



## Νέο Ψηφιακό Πλανητάριο

Ψηφιακή παράσταση Θόλου

Πώς γεννήθηκε η Γη και πώς εξελίχθηκε στο πέρασμα του χρόνου; Πώς σχηματίστηκαν οι οροσειρές στην επιφάνειά της, αλλά και οι βαθιές τάφροι στον ωκεάνιο πυθμένα; Πώς προκαλούνται οι σεισμοί και οι ηφαιστειακές εκρήξεις; Και γιατί σήμερα η Αφροδίτη και ο Άρης είναι τόσο εχθρικοί στην ζωή, σε αντίθεση με τον πλανήτη μας; Παρόλο που γνωρίζουμε ήδη πολλά, η προσπάθειά μας να διευρύνουμε τις γνώσεις μας για την γένεση και την εξέλιξη του Ηλιακού συστήματος συνεχίζεται. Σας προσκαλούμε σ' ένα συναρπαστικό ταξίδι στον χρόνο για να ανακαλύψουμε την Ιστορία της Γης.

# Η Βιβλίο Παράστασης ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ





ΊΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

# Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ  
Αστρονόμου Ευγενιδείου Πλανηταρίου

ΑΘΗΝΑ 2021



ΠΡΟΛΟΓΟΣ ...4

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ...6



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΑΡΧΕΓΟΝΗ ΓΗ ...18



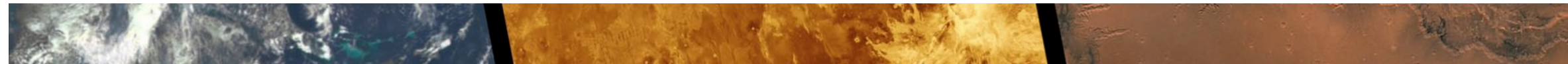
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ...30



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΓΗ, Η ΑΦΡΟΔΙΤΗ ΚΑΙ Ο ΑΡΗΣ ...44



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ...58

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ...60

**Φωτογραφία εξωφύλλου:**

Καλλιτεχνική απεικόνιση της σύγκρουσης δύο πρωτοπλανητικών σωμάτων.

 Michael Elser, University of Zurich

Το Νέο Ψηφιακό Πλανητάριο του Ιδρύματος Ευγενίδου, ένα από τα μεγαλύτερα και καλύτερα ψηφιακά πλανητάρια στον κόσμο, συμβάλλει στην επιστημονική εκπαίδευση του κοινού της χώρας μας με πολλούς τρόπους, πρωτίστως όμως με τις ψηφιακές του παραγωγές. Από την έναρξη της λειτουργίας του το 2003, χρησιμοποιεί όλες τις δημιουργικές και τεχνικές δυνατότητες που παρέχουν τα σύγχρονα οπτικοακουστικά μέσα και οι νέες τεχνολογίες, τις οποίες συνδυάζει, προκειμένου να αφηγηθεί τα επιτεύγματα και την ιστορία της επιστήμης μ' έναν συναρπαστικό τρόπο. Μέσα από τις παραστάσεις του Πλανηταρίου, το ευρύ κοινό και οι μαθητές ενημερώνονται για την πρόοδο της επιστήμης, τις νέες τεχνολογικές εξελίξεις και διαφωτίζονται σχετικά με τη φύση της επιστημονικής έρευνας.

Η παράσταση του Νέου Ψηφιακού Πλανηταρίου «Η Ιστορία της Γης» καλύπτει το θέμα της δημιουργίας και της εξέλιξης του πλανήτη μας. Είναι πολύ συχνά τα ερωτήματα που δεχόμαστε από τους επισκέπτες του Πλανηταρίου, τόσο από το μαθητικό όσο και από το γενικό κοινό, σχετικά με την προέλευση του πλανήτη μας. Σήμερα, στην εποχή της υπερπληροφόρησης μέσω του διαδικτύου, υπάρχουν αμέτρητες πηγές, εύκολα προσβάσιμες, όπου μπορεί να βρει ο καθένας και η καθεμία στοιχεία για την Γη και το Ηλιακό σύστημα, χωρίς πολλά από αυτά να είναι επιστημονικά τεκμηριωμένα. Το βιβλίο αυτό, παραθέτοντας στο τέλος και τις αντίστοιχες επιστημονικές πηγές, έντυπες και ηλεκτρονικές, προσφέρει στους αναγνώστες μία έγκυρη παρουσίαση και απαντήσεις στα ερωτήματα σχετικά με το θέμα του. Πώς και πότε γεννήθηκε η Γη; Πώς εξελίχθηκε στο πέρασμα δισεκατομμυρίων ετών, για να φτάσει στην σημερινή της μορφή; Πώς σχηματίστηκαν οι επιβλητικές οροσειρές σε κάθε ήπειρο και οι βαθιές τάφροι στους ωκεανούς της; Πώς προκαλούνται οι σεισμοί και οι ηφαιστειακές εκρήξεις και γιατί οι γειτονικοί μας πλανήτες, δηλαδή ο Άρης και η Αφροδίτη, εξελίχθηκαν τόσο διαφορετικά από την Γη;

Το πρώτο κεφάλαιο του βιβλίου εστιάζει στην γένεση του Ηλιακού μας συστήματος, και ειδικότερα στον σχηματισμό του Ήλιου και των πλανητών που περιφέρονται γύρω του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα πρώτα στάδια της εξέλιξης της αρχέγονης Γης, περιλαμβανομένου του σχηματισμού της Σελήνης, ενώ γίνεται αναφορά στον κατακλυσμιαίο βομβαρδισμό της από αστεροειδείς και κομήτες, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο σχηματίστηκε η πρώτη της πυκνή ατμόσφαιρα και οι πρώτοι ωκεανοί. Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερα η θεωρία των τεκτονικών πλακών, που δίνει απαντήσεις σε αρκετά από τα ερωτήματα που τέθηκαν πιο πάνω, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο εξηγούνται οι βασικοί λόγοι για τους οποίους η ζωή στέριωσε στην Γη και όχι στην Αφροδίτη και τον Άρη.

Θεωρούμε ότι τα θέματα που έχουμε συμπεριλάβει σε αυτό το βιβλίο, καθώς και η σχετική βιβλιογραφία που παρατίθεται, συμπληρώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όλα όσα παρουσιάζονται στην παράσταση και ευελπιστούμε ότι θα αποτελέσει χρήσιμο βοήθημα για κάθε ενδιαφερόμενο. Το συγκεκριμένο βιβλίο που συνοδεύει την παράσταση, όπως και όλα τα προηγούμενα, έχουν αναρτηθεί στην ιστοσελίδα του Ίδρύματος Ευγενίδου, στην Ενότητα [Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Πλανηταρίου](#), ελεύθερα διαθέσιμα για το κοινό και τους εκπαιδευτικούς. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι, αρχής γενομένης από την ψηφιακή παράσταση «Αναζητώντας την Σκοτεινή Ύλη» και παράλληλα με το βιβλίο της παράστασης, συγγράφεται και ένας συνοπτικός Οδηγός λίγων σελίδων, ο οποίος απευθύνεται σε μαθητές, που κι αυτός είναι ελεύθερα διαθέσιμος στην πιο πάνω ενότητα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Αλέξη Δεληβοριά, διδάκτορα φυσικής του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, για τη συγγραφή του βιβλίου αυτού, καθώς και όλους τους συναδέλφους της Ομάδας Εκδόσεων του Ίδρύματος Ευγενίδου για την επιμέλειά του. Θα ήταν, τέλος, παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα και όλους τους συνεργάτες του Πλανηταρίου μας που συμμετείχαν στη δημιουργία της νέας παράστασης και των οποίων τα ονόματα παρατίθενται στην τελευταία σελίδα του.

Δρ. Μάνος Κιτσώνας  
Διευθυντής Ευγενιδείου Πλανηταρίου



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

**Η** θεωρία που περιγράφει την προέλευση του Ηλιακού συστήματος έχει τις ρίζες της στην «νεφελοειδή υπόθεση», που πρώτος διατύπωσε ο Γερμανός φιλόσοφος **Immanuel Kant** (1724-1804) και ανέπτυξε περαιτέρω ο Γάλλος μαθηματικός και αστρονόμος **Pierre-Simon Laplace** (1749-1827) στη διάρκεια του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Αν και σε γενικές γραμμές η θεωρία αυτή είναι σωστή, η βαθύτερη κατανόηση συγκεκριμένων σταδίων στην εξέλιξη του Ηλιακού συστήματος, αλλά και συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των ουράνιων σωμάτων που εμπεριέχει, παραμένει προβληματική σε κάποια σημεία της. Η έρευνα, φυσικά, συνεχίζεται.





Ο Ήλιος είναι ένα σχετικά μικρό άστρο, γύρω απ' το οποίο έχει σχηματιστεί ένα πλανητικό σύστημα με 8 πλανήτες, τουλάχιστον 5 νάνους πλανήτες, δεκάδες δορυφόρους και αναρίθμητα ακόμη μικρότερα ουράνια σώματα, όπως αστεροειδείς και κομήτες. Οι 4 πλησιέστεροι στον Ήλιο πλανήτες, δηλαδή ο Ερμής, η Αφροδίτη, η Γη και ο Άρως, έχουν μικρή μάζα και μεγάλη πυκνότητα, ενώ απαρτίζονται κυρίως από πυριτιούχα πετρώματα και μέταλλα. Στην διαχωριστική γραμμή μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών πλανητών βρίσκεται η **Ζώνη των Αστεροειδών**, που αποτελείται από βραχώδη συντρίμμια του πρώιμου Ηλιακού Συστήματος, ενώ εκεί βρίσκεται και η Δήμητρα, ο πλησιέστερος στην Γη νάνος πλανήτης.

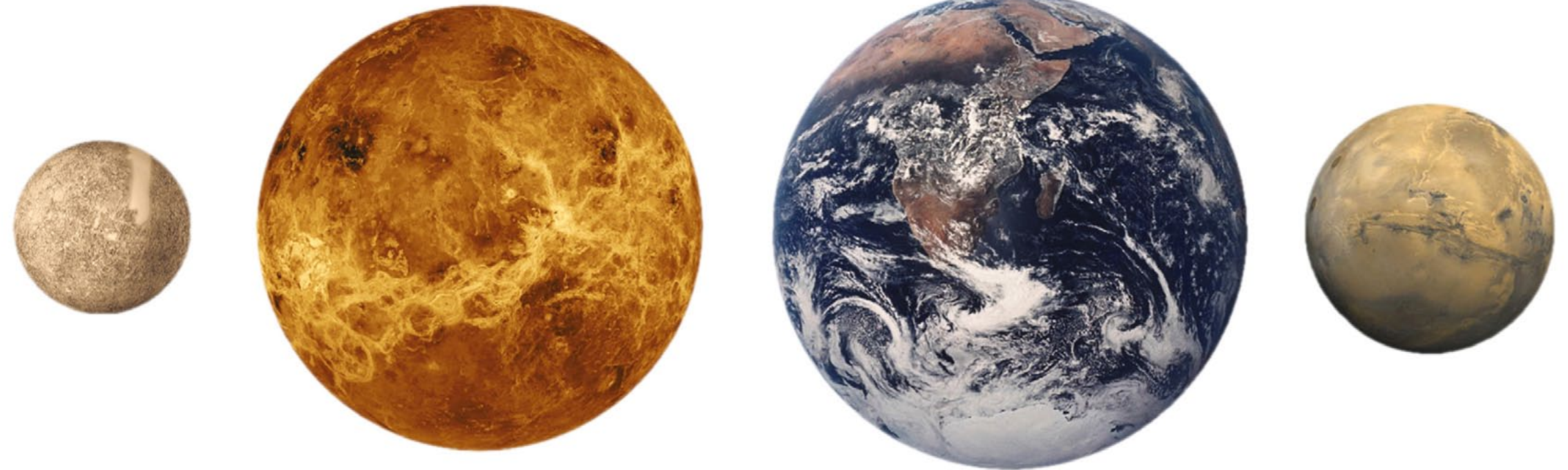
Σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις εκτείνεται το βασίλειο των αέριων γιγάντων, δηλαδή του Δία και του Κρόνου, που αποτελούνται ως επί το πλείστον από υδρογόνο και ήλιο, καθώς και του Ουρανού και του Ποσειδώνα, οι οποίοι εμπεριέχουν μεγάλες ποσότητες παγωμένων πτητικών ενώσεων, όπως νερού, αμμωνίας και μεθανίου. Ακόμη μακρύτερα, σε αποστάσεις 30-55 ΑΜ<sup>1</sup> από τον Ήλιο, βρίσκεται η **Ζώνη Kuiper**. Τα ουράνια σώματα που την απαρτίζουν, αποτελούνται κυρίως από συσσωματώσεις παγωμένων πτητικών ενώσεων και πετρωμάτων, ενώ σ' αυτήν βρίσκεται ο νάνος πλανήτης Πλούτωνας, καθώς και τρεις ακόμη νάνοι πλανήτες που ανακαλύφθηκαν τα τελευταία χρόνια. Οι πλανήτες, τα ουράνια σώματα της Ζώνης

των Αστεροειδών και τα περισσότερα απ' αυτά που απαρτίζουν την Ζώνη Kuiper κινούνται σε επίπεδα τα οποία σε γενικές γραμμές συμπίπτουν με αυτό της **Εκλειπτικής**, δηλαδή με το επίπεδο που σχηματίζει η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο.

Υπάρχουν, όμως, πολλά ακόμη ουράνια σώματα, με ιδιαίτερα επιμήκεις τροχιές, οι οποίες μάλιστα τέμνουν το επίπεδο της Εκλειπτικής. Αυτά τα ουράνια σώματα συγκροτούν τον **Διάσπαρτο Δίσκο**, απ' τον οποίο

προέρχονται οι κομήτες με μικρή περίοδο περιφοράς γύρω από τον Ήλιο. Τέλος, σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις, οι οποίες υπερβαίνουν τις 50.000 ΑΜ από τον Ήλιο, εικάζεται ότι υπάρχει ένα σφαιρικό νέφος παγωμένων σωμάτων, το επονομαζόμενο **Νέφος Oort**. Πώς, λοιπόν, δημιουργήθηκε ο Ήλιος και το Ηλιακό μας σύστημα και πώς εξηγείται η διαφορά που παρατηρείται ως προς το μέγεθος και την χημική σύσταση των ουράνιων σωμάτων που το απαρτίζουν;

Το μεσοαστρικό Διάστημα εμπεριέχει ένα εξαιρετικά αραιό μείγμα αερίων και σκόνης, που ονομάζεται **μεσοαστρική ύλη**. Η μεσοαστρική ύλη αποτελείται κυρίως από αρχέγονο υδρογόνο και ήλιο, που δημιουργήθηκαν στα πρώτα λεπτά μετά τη Μεγάλη Έκρηξη, και από μόλις 1% σκόνη, που εμπεριέχει και ίχνη όλων των βαρύτερων στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά συντήχθηκαν στο εσωτερικό γιγάντιων άστρων, τα οποία διαμελίστηκαν σε εκρήξεις σουπερνόβα, εμπλουτίζοντας τον μεσοαστρικό χώρο μ' αυτά ακριβώς τα βαρύτερα στοιχεία που είχαν



Από αριστερά προς τα δεξιά, ο Ερμής, η Αφροδίτη, η Γη και ο Άρως

 NASA/Lunar and Planetary Institute

<sup>1</sup> Μία Αστρονομική Μονάδα ισούται με την μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο.





συνθέσει στο εσωτερικό τους. Γνωρίζουμε, λοιπόν, ότι τα άστρα γεννιούνται στις ψυχρότερες και πυκνότερες περιοχές της μεσοαστρικής ύλης, δηλαδή μέσα σε **γιγάντια μοριακά νέφη** αερίων και σκόνης. Με θερμοκρασίες που δεν υπερβαίνουν τους  $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , τα μεγαλύτερα από αυτά τα παγωμένα αστρικά μαιευτήρια εμπεριέχουν συνολική μάζα που επαρκεί για τη δημιουργία δεκάδων χιλιάδων άστρων, όπως ο Ήλιος.

Κάθε μοριακό νέφος παραμένει σε μία κατάσταση ασταθούς ισορροπίας, σε μία αέναη διελκυστίδα μεταξύ της ίδιας του της βαρύτητας που τείνει να το συρρικνώσει και της εσωτερικής του πίεσης, η οποία οφείλεται στη μικρή κινητική ενέργεια των σωματιδίων του νέφους και έχει την τάση να τα απομακρύνει το ένα από το άλλο. Επειδή, όμως, τα μοριακά νέφη είναι ψυχρά και κατά συνέπεια οι ταχύτητες των σωματιδίων που εμπεριέχουν πολύ μικρές, υπάρχουν στο εσωτερικό τους περιοχές, όπου η τάση τους να συσσωρευθούν υπερσχύει της τάσης τους να απομακρυνθούν.

Γ' αυτό, οποιαδήποτε διαταραχή, όπως είναι η σύγκρουση δύο διαφορετικών νεφών και η έκρηξη ενός γειτονικού σουπερνόβα, θα προκαλέσει την κατάρρευσή τους. Στην περίπτωση του Ηλιακού μας συστήματος, η ισορροπία του νέφους εικάζεται ότι διαταράχθηκε από μία έκρηξη σουπερνόβα, το κρουστικό κύμα της οποίας έδωσε το έναυσμα για τον σχηματισμό μικρότερων και πυκνότερων περιοχών εντός του νέφους, καθεμία από τις οποίες θα καταρρεύσει, σχηματίζοντας το δικό της άστρο. Μία από αυτές ήταν και το Ηλιακό νεφέλωμα, από το οποίο προήλθε το Ηλιακό σύστημα.


Αρχικά, το Ηλιακό νεφέλωμα είχε την δική του αργή πε-

ριστροφική κίνηση. Με την έναρξη της κατάρρευσής του, ωστόσο, η ταχύτητα περιστροφής του άρχισε να αυξάνει, όπως περίπου συμβαίνει και με έναν αθλητή της καλλιτεχνικής παγοδρομίας, που στροβιλίζεται πιο γρήγορα όταν φέρνει τα απλωμένα χέρια του προς το στήθος. Καθώς, λοιπόν, το Ηλιακό νεφέλωμα καταρρέει βαρυτικά και περιστρέφεται όλο και πιο γρήγορα, μετατρέπεται σταδιακά σ' έναν πεπλατυσμένο και περιστρεφόμενο δίσκο, γνωστό ως **πρωτοπλανητικό δίσκο**. Το μεγαλύτερο, όμως, ποσοστό από τα αέρια και την σκόνη του νεφελώματος συσσωρεύεται προς το κέντρο του δίσκου, μετατρέποντας τη δυναμική τους ενέργεια σε κινητική. Οι συγκρούσεις μεταξύ των επιμέρους σωματιδίων, αντιθέτως, μετατρέπουν την κινητική τους ενέργεια σε θερμότητα.

Αρχικά, το Ηλιακό νεφέλωμα ακτινοβολεί το πλεόνασμα της θερμικής του ενέργειας, διατηρώντας την εσωτερική του πίεση μικρότερη από τη βαρύτητα και διασφαλίζοντας έτσι ότι η κατάρρευσή του μπορεί να συνεχιστεί απρόσκοπτα. Καθώς, όμως, η πυκνότητά του αυξάνει διαρκώς, από κάποια στιγμή και μετά αδυνατεί να αποβάλει θερμότητα, φυλακίζοντάς την στο εσωτερικό του. Από το σημείο αυτό και μετά, η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η πίεση στον πυρήνα του πρωτοπλανητικού δίσκου αυξάνει ραγδαία, καθώς διαμορφώνεται εκεί ο πρωτοήλιος, δηλαδή μία περιστρεφόμενη υπέρθερμη σφαίρα αερίων, που είναι και το «έμβρυο» του Ήλιου που θα «γεννηθεί» σε λίγο.

Όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του πρωτοήλιου αγγίζει τους  $10\text{ εκατ. }^{\circ}\text{C}$ , οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες υδρογόνου, που σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απωθούσαν ο ένας τον άλλον εξαιτίας του ομώνυμου φορτίου τους, αρχίζουν και συντήκονται μεταξύ τους σε ήλιο,

**Οι Πυλώνες της Δημιουργίας, περιοχή αστρογένεσης εντός του νεφελώματος Αετός, ενός από τα γνωστότερα μοριακά νέφη**

 NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

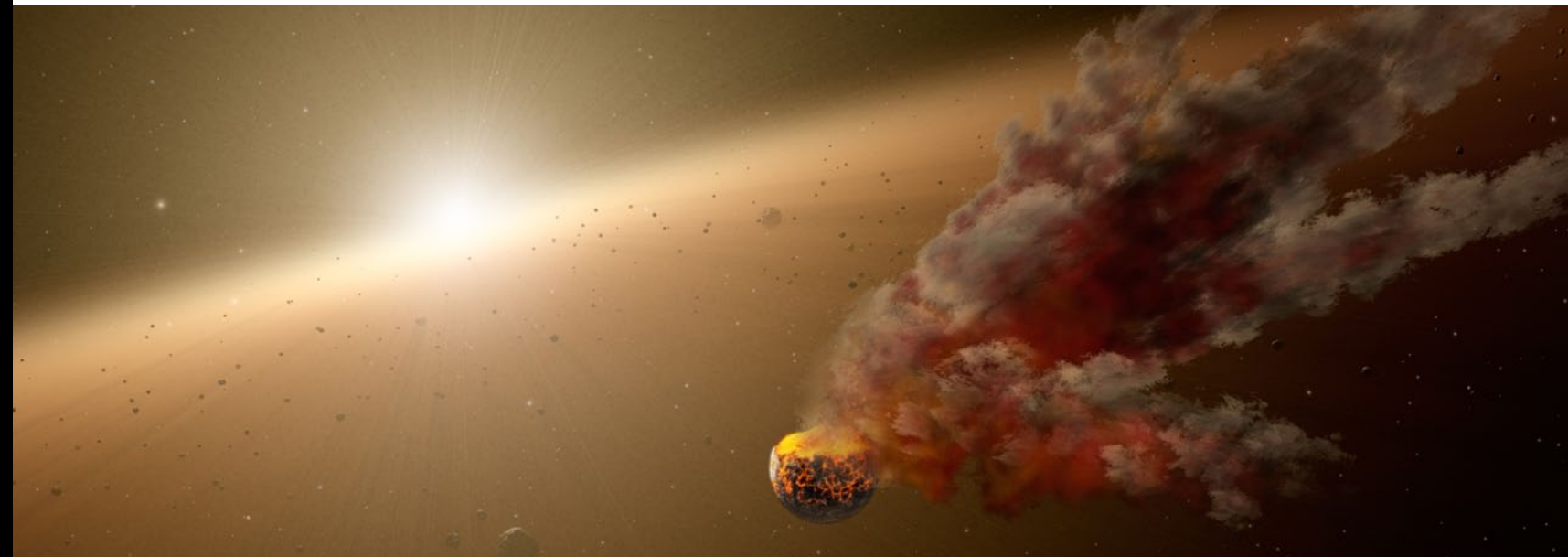




εκλύοντας τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Με την έναρξη αυτών των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης, η εσωτερική πίεση του νεογέννητου άστρου εξισορροπεί την περαιτέρω βαρυτική του κατάρρευση και ο Ήλιος εισέρχεται σε μία μακρά περίοδο ισορροπίας ως άστρο της **Κύριας Ακολουθίας**, όπως ονομάζεται. Αυτός είναι σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός γένεσης ενός νέου άστρου και κάπως έτσι σχηματίστηκε και ο Ήλιος πριν από περίπου 4,6 δισ. χρόνια.

Η πρωταρχική μαγιά, αντιθέτως, απ' την οποία θα σχηματιστούν οι πλανήτες, οι δορυφόροι, οι αστεροειδείς και οι κομήτες του Ηλιακού συστήματος απαρτίζεται από τους μικροσκοπικούς κόκκους σκόνης και τα αέρια του πρωτοπλανητικού δίσκου, που συνεχίζουν να στροβιλίζονται

γύρω από τον Ήλιο. Με τρόπο που δεν είναι ακόμη κατανοητός σε βάθος, τα σωματίδια αυτά αρχίζουν και κολλούν μεταξύ τους, διευρύνοντας το μέγεθός τους όλο και πιο πολύ. Καθώς, λοιπόν, οι συγκρούσεις μεταξύ τους συνεχίζονται, σχηματίζεται με την βοήθεια της βαρύτητας ένας τεράστιος αριθμός από όλο και μεγαλύτερες συσσωματώσεις ύλης, που σταδιακά φτάνουν σε μέγεθος μερικών χιλιομέτρων, τους επονομαζόμενους **πλανητοειδείς**. Οι συγκρούσεις μεταξύ των πλανητοειδών διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην τελική διαμόρφωση του Ηλιακού συστήματος. Πολλοί απ' αυτούς δεν κατόρθωσαν να επιβιώσουν, καθώς οι βιαιότερες συγκρούσεις τούς συνέτριβαν. Άλλοι πλανητοειδείς, ωστόσο, συγχωνεύονταν μέσα από ηπιότερες συγκρούσεις, επαυξάνοντας την μάζα τους όλο και περισσότερο και σχηματίζοντας σταδιακά **πρωτο-**



### Καλλιτεχνική αναπαράσταση της συντριβής ενός πλανητοειδούς σε έναν πρωτοπλανήτη


 NASA/JPL-Caltech

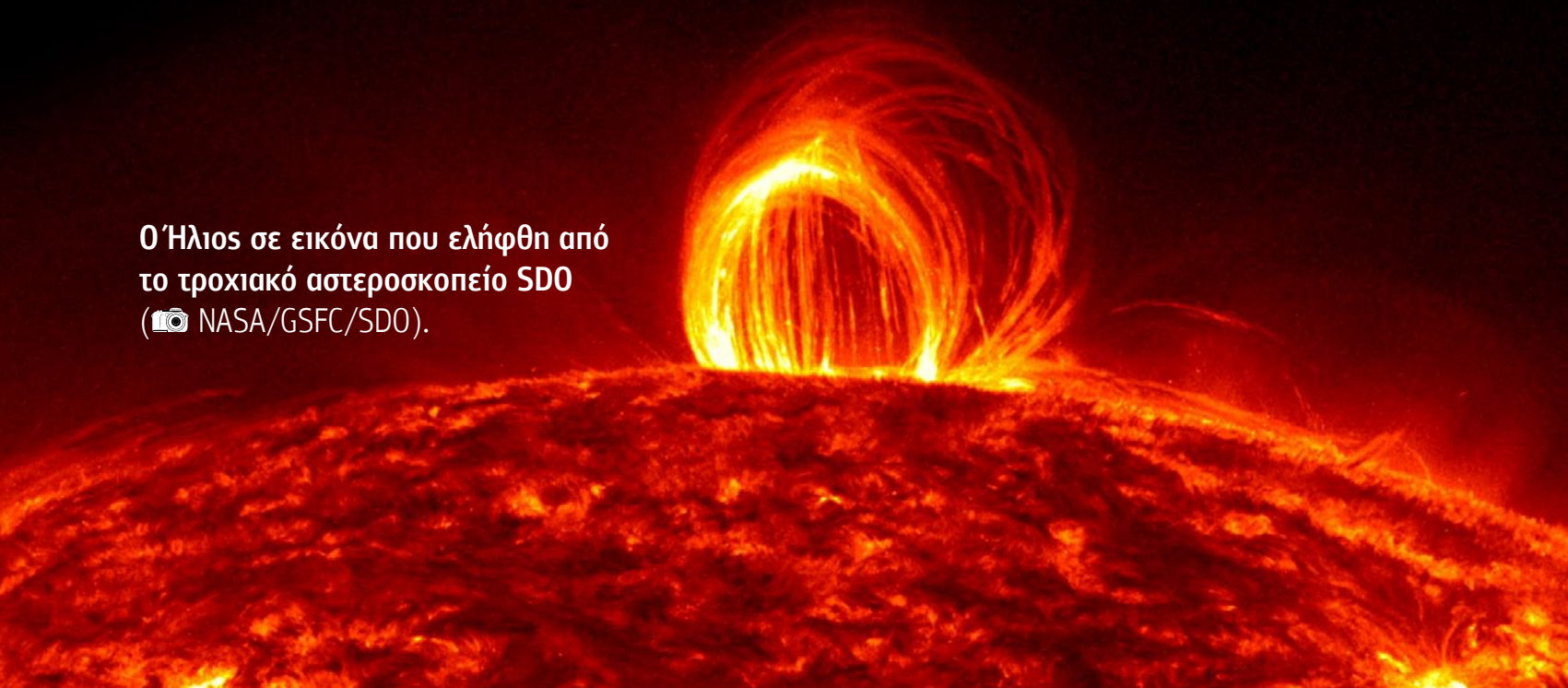
**πλανήτες** και εντέλει πλανήτες. Τα πλανητικά έμβρυα και οι γιγάντιοι πλανήτες εικάζεται ότι σχηματίστηκαν μέσα σε λίγα μόλις εκατ. χρόνια, ενώ οι βραχώδεις πλανήτες σχηματίστηκαν μέσα σε 30-100 εκατ. χρόνια.

Η θεωρία του Ηλιακού νεφελώματος, όπως περίπου την περιγράψαμε, εξηγεί πολλά από τα χαρακτηριστικά των πλανητών του Ηλιακού συστήματος. Για παράδειγμα, οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται στην χημική σύσταση και το μέγεθος των αέριων γιγάντων σε σχέση με τους εσωτερικούς πλανήτες οφείλεται στις συνθήκες που επικρατούσαν στο πρώιμο Ηλιακό σύστημα, όταν ακόμη διέφυγε τα πρώτα στάδια της εξέλιξής του. Σε γενικές γραμμές, ο πρωτοπλανητικός δίσκος εμπεριείχε κυρίως υδρογόνο

και ήλιο σε ποσοστό περίπου 98%, πάγους νερού, μεθανίου, αμμωνίας και άλλων πτητικών ενώσεων (1,4%), πυριτιούχα πετρώματα (0,4%) και μέταλλα (0,2%). Το μέγεθος, δηλαδή, και η σύσταση των πλανητών που σχηματίζονταν μέσα στον δίσκο καθορίστηκε από την περιεκτικότητά του σε αυτά τα υλικά και με αυτές περίπου τις αναλογίες, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πλησιέστερα στον Ήλιο η θερμοκρασία ήταν αρκετά υψηλότερη.

Ειδικότερα, η υψηλή θερμοκρασία στο εσωτερικό τμήμα του πρωτοπλανητικού δίσκου δεν επέτρεψε στις διάφορες πτητικές ενώσεις να συμπυκνωθούν περαιτέρω και να στερεοποιηθούν. Γι' αυτό και οι πλανητοειδείς που διαμορφώνονταν κοντά στον Ήλιο αποτελούνταν κυρίως

**Ο Ήλιος σε εικόνα που ελήφθη από το τροχιακό αστεροσκοπείο SDO**  
( NASA/GSFC/SDO).





από ενώσεις με υψηλό σημείο τήξης, όπως μέταλλα και ενώσεις πυριτίου. Επειδή, όμως, οι ενώσεις αυτές αντιστοιχούν, όπως είπαμε, σε ένα ελάχιστο ποσοστό της μάζας του πρωτοπλανητικού δίσκου, οι πλανητοειδείς και οι πρωτοπλανήτες που σχηματίζονταν στο εσωτερικό τμήμα του δεν επαύξησαν σημαντικά την μάζα τους, γι' αυτό και οι βραχώδεις πλανήτες παρέμειναν σχετικά μικροί σε μέγεθος.

Αντιθέτως, οι αέριοι γίγαντες δημιουργήθηκαν σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον Ήλιο, εκεί δηλαδή όπου οι αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες διατηρούσαν τις διάφορες πτητικές ενώσεις παγωμένες. Επειδή, όμως, αυτές υπήρχαν σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες απ' ό,τι οι ενώσεις πυριτίου και τα μέταλλα, οι πλανητοειδείς που σχηματίζονταν μακριά από τον Ήλιο κατόρθωσαν να αυξήσουν αρκετά περισσότερο την μάζα τους. Έτσι, λοιπόν, τα πλανητικά έμβρυα που σχηματίζονταν στο εξωτερικό Ηλιακό σύστημα και συσσωρεύαν περισσότερη μάζα, κατόρθωσαν με την μεγαλύτερη βαρυτική τους έλξη να «αιχμαλωτίσουν» και μεγάλες ποσότητες αερίου υδρογόνου και ηλίου.

Κάπως έτσι, ο αρχέγονος Δίας αύξησε τη μάζα του ραγδαία, ενώ ο Κρόνος, ο οποίος εικάζεται ότι δημιουργήθηκε μετά τον Δία, οφείλει τη μικρότερη μάζα του στο γεγονός ότι τα διαθέσιμα υλικά για τον σχηματισμό του ήταν εμφανώς λιγότερα, αφού τα περισσότερα είχαν ήδη καταλήξει στον Δία. Ο Ουρανός και

ο Ποσειδώνας από την άλλη, εικάζεται ότι σχηματίστηκαν μετά τον Δία και τον Κρόνο. Γι' αυτό και η περιεκτικότητά τους σε υδρογόνο και ήλιο είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν του Δία και του Κρόνου.

Παρόλο που ο σχηματισμός του Ηλιακού συστήματος, όπως περίπου τον περιγράψαμε, είναι σε γενικές γραμμές σωστός, αντιμετωπίζει ορισμένα προβλήματα. Γνωρίζουμε, για παράδειγμα, ότι τα αέρια του πρωτοπλανητικού δίσκου, που δεν κατέληξαν στον Ήλιο και δεν απορροφήθηκαν από τα πλανητικά έμβρυα, από κάποια στιγμή και μετά απομακρύνονται με την επίδραση του ηλιακού ανέμου, αλλά και άλλων φυσικών φαινομένων στα οποία δεν θα επεκταθούμε, και κατά συνέπεια ο ίδιος ο δίσκος διαλύεται σε χρονικές κλίμακες που δεν υπερβαίνουν τα λίγα μόλις εκατ. χρόνια από τον σχηματισμό

του. Επομένως, πώς «πρόλαβε» ο γιγάντιος Δίας να συσσωρεύσει πάνω του αυτές τις τεράστιες ποσότητες υδρογόνου και ηλίου, δεδομένου ότι τα αέρια αυτά πρέπει να είχαν ήδη απομακρυνθεί από τον πρωτοπλανητικό δίσκο αρκετά νωρίτερα; Στην προσπάθειά τους να απαντήσουν σε αυτό το ερώτημα, ορισμένοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι ο Δίας διέυρυνε την μάζα του με την βοήθεια ενός διαφορετικού φυσικού μηχανισμού, που ονομάζεται αστάθεια δίσκου. Σύμφωνα με αυτόν τον μηχανισμό, το πλανητικό έμβρυο του γιγάντιου πλανήτη σχηματίστηκε ταχύτατα, μέσα από την απευθείας κατάρρευση μίας πυκνότερης και βαρύτερης ασταθούς περιοχής του δίσκου και όχι μέσα από την σύγκρουση και συγχώνευση μικρότερων ουράνιων σωμάτων, όπως δηλαδή συνέβη με τους βραχώδεις πλανήτες.

### Ο πλανήτης Δίας

📷 NASA/JPL/Space Science Institute

### Προσομοίωση σχηματισμού αέριων γιγάντων, σύμφωνα με την θεωρία της αστάθειας δίσκου

📷 Mayer L., Quinn T., Wadsley J., Stadel J.,  
Science 298, 1756-59 (2002)



Ένα δεύτερο πρόβλημα αφορά στο μικρό μέγεθος του πλανήτη Άρη, καθώς σύμφωνα με την κλασική θεωρία του Ηλιακού νεφελώματος ο πλανήτης αυτός θα έπρεπε να έχει παραπλήσιο μέγεθος με την Γη. Αυτό το πρόβλημα εικάζεται ότι αντιμετωπίζεται στο πλαίσιο μίας σχετικά νέας υπόθεσης, η οποία προτάθηκε το 2011 και είναι γνωστή ως το **Πρότυπο της Μεγάλης Αναστροφής**. Σύμφωνα με αυτό, ο Δίας γεννήθηκε σε μικρότερη απόσταση από τον Ήλιο, σε σχέση με αυτήν στην οποία βρίσκεται σήμερα, πιθανώς μέσω του μηχανισμού της αστάθειας δίσκου. Εξαιτίας, όμως, των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων με την αρκετά πυκνότερη τότε ύλη του δίσκου, αλλά και της βαρυτικής έλξης από το εσωτερικό τμήμα του Ηλιακού συστήματος, ο Δίας άρχισε να στροβιλιίζεται όλο και πλησιέστερα προς τον Ήλιο. Την ίδια περίπου περίοδο, ο Κρόνος συνέχισε να επαυξάνει την μάζα του, ώσπου το μέγεθός του έγινε περίπου αυτό που είναι σήμερα. Εκείνη την στιγμή, ξεκίνησε κι αυτός την μετανάστευσή του προς το εσωτερικό Ηλιακό σύστημα. Όταν, όμως, ο Δίας έφτασε σε απόσταση περίπου 1,5 ΑΜ από τον Ήλιο, οι δύο αυτοί πλανήτες εισήλθαν σε **τροχιακό συντονισμό**, με τον Κρόνο να συμπληρώνει τρεις περιφορές γύρω από τον Ήλιο, την ίδια στιγμή που ο Δίας συμπλήρωνε δύο. Το αποτέλεσμα του συντονισμού αυτού ήταν να κάνει ο Δίας την μεγάλη αναστροφή, να αλλάξει δηλαδή την κατεύθυνση της μετανάστευσής του, κινούμενος μαζί με τον Κρόνο ξανά προς το εξωτερικό Ηλιακό σύστημα. Αυτή η

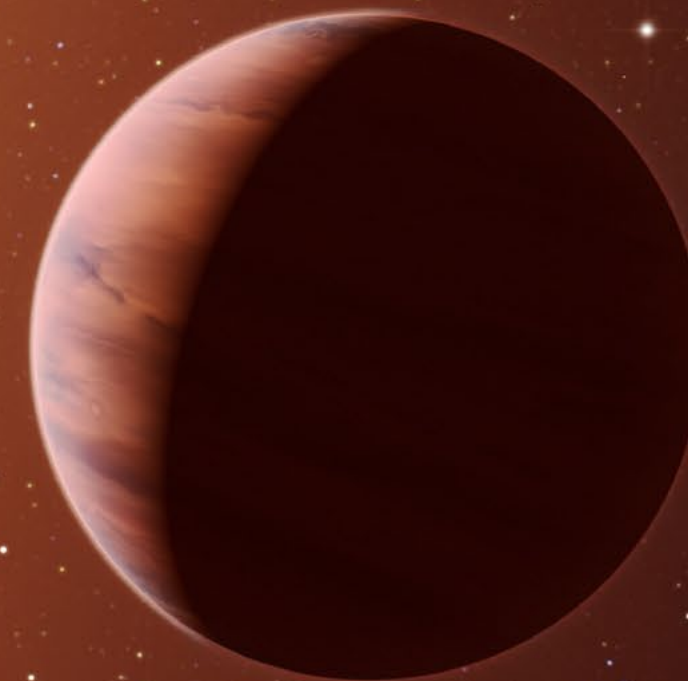
διπλή μετανάστευση του Δία εικάζεται ότι ολοκληρώθηκε στα πρώτα 5-10 εκατ. χρόνια της ιστορίας του Ηλιακού μας συστήματος.

Ένα από τα θετικά στοιχεία αυτού του προτύπου είναι ότι εξηγεί για ποιον λόγο δεν υπάρχει στο Ηλιακό μας σύστημα **θερμός Δίας**, δηλαδή γιγάντιος αέριος πλανήτης σε πολύ μικρή απόσταση από το άστρο του, όπως υπάρχει σε πολλά εξωηλιακά συστήματα που έχουμε ανακαλύψει. Ακόμη περισσότερο, όμως, το πρότυπο αυτό εξηγεί και το μικρό μέγεθος του Άρη, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι, με την μετανάστευσή του, ο Δίας μείωσε κατά πολύ τα υλικά του δίσκου που ήταν διαθέσιμα για τον σχηματισμό του κόκκινου πλανήτη, απορροφώντας τα με την βαρυτική του έλξη ή εκτινάσσοντάς τα μακριά.

Το επόμενο στάδιο στην εξέλιξη του Ηλιακού συστήματος περιγράφεται από το **Πρότυπο της Νίκαιας**, το οποίο διατυπώθηκε το 2005 από τους R. Gomes, H. Levison, A. Morbidelli και K. Τσιγάνη. Ωστόσο, δεν θα αναφερθούμε περισσότερο σ' αυτό, καθώς το Πρότυπο της Νίκαιας έχει παρουσιαστεί αναλυτικά από τον ίδιο τον Τσιγάνη στο βιβλίο [Το Μυστήριο της Ζωής](#). Όλα αυτά τα «σενάρια», καθώς και αρκετές ακόμη παραλλαγές τους, αποτελούν σήμερα ένα ενεργό πεδίο έρευνας, η αλήθεια όμως είναι ότι δεν έχουμε ακόμη πλήρη εικόνα γι' αυτήν την πρώιμη περίοδο της γένεσης και της εξέλιξης του Ηλιακού μας συστήματος ◀

Καλλιτεχνική αναπαράσταση θερμού Δία

ESO/L. Calçada





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Η ΑΡΧΕΓΟΝΗ ΓΗ

Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

**Η** Γη διαμορφώθηκε όπως είναι σήμερα στο πέρασμα δισεκατομμυρίων ετών, μέσα από titánies συγκρούσεις και κάτω από την ασταμάτητη επίδραση της βαρύτητας, των τεκτονικών δυνάμεων και της διάβρωσης από τα στοιχεία της Φύσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο πλανήτης μας άρχισε να σχηματίζεται πριν από σχεδόν 4,6 δισ. χρόνια, αρχικά συσσωρεύοντας ύλη από τον πρωτοπλανητικό δίσκο και στη συνέχεια μέσα από αλληπάλληλες συγκρούσεις και συγχωνεύσεις. Τα τεράστια αποθέματα θερμότητας στο εσωτερικό του αρχέγονου πλανήτη μας πρέπει αρχικά να τον διατηρούσαν σε ρευστή κατάσταση.

Καλλιτεχνική αναπαράσταση της αρχέγονης Γης  
NASA's Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab





Η θερμότητα αυτή στο εσωτερικό της Γης, όπως και στο εσωτερικό κάθε άλλου πλανήτη, οφείλεται κατά κύριο λόγο σε τέσσερεις φυσικούς μηχανισμούς, οι οποίοι επιδρούν συμπληρωματικά ο ένας στον άλλον καθ' όλη την διάρκεια της γεωλογικής της εξέλιξης, παράγοντας τεράστια ποσά θερμότητας. Ο πρώτος απ' αυτούς σχετίζεται με τον σχηματισμό των πλανητοειδών και των πρωτοπλανητών του Ηλιακού συστήματος, μέσα από αναρίθμητες συγκρούσεις μικρότερων διαστημικών συντριμμιών και την επακόλουθη παραγωγή τεράστιων ποσοτήτων θερμότητας, μέσα από την μετατροπή της κινητικής ενέργειας των συγκρουόμενων σωμάτων σε θερμότητα. Ο δεύτερος μηχανισμός παραγωγής θερμότητας στο εσωτερικό του πλανήτη μας ήταν η **βαρυτική συστολή**, το γεγονός δηλαδή ότι κατά τα πρώτα, κυρίως, στάδια του σχηματισμού της, η Γη συσσωρεύει πάνω της όλο και μεγαλύτερες ποσότητες ύλης από τα συντρίμια της γένεσης του Ηλιακού συστήματος, και καθώς η μάζα της αυξανόταν, η βαρυτική έλξη προς το κέντρο της μεγάλωνε επίσης. Η αυξανόμενη βαρύτητα της αρχέγονης Γης, με τη σειρά της, επέδρασε στον ίδιο τον πλανήτη, συμπιωνόντάς τον και μετατρέποντας μέρος από τη βαρυτική του ενέργεια σε θερμότητα.

Καθώς, λοιπόν, η Γη βρισκόταν ακόμη σε ρευστή κατάσταση, τα βαρύτερα μέταλλα βυθίστηκαν προς το κέντρο της, μετατρέποντας την βαρυτική δυναμική

τους ενέργεια σε θερμότητα και οδηγώντας έτσι στον διαχωρισμό ενός αρχέγονου μανδύα και ενός αρχέγονου μεταλλικού πυρήνα, που έδωσε αργότερα και το έναυσμα για τη δημιουργία του μαγνητικού του πεδίου. Αυτή η διαδικασία της **διαφοροποίησης**, όπως ονομάζεται, απελευθέρωσε ακόμη περισσότερη θερμότητα στο εσωτερικό του πλανήτη. Ο τέταρτος φυσικός μηχανισμός που συνέβαλε στην αύξηση της εσωτερικής θερμότητας της Γης οφείλεται στην διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων στο εσωτερικό της. Και οι τέσσερεις αυτοί φυσικοί μηχανισμοί, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο πλανήτης μας αποβάλλει την θερμότητα από το εσωτερικό του με βραδύ ρυθμό, συνέβαλαν ώστε, ακόμη και σήμερα, να διατηρεί μεγάλο μέρος από την πρωτογενή θερμότητα του αρχέγονου παρελθόντος του, αλλά και να παράγει νέα μέσα από την διαδικασία της ραδιενεργού διάσπασης, που συνεχίζεται και σήμερα.

Εκείνη την εποχή, τα υπολείμματα του υδρογόνου και του ηλίου που εμπεριείχε το Ηλιακό νεφέλωμα πρέπει να είχαν δημιουργήσει μία πρώτη, αλλά ιδιαίτερα αραιή ατμόσφαιρα γύρω από την αρχέγονη Γη, η οποία χάθηκε στο Διάστημα. Η απώλεια αυτής της πρωταρχικής ατμόσφαιρας του πλανήτη μας οφείλεται στην υψηλή του θερμοκρασία, που προσέδιδε μεγάλες ταχύτητες στα άτομα υδρογόνου και ηλίου, τα οποία διέφευγαν από την βαρυτική του έλξη, καθώς και στον ηλιακό άνεμο, μία

ασταμάτητη ροή φορτισμένων σωματιδίων, κυρίως πρωτονίων και ηλεκτρονίων, από την επιφάνεια του Ήλιου. Λίγο αργότερα, σχηματίστηκε και η Σελήνη. Σύμφωνα με μία από τις πρώτες υποθέσεις, η Σελήνη αποτελούσε τμήμα της αρχέγονης Γης, το οποίο αποκολλήθηκε, σχηματίζοντας τη λεκάνη του Ειρηνικού Ωκεανού. Σύμφωνα με μία άλλη υπόθεση, η Σελήνη σχηματίστηκε την ίδια περίοδο, στην ίδια περίπου περιοχή και με τον ίδιο περίπου τρόπο

που σχηματίστηκε και η Γη, ενώ άλλοι επιστήμονες υποστήριξαν κατά το παρελθόν ότι η Σελήνη είχε ήδη δημιουργηθεί σε κάποια άλλη περιοχή του Διαστήματος και αιχμαλωτίστηκε από την βαρυτική έλξη του πλανήτη μας. Όλες αυτές οι υποθέσεις έχουν πλέον αποκλειστεί, και η επικρατέστερη ερμηνεία για τον σχηματισμό του μοναδικού φυσικού μας δορυφόρου βασίζεται στην υπόθεση της **Γιγάντιας Πρόσκρουσης**.



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της Γιγάντιας Πρόσκρουσης

📷 Dana Berry/National Geographic.Creative





Σύμφωνα μ' αυτήν, η Σελήνη σχηματίστηκε όταν η αρχέγονη Γη συγκρούστηκε με ένα πρωτοπλανητικό σώμα στο μέγεθος του πλανήτη Άρη. Η τιτάνια σύγκρουση εκτίναξε χιλιάδες τόνους διάπυρης ύλης και εξαερωμένων πετρωμάτων στο Διάστημα, τα οποία συσσωρεύτηκαν σε σχήμα σφαιρικό και στερεοποιήθηκαν σχηματίζοντας εντέλει την Σελήνη. Η τεράστια απελευθέρωση ενέργειας από την σύγκρουση των δύο ουράνιων σωμάτων ρευστοποίησε ξανά ένα μεγάλο μέρος του πλανήτη μας και ο μεταλλικός πυρήνας αυτού του αρχέγονου πρωτοπλανήτη πρέπει να βυθίστηκε προς το εσωτερικό της Γης και να ενσωματώθηκε στον πυρήνα της. Επειδή, μάλιστα, αμέσως μετά τη Γιγάντια Πρόσκρουση, η πρώτη ατμόσφαιρα της Γης είχε εξαφανιστεί, η επιφανειακή θερμοκρασία του πλανήτη μας μειώθηκε σχετικά γρήγορα και ο φλοιός της στερεοποιήθηκε. Αρχικά η Σελήνη περιφερόταν γύρω από την Γη σε πολύ μικρότερη απόσταση απ' ό,τι σήμερα. Σιγά-σιγά, όμως, άρχισε να απομακρύνεται, ενώ με τις παλιρροϊκές της δυνάμεις επιβράδυνε την περιστροφή του πλανήτη μας και σταθεροποίησε την κλίση του άξονα περιστροφής του.

Η χαρτογράφηση της Σελήνης και του Ερμή μάς έχει αποκαλύψει ότι η επιφάνεια των δύο αυτών ουράνιων σωμάτων καλύπτεται από αναρίθμητους κρατήρες πρόσκρουσης που προκλήθηκαν στην διάρκεια ενός κατακλυσμιαίου βομβαρδισμού από μικρούς

και μεγάλους αστεροειδείς, γνωστού ως ο **Ύστερος Μεγάλος Βομβαρδισμός**. Ο βομβαρδισμός αυτός εικάζεται ότι ολοκληρώθηκε πριν από περίπου 3,8 δισ. χρόνια, τελευταία όμως ορισμένοι επιστήμονες έχουν αρχίσει να αμφιβάλλουν ως προς την ένταση και την έκταση που ενδεχομένως είχε.

Στη Σελήνη, ειδικότερα, έναν άνυδρο και γεωλογικά «νεκρό» κόσμο, έχουν καταγραφεί περισσότεροι από 300.000 κρατήρες με μέγεθος ίσο ή μεγαλύτερο του 1 km. Στον πλανήτη μας, αντιθέτως, οι πραγματικά μεγάλοι κρατήρες που έχουμε εντοπίσει, με διάμετρο μεγαλύτερη των 20 km, μόλις υπερβαίνουν τους 45, ενώ ο συνολικός αριθμός των κρατήρων δεν υπερβαίνει τους περίπου 175. Είναι δυνατό να «γλίτωσε» με κάποιο τρόπο η Γη μας τις συνέπειες του Ύστερου Μεγάλου Βομβαρδισμού; Η απάντηση είναι αρνητική. Δεδομένης της πολύ μεγαλύτερης επιφάνειας του πλανήτη μας, οι αστεροειδείς και οι κομήτες που συνετρίβησαν στην επιφάνειά του πρέπει να ήταν πολύ περισσότεροι. Επειδή, όμως, ο πλανήτη μας αναμορφώνει διαρκώς την επιφάνειά του, απαλείφοντας τα προγενέστερα χαρακτηριστικά της, οι «ουλές» που προκλήθηκαν από την πτώση αυτών των διαστημικών εισβολέων έσβησαν με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου.

Την ίδια, περίπου, περίοδο, οι υδρατμοί που διέφευγαν από τα πετρώματα του γήινου φλοιού, τα



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της εποχής του Ύστερου Μεγάλου Βομβαρδισμού

© Ron Miller, [Black Cat Studios](#)

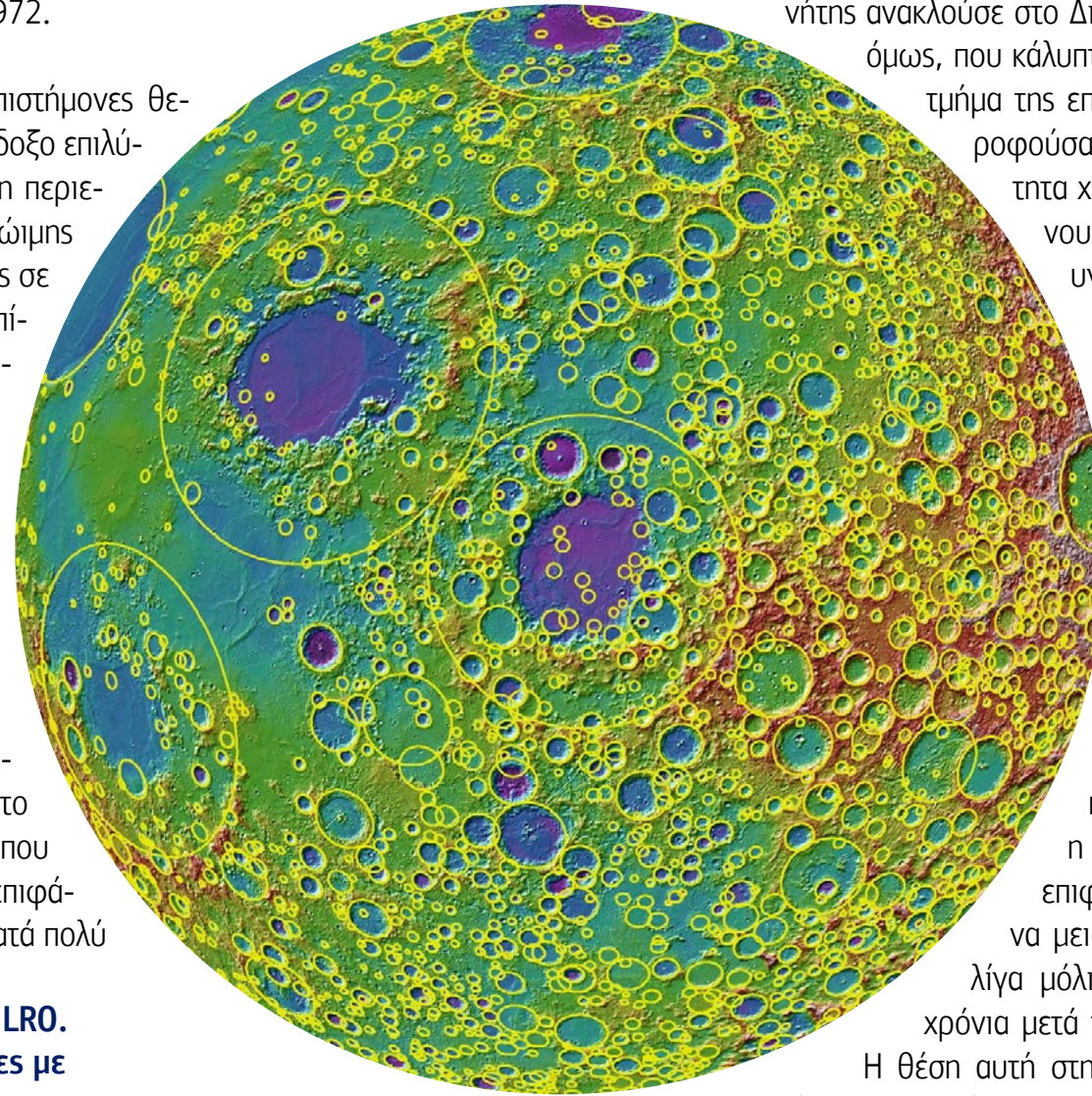


αέρια που απελευθερώνονταν από τις ηφαιστειακές εκρήξεις, το νερό και οι άλλες πτητικές ενώσεις που απελευθερώνονταν κατά τη συντριβή αστεροειδών και κομητών στην επιφάνεια του πλανήτη μας, σχημάτισαν σταδιακά την πρώτη πυκνή του ατμόσφαιρα. Σημαντικό ρόλο στην διατήρηση αυτής της ατμόσφαιρας διαδραμάτισε και η ενεργοποίηση του μαγνητικού πεδίου της Γης, που προστατεύει τον πλανήτη μας από τον ηλιακό άνεμο.

Καθώς, όμως, η θερμοκρασία της πρώιμης Γης σιγά-σιγά μειωνόταν, η διαρκής συμπύκνωση των υδρατμών στην ατμόσφαιρά της οδήγησε σε ραγδαίους κατακλυσμούς, που σχημάτισαν τους πρώτους ωκεανούς, πριν από περίπου 4,2 δισ. χρόνια. Σύμφωνα με τα γεωλογικά ευρήματα που έχουμε στη διάθεσή μας, γνωρίζουμε ότι εκείνη την εποχή οι ωκεανοί που κάλυπταν τον πλανήτη μας ήταν ρευστοί. Αυτό εκ πρώτης αποτελεί ένα παράδοξο, διότι ο νεαρός τότε Ήλιος είχε φωτεινότητα που δεν υπερέβαινε το 70% της σημερινής, και κατά συνέπεια η μέση θερμοκρασία της Γης πρέπει να ήταν πολύ χαμηλή, ώστε να διατηρήσει τους ωκεανούς της σε υγρή κατάσταση. Αυτό το παράδοξο του **ασθενούς**

**νεαρού Ήλιου**, όπως ονομάζεται, επισημάνθηκε για πρώτη φορά από τον αστρονόμο **Carl Sagan** (1934-1996) το 1972.

Οι περισσότεροι επιστήμονες θεωρούν ότι το παράδοξο επιλύεται, διότι η μεγάλη περιεκτικότητα της πρώιμης γήινης ατμόσφαιρας σε αέρια του θερμοκηπίου, όπως οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), παγίδευαν περισσότερη θερμότητα, αποτρέποντας το πάγωμα των ωκεανών. Άλλοι επιστήμονες υποστηρίζουν, αντίθετα, ότι επειδή το ποσοστό ξηράς που κάλυπτε τότε την επιφάνεια της Γης ήταν κατά πολύ



**Τοπογραφικός χάρτης της Σελήνης από το τροχιακό αστεροσκοπείο LRO. Οι κίτρινοι κύκλοι σημειώνουν λίγους μόνο από τους 5185 κρατήρες με διάμετρο μεγαλύτερη των 20km που καταμετρήθηκαν.**

 NASA/Goddard/MIT/Brown

μικρότερο, αντίστοιχα μικρότερο πρέπει να ήταν και το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που ο πλανήτης ανακλούσε στο Διάστημα. Οι ωκεανοί, όμως, που κάλυπταν πολύ μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειάς του, απορροφούσαν όση ηλιακή θερμότητα χρειαζόταν, προκειμένου να παραμείνουν σε υγρή κατάσταση.

Κάποιοι επιστήμονες, μάλιστα, ισχυρίζονται ότι υπήρχαν περιοχές του πλανήτη μας με νερό σε υγρή μορφή αρκετά νωρίτερα, ακόμη και πριν από 4,3 δισ. έτη, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία στην επιφάνειά του πρέπει να μειώθηκε σημαντικά σε λίγα μόλις εκατοντάδες εκατ. χρόνια μετά τον σχηματισμό του.

Η θέση αυτή στηρίζεται στην χρονολόγηση και ανάλυση κρυστάλλων ζirkονίου, που καταδεικνύει ότι ο φλοιός της Γης σχηματίστη-

κε τουλάχιστον 4,4 δισ. χρόνια πριν, δηλαδή μόλις 160 εκατ. χρόνια μετά τον σχηματισμό του Ηλιακού μας συστήματος.

Εάν όντως ισχύει αυτή η υπόθεση της **Ψυχρής Πρώιμης Γης**, όπως ονομάζεται, ο γήινος φλοιός πρέπει να στερεοποιήθηκε ταχύτερα, ενώ η ύπαρξη νερού σε υγρή μορφή, ίσως ακόμη και η εμφάνιση των πρώτων μορφών ζωής, να παρατηρήθηκε νωρίτερα απ' όσο θεωρούσαμε προηγουμένως. Επομένως, πώς τελικά έμοιαζε η Γη, όταν ήταν ακόμη νέα; Έμοιαζε περισσότερο με επίγεια κόλαση ή μήπως επικρατούσαν ηπιότερες συνθήκες, όπως υποστηρίζει η υπόθεση της Ψυχρής Πρώιμης Γης; Την απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν τη γνωρίζουμε προς το παρόν με βεβαιότητα.

Η βιολογική εξέλιξη των ειδών στη Γη είναι στενά συνυφασμένη με την γεωλογική της εξέλιξη. Οι επιστήμονες πολλών και διαφορετικών ερευνητικών πεδίων, από την βιολογία και την γεωλογία μέχρι την αστρονομία, την παλαιοντολογία και την παλιόκλιματολογία, έχουν ανασυνθέσει ένα ογκώδες αρχείο, στο οποίο έχουν καταγράψει τα βασικά στάδια της βιολογικής εξέλιξης των έμβιων οργανισμών του πλανήτη μας, ενσωματώνοντάς τα στην επονομαζόμενη **Κλίμακα του Γεωλογικού Χρόνου**, που αποτυπώνει και τα βασικά στάδια της γεωλογικής του εξέλιξης. Είναι αλήθεια, όμως, ότι το μεγάλο





Καλλιτεχνική αναπαράσταση του κύκλου της ζωής ενός άστρου σαν τον Ήλιο, μέχρι την μετατροπή του σε λευκό νάνο στο κέντρο ενός πλανητικού νεφελώματος. Καθώς ένα τέτοιο άστρο ενηλικιώνεται, η φωτεινότητά του αυξάνει διαρκώς.

📷 ESO/S. Steinhöfel



αυτό «Βιβλίο της Φύσης» έχει ακόμη πολλές κενές σελίδες, γεγονός που οφείλεται στο ότι η γεωλογική ιστορία του πλανήτη μας, καθώς και η βιολογική ιστορία που περιγράφει την εμφάνιση και την εξέλιξη της ζωής, είναι ιστορίες αέναων μεταβολών.

Πολύ περισσότερο, όμως, η συνεχής διάβρωση των επιφανειακών πετρωμάτων από τα στοιχεία της Φύσης, η ασταμάτη τεκτονική δραστηριότητα που αναμορφώνει διαρκώς την επιφάνεια της Γης, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι προσκρούσεις αστεροειδών και κομητών, «καταστρέφουν» συστηματικά τις παλαιότερες γεωλογικές ενδείξεις, που θα μπορούσαν να μας αποκαλύψουν με περισσότερες

λεπτομέρειες το απώτερο γεωλογικό παρελθόν της. Το ίδιο φυσικά ισχύει και για τα παλαιοντολογικά «ίχνη» της ζωής. Προφανώς, λοιπόν, όσο πιο πίσω πηγαίνουμε στον χρόνο, τόσο πιο δυσεύρετες γίνονται οι ενδείξεις αυτές και τόσο πιο αβέβαιη καθίσταται η γνώση μας.

Παρόλ' αυτά, η ανάλυση των παλαιότερων γεωλογικών ευρημάτων και των αρχαιότερων απολιθωμάτων καταδεικνύει ότι οι πρώτες «ζωντανές» κυτταρικές μορφές έχουν ηλικία τουλάχιστον 3,5 δισ. ετών. Δεδομένου ότι η Γη σχηματίστηκε πριν από περίπου 4,5 δισ. χρόνια, αυτό σημαίνει ότι το «θαύμα της ζωής» πρέπει να συνέβη το πολύ

μέσα σε 1 δισ. χρόνια. Οι περισσότεροι επιστήμονες υποστηρίζουν σήμερα ότι το «πέρασμα στη ζωή» συντελέστηκε μέσα από μία μακρά περίοδο αβιοτικής χημικής εξέλιξης, κατά τη διάρκεια της οποίας συνετέθησαν από απλούστερες οργανικές ενώσεις τα βασικά δομικά συστατικά της, και στη συνέχεια τα πρώτα βιολογικά και αυτοαντιγραφόμενα μακρομόρια. Επειδή, όμως, καμία μέθοδος αντιγραφής δεν είναι τέλεια, η ποικιλομορφία που «μοιραία» εμφανίστηκε σε αυτόν τον αρχέγονο «πληθυσμό» μακρομορίων ήταν αναπόφευκτη. Από το σημείο αυτό και μετά, την σκυτάλη πήρε η βιολογική εξέλιξη, από την οποία προήλθαν οι πρώτοι προκαρυωτικοί κυτταρικοί οργανισμοί,

που με τη σειρά τους εξελίχθηκαν μέσω της φυσικής επιλογής στα ευκαρυωτικά κύτταρα. Η εξέλιξη των πρωταρχικών προκαρυωτικών κυττάρων θα πρέπει να ακολούθησε αργό ρυθμό. Καθώς, όμως, η γήινη ατμόσφαιρα άρχισε να εμπλουτίζεται με το οξυγόνο που παρήγαγαν τα πρώτα αυτά «πλάσματα» μέσω της φωτοσύνθεσης, εμφανίστηκαν σιγά-σιγά και τα πρώτα ευκαρυωτικά κύτταρα. Όμως, το πώς ακριβώς έγινε η μετάβαση από την απουσία της ζωής στην ζωή εξακολουθεί να αποτελεί πεδίο ενδελεχούς έρευνας και έντονης αντιπαράθεσης μεταξύ των επιστημόνων, και δεκάδες υποθέσεις έχουν προταθεί στην προσπάθεια να ερμηνευθεί το μεγάλο «άλμα» της ζωής ◀

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις συμβάλουν κι αυτές στην «διαγραφή» των παλαιότερων γεωλογικών ενδείξεων στην επιφάνεια της Γης (📷 USGS).



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

Χάρτης που απεικονίζει την ηλικία του ωκεάνιου φλοιού στην ευρύτερη περιοχή της Μεσο-Ατλαντικής Ράχης, όπου τα θερμά χρώματα αντιστοιχούν σε πετρώματα μικρότερης ηλικίας ( Mr. Elliot Lim, CIRES & NOAA/NCEI).

**Η** όψη της Γης μεταβάλλεται διαρκώς. Τις περισσότερες φορές, ωστόσο, η αέναη αναμόρφωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών του πλανήτη μας είναι τόσο ανεπαίσθητη, ώστε είναι αδύνατο να την παρατηρήσουμε από την μία μέρα στην άλλη. Επομένως, πώς εξελίχθηκε η Γη στο πέρασμα του γεωλογικού χρόνου; Πώς σχηματίστηκαν οι τεράστιες οροσειρές που ορθώνονται στην επιφάνειά της, αλλά και οι βαθιές τάφροι που ανακαλύψαμε στον ωκεάνιο πυθμένα; Πώς προκαλούνται οι σεισμοί και οι ηφαιστειακές εκρήξεις; Τις απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα μας τις δίνει η θεωρία των τεκτονικών πλακών, που στην σημερινή περίπου μορφή της διατυπώθηκε μόλις στα μέσα του 20<sup>ού</sup> αιώνα.

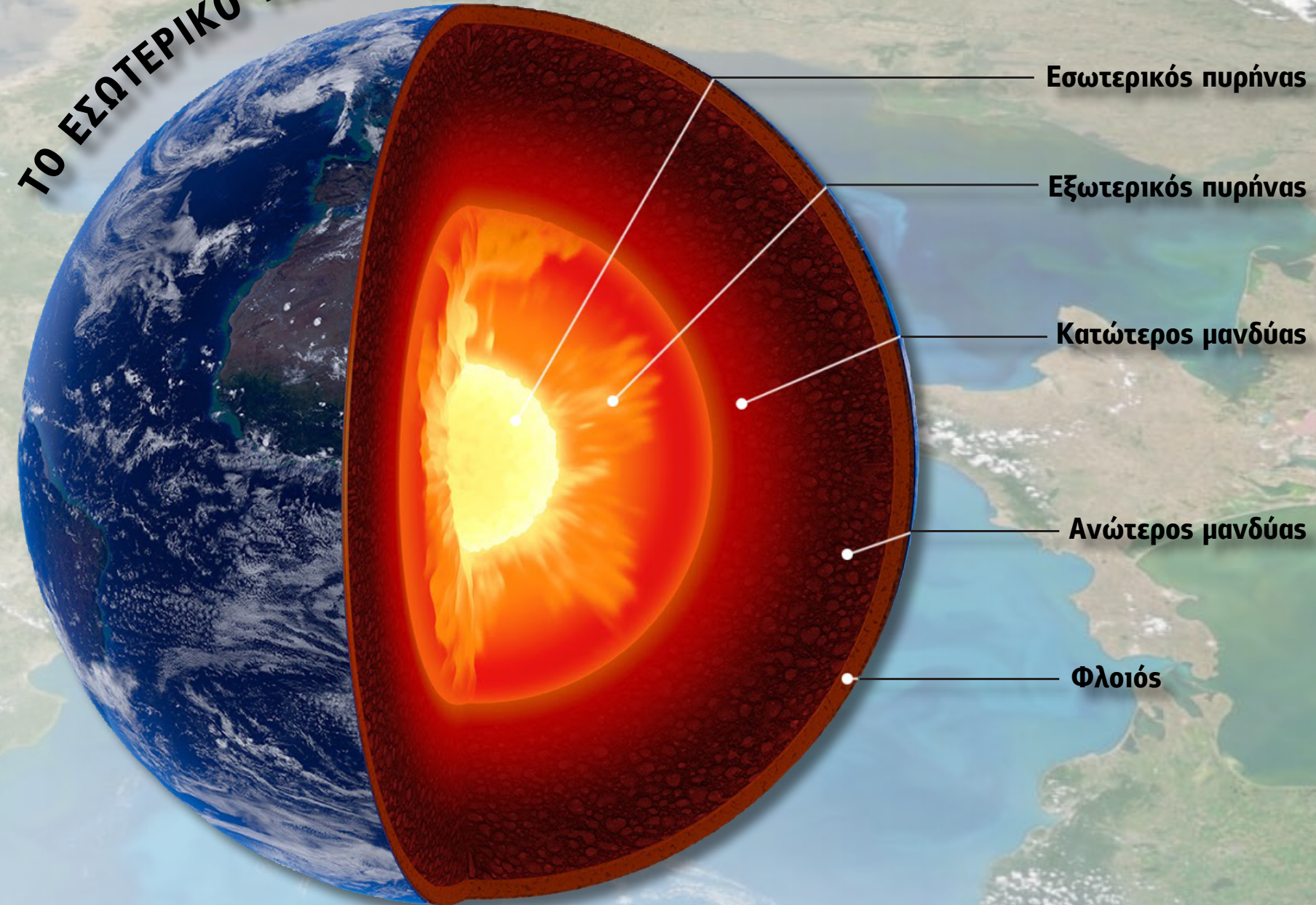




## ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

Προτού, όμως, αναφερθούμε εκτενέστερα σ' αυτήν, θα περιγράψουμε με συντομία την εσωτερική δομή του πλανήτη μας, η οποία αποτελείται από τον φλοιό, τον μανδύα, τον εξωτερικό πυρήνα και τον εσωτερικό πυρήνα. Ο **φλοιός** της Γης, δηλαδή η στέρεα εξωτερική της στοιβάδα, έχει πάχος που κυμαίνεται από 30 έως 60 km κάτω από τις ηπείρους και από 5 έως 10 km κάτω από τους ωκεανούς. Ο ωκεάνιος φλοιός απαρτίζεται κυρίως από βασαλτικά πετρώματα, μεγαλύτερης πυκνότητας και μικρότερης ηλικίας, σε σχέση με πετρώματα γρανίτη που απαρτίζουν τον ηπειρωτικό φλοιό. Από τη βάση του φλοιού μέχρι το βάθος των περίπου 2.900 km εκτείνεται ο **μανδύας**, που τελειώνει εκεί που αρχίζει ο ρευστός **εξωτερικός πυρήνας** με πάχος μεγαλύτερο των 2.200 km, ο οποίος αποτελείται κυρίως από σίδηρο. Ο **εσωτερικός πυρήνας**, τέλος, έχει διάμετρο περίπου 1.200 km, ενώ εικάζεται ότι αποτελείται κι αυτός κατά κύριο λόγο από σίδηρο, σε στερεή όμως κατάσταση.

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της θεωρίας των τεκτονικών πλακών διαδραμάτισε ο Γερμανός μετεωρολόγος **Alfred Wegener** (1880–1930), ο οποίος υποστήριξε ότι οι ήπειροι δεν βρίσκονταν πάντα εκεί που είναι σήμερα, αλλά αντίθετα μετατοπίστηκαν με κάποιο τρόπο στις τωρινές τους θέσεις. Δύο από τους λόγους που ώθησαν τον Wegener να εμπνευστεί αυτή την υπόθεση της μετατόπισης των ηπείρων ήταν το εμφανές «ταίριασμα» του δυτικού περιγράμματος







**Ο Γερμανός  
μετεωρολόγος  
Alfred Wegener**

της Αφρικής με τις ανατολικές ακτές της κεντρικής και της νότιας Αμερικής, καθώς και η διαπίστωση ότι στις αντίπερα όχθες του Ατλαντικού ωκεανού εμφανίζονται απολιθώματα των ίδιων ζώων και φυτών. Έτσι, στις δύο μελέτες του που δημοσιεύθηκαν το 1912, ο Wegener υποστήριξε ότι 200 εκατ. χρόνια πριν όλες οι ήπειροι ήταν ενωμένες μεταξύ τους σε μία υπερήπειρο: την **Παγγαία**. Με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου, όμως, η Παγγαία διασπάστηκε και τα «κομμάτια» της, οι σημερινές ήπειροι δηλαδή, άρχισαν να απομακρύνονται, «ολισθαίνοντας» αργά προς τις τωρινές τους θέσεις. Όμως, παρ' όλο που η υπόθεση του Wegener ήταν συμβατή με τα επιστημονικά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα στην εποχή του, αδυνατούσε να εξηγήσει ποιος φυσικός μηχανισμός μπορούσε να με-

τατοπίσει αυτές τις τεράστιες μάζες πετρωμάτων σε τόσο μεγάλες αποστάσεις.

Γι' αυτό άλλωστε και το επιστημονικό κατεστημένο της εποχής του την αντιμετώπισε με ειρωνεία. Επίμονος, όμως, και ισχυρογνώμων καθώς ήταν, ο Wegener δεν σταμάτησε να αναζητά τις επιπλέον αποδείξεις που θα ισχυροποιούσαν ακόμη περισσότερο την υπόθεσή του, ενώ στην διάρκεια μίας αποστολής στην Γροιλανδία το 1930 πέθανε από το κρύο. Ο γεωλόγος **Alexander du Toit** (1878–1948), ένας από τους ελάχιστους υποστηρικτές του Wegener εκείνη την εποχή, δημοσίευσε τις δικές του μελέτες σε ένα βιβλίο που εκδόθηκε το 1937, το οποίο και αφιέρωσε στην μνήμη του. Μετά τον θάνατο του Wegener,

όμως, και καθώς νέες ενδείξεις έρχονταν συνεχώς στο φως, το ενδιαφέρον για την υπόθεση της μετατόπισης των ηπείρων αναθερμάνθηκε, οδηγώντας εντέλει στην ανάπτυξη της θεωρίας των τεκτονικών πλακών, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα.

Η **θεωρία των τεκτονικών πλακών** ερμηνεύει τις αέναιες γεωτεκτονικές ανακατατάξεις, που μεταβάλλουν το γήινο ανάγλυφο και καθορίζουν την γεωλογική εξέλιξη του πλανήτη μας. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, ολόκληρη η εξωτερική στοιβάδα του πλανήτη μας, περιλαμβανομένου και του ωκεάνιου πυθμένα, αποτελείται από ένα σχετικά άκαμπτο και συμπαγές στρώμα πετρωμάτων, την **λιθόσφαιρα**, η οποία περιλαμβάνει τον φλοιό και ένα μέρος του ανώτατου μανδύα. Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία, αλλά απαρτίζεται από επτά κύριες και δεκάδες μικρότερες **λιθοσφαιρικές** ή **τεκτονικές πλάκες** πετρωμάτων, οι οποίες στα όριά τους εφάπτονται ή/και επικαλύπτουν η μία την άλλη, όπως περίπου τα κομμάτια ενός γιγάντιου παζλ, ενώ διακρίνονται σε ηπειρωτικές και ωκεάνιες. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες, «γλιστρώντας» αργά πάνω σε μία εύκαμπτη και παχύρρευστη στοιβάδα μερικώς λιωμένων πετρωμάτων, η οποία ονομάζεται **ασθενόσφαιρα**, ολισθαίνουν η μία παράλληλα με την άλλη, αποκλίνουν ή συγκλίνουν μεταξύ τους, εξαιτίας των κινήσεων του μάγματος που βρίσκεται κάτω από αυτές και τις παρασύρει.

Η βαθύτερη αιτία αυτών των κινήσεων δεν είναι

ακόμη απολύτως κατανοητή, εικάζεται όμως ότι οφείλεται στην αργή διαρροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνειά της. Η διαφορά, δηλαδή, της θερμοκρασίας ανάμεσα στον εξωτερικό πυρήνα της Γης και στον φλοιό, εξαναγκάζει το θερμότερο και με μικρότερη πυκνότητα μανδουακό υλικό να ανέρχεται προς την επιφάνεια, ενώ το υπερκείμενο υλικό που είναι ψυχρότερο και πυκνότερο, καταβυθίζεται. Αυτά τα **ρεύματα μεταφοράς**, όπως ονομάζονται, μετατοπίζουν και τις τεκτονικές πλάκες που «επιπλέουν» στην ασθενόσφαιρα, με ρυθμό που δεν υπερβαίνει τα 2-15 cm τον χρόνο.

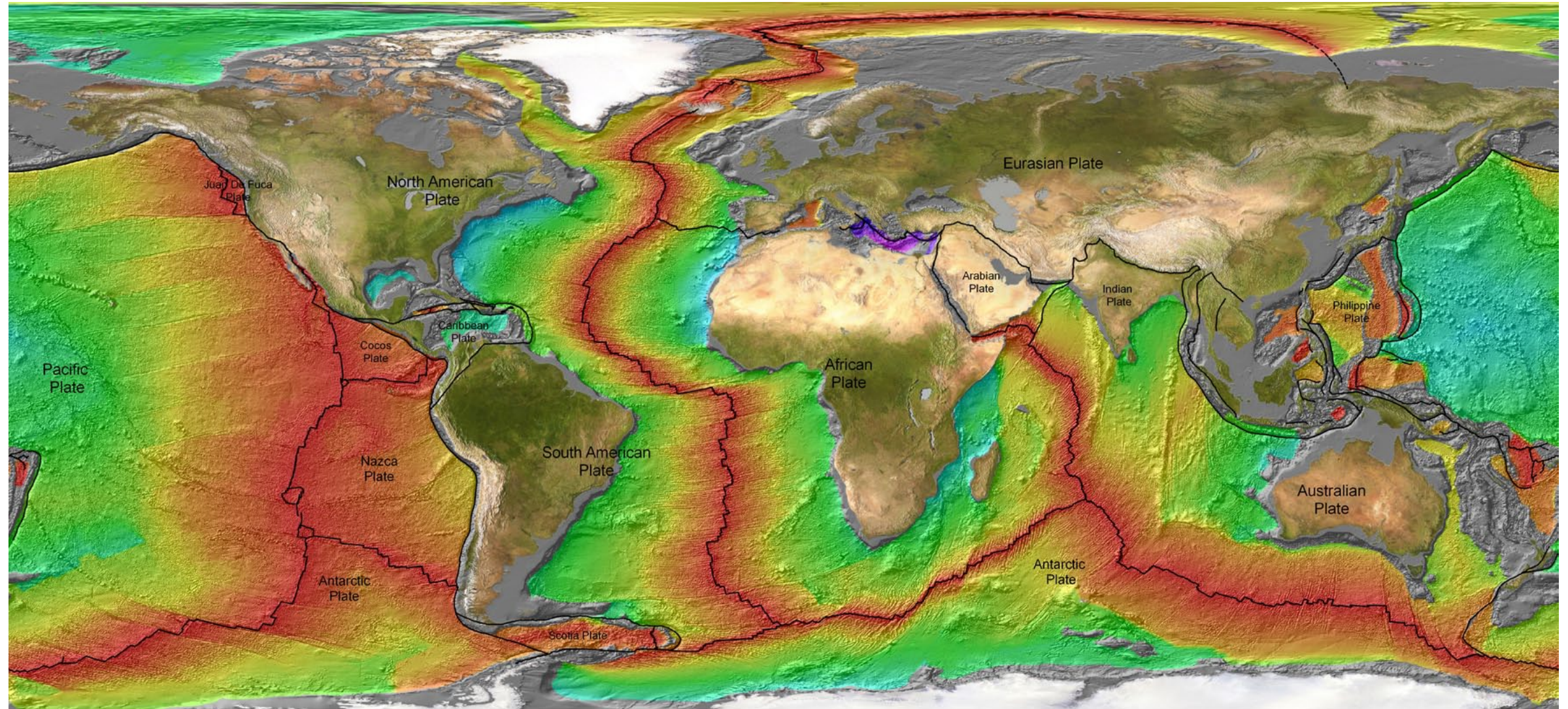
Τρεις ήταν οι βασικότερες ενδείξεις που συνέβαλαν στην διαμόρφωση της θεωρίας των τεκτονικών πλακών. Η πρώτη απ' αυτές ήρθε στο φως ήδη από το 1947, όταν διαπιστώθηκε ότι το στρώμα του ιζήματος που έχει κατακαθίσει στον πυθμένα του Ατλαντικού ωκεανού είναι κατά πολύ λεπτότερο από αυτό που θα έπρεπε να είναι εάν οι ωκεανοί όντως προϋπήρχαν εδώ και τουλάχιστον 4 δισ. χρόνια. Η δεύτερη ένδειξη προήλθε μέσα από την χαρτογράφηση του ωκεάνιου πυθμένα, στην διάρκεια της δεκαετίας του 1950. Πραγματικά, η ανακάλυψη μίας τεράστιας υποθαλάσσιας οροσειράς, που ελίσσεται ανάμεσα στις ηπείρους του πλανήτη, με μήκος που υπερβαίνει τα 50.000 km, με μέσο ύψος 4.500 m, και πλάτος 800 km, γνωστή πλέον ως η **παγκόσμια ωκεάνια ράχη**, ήταν καταλυτική για την διαμόρφωση της νέας θεωρίας.





Η τρίτη σημαντική ένδειξη, τέλος, αφορούσε στην καταγραφή στον ωκεάνιο πυθμένα μαγνητικών «ανωμαλιών». Εκείνη την εποχή, οι επιστήμονες γνώριζαν ότι τα βασαλτικά πετρώματα στον ωκεάνιο πυθμένα είναι ελαφρώς μαγνητισμένα, καθώς εμπεριέχουν και ψήγματα ενός μαγνητικού ορυκτού, που ονομάζεται **μαγνητίτης**. Ειδικότερα, όταν το ρευστό μάγμα που αναβλύζει στον ωκεάνιο πυθμένα ψύχεται και στερεοποιείται, τα κρυσταλλοποιημένα σωματίδια μαγνητίτη που εμπεριέχει μαγνητίζονται μόλις, με την διεύθυνση του μαγνητικού τους πεδίου να ευθυγραμμίζεται μ' εκείνη που είχε το μαγνητικό πεδίο της Γης κατά την στιγμή της κρυσταλλοποίησής τους. Το 1963, όμως, διαπιστώθηκε ότι αυτές οι μαγνητικές ανωμαλίες συγκροτούν εναλλασσόμενες σειρές από αντίθετα μαγνητισμένα πετρώματα, σε κάθε μία από τις δύο πλευρές των ωκεάνιων ραχών και παράλληλα με την κορυφή τους.

Γιατί, επομένως, το ίζημα που έχει κατακαθίσει στον Ατλαντικό έχει τόσο μικρό πάχος; Πώς δημιουργήθηκαν οι υποθαλάσσιες οροσειρές και οι μαγνητικές ανωμαλίες που ανακαλύψαμε στον ωκεάνιο πυθμένα; Η απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα δόθηκε όταν συνειδητοποιήθηκε ότι οι ωκεάνιες ράχες σχηματίζονται εκεί όπου ο ωκεάνιος πυθμένας «σκίζεται» στα δύο κατά μήκος της κορυφής τους. Οι ωκεάνιες ράχες, δηλαδή, διαμορφώνονται στα όρια απόκλισης δύο τεκτονικών πλακών, καθώς νέο μάγμα από τα βάθη της Γης αναβλύζει κατά μήκος της κορυφής της ράχης, δημιουργώντας διαρκώς νέο ωκεάνιο



Χάρτης της ηλικίας της ωκεάνιας λιθόσφαιρας, στον οποίο διακρίνονται οι μεγαλύτερες τεκτονικές πλάκες και τα όριά τους, καθώς και η παγκόσμια ωκεάνια ράχη. Τα δεδομένα που απεικονίζονται καταδεικνύουν με σαφήνεια ότι η ηλικία του φλοιού στον ωκεάνιο πυθμένα αυξάνει με την απόσταση από την ράχη (Mr. Elliot Lim, CIRES & NOAA/NCEI).





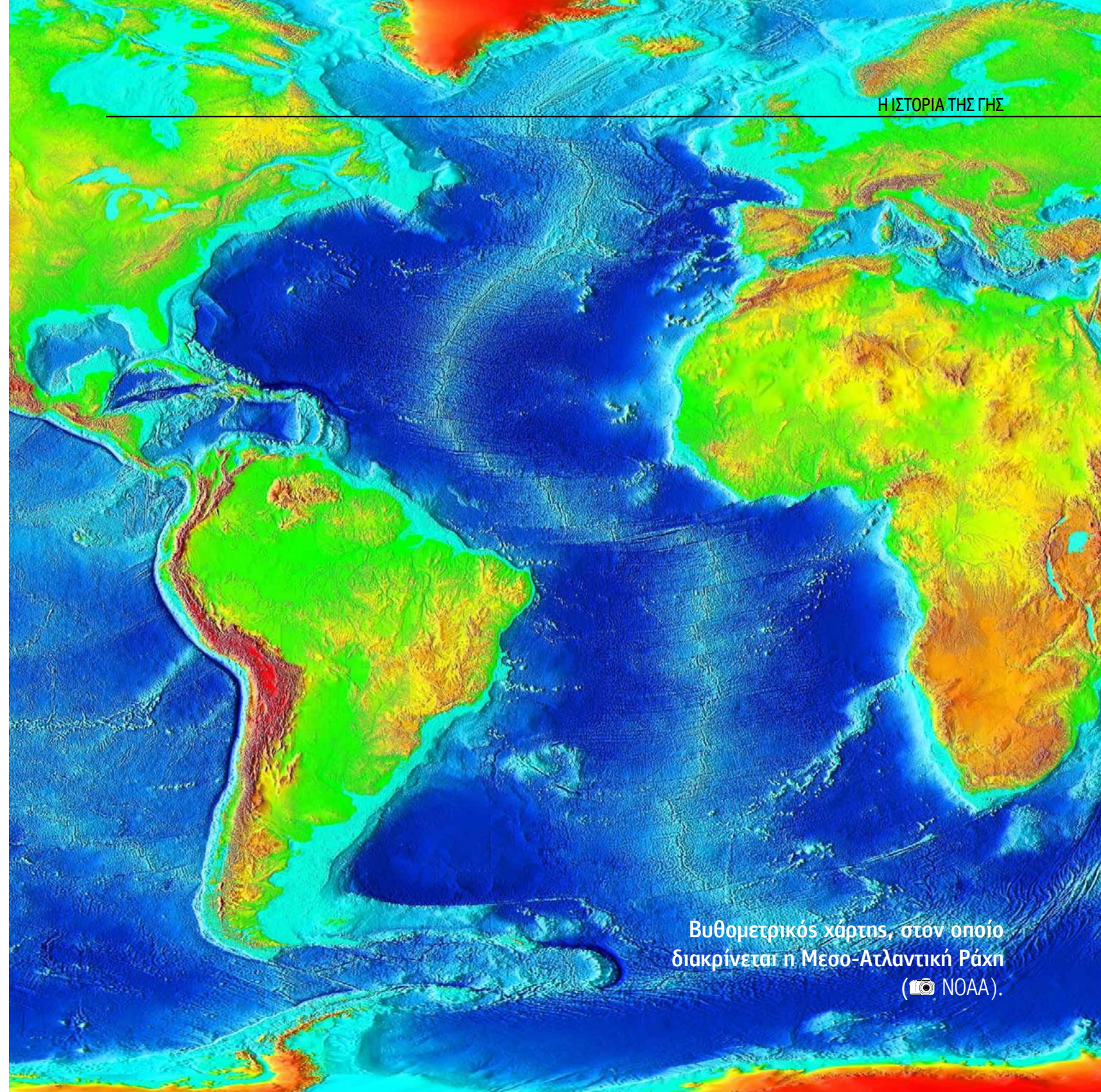
φλοιό. Η διαδικασία αυτή, που ονομάζεται **εξάπλωση του ωκεάνιου πυθμένα**, προτάθηκε αρχικά από τον Αμερικανό γεωλόγο **Harry H. Hess** (1906–1969) και ήταν καταλυτική για την ανάπτυξη της θεωρίας των τεκτονικών πλακών.

Η υπόθεση αυτή στηρίζεται σε σημαντικά αποδεικτικά στοιχεία. Ένα από αυτά προήλθε από τις μετρήσεις που καταδεικνύουν ότι η ηλικία των υποθαλάσσιων πετρωμάτων αυξάνει με την απόστασή τους από την ωκεάνια ράχη, με τα νεότερης ηλικίας πετρώματα να βρίσκονται πλησιέστερα στην κορυφή της, εκεί δηλαδή που αναβλύζει νέο μάγμα. Ένα ακόμη στοιχείο που συνηγορεί υπέρ της διαρκούς δημιουργίας νέου φλοιού κατά μήκος των ωκεάνιων ραχών ήταν και η ανακάλυψη ότι τα νεότερης ηλικίας πετρώματα έχουν πάντα τη σημερινή πολικότητα, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από την κάθε ράχη, οι ζώνες των παράλληλων πετρωμάτων εναλλάσσουν την πολικότητά τους, γεγονός που αποδεικνύει ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης αναστράφηκε στο παρελθόν πολλές φορές.

Γιατί, όμως, η εξάπλωση του ωκεάνιου πυθμένα δεν διεύρυνε έστω και λίγο το μέγεθος του πλανήτη μας; Η απάντηση είναι ότι ο νέος ωκεάνιος φλοιός που σχηματίζεται σε μία ωκεάνια ράχη και σταδιακά απομακρύνεται από την κορυφή της με την εξάπλωση του ωκεάνιου πυθμένα, εκατομμύρια χρόνια αργότερα καταλήγει ξανά στον γήινο μανδύα, διότι βυθίζεται και εντέλει καταστρέφεται σε

**ωκεάνιες τάφρους**, οι οποίες σχηματίζονται στα όρια καταβύθισης μίας πλάκας κάτω από μία άλλη. Επειδή, μάλιστα, οι ηπειρωτικές πλάκες έχουν μικρότερη πυκνότητα και μεγαλύτερο πάχος από τις ωκεάνιες πλάκες, εκείνες που πάντα καταβυθίζονται είναι οι δεύτερες. Με δυο λόγια, ο ωκεάνιος πυθμένας ανακυκλώνεται διαρκώς, με τη δημιουργία νέου φλοιού κατά μήκος των ωκεάνιων ραχών και την «καταβύθιση» του παλαιού φλοιού μέσα στις ωκεάνιες τάφρους. Αυτή η αέναη ανακύκλωση του φλοιού, τέλος, εξηγεί και το μικρό πάχος της στοιβάδας ιζημάτων στον ωκεάνιο πυθμένα, αφού το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εναποτίθενται τα ιζήματα αυτά είναι πολύ μικρότερο από την ηλικία των ωκεανών. Πραγματικά, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ανακύκλωση του νέου φλοιού που σχηματίζεται στην κορυφή μίας ωκεάνιας ράχης, μέχρι την καταβύθισή του μέσα σε μία ωκεάνια τάφρο, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 200-300 εκατ. χρόνια.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεσοωκεάνιας ράχης αποτελεί η **Μεσο-Ατλαντική Ράχη**, που ξεκινά από τον Αρκτικό Ωκεανό και εκτείνεται νοτιότερα και από το Ακρωτήριο της Καλής Ελπίδας, η οποία «εξαπλώνεται» με ρυθμό που δεν υπερβαίνει τα 2,5 cm τον χρόνο. Σ' αυτή την εξάπλωση, ωστόσο, οφείλεται η διεύρυνση του Ατλαντικού ωκεανού τα τελευταία 100-200 εκατ. χρόνια, από έναν μικρό πορθμό που βρισκόταν μεταξύ των ηπείρων της Αφρικής, της Ευρώπης, καθώς και της βόρειας και της Νότιας



Βυθομετρικός χάρτης, στον οποίο διακρίνεται η Μεσο-Ατλαντική Ράχη (NOAA).



Αμερικής, στον τεράστιο ωκεανό που είναι σήμερα. Είναι, ακόμη, δυνατό να σχηματιστούν ενεργές ζώνες «διαμελισμού» ή διάρρηξης ηπειρωτικών πλακών, όπως εκείνη που αναπτύσσεται κατά μήκος της **Μεγάλης Ρηξιγενούς Κοιλιάδας** στην ανατολική Αφρική. Καθώς, δηλαδή, οι μικρο-πλάκες της Νουβίας, της Σομαλίας και της Αραβικής χερσονήσου αποκλίνουν μεταξύ τους και ο φλοιός κατά μήκος της ζώνης διάρρηξης λεπταίνει διαρκώς, εκατομμύρια χρόνια από τώρα, το «κέρα» της βορειοανατολικής Αφρικής θα αποκοπεί από την υπόλοιπη ήπειρο και θα γίνει νησί, ενώ η ξηρά που προηγουμένως υπήρχε εκεί θα κατακλυσθεί από τα νερά του Ινδικού ωκεανού. Στην περίπτωση, όμως, που οι σχετικές κινήσεις μεταξύ των τεκτονικών πλακών εξαναγκάζουν δύο απ' αυτές

να μετακινούνται παράλληλα και εφαπτομενικά η μία με την άλλη, αναπτύσσονται ρήγματα, όπως αυτό του **Αγίου Ανδρέα**, που προκάλεσε τον καταστροφικό σεισμό του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο.

Πραγματικά, το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής δραστηριότητας στη Γη συσσωρεύεται σε σχετικά στενές ζώνες, οι οποίες εντοπίζονται στα όρια των τεκτονικών πλακών, εκεί δηλαδή που οι τεκτονικές πλάκες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Καθώς, λοιπόν, οι πλάκες μετατοπίζονται η μία σε σχέση με την άλλη, τα πετρώματα στα όριά τους παραμορφώνονται αργά, συσσωρεύοντας με τον χρόνο τεράστια ποσά ενέργειας και σχηματίζοντας ρήγματα στον γήινο φλοιό, οι πλευρές των οποίων συγκρατούνται από



Τμήμα του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα  
 © ikluft GFDL



Έκρηξη του ηφαιστείου Αρενάλ στην Κόστα Ρίκα

την μεγάλη τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ τους. Όταν, όμως, η συσσωρευόμενη ενέργεια φτάσει σε σημείο που υπερβαίνει τις αντοχές των πετρωμάτων, τα σημεία τριβής σπάνε, με αποτέλεσμα την ξαφνική και απότομη ολίσθηση του ρήγματος, που απελευθερώνει την συσσωρευμένη του ενέργεια με την μορφή σεισμικών κυμάτων.

Στην μετατόπιση των τεκτονικών πλακών, όμως, οφείλεται και το μεγαλύτερο μέρος της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Τα περισσότερα, μάλιστα, από τα ενεργά ηφαιστεια του πλανήτη βρίσκονται σε μία σχεδόν κυκλική περιοχή που περιβάλλει την λεκάνη του Ειρηνικού ωκεανού, περιμετρικά της οποίας εντοπίζονται πολλαπλές ζώνες καταβύθισης, γνωστή ως ο **Δακτύλιος της Φωτιάς**. Οι ζώνες αυτές σχηματίζονται μέσα από την σύγκλιση και καταβύθιση μίας ωκεάνιας πλάκας κάτω από μία άλλη ωκεάνια ή ηπειρωτική πλάκα. Καθώς, λοιπόν, η ωκεάνια πλάκα καταβυθίζεται σε όλο και μεγαλύτερα βάθη, θερμαίνεται όλο και περισσότερο. Παράλληλα, όμως, οι υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις μέσα στον μανδύα «αποδεσμεύουν» το νερό που εμπεριέχουν τα πετρώματά της, το οποίο, καθώς ανέρχεται και συναντά τα πετρώματα του υπερκείμενου μανδύα, χαμηλώνει το σημείο τήξης τους, μετατρέποντάς τα σε μάγμα. Αυτό το μάγμα, στη συνέχεια, έχοντας μικρότερη πυκνότητα από τα πετρώματα που το περιβάλλουν, ανέρχεται προς την επιφάνεια, σχηματίζοντας εντέλει ηφαιστεια.



Ειδικότερα, όταν μία ωκεάνια πλάκα συγκλίνει και καταβυθίζεται κάτω από μία άλλη ωκεάνια πλάκα, στην περιοχή καταβύθισης σχηματίζονται, όπως είπαμε, βαθιές ωκεάνιες τάφροι. Με μέγιστο βάθος που αγγίζει τα 11 km, η **Τάφρος των Μαριανών**, που σχηματίστηκε μέσα από την σύγκλιση και καταβύθιση της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την πλάκα των Φιλιππίνων, είναι η βαθύτερη τάφρος του κόσμου. Παράλληλα, όμως, σχηματίζονται και τα επονομαζόμενα νησιωτικά τόξα, δηλαδή σειρές ηφαιστειακών νησιών, όπως είναι το ηφαιστειακό τόξο των Μαριανών Νήσων, σε μικρή απόσταση και

δυτικά της ομώνυμης τάφρου. Βαθιές τάφροι και ηφαιστειακές αλυσίδες σχηματίζονται και στην περίπτωση που μία ωκεάνια πλάκα καταβυθίζεται κάτω από μία ηπειρωτική πλάκα. Σ' αυτήν την περίπτωση, η αλυσίδα των ηφαιστειών που θα δημιουργηθεί στον υπερκείμενο ηπειρωτικό φλοιό, ονομάζεται **ηπειρωτικό τόξο**, όπως αυτό που έχει σχηματιστεί στην οροσειρά των Άνδεων. Η γιγάντια αυτή οροσειρά σχηματίστηκε μέσα από την σύγκλιση και καταβύθιση της ωκεάνιας πλάκας Νάζκα κάτω από τη Νοτιοαμερικανική ηπειρωτική πλάκα, ενώ στην ζώνη της καταβύθισης σχηματίστηκε και η **Τάφρος**

**Ατακάμα**, με μέγιστο βάθος 8 km και μήκος σχεδόν 6.000 km. Μεγάλες, όμως, οροσειρές σχηματίζονται και κατά την σύγκλιση και σύγκρουση δύο ηπειρωτικών πλακών, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα την οροσειρά των Ιμαλαΐων, η οποία άρχισε να σχηματίζεται εδώ και 50 εκατ. χρόνια εξαιτίας της σύγκλισης και σύγκρουσης της πλάκας της Ινδίας με αυτήν της Ευρασίας.

Δεδομένου, τέλος, ότι γνωρίζουμε σε γενικές γραμμές τις σχετικές κινήσεις των τεκτονικών πλακών, μπορούμε να προβάλλουμε τη μετατόπισή τους και στο

μέλλον. Για παράδειγμα, σε 50-100 εκατ. χρόνια εικάζεται ότι η πλάκα της Ευρασίας θα «στραφεί» σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, μετατοπίζοντας τη Μεγάλη Βρετανία πλησιέστερα προς τον Βόρειο Πόλο και τη Σιβηρία προς τα θερμότερα γεωγραφικά πλάτη. Η Αφρικανική πλάκα, από την άλλη, θα συνεχίσει να πλησιάζει προς την Ευρωπαϊκή, συρρικνώνοντας όλο και πιο πολύ την έκταση της Μεσογείου, ώσπου εντέλει οι δύο ήπειροι θα συγκρουστούν, η Μεσόγειος θα εξαφανιστεί και στη θέση της θα ορθωθεί μία τεράστια οροσειρά στο μέγεθος των Ιμαλαΐων ◀

**Έβερεστ:**  
η υψηλότερη κορυφή των Ιμαλαΐων





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# Η ΓΗ, Η ΑΦΡΟΔΙΤΗ ΚΑΙ Ο ΑΡΗΣ

Ο συνθήκες στον Άρη, την Γη και την Αφροδίτη είναι εντελώς διαφορετικές (NASA/JPL-Caltech).

Γιατί η ζωή στέριωσε στην Γη και όχι στην Αφροδίτη και τον Άρη, τους γειτονικούς της πλανήτες; Η ύπαρξη νερού σε υγρή μορφή είναι ίσως το βασικότερο προαπαιτούμενο για την εμφάνιση της ζωής σε έναν πλανήτη και προφανώς εξαρτάται από την επιφανειακή του θερμοκρασία, η οποία με την σειρά της καθορίζεται πρωτίστως από την απόστασή του από τον Ήλιο. Εάν, δηλαδή, ένας πλανήτης βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση από το άστρο του, το νερό στην επιφάνειά του εξατμίζεται, ενώ εάν βρίσκεται πολύ μακριά, παγώνει.



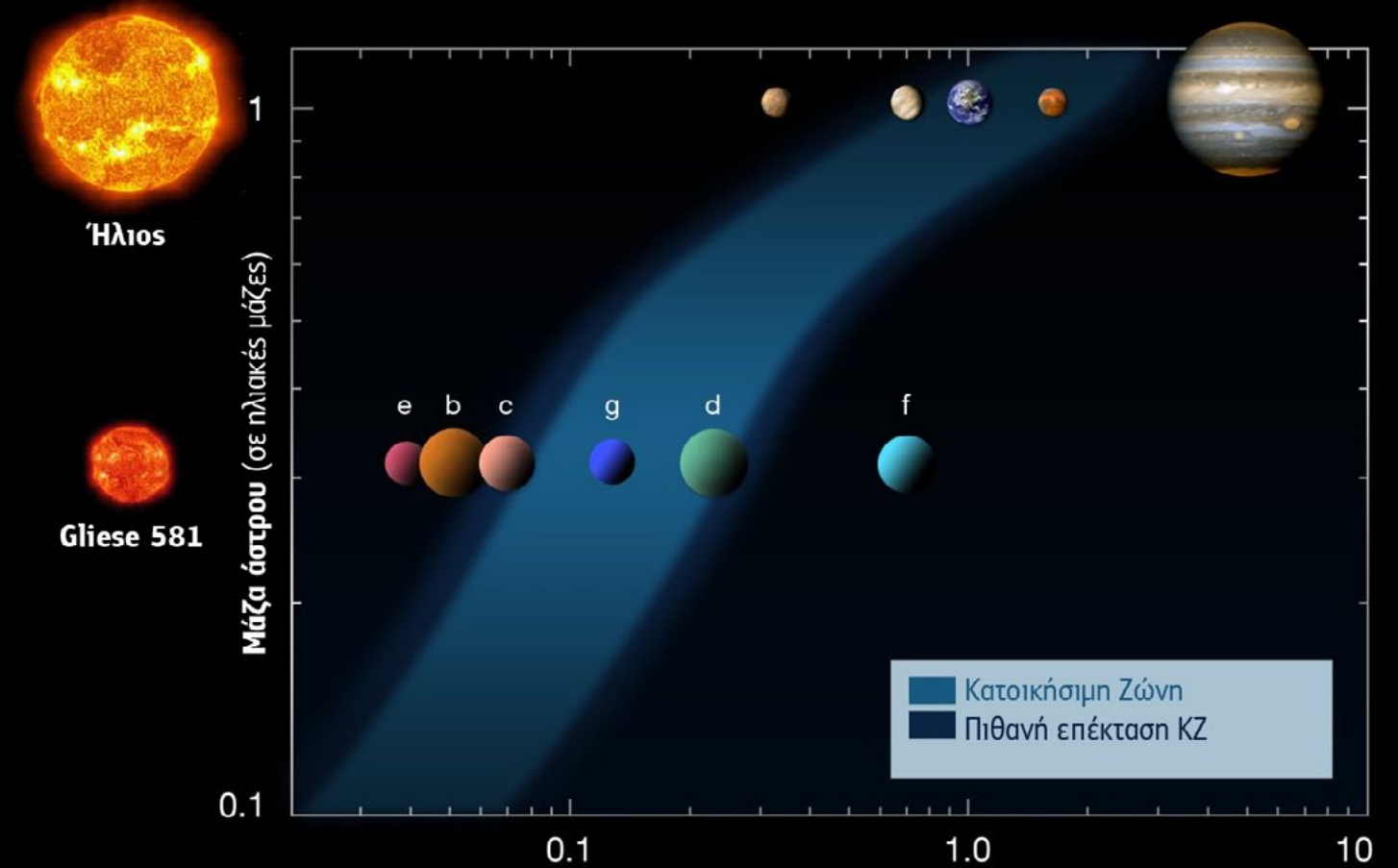


Επομένως, γύρω από τον Ήλιο, αλλά και γύρω από κάθε άλλο άστρο, διαμορφώνεται μία **Κατοικήσιμη Ζώνη**: κάθε πλανήτης που βρίσκεται μέσα στα όριά της έχει θερμοκρασίες που διατηρούν το νερό του σε υγρή κατάσταση. Αναμφίβολα, δηλαδή, η απόσταση ενός πλανήτη από το άστρο του είναι ο καθοριστικός παράγοντας που προσδιορίζει την μέση θερμοκρασία του, δεν είναι όμως ο μοναδικός. Γιατί αν ήταν έτσι, η Αφροδίτη που βρίσκεται μακρύτερα απ' τον Ήλιο απ' ό,τι ο Ερμής θα έπρεπε να έχει χαμηλότερες θερμοκρασίες από τον εσώτατο πλανήτη του Ηλιακού μας συστήματος. Εκτός αυτού, όπως είπαμε και προηγουμένως, οι ωκεανοί που κάλυπταν τον αρχέγονο πλανήτη μας στα πρώτα στάδια της εξέλιξής του, πρέπει να ήταν σε ρευστή κατάσταση. Δεδομένου, όμως, ότι η φωτεινότητα του Ήλιου δεν υπερέβαινε τότε το 70% της σημερινής, η μέση επιφανειακή θερμοκρασία της Γης πρέπει να ήταν πολύ χαμηλή, ώστε να διατηρήσει τους ωκεανούς ρευστούς. Αυτό, λοιπόν, που συνέβαλε στην αύξηση της θερμοκρασίας της δεν ήταν αποκλειστικά η «σωστή» απόστασή της από τον Ήλιο, αλλά και κάτι άλλο. Οι περισσότεροι επιστήμονες σήμερα συμφωνούν ότι αυτό το «κάτι άλλο», που συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας ενός πλανήτη είναι ο σύνθετος τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η ατμόσφαιρα που τον περιβάλλει και καθορίζεται κυρίως από

την βαρύτητα του πλανήτη, την ύπαρξη ή μη πλανητικού μαγνητικού πεδίου και το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ατμόσφαιρα ενός βραχέδους πλανήτη σχηματίζεται αρχικά κατά τον βομβαρδισμό του από αστεροειδείς και κομήτες, στην διάρκεια του οποίου απελευθερώνονται υδρατμοί και άλλες πτητικές ενώσεις, ενώ στην συνέχεια εμπλουτίζεται από τους υδρατμούς που διαρρέουν μέσα από τον φλοιό του όσο αυτός ψύχεται, καθώς και από την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Ο τρόπος, ωστόσο, με τον οποίο κάθε πλανήτης συγκρατεί την ατμόσφαιρα γύρω του είναι διαφορετικός. Για παράδειγμα, ένας πλανήτης με μεγάλη μάζα και ισχυρότερη βαρυτική έλξη συγκρατεί πιο εύκολα τα αέρια της ατμόσφαιράς του, σε αντίθεση με έναν μικρότερο πλανήτη, τα αέρια του οποίου διαφεύγουν ευκολότερα προς το Διάστημα. Επιπλέον, όσο μικρότερος είναι ένας πλανήτης τόσο ταχύτερα αποβάλλει την εσωτερική του θερμότητα και τόσο πιο γρήγορα σταματά η ηφαιστειακή του δραστηριότητα, που σημαίνει ότι από κάποιο σημείο της γεωλογικής του εξέλιξης και μετά, ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιράς του με αέρια σταματά.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την πυ-



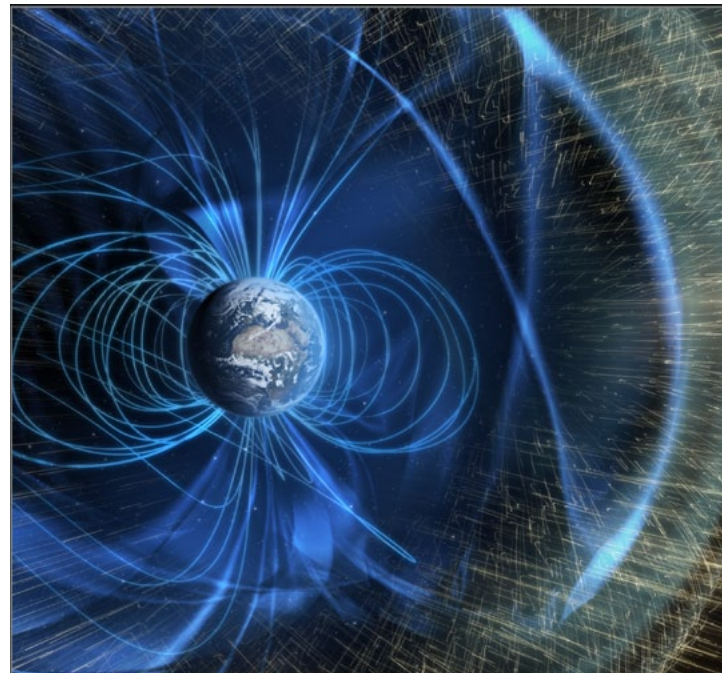
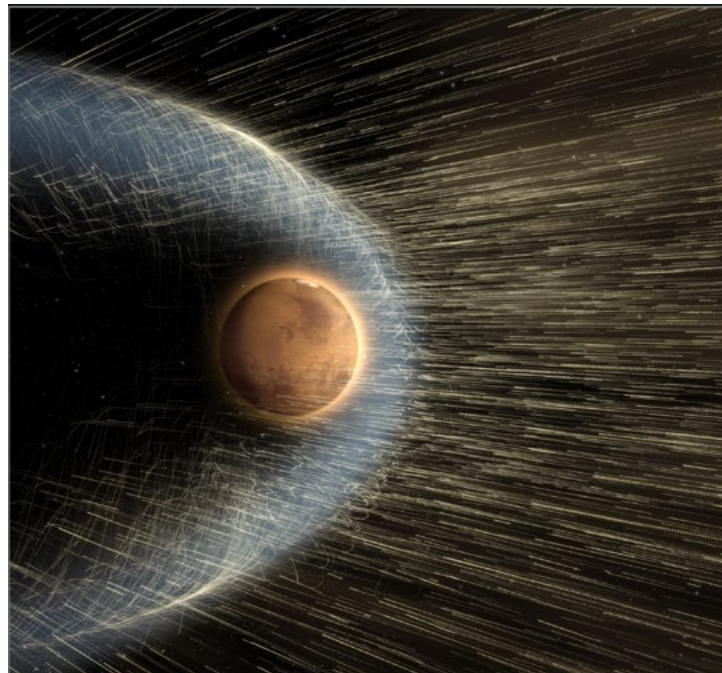
Διάγραμμα της Κατοικήσιμης Ζώνης γύρω από τον Ήλιο, καθώς και γύρω από το άστρο Gliese 581

ESO



κνότητα της ατμόσφαιρας ενός πλανήτη είναι η ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου που ενδεχομένως παράγει στο εσωτερικό του. Χωρίς αυτό το μαγνητικό πεδίο, τα ενεργητικά σωματίδια του ηλιακού ανέμου που συγκρούονται με τα ελαφρύτερα στοιχεία που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα τα ατμόσφαιράς του, τα επιταχύνουν τόσο πολύ, ώστε διαφεύγουν ευκολότερα από την βαρυτική έλξη του πλανήτη τους.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ωστόσο, είναι ίσως ο πλέον σημαντικός από τους παράγοντες που καθορίζουν την επιφανειακή θερμοκρασία ενός πλανήτη (με εξαίρεση την απόστασή του από τον Ήλιο φυσικά). Για παράδειγμα, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του Ήλιου που φτάνει στην Γη ανακλάται στο Διάστημα ή απορροφάται από την ατμόσφαιρά της, όπως δηλαδή συμβαίνει με τις ακτίνες Χ ή



Αριστερά: Η απουσία μαγνητικού πεδίου στον Άρη συνέβαλε καθοριστικά στην απώλεια της ατμόσφαιράς του. Δεξιά: Η Γη, αντιθέτως, προστατεύεται από το μαγνητικό πεδίο που παράγει στο εσωτερικό της (📷 NASA/GSFC).

με την υπεριώδη ακτινοβολία, που απορροφάται από την ασπίδα του όζοντος. Ωστόσο, η γήινη ατμόσφαιρα είναι διαφανής στην Ηλιακή ακτινοβολία που αντιστοιχεί στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, γι' αυτό και την διασχίζει ανεμπόδιστα, θερμαίνοντας την επιφάνειά της. Το έδαφος, στη συνέχεια, εκπέμπει την θερμότητα που απορρόφησε με την μορφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Σε αντίθεση, όμως, με το ορατό φως, η γήινη ατμόσφαιρα είναι μερικώς αδιαφανής στην υπέρυθρη ακτινοβολία, διότι τα αέρια του θερμοκηπίου που εμπεριέχει, κυρίως CO<sub>2</sub> και υδρατμοί, την παγιδεύουν, «φυλακίζο-

ντας» παράλληλα και την θερμική ενέργεια που της αντιστοιχεί. Η περιεκτικότητα, δηλαδή, της γήινης ατμόσφαιρας σε υδρατμούς και CO<sub>2</sub> διατηρεί την επιφάνεια του πλανήτη μας θερμότερη απ' όσο θα περίμενε κάποιος, απλά και μόνο με βάση της απόστασή του από τον Ήλιο. Χωρίς τα δύο αυτά αέρια του θερμοκηπίου, η Γη για μεγάλο μέρος της ιστορίας της θα ήταν παγωμένη.

Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που παγιδεύει



Χωρίς τα αέρια του θερμοκηπίου, η θερμοκρασία της Γης θα ήταν πολύ χαμηλότερη (📷 NASA/Joe MacGregor).

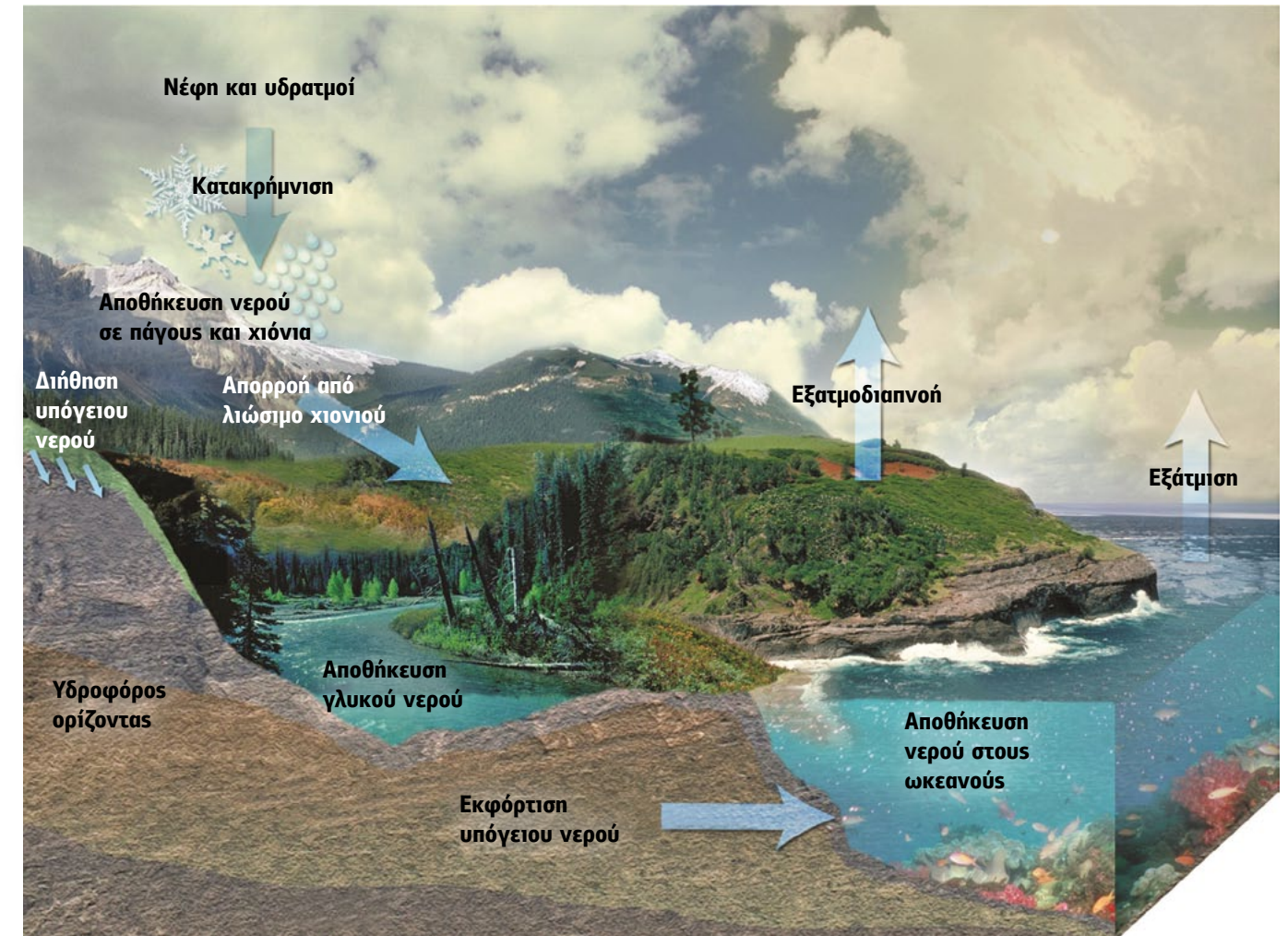


και τόσο περισσότερο αυξάνει η θερμοκρασία του. Όπως θα δούμε στην συνέχεια, η υπέρπυκνη ατμόσφαιρα της Αφροδίτης «πνίγεται» από τεράστιες ποσότητες CO<sub>2</sub>, που ανέβασαν τη μέση θερμοκρασία της στα ύψη. Ο Άρης, αντιθέτως, είναι σήμερα πιο κρύος από την Αρκτική και πιο παγωμένος από την Σαχάρα. Επιπλέον, παρόλο που η ατμόσφαιρά του αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από CO<sub>2</sub>, είναι τόσο αραιή και κατά συνέπεια το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι τόσο εξασθενημένο, ώστε ο πλανήτης αυτός δεν κατόρθωσε να διατηρήσει την θερμοκρασία του σε υψηλότερα επίπεδα. Επομένως, η απάντηση στο ερώτημα γιατί η ατμόσφαιρα των τριών αυτών πλανητών εξελίχθηκε τόσο διαφορετικά, σχετίζεται και με τις ποσότητες των αερίων του θερμοκηπίου που εμπεριέχει ο κάθε πλανήτης: στην Αφροδίτη είναι πολύ μεγάλες, στον Άρη πολύ μικρές και στη Γη αυτές που πρέπει.

Σ' αυτή την περίπτωση, το επόμενο ερώτημα που ευλόγως τίθεται είναι το εξής: γιατί η συσσώρευση του CO<sub>2</sub> είναι τόσο διαφορετική στην ατμόσφαιρα του κάθε πλανήτη; Το στοιχείο εκείνο που, κατά κύριο λόγο, διαφοροποιεί την Γη από την Αφροδίτη και τον Άρη είναι ότι ο πλανήτης μας διαθέτει έναν τεράστιο πλανητικό «θερμοστάτη», που μειώνει σε βάθος χρόνου την θερμοκρασία του όταν αυξάνει υπερβολικά και την

αυξάνει όταν χαμηλώνει «επικίνδυνα». Αυτός ο πολύπλοκος θερμοστάτης βασίζεται στην αλληλοσυμπληρούμενη λειτουργία τουλάχιστον τριών φυσικών μηχανισμών: του κύκλου του νερού, του κύκλου του άνθρακα και της γεωτεκτονικής δραστηριότητας.

Ο **κύκλος του νερού** είναι η αέναη ανακύκλωση και μεταφορά του νερού από την ξηρά στους ωκεανούς, μέσω των τρεχούμενων υδάτων, εν συνεχεία από τους ωκεανούς και τα επιφανειακά νερά στην ατμόσφαιρα, μέσω της εξάτμισης και εντέλει από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της Γης, μέσω της συμπύκνωσης και κατακρήμισης. Ο κύκλος αυτός συμβάλλει με την σειρά του στην αέναη ανακύκλωση του άνθρακα, που ρυθμίζει και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε CO<sub>2</sub>, με την βοήθεια ενός μηχανισμού που είναι γνωστός ως ο **κύκλος του άνθρακα**. Αυτό που συμβαίνει είναι το εξής: το CO<sub>2</sub> που υπάρχει στην ατμόσφαιρα της Γης μεταφέρεται μέσω της βροχής στην επιφάνειά της. Εκεί ένα ποσοστό του απορροφάται από τα επιφανειακά πετρώματα, ενώ ένα άλλο αλληλεπιδρά μ' αυτά, αποδεσμεύοντας ασβέστιο, για να καταλήξει μέσω της διάβρωσης στους ωκεανούς. Οι αναρίθμητοι μικροοργανισμοί που αποτελούν το πλαγκτόν δεσμεύουν στη συνέχεια CO<sub>2</sub> και ασβέστιο, με τα οποία κατασκευάζουν τους μικροσκοπικούς εξωσκελετούς τους.



Σχηματική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου

NASA/GSFC





Όταν όμως οι μικροοργανισμοί αυτοί ολοκληρώσουν τον κύκλο της ζωής τους, τα νεκρά τους σώματα, μαζί με τα αποθέματά τους σε άνθρακα και ασβέστιο καταλήγουν στον ωκεάνιο πυθμένα, όπου και συσσωρεύονται σε αλληπάλληλα στρώματα και μετατρέπονται με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου σε πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος. Στην ξηρά, από την άλλη, ο άνθρακας που έχει δεσμευθεί από τα φυτά και τα ζώα του πλανήτη καταλήγει στο έδαφος, όταν αυτά πεθάνουν και αποσυντεθούν. Κάποιο ποσοστό του επανακάμπτει στην ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο καταλήγει στο εσωτερικό του γήινου φλοιού, όπου μετα-

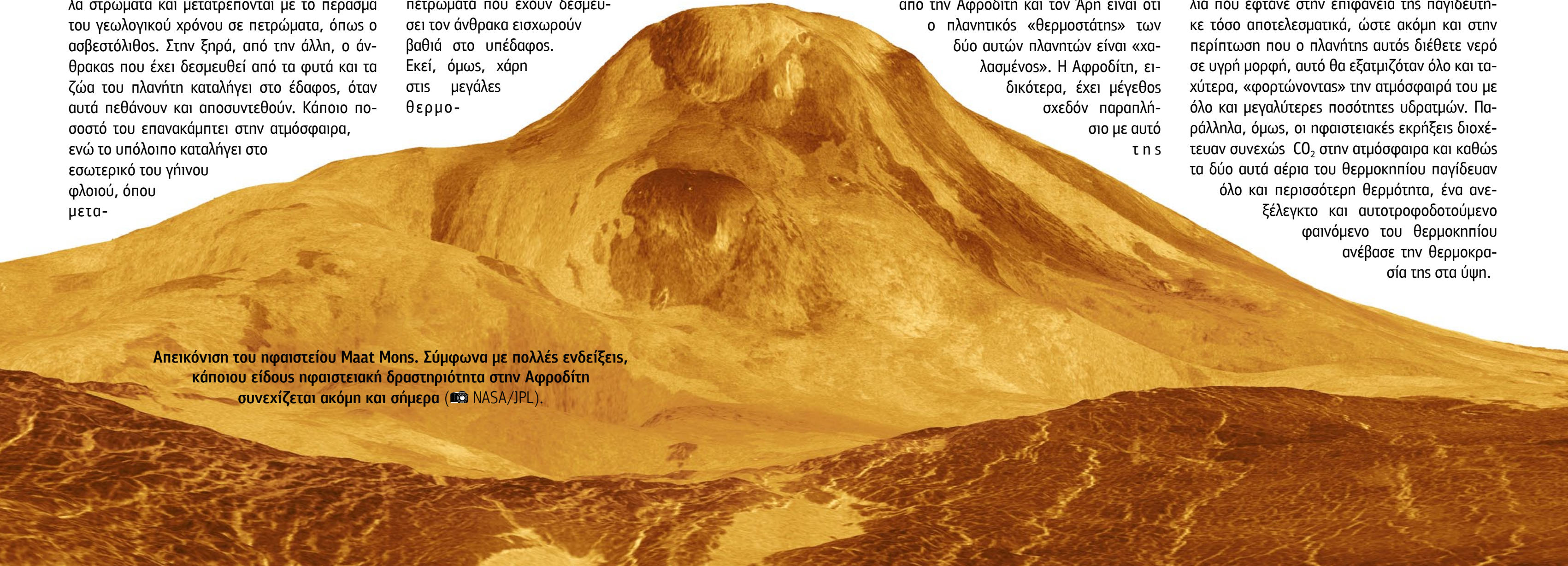
τρέπεται σε ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Εδώ «παρεμβαίνει» ο τρίτος μηχανισμός του πλανητικού μας θερμοστάτη, που δεν είναι άλλος από τη γεωτεκτονική δραστηριότητα. Εξαιτίας της κίνησης των τεκτονικών πλακών, τα πετρώματα που έχουν δεσμεύσει τον άνθρακα εισχωρούν βαθιά στο υπέδαφος. Εκεί, όμως, χάρη στις μεγάλες θερμο-

κρασίες και πιέσεις, τον «αποδεσμεύουν» και ο άνθρακας επιστρέφει στην ατμόσφαιρα ως CO<sub>2</sub> μέσα από την ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Η μεγάλη, λοιπόν, διαφορά του πλανήτη μας από την Αφροδίτη και τον Άρη είναι ότι ο πλανητικός «θερμοστάτης» των δύο αυτών πλανητών είναι «χαλασμένος». Η Αφροδίτη, ειδικότερα, έχει μέγεθος σχεδόν παραπλήσιο με αυτό

της και κατά συνέπεια το βαρυτικό της πεδίο είναι αρκετά ισχυρό ώστε να συγκρατεί γύρω του την πυκνή της ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η Αφροδίτη, ωστόσο, είναι λίγο πλησιέστερα προς τον Ήλιο και η ηλιακή ακτινοβολία που έφτανε στην επιφάνειά της παγιδεύτηκε τόσο αποτελεσματικά, ώστε ακόμη και στην περίπτωση που ο πλανήτης αυτός διέθετε νερό σε υγρή μορφή, αυτό θα εξατμιζόταν όλο και ταχύτερα, «φορτώνοντας» την ατμόσφαιρά του με όλο και μεγαλύτερες ποσότητες υδρατμών. Παράλληλα, όμως, οι ηφαιστειακές εκρήξεις διοχέτευαν συνεχώς CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και καθώς τα δύο αυτά αέρια του θερμοκηπίου παγίδευαν όλο και περισσότερη θερμότητα, ένα ανεξέλεγκτο και αυτοτροφοδοτούμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου ανέβασε την θερμοκρασία της στα ύψη.

Απεικόνιση του ηφαιστείου Maat Mons. Σύμφωνα με πολλές ενδείξεις, κάποιου είδους ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Αφροδίτη συνεχίζεται ακόμη και σήμερα (NASA/JPL).

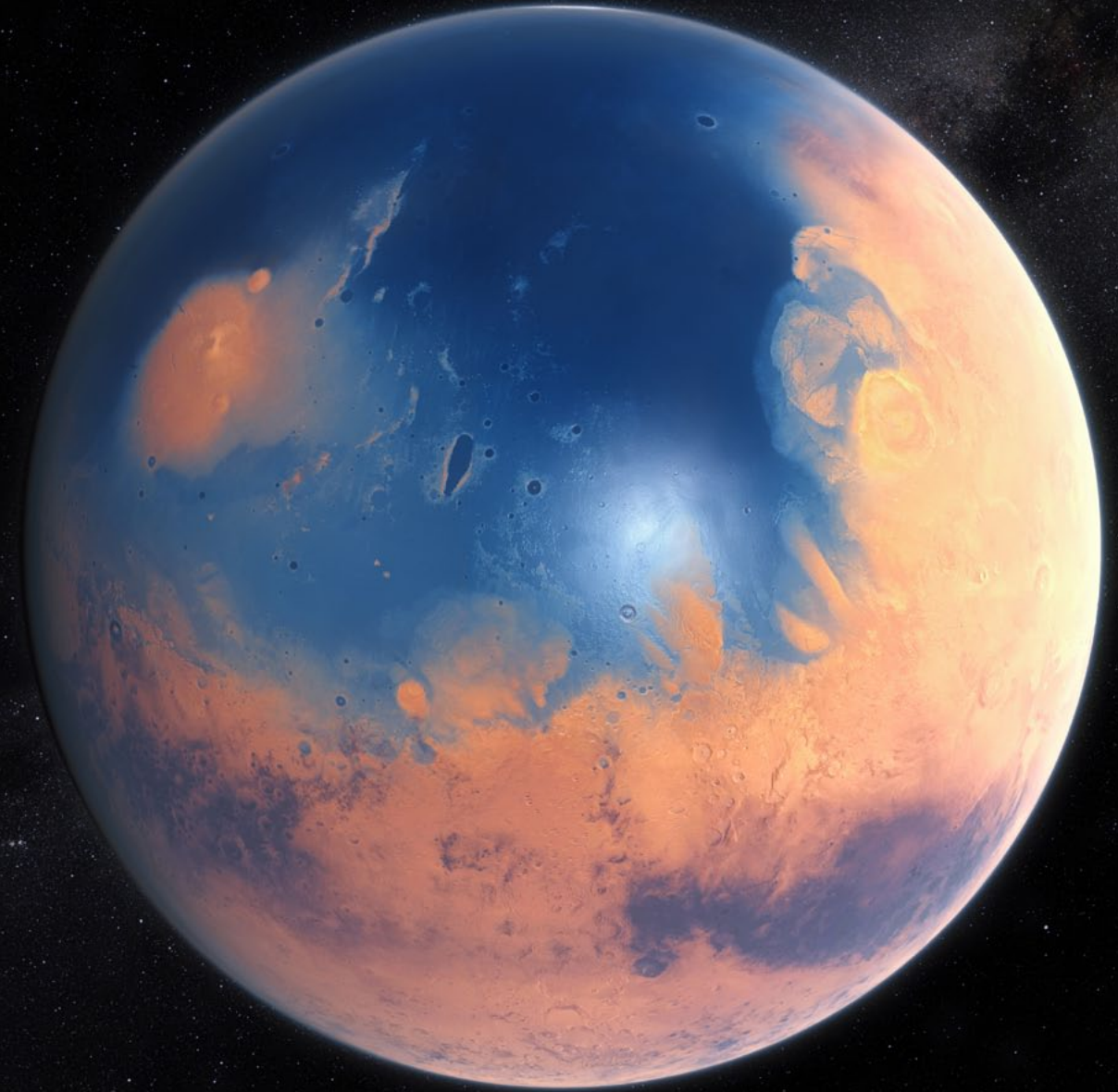




Επειδή, όμως, η Αφροδίτη δεν διαθέτει ούτε ασπίδα όζοντος που θα την προστάτευε από την υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου, ούτε όμως και μαγνητικό πεδίο που θα την προστάτευε από τον ηλιακό άνεμο, οι υδρατμοί στην ατμόσφαιρά της διασπάστηκαν με την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας σε υδρογόνο και οξυγόνο. Έτσι, το ελαφρύτερο υδρογόνο ανήλθε στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιράς της και εντέλει παρασύρθηκε στο Διάστημα από τον ηλιακό άνεμο, ενώ το οξυγόνο σχημάτισε ενώσεις με άλλα στοιχεία ή/και δεσμεύθηκε στα επιφανειακά της πετρώματα. Κάπως έτσι, λοιπόν, η Αφροδίτη έχασε εντελώς τα αποθέματά της σε νερό και μετατράπηκε στον άνυδρο πλανήτη που γνωρίζουμε. Χωρίς, όμως την παρουσία νερού, το CO<sub>2</sub> που συσσωρευόταν στην ατμόσφαιρά της από τις ηφαιστειακές εκρήξεις δεν μπορούσε να επιστρέψει στο έδαφος, όπως συμβαίνει στη Γη. Επιπλέον, τα πετρώματα που απαρτίζουν τις τεκτονικές πλάκες του πλανήτη μας έχουν δεσμεύσει σημαντικές ποσότητες νερού, το οποίο λειτουργεί ως λιπαντικό, διευκολύνοντας την μετατόπισή τους. Επειδή, όμως, τα πετρώματα της Αφροδίτης έχουν χάσει προ πολλού το νερό που κάποτε εμπεριείχαν, η μετατόπιση των τεκτονικών πλακών και κατά συνέπεια η ανακύκλωση του φλοιού της, που συμβάλλει στην «αποθήκευση» του CO<sub>2</sub> στο

εσωτερικό της, σταμάτησε νωρίς. Γι' αυτό και σήμερα η Αφροδίτη είναι ένας κόσμος χωρίς νερό και χωρίς ζωή, με ατμόσφαιρα που πνίγεται στο CO<sub>2</sub> και με επιφανειακές θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 450 °C.

Ο Άρης από την άλλη είχε πολύ μικρό μέγεθος για να διατηρήσει την γεωτεκτονική του δραστηριότητα για πολύ. Καθώς, λοιπόν, απέβαλε πολύ ταχύτερα από την Γη την εσωτερική του θερμότητα, η ηφαιστειακή του δραστηριότητα και κατά συνέπεια ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιράς του με CO<sub>2</sub> κάποια στιγμή σταμάτησε. Εντέλει, με την πάροδο του χρόνου, το περισσότερο από αυτό παρασύρθηκε στο Διάστημα από τον ηλιακό άνεμο, όταν ο κόκκινος πλανήτης απώλεσε το μαγνητικό του πεδίο. Το ίδιο, άλλωστε, συνέβη και με το νερό που κάποτε διέθετε. Πραγματικά, σύμφωνα με όλα τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει, ο Άρης κατά το αρχέγονο παρελθόν του ήταν ένας αρκετά πιο ζεστός και υγρός πλανήτης, με πυκνή ατμόσφαιρα και νερό που συσσωρευόταν σε λίμνες και θάλασσες, ενώ πιθανότατα το βόρειο ημισφαίριό του καλυπτόταν από έναν ωκεανό με περισσότερο νερό απ' αυτό που εμπεριέχει ο Αρκτικός ωκεανός στην Γη. Στην διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας, όμως, ο Άρης έχασε το νερό σε υγρή μορφή που κάποτε διέθετε. Παρόλ' αυτά, ένα μέρος του παραμένει στους πόλους και στο υπέδα-



Καλλιτεχνική απεικόνιση του Άρη κατά το αρχέγονο παρελθόν του, όταν ακόμη διέθετε μεγάλες ποσότητες νερού [ESO/M. Kornmesser/N. Risinger ([skysurvey.org](https://www.skysurvey.org))].



φος του κόκκινου πλανήτη, με την μορφή πάγου.

Το περισσότερο, ωστόσο, χάθηκε στο Διάστημα, όταν ο Άρης απώλεσε την προστατευτική ασπίδα του μαγνητικού του πεδίου, μέσα από την συνεχή «διάβρωση» της ατμόσφαιράς του από την υπεριώδη ακτινοβολία και τον ηλιακό άνεμο. Καθώς, δηλαδή, η υπεριώδης ακτινοβολία του Ήλιου διασπούσε τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρά του, το ελαφρύτερο υδρογόνο παρασύρθηκε στο Διάστημα, διότι τα σωματίδια του ηλιακού ανέμου συγκρούονταν με τα άτομα και τα μόρια υδρογόνου της ατμόσφαιρας και τα επιτάχυναν τόσο πολύ, ώστε αυτά διέφευγαν από την βαρυτική έλξη του κόκκινου πλανήτη. Σύμφωνα, μάλιστα, με τα δεδομένα που συνέλεξε το τροχιακό αστεροσκοπείο **MAVEN**, που τέθηκε σε τροχιά γύρω από τον Άρη τον Σεπτέμβριο του 2014, ο κόκκινος πλανήτης απώλεσε στο διάβα του γεωλο-

γικού χρόνου ίσως και το 99% της αρχικής του ατμόσφαιρας, καθώς και το μεγαλύτερο μέρος του νερού που κάποτε διέθετε.

Με αυτά τα δεδομένα, πώς θα είναι άραγε το μέλλον του πλανήτη μας; Καθώς η κίνηση των τεκτονικών πλακών θα συνεχίσει να μεταβάλλει το γήινο ανάγλυφο και στο μέλλον, σε δεκάδες εκατομμύρια χρόνια από σήμερα η επιφάνεια του πλανήτη μας δεν θα μοιάζει σε τίποτα με αυτήν που όλοι γνωρίζουμε. Όταν, όμως, η Γη αποβάλει και τα τελευταία ίχνη θερμότητας από το εσωτερικό της, η μετατόπιση των τεκτονικών πλακών θα σταματήσει για πάντα. Θα κατορθώσει άραγε να επιβιώσει η ζωή στην Γη μέχρι τότε; Η σύγκρουση ενός γιγάντιου αστεροειδούς ή ακόμη και η έκρηξη ενός γειτονικού σουπερνόβα θα μπορούσαν να προκαλέσουν μία νέα μαζική εξαφάνιση ειδών του πλανήτη μας πολύ νωρίτερα, ωστόσο

η πρόβλεψη και αξιολόγηση της πιθανότητας να πραγματοποιηθούν τέτοιου είδους καταστροφές είναι αρκετά δύσκολη. Δεν υπάρχει αμφιβολία, ωστόσο, ότι το «πεπρωμένο» του πλανήτη μας είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τον Ήλιο. Διότι, καθώς ο Ήλιος θα γερνάει όλο και πιο πολύ, πλησιάζοντας προς την μετατροπή του σε **κόκκινο γίγαντα**, το μέγεθος και η φωτεινότητά του θα αυξάνονται διαρκώς. Έτσι, καθώς η θερμοκρασία της Γης θα αυξάνει όλο και πιο πολύ, οι ωκεανοί θα αρχίσουν να εξατμίζονται όλο και πιο γρήγορα, «φορτώνοντας» τη γήινη ατμόσφαιρα με ακόμη περισσότερους υδρατμούς. Εντέλει, ένα ανεξέλεγκτο και αυτοτροφοδοτούμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου θα προκαλέσει την ολική εξάτμιση των ωκεανών, όπως περίπου εικάζεται ότι συνέβη στην Αφροδίτη. Αυτό, βέβαια, δεν αναμένεται να αρχίσει να συμβαίνει νωρίτερα από περίπου 2 δισ. χρόνια.

Ήδη, όμως, η ζωή στον πλανήτη μας αγωνίζεται να επιβιώσει σε ένα περιβάλλον που κάθε μέρα υποβαθμίζεται όλο και πιο πολύ. Οι τεράστιες ποσότητες CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων του θερμοκηπίου που εκλύονται στην ατμόσφαιρα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν ήδη απορυθμίσει τον πλανητικό μας θερμοστάτη και η θερμοκρασία του πλανήτη μας αυξάνει επικίνδυνα. Και πολλοί επιστήμονες θεωρούν ότι ήδη συντελείται μία νέα μαζική εξαφάνιση των ειδών, που κι αυτή οφείλεται στην συστηματική υποβάθμιση του περιβάλλοντος από τον άνθρωπο. Καθώς η καταστροφική μας επίδραση στο κλίμα και στο φυσικό περιβάλλον αυξάνει διαρκώς, οι δραματικές επιπτώσεις που έχει η αλόγιστη υπερεκμετάλλευση της Φύσης από τον άνθρωπο πρέπει να αντιμετωπιστούν τώρα. Αύριο ίσως να είναι πολύ αργά ◀



- ▶ Archer, David, *The long thaw: how humans are changing the next 100.000 years of earth's climate*, Princeton University Press, c2009.
- ▶ Bond, Peter, *Exploring the solar system*, Wiley-Blackwell, 2012.
- ▶ Brahic, A, *Ta παιδιά του ήλιου: η προέλευση, η εξέλιξη και η εξερεύνηση του ηλιακού συστήματος*, Κάτοπτρο, 2002.
- ▶ Condie, Kent C., *Origin and evolution of earth: principles of historical geology*, Prentice - Hall, 1998.
- ▶ Impey, Chris, *To ζωντανό σύμπαν: η αναζήτηση της ζωής στο διάστημα*, Ψυχογιός, 2009.
- ▶ Kargel, J. S., *Mars: a warmer, wetter planet*, Springer, c2004.
- ▶ Kolbert, Elizabeth, *Ημερολόγιο μιας καταστροφής: άνθρωπος, φύση και κλιματική αλλαγή*, Αβγό, 2007.
- ▶ Woolfson, Michael M., *The formation of the solar system: theories old and new*, Imperial College Press, c2007.

- ▶ [Περί σεισμών](#)
- ▶ [Cosmic Evolution: from Big Bang to Humankind](#)
- ▶ [Global climate change](#)
- ▶ [Solar System Exploration](#)
- ▶ [This Dynamic Earth: the Story of Plate Tectonics](#)
- ▶ [Understanding Evolution](#)



παρουσίαση & αφήγηση  
ΑΡΙΣ ΓΕΡΟΝΤΑΚΗΣ

english narration  
ARIS GERONTAKIS

σκηνοθετική επιμέλεια  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ

σενάριο, επιστημονική επιμέλεια & κείμενο αφήγησης  
ΑΛΕΞΗΣ ΔΕΛΗΒΟΡΙΑΣ

μουσική & sound design  
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Κ. ΚΑΤΣΑΡΗΣ

διεύθυνση φωτογραφίας  
(VR 360 video - fulldome video - chroma key video)  
ΗΛΙΑΣ ΜΠΑΛΛΝΤΑΣ

διεύθυνση παραγωγής  
ΜΑΝΟΣ ΚΙΤΣΩΝΑΣ

σύμβουλος παραγωγής  
ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Π. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ

compositing & post-processing  
(VR 360 video - fulldome video - chroma key video)  
ΗΛΙΑΣ ΜΠΑΛΛΝΤΑΣ

post-production video & title animation  
ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ

graphic design  
ΕΥΓΕΝΙΑ ΣΤΑΒΑΡΗ  
ΧΡΥΣΑΝΘΗ ΒΑΣΟΠΟΥΛΟΥ

τεχνικοί πλανηταρίου  
ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΛΟΥΒΑΡΗΣ  
ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΡΗΣΤΟΓΙΩΡΓΟΣ

**ADVANCED VISUALIZATION LAB**  
National Center for Supercomputing Applications,  
University of Illinois

producer  
DONNA COX

visualizations  
DONNA COX  
ROBERT PATTERSON  
STUART LEVY  
AJ CHRISTENSEN  
KAUNA BORKIEWICZ  
JEFF CARPENTER

**EVANS & SUTHERLAND**  
Salt Lake City, Utah

executive producers  
TERENCE MURTAGH  
KIRK JOHNSON

producer  
MICHAEL DAUT

art & animation director  
DON DAVIS

animators  
KEN CARLSON  
MARTY SISAM

post-production  
BRYCE BUCHANAN

**FULLDOME STUDIO DN**  
Berlin, Germany

supervisors  
Dr. WILLIAM GUTSCH  
MARINA EFANOVA

producer  
IRYNA FILIPOVA  
lead designer  
PETER IVANOV

computer graphics  
PETER IVANOV  
RAFAEL ZANEDINOV

technical support  
DENIS BOCHINSKY

artist-designer  
OLGA MOROZOVA

**MUSEUM OF SCIENCE**  
Boston, Massachusetts

supervisor  
DANIELLE KHOURY LeBLANC

producer  
ALAN LIGHTMAN

executive producers  
IOANNIS MIAOULIS  
PAUL FONTAINE  
DAVID RABKIN

animation & effects artists  
CHARLES WILCOX  
WADE SYLVESTER  
HEATHER FAIRWEATHER  
JASON FLETCHER

systems & technical coordinator  
DARRYL DAVIS

**NATIONAL SPACE CENTRE**  
Leicester, UK

producer  
PAUL MOWBRAY

CG supervisor  
AARON BRADBURY

computer animation & design  
AARON BRADBURY  
MAX CROW  
PHIL DAY  
AUSTIN DUROSE  
PAULS KALNENIEKS  
IAN SMITH  
LIAM WARDLE

**SPITZ CREATIVE MEDIA**  
Chadds Ford, Pennsylvania

supervisor  
THOMAS LUCAS

executive producers  
PAUL DAILEY  
JONATHAN SHAW

producers  
MIKE BRUNO  
DONNA COX  
BRADLEY THOMPSON  
ROBERT PATTERSON

animation & vfx production  
BILL CARR

INNA LEONOV-KENNY  
BRADLEY THOMPSON  
WES THOMPSON

location photography  
BRADLEY THOMPSON  
INNA LEONOV-KENNY

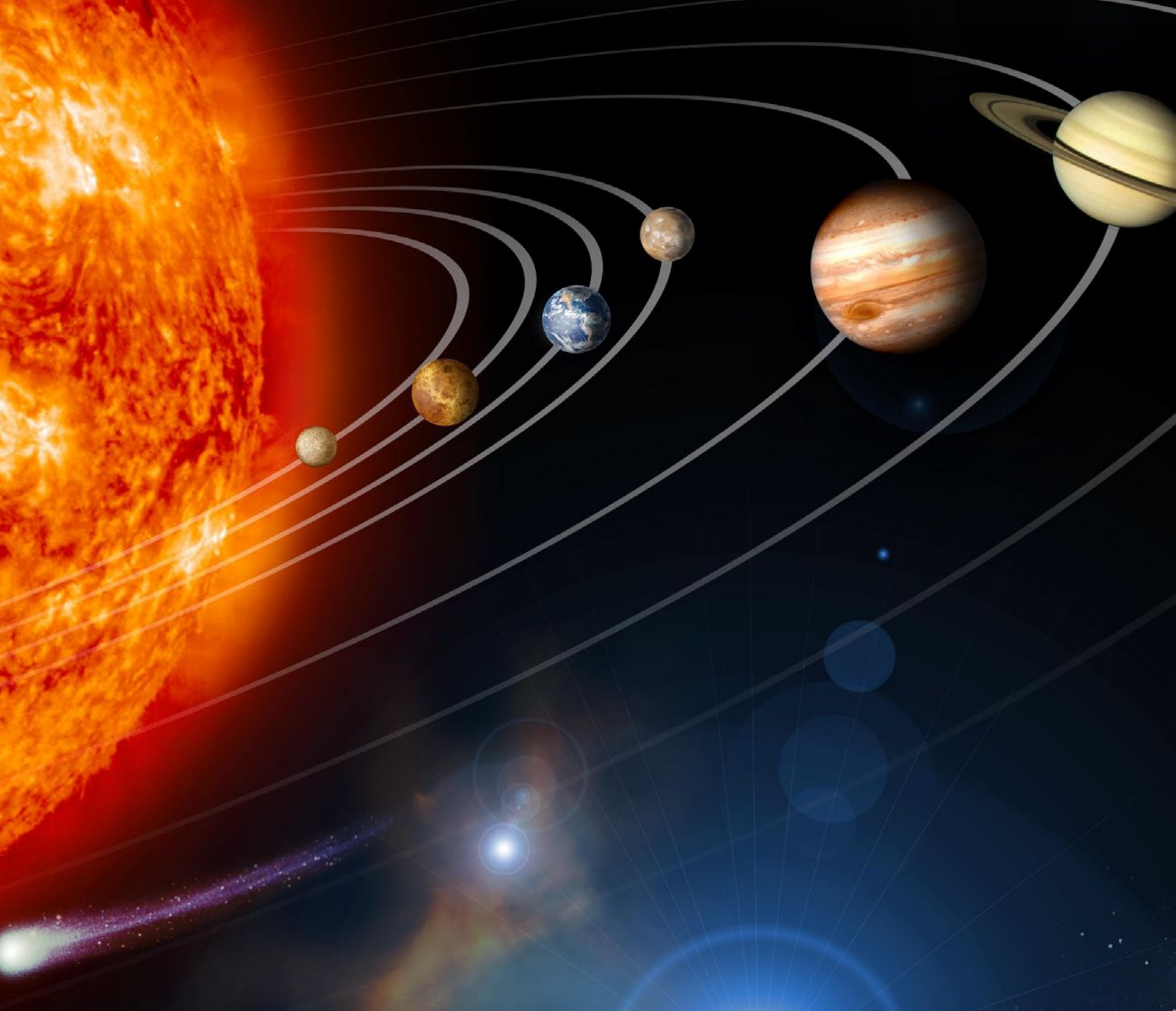
fulldome & post-production video services  
ΕΥΓΕΝΙΔΕΙΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

post-production audio services  
STARGAZER AUDIO  
Ιδρύματος Ευγενίδου

παραγωγή  
ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ  
© 2021







ΣΕΛΙΔΟΠΟΙΗΣΗ - ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ: ΟΜΑΔΑ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

---