

# Φύση του φωτός



**Κύμα;**

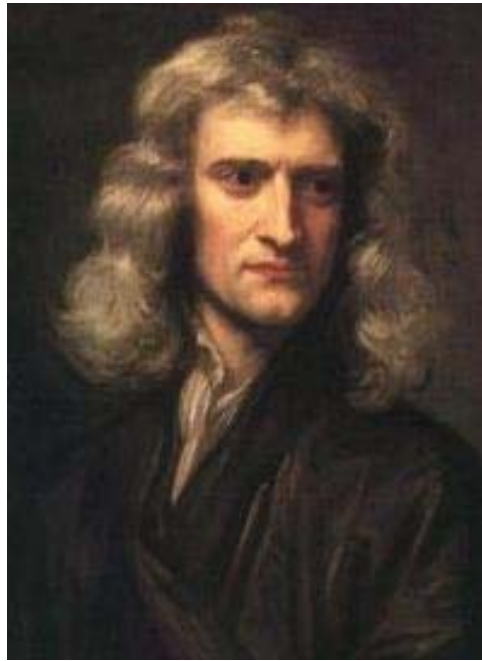
**Τι είμαι;**



**Σωματίδια;**

Το 17<sup>ο</sup> αιώνα είχαμε διαφωνίες για τη φύση του φωτός

Ανάκλαση ————— Διάθλαση



**Isaac Newton**  
1643 - 1727

Το φως  
είναι  
σωματίδια

Όχι! Το  
φως είναι  
κύμα



**Christian Huygens**  
1629 - 1695

# 100 χρόνια μετά τη διατύπωση της σωματιδιακής θεωρίας του φωτός από τον Νεύτωνα

Συμβολή

Περίθλαση

Το φως είναι  
κύμα!



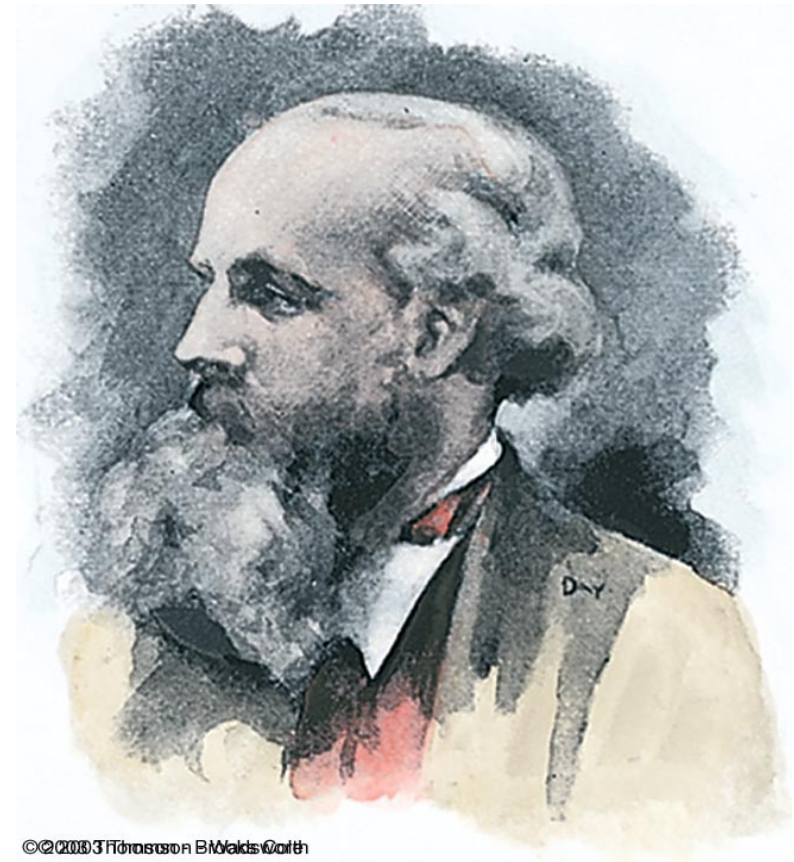
**Thomas Young**  
1773 - 1829

**50 χρόνια αργότερα (1865)**

**Maxwell**

Το φως είναι ΗΜ κύμα

αυξομειούμενα  
ηλεκτρικά και  
μαγνητικά πεδία.



©2003 Pearson Education, Inc.



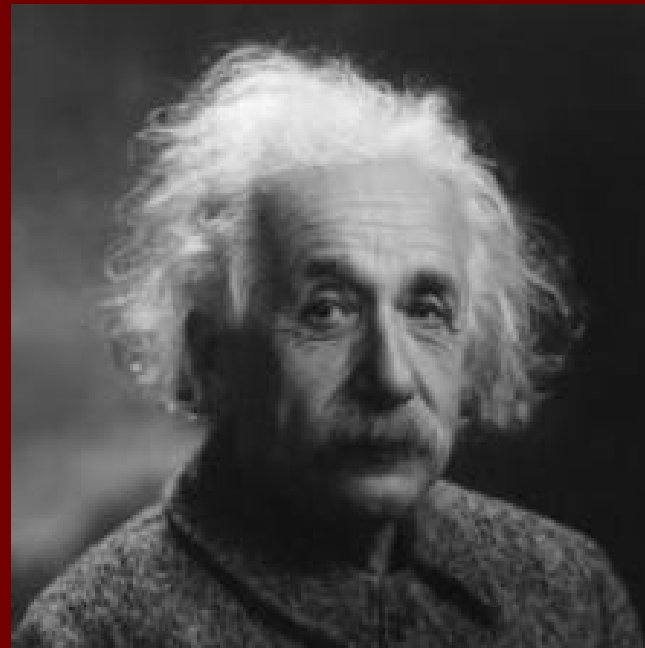
# Heinrich Rudolf Hertz

**Πρώτη εκπομπή και  
λήψη ΗΜ κυμάτων  
1885**

Η κυματική φύση του φωτός ήταν ευρέως αποδεκτή μέχρι το 1905.....

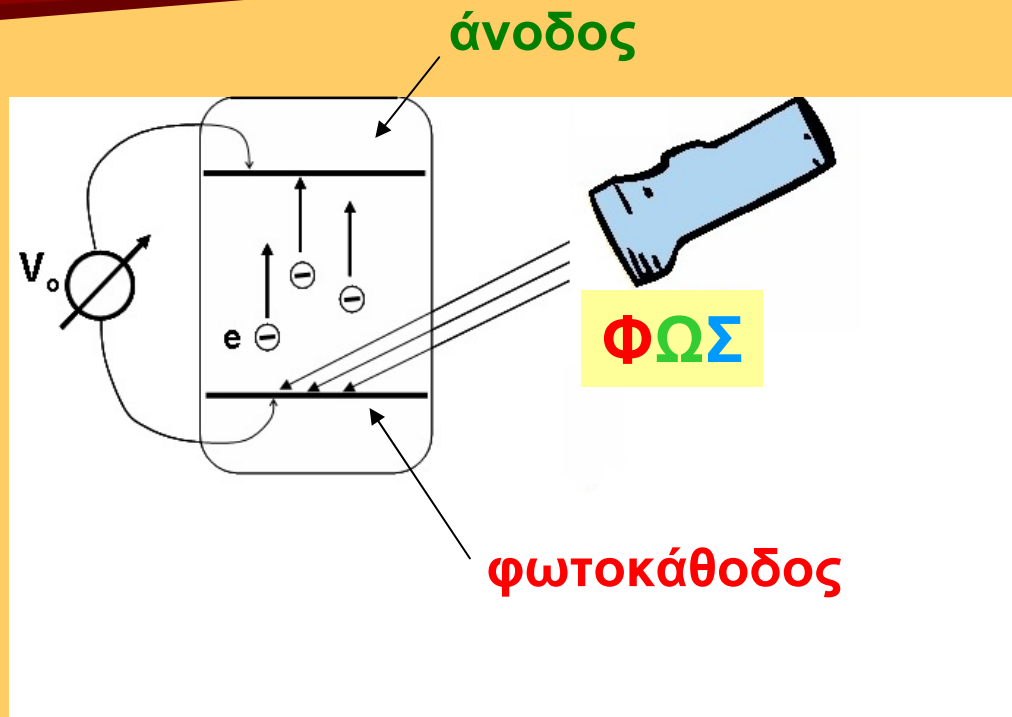
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Φως;  
Πακέτα  
ενέργειας



**Albert Einstein**  
**1879 - 1955**

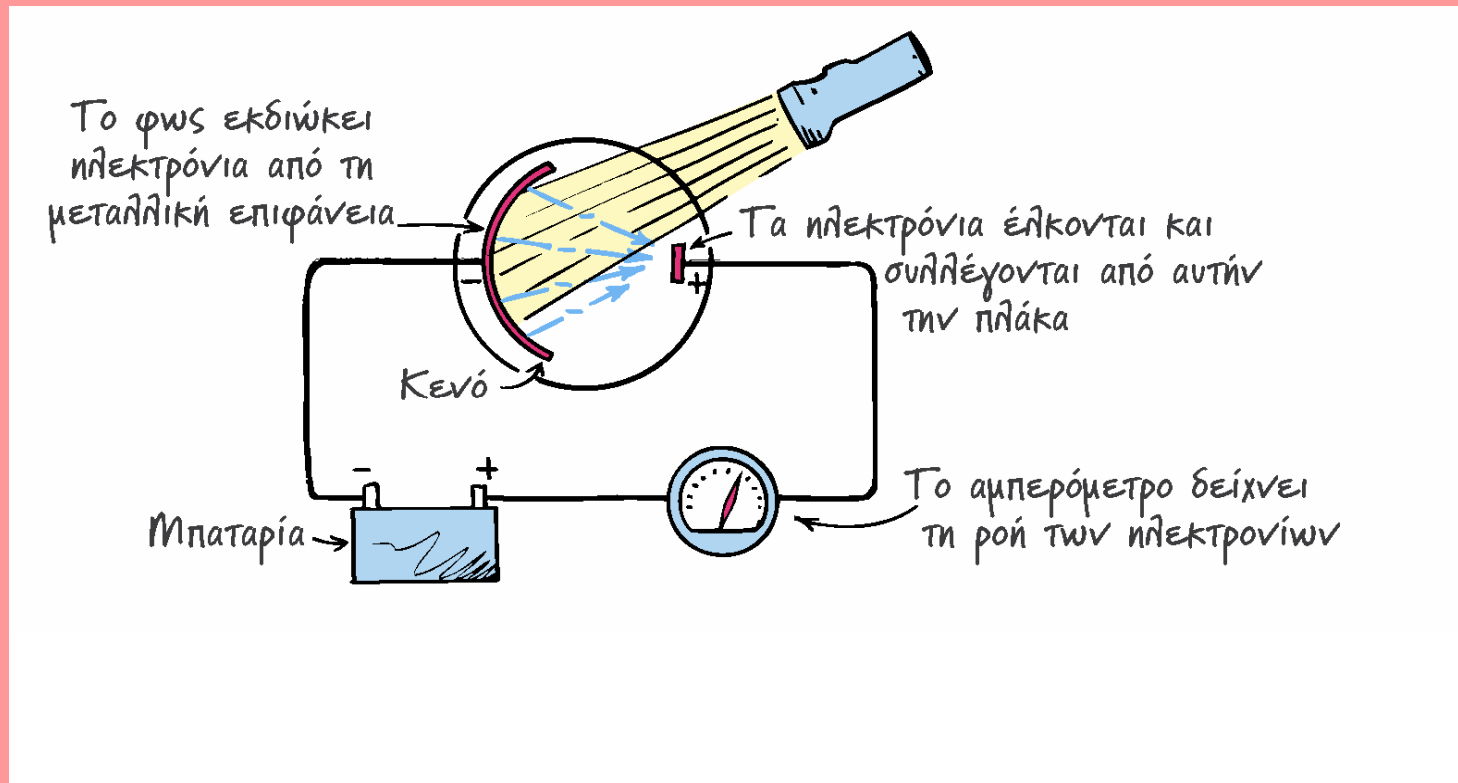
# Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



Όταν φωτεινή ή υπεριώδης ακτινοβολία πέφτει στην επιφάνεια ενός μετάλλου, εκπέμπονται ηλεκτρόνια από αυτό

# Πείραμα

Όσο αμυδρή και αν είναι η πηγή φωτός το αμπερόμετρο δείχνει αμέσως ρεύμα





# Παρατηρήσεις

1) Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στην κάθοδο και ο χρόνος εμφάνισης του ρεύματος δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός.

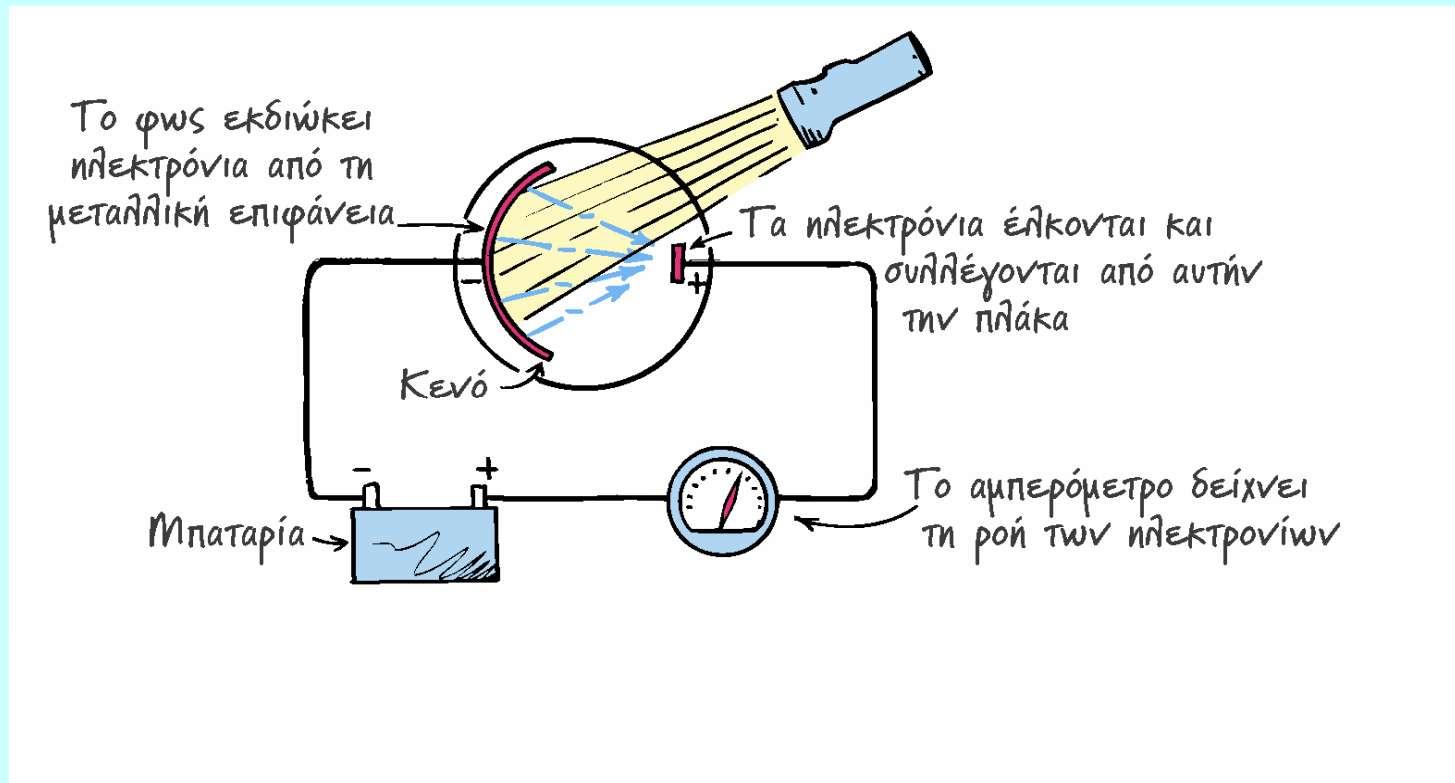
**Σύμφωνα με την κλασική κυματική θεωρία για το φως:**

Αν η πηγή φωτός είναι αμυδρή τα ηλεκτρόνια αποκτούν με κάποια καθυστέρηση αρκετή ενέργεια δόνησης για να αποσπαστούν. Κάτι τέτοιο όμως δεν συνέβαινε.

**ΠΡΟΒΛΗΜΑ!!!!**

# Πείραμα

Όσο ισχυρότερος ο φωτισμός τόσο μεγαλύτερη η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος



# Παρατηρήσεις

2) Όσο ισχυρότερη (πολύ φωτεινή) είναι η δέσμη φωτός που πέφτει στην φωτοκάθοδο τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια εκδιώκονται από το μέταλλο.

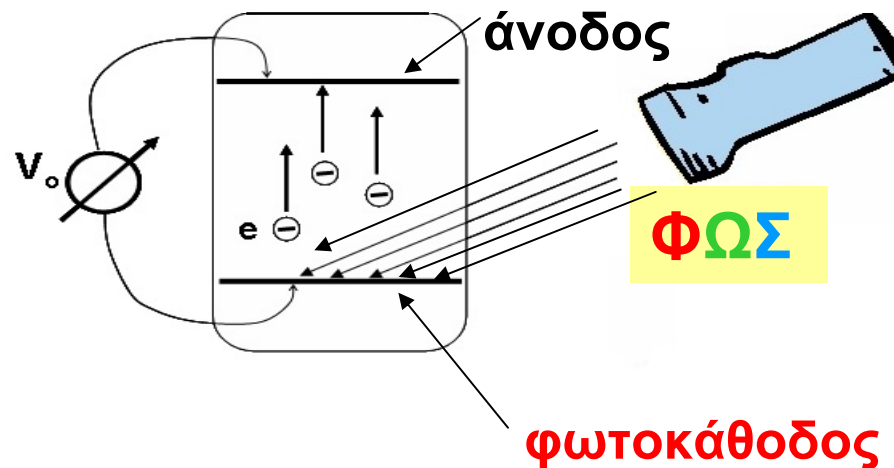
**Σύμφωνα με την κλασική κυματική θεωρία για το φως:**

Αν η πηγή φωτός είναι πολύ φωτεινή σημαίνει ισχυρά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία άρα θα τραβήξει με περισσότερη δύναμη ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο αλλά δε θα επηρεάσει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που εκδιώκονται.

Κάτι τέτοιο όμως δεν συνέβαινε.

**ΠΡΟΒΛΗΜΑ!!!!**

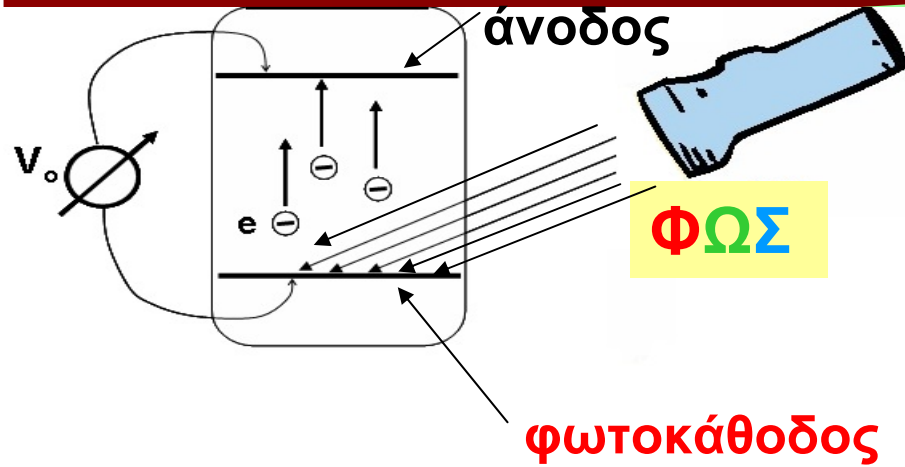
Μπορούμε να εκτιμήσουμε την ενέργεια των ηλεκτρονίων που φεύγουν από την φωτοκάθοδο μετρώντας τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην φωτοκάθοδο και την άνοδο.



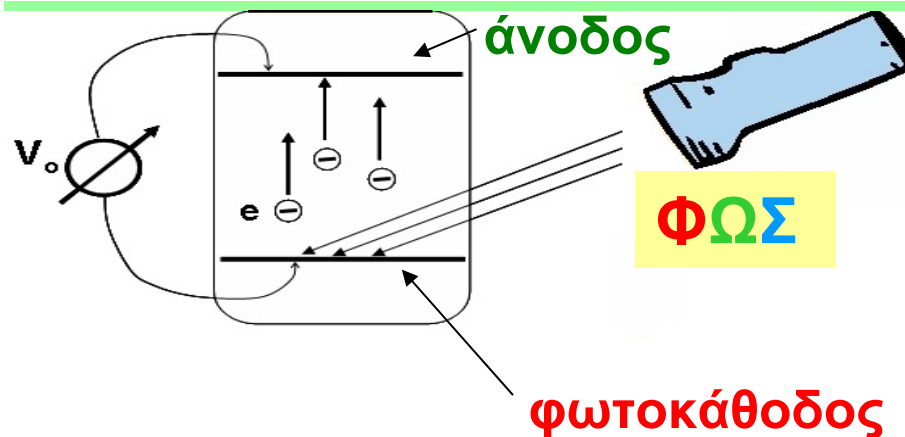
Όσο περισσότερα φωτοηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο τόσο μεγαλώνει η διαφορά δυναμικού  $V$ . Έρχεται κάποια στιγμή που η διαφορά δυναμικού παίρνει τιμή  $V_0$  τέτοια που είναι αδύνατο πια καινούργια ηλεκτρόνια να πάνε στην άνοδο.

Το  $V_0$  το λέμε δυναμικό αποκοπής. Όσο μεγαλύτερο το δυναμικό αποκοπής τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα των φωτοηλεκτρονίων

# Πείραμα

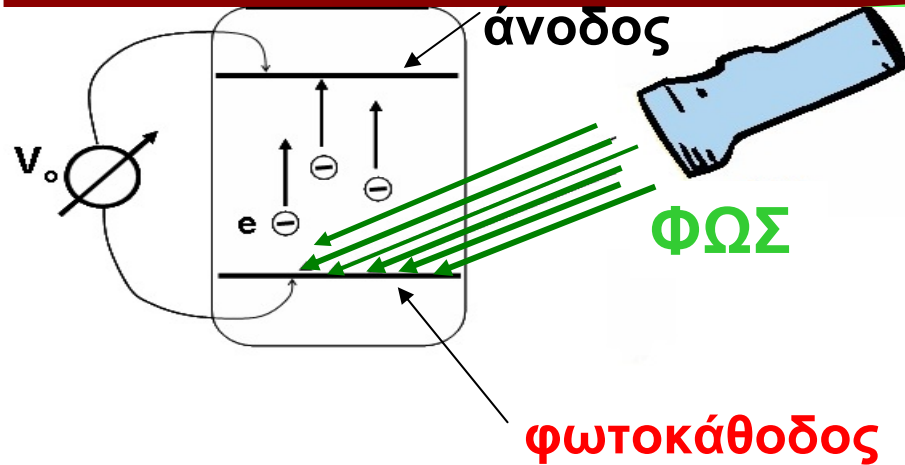


Πολύ φως  
Δυναμικό αποκοπής  $V_0$

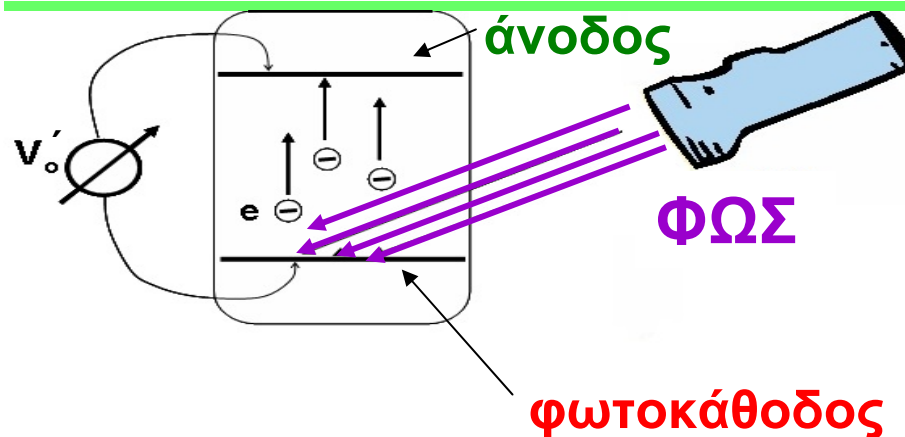


Λίγο φως  
Δυναμικό αποκοπής  $V_0$

# Πείραμα



Φως μικρής συχνότητας  
Δυναμικό αποκοπής  $V_0$



Φως μεγαλύτερης  
συχνότητας  
Μεγαλύτερο δυναμικό  
αποκοπής  
 $V'_0 > V_0$

# Παρατηρήσεις

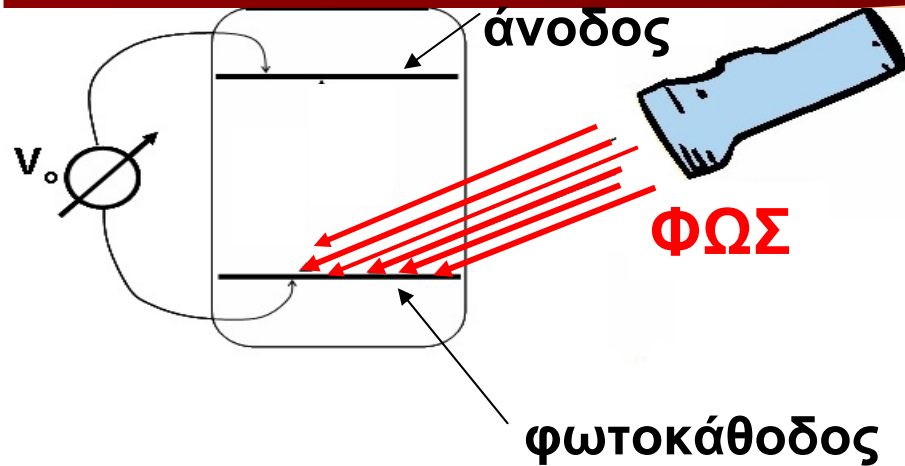
3) Η μέγιστη ταχύτητα των εξερχόμενων ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από τη φωτεινή ένταση παρά μόνο από την συχνότητα.

**Σύμφωνα με την κλασσική κυματική θεωρία για το φως:**

Όσο εντονότερη είναι η φωτεινή δέσμη (το οποίο σημαίνει ισχυρότερα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία) τόσο εντονότερα θα έπρεπε να εκτινάσσονταν τα ηλεκτρόνια από την φωτοκάθοδο. Και αυτό όμως δεν συνέβαινε.

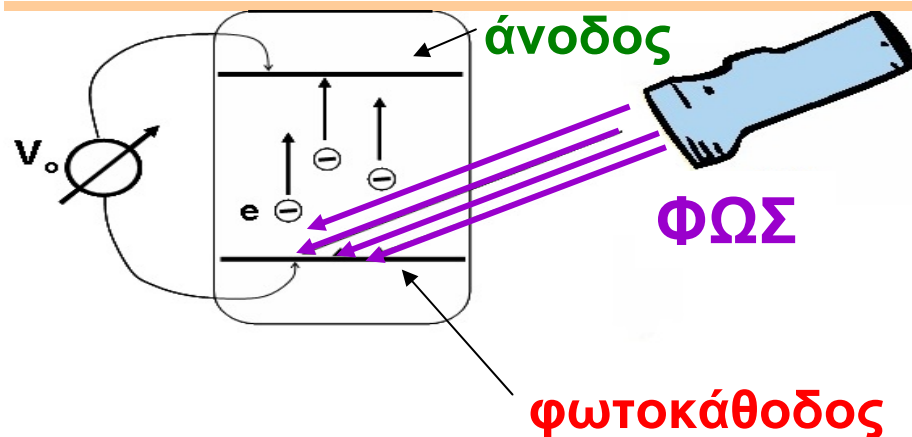
**ΠΡΟΒΛΗΜΑ!!!!**

# Πείραμα



Φως συχνότητας  
μικρότερης μιας  $\nu_{\min}$

Καθόλου  
φωτοηλεκτρόνια



Φως μεγαλύτερης της  
 $\nu_{\min}$  συχνότητας

Εκδιώκονται ηλεκτρόνια



# Παρατηρήσεις

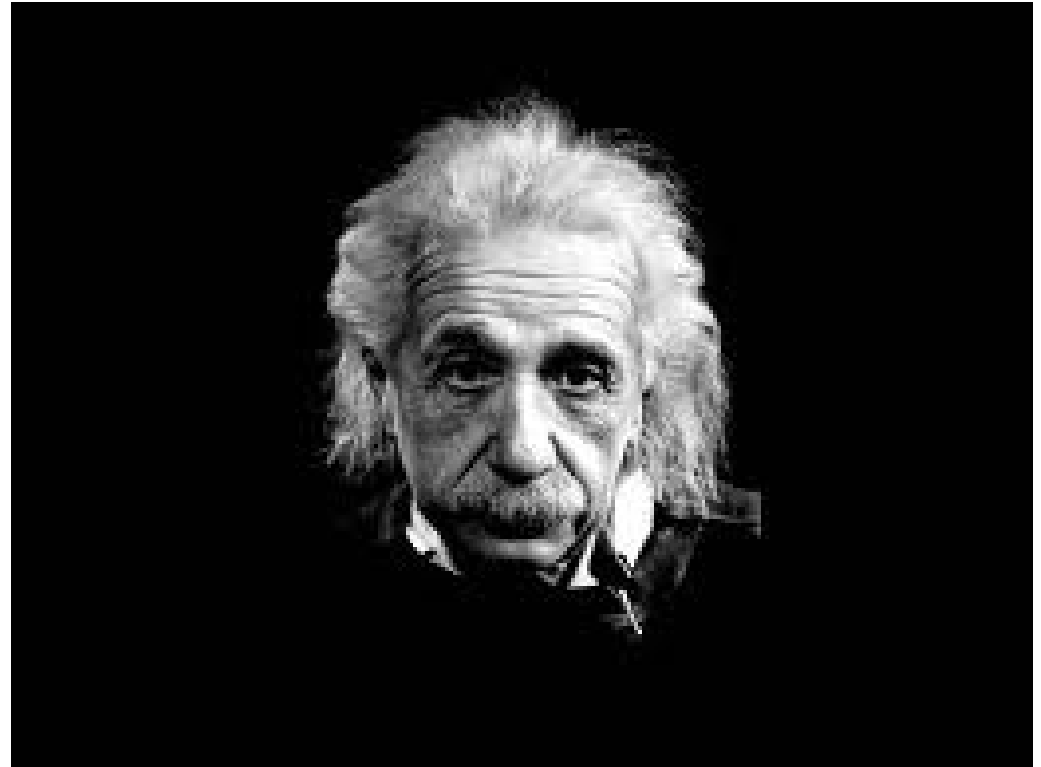
4) Το φαινόμενο παρατηρούνταν με φως που είχε συχνότητα μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή χαρακτηριστική του υλικού της φωτοκαθόδου.

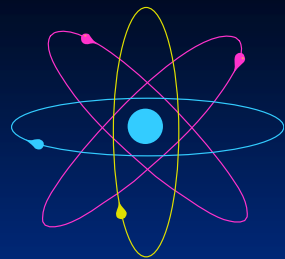
**Σύμφωνα με την κλασσική κυματική θεωρία για το φως:**

Ακόμη και με φως μικρής συχνότητας (ενέργειας) αν η φωτεινή δέσμη έπεφτε επί μεγάλο χρονικό διάστημα στην φωτοκάθοδο θα έδινε αρκετή ενέργεια στα ηλεκτρόνια του μετάλλου ώστε να τα διώξει. Και αυτό όμως δεν συνέβαινε.

**ΠΡΟΒΛΗΜΑ!!!!**

1905  
Εξήγηση



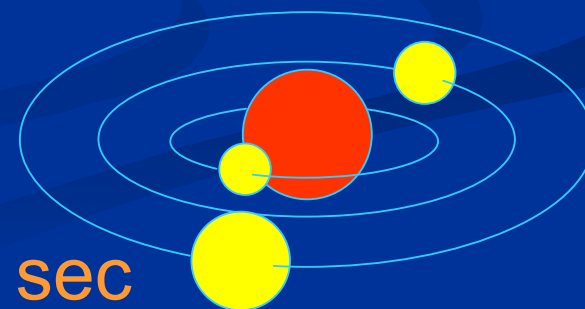


# Φως: δέσμη φωτονίων

- ✓ Για φως συγκεκριμένης συχνότητας, μεγάλη ένταση φωτεινής δέσμης σημαίνει μεγάλος αριθμός φωτονίων.
- ✓ Μονοχρωματική ΗΜ ακτινοβολία συχνότητας  $f$ , αποτελείται από φωτόνια που το καθένα έχει ενέργεια:

$$E = h \cdot f$$

Σταθερά του Planck:  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Joule sec}$



Άρα όταν ρίχνουμε μονοχρωματική ΗΜ ακτινοβολία συχνότητας  $f$  σε ένα μέταλλο , βροχή φωτονίων με ενέργεια  $hf$  πέφτουν πάνω του.

Ένα ηλεκτρόνιο του μετάλλου είτε απορροφά ολόκληρη την ενέργεια ενός φωτονίου ή τίποτε.

Για να διαφύγει ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο πρέπει να υπερνικήσει τις ελκτικές δυνάμεις που το κρατούν μέσα στο μέταλλο. Χρειάζεται λοιπόν ενέργεια  $W_{εξ}$  που τη λέμε έργο εξαγωγής και εξαρτάται μόνο από το είδος του μετάλλου.

Για να φύγει λοιπόν το ηλεκτρόνιο από το μέταλλο πρέπει η ενέργεια του φωτονίου που το χτυπά να είναι:

$$h \cdot f \geq W_{\varepsilon\xi}$$

Αν  $h \cdot f = W_{\varepsilon\xi}$  το ηλεκτρόνιο ίσα που βγαίνει από το μέταλλο

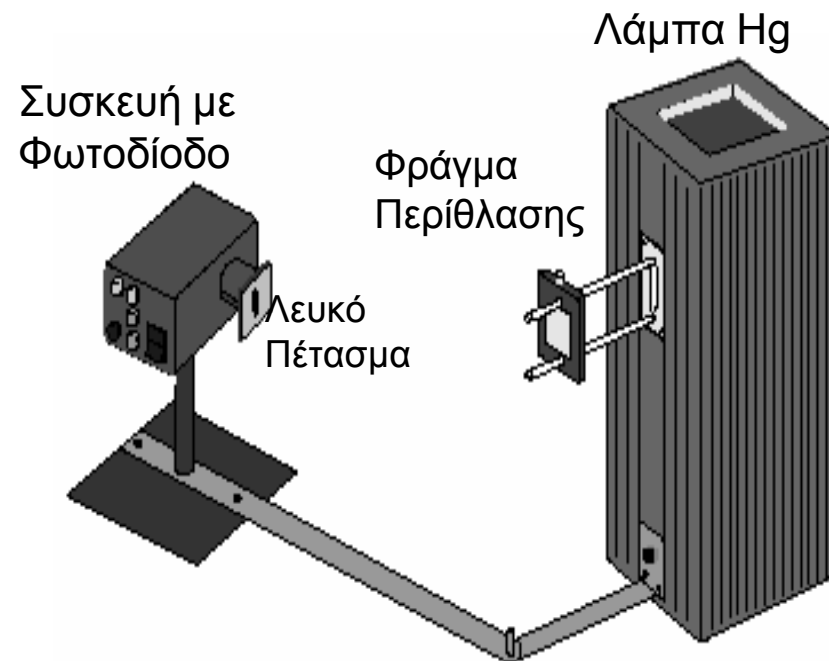
Αν  $h \cdot f > W_{\varepsilon\xi}$  το ηλεκτρόνιο βγαίνει από το μέταλλο και περισεύει και ενέργεια

Το περίσσευμα  $h \cdot f - W_{\varepsilon\xi} = \frac{1}{2} m u^2$  ← Γίνεται κινητική ενέργεια

# Τώρα όλα εξηγούνται

- 1) Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στην κάθοδο και δεν εξαρτάται από την ένταση και τη συχνότητα του φωτός.
- 2) Όσο ισχυρότερη (πολύ φωτεινή) είναι η δέσμη φωτός που πέφτει στην φωτοκάθοδο τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια εκδιώκονται από το μέταλλο.
- 3) Η μέγιστη ταχύτητα των εξερχόμενων ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από τη φωτεινή ένταση παρά μόνο από την συχνότητα.
- 4) Το φαινόμενο παρατηρούνταν με φως που είχε συχνότητα μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή χαρακτηριστική του υλικού της φωτοκαθόδου.

# Συσκευή για μελέτη φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο εργαστήριο



## Προτάσεις:

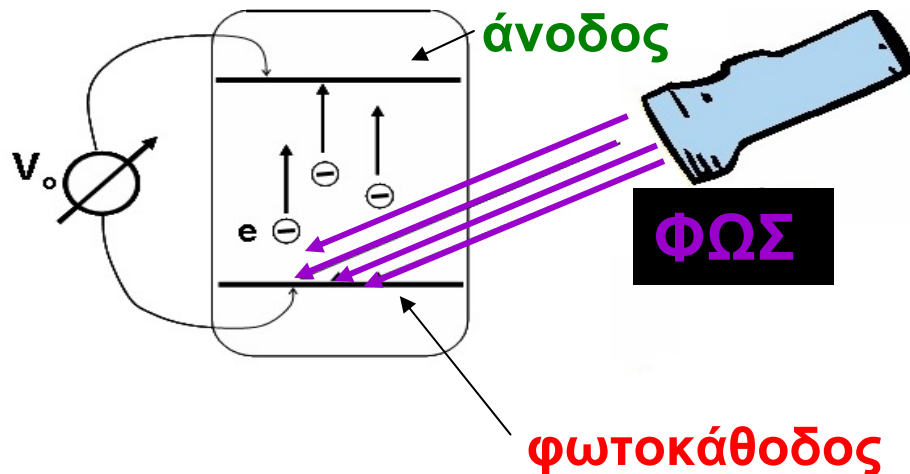
**Ρίχτε φως διαφορετικού χρώματος στη φωτοδίοδο**

**Ρίχτε φως διαφορετικής έντασης στη φωτοδίοδο**

**Βρείτε το δυναμικό εξαγωγής ενός μετάλλου**

# Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein

$$h \cdot f - W_{\varepsilon\xi} = \frac{1}{2} m u^2$$



Ενέργεια φρεναρίσματος:

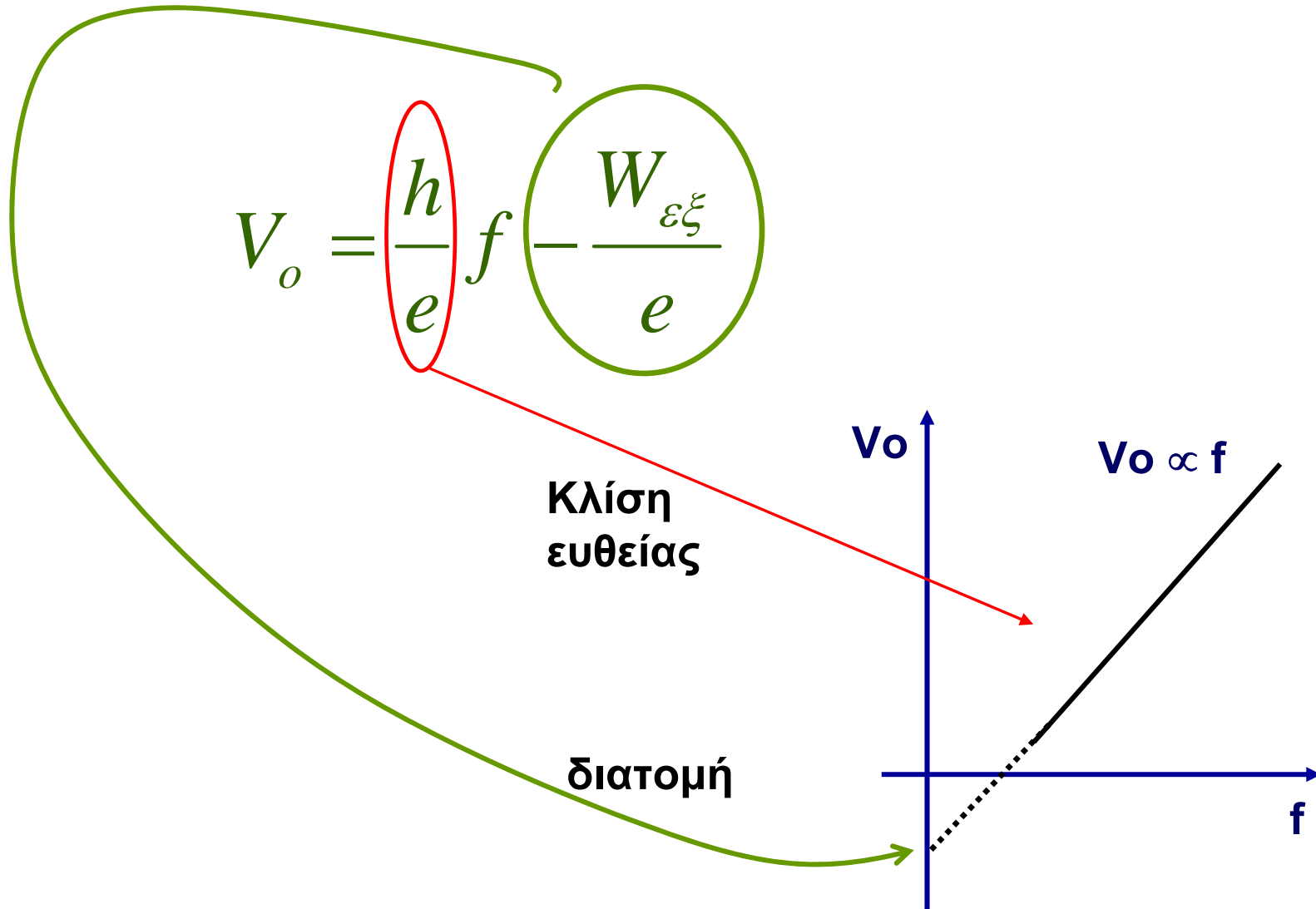
$$e \cdot V_0$$



# Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein

$$h \cdot f - W_{\varepsilon\xi} = e \cdot V_o \Leftrightarrow$$

$$V_o = \frac{h}{e} f - \frac{W_{\varepsilon\xi}}{e}$$



# Πρόβλημα

Θέλεις να τραβήξεις καλλιτεχνικές φωτογραφίες με την φωτογραφική σου μηχανή, οπότε είναι πολύ σημαντικό να μετρήσεις την ένταση του φωτός, που έρχεται από τα διάφορα αντικείμενα που υπάρχουν στο θέμα που θέλεις να φωτογραφήσεις.

Η ένταση του φωτός μετριέται με ένα φωτόμετρο. Για να κατασκευάσεις ένα απλό φωτόμετρο θα χρειαστείς μια φωτοδίοδο, η οποία θα μετατρέπει το φως (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία), σε φωτοηλεκτρικό ρεύμα και ένα αμπερόμετρο για να μετράς το φωτοηλεκτρικό ρεύμα.

Σου δίνουν δύο φωτοδιόδους. Η πρώτη έχει μέταλλο με έργο εξαγωγής

$W_{\text{εξ1}} = 5.5 \times 10^{-19} \text{ Joule}$  και η δεύτερη

$W_{\text{εξ2}} = 2.5 \times 10^{-19} \text{ Joule}$ .

1) Ποια από τις δύο είναι κατάλληλη για να φτιάξεις το φωτόμετρό σου και γιατί;

Υπόδειξη: Το φωτογραφικό σου φιλμ είναι ευαίσθητο και άρα μπορεί να καταγράψει φως με εύρος συχνοτήτων από  $f_{\text{κοκ}} = 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$  που αντιστοιχεί σε κόκκινο φως έως  $f_{\text{υπερ}} = 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$  που αντιστοιχεί σε υπεριώδες φως.

Για να είναι χρήσιμη η φωτοδίοδος για την κατασκευή φωτομέτρου πρέπει το μέταλλό της να έχει έργο εξαγωγής τέτοιο ώστε πέφτοντας πάνω του φωτόνια σε όλη την παραπάνω περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (κόκκινη έως την υπεριώδη) να έχουν την δυνατότητα να βγάλουν ηλεκτρόνια από το μέταλλο και να δημιουργήσουν φωτοηλεκτρικό ρεύμα

**Ποια φωτόνια έχουν τη μικρότερη ενέργεια;**

**Του κόκκινου φωτός**

**Τι ενέργεια έχουν;**

## Έχουν ενέργεια

$$E_{\text{κοκ}} = h \cdot f_{\text{κοκ}} \Leftrightarrow E_{\text{κοκ}} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \Leftrightarrow$$

$$E_{\text{κοκ}} = 2,85 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ποια φωτοδίοδος είναι κατάλληλη;

$$W_{\text{εξ1}} = 5,5 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$W_{\text{εξ2}} = 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ Joule.}$$

Μπορείτε να υπολογίσετε την ενέργεια με την οποία εξέρχονται από το μέταλλο της φωτοδίοδου τα ηλεκτρόνια που κτυπιούνται από κόκκινα φωτόνια;

$$\begin{aligned} h \cdot f_{\text{κοκ}} - W_{\text{εξ}} &= E_{\text{κοκ}} - W_{\text{εξ}} = 2,85 \cdot 10^{-19} - 2,5 \cdot 10^{-19} = \\ &= 0,35 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

# ΧΡΩΜΑΤΑ



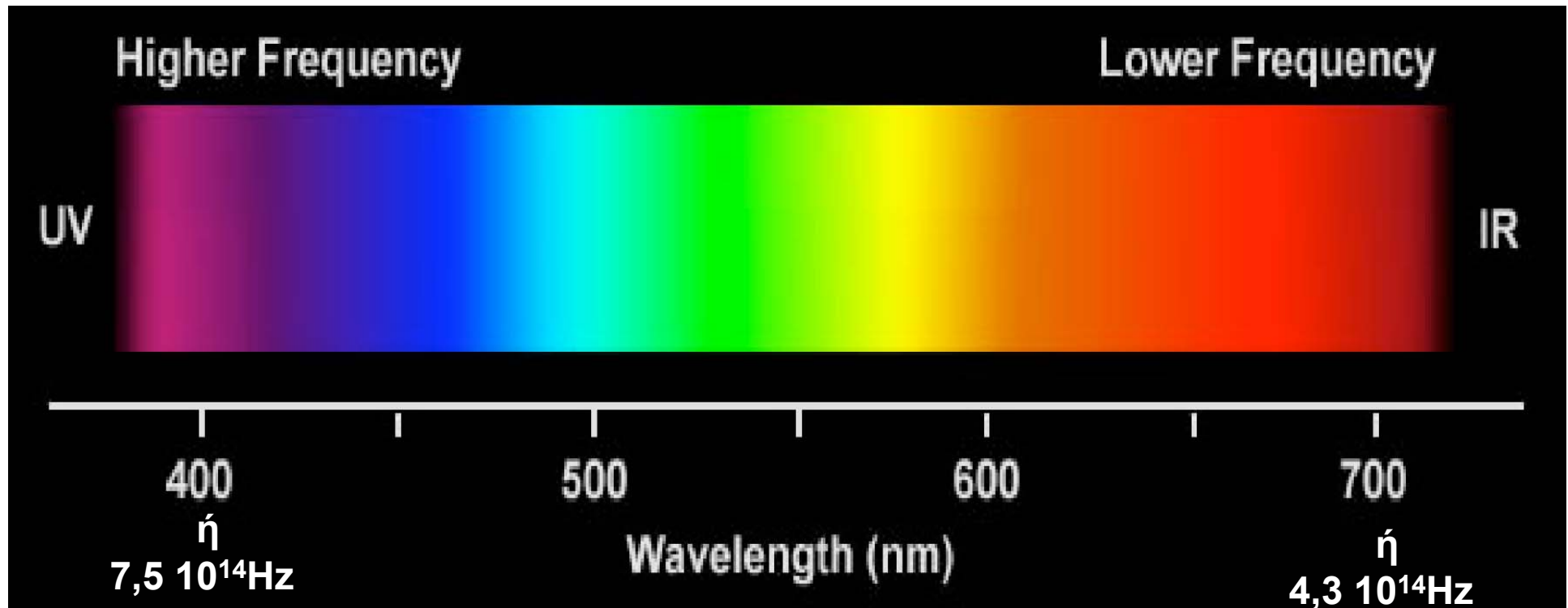
Τα τριαντάφυλλα είναι κόκκινα;

Τα τριαντάφυλλα φαίνονται κόκκινα;

Συνδυασμός : Φωτός που πέφτει στο αντικείμενο

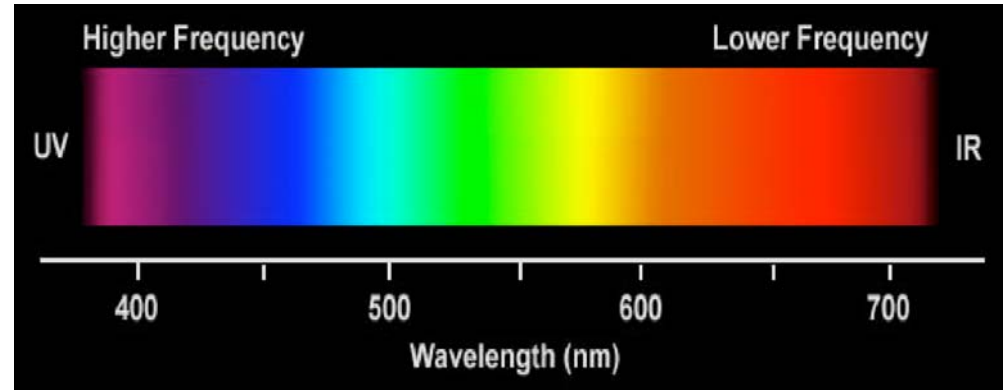
Αλληλεπίδραση Φωτός και αντικειμένου

Ερμηνεία του εγκεφάλου



Ο εγκέφαλος ερμηνεύει το φως διαφορετικών συχνοτήτων ως διαφορετικό χρώμα





Γιατί τα πέταλα φαίνονται κόκκινα;

**Γιατί ανακλούν κυρίως το κόκκινο φως**

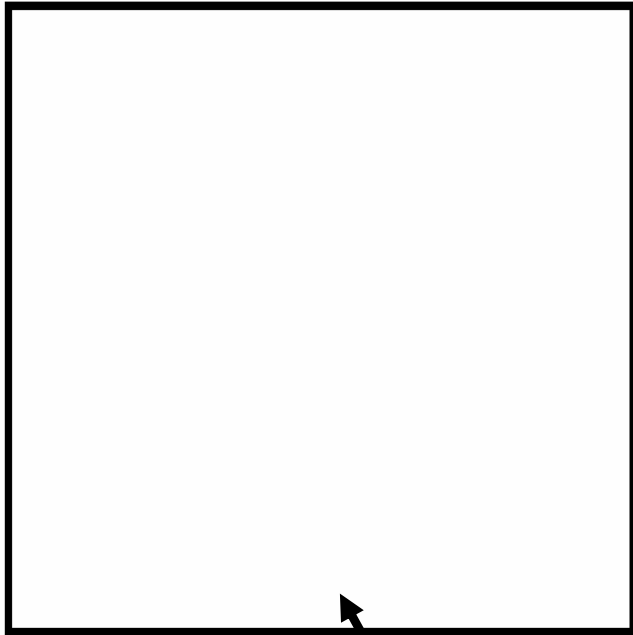
Γιατί τα φύλλα φαίνονται πράσινα;

**Γιατί ανακλούν κυρίως το πράσινο φως**

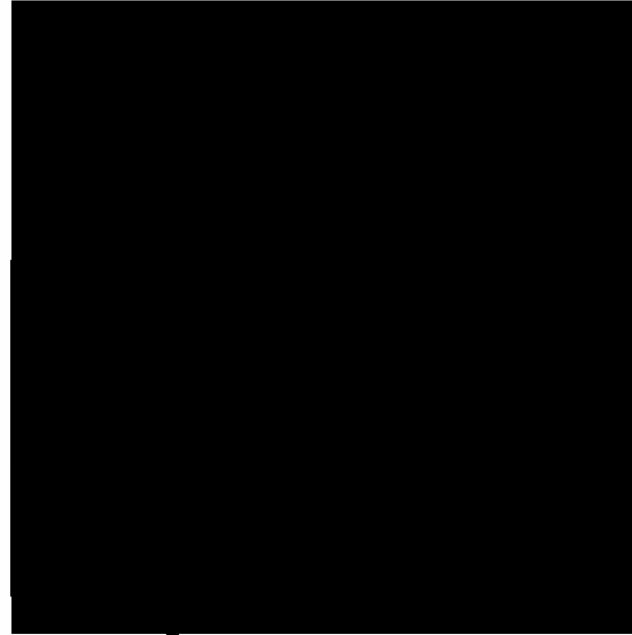
Αν φωτίσω με κόκκινο φως το τριαντάφυλλο πως θα μοιάζει;

**κόκκινα πέταλα , καφε-μαύρα φύλλα**

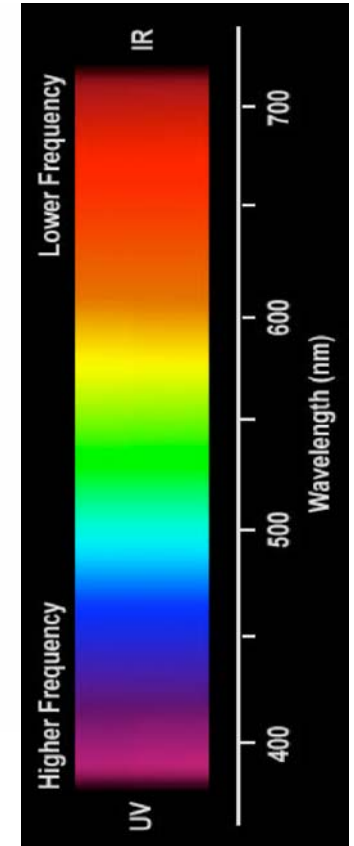
Τα άσπρα λουλουδάκια πως θα μου φανούν;



Γιατί είναι άσπρο;



Γιατί είναι μαύρο;

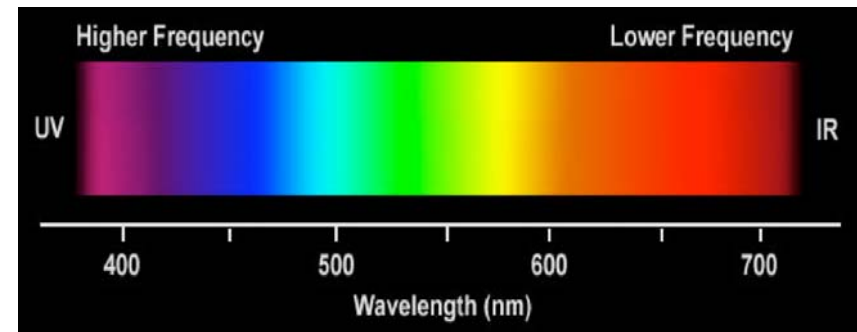
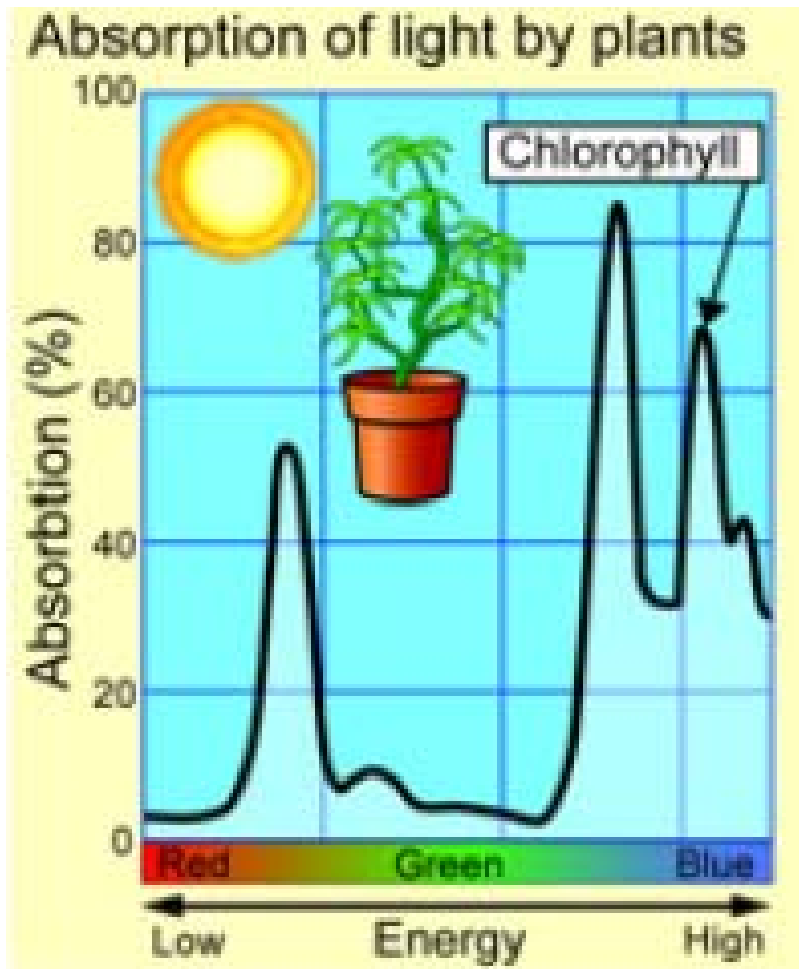


**Ανακλά όλα τα χρώματα**

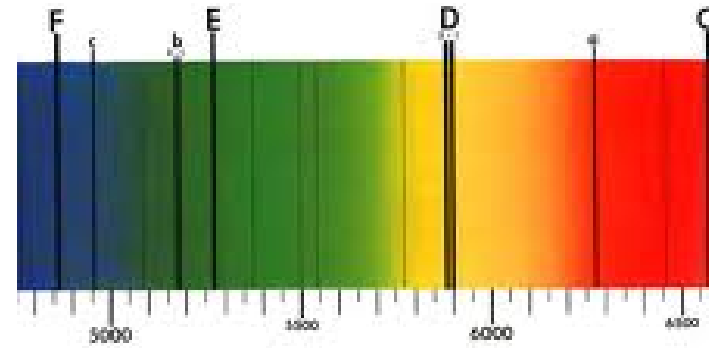
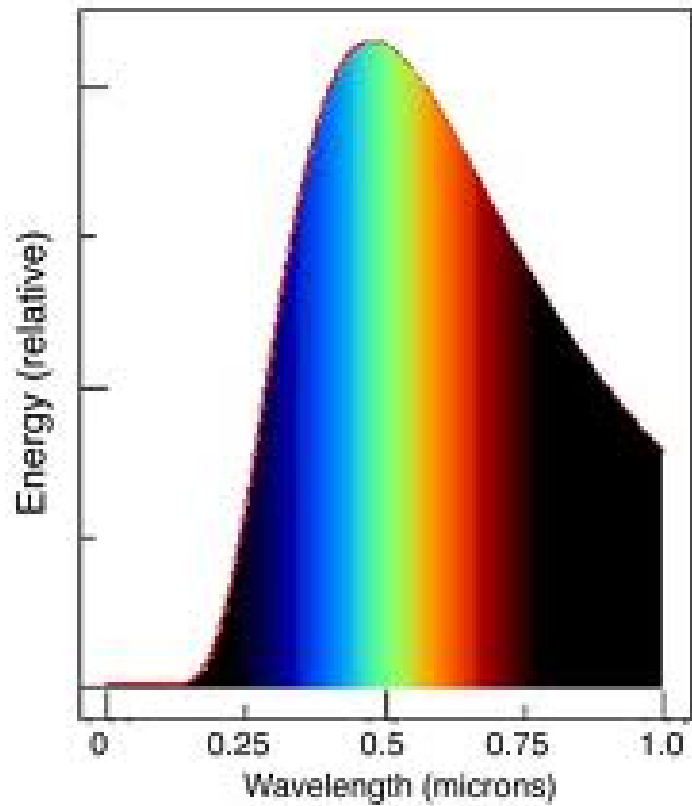
**Απορροφά όλα τα χρώματα**

Αν φωτίσω το άσπρο τετράγωνο με πράσινο φως πως θα φανεί;





Η χλωροφύλη δεν απορροφά τα πράσινα φωτόνια



## Φάσμα του ήλιου

Το φως του ήλιου  
μας φαίνεται λευκό

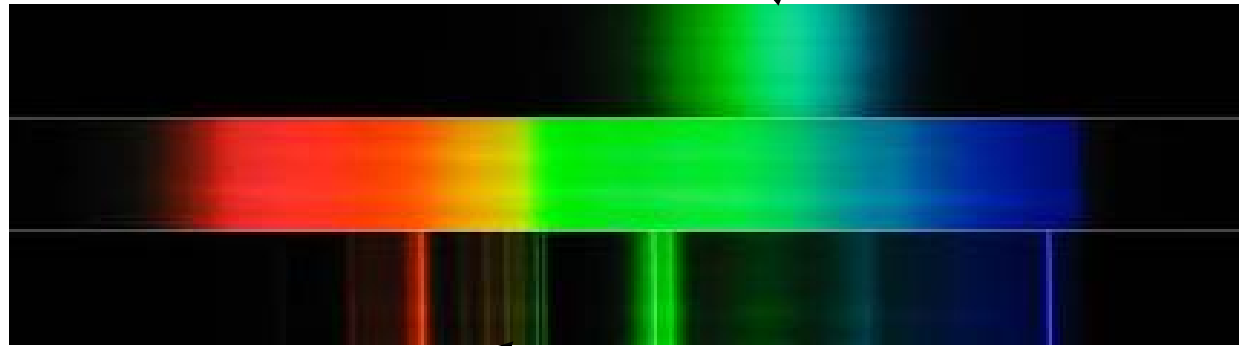




**κερί**



**LED**



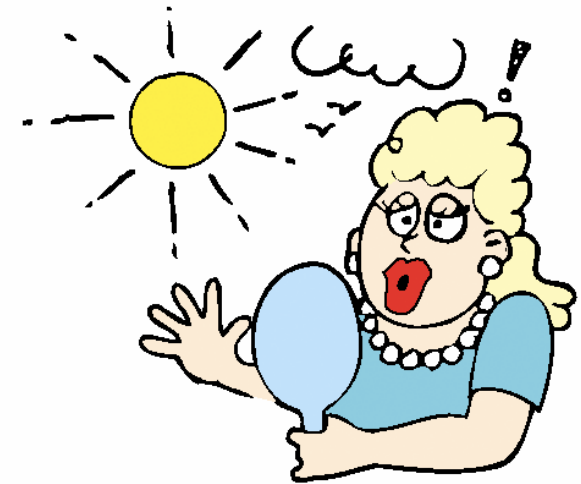
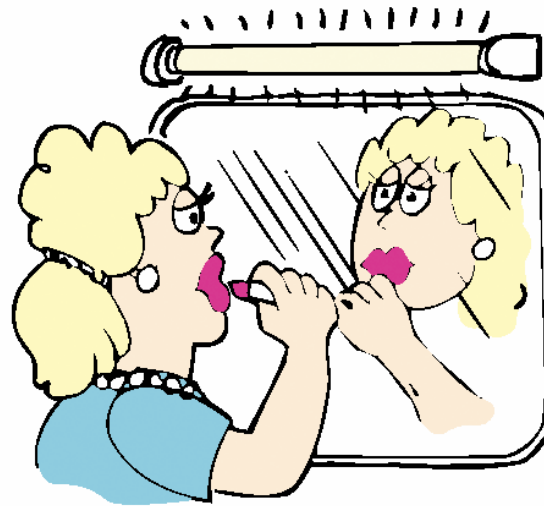
**Λάμπα φθορισμού**

**Το φως κάθε φωτεινής πηγής έχει διαφορετικό μίγμα συχνοτήτων και αριθμού φωτονίων**

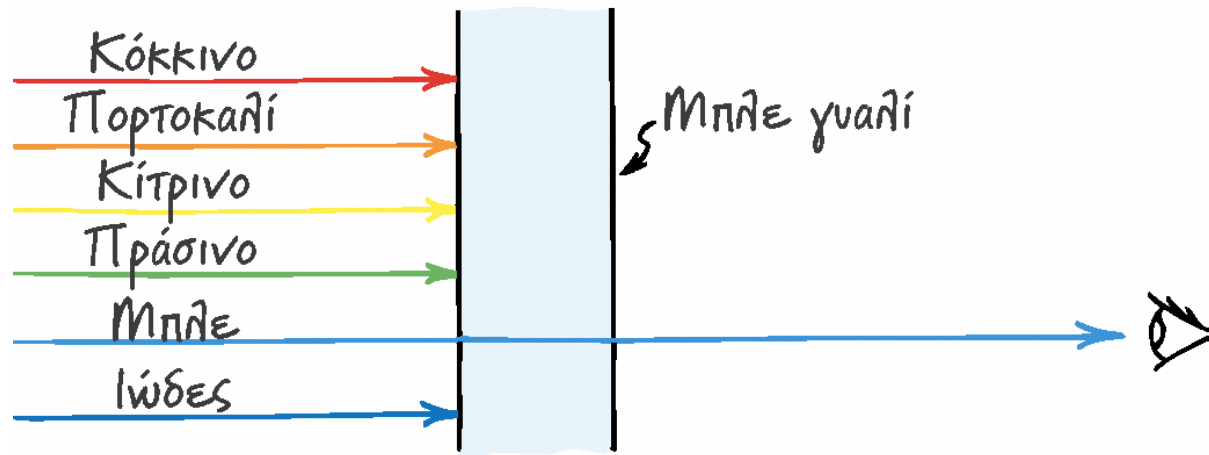
Μπορείτε να εξηγήσετε τι συμβαίνει εδώ;

Το χρώμα εξαρτάται  
από τη φωτεινή πηγή

λάμπα φθορισμού



# Διαφανή αντικείμενα



Το χρώμα τους εξαρτάται από το ποιες συχνότητες φωτός αφήνουν να περάσουν

# Διαφανή αντικείμενα

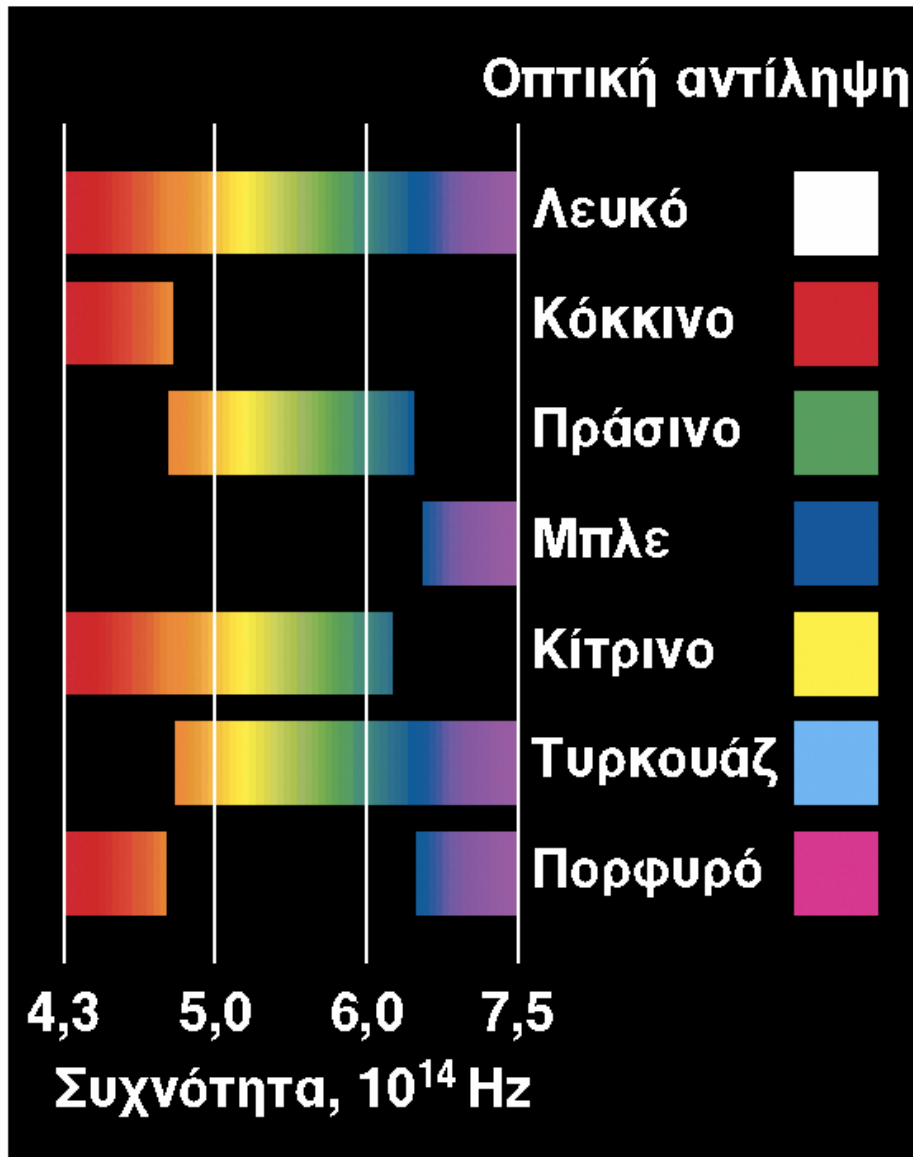
Φωτόνια ποιών συχνοτήτων περνούν πίσω από ένα τζάμι παραθύρου;



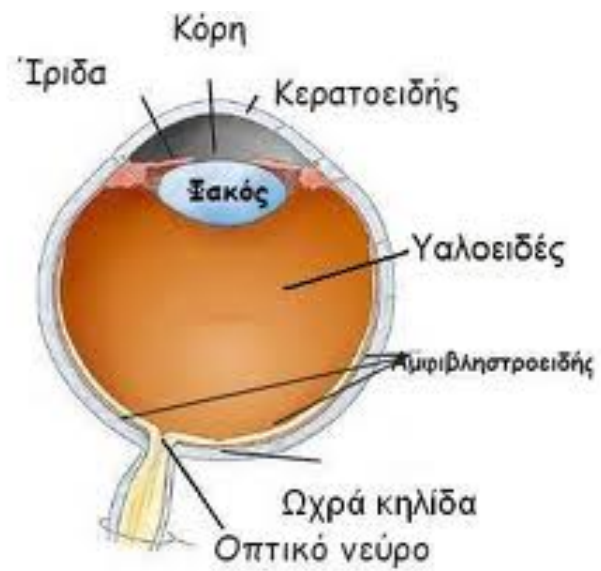
**Δεν απορροφά επιλεκτικά**



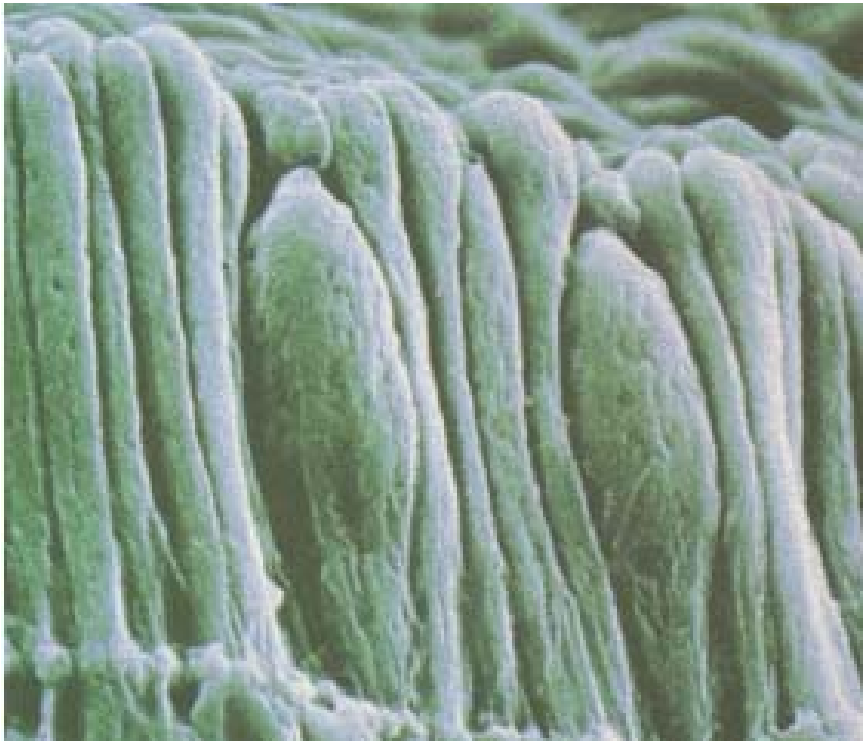
**Στα βιτρώ τι συμβαίνει;**



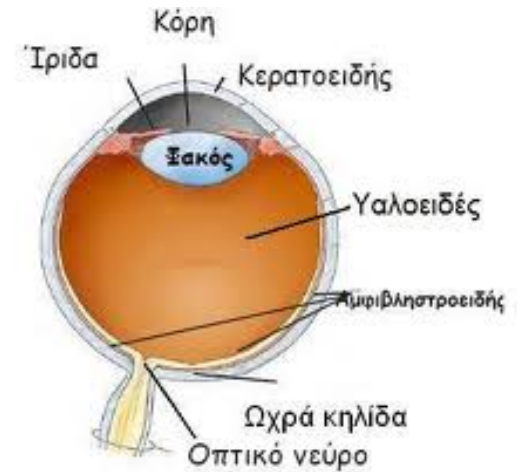
Ανάμιξη χρωμάτων





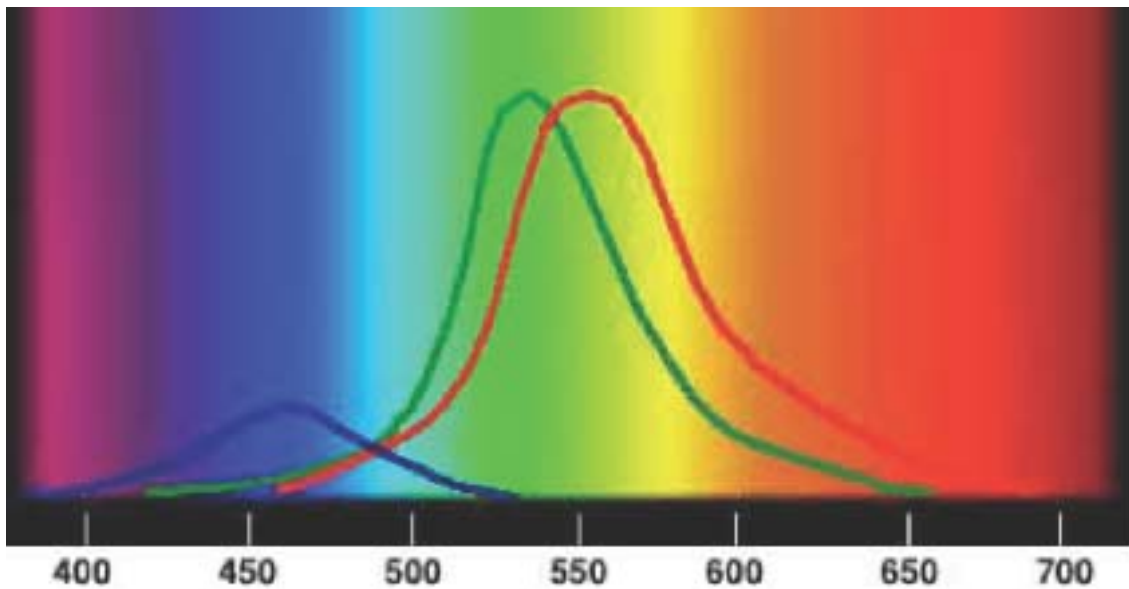


Ραβδία και κώνοι στο μάτι μας.  
Με τη βοήθεια ηλεκτρονικού  
μικροσκοπίου



## ΚΩΝΙΑ

Καμπύλες ευαισθησίας  
μπλε (μέγιστο 450nm)  
πράσινων (525 nm) και  
κόκκινων (550 nm)







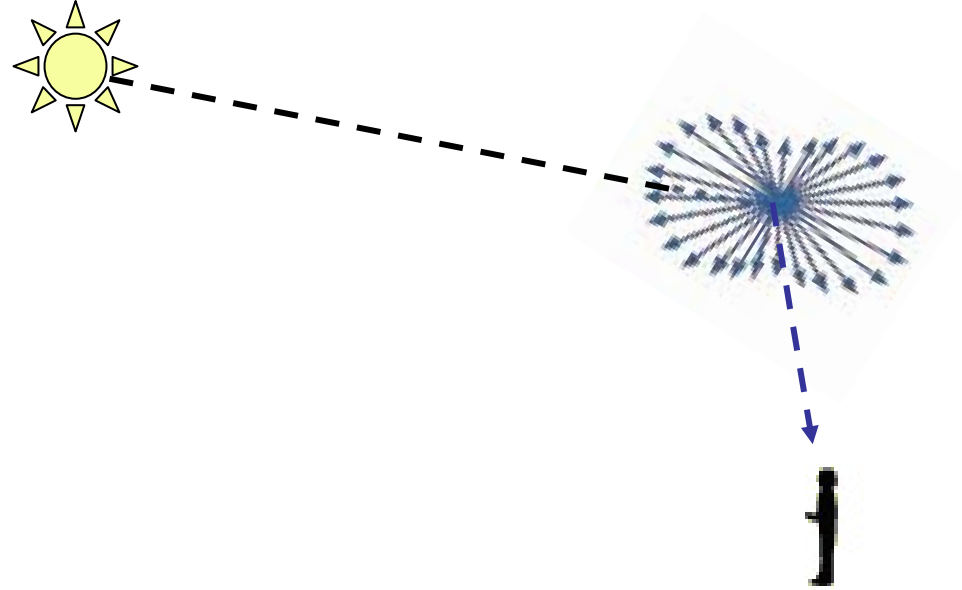
Γιατί ο ήλιος είναι ασπροκίτρινος;

Γιατί ο ουρανός είναι μπλε;



Γιατί ο ήλιος είναι κόκκινος;





Τον ουρανό τον βλέπω γιατί από την κατεύθυνση αυτή κάποιος μου στέλνει μπλε φωτόνια !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

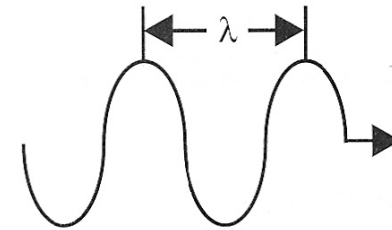
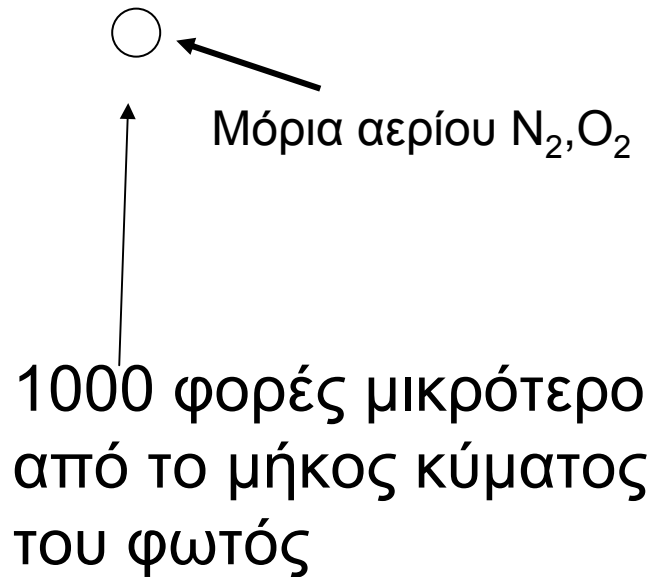
# Σκέδαση Rayleigh

$$\lambda \gg a$$

$\lambda$  : μήκος κύματος ΗΜ ακτινοβολίας

$a$ : διάσταση σωματιδίων

## Σκέδαση Rayleigh



Ιώδες: 400nm  
Μπλε : 450nm  
Κόκκινο: 700 nm

# Μπλε χρώμα του ουρανού

$$\text{σκέδαση} \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Ιώδες: 400nm

Μπλε : 450nm

Κόκκινο: 700 nm

$$I_{\text{ιώδες}}/I_{\text{κόκκινο}} = (700/400)^4 = 9.4$$

$$I_{\text{μπλε}}/I_{\text{κόκκινο}} = (700/450)^4 = 5.8$$

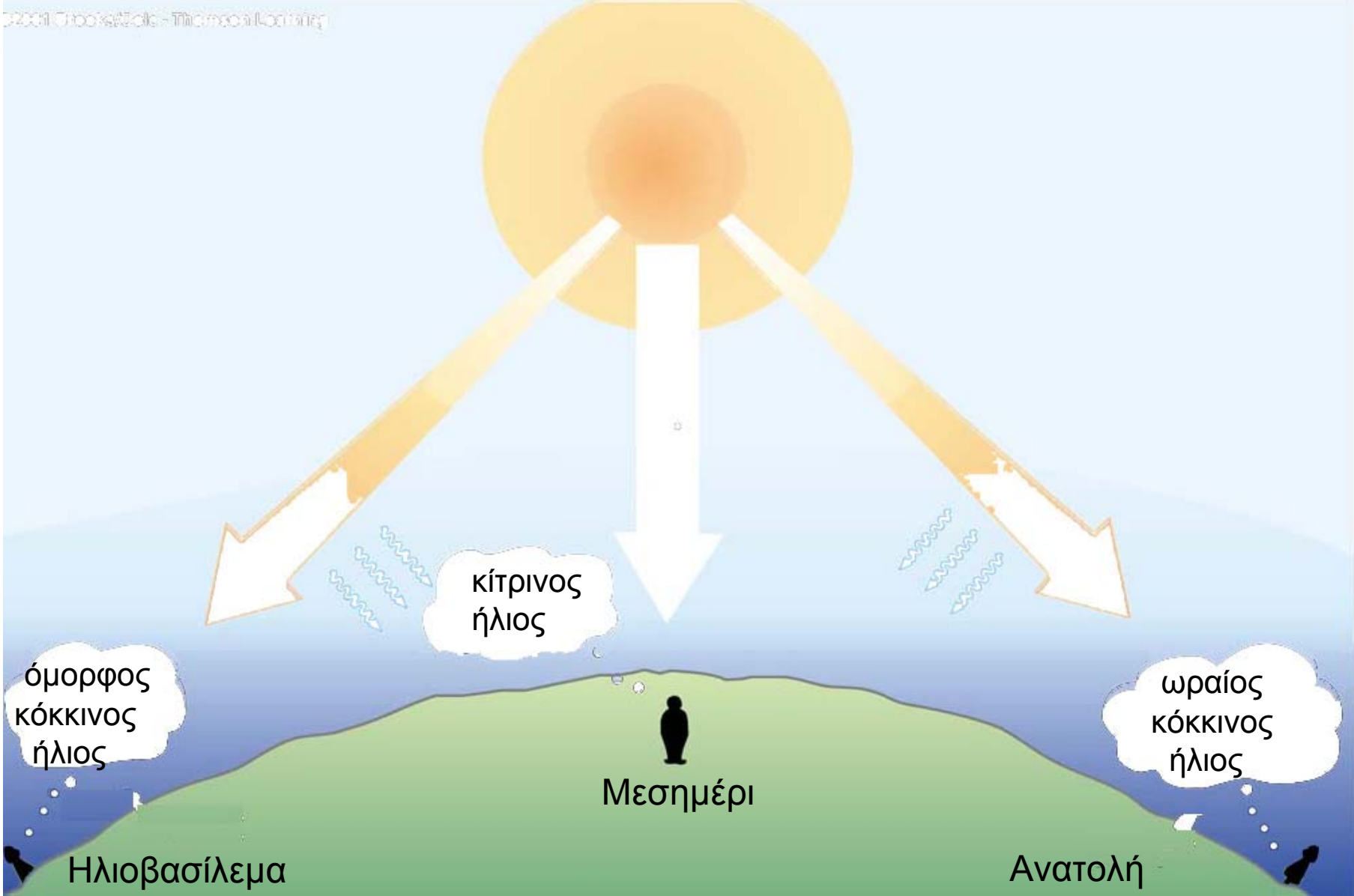
Άρα από τα μόρια στον ουρανό σκεδάζεται περισσότερο το ιώδες από το κόκκινο

Γιατί ο ουρανός είναι μπλε και όχι ιώδης;

Γιατί η ενέργεια που περιέχεται στα ιώδη μήκη κύματος είναι μικρότερη απ' ότι στα μπλε και επίσης η ευαισθησία του ματιού μας είναι μεγαλύτερη στο μπλε απ' ότι στο μωβ







όμορφος  
κόκκινος  
ήλιος

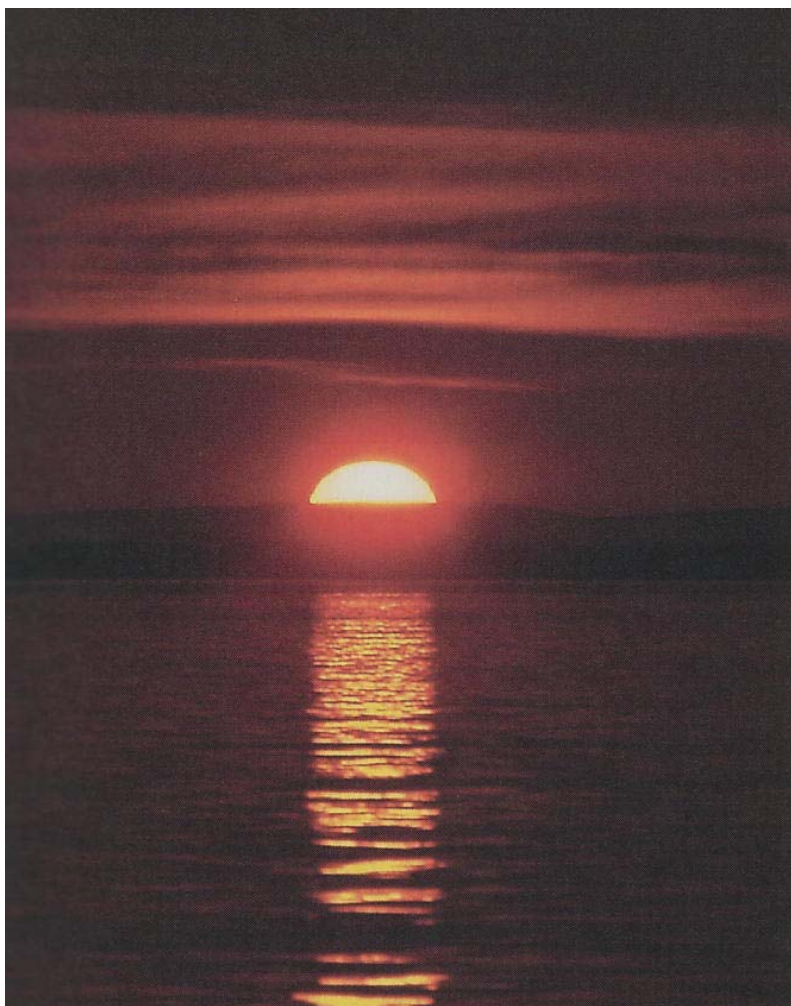
κίτρινος  
ήλιος

ωραίος  
κόκκινος  
ήλιος

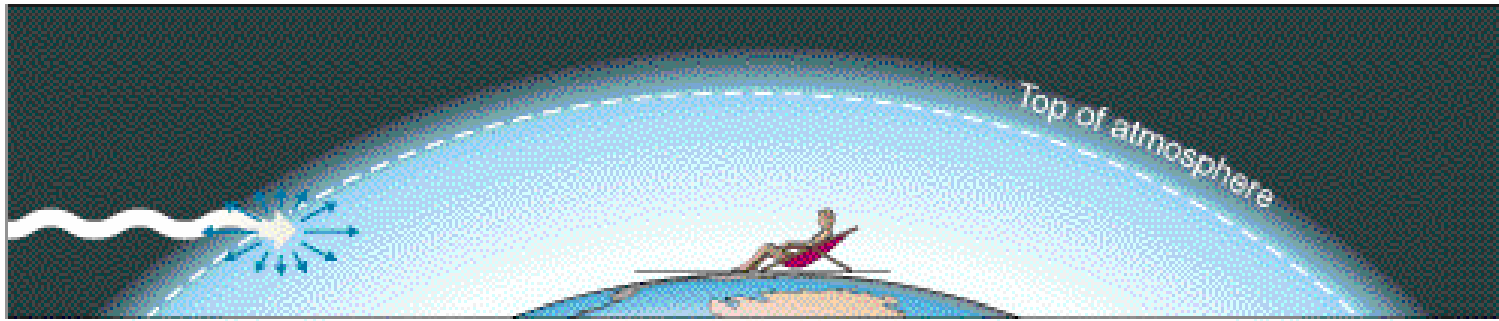
Ηλιοβασίλεμα

Μεσημέρι

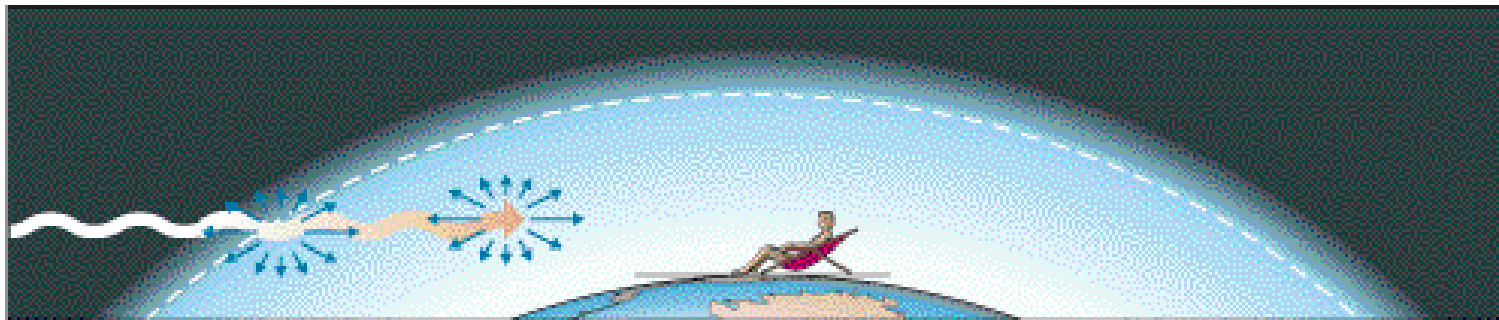
Ανατολή



Γιατί όταν ανατέλλει και όταν  
δύει ο ήλιος είναι κόκκινος;



(a)



(b)



(c)

Γιατί από το φως του ήλιου (όταν ανατέλει ή δύει) που έρχεται απευθείας στα μάτια μας έχουν χαθεί τα περισσότερα μωβ και μπλε φωτόνια



**ΤΕΛΟΣ**