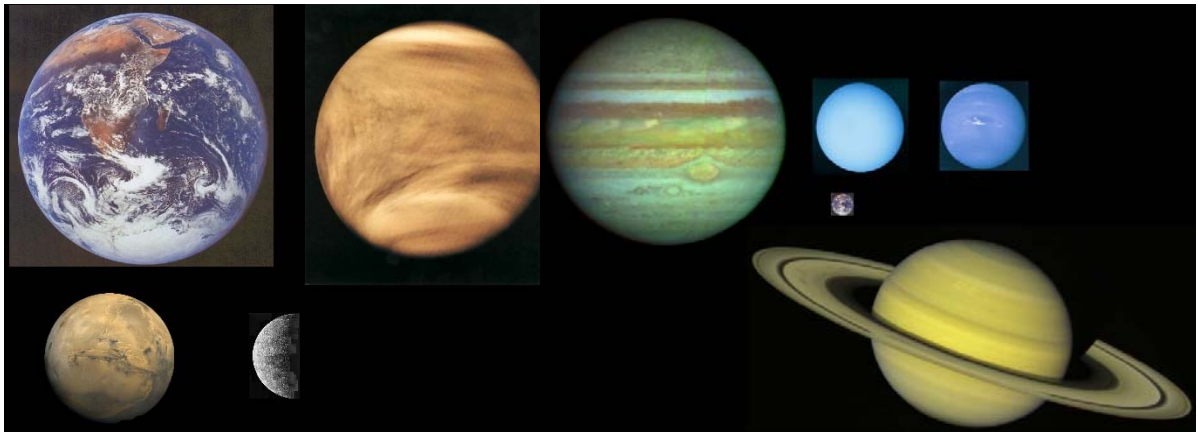


# ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΜΟΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΑΝΗΤΙΚΩΝ ΦΛΟΙΩΝ

Δρ. ΠΑΥΛΟΣ ΜΕΓΑΛΟΒΑΣΙΛΗΣ

ΓΕΩΛΟΓΟΣ & ΓΕΩΧΗΜΙΚΟΣ MSc

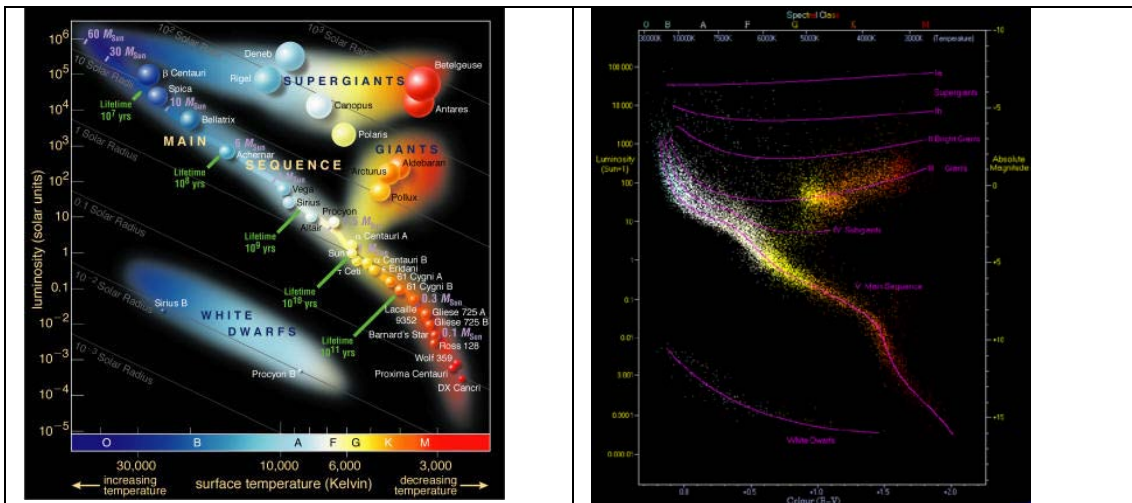


ΤΑΚΤΙΚΗ ΣΥΝΑΝΤΗΣΗ ΟΜΑΔΑΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΟΡΙΩΝ, ΠΑΤΡΑ 17-2-2010

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να δει κανείς πως δημιουργήθηκαν οι Πλανήτες και γιατί διαφέρουν ο ένας με τον άλλο πρέπει να διεισδύσει βαθιά στο εσωτερικό τους. Για να αντιληφθούμε γιατί και πως δημιουργήθηκαν οι πλανητικοί φλοιοί πρέπει να κατανοήσουμε τις πρωταρχικές αιτίες ύπαρξης των πλανητών που αυτοί ανήκουν και γιατί αυτοί διαφέρουν μεταξύ τους.

Στα 40 Χρόνια Διαστημικών Εξερευνήσεων οδήγησαν στην ανακάλυψη περισσότερους από 200 πλανήτες γύρω από άστρα εκτός του δικού μας Ηλίου. Τα άστρα διαφέρουν σε μάζα, έχουν όμως παρόμοιες ιδιότητες και υπόκεινται στους μαθηματικούς και φυσικούς νόμους. Σχηματίζονται (από πάνω προς τα κάτω), από συμπύκνωση αερίων κυρίως H, He, πυκνών πυρήνων σε μοριακά νέφη. Διαφέρουν σε μάζα, φωτεινότητα και επιφανειακή θερμοκρασία και συνοψίζονται στο διάγραμμα Hertzsprung–Russell (1909) όπου θεμελιώνονται πάνω στις αρχές της Πυρηνικής Φυσικής και στις Αστρικές Διεργασίες.



Εικόνα 1. Διαγράμματα εξισώσεων Hertzsprung–Russell

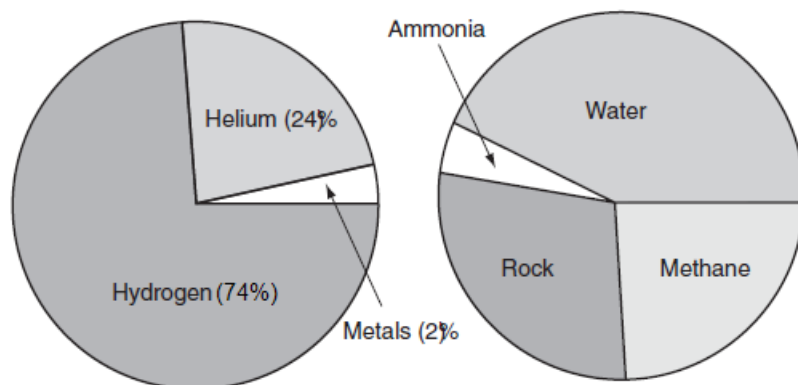
Αντίθετα οι πλανήτες συναθροίστηκαν περιστασιακά (από κάτω προς τα πάνω), από εναπομείναντα υλικό στο δισκοειδή νεφέλωμα (τουλάχιστον στο δικό μας Ηλιακό Σύστημα). Είναι διακριτοί μεταξύ τους, σχηματιζόμενοι από ένα σύνθετο μείγμα υλικών: Αερίων, Πάγου και Πετρωμάτων. Από τις παρατηρήσεις και οι εντός και οι εκτός ηλιακού συστήματος πλανήτες αποτελούνται από συνδυασμούς των παραπάνω φάσεων. Δεν υπάρχει αντίστοιχο διάγραμμα όμως.

Μεγάλη σύγχυση στην ονοματοδοσία ενός πλανήτη π.χ. Πλούτωνα ή Ήρις- Εκκεντρικοί νάνοι μέσα στους πλανήτες ή τα μεγαλύτερα πλανητοειδή από πάγο στη Ζώνη Kuiper; Στο Ηλιακό μας σύστημα έχουμε 8 πλανήτες που διαφέρουν σε μάζα, πυκνότητα, σύσταση, λοξότητα και χρόνο περιστροφής. Το μόνο κοινό είναι η «κάπως» κυκλική τροχιά και οι μικρές κλίσεις σε σχέση με την εκλειπτική (Laplace 1796: δημιουργήθηκαν από ένα δίσκο αερίων και αστρικής σκόνης).

Έχουν βρεθεί επίσης περισσότεροι από 160 Δορυφόροι με ιδιαιτερότητες στη σύσταση, το μέγεθος και τη συμπεριφορά τους ο καθένας.

Συμπερασματικά: Δεν υπάρχει Ομοιομορφία κατά τη δημιουργία τους από τις πρωτογενείς φάσεις: **Αερίων, Πάγων** και **Πετρωμάτων** και πολύ πιθανόν Κλώνοι του δικούς πλανητικού συστήματος να μην υπάρχουν ή να είναι πολύ σπάνιοι...

Οι εκτός-ηλιακού συστήματος πλανήτες παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Πολλοί από αυτούς έχουν πολύ ελλειπτικές τροχιές, και πολύ πιθανό να βρούμε πλανήτες που αν και δημιουργούνται σε δισκοειδή Kerper μορφή, να καταλαμβάνουν κάθε πιθανό χώρο-διαδρομή μέσα στα όρια των Κοσμοχημικών στοιχειακών συγκεντρώσεων και τους νόμους Φυσικής και Χημείας.



**Εικόνα 2.** Σύσταση του πρωταρχικού ηλιακού νεφελώματος που αποτελείται από 98% αέρια (H και He) και 2% “Μέταλλα” (με τον αστρονομικό όρο). Δεξιά «Πάγοι» (νερό, αμμωνία, μεθάνιο) και στερεά πετρώματα (τα υπόλοιπα στοιχεία) Οι πλανήτες πιθανώς δημιουργήθηκαν από συνδυασμό αερίων, πάγων και στερεών. Έτσι στο Δία και τον Κρόνο κυριαρχούν το Υδρογόνο και το Ήλιο (γίγαντες Αερίων), ενώ ο Ουρανός και ο Πλούτωνας είναι «παγωμένοι γίγαντες». Από την άλλη οι πετρώδεις πλανήτες σχηματίζονται από

**Μεταλλικότητα (metallicity)** Οι συγκεντρώσεις στα Αστέρια τους Γαλαξίες όλων των στοιχείων βαρύτερα του H και του He (για τα οποία τα πρωτογενή ίχνη τους ήταν μέταλλα όπως Ca, Fe, και Na). Η ηλιακή τιμή είναι 1.7% ή  $Z = 0.017$ . Οι παρατηρούμενες τιμές κυμαίνονται από  $10^{-4}$  Ηλιακής Μεταλλικότητας (για παλαιότερα άστρα στην γαλαξιακή άλω του δικού μας και άλλων όμως γαλαξιών), έως ίσως 2 με 3 φορές περισσότερο αυτής (για άστρα στο κέντρο μεγάλων ελλειπτικών γαλαξιών καθώς και στα ιονισμένα αέρια κοντά στα κέντρα των κβάζαρς). Σήμερα η Μεταλλικότητα ορίζεται σαν δεκαδικός λογάριθμος  $\log_{10}$  του λόγου Fe/H ενός άστρου προς τον λόγο Fe/H στον Ήλιο.

Η Γη είναι μοναδικός πλανήτης και είναι δύσκολο να προβλεφθούν οι γεωλογικές διεργασίες που θα συμβούν μελλοντικά. Π.χ. αν κάποιος είχε επισκεφθεί τη Γη κατά το Πέρμιο δεν θα μπορούσε με τίποτα να προβλέψει τον κόσμο του Τριαδικού με την εντελώς διαφορετική πανίδα ή ένας επισκέπτης τους Κρητιδικού δύσκολα θα μπορούσε να φανταστεί την πτώση θερμοκρασίας κατά το Τριτογενές και τις Παγετώδεις Εποχές που θα ακολουθούσαν.

Συμπερασματικά λοιπόν, οι Γεωλογικές, Γεωχημικές και Γεωλογικές «αλήθειες» που ήταν αποτέλεσμα 200 χρόνων ερευνών δεν μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν στους άλλους πλανήτες λόγω ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του καθενός.

Η τεκτονική των λιθοσφαιρικών πλακών ήταν πολύ χρήσιμη στη ερμηνεία της δημιουργίας Ηπείρων ή Κοιτασμάτων, όμως είναι μοναδική και υπάρχει μόνο στη Γη από όλους τους πλανήτες. Πολλές δυσκολίες συνάντησε η εξερεύνηση της δομής της Σελήνης επειδή στην προσπάθεια κατανόησης της πήγαν να εφαρμοστούν «γήινες πρακτικές και μεθοδολογίες». Η οικοδόμηση δύο παρόμοιων πλανητών, (Γη και Αφροδίτη) είναι γεγονός και οι δύο πλανήτες έχουν παρόμοια μάζα, πυκνότητα, και ολική σύνθεση ενώ παρουσιάζουν και ομοιότητες στις περιεκτικότητες στοιχείων που παράγουν θερμότητα όπως Κ, U και Th, σε αντίθεση με τον Άρη και τον Ερμή. Όμως η Αφροδίτη δεν έχει δορυφόρους ούτε λιθοσφαιρικές πλάκες και αναδιαμορφώνει την επιφάνεια της πιθανά κάθε 1 δις εκ. έτη, με βασάλτη (πυριγενές πέτρωμα).

Γιατί άραγε αυτές οι διαφορές στη γεωλογική ιστορία των δύο παρόμοιων πλανητών; Μία σύντομη απάντηση θα ήταν: «Το Νερό». Όμως ένα μεγάλο μέρος μπορεί να οφείλεται στις διακυμάνσεις της πλανητικής προσαύξησης-δημιουργίας κατά την πρώιμη ιστορία του πλανήτη.

### **Το Ηλιακό Νεφέλωμα και οι Πλανήτες**

Το ηλιακό νεφέλωμα από το οποίο ο ήλιος και οι πλανήτες διαμορφώθηκαν είχε τρία βασικά συστατικά: "**αέρια**", "**πάγους**" και "**πετρώματα**". Οι πλανήτες δημιουργήθηκαν περιστασιακά από ένα συνδυασμό αυτών των πρωτογενών υλικών.

Το κυρίαρχο συστατικό ήταν αέριο (98% **H** και **He**). Τα βαρύτερα στοιχεία (2%) είχαν συσσωρευτεί στο διαστρικό μεσαίο χώρο έπειτα από 10 δισεκατομμύρια έτη διαμόρφωσης πυρήνων από τις προηγούμενες γενεές των άστρων. Τα άφθονα στοιχεία όπως ο **C**, το **O** και το **N** υπήρχαν στο πρωταρχικό νεφέλωμα με τη μορφή πάγου (π.χ. νερό, μεθάνιο, μονοξείδιο άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία).

Τα υπόλοιπα στοιχεία, του περιοδικού πίνακα υπήρχαν με τη μορφή σκόνης και ορυκτών κόκκων σύστασης παρόμοιας με αυτής των **CI-Μετεωριτών**.

Πρώτος σχηματιζόμενος πλανήτης ήταν ο Δίας κυριαρχώντας στο ηλιακό σύστημα ενώ το ηλιακό νεφέλωμα είχε ουσιαστικά λίγο διάστημα ζωής (μερικά εκατομμύρια έτη, My). Όμως το εσωτερικό μέρος του νεφέλωματος, τα αέρια, οι πάγοι και πολλά πτητικά στοιχεία (π.χ. Κ, Pb, Bi), που αξιολογήθηκαν με βάση τους λόγους Κ/U Κ/Th, εκπλύθηκαν προς τα έξω σε μια γραμμή «αστρικών νιφάδων» και σε απόσταση 5 αστρονομικών μονάδων (AU), από μία πρώιμη και έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η μείωση των πτητικών σχετικά με τους CI Μετεωρίτες συμπεριελάμβανε σημαντικά βιολογικά στοιχεία όπως C, N, K και P και επηρέασε τις συγκεντρώσεις <sup>40</sup>K (πρώιμη πηγή θερμότητας).

Τα επόμενα ουράνια σώματα που σχηματίστηκαν ήταν τα πλανητοειδή από το υπόλοιπο υλικό που έμεινε και ήταν κυρίως ξηρό και πετρώδες (απομεινάρια του έχουν σχηματίσει την Ζώνη Αστεροειδών).

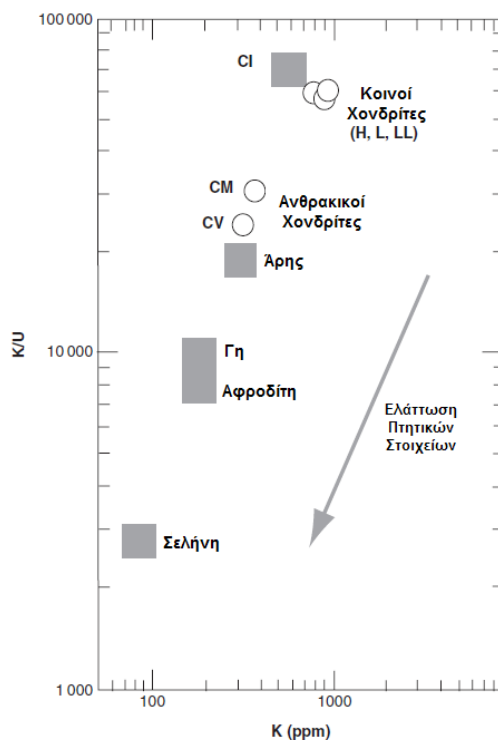
Πολλά ουράνια σώματα και πλανήτες τήχθηκαν (έλιωσαν) και επετράπη με αυτόν τον τρόπο ο διαχωρισμός του μεταλλικού από το πυριτικό υλικό. Οι σημερινά παρατηρούμενοι μετεωρίτες αποτελούν κάτι όχι ακριβώς αλλά ανάλογο των παραπάνω διεργασιών (χωρίστηκαν σε μεταλλικά, θειούχα και πυριτικά στοιχεία).

Ο Άρης και ο Ερμής δημιουργήθηκαν πολύ γρήγορα μέσα σε λίγα εκ.έτη, αλλά η Γη και η Αφροδίτη σχηματίστηκαν μέσα σε 10-100 εκ.έτη έως ολοκληρωθεί η συνάθροιση των τεμαχών τους. (Μια άλλη έρευνα με ισότοπα Hf-W υπολογίζει την ηλικία στα 30 εκ.έτη).

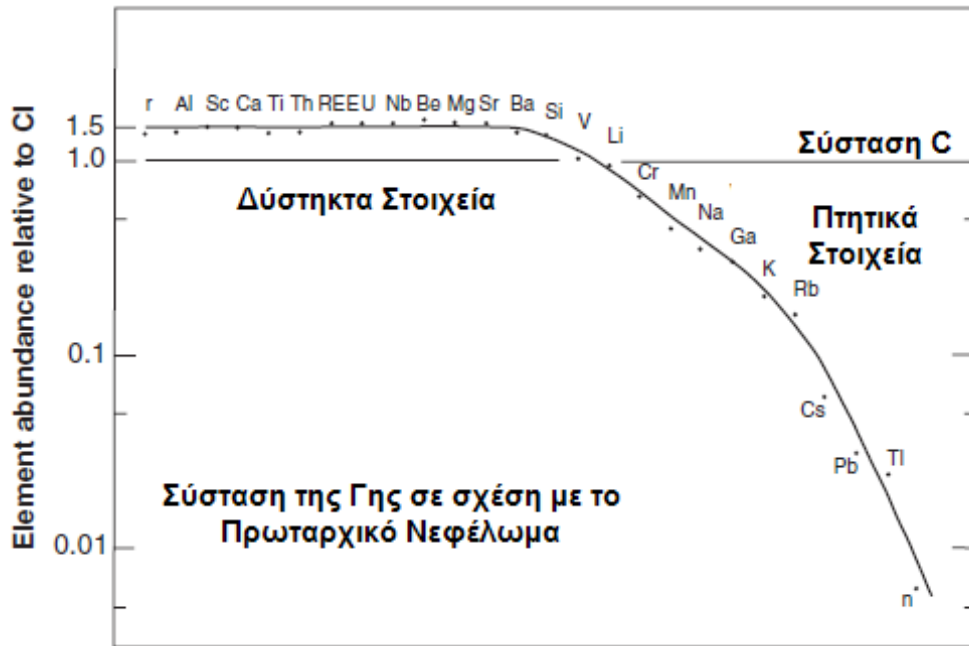
Η Γη και η Αφροδίτη έχουν παρεμφερείς πυκνότητες προϋποθέτοντας παρόμοια σύσταση αλλά ο Άρης είναι κατά 6–7% λιγότερο πυκνός με υψηλά ποσοστά πτητικών στοιχείων. Και ο Άρης και ο Ερμής αποτελούν παραδείγματα ουρανίων σωμάτων που «απέτυχαν» να «μεγαλώσουν» σε μεγαλύτερους πλανήτες. Η ενέργεια που εκλύθηκε κατά την «συσσωμάτωση» ήταν αρκετή ώστε να προκαλέσει ευρύ τήξιμο με αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των συστατικών υλικών και τη δημιουργία Πλανητικού πυρήνα και μανδύα.

Ο Κρόνος και ο Δίας εκτός από τις τεράστιες μάζες αερίων διαθέτουν και πυρήνες από πετρώματα και πάγους σε μέγεθος 10-15 φορές της Γήινης μάζας.

Αντίθετα ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας που έχουν μέγεθος 14-17 γήινες μάζες περιέχουν όγκους αερίων ίσους με 1-2 γήινες μάζες. Αυτοί οι πλανήτες πάγου έχουν μέγεθος όσο οι πυρήνες του Δία και του Κρόνου με τη διαφορά ότι οι δεύτεροι δέσμευσαν μεγαλύτερες ποσότητες αερίων.



**Εικόνα 3.** Η ελάττωση Κ (πτητικό στοιχείο), σε σχέση με το δύστηκτο U σε ουράνια σώματα. Και τα δύο στοιχεία έχουν διαφορετικές ιοντικές ακτίνες και σθένος (ασυμβίβαστα), παραμένουν μαζί κατά την πλανητική διαφοροποίηση μένοντας σε φλοιούς και τήγματα.



Εικόνα 4. Η σύσταση της Γης σε σχέση με CI, φαίνεται ο εμπλουτισμός σε δύστηκτα στοιχεία και η μείωση των πτητικών στοιχείων

#### Κατηγορίες Πλανητικών Φλοιών

Υπάρχουν 3 κύριες κατηγορίες Πλανητικών Φλοιών: **Πρωτογενής, Δευτερογενής, Τριτογενής** και η ταξινόμηση αυτή οφείλεται στη γένεση και την εξέλιξη τους:

- Ο Πρωτογενής φλοιός δημιουργείται από το πρωταρχικό πλανητικό τήξιμο.
- Ο Δευτερογενής φλοιός δημιουργείται από μερικό τήξιμο μανδουακού υλικού
- Ο Τριτογενής φλοιός σχηματίζεται από την επανεπεξεργασία ενός δευτερογενούς φλοιού.

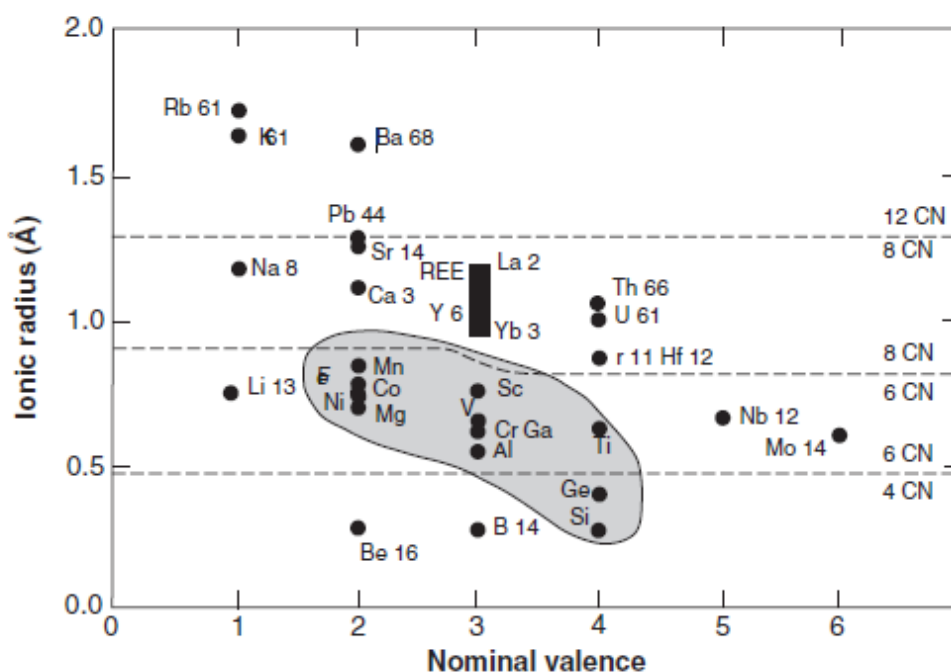
Η κατανομή των χημικών στοιχείων ανάμεσα στους πυρήνες, μανδύες και φλοιούς σε ένα πλανητικό σώμα καθοδηγείται από τους αμετάβλητους νόμους της Φυσικής και της Χημείας, όμως η κατανομή των στοιχείων στον πλανητικό φλοιό εξαρτάται κυρίως από τις διαφορές στις ιοντικές ακτίνες και τον Αριθμό Οξειδωσης τους σε σχέση με τα κύρια στοιχεία του Μανδύα (Fe, Mg).

Το Eu (Σπάνια Γαία), αποτελεί το μόνο στοιχείο του Περιοδικού Πίνακα που μπορεί να παρέχει τόσες πληροφορίες στη μελέτη των φλοιών και της πλανητικής εξέλιξης λόγω του μοναδικού συνδυασμού Αριθμού οξειδωσης, Ιοντικής ακτίνας και Πτητικότητας. Είναι το πιο χρήσιμο στην Κοσμοχημεία, την Γεωχημεία και την Αστροφυσική.

Η δημιουργία πλανητικού φλοιού συγκεντρώνει ασυμβίβαστα στοιχεία προς την επιφάνεια. Αυτές οι διεργασίες επιταχύνουν την πτώση θερμοκρασιών στον Μανδύα διότι αποβάλ-λονται μαζί και τα ραδιενεργά K, U και Th στα οποία οφείλεται κατά μεγάλο μέρος η θερμοκρασία των βαθύτερων πλανητικών τμημάτων.

Η δημιουργία πλανητικού φλοιού εξαρτάται από την πτητικότητα των στοιχείων και το γεωχημικό χαρακτήρα τους (Σιδηρόφιλα, Χαλκόφιλα, Λιθόφιλα). Η πτητικότητα είναι υπεύθυνη για την σπανιότητα αερίων, πάγων και «πτητικών» στοιχείων στους γεώδεις πλανήτες.

Μετά την τήξη του Πυριτικού Μανδύα τα Λιθόφιλα στοιχεία κάνουν ιοντικούς δεσμούς με το Οξυγόνο και σχηματίζουν ορυκτά όπως: **Ολιβίνης** ( $Mg, Fe)_2SiO_4$  και **Πυρόξενοι** ( $Ca, Mg, N, Fe, Zn)(Cr, Al) ( (Si, Al)_2O_6$  που επικρατούν στους άνω μανδύες των εσωτερικών πλανητών επειδή ο Fe και το Mg είναι άφθονα κατά τον σχηματισμό των πυρήνων των αστέρων. Όσα στοιχεία καταφέρουν να μπουν στους κρυστάλλους αυτών των μανδυκών ορυκτών λέγονται συμβατά στοιχεία. Τα ασυμβίβαστα στοιχεία όμως επειδή δεν ενσωματώνονται σε ορυκτά του μανδύα, καταφέρνουν να βρουν την «διέξοδο τους στους πλανητικούς φλοιούς».



Εικόνα 5 . Ο εμπλουτισμός ενός στοιχείου στον ηπειρωτικό φλοιό εξαρτάται από τις διαφορές στην ιοντική ακτίνα και το σθένος του από τα άφθονα στοιχεία στον Μανδύα (σκιασμένη περιοχή).

**Πίνακας 1. Σύσταση του «Πετρώδους» κλάσματος του Πρωταρχικού Νεφελώματος (Elem/Si ίδιος με τη Ηλιακή φωτόσφαιρα, Ήλιος 99,9% μάζας του Ηλιακού Συστήματος).**

Atomic number	Element	Mean CI chondrite		Atomic number	Element	Mean CI chondrite	
		Ref. 1	Ref. 2			Ref. 1	Ref. 2
3	Li (ppm)	1.49	1.50	47	Ag (ppb)	197	199
4	Be (ppb)	24.9	24.9	48	Cd (ppb)	680	686
5	B (ppb)	690	870	49	In (ppb)	78	80
9	F (ppm)	58	61	50	Sn (ppb)	1680	1720
11	Na (ppm)	4982	5000	51	Sb (ppb)	133	142
12	Mg (wt%)	9.61	9.89	52	Te (ppb)	2270	2320
13	Al (ppm)	8490	8680	53	I (ppb)	433	433
14	Si (wt%)	10.68	10.64	55	Cs (ppb)	188	187
15	P (ppm)	926	1220	56	Ba (ppb)	2410	2340
16	S (wt%)	5.41	6.25	57	La (ppb)	245	234.7
17	Cl (ppm)	698	704	58	Ce (ppb)	638	603.2
19	K (ppm)	544	558	59	Pr (ppb)	96.4	89.1
20	Ca (ppm)	9320	9280	60	Nd (ppb)	474	452.4
21	Sc (ppm)	5.90	5.82	62	Sm (ppb)	154	147.1
22	Ti (ppm)	458	436	63	Eu (ppb)	58	56.0
23	V (ppm)	54.3	56.5	64	Gd (ppb)	204	196.9
24	Cr (ppm)	2646	2660	65	Tb (ppb)	37.5	36.3
25	Mn (ppm)	1933	1990	66	Dy (ppb)	254	242.7
26	Fe (wt%)	18.43	19.40	67	Ho (ppb)	56.7	55.6
27	Co (ppm)	506	502	68	Er (ppb)	166	158.9
28	Ni (wt%)	1.08	1.10	69	Tm (ppb)	25.6	24.2
29	Cu (ppm)	131	126	70	Yb (ppb)	165	162.5
30	Zn (ppm)	323	312	71	Lu (ppb)	25.4	24.3
31	Ga (ppm)	9.71	10.0	72	Hf (ppb)	107	104
32	Ge (ppm)	32.6	32.7	73	Ta (ppb)	14.2	14.2
33	As (ppm)	1.81	1.86	74	W (ppb)	90.3	92.6
34	Se (ppm)	21.4	18.6	75	Re (ppb)	39.5	36.5
35	Br (ppm)	3.5	3.57	76	Os (ppb)	506	486
37	Rb (ppm)	2.32	2.30	77	Ir (ppb)	480	481
38	Sr (ppm)	7.26	7.80	78	Pt (ppb)	982	990
39	Y (ppm)	1.56	1.56	79	Au (ppb)	148	140
40	Zr (ppm)	3.86	3.94	80	Hg (ppb)	310	258
41	Nb (ppb)	247	246	81	Tl (ppb)	143	142
42	Mo (ppb)	928	928	82	Pb (ppb)	2530	2470
44	Ru (ppb)	683	712	83	Bi (ppb)	111	114
45	Rh (ppb)	140	134	90	Th (ppb)	29.8	29.4
46	Pd (ppb)	556	560	92	U (ppb)	7.8	8.1



## ΣΕΛΗΝΗ

Γιατί να παρουσιαστεί η Σελήνη πρώτη αφού δεν είναι πλανήτης αλλά δορυφόρος; Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν 2 είδη φλοιού σε αυτήν. Ο ένας στα «φωτεινότερα» υψίπεδα των **Σεληνικών Όρεων** και ο «σκοιρότερος» των **Σεληνικών Θαλασσών**.

Αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα Πρωτογενούς και Δευτερογενούς πλανητικού Φλοιού που μπόρεσαν να παρατηρηθούν και αναλυθούν σε όλο το Ηλιακό Σύστημα. Επιπλέον σε αντίθεση με τη Γη, ο φλοιός της Σελήνης αποτελείται από μια λιθοσφαιρική πλάκα κάτι τυπικό και για τους υπόλοιπους πλανήτες του Ηλιακού Συστήματος μας.

### **Η σύσταση της Σελήνης**

Η μέση σεληνιακή ακτίνα είναι 1737.1 km, ενδιάμεση μεταξύ των δύο μεγάλων δορυφόρων του Δία, της Ευρώπης ( $\rho = 1561$  km) και Ιώ ( $\rho = 1818$  km).

Η Σελήνη είναι πολύ μικρότερη από το Γανυμήδη ( $\rho = 2634$  km), τον μεγαλύτερο δορυφόρο στο ηλιακό σύστημα και όπως ο Τιτάνα, είναι μεγαλύτεροι από τον Ερμή

Η αναλογία μαζών Σελήνη/Γή είναι η μεγαλύτερη σε όλο το ηλιακό σύστημα αναλογίας Δορυφόρος/Μητρικός Πλανήτης καταδεικνύοντας την ξεχωριστή προέλευση.

Η αναλογία Χάρων/Πλούτωνας μπορεί να είναι ονομαστικά μεγαλύτερη αλλά ο Πλούτωνας αποτελείται από πάγους και έχει μικρότερη μάζα που φθάνει στο 20% της Σεληνιακής και δεν είναι ακριβώς «πλανήτης», όμως ο δορυφόρος τους πιθανά έχει την ίδια αιτία προέλευσης-δημιουργίας λόγω σύγκρουσης.

Η μάζα του φεγγαριού είναι  $7,35 \times 10^{25}$  g, δηλαδή 1/81 της Γήινης μάζας.

Η Σεληνιακή πυκνότητα είναι  $3,346$  g/cm<sup>3</sup>

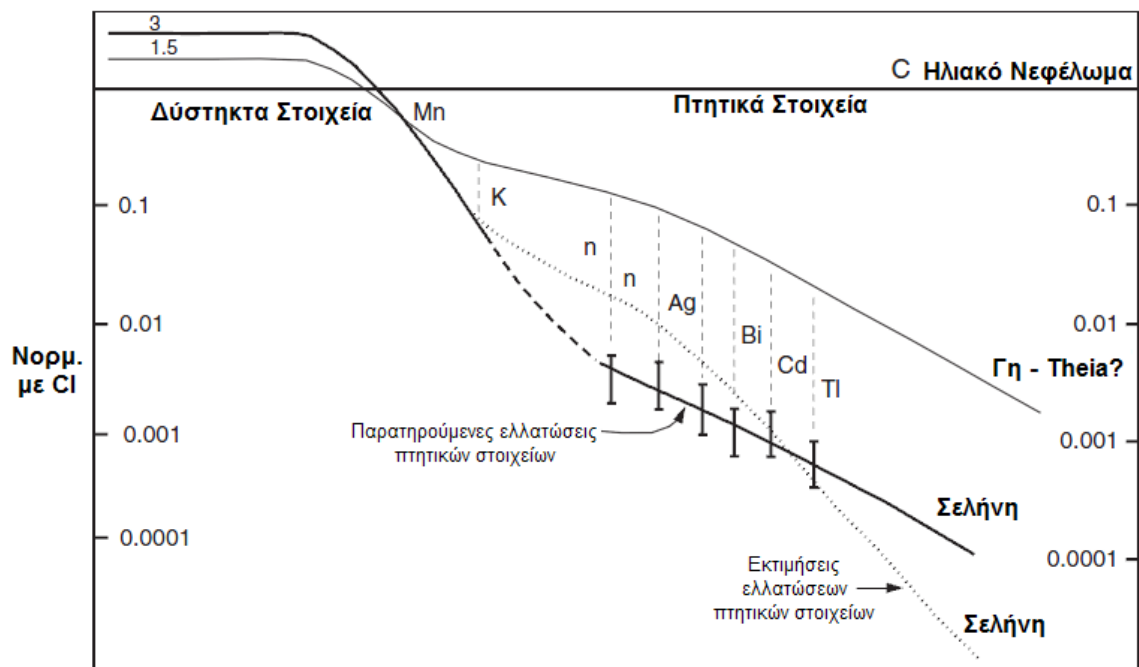
Η Γήινη πυκνότητα είναι  $5,540$  g/cm<sup>3</sup>

Αυτή η διαφορά πυκνότητας είναι σημαντική για τόσο κοντινά ουράνια σώματα. Το γεγονός αυτό μας αποκαλύπτει ότι στη Σελήνη μειώθηκε ο μεταλλικός Fe σχετικά με τους εσωτερικούς πλανήτες. Επίσης από μεγάλη τιμή της ροπής αδράνειας της ( $I/Mr^2=0.3935$ ), προκύπτει μια μικρή αύξηση της πυκνότητας προς το κέντρο και για αυτό θεωρούμε σήμερα ότι η Σελήνη διαθέτει έναν μικρό πυρήνα ακτίνας 350km.

**Πίνακας 2. Ανάλυση κύριων στοιχείων στη Σελήνη  
(Συγκεντρώσεις με τη μορφή Οξειδίων και %wt)**

Στοιχείο	Σελήνη Ολική	Σεληνιακά Όρη
SiO <sub>2</sub>	47.0	46.0
TiO <sub>2</sub>	0.3	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.0	28.0
FeO	13.0*	4.5
MgO	29.0	4.5
CaO	4.6	16.0
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.45
K <sub>2</sub> O	0.01	0.075
Σ	100.0	99.8

\*2,3%Fe ή FeS επιμερίζεται στον Πυρήνα και 10,7% Μανδύα. [Mg# molar Mg/(Mg+Fe)=0,80]



**Στοιχειακοί Εμπλουτισμοί - Μειώσεις σε σχέση με CI**

Εικόνα 6. Η σύσταση της Σελήνης συγκριτικά με τη Γη (με κανονικοποιημένες τις συγκεντρώσεις ως προς τους CI –Μετεωρίτες. Το υλικό στο μανδύα σύγκρουσης (Theia), από το οποίο προήλθε η Σελήνη, ήταν υλικό του εσωτερικού νεφελώματος, με λιγότερα πτητικά χημικά στοιχεία. Αξιοσημείωτο είναι ότι η Σεληνιακή μείωση είναι ομοιόμορφη και δεν συσχετίζεται με την πτητικότητα γιατί αλλιώς θα δημιουργούσε απότομη γραμμή στο σχεδιάγραμμα (στικτή γραμμή). Αυτό προέκυψε από πιθανή συμπίκνωση σε ένα μόνο στάδιο από ατμούς >2500 K με πτώση στους 1000K.

Οι συγκεντρώσεις FeO και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> είναι εμπλουτισμένες 1,5 φορά σε σχέση με τη Γη και 3 φορές εμπλουτισμένες από ότι στους CI-Μετεωρίτες.

Η ολική σύνθεση της Σελήνης μπορεί να γίνει κατανοητή μέσα στο γενικό πλαίσιο του Τυποποιημένου Μοντέλου για την εξέλιξη του εσωτερικού ηλιακού συστήματος:

Έτσι, όλα τα εσωτερικά ουράνια σώματα στο ηλιακό σύστημα έχουν μειωμένες συγκεντρώσεις Πτητικών Χημικών Στοιχείων σε σχέση με το αρχέγονο πετρώδες υλικό (CI) του ηλιακού νεφελώματος. Οι αρχικές διαφορές στη σύσταση τους έχουν δραματικά αλλάξει από τις πολλές συγκρούσεις που έχουν με τη σειρά τους παράγει ακραία μέλη. Για παράδειγμα η φτωχή σε μέταλλα Σελήνη σε αντίθεση με τον πλούσιο σε μέταλλα Ερμή φανερώνουν και τη δημιουργία πλανητικού μεγέθους ουρανίων σωμάτων από μικρότερα τους, αλλά και τον «περιστασιακό» και κατά περίπτωση σχηματισμό.

### Σεληνιακός Φλοιός

Το 99% της σεληνιακής επιφάνειας είναι ηλικίας >3 Gyr (δισ.έτη), και 80% είναι ηλικίας > 4 Gyr. Αντίθετα, το 80% της γήινης επιφάνειας είναι ηλικίας < 200 εκατομμύρια έτη.

Απουσιάζει η Τεκτονική των Λιθοσφαιρικών Πλακών, τον νερό (αυτό το τελευταίο ανατράπηκε πρόσφατα με τον βομβαρδισμό της Σελήνης από τη NASA με πύραυλο), Η ζωή, και η ατμόσφαιρα. Η τροποποίηση όμως της σεληνιακής επιφάνειας οφείλεται κατά πολύ, στον «βομβαρδισμό» ουράνιων σωμάτων μεγέθους μερικών μικρών ( $\mu = 10^{-6}m$ ), έως εκατοντάδες χιλιομέτρων. Αποτέλεσμα αυτού του βομβαρδισμού είναι ότι η επιφάνεια της Σελήνης καλύπτεται με ένα κάλυμμα συντριμμάτων, αποκαλούμενο **regolith**. Το μέγεθος του είναι από λεπτή σκόνη έως τεμάχια αρκετών μέτρων. Παρουσιάζει διακύμανση τοπικά ενώ στις θάλασσες της Σελήνης έχει πάχος 4-5m ενώ στα Όρη φθάνει έως και τα 10m. Αποτελείται από «φύλλα» πάχους λίγα mm έως 10cm. Δεν παρουσιάζει μεγάλη οριζόντια συνέχεια (λίγα μέτρα μόνο). Ο ρυθμός ανάπτυξης τους είναι αργός 1,5mm / 1.000.000 έτη ή 15 $\dot{A}$ /έτος

Ένας άλλο σχηματισμός ονομάζεται **Megaregolith** και είναι αγνώστου πάχους αλλά καλύπτει τα Όρη με τους μεγάλους κρατήρες. Πιθανά κυμαίνεται από 2,5-10km.

### Δομή του Φλοιού

Σεισμικά δεδομένα στις θέσεις Apollo 12 και 14 εμφανίζουν ηπειρωτικό φλοιό πάχους  $45 \pm 5$  km, ενώ εκτιμάται το Μέσο Σεληνιακό πάχος στα 52km αποτελώντας το 8.7% του όγκου της.

Το μέγιστο ύψος ανάγλυφου φθάνει 16 km και το μεγαλύτερο βάθος παρατηρείται στον κρατήρα σύγκρουσης South Pole–Aitken και φθάνει τα 12 km βάθος. Στη Γη το εύρος ανάγλυφου είναι 20 km (από τα απολιθωματοφόρους ασβεστόλιθους Ορδοβίσιας ηλικίας στην κορυφή του όρους Έβερεστ έως τα σύγχρονα ιζήματα της τάφρου Marianas. Ο Άρης αν και μικρός σε μέγεθος έχει εύρος ανάγλυφου 30 km από την κορυφή του Όρους Olympus Mons έως τον πυθμένα του κρατήρα Hellas.

Οι βασάλτες των θαλάσσιων περιοχών (τυπικό δείγμα δευτερογενούς φλοιού). Καλύπτουν 17% της επιφάνειας και έχουν πάχος 1 ή 2 km.

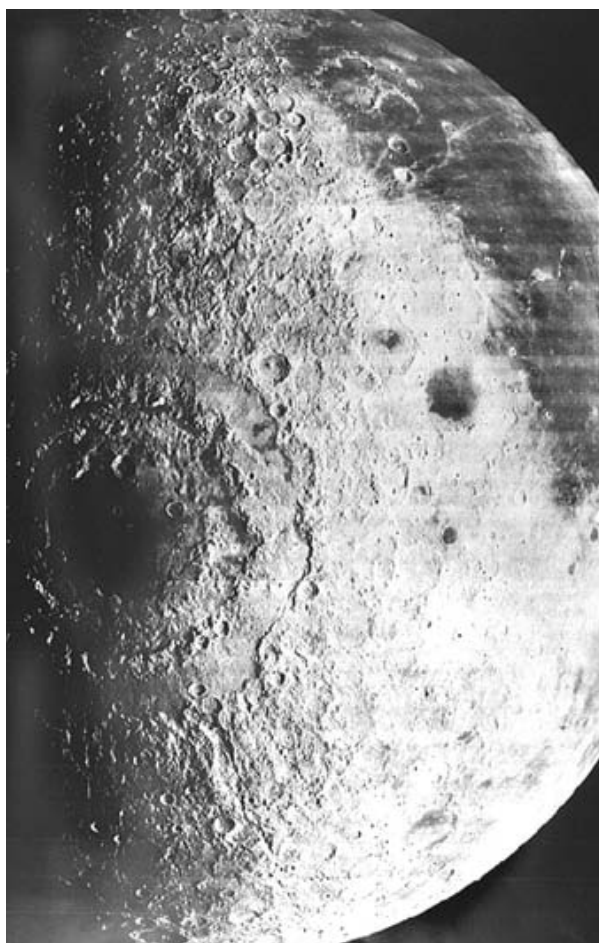
## Στρωματογραφία Σελήνης

Πίνακας 3 Αναλυτική Στρωματογραφία Σελήνης

Σύστημα	Ηλικία (δισετία)	Παρατηρήσεις
Copernican	1.0 έως σήμερα	The youngest system, which includes fresh ray craters (e.g. Tycho), begins with the formation of Copernicus.
Eratosthenian	1.0–3.1	Youngest mare lavas and craters without visible rays (e.g. Eratosthenes).
Imbrium	3.1–3.85	Extends from the formation of the Imbrium Basin to the youngest dated mare lavas. Includes Imbrium Basin deposits, Orientale and Schrödinger multiring basins, most visible basaltic maria, and many large impact craters, including those filled with mare lavas (e.g. Plato, Archimedes). Sometimes divided into Early Imbrium from the formation of the Imbrium Basin (3.85 Gyr) to the formation of the Orientale Basin (3.82 Gyr), and the Late Imbrium from 3.82 to 3.10 Gyr.
Nectarian	3.85–3.92	Extends from the formation of the Nectaris Basin to that of the Imbrium Basin. Contains 12 large, multiring basins and some buried maria.
Pre-Nectarian	Pre 3.92	Basins and craters formed before the Nectaris Basin. Includes 30 identified multiring basins.

## Κρατήρες και πολλαπλές λεκάνες

Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η multiring-λεκάνες, η οποίες μπορεί να έχουν έξι ή περισσότερα δαχτυλίδια. Ένα παράδειγμα η λεκάνη Orientale (920km διάμετρο περίπου το μέγεθος της Γαλλίας), με αρκετά ομόκεντρα δαχτυλίδια βουνών ύψους 3km που δημιουργήθηκε από πτώση ενός σώματος διαμέτρου περίπου 50km. Τριάντα τέτοιες λεκάνες έχουν αναγνωρισθεί στην Σελήνη και μελετούνται άλλες 14. Το μεγαλύτερο επιβεβαιωμένο παράδειγμα είναι η λεκάνη νότιου –Πόλου Aitken Basin (180° E, 56°N) διαμέτρου 2500km και βάθους 12km. Υπάρχει και μεγαλύτερη λεκάνη (Procellarum Basin διαμέτρου 3200 χλμ, 23°B, 15°Δ), όμως τα αίτια δημιουργίας της είναι υπό έρευνα ακόμα.



**Εικόνα 7. Mare Orientale, το κλασικό παράδειγμα μιας πολύ-δακτυλοειδούς λεκάνης. Η διάμετρος στο εξωτερικό δαχτυλίδι η οροσειρά Montes, είναι 900 km.**

## Σύσταση του φλοιού των Ορέων

Ο φλοιός αυτός είναι πρωτογενής και δημιουργήθηκε με την αυξητική διαδικασία του ουράνιου σώματος. Τα δείγματα των αποστολών Apollo έδειξαν «τήγματα από συγκρούσεις», λατυποπαγή τεμαχών πετρωμάτων σε λεπτόκοκκο υπόβαθρο. Όλες οι αποστολές έδειξαν την «Ανορθοσιτική» φύση του φλοιού αυτού. Όλα τα πετρώματα έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά αντίθετα από οποιοδήποτε επίγειο πέτρωμα. Χαρακτηριστικά

τα REE, Ba, U και Zr έχουν υψηλές συγκεντρώσεις ενώ οι συγκεντρώσεις Rb, K, P, Sr, Na είναι γενικά χαμηλές.

**Πίνακας 4. Κύρια στοιχεία σε Σεληνιακά δείγματα πετρωμάτων (%wt)**

Στοιχείο	Ανορθοσίτης (15415)	Γαβρ.Ανορθ (68415)	Ανορθ. Γάββρος(15455)	Νορίτης (78235)	Εκρηξ. Λάτυπες (14310)
SiO <sub>2</sub>	44.1	45.5	44.5	49.5	47.2
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.32	0.39	0.16	1.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.5	28.6	26.0	20.9	20.1
FeO	0.23	4.25	5.77	5.05	8.38
MnO	–	0.06	–	0.08	0.11
MgO	0.09	4.38	8.05	11.8	7.87
CaO	19.7	16.4	14.9	11.7	12.3
Na <sub>2</sub> O	0.34	0.41	0.25	0.35	0.63
K <sub>2</sub> O	–	0.06	0.10	0.061	0.49
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	0.10	0.06	0.23	0.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.07	–	0.04	0.34
Σ	100.0	100.1	100.0	99.8	98.8

**Διαίρεση Σεληνιακών Πετρωμάτων ανάλογα τον αριθμό γενετικών υλικών:**

**Μονομεικτικά**, (από ίδιο μητρικό πέτρωμα)

**Διμεικτικά** (δύο διαφορετικών συστατικών),

**Πολυμεικτικά** (διάφορα πετρώματα και τήγματα)

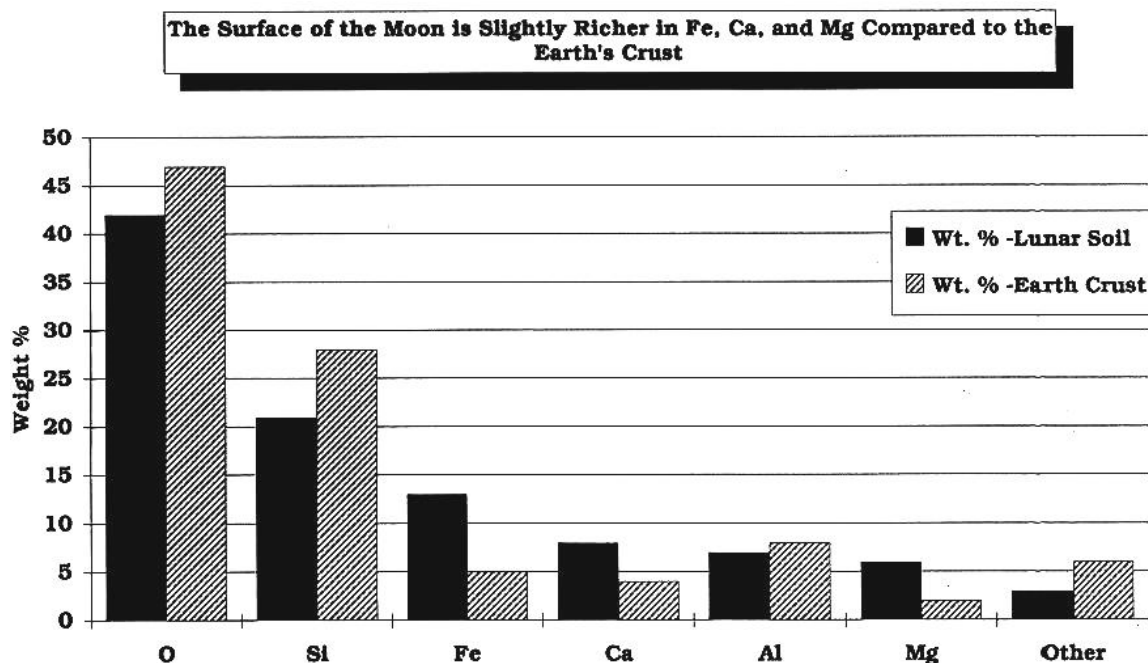
- Τεμαχισμένα
- Υαλώδη τήγματα
- Κρυσταλλικά τήγματα
- Φτωχά σε κλαστικό υλικό
- Γρανουλιτικά
- Regolith

Από τις αναλύσεις και τα στοιχεία της τροχιάς της Σελήνης προκύπτει η πιθανή σύνθεση της Σελήνης:

**Πίνακας 5: Περιεκτικότητες στοιχείων στη Σελήνη και στον Φλοιό των Ορέων**

Στοιχείο	Σελήνη (ολική)	Φλοιός Όρεων	Sr (ppm)	34	140	Eu (ppm)	0.26	1.0
Li (ppm)	0.83	2	Y (ppm)	6.3	13.4	Gd (ppm)	0.92	2.3
Be (ppm)	0.21	–	Zr (ppm)	17	63	Tb (ppm)	0.17	0.35
B (ppm)	0.1	–	Nb (ppm)	1.3	4.5	Dy (ppm)	1.14	2.3
Na (wt%)	0.06	0.33	Mo (ppb)	1.4	–	Ho (ppm)	0.255	0.53
Mg (wt%)	17.5	2.71	Ru (ppb)	30	–	Er (ppm)	0.75	1.51
Al (wt%)	3.17	14.8	Rh (ppb)	10	–	Tm (ppm)	0.11	0.22
Si (wt%)	21.9	21.5	Pd (ppb)	22	–	Yb (ppm)	0.74	1.4
K (ppm)	83	600	Ag (ppb)	0.8	–	Lu (ppm)	0.11	0.21
Ca (wt%)	3.28	11.4	Cd (ppb)	1.0	–	Hf (ppm)	0.51	1.4
Sc (ppm)	19	5	In (ppb)	0.12	–	W (ppm)	0.008	–
Ti (ppm)	1800	1800	Sn (ppb)	5.0	–	Re (ppb)	1.6	–
V (ppm)	150	21	Sb (ppb)	0.6	–	Os (ppb)	25	–
Cr (ppm)	4200	500	Te (ppb)	14	–	Ir (ppb)	23	–
Mn (wt%)	0.12	–	Cs (ppb)	12	100	Pt (ppb)	40	–
Fe (wt%)	10.6	3.5	Ba (ppm)	11	70	Au (ppb)	7	–
Co (ppm)	20	–	La (ppm)	1.10	5.3	Hg (ppb)	0.7	–
Ni (ppm)	400	–	Ce (ppm)	2.87	13	Tl (ppb)	0.2	–
Cu (ppm)	15	–	Pr (ppm)	0.411	1.8	Pb (ppm)	0.004	1.0
Zn (ppm)	5	2.0	Nd (ppm)	2.13	7.4	Bi (ppb)	0.17	–
Ga (ppm)	1.0	–	Sm (ppm)	0.69	2.0	Th (ppb)	115	900
Ge (ppm)	0.14	–				U (ppb)	30	240
As (ppm)	0.007	–						
Se (ppm)	0.09	–						
Rb (ppm)	0.28	1.7						

Η ηλικία του φλοιού εκτιμάται στα  $4460 \pm 40$  Myr και αντιπροσωπεύει την κρυστάλλωση των Ανορθοσιτών από το Σεληνιακό μάγμα. Ο άνω-φλοιός είναι πλούσιος σε Πλαγιόκλαστα και έχει περίπου 30%  $Al_2O_3$  πιθανά αυτή η σύσταση είναι σταθερή έως και 30km. Αν και ο τεράστιος βομβαρδισμός των Όρεων έχει καταστρέψει αρκετά πρωταρχικά στοιχεία υφής, έχει μικρή επίδραση στην ολική σύσταση και έτσι μπορεί να προσεγγιστεί γεωχημικά η εξέλιξη της Σελήνης.



**Εικόνα 8. Κατανομή μερικών στοιχείων στους φλοιούς της Γης και της Σελήνης.**

Επιπλέον, μερικά μονομεικτικά λατυποπαγή έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε σιδηρόφιλα στοιχεία προϋποθέτοντας ελάχιστη επιμόλυνση από τους μετεωρίτες. Αυτά τα πετρώματα θεωρούνται τα πρωταρχικά πυριγενή πετρώματα της Σελήνης.

Τρία από αυτά αποτελούν τον φλοιό των Όρεων:

1. **Ανορθοσίτες (Ferroan Anorthosites )**
2. **KREEP**
3. **Μαγνησιούχος Σειρά (Mg-suite)**

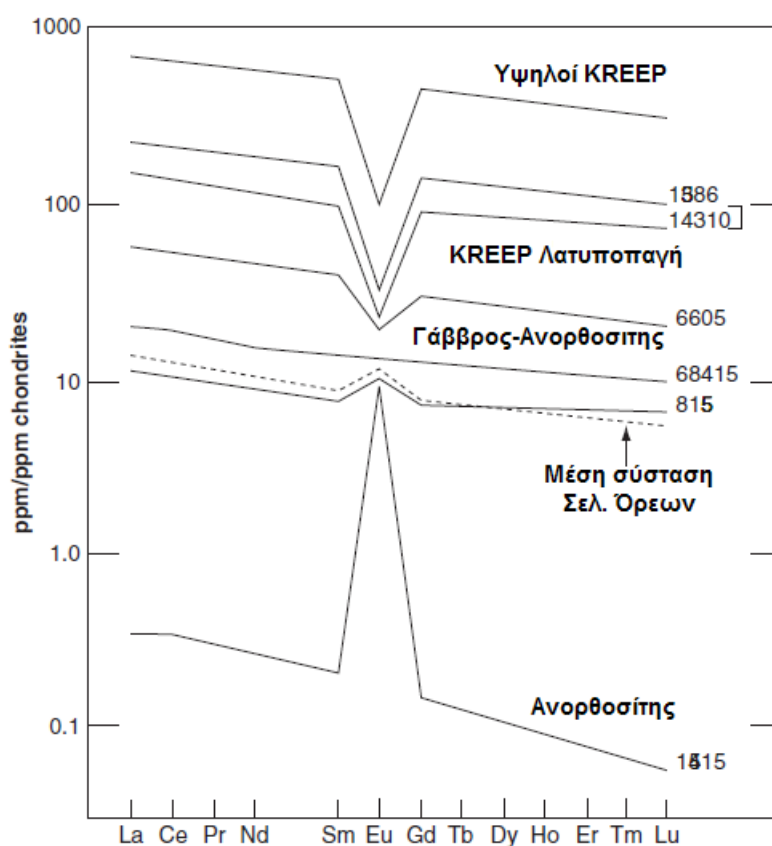
### Ανορθοσίτες

Το πιο διαδεδομένο πέτρωμα αποτελεί το 80% του φλοιού των Όρεων. Αποτελούνται στο 95% πλούσια σε ασβέστιο Πλαγιόκλαστα (Ανορθίτης, An95 to An97) με σημαντικούς εμπλουτισμούς σε Eu (REE). Το Eu φθάνει το 50% στον φλοιό και η μείωση του στον

μανδύα ήταν το «κλειδί» για την ανακάλυψη της γεωχημικής εξέλιξης της Σελήνης. Χαμηλής περιεκτικότητας σε Mg πυροξένων είναι το επόμενο πιο άφθονο ορυκτό και τέλος, Μαφικά Σιδηρούχα και Μαγνησιούχα ορυκτά συμπληρώνουν τη κρυσταλλική ορυκτολογική δομή των ανορθοσιτών.

### **KREEP**

Αποτελεί το σχηματισμό μη-συγγενών μεταξύ τους χημικών στοιχείων. Προέρχεται από το υπολειμματικό τήγμα (2%), και περιλαμβάνει στοιχεία που δεν συμπεριελήφθησαν στις κύριες ορυκτές ομάδες (Ολιβίνης, Ορθοπυρόξενος, Κλινοπυρόξενος, Πλαγιόκλαστα και Ιλμενίτης), κατά την κρυστάλλωση του ωκεάνιου μάγματος. Το μείγμα είναι πλούσιο σε Κάλιο (K), Σπάνιες Γαίες (REE), και Φώσφορο (P). Υπάρχει και ο Βασάλτης-KREEP ο οποίος έχει περισσότερο πρωταρχικό λόγο  $Mg/(Mg+Fe)$ . Πολύ πιθανές είναι και οι διαφορετικές πηγές προέλευσης των υλικών αυτών (π.χ.: τήγματα συγκρούσεων ή δεξαμενές τηγμένου υλικού).



**Εικόνα 9. Κατανομές REE σε τυπικά δείγματα φλοιού Ορεινών περιοχών.**



### **Mg-Σειρά**

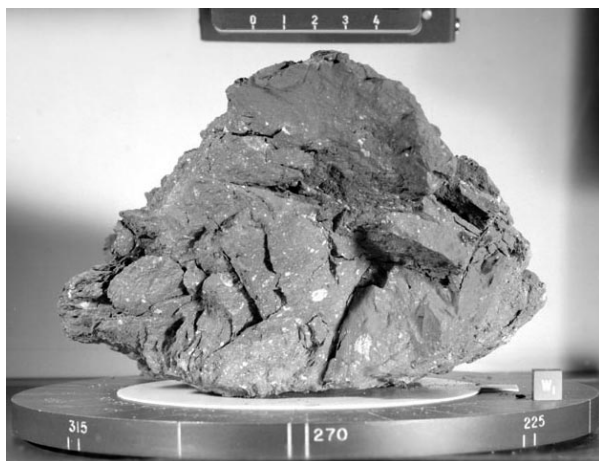
Αποτελούν μια μικρή ποσότητα του φλοιού γύρω στο 10% και βρέθηκαν κοντά στα δείγματα των αποστολών του Απόλλων. Ονομάστηκε πετρολογική ακολουθία Mg-Σειρά. Πιθανά λοιπόν να έχουν τοπική εξάπλωση μόνο. Στα μέλη της η σειρά περιλαμβάνει:

- Δουνίτες
- Γάββρους
- Ανορθοσίτες
- Νορίτες
- Σπινέλιο-Τροκτόλιθους
- Τροκτόλιθους

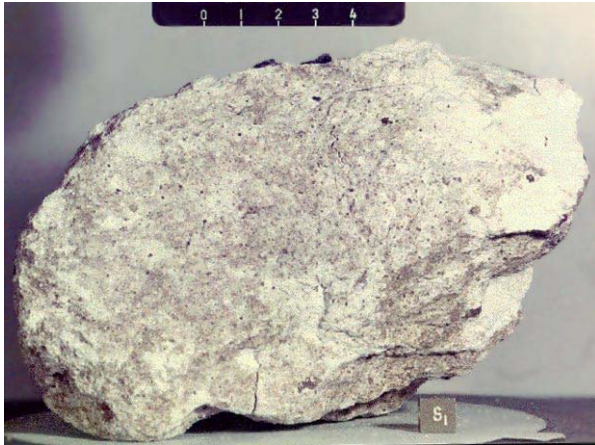
Τα πετρώματα αυτά έχουν ηλικία 4.44 Gyr έως 4.2 Gyr; (100–200 Myr νεότερα Σιδηρούχους Ανορθοσίτες). Έχουν επίσης υψηλότερο  $Mg/(Mg + Fe)$ . Ο υψηλός λόγος  $Mg/(Mg + Fe)$  δείχνει αρχέγονη προέλευση αλλά η ακολουθία παρουσιάζει εμπλουτισμούς μη συμβατών στοιχείων μεταξύ τους. Πιθανά σχετίζεται με τη χημική διαφοροποίηση πυριγενών πετρωμάτων (πρωταρχικού μάγματος), και πιθανή μίξη KREEP-πλούσιων χημικά περιοχών.

Υπάρχουν και θεωρίες για τη συσχέτιση με συνεχιζόμενα ηφαιστειακά γεγονότα όμως η παράλληλη κατανομή των REE (ελάττωση Eu), δεν συνεισφέρει σε αυτό το γεγονός. Επιπλέον η ακολουθία περιέχει πλούσιο σε Mg Ορθοπυρόξενο, ορυκτό που δεν απαντάται στους θαλάσσιους βασάλτες άρα υπάρχει διαφορετική πηγή γένεσης των υλικών αυτών.

### **Εικόνες Σεληνιακών Πετρωμάτων:**



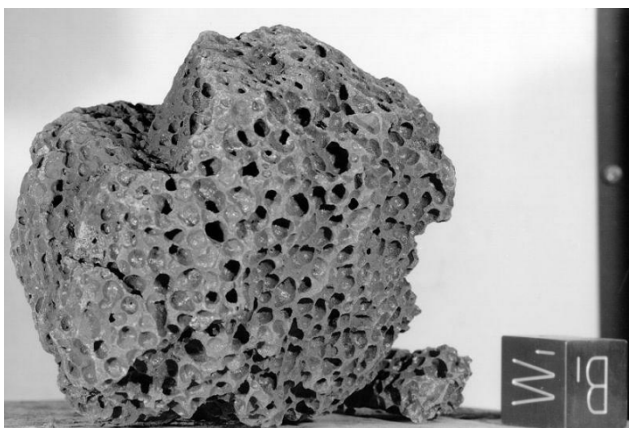
**Εικόνα 10. Σεληνιακό εκρηξιγενές λατυποπαγές (Apollo 17)**



**Εικόνα 11. Ανορθοσίτης (Apollo 16)**



**Εικόνα 12. Τροκτόλιθος (Apollo 17)**

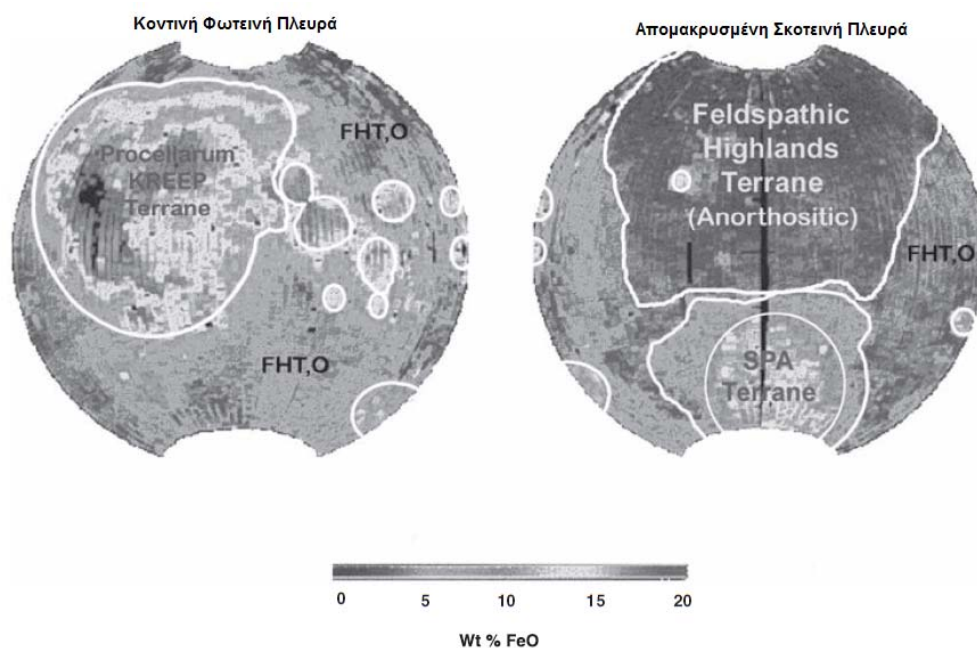


**Εικόνα 13. Βασάλτης (Apollo 15)**

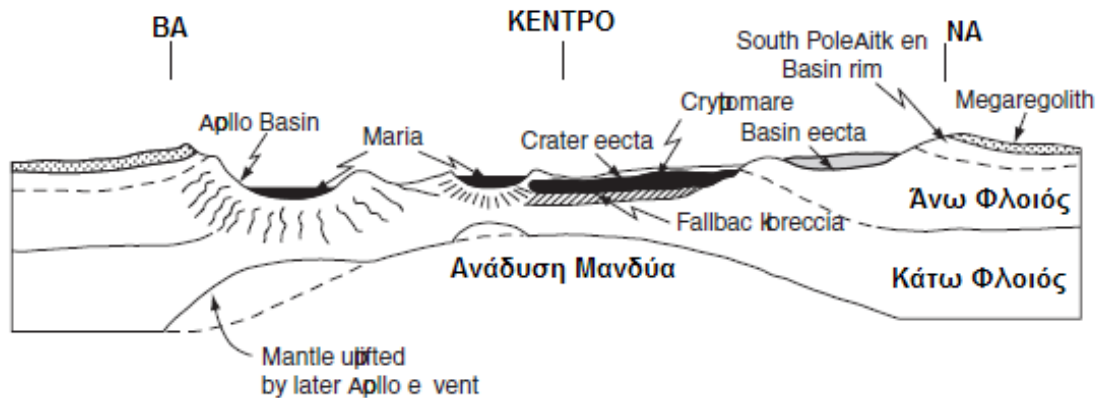
## Σεληνιακοί Επιφανειακοί Σχηματισμοί και Εδάφη

Η γεωχημική χαρτογράφηση της Σελήνης βασίστηκε πάνω στις συγκεντρώσεις FeO και Th και μπόρεσε να διακρίνει την ύπαρξη τριών ειδών εδαφών στον φλοιό των Ορέων:

- (i) **Feldspathic Highlands Terrane (FHT).** Είναι ο πρωτογενής αρχέγονος σεληνιακός φλοιός που σχηματίστηκε πριν  $4460 \pm 40$  Myr με άνοδο από το ωκεανό μάγματος. Χωρίστηκε περαιτέρω σε FHT-A (Ανορθοσιτικός) and FHT-O, (πλουσιότερος σε FeO) και φτωχότερος σε  $Al_2O_3$ .
- (ii) **Procellarum KREEP (PKT).** Αυτός σχηματίστηκε στο τελευταίο στάδιο της κρυστάλλωσης τους αρχέγονου μάγματος από τα υπόλοιπα μη συγγενικά χημικά στοιχεία.
- (iii) **South Pole–Aitken (SPAT).** Σχηματίζει ουσιαστικά τον Νότιο πόλο στη λεκάνη Aitken, όπου τα πετρώματα διάνοιξαν το επάνω μέρος του φλοιού καθώς αναδύονταν οι ηφαιστειακές εκχύσεις οι οποίες αύξησαν και το πάχος του φλοιού του απομακρυσμένου αυτού Ανορθοσιτικού Φλοιού.



Εικόνα 14. Κύριοι Εδαφικοί Φλοιοί Σελήνης. PKT με Th > 3.5 ppm.. Ο Νότιος Πόλος–Aitken Terrane (SPAT) έχει μια εξωτερική περιοχή που σχετίζεται με τις ηφαιστειακές αναδύσεις. Ο FHT αποτελεί το παχύτερο τμήμα του φλοιού αλλά συγκεντρώνεται στην απομακρυσμένη περιοχή. (courtesy Brad Jolliff, Washington University).



Εικόνα 15. Ο νότιος πόλος – Λεκάνη Aitken, 2500km διάμετρος και 12km βάθος με δύο κρατήρες από σύγκρουση και άνοδος υλικού του μανδύα.

### Άλλοι μορφολογικοί και πετρολογικοί σχηματισμοί

- **The Cayley Plains**

Φωτεινές περιοχές στα όρη π.χ 80 km διάμετρος κρατήρας Wargentín. Αρχικά θεωρούνταν ηφαιστειακές λάβες ή τόφφοι. Το Apollo 16 προσγειώθηκε στα Cayley Plains το 1972 και αρχικά θεωρήθηκαν δόμοι ρυολίθων. Δηλαδή τα Όρη να ήταν γρανιτικά, όμως τα δείγματα έδειξαν: Ανορθοσιτικά Λατυποπαγή σύγκρουσης και όχι ηφαιστειακό πετρώματα.

- **Τεκτίτες**

Οι περισσότεροι σχηματίζονται στη Γη από την τήξη πυριτικών ιζηματογενών πετρωμάτων κατά τη σύγκρουση με μετεωρίτη, αστεροειδή ή κομήτη που στη συνέχεια αποκόλλησε το αρχικό υλικό και σχηματίστηκε η Σελήνη (επικρατέστερη θεωρία σχηματισμού). Το K συσχετίζεται αντίστροφα με το SiO<sub>2</sub>, (στα πυριγενή πετρώματα στη Γη συμβαίνει το αντίθετο). Για αυτό θεωρήθηκε αρχικά από μερικούς ότι υπάρχουν και ιζηματογενή πετρώματα στη Σελήνη.

### Σύνοψη Φλοιού Ορέων Σελήνης

- Η Σελήνη είναι εμπλουτισμένη σε δύστηκτα στοιχεία ενώ, είναι "τελείως ξηρή" (αν και αυτό μάλλον αναθεωρήθηκε τελευταία), και έχει μικρότερες συγκεντρώσεις πτητικών στοιχείων σε σχέση με τη Γη και τους CI-Μετεωρίτες.
- Έχει χαμηλή πυκνότητα, και παρουσιάζει μειωμένες συγκεντρώσεις Fe (2–3%), αλλά λίγο μεγαλύτερες συγκεντρώσεις FeO (13%), έναντι 8% με τον γήινο Μανδύα.
- Η προέλευση της χαμηλής πυκνότητας Σελήνης και του υψηλής πυκνότητας Ερμή με τα ειδικά γεωλογικά χαρακτηριστικά οφείλεται σε συγκρούσεις.
- Στη Σελήνη δεν υπάρχουν λιθοσφαιρικές πλάκες και όλος ο φλοιός αποτελείται ουσιαστικά από μία «γεωλογική πλάκα».

- Η επιφάνεια της διαμορφώθηκε από τις συγκρούσεις μετεωριτών, αστεροειδών και κομητών. Η «Σεληνιακή» τοπογραφία οφείλεται σε ένα «κατακλυσμικό» βομβαρδισμό ουράνιων σωμάτων που διήρκησε από 4 έως 3,85εκ. έτη. Η πηγή των σωμάτων αυτών παραμένει υποθετική ακόμη αλλά μπορεί να συνδέεται με την προς τα έξω «μετανάστευση» των εξωτερικών πλανητών.
- Τεκτονικές δομές είναι σπάνιες αλλά οφείλονται συνήθως στην καθίζηση των «Θαλάσσιων» βασαλτών και όχι σε εκτεταμένη ενεργό τεκτονική (εφελκυσμοί-συμπιέσεις).
- Ο φλοιός των Σεληνιακών Όρεων είναι μοναδικός στο ηλιακό σύστημα έχει 50km πάχος με 16km ανάγλυφο.
- Ο «φλοιός» των Όρεων αποτελεί τυπικό δείγμα πρωταρχικού φλοιού. Έχει βρεθεί από δείγματα του ότι αποτελείται από «πολλαπλά στρώματα λατυποπαγών» που οφείλονται στις πολλαπλές συγκρούσεις ουράνιων σωμάτων. Επίσης πολύ συχνά εμφανίζεται «τηγμένο υλικό» από τις συγκρούσεις. Η μέση περιεκτικότητα σε  $Al_2O_3$  είναι περίπου 30% και επικρατεί Ανορθοσίτης που διαποτίστηκε από το KREEP που θεωρείται σαν το υπολειμματικό ρευστό από την κρυστάλλωση του μάγματος των ωκεανών και για αυτό το KREEP εμπλουτίστηκε με ιδιαίτερα χημικά στοιχεία.
- Η νεότερης ηλικίας ακολουθίας πετρωμάτων γνωστής ως Mg-Ακολουθία με εξακολουθεί να είναι αβέβαιης προέλευσης και μάλλον αποτελεί ένα μείγμα πρωτογενών τεμαχών και εξελιγμένων χρονικά πετρωμάτων. Λόγω απουσίας άλλης ενεργειακής πηγής εκτός των συγκρούσεων και την έλλειψη τεκτονο-στρωματογραφικών διεργασιών καθίσταται η αξιολόγηση αυτής της ακολουθίας σχηματισμών εξαιρετικά δύσκολη.
- Τρία πεδία Σεληνιακού Φλοιού έχουν αναγνωρισθεί: FHT, PKT και SPAT ενώ το KREEP εμφανίζεται να συγκεντρώνεται κάτω από τη σεληνιακές περιοχές γειτνείας με το κρυσταλλούμενο ωκεάνιο μάγμα. Αρκετές πεδινές περιοχές (Cayley Plains), αρχικά θεωρούνταν ροές ηφαιστειακής τέφρας ενώ σήμερα πιστεύεται ότι είναι οι υπολειμματικές στρώσεις από τη δημιουργία κρατήρων λόγω των συγκρούσεων. Σημαντικό εύρημα που προέκυψε από την ανάλυση δειγμάτων είναι ότι οι Τεκτίτες δεν έχουν σεληνιακή προέλευση.

## Ταξινόμηση Πυριγενών Πετρωμάτων στη Γη

Η ταξινόμηση αυτή χρησιμοποιείται μόνο για πετρώματα των οποίων ο ΧΔ (χρωματικός δείκτης), είναι μικρότερος από 90%. όπου ΧΔ = μαρμαρυγίες, αμφίβολοι, πυρόξενοι, ολιβίνης, αδιαφανή ορυκτά και επουσιώδη (τιτανίτης, ζιρκόνιο κτλ.)

Τα πετρώματα τα οποία έχουν ΧΔ>90 ταξινομούνται με βάση τα κύρια φεμικά συστατικά τους, όπως θα δούμε πιο κάτω. Τα υπερ-κορεσμένα πετρώματα προβάλλονται στο τρίγωνο QAP, ενώ τα ακόρεστα στο APF. Τα κορεσμένα πετρώματα και τα ακόρεστα χωρίς αστριοειδή (ολιβινούχα) προβάλλονται στο κοινό όριο AP.

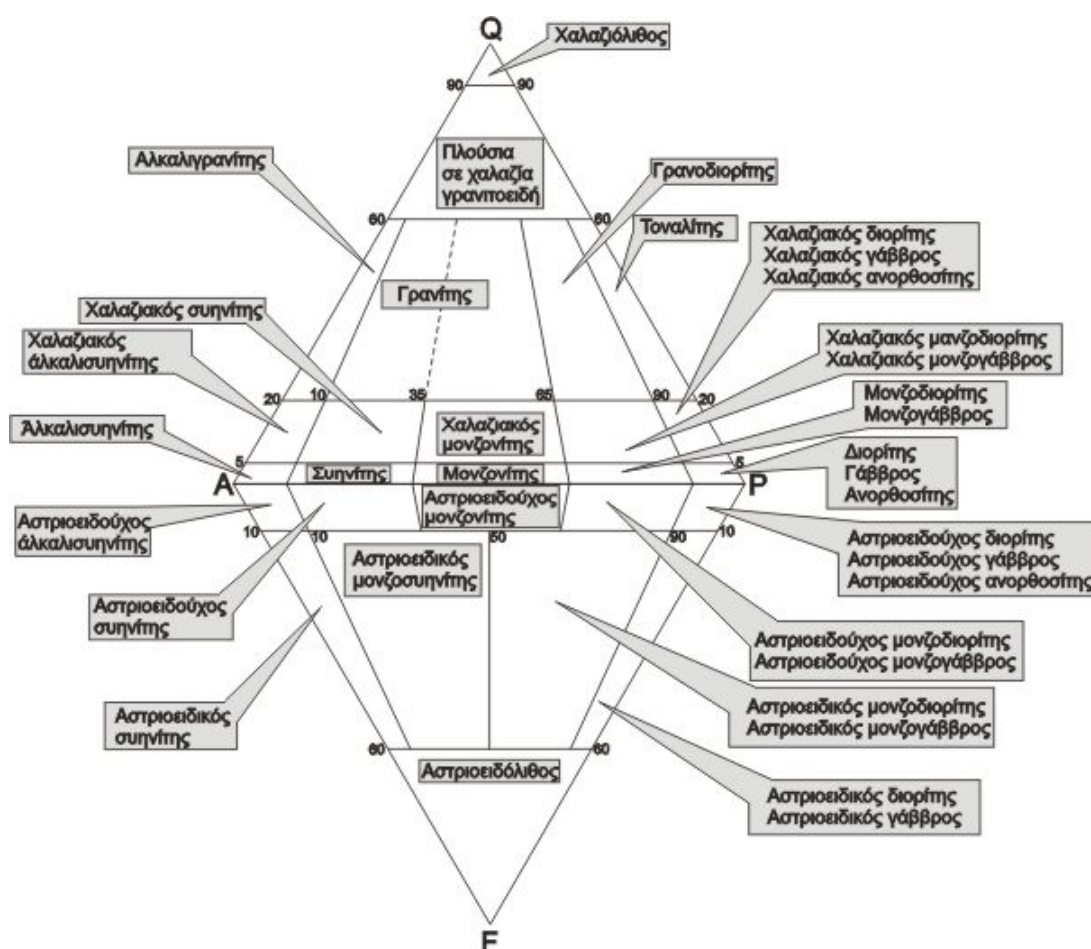
Η ταξινόμηση ενός πετρώματος στο σύστημα αυτό γίνεται ως εξής: έστω ότι το πέτρωμα περιέχει 15% Q, 10% A, 25% P και 50% φεμικά. Επειδή τα φεμικά συστατικά δε λαμβάνονται υπόψη στην ταξινόμηση, προστίθενται τα ποσά Q, A και P και ανάγονται επί τους εκατό, οπότε γίνονται 30%, 20% και 50%, αντίστοιχα.

Q = χαλαζίας

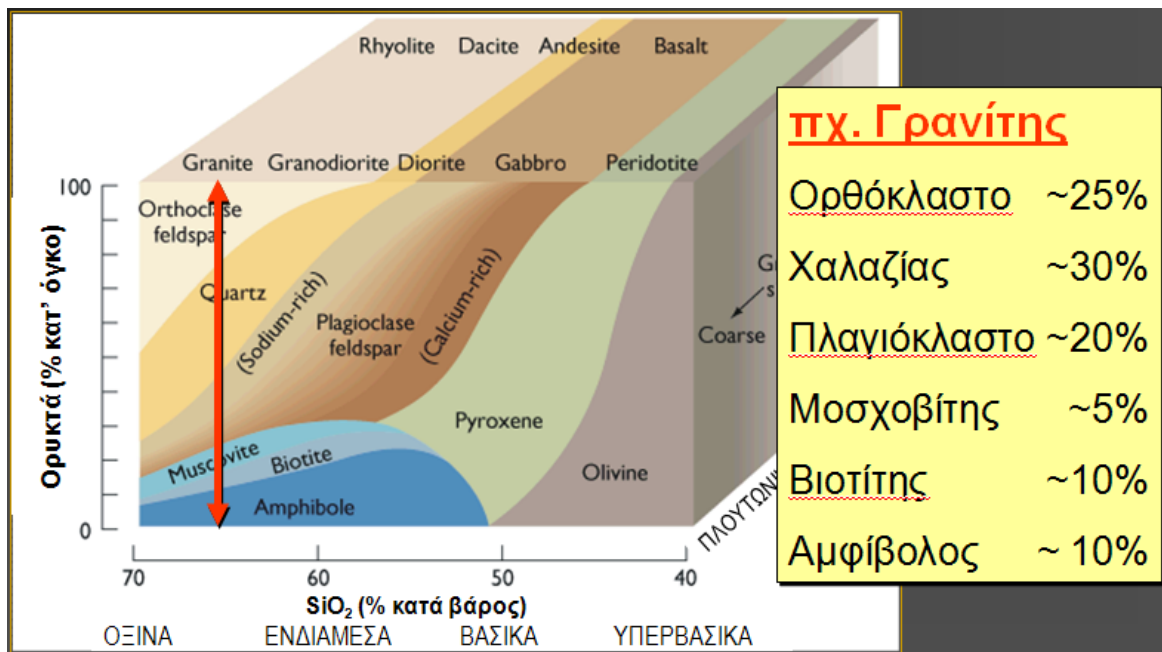
A = Αλκαλιούχοι άστριοι (σανίδιο, ορθόκλαστο, μικροκλινή, περθίτης, ανορθόκλαστο, αλβίτης An0-5)

P = Πλαγιόκλαστα (An5-100), σκαπόλιθος

F = Αστριοειδή (λευκίτης, νεφελίνης, σοδάλιθος, νοσεάνης, χαουϊνης, ανάλκιμο, κ.α.)



Εικόνα 16. Ταξινόμηση Γήινων Πυριγενών Πετρωμάτων.



Εικόνα 17. Ταξινόμηση Πυριγενών πετρωμάτων στη Γη (π.χ. Γρανίτης).

### Πλαγιόκλαστα

Τα πλαγιόκλαστα είναι ισόμορφες παραμειξίες μεταξύ των ακραίων μελών **αλβίτη**  $NaAlSi_3O_8$  (**Ab**) και **ανορθίτη**  $CaAl_2Si_2O_8$  (**An**). Τα πλαγιόκλαστα που έχουν λιγότερο από 50% An ονομάζονται όξινα και αυτά που έχουν περισσότερο από 50% An ονομάζονται βασικά. Τα πλαγιόκλαστα διαιρούνται στα ακόλουθα μέλη:

**Αλβίτης:** βρίσκεται κυρίως σε γρανιτικά και συηνιτικά πετρώματα καθώς και σε πηγματιτικές φλέβες. Κλιβελανδίτης είναι η πλακώδης ποικιλία του αλβίτη.




**Ολιγόκλαστο:** βρίσκεται κυρίως σε γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες και αντίστοιχα έκχυτα. Ηλιόλιθος (sunstone) ονομάζεται μία χρυσοκίτρινη ποικιλία ολιγοκλάστου με λαμπυρίζουσα όψη λόγω εγκλεισμάτων αιματίτη.

**Ανδεσίνης:** βρίσκεται κυρίως σε γρανοδιορίτες, μονζονίτες, διορίτες και αντίστοιχα έκχυτα.

**Λαβραδόριο:** αποτελεί το βασικό άστρο στους γάββρους και βασάλτες καθώς και ανορθοσίτες. Χαρακτηριστικό του είναι ο ιριδισμός, όμορφο παιχνίδισμα χρωμάτων γνωστό ως λαβραδορισμός.

**Βυτωβνίτης:** απαντάται σπάνια, κυρίως σε γάββρους.

**Ανορθίτης:** είναι σπάνιος και βρίσκεται σε μερικούς γάββρους και σε κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους μεταμορφωμένους εξ επαφής. Όνομα: **Πλαγιόκλαστο:** από τις ελληνικές λέξεις πλάγιος και κλάσις = σπάσιμο, επειδή οι δύο σχισμοί τέμνονται υπό γωνία δηλαδή πλάγια.

		
<b>Αλβίτης</b> $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (An0-10)	<b>Λαβραδόριο</b> An50-70	<b>Ανορθίτης</b> $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (An90-100)

**Εικόνα 18 . Φυσικά ορυκτά διαφόρων Πλαγιοκλάστων.**

Αλβίτης: από τη λατινική λέξη *albus* = λευκός λόγω του χρώματός του.

Ολιγόκλαστο: από τις ελληνικές λέξεις *ολίγος* και *κλάσις* = σπάσιμο, διότι θεωρήθηκε ότι είχε λιγότερο τέλειο σχισμό από τον αλβίτη.

Ανδεσίνης: από την οροσειρά των Άνδεων, όπου βρέθηκε σε ανδεσιτικές λάβες στο *Marmato, Βολιβία*.

Λαβραδόριο: από την περιοχή *Labrador*, Καναδάς όπου βρέθηκε.

Βυτωβνίτης: από την περιοχή *Bytown, Ontario*, Καναδάς (τη σημερινή Οττάβα) όπου βρέθηκε.

Ανορθίτης: από το στερητικό *α* και τη λέξη *ορθός*, επειδή οι κρύσταλλοί του που ανήκουν στο τρικλινές είναι πλάγιοι (μη ορθοί)). Παρά τη πετρολογική πολυπλοκότητα, οι χημικές αναλογίες των στοιχείων στα πετρώματα δεν επηρεάζονται και επικρατούν οι Άστριοι και το *KREEP*. Για αυτό και οι κατανομές των *REE* στο φλοιό των Όρεων είναι περίπου παράλληλες εκτός από τον εμπλουτισμό ή τη μείωση του *Eu* λόγω των μίξεων Αστρίων ή του *KREEP*.

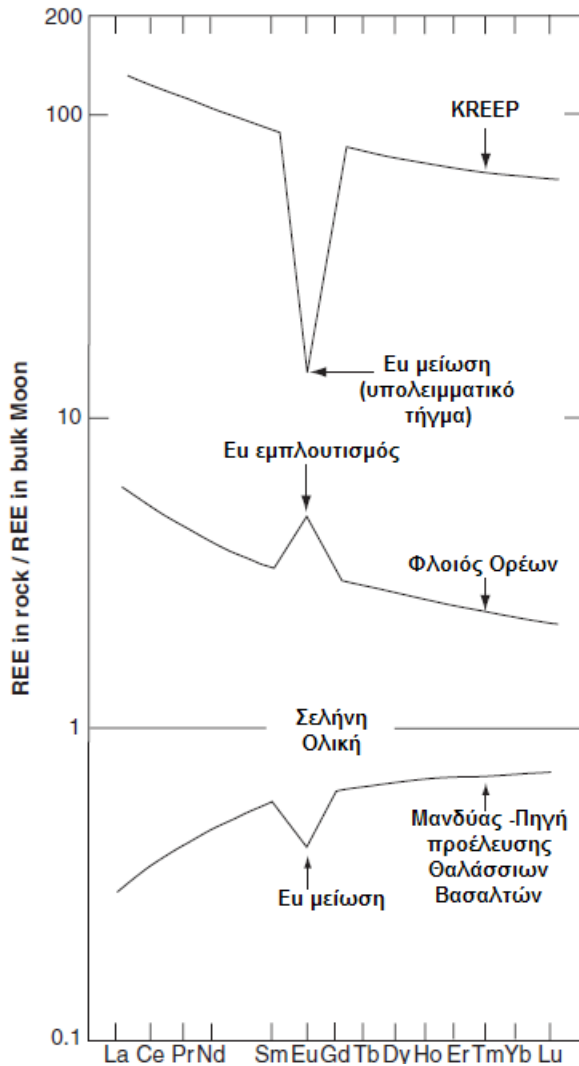


## Σεληνιακές Θάλασσες

Οι σκουρόχρωμες Σεληνιακές Θάλασσες αποτελούν ένα τυπικό παράδειγμα δευτερογενούς φλοιού που παράγεται από μερική τήξη του μανδύα κατά τη διάρκεια της πλανητικής εξέλιξης. Αυτός ο τεράστιος πεδινός χώρος καλύπτει το 17% ( $6,4 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) της επιφάνειας της Σελήνης, έχει ένα πολύ λεπτό πάχος και καλύπτεται από λάβες με συνήθως λιγότερο από 500m πάχος με μέγιστο τα 4km όπως π.χ. στην Θάλασσα Imbrium.



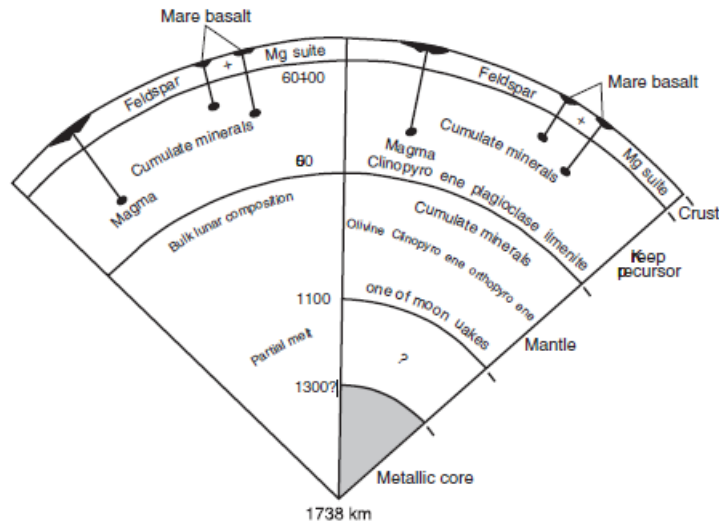
**Εικόνα 19. Σχέση Ανορθοσιτικού φλοιού υψηλών περιοχών και Βασαλτικών Θαλασσών Περιοχή Mare Ingenii (απομακρυσμένη περιοχή). Ο κρατήρας Thomson έχει διάμετρο 112 km και αποτελείται από Βασάλτη. Ο κρατήρας στο πρώτο πλάνο είναι ο Zelinsky με 54km διάμετρο που περιέχει παλαιό «Ορεινό Φλοιό»**



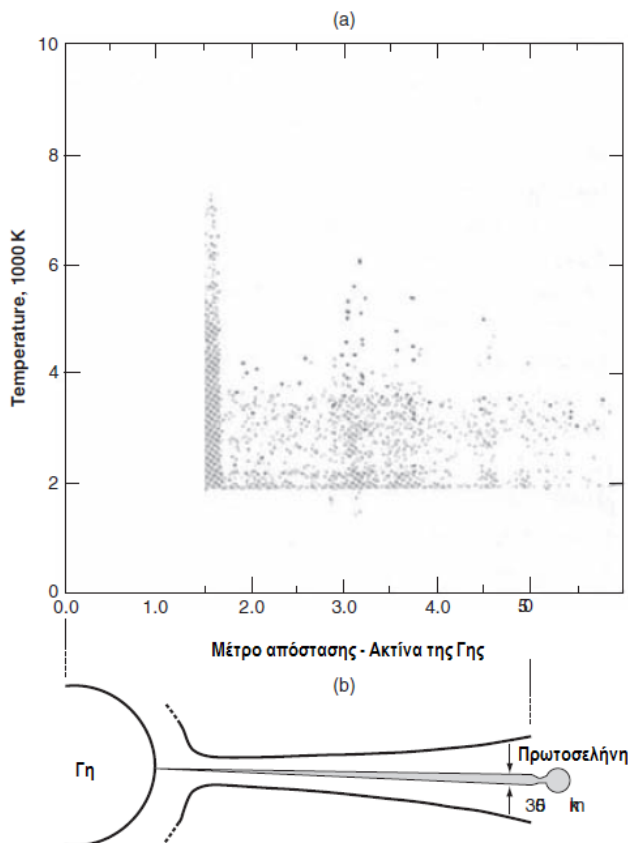
**Εικόνα 20.** Περιεκτικότητες REE στις πηγές προέλευσης των Θαλάσσιων Βασαλτών, τον Φλοιό των Ορέων και στα KREEP σε σχέση με τη μέση συγκέντρωση όλης της Σελήνης (bulk). Αποτυπώνεται η γεωχημική προτίμηση του Eu (ίδια ακτίνα με το Sr), να ενσωματωθεί στα Αστριούχα Πλαγιόκλαστα, που επιπλέοντας δημιούργησαν τον ορεινό φλοιό και μειώθηκαν στο εσωτερικό. Το KREEP σαν τελευταίο υπολειμματικό υλικό του ωκεάνιου μάγματος μειωμένο και αυτό σε Eu, είναι όμως εμπλουτισμένο σε άλλα REE και μη συγγενικά χημικά στοιχεία π.χ. K, U, Th, Ba, Rb, Cs, Zr, P τα οποία σχημάτισαν Ολιβίνη, Πυρόξενους και Ιλμενίτη κατά το στάδιο της κρυστάλλωσης.

## Ανακεφαλαίωση & Σύσταση Σεληνιακών Θαλασσών

- Οι σεληνιακές θάλασσες αποτελούν ένα τυπικό παράδειγμα δευτερογενούς πλανητικού φλοιού.
- Καταλαμβάνουν οπτικά αρκετό χώρο αλλά αποτελούν <1% του όγκου του φλοιού της Σελήνης.
- Οι λάβες είναι χαμηλού ιξώδους και δημιουργούν εξαιρετικά επίπεδες περιοχές και όχι ηφαιστειακές κεντρικές δομές.
- Γεμίζουν διάφορες λεκάνες από σύγκρουση ή κρατήρες σε διαφορετικά επίπεδα
- 25 διαφορετικοί τύποι έχουν αναγνωριστεί καταδεικνύοντας ετερογενή προέλευση στο Σεληνιακό Μανδύα σε αντίθεση με τους γήινους σχετικά ομοιόμορφους MORB.
- Οι λάβες είναι πολύ παλαιές και ηλικίας οι περισσότερες 3 έως 4 Gyr.
- Συγκριτικά με τη Γη έχουν υψηλότερο FeO (20%), χαμηλότερο Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και περιέχουν μεγαλύτερο εύρος συγκεντρώσεων σε TiO<sub>2</sub> (0,4 to 16%) από διαφορετικά μέρη του Μανδύα.
- Παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις σε Σιδηρόφιλα στοιχεία (Au, Co, Fe, Ir, Mn, Mo, Ni, Os, Pd, Pt, Re, Rh, Ru), και Πτητικά στοιχεία (H, C, N, Αλογόνα κλπ)
- Η κατανομή των REE (Σπάνιες Γαίες), παρουσιάζει την χαρακτηριστική «μείωση» στο στοιχείο Eu. Πιθανολογείται ένας μανδύας με ενδιάμεσα στρώματα και ο πυρήνας όμως είναι πιθανά μεταλλικός.
- Οι βασάλτες προέκυψαν από μερική τήξη υλικού σε βάθη 200-400km πιθανά οι πηγές θερμότητας έχουν τοπικότητα και οφείλονται μάλλον στα στοιχεία K, U και Th.
- Η ηλικία σχηματισμού τους ήταν διακοπτόμενη κατά εκατοντάδες Myr (εκατομμύρια έτη), ενώ σχηματίζονταν οι λεκάνες σύγκρουσης.
- Η τήξη της Σελήνης δημιούργησε τελικά έναν ωκεανό μάγματος που με αλληπάλληλες στρώσεις διαμόρφωσε την επιφάνεια της όσο διαρκούσαν τα στάδια ανάδυσής του.
- Η προέλευση της Σελήνης οφείλεται στην τεράστια σύγκρουση ενός σώματος μεγέθους του Άρη που «ονομάζεται» **Theia** του οποίου ο μεταλλικός πυρήνας συσσωματώθηκε λόγω της σύγκρουσης με τη Γη. Το υλικό αυτό αποτελεί και το 85% του σεληνιακού υλικού.
- Η δομή της Σελήνης είναι μοναδική στο Ηλιακό σύστημα και προέκυψε με την μείωση των πτητικών στοιχείων και τον εμπλουτισμό των δύστηκτων σε αυτήν, λόγω σταδιακής ψύξης ανάμεσα σε 2500-1000 K πιθανά όμως σε ένα και όχι σε πολλά χρονικά στάδια.

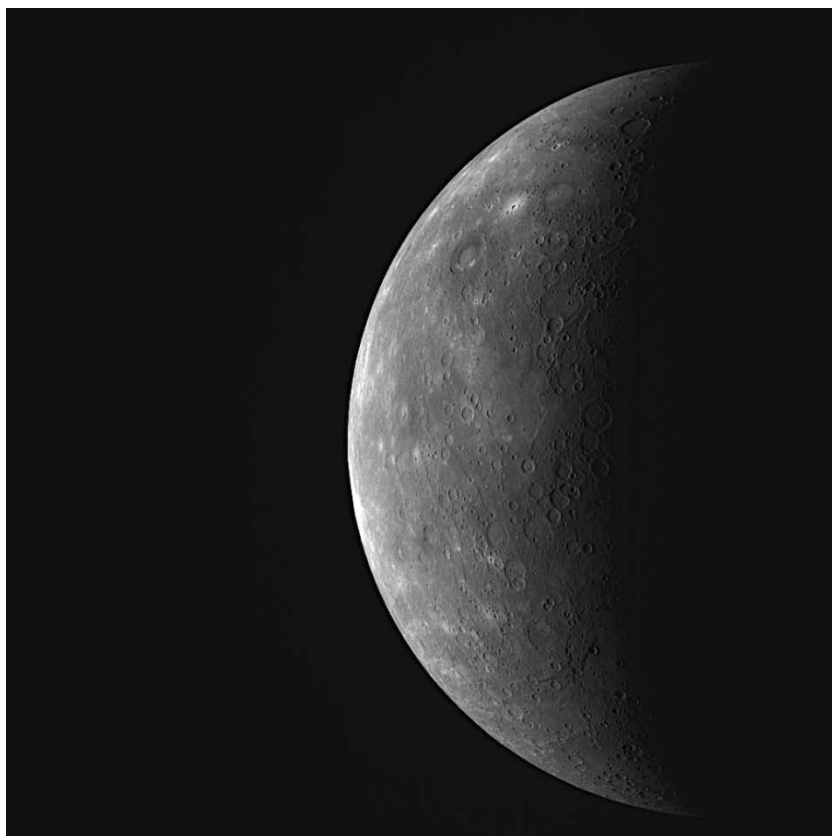


Εικόνα 21. Δύο εναλλακτικές υπάρχουσες θεωρίες για την εσωτερική δομή της Σελήνης. Στον αριστερό, μόνο η μισή έλειωσε και διαφοροποιήθηκε ενώ το βαθύ εσωτερικό έχει την πρωτόγονη σεληνιακή σύνθεση. Κάποια μερική τήξη ίσως εμφανίστηκε λόγω της παρουσίας των K, U και Th. Δεξιά, έλειωσε συνολικά η Σελήνη και διαφοροποιήθηκε γεωχημικά, διαμορφώνοντας τελικά ένα μικρό μεταλλικό πυρήνα στο κέντρο.



Εικόνα 22. (α) Κατανομή θερμοκρασίας σε απόσταση 1.5 έως 6 Γήινες ακτίνες, 40 ώρες μετά την σύγκρουση της πρωτο-Σελήνης (Theia). Η θερμοκρασία φθάνει 2500K σε απόσταση μέχρι και 5 γήινες ακτίνες.

## ΕΡΜΗΣ



**Εικόνα 23 . Πλανήτης Ερμής νέα εικόνα από την αποστολή Messenger**

**Date Acquired:** September 29, 2009

**Image Mission Elapsed Time (MET):** 162741055

**Instrument:** Wide Angle Camera (WAC) of the Mercury Dual Imaging System (MDIS)

**WAC Filter:** 7 (750 nanometers)

**Resolution:** 4.8 kilometers/pixel (3.0 miles/pixel)

**Scale:** Mercury's diameter is 4880 kilometers (3030 miles)

**Spacecraft Altitude:** 26,900 kilometers (16,700 miles)

Ο Ερμής μαζί με τον Άρη προϋπήρχαν στο εσωτερικό Ηλιακό Νεφέλωμα πριν την ιεραρχική «συνάθροιση» της Γης και της Αφροδίτης. Ο φλοιός του Ερμή παρουσιάζει μερικές ομοιότητες με αυτόν των Σεληνιακών Όρεων και αποτελείται και αυτός από μια λιθοσφαιρική πλάκα (όπως ο Άρης και η Αφροδίτη). Πόσο λοιπόν μοιάζει ο Ερμής στη Σελήνη;

Η τροχιά και η περιστροφή του Ερμή είναι «ιδιαιότερες». Περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του αργά με μια περίοδο 59 ημερών ενώ κάνει μια περιστροφή γύρω από τον ήλιο κάθε 88 ημέρες. Δηλαδή περιστρέφεται τρεις φορές κάθε δύο ηλιακές περιστροφές. Η τρέχουσα κλίση της τροχιάς είναι σε  $7^\circ$  και είναι η υψηλότερη μεταξύ των πλανητών, ενώ η εκκεντρικότητα είναι 0.2056, τιμή ελάχιστα χαμηλότερη από αυτήν του Πλούτωνα (0,325 σε 4 Gyr).

Η θερμοκρασία επιφάνειας στην ηλιοφώτιστη πλευρά αυτού του χωρίς αέρα πλανήτη φθάνει σε 725 K, κοντά σε αυτήν της Αφροδίτης (743 K). Η θερμοκρασία την νυχτερινή περίοδο πέφτει στους 90 K αν και σε μερικούς βαθιούς κρατήρες στους πόλους μπορεί να φθάνει και τους 60K. Αυτό σημαίνει ότι αν υπήρχε νερό θα ήταν με τη μορφή πάγου και θα παρέμενε σταθερό λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Κάποιες αντανακλάσεις στα επίγεια Ραντάρ πιθανά μπορούν να ερμηνευτούν με την υπόθεση της ύπαρξης πάγων στον πλανήτη.

Ο Ερμής έχει υψηλή πυκνότητα  $5.43 \text{ g/cm}^3$  που πιθανά συνδέεται με την ύπαρξη υποκείμενου μεταλλικού πυρήνα που θα αποτελεί το 75–80% της πλανητικής μάζας. Λόγω του μεγέθους του πυρήνα ο μανδύας του αποτελεί ένα λεπτό πυριτικό στρώμα όπως και οι άλλοι Γαιώδεις Πλανήτες.

Έχουν βρεθεί ακόμα και ιόντα N, K και Ca στην ατμόσφαιρα του Ερμή. Το γεγονός αυτό είναι παρόμοιο και με τις παρατηρήσεις μας στη Σελήνη όπου βρέθηκαν και εκεί ιόντα Na και K σε ύψος έως και 1200km από την επιφάνεια της. Έτσι μπορούν να βγουν συμπεράσματα για την σύσταση του πλανητικού φλοιού. Τα άλλα στοιχεία που έχουν ανιχνευθεί επίσης στην ατμόσφαιρα του πλανήτη είναι H, He και O. Συμπερασματικά μπορεί να υποθεθεί μια Αστριούχος γεωχημεία για τον φλοιό.

Η φασματική ανάκλαση της επιφανείας είναι παρόμοια της Σελήνης και προϋποθέτει πυριτικό φλοιό όμοιων των Σεληνιακών Όρέων. Η υψηλή πυκνότητα και το μαγνητικό πεδίο (300 nT), του πλανήτη δείχνουν την ύπαρξη Fe, ή F-FeS πυρήνα. Είναι όμως ο πυρήνας μερικώς λειωμένος; Πάντως φασματικά ο φλοιός του Ερμή δείχνει να έχει «Σεληνιακούς Ανορθοσίτες» με χαμηλή περιεκτικότητα σε Fe, και Αλβίτη πλούσιο σε Na

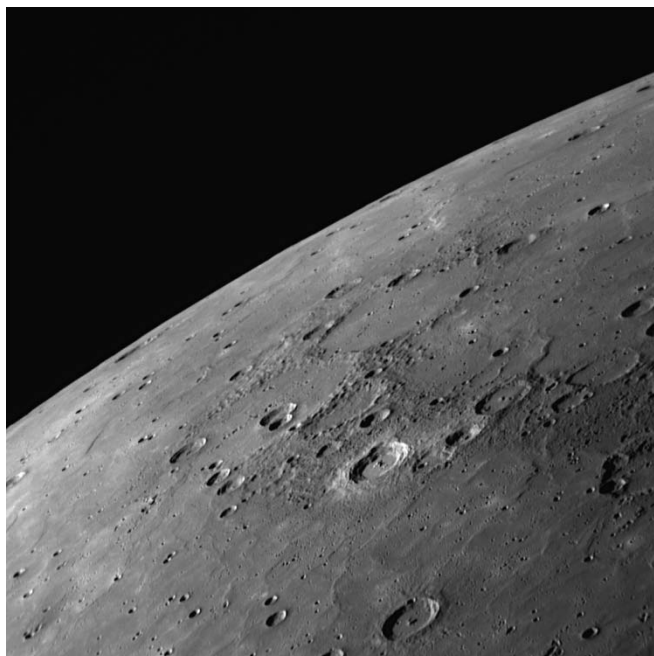


**Εικόνα 24 α.β. Είδη Αλβίτη ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )**

Το μοντέλο σχηματισμού του Ερμή στηρίζεται στο ότι ένας πρωτο-πλανήτης (μεγέθους όσο ο Άρης), διαταράχθηκε από μια κατά μέτωπο σύγκρουση με κάποιο ουράνιο σώμα και το υπόλοιπο υλικό του μανδύα δεν μπόρεσε να ξανα-συνενωθεί απόλυτα (ισοχημικά ή με μανδουακές διαφοροποιήσεις).

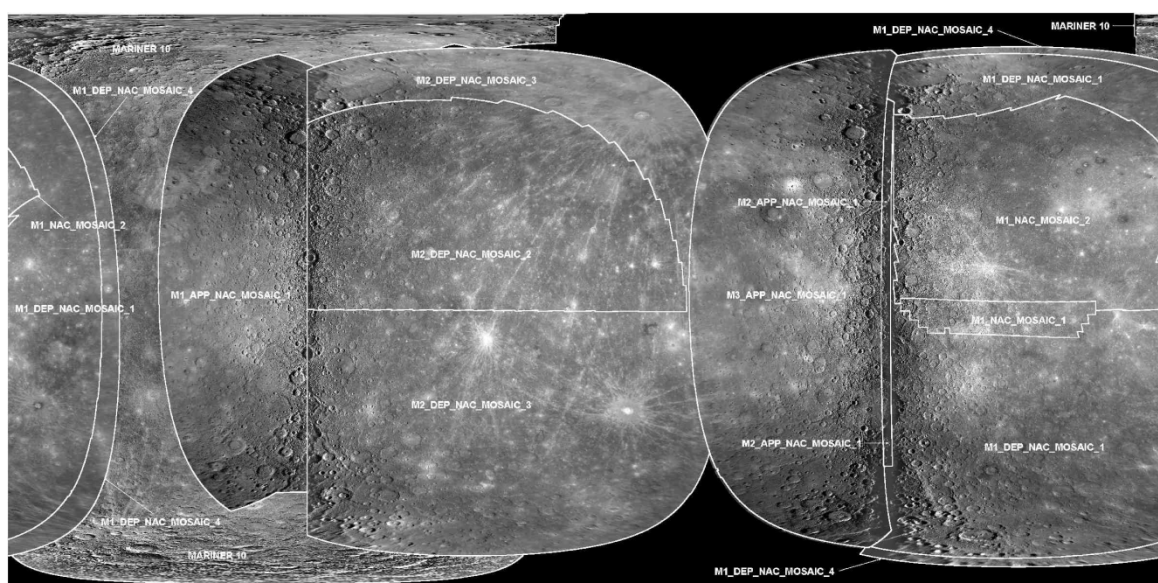
Η παλαιότερης ηλικίας επιφάνεια είναι γεμάτη κρατήρες με ενδιάμεσες πεδινές περιοχές ενώ νεώτεροι κρατήρες σχηματίζονταν με τον χρόνο π.χ. η Λεκάνη Caloris. Έτσι η σημερινή μορφολογία είναι ουσιαστικά ένα σύνθετο αποτέλεσμα και υπάρχουν πολλές διαφωνίες

κατά πόσο οι πεδινές περιοχές είναι αποτέλεσμα επάλληλων ρωών λαβών ή αποτέλεσμα μόνο των συγκρούσεων. Οι διαφορές στην Λευκαύγεια του πλανήτη είναι μικρές και αν οι πεδινές περιοχές σχηματίστηκαν από λάβες θα έπρεπε να παρουσιάζουν χαμηλότερη λευκαύγεια αυτήν των βασαλτών.

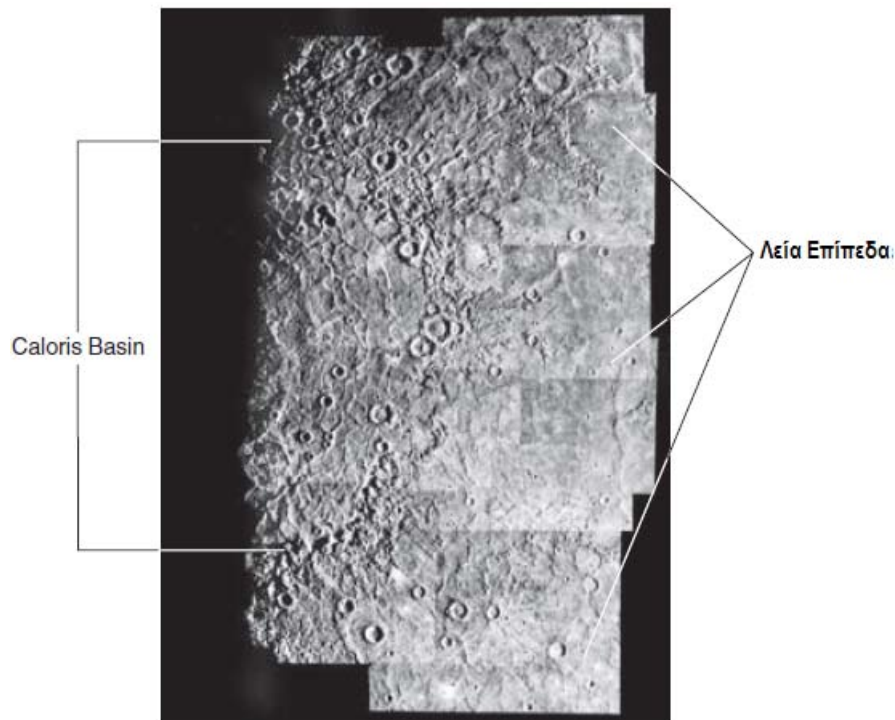


**Εικόνα 25. Λείες περιοχές και κρατήρες στην επιφάνεια του Ερμή.**

Συμπερασματικά, η επιφάνεια του Ερμή μάλλον αποτελεί πρωταρχικό φλοιό που επηρεάστηκε από τον βομβαρδισμό «διαστημικών τεμαχών». Στις φασματικές απεικονίσεις η επιφάνεια του πλανήτη δείχνει να έχει επηρεαστεί από έντονη διαστημική διάβρωση οπότε τα πραγματικά χαρακτηριστικά του φλοιού (σύσταση, πάχος και προέλευση), παραμένουν αρκετά αβέβια.



**Εικόνα 26. Εικόνες της επιφάνειας του Ερμή από την αποστολή Messenger.**

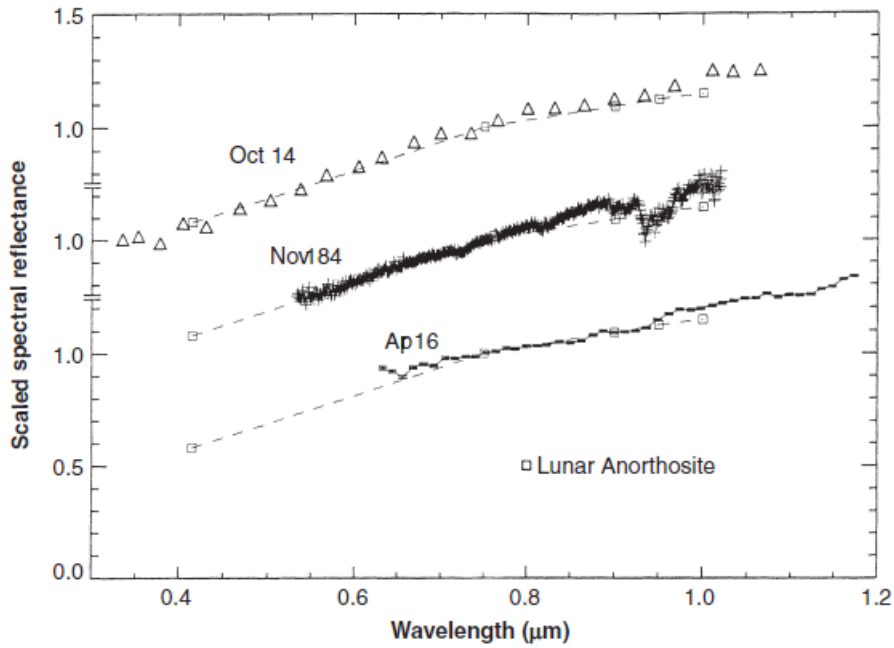


Εικόνα 27. Οι πεδινές (λείες) περιοχές του Ερμή και η μεγάλη Λεκάνη «Caloris Basin»



Εικόνα 28. Ρήγματα «αναχωματικά» μοναδικά στον Ερμή. Υπάρχουν εκατοντάδες με μήκος από 20-500km και με ύψη από λίγες εκατοντάδες μέτρα έως και 3km. Είναι ουσιαστικά αντίστροφης ώσης ρήγματα λόγω των συμπιεστικών τάσεων. Παρατηρούνται στις ενδιάμεσες ζώνες και στα παλαιότερα μέρη με πολλούς κρατήρες. Σχηματίστηκαν αρκετά νωρίς >4 Gyr.





Εικόνα 29. Τρία φάσματα ανάκλασης κοντά στο υπέρυθρο (1μm) έως μικροκύματα (20cm), από τον Ερμή συγκρινόμενα με αυτά των Σεληνιακών Ανορθοσιτών με >90% Πλαγιόκλαστα. Φαίνεται ότι ο Ερμής έχει Regolith με αστριούχο επιφάνεια με πλαγιοκλαστική ορυκτοχημεία περισσότερο με Na, (An<sub>90</sub>-), (Blewett D.T. et al 2002).

## ΑΡΗΣ



**Εικόνα 30. Άρης από το Τηλεσκόπιο Hubble.**

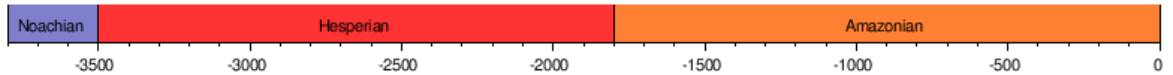
Η εξέλιξη του φλοιού στον πλανήτη αποτελεί ένα ενδιαμέσο παράδειγμα ανάμεσα στους απλούς και αρχαίους φλοιούς του Ερμή και της Σελήνης που επικρατεί ο πρωταρχικός πλανητικός φλοιός και την Γη που ο πρωταρχικός πλανητικός φλοιός της σχεδόν «εξαφανίστηκε» με το χρόνο και δημιουργήθηκαν στη συνέχεια ο δευτερογενής και ο τριτογενής πλανητικός φλοιός της.

Διαιρείται σε δύο πλήρως διαφορετικές γεωλογικές επαρχίες περίπου ημισφαιρικές. Την πιο νότια επαρχία με τους πολλούς κρατήρες, και τους παλαιότερους γεωλογικούς σχηματισμούς, με επιφάνεια που μοιάζει με τις Ορεινές περιοχές της Σελήνης και του Ερμή. Αλλά και τη βόρεια επαρχία με λιγότερους κρατήρες, νεώτερα γεωλογικά πετρώματα, με εκτενείς πεδιάδες, ηφαιστειακές δομές και calderas.

### **Συνοπτικά:**

- 5 αποστολές έχουν μελετήσει την γεωχημεία της επιφάνειας του Άρη.
- Οι 2 τελευταίες αποστολές εξέτασαν την ορυκτολογία των πετρωμάτων και του εδάφους.
- Υπάρχουν πολλές αναλύσεις στα στοιχεία Cr, Ni, Zn, Br.
- Φασματικές παρατηρήσεις δημιουργούν και ορυκτολογικές «αμφιβολίες».
- Μέθοδοι Φασματικής Τηλεπισκόπησης με ακτίνες γάμμα (GRS) εφαρμόστηκαν και «ανέλυσαν» χημικά μεγάλες περιοχές (διάστασης 300km) και βάθη έως 1m.
- Τα στοιχεία που «παράγουν» θερμότητα K, Th μπόρεσαν να υπολογιστούν με ακρίβεια.

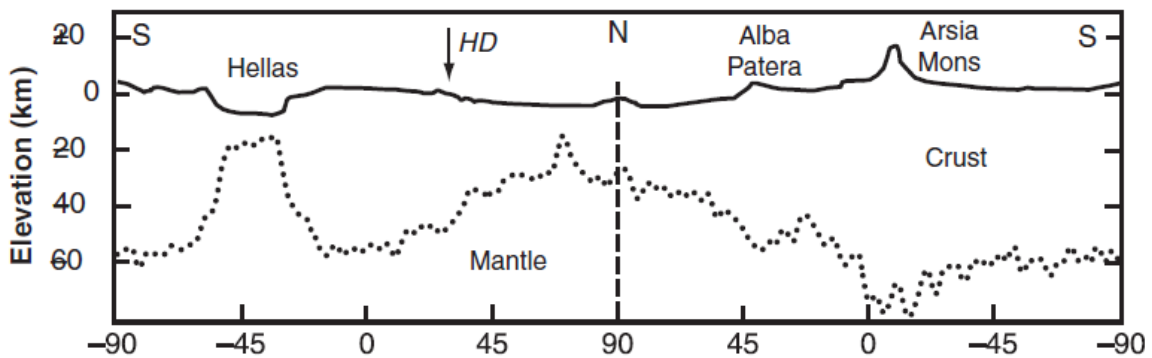
- Μετρήσεις υπάρχουν για Si, Fe, Ca και Al (για τη μοντελοποίηση των πετρολογικών τύπων).
- Μετρήσεις υπάρχουν και για Cl, S (για την ανάλυση επιφανειακών διεργασιών).
- Θερμική Διασκόπηση Υπέρυθρης Ακτινοβολίας βρήκε αρκετά στοιχεία για τα ορυκτά επιφανείας.



Εικόνα 31. Οι γεωλογικές εποχές του Άρη (η κλίμακα σε εκατομμύρια έτη).

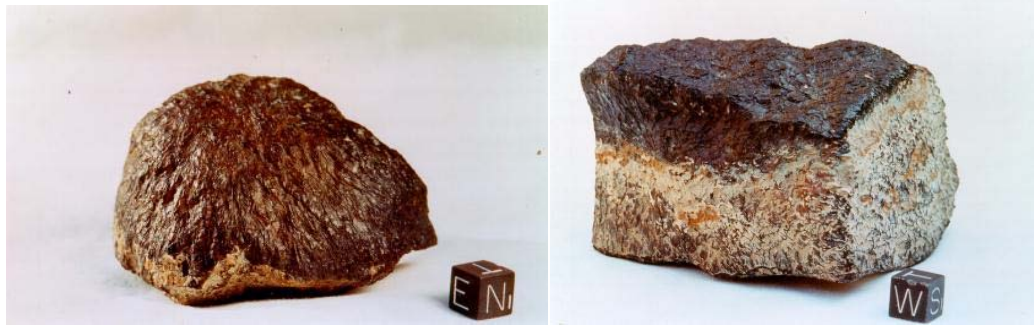
### Διαστάσεις του Πλανητικού Φλοιού

- Η έκταση επιφάνειας  $1.444 \times 10^8 \text{ km}^2$ , περίπου 28,2% της γήινης επιφάνειας, κατά προσέγγιση δηλαδή είναι τα δύο τρίτα του γήινου ηπειρωτικού φλοιού.
- Ο πλανήτης έχει 29,4km εύρος ανάγλυφου με κατώτατο σημείο τη Λεκάνη Σύγκρουσης Hellas (-8,2 km) και υψηλότερο την κορυφή του όρους Olympus Mons (+ 21,2 km).
- Το μέσο πάχος του φλοιού είναι γύρω στα **50km** ενώ κυμαίνεται από 3-92 km, κυρίως όμως 20-70km.
- Ο φλοιός κάτω από τα νότια υψίπεδα είναι παχύτερος κατά 25km από ότι κάτω από τα βόρεια υψίπεδα.
- Ο όγκος του φλοιού είναι  $7,11 \pm 1,68 \times 10^9 \text{ km}^3$ , και πυκνότητα  $3,00 \text{ g/cm}^3$ .
- Με αυτούς τους υπολογισμούς ο φλοιός αποτελεί το  $4,4 \pm 1\%$  του πλανητικού όγκου.

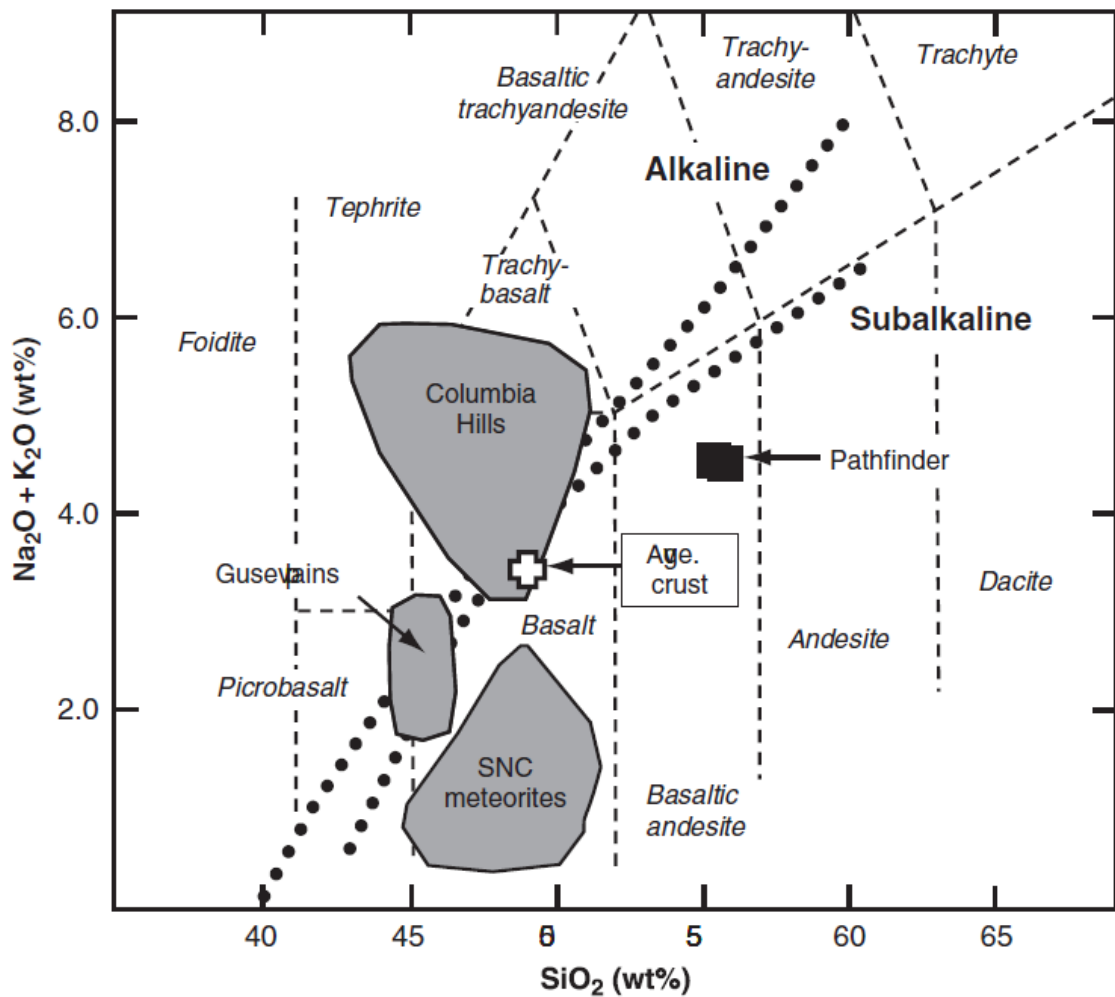


Εικόνα 32. Διακύμανση του πάχους φλοιού στον Άρη κατά μήκος:  $60^\circ\text{A} - 240^\circ\text{A}$ . Εξαιρετικά μικρό πάχος παρατηρείται κάτω από τη Λεκάνη Hellas και πολύ μεγάλο πάχος κάτω από τη Λεκάνη Tharsis κοντά στα όρη Arsia Mons (μήκος 600km).

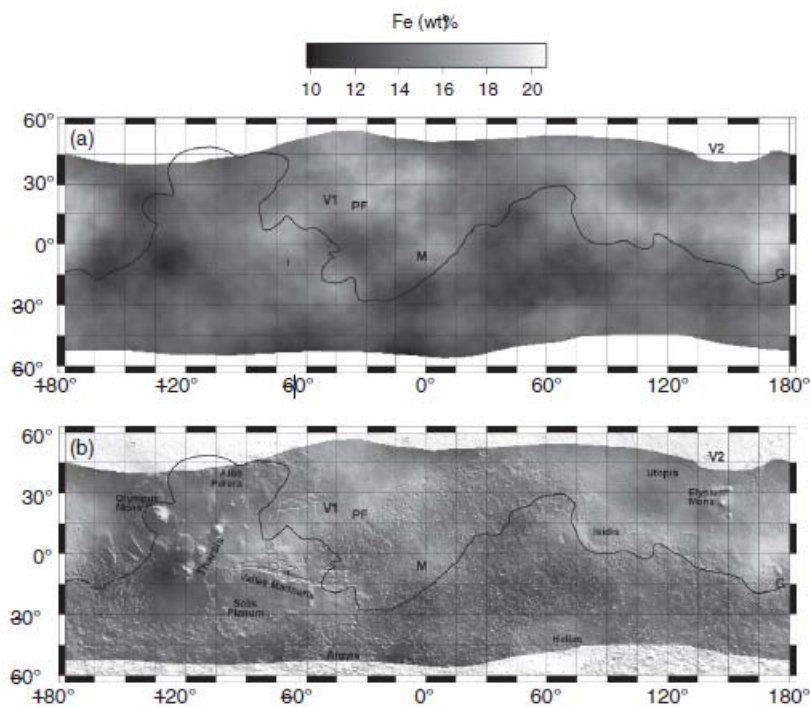
Ο Άρης είναι γενικά ένας βασαλτικός πλανήτης. Όμως με τη γνώση που αποκτήθηκε τελευταία και την ανάλυση των Μετεωριτών που έπεσαν στη Γη με προέλευση τον Άρη, μελετήθηκε καλύτερα για να μην αποδίδεται «απλότητα» στη θέση της «άγνοιας», και η δομή του παρουσιάζει περισσότερη διακύμανση όπως φαίνεται και από την Εικόνα 34.



Εικόνα 33. Μετεωρίτες από τον Άρη



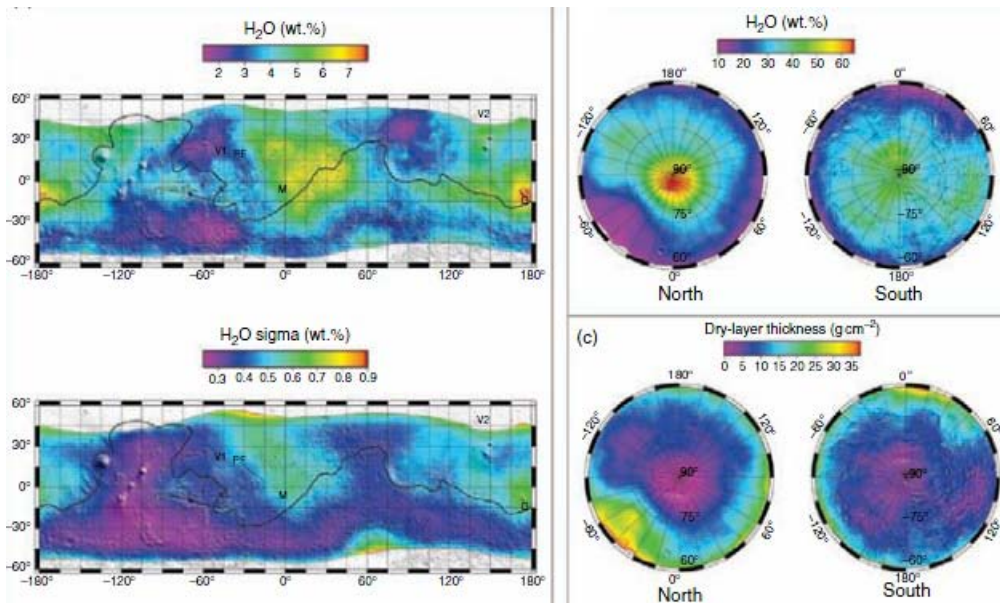
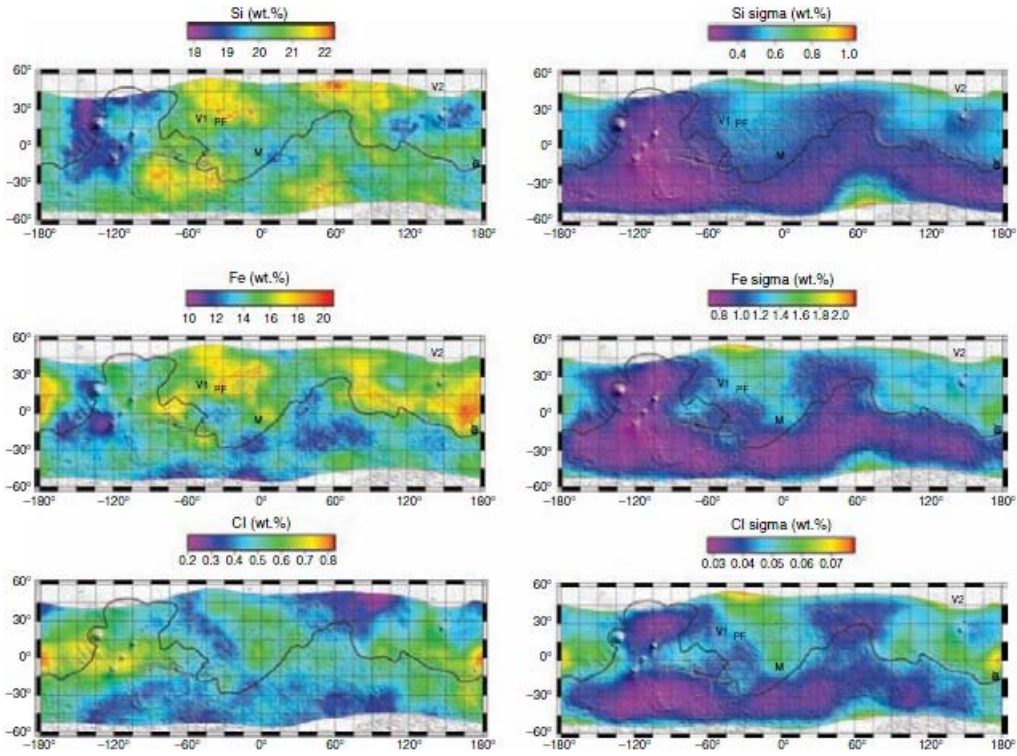
Εικόνα 34. Σχεδιάγραμμα  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  με το  $\text{SiO}_2$  για πυριγενή πετρώματα από τον Άρη Μετεωρίτες SNC, Πυριγενή της περιοχής Gusev plains και Columbia Hills (από Spirit rover), Θειούχα πετρώματα (από Pathfinder). Εστιγμένες γραμμές αναπαριστούν το όρια ανάμεσα στις Αλκαλικές και Υπο-αλκαλικές Ηφαιστειακές σειρές (κυρίως βασαλτικής σύστασης). Επίσης φαίνεται και η υπολογισμένη Μέση Σύσταση του Φλοιού (σταυρός).



Εικόνα 35. Χάρτες κατανομής Fe κοντά στην επιφάνεια με Διασκόπηση Ακτίνων Γάμμα.

(a) Περιεκτικότητες φαίνονται σε τόνους του γκρι. Η μαύρη γραμμή είναι το υψόμετρο=0. Θέσεις προσγείωσης: V1, V2 – Viking 1 and 2 PF –Pathfinder, M– Opportunity at Meridiani Planum; G – Spirit at Gusev Crater. Βόρεια και Νότια παρατηρείται πτώση δεδομένων η οποία συνδέεται με πλούσιες σε νερό περιοχές (ονομάζονται “H-mask”).

(b) Σύνδεση των δεδομένων με την τοπογραφία (από Buck Janes and Bill Boynton).



36. Έγχρωμη αναπαράσταση στοιχειακών συγκεντρώσεων στη ζώνη του Ισημερινού

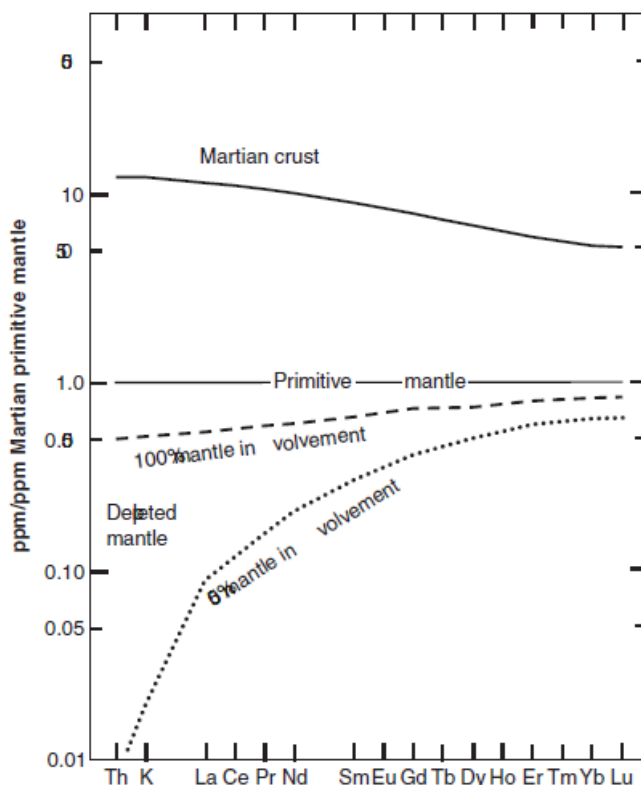
**Πίνακας 6. Γεωχημική σύσταση επιφανειακών ηφαιστειακών και πυροκλαστικών πετρωμάτων από τον Άρη.**

	Gusev plains		Columbia Hills				Home Plate	Meridiani Planum	Pathfinder	
	Adirondack		Wishstone		Backstay		Fastball	Bounce Rock	Shark	
	1	2	1	2	1	2			1	2
SiO <sub>2</sub>	45.7	46.0	43.8	44.6	49.5	50.1	45.3	51.6	54.3	55.1
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.48	2.59	2.64	0.93	0.94	0.67	0.74	0.6	0.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.87	10.94	15.03	15.3	13.25	13.40	7.85	10.48	10.3	10.5
FeO <sub>T</sub>	18.8	18.9	11.6	11.8	13.0	13.1	17.8	14.4	15.2	15.4
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.61	n.d.	–	0.15	0.15	0.49	0.11	0.1	0.1
MnO	0.41	0.41	0.22	0.22	0.24	0.24	0.47	0.40	0.4	0.4
MgO	10.83	10.90	4.50	4.58	8.31	8.40	12.0	6.84	3.7	3.8
CaO	7.75	7.80	8.89	9.05	6.04	6.11	5.80	12.09	8.2	8.3
Na <sub>2</sub> O	2.4	2.4	5.0	5.1	4.15	4.20	2.35	1.66	3.5	3.6
K <sub>2</sub> O	0.07	0.07	0.57	0.58	1.07	1.08	0.23	0.11	1.0	1.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.52	0.52	5.19	5.28	1.39	1.41	0.79	0.92	0.4	0.4
SO <sub>3</sub>	1.23	0.75	2.20	0.75	1.52	0.75	4.63	0.56	1.8	0.75
Cl	0.20	–	0.35	–	0.35	–	1.57	0.35	0.45	–
Σ	99.9	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	100.0	100.3	100.0	100.0
Cr	4175	4200	n.d.	–	1025	1035	3350	750	700	710
Ni	165	166	67	68	191	193	352	81	–	–
Zn	81	82	64	65	269	272	415	38	–	–
Br	14	19	22	–	26	–	370	39	–	–
Ge	–	–	–	–	–	–	70	–	–	–
	Abraded		Abraded		Abraded		As is	Abraded	As is	

## ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΑΡΗ

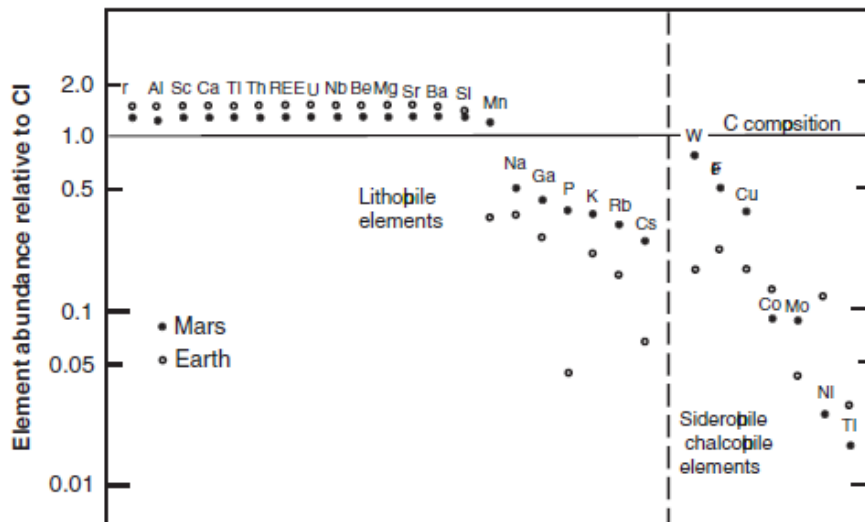
- Το πυριτικό κλάσμα του Άρη είναι εμπλουτισμένο σε Fe και σε μέτριου-πτητικού χαρακτήρα στοιχεία.
- Ο πλανήτης σχηματίστηκε από τη συσσωμάτωση ξεχωριστών σχετικά οξειδωμένων πλανητοειδών.
- Το μικρό του μέγεθος είναι αποτέλεσμα του σχηματισμού του Δία πριν από αυτόν που είχε συνέπεια την μείωση του υλικού του αρχικού νεφελώματος.
- Συνεπώς ανήκει στην ομάδα των «τελευταίων» πλανητών που σχηματίστηκαν (Γή & Αφροδίτη).
- Στοιχεία από Μετεωρίτες προερχόμενους από τον Άρη δείχνουν ότι ο πλανήτης «τήχθηκε» σε μεγάλο τμήμα και διαφοροποιήθηκε σε έναν πλούσιο σε S Πυρήνα, σε έναν πλούσιο σε Fe πυριτικό Μανδύα, ο οποίος «παρήγαγε» ξεχωριστά ισοτοπικά και γεωχημικά reservoirs και Βασαλτικό Φλοιό. Από τα ισότοπα <sup>182</sup>Hf–<sup>182</sup>W αυτό φαίνεται να συνέβη πριν ~15 My αλλά εάν υποθεθεί ότι τα πλανητοειδή είχαν και μεταλλικούς πυρήνες η ηλικία μπορεί να είναι λίγο διαφορετική. Η ηλικία του Άρη υπολογισμένη με τη μέθοδο <sup>146</sup>Sm–<sup>142</sup>Nd φθάνει στα ~ 30–50 My (εκ.έτη).
- Οι περισσότερες γεωλογικές διεργασίες συνέβησαν το πρώτο δεκατομμύριο χρόνια (Εποχές Noachian και Hesperian), αλλά η ηφαιστειότητα συμβαίνει (με κάποιες διακοπές) μέχρι σήμερα.
- Οι Βασαλτικοί Σεργοτίτες είναι προϊόντα νεώτερου μαγματισμού (575–165Myr)
- Η ημισφαιρική διχοτόμηση με πολλούς κρατήρες, παχύτερο και υψηλότερο φλοιό στο Νότιο Μέρος, με χαμηλό λεπτό φλοιό και πεδινές περιοχές στο Βόρειο Μέρος οι οποίες καλύπτονται από λεπτές στρώσεις με ηφαιστειο-ιζηματογενή πετρώματα.
- Τα ιζηματογενή πετρώματα του Άρη παρουσιάζουν δελταϊκή και πυροκλαστική υφή
- Υπάρχουν διαφορετικές απόψεις αλλά και ο Άρης θεωρείται ότι έχει μία λιθοσφαιρική πλάκα. Πιθανά μια γιγαντιαία σύγκρουση να λέπτυνε τον φλοιό της Βόρειας πλευράς.

- Το πιο πιθανό είναι ο πρωταρχικός Μανδύας να ήταν εμπλουτισμένος σε Fe και μέτρια-πτητικά χημικά στοιχεία και συγκρινόμενος με τη Γη περίπου διπλάσιες ποσότητες (υπόθεση στηριγμένη στους μετεωρίτες που βρέθηκαν στη Γη).
- Αρκετή από την επιφάνεια του καλύπτεται από μη-συμπαγοποιημένο έδαφος που δημιουργήθηκε από α)Συγκρούσεις, β)Αιολική δράση και γ) Ιζηματογενείς διεργασίες.
- Το έδαφος του Άρη αποτελείται από ένα μείγμα από:  
1.Υλικό συγκρούσεων 2. Άμμος από Αιολική δράση 3.Χημικά στοιχεία θειούχα άλατα Mg, Ca, Fe και ίσως και Clorides (χλωρίδια). 4.Άμορφο Πυρίτιο 5.Λεπτή σκόνη ανοικτού χρώματος (άγνωστης ορυκτολογίας).
- Η περισσότερη μετα- Noachian Ηφαιστειότητα παρουσιάζεται σε ορισμένες θέσεις μόνο.
- Το οροπέδιο Tharsis, (το μεγαλύτερο κέντρο), είναι περιοχή μαγματισμού σχεδόν σταθερή για 3,5 Gy.
- Η ιστορία του Φλοιού του Άρη αποτυπώνεται μέσα στις αλληπάλληλες εναποθέσεις ηφαιστειακών σειρών και ιζημάτων στην περιοχή Valles Marineris.
- Η μαγματική ποικιλομορφία, και οι συνθετικοί τύποι κυμαίνονται από Υπερβασικούς έως Χαλαζιακούς Δακίτες/Ρυόλιθους. Πολύ κοινά είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε K, βασάλτες ενώ στον κρατήρα Gusev έχουν βρεθεί αλκαλικής περιεκτικότητας ηφαιστειακά πετρώματα ενώ βρέθηκαν και Ανδεσίτες (περιοχή Pathfinder)
- Υπολογίζεται σε 2% τα υλικά στην επιφάνεια του πλανήτη μετεωριτικής προέλευσης.

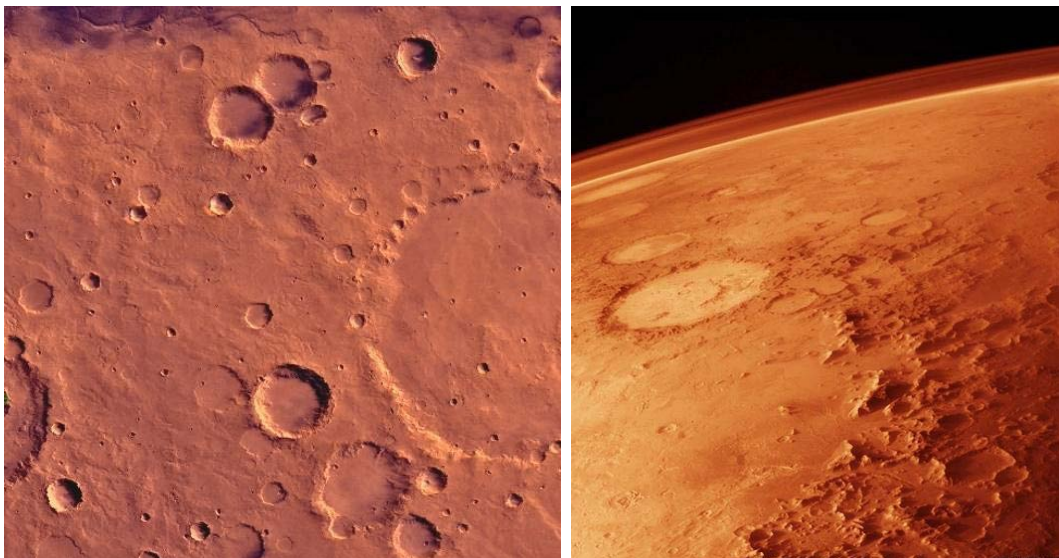


**Εικόνα 37. Τα 2 μοντέλα δημιουργίας του φλοιού από τα Ιχνοστοιχεία του Μανδύα του Άρη. Αρχική Συγκέντρωση (Primitive mantle), και η σύσταση του Φλοιού (Martian Crust). Στο 1<sup>ο</sup> όλος ο μανδύας έλειωσε και επηρέασε τον φλοιό, ενώ στο 2<sup>ο</sup> μόνο το 50% του.**





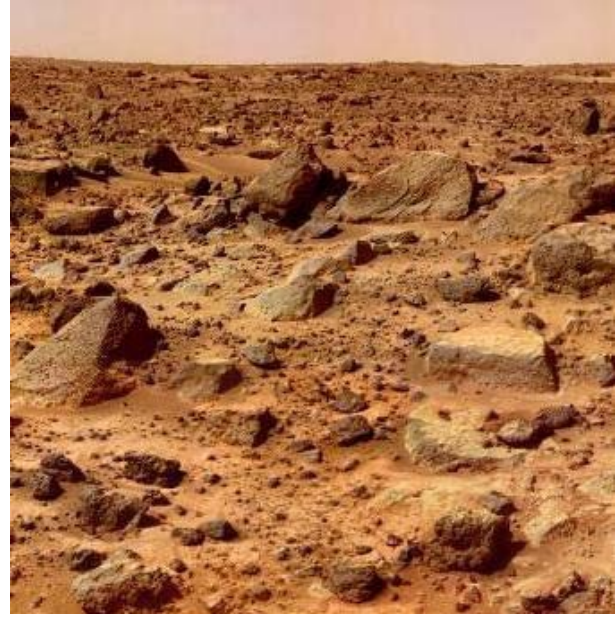
Εικόνα 38. Κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις με CI του πρωταρχικού Μανδύα του Άρη και της Γής. Ο Άρης έχει μικρότερες συγκεντρώσεις σε δύστηκτα λιθόφιλα στοιχεία αλλά λιγότερο μειωμένες συγκεντρώσεις σε πτητικά από ότι στη Γη. Πιθανά τα Χαλκόφιλα και Σιδηρόφιλα στοιχεία στον Άρη να ενσωματώθηκαν στον πυρήνα του.



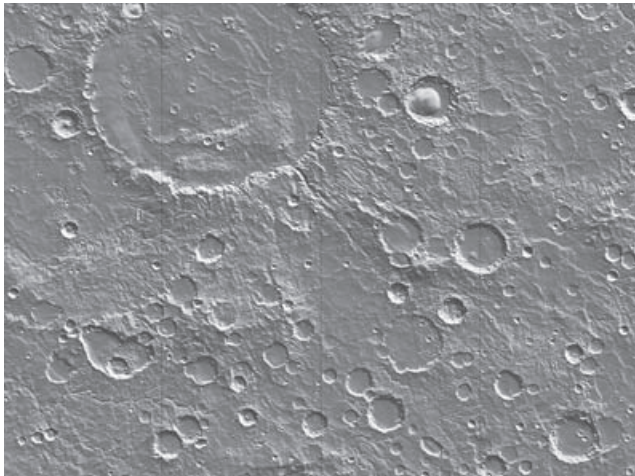
Εικόνα 39. Νότια περιοχή με κρατήρες (α,β)



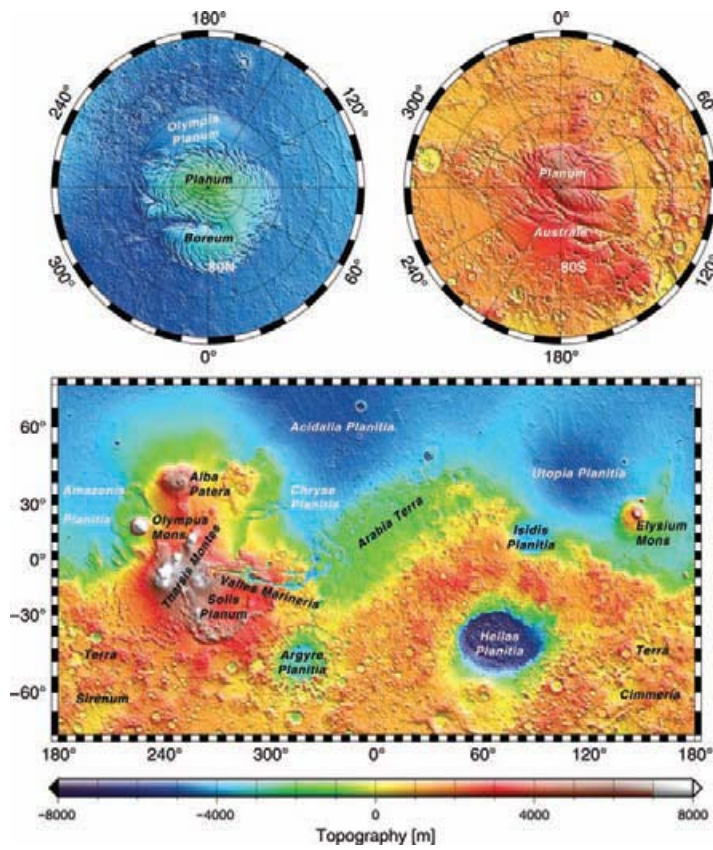
**Εικόνα 40. Κανάλια νερού στον Άρη**



**41. Η επιφάνεια στο σημείο του Pathfinder**



**Εικόνα 42. Πολυάριθμοι κρατήρες Νοτίου μέρους**



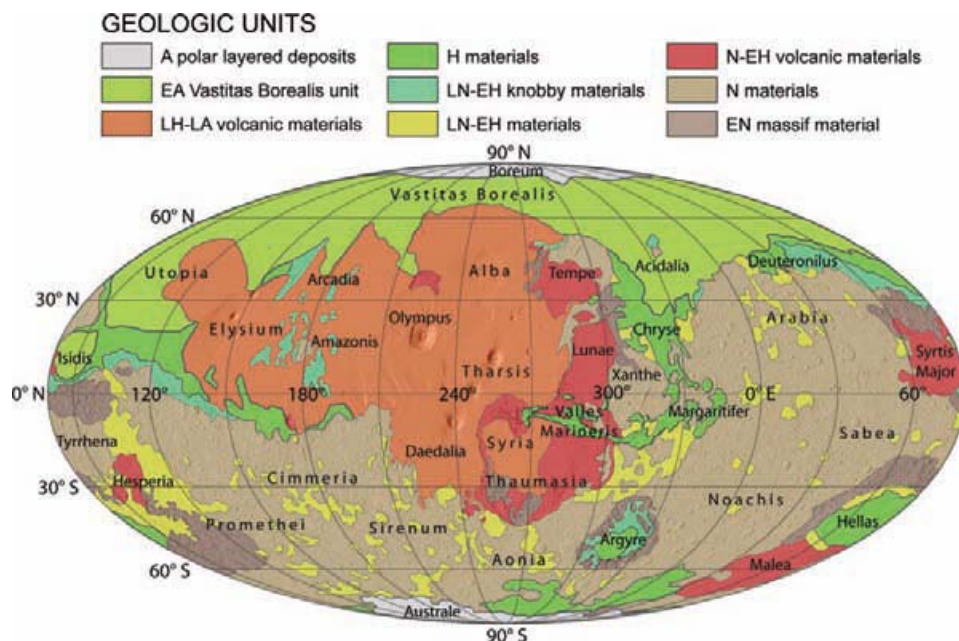
Εικόνα 43. Η διχοτόμηση του φλοιού του Άρη



Εικόνα 44. Ιζηματογενείς σειρές στον Άρη (Meridiani Planum)

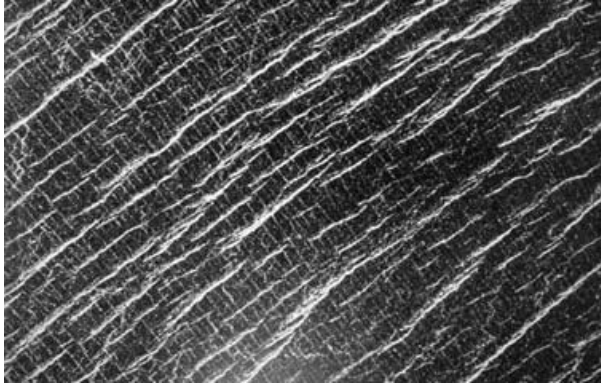
## Πίνακας 7. Αναλύσεις ιζηματογενών πετρωμάτων Άρη

	Meridiani Planum			Columbia Hills		Home Plate	
	Average Burns	Upper Burns	Lower Burns	Peace	Alligator	Posey	Crawfords
	Formation	(Guadalupe)	(Mackenzie)				
SiO <sub>2</sub>	37.1	36.2	43.0	37.3	41.8	45.8	46.6
TiO <sub>2</sub>	0.74	0.65	0.86	0.45	0.53	1.02	1.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.40	5.85	7.27	2.24	5.49	9.39	9.98
FeO <sub>T</sub>	15.6	14.8	15.6	20.4	18.3	15.5	15.4
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.17	0.20	0.75	0.63	0.32	0.34
MnO	0.32	0.30	0.32	0.47	0.33	0.32	0.29
MgO	7.89	8.45	5.43	21.53	16.27	9.56	10.3
CaO	4.98	4.91	4.60	4.90	4.72	6.71	6.74
Na <sub>2</sub> O	1.76	1.66	1.93	n.d.	1.6	3.53	3.36
K <sub>2</sub> O	0.56	0.53	0.69	n.d.	0.19	0.42	0.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.05	0.97	1.15	0.49	0.29	1.38	1.27
SO <sub>3</sub>	22.18	24.91	17.01	10.6	8.48	4.85	2.91
Cl	1.00	0.50	1.90	0.72	1.26	1.96	1.35
Σ	99.8	99.9	100.0	99.9	99.9	100.8	100.0
Cr	1370	1160	1370	5130	4310	2190	2330
Ni	590	589	546	774	506	379	297
Zn	423	324	447	64	205	407	314
Br	100	30	9	71	217	181	91
Ge	–	–	–	–	–	30	30

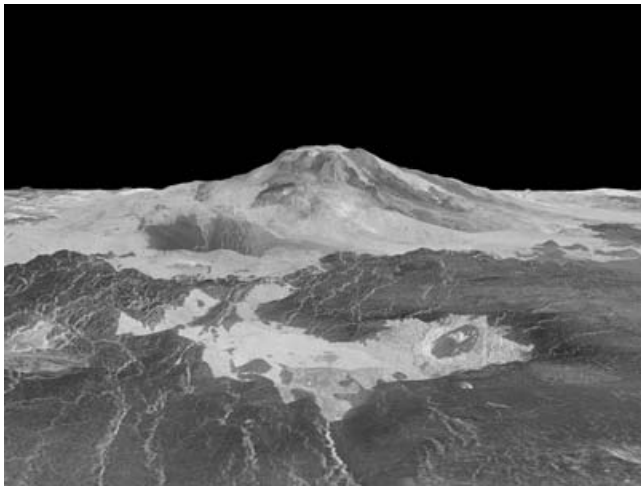


Εικόνα 45. Γεωλογικός Χάρτης Άρη (Symbols: Early and Late (E and L) Noachian, Hesperian, and Amazonian (N, H, and A). (Credit: Nimmo and Tanaka, 2005, Reprinted, with permission, from the Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Volume 33; # 2005.)

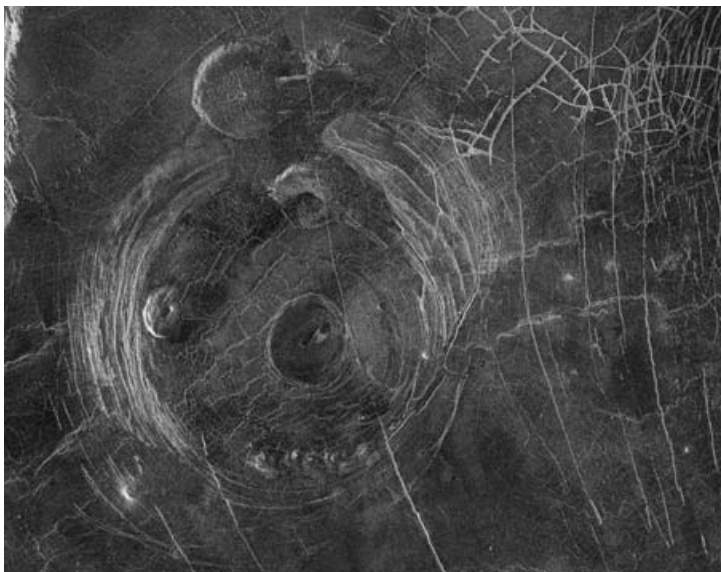
## ΑΦΡΟΔΙΤΗ



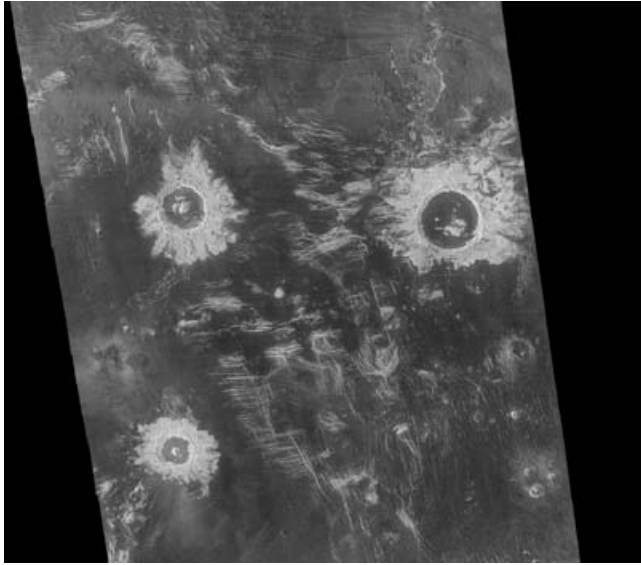
Εικόνα 46. Λείες βασαλτικές πεδιάδες με συστήματα κάθετων ρηγμάτων (περιοχή Lakshmi)



Εικόνα 47. Όρη Maat με ύψος 8km το υψηλότερο ηφαίστειο (0,9B & 194.5A)



Εικόνα 48. Αινη Corona (ένα από τα μικρότερα παραδείγματα), διαμέτρου 200km



**Εικόνα 49 . Τρεις κρατήρες σύγκρουσης με διάμετρο από 37-50km, πάνω σε βασαλτικά πεδία (27N & 339A).**

#### **Αναλυτική Σύνοψη**

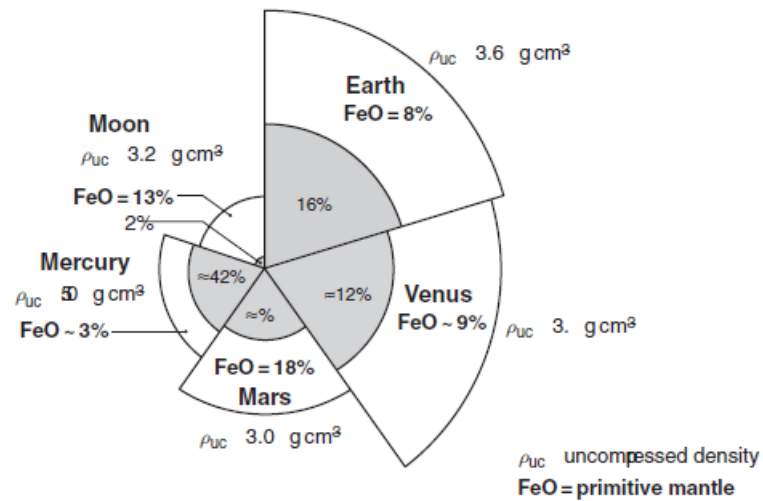
- Η Αφροδίτη έχει παρεμφερή μάζα με τη Γή καθώς και παρόμοια ασυμπίεστη πυκνότητα.
- Πιθανά να έχει και παρεμφερή πετρολογική σύσταση.
- Η ακτίνα της είναι 320km λιγότερη της γης.
- Το πάχος του Φλοιού εκτιμάται στα 30km ενώ η πετρολογική διαφοροποίηση είναι μικρότερη τα Γης (<25%, <sup>40</sup>Ar-<sup>40</sup>K).
- Υπάρχει ισχυρή συσχέτιση της τοπογραφίας και της βαρύτητας. Τα μεγάλα ηφαίστεια στηρίζονται πάνω στον φλοιό και τα πετρώματα του είναι σκληρά λόγω απουσίας νερού.
- Δεν υπάρχουν στοιχεία ύπαρξης λιθοσφαιρικών πλακών και αυτό οφείλεται στο μέγεθος της που βυθίζει το όριο ανάμεσα σε βασάλτες-εκλογίτες πολύ μακριά από την επιφάνεια και την μη ύπαρξης ασθενόσφαιρας (άνω μανδύας), λόγω έλλειψης νερού.
- Το έδαφος αποτελείται από βασαλτικές πεδιάδες που διακόπτονται από μαιανδρικά κανάλια διάβρωσης από ροές λάβας.
- Υπάρχουν πολλά και διαφορετικού μεγέθους ηφαίστεια και «κορόνες» (μέρη αντίστοιχα με θερμές κηλίδες στη γη ή μανδουακών αναδύσεων).
- Δύο περιοχές σε μέγεθος μικρο-ηπείρων (Ishtar και Aphrodite Terrae) διαχωρίστηκαν και ανυψώθηκαν από συμπιεστικές τάσεις ενώ δημιουργήθηκαν παραμορφώσεις σε μεγάλη έκταση (tesserae).
- Κρατήρες έχουν καταγραφεί (940 σύγχρονοι) διάσπαρτοι στην επιφάνεια ενώ η ηλικία του φλοιού πιθανά είναι 750Myr. Οι κρατήρες υπέρκεινται σε ένα δευτερογενή βασαλτικό φλοιό που «εξαφάνισε» τα πετρώματα που σχηματίστηκαν πριν από 750Myr).
- Το 85% της γεωλογικής ιστορίας του πλανήτη είναι ακόμα άγνωστη.
- Οι συγκεντρώσεις σε K, U και Th είναι παρόμοιες της γης ενώ ο φλοιός είναι βασαλτικός με περιστασιακά υψηλότερες τιμές σε αυτά αλλά και σε αλκάλια.

- Δομές σαν «τηγανίτες» οφείλονται σε διαφοροποιήσεις αστριο-πυριτικών ορυκτών μπορεί όμως να οφείλονται και λόγω μεγάλης ατμοσφαιρικής πίεσης (95bar).
- Έχουν μετρηθεί 200 ppm νερού στην ατμόσφαιρα με υψηλό λόγο D/H που πιθανά οφείλεται ή σε πρώιμη ελάττωση ή στους κομήτες. .

**Πίνακας 8. XRF Αναλύσεις της επιφάνειας της Αφροδίτης (USSR)**

Constituent	Venera 8	Venera 9	Venera 10	Venera 13	Venera 14	Vega 1	Vega 2
SiO <sub>2</sub>	–	–	–	45.1±3.0	48.7±3.6	–	45.6±3.2
TiO <sub>2</sub>	–	–	–	1.59±0.45	1.25±0.41	–	0.2±0.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	15.8±3.0	17.9±2.6	–	16.0±1.8
FeO	–	–	–	9.3±2.2	8.8±1.8	–	7.74±1.1
MnO	–	–	–	0.2±0.1	0.16±0.08	–	0.14±0.12
MgO	–	–	–	11.4±6.2	8.1±3.3	–	11.5±3.7
CaO	–	–	–	7.1±0.96	10.3±1.2	–	7.5±0.7
K <sub>2</sub> O	4.8±1.5	0.6±0.1	0.4±0.2	4.0±0.63	0.2±0.07	0.54±0.27	0.48±0.24
S	–	–	–	0.65±0.4	0.35±0.31	–	1.9±0.6
Cl	–	–	–	<0.3	<0.4	–	<0.3
U (ppm)	2.2±0.7	0.6±0.2	0.5±0.3	–	–	0.64±0.47	0.68±0.38
Th (ppm)	6.5±0.2	3.7±0.4	0.7±0.3	–	–	1.5±1.2	2.0±1.0
K	4.0±1.2	0.5±0.07	0.33±0.15	3.3±0.5	0.17±0.05	0.65±0.2	0.40±0.2

## Συγκρίσεις μεταξύ των εσωτερικών πλανητών



Εικόνα 50. Σύνθεση Πλανητικών φλοιών και Μανδύων στους εσωτερικούς πλανήτες

	Πρωτογενής Φλοιός	Δευτερογενής Φλοιός	Τριτογενής Φλοιός	Λιθοσφαιρ. Πλάκες
Ερμής	X	?	-	-
Αφροδίτη	-	X	-	-
Γη	-	X	X	X
Σελήνη	X	X	-	-
Άρης	X	X	-	-

Εικόνα 51. Σύνοψη ειδών Πλανητικών φλοιών



Εικόνα 52. Ροή Βασαλτικής λάβας





Εικόνα 53. Βασάλτης στερεοποιημένος

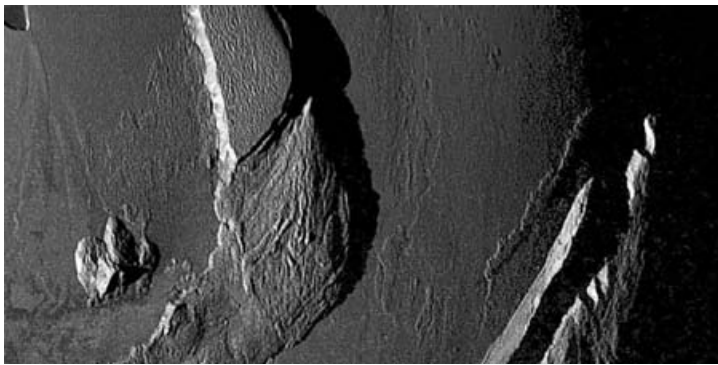
### Πίνακας 9. Βασικών Χαρακτηριστικών Βασάλτη στη Γη.

Χημική σύσταση	$\text{SiO}_2$ $\text{TiO}_2$ $\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{FeO}$ $\text{MgO}$ $\text{CaO}$ $\text{Na}_2\text{O}$ $\text{K}_2\text{O}$
<b>Πλαγιόκλαστα</b>	Τα πλαγιόκλαστα αποτελούν ένα από τα κύρια ορυκτά του βασάλτη. Εμφανίζονται και ως φαινοκρύσταλλοι και ως δοκίδες στην κύρια μάζα. Οι φαινοκρύσταλλοι των πλαγιοκλάστων έχουν, συνήθως, σύσταση από βυτοβνίτη έως λαβραδόριο και, συνήθως, παρουσιάζουν ζώνωση. Τα πλαγιόκλαστα της κύριας μάζας έχουν σύσταση λαβραδορίου και βρίσκονται προσανατολισμένα κατά τη διεύθυνση ροής της λάβας (ρευστική υφή).
<b>Πυρόξενοι</b>	Οι πυρόξενοι μαζί με τα πλαγιόκλαστα αποτελούν τα κύρια ορυκτά του βασάλτη. Εμφανίζονται τόσο ως φαινοκρύσταλλοι όσο και ως συστατικό της κύριας μάζας. Η σύσταση του πυροξένου στους βασάλτες είναι, κυρίως, αυγίτη, εξαρτάται, όμως, από το είδος του βασάλτη (θολειτικός βασάλτης ή ασβεσταλκαλικός βασάλτης).
<b>Ολιβίνης</b>	Στους θολειτικούς βασάλτες ο ολιβίνης ή απουσιάζει ή εμφανίζεται σε πολύ μικρή ποσότητα. Στους θολειτικούς ολιβινικούς βασάλτες ο ολιβίνης αποτελεί κύριο ορυκτολογικό συστατικό. Στους αλκαλικούς βασάλτες ο ολιβίνης αποτελεί το δεύτερο κύριο ορυκτολογικό συστατικό. Οι κρύσταλλοι του ολιβίνη παρουσιάζονται, συχνά, εξαλλοιωμένοι σε σερπεντίνη.
	Στη λεπτή τομή του εργαστηρίου υπάρχουν διάσπαρτοι μικροί κόκκοι ολιβίνη στην κύρια μάζα του πετρώματος, συχνά εξαλλοιωμένοι.
<b>Δευτερεύοντα ορυκτά</b>	
<b>Αδιαφανή</b>	Ο μαγνητίτης και ο ιλμενίτης αποτελούν τα κύρια σιδηροξείδια των βασάλτικών πετρωμάτων. Σχηματίζουν συνήθως μικρούς κόκκους στην κύρια μάζα.

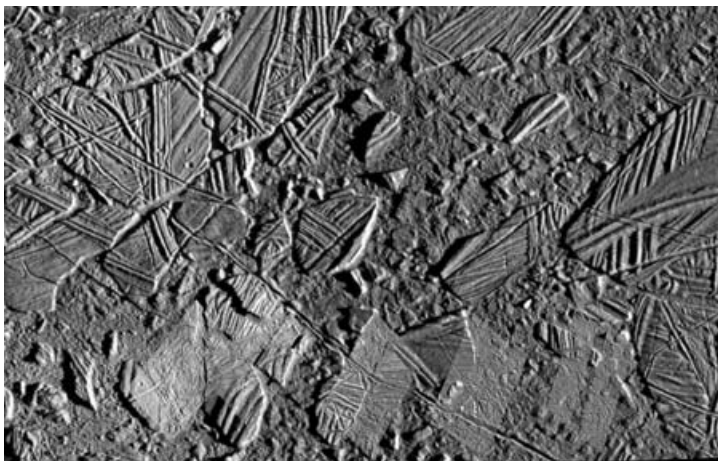
## ΦΛΟΙΟΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΩΝ ΟΥΡΑΝΙΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ



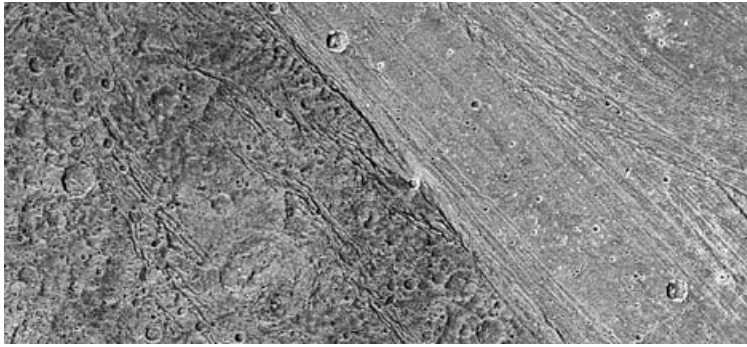
Εικόνα 54 . Σημείο προσγείωσης NEAR στον Έρωσ.  
Near Earth Asteroid Rendezvous (Αποστολή Shoemaker).



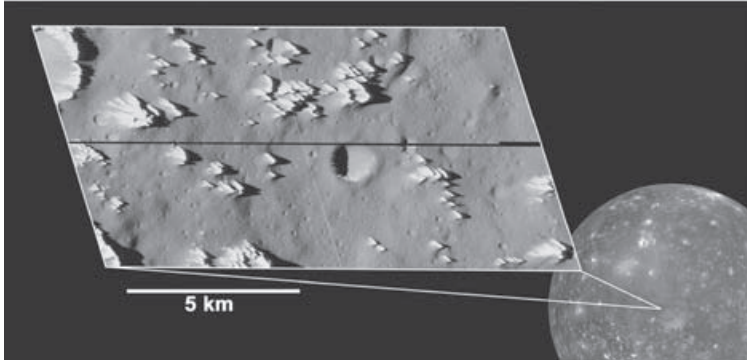
Εικόνα 55. Όρη οριοθετημένα με ρήγματα στην Ιώ (αριστερά ύψος 4km, θέαση 210-110km).



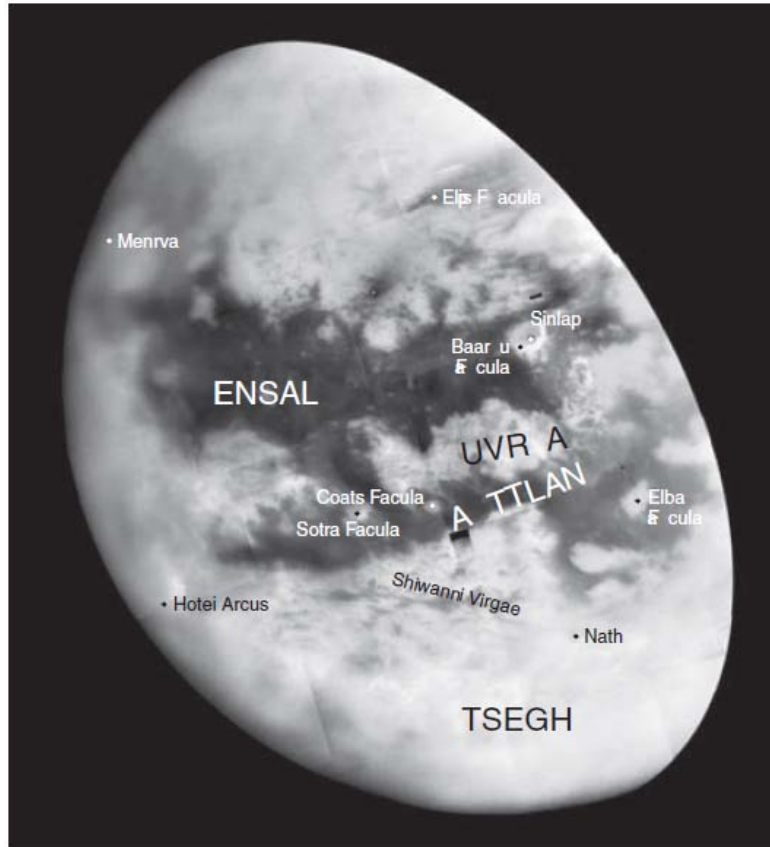
Εικόνα 56. Χαοτικές? Επιφάνεια στην Ευρώπη.



**Εικόνα 57. Αντίθεση ανοιχτών και σκούρων περιοχών στην επιφάνεια του Γανυμήδη.**



**Εικόνα 58. Κρατήρες στο έδαφος της Καλλιστώς.**



**Εικόνα 59. Η επιφάνεια του Τιτάνα με ονόματα. Περιοχής διάβρωσης (φωτεινές), και χαμηλού αναγλύφου (σκουρόχρωμες).**

*“So the formation of the Earth was “not” essentially accidental”  
 Η δημιουργία της Γης «δεν» ήταν τυχαία.....*

**Π.Μ.**

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bannerdt, W. B. (1997) Plains tectonics on Venus, in Venus II (eds. S.W. Bougher et al.), University of Arizona Press, pp. 901–30.
- Basilevsky, A. T. and Head, J.W. (1996) Evidence for rapid and widespread emplacement of volcanic plains on Venus: Stratigraphic studies in the Baltis Vallis region. *GRL* 23, 1497–500.
- Basilevsky, A. T. et al. (1997) The resurfacing history of Venus, in Venus II (eds. S.W. Bougher et al.), University of Arizona Press, p. 1078.
- Benz, W. et al. (1988) Collisional stripping of Mercury's mantle. *Icarus* 74, 516–28.
- Bertka, C. M. and Fei, Y. (1998) Implications of Mars Pathfinder data for the accretion history of the terrestrial planets. *Nature* 281, 1838–40.
- Blichert-Toft, J. et al. (1999) The Lu–Hf isotope geochemistry of shergottites and the evolution of the Martian mantle–crust system. *EPSL* 173, 25–39.
- Breuer, D. et al. (1998) Three dimensional models of Martian mantle convection with phase transitions. *GRL* 25, 229–32.
- Canup, R. and Asphaug, E. (2001) Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature* 412, 708–12.
- Canup, R. M. (2004) Dynamics of lunar formation. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 42, 441–75.
- Carr, M.H. (2006) *The Surface of Mars*, Cambridge University Press.
- Chambers, J. E. (2004). Planetary accretion in the inner solar system. *EPSL* 223, 241–52;
- Fegley, B. and Cameron, A. G.W. (1987) A vaporization model for iron/silicate fractionation in the Mercury protoplanet. *EPSL* 82, 207–22.
- Fielder, G. H. (1961) *Structure of the Moon's Surface*, Pergamon Press.
- Filiberto, J. et al. (2006) The Mars/Earth dichotomy in Mg/Si and Al/Si ratios: Is it real? *Am. Mineral.* 91, 71–4.
- Goldschmidt, V. M. (1954) *Geochemistry*, Oxford University Press, ch. 2.
- Gomes, R. et al. (2005) Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature* 435, 466–9.
- Grieve, R. A. F. (1998) in *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects* (eds. M. M. Grady et al.), Geological Society of London Special Publication 140, p. 120.
- Grindrod, P. M. et al. (2006) The geological evolution of Altai Mons, Venus: Avolcanocorona 'hybrid'. *J. Geol. Soc. London* 163, 265–75
- Guest, J. E. (1988) Stratigraphy and geologic history of Mercury, in *Mercury* (eds. F. Vilas et al.), University of Arizona Press, p. 139.
- Haisch, K. E. et al. (2001) Disk frequencies and lifetimes in young clusters *Astrophys. J.* 553, L153–6.
- Halliday, A.N. and Kleine, T. (2006) Meteorites and the timing, mechanisms and conditions of terrestrial planet accretion and early differentiation, in *Meteorites and the Early Solar System II* (eds. D. S. Lauretta and H.Y. McSween), University of Arizona Press, pp. 775–801.
- Halliday, A.N. and Kleine, T. (2006) Meteorites and the timing, mechanisms and conditions of terrestrial planet accretion and early differentiation, in *Meteorites and the Early Solar System II* (eds. D. S. Lauretta and H.Y. McSween), University of Arizona Press, pp. 775–801.
- Hapke, B. (2001) Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *JGR* 106, 10,039–73.
- Hartmann, W. K. (2003) Megaregolith evolution and cratering cataclysm models –Lunar cataclysm as a misconception (28 years later). *MPS* 38, 579–93.
- Hartmann, W. K. and Barlow, N.G. (2006) Nature of the Martian uplands: Effect on Martian meteorite age distribution and secondary cratering. *MPS* 41, 1453–67.
- Jacobsen, S. (2005) The Hf–W isotopic system and the origin of the Earth and Moon. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 531–70.
- Jacobsen, S. B. (2005) The isotopic system and the origin of the Earth and Moon. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 531–70.

- Khan, A. et al. (2000) A new seismic velocity model for the Moon from a Monte Carlo inversion of the Apollo lunar seismic data. *GRL* 27, 1591–8.
- Khan, A. et al. (2004) Does the Moon possess a molten core? Probing the deep lunar interior using results from LLR and Lunar Prospector. *JGR* 109, doi: 10.1029/2004JE002294
- Kleine, T. et al. (2005) Hf–W chronometry and the age and early differentiation of the Moon. *Science* 310, 1671–4.
- Koeberl, C. (1986) Geochemistry of tektites and impact glasses. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 14, 323–50.
- Kring, D. A. and Cohen, B.A. (2002) Cataclysmic bombardment throughout the inner solar system. *JGR* 107, doi: 1029/2001JE001529.
- Levison, H. et al. (1998) Modeling the diversity of outer planetary systems. *Astron. J.* 116, 1998–2014.
- Lissauer, J. J. (1999) Chaotic motion in the solar system. *Rev. Modern Phys.* 71, 835–45.
- Canup, R. and Agnor, C. B. (2000) Accretion of the terrestrial planets and the Earth–Moon system, in *Origin of the Earth and Moon* (eds. R. Canup and K. Righter), University of Arizona Press, p. 113.
- Lunine, J. I. et al. (2004) The origin of Jupiter, in *Jupiter* (eds. F. Bagenal et al.), Cambridge University Press, pp. 19–34.
- Lunine, J. L. (2006). Origin of water ice in the solar system, in *Meteorites and the Early Solar System II* (eds. D. S. Lauretta and H.Y. McSween), University of Arizona Press, pp. 309–319.
- Luu, J.X. and Jewitt, D. C. (2002) Kuiper Belt objects: Relics from the accretion disk of the Sun. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 40, 63–101.
- McKinnon, W. B. et al. (1997) Cratering on Venus: Models and observations in *Venus II* (eds. S.W. Bougher et al.), University of Arizona Press, pp. 969–1014.
- McLennan, S.M. and Grotzinger, J. P. (2008) The sedimentary rock cycle of Mars, in *The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties* (ed. J. F. Bell III), Cambridge University Press, pp. 541–77.
- McSween, H.Y. (2003) Mars, in *Treatise on Geochemistry* (eds. H. D. Holland and K. K. Turekian) vol. 1, 601–21.
- McSween, H.Y. et al. (2003) Constraints on the composition and petrogenesis of the martian crust. *JGR* 108, doi: 10.1029/2003JE002175.
- McWilliam, A. (1997) Abundance ratios and galactic chemical evolution. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 35, 503–56.
- Neukum, G. et al. (2001) Geologic evolution and cratering history of Mercury. *Planet. Space Sci.* 49, 1507–21.
- Nimmo, F. and McKenzie, D. (1998) Volcanism and tectonics on Venus. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 26, 23–51.
- Nimmo, F. and Tanaka, K. (2005) Early crustal evolution of Mars. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 133–61.
- Norman, M. D. et al. (2003) Chronology, geochemistry, and petrology of a ferroan noritic anorthosite clast from Descartes breccia 67215: Clues to the age, origin, structure, and impact history of the lunar crust. *MPS* 38, 645–61.
- Raymond, S. N. (2006) High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus* 183, 265–82.
- Raymond, S.N. et al. (2007) High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets 2: Water delivery and planetary habitability. *Astrobiol.* 7, 66–84.
- Righter, K. et al. (2006) Compositional relationships between meteorites and terrestrial planets, in *Meteorites and the Early Solar System II* (eds. D. S. Lauretta and H.Y. McSween), University of Arizona Press, pp. 803–28.
- Ryder, G. (1990) Lunar samples, lunar accretion and the early bombardment of the Moon. *EOS* 71, 322–3.

- Shearer, C. K. et al. (2006) Thermal and magmatic evolution of the Moon, in *New Views of the Moon* (eds. B. Jolliff et al.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 60, pp. 365–518.
- Shoemaker, E. M. and Hackman, R. J. (1962) Stratigraphic basis for a lunar time scale in *The Moon* (eds. Z. Kopal and Z. K. Mikhailov), Academic Press, pp. 289–300.
- Sleep, N. H. (1994) Martian plate tectonics. *JGR* 99, 5639–55. Sleep, N. H. (2000) Evolution of the mode of convection within terrestrial planets. *JGR* 105, 17563–78.
- Smith, D. E. et al. (1997) Topography of the Moon from the Clementine LIDAR. *JGR* 102, 1591–612.
- Spohn, T. et al. (2001) Geophysical constraints on the evolution of Mars. *Space Sci. Rev.* 96, 231–62.
- Spohn, T. et al. (2001) The interior structure of Mercury. *Planet. Space Sci.* 49, 1561–70.
- Squyres, S.W. et al. (1992) Ice in the martian regolith, in *Mars* (eds. H. H. Kieffer et al.), University of Arizona Press, pp. 523–54.
- Stofan, E. R. (1997) Coronae on Venus: Morphology and origin, in *Venus II* (eds. S.W. Bougher et al.), University of Arizona Press, pp. 931–65.
- Stofan, E. R. et al. (2000) Emplacement and composition of steep-sided domes on Venus. *JGR* 105, 26,757–71.
- Stofan, E. R. et al. (2001) Preliminary analysis of an expanded corona database for Venus. *GRL* 28, 4267–70.
- Stöffler, D. et al. (2006) Cratering history and lunar chronology, in *New Views of the Moon* (eds. B. Jolliff et al.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 60, pp. 519–96.
- Taylor, S. R. and Koeberl, C. (1994) The origin of tektites. *Meteoritics* 29, 739–44.
- Taylor, S. R. (1989) Growth of planetary crusts. *Tectonophysics* 161, 147–56.
- Taylor, S. R. (1994) Large scale basaltic volcanism on the Moon, Mars and Venus, in *Volcanism Radhakrishna Vol.* (ed. K.V. Subbarao), Wiley Eastern, pp. 2–20.
- Taylor, S.R. and Norman, M. D. (1990) Accretion of differentiated planetesimals to the Earth, in *Origin of the Earth* (eds. H. E. Newsom and J. H. Jones), Oxford University Press, pp. 29–43.
- Thommes, E.W. et al. (2002) The formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn. *Astron. J.* 121, 2862–83.
- Van Thienen, P. et al. (2006) A top-down origin for martian mantle plumes. *Icarus* 185, 197–210.
- Walker, D. and Hays, J. F. (1977) Plagioclase flotation and lunar crust formation. *Geology* 5, 425–8.
- Wänke, H. and Dreibus, G. (1988). Chemical composition and accretion history of the terrestrial planets. *Phil. Trans. Royal Soc. London A325*, 545–57.
- Warren, P. H. (1986) Anorthosite assimilation and the origin of the Mg/Fe related bimodality of pristine lunar rocks. *JGR* 91, D331–43.
- Watters, T. R. et al. (2007) Hemispheres apart: The crustal dichotomy on Mars. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 35, 621–52.
- Wieczorek, M. A. and Phillips, R. J. (1997) The structure and compensation of the lunar highland crust. *JGR* 102, 10,933–43.
- Wieczorek, M. A. and Zuber, M. T. (2001) The composition and origin of the lunar crust: Constraints from central peaks and crustal thickness modeling. *GRL* 28, 4023–6.
- Wieczorek, M. A. and Zuber, M. T. (2001) The composition and origin of the lunar crust: Constraints from central peaks and crustal thickness modeling. *GRL* 28, 4023–6.
- Wilhelms, D. E. (1970) *Summary of Lunar Stratigraphy – Telescopic Observations*, US Geological Society Professional Paper 599F, p. 27.
- Wilhelms, D. E. (1987) *The Geologic History of the Moon*, US Geological Survey Professional Paper 1348.