

Ταξιδεύοντας προς τη ΣΕΛΗΝΗ...

εισαγωγή στη γεωλογία της Σελήνης και διαστημικές αποστολές

Δρ. Όλγα Συκιώτη
Κύρια Ερευνήτρια

*Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών
Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης
Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών*



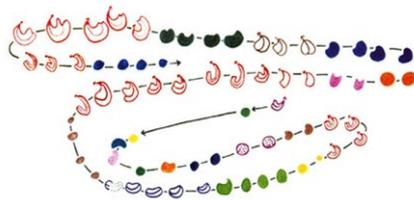
Σελήνη, ή Δωρ. σελάνα (σέλας=φως), Αιολ. σελάννα ή Μην, Λατ. Luna

Κατά τη Θεογονία του Ησιόδου, κόρη του Τιτάνα Υπερίωνα και της Τιτανίδας Θείας (ή Ευρυφάεσσα ή Ευρυφάτεια). Αδελφή της Ηούς (Αυγής) και του Ήλιου.

(Πηγή: wikipedia)

Λατρεία σε σχεδόν όλον τον ελληνικό χώρο και ιδιαίτερα στην αρχαία Σπάρτη, στο μαντείο της Πασιφάης στις Αρχαίες Θαλάμεις.

Αρτεμις, Αστάρτη, Εκάτη (Ελλάδα), Losna (Ετρούσκοι), Thoth, Iah & Khonsu (Αίγυπτος), Kaskuh (Χετταίοι), Men (Φρύγες), Aglibol (Συρία, Παλμύρα), **Luna** (Ρώμη), Μάνι (Σκανδιναβική μυθολογία), Abuk/Amesemi/Gieti/Mawu (Αφρική), **Anningan** (Inuit spirit), Komorkis (Blackfoot goddess) Som/Nishakara/**Chandra** (Ινδία), Changxi/Changyi/**Chang'e** (Κίνα), Devi Ratih (Ιάβα, Ινδονησία), Tsukuyomi-no-Mikoto (Shinto, Ιαπωνία) κλπ ...



Το αρχαιότερο σεληνιακό ημερολόγιο, 32.000 π.Χ
Blanchard calendar bone, Grotte d' Aurignac (47000-41000 BC)

Σε οστό ζώου για εύκολη μεταφορά

Οφιοειδή σχήματα: πιθανή σύνδεση με θεότητα ή ρυάκια/ποτάμια
(Πηγή: <https://sservi.nasa.gov/articles/oldest-lunar-calendars/>)

Η Σελήνη σαγηνεύει τον άνθρωπο εδώ και χιλιετίες ...

1) Pasachoff J.M. & Olson, R., **Depictions of the Moon in Western Visual Culture**, *Planetary Science*, 2019.

2) <https://sservi.nasa.gov/articles/oldest-lunar-calendars/>



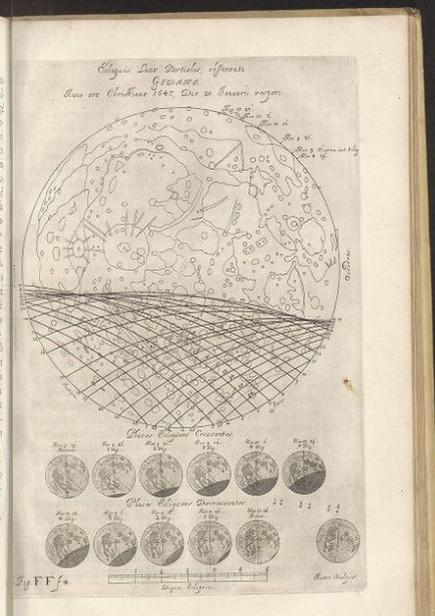
Ο θεός Chandra, 1700-1725 μ.Χ
Udaipur (Rajasthan, India), Folio from Book of Dreams



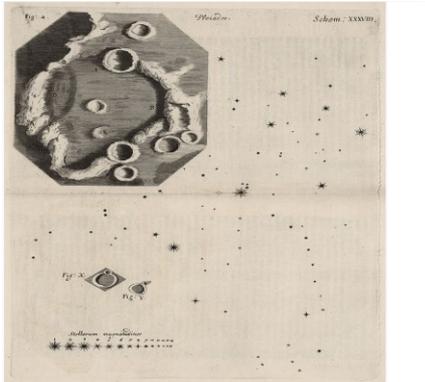
Σεληνιακό ημερολόγιο 17.000 π.Χ.,
Grotte de Lascaux, παλαιολιθική τοιχογραφία



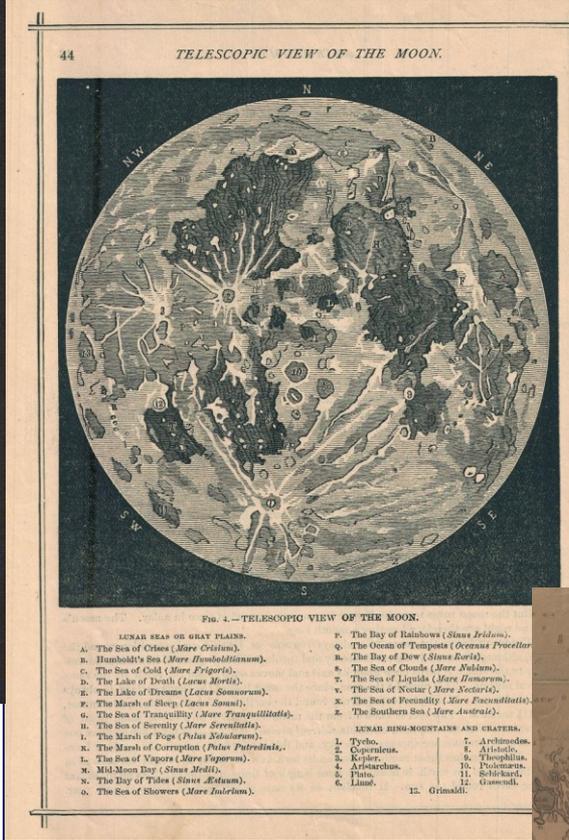
The Moon, Galileo Galilei, 1609.
 Credit: Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze



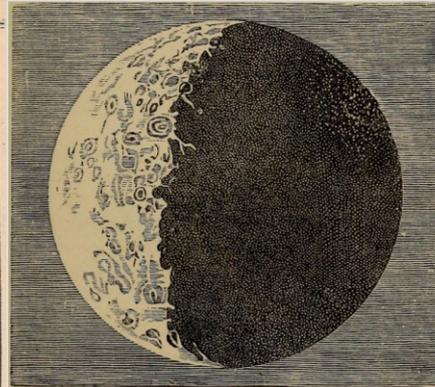
Selenographia, sive, Lunæ Map,
 Johannes Hevelius, 1647.



Μελέτη της Σελήνης ("Micrographia"),
 Robert Hooke, 1665.



Σχέδιο της Σελήνης από τηλεσκόπιο, 1870.



Σχέδιο της Σελήνης από
 τηλεσκόπιο, 1868.



Αναλυτικός χάρτης της Σελήνης από τον Johann Friedrich Julius Schmidt, 1878.
 (αντίγραφο των 25 τμημάτων στο Μουσείο Γεωαστροφυσικής στο ΕΑΑ)



"A Trip to the Moon"
(Georges Melies, 1902)

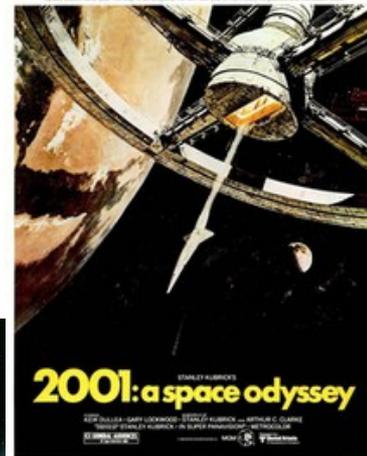


"Frau im Mond" (Fritz Lang, 1929)



"Destination Moon" (George Pal, 1950)

An epic drama of
adventure and exploration



"2001: Space Odyssey"
(Stanley Kubrick, 1968)



"Ad Astra" (James Gray, 2019)

Ως τη σύγχρονη τέχνη...



"Alita Battle Angel"
(Robert Rodriguez, 2019)



Two Men Contemplating the Moon,
Caspar David Friedrich (1819)



*Simultaneous Contrasts
Sun and Moon*,
Robert Delaunay (1913)



The Dark Side of the Moon
(Pink Floyd, 1973)

Από τη Γη στη Σελήνη
(Jules Verne, 1865)

Περιεχόμενα

1

Γενικά

2

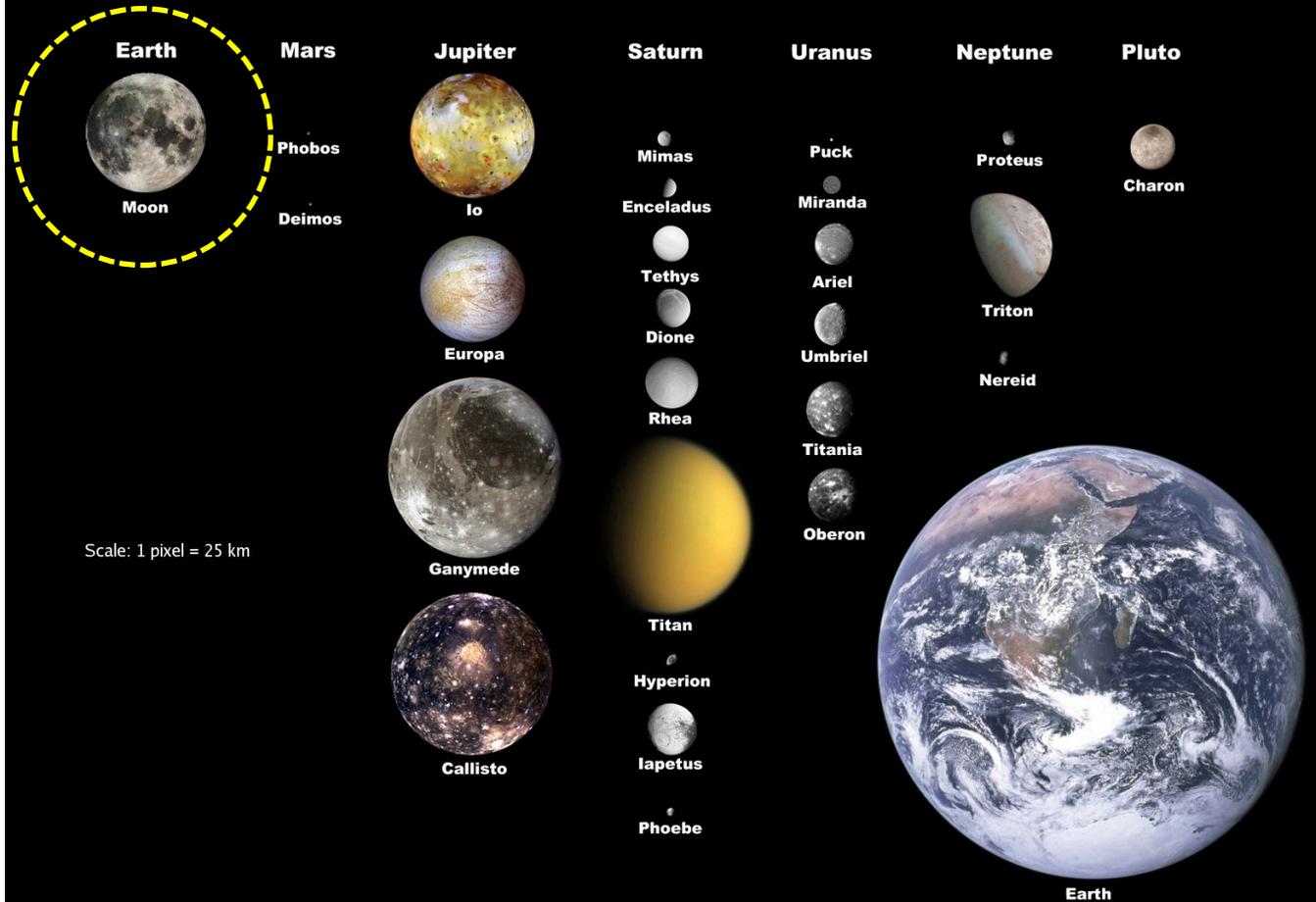
- Από την ατμόσφαιρα στον πυρήνα
- Νερό
- Φυσικοί πόροι

3

Διαστημικές αποστολές

1. Γενικά

Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale



✓ Ο μοναδικός φυσικός δορυφόρος της Γης

✓ Μαζί με Γανυμήδη, Καλλιστώ, Ιώ και Τιτάνα οι μεγαλύτεροι φυσικοί δορυφόροι στο Ηλιακό Σύστημα

✓ Η Αφροδίτη και ο Ερμής δεν έχουν δορυφόρους

✓ Μετά την Ιώ, ο δορυφόρος με τη μεγαλύτερη πυκνότητα

Απόσταση: ~385.000km
Διάμετρος: 1/4 της γης
Πυκνότητα: ~ 3.3 g/cm³ (≅ μανδύας Γης) <-> Γη 5.51g/cm³
Όγκος: 50x < Γης
Βαρύτητα: 1/6 Γης
 (Γη 60kg → Σελήνη 10kg)

- δεν εκπέμπει δικό της φως
- ανακλά το φως του Ήλιου
- αν και φαίνεται φωτεινή, είναι πολύ σκοτεινή (π.χ. άσφαλτος) (λευκαύγεια= 0.12 <-> Γη=0.39)

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ -233C° +123C°

➤ Περίοδος περιφοράς ως προς τον Ήλιο ~29,53 ημέρες (συνοδικός μήνας)

➤ Τροχιά: σχεδόν κυκλική έλλειψη κοντά στο εκλειπτικό επίπεδο (αντί του ισημερινού επιπέδου της Γης)

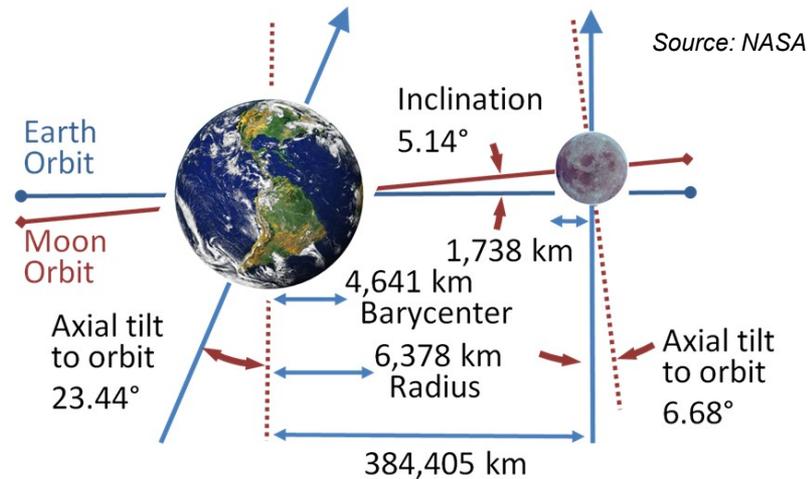
➤ Κλίση τροχιακού επιπέδου της Σελήνης ~5,1° σε σχέση με το εκλειπτικό επίπεδο.

➤ Βαρύτητα και παλιρροϊκές δυνάμεις επιβραδύνουν την περιστροφή της Γης → αυξάνεται η απόσταση

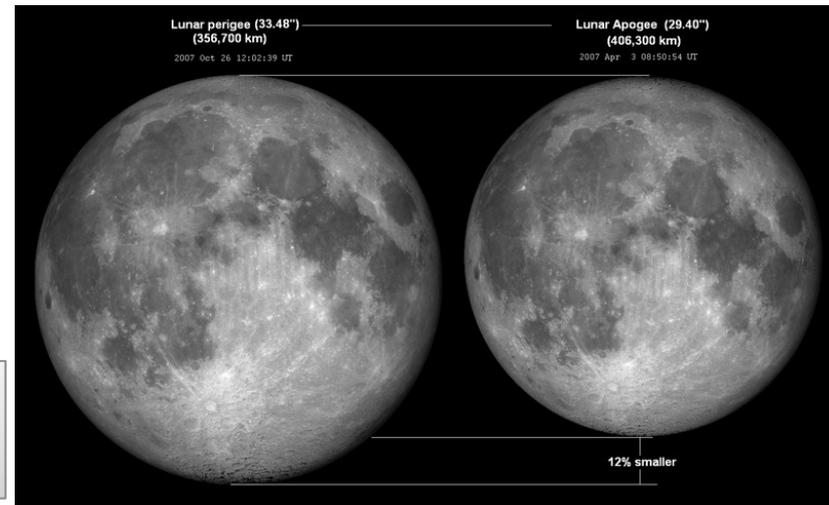
⇒ Η Σελήνη απομακρύνεται από τη Γη κατά ~4 cm/έτος

ΜΟΝΙΜΑ ΘΕΑΤΗ-ΑΘΕΑΤΗ ΠΛΕΥΡΑ

Αιτία: ίδιος ρυθμός χρόνος περιστροφής γύρω από τον άξονά της και γύρω από τη Γη (29.5 μέρες)



Τροχιακή κλίση — η τροχιά της Σελήνης έχει κλίση 5,14 ° προς τη εκλειπτική.



ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ: Γιγάντια σύγκρουση

Χρονολόγηση των παλαιότερων δειγμάτων Apollo
→ η Σελήνη δημιουργήθηκε πριν ~4.4Ga

Σύγκρουση της πρωτο-Γης με πρωτοπλανήτη
("Theia", πιθανώς τρωικό* σώμα της Γης,
~μέγεθος του Άρη) και ταυτόχρονη δέσμευσή
της από το βαρυτικό πεδίο της Γης

Επιμέρους θεωρίες:

- (1) Πλάγια σύγκρουση
- (2) Συνεστία
- (3) Πολλαπλές συγκρούσεις

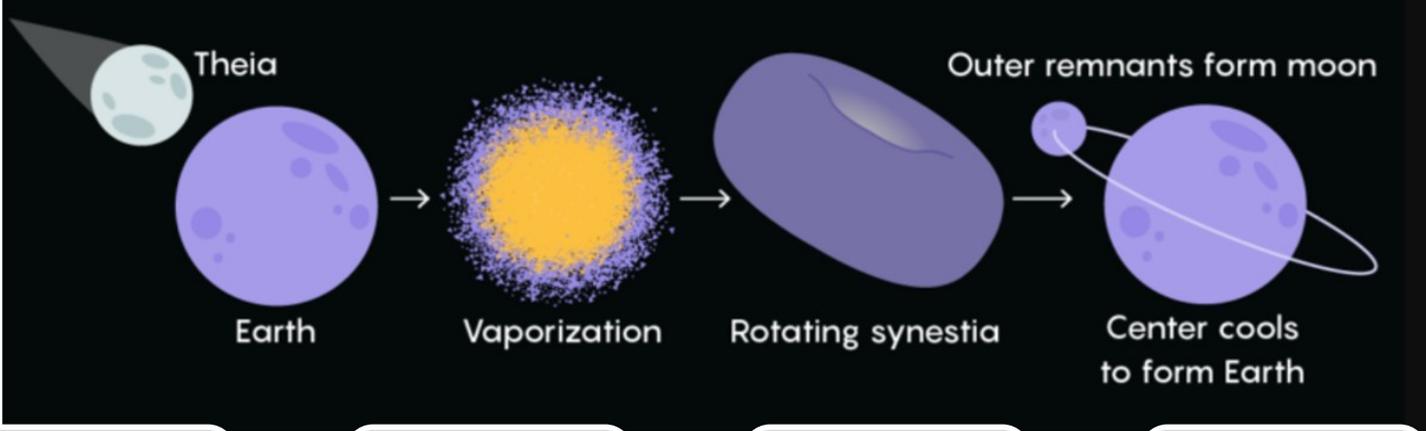


Hartmann, The giant impact hypothesis: past, present (and future?), *Phil. Trans. R. Soc.*, 2014.

* τρωικό σώμα = μικρό πλανητοειδές (αστεροειδής) ή φυσικός δορυφόρος που κινείται στην ίδια τροχιά με μεγαλύτερο πλανήτη ή δορυφόρο αντίστοιχα, αλλά δεν συγκρούεται με αυτό(ν) διότι ο χώρος στον οποίο βρίσκεται παγιωμένο τοποθετείται 60° μπροστά ή πίσω του σώματος με το οποίο μοιράζεται την τροχιά (σημεία Lagrangs L_4 και L_5 αντίστοιχα).

Συνεστία

Η Σελήνη γεννήθηκε πριν τη «νέα» Γη



Εξηγείται:

- 1) η ίδια κατεύθυνση τροχιάς περιστροφής με τη Γη
- 2) ο μικρός πυρήνας από σίδηρο
- 3) η μικρότερη πυκνότητα από τη Γη
- 4) η πανομοιότυπη σύνθεση ισωτόπων (O_2 , W) (αν ισχύει...⁽³⁾)
- 5) μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε μέταλλα από τη Γη ⁽²⁾
- 6) έλλειψη πτητικών στοιχείων
- 7) οι πανομοιότυπες χημικές συνθέσεις (πλήρης ανάμιξη των υλικών?)

1. Σύγκρουση και διάλυση πρωτοπλανήτη ("Theia", διάμετρος ~6200km) και πρωτο-Γης (μικρή, μεγάλη ταχύτητα περιστροφής)

2. Εξάτμιση και ανάμιξη φλοιού/μανδύα Γης με πρωτοπλανήτη

3. Δημιουργία μάζας υλικών και ατμών → Συνεστία

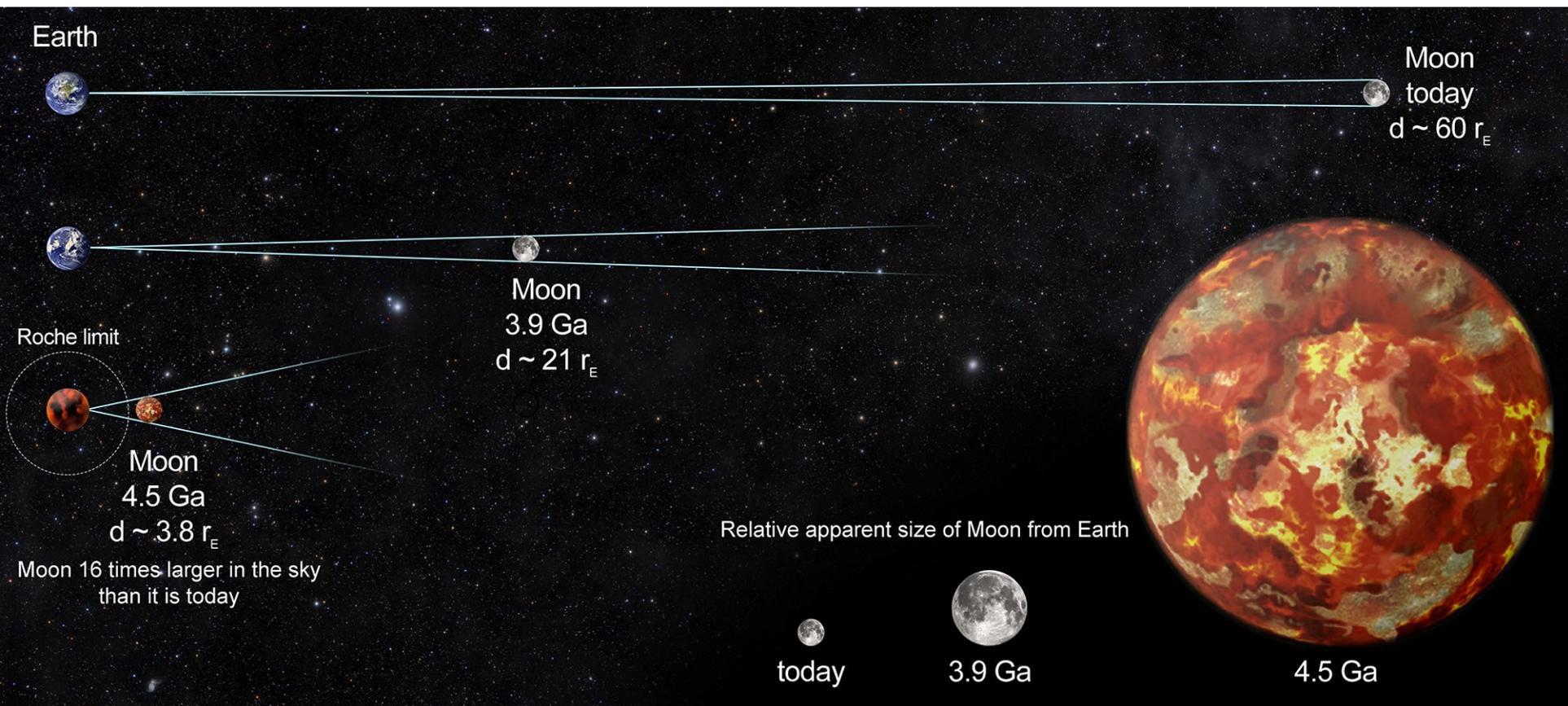
4. Γρήγορος σχηματισμός Σελήνης. Τα πιο πτητικά στοιχεία παραμένουν στο νέφος και όταν η συνεστία κρυώσει, σχηματίζουν τη Γη

Σύγκρουση → κλίση του άξονα της Γης ~23.5° → εποχές

Πολλαπλές συγκρούσεις ⁽⁴⁾
ακριβέστερη εξήγηση για τις μεγάλες ομοιότητες στη σύσταση Γης-Σελήνης

- 1) Heggy *et al.*, **Bulk composition of regolith fines on lunar crater floors: Initial investigation by LRO/Mini-RF**, *EPSL*, 2020.
- 2) Cano *et al.*, **Distinct oxygen isotope compositions of the Earth and Moon**, *Nature*, 2020.
- 3) Lock *et al.*, **The Origin of the Moon Within a Terrestrial Synestia**, *JGR Planets*, 2018.
- 4) Refu *et al.*, **A multiple-impact origin for the Moon**, *Nature Geoscience*, 2017.

Πώς θα φαινόταν η Σελήνη από τη Γη στο παρελθόν?



$r_E \cong 6.371 \text{ km}$

Illustration Credit: LPI (David A. Kring and John Blackwell)

2. Από την ατμόσφαιρα στον πυρήνα

It could be the part of the presentation where you can introduce yourself, write your email...

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ - ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

ατμόσφαιρα

Λεπτή ατμόσφαιρα (εξώσφαιρα)

Ελάχιστος και τοξικός αέρας

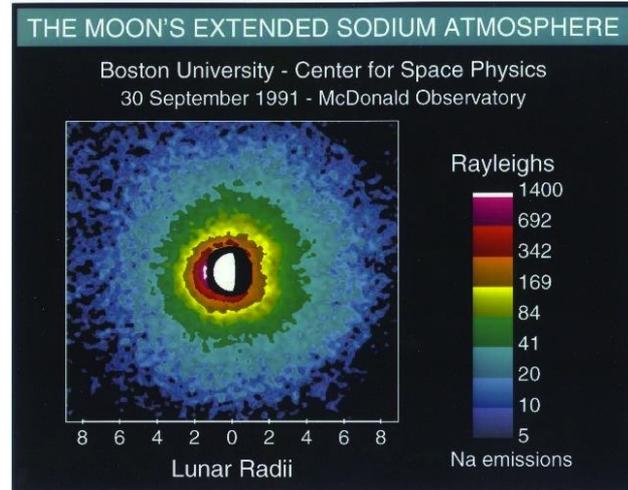
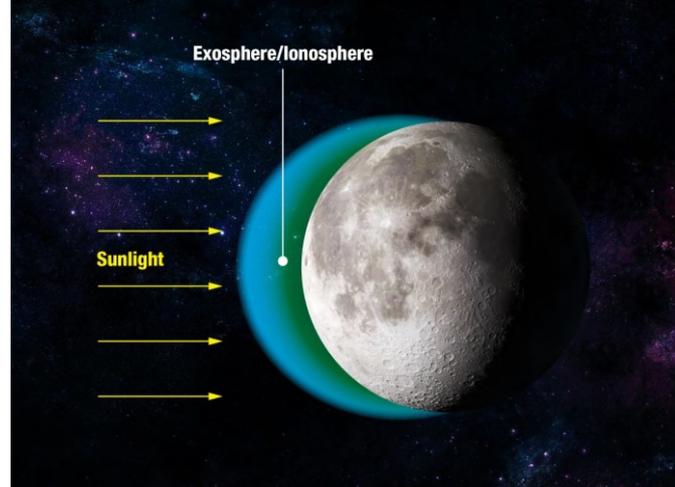
επιφανειακή πυκνότητα → 408km γήινο υψόμετρο

Τη νύχτα, η ατμόσφαιρα «πέφτει» στο έδαφος λόγω πτώσης θερμοκρασίας

Ασυνήθιστα αέρια: Na, K, He, Ar, μικρές ποσότητες Ne, NH₃, CH₄ και CO₂

Πηγές των αερίων? υπό διερεύνηση...

→ πριν ~3.5Ga η ατμόσφαιρα της Σελήνης ήταν πιο υγρή και πιο δυναμική πιθανόν λόγω ενεργής ηφαιστειότητας (*)



Credit: NASA

* Needham, D., et al., Lunar volcanism produced a transient atmosphere around the ancient Moon, *Earth and Planetary Science Letters*, Nov. 2017.

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

— Διαμόρφωση από **συγκρούσεις μετεωριτών, αστεροειδών και κομητών**

[Περίοδος Τελευταίου Βαρέως Βομβαρδισμού (Lunar cataclysm) 4-3.85Ga, διάρκεια <200Ma]

Αιτία...????(*)

— καθίζηση λαβών και **όχι** εκτεταμένη ενεργή **ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ**

- Κρατήρες μετεωρητικής σύγκρουσης
- Πυροκλαστικά (ejecta)
- Λίγα ηφαίστεια
- Υψίπεδα/Όρη
- Ροές λάβας
- Ζώνες υποβύθισης πληρωμένες με μάγμα



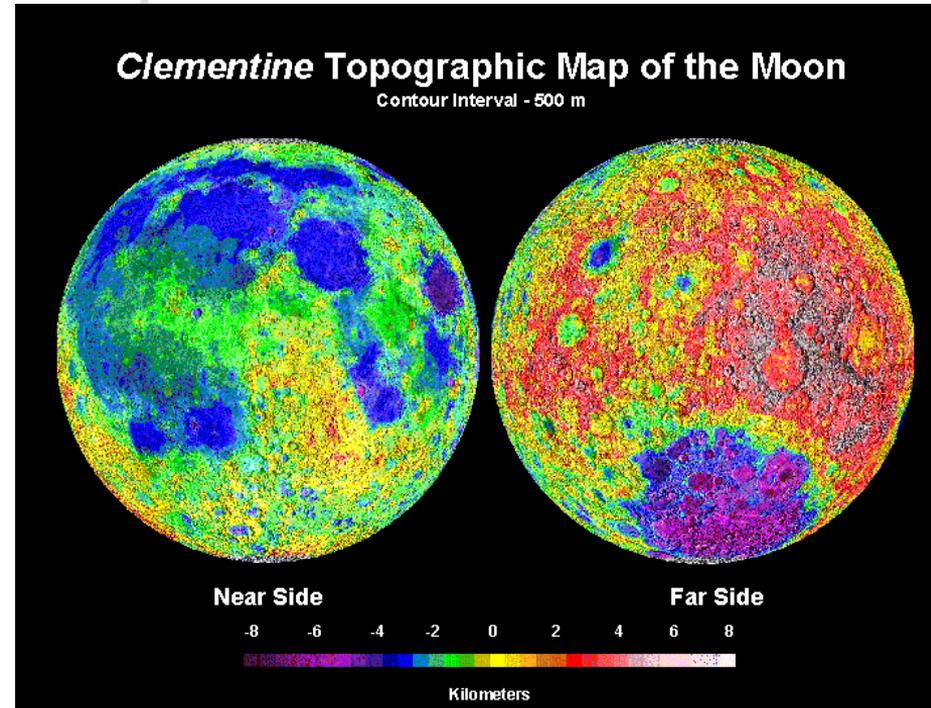
* Mojzsis, S.J. et al., Onset of Giant Planet Migration before 4480 Million Years Ago, *The Astrophysical Journal*, Aug. 2019

ασυμμετρία

Εντυπωσιακή γεωλογική ασυμμετρία μεταξύ ορατής και αθέατης πλευράς ως προς:

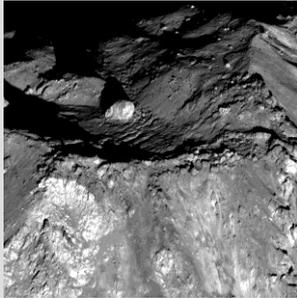
- Τοπογραφία
- Πάχος του φλοιού
- Χημική σύσταση

Αιτία ... ακόμα υπό διερεύνηση...



- 1) Zhu *et al.*, **Are the Moon's Nearside-Farside Asymmetries the Result of a Giant Impact?**, *JGR Planets*, May 2019.
- 2) Quillen, A.C., **Near/far side asymmetry in the tidally heated Moon**, *Icarus*, 329, 182-196, Sept. 2019.
- 3) Stevenson, D.J., **Lunar asymmetry and palaeomagnetism**, *Nature*, 1980.

γεωμορφές



Impact craters

Εσωτερικό peak
κρατήρα Tycho

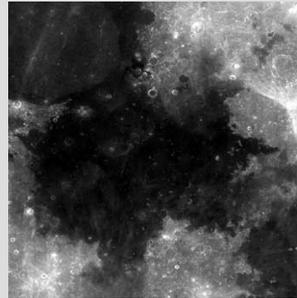
~>9000
1/3/2013: η μεγαλύτερη
πρόσκρουση



Highlands/terrae

South pole

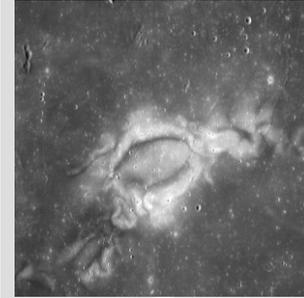
Υψίπεδα



Maria

Mare Tranquillitatis

ονόματα χαρακτηρισμού
θαλασσών
Λιγότεροι κρατήρες από
τα highlands



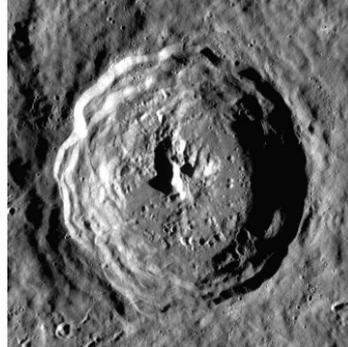
Lunar swirls

Reiner Gamma

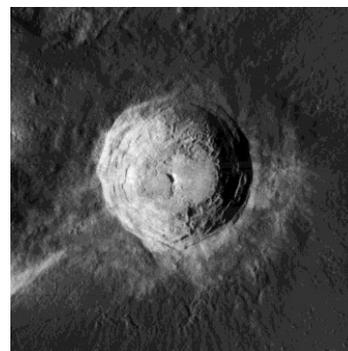
Σεληνιακοί στρόβιλοι

κρατήρες

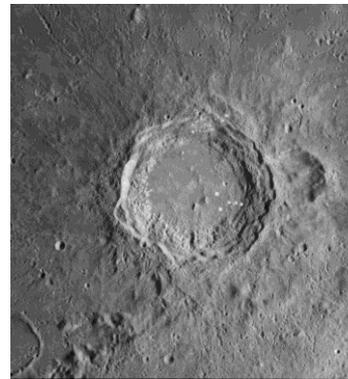
- μετεωρίτες/αστεροειδείς (κυρίως 3.8-4Ga)
- διάμετρος >290km
- προσδιορισμός ηλικίας: από τον αριθμό μικρότερων κρατήρων που εμπεριέχουν (όσο πιο παλιό, τόσο περισσότεροι μικρότεροι κρατήρες)
- συνήθως έχουν πληρωθεί με μεταγενέστερες λάβες



Κρατήρας Ερατοσθένης



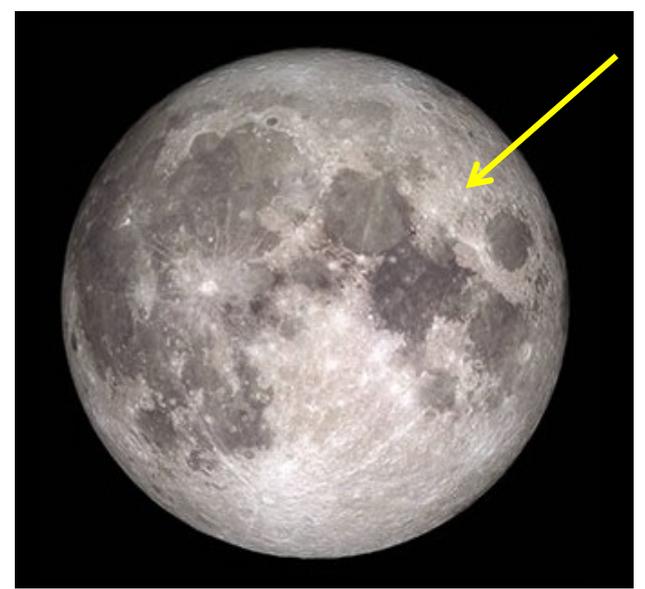
Κρατήρας Αρίσταρχος



Κρατήρας Αριστοτέλης

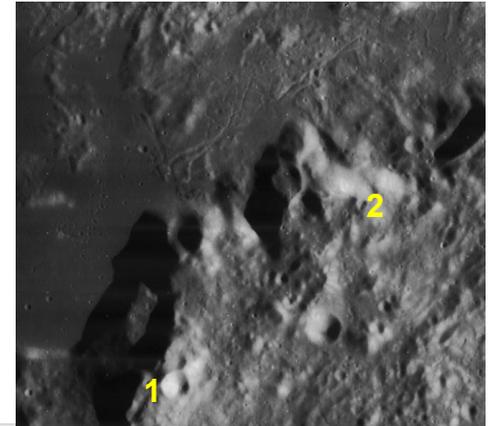
highlands

- 3.8 - 4.3Ga
- 83% του φλοιού
- Μεγάλη πυκνότητα κρατήρων από αστεροειδείς και μετεωρίτες (~3.9Ga)
- «Ανοιχτόχρωμες» (φωτεινές) περιοχές
- μεγαλύτερα υψόμετρα
- οι πιο παλιές δομές της Σελήνης
- Πετρώματα χαμηλής πυκνότητας που στερεοποιήθηκαν επιπλέοντας στο ημι-στερεό μάγμα ενός μεγάλου μαγματικού ωκεανού



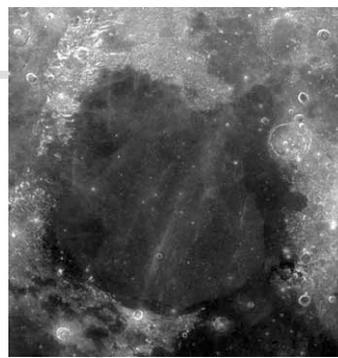
Mons Ampere (1)
Mons Huygens (2)
(Montes
Appeninus),
(υψόμετρο 5500m)

*Credit: NASA,
Lunar Orbiter 4*

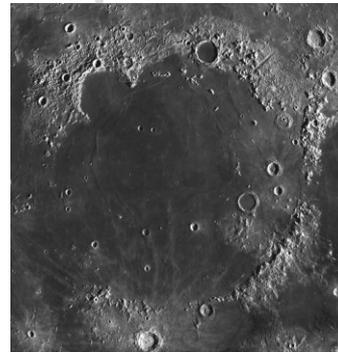


maria

- ~3.1 - 3.6Ga
- Τυπικό παράδειγμα δευτερογενούς πλανητικού φλοιού
- <1% του συνολικού όγκου του φλοιού
- 31% της ορατής επιφάνειας
- «Σκουρόχρωμες» (σκοτεινές) περιοχές
- ηλικιακά νεώτερες → χαμηλά υψόμετρα
- Λεκάνες ή/και κρατήρες που έχουν γεμίσει με βασαλτικές λάβες Fe↑ και Ti ↑



Mare Serenitatis. Φωτο: LRO/NASA



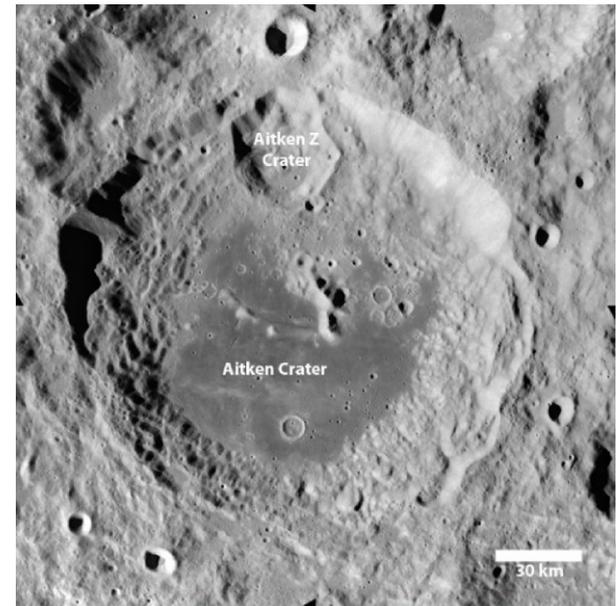
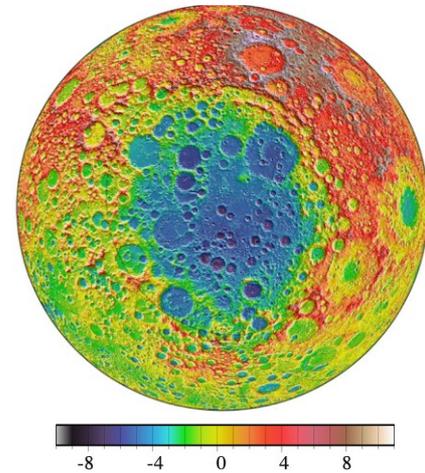
Mare Imbrium. Φωτο: LRO/NASA



Mare Moscoviense. Φωτο: Apollo 13

South Pole - Aitken basin

- Αθέατη πλευρά
- Ο μεγαλύτερος, παλαιότερος και βαθύτερος κρατήρας (από τους μεγαλύτερους του Ηλιακού Συστήματος)
- Βάθος -8km και υψόμετρο +8km στο ΒΑ άκρο (Leibnitz Mountains) → διαφορά υψομέτρου = 2x όρος Έβερεστ
- Διάμετρος = ~2500km (25% περιφέρειας της Σελήνης)
- Έκθεση των πιο παλιών πετρωμάτων του φλοιού (υψηλές συγκεντρώσεις σε Fe, Ti, Th)
- 3/1/2019: προσελήνωση του Chang'e 4



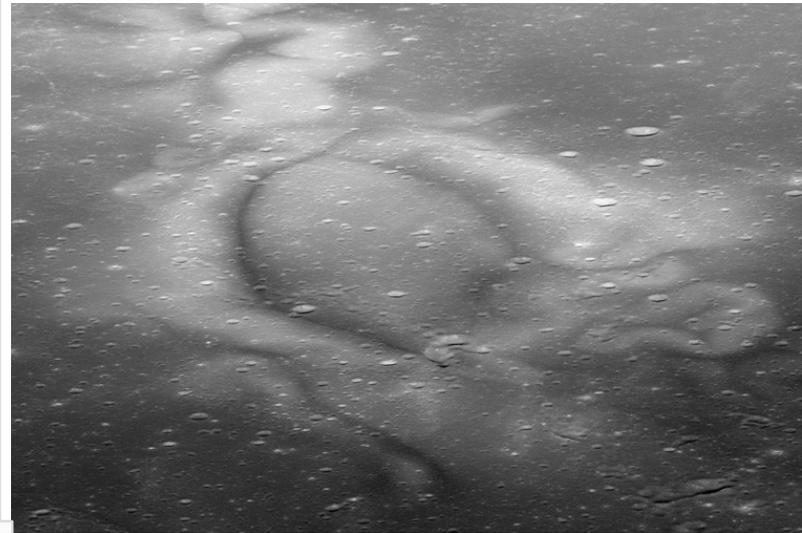
- 1) Trowbridge *et al.*, **Why the lunar South Pole-Aitken Basin is not a mascon**, *Icarus*, 2020.
- 2) James *et al.*, **Deep Structure of the Lunar South Pole-Aitken Basin**, *JGR*, 2019

Lunar swirls

- σιγμοειδείς δομές υψηλής λευκαύγειας
- παρατηρούνται σε highlands και mare
- πιθανώς συνδέονται με τοπικές, σχετικά ισχυρές, μαγνητικές ανωμαλίες → μαγνητισμένη λάβα κοντά στην επιφάνεια δημιουργεί μικρά τοπικά, σχετικά ισχυρά, ΜΠ

“γεωλογικοί μαγνήτες”: πολύ παλιά, στενά, μαγνητικά σώματα κάτω από την επιφάνεια (πριν 3Ga π.χ. η ηφαιστειότητα προκάλεσε δημιουργία κάθετων lava dikes μέσα στον φλοιό σε 600 °C τα οποία μαγνητίστηκαν ενώ ψύχονταν)

- Μικρές «μαγνητικές ομπρέλλες» στην ηλιακή ακτινοβολία



Reiner Gamma lunar swirl complex,
Lunar Reconnaissance Orbiter, Narrow Angle Camera
(Credit: NASA/GSFC/ASU)

- 1) Hemingway & Tikoo, **Lunar Swirl Morphology Constrains the Geometry, Magnetization, and Origins of Lunar Magnetic Anomalies**, *JGR Planets*, Aug. 2018.
- 2) Syal & Schultz, **Cometary impact effects at the Moon: Implications for lunar swirl formation**, *Icarus*, 2015.
- 3) Glotch *et al.*, **Formation of lunar swirls by magnetic field standoff of the solar wind**, *Nature Comm.*, 2014.

ΕΔΑΦΟΣ - ΣΚΟΝΗ

Σεληνιακό έδαφος

- Λεπτόκοκκο (διάμετρος κόκκων <math><1\text{cm}</math>)
- Έλλειψη ένυδρων ορυκτών
- Βομβαρδισμός από H^+ από τον ηλιακό άνεμο
- Μηχανική αποσάθρωση και διάλυση των υποκείμενων πετρωμάτων λόγω συνεχούς βομβαρδισμού από μετεωρίτες και σωματίδια ηλιακής και διαστρικής προέλευσης.
- ~ 1% μετεωρητική προέλευση



Αποτύπωμα του Buzz Aldrin



Shorty crater - «Πορτοκαλί» έδαφος
(φωτο, Apollo 17)



Συλλογή δειγμάτων σεληνιακού
εδάφους από τους αστροναύτες της
αποστολής Apollo 16
(φωτο, NASA)

Σεληνιακή σκόνη

- Πολύ λεπτόκοκκη
- Ηλεκτρισμένη
- Κολλάει παντού
- Χαρακτηριστική μυρωδιά “καμμένης πυρίτιδας”
- Υψηλή συγκέντρωση σε αναπνεύσιμα σωματίδια, νανο-σωματίδια σιδήρου → Εξαιρετικά τοξική για τον άνθρωπο
- Αναπνευστικά προβλήματα στους αστροναύτες
- Πιθανές επιπτώσεις σε πνεύμονες, νευρικό και καρδιαγγειακό σύστημα

Συνεχώς βελτιούμενα πρωτόκολλα προστασίας για moonwalking spacesuits του αστροναυτών του Artemis III (*)



Η στολή του αστροναύτη Eugene Cernan (Apollo 17), καλυμμένη με σκόνη

(*) 8/9/2022: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-taps-axiom-space-for-first-artemis-moonwalking-spacesuits>
<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-s-coating-technology-could-help-resolve-lunar-dust-challenge>



Neil Armstrong's Apollo 11 spacesuit

Ασφάλεια
Ευλυγισία
Επικοινωνίες

ARTEMIS SPACESUITS

Exploration EMU Development Unit for moonwalking



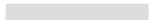
NASA's prototype Exploration spacesuits (Jan. 2022)

Orion Crew Survival System

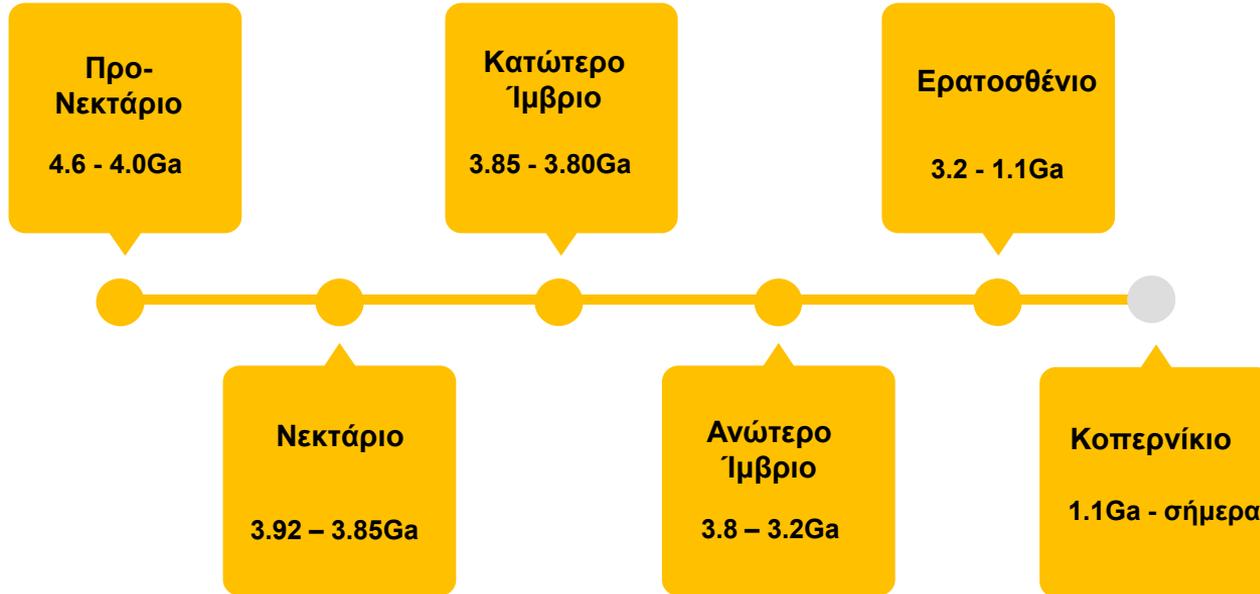


- <https://www.nasa.gov/suitup>
- <https://www.nasa.gov/feature/a-next-generation-spacesuit-for-the-artemis-generation-of-astronauts>

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ

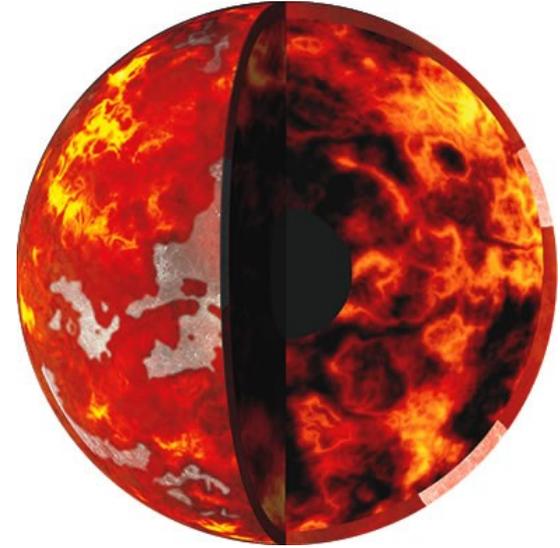


Γεωλογική κλίμακα



1. Lunar Magma Ocean (LMO)

- αρχικός μεγάλος ωκεανός τηγμένου θερμού μάγματος
- ψύχθηκε και διαφοροποιήθηκε για να σχηματίσει τον φλοιό (ελαφρά στοιχεία Ca, Mg, Si (ρ_c)) και τον μανδύα (βαρέα στοιχεία $Fe, Ni \dots$ (O_l, ρ_x))
- **4.5-4.4Ga**
(~45-152Ma μετά τη δημιουργία του Ηλιακού Συστήματος)
- διάρκεια ~55-155Ma
- ακόμα υπό μελέτη



Η Σελήνη πριν στερεοποιηθεί πλήρως. Ήδη υπάρχει ο μεταλλικός πυρήνας. Μερικά από τα υπόλοιπα τηγμένα υλικά, κυρίως πυριτικά, αρχίζουν να ψύχονται εκπέμποντας θερμότητα στο διάστημα και να δημιουργούνται τα πρώτα κομμάτια του στερεοποιημένου φλοιού.

Illustration Credit: LPI

2. Βασαλτική Ηφαιστειότητα

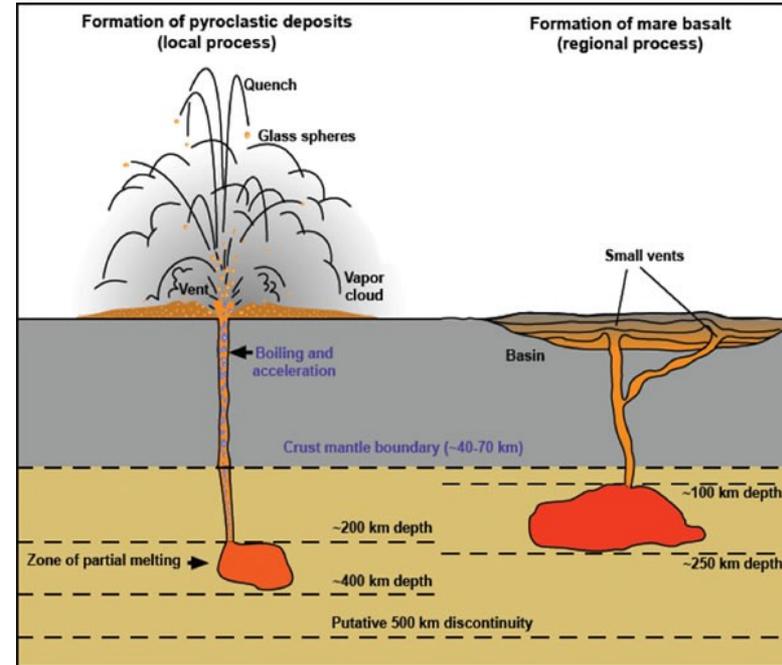
Η δεύτερη πιο συνήθης (συχνά η κύρια) επιφανειακή γεωλογική διαδικασία σε πλανήτες

Μάγμα βασαλτικής σύστασης^(*) ανεβαίνει αργά στην επιφάνεια μέσα σε λεκάνες (φλοιός μικρότερου πάχους)

→ Ροές λάβας ή εκτίναξη πυροκλαστικών (π.χ. σταγονίδια τηγμένης υέλου)

—Απόθεση βασαλτικών λαβών → **mare**

—Πυροκλαστικά και φυσαλίδες που ταξιδεύουν μακριά και αποτίθενται σαν «γυάλινα σφαιρίδια» → “πράσινα” (Apollo 15) και “πορτοκαλί” (Apollo 17) και μαύρα σφαιρίδια υέλου στην επιφάνεια.



*Περιεκτικότητα σε Si <50%, χαλαζίας (SiO₂) <20%, πλούσιο σε Fe, Mg και φτωχό σε αλκάλια και αργίλιο

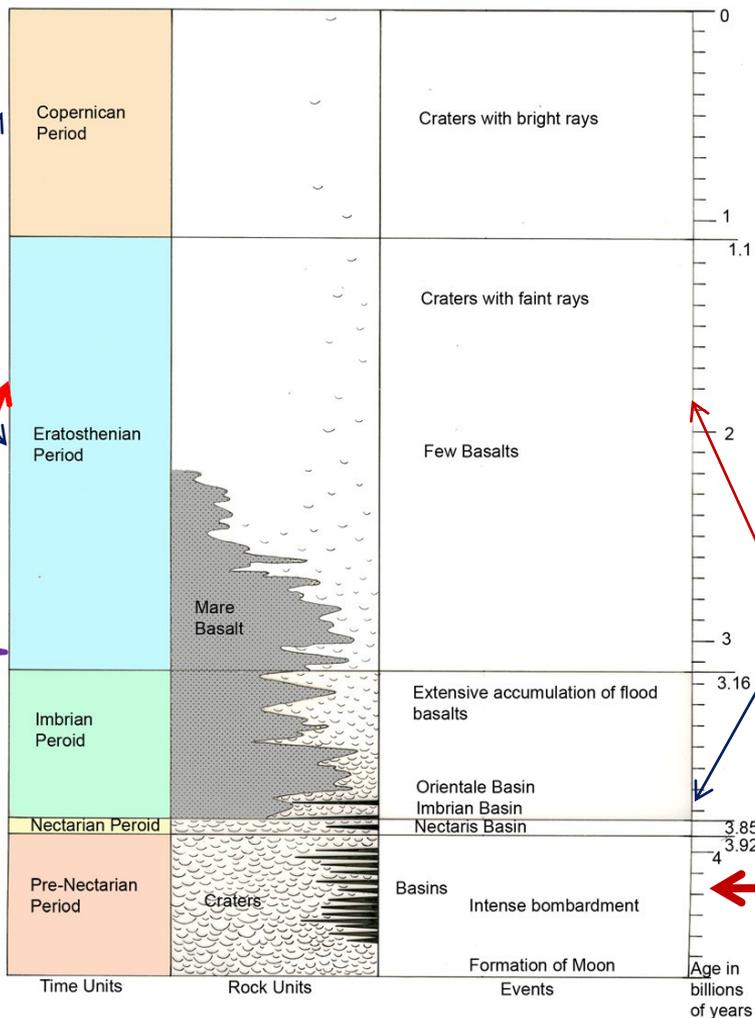
Η γεωλογική ιστορία της Σελήνης εν συντομία

- Ασθενής βομβαρδισμός μετεωριτών (<3.2Ga).
- Κρατήρες με φωτεινά ακτινωτά ejecta.
- Ελάχιστη αλλαγή στην τοπογραφία.

νέα στοιχεία (2021)

3. Ηφαιστειότητα (mare volcanism)

1. Δημιουργία φλοιού



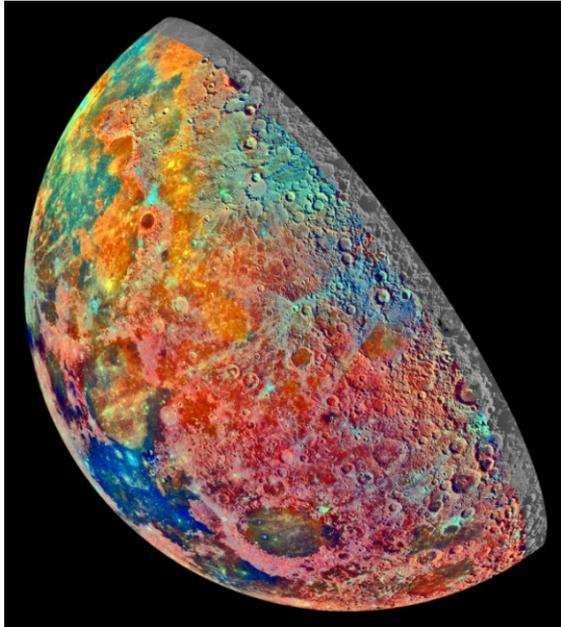
νέα στοιχεία (2021)

(3) Έκχύσεις βασαλτικών λαβών στις λεκάνες της ορατής πλευράς

2(α) Δημιουργία λεκανών λόγω μετεωρητικών συγκρούσεων

2. Τελευταίος Βαρύς Βομβαρδισμός (4-3.85Ga)

Αρχαιότερη λεκάνη: South Pole-Aitken basin.



ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Χημική σύσταση

Estimated Composition of Crust and Mantle (Percent by Weight)		
Element	Earth	Moon
Oxygen	45.2	44.7
Silicon	22.1	22.5
Magnesium	21.9	20.3
Iron	6.0	8.2
Calcium	2.3	2.0
Aluminum	2.1	1.9
Sodium	<1	<1
Titanium	<1	<1

Compound	Formula	Composition (wt %)	
		Maria	Highlands
silica	SiO ₂	45.4%	45.5%
alumina	Al ₂ O ₃	14.9%	24.0%
lime	CaO	11.8%	15.9%
iron(II) oxide	FeO	14.1%	5.9%
magnesia	MgO	9.2%	7.5%
titanium dioxide	TiO ₂	3.9%	0.6%
sodium oxide	Na ₂ O	0.6%	0.6%
Total		99.9%	100.0%

Κύρια ορυκτά στη Σελήνη

Πλαγιόκλαστα (pc)

— **ανορθίτης (An) $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$**
 $[\text{An}_{90-100}]$.

— *ελάχιστες ποσότητες αλβίτη (Ab)*
 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

Ολιβίνες (Ol)

ισόμορφες παραμείξεις
μεταξύ ακραίων μελών:

— *Φορστερίτης* Mg_2SiO_4
— *Φαϋαλίτης* $\text{Fe}^{+2}_2\text{SiO}_4$

*Συνοδεύονται από px και
βασικά pc.*

Συνήθως στους βασάλτες Fa_{20-}
 Fa_{70} , λίγοι $\text{Fe}^{\uparrow}\text{ol}$ ($\text{Fa}_{90-}\text{Fa}_{100}$)

$\text{Cr}_2\text{O}_3 \uparrow$ (~0.6wt%),
Ca, Mn, Mg, Al

Πυρόξενοι (px)

ισόμορφες παραμείξεις μεταξύ
ακραίων μελών 2 οικογενειών:

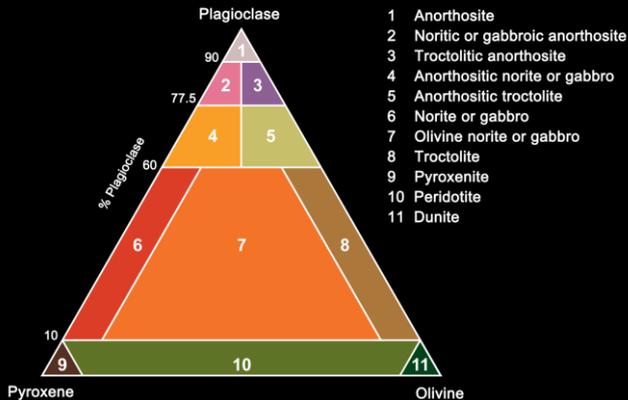
— Ορθοπυρόξενοι (LCP) MgSiO_3 –
 FeSiO_3
— Κλिनοπυρόξενοι (HCP) $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
– $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$

π.χ. **HCP: αυγίτης**
 $(\text{Ca,Na})(\text{Mg,Fe,Al,Ti})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$

ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ:

**Σχεδόν όλα τα σεληνιακά πετρώματα
δεν περιέχουν πτητικά ούτε ένυδρα
ορυκτά**

- *ανορθοσίτες*
- *βασάλτες (λάβες, πυροκλαστικά)*
- *λατυποπαγή (breccia)*
- *επανατηγμένα υλικά (impact melts)*
- *έδαφος*



Highlands

Ψύξη του μεγάλου μαγματικού
ωκεανού

ferroan ανορθοσίτης - FAN (4.4Ga)

— Ανορθοσίτης → >90% Ca-pc
(An94-96)

↓Mg/Fe
Θετική ανωμαλία σε Eu

Μαγνησιούχα σειρά (4.3-4.1Ga)

— Δουνίτης → 90% Ol
— Τροκτόλιθος → Ol- pc (<50% Si,
SiO₂ <20%)
— Γάββρος → pc-px

Ca-pc (An86-93)
↑Mg/Fe
Μεταγενέστερη διεισδύση σε FAN

Αλκαλική σειρά

— Αλκαλικοί νατριούχοι ανορθοσίτες
→ An70-85
— Νορίτες → pc-LCP
— Γαββρονορίτες → pc-HCP-LCP
Fe↑

Προέλευση από μάγμα KREEP

Breccias

Λατυποπαγή

Mare

— Βασάλτες

Ca,Fe ρχ— οΙ — ρc — ιλμενίτης

— KREEP

Βασάλτες με συγκεντρώσεις σπανίων γαιών

(διαφοροποιήσεις στις συγκεντρώσεις Fe, Ti)

Δείγματα πετρωμάτων highlands (αποστολές Apollo)



Apollo 17, 76535, τροκτόλιθος



Apollo 15, 60015, ανορθοσίτης



Apollo 17, 78235, νορίτης



Apollo 15, 65095, λατυποπαγές

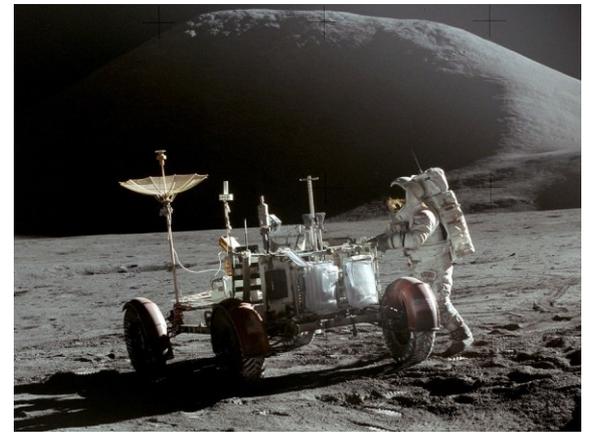
Το 2019, η NASA έδωσε ανοικτή πρόσβαση στην επιστημονική κοινότητα στα δείγματα των αποστολών Apollo

“Genesis” rock

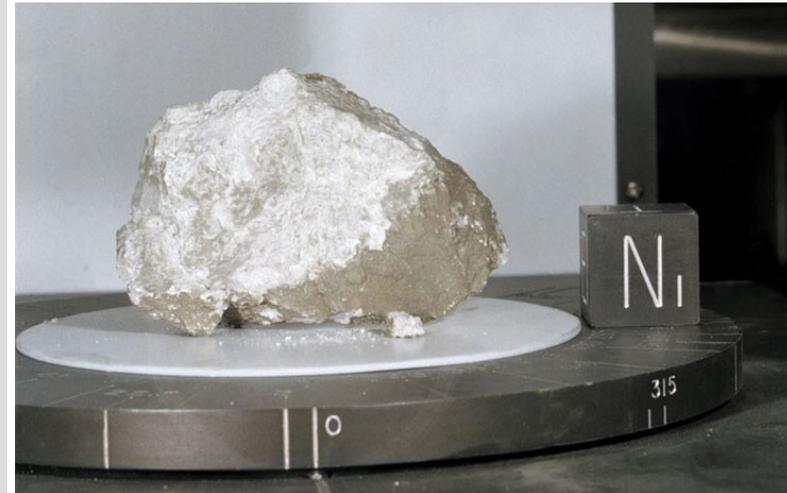
- **Περιοχή:** Hadley-Apennines (Apollo 15)
- **Συλλογή:** 1/81971
- **Τμήμα του πρωταρχικού σεληνιακού φλοιού**
- ~97% πλαγιόκλαστο, ~3% πυρόξενος με ίχνη ιλμενίτη
- **Ηλικία: ~ 4Ga, στις αρχές τις δημιουργίας του Ηλιακού Συστήματος**



Λίγο πριν τη συλλογή του “Genesis” rock



το rover της αποστολής Apollo 15



“Genesis” rock (sample number 15415) (φωτο: NASA).

**Δείγματα
πετρωμάτων
mare
(αποστολές
Apollo)**



Apollo 15, 15016, βασάλτης



Apollo 17, 70135, βασάλτης ↑Ti

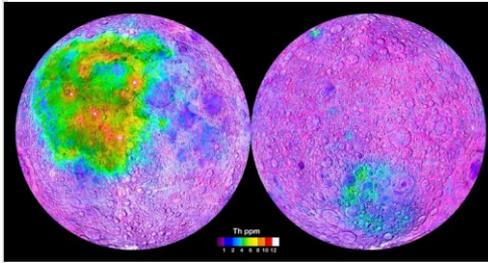


Apollo 15, βασάλτης (3.5Ga) (ίδια
σύσταση με βασάλτες Χαβάης)



Apollo 11 , 10062, βασάλτης ↑Ti

KREEP



Χάρτης συγκεντρώσεων θορίου.
Credit: NASA



Apollo 12, 12013

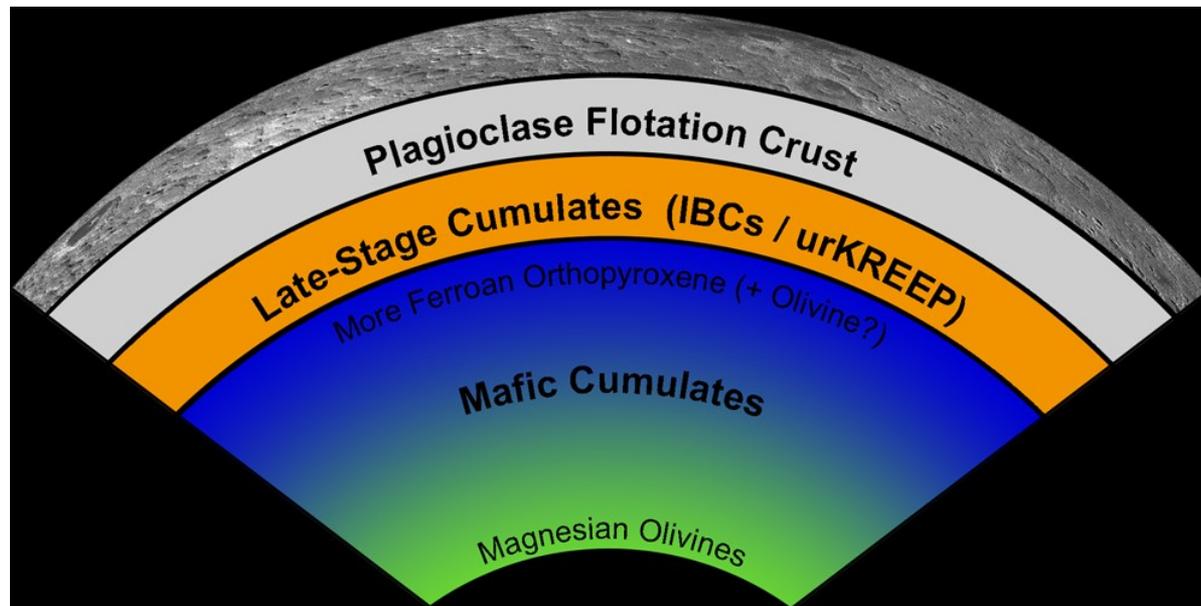
- Oceanus Procellarum, South Pole Aitken-basin
- Συνύπαρξη «ασύμβατων» στοιχείων και σε ασυνήθιστες συγκεντρώσεις: K, REE, P, Rb, (Th, U) σε αστριούχους βασάλτες (>59% pl)
- Δημιουργία μεταξύ φλοιού και μανδύα κατά την κρυστάλλωση του μεγάλου μαγματικού ωκεανού



Apollo 15, 15386

- 1) Li & Du, **Petrogenesis of the Lunar volcanic glasses and Mg-suite: constraints on a post-magma-ocean cumulate overturn**, *Acta Geochimica*, 2022.
- 2) Moriarty III *et al.*, **The search for lunar mantle rocks exposed on the surface of the Moon**, *Nature Communications*, 2021.
- 3) Wieczorek & Phillips, **The “Procellarum KREEP Terrane”**: Implications for mare volcanism and lunar evolution, *JGR Planets*, 2000.
- 4) Jolliff, B. *et al.*, **Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins**, *JGR Planets*, 2000.

Γενική στρωματογραφία του Σεληνιακού Μαγματικού Ωκεανού



Moriarty III *et al.*, The search for lunar mantle rocks exposed on the surface of the Moon, *Nature Communications*, 2021.

**Επιπλέον
πρόσφατες
ενδιαφέρουσες
ανακαλύψεις**

(I)

Big Bertha^(*)

Apollo 14
Δείγμα No 14321, 9kg

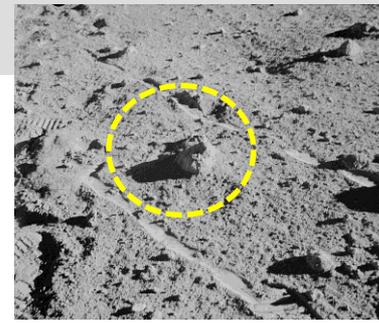
Δείγμα που εμπεριέχει μετεωρίτη γήινης προέλευσης

Σύσταση: ορυκτά συνηθισμένα στη Γη αλλά **ασυνήθιστα στη Σελήνη** όπως το **ζιρκόνιο**)

Ηλικία: **4.1Ga**, η Σελήνη ήταν 3x πιο κοντά στη Γη

Πιθανή αιτία: εκτόξευση γήινου θραύσματος λόγω πρόσκρουσης μεγάλου μετεωρίτη στην επιφάνεια της Γης

- ❑ Πιθανόν το αρχαιότερο πέτρωμα της Γης
- ❑ Ο πρώτος μετεωρίτης γήινης προέλευσης που ανακαλύφθηκε στη Σελήνη



Bellucci *et al.*, Terrestrial-like zircon in a clast from an Apollo 14 breccia, *Earth and Planetary Science Letters*, 2019

Apollo 14, 14321, περιοχή Fra Mauro
(collected by Com. Alan Shepard)

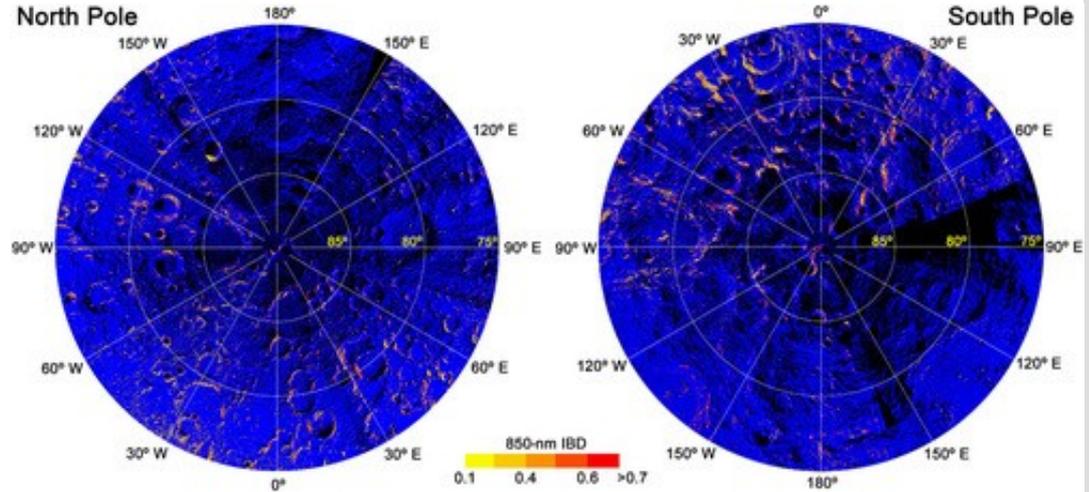
^(*) large World War I German howitzer Big Bertha

(II)

Ανίχνευση αιματίτη (Fe_2O_3) σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη

Chandrayaan-1/M3

Li *et al.*, **Widespread hematite at high latitudes of the Moon**, *Science Advances*, Sept. 2020.

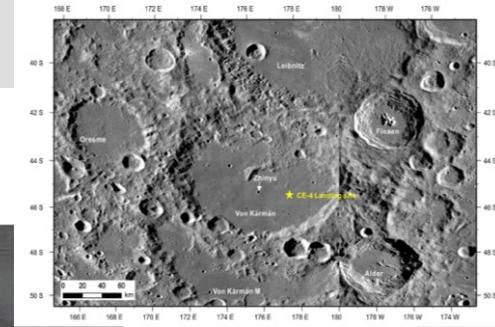
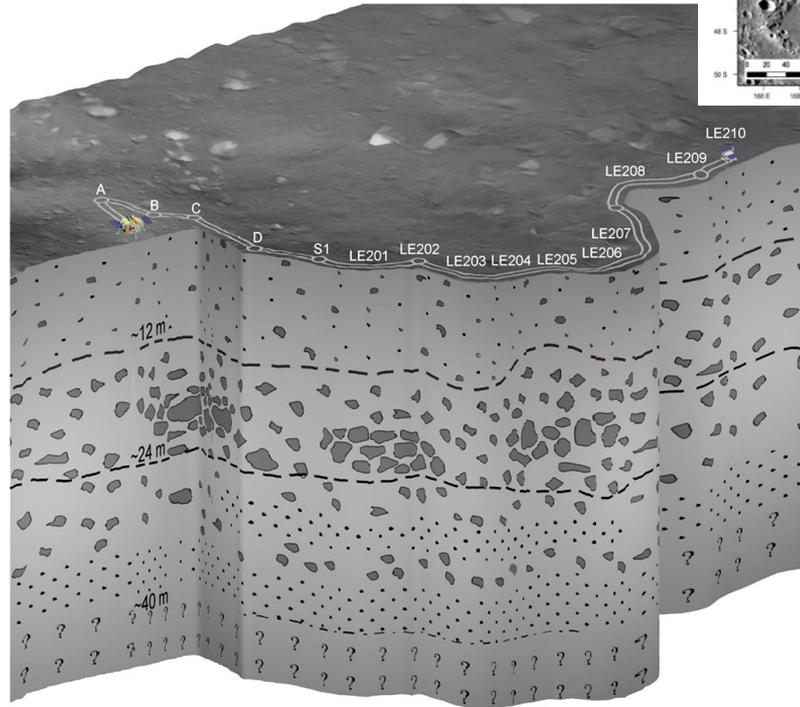


- ❑ Κοινό **προϊόν οξείδωσης** στη Γη, Άρη και κάποιους αστεροειδείς.
- ❑ **Κρατήρες διαφόρων ηλικιών σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη** με προσανατολισμό **προς τα ανατολικά** και **προς τον ισημερινό**
- ❑ Κυρίως στη **θεατή πλευρά** → πιθανό οξειδωτικό στοιχείο για τη δημιουργία του: **οξυγόνο από την ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης**

(III)

Πρώτος χάρτης της γεωλογικής δομής του υπεδάφους της Σελήνης

Yutu-2 rover, Chang'e 4 (LPR radar)
(Von Kármán crater, within South Pole-
Aitken basin)

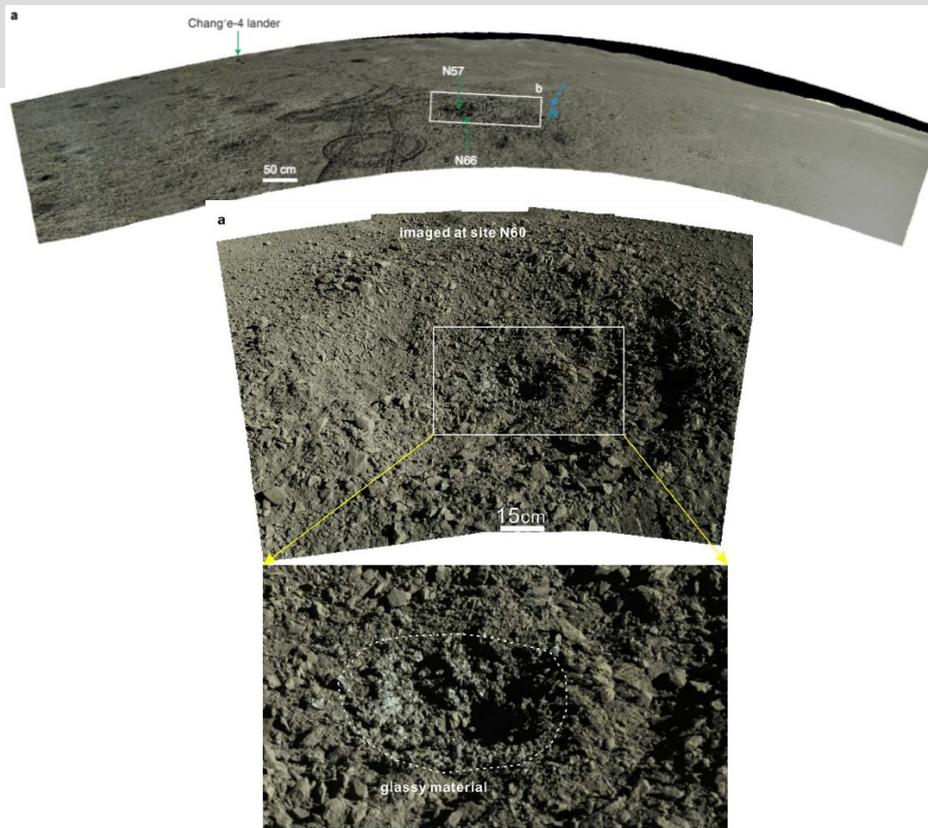


Li *et al.*, The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar, *Science Advances*, 2020.

(IV)

Αναλλοίωτα θραύσματα ανθρακούχων χονδριτών (CC) σε πρόσφατο κρατήρα (~1Ma) με παρουσία νερού

Yutu-2 rover, Chang'e 4 (VNIS, SWIR cameras)
(Von Kármán crater, within South Pole-Aitken basin)



Ανθρακούχοι χονδρίτες

- ☐ Μετεωρίτες που περιέχουν ως βάση τον άνθρακα.
 - ☐ Ίσως η πιο αρχέγονη ομάδα μετεωριτών.
 - ☐ Σπάνιοι.
 - ☐ Πολλοί από αυτούς εμπιριέχουν οργανικά.
- (Πηγή:
<http://meteorites.gr/>)

- CC πιθανώς έφεραν στη σεληνιακή επιφάνεια νερό και πάγο νερού
- Το υελώδες υλικό περιέχει 47% CC → >280ppm νερού διατηρήθηκαν μέσα στο υλικό (>>100ppm στα μέσα και χαμηλά γεωγραφικά πλάτη)
- πιθανές σημαντικές πηγές νερού (ορατή πλευρά) και πάγου νερού (αθέατη πλευρά)

(V)

Ηφαιστειακή δραστηριότητα ~2Ga ± 4Ma

Chang'e 5 (23 ημέρες, Δεκέμβριος 2020)

Συλλογή, επιστροφή και ανάλυση στη Γη
δειγμάτων 1.73kg σεληνιακής σκόνης και
πετρωμάτων, Oceanus Procellarum



Δείγματα εδάφους.
Συλλογή: Chang'e 5
(Photo: Hui Ren)



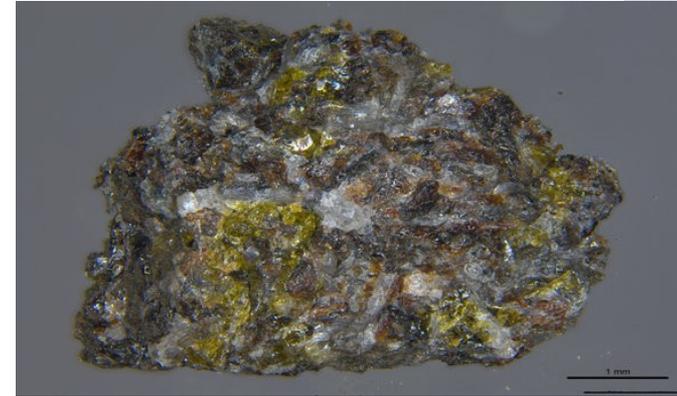
- 44.5% ρx, 30.4% ρl, 3.6% ol, 6.0%
ιλμενίτης, ~3% ύελος

- Fe↑ και Mg↓ σε σύγκριση με άλλες
βασαλτικές περιοχές

Βασάλτες ηλικίας ~2Ga ± 4Ma ⇒
*1Ga μεταγενέστερη κρυστάλλωση από
αντίστοιχα δείγματα Apollo και Luna*

⇒ **Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη
Σελήνη είχε μεγαλύτερη διάρκεια
κατά ~800-900Ma**
⇒ **Καλύπτει το κενό στις ηλικίες των
δειγμάτων Apollo/Luna μεταξύ
3.0 Ga - 1.0 Ga**

(~η μισή ιστορία της Σελήνης...)



Δείγμα σεληνιακού βασάλτη
Συλλογή: Chang'e 5
(Image credit: CNSA/GRAS/NAOC)

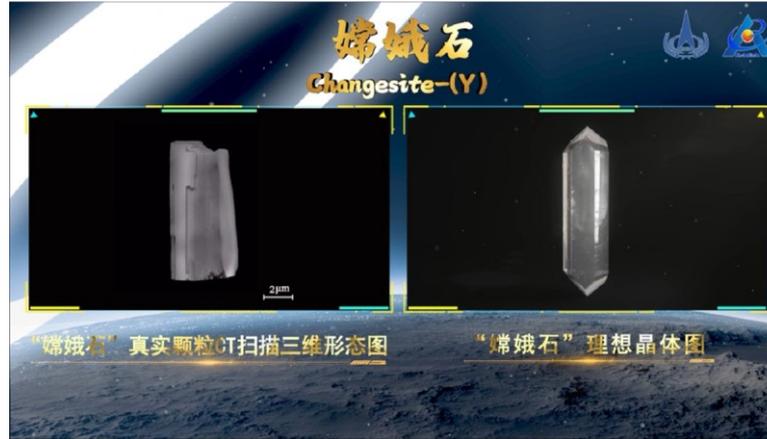
- 1) Yue *et al.*, **Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples**, *Nature Astronomy*, 2022.
- 2) Zhang *et al.*, **Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission**, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022.
- 3) Li *et al.*, **Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts**, *Nature*, 2021.

(VI)

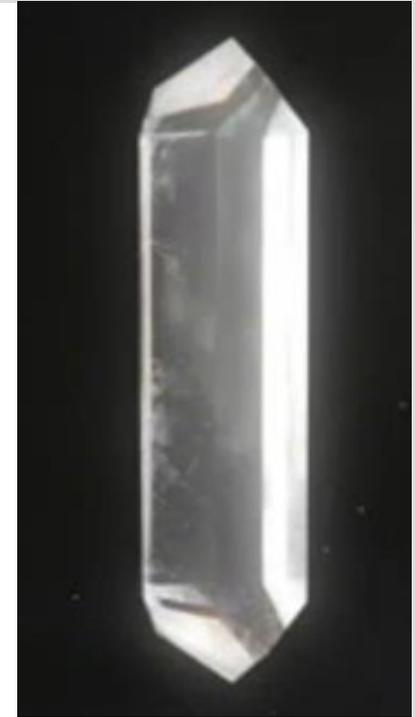
Changesite-(Y)

Chang'e 5 (23 ημέρες, Δεκέμβριος 2020)

Συλλογή, επιστροφή και ανάλυση στη Γη δειγμάτων 1.73kg σεληνιακής σκόνης και πετρωμάτων, Oceanus Procellarum



- ❑ **Νέο ορυκτό** σε κόκκους βασαλτικής σύστασης
- ❑ Διαφανές ορυκτό της ομάδας των μεριλλιτών (**Merrillite**)→ ασβεστούχα φωσφορικά ορυκτά με γενικό χημικό τύπο **Ca₉NaMg(PO₄)₇**.
- ❑ Το συγκεκριμένο περιέχει **Helium-3**.
- ❑ Η Κίνα έγινε η τρίτη χώρα στην ιστορία που ανακάλυψε ένα νέο σεληνιακό ορυκτό.



Κρύσταλλος Changesite-(Y)
(Image credit: Beijing Research Institute of Uranium Geology)

**ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ
ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ
ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ**

Εσωτερική δομή

Πυρήνας: Διάμετρος 660km

- ✓ **Εσωτερικός πυρήνας:** στερεός, μεταλλικός (Fe, Ni) διάμετρος 480km
- ✓ **Εξωτερικό υγρό περίβλημα (Fe)** βάθος >1200km, >1600°C [2]

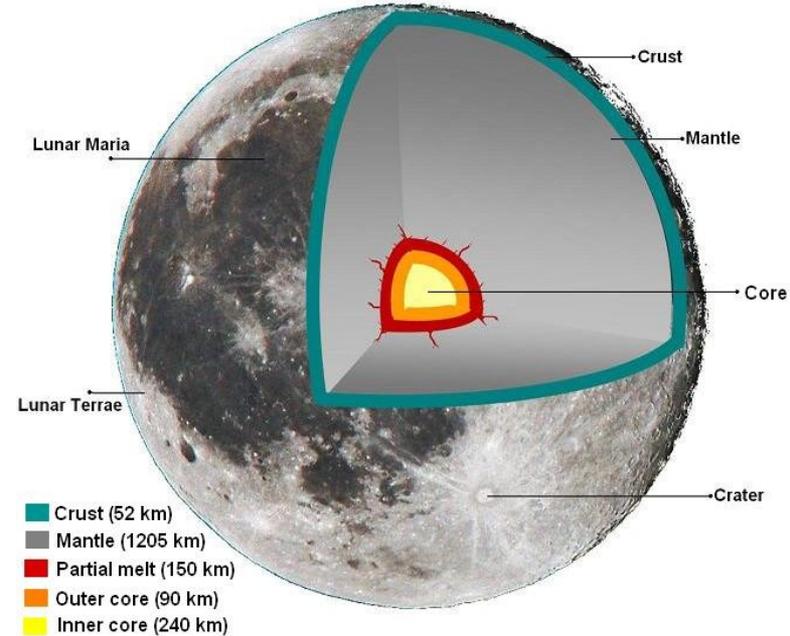
Μερικώς τηγμένο στρώμα: FeO, TiO₂↑
πάχος 150km,

Μανδύας [1]:

- ορυκτά πλούσια σε Mg, Fe
- πάχος ~1300km

Φλοιός:

- O₂, Si, Mg, Fe, Ca, Al και μικρές ποσότητες Ti, Ur, Th, K.
- Πάχος ~60 km στο ορατό, 150 km στο μη-ορατό ημισφαίριο

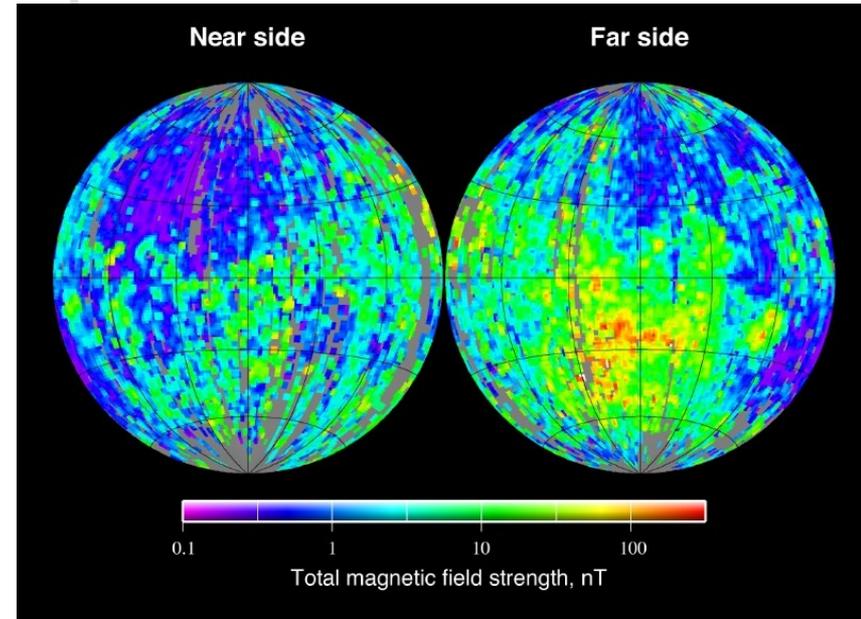


1) Li, C. *et al.*, **Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials**, *Nature*, 2019

2) Khan. A. *et al.*, **Geophysical evidence for melt in the deep lunar interior and implications for lunar evolution**, *JGR Planets*, 2014

Μαγνητικό πεδίο

- Ίσως υπήρχε αλλά με σύντομη διάρκεια ⁽¹⁾ [⇒ ύπαρξη θαμένου ^3He , νερού και άλλων πτητικών στον ρεγόλιθο από τον ηλιακό άνεμο και την μαγνητόσφαιρα της Γης ($\sim 4\text{Ga}$) ⁽¹⁾]
- 10.000 x ασθενέστερο της Γης
- Τοπικές μαγνητικές ανωμαλίες (π.χ. Aitken Basin) → έντονα μαγνητισμένα πετρώματα → ψύξη με την παρουσία ισχυρού, σταθερά προσανατολισμένου ΜΠ.
- Σήμερα δεν υπάρχει αρκετά γρήγορη περιστροφική κίνηση του πυρήνα και φαινόμενα θερμικής μεταφοράς για τη δημιουργία ενιαίου και σταθερού ΜΠ.



Lunar Prospector electron reflectometer experiment, 2006

- 1) Tarduno *et al.*, **Absence of a long-lived lunar paleomagnetosphere**, *Science Advances*, 2022.
- 2) Tikoo *et al.*, **A two-billion-year history for the lunar dynamo**, *Science Advances*, 2017.
- 3) Richter *et al.*, **Phase equilibria of a low S and C lunar core: Implications for an early lunar dynamo and physical state of the current core**, *EPSL*, 2017.
- 4) Witze., **Moon rocks offer new view of lunar dynamo**, *Nature*, 2013.
- 5) Hood, **Central magnetic anomalies of Nectarian-aged lunar impact basins: Probable evidence for an early core dynamo**, *Icarus*, 2011.

Σεισμοί

Μοονκουακς

(σειсмоγράφοι, Apollo, 8 χρόνια μετρήσεις)

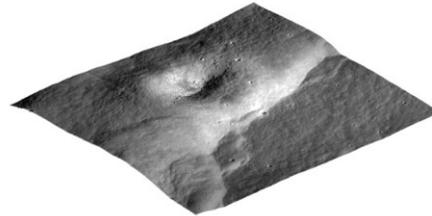
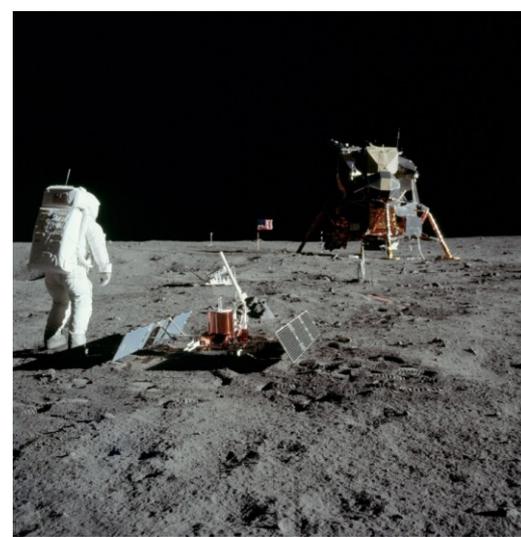
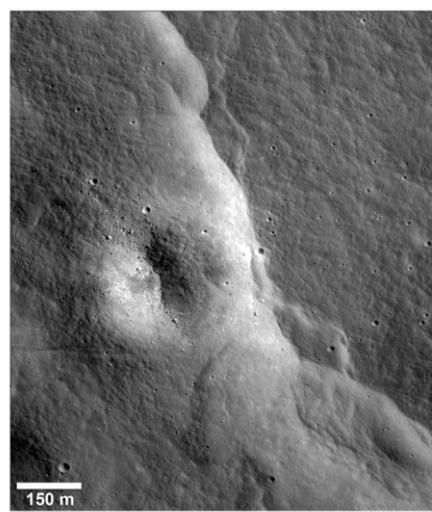
Ασθενείς αλλά πολύ μεγαλύτερης διάρκειας

Μεγάλου βάθους (700-1200km)

— Παλιρροιακά φαινόμενα

Ρηχοί (20-220km) – πιο σπάνιοι

- Ταλαντώσεις από πτώση μετεωριτών
- Θερμότητα (διαστολή του «κρύου» φλοιού από τη νύχτα στο φως του ήλιου, ασθενείς)
- Άγνωστης αιτίας (20-30km), <5.5R, >10 λεπτά, 28 σεισμοί (1972 – 1977), τεκτονικοί?



Watters *et al.* (2019)*:

- Τα επίκεντρα των 28 ρηχών σεισμών σε απόσταση <30km από ρήγματα
- **3.200 ανάστροφα ρήγματα**
- **Ενεργοποίηση ρηγμάτων ή δημιουργία νέων** λόγω συμπίεσης του φλοιού και παλιρροϊκών δυνάμεων

→ Η Σελήνη **συρρικνώνεται**
~>50m τα τελευταία 100Ma

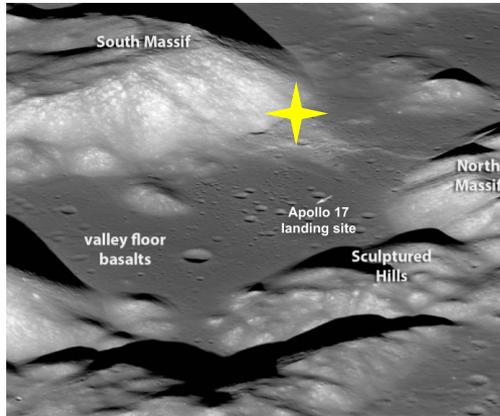
→ Η Σελήνη **τοπικά είναι**
τεκτονικά ενεργή

1) Watters *et al.*, **Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon**, *Nature Geoscience*, 2019.

2) Gillet *et al.*, **Scattering attenuation profile of the Moon: Implications for shallow moonquakes and the structure of the megaregolith**, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2017.

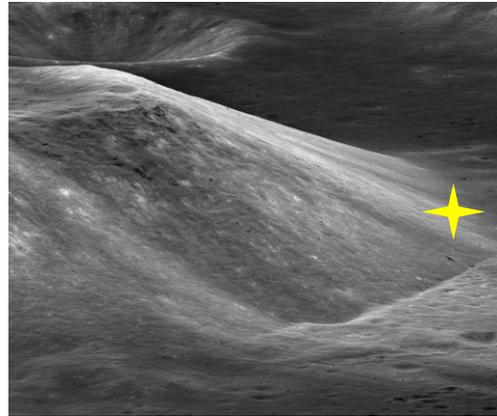
Κατολισθήσεις

Δειγματοληψία κατολισθητικού υλικού από Apollo 17 ηλικίας 110Μα



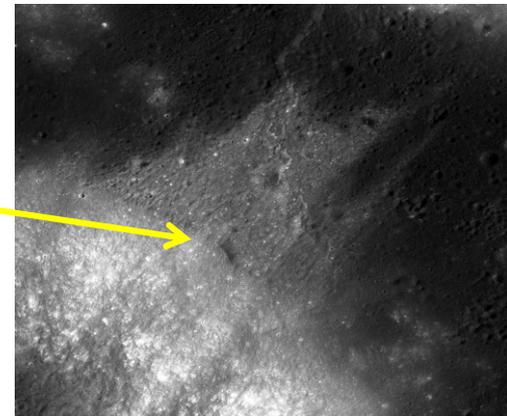
South Massif Mount

(εύρος βάσης 7km, ύψος 2.3km)
Taurus Littrow Valley, θέση Apollo 17



Κατολίσθηση στη βάση της βόρειας πλευράς του South Massif

Credit: NASA/GSFC/Arizona State University



- 1) Schmitt *et al.*, **APOLLO 17 Exploration of Taurus-Littrow: Summary of major findings**, 49th LPCS, 2018
- 2) Boyce *et al.*, **The Tsiolkovskiy crater landslide, the moon: An LROC view**, *Icarus*, 2020.
- 3) Scaioni *et al.*, **Recognition of landslides in lunar impact craters**, *European J. of Remote Sensing*, 2018.
- 4) Brunetti *et al.*, **Large rockslides in impact craters on the Moon and Mercury**, *Icarus*, 2015.

ΝΕΡΟ ΣΤΗ ΣΕΛΗΝΗ



**Πρόσφατες μετρήσεις από LCROSS,
Cassini, Deep Impact, Lunar
Prospector, Chandrayaan-1 και
SOFIA telescope δείχνουν παρουσία
νερού στη Σελήνη**

Μοριακό νερό - Πάγος νερού

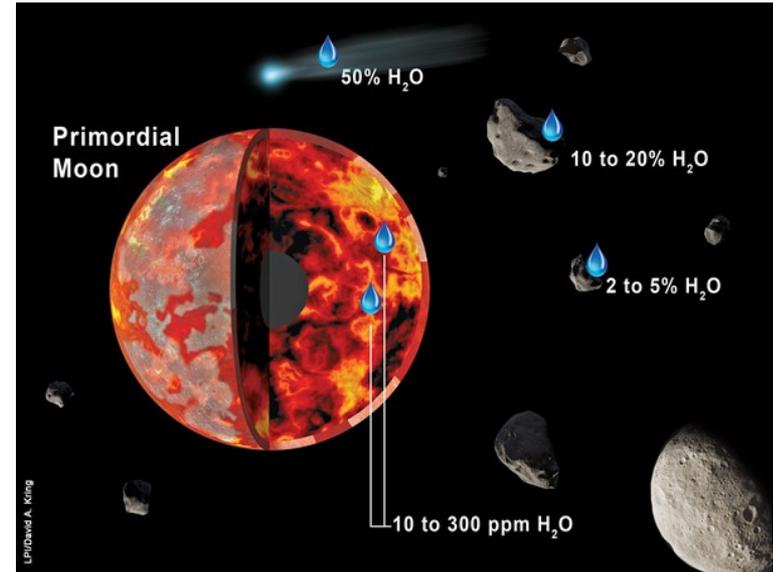
— **πόλοι:** μόνιμες αποθέσεις πάγου σε μόνιμα σκιασμένες περιοχές (π.χ. κρατήρες),

— **επιφάνεια:** μοριακό νερό ($100 \times < \text{Σαχάρα}^{(3)}$)
Πρόέλευση :

- (i) μικρομετεωρίτες και ηλιακός άνεμος ^(5,2) και
- (ii) επιτόπια απελευθέρωση OH- στις ημερήσιες «μέγιστες» θερμοκρασίες (π.χ. ισημερινός)

- πετρώματα και έδαφος ~ 30 ppm OH-
- στην **κρυσταλλική δομή** - **απατίτης** (0 to 179 ± 13 ppm ⁽¹⁾)
- από τον **ηλιακό άνεμο** (120 OH- + H₂O ppm ⁽²⁾)

→ **Ημερήσιος κύκλος νερού**⁽⁴⁾: Ανεξάρτητα από τη γεωλογική σύσταση και την τοπογραφία, **όλη η επιφάνεια της Σελήνης «ενυδατώνεται» κάποια στιγμή μέσα στην σεληνιακή ημέρα.**



Credit: LPI

- 1) Liu *et al.*, Evidence of water on the lunar surface from Chang'E-5 in-situ spectra and returned samples, *Nature Communications*, 2022.
- 2) Lin *et al.*, In situ detection of water on the Moon by the Chang'E-5 lander, *Science Advances*, 2022.
- 3) Honniball *et al.*, Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA, *Nature Astronomy*, 2020.
- 4) Hendrix *et al.*, Diurnally Migrating Lunar Water: Evidence From Ultraviolet Data, *Geoph. Res. Ltrrs*, 2019.
- 5) Benna *et al.*, Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts, *Nature Geoscience*, 2019.

Ειδικές αποστολές NASA για ανίχνευση και χαρτογράφηση αποθέσεων νερού

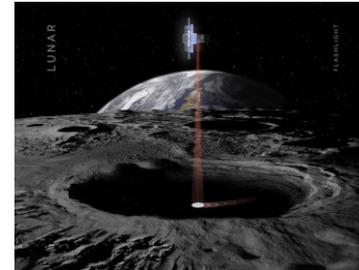
(Νότιος Πόλος)

<https://www.nasa.gov/viper/overview>
<https://www.nasa.gov/specials/artemis/>



NASA VIPER (rover)

~2023, ανίχνευση/συλλογή φυσικών πόρων, επιτόπιες αναλύσεις, μακροχρόνια συντήρηση ανθρώπινης παρουσίας.



ARTEMIS I Cubesat: Lunar Flashlight

παρουσία/σύνθεση αποθέσεων πάγου σε μόνιμα σκιασμένες περιοχές με laser



ARTEMIS I Cubesat: Skyfire

χαρακτηρισμός της επιφάνειας, και επιλογή θέσεων πάγου με φασματοσκοπία και θερμογραφία



ARTEMIS I Cubesat: Lunar Polar Hydrogen Mapper

→ H+ σε μόνιμα σκιασμένες περιοχές αποθέσεις ~>600ppm κάτω από την επιφάνεια με φασματοσκοπία νετρονίων

ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ
επιστημονικό - οικονομικό
ενδιαφέρον
προβληματισμοί



- Ήλιο-3 (^3He): μη ραδιενεργό, ενέργεια, καύσιμο
- Υδρογόνο: καύσιμο
- Νερό: ζωή, καλλιέργειες εκτός Γης, καύσιμο
- Σπάνιες γαίες (15 λανθανίδες, σκάνδιο, ύτριο) * : έξυπνες τεχνολογίες, Η/Υ, ιατρικός εξοπλισμός (κυρίως στην Κίνα, αύξηση 10-15% αναγκών ετησίως)
- Σίδηρος, Τιτάνιο, Νικέλιο, Ουράνιο



Εκτίμηση αποθεμάτων U-Th-REE $\sim 2.2 \times 10^8 \text{ km}^3$ ⁽²⁾

- 1) Heggy *et al.*, **Bulk composition of regolith fines on lunar crater floors: Initial investigation by LRO/Mini-RF**, *Earth and Planetary Science Letters*, 2020.
- 2) McLeod & Shaulis, **Rare Earth Elements in Planetary Crusts: Insights from Chemically Evolved Igneous Suites on Earth and the Moon**, *Minerals*, 2018.
- 3) <https://universemagazine.com/en/the-moon-as-a-source-of-rare-earth-metals/>, 2022

Εκμετάλλευση φυσικών πόρων (~2025)

προκλήσεις

Τεχνολογίες

Υποδομές (μόνιμη βάση, αποθηκευτικοί χώροι, πηγές ενέργειας), έξυπνα αυτόνομα robots, τεχνολογίες εξόρυξης... (3D printing?, αλλά περιορισμοί στην θερμοκρασία, +20C)

πλεονεκτήματα

Εξόρυξη 1 τόνου/ημέρα :

- ✓ 220 χρόνια για την αφαίρεση 1% της μάζας της
- ✓ καμία αλλαγή στην τροχιά ή βαρύτητα

περιβαλλοντικές ανησυχίες/ ηθικά ζητήματα

- ✓ Η Σελήνη είναι πολιτιστική κληρονομιά της Γης στις επόμενες γενεές. Επιπτώσεις?
- ✓ Οπτικές αλλαγές?
- ✓ Ποιοι θα είναι οι stakeholders?

→ Συνθήκη του ΟΗΕ (1967) για το Διάστημα^(*): **«κανένα έθνος δεν μπορεί διεκδικήσει ιδιοκτησία στη Σελήνη»**...ιδιώτες, ιδιωτικές εταιρείες???

→ **2020**: "NASA Selects Companies to Collect Lunar Resources for Artemis Demonstrations"...

* UN Outer Space Treaty (1966):

<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html>

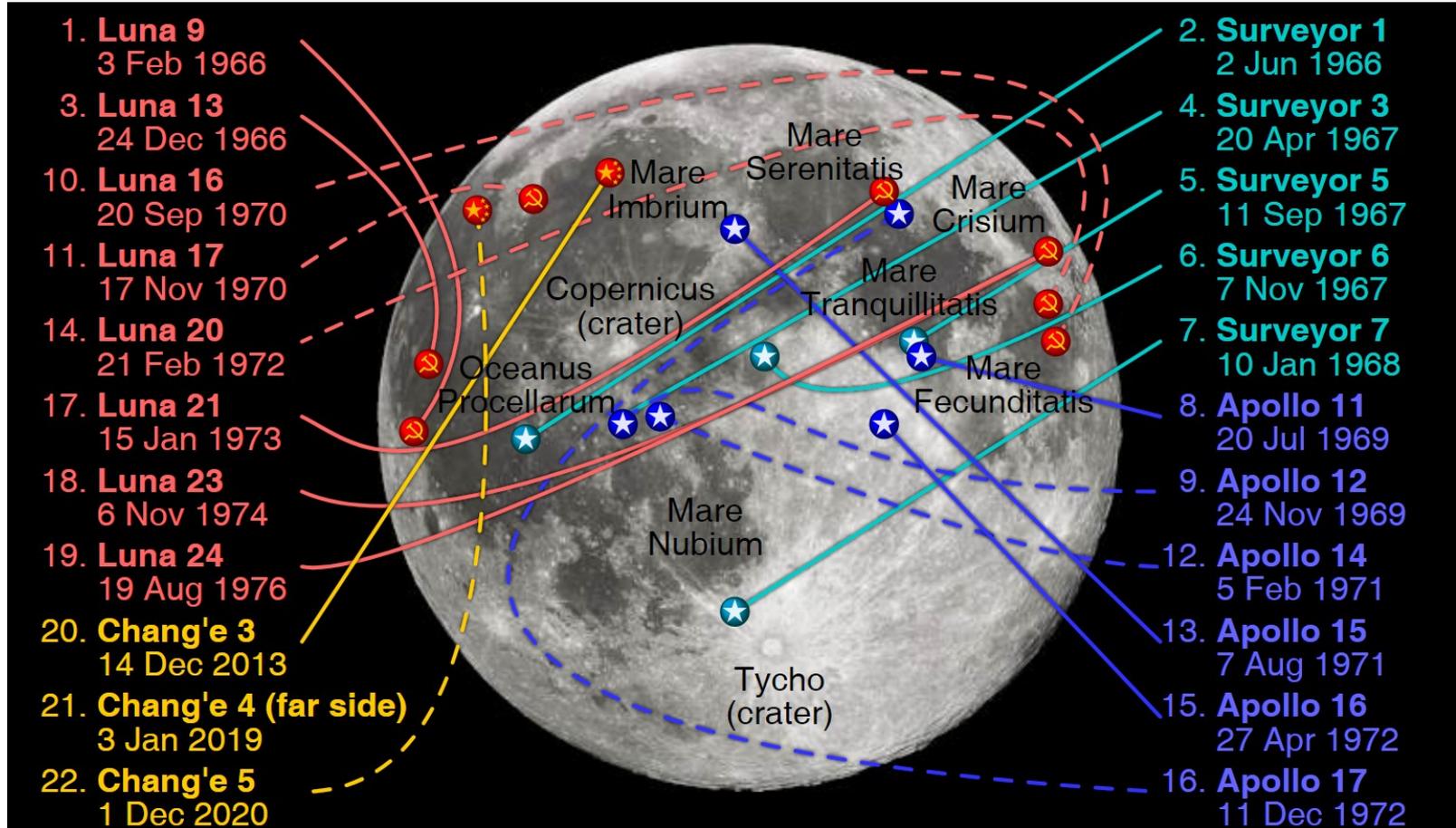
<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-selects-companies-to-collect-lunar-resources-for-artemis-demonstrations>

3. Διαστημικές αποστολές

(το 2022, οι συνεργασίες της Roscosmos με ESA/NASA ακυρώθηκαν ενώ ανακοινώθηκε ότι οι ρωσικές αποστολές LUNA 6+ συνεχίζονται μεν αλλά δεν αποτελούν πλέον προτεραιότητα για τη Ρωσία.

Ωστόσο, η Ρωσία συνεργάζεται πλέον με την Κίνα για την κατασκευή Διαστημικού Σταθμού σε τροχιά γύρω από τη Σελήνη)

Μέχρι σήμερα ...





Σύγχρονες και μελλοντικές αποστολές – διαστημικά προγράμματα

ESA Lunar Exploration



European Service Module for ARTEMIS 1

- Orion and the European Space Module (ESM) - Νέες τεχνολογίες για **μεταφορά ανθρώπων στο διάστημα** (συμμετοχή και στο πρόγραμμα ARTEMIS)
- ISRU (IN-SITU RESOURCE UTILISATION)
 - Demonstration mission
 - 2025
 - **επιτόπια εξαγωγή και επεξεργασία φυσικών πόρων**
 - **παραγωγή πόσιμου νερού και οξυγόνου**

https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation

https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Off-Earth_manufacturing_using_local_resources_to_build_a_new_home

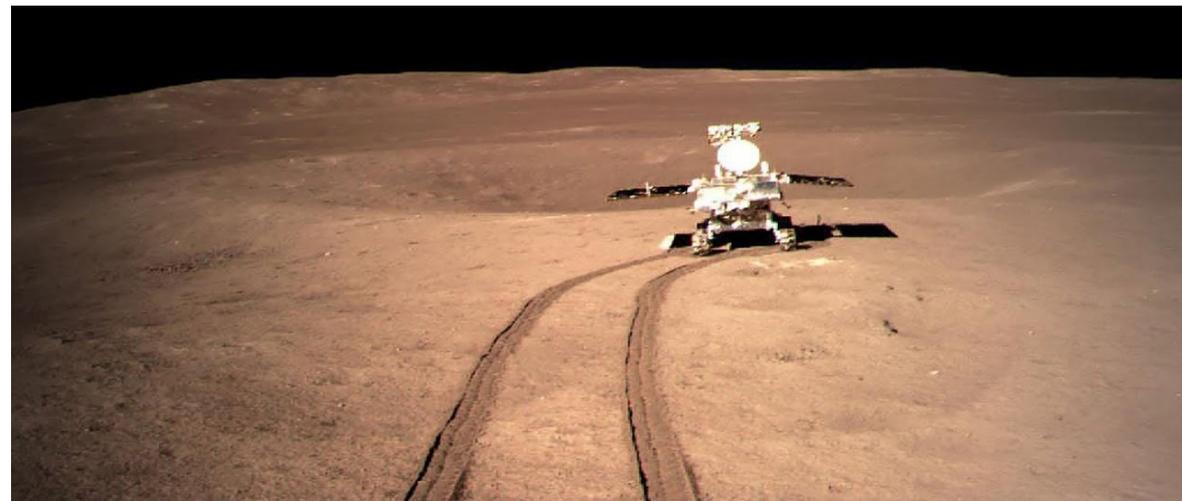
https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Open_Space_Innovation_Platform_OSIP

Chinese Lunar Exploration programme



Εικόνα της αθέατης πλευράς, **Chang'e 3**.
*Image courtesy of Chinese Academy of Sciences /
China National Space Administration*

Συλλογή δειγμάτων από το Chang'e 5,
Δεκέμβριος 2020



3/1/2019: Τα πρώτα βήματα του μικρού rover **Jade Rabbit 2 (Yutu 2)** του **Chang'e 4** στη
αθέατη πλευρά της Σελήνης...

Phase II: Soft landers/rovers

Chang'e 4 (2019): 1^η ρομποτική αποστολή στην
αθέατη πλευρά: South Pole -Aitken crater

Phase III: Αποστολή δειγμάτων στη Γη

Chang'e 5 (2020): **Συλλογή και αποστολή
δειγμάτων στη Γη (1.79 kg).**

Phase IV: Ρομποτικός ερευνητικός σταθμός κοντά στο Νότιο Πόλο

Chang'e 6 (2023-2024): ρομποτική,
**τοπογραφία, σύσταση, υπόγειες δομές, κύκλος
νερού, 2^η αποστολή δειγμάτων στη Γη**

Chang'e 7 (2024): **N. Πόλος**. **Orbiter, lander, rover,
relay satellite και μικρός ανιχνευτής νερού μέσα
σε κρατήρες**. Γεωλογία, νερό/πάγος,
αναζήτηση/εκμετάλλευση φυσικών πόρων,
προετοιμασία για διαμονή αστροναυτών το 2030.

Chang'e 8: δοκιμή νέων τεχνολογιών (3D printing),
αξιοποίησης τοπικών φυσικών πόρων

International Lunar Research Station (ILRS) (2030s)
σε συνεργασία με τη Ρωσία και άλλους.

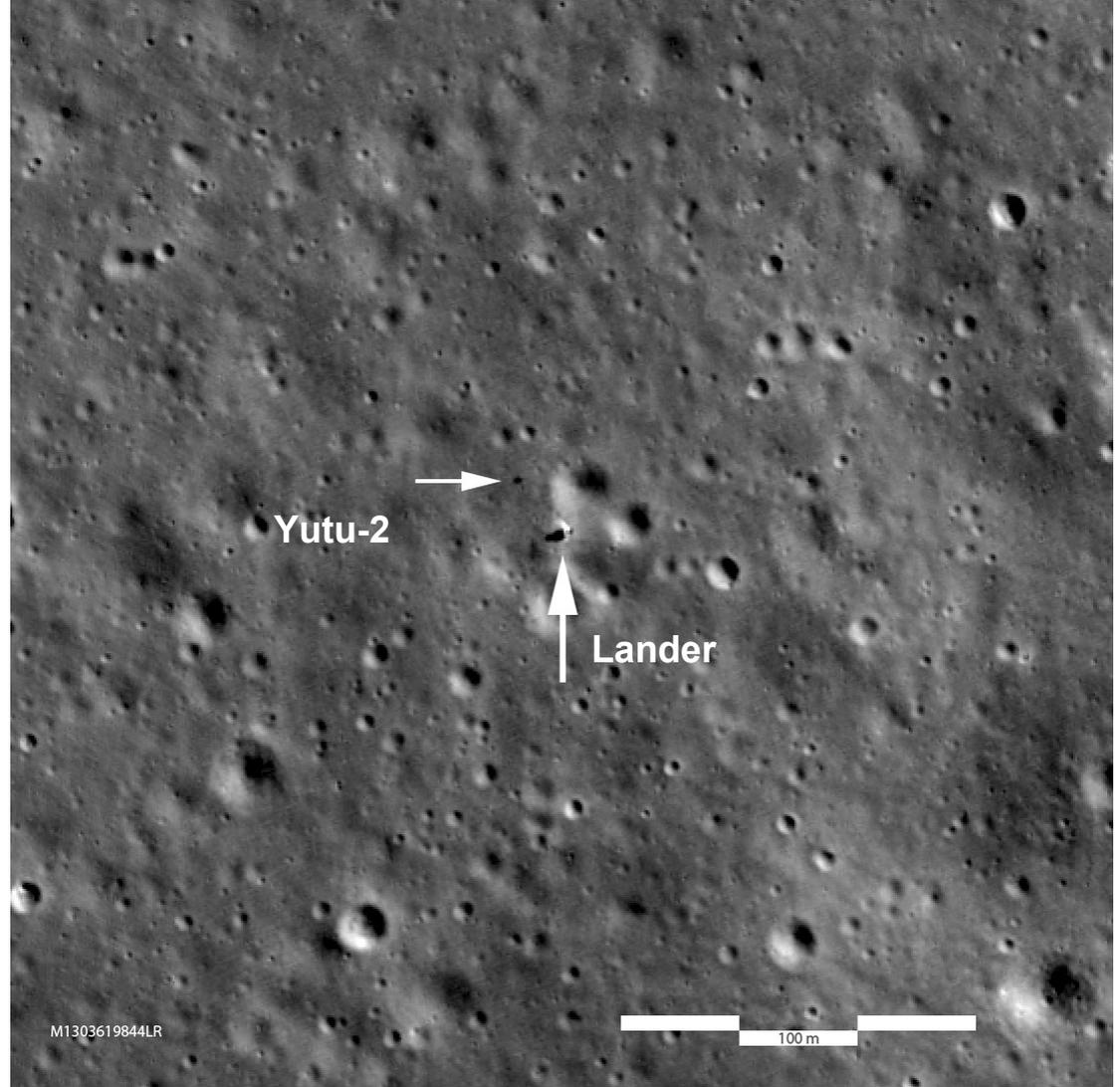
Chang'e 4 lander & Yutu-2 rover

1/02/2019

Φωτο: Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) (σε τροχιά).

Υψόμετρο: 82 km.

Απόσταση μεταξύ lander και rover ~29m



Indian (ISRO) Lunar Exploration Programme



Εκτόξευση του Chandrayaan-2

Phase I: Orbiter and Impactor

- Chandrayaan-1 (2008): πρώτη ανακάλυψη νερού, γεωλογική χαρτογράφηση της Σελήνης

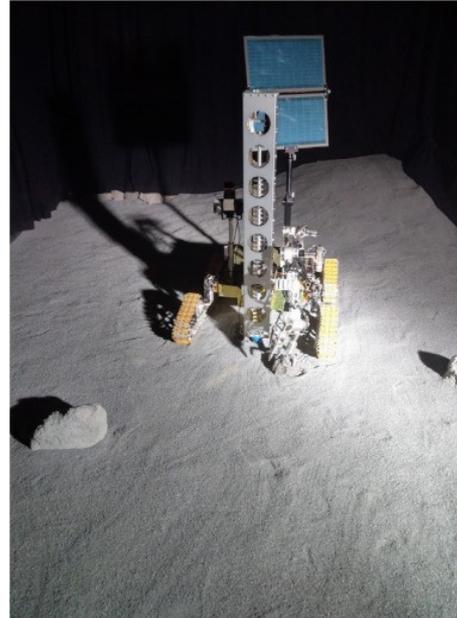
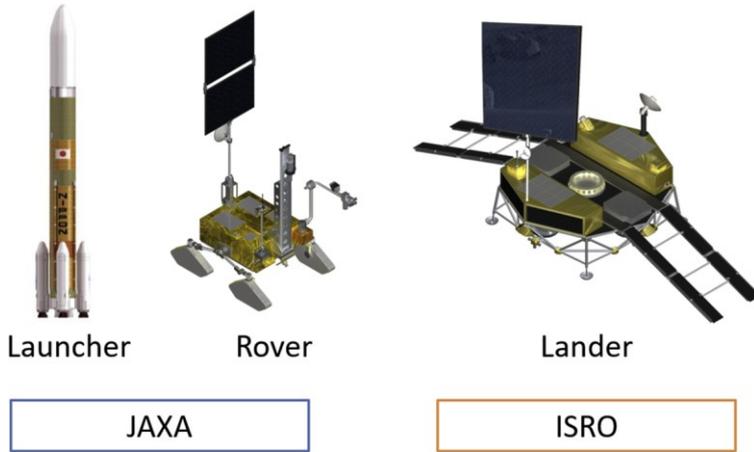
Phase II: Soft landers and rovers

- Chandrayaan-2 (22/7/2019) – ενεργό για 7.5 χρόνια
- Chandrayaan-3 (2023) lander, rover και propulsion module

Phase III: On site sampling

- LUPEX (2024)
- συνεργασία με JAXA

LUPEX: Indian (ISRO) - Japanese (JAXA) Joint Lunar Exploration programme



Rover test model με γεωτρητικό τρυπάνι

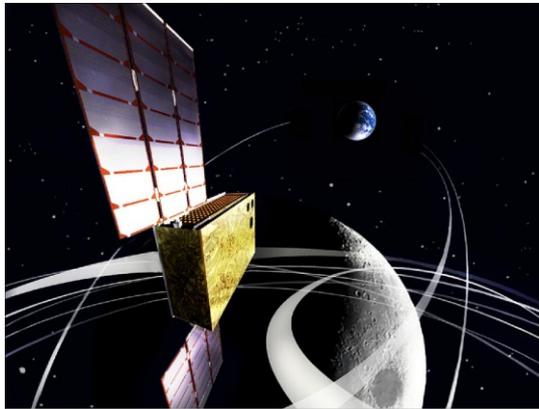
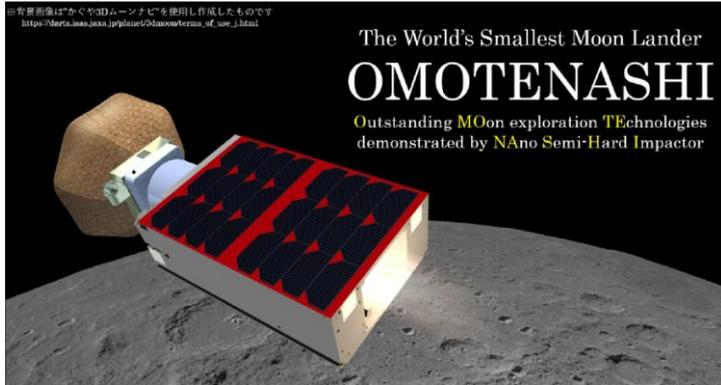
- Lander and rover
- Περιοχή: Νότιος Πόλος
- Εκτόξευση ~ 2024

JAXA: πύραυλος εκτόξευσης + rover

ISRO: όχημα προσελήνωσης

- αναζήτηση **αποθέσεων πάγου νερού με γεώτρηση**
- ανάπτυξη **νέων τεχνολογιών μεταφοράς με όχημα και επιβίωση τη σεληνιακή νύχτα στις πολικές περιοχές**

JAXA/UTokyo: OMOTENASHI και EQUULEUS



Payloads 1ης πτήσης της νέας αποστολής της NASA SLS (Space Launch System) EM-1: 2/3 Deep-space 6U CubeSat missions by international partners

Διαστάσεις: 10 x 20 x 30 cm, συνολικά ~14kg

A. Outstanding MOon exploration TEchnologies demonstrated by Nano Semi-Hard Impactor (OMOTENASHI)

CubeSat + lander (το μικρότερο lander μέχρι σήμερα)

- Low-cost τεχνολογία προσελήνωσης και επιφανειακής εξερεύνησης
- Μετρήσεις ακτινοβολίας κοντά και επάνω στην επιφάνεια

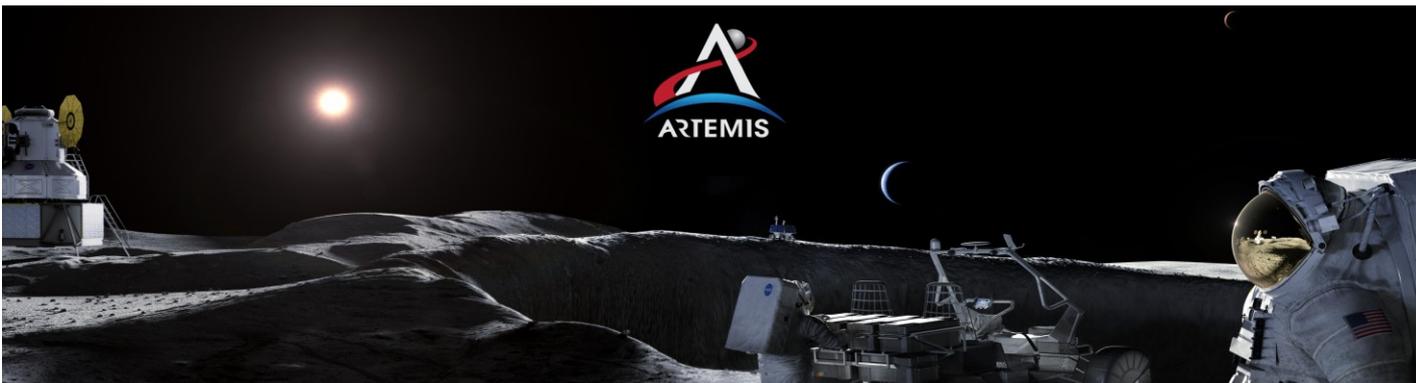
B. EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft (EQUULEUS)

Η μικρότερη διαστημοσυσκευή που θα φτάσει στο L2 (Earth-Moon Lagrange point 2) της Σελήνης

- Πλοήγηση, έλεγχος κατεύθυνση
- Εικόνες παρατήρησης της γήινης πλασμόσφαιρας
- Σεληνιακή σκόνη
- Εκλάμψεις από μετεωρητικές πτώσεις στην αθέατη πλευρά
- Δυνατότητα κατασκευής Deep Space port σε σημείο Lagrange

NASA: Το πρόγραμμα ARTEMIS

<https://www.nasa.gov/specials/artemis/>



ARTEMIS I: δοκιμή εκτόξευσης

Παρασκευή 23 Σεπτεμβρίου, 6:47a.m. EDT*

(backup Sept. 27)

ARTEMIS II: May 2024

ARTEMIS III: 2025

...

ARTEMIS VI: 2027

SUSTAINABLE HUMAN LUNAR PRESENCE: 2028

ASTRONAUTS ON MARS: 2030

1^η γυναίκα και ο επόμενος άνδρας
αστροναύτης στη Σελήνη μετά τις
αποστολές APOLLO.

Διεθνής σύμπραξη διαστημικών
υπηρεσιών, ιδιωτικού τομέα,
ερευνητικών οργανισμών και
πανεπιστημίων

* 6:45πμ, ώρα Αθήνας



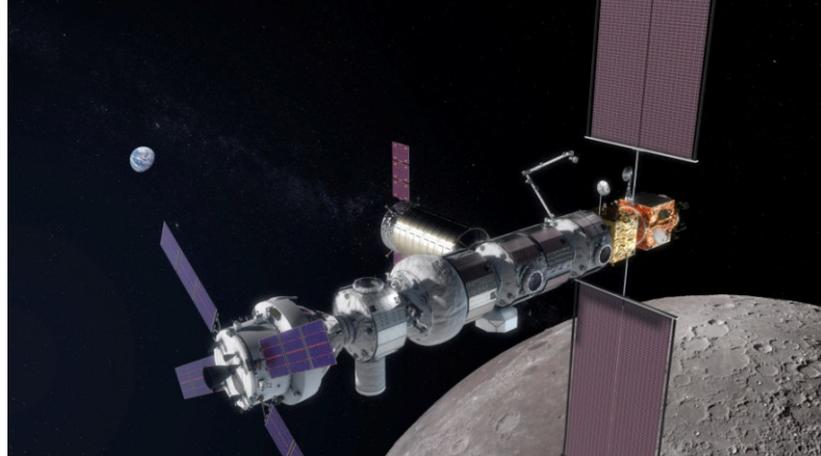
Οι αποστολές ARTEMIS

Καινοτόμες τεχνολογίες:

- Deep Space Gateway: Διαστημικός Σταθμός σε τροχιά (LOP-G)
- Artemis Surface Camp στο Ν. Πόλο (καμπίνα, rover, κινητό σπίτι, στόχος: διαμονή 1-2 μήνες)
- Orion: κάψουλες μεταφοράς
- Στολές αστροναυτών για Deep Space exploration
- Ρομποτικά συστήματα, όργανα, τεχνολογίες

Στόχοι:

- Νερό, ορυκτοί πόροι, δοκιμές μακροπρόθεσμης διαμονής στο διάστημα
- Επιβίωση σε επιφάνεια ουράνιου σώματος μακριά από τη Γη
- Επικύρωση τεχνολογιών για την αποστολή αστροναυτών στον Άρη (και όχι μόνο...)
- **Νέα επιστημονική γνώση!**



LOP-G: Διαστημικός σταθμός σε τροχιά. Πειράματα, βραχυπρόθεσμη παραμονή αστροναυτών, αφετηρία επίγειων ρομποτικών κι επανδρωμένων αποστολών στο Νότιο Πόλο, βάση για ταξίδια στον Άρη, αστεροειδείς κλπ.



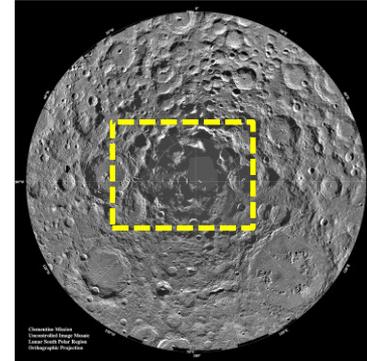
Orion: κάψουλες μεταφοράς αστροναυτών στη Σελήνη, στον Άρη, αστεροειδείς

ARTEMIS III: υποψήφιες περιοχές προσελήνωσης

Ανακοίνωση 19/8/2022

<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-identifies-candidate-regions-for-landing-next-americans-on-moon>

Credits: NASA



13 περιοχές στο Νότιο Πόλο (διάμετρος 100m)

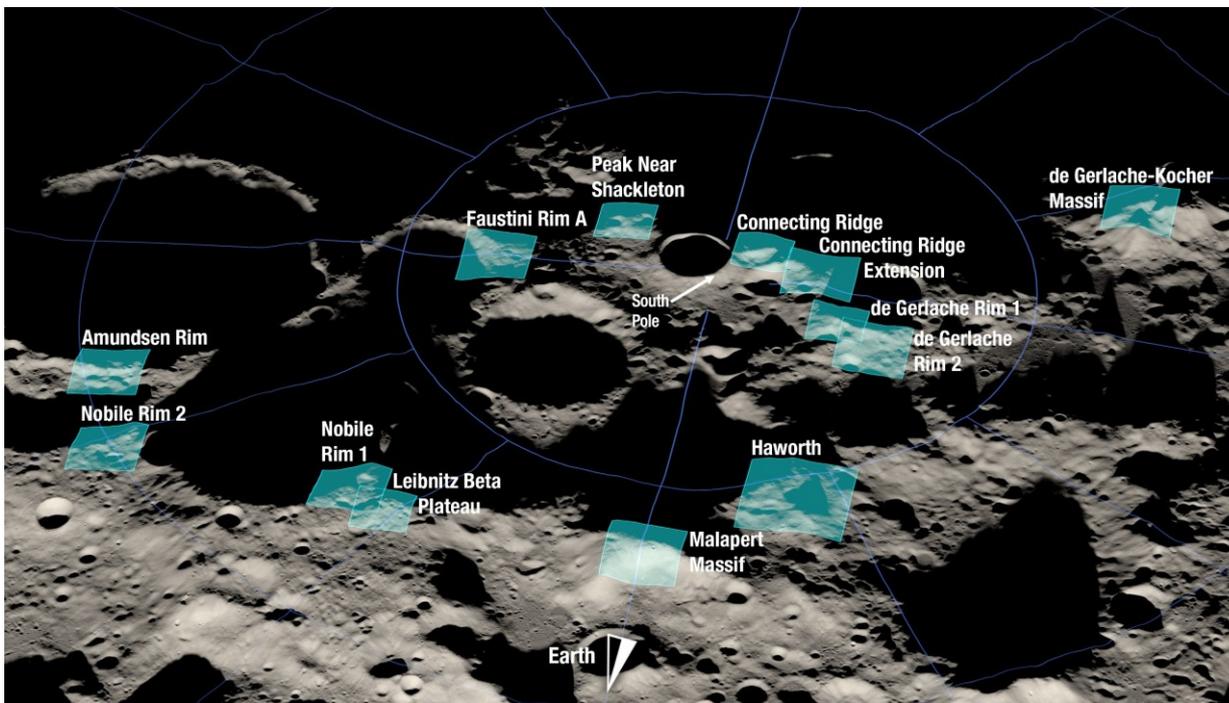
Σε κάθε περιοχή:

- ✓ πολλαπλές θέσεις προσελήνωσης
- ✓ πλήρωμα 2 αστροναυτών που θα μείνει στην επιφάνεια ~1 εβδομάδα.
- ✓ έκταση εξερεύνησης 15 x 15 km
- ✓ διαφορετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά

Όλες επιστημονικά σημαντικές λόγω:

εγγύτητας στο Νότιο Πόλο (μόνιμα σκιασμένες περιοχές με σημαντικά αποθέματα νερού και ορυκτών πόρων)

δεν έχουν εξερευνηθεί ποτέ από τον άνθρωπο, κάποιες είναι στα πιο παλιά πετρώματα της Σελήνης





EXPLORE MOON *to* MARS

MOON LIGHTS THE WAY

Μια άλλη συναρπαστική ιστορία...

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας...

“...Το φεγγάρι παρατηρούσε τη Γη από κοντά για περισσότερο χρόνο από οποιονδήποτε. Υπήρξε μάρτυρας όλων των φαινομένων και κάθε πράξης που έχουμε κάνει ως ανθρώπινο είδος πάνω σε αυτόν τον πλανήτη. Και παρέμενε σιωπηλό. Δεν έλεγε ιστορίες. Αγκάλιαζε μόνο το βαρύ παρελθόν με μια ψυχρή αποστασιοποίηση. Στο φεγγάρι δεν υπήρχε αέρας ούτε άνεμος. Το κενό του ήταν ιδανικό για να διατηρηθούν οι μνήμες ...”

- Haruki Murakami, IQ84



Contact info:

Δρ. Ολγα Συκιώτη

Κύρια Ερευνήτρια

Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

<http://astro.noa.gr>

email: sykioti@noa.gr

Τηλ. 210-8109195