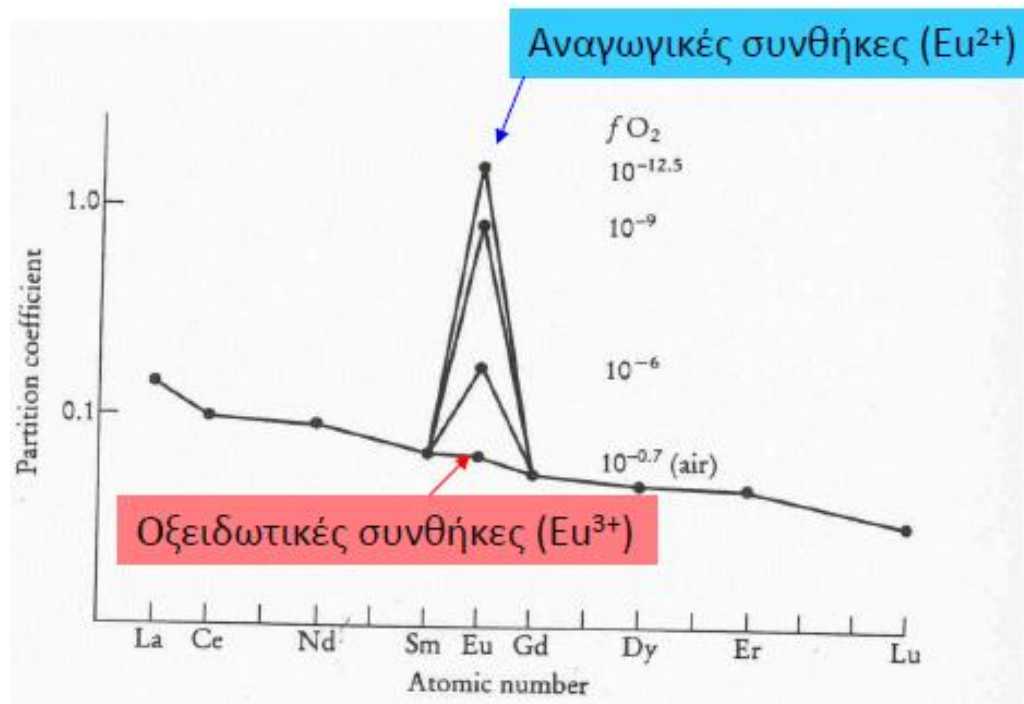
15

Granites from the Cape Granite Suite
Darling-Vredenburg area



Kd's για το Πλαγιόκλαστο

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

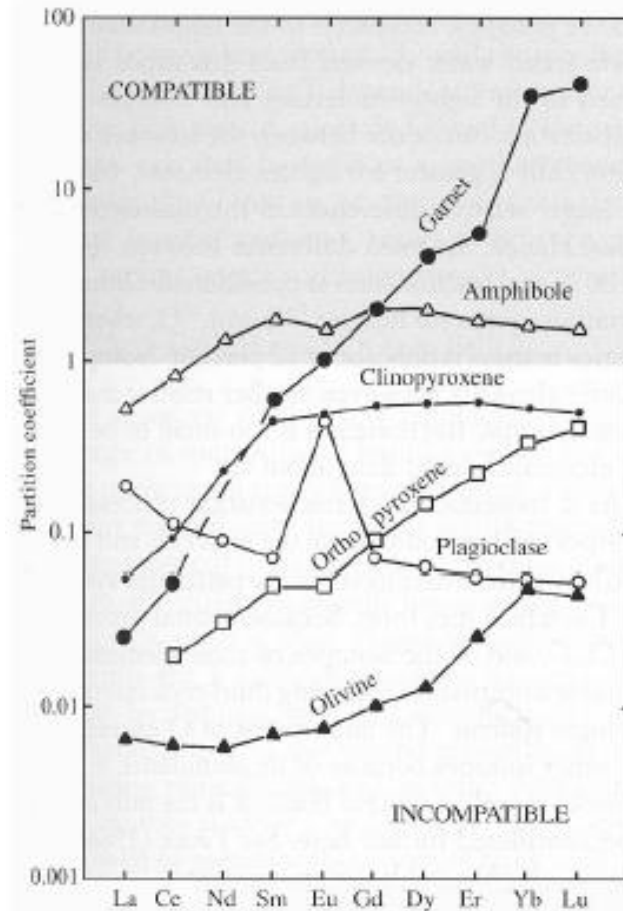


16



Συντελεστές Κατανομής για τις REEs

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



17

Μερική τήξη

Τα ιχνοστοιχεία μας δίνουν πληροφορίες για το βαθμό μερικής τήξης.
Πως κατανέμονται τα ιχνοστοιχεία μεταξύ τήγματος & ορυκτών, όταν μεταβάλεται ο βαθμός μερικής τήξης?

Δεδομένα

- Μαγματικό πέτρωμα (πολυφασικό & πολυκρυσταλλικό σύστημα)
- Χρησιμοποιούμε το **D** (Ολικό Συντελεστή Κατανομής) ιχνοστοιχείου

Μοντέλα Μερικής Τήξης:

- α) Ευτηκτική τήξη (Απλή περίπτωση)
- β) Μη ευτηκτική τήξη (περίπλοκη περίπτωση)



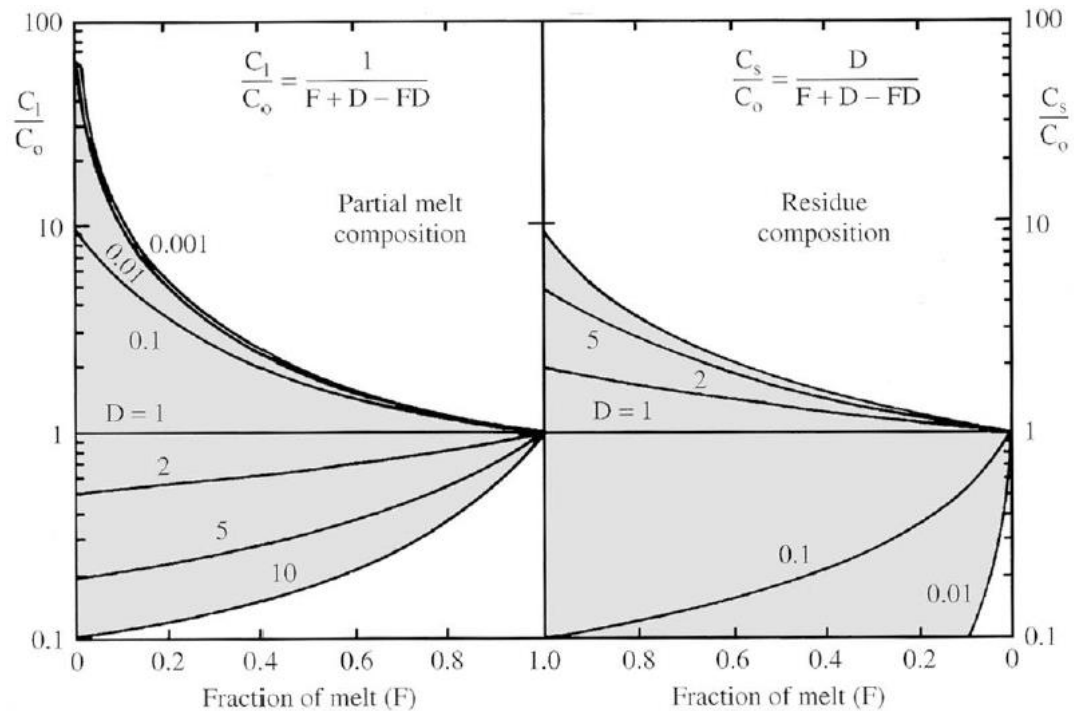
Μερική τήξη

α) Ευτηκτική τήξη

Η σχετική αναλογία των ορυκτών στο αρχικό στερεό (αρχικό πέτρωμα=πηγή μάγματος) και στο τήγμα (liquid), παραμένει ίδια κατά τη διάρκεια της τήξης.

D , (Ολικό Συντελεστή Κατανομής) ιχνοστοιχείου = σταθερό, κατά τη διάρκεια της τήξης.

- Ο λόγος C_l/C_o , μας δείχνει τη μεταβολή στη συγκέντρωση του ιχνοστοιχείου στο τήγμα.
- Fraction of melt (F): ο βαθμός μερικής τήξης (πχ. 0.4 ή 40%).
- Αλλαγή στο D , σημαίνει \rightarrow μεταβολή στην ανταγωνιστικότητα του ιχνοστοιχείου.



Τι ξέρουμε για τη συμπεριφορά των ιχνοστοιχείων:

Γενικά, στα ορυκτά του μανδύα (πηγή των πρωταρχικών μαγμάτων)

Μη Ανταγωνιστικά στοιχεία είναι:

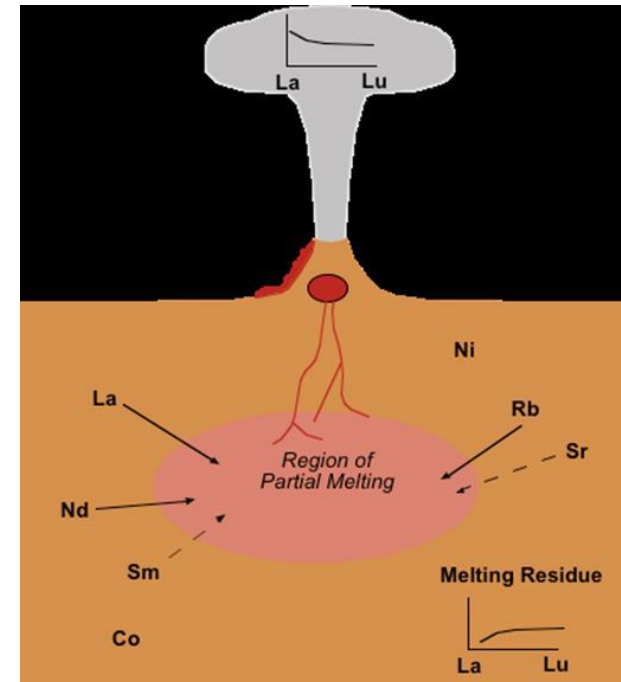
- K, Rb, Cs, Ta, Nb, U, Th, Y, Hf, Zr, και
- Σπάνιες Γαίες [REE: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, & Lu].

Τα περισσότερα από τα παραπάνω στοιχεία έχουν μεγάλη ιοντική ακτίνα, συγκριτικά με τις διαστάσεις των θέσεων στο κρύσταλλο των κοινών ορυκτών του μανδύα: -ολιβίνης, πυρόξενος, σπινέλιος και γρανάτης

Ανταγωνιστικά στοιχεία είναι:

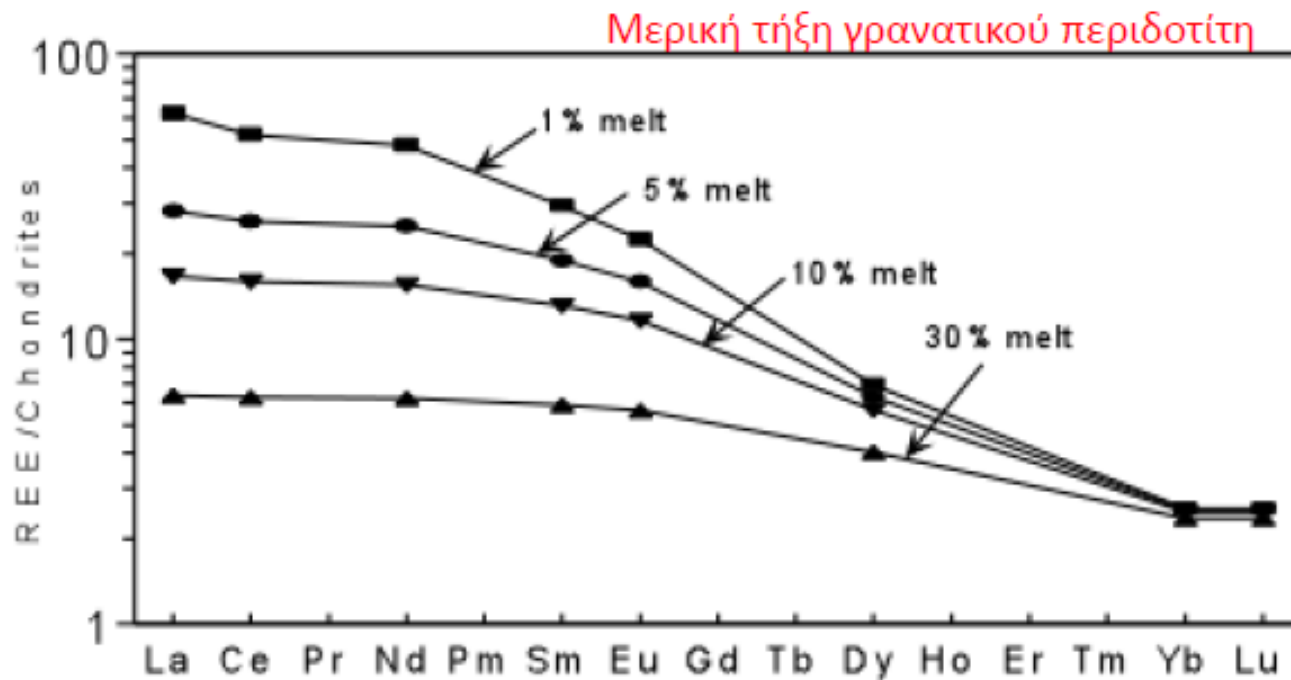
- Ni, Cr, Co, V, και Sc,

Τα οποία έχουν ιοντική ακτίνα μικρότερη και ταιριάζουν ευκολότερα στις κρυσταλλογραφικές θέσεις του Mg Fe.



Παράδειγμα μερικής τήξης ανώτερου μανδύα....

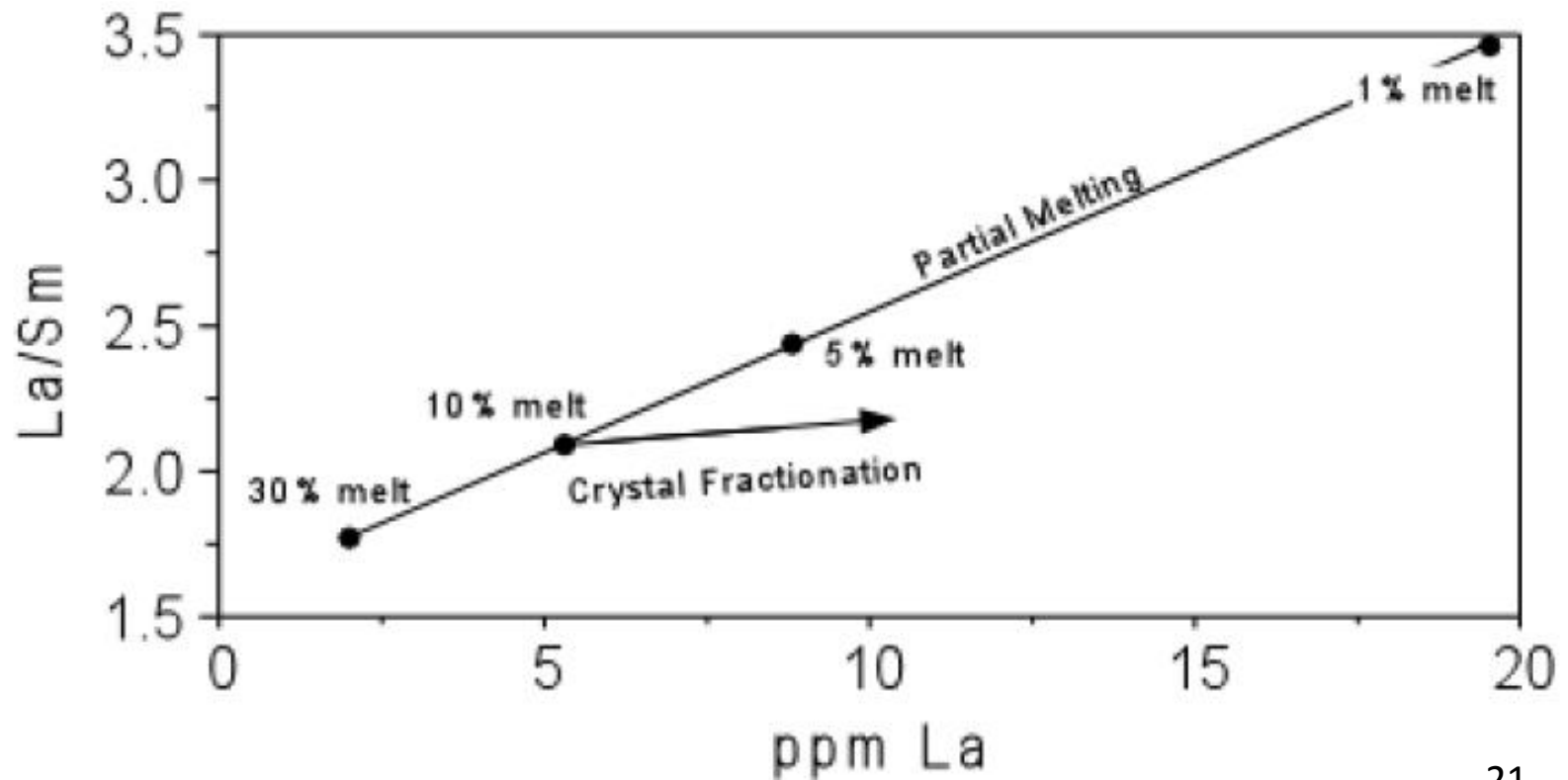
Μη ανταγωνιστικά στοιχεία: ό λες οι REE, και ειδικότερα οι ελαφριές (LREE) περισσότερο μη-ανταγωνιστικές από τις βαριές (HREE)



20



Λόγος δύο ιχνοστοιχείων με διαφορετική ανταγωνιστικότητα

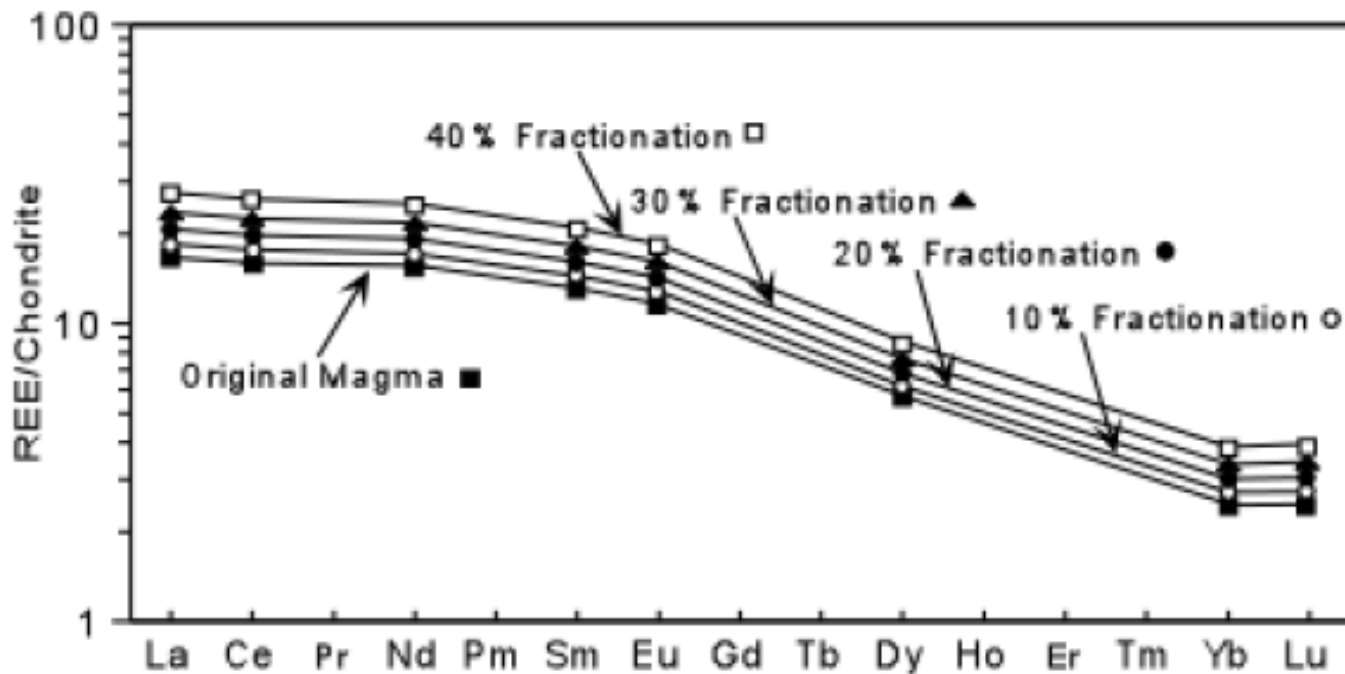


21



Κλασματική Κρυστάλλωση

Ο λόγος στοιχείων διαφορετικής ανταγωνιστικότητας (LREE/HREE) δεν διαφέρει πολύ στην κλασματική κρυστάλλωση → σταθερό “pattern” με παράλληλη μετατόπιση (εμπλουτισμό REE, όσο αυξάνει ο βαθμός Κλ. Κρυστάλλωσης (Fractionation %)).



22



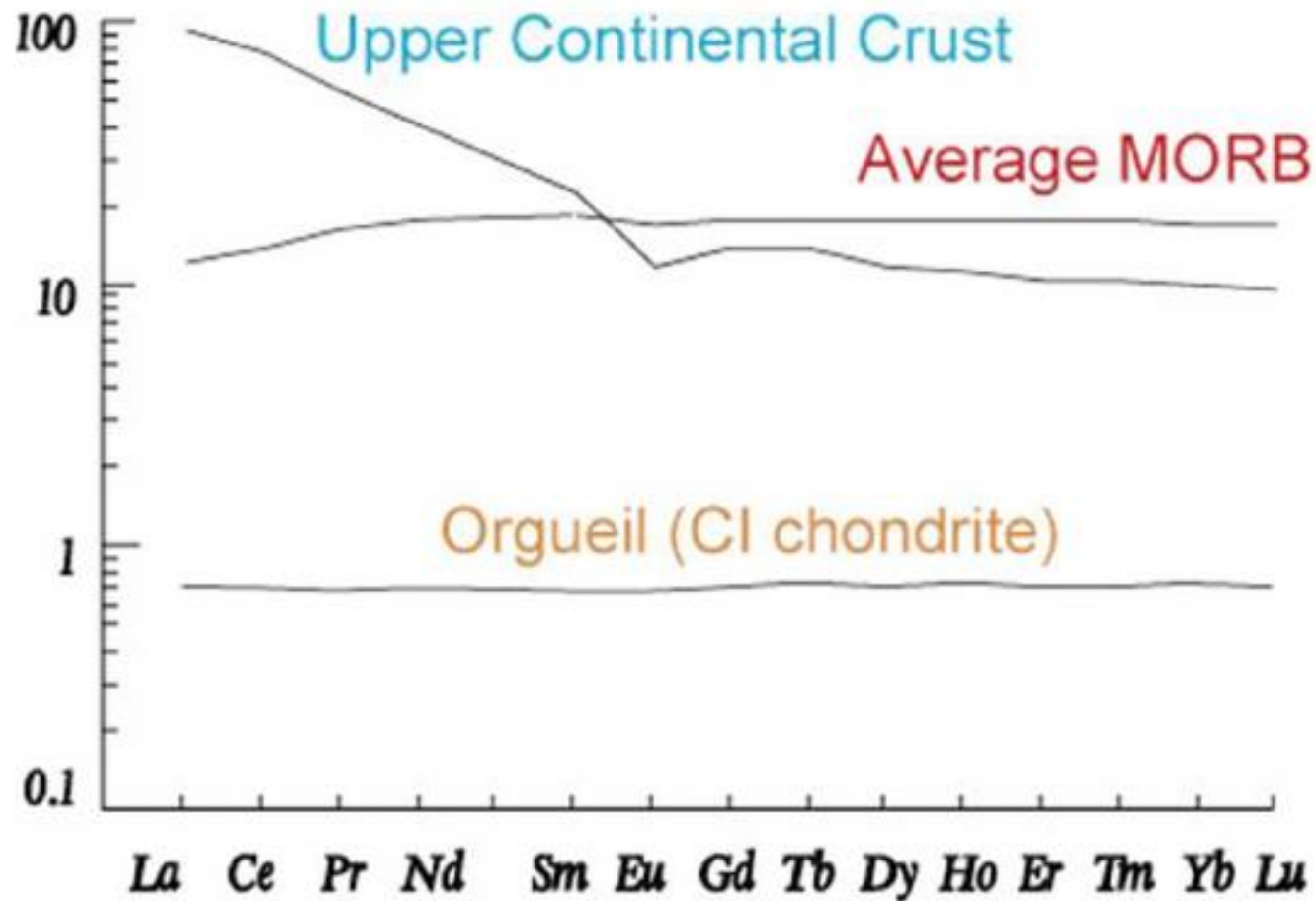
Συνοψίζοντας...

Χρησιμοποιούμε τα **διαγράμματα REE** (κανονικοποιημένα ως προς τη σύσταση του C1 Χονδρίτη μετωρίτη) για να:

- 1) Προσδιορίσουμε την **προέλευση** των μαγμάτων, υποθέτοντας ότι τα πρωταρχικά μάγματα σχηματίζονται στον ανώτερο μανδύα.
- 2) Για να διακρίνουμε **διεργασίες μερικής τήξης** ή κλασματικής **κρυστάλλωση**.
- 3) Να **συγκρίνουμε** πετρώματα διαφορετικών συστάσεων και να προσδιορίσουμε την προέλευση τους.



Το “Pattern” του κανονικοποιημένου διαγράμματος REE ... ταυτότητα ενός πετρώματος

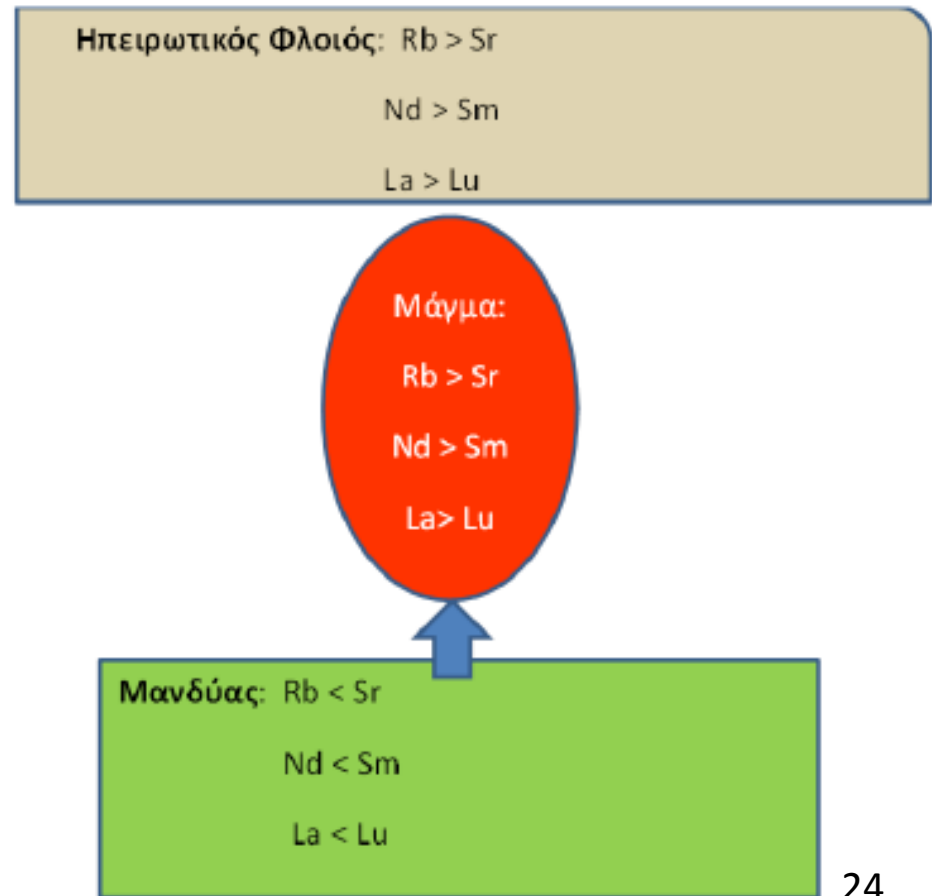


23



Διαφοροποίηση στη σύσταση φλοιού και μανδύα

- Ο φλοιός σχηματίστηκε από τήγματα που προήρθαν από το μανδύα, μεταφέροντας το χαρακτηριστικό του εμπλουτισμού (στο “pattern”):
 - **Ηπειρωτικός φλοιός:** έγινε εμπλουτισμένος σε **μη-ανταγωνιστικά** στοιχεία
 - **Μανδύας:** έγινε απεμπλουτισμένος σε **μη-ανταγωνιστικά** στοιχεία.



24



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 2014. 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: Copyrighted. Πηγή: W. M. White, 2001.

Εικόνα 2: Copyrighted. Πηγή: W. M. White, 2001.

Εικόνα 3: Copyrighted.

Εικόνα 4: Copyrighted.

Εικόνα 5: Περιοδικός πίνακας. Copyrighted.

Εικόνα 6: Copyrighted.

Εικόνα 7: Copyrighted.

Εικόνα 8: Copyrighted.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/3)

Εικόνα 9: Copyrighted.

Εικόνα 10: Copyrighted.

Εικόνα 11: Copyrighted.

Εικόνα 12: Copyrighted.

Εικόνα 13: Copyrighted.

Εικόνα 14: Copyrighted.

Εικόνα 15: Copyrighted.

Εικόνα 16: Copyrighted.

Εικόνα 17: Copyrighted.

Εικόνα 18: Copyrighted.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/3)

Εικόνα 19: Copyrighted.

Εικόνα 20: Copyrighted.

Εικόνα 21: Copyrighted.

Εικόνα 22: Κλασματική κρυστάλλωση. Copyright Tulane University. Σύνδεσμος:
<http://www.tulane.edu/~sanelson/eens212/magmadiff.htm>. Πηγή: www.tulane.edu

Εικόνα 23: Copyrighted.

Εικόνα 24: Copyrighted.

