



Νέο Ψηφιακό Πλανητάριο

Ψηφιακή παράσταση Θόλου

Η Συνοπτικός Οδηγός για Μαθητές ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

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 πολλά, η προσπάθεια 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.

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ

Αστρονόμου Ευγενιδείου Πλανηταρίου

Το Ηλιακό σύστημα

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 Άρης, 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 συντρίμια 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 πηπτικών ενώσεων, όπως νερού, αμμωνίας και μεθανίου. Ακόμη μακρύτερα, σε αποστάσεις 30-55 ΑΜ από τον Ήλιο (1 Αστρονομική Μονάδα ισούται με την μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο), βρί-



Καλλιτεχνική απεικόνιση του Ηλιακού συστήματος
NASA.

σκεται η **Ζώνη Kuiper**. Τα ουράνια σώματα που την απαρτίζουν, αποτελούνται κυρίως από συσσωματώσεις παγωμένων πηπτικών ενώσεων και πετρωμάτων, ενώ σ' αυτήν βρίσκεται ο νάνος πλανήτης Πλούτωνας, καθώς και τρεις ακόμη νάνοι πλανήτες που ανακαλύφθηκαν τα τελευταία χρόνια. Τέλος, σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις, οι οποίες υπερβαίνουν τις 50.000 ΑΜ από τον Ήλιο, εικάζεται ότι υπάρχει ένα σφαιρικό νέφος μικρών παγωμένων σωμάτων, το επονομαζόμενο **Νέφος Oort**.

Η προέλευση του Ηλιακού συστήματος

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^{ου} αιώνα. Πώς, λοιπόν, δημιουργήθηκε ο Ήλιος και το Ηλιακό μας σύστημα; Γνωρίζουμε ότι τα άστρα γεννιούνται στις ψυχρότερες και πυκνότερες περιοχές της μεσο-



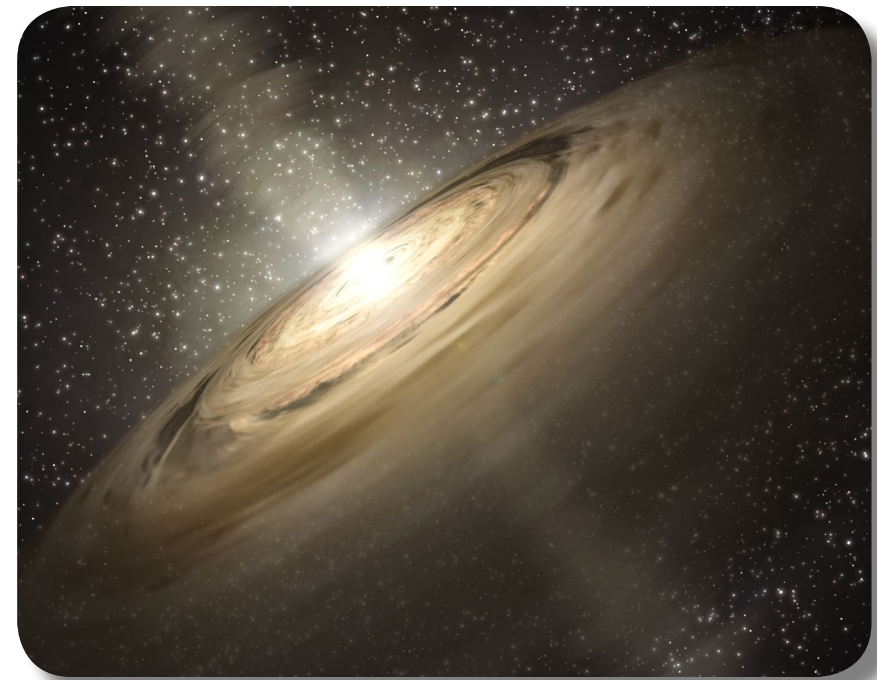
Οι Πυλώνες της Δημιουργίας, περιοχή αστρογένεσης
NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

αστρικής ύλης, δηλαδή μέσα σε **γιγάντια μοριακά νέφη αερίων** (κυρίως υδρογόνου) 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 διεκκυστίδα 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 απ' 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. Γι' αυτό, οποιαδήποτε διαταραχή, όπως είναι η έκρηξη ενός γειτονικού σουπερνόβα, οδηγεί στον σχηματισμό εντός του νέφους μικρότερων και πυκνότερων περιοχών, κάθε μία από τις οποίες θα καταρρεύσει, σχηματίζοντας το δικό της άστρο. Μία απ' αυτές ήταν και το **Ηλιακό νεφέλωμα**, απ' το οποίο προήλθε το Ηλιακό μας σύστημα.

Ένα αστέρι γεννιέται

Το Ηλιακό νεφέλωμα, που αρχικά είχε την δική του αργή περιστροφική κίνηση, άρχισε να συστέλλεται πριν από περίπου 4,6 δισ. χρόνια, πιθανότατα εξαιτίας της έκρηξης ενός γειτονικού του σουπερνόβα. 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 νεφέλωματος 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. Καθώς, λοιπόν, η θερμοκρασία και η πυκνότητα στην κεντρική περιοχή του δίσκου αυξάνουν διαρκώς, διαμορ-

φώνεται εκεί ο **πρωτοήλιος**, δηλαδή μία περιστρεφόμενη υπέρθερμη σφαίρα αερίων, που είναι και το «έμβρυο» του Ήλιου που θα «γεννηθεί» σε λίγο. Εντέλει η θερμοκρασία και η πυκνότητα στο εσωτερικό του πρωτοήλιου αυξάνουν τόσο πολύ, ώστε οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες υδρογόνου, που σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απωθούν ο ένας τον άλλον εξαιτίας του ομώνυμου φορτίου τους, αρχίζουν και συντήκονται μεταξύ τους σε ήλιο, 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.

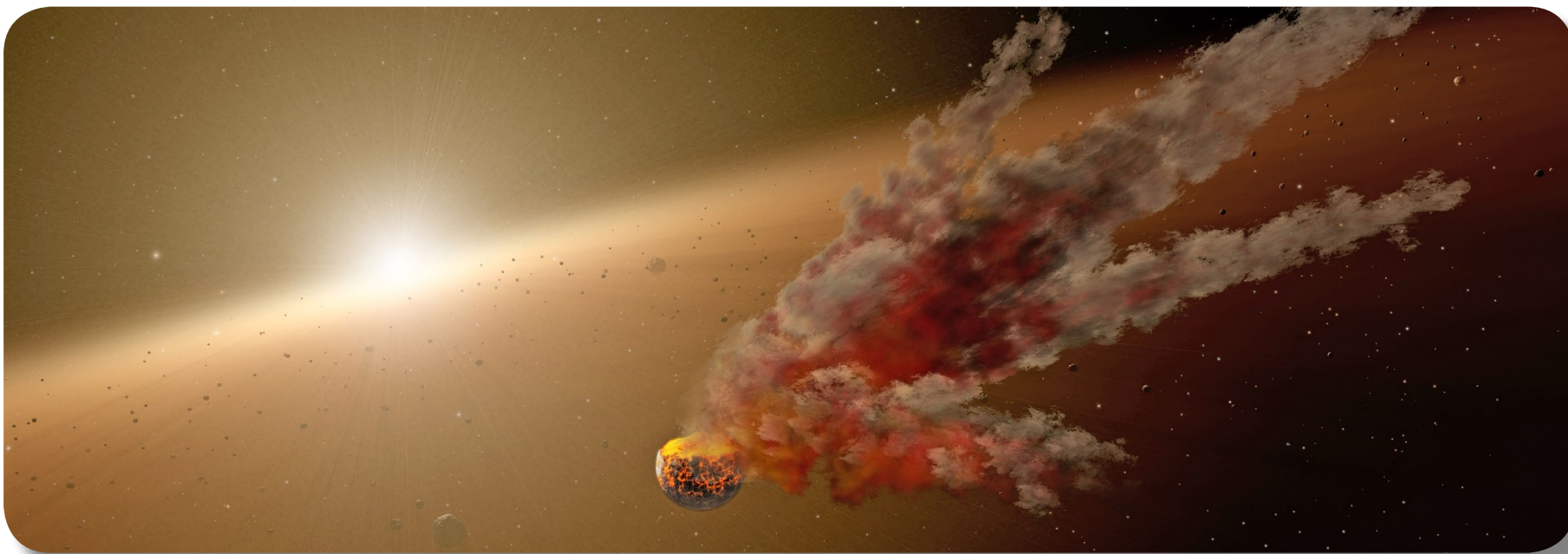


Καλλιτεχνική αναπαράσταση πρωτοπλανητικού δίσκου
NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC).

Η προέλευση των πλανητών

Η πρωταρχική μαγιά 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 νεογέννητο 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 μεγάλος 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 πλα-

νητοειδείς, ωστόσο, συγχωνεύονταν μέσα από ηπιότερες συγκρούσεις, επαυξάνοντας την μάζα τους όλο και περισσότερο και σχηματίζοντας σταδιακά **πρωτοπλανήτες** και εντέλει πλανήτες. Η θεωρία του Ηλιακού νεφελώματος, όπως περίπου την περιγράψαμε, εξηγεί πολλά από τα χαρακτηριστικά των πλανητών του Ηλιακού συστήματος, όπως τις μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται στην χημική σύσταση και το μέγεθος των αέριων γιγάντων σε σχέση με τους εσωτερικούς πλανήτες. Η βαθύτερη, όμως, κατανόηση συγκεκριμένων σταδίων στην εξέλιξη του πρώιμου Ηλιακού συστήματος, αλλά και συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των ουράνιων σωμάτων που εμπεριέχει, παραμένει προβληματική σε κάποια σημεία της. Οι προσπάθειες των επιστημόνων να επιλύσουν αυτά τα προβλήματα τους οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην διατύπωση συμπληρωματικών θεωρητικών μοντέλων, όπως είναι το **Πρότυπο της Μεγάλης Αναστροφής** και το **Πρότυπο της Νίκαιας**, περισσότερες πληροφορίες για τα οποία μπορείτε να αντλήσετε από το βιβλίο της παράστασης [Η Ιστορία της Γης](#).



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της συντριβής ενός πλανητοειδούς σε έναν πρωτοπλανήτη  NASA/JPL-Caltech.

Ο σχηματισμός της Σελήνης

Η επικρατέστερη ερμηνεία για τον σχηματισμό της Σελήνης βασίζεται στην υπόθεση της **Γιγάντιας Πρόσκρουσης**. Σύμφωνα μ' αυτήν, η Σελήνη σχηματίστηκε περίπου 20-100 εκατ. χρόνια μετά την γένεση του Ηλιακού συστήματος, όταν η αρχέγονη Γη συγκρούστηκε με ένα πρωτοπλανητικό σώμα στο μέγεθος του πλανήτη Άρη. Η τιτάνια σύγκρουση εκτίναξε τεράστιες ποσότητες διάπυρης ύλης και εξαερωμένων πετρωμάτων στο Διάστημα, τα οποία συσσωρεύτηκαν σε σχήμα σφαιρικό και στερεοποιήθηκαν σχηματίζοντας εντέλει την Σελήνη. 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.



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της Γιγάντιας Πρόσκρουσης
📷 Dana Berry/National Geographic Creative).

Ο ύστερος μεγάλος βομβαρδισμός

Η επιφάνεια της Σελήνης και του Ερμή καλύπτεται από αναρίθμητους κρατήρες πρόσκρουσης που προκλήθηκαν στην διάρκεια ενός κατακλυσμιαίου βομβαρδισμού από αναρίθμητα διαστημικά συντρίμια, γνωστού ως ο **Ύστερος Μεγάλος Βομβαρδισμός**, ο οποίος 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, έχουν καταγραφεί περισσότεροι από 300.000 κρατήρες με μέγεθος ίσο ή μεγαλύτερο του 1 km. Στον πλανήτη μας, αντιθέτως, 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 της ήταν πολύ περισσότεροι. Επειδή, όμως, η Γη αναμορφώνει διαρκώς την επιφάνειά της, απαλείφοντας τα προγενέστερα χαρακτηριστικά της, οι «ουλές» που προκλήθηκαν από την πτώση αυτών των διαστημικών εισβολέων έσβησαν με το πέρασμα του γεωλογικού χρόνου.



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της εποχής του Ύστερου Μεγάλου Βομβαρδισμού
📷 © Ron Miller, [Black Cat Studios](#)

Ατμόσφαιρα και ωκεανοί

Την ίδια, περίπου, περίοδο, οι υδρατμοί που διέφευγαν από τα πετρώματα του γήινου φλοιού, τα 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 (CO₂), παγίδευαν περισσότερη θερμότητα, αποτρέποντας το πάγωμα των ωκεανών.

Η εμφάνιση της ζωής

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 παλαιοκλιματολογία, 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 γεω-

λογικής του εξέλιξης. Είναι αλήθεια, όμως, ότι το μεγάλο αυτό «Βιβλίο της Φύσης» έχει ακόμη πολλές κενές σελίδες. Πραγματικά, η συνεχής διάβρωση των επιφανειακών πετρωμάτων από τα στοιχεία της Φύσης, η ασταμάτητη τεκτονική δραστηριότητα που αναμορφώνει διαρκώς την επιφάνεια της Γης, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι προσκρούσεις αστεροειδών και κομητών, «καταστρέφουν» 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. 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 αυτό το μεγάλο «άλμα» της ζωής.

Η εσωτερική δομή της Γης

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 από πετρώματα μεγαλύτερης πυκνότητας και μικρότερης ηλικίας σε σχέση με πετρώματα που απαρτίζουν τον ηπειρωτικό φλοιό. Από τη βάση του φλοιού μέχρι το βάθος των περίπου 2.900 km εκτείνεται ο ρευστός **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.

Η μετατόπιση των ηπείρων

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 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 υποστή-



Ο Γερμανός μετεωρολόγος Alfred Wegener.

ριξε 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, η υπόθεση του Wegener αδυνατούσε να εξηγήσει ποιος φυσικός μηχανισμός μπορούσε να μετατοπίσει αυτές τις τεράστιες μάζες πετρωμάτων σε τόσο μεγάλες αποστάσεις. Γι' αυτό άλλωστε και το επιστημονικό κατεστημένο της εποχής του την αντιμετώπισε με ειρωνεία. 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.

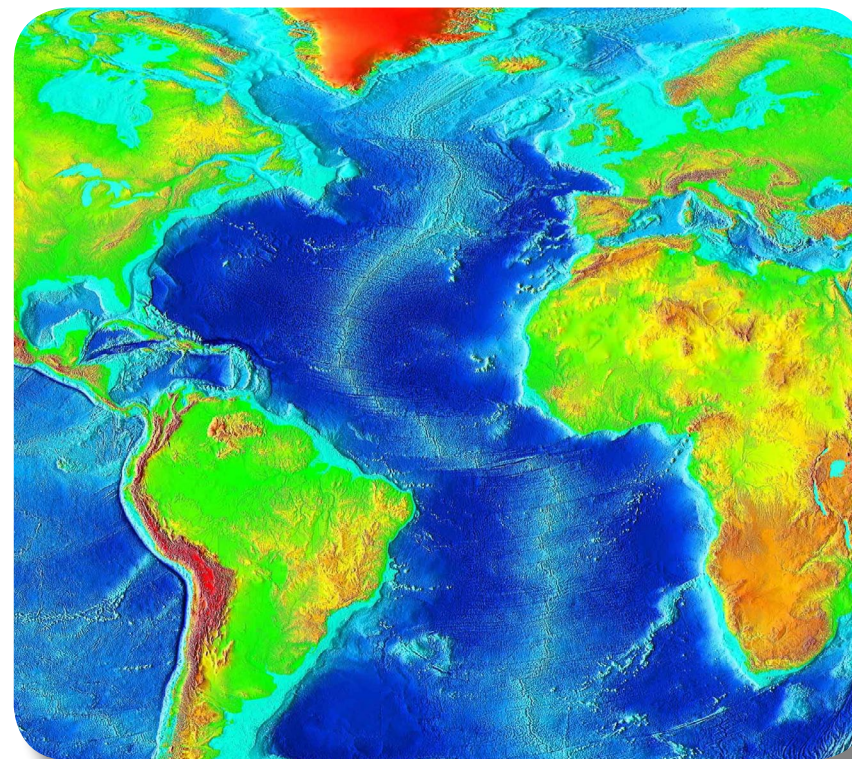
Η θεωρία των τεκτονικών πλακών

Η **θεωρία των τεκτονικών πλακών** ερμηνεύει τις αέναες 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 αποτελείται από 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 απ' αυτές και τις παρασύρει. Η βαθύτερη αιτία αυτών των κινήσεων δεν είναι ακόμη απολύτως κατανοητή, εικάζεται όμως ότι οφείλεται στην διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα στον εξωτερικό πυρήνα της Γης και στον φλοιό, που 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.

Η εξάπλωση του ωκεάνιου πυθμένα

Μία από τις σημαντικότερες ενδείξεις που συνέβαλαν στην διαμόρφωση της θεωρίας των τεκτονικών πλακών 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. Όπως γνωρίζουμε σήμερα, οι ωκεάνιες ράχες 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 φλοιό. Η διαδικασία αυτή, που ονομάζεται **εξάπλωση του ωκεάνιου πυθμένα**, προτάθηκε αρχικά από τον Αμερικανό γεωλόγο **Harry H. Hess** (1906-1969). 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. 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 λίγα 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.



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

Σεισμική δραστηριότητα

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 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.

Ηφαίστεια

Στην μετατόπιση των τεκτονικών πλακών, όμως, οφείλεται και το μεγαλύτερο μέρος της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Τα περισσότερα, μάλιστα, από τα ενεργά ηφαίστεια 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 ηφαίστεια.



Έκρηξη του ηφαιστείου Αρενάλ στην Κόστα Ρίκα.

Τάφροι, τόξα, οροσειρές

Ειδικότερα, όταν μία ωκεάνια πλάκα συγκλίνει και καταβυθίζεται κάτω από μία άλλη, στην περιοχή καταβύθισης σχηματίζονται ωκεάνιες τάφροι. Με μέγιστο βάθος που αγγίζει τα 11 km, η **Τάφος των Μαριανών**, που σχηματίστηκε μέσα από την σύγκλιση και καταβύθιση της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την πλάκα των Φιλιππίνων, είναι η βαθύτερη τάφος 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 **Τάφος 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 ορο-



Έβερεστ: η υψηλότερη κορυφή των Ιμαλαΐων.

σειρά 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 προβάλουμε 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.

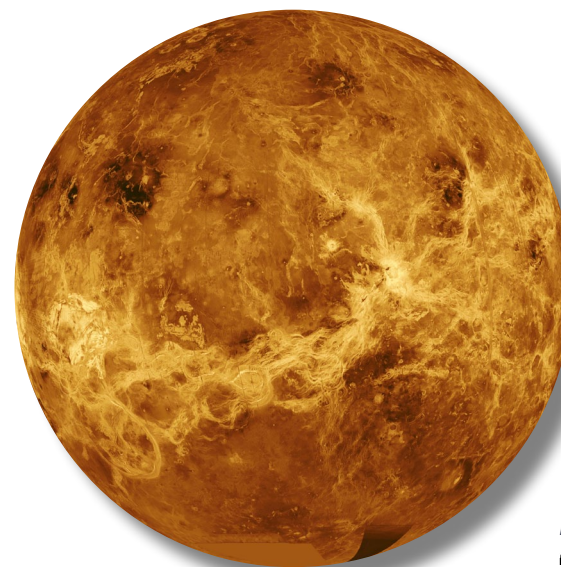
Η μέση θερμοκρασία ενός πλανήτη

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. Αυτός, ωστόσο, δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που προσδιορίζει την μέση θερμοκρασία του διότι, εάν 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. Αυτό, λοιπόν, που συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας ενός πλανήτη δεν είναι αποκλειστικά η «σωστή» απόστασή του από τον Ήλιο, αλλά και κάτι άλλο. Οι περισσότεροι επιστήμονες σήμερα συμφωνούν ότι αυτό το «κάτι άλλο» 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. 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, σε έναν πλανήτη χωρίς πλανητικό μαγνητικό πεδίο, τα ενεργητικά σωματίδια του ηλιακού ανέμου τα οποία

συγκρούονται με τα ελαφρύτερα στοιχεία που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιράς του, τα επιταχύνουν τόσο πολύ, ώστε διαφεύγουν ευκολότερα από την βαρυτική έλξη του πλανήτη τους. Τέλος, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ενός πλανήτη, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας που παγιδεύει και τόσο περισσότερο αυξάνει η θερμοκρασία του.

Η Αφροδίτη

Χωρίς μαγνητικό πεδίο και χωρίς ασπίδα του όζοντος, η Αφροδίτη βομβαρδιζόταν ανηλεώς από την υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου και τον ηλιακό άνεμο. Γι' αυτό και το νερό της εξατμίστηκε και εντέλει χάθηκε. Χωρίς, όμως, το νερό, που λειτουργεί σαν λιπαντικό διευκολύνοντας την μετατόπιση των τεκτονικών πλακών, η Αφροδίτη στάματσε να ανακυκλώνει τον φλοιό της. Έτσι, καθώς οι ηφαιστειακές εκρήξεις διοχέτευαν όλο και πιο πολύ CO₂ στην ατμόσφαιρα, ένα ανεξέλεγκτο φαινόμενο του θερμοκηπίου ανέβασε την θερμοκρασία της στα ύψη. Γι' αυτό και σήμερα η Αφροδίτη είναι ένας κόσμος χωρίς νερό και χωρίς ζωή, με ατμόσφαιρα που πνίγεται στο CO₂ και με επιφανειακές θερμοκρασίες που φτάνουν τους 460 °C.

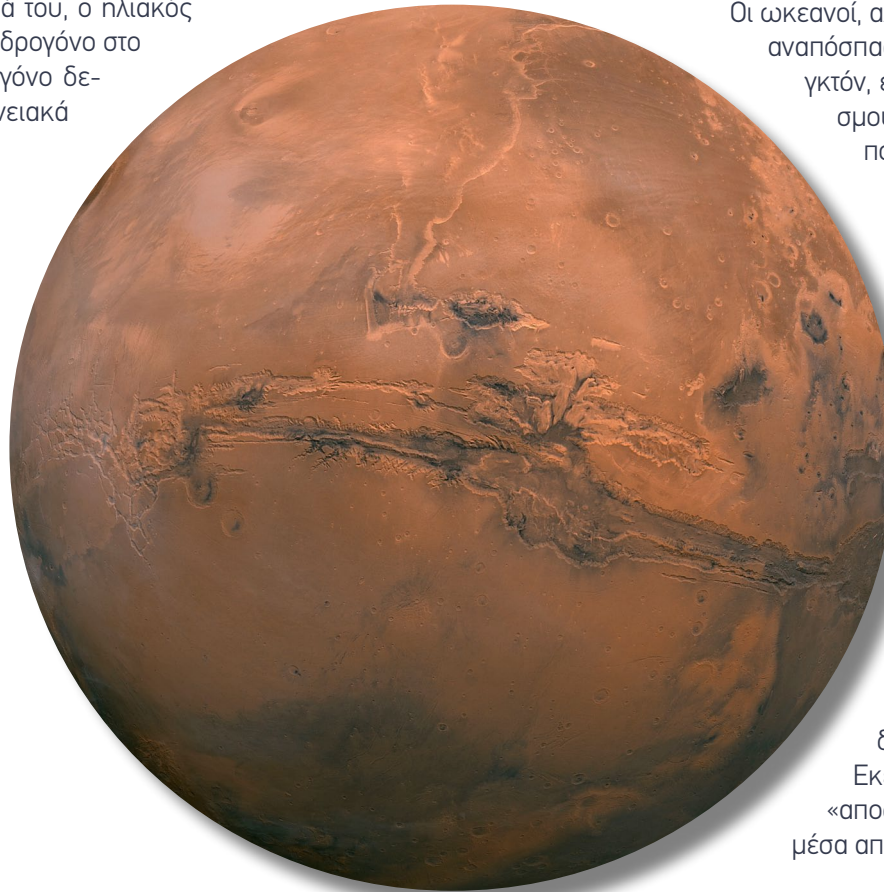


Η Αφροδίτη
NASA/JPL-Caltech.

Ο Άρης

Ο αρχέγονος Άρης, από την άλλη, είχε ένα ευνοϊκότερο περιβάλλον για την εμφάνιση της ζωής. Με ηπιότερες θερμοκρασίες και πυκνότερη ατμόσφαιρα, το νερό στην επιφάνειά του σχημάτιζε λίμνες και θάλασσες. Πώς έχασε ο κόκκινος πλανήτης το νερό που κάποτε διέθετε; Ένα μέρος του παραμένει στους πόλους και στο υπέδαφός του, με την μορφή πάγου. Το υπόλοιπο, όμως, χάθηκε στο Διάστημα όταν ο Άρης απώλεσε το μαγνητικό του πεδίο. Καθώς η υπεριώδης ακτινοβολία του Ήλιου διασπούσε τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρά του, ο ηλιακός άνεμος παρέσυρε το υδρογόνο στο Διάστημα, ενώ το οξυγόνο δεσμεύτηκε στα επιφανειακά του πετρώματα.

Ο πλανήτης Άρης
NASA/JPL-Caltech.



Ο Πλανητικός θερμοστάτης της Γης

Ο πλανήτης μας, αντιθέτως, διαθέτει έναν πολύπλοκο φυσικό «θερμοστάτη», που ρυθμίζει σε βάθος χρόνου την θερμοκρασία του, αυξάνοντας ή μειώνοντας το CO₂ που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Αυτό που συμβαίνει είναι το εξής: η βροχή αφαιρεί CO₂ από την ατμόσφαιρα και το μεταφέρει στην επιφάνεια. Αυτή η όξινη βροχή αλληλεπιδρά με τα επιφανειακά πετρώματα, αποδεσμεύοντας ασβέστιο. Τελικά, μέσω της διάβρωσης, το CO₂ και το ασβέστιο καταλήγουν στους ωκεανούς. Οι ωκεανοί, αλλά και τα αναρίθμητα είδη ζωής που εμπεριέχουν, είναι αναπόσπαστο μέρος του πλανητικού μας θερμοστάτη. Το φυτοπλαγκτόν, ειδικότερα, είναι από τους πιο σημαντικούς μικροοργανισμούς του πλανήτη μας διότι απορροφά ένα μέρος από το CO₂ που καταλήγει στους ωκεανούς και απελευθερώνει οξυγόνο. Οι μικροοργανισμοί που αποτελούν το ζωοπλαγκτόν, από την άλλη, δεσμεύουν CO₂ και ασβέστιο, με τα οποία κατασκευάζουν τα μικροσκοπικά τους όστρακα. 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. Εκεί, συσσωρεύονται σε αλληπάλληλα στρώματα και με το πέρασμα του χρόνου σχηματίζουν πετρώματα, όπως ο ασβεστόλιθος. Εδώ παρεμβαίνει ένας άλλος μηχανισμός του πλανητικού μας θερμοστάτη, που συμβάλλει κι αυτός στην αέναη ανακύκλωση του άνθρακα: η ικανότητα της Γης να τον αποθηκεύει στο εσωτερικό της για μεγάλο χρονικό διάστημα, μέσα από την τεκτονική δραστηριότητα. Εξαιτίας της κίνησης των τεκτονικών πλακών, τα πετρώματα που έχουν δεσμεύσει τον άνθρακα εισχωρούν βαθιά στο υπέδαφος. Εκεί, όμως, χάρη στις μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις, τον «αποδεσμεύουν». Και τότε, το CO₂ επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσα από τις ηφαιστειακές εκρήξεις.

Επίλογος

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. Ήδη, όμως, η ζωή στον πλανήτη μας αγωνίζεται να επιβιώσει σε ένα περιβάλλον που κάθε μέρα υποβαθμίζεται όλο και πιο πολύ. Οι τεράστιες ποσότητες CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου που εκλύονται στην ατμόσφαιρα από τις ανθρωπίνες δραστηριότητες έχουν ήδη απορρυθμίσει 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.



Shutterstock/kwest

Βιβλιογραφία

- Archer, David, *The long thaw: how humans are changing the next 100.000 years of earth's climate*, Princeton University Press, ©2009.
- Bond, Peter, *Exploring the solar system*, Wiley-Blackwell, 2012.
- Brahic, A, *Τα 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, *Το ζωντανό σύμπαν: η αναζήτηση της ζωής στο διάστημα*, Ψυχολογός, 2009.
- Kargel, J. S., *Mars: a warmer, wetter planet*, Springer, ©2004.
- 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, ©2007.

Ηλεκτρονικές Πηγές

- [Η ιστορία της Γης \(βιβλίο παράστασης\)](#)
- [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](#)



Λεωφ. Συγγρού 387 - 17564 Π. Φάληρο, τηλ. 210 9469600, fax: 210 9430171,
e-mail: info@eef.edu.gr, <http://www.eef.edu.gr>