

Το **Μυστήριο της Ζωής** είναι η πρώτη μιας τριλογίας παραστάσεων αφιερωμένων στις διάφορες πτυχές του προαιώνιου ερωτήματος του ανθρώπου για το αν είμαστε μόνοι μας στο Σύμπαν. Ακολουθώντας σε γενικές γραμμές τη δομή της παράστασης, ο Οδηγός που κρατάτε στα χέρια σας πραγματεύεται την εμφάνιση της ζωής στη Γη και τον τρόπο με τον οποίο εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου οδηγώντας στην εντυπωσιακή ποικιλομορφία όλων των μορφών ζωής του πλανήτη μας. Αντίστοιχα και η ίδια η παράσταση ξεκινάει με μία παρουσίαση της γέννησης του Ηλιακού Συστήματος και της Γης, και συνεχίζει περιγράφοντας τους δομικούς λίθους της ζωής, ορισμένες από τις βασικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια σχετικά με την απαρχή και τα πρώτα βήματα της ζωής, τις περίφημες θεωρίες του Δαρβίνου για την Εξέλιξη, καθώς και τη σημασία που έχει η μελέτη των απολιθωμάτων στην αποκρυπτογράφηση του τρόπου με τον οποίον εξελίχθηκε η ζωή στο διάβα των γεωλογικών αιώνων.



Λεωφ. Συγγρού 387 - 175 64 Π. Φάληρο, τηλ. 210 9469 600, fax: 210 9430 171, e-mail: public@eugenfound.edu.gr, <http://www.eugenfound.edu.gr>

ΤΟ ΜΥΣΤΗΡΙΟ ΤΗΣ ΖΩΗΣ



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΩΝ
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

ΤΟ ΜΥΣΤΗΡΙΟ ΤΗΣ ΖΩΗΣ

Οδηγός Παράστασης

Επιμέλεια

ΔΙΟΝΥΣΗ Π. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ
Διευθυντή Ευγενιδείου Πλανηταρίου

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ
Αστ. ρονόμου Ευγενιδείου Πλανηταρίου



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΝΕΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

ΤΟ ΜΥΣΤΗΡΙΟ ΤΗΣ

ΖΩΗΣ

Οδηγός Παράστασης

Επιμέλεια

ΔΙΟΝΥΣΗ Π. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ
Διευθυντή Ευγενιδείου Πλανηταρίου

ΑΛΕΞΗ Α. ΔΕΛΗΒΟΡΙΑ
Αστρονόμου Ευγενιδείου Πλανηταρίου

Στη μνήμη του ευπατρίδη καθηγητή
του Πανεπιστημίου Πειραιά
Αλέξανδρου Σταυρόπουλου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ



παρούσα παράσταση του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, με τίτλο **Το Μυστήριο της Ζωής**, είναι μέρος μιας τριλογίας παραστάσεων που πραγματεύεται τις διάφορες πτυχές του προαιώνιου ερωτήματος του ανθρώπου για το αν είμαστε μόνοι μας στο Σύμπαν. Η παράσταση αυτή αφιερώνεται στον αξέχαστο και επί χρόνια παλαιό συνεργάτη του Ομίλου Ευγενίδη, τον αείμνηστο καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιά Αλέξανδρο Σταυρόπουλο, του οποίου το δίτομο έργο, **Η Ζωή σ' Επίνεδο Μορίων** (Ιδρυμα Ευγενίδου, 2007), είναι η βάση της παράστασης. Στους δύο αυτούς τόμους ο συγγραφέας κατορθώνει, με απλό και κατανοητό τρόπο, να απαντήσει στα σημαντικότερα ερωτήματα που θα έχετε κάποιος για την εξελικτική πορεία της ζωής και για τους τρόπους με τους οποίους κατανοώντας τον βιολογικό μας εαυτό, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τον κόσμο γύρω μας.

Η πρώτη αυτή παράσταση της τριλογίας πραγματεύεται το **Μυστήριο της Ζωής**, δηλαδή την εμφάνιση της ζωής στη Γη και τον τρόπο με τον οποίο εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου, οδηγώντας στην εντυπωσιακή ποικιλομορφία όλων των μορφών ζωής του πλανήτη μας, τόσο αυτών που έχουν πλέον αφανιστεί όσο και αυτών που παρατηρούμε σήμερα. Ακολουθώντας σε γενικές γραμμές τη δομή της παράστασης, ο Οδηγός που κρατάτε στα χέρια σας ξεκινάει με τη γέννηση του Ηλιακού μας Συστήματος και της Γης. Στο δεύτερο κεφάλαιο του παρόντος Οδηγού παρουσιάζεται μια σχετικά νέα ιδέα, σύμφωνα με την οποία οι πλανήτες του Ηλιακού μας Συστήματος δεν σχηματίστηκαν στις τωρινές τους τροχιές, αλλά «μετανάστευσαν» σ' αυτές. Αυτή η θεωρία της Πλανητικής μετανάστευσης παρουσιάζεται από τον Κληομένη Τσιγάνη, έναν από τους κύριους ερευνητές της διεθνούς επιστημονικής ομάδας που τη διαμόρφωσε και επίκουρο καθηγητή του Τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται με περισσότερες λεπτομέρειες ο πλανήτης στον οποίο ζούμε και η γεωλογική του εξέλιξη, απ' τον σχηματισμό της Σελήνης μέχρι την προέλευση του νερού που τον καλύπτει και τη σύσταση της ατμόσφαιράς του. Στα δύο επόμενα κεφάλαια, που συνέγραψε η διδάκτορας Βιολογίας Βασιλεία-Ισμήνη Αλεξάκη, παρουσιάζονται με περισσότερες λεπτομέρειες οι δομικοί λίθοι της ζωής καθώς και ορισμένες από τις βασικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια σχετικά με την απαρχή και τα πρώτα βήματα της ζωής, από τα πρώτα αυτοαντιγραφόμενα μακρομόρια στα ευκαρυωτικά κύτταρα και τους πολυκύτταρους οργανισμούς. Ακολουθεί ένα κεφάλαιο που περιγράφει το θαυμαστό ταξίδι του Beagle, στη διάρκεια του οποίου ο Κάρολος Δαρβίνος συνέλεξε τα

βασικά εκείνα στοιχεία που τον οδήγησαν στη διατύπωση της περίφημης θεωρίας του για την **Εξέλιξη των Ειδών**. Τα δύο επόμενα κεφάλαια, που περιγράφουν τις ιδέες του Δαρβίνου για τους βασικούς μηχανισμούς της Εξέλιξης, δηλαδή τη φυσική και τη φυλετική επιλογή, συνέγραψαν οι συνεργάτιδες του Ιδρύματος Ευγενίδου, η βιολόγος Κατερίνα Τσικαλάκη και η υποψήφια διδάκτορας Γενετικής του Πανεπιστημίου Αθηνών Μαρία Τσίπνη. Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύντομη, αλλά περιεκτική περιγραφή της εξελικτικής πορείας της ζωής στη Γη σε συνάρτηση με τις αέναες γεωτεκτονικές και κλιματικές μεταβολές του πλανήτη μας, καθώς και με τις μεγαλύτερες μαζικές εξαφανίσεις των ειδών ζωής που φιλοξενεί. Αντί επιλόγου, ο Οδηγός αυτός ολοκληρώνεται με ένα κεφάλαιο που περιγράφει τη σημασία που έχει η μελέτη των απολιθωμάτων στην αποκρυπτογράφηση του τρόπου με τον οποίον εξελίχθηκε η ζωή, που συνέγραψαν ο καθηγητής Μιχάλης Δ. Δερμιτζάκης, τ. Αντιπρύτανης του Πανεπιστημίου Αθηνών και ηρ. Κοσμήτορας της Σχολής Θετικών Επιστημών, και η διδάκτορας Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος Γεωργία Φέρμελη, διδάσκουσα στο τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.

Όπως είναι ευνόητο, σ' ένα σενάριο 40 λεπτών δεν θα ήταν δυνατόν να παρουσιαστούν όλες οι πιθανές απαντήσεις και πληροφορίες που ίσως κάποιος να ήθελε να αποκτήσει γύρω από τα διάφορα θέματα που παρουσιάζονται στη διάρκεια της παράστασης. Γι' αυτό και ο κύριος σκοπός του «Επιμορφωτικού Οδηγού» είναι να προσφέρει ορισμένα πρόσθετα στοιχεία, ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητό το περιεχόμενο της νέας μας παράστασης. Κάθε ενότητα του παρόντος οδηγού, που ακολουθεί τη σπονδυλωτή δομή του σεναρίου της παράστασης, περιλαμβάνει περισσότερα στοιχεία απ' ό,τι η αφήγηση της παράστασης, ενώ παραπέμπουμε επίσης και σε ενδεικτική βιβλιογραφία απ' όπου ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης θα μπορέσει να αντλήσει ακόμη πιο πολλές σχετικές πληροφορίες. Μ' αυτόν τον τρόπο πιστεύουμε ότι οι θεατές θα μπορέσουν να αποκομίσουν μεγαλύτερα οφέλη απ' την εμπειρία τους στη διάρκεια της παράστασης.

Όπως και με τις προηγούμενες παραστάσεις του Ευγενιδείου Πλανηταρίου, το ίδιο και στην παρούσα, η «από καθέδρας» παρουσίαση και διάδοση των νέων γνώσεων έχει αντικατασταθεί από μια παρουσίαση «ψυχαγωγικής επιμόρφωσης». Η μεγάλη ποικιλία θεμάτων στον τρισδιάστατο χώρο του Πλανηταρίου, κερδίζει τη συμμετοχή των θεατών του, οι οποίοι «ψυχαγωγούνται» (με όλη τη σημασία της λέξης) μαθαίνοντας. Μετά από 50 χρόνια εξέλιξης, άλλωστε, το Ευγενίδειο Πλανητάριο έχει μεταμορφωθεί σ' ένα ευέλικτο διεπιστημονικό κέντρο παρουσιάσεων που υπηρετεί όχι

μόνο τις επιστήμες, αλλά και τις τέχνες, και απευθύνεται σ' ένα ευρύ κοινό, ανεξαρτήτως ηλικίας και μορφωτικού επιπέδου. Στις υπεράυχρονες εγκαταστάσεις του Πλανηταρίου χρησιμοποιούνται πλέον όλες οι δημιουργικές και τεχνικές δυνατότητες που παρέχουν σήμερα τα οπτικοακουστικά μέσα και οι νέες τεχνολογίες, ώστε να γίνει η αφήγηση της ιστορίας της επιστήμης με τρόπο συναρπαστικό.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω εδώ και επίσημα έναν σημαντικό παράγοντα στη δημιουργία αυτής της παράστασης, έναν αξιολάπητο άνθρωπο και δημιουργό, που έχω την τιμή να με συγκαταλέγει ανάμεσα στους φίλους του. Αναφέρομαι, φυσικά, στον μαέστρο και πολυβραβευμένο συνθέτη εκατοντάδων μουσικών επιτυχιών Μίμη Πλέσσα που, εκτός των άλλων, είναι επί πλέον και κάτοχος διδακτορικού διπλώματος Χημείας από το Πανεπιστήμιο Κορνέλ των ΗΠΑ. Αυτή είναι η δεύτερη παράσταση του Πλανηταρίου που φέρει τη μουσική του υπογραφή, και ελπίζουμε ότι δεν θα είναι και η τελευταία.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω και όλους τους φίλους και συναδέλφους που συμμετείχαν στη συγγραφή του «Οδηγού» αυτού: τον Κληομένη Τσιγάνη, επίκουρο καθηγητή του τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, τη Βασιλεία-Ισμήνη Αλεξάκη, Διδάκτορα Βιολογίας και ερευνήτρια στο Max Planck Institute, και τις επιστημονικές συνεργάτιδες του Ιδρύματος Ευγενίδου Κατερίνα Τσικαλάκη, βιολόγο, και Μαρία Τσίπνη, υποψήφια διδάκτορα Γενετικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, τον Μιχάλη Δ. Δερμιτζάκη, τ. Αντιπρύτανη του Πανεπιστημίου Αθηνών και ηρ. Κοσμήτορα της Σχολής Θετικών Επιστημών και την Γεωργία Φέρμελη, διδάκτορα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος και διδάσκουσα στο τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα πρέπει να αποδοθούν και στον άμεσο συνεργάτη μου και συνάδελφο Αλέξη Δεληβοριά, ο οποίος, εκτός από τη συγγραφική του προσφορά, επιμελήθηκε και τη φωτογραφική ηλαιοσίωση του «Οδηγού».

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και όλους τους φίλους-συνεργάτες της δημιουργικής μας ομάδας που συμμετείχαν στη διαμόρφωση της νέας μας παράστασης και των οποίων τα ονόματα παρατίθενται στην τελευταία σελίδα του παρόντος «Οδηγού», καθώς επίσης και τον Αντώνη Ασηρόμουργο, ο οποίος δημιούργησε μια ευπαρουσίαστη έκδοση.

Διονύσης Π. Σιμόπουλος
Διευθυντής Ευγενιδείου Πλανηταρίου



Τ α λ ό γ ι α

Με μαθηματικά εφόδια τον διαφορικό λογισμό και τα ολοκληρώματα (καθηγητής: Αντώνης Ζερβός), την κυματική θεωρία του Huygens (καθηγητής: Δημήτρης Χόνδρος) στο πρώτο έτος του Πανεπιστημίου, προβληματισμένος από την απροσδιοριστία του Heisenberg και καθησυχασμένος από τη σταθερά του Planck, βρέθηκα στο δεύτερο έτος του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, επιμελητής στο εργαστήριο Φυσικής.

Απέναντι ακριβώς, στον ίδιο διάδρομο, καμάρι μα και τρόμος μας ο Λεωνίδας Ζέρβας της οργανικής χημείας (μέθοδος Bergmann–Ζέρβα για την ανίχνευση κακοηθών κυττάρων). Με επιμελητή έναν νέο εξαιρετο φοιτητή, τον Αλέκο Σταυρόπουλο (έπαιζε και θαυμάσιο κλασικό πιάνο) με έκαναν να νιώθω πως άξιζε η θυσία μου να εργάζομαι πιανίστας στο cabaret Argentina από τις 9 το βράδυ μέχρι τις 6 το πρωί και στις 7 να ανοίγω το εργαστήριο για να το βρίσκουν καθαρό οι ασκούμενοι φοιτητές...

Το 1943, όμως, οι Γερμανοί κλείνουν το Πανεπιστήμιο, γιατί ήταν φωλιά αντίστασης (τότε ήμασαν πολλοί οι αθηναίοι ΕΛΛΗΝΕΣ).

Τύχη αγαθή με τους φίλους Μανώλη Νικολούδη και Κώστα Ποδίτη βοηθάγαμε τον Εβραίο καθηγητή Dr George Maria

τ ο υ σ υ ν θ έ τ η

Schwab, πατέρα της κατάλυσης, που βρισκόταν στην Αθήνα, και εκείνος μάς μάζευε δύο φορές την εβδομάδα και μας μιλούσε για το βαρύ ύδωρ και την κούρσα να φτάσουν οι επιστήμονες στη σχάση του ατόμου (ατομική βόμβα).

Το πρώτο φιλοσοφικό δοκίμιο που έπεσε στα χέρια μου ήταν το «La philosophie positive de Henri Bergson» που φυσικά με είχε κάνει φανατικό θετικιστή...

Λυπούμαι που δεν αναθεώρησα εγκαίρως τα όσα μού αποκάλυπταν οι ερευνητές της νιότης μου και ευχαριστώ εκείνους που, σεβόμενοι τη μουσική μου, μού συγχωρούσαν τις παρασπονδίες μου στην επιστήμη.

Πριν μερικούς μήνες, άκουγα στο Ευγενίδειο Ψηφιακό μας Πλανητάριο το φίλο Δημήτρη Νανόπουλο να μιλάει για τα πειράματα στο CERN και το ίδιο βράδυ ονειρεύτηκα τη διάλεξη που είχα ακούσει στο Cornell το 1951 από τη Miss Leavitt, μία εβδομηντάχρονη γλυκιά αστρονόμο που μιλούσε για την ισοκατανομή της Ύλης στο Διάστημα.

Και μόλις προχθές, ακούγοντας το τι συμβαίνει στο διαστελλόμενο ΣΥΜΠΑΝ, γύρισα στο σπίτι έτοιμος για άλλη μία φορά να αναθεωρήσω αυτά που έχτισαν τα πιστεύω μου, σμίλεψαν το χαρακτήρα μου και με έκαναν να θέλω να διαβάσω ξανά κάποια από τα βιβλία μου.

Και διάβασα...

Το *Η ζωή σ' επίπεδο μορίων* (Ιδε ο άνθρωπος) του Αλέκου Σταυρόπουλου – βραβείο Ακαδημίας Αθηνών – με αφιέρωση του Λεωνίδα Δημητριάδη–Ευγενίδη αναλογιζόμενος την ευθύνη να συνθέσω τη μουσική για την αντίστοιχη παράσταση του Πλανηταρίου μας.

Με την πολύτιμη βοήθεια του Διονύση Σιμόπουλου και τον ενθουσιασμό των νέων συνεργατών, του Παναγιώτη Σιμόπουλου και του Τάσου Κατσάρη, τολμώ να δοκιμάσω με βιωμένα μοτίβα μου που βρίσκονται στο DNA των παιδιών μας μα και με ήχους που η προκοπή της τεχνολογίας μού επιτρέπει να πετύχω και να χρησιμοποιήσω στη σύνθεση, να δώσω ένα θέαμα-ακρόαμα που θα αφήνει στα παιδιά μας ένα παράθυρο ανοιχτό στο μέλλον της περιπέτειας που είναι... Η ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΖΩΗ ΣΤΟΝ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΛΑΝΗΤΗ ΓΗ ΤΗΣ ΦΤΩΧΙΚΗΣ ΓΕΙΤΟΝΙΑΣ ΠΟΥ Ο ΗΛΙΟΣ ΜΑΣ ΒΟΗΘΑΕΙ ΝΑ ΕΞΕΛΙΣΣΟΜΑΣΤΕ.

Με πολλή αγάπη το αφιερώνω στη μνήμη της αδελφικής φίλης της μητέρας μου Μαριάνθης Σίμου και του αξέχαστου φίλου Αλέκου Σταυρόπουλου.

Μίμης Πλέσσας
Συνθέτης

Αλέξης Α. Δεληβοριάς

Αστρονόμος Ευγενιδείου Πλανηταρίου



1ο κεφάλαιο

Η Γέννηση του Ηλιακού Συστήματος

Η ποικιλομορφία των ουρανίων σωμάτων του Ηλιακού μας Συστήματος είναι εντυπωσιακή. Όμως, παρόλες τις ομοιότητες που μπορούν να έχουν μεταξύ τους, καθένα τους είναι μοναδικό. Πάρτε για παράδειγμα τους 4 πλησιέστερους στον Ήλιο πλανήτες, δηλαδή τον Ερμή, την Αφροδίτη, τη Γη και τον Άρη. Παρόλο που και οι 4 έχουν βραχώδη σύσταση και οι πυρήνες τους αποτελούνται κατά κύριο λόγο από σίδηρο, οι ομοιότητές τους σταματούν εδώ. Η Αφροδίτη για παράδειγμα, που μέχρι πριν από λίγες δεκαετίες θεωρούταν ως η δίδυμη αδελφή της Γης, καλύπτεται από πυκνά νέφη θειικού οξέος και η πυκνότητα της γεμάτης με διοξείδιο του άνθρακα ατμόσφαιράς της συντηρεί την επιφανειακή της θερμοκρασία στους εξωπραγματικούς για τα γήινα δεδομένα 465 °C. Ο μικροσκοπικός Ερμής, από την άλλη, «βλοσυροκομμένος» θα έλεγε κάποιος από τις αμέτρητες πτώσεις αστεροειδών στην επιφάνειά του, δεν θυμίζει σε τίποτα τον Άρη με τα τεράστια ηφαίστεια και τις γιγάντιες χαράδες.

Πέρα από τη Ζώνη των Αστεροειδών, που αποτελείται από αναρίθμητα βραχώδη συντρίμμια του πρώιμου Ηλιακού μας Συστήματος, εκτείνεται το βασίλειο των 4 γιγάντων, δηλαδή του Δία και του Κρόνου, που συνίστανται ως επί το πλείστον από υδρογόνο και ήλιο, καθώς και του Ουρανού και του Ποσειδώνα, οι οποίοι εμπεριέχουν μεγάλες ποσότητες παγωμένου νερού, αμμωνίας και μεθανίου. Ακόμη μακρύτερα, 30-50 αστρονομικές μονάδες (ΑΜ) μακριά από τον Ήλιο, εκτείνεται η Ζώνη Kuiper, που αποτελείται από μικρά και μεγαλύτερα κομμάτια βράχων και παγωμένων πτητικών ενώσεων. Τέλος, σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις, οι οποίες υπερβαίνουν τις 50.000 ΑΜ από τον Ήλιο, εικάζεται ότι υπάρχει ένα αραιό σφαιρικό νέφος παγωμένων σωμάτων, το επονομαζόμενο Νέφος Oort, η ύπαρξη του οποίου όμως δεν έχει ακόμα επιβεβαιωθεί με την παρατήρηση. Πώς, λοιπόν, δημιουργήθηκε ο Ήλιος και το Ηλιακό μας Σύστημα και πώς εξηγείται αυτή η θαυμαστή πολυπλοκότητά του;



Οι Immanuel Kant (πάνω) και Pierre-Simon Laplace (αριστερά) ήταν οι πρώτοι που διατύπωσαν την υπόθεση του Ηλιακού Νεφελώματος. Ο Άγγλος φυσικός Ισαάκ Νεύτωνας (κάτω) ήταν ο πρώτος επιστήμονας που απέδειξε ότι η κίνηση των σωμάτων στη Γη και των ουράνιων σωμάτων στο Σύμπαν περιγράφονται από τους ίδιους φυσικούς νόμους.

Μία από τις βασικότερες ίσως παραδοχές των αστρονόμων για τη μελέτη όλων των αστρονομικών φαινομένων, από τη δημιουργία ενός πλανητικού Συστήματος μέχρι τη διαστολή του Σύμπαντος, είναι η καθολικότητα των νόμων που τα διέπουν. Με άλλα λόγια, οι ίδιοι φυσικοί νόμοι και οι ίδιες θεωρίες που περιγράφουν τη γένεση του Ηλιακού μας Συστήματος ισχύουν σε γενικές γραμμές και για τη γένεση κάθε άλλου αστρικού Συστήματος, οπουδήποτε κι αν αυτό βρίσκεται στο Σύμπαν. Η βασική αυτή παραδοχή έχει επιβεβαιωθεί από πλήθος αστρονομικών παρατηρήσεων και πραγματικά καθιστά των έργο των επιστημόνων που διερευνούν τα μυστικά του Σύμπαντος πολύ απλούστερο. Η θεωρία που περιγράφει τη γένεση και τη μετέπειτα εξέλιξη του Ηλιακού μας Συστήματος, καθώς και κάθε άλλου πλανητικού συστήματος, έχει τις ρίζες της στην πρωτοποριακή για την εποχή της υπόθεση του Ηλιακού Νεφελώματος, που εισήγαγαν στη διάρκεια του 18ου αιώνα οι **Immanuel Kant** (1724-1804), και **Pierre-Simon Laplace** (1749–1827). Οι αστρονομικές παρατηρήσεις και οι θεωρητικές μελέτες που ακολούθησαν στα χρόνια που μεσολάβησαν, οδήγησαν στη διαμόρφωση ενός κοινά αποδεκτού φυσικού μηχανισμού, ο οποίος περιγράφει τη γένεση νέων άστρων και πλανητικών συστημάτων, και σύμφωνα με τον οποίο τα αστρικά και πλανητικά μαιευτήρια εντοπίζονται βαθιά μέσα σε γιγάντια μοριακά νέφη αερίων και σκόνης.

Εδώ και αρκετά χρόνια οι αστρονόμοι γνωρίζουν ότι ο χώρος ανάμεσα στα άστρα των γαλαξιών του Σύμπαντος, παρόλο που είναι περισσότερο «κενός» από ύλη ακόμη και από το καλύτερο τεχνητό κενό που μπορούμε να επιτύχουμε στη Γη, εμπεριέχει ένα εξαιρετικά αραιό μείγμα αερίων και σκόνης, που ονομάζεται **μεσοαστρική ύλη**. Η μεσοαστρική ύλη του Γαλαξία μας, για παράδειγμα, αντιστοιχεί περίπου στο 10% της συνολικής ορατής του μάζας και αποτελείται κατά κύριο λόγο από 99% αέρια και από μόλις 1% σκόνη. Η αέρια μεσοαστρική ύλη αποτελείται κατά κύριο λόγο από αρχέγονο υδρογόνο (90%) και ήλιο (10%), στοιχεία που δημιουργήθηκαν στα πρώτα λεπτά μετά τη Μεγάλη Έκρηξη, καθώς και από ίχνη βαρύτερων στοιχείων, τα οποία δημιουργήθηκαν πολύ αργότερα στο εσωτερικό γιγάντιων άστρων. Τα άστρα αυτά, ολοκληρώνοντας τον κύκλο της ζωής τους, διαμελίστηκαν σε κατακλυσμιαίες εκρήξεις σουπερνόβα εμπλουτίζοντας τον μεσοαστρικό χώρο μ' αυτά ακριβώς τα βαρύτερα στοιχεία που είχαν συνθέσει στο εσωτερικό τους.

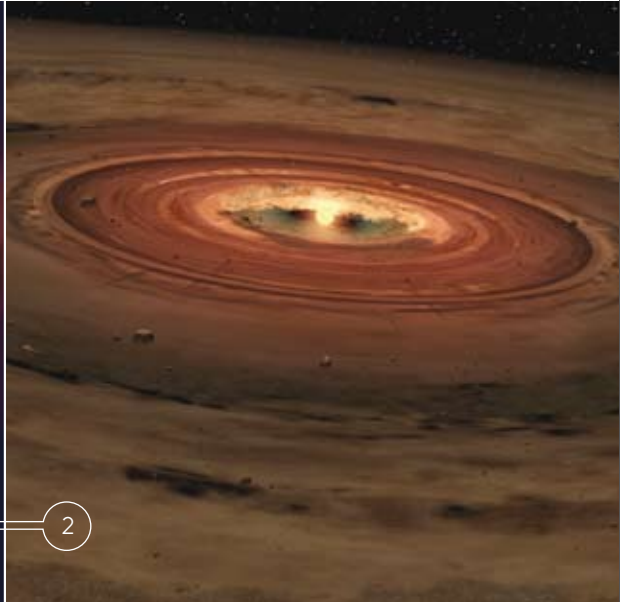
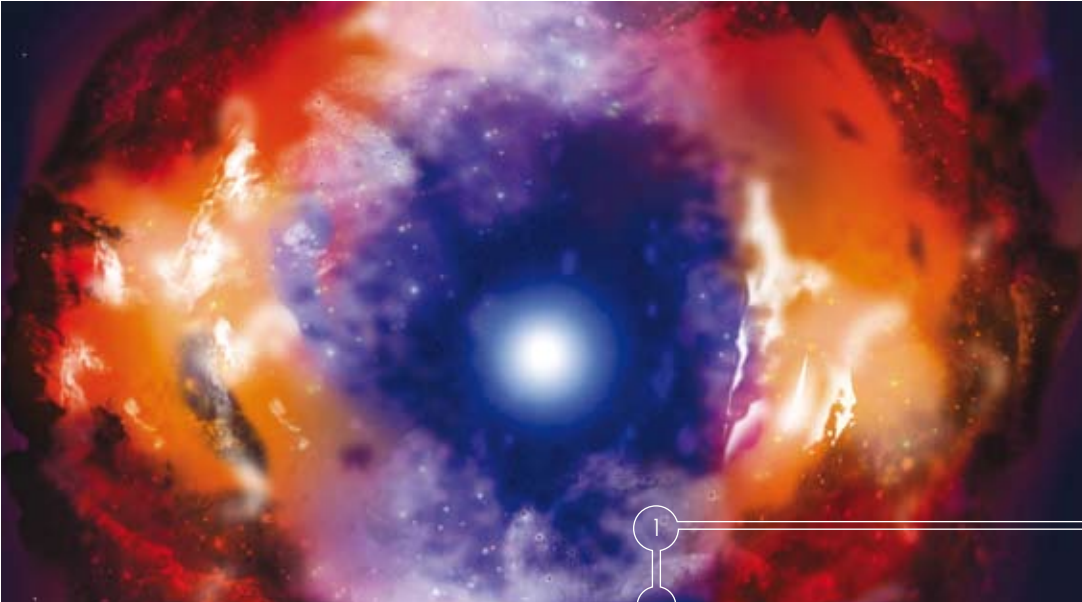


Το νεφέλωμα του Ωρίωνα
[NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA)].

Γνωρίζουμε, λοιπόν, σήμερα ότι τα άστρα γεννιούνται στις ψυχρότερες και πυκνότερες περιοχές της μεσοαστρικής ύλης, μέσα σε γιγάντια μοριακά νέφη αερίων και σκόνης. Αυτά τα παγωμένα αστρικά μαιευτήρια αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μοριακό υδρογόνο, με πυκνότητα από μερικές εκατοντάδες έως και μερικά εκατ. σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό και θερμοκρασία από -263 έως -253 °C. Με διάμετρο που μπορεί να φτάσει ακόμη και εκατοντάδες έτη φωτός, τα μεγαλύτερα από τα μοριακά νέφη, όπως για παράδειγμα εκείνα που εντοπίστηκαν στον Αστερισμό του Ωρίωνα, εμπεριέχουν συνολική μάζα που επαρκεί για τη δημιουργία ακόμη και εκατοντάδων χιλιάδων άστρων, όπως ο Ήλιος μας.

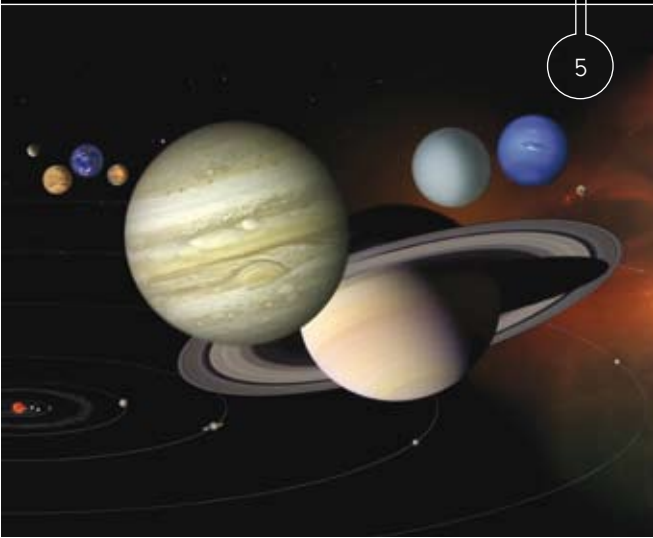
Δύο είναι οι κύριες δυνάμεις, οι οποίες ανταγωνίζονται η μία την άλλη στο εσωτερικό των μοριακών νεφών: η **βαρύτητα** και η **πίεση**. Η βαρύτητα οφείλεται στη μάζα των σωματιδίων που εμπεριέχονται σε κάθε μοριακό νέφος και έχει την τάση να συσσωρεύει τα αέρια μόρια και τη σκόνη σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ύλης, εξαιτίας της αμοιβαίας έλξης που αναπτύσσεται ανάμεσά τους. Η εσωτερική πίεση αντίθετα, που

οφείλεται στη μικρή κινητική ενέργεια αυτών των σωματιδίων, έχει την τάση να απομακρύνει το ένα απ' το άλλο. Επειδή όμως τα μοριακά νέφη είναι κατά κανόνα ψυχρά, οι ταχύτητες των σωματιδίων που εμπεριέχουν είναι πολύ μικρές, γεγονός που σημαίνει ότι στο εσωτερικό των μοριακών νεφών υδρογόνου υπάρχουν περιοχές, όπου η τάση συσσωρεύσεως των σωματιδίων αυτών υπερσχύει της τάσης τους να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο. Αυτή η ανομοιομορφία στην κατανομή της μάζας στο εσωτερικό των γιγάντιων μοριακών νεφών τα καθιστά βαρυτικά ασταθή. Γι' αυτό, η οποιαδήποτε διαταραχή στην ευρύτερη περιοχή τους, όπως η σύγκρουση δύο διαφορετικών νεφών, η έκρηξη ενός γειτονικού σουπερνόβα ή ακόμη και η διέλευση του νέφους από μία περιοχή με μεγαλύτερη συγκέντρωση ύλης, θα δώσει το έναυσμα για την κατάρρευσή τους, δημιουργώντας αρχικά εντός τους περιοχές όλο και μεγαλύτερης πυκνότητας. Σ' αυτές τις περιοχές, η πυκνότητα ύλης και συνακόλουθα η βαρύτητα είναι αρκετά μεγαλύτερες απ' τις γειτονικές τους, ενώ η θερμοκρασία και η εσωτερική τους πίεση παραμένουν αρκετά χαμηλές, με αποτέλεσμα να αρχίσουν να συστέλλονται βαρυτικά, αλλά και να έλκουν συνεχώς όλο και περισσότερη ύλη. Κάθε μοριακό νέφος ►



Η δημιουργία του Ηλιακού Συστήματος σε εικόνες:

1. Έκρηξη σουπερνόβα (N. Bartel και M. F. Bietenholz, York University ; Artist: G. Arguner).
2. Σχηματισμός πρωτοπλανητικού δίσκου (NASA).
3. Από τους πόλους του δίσκου εκτινάσσονται πίδακες αερίων [NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC)] .
4. Ένα νέο άστρο, ο Ήλιος, γεννιέται (NASA/ESA).
5. Από τα συντρίμια του πρωτοπλανητικού δίσκου «γεννήθηκαν» οι πλανήτες (NASA/JPL).

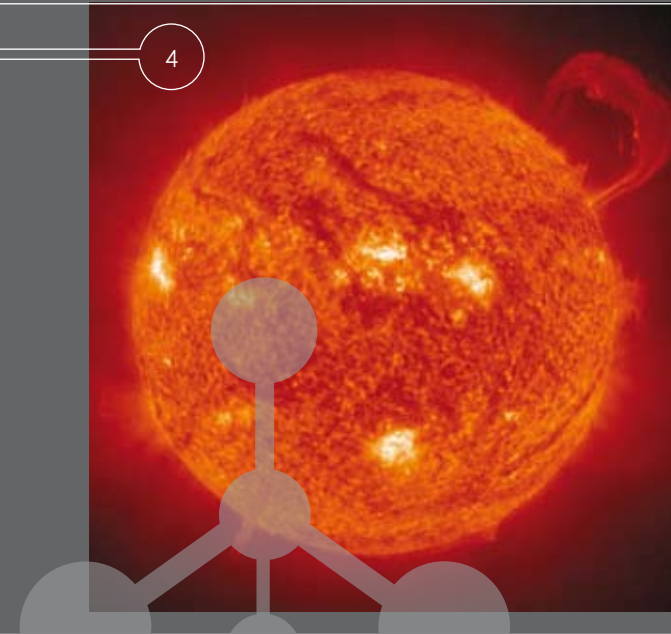


μπορεί να αιωρείται σ' αυτό το χείλος της κατάρρευσης για αρκετά εκατ. χρόνια, προτού κάποιος εξωτερικός παράγοντας, όπως αυτοί που αναφέραμε νωρίτερα, το επηρεάσει. Στην περίπτωση του Ηλιακού μας Συστήματος που, σύμφωνα με τα όσα γνωρίζουμε, δημιουργήθηκε πριν από περίπου 4,6 δισ. χρόνια, το έναυσμα για τη δημιουργία του θα πρέπει να δόθηκε από την έκρηξη ενός σουπερνόβα.

Όμως, η βαρυτική κατάρρευση ενός γιγάντιου μοριακού νέφους δεν οδηγεί στη δημιουργία ενός μόνο γιγάντιου άστρου. Αντίθετα, το νέφος έχει την τάση να διασπάται σε μικρότερες και πυκνότερες περιοχές, κάθε μία απ' τις οποίες θα καταρρεύσει σχηματίζοντας το δικό της άστρο. Καθώς λοιπόν

τα υπό κατάρρευση τμήματα του νέφους καθίστανται αδιαφανή στη θερμική ενέργεια, φυλακίζοντάς την στο εσωτερικό τους. Από το σημείο αυτό και μετά, η αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στο εσωτερικό τους επιταχύνεται. Αυτή η συνεχής συστολή των διαφορετικών περιοχών του γιγάντιου μοριακού νέφους, οι οποίες καταρρέουν από την ίδια τους τη βαρύτητα, διαρκεί συνήθως από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες έως μερικά εκατ. έτη, ανάλογα με τη μάζα των άστρων που θα γεννηθούν σε καθεμία απ' αυτές.

Καθώς λοιπόν η θερμοκρασία και η πίεση των υπό κατάρρευση περιοχών του νέφους συνεχίζει να αυξάνει, σχηματίζεται σιγά-σιγά σε κάθε μία απ' αυτές και μία περιστρεφόμενη υπέρθερμη σφαίρα αερίων, το έμβρυο του άστρου που θα γεννηθεί, το οποίο ονομάζεται **πρωταστέρas**. Καθώς μεσοαστρική ύλη από το γιγάντιο μοριακό νέφος εξακολουθεί να «πέφτει» σε καθέναν από τους πρωταστέρες, οι συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων στο εσωτερικό τους γίνονται όλο και πιο ενεργητικές, ενώ η θερμοκρασία και η εσωτερική τους πίεση συνεχίζει να αυξάνει. Γι' αυτό και η συστολή τους υπό το βάρος των εξωτερικών τους στρωμάτων αρχίζει να επιβραδύνεται. Όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός πρωταστέρα φτάσει τους περίπου 10 εκατ. °C, οι πυρήνες υδρογόνου, που σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απωθούνταν ο ένας τον άλλον εξαιτίας του ομώνυμου φορτίου τους, αρχίζουν να συνενώνονται μεταξύ τους μέσω θερμοπυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης, δημιουργώντας ήλιο. Τα αέρια υλικά, τα οποία προσελκύονται από τις παρυφές της περιοχής που καταρρέει, συνεχίζουν να στροβιλίζονται γύρω από το νεογέννητο άστρο, σχηματίζοντας μία τεράστια δίνη υπερθερμασμένων υλικών, ενώ από τους πόλους αυτού του περιστρεφόμενου δίσκου αρχίζουν και εκτινάσσονται ενεργητικοί πίδακες αερίων. Με την έναρξη των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης, ένας ισχυρός αστρικός άνεμος απομακρύνει σιγά-σιγά τα υπολείμματα του νεφελώματος, από το οποίο προήλθε. Ένα νέο άστρο έχει μόλις γεννηθεί. Αυτός είναι σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός γένεσης ενός νέου άστρου και κάπως έτσι δημιουργήθηκε και ο Ήλιος μας πριν από 4,6 δισ. χρόνια περίπου.



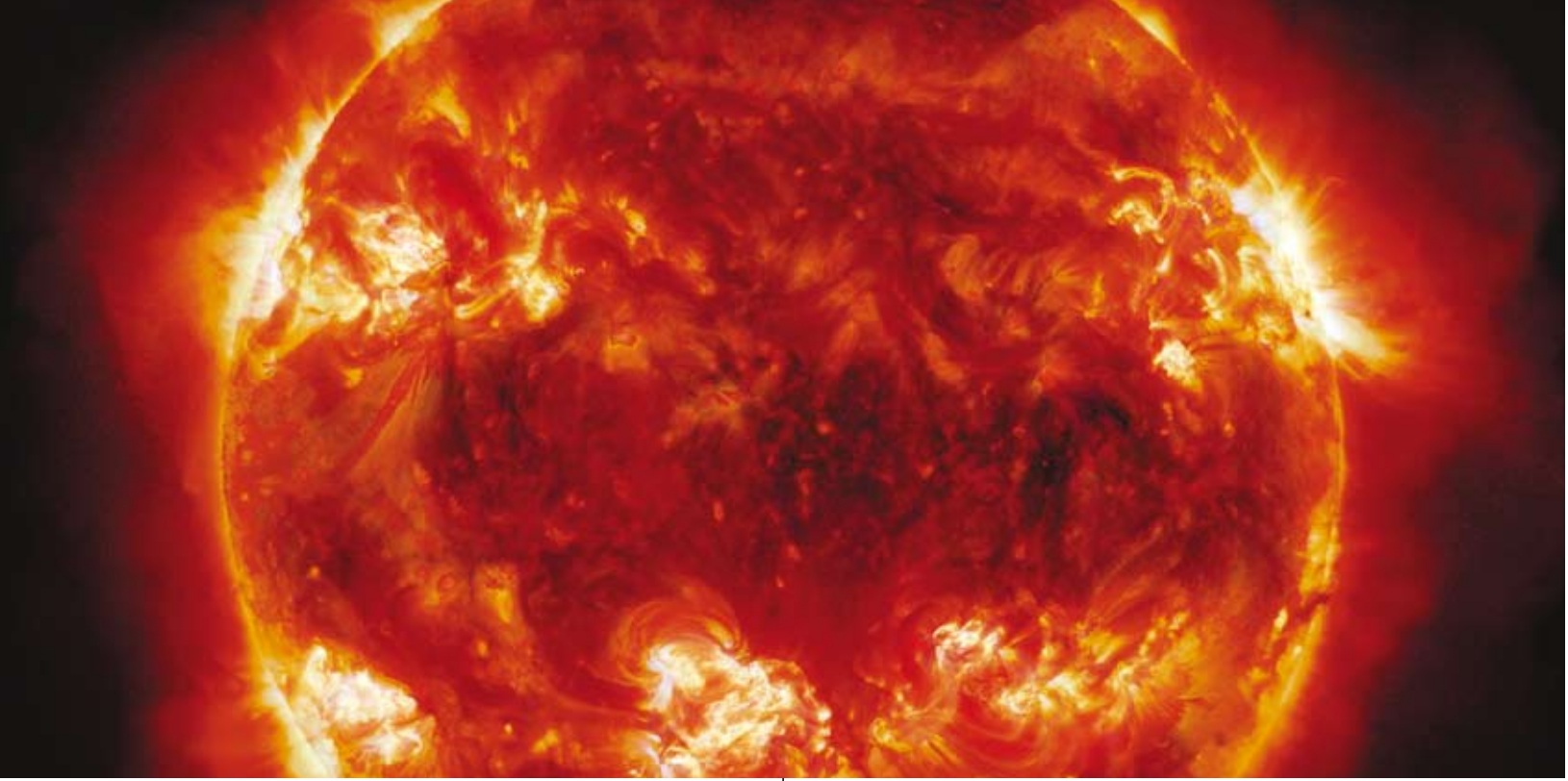
αέρια και σκόνη αρχίζουν να «πέφτουν» προς το κέντρο των περιοχών που καταρρέουν μετατρέποντας τη δυναμική τους ενέργεια σε κινητική, οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων της ύλης που καταρρέει και συνακόλουθα η θερμοκρασία τους αρχίζει να αυξάνει. Αρχικά, οι περιοχές αυτές ακτινοβολούν το πλεόνασμα της θερμικής τους ενέργειας, εξασφαλίζοντας ότι η εσωτερική τους πίεση παραμένει μικρότερη απ' τη βαρύτητα και ως εκ τούτου ότι η κατάρρευσή τους μπορεί να συνεχιστεί απρόσκοπτα. Καθώς, όμως, η πυκνότητά τους αυξάνει συνεχώς,

Χάρη στις παρατηρήσεις των αστρονόμων γνωρίζουμε όμως ότι πολλά από τα άστρα του Γαλαξία μας δεν «ταξιδεύουν» μόνο τους στην απεραντοσύνη του Διαστήματος, αλλά αντιθέτως σχηματίζουν στα πρώτα στάδια της δημιουργίας τους πλανήτες. Στην περίπτωση του Ηλιακού μας Συστήματος, ειδικότερα, ►

μία από αυτές τις υπό κατάρρευση περιοχές, το **προ-Ηλιακό νεφέλωμα** όπως ονομάζεται, δημιούργησε τον Ήλιο και τους πλανήτες του. Όπως μια μπαλαρίνα στον πάγο, που φέρνοντας τα χέρια της κοντά στο σώμα της στροβιλίζεται όλο και πιο γρήγορα, διατηρώντας τη στροφορμή της, το υπό κατάρρευση νεφέλωμα άρχισε να περιστρέφεται όλο και πιο γρήγορα. Η συνεχιζόμενη περιστροφή του νέφους σε συνδυασμό με τα περίπλοκα βαρυτικά και μαγνητικά πεδία το μετέτρεψαν σταδιακά σε έναν πεπλατυσμένο και περιστρεφόμενο δίσκο ύλης, γνωστό ως **πρωτοπλανητικό δίσκο**, στο κέντρο του οποίου σχηματίστηκε μία περιστρεφόμενη και υπέρθερμη σφαίρα αερίων, δηλαδή το έμβρυο του Ήλιου που θα γεννιόταν, όπως περιγράψαμε νωρίτερα. Πραγματικά, σε λίγες δεκάδες εκατ. χρόνια η θερμοκρασία στον πυρήνα του πρωταστέρα-Ήλιου έφτασε τους 10 εκατ. °C, δίνοντας το έναυσμα για την έναρξη των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης του υδρογόνου σε ήλιο. Χάρη σ' αυτήν τη νέα πηγή ενέργειας, η εσωτερική πίεση του νεογέννητου Ήλιου εξισορρόπησε την περαιτέρω βαρυτική του κατάρρευση και ο Ήλιος εισήλθε σε μια μακρά περίοδο υδροστατικής ισορροπίας ως άστρο της Κύριας Ακολουθίας, στην οποία παραμένει ακόμη και σήμερα, 4,6 δισ. χρόνια μετά τη γέννησή του.

Οι «σπόροι» από τους οποίους «γεννήθηκαν» οι πλανήτες του Ηλιακού μας Συστήματος δεν ήταν άλλοι από τους μικροσκοπικούς κόκκους σκόνης του πρωτοπλανητικού δίσκου, οι οποίοι συνέχισαν να στροβιλίζονται γύρω από τον νεογέννητο Ήλιο. Η βαρυτική έλξη που ασκούσε η συσσωρευμένη ύλη του πρωτοπλανητικού δίσκου εξανάγκασε τα σωματίδια που τον περιβάλλουν να πέφτουν προς το επίπεδό του, όπου και άρχισαν να συσσωματώνονται και να κολλούν μεταξύ τους, αρχικά με ηλεκτροστατικές και εν συνεχεία, όταν αυξήθηκε λίγο η μάζα τους, με βαρυτικές δυνάμεις, διευρύνοντας σταδιακά το μέγεθός τους απ' αυτό της σχεδόν αόρατης σκόνης στο μέγεθος ενός χαλικιού, μιας πέτρας, ενός βράχου.

Καθώς αυτά τα κομμάτια ύλης συνέχισαν να περιφέρονται γύρω από τον νεογέννητο Ήλιο, οι περίπλοκες βαρυτικές αλληλεπιδράσεις μέσα στον πρωτοπλανητικό δίσκο τούς προσέδωσαν μία ανισομερή και ακανόνιστη κατανομή, συσσωρεύοντας τα περισσότερα απ' αυτά σε συγκεκριμένες τροχιές. Μέσα σε κάθε τέτοια τροχιά οι συγκρούσεις μεταξύ των επιμέρους κομματιών συνεχίστηκαν, σχηματίζοντας όλο και μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ύλης, που σταδιακά



έφτασαν σε μέγεθος μερικών χιλιομέτρων, οι επονομαζόμενοι **πλανητοειδείς**. Οι συγκρούσεις μεταξύ των πλανητοειδών ήταν πιο βίαιες: κάποιοι από αυτούς διαλύθηκαν, κάποιοι άλλοι όμως επιβίωσαν από τις συγκρούσεις και συγχωνεύθηκαν, σχηματίζοντας στα επόμενα μερικά εκατ. χρόνια πρωτοπλανήτες και εντέλει πλανήτες.

Η θεωρία αυτή του Ηλιακού νεφελώματος εξηγεί πολλὰ από τα χαρακτηριστικά των πλανητών του Ηλιακού Συστήματος, όπως το μέγεθος και τη σύστασή τους. Ας δούμε πώς: Η θερμοκρασία, στο εσωτερικό τμήμα του πρώιμου Ηλιακού Συστήματος (σε απόσταση δηλ. μέχρι και 4 ΑΜ από τον Ήλιο), ήταν πολύ μεγάλη για να «επιτρέψει» στις διάφορες πτητικές ενώσεις, όπως αυτές του νερού και του μεθανίου, να στερεοποιηθούν και να συμπυκνωθούν περαιτέρω. Γι' αυτό και οι πλανητοειδείς που σχηματίστηκαν κοντά στον Ήλιο αποτελούνταν κατά βάση από ενώσεις με υψηλό

σημείο τήξης, όπως μέταλλα και ενώσεις πυριτίου. Επειδή όμως οι ενώσεις αυτές αντιστοιχούσαν σε ελάχιστο ποσοστό της συνολικής μάζας του προ-Ηλιακού νεφελώματος, οι βραχύδεις πλανήτες παρέμειναν σχετικά μικροί σε μέγεθος.

Οι αέριοι γίγαντες του Ηλιακού μας Συστήματος, αντίθετα, δημιουργήθηκαν πιο μακριά απ' τον Ήλιο, πέρα από το επονομαζόμενο **όριο πάγου**, εκεί δηλαδή όπου η θερμοκρασία ήταν όσο χαμηλή έπρεπε, ώστε οι διάφορες πτητικές ενώσεις να παραμένουν παγωμένες. Επειδή όμως οι ενώσεις αυτές υπήρχαν σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες απ' ό,τι ο σίδηρος, το νικέλιο και οι ενώσεις πυριτίου, οι εξωτερικοί πλανήτες συσώρευσαν στα πρώτα στάδια της εξέλιξής τους πολύ περισσότερη μάζα απ' ό,τι οι βραχύδεις πλανήτες, γεγονός που τους επέτρεψε να αιχμαλωτίσουν με τη μεγαλύτερη βαρύτητά τους και μεγάλες ποσότητες υδρογόνου και ηλίου.



Αριστερά: Ο Ήλιος σε εικόνα που ελήφθη από το SOHO.
Πάνω: Κολλητεχνική απεικόνιση της Ζώνης των Αστεροειδών.
Κάτω: Ο πλανήτης Κρόνος σε εικόνα που ελήφθη από το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble {NASA/ESA/J. Clarke (Boston University)}.

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, πιστεύεται ότι σχηματίστηκαν μετά τον Δία και τον Κρόνο, όταν ο ηλιακός άνεμος του νεαρού Ήλιου είχε ήδη απομακρύνει τα υπολείμματα του Ηλιακού νεφελώματος. Γι' αυτό και η περιεκτικότητά τους σε υδρογόνο και ήλιο είναι μικρότερη σε σχέση μ' αυτήν του Δία και του Κρόνου.

Η αρχέγονη Ζώνη των Αστεροειδών, απ' την άλλη, υπολογίζεται ότι περιείχε αρχικά αρκετά πλανητικά έμβρυα με μάζες μεταξύ εκείνης της Σελήνης και αυτής του Άρη, καθώς και πολλά μικρότερα, αρκετή ύλη δηλαδή για τον σχηματισμό τουλάχιστον ενός, ίσως ακόμη και τριών πλανητών στο μέγεθος ▶

της Γης. Ο γειτονικός Δίας, όμως, που είχε ήδη διαμορφωθεί κάπου 3 εκατ. χρόνια μετά τον Ήλιο, καθώς και ο Κρόνος, προσέδωσαν με τη βαρυτική τους έλξη μεγαλύτερη ταχύτητα στους πλανητοειδείς της αρχέγονης Ζώνης. Γι' αυτό και οι κατά πολύ βιαιότερες συγκρούσεις μεταξύ τους, αντί να τους συσσωματώνουν, τους διαμέλιζαν, εκτινάσσοντας μάλιστα κάποιους απ' αυτούς προς το εσωτερικό Ηλιακό σύστημα και μειώνοντας έτσι τη συνολική μάζα της αρχέγονης Ζώνης σε λιγότερο από το 1% της μάζας της Γης.

Το γεγονός ότι η θεωρία αυτή μπορεί να εξηγήσει ικανοποιητικά το παρατηρούμενο μέγεθος και τη χημική σύσταση των πλανητών του Ηλιακού Συστήματος, όπως επίσης και το σύνολο της μάζας που εμπεριέχει σήμερα η Ζώνη

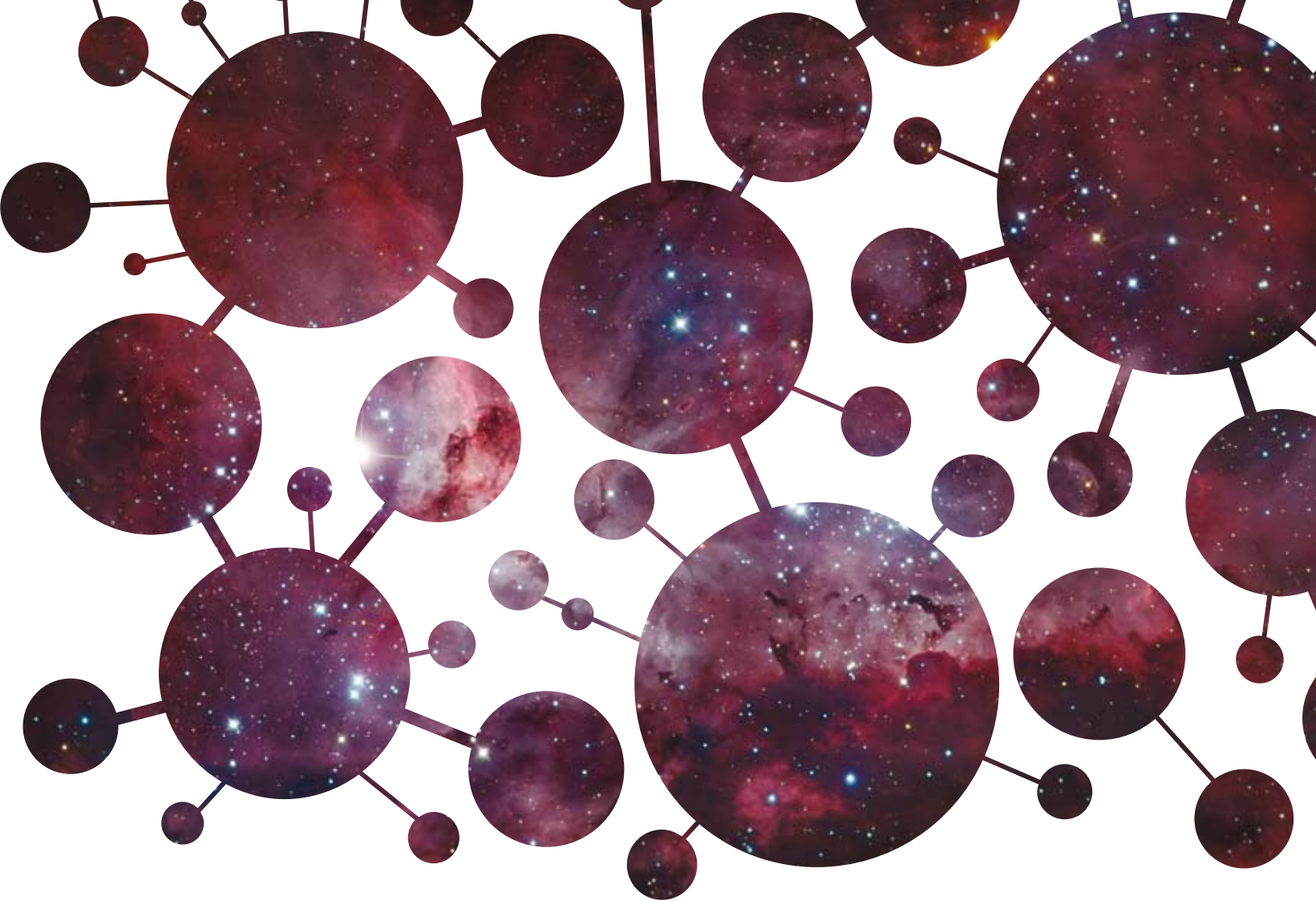


Ουράνιο σώμα της Ζώνης Kuiper (Adolf Schaller, ESA, NASA).

των Αστεροειδών, σημαίνει ότι σε γενικές γραμμές πρέπει να είναι σωστή. Παρουσιάζει ωστόσο ορισμένα προβλήματα, τα οποία προσπαθεί να αντιμετωπίσει μία νέα θεωρία, γνωστή ως το **Πρότυπο της Νίκαιας**. Η θεωρία αυτή διατυπώθηκε από τους **R. Gomes, H. Levison, A. Morbidelli** και **K. Τσιγάνη** στο αστεροσκοπείο της ομώνυμης πόλης της Γαλλίας και δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Nature το 2005.

Σύμφωνα με το Πρότυπο της Νίκαιας, οι 4 βραχώδεις πλανήτες θα πρέπει να σχηματίστηκαν όπως περίπου περιγράψαμε νωρίτερα, με τη διαφορά όμως ότι αρχικά οι αποστάσεις τους από τον Ήλιο ήταν λίγο μεγαλύτερες και ότι μετακινήθηκαν στις τωρινές περίπου τροχιές τους εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με την ύλη του πρωτοπλανητικού δίσκου. Οι 4 γιγάντιοι πλανήτες, από την άλλη, θα πρέπει να δημιουργήθηκαν αρχικά πολύ πλησιέστερα ο ένας στον άλλον και όλοι μαζί στον Δία. Σε κάποιες μάλιστα από τις παραλλαγές της θεωρίας της Νίκαιας, ο Ουρανός θα πρέπει αρχικά να βρισκόταν πλησιέστερα στον Ήλιο απ' ό,τι ο Ποσειδώνας, ενώ έξω ακριβώς από την τροχιά του αρχέγονου Ουρανού και μέχρι τις 30–35 ΑΜ από τον Ήλιο εκτεινόταν η αρχέγονη Ζώνη Kuiper, ένας πυκνός δίσκος πλανητοειδών με συνολική μάζα πολύ μεγαλύτερη απ' αυτήν που υπολογίζεται ότι έχει σήμερα.

Βαρυτικές επαφές μεταξύ του Ουρανού και εκείνων των πλανητοειδών, που κινούνταν στο εσώτατο όριο της αρχέγονης Ζώνης Kuiper, θα πρέπει να εκτίναξαν κάποια απ' αυτά προς το εσωτερικό του Ηλιακού μας Συστήματος, γεγονός που εξανάγκασε τον Ουρανό να «μεταναστεύσει» σε μεγαλύτερη τροχιά. Καθώς οι πλανητοειδείς αυτοί συνέχισαν να κινούνται προς το εσωτερικό Ηλιακό Σύστημα, αλληλεπιδρούσαν με κάθε νέο πλανήτη που συναντούσαν, διευρύνοντας έτσι σταδιακά τις τροχιές και του Ποσειδώνα και του Κρόνου. Όταν όμως έφτασαν τον γιγάντιο Δία, η τεράστια βαρυτική του έλξη τούς προσέδωσε ιδιαίτερα ελλειπτικές τροχιές, εκτινάσσοντας μάλιστα πολλούς απ' αυτούς εκτός του Ηλιακού Συστήματος. Κάπως έτσι, οι τροχιές των 4 γιγάντων συνέχισαν να μεταβάλλονται αργά, μέχρις ότου 600–700 εκατ. χρόνια μετά τη δημιουργία του Ήλιου, ο Κρόνος και ο Δίας εισήλθαν σε τροχιακό συντονισμό, με τον Κρόνο να συμπληρώνει μία περιφορά γύρω από τον Ήλιο στον ίδιο χρόνο που ο Δίας συμπλήρωνε δύο. Ολόκληρο το πρώιμο Ηλιακό Σύστημα θα πρέπει τότε να αποσταθεροποιήθηκε πλήρως.

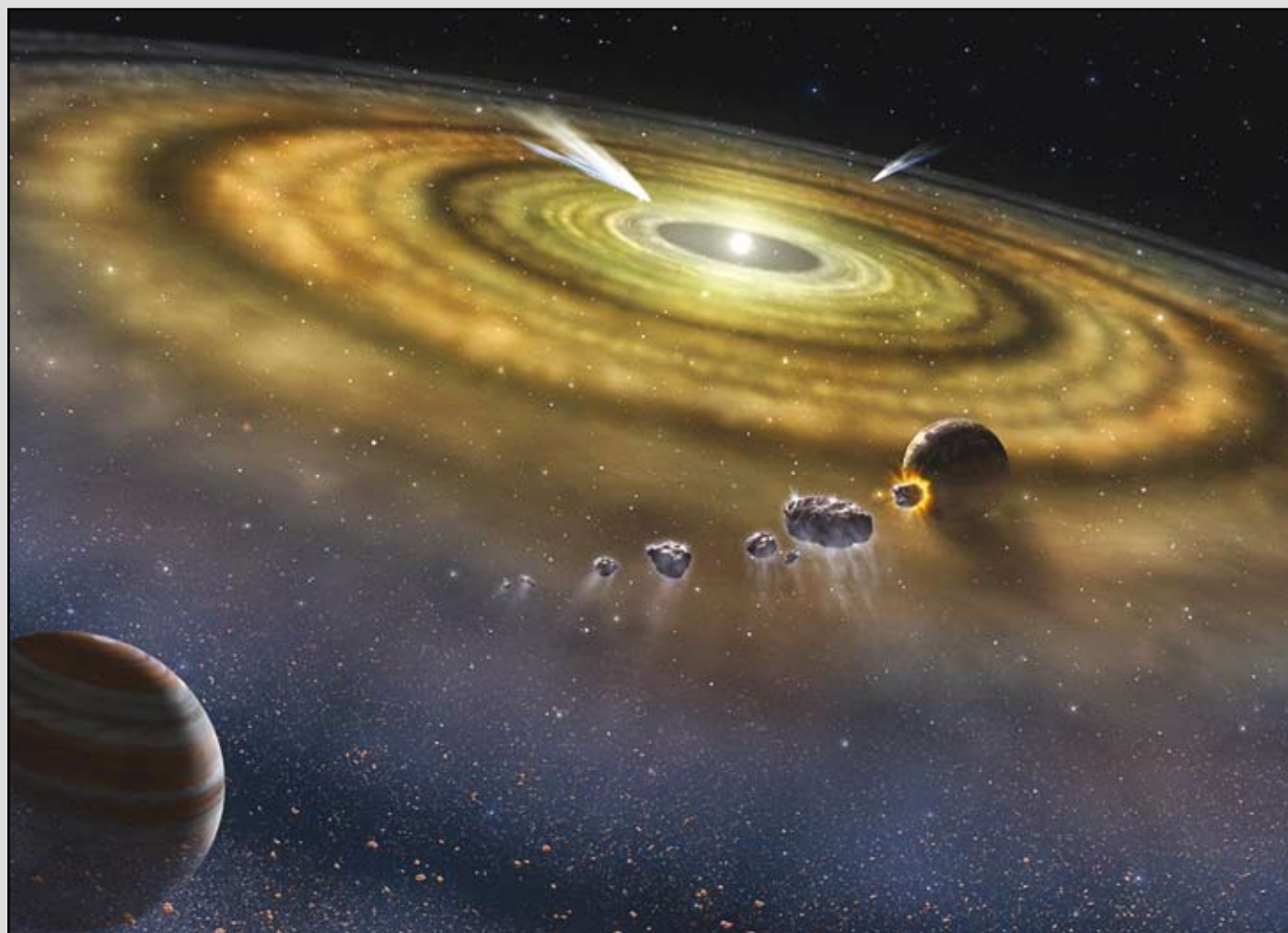


Ο Κρόνος εκτινάχθηκε προς τη σημερινή του τροχιά, ενώ η βίαιη βαρυτική ώθηση που δέχτηκε ο Ποσειδώνας, τον εξανάγκασε να προσπεράσει τον Ουρανό και να πέσει με ορμή στην αρχέγονη Ζώνη Kuiper. Δεκάδες χιλιάδες από τους πλανητοειδείς της Ζώνης εκτινάχθηκαν τότε απ' τις αρχικά σταθερές τροχιές τους, γεγονός που ελάττωσε τη συνολική της μάζα κατά 99%. Εκείνα τα συντρίμια, που η βαρυτική κλοτσιά του Δία τούς προσέδωσε ιδιαίτερα ελλειπτικές τροχιές, σχημάτισαν το Νέφος Oort, ενώ εκείνα που εκτινάχθηκαν με λιγότερο ελλειπτικές τροχιές εξαιτίας της «μετανάστευσης» του

Ποσειδώνα, θα πρέπει να διαμόρφωσαν τη Ζώνη Kuiper, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Κάποια, όμως, από τα πλανητοειδή της Ζώνης Kuiper εκτινάχθηκαν προς το εσωτερικό Ηλιακό Σύστημα, προκαλώντας έναν κατακλυσμιαίο βομβαρδισμό των εσωτερικών πλανητών του από μικρά και μεγάλα διαστημικά βλήματα, που έμεινε γνωστός ως ο **Ύστερος Μεγάλος Βομβαρδισμός**. Η αλήθεια, βέβαια, είναι ότι δεν έχουμε ακόμη πλήρη εικόνα γι' αυτήν την πρώιμη περίοδο της γένεσης και της εξέλιξης του Ηλιακού μας Συστήματος. Η έρευνα, όμως, συνεχίζεται.

Κλεομένης Τσιγάνης

Επίκουρος Καθηγητής του Τομέα Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



2ο κεφάλαιο

Η Μετανάστευση των Πλανητών

Τα τελευταία χρόνια η έρευνα πάνω στις φυσικές διεργασίες, που διέπουν τη γένεση και τη μορφολογία των πλανητικών συστημάτων, έχει κάνει αλητωδὴ πρόοδο. Αυτό οφείλεται τόσο στην πληθώρα νέων παρατηρήσεων, που καθοδηγούν την ανάπτυξη νέων θεωρητικών προτύπων, όσο και στη μεγάλη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, που έχει επιτρέψει τη λεπτομερή προσομοίωση της εξέλιξης ενός Συστήματος και ὅρα την «πειραματική» αξιολόγηση των διαφόρων θεωριών. Έτσι, η κλασική θεωρία της Κοσμογονίας αναθεωρείται συνεχώς. Η βασική ιδέα παραμένει βέβαια η ίδια: το Ηλιακό Σύστημα γεννήθηκε μετά την κατάρρευση του πρωταστρικού νεφελώματος που δημιουργήσε τον Ήλιο. Στη συνέχεια, οι πλανήτες δημιουργήθηκαν μέσα στον πρωτοπλανητικό δίσκο αερίων και σκόνης, που περιφερόταν γύρω από τον νεαρό αστέρα. Μέχρι πρόσφατα, ὅμως, πιστεύαμε ότι οι πλανήτες φτιάχτηκαν «επί τόπου», δηλαδή στις τροχιές που και σήμερα παρατηρούνται. Αυτό έχει πλέον ανατραπεί, μετά την ανακάλυψη του φαινομένου της

πλανητικής μετανάστευσης. Πρόκειται για ένα, ἄγνωστο μέχρι πρόσφατα, εξελικτικό στάδιο των πλανητικών συστημάτων, το οποίο ἑπεται της δημιουργίας των πλανητών και καθορίζει την τελική «αρχιτεκτονική» του Συστήματος. Η κατανόηση τέτοιων πολύπλοκων φαινομένων, ὅπως η δημιουργία και η μετανάστευση των πλανητών, θα ήταν αδύνατη, αν δεν είχαμε στα χέρια μας το πολύτιμο «εργαλείο» των αριθμητικών προσομοιώσεων.

Η Επιτροπή Ονοματοθεσίας της Διεθνούς Αστρονομικής Ένωσης (IAU), ἔδωσε πρόσφατα το ὄνομα του Κλεομένη Τσιγάνη στον αστεροειδὴ που μέχρι πριν από λίγο καιρό ήταν γνωστός με τα στοιχεία 1999 RC221. Στο εξής ο αστεροειδὴς αυτός ονομάζεται 21775 Tsiganis, ὅπου ο αριθμὸς 21775 δηλώνει τη θέση του αστεροειδούς στον κατάλογο εκείνων των οποίων η τροχιά έχει υπολογισθεῖ με ακρίβεια. Δύο ἀκόμη Έλληνες ἔχουν δώσει το ὄνομά τους σε αστεροειδεῖς: 6354 Vangelis (1934 GA) και 8323 Krimigis (1979 UH).



Ο Γερμανός αστρονόμος Johannes Kepler (1571-1630).

Οι κινήσεις των πλανητών και των άλλων σωμάτων του Ηλιακού Συστήματος (αστεροειδείς, κομήτες κ.λπ.) καθορίζονται από τους νόμους της Φυσικής –κυρίως τον νόμο της παγκόσμιας έλξης και τους νόμους της δυναμικής του Νεύτωνα– με εφαρμογή των οποίων παίρνουμε τις εξισώσεις κίνησης κάθε σώματος. Η τροχιά ενός πλανήτη –δηλαδή η θέση και η ταχύτητά του για κάθε χρονική στιγμή– βρίσκεται αν καταφέρουμε να επιλύσουμε αυτές τις εξισώσεις. Τότε, γνωρίζοντας τη λύση, μπορούμε να προσδιορίσουμε πού θα βρίσκεται ο εν λόγω πλανήτης την ημέρα και την ώρα που θέλουμε να τον παρατηρήσουμε. Το μόνο που χρειαζόμαστε επί πλέον είναι μια «αρχική συνθήκη», δηλαδή τη θέση και την ταχύτητά του κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, π.χ. σήμερα στις 10 το βράδυ. Η διαδικασία που μόλις περιγράψαμε δεν διαφέρει ουσιαστικά από αυτήν που εφαρμόζουμε στο Λύκειο για να βρούμε π.χ. την κίνηση μίας μπίλιας σε κεκλιμένο επίπεδο (με λίγο πιο περίπλοκα Μαθηματικά).

Οι πλανήτες έχουν πολύ μικρή μάζα σε σύγκριση με τον Ήλιο. Επομένως, σε πρώτη προσέγγιση, μπορούμε να αγνοήσουμε τις βαρυτικές δυνάμεις μεταξύ των πλανητών και να θεωρήσουμε μόνο τις δυνάμεις ανάμεσα στον πλανήτη που μας ενδιαφέρει και τον Ήλιο –το λεγόμενο πρόβλημα του Kepler. Η λύση τότε είναι απλή: η κίνηση του πλανήτη διέπεται από τους νόμους (τύπους) του Kepler και μπορούμε να βρούμε τη θέση του μετά από μερικές ημέρες ή εβδομάδες, χρησιμοποιώντας ένα απλό κομπιουτεράκι. Όμως, αν θέλαμε (και μπορούσαμε!) να παρατηρήσουμε τον πλανήτη π.χ. την πρωτοχρονιά του έτους 3153, τότε πιθανότατα δεν θα τον βρίσκαμε «στη θέση του». Ο λόγος είναι ότι, έχοντας αγνοήσει τις βαρυτικές δυνάμεις που ασκούν οι υπόλοιποι πλανήτες, η προσεγγιστική τροχιά που παίρνουμε από τους νόμους του Kepler αποκλίνει όλο και περισσότερο απ’ την πραγματική τροχιά του πλανήτη στον ουρανό, με την πάροδο του χρόνου.

Φανταστείτε τώρα ότι, αντί για μια απλή παρατήρηση, θέλω να απαντήσω σε ερωτήματα όπως: (α) Πού θα βρίσκονται οι πλανήτες του Ηλιακού Συστήματος μετά από μερικά εκατ. χρόνια; Θα υπάρχει το Σύστημά μας ή θα έχει διαλυθεί; (β) Από ποια περιοχή του Ηλιακού Συστήματος προήλθε ο μεγάλος αστεροειδής που συγκρούστηκε με τη Γη πριν από 65 εκατ. χρόνια, γεγονός που πιθανότατα ευθύνεται για την εξαφάνιση των δεινοσαύρων; (γ) Μπορεί όντως η Σελήνη

να σχηματίστηκε μετά από σύγκρουση της Γης με έναν άλλο πρωτοπλανήτη;

Για να απαντήσουμε σε τέτοια ερωτήματα, θα πρέπει να μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια και για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα την εξέλιξη των τροχιών πολλών σωμάτων που ασκούν δυνάμεις το ένα στο άλλο, καθώς και τις πιθανές συγκρούσεις μεταξύ τους. Τότε, η απλή προσέγγιση που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως δεν έχει πια καμιά αξία.

Όμως, έχει αποδειχθεί ότι από τρία και πλέον ουράνια σώματα (π.χ. Ήλιος και δύο πλανήτες), δεν είναι δυνατό να βρεθούν απλοί μαθηματικοί τύποι που να δίνουν με απόλυτη ακρίβεια τις τροχιές τους – όπως αντίστοιχα οι τύποι του Kepler, για την περίπτωση των δύο σωμάτων. Παρά ταύτα, μπορούμε πάντοτε να επιλύσουμε τις εξισώσεις κίνησης όσων σωμάτων θέλουμε, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες εξασφαλίζουν προσεγγίσεις εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας! Κάθε αριθμητική μέθοδος βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία: με τη χρήση κατάλληλων «τύπων», προβλέπω τις θέσεις και τις ταχύτητες των πλανητών π.χ. για αύριο, γνωρίζοντας τις σημερινές τιμές τους. Στη συνέχεια χρησιμοποιώ τις προβλέψεις μου αυτές ως «αρχικές συνθήκες», για να προβλέψω τις μεθαυριανές τιμές κ.ο.κ.. Το πρόβλημα είναι ότι, για υπολογισμούς μεγάλης ακρίβειας, ο αριθμός των απαιτούμενων πράξεων είναι τόσο μεγάλος που αν θέλω να βρω π.χ. τις τροχιές των οκτώ πλανητών του ηλιακού Συστήματος για τα επόμενα χίλια χρόνια, πιθανότατα θα γεράσω (στην καλύτερη περίπτωση!) κάνοντας πράξεις...

Ακριβώς γι’ αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούμε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, που μπορούν να κάνουν τον ίδιο αριθμό πράξεων μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα(!), κάτι που επιτυγχάνεται αν γράψουμε έναν «κώδικα» – σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού που οι υπολογιστές «καταλαβαίνουν» – που θα καθοδηγεί τον υπολογιστή στο να εκτελέσει με αυτοματοποιημένο τρόπο τις πράξεις. Σήμερα, ένας προσωπικός υπολογιστής μπορεί να μας δώσει τις ακριβείς συντεταγμένες των οκτώ πλανητών για κάθε μέρα εδώ και 4.5 δισ. χρόνια –που είναι η ηλικία του Ηλιακού Συστήματος– μέσα σε 1-2 μέρες! Έτσι, αν «ζωγραφίσουμε» στην οθόνη του υπολογιστή τις διαδοχικές θέσεις των πλανητών, θα πάρουμε μια «ζωντανή» αναπαράσταση της εξέλιξης του Ηλιακού Συστήματος από τη γέννησή του μέχρι και σήμερα!

Η προσομοίωση –ένα αριθμητικό πείραμα– είναι το βασικό εργαλείο ελέγχου και αξιολόγησης κάθε θεωρίας που έχει στόχο να ερμηνεύσει τις παρατηρήσεις. Ας δώσουμε ένα παράδειγμα: έχει προταθεί ότι η Σελήνη σχηματίστηκε απ’ τα θραύσματα της σύγκρουσης της Γης με έναν πρωτοπλανήτη του μεγέθους του Άρη. Πώς μπορούμε να δούμε αν αυτή η ιδέα είναι σωστή;

Πρώτα θα υπολογίσουμε – με βάση τις μάζες, τη σχετική ταχύτητα σύγκρουσης και τη μορφή της ύλης των δύο σωμάτων – πόση μάζα περιμένουμε να εκτοξευθεί από την επιφάνεια της Γης λόγω της σύγκρουσης, πόσο μακριά και με τι ταχύτητα. Ακολουθώντας, θα επιλέξουμε π.χ. 1.000 αντιπροσωπευτικά «θραύσματα» και θα δώσουμε στον υπολογιστή αυτές τις «αρχικές συνθήκες» του πειράματος. Στη συνέχεια, θα



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της σύγκρουσης της αρχέγονης Γης με έναν πρωτοπλανήτη.

προσμοιάσουμε την εξέλιξη του Συστήματος, λύνοντας τις εξισώσεις κίνησης κάθε θραύσματος και ελέγχοντας αν και πότε δύο από αυτά συγκρούονται πηλαστικά (δηλ. «κολλάνε» μεταξύ τους). Αν η αρχική ιδέα είναι σωστή, τότε περιμένουμε να καταγράψουμε διαδοχικές συγκρούσεις θραυσμάτων που οδηγούν στον σχηματισμό ενός όλο και μεγαλύτερου σώματος. Επί πλέον, αν οι αρχικές συνθήκες ήταν κατάλληλες, στο τέλος της προσομοίωσης το σώμα που δημιουργείται θα πρέπει να έχει παραπλήσια μάζα με τη Σελήνη και να βρίσκεται στην κατάλληλη απόσταση από τη Γη. Τέτοιες προσομοιώσεις έχουν όντως πραγματοποιηθεί επιτυχώς, από διάφορους επιστήμονες, ενισχύοντας αυτήν τη θεωρία.

Με παρόμοιο τρόπο μπορεί κάποιος να προσομοιώσει τη δημιουργία των γήινων πλανητών του Ηλιακού Συστήματος –Ερμής, Αφροδίτη, Γη και Άρης– για τους οποίους πιστεύουμε ότι σχηματίστηκαν μέσα από πολυάριθμες συγκρούσεις πολύ μικρότερων σωμάτων, των λεγόμενων **πλανητοειδών**. Οι πλανητοειδείς, για τους οποίους πιστεύουμε ότι είχαν διαστάσεις της τάξης των 100 km, θεωρούνται ως οι δομικοί λίθοι κάθε πλανητικού Συστήματος. Σχετικές προσομοιώσεις δείχνουν ότι οι γήиноι πλανήτες μπορεί όντως να δημιουργήθηκαν κατ' αυτόν τον τρόπο, μέσα σε 30–100 εκατ. χρόνια μετά τη γένεση του Ήλιου.

Αντίθετα, οι «γιγάντιοι» πλανήτες του Συστήματος –Δίας, Κρόνος, Ουρανός και Ποσειδώνας– πρέπει να σχηματίστηκαν πολύ πιο γρήγορα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι σημαντικό ποσοστό της μάζας τους –το μεγαλύτερο για τους Δία και Κρόνο– είναι σε αέρια μορφή. Αυτό το αέριο αποτελεί μέρος του ίδιου νεφελώματος απ' το οποίο φτιάχτηκε και ο Ήλιος, τα υπολείμματα του οποίου συνέχισαν να περιφέρονται γύρω από τον νεαρό Ήλιο, σχηματίζοντας έναν πρωτοπλανητικό δίσκο αερίων (κυρίως) και σκόνης. Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία σχηματισμού των αερίων γιγάντων, σε κάποιες περιοχές του δίσκου δημιουργούνται στερεοί «πρωτοπλανήτες», οι οποίοι στη συνέχεια, λόγω βαρύτητας, «μαζεύουν» αρκετό αέριο από τη γειτονιά τους, ώστε να μετατραπούν σε γιγάντιους πλανήτες.

Όμως, οι παρατηρήσεις νεαρών αστέρων σε διάφορες περιοχές αστερογενέσεως στον Γαλαξία δείχνουν ότι οι πρωτοπλανητικοί δίσκοι «εξατμίζονται» μέσα σε 1–10 εκατ. χρόνια από τη γένεση του αστήρα, κυρίως λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας που εκπέμπουν οι παρακείμενοι αστέρες – το φαινόμενο της φωτοεξάτμισης. Αυτό που μένει πίσω είναι ένας δίσκος μικρών στερεών σωμάτων –των πλανητοειδών– και όσων αερίων γιγάντων είχαν στο μεταξύ προλάβει να σχηματιστούν. Επομένως, μετά τα πρώτα 10 εκατ. χρόνια από τη δημιουργία του Ήλιου, το σύστημά μας πιθανότατα αποτελούνταν από τον Ήλιο, τους τέσσερεις γιγάντιους πλανήτες και έναν τεράστιο αριθμό πλανητοειδών.

Τα υπολείμματα του αρχικού δίσκου των πλανητοειδών, από τον οποίο προέκυψαν οι γήиноι πλανήτες, παρατηρούνται και σήμερα και είναι γνωστά ως ζώνη των αστεροειδών (ανάμεσα στις τροχιές του Άρη και του Δία) και ζώνη του Κιύπερ (εκτείνεται πέρα από την τροχιά του Ποσειδώνα). Με



βάση τις παρατηρήσεις, έχει υπολογιστεί ότι η αρχική μάζα της ζώνης Κιύπερ ήταν περίπου 1.000 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι παρατηρούμε σήμερα, δηλαδή αρκετές φορές η μάζα της Γης. Το ερώτημα λοιπόν έρχεται αβίαστα: τι απέγινε αυτό το υλικό;

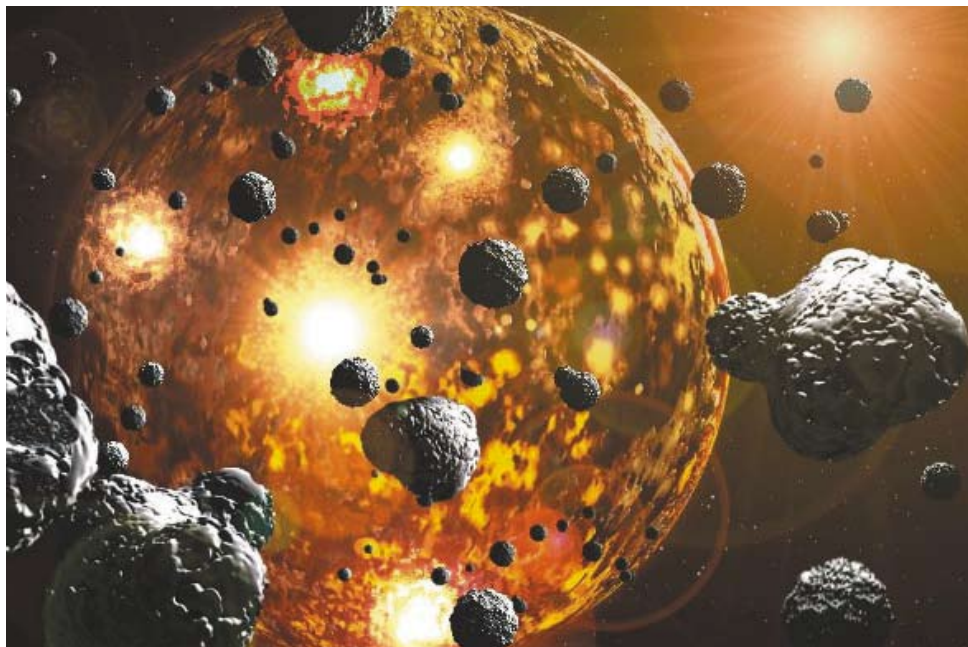
Η απάντηση είναι ότι πιθανότατα «χάθηκε» από το σύστημα, λόγω της βίαιης βαρυτικής αλληλεπίδρασης των μικρών πλανητοειδών με τους γιγάντιους πλανήτες. Η αλληλεπίδραση αυτή μας είναι γνωστή ως «φαινόμενο της σφενδόνας»: ένα μικρό σώμα (π.χ. ένα διαστημικό σκάφος ή ένας πλανητοειδής) που πλησιάζει έναν μεγάλο πλανήτη με την κατάλληλη κατεύθυνση και ταχύτητα, επιταχύνεται και εκτοξεύεται μακριά, «παίρνοντας» ενέργεια από το βαρυτικό πεδίο του πλανήτη. Αυτό το φαινόμενο εκμεταλλευόμαστε σε διαστημικές αποστολές, προκειμένου ένα σκάφος να φτάσει στην απόσταση π.χ. του Δία. Αν ο πλανήτης είναι «γίγαντας», ο πλανητοειδής μπορεί ακόμη και να εκτοξευθεί εκτός Ηλιακού Συστήματος! Όμως, ένας πλανητοειδής έχει αρκετή μάζα ώστε, κατά τη διαδικασία αυτή, να προκαλεί μια (πολύ μικρή) μετατόπιση του πλανήτη – καθώς η συνολική ενέργεια του συστήματος δεν μπορεί να αλλιάξει.

Με δεδομένο τον τεράστιο αριθμό πλανητοειδών που υπήρχε στο σύστημα κατά την εποχή σχηματισμού των πλανητών, κάθε μικρή μετατόπιση του πλανήτη είχε ως αποτέλεσμα ένας νέος πλανητοειδής να εισέρχεται στη «σφαίρα επιρροής» του πλανήτη αυτού. Μπορούμε λοιπόν να φανταστούμε το φαινόμενο της σφενδόνας να επαναλαμβάνεται διαρκώς, μέχρις ότου ο δίσκος των πλανητοειδών «αδειάσει», με τους πλανητοειδείς να καταλήγουν είτε εκτός Ηλιακού Συστήματος είτε να συγκρούονται με κάποιον πλανήτη.

Η παραπάνω διεργασία μπορεί καλύτερα να προσομοιωθεί στον υπολογιστή. Η «συνταγή» μάς είναι πια γνωστή: παίρνουμε τους τέσσερεις γιγάντιους πλανήτες και μερικές χιλιάδες αντιπροσωπευτικούς πλανητοειδείς με κατάλληλες μάζες και τροχιές. Ξεκινούμε την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης όλων των σωμάτων και καταγράφουμε τις μεταβολές κάθε τροχιάς. Τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά, καθώς δείχνουν ότι οι τροχιές των γιγάντιων πλανητών αλληλίζουν δραστικά! Κάποιες προσομοιώσεις δείχνουν ότι η απόσταση του Ποσειδώνα απ' τον Ήλιο θα μπορούσε ακόμη και να διπλασιαστεί, κατά το «άδειασμα» του δίσκου. Ο Δίας και ο Κρόνος πιθανότατα μετατοπίστηκαν πολύ λιγότερο, καθώς ►



Αριστερά: Οι 4 γήиноι πλανήτες Ερμής, Αφροδίτη, Γη και Άρης (NASA). Πάνω: Τα μεγέθη των πλανητών του Ηλιακού Συστήματος σε κλίμακα. Κάτω: Ο Κρόνος σε φωτογραφία που ελήφθη από την διαστημοσυσκευή Cassini (NASA).



Καλλιτεχνική αναπαράσταση της αρχέγονης Γης κατά την περίοδο του Όψιμου Σφοδρού Βομβαρδισμού.

έχουν πολύ μεγαλύτερη μάζα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **μετανάστευση των μεγάλων πλανητών**.

Σύμφωνα επομένως με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, οι γιγάντιοι πλανήτες πρέπει να δημιουργήθηκαν πολύ πιο κοντά στον Ήλιο απ' ό,τι τους παρατηρούμε σήμερα και στη συνέχεια μετανάστευσαν προς τις σημερινές τροχιές τους. Μία τόσο δραστική μεταβολή των τροχιών των μεγάλων πλανητών δεν μπορεί να άφησε ανεπηρέαστο το υπόλοιπο σύστημα. Προκειμένου όμως να δούμε «πώς» και «πόσο» επηρεάστηκε π.χ. η περιοχή της Γης, θα πρέπει πρώτα να απαντήσουμε στα εξής ερωτήματα: (α) Είναι δυνατόν να εντοπίσουμε τις «αρχικές» τροχιές των πλανητών και να προσομοιώσουμε με ακρίβεια το «ταξίδι» τους προς τις σημερινές τροχιές τους; (β) Υπάρχουν παρατηρησιακά δεδομένα που να αποτελούν «καταγραφή» των επιπτώσεων της πλανητικής μετανάστευσης στο υπόλοιπο Ηλιακό Σύστημα;

Όπως η ύπαρξη γεωλογικών στρωμάτων μός βοηθά να αποκρυπτογραφήσουμε τη γεωλογική και κλιματολογική ιστορία της Γης, έτσι και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των πλανητών και των δορυφόρων τους μός βοηθούν

να αποκρυπτογραφήσουμε την ιστορία της εξέλιξης του Ηλιακού Συστήματος. Σχεδόν όλα τα στερεά σώματα του Ηλιακού Συστήματος φέρουν εμφανή σημάδια –κρατήρες– πρόσκρουσης μεγάλων μετεωριτών στην επιφάνειά τους. Τα σημάδια αυτά είναι πολύ έντονα σε σώματα που δεν έχουν σημαντική ατμοσφαιρική ή γεωλογική δραστηριότητα, που θα μπορούσε να τα «σβήσει» με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, με βάση το πλήθος και τις διαστάσεις των κρατήρων της Σελήνης, μπορεί κάποιος να υπολογίσει κατά πόσον έχει μεταβληθεί ο ρυθμός πρόσκρουσης μετεωριτών στην περιοχή της Γης, από τότε που δημιουργήθηκε μέχρι και σήμερα. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι ο ρυθμός πρόσκρουσης είναι σχεδόν σταθερός εδώ και περίπου 4 δισ. χρόνια. Μπορούμε βέβαια να φανταστούμε ότι ήταν πολύ μεγαλύτερος την εποχή της δημιουργίας των πλανητών, δηλαδή τα πρώτα 30–100 εκατ. χρόνια μετά τη γένεση του Ήλιου.

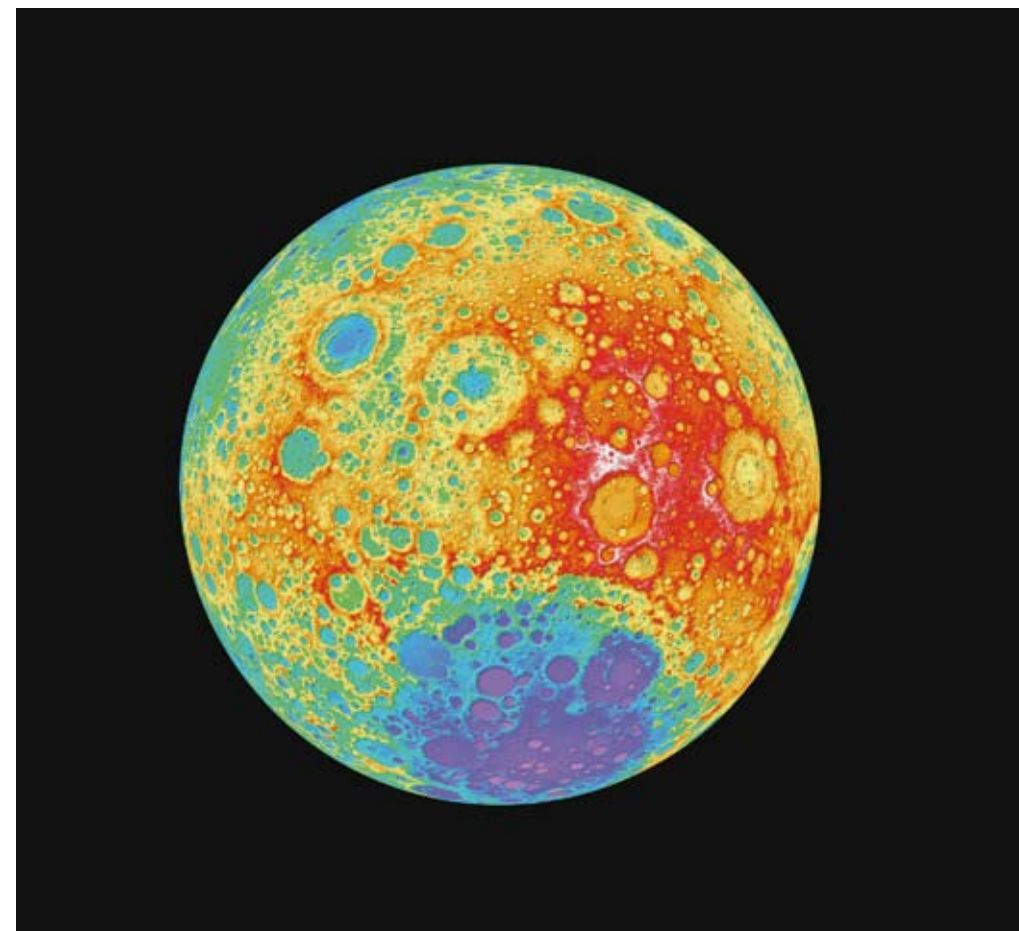
Η ακριβής «ηλικία» ενός κρατήρα μπορεί να βρεθεί, αν συλλέξουμε δείγματα των πετρωμάτων του και τα αναλύσουμε στο εργαστήριο. Αυτό έχει γίνει για αρκετούς από τους μεγάλους κρατήρες της Σελήνης, με δείγματα που έφεραν στη Γη οι αστροναύτες των ιστορικών αποστολών Apollo.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ήταν μη αναμενόμενα. Οι μεγάλοι κρατήρες στη Σελήνη φαίνεται ότι δημιουργήθηκαν σχεδόν ταυτόχρονα, αλλά περίπου 600–700 εκατ. χρόνια μετά από τη δημιουργία της! Αυτό σημαίνει ότι ξαφνικά, μετά από 600 εκατ. χρόνια σχετικής ηρεμίας, ένας σφοδρός βομβαρδισμός που διήρκεσε μόλις μερικές δεκάδες εκατ. χρόνια διέλυσε ουσιαστικά την επιφάνεια της Σελήνης. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι, την ίδια περίοδο, ο ρυθμός πρόσκρουσης μετεωριτών στη Γη αυξήθηκε ξαφνικά κατά περίπου 20.000 φορές(!), γεγονός που σημαίνει ότι, κατά μέσον όρο, ένας μετεωρίτης με διάμετρο 1 km έπεφτε στη Γη κάθε έτος, καθόλη τη διάρκεια του βομβαρδισμού! Τα σημάδια αυτού του πανάρχαιου βομβαρδισμού έχουν βέβαια σβηστεί

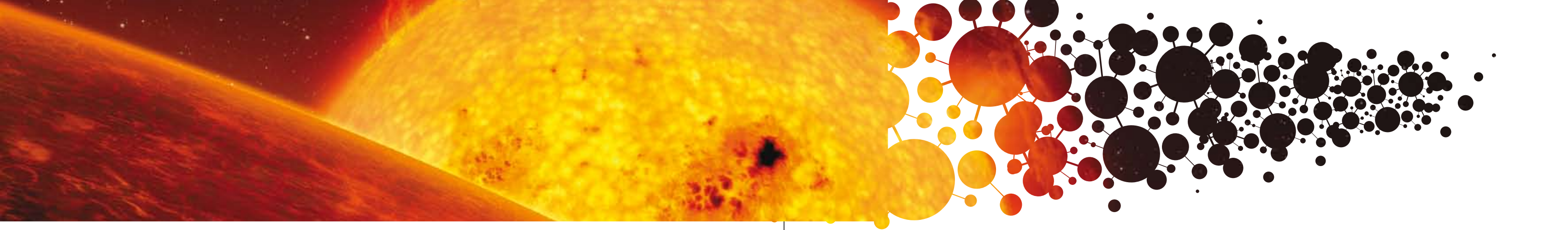
από την επιφάνεια του πλανήτη μας (λόγω των διαβρωτικών διαδικασιών που επικρατούν – άνεμοι, βροχές κ.λπ.), είναι όμως εμφανή στη Σελήνη.

Η συνεισφορά αυτού του **Όψιμου Σφοδρού Βομβαρδισμού** (Late Heavy Bombardment, LHB) στην εξέλιξη του κλίματος, αλλά και της ζωής στη Γη, αποτελεί μεγάλο ερωτηματικό για τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Κανένα θεωρητικό πρότυπο δεν είχε καταφέρει να φωτίσει τα αίτια του LHB, μέχρι πρόσφατα. Είναι δυνατόν ο LHB να προήλθε ως συνέπεια της μετανάστευσης των μεγάλων πλανητών;

Το 2005 μια διεθνής ομάδα ερευνητών, αποτελούμενη από ►



Αυτός ο τοπογραφικός χάρτης της Σελήνης, που απεικονίζει με εντυπωσιακή λεπτομέρεια τη βολογιοκομμένη με κρατήρες επιφάνειά της, κατασκευάστηκε χάρη στα δεδομένα που συνέλεξε η διαστημοσυσκευή της NASA Lunar Reconnaissance Orbiter. Οι περισσότεροι από τους μεγαλύτερους κρατήρες σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του Όψιμου Σφοδρού Βομβαρδισμού (NASA's Goddard Space Flight Center/DLR/ASU).



τους **Alessandro Morbidelli** (Ιταλία), **Harold Levison** (ΗΠΑ), **Rodney Gomes** (Βραζιλία) και τον γράφοντα (Ελλάδα), παρουσίασε μια νέα θεωρία εξέλιξης του Ηλιακού Συστήματος, η οποία συνέδεσε για πρώτη φορά τη μετανάστευση των γιγάντιων πλανητών με τον σφοδρό βομβαρδισμό των γήινων πλανητών, εξηγώντας πώς το «ταξίδι» των μεγάλων πλανητών «πυροδότησε» τον βομβαρδισμό. Η θεωρία αυτή είναι πλέον διεθνώς γνωστή με το όνομα **μοντέλο της Νίκαιας** (Nice model), από τη γαλλική πόλη Nice, στην οποία εργάζονταν όλα τα μέλη της ομάδας εκείνη την περίοδο.

Είδαμε ότι η μετανάστευση των πλανητών συνδέεται με το «άδειασμα» του δίσκου των πλανητοειδών, μέσω βαρυτικών αλληλεπιδράσεων. Πολλοί απ' αυτούς τους πλανητοειδείς εκσφενδονίζονται προς την περιοχή της Γης, με συνέπεια την αύξηση του ρυθμού πρόσκρουσης μετεωριτών. Το ερώτημα λοιπόν που οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου της Νίκαιας ήταν το εξής: μήπως οι «αρχικές συνθήκες» αυτής της διαδικασίας ήταν οι κατάλληλες, ώστε η μετανάστευση να είναι «αναμικτή» για περίπου 600 εκατ. χρόνια και στη συνέχεια να «επιταχύνθηκε», προκαλώντας έτσι τον LHB;

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι «ναι», όπως έδειξε η ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων. Η «αναμικτή» μετανάστευση των πλανητών για μεγάλο χρονικό διάστημα και άρα η καθυστέρηση στην έναρξη του βομβαρδισμού θα ήταν φυσιολογική, αν η γειτονιά των μεγάλων πλανητών ήταν ήδη από την αρχή σχεδόν άδεια από πλανητοειδείς. Αυτό όμως δεν μπορεί παρά να ίσχυε, αφού οι ίδιοι οι πλανήτες –για την ακρίβεια, οι στερεοί πυρήνες τους– σχηματίστηκαν ενσωματώνοντας τους

πλανητοειδείς της γειτονιάς τους! Έτσι, μετά τον σχηματισμό των γιγάντιων πλανητών, πολύ λίγοι πλανητοειδείς, προερχόμενοι από τις πιο απομακρυσμένες περιοχές του Ηλιακού Συστήματος, εκσφενδονίζονταν κατά καιρούς απ' τους πλανήτες, με αποτέλεσμα η μετανάστευση να γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς. Φυσικά, αντίστοιχα λίγοι πλανητοειδείς κατέληγαν σε σύγκρουση με τη Γη ή τη Σελήνη, καθόλη τη διάρκεια αυτής της πρώτης φάσης της μετανάστευσης.

Οι προσομοιώσεις όμως έδειξαν ότι κάποια στιγμή, περίπου 600 εκατομμύρια χρόνια μετά την έναρξη της διαδικασίας, η αναμικτή μετανάστευση των πλανητών διακόπτεται ξαφνικά, με «βίαιο» τρόπο! Οι τροχιές των πλανητών αρχίζουν να γίνονται ακανόνιστες – χαοτικές, όπως λέμε στη Φυσική. Οι πλανήτες προσεγγίζουν κατά καιρούς ο ένας τον άλλο, με αποτέλεσμα να εκσφενδονίζονται πλέον οι ίδιοι σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις από τον Ήλιο. Μετά από μερικά εκατ. χρόνια, όταν πλέον ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας έχουν απομακρυνθεί αρκετά από τους άλλους δύο, οι πλανήτες «ηρεμούν» και καταλαμβάνουν τις σημερινές τροχιές τους, έχοντας καταστρέψει στην πορεία τον δίσκο των πλανητοειδών. Όσο διαρκεί αυτή η χαοτική αναδιάρθρωση των πλανητικών τροχιών, μεγάλος αριθμός πλανητοειδών κατευθύνεται προς την περιοχή της Γης, προκαλώντας έτσι τον έντονο βομβαρδισμό της. Η ένταση, η διάρκεια και η χρονική καθυστέρηση της έναρξης του βομβαρδισμού στα «πειράματά» μας σχεδόν συμπίπτουν με τα αντίστοιχα δεδομένα του LHB. Η «σύμπτωση» είναι απλά πολύ καλή για να είναι σύμπτωση.

Τι όμως προκάλεσε την προσωρινή «τρέλλα» των πλανητών και γιατί τελικά οι πλανήτες ηρέμησαν; Η απάντηση στο πρώτο ερώτημα βρίσκεται πιθανότατα σε ένα πολύ γνωστό

φαινόμενο της Μηχανικής – αυτό του συντονισμού. Θυμάμαι χαρακτηριστικά τον καθηγητή Φυσικής που είχα στο Γυμνάσιο να μας λέει ότι, όταν μια ομάδα στρατιωτών θέλει να περάσει από μια κρεμαστή γέφυρα, ο επικεφαλής διατάζει «ελεύθερο βάδην» και όχι «βήμα», για να μην «συντονιστεί» η γέφυρα και αρχίσει να ταλαντώνεται επικίνδυνα. Στη γλώσσα της Φυσικής, ο συντονισμός συμβαίνει όταν η συχνότητα του «βήματος» γίνει ίδια (ή διπλάσια, τριπλάσια κ.ο.κ.) με την ιδιοσυχνότητα της γέφυρας – δηλαδή, τη συχνότητα με την οποία (λόγω μήκους, μάζας, σχήματος κ.ά.) η γέφυρα τείνει από τη Φύση της να ταλαντώνεται. Αν αυτό συμβεί, τότε το πλάτος των ταλαντώσεων διαρκώς μεγαλώνει και η γέφυρα μπορεί ακόμη και να διαλυθεί.

Ε, λοιπόν, συντονισμό μπορεί να έχουμε και μεταξύ δύο πλανητών(!), όταν η συχνότητα με την οποία περιφέρεται ο ένας γύρω από τον Ήλιο γίνει π.χ. ακριβώς διπλάσια από τη συχνότητα περιφοράς του άλλου. Αυτό συμβαίνει στις προσομοιώσεις μας επειδή, καθώς οι πλανήτες απομακρύνονται αργά από τον Ήλιο, η συχνότητα περιφοράς τους μεταβάλλεται επίσης και μάλιστα με διαφορετικό ρυθμό. Έτσι, πάντοτε σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, εμφανίζεται ένας ισχυρός συντονισμός. Σχηματικά, μπορούμε να φανταστούμε τις τροχιές των δύο πλανητών σαν την εσωτερική και την εξωτερική πλευρά ενός κυκλικού δακτυλίου, το πάχος του οποίου μεγαλώνει σιγά-σιγά. Όταν η απόσταση των δύο πλευρών γίνει τέτοια, ώστε να προκληθεί συντονισμός, οι πλανήτες, αντί να ακολουθούν τις αρχικές, κυκλικές τροχιές τους, αρχίζουν να «ταλαντώνονται» γύρω απ' αυτές με όλο και μεγαλύτερο πλάτος, «παραμορφώνοντας» τον δακτύλιο και πλησιάζοντας κατά διαστήματα αρκετά κοντά ο ένας στον άλλο. Σύντομα, οι δυο τροχιές αρχίζουν να τέμνονται, οπότε οι «πλευρές» του δακτυλίου διαλύονται, όπως

και η γέφυρα του παραδείγματός μας. Αυτή είναι η στιγμή που οι πλανήτες εκσφενδονίζουν μακριά ο ένας τον άλλο.

Και γιατί το σύστημα ηρεμεί τελικά; Ο λόγος είναι ότι, η περιοχή στην οποία εκσφενδονίζονται οι πλανήτες αμέσως μετά την εμφάνιση του συντονισμού είναι ακόμη γεμάτη πλανητοειδείς. Σχηματικά πάλι, οι πλανητοειδείς λειτουργούν σαν ένα είδος «βαρυτικού αμορτισέρ», που «απορροφά» τους «κραδασμούς» των χαοτικών πλανητικών τροχιών. Οι μεγάλοι πλανήτες «θυσιάζουν» τους πλανητοειδείς προκειμένου να «σωθούν» αυτοί, εκτοξεύοντάς τους κατά χιλιάδες προς την περιοχή της Γης (LHB) ή εκτός Ηλιακού Συστήματος. Το Ηλιακό Σύστημα ηρεμεί σταδιακά, με τους γιγάντιους πλανήτες να καταλήγουν στις σημερινές, σχεδόν κυκλικές, τροχιές τους, έχοντας όμως στο μεταξύ προκαλέσει τον σφοδρό βομβαρδισμό των γήινων πλανητών.

Από το 2005 μέχρι σήμερα το μοντέλο της Νίκαιας έχει διερευνηθεί διεξοδικά και είναι πλέον ευρέως αποδεκτό από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Έτσι, η φάση της πλανητικής μετανάστευσης θεωρείται σήμερα ως ένα επί πλέον στάδιο εξέλιξης του Ηλιακού Συστήματος, καθοριστικό μάλιστα για την τελική μορφή του. Επίσης, έχει αποδειχτεί ότι το μοντέλο της Νίκαιας ερμηνεύει πολλά ακόμη παρατηρησιακά δεδομένα, που σχετίζονται με την κατανομή των αστεροειδών στο Ηλιακό Σύστημα, τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των δορυφόρων των γιγάντιων πλανητών κ.ά.. Αντίστοιχες έρευνες έχουν πλέον επεκταθεί και «εκτός Ηλιακού Συστήματος», καθώς οι τροχιές των πλανητών πολλών εξωηλιακών πλανητικών συστημάτων –αυτών των «νέων κόσμων», που ανακαλύπτονται πλέον σε σχεδόν καθημερινή βάση– φαίνεται ότι ερμηνεύονται με την υπόθεση της μετανάστευσης κατά το απώτερο παρελθόν. ○

Διονύσης Π. Σιμόπουλος

Διευθυντής Ευγενιδείου Πλανηταρίου



3ο κεφάλαιο

Ο Ζωντανός Πλανήτης

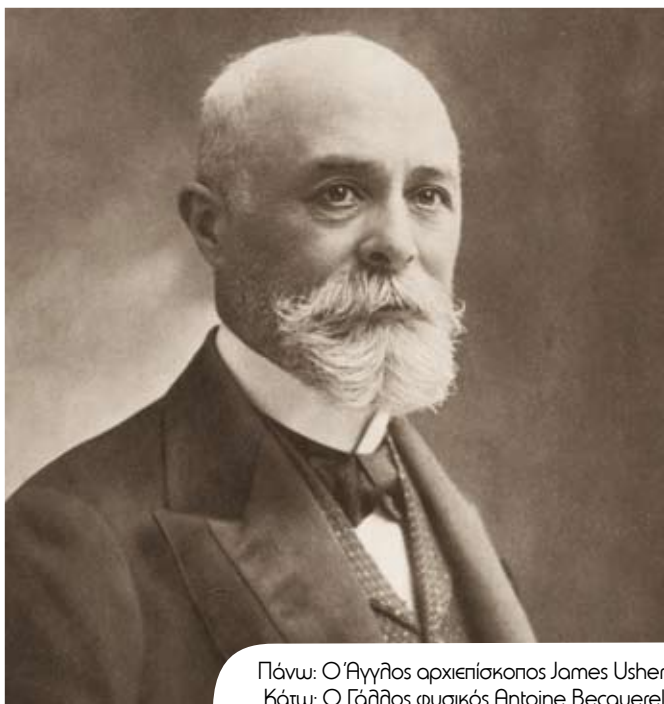
Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει πλέον συνείδηση σε όλους ότι όλα τα άστρα και οτιδήποτε το υλικό είναι φτιαγμένο από τα άτομα των 92 χημικών στοιχείων που βρίσκονται ελεύθερα στη Φύση. Κι όλα αυτά τα άτομα, όλα τα συστατικά της Γης, κάθε βράχος ή πλουλούδι, η φωτιά, το σύννεφο και η θάλασσα, γεννήθηκαν προηγουμένως σε κάποιους άλλους ήλιους, κάποιας άλλης εποχής πριν από δισεκατομμύρια χρόνια. Όπως κι εμείς, άλλωστε. Γιατί κι εμείς δεν είμαστε παρά μέρος της πρωτόγονης εκείνης ύλης που αρχικά δημιουργήθηκε με τη βίαιη γέννηση του Σύμπαντος. Η ύλη που αποτελεί τα σώματά μας «κάηκε» και ανασχηματίστηκε στην καρδιά γιγάντιων κόκκινων άστρων. Ύλη που δημιουργήθηκε από στοιχεία που εκσφενδονίστηκαν στο διαστημικό κενό από εκρήξεις σουπερνόβα. Όλοι μας

δηλαδή είμαστε αστροσκοπή και κάποια μέρα θα ξαναγυρίσουμε στα άστρα. Στο Σύμπαν υπάρχουν ένα τρισεκατομμύριο τρισεκατ. περίπου άστρα. Τόσα άστρα, όσοι είναι και οι κόκκοι της άμμου σ' όλους τους ωκεανούς της Γης. Και παρ' όλα αυτά βρίσκουμε ένα δισεκατομμύριο τρισεκατ. άτομα στην ύλη που περιέχεται μέσα σε μία δαχτυλήθρα. Το Σύμπαν, δηλαδή, δεν είναι παρά μια πραγματική μουσική συμφωνία, της οποίας οι νότες είναι άτομα σε συνδυασμούς απίστευτα πολύπλοκους, αν και βασίζονται σε απλούς φυσικούς νόμους. Όλα όσα συνέβησαν στη Γη, θα μπορούσαν να είχαν συμβεί αμέτρητες φορές στο παρελθόν και να επαναληφθούν και πάλι στο μέλλον μέσα στην απεραντοσύνη του Σύμπαντος. Γιατί οι πλανήτες, τα άστρα, οι γαλαξίες και η ύπαρξη ζωής, δεν είναι παρά παραλλαγές στο ίδιο θέμα.

Από την αρχαιότητα ακόμη πολλοί ήσαν αυτοί που προσπάθησαν να υπολογίσουν με διάφορους τρόπους την ηλικία, καθώς επίσης και την εξέλιξη της Γης. Η οποιαδήποτε όμως προσπάθεια υπολογισμού της ηλικίας του πλανήτη μας βασιζόταν μέχρι πρότινος σε αυθαίρετες υποθέσεις. Τον 17ο αιώνα, για παράδειγμα, ο Αρχιεπίσκοπος της Αγγλίας **James Usher** (1580 –1656) «υπολόγισε» ότι το Σύμπαν δημιουργήθηκε την Κυριακή 23 Οκτωβρίου 4004 π.Χ. και η ανθρωπότητα πέντε ημέρες αργότερα, την Παρασκευή 28 Οκτωβρίου. Μη ρωτάτε πώς έβγαλε αυτό το συμπέρασμα με βάση τα γραπτά της Βίβλου, γιατί πρόκειται πράγματι για μία ολόκληρη ιστορία. Το γεγονός πάντως είναι ότι την ίδια εκείνη εποχή (17ος αιώνας) οι επιστήμονες είχαν αρχίσει ήδη να αντιλαμβάνονται ότι αν οι προσχώσεις των ποταμών έγιναν με τον ίδιο ρυθμό που έδειχναν οι μετρήσεις τους, τότε η δημιουργία τους θα χρειαζόταν πολύ περισσότερες χιλιετίες.

Στη διάρκεια του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα οι μελέτες της γεωλογικής μορφολογίας και πετρολογίας απέκλεισαν τις διάφορες καταστροφολογικές θεωρίες (σεισμοί κ.λπ.) για τη δημιουργία των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του πλανήτη μας, αρχίζοντας έτσι να υποστηρίζουν μία πιο αργή και εξελικτική διαδικασία. Μια διαδικασία που βρήκε τη δικαίωσή της όταν ανακαλύφθηκε η τεχνική του υπολογισμού της ηλικίας των διαφόρων πετρωμάτων. Η τεχνική αυτή βασίστηκε στην ανακάλυψη της ραδιενέργειας, το 1896, από τον Γάλλο φυσικό **Antoine Becquerel** (1852–1908). Ο Becquerel ανακάλυψε ότι ορισμένα ορυκτά έχουν την ιδιότητα να εκπέμπουν «ακτίνες», που αποδείχθηκε ότι είναι ενεργά σωματίδια, τα οποία αποβάλλονται από ασταθή άτομα. Η ιδιότητα αυτή μετατρέπεται σταδιακά το αρχικό άτομο σε ένα διαφορετικό χημικό ισότοπο του ίδιου στοιχείου.

Στις αρχές λοιπόν του 20ού αιώνα ο υπολογισμός της ηλικίας ενός πετρώματος άρχισε να γίνεται με βάση τα διάφορα ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν σ' αυτό. Μ' αυτήν την τεχνική μπορούμε να υπολογίσουμε ποια ήταν η ποσότητα του αρχικού στοιχείου και πόσο απ' αυτό είχε μεταστοιχειωθεί, έτσι ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τελικά και την ηλικία του. Επειδή όμως η Γη είναι γεωλογικά ενεργή, η ανεύρεση πετρωμάτων που ανάγονται στην εποχή της δημιουργίας της είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα πετρώματα αυτά έχουν προ πολλού διαβρωθεί από τις γεωλογικές και κλιματολογικές διεργασίες που υφίστανται στον πλανήτη μας.



Πάνω: Ο Άγγλος αρχιεπίσκοπος James Usher.
Κάτω: Ο Γάλλος φυσικός Antoine Becquerel.

Παρ' όλη αυτά, στον Καναδά βρέθηκαν το 1993 πετρώματα της Γης με ηλικία 3,96 δισεκατομμυρίων ετών, ενώ πιο πρόσφατα ο Τζόνθαν Ο'Νηλ, του Πανεπιστημίου Μαγκίλ, εντόπισε στο Χάντσον Μπέου του Καναδά ακόμη πιο ηλικιωμένα πετρώματα 4,28 δισεκατομμυρίων ετών, τα οποία είχαν σχηματιστεί 18 km κάτω από την τότε επιφάνεια. Το πιο ενδιαφέρον όμως στοιχείο είναι ότι τα αρχαία αυτά πετρώματα είχαν σχηματιστεί όταν η Γη είχε ήδη μία στερεή επιφάνεια, αλλά και ήδη δημιουργημένους ωκεανούς! Όλα αυτά μας υποδεικνύουν ότι η Γη μας πρέπει να έχει ηλικία άνω των 4,3 δισεκατομμυρίων ετών. Και πράγματι οι έρευνες που έγιναν στη Σελήνη και στους άλλους πλανήτες, καθώς και η μελέτη των μετεωριτών και των σεληνιακών πετρωμάτων στα εργαστήρια προσδιορίζουν τη δημιουργία των πλανητών του Ηλιακού μας Συστήματος και της Γης πριν



Τα αρχαιότερα πετρώματα που έχουν εντοπιστεί μέχρι σήμερα βρέθηκαν στο Χάντσον Μπέου του Καναδά.



συμβεί αυτό, η ατμόσφαιρα θα είχε αποβληθεί όπως συνέβη με τον Άρη. Παρ' όλη όμως την ύπαρξη της μαγνητόσφαιρας, ο πλανήτης μας χάνει ακόμη και τώρα 14 τόνους από την ατμόσφαιρά του κάθε ώρα, αλλά η ατμόσφαιρα αυτή είναι τόσο μεγάλη, ώστε θα διατηρηθεί πολύ περισσότερο χρόνο απ' ό,τι η ζωή του Ήλιου.

Περίπου 50 εκατ. χρόνια μετά τον σχηματισμό της Γης, ένας πλανήτης στο μέγεθος του Άρη (το ήμισυ δηλαδή του μεγέθους της Γης) συγκρούστηκε με τον πλανήτη μας με ταχύτητα 10 km/s (36.000 km/h). Η σύγκρουση σχημάτισε έναν δίσκο υλικών γύρω από τη Γη, ο οποίος συμπυκνώθηκε σχηματίζοντας τη Σελήνη σε απόσταση που, αν και υπερβολική, ίσως να μην ξεπερνούσε τα 40.000 km, όταν η σημερινή της μέση απόσταση είναι 385.000 km. Η βαρυτική πάντως δύναμη της Σελήνης σταθεροποίησε τον παραπαίοντα άξονα περιστροφής της Γης δίνοντάς του μία κλίση 23,5 μοιρών που είναι η αιτία των εποχών, θέτοντας έτσι και τις βάσεις για τη δημιουργία της ζωής.

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε τον σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισε η παρουσία της Σελήνης γύρω από τη Γη στη γέννηση και την εξελικτική πορεία της ζωής στον πλανήτη μας. Κι αυτό γιατί απλούστατα η απόσταση της Σελήνης από τη Γη είναι το βασικότερο ίσως στοιχείο στον υπολογισμό των παλιρροιακών δυνάμεων που ασκούνται από τη Σελήνη στον πλανήτη μας, ενώ συγχρόνως οι δυνάμεις αυτές παίζουν σημαντικότερο ρόλο στον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται η Γη για μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της.

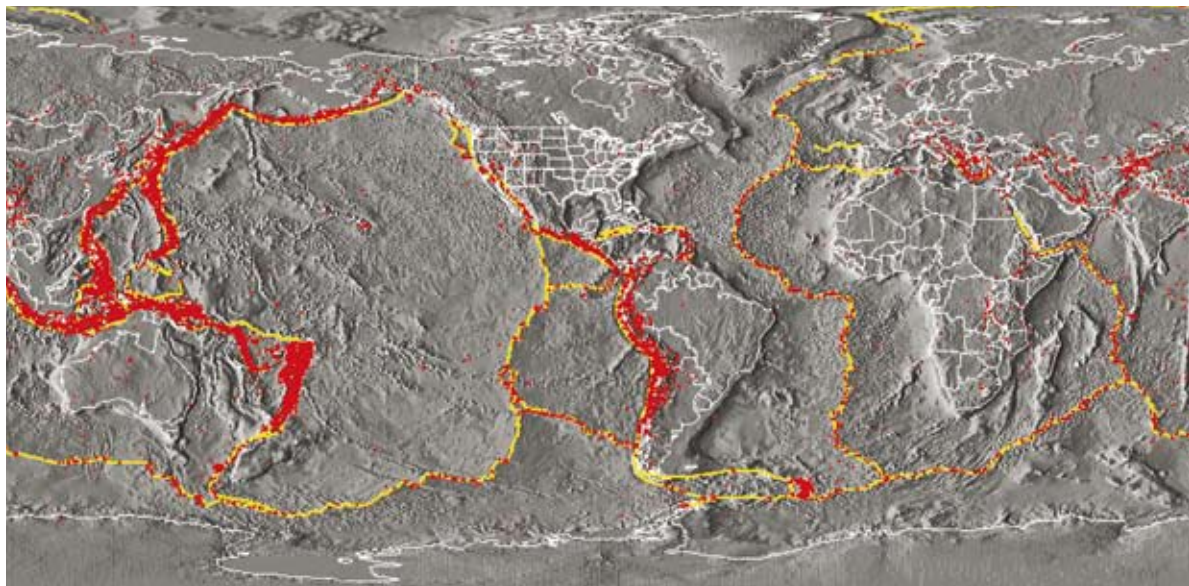
Τα σύγχρονα στοιχεία μάς λένε ότι οι παλιρροιακές δυνάμεις πάνω στα νερά των ωκεανών προκαλούν τριβές που μειώνουν σήμερα την περιστροφή της Γης κατά 0,0016 του δευτερολέπτου κάθε αιώνα. Το ίδιο συνέβαινε και στο παρελθόν, αφού όλα τα στοιχεία που έχουν συγκεντρωθεί μέχρι τώρα μάς πληροφορούν ότι η διάρκεια της ημέρας στο παρελθόν ήταν πολύ πιο μικρή απ' ό,τι σήμερα. Φυσικά δεν είναι αρκετό να βασιστούμε στις παλιρροιακές μόνο τριβές, αλλά θα πρέπει να υπολογίσουμε επίσης και τα διάφορα γεωφυσικά χαρακτηριστικά, όπως είναι οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών και το ύψος της θαλάσσιας στάθμης και κυρίως τα βιολογικά στοιχεία από τις μετρήσεις των αρχαιοβακτηριδίων, των αρχαιοκοραλλιών και άλλων απολιθωμάτων.

Εκείνο πάντως που γνωρίζουμε με βεβαιότητα είναι ότι η μέση απόσταση της Σελήνης από τη Γη συνεχώς μεγαλώνει κατά 3,82 cm κάθε 100 χρόνια, γεγονός που σημαίνει ότι στο παρελθόν η Σελήνη πρέπει να βρισκόταν πολύ πλησιέστερα στη Γη απ' ό,τι είναι σήμερα. Οι διάφορες πηγές αναφέρουν αντικρουόμενες εκτιμήσεις που κυμαίνονται από το 1/2 της σημερινής απόστασης (190.000 km) μέχρι και το 1/10 (38.000 km). Φανταστείτε λοιπόν το μέγεθος των παλιρροιών πάνω στη Γη, όταν η απόσταση της Σελήνης ήταν σ' αυτήν τη μικρότερη απόσταση. Σ' αυτήν την περίπτωση και η πλημμυρίδα και η άμπωτη των παλιρροιών θα διαφοροποιούσαν το ύψος των θαλασσών κατά εκατοντάδες μέτρα μέσα σε μερικές μόλις ώρες!

Φυσικά, η ελάχιστη αυτή απόσταση είναι μάλλον υπερβολική για τον απλούστατο λόγο ότι σ' αυτήν την απόσταση, η Σελήνη θα κινδύνευε να καταστραφεί σε τρισεκατ. κομμάτια σχηματίζοντας έτσι γύρω από τον πλανήτη μας έναν δακτύλιο υλικών παρόμοιο με αυτόν που διαθέτουν οι αέριοι γίγαντες πλανήτες όπως ο Κρόνος. Γιατί απαιτείται μία ελάχιστη απόσταση, στην οποία η Σελήνη μπορεί να είναι ασφαλής και να μην κινδυνεύει απ' τις βαρυτικές δυνάμεις που ασκεί πάνω της η Γη. Η απόσταση αυτή (ανάμεσα στο κέντρο ενός πλανήτη και το κέντρο ενός δορυφόρου) ονομάζεται **Όριο του Ρος**, και στην περίπτωση της Σελήνης είναι τέσσερις φορές το μέγεθος της γήινης ακτίνας. Πράγμα που σημαίνει ότι στην περίπτωση Γης-Σελήνης, το Όριο του Ρος είναι 25.512 km.

Σήμερα πάντως, δεν υπάρχει κανένα στοιχείο που να μας προσδιορίζει την ακριβή απόσταση του φυσικού μας δορυφόρου γύρω απ' τη Γη στο πέρασμα των χιλιετιών, αν και την εποχή της γέννησής της, η περιστροφή της Γης υπολογίζεται ότι ήταν τέσσερις φορές μεγαλύτερη από τη σημερινή, μία δηλαδή περιστροφή κάθε έξι ώρες! Παρ' όλη αυτά, οι διάφοροι υπολογισμοί που έχουν γίνει μέχρι τώρα, και οι οποίοι βασίζονται στις έρευνες των γεωλογικών στρωμάτων, των κοραλλιών και άλλων απολιθωμάτων σε διάφορες περιοχές της Γης και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, μας βοήθησαν στη διαμόρφωση ενός αρκετά ενδιαφέροντος σεναρίου σχετικά με την απόσταση της Σελήνης από τον πλανήτη μας και τη διάρκεια της ημέρας στη Γη στα τελευταία 900 εκατ. χρόνια.

Έτσι, βασισμένοι στις μέχρι σήμερα έρευνες μπορούμε να εκτιμήσουμε αρκετά βάσιμα ότι πριν από 900 περίπου εκατ.



Οι μεγαλύτεροι σεισμοί (κόκκινο) παρατηρούνται στα όρια των τεκτονικών πλακών (κίτρινο), (NOAA).

χρόνια η διάρκεια της ημέρας πρέπει να ήταν 18 περίπου ώρες, οπότε και η διάρκεια του έτους έφτανε τις 487 ημέρες. Για 300 εκατ. χρόνια μετά την περίοδο εκείνη, η περιστροφή της Γης συνεχώς ελαττωνόταν μέχρις ότου, λίγο πριν από τη μεγάλη ανάπτυξη των διαφόρων ειδών ζωής (στη διάρκεια της λεγομένης **Κάμβριας Έκρηξης**, πριν από 545–505 εκατ. χρόνια), η ημέρα είχε φτάσει τις 20,67 ώρες και το έτος είχε τότε διάρκεια 424 ημερών.

Σήμερα, από τη νέα πλεονεκτική θέση που βρισκόμαστε εξαιτίας της διαστημικής εποχής, είδαμε τις ηπείρους σαν κομμάτια ενός τεράστιου ψηφιδωτού και πληροφορίες διαφορετικών επιστημών ήρθαν να προκαλέσουν επανάσταση στη μελέτη της Γης, όπως για παράδειγμα η θεωρία των **τεκτονικών πλακών**. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, ο φλοιός της Γης καταστρέφεται και ξαναδημιουργείται συνεχώς. Είναι η γένεση που ποτέ δεν τελείωσε, ένα πραγματικό εκπληκτικό ταξίδι των ηπείρων. Τα τελευταία 40 χρόνια, αργά αλλά σταθερά, διαπιστώσαμε ότι ολόκληρος ο φλοιός της Γης αποτελείται από μεγάλες στερεές πλατφόρμες, που ονομάσαμε **λιθόσφαιρικές πλάκες**.

Κάθε μία από τις πλάκες αυτές έχει έκταση χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων, αν και το πάχος τους δεν ξεπερνάει τα 80 km μόνο. Σαν μεγάλοι πέτρινοι δίσκοι οι πλάκες αυτές

ταξιδεύουν αργά πάνω στον θερμό ρευστό μανδύα της Γης, με ρυθμό μερικών μόνο χιλιοστών κάθε χρόνο. Αλλού ενώνονται, αλλού τρίβονται, αλλού συγκρούονται και αλλού η μία υπερκαλύπτει την άλλη εξαφανίζοντάς την στα έγκατα της Γης. Όλες αυτές οι κινήσεις συνοδεύονται συγχρόνως από τη συνεχή δημιουργία νέου φλοιού στις κεντρικές ρωγμές που βρίσκονται στα βάθη των ωκεανών.

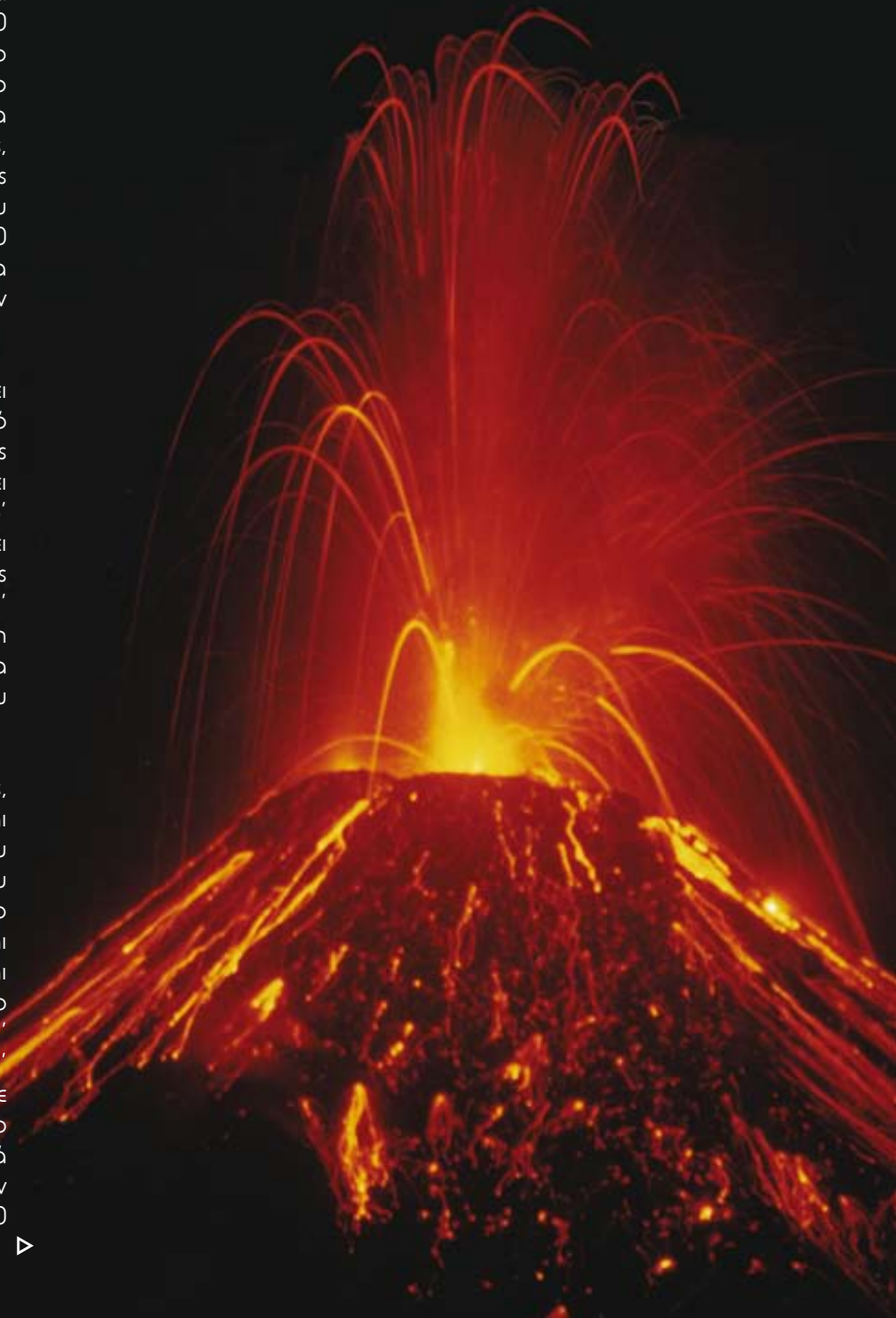
Από τις σχισμές του φλοιού της Γης τα λειωμένα της υλικά άνοιγαν δρόμο προς τα πάνω ξεπηδώντας στην επιφάνεια με τη μορφή ηφαιστίων. Καυτή λάβα και πυκνά αέρια διασκορπίζονταν ολόγυρα αλλιάζοντας το τοπίο συνεχώς. Όμως, 150 εκατ. χρόνια μετά τη γέννησή της, η Γη άρχισε να κρυώνει, αν και η επιφάνειά της ήταν ακόμη καλυμμένη με λίμνες ρευστής λάβας και λάσπη. Πολλές από τις αλλαγές που εμφανίζονται στην επιφάνεια της Γης, ξεκινούν με τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται κάτω από τον φλοιό της. Οι σεισμοί προκαλούν κύματα εκρήξεων. Μελετώντας αυτά τα κύματα και τις κινήσεις τους μέσα στη Γη, έχουμε τη δυνατότητα να καταλάβουμε όλα όσα υπάρχουν κάτω από την επιφάνειά της.

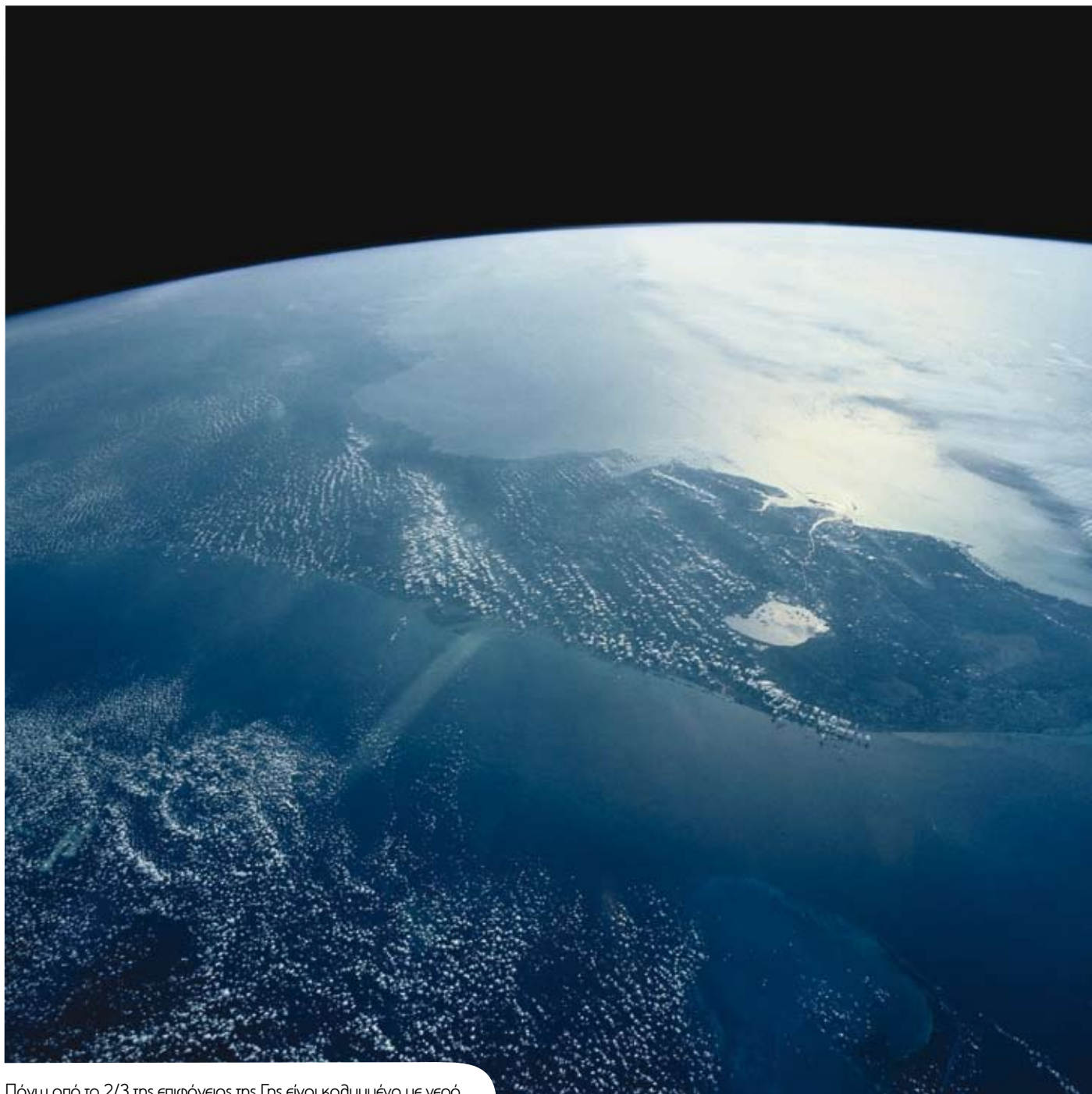
Οι σύγχρονες μελέτες μάς έχουν αποδείξει ότι ο φλοιός είναι το πιο λεπτό στρώμα της Γης, πάνω στο οποίο ζουν

και αναπτύσσονται τα διάφορα είδη ζωής. Κάτω απ' τους ωκεανούς ο φλοιός, που ονομάζεται επίσης και **λιθόσφαιρα**, επεκτείνεται σε μερικά μέρη μόνο έως τα 12 km, ενώ στα ηπειρωτικά το πάχος υπερβαίνει τα 60 km. Το στρώμα αυτό αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου και άλλα πυριτικά άλατα και είναι το πιο κρύο στρώμα του πλανήτη μας. Πάνω στη λιθόσφαιρα βρίσκονται τα ενεργά ηφαιστεία, τα βουνά και οι κοιλάδες, οι εύφορες πεδιάδες και οι αφιλόξενες έρημοι που συνεχώς αλλιάζουν με την πάροδο των χιλιετιών. Τα βουνά του φλοιού, για παράδειγμα, σχηματίστηκαν πριν από 30 – 70 εκατ. χρόνια, ενώ οι έρημοι, ίσως να είναι το αποτέλεσμα της διάβρωσης και της αποσάθρωσης ακόμα πιο παλαιών ορέων που βρίσκονταν σ' εκείνες τις περιοχές.

Κάτω από τη λιθόσφαιρα βρίσκεται ο μανδύας που έχει βάθος 3.000 km περίπου και μεταφέρει τη θερμότητα από τον πυρήνα προς τη βάση του φλοιού. Αποτελείται κυρίως από πυρίτιο, μαγνήσιο και οξυγόνο και ίσως να υπάρχει επίσης και αρκετός σίδηρος, ασβέστιο και αλουμίνιο. Παρ' όλο που είναι συμπαγής, ένα μέρος του μανδύα καταφέρει να κυκλοφορεί αργά. Η κίνηση, για παράδειγμα, μίας πέτρας στον μανδύα είναι 10.000 φορές πιο αργή απ' την κίνηση του λεπτοδείκτη ενός ρολογιού, αλλά κατά τη διάρκεια της ιστορίας της Γης μια πέτρα στον μανδύα θα είχε τον χρόνο να ταξιδέψει με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω και αντίθετα, σαράντα περίπου φορές.

Από τη βάση του μανδύα αρχίζει ο εξωτερικός πυρήνας, μια ρευστή μάζα από λειωμένα πετρώματα που εκτείνεται σε βάθος 3.000–5.000 km και αποτελεί το 30% περίπου της γήινης μάζας. Υπολογίζεται μάλιστα ότι το 90% του στρώματος αυτού είναι λειωμένος σίδηρος, ενώ το υπόλοιπο πρέπει μάλλον να αποτελείται από θείο και οξυγόνο. Το στρώμα αυτό είναι ηλεκτρικά αγωγίμο, και σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης δημιουργεί το μαγνητικό της πεδίο που προστατεύει τον πλανήτη μας απ' τις επικίνδυνες ακτινοβολίες του Ήλιου. Τέλος, κάτω απ' αυτό το στρώμα υπάρχει ο στέρεος πυρήνας της Γης, με διάμετρο 2.500 km περίπου και με βασικό του στοιχείο τον σίδηρο. Το τμήμα αυτό της Γης βρίσκεται σε στερεά μορφή λόγω των μεγάλων πιέσεων και θερμοκρασιών που επικρατούν εκεί και οι οποίες αγγίζουν τους 7.500 – 8.000 °C.





Πάνω από τα 2/3 της επιφάνειας της Γης είναι καλυμμένα με νερό.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο στη δημιουργία της ζωής στη Γη είναι και η ύπαρξη του νερού σε υγρή μορφή. Στη διάρκεια του σχηματισμού του Ηλιακού μας Συστήματος το νερό πάγωσε και υπολογίζεται ότι το 20% φυλακίστηκε με τη μορφή πάγου στους αστεροειδείς και τους κομήτες. Τα χημικά συστατικά του νερού της Γης είναι διαφορετικά από το νερό που βρίσκεται φυλακισμένο στους κομήτες, ενώ μοιάζουν με το νερό των μετεωριτών. Οι τελευταίες, μάλιστα, έρευνες που διεξήχθησαν σε μετεωρίτες στα τέλη της δεκαετίας του '90 εντόπισαν νερό και αμινοξέα (βασικά στοιχεία της ζωής) στο εσωτερικό τους. Γι' αυτό, πολλοί ερευνητές σήμερα εκτιμούν ότι το νερό και τα αμινοξέα, που ήταν βασικά στοιχεία στη μετέπειτα δημιουργία της ζωής στη Γη, προήλθαν από τους αστεροειδείς και τους μετεωρίτες που προσέκρουσαν με τη Γη, όταν όλα αυτά τα αντικείμενα μετακινήθηκαν από τις τροχιές τους από τη βαρυτική δύναμη που εξασκούσε πάνω τους ο μεγαλύτερος πλανήτης του Ηλιακού Συστήματος, ο Δίας.

Στη λασπωμένη επιφάνεια της Γης, που έβραζε από τη θερμότητα που είχε απομείνει, σχηματίστηκαν οι πρώτες λίμνες νερού, πριν από 4,4 δισ. χρόνια. Οι λίμνες αυτές ήταν πλούσιες σε σίδηρο και είχαν ένα πρασινωπό χρώμα. Στη συνέχεια, οι πυκνές ποσότητες ατμού που σκέπαζαν τον πλανήτη μας δημιούργησαν βαριά σύννεφα και οι κατακλυσμιαίες βροχές που έπεσαν συγκεντρώθηκαν σε φυσικές λεκάνες σχηματίζοντας τις πρώτες θάλασσες μέσα σ' ένα τοπίο που το μαστίγωναν συνεχώς οι αστραπές. Σ' αυτό το τοπίο ήταν που εμφανίστηκε για πρώτη φορά το θαύμα της δημιουργίας: η ζωή.

Πάνω από τα 2/3 της επιφάνειας της Γης είναι σήμερα καλυμμένα με νερό, που επιτρέπει την ύπαρξη κάθε είδους ζωής. Η διατήρηση όμως της ζωής απαιτεί τη «συνεργασία» της Γης και των πηλασμάτων της. Όταν αυτή η «συνεργασία» πετύχει, τότε η ζωή θριαμβεύει. Η Γη δηλαδή συντηρεί τη ζωή προσφέροντάς μας τροφή, νερό, στέγη και προκλήσεις που την παρακινούν στην προσπάθειά της να επιβιώσει. Για να μπορέσει όμως το νερό να συντηρήσει επιτυχώς τη ζωή στον πλανήτη μας, θα πρέπει να μετακινείται από μέρος σε μέρος. Αυτή η μετακίνηση ονομάζεται **κύκλος του νερού**.

Όλοι φυσικά γνωρίζουμε ότι η πιο γνωστή μορφή του νερού είναι η υγρή, που έχει αποδειχθεί και η πιο χρήσιμη για τη ζωή. Όταν το νερό θερμαίνεται, μετατρέπεται σε αέριο που ονομάζεται **υδρατμός**, ενώ όταν το νερό ψύχεται κάτω από μια



Σαχάρα: η μεγαλύτερη έρημος του κόσμου.

συγκεκριμένη θερμοκρασία, μετατρέπεται σε **στερεό πάγο**. Ως υγρό στους ωκεανούς, στις λίμνες και στα ποτάμια, το νερό θερμαίνεται από τον Ήλιο και μετατρέπεται σε υδρατμούς με μία διαδικασία που ονομάζεται **εξάτμιση**. Οι υδρατμοί ανεβαίνουν στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι θερμοκρασίες είναι πιο χαμηλές. Εκεί οι υδρατμοί ψύχονται και αρχίζουν να συμπυκνώνονται και πάλι σε υγρό, σχηματίζοντας μικρά σταγονίδια που συγκροτούν τα σύννεφα. Όταν τα σταγονίδια αυτά ενώνονται μεταξύ τους, βαραίνουν και πέφτουν στη Γη με τη μορφή βροχής, ενώ όταν οι θερμοκρασίες είναι αρκετά χαμηλές, οι σταγόνες παγώνουν και γίνονται νιφάδες πάγου δημιουργώντας έτσι το χιόνι.

Το νερό σε ποικίλες ποσότητες μεταφέρεται μέσω του κύκλου του νερού σε όλες τις γήινες τοποθεσίες. Το πόσο νερό δέχεται κάθε περιοχή καθορίζει και τον τύπο του κλίματος και της ζωής που υπάρχει εκεί. Στα τροπικά δάση, οι ζεστές βροχές τρέφουν ολόκληρα συστήματα φυτών και ζώων. Η σκιά των φύλλων σκιάζει το έδαφος, το οποίο δεν βλέπει ποτέ το φως του Ήλιου, ενώ οι σταθερές καιρικές συνθήκες επιτρέπουν μία τεράστια ποικιλία ζωής να επιζήσει για πολλές γενεές. Στις ψυχρές όμως συνθήκες των πολικών κλιμάτων, οι ποσότητες της βροχής και του χιονιού που πέφτουν από τον ουρανό είναι ελάχιστες. Ο πάγος όμως παραμένει στο έδαφος καθόλη τη διάρκεια του χρόνου και προσφέρει νερό σε πολλά πλάσματα που ζουν εκεί.



Τροπικό δάσος.

Αντίθετα, τα ξηρά κλίματα των ερήμων φαίνεται να μην μπορούν να διατηρήσουν τη ζωή. Παρ' όλ' αυτά, μερικά ζώα και φυτά έχουν μάθει να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το ελάχιστο, έστω, νερό που υπάρχει. Πολλά φυτά και ζώα σ' αυτό το κλίμα αποθηκεύουν νερό μέσα τους, ούτως ώστε να προστατευθούν από τους ξηρούς ανέμους, ενώ βρίσκουν καταφύγιο από τον Ήλιο με το να τρυπώνουν κάτω από την άμμο ή τους βράχους. Γι' αυτό άλληλωςτε τα ήπια κλίματα, με τις πολλές βροχοπτώσεις και τη μεγάλη ηλιοφάνεια, αποτελούν την αγαπημένη κατοικία των ανθρώπων. Οι παραθαλάσσιες περιοχές μάλιστα είναι και οι πιο πυκνοκατοικημένες, αφού εκεί οι φυσικοί πόροι είναι πιο πολλοί και η ναυτιλία συνεισφέρει στη διακίνηση αγαθών.

Η Γη είναι ο μοναδικός πλανήτης του Ηλιακού Συστήματος, στον οποίο το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, ως ένα στοιχείο απαραίτητο για την ύπαρξη της ζωής, καθώς την υποβοηθάει και μ' έναν ακόμη τρόπο. Γιατί η θερμική χωρητικότητα των ωκεανών βοηθάει στη σταθεροποίηση της θερμοκρασιακής ισορροπίας στον πλανήτη μας. Δεν πρέπει άλληλωςτε να ξεχνάμε ότι η Γη δεν είναι μόνο κατοικία των ανθρώπων, αλλά και δισεκατομμυρίων άλλων ειδών ζωής. Εάν δράσουμε με βάση αυτήν τη γνώση, θα εγγυηθούμε την επιβίωση και τη συνύπαρξη πολλών πλάσμάτων. Θα πρέπει φυσικά να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο, με τον οποίο λειτουργεί η Γη, και την αλληλεπίδραση του ανθρώπου, του περιβάλλοντος και των άλλων ειδών ζωής πάνω στο «διαστημόπλοιο» που μας μεταφέρει στο αέριο ταξίδι μας στο διαστημικό κενό.

Την επιφάνεια της Γης περιβάλλει η ατμόσφαιρά της, η οποία διαχωρίζεται κι αυτή σε στρώματα. Το στρώμα που βρίσκεται πιο κοντά στη Γη ονομάζεται **τροπόσφαιρα**. Έχει ύψος 15 km περίπου, και τα περισσότερα καιρικά φαινόμενα παρουσιάζονται σ' αυτό το στρώμα. Αποτελείται κυρίως από οξυγόνο (21%) και άζωτο (77%) με ίχνη αργού, διοξειδίου του άνθρακα και νερού. Είναι μάλλον πιθανόν ότι η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα ήταν μεγαλύτερη τη στιγμή της δημιουργίας της Γης, σήμερα όμως έχει ενσωματωθεί σε ανθρακοφόρους βράχους ή έχει διαλυθεί στους ωκεανούς, ενώ αρκετές άλλες ποσότητες καταναλώθηκαν από τους ζωντανούς οργανισμούς.

Αμέσως πάνω από την τροπόσφαιρα βρίσκεται η **στρατόσφαιρα**. Το στρώμα αυτό επεκτείνεται σε ύψος 45 km περίπου και εκεί



Πολικό σέλιος.

εμφανίζονται πανίσχυροι άνεμοι, που κινούνται σε οριζόντια κατεύθυνση και ελέγχουν τα συστήματα των καταιγίδων. Η στρατόσφαιρα περιέχει επίσης το **στρώμα του όζοντος**, το λεπτό στρώμα αερίων το οποίο απορροφά τις επικίνδυνες υπεριώδεις ακτινοβολίες του Ήλιου, ενώ η θερμοκρασία που επικρατεί κυμαίνεται από -52°C έως -3°C .

Μετά ακολουθεί η **μεσόσφαιρα**, στην οποία βρίσκουμε μεμονωμένα μόνον άτομα και μόρια και η οποία εκτείνεται μέχρι τα 80 km περίπου. Πολλά από τα ορατά μετέωρα «καίγονται» σ' αυτό το στρώμα, του οποίου η θερμοκρασία κυμαίνεται από -3°C έως -93°C . Από τα 80 έως τα 600 km βρίσκεται η **θερμόσφαιρα**, της οποίας η θερμοκρασία αυξάνει βαθμιαία και φτάνει τους 500–1.700 $^{\circ}\text{C}$. Οι μεγάλες αυτές θερμοκρασίες είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία προκαλεί ιονισμό των ατόμων και διάφορες άλλες χημικές αντιδράσεις. Τέλος, το απώτερο στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας είναι η **εξώσφαιρα** που εκτείνεται πέρα από τα 600 km και αποτελείται από αέρια εξωγήινης προέλευσης.

Ο άξονας του μαγνητικού πεδίου της Γης που ενώνει τους δύο πόλους της έχει μια κλίση ως προς τον άξονα περιστροφής της που φτάνει τις 12 περίπου μοίρες και επί πλείον δεν περνάει μέσα από το κέντρο της. Πηγή του μαγνητικού αυτού πεδίου είναι ο μεταλλικός πυρήνας της Γης, ο οποίος όπως είπαμε βρίσκεται σε ημίρρευση κατάσταση και είναι ηλεκτρικά αγωγίμος. Ο ρευστός αυτός πυρήνας παράγει ηλεκτρισμό, ο οποίος με τη σειρά του δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο. Έτσι, η μαγνητόσφαιρα της Γης λειτουργεί και ως ασπίδα της ενάντια

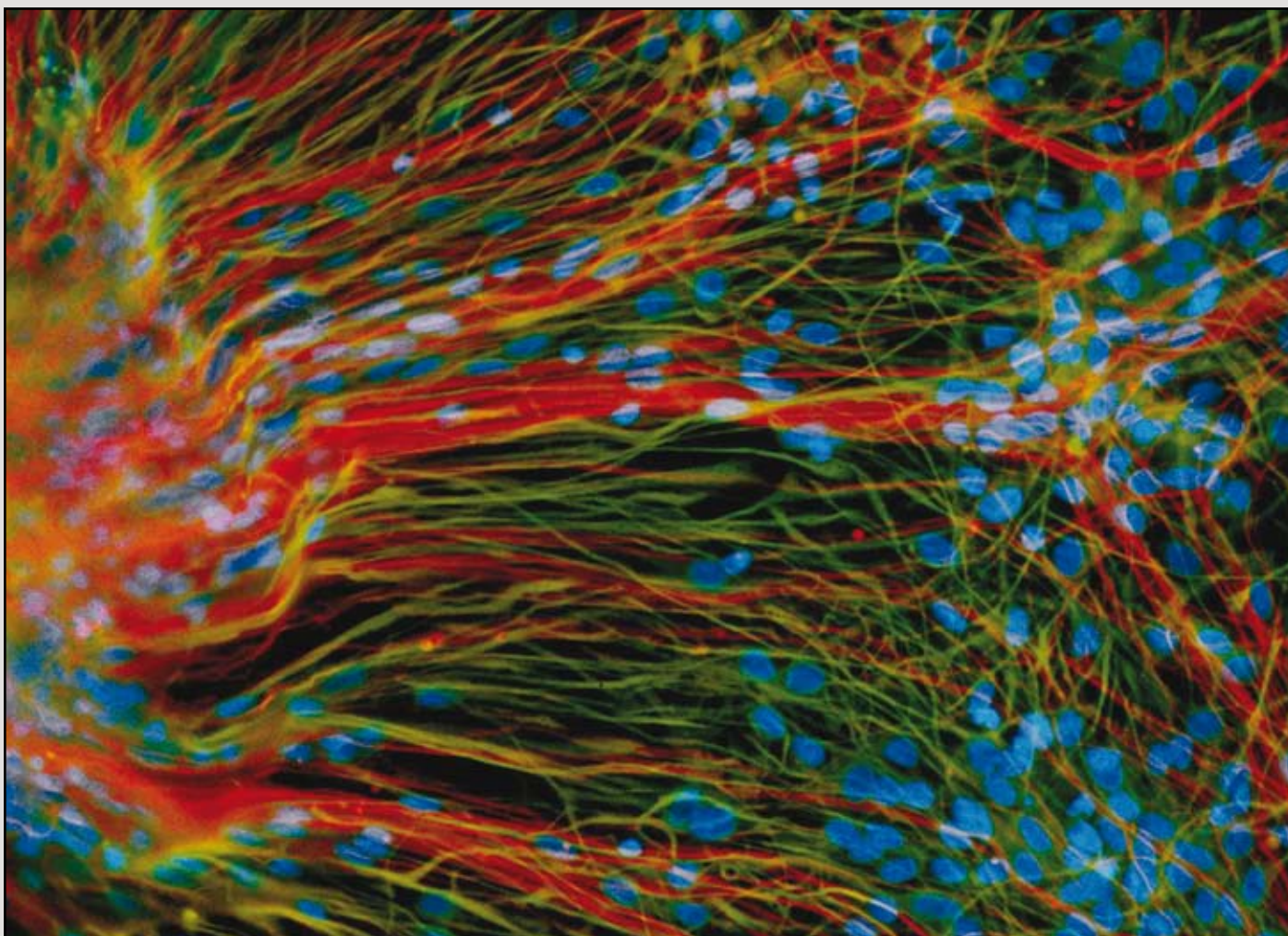
στον ηλιακό άνεμο, που αποτελείται από μία ροή σωματιδίων που εκτοξεύει ο Ήλιος.

Μ' αυτόν τον τρόπο, το γήινο μαγνητικό πεδίο στην ηλιόλουστη πλευρά συμπιέζεται, ενώ στη νυχτερινή πλευρά δημιουργεί μια μακριά μαγνητική ουρά αρκετών γήινων ακτίνων. Γύρω από τη Γη και σε σχήμα κουλούρας βρέθηκαν δύο ζώνες, οι επονομαζόμενες **ζώνες Βαν-Άλνεν**, από πρωτόνια και νετρόνια παγιδευμένα από το μαγνητικό της πεδίο. Η σύγκρουση των σωματιδίων αυτών, που βρίσκονται στη γήινη μαγνητόσφαιρα, με τα σωματίδια που αποτελούν τον ηλιακό άνεμο, δημιουργεί πάνω από τους πόλους της Γης το φαινόμενο του **βόρειου** και του **νότιου Σέλαος**.

Σ' αυτό, λοιπόν, το υπέροχο σύστημα προστασίας από τους κινδύνους που ελλοχεύουν στο Διάστημα ζουν και αναπτύσσονται τα χιλιάδες είδη ζωής του πλανήτη μας. Αλλά και εμείς οι ίδιοι που έχουμε ήδη κατορθώσει να ξεφύγουμε από τα δεσμά της επιφάνειάς του, και με τα διερευνητικά μας διαστημόπλοια μπορούμε σήμερα να εξετάζουμε από κοντά τα υπόλοιπα παιδιά του Ήλιου: τους αέριους γίγαντες και τους βιολογικοκρομένους από κρατήρες δορυφόρους, τις παγωμένες ή και φλεγόμενες ατμόσφαιρες αμμωνίας και διοξειδίου του άνθρακα και τους δεκάδες άλλους, διαφορετικούς μεταξύ τους, κόσμους. Παρ' όλ' αυτά, κανένας απ' αυτούς τους παράξενους, και κατά κάποιον τρόπο γοητευτικούς κόσμους, δεν είναι αρκετά φιλόξενος για τη δημιουργία και τη συντήρηση του θαυμαστού οικοδομήματος της ζωής. Ίσως κάπου αλλού, στη γειτονιά ενός άλλου άστρου, υπάρξει κάποτε και κάποιος άλλος πλανήτης, πιο φιλόξενος και στη ζωή και σ' εμάς.

Βασιλεία-Ισμήνη Αλεξάκη

Διδάκτορας Βιολογίας



4ο κεφάλαιο

Βιομόρια: Τα μόρια της Ζωής

Από πολύ νωρίς ο άνθρωπος έθεσε το ερώτημα της γένεσης της ζωής. Θεωρίες προς απάντηση αυτού του ερωτήματος αναπτύχθηκαν στις διάφορες φιλοσοφίες, θρησκείες και μυθολογίες ανά τον κόσμο. Οι πρώτες προσπάθειες εξήγησης της εμφάνισης της ζωής και τα πρώτα σπέρματα της ιδέας της εξέλιξης συναντώνται στον αρχαίο ελληνικό πολιτισμό. Αν και οι απόψεις των αρχαίων Ελλήνων φιλοσόφων δεν διαθέτουν επιστημονική εγκυρότητα, αποτελούν αξιοσημείωτο δείγμα μίας σοβαρής προσπάθειας εξήγησης φαινομένων, βασισμένης σε παρατηρήσεις του φυσικού κόσμου και σε λογικά συμπεράσματα. Πρώτος ο **Θαλής ο Μιλήσιος** (6ος π.Χ. αιώνας) προσπάθησε να αναπτύξει μία επιστημονική εξήγηση των φυσικών φαινομένων, υποστηρίζοντας ότι η αρχή του κόσμου και της ζωής είναι το νερό. Ο **Αναξίμανδρος** (611–547 π.Χ.) πίστευε ότι όλες οι μορφές ζωής εμφανίζονται αβιογενετικά και θεωρείται ο πρόδρομος της θεωρίας της **αυτόματης γένεσης**. Ο **Ξενοφάνης** (570–480 π.Χ.) υποστήριζε ότι τα

απολιθώματα είναι λείψανα προγενέστερων οργανισμών, ενώ ο **Εμπεδοκλής** (495–435 π.Χ.) πρότεινε ότι η ζωή είναι το αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ δύο κοσμικών ανταγωνιστικών δυνάμεων, της Φιλότητας, που αποσκοπεί στην ένωση της ύλης, και του Νείκους, που αποσκοπεί στον διχασμό. Επί πλέον υποστήριζε ότι ο άνθρωπος δημιουργήθηκε από λάσπη και νερό, κάτι το οποίο βέβαια παρουσιάζει αξιοπρόσεκτη ομοιότητα με τη χριστιανική θεωρία της Γένεσης. Οι ιδέες ωστόσο του Αναξίμανδρου και του Εμπεδοκλή γρήγορα επισκιάστηκαν από την Πλατωνική και την Αριστοτελική φιλοσοφία, που περιείχαν στοιχεία συμβατά με τη νεοεμφανιζόμενη τότε χριστιανική θρησκεία, η οποία και τα οικειοποιήθηκε, όπως η θεώρηση της μη μεταβλητότητας των οργανισμών και η Αριστοτελική κλίμακα ιεράρχησης των όντων από τα κατώτερα στα ανώτερα. Επί πλέον ο Αριστοτέλης απέδιδε την εμφάνιση των έμβιων όντων στην **αυτόματη γένεση**, μια λανθασμένη θεωρία, που όμως κυριάρχησε στην επιστημονική σκέψη μέχρι πρόσφατα.



Για τους επόμενους είκοσι περίπου αιώνες κυριαρχούσε στον δυτικό κόσμο η βιβλική ερμηνεία της προέλευσης των έμβιων οργανισμών, που δεχόταν τη δημιουργία του κόσμου και των όντων από μία υπέρτατη δύναμη. Από τους πρώτους που τόλμησαν να αμφισβητήσουν την εκ του μηδενός

δημιουργία των οργανισμών και να διατυπώσουν την έννοια της εξέλιξης της ζωής ήταν ο **Jean-Baptiste Lamarck** (1744–1829), ο **Έρασμος Δαρβίνος** (1731–1802) και ο **Κάρολος Δαρβίνος** (1809–1882), ο οποίος έθεσε με τις μελέτες του τις βάσεις για τη θεωρία της εξέλιξης μέσω της φυσικής επιλογής. Σήμερα η θεωρία της βιολογικής εξέλιξης, όπως εμπεριεχόταν και εξελίχθηκε στα 150 και πλέον χρόνια μετά την πρώτη της δημοσίευση, με τις μελέτες του **Gregor Mendel** (1822–1884), την ανάπτυξη της Γενετικής και τις ανακαλύψεις της μοριακής βιολογίας, είναι μία από τις εγκυρότερες επιστημονικές θεωρίες που έχουν διατυπωθεί ποτέ. Παρ' όλη αυτά, η αρχή της ζωής δεν έχει ακόμη αποκρυπτογραφηθεί και πολλά ερωτήματα εξακολουθούν να μένουν ακόμη αναπάντητα.

Πριν επιχειρήσουμε, όμως, να δώσουμε απαντήσεις στο ερώτημα της δημιουργίας της ζωής, πρέπει να προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τι είναι η ζωή και να εντοπίσουμε τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τη ζωντανή ύλη. Πολλοί φιλόσοφοι και επιστήμονες έχουν προσπαθήσει να ορίσουν τη ζωή. Παρά τις πολλαπλές προσπάθειες, όμως, μέχρι σήμερα δεν έχει δοθεί ένας σαφής ορισμός. Από την άλλη, ίσως και να είναι λάθος να προσπαθήσουμε να περιορίσουμε την έννοια της ζωής σ' έναν ορισμό. Είναι βεβαίως αποδεκτό ότι η έννοια της ζωής, όπως εξελίχθηκε στη Γη τουλάχιστον, είναι συνυφασμένη με το κύτταρο. Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί αποτελούνται από ένα (μονοκύτταροι οργανισμοί) ή πολλά κύτταρα (πολυκύτταροι οργανισμοί). Εξωκυτάρια ζωή στον πλανήτη

μας, τουλάχιστον ως σήμερα, δεν έχει ανακαλυφθεί. Η αρχή ότι όλοι οι οργανισμοί είναι ή αποτελούνται από κύτταρα αποτελεί μία από τις βασικές αρχές της επιστήμης της Βιολογίας, την **Κυτταρική Θεωρία**. Όμως, ποιες ιδιότητες καθιστούν μια οντότητα ζωντανή;

Σύμφωνα με τον μεγάλο Γερμανό φυσικοχημικό **Manfred Eigen** (1927–), η ζωή είναι μια δυναμική κατάσταση της ύλης, που είναι οργανωμένη με πληροφωρία. Αυτός ο ορισμός βέβαια θα μπορούσε να περιγράψει και μη ζωντανά συστήματα, για παράδειγμα κρυστάλλους, οι οποίοι μπορούν να αυξηθούν σε μέγεθος και να παράγουν νέους, χρησιμοποιώντας ως πληροφωρία (καλούπι) την τρισδιάστατη δομή του αρχικού κρυστάλλου. Σύμφωνα με μια άλλη άποψη, η ζωή είναι ένα αυτοσυντηρούμενο χημικό σύστημα, ικανό να υφίσταται δαρβίνεια εξέλιξη. Βάσει όμως αυτού του ορισμού, στείροι οργανισμοί (π.χ. το μολύβι), που δεν μπορούν να εξελιχθούν μέσω αναπαραγωγής, δεν θα θεωρούνταν ζωντανοί. Τέλος, σύμφωνα με μία τρίτη άποψη, η προϋπόθεση που ορίζει τη ζωή είναι η έλλειψη θερμοδυναμικής ισορροπίας. Από τη Θερμοδυναμική γνωρίζουμε ότι ένα σύστημα σε ισορροπία είναι ένα νεκρό σύστημα, διότι ούτε προσλαμβάνει ούτε παράγει ενέργεια. Σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, η **εντροπία** (δηλ. η **αταξία**) ενός συστήματος τείνει πάντοτε να αυξάνεται. Θα λέγαμε δηλαδή ότι η ζωή, ως ένα δυναμικό σύστημα σε τάξη, αντιβαίνει σε αυτό το αξίωμα.

Σήμερα δεχόμαστε ότι η ζωή πρέπει να χαρακτηρίζεται από τις εξής ιδιότητες:

- 1) Αυτόνομη δομική και λειτουργική οργάνωση.
- 2) Μεταβολισμό, δηλαδή δυνατότητα επεξεργασίας της τροφής, για άντληση ενέργειας και σύνθεση ουσιών.
- 3) Δυνατότητα αναπαραγωγής (με εξαίρεση τους στείρους οργανισμούς).
- 4) Απόκριση σε ερεθίσματα του περιβάλλοντος και
- 5) εξέλιξη μέσω φυσικής επιλογής.

Βέβαια, ορισμένες από τις ιδιότητες αυτές συναντώνται και σε μη ζωντανούς οργανισμούς. Αναφέρθηκε παραπάνω το



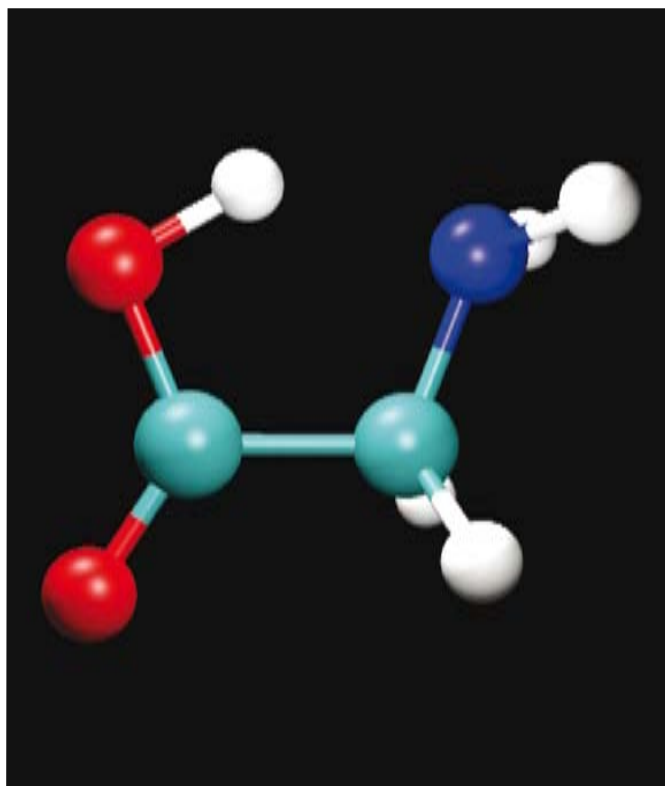
Αριστερά: Ο Jean-Baptiste Lamarck, ένας από τους πρώτους που διατύπωσαν την έννοια της εξέλιξης των έμβιων οργανισμών. Δεξιά: Χάρη στους δεσμούς υδρογόνου, ο πάγος έχει μικρότερη πυκνότητα από το νερό, γι' αυτό και επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας.

παράδειγμα των κρυστάλλων, που μεταφέρουν πληροφωρία κωδικοποιημένη στην τρισδιάστατη δομή τους στους νεοδημιουργηθέντες κρυστάλλους. Παράδειγμα μεταβολισμού από ανόργανη ουσία αποτελεί η διάσπαση του υπεροξειδίου του υδρογόνου σε νερό και μοριακό οξυγόνο στην επιφάνεια σπογγώδους πλάτινας, ενώ παράδειγμα απόκρισης σε ερέθισμα αποτελεί η έκρηξη της δυναμίτιδας από σπίθα. Όμως η ζωή δεν πληροί κάποια, αλλά όλα τα παραπάνω κριτήρια.

Το νερό είναι, επίσης, απολύτως απαραίτητο για την ύπαρξη της ζωής, τουλάχιστον όπως τη γνωρίζουμε στη Γη. Πώς εξηγείται όμως η τόσο μεγάλη σημασία του νερού; Αρχικά, το νερό είναι εξαιρετικός διαλύτης για τα μόρια που έχουν ηλεκτρικό φορτίο, θετικό (π.χ. πρωτεΐνες) ή αρνητικό (π.χ. DNA, RNA, πρωτεΐνες). Η ύπαρξη της ζωής εξαρτάται απ' αυτήν την ιδιότητα του νερού να διαλύει ένα σύνολο μορίων που χρησιμεύουν στους οργανισμούς ως καύσιμα, δομικά μόρια, καταλύτες και φορείς πληροφοριών. Αντιθέτως, στο νερό είναι αδιάλυτα τα λιπόφιλα

ή αλλιώως υδρόφοβα μόρια, όπως είναι τα λιπίδια. Έτσι, όπως βλέπουμε και μακροσκοπικά να συμβαίνει σε σταγόνες λαδιού στην επιφάνεια νερού, σε μικροσκοπικό επίπεδο τα υδρόφοβα μόρια «συγκεντρώνονται» το ένα δίπλα στο άλλο, φαινόμενο που αποτελεί την κύρια δύναμη του σχηματισμού μεμβρανών, οι οποίες, όπως θα δούμε στη συνέχεια, είναι απαραίτητες για την εμφάνιση της ζωής.

Εκτός αυτού, το νερό έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα, τείνει δηλαδή να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ύπαρξη υδατινών, αλλά και χερσαίων οικοσυστημάτων. Επί πλέον, στους δεσμούς υδρογόνου οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πάγου, ο οποίος ως εκ τούτου έχει μεγαλύτερο όγκο και μικρότερη πυκνότητα από το υγρό νερό. Έτσι ο πάγος επιπλέει στην επιφάνεια του νερού, αφήνοντας τη δυνατότητα στους υδρόβιους οργανισμούς να ζουν κάτω απ' το στρώμα πάγου σε παγωμένες λίμνες και θάλασσες. Τέλος, το νερό έχει υψηλή ▶



Πάνω: Η σαύρα του Ιησού.
Κάτω: Η δομή του αμινοξέος γλυκίνη.
Δεξιά: Το DNA, προκειμένου να χωρέσει στον πυρήνα του κυττάρου, «πακετάρεται» σε υπερδομές.

επιφανειακή τάση, η οποία είναι η αιτία του σχηματισμού των σταγόνων της βροχής, αλλά και η οποία επιτρέπει σε κάποιους οργανισμούς να περπατούν κυριολεκτικά πάνω στην επιφάνειά του (π.χ. σαύρα του Ιησού).

Όλα τα κύτταρα αλλά, αλλά και οι ιοί, αποτελούνται από τέσσερις κατηγορίες βιολογικών πολυμερών, δηλαδή μεγάλων οργανικών μορίων, που απαρτίζονται από απλούστερους δομικούς λίθους. Τα βιολογικά μακρομόρια είναι οι **πρωτεΐνες**, τα **νουκλεϊκά οξέα** (DNA, RNA), οι **υδατάνθρακες** και τα **λιπίδια**.

Όλες οι βιολογικές διεργασίες βασίζονται στις ποικίλες δράσεις των πρωτεϊνών. Οι ρόλοι των διαφόρων πρωτεϊνών είναι:

1) Η ενζυμική κατάλυση, δηλαδή η αύξηση της ταχύτητας μιας αντίδρασης κατά εκατ. φορές, έτσι ώστε η αντίδραση να καθίσταται εφικτή.

2) Η μεταφορά και αποθήκευση ιόντων, μετάλλων, ανόργανων μορίων κ.λπ. (π.χ. η αιμοσφαιρίνη μεταφέρει οξυγόνο στους ιστούς).

3) Η κίνηση (π.χ. η μυική σύσπαση οφείλεται στη διολίσθηση πρωτεϊνικών ινών).

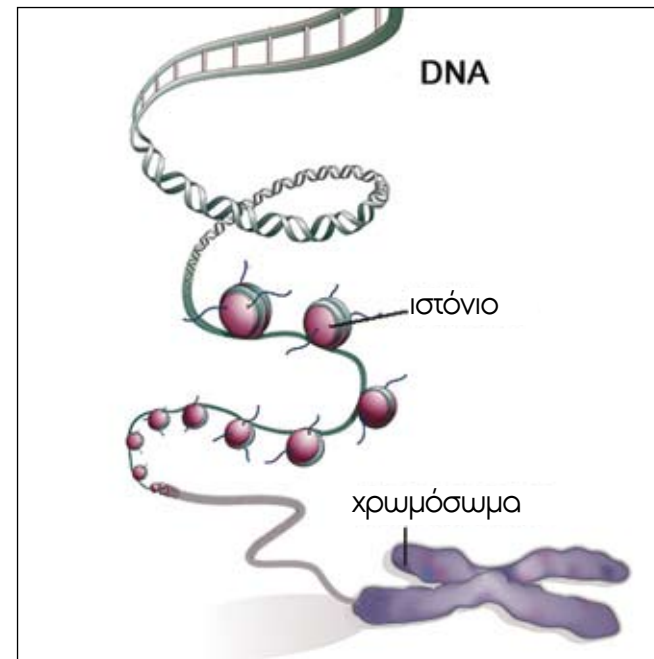
4) Η μηχανική στήριξη (π.χ. τα οστά και το δέρμα αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από μία ινώδη πρωτεΐνη, το κολλαγόνο).

5) Η ανοσολογική δράση (δράση αντισωμάτων).

6) Η δημιουργία και η μεταφορά νευρικών ώσεων και

7) η ρύθμιση της κυτταρικής ανάπτυξης, της κυτταρικής διαφοροποίησης και του κυτταρικού πολλαπλασιασμού.

Οι πρωτεΐνες δομούνται από ένα «ρεπερτόριο» είκοσι αμινοξέων. Κάθε αμινοξύ αποτελείται από ένα κεντρικό άτομο άνθρακα, στο οποίο είναι δεσμευμένα μία αμινομάδα, μία καρβοξυλομάδα, ένα άτομο υδρογόνου και μία χαρακτηριστική πλευρική ομάδα (ομάδα R), ειδική και διαφορετική για κάθε αμινοξύ. Στις πρωτεΐνες συναντούμε είκοσι είδη πλευρικών ομάδων με διαφορετικό μέγεθος, σχήμα, φορτίο και χημική αντιδραστικότητα. Όλες οι πρωτεΐνες σε όλα τα είδη δομούνται



απ' το ίδιο σύνολο των είκοσι αμινοξέων. Αυτό μας οδηγεί στην υπόθεση ότι αυτό το βασικό αλφάβητο των πρωτεϊνών είναι ηλικίας τουλάχιστον 2 δισεκατομμυρίων ετών.

Η σειρά με την οποία ενώνονται τα διάφορα αμινοξέα μεταξύ τους, προκειμένου να σχηματίσουν μια πρωτεΐνη, δηλαδή η αλληλουχία των αμινοξέων, καθορίζει την τρισδιάστατη δομή των πρωτεϊνών, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τη λειτουργία και τον ρόλο των πρωτεϊνών. Η αλληλουχία των αμινοξέων καθορίζεται γενετικά απ' την αλληλουχία των νουκλεοτιδίων των γονιδίων του DNA, του μορίου της κληρονομικότητας.

Το DNA είναι ένα πολύ επίμηκες μόριο, που μοιάζει με νήμα και αποτελείται από μεγάλο αριθμό μικρότερων μονάδων, των δεοξυριβονουκλεοτιδίων. Ένα νουκλεοτίδιο αποτελείται από μια αζωτούχο βάση, ένα σάκχαρο (δεοξυριβόζη) και μια έως τρεις φωσφορικές ομάδες. Η δεοξυριβόζη, διαφέρει απ' τη ριβόζη, το πατρικό της μόριο, που βρίσκεται όπως θα δούμε στη συνέχεια στο RNA, στο ότι είναι πολύ πιο σταθερή ένωση. Οι αζωτούχες βάσεις στο DNA είναι η **αδενίνη** (A) η **γουανίνη** (G), η **θυμίνη** (T) και η **κυτοσίνη** (C). Όπως αποκαλύφθηκε το 1953 από τους **James Watson** (1928–) και **Francis Crick** (1916 – 2004), το DNA έχει **δομή διπλής έλικας**.

Τα φωσφορικά και οι μονάδες δεοξυριβόζης βρίσκονται στο εξωτερικό μέρος της έλικας, ενώ οι αζωτούχες βάσεις στο εσωτερικό. Δεσμοί υδρογόνου μεταξύ ζευγών βάσεων συγκρατούν τις δύο αλυσίδες συνδεδεμένες, βάσει του κανόνα συμπληρωματικότητας: η αδενίνη ζευγαρώνει πάντοτε με τη θυμίνη (A:T) και η γουανίνη με την κυτοσίνη (G:C).

Το DNA αντιγράφεται από ειδικά ένζυμα, τις DNA πολυμεράσες, ενώ η όλη διαδικασία της αντιγραφής ρυθμίζεται από περισσότερες των είκοσι πρωτεϊνών. Η DNA πολυμεράση καταλύει την προσθήκη βήμα προς βήμα μονάδων δεοξυριβονουκλεοτιδίων σε μία αλυσίδα DNA, χρησιμοποιώντας μια άλλη αλυσίδα DNA ως εκμαγείο και πάντοτε βάσει του κανόνα της συμπληρωματικότητας. Το ένζυμο δηλαδή παίρνει οδηγίες από το εκμαγείο και συνθέτει ένα προϊόν με αλληλουχίες βάσεων συμπληρωματικές σε αυτές του προτύπου. Κατ' αυτήν τη διαδικασία, όμως, συμβαίνουν συχνά λάθη. Η DNA πολυμεράση έχει την εντυπωσιακή ιδιότητα να επιδιορθώνει τα τυχόν λάθη, αντικαθιστώντας τα «λάθος» νουκλεοτίδια με τα «σωστά».

Το μήκος του DNA ακόμη και του απλούστερου βακτηρίου είναι εντυπωσιακό. Το μήκος του ανθρώπινου DNA ενός κυττάρου είναι περίπου 2 m, δηλαδή το μήκος του DNA όλων των κυττάρων ενός ανθρώπου είναι 140 φορές μεγαλύτερο από την απόσταση της Γης από τον Ήλιο! Είναι προφανές, λοιπόν, ότι για να χωρέσει το DNA στον πυρήνα του κυττάρου απαιτείται το «πακετάρισμά» του σε υπερδομές. Το DNA «τυλίγεται» γύρω από ειδικές πρωτεΐνες, τις **ιστόνες**, σχηματίζοντας τα **νουκλεοσώματα**. Αυτά με περαιτέρω οργάνωση στον χώρο σχηματίζουν τα **σωληνοειδή**, και με περαιτέρω αναδίπλωση σχηματίζονται τελικά τα **χρωμοσώματα**.

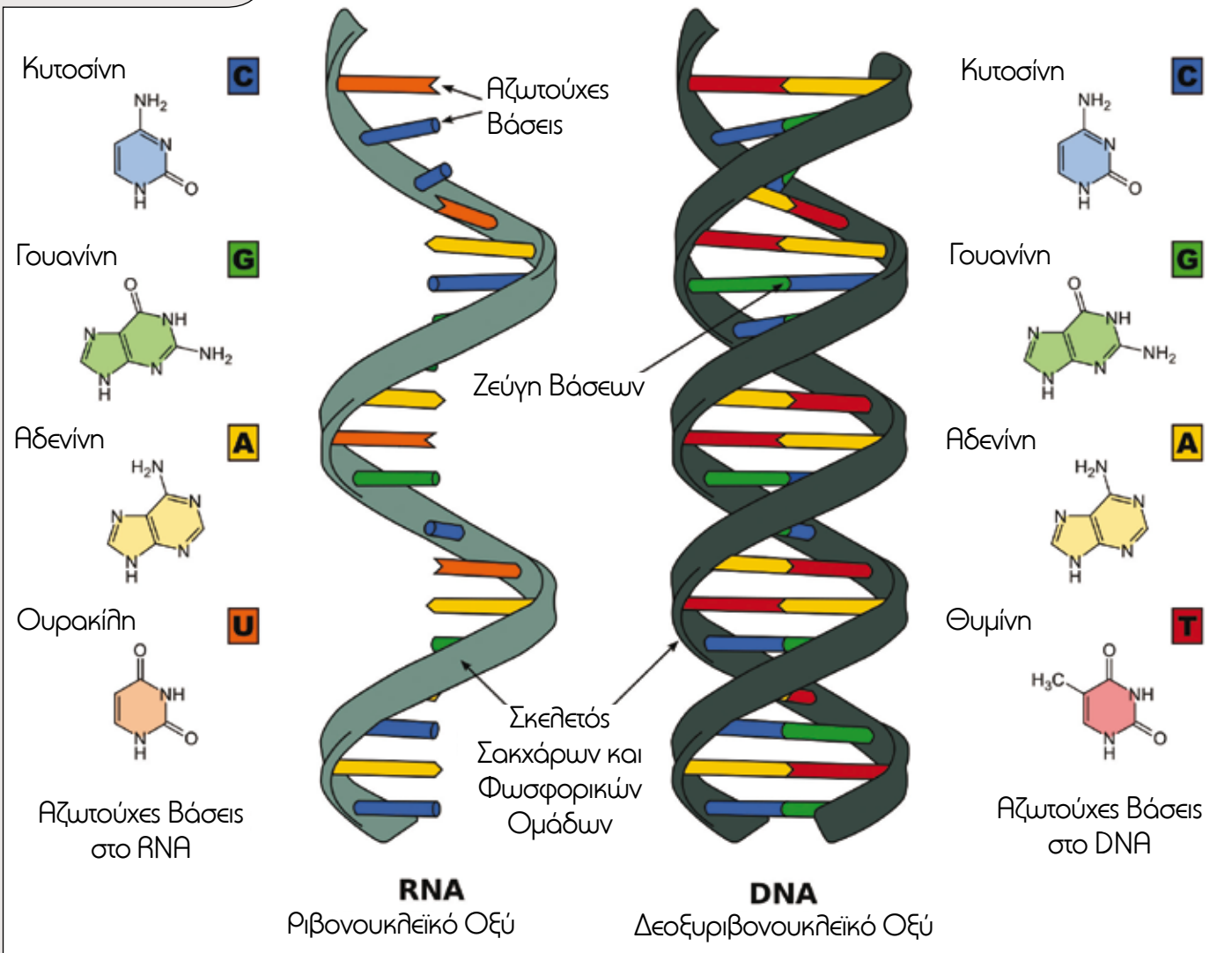
Το RNA, όπως το DNA, είναι ένα πολυμερές χωρίς διακλαδώσεις, που αποτελείται από νουκλεοτίδια ενωμένα μεταξύ τους. Η δομή του RNA, όμως, διαφέρει από αυτήν του DNA σε δύο σημεία: στο ότι το σάκχαρο στο RNA είναι **ριβόζη** και όχι δεοξυριβόζη, και στο ότι η μία από τις τέσσερις αζωτούχες βάσεις του RNA είναι η **ουρακίλη** (U) αντί της θυμίνης (T).

Επειδή η ριβόζη είναι πιο ασταθής ένωση από τη δεοξυριβόζη, αλλά και επειδή το RNA συνήθως (με εξαίρεση κάποιους ιούς) απαντάται ως μονόκλωνο, το RNA είναι πολύ πιο ασταθές μόριο από το DNA.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα νουκλεοτίδια δεν συμμετέχουν μόνο στη δομή του DNA και του RNA, αλλά συναντώνται και ως ελεύθερα νουκλεοτίδια, εκ των οποίων το σημαντικότερο για τον μεταβολισμό του κυττάρου είναι το ATP, ένα ενεργειακά πλούσιο μόριο, που αποτελεί το «νόμισμα» ελεύθερης ενέργειας σε βιολογικά συστήματα. Για παράδειγμα, η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά

την υδρόλυση του ATP χρησιμοποιείται για την προαγωγή αντιδράσεων, όπως τη σύσπαση μυών, και ως εκ τούτου το ATP είναι ο βασικός τρόπος ανταλλαγής ενέργειας στα βιολογικά συστήματα. Στο κύτταρο ένα μόριο ATP αναλώνεται εντός ενός λεπτού περίπου, ενώ ένας άνθρωπος σε ανάπαυση καταναλώνει περίπου 40 kg ATP σε 24 ώρες!

Η δομή του RNA και του DNA.



Τα είδη των πρωτεϊνών που συντίθενται από τα κύτταρα καθορίζονται από τα γονίδια. Το DNA όμως δεν είναι το άμεσο εκμαγείο για την πρωτεϊνοσύνθεση. Τα εκμαγεία για την πρωτεϊνοσύνθεση είναι **ριβονουκλεϊκά οξέα** (RNA) και συγκεκριμένα το **αγγελιοφόρο RNA** (mRNA). Στον μηχανισμό πρωτεϊνοσύνθεσης συμμετέχουν και άλλα μόρια RNA, δηλαδή το **μεταφορικό RNA** (tRNA) και το **ριβοσωμικό RNA** (rRNA). Όλες οι μορφές του κυτταρικού RNA συντίθενται από RNA πολυμεράσες, που λαμβάνουν πληροφορίες από εκμαγεία DNA, σε μια διαδικασία που ονομάζεται **μεταγραφή**.

Ακολουθεί η διαδικασία της **μετάφρασης**, δηλαδή της σύνθεσης πρωτεϊνών σύμφωνα με πληροφορίες που παρέχονται από τα εκμαγεία mRNA. Η ροή των γενετικών πληροφοριών είναι δηλαδή η ακόλουθη (Κεντρικό Δόγμα της Βιολογίας):

DNA → RNA → Πρωτεΐνη

Μεταγραφή Μετάφραση

Η μεταγραφή λαμβάνει χώρα με τη δράση ενός ειδικού ενζύμου, της RNA πολυμεράσης. Η RNA πολυμεράση, χρησιμοποιώντας ως μήτρα DNA και βάσει της αρχής της συμπληρωματικότητας των αζωτούχων βάσεων (η αδενίνη ζευγαρώνει με την ουρακίλη, η γουανίνη με την κυτοσίνη) συνθέτει μία νέα πολυριβονουκλεοτιδική αλυσίδα (RNA), η οποία μόλις σχηματιστεί, απομακρύνεται αυθόρμητα και μεταφέρει την πληροφορία για τη σύνθεση της πρωτεΐνης στα ριβοσώματα. Εκεί λαμβάνει χώρα η μετάφραση, δηλαδή η σύνθεση της πολυπεπτιδικής αλυσίδας απ' την οποία θα αποτελέσει η συντιθέμενη πρωτεΐνη. Η μετάφραση της πολυνουκλεοτιδικής αλυσίδας σε πολυπεπτιδική αλυσίδα βασίζεται στον λεγόμενο **γενετικό κώδικα**, το «λέξικό» δηλαδή που μεταφράζει τη νουκλεοτιδική σε πολυπεπτιδική αλληλουχία (τρία νουκλεοτίδια κωδικοποιούν πάντοτε ένα αμινοξύ).

Το πώς ακριβώς πραγματοποιούνται οι διαδικασίες της μεταγραφής και της μετάφρασης υπερβαίνει τους στόχους αυτής της παρουσίασης. Θα πρέπει εντούτοις να σημειωθεί ότι ο γενετικός κώδικας είναι πανομοιότυπος (συντηρημένος) σε όλους τους οργανισμούς, απ' τους απλούστερους μικροοργανισμούς μέχρι τον άνθρωπο. Σ' αυτό το γεγονός βασίζεται για παράδειγμα και το ότι σήμερα με τις μεθόδους της βιοτεχνολογίας συνθέτουμε

πρωτεΐνες (π.χ. ινσουλίνη) σε βακτήρια. Μοναδικές εξαιρέσεις στην καθολικότητα του γενετικού κώδικα, που έχουν αναγνωριστεί τουλάχιστον έως τώρα, αποτελούν τα μιτοχόνδρια των ευκαρυωτικών κυττάρων, αλλά και τα βλεφαριδωτά πρωτόζωα, που εμφανίζουν κάποιες διαφοροποιήσεις στον κώδικα.

Οι υδατάνθρακες είναι πολυμερή αποτελούμενα από μονάδες σακχάρων με πέντε ή έξι άτομα άνθρακα. Χρησιμεύουν ως αποθήκες ενέργειας, ως καύσιμα και ως μεταβολικά ενδιάμεσα. Επί πλέον συνιστούν δομικά στοιχεία στα κυτταρικά τοιχώματα βακτηρίων και φυτών, καθώς και στον εξωσκελετό των αρθροπόδων. Για παράδειγμα η κυτταρίνη, το κύριο συστατικό των φυτικών κυτταρικών τοιχωμάτων, είναι η πιο άφθονη οργανική ένωση στη βιόσφαιρα. Τέλος, οι υδατάνθρακες είναι ενωμένοι με πολλά λιπίδια και πρωτεΐνες και λειτουργούν σε πολλές περιπτώσεις στην κυτταρική επιφάνεια ως μόρια αναγνώρισης ερεθισμάτων του περιβάλλοντος.

Τα λιπίδια είναι βιομόρια αδιάλυτα στο νερό και συνιστούν το βασικό δομικό στοιχείο των βιολογικών μεμβρανών. Επί πλέον τα λιπίδια αποτελούν καύσιμα και χημική αποθήκη ενέργειας. Τα τρία κύρια είδη λιπιδίων είναι τα **φωσφολιπίδια**, τα **γλυκολιπίδια** και η **χοληστερόλη**. Τα φωσφολιπίδια, ειδικότερα, βρίσκονται σε μεγάλη συγκέντρωση σε όλες τις βιολογικές μεμβράνες, χάρη στις φυσικοχημικές τους ιδιαιτερότητες, οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη μίας **υδρόφοβης ουράς** και μίας **υδρόφιλης κεφαλής**, και που τους επιτρέπουν να δημιουργούν αυθόρμητα μέσα σε υδατικό περιβάλλον μία διπλοστοιβάδα λιπιδίων, στην οποία οι υδρόφιλες κεφαλές διατάσσονται στο εξωτερικό, ενώ οι υδρόφοβες ουρές στο εσωτερικό.

Οι διπλοστοιβάδες λιπιδίων είναι εκ κατασκευής αδιαπέραστες από υδρόφιλα μόρια και μπορούν έτσι να τα «παγιεύσουν» στο υδατικό διαμέρισμα στο εσωτερικό τους, να επιτύχουν δηλαδή την απαραίτητη για τη ζωή **διαμερισματοποίηση**. Οι μεμβράνες του κυττάρου αποτελούνται από διπλοστοιβάδα φωσφολιπιδίων, μέσα στην οποία είναι ενσωματωμένες μεμβρανικές πρωτεΐνες. Αναλόγως με τον τύπο του κυττάρου διαφέρει και η σύσταση των μεμβρανών σε πρωτεΐνες. Οι βιολογικές μεμβράνες δεν είναι άκαμπτες, αλλά τα λιπίδια και οι μεμβρανικές πρωτεΐνες βρίσκονται σε διαρκή πλευρική κίνηση μέσα στο επίπεδο της μεμβράνης, κάτι το οποίο ονομάζεται **μοντέλο του ρευστού μωσαϊκού**, και προτάθηκε από τους **Seymour Singer** και **Garth Nicolson**.

Βασιλεία-Ισμήνη Αλεξάκη

Διδάκτορας Βιολογίας



5ο κεφάλαιο

Τα πρώτα Βήματα της Ζωής

Η ηλικία της Γης υπολογίζεται στα 4,6 δισ. έτη, ενώ οι πρώτες κυτταρικές μορφές ζωής εμφανίστηκαν πριν από περίπου 3,85 δισ. έτη. Μέχρι σήμερα δεν γνωρίζουμε τις διαδικασίες μέσα απ' τις οποίες δημιουργήθηκε η ζωή στον πλανήτη μας, ούτε γνωρίζουμε τις ακριβείς συνθήκες που επικρατούσαν στην αρχέγονη Γη. Ωστόσο έχουν διατυπωθεί αξιόλογες θεωρίες, βασιζόμενες σε ευρήματα εκείνης της περιόδου (γεωλογικά, χημικά, βιολογικά), σε πειράματα, σε λογικές υποθέσεις και σε συμπεράσματα. Η επικρατούσα θεωρία, η οποία αναπτύχθηκε πρώτα από τον Ρώσο **Alexander I. Oparin** (1894 – 1980) το 1924 αλλά, εμπλουτίστηκε στη συνέχεια από άλλους επιστήμονες, όπως τους **John Haldane** (1892–1964) και **John Bernal** (1901–1971), υποστηρίζει τη δημιουργία της ζωής σε μία **Αρχέγονη Σούπα**. Σύμφωνα μ' αυτήν τη θεωρία, η ζωή στη Γη γεννήθηκε σταδιακά από απλές ανόργανες ενώσεις μέσα στους ωκεανούς. Κατ' αρχάς πρέπει να

γνωρίζουμε ότι η αρχέγονη ατμόσφαιρα της Γης δεν είχε τη σύσταση που έχει σήμερα, γιατί στερούνταν οξυγόνου, ήταν δηλαδή ισχυρά αναγωγική. Αυτό οφείλεται στο ότι οι πρωταρχικές υψηλές θερμοκρασίες της Γης δεν επέτρεπαν την ύπαρξη μοριακού οξυγόνου σε ελεύθερη μορφή, γιατί τα μόρια του οξυγόνου αντιδρούσαν με συστατικά του φλοιού της Γης (πυρίτιο, άνθρακα, θείο κ.λπ.), δημιουργώντας οξείδια. Επίσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούσαν, όλο το νερό της Γης βρισκόταν υπό τη μορφή υδρατμών, ο άνθρακας βρισκόταν υπό τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα, ενώ το άζωτο υπό τη μορφή αμμωνίας. Όταν η Γη ψύχθηκε αρκετά, η υπεριώδης ακτινοβολία του Ήλιου προσέφερε την απαραίτητη ενέργεια, ώστε να αντιδράσουν οι υδρατμοί, η αμμωνία, το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα, δημιουργώντας μια μεγάλη ποικιλία από πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως αλκοόλες, αλδεΐδες και οργανικά οξέα.

Με τη σταδιακή ψύξη του πλανήτη μας, η θερμοκρασία έπεσε κάτω από τους 100°C, οπότε οι υδρατμοί συμπυκνώθηκαν και άρχισαν να πέφτουν στη γήινη επιφάνεια ως βροχή, συμπαρασύροντας τις ενώσεις που είχαν δημιουργηθεί κατά τη θερμή περίοδο. Οι αρχαιότερες μέχρι σήμερα ενδείξεις για την παρουσία νερού χρονολογούνται πριν από 4,3 δισ. χρόνια. Μέσα στους πρώτους ωκεανούς οι απλές ανόργανες και οργανικές ενώσεις αντιδρούσαν μεταξύ τους δίδοντας γένεση σε σειρά άλλων οργανικών ενώσεων, π.χ. αμινοξέων, σακχάρων κ.λπ.. Η απαραίτητη για τη διεξαγωγή των αντιδράσεων αυτών ενέργεια προερχόταν από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία –που την εποχή εκείνη ήταν πολύ έντονη λόγω απουσίας του στρώματος όζοντος– την ηλεκτρική ενέργεια αστραπών και κεραυνών, τη θερμική ενέργεια των ηφαιστειακών εκρήξεων, τη ραδιενέργεια απ’ τη διάσπαση ραδιενεργών υλικών του φλοιού της Γης, την ενέργεια των υδροθερμικών πηγών, αλλά και την κοσμική ακτινοβολία.

Η θεωρία της Αρχέγονης Σούπας αποδείχθηκε πειραματικά από τον **Stanley Miller** (1930 – 2007), μεταπτυχιακό φοιτητή του βραβευμένου με Νόμπελ Χημείας (1934) **Harold Urey** (1893–1981). Στο ιδιοφυές του πείραμα ο Miller προσπάθησε να προσομοιώσει τις συνθήκες της αρχέγονης ατμόσφαιρας σ’ ένα κλειστό σύστημα σε κατάλληλη συσκευή. Υπέβαλλε ένα μείγμα αερίων αποτελούμενο από υδρογόνο, μεθάνιο και αμμωνία, σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, ενώ διοχέτευε για αρκετές μέρες υδρατμούς διὰ μέσου του δείγματος. Έτσι διαπίστωσε ότι μεταξύ άλλων δημιουργήθηκε μεγάλη ποικιλία αμινοξέων, ενώ αλληάζοντας τη σχετική αναλογία μεταξύ υδρογόνου, μεθανίου και αμμωνίας παρήγαγε διαφορετικά προϊόντα.

Ακολούθησαν πολλά άλλα πειράματα από άλλους ερευνητές, τα οποία διέφεραν μεταξύ τους ως προς τα συστατικά του αρχικού μείγματος και ως προς το είδος της διοχετευόμενης ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν στο αρχικό μείγμα προστέθηκε υδροκυάνιο, το οποίο σχηματίζεται συχνά σε προβιοτικές συνθήκες, συντέθηκε μεγάλη ποικιλία αμινοξέων, αζωτούχες βάσεις και πορφυρίνες, ενώ όταν προστέθηκε φορμαλδεΰδη, σχηματίστηκαν λιπαρά οξέα και σάκχαρα. Από το σύνολο αυτών των πειραμάτων αποδείχθηκε η δυνατότητα προβιοτικής σύνθεσης των δομικών λίθων όλων των σημαντικών για τη ζωή μακρομορίων (πρωτεϊνών, νουκλεϊκών οξέων, λιπαρών οξέων, υδατανθράκων).



Μέσα στην Αρχέγονη Σούπα επικράτησαν τυχαία οι κατάλληλες συνθήκες για τη **δημιουργία των πρώτων πολυμερών ενώσεων** (π.χ. νουκλεϊκών οξέων, πρωτεϊνών, υδατανθράκων). Αυτός ο πολυμερισμός πιθανώς να συνέβη είτε με τοπικές συμπυκνώσεις με την εξάτμιση του νερού, π.χ. σε νερόλακκους ή σε κοιτώματα βράχων ή μετά από προσρόφηση των συστατικών των πολυμερών (αμινοξέων, αζωτούχων βάσεων, σακχάρων, φωσφορικών ομάδων) σε επιφάνειες τρισδιάστατων υποστρωμάτων πηλού, σιδηροπηρίτη ορυκτών ή άλλων ορυκτών που βρίσκονταν σε ακρογιαλιές και εκβολές ποταμών κ.λπ., ενώ σε κάποιες περιπτώσεις ίσως τα ίδια αυτά καθαυτά τα πολυμερή να μπορούσαν να επιταχύνουν την ίδια τη σύνθεσή τους.

Μία άλλη θεωρία, διαφορετική από αυτήν της Αρχέγονης Σούπας, υποστηρίζει τη δημιουργία της ζωής μέσα από **διαδοχικά στάδια οργάνωσης ανόργανων συστημάτων**. Ο εμπνευστής αυτής της θεωρίας **Alexander Cairns - Smith** (1931–) υποστήριζε ότι η πρόδρομος μορφή ζωής ήταν σωματίδια πηλού, τα οποία ως απλοί κρύσταλλοι με δομικές ανωμαλίες προσροφούσαν οργανικά μόρια από το μικροπεριβάλλον τους, δρώντας ως καταλύτες σε χημικές αντιδράσεις. Τέτοια σύμπλοκα οργανικών μορίων πηλού αποκτούσαν ομοιότητα και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, προσλαμβάνοντας αμινοξέα, υδατάνθρακες, αζωτούχες βάσεις και άλλα οργανικά μόρια, απαραίτητα για τη δημιουργία βιομορίων. Σύμφωνα μ’ αυτήν τη θεωρία, το πρώτο «γονίδιο», δηλαδή η πρώτη οντότητα που μπορούσε να μεταφέρει πληροφορία, ήταν ανόργανο,

Σύμφωνα με τη θεωρία της «Αρχέγονης Σούπας», οι αστραπές, οι κεραυνοί και οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτέλεσαν, μεταξύ άλλων, τον καταλύτη για τον σχηματισμό πιο πολύπλοκων οργανικών ενώσεων.

Αριστερά: Ο Stanley Miller στο εργαστήριό του.

ένα μικροκρυσταλλικό ορυκτό με δομές που συναντούμε στα σωματίδια πηλού. Η πληροφορία ήταν «εγγεγραμμένη» στις δομικές ανωμαλίες που έχουν όλοι οι κρύσταλλοι και η μεταβίβαση της πληροφορίας γινόταν με συνεχή θραύση των κρυστάλλων. Βέβαια αυτή η θεωρία δεν ερμηνεύει το πέρασμα από το «γονίδιο» πηλού στο πολυνουκλεοτιδικό γονίδιο.

Τέλος, σύμφωνα με το πιο πρόσφατο μοντέλο ανόργανης προέλευσης της ζωής, των **William Martin** και **Michael Russell**, η ζωή εμφανίστηκε στον **πυθμένα των αρχέγονων ωκεανών** σε βάθος 4 km, σε θερμό, ανηγμένο, αλκαλικό νερό υδροθερμικών πηγών, πλούσιο σε θειούχες ενώσεις. Οι υδροθερμικές πηγές αντλούσαν νερό από τον πυθμένα του ωκεανού, το οποίο περιείχε μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και μοριακό άζωτο σε αέρια μορφή, καθώς και προϊόντα αζώτου, άνθρακα και θείου. Ίζημα κολλοειδούς θείου (FeS), που σχηματίζονταν στον πυθμένα του ωκεανού, διογκωνόταν από τα εκλυόμενα αέρια, δημιουργώντας δομές θείου σιδήρου.

Το τρισδιάστατο ίζημα θείου σιδήρου προσέφερε εκτεταμένες επιφάνειες για κατάλυση, και μέσα σ’ αυτό παρέμεναν συμπυκνωμένες ανόργανες και οργανικές ενώσεις, που αντιδρούσαν μεταξύ τους, δημιουργώντας μεγαλύτερα μόρια και πολυμερή. Επί πλέον, οι αυξημένες πιέσεις στον βυθό των ωκεανών σταθεροποιούσαν τα πολυμερή που δημιουργούνταν.

Έτσι σταδιακά δημιουργήθηκαν **μη κυτταρικές μορφές ζωής, με τη μορφή ανόργανων κυψελίδων**, οι οποίες αντλούσαν ενέργεια, απαραίτητη για τον υποτυπώδη μεταβολισμό των κυψελίδων, από τη διαβάθμιση του pH που διαμορφωνόταν στις δύο πλευρές του τοιχώματος των κυψελίδων. Σύμφωνα μ’ αυτήν τη θεωρία, οι πρώτες ακυτταρικές μορφές ζωής, οι οποίες είχαν αρχέγονο μεταβολισμό και πολλαπλασιασμό, με την πάροδο του χρόνου έδωσαν γένεση στις πρώτες κυτταρικές μορφές ζωής.

Η ύπαρξη ζωής απαιτεί την κυτταρική οργάνωση, που επιτυγχάνεται μέσω της διαμερισματοποίησης, δηλαδή του περιορισμού των βιολογικά ενεργών μορίων σε συγκεκριμένο χώρο. Η εμφάνιση των μεμβρανών υπήρξε λοιπόν καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη της ζωής στον πλανήτη μας. Όλες οι σύγχρονες μεμβράνες αποτελούνται από φωσφολιπίδια, γι’ αυτό και θεωρούμε ότι και οι πρωτόγονες μεμβράνες κατά την αβιοτική σύνθεση πρέπει να είχαν την ίδια ή πολύ παρόμοια σύσταση. Έχει αποδειχθεί ότι τα φωσφολιπίδια μπορούν να παραχθούν αβιοτικά και μάλιστα όταν βρεθούν σε υδατικό περιβάλλον σχηματίζουν αυθόρμητα κυστίδια, τα λεγόμενα **λιποσώματα**, που αποτελούνται από **λιπιδική διπλοστιβάδα**. Τα λιποσώματα έχουν μάλιστα τη δυνατότητα πρόσληψης οργανικών ουσιών από το περιβάλλον, οι οποίες είτε εισέρχονται στο εσωτερικό των κυστιδίων ή δεσμεύονται στην επιφάνειά τους είτε παρεμβάλλονται στην υδρόφοβη περιοχή ▶

στο εσωτερικό της λιπιδικής διπλοστοιβάδας. Η ιδιότητα αυτή θεωρείται πρόδρομος της εκλεκτικής διαπερατότητας των σύγχρονων μεμβρανών. Τα λιποσώματα εγκλείουν αυτόματα DNA, ενώ αναπτύσσονται σε μέγεθος με την προσθήκη λιπιδίων στο περιβάλλον, και διαιρούνται με τρόπο που θυμίζει την κυτταρική διαίρεση.

Μέσα στην αρχέγονη σούπα υπήρχαν τα υλικά (αζωτούχες βάσεις, ριβόζη, φωσφορικά οξέα) και οι συνθήκες για τη δημιουργία των πρώτων νουκλεοτιδίων. Τα νουκλεοτίδια με διαδικασίες συμπύκνωσης που περιγράφηκαν παραπάνω, πολυμερίζονταν σχηματίζοντας πολυνουκλεοτιδικές αλυσίδες. Σήμερα γνωρίζουμε ότι το πρώτο πολυνουκλεοτίδιο που υπήρξε στη Γη ήταν το **RNA**. Κατ' αρχάς θα ήταν παράλογο να δεχτούμε ότι συνέπεσε ταυτόχρονα στον ίδιο πρώιμο οργανισμό να εμφανιστούν DNA (που διέθετε την απαραίτητη γενετική πληροφορία), RNA (που να μεταφέρει τη γενετική πληροφορία) και πρωτεΐνες (οι οποίες κατέλυαν αυτές τις διαδικασίες). Στην προσπάθεια αναζήτησης του πρώτου μορίου-αποθήκης και του πρώτου μορίου-ενζύμου, που κωδικοποιείται από το προηγούμενο, οδηγούμαστε σ' έναν φαύλο κύκλο του τύπου «η κότα έκανε το αυγό ή το αυγό την κότα;». Ποιο από τα δύο προηγήθηκε, το λειτουργικό μακρομόριο ή το μόριο-φορέας της πληροφορίας για την κατασκευή του λειτουργικού μορίου;



Υδροθερμικές αναβλύσεις.

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι απλή: Το πρώτο μόριο αποθήκευσης πληροφοριών θα πρέπει να ήταν ταυτόχρονα και καταλυτικά ενεργό, η δε δραστηριότητά του θα περιοριζόταν απλώς στην αναπαραγωγή του. Η εμφάνιση τέτοιων «ζωντανών μορίων» δεν προϋποθέτει αναγκαστικά «κυτταρική» οργάνωση και η παρουσία τους θα μπορούσε να έχει προηγηθεί της εμφάνισης του πρωτοοργανισμού. Όπως αναφέραμε, σήμερα έχουμε πληθώρα ενδείξεων ότι αυτό το «ζωντανό μόριο» υπήρξε το RNA. Αποκλείεται να ήταν το DNA, γιατί η δίκλινη δομή του, αποκλείει κάθε καταλυτική δυνατότητα, ενώ αντίθετως προσφέρει χημική σταθερότητα, έτσι ώστε το DNA να λειτουργεί ως μόριο-αποθήκη της γενετικής πληροφορίας.

Έτσι, παρόλο που σε όλους τους οργανισμούς (με εξαίρεση κάποιους ιούς) το γενετικό υλικό είναι το DNA, το αρχέγονο γενετικό υλικό θα πρέπει να ήταν το RNA. Εξάλλου το RNA μπορεί να προκύψει με αβιοτική σύνθεση ευκολότερα απ' το DNA, εφόσον η αβιοτική σύνθεση της δεοξυριβόζης του DNA είναι εξαιρετικά δύσκολη, σε αντίθεση με την εύκολη αβιοτική σύνθεση της ριβόζης. Επί πλέον, ορισμένα σύγχρονα μόρια RNA έχει αποδειχθεί ότι έχουν καταλυτικές ιδιότητες. Αυτά είναι τα λεγόμενα **ριβοένζυμα** ή **ριβόζυμα**, που περιγράφηκαν για πρώτη φορά από τους **Thomas Cech** (1947–) και **Sidney Altman** (1939–) (Νόμπελ Χημείας 1989). Καταλυτικές δράσεις έχει και το RNA των μιτοχονδρίων και των χλωροπ्लाστών, ενώ υπάρχουν μόρια RNA που καταλύουν την ίδια τη μεταγραφή τους, τα οποία ονομάζουμε **ρεπλικάσες**. Πολλά από τα σύγχρονα λειτουργικά RNA, όπως το tRNA ή το rRNA, αναφέρονται ως ζωντανά απολιθώματα, με την έννοια ότι διαθέτουν καταλυτικές ιδιότητες, απομεινάρια του κόσμου του RNA.

Τα μόρια RNA μπορούσαν λοιπόν να αντλούν νουκλεοτίδια από μια «σούπα» νουκλεοτιδίων και με εκμαγείο τον εαυτό τους και τη βοήθεια της καταλυτικής τους ενεργότητας, να συνθέτουν νέα μόρια RNA. Σταδιακά άρχισαν να δημιουργούνται τα πρώτα δίκλινα μόρια RNA. Κάποια από τα δίκλινα μόρια αποδιατάσσονταν και ο ένας από τους δύο κλώνους δρούσε ως ριβόζιμο, που μπορούσε να αντιγράφει τον εαυτό του και το συμπλήρωμά του. Έτσι προέκυψε ένας εκθετικά αυξανόμενος πληθυσμός μορίων RNA. Σταδιακά εμφανίστηκαν μόρια RNA που μπορούσαν να δεσμεύουν αμινοξέα κι έτσι εξελίχθηκε ο μηχανισμός σύνθεσης των πρώτων πρωτεϊνών. Προέκυψαν

λοιπόν πρωτεΐνες με καταλυτικές ιδιότητες, τα ένζυμα, τα οποία ήταν πολύ πιο αποδοτικά από τα ριβόζυμα και με τον καιρό ανέλαβαν την κατάλυση των αντιδράσεων σύνθεσης RNA και πρωτεϊνών.

Το RNA όμως παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα: είναι μόριο ασταθές και ιδιαίτερα ευαίσθητο στην αύξηση της θερμοκρασίας και στις μεταβολές του pH. Γι' αυτόν τον λόγο, όταν «εφευρέθηκε» από τη Φύση ο τρόπος ενζυμικής πια σύνθεσης της δεοξυριβόζης κι εμφανίστηκε το πρώτο DNA, αυτό ως πολύ σταθερότερο μόριο, ανέλαβε εξ ολοκλήρου την αποθήκευση της γενετικής πληροφορίας. Ο κόσμος του RNA πρέπει να διήρκεσε μέχρι την περίοδο συγκρότησης του πρωτοοργανισμού και ο σχηματισμός μεμβρανικών συστημάτων πρέπει να εξελίχθηκε παράλληλα και σε συνάρτηση με τη διαδικασία εμφάνισης του RNA. Τον κόσμο του RNA διαδέχθηκε ο κόσμος του DNA και η συγκρότηση πια κυτταρικών συστημάτων.

Η μετάβαση από τον κόσμο του RNA στον κόσμο του DNA καθοδηγήθηκε από την εύνοια της φυσικής επιλογής: από τη



Οι James Watson και Francis Crick (στα δεξιά της εικόνας), που ανακάλυψαν τη δομή της διπλής έλικας του DNA.

στιγμή που έκαναν την εμφάνισή τους ο γενετικός κώδικας και το DNA, το RNA έπαψε να παίζει τον διπλό ρόλο του γενετικού και του λειτουργικού μακρομορίου, εφόσον το DNA και οι πρωτεΐνες, αντίστοιχα, ανέλαβαν αυτούς τους ρόλους με πολύ μεγαλύτερη επιτυχία. Η πρωτεϊνοσυνθετική μηχανή και ο γενετικός κώδικας πρέπει να διαμορφώθηκαν στον οικουμενικό πρόγονο των σημερινών μορφών ζωής, εφόσον είναι εξαιρετικά περίπλοκες διαδικασίες και πρακτικά ίδιες σε όλους τους σύγχρονους οργανισμούς, αποκλείοντας έτσι την πιθανότητα να «εφευρέθηκαν» απ' τη Φύση περισσότερες από μία φορές.

Αξίζει, επίσης, να γίνει αναφορά και στην αρκετά διαδεδομένη **Θεωρία της Πανσπερμίας**, η οποία αναπτύχθηκε πρώτα το 1967 από τον **John Bernal** (1901–1971), ενώ για πρώτη φορά προτάθηκε από τον αρχαίο Έλληνα φιλόσοφο **Αναξαγόρα**. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η ζωή δημιουργήθηκε κάπου εκτός της Γης και μεταφέρθηκε μέσω ουράνιων σωματιδίων (μετεωριτών) κάποια στιγμή στη Γη. Με δεδομένο ότι η ατμόσφαιρα της πρωτόγονης Γης ήταν πολύ αραιή, ο αριθμός των μετεωριτών που έφθαναν

στην επιφάνειά της, χωρίς να καταστραφούν λόγω τριβής με τα μόρια της ατμόσφαιρας, θα πρέπει να ήταν αρκετά μεγάλος. Βάσει υπολογισμών, η ποσότητα οργανικής ύλης διαστημικής προέλευσης, που τροφοδοτούσε την πρωτόγονη Γη, ήταν τουλάχιστον 1–10 χιλιάδες τόνοι το χρόνο.

Μικροβιακοί σπόροι θα μπορούσαν να φθάσουν μ' έναν μετεωρίτη-φορέα στην επιφάνεια της Γης, «προστατευμένοι» από την κοσμική ακτινοβολία και τις υψηλές θερμοκρασίες που θα αναπτύσσονταν κατά την είσοδο του μετεωρίτη στη γήινη ατμόσφαιρα από ένα στρώμα πάγου, άνθρακα ή άλλων ορυκτών. Ωστόσο, εδώ δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω ▶

Σύνθετη εικόνα σε υπέρυθρα και χιλιοστομετρικά μήκη κύματος του Γαλαξιακού κέντρου και του γιγάντιου μοριακού νέφους Τοξότης B2, στο οποίο εντοπίστηκε μεγάλη ποικιλία πολύπηλοκων οργανικών μορίων (ESO/APEX & MSX/IPAC/NASA).



μ' αυτήν τη θεωρία, διότι απλώς μεταθέτει το πρόβλημα της εμφάνισης της ζωής από τη Γη σε κάποιον άλλον πλανήτη ή σε κάποιο άλλο σημείο του Σύμπαντος. Εξάλλου, με δεδομένη την ποικιλία συνθηκών της αρχέγονης Γης, δεν μπορεί να εξηγηθεί τι παραπάνω υπήρχε σε άλλους πλανήτες (π.χ. στον Άρη), το οποίο επέτρεψε την εμφάνιση της ζωής εκεί.

Ως **πρωτοοργανισμός** δεν θα έπρεπε να νοείται ένα συγκεκριμένο είδος κυττάρων, σύμφωνα με τα σημερινά μέτρα, αλλά μία ή πολλές διαφορετικές οντότητες, που να διέθεταν τουλάχιστον κάποιο πρωτόγονο μεταβολισμό, ο οποίος θα «κατευθυνόταν» από κάποιο γονιδίωμα. Η παραδοχή της ύπαρξης ενός κοινού προγόνου βασίζεται στο γεγονός ότι, παρά την πολυπηλοκότητά τους, οι θεμελιώδεις δομές και μηχανισμοί που εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ζωής είναι πρακτικά ίδιοι σε όλες τις σύγχρονες μορφές κυττάρων.

Πώς συνέβαιναν όμως αλλαγές στο γενετικό υλικό και ως εκ τούτου η εξέλιξη του πρωτοοργανισμού; Αλλαγές στο γονιδίωμα εισάγονταν με σημειακές μεταλλαγές μίας ή λίγων βάσεων, αλλά και με ευρείας κλίμακας ανακατατάξεις αλληλουχιών DNA. Από τον οικουμενικό πρωτοοργανισμό προέκυψαν όλοι οι οργανισμοί, οι οποίοι κατατάσσονται σε τρεις επικράτειες: τα **Αρχαιοβακτήρια** (ή Αρχαία), τα **Ευβακτήρια** (ή Βακτήρια) και τα **Ευκαρυωτικά** (ή Ευκάρυα).

Οι πρώτοι μικροοργανισμοί ήταν ετερότροφοι, δηλαδή τρέφονταν με οργανική ύλη που λάμβαναν απ' το περιβάλλον. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των ετερότροφων μικροοργανισμών, οδήγησε σε σταδιακή μείωση της τροφής. Αυτό αποτέλεσε βασική προϋπόθεση για την

εμφάνιση κι εξάπλωση των **αυτότροφων φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών**, οι οποίοι συνέθεταν μόνοι τους την τροφή τους από απλές ανόργανες ουσίες δεσμεύοντας την ηλιακή ακτινοβολία και οι οποίοι ως εκ τούτου διέθεταν τεράστιο προσαρμοστικό πλεονέκτημα. Η εμφάνιση των πρώτων φωτοσυνθετικών προκαρυωτικών μικροοργανισμών υπολογίζεται πριν από τουλάχιστον 3,5 δισ. χρόνια.

Τα παλαιότερα απολιθώματα φωτοσυνθετικών μικροοργανισμών, κυρίως κυανοβακτηρίων, ονομάζονται **στρωματολίτες**, και δημιουργούνται (ακόμη και σήμερα) από την εναπόθεση αλάτων, κυρίως θείου, σε παράκτιους βράχους. Αποτέλεσμα της εμφάνισης οργανισμών με δυνατότητα φωτοσύνθεσης ήταν ο **εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με οξυγόνο**, κάτι το οποίο άλλαξε δραματικά την πορεία της εξέλιξης της ζωής, αφού πολλοί οργανισμοί εξαφανίστηκαν, γιατί δεν μπορούσαν να επιβιώσουν στο νέο περιβάλλον, ενώ νέες μορφές ζωής δημιουργήθηκαν. Με βάση αυτά, αλλά και άλλα ευρήματα, η μετάβαση της ατμόσφαιρας από αναγωγική σε οξειδωτική συνέβη πριν τουλάχιστον 2 δισ. χρόνια.

Από τον πρωτοοργανισμό και μέσα από μία μακρά διαδικασία εξελικτικών βημάτων, προέκυψαν τα πρώτα **ευκαρυωτικά κύτταρα**. Τα αρχαιότερα απολιθώματα ευκαρυωτικών μονοκύτταρων οργανισμών (συγκεκριμένα ευκαρυωτικών φυκών) χρονολογούνται γύρω στα 2,1 δισ. χρόνια πριν. Πολύ διαδεδομένες μορφές ευκαρυωτικών κυττάρων ήταν οι Ακριτάρκες, οι οποίοι γνώρισαν μεγάλη εξάπλωση πριν από 1,6 δισ. χρόνια.

Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, τη **Θεωρία της**

Συμβίωσης της Lynn Margulis (1938–), τα ευκαρυωτικά κύτταρα προήλθαν από υποθετικά προγονικά κύτταρα, τα αρχαιοκαρυωτικά ή ουκαρυωτικά κύτταρα, που στερούνταν μιτοχονδρίων και χλωροπλαστών, και στα οποία εισήλθαν κι εγκαταστάθηκαν ως συμβιωτικοί οργανισμοί ελεύθερα προκαρυωτικά κύτταρα. Ο συμβιωτικός οργανισμός προσέφερε στο ουκαρυωτικό κύτταρο νέες λειτουργικές δυνατότητες, ενώ «απολάμβανε» οφέλη, που προέκυπταν από λειτουργίες του ξενιστή.

Σταδιακά οι συμβιωτικοί οργανισμοί μετατράπηκαν σε **μιτοχόνδρια** και **χλωροπλάστες**, εξασφαλίζοντας στον ξενιστή τους τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας και φωτοσύνθεσης, αντίστοιχα. Ισχυρή ένδειξη υπέρ αυτής της θεωρίας αποτελεί το γεγονός ότι τα μιτοχόνδρια και οι χλωροπλάστες περιβάλλονται από διπλή μεμβράνη και έχουν δικό τους γενετικό υλικό (DNA), το οποίο συμφωνεί με την εγκόλιπυσή τους απ' το αρχαίο κύτταρο - ξενιστή.

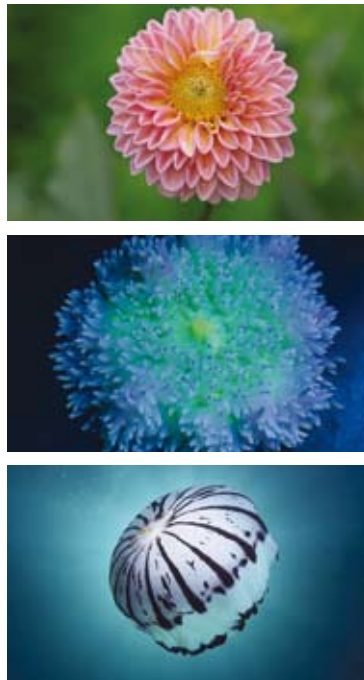
Για περίπου 2 δισ. χρόνια τη Γη εποικούσαν αποκλειστικά μονοκύτταροι μικροοργανισμοί. Οι πρώτοι πολυκύτταροι οργανισμοί εμφανίστηκαν πριν από περίπου 1,6 δισ. χρόνια. Η μεγάλη καθυστέρηση της εμφάνισης πολυκύτταρων οργανισμών πιθανώς να οφείλεται στην επιτυχία προσαρμογής των μονοκύτταρων οργανισμών σε μία μεγάλη ποικιλία συνθηκών, γεγονός που καταδεικνύεται εξάλλου από το ότι και σήμερα οι μονοκύτταροι οργανισμοί κατέχουν περισσότερο απ' το μισό της συνολικής βιομάζας στη Γη. Τίθεται το ερώτημα,

λοιπόν, τι προσαρμοστικό πλεονέκτημα προσέφερε στα κύτταρα η δημιουργία πολυκύτταρων οργανισμών.

Μία απλή απάντηση είναι ότι οι πολυκύτταροι οργανισμοί, μέσω κυτταρικής συνεργασίας και εξειδίκευσης, μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν πηγές, τις οποίες ένα μόνο κύτταρο δεν μπορούσε να χρησιμοποιήσει. Για παράδειγμα, κάποια μυξοβακτήρια (του είδους *Chondromyces crocatus*), τα οποία τρέφονται με οργανικά μόρια εκκρίνοντας συγκεκριμένα ένζυμα, δημιουργούν αποικίες, στις οποίες αυξάνει πολύ η συγκέντρωση αυτών των ενζύμων, διευκολύνοντας έτσι τη θρέψη τους. Μάλιστα, ελλείψει τροφής, αυτά τα κύτταρα δημιουργούν χαρακτηριστικούς πολυκύτταρους σχηματισμούς, μέσα στους οποίους τα βακτήρια διαφοροποιούνται σε ανθεκτικές μορφές (σπόρια).

Επίσης κάποια μαστιγοφόρα κυανοφύκη (ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί) απαντώνται ως ελεύθερα κύτταρα, αποικίες, ή σχηματίζουν πολυκύτταρες μορφές, τα *Volvox*. Το εντυπωσιακό είναι ότι η κίνηση των μαστιγίων των κυττάρων των *Volvox* συντονίζεται μέσω διακυτταρικής επικοινωνίας, ώστε να κατευθύνεται η κίνηση όλου του συσσωματώματος μέσα στο νερό προς το φως. Επί πλέον, μέσα στα *Volvox* παρατηρείται κυτταρική διαφοροποίηση: συγκεκριμένα «αναπαραγωγικά» κύτταρα δίνουν γένεση σε νέα κύτταρα δημιουργώντας μικρότερες νέες αποικίες, οι οποίες παραμένουν για κάποιο διάστημα μέσα στο «γονικό» *Volvox* κι έπειτα το εγκαταλείπουν.





Συμμετρίες στη Φύση

Κάποια στιγμή λοιπόν στην εξέλιξη, οι μονοκύτταροι οργανισμοί άρχισαν να δημιουργούν αποικίες περισσότερων κυττάρων. Ο πιο απλός τρόπος να συμβεί αυτό είναι τα νέα κύτταρα που προκύπτουν απ' την κυτταρική διαίρεση να παραμένουν σε επαφή μεταξύ τους. Με τον χρόνο εξελίχθηκε η κυτταρική επικοινωνία/συνεργασία και η κυτταρική εξειδίκευση, προσδίδοντας στον πολυκύτταρο σχηματισμό περισσότερες λειτουργικές δυνατότητες, γεγονός που οδήγησε πια στην εμφάνιση πολυκύτταρων οργανισμών. Οι πρώτοι πολυκύτταροι οργανισμοί στερούνταν συμμετρίας, όπως για παράδειγμα τα σημερινά Ποροφόρα ή αλλιώς σπόγγοι, που αποτελούνται από συγκεκριμένους τύπους κυττάρων, αλλά δεν διαθέτουν διαμορφωμένους ιστούς, όπως τα ανώτερα ζώα. Έπειτα εμφανίστηκαν πολυκύτταροι οργανισμοί με ακτινωτή συμμετρία, όπως τα σημερινά Κνιδόζωα (π.χ. οι μέδουσες), ενώ αργότερα, κατά τη Βένδιο περίοδο, «εφευρέθηκε» από τη Φύση η αμφίπλευρη συμμετρία.

Τα εξελικτικά αρχαιότερα Μετάζωα (ζώα) κατατάσσονται στην ομάδα **Εδιάρκα**, τα οποία πρέπει να αφθονούσαν

στη Γη κατά τη Βένδιο περίοδο (πριν από 565 – 543 εκατ. χρόνια). Τα Εδιάρκα χαρακτηρίζονταν από πλούτο μορφών και πρέπει να αποτέλεσαν τον πρόγονο των Κνιδοζώων (π.χ. μεδουσών, θαλάσσιων ανεμώνων κ.λπ.). Όμως μερικά απ' αυτά, τα ονομαζόμενα Βενδόζωα, εμφάνιζαν αμφίπλευρη κι όχι ακτινωτή συμμετρία, κάτι το οποίο προκαλεί έκπληξη, γιατί η αμφίπλευρη συμμετρία εμφανίζεται εξελικτικά πολύ αργότερα.

Κατά τη διάρκεια της Καμβρίου περιόδου και σε διάστημα 50 εκατομμυρίων ετών συνέβη η λεγόμενη **έκρηξη ειδογένεσης** της Καμβρίου, κατά την οποία εμφανίστηκαν 34 από τα 35 φύλα των σημερινών οργανισμών! Πολύ διαδεδομένοι οργανισμοί που έζησαν κατά την Κάμβριο περίοδο ήταν οι Τριλοβίτες (ομάδα αρθροπόδων) και αντιπρόσωποι του γένους Ρικαία, το οποίο πιθανολογείται ότι αποτελεί τον παλαιότερο γνωστό πρόγονο των Χορδωτών, δηλαδή των ζωικών οργανισμών που φέρουν νωτιαία χορδή όπως τα σπονδυλόζωα.

Τι προκάλεσε όμως αυτήν την έκρηξη ειδογένεσης της Καμβρίου

περιόδου; Μία εξήγηση είναι ο εμπλουτισμός των ωκεανών με οξυγόνο, ο οποίος υπήρξε το επακόλουθο της αφθονίας φωτοσυνθετικών φυκών κατά τη διάρκεια της προκαμβρίου περιόδου. Το οξυγόνο επέτρεψε την αύξηση των διαστάσεων του σώματος, αλλά και του μεταβολικού ρυθμού των οργανισμών, που είναι απαραίτητο στοιχείο για την εξασφάλιση της κίνησης. Επίσης, κατά την Κάμβριο περίοδο εμφανίστηκαν για πρώτη φορά οργανισμοί με εξωσκελετό (κέλυφος). Η δημιουργία σκληρού εξωσκελετού με ταυτόχρονη αύξηση των διαστάσεων του σώματος προσέφερε περισσότερες δυνατότητες επιβίωσης. Επί πλέον, στην έκρηξη της Καμβρίου περιόδου είναι πιθανό να συνέβαλε η εμφάνιση οργανισμών φυλκτικά αναπαραγόμενων, πράγμα το οποίο θα επιτάχυνε τη γενετική ποικιλοότητα μέσω του ανασυνδυασμού του μητρικού και του πατρικού γονιδιώματος και τον ρυθμό εμφάνισης νέων μορφών ζωής.

Η συσσώρευση οξυγόνου στην ατμόσφαιρα, λόγω της φωτοσύνθεσης, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της στοιβάδας του όζοντος, η οποία απορροφούσε το μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ήλιου. Αυτό αποτέλεσε βασική προϋπόθεση για τον «αποικισμό» της ξηράς από τους οργανισμούς. Οι πρώτοι «άποικοι» της ξηράς ήταν προκαρυωτικοί μικροοργανισμοί (πριν από 2,6 δισ. χρόνια) και ακολούθησαν ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί (π.χ. μύκητες) πριν από περίπου 1 δισ. χρόνια. Τα πρώτα χερσαία φυτά πρέπει να εμφανίστηκαν πριν από 700 εκατ. χρόνια, και αναπτύσσονταν στα όρια του νερού, ενώ η μεγάλη εξάπλωσή τους στην ξηρά ξεκίνησε πριν από περίπου 450 εκατ. χρόνια. Την ίδια περίοδο, αρθρόποδα, πιθανώς έντομα, «εγκατέλειπαν» τις θάλασσες για να ζήσουν στην ξηρά.

Τα πρώτα Χορδωτά εμφανίζονται κατά την Ορδοβίκιο περίοδο (495 – 439 εκατ. χρόνια πριν) μαζί με τους κατώτερους ιχθύς, τα λεγόμενα **άγναθα**, ενώ κατά τη Σιλούριο περίοδο (439 – 409 εκατ. χρόνια πριν) γνωρίζουν εξάπλωση οι ιχθύες. Απ' αυτούς πριν από 380 – 375 εκατ. χρόνια εξελίσσονται τα πρώτα τετράποδα, τα οποία έδωσαν γένεση στα πρώτα **αμφίβια**. Από τα πρωτόγονα αμφίβια, εξελίχθηκαν τα λεγόμενα **αμνιωτά**, τα οποία σε αντίθεση με τα αμφίβια γεννούν τα αυγά τους και εκκολάπτονται στην ξηρά (ερπετά, θηλαστικά, πτηνά).

Τα ερπετά άρχισαν να γνωρίζουν μεγάλη εξάπλωση κατά την Ανθρακοφόρο περίοδο (354 – 290 εκατ. χρόνια πριν), των

οποίων το μέγεθος σταδιακά μεγάλωνε, ώστε τελικά για 160 αιώνες επικράτησαν τα μεγάλα ερπετά (δεινόσαυροι) στη Γη, από τις αρχές της Τριασικής περιόδου (230 εκατ. χρόνια πριν) μέχρι πριν από 65 εκατ. χρόνια, όταν συνέβη η μαζική τους εξαφάνιση στο όριο της Κρητιδικής–Τριτογενούς περιόδου (Κ–Τ εξαφάνιση). Η εξαφάνισή τους αποδίδεται στην πτώση μεγάλου μετεωρίτη (διαμέτρου 10 km) στη Γη, η οποία είχε ως συνέπειες σεισμούς, πλημμύρες, σύννεφα στάχτης και σκόνης καθώς και όξινη βροχή. Εκτιμάται ότι εξαφανίστηκε το 60–80% των ειδών, μεταξύ των οποίων όλα τα είδη των δεινοσαύρων, ενώ τις μικρότερες απώλειες τις υπέστησαν τα αμφίβια, τα κροκοδείλια, οι χελώνες και τα θηλαστικά. Και τα φυτά υπέστησαν σημαντικές απώλειες, με εξαίρεση τα πτεριδόφυτα, τα οποία αναδείχθηκαν στην επικρατούσα μορφή φυτών της εποχής εκείνης.

Αξίζει, εντούτοις, να σημειωθεί ότι η Κ–Τ εξαφάνιση δεν υπήρξε η μοναδική, ούτε η μεγαλύτερη εξαφάνιση ειδών που συνέβη στον πλανήτη. Η μεγαλύτερη εξαφάνιση συνέβη κατά την Πέρμιο περίοδο, κατά την οποία εξαφανίστηκε το 90 – 96% των ειδών, αν και τα αίτια της εξαφάνισης δεν είναι ακόμη γνωστά. Μετά την Κ–Τ εξαφάνιση, όμως, που οριοθετεί το τέλος της περιόδου κυριαρχίας των μεγάλων ερπετών, άρχισε πια η εξάπλωση των **θηλαστικών** στη Γη. Τα θηλαστικά ήταν αρχικά μικρόσωμα, ώστε χρειάζονταν μικρές ποσότητες τροφής, και ως θερμόαιμα με τρίχωμα, επιβίωναν με επιτυχία στις χαμηλές θερμοκρασίες των πολυπαλίων παγετώνων που ακολούθησαν κατά τη διάρκεια της Καινοζωικής εποχής (65 εκατ. χρόνια πριν – σήμερα). Η εξέλιξη των θηλαστικών κατά τη διάρκεια αυτή των 70 εκατ. χρόνων έδωσε γένεση σε χιλιάδες είδη, που έζησαν στο παρελθόν ή ζουν και σήμερα, μεταξύ των οποίων είναι και ο άνθρωπος.

Μία απ' τις μεγαλύτερες, όμως, μαζικές εξαφανίσεις ειδών τη βιώνουμε σήμερα. Η αλόγιστη «εκμετάλλευση», αν όχι η ισοπεδωτική καταστροφή του περιβάλλοντος από τον άνθρωπο αφήνει ελάχιστα περιθώρια επιβίωσης πολλών μορφών ζωής, που έχουν προκύψει από εξέλιξη εκατομμυρίων ετών. Βέβαια η καταστροφή της ζωής του πλανήτη εντάσσεται στο γενικό πλαίσιο της λανθασμένης δόμησης ολόκληρου του Συστήματος, που θέλουμε να ονομάζουμε ανθρώπινο πολιτισμό, του οποίου όμως τους παραλογισμούς κάθε νοήμων άνθρωπος αδυνατεί να κατανοήσει. **Ο**

Αλέξης Α. Δεληβοριάς

Αστρονόμος Ευγενιδείου Πλανηταρίου



6ο κεφάλαιο

Το ταξίδι του Beagle

Το πνεύμα της εξερεύνησης που χαρακτηρίζει το ανθρώπινο γένος, το οποίο οδήγησε toλμηρούς εξερευνητές από τα πέρατα της Αφρικής στους Πόλους του πλανήτη και από τη Στέγη του Κόσμου στα βάθη των θαλασσών, παραμένει άσβεστο. Πραγματικά, λίγες τέτοιες εξερευνητικές αποστολές έχουν εξάψει τη φαντασία των ανθρώπων παγκοσμίως για το ριψοκίνδυνο πνεύμα τους και τον φαινομενικά ακατόρθωτο χαρακτήρα τους, όσο η κατάκτηση του Έβερεστ, της ψηλότερης κορυφής των Ιμαλαΐων από τον **Edmund Hillary** (1919–2008) και τον Σέρπα συνοδό του **Tenzing Norgay** (1914 – 1986) στις 25 Μαΐου 1953. Υπήρξαν, όμως, και κάποιες

άλλες αποστολές, οι οποίες έμειναν στην Ιστορία, όχι τόσο για τους προαναφερθέντες λόγους, όσο γιατί η υλοποίησή τους έδωσε το έναυσμα για μεγάλες επιστημονικές επαναστάσεις, για μεγάλες «αλληλαγές παραδείγματος», που μετέβαλαν ριζικά τα όσα νομίζαμε ότι γνωρίζαμε για τον κόσμο, τα φυσικά φαινόμενα και την ίδια τη ζωή. Δεν υπάρχει ίσως καλύτερο παράδειγμα μιας τέτοιας αποστολής από τον περίπλοκο της Γης, που πραγματοποίησε το Βρετανικό πλοίο Beagle στη δεύτερη αποστολή του. Γιατί αυτό το πενταετές ταξίδι επέτρεψε στον Άγγλο φυσιοδίφη Χάρολντ Δαρβίνο (1809–1882) να θεμελιώσει μία από τις εγκυρότερες επιστημονικές θεωρίες όλων των εποχών: τη **Θεωρία της Εξέλιξης**.



Για να πιάσουμε το νήμα της ιστορίας μας από την αρχή, θα μεταφερθούμε στην πρώτη περίοδο μετά το τέλος των Ναπολεόντειων πολέμων, την περίοδο δηλαδή που η Μεγάλη Βρετανία, η μεγαλύτερη ναυτική δύναμη εκείνης της εποχής, άρχισε να πραγματοποιεί αποστολές υδρογράφησης και χαρτογράφησης των ανεξερεύνητων ακόμη περιοχών του πλανήτη μας, στην κορυφή της λίστας των οποίων ήταν η Νότιος Αμερική. Ένα από τα πλοία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση αυτών των αποστολών ήταν και το Beagle, που στο χρονικό διάστημα 1826–1843 πραγματοποίησε συνολικά 3 αποστολές. Το Beagle κατελήχυστηκε στις 14 Μαΐου 1820

και 6 χρόνια αργότερα σάλπανε για την πρώτη του αποστολή στη Νότιο Αμερική, συνοδευόμενο από το πλοίο Adventure. Πλωτάρχης του πλοίου ήταν ο **Robert FitzRoy** (1805 – 1865), ο οποίος ανέλαβε τη διοίκηση του Beagle τον Αύγουστο του 1828, όταν ο πλοίαρχος Pringle Stokes αυτοκτόνησε. Η πρώτη αυτή αποστολή του Beagle ολοκληρώθηκε στις 14 Οκτωβρίου 1830.

Στις 25 Ιουνίου 1831, ο FitzRoy επανατοποθετήθηκε πλοίαρχος του Beagle για τη δεύτερη αποστολή του στη Νότιο Αμερική. Συνειδητοποιώντας άμεσα τα ευρύτερα οφέλη που θα προέκυπταν για τις επιστήμες από τη συμμετοχή ενός επιστήμονα με γνώσεις ορυκτολογίας, γεωλογίας και ζωολογίας, ο FitzRoy πρότεινε στον επικεφαλής της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Βρετανικού Ναυτικού **Francis Beaufort** (1774 – 1857) να συμπεριληφθεί στην αποστολή και ένας φυσιοδίφης. Ο FitzRoy προσπάθησε μάλιστα να εξασφαλίσει τη συμμετοχή του φίλου του Harry Chester, ο οποίος όμως αρνήθηκε. Ο Beaufort τότε ζήτησε τη βοήθεια του **George Peacock** (1791–1858), καθηγητή μαθηματικών στο Cambridge, προκειμένου να βρεθεί εκείνος ο άνθρωπος που θα είχε όχι μόνο τις απαραίτητες γνώσεις, αλλά και τη θέληση να συμμετάσχει σε ένα ταξίδι που, όπως σχεδιαζόταν τότε, προοριζόταν να διαρκέσει τουλάχιστον 3 χρόνια. Ο Peacock επικοινωνήσε με τον **John Stevens Henslow** (1796 – 1861), κληρικό, βοτανολόγο και γεωλόγο στο ίδιο πανεπιστήμιο, καθώς και με τον αιδεσιμότατο και φυσιοδίφη **Leonard Jenyns** (1800 – 1893), οι οποίοι όμως αρνήθηκαν, για διαφορετικούς λόγους ο καθένας. Αντιθέτως, και οι δύο πρότειναν τον 22χρονο τότε Κάρολο Δαρβίνο.

Γεννημένος στις 12 Φεβρουαρίου 1809 στο Shrewsbury της Αγγλίας, ο Δαρβίνος ξεκίνησε τις σπουδές του στην Ιατρική σχολή του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου σε ηλικία 16 μόλις ετών. Τις εγκατέλειψε όμως νωρίς και, έπειτα από προτροπή του πατέρα του, ξεκίνησε έναν νέο κύκλο σπουδών, προκειμένου να γίνει ιερωμένος. Ευτυχώς, όμως, τα ενδιαφέροντά του στρέφονταν αλλού. Έχοντας εκφράσει από μικρός την κλίση του προς τη φυσική ιστορία και τη συλλογή δειγμάτων, συναναστρεφόμενος με ανθρώπους όπως ο Henslow, που παρότι ιερωμένος χαρακτηριζόταν από ευρύτητα πνεύματος, και μελετώντας έργα μεγάλων επιστημόνων της εποχής του, όπως ο περίφημος αστρονόμος **John Herschel** (1792–1871) και ο Γερμανός φυσιοδίφης και εξερευνητής **Alexander von**

Humboldt (1769–1859), ο Δαρβίνος αποφοίτησε από το Πανεπιστήμιο του Cambridge μόλις τον Απρίλιο του 1831.

Τόσο το βιβλίο του Herschel *Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*, που πραγματευόταν τον τρόπο που διεξάγεται η επιστημονική έρευνα, όσο και το βιβλίο του Humboldt *Personal Narrative*, που εξιστορούσε τις περιπέτειες του Γερμανού εξερευνητή στη Νότιο Αμερική, επηρέασαν σημαντικά τον νεαρό Δαρβίνο και πυροδότησαν την επιθυμία του να ταξιδέψει στους Τροπικούς. Έχοντας ήδη εξασφαλίσει τη συγκατάθεση του πατέρα του να εξερευνήσει το νησί της Τενερίφης στις Κανάριες Νήσους και έχοντας πείσει τον φίλο του Marmaduke Ramsey να τον συνοδεύσει σ' αυτό το ταξίδι, ο Δαρβίνος ξεκίνησε εντατικά μαθήματα γεωλογίας με τον καθηγητή του Κέιμπριτζ **Adam Sedgwick** (1785 – 1873), ακολουθώντας τον μάλιστα στις αρχές Αυγούστου και σε μια εκπαιδευτική αποστολή στην Ουαλία. Μια αποστολή που ολοκληρώθηκε με τον πλέον τραγικό τρόπο, όταν πληροφορήθηκε ότι ο Ramsey είχε πεθάνει. Όπως ήταν φυσικό, η είδηση αυτή τον συνέτριψε και τα όνειρα του Δαρβίνου για την εξερεύνηση των Τροπικών έμοιαζαν να καταρρέουν.

Επιστρέφοντας, όμως, στις 29 Αυγούστου στο Shrewsbury, τον περίμενε μια έκπληξη: οι επιστολές των Henslow και Peacock, με τις οποίες τον προσκαλούσαν να συμμετάσχει ως φυσιοδίφης στη δεύτερη αποστολή του Beagle, που επρόκειτο να σαλπάρει στις 25 Σεπτεμβρίου. Δέχτηκε αμέσως και, ξεπερνώντας τις αντιρρήσεις του πατέρα του, κανόνισε μια πρώτη συνέντευξη με τον FitzRoy, προκειμένου να τον πείσει ότι ήταν ο κατάλληλος άνθρωπος στην κατάλληλη θέση. Ο συντηρητικός πλοίαρχος όμως είχε τους ενδοιασμούς του, όπως αποδεικνύεται αλλιωστε και από το γεγονός ότι σχεδόν τον απέρριψε επειδή, όπως πίστευε, το σχήμα της μύτης του Δαρβίνου υποδείκνυε έλλειψη αποφασιστικότητας. Εφοδιασμένος εν τέλει με τον πρώτο τόμο των Αρχών Γεωλογίας του περίφημου Βρετανού γεωλόγου **Charles Lyell** (1797–1875), έναν από τους πρώτους που υποστήριξαν ότι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της Γης αναμορφώνονται συνεχώς και σε βάθος χρόνου, ο Δαρβίνος πήγε στο Πλýmουθ περιμένοντας τον απόπλου του πλοίου.

Έπειτα από αλληπάλληλες καθυστερήσεις και αναβολές, το Beagle σάλπανε εν τέλει από το λιμάνι του Πλýmουθ στις 27



Αριστερά: Ο πλοίαρχος του Beagle Robert FitzRoy. Δεξιά: Ο Κάρολος Δαρβίνος.

Δεκεμβρίου 1831, με κατεύθυνση τις δυτικές ακτές της Αφρικής και τα Κανάρια νησιά, φτάνοντας στο λιμάνι Σάντα Κρουζ της Τενερίφης στις 6 Ιανουαρίου 1832. Όμως, η επιδημία χολέρας που είχε ξεσπάσει στην Αγγλία, τους εμπόδιζε να αποβιβαστούν άμεσα στο νησί, και ο FitzRoy, αντί να παραμείνει σε καραντίνα για 12 μέρες, προτίμησε να συνεχίσει την πορεία του προς τα νησιά του Πράσινου Ακρωτηρίου, ανοιχτά της σημερινής Σενεγάλης, όπου και έφτασε στις 16 Ιανουαρίου. Στο νησί Σαντιάγκο, ειδικότερα, ο Δαρβίνος πραγματοποίησε την πρώτη του σοβαρή ανακάλυψη: μία οριζόντια στρώση από κοράλλια και όστρακα κατά μήκος των μαύρων ηφαιστειακών πετρωμάτων ενός απότομου βράχου, αρκετά μέτρα πάνω απ' την επιφάνεια της θάλασσας. Μια ανακάλυψη, δηλαδή, που ενίσχυε τα όσα υποστήριζε ο Lyell για την αργή και σταδιακή μεταβολή των ηπείρων με την πάροδο των αιώνων.



Χάρτης που δείχνει το πενταετές ταξίδι του Beagle από το βιβλίο *Το ταξίδι του Beagle* της έκδοσης του 1890 (ευγενής παραχώρηση: John van Wyhe ed. 2002, The Complete Work of Charles Darwin Online, <http://darwin-online.org/uk>).

Εγκαταλείποντας τα Νησιά του Πράσινου Ακρωτηρίου στις 7 Φεβρουαρίου, το Beagle άνοιξε τα πανιά του για τις ανατολικές ακτές της Νότιας Αμερικής, φτάνοντας στο Σαλβαντόρ της Βραζιλίας 21 μέρες αργότερα. Εκεί, ο Δαρβίνος κατέστη μάρτυρας της απάνθρωπης μεταχείρισης των μαύρων σκλάβων. Η έντονη διαμάχη του με τον FitzRoy για το εάν και κατά πόσο είναι ηθικό να αντιμετωπίζονται ανθρώπινα όντα ως ιδιοκτησία οδήγησαν σε μια άγρια αντιπαράθεση. Έξαλλος ο FitzRoy, που δεν έβλεπε τίποτα το μεμπτό σ' αυτήν την εκμετάλλευση ανθρώπου από άνθρωπο, απαγόρευσε στον Δαρβίνο να δειπνεί μαζί του στην τραπεζαρία του πλοίου, αν και αργότερα ζήτησε συγγνώμη γι' αυτή του τη συμπεριφορά.

Στις 18 Μαρτίου, το Beagle ξεκίνησε τη βυθομέτρηση των νησιών Abrolhos και των επικίνδυνων υφάλων τους και έφτασε στο Ρίο ντε Τζανέιρο στις 3 Απριλίου 1832, όπου ο Δαρβίνος

αφιέρωσε αρκετές ημέρες στην εξερεύνηση του τροπικού δάσους της περιοχής, συλλέγοντας πολλά αντιπροσωπευτικά δείγματα απ' τα φυτά, τα έντομα και τα ζώα που φιλοξενούσε. Στις 5 Ιουλίου, το Beagle σάληπαρε από το Ρίο με προορισμό το Montevideo της Ουρουγουάης, όπου και αγκυροβόλησε στις 26 Ιουλίου. Ακολούθησε η εξερεύνηση της Παταγονίας, όπου για αρκετές εβδομάδες ο Δαρβίνος συνέλεξε απολιθώματα, μεταξύ των οποίων και τεράστια απολιθωμένα οστά και δόντια στην Πούντα Άλτα της Αργεντινής, τα περισσότερα απ' τα οποία, όπως αποδείχτηκε, ήταν παντελώς άγνωστα στους επιστήμονες της εποχής εκείνης. Στις 27 Νοεμβρίου, το πλοίο αναχώρησε από το Montevideo με προορισμό τη Γη του Πυρός, το νοτιότερο τμήμα της Νότιας Αμερικής, στο οποίο και έφτασε στις 18 Δεκεμβρίου.

Αντιμετωπίζοντας άγριες θαλασσοταραχές, χιονοθύελλες και

παγόβουνα, το Beagle εξερεύνησε την ευρύτερη περιοχή έως και τα τέλη Φεβρουαρίου του 1833, φτάνοντας μέχρι τα νησιά Φώκλαντ την 1η Μαρτίου. Στις 6 Απριλίου, το Beagle και ένα ακόμη πλοίο, το οποίο αγόρασε ο FitzRoy με δική του πρωτοβουλία και το μετονόμασε αργότερα σε Adventure, άφησαν πίσω τους τα νησιά Φώκλαντ και 20 μέρες αργότερα έπιασαν λιμάνι στο Maldonado, όπου και άφησαν τον Δαρβίνο, συνεχίζοντας το ταξίδι τους για το γειτονικό Montevideo. Απαραίτητες επισκευές στο σκαρί του Adventure θα τους κρατήσουν στην ευρύτερη περιοχή για αρκετές εβδομάδες, γεγονός που θα δώσει την ευκαιρία στον Δαρβίνο να συνεχίσει την εξερεύνηση της ενδοχώρας και τη συλλογή δειγμάτων. Εν τέλει τα δύο πλοία έπλευσαν στον ποταμό Ρίο Νέγκρο της Αργεντινής και στις 8 Αυγούστου ο Δαρβίνος αναχώρησε για μια ακόμη εξερεύνηση της ενδοχώρας, φτάνοντας ξανά μέχρι την Πούντα Άλτα, όπου και ανακάλυψε τον σχεδόν άθικτο απολιθωμένο σκελετό ενός μεγάλου ζώου.

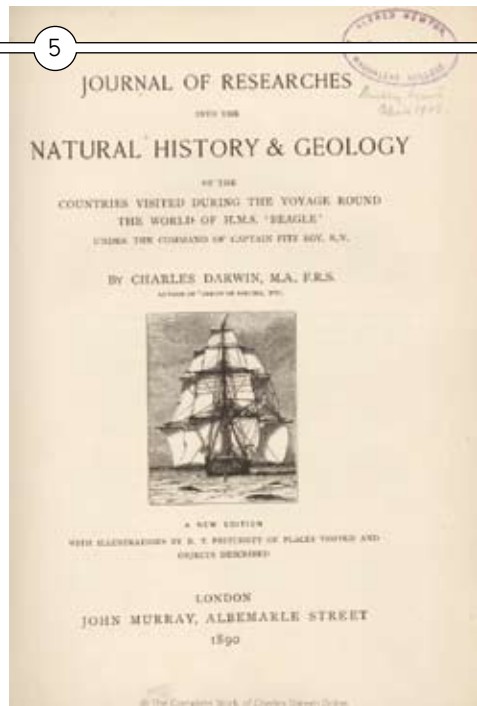
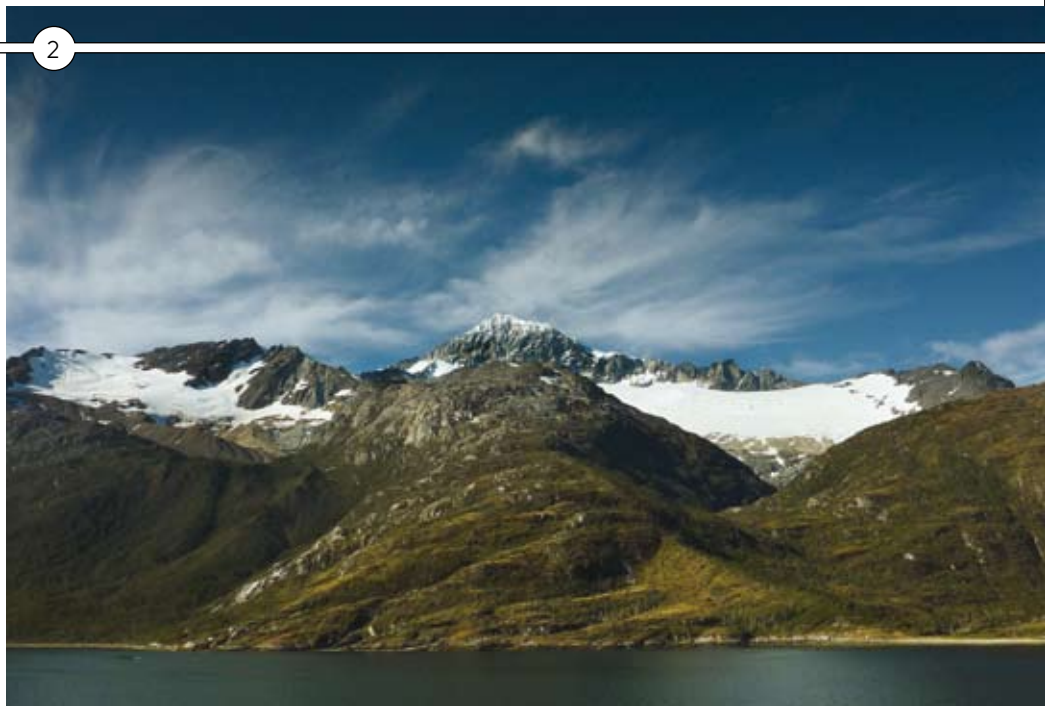
Τα αναπάντητα ερωτήματα που συνεχώς γεννούσε η ανήσυχη σκέψη του Δαρβίνου πλήθαιναν με κάθε νέα του ανακάλυψη και αναμφίβολα αποτέλεσαν τη βάση για τη μετέπειτα διατύπωση της **Θεωρίας της Εξέλιξης**. Η εξερεύνηση αυτή της νοτιοανατολικής πλευράς της Νότιας Αμερικής συνεχίστηκε με τον Δαρβίνο να πραγματοποιεί εξορμήσεις στο εσωτερικό της ηπείρου και εν τέλει στις αρχές Δεκεμβρίου το Beagle απέπλευσε για μια ακόμη φορά από το Montevideo, φτάνοντας στα Στενά του Μαγγελάνου στις 26 Ιανουαρίου 1834. Η εξερεύνηση αυτής της περιοχής της Γης του Πυρός συνεχίστηκε για αρκετές εβδομάδες και επεκτάθηκε ξανά μέχρι τα νησιά Φώκλαντ. Στη συνέχεια, διαπλέοντας ανοικτά της νότιας Παταγονίας, το Beagle και το Adventure συνέχισαν την επισκόπηση των στενών του Μαγγελάνου και στις 11 Ιουνίου έπλεαν πια στον Ειρηνικό ωκεανό.

Κατευθυνόμενα βόρεια, κατά μήκος των δυτικών ακτών της Νότιας Αμερικής, τα δύο πλοία έφτασαν στο νησί Chiloe του αρχιπελάγους Chonos στις 28 Ιουνίου 1834 και στο Valparaiso της Χιλής περίπου 1 μήνα αργότερα. Και ενώ το Beagle εξερευνούσε τις παράκτιες περιοχές, ο Δαρβίνος ξεκίνησε στα μέσα του Αυγούστου για την πρώτη του αποστολή στις Άνδεις, η οποία ολοκληρώθηκε με την επιστροφή του στο Valparaiso, στις 27 Σεπτεμβρίου. Καταπονημένος, όμως, από τις κακουχίες του ταξιδιού, ο Δαρβίνος αρρώστησε. Και ενώ

ανάρρωνε, πληροφορήθηκε ότι ο FitzRoy, σ' ένα από τα γνωστά ξεσπάσματά του, πούλησε το Adventure και κατέθεσε την παραίτησή του. Ο ευέξαπτος πλοίαρχος είχε φαίνεται εξοργιστεί με τη στάση του Βρετανικού Ναυαρχείου, το οποίο επέκρινε την αγορά του Adventure χωρίς τη συγκατάθεσή του. Ευτυχώς, όμως, την παραίτησή του αυτή την ανακάλεσε αργότερα.

Στις 10 Νοεμβρίου 1834 η εξερεύνηση συνεχίστηκε με την επισκόπηση των νησιών του Αρχιπελάγους Chonos και τελικά το Beagle έριξε άγκυρα στο νησί Valdivia στις 8 Φεβρουαρίου 1835. Δώδεκα μέρες αργότερα, στο ίδιο αυτό μέρος, το πλήρωμα του Beagle και ο Δαρβίνος βίωσαν την τρομακτική εμπειρία ενός καταστροφικού σεισμού διάρκειας 3 λεπτών. Όταν μάλιστα έφτασαν στο λιμάνι Talcahuano, στην Concepción της Χιλής, στις 4 Μαρτίου διαπίστωσαν ότι, όπως και στη Valdivia, οι καταστροφές από τον σεισμό ήταν τεράστιες, ενώ σε αρκετές περιοχές παρατήρησαν ότι οι υποθαλάσσιοι βράχοι είχαν ανυψωθεί αρκετά μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Με την επιστροφή τους στο Valparaiso στις 14 Μαρτίου, ο Δαρβίνος ξεκίνησε τη δεύτερη αποστολή του στις Άνδεις, η οποία διήρκεσε σχεδόν 1 μήνα. Εκεί, 2.100 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 1.100 km από την ακτή, ο Δαρβίνος ανακάλυψε υποθαλάσσιες και στερεοποιημένες πια ροές λάβας, καθώς και απολιθωμένα δέντρα και απολιθώματα οστράκων. Η τρίτη και τελευταία του εξόρμηση στις Άνδεις, με αφετηρία το Valparaiso στις 27 Απριλίου 1835, ολοκληρώθηκε στις 5 Ιουλίου.

Στις 19 Ιουλίου, το Beagle είχε πλέον φτάσει στο Callao, έξω από τη Λίμα του Περού και στις 7 Σεπτεμβρίου συνέχισε το ταξίδι του προς το Αρχιπέλαγος των νησιών Γκαλαπάγκος, στα ανοικτά του Εκουαδόρ, όπου και έφτασε στις 15 Σεπτεμβρίου 1835. Λίγες μέρες αργότερα, ο Δαρβίνος ενημερώθηκε από τον Άγγλο διοικητή των νησιών ότι μπορούσε κάποιος να προσδιορίσει από ποιο νησί προερχόταν η κάθε χελώνα του Αρχιπελάγους, παρατηρώντας απλά το καβούκι της. Οι εκτεταμένες παρατηρήσεις που πραγματοποίησε ο Δαρβίνος στη διάρκεια των 5 εβδομάδων παραμονής του στα νησιά Γκαλαπάγκος αποδείχθηκαν καθοριστικές για τη μετέπειτα διαμόρφωση της θεωρίας του. Εκτός από τον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο οι γιγάντιες χελώνες της σχεδόν παρθένας αυτής περιοχής είχαν προσαρμοστεί στα επί μέρους οικοσυστήματα του κάθε νησιού, με αντίστοιχο



1: Γεωλογικός χάρτης της Παταγονίας, σχεδιασμένος από τον Δαρβίνο (© Cambridge University Library). 2: Το κανάλι του Beagle, ένα από τα 3 πλεύσιμα περάσματα μεταξύ του Ατλαντικού και του Ειρηνικού ωκεανού. 3: Το όρος FitzRoy στις Άνδεις, που ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του πλοιάρχου του Beagle. 4: Χελώνα των Νησιών Γκαλαπάγκος. 5: Το ταξίδι του Beagle, προμετωπίδα της έκδοσης του 1890 (ευγενής παραχώρηση: John van Wyhe ed. 2002, The Complete Work of Charles Darwin Online, <http://darwin-online.org.uk>).

τρόπο φαίνεται ότι είχαν προσαρμοστεί και άλλα ζωικά είδη της περιοχής, όπως οι σπίνιοι και τα ιγκουάνα, μεταβάλλοντας με τέτοιο τρόπο κάποια από τα χαρακτηριστικά τους, ώστε να επιβιώνουν ευκολότερα.

Ο σπόρος μιας μεγαλειώδους ιδέας άρχισε σιγά-σιγά να παίρνει σάρκα και οστά. Ίσως δηλαδή τα ζώα και τα φυτά του πλανήτη μας να μην ήταν σταθερά και αμετάβλητα, αλλά να κατάγονταν από κοινούς προγόνους. Ίσως με το πέρασμα των χιλιετιών, ορισμένοι έμβιοι οργανισμοί να ανέπτυσαν σταδιακά διαφορετικά «χρήσιμα» χαρακτηριστικά, που τους επέτρεπαν να επιβιώνουν και να αναπαράγονται ευκολότερα από άλλους οργανισμούς του ίδιου είδους. Και ίσως, εν τέλει, τα χαρακτηριστικά αυτά να τα κληρονομούσαν και σε κάποιους από τους απογόνους τους, σε μια εξελικτική διαδικασία που, όπως γνωρίζουμε σήμερα, διήρκεσε τουλάχιστον 3,5 δισεκατομμύρια χρόνια. Αυτή η διαδικασία της φυσικής επιλογής, όπως την ονόμασε ο Δαρβίνος, «μεταβάλλει» με την πάροδο του χρόνου

το κάθε είδος, και η επιβίωση ή η εξαφάνιση του καθενός από αυτά προσδιορίζεται από την ικανότητά του να προσαρμόζεται στο περιβάλλον του.

Το απόγευμα της 20ής Οκτωβρίου το Beagle άφησε πίσω του τα νησιά Γκαλαπάγκος με προορισμό την Ταϊτή, κάπου 5.000 km μακριά, φτάνοντας σε αυτό το νησί του Ειρηνικού στις 15 Νοεμβρίου 1835. Περίπου έναν μήνα αργότερα, το Beagle έφτασε στη Νέα Ζηλανδία και στις 12 Ιανουαρίου 1836 στο Σίδνεϊ της Αυστραλίας. Στο τέλος του ίδιου μήνα το Beagle σάλπαρα για την Τασμανία, όπου και έφτασε στις 5 Φεβρουαρίου, ενώ διαπλέοντας στη συνέχεια τις νότιες ακτές της Αυστραλίας έφτασε στα νησιά Keeling την 1η Απριλίου. Στις 29 Απριλίου το Beagle σταμάτησε στο νησί Μαυρίκιος και στις 31 Μαΐου στο Ακρωτήριο της Καλής Ελπίδας, το νοτιότερο άκρο της Αφρικής. Εκεί, μερικές μέρες αργότερα, ο Δαρβίνος και ο FitzRoy επισκέφθηκαν τον Βρετανό αστρονόμο John Herschel και, επιβιβαζόμενοι εκ νέου στο Beagle, συνέχισαν το

ταξίδι τους βόρεια, κατά μήκος των δυτικών ακτών της Αφρικής, φτάνοντας στο νησί της Αγίας Ελένης, όπου είχε εξοριστεί ο Ναπολέοντας, στις 8 Ιουλίου.

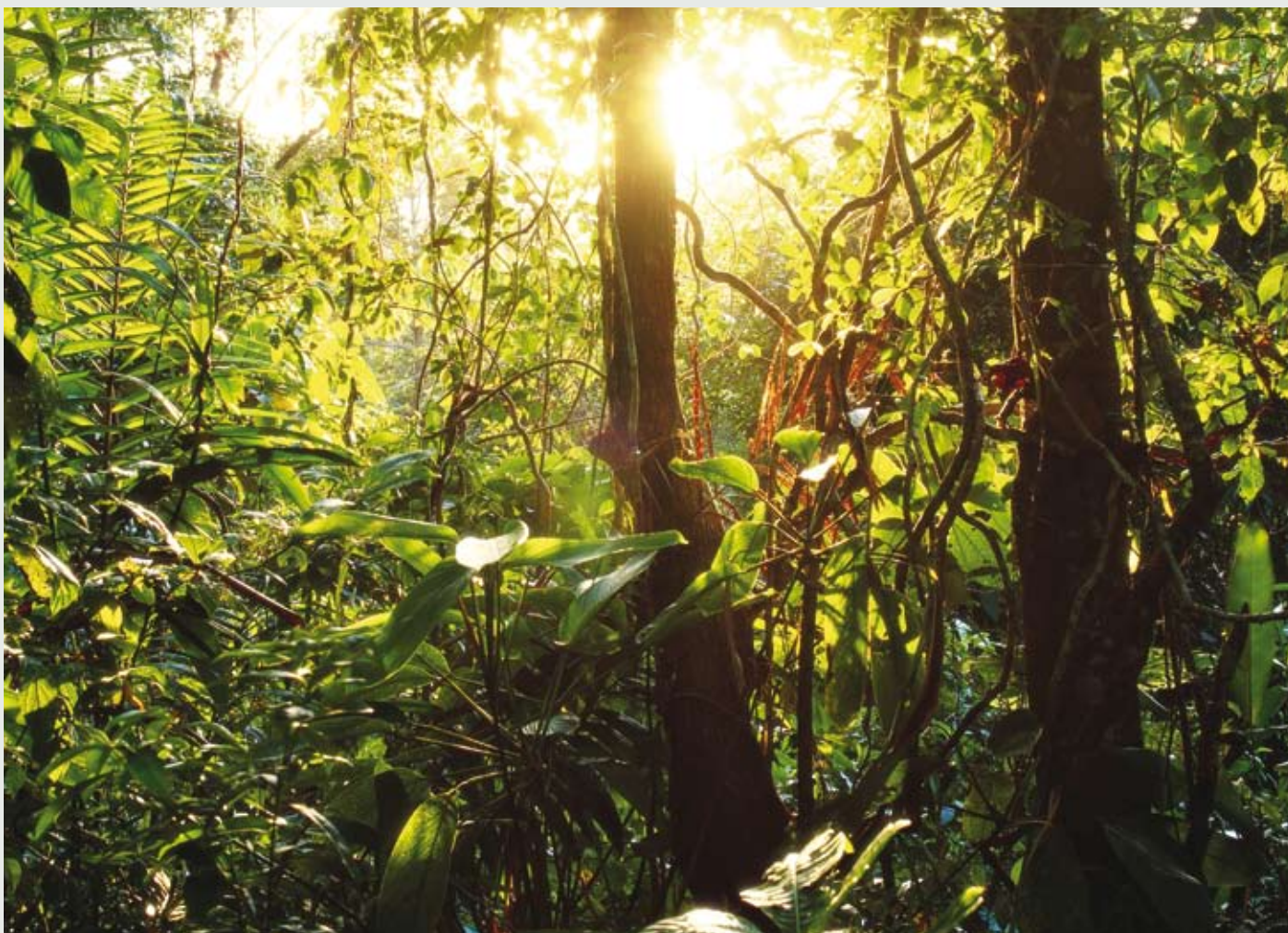
Λίγες μέρες αργότερα κατέπλευσαν στο Ascension Island, ένα απομονωμένο ηφαιστειογενές νησί 1600 km ανοικτά της Αφρικής. Όμως οι αμφιβολίες του FitzRoy σχετικά με ορισμένες μετρήσεις που είχαν πραγματοποιήσει στο Σαλβαντόρ της Βραζιλίας τον οδήγησαν στην απόφαση, αντί να πλεύσει βόρεια προς Αγγλία, να συνεχίσει δυτικά προς τη νότια Αμερική και τη Βραζιλία, όπου και έφτασαν την 1η Αυγούστου. Με την ολοκλήρωση των νέων μετρήσεων, το Beagle άνοιξε τα πανιά του για το ταξίδι της επιστροφής και μετά από έναν περίπλου που διήρκεσε σχεδόν 5 χρόνια, έφτασε στο Falmouth της Αγγλίας στις 2 Οκτωβρίου 1836.

Η δημοσίευση των επιστολών, που έστειλε ο Δαρβίνος τακτικά προς τον μέντορά του Henslow αναφορικά με τη γεωλογία

της Νότιας Αμερικής, καθώς και η εντυπωσιακή συλλογή απολιθωμάτων του, τον είχαν ήδη κάνει ευρύτερα γνωστό. Με την επιστροφή του στην Αγγλία δεν άργησαν να ακολουθήσουν και οι πρώτες του ανακοινώσεις, γεωλογικού κατά κύριο λόγο περιεχομένου, ενώ τον Αύγουστο του 1839 δημοσιεύθηκε το ημερολόγιο που κρατούσε κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του, που θα μείνει γνωστό ως το **Ταξίδι του Beagle**. Όμως, παρόλο που η μετέπειτα μελέτη των λεπτομεριών του σημειώσεων θα αποκρυστάλλωνε σχετικά γρήγορα τις σκέψεις του αναφορικά με την καταγωγή των ειδών, ο ίδιος δίσταζε να τις δημοσιεύσει, συνειδητοποιώντας ότι πολλοί θα αντιμετώπιζαν τη Θεωρία της Εξέλιξης ως μια επίθεση στη θρησκεία και ότι, προκειμένου να πείσει την ευρύτερη κοινωνία και το επιστημονικό κατεστημένο της εποχής του για την ορθότητά της, τα επιχειρήματά του θα έπρεπε να είναι ακλόνητα. Εν τέλει, το κορυφαίο του έργο, με τίτλο **Περί της Καταγωγής των Ειδών Μέσω Φυσικής Επιλογής** δημοσιεύθηκε την Τετάρτη 24 Νοεμβρίου 1859, 23 ολόκληρα χρόνια μετά την επιστροφή του Δαρβίνου στην Αγγλία.

Κατερίνα Τσικαλάκη

Βιολόγος, Επιστημονική Συνεργάτις του Ιδρύματος Ευγενίδου



7ο κεφάλαιο

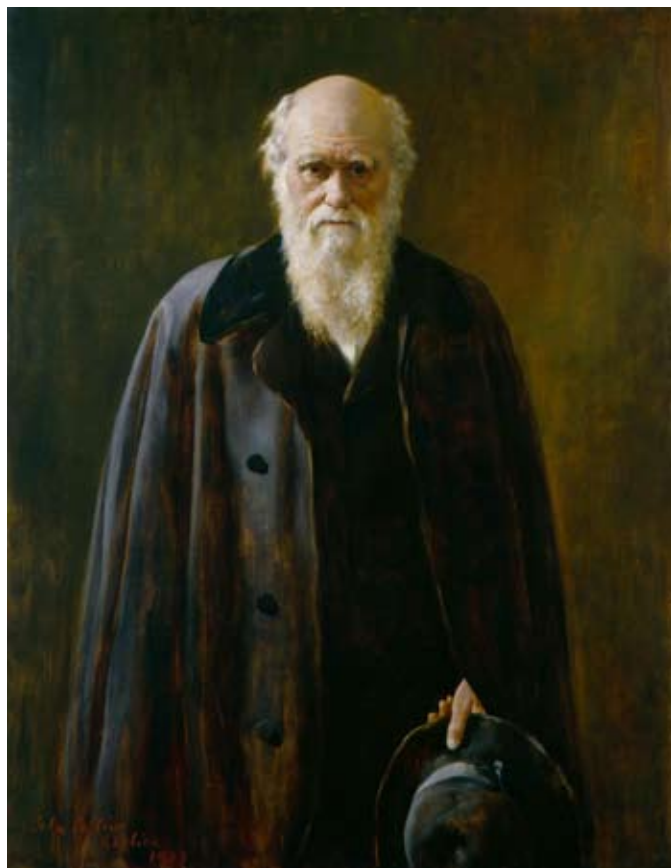
Εξέλιξη και Φυσική Επιλογή

Στις αρχές του 19ου αιώνα οι πρώτοι «βιολόγοι» δυσκολεύονταν να εξηγήσουν το πώς προέκυψε η ποικιλία των ζωντανών οργανισμών στη Φύση και αδυνατούσαν να ερμηνεύσουν την εκπληκτική προσαρμογή τους στο περιβάλλον τους. Η αντίληψη που επικρατούσε ήταν ότι ο κόσμος είναι σταθερός και αυτό υποστήριζαν και οι ταξινόμοι που κατέγραφαν τα είδη των ζωντανών οργανισμών, όπως ο **Κάρολος Λινναίος** (1707–1778). Πώς προέκυπταν, όμως, τα νέα είδη; Αρχικά υποστηριζόταν ότι τα νέα είδη προέκυπταν από απότομες αλλαγές ή από διασταυρώσεις μεταξύ ειδών και δημιουργία υβριδίων. Αργότερα, όμως, εμφανίστηκε η ιδέα της βαθμιαίας

αλλαγής των ειδών. Ο **Jean-Baptiste de Lamarck** (1744 – 1829) ήταν εκείνος που το 1809 με τη **Ζωολογική φιλοσοφία** πρότεινε έναν τρόπο αλλαγής και δημιουργίας νέων ειδών με βαθμιαίο τρόπο μέσα από την κληρονόμηση των επίκτητων χαρακτήρων. Πολλές ιδέες που είχαν εκφραστεί ήδη από την εποχή του μεγάλου ταξιδιού του **Καρόλου Δαρβίνου** με το Beagle, κατά τα έτη 1831–1836, συναντήθηκαν στη θαυμαστή του σκέψη, ζυμώθηκαν με τις δικές του, απέκτησαν σάρκα και οστά μέσα από τις παρατηρήσεις του και αποτέλεσαν και για εκείνον, αλλιά και για ολόκληρο τον κόσμο, μία εκπληκτική αποκάλυψη πολλών από τα μυστικά της Φύσης.

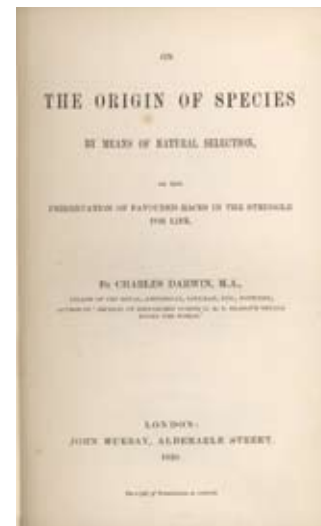
Ο Δαρβίνος, όμως, δεν ήταν ο μόνος που κατέληγε εκείνη την περίοδο σε αυτά τα συμπεράσματα. Ο **Alfred Russel Wallace** (1823 – 1913), ένας ανεξάρτητος φυσιοδίφης, έγραψε στον Δαρβίνο το 1858, γνωστοποιώντας του τις απόψεις του, οι οποίες ταυτίζονταν σχεδόν με εκείνες του Δαρβίνου. Επρόκειτο για μία εκπληκτική σύμπτωση! Εκείνο που ανακάλυψαν και οι δύο φυσιοδίφες ταυτόχρονα ήταν η ιδέα της **φυσικής επιλογής**, η οποία πυροδοτεί την εξέλιξη της ζωής. Οι δύο άνδρες, αν και προέρχονταν από εντελώς διαφορετικές κοινωνικές τάξεις, μοιράζονταν ορισμένα πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά. Ήταν και οι δύο Βρετανοί φυσιοδίφες, είχαν ταξιδέψει στα τροπικά αρχιπελάγη για να συλλέξουν διάφορους οργανισμούς και είχαν διαβάσει τα ίδια βιβλία. Η επικοινωνία του Wallace με τον Δαρβίνο ήταν, άλλωστε, καταλυτική για την επίσπευση της έκδοσης του «μακροσκελούς επιχειρήματός» του, όπως αποκαλούσε την **Καταγωγή των Ειδών** ο ίδιος ο Δαρβίνος.

Η Καταγωγή των Ειδών περιέχει επιχειρήματα που στηρίζουν τη **βιολογική εξέλιξη**, δηλαδή τη μεταβολή οποιασδήποτε οντότητας κατά τη διάρκεια του χρόνου με σταδιακή συσσώρευση αλλαγών, **μέσω της φυσικής επιλογής**. Μέσα απ’ αυτήν την αντίληψη προκύπτει και η ιδέα της κοινής καταγωγής όλων των ζωντανών όντων που έζησαν και ζουν στη Γη από έναν κοινό πρόγονο. Ο Δαρβίνος παραθέτει με μεγάλη λεπτομέρεια τα φαινόμενα που αποδεικνύουν το γεγονός της εξέλιξης, συχνά προβλέποντας τα επιχειρήματα των επικριτών του και προσπαθώντας εκ των προτέρων να τα αντικρούσει. Σήμερα, φυσικά, η θεωρία της εξέλιξης έχει αναπτυχθεί πάρα πολύ από τον καιρό του Δαρβίνου και του Wallace, αφού πολλά από τα κενά της συμπληρώθηκαν και πολλές αποδείξεις συλλέχθηκαν, έτσι ώστε να έχουμε πλέον τη σύγχρονη εξελικτική θεωρία, καθώς και την επιστήμη της Εξέλιξης. Η Εξέλιξη στις μέρες μας χρησιμοποιεί όλους τους τομείς της Βιολογίας, από την Οικολογία και την Ταξινομική, έως τη Γενετική και τη Βιοπληροφορική. Αλλά συμβαίνει και το αντίθετο: όλοι οι τομείς της Βιολογίας χρησιμοποιούν την Εξέλιξη, γιατί όπως έγραψε και ο μεγάλος εξελικτικός βιολόγος **Theodosius Dobzhansky** (1900 – 1975), «τίποτε στη Βιολογία δεν έχει νόημα, παρά μόνο υπό το φως της εξέλιξης». Στον «Οδηγό» της παράστασης αυτής θα περιοριστούμε στην περιγραφή του βασικού μηχανισμού της εξέλιξης, μέσα από τη ματιά των φυσιοδιφών της εποχής του Δαρβίνου, καθώς οτιδήποτε άλλο θα υπερέβαινε τους ειδικότερους στόχους του.



Πάνω: Πορτρέτο του Δαρβίνου, από τον John Collier το 1883 (National Portrait Gallery, London).

Κάτω: Ο Alfred Wallace (αριστερά), ο Jean Baptiste de Lamarck (κέντρο) και προμετωπίδα του βιβλίου *Το Αρχιπέλαγος της Μαλαισίας* του Wallace, σε έκδοση του 1890



Τι είναι όμως η φυσική επιλογή; Ας δούμε ένα κλασικό παράδειγμα: Μία ομάδα (πληθυσμός) από καμηλοπαρδάλεις πριν από πολλές χιλιάδες χρόνια, ζει σε μία περιοχή με ψηλά δένδρα. Σ’ αυτήν την ομάδα, όπως σε όλους τους φυσικούς πληθυσμούς, υπάρχει **ποικιλία** στα χαρακτηριστικά των ατόμων, π.χ. μήκος λαιμού – δεν έχουν όλες οι καμηλοπαρδάλεις το ίδιο. Εκείνες οι καμηλοπαρδάλεις που έχουν μακρύτερο λαιμό έχουν ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες: μπορούν να φτάσουν τα πιο ψηλά κλαδιά και να τραφούν καλύτερα με περισσότερα φύλλα. Δηλαδή, ο χαρακτήρας «μακρύς λαιμός» του χαρακτηριστικού «μήκος λαιμού» αποτελεί πλεονέκτημα σε σχέση με τον χαρακτήρα «κοντός λαιμός» στο συγκεκριμένο περιβάλλον, δηλαδή στην περιοχή με τα ψηλά δένδρα.

Οι καμηλοπαρδάλεις που έχουν αυτόν τον χαρακτήρα είναι καλύτερα προσαρμοσμένες στο συγκεκριμένο περιβάλλον και είναι αυτές που θα επιβιώσουν καλύτερα και θα αφήσουν περισσότερους απογόνους. Εφόσον ο χαρακτήρας «μακρύς λαιμός» μπορεί να κληρονομηθεί και οι καμηλοπαρδάλεις με μακρύ λαιμό κάνουν περισσότερους απογόνους σε σχέση με εκείνες που έχουν κοντό λαιμό, στην επόμενη γενιά περισσότερες καμηλοπαρδάλεις θα έχουν μακρύ λαιμό. Με την πάροδο των γενεών ο πληθυσμός αλληλάζει ως προς το χαρακτηριστικό «μήκος λαιμού» και προκύπτουν ολόένα και περισσότερες καμηλοπαρδάλεις με μακρύ λαιμό. Έτσι σήμερα, μετά από πάρα πολλές γενιές, η καμηλοπαρδαλη,

Αριστερά: Η Καταγωγή των Ειδών, προμετωπίδα της έκδοσης του 1859 (ευγενής παραχώρηση: John van Wyhe ed. 2002, The Complete Work of Charles Darwin Online, <http://darwin-online.org/uk/>).

Δεξιά: Η επιλογή των χαρακτηριστικών που προσδίδουν πλεονέκτημα, όπως ο μακρύς λαιμός στις καμηλοπαρδάλεις, γίνεται σε βάθος γενεών.

διαθέτει έναν μακρύ λαιμό που τη βοηθάει να τρέφεται με τα φύλλα των ψηλότερων κλαδιών. Σίγουρα δεν έχουν όλες οι καμηλοπαρδάλεις τον ίδιο λαιμό, αλλά κατά μέσο όρο έχουν μακρύτερο από τους προγόνους τους. Η επιλογή, δηλαδή, των χαρακτηριστικών που προσδίδουν πλεονέκτημα στους κατόχους τους γίνεται σε βάθος γενεών από τις ανάγκες που επιβάλλει το ίδιο το φυσικό περιβάλλον, κι έτσι ο τρόπος ζωής του οργανισμού, που ονομάστηκε από τον Δαρβίνο «Φυσική Επιλογή», είναι η κινητήρια δύναμη της εξέλιξης.

Σε κάθε είδος γεννιούνται πολύ περισσότερα άτομα από εκείνα που θα επιβιώσουν, ώστε τελικά να καταφέρουν να αναπαραχθούν. Στα ψάρια, για παράδειγμα, εκατομμύρια αυγά γεννιούνται, για να επιβιώσει ένα πολύ μικρό ποσοστό ψαριών έως την ενηλικίωση. Σύμφωνα με τον οικονομολόγο **Thomas Malthus** (1766 – 1834), ένας πληθυσμός αυξάνεται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό απ’ ό,τι οι πόροι που του εξασφαλίζουν την επιβίωση, όπως είναι η τροφή. Την ιδέα αυτή δανείστηκε ο Δαρβίνος και έγραψε ότι όλοι οι οργανισμοί βρίσκονται σε έναν συνεχή αγώνα για την ύπαρξή τους. Μέσα απ’ τον αγώνα για την ύπαρξη, «νικητές» αναδεικνύονται οι οργανισμοί που καταφέρνουν σ’ ένα δεδομένο περιβάλλον, με «όπλα» τα φυσικά χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά τους, να αφήσουν τους περισσότερους βιώσιμους απογόνους. Εκείνοι που παράγουν περισσότερους απογόνους κληροδοτούν τα χαρακτηριστικά τους σε μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού, ▶



όπως οι καμηλοπαρδάλεις με τον μακρύτερο λαιμό. Έτσι τα χαρακτηριστικά που εξασφάλισαν την επιβίωση και την αναπαραγωγή στους κατόχους τους έχουν περισσότερες πιθανότητες να διαιωνιστούν.

Μέσα από τον αγώνα για την ύπαρξη εμφανίζεται και ο ανταγωνισμός, που συχνά δίνει την εικόνα μίας Φύσης με ματωμένα νύχια και δόντια. Μπορεί κάποιος να φανταστεί σκληρές μάχες ανάμεσα σε ζώα του ίδιου ή διαφορετικού είδους που καταλήγουν σε βάρβαρες σκηνές. Όμως η μεγαλύτερη μάχη που έχει να δώσει ένας οργανισμός είναι, αδιαμφισβήτητη, η μάχη εναντίον των αντίξων συνθηκών του αβιοτικού περιβάλλοντος. Αυτές οι φυσικές συνθήκες της ζωής, η θερμοκρασία, το υψόμετρο, η διαθεσιμότητα τροφής κ.ά., είναι που διαμορφώνουν τις σχέσεις μεταξύ των ατόμων ενός είδους και ανάμεσα στα διαφορετικά είδη. Ο αγώνας, όμως, για την ύπαρξη δεν λειτουργεί πάντα με τη μορφή αντιπαράθεσης. Για παράδειγμα, τα δένδρα σε ένα τροπικό δάσος βροχής που αγωνίζονται για μία θέση στον Ήλιο δεν αντιλαμβάνονται την παρουσία των «αντιπάλων» τους, αλλά μόνο την ύπαρξη ή όχι ηλιακής ακτινοβολίας.



Πολλά εντυπωσιακά σωματικά εργαλεία, αλλά και στρατηγικές έχουν επιστρατευθεί στον αγώνα για την ύπαρξη. Συχνά, μάλιστα, οι στρατηγικές αυτές μπορεί να αφορούν στη συνεργασία ανάμεσα σε άτομα του ίδιου είδους, αλλά και διαφορετικών ειδών. Αυτή η δημιουργία σχέσεων αμοιβαιότητας είναι μία στρατηγική, η οποία έρχεται σε αντίθεση με την αντιπαλότητα που χαρακτηρίζει τον αγώνα για την ύπαρξη. Έχει όμως θαυμαστά αποτελέσματα με συγκλονιστικά παραδείγματα αλτρουισμού, που συχνά μετατρέπεται σε αυτοθυσία, καθώς και ανταποδοτικής συμβίωσης μεταξύ ατόμων διαφορετικών ειδών.



Ο αγώνας για την ύπαρξη μπορεί να είναι «ματωμένος» (πάνω), πιο «ειρηνικός» (κέντρο), όπως στην περίπτωση ενός τροπικού δάσους όπου τα δένδρα δεν αντιλαμβάνονται «αντιπάλους» ή ακόμη και «αλτρουιστικός» (κάτω), όπως στην περίπτωση των εργατών στα μυρμήγκια.

από το αίμα που συνέλεξαν κατά τη διάρκεια της νύκτας για τον εαυτό τους, προκειμένου να τραφούν εκείνες που δεν τα κατάφεραν.

Η συμβίωση, επίσης, είναι μία σχέση αμοιβαιότητας ανάμεσα σε άτομα διαφορετικών ειδών. Τα ψυχανθή φυτά, όπως το φασόλι και το τριφύλλι, συμβιώνουν με βακτήρια στις ρίζες τους, τα οποία δεσμεύουν το απαραίτητο για τη σύνθεση πρωτεϊνών άζωτο και το μετατρέπουν σε εύληπτη μορφή γι' αυτά. Πολλές σχέσεις αμοιβαιότητας μεταξύ διαφορετικών ειδών έχουν τις ρίζες τους στα βάθη των αιώνων. Καθώς έχουν διατηρηθεί μετά από πολλές γενιές και το όφελος είναι αμοιβαίο, συχνά παρατηρείται και το φαινόμενο της συνεξέλιξης, όπου και οι δύο πλευρές εμφανίζουν προσαρμοσμένα χαρακτηριστικά και συμπεριφορά για το καλό της συνεργασίας. Το πιο κλασικό παράδειγμα είναι εκείνο των επικονιαστών των ανθέων (μέλισσες, νυχτερίδες, πουλιά). Τα ανθοφόρα φυτά εξελίχθηκαν, ώστε να προσελκύουν τους ιπτάμενους συνεργάτες τους, αναπτύσσοντας γι' αυτό τον σκοπό άνθη με ελκυστικά χρώματα και αρώματα, που δίνουν το μήνυμα «τροφή» στον εγκέφαλο του επικονιαστή. Η τροφή, το θρεπτικό νέκταρ που περιέχουν τα άνθη, είναι η πληρωμή για τη μεταφορά της γύρης και συνήθως είναι αδύνατον να την προσεγγίσει κάποιος χωρίς να πασπαλειφτεί με τους γυρεόκοκκους. Στο επόμενο βλουλούδι, οι γυρεόκοκκοι θα αφεθούν στο θηλυκό μέρος του άνθους κι έτσι θα πραγματοποιηθεί η γονιμοποίηση.

Το μυστήριο των μυστηρίων για την εποχή του Δαρβίνου ήταν ο τρόπος που δημιουργούνται τα νέα είδη. Σήμερα γνωρίζουμε, φυσικά, ότι τα νέα είδη προκύπτουν από τη διαδικασία της **ειδογένεσης**, όπου ένα είδος διαιρείται σε δύο νέα. Η ειδογένεση βέβαια δεν συμβαίνει από τη μία μέρα στην άλλη. Χρειάζονται πολλές γενιές και τα όρια ανάμεσα στα προγονικά και στα νέα είδη είναι ασαφή.

Όμως, τι σημαίνει «είδος» στη Βιολογία; Ο μεγάλος βιολόγος του 20ού αιώνα **Ernst Mayr** (1904 – 2005) χαρακτήρισε ως βιολογικό είδος μία ομάδα πληθυσμών, οι οποίοι μπορούν να διασταυρωθούν μόνο μεταξύ τους, με αποτέλεσμα γόνιμους απογόνους, κι όχι με άλλους πληθυσμούς που δεν ανήκουν στο ίδιο είδος. Αυτός ο ορισμός μπορεί να εφαρμοζέται εύκολα στα ζώα, αλλά δεν είναι καθολικός. Για παράδειγμα τα βακτήρια, που αναπαράγονται το καθένα μόνο του χωρίς ζευγάρωμα, δεν μπορούν να ταξινομηθούν σε είδη σύμφωνα

με τον ορισμό του Mayr. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε παραδείγματα με ζώα, όπου τα όρια ανάμεσα στα είδη είναι πιο σαφή.

Για να δημιουργηθούν δύο νέα είδη από έναν πληθυσμό, πρέπει να εμφανιστούν εμπόδια στην αναπαραγωγή μεταξύ δύο μερίδων του πληθυσμού. Μπορεί ένας πληθυσμός να χωριστεί σε δύο μέρη λόγω διαφορών σε μερικά σωματικά χαρακτηριστικά, αλλά οι δύο αυτοί πληθυσμοί δεν θα γίνουν πότε δύο ξεχωριστά είδη, αν δεν **απομονωθούν αναπαραγωγικά**. Η αναπαραγωγική απομόνωση μπορεί να δημιουργηθεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο κλασικός τρόπος είναι με τη βοήθεια ενός γεωγραφικού εμποδίου ή μέσω της μετανάστευσης. Καθώς ο πληθυσμός χωρίζεται στα δύο και τα άτομα του ενός μέρους αδυνατούν να ζευγαρώσουν με τα άτομα του άλλου, οι διαφορές ανάμεσά τους συσσωρεύονται και, μετά από πολλές γενιές, καθίστανται πλέον τόσο μεγάλες που, αν διασταυρωθούν άτομα από τα δύο νέα είδη, οι απόγονοί τους θα είναι στérροι.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα γεωγραφικής απομόνωσης λόγω μετανάστευσης αποτελούν τα υποείδη των γιγάντιων χελωνών των νησιών Γκαλαπάγκος. Το πιο πιθανό είναι ότι τα νησιά αυτά, που βρίσκονται 1.000 km δυτικά του Εκουαδόρ, αποικήθηκαν από χελώνες της ηπειρωτικής Νοτίου Αμερικής πριν από πολλές χιλιαετίες. Οι χελώνες-ιδρυτές των πληθυσμών του αρχιπελάγους Γκαλαπάγκος μάλλον παρασύρθηκαν παρά τη θέλησή τους από τα θαλάσσια ρεύματα και αποίκησαν πρώτα τα παλαιότερα νησιά. Η υπόθεση αυτή στηρίζεται στο ότι οι χελώνες αυτές μπορούν να επιπλέουν και να αντέχουν

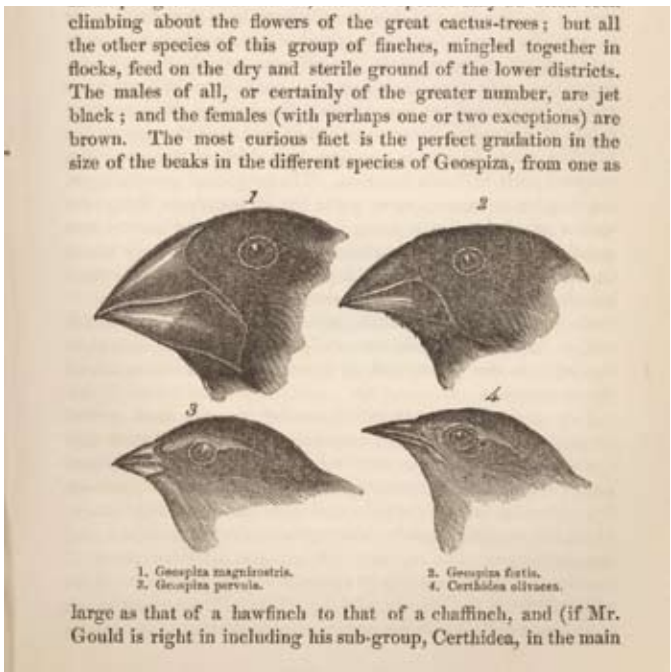


Χελώνα των νησιών Γκαλαπάγκος.



Αριστερά: Χάρτης των νησιών Γκαλαπάγκος.

Κάτω: Σελίδα από το *Ταξίδι του Beagle*, στην οποία ο Δαρβίνος αναλύει το σχήμα του ράμφους των περίφημων σπίνων του, από την έκδοση του 1845 (ευγενής παραχώρηση: John van Wyhe ed. 2002, The Complete Work of Charles Darwin Online, <http://darwin-online.org.uk/>).



για μεγάλο διάστημα χωρίς φαγητό και νερό. Οι πληθυσμοί αυτοί διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από νησί σε νησί, ώστε ένα έμπειρο μάτι να μπορεί να καταλάβει την καταγωγή τους με την απλή παρατήρηση της εξωτερικής τους μορφολογίας. Οι πληθυσμοί αυτοί σήμερα θεωρούνται ότι αποτελούν υποείδη του είδους *Chelonoidis nigra*, καθώς σε αιχμαλωσία έχουν προκύψει γόνιμοι απόγονοι από διασταυρώσεις χελωνών διαφορετικής καταγωγής.

Ένας ακόμη πιο εντυπωσιακός τρόπος ειδογένεσης, μέσα από τον οποίο δημιουργήθηκαν οι περίφημοι **σπίνοι του Δαρβίνου**, είναι όταν τμήματα του πληθυσμού προσαρμόζονται σε διαφορετικούς πόρους, που είναι διαθέσιμοι σε μία περιοχή. Παρόλο που δεν υπάρχει γεωγραφική απομόνωση, οι σπίνες των νησιών Γκαλαπάγκος χωρίστηκαν σε πληθυσμούς ανάλογα με το σχήμα του ράμφους τους, στο οποίο αντικατοπτρίζεται ο προσανατολισμός της διατροφής τους (από φραγκόσυκα έως αίμα άλλων πουλιών). Με το πέρασμα των γενεών προέκυψαν εμπόδια στην αναπαραγωγή μεταξύ των πληθυσμών που είχαν διαφορετικές διατροφικές συνήθειες. Έτσι, οι πληθυσμοί αυτοί σήμερα θεωρούνται ότι ανήκουν σε διαφορετικά είδη.

Στη Φύση η επιλογή του καλύτερα προσαρμοσμένου γίνεται στο σύστημα οργανισμός-περιβάλλον. Υπάρχει όμως και μία άλλη επιλογή γνωστή εδώ και χιλιάδες χρόνια: η επιλογή από τον άνθρωπο. Τα οικόσιτα ζώα (κασίκες, πρόβατα, κότες, κουνέλια κ.λπ.) και τα καλλιιεργήσιμα φυτά (ντοματιές, ελιές, πορτοκαλιές κ.ά) έχουν «εξημερωθεί» από τον άνθρωπο. Αυτό σημαίνει ότι καθώς ο άνθρωπος επέλεξε το περιβάλλον στο οποίο θα ζήσουν (στάβλη, κοτέτσι, χωράφι με κοκκινόχρωμα κ.λπ.), επέλεγε και το ποιος οργανισμός θα διασταυρωθεί με ποιον. Ο κτηνοτρόφος, για παράδειγμα,

διαλέγει για αναπαραγωγή τα ζώα με τα χρησιμότερα για εκείνον χαρακτηριστικά, ευελπιστώντας ότι και οι απόγονοί τους θα είναι εξίσου εύρωστοι και χρήσιμοι γι' αυτόν. Συχνά έχει δίκιο, καθώς ορισμένα «καλά» χαρακτηριστικά οφείλονται σε γονίδια που κληρονομούνται στους απογόνους. Έτσι μπορεί να αποκτήσει π.χ. προβατίνες που έχουν πυκνότερο μαλλί ή παράγουν περισσότερο γάλα.

Η αλλαγή ορισμένων χαρακτηριστικών των εξημερωμένων οργανισμών μέσα σε λίγες γενιές δεν είναι τόσο σημαντική,



Ο κορμοράνος των νησιών Γκαλαπάγκος με τα ατροφικά φτερά.



ώστε να οδηγήσει στη δημιουργία νέων ειδών. Είναι όμως αρκετά σημαντική για να κατανοήσει κάποιος τον μηχανισμό της εξέλιξης μέσω της φυσικής επιλογής. Ένας **παράγοντας επιλογής** λειτουργεί ως κριτήριο αξιολόγησης για το ποια χαρακτηριστικά θα περάσουν στις επόμενες γενιές. Τέτοιοι παράγοντες επιλογής μπορεί να είναι είτε το ύψος των δένδρων στο παράδειγμα της καμηλοπάρδαλης, είτε οι προσδοκίες του κτηνοτρόφου για γάλα ή μαλλί. Τα άτομα που θα επιλεγούν από τον κτηνοτρόφο για να ζευγαρώσουν θα είναι εκείνα που θα δώσουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Άρα στην επόμενη γενιά, ο πληθυσμός θα διαθέτει περισσότερα άτομα με τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά. Παρομοίως στη Φύση, με το πέρασμα των γενεών, ο λαιμός της καμηλοπάρδαλης θα μακραινε ολοένα και περισσότερο. Εκεί βέβαια η αλλαγή στον πληθυσμό θα γίνει αντιληπτή μετά από πολύ περισσότερες γενιές, καθώς το ζευγάρισμα είναι τυχαίο κι όχι αυστηρά με το κριτήριο του μήκους του λαιμού.

Ένα από τα φαινόμενα που δεν μπορούν να ερμηνευθούν χωρίς τη βοήθεια της εξέλιξης είναι, μεταξύ άλλων, και τα υπολειμματικά όργανα. Υπολειμματικά όργανα είναι τα οπίσθια άκρα των φαλαγγιών, τα μάτια των ζώων που ζουν σε σκοτεινές σπηλιές, ο κόκκυγας στη σπονδυλική στήλη των ανθρώπων και των μεγάλων πιθήκων, καθώς και τα ατροφικά φτερά του **κορμοράνου** των νησιών Γκαλαπάγκος. Τα υπολειμματικά όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποδείξεις για την ιδέα της κοινής καταγωγής όλων των οργανισμών. Ο κορμοράνος των νησιών Γκαλαπάγκος, για παράδειγμα, τρέφεται με τα ψάρια που πιάνει βουτώντας στη θάλασσα. Δεν μπορεί και δεν χρειάζεται να πετάξει, αφού ψαρεύει πολύ κοντά στην ακτή. Οι φτερούγες του είναι μικρές και ατροφικές, ενώ έχει δυνατό κολυμβητικά πόδια που τον

βοηθούν στο ψάρεμα. Μετά από κάθε βουτιά, ο κορμοράνος των Γκαλαπάγκος ανοίγει τις ατροφικές φτερούγες του για να στεγνώσουν, όπως και οι άλλοι κορμοράνοι, παρόλο που δεν σκοπεύει να πετάξει. Είναι φανερό ότι καθώς ο κορμοράνος των Γκαλαπάγκος άλλαξε τρόπο ζωής πριν από πάρα πολλά χρόνια, οι φτερούγες που είχε ως μέλος της τάξης των Πτηνών, δεν ήταν πλέον απαραίτητες για την επιβίωσή του. Έτσι, άρχισαν να υποβαθμίζονται σιγά-σιγά από γενιά σε γενιά.

Γιατί ο κορμοράνος να μην κρατήσει τα λειτουργικά του φτερά ούτως ή άλλως; Ένα δυνατό και περίπλοκο όργανο, όπως είναι οι φτερούγες ενός πουλιού, μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο σε ορισμένες συνθήκες, αλλά σε άλλες να αποβεί ζημιογόνο. Το ενεργειακό κόστος για την ανάπτυξη και τη συντήρηση της ικανότητας για πτήση στην περίπτωση του κορμοράνου των Γκαλαπάγκος αποδείχθηκε πολύ μεγάλο σε σχέση με τη χρησιμότητά του. Όταν κάτι χάνει τη χρησιμότητά του στην εξελικτική πορεία ενός οργανισμού, μπορεί είτε να τροποποιηθεί για κάποια άλλη χρήση, είτε να αποβληθεί. Και οι δύο διαδικασίες θα γίνουν με βαθμιαίο και αργό τρόπο και πάντα με κριτήριο την επιτυχημένη αναπαραγωγή, όπως επιβάρη η φυσική επιλογή.

Όμως, το περιβάλλον μέσα στο οποίο ζουν οι οργανισμοί αλλάζει διαρκώς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνεχώς νέες συνθήκες-προκλήσεις, στις οποίες οι οργανισμοί καλούνται να αντεπεξέλθουν. Επίσης, οι οργανισμοί διαθέτουν χαρακτηριστικά που δεν ενδιαφέρουν τη φυσική επιλογή, γιατί δεν έχουν κάποια σχέση με την απόκτηση καλύτερων και περισσότερων απογόνων. Ακόμη και σε ένα σταθερό περιβάλλον λοιπόν, η εξέλιξη δεν είναι μία πορεία προς την τελειότητα.

Μαρία Τσίπη

Υπ. Διδάκτωρ Γενετικής του Πανεπιστημίου Αθηνών,
Επιστημονική Συνεργάτις του Ιδρύματος Ευγενίδου



8ο κεφάλαιο

Εξέλιξη και Φυλετική Επιλογή

Η **φυσική επιλογή**, η επιλογή δηλαδή των παραγόντων και των διαδικασιών που ευνοούν την επιβίωση των οργανισμών και την προσαρμογή τους στο περιβάλλον όπου ζουν είναι η γνωστότερη από τις ιδέες που ανέπτυξε ο **Κάρολος Δαρβίνος**. Εκτός όμως από την περιγραφή των χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τον αγώνα για την επιβίωση, ο Δαρβίνος προσπάθησε να εξηγήσει και το πού οφείλονται οι έντονες διαφορές ανάμεσα στα αρσενικά και τα θηλυκά άτομα του ίδιου είδους. Ο Δαρβίνος είχε παρατηρήσει ότι ανάμεσα σε πολλά είδη πτηνών και εντόμων, τα θηλυκά άτομα ήταν φτιαγμένα με πιο «οικονομικό και λογικό» τρόπο, έτσι ώστε να προσαρμόζονται όσο το δυνατόν

καλύτερα στο περιβάλλον τους, υπακούοντας στους κανόνες της φυσικής επιλογής. Συχνά, όμως, τα χαρακτηριστικά των αρσενικών δεν φαίνονταν να υπακούουν σ' αυτόν τον κανόνα. Στην προσπάθειά του λοιπόν να κατανοήσει αυτήν τη διαφορετικότητα μεταξύ των δύο φύλων στα διάφορα είδη ζώων, ο Δαρβίνος υποστήριξε ότι υπάρχει ένα άλλο σύνολο παραγόντων, οι οποίοι δεν σχετίζονται με τον αγώνα για την επιβίωση, αλλά με τον αγώνα για την αναπαραγωγή. Οι παράγοντες αυτοί ενισχύουν την πιθανότητα των οργανισμών να ζευγαρώνουν και να αφήνουν απογόνους. Το σύνολο των διαδικασιών που αυξάνουν την επιτυχή αναπαραγωγή ονομάστηκε από τον Δαρβίνο **φυλετική επιλογή**.



Η φυλετική επιλογή σχετίζεται με τον αγώνα ανάμεσα στα άτομα του ίδιου είδους και φύλου, προκειμένου να προσελκύσουν το αντίθετο φύλο. Συνήθως, ο αγώνας αυτός αφορά στην πάλη μεταξύ των αρσενικών ατόμων για την κατάκτηση των θηλυκών. Τα αρσενικά που κυριαρχούν στη μάχη αυτή είναι, σύμφωνα με τον Δαρβίνο, τα πιο ρωμαλέα. Αυτά έχουν τις περισσότερες πιθανότητες να αναπαραχθούν και να αφήσουν απογόνους. Τα αρσενικά αυτά συνήθως είναι εξοπλισμένα με ειδικά «όργανα» που τα βοηθούν στη μάχη αυτή όπως είναι, για παράδειγμα, τα κέρατα των ελαφιών ή τα «σπιρούνια» των πετεινών. Σ' αυτήν την περίπτωση το έπαθλο των νικητών δεν αφορά στην επιβίωσή τους, αλλά στην αναπαραγωγή τους. Επομένως, οι νικητές κατορθώνουν να γονιμοποιήσουν τα θηλυκά και να μεταβιβάσουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Ο αγώνας αυτός είναι πιο έντονος στα πολυγαμικά είδη, όπου ένα αρσενικό ζευγαρώνει με περισσότερα από ένα θηλυκά. Κατά τη διάρκεια της πάλης ανάμεσα στα αρσενικά, τα θηλυκά φαίνεται ότι παρακολουθούν αμέτοχα και παθητικά, χωρίς να επηρεάζουν την έκβασή της. Αυτή η περίπτωση φυλετικής επιλογής ονομάζεται **ενδοφυλετική**, διότι αφορά μόνο στα άτομα του ίδιου φύλου.

Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελούν οι θαλάσσιοι ελέφαντες, μεγάλα θηλαστικά που ζουν στους ωκεανούς και ανήκουν στο γένος *Mirounga*. Τα αρσενικά διαφέρουν πολύ απ' τα θηλυκά, αφού είναι αρκετά μεγαλύτερα σε όγκο και

βάρος. Τα αρσενικά καταφτάνουν στον τόπο του ζευγαριώματος πριν από τα θηλυκά. Εκεί, παλεύουν σκληρά μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τον όγκο και τα σαγόνια τους, προκειμένου να ελέγξουν ομάδες θηλυκών δημιουργώντας έτσι ολόκληρα χαρέμια. Οι νικητές στη συνέχεια μπορεί να μείνουν για αρκετές μέρες χωρίς να τραφούν, προκειμένου να εποπτεύουν τα χαρέμια τους και την περιοχή τους. Σ' αυτήν την περίπτωση τα ισχυρότερα αρσενικά πλεονεκτούν στην αναπαραγωγή τους και η φυλετική επιλογή δεν εξαρτάται απ' τις προτιμήσεις ή την επιλογή των θηλυκών.

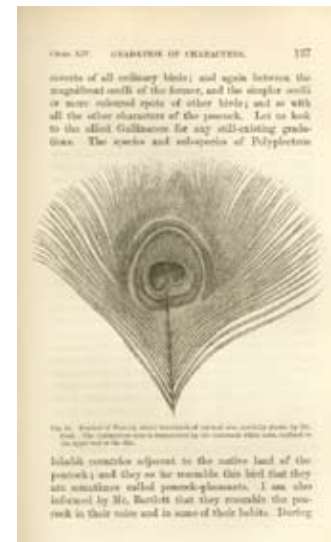
Η αυξημένη πιθανότητα για αναπαραγωγή μπορεί να επιτυγχάνεται και με «ειρηνικά» μέσα. Για παράδειγμα, πολλή αρσενικά πτηνά πασχίζουν να προσελκύσουν το ταίρι τους, γοντεύοντάς το με το τραγούδι τους, ενώ άλλα προσπαθούν να το κατακτήσουν με το χρώμα και το εντυπωσιακό φτέρωμά τους. Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν τα αρσενικά παγώνια, τα οποία φέρουν μεγαλοπρεπείς ουρές με εντυπωσιακά χρώματα και σχέδια. Το φτέρωμα των αρσενικών παγωνιών είχε προβληματίσει ιδιαίτερα τον Δαρβίνο, ο οποίος αδυνατούσε να φανταστεί τη χρησιμότητα μιας τόσο μεγάλης και δύσκαμπτης ουράς στον αγώνα τους για επιβίωση. Ένα άλλο παρόμοιο παράδειγμα, όπου είναι εμφανής η επίδραση της φυλετικής επιλογής, αποτελούν τα αρσενικά παραδείσια πουλιά της Νέας Γουινέας. Τα πτηνά αυτά, εκτός από το πολύχρωμο φτέρωμα που τα καλύπτει, χρησιμοποιούν και άλλες τεχνικές, προκειμένου να εντυπωσιάσουν τα θηλυκά. Επιδίδονται, δηλαδή, σε θορυβώδεις χορούς και ακροβατικά.

Επομένως, πέρα από το φτέρωμά τους ή τα «εξαρτήματα» που φέρουν τα αρσενικά άτομα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και συγκεκριμένα πρότυπα συμπεριφοράς που ενισχύουν την αναπαραγωγική επιτυχία. Σ' αυτές τις περιπτώσεις φυλετικής επιλογής, εκτός από τα αρσενικά, που κάνουν ό,τι μπορούν προκειμένου να γοντεύσουν το αντίθετο φύλο, καταλυτικό ρόλο διαδραματίζουν και τα θηλυκά, που επιλέγουν το καταλληλότερο γι' αυτά αρσενικό. Αυτή η κατηγορία φυλετικής επιλογής ονομάζεται **διαφυλετική**, διότι εμπλέκονται και τα δύο φύλα στο τελικό αποτέλεσμα. Μπορούμε, λοιπόν, να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις φυλετικής επιλογής: στην πρώτη τα αρσενικά παλεύουν μεταξύ τους για να αποκτήσουν το ή τα παθητικά θηλυκά (ενδοφυλετική επιλογή), ενώ στη δεύτερη τα θηλυκά επιλέγουν τα πιο γονιευτικά αρσενικά (διαφυλετική επιλογή).

Τα αρσενικά που πλεονεκτούν στη μάχη για την προσέλευση του θηλυκού, όπως για παράδειγμα τα παραδείσια πτηνά με το εντυπωσιακότερο φτέρωμα ή οι πετεινοί με τα μεγαλύτερα «σπιρούνια», θα επιλεγούν από τα θηλυκά και θα αφήσουν περισσότερους απογόνους. Οι αρσενικοί τους απόγονοι πιθανότατα θα κληρονομήσουν τα χαρακτηριστικά αυτά. Η φυλετική, όμως, επιλογή δεν μπορεί παρ' όλη αυτά να υπερβεί τους κανόνες της φυσικής επιλογής. Γι' αυτό και όσα χαρακτηριστικά δυσχεραίνουν την επιβίωση των οργανισμών «κόβονται» από το «φίλτρο» της φυσικής επιλογής. Μπορούμε να φανταστούμε, δηλαδή, ότι δεν θα συναντήσουμε εύκολα παγώνια με υπερβολικά ανεπτυγμένες ουρές, καθώς σ' αυτήν την περίπτωση η επιβίωσή τους θα ήταν αδύνατη.

Οι διαφορές στους ρόλους ανάμεσα στα δύο φύλα σχετίζονται με τις διαφορές στους γαμέτες, δηλαδή στα αναπαραγωγικά κύτταρα που φέρουν τα αρσενικά και τα θηλυκά άτομα. Τα θηλυκά παράγουν σχετικά λίγους και συνήθως ακίνητους γαμέτες, όπως τα ωάρια των γυναικών, ενώ τα αρσενικά παράγουν άφθονους, μικρότερους και κινητούς γαμέτες, όπως τα σπερματοζωάρια των ανδρών. Επειδή όμως απαιτείται μόνο ένας γαμέτης από κάθε φύλο για να προκύψει ένας απόγονος, πολλοί αρσενικοί γαμέτες δεν θα γονιμοποιήσουν κάποιον θηλυκό. Τα θηλυκά δαπανούν πολλή ενέργεια, προκειμένου να παράγουν τους μεγάλους γαμέτες τους, ενώ τα αρσενικά επενδύουν στην εξεύρεση και την κατάκτηση των θηλυκών. Αυτός είναι και ο λόγος που τα αρσενικά ανταγωνίζονται μεταξύ τους για τη γονιμοποίηση των θηλυκών και που τα θηλυκά ζευγαρώνουν με το καλύτερο γι' αυτά αρσενικό.

Πώς όμως δημιουργούνται οι διαφορές ανάμεσα στα θηλυκά και τα αρσενικά και πώς μεταφέρονται από γενιά σε γενιά; Για να απαντήσουμε σε αυτά τα ερωτήματα, θα πρέπει να κατανοήσουμε από τι εξαρτώνται τα κληρονομικά χαρακτηριστικά και πώς πραγματοποιείται η κληρονομική τους. Η ιδέα της κληρονομικής μετάδοσης των χαρακτηριστικών υπήρχε πολύ πριν την εποχή του Δαρβίνου. Άλλωστε εδώ και χιλιάδες χρόνια εφαρμόζεται η τεχνητή επιλογή, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα στην κτηνοτροφία και τη γεωργία. Οι νόμοι που διέπουν την κληρονομική μετάδοση των χαρακτηριστικών δεν έγιναν ποτέ γνωστοί στον Δαρβίνο, παρ' ό,τι ανακαλύφθηκαν από τον μοναχό **Gregor Mendel** (1822–1884) το 1866. Αν και η εργασία του Mendel βρέθηκε αργότερα στη βιβλιοθήκη του Δαρβίνου, εκείνος δεν την είχε ▶



Αριστερή σελίδα: Ο αγώνας ανάμεσα στους αρσενικούς θαλάσσιους ελέφαντες, προκειμένου να προσελκύσουν το ταίρι τους είναι σκληρός.

Αριστερά: Σελίδα από το βιβλίο του Δαρβίνου *Η Καταγωγή του Ανθρώπου*, από την πρώτη έκδοση του 1871 (ευγενής παραχώρηση: John van Wyhe ed. 2002, The Complete Work of Charles Darwin Online, <http://darwin-online.org.uk/>).

Τα αρσενικά παγώνια (πάνω) και τα αρσενικά παραδείσια πουλιά (δεξιά) χρησιμοποιούν πιο «ειρηνικά» μέσα για να προσελκύσουν το ταίρι τους, όπως το εντυπωσιακό φτέρωμά τους ή χορούς και ακροβατικά.

Η αναπαραγωγική επιτυχία σε πολλά είδη δεν εξασκείται μόνο με τη γονιμοποίηση, αλλά και με τη συμβολή του κάθε φύλου στην προστασία των νεογνών. Στα λιοντάρια, τη φροντίδα των μικρών αναλαμβάνουν οι θέαινες, ενώ οι βασιλικοί πιγκουίνοι είναι από τους πιο «στοργικούς» γονείς του ζωικού βασιλείου. Στο πτηνό φαλαρόποδος μόνο το αρσενικό παρέχει γονική φροντίδα.



διαβάσει, καθώς δεν γνώριζε γερμανικά. Επίσης, στην εποχή του Δαρβίνου και του Mendel δεν είχε ανακαλυφθεί το DNA που, όπως γνωρίζουμε σήμερα, είναι το μόριο που περιέχει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για να λειτουργήσει το κύτταρο και κατ' επέκταση ένας πολυκύτταρος οργανισμός.

Σύμφωνα με τον Mendel, κάθε χαρακτηριστικό, όπως είναι το χρώμα του καρπού στα μπιζέλια για παράδειγμα, μπορεί να εμφανίζει πολλούς χαρακτήρες, (π.χ. κίτρινο ή πράσινο). Ο χαρακτήρας αυτός, δηλαδή το χρώμα που διαπιστώνουμε κατά την παρατήρηση, ονομάζεται **φαινότυπος**. Ο φαινότυπος ελέγχεται από ορισμένους παράγοντες, τα γονίδια, που είναι περιοχές στο DNA. Συνήθως στους πολυκύτταρους οργανισμούς σε κάθε γονίδιο αντιστοιχούν δύο παραλληλαγές, που ονομάζονται **αλληληλόμορφα**. Ο φαινότυπος διαμορφώνεται ανάλογα με το είδος της πληροφορίας που περιέχει το κάθε γονίδιο και με τη σχέση μεταξύ των αλληλομόρφων. Υπάρχουν αλληληλόμορφα που επιβάλλουν την πληροφορία τους σε άλλα διαμορφώνοντας τον φαινότυπο. Υπάρχουν όμως και κάποια αλληληλόμορφα, τα οποία «σέβονται» την πληροφορία των άλλων, με αποτέλεσμα ο φαινότυπος να είναι ενδιάμεσος σαν να γίνεται ένας συμβιβασμός. Υπάρχουν πάρα πολλές αντίστοιχες σχέσεις μεταξύ αλληλομόρφων, γεγονός που αυξάνει την ποικιλία των φαινοτύπων.

Πώς όμως κληρονομούνται τα χαρακτηριστικά; Η εξήγηση της κληρονόμησης των χαρακτηριστικών βρίσκεται σε

επίπεδο μορίων. Εφόσον το DNA είναι το γενετικό υλικό που κληρονομείται στους απογόνους, τα αλληληλόμορφα περνούν στην επόμενη γενιά μαζί με το DNA. Έτσι, ο φαινότυπος του απογόνου διαμορφώνεται από τα αλληληλόμορφα γονίδια που έχει πάρει από τους γονείς του, με αποτέλεσμα να παίρνει τα χαρακτηριστικά τους. Οι γαμέτες, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κύτταρα του οργανισμού, φέρουν ένα αλληληλόμορφο για κάθε γονίδιο. Συνεπώς, στους οργανισμούς που αναπαράγονται με συνδυασμό δύο γονέων, ο απόγονος θα κληρονομήσει τα μισά αλληληλόμορφα απ' τον έναν γονέα και τα άλλα μισά απ' τον άλλο. Στα είδη αυτά δημιουργείται πολύ μεγάλη ποικιλία συνδυασμών χαρακτηριστικών, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο για τη φυσική επιλογή, καθώς η ποικιλία δίνει πολλές ευκαιρίες στον πληθυσμό να ανταποκριθεί στις αλλαγές των συνθηκών του περιβάλλοντος.

Οι οργανισμοί φέρουν πολύ περισσότερα γονίδια από εκείνα που εκφράζουν κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Στους πολυκύτταρους οργανισμούς διαφορετικά γονίδια εκφράζονται από διαφορετικούς τύπους κυττάρων παρόλο που όλα τα κύτταρα έχουν το ίδιο DNA, άρα και τα ίδια γονίδια. Μ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα διαφορετικά κύτταρα, οι ιστοί και τα όργανα ενός οργανισμού. Αντίστοιχα, υπάρχουν γονίδια που εκφράζονται είτε με διαφορετικό τρόπο ανάμεσα στα δύο φύλα είτε αποκλειστικά στο ένα απ' τα δύο φύλα, γι' αυτό και συχνά τα αρσενικά διαφέρουν πολύ από τα θηλυκά.



Τα περισσότερα είδη παρέχουν λίγη ή καθόλου φροντίδα στους απογόνους τους. Παρόλ' αυτά, υπάρχουν είδη στα οποία είναι αναγκαία η γονική φροντίδα για την επιβίωση και ανάπτυξη των απογόνων. Σ' αυτά τα είδη η αναπαραγωγική επιτυχία δεν εξασφαλίζεται μόνο με τη γονιμοποίηση, αλλά και με τη συμβολή του κάθε φύλου στην προστασία και φροντίδα του ενός ή περισσότερων νεογνών. Όταν τα θηλυκά αναλαμβάνουν τη γονική φροντίδα, τότε δεν είναι άμεσα διαθέσιμα για ζευγάρωμα. Σ' αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των διαθέσιμων θηλυκών μειώνεται και ταυτόχρονα αυξάνεται ο ανταγωνισμός ανάμεσα στα αρσενικά. Το γεγονός αυτό επιταχύνει τη φυλετική επιλογή, με αποτέλεσμα τα αρσενικά να διαφέρουν ολοένα και περισσότερο από τα θηλυκά. Αυτές οι διαφορές περιγράφονται με τον όρο **φυλετικός διμορφισμός**. Σε είδη στα οποία απαιτείται γονική φροντίδα και από τα δύο φύλα, ο φυλετικός διμορφισμός δεν είναι τόσο έντονος και τα δύο φύλα μοιάζουν μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, στο ζωικό βασίλειο υπάρχουν περιπτώσεις, όπου μόνο τα αρσενικά παρέχουν γονική φροντίδα. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το πτηνό ερυθρόλαιμος φαλαρόποδος, που ανήκει στο γένος Phalaropus. Σ' αυτά τα πτηνά, τα θηλυκά άτομα είναι αυτά που δεν συμμετέχουν στο μέγιστο των απογόνων και που ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την κατάκτηση του αντίθετου φύλου.

Ενώ ο Δαρβίνος θεωρούσε ότι η φυλετική επιλογή είναι ξεχωριστός μηχανισμός από τη φυσική επιλογή, σήμερα

γνωρίζουμε ότι η φυλετική επιλογή είναι μία περίπτωση φυσικής επιλογής. Όπως τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την επιβίωση επιλέγονται από το σύστημα οργανισμός-περιβάλλον, έτσι και τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αναπαραγωγή ελέγχονται, στην περίπτωση της φυλετικής επιλογής, από το σύστημα θηλυκό-αρσενικό ή απ' την αντιπαράθεση μεταξύ αρσενικών.

Από το παράδειγμα του παγωνιού μπορούμε να καταλάβουμε ότι ο ουσιαστικός στόχος των οργανισμών δεν είναι μόνο η επιβίωση, αλλά και η επιτυχής αναπαραγωγή. Τα αρσενικά προκαλούν την προσοχή των θηρευτών με το εντυπωσιακό φτέρωμά τους, αλλά κερδίζουν για τα χαρακτηριστικά τους μία θέση στην επόμενη γενιά. Πολλές φορές βέβαια, η μακρόχρονη επιβίωση εξασφαλίζει την αναπαραγωγική επιτυχία, αλλά δεν είναι απαραίτητη. Για παράδειγμα, πολλά ψάρια, μεταξύ των οποίων και ο σολομός, πεθαίνουν μετά τη γέννα, με αποτέλεσμα να μην συναντούν ποτέ τα μικρά τους.

Εν κατακλείδι, στα περισσότερα είδη που συναντάμε στο ζωικό βασίλειο, η φυλετική επιλογή είναι εξίσου σημαντική με τις άλλες μορφές φυσικής επιλογής, όπως είναι ο αγώνας για την εύρεση τροφής και την αποφυγή των θηρευτών. Η σημασία της έγκειται στο ότι ικανοποιεί το θεμελιώδες κριτήριο της φυσικής επιλογής, που είναι η αναπαραγωγική επιτυχία.

Διονύσης Π. Σιμόπουλος

Διευθυντής Ευγενιδείου Πλανηταρίου



9ο κεφάλαιο

Η Εξέλιξη της Ζωής στη Γη

Μία από τις διάφορες θεωρίες που υπάρχουν για τη δημιουργία της ζωής στη Γη υποστηρίζει ότι η ζωή προήλθε από τα σκουπίδια που άφησαν πίσω τους κάποιοι εξωγήиноι επισκέπτες του πλανήτη μας! Τέτοιου είδους θεωρίες όμως αποφεύγουν το βασικό ερώτημα της προέλευσης της ζωής μεταφέροντας απλώς το πρόβλημα σε κάποιον άλλον πλανήτη. Γιατί μ' ένα τέτοιο σκεπτικό, το ερώτημα παραμένει: «Από πού προήλθαν και πώς δημιουργήθηκαν αυτοί οι εξωγήиноι»; Η συνταγή, πάντως, της ζωής στη Γη είναι πολύ απλή: άνθρακας, οξυγόνο, άζωτο και υδρογόνο, με λίγο φώσφορο, σίδηρο, κάλιο και νάτριο για ποικιλία. Η πολυπλοκότητά της, όμως, βασίζεται στον άπειρο σχεδόν αριθμό των

συνδυασμών που σχηματίζουν μεταξύ τους τα απλά αυτά στοιχεία, ακριβώς όπως τα 24 γράμματα της αλφαβήτου σχηματίζουν την ατέλειωτη λιτανεία των κειμένων της παγκόσμιας λογοτεχνίας. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι, λόγω της δομής που έχουν, τα άτομα των χημικών στοιχείων μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους σχετικά εύκολα. Το άτομο του άνθρακα, μάλιστα, έχει αποδειχθεί το πιο επιδέξιο απ' όλα, γιατί μπορεί να συνδυαστεί όχι μόνο με άτομα διαφόρων άλλων χημικών στοιχείων, αλλά και με άλλα άτομα άνθρακα σε μια ιδιαίτερα μεγάλη ποικιλία συνδυασμών. Γι' αυτόν αλλήλωσε τον λόγο και η ζωή που γνωρίζουμε πάνω στη Γη βασίζεται στον άνθρακα.

Συγγραφείς επιστημονικής φαντασίας, πάντως, περιγράφουν συχνά κι άλλα είδη ζωής που βασίζονται σε χημικά πρότυπα τα οποία δεν μπορούν να εξελιχθούν στη Γη, όπως η ζωή που βασίζεται στο πυρίτιο ή στο μόριο του υδροξυλίου της αμμωνίας, αντί για τον άνθρακα. Οι μορφές αυτές, όμως, είναι προς το παρόν τουλάχιστον φανταστικές και δεν υπάρχει η παραμικρή ένδειξη ότι μπορεί να υπάρξουν. Αντίθετα οι ενδείξεις που έχουμε σήμερα μάς λένε πως η ζωή στη Γη βασίζεται στα χημικά συστατικά οργανικών μορίων που έχουμε ήδη δημιουργήσει στα εργαστηριακά μας πειράματα. Τα πειράματα αυτά αναπαριστούν τη χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας της αρχέγονης Γης και τις συνθήκες που επικρατούσαν τότε και είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μορίων, όπως είναι τα αμινοξέα και οι οργανικές βάσεις, που αποτελούν τα θεμελιώδη συστατικά της ζωής.

Με τη βοήθεια αυτών των οξέων και των βάσεων, δημιουργούνται οι πρωτεΐνες και τα μόρια RNA και DNA, τα ελικοειδή δηλαδή μόρια που μεταφέρουν όλες τις γενετικές πληροφορίες, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη βιολογική αναπαραγωγή. Έτσι, με το πέρασμα των εκατομμυρίων ετών, τα ανόργανα υλικά ενώθηκαν μεταξύ τους δισεκατομμύρια φορές. Οι πρασινωποί ωκεανοί ήταν τότε πλούσιοι σε σίδηρο και παρόλο που ακόμη δεν γνωρίζουμε την ακριβή διαδικασία σχηματισμού της πρώτης ζωής, φαίνεται ότι η όλη αυτή διαδικασία ίσως να οδήγησε στον κόσμο του RNA των ανταγωνιζόμενων οργανικών ενώσεων πριν από 4,1 δισ. χρόνια, όταν αναπτύχθηκε ένα ειδικό μακρομόριο, που είχε την ικανότητα να αντιγράφει τον εαυτό του.

Η πρώτη αυτή μορφή ζωής προήλθε από αυτοαναπαραγώμενα μόρια RNA. Η αντιγραφή των οργανισμών αυτών απαιτούσε διάφορους πόρους, όπως είναι η ενέργεια, και μικρότερους θεμέλιους λίθους, οι οποίοι σύντομα περιορίστηκαν από τον ανταγωνισμό και με βάση τη φυσική επιλογή επικράτησαν εκείνα τα μόρια που ήταν πιο αποτελεσματικά στην αντιγραφή τους. Τότε ήταν που ανέλαβαν κυρίαρχο ρόλο τα μόρια DNA ως οι κύριοι αντιγραφείς δημιουργώντας τα πρωτοκύτταρα. Τα πρώτα εκείνα γονιδιώματα ήταν προστατευμένα από μεμβράνες, που παρείχαν το σταθερό φυσικό και χημικό περιβάλλον, που ήταν απαραίτητο για τη διαδικασία της αντιγραφής τους.

Την εποχή εκείνη, μέσα στις ζεστές θάλασσες και τους πρώτους ωκεανούς, διάφορα χημικά συστατικά ενώθηκαν επανειλημμένα σε τυχαίους συνδυασμούς. Και πράγματι, μόλις η Γη μας διέθετε σε αφθονία τα πολύπλοκα αυτά μόρια, η διαδικασία των ατέρμονων χημικών συνδυασμών και των αναρίθμητων πειραματισμών της Φύσης, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των πρώτων προκαρυωτικών κυττάρων πριν από 3,8 δισ. χρόνια. Το σχεδιάγραμμα της ζωής πέρασε έτσι σιγά-σιγά στους μετέπειτα οργανισμούς αλληλάζοντας κατά καιρούς από τυχαίες μεταλλάξεις. Μερικές παραλλαγές ήταν καλύτερα προσαρμοσμένες στο περιβάλλον τους και επέζησαν, ενώ άλλες εξαφανίστηκαν.

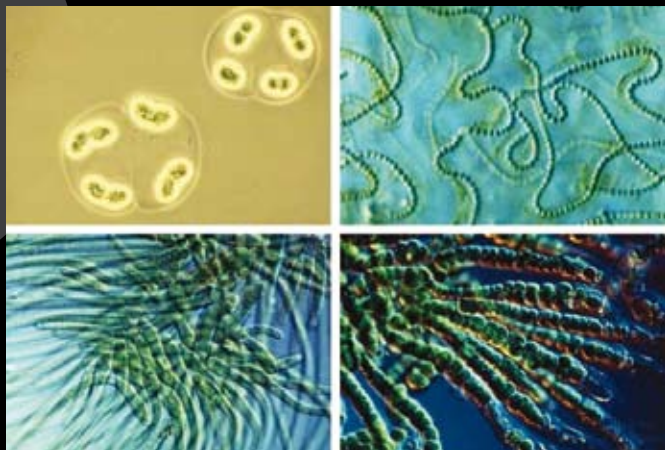
Οι πρώτοι αυτοί οργανισμοί χρησιμοποιούσαν το διοξείδιο του άνθρακα ως πηγή άνθρακα οξειδώνοντας ανόργανα υλικά για να αποσπάσουν ενέργεια. Αργότερα, τα προκαρυωτικά κύτταρα δημιούργησαν τη διαδικασία της γλυκόλυσης, μια σειρά χημικών αντιδράσεων που απελευθέρωναν την ενέργεια οργανικών μορίων όπως η γλυκόζη και την αποθήκευαν με τον ίδιο τρόπο που γίνεται ακόμη και σήμερα σε όλους σχεδόν τους οργανισμούς.

Μία σπουδαία φάση στην εξέλιξη της ζωής και του πλανήτη μας ήταν όταν η μετάλλαξη των διαφόρων οργανισμών οδήγησε στη χρήση μιας αστείρευτης πηγής ενέργειας, του Ήλιου, για την παρασκευή τροφής. Μ' αυτόν τον τρόπο οι θάλασσες και ολόκληρη η ατμόσφαιρα της Γης μετασχηματίστηκαν, προετοιμάζοντας έτσι τον δρόμο για την εμφάνιση πιο αναπτυγμένων ειδών ζωής. Την ίδια περίοδο, η Σελήνη βρισκόταν ακόμη πολύ κοντά στη Γη προκαλώντας παλίρροιας ύψους 300 m, ενώ άνεμοι που είχαν την ένταση τυφώνα επικρατούσαν στην επιφάνεια ολόκληρου του πλανήτη.

Η εμφάνιση του πρώτου αρχέγονου προγόνου μας έγινε πριν από 3,5 δισ. χρόνια, όταν διαχωρίστηκαν τα βακτήρια από τα αρχαία. Τον καιρό εκείνο η ατμόσφαιρα δεν περιείχε καθόλου οξυγόνο. Το οξυγόνο εμφανίστηκε σιγά-σιγά με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης πριν από 3 δισ. χρόνια, προερχόμενο από τα πρώτα κυανοβακτήρια, τα οποία χρησιμοποιούσαν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας για την παραγωγή τεραστίων ποσοτήτων οξυγόνου. Αρχικά, το οξυγόνο ενώθηκε με τον σίδηρο των ωκεανών σχηματίζοντας οξείδια του σιδήρου (σκουριά), τα οποία βυθίστηκαν στα βάθη των ωκεανών.



Αρχικά η Σελήνη βρισκόταν πολύ κοντά στη Γη προκαλώντας παλίρροιας ύψους 300 m. Σταδιακά, όμως, απομακρύνθηκε και οι παλίρροιας σήμερα δεν υπερβαίνουν τα μερικά μέτρα.



Πάνω: Τα αρχέγονα κυανοβακτήρια συνέβαλαν στον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας με οξυγόνο.

Κάτω: Τα πρώτα κοράλλια θα πρέπει να εμφανίστηκαν στη διάρκεια της Κάμβριας Έκρηξης.

Μ' αυτήν τη διαδικασία, ο σίδηρος των ωκεανών, πριν από περίπου 2,5 δισ. χρόνια, είχε μετασχηματιστεί σε σκουριά κι έτσι το οξυγόνο απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα στα επόμενα 2 δισ. χρόνια. Ο εμπλουτισμός της ατμόσφαιρας με οξυγόνο εξαφάνισε όλα σχεδόν τα βακτήρια, αν και μερικά από αυτά επέζησαν και προσαρμόστηκαν στις νέες συνθήκες σχηματίζοντας πιο σύνθετα ευκαρυωτικά κύτταρα πριν από 2,1 δισ. χρόνια. Τα κύτταρα αυτά ήταν οργανίδια με διάφορες λειτουργίες που καλύπτονταν από μία μεμβράνη. Με άλλα λόγια, όλα τα είδη ζωής γύρω μας, κι εμείς οι ίδιοι, οφείλουμε την ύπαρξή μας στα κυανοβακτήρια, ορισμένα από τα οποία υπάρχουν ακόμη και σήμερα!

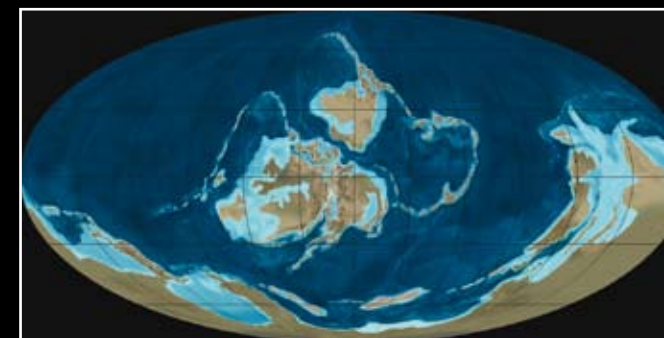
Πριν από περίπου 1,2 δισ. χρόνια το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα και το όζον στη στρατόσφαιρα προστάτευαν την επιφάνεια του πλανήτη μας από τις επικίνδυνες υπεριώδεις ακτινοβολίες του Ήλιου. Την ίδια περίοδο, η σεξουαλική αναπαραγωγή αύξησε θεαματικά τον ρυθμό της εξέλιξης. Συγχρόνως οι εμπλουτισμένοι με οξυγόνο ωκεανοί και η ατμόσφαιρα της Γης επέτρεψαν τη δημιουργία πολυκύτταρων οργανισμών που αποτελούνταν κυρίως από αποικίες κυττάρων μικρής πολυπλοκότητας, πριν από 700 εκατ. χρόνια. Στα επόμενα, όμως, 150 εκατ. χρόνια, οι ωκεανοί γέμισαν με τεράστιο αριθμό πολυκύτταρων οργανισμών σε μία περίοδο που σήμερα είναι γνωστή ως **Κάμβρια Έκρηξη**.

Οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί για την εξέλιξη της ζωής τα τελευταία 500 εκατ. χρόνια μάς έχουν επίσης αποκαλύψει ενδείξεις για αρκετούς μαζικούς αφανισμούς ζώντων οργανισμών του πλανήτη μας που έγιναν κατά καιρούς. Αν και είναι αρκετά δύσκολο να εντοπίσουμε επακριβώς πότε συνέβησαν οι μαζικές εξαφανίσεις μεγάλων ποσοστών διαφόρων ειδών ζωής, εντούτοις υπάρχουν αρκετά στοιχεία που οδηγούν ορισμένους επιστήμονες να προσδιορίσουν ότι μαζικές εξαφανίσεις συμβαίνουν κάθε 26 περίπου εκατ. χρόνια, πράγμα που σημαίνει ότι τα τελευταία 500 περίπου εκατ. χρόνια είχαμε συνολικά 20 περίπου μαζικούς αφανισμούς.

Από όλους αυτούς τους αφανισμούς έχουν εντοπιστεί πέντε περίπου μαζικές εξαφανίσεις που ήταν ιδιαίτερα έντονες, μερικές μάλιστα πρέπει να οφείλονται σε εξωγήινους παράγοντες, όπως οι συγκρούσεις της Γης μας με αστεροειδείς. Ο πρώτος από τους κυριότερους αυτούς μαζικούς αφανισμούς συνέβη πριν από 500 περίπου εκατ. χρόνια. Την εποχή εκείνη

τα διάφορα ραδιενεργά στοιχεία απελευθέρωναν τεράστιες ποσότητες θερμότητας στα έγκατα της Γης, ενώ η επιφάνεια ήταν κερματισμένη σε τεράστιες λιθοσφαιρικές πλάκες, που έπλεαν σαν παγόβουνα πάνω στο ρευστό υπόστρωμα του γήινου φλοιού.

Με το τέλος της **Κάμβριας Περιόδου** και την αρχή της **Ορδοβίκιας Περιόδου** (πριν από 500 – 440 εκατ. χρόνια), όλες σχεδόν οι λιθοσφαιρικές πλάκες είχαν συγκεντρωθεί στα νότια δημιουργώντας την υπερήπειρο Γκοντουάνα, την οποία αποτελούσαν οι σημερινές περιοχές της Νότιας Αμερικής, της Αφρικής, της Ανταρκτικής, της Ινδίας και της Αυστραλίας. Βορειότερα, υπήρχε η Λαυρασία, που συνίστατο από τις σημερινές ηπειρωτικές μάζες του βόρειου ημισφαιρίου. Την εποχή εκείνη, στις θάλασσες και στους ωκεανούς της Γης

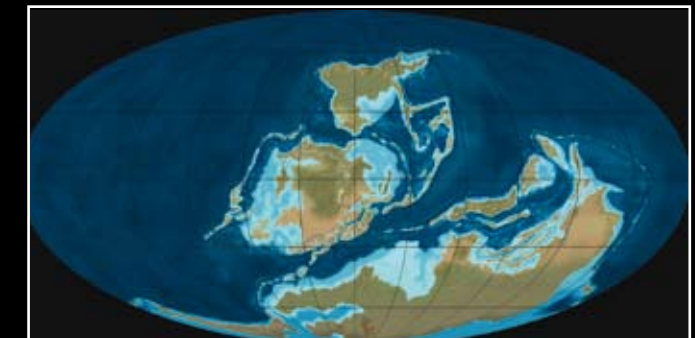


Σιλούρια Περίοδος (Ron Blakey, NAU Geology).

υπήρχε μεγάλη ποικιλία ειδών ζωής, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονταν τα πρώτα ζώα με όστρακα, τα πρώτα πρωτόγονα ψάρια, τα ασπόνδυλα αρθρωτά όπως οι τριλοβίτες, τα βραχιόποδα, τα κοράλλια, τα κρινοειδή, τα φύκια και τα πρώτα πρωτόγονα φυτά που προς το τέλος της περιόδου μεταφέρθηκαν σιγά-σιγά και άρχισαν να καλύπτουν για πρώτη φορά την επιφάνεια της ξηράς. Όταν όμως η Γκοντουάνα σταθεροποιήθηκε στον Νότιο Πόλο, σχηματίστηκαν τεράστιοι παγετώνες που υποχρέωσαν τη στάθμη της θάλασσας να χαμηλώσει τόσο πολύ, ώστε οι μαζικοί αφανισμοί που σημειώθηκαν τότε να θεωρούνται ως η δεύτερη μεγαλύτερη σε έκταση περίοδος αφανισμών. Τότε, μία πλήρης περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονά της διαρκούσε 21,28 ώρες και το έτος 412 ημέρες.

Στην επόμενη γεωλογική περίοδο, τη **Σιλούριο** (πριν από 440 – 410 εκατ. χρόνια), οι κλιματολογικές συνθήκες στη Γη άρχισαν να σταθεροποιούνται, με αποτέλεσμα το λιωσίμο των παγετώνων που οδήγησε στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης. Την περίοδο αυτή εμφανίστηκαν οι πρώτοι κοραλλιογενείς ύφαλοι και τα πρώτα σπονδυλωτά ψάρια που εξελίχθηκαν γρήγορα, ενώ στην ξηρά βλέπουμε μια εκτεταμένη αύξηση στη διασπορά της ζωής με την εμφάνιση των πρώτων φυτών (βρύα). Εμφανίζονται επίσης οι σαρανταποδαρούσες και οι πρώτοι συγγενείς των αραχνοειδών.

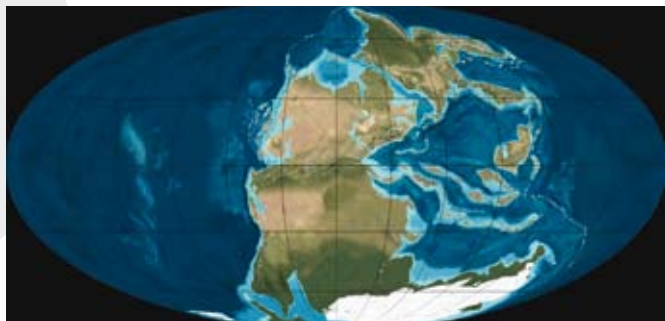
Στη διάρκεια της **Δεβόνιας Περιόδου** (πριν από 420–350 εκατ. χρόνια) υπήρχαν τρεις κύριες ήπειροι. Η Βόρειος Αμερική ήταν τότε ενωμένη με την Ευρώπη και βρισκόταν κοντά στον Ισημερινό. Στα βόρεια βρισκόταν ένα τμήμα της Σιβηρίας,



Ύστερη Δεβόνια Περίοδος (Ron Blakey, NAU Geology).

ενώ στο νότιο ημισφαίριο εξακολουθούσε να υπάρχει η Γκοντουάνα. Την περίοδο εκείνη τα φυτά δεν είχαν ύψος μεγαλύτερο του 1 m, ενώ προς τα τέλη της είχαν εμφανιστεί οι φτέρες, τα πρώτα δέντρα και τα πρώτα δάση. Επίσης είχαν αρχίσει να εμφανίζονται και τα πρώτα αρθρόποδα συμπεριλαμβανομένων των πρώτων άπτερων εντόμων και των αραχνιδών, ενώ στις θάλασσες υπήρχαν τα εχινόδερμα, οι αμμωνίτες και πολλή νέα είδη ψαριών. Σ' αυτό το σκηνικό, λοιπόν, πριν από 370 εκατ. χρόνια, η ημέρα είχε διάρκεια 22 ώρες και το έτος 398 ημέρες.

Μία από τις μεγαλύτερες μαζικές εξαφανίσεις των ειδών ζωής συνέβη προς τα τέλη της περιόδου αυτής πριν από περίπου 365 εκατ. χρόνια, όταν σχεδόν το 70% όλων των ειδών ζωής ▶



εξαφανίστηκαν από προσώπου Γης. Οι θαλάσσιοι οργανισμοί έπαθαν τη μεγαλύτερη ζημιά κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος που ίσως να συνδέεται με τη σύγκρουση της Γης μας μ' έναν μεγάλο αστεροειδή ή με τη σύγκρουση πολλών μικρότερων εξωγήινων εισβολέων, κομητιών ή μετεωριτών. Σύμφωνα με μία άλλη υπόθεση, αιτία του μεγάλου αυτού αφανισμού ήταν η κάλυψη της Γκοντουάνα από ένα παχύ στρώμα πάγου, όπως φαίνεται από τα ευρήματα παγετώνων στη βόρεια Βραζιλία, που ανάγονται σ' εκείνη την περίοδο.

Πριν από την καταστροφή αυτή, πάντως, στη θάλασσα έκανε την εμφάνισή του ένα είδος ψαριού που ονομάζεται **δίννοος**, το οποίο ανέπτυξε σιγά-σιγά και πνεύμονες, που του επέτρεψαν αργότερα να μπορεί να αναπνέει κι έξω από το νερό. Μερικά από τα ψάρια του είδους αυτού μεταφέρθηκαν και στην ξηρά στη διάρκεια της **Λιθανθρακοφόρου Περιόδου** (πριν από 354 – 290 εκατ. χρόνια) και μεταμορφώθηκαν στα πρώτα αμφίβια. Στη διάρκεια αυτής της περιόδου, μεγάλες περιοχές της ξηράς καλύπτονταν από βάλτους με υδρόβια δάση που σήμερα αποτελούν τις τοποθεσίες των ανθρακοφόρων στρωμάτων της Γης. Τότε ήταν που εξελίχθηκε και η δυνατότητα της αναπαραγωγής στην ξηρά, που έδωσε την ευκαιρία στους προγόνους των πουλιών, των θηλαστικών και των ερπετών να αναπτυχθούν. Την ίδια αυτή περίοδο, η Λαυρασία συγκρούστηκε με την Γκοντουάνα και η σύγκρουση εκείνη δημιούργησε την Απαλάχια οροσειρά της ανατολικής Βόρειας Αμερικής, ενώ η σύγκρουση της Σιβηρίας με την ανατολική πλευρά της Λαυρασίας δημιούργησε τα Ουράλια Όρη.

Η περίοδος που ακολούθησε ονομάζεται **Πέρμια Περίοδος** (πριν από 290 – 252 εκατ. χρόνια) και αποτελεί την τελευταία γεωλογική περίοδο της **Παλαιοζωικής Εποχής**. Από εκεί κι έπειτα αρχίζει η **Μεσοζωική Εποχή**, που διαχωρίζεται από την

Παλαιοζωική με ορόσημο τον μεγαλύτερο μαζικό αφανισμό των ειδών ζωής της Γης μας, πριν από 252 εκατ. χρόνια. Το γεγονός εκείνο εξαφάνισε το 90% περίπου όλων των ειδών ζωής που βρίσκονταν στη Γη, και από την περίοδο αυτή και μετά, η ζωή στη Γη άλλαξε άρδην, αφού ο μαζικός εκείνος αφανισμός οδήγησε στην ανάπτυξη της **Εποχής των Δεινοσαύρων**.

Πριν απ' την καταστροφή εκείνη, οι διάφορες τεκτονικές πλάκες είχαν δημιουργήσει μια μεγάλη υπερήπειρο που ονομάζεται σήμερα **Παγγαία**, η οποία εκτεινόταν από τον Βόρειο μέχρι τον Νότιο Πόλο, ενώ υπήρχε ένας μεγάλος ωκεανός, η **Πανθάλασσα** και ένα μικρότερο πέλαγος με το όνομα **Τηθύς**. Στην ξηρά, τα δάση με τις φτέρες είχαν αρχίσει να αντικαθίστανται από τα πρώτα κωνοφόρα και η ραγδαία ανάπτυξή τους απελευθέρωσε τεράστιες ποσότητες οξυγόνου, που χρειαζόταν για την ανάπτυξη των ζώων της ξηράς. Με την έναρξη της Μεσοζωικής Εποχής, η διάρκεια της ημέρας είχε μεγαλώσει και ήταν 22,71 ώρες, οπότε και η διάρκεια του έτους έφτανε τις 386 ημέρες.

Στα μέσα της **Τριαδικής Περιόδου** (πριν από 245 – 205 εκατ. χρόνια), η Παγγαία άρχισε να διασπάται βαθμιαία σε 20 ξεχωριστές πλάκες, που συνέχισαν ακάθεκτες τον προαιώνιο χορό τους. Κι όμως, η απειροελάχιστη αυτή μετακίνηση των τεκτονικών πλάκων κατά μερικά μόνο εκατοστά κάθε χρόνο, είναι η κύρια αιτία της δημιουργίας των χαρακτηριστικών της ξηράς και του θαλάσσιου πυθμένα, ενώ συγχρόνως οι τεράστιες δυνάμεις που εφαρμόζονται στα σημεία σύγκρουσης των πλάκων αυτών οδηγούν σε διαδικασίες ορογένεσης και σχηματισμού των οροσειρών. Η διάσπαση της Παγγαίας έγινε φυσικά τμηματικά σχηματίζοντας στα νότια την ήπειρο Γκοντουάνα (Νότιος Αμερική, Αφρική, Ινδία, Ανταρκτική και Αυστραλία), και στα βόρεια τη Λαυρασία (Βόρεια Αμερική και Ευρασία). Η κίνηση των δύο υπερηπείρων δημιούργησε τις οροσειρές της Αμερικής και άρχισε να διαχωρίζει την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική από την Αφρική.

Στη διάρκεια της **Ιουρασικής Περιόδου** (πριν από 205 – 144 εκατ. χρόνια), τη Γη εξουσίαζαν κάθε λογής δεινόσαυροι που αποτελούσαν το αντιπροσωπευτικότερο στοιχείο ζωής. Ήταν πλάσματα ιδιαίτερα προικισμένα, προσαρμοσμένα με μοναδικό τρόπο στο γύρω τους περιβάλλον, ενώ η νοημοσύνη τους συναγωνιζόταν και ίσως ξεπερνούσε, εκείνη πολλών σύγχρονων ζώων. Μια τεράστια ποικιλία πλάσμάτων που

ζούσαν σε αρμονία με το περιβάλλον τους, οι δεινόσαυροι, κυριάρχησε στη Γη καλύπτοντας όλα τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη, από τους πόλους μέχρι τον Ισημερινό. Επί 100 εκατ. χρόνια οι δεινόσαυροι ήταν η πιο πολυποίκιλη και πολύπλοκη μορφή ζωής. Την ίδια εκείνη περίοδο άρχισαν να δημιουργούνται και οι τεράστιες «πετρελαιοπαραγωγικές αποθήκες» της Βόρειας Θάλασσας. Στα μέσα λοιπόν εκείνης της περιόδου, πριν από 180 εκατ. χρόνια, η διάρκεια της ημέρας ήταν κατά μία μόνον ώρα μικρότερη της σημερινής και η διάρκεια του έτους έφτανε τις 381 ημέρες.

Πριν από 65 εκατ. χρόνια οι μετακινήσεις των τεκτονικών πλάκων είχαν προσδώσει στις ηπείρους την μορφή σχεδόν που έχουν σήμερα, αν και η Ινδία δεν είχε ακόμη συγκρουστεί με την Ασία ώστε να δημιουργηθεί η οροσειρά των Ιμαλαΐων. Εκτός όμως απ' την αργή αυτή δραστηριότητα, κι άλλες δυνάμεις επιδρούσαν καταλυτικά στην όλη εξελικτική πορεία των κατοίκων της Γης. Ο θάνατος των δεινοσαύρων, για παράδειγμα, θεωρείται σήμερα ότι ήταν το αποτέλεσμα ενός τέτοιου εξαιρετικού συμβάντος, όταν η σύγκρουση ενός αστεροειδούς, περίπου 10 km, στη χερσόνησο Γιουκατάν του Μεξικού, κάλυψε ολόκληρη τη Γη, και επί πολλά χρόνια, με ένα σύννεφο καπνού και σκόνης. Πάνω από το 70% όλων των ειδών ζωής του πλανήτη μας καταδικάστηκε έτσι σε μαζικό

αφανισμό, ενώ όλα τα είδη ζωής που βλέπουμε σήμερα γύρω μας είναι οι απόγονοι όσων επιβίωσαν από την τρομερή εκείνη σύγκρουση. Την εποχή της εξαφάνισης των δεινοσαύρων, στο τέλος του **Κρητιδικού** (πριν από 146 – 65 εκατ. χρόνια) και στις αρχές του **Τριτογενούς** (πριν από 65 – 1,8 εκατ. χρόνια), η διάρκεια της ημέρας ήταν 23,63 ώρες και το έτος διαρκούσε 371 ημέρες.

Σήμερα η Γη μας χρειάζεται πλέον 24 ώρες για μια πλήρη περιστροφή της γύρω από τον άξονά της και έτσι το έτος διαρκεί 365,242199 ημέρες. Στα χρόνια που έρχονται οι ημέρες συνεχώς θα μεγαλώνουν, καθώς η Σελήνη θα απομακρύνεται όλο και πιο πολύ από τη Γη μας. Όλα αυτά σημαίνουν ότι στο παρελθόν η Σελήνη φάνταζε μεγαλύτερη στον νυχτερινό ουρανό απ' ό,τι σήμερα, ενώ στο απώτερο μέλλον (σε 780 εκατ. περίπου χρόνια!) θα έχει απομακρυνθεί τόσο πολύ ώστε οι απόγονοί μας δεν θα ξαναδούν ποτέ πια το υπέροχο θέαμα μιας ολικής ηλιακής έκλειψης και θα περιοριστούν να βλέπουν τις δακτυλιοειδείς μόνον εκλείψεις του.

Φυσικά στο ανθρώπινο μάτι τα μυριάδες διαφορετικά χαρακτηριστικά της Γης φαίνονται αθάνατα και αναλλοίωτα. Από γεωλογικής όμως άποψης όλα τους εξελίσσονται συνεχώς. Η δημιουργία των διαφόρων γεωμορφολογικών ►



Η οροσειρά των Ιμαλαΐων «γεννήθηκε» κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης των τεκτονικών πλάκων της Ινδίας και της Ασίας.



Χάρτης που δείχνει την έκταση παγο-
κάλυψης του βόρειου ημισφαιρίου
κατά τη διάρκεια της τελευταίας
περιόδου παγετώνων.



Ο τρικεράτοπος ήταν ένα από τα τελευταία είδη δεινο-
σαύρων που περπάτησαν στη Γη (Cleveland Museum of
Natural History).

χαρακτηριστικών οφείλεται εν μέρει στις τεκτονικές δυνάμεις που ανυψώνουν και μεταφέρουν νέες μάζες πετρωμάτων στην επιφάνεια. Αντίθετα οι διάφορες διαβρωτικές διαδικασίες προκαλούν φθορές στα νέα αυτά πετρώματα. Φορείς της διάβρωσης είναι ο άνεμος και η βροχή. Οι χείμαρροι και τα ποτάμια. Τα ωκεάνια ρεύματα και οι πάγοι. Και ο ισχυρότερος όλων: οι παγετώνες.

Πάνω στις πολικές περιοχές της Γης, και με την πάροδο του χρόνου, η εξάπλωση και η απόσυρση των πολικών πάγων οφείλεται στις αλλαγές της έντασης της ακτινοβολίας του Ήλιου. Στα τελευταία μάλιστα 750.000 χρόνια έχουν εντοπιστεί οκτώ τέτοιες επεκτάσεις στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ η τελευταία περίοδος παγετώνων άρχισε να αποσύρεται πριν από 20.000 περίπου χρόνια δίνοντας έτσι στον άνθρωπο την ευκαιρία να σταματήσει τις περιπλανήσεις του, να εγκατασταθεί στους πρώτους μόνιμους καταυλισμούς του, να καλλιεργήσει τη Γη και να αναπτύξει έτσι τους πρώτους ανθρώπινους πολιτισμούς. Περίπου 3,5 δισ. χρόνια μετά τη γέννηση της πρώτης ζωής στη Γη, οι απόγονοί της έχουν ήδη ξεκινήσει το ταξίδι τους για την κατάκτηση του Διαστήματος, και την προσπάθεια ανακάλυψης ζωής και κάπου αλλού στο Σύμπαν.

Σύντομη Εξελικτική Πορεία της Ζωής

- 570 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν τα αρθρόποδα, τα αραχνοειδή και τα οστρακοειδή.
- 550 εκατ. χρόνια πριν αναπτύσσονται ακόμη πιο πολύπλοκα ζώα.
- 510 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν τα πρώτα κεφαλόποδα.
- 500 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν τα πρώτα ψάρια και τα πρωτοαμφίβια.
- 450 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν στην ξηρά τα πρώτα φυτά και οι μύκητες.
- 400 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν τα έντομα και αναπτύχθηκαν οι σπόροι.
- 360 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν τα πρώτα καβούρια, αναπτύχθηκαν τα αμφίβια και στην ξηρά επικράτησαν οι φτέρες.
- 350 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν οι πρώτοι μεγάλοι καρχαρίες.
- 340 εκατ. χρόνια πριν διαφοροποιήθηκαν τα αμφίβια.
- 305 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν τα πρώτα ερπετά.
- 280 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν τα σκαθάρια, τα σποριόφυτα, ενώ διαφοροποιήθηκαν τα κωνοφόρα.
- 251 εκατ. χρόνια πριν ο μεγαλύτερος αφανισμός της ζωής κατέστρεψε περίπου το 90% των θαλάσσιων ειδών.
- 245 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν οι πρώτοι ιχθυόσαυροι.
- 200 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν τα θηλαστικά.
- 150 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν τα πουλιά.
- 130 εκατ. χρόνια πριν αναπτύχθηκαν τα αγγειόσπερμα και τα ανθοφόρα.
- 100 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν οι πρώτες μέλισσες.
- 80 εκατ. χρόνια πριν εμφανίστηκαν τα πρώτα μυρμήγκια και οι τερμίτες.
- 68 εκατ. χρόνια πριν κάνει την εμφάνισή του ο Τυρανόσαυρος.
- 65 εκατ. χρόνια πριν έχουμε τον μεγάλο αφανισμό των δεινοσαύρων.
- 2,5 εκατ. χρόνια πριν εμφανίζεται το γένος του ανθρώπου (Homo).
- 25.000 χρόνια πριν αφανίζονται οι Νεότερνταλ και επικρατεί ο Homo Sapiens.

Μιχάλης Δ. Δερμιτζάκης

τ. Αντιπρύτανης Πανεπιστημίου Αθηνών, πρ. Κοσμήτωρ Σχολής Θετικών Επιστημών

Γεωργίας Φέρμελη

Δρ. Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, διδάσκουσα (Π. Δ. 407/80), Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος



10ο κεφάλαιο

Απολιθώματα: Μάρτυρες της Ζωής στη Γη

Η Γη δημιουργήθηκε πριν από 4,6 δισ. χρόνια από το ίδιο σύννεφο σκόνης και θερμών αερίων που δημιουργήθηκε και όλο το Ηλιακό μας Σύστημα. Στην αρχή η Γη περιφερόταν γύρω από τον Ήλιο σαν μια διάπυρη μπάλα. Σιγά-σιγά το διάπυρο υλικό που την αποτελούσε έσβησε, η επιφάνειά της πάγωσε, ο όγκος της μίκρυνε και με τον χρόνο η στερεοποίησή της έφτασε σε σημαντικό βάθος.

Στα πρώτα στάδια της δημιουργίας της Γης δεν υπήρχε ατμόσφαιρα. Μόλις

άρχισε να σταθεροποιείται η Γη, τα αέρια που ήταν παγιδευμένα μέσα στη μάζα της άρχισαν μέσω των ηφαιστειακών εκρήξεων να εκτοξεύονται και να δημιουργούν μια πρώτη ατμόσφαιρα πλούσια σε διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς.

Όταν κατόρθωσε η Γη να συγκρατήσει γύρω της αυτά τα αέρια, λόγω της δύναμης της βαρύτητας και καθώς η θερμοκρασία έπεφτε, άρχισε η συμπύκνωση των υδρατμών. Ακολούθησαν καταρρακτώδεις βροχές, οι οποίες δημιούργησαν τους ωκεανούς.

Το εσωτερικό της Γης αποτελείται από στοιβάδες με διαφορετική δομή και σύσταση. Τα όρια των στοιβάδων αυτών προσδιορίζονται στα βάθη των 35 και 2.900 km περίπου. Έτσι, σε αδρές γραμμές, η Γη χωρίζεται σε τρία διακριτά τμήματα: τον φλοιό, τον μανδύα και τον πυρήνα. Στις ηπείρους, ο φλοιός είναι η εξωτερική στερεή στοιβάδα της Γης, με μέσο πάχος 35 km. Εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης μέχρι και 60 km βάθος στην ξηρά, ενώ στον πυθμένα της θάλασσας από 0 - 10 km. Στην Ελλάδα το πάχος του φλοιού είναι περίπου 50 km. Στον φλοιό της Γης συμβαίνουν και τα περισσότερα γεωλογικά φαινόμενα.

Η ηλικία της Γης όπως ήδη αναφέρθηκε είναι 4,6 δισ. χρόνια. Ο προσδιορισμός της ηλικίας της δεν είναι αυθαίρετος, αλλά στηρίζεται σε αντικειμενικά στοιχεία, που είναι οι ηλικίες των πετρωμάτων. Και παρότι η Γη από τη στιγμή της δημιουργίας της συνεχώς μεταβάλλεται και συντελούνται ακατάπαυστα μεταβολές στην επιφάνεια και το εσωτερικό της, οι γεωλόγοι έχουν καταφέρει να εντοπίσουν αδιάσειστα στοιχεία για την ηλικία των πετρωμάτων του πλανήτη μας σε όλες τις ηπείρους. Ο φλοιός της Γης αποτελείται από πετρώματα διαφόρων ηλικιών. Ο προσδιορισμός της ηλικίας τους έχει γίνει με ραδιομετρικές μεθόδους και με τα απολιθώματα. Μάλιστα, πριν την ευρεία χρήση της ραδιοχρονολόγησης, οι ηλικίες των πετρωμάτων της Γης προσδιορίζονταν αποκλειστικά από τις σχετικές θέσεις των γεωλογικών στρωμάτων και των απολιθωμάτων που αυτά περιείχαν. Όταν τα στρώματα των πετρωμάτων διατηρούν την αρχική τους θέση και δεν έχουν διαταραχθεί από τεκτονικές δυνάμεις, τότε θεωρείται ότι διατηρούν την κανονική τους επαλληλία και τα αρχαιότερα είναι τα κατώτερα, ενώ τα νεότερα είναι τα ανώτερα. Ειδικότερα, εάν τα στρώματα αποτελούνται από ιζηματογενή πετρώματα, τότε είναι δυνατόν να περιέχουν τα απολιθώματα των οργανισμών που ζούσαν μέσα σ’ αυτά, κατά τη διάρκεια της απόθεσής τους. Οι οργανισμοί αυτοί ανταποκρίνονται στις συνθήκες εκείνης της εποχής.

Η χρονολόγηση των εκρηξιγενών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων, τα οποία δεν περιέχουν απολιθώματα, μπορεί να προσδιορισθεί από τη στρωματογραφική τους θέση ανάμεσα σε απολιθωματοφόρα ιζηματογενή πετρώματα.

Όπως συμβαίνει και στην Ιστορία, όσο πηγαίνουμε πίσω στον χρόνο, τόσο πιο σπάνια και δυσανάγνωστα είναι τα στοιχεία που την αποδεικνύουν. Αυτό ισχύει όχι μόνο για τη γεωλογική

ιστορία του πλανήτη μας, αλλά και για την ύπαρξη της ζωής. Όσο πηγαίνουμε προς το παρελθόν, τόσο πιο δύσκολο είναι να βρούμε στοιχεία που αποδεικνύουν την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη. Αντίθετα όσο πλησιάζουμε στο παρόν, καθίσταται όλο και πιο εύκολο να βρούμε ίχνη και να επεξεργαστούμε στοιχεία που αποδεικνύουν την ποικιλία της ζωής στη Γη. Τα απολιθώματα συμμερίζονται την τύχη των γεωλογικών στρωμάτων στα οποία παρενστρώθηκαν και διακρίνονται σε συνήθη και χαρακτηριστικά.

Τα συνήθη αντιστοιχούν σε οργανισμούς, οι οποίοι δεν παρουσίασαν αξιόλογες μεταβολές μέσα στον γεωλογικό χρόνο. Τα χαρακτηριστικά απολιθώματα αντιστοιχούν σε οργανισμούς που παρουσίασαν περιορισμένη κατακόρυφη και μεγάλη οριζόντια ανάπτυξη και εξάπλωση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι τριλοβίτες, οι γραπτόλιθοι, οι αμμωνίτες, οι ιππουρίτες κ.λπ..

Οι επιστήμονες μέχρι πρόσφατα προβληματίζονταν σχετικά με την εμφάνιση άφθονων και ποικίλων πρωτόγονων απολιθωμάτων κατά τη διάρκεια του κατώτερου Παλαιοζωικού αιώνα και με την καθολική απουσία απολιθωμάτων από τα πετρώματα του Προκάμβριου. Ο προβληματισμός τους προέκυπτε από το γεγονός ότι στο Προκάμβριο, που αποτελεί τα 7/8 του χρόνου της ηλικίας της Γης, δεν είχαν εντοπισθεί ίχνη ζωής, ενώ εμφανίζονται άφθονα στη διάρκεια του Φανεροζωικού (Παλαιοζωικός, Μεσοζωικός και Καινοζωικός αιώνας) που αποτελεί μόλις το 1/8 του χρόνου της ιστορίας της Γης.

Πολλοί επιστήμονες υποστηρίζουν ότι το Προκάμβριο απετέλεσε μία περίοδο σταδιακής εξέλιξης και διαφοροποίησης της ζωής, που οδήγησε στις απολιθωμένες πανίδες του Καμβρίου. Αλλά πού βρίσκονται τα απολιθώματα του Προκαμβρίου; Εκτός από τα απολιθωμένα φύκη και κάποια διάσπαρτα ίχνη, τα πετρώματα του Προκαμβρίου απέτυχαν να αποκαλύψουν κατάλληλους προγόνους της ζωής του κατωτέρου Καμβρίου. Μια ποικιλία αιτιάσεων προσφέρθηκε να εξηγήσει την απουσία των απολιθωμάτων από το Προκάμβριο, όπως:

α) ότι τα πετρώματα του Προκαμβρίου είναι ισχυρά μεταμορφωμένα και δεν επιτρέπουν τη διατήρηση των απολιθωμάτων,

β) ότι τα περιβάλλοντα στα οποία αυτοί οι πρωτόγονοι

οργανισμοί έζησαν, δεν κατεγράφησαν στα πετρώματα του Προκαμβρίου ή ακόμη

γ) ότι τα απολιθώματα και τα περιβάλλοντα αρχικά διατηρήθηκαν και ότι ακολούθησε μια ευρείας έκτασης διάβρωση, που αφαίρεσε τα κρίσιμα στοιχεία ή ακόμα και

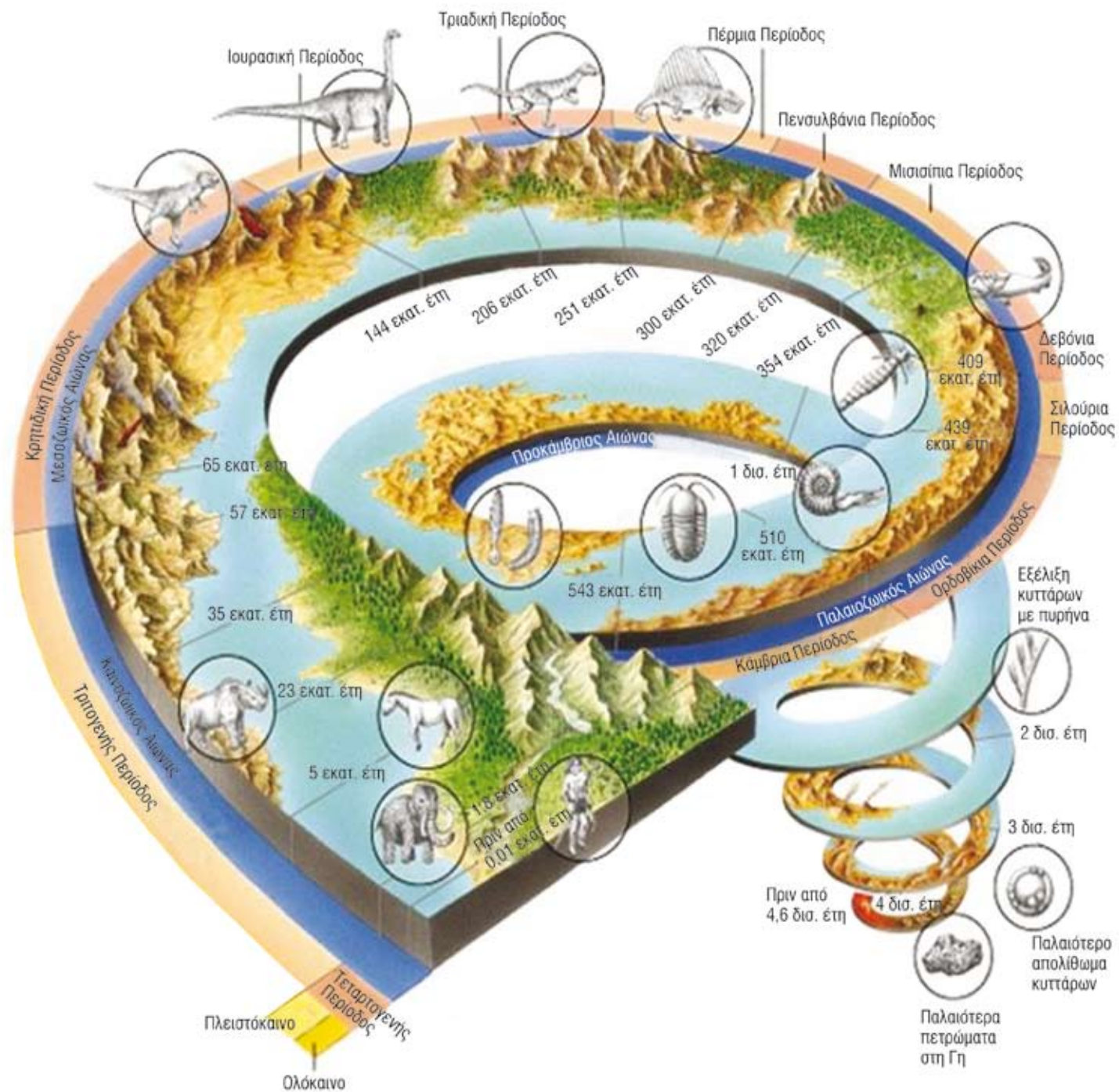
δ) ότι οι οργανισμοί του Προκαμβρίου δεν είχαν διαμορφώσει προστατευτικά περιβλήματα και σκελετικά κατασκευάσματα, τα οποία θα μπορούσαν εύκολα να απολιθωθούν.

Παρά τις προσπάθειες εκλογίκευσης της απουσίας των απολιθωμάτων, οι επιστήμονες συνέχισαν τις έρευνες για τον εντοπισμό ενός καθοδιατηρημένου απολιθώματος του Προκαμβρίου, αφού έγιναν γνωστά πολλά παραδείγματα από σχετικά μη μεταμορφωμένα πετρώματα πολλών και διαφορετικών ιζηματογενών περιβαλλόντων του Προκαμβρίου. Επι πλέον, ένας αριθμός γεωλογικών θέσεων στον κόσμο έδειξε ότι δεν υπήρξε ευρείας έκτασης σημαντική διάβρωση που να διαχωρίζει το ανώτερο Προκάμβριο από το κατώτερο Κάμβριο.

Τελικά, μόλις πριν λίγες δεκαετίες άρχισαν να ανακαλύπτουν μια ποικιλία μικροσκοπικών οργανισμών (πρωτόγονα φύκη και οργανισμούς που έμοιαζαν με βακτήρια) σε στρώματα του Προκαμβρίου σε διάφορες περιοχές του πλανήτη μας. Τα αρχαιότερα απολιθώματα, κάποια μικροσκοπικά βακτήρια και φύκη, η ηλικία ορισμένων απ’ τα οποία αγγίζει σχεδόν τα 4 δισ. χρόνια, εντοπίστηκαν σε πετρώματα του Προκαμβρίου στην Αφρική, στον Καναδά, στην Αυστραλία και στη Γροιλανδία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για τα παλαιότερα ίχνη ζωής στον πλανήτη μας αποτελούν εκείνα που έχουν εντοπιστεί στην **Ίζουα** της Γροιλανδίας και το γειτονικό νησί Ακίλθια. Τα ίχνη αυτά, σύμφωνα με τους γεωλόγους, είναι τα παλαιότερα που έχουν βρεθεί μέχρι σήμερα και αποδεικνύουν όχι μόνο ότι η Γη είχε βιόσφαιρα που λειτουργούσε 3,7 δισ. χρόνια πριν, αλλά και ότι το νερό που προήλθε από τη συμπύκνωση των υδρατμών που προσέφεραν οι ηφαιστειακές εκρήξεις υπήρχε ήδη από εκείνη την εποχή σε αξιοσημείωτες ποσότητες, ακόμη και σαν ρχές θάλασσες. Είναι γνωστό ότι η θερμότητα και η ταφή μεταμορφώνει τα πετρώματα και η διάβρωση τελικά τα αποσυνθέτει στα αρχικά συστατικά τους, για να εμπλακούν και πάλι από την αρχή σε έναν νέο μεγάλο κύκλο ιζηματογένεσης και αλληαγής.

Μεγααιώνες	Αιώνες	Περίοδοι	Ηλικία σε εκατομ. χρ.
ΦΑΝΕΡΟΖΩΙΚΟΣ	ΚΑΙΝΟΖΩΙΚΟΣ	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ	2,588
		ΤΡΙΤΟΓΕΝΕΣ	65,5
	ΜΕΣΟΖΩΙΚΟΣ	ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ	145,5
		ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ	199,6
		ΤΡΙΑΔΙΚΟ	251
		ΠΕΡΜΙΟ	299
		ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟ	359,2
	ΠΑΛΑΙΟΖΩΙΚΟΣ	ΔΕΒΟΝΙΟ	416
		ΣΙΛΟΥΡΙΟ	443,7
		ΟΡΔΟΒΙΣΙΟ	488,3
		ΚΑΜΒΡΙΟ	542
ΚΡΥΠΤΟΖΩΙΚΟΣ	ΠΡΟΤΕΡΟΖΩΙΚΟΣ		2,500
	ΑΡΧΑΙΟΖΩΙΚΟΣ		3,600
	ΚΑΤΑΡΧΑΙΟΖΩΙΚΟΣ		

Χρονοστρωματογραφική κλίμακα. Οι γεωλόγοι, προκειμένου να περιγράψουν την ιστορία 4,6 δισ. χρόνων της Γης, τη χωρίζουν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και χρησιμοποιούν μια ιδιαίτερη ονομασία για κάθε ένα απ’ αυτά. Έτσι, η συνολική ηλικία της Γης χωρίζεται σε έξι μεγάλα χρονικά διαστήματα, τους αιώνες (τον **Καταρχαίοζωικό**, τον **Αρχαιοζωικό**, τον **Προτεροζωικό**, τον **Παλαιοζωικό**, τον **Μεσοζωικό** και τον **Καινοζωικό**), οι οποίοι αντιστοιχούν σε δύο μεγάλλες, τον **Κρυπτοζωικό** και τον **Φανεροζωικό**. Οι αιώνες χωρίζονται σε μικρότερα διαστήματα, τις περιόδους, και οι περίοδοι σε ακόμη μικρότερα διαστήματα, που ονομάζονται βαθμίδες.



Γιατί, επομένως, τα πετρώματα της Ίζουα έχουν διατηρηθεί μέχρι σήμερα, αφού είναι γνωστό ότι τα περισσότερα πετρώματα από τον «αρχέγονο φλοιό» της Γης έχουν «ανακυκλωθεί» στον αέναο κύκλο της ύλης μέσω των τεκτονικών πλακών; Μια πιθανή εξήγηση μπορεί να αποτελεί το γεγονός ότι ο φλοιός στη Γροιλανδία σταθεροποιήθηκε πολύ νωρίς. Αλλά, ακόμη και μ' αυτήν την προϋπόθεση, η διατήρησή του μέσα στις εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια που πέρασαν από τότε μέχρι σήμερα ίσως να είναι θέμα απλής τύχης. Τα πετρώματα της Ίζουα, δεν είναι σαν έναν επιζώντα από μια σκληρή εκστρατεία ή μια αδυσώπητη μάχη, αλλά σαν κάποιον που επέζησε μετά από πολλούς διαδοχικούς σφοδρούς πολέμους.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή του **Μάρμοθ Μπαρ** στη Δυτική Αυστραλία, όπου έχουν εντοπισθεί υπολείμματα ενός αρχέγονου ωκεάνιου πυθμένα. Στα πετρώματα που αποτελούν αυτόν τον πυθμένα, οι γεωλόγοι έχουν εντοπίσει και προσδιορίσει στρώματα απολιθωμένων μικροβίων, τα οποία αποτελούν προγόνους των κυανοβακτηρίων, που συνέβαλαν στην αλλαγή της ατμόσφαιρας της Γης. Στοιχεία από την περιοχή του Μάρμοθ Μπαρ αποδεικνύουν την παρουσία αυτών των μικροβίων πριν από 3,5 δισ. χρόνια, και είναι αξιοσημείωτο ότι ο μεταβολισμός τους στηριζόταν στο θείο.

Στρωματόλιθοι. Πρόκειται για ιζηματογενείς δομές που σχηματίζονται σε συνθήκες ανοξίας (έλλειψης οξυγόνου), κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου και με πολύ αργούς ρυθμούς. Δημιουργούνται από την παγίδευση, τη δέσμευση ή και την κατακρήμνιση ιζήματος (ανθρακικού υλικού) σε συνδυασμό με τη βιολογική δραστηριότητα ομάδων μικροοργανισμών, των ονομαζόμενων κυανοβακτηρίων. Από πολλές απόψεις, οι στρωματόλιθοι είναι από τα πιο ενδιαφέροντα απολιθώματα και ίσως από τα λίγα που μας δίνουν πληροφορίες για την εμφάνιση της ζωής, και ενδεχομένως για την εξέλιξη των διαφόρων μορφών ζωής από το Κάμβριο μέχρι σήμερα. Κωδικοποιούν τον ρόλο που οι αρχαίοι μικροοργανισμοί διαδραμάτισαν στην εξέλιξη της ζωής στη Γη και στη διαμόρφωση των γήινων περιβαλλόντων.

Ανάλογα παραδείγματα πολύ παλαιών απολιθωμάτων υπάρχουν και στη βόρεια Αμερική κοντά στη λίμνη **Σουπήριον**, όπου έχουν εντοπισθεί μικροσκοπικά απολιθώματα με τη μορφή κοίλων σφαιρών και ελικοειδών νημάτων οργανικής ύλης καθώς και άλλων μορφών που μοιάζουν με μικροσκοπικές ομπρέλες. Επί πλέον, στην Αφρική, στην έρημο της Ναμίμπια, έχει εντοπισθεί μια ασυνήθιστη συλλογή απολιθωμάτων –μοναδικές και πολύπλοκες δομές που αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό κυττάρων. Οι μορφές αυτές είναι διαπιστωμένο ότι έχουν ηλικία περίπου 750 εκατ. έτη. Στο **Μπέρζες Σέιτλ**, στα καναδικά Βραχώδη Όρη, απ' την άλλη, έχει εντοπισθεί πληθώρα πολύπλοκων πλάσμάτων, τα οποία ευδοκίμησαν κατά τη διάρκεια της «έκρηξης της ζωής», που σημειώθηκε μετά την τελευταία τήξη των πάγων στη Γη. Τριλοβίτες, μαλακοί σκώληκες και μυστηριώδη μαλακόστρακα μάς αποκαλύπτουν την ποικιλία των μορφών ζωής.

Καθώς σιγά-σιγά συναρμολογούμε τα κομμάτια της ιστορίας των απολιθωμάτων του πλανήτη μας, μαθαίνουμε όλο και πιο πολλό για την εξέλιξη της ζωής στο διάβα των γεωλογικών αιώνων. Σήμερα γνωρίζουμε ότι από το σύνολο των ειδών που έχουν ζήσει στη Γη από την πρώτη εμφάνιση της ζωής, περίπου πριν από 3,7 δισ. χρόνια, μόλις το ένα στα χίλια εξακολουθεί να ζει. Όλα τα υπόλοιπα έχουν εξαφανιστεί.





Ασβεστόλιθος με βραχιονόποδα από τη νήσο Χίο. Είναι από τα παλαιότερα απολιθώματα του Ελληδικού χώρου. Πρόκειται για θαλάσσια ασπόνδυλα που φέρουν όστρακο, και παρουσίασαν ιδιαίτερη ανάπτυξη κατά τη διάρκεια του Παλαιοζωικού. Στο Δεβόνιο της Χίου βρέθηκαν τα γένη *Stringocephalus* και *Rhynchonella*. Στο Λιθανθρακοφόρο και Πέρμιο της ανατολικής Ελλάδας στη Χίο, την Ύδρα και αλλού έχουν βρεθεί διάφορα είδη του γένους *Productus*, ανάμεσα στα οποία και το γιγαντιαίο είδος *Productus semiptanus*.

Η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των απολιθωμάτων είναι η Παλαιοντολογία. Η Παλαιοντολογία είναι και παραμένει στενά συνδεδεμένη με τη Γεωλογία, χάριν της οποίας άρχισαν να εξαγονται συστηματικά απολιθώματα, και κατόπιν η ταξινόμηση και η συσχέτισή τους έδωσε τη δυνατότητα σχετικής χρονολόγησης των ποικίλων γεωλογικών στρωμάτων. Παράλληλα, η Παλαιοντολογία συνδέεται άμεσα με τη Βιολογία, αφού η μελέτη των σύγχρονων οργανισμών, που προηγείται χρονικά, έδωσε τη δυνατότητα για τη συστηματική μελέτη των παλαιότερων. Ιδιαίτερα η Στρωματογραφία, σε συνδυασμό με την Παλαιοντολογία και την Παλαιογεωγραφία, έχουν δώσει απαντήσεις σε ορισμένα κρίσιμα ερωτήματα, όπως τους λόγους που συνετέλεσαν στην εξάπλωση, στην τροποποίηση ή στην εξαφάνιση πληθυσμών και ειδών.

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που συνδέει τα απολιθώματα με τη Βιολογία είναι η ανίχνευση μεγαλομοριακών ενώσεων σε αρχαία υπολείμματα, που έδωσε έναυσμα για την προσπάθεια

εξαγωγής αρχαίου DNA (aDNA) από απολιθώματα. Όταν αυτό καταστεί δυνατόν σε ευρεία κλίμακα, θα γίνει εφικτή η προσέγγιση στην εξέλιξη των οργανικών μορίων και θα ανοίξει ο δρόμος στη δυνατότητα μελέτης της εξέλιξης σε μοριακό επίπεδο στη γεωλογική κλίμακα του χρόνου.

Με αυτόν τον τρόπο θα υπάρξει στενή σύνδεση της Μοριακής Βιολογίας με την Παλαιοντολογία και η ανταλλαγή της συστηματικής γνώσης μεταξύ των διαφόρων επιστημονικών πεδίων θα δώσει περαιτέρω ανάπτυξη στη Βιολογία και τη Γεωλογία. Ειδικότερα, στον χώρο της Γεωλογίας θα προστεθεί ένα επιπλέον εργαλείο στην καλύτερη γνώση του γεωλογικού παρελθόντος, με σημαντική επίδραση στην αρτιότερη κατανόηση της Παλαιογεωγραφίας σε διάφορες περιόδους του απώτατου παρελθόντος, αφού μέχρι σήμερα για τη μελέτη των απολιθωμάτων και για τον καθορισμό των παλαιοντολογικών ειδών χρησιμοποιούνται κατ' ανάγκη κυρίως μορφολογικά κριτήρια. Οι περισσότερες έρευνες που αφορούν το aDNA ασχολούνται με την αναπαραγωγή του από υπολείμματα

μαλακών ιστών. Η ανακάλυψη ότι το DNA μπορεί επίσης να εξαχθεί από παλαιά οστά έδωσε τη δυνατότητα για τη μελέτη παλαιότερων πληθυσμών, αφού είναι παρόντα σε αφθονία, σε πολλά μουσεία ανά τον κόσμο.

Η σημαντικότερη εξέλιξη που αφορά στο aDNA είναι η όσο το δυνατόν σε καλύτερο βαθμό εξαγωγή του από τα παλαιοντολογικά ευρήματα, στα οποία μπορεί να βρεθεί κάτι που θα αποτελεί το ζητούμενο εφεξής. Σε περίπτωση που αυτό αποβεί επιτυχές, ένας δεύτερος στόχος θα είναι να διερευνηθεί εάν αυτές οι αρχαίες ακολουθίες του DNA προσφέρουν κάποια χρήσιμη πληροφορία, η οποία θα μπορούσε να βοηθήσει στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ σύγχρονων ειδών και στην πιθανή εξελικτική διαδικασία σε μοριακό επίπεδο. Ειδικότερα, το υλικό αυτό θα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί, έτσι ώστε να περιγράψει και να ερμηνεύσει την εξέλιξη ειδών και πληθυσμών, καθώς επίσης θα είναι δυνατή η πρόσβαση στις μικροεξελικτικές διαδικασίες. Κατόπιν αυτού, αυτές οι σύγχρονες έρευνες θα είναι χρήσιμες στους παλαιοντολόγους και τους εξελικτικούς γενετιστές.

Θα είναι δυνατή λοιπόν η συντονισμένη έρευνα των μικρο- και μακροεξελικτικών προτύπων, που θα αναφέρονται απευθείας στη σχέση μεταξύ των μορφολογικών και των γενετικών αλλαγών. Συνεπώς, οι υποθέσεις που μέχρι τώρα έχουν ληφθεί υπόψη στην ερμηνεία των σχέσεων μεταξύ των προγονικών μορφών ενός είδους, θα είναι δυνατόν να υπόκεινται σε μεγαλύτερο έλεγχο μέσω του aDNA, το οποίο θα αποτελεί πειραματικό υλικό. Μία επί πλέον χρησιμότητα θα είναι η δυνατότητα που θα παρέχεται στους παλαιοντολόγους να αποσυνδέσουν την ταυτοποίηση ενός είδους από τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του και κατά συνέπεια να περιορισθεί η πιθανότητα εισαγωγής «λανθασμένων» νέων ειδών.

Η παραγόμενη γνώση θα βασίζεται στα προϋπάρχοντα δεδομένα της Στρωματογραφίας και της Παλαιοντολογίας, ενώ μελλοντικά η Παλαιοντολογία, ως κλάδος των γεωεπιστημών, καθώς και η εξελικτική ή ιστορική Βιολογία θα πρέπει να συνεργάζονται στενότερα. Έτσι, αφενός οι παλαιοντολόγοι θα μπορέσουν να αντιληφθούν καλύτερα τα μικροεξελικτικά πρότυπα και αφετέρου οι μοριακοί βιολόγοι τα αντίστοιχα μακροεξελικτικά, τα οποία βασίζονται στις μεταβολές του περιβάλλοντος, γεωλογικού ή βιογενοούς. Η σχέση της Βιολογίας



Σκελετός κρητικού ενδημικού ελαφιού (*Candiacervus*). Κατά τη διάρκεια του Πλειστοκαίνου (1.77 εκατ. χρόνια πριν από σήμερα) διάφορα θηλαστικά – καλοί κολυμβητές, όπως ελέφαντες, ιπποπόταμοι και ελάφια προσέγγισαν την Κρήτη και προσαρμόστηκαν στο ιδιαίτερο περιβάλλον της για να επιζήσουν.

και της Γεωλογίας με την Παλαιοντολογία είναι προφανώς πολύ στενή. Η Βιολογία αποτελεί το παρόν, η μελέτη του οποίου συνιστά εργαλείο για την ερμηνεία του παρελθόντος, και παράλληλα η Γεωλογία αποτελεί το παρελθόν, η μελέτη και η ερμηνεία του οποίου είναι εργαλείο για την πρόβλεψη του μέλλοντος.

Η μελέτη των απολιθωμάτων μέσα από το πρίσμα πολλών επιστημονικών πεδίων αναδεικνύει την ατέρμονη πορεία των επιστημόνων προς την έρευνα και την αλήθεια. Σίγουρα όμως μια συζήτηση για τα πρώτα ίχνη ζωής στη Γη μάς προκαλεί δέος. Η αναζήτηση της επιστημονικής γνώσης και το πάθος για την αλήθεια – αυτό που ο Φάουστ εννοούσε όταν έλεγε: «Να γνωρίσω τι Βαθεία τον κόσμο συγκρατεί» – αποτελεί ίσως μία από τις χίμαιρες που έδωσε ο Δημιουργός στον άνθρωπο, ώστε να αιχμαλωτίσει μέσα στο εφήμερο τη διάρκεια.

Βιβλιογραφία

● Alters, S., Alters, B., *Biology: understanding life*, Hoboken, New Jersey: Wiley, c2006.

● Borghoorn, E.S., «The Oldest Fossils», *Scientific American*, v. 224, no. 5, pp. 30-42, 1971.

● Birkhead, T.R., Moller, A.P., *Sperm Competition and Sexual Selection*, San Diego, CA: Academic Press, 1998.

● Bowler, P.J., *Evolution: the history of an idea*, Berkeley; Los Angeles; London: University of California Press, 2009.

● Brahic, A., *Τα παιδιά του ήλιου: η προέλευση, η εξέλιξη και η εξερεύνηση του ηλιακού συστήματος – και της ζωής*, Αθήνα: Κάτοπτρο, 2002.

● Condie, K.C., Sloan, R.E., *Origin and evolution of earth: principles of historical geology*, Upper Saddle River, NJ: Prentice - Hall, 1998.

● Coyne, J.A., *Why evolution is true*, Oxford; New York: Oxford University Press, 2010.

● Cronin, H., *The Ant and the Peacock*, New York: Cambridge University Press, 1991.

● Darwin, C., *The Origin of Species by Means of Natural Selection: Or, the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life*, New York City: AMS Press, 1972.

● Darwin, C., *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*, Princeton: Princeton University Press, 1981.

● Darwin, C., *The Voyage of the Beagle: Charles Darwin's Journal of Researches*, Penguin Classics, 1989.

● Dawkins, R., *The ancestor 's tale: a pilgrimage to the dawn of life*, Great Britain: Phoenix, 2005.

● Dawkins, R., *Το μεγαλύτερο θέαμα στη Γη: η απόδειξη για την εξέλιξη*, Αθήνα: Ωκεανίδα/ΑΒΓΟ, 2009.

● Δερμιτζάκης, Μ., *Γεωλογικές διαδρομές και μικρά μελετήματα*, εκδ. Γ. Γκέλημπεσς, 2002.

● Δερμιτζάκης, Μ., *Γεωλογικές προσεγγίσεις στην εξαήμερο του Μεγάλου Βασιλείου*, εκδ. Αρμός, 2008.

● Eigen, M., *Steps towards life*, Oxford University Press, 1992.

● Evans, D., Howard S., *Εξέλιξη–Εικονογραφημένος Οδηγός*, ΔΟΛ, 2011.

● Fortey R., *Life: a natural history of the first four billion years of life on Earth*, New York: Alfred A. Knopf, 1998.

● Fry, I., *The emergence of life on earth: a historical and scientific overview*, London: Free Association, c 2000.

● Futuyma, D.J., *Εξελικτική βιολογία*, Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1991.

● Garlick, M.A., *The story of the solar system*, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

● Koshland, D.E., «The Seven Pillars of Life», *Science*, 2002; 295: pp. 2215–2216.

● Margulis, L., *Ο συμβιωτικός πλανήτης*, Αθήνα: Κάτοπτρο, 1999.

● Margulis, L., Dolan, M.F., *Early life: evolution on the precambrian earth*, Boston: Jones and Bartlett, c 2002.

● Margulis, L., Sagan, D., *Acquiring genomes: a theory of the origins of species*, New York: Perseus / Basic Books, 2003.

● Μαγρ, Ε., *Ο Δαρβίνος και η γένεση της σύγχρονης εξελικτικής σκέψης*, Αθήνα: Σύναγμα, 2001.

● Μαγρ, Ε., *Αυτή είναι η βιολογία: η επιστήμη του έμβιου κόσμου*, Αθήνα: Κάτοπτρο, 2002.

● Μαγρ, Ε., *Τι είναι η εξέλιξη: από τα βακτήρια στον άνθρωπο: γεγονότα, αποδείξεις και αλήθειες*, Αθήνα: Κάτοπτρο, 2005.

● Μαγρ, Ε., *Η ανάπτυξη της βιολογικής σκέψης: ποικιλότητα, εξέλιξη και κληρονομικότητα*, Αθήνα: ΜΙΕΤ, 2008.

● Παπανικολάου, Δ.Ι., Σίδερης, Χ., *Γεωλογία : η επιστήμη της Γης*, Αθήνα: Πατάκης, 2009.

● Ροδάκης, Γ.Κ., *Εισαγωγή στην Εξελικτική Βιολογία*, Ιατρικές Εκδόσεις Λίτσας, 2001.

● Shapiro, R., Feinberg, G., «Possible forms of Life in Environments Very Different From the Earth», in B. Zuckerman and M. H. Hart (eds.), *Extraterrestrials: Where Are they?*, Cambridge: Cambridge U. Press, 1995; p. 165–172.

● Σιμόπουλος, Δ., *Γένεση και Κατακλυσμός: η Βιογραφία της Γης: Οδηγός Παράστασης*, Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου, 2006.

● Σιμόπουλος, Δ., Δεληβοριάς Α., *Εξέλιξη: οδηγός παράστασης*, Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου, 2011.

● Schrödinger, E., *What Is Life?*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1945.

● Stringer, C., Andrews, P., *Homo: η καταγωγή και η εξέλιξη του ανθρώπου*, Αθήνα: Polaris, 2006.

● Trotman, C., *The feathered onion: creation of life in the universe*, Chichester, England: Wiley, 2004.

● Watson, J.D. ed., *Darwin: the indelible stamp: the evolution of an idea*, Philadelphia; London: Running Press, c2005.

● Watson, J.D.; Berry, A., *DNA: the secret of life*, New York: Knopf A.A., 2004.

● Woolfson, M.M., *The formation of the solar system: theories old and new*, London: Imperial College Press; Hackensack, NJ: Distributed by World Scientific Publishing Co., c2007.

ΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ

μουσική
ΜΙΜΗΣ ΠΛΕΣΣΑΣ

σκηνοθεσία
ΡΥΑΝ ΨΥΑΤΤ
Life: A Cosmic Story

σκηνοθεσία
ROBIN SIP
Natural Selection

διεύθυνση παραγωγής
ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ Π. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ
ΜΑΝΟΣ ΚΙΤΣΩΝΑΣ
ΑΛΕΞΗΣ ΔΕΛΗΒΟΡΙΑΣ

producer
TOM KENNEDY
Life: A Cosmic Story

producer
ROBIN SIP
Natural Selection

προσαρμογή
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΣ

sound design
ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ

μίξη ήχου
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Κ. ΚΑΤΣΑΡΗΣ

music arrangements
ΜΙΜΗΣ ΠΛΕΣΣΑΣ

music recording
ΝΑΣΣΟΣ ΣΩΠΥΛΗΣ

αφήγηση
ΘΕΜΙΣ ΜΠΑΖΑΚΑ
ΚΟΣΜΑΣ ΔΕΒΕΛΕΓΚΑΣ
στον ρόλο του Κάρολου Δαρβίνου
ΓΙΑΝΝΗΣ ΣΤΕΦΟΠΟΥΛΟΣ

narration
JODIE FOSTER
TONY MAPLES

voice of Charles Darwin
MICHAEL HARRIGAN

title design
ΑΝΤΩΝΗΣ ΑΣΠΡΟΜΟΥΡΓΟΣ

title composition
ΙΩΣΗΦ ΨΙΣΤΑΚΗΣ

senior technical director
JEROEN LAPRE
Life: A Cosmic Story

lead digital artist
MICHAEL SCHMITT
Life: A Cosmic Story

technical director / data manager
MATTHEW BLACKWELL
Life: A Cosmic Story

senior animators
MATHIJS BRUSSAARD
JOHANNES BEVELANDER
PETER GEERTS
KEES VAN DER VIJVER
Natural Selection

full-dome technical support
ΓΙΩΡΓΟΣ ΜΑΥΡΙΚΟΣ

full-dome production assistants
ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΛΟΥΒΑΡΗΣ
ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΡΗΣΤΟΓΙΩΡΓΟΣ

computer graphics & 3D animation services
CALIFORNIA ACADEMY OF SCIENCES
San Francisco, California
MIRAGE 3D STUDIO
The Hague, Netherlands

post-production video services
ΕΥΓΕΝΙΔΕΙΟ ΠΛΑΝΗΤΑΡΙΟ

post-production audio services
FABRIKA SONIC ARTS
Αθήνα
STARGAZER AUDIO
Ιδρύματος Ευγενίδου

music services
STUDIO EL-MI
Αθήνα

θερμές ευχαριστίες
ESA
NASA

παραγωγή
ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
© 2012

