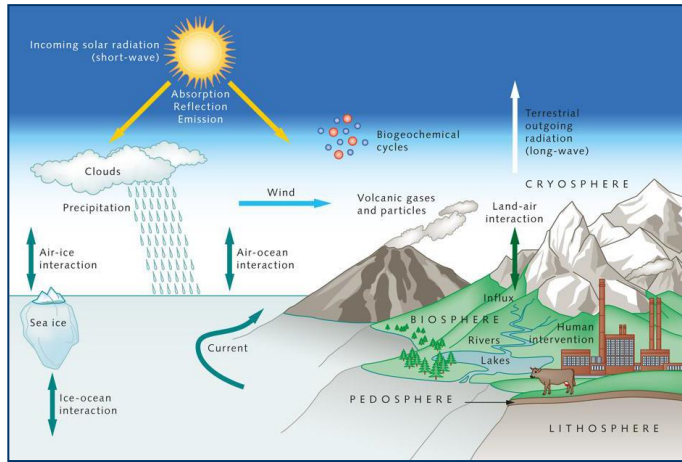


Ο Μηχανισμός Αυτορρύθμισης της Επιφανειακής Θερμοκρασίας της Γης

Η εισαγωγή της επιστημονικής γνώσης στην περιβαλλοντική εκπαίδευση, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά τόσο στην κατανόηση της κλιματικής αλλαγής, που είναι πλέον ορατή στην καθημερινότητά μας, όσο και στην αποτροπή ή στην αναστροφή των αρνητικών συνεπειών της. Έτσι η διδασκαλία κατάλληλης περιβαλλοντικής γνώσης όσο και η ανάπτυξη αντίστοιχης συνείδησης κρίνονται απαραίτητες ιδιαίτερα στους μαθητές όλων των βαθμίδων της εκπαίδευσης (UNESCO 1978). Ενδεικτικό παράδειγμα μπορεί να αποτελέσει η διδασκαλία του Μηχανισμού Αυτορρύθμισης της Επιφανειακής Θερμοκρασίας της Γης με ερωτήσεις



σύντομης ανάπτυξης, που ενεργοποιούν τις τρεις ανώτερες νοητικές λειτουργίες ανάλυση, αξιολόγηση και δημιουργία (Krathwohl 2002) για την εννοιολογική του κατανόηση.

Εικ. 1 Το κλιματικό σύστημα της Γης σήμερα.

Γνωστικό υπόβαθρο

Η εμφάνιση και διατήρηση των γνωστών μορφών ζωής σχετίζεται με σταθερές, ήπιες και μακροχρόνιες συνθήκες στην επιφάνεια της Γης (Εικ. 1). Παρά το γεγονός ότι η ατμόσφαιρα της Γης δεν είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία, η ύπαρξη Μηχανισμού Αυτορρύθμισης της Επιφανειακής Θερμοκρασίας της Γης (ΜΑΡΕΘ) διατηρεί τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειάς της σχεδόν σταθερή και επιτρέπει στο νερό να βρίσκεται σε υγρή κατάσταση ευνοώντας έτσι την εξέλιξη της ζωής. Είναι κυρίως αποτέλεσμα του συνδυασμού του φαινομένου του θερμοκηπίου, της τρέχουσας χημικής ατμοσφαιρικής σύνθεσης, του παγκόσμιου κύκλου του άνθρακα, της γεωλογίας του πλανήτη και της ηλιακής δραστηριότητας.

Φαινόμενο του Θερμοκηπίου: Αν και η ατμόσφαιρα αποτελείται κυρίως από

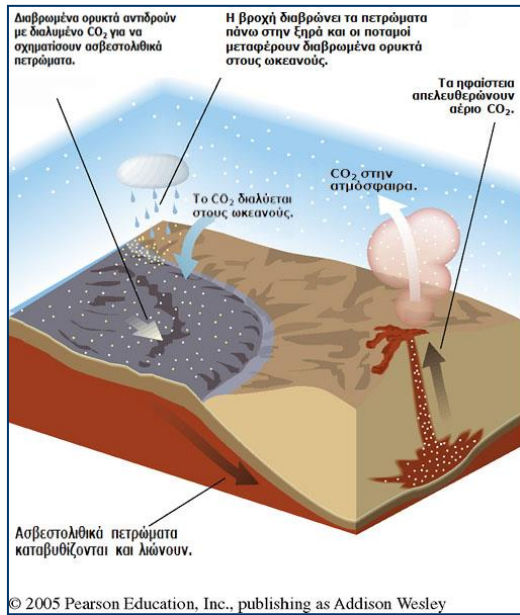


τα αέρια μοριακό άζωτο και οξυγόνο, μικρές ποσότητες από τα δευτερεύοντα ατμοσφαιρικά συστατικά (CO_2 , υδρατμοί H_2O , CH_4 , O_3 , N_2O , κ.ά.) εγκλωβίζουν (απορροφούν και επανεκπέμπουν) την υπέρυθη ηλιακή και γήινη ακτινοβολία επιτυγχάνοντας κοντά στην επιφάνεια θερμοκρασία 15°C με την κανονική λειτουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αν εξέλιπε το φαινόμενο του θερμοκηπίου η επιφανειακή θερμοκρασία θα ήταν 33°C χαμηλότερη (Εικ. 2).

Εικ. 2 Το ατμοσφαιρικό φαινόμενο του θερμοκηπίου συνοπτικά.

Κύκλος του άνθρακα (Εικ. 3): Αν η συγκέντρωση του CO_2 αυξηθεί στην ατμόσφαιρα, τότε η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης αυξάνεται λόγω υπερθέρμανσης του πλανήτη, και

στη συνέχεια η εξάτμιση του νερού θ' αυξηθεί πάνω από τους ωκεανούς καθώς και οι βροχοπτώσεις. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) διαλύεται στο νερό της βροχής και πέφτει στους ωκεανούς, όπου αποθηκεύεται με τη μορφή ανθρακικού ασβεστίου στα κελύφη οστράκων. Αυτό οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας. Τα κελύφη με την πάροδο του χρόνου συνθλίβονται μέσα στο μανδύα. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του μανδύα το ανθρακικό ασβέστιο αποσυντίθεται σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και CO₂ και το τελευταίο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των εκρήξεων ηφαιστειών και παρατηρείται πάλι αύξηση της θερμοκρασίας (Kasting and Catling 2003).

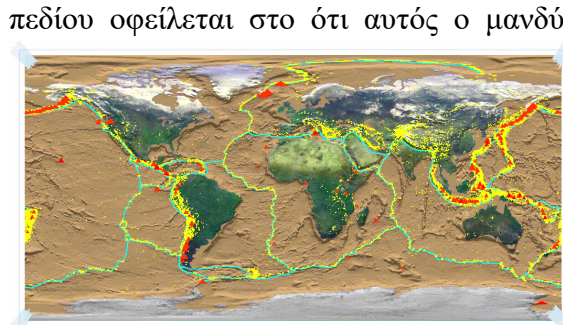


Εικ. 3 Παγκόσμιος κύκλος του άνθρακα.
 Πηγή: Pearson Education

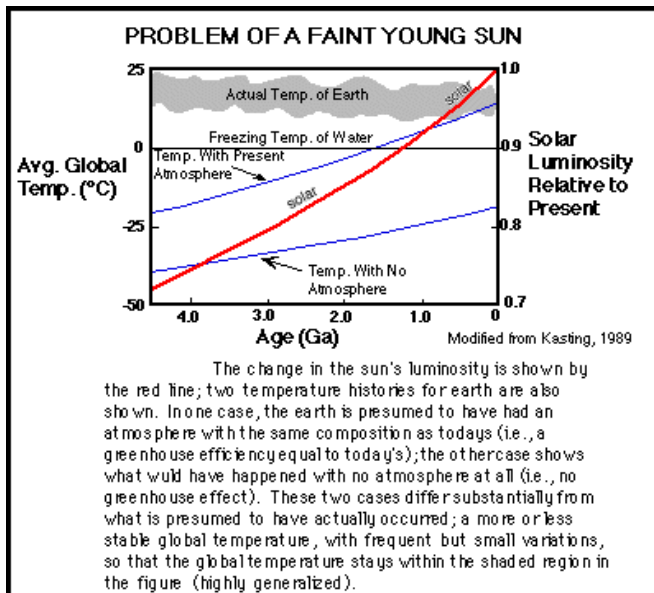
Ο μηχανισμός αυτός κράτησε τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης κατά τα τελευταία 2-3 δισεκατομμύρια χρόνια πάνω από τους 0°C και κάτω από 100°C και έτσι το νερό δεν πάγωσε ή δεν εξατμίστηκε ολοκληρωτικά (Αυγολούπης, 2010; Βάρβογλης, 2005).

Άλλοι παράγοντες που έμμεσα δημιουργούν σταθερές ήπιες συνθήκες ζωής και σχετίζονται με τον ΜΑΡΕΘ είναι:

α. Η **γεωλογική δομή της Γης** (Εικ. 4), Η ηφαιστειακή και σεισμική δραστηριότητα στη Γη οφείλεται στο ότι οι ήπειροι «επιπλέουν» σε ένα ρευστό μανδύα από λιωμένο υλικό και η ύπαρξη μαγνητικού πεδίου οφείλεται στο ότι αυτός ο μανδύας περιστρέφεται. Έτσι απελευθερώνεται αφενός CO₂ στην ατμόσφαιρα και αφετέρου προστατεύεται η Γη από τα φορτισμένα σωματίδια του Ήλιου.



Εικ. 4 Χάρτης της Γης με τα όρια των τεκτονικών πλακών (γαλάζιες γραμμές), η κατανομή των πρόσφατων σεισμών (κίτρινα σημεία) και των ενεργών ηφαιστείων (κόκκινα σημεία).



β. Η ηλιακή δραστηριότητα, η οποία τα τελευταία χρόνια εμφανίζει μια αύξηση (Εικ. 5).

Εικ. 5 Σχετικές μεταβολές της θερμοκρασίας επιφάνειας της Γης με και χωρίς ατμόσφαιρα και της λαμπρότητας του Ήλιου.

Μέτρο της δραστηριότητας του Ηλίου είναι η **ηλιακή σταθερά**, δηλ. η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται επιφάνεια εμβαδού 1 cm² στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, όταν εκτεθεί κάθετα στις ηλιακές

ακτίνες επί 1 min (λεπτό της ώρας) σε μέση απόσταση μίας αστρονομικής μονάδας από τον Ήλιο, δηλ. σε $1,49598 \cdot 10^8$ Km. Είναι ίση με 2 cal (2 θερμίδες), δηλαδή προκαλεί άνοδο τη; Θερμοκρασία; νερού μάζας 1 gr κατά 2°C σε 1 min.



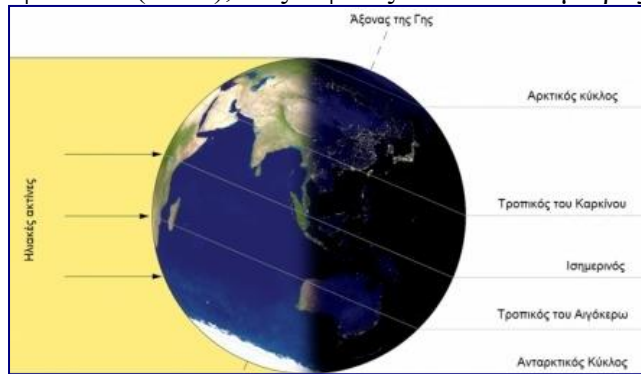
γ. Η σχεδόν κυκλική τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο και η απόστασή της από τον αυτόν

Εικ. 6 Η σχεδόν κυκλική τροχιά περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο.

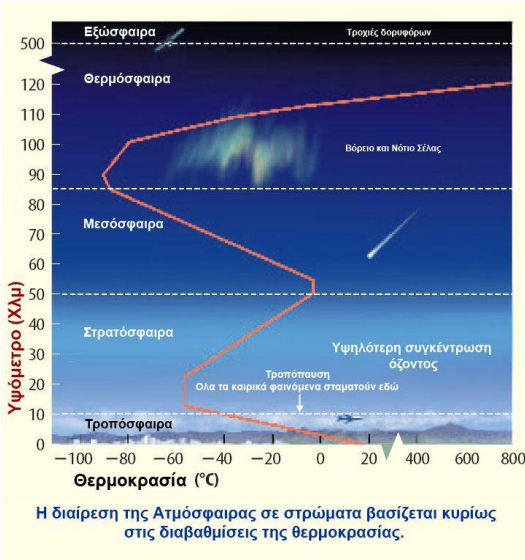
(Εικ. 6), η κλίση τον άξονά της Γης (λόξωση) σε σχέση με την κάθετη στο επίπεδο περιφοράς της γύρω από τον Ήλιο και συνεπώς η γωνία πρόσπτωσης των

ηλιακών ακτινών στη γήινη επιφάνεια (Εικ.7), εξασφαλίζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Εικ. 7 Γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του Ήλιου κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο του Βόρειου Ημισφαιρίου.



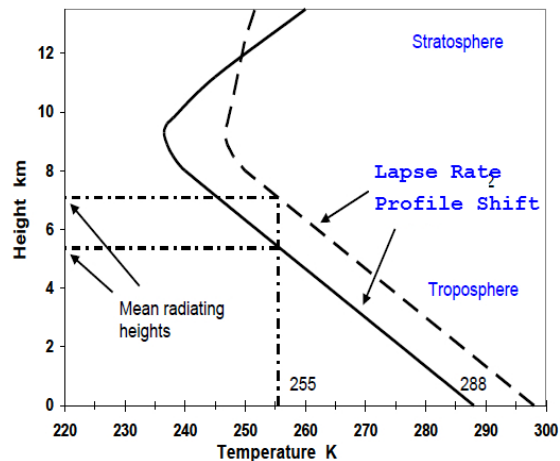
δ. Το στρώμα του όζοντος σε ύψος μεταξύ 30-45 Km από την επιφάνεια του πλανήτη, που δρα ως ασπίδα απέναντι στη βλαβερή



υπεριώδη (UVA, B) ακτινοβολία του Ήλιου (Εικ. 8).

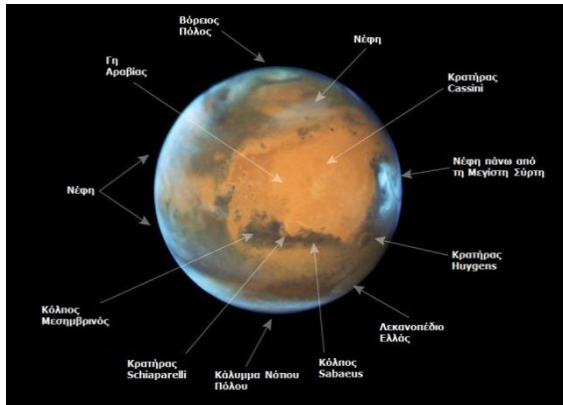
Εικ. 8 Στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας.

ε. Η ψύξη των υδρατμών στην κατώτερη ατμόσφαιρα που εντοπίζεται σε ύψος 5 Km. Αν το στρώμα στο οποίο η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 0°C ανέλθει πάνω από τα 30 Km, δηλ. πάνω από το στρώμα του όζοντος, το νερό διασπάται από την υπεριώδη ακτινοβολία του Ηλίου σε υδρογόνο και οξυγόνο (Εικ. 9). Το



υδρογόνο, ως ελαφρό αέριο, διαφεύγει στο διάστημα ενώ το οξυγόνο, ως βαρύτερο, παραμένει και ενώνεται με τον άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα.

Εικ. 9 Η μετατόπιση της θερμοβαθμίδας (lapse rate) προς τα δεξιά (θέρμανση) αυξάνει το μέσο ύψος ψύξης των υδρατμών και της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα.



Εικ. 10 Ο κόκκινος πλανήτης Άρης.
 Πηγή: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), J. Bell (ASU), and M. Wolff (Space Science Institute)

Ο MAPEΘ είναι αποτελεσματικός εντός κάποιων ορίων. Δηλαδή λειτουργεί κάτω από ορισμένες ελαφρές διαταραχές της θερμοκρασίας ή μεταβολές της αναλογίας μείγματος των αερίων του θερμοκηπίου. Οι αλλαγές όμως στην ατμοσφαιρική σύσταση, π.χ. η αύξηση της συγκέντρωσης του μεθανίου (που είναι 20-25 φορές πιο ενεργό από το CO₂) ή η έλλειψη της τεκτονικής δραστηριότητας (όπως στον πλανήτη Άρη, Εικ. 10) ή η έλλειψη H₂O (όπως στην ατμόσφαιρα της Αφροδίτης, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι 90 φορές μεγαλύτερη από ό,τι στη Γη), απενεργοποιούν ή αναστέλλουν τον MAPEΘ (Foley 2015; Frank et al 1999, 2002; Lenton 2003).

Ερωτήσεις σύντομης ανάπτυξης:

Οι φοιτητές μετά από αναζήτηση στη βιβλιογραφία, σε ηλεκτρονικές πηγές και εκπαιδευτικά λογισμικά με προσομοιώσεις καλούνται να συνθέσουν τις γνώσεις τους για να απαντήσουν στις παρακάτω ερωτήσεις.

1. Η θερμοκρασία στην κατώτερη ατμόσφαιρα-τροπόσφαιρα, που εκτείνεται έως 10-12 Km από την επιφάνεια της Γης, πέφτει με περίπου σταθερό ρυθμό 6.5°C ανά Km και οι υδρατμοί ανέρχονται μέχρι τα 5Km. Πόση είναι η θερμοκρασία στα 5Km;
2. Αν η λόξωση του άξονα περιστροφής της Γης μειωθεί από τις 23,5° στις 15°, πού θα βρίσκεται ο τροπικός του Καρκίνου και μεταξύ ποιών παραλλήλων θα αναπτύσσεται η εύκρατη ζώνη του Β. Ημισφαιρίου; Θα επηρεαστεί ο MAPEΘ;
3. Ο MAPEΘ δεν λειτουργεί στον πλανήτη Αφροδίτη επειδή αυτή είναι σχετικά κοντά στον Ήλιο ή για άλλους λόγους;
4. Στον πλανήτη Άρη υπάρχουν μικρές ποσότητες νερού και διοξειδίου του άνθρακα και η επιφανειακή του θερμοκρασία είναι περίπου 50 °C κάτω από το μηδέν. Λόγω του μικρού μεγέθους του ψύχθηκε γρήγορα και η θερμοκρασία στο εσωτερικό του έπεσε κάτω από το σημείο τήξης των πετρωμάτων που τον αποτελούν. Τότε σταμάτησε η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Συνεχίζεται όμως η επανεισαγωγή CO₂ στην ατμόσφαιρά του;
5. Υπάρχουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου παγιδευμένες μέσα στους παγετώνες στις πολικές και στις παραπόλιες περιοχές καθώς και σε ιζήματα στα βάθη των ωκεανών. Μια αισθητή άνοδος της μέσης θερμοκρασίας εξαιτίας αυξημένης ποσότητας CO₂ από την καύση ορυκτών καυσίμων θα μπορούσε να απελευθερώσει παγιδευμένο CH₄. Μπορεί τότε να διατηρείται ο μηχανισμός αυτορρύθμισης;
6. Ο MAPEΘ, όταν λειτουργεί, μοιάζει με την ταλάντωση ελατηρίου εντός των ορίων ελαστικότητας. Όταν ανατρέπεται πώς συμπεριφέρεται;

Να επισκεφτείτε τις παρακάτω προσομοιώσεις:

http://e-geografia.eduportal.gr/geo-st/gstd05_san-rays/index.html

http://e-geografia.eduportal.gr/geo-st/gstd05_seasons-months/index.html

http://e-geografia.eduportal.gr/geo-st/gstd05_kinisi-epoxes/index.html

http://e-geografia.eduportal.gr/geo-st/gstd05_epoxes_why/index.html

Σχόλιο

Αυτή η μελέτη, παρά τον περιγραφικό της χαρακτήρα, θα μπορούσε να σταθεί ως μια συνοπτική εισαγωγή στο MAPEΘ, η οποία συμπληρώνεται από τις απαντήσεις σύντομης ανάπτυξης, την αντίστοιχη αναζήτηση και την κατανόησή τους από τους μαθητές. Επιπλέον, η έλλειψη ή η ακύρωση του ομοειδούς MAPEΘ στον Άρη και την Αφροδίτη, η αλλαγή σύστασης της ατμόσφαιρας και η ταλάντωση του ελατηρίου ως γνωστό φυσικό-μηχανικό ανάλογο μπορούν να οδηγήσουν σε μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση του όρου MAPEΘ.

Βιβλιογραφία

- Αυγολούπης, Σ. (2010). Το εγγύς διαστημικό περιβάλλον της Γης: Ιστορία, τεχνολογία και επιστήμη της αστρονομίας. Πλανητάριο Θεσσαλονίκης, ISBN 978-960-89049-6-5, Θεσσαλονίκη
- Βάρβογλης, Χ. (2005). Ζωή και Πλανητικές Ατμόσφαιρες: Μια Αμφίδρομη Σχέση, Ινστιτούτο Αστρονομίας και Αστροφυσικής Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. http://www.astro.noa.gr/journal/Periodic/journal_07varvoglis.htm
- Foley, B.J. (2015). The Role of Plate Tectonic-Climate Coupling and Exposed Land Area in the Development of Habitable Climates on Rocky Planets. *The Astrophysical Journal*, Volume 812, Number 1. doi: 10.1088/0004-637X/812/1/36
- Franck, S., Kossacki, K.J., Bounama, C. (1999). The global carbon cycle for the past and future evolution the earth system. *Chem. Geol.* 159, 305–317. doi:10.1016/S0009-2541(99)00043-1
- Franck, S., Kossacki, K.J., von Bloh, W., Bounama, C. (2002). Long-term evolution of the global carbon cycle: historic minimum of global surface temperature at present. *Tellus* 54B, 325–343. doi: 10.1034/j.1600-0889.2002.201377
- Kasting, J.F., Catling, D.C. (2003). Evolution of a habitable planet, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 41, 429-463, 200. doi: 10.1146/annurev.astro.41.071601.170049
- Krathwohl, D.R. (2002). A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview. *Theory Into Practice*, 41:4, 212-218.
- Lenton, T.M. (2003). Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model. *Tellus* 52B, 1159–1188. doi: 10.1034/j.1600-0889.2000.01104.x
- The Tbilisi Declaration. UNESCO/UNEP Environmental Education Newsletter, Vol. III, No. 1 (January 1978). Final report: Intergovernmental Conference on Environmental Education organized by UNESCO in cooperation with UNEP, Tbilisi, Georgia, USSR, 14–26 October 1977. Paris: UNESCO.

Πηγές:

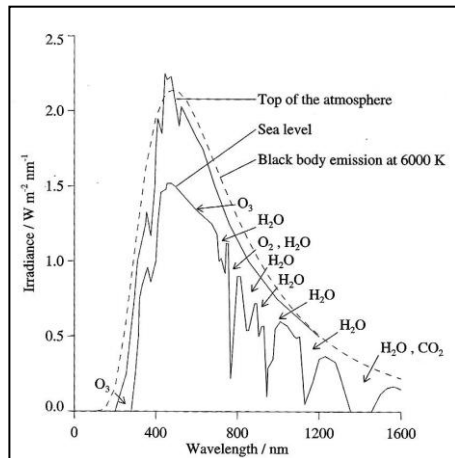
Α. Σταύρου Αυγολούπη «Το Εγγύς Διαστημικό Περιβάλλον της Γης» (σ. 263-265)

Ο κόσμος που ζούμε (εμπλουτισμένο)

Τελικά, πιστεύουμε πως η ύπαρξη ζωής είναι συνδεδεμένη με τη διατήρηση σταθερών ήπιων συνθηκών στην επιφάνεια της Γης, οι οποίες εξασφαλίζονται με τον γνωστό μηχανισμό αυτορρύθμισης. Με τον μηχανισμό αυτό ρυθμίζεται η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας της Γης σε τριατομικά αέρια που επηρεάζουν τη θερμοκρασία της Γης, με πρωταγωνιστές το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και τους υδρατμούς (H₂O)(Εικ. 11, 12).

Όταν αυξάνει η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα, τότε ανεβαίνει η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης, λόγω του φαινομένου του

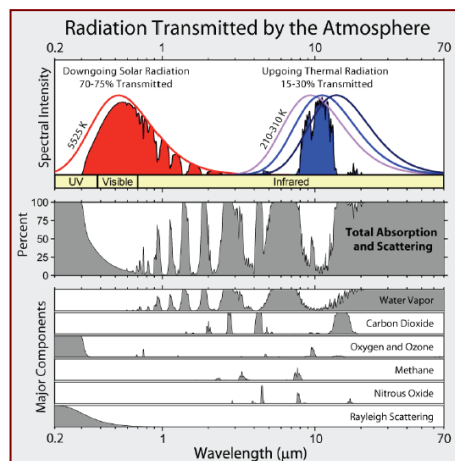
θερμοκηπίου, και επομένως αυξάνεται η εξάτμιση νερού από τους ωκεανούς και κατά συνέπεια η βροχόπτωση. Το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται στο νερό της βροχής και πέφτει στους ωκεανούς, όπου αποθηκεύεται υπό μορφή ανθρακικού ασβεστίου στα κελύφη των οστράκων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμοκρασία της Γης



Εικ. 11 Η ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με το μήκος κύματος, όπως φθάνει στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, στην επιφάνεια της Γης και η αντίστοιχη καμπύλη μέλανος σώματος θερμοκρασίας ίσης με αυτής της επιφάνειας του Ήλιου. Διακρίνονται και οι γραμμές απορρόφησης ατμοσφαιρικών μορίων.

Τα όστρακα, με τη σειρά τους, καθώς καταπλώνονται στο εσωτερικό της Γης, θερμαίνονται και διασπώνται σε ασβέστιο και σε διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα με τη βοήθεια των ηφαιστειών και έτσι αυξάνεται πάλι η θερμοκρασία του πλανήτη.

Αυτός ο μηχανισμός αυτορρύθμισης διατήρησε τη μέση θερμοκρασία της Γης σε κατάλληλα για τη ζωή επίπεδα.



Εικ. 12 Εκπεμπόμενη ακτινοβολία από τη γήινη ατμόσφαιρα με τη συνεισφορά διαφόρων ατμ. αερίων.

Γήινη εμπειρία και πιθανά σενάρια (εμπλουτισμένο)

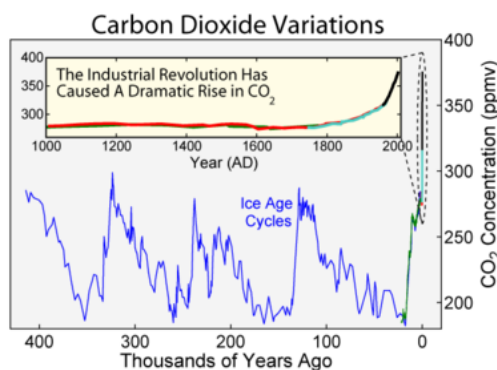
Μια ανατροπή του μηχανισμού που περιγράφηκε παραπάνω θα μπορούσε να έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα της Γης έως σημείου να μετατεθεί το όριο στο οποίο παγώνουν οι υδρατμοί πάνω από το ύψος της στοιβάδας του όζοντος (περίπου 30 χιλιόμετρα), ενώ σήμερα παγώνουν κάτω από αυτό το ύψος.

Αν συμβεί κάτι τέτοιο, το νερό, υπό μορφή υδρατμών, θα ανεβαίνει πάνω από το στρώμα του όζοντος. Εκεί όμως, η υπερϊώδης ακτινοβολία του Ήλιου θα το διασπά σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο, ως ελαφρύ αέριο, θα διαφεύγει στο διάστημα, ενώ το οξυγόνο, ως βαρύτερο, θα παραμένει και θα ενώνεται με τον άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα. Το αποτέλεσμα

θα είναι η άνοδος της θερμοκρασίας, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Αυτό το σενάριο είναι πιθανό να έλαβε χώρα στην Αφροδίτη στο μακρινό παρελθόν.

Εικ. 13 Διακυμάνσεις του ατμοσφαιρικού CO₂ με τον χρόνο.



Πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο μηχανισμός αυτορρύθμισης της θερμοκρασίας δεν έχει απεριόριστο δυναμικό, δηλαδή μπορεί να αντισταθμίσει μόνο μικρές αλλαγές.

Εξάλλου, αν η μέση θερμοκρασία περάσει κάποιες οριακές τιμές, πυροδοτούνται και κάποια άλλα φαινόμενα που καθιστούν ανίκανο τον μηχανισμό αυτορρύθμισης να ανταπεξέλθει.

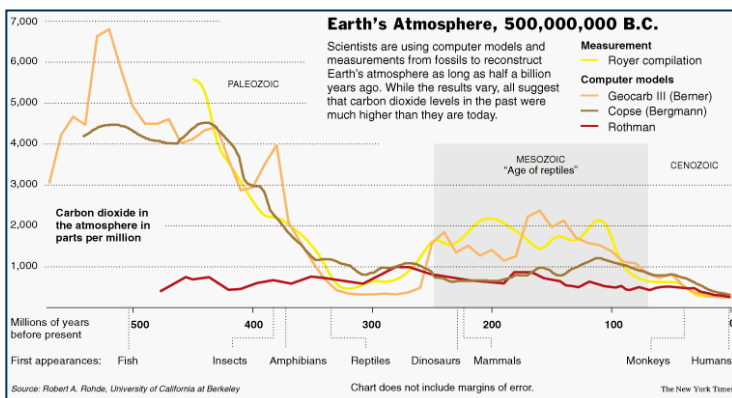
Μια ανατροπή του μηχανισμού που περιγράφηκε παραπάνω θα μπορούσε να έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα της Γης έως σημείου να μεταταθεί το όριο στο οποίο παγώνουν οι υδρατμοί πάνω από το ύψος της στοιβάδας του όζοντος (περίπου 30 χιλιόμετρα), ενώ σήμερα παγώνουν κάτω από αυτό το ύψος. Αν συμβεί κάτι τέτοιο, το νερό, υπό μορφή υδρατμών, θα ανεβαίνει πάνω από το στρώμα του όζοντος. Εκεί όμως, η υπεριώδης ακτινοβολία του Ήλιου θα το διασπά σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο, ως ελαφρύ αέριο, θα διαφεύγει στο διάστημα, ενώ το οξυγόνο, ως βαρύτερο, θα παραμένει και θα ενώνεται με τον άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα. Το αποτέλεσμα θα είναι η άνοδος της θερμοκρασίας, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Αυτό το σενάριο είναι πιθανό να έλαβε χώρα στην Αφροδίτη στο μακρινό παρελθόν. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο μηχανισμός αυτορρύθμισης της θερμοκρασίας δεν έχει απεριόριστο δυναμικό, δηλαδή μπορεί να αντισταθμίσει μόνο μικρές αλλαγές. Εξάλλου, αν η μέση θερμοκρασία περάσει κάποιες οριακές τιμές, πυροδοτούνται και κάποια άλλα φαινόμενα που καθιστούν ανίκανο τον μηχανισμό αυτορρύθμισης να ανταπεξέλθει.

Ξεκινάει τότε ένας φαύλος κύκλος δράσεων και αντιδράσεων που οδηγεί με μεγάλη ταχύτητα σε επικίνδυνη για τη ζωή άνοδο της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να είναι η απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Το μεθάνιο ως θερμοκηπικό αέριο είναι 20-25 φορές πιο δραστικό από το διοξείδιο του άνθρακα. Αν η συμβολή του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μικρότερη από αυτή του διοξειδίου του άνθρακα, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνολική του ποσότητα στην ατμόσφαιρα είναι αντίστοιχα πολύ μικρότερη. Αλλά υπάρχουν μεγάλες ποσότητες μεθανίου παγιδευμένες μέσα στους παγετώνες στις πολικές και στις παραπόλιες περιοχές καθώς και σε ιζήματα στα βάθη των ωκεανών. Μια αισθητή άνοδος της μέσης θερμοκρασίας θα μπορούσε να απελευθερώσει αυτές τις ποσότητες μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Μια τέτοια εξέλιξη ενδέχεται να έχει ολέθριες συνέπειες για το κλίμα της Γης.

Πιο ήπια και σταδιακά είναι τα σενάρια που προβλέπουν υπερκορεσμό του μηχανισμού αυτορρύθμισης είτε λόγω της αύξησης της ροής ενέργειας προς τη Γη

είτε λόγω υπερβολικής συσσώρευσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Εικ. 13, 14).



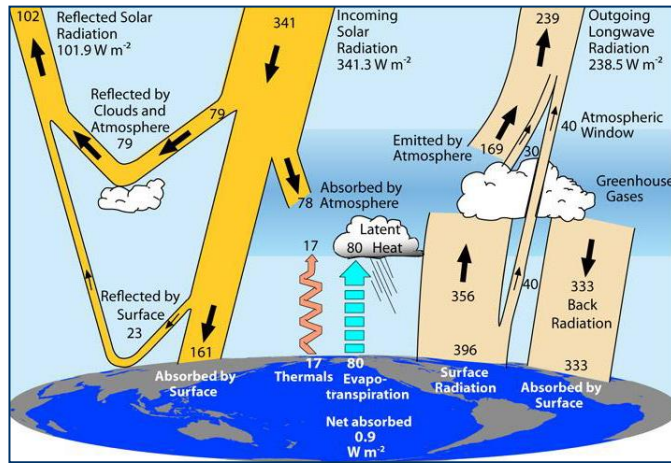
Εικ. 14 Εκτιμήσεις της Συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα κατά τις διάφορες γεωλογικές περιόδους.

Πράγματι, η «ηλιακή σταθερά», δηλαδή η ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας της Γης ανά δευτερόλεπτο από τον Ήλιο, δεν είναι τελικά σταθερή, αλλά τα τελευταία χρόνια εμφανίζει μια αύξηση, που οφείλεται στην εντονότερη δραστηριότητα που παρατηρούμε στον Ήλιο.

Από την άλλη μεριά έχουμε την αλλαγή της χημικής σύστασης της ατμόσφαιρας, δηλαδή, κυρίως, την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα που περιέχεται σε αυτή,

λόγω της καύσης των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου να γίνεται ολοένα και πιο έντονο.

Τελικά η επιστημονική κοινότητα εκτιμά πως ο δεύτερος παράγοντας, δηλαδή η



κλιματική αλλαγή, που οφείλεται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, είναι ο μεγάλος εφιάλτης που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας διαταράσσοντας το σύγχρονο ενεργειακό ισοζύγιο της γήινης ατμόσφαιρας, όπως έχει διαμορφωθεί. (Εικ. 15).

Εικ. 15 Σύγχρονο Ενεργειακό Ισοζύγιο του συστήματος Ήλιος, Γήινη επιφάνεια και Ατμόσφαιρα.

Ας σημειωθεί ότι σημαντικός παράγοντας επιρροής του μηχανισμού αυτορρύθμισης στη Γη είναι και η γεωλογική δομή της. Από τη μία μεριά, σε αυτήν οφείλεται το μαγνητικό πεδίο της Γης, το οποίο προσφέρει πολύτιμες προστατευτικές υπηρεσίες από τα φορτισμένα σωματίδια του Ήλιου. Από την άλλη μεριά, αυτή καθορίζει τη σεισμική δραστηριότητα, μέσω της οποίας απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Στο γειτονικό μας Άρη φαίνεται ότι, επειδή η μάζα του είναι μικρή (ίση με το ένα δέκατο της μάζας της Γης), σταμάτησε νωρίς η ηφαιστειακή δραστηριότητα και επομένως και η επανεισαγωγή στην ατμόσφαιρα των ποσοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα που είχαν αφαιρεθεί με τη βροχή. Έτσι χάλασε ο μηχανισμός αυτορρύθμισης του Άρη, με αποτέλεσμα η μέση θερμοκρασία του να πέσει στους -50°C .

Συμπεράσματα

Οι παρατηρήσεις με τα σύγχρονα διαστημικά τηλεσκόπια και με τα γιγάντια επίγεια τηλεσκόπια περισσότερων των 300 πλανητικών συστημάτων σε άλλους αστέρες καθώς και ο προγραμματισμός πολλών διαστημικών αποστολών εντός του ηλιακού μας συστήματος θα μας βοηθήσουν να ικανοποιήσουμε ορισμένες υπαρξιακές μας περιέργειες αλλά και να κατακτήσουμε νέες, βαθύτερες γνώσεις, πολύτιμες για την κατανόηση της ζωής και την προστασία της. Εξάλλου, η ανακάλυψη πλανητών σε άλλους αστέρες αποτελεί σημαντικό και ίσως τον πιο συναρπαστικό σταθμό στην ιστορία της Αστρονομίας.

Αν και πιστεύουμε ότι δεν είμαστε μόνοι, ξέρουμε καλά ότι τόσο φιλόξενο μέρος σαν τον πλανήτη μας δεν υπάρχει στη γειτονιά του Ήλιου μας. Αυτόν τον μικρό πλανήτη με την τόση ομορφιά και την λεπτότατη γλυκιά ισορροπία του πρέπει να τον προσέξουμε με την κατάλληλη παιδεία και να τον αγαπήσουμε όσο του αξίζει.

Η υπόθεση της σπάνιας Γης προτάθηκε από τον παλαιολόγο Ward και τον αστρονόμο της NASA Brownlee, που πιστεύουν ότι οι συνθήκες υπό τις οποίες αναπτύχθηκε η πολυκύτταρη και ευφυής ζωή ήταν αποτέλεσμα μιας σειράς από εξαιρετικές συγκυρίες, όπως:

- Η κατάλληλη μάζα του Ήλιου
- Η κατάλληλη απόσταση της Γης από τον Ήλιο
- Η κατάλληλη θέση του Ήλιου μέσα στον Γαλαξία (μακριά από το κέντρο του)

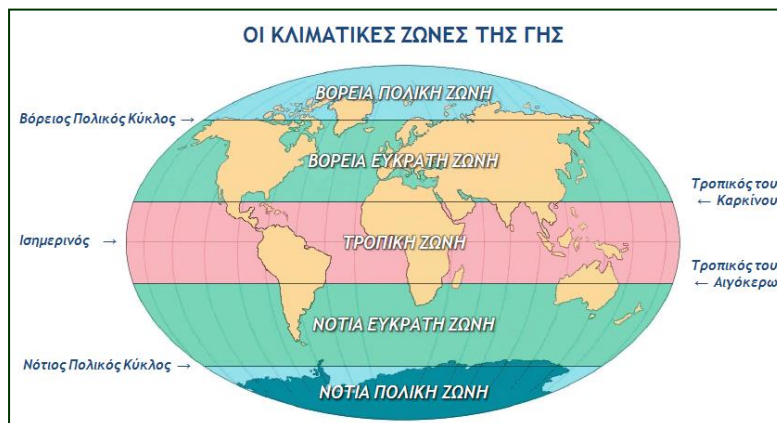
- Η παρουσία του γίγαντα Δία, που δρα ως ασπίδα προστασίας από τους κομήτες και τους αστεροειδείς
- Η παρουσία της σελήνης, που με τη μεγάλη σχετικά με τη Γη μάζα της συμβάλλει στη σταθερότητα του άξονα περιστροφής της Γης
- Το μαγνητικό πεδίο της Γης
- Η τεκτονική των πλακών της Γης, που συμβάλλει στο μηχανισμό ρύθμισης της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, όπως αναφέραμε προηγουμένως.

Η άποψη αυτή των Ward και Brownlee, γνωστή ως «υπόθεση της σπάνιας Γης», δέχτηκε όμως και αρκετές αμφισβητήσεις.

Σε κάθε περίπτωση, είναι πολύ σημαντικό να βλέπουμε ολόκληρη τη Γη σαν ένα ζωντανό οργανισμό, όπως την έβλεπαν οι αρχαίοι μας πρόγονοι. Η πραγματική απειλή για το μέλλον του ανθρώπινου είδους είναι η ίδια η ανθρώπινη φύση, που πρέπει να αποβάλλει το αρπαχτικό πνεύμα που τη διακατέχει.

Ο Ιούλιος Βερν με τα έργα του έστειλε και το μήνυμα ότι μόνο αν οι άνθρωποι μάθουν να συνεργάζονται μεταξύ τους και με τη φύση αρμονικά και με σοφία, τότε μόνο η τεχνολογία θα τους βοηθήσει να ζήσουν σε έναν καλύτερο κόσμο. Διαφορετικά, υπάρχει ημερομηνία λήξης για τον πλανήτη μας και για την ανθρώπινη ζωή. Μάλιστα, πολλοί επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων προειδοποιούν ότι η ημερομηνία αυτή δεν είναι πολύ μακριά.

B. Η διαίρεση της Γης σε κλιματικές ζώνες (π.Δ.Α.)



Εικ. 16 Οι Κλιματικές Ζώνες στη Γη

Εφόσον ο Ήλιος μας είναι ο αστέρας που θερμαίνει τη Γη, είναι φυσικό ότι οι παράγοντες που καθορίζουν τη διαίρεση της Γης σε κλιματικές ζώνες εξαρτώνται από τον Ήλιο. Έτσι, λοιπόν, οι

κλιματικές ζώνες της Γης ορίζονται ως εξής (Εικ. 16):

1) Η πρώτη ζώνη της Γης είναι η **διακεκαυμένη ζώνη**, που εκτείνεται βόρεια και νότια του ισημερινού και οριοθετείται στον βορρά από τον τροπικό του Καρκίνου και στον νότο από τον τροπικό του Αιγόκερω. Οι δύο αυτοί τροπικοί κύκλοι (παράλληλοι προς τον ισημερινό) βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος $\varphi = +23,5$ μοίρες και $\varphi = -23,5$ μοίρες, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το επίπεδο της φαινόμενης ετήσιας τροχιάς του Ήλιου (εκλειπτική) και το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού (προέκταση του γήινου ισημερινού) σχηματίζουν τη σταθερή γωνία $\omega = 23,5$ μοίρες (λόξωση της εκλειπτικής), που είναι υπεύθυνη για την εναλλαγή των εποχών του έτους, καθώς εξαιτίας της μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του Ήλιου στην επιφάνεια της Γης.

Σε όλους τους τόπους που περιέχονται ανάμεσα σε αυτούς τους δύο κύκλους ο Ήλιος μεσουρανή δυο φορές τον χρόνο στο Ζενίθ, δηλαδή ακριβώς πάνω από τα κεφάλια των ανθρώπων. Για τους κατοίκους, όμως, των τόπων που βρίσκονται ακριβώς πάνω στους δύο τροπικούς ο Ήλιος μεσουρανή στο Ζενίθ μόνο το μεσημέρι της 21ης

Ιουνίου για τον τροπικό του Καρκίνου (γεωγραφικό πλάτος $\varphi=+23,5$ μοίρες) και το μεσημέρι της 22ης Δεκεμβρίου για τον τροπικό του Αιγόκερω ($\varphi=-23,5$ μοίρες).

2) Στη συνέχεια έχουμε τους δύο πολικούς κύκλους (παράλληλους προς τον ισημερινό), σε γεωγραφικό πλάτος $\varphi=90-23,5=66,5$ μοίρες για το βόρειο ημισφαίριο και $\varphi=-66,5$ μοίρες για το νότιο ημισφαίριο. Μεταξύ αυτών των πολικών κύκλων και των αντίστοιχων πόλων της Γης ορίζονται η **βόρεια πολική ζώνη** και η **νότια πολική ζώνη**

Για τους τόπους που βρίσκονται ακριβώς πάνω στον βόρειο πολικό κύκλο ο Ήλιος στις 21 Ιουνίου (*θερινό ηλιοστάσιο*) δεν θα δύσει για ένα ολόκληρο 24ωρο, για τους βορειότερους τόπους δεν θα δύσει για περισσότερα 24ωρα και ακριβώς στον Βόρειο Πόλο ο Ήλιος θα φαίνεται συνεχώς για ένα ολόκληρο εξάμηνο, από τις 21 Μαρτίου (*εαρινή ισημερία*) έως τις 22 Σεπτεμβρίου (*φθινοπωρινή ισημερία*).

Αντίστοιχα, στις 22 Δεκεμβρίου (*χειμερινό ηλιοστάσιο*), για τους τόπους που βρίσκονται ακριβώς πάνω στον βόρειο πολικό κύκλο ο Ήλιος δεν θα ανατείλει για ένα ολόκληρο 24ωρο, ενώ για τους βορειότερους τόπους δεν θα ανατείλει για περισσότερα 24ωρα και ακριβώς στον Βόρειο Πόλο ο Ήλιος δεν θα φανεί για ένα ολόκληρο εξάμηνο, από 22 Σεπτεμβρίου έως 21 Μαρτίου.

Ακριβώς το αντίστροφο συμβαίνει στη νότια πολική ζώνη.

3) Τέλος, ανάμεσα στον τροπικό του Καρκίνου και στον βόρειο πολικό κύκλο περιλαμβάνεται η **βόρεια εύκρατη ζώνη**, ενώ ανάμεσα στον τροπικό του Αιγόκερω και στον νότιο πολικό κύκλο περιλαμβάνεται η **νότια εύκρατη ζώνη**.

Στις δύο αυτές εύκρατες ζώνες ανήκουν οι τόποι της Γης στους οποίους ο Ήλιος:

- α) δεν παραλείπει ποτέ να ανατέλλει και να δύει μέσα σε ένα 24ωρο
- β) δεν περνάει ποτέ από το Ζενίθ των τόπων αυτών, που σημαίνει ότι ποτέ δεν εξαφανίζεται η σκιά μιας κατακόρυφης ράβδου, δηλαδή ποτέ οι ακτίνες του Ήλιου δεν πέφτουν κάθετα, και
- γ) μεσουρανεί πάντα νοτιότερα του Ζενίθ για τους τόπους της βόρειας εύκρατης ζώνης και πάντα βορειότερα του Ζενίθ για τους τόπους της νότιας εύκρατης ζώνης, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους

Αξίζει να σημειώσουμε ότι, αφού η Γη βρίσκεται στην ελάχιστη απόσταση από τον Ήλιο στις 5 Ιανουαρίου και στη μέγιστη απόσταση στις 5 Ιουλίου, οι τόποι του νότιου ημισφαιρίου έχουν, σε σχέση με τους τόπους του βόρειου ημισφαιρίου με το ίδιο γεωγραφικό πλάτος, ελαφρώς ψυχρότερους χειμώνες και θερμότερα καλοκαίρια.

Γ. Ζωή και Πλανητικές Ατμόσφαιρες: Μια Αμφίδρομη Σχέση (εμπλουτισμένο)

Δρ. Χάρης Βάρβογλης, Ιούνιος 2005

ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝ/ΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντιμετωπίζοντας τη ζωή στο πλαίσιο της εμπειρίας μας από το γήινο περιβάλλον, διαπιστώνουμε ότι είναι στενά συνδεδεμένη με την ύπαρξη σταθερών ατμοσφαιρικών συνθηκών στον πλανήτη μας. Η σταθερότητα αυτή, με τη σειρά της, οφείλεται στην ύπαρξη νερού σε υγρή μορφή στην επιφάνεια της Γης. Σε αυτό το άρθρο εξετάζονται οι συνθήκες που οδήγησαν τους άλλους πλανήτες του ηλιακού συστήματος να μην έχουν σήμερα νερό, καθώς και η πιθανότητα να είχε αναπτυχθεί εκεί ζωή στο παρελθόν. Τέλος παρουσιάζονται δορυφόροι που, λόγω του μεγέθους τους και των συνθηκών που επικρατούν εκεί, θα μπορούσαν να φιλοξενήσουν ζωντανούς οργανισμούς.

Υπάρχει ζωή σε άλλους πλανήτες, πέρα από τον πλανήτη που μας φιλοξενεί, τη Γη, ή μήπως είμαστε μοναδικοί στο σύμπαν; Είναι γνωστό ότι το ερώτημα αυτό, διατυπωμένο ανάλογα με τις αντιλήψεις που επικρατούσαν σε κάθε εποχή για τη δομή και τις διαστάσεις του κόσμου, έχει απασχολήσει τον άνθρωπο από πολύ παλιά,

όπως δείχνουν τα διασωζόμενα γραπτά μνημεία. Για παράδειγμα ο Έλληνας φιλόσοφος Μετρόδωρος από τη Χίο έγραφε τον 5ο αιώνα π.Χ. στο έργο του Φυσικά: "Δεν είναι φυσικό σε ένα μεγάλο αγρό να υπάρχει μόνο ένα στάχυ σιταριού και στο απέραντο σύμπαν μόνον ένας ζωντανός κόσμος". Η τεκμηρίωση, όμως, από τον Κέπλερ και άλλους σύγχρονους αστρονόμους, ότι η Γη δεν είναι το κέντρο του κόσμου έδωσε επιστημονική βάση στο ερώτημα αυτό, που μέχρι τότε συζητιόταν σε καθαρά φιλοσοφικό επίπεδο.

2. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΖΩΗ

Βέβαια, όταν αναζητούμε ζωή σε άλλους κόσμους, θα πρέπει πρώτα να έχουμε ξεκαθαρίσει τι είναι αυτό για το οποίο ψάχνουμε. Σύμφωνα με τον κλασικό ορισμό, η ζωή προσδιορίζεται από την ικανότητά της να αναπαράγεται και να εξελίσσεται. Σε αυτό το πλαίσιο θα μπορούσαμε να φανταστούμε μορφές ζωής εντελώς ξένες προς την εικόνα που υπάρχει γύρω μας στη Γη. Για παράδειγμα, στο μυθιστόρημα επιστημονικής φαντασίας Το μαύρο

σύννεφο ο μεγάλος άγγλος αστροφυσικός Φρεντ Χόιλ (Fred Hoyle) περιγράφει ένα νοήμον ον που αποτελείται από αέριο και σκόνη. Το ον αυτό «σκέπτεται» μέσα από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανταλλάσσουν τα ηλεκτρικά φορτισμένα άτομα του αερίου, όπως ο ανθρώπινος εγκέφαλος σκέπτεται μέσα από τα ηλεκτρικά σήματα που ανταλλάσσουν τα κύτταρά του. Αν όμως περιοριστούμε στη ζωή, όπως αυτή εμφανίζεται στον πλανήτη μας, τότε αντιλαμβανόμαστε ότι παρόμοιες μορφές θα πρέπει να αναζητήσουμε μόνο σε πλανήτες που έχουν στερεή επιφάνεια και ατμόσφαιρα. Η στερεή επιφάνεια προσφέρει τον χώρο ανάπτυξης της ζωής και τις πρώτες ύλες για την ανάπτυξη των έμβιων όντων ενώ η ατμόσφαιρα συντελεί στην παραγωγή ενέργειας και προστατεύει τη ζωή από την κοσμική ακτινοβολία, δηλαδή πρωτόνια και φωτόνια μεγάλης ενέργειας που καταστρέφουν τα κύτταρα.

Με βάση τα παραπάνω, τα ουράνια σώματα του ηλιακού συστήματος, πέρα από τη Γη, που θα μπορούσαν να φιλοξενήσουν ζωή σε κάποια εποχή της εξελικτικής ιστορίας τους είναι βασικά τρία: δύο πλανήτες, η Αφροδίτη και ο Άρης, και ένας δορυφόρος, ο Τιτάνας, που περιφέρεται γύρω από τον Κρόνο. Είναι λοιπόν μάλλον προφανής ο λόγος για τον οποίο έχει δοθεί τόση σημασία στην προσεδάφιση διαστημοπλοίων στην Αφροδίτη και τον Άρη. Η πρόσφατη προσεδάφιση της ακάτου Χόιγκενς (Huygens) στον Τιτάνα έκλεισε τον κατάλογο των υποψηφιοτήτων για ανακάλυψη κάποιου είδους ζωής, παρόμοια με αυτήν που υπάρχει στη Γη, σε άλλα μέλη του ηλιακού συστήματος.

Αλλά ακόμη και αν δεν βρεθούν ίχνη ζωής, έστω υπό μορφή απολιθωμάτων, στα παραπάνω σώματα, υπάρχει και ένα έμμεσο κέρδος από την εξερεύνησή τους:

κατανοούμε ποιες είναι οι διαφορές τους από τη Γη, οι οποίες δεν ευνόησαν την ανάπτυξη ζωής εκεί. Αλλά ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή.

3. Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΤΗΣ ΓΗΣ ΚΑΙ Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΖΩΗΣ

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η Γη δημιουργήθηκε πριν από περίπου 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια και ότι η ατμόσφαιρά της, στη αρχή, δεν έμοιαζε καθόλου με τη σημερινή. Αποτελούνταν κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), υδρογόνο (H₂), άζωτο (N₂), μεθάνιο (CH₄), αμμωνία (NH₃) και υδρατμούς (H₂O), ενώ έλειπε τελείως το ελεύθερο οξυγόνο (O₂). Η επίδραση ισχυρών πηγών ενέργειας (όπως για παράδειγμα είναι η ηλιακή ακτινοβολία και οι ηλεκτρικές εκκενώσεις, κεραυνοί και αστραπές) στην πρωταρχική ατμόσφαιρα της Γης δημιούργησε αρχικά αμινοξέα και άλλες σύνθετες οργανικές ενώσεις, οι οποίες διαλύθηκαν στο νερό που από τότε κάλυπτε το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της Γης. Εκεί οι ενώσεις αυτές, προστατευμένες από την έντονη υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου, η οποία έφτανε μέχρι την

επιφάνεια της Γης μιας και δεν είχε δημιουργηθεί ακόμη ο προστατευτικός μανδύας του όζοντος, σχημάτισαν τα μόρια του DNA και του RNA, τα οποία στη συνέχεια αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη της ζωής. Σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτή έπαιξε το γεγονός ότι οι φυσικές συνθήκες στη Γη παρέμειναν ήπιες και σταθερές κατά τα τελευταία 2-3 δισεκατομμύρια χρόνια. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μηχανισμών αυτορρύθμισης της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και υδρατμούς (H_2O). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να εξηγηθεί ποιος είναι αυτός ο "μηχανισμός αυτορρύθμισης" και γιατί τα αέρια αυτά επηρεάζουν τη θερμοκρασία της Γης.

Από τη Φυσική και τη Χημεία είναι γνωστό ότι μόρια που αποτελούνται από τρία άτομα, όπως είναι το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα αλλά και το όζον, απορροφούν την ακτινοβολία που εκπέμπει η Γη, όταν θερμαίνεται από το φως του Ήλιου. Με τον τρόπο αυτό δεν αφήνουν την επιφάνεια της Γης να κρυώσει, όπως ακριβώς μια κουβέρτα δεν αφήνει το σώμα μας να κρυώσει όταν κοιμόμαστε σε ψυχρό περιβάλλον. Είναι φανερό ότι μεγάλη περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε τριατομικά αέρια οδηγεί σε υπερθέρμανση της Γης ("βαριά κουβέρτα"), ενώ μικρή περιεκτικότητα οδηγεί σε χαμηλές θερμοκρασίες ("ελαφριά κουβέρτα"). Ο μηχανισμός αυτορρύθμισης που προαναφέρθηκε αφαιρεί τριατομικά αέρια από την ατμόσφαιρα της Γης όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει, έτσι ώστε να «ελαφρύνει» η κουβέρτα, και τα προσθέτει όταν η θερμοκρασία πέφτει, έτσι ώστε να «βαρύνει» η κουβέρτα. Σ' αυτόν το μηχανισμό συμμετέχει κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο ανανεώνεται συνέχεια: Σε πρώτη φάση το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας διαλύεται στο νερό της βροχής, πέφτει στους ωκεανούς και αποθηκεύεται στα κελύφη των οστράκων υπό μορφή ανθρακικού ασβεστίου (το βασικό συστατικό του ασβεστόλιθου). Σε δεύτερη φάση τα όστρακα καταπλακώνονται στο εσωτερικό της Γης, όπου, λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας, το ανθρακικό ασβέστιο διασπάται (όπως ακριβώς συμβαίνει στα ασβεστοποιεία) σε ασβέστη και διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο στη συνέχεια διαφεύγει στην ατμόσφαιρα από τα ηφαίστεια. Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης αρχίσει να ανεβαίνει, αυξάνει η εξάτμιση νερού από τους ωκεανούς και, κατά συνέπεια, η βροχόπτωση και ο ρυθμός αφαίρεσης διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Το αντίθετο συμβαίνει όταν αρχίσει να μειώνεται η θερμοκρασία: μειώνεται η εξάτμιση του νερού και η βροχόπτωση, έτσι ώστε η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα αρχίζει και αυξάνει (αφού αυτό συνεχίζει να εκλύεται από τα ηφαίστεια). Με τον τρόπο αυτό η θερμοκρασία επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα. Χάρη στον παραπάνω μηχανισμό η μέση θερμοκρασία της Γης δεν έπεσε ποτέ κάτω από τους 0°C ούτε ξεπέρασε τους 100°C σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας της, οπότε το νερό των ωκεανών ούτε πάγωσε αλλά ούτε και έβρασε.

Η παρουσία του νερού σε υγρή μορφή είχε αποφασιστική σημασία για την ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας. Οι ζωντανοί οργανισμοί, με τη σειρά τους, έπαιξαν σημαντικό ρόλο, μέσω της αναπνοής, της φωτοσύνθεσης και της αποσύνθεσης, στην ανακύκλωση των αερίων της ατμόσφαιρας: η αναπνοή αφαιρεί οξυγόνο και αποδίδει διοξείδιο του άνθρακα, η φωτοσύνθεση κάνει το αντίστροφο ενώ η αποσύνθεση αποδίδει μεθάνιο, που είναι και αυτό ένα από τα αέρια που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επομένως διαπιστώνεται ότι η ύπαρξη ζωής είναι στενά συνδεδεμένη με τη διατήρηση ήπιων συνθηκών στην επιφάνεια της Γης, έτσι ώστε είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς αν οι ήπιες συνθήκες είχαν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της ζωής ή αν η εμφάνιση της ζωής συντέλεσε στη διατήρηση των ήπιων συνθηκών. Με άλλα λόγια βρισκόμαστε μπροστά στο κλασικό ερώτημα: "το αβγό έκανε την κότα ή η κότα το αβγό";

Πέρα από την επίδραση της ζωής, η κλιματική εξέλιξη της Γης, όπως και των υπόλοιπων πλανητών, επηρεάζεται σημαντικά από την παράλληλη εξέλιξη του Ήλιου. Ο Ήλιος μας είναι ένα τυπικό αστέρι, που παράγει την ενέργειά του μετατρέποντας το υδρογόνο σε ήλιο μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, οι οποίες συμβαίνουν βαθιά στο εσωτερικό του. Η φωτεινότητά του αυξάνει με το χρόνο, με ρυθμό περίπου 1% σε κάθε 100 εκατομμύρια χρόνια. Υπολογίζοντας ότι ο Ήλιος, μαζί με το υπόλοιπο ηλιακό σύστημα, δημιουργήθηκαν πριν από 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια, συμπεραίνουμε ότι αρχικά ήταν κατά 25-30% λιγότερο φωτεινός απ' ό,τι σήμερα. Η βαθμιαία αύξηση της ηλιακής φωτεινότητας, που συνεχίζεται και σήμερα, έχει για αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση της ενέργειας που φθάνει στο άνω όριο της ατμόσφαιρας ενός πλανήτη και, συνεπώς, επιδρά στη διαμόρφωση του κλίματος του.

Η δυνατότητα, όμως, των έμβιων οργανισμών και του κύκλου του CO₂ να ρυθμίζουν τη θερμοκρασία της Γης δεν αναμένεται να διαρκέσει για πάντα. Σε ένα περίπου δισεκατομμύριο χρόνια η ακτινοβολία του Ήλιου θα αρχίσει να αυξάνει με πολύ ταχύτερο ρυθμό, ο μηχανισμός αυτορρύθμισης δεν θα επαρκεί πια, και η ισορροπία που υπάρχει σήμερα θα ανατραπεί. Τότε η θερμοκρασία θα ξεπεράσει τους 100°C και, τελικά, η ζωή στη Γη, όπως τη γνωρίζουμε σήμερα, θα χάσει οριστικά το παιχνίδι και θα εξαφανιστεί.

4. ΣΕ ΤΙ ΔΙΑΦΕΡΕΙ Η ΓΗ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΑΛΛΟΥΣ ΠΛΑΝΗΤΕΣ

Γιατί όμως η Γη φαίνεται ότι είναι, από την άποψη της ύπαρξης ζωής, μοναδική στο ηλιακό σύστημα; Η μελέτη των άλλων πλανητών αποκάλυψε ότι εκεί επικρατούν ακραίες κλιματικές συνθήκες που δεν συμβιβάζονται με την ύπαρξη μορφών ζωής. Ξεκινώντας από τον πλησιέστερο προς τον Ήλιο πλανήτη, τον Ερμή, διαπιστώνουμε ότι οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από πολύ υψηλές (500°C) στην πλευρά που «βλέπει» ο Ήλιος έως πολύ χαμηλές (κάτω από 0°C) στην αντίθετη πλευρά του. Στην ατμόσφαιρά του, που είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη (1 εκατομμύριο δισεκατομμύρια φορές περισσότερο αραιή από αυτή της Γης), κυριαρχούν αέρια όπως το ήλιο (He), το νάτριο (Na) και το υδρογόνο (H₂).

Ο γειτονικός μας πλανήτης, η Αφροδίτη (Εικ. 17), αν και ως προς το μέγεθος και τη σύσταση μοιάζει πολύ με τη Γη, έχει εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες (~500°C) και ατμοσφαιρική πίεση 90 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της Γης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρά της δεν έχει καθόλου νερό, οπότε δεν μπορεί να λειτουργήσει καθόλου ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι όλο το διαθέσιμο διοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα το έντονο φαινόμενο του θερμοκηπίου να διατηρεί την εξαιρετικά υψηλή επιφανειακή θερμοκρασία του πλανήτη. Η σημερινή απουσία νερού φαίνεται ότι οφείλεται στην ανατροπή του μηχανισμού αυτορρύθμισης στην Αφροδίτη σε παλιότερα χρόνια. Όσοι έχουν κάνει αεροπορικά ταξίδια σίγουρα έχουν παρατηρήσει ότι στο ύψος των δέκα χιλιομέτρων, που πετούν συνήθως τα αεροπλάνα, η θερμοκρασία είναι κάτω από το μηδέν. Επομένως οι υδρατμοί δεν μπορούν να φθάσουν μέχρι εκεί, αφού μετατρέπονται σε πάγο πολύ χαμηλότερα.

Έτσι το νερό προστατεύεται από την υπερϊώδη ακτινοβολία του Ήλιου, η οποία απορροφάται σε ύψος 30 χιλιομέτρων από το στρώμα του όζοντος. Αν όμως η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης αυξηθεί σημαντικά, το ύψος στο οποίο η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 0 βαθμούς θα μετακινηθεί προς τα πάνω και είναι δυνατό να ανέλθει πάνω από τα 30 χιλιόμετρα. Στην περίπτωση αυτή όσο νερό περνάει πάνω από το στρώμα του όζοντος διασπάται από την υπερϊώδη ακτινοβολία σε υδρογόνο και οξυγόνο και το υδρογόνο, ως ελαφρό αέριο, διαφεύγει στο διάστημα ενώ το οξυγόνο, ως βαρύτερο, παραμένει και ενώνεται με τον άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα. Με τον τρόπο αυτόν σιγά-σιγά θα χαθεί το νερό του πλανήτη μας. Το

σενάριο αυτό, που ακούγεται ως εφιάλτης για το μέλλον της Γης, φαίνεται ότι ίσως πραγματοποιήθηκε στο απώτερο παρελθόν της Αφροδίτης.

Η επιφανειακή θερμοκρασία του Άρη, αντίθετα, είναι πολύ χαμηλή, γύρω στους 50°C κάτω από το μηδέν. Παρόλο που υπάρχει νερό και διοξείδιο του άνθρακα, η ποσότητά τους σήμερα στην επιφάνεια είναι τόσο χαμηλή (η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια του πλανήτη είναι 150 φορές μικρότερη από τη γήινη) ώστε ο μηχανισμός αυτορρύθμισης πρακτικά δεν υφίσταται. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι οι πρόσφατες εξερευνητικές αποστολές σ' αυτόν τον πλανήτη έδειξαν την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων νερού στο υπέδαφός του, καθώς και γεωλογικών σχηματισμών στην επιφάνεια, όπως π.χ. ποταμών, που διαμορφώθηκαν από τη ροή νερού. Άρα είναι πολύ πιθανό ότι στο παρελθόν ο Άρης είχε μεγάλες ποσότητες επιφανειακού νερού, οπότε είναι επίσης πιθανό ότι τότε θα λειτουργούσε και εκεί ο κύκλος του διοξειδίου του άνθρακα, με αποτέλεσμα την διατήρηση ήπιων κλιματολογικών συνθηκών. Επομένως, αν οι ήπιες συνθήκες διατηρήθηκαν για μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι δυνατό να εμφανίστηκε κάποια μορφή ζωής στον Άρη. Δεν είναι σήμερα γνωστός ο λόγος για τον οποίον ο Άρης έχασε αυτήν την ατμόσφαιρα, πιστεύεται όμως ότι έπαιξε σημαντικό ρόλο η αδυναμία του πλανήτη αυτού να συντηρήσει τον κύκλο του διοξειδίου του άνθρακα, εξαιτίας της απουσίας μηχανισμού εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας με αυτό το αέριο. Μετρήσεις από τις αποστολές στον Άρη έδειξαν ότι ο πλανήτης αυτός δεν έχει σεισμική δραστηριότητα ούτε αξιόλογο μαγνητικό πεδίο. Επειδή η σεισμική δραστηριότητα στη Γη οφείλεται στο γεγονός ότι οι ήπειροι «επιπλέουν» σε ένα ρευστό μανδύα από λιωμένο υλικό και η ύπαρξη μαγνητικού πεδίου οφείλεται στο ότι αυτός ο μανδύας περιστρέφεται, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι το εσωτερικό αυτού του πλανήτη δεν είναι σήμερα σε ρευστή μορφή. Βέβαια αρχικά ολόκληρος ο πλανήτης βρισκόταν σε ρευστή κατάσταση, λόγω του μικρού μεγέθους του όμως ψύχθηκε γρήγορα και η θερμοκρασία στο εσωτερικό του έπεσε κάτω από το σημείο τήξης των πετρωμάτων

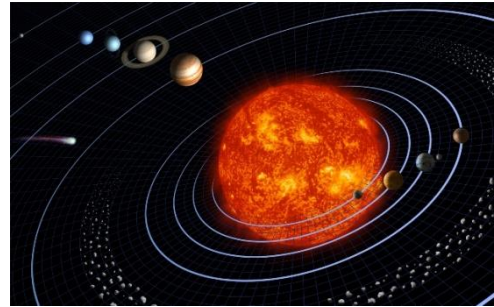
που τον αποτελούν. Την εποχή που συνέβη αυτό σταμάτησε η ηφαιστειακή δραστηριότητα και, συνακόλουθα, σταμάτησε και η λειτουργία του μηχανισμού επανεισαγωγής στην ατμόσφαιρα του διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο είχε αφαιρεθεί μέσω της διάλυσής του στο νερό της βροχής.



Εικ. 17 Πυκνά νέφη θειικού οξέος καλύπτουν μόνιμα την επιφάνεια της Αφροδίτης και δεν επιτρέπουν τη φωτογράφισή της στο ορατό φως. Η φωτογραφία αυτή είναι αποτέλεσμα ανίχνευσης της επιφάνειάς της με ραντάρ από το διαστημόπλοιο Μαγγελάνος.

Το τελικό συμπέρασμα, όσον αφορά στους στερεούς πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος (Εικ. 18), είναι ότι, πέρα από τον Ερμή που είναι ειδική περίπτωση, επειδή είναι μικρός και βρίσκεται πολύ κοντά στον Ήλιο, οι ατμόσφαιρες της

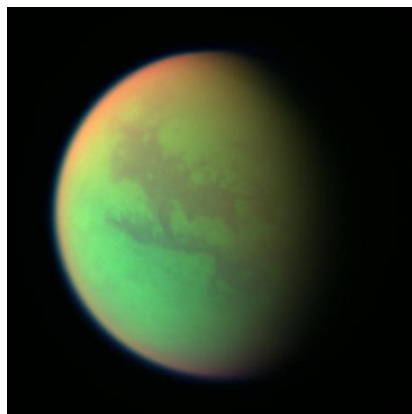
Αφροδίτης και του Άρη έχουν ακολουθήσει διαμετρικά αντίθετες κατευθύνσεις εξέλιξης, επειδή στον καθένα έπαυσε να λειτουργεί το ένα από τα δύο σκέλη του κύκλου του διοξειδίου του άνθρακα. Στην Αφροδίτη σταμάτησε η αφαίρεση του αερίου αυτού, επειδή διέφυγε το νερό εξαιτίας της ανατροπής του μηχανισμού αυτορρύθμισης της θερμοκρασίας του πλανήτη, ενώ στον Άρη σταμάτησε η προσθήκη του αερίου αυτού, λόγω της διακοπής της ηφαιστειακής δραστηριότητας, εξαιτίας της ψύξης του πλανήτη και της ολοκληρωτικής στερεοποίησής του.



Εικ. 18 Το Ηλιακό μας Σύστημα

5. ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΣΜΕ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Από τα σώματα του ηλιακού μας συστήματος με στερεή επιφάνεια και αξιόλογη ατμόσφαιρα είναι ο Τιτάνας (Εικ. 19), ο μεγαλύτερος δορυφόρος του Κρόνου. Η διάμετρός του (5150 km) τον καθιστά δεύτερο σε μέγεθος δορυφόρο (μετά τον δορυφόρο του Δία, Γανυμήδη) στο ηλιακό σύστημα, ενώ είναι και μεγαλύτερος από τους Πλούτωνα και Ερμή. Η ατμόσφαιρα του Τιτάνα αποτελείται από άζωτο (υπάρχει και στην ατμόσφαιρα της Γης), μεθάνιο, αργόν και ίχνη άλλων ενώσεων (οργανικών, όπως αιθάνιο και υδροκυάνιο, και ανόργανων, όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνειά του είναι περίπου 1.5 ατμόσφαιρες, δηλαδή



Εικ. 19 Οι φωτογραφίες του Τιτάνα που πήρε η άκατος Huygens (Χόιχενς) δείχνουν ότι στην επιφάνειά του υπάρχουν ποτάμια και λίμνες από υγρό μεθάνιο.

λίγο μεγαλύτερη από αυτήν της Γης,, οπότε ότι η συστηματική μελέτη της ατμόσφαιρας αυτού του δορυφόρου θα βοηθήσει σημαντικά στην κατανόηση του μηχανισμού δημιουργίας και εξέλιξης των πλανητικών ατμοσφαιρών, μετά τη μελέτη των ατμοσφαιρών της Αφροδίτης και του Άρη. Γι' αυτό η μελέτη της ατμόσφαιρας αυτού του δορυφόρου

θεωρήθηκε σημαντικό βήμα στην κατανόηση της Φυσικής του ηλιακού συστήματος και προγραμματίστηκε η εξερεύνησή του από τη διαστημική αποστολή Cassini. Το διαστημόπλοιο Cassini, το οποίο εκτοξεύτηκε τον Οκτώβριο 1997, έφθασε στην περιοχή του Κρόνου τον Ιούλιο 2004 και έγινε δορυφόρος του. Ανήμερα τα Χριστούγεννα του 2004 απελευθέρωσε την άκατο Huygens, η οποία στις 14 Ιανουαρίου 2005 προσεδαφίστηκε στον Τιτάνα. Οι φωτογραφίες που μας έστειλε δείχνουν μια επιφάνεια με πορτοκαλί χρώμα, η οποία καλύπτεται από αντικείμενα που μοιάζουν με πέτρες και διασχίζεται από σχηματισμούς που μοιάζουν με ποτάμια και λίμνες. Επειδή η θερμοκρασία της επιφάνειας του Τιτάνα είναι -180°C , τα υγρά αυτά δεν μπορεί να είναι νερό ούτε βαρείς υδρογονάνθρακες, που στη θερμοκρασία αυτή έχουν ήδη παγώσει. Μάλλον πρόκειται για ελαφρούς υδρογονάνθρακες, όπως το μεθάνιο, που στην καθημερινή ζωή ονομάζεται φυσικό αέριο, το οποίο υγροποιείται στους -182°C . Επειδή η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας του Τιτάνα μοιάζει με αυτήν που είχε αρχικά η ατμόσφαιρα της Γης, εκτιμάται ότι η μελέτη της θα δώσει απάντηση σε πολλά ερωτήματα για τα αρχικά στάδια του πλανήτη μας, πριν ακόμη εμφανιστεί η ζωή σ' αυτόν.