

ΥΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Μάθημα I: Εισαγωγικές έννοιες

Πρασά Βάια

Περιγραφή

Στοιχειώδεις έννοιες της επιστήμης υλικών, ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα στα στερεά, στοιχειώδης κβαντομηχανική, σύγχρονη θεωρία στερεών, ημιαγώγιμα υλικά, ημιαγώγιμες διατάξεις, κεραμικά, ύαλοι, ηλεκτρομωνοτικά, διηλεκτρικά υλικά μικροηλεκτρονικής, ενεργά διηλεκτρικά, μονωτές, θερμικές ιδιότητες, μαγνητικές ιδιότητες, οπτικές ιδιότητες, αγωγιμότητα, ηλεκτρονικές ιδιότητες μετάλλων, τεχνολογία ημιαγώγιμων διατάξεων, νανοϋλικά, νανοτεχνολογίες, επιλογή υλικών και μελέτη σχεδιασμού.

Σκοπός και στόχοι του μαθήματος

Εισαγωγή στις ιδιότητες, τις μεθόδους παρασκευής και κατεργασίας, και τις εφαρμογές των υλικών της ηλεκτρονικής τεχνολογίας. Κύρια επιδίωξη είναι η διερεύνηση των σχέσεων που συνδέουν τη δομή των υλικών με τις ιδιότητές τους και τις εφαρμογές τους στην Ηλεκτρονική.

Βιβλιογραφία

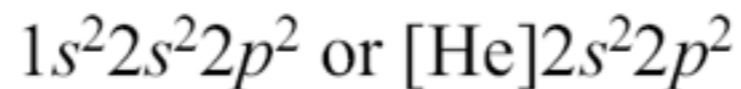
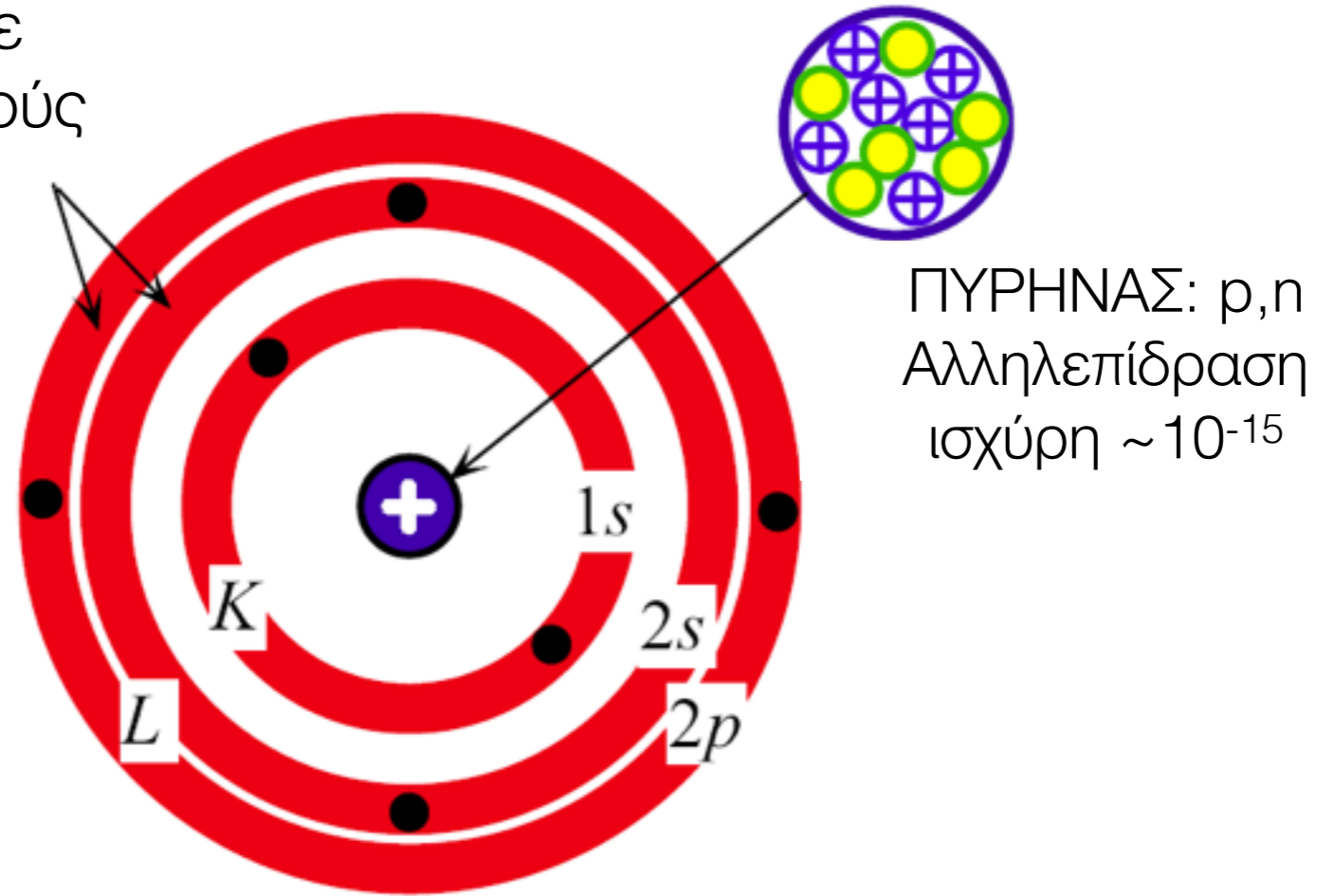
Βιβλίο [9650]: Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων, Kasap S.O., Ξανθάκης Ι., Τσαμάκης Δ.

Βιβλίο [18548824]: Επιστήμη και τεχνολογία υλικών, Callister William D.

Βιβλίο [18548947]: Αγώγιμες ιδιότητες των ηλεκτροτεχνικών υλικών, Σπύρου Νικόλαος Σ.

ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

L φλοιός με
δύο υποφλοιούς



Στο μοντέλο φλοιών τα ηλεκτρόνια είναι περιορισμένα σε φλοιούς και υποφλοιούς, τα οποία καθορίζονται από δύο ακέραιους αριθμούς, n (κύριος) και l (γωνιακός κβαντικός αριθμός, $l=0, 1, 2, \dots, n-1$).

Οι φλοιοί $n=1, 2, \dots$ συμβολίζονται με K, L, M, N, \dots

Οι υποφλοιοί $l=0, 1, 2, 3$ με s, p, d, f, \dots

π.χ. ο υποφλοιός $l=1$ και $n=2$ γράφετε $2p$

Σε κάθε υποφλοιό υπάρχουν $2(2l+1)$ ηλεκτρόνια

Μέγιστος αριθμός ηλεκτρονίων στους φλοιούς και υποφλοιούς ενός ατόμου

n	Shell	Subshell			
		$\ell = 0$ s	1 p	2 d	3 f
1	K	2			
2	L	2	6		
3	M	2	6	10	
4	N	2	6	10	14

ΚΛΑΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Σωματίδια
Εξισώσεις Νεύτωνα
Καθορισμός Θέσης-ορμής
Μη κβαντισμένη συμπεριφορά

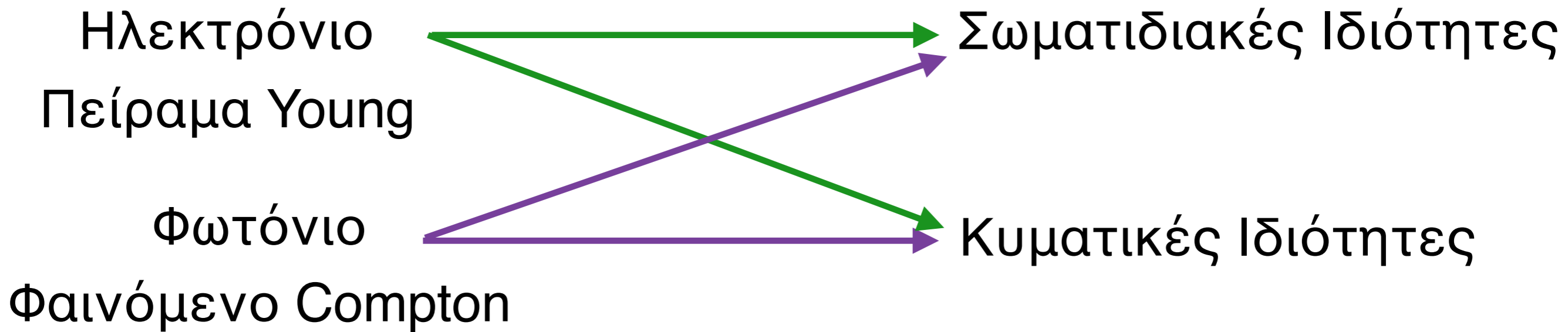
Κύματα
Κυματικές Εξισώσεις
Αβεβαιότητα θέσης ορμής
Συχνότητες κβαντισμένες

ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

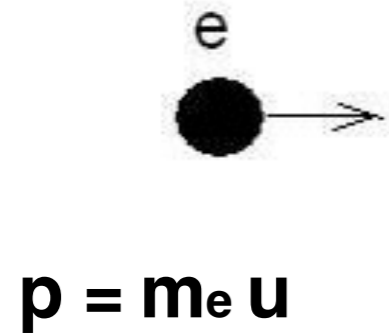
Σωματίδιο + Κύμα (δυϊσμός)
Αβεβαιότητα φυσικών μεγεθών - Αρχή απροσδιοριστίας (Heisenberg)
Κυματοσυνάρτηση – Εξ. Schrödinger
Κβαντισμός Φυσικών μεγεθών

Στοιχεία Κβαντομηχανικής

Διϊσμός Ύλης:
Κύμα \Leftrightarrow Σωματίδιο



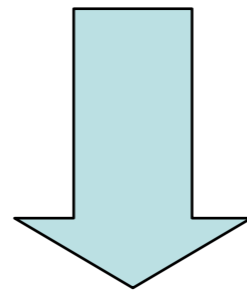
Σωματίδιο-κύμα



$$p = h/\lambda$$



$$E = \hbar\omega \text{ (Planck)} \quad \hbar = h/2\pi$$



De Broglie (1924)

Σε ένα σωματίδιο ενέργειας E και ορμής p αντιστοιχεί ένα κύμα συχνότητας ν ($\omega = 2\pi\nu$) και διανύσματος κύματος k έτσι ώστε:

$$E = h\nu \text{ και } p = h/\lambda$$

Μήκος κύματος ή κύμα de Broglie

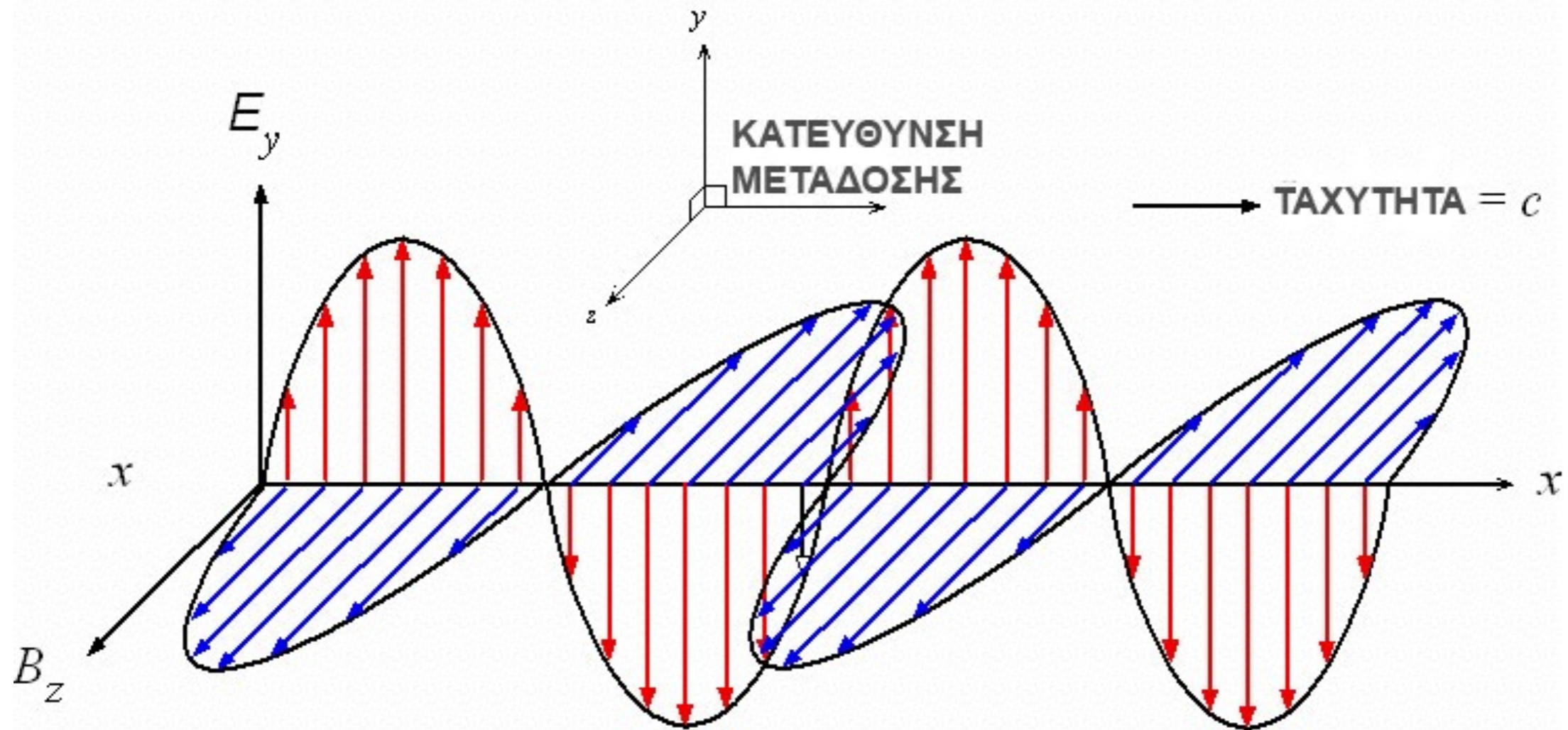
Ηλεκτρόνιο ως κύμα
Πείραμα του Young με τη διπλή σχισμή - Double slit experiment



Νόμος ή συνθήκη Bragg για την συμβολή των σκεδαζόμενων κυμάτων

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

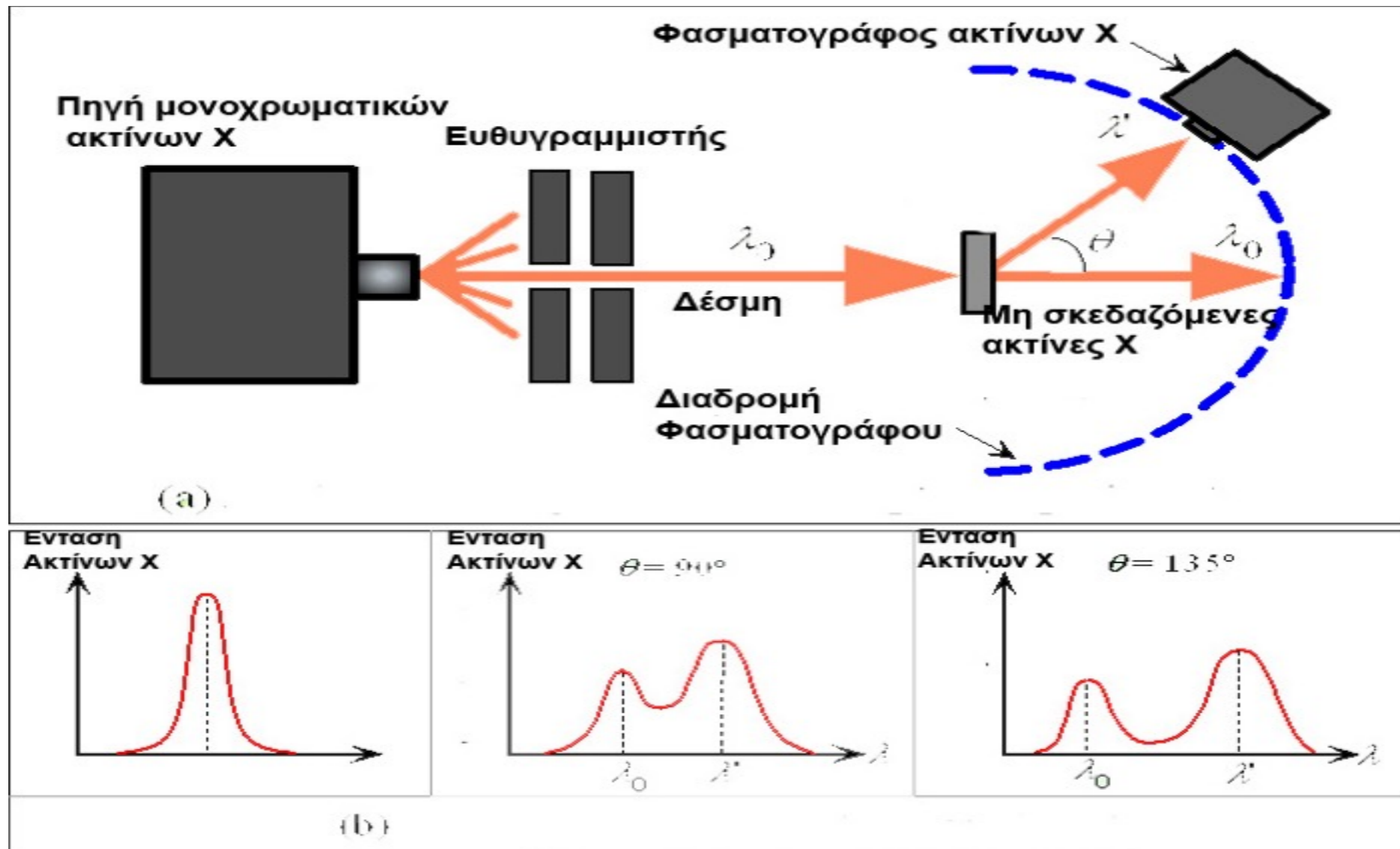
Η κλασική θεώρηση του φωτός ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα



Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ένα οδεύον κύμα στο οποίο το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται με τον χρόνο και είναι κάθετα μεταξύ τους και με τη διεύθυνση μετάδοσης

$$E_y(x, t) = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

Πείραμα Compton



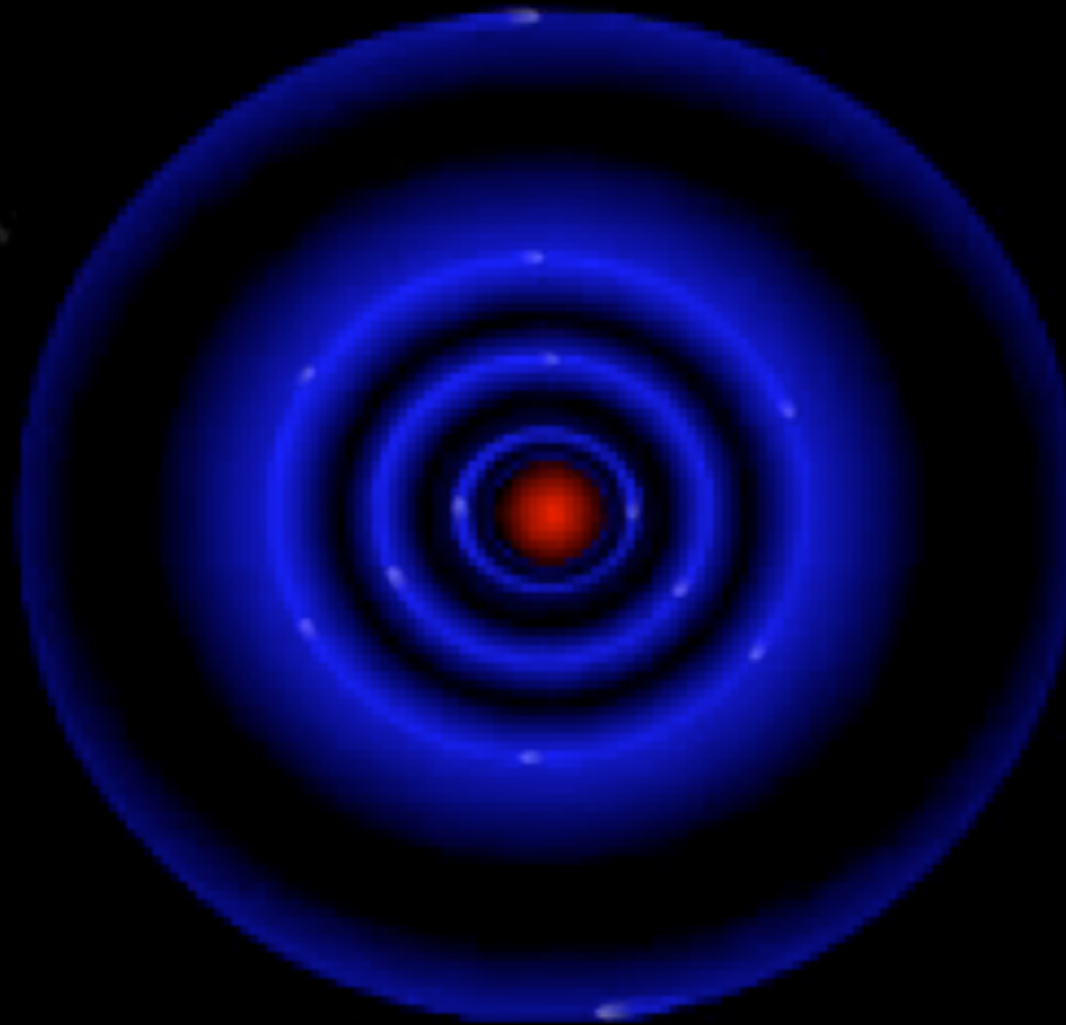
- A) Σχηματική απεικόνιση του πειράματος Compton
- B) Τα αποτελέσματα του πειράματος Compton
- C) Στο σχήμα φαίνεται η καμπύλη της έντασης της σκεδασθείσας ακτινοβολίας σε γωνία 90° με δύο κορυφές. Η μία αντιστοιχεί στο μήκος $\lambda=0.0709$ nm και η άλλη σε μήκος κύματος $\lambda'=0.0731$ nm. Το μήκος λ' της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αλλάζει ανάλογα με τη γωνία Θ . Η πρώτη κορυφή (λ) οφείλεται στα **εσωτερικά ηλεκτρόνια** του άνθρακα, που είναι ισχυρώς δέσμια. Η δεύτερη όμως κορυφή (λ') οφείλεται στη **σκέδαση των ακτίνων-Χ** από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του στόχου.

Σύμφωνα με την **κλασική θεωρία** ένα **ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f** που προσπίπτει σ' ένα υλικό **αναγκάζει τα ηλεκτρόνια** του υλικού να **ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα** και, επακόλουθα, να **παράγουν** με τη σειρά τους σαν μικρές κεραίες, **ηλεκτρομαγνητικό κύμα της ίδιας συχνότητας f** .

Στα πειράματα του Compton, όταν ένα **ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f_0** κτυπάει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, τότε η **δευτερογενής ακτινοβολία είχε συχνότητα $f < f_0$** . Επίσης οι πειραματικές μετρήσεις του Compton έδειχναν ότι η μεταβολή του μήκους κύματος $\Delta\lambda$ των σκεδαζόμενων κατά μία ορισμένη γωνία ακτίνων, εξαρτιόταν μόνον από τη γωνία σκέδασης θ .

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

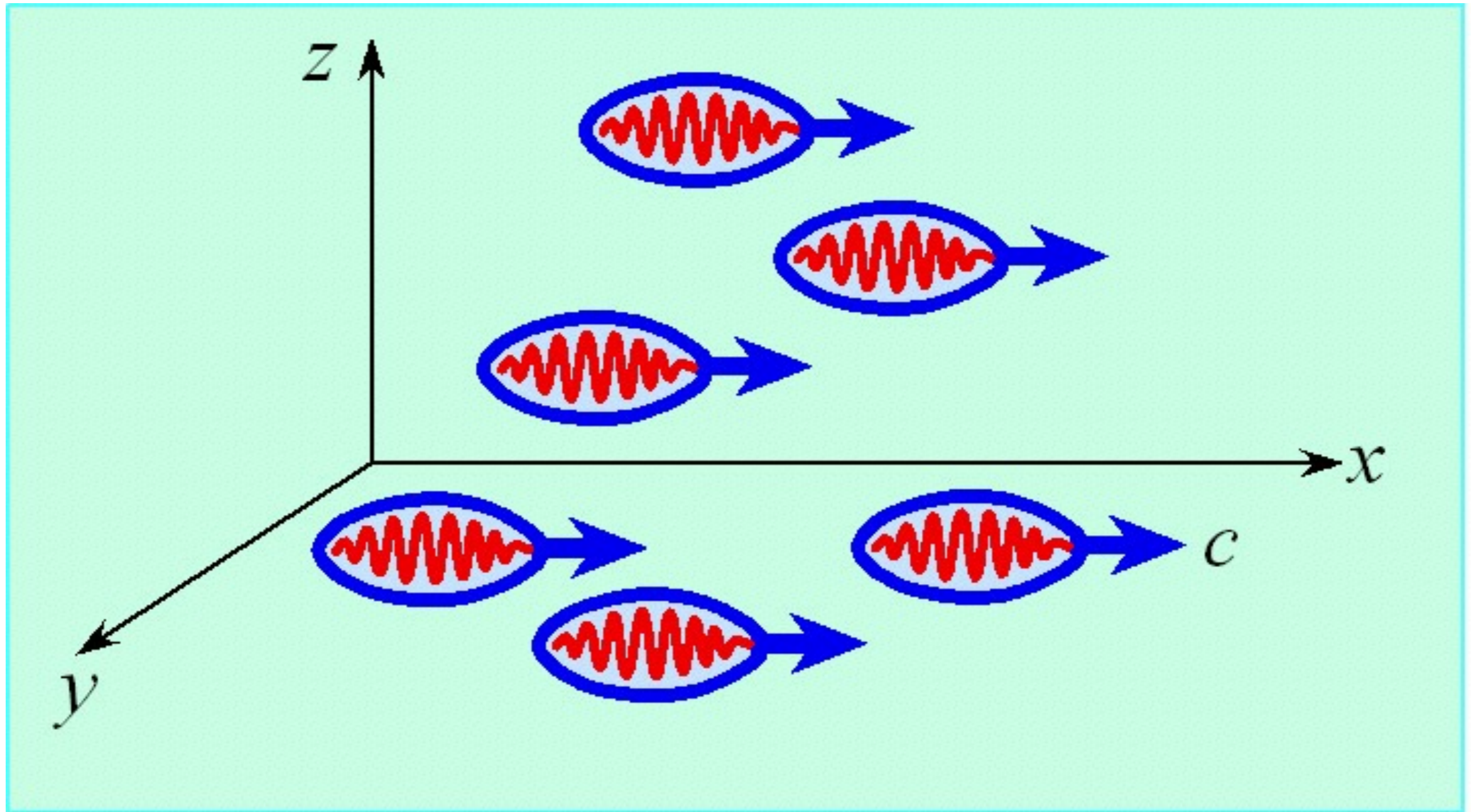
X-RAY PHOTON



COMPTON EFFECT

M. Mongkolsuk

11/04/2004



Μια διαισθητική απεικόνιση του φωτός θεωρούμενου ως ρεύμα φωτονίων

Κυματοσυνάρτηση σωματιδίου (καθορίζει τη συμπεριφορά του)

$$\Psi(x,t) = \psi(x) \exp\left(-\frac{jEt}{\hbar}\right)$$

όπου E η ολική ενέργεια του σωματιδίου $E = p^2/2m + V$

Αν την διαφορίσουμε δύο φορές ως προς x

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\psi = 0$$

ή αν

$$k^2 = \frac{2m(E - V)}{\hbar^2}$$

παίρνουμε την ανεξάρτητη από τον χρόνο εξίσωση Schrödinger:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + k^2\Psi = 0$$

όταν το V (δυναμικό που δέχεται το σωματίδιο) είναι ανεξάρτητο από χωρικές συντ/νες \rightarrow εύκολη λύση

Εξίσωση Schrödinger

- Δέχεται πεπερασμένη και συνεχή λύση μόνο για συγκεκριμένες τιμές της E (E_1, E_2, \dots, E_n)
- Οι τιμές ονομάζονται **ιδιοτιμές**
- Οι λύσεις της Ψ ($\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$) **ιδιοσυναρτήσεις**
- Δίνουν πληροφορίες σχετικά με την δομή του ατομικού συστήματος σε διάφορες στάσιμες καταστάσεις

Ηλεκτρόνιο σε «πηγάδι» δυναμικού απείρου βάθους

Εντοπισμένο ηλεκτρόνιο

Θεωρούμε ηλεκτρόνιο περιορισμένο στο πηγάδι δυναμικού του σχήματος
 Ισχύουν:

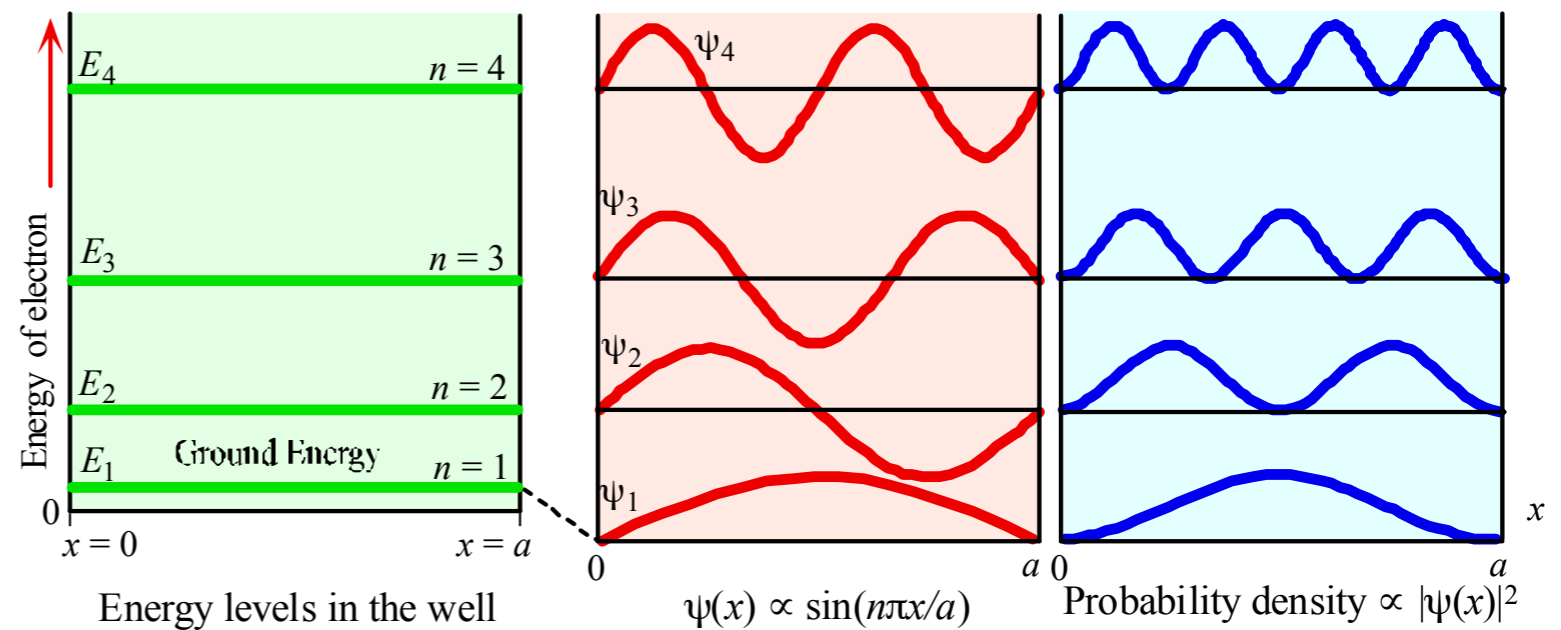
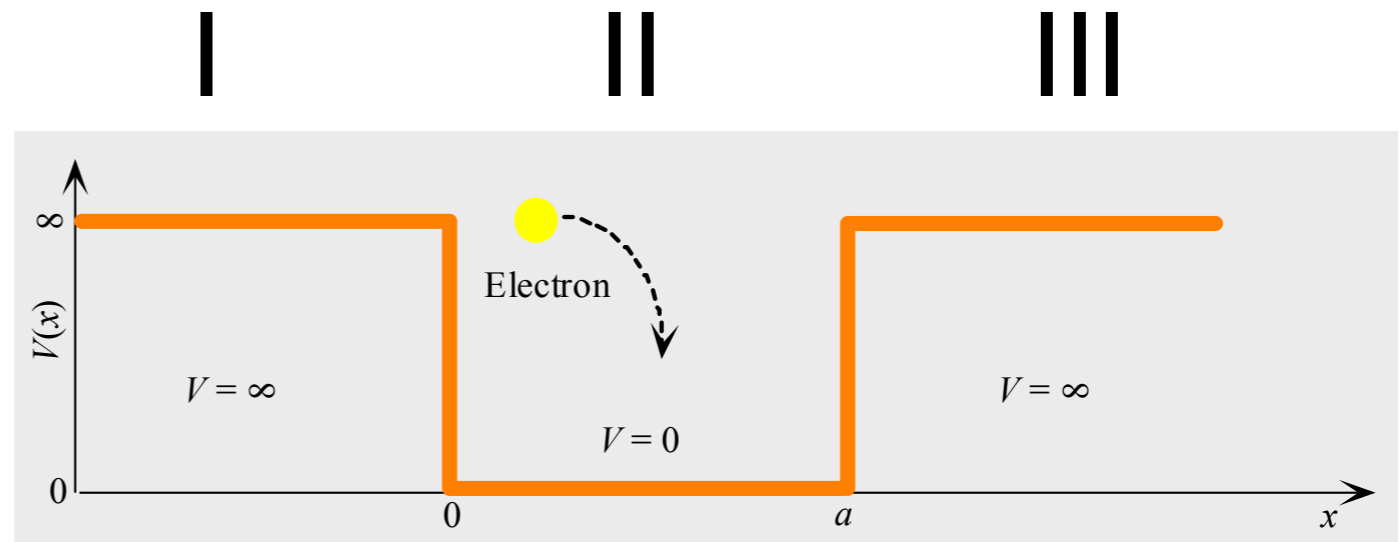
$$\begin{aligned} |\Psi|^2 &= 0 && \text{για } x < 0 \quad x > a \\ \Psi &= 0 \end{aligned}$$

Εντός τοιχωμάτων: $0 \leq x \leq a$, $V=0$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\Psi = 0$$

Εξίσωση Schrödinger (Ιδιοτιμών)

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi_n(x)}{dx^2} = E_n \Psi_n(x)$$



Οριακές Συνθήκες:

$$\Psi_I(0) = \Psi_{II}(0) \quad (1)$$

$$\Psi_{III}(\alpha) = \Psi_{II}(\alpha) \quad (2)$$

Κανονικοποίηση:

$$\int_0^\alpha |\Psi|^2 dV = 1 \quad (3)$$

Γενική λύση:

$$\Psi_n(x) = A_n \sin(k_n x) + B_n \cos(k_n x)$$

Υπολογισμός Σταθερών

$$(1) \Rightarrow B_n = 0$$

$$(2) \Rightarrow \sin(k_n \alpha) = 0 \quad \Rightarrow k_n \alpha = n\pi, n=1,2,\dots \Rightarrow \boxed{k_n = \frac{n\pi}{\alpha}}$$

$$(3) \Rightarrow A_n^2 \int_0^\alpha \sin^2(k_n x) dx = 1 \Rightarrow A_n = \sqrt{\frac{2}{\alpha}}$$

Ιδιοτιμές ενέργειας:

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} \Rightarrow E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2m\alpha}$$

Ιδιοτιμές ορμής :

$$\vec{p}_n = \hbar \vec{k}_n$$

Ηλεκτρόνιο σε δυναμικό απείρου βάθους. Συνοπτικά ισχύουν

Κυματοσ/ση: $\psi_n(x) = A \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right)$, $A = \frac{2^{1/2}}{a^{1/2}}$

Ορμή: $p_n = \frac{\hbar(\pi n)}{a}$

Ενέργεια: $E_n = \frac{\hbar^2 (\pi n)^2}{2ma^2} = \frac{h^2 n^2}{8ma^2}$

Διαφορά: $\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{h^2 (2n+1)}{8ma^2}$

Αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg

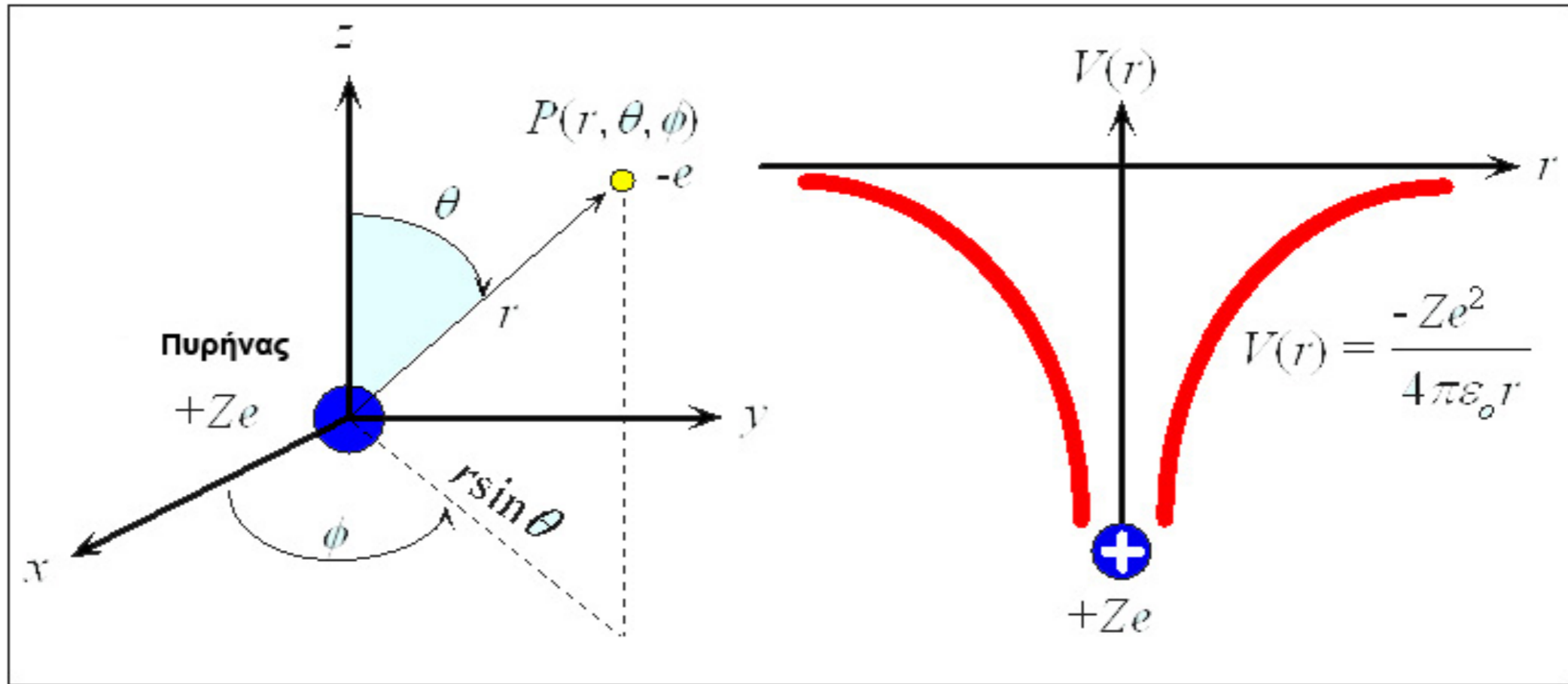
Για την θέση και την ορμή

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

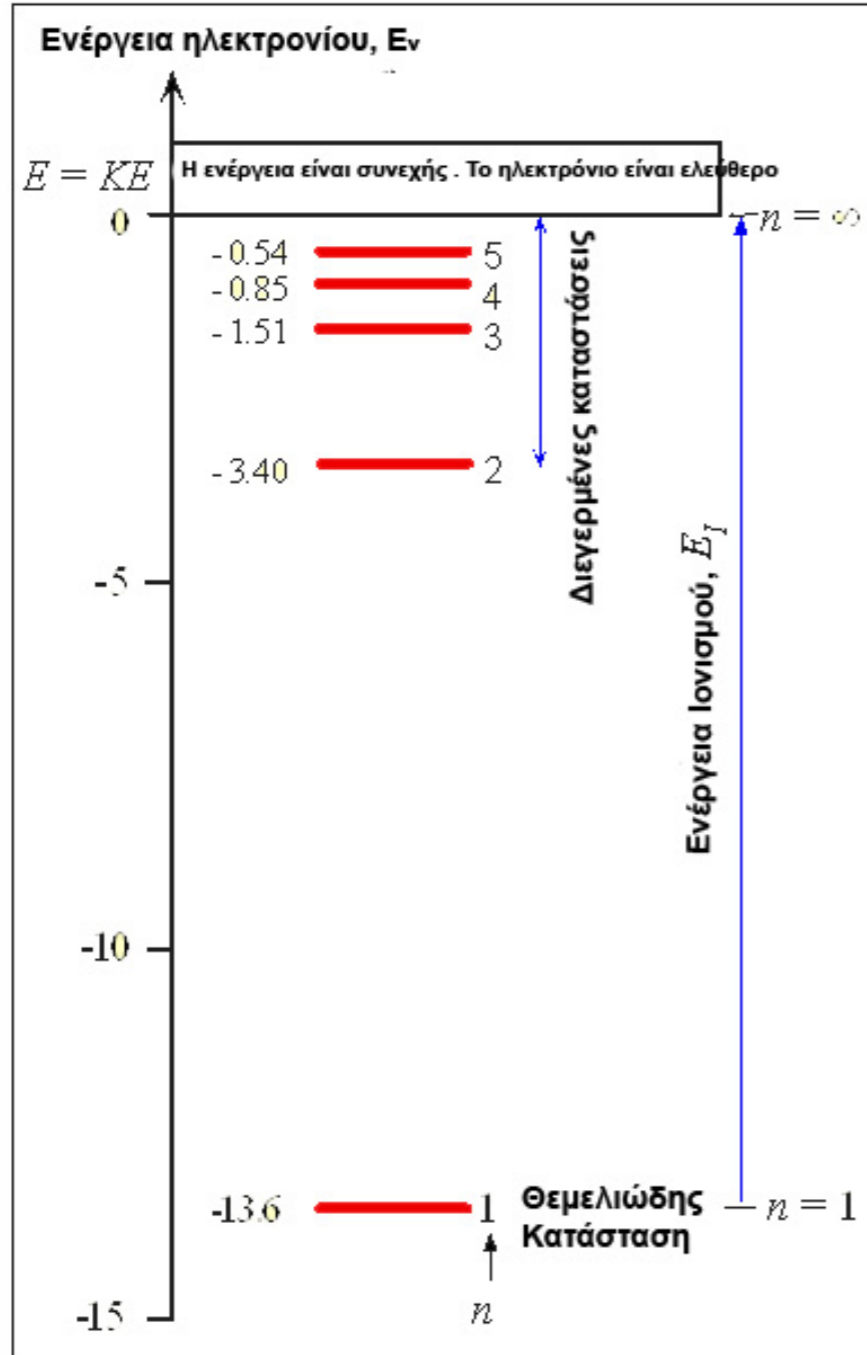
Για την ενέργεια και τον χρόνο

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Υδρογονοειδές άτομο



Ένα ηλεκτρόνιο σε ένα υδρογονοειδές άτομο έλκεται από μια κεντρική δύναμη η οποία έχει πάντα κατεύθυνση προς τον πυρήνα. Για αυτό χρησιμοποιούμε σφαιρικές συντεταγμένες με κέντρο τον πυρήνα για τον προσδιορισμό της θέσης του ηλεκτρονίου. Η ΔE του ηλεκτρονίου εξαρτάται μόνο από την r .



Η ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του Υδρογόνου ($Z=1$)

Κβαντισμένη Ενέργεια ηλεκτρονίου υδρογονοειδούς ατόμου

Εξίσωση Schrödinger



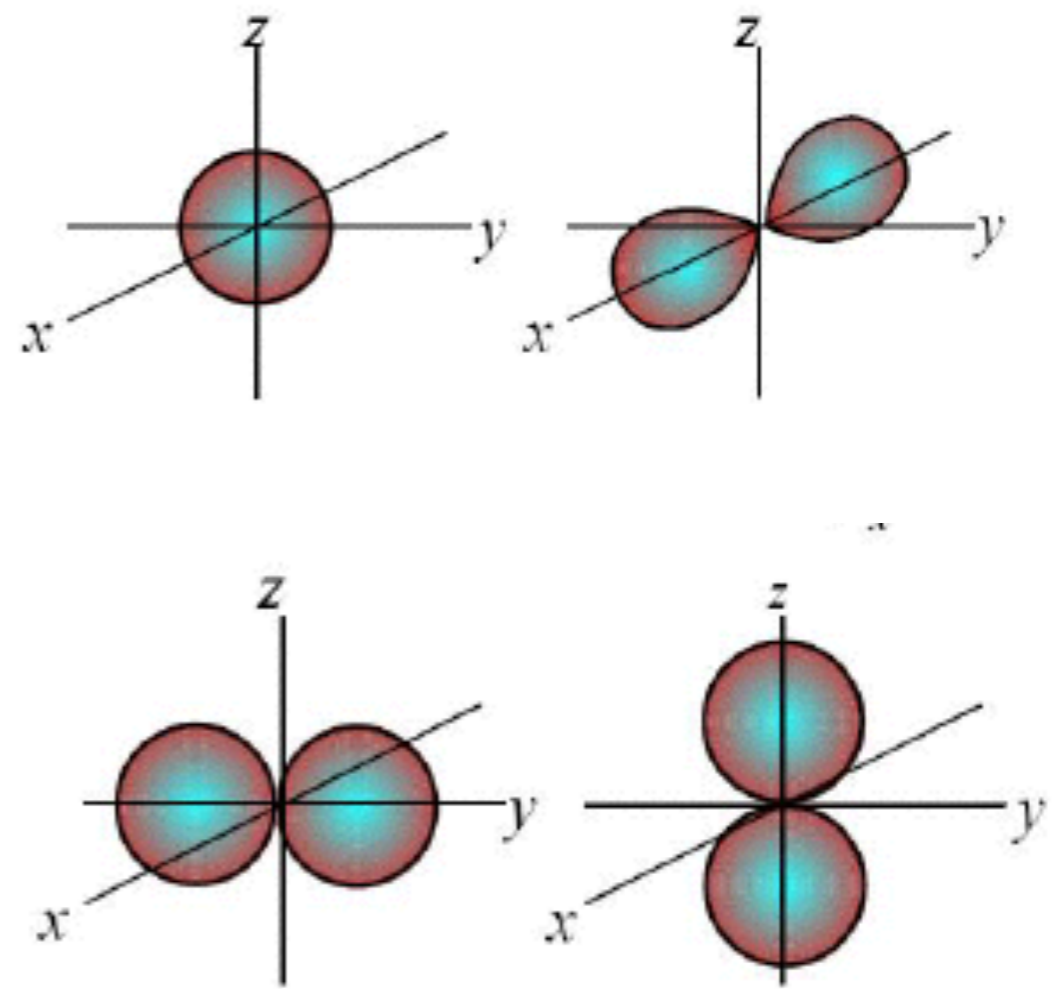
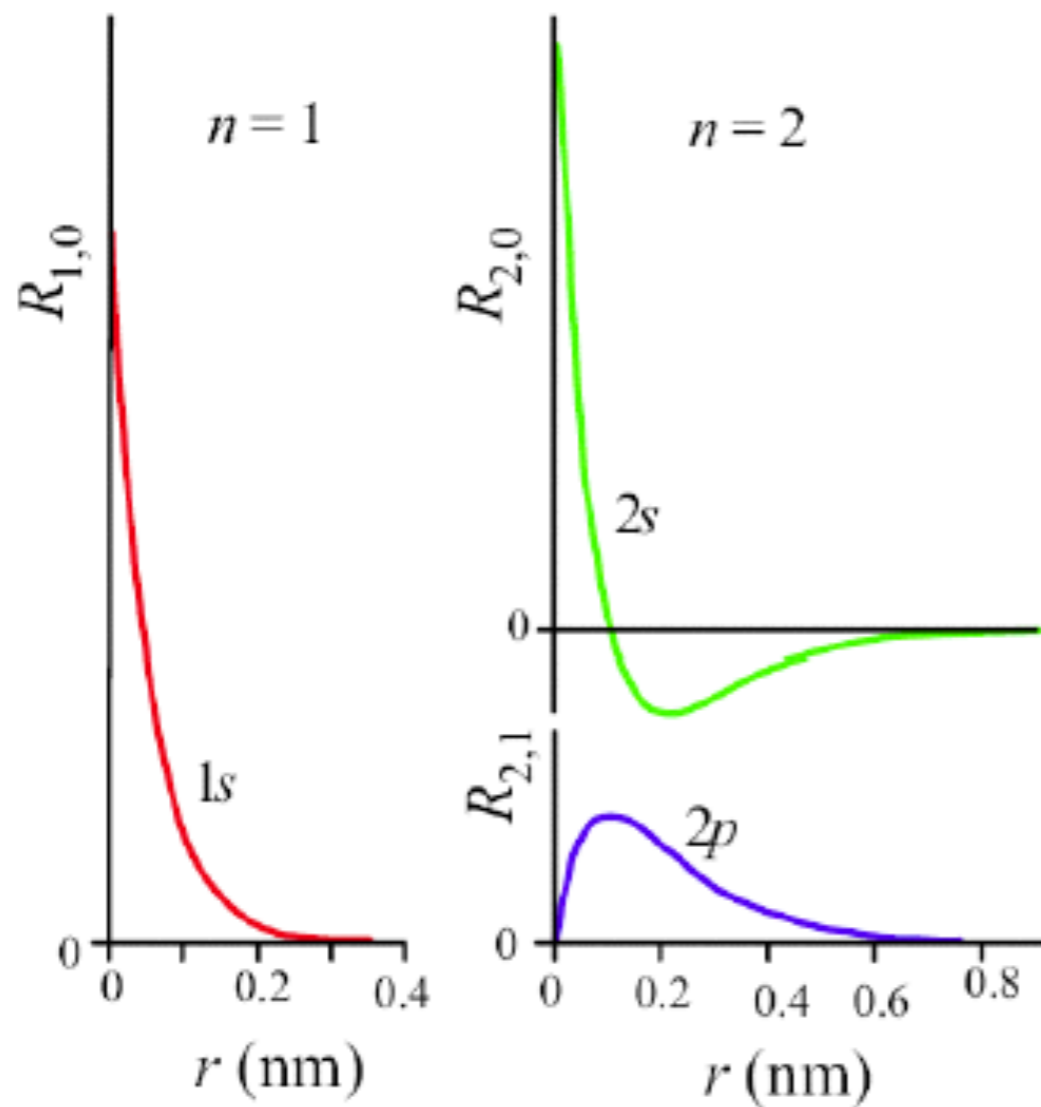
$$E_n = -\frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^2 \cdot n^2}$$

ή

$$E_n = -\frac{Z^2 E_I}{n^2}$$

$$E_I = 13,6eV$$

Ενέργεια ιονισμού ατόμου

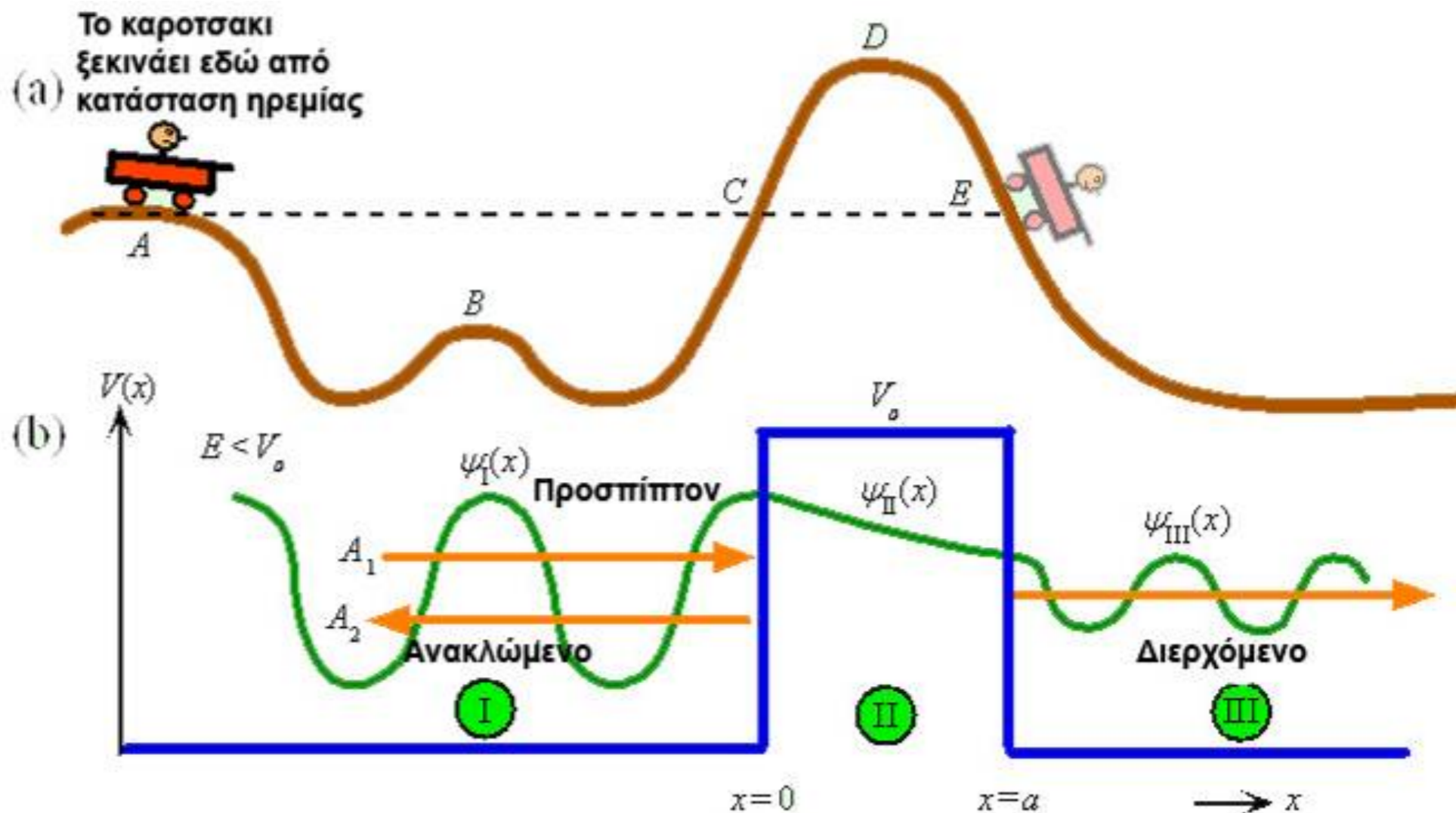


(a)

αριστερά: Ακτινικές κυματοσυναρτήσεις για ένα υδρογονοειδές άτομο για διάφορα n και l .

δεξιά: Γωνιακή εξάρτηση της κατανομής πιθανότητας των s , p_x , p_y , p_z τροχιακά

Φαινόμενο σήραγγας: Κβαντική διαρροή



a) Στην κβαντική θεωρία υπάρχει μια πιθανότητα το καροτσάκι να περάσει διαμέσου μιας σήραγγας το ενεργειακό φράγμα και να φτάσει στο σημείο E.

b) Η κυματοσυνάρτηση ενός ηλεκτρονίου που προσπίπτει σε ένα ενεργειακό φράγμα (V_0). Το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα συμβάλουν και δίνουν ως αποτέλεσμα την συνάρτηση $\Psi_1(x)$. Στην περιοχή III δεν υπάρχει ανακλώμενο κύμα. Στην περιοχή II επειδή $E < V_0$, η κυματοσυνάρτηση φθίνει όσο αυξάνεται το x

Λύσεις εξίσωσης Schroedinger

$$x < 0: \quad \Psi_I(x) = A_1 \exp(jkx) + A_2 \exp(-jkx)$$

$$0 \leq x \leq a: \quad \Psi_{II}(x) = B_1 \exp(cx) + B_2 \exp(-cx)$$

$$a < x: \quad \Psi_{III}(x) = C_1 \exp(jkx) + C_2 \exp(-jkx)$$

$$\text{όπου:} \quad k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \quad \text{και} \quad c^2 = \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}$$

Συντελεστής διέλευσης T:

$$T = \frac{|\Psi_{\text{III}}(x)|^2}{|\Psi_{\text{I}}(x)|^2} = \frac{C_1^2}{A_1^2} = \frac{1}{1 + D \sinh(ac)} \quad \text{όπου} \quad D = \frac{V_0^2}{4E(V_0 - E)}$$

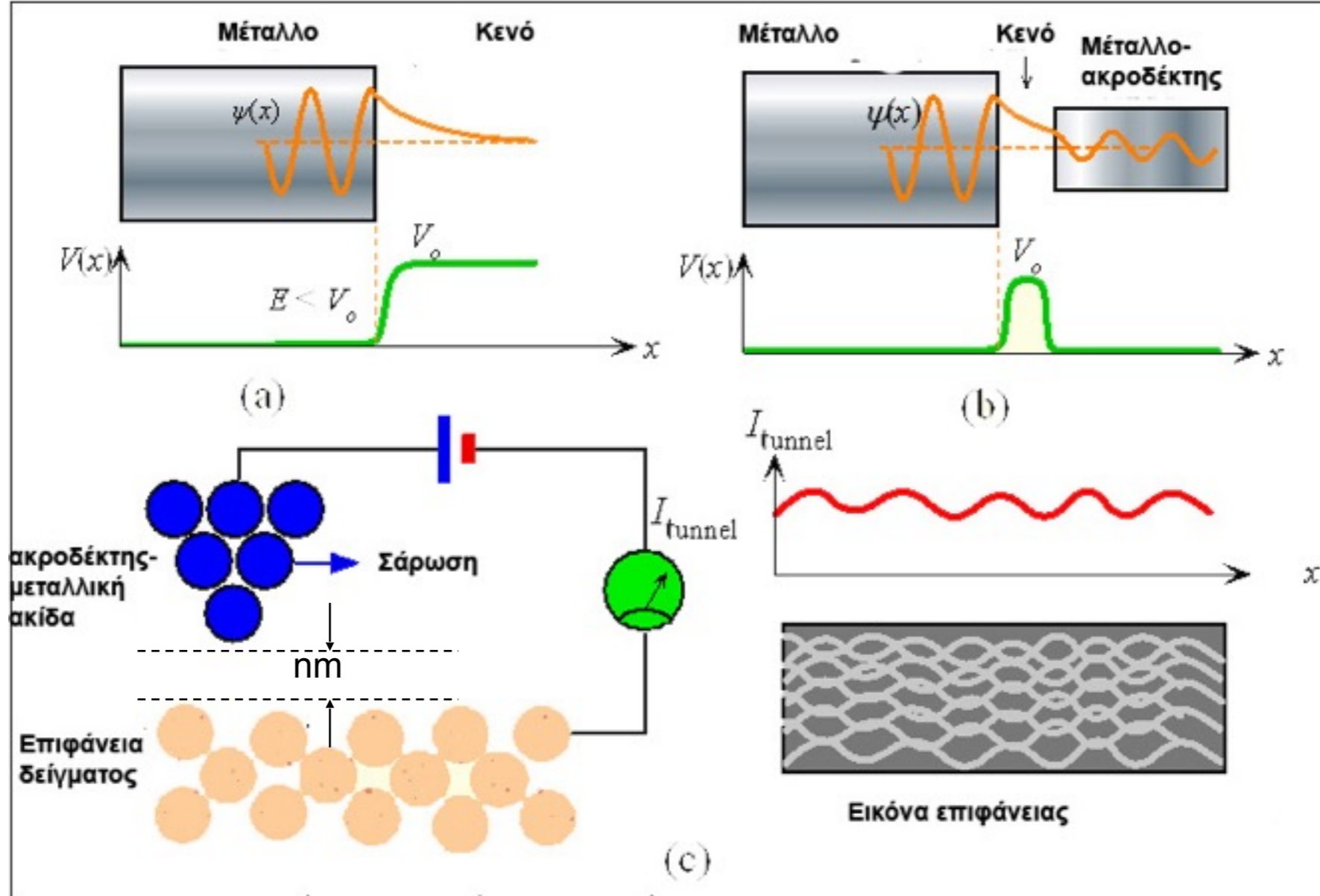
* Αν $ac \gg 1$: υψηλός φραγμός \Rightarrow

$$\sinh ac \simeq \frac{1}{2} \cdot \exp(ac) \Rightarrow \boxed{T \simeq T_0 \exp(-2ac)}$$

$$\text{όπου} \quad T_0 = \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2}$$

Συντελεστής ανάκλασης R:

$$R = 1 - T = \frac{A_2^2}{A_1^2}$$



- A) Η κυματοσυνάρτηση φθίνει εκθετικά καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια. Ο λόγος είναι το ότι εκτός του μετάλλου η ΔE είναι V_0 ενώ η ενέργεια του ηλεκτρονίου $E < V_0$.
- B) Αν φέρουμε ένα δεύτερο μέταλλο κοντά στο πρώτο, τότε η κυματοσυνάρτηση μπορεί να διεισδύσει σε αυτό: Το ηλεκτρόνιο μπορεί να περάσει μέσω του «φαινομένου σήραγγας» από το ένα υλικό στο άλλο
- C) Η αρχή λειτουργίας του μικροσκοπίου σάρωσης (scanning tunneling microscope/STM). Το ρεύμα σήραγγας εξαρτάται από τον παράγοντα $\exp(-2ca)$, όπου a είναι η απόσταση του ακροδέκτη από την επιφάνεια και c μια σταθερά