



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

## **Ισοτοπική Γεωχημεία**

### II. Μέθοδοι γεωχρονολόγησης

# Περιεχόμενα

- **Θεωρία**
  - Οι 2 βασικές προϋποθέσεις για την εφαρμογή των μεθόδων γεωχρονολόγησης
- **Μέθοδοι γεωχρονολόγησης:**
  - Rb – Sr
  - Sm – Nd
  - Re – Os (PGE)
  - Σειρά U – Th - Pb
- **Μελέτη διεργασιών σχηματισμού πετρωμάτων**



# Βασικές Αρχές Γεωχρονολόγησης

- Σε ποιες βασικές αρχές στηρίζεται η γεωχρονολόγηση ?
- Γιατί χρησιμοποιούμε τους ισοτοπικούς λόγους?
- Πως ξέρουμε ότι οι ισοτοπικοί λόγοι των διαφόρων γεωλογικών υλικών (πέτρωμα, ορυκτά, νερά, αέρια) δεν έχουν μεταβληθεί κατά την εξελικτική τους πορεία ?



# Οι δύο βασικές αρχές

## 1η

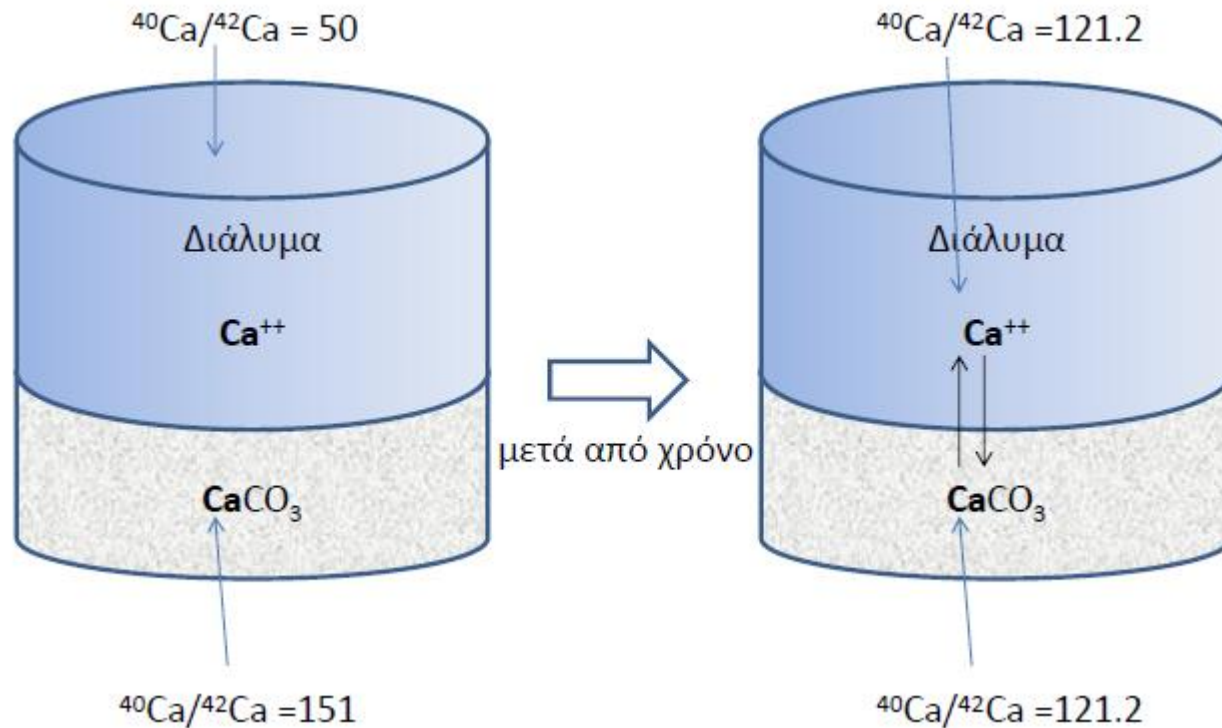
Όταν δύο, ή περισσότερα ορυκτά σε ένα πέτρωμα (ή πέτρωμα / διάλυμα) βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία (δηλ. δεν αντιδρούν μεταξύ τους), τότε οι ισοτοπικοί λόγοι των χημικών στοιχείων που υπάρχουν στα ορυκτά είναι ίσοι.

Εάν δεν είναι ίσοι οι ισοτοπικοί λόγοι τότε μεταξύ των υλικών με διαφορετική ισοτοπική, θα γίνει **ανταλλαγή** ισοτόπων, έτσι ώστε να τελικά αποκτήσουν ίσους λόγους .

**(ΙΣΟΤΟΠΙΚΗ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ)**



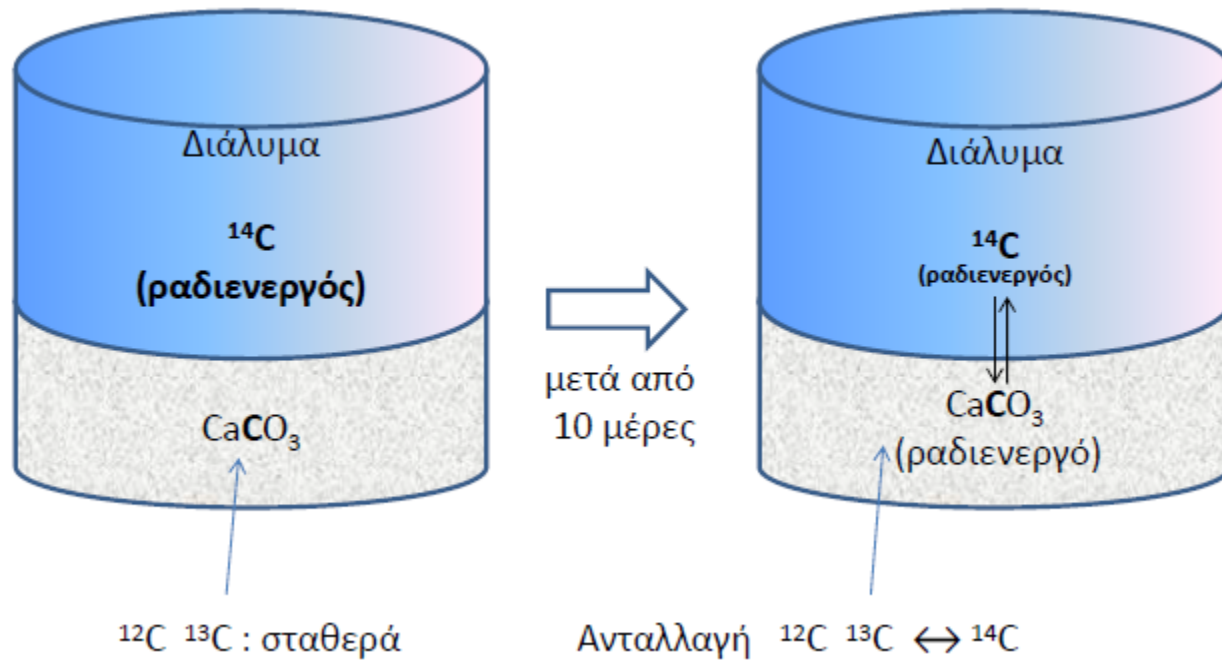
# Παράδειγμα (Ισοτοπική Ομογενοποίηση)



1



# Παράδειγμα (Ισοτοπική Ομογενοποίηση)



2

# Ισοτοπική Ομογενοποίηση

- **Υψηλές θερμοκρασίες:** η ανταλλαγή ισοτόπων γίνεται **γρήγορα** (ομογενοποίηση ισοτοπικών λόγων στα μαγματικά πετρώματα).
- **Χαμηλές θερμοκρασίες:** η ανταλλαγή ισοτόπων γίνεται **αργά**.
- Μεταξύ αερίων ή υγρών: η ανταλλαγή (διάχυση) γίνεται γρήγορα.
- **πετρώματα** = αποτυπώνουν την ισοτοπική σύσταση της πηγής από την οποία προέρχονται.





# Οι δύο βασικές αρχές (συνέχεια)

## 2η

Μετά το σχηματισμό του πετρώματος **δεν** είχαμε κάποια **αλλοίωση** στην ισοτοπική σύσταση, ώστε να προκύψει νέα ομογενοποίηση.

**(ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ)**

Διατήρησε το πέτρωμα την αρχική του ισοτοπική σύσταση?

Η διάχυση σε συνθήκες επιφανείας συντελείται τόσο αργά, που πρακτικά θεωρούμε ότι οι αρχικοί ισοτοπικοί λόγοι παραμένουν αναλλοίωτοι στις συνθήκες επιφανείας.



# Σύστημα $^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$

Στοιχείο **Rb**.

Έχει 2 φυσικά ισότοπα:  $^{37}_{37}\text{Rb}$  (αφθονία ατόμων 27.83 %) - **ραδιενεργό**  
σταθερό  $^{37}_{37}\text{Rb}$  (αφθονία ατόμων 72.16 % των ατόμων) -

Στοιχείο **Sr**.

Έχει 4 φυσικά ισότοπα:  $^{38}_{38}\text{Sr}$  (αφθονία ατόμων 82.58%) - σταθερό  
 $^{38}_{38}\text{Sr}$  ( $^{87}\text{Sr}$ ) (αφθονία ατόμων 7 %) - σταθερό  
 $^{38}_{38}\text{Sr}$  ( $^{86}\text{Sr}$ ) (αφθονία ατόμων 9.86%) - σταθερό  
 $^{38}_{38}\text{Sr}$  ( $^{84}\text{Sr}$ ) (αφθονία ατόμων 0.56% - σταθερό

**Ραδιενεργή διάσπαση  $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \text{σωματίδια } \beta^-$**

Μέθοδος **χρονολόγησης Rb-Sr ορυκτών** που περιέχουν **Rb** ή **ολικό πέτρωμα**,  
βασίζεται στη **Ραδιενεργή διάσπαση**

**$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \text{σωματίδια } \beta^-$**

$$\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 * 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$$



# Σύστημα $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$

$^{87}\text{Rb}$ =27.83%

$^{85}\text{Rb}$ =72.17%

$^{88}\text{Sr}$ =82.53%

$^{87}\text{Sr}$ =7.04%

$^{86}\text{Sr}$ =9.87%

$^{84}\text{Sr}$ =0.56%

-διασπάται σε  $^{87}\text{Sr}$  και δίνει  $\beta^-$ ,  
half-life=48.8 δισεκατομμύρια χρόνια

ΣΤΑΘΕΡΑ

## Rb/Sr λόγοι στα διάφορα πετρώματα:

Υπερμαφικά **0.2**

Βασαλτικά **0.06**

Γρανίτες **0.25 - 1.7**

Κλαστ. Ιζ. πετρ. (shale) **0.46**

Πυριτιόλιθοι **3**

## Τι προκαλεί την μεγάλο εύρος διακύμανσης του Rb/Sr πετρώματα?

1. Rb υποκαθιστά K στα K-ούχα ορυκτά

ενώ

Sr υποκαθιστά το Ca στα Ca-ούχα ορυκτά

2. Rb και Sr διαφοροποιούνται (κλασματώνονται) στις μαγματικές διεργασίες:

Rb έχει την τάση να εισέρχεται στο τήγμα (περισσότερο “μη-ανταγωνιστικό – incompatible” απ’ ότι το Sr)

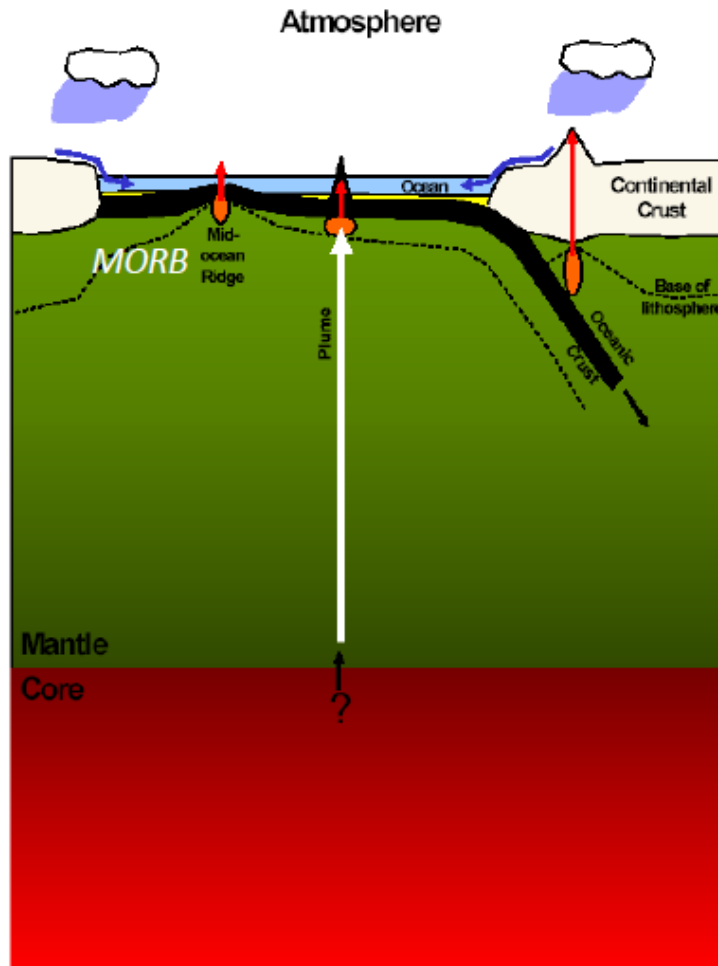
## Συμπέρασμα:

Πετρώματα ή ορυκτά με **υψηλό Rb/Sr** θα περιέχουν **περισσότερο  $^{87}\text{Sr}$**

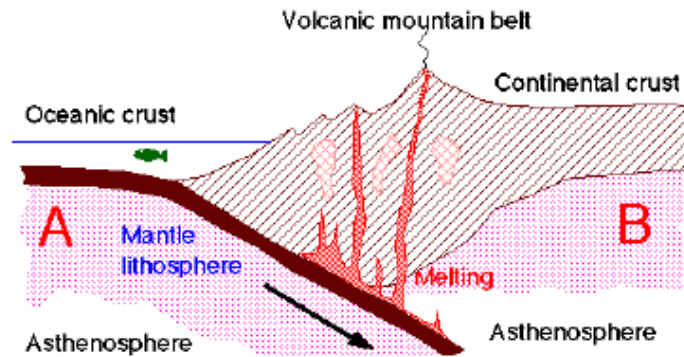
Πετρώματα ή ορυκτά με **χαμηλό Rb/Sr** θα περιέχουν **λιγότερο  $^{87}\text{Sr}$**



# Μαγματικές διεργασίες και διακύμανση του λόγου $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$



Not to scale



\* ΘΥΜΟΜΑΣΤΕ :  $^{87}\text{Rb}$  προτιμά το τήγμα

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  λόγοι στα μαγματικά πετρώματα:

MORB	0.7025
Ηφαιστ. Τόξα σε ηπειρωτικό φλοιό	0.7119
Ηφαιστ. Ωκεάνεια νησιά	>0.704
Μετεωρίτες	0.699

3

# Μέθοδος γεωχρονολόγησης $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left[ \frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right]_i + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} [e^{-\lambda t} - 1]$$

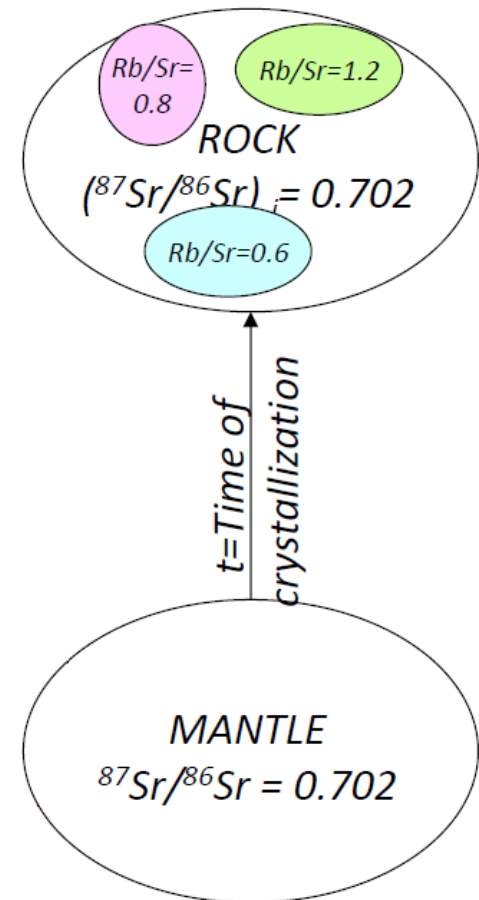
Μετράμε

Μετράμε

Κάθε μαγματικό πέτρωμα όταν κρυσταλλώνεται έχει μια αρχική σύσταση Sr.

Πως προσδιορίζουμε τον αρχικό λόγο:  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

Επειδή τα πυριγενή πετρώματα είναι τόσο ετερογενή (πολλά ορυκτά) τα διάφορα ορυκτά θα έχουν διαφορετικό λόγο Rb/Sr, όμως έχουν την ίδια ηλικία κρυστάλλωσης (χρόνος σχηματισμού) και τον ίδιο αρχικό λόγο  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ .



# Πως κατασκευάζονται οι ισόχρονες $^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$ ?

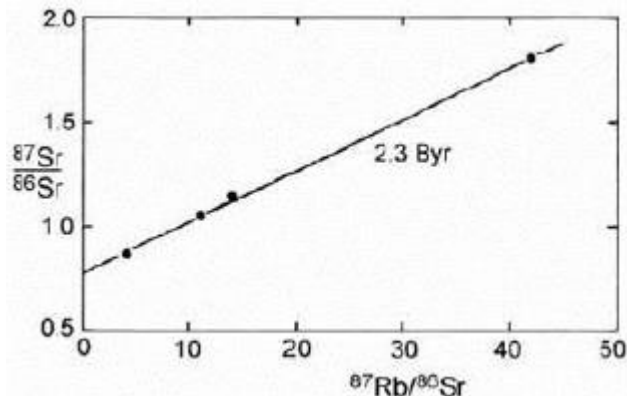
$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = \left[ \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right]_i + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} [e^{-\lambda t} - 1]$$

Μετράμε

Μετράμε

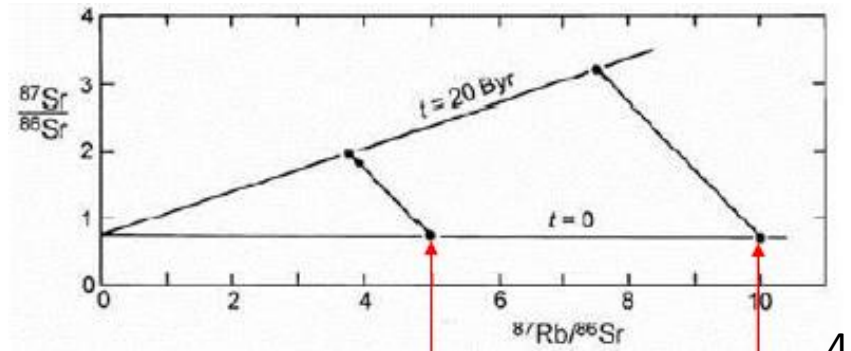
Κάθε μαγματικό πέτρωμα όταν κρυσταλλώνεται έχει μια αρχική σύσταση Sr.

Ισόχρονη Rb-Sr για το Γρανίτης του Bushveld



5

Η γραφική παράσταση της ισόχρονης Rb-Sr



Δείγμα με χαμηλότερο [Rb]

Δείγμα με υψηλότερο [Rb]

4

εάν  $x = (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_m$

&  $y = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$

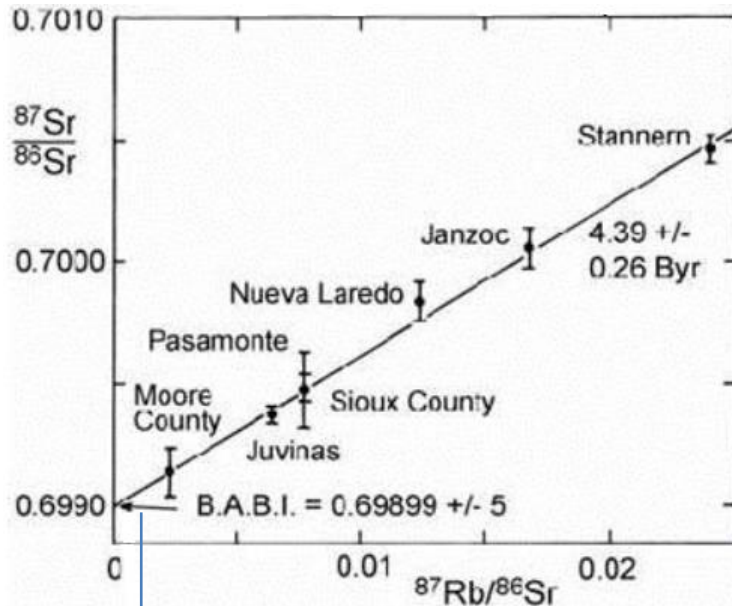
έχουμε  $y = b + mx$

Η γραμμή τέμνει τον Y στο  $b = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

Κλίση της γραμμής  $m = (e^{\lambda t} - 1)$

Η μέθοδος είναι περισσότερο από ένα εργαλείο χρονολόγησης.  
 Προσδιορισμό του αρχικού λόγου ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> στην πορεία του χρόνου

Ισόχρονη Rb-Sr μετεωριτών



→  
 T=4.5Ga

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of igneous rocks:

MORB 0.7025  
 Continents 0.7119  
 Ocean Islands >0.704  
 vs.  
 Meteorites 0.699

Βασικές Ερωτήσεις:

1. Γιατί όλες οι τιμές του λόγου ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) σήμερα είναι μεγαλύτερες από το BABI?
2. Γιατί ο ηπειρωτικός φλοιός έχει τις υψηλότερες τιμές?

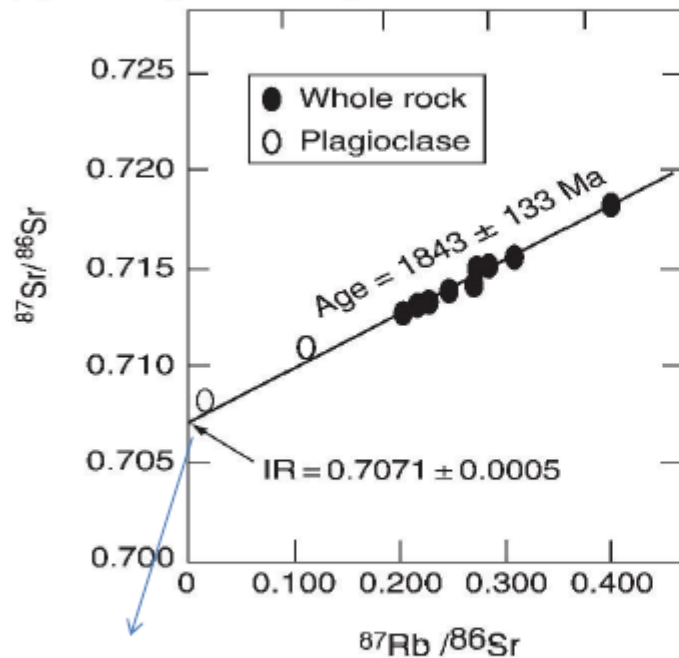
BABI - Basaltic Achondrite Best Initial = Αρχική ισοτοπική σύσταση της Γης πριν διαφοροποιηθεί (Bulk Earth, undifferentiated)



# Ισόχρονη γραμμή

## 1) Rb – Sr

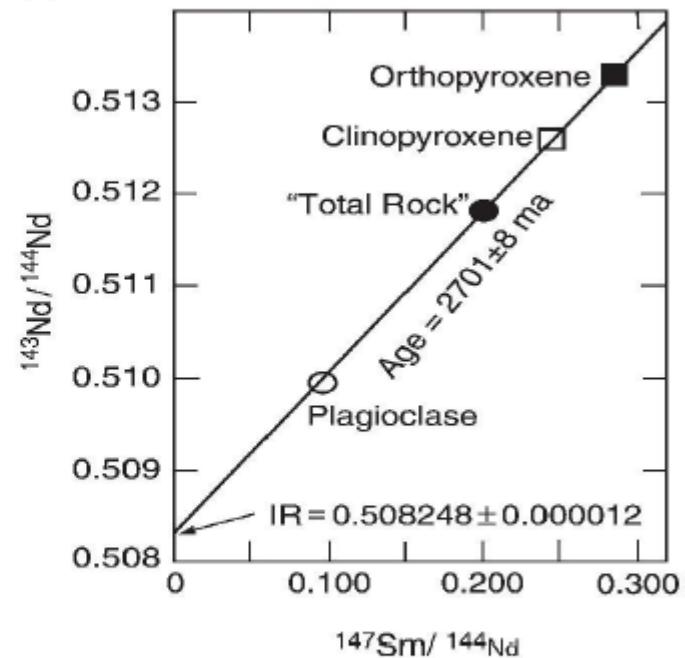
(a) Sudbury Nickel Irruptive



IR = Initial Ratio (Αρχικός λόγος)

## 2) Sm - Nd

(b) Stillwater Gabbro

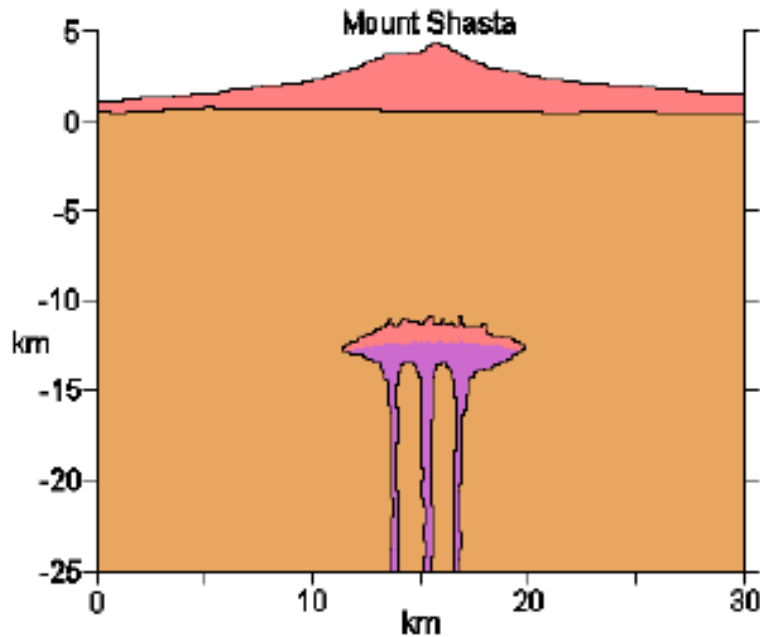


7





# Μελέτη προβλημάτων ανάμιξης διαφορετικών μαγμάτων με διαφορετικό $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$



8

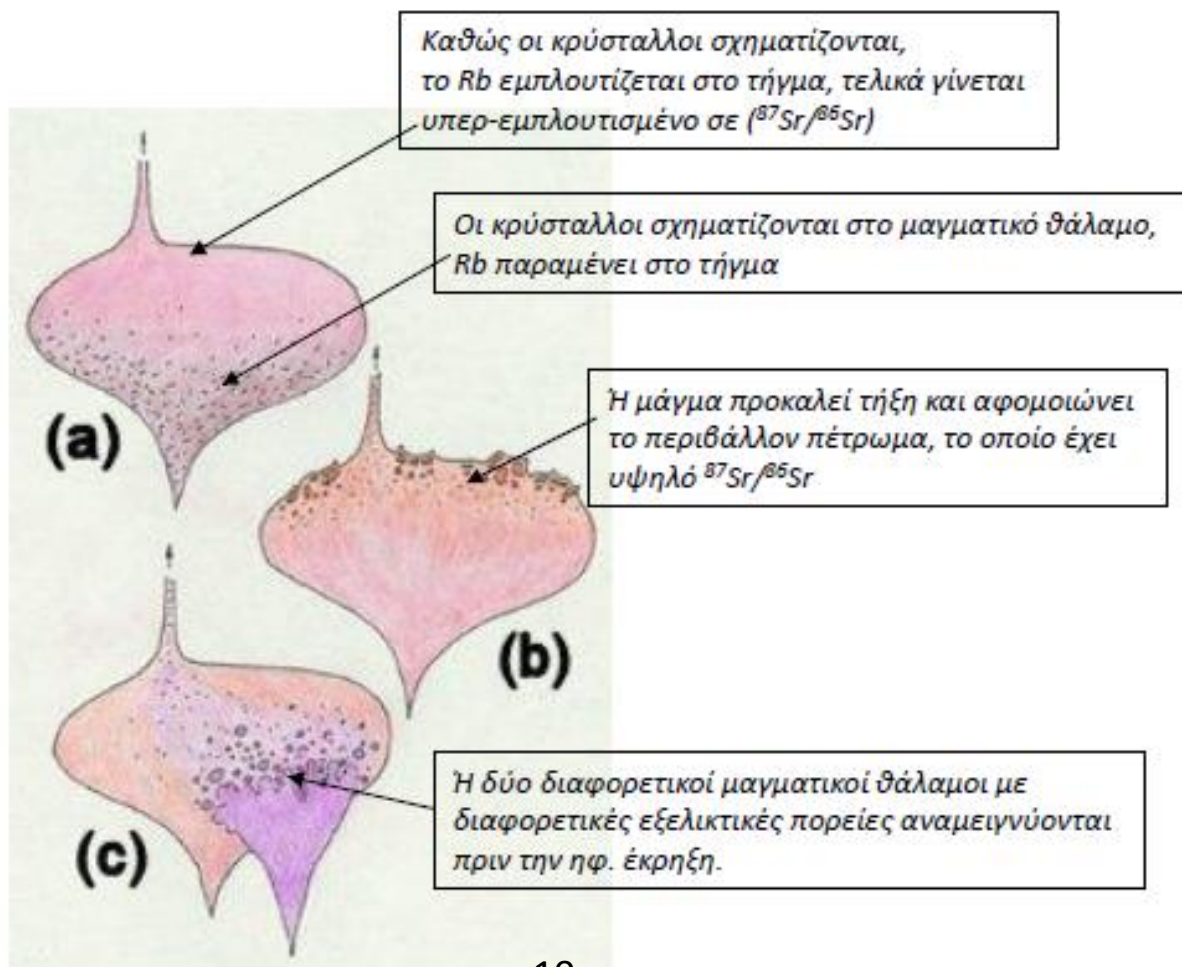
Λάβες του Mt. Shasta έχουν μεγάλο εύρος τιμών στο αρχικό λόγο  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i \rightarrow$  ανάμιξη διαφορετικών συστάσεων



Αεροφωτογραφία του ηφαιστείου, Mt. Shasta<sup>9</sup> (οροσειρά Cascades, California - ηφαιστειακό τόξο στο ηπειρωτικό περιθώριο Β. Αμερικής)



# 3 διαφορετικά μοντέλα

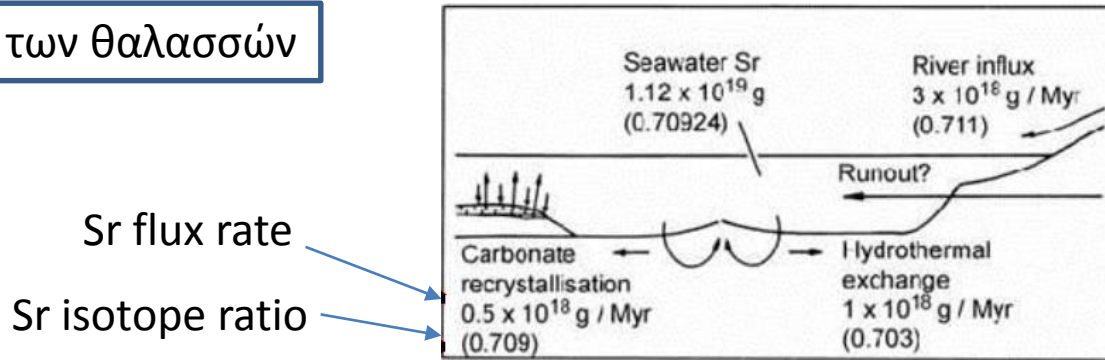


10

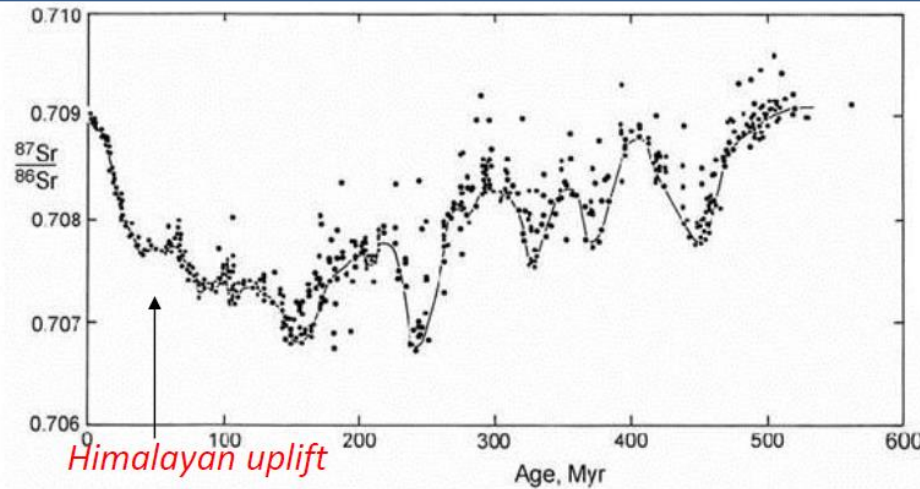


# Η μεταβολή του ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) στο θαλασσινό νερό

Ισοζύγιο Sr των θαλασσών



Η καμπύλη του ισοτοπικού λόγου του Sr των θαλασσών (μετρήσεις σε παλαιά και σύγχρονα ανθρακικά πετρώματα)



Ορογενετικές διεργασίες

Υδροθερμική δραστηριότητα

11

# Σύστημα $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$

$^{147}\text{Sm}=15\%$

4 άλλα ισότοπα

$^{143}\text{Nd}=12.2\%$

6 άλλα ισότοπα

-Διασπάται στο  $^{143}\text{Nd}$

-δίνοντας σωματίδια  $\alpha$ ,

half-life=106 δισεκ. Χρόνια (Ga)

**Λόγος Sm/Nd στους γήινους σχηματισμούς:**

γρανάτης (ορυκτό) **0.539**

MORB (Βασάλτες Μ.Ρ) **0.32**

Θαλασσινό νερό **0.211**

Shale 0.209

Ηλιακό σύστημα 0.31

Το **Nd** έχει χαμηλότερο ιοντικό δυναμικό (φορτίο/ακτίνα) συγκριτικά με το **Sm**, έτσι οι δεσμοί του είναι ασθενέστεροι. Το **Nd** συγκεντρώνεται στο τήγμα, ενώ το **Sm** παραμένει στο στερεό.

Έτσι...

Πέτρωμα με **Υψηλό Sm/Nd** θα περιέχει και **περισσότερο  $^{143}\text{Nd}$**

Πέτρωμα με Χαμηλό **Sm/Nd** θα περιέχει λιγότερο  $^{143}\text{Nd}$

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Το μητρικό **Sm** θα εμπλουτίζεται στον υπολειματικό μανδύα, σε τομείς που έχουν υποστεί μερική τήξη & αφαίρεσης μαγμάτων

[ “απεμπλουτισμένες” πηγές, πχ. MORB)  $\rightarrow$  Sm/Nd  $\gg$

(αντίθετη πορεία απ’ αυτή του λόγου Rb/Sr, όπου ο λόγος αυξάνεται στους ηπειρωτικούς φλοιούς)



# Ισόχρονη $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$

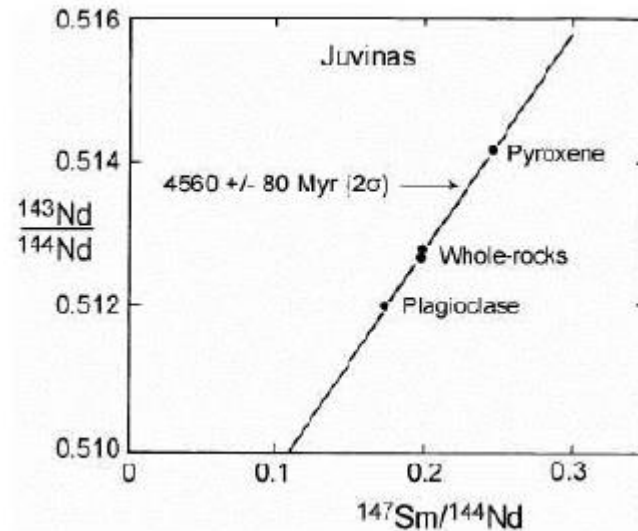
$$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} = \left[ \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right]_i + \frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} [e^{\lambda t} - 1]$$

Μετράμε

Μετράμε

Κάθε μαγματικό πέτρωμα όταν κρυσταλλώνεται έχει μια αρχική σύσταση Nd.

**Πρακτικά είναι η ίδια εξίσωση με αυτή του συστήματος Rb/Sr**



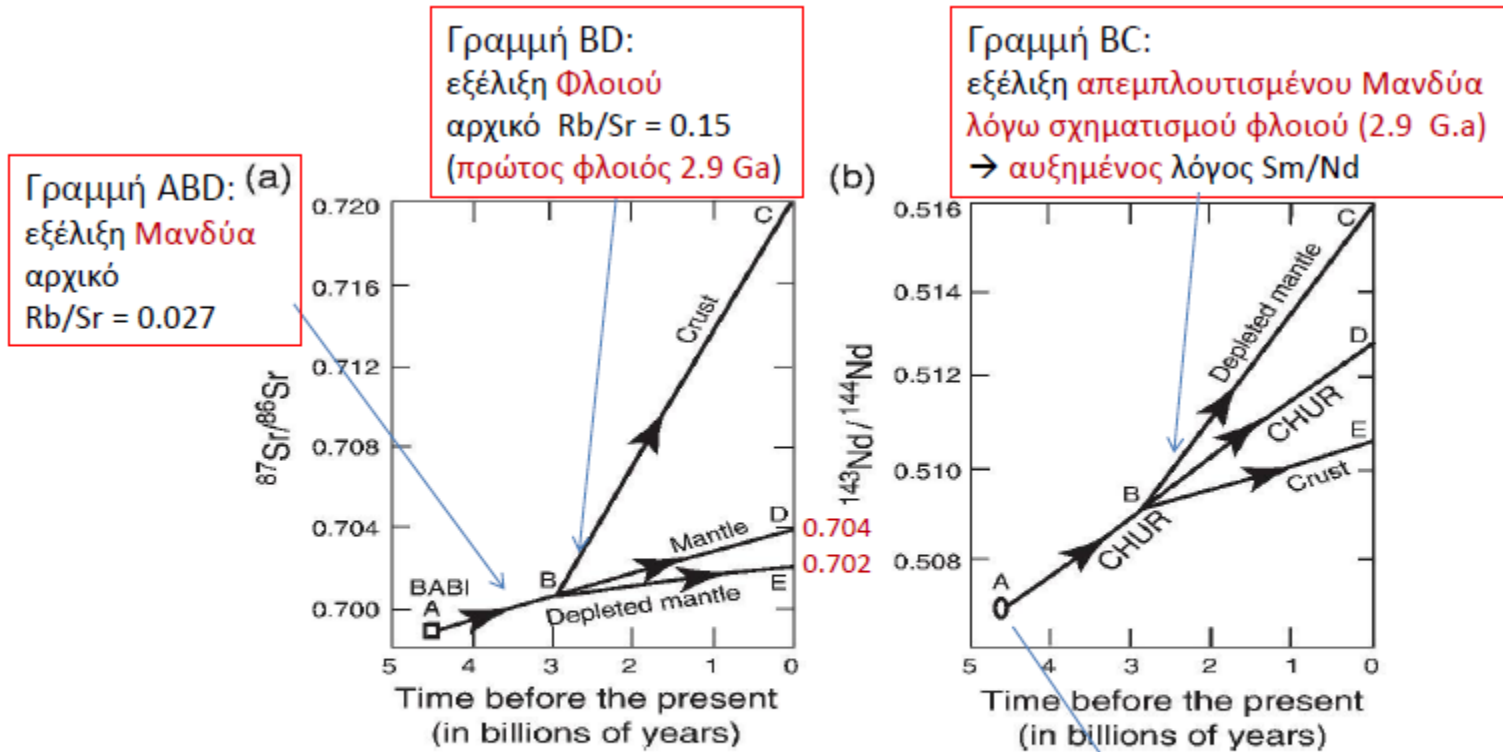
12

Εάν  $x = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$   
&  $y = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$   
Έχουμε  $y = b + mx$

Εκεί που τέμνεται ο Y είναι:  
 $b = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$   
Και η κλίση  $m = (e^{\lambda t} - 1)$



# Εξέλιξη του ισοτοπικού λόγου Sr, Nd στα διάφορα τμήματα της Γης



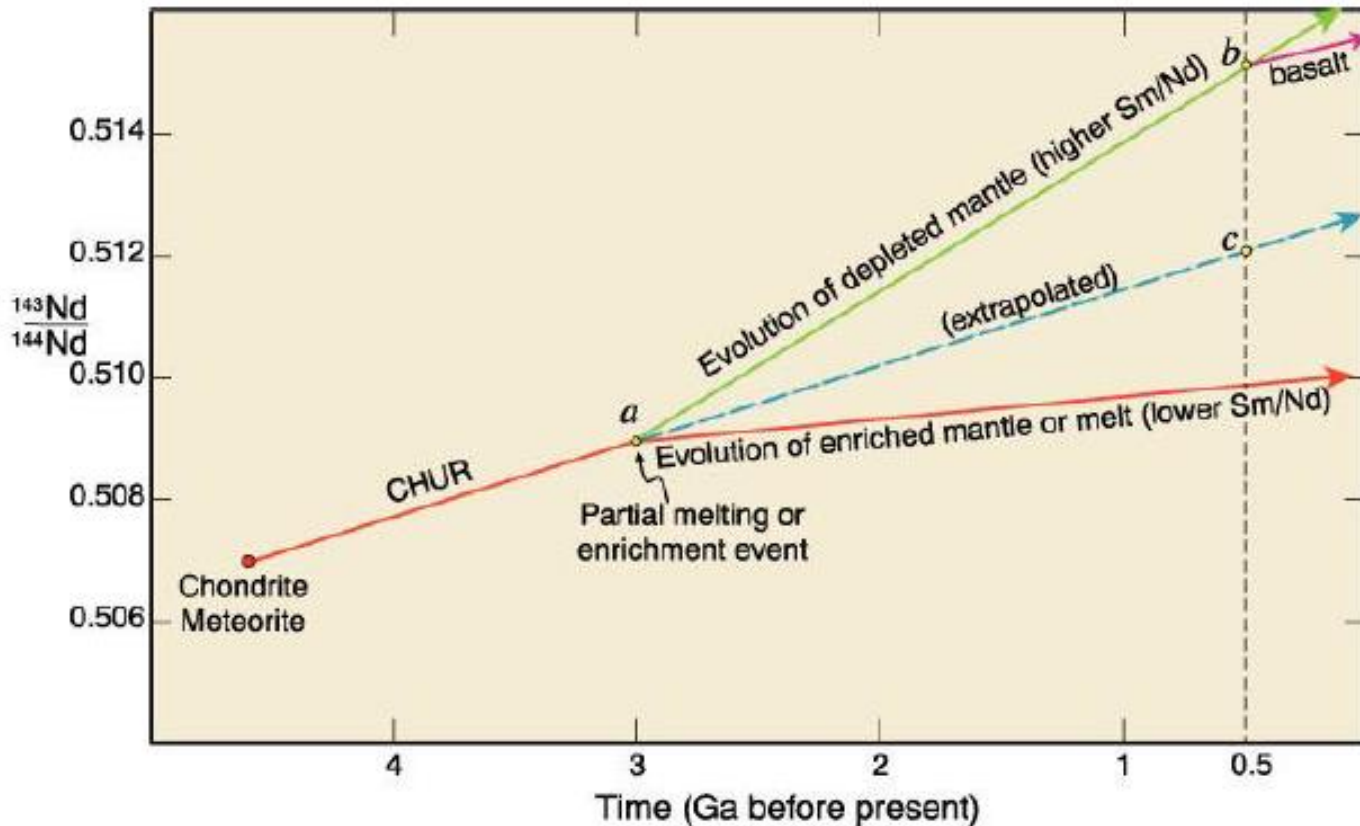
*Introduction to Geochemistry: Principles and Applications*, First Edition. Kula C. Misra.  
© 2012 Kula C. Misra. Published 2012 by Blackwell Publishing Ltd.

13

**CHUR:** Chondrite Uniform Reservoir  
(Υποθετική Πρωταρχική Σύσταση Γης)



# Εξέλιξη ισοτόπων Nd (διαφοροποίηση της Γης στα 3 Ga, σχηματισμός φλοιού από τον μανδύα)



14

(πηγή : Wilson (1989). Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman/Kluwer.



## Συντελεστής έψιλον ( $\epsilon_{Nd, CHUR}$ )

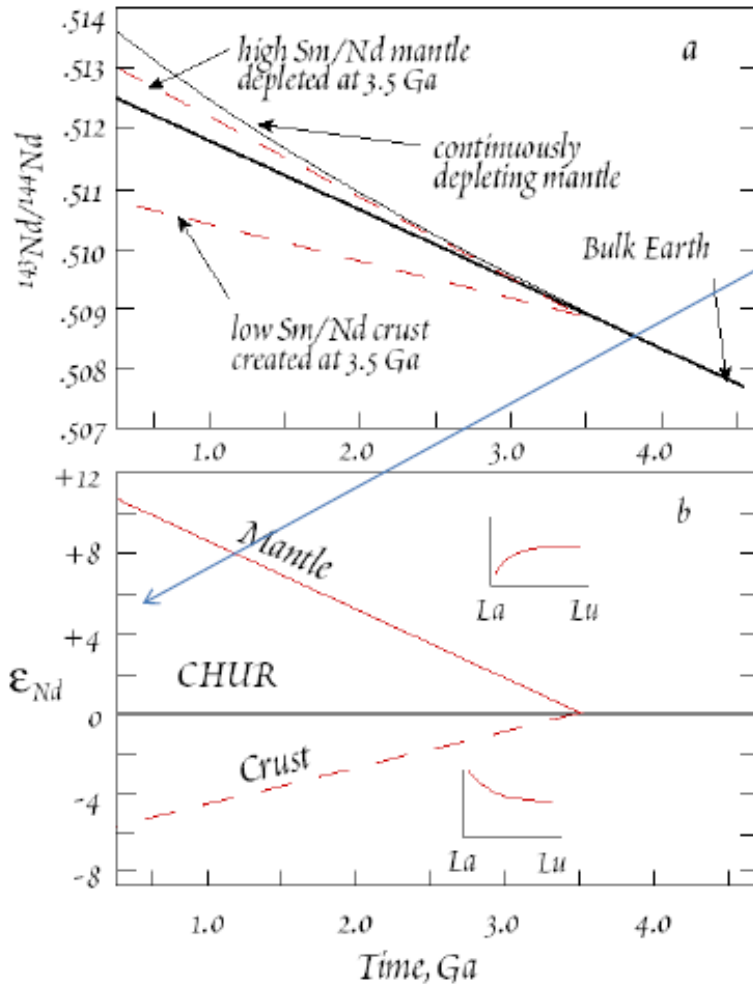
$$\epsilon_{Nd, CHUR} = \left[ \frac{\left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{sample}}}{\left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{CHUR}}} - 1 \right] 104$$

### CHUR = “Chondritic Uniform Reservoir”

(υποθετική σύσταση της πρωταρχικής μη διαφοροποιημένης γης)

- βασίστηκε σε μετρήσεις χονδριτών μετεωριτών (DePaulo and Wasserburg, 1976a)
- συγκρίνουμε τις τιμές των δειγμάτων μας σε σχέση με την τιμή CHUR → τιμή  $\epsilon_{Nd}$
- Μπορούμε να αναφερόμαστε σε πολύ μικρές μεταβολές των ισοτόπων Nd (~0.0001)

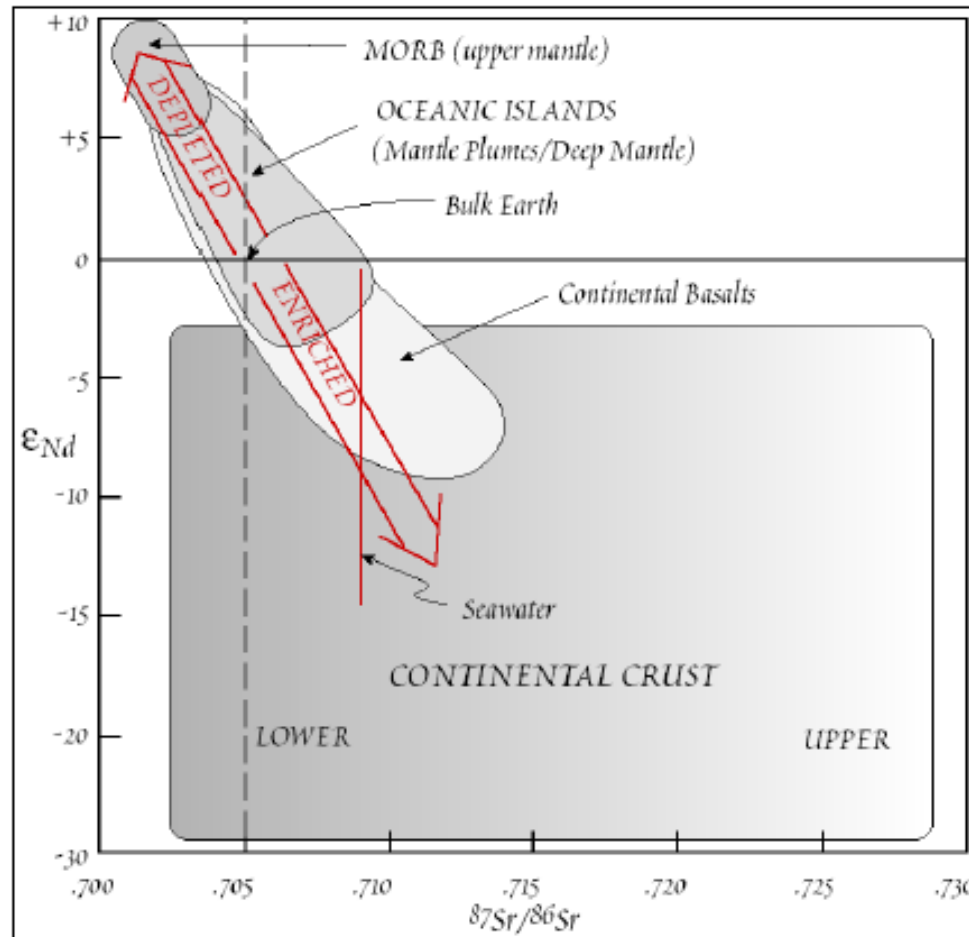
- Ποιά είναι η τιμή του  $\epsilon$  για το CHUR?



15



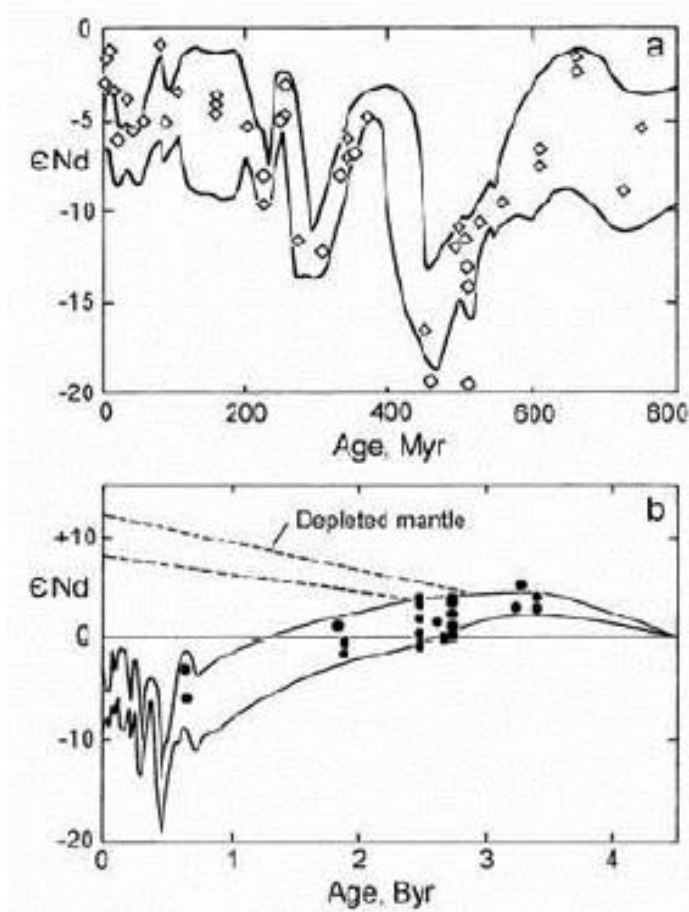
# Συνδιασμένη προβολή Sm-Nd & Rb-Sr



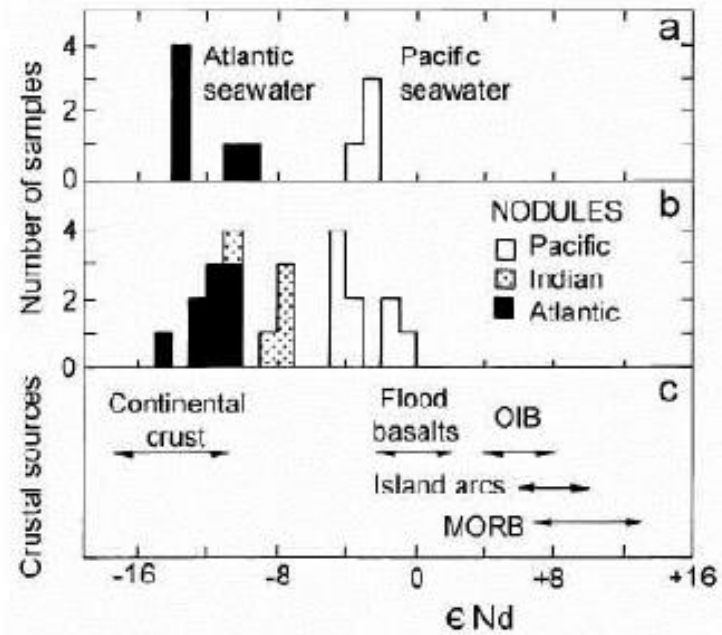
16



# Διακύμανση του ισοτοπικού Nd στο θαλασσινό νερό



17



18

- Το **Nd** δεν έχει ομοιογένεια στους ωκεανούς λόγω της μικρού χρόνου παραμονής του στο θαλασσινό νερό.
- $R_t = \text{total reservoir} / (\text{C sinks})$



# Εφαρμογές χρονολόγησης με ισότοπα Nd

- REE είναι εξαιρετικά ανθεκτικές στις συνθήκες μεταμόρφωσης, έτσι μπορούμε να μετρήσουμε ισότοπα Nd σε: **πολύ παλιά ιζήματα, δόντια ψαριών, Fe-Mn σφαιρίδια,** κλπ.
- Οι διακυμάνσεις στα ισότοπα Nd αποτυπώνουν την τεκτονική εξέλιξη ενός σχηματισμού σε μεγάλη χρονική κλίμακα.

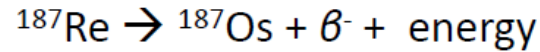
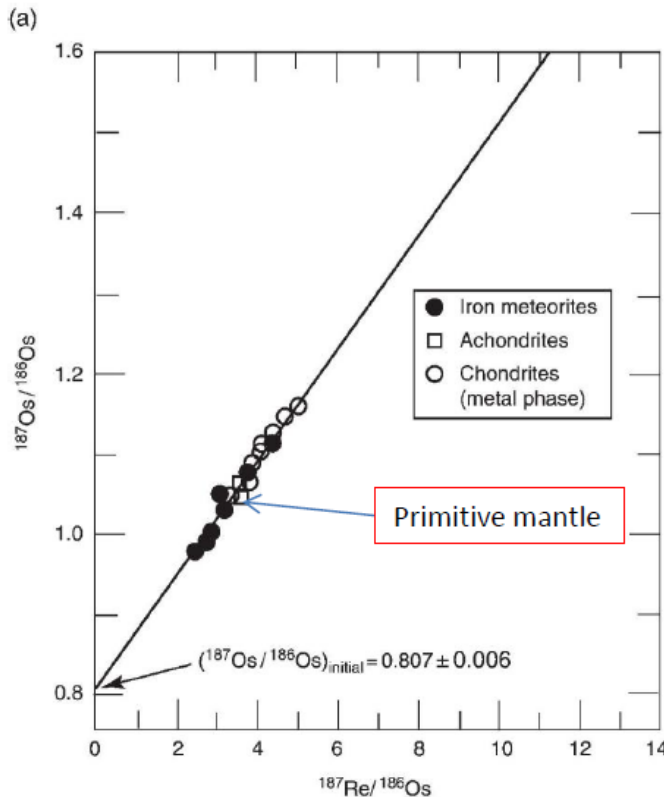


Φωτ. 2. Fe-Mn σφαιρίδια από τον Ειρηνικό Ωκεανό

19



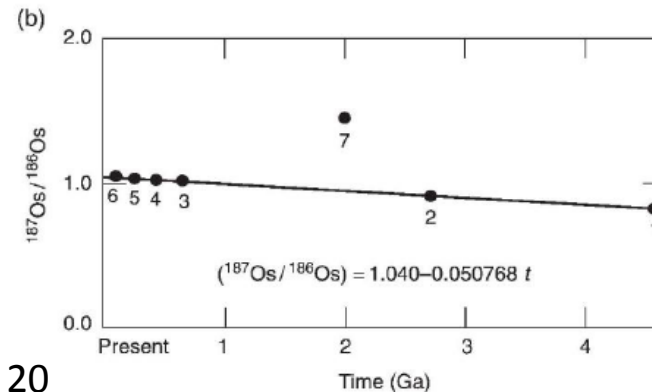
# Ισόχρονη Rhenium – Osmium (PGE) Χρονολόγηση Μετεωριτών



$$^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = [^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}]_o + ^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os} (e^{\lambda t} - 1)$$

$$\lambda = 1.64 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$$

$$\text{Half-life} = 42.3 \times 10^9 \text{ yr}$$



**Fig. 10.12** (a) Re–Os isochron for iron meteorites and metallic phases in chondrites. The colinearity of the data indicates that the meteorites formed within a narrow time range from a primordial source that was isotopically homogeneous with respect to Os. The primitive mantle composition included in this figure,  $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os} = 3.34$ , and the present  $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os} = 1.040$  are taken from the mantle evolution curve plotted in Fig. 10.12b. The fit of the estimated mantle composition (Luck and Allègre, 1983) to the Re–Os isochron is evidence that the parent bodies of meteorites and the Earth formed at about the same time from the same primordial source. (Sources of data: Allègre and Luck, 1980; Luck and Allègre, 1983.) (b) Evolution of the isotopic composition of osmium in the Earth's mantle based on samples of iron meteorites, osmiridium, and laurite. Data points for the Bushveld Complex (McCandless and Ruiz, 1991) plot above the mantle evolution curve, and probably reflect crustal contamination.

20



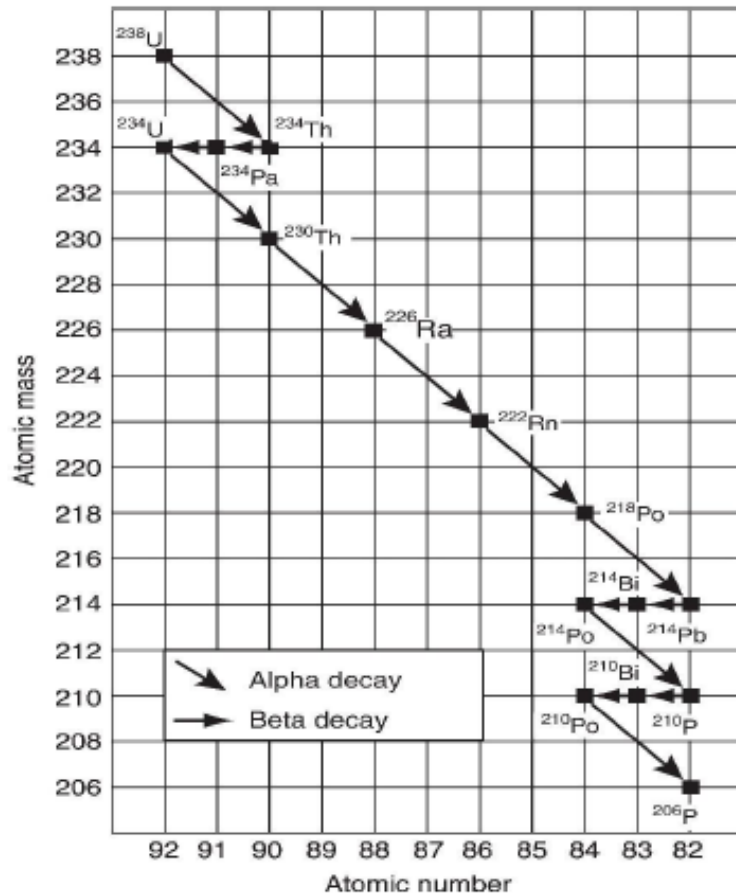


Φωτ. 3. Δείγματα Μετωριτών: Fe-Ni Μετεωρίτης (αριστερά) and Χονδρίτης Μετεωρίτης (δεξιά)

21



# Ειδική Περίπτωση Σειρά U – Th – Pb



Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition. Kula C. Misra.  
© 2012 Kula C. Misra. Published 2012 by Blackwell Publishing Ltd.

22

Fig. 10.3 Uranium-238 decay series: the radioactive decay of parent  $^{238}_{92}\text{U}$  nuclide (half-life =  $4.47 \times 10^9$  yr) to its stable daughter nuclide  $^{206}_{82}\text{Pb}$  via a series of intermediate radiogenic daughters, including radium ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ; half-life = 1622 yr) and radon gas ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ; half-life = 3.83 days).

# Σύστημα U-Pb-Th

Πολύ πολύπλοκο σύστημα.

- 3 ραδιενεργά ισότοπα του U:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ .
- 3 ραδιογενή ισότοπα του Pb:  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ , and  $^{208}\text{Pb}$ .
- Μόνο το  $^{204}\text{Pb}$  είναι αυστηρά μη ραδιογενές (non-radiogenic).

U, Th, και Pb είναι μη ανταγωνιστικά (*incompatible*) στοιχεία, και συγκεντρώνονται στα πρώτα τήγματα.

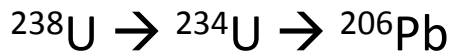
Ισοτοπική σύσταση του Pb στο πέτρωμα = συνάρτηση μιας σειράς ραδιενεργών διασπάσεων.

- $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$  ( $\lambda = 1.5512 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ )
- $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$  ( $\lambda = 9.8485 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ )
- $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$  ( $\lambda = 4.9475 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ )



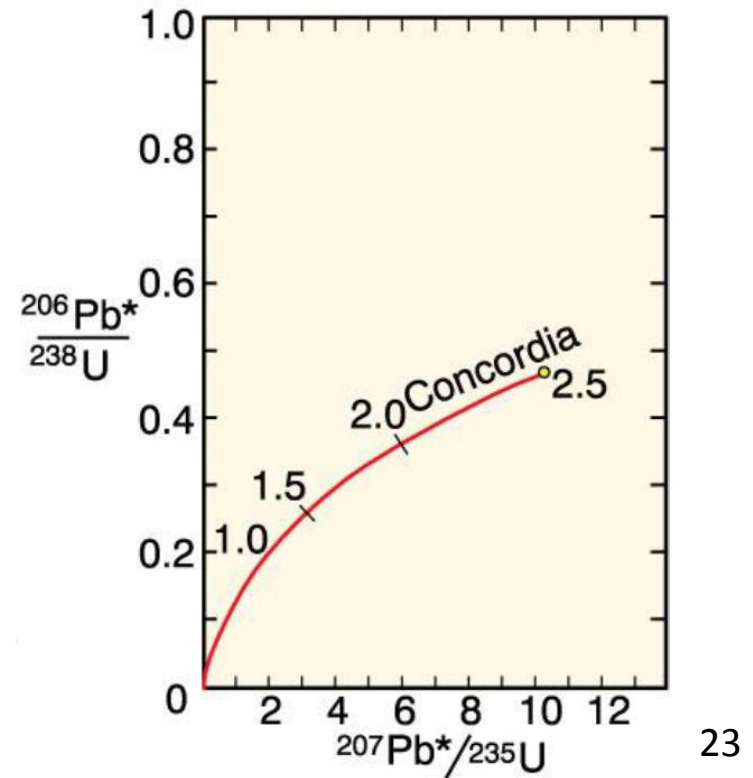
# Σύστημα U-Pb-Th

**Ισόχρονη - Concordia** = ταυτόχρονη εξέλιξη του  $^{206}\text{Pb}$  και  $^{207}\text{Pb}$  μέσω των διασπάσεων:



$^{206}\text{Pb}^*$  : radiogenic  $^{206}\text{Pb}$

Το παράδειγμα την εξέλιξη ενός ισοτοπικού συστήματος για χρονική περίοδο 2.5 Ga



Concordia , εξέλιξη ισοτόπων Pb ενός αρχαίου πετρώματος 3.5 Ga με ένα επεισόδιο απώλειας Pb. (πηγή: Faure (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd, ed. John Wiley & Sons. New York.)





# Σύστημα U-Pb-Th

**Discordia** = ταυτόχρονη απώλεια  $^{206}\text{Pb}$  και  $^{207}\text{Pb}$

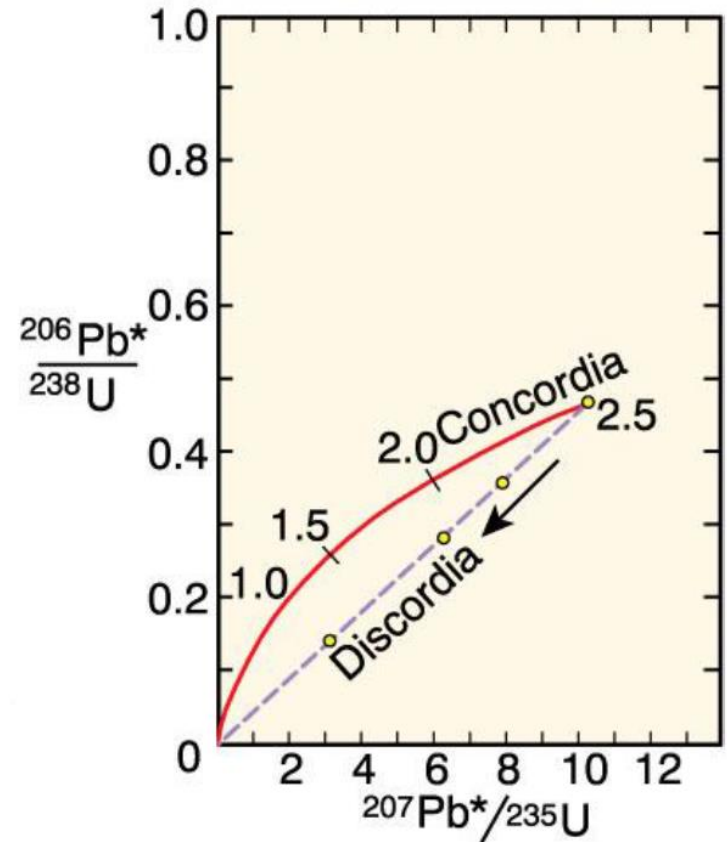
Discordia: loss of both  $^{206}\text{Pb}$  and  $^{207}\text{Pb}$  due to some thermal event (metamorphism)

All  $\rightarrow$  origin but not same amount

Suppose this occurs 2.5 Ga after original crystallization.

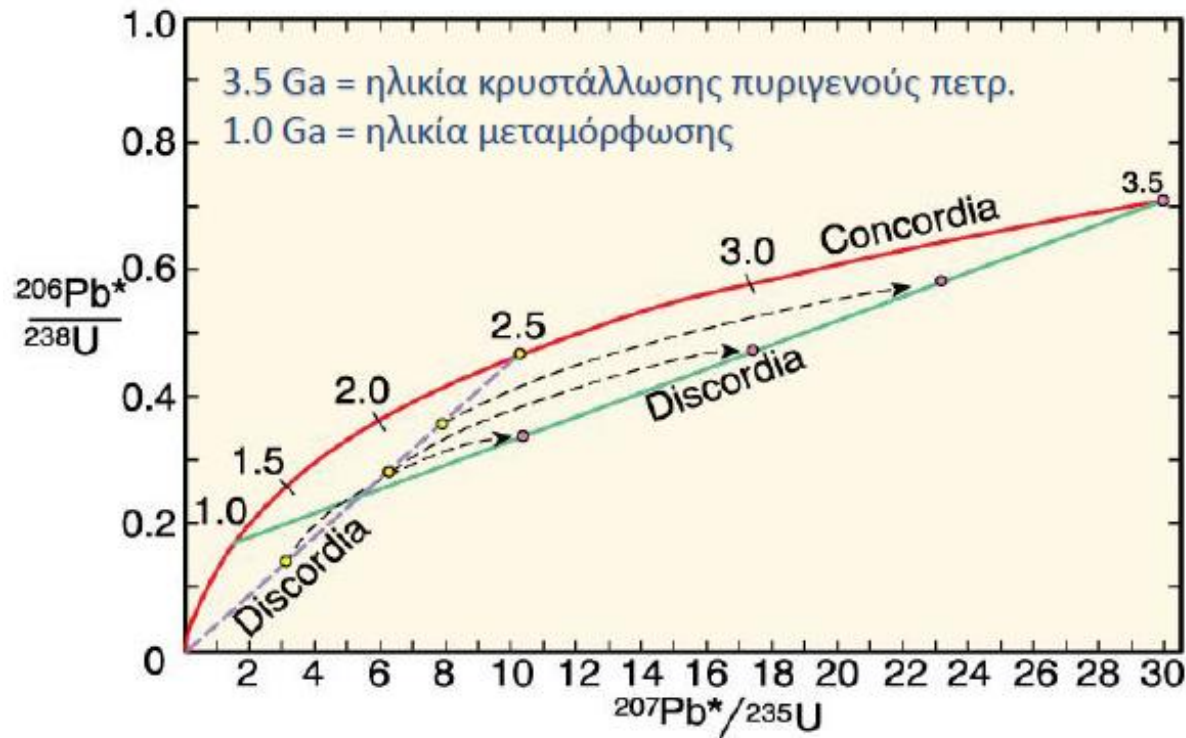
Concordia diagram illustrating the Pb isotopic development of a 3.5 Ga old rock with a single episode of Pb loss.

(πηγή: Faure (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd, ed. John Wiley & Sons. New York.



# Σύστημα U-Pb-Th

Διάγραμμα Concordia για συνολικό χρόνο 3.5 Ga



25

Concordia diagram illustrating the Pb isotopic development of a 3.5 Ga old rock with a single episode of Pb loss. (πηγή: Faure (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd, ed. John Wiley & Sons. New York. )



# Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Allègre, C. J. (2008). Isotope Geology. Cambridge University Press, Cambridge, 512 pp.
2. Faure, G. Principles of Isotope Geology. (1986). 2<sup>nd</sup> edn. J. Wiley & Sons, New York, 589 pp.
3. Misra, K. C. (2012). Introduction to Geochemistry: principles & applications.  
WILEY-BLACKWELL, UK, 438 pp.
4. DePaulo and Wasserburg, 1976a. Nd isotopic variations and petrogenetic models.  
Geophys. Res. Lett. 3, 249-52.



# 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 (1/5)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

## **Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες**

Εικόνα 1: Παράδειγμα Ισοτοπικής Ομογενοποίησης. Copyrighted.

Εικόνα 2: Παράδειγμα Ισοτοπικής Ομογενοποίησης. Copyrighted.

Εικόνα 3: Διακύμανση του λόγου  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Copyright Department of Geology Panjab University, Chandigarh. Σύνδεσμος: <http://www.slideshare.net/jktiwana/rubidium-strontium-dating-41668544>. Πηγή: [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net)

Εικόνα 4: Η γραφική παράσταση της ισόχρονης Rb-Sr. Copyrighted.

Εικόνα 5: Ισόχρονη Rb-Sr για το Γρανίτη του Bushveld. Copyrighted.

Εικόνα 6: Ισόχρονη Rb-Sr μετεωριτών. Copyrighted.

Εικόνα 7: Ισόχρονη Rb-Sr και Sm-Nd. Copyrighted.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/5)

Εικόνα 8: Λάβες του Mt. Shasta. Copyright College of Siskiyou. Σύνδεσμος: <http://www.siskiyou.edu/shasta/geo/fig6.htm>. Πηγή: [www.siskiyou.edu](http://www.siskiyou.edu).

Εικόνα 9: Αεροφωτογραφία του ηφαιστείου, Mt. Shasta. CC BY-SA Wikipedia. Σύνδεσμος: [http://en.wikipedia.org/wiki/Portal:Volcanoes/Project\\_collaboration](http://en.wikipedia.org/wiki/Portal:Volcanoes/Project_collaboration). Πηγή: [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)

Εικόνα 10: Τρία διαφορετικά μοντέλα (Geology of Mount Shasta). Copyright College of Siskiyou. Σύνδεσμος: <http://www.siskiyou.edu/shasta/geo/fig6.htm>. Πηγή: [www.siskiyou.edu](http://www.siskiyou.edu).

Εικόνα 11: Sr isotope data for Phanerozoic carbonates. After Burke et al. (1982). Σύνδεσμος: <http://www.onafarawayday.com/Radiogenic/Ch3/Ch3-6.htm>. Πηγή: [www.onafarawayday.com](http://www.onafarawayday.com)

Εικόνα 12: Ισόχρονη  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$ . Copyrighted.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/5)

Εικόνα 13: Εξέλιξη του ισοτοπικού λόγου Sr, Nd στα διάφορα τμήματα της Γης. Copyright 2012 Kula C. Misra. Πηγή: Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition, Kula C. Misra.

Εικόνα 14: Εξέλιξη ισοτόπων Nd. Copyrighted. Πηγή : Wilson (1989). Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman/Kluwer.

Εικόνα 15: Copyrighted.

Εικόνα 16: Copyrighted.

Εικόνα 17: Διακύμανση του ισοτοπικού Nd στο θαλασσινό νερό. After Keto and Jacobsen (1988); Jacobsen and Pimentel-Klose (1988). Σύνδεσμος: <http://www.onafarawayday.com/Radiogenic/Ch4/Ch4-5.htm>. Πηγή: [www.onafarawayday.com](http://www.onafarawayday.com)



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/5)

Εικόνα 18: Διακύμανση του ισοτοπικού Nd στο θαλασσινό νερό. After Piepgras and Wasserburg (1980). Σύνδεσμος:

<http://www.onafarawayday.com/Radiogenic/Ch4/Ch4-5.htm>. Πηγή:  
www.onafarawayday.com

Εικόνα 19: Fe-Mn σφαιρίδια από τον Ειρηνικό ωκεανό. Copyright 1994-2001 Russell E. McDuff and G. Ross Heath. Σύνδεσμος:

<http://www2.ocean.washington.edu/oc540/lec01-16>. Πηγή:  
www2.ocean.washington.edu

Εικόνα 20: Copyrighted.

Εικόνα 21: Δείγματα Μετωριτών. Copyright New England Meteoritical Services. Σύνδεσμος: <http://www.meteorlab.com/METEORLAB2001dev/Open1.htm>. Πηγή:  
www.meteorlab.com



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/5)

Εικόνα 22: Σειρά U – Th – Pb. Copyright 2012 Kula C. Misra. Πηγή: Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition, Kula C. Misra.

Εικόνα 23: Concordia , εξέλιξη ισοτόπων Pb ενός αρχαίου πετρώματος 3.5 Ga με ένα επεισόδιο απώλειας Pb. Copyrighted. Πηγή: Faure (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd, ed. John Wiley & Sons. New York.

Εικόνα 24: Concordia diagram illustrating the Pb isotopic development of a 3.5 Ga old rock with a single episode of Pb loss. Copyrighted. Πηγή: Faure (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd, ed. John Wiley & Sons. New York.

Εικόνα 25: Concordia diagram illustrating the Pb isotopic development of a 3.5 Ga old rock with a single episode of Pb loss. Copyrighted. Πηγή: Faure (1986). Principles of Isotope Geology. 2nd, ed. John Wiley & Sons. New York.

