

# Αλληλεπίδραση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων με την Ύλη

Ελένη Καλδούδη

*Υποψήφια Επίκουρος ΔΠΘ  
Φυσική Ιατρική Απεικόνισης - Τηλεϊατρική*

# δομή μαθήματος

---

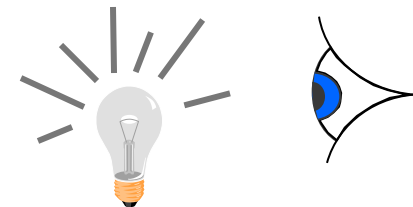
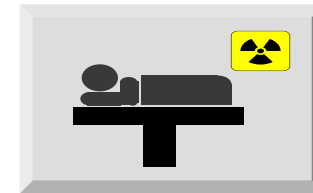
- φύση & χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- γενικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη
- για κάθε επιμέρους τμήμα του φάσματος
  - αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με την ύλη
  - χρήσεις στην ιατρική
  - επιπτώσεις για τον άνθρωπο
- βιβλιογραφία



# σημασία ΗΜ κυμάτων

---

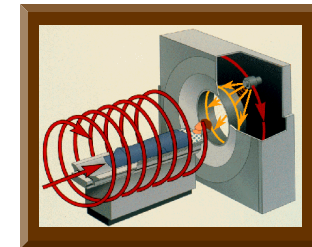
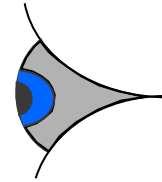
- 0.01% της μάζας-ενέργειας του σύμπαντος είναι ΗΜ ακτινοβολία
- άμεση εξάρτηση της ζωής από την ΗΜ ακτινοβολία (φωτοσύνθεση, αναγνώριση περιβάλλοντος)
- σε ΗΜ ακτινοβολία βασίζονται:
  - τηλεπικοινωνίες, τηλεόραση, αεροπλοΐα
  - θέρμανση, προετοιμασία φαγητού
  - διαγνωστικές απεικονιστικές συσκευές
  - ακτινοθεραπευτικές μέθοδοι
  - ...



# ΗΜ και ιατρική

---

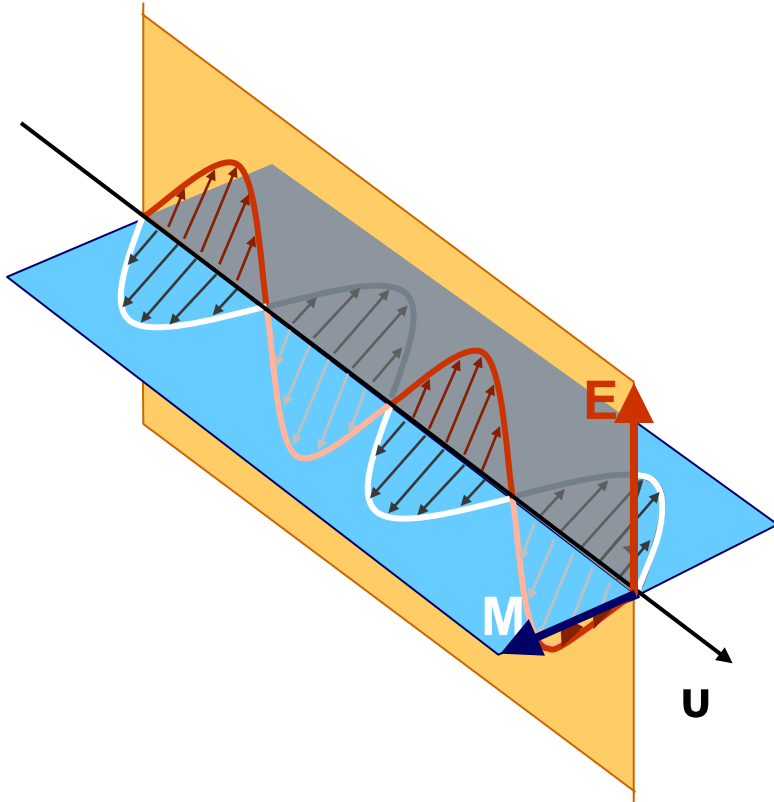
- κατανόηση λειτουργίας διαφόρων μηχανισμών απαραίτητων για τη ζωή (όραση, φωτοσύνθεση, τηλεπικοινωνίες, κλπ)
- επίδραση ΗΜ ακτινοβολίας στην υγεία του πληθυσμού
- διαγνωστικές απεικονιστικές μέθοδοι
- θεραπεία με χρήση ακτινοβολίας



# ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ΗΜ)

---

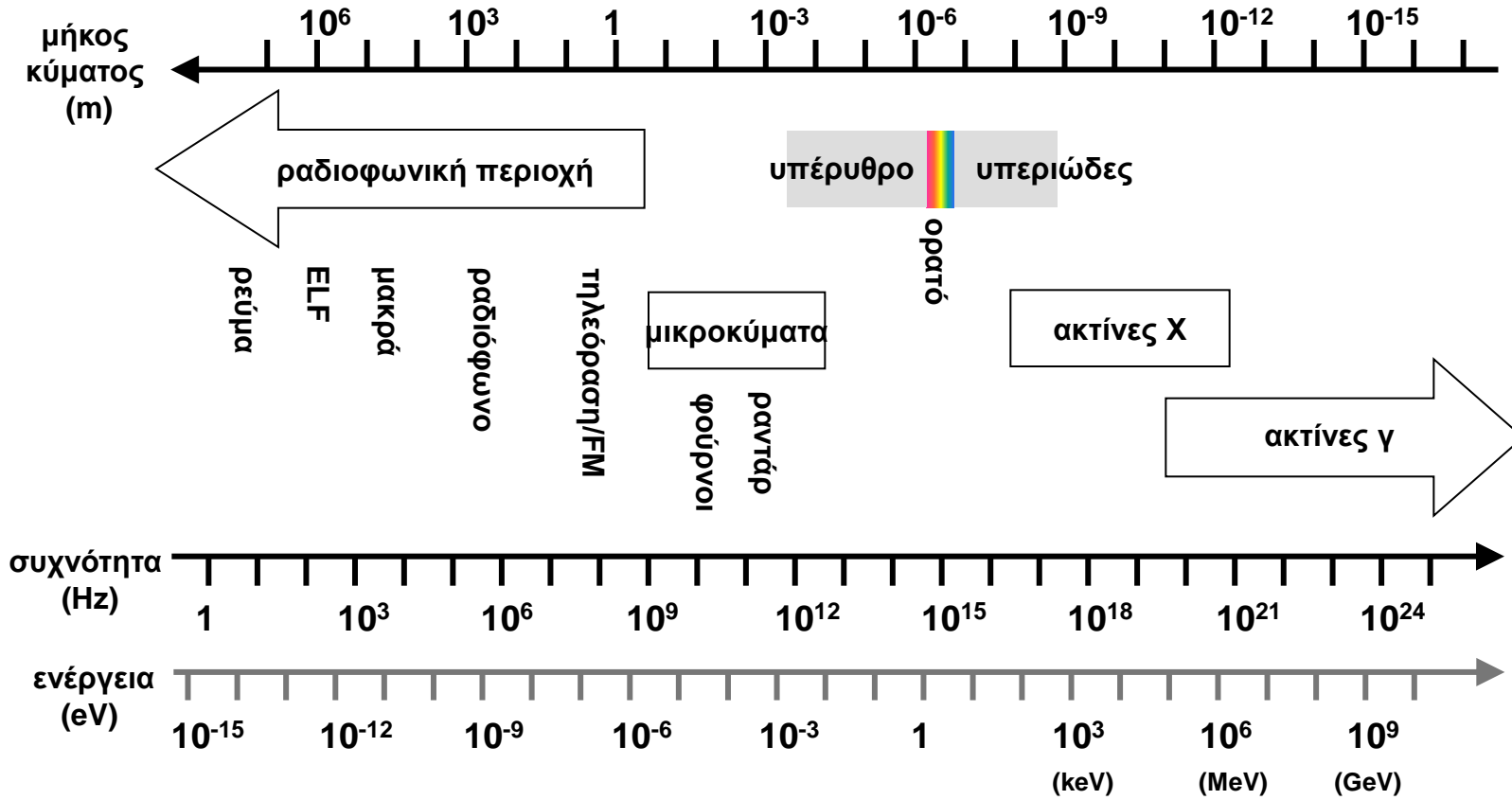
ταχύτητα διάδοσης  
στο απόλυτο κενό



1864 – Maxwell, θεωρητική πρόβλεψη

1887 – Hertz, πειραματική επαλήθευση

# φάσμα ΗΜ κυμάτων



# αλληλεπίδραση Η/Μ κυμάτων με την ύλη

---

**ηλεκτρικό  
πεδίο**

αλληλεπίδραση με

**ηλεκτρικά φορτία**

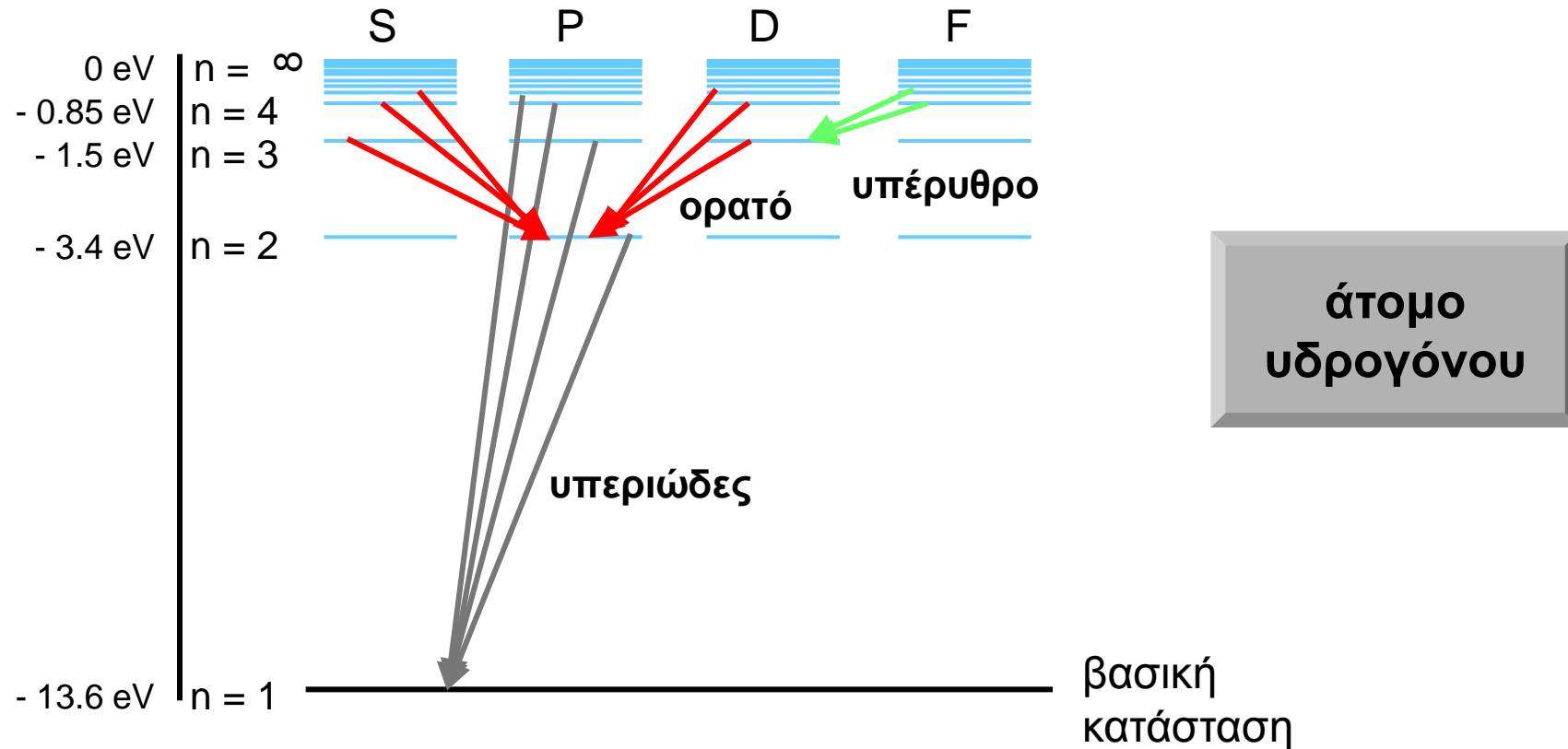
[ελεύθερα φορτία  
ηλεκτρόνια  
ατομικά-μοριακά δίπολα]

**μαγνητικό  
πεδίο**

αλληλεπίδραση με

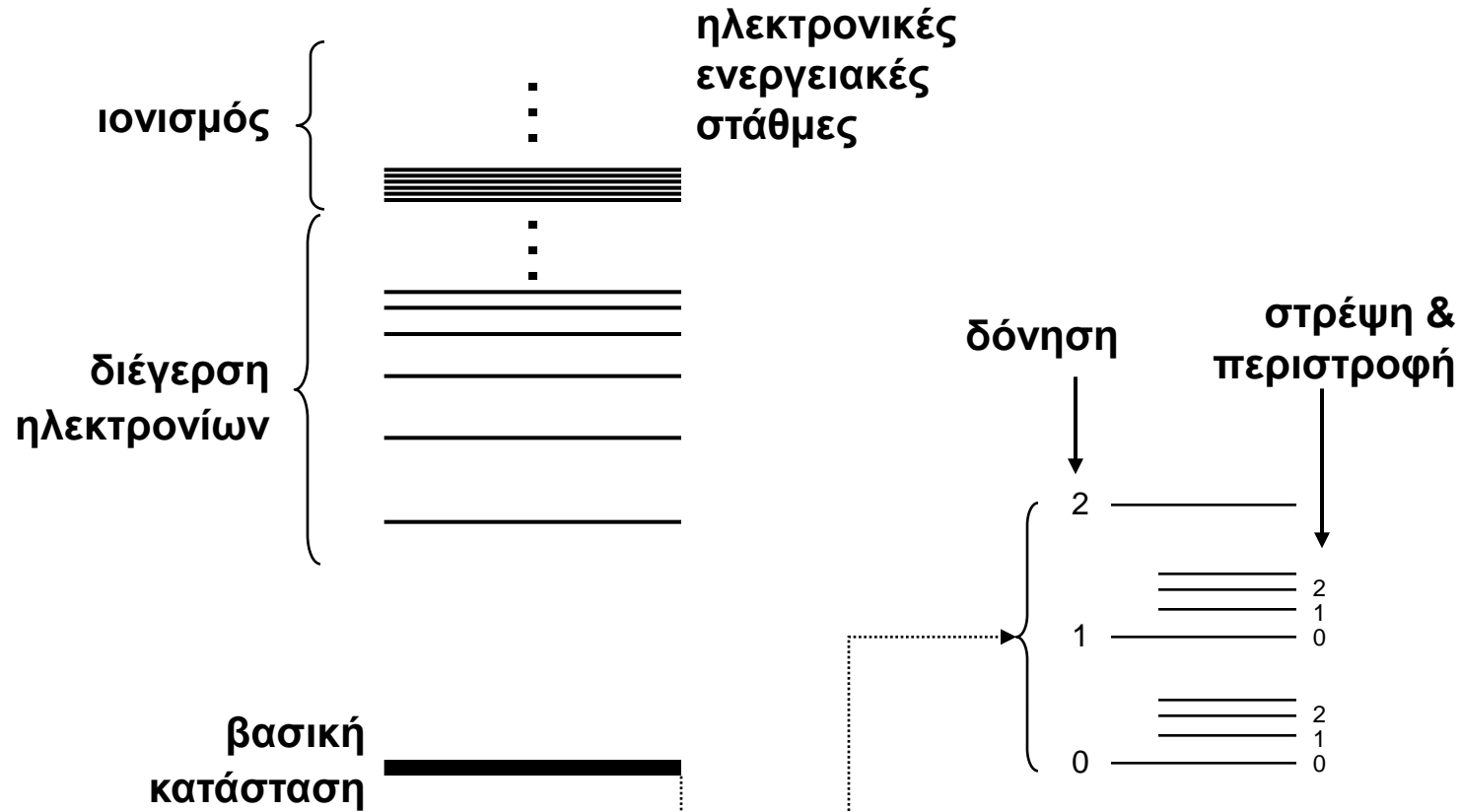
**μαγνητική ροπή  
σωματιδίων**

# δομή της ύλης – ατομικά ενεργειακά επίπεδα





# δομή της ύλης – μοριακά ενεργειακά επίπεδα



# αλληλεπίδραση Η/Μ κυμάτων με την ύλη

---

είδος ακτινοβολίας	μήκος κύματος	είδος αλληλεπίδρασης
ακτίνες γ	$< 1 \text{ pm}$	πυρηνικά φαινόμενα – εκδίωξη ηλεκτρονίων
ακτίνες Χ	$1 \text{ nm} - 1 \text{ pm}$	πυρηνικά φαινόμενα – εκδίωξη ηλεκτρονίων
υπεριώδης	$400 \text{ nm} - 1 \text{ nm}$	εκδίωξη ηλεκτρονίων – διέγερση ηλεκτρονίων
ορατό	$750 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$	διέγερση ηλεκτρονίων
υπέρυθρη	$750 \text{ nm} - 25 \text{ }\mu\text{m}$	μοριακή δόνηση
μικροκύματα	$25 \text{ }\mu\text{m} - 1 \text{ mm}$	μοριακή στρέψη & περιστροφή μαγνητικός συντονισμός ηλεκτρονίου
ραδιοκύματα	$> 1 \text{ mm}$	ταλάντωση φορτίων σε αγωγούς πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός

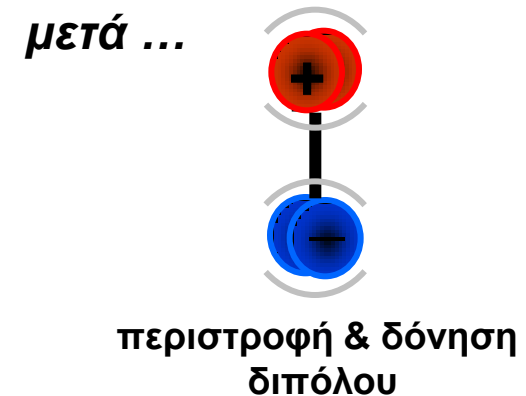
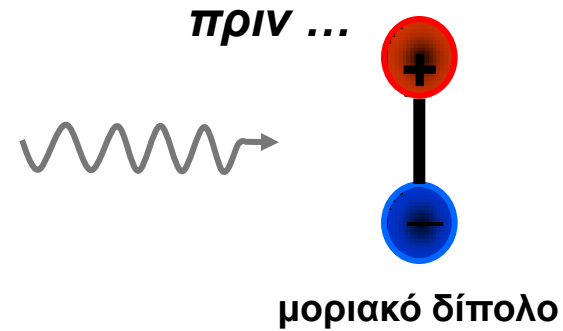
# μηχανισμοί αλληλεπίδρασης

---

- θερμική απορρόφηση
- σκέδαση Raman
- σκέδαση Rayleigh
- σκέδαση Thomson
- φθορισμός – φωσφορισμός
- εξαναγκασμένη αποδιέγερση ηλεκτρονίου
- φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- φαινόμενο Compton
- δίδυμη γέννηση
- πυρηνικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- πυρηνική σκέδαση συντονισμού
- Delbruck σκέδαση
- ....
- πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός

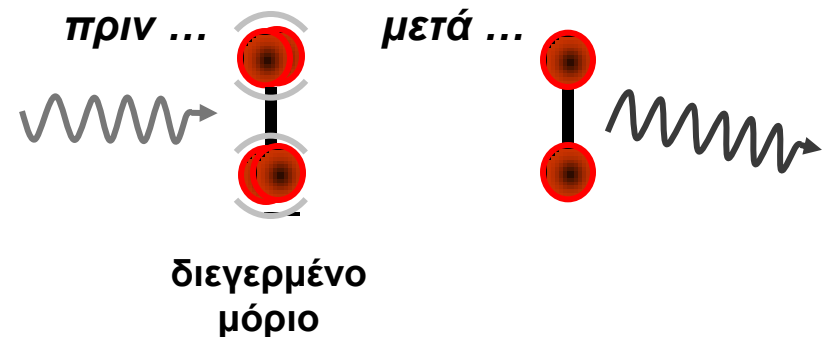
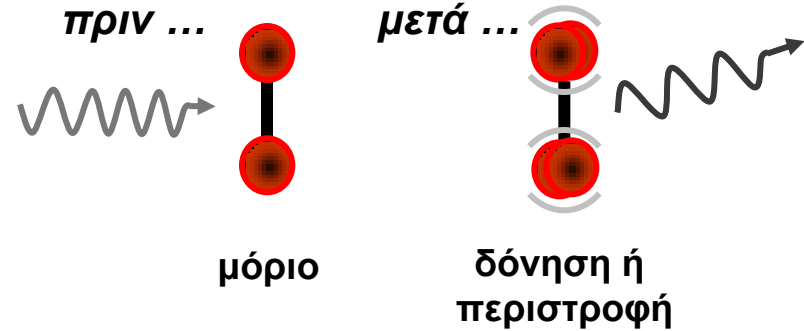
# θερμική απορρόφηση

- φωτόνιο – μόριο ή ελεύθερο φορτίο
- απορρόφηση φωτονίου
- η ενέργεια διατίθεται για περιστροφή & δόνηση του μορίου ή ταλάντωση ελεύθερου φορτίου
- αύξηση θερμοκρασίας υλικού



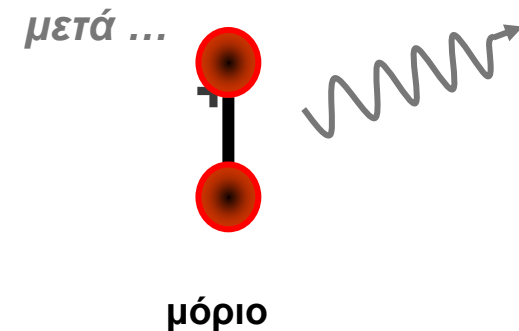
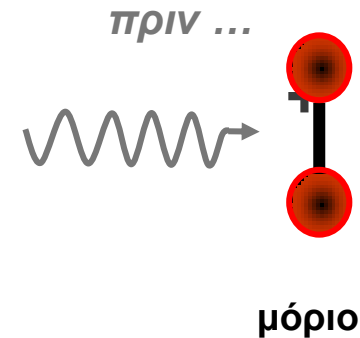
# ανελαστική σκέδαση Raman

- φωτόνιο – μόριο
- σκέδαση φωτονίου
- η ενέργεια δίδεται για:
  - σκεδαζόμενο φωτόνιο διαφορετικής ενέργειας
  - δόνηση ή περιστροφή μορίου
- συμβαίνει με πιθανότητα  $1:10^8$
- συχνότητα εκπεμπόμενου φωτονίου χαρακτηριστική του μορίου



# ελαστική σκέδαση Rayleigh

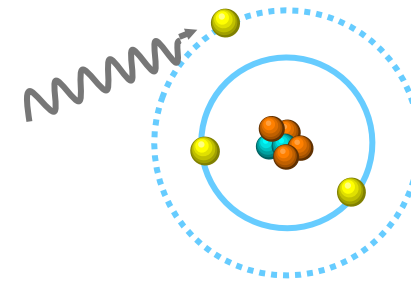
- φωτόνιο – μόριο (συνδεδεμένα φορτία)
- σκέδαση φωτονίου
- η ενέργεια δίδεται για φωτόνιο ίδιας ενέργειας
- σκέδαση προς όλες τις διευθύνσεις
- πιθανότητα σκέδασης  $\sim 1:10^3$
- πιθανότητα σκέδασης αυξάνει
  - ύλη με μεγάλο ατομικό αριθμό
  - μεγαλύτερη συχνότητα φωτονίων ( $\sim \lambda^{-4}$ )



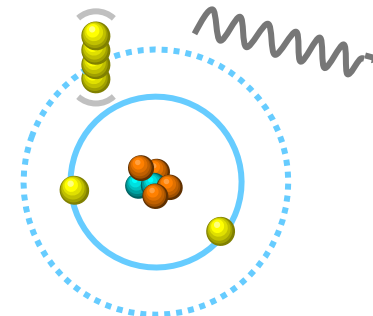
# ελαστική σκέδαση Thomson

- φωτόνιο – (σχεδόν) ελεύθερο ηλεκτρόνιο
- σκέδαση φωτονίου
- η ενέργεια δίδεται για φωτόνιο ίδιας ενέργειας
- συμμετρική σκέδαση προς όλες τις διευθύνσεις, ανεξάρτητη ενέργειας φωτονίου
- συνθήκη:  
η ενέργεια φωτονίου να είναι κατά πολύ μικρότερη από τη μάζα ηρεμίας του φορτίου

πριν ...



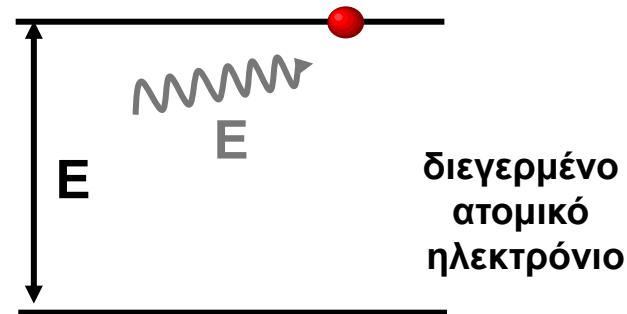
μετά ...



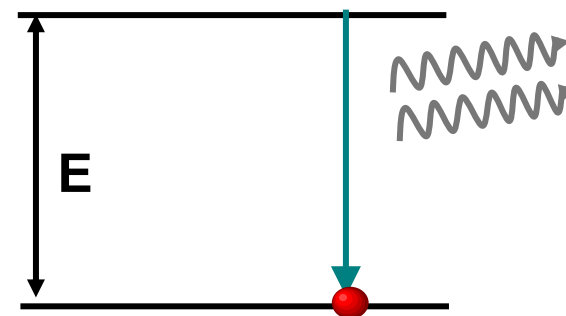
# εξαναγκασμένη αποδιέγερση ηλεκτρονίου

- φωτόνιο – διεγερμένο ατομικό ηλεκτρόνιο
- εξαναγκασμένη αποδιέγερση ηλεκτρονίου
- εκπομπή φωτονίου πανομοιότυπου με το αρχικό
- αρχή παραγωγής LASER

πριν ...



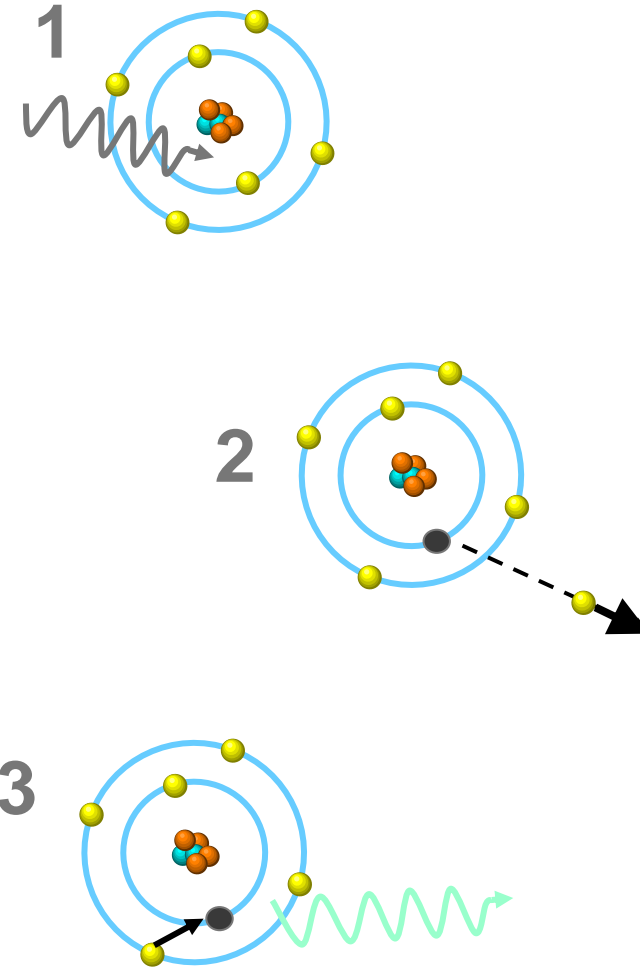
μετά ...





# φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

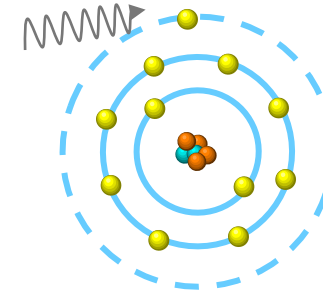
- φωτόνιο – συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο
- απορρόφηση φωτονίου
- η ενέργεια δίδεται για:  
εκδίωξη ηλεκτρονίου  
(δηλ. ιονισμό ατόμου)
- συνθήκη: η ενέργεια του φωτονίου  
να είναι τουλάχιστο όσο το  
έργο εξόδου ηλεκτρονίου  
(καίσιο  $\sim 4\text{eV}$ )
- δευτερογενής εκπομπή φωτονίου  
χαρακτηριστικής συχνότητας



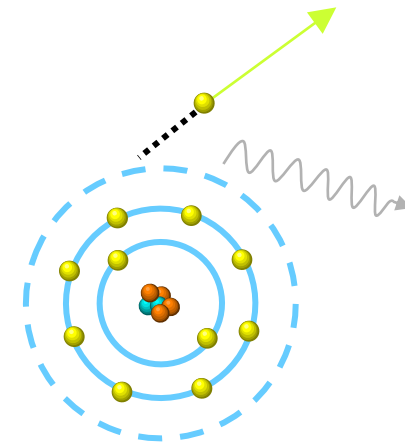
# φαινόμενο Compton

- φωτόνιο – (σχεδόν) ελεύθερο ηλεκτρόνιο
- σκέδαση φωτονίου
- η ενέργεια δίδεται για:
  - σκεδαζόμενο φωτόνιο διαφορετικής ενέργειας
  - εκδίωξη ηλεκτρονίου
- συνθήκη:  
η ενέργεια φωτονίου να είναι ίση ή μεγαλύτερη από τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου

πριν ...



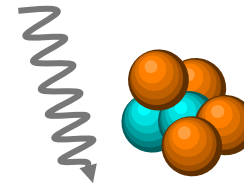
μετά ...



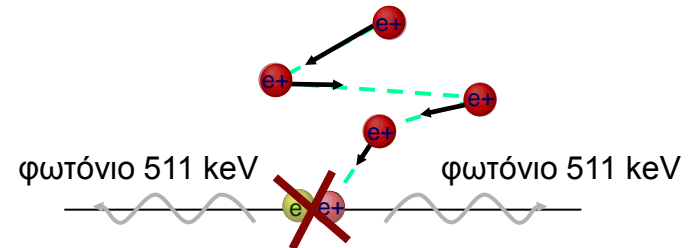
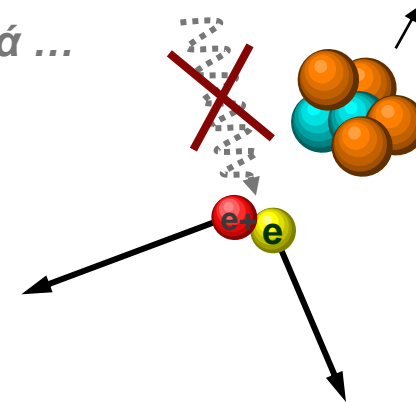
# δίδυμη γέννηση

- φωτόνιο (παρουσία πυρήνα)
- απορρόφηση φωτονίου
- η ενέργεια δίδεται για:  
δημιουργία ζεύγους  
ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου
- συνθήκη:  
η ενέργεια φωτονίου να είναι  
ίση ή μεγαλύτερη από 2 φορές  
τη μάζα ηρεμίας του  
ηλεκτρονίου,  $1.022 \text{ MeV}$

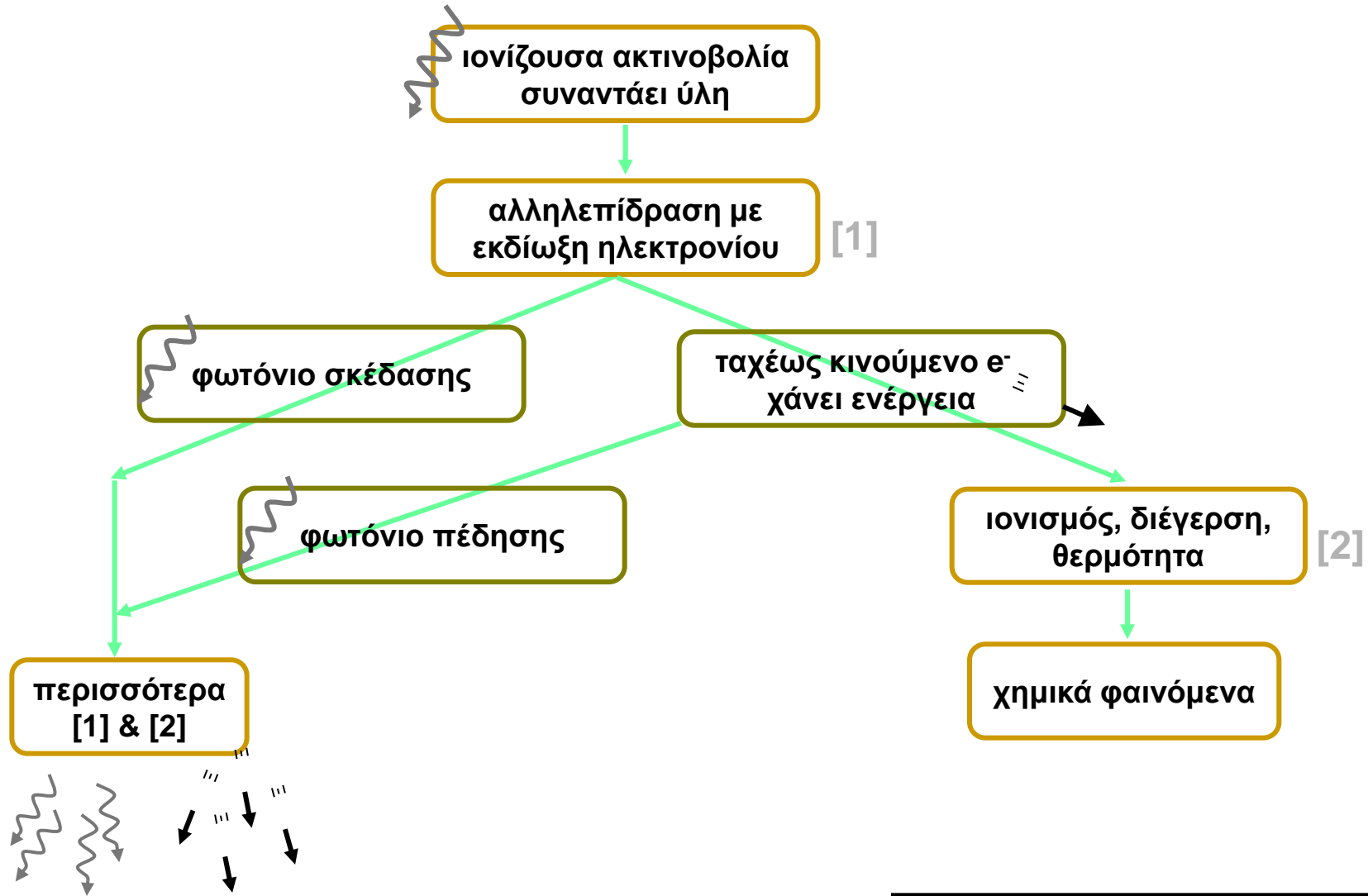
πριν ...



μετά ...



# φαινόμενο χιονοστιβάδας

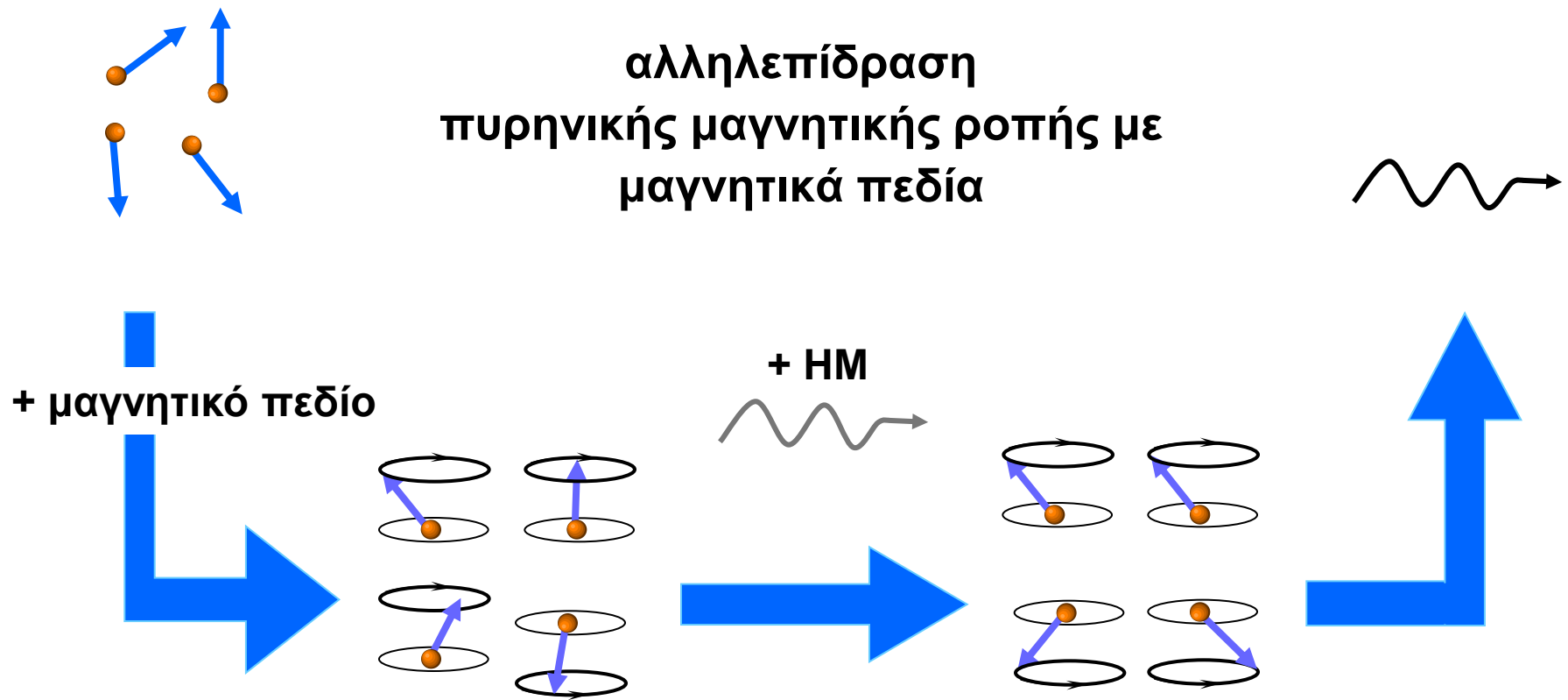


# πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων

---

	εξάρτηση από τον ατομικό αριθμό	εξάρτηση από την ενέργεια φωτονίου	
φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	$Z^4 - Z^5$	$E^{-3} - E^{-1}$	10 - 500 keV
φαινόμενο Compton	$Z$	$E^{-1}$	100 - 1000 keV
δίδυμη γένεση	$Z^2$	$\ln E$	> 1022 keV

# πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός



# επιπτώσεις αλληλεπίδρασης ΗΜ με ύλη

---

**πρωτογενείς**

- **διέγερση – ιονισμός**

**δευτερογενείς**

- **φωτοχημικές αντιδράσεις - έντονος ιονισμός**

**τριτογενείς**

- **φυσικά και χημικά αποτελέσματα**
  - θερμικά φαινόμενα
  - αλλαγές κρυσταλλικού πλέγματος
  - βιολογικές διεργασίες

# βιολογικές επιπτώσεις

---

εξαρτώνται από:

- συχνότητα
- ένταση
- βαθμίδωση έντασης
- διάρκεια
- παλμική/συνεχής ακτινοβολία
- κατεύθυνση



# εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας ΗΜ (ELF)

---

< 1000 Hz

- ρεύμα οικιακής χρήσης (50-60 Hz )
- τηλεπικοινωνίες υποβρυχίων
- ειδικά όργανα σε ψάρια για την ανίχνευση ELF
- παρουσία βιομαγνητικών σωματίων σε ζώα (μαγνητίτης)

ταλάντωση ελεύθερων φορτίων

- αύξηση θερμοκρασίας
- αλλαγή ιοντικής εκροής μεμβράνης
- διαταραχή κύκλου μελατονίνης
- διαταραχή δραστηριότητας ενζύμων
- επιτάχυνση επούλωσης οστών
- μικρή συσχέτιση με μερικές μορφές καρκίνου (λευχαιμία)

# ραδιοκύματα

---

1 kHz – 1 GHz

- τηλεπικοινωνίες
- μελέτη διαστήματος
- μαγνητική τομογραφία
- διαθερμία

- ταλάντωση ελεύθερων φορτίων
- πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός
- μοριακή ταλάντωση & περιστροφή

- αύξηση θερμοκρασίας
- διαταραχή ανοσοποιητικού
- διαταραχή ηλεκτροχημείας εγκεφάλου (παλμική εκπομπή σε χαμηλές συχνότητες)
- παρεμβολή σε ιατρικές συσκευές

# μικροκύματα

---

1 – 300 GHz

- ραντάρ
- τηλεπικοινωνίες υψηλής ταχύτητας
- δορυφορικές τηλεπικοινωνίες
- φούρνοι μικροκυμάτων
- διαθερμία

- μοριακή περιστροφή
- μαγνητικός συντονισμός ηλεκτρονίου

- αύξηση θερμοκρασίας
- πρόκληση καταρράκτη (3 GHz)
- διαταραχή ηλεκτροχημείας εγκεφάλου (παλμική εκπομπή σε χαμηλές συχνότητες)
- μικροκυματικό ακουστικό φαινόμενο

# υπέρυθρη ακτινοβολία

---

1 – 100  $\mu\text{m}$

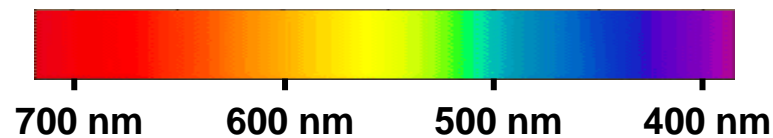
περιστροφή & δόνηση χημικά  
συνδεδεμένων ατόμων & μορίων

- σημαντική συνιστώσα ηλιακού φάσματος
- φασματογραφία υπερύθρου
- θερμογραφία
- θερμική θεραπεία
- αύξηση (επιφανειακής) θερμοκρασίας
- εγκαύματα

# ορατό φως

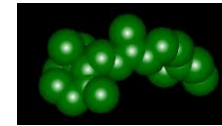
400 – 700 nm

- σημαντική συνιστώσα ηλιακού φάσματος
- οπτικές ίνες
- LASER

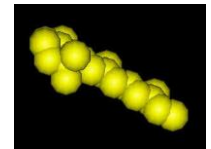


διέγερση ηλεκτρονίων

- όραση



~ 1.8 eV



- φωτοσύνθεση
- φωτογραφική διεργασία
- φωτοχημεία (~ 1 eV)

# υπεριώδης ακτινοβολία (ιονίζουσα ακτινοβολία)

---

1 – 100 eV

- συνιστώσα ηλιακού φάσματος
- φασματογραφία φθορισμού
- απολύμανση ατμόσφαιρας
- φωτοθεραπεία

- διέγερση ηλεκτρονίων
- ιονισμός

- φθορισμός
- φωτοχημεία (~ 1 eV)
- καρκίνος δέρματος
- καταρράκτης
- προσβολή ανοσοποιητικού συστήματος

# ακτίνες X & γ (ιονίζουσα ακτινοβολία)

---

X: 100 eV – 100 keV

γ: < 10 keV

- εκδίωξη ηλεκτρονίων
- πυρηνικά φαινόμενα

- παραγωγή X:
  - πέδηση ηλεκτρονίου
  - μετάπτωση ηλεκτρονίου
- παραγωγή γ:
  - αποδιέγερση πυρήνα
- συνιστώσα κοσμικής ακτινοβολίας
- ιατρική απεικόνιση
- ακτινοθεραπεία
- ιονισμός – παραγωγή πλήθους δευτερογενών ενεργειακών ηλεκτρονίων
- σημαντικές βιολογικές επιπτώσεις
  - σωματικές – γενετικές
  - άμεσες – με λανθάνουσα περίοδο
  - στοχαστικές – μη στοχαστικές

# ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

---

- με ενέργεια αρκετή για να εκδιώξει ένα ηλεκτρόνιο από τις ηλεκτρονικές στιβάδες ενός ατόμου
- η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για ιονισμό εξαρτάται από το άτομο-στόχος (τυπικά κάτω όρια 6-12 eV για πολλά άτομα και ενώσεις)

**Roentgen (R) = μονάδα έκθεσης**

1 esu σε 1 cm<sup>3</sup> αέρα σε Κ.Σ. = 86.9 erg/g αέρα

**gray (Gy) = απορροφούμενη δόση**

1 joule ενέργειας ανά 1 kg ύλης

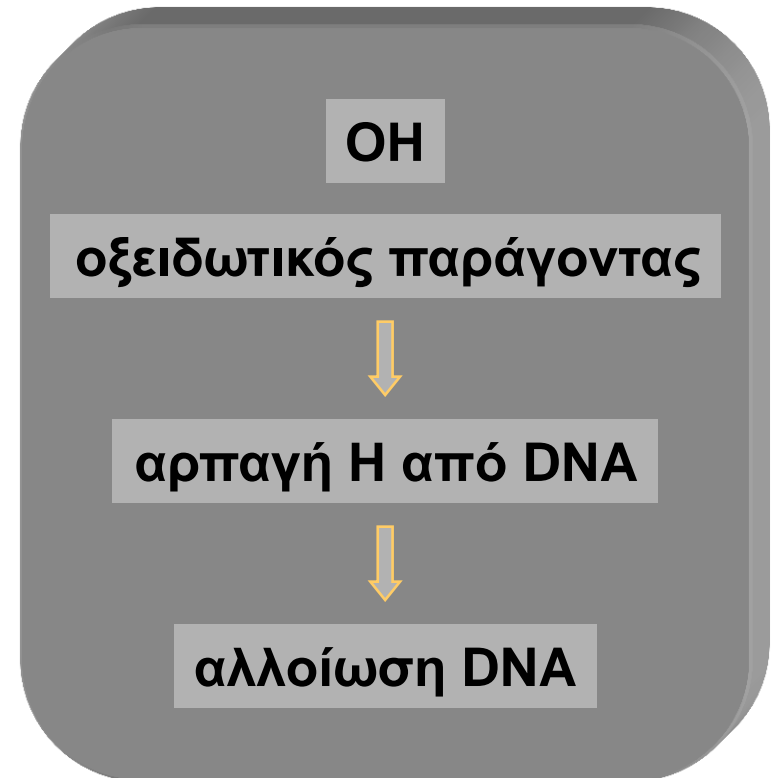
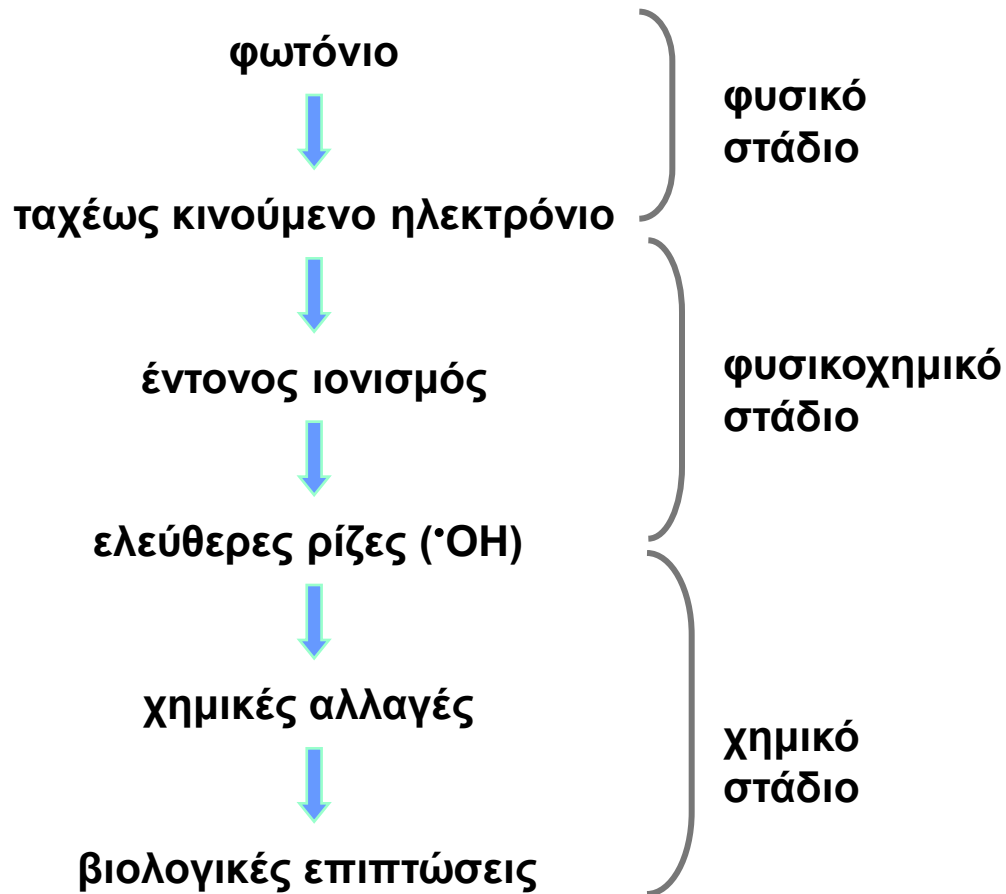
$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

**sievert (Sv) = κανονικοποιημένη δόση**

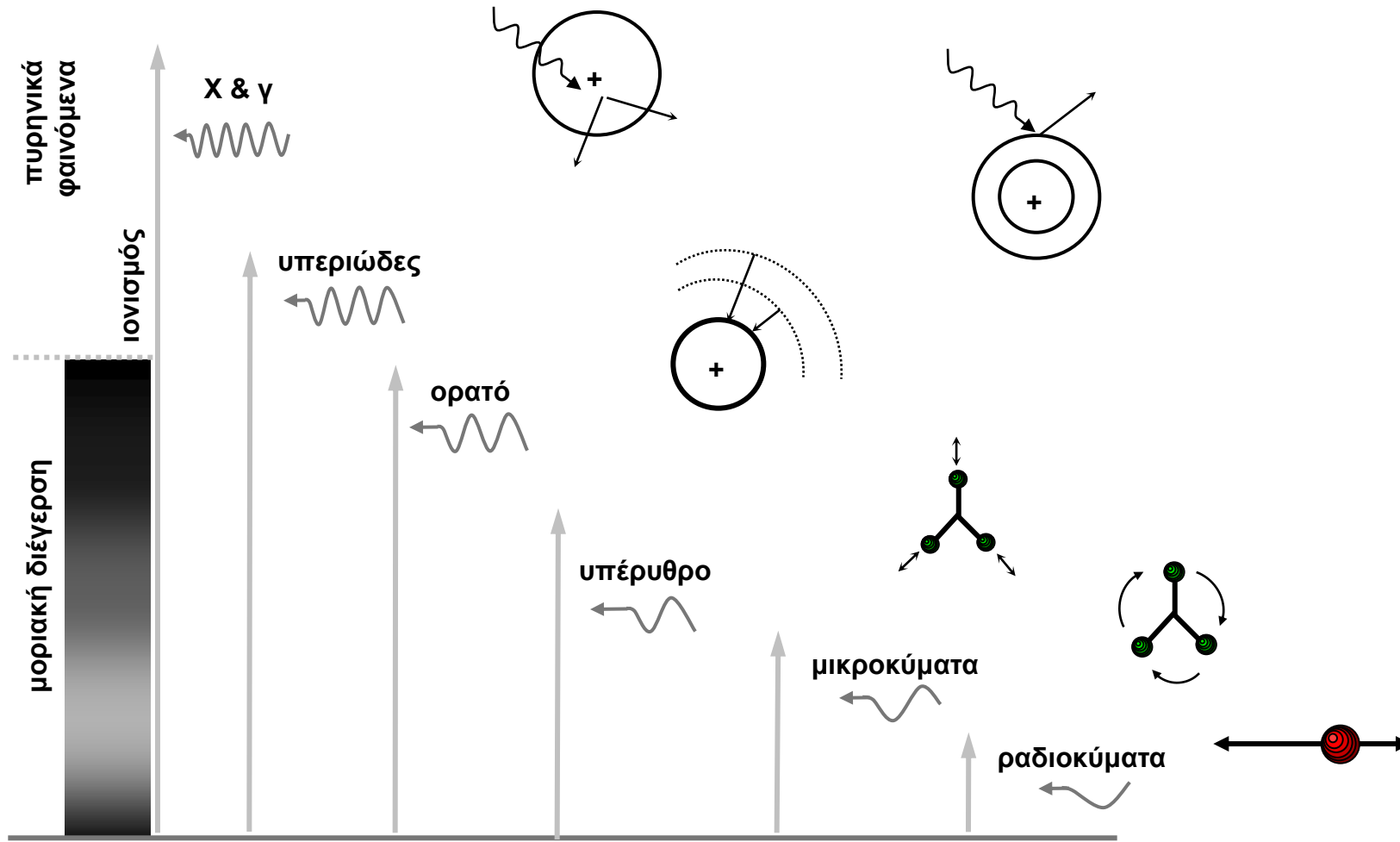
$$1 \text{ Sv} = \text{RBE} \times 1 \text{ Gy} \quad 1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$



# βιολογικές επιπτώσεις ιονίζουσας ακτινοβολίας



# αλληλεπίδραση Η/Μ κυμάτων με την ύλη



# βιβλιογραφία

---



- Φ. Άννινος, “Ιατρική Φυσική”, ΔΠΘ, 1991
- Ε.Ν. Οικονόμου, “Η Φυσική Σήμερα”, Πανεπ. Εκδόσεις Κρήτης, 1991
- Σ. Χαραλάμπους, “Εισαγωγή στην Ατομική και Μοριακή Φυσική”, ΑΠΘ, 1981
- Σ. Χαραλάμπους, “Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική”, ΑΠΘ, 1983
- Σ. Χαραλάμπους, “Δοσιμετρία και Βιολογικές Επιπτώσεις των Ακτινοβολιών”, ΑΠΘ, 1985
- G.F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement”, 2<sup>nd</sup> ed., John Willey & Sons, 1989
- H.E. Johns, J.R. Cunningham, “The Physics of Radiology”, 4<sup>th</sup> ed., Charles Thomas, 1983
- E.L. Carstensen, “Magnetic Fields and Cancer”, IEEE Eng. Med. Biol., vol. 14(4), 362-369, 1995
- S.P.A. Bren, “60 Hz EMF Health Effects – A Scientific Uncertainty”, IEEE Eng. Med. Biol., vol. 14(4), 370-374, 1995

**cite as**

---

**Ε. Καλδούδη, “Αλληλεπίδραση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων με την Ύλη”, Υποδειγματική Διδασκαλία στα πλαίσια Υποψηφιότητας για τη θέση Επίκουρου Καθηγητή ΔΠΘ στην “Φυσική Ιατρικής Απεικόνισης – Τηλεϊατρική”, 8 Δεκεμβρίου 2000**