

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ και ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Δημήτρης Κεχράκος

Παιδαγωγικό Τμήμα

ΑΣΠΑΙΤΕ

Επικοινωνία: dkehrakos@aspete.gr

Ιστοσελίδα Μαθήματος: <http://eclass.aspete.gr/courses/GM145/>

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ

1. Εκπόνηση Εργασίας (15-20 σελ) σε σχετικό με το περιεχόμενο του μαθήματος θέμα (40%).

- › Μέγεθος 15-20 σελίδες
- › Ομάδες 1-2 ατόμων
- › Ολιγόλεπτη προφορική παρουσίαση στην τάξη
- › Ανάρτηση Εργασιών στην ιστοσελίδα του μαθήματος

2. Γραπτή Εξέταση (60%)



- | | | |
|--------------------|---------------------|---------------------|
| 1. A. Picard | 11. L. Brillouin | 21. I. Langmuir |
| 2. E. Henriot | 12. P. Debye | 22. M. Planck |
| 3. P. Ehrenfest | 13. M. Knudsen | 23. M. Curie |
| 4. E. Herzen | 14. W.L. Bragg | 24. H.A. Lorentz |
| 5. Th. de Donder | 15. H.A. Kramers | 25. A. Einstein |
| 6. E. Schroedinger | 16. P.A.M. Dirac | 26. P. Langevin |
| 7. E. Verschaffel | 17. A.H. Compton | 27. C.E. Guye |
| 8. W. Pauli | 18. L.V. de Broglie | 28. C.T.R. Wilson |
| 9. W. Heisenberg | 19. M. Born | 29. O.W. Richardson |
| 10. R.H. Fowler | 20. N. Bohr | |

The "architects" of modern physics. This unique photograph shows many eminent scientists who participated in the Fifth International Congress of Physics held in 1927 by the Solvay Institute in Brussels. At this and similar conferences, held regularly from 1911 on, scientists were able to discuss and share the many dramatic developments in atomic and nuclear physics. This elite company of scientists includes fifteen Nobel prize winners in physics and three in chemistry. (Photograph courtesy of AIP Niels Bohr Library)

ΔΙΔΑΚΤΕΑ ΥΛΗ

Ενότητα 1η : Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική (3 εβδ)

- Θερμική Ακτινοβολία (Μελανό Σώμα). Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο. Φωτόνια. Γραμμικά Φάσματα. Ατομικό Πρότυπο Bohr. Ατομικός Πυρήνας. Κυματική Φύση της Υλης (Αρχή του de Broglie).

Ενότητα 2η : Κβαντική Μηχανική (3 εβδ)

- Κυματοσυνάρτηση. Αβεβαιότητα και Πιθανότητα. Αρχή Heisenberg. Εξίσωση Schrödinger. Ηλεκτρόνιο σε κουτί και Εφαρμογές. Φαινόμενο Σήραγγας και Εφαρμογές.

Ενότητα 3η : Ατομα, Μόρια, Στερεά (2 εβδ)

- Διέγερση και Αποδιέγερση. Το χρώμα των σωμάτων. Το LASER (Ru, He-Ne). Ο ομοιοπολικός δεσμός. Ηλεκτρονική Δομή Στερεών: Αγωγοί, Μονωτές και Ημιαγωγοί. Το σπίν του ηλεκτρονίου και Εφαρμογές: Γιγαντιαία Μαγνηταντίσταση.

Ενότητα 4η : Πυρηνική Φυσική (2 εβδ)

- Δομή Πυρήνα. Ενέργεια Σύνδεσης. Ραδιενέργεια και Εφαρμογές. Πυρηνική Σχάση. Αλυσωτές Αντιδράσεις. Πυρηνικοί Αντιδραστήρες. Πυρηνική Σύντηξη και το Ενεργειακό Πρόβλημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ R. Serway, C. Moses, C. Moyer, «Σύγχρονη Φυσική»
- ❖ H. D. Young, «Φυσική», Τόμος Β΄
- ❖ R. Serway, «Φυσική για Επιστήμονες και Μηχανικούς», Τόμος IV
- P. G. Hewitt, «Οι Εννοιες της Φυσικής», Τόμος II
- K.W. Ford, «Κλασική και Σύγχρονη Φυσική»
- J. Singh, «Modern Physics for Engineers»
- ❖ R. Knight, «Physics for Scientists and Engineers»

❖ Προτεινόμενα συγγράμματα

Εισαγωγή

- Νευτώνεια Μηχανική Newton (~1750)
- Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία Maxwell (~1800)
- Θερμοδυναμική (~1800)

ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

- Θεμέλιο επιστήμης μέχρι ~1900
- Βαση τεχνολογικών εφαρμογών 20ου αιώνα

~1900: Στροφή προς ερμηνεία ατομικής δομής της ύλης και φασμάτων φωτός.

Αναδύεται η διακριτή δομή πολλών φυσικών μεγεθών (ενέργεια, ύλη)

Η Κλασσική Φυσική κρίνεται **ανεπαρκής** στην ερμηνεία των νέων πειραματικών δεδομένων.

Γένεση **ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**

Θεωρία Σχετικότητας

(Einstein): Νέα θεώρηση της σχέσης χώρου-χρόνου

Κβαντική Μηχανική

(Heisenberg, Born, Schrödinger, Dirac): Διυσμός σωματιδίου-κύματος στον (υπο)ατομικό κόσμο

Η Φυσική μέχρι το 1800

- Η ύλη αποτελείται από στοιχειώδεις λίθους τα «ατομα»

Δημόκριτος 400πΧ

Newton 1700 – απέδειξε $pV = \text{σταθ}$

Bernoulli 1750 – τυχαία κίνηση ατομών αερίου

Dalton 1800 – ερμηνεία ερμηνεία χημικών αντιδράσεων

Avogadro 1800 – σχηματισμός μορίων από άτομα

- Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ένα συνεχές ρευστό (σε αναλογία με το «ρευστό» της θερμότητας)

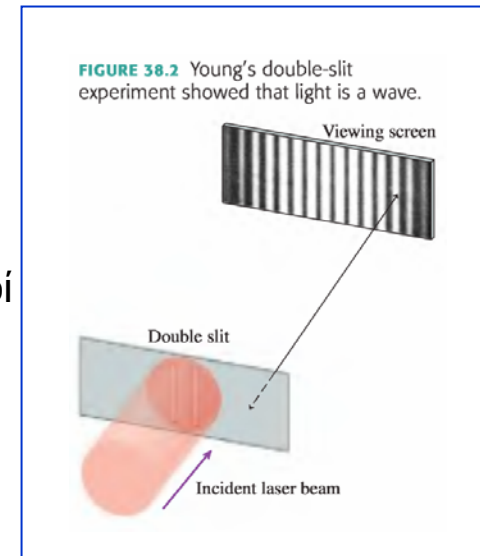
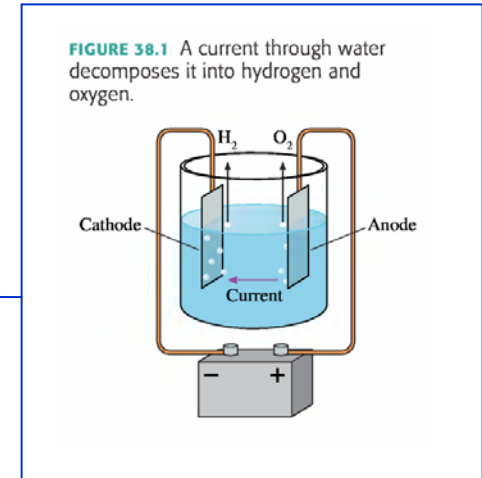
Volta 1800 : Ηλεκτρόλυση => ανέδειξε δομή ύλης και σχέση της με τον ηλεκτρισμό. Στοιχ. Φορτίο $q/m \sim 10^8$ C/kg

- Το φως είναι σωματίδια (Newton).

Young 1801 : Πείραμα Συμβολής με Δύο Σχισμές (Κροσσοί Συμβολής) αναδεικνύει την κυματική φύση του φωτός.

Fresnel 1819: Μαθηματική θεωρία συμβολής φωτός

Ερώτημα: Τί «κυματίζει»;



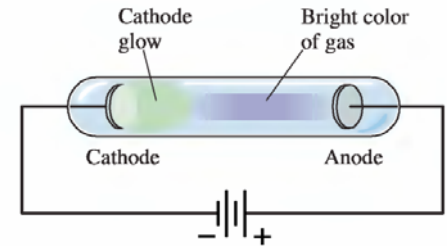
Σταθμοί στη Φυσική του 19ου αιώνα (1800-1900)

Faraday (1820):

Αγωγιμότητα υγρών: Τα «άτομα» μεταφέρουν ηλεκτρικό φορτίο (ιόντα), οπότε το ηλεκτρικό ρεύμα έχει ασυνεχή ροή

Αγωγιμότητα αερίων: Ηλεκτρική εκκένωση. Παραγωγή φωτός.
Παραγωγή **καθοδικών ακτίνων** άγνωστης φύσης.

FIGURE 38.3 Faraday's gas discharge tube.



Thomson (1897): Ανακάλυψη ηλεκτρονίου (από ιονισμό He)

Απόκλιση καθοδικών ακτίνων σε ΗΠ

Μηδενική απόκλιση σε κάθετα ΗΠ και ΜΠ

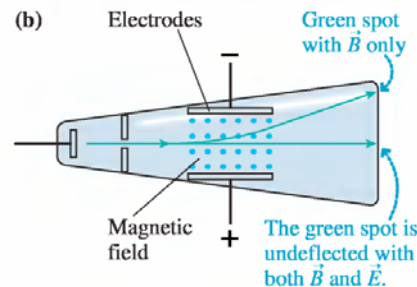
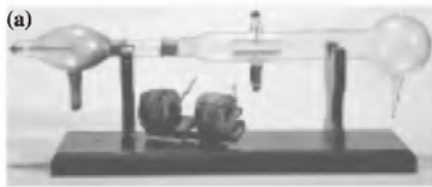
$$\left. \begin{array}{l} \text{Απόκλιση καθοδικών ακτίνων σε ΗΠ} \\ \text{Μηδενική απόκλιση σε κάθετα ΗΠ και ΜΠ} \end{array} \right\} \frac{q}{m} \approx 10^{11} \text{C/kg}$$



J. J. Thomson.

Ανακάλυψη στοιχειώδους φορτίου με 1000 φορές μικρότερο λόγο q/m από τα αποτελέσματα της ηλεκρολυσης (Volta). Αργότερα ονομάστηκε **ηλεκτρόνιο**.

FIGURE 38.7 Thomson's crossed-field experiment to measure the velocity of cathode rays. The photograph shows his original tube and the coils he used to produce the magnetic field.



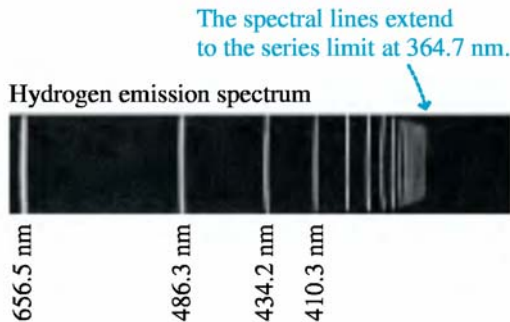
Παρομοια αποτελέσματα q/m από θερμιονική εκπομπή και ραδιενεργό διάσπαση β .

Σταθμοί στη Φυσική του 1800-1900 (συνέχεια)

Balmer (1885): Περιγραφή Φάσματος Υδρογόνου

$$\lambda_n = \frac{91.18\text{nm}}{\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)}; \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

FIGURE 38.22 The hydrogen emission spectrum.



Ανοικτά ερωτήματα

Γιατί τα άτομα εκπέμπουν φως;

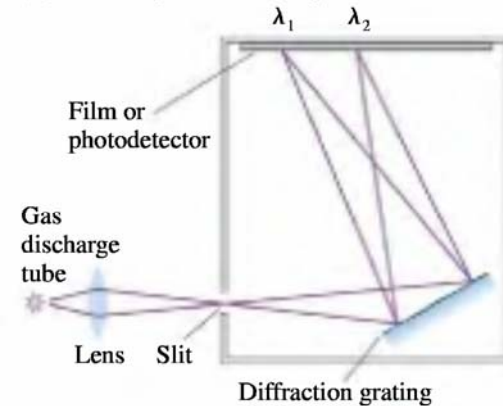
Γιατί το φάσμα τους είναι διακριτό;

Γιατί ορισμένα μ.κ υπάρχουν στο φάσμα εκπομπής αλλά όχι στο φάσμα απορρόφησης;

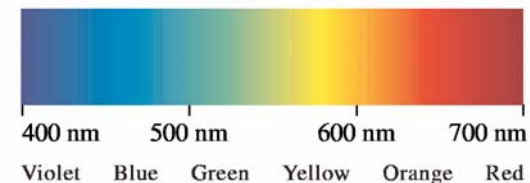
Γιατί το φάσμα κάθε αερίου είναι διαφορετικό;

FIGURE 38.19 A grating spectrometer is used to study the emission of light.

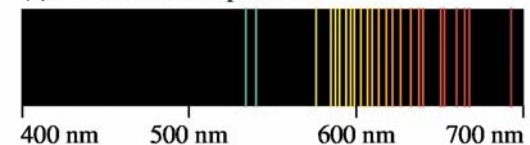
(a) Measuring an emission spectrum



(b) Incandescent lightbulb



(c) Neon emission spectrum



Σταθμοί στη Φυσική του 1800-1900 (συνέχεια)

Millikan (1906): Μέτρηση φορτίου ηλεκτρονίου

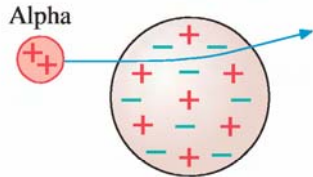
Οι αιωρούμενες φορτισμένες σταγόνες λαδιού βρέθηκαν να έχουν φορτία ακέραια πολλαπλάσια μιας στοιχειώδους ποσότητας $e \sim 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$

Rutherford (1909): Ύπαρξη πυρήνα του ατόμου

Βομβάρδισε φύλλα χρυσού με ταχέως κινούμενα σωματΙΑ-α (Becquerel 1896) => έντονη οπισθοσκέδαση !

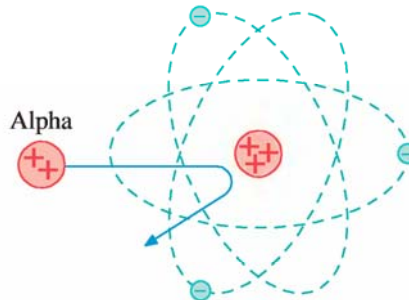
FIGURE 38.12 Alpha particles interact differently with a concentrated positive nucleus than they would with the spread-out charge in Thomson's model.

(a)



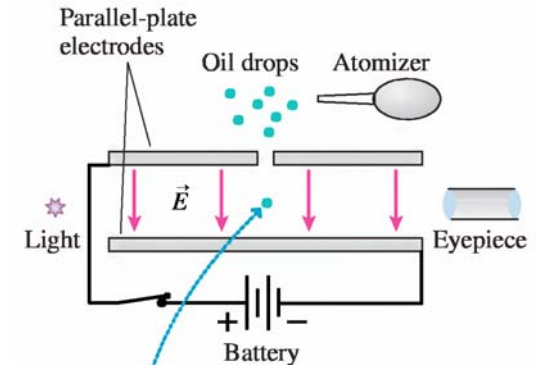
The alpha particle is only slightly deflected by a Thomson atom because forces from the spread-out positive and negative charges nearly cancel.

(b)



If the atom has a concentrated positive nucleus, some alpha particles will be able to come very close to the nucleus and thus feel a very strong repulsive force.

FIGURE 38.9 Millikan's oil-drop apparatus to measure the fundamental unit of charge.



The upward electric force on a negatively charged droplet balances the downward gravitational force.

Ernest Rutherford (1871-1937)
Nobel Prize (1908): Ατομική
Προέλευση Ραδιενεργείας



Ενότητα 1:

Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

Θερμική Ακτινοβολία

ΕΝΟΤΗΤΑ 1 : Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

1.1 Θερμική Ακτινοβολία Σώματος

1.1.1 Νόμος Stefan & Boltzmann (~1880)

$$I = e\sigma T^4$$

I = ένταση (=εκπεμπόμενη ισχύς ανά επιφάνεια) [W/m^2]

T = θερμοκρασία [K]

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [m^2K^4]

e = συντελεστής εκπομπής ($0 < e < 1$)



Black lava glows brightly when hot.

Μελανό σώμα ($e=1$) : Εκπέμπει (ή απορροφά, ανάλογα με τις συνθήκες) ΗΜ ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος

Πχ Ορυκτό κάρβουνο, Ήλιος, Λαμπτήρας Πυρακτώσεως, Κόρη Ματιού.

Φαιό σώμα ($e < 1$) : Μερική εκπομπή (ή απορρόφηση) της ΗΜ ακτινοβολίας.

Πχ ένα κομμάτι ξύλο βαμμένο καφέ ή πρασινο ή κοκκινο. Γυαλιστερό μέταλλο ($e \sim 0.3$)

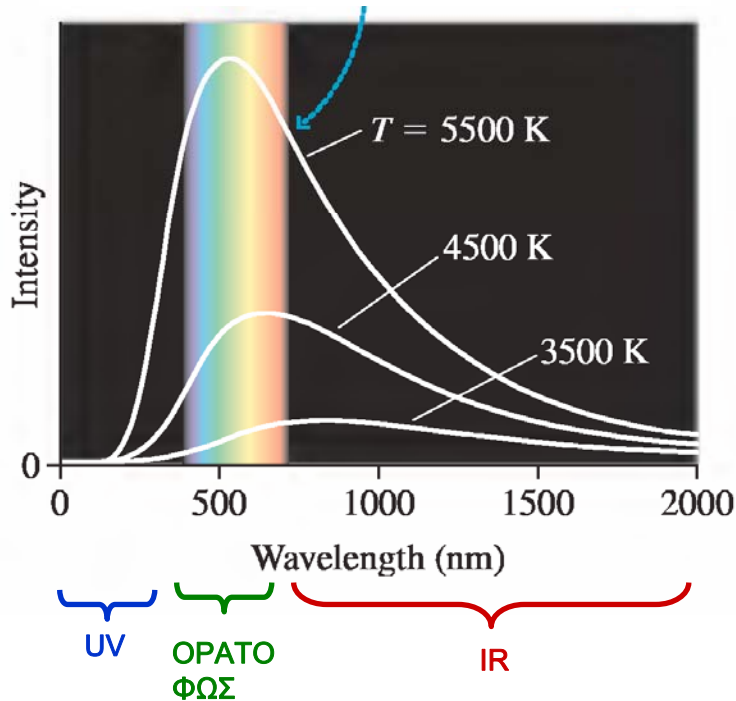
Απόλυτα λευκό σώμα ($e=0$): Αντανακλά πλήρως κάθε ΗΜ ακτινοβολία και έχει μηδενική εκπομπή ακτινοβολίας

Πχ ένας απολυτα ανακλαστικός καθρέπτης.

1.1.2 Φάσμα Θερμικής Ακτινοβολίας

FIGURE 38.20 Φάσμα εκπομπής μελανού σώματος

Ένα θερμότερο σώμα εκπέμπει μεγαλύτερη ένταση σε μικρότερα μήκη κύματος



1. Το φάσμα εκτείνεται από την περιοχή του υπεριθρου (IR) μέχρι την περιοχή του υπεριώδους (UV)
2. Το φάσμα είναι ανεξάρτητο από τη φύση του υλικού. Εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.
3. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της συνολικά εκπεμπόμενης ισχύος δηλαδή του εμβαδού της καμπύλης $I(\lambda)$.
4. Αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μετατόπιση της κορυφής του φάσματος προς μικρότερα μήκη κύματος:

$$\lambda_{\max} = \frac{2.90 \times 10^{-3}}{T} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Νόμος του Wien

Εφαρμογή : Απομακρυσμένη Θερμομέτρηση

Ηλιος: $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$ (Πράσινο) $\Rightarrow T_{\max} = 5800 \text{ K}$

Γη: $T_{\max} = 300 \text{ K} \Rightarrow \lambda_{\max} = 10,000 \text{ nm}$ (IR)

Deepest red	700 nm
Red	650 nm
Green	550 nm
Blue	450 nm
Deepest violet	400 nm



1.1.3 Θεωρία των Rayleigh & Jeans (~1900)

- Μέσα στο θερμό σωμα σχηματίζονται στάσιμα ΗΜ κύματα (ΣΗΜΚ)
- Η ενέργεια του καθενός είναι $E \sim A^2$
- Η ενέργεια ισοκατανέμεται στους τρόπους ταλάντωσης $A^2 \sim T$
- Αθροίζοντας την ενέργεια των κυμάτων προκύπτει: $I(\lambda) = \frac{2\pi c k T}{\lambda^4}$
- Όταν $\lambda \rightarrow 0$ τότε $I(\lambda) \rightarrow \infty$ Υπεριώδης Καταστροφή !!!
- Αδυναμία της κλασσικής φυσικής (Θερμοδυναμική + Ηλεκτρομαγνητική θεωρία) να ερμηνεύσει το φάσμα του μελανού σώματος

1.1.4 Θεωρία του Planck (1908) - Nobel Prize 1920

- Το μελανό σώμα αποτελείται από «μικροσκοπικά ταλαντούμενα ηλεκτρικά φορτία»
- Τα ταλαντούμενα φορτία εκπέμπουν ΗΜ ακτινοβολία συχνότητας ίση με την συχνότητα ταλάντωσής τους (Maxwell) .
- Η ενέργεια δόνησης κάθε ταλαντωτή είναι **ακέραιο πολλαπλάσιο** της συχνότητας ταλάντωσης $E_n = 0, hf, 2hf, 3hf, \dots$

Κατόπιν υπολογισμών προέκυψε ότι:

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

όπου:

$I(\lambda)$ = εκπεμπόμενη ισχύς (ανά μονάδα επιφάνειας) με μ.κ. μεταξύ ($\lambda, \lambda + d\lambda$)

h = εμπειρική σταθερά (του Planck) = $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

c = ταχύτητα φωτός

k = σταθερά Boltzmann

T = απόλυτη θερμοκρασία

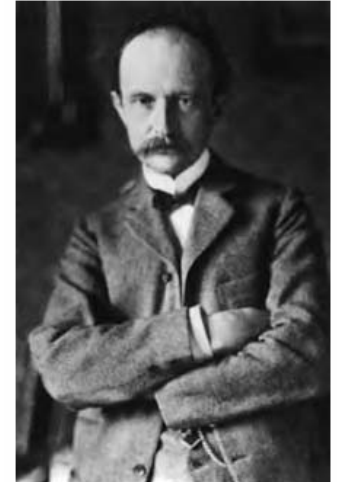


Figure 3.8 Max Planck (1858–1947).

1.1.5 Επιτυχίες της Θεωρία του Planck

- Εξήγησε την πειραματικά παρατηρούμενη μορφή του φάσματος $I(\lambda)$
- Εξήγησε το νόμο του Wien και υπολόγισε την τιμή της σταθεράς $w=2.90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

$$\left[\frac{dI}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{\max} = \frac{w}{T} \right]$$

- Εξήγησε το νόμο των Stefan-Boltzmann και υπολόγισε την τιμή της σταθεράς $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{K}^4$

$$\left[I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \right]$$

Σχόλιο : Η σημασία της θεώρησης του Planck

Η υπόθεση του Planck για **διακριτές τιμές της ενέργειας ενός ταλαντωτή** ($E_n = nhf$) παρότι επινοήθηκε σα **μαθηματικό τέχνασμα ...**

... εδραίωσε την αντίληψη ότι **η ενέργεια ενός ταλαντωτή είναι κβαντισμένη...**

... κι ενώ ο ίδιος δεν πίστεψε ποτέ σε αυτήν, ο Einstein λίγα χρόνια αργότερα την ισχυροποίησε !

1.1.6 Ασκήσεις

1. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του Ηλιου έχει εκτιμηθεί ότι είναι περίπου 5800K. Αν θεωρήσουμε τον Ηλιο μελανό σώμα, βρείτε (α) ποιο είναι το κυρίαρχο μήκος κύματος στην εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία και (β) σε ποιο χρώμα αντιστοιχεί αυτό; *Απ. (α) 500nm (β) Πράσινο.*
2. Πόση ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας εκπέμπει ο Ηλιος στην περιοχή μηκών κύματος από 600 μέχρι 605nm; *Απ. 0.39MW/m².*
3. Εκτιμήστε τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του Ηλιου από τις παρακάτω πληροφορίες: Η ακτίνα του Ηλιου είναι $R=7.0 \times 10^8 \text{m}$. Η απόσταση Ηλιου-Γης είναι $r=1.5 \times 10^{11} \text{m}$. Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας της προσπίπτουσας στη Γη ακτινοβολίας είναι 1400W/m^2 . Ο Ηλιος θεωρείται κατά προσέγγιση μελανό σώμα και η απορρόφηση της Ηλιακής ακτινοβολίας στο Διάστημα είναι αμελητέα. [*Λύση: Η ένταση της ακτινοβολίας του Ηλιου στην επιφάνεια της Γης είναι $I_{GH} = P_{HL} / 4\pi r^2$, όπου είναι η συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς από τον Ηλιο και για την οποία ισχύει ο νομος Stefan-Boltzmann $I_{HL} = \sigma T^4 \Rightarrow P_{HL} / 4\pi R^2 = \sigma T^4$. Άρα $I_{GH} 4\pi r^2 = 4\pi R^2 \sigma T^4 \Rightarrow T^4 = I_{GH} r^2 / \sigma R^2$] *Απ. 5800K**

Ενότητα 1:

Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

ΕΝΟΤΗΤΑ 1 : Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

1.2 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (ΦΦ)

1.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Herz (1886) : Το φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο εκφορτίζεται όταν φωτιστεί με UV ακτινοβολία !

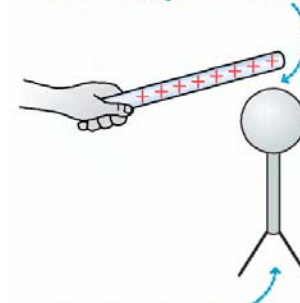
Thomson (1899): Το ηλεκτροσκόπιο εκφορτίζεται (όταν ακτινοβοληθεί) εκπέμποντας ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο ονομάστηκε **φωτοηλεκτρικό** και τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια, **φωτοηλεκτρόνια**.

Lenard (1900): Μελέτησε και κατέγραψε συστηματικά τα χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.



Figure 3.1 Heinrich Hertz (1857–1894), an extraordinarily gifted German experimentalist. (©Bettmann/Corbis)

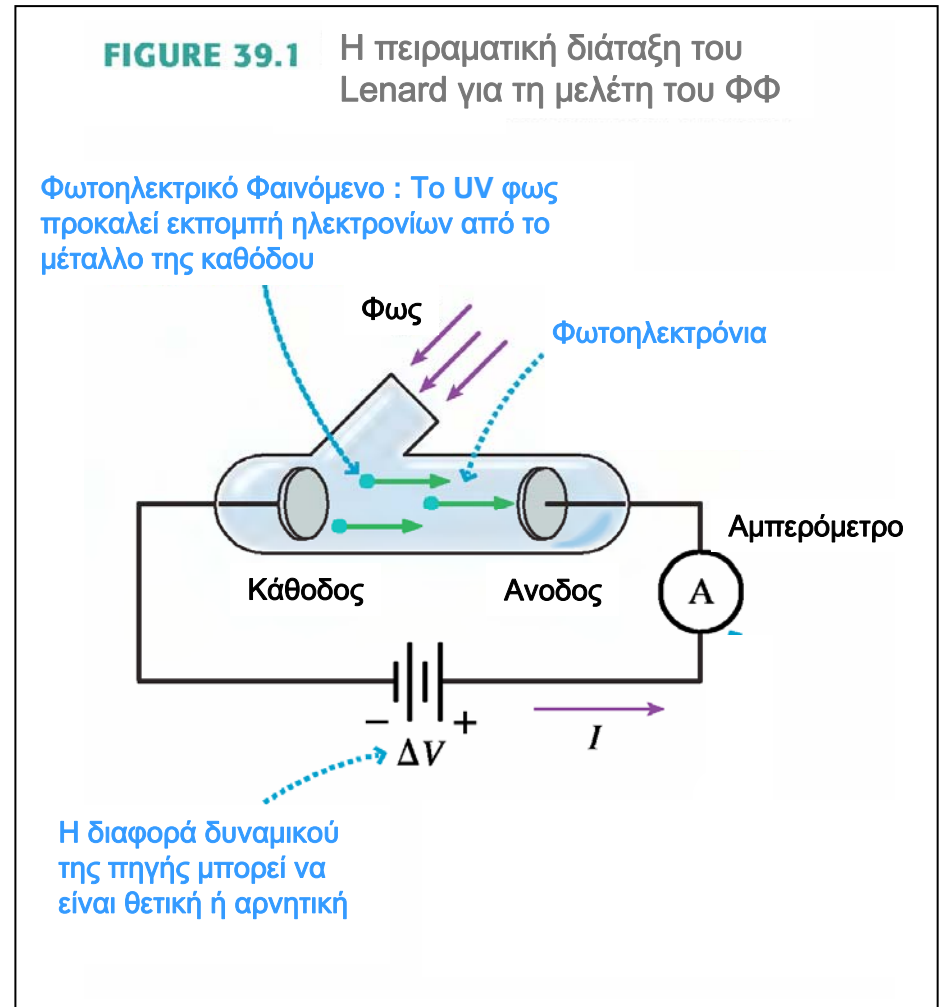
Bring a positively charged glass rod close to an electroscope without touching the sphere.



The electroscope is neutral, yet the leaves repel each other. Why?

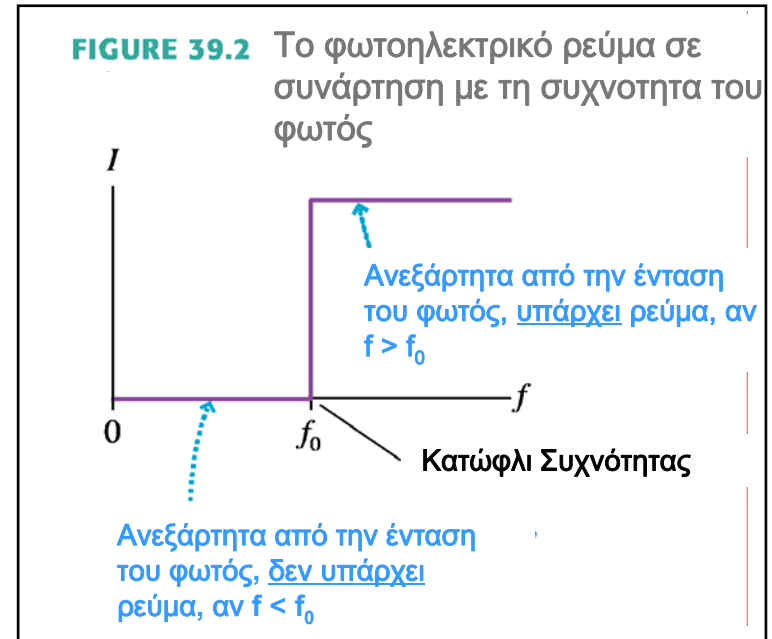
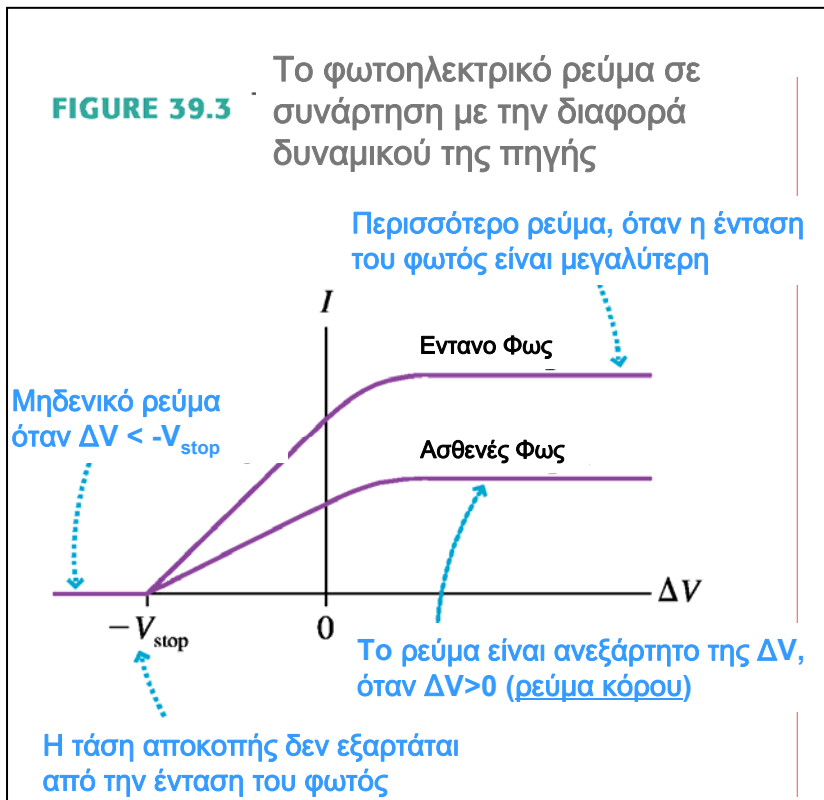
1.2.2 Τα χαρακτηριστικά του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

1. Η ένταση του ρεύματος (I) είναι **ανάλογη** της έντασης (J) του προσπίπτοντος φωτός.
2. Το ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν **ακαριαία** μετά την έναρξη του φωτισμού.



1.2.2 Τα χαρακτηριστικά του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

3. Φωτοηλεκτρόνια εμφανίζονται μόνο αν η συχνότητα του φωτός (f) ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή (**κατώφλι συχνότητας**) (f_0).
4. Η τιμή του κατωφλίου συχνότητας εξαρτάται από τη **φύση του μετάλλου** της καθόδου



5. Για **θετική τάση** ΔV ($V_A > V_K$) η ένταση του ρεύματος φτάνει σε **τιμή κόρου**, η οποία αυξάνεται μόνο με αύξηση της έντασης του φωτός.
6. Για **αρνητική τάση** ΔV ($V_A < V_K$) η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται όταν η τάση υπερβεί την **τάση αποκοπής** (V_{stop})

1.2.3. Κλασική Ερμηνεία του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου

Βασιζόμενη στο φαινόμενο της **θερμιονικής εκπομπής** ηλεκτρονίων από τα μέταλλα, η κλασική ερμηνεία του ΦΦ θεωρεί ότι:

- ένα ηλεκτρόνιο για να εξαχθεί από ένα μέταλλο απαιτεί ελάχιστη ενέργεια ίση με το ονομαζόμενο **έργο εξαγωγής** (E_b) του μετάλλου. Τυπική τιμή $E_b \sim 2 - 5 \text{ eV}$.
- το φώς προκαλεί θέρμανση των ηλεκτρονίων του μετάλλου (αύξηση της κινητικής ενέργειας) με αποτέλεσμα μερικά από αυτά να αποκτούν ενέργεια (E) αρκετή για να διαφύγουν από το μέταλλο ($E > E_b$).
- το φώς είναι ΗΜ κύμα και συνεπώς **προσφέρει ενέργεια ανά μονάδα χρόνου ανάλογη της έντασής του** ($dE/dt \sim J$)
- λόγω της **αρχής διατήρησης της ενέργειας**, το φωτοηλεκτρονιο εξέρχεται με κινητική ενέργεια $K = E - E_b$.

Αναπάντητα ερωτήματα:

- Γιατί το ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται **ακαριαία** μετά το φωτισμό;
- Γιατι υπάρχει **κατώφλι** συχνότητας f_0 ;
- Γιατι όταν είναι $f < f_0$, **δεν εμφανίζεται ρεύμα** καθώς αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας;
- Γιατι η τάση αποκοπής **δεν εξαρτάται** από την ένταση του φωτός, ($V_{\text{stop}} \sim \psi$)

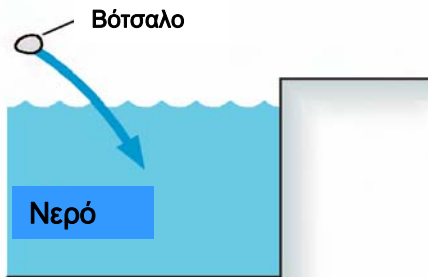
1.2.4 Θεωρία του Einstein για το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (1905)

(Nobel Prize 1921)

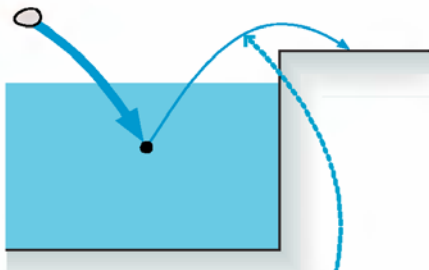


Το Μηχανικό Ανάλογο του ΦΦ

FIGURE 39.9 Ένα βότσαλο μεταφέρει ενέργεια στο νερό



Κλασικά, η ενέργεια του βότσαλου μοιράζεται σε όλα τα μορια του νερού. Ένα βότσαλο προκαλεί μόνο ελαφρύ κυματισμό.



Αν το βότσαλο μπορούσε να μεταφέρει όλη την ενέργειά του σε μια σταγόνα νερό, αυτή η σταγόνα θα μπορούσε εύκολα να πεταχτεί έξω από το δοχείο.

Οι 3 υποθέσεις (αξιώματα) :

1. Φως συχνότητας f αποτελείται από κβάντα φωτός (φωτόνια), καθένα με ενέργεια $E=hf$. Τα φωτόνια ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός.
2. Τα φωτόνια εκπέμπονται ή απορροφώνται καθ'ολοκληρία.
3. Κάθε φωτόνιο απορροφάται από ένα και μοναδικό ηλεκτρόνιο.

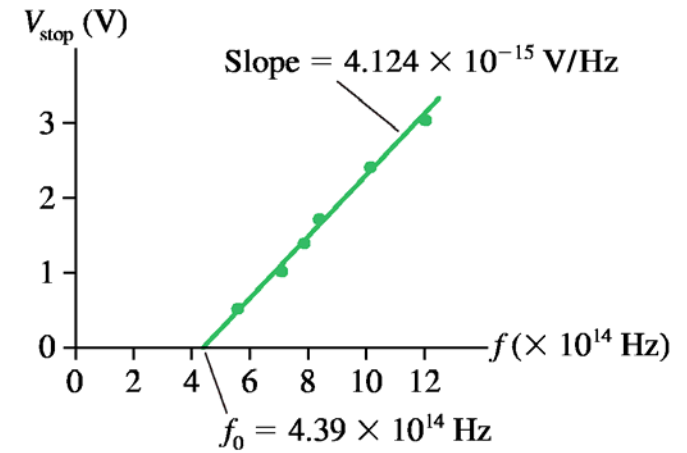
1.2.4 Θεωρία του Einstein για το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (1905)

(Nobel Prize 1921)

Συμπεράσματα

- Αρχή Διατήρησης Ενέργειας $\Rightarrow hf = E_b + K$.
Οπότε, εμφάνιση φωτοηλεκτρονίου $\Leftrightarrow hf \geq E_b$,
δηλαδή υπάρχει κατώφλι συχνότητας $f_0 = E_b / h$
- Για την τάση αποκοπής ισχύει $eV_{\text{stop}} = K_{\text{max}}$.
Αλλά $K_{\text{max}} = hf - E_b$, οπότε $V_{\text{stop}} = (hf - E_b) / e$ ή
 $V_{\text{stop}} = h(f - f_0) / e$, δηλαδή η τάση αποκοπής:
 - Δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός
 - Μεταβάλλεται γραμμικά με την προσπίπτουσα συχνότητα

FIGURE 39.10 Πειραματική επαλήθευση από τον Millikan της γραμμικής σχέσης μεταξύ τάσης αποκοπής και προσπίπτουσας συχνότητα



1.2.5 Η Φύση του Φωτονίου

- **Δεν είναι κλασικό σωματίο:** Φαινόμενα Συμβολής (Young) ακόμα και με πολύ ασθενείς δέσμες (1 φωτόνιο περιθλάται και συμβάλλει με τον εαυτό του)
 - **Δεν είναι κλασικό κύμα:** Η ενεργειά του μεταφέρεται σαν αδιάσπαστη οντότητα. Εξάλλου $E \sim f$ αντί για $E \sim A^2$ που ισχύει για τα κλασικά κύματα.
 - **Δεν είναι κύμα εντοπισμένο στο χώρο (κυματοπακέτο):** Δεν απαιτεί πεπερασμένο χρονικό διάστημα για να εκπεμφθεί ή να απορροφηθεί όπως ένα κλασικό κυματοπακέτο.
 - **Δεν υπάρχει ξεκάθαρη εμπειρική εικόνα** για τη φύση του φωτονίου.
- «Ένα φωτόνιο είναι ένα φωτόνιο» κατά το «A rose is a rose» της Gertrude Stein (1913). Η φράση εκφράζει το γεγονός ότι το όνομα ενός πράγματος ήδη συμπεριλαμβάνει την εικόνα και τα συναισθήματα που αυτό εκφράζει.*

FIGURE 38.2 Young's double-slit experiment showed that light is a wave.

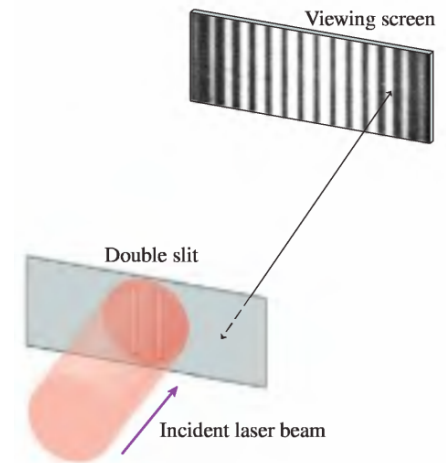
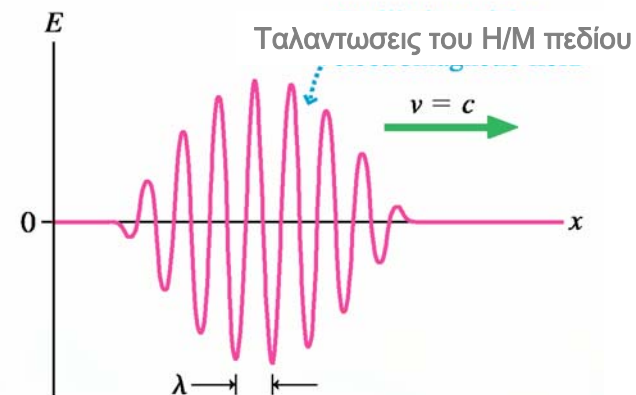
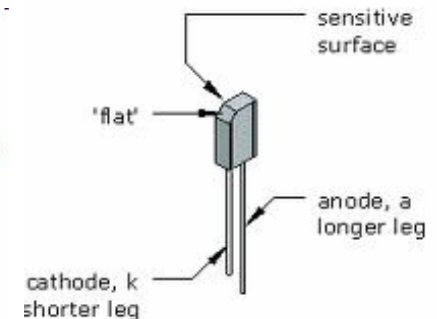
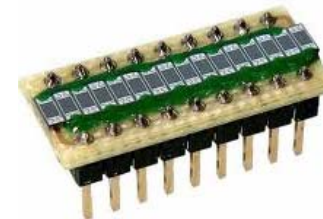
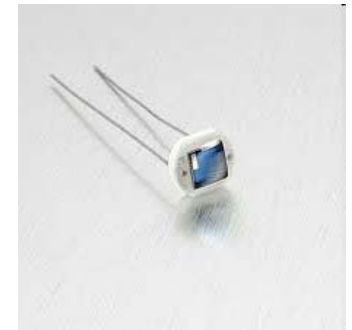
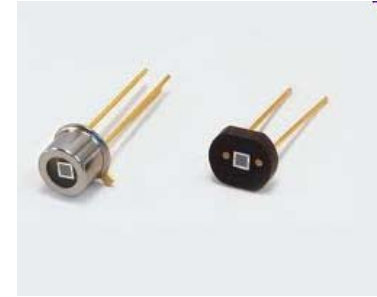


FIGURE 39.11 A wave packet has wave-
Ενα κυματοπακέτο έχει σωματιδιακές ιδιότητες



1.2.6 Φωτοανιχνευτές

- Βασικό τμήμα ενός **φωτοανιχνευτή** είναι η **φωτοδίοδος** η λειτουργία της οποίας βασίζεται στο **Εσωτερικό Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (ΕΦΦ)**.
- **ΕΦΦ**: Τα φωτοηλεκτρόνια παράγονται στο εσωτερικό ενός ημιαγωγού (p-n). Ένα φωτόνιο απορροφάται από τον ημιαγωγό και μετατρέπει ένα ηλεκτρόνιο σθένους σε ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας, Υλικά: Si, Ge, InGaAs.
- **Χαρακτηριστικά του ΕΦΦ** : f_0 και V_{stop} . Σε σύγχρονα υλικά η f_0 φτάνει στην περιοχή του IR (Si ~ 1.1eV). Πχ Φωτοανιχνευτής μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής μπορεί να αποτυπώσει το IR σήμα του τηλεχειριστηρίου της TV
- **Χρήσεις**: CD Players, Ανιχνευτές καπνού, Τηλεχειριστήρια (TV, VCR), Ρυθμιστές Φωτεινότητας (ρολόγια, φώτα στήλων), ...

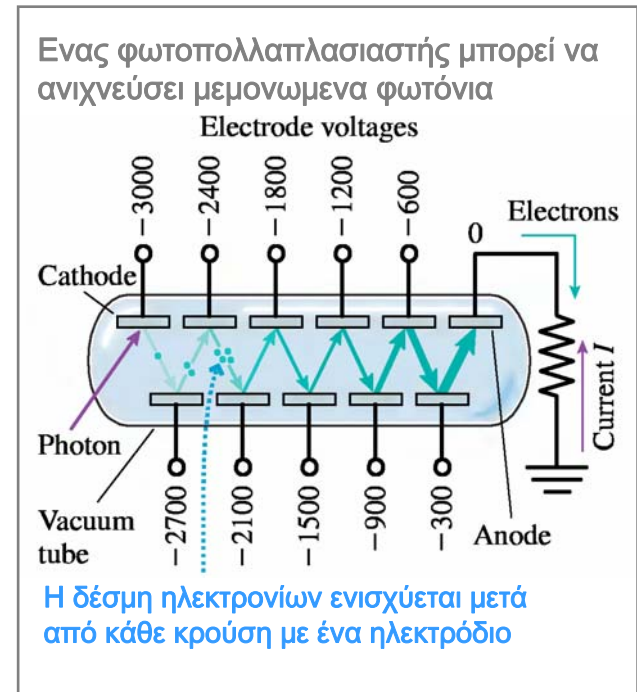


Διαβάστε:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>

1.2.7 Φωτοπολλαπλασιαστές

- Σε ένα **Φωτοπολλαπλασιαστικό Σωλήνα (PMT)** οι κάθοδοι επικαλύπτονται με μεταλλο μικρού έργου εξαγωγής ($E_b \sim$ ορατό φώς). Η αρχική δέσμη παραγόμενων φωτοηλεκτρονίων ενισχύεται καθώς νέα ηλεκτρόνια παράγονται κατά τις διαδοχικές κρούσεις της e^- δέσμης με τις καθόδους. Έτσι ένα *μόνο* φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει ανιχνεύσιμο ηλεκτρικό ρεύμα.
- **Χρήσεις του PMT**
 - ο Πειράματα Πυρηνικής Φυσικής – Ανίχνευση ακτινοβολίας
 - ο Πειράματα Εκπομπής Φωτός από Διατάξεις Ημιαγωγών
 - ο Ιατρικές συσκευές: Ανάλυση Αιματος, Διάγνωση με χρήση Οπτικών Ινών



Διαβάστε:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

1.2.8 Ασκήσεις

4. Τα έργα εξαγωγής τριών μετάλλων Α, Β και Γ είναι αντίστοιχα 2,3 και 4eV. Ταξινομήστε κατά σειρά αύξοντος μεγέθους τις τάσεις αποκοπής των τριών μετάλλων. **Απ.**
5. Ένα laser He-Ne εκπέμπει φως με μήκος κύματος $\lambda=633\text{nm}$ και η δέσμη του έχει ισχύ 1mW. Πόσα φωτόνια εκπέμπει κάθε δευτερόλεπτο; **Απ. 3.2×10^5 pps**
6. Αν η ισχύς μίας μονοχρωματικής δέσμης φωτός αυξάνεται, ποιο από τα παρακάτω συμβαίνει: (α) τα φωτόνια έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα (β) κάθε φωτόνιο έχει μεγαλύτερη ενέργεια (γ) τα φωτόνια είναι μεγαλύτερα σε διαστάσεις (δ) εκπέμπονται περισσότερα φωτόνια ανά δευτερόλεπτο. **Απ.**

Ενότητα 1:

Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

Ατομικό Πρότυπο Bohr

ΕΝΟΤΗΤΑ 1 : Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

1.3 Ατομικό Πρότυπο του Bohr (1913)

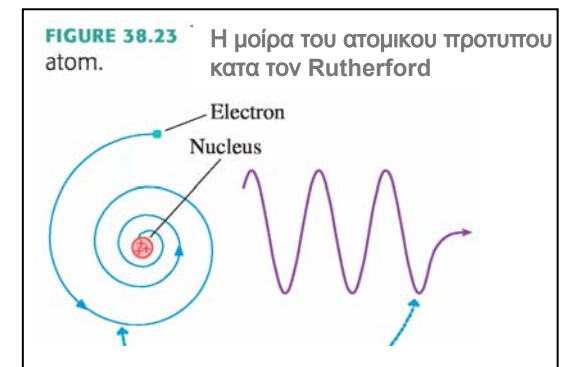
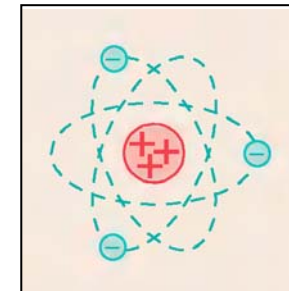
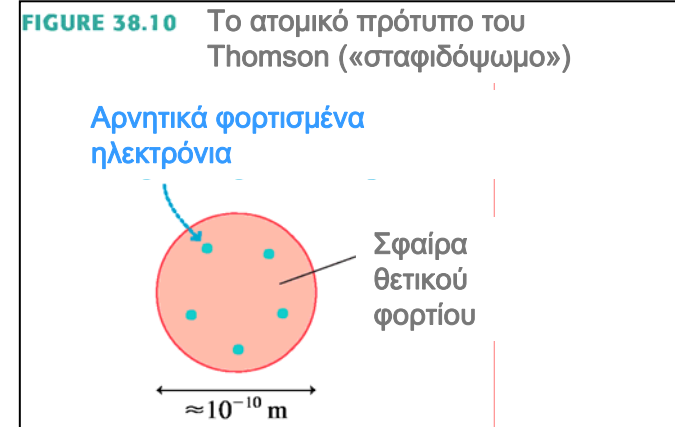
1.3.1 Ιστορική Αναδρομή

Thomson (1900): Το άτομο αποτελείται από ένα υπόβαθρο θετικού φορτίου μέσα στο οποίο βρίσκονται διάσπαρτα τα αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια).

Rutherford (1909): Το θετικό φορτίο του ατόμου βρίσκεται συγκεντρωμένο σε μικρή περιοχή στο κέντρο του (πυρήνας). Τα ηλεκτρονια κινούνται σε τροχιές γύρω από τον πυρήνα κατά το «Πλανητικό Μοντέλο».

1.3.2 Αναπάντητα ερωτήματα

- Γιατί το άτομο κατά το πλανητικό μοντέλο του Rutherford δεν καταρρέει εκπέμποντας ΗΜ ακτινοβολία με συνεχές φάσμα;
- Αφού η ΗΜ ακτινοβολία εκπέμπεται από άτομα και μάλιστα κατά κβάντα (Einstein 1905), ποιά επίπτωση έχει το γεγονός αυτό στη δομή του ατόμου;



1.3.3 Παραδοχές του Ατομικού Πρότυπου του Bohr (1913)

1. Το άτομο περιγράφεται από το πυρηνικό μοντέλο του Rutherford (θετικός πυρήνας + περιφερόμενα ηλεκτρόνια)

2. Τα άτομα βρίσκονται σε **στάσιμες καταστάσεις (ΣΚ)** που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ηλεκτρονικές τροχιές, οι οποίες αριθμούνται με τον **κβαντικό αριθμό $n=1,2,3,\dots$** και έχουν **διακριτές ενέργειες (E_n)** με $E_1 < E_2 < E_3 < \dots$

3. Η ΣΚ με την ελάχιστη ενέργεια είναι ευσταθής και ονομάζεται **βασική**, ενώ οι υπολοιπες λέγονται **διεγερμένες** και είναι ασταθείς.

4. Ένα άτομο μεταβαίνει με «**άλμα**» από μια κατάσταση (m) σε μια άλλη (n) εκπέμποντας ή απορροφώντας ένα φωτόνιο συχνότητας

$$f = \frac{\Delta E_{\text{atom}}}{h} = \frac{|E_m - E_n|}{h}$$

5. Ένα άτομο μπορεί να διεγερθεί με **ανελαστική κρούση** με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ή με άλλο άτομο.

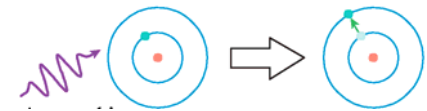
6. Τα άτομα μεταβαίνει αυθόρμητα στην **κατάσταση ελάχιστης ενέργειας (βασική)**. Αν διεγερθεί, κατόπιν επανέρχεται με διαδοχικά άλματα στη βασική κατάσταση.

Συνδίασε την ιδέα της κβάντωσης της ενέργειας (Einstein) με το πυρηνικό άτομο (Rutherford)

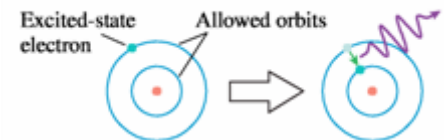


Niels Bohr

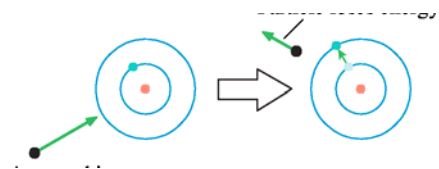
Απορροφήση φωτός



Εκπομπή φωτός



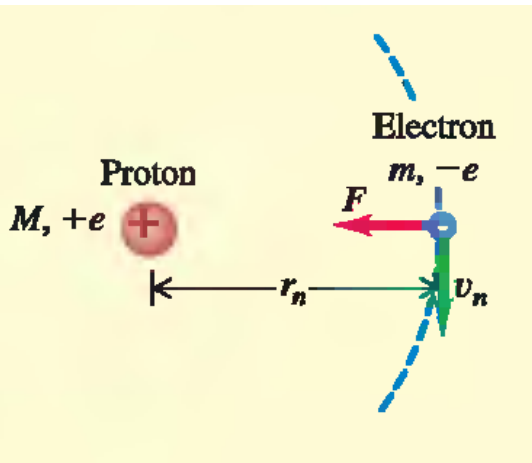
Διέγερση με κρούση



1.3.4 Το άτομο του Υδρογόνου κατά το προτυπο του Bohr

Βασιζόμενος στην υπόθεση ότι η ενέργεια του ατόμου είναι κβαντισμένη (E_n) απέδειξε ότι και η **στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντισμένη** $L_n = n\hbar$ όπου $L = mvr$ και $\hbar = h/2\pi$

Η έλξη Coulomb αποτελεί την απαιτούμενη κεντρομόλο δύναμη για την κυκλική κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον ακίνητο πυρήνα:



$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m \frac{v_n^2}{r_n} \xrightarrow{m v_n r_n = n\hbar} r_n = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m e^2} n^2 \quad v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar} \cdot \frac{1}{n}$$

Για $n=1$:

η πιο μικρή ακτίνα: $r_1 = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m e^2} \approx 5.3 \times 10^{-11} \text{ m} \equiv \alpha_B$

η πιο μεγάλη ταχύτητα: $v_1 = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar} \approx 2.19 \times 10^6 \text{ m/s} \ll c$

Η κινητική ενέργεια: $K_n = \frac{1}{2} m v_n^2 = \frac{m e^4}{2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ η δυναμική ενέργεια: $U_n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} = -\frac{m e^4}{2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$

και η ολική ενέργεια: $E_n = K_n + U_n = -\frac{m e^4}{2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ Οπότε: $E_1 = -\frac{m e^4}{2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \approx -13.6 \text{ eV}$

1.3.5 Επιτεύγματα της θεωρίας του Bohr

1. Η ύλη είναι ευσταθής και δεν καταρρέει κατά την προβλεψη της ΗΜ θεωρίας για το πυρηνικό μοντέλο.
2. Τα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης των ατόμων είναι διακριτά.
3. Φασματα εκπομπής μπρούν να παραχθούν με κρούσεις ατόμου-ατόμου ή ατόμου-ηλεκτρονίου (Σωλήνες εκκένωσης αερίων)
4. Τα φάσματα εκπομπής ($n \rightarrow n-m$, $n=1,2,3,\dots$) εμφανίζουν περισσότερες γραμμές από τα φάσματα απορρόφησης ($1 \rightarrow 2$, $1 \rightarrow 3$, $1 \rightarrow 4$, ...)
5. Κάθε στοιχείο έχει ένα μοναδικό φάσμα (λογω των διακριτων ενεργειακών του καταστάσεων)
6. Το φάσμα εκπομπής ή απορρόφησης του υδρογόνου εξηγήθηκε πλήρως (βλέπε Ενότητα 1.4).

1.3.6 Αποτυχίες της θεωρίας του Bohr

1. Η αδυναμία να εξηγήσει την πολυπλοκότητα των φασμάτων των **πολυηλεκτρονικών ατόμων**.
2. Η άγνωστη **προέλευση των στασίμων καταστάσεων** και η αδυναμία να προβλεφθούν τα χαρακτηριστικά τους. (Ο Bohr υπέθεσε μόνο την ύπαρξη τους).

*Απάντηση στα δύο παραπάνω ερωτήματα έδωσε η **Κβαντική Μηχανική** στη μαθηματική της θεμελίωση από τον Schrödinger.*

Σημείωση

Τα αποτελέσματα της θεωρίας Bohr για πολυηλεκτρονικά άτομα προκύπτουν αν θέσουμε όπου $e^2 \rightarrow Ze^2$ και όπου $e^4 \rightarrow Z^2e^4$ (Z =ατομικός αριθμός του πυρήνα) στα αποτελέσματα για το άτομο του υδρογόνου (§1.3.5).

1.3.7 Ασκήσεις

7. Ένα (υποθετικό) άτομο έχει στάσιμες καταστάσεις με ενέργειες $E_1=0\text{eV}$, $E_2=3\text{eV}$, και $E_3=5\text{eV}$. Ποια μήκη κύματος εμφανίζονται (α) στο φάσμα εκπομπής και (β) στο φάσμα απορροφησης του στοιχείου αυτού; *Απ. (α) 248nm(UV), 414nm(κυανό), 621nm(πορτοκαλί) (β) 248nm, 414nm*
8. Υπολογίστε το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου κατά την αποδιέγερση ενός ατόμου υδρογόνου από την πρώτη διεγερμένη ($n=2$) στη θεμελιώδη ($n=1$) κατάσταση. Σε ποιά περιοχή του φάσματος ανήκει; Δίνονται: $h=4.136 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$, $c=3.00 \times 10^8 \text{m/s}$. *Απ. 122nm (UV)*
9. Ατομα υδρογόνου βομβαρδίζονται με ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια τα οποία επιταχύνονται υπό τάση V . (α) Ποιά είναι η ελάχιστη τιμή της απαιτούμενης τάσης (V_{min}) ώστε να επιτευχθεί ιονισμός των ατόμων υδρογόνου; (β) Πόση είναι τότε η ταχύτητα των ηλεκτρονίων-βλημάτων; Δίνονται: $m=9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$, $e=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$. *Απ. (α) 13.6V (β) $2.19 \times 10^6 \text{m/s}$*
10. Ο χρόνος ζωής ενός ατόμου υδρογόνου στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση ($n=2$) είναι περίπου $1.0 \times 10^{-8} \text{s}$. Υπολογίστε πόσες περιστροφές θα κάνει το ηλεκτρόνιο στην κατάσταση αυτή πριν το άτομο αποδιεγερθεί. Δίνονται: $v_1=2.19 \times 10^6 \text{m/s}$ και $r_1=5.30 \times 10^{-11} \text{m}$. *Απ. 0.82×10^7*

1.3.7 Ασκήσεις

11. Αέριο υδρογόνο «φωτίζεται» με δέσμη μήκους κύματος 85.5nm και προκαλεί φωτόρρευμα. Αν θεωρήσουμε ότι τα άτομα του υδρογόνου ήταν όλα στη βασική κατάσταση ($n=1$) πριν το φωτισμό, να βρείτε (α) με πόση κινητική ενέργεια (σε eV) ελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια και (β) πόση είναι η τάση αποκοπής. Απ. (α) 14.5eV (β) 14.5V
12. Δείξτε ότι η συχνότητα περιφοράς του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση $f = me^4/4\epsilon_0^2 h^3$. Κατά την κλασική ΗΜ θεωρία ένα περιφερόμενο ηλεκτρικό φορτίο εκπέμπει ΗΜ κύματα συχνότητας ίσης με τη συχνότητα περιφοράς του. Με βάση αυτό να συγκρίνετε τις τιμές της συχνότητας που εκπέμπει το άτομο σύμφωνα με την κλασική θεωρία και σύμφωνα με τη θεωρία του Bohr κατά τη μετάβαση $n+1 \rightarrow n$. Για τη σύγκριση να χρησιμοποιήσετε τις τιμές $n=1$, $n=10$ και $n=100$. Τι παρατηρείτε;

Ενότητα 1:

Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

Κυματική Φύση της Ύλης –
Αρχή de Broglie

ΕΝΟΤΗΤΑ 1 : Από την Κλασική στη Σύγχρονη Φυσική

1.4 Κύματα Υλης και Κβάντωση Ενέργειας

1.4.1 Η υπόθεση του de Broglie (1924) Nobel Prize 1929

Η φύση πρέπει να έχει μιας μορφής συμμετρία : Αφού το φως (κύμα) εμφανίζει σωματιδιακές ιδιότητες (βλ. Einstein και ΦΦ) γιατί τα σωματίδια να μην εμφανίζουν κυματικές ιδιότητες;

Συνδιάζοντας τη Θεωρία της Σχετικότητας με τη σχέση του Einstein $E=hf$ κατέληξε ότι:

«Αν ένα σωματιδιο με ορμή $p = mv$ έχει κυματικές ιδιότητες, τότε το μηκος κύματός του είναι $\lambda = h / p$ »

Το λ ονομάστηκε **μηκος κύματος de Broglie** του σωματιδίου.

Παραδείγματα

- Ηλεκτρονιο με $E=1\text{eV}$ έχει $u=(2E/m)^{1/2}=5.9 \times 10^6 \text{m/s}$ άρα
 $\lambda=1.2 \times 10^{-9} \text{m} \sim 10 a_{\text{cryst}} \leftarrow$ μετρήσιμο με περίθλαση από κρυσταλλο
- Μπαλάκι τέννις με $m=50\text{g}$ και $u=10\text{m/s}$ έχει
 $\lambda=1.3 \times 10^{-33} \text{m} \leftarrow$ πολύ μικρό για να μετρηθεί

39.1 Louis-Victor de Broglie, the seventh Duke de Broglie (1892–1987), broke with family tradition by choosing a career in physics rather than as a diplomat. His revolutionary proposal that particles have wave characteristics—for which de Broglie won the 1929 Nobel Prize in physics—was published in his doctoral thesis.

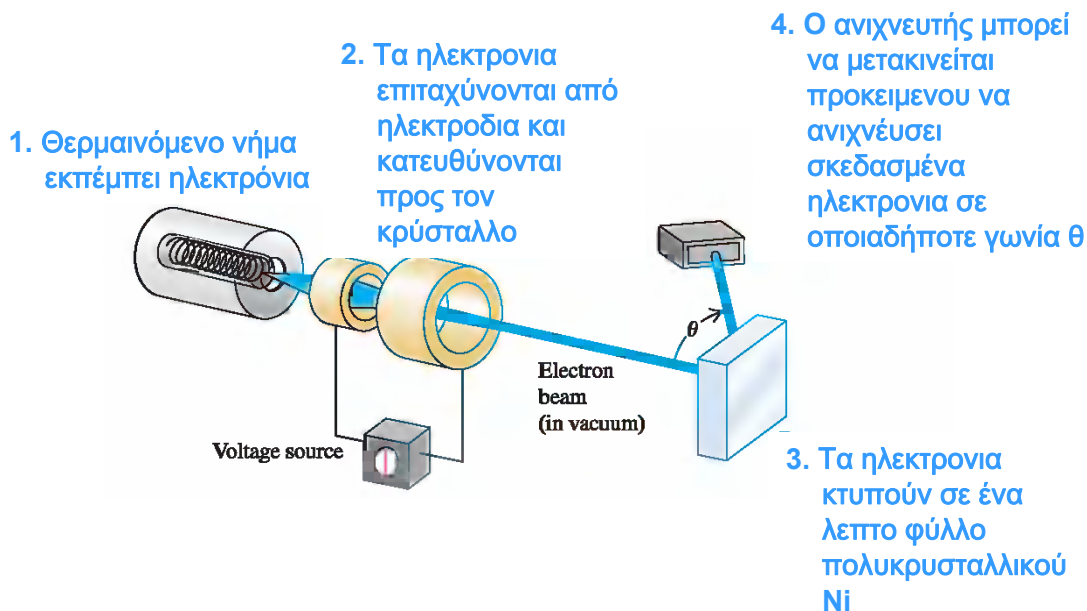


1.4.2 Κύματα Υλης και Περίθλαση

Davisson & Germer (1927) Παρατήρησαν (εκ παραδρομής) φαινόμενα συμβολής στην σκεδαζόμενη δέσμη ηλεκτρονίων από φύλλα Ni, επαληθεύοντας έτσι την κυματική φύση των ηλεκτρονίων και το αντίστοιχο μήκος κύματος de Broglie.

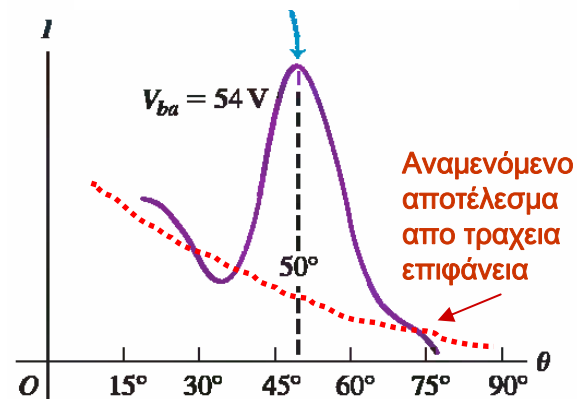
Το πείραμα ...

$$E=54\text{eV} \Rightarrow \lambda=0.16\text{nm} = 1.6 \text{ \AA} \quad \text{και } d(\text{Ni})\sim 3.5 \text{ \AA}$$



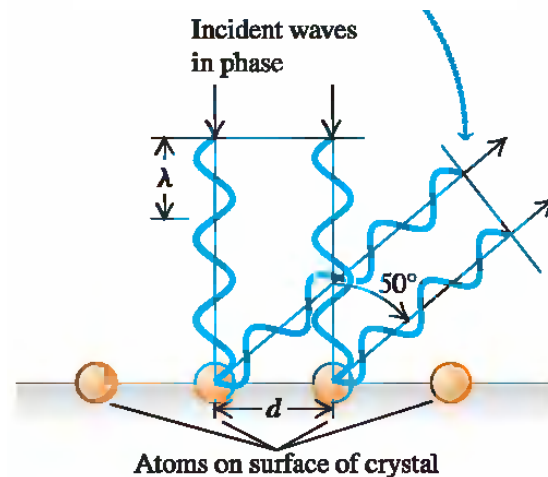
... οι μετρήσεις ...

- (a) Κορυφή λόγω ενισχυτικής συμβολής των σκεδζομενων ηλεκτρονιων



... και η ερμηνεία

- (b) Ενισχυτική συμβολή σκεδαζόμενων ηλεκτρονιων



1.4.3 Κβάντωση της Ενέργειας

Ερώτημα: Τι συνέπειες έχει ο κυματικός χαρακτήρας της ύλης για ένα σωματίδιο που είναι περιορισμένο να κινείται σε μια μικρή περιοχή του χώρου;

Εστω ένα σωματίδιο m που κινείται σε ένα μονοδιαστατο «κουτί» μήκους L (πχ ηλεκτρονιο σε ένα πολύ λεπτό σύρμα μικρου μήκους).

Λόγω ανακλάσεων δημιουργει «στάσιμο κύμα de Broglie». Οι συνοριακές συνθήκες επιβάλλουν δεσμούς στα όρια του κουτιού. Δηλαδή:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Αλλά $\lambda = h/p$, οπότε: $p_n = n \frac{h}{2L}$

και κατα συνεπεια

$$E = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow$$

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2} = n^2 E_1$$

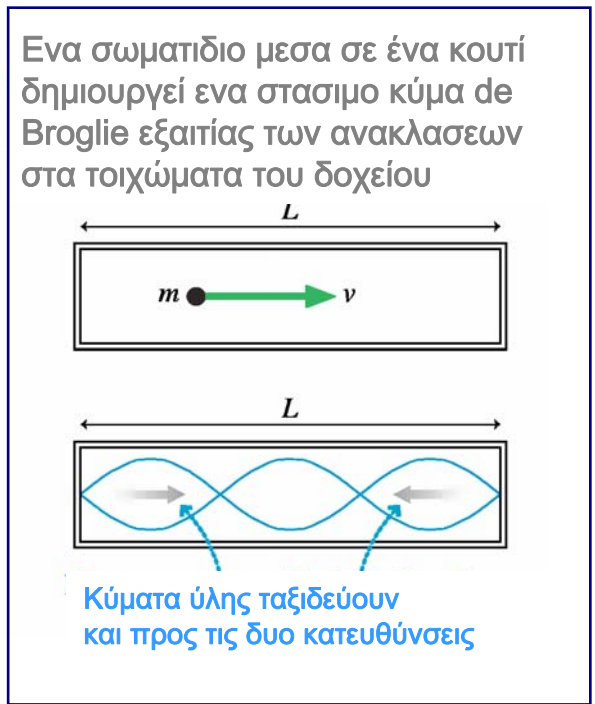
$n =$ κβαντικός αριθμός

οπου

$$E_1 = \frac{h^2}{8mL^2}$$

$E_n =$ ενεργειακές σταθμες

$E_1 =$ θεμελιώδες κβάντο ενεργειας του σωματιδίου.



Η κβάντωση της ενέργειας ενός σωματιδίου είναι συνέπεια του περιορισμού του στο χώρο

1.4.3 Κβάντωση της Ενέργειας

Παράδειγμα-1: Το κβάντο ενέργειας ενός ηλεκτρονίου μέσα σε ένα κουτί μήκους $L=0.10\text{nm}$.

Θυμηθείτε ότι η ακτίνα του ατομίου του υδρογόνου είναι $a_B \sim 0.05\text{nm}$.

Είναι $m = 9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$, οπότε $E_1 = 6.0 \times 10^{-18}\text{J} = 38\text{eV}$. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ κοντά στη θεμελιώδη ενέργεια του ατομίου του υδρογόνου $E_1 = 13.6\text{eV}$.

Παράδειγμα-2: Το κβάντο ενέργειας μιας σταγόνας λαδιού με $\varnothing = 0.1\mu\text{m}$ που είναι μέσα σε ένα κουτί μήκους $L = 10\mu\text{m}$.

Είναι $m = \rho V = 4.7 \times 10^{-16}\text{kg}$, οπότε $E_1 = 7.3 \times 10^{-24}\text{eV} \Rightarrow$ πάρα πολύ μικρή τιμή για να παρατηρηθεί η διαφορά μεταξύ $E_1, 4E_1, 9E_1, \dots$ κλπ \Rightarrow η ενέργεια μοιάζει συνεχής ποσότητα

Παράδειγμα-3: Μια μπίλια με $m = 100\text{gr}$ κινείται μέσα σε ένα σπирτόκουτο με $L = 3\text{cm}$.

Είναι $E_1 = 6.1 \times 10^{-63}\text{eV} \Rightarrow$ είναι πρακτικά αδύνατο να μετρηθεί η διαφορά μεταξύ $E_1, 4E_1, 9E_1, \dots$ κλπ \Rightarrow η ενέργεια είναι συνεχής ποσότητα

1.4.4 Ερμηνεία της θεωρίας του Bohr με την υπόθεση de Broglie

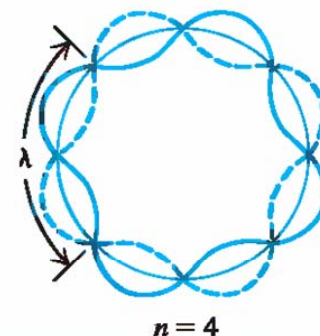
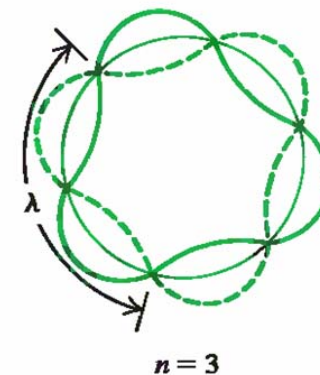
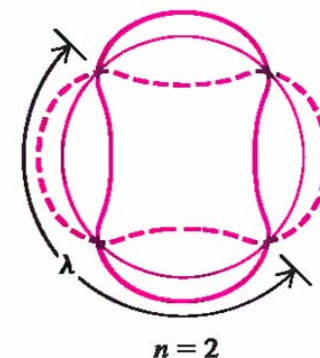
Bohr: Το ηλεκτρόνιο κινείται σε συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τον πυρήνα ...

de Broglie: ... η κυματική φύση του αναγκάζει να σχηματίσει στασιμό κύμα. Οι συνοριακές συνθήκες απαιτούν $2\pi r = n\lambda \Rightarrow 2\pi r = nh/mv \Rightarrow mvr = nh/2\pi \Rightarrow L_n = n\hbar$.

Η κβάντωση της στροφορμής είναι αποτέλεσμα του κυματικού χαρακτήρα του ηλεκτρονίου

Με βάση το συμπέρασμα αυτό μπορούμε να αποδείξουμε τις σχέσεις της §1.3.4 (Ατομό Υδρογόνου)

Η υπόθεση de Broglie ερμήνευσε την προέλευση των Στάσιμων Καταστάσεων, που αναφέρονται στο Ατομικό Πρότυπο Bohr, ως αποτέλεσμα της κυματικής φύσης του ηλεκτρονίου και του γεγονότος ότι η κίνησή του είναι περιορισμένη στο χώρο.

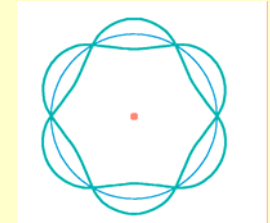


Στασιμα κύματα που αντιστοιχούν στην κίνηση του ηλεκτρονίου σε ένα άτομο. Προσεξτε ότι ο κβαντικός αριθμός (n) συνδέεται με το πλήθος των δεσμών του ΣΚ (N) με τη σχέση $n = N + \frac{1}{2}$

1.4.5 Ασκήσεις

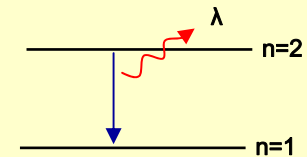
13. Ποιός είναι ο κβαντικός αριθμός (n) που περιγράφει την στάσιμη κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου που φαίνεται στο σχήμα; *Απ.*

$$n=3$$



14. Γιατί δεν είναι επιτρεπτή μια στάσιμη κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου με περιττό αριθμό δεσμών; *Απ. Γιατί το στάσιμο κύμα που περιγράφει το ηλεκτρόνιο θα είχε σε κάθε σημείο της τροχιάς δύο διαφορετικές τιμές φάσης.*

15. Ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα «κβαντικό σύρμα» μήκους L εκπέμπει φωτόνιο μήκους κύματος $\lambda=200\text{nm}$ όταν μεταπίπτει από τη στάθμη $n=2$ στη στάθμη $n=1$. Προσδιορίστε το L . *Υπόδειξη: $\Delta E=3E_1$, $E_1=h^2/8mL^2$ και $\Delta E=hc/\lambda$.*



16. Ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα «κβαντικό σύρμα» μήκους L έχει παρατηρηθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ότι αποκτά ενέργειες 12eV , 27eV και 48eV . Προσδιορίστε το L . *Απ. $12=4\cdot 3$, $27=9\cdot 3$, $48=16\cdot 3$, άρα η διαδοχή $E_1, 4\cdot E_1, 9\cdot E_1, 16\cdot E_1, \dots$ ικανοποιείται για $E_1=3\text{eV}$ οπότε $L^2=h^2/8mE_1$.*

Ενότητα 2:

Κβαντική Μηχανική

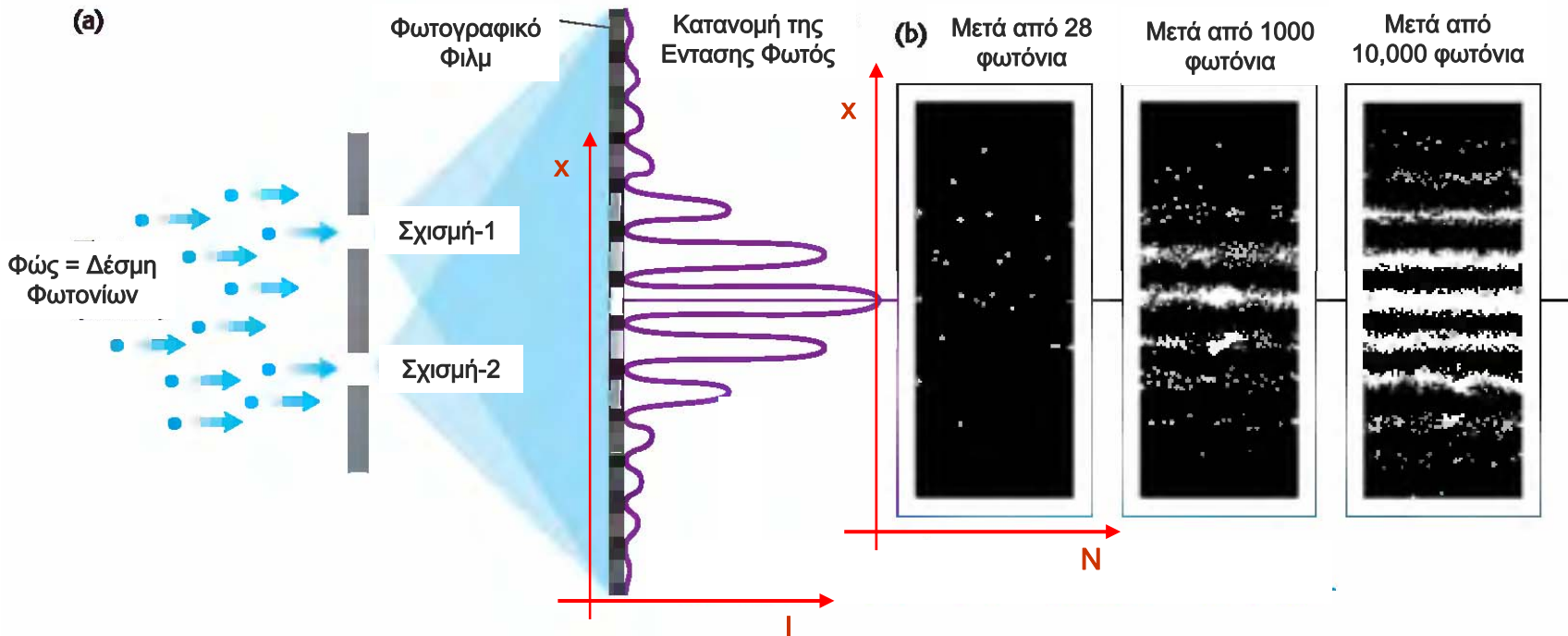
Κυματοσυναρτήσεις -
Αβεβαιότητα και Πιθανότητα -
Αρχή του Heisenberg

ΕΝΟΤΗΤΑ 2 : Κβαντική Μηχανική

2.1 Κυματοσυναρτήσεις και Αρχή του Heisenberg

2.1.1 Το πείραμα της Διπλής Σχισμής

(a) Σχηματισμός κροσσών συμβολής για φως (φωτόνια) που πέφτουν στη διπλή σχισμή (b) μετά από 28, 1000 και 10.000 φωτόνια



Κυματική Ερμηνεία της Συμβολής

$$I \propto |A|^2 = \cos^2\left(\frac{\pi x d}{\lambda L}\right)$$

A = πλάτος του ΗΜ κύματος

Σωματιδιακή Ερμηνεία της Συμβολής

$$\text{Prob } (x, x + dx) = \lim_{N_{\text{tot}} \rightarrow \infty} \frac{N(x, x + dx)}{N_{\text{tot}}}$$

2.1.1 Το πείραμα της Διπλής Σχισμής (συνέχεια)

Οι δύο περιγραφές συνδέονται αν υποθέσουμε ότι : Τα φωτόνια είναι πιθανότερο να ανιχνευθούν στα σημεία όπου η ένταση (I) του φωτός είναι μεγαλύτερη

Τότε $\text{Prob } x, x + dx \sim |A|^2 dx$

Αρα η **πυκνότητα πιθανότητας** $P(x) \sim |A|^2$

Σωματιδιακό
χαρακτηριστικό
φωτονίου

Κυματικό
χαρακτηριστικό
φωτονίου

39.12 In 1926, the German physicist Max Born (1882–1970) devised the interpretation that $|\Psi|^2 dV$ is the probability of finding a particle within a given volume dV . He also coined the term “quantum mechanics” (in the original German, *Quantenmechanik*). For his contributions, Born shared (with Walther Bothe) the 1954 Nobel Prize in physics.



2.1.2 Η έννοια της κυματοσυνάρτησης

Ο κυματικός χαρακτήρας του φωτονίου περιγράφεται από το μέγεθος A (πλάτος ΗΜ κύματος). Ποιο είναι το αντίστοιχο μέγεθος του A για ένα άλλο σωματίδιο, πχ ένα ηλεκτρόνιο ?

Παραδοχή: Για κάθε σωματίδιο υπάρχει μια **κυματική συνάρτηση** ή **κυματοσυνάρτηση** $\Psi(x)$ που συνδέει την κυματική με τη σωματιδιακή του φύση σύμφωνα με τη σχέση $P(x) \sim |\Psi(x)|^2$

☞ Η $\Psi(x)$ αυτή καθαυτή δεν έχει φυσική σημασία, μόνο το $|\Psi(x)|^2$ έχει:

$|\Psi(x)|^2 dx =$ πιθανότητα να βρίσκεται το σωματίδιο στην περιοχή $(x, x+dx)$.

Στατιστική ερμηνεία κυματοσυνάρτησης (Max Born 1926)

2.1.3 Κανονικοποίηση της κυματοσυνάρτησης

Η συνολική πιθανότητα ένα σωματίδιο που κινείται στον x-άξονα να βρισκεται κάπου μεταξύ $(-\infty, +\infty)$ είναι ίση με τη μονάδα,

αρα:
$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) dx = 1 \quad \Rightarrow \quad \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1$$

Παράδειγμα: Ένα ηλεκτρόνιο κινείται στο διάστημα $(0, 1)\text{nm}$ με $\psi(x) = C(1 - x/L)$, όπου $L = 1\text{nm}$. (α) Βρείτε την τιμή της σταθεράς C . (β) Πόση είναι η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο στο διάστημα $(0.05\text{nm}, 0.15\text{nm})$;

Απάντηση:

(α)

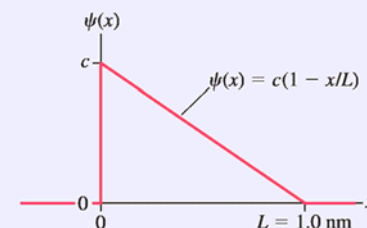
$$1 = \int_0^L |\Psi(x)|^2 dx = C^2 \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 dx = \frac{1}{3} C^2 L \Rightarrow C = \sqrt{\frac{3}{L}} \approx 1,7 \text{nm}^{-1/2}$$

(β)

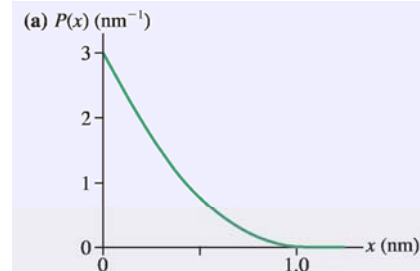
$$\text{Prob}(x, x + dx) = |\Psi(x)|^2 dx = \frac{3}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 dx \Rightarrow$$

$$\text{Prob}(0.05, 0.05 + 0.10) = \frac{3}{1} \left(1 - \frac{0.05}{1}\right)^2 \cdot 0.10 \approx 0.27 = 27\%$$

Η κυματοσυνάρτηση



(α) Η πυκνότητα πιθανότητας και (β) τα σωματίδια στον ανιχνευτή



2.1.4 Η έννοια του «ταυτόχρονου» στην Κλασική (Κυματική) Φυσική

Ένα κυματοπακέτο συνδιάζει:

- Κυματικές Ιδιότητες (ταλαντούμενο μέγεθος)
- Σωματιδιακές Ιδιότητες (εντοπισμένο στο χώρο)

Για διακρότημα : $\Delta t = T_{\delta} = \frac{1}{f_{\delta}} = \frac{1}{\Delta f} \Rightarrow \Delta t \cdot \Delta f = 1$

Για κυματοπακέτο : $\Delta t \cdot \Delta f \approx 1$

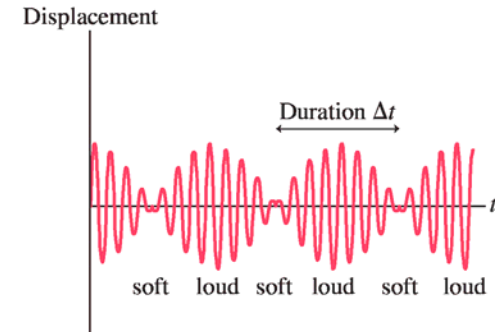
$\Delta t \sim$ διάρκεια και $\Delta f \sim$ εύρος συχνοτήτων

Η **αβεβαιότητα** στο χρόνο αφίξης ενός κυματοπακέτου (Δt) είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερο είναι το εύρος συχνοτήτων (Δf) (των κυμάτων) που το αποτελούν.

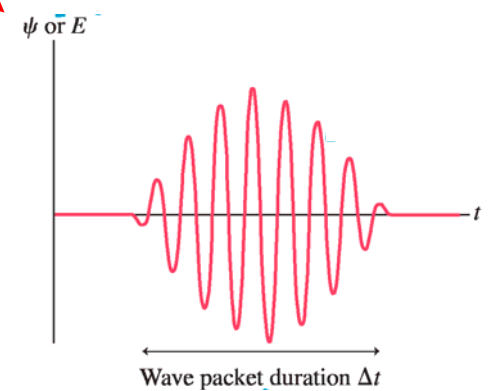
Αρα από την Κλασική Κυματική μαθαίνουμε ότι:

Ακριβής ταυτόχρονος προσδιορισμός του χρόνου αφίξης και της συχνότητας ενός κυματος είναι αδύνατη.

- Ένα διακρότημα μοιάζει με αλυσίδα κυματοπακέτων



Χρονική εξέλιξη ενός κυματοπακέτου με διάρκεια Δt



2.1.5 Αρχή Αβεβαιότητας του Heisenberg (1927)

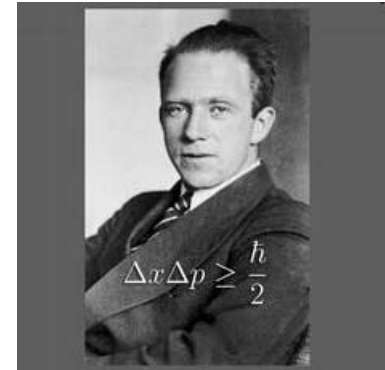
Ερώτημα: Αν η ύλη έχει κυματικές ιδιότητες (de Broglie) ποιές επιπτώσεις έχει για τα σωματιδια η σχέση $\Delta f \cdot \Delta t \geq 1$;

Από τη σχέση:
$$\Delta t = \frac{m}{p_x} \Delta x$$

και
$$f = \frac{u_x}{\lambda} = \frac{p_x/m}{h/p_x} = \frac{p_x^2}{mh} \Rightarrow \Delta f = \frac{2p_x \Delta p_x}{mh}$$

Καταλήγουμε:
$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$$

Ερμηνεία: Η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα με βεβαιότητα. Όσο κι αν βελτιωθεί η ποιότητα των οργάνων μετρησης και η ακριβεια της πειραματικής μεθόδου μετρησης το γινομενο των απροσδιοριστιων θεσης και ορμης δεν ειναι δυνατο να μειωθεί περαν του h .



2.1.5 Αρχή Αβεβαιότητας του Heisenberg (συνέχεια)

Παράδειγμα: Ποιό είναι το εύρος ταχυτήτων ενός ηλεκτρονίου που είναι περιορισμένο να κινείται σε μια περιοχή πλάτους 1\AA ($1\text{\AA}=0.1\text{nm}$);

Είναι $\Delta x=L=0.1\text{nm}$ άρα $\Delta u_x = \frac{\Delta p_x}{m} \approx \frac{1}{m} \frac{h}{2\Delta x} = \frac{h}{2mL} \approx 4 \times 10^6 \text{m/s}$ **μεγαλο !!!**

Παράδειγμα: Ο μικρός Αντρέας με $m=25\text{kg}$ κάθεται και διαβάζει στο δωμάτιό του που έχει μήκος 3.0m . Μπορούμε να είμαστε βεβαιοί ότι είναι ακίνητος; Ποιό είναι το εύρος ταχυτήτων που μπορεί να έχει ?

$$\Delta u_x = \frac{h}{2mL} \approx 4.4 \times 10^{-36} \text{m/s} \quad \text{ασημαντο !!!}$$

Ενότητα 2:

Κβαντική Μηχανική

Εξίσωση του Schrödinger και Εφαρμογές

ΕΝΟΤΗΤΑ 2 : Κβαντική Μηχανική

2.2 Εξίσωση του Schrödinger (1926) Nobel Prize 1933

2.2.1 Η εξίσωση του Schrödinger

Βασική σκέψη του Schrodinger: *Να βρεί μια ΔE που να έχει μια κυματική λύση με μήκος κύματος το $\mu.κ.$ De Broglie*

Για ένα σωματίδιο που κινείται στον άξονα- x είναι:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + U(x)\Psi(x) = E\Psi(x)$$

- Ομοιότητα με ΑΔΕ : $K + U = E$
- Προσδιορίζει τη χωρική μορφή (x) και τη χρονική εξέλιξη (t) της κυματοσυνάρτησης ενός σωματιδίου.
- Δεν αποδεικνύεται ούτε προκύπτει από άλλη (πιο βασική) εξίσωση. Έχει **αξιωματική** θέση στην Κβαντική Μηχανική.



Erwin Schrödinger.

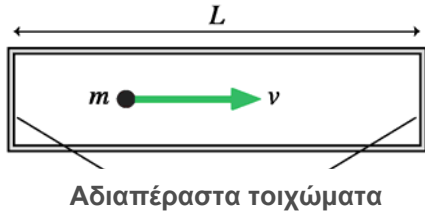
2.2.2 Οι ιδιότητες της κυματοσυναρτησης

- Η $\Psi(x)$ είναι συνεχής συνάρτηση
- $\Psi(x) \rightarrow 0$ καθώς $x \rightarrow +\infty$ και $x \rightarrow -\infty$
- Η $\Psi(x)$ είναι κανονικοποιημένη δηλαδή $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1$
- Η $\Psi(x) = 0$ όταν το x είναι σε μια **ενεργειακά απαγορευμένη περιοχή** με (ημι)άπειρο μήκος, δηλαδή περιοχή με $U(x) > E$.
- Η $\Psi(x) \sim \sin(kx)$ ή $\cos(kx)$ σε περιοχές όπου η δυναμική ενέργεια $U(x) =$ σταθερή

2.2.3 Επίλυση της ΔΕ του Schrödinger

- **Αρχή Επαλληλίας:** Αν οι Ψ_1, Ψ_2 είναι **ανεξαρτητες** λύσεις τότε η γενική λύση είναι $\Psi = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2$.
- **Βήματα για τη λύση:**
 1. Ορίσε τη δυναμική ενέργεια
 2. Καθορίσε τις συνοριακές συνθήκες
 3. Βρες τις Ψ_1 και Ψ_2
 4. Βρες τις επιτρεπτές τιμές της ενέργειας
 5. Κανονικοποίησε την $\Psi = \alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2$

2.3 Σωματίδιο σε κουτί με αδιαπέραστα τοιχώματα - Πηγάδι Δυναμικού Απειρου Βαθους

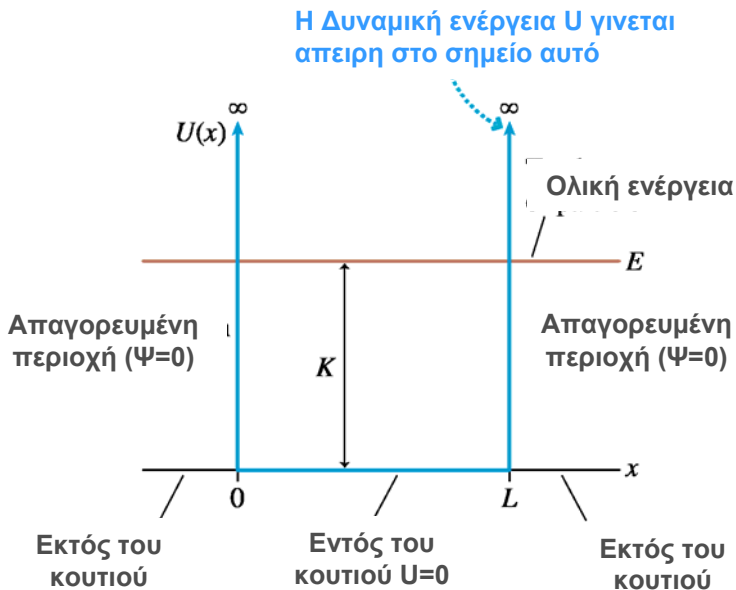


- Ποιές είναι οι ενεργειακές στάθμες του σωματιδίου;
- Σε ποιά περιοχή του κουτιού βρίσκεται το σωματίδιο;

(1) Το μοντέλο της δυναμικής ενέργειας:

$$U(x) = \begin{cases} 0 & x \in [0, L] \\ \infty & x < 0 \text{ και } x > L \end{cases}$$

Ενεργειακό διάγραμμα σωματιδίου σε κουτί με άκαμπτα τοιχώματα και μήκος L



(2) Συνοριακές συνθήκες: $\Psi(0) = 0$

$$\Psi(L) = 0$$

$$\Psi(x) = 0 \text{ για } x < 0, x > L$$

(3) Επίλυση μέσα στο κουτί:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{2mE}{\hbar^2}\Psi \Rightarrow$$

$$\Psi(x) = A \sin kx + B \cos kx ;$$

$$k \equiv \sqrt{2mE}/\hbar$$

(4) Εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών

- $\Psi(0) = 0 \Rightarrow B = 0$

- $\Psi(L) = 0 \Rightarrow \sin kL = 0 \Rightarrow k_n = \frac{n\pi}{L}; n = 1, 2, 3, \dots$

Αρα: $\Psi(x) = A \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right); n = 1, 2, 3, \dots$

(5) Κανονικοποίηση της $\Psi(x)$: $\int_0^L |\Psi(x)|^2 dx = 1 \Rightarrow A^2 \int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx = 1 \Rightarrow$

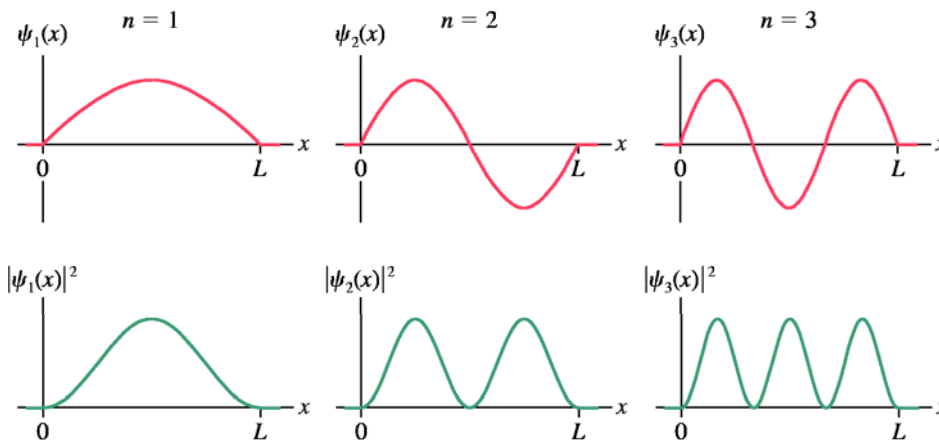
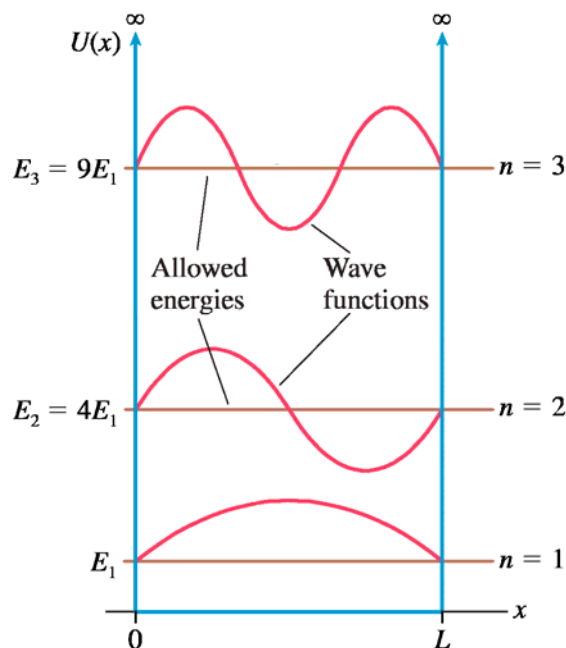
$$A^2 = \frac{2}{L} \Rightarrow A = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

(6) Ενεργειακές Στάθμες: $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \Rightarrow E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$ *Ιδιο αποτέλεσμα με τη θεωρία De Broglie !*

Ελάχιστη Ενέργεια: $E_{\min} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} > 0$

\Rightarrow Το σωματίδιο που είναι **περιορισμένο** στο χώρο, **ποτέ** δεν ηρεμεί ($E > 0$) !

(7) Πυκνότητα Πιθανότητας Θέσης του σωματίδιου μέσα στο κουτί: $P(x) = |\Psi(x)|^2$



Όσο αυξάνεται ο κβαντικός αριθμός (n) το σωματίδιο εμφανίζει εξίσου την πιθανότητα να βρεθεί και σε άλλα σημεία πέραν του μέσου του κουτιού.

Στο όριο $n \rightarrow \infty$ η πυκνότητα πιθανότητας γίνεται σχεδόν σταθερή συνάρτηση, δηλαδή, για $n \rightarrow \infty$ το σωματίδιο βρίσκεται με την ίδια πιθανότητα σε όλα τα σημεία του κουτιού.

Αρχή της Αντιστοιχίας:

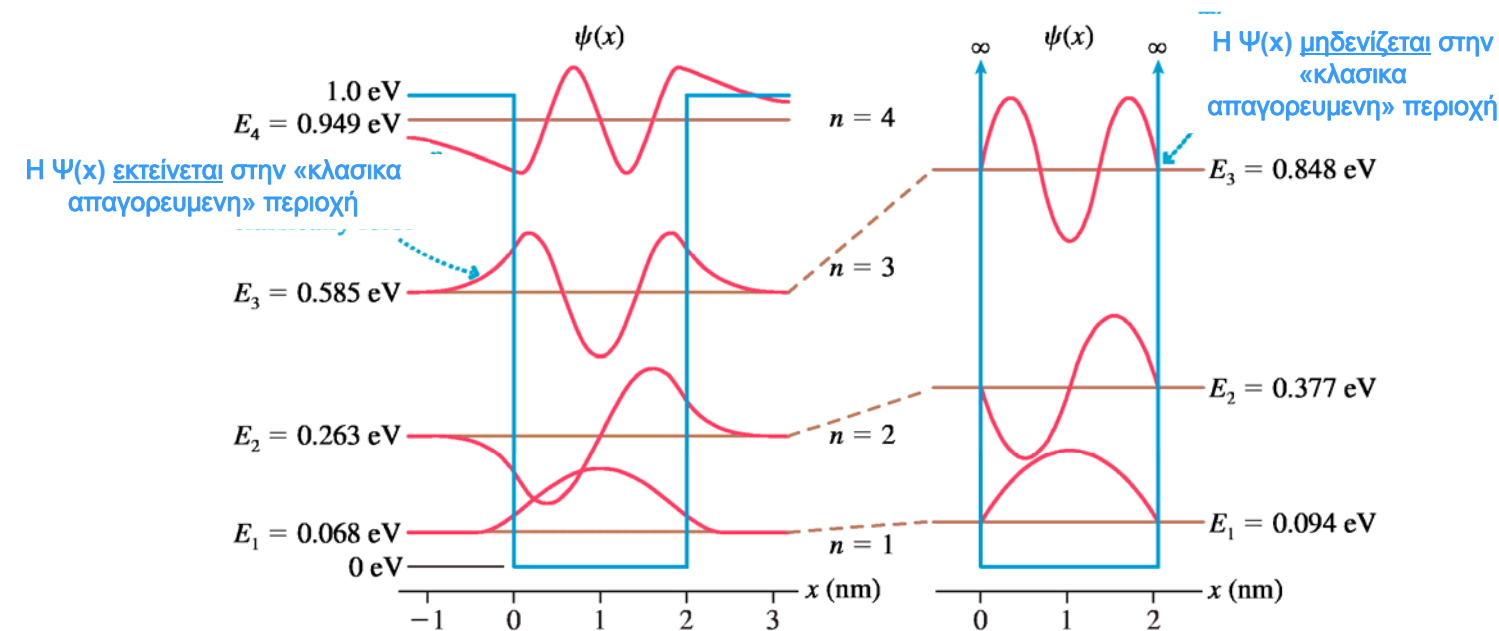
Στο όριο των πολύ μεγάλων κβαντικών αριθμών ($n \rightarrow \infty$) τα συμπεράσματα της κβαντικής και της κλασικής (Νευτώνειας) Μηχανικής συμπίπτουν.

2.4 Σωματίδιο σε κουτί με περατά τοιχώματα - Πηγάδι Δυναμικού Πεπερασμένου Βαθους

Ενεργειακές στάθμες και κυματοσυναρτήσεις για πηγάδι δυναμικού πλάτους $L=2\text{nm}$ και πεπερασμένου βαθους $U_0=1\text{eV}$. Για σύγκριση, οι σταθμες και οι συναρτήσεις ενός απειρόβαθου πηγαδιού (αδιαπεραστο κουτί) σχεδιάστηκαν δεξιά.

(a) Πηγάδι πεπερασμένου βαθους

(b) Πηγάδι άπειρου βάθους



$$\Psi(x) = C \cdot \exp(-x/d)$$

$$\Psi(x) = A \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + B \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

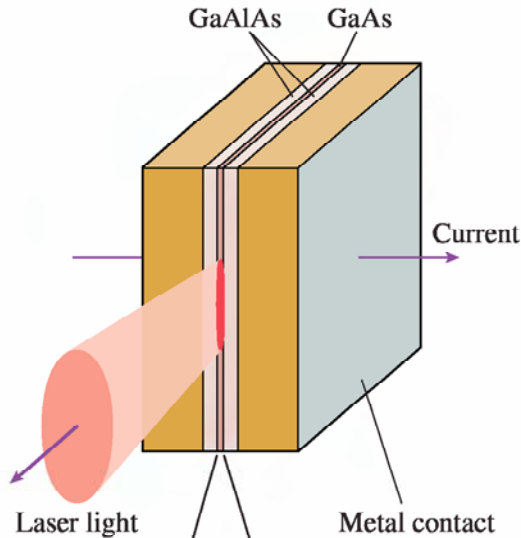
$$\Psi(x) = D \cdot \exp(-x/d)$$

Σύγκριση των αποτελεσμάτων για πηγάδι δυναμικού με πεπερασμένο και με άπειρο βάθος

Πεπερασμένο Βαθος (U_0)	Άπειρο Βαθος ($U_0 \rightarrow \infty$)
Κβαντισμένη Ενέργεια $E_n = n^2 E_1$	Κβαντισμένη Ενέργεια $E_n = n^2 E_1$
$E_1 < \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$	$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$
Πεπερασμένος αριθμός Δέσιμων Καταστάσεων $n=1,2,\dots,n_{\max}$	Άπειρος αριθμός Δέσιμων Καταστάσεων $n=1,2,3,\dots,\infty$
Μη-μηδενική πυκνοτητα πιθανότητας εκτος πηγαδιου	Μηδενική πυκνοτητα πιθανότητας εκτος πηγαδιου
Βάθος Διείσδυσης: $d = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(U_0 - E)}}$	Βάθος Διείσδυσης: $d=0$

Εφαρμογή Κβαντικού Πηγαδιού: LASER Στερεάς Κατάστασης

(a) Quantum-well laser

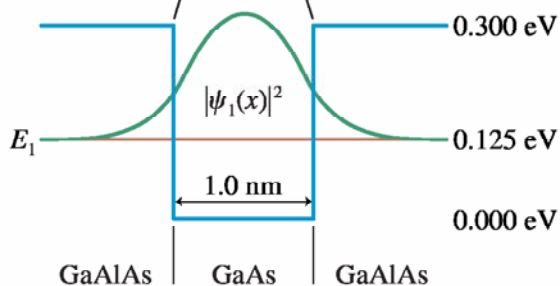


Σε $T \approx 300\text{K}$ η ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου είναι:
 $u = (3k_B T/m)^{1/2} \sim 10^5 \text{m/s}$. $\Rightarrow \lambda = h/mu \sim 6\text{nm}$.

Αν το ηλεκτρόνιο περιορισθεί σε ένα κβαντικό πηγάδι με $L \sim 6\text{nm}$ θα εμφανιστεί έντονα κβαντικά φαινόμενα, δηλαδή κβαντώση ενέργειας. (Τα κβαντικά φαινόμενα εξαφανίζονται για $L \sim 100\text{nm}$ και ανω.)

Πραγματι, ένα λεπτό στρώμα GaAs ανάμεσα σε στρώματα GaAlAs αποτελεί το ζητούμενο «πηγάδι δυναμικού» για τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του GaAs.

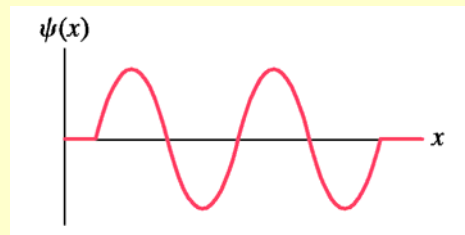
(b)



Αν το στρώμα του GaAs είναι πολύ λεπτό ($\sim 1\text{nm}$), υπάρχει μόνο μια δεσμία κατάσταση ($n=1$) και συνεπώς όλα τα ηλεκτρόνια του στρώματος έχουν την ίδια ενέργεια (E_1). Η μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε μια μικρή περιοχή του χώρου (\sim μέσο του πηγαδιού) και το γεγονός ότι όλα έχουν την ίδια ενέργεια δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για δημιουργία laser.

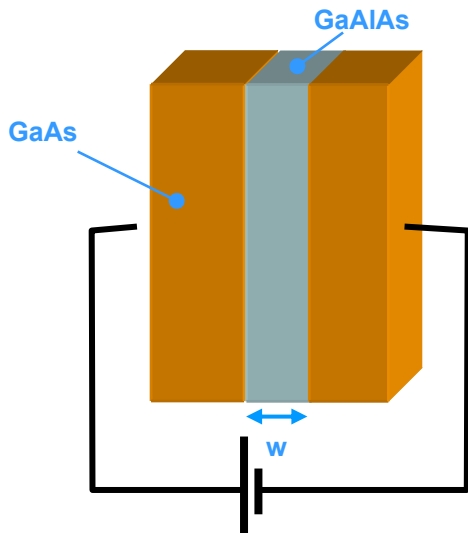
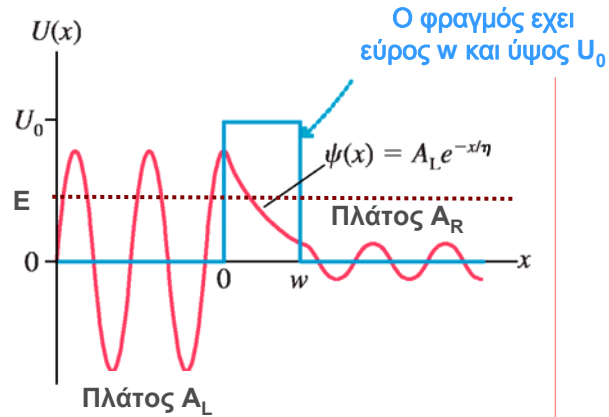
Ασκήσεις

17. Ένα ηλεκτρόνιο μέσα σε ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού απορροφά φως. Αν το μεγαλύτερο μήκος κύματος στο φάσμα απορρόφησης είναι 600nm, να βρείτε το πάχος του στρώματος. *Υπόδειξη: $E_1 = h^2/8mL^2$.*
18. Το ηλεκτρόνιο σε μια δίοδο laser (A-B-A) βρίσκεται περιορισμένο στο λεπτό στρώμα B πάχους L_B . Αν το βάθος του πηγαδιού είναι η 0.300eV και της θεμελιώδους στάθμης $E_1 = 0.125\text{eV}$, να υπολογίσετε (α) το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρονίου στο στρώμα A και (β) το ελάχιστο πάχος του στρώματος A ώστε το ηλεκτρόνιο να μην μπορεί να περάσει με φαινόμενο σήραγγος στο μεταλλικό ηλεκτροδίο (M). *Υπόδειξη: $d = \hbar/[2m(U_0 - E)]^{1/2}$.*
19. Η κυματοσυναρτηση ενός ηλεκτρονίου σε πηγάδι δυναμικού δίνεται στο σχήμα, ενώ η αντιστοιχη ενέργεια είναι 6eV. Να βρείτε (α) τον κβαντικό αριθμό n , και (β) το εύρος του πηγαδιού. *Υπόδειξη: $E_n = n^2 h^2/8mL^2$.*



2.5 Κβαντικό Φαινόμενο Σήραγγος

Κβαντικό Φαινόμενο Σήραγγος (ΚΦΣ) μέσα από τετραγωνικό φραγμό δυναμικού



Μέσα στο φραγμό ($0 \leq x \leq w$) ισχύει:

$$\Psi(x) = A_L \cdot \exp(-x / d)$$

Οπότε στο δεξί άκρο ($x=w$) του φραγμού ισχύει:

$$\Psi(w) = A_L \cdot \exp(-w / d) \equiv A_R$$

Η πιθανότητα να γίνει διέλευση του φραγμού ισούται με το πηλικο:

$$P_{\text{tunnel}} = \frac{|A_R|^2}{|A_L|^2} = \exp(-2w / d)$$

Η πιθανότητα διέλευσης μειώνεται, καθώς:

(α) αυξάνεται το εύρος του φραγμού (w)

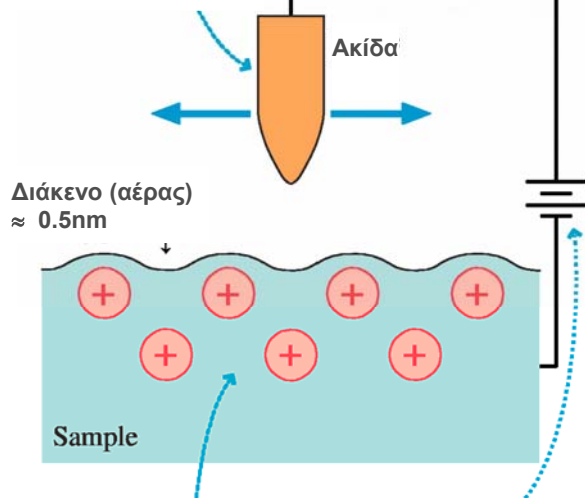
(β) αυξάνεται η διαφορά ($U_0 - E$)

Εφαρμογή Κβαντικού Φαινομένου Σήραγγος: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (STM)

(a)

4. Διάταξη απεικόνισης του ρεύματος σε συνάρτηση με τη θέση της ακίδας παράγει το προφίλ της επιφάνειας

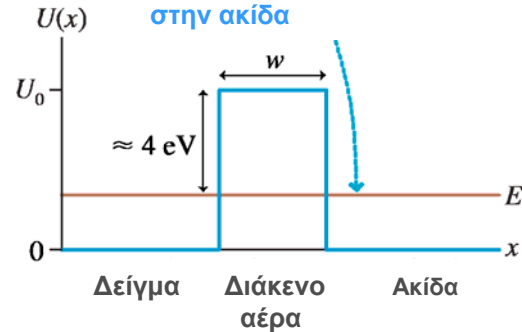
3. Το ηλεκτρικό ρεύμα καταγράφεται ενώ η ακίδα μετακινείται κοντά στην επιφάνεια.



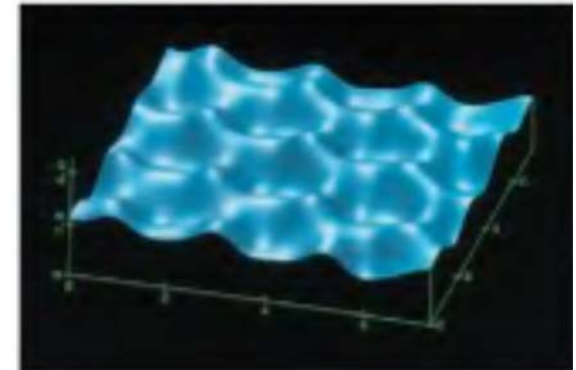
1. Το στερεό δείγμα περιγράφεται σαν θετικά ιόντα μέσα σε μια «θαλασσα» ηλεκτρονίων
2. Μια μικρή τάση επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να «διατρύπανε» το διάκενο αέρα μεταξύ της ακίδας και της επιφάνειας του δείγματος

(b)

Ενεργειακό Διάγραμμα ενός ηλεκτρονίου στο δείγμα και στην ακίδα



Εικόνα STM : Τα άτομα άνθρακα στην επιφάνεια του γραφίτη, όπου διακρίνονται οι εξαγωνικοί δακτύλιοι.



Μέγιστη ανάλυση:
0.001nm \approx 1% Ατομικής Διαμέτρου

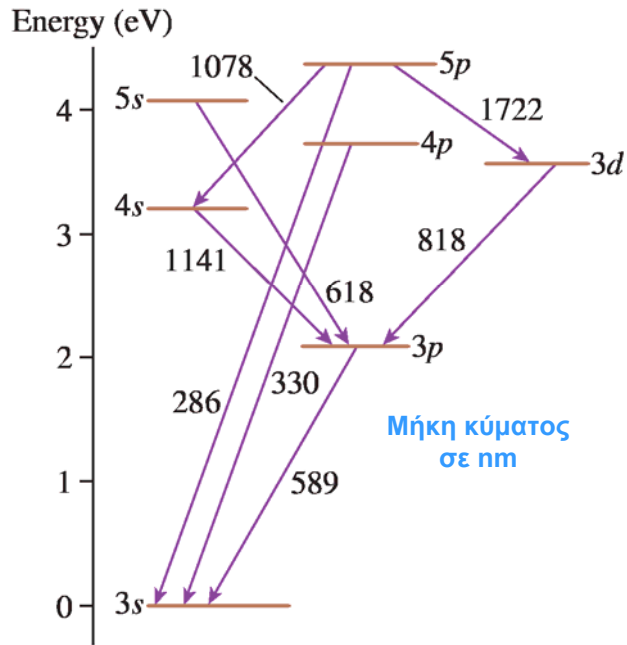
Ενότητα 3:

Ατομα, Μόρια, Στερεά

Το χρώμα των Σωμάτων

2.6 Φασματα Εκπομπής Αερίων

(a)



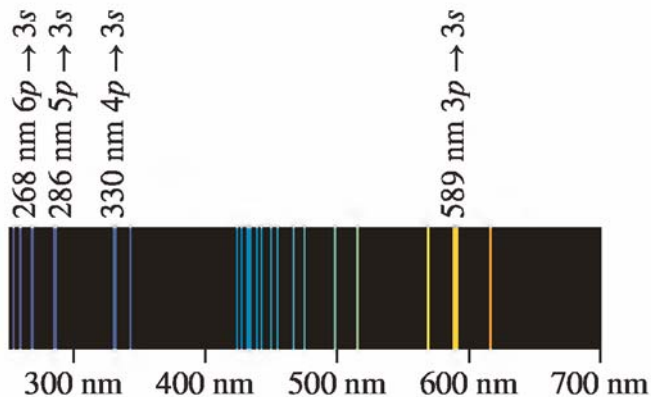
Το φασμα εκπομπης του Νατριου (Na)

Κάθε εκπεμπόμενο μήκος κύματος προέρχεται από ένα «κβαντικό άλμα» μεταξύ δύο αυστηρα καθορισμένων ενεργειακών σταθμών, χαρακτηριστικών του ατομου.

Η μετάβαση $3p \rightarrow 3s$ με $\lambda = 589 \text{ nm}$ παραγει το χαρακτηριστικο κίτρινο χρωμα των ατμων νατρίου.

Χρήση ατμών νατρίου γίνεται σε λαμπες εξωτερικου φωτισμου.

(b)



2.7 Το χρώμα των στερεών σωμάτων

2.7.1. Χρωστικές Ουσίες



- Απορροφούν ορισμένες περιοχές μηκών κύματος.
- Κατά την αποδιέγερση η ενεργεια μετατρεπεται σχεδον ολοκληρωτικα σε θερμοτητα και δεν επανεκπέμπεται φως (φωτόνια).
- Τα σκουρα χρώματα απορροφουν μεγαλο ευρος μηκών κύματος οπότε και θερμαίνονται περισσότερο κατα το φωτισμό τους απο λευκο φώς.

Παράδειγμα :

Μια χρωστικη που απορροφα στο κυανο, ανακλά στο κόκκινο και κιτρινο με αποτελεσμα να δίνει πορτοκαλί χρωματισμό.

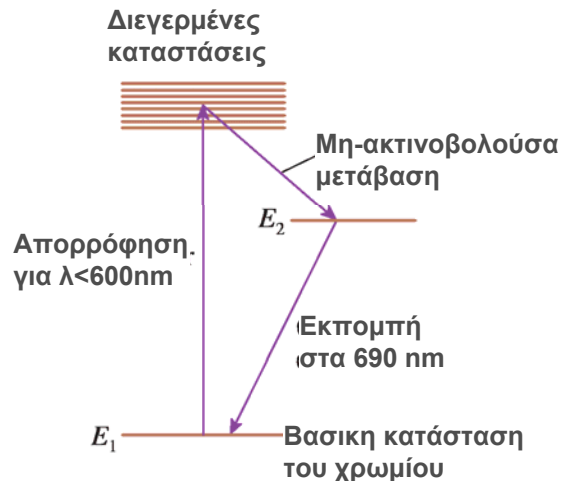
2.7.2 Χρωματισμός Διάφανων Υλικών

Το χρώμα των διαφανων υλικών (γυαλια, ημιπολυτμοι λιθοι) οφείλεται στην παρουσία προσμίξεων από ξένα άτομα που λέγονται **χρωματικά κέντρα**.

Παράδειγμα:

το ορυκτό **Ρουμπίνι** (ruby) = $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.1\% \text{Cr}$ οφείλει το χαρακτηριστικο κόκκινο χρώμα του στα λιγοστά άτομα χρωμίου που περιέχει.

Απορρόφηση και εκπομπή φωτός απο τον κρύσταλλο του ρουμπινιού



Το ρουμπίνι απορροφα μικρά μηκη κυματος (<600nm δηλαδή **κυανο, πρασινο κίτρινο**).

Υφιστάται μια μη-ακτινοβολούσα μεταβαση μικρης ενεργειας (οποτε μετατρεπει σε θερμοτητα μικρο ποσο απο την ενεργεια που απορροφησε) και στη συνεχεια και επανεκπέμπει φως με μεγάλο μηκος κυματος (690nm, δηλαδή **ΚΟΚΚΙΝΟ**) καθώς μεταπίπτει στη βασική κατάσταση.

Συνολικά : $\lambda_{\text{εκπ}} > \lambda_{\text{απορ}} \Rightarrow$ λαμπιριζει !!



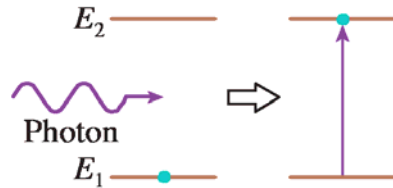
Ενότητα 3:

Ατομα, Μόρια, Στερεά

Το LASER

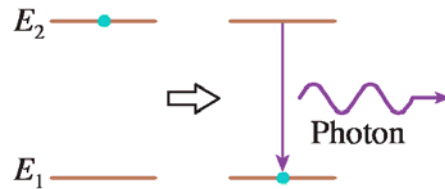
Ειδη μεταβάσεων κατά την αλληλεπίδραση ατόμων-φωτός

(a) Absorption



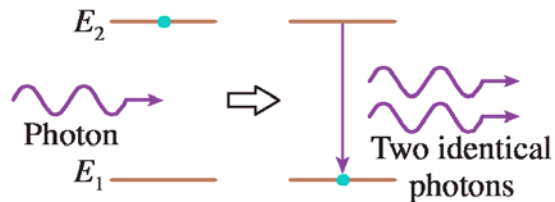
1^ο: Απορροφήση

(b) Spontaneous emission



2^ο: Αυθορμητη εκπομπή

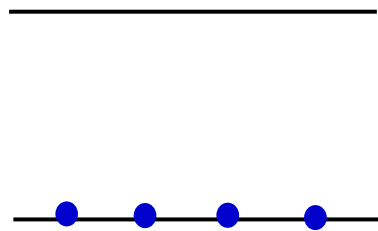
(c) Stimulated emission



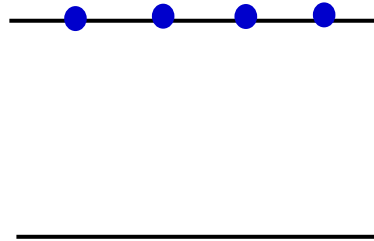
3^ο: Εξαναγκασμενη εκπομπη
(Θεωρητική πρόβλεψη Einstein 1917)

1960: C.Townes ανακάλυψη του MASER (εξαναγκασμενη εκπομπή μικροκυματων απο μοριο NH_4)
= προγονος του LASER

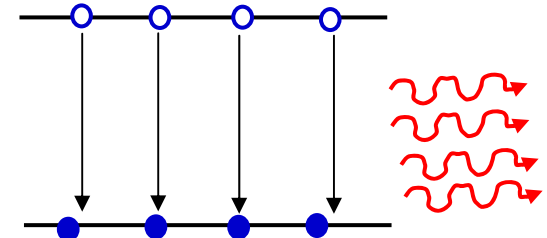
Τα τρία στάδια ενός LASER



Όμοια άτομα στη βασική κατάσταση

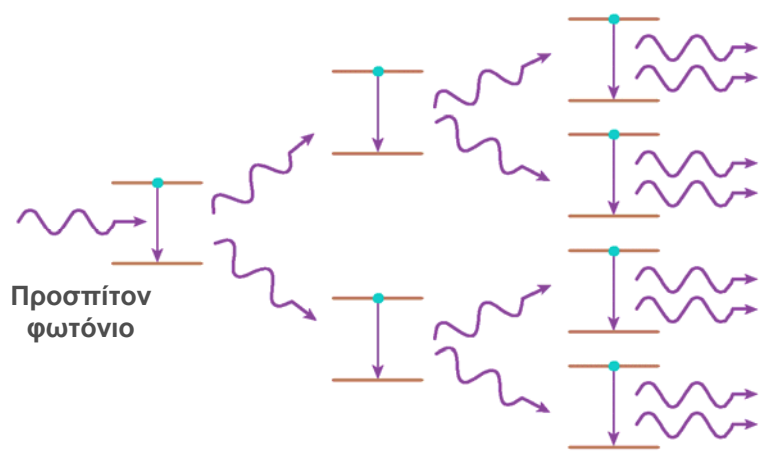


Αναστροφή πληθυσμών με αντληση (pumping)



Εξαναγκασμένη αποδιέγερση με εκπομπή σύμφωνων φωτονίων

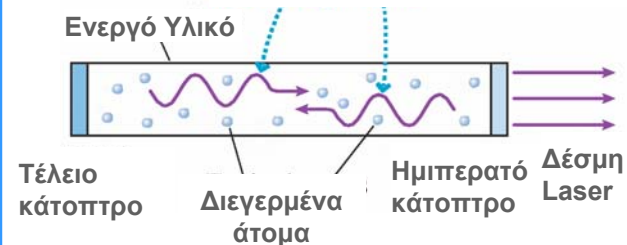
Η εξαναγκασμένη εκπομπή δημιουργεί αλυσιδωτή παραγωγή φωτονίων σε όλο τον πληθυσμό των διεγερμένων ατομών



Δημιουργία πολλών σύμφωνων φωτονίων

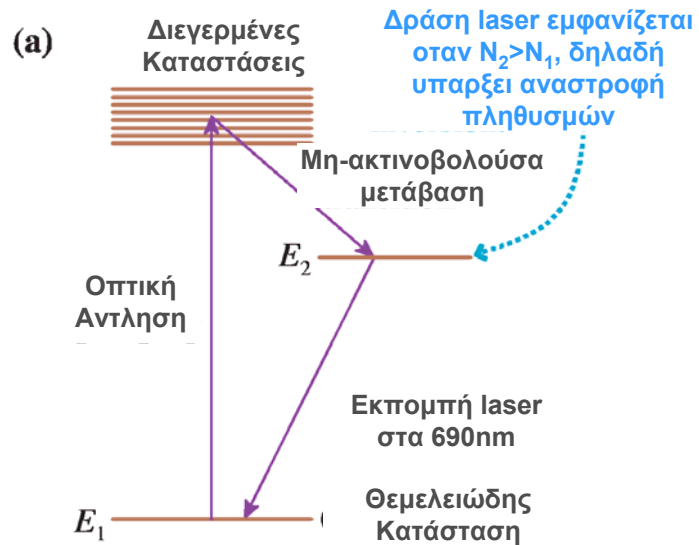
Η δράση laser πραγματοποιείται σε μια οπτική κοιλότητα

Τα φωτόνια ταξιδεύουν και στις δυο κατευθύνσεις και αλληλεπιδρούν με τα άτομα, προκαλώντας παραγωγή δευτερογενών φωτονίων και ενισχύοντας έτσι την ένταση του παραγόμενου φωτός μέσα στην κοιλότητα

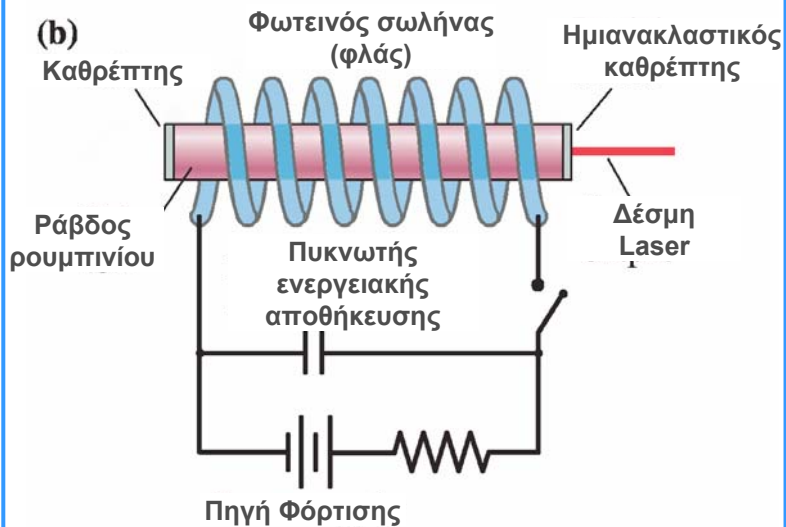


Το LASER Ρουμπινίου

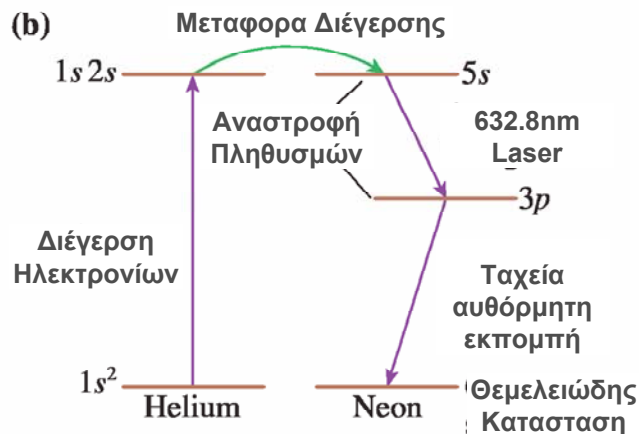
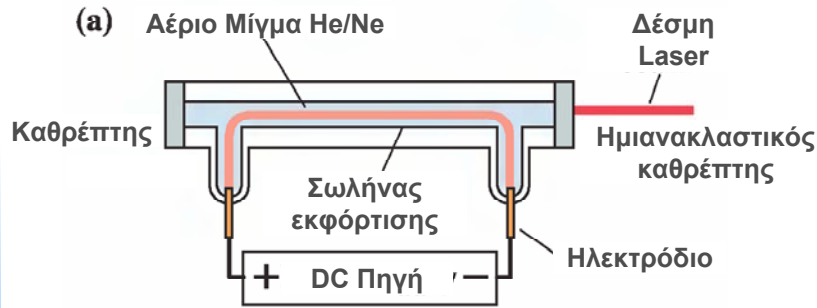
(a) (b)



- Παλμική εκπομπή
- $\lambda=690\text{nm}$ (κόκκινο)
- Διάρκεια παλμού $\Delta t = 10\text{ns}$ ($E=1\text{J}$)
- Ισχύς εξόδου 100 MW (!)
- Χρήσεις: μόνο εκπαιδευτική



Το LASER Ηλίου-Νέου (He-Ne)



- Συνεχής εκπομπή
- $\lambda=632\text{nm}$ (κόκκινο)

• Ισχύς εξοδου 1mW

• Χρήσεις:

- εργαστηριακή,
- σαρωτές τιμών,
- φωτεινοί δείκτες

Άλλοι τύποι laser:

- **Ar laser** : 20W πράσινο-κυανό. Χρήση: ερευνητική
- **CO₂ laser**: 1kW υπερευθρη (<300nm). Χρήση: βιομηχανική (κοπή-συγκόλληση μετάλλων)

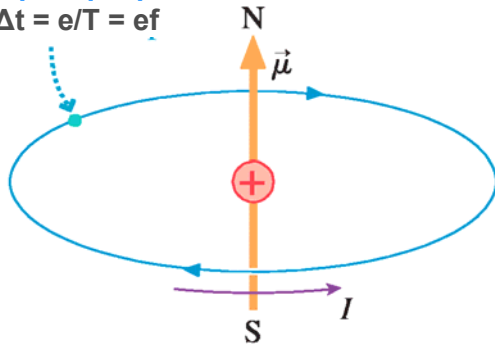
Ενότητα 3:

Ατομα, Μόρια, Στερεά

Το σπιν του ηλεκτρονίου

Τροχιακή Κίνηση και Στροφορμή του ηλεκτρονίου (Κλασική περιγραφή)

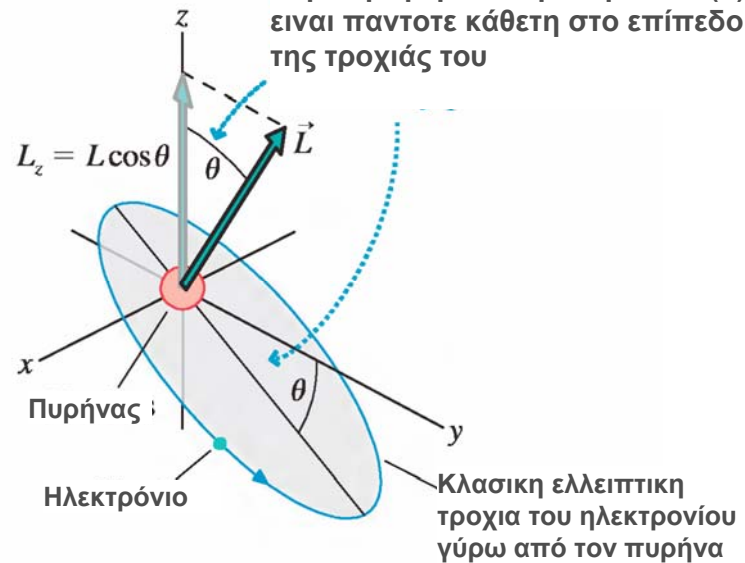
Ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρόνιο ισοδυναμεί με **ηλεκτρικό ρεύμα**:
 $I = \Delta Q / \Delta t = e / T = ef$



Ένα κυκλικό ρεύμα δημιουργεί **μαγνητική ροπή** (μ), με ένα Βόρειο (N) κι ένα Νότιο (S) πόλο

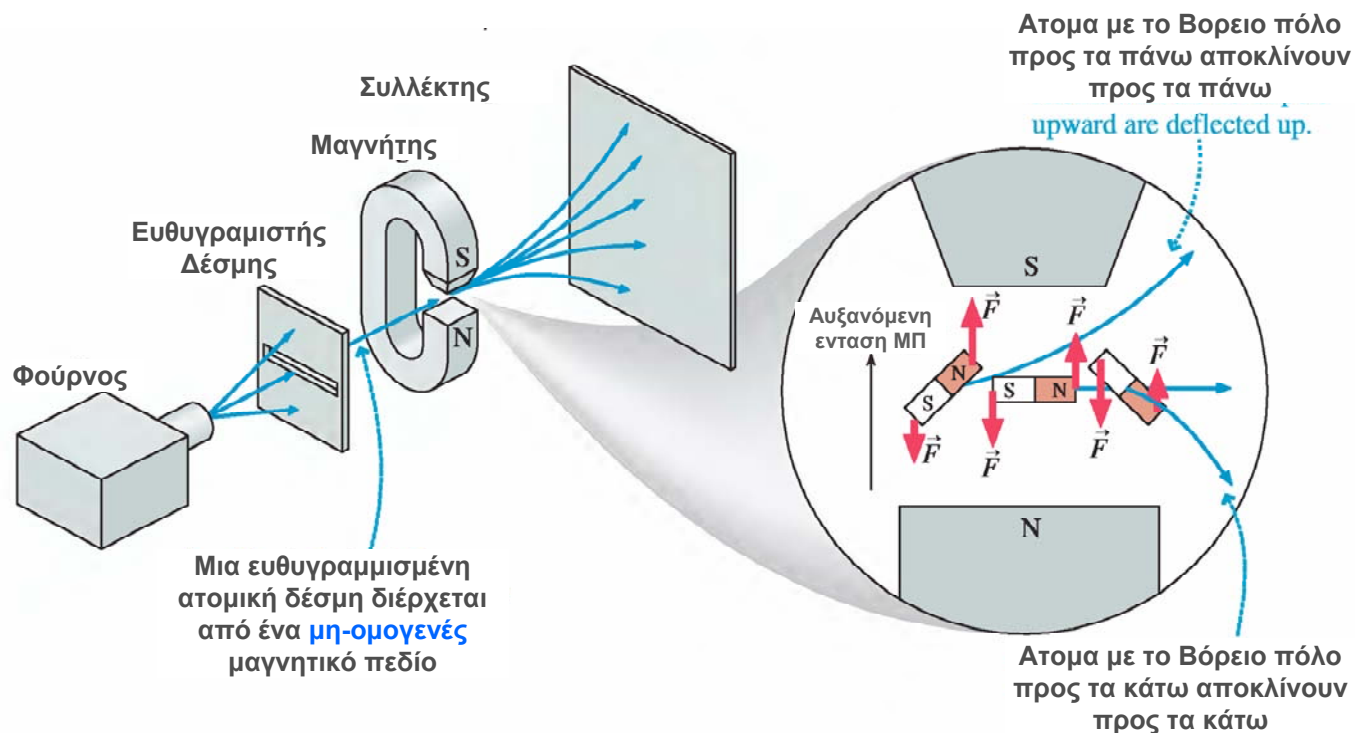
$$\mu = I \cdot A = \frac{e}{T} \cdot \pi R^2 = ef \cdot \pi R^2$$

Η **στροφορμή** του περιστρεφόμενου ηλεκτρονίου (L) είναι πάντοτε κάθετη στο επίπεδο της τροχιάς του



$$L = mR^2\omega = 2\pi f \cdot mR^2$$

Πείραμα Stern-Gerlach (1920) και Ανακάλυψη του Σπιν

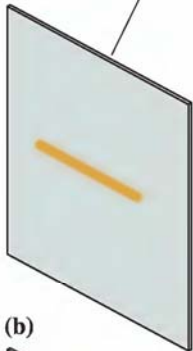


- Το **ομογενές** μαγνητικό πεδίο ασκεί **μηδενική** συνισταμενη δύναμη σε ένα μαγνητικό δίπολο.
- Το **μη-ομογενές** μαγνητικό πεδίο ασκεί **μη-μηδενική** μαγνητική δύναμη στα μαγνητικά δίπολα, προκαλώντας έτσι απόκλιση από την ευθύγραμμη πορεία τους.
- Η **κατεύθυνση της αποκλισης** εξαρτάται από τον **προσανατολισμό του διπόλου** καθώς εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο.

Πείραμα Stern-Gerlach και Ανακάλυψη του Σπιν

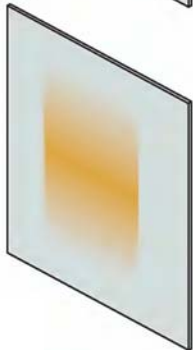
«Κλασικές» προβλεψεις για την αναμενόμενη κατανομή των ατόμων πανω στο συλλέκτη

(a) Συλλέκτης



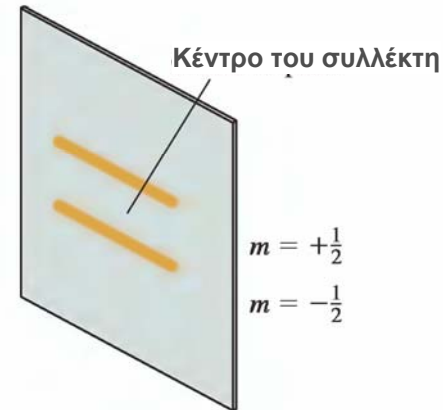
Χωρίς ΜΠ ($B=0$): Μηδενική απόκλιση, όλα τα άτομα καταληγουν στο κέντρο του συλλέκτη

(b)



«Κλασικά» άτομα (Η συνιστώσα L_z παίρνει συνεχείς τιμές): οι αποκλίσεις των ατομων αναμενόταν να εχουν εχουν όλες τις δυνατες τιμές

Τα αποτελέσματα του πειράματος με δέσμη ατόμων υδρογόνου

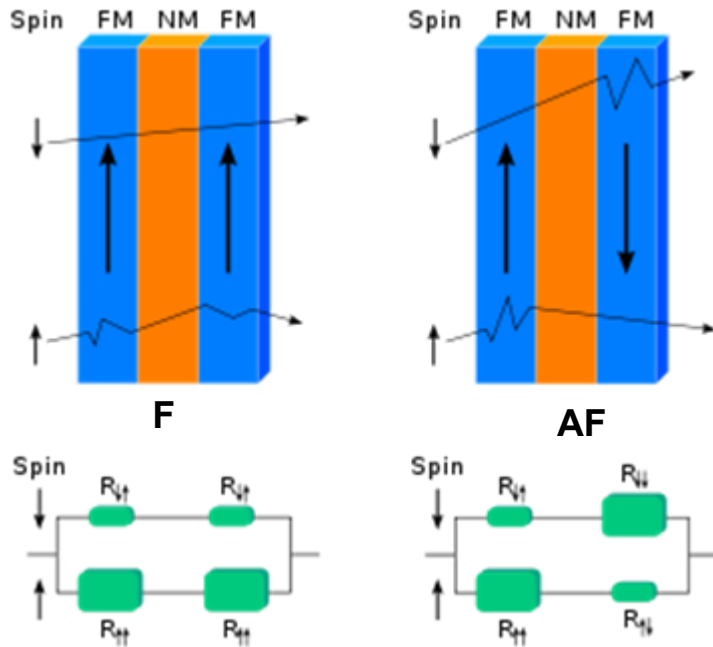


Οι δύο διακριτες τιμες της απόκλισης υποδεικνύουν ότι υπαρχει μια **μη-κλασική στροφορμή** (σπιν) του ατόμου Η που παίρνει **μόνο δύο** τιμές:

$$S_z = m_s \hbar \quad \text{με} \quad m_s = \pm \frac{1}{2}$$

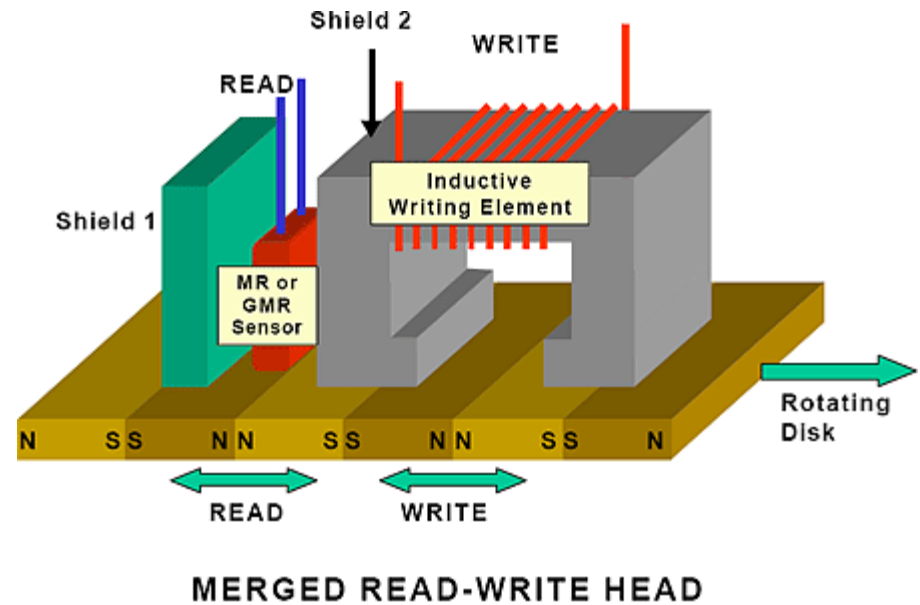
Σύγχρονη τεχνολογική αξιοποίηση του ηλεκτρονικού σπιν

Το φαινόμενο της **Γιγαντιαίας ΜαγνητοΑντίστασης (GMR)** στα υμένια μαγνητικών μεταλλών



Η AF διάταξη των υμενίων (δεξιά) εμφανίζει πάντοτε μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση, $R_{AF} > R_F$

Η τεχνολογική αξιοποίηση σε **μαγνητικές κεφαλές ανάγνωσης** με τεράστια ευαισθησία



A.Fert – P.Grünberg, Βραβείο Nobel 2007

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/press.html

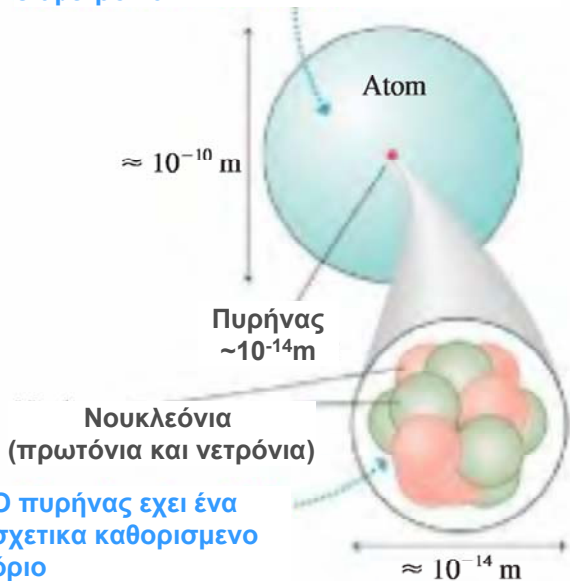
Ενότητα 4:

Πυρηνική Φυσική

Δομή Πυρήνα.
Ενέργεια Σύνδεσης.
Ραδιενέργεια.
Πυρηνική Σχάση.

3.1 Δομή του Πυρήνα

Αν η κουκίδα στο κεντρο παριστανει το πραγματικο μεγαθος ενος πυρηνα, τοτε το ατομο θα επρεπε να σχεδιασει με διαμετρο 10m !



	Πρωτόνια	Νετρόνια	Ηλεκτρόνιο
Αριθμός	Z	N	Z
Φορτίο	+e	0	-e
Μάζα	1.00728u	1.00866u	~ 10 ⁻⁴ u

Νουκλεόνια = Πρωτόνια, Νετρόνια

Μαζικός Αριθμός $A = Z + N$

Ισότοπα = Δύο στοιχεία με κοινό Z και διαφορετικό N

Σύμβολο : A_ZX .

πχ ${}^{12}_6C, {}^{13}_6C, {}^{14}_6C$.

πχ ${}^1_1H, {}^2_1H, {}^3_1H$

Κοινες χημικές ιδιότητες, διαφορετικές πυρηνικές.

Ισόβαρη = Δύο στοιχεία με κοινό A αλλά διαφορετικά Z, N

πχ ${}^{14}_6C, {}^{14}_7N, {}^{14}_8O$.

Ατομική Μονάδα Μάζας $1u = 1.6606 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.49 \text{ MeV}/c^2$.

Ιδιότητες της «πυρηνικής ύλης»

- Τα νουκλεόνια είναι ασυμπίεστα και σε πυκνή διάταξη (σαν ανελαστικές σφαίρες)
- Ο όγκος ενός πυρήνα είναι ανάλογος του μαζικού του αριθμού $V(A) = V_0 \cdot A$ όπου $V_0 \sim 10^{-45} \text{ m}^3$.
- Η πυκνότητα του πυρήνα είναι ίδια για όλα τα στοιχεία (Προτυπο Υγρής Σταγόνας):

$$\rho_{\text{πυρ}} = m / V = (A \cdot u) / (V_0 \cdot A) \sim 10^{17} \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ δηλαδή } \rho_{\text{πυρ}} = 10^{14} \rho_{\text{νερου}}$$

3.2 Ενέργεια Σύνδεσης ενός Πυρήνα

Ενέργεια σύνδεσης (B) είναι:

η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά στο σχηματισμο του πυρήνα απο τα ελεύθερα νουκλεόνια

ή, ισοδύναμα,

η ενέργεια που πρέπει να δώσουμε για τη διασπαση ενος πυρήνα σε ελεύθερα νουκλεόνια

$$m_{\text{nucl}}c^2 + B = (Zm_p + Nm_n)c^2.$$

Συνεπεια : Πάντοτε ισχύει $m_{\text{nucl}} < Zm_p + Nm_n$

Επειδη $m_{\text{atom}} = Zm_e + M_{\text{nucl}}$ και $m_p + m_e = m_H$, ισχυει:

$$B = (Zm_H + Nm_n - m_{\text{atom}})c^2$$

Παραδειγμα : Η ενέργεια συνδεσης του ^{56}Fe .

Για το σιδηρο εχουμε $Z=26$, $N=30$.

Ατομικές μαζες:

Σιδήρου $m_{\text{Fe}} = 55.9349\text{u}$,

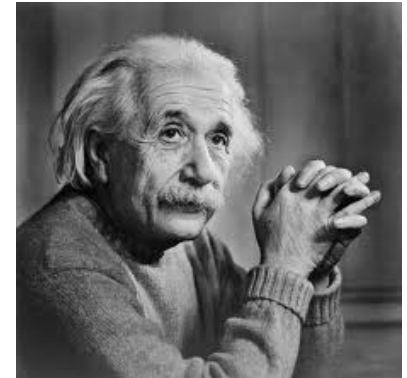
Υδρογόνου $m_H = 1.00783\text{u}$

Οπότε:

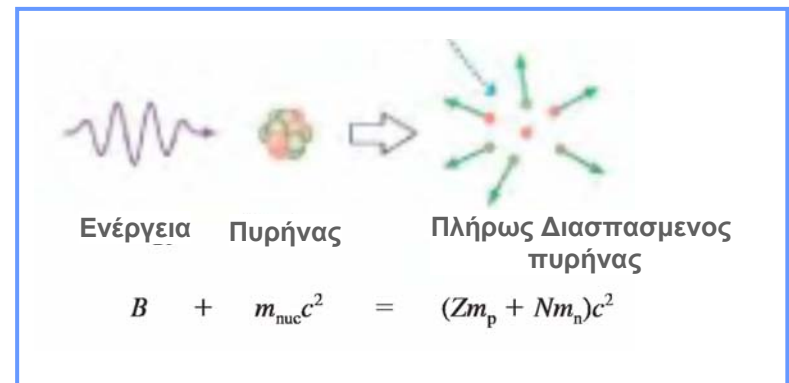
$$B = [26(1.0078\text{u}) + 30(1.0087\text{u}) - 55.9349\text{u}] \cdot c^2 = 0.529\text{u} \cdot c^2 =$$

$$0.529\text{u} \cdot c^2 \times 931.49\text{MeV}/c^2 =$$

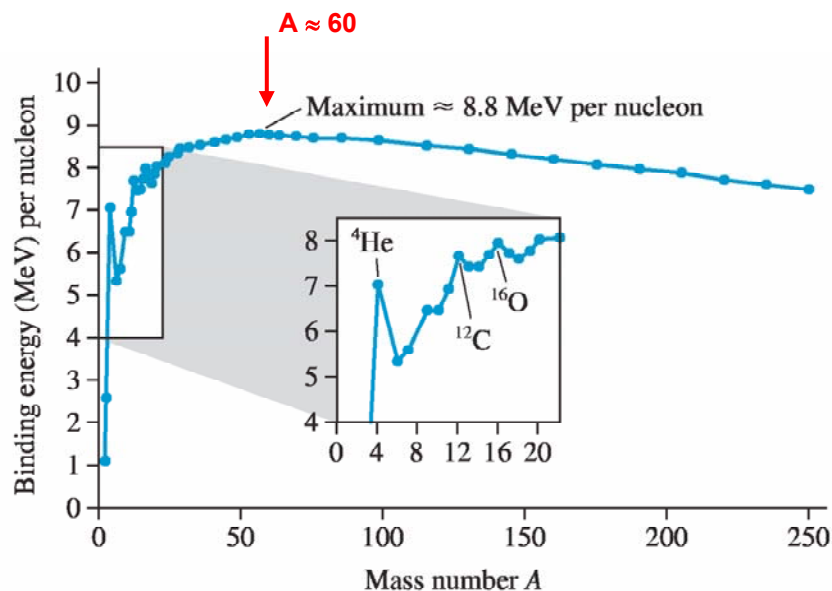
$$493\text{MeV}$$



Ισοδυναμία Μαζας-Ενέργειας
 $E=mc^2$



3.3 Ενέργεια Σύνδεσης και Ευστάθεια ενός Πυρήνα

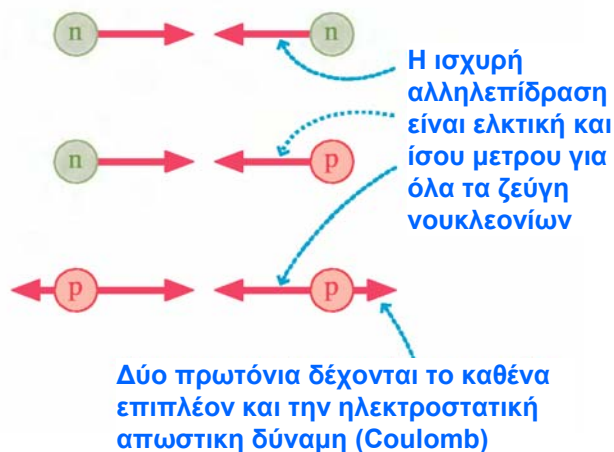


➤ Μεγάλες τιμές της ενέργειας σύνδεσης (ανα νουκλεόνιο) χαρακτηρίζουν ένα ευσταθή (δηλαδή, ενεργειακά δύσκολο να διασπασθεί) πυρήνα

Συμπερασματα από την καμπύλη ενέργειας σύνδεσης ανα νουκλεονιο:

- Εμφανίζει «κορυφές» στα $A=4(\text{He}), 12(\text{C}), 16(\text{O}) \Rightarrow$ ιδιαίτερα ευσταθείς οι πυρήνες He, C και O.
- Έχει περιπου σταθερη τιμη ($\approx 8 \text{ MeV}$) για $A > 20 \Rightarrow$ κορεσμος των (ενδο)πυρηνικών αλληλεπιδράσεων \Rightarrow οι (ενδο)πυρηνικές αλληλεπιδρασεις ειναι μικρής εμβέλειας !
- Εμφανίζει ενα ευρύ μέγιστο γύρω στην τιμη $A \approx 60$. \Rightarrow είναι ενεργειακα συμφέρον για όλους τους πυρήνες να διασπασθούν (σχαση) ή να συνενωθούν (συντηξη) προκειμενου να δημιουργηθουν νεοι πυρήνες με $A \approx 60$ που είναι ενεργειακά σταθερότεροι.

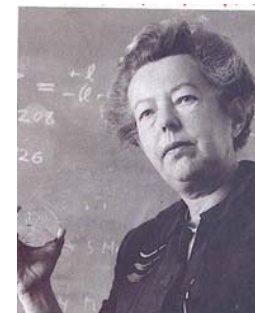
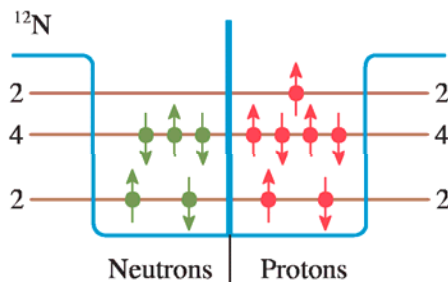
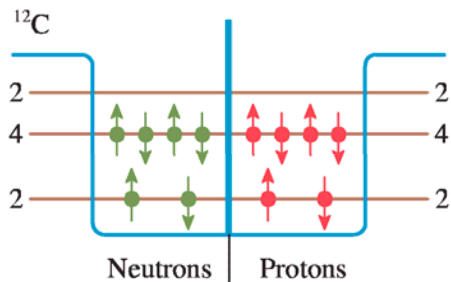
3.4 Τι συγκρατεί τα νουκλεόνια; Η Ισχυρή Αλληλεπίδραση



Η ισχυρή αλληλεπίδραση:

- Είναι ελκτική μεταξύ δύο οποιωνδήποτε νουκλεονίων
- Δεν επιδρά στα ηλεκτρόνια
- Είναι μικρής εμβέλειας, εμφανίζεται μόνο μέσα στον πυρήνα
- Είναι κατά πολύ ισχυρότερη της ηλεκτροστατικής άπωσης που τείνει να απομακρύνει τα πρωτόνια μεταξύ τους

Το πρότυπο φλοιών (Shell Model, 1949)



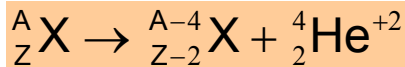
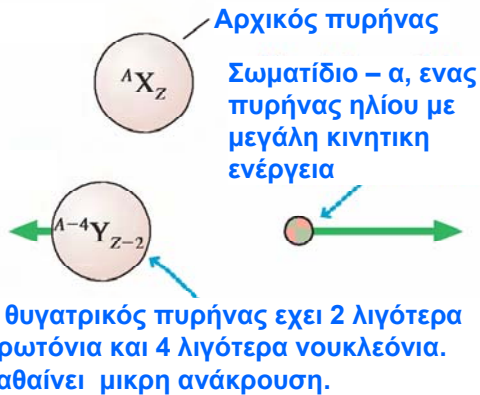
Maria Goeppert-Mayer
Nobel 1963

3.5 Ραδιενέργεια

Ραδιενεργός διάσπαση = Η αυθόρμητη εκπομπή σωματιδίων ή φωτονίων υψηλης ενέργειας από ασταθείς πυρήνες που μεταπίπτουν από μια κατάσταση υψηλης ενέργειας σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας.

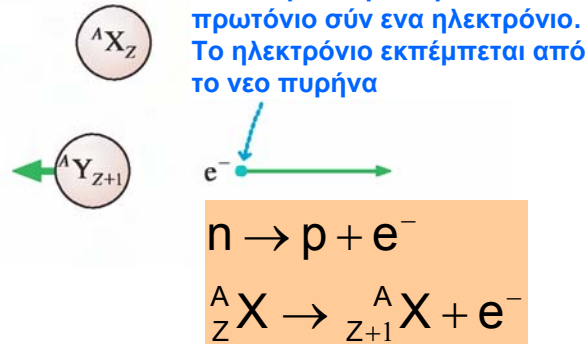
Από τα ~3000 γνωστα ισότοπα μόνο 266 (~10%) είναι ευσταθη και συναντώνται στη φύση, τα υπολοιπα (~90%) διασπώνται αυθόρμητα εκπέμποντας ακτινοβολία (**ραδιενεργεια**)

Διάσπαση - α

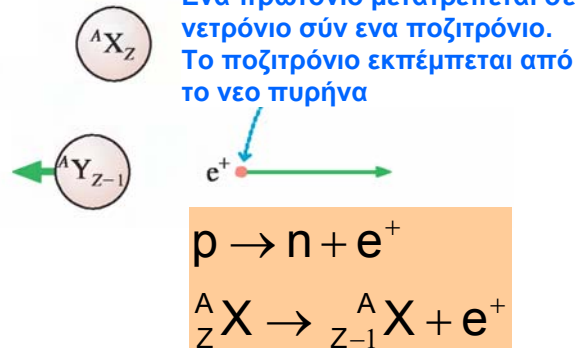


Διάσπαση - β

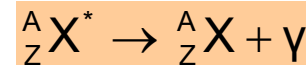
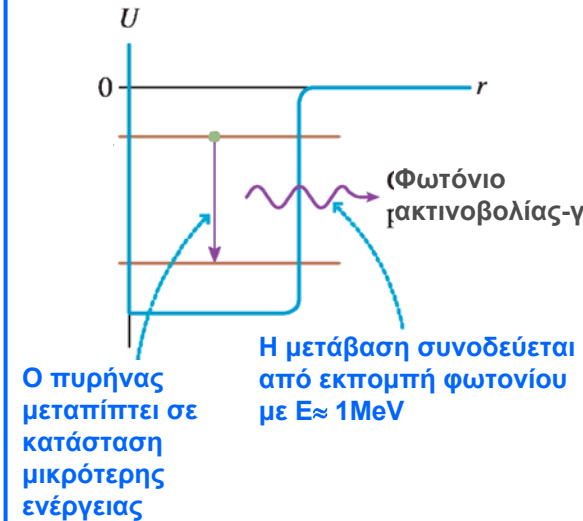
(a) διάσπαση β-μείον



(b) διάσπαση β-σύν



Διάσπαση - γ



Νομος Ραδιενεργών Διασπάσεων

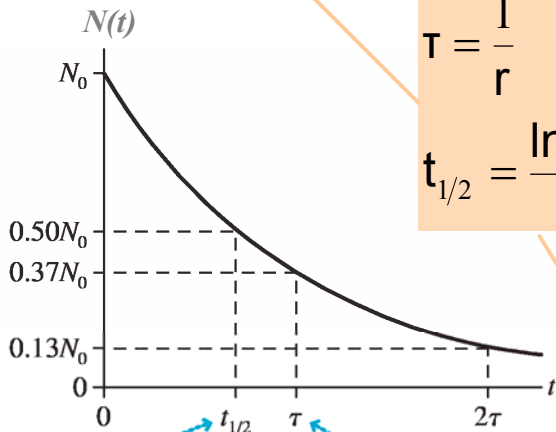
(Πλήθος Διασπάσεων σε Δt) = (Πλήθος πυρήνων) x (πιθανότητα διασπασης) x (χρονικό διάστημα Δt)
 = -(μεταβολή πλήθους πυρήνων)

$$dN = -N(t) \cdot r \cdot dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -r \cdot dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -r \int_0^t dt \Rightarrow \ln N - \ln N_0 = -rt$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-rt}$$

$$\tau = \frac{1}{r}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{r} = \tau \cdot \ln 2$$

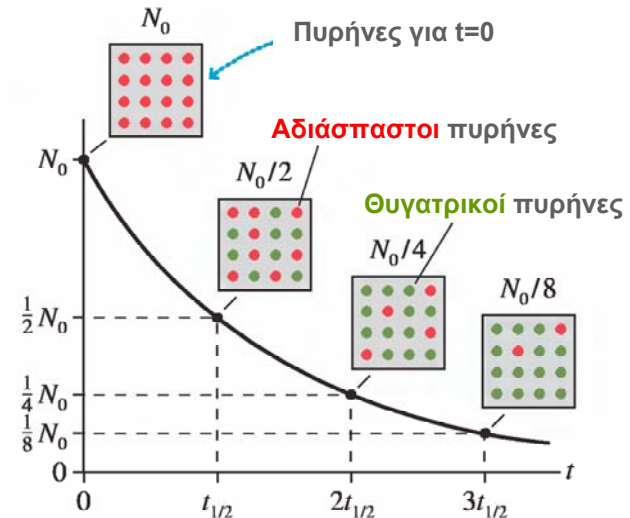


Ο χρόνος μισής ζωής είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο έχουν απομείνει οι μισοί από τους αρχικούς πυρήνες

Η σταθερά χρόνου είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο το πληθος των αδιασπαστων πυρήνων είναι το 1/e του αρχικού πληθους.

$$N(t) = \frac{N_0}{2^{t/t_{1/2}}}$$

Οι μισοί από τους εναπομείναντες πυρήνες διασπώνται σε κάθε χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο μισής ζωής



Μονάδες Μέτρησης Ρυθμού Διάσπασης (Δραστηριότητας):

$$1 \text{ Becquerel (Bq)} = 1 \text{ decay / s} = 1 \text{ s}^{-1}$$

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Βιολογικές επιπτώσεις Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες : α,β,γ και Χ

Ιοντίζουσα ακτινοβολία + Υλη \Rightarrow διασπαση χημικών δεσμών, ιοντισμός ατομων, καταστροφή κυττάρων ενώ,

H/M ακτινοβολία (μικροκύματα,υπερυθρη, ορατή, υπεριωδης) + Υλη \Rightarrow θερμοανση.

Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας

- **Απορροφούμενη δόση** = ενέργεια που εναποτίθεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας της προσβαλλόμενης ύλης. Μοναδα: **1 Gray (Gy) = 1J/Kgr.**
- **Σχετική Βιολογική Δραστικότητα (RBE)** = το βιολογικο αποτελεσμα συγκεκριμενης δωσης προς με το βιολογικο αποτελεσμα ισης δωσης ακτινων-Χ. Παραδειγμα: **RBE(γ,Χ)=1 , RBE(β)=1-2 , RBE(α)=10-20**
- **Ισοδύναμη δόση** = είναι το δοσιμετρικό μέγεθος που σχετίζεται με τη βλάβη που μπορεί να προκαλέσει σε έναν ιστό η απορροφούμενη δόση ενός συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας. Μονάδα: **1 Sievert (Sv) = 1Gy x RBE , 1 rem = 0.01 Sv**

Πηγή Ακτινοβολίας	Τυπική Δόση (mrem)
CT scan (e ⁺)	1000
Φυσικό περιβάλλον (1 χρονος)	300
Μαστογραφία (Χ)	80
Ακτ.Θωρακα (Χ)	30
Ακτ. Οδοντιατρική (Χ)	3
Καπνισμα 1 πακετο/μερα (1χρονος)	15000

Πόση είναι η ασφαλης δόση ιοντίζουσας ακτινοβολίας ?

Δεν υπαρχει σαφής απάντηση !!!

Εφαρμογές Πυρηνικής Ακτινοβολίας (α,β,γ)

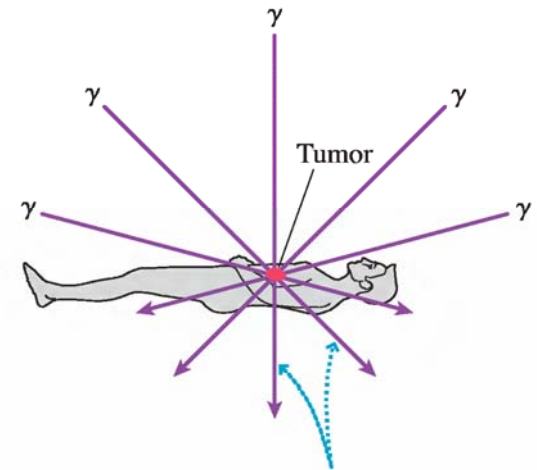
Ραδιενεργός Χρονολόγηση

Το κλάσμα $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ σε κάθε ζώντα οργανισμό είναι $\approx 1.3 \times 10^{-12}$. Όταν ο οργανισμός αποβιώσει οι πυρήνες του ^{14}C στους ιστούς του, που συνεχίζουν να διασπώνται, δεν αντικαθίστανται. Η χρονολόγηση (από την ημερομηνία θανάτου) γίνεται μετρώντας το κλάσμα $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ και συγκρίνοντας με την τιμή 1.3×10^{-12} , με δεδομένο το χρόνο μισής ζωής του ^{14}C που είναι 5730 χρόνια.

Ιατρικές Εφαρμογές – Πυρηνική Ιατρική

- **Καταπολέμηση καρκινικών όγκων:** καταστροφή καρκινικών όγκων με ακτινοβολήση-γ ή με χειρουργική επέμβαση και τοποθέτηση ραδιενεργών υλικών (ακτινοβολία-α)
- **Διαγνώση ασθενειών:** Διάγνωση θυροειδούς με χρήση ραδιενεργού ^{131}I (ως ιχνηθέτη) σε αντικατάσταση του ^{127}I . Το ^{131}I που συγκεντρώνεται στην πασχουσα περιοχή υφίσταται β-διασπασή και ανιχνεύεται. Ο ρυθμός συγκεντρώσεως του ^{131}I αποτελεί ένδειξη υγιούς ή μη λειτουργίας του θυροειδή.

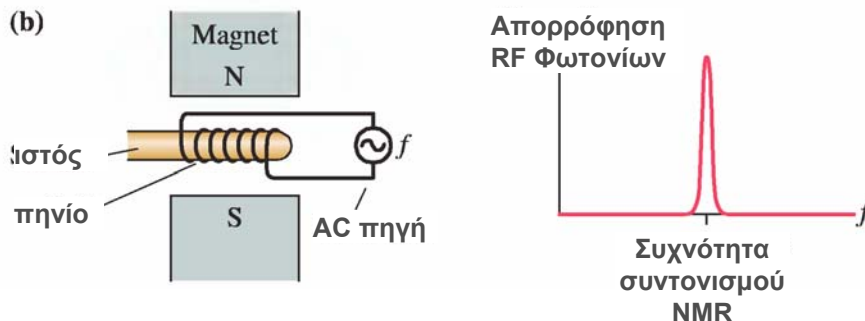
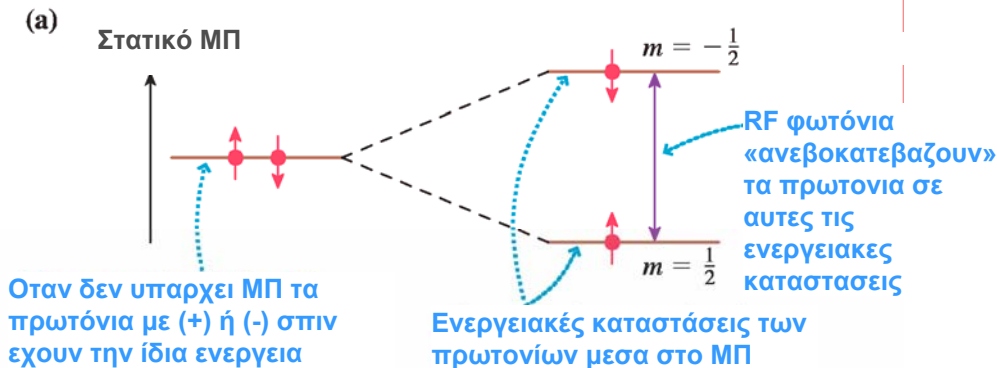
FIGURE 43.25 Radiation therapy is designed to deliver a lethal dose to the tumor without damaging nearby tissue.



Gamma radiation is incident along many lines, all of which intersect the tumor.

- Τεχνικές Απεικόνισης οργανικών ιστών (Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός NMR , Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού MRI) : Το 70% των βιολογικών ιστών αποτελείται από νερό, δηλαδή πρωτόνια. Τα πρωτόνια έχουν σπιν $s=1/2$ (όπως τα ηλεκτρόνια) και με εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου ΜΠ κατάλληλης συχνότητας εναλλάσσουν τον προσανατολισμό τους μέσα σε ένα στατικό ΜΠ, απορροφώντας ή εκπέμποντας RF φωτόνια τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν. Σε ένα χωρικά μεταβαλλόμενο στατικό ΜΠ, η συχνότητα και το εύρος του συντονισμού μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο ακολουθώντας τις μεταβολές του ΜΠ. Οι χωρικές μεταβολές αυτές καταγράφονται και μετατρέπονται με κατάλληλη επεξεργασία σε εικόνα.

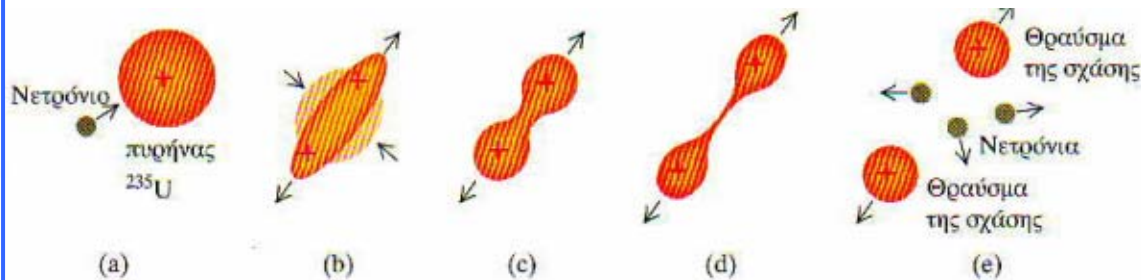
Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)



3.6 Πυρηνική Σχάση

- Σχάση = διεργασία κατά την οποία ένας ασταθής πυρήνας διασπάται σε δυο θραύσματα με συγκρίσιμες μαζες, αντι να εκπέμψει σωματιδία α ή β. (Hahn-Strassman 1939)
- Για να πραγματοποιηθεί απαιτείται ο αρχικός πυρήνας να βομβαρδιστεί με νετρόνια.
- Πάντοτε κατά τη σχάση ελευθερώνονται νετρόνια.
- Είναι δυνατό ολοι οι πυρηνες να υποστούν σχάση, αλλά προτιμώνται αυτοί που απαιτούν βομβαρδισμό με αργά κινούμενα («θερμικά») νετρόνια. (πχ ^{235}U)

Το πρότυπο της σταγόνας (1936) και η πυρηνική σχάση



Συνθήκη για σχάση:

Τα θραύσματα να έχουν μεγαλύτερη ενέργεια σύνδεσης από τον αρχικό πυρήνα

$$X \rightarrow Y + Z \Leftrightarrow B(X) < B(Y), B(Z)$$

$$B(A) = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(A-2Z)^2}{A};$$

$$C_1 = 15.7 \text{ MeV}$$

1: Ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο

$$C_2 = 17.8 \text{ MeV}$$

2: Επιφανειακή διόρθωση ενέργειας σύνδεσης

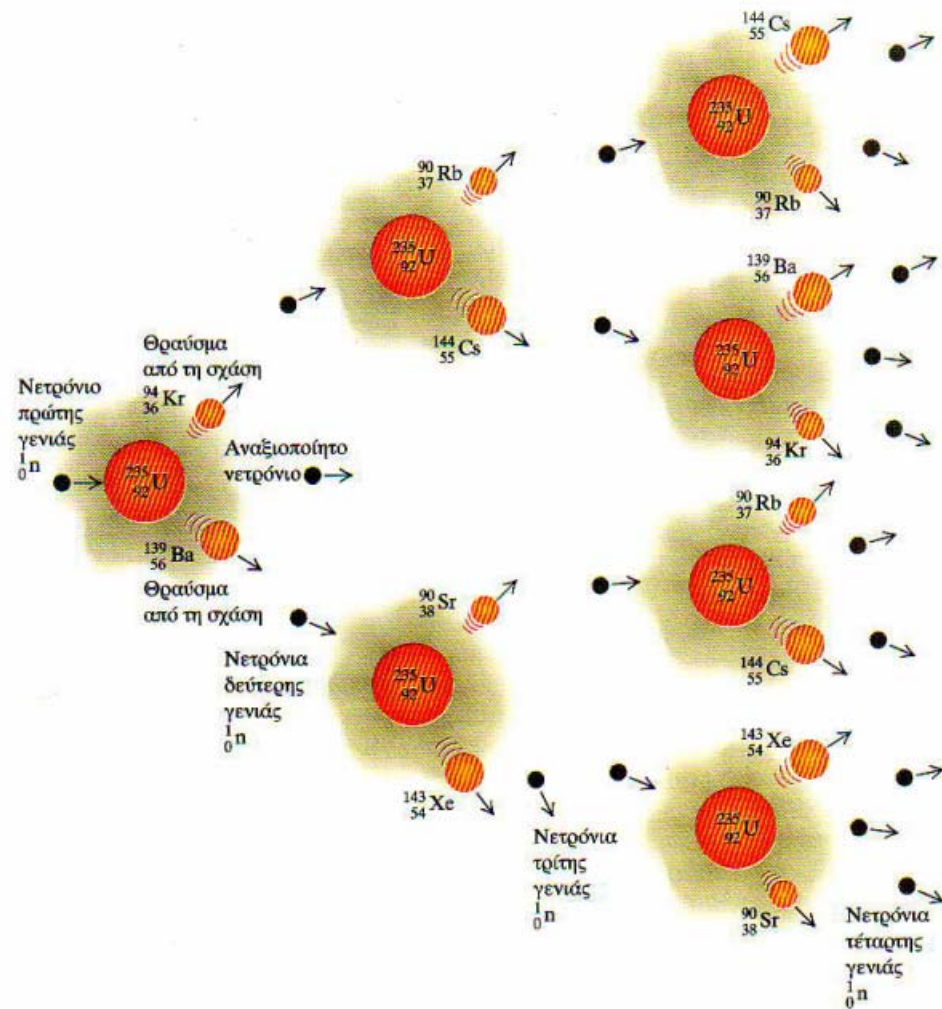
$$C_3 = 0.71 \text{ MeV}$$

3: Ηλεκτροστατική απωστική ενέργεια πρωτονίων

$$C_4 = 23.7 \text{ MeV}$$

4: Μείωση της ενέργειας ισχυρής αλληλεπίδρασης, λόγω των αζευγάρωτων νουκλεονίων $|N-Z|=|A-2Z|$

Αλυσωτές Αντιδράσεις



Τα παραγόμενα από τη σχάση νετρόνια προκαλούν με τη σειρά τους νέες σχάσεις πυρήνων, οπότε προκαλείται ένα «φαινόμενο χιονοστιβαδας» απο διαδοχικές πυρηνικές σχάσεις, το οποίο περιγράφεται ως **αλυσωτη αντιδραση**.

Η εξέλιξη της αλυσωτης αντιδρασης γίνεται με ελεγχόμενο (αργό) ρυθμό, στους **πυρηνικούς αντιδραστήρες**, ενώ με ανεξέλεγκτο ρυθμό σε μια πυρηνική βόμβα.

Η **επιβράδυνση των νετρονίων** γίνεται μεσω συγκρούσεων με το περιβαλλον αδρανες (μη-σχασιμο) υλικό (πχ νερο, γραφίτης, ραβδοι καδμίου).

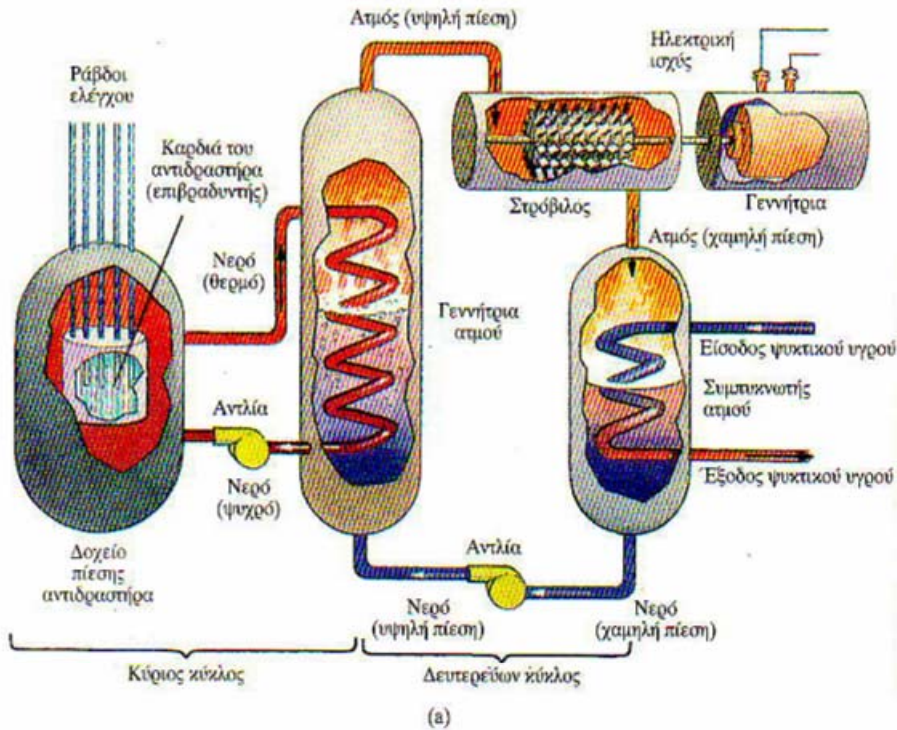


ΕΚΕΦΕ «Δ» (5MW)

Forsmark, Sweden

Πυρηνικοί Αντιδραστήρες

Πυρηνικός Αντιδραστήρας = Συστημα στο οποίο πραγματοποιείται μια ελεγχόμενη πυρηνική αλυσωτή αντίδραση με σκοπό την απελευθέρωση ενέργειας



Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Πυρηνικό Αντιδραστήρα:

Σχάση → Κινητική Ενέργεια των θραυσμάτων (πυρηνων, νετρονίων) → θέρμανση νερού και παραγωγή ατμού → κίνηση ατμοστρόβιλου → κίνηση γεννητρια → **παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**

Άλλες Χρήσεις Πυρηνικού Αντιδραστήρα:

- Παραγωγή τεχνητών ραδιοϊσοτόπων (ιατρική, έρευνα)
- Παραγωγή δέσμης νετρονίων (έρευνα φυσικής)
- Παραγωγή σχάσιμων υπερουράνιων στοιχείων (πλουτώνιο)



The CANDU [Bruce Nuclear Generating Station](#) in **Canada** is the largest [nuclear power](#) plant in the world. (900 MW)



Fukushima Daiichi (**Japan**) nuclear disaster 16-3-2011



Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant (**Japan**) is the most powerful nuclear plant in the world (8.21 GW)



Tsar Bomba is the nickname for the AN602 hydrogen bomb, the most powerful nuclear weapon ever detonated. Its October 30, 1961 test remains the most powerful artificial explosion in human history. (33.8 YW peak power output , 1yottawatt= 10^{24} W)

Σημαντικά ατυχήματα αντιδραστήρων(*)

(*) http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_accidents

Χρονολογία	Τοπος	Απώλειες	Επίπεδο (log)
28-3-1979	“Three Mile Island”, Pennsylvania, USA	1 θάνατος	5 / 7
26-4-1986	“Chernobyl”, USSR	56 θάνατοι + 4000 απο καρκίνο	7 / 7
11-3-2011	Fukushima, Japan	37 τραυματίες	7/7



Chernobyl. The nuclear reactor after the disaster.



clean-up crew working to remove radioactive contamination at Three Mile Island.



Fukushima Daiichi (**Japan**) nuclear disaster 16-3-2011