

Εισαγωγή στην Επιστήμη του Μηχανικού Περιβάλλοντος

Νίκος Ξεκουκουλωτάκης
Επίκουρος Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Γραφείο Κ2.125, τηλ.: 28210-37772
e-mail: nikosxek@gmail.com

Κεφάλαιο 4^ο



- Ισοζύγια ενέργειας
- Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Ενέργεια (Energy)



- Ως γνωστό, υπάρχουν διάφορες μορφές ενέργειας:
- ✓ Κινητική ενέργεια
- ✓ Δυναμική ενέργεια
- ✓ Ηλεκτρική ενέργεια
- ✓ Χημική ενέργεια
- ✓ Θερμική ενέργεια
- ✓ Ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
- ✓ Πυρηνική ενέργεια



Μονάδες μέτρησης της ενέργειας

- Η μονάδα μέτρησης της ενέργειας στο SI είναι το **joule**, σύμβολο **J** ($1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$).
- Άλλες μονάδες μέτρησης της ενέργειας είναι:
 - ✓ το calorie, σύμβολο cal, $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$
 - ✓ η κιλοβατώρα, σύμβολο kWh, $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J} = 3600 \text{ kJ}$

Ισχύς (Power)



- Στενά συνδεδεμένη με την έννοια της ενέργειας είναι η έννοια της ισχύος.
- Η ισχύς είναι ο ρυθμός της μεταφοράς ενέργειας.
- Η **μονάδα μέτρησης της ισχύος στο SI** είναι το **watt**, σύμβολο **W** ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$).
- Άλλες μονάδες μέτρησης της ισχύος είναι ο ίππος (horsepower), σύμβολο hp, $1 \text{ hp} = 745,7 \text{ W}$.

Άνθρωπος και Ενέργεια



- Ένας μέσος ενήλικας προσλαμβάνει μέσω της τροφής του περίπου 1500 (γυναίκες) έως 2000 (άνδρες) kcal ανά ημέρα.
- Η ενέργεια αυτή αντιστοιχεί σε περίπου:
 - ✓ 6300 (γυναίκες) και 8400 (άνδρες) kJ ανά ημέρα
 - ✓ 1,74 (γυναίκες) 2,32 (άνδρες) kWh ανά ημέρα
 - ✓ 640 (γυναίκες) 850 (άνδρες) kWh ανά έτος

Πρωτογενής ενέργεια (primary energy)

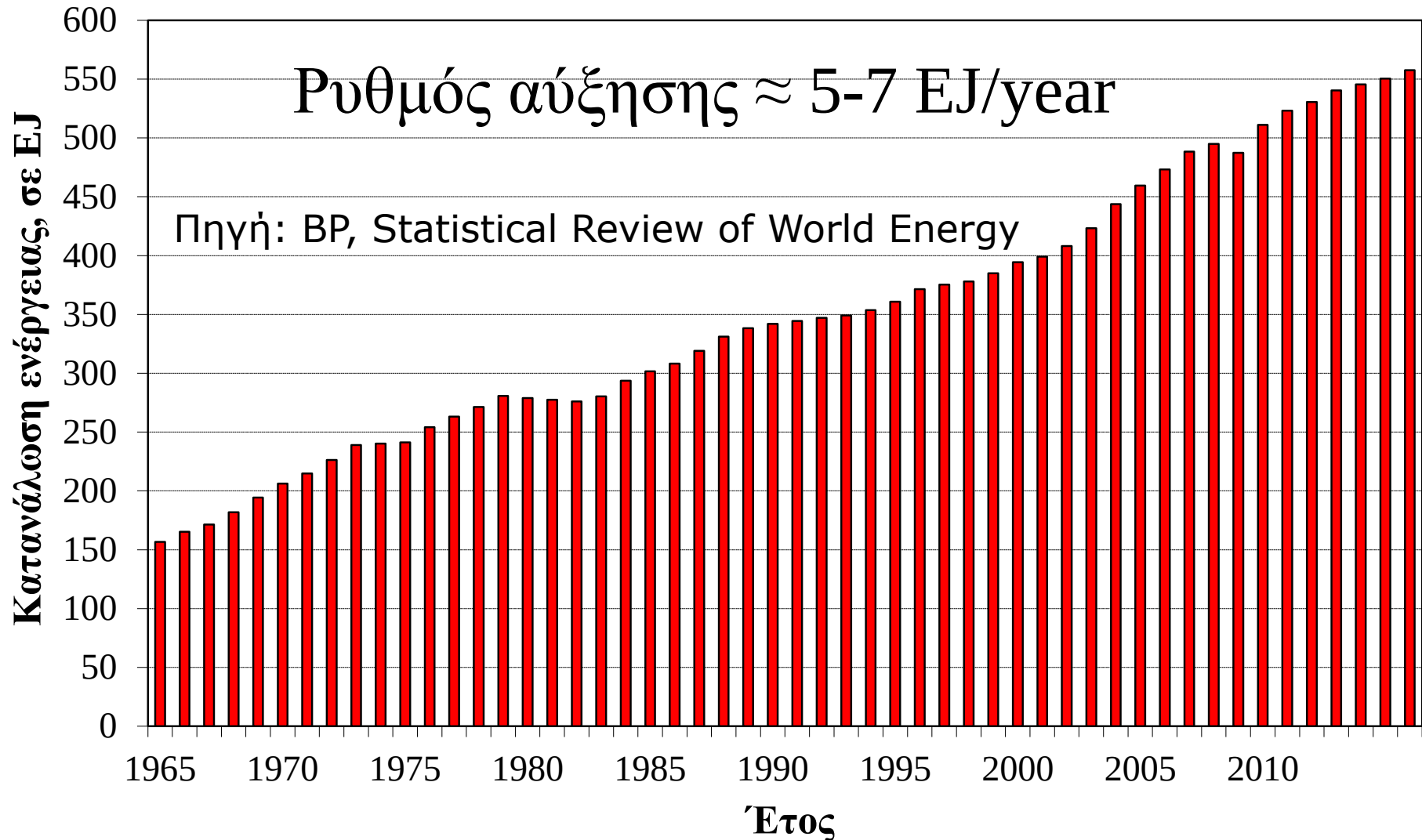


- Επιπλέον, οι άνθρωποι καταναλώνουν ενέργεια για πάρα πολλές άλλες δραστηριότητες: θέρμανση και ψύξη κατοικιών, μεταφορές, παραγωγή αγαθών.
- **Πρωτογενής ενέργεια (primary energy):** είναι η ενέργεια η οποία είναι ενσωματωμένη στους διάφορους φυσικούς πόρους πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε ανθρώπινη μετατροπή.
- Παραδείγματα: άνθρακας (κάρβουνο), αργό πετρέλαιο, ηλιακό φως, άνεμος, υδατοπτώσεις, βιομάζα, ουράνιο.

Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά έτος



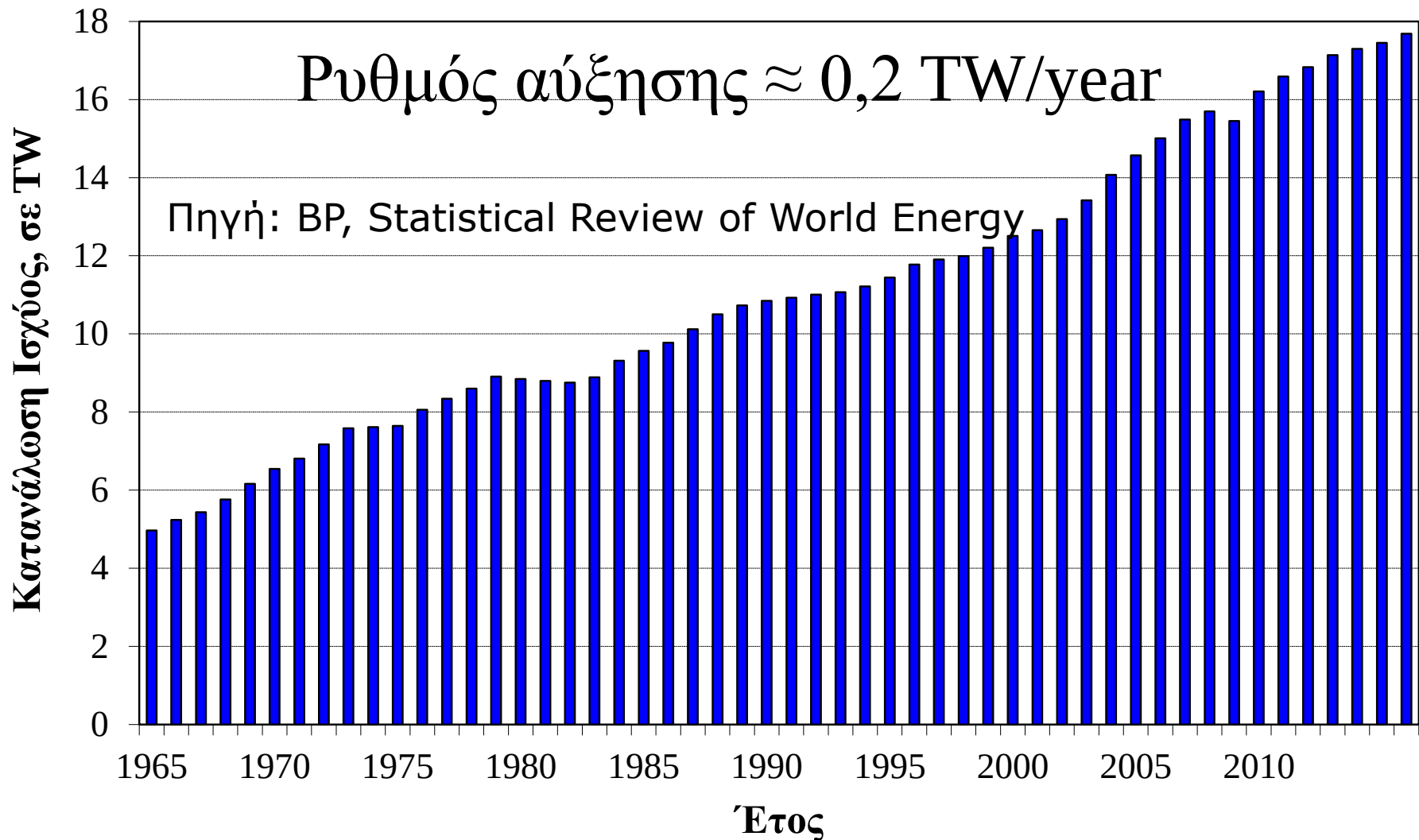
1 exajoule (σύμβολο EJ) = 10^{18} joule



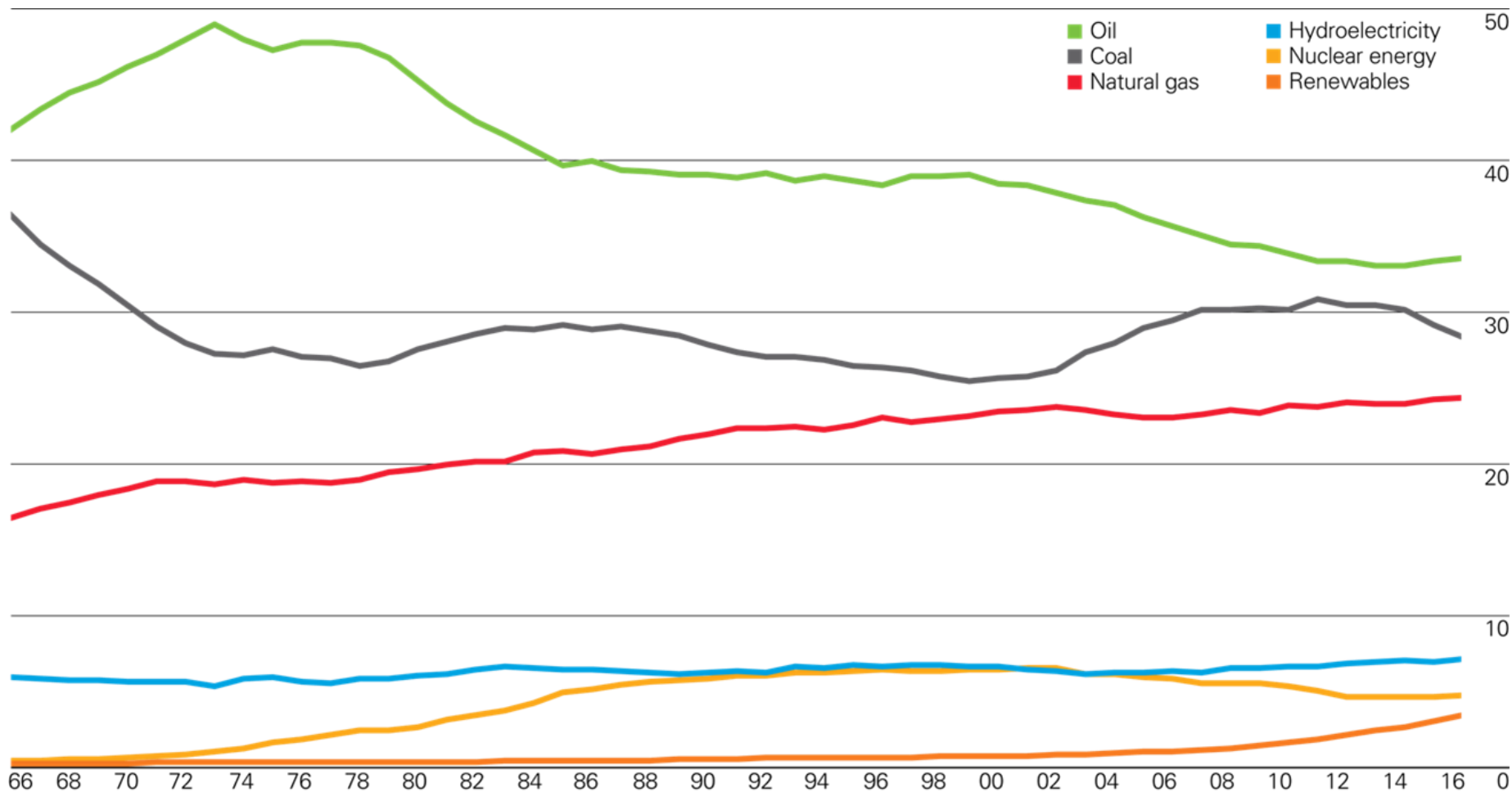
Παγκόσμια κατανάλωση ισχύος ανά έτος



1 terawatt (σύμβολο TW) = 10^{12} watt



Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή

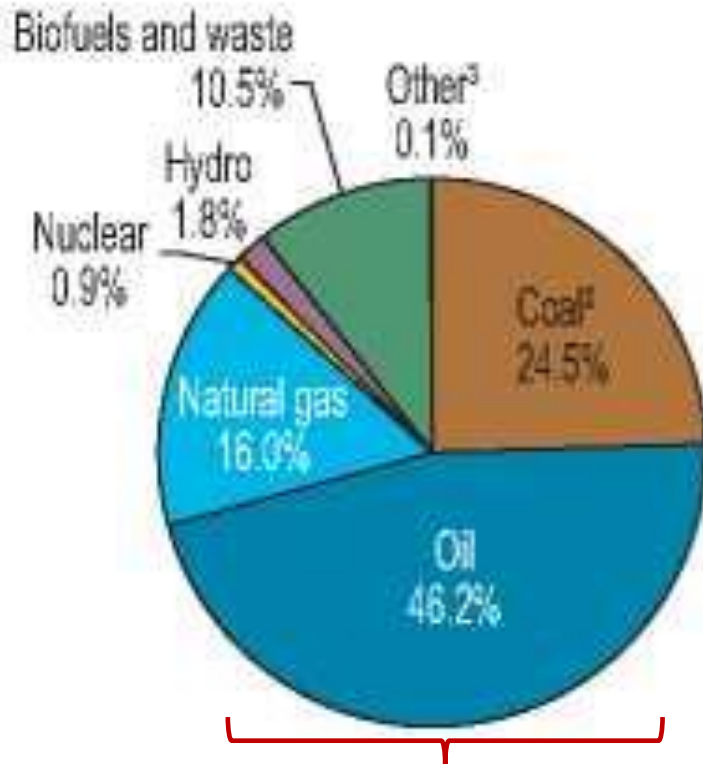


Πηγή: BP, Statistical Review of World Energy

Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

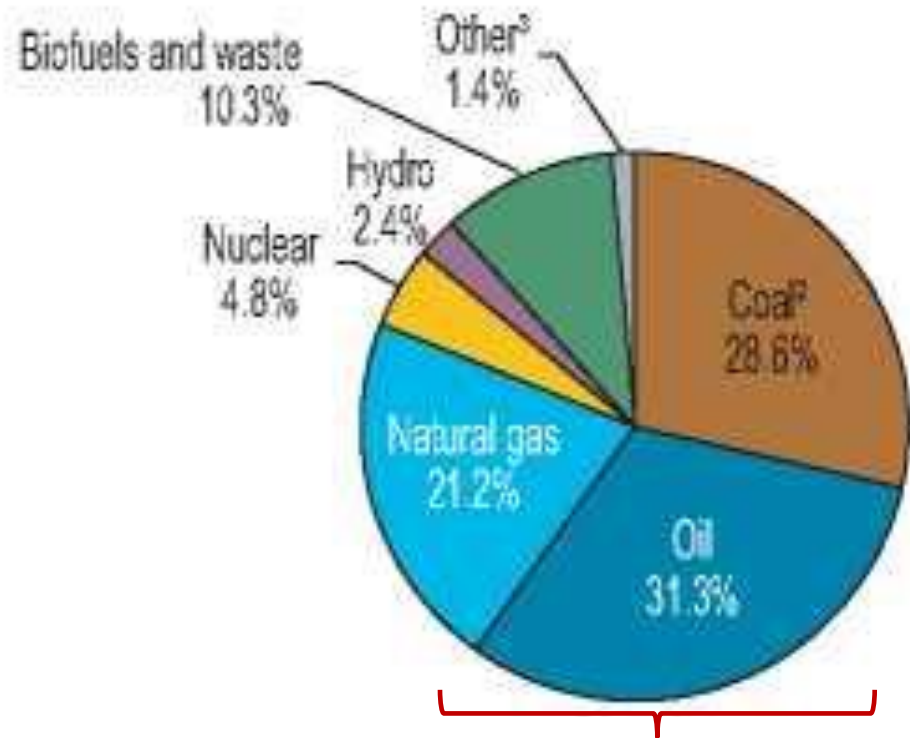


1973



Ορυκτά καύσιμα: 86.7%

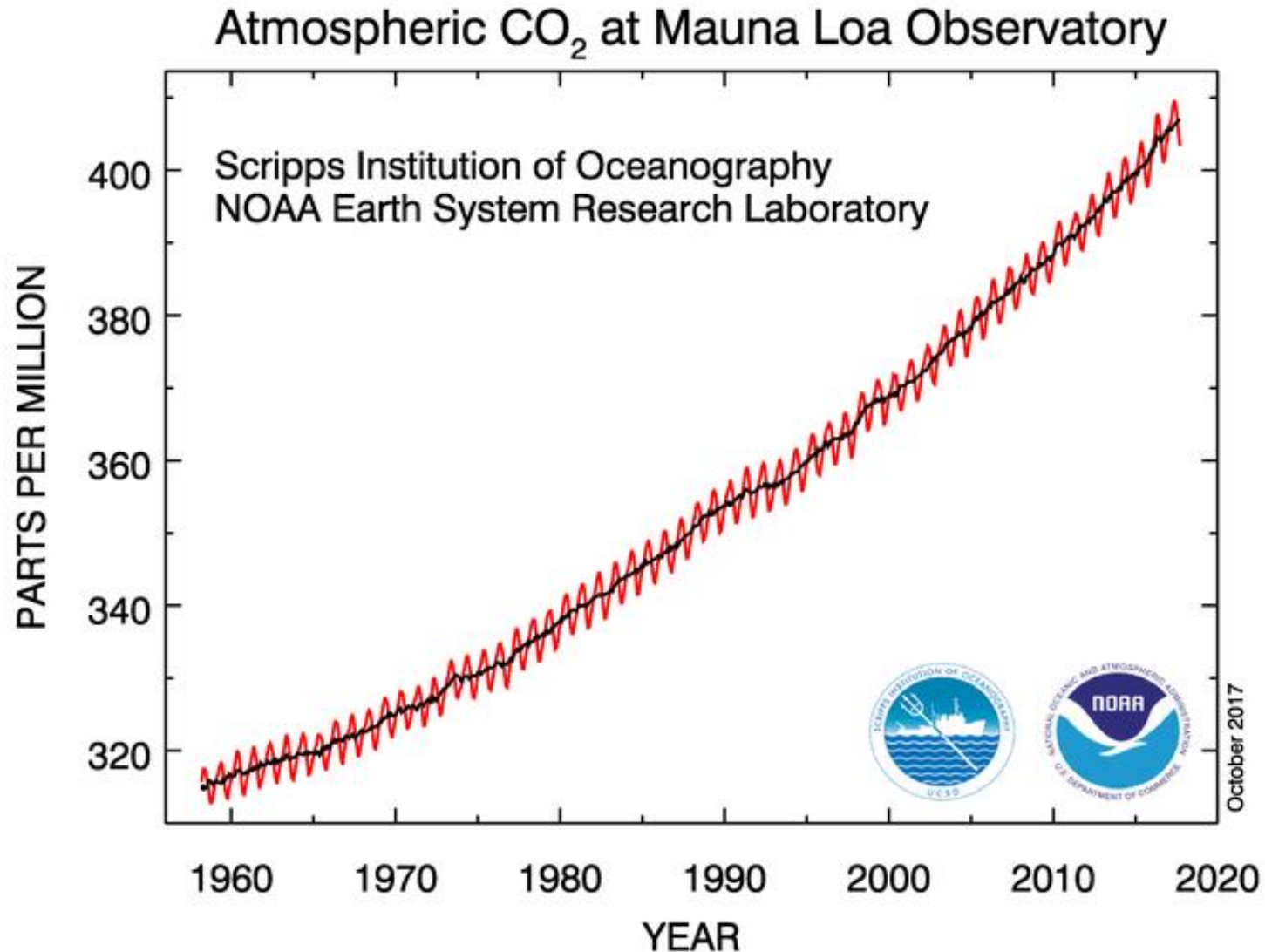
2014



Ορυκτά καύσιμα: 81.1%

Πηγή: International Energy Agency, Key World Energy Statistics, 2016, <http://www.iea.org/>

CO₂ στην ατμόσφαιρα, Keeling curve

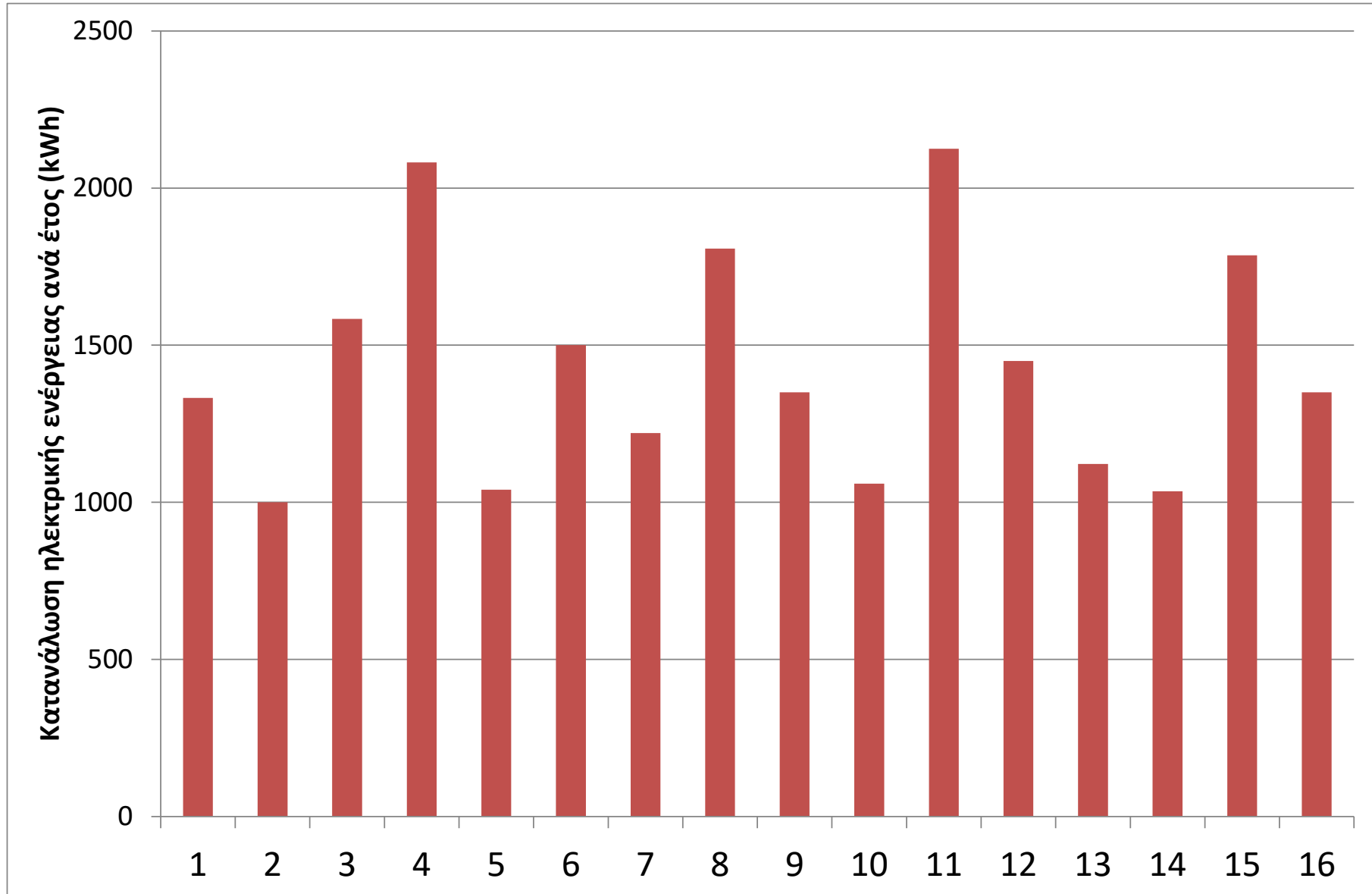


CO₂ στην ατμόσφαιρα, Keeling curve



Πηγή: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>

Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος (kWh)





Άσκηση 4.1

- Στο δωμάτιό σας υπάρχει ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας ισχύος 100 W.
- Έστω ότι αφήνετε το λαμπτήρα αυτό αναμμένο για μία ολόκληρη ημέρα.
- Να υπολογίσετε την ενέργεια μετρημένη σε joules και σε kWh την οποία καταναλώνει ο λαμπτήρας αυτός.

Άσκηση 4.1



- Κατά την καύση του άνθρακα στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγονται περίπου 22,3 MJ ανά κιλό άνθρακα.
- Ωστόσο, το ποσοστό μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι περίπου 33%.
- Με βάση τα παραπάνω, να υπολογίσετε πόσα κιλά άνθρακα απαιτούνται για την τροφοδοσία του παραπάνω λαμπτήρα με ηλεκτρική ενέργεια.

Άσκηση 4.1



- Να υπολογίσετε πόσα κιλά CO_2 παράγονται κατά την καύση της παραπάνω ποσότητας του άνθρακα.
- Δίνεται ότι το ατομικό βάρος του άνθρακα ισούται με 12,01 amu και του οξυγόνου με 16,00 amu.

Άσκηση 4.2



- Το ψυγείο το οποίο βρίσκεται στην κουζίνα σας έχει ισχύ 250 W.
- Να υπολογίσετε την ενέργεια μετρημένη σε joules και σε kWh την οποία καταναλώνει το ψυγείο σας κατά τη διάρκεια μιας μέρας.

Άσκηση 4.2



- Κατά την καύση του άνθρακα στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγονται περίπου 22,3 MJ ανά κιλό άνθρακα.
- Ωστόσο, το ποσοστό μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι περίπου 33%.
- Με βάση τα παραπάνω, να υπολογίσετε πόσα κιλά άνθρακα απαιτούνται κάθε μέρα για την τροφοδοσία του ψυγείου σας με ηλεκτρική ενέργεια.

Άσκηση 4.2



- Να υπολογίσετε πόσα κιλά CO_2 παράγονται κατά την καύση της παραπάνω ποσότητας του άνθρακα.
- Δίνεται ότι το ατομικό βάρος του άνθρακα ισούται με 12,01 amu και του οξυγόνου με 16,00 amu.

Εργασία (Project)



1. Να υπολογίσετε πόση πρωτογενή ενέργεια (primary energy) (μετρημένη σε kWh και σε J) και πόση ισχύ (μετρημένη σε W) καταναλώνετε σε ετήσια βάση.
2. Να υπολογίσετε πόσους τόνους εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται η κατανάλωση της ενέργειας αυτής.
3. Να αναζητήσετε στοιχεία σχετικά με τις εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο στην Ελλάδα, στην Ευρώπη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο.

Ισοζύγιο Ενέργειας (Energy Balance)



- Οι ροές ενέργειας (σε όλες τις μορφές της) από και προς το υπό μελέτη περιβαλλοντικό σύστημα μπορούν να αναλυθούν όπως και οι ροές ύλης στα ισοζύγια μάζας.
- Ωστόσο υπάρχει μια ουσιώδης διαφορά.
- Η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί αλλά ούτε και να καταστραφεί.
- Κατά συνέπεια, στα ισοζύγια μάζας δεν υπάρχει όρος αντίστοιχος με το σχηματισμό ή τη διάσπαση μιας χημικής ουσίας λόγω χημικών ή/και βιολογικών αντιδράσεων.

Ισοζύγιο Ενέργειας



- Άρα η γενικευμένη εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας γράφεται:

$$\begin{array}{ccccc} \text{συσσώρευση ενέργειας} & \text{εισροή ενέργειας} & & \text{εκροή ενέργειας} & \\ \text{κατά το χρονικό} & = & \text{κατά το χρονικό} & - & \text{κατά το χρονικό} & (4.1) \\ \text{διάστημα } \Delta t & & \text{διάστημα } \Delta t & & \text{διάστημα } \Delta t \end{array}$$

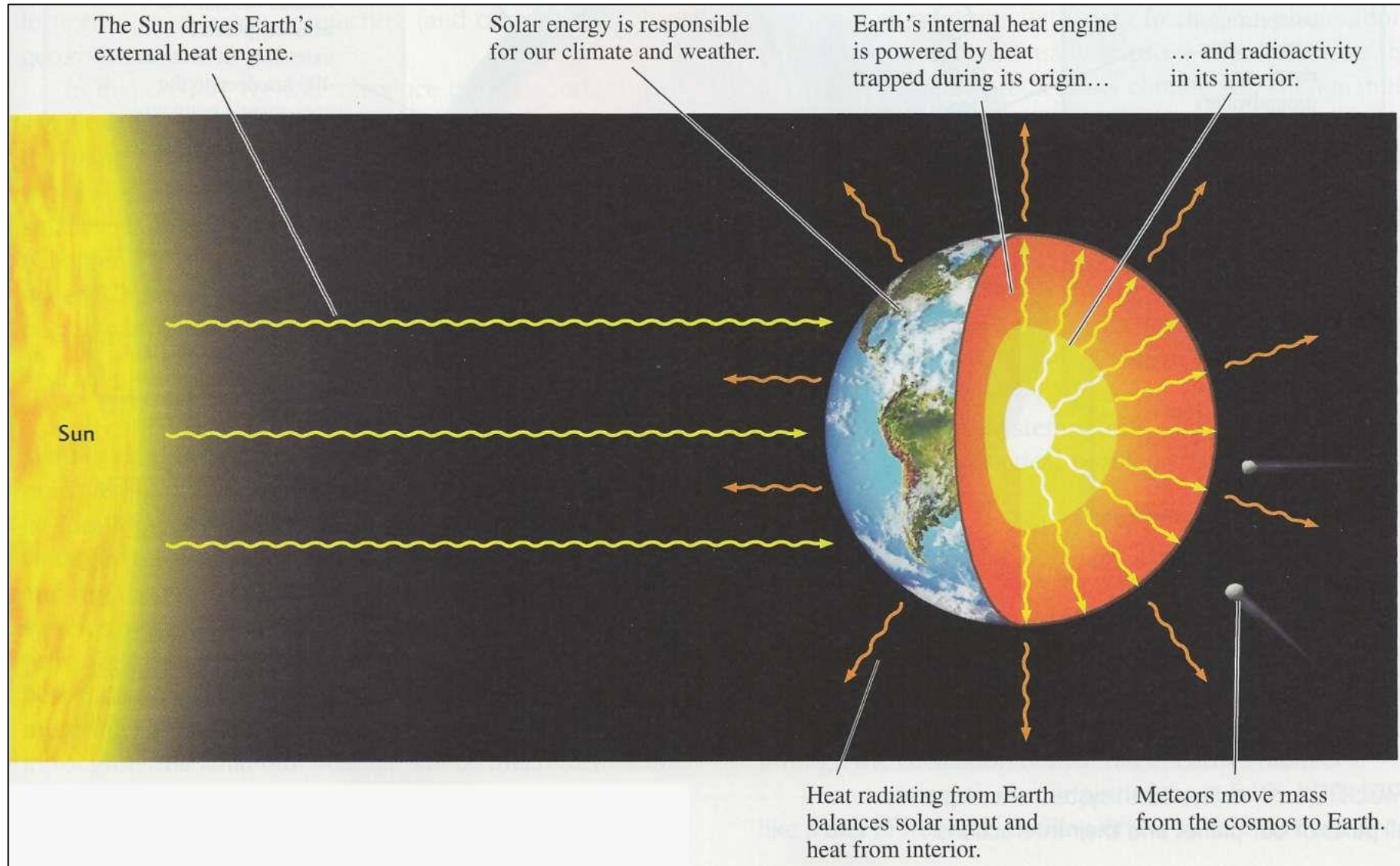
- Η παραπάνω εξίσωση είναι αντίστοιχη με την εξίσωση των ισοζυγίων μάζας χωρίς τον όρο ο οποίος αναφέρεται στο σχηματισμό ή τη διάσπαση μια χημικής ουσίας.
- Όλοι οι όροι της παραπάνω εξίσωσης έχουν μονάδες ενέργειας.

Ισοζύγιο ενέργειας σε κλειστά συστήματα

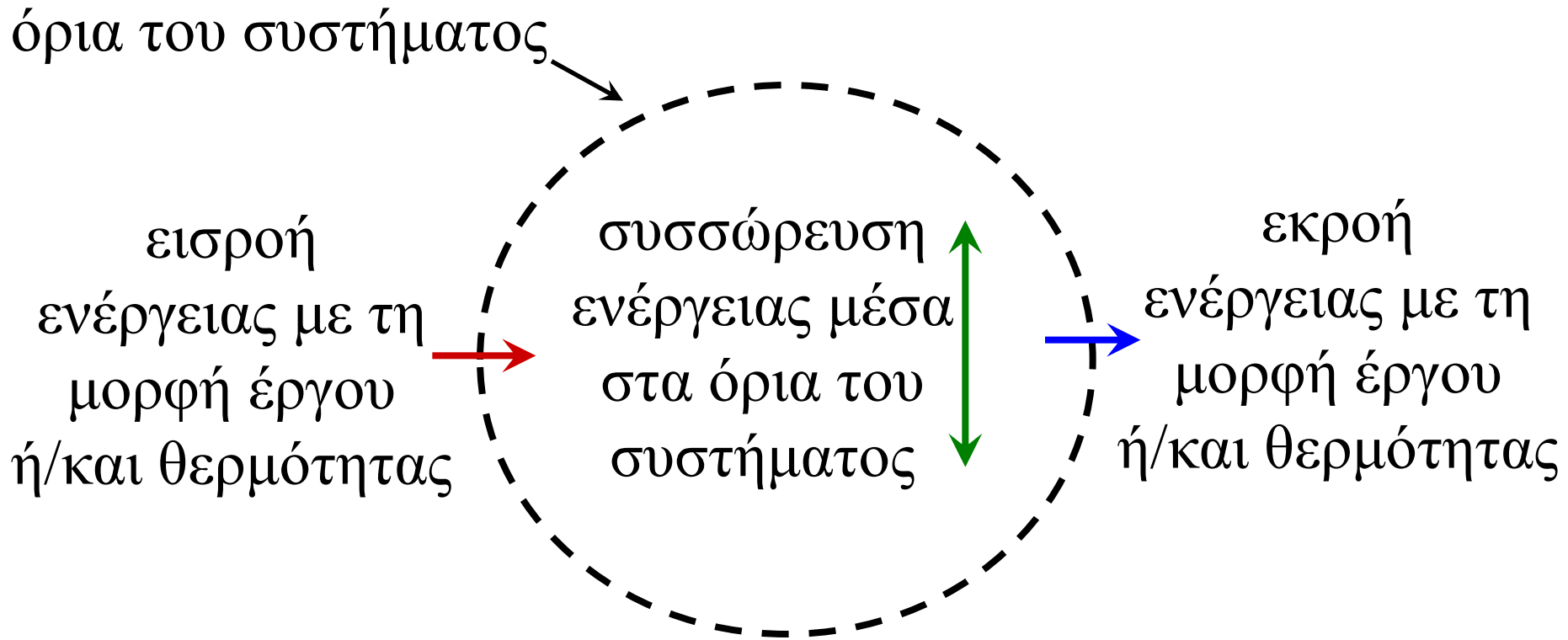


- Θα εξετάσουμε το ισοζύγιο ενέργειας της Γης, η οποία αποτελεί ένα **κλειστό ως προς τη μάζα σύστημα**.
- Ένα τέτοιο σύστημα δεν ανταλλάσσει μάζα με το περιβάλλον του.
- Μπορεί όμως να ανταλλάσσει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας ή/και έργου.

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης



Ισοζύγιο ενέργειας σε κλειστά συστήματα



Θερμική ακτινοβολία



- Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολίες (radiant heat transfer) είναι ένας τρόπος με τον οποίο ένα αντικείμενο μπορεί να θερμάνει ένα άλλο.
- Η ενέργεια των ακτινοβολιών μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτεί ένα μέσο ώστε να μεταφερθεί η ενέργεια.

Θερμική ακτινοβολία

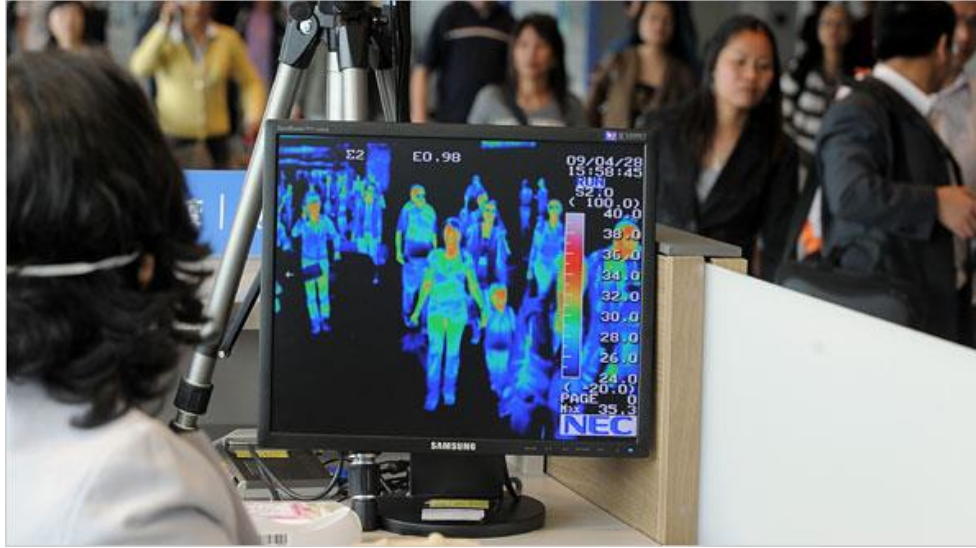


- Όλα τα σώματα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία.
- Η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία.
- Σε χαμηλές θερμοκρασίες το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας βρίσκεται συνήθως στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος και κατά συνέπεια δεν είναι ορατό με γυμνό μάτι.
- Σε υψηλότερες θερμοκρασίες το φάσμα εκπομπής μετατοπίζεται προς το ορατό.

Θερμική ακτινοβολία



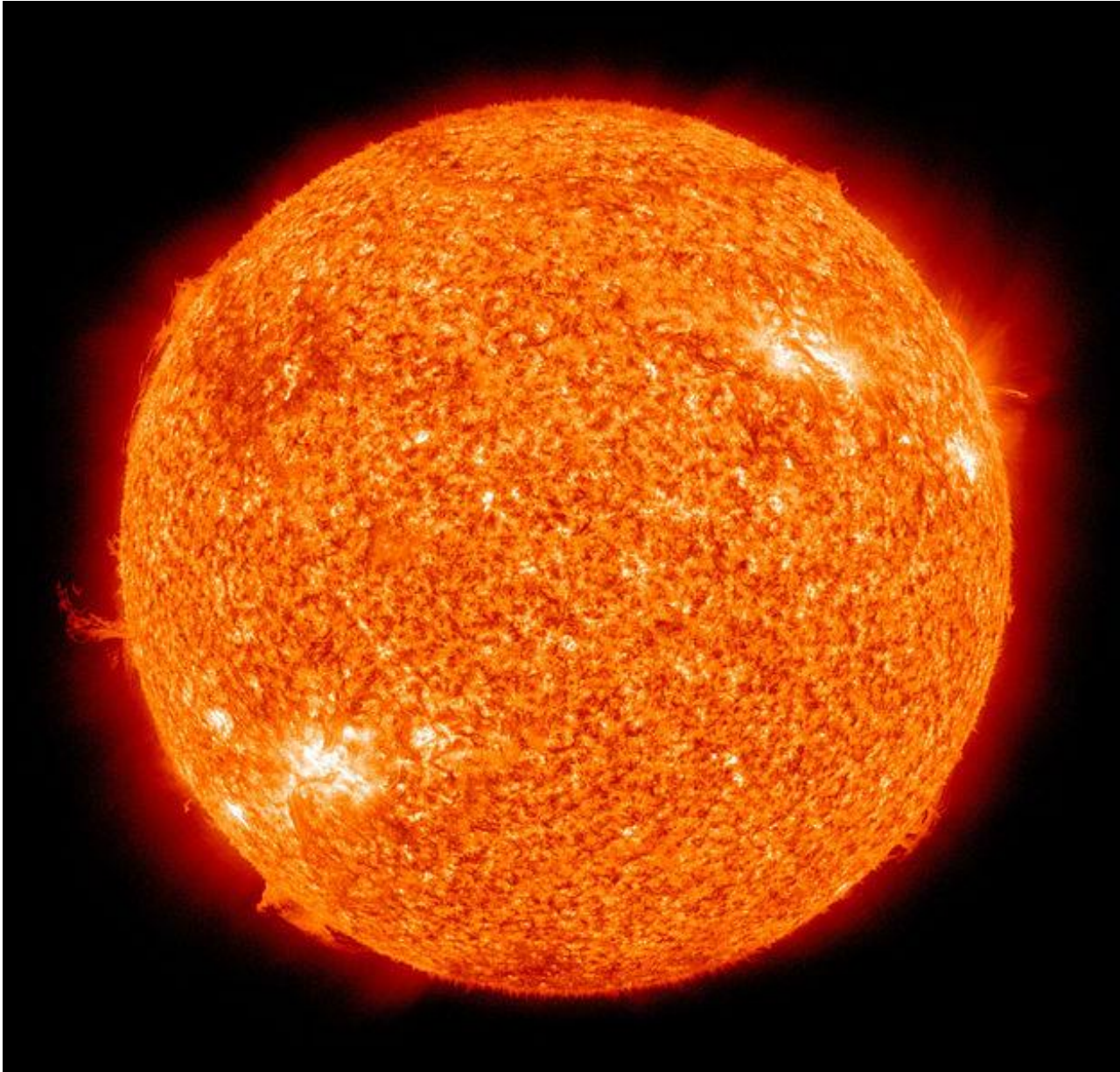
Θερμική ακτινοβολία



© 2003, 2005 Dave Galtrey, Greg Mathieson / MAI



Ήλιος



Ακτινοβολία μέλανος σώματος



- **Ακτινοβολία μέλανος σώματος (black body radiation)** είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία την οποία εκπέμπουν όλα τα σώματα όταν θερμανθούν ($T > 0$).
- Συχνά ονομάζεται και **θερμική ακτινοβολία (thermal radiation)**.
- Το **μέλαν σώμα (black body)** είναι ένα εξιδανικευμένο μοντέλο το οποίο επινοήθηκε για να διευκολυνθεί η μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας των πραγματικών σωμάτων.

Ακτινοβολία μέλανος σώματος



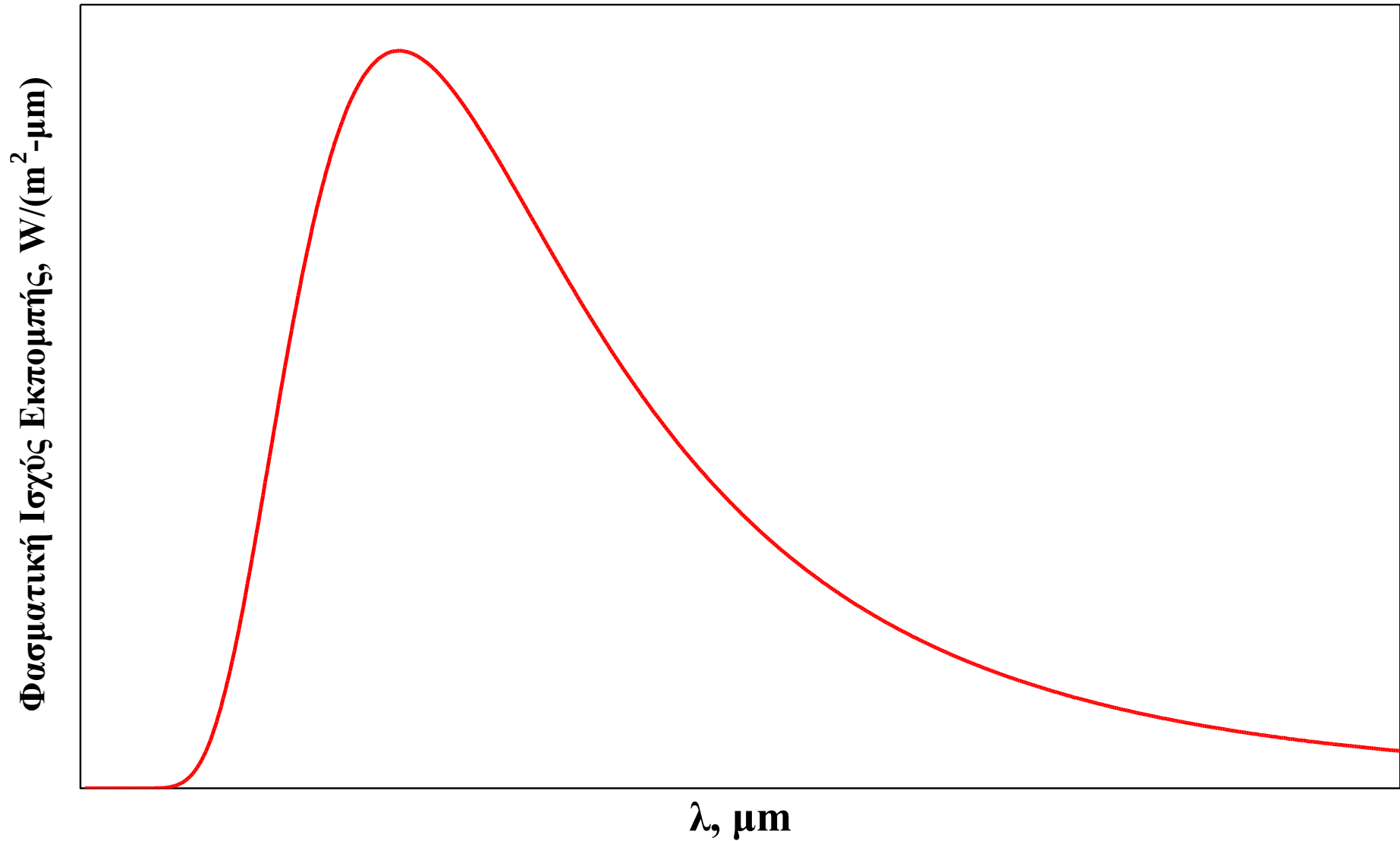
- Το μέλαν σώμα συμπεριφέρεται ιδανικά ως προς την απορρόφηση και την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας.
- Το μέλαν σώμα απορροφάει όλες τις ακτινοβολίες οι οποίες προσπίπτουν σε αυτό (δηλαδή οι ακτινοβολίες ούτε ανακλώνται ούτε διαπερνούν το σώμα, αλλά απορροφούνται στο σύνολό τους).
- Αυτό ισχύει για όλα τα μήκη κύματος και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης.

Ακτινοβολία μέλανος σώματος



- Δηλαδή το μέλαν σώμα είναι ένα ιδανικός απορροφητής όλων των ακτινοβολιών οι οποίες προσπίπτουν σε αυτό.
- Αφού απορροφάει όλες τις ακτινοβολίες θα έχει μαύρο χρώμα (εξ' ου και η ονομασία του).
- Στην πράξη όλα τα στερεά σώματα όταν θερμανθούν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Η κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις διάφορες συχνότητες έχει την ακόλουθη χαρακτηριστική μορφή:

Κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος



Ακτινοβολία μέλανος σώματος



- Η ισχύς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος.
- Το μελανό σώμα εκπέμπει το μεγαλύτερο δυνατό ποσό θερμικής ακτινοβολίας από όλα τα πραγματικά σώματα τα οποία βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία.
- Τα πραγματικά σώματα δεν εκπέμπουν τόση θερμική ακτινοβολία όση το μελανό σώμα, αλλά τα πιο πολλά σώματα βρίσκονται κοντά σε αυτό το θεωρητικό όριο.



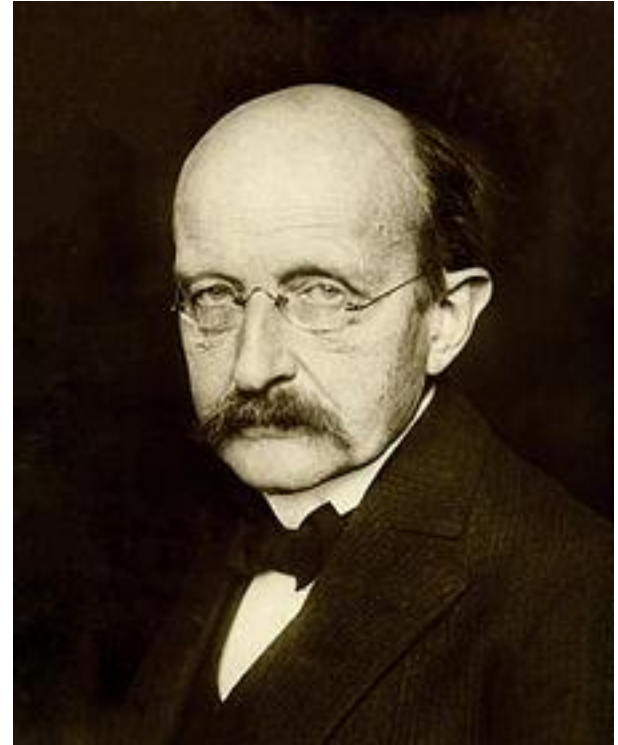
Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Τα μήκη κύματος των ακτινοβολιών οι οποίες εκπέμπονται από ένα μελανό σώμα εξαρτώνται από την θερμοκρασία του σώματος.
- Το μέγεθος το οποίο δίνει την ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας στα διάφορα μήκη κύματος, ονομάζεται **φασματική ισχύς εκπομπής (spectral emissive power)**, $M(\lambda, T)$.
- Συχνά, η ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **ένταση (intensity)** της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Ακτινοβολία μέλανος σώματος



- Η φασματική ισχύς εκπομπής είναι συνάρτηση του μήκους κύματος εκπομπής και της θερμοκρασίας του σώματος και δίνεται από το νόμο του Planck.
- **Max Planck**, Γερμανός Φυσικός, από τους θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας (quantum theory). Το 1918 του απονεμήθηκε το βραβείο Nobel στη Φυσική.



Max Planck, (1858 – 1947)₃₈

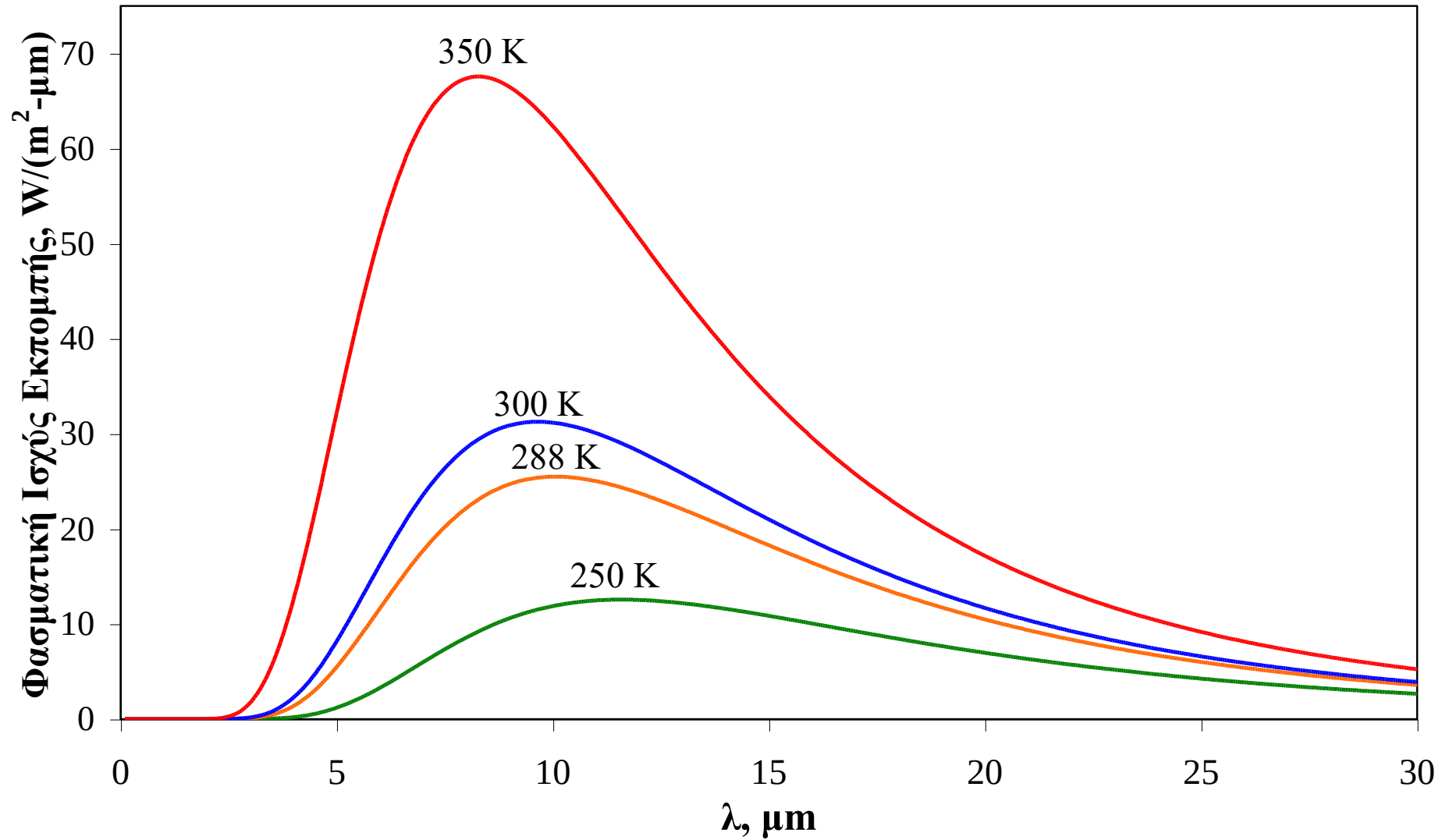
Ακτινοβολία μέλανος σώματος



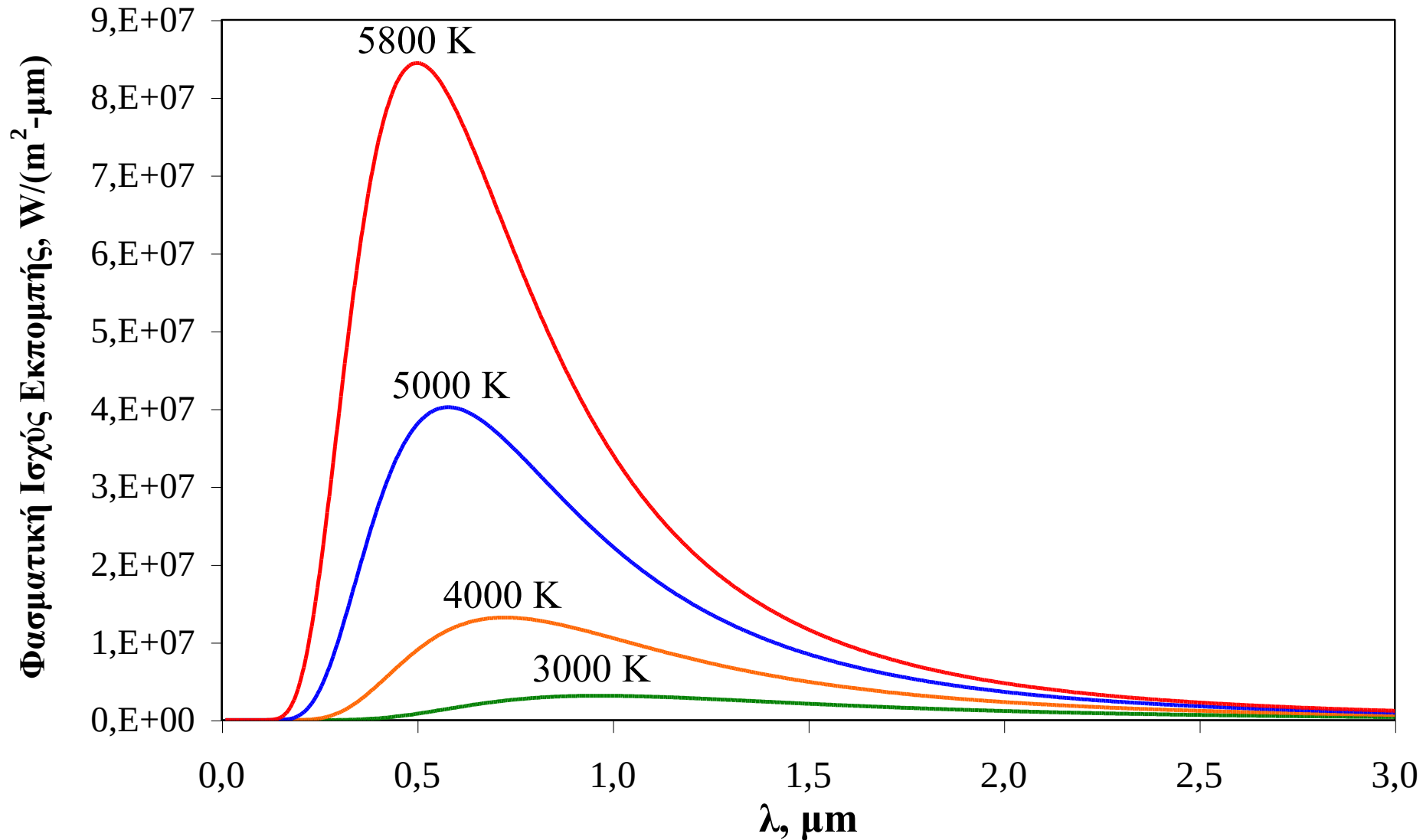
$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (4.2)$$

- Όπου $M(\lambda, T)$: η φασματική ισχύς εκπομπής (spectral emissive power) της ακτινοβολίας, σε $W/(m^2 \cdot \mu m)$
- h : η σταθερά του Planck με τιμή ίση με $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot s$
- k : η σταθερά του Boltzmann με τιμή ίση με $k = 1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
- T : η απόλυτη θερμοκρασία, σε K.

Ακτινοβολία μέλανος σώματος



Ακτινοβολία μέλανος σώματος

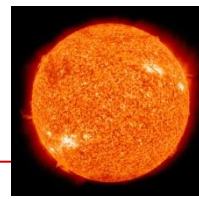


Ακτινοβολία μέλανος σώματος



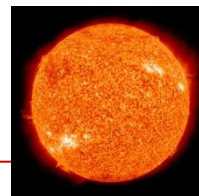
- Το εμβαδόν το οποίο περικλείεται από την κάθε καμπύλη ισούται με την ολική ισχύ εκπομπής του μελανού σώματος ανά μονάδα επιφάνειας.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος προκαλεί:
 - i. αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος
 - ii. μετατόπιση του μήκους κύματος στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη ισχύς εκπομπής, προς μικρότερα μήκη κύματος.

Ηλιακή ακτινοβολία



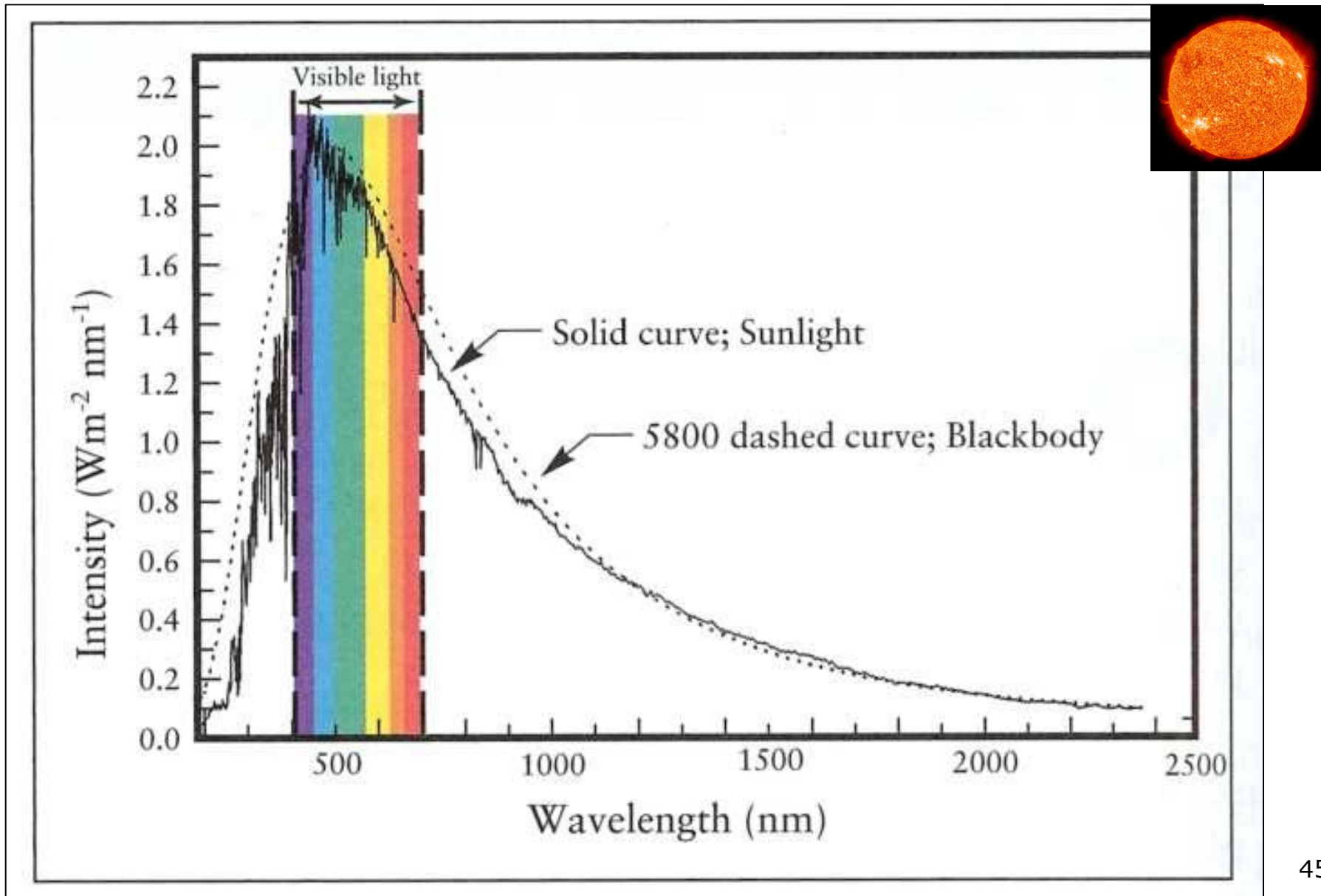
- Η ηλιακή ακτινοβολία η οποία καταφθάνει στην εξωτερική ατμόσφαιρα της Γης προσομοιάζει με την ακτινοβολία μελανού σώματος θερμοκρασίας **5800 K** (για την ακρίβεια 5777 K).
- Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **εξωγήινη ακτινοβολία (extraterrestrial radiation)**.
- Δηλαδή, ο ήλιος συμπεριφέρεται ως μελανό σώμα θερμοκρασίας περίπου **5800 K**.

Ηλιακή ακτινοβολία

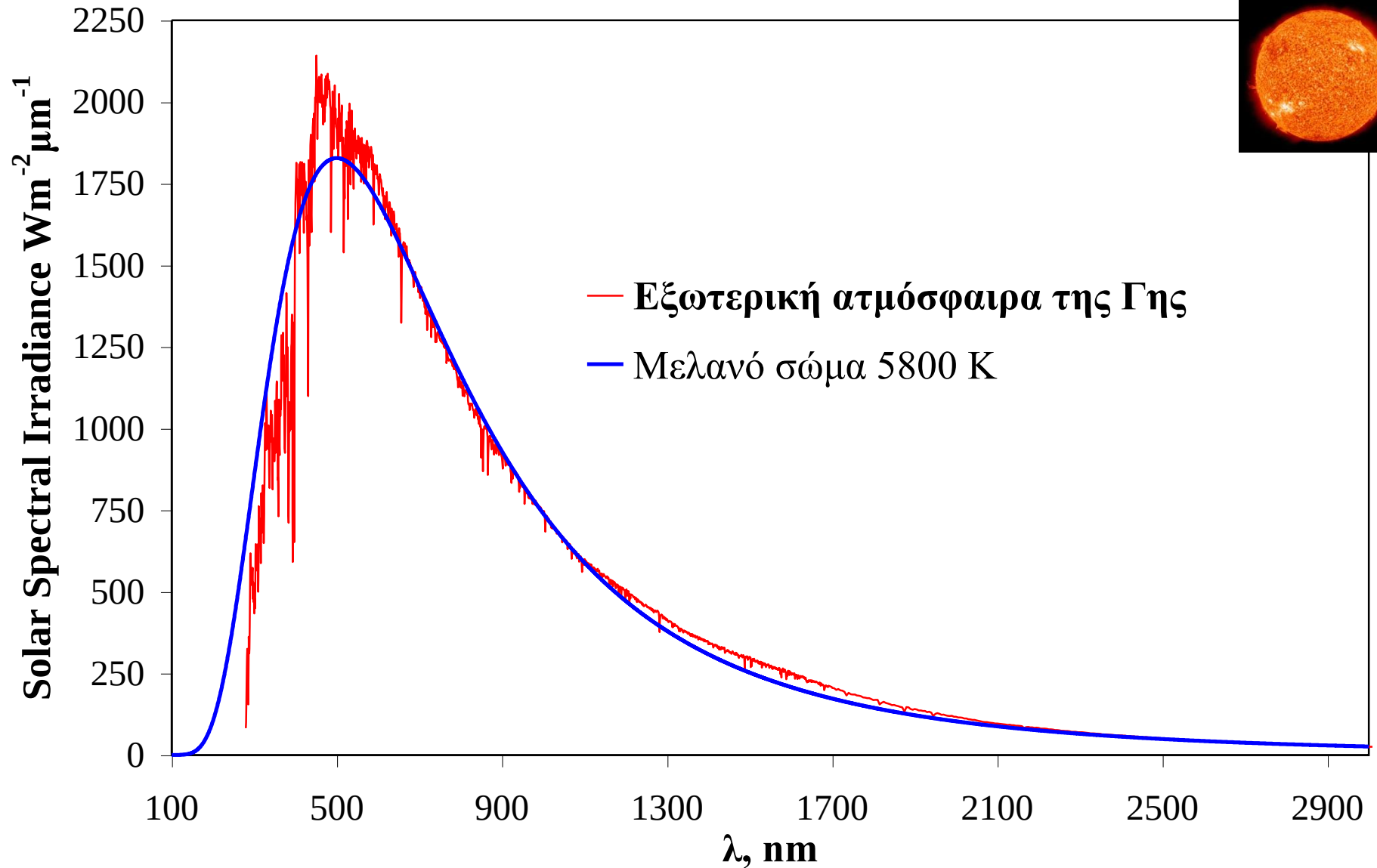


- Λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ Γης και Ήλιου ($1,496 \cdot 10^8$ km), θεωρούμε ότι οι ηλιακές ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους.
- Η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό τμήμα της ατμόσφαιρας της Γης ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης στις ηλιακές ακτίνες, ονομάζεται **ηλιακή φασματική ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (solar spectral irradiance)**.
- Έχει μονάδες $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$.
- Συχνά ονομάζεται και **ένταση (intensity)** της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

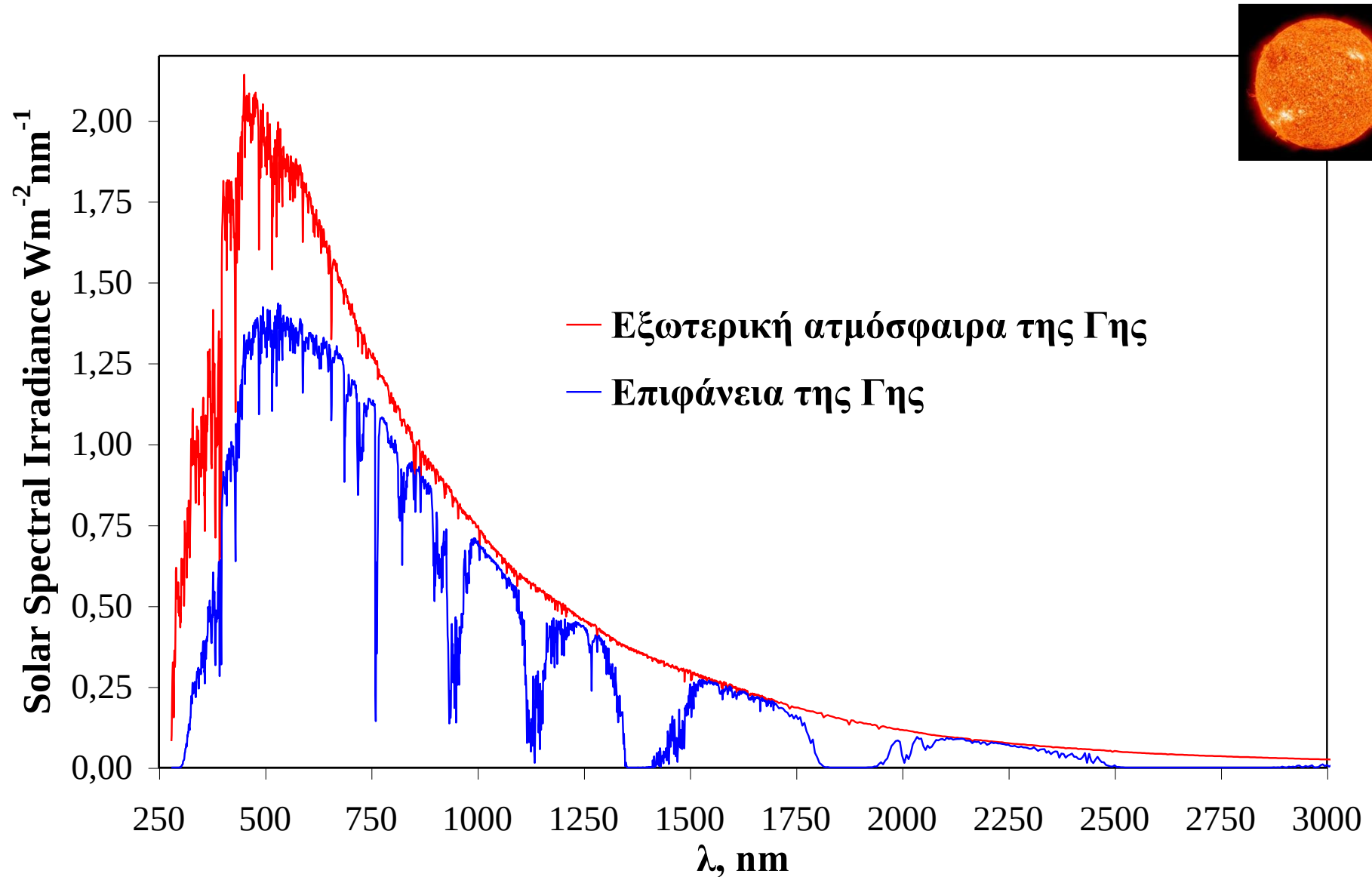
Ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας



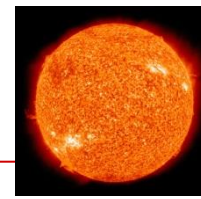
Ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας



Ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

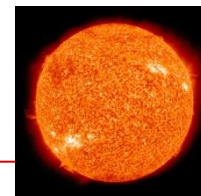


Ηλιακή ακτινοβολία



- Περίπου το 47% της ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας έχει μήκη κύματος από 380 nm 780 nm, ανήκει δηλαδή στην **ορατή (Visible, Vis)** περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- Το 7% ανήκει στην **υπεριώδη (Ultraviolet, UV)** περιοχή με μήκη κύματος μικρότερα από 380 nm, ενώ το υπόλοιπο 46% ανήκει στην **υπέρυθρη (Infrared, IR)** περιοχή με μήκη κύματος μεγαλύτερα από 780 nm.

Ηλιακή ακτινοβολία



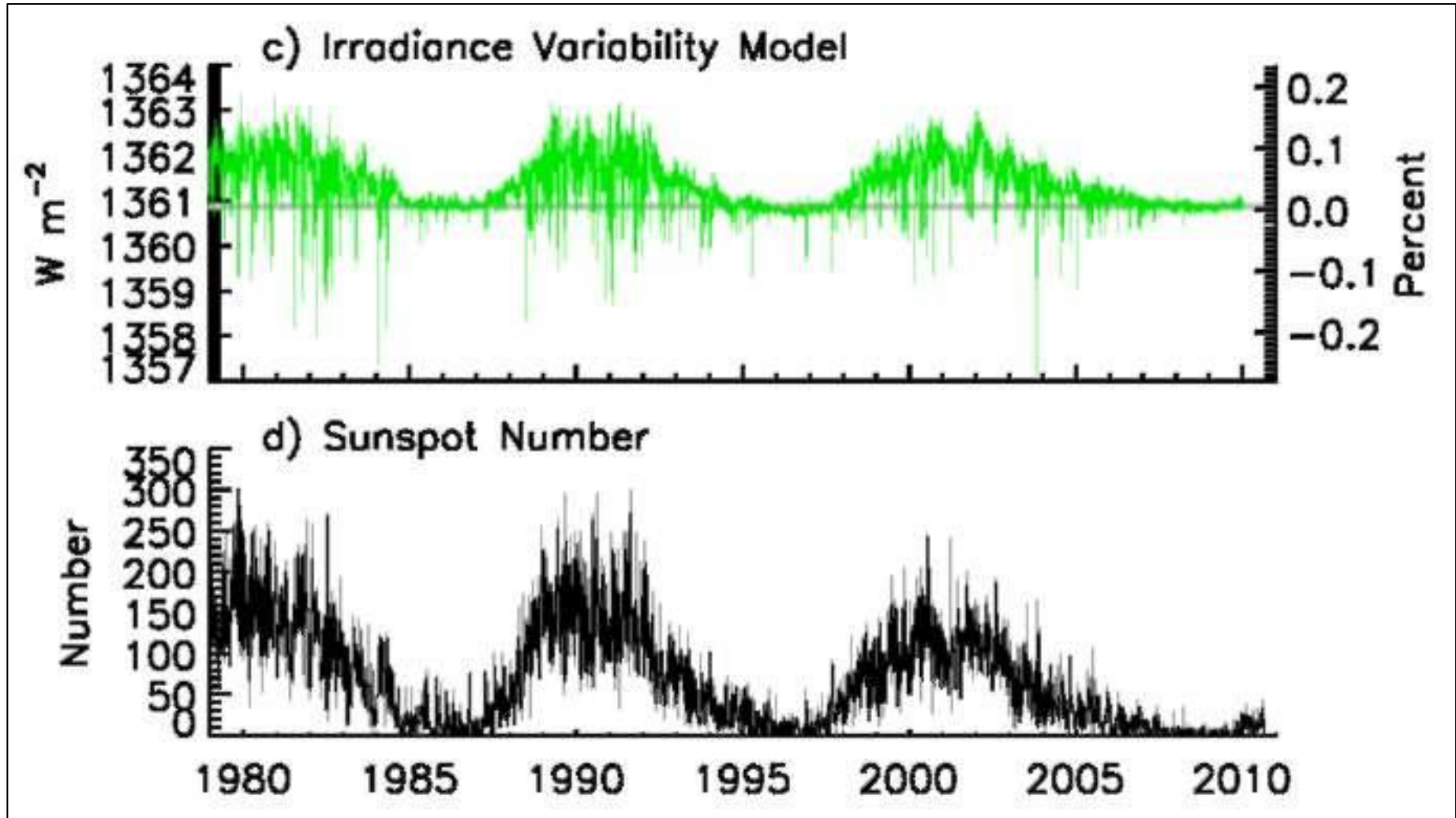
- Το συνολικό εμβαδόν το οποίο περικλείεται από την καμπύλη της ηλιακής φασματικής ισχύος για όλα τα μήκη κύματος, είναι η **συνολική ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (total solar irradiance)** η οποία καταφθάνει στην εξωτερική ατμόσφαιρα της Γης.
- Η συνολική αυτή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **ηλιακή σταθερά (solar constant)**, σύμβολο S , και ισούται με $1360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ (παλιότερη τιμή 1370 W/m^2).

Ηλιακή σταθερά



- Η ηλιακή σταθερά παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στην τιμή της λόγω της ηλιακής δραστηριότητας (11^{ετής} κύκλος της ηλιακής δραστηριότητας).
- Η τιμή της ηλιακής σταθεράς μετριέται συνεχώς από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 από κατάλληλα εξοπλισμένους δορυφόρους και από κατάλληλα όργανα μέτρησης διαφόρων διαστημικών αποστολών.
- Η τιμή της σταθεράς αυτής επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό το κλίμα της Γης.

Ηλιακή σταθερά





Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Η συνολική ισχύς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας ενός μελανού σώματος δίνεται από το νόμο των Stefan και Boltzmann:

$$P = \sigma A T^4 \quad (4.3)$$

- Όπου P : η συνολική ισχύς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας, σε W
- σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann με τιμή ίση με $\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- A : η επιφάνεια του σώματος, σε m^2
- T : η απόλυτη θερμοκρασία, σε K .



Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Το μήκος κύματος το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο της ισχύος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας, συμβολίζεται με $\lambda_{\max}$, και δίνεται από το νόμο μετατόπισης του Wien:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8977721 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{T} \quad (4.4)$$

- Όπου T : η απόλυτη θερμοκρασία, σε K
- $\lambda_{\max}$: το μήκος κύματος στο μέγιστο της ισχύος, σε m.

Άσκηση 4.3



- Να θεωρήσετε ότι η Γη είναι ένα μελανό σώμα με μέση θερμοκρασία $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Η μέση ακτίνα της Γης είναι 6370 km .
- Να υπολογίσετε τη συνολική ισχύ της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας της Γης καθώς και το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μέγιστη ισχύς.
- **Απάντηση:**
- Επιφάνεια της Γης: $A = 4\pi r^2 \Leftrightarrow$

$$A = 4 \cdot 3,14 \cdot (6370 \cdot 10^3\text{ m})^2 = 5,10 \cdot 10^{14}\text{ m}^2$$



Άσκηση 4.3: Απάντηση

- Η συνολική ισχύς ισούται με:

$$P = \sigma A T^4 \Leftrightarrow$$

$$P = 5,670373 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot 5,10 \cdot 10^{14} \text{m}^2 \cdot (288 \text{ K})^4 \Leftrightarrow$$

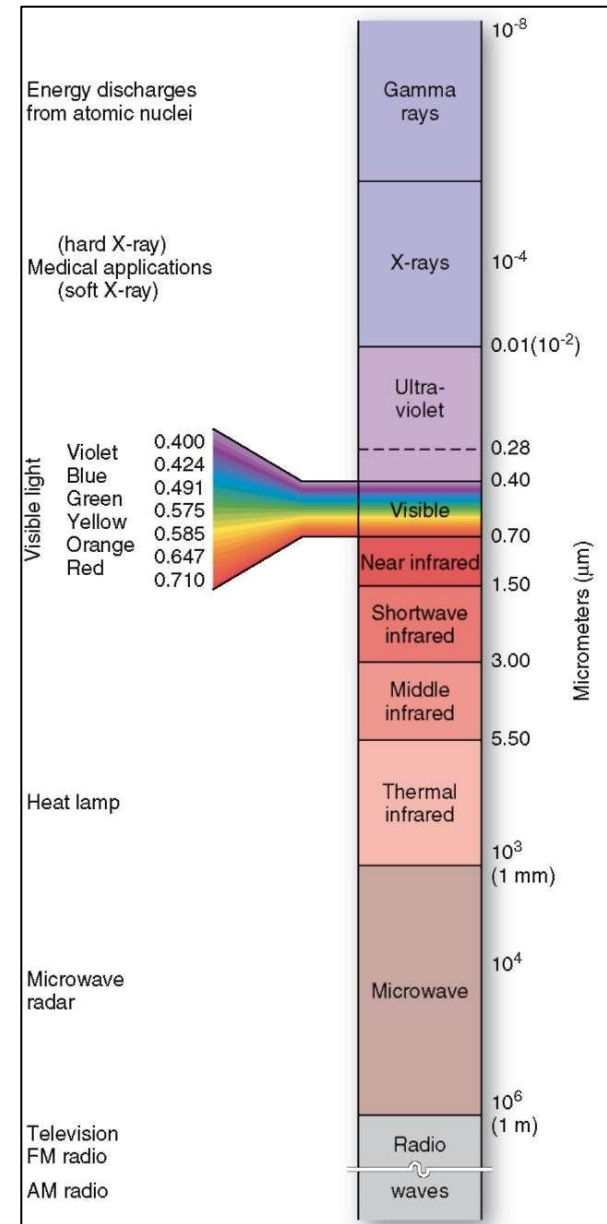
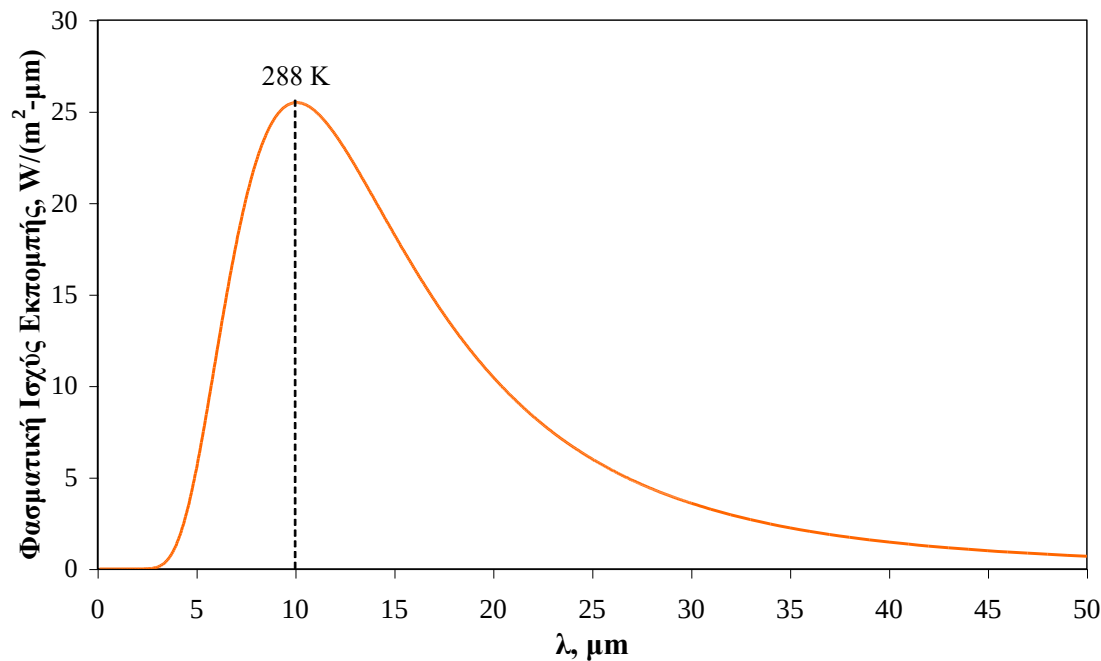
$$P = 1,99 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

- Το λ_{max} ισούται με:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,8977721 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{288 \text{ K}} = 10,1 \text{ } \mu\text{m}$$

Άσκηση 4.3: Απάντηση

- Το μήκος κύματος αυτό βρίσκεται στην **υπέρυθρη (infrared, IR)** περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



Ενέργεια

Άσκηση 4.4



- Η μέγιστη ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται σε μήκος κύματος ίσο με 501,6 nm.
- Να θεωρήσετε ότι ο Ήλιος είναι ένα μελανό σώμα και να υπολογίσετε:
 - i. τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειάς του
 - ii. τη συνολική ισχύ της εκπεμπόμενης θερμικής ηλιακής ακτινοβολίας
 - iii. τη συνολική ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακή σταθερά, S) στην εξωτερική ατμόσφαιρα της Γης.

Άσκηση 4.4



- Δίνεται ότι:
- ✓ η μέση ακτίνα του Ήλιου είναι $R = 696000 \text{ km}$
- ✓ η μέση ακτίνα της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο ισούται με $1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$ (η απόσταση αυτή ονομάζεται αστρονομική μονάδα, astronomical unit, AU).



Άσκηση 4.4: Απάντηση

- i. Για τη μέση θερμοκρασία της επιφάνειάς του Ήλιου έχουμε:

$$T = \frac{2,8977721 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{max}}} \Leftrightarrow$$

$$T = \frac{2,8977721 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{501,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5777 \text{ K}$$

- ii. Για να υπολογίσουμε τη συνολική ισχύ της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζουμε αρχικά την επιφάνεια του Ήλιου:

$$A = 4\pi R^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot (696000 \cdot 10^3 \text{ m})^2 = 6,08 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$



Άσκηση 4.4: Απάντηση

➤ Στη συνέχεια έχουμε:

$$P = \sigma A T^4 \Leftrightarrow$$

$$P = 5,670373 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot 6,08 \cdot 10^{18} \text{m}^2 \cdot (5777 \text{ K})^4 \Leftrightarrow$$

$$P = 3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

➤ Παρατήρηση: Η ισχύς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας του Ήλιου είναι περίπου 2 δισεκατομμύρια ($2 \cdot 10^9$) φορές μεγαλύτερη από αυτήν της Γης!!!

Άσκηση 4.4: Απάντηση



- iii. Για να υπολογίσουμε την ηλιακή σταθερά S , θεωρούμε ότι ο Ήλιος βρίσκεται στο κέντρο μιας γιγάντιας σφαίρας ακτίνας ίσης με τη μέση ακτίνα της κυκλικής τροχιάς περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο, δηλαδή ίσης με $1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$.
- Θέλουμε να υπολογίσουμε τη συνολική ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας στην περιφέρεια αυτής της γιγάντιας σφαίρας.
 - Η ισχύς αυτή θα ισούται με τη συνολική ισχύ της εκπεμπόμενης θερμικής ηλιακής ακτινοβολίας προς το εμβαδόν της σφαίρας.

Άσκηση 4.4: Απάντηση



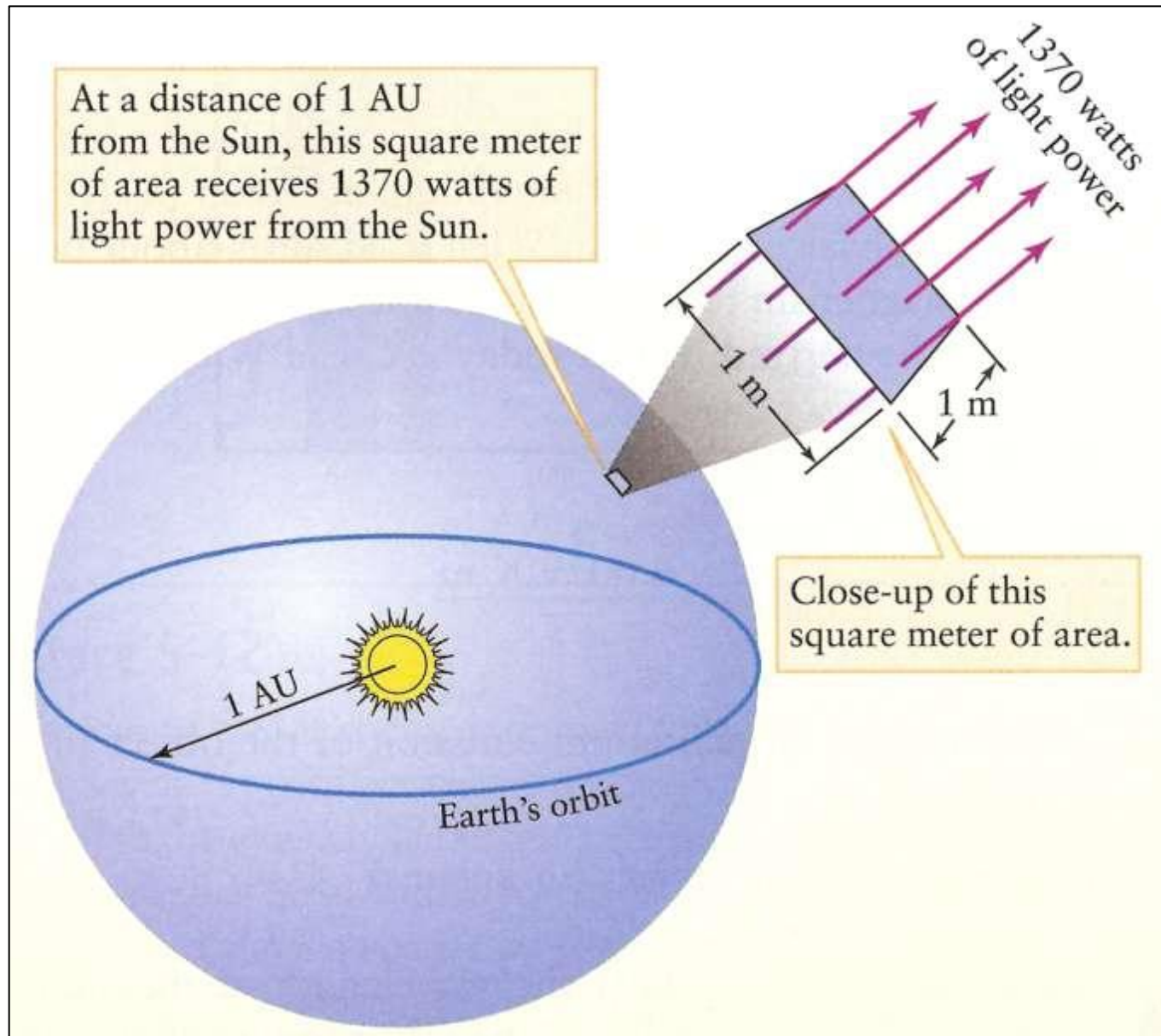
➤ Δηλαδή:

$$S = \frac{P}{4\pi(1 \text{ AU})^2} = \frac{\sigma AT^4}{4\pi(1 \text{ AU})^2} = \frac{\sigma 4\pi R^2 T^4}{4\pi(1 \text{ AU})^2} = \sigma T^4 \left(\frac{R}{1 \text{ AU}} \right)^2$$

$$\Leftrightarrow S = 5,670373 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot (5777 \text{ K})^4 \left(\frac{6,96 \cdot 10^8 \text{ m}}{1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}} \right)^2$$

$$\Leftrightarrow \boxed{S = 1370 \text{ W/m}^2}$$

Άσκηση 4.4: Απάντηση



Άσκηση 4.5



- Να υπολογίσετε τη συνολική ισχύ της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας του σώματός σας καθώς και το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μέγιστη ισχύς.

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης



- Η Γη είναι ένα ανοικτό ως προς την ενέργεια σύστημα, αλλά πρακτικά κλειστό ως προς τη μάζα.
- Η Γη δέχεται συνεχώς ενέργεια με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας από τον Ήλιο και εκπέμπει συνεχώς ενέργεια, επίσης με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας, προς το διάστημα.
- Δηλαδή, στην πραγματικότητα, μας ενδιαφέρει ο **ρυθμός** πρόσπτωσης της ενέργειας και ο **ρυθμός** εκπομπής της ενέργειας, δηλαδή η **ισχύς** της προσπίπτουσας και της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας.

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης



- Αν θεωρήσουμε ότι η Γη βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, τότε το ισοζύγιο ενέργειας της Γης με λόγια διατυπώνεται ως εξής:
- **Ο ρυθμός με τον οποίο η Γη δέχεται ενέργεια από τον Ήλιο ισούται με το ρυθμό με τον οποίο η Γη εκπέμπει ενέργεια προς το διάστημα.**
- Δηλαδή, με άλλα λόγια: η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη Γη ισούται με την ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τη Γη.

Θερμοκρασία της Γης



- Για να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία της Γης θα θεωρήσουμε αρχικά ένα σχετικά απλουστευμένο μοντέλο της Γης.
- Έστω ότι η ατμόσφαιρα της Γης περιέχει μόνο άζωτο και οξυγόνο.
- Δηλαδή, η ατμόσφαιρα της Γης δεν έχει σύννεφα και υδρατμούς, καθώς επίσης και αιωρούμενα σωματίδια.
- Επίσης, έστω ότι δεν περιέχει CO_2 καθώς και άλλα αέρια σε μικρότερο ποσοστό.



Σύσταση της Ατμόσφαιρας

- **Ξηρός αέρας:** Η επί τοις εκατό κατ' όγκο σύσταση του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα (δηλαδή χωρίς υδρατμούς) είναι:
 - ✓ 78,08 % άζωτο, N_2
 - ✓ 20,95 % οξυγόνο, O_2
 - ✓ 0,93 % αργό, Ar
 - ✓ 0,0403 % διοξείδιο του άνθρακα, CO_2
 - ✓ ίχνη άλλων αερίων όπως Ne , He , CH_4 , Kr , H_2 , N_2O , NO_2 , O_3 , Xe .

Σύσταση της Ατμόσφαιρας

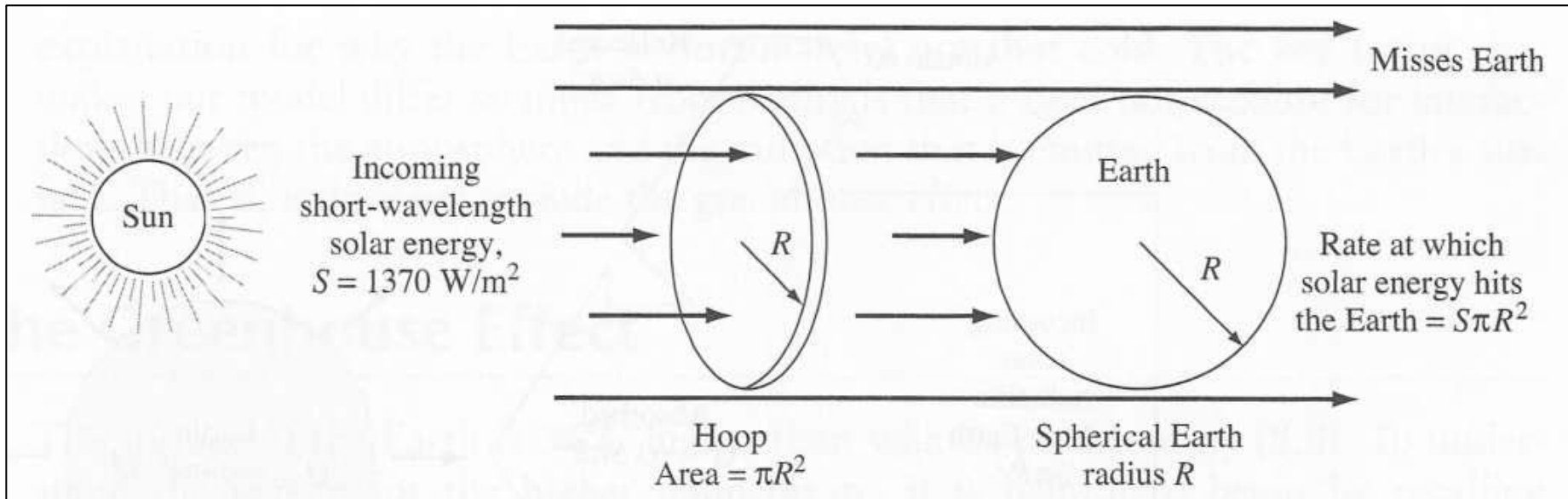


- Η ατμόσφαιρα περιέχει επίσης:
- ✓ υδρατμούς (δηλ. νερό σε αέρια μορφή, $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$) σε ποσοστά τα οποία κυμαίνονται από 0-4% κατ' όγκο.
- ✓ αιωρούμενα σωματίδια (**αερολύματα, aerosols**).



Ισοζύγιο ενέργειας της Γης

- Ο ρυθμός με τον οποίο η Γη δέχεται ενέργεια από τον Ήλιο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:
- Έστω ένας κυκλικός δίσκος ακτίνας ίσης με την ακτίνα της Γης R , ο οποίος είναι τοποθετημένος κάθετα προς τις ηλιακές ακτίνες.





Ισοζύγιο ενέργειας της Γης

- Ο ρυθμός με τον οποίο η Γη δέχεται ενέργεια από τον Ήλιο είναι ο ρυθμός με τον οποίο προσπίπτει ενέργεια στον κυκλικό αυτό δίσκο.
- Ο ρυθμός αυτός ισούται με τη συνολική ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (δηλαδή με την ηλιακή σταθερά, S) επί το εμβαδόν του κυκλικού δίσκου.

$$\text{Προσπίπτουσα Ισχύς στη Γη} = S\pi R^2 \quad (4.5)$$

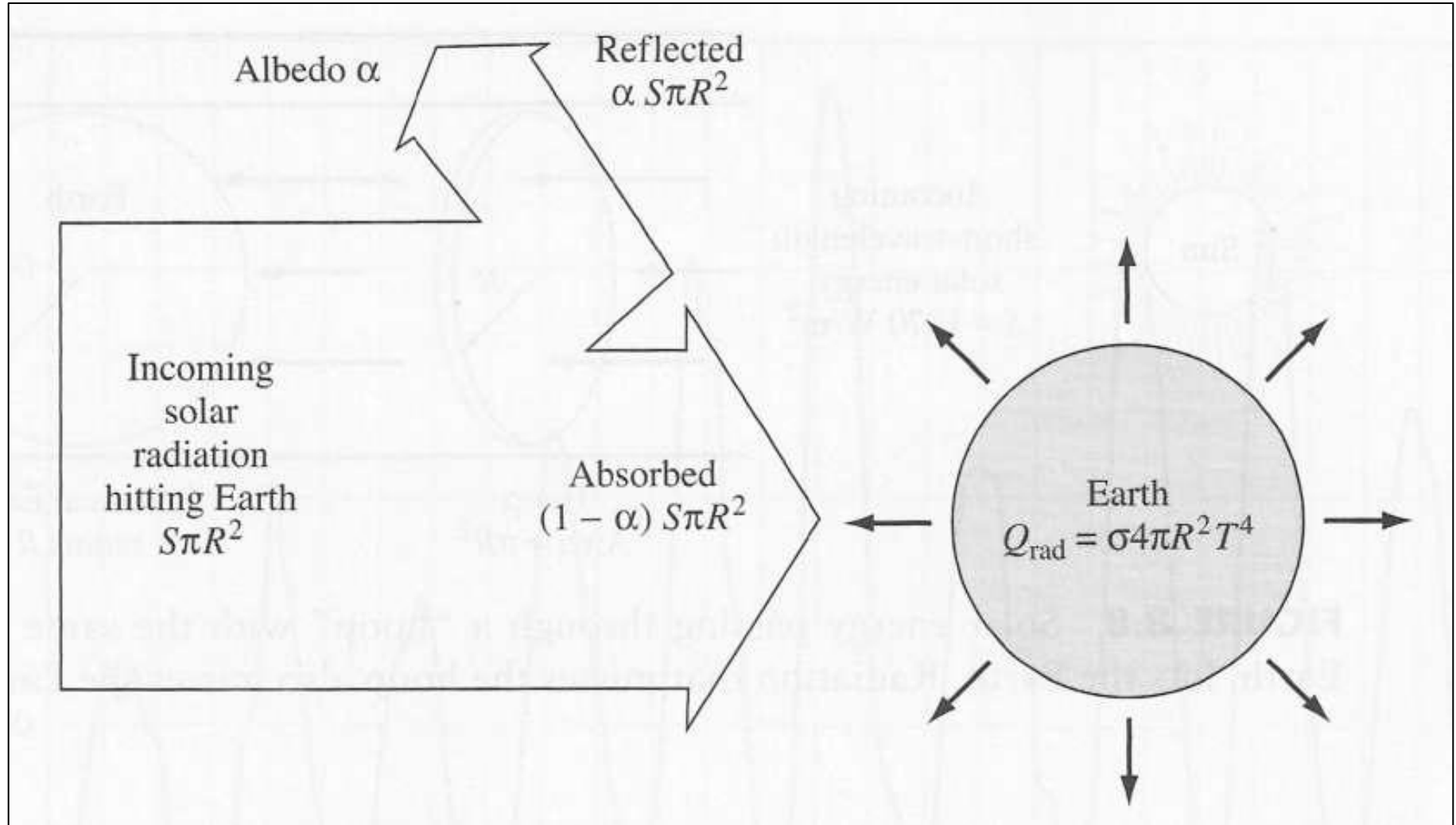
- Όπου S : η ηλιακή σταθερά, 1370 W/m^2
- R : η μέση ακτίνα της Γης, $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης



- Ένα ποσοστό της προσπίπτουσας στη Γη ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται προς το διάστημα.
- Αυτή η ανακλώμενη ακτινοβολία δεν απορροφάται από τη Γη, ή από την ατμόσφαιρα της Γης, και κατά συνέπεια δεν συνεισφέρει στην θέρμανση της Γης.
- Το κλάσμα της προσπίπτουσας προς την ανακλώμενη ακτινοβολία ονομάζεται **συντελεστής ανάκλασης (albedo)**, σύμβολο α , και ισούται περίπου με **0,31**.

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης





Ισοζύγιο ενέργειας της Γης

- Η ποσότητα της ακτινοβολίας η οποία δεν ανακλάται, απορροφάται από τη Γη και συνεισφέρει στη θέρμανσή της.
- Κατά συνέπεια, ο ρυθμός με τον οποίο απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία από τη Γη ισούται με:

$$\text{Απορροφούμενη Ισχύς από τη Γη} = (1 - \alpha) S \pi R^2 \quad (4.6)$$

- Όπου α : ο συντελεστής ανάκλασης, $\alpha = 0,31$.



Ισοζύγιο ενέργειας της Γης

- Ο ρυθμός με τον οποίο η Γη εκπέμπει ενέργεια προς το διάστημα μπορεί να υπολογιστεί αν θεωρήσουμε ότι η Γη συμπεριφέρεται ως ένα μελανό σώμα θερμοκρασίας T .
- Θεωρούμε ότι η Γη έχει συντελεστή εκπομπής (emissivity), ίσο με 1 και ότι έχει σταθερή θερμοκρασία σε όλα τα μήκη και πλάτη καθόλη τη διάρκεια του χρόνου.
- Κατά συνέπεια, ο ρυθμός εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας από την επιφάνεια της Γης μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο των Stefan και Boltzmann:

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης



$$P = \sigma A T^4 \Leftrightarrow P = \sigma 4\pi R^2 T^4 \quad (4.7)$$

- Όπου P : η συνολική ισχύς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας της Γης, σε W
- σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann με τιμή ίση με $\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- A : η επιφάνεια της Γης, σε m^2
- R : η μέση ακτίνα της Γης, $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$
- T : η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης, σε K .



Ισοζύγιο ενέργειας της Γης

- Αν θεωρήσουμε ότι η Γη βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή η θερμοκρασία της δε μεταβάλλεται, τότε μπορούμε να εξισώσουμε τις σχέσεις (4.6) και (4.7):

$$(1 - \alpha)S\pi R^2 = \sigma 4\pi R^2 T^4 \Leftrightarrow (1 - \alpha)S = 4\sigma T^4 \Leftrightarrow$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{4\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,31) \cdot 1370 \text{ W/m}^2}{4 \cdot 5,670373 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)}} \Leftrightarrow$$

$$T = 254 \text{ K} = -19 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ισοζύγιο ενέργειας της Γης



- Ωστόσο, η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας του Πλανήτη Γη στις μέρες μας είναι περίπου ίση με $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Η διαφορά είναι περίπου $34\text{ }^{\circ}\text{C}$, διαφορά αρκετά σημαντική σε ότι αφορά την εμφάνιση και την ανάπτυξη της ζωής στον Πλανήτη Γη.
- **Που οφείλεται αυτή η διαφορά?**
- Δεν έχουμε λάβει υπόψη μας τις τυχόν απορροφήσεις ακτινοβολίας από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας της Γης.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου

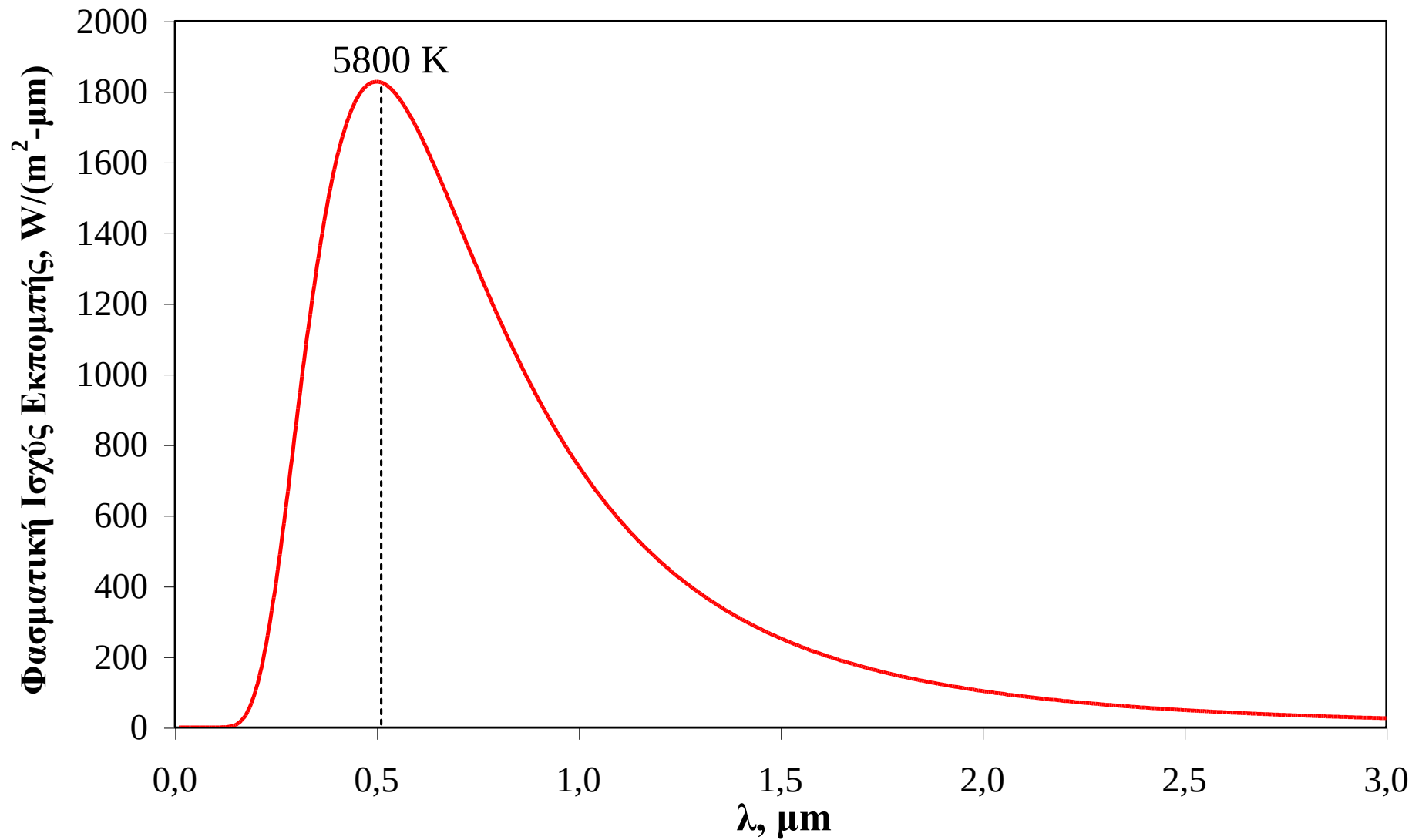


- Σύμφωνα με το νόμο μετατόπισης του Wien, το μήκος κύματος το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο της ισχύος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας ενός μελανού σώματος δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8977721 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}}{T} \quad (4.4)$$

- Ο Ήλιος είναι ένα μελανό σώμα με θερμοκρασία 5800 K.
- Άρα το μέγιστο της ακτινοβολίας είναι σε μήκος κύματος περίπου ίσο με 0,5 μm .

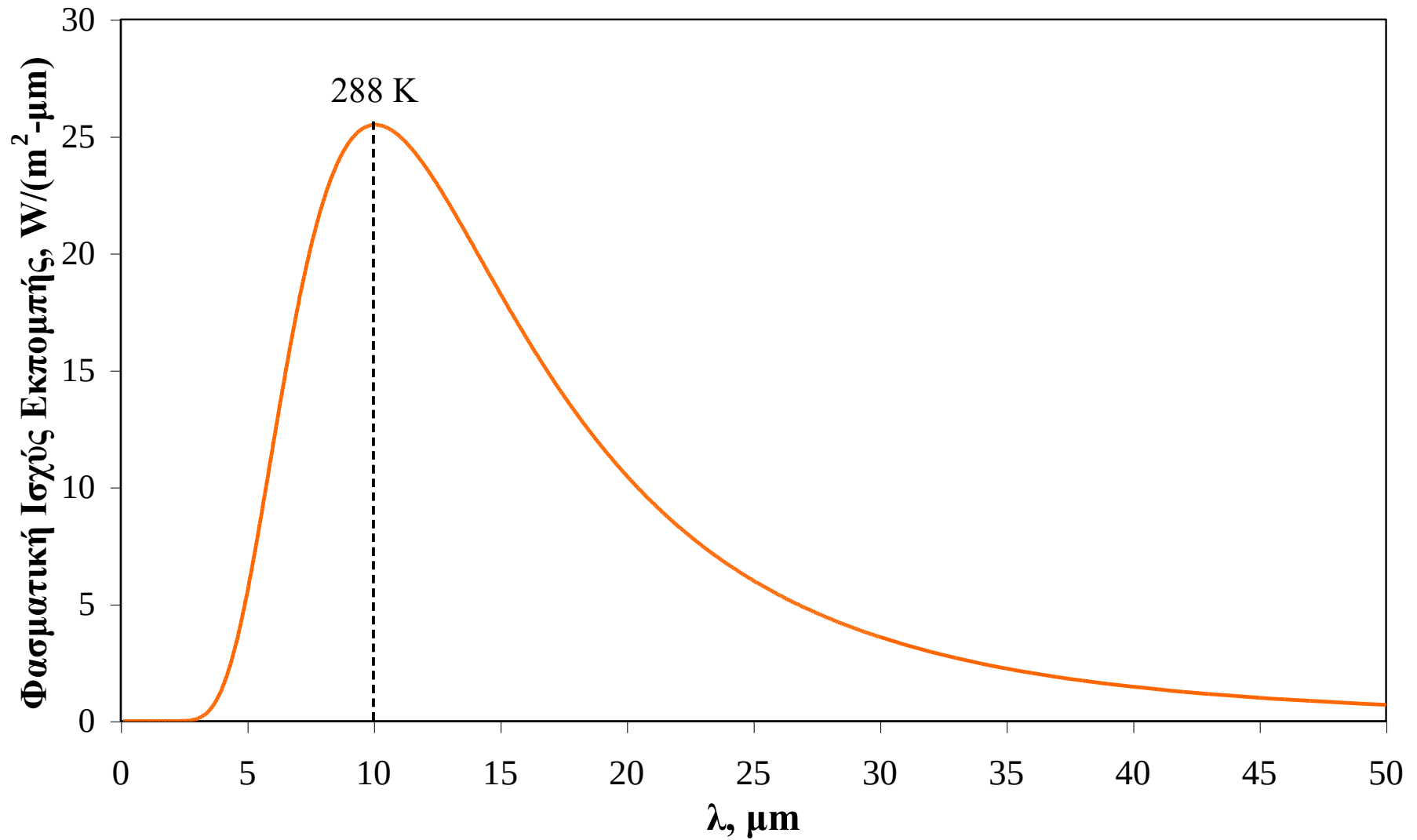
Ήλιος



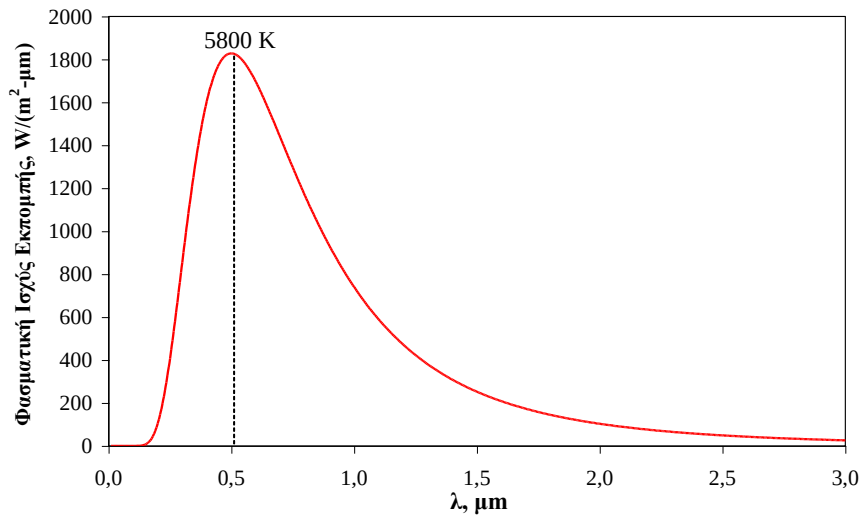
Φαινόμενο του θερμοκηπίου



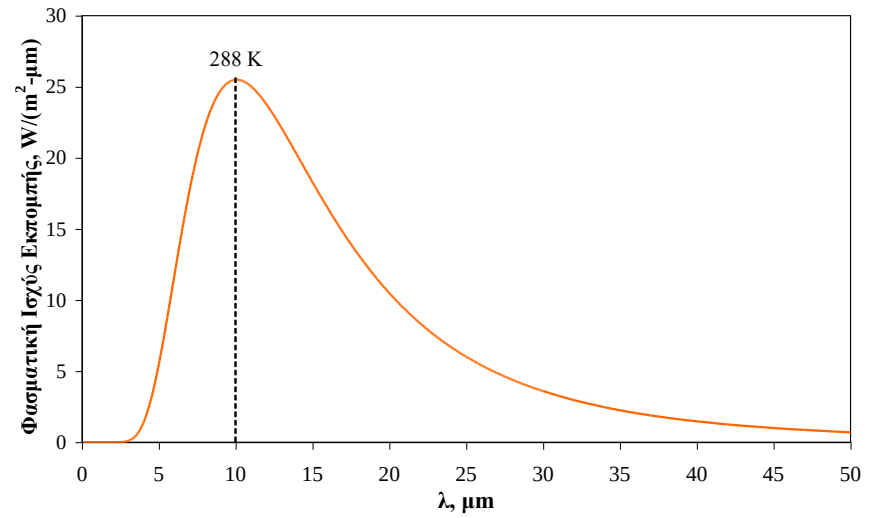
- Η Γη με μέση θερμοκρασία στην επιφάνειά της ίση με $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (288 K) θα εμφανίζει το μέγιστο της εκπομπής περίπου στα $10,1\text{ }\mu\text{m}$, δηλαδή στην **υπέρυθρη (Infrared, IR) περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος**.
- Σχεδόν όλη η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια της Γης έχει μήκη κύματος μικρότερα από $3\text{ }\mu\text{m}$.
- Σχεδόν όλη η εξερχόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της Γης έχει μήκη κύματος μεγαλύτερα από $3\text{ }\mu\text{m}$.



Ήλιος και Γη



Ήλιος

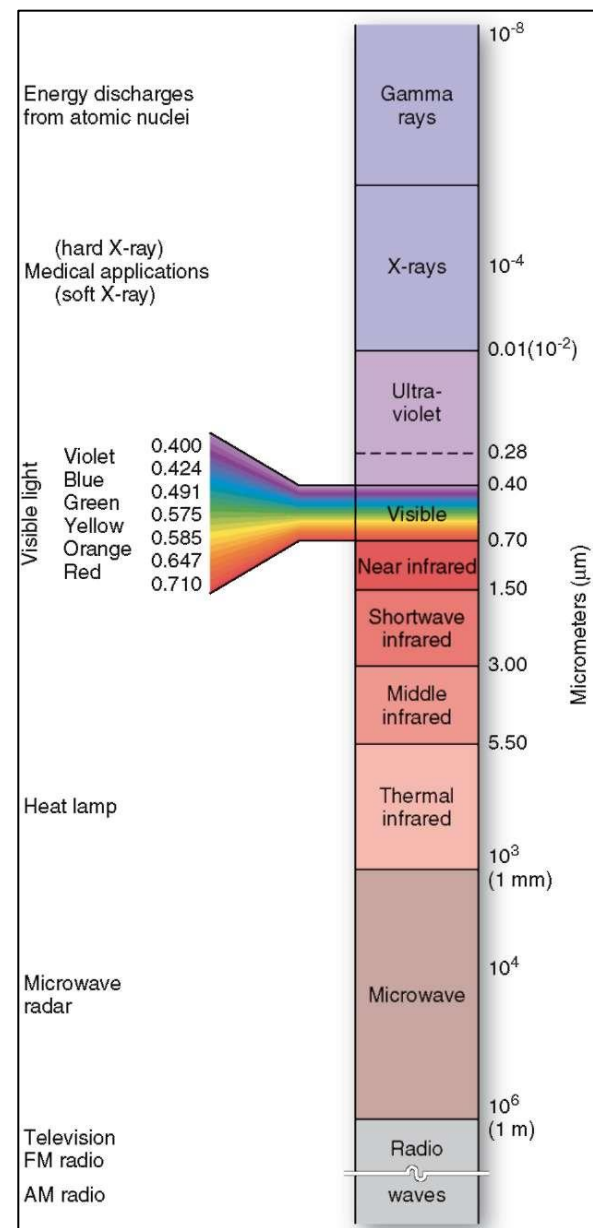


Γη

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Η υπέρυθρη περιοχή (IR) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ξεκινάει περίπου από τα $0,75 \mu\text{m}$ (750 nm) και εκτείνεται μέχρι τα $1000 \mu\text{m}$.
- Άρα μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και σχεδόν ολόκληρη η εξερχόμενη ακτινοβολία ανήκει στην περιοχή IR.



Ενέργεια

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Η θερμική ακτινοβολία την οποία εκπέμπει η Γη αλληλεπιδρά με διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας.
- Ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας ανακλάται, ένα άλλο μέρος απορροφάται από διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας, ενώ το υπόλοιπο μέρος διαφεύγει προς το διάστημα.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



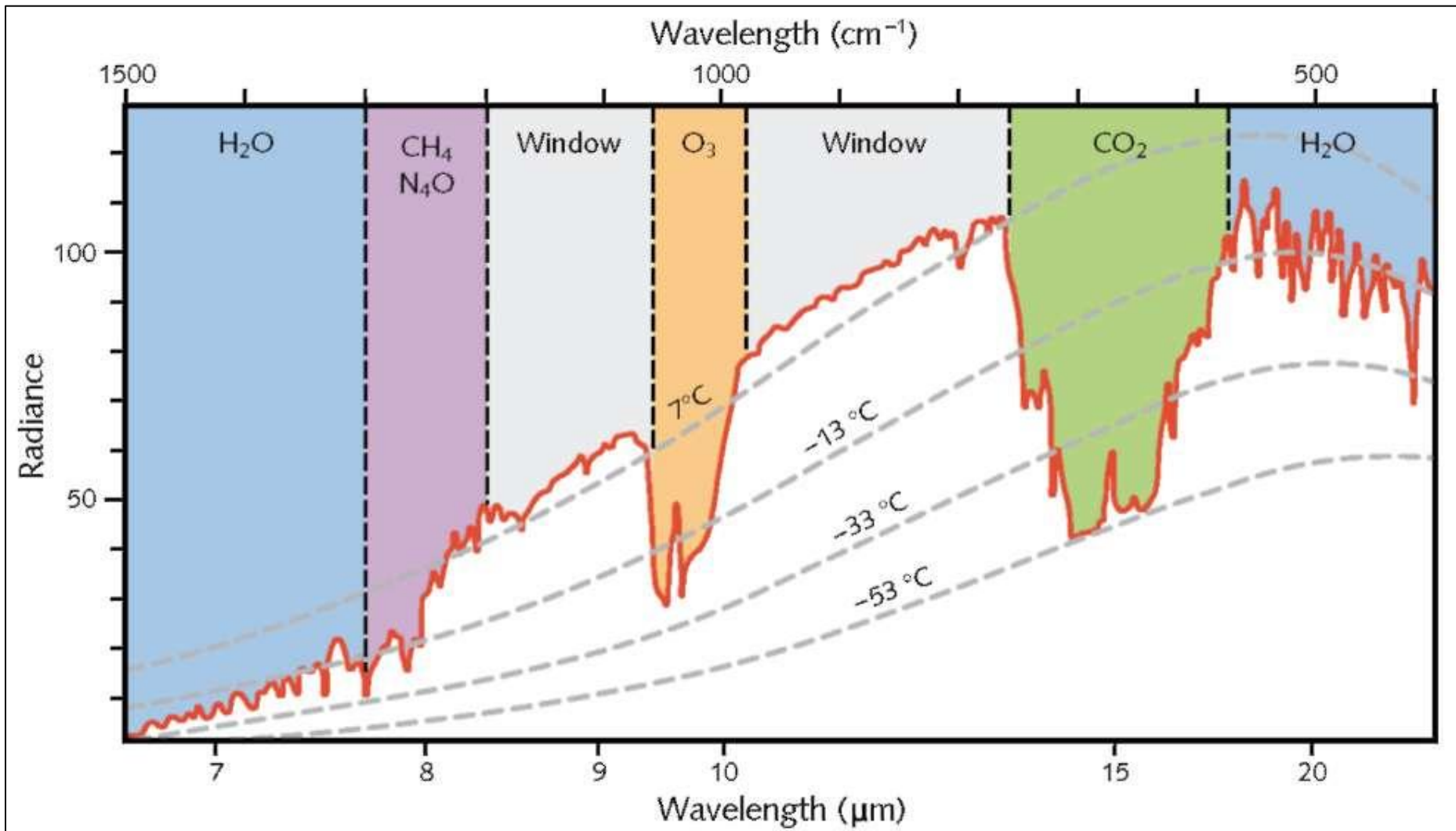
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας τα οποία απορροφούν την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία της Γης στην περιοχή του υπερύθρου.
- Η απορρόφηση αυτή λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος στην περιοχή του υπερύθρου, τα οποία εξαρτώνται από τη φύση του αερίου.



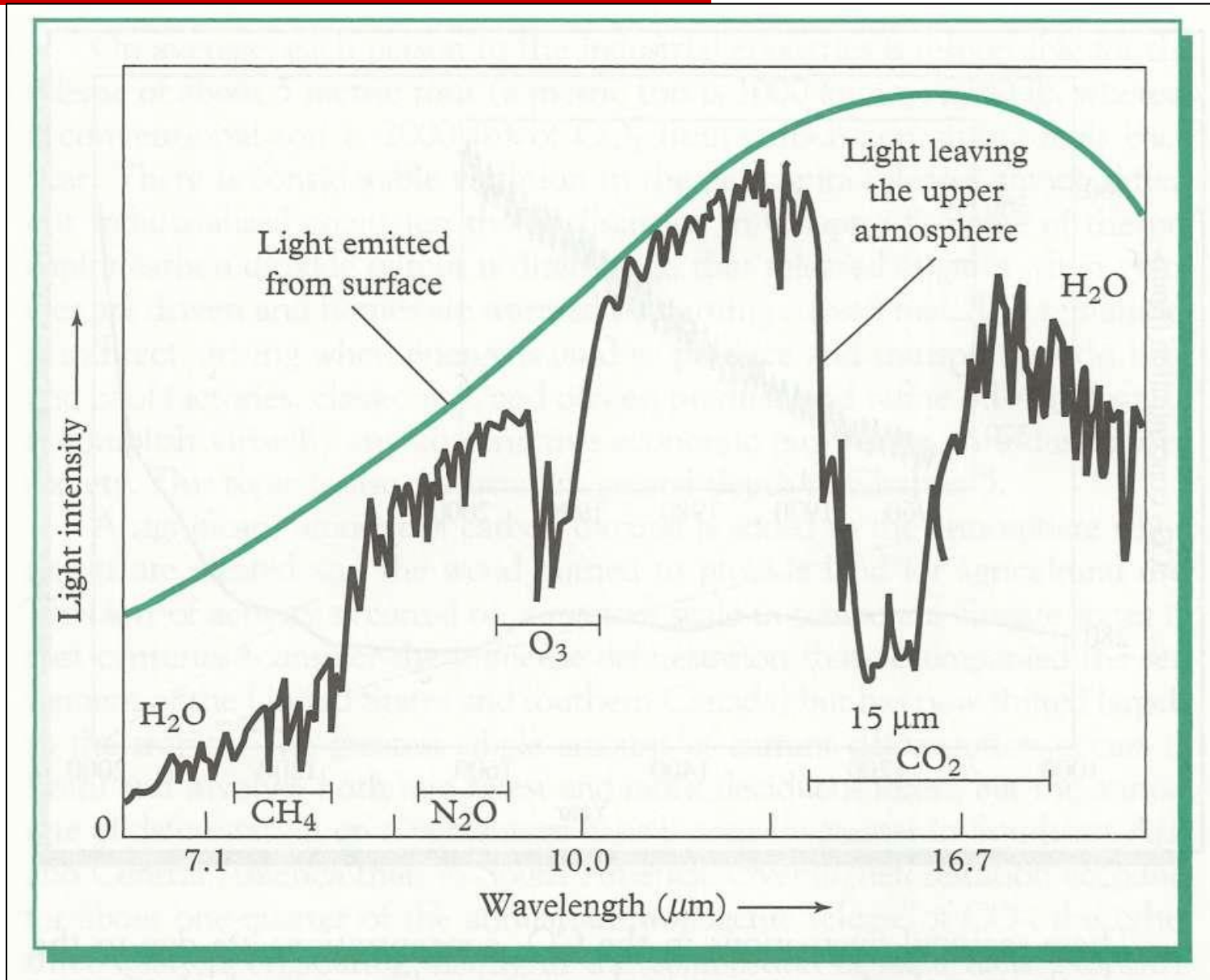
Αέρια του θερμοκηπίου

- Τα αέρια αυτά συστατικά της ατμόσφαιρας της Γης τα οποία έχουν την ιδιότητα να **απορροφούν μέρος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας της Γης στην περιοχή του υπερύθρου (IR)** είναι, κατά σειρά ελαττούμενης ικανότητας απορρόφησης, τα εξής:
 - ✓ υδρατμοί, δηλ. νερό στην αέρια φάση, $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
 - ✓ διοξείδιο του άνθρακα, CO_2
 - ✓ μεθάνιο, CH_4
 - ✓ υποξείδιο του αζώτου, N_2O
 - ✓ όζον, O_3

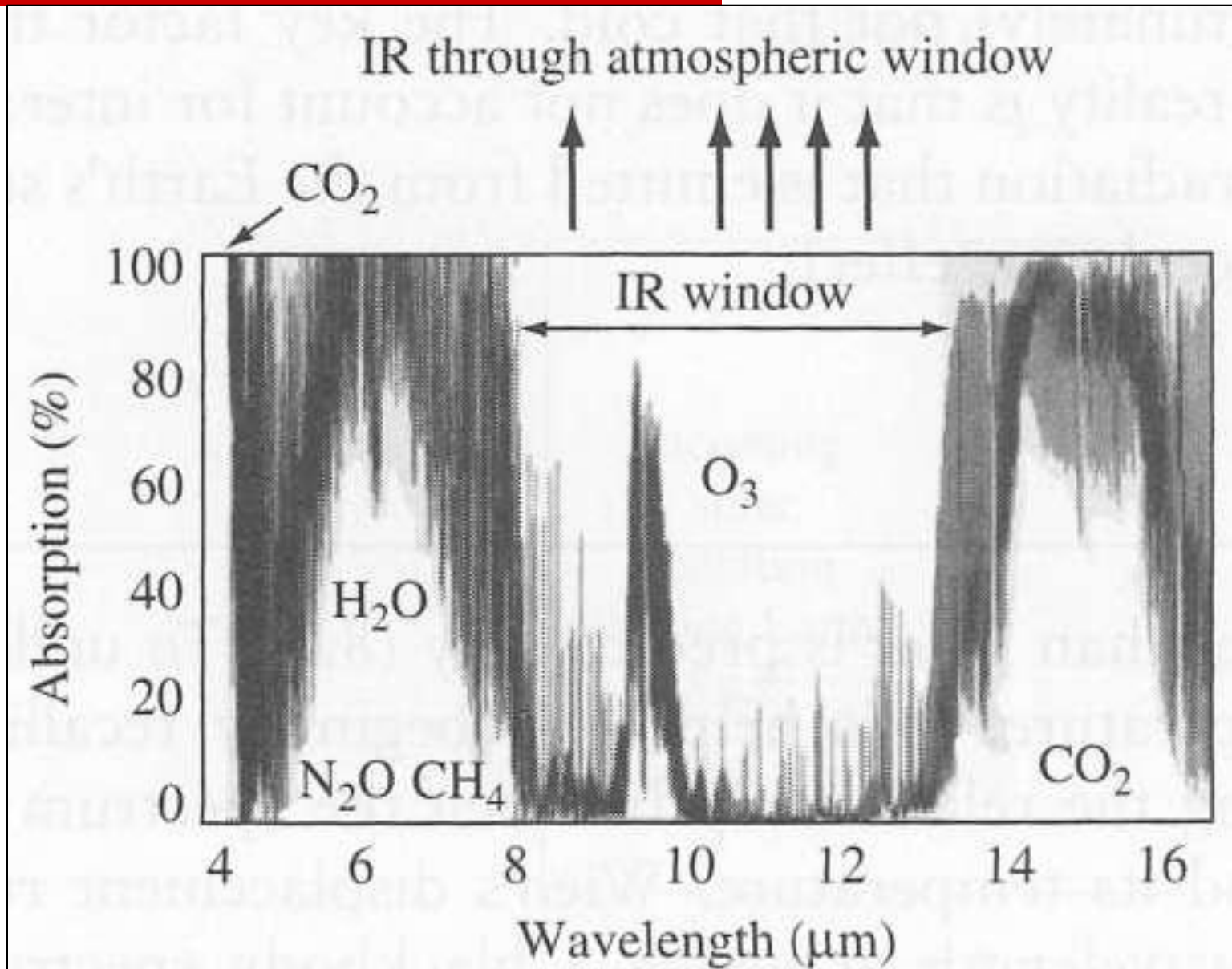
Αέρια του θερμοκηπίου



Αέρια του θερμοκηπίου



Αέρια του θερμοκηπίου





Αέρια του θερμοκηπίου

- Τα αέρια αυτά ονομάζονται **αέρια του θερμοκηπίου (greenhouse gases)**.
- Το αέριο το οποίο έχει τη μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης είναι οι **υδρατμοί, $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$** .
- Οι υδρατμοί απορροφούν ισχυρά την θερμική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τη Γη με μήκη κύματος μικρότερα από $8 \mu\text{m}$ και μεγαλύτερα από $18 \mu\text{m}$.
- Το CO_2 εμφανίζει ισχυρή απορρόφηση στην περιοχή μεταξύ $13\text{-}16 \mu\text{m}$, καθώς και στις περιοχές γύρω από τα $2,7 \mu\text{m}$ και τα $4,3 \mu\text{m}$.



Αέρια του θερμοκηπίου

- Μεταξύ 9,5 μm και 10,6 μm υπάρχει μια ζώνη απορρόφησης η οποία αντιστοιχεί στο όζον της ατμόσφαιρας.
- Στην υπόλοιπη περιοχή μεταξύ 7 μm και 13 μm , με εξαίρεση την περιοχή απορρόφησης του όζοντος, υπάρχει μια περιοχή μηκών κύματος στην οποία δεν παρατηρείται απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας.
- Η περιοχή αυτή ονομάζεται «παράθυρο» (window) ακτινοβολιών, και η θερμική ακτινοβολία με αυτά τα μήκη κύματος διαφεύγει προς το διάστημα.



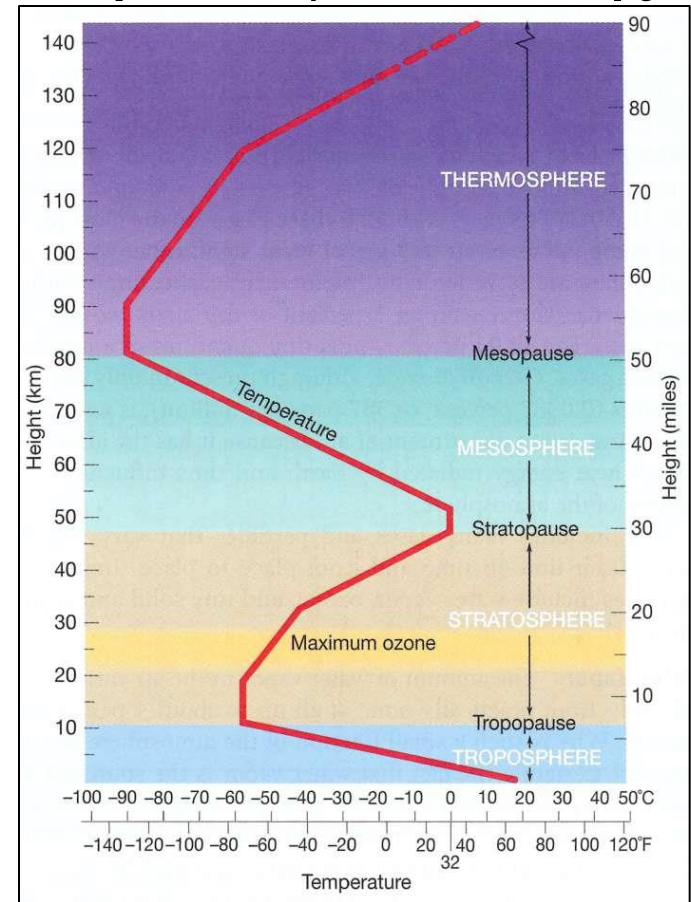
Αέρια του θερμοκηπίου

- Τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν μέρος της θερμικής ακτινοβολίας της Γης και στη συνέχεια επανεκπέμπουν μέρος αυτής της απορροφούμενης ακτινοβολίας προς το διάστημα.
- Η ποσότητα της θερμικής ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν εξαρτάται από τη θερμοκρασία τους, και μάλιστα από την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας (νόμος των Stefan-Boltzmann).

Αέρια του θερμοκηπίου



- Η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τα αέρια του θερμοκηπίου λαμβάνει χώρα κυρίως από ύψη μεταξύ 5 και 10 km από την επιφάνεια της Γης.
- Σε αυτά τα ύψη η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι από 30 °C έως 50 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης.

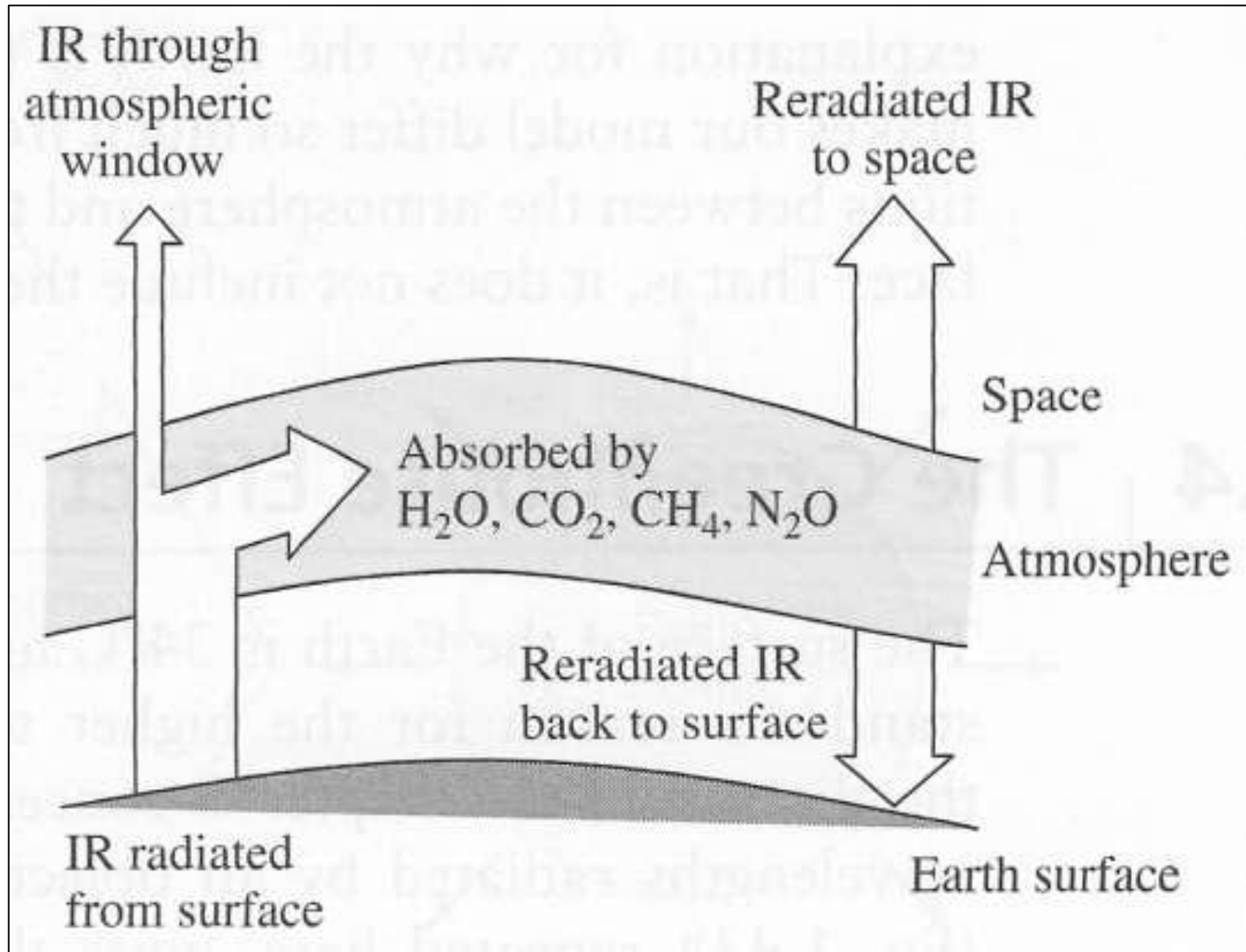




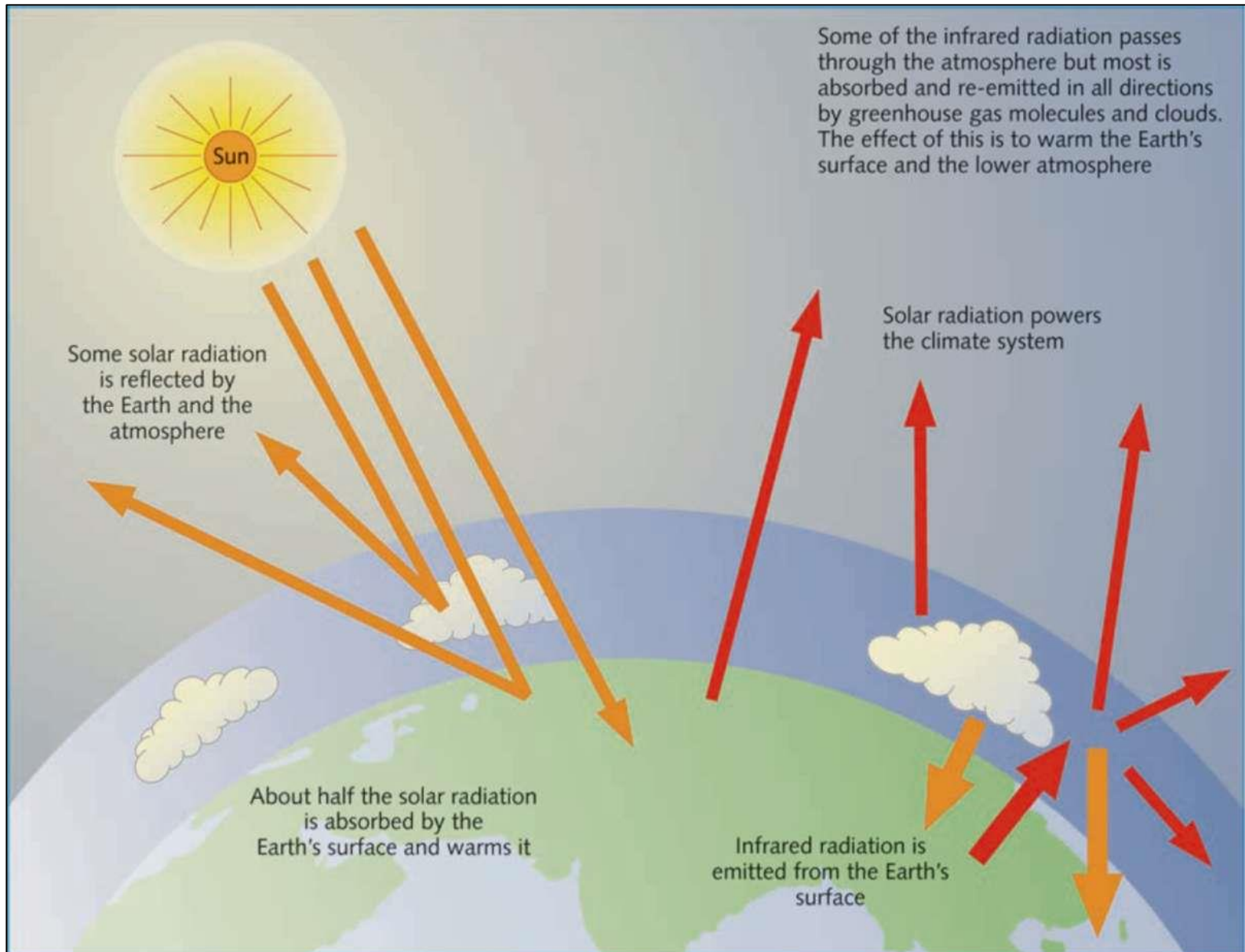
Αέρια του θερμοκηπίου

- Επειδή τα αέρια είναι πιο ψυχρά από την επιφάνεια της Γης, εκπέμπουν αντίστοιχα μικρότερη θερμική ακτινοβολία προς το διάστημα.
- Συμπερασματικά λοιπόν, **τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν μέρος της θερμικής ακτινοβολίας την οποία εκπέμπει η Γη και στη συνέχεια εκπέμπουν λιγότερη ακτινοβολία προς το διάστημα.**
- Δρουν έτσι ως ένα στρώμα το οποίο απορροφά ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολίας και θερμαίνει την ατμόσφαιρα της Γης.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



Φαινόμενο του θερμοκηπίου



Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Έτσι η θερμοκρασία της Γης είναι μεγαλύτερη κατά περίπου $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με τη θερμοκρασία που θα είχε η Γη αν δεν υπήρχαν τα αέρια αυτά στην ατμόσφαιρά της.
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φαινόμενο του θερμοκηπίου (greenhouse effect)**.
- Σε μερικές περιπτώσεις ονομάζεται **φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου (natural greenhouse effect)** με την έννοια ότι τα αέρια αυτά είναι φυσικά συστατικά της ατμόσφαιρας της Γης.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



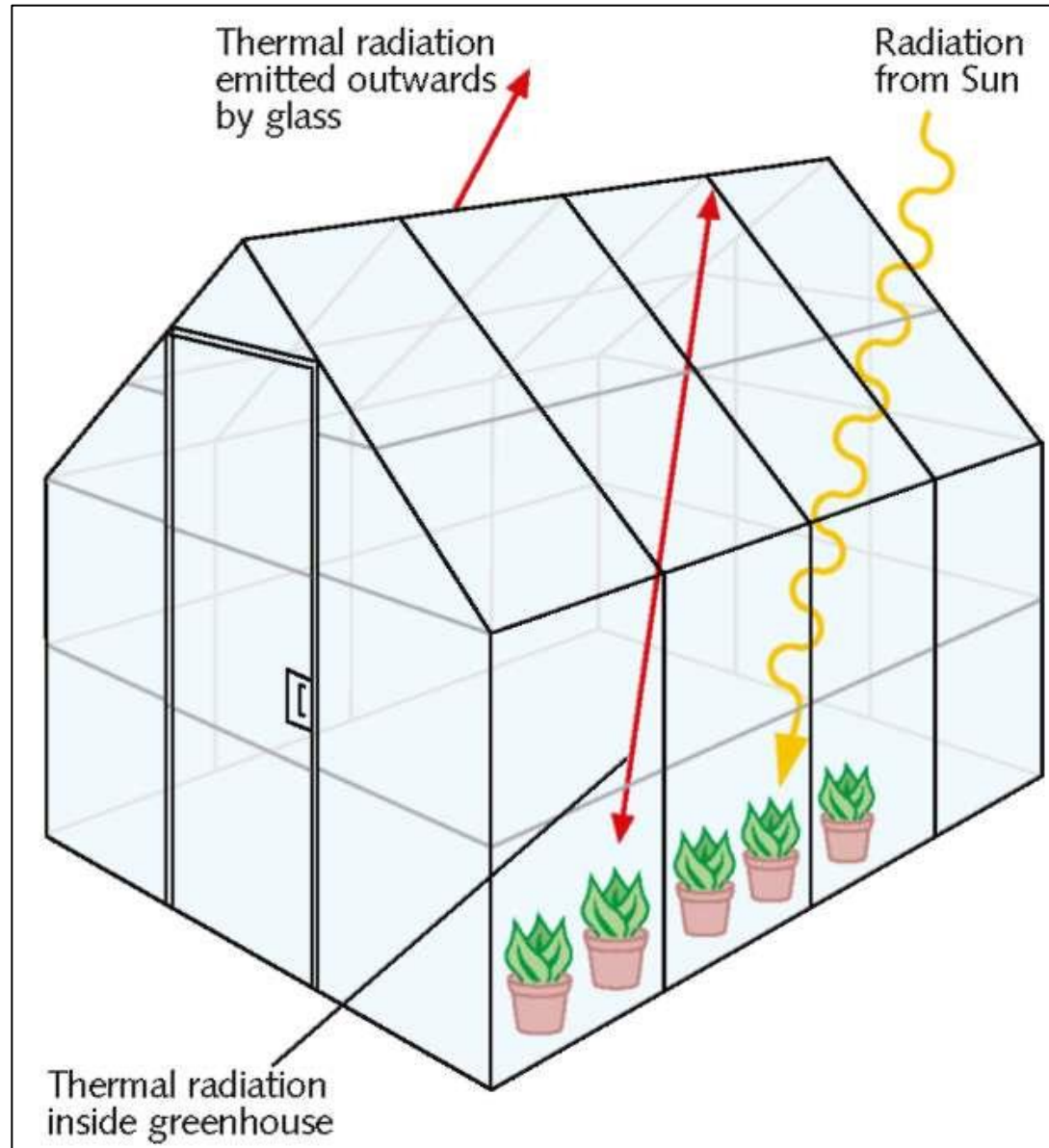
- Στις περιπτώσεις όπου διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες προκαλούν αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων αυτών στην ατμόσφαιρα, αναφερόμαστε στο **ενισχυμένο φαινόμενο του θερμοκηπίου (enhanced greenhouse effect)**.
- Τέτοιου είδους αέρια είναι κυρίως το CO_2 και το CH_4 , καθώς και μερικά άλλα αέρια σε μικρότερο ποσοστό.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Το φαινόμενο πήρε το όνομά του από το αντίστοιχο φαινόμενο το οποίο παρατηρείται στα θερμοκήπια.
- Το γυαλί, το οποίο συνήθως σκεπάζει τα θερμοκήπια, απορροφά την θερμική ακτινοβολία την οποία εκπέμπει η Γη στην περιοχή του υπερύθρου, κατά τρόπο αντίστοιχο με τα προαναφερθέντα αέρια.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



Φαινόμενο του θερμοκηπίου



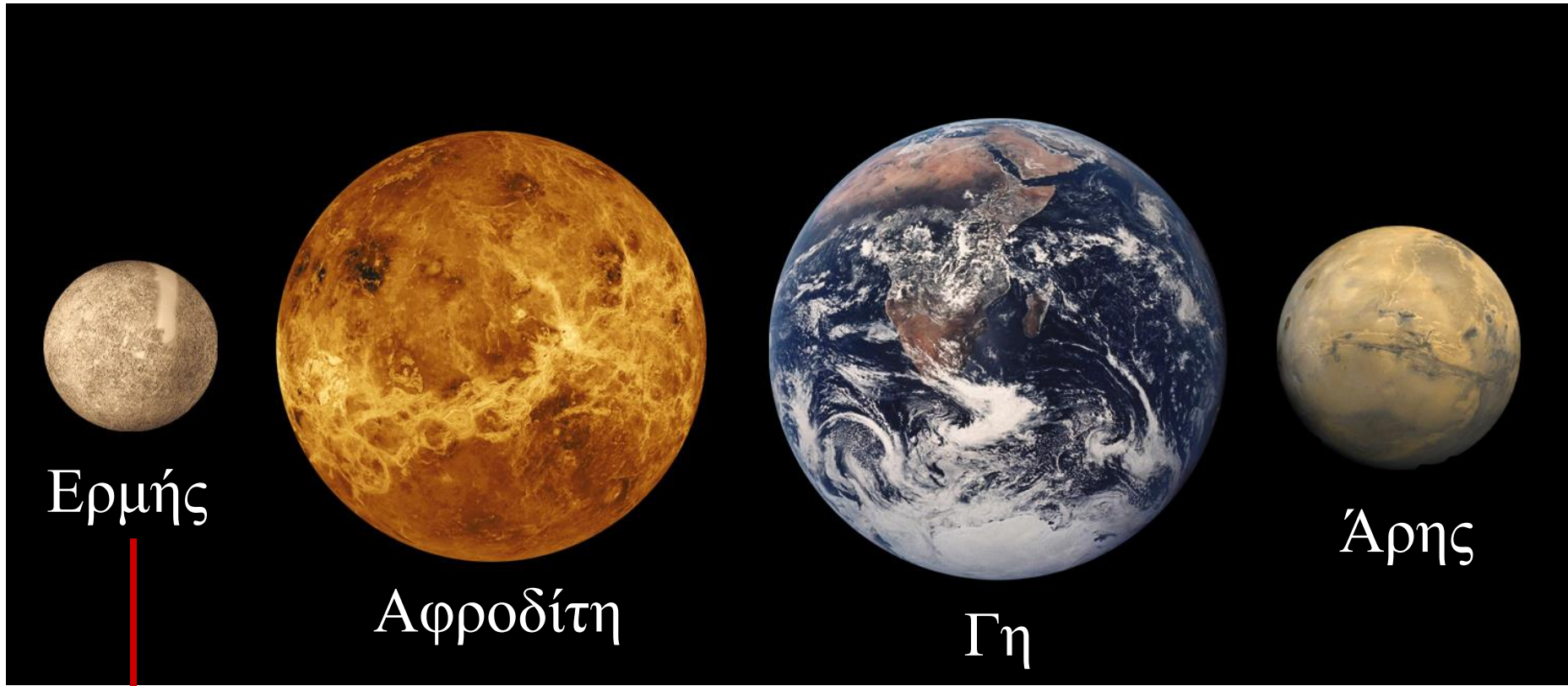
- Αυτή η παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με την παγίδευση του αέρα μέσα στον κλειστό χώρο του θερμοκηπίου, είναι υπεύθυνη για την αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο.
- Το ίδιο συμβαίνει αν αφήσετε το αυτοκίνητό σας το καλοκαίρι κάτω από την Ήλιο με κλειστά παράθυρα: η θερμοκρασία στο εσωτερικό του ανέρχεται κατά πολύ!!!

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Αν η Γη δεν είχε τα αέρια του θερμοκηπίου τότε η μέση θερμοκρασία στην επιφάνειά της θα ήταν περίπου -19°C (254 K).
- Κατά συνέπεια το μέγεθος του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου στον Πλανήτη Γη ισούται με περίπου 34°C .
- Αντίστοιχα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα στην Αφροδίτη και στον Άρη.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



Ερμής

Αφροδίτη

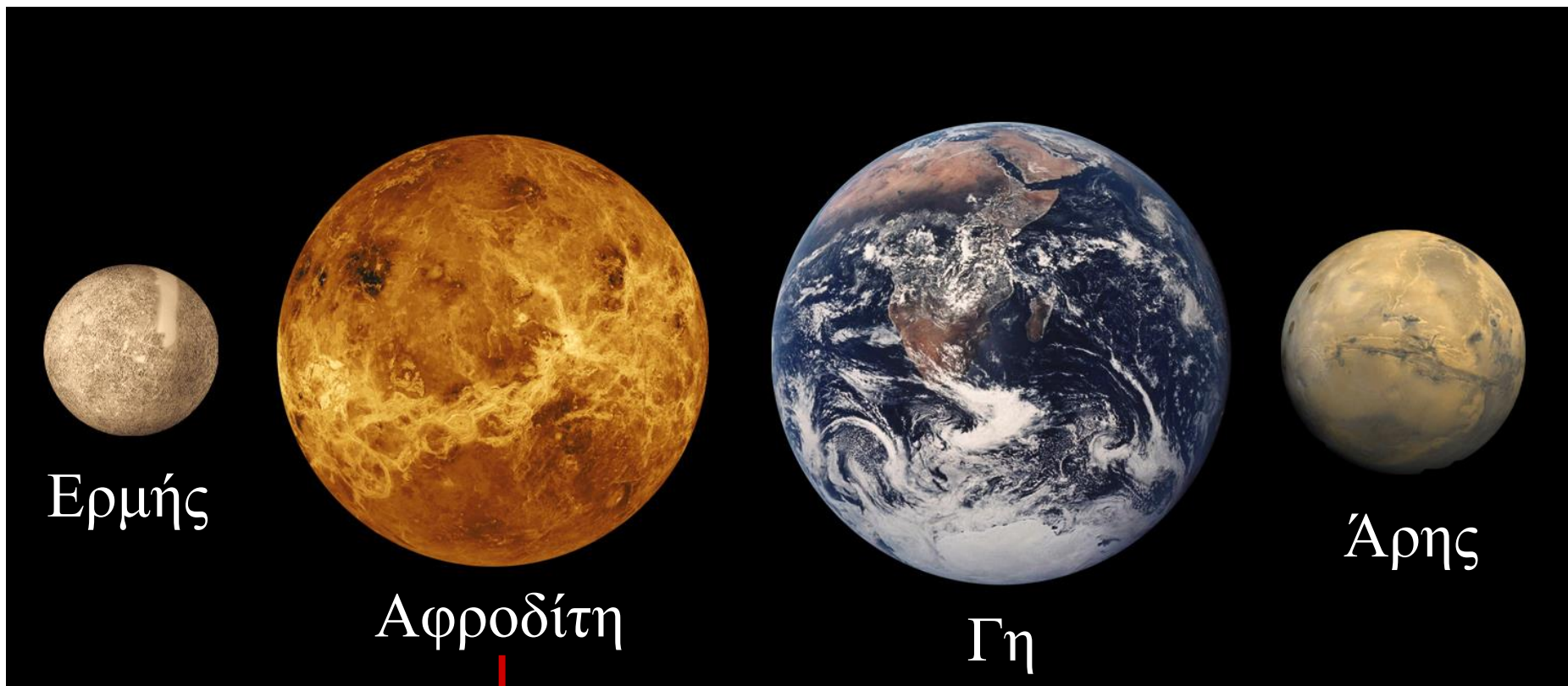
Γη

Άρης

δεν έχει ατμόσφαιρα
θερμοκρασία:

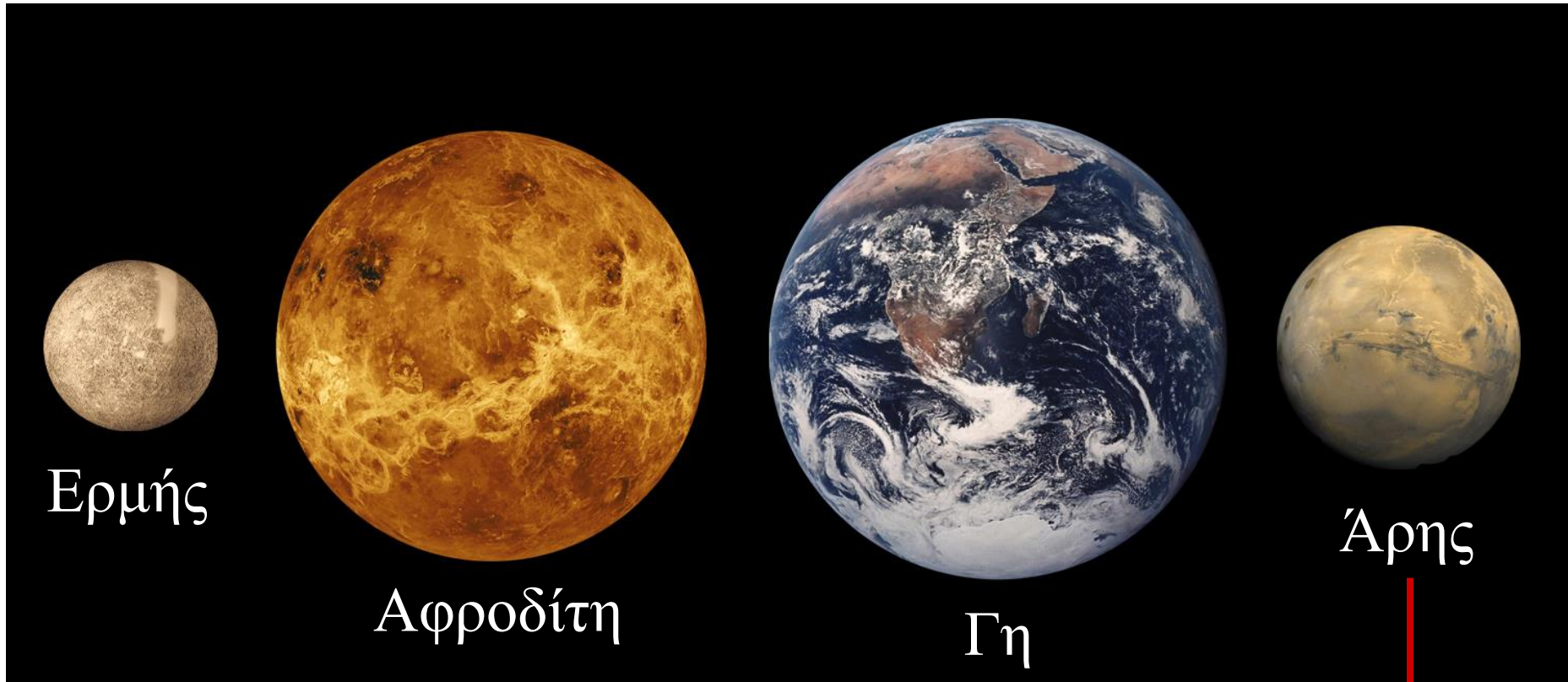
- ✓ ημέρα: $350\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ✓ νύχτα: $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



↓
πυκνή ατμόσφαιρα: πυκνά νέφη από CO_2 (96,5%) και N_2 (3,5%),
τα νέφη περιέχουν σταγόνες θειικού οξέος (H_2SO_4)!!!
ατμοσφαιρική πίεση: 90 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της Γης
θερμοκρασία: 460 °C!!!

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



Ερμής

Αφροδίτη

Γη

Άρης

αραιή ατμόσφαιρα: CO_2 (95,3%), N_2 (2,7%) και άλλα αέρια (2%)

ατμοσφαιρική πίεση: περίπου το 0,6% της πίεσης της Γης

θερμοκρασία: $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



Πλανήτης	Απόσταση από τον Ήλιο (10^6 km)	Ατμοσφ. Πίεση, σε atm	Ηλιακή Σταθερά, S, σε W/m^2	Albedo	Επιφαν. Θερμοκρ. σε K	Θέρμανσ. λόγω του φαινομ. θερμοκηπ.
Αφροδίτη	108	90	2620	0,59	733	470
Γη	150	1	1361	0,31	288	34
Άρης	228	0,006	589	0,15	250	33

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Ιδιαίτερα στην Αφροδίτη, της οποίας η ατμόσφαιρα περιέχει CO_2 σε ποσοστό πάνω από 96% και ατμοσφαιρική πίεση περίπου 90 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της Γης, το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά $470\text{ }^\circ\text{C}!!!$
- Η ατμόσφαιρα του Άρη είναι ιδιαίτερα αραιή (μόλις το 0,6% της Γήινης ατμόσφαιρας) και παρά το ότι αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από CO_2 , το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι σημαντικά μικρότερο.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο.
- Εξαιτίας του, η θερμοκρασία της Γης είναι κατά $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου υψηλότερη από ότι θα ήταν αν δεν υπήρχαν τα αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα της Γης.
- Ωστόσο διάφορες ανθρωπογενείς πηγές συνεισφέρουν στην αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.
- Η αύξηση αυτή οδηγεί στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του Πλανήτη Γη.

Φαινόμενο του θερμοκηπίου



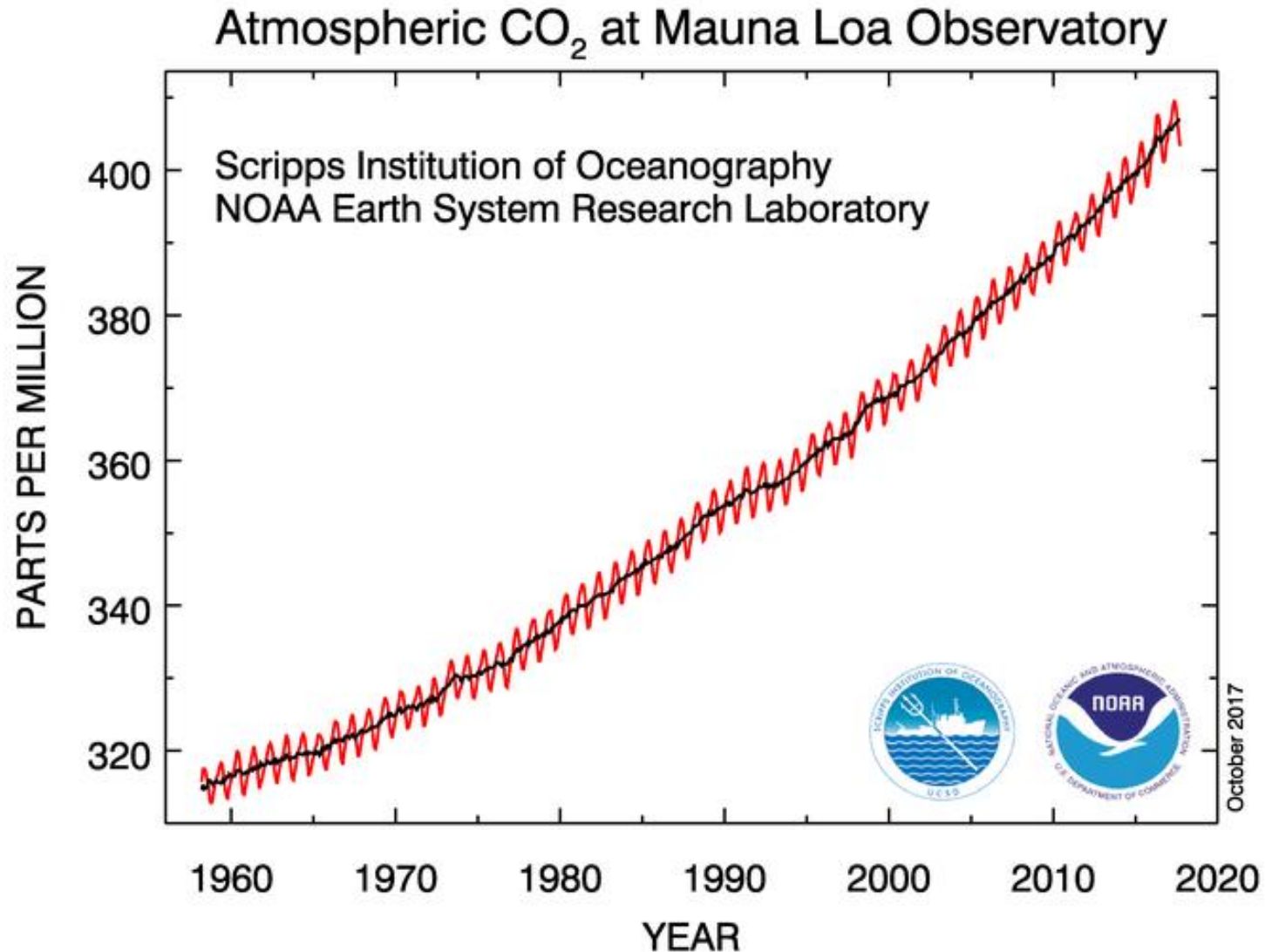
- Τα σημαντικότερα αέρια το οποία συνεισφέρουν στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι:
- ✓ διοξείδιο του άνθρακα, CO_2 : 72%
- ✓ μεθάνιο, CH_4 : 21%
- ✓ υποξείδιο του αζώτου, N_2O : 7%
- ✓ χλωροφθοράνθρακες (chlorofluorocarbons, CFCs)
- ✓ διάφορα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, γνωστά ως **αερολύματα (aerosols)**.

Διοξείδιο του άνθρακα, CO₂

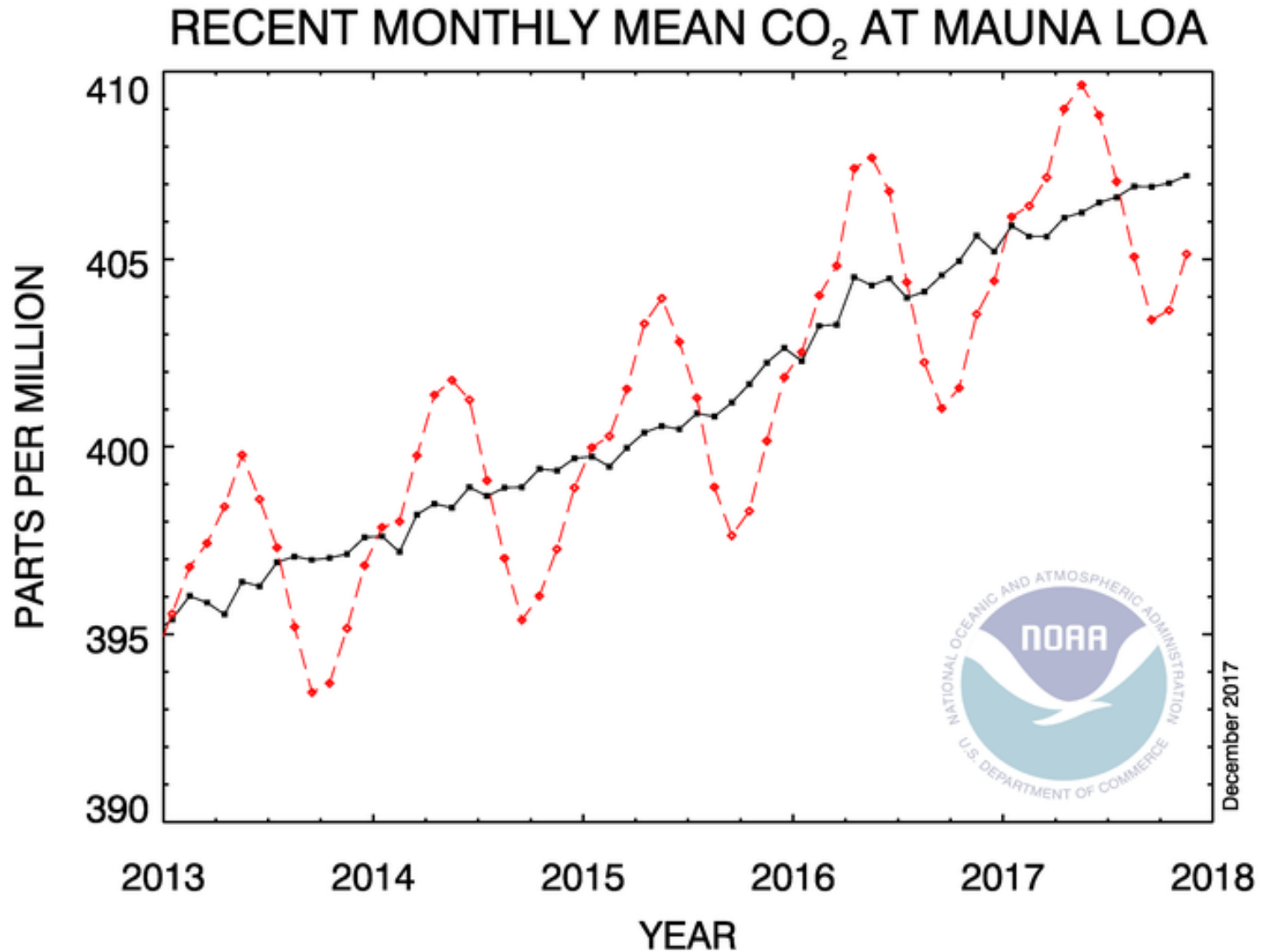


- Λόγω της καύσης των ορυκτών υδρογονανθράκων (πετρελαίου, φυσικού αερίου και γαιάνθρακα) η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα αυξάνεται συνεχώς από τη βιομηχανική επανάσταση και μετά.
- Οι πρώτες ακριβείς μετρήσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και συνεχίζονται ως τις μέρες μας.

CO₂ στην ατμόσφαιρα, Keeling curve



Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



- Η διακύμανση των τιμών προκαλείται από εποχιακές μεταβολές στην ταχύτητα της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής των φυτών.
- Κατά τη φωτοσύνθεση τα φυτά δεσμεύουν CO₂ από την ατμόσφαιρα και υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας σχηματίζονται υδατάνθρακες και οξυγόνο:

Φωτοσύνθεση:



Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



- Την άνοιξη και το καλοκαίρι οι ρυθμοί φωτοσύνθεσης αυξάνονται και η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα μειώνεται.
- Στο Βόρειο Ημισφαίριο, η ελάχιστη τιμή κατ' έτος παρατηρείται συνήθως κατά τον Οκτώβριο.
- Η αντίστροφη διαδικασία είναι η αναπνοή κατά την οποία οι ζωντανοί οργανισμοί παράγουν την ενέργεια η οποία απαιτείται για να διατηρηθούν στη ζωή.
- Κατά την αναπνοή, οι ζωντανοί οργανισμοί προσλαμβάνουν οξυγόνο και διασπούν την οργανική ύλη σε CO₂ και νερό.

Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



Αναπνοή:



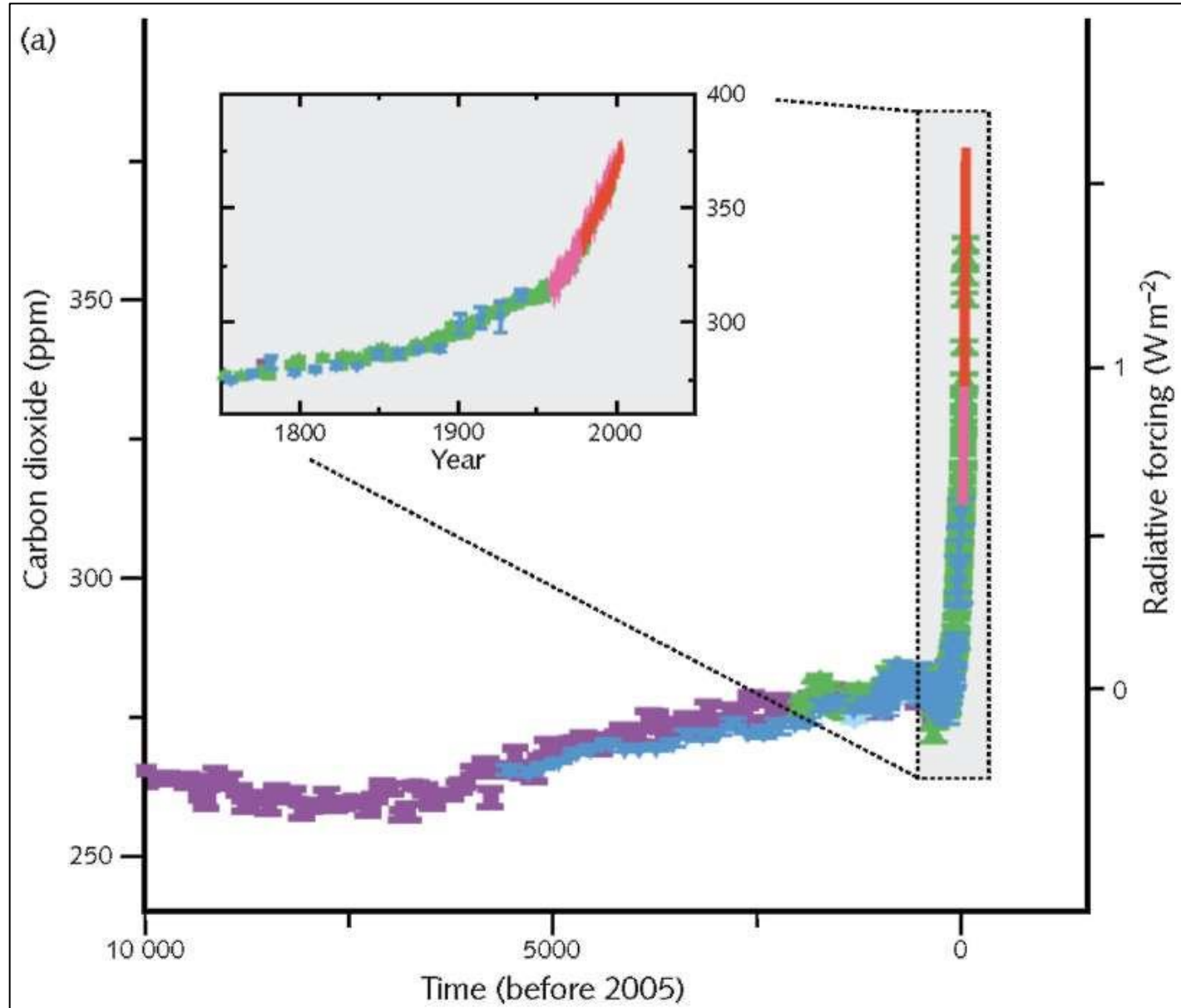
- Όταν η ταχύτητα της αναπνοής είναι μεγαλύτερη από αυτήν της φωτοσύνθεσης, όπως συμβαίνει το φθινόπωρο και το χειμώνα, η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα αυξάνεται.
- Στο Βόρειο Ημισφαίριο, η μέγιστη τιμή κατ' έτος παρατηρείται συνήθως κατά το Μάιο.

Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



- Έτσι, ο άνθρακας μεταφέρεται συνεχώς από την ατμόσφαιρα στην τροφική αλυσίδα μέσω της φωτοσύνθεσης, και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής.
- Έτσι είχε αποκατασταθεί μια ισορροπία και η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα παρέμενε πρακτικά σταθερή για χιλιάδες χρόνια μέχρι πριν από τη βιομηχανική επανάσταση.
- Ωστόσο, στις μέρες μας η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί κατά περίπου 40% σε σχέση με την προ-βιομηχανική περίοδο.

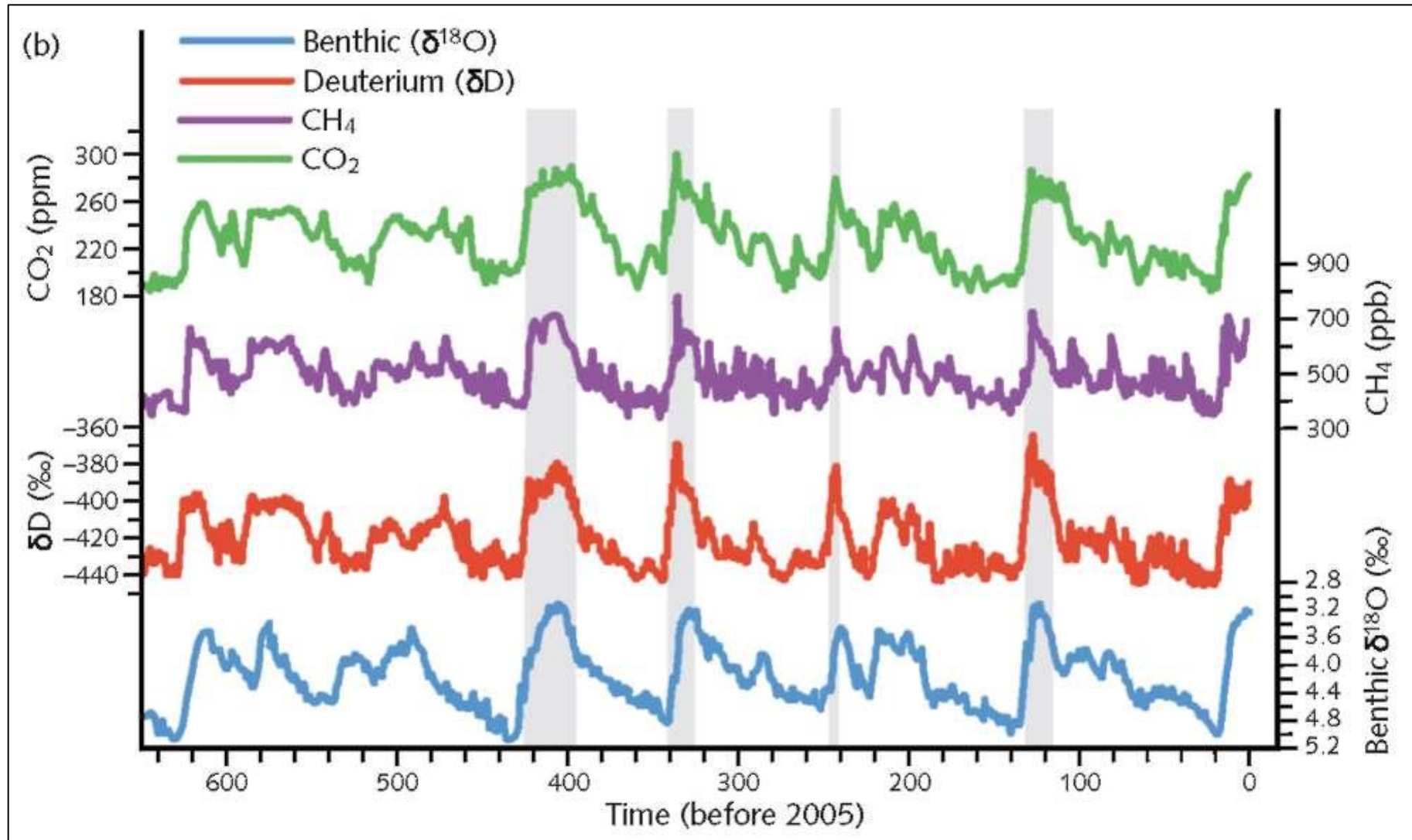
Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



Πυρήνες πάγου από την Ανταρκτική

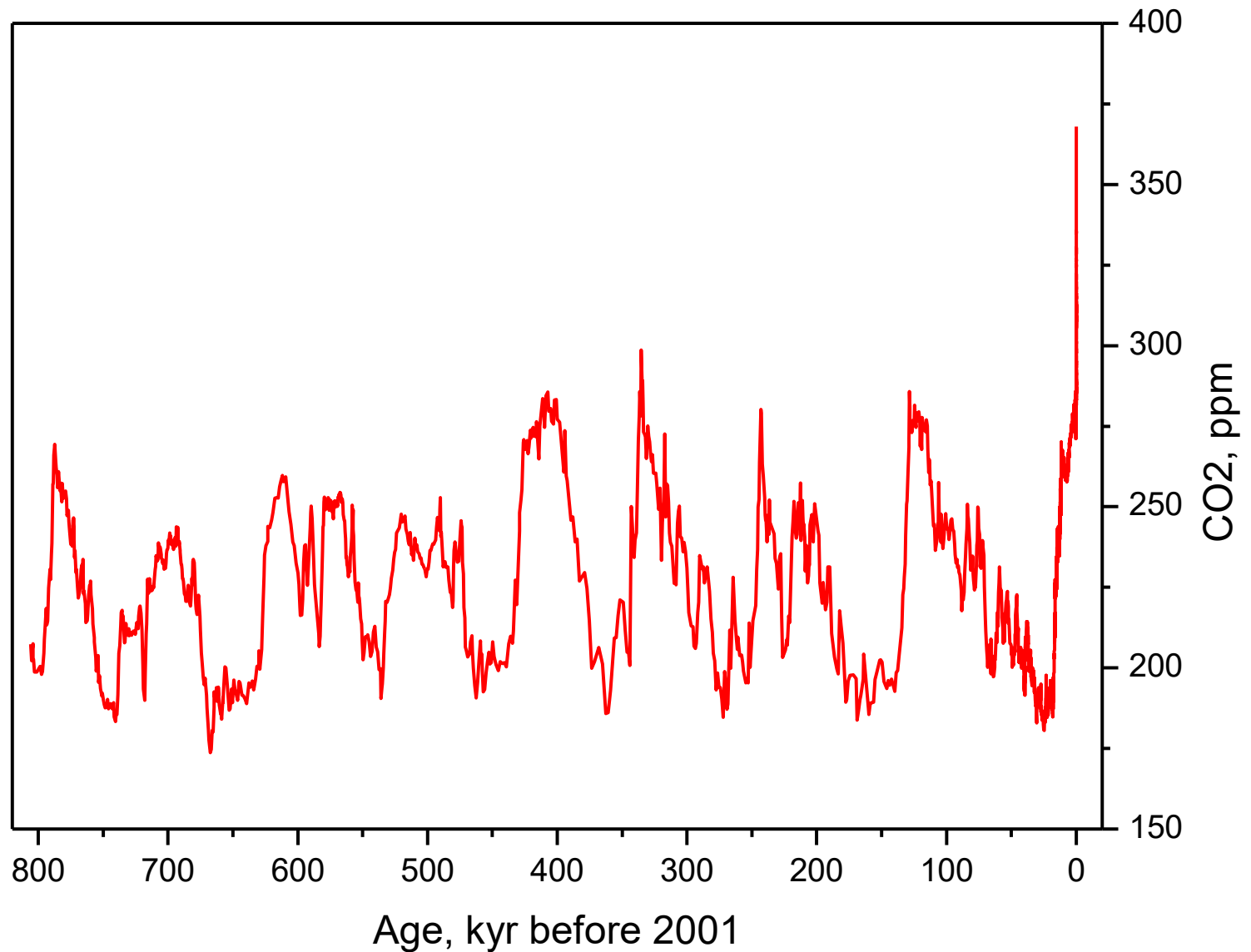


Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα

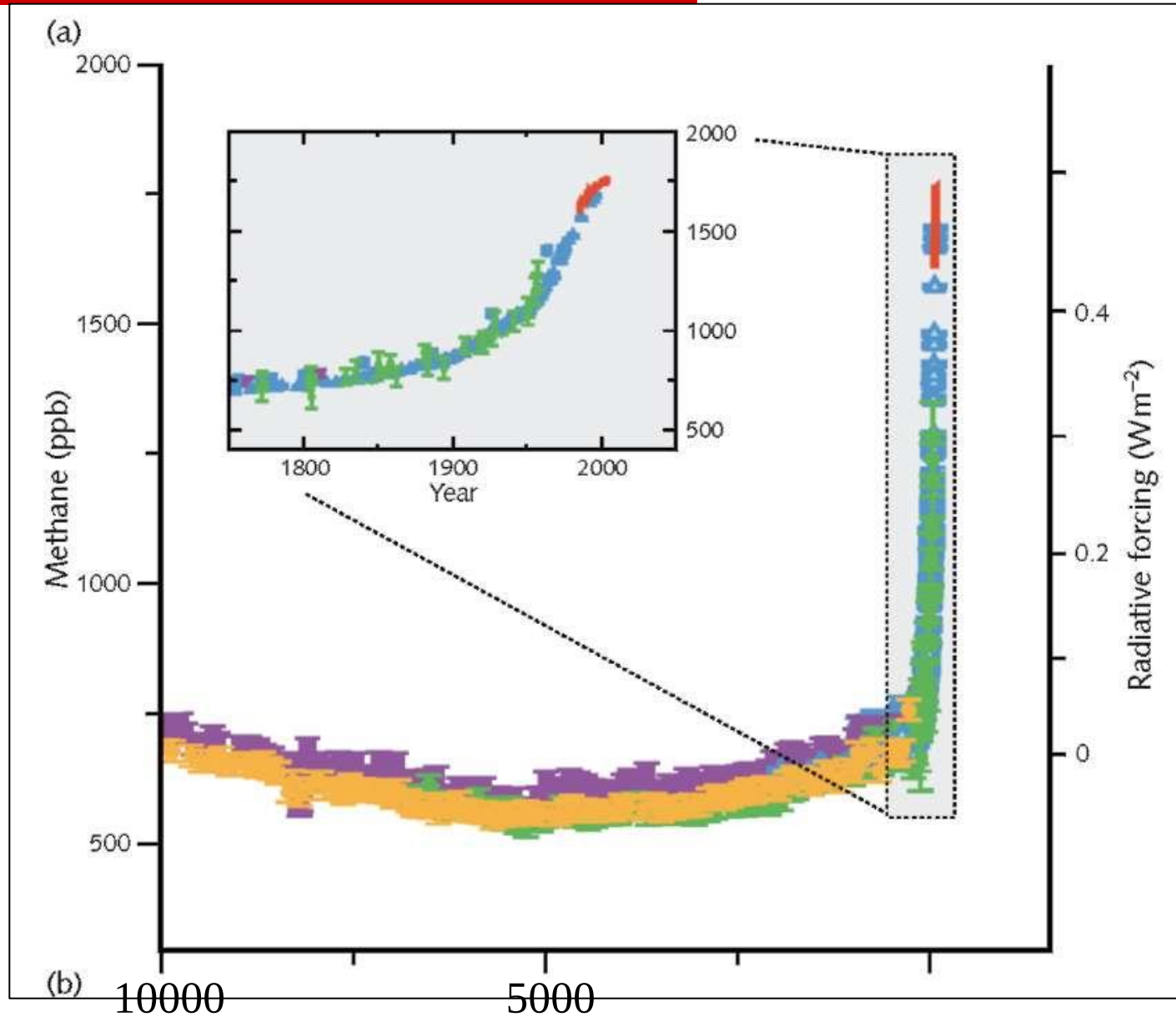


Οι τιμές είναι σε χιλιάδες χρόνια πριν από το 2005

Συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα



Συγκέντρωση του CH₄ στην ατμόσφαιρα

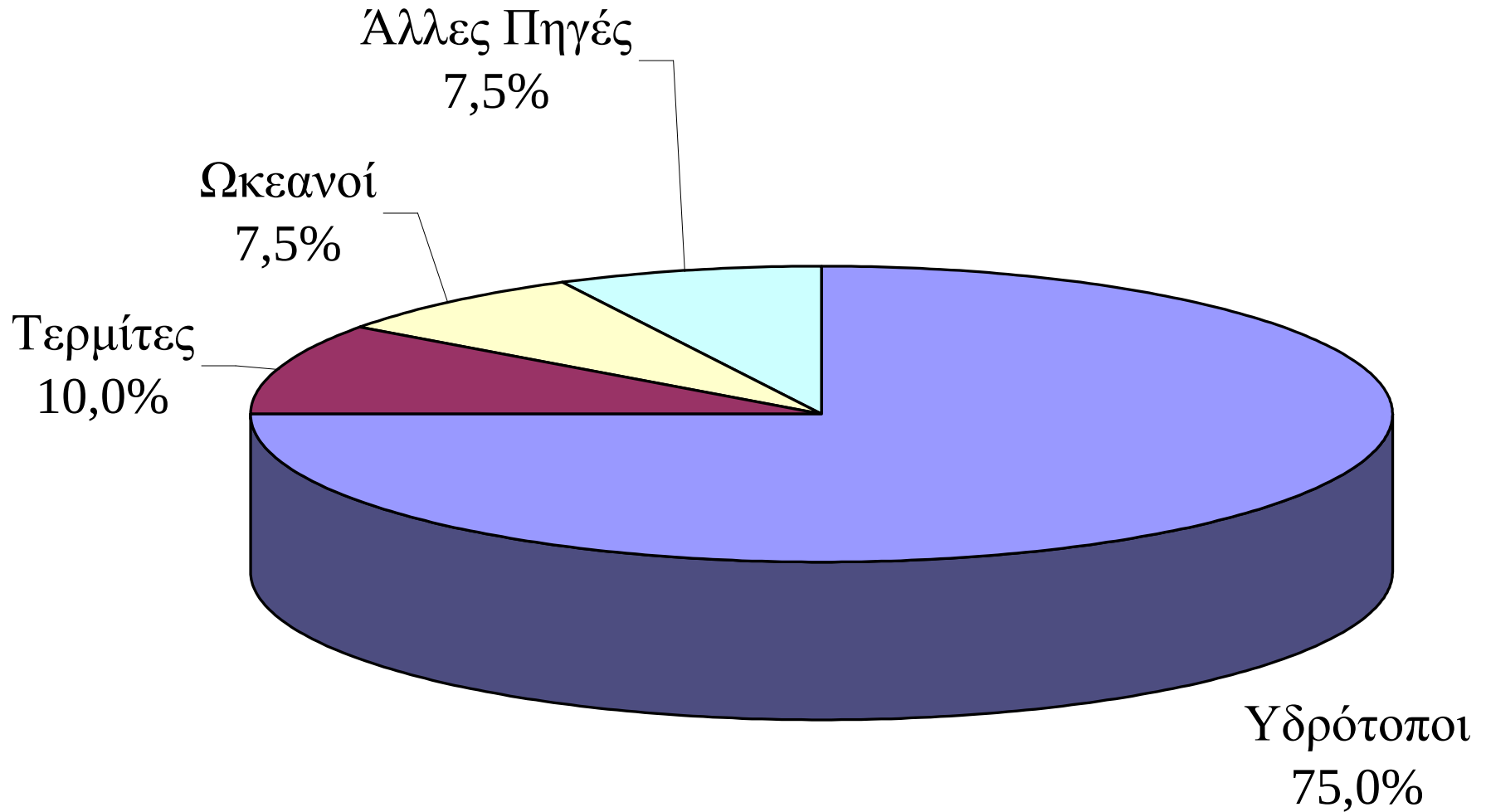




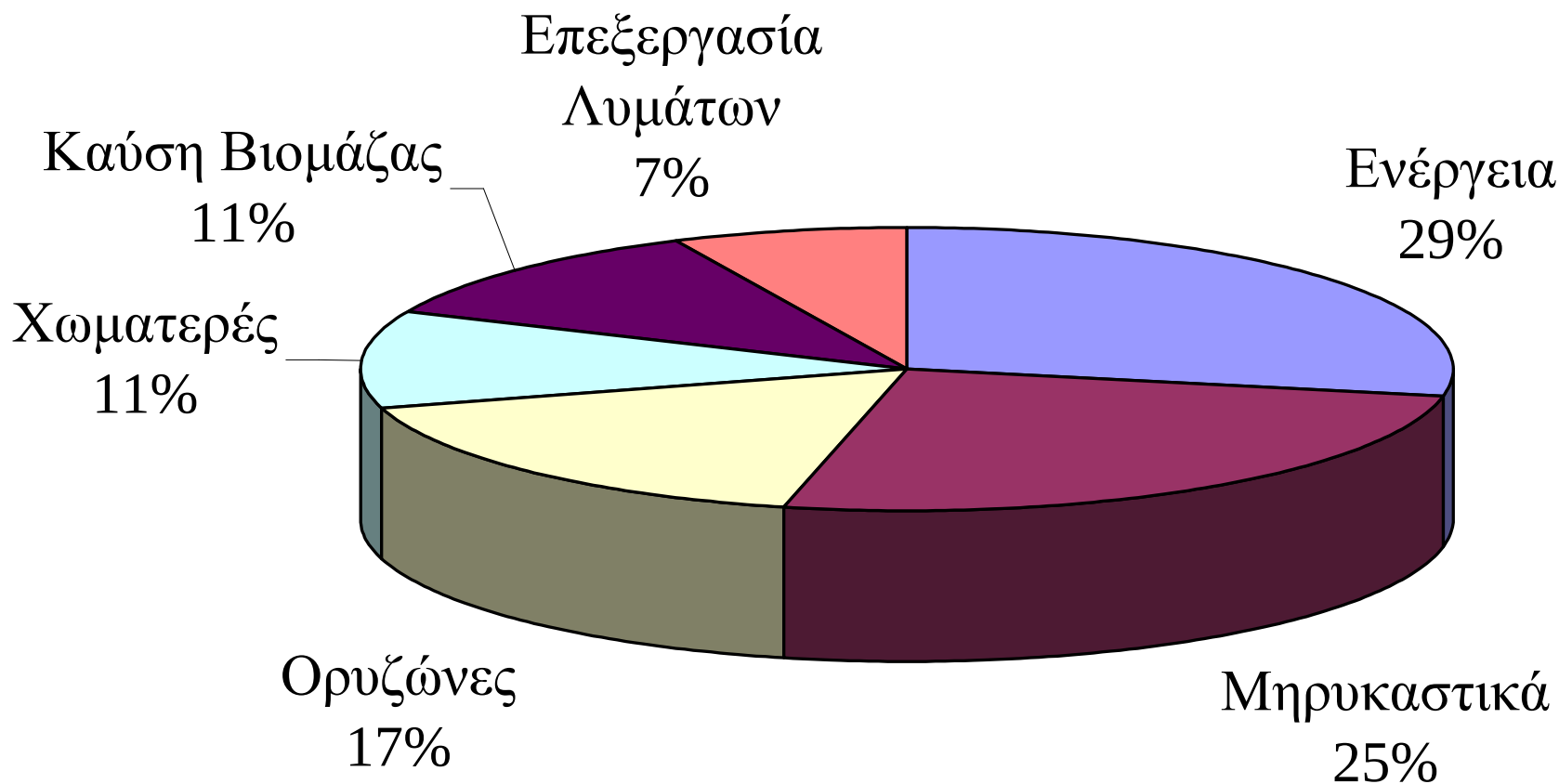
Πηγές μεθανίου στην ατμόσφαιρα

- Το μεθάνιο στην ατμόσφαιρα προέρχεται από:
- ✓ φυσικές πηγές: 36%
- ✓ ανθρωπογενείς πηγές: 64%

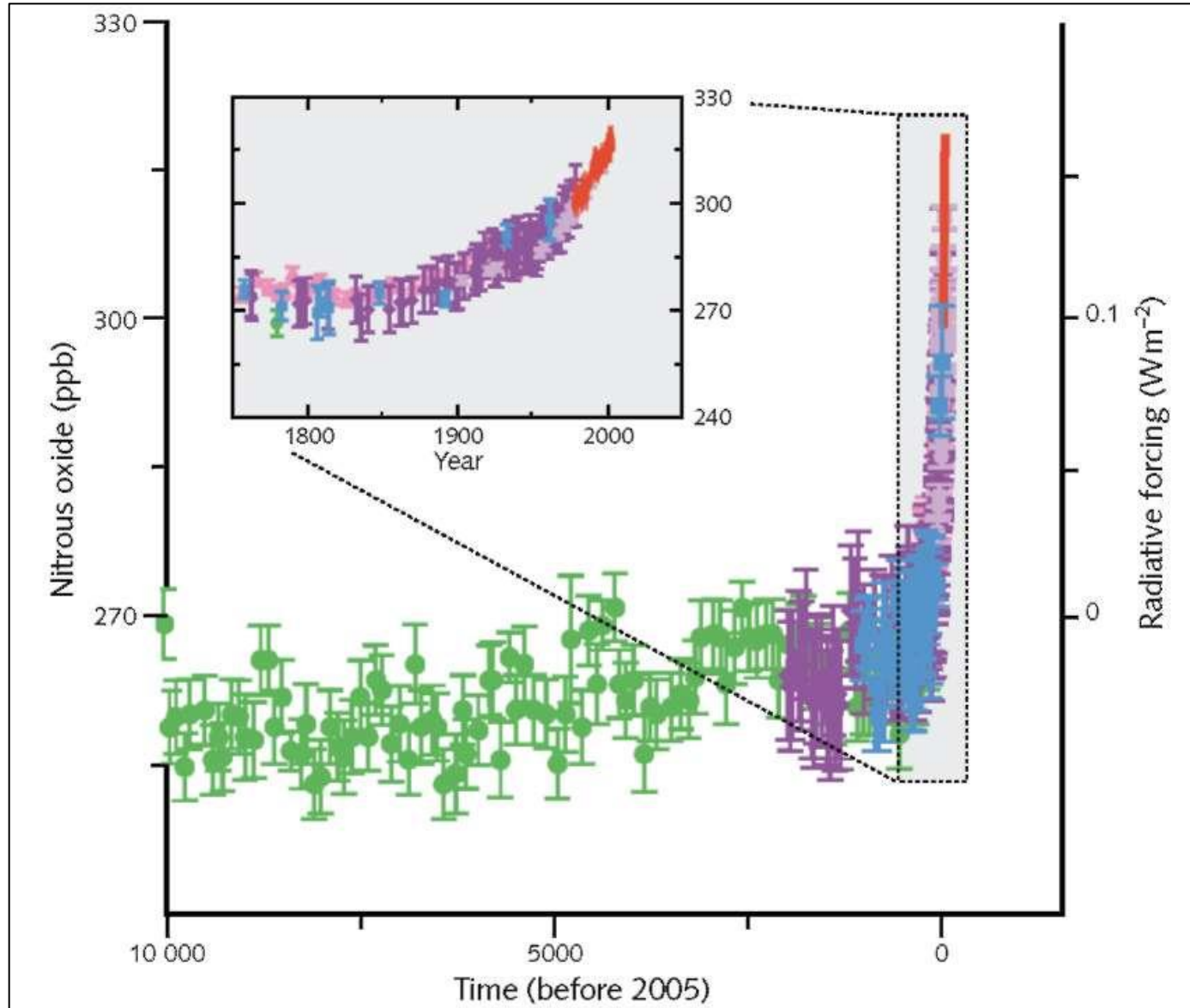
Φυσικές πηγές CH₄ στην ατμόσφαιρα



Ανθρωπογενείς πηγές CH₄ στην ατμόσφαιρα



Συγκέντρωση του N_2O στην ατμόσφαιρα

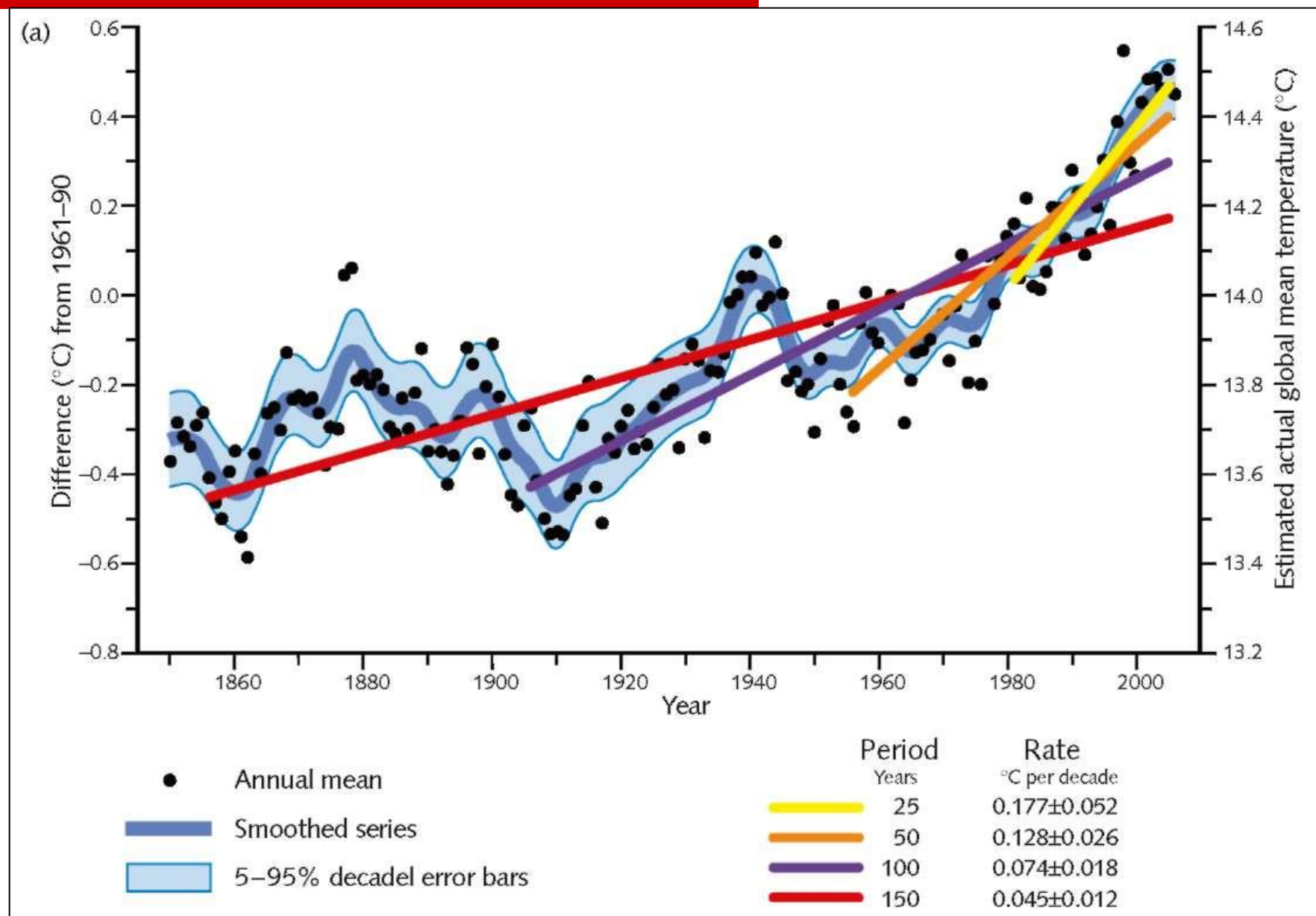


Θερμοκρασία της Γης



- Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του Πλανήτη Γη.
- Από το 1880 έως το 2012 έχει παρατηρηθεί αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του Πλανήτη κατά 0,85 °C.
- Οι τρεις πιο θερμές χρονιές στην καταγεγραμμένη ιστορία ήταν το 1998, το 2005 και το 2010.

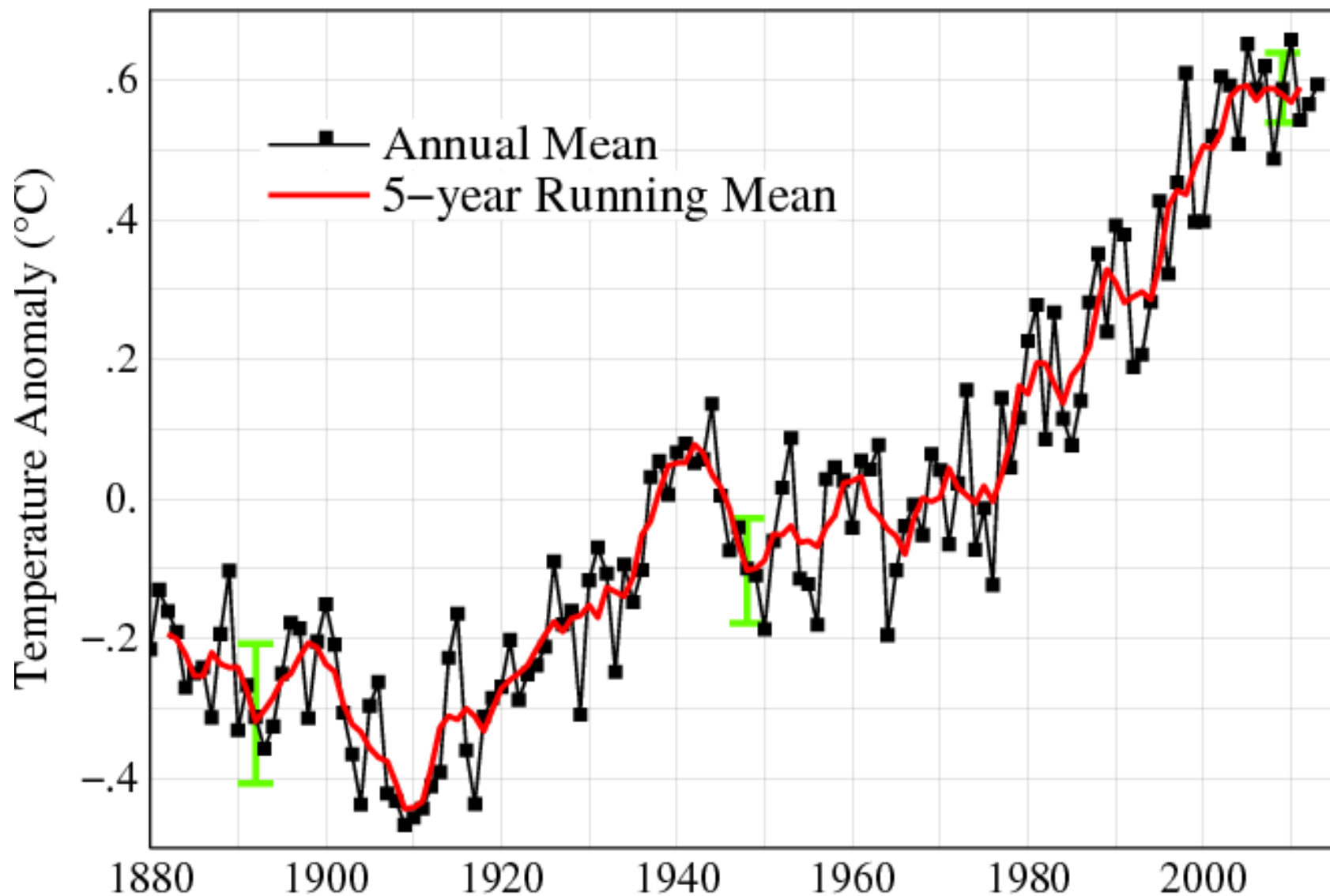
Θερμοκρασία της Γης



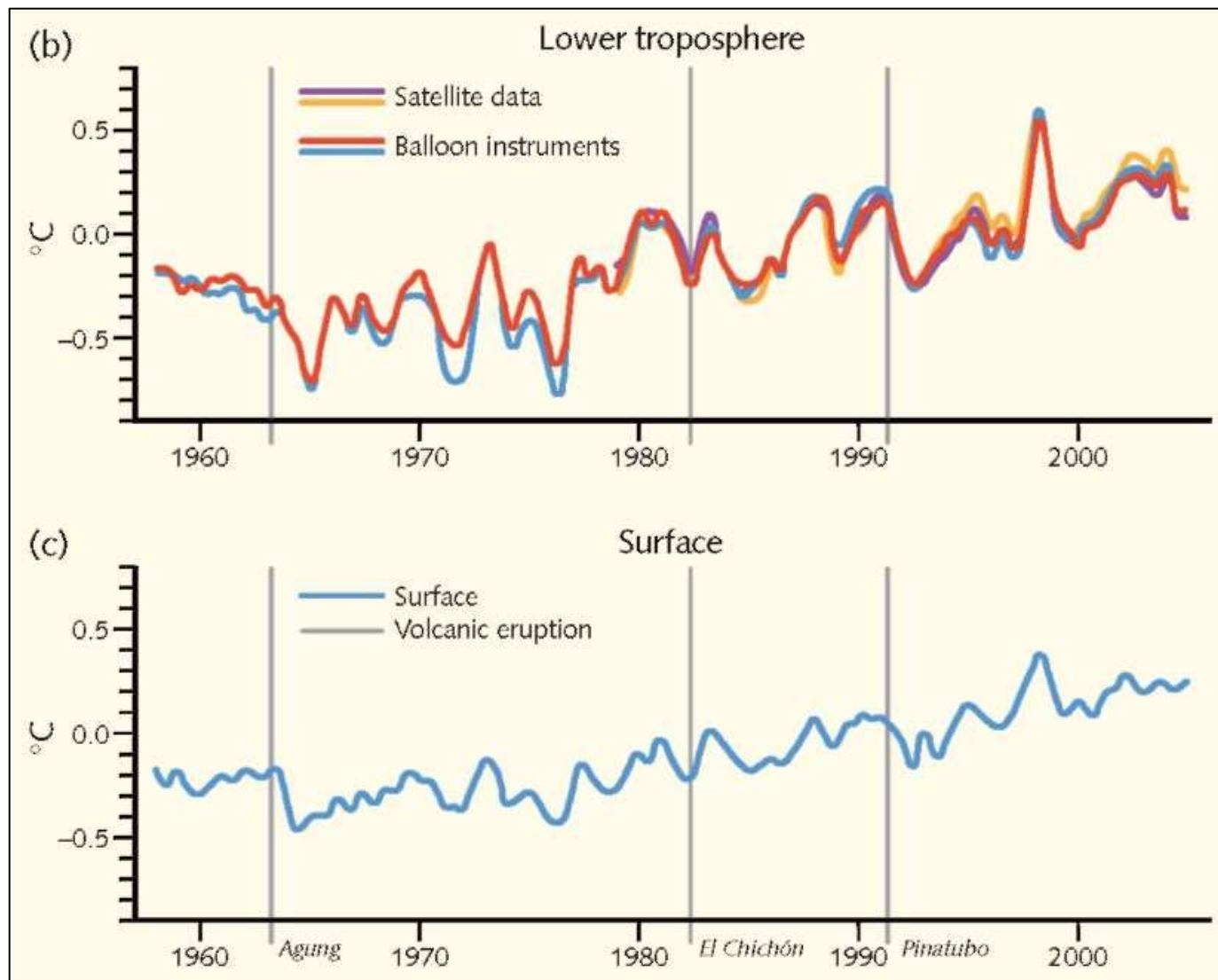
Θερμοκρασία της Γης



Global Land–Ocean Temperature Index

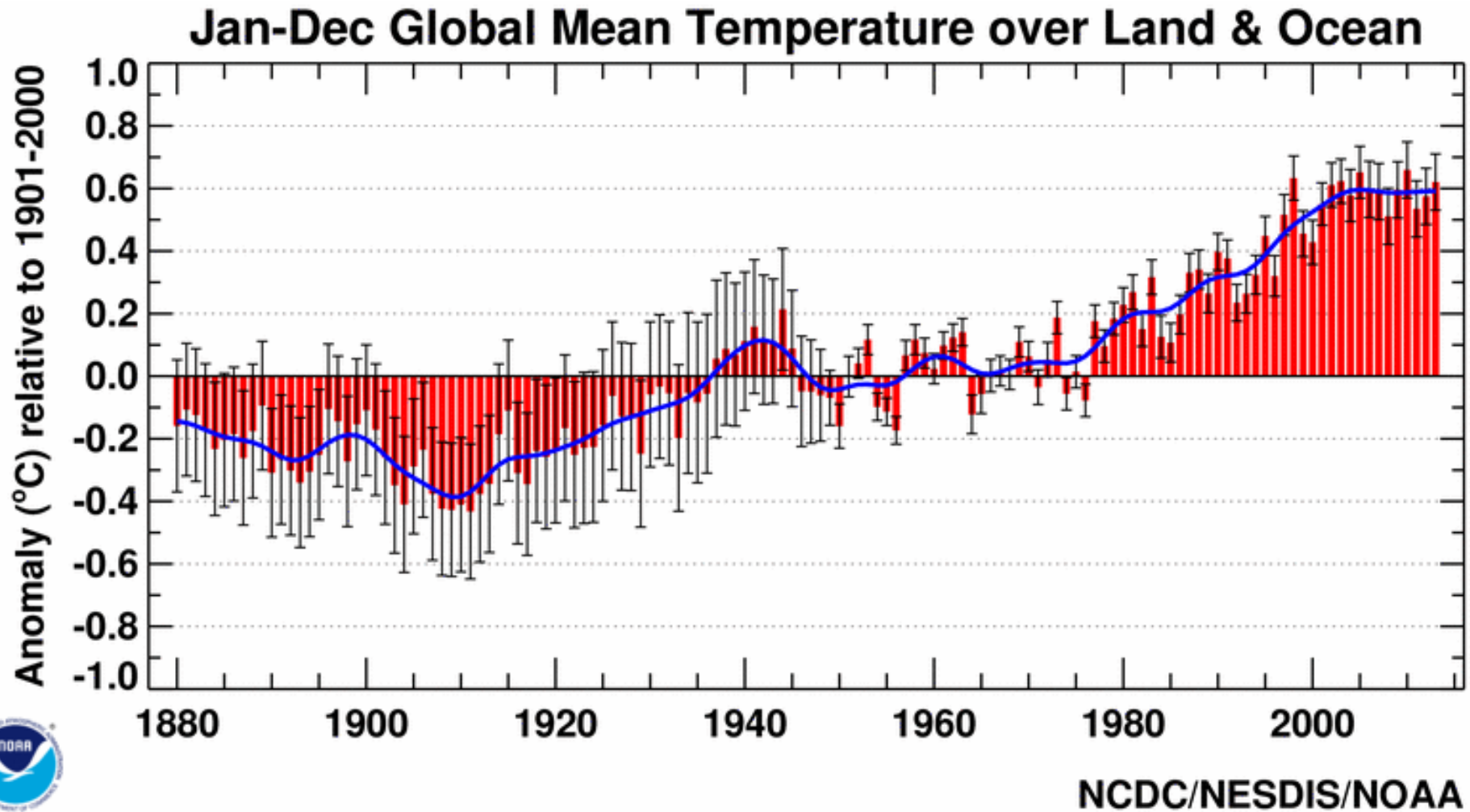


Θερμοκρασία της Γης



Διακυμάνσεις ως προς το μέσο όρο των ετών 1979-1997

Θερμοκρασία της Γης



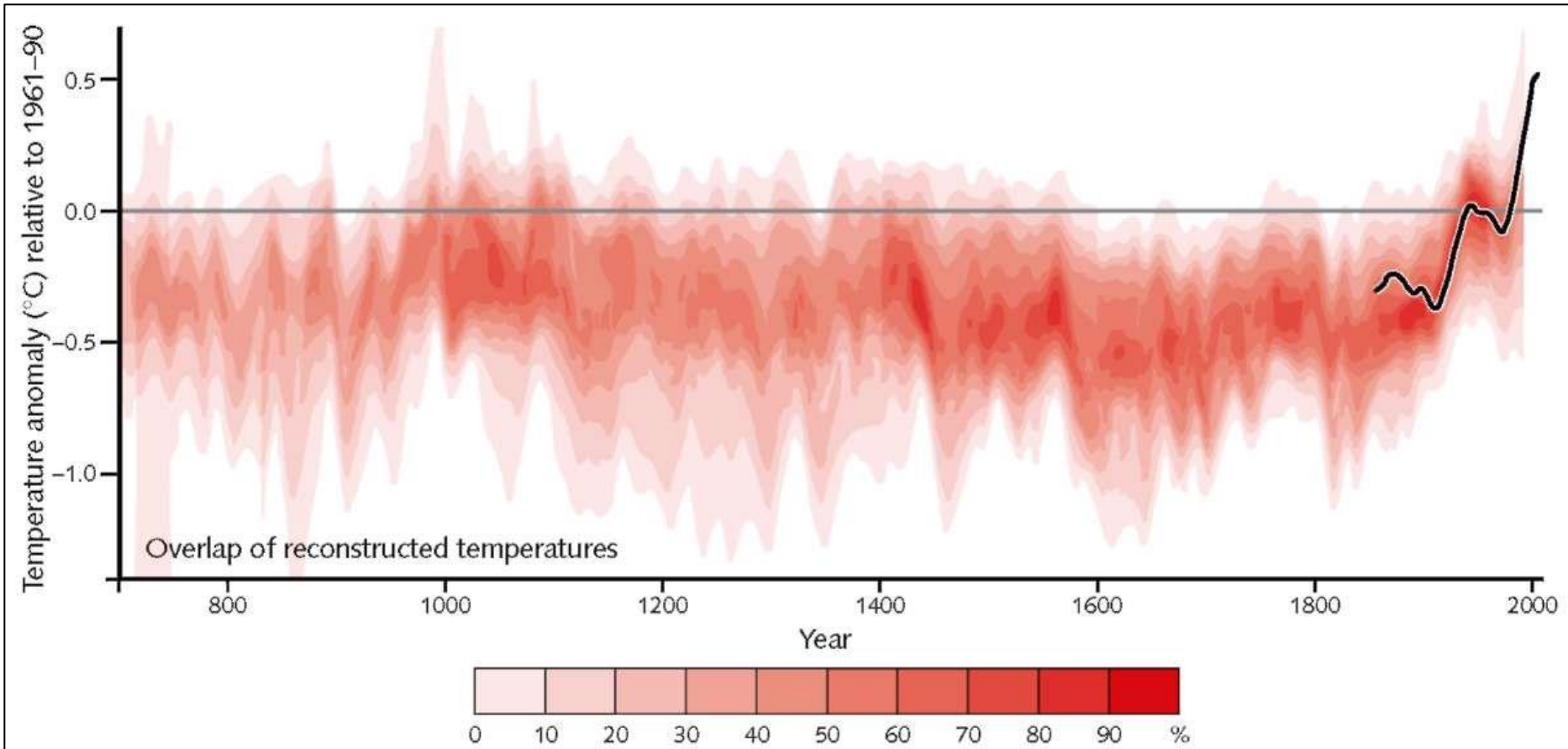
Η μέση θερμοκρασία της Γης τον 20^ο αιώνα ήταν 13,9 °C 131

Θερμοκρασία της Γης

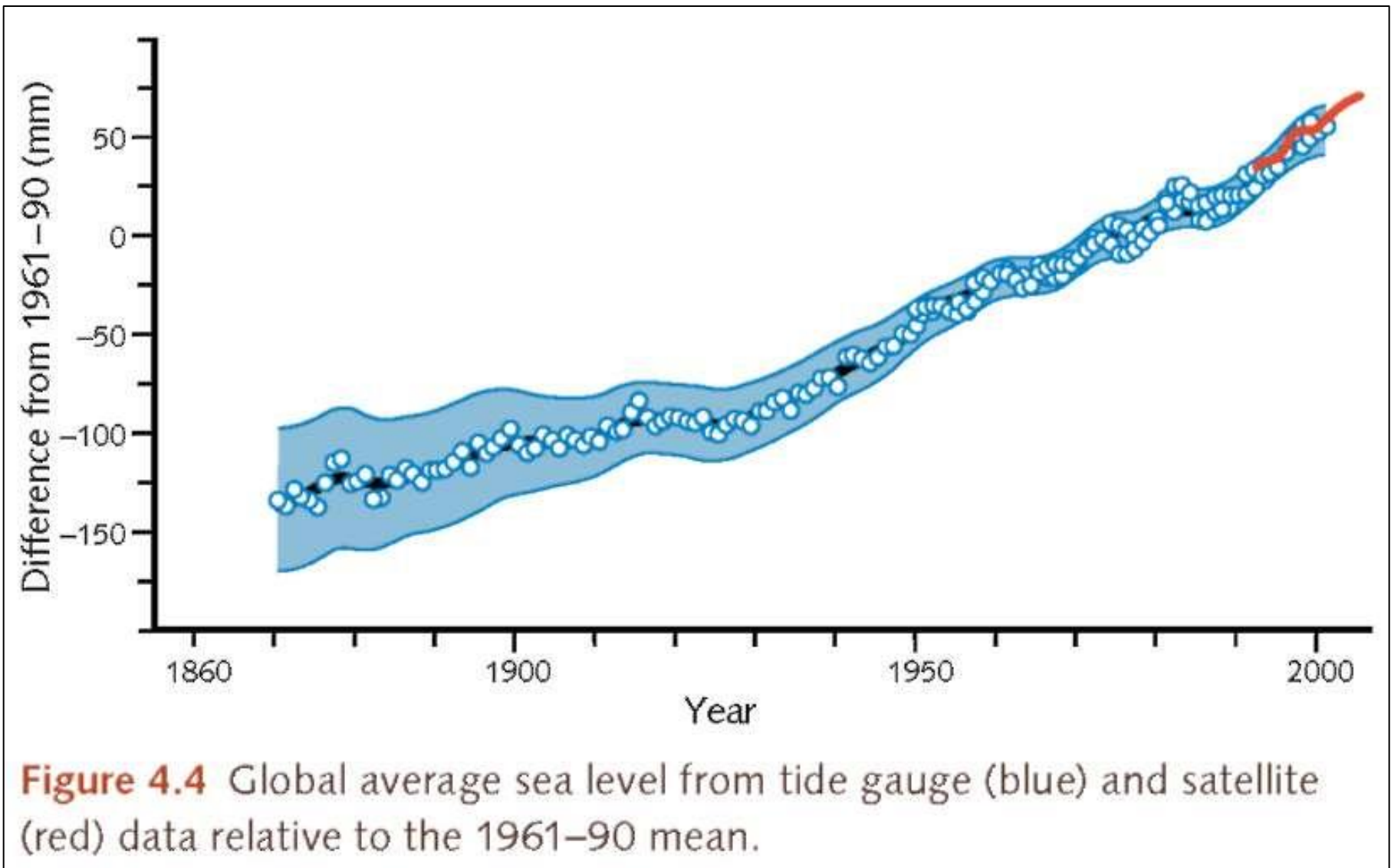


- Η μέση θερμοκρασία της Γης τον 20^ο αιώνα ήταν 13,9 °C.
- Από το 1976 έως σήμερα, δηλαδή για 35 συναπτά έτη, η θερμοκρασία της Γης είναι μεγαλύτερη από το μέσο όρο της θερμοκρασίας κατά τον 20^ο αιώνα.
- Ωστόσο, παρά την σαφή τάση αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του Πλανήτη υπάρχουν περιόδους σχετικά πιο ψυχρές.

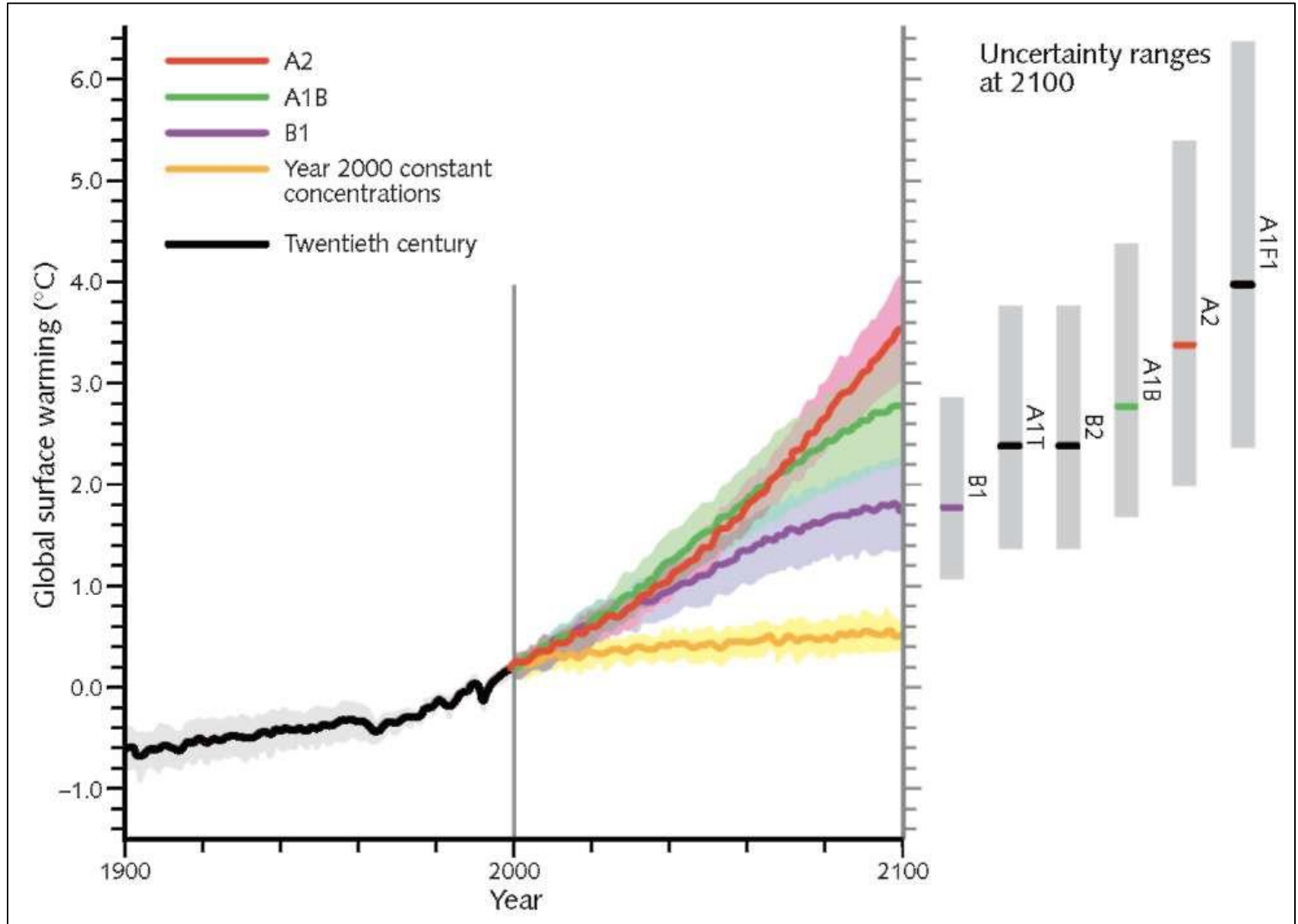
Θερμοκρασία της Γης



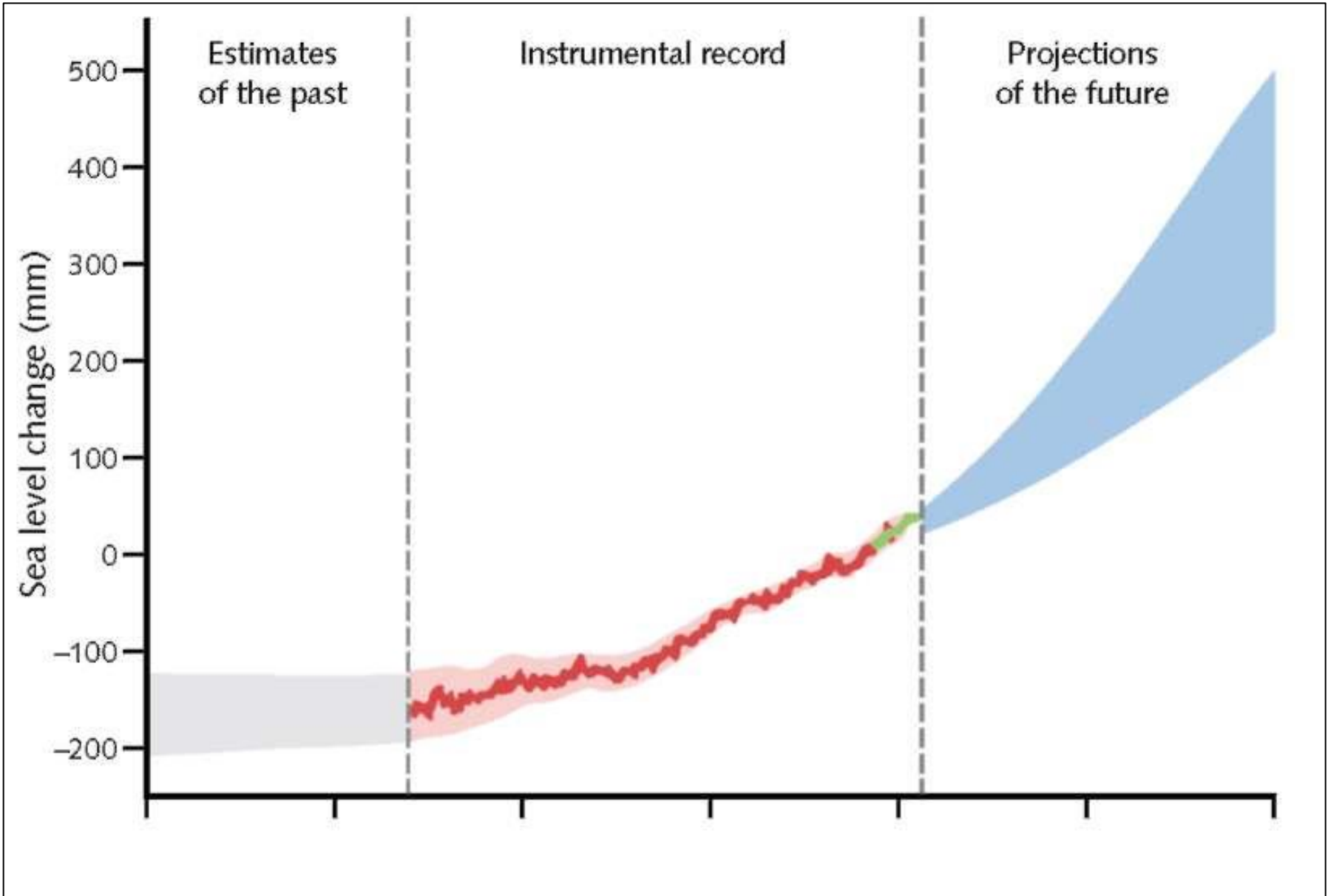
Επίπεδο της θάλασσας



Τι θα συμβεί στο μέλλον???



Τι θα συμβεί στο μέλλον???



Τι θα συμβεί στο μέλλον???

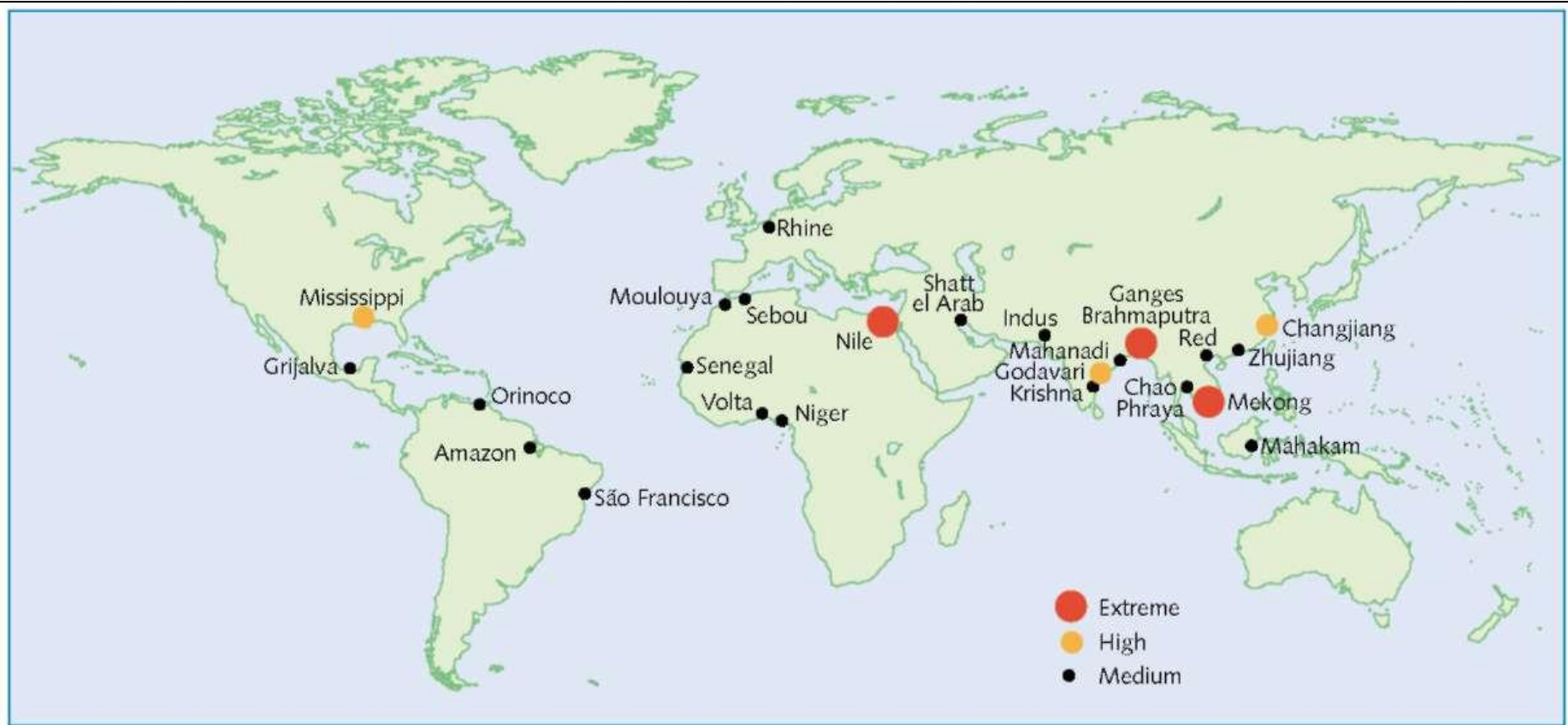


Figure 7.3 Relative vulnerability of coastal deltas as indicated by estimates of the population potentially displaced by current sea level trends to 2050 (extreme, >1 million; high, 1 million to 50000; medium, 50000 to 5000). Climate change would exacerbate these impacts.

Τι θα συμβεί στο μέλλον???



In September 2008 a report by the government-appointed Delta Commission concluded that the Netherlands must spend billions of euros on dyke upgrades and coastal expansion to avoid the ravages of rising sea levels due to global warming over the coming decades

Τι θα συμβεί στο μέλλον???



- Έντονα καιρικά φαινόμενα
- Πλημμύρες και ξηρασίες
- Μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων
- Μείωση των γεωργικών δραστηριοτήτων
- Μείωση των τροφίμων
- Καταστροφή των οικοσυστημάτων
- Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία



- Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή μπορείτε να ανατρέξετε στην ιστοσελίδα της επιστημονικής ομάδας η οποία βρίσκεται υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών και ονομάζεται Διακυβερνητική Διάσκεψη για την Κλιματική Αλλαγή, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, <http://www.ipcc.ch>