



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 2: Ηλιακή Ενέργεια & Εφαρμογές

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Φυσικής



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

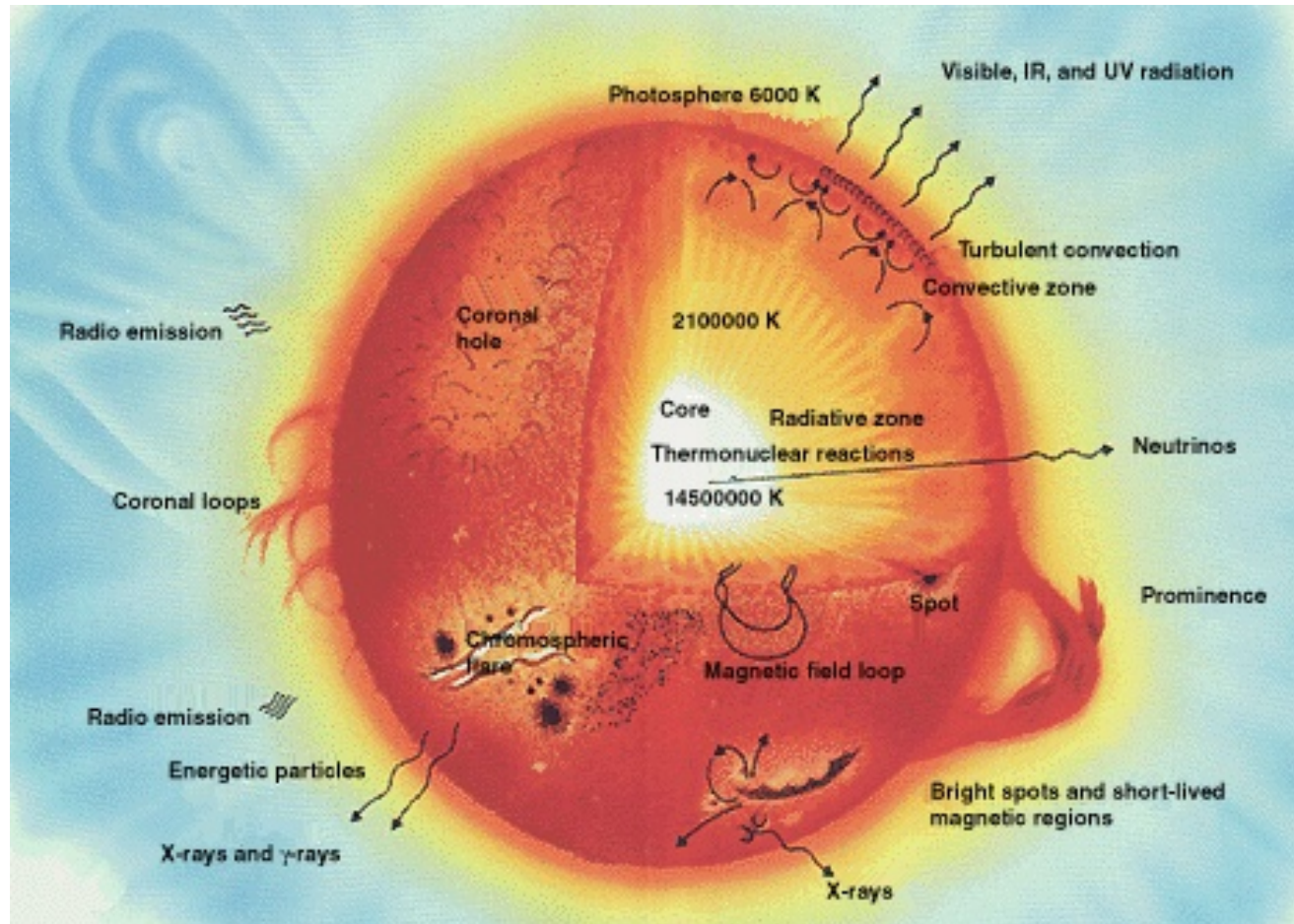
# Σκοποί ενότητας

- Γνωριμία με τα χαρακτηριστικά φάσματος και έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και εμπέδωση της εξάρτησής τους από τη σχετική θέση ήλιου-γης
- Παρουσίαση των σημαντικότερων εφαρμογών συγκέντρωσης και μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε άλλες μορφές ενέργειας.
- Παρουσίαση στοιχείων εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας ανα τον κόσμο.

# Περιεχόμενα ενότητας

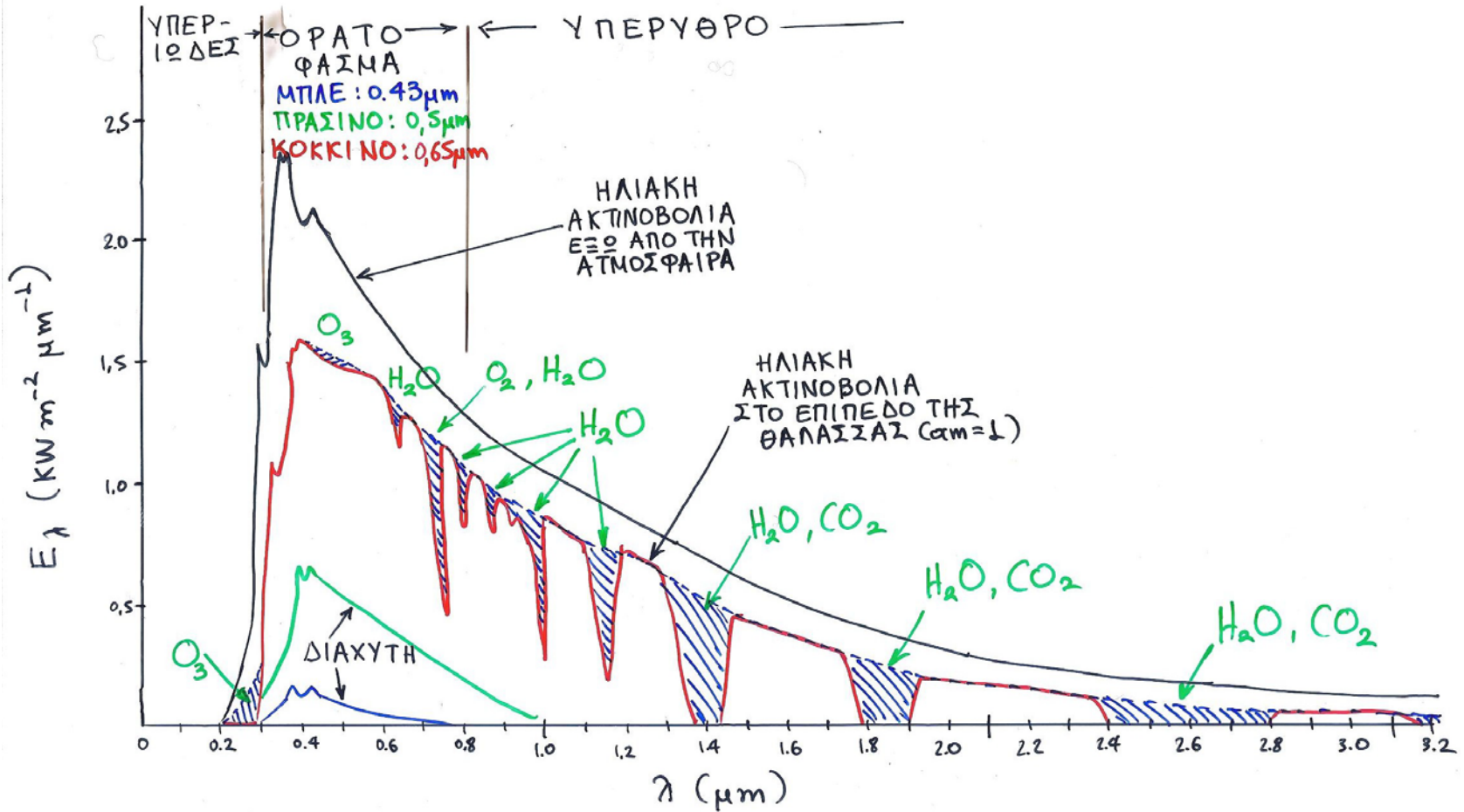
- Φασματικά χαρακτηριστικά ηλ. ακτινοβολίας
- Σχετική θέση Ήλιου-Γης (αέρια μάζα)
- Μετρητικά όργανα έντασης ηλ. ακτινοβολίας
- Εφαρμογές συγκέντρωσης/μετατροπής ηλιακής ενέργειας
  - σε θερμική ενέργεια
  - σε ηλεκτρική ενέργεια
- Παθητικά ηλιακά συστήματα
- Δυναμικά κτήρια

# Η ανατομία του ήλιου



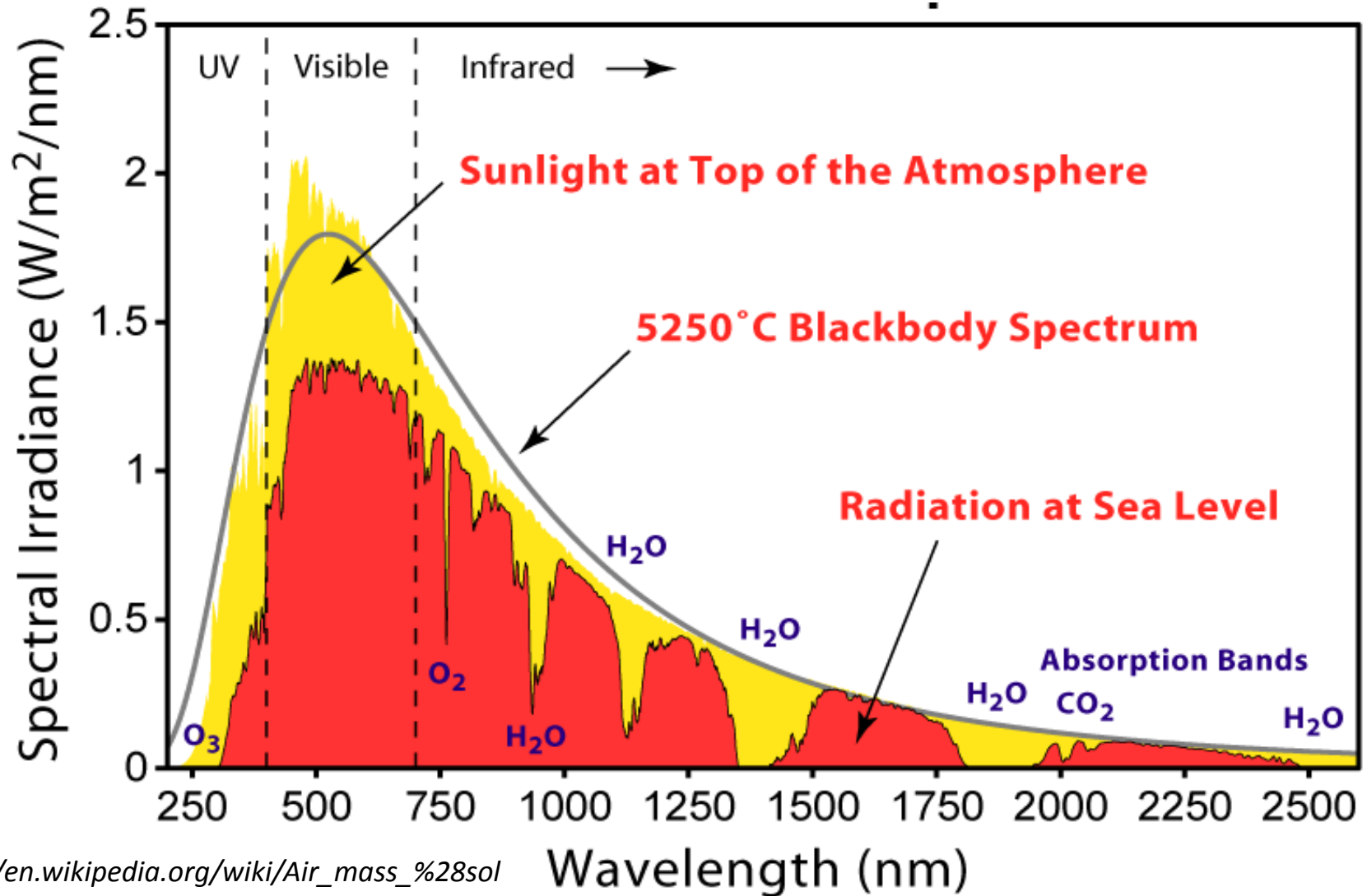
[http://en.wikipedia.org/wiki/Portal:Star/Selected\\_article](http://en.wikipedia.org/wiki/Portal:Star/Selected_article)

# Φασματικά χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας (1)

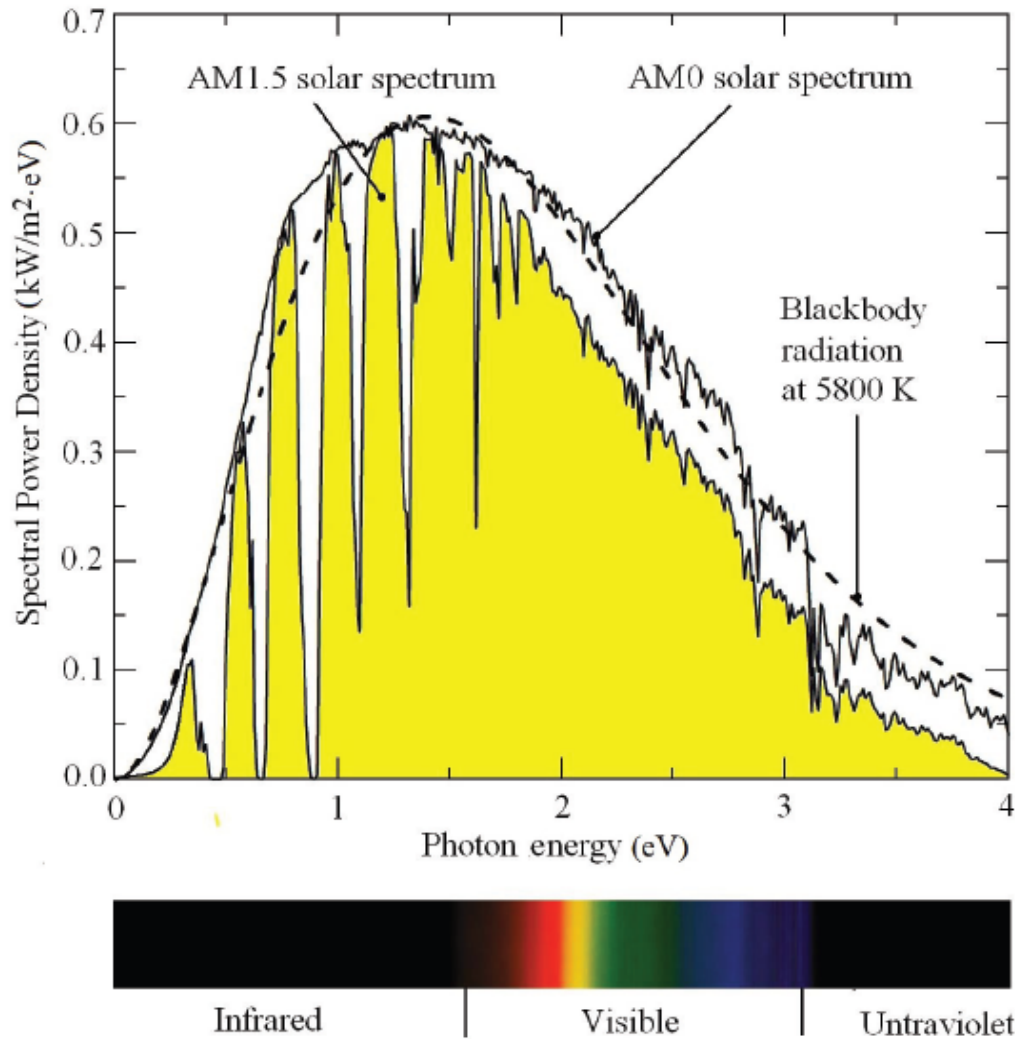


Σχήμα 2: Η φασματική κατανομή της ηλιακής ενέργειας.

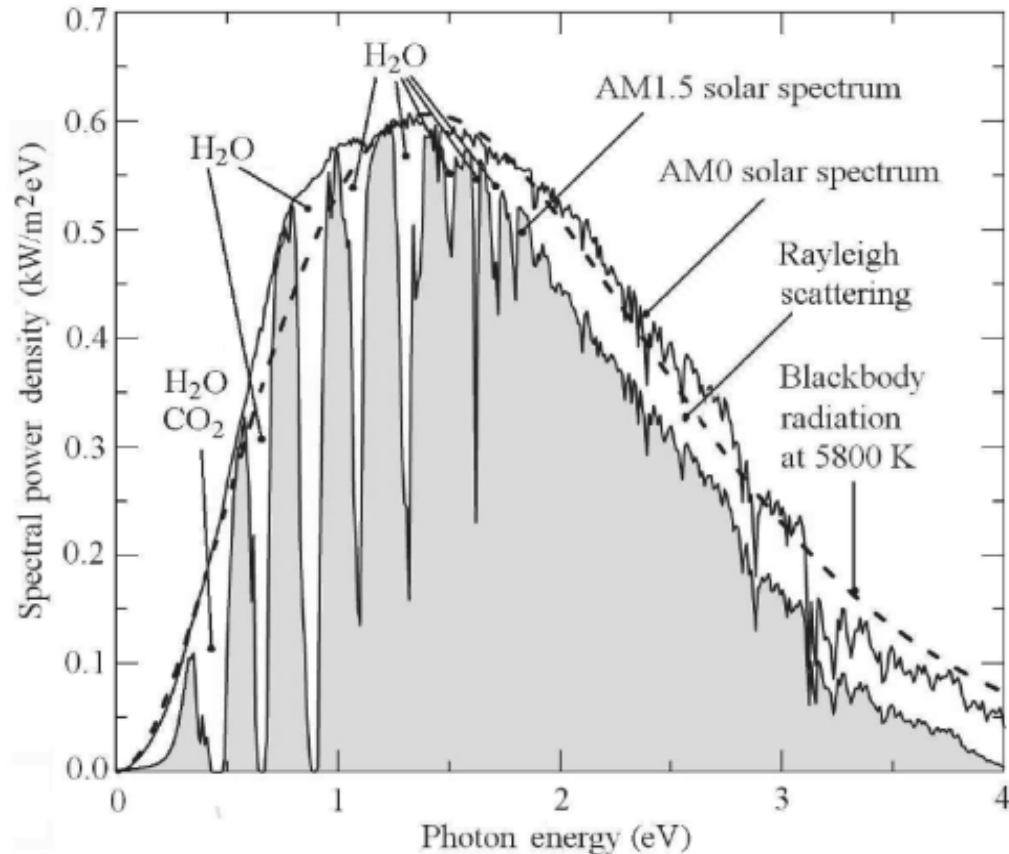
# Φασματικά χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας (2)



# Φασματικά χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας (3)



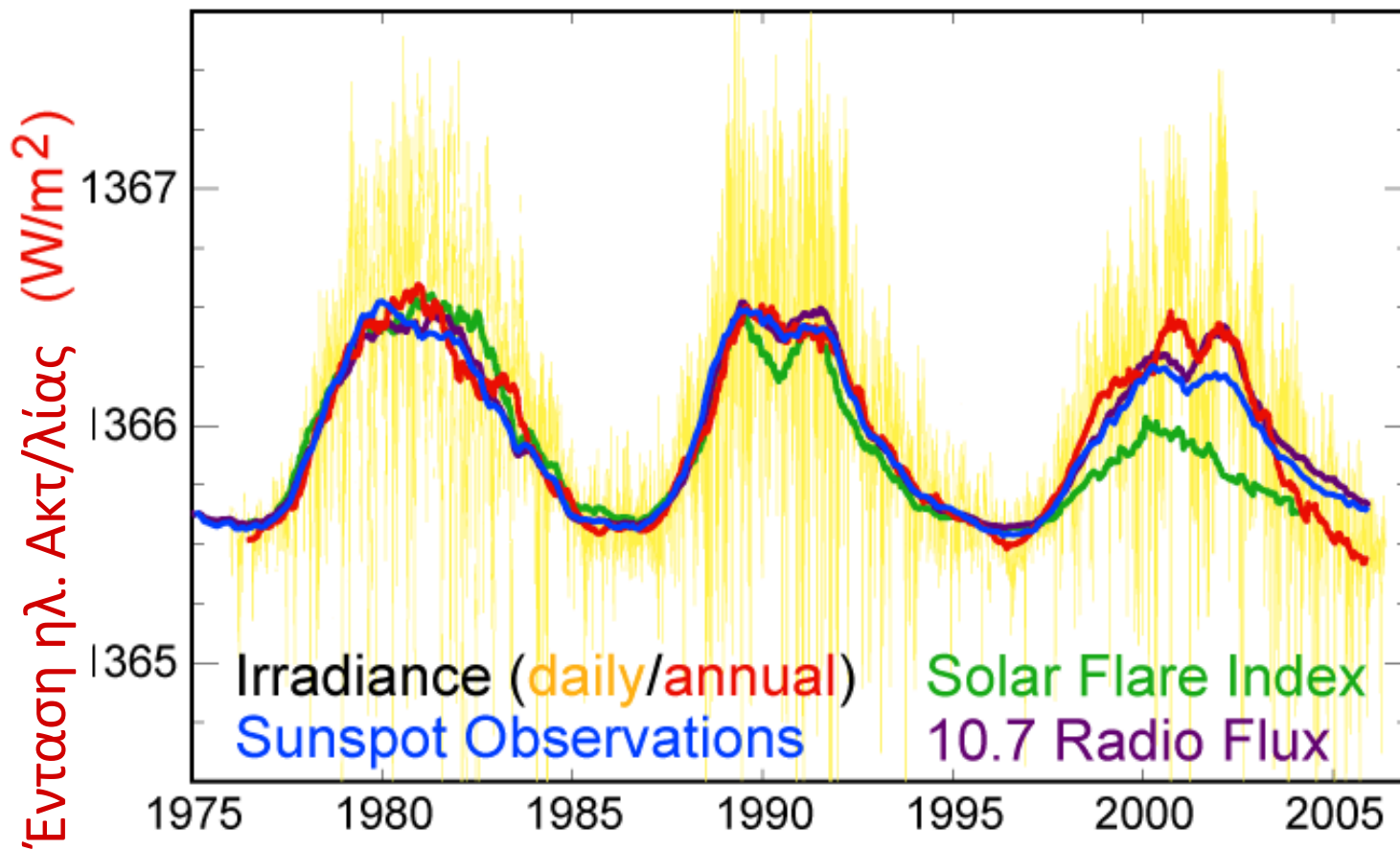
# Φασματικά χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας (4)





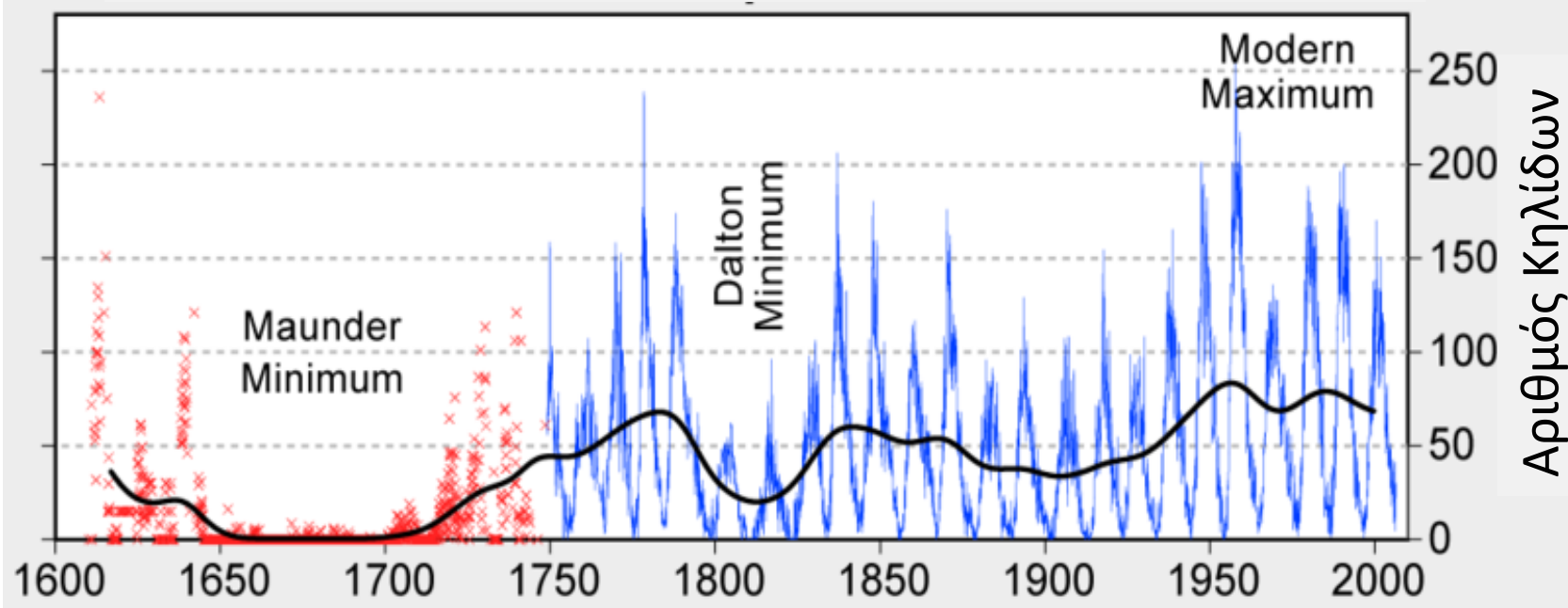
# Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (1)

## Μεταβολές ηλιακού κύκλου



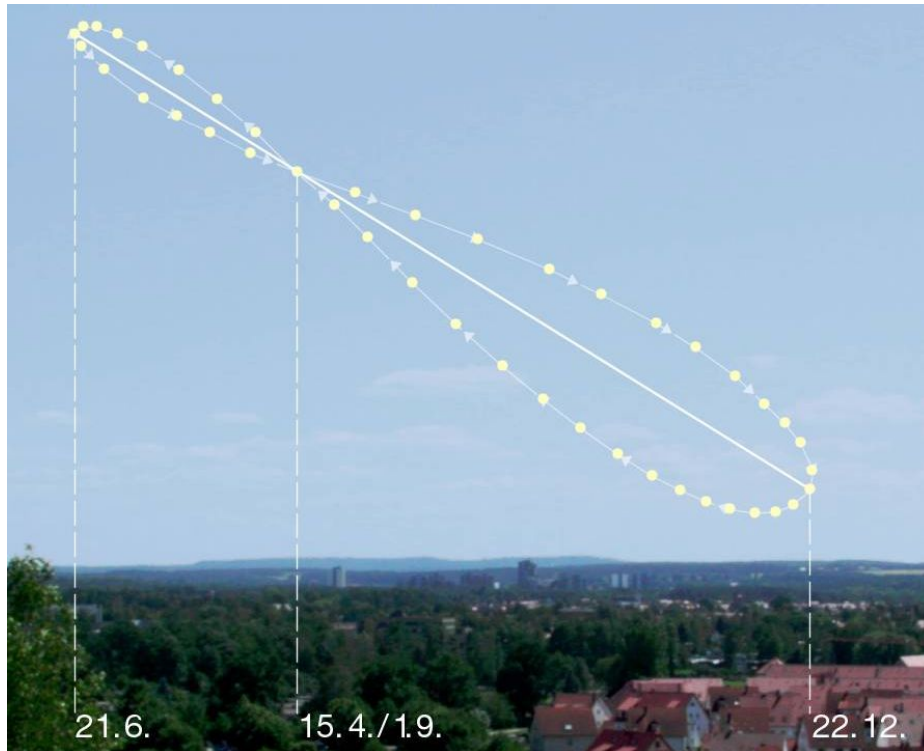
# Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (2)

## 400 Χρόνια Παρατήρησης Ηλιακών Κηλίδων



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunspot\\_Numbers.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png)

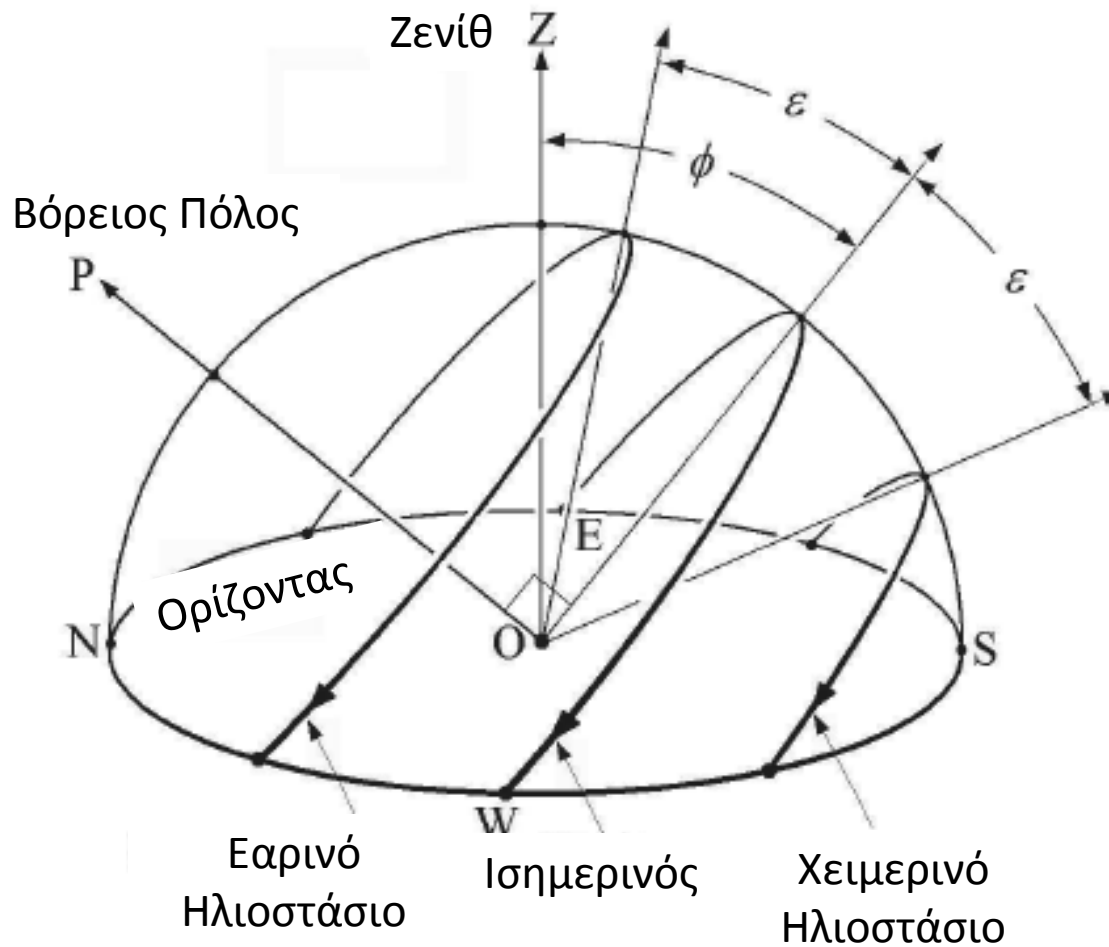
# Σχετική θέση Ήλιου-Γης (1)



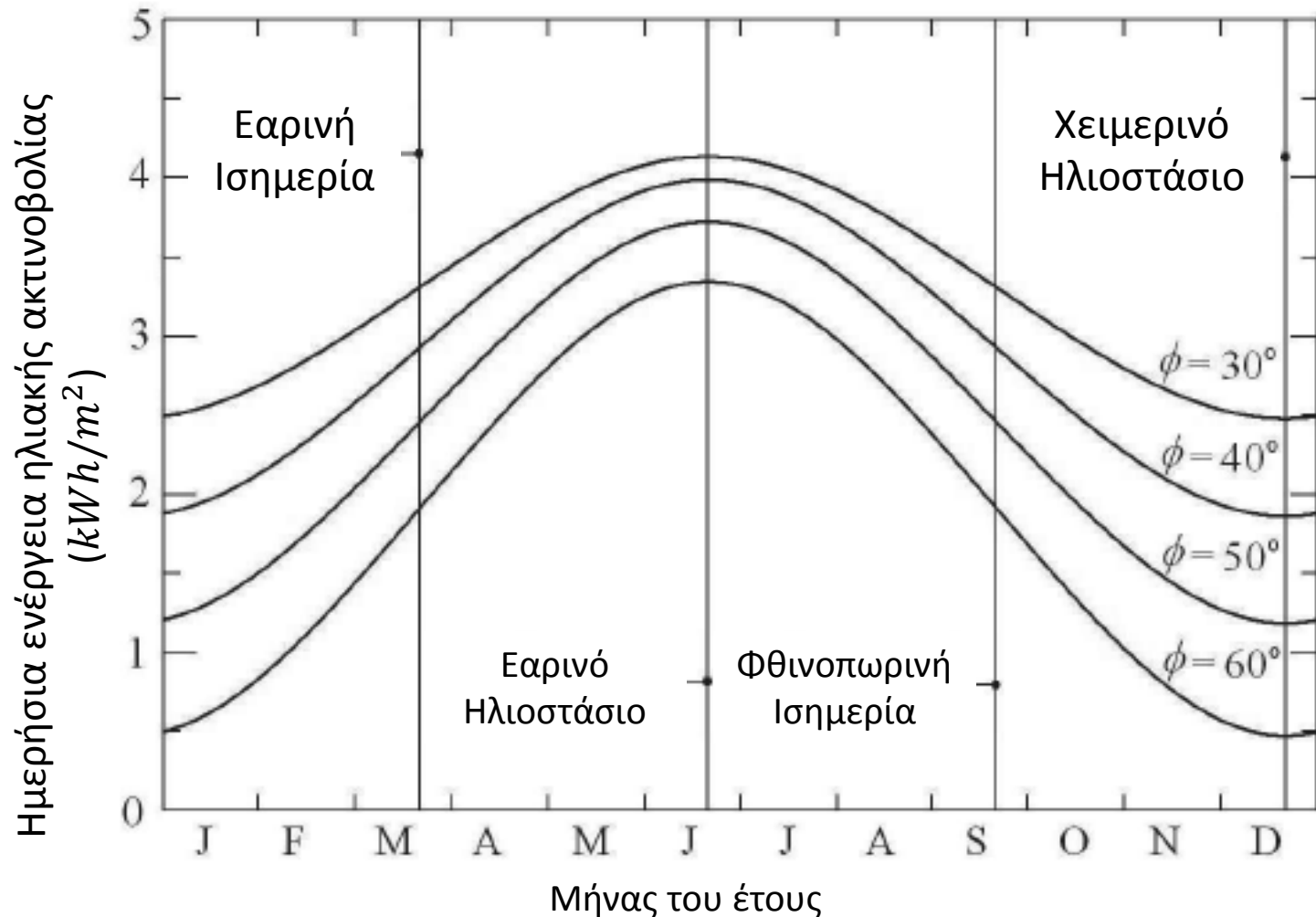
«*άνάλημμα*»: καμπύλη που αντιπροσωπεύει την γωνιακή μετατόπιση ενός ουράνιου σώματος (Ήλιος) από τη μέση θέση του στην ουράνια σφαίρα, όπως φαίνεται από ένα άλλο ουράνιο σώμα (Γη)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Analemma>

# Σχετική θέση Ήλιου-Γης (2)

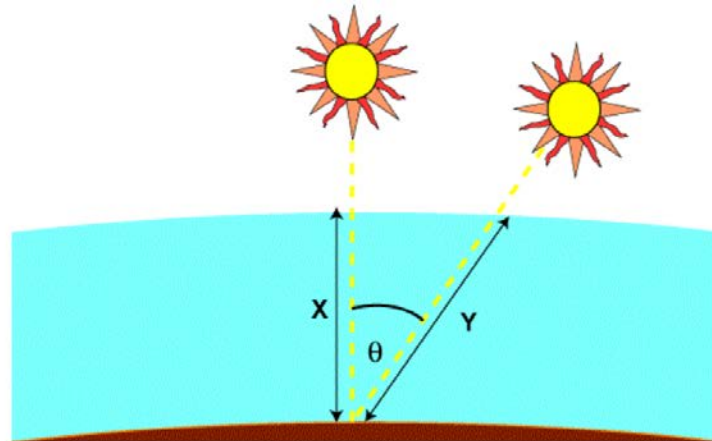


# Σχετική θέση Ήλιου-Γης (3)



# Αέρια Μάζα (1)

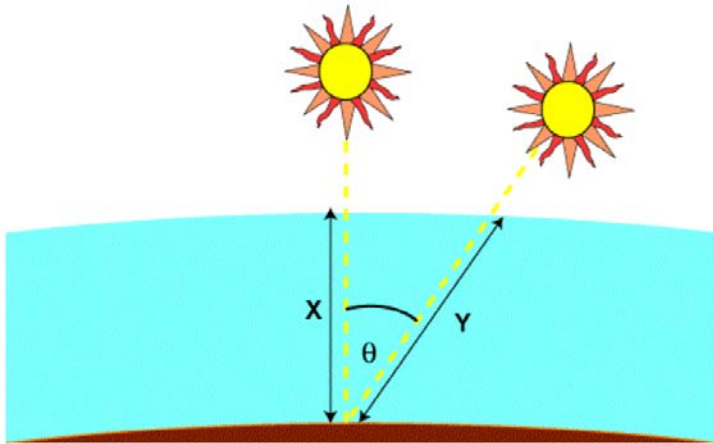
**Μάζα αέρα (AM):** Ο λόγος της οπτικής πυκνότητας ( $OD$ ) της ατμόσφαιρας κατά τη διέλευση του ηλιακού φωτός, προς την οπτική πυκνότητα όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ.



<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>

Πρακτικά είναι ο λόγος της απόστασης που διανύει το φως μέσα στην ατμόσφαιρα προς το ύψος της ατμόσφαιρας.

# Αέρια Μάζα (2)

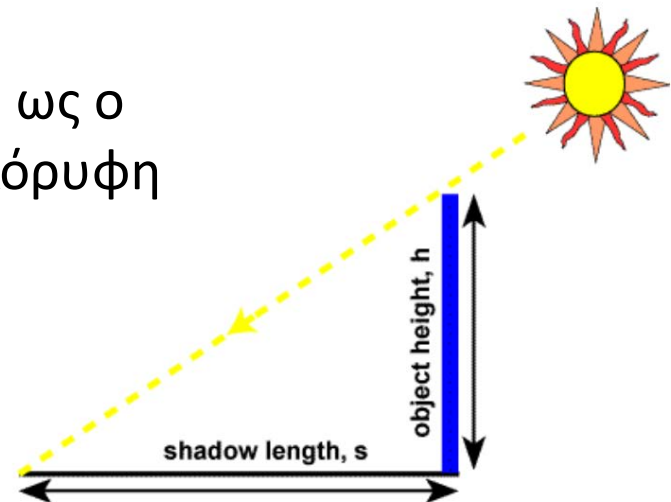


$$OD = \log\left(\frac{I_0}{I(x)}\right) \xrightarrow{I(x)=I_0e^{-ax}} OD = ax \log e$$

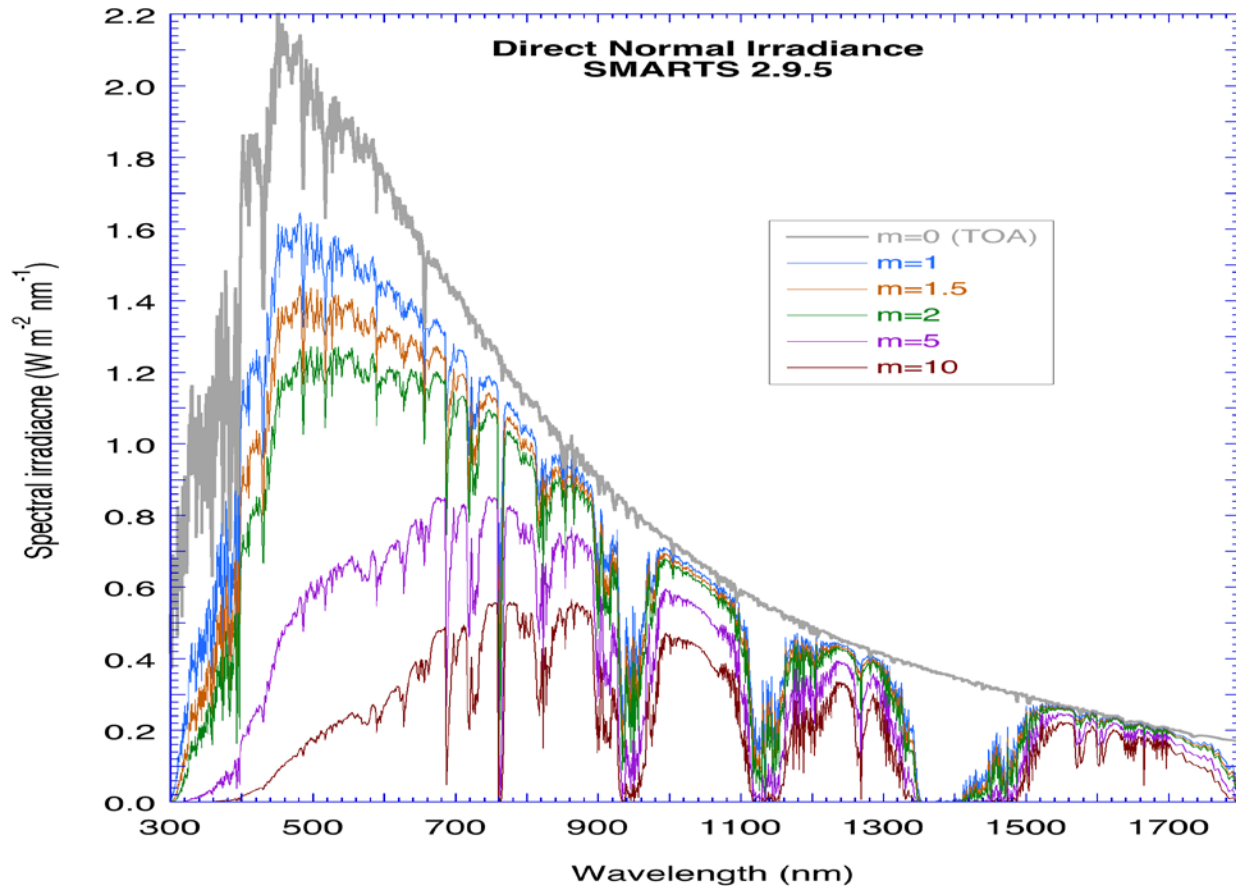
$$AM\acute{\alpha} = \frac{OD(y)}{OD(x)} = \frac{y}{x} = \frac{1}{\cos\theta} \quad \gamma\iota \quad \theta < 65^\circ$$

Υπολογίζεται και από τη σκιά του ήλιου, ως ο λόγος της υποτείνουσας προς την κατακόρυφη πλευρά του ορθογώνιου τριγώνου:

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$



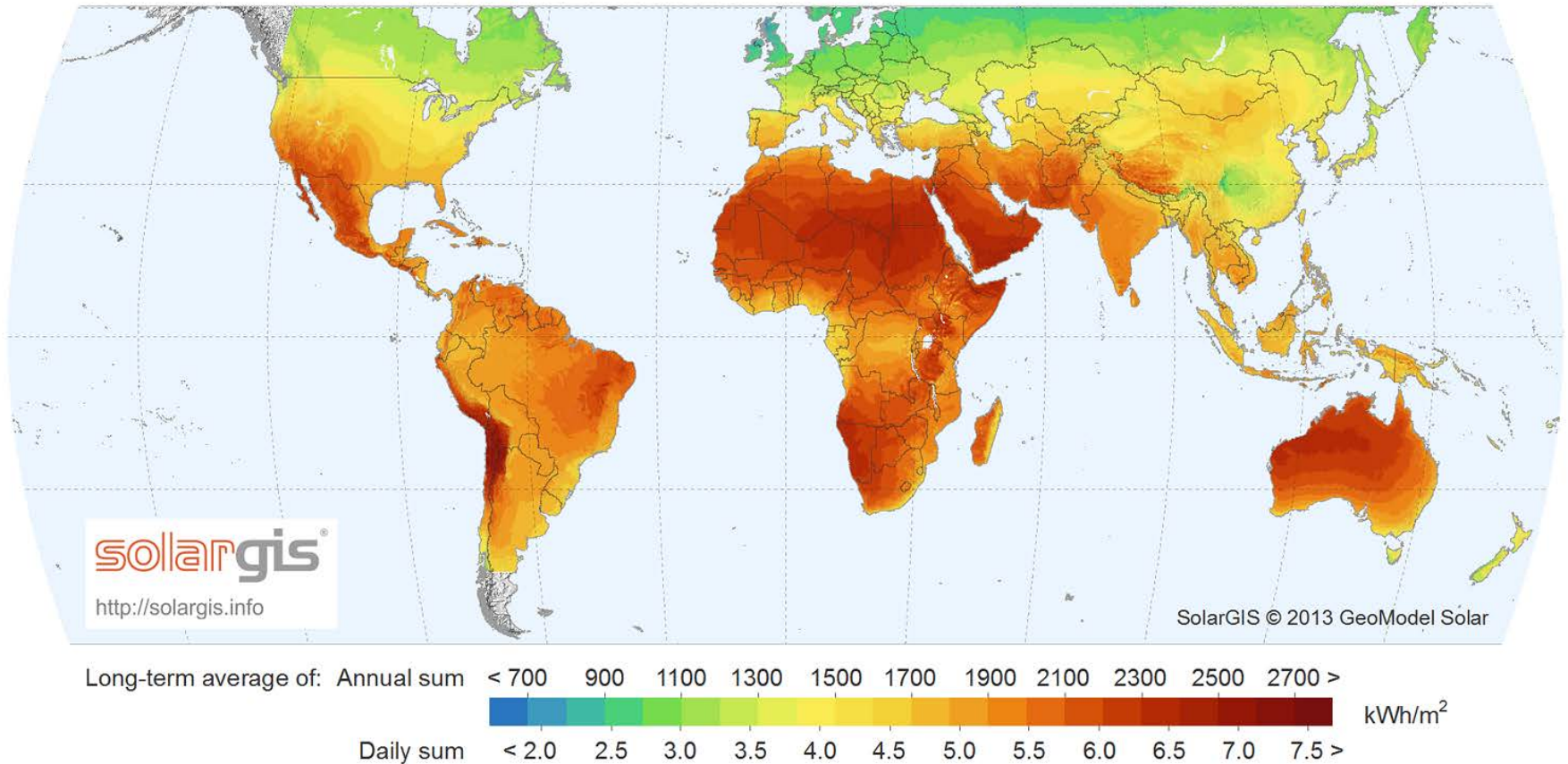
# Σχέση έντασης ηλ. ακτ/λίας – αέριας μάζας



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simulated\\_direct\\_irradiance\\_spectra\\_for\\_air\\_mass%3D0\\_to\\_10\\_with\\_SMARTS\\_2.9.5.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Simulated_direct_irradiance_spectra_for_air_mass%3D0_to_10_with_SMARTS_2.9.5.png)



# Χάρτες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (1)

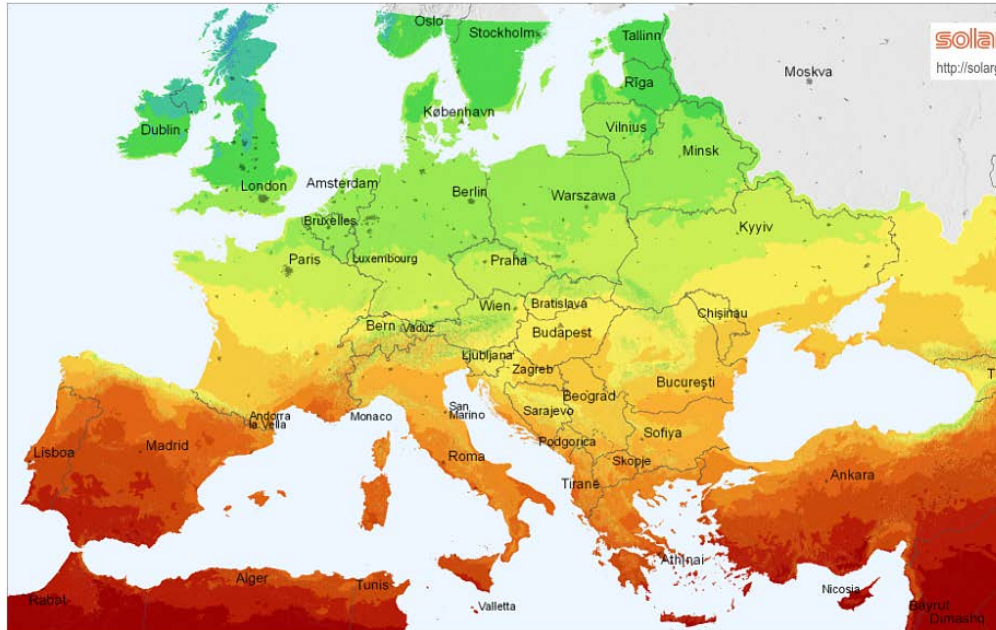


<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarGIS-Solar-map-World-map-en.png>

**Χάρτης έντασης ακτινοβολίας:** Μεσοσταθμική ανα έτος ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε  $KWh/m^2$ . Στις μεγάλες περιοχές της βόρειας Αφρικής παρουσιάζεται η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

# Χάρτες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (2)

Global horizontal irradiation



Average annual sum (4/2004 - 3/2010)

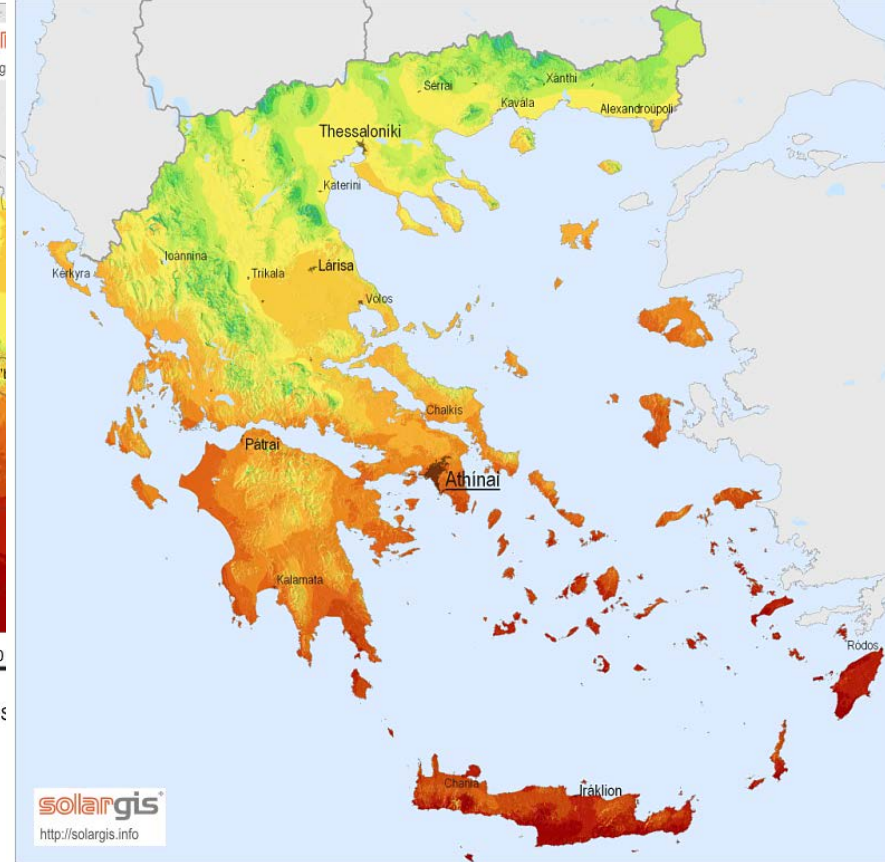


0 250

© 2011 GeoModel S

[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy\\_in\\_the\\_European\\_Union](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy_in_the_European_Union)

E Global horizontal irradiation



Average annual sum (4/2004 - 3/2010)



0 50 100 km

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_GIS-Solar-map-Greece-en.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_GIS-Solar-map-Greece-en.png)

# Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας - (πυρηλιόμετρο)



<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrheliometer>

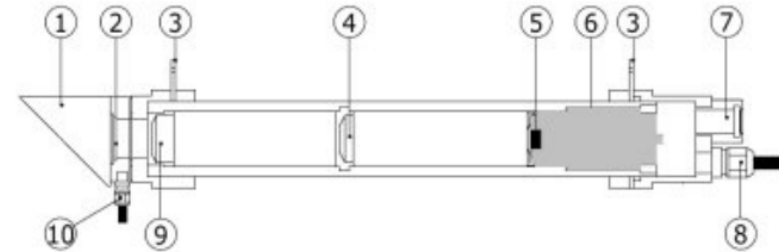


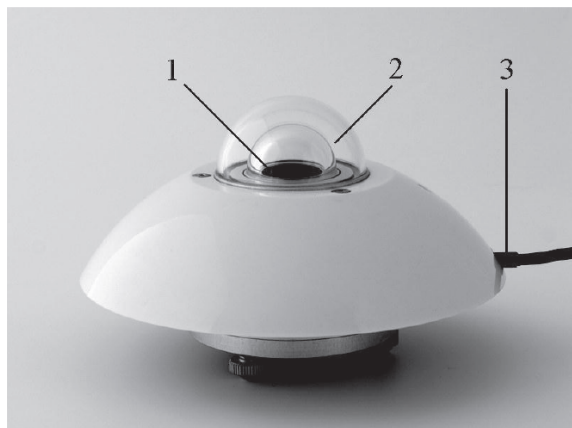
Figure 1: DR01 pyrheliometer: (1) protection cap, (2) window with heater, (3) sight, (5) sensor, (7) humidity indicator, (10) cable for heater

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hukseflux\\_so\\_larradiation\\_dr01\\_sectionv\\_iew.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hukseflux_so_larradiation_dr01_sectionv_iew.png)

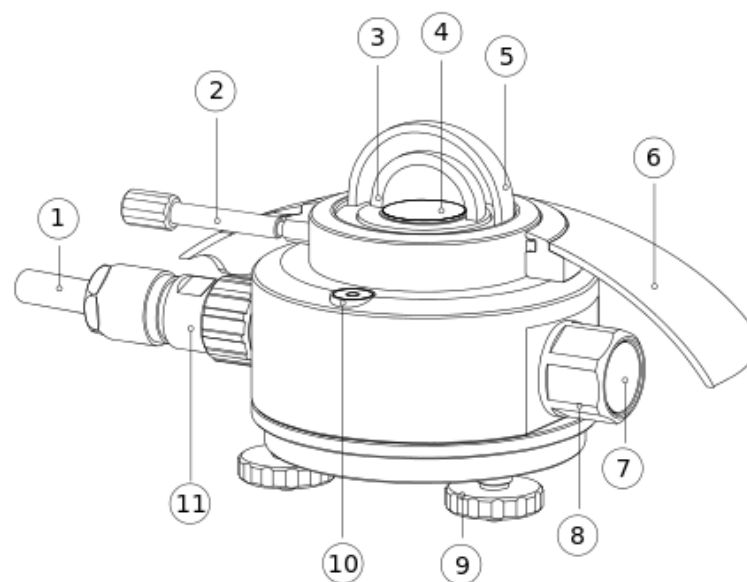


[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eppley\\_Normal\\_Incidence\\_Pyrheliometer.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eppley_Normal_Incidence_Pyrheliometer.jpg)

# Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας - (πυρανόμετρο)



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hukseflux\\_radiometer\\_sr11\\_photo.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hukseflux_radiometer_sr11_photo.jpg)



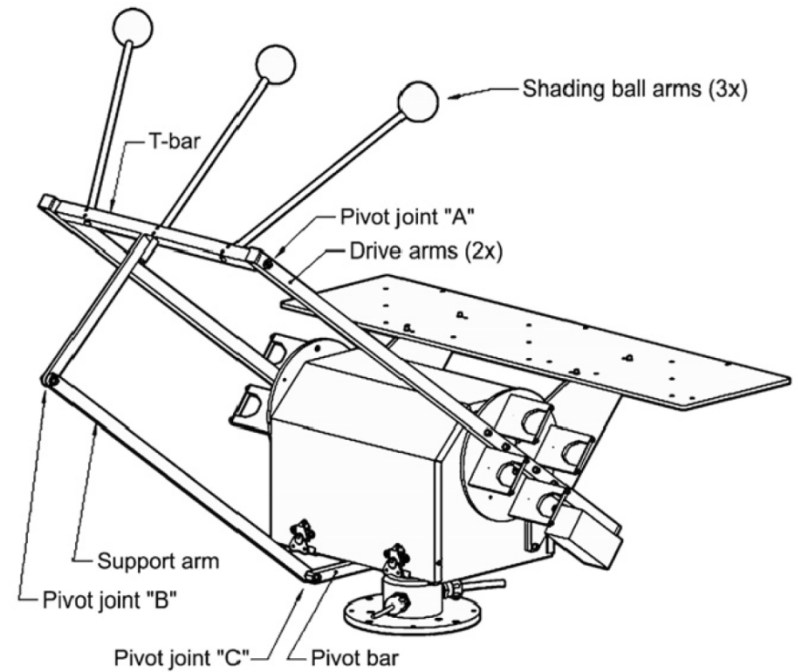
(1) cable, (3) glass inner dome, (4) thermopile sensor, (5) glass outer dome, (7) humidity indicator with desiccant, (11) connector.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>

# Συστήματα παρακολούθησης ήλιου

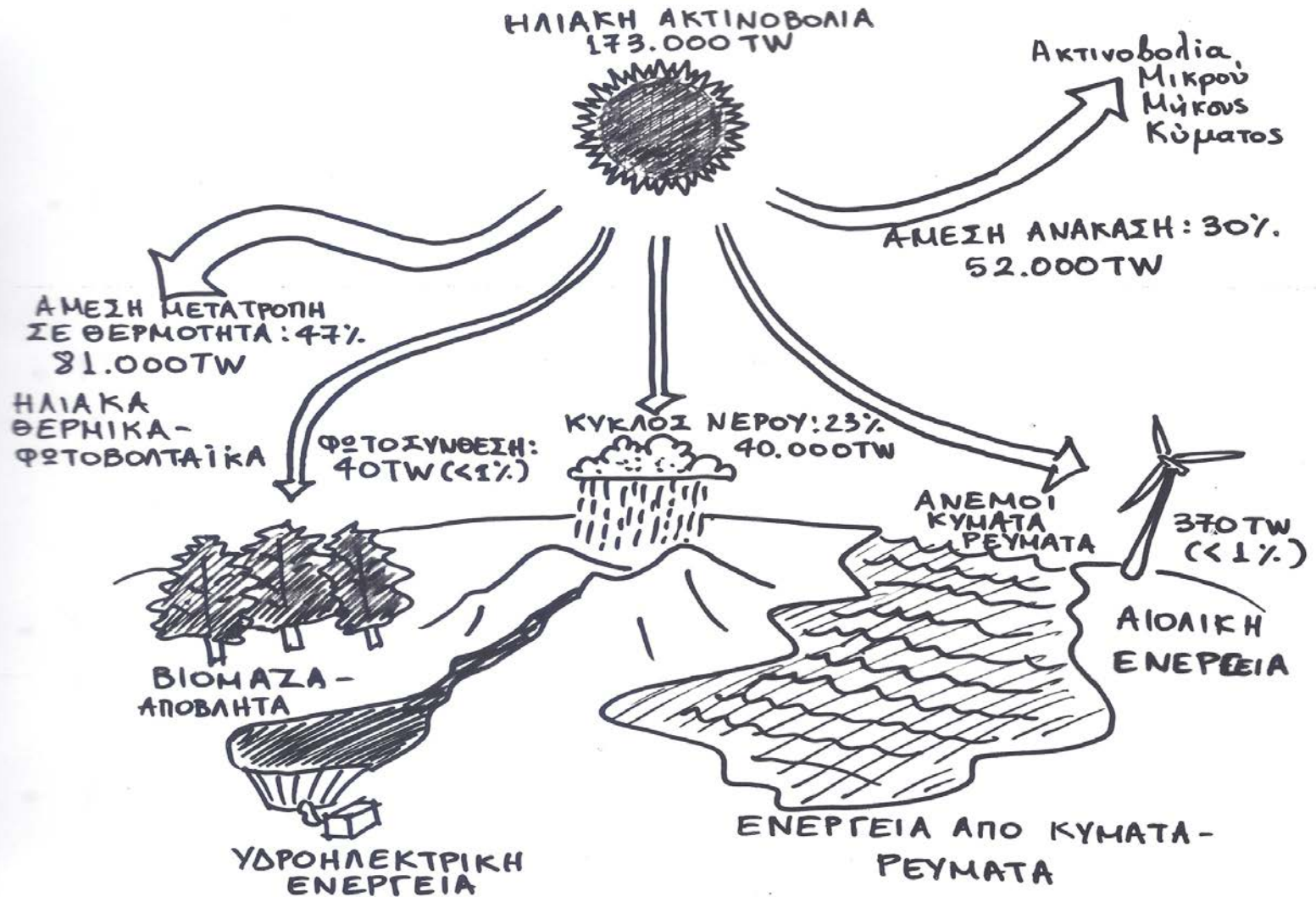


## Sun Trackers



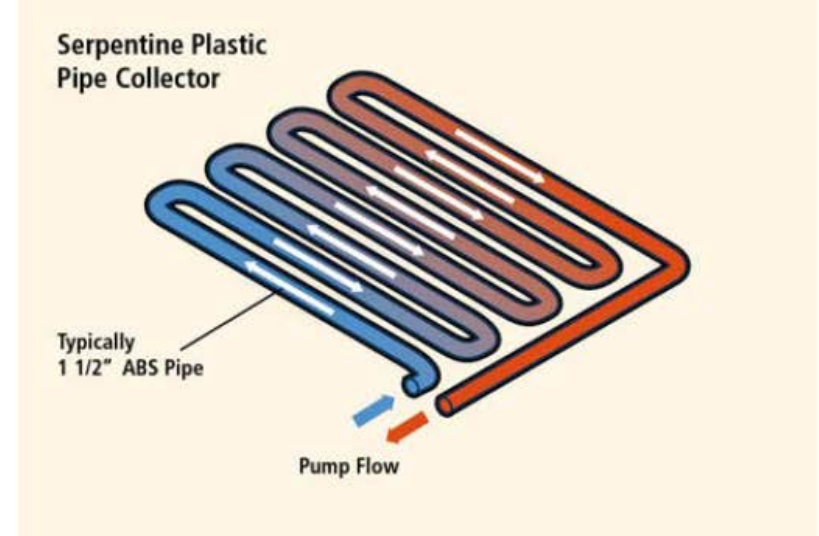
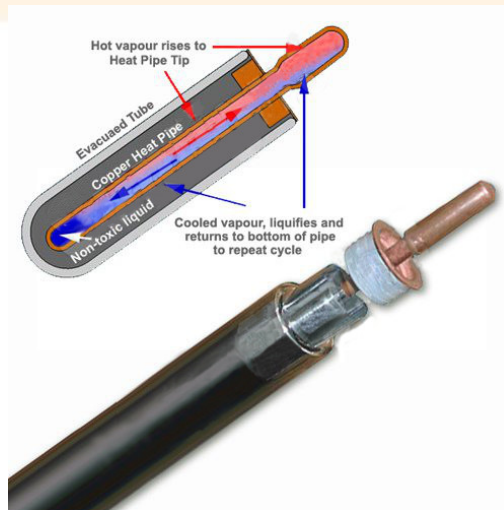
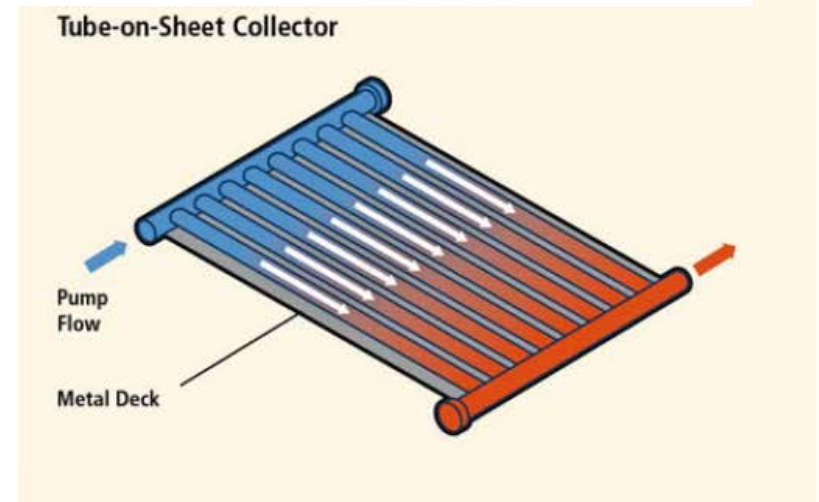
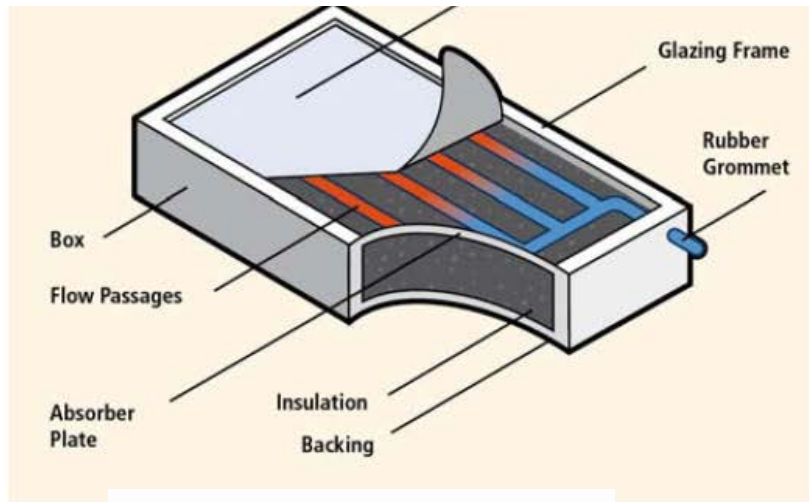
[http://www.directindustry.com/prod/kipp-zonen/solar-trackers-9079-519672.html#product-item\\_373339](http://www.directindustry.com/prod/kipp-zonen/solar-trackers-9079-519672.html#product-item_373339)

# Μετατροπές ηλιακής ενέργειας



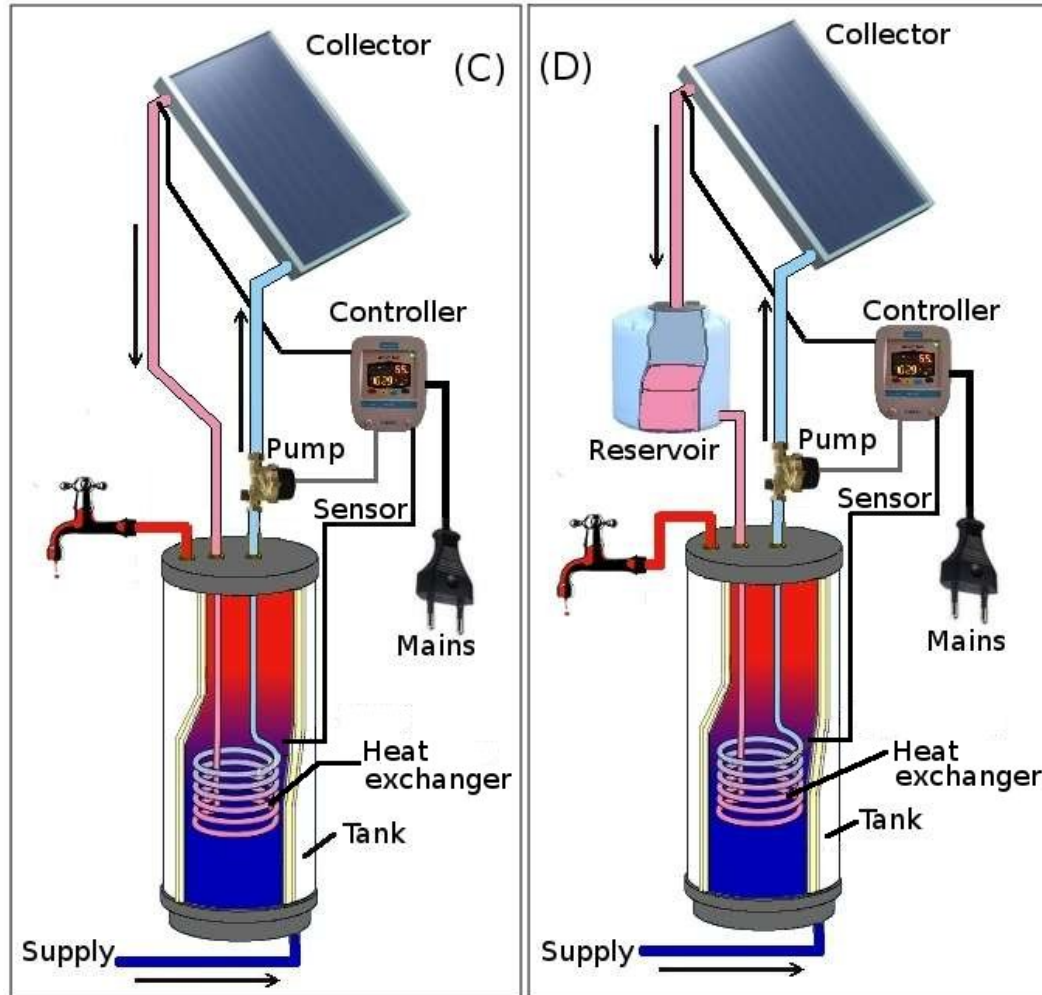
# Συστήματα ηλιακής ενέργειας

## Άμεση μετατροπή σε θερμότητα (1)



# Συστήματα ηλιακής ενέργειας

## Άμεση μετατροπή σε θερμότητα (2)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_water\\_heating](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_water_heating)



# Στοιχεία ανάλυσης επίπεδου ηλιακού συλλέκτη

- Επιφάνεια συλλέκτη ( $A$ )
- Θερμοκρασία εισόδου νερού ( $T_i$ )
- Θερμοκρασία εξόδου ( $T_o$ )
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_a$ )
- Απορροφούμενη ισχύς ανα επιφ. ( $S$ )
- Θερμοκρασία συλλέκτη ( $T_s$ )
- Απόδοση εναλλάκτη θερ/τας ( $F_R$ )
- Θερμικές απώλειες συλλέκτη ανα επιφ. για μοναδιαία διαφορά
- Θερμοκρασίας ( $U_L$ )
- Ρυθμός ροής νερού  $\dot{m} = dm/dt$
- Ωφέλιμη θερμική ισχύς ( $Q_U$ )
- Προσπίπτουσα ακτινοβολία ( $G_T$ )
- Απόδοση συλλέκτη ( $\eta$ )
- Γινόμενο διαπερατότητας-ανακλαστικότητας ( $\tau\alpha$ )
- Ειδική θερμότητα  $C_p$

# Υπολογισμοί απόδοσης ηλιακού συλλέκτη (1)

Γενικά.. :

$$\eta = \frac{\text{Ωφέλιμη Ένέργεια}}{\text{Προσπίπτουσα Ένέργεια}} = \frac{Q_U}{A G_T}$$

$$Q_U = A[S - U_L(T_s - T_a)]$$



$$\eta = \frac{S - U_L(T_s - T_a)}{G_T}$$



👎  $T_s$  του απορροφητή δεν είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια του συλλέκτη και για να μετρηθεί χρειάζεται μεγάλος αριθμός αισθητήρων



**ΔΥΣΧΡΗΣΤΗ**

👍 Αντίθετα, οι θερμοκρασίες εισόδου, εξόδου του νερού και περιβάλλοντος μετρώνται εύκολα



$$Q_{U_{\max}} = A[S - U_L(T_i - T_a)]$$

Για  $T_s = T_i$

# Υπολογισμοί απόδοσης ηλιακού συλλέκτη (2)

Η απόδοση του εναλλάκτη θα είναι  $F_R = \frac{Q_U}{Q_{U \max}} \Rightarrow Q_U = F_R A [S - U_L (T_i - T_a)]$

$$\rightarrow \eta = \frac{F_R A [S - U_L (T_i - T_a)]}{A G_T} = \frac{F_R S}{G_T} - U_L \frac{T_i - T_a}{G_T}$$

- $S = G_T (\tau \alpha)$
- Η  $U_L$  βρίσκεται με υπολογισμό των θερμικών απωλειών από όλες τις επιφάνειες του συλλέκτη, με χρήση των νόμων διάδοσης θερμότητας (αγωγή-μεταφορά-ακτινοβολία).

# Υπολογισμοί απόδοσης ηλιακού συλλέκτη (3)

Οπτική απόδοση συλλέκτη



$$\eta = F_R (\tau\alpha) - U_L \frac{T_i - T_a}{G_T}$$

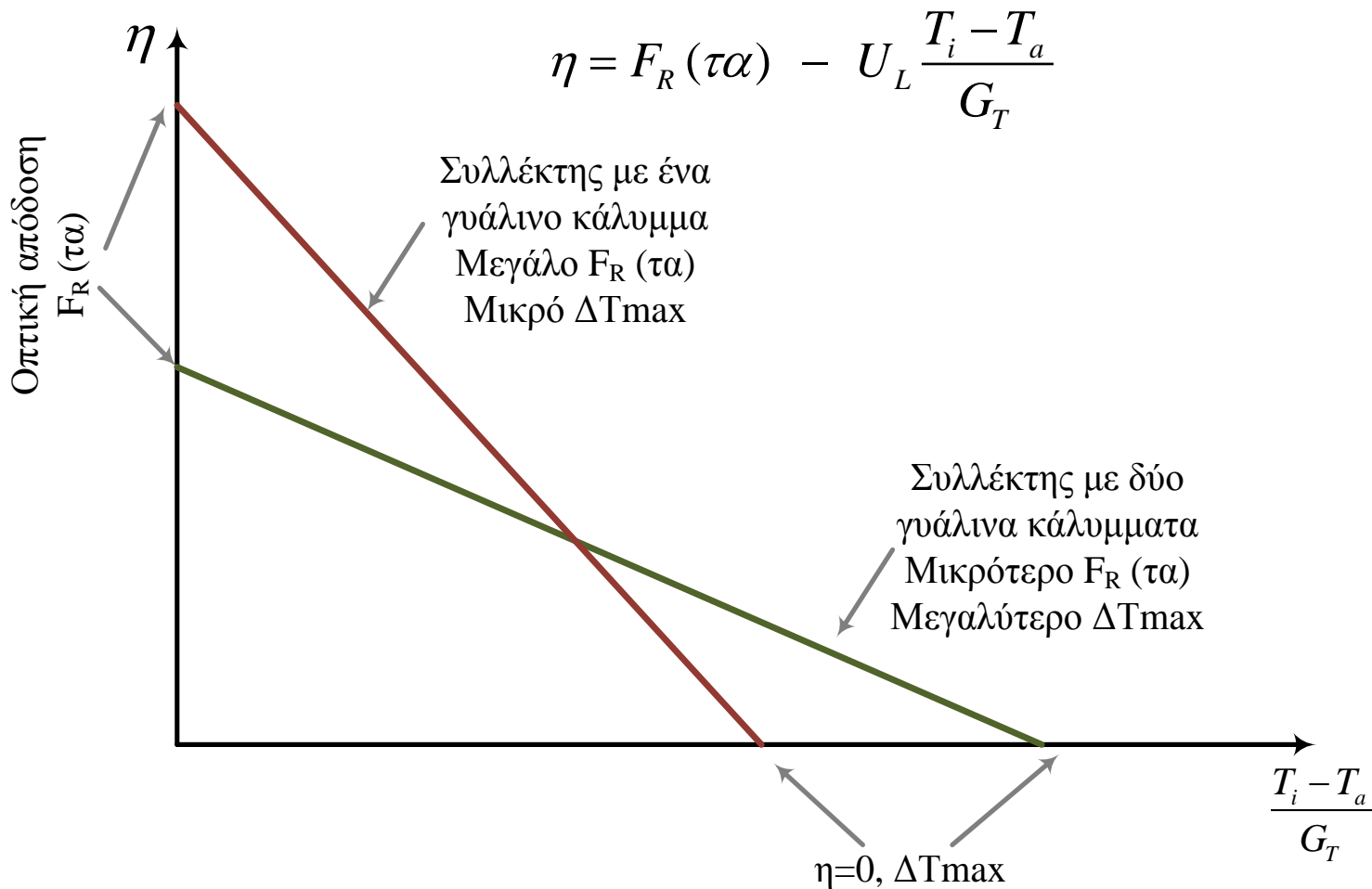
Το σημείο  $\eta=0$  ονομάζεται σημείο στασιμότητας, γιατί, σε συλλέκτη με φυσική κυκλοφορία νερού, σταματάει η ροή. Απόδειξη..

$$Q_U = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad \longrightarrow \quad \eta = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A G_T}$$

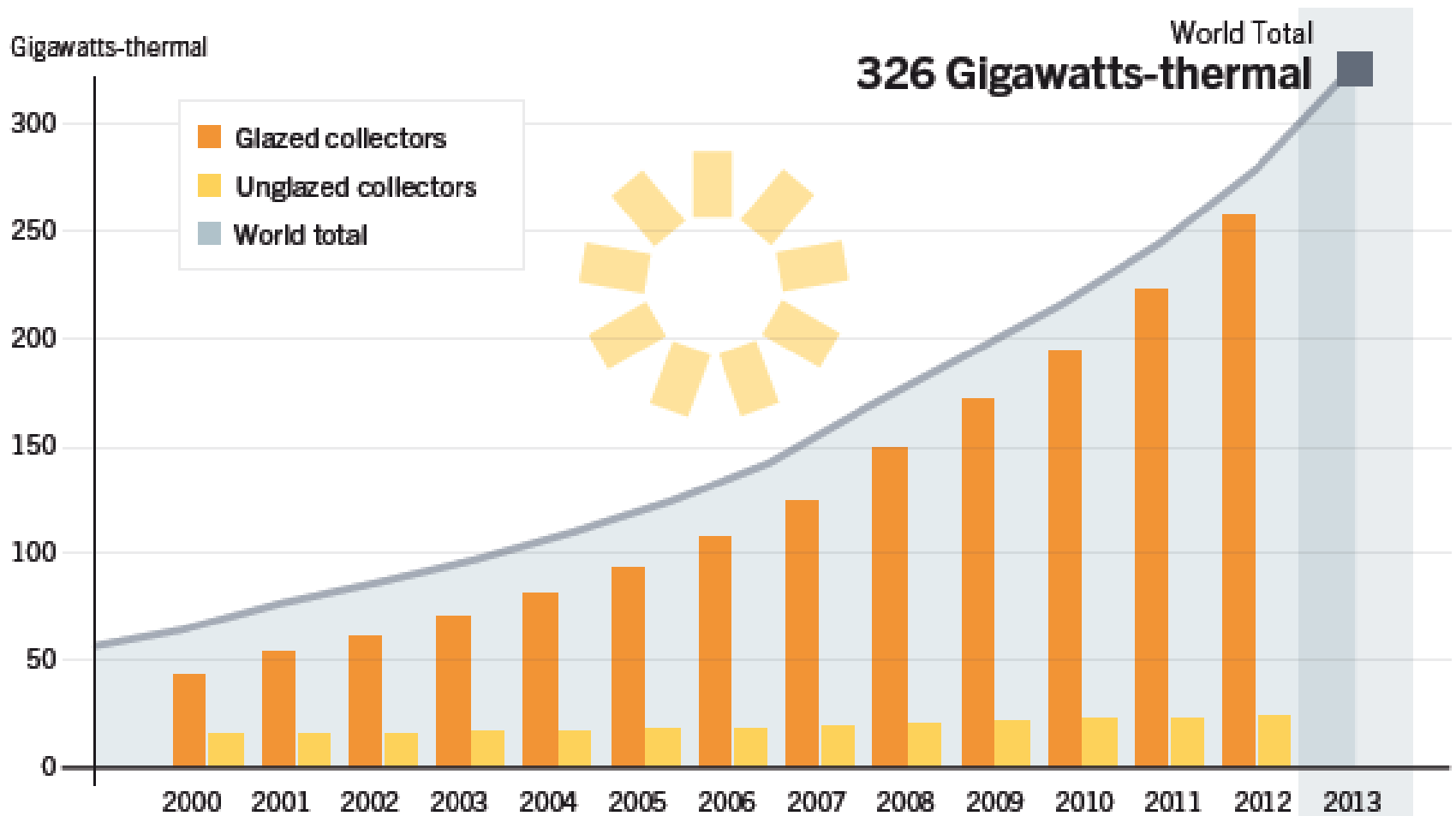
Είναι προφανές ότι όταν  $\eta=0$ , είτε  $T_o=T_i$ , είτε  $\dot{m}=0$

Για φυσική ροή του νερού ισχύουν και τα δύο.

# Υπολογισμοί απόδοσης ηλιακού συλλέκτη (4)

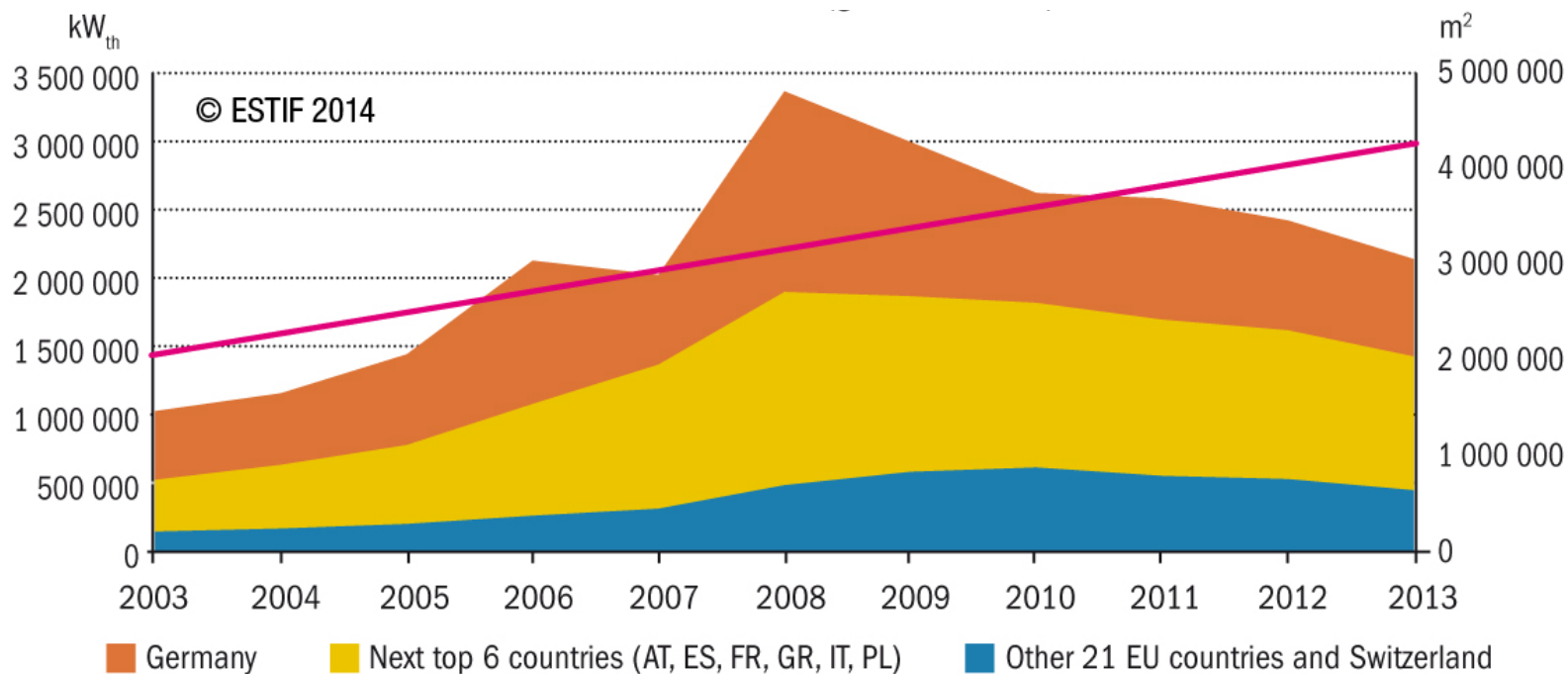


# Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ηλιακών θερμικών νερού



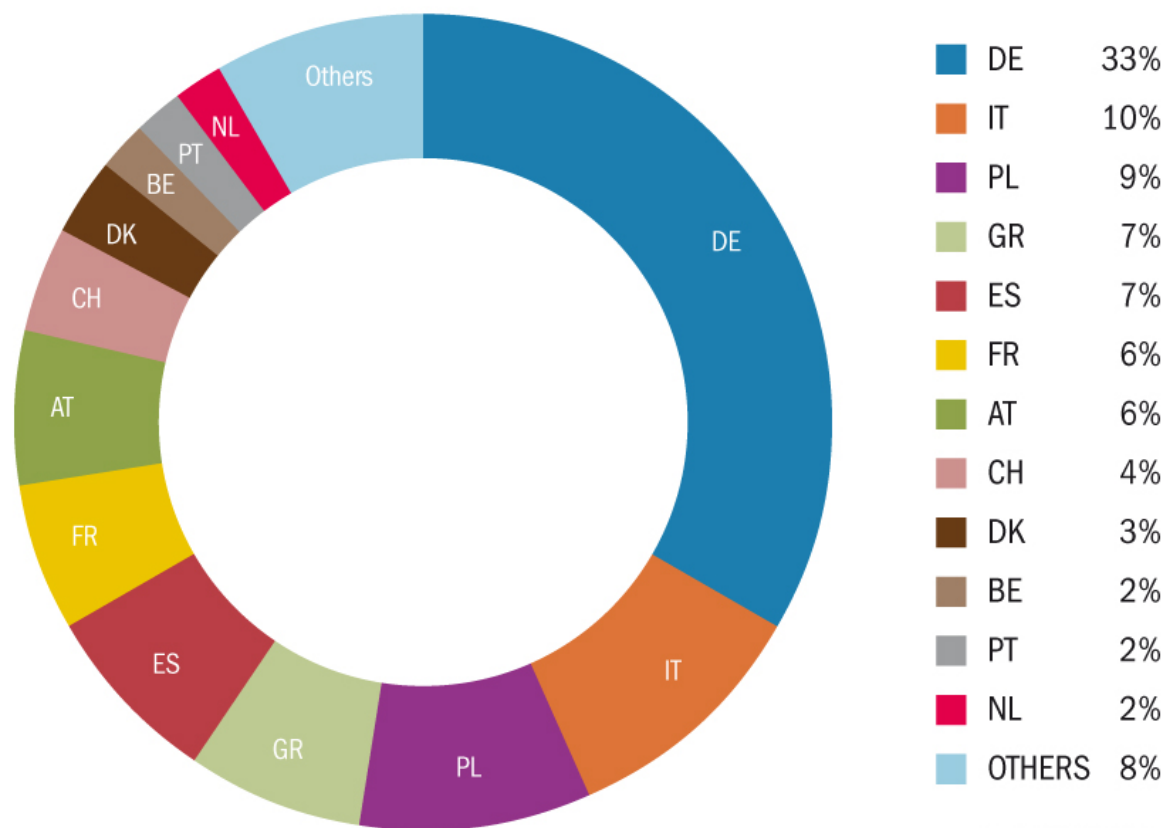
# Στοιχεία αγοράς ηλιακών θερμικών (1)

## Μερίδια αγοράς τεχνολογίας ηλιακών θερμικών



# Στοιχεία αγοράς ηλιακών θερμικών (2)

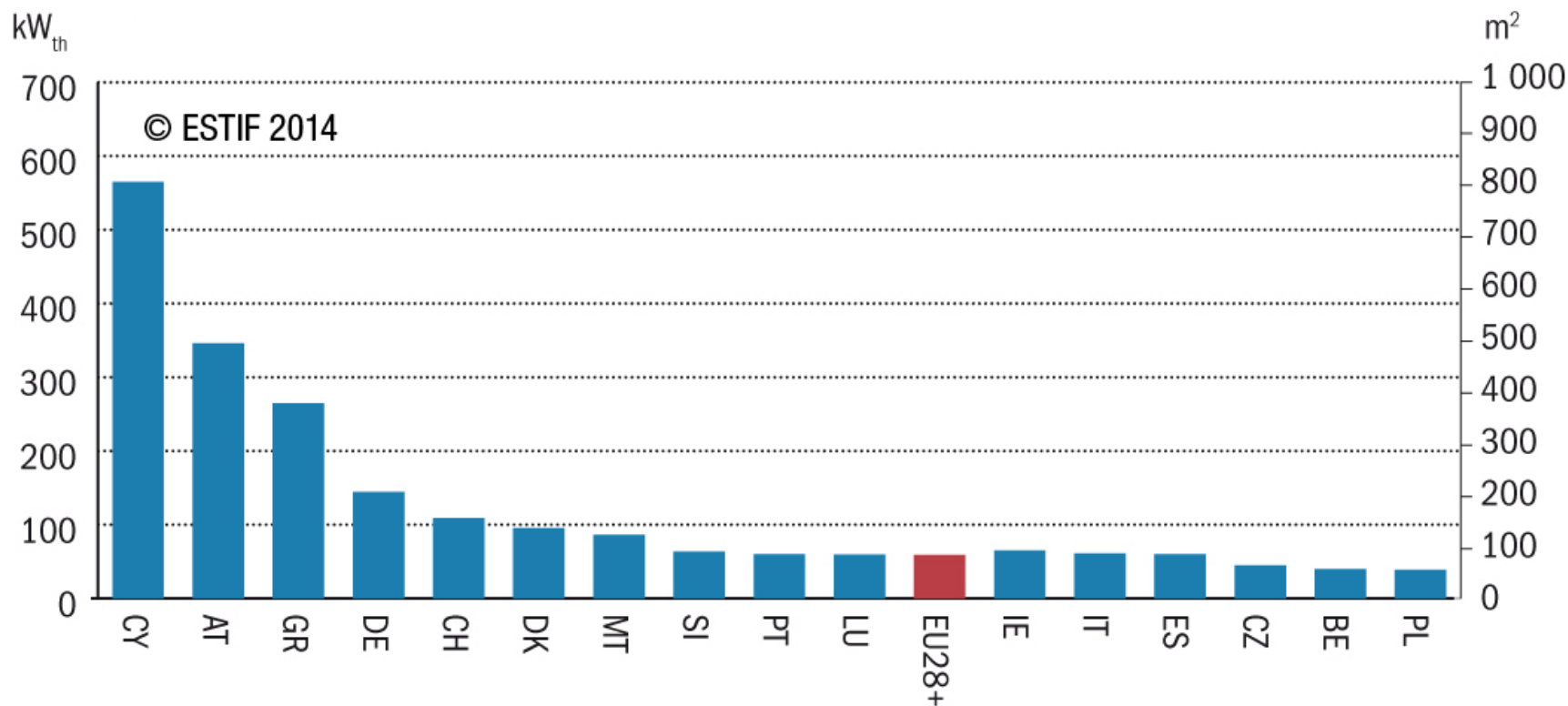
## Μερίδια αγοράς τεχνολογίας ηλιακών θερμικών





# Στοιχεία αγοράς ηλιακών θερμικών (3)

Εγκατεστημένη χωρητικότητα ηλιακών θερμικών στην Ευρώπη



# Συστήματα ηλιακής ενέργειας

## Άμεση μετατροπή σε ηλεκτρισμό



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarparkTh%C3%BCngen-020.jpg>



[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power\\_plants\\_in\\_the\\_Mojave\\_Desert](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_plants_in_the_Mojave_Desert)

# Συστήματα ηλιακής ενέργειας

## Μετατροπή σε ηλεκτρισμό με ενδιάμεσο θερμοδυναμικό μετασχηματισμό

### Ηλιακοί Πύργοι



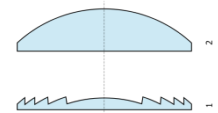
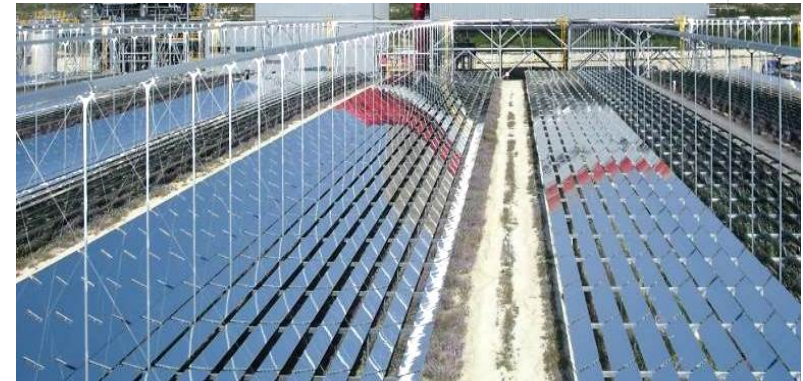
### Παραβολικά γραμμικής εστίας



### Παραβολικά σημειακής εστίας



### Φακοί Fresnel



# Παραβολικά συστήματα γραμμικής εστίας



[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power\\_in\\_California](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_in_California)

- ❖ Προσανατολισμός εστίας: Βορράς-Νότος
- ❖ Κίνηση κατόπτρων : Ανατολή προς Δύση (sun trackers)
- ❖ Θέρμανση συνθετικού λαδιού στους 400°C
- ❖ Ατμός υψηλής θερμοκρασίας οδηγεί τουρμπίνες (απόδοση ρεκόρ: 20%)

# Παραβολικά συστήματα σημειακής εστίας



Sandia National  
Laboratories (SNL)  
& Stirling Energy  
Systems (SES)

Ρεκόρ απόδοσης  
μετατροπής Solar-to-  
grid: 31,25%  
(Φεβ. 2008)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power)

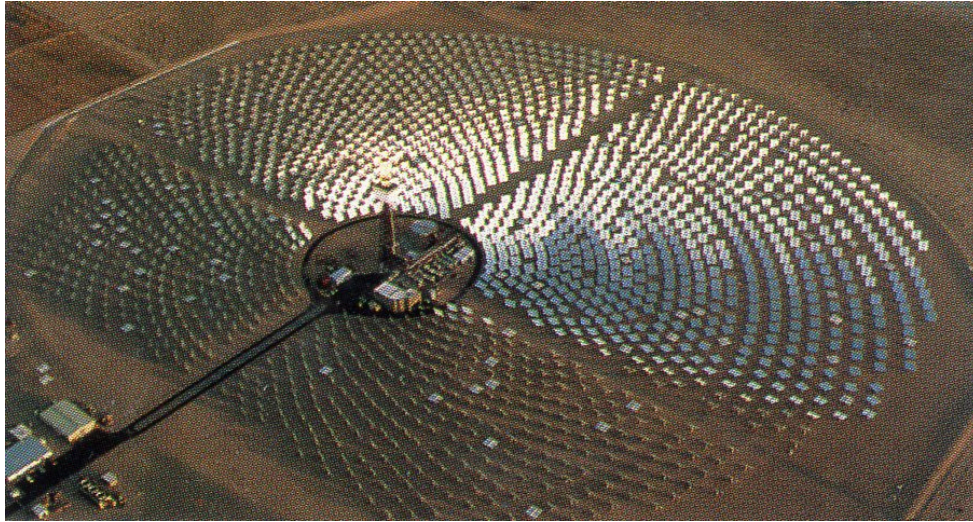
- ❖ Συγκέντρωση της ηλ. ακτινοβολίας από το «ηλιακό πιάτο» στον δέκτη
- ❖ Μεταφορά της θερμικής ενέργειας στα έμβολα μηχανής υδρογόνου
- ❖ Παραγωγή μηχανικού έργου (κίνηση ηλεκτρικών μηχανών)
- ❖ Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ρεκόρ απόδοσης: 31.25% (2008))

# Φακοί Fresnel



Αγωγός  
ρευστού ή  
φωτοβολταϊκή  
συστοιχία  
συνήθως  
υψηλής  
απόδοσης  
μετατροπής  
(π.χ. GaAs)

# Ηλιακοί Πύργοι



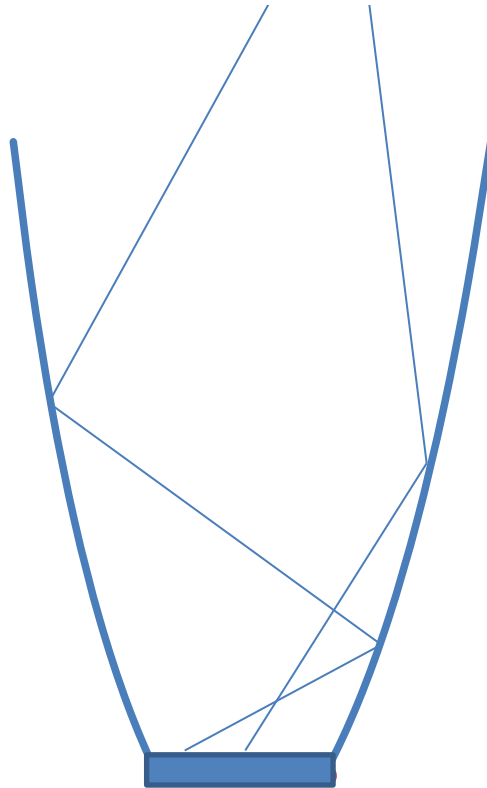
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_Two\\_Power\\_Tower\\_Project.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Two_Power_Tower_Project.jpg)



[http://en.wikipedia.org/wiki/PS10\\_solar\\_power\\_plant](http://en.wikipedia.org/wiki/PS10_solar_power_plant)

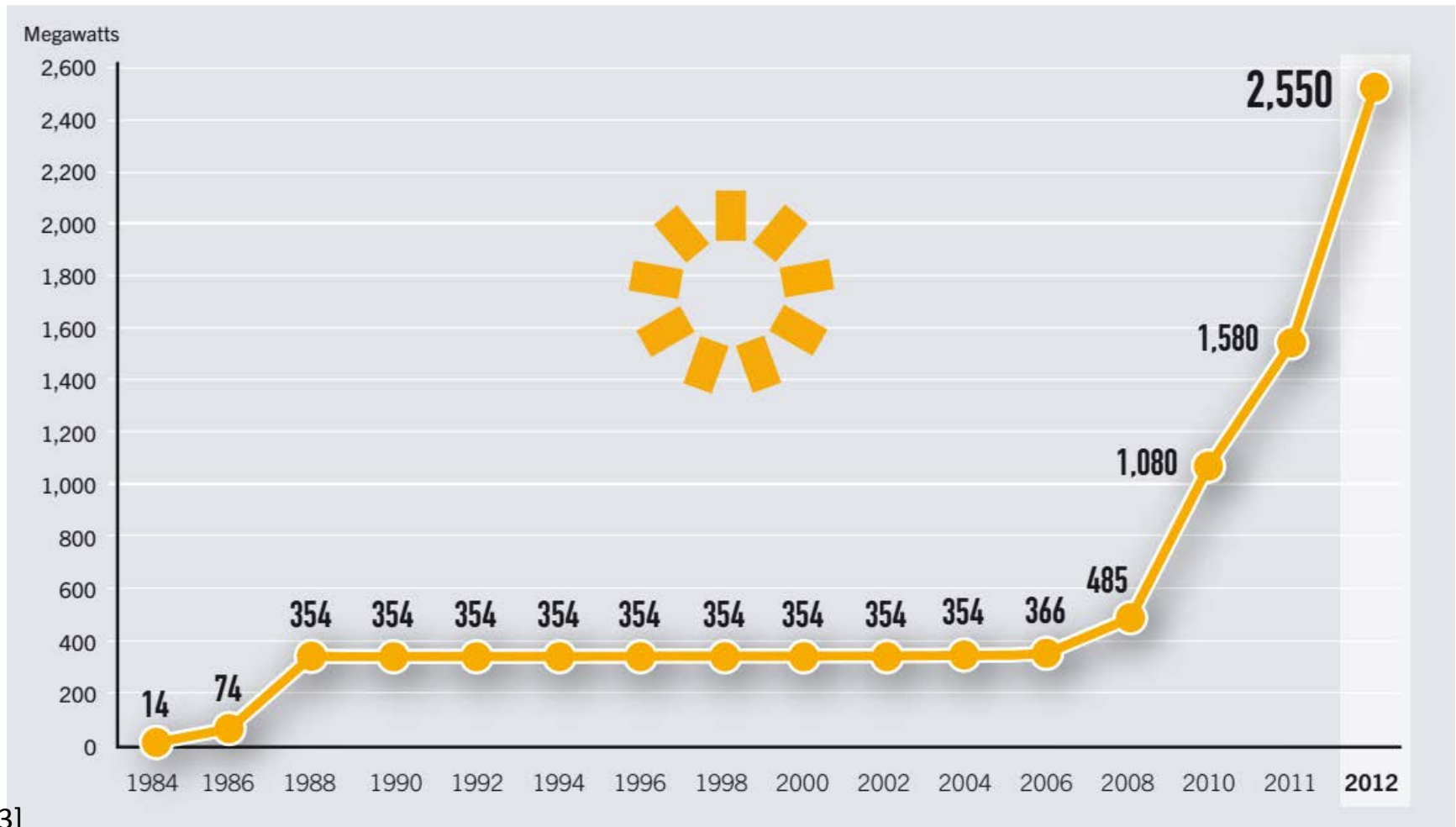
# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Σύνθετα Παραβολικά Συγκεντρωτικά (CPC)

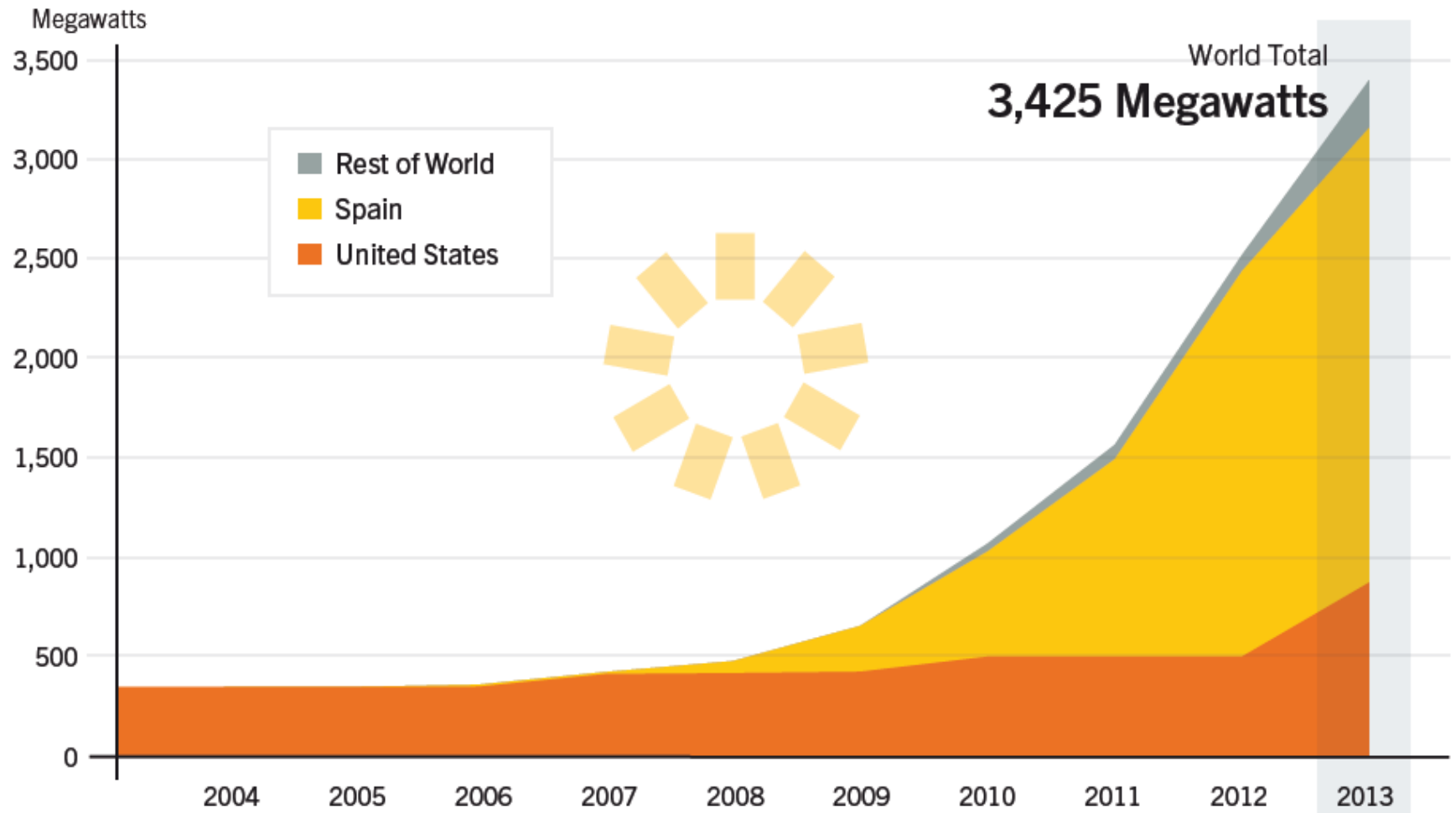




# Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς συγκεντρωτικών ηλιακών θερμικών (1)

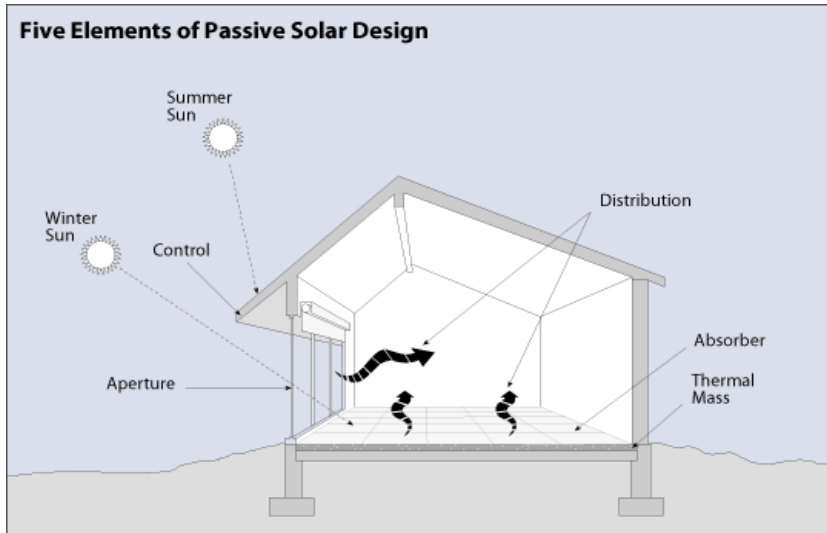


# Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς συγκεντρωτικών ηλιακών θερμικών (2)

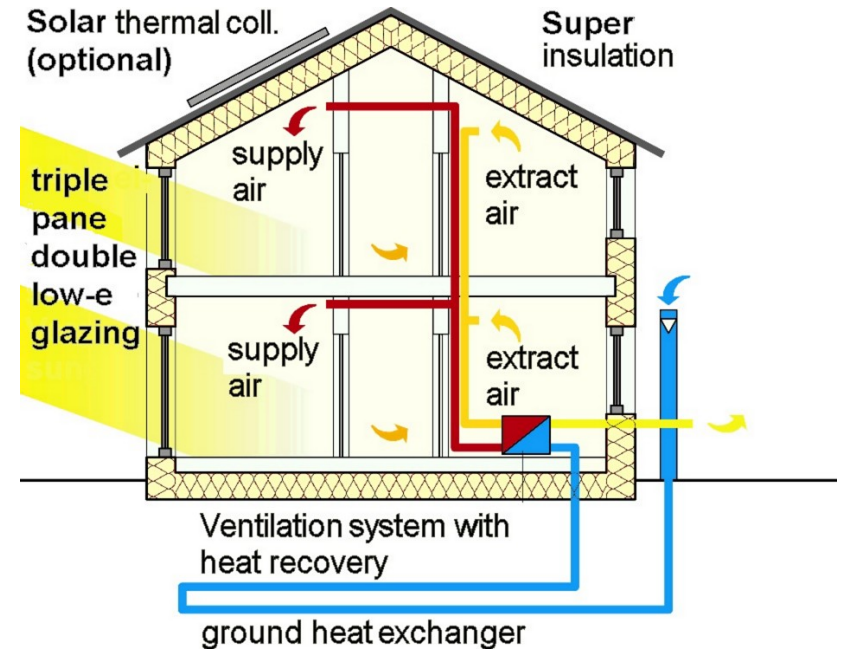


# Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

## Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική (1)



[http://simple.wikipedia.org/wiki/Passive\\_solar\\_building\\_design](http://simple.wikipedia.org/wiki/Passive_solar_building_design)



<http://gu.wikipedia.org/wiki>

# ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

## Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική (2)



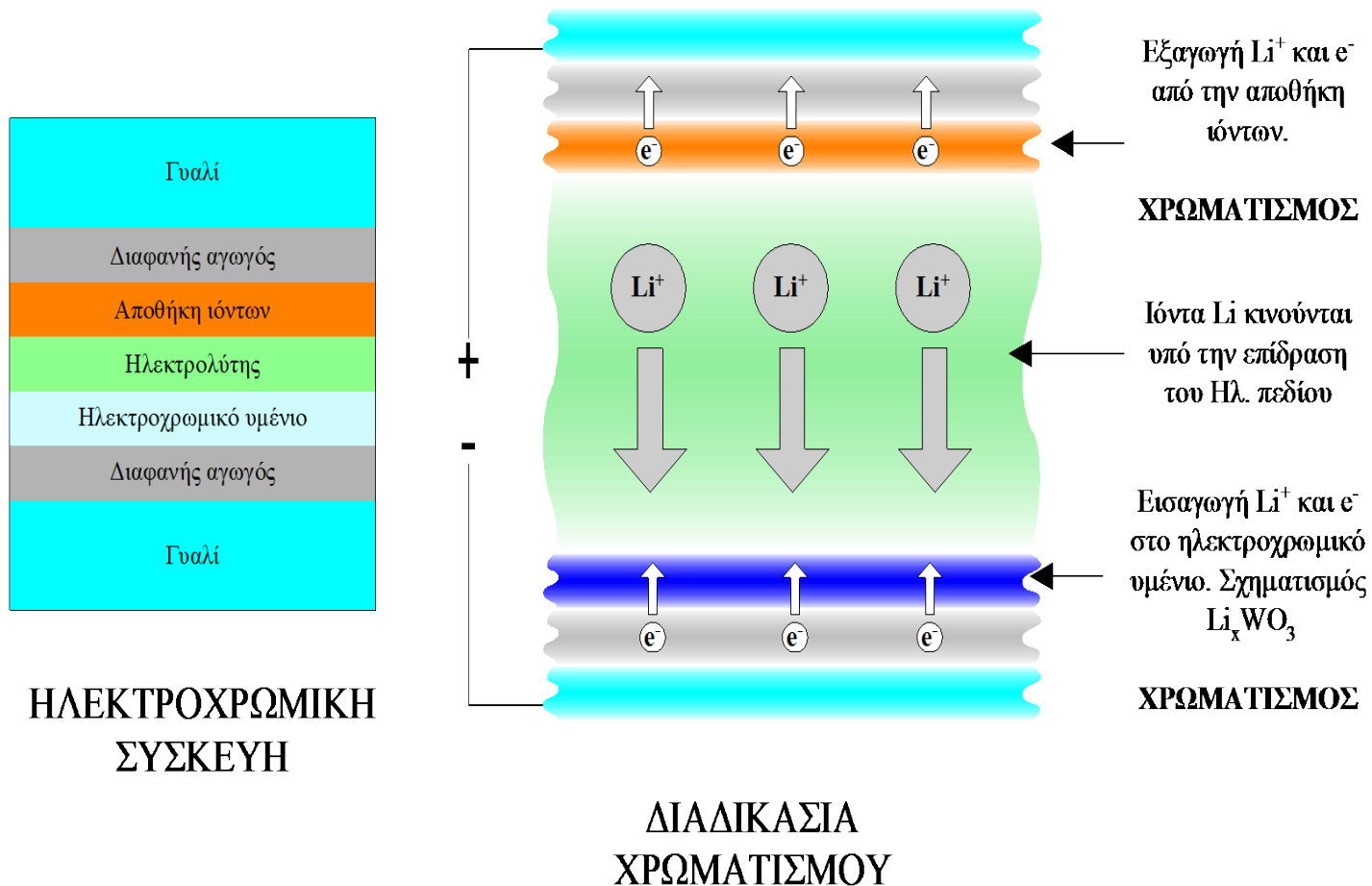
[http://en.wikipedia.org/wiki/Creative\\_Energy\\_Homes](http://en.wikipedia.org/wiki/Creative_Energy_Homes)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)

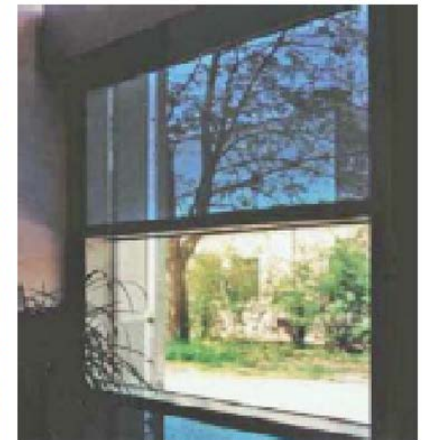
# Δυναμικά Κτήρια (1)

## «Έξυπνα» ηλεκτροχρωμικά παράθυρα (α)



# Δυναμικά Κτήρια (1)

«Έξυπνα» ηλεκτροχρωμικά παράθυρα (β)

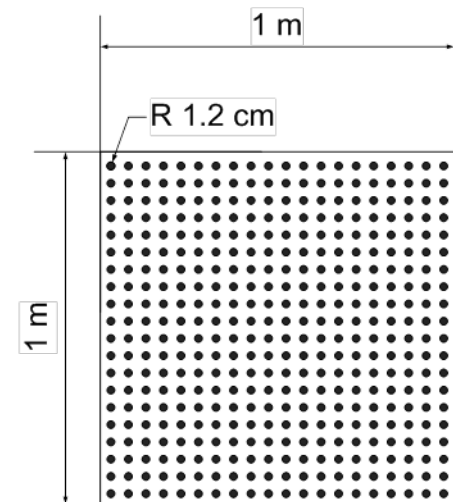
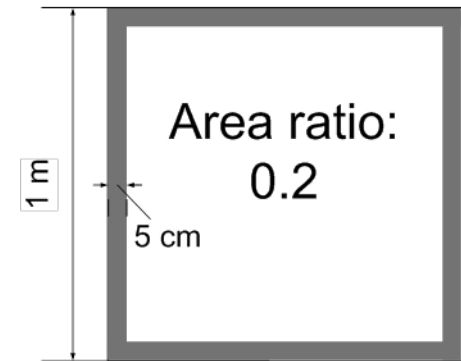
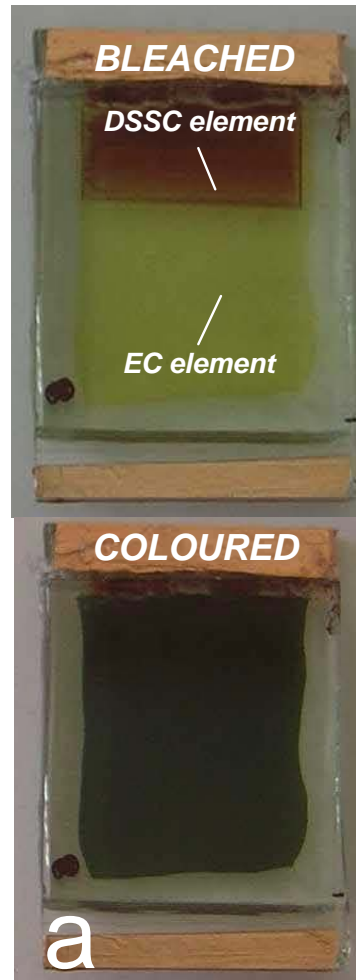
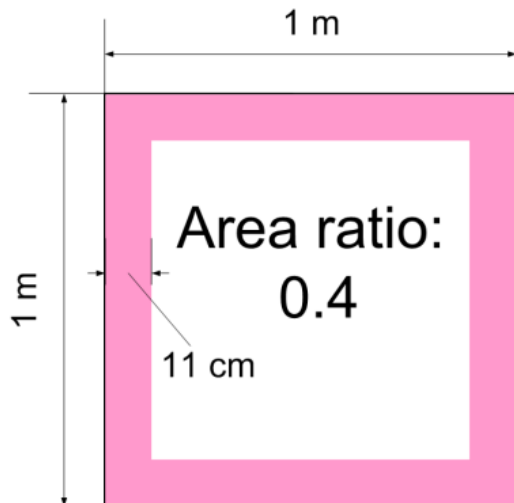
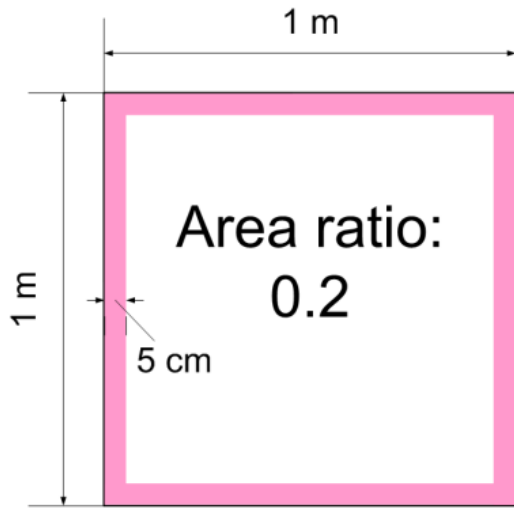


[http://en.wikipedia.org/wiki/Electrochromic\\_devices](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrochromic_devices)

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Figure\\_4\\_-\\_Glass\\_electrochromic\\_coating.PNG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Figure_4_-_Glass_electrochromic_coating.PNG)

# Δυναμικά Κτήρια (2)

Φωτο-ηλεκτροχρωμικά παράθυρα για ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



# Τέλος Ενότητας



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015.**

«**Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ενότητα: Ηλιακή Ενέργεια & Εφαρμογές**»

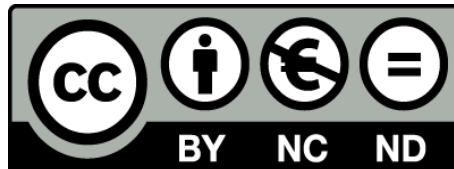
Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2015**. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

*<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1953&id=4284>*



# Σημείωμα Αδειοδότησης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι πηγές των εικόνων είναι:

- [1] C. Julian Chen, *Physics of Solar Energy*, Department of Applied Physics and Applied Mathematics, Columbia University, 2011, Jon Wiley & Sons
- [2] REN21 – Renewable Policy Network for the 21st Century: *Renewables 2012 – Global Status Report*, [www.ren21.net](http://www.ren21.net)
- [3] REN21 – Renewable Policy Network for the 21st Century: *Renewables 2013 – Global Status Report*, [www.ren21.net](http://www.ren21.net)
- [4] <http://www.bp.com/en/global/alternative-energy/our-businesses/solar-power.html>
- [5] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>
- [6] [http://www.directindustry.com/prod/kipp-zonen/solar-trackers-9079-519672.html#product-item\\_373339](http://www.directindustry.com/prod/kipp-zonen/solar-trackers-9079-519672.html#product-item_373339)

*\*Όλοι οι διαδικτυακοί ιστότοποι που αναφέρονται ως πηγές εικόνων είναι ενεργοί στις 28/2/2015*

