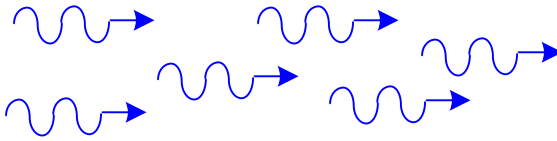


ΚΥΜΑΤΑ DE BROGLIE

Άρα Για να εξηγηθούν όλα τα πειράματα με το φως πρέπει να θεωρήσουμε πως το φως είναι και κύμα και σωματίδια

Φωτόνιο κυματοσωματίδιο



Ενέργεια φωτονίου $E_\phi = \hbar\omega$

Το Η/Μ κύμα έχει κυματόνισμα k είναι δέσμη ακέραιου αριθμού φωτονίων με συχνότητα ω .

Από τη θεωρία της σχετικότητας

αφού το φωτόνιο έχει ενέργεια έχει και μάζα (m) $E = mc^2$ και ταχύτητα c

με μάζα ηρεμίας $m=0$

Τα Η/Μ κύματα δεν είναι ούτε κύμα ούτε σωματίδιο είναι σύνθεση και των 2 είναι κυματοσωματίδια

Πως μπορεί να υπάρξει σωματίο με μάζα ηρεμίας $m=0$?

$$P = \frac{m u}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad \frac{p^2}{m^2 c^2} = \frac{u^2/c^2}{1 - u^2/c^2} \quad E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad \frac{E^2}{m^2 c^4} = \frac{1}{1 - u^2/c^2}$$

Με απαλοιφή της u πέρνω

$$E^2 = (mc^2)^2 + (Pc)^2$$

όταν $P=0$ τότε $E=mc^2$

ακίνητο σωματίο $P=0$ έχει ενέργεια $E = mc^2$

όταν $m=0$ τότε $E=Pc$

σωματίο με μάζα ηρεμίας $m=0$ μπορεί να έχει ορμή και ενέργεια με $E = Pc$

τέτοια σωματίδια υπάρχουν (φωτόνια) και κινούνται με τη ταχύτητα του φωτός c

Ενέργεια φωτονίου $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = Pc$ $p = \frac{h}{\lambda}$ Ορμή φωτονίου $P = \hbar k$

Ο de Broglie διερωτήθη : Μήπως και τα στοιχειώδη σωματίδια είναι και κύμα ?
ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια,

δηλ. κυματοσωματίδια ?

Ο de Broglie θεώρησε πως σε σωματίο μάζας m και ταχύτητας u αντιστοιχεί μήκος κύματος λ :

$$P = mu = \frac{h}{\lambda}$$

για τα μακροσκοπικά σώματα το m είναι πολύ μεγάλο και έτσι το λ αμελητέο δύσκολα παρατηρήσιμο

Η πρόταση του de Broglie διετυπώθηκε χωρίς να υπάρχουν ακόμα πειραματικά δεδομένα που να συνηγορούν στο ότι τα σωματίδια έχουν σωματιδιακές ιδιότητες.

Υιοθετούμε την άποψη του de Broglie ότι τα ηλεκτρόνια είναι κυματοσωματίδια με

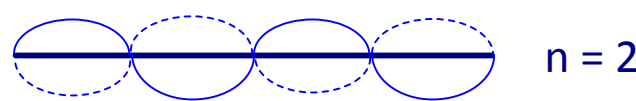
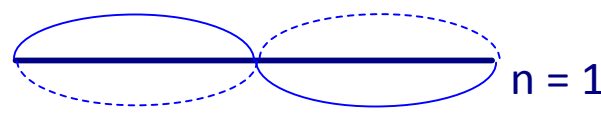
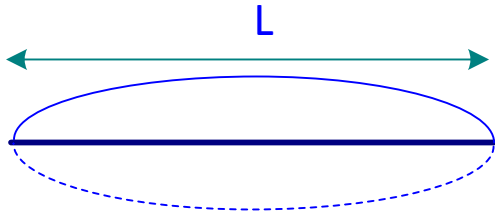
$$p = mv = \frac{h}{\lambda} \quad \text{Ορμή ηλεκτρονίου} \\ p = \hbar k$$

όπως η ορμή του φωτονίου

στάσιμα κύματα ηλεκτρονίου σε άτομο

στάσιμα κύματα σε χορδή

Για να ευρίσκεται το ηλεκτρόνιο σε μόνιμη κατάσταση στο άτομο το κύμα θα πρέπει να συναντάει τον εαυτό του.



Για να χωράει το στάσιμο κύμα στη χορδή πρέπει το λ να είναι έτσι ώστε

$$L = n\lambda/2$$

με την ιδέα ότι το ηλεκτρόνιο μπορεί να είναι κυματοσωματίδιο

δηλ. η συχνότητα θα πρέπει να πέρνει συγκεκριμένες τιμές

$$\omega = 2\pi\nu/\lambda$$

$$\text{τότε } E = h\omega$$

θα μπορεί να πέρνει μόνο συγκεκριμένες τιμές ενέργειας

παρέχει μία εξήγηση στο αυθαίρετη παραδοχή του Bohr

γι αυτό θα πρέπει

$$L = 2\pi r = n\lambda$$

αφού

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$2\pi r = nh/mv$$

$$2\pi mvr = nh$$

αφού

$$\text{ή } mvr = nh/2\pi$$

$$L = \hbar n$$

δηλ. κατλήγουμε στη συνθήκη του Bohr

Η στροφορμή L είναι κβαντισμένη

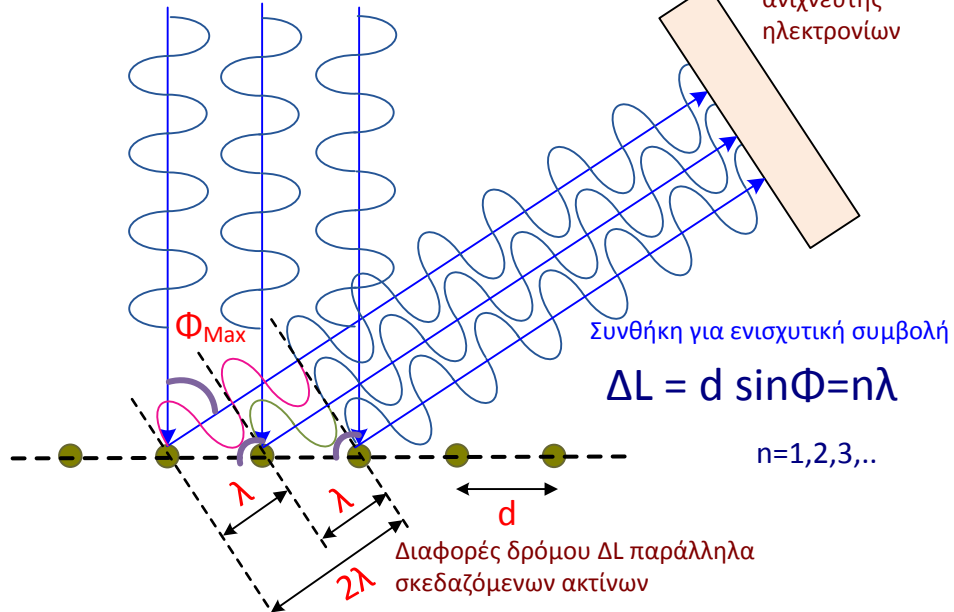
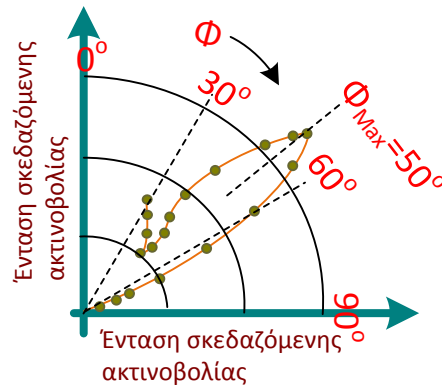
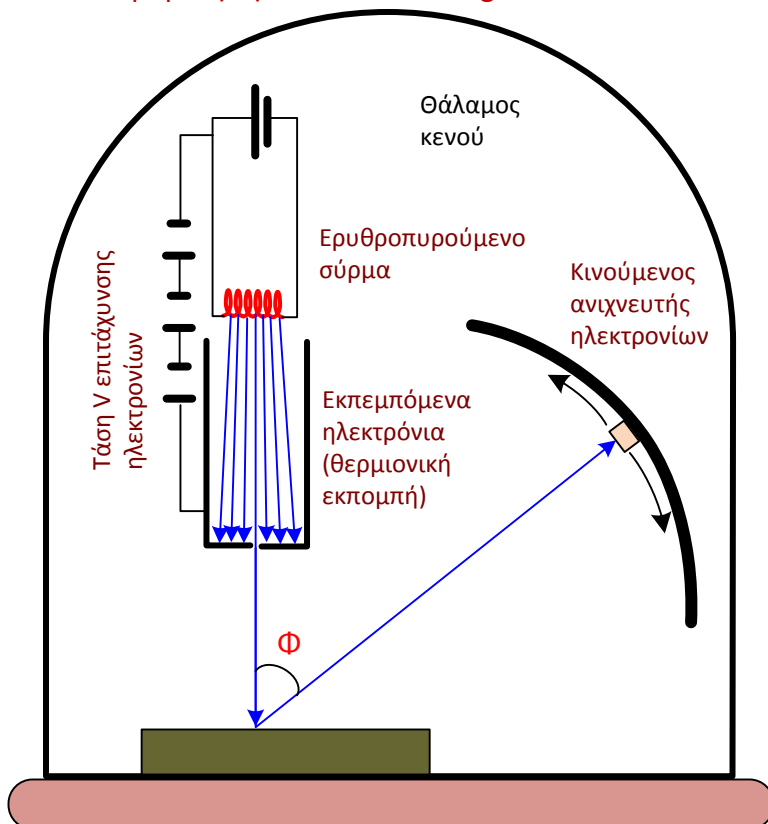
Άρα ο κυματοσωματιδιακός χαρακτήρας της ύλης φαίνεται να μπορεί να εξηγήσει το μυστήριο της σταθερότητα των ατόμων.

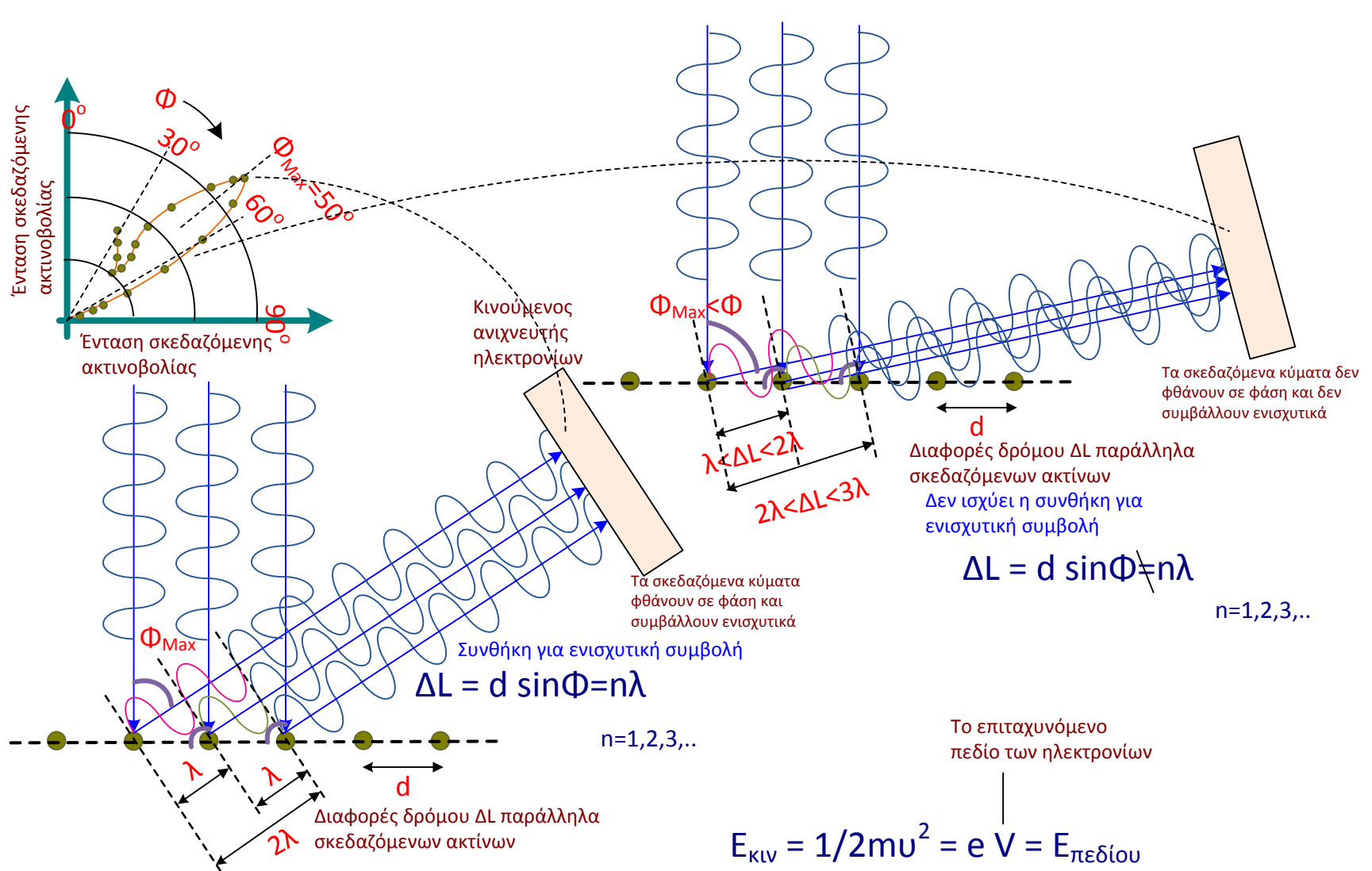
Άρα αν οι δέσμες ηλεκτρονίων παρουσιάζουν πράγματι και κυματικές ιδιότητες θα πρέπει να παρουσιάζουν όλα τα φαινόμενα περίθλασης και συμβολής όπως συμβαίνει και στο φως.

Το πείραμα Davisson-Germer

Έδειξαν πως στα ηλεκτρόνια αντιστοιχεί πράγματι ένα μήκος κύματος αυτό ακριβώς που προβλέφτηκε από το de Broglie.

Αυτοί εξέτασαν αν πράγματι δέσμη ηλεκτρονίων παράγουν φαινόμενα περίθλασης όταν προσπίπτουν σε κρυστάλλους, όπως οι ακτίνες X





$$p = mu = \frac{h}{\lambda_{deBroglie}}$$

$$\lambda_{deBroglie} = \frac{h}{mu}$$

$$\Delta L = d \sin\Phi_{max} = 1 \lambda$$

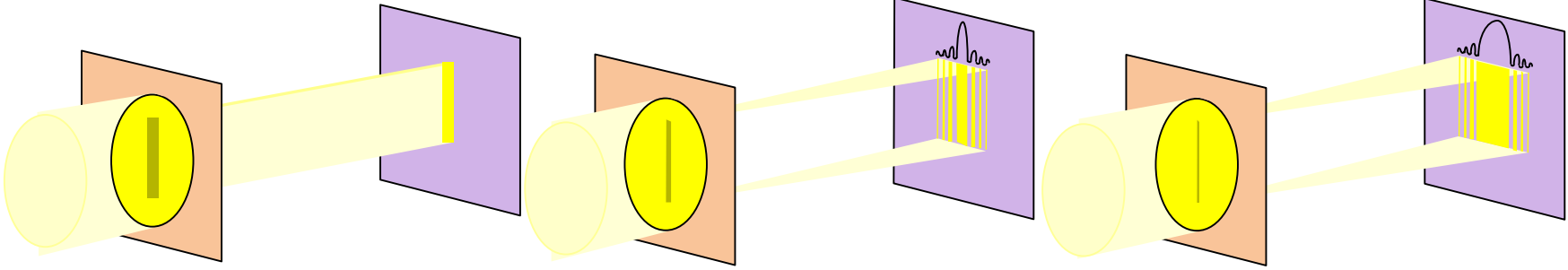
Βρέθηκε πως $\lambda = \lambda_{deBroglie}$

Επομένως στα κινούμενα ηλεκτρόνια αντιστοιχεί πράγματι ένα μήκος κύματος το λ_{deBroglie}

Άρα δέσμες ηλεκτρονίων θα παρουσιάζουν όλα τα φαινόμενα περίθλασης και συμβολής όπως συμβαίνει και στο φως

Περίθλαση ηλεκτρονίων και πιθανότητα και αβεβαιότητα στη θέση και τη κίνησή τους

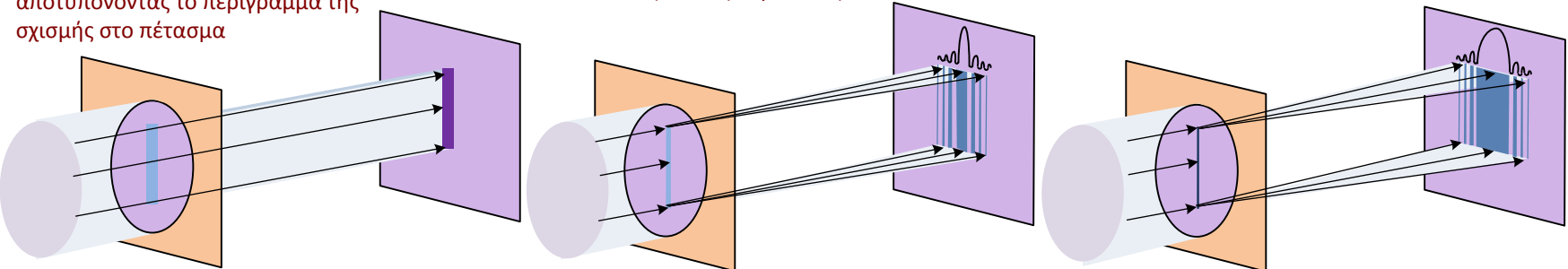
Περίθλαση δέσμης φωτός



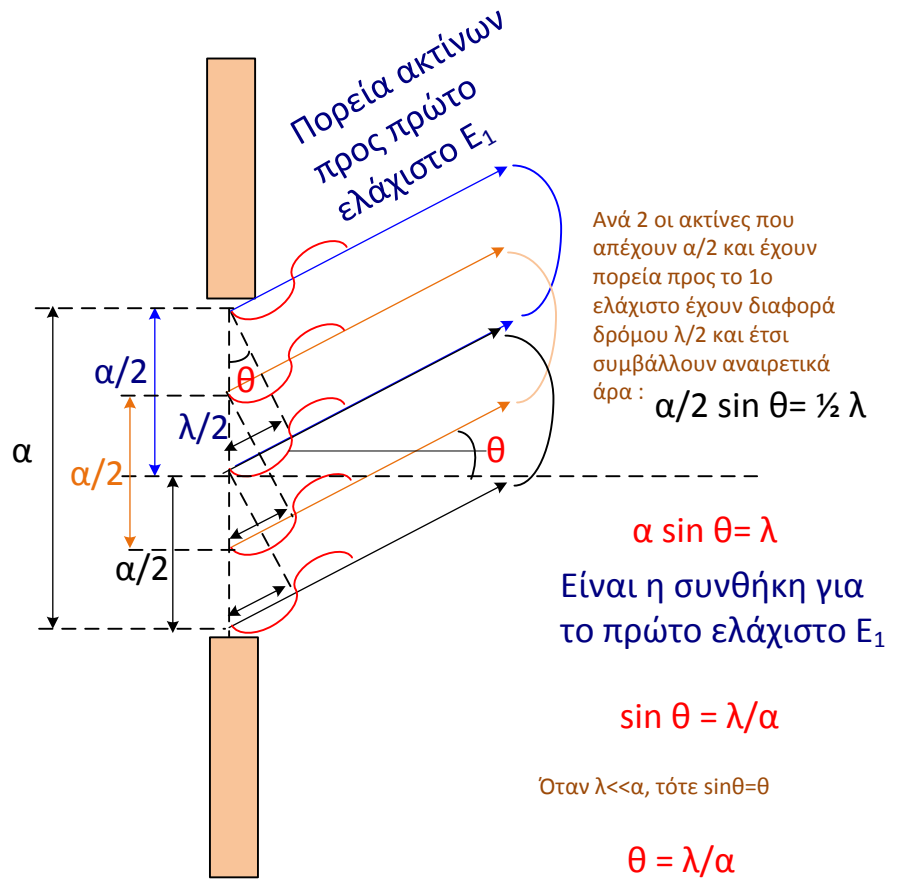
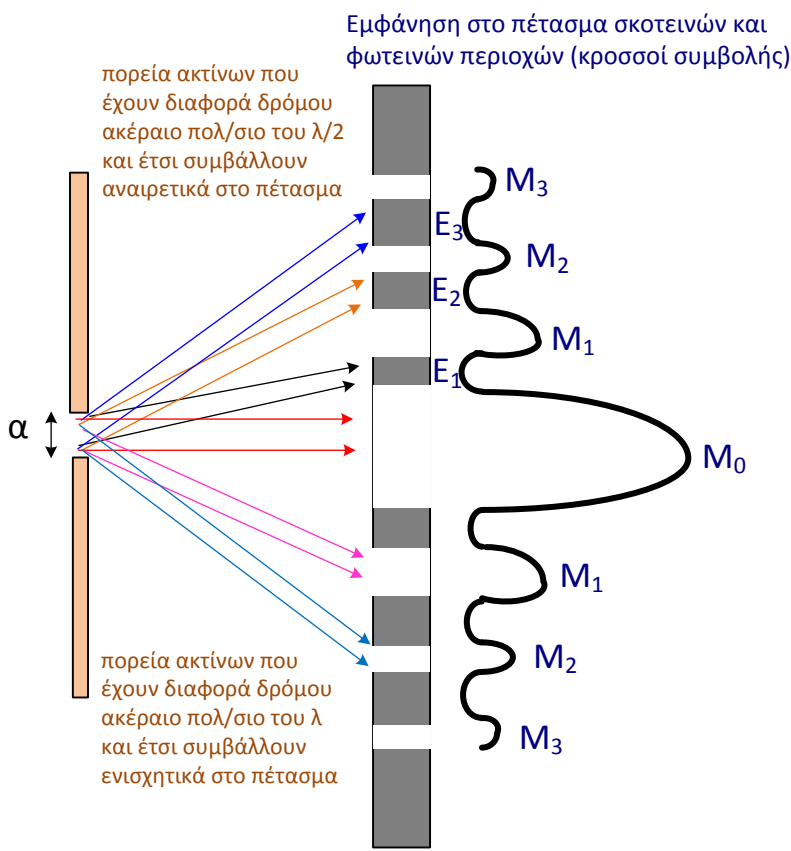
Όταν έχει μεγάλο εύρος η σχισμή τότε η δέσμη φωτός ή ηλεκτρονίων διέρχεται από τη σχισμή χωρίς απόκλιση αποτυπώνοντας το περίγραμμα της σχισμής στο πέτασμα

Όταν το εύρος της σχισμής γίνεται συγκρίσιμο με το μήκος κύματος της δέσμης, τότε η δέσμη φωτός ή ηλεκτρονίων αποκλίνει από την ευθύγραμμη διάδοση και στο πέτασμα εμφανίζονται κροσσοί συμβολής από φωτεινές και σκοτεινές περιοχές αυτή είναι η περίθλαση

Περίθλαση δέσμης ηλεκτρονίων



Περίθλαση φωτός από απλή σχισμή

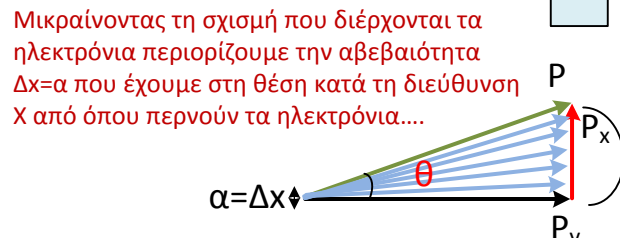
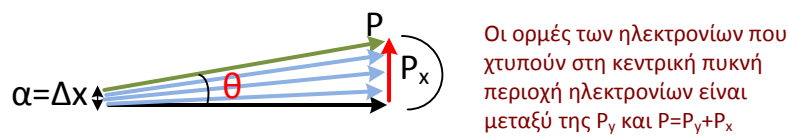
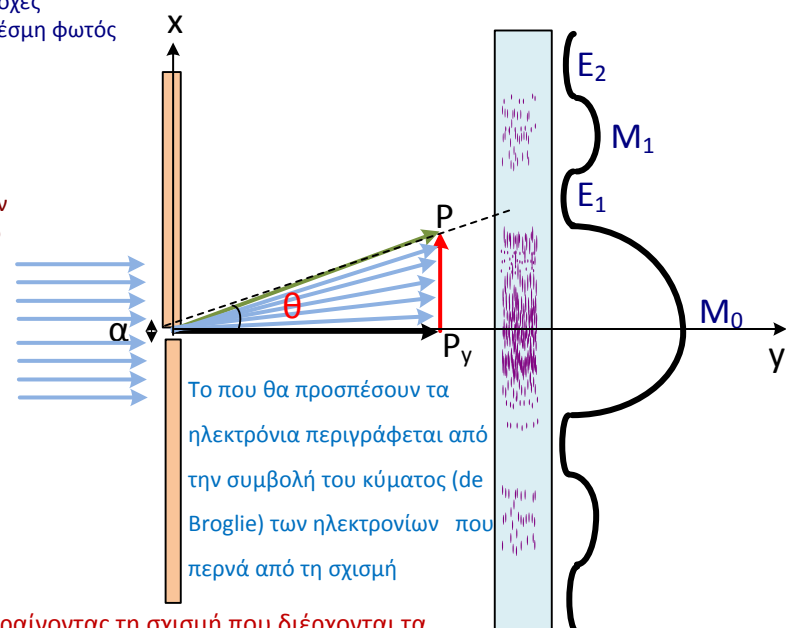
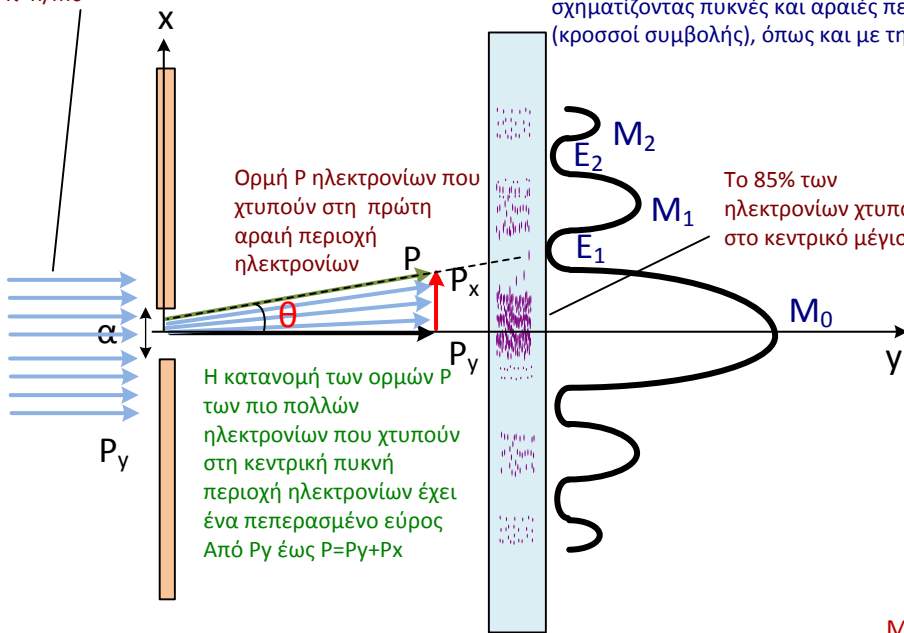


Περίθλαση ηλεκτρονίων από απλή σχισμή

Δέση ηλεκτρονίων στο κενό που παράγονται όπως σε καθοδικό σωλήνα έχουν ένα σχετικά μεγάλο εύρος και επομένως δεν γνωρίζουμε την ακριβή θέση τους, έχουν όμως καθορισμένη ταχύτητα u και ορμή P_y στον άξονα y και επομένως καθορισμένο μήκος κύματος De Broglie $\lambda = h/mu$

Όταν όμως τα ηλεκτρόνια διέλθουν από μια στενή σχισμή α και επομένως περιορίζεται η θέση τους στον άξονα x , τότε η διεύθυνση κίνησής τους που ορίζει την ορμή τους P διευρύνεται προς τη διεύθυνση x και αποκτούν συνιστώσα ορμής στη διεύθυνση x και έτσι η ορμή εκτείνεται σε μια πεπερασμένη περιοχή

Καθώς μικραίνουμε τη σχισμή που διέρχονται τα ηλεκτρόνια η κεντρική πυκνή περιοχή με ηλεκτρόνια στο πέτασμα μεγαλώνει



$P_x = P_y \sin \theta$
 $P_x = P_y \lambda/\alpha$
Αφού $\sin \theta = \lambda/\alpha$ από την συμβολή

$\sin \theta = \lambda/\alpha$
Ελλάτωση του α προκαλεί αύξηση του θ δηλ στη θέση του πρώτου ελαχίστου

Επομένως η αβεβαιότητα ΔP_x στη ορμή θα είναι $\Delta P_x = P_x$

Αφού $\lambda = h/P_y$ De Broglie

$\Delta P_x \geq P_y \lambda/\alpha$

$\Delta P_x \geq h/\alpha$

$\Delta P_x \alpha \geq h$

Όμως η αβεβαιότητα Δx στη θέση θα είναι της τάξεως του πλάτους της σχισμής $\alpha = \Delta x$

$\Delta P_x \Delta x \geq h$

Αν θεωρήσουμε την στατιστική έννοια της αβεβαιότητας που εκφράζεται με τη τυπική απόκλιση, που είναι το εύρος του συνόλου των μετρήσεων από το μέσο όρο, τότε οι αβεβαιότητες της ορμής και της θέσης των ηλεκτρονίων θα σχετίζονται με

$\Delta P_x \Delta x \geq h/2\pi$

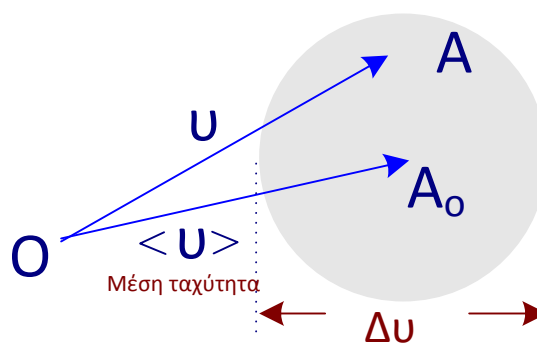
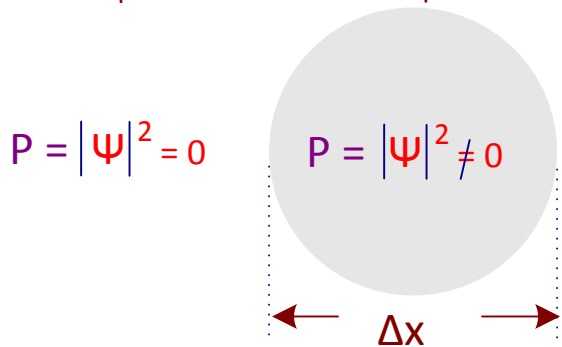
Αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg

όσο ελαττώνω το Δx για να προσδιορίσω κάποια τροχιά τότε μεγαλώνει η απροσδιοριστία της ορμής και της ταχύτητας και το αντίστροφο

Η εικόνα περίθλασης **επιβάλλει να εγκαταλείψουμε την έννοια της τροχιάς**

Η κίνηση περιγράφεται με τη πιθανότητα να βρούμε το σωματίδιο σε κάποια θέση

για τα σωματίδια του μικρόκοσμου



Το σωματίδιο βρίσκεται κάπου στη γκρίζα σφαίρα με εύρος ή απροσδιοριστία Δx

συνεχώς κινείται

με διανύσματα ταχυτήτων που καταλήγουν στη γκρίζα σφαίρα με εύρος ή απροσδιοριστία Δu

αποκλείεται $\Delta x = 0$ & $\Delta u = 0$

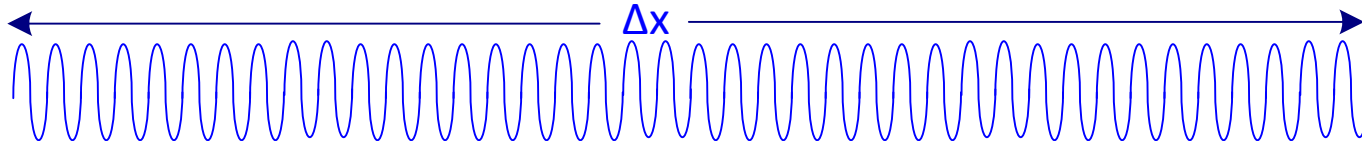
γιατί θα ήξερα ακριβώς τη θέση του σωματιδίου

και θα πρόβλεπα που θα έπεφτε στο πέτασμα

Κυματοπακέτα και αρχή απροσδιοριστίας

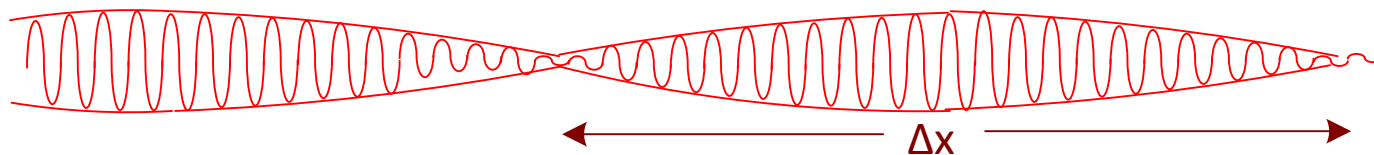
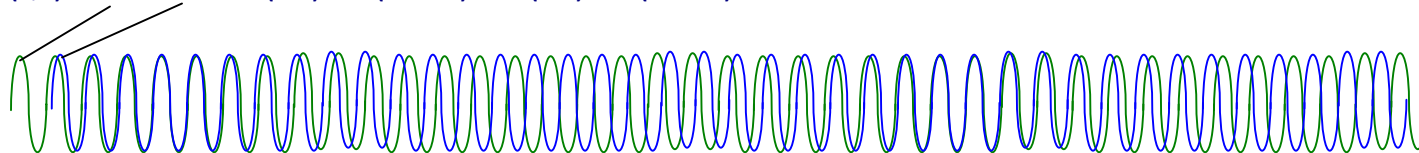
Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να είναι και σωματίδιο και κύμα, αντιστοιχώντας ένα μήκος κύματος λ κατά de Broglie και έτσι έχει καθορισμένη ορμή P , αφού $\lambda = h/P$, και καθόλου απροσδιοριστία $\Delta P = 0$ στην ορμή. Τότε η απροσδιοριστία Δx στη θέση θα είναι άπειρη δηλ το ηλεκτρόνιο θα εκτείνεται σε άπειρη περιοχή.

Ένα ηλεκτρόνιο με καθορισμένη ορμή P τότε $\lambda = h/P$ και το μήκος κύματός του θα εκτείνεται σε άπειρη περιοχή.



Αν στο ηλεκτρόνιο αντιστοιχήσουμε από συνολικό κύμα γ από το άθροισμα ή υπέρθεση 2 ημιτονοειδών κυμάτων με μήκη κύματος λ_1 και λ_2 με πολύ μικρή διαφορά

$$\gamma(r,t) = \gamma_1 + \gamma_2 = A(k_1) \sin(k_1 r) + A(k_2) \sin(k_2 r) \quad \text{με } k_1 = 2\pi/\lambda_1 \text{ και } k_2 = 2\pi/\lambda_2$$



προκύπτει ένα κύμα με αβεβαιότητα στην ορμή, αφού αντιστοιχούν 2 ορμές: $P_1 = h/\lambda_1$ και $P_2 = h/\lambda_2$, εντοπισμένο σε διάφορες περιοχές Δx του χώρου. Ένα τέτοιο κύμα λέγεται: **Κυματοπακέτο**

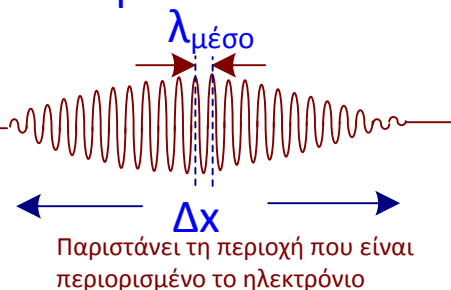
Ένα κύμα εντοπισμένο σε μία μόνο περιορισμένη περιοχή του χώρου Δx είναι:

$$\Psi(r,t) = \sum A(k) \sin(k r)$$

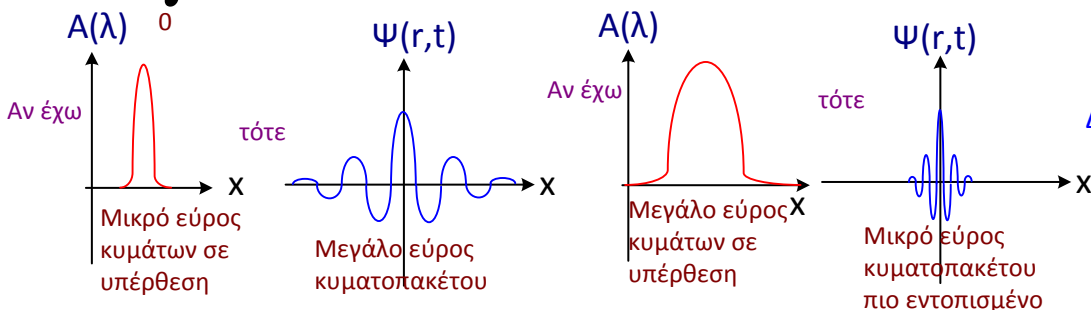
Αντί για άθροισμα γράφεται και σαν ολοκλήρωμα

Προκύπτει από το άθροισμα ή υπέρθεση πάρα πολλών ημιτονοειδών κυμάτων με διάφορα λ .

$$\Psi(r,t) = \int_0^\infty A(\lambda) \sin(2\pi/\lambda x) d\lambda \quad \text{ολοκλήρωμα Fourier}$$



Παριστάνει τη περιοχή που είναι περιορισμένο το ηλεκτρόνιο



Δηλ προκύπτει η αρχή της απροσδιοριστίας

Αφού μικρό (μεγάλο) εύρος κυμάτων σε υπέρθεση σημαίνει μικρό (μεγάλο) εύρος ή αβεβαιότητα ορμών ΔP στην οποία αντιστοιχεί μεγάλη (μικρή) αβεβαιότητα θέσης

Αν Δk : το εύρος των $k=2\pi/\lambda$ που συμμετέχουν στην άθροιση

$$\Psi(r,t) = \sum A(k) \sin(k r)$$

τότε ισχύει : $\Delta x \Delta k \cong 1$ Αρχή απροσδιοριστίας

Αν ένα κύμα είναι εντοπισμένο σε μικρή περιοχή $\Delta x=0$ του χώρου τότε $\Delta k=\infty$ μεγάλο.

Αν ένα κύμα καταλαμβάνει μεγάλο χώρο $\Delta x = \infty$ τότε $\Delta k=\Delta\lambda=0$.

1 απλό ημιτονοειδές κύμα με $1 (\lambda)$

Αφού $P = \hbar k$ τότε ισχύει : $\Delta P = \hbar \Delta k$ $\Delta x \Delta k \cong 1$

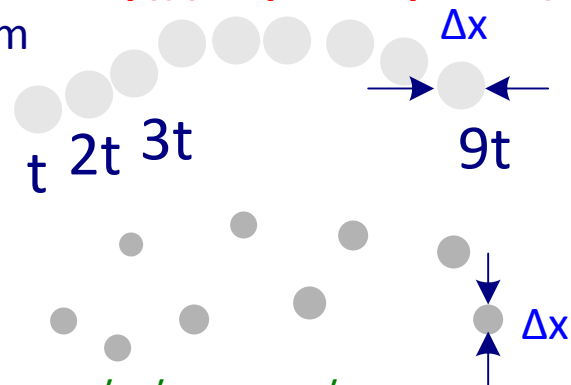
$\Delta x = 0$ τότε $\Delta u = \infty$

$$\Delta x \Delta P \cong \hbar$$

$$\Delta x \Delta u \cong \hbar/m$$

Αρχή απροσδιοριστίας

όσο ελαττώνω το Δx για να προσδιορίσω κάποια τροχιά τότε μεγαλώνει η απροσδιοριστία της ταχύτητας

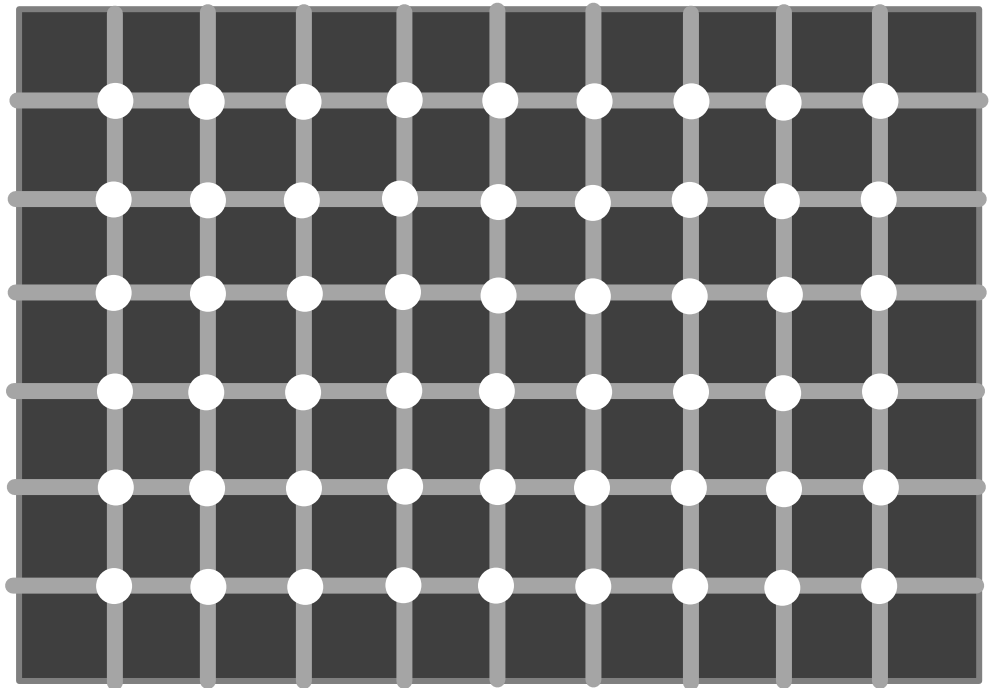


και η τροχιά γίνεται πιο ακανόνιστη

Παράδειγμα με τη βοήθεια οπτικής ψευδαίσθησης όπου δείχνει πως η πράξη της μέτρησης επηρεάζει το κβαντικό σύστημα

Παρατηρώντας μια οποιαδήποτε λευκή κουκκίδα τότε δίπλα της εμφανίζονται μαύρες κουκκίδες. Αν στραφούμε να δούμε τις εμφανιζόμενες μαύρες κουκκίδες τότε αυτές εξαφανίζονται.

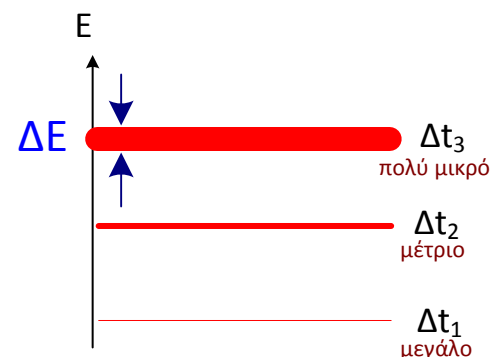
Έτσι και η πράξη της μέτρησης μπορεί να καστρέψει τη κβαντική κατάσταση



Αβεβαιότητα ή απροσδιοριστία και στη ενέργεια

Προκύπτει πως υπάρχει και αβεβαιότητα στη ενέργεια ΔE η οποία εξαρτάται από το χρονικό διάστημα Δt που βρίσκεται το σύστημα σε μια δεδομένη κατάσταση και εκφράζεται από

$$\Delta E \Delta t \cong \hbar$$



$$\Delta t_1 > \Delta t_2 > \Delta t_3$$

Αρχή απροσδιοριστίας στο μικρόκοσμο είναι καθοριστική διαδραματίζει θετικό ρόλο για τη σταθερότητα της ύλης

Κατά τη κλασική φυσική η ολική ενέργεια $E = E_{κιν} + E_{δυν}$ ελαχιστοποιείται όταν

Στο μικρόκοσμο δεν πραγματοποιείται

$$E_{κιν} = 0$$

$$E_{δυν} = \min$$

$$p = 0$$

σώμα στη θέση ισορροπίας x_0

αποκλείεται ταυτόχρονος προσδιορισμός σωματιδίου στο x_0 και $p=0$

δεν οδηγεί σε ελαχιστοποίηση της ενέργειας

Αν το σωματίδιο ήταν στη θέση ισορροπίας x_0 $\Delta x=0$

θέση ισορροπίας x_0 ο πυρήνας

$$E_{δυν} = \min \quad \text{τότε} \quad \Delta P = \infty \quad \text{και} \quad E_{κιν} = \infty$$

Αν το σωματίδιο είχε

$$E_{κιν} = 0 \quad \text{τότε} \quad \Delta P = 0 \quad \text{και} \quad \Delta x = \infty$$

$$E_{δυν} = \infty$$

Δηλ.

$$E_{δυν} = \min \quad \longrightarrow \quad E_{κιν} = \infty$$
$$E_{κιν} = 0 \quad \longrightarrow \quad E_{δυν} = \infty$$

το ηλεκτρόνιο σταθεροποιείται γύρω στο πυρήνα

έτσι ώστε να κινείται γύρω από τη θέση $E_{δυν} = \min$

και έτσι δεν πέφτει στο πυρήνα

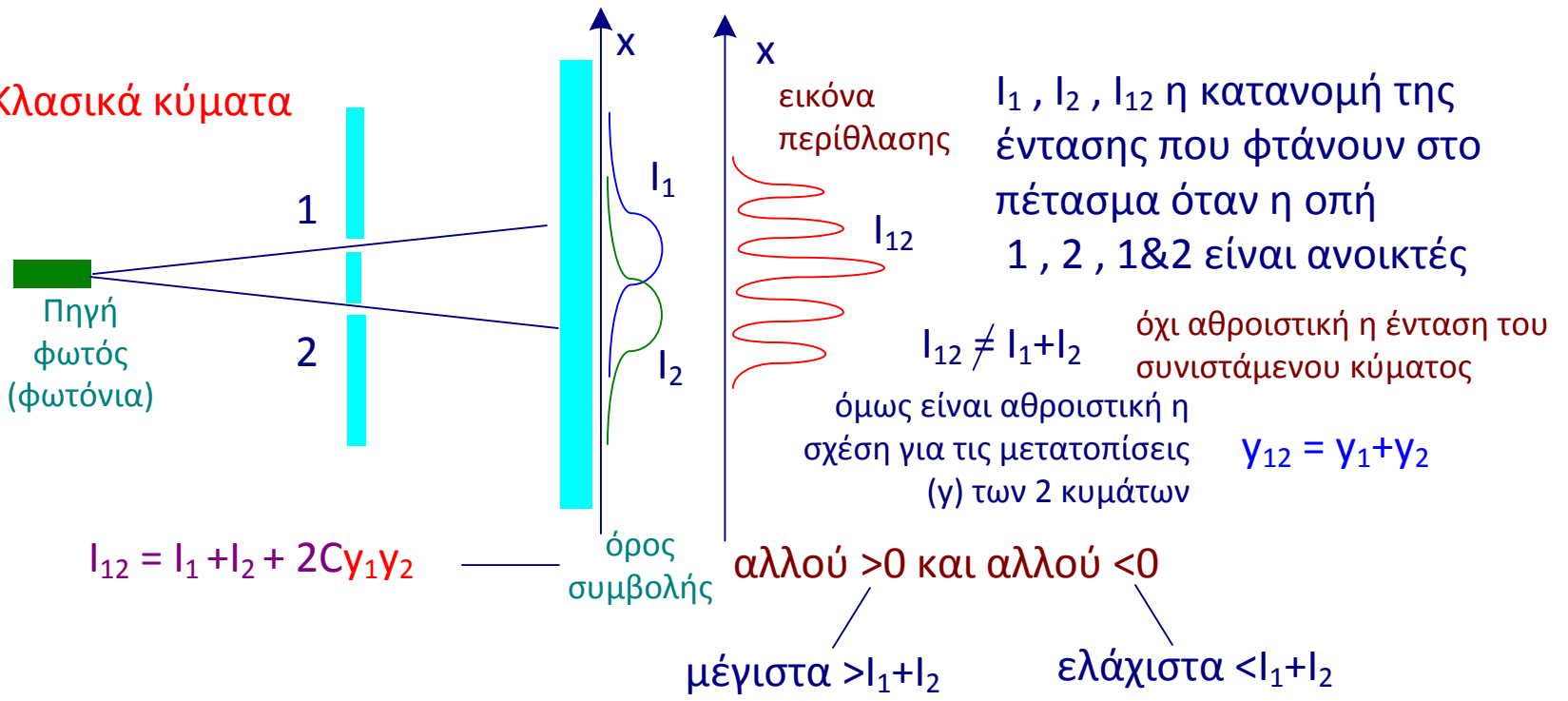
Η ελαχιστοποίηση της ενέργειας στο μικρόκοσμο πραγματοποιείται

διαφορετικά από $E_{δυν} = \min$ $E_{κιν} = 0$

και μέσα στα πλαίσια της αρχής της απροσδιοριστίας

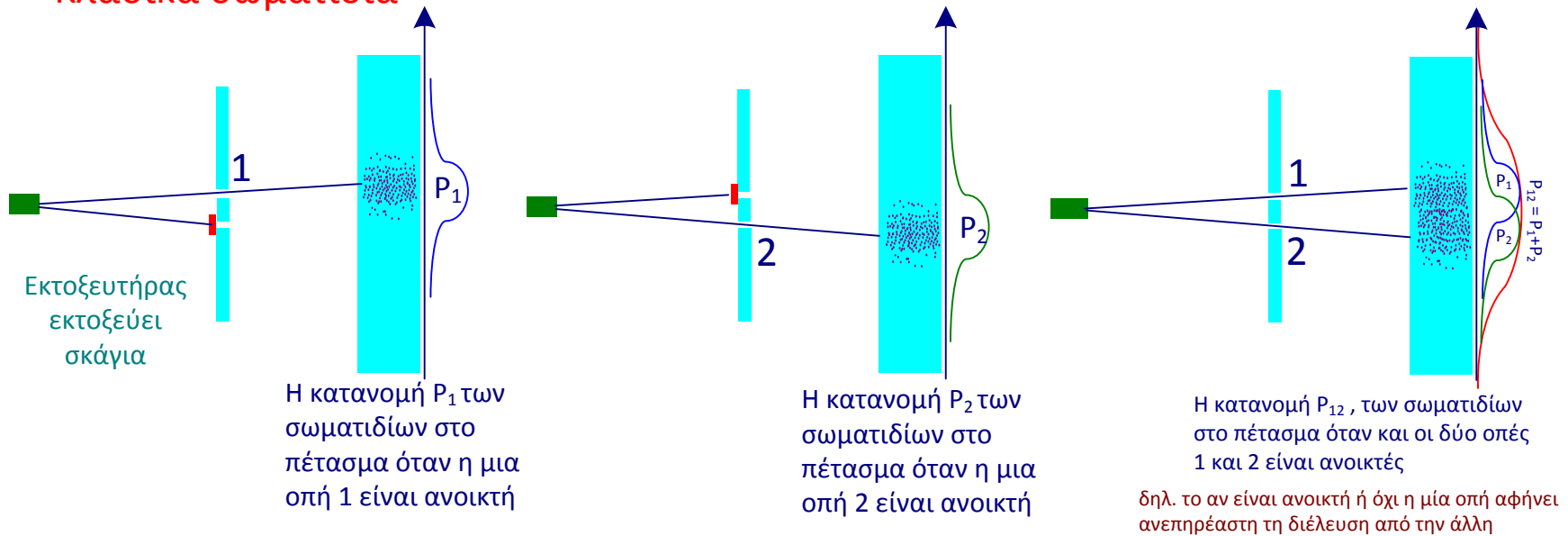
Συμβολή φωτός από δύο σχισμές

Κλασικά κύματα

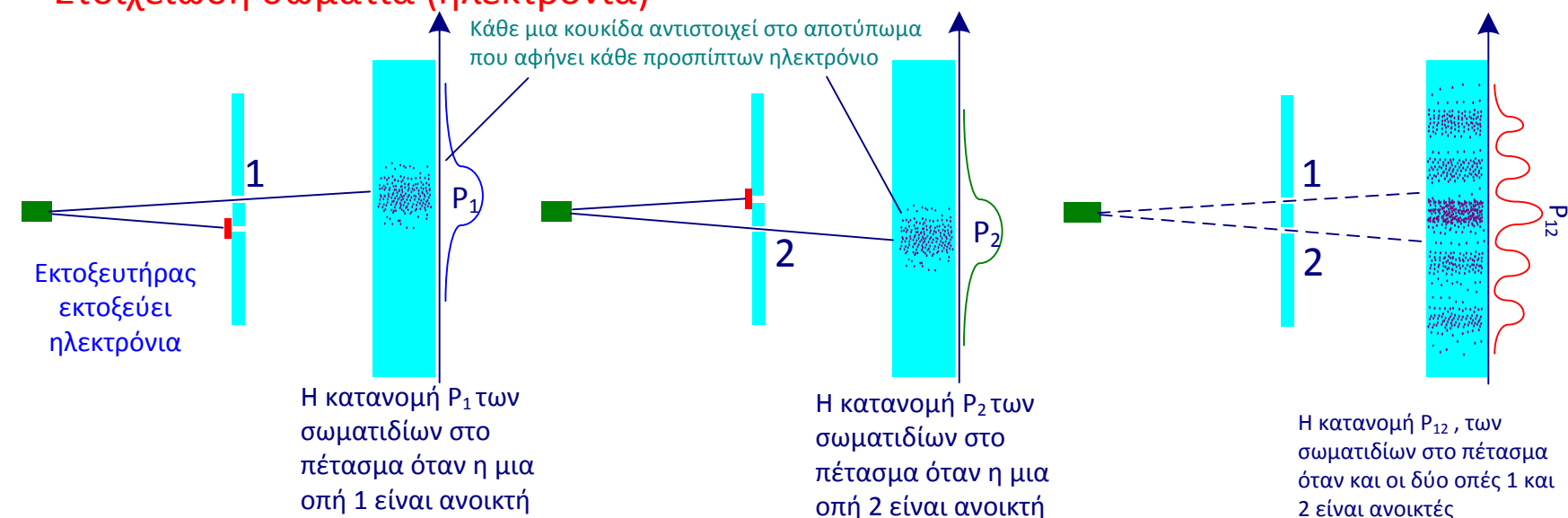


Τι είναι η διπλή φύση (κυματοσωματιδιακός χαρακτήρας) της ύλης ?

Κλασικά σωματίδια



Στοιχειώδη σωματίδια (ηλεκτρόνια)

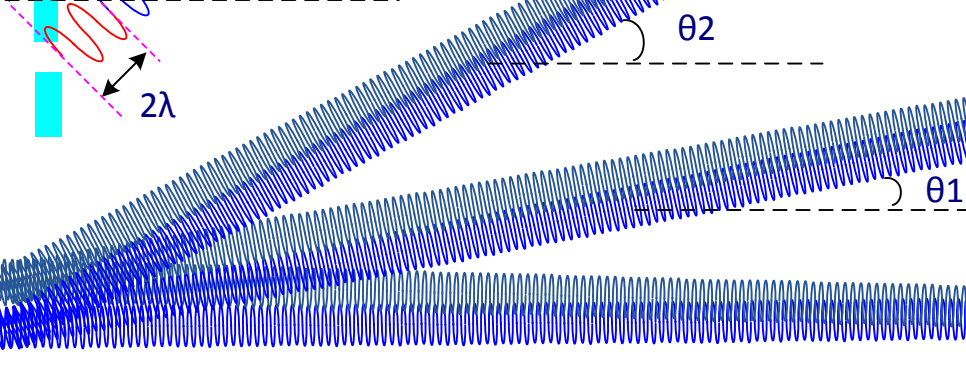
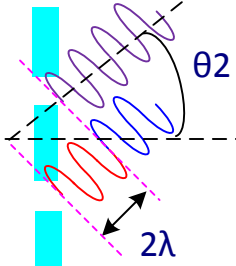


δηλ. τα ηλεκτρόνια είναι σωματίδια αλλά δεν ακολουθούν κάποια τροχιά όπως μακροσκοπικά σώματα (π.χ. σκάγια) για να φθάνουν στο πέτασμα παρουσιάζουν το χαρακτηριστικό σχήμα της κυματικής συμβολής

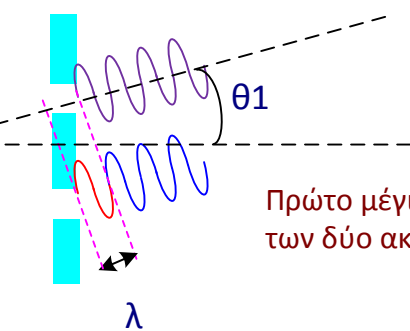
Συμβολή φωτός που περνά από 2 σχισμές

Τα 2 κύματα του προσπίπτοντος φωτός που διαπερνούν τις 2 σχισμές συμβάλλουν και δίνουν την εικόνα της συμβολής με μέγιστα ακτινοβολία σε ορισμένες γωνίες $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ όπου τα κύματα συμβάλλουν ενισχυτικά

δεύτερο μέγιστο σε γωνία θ_2 όταν η διαφορά δρόμου των δύο ακτίνων από τις σχισμές είναι 2λ



Κεντρικό μέγιστο σε γωνία $\theta_0=0$ όταν η διαφορά δρόμου των δύο ακτίνων από τις σχισμές είναι 0λ



Πρώτο μέγιστο σε γωνία θ_1 όταν η διαφορά δρόμου των δύο ακτίνων από τις σχισμές είναι 1λ

Κι εδώ η εικόνα της περίθλασης μας επιβάλλει να περιγράψουμε τη κίνηση των ηλεκτρονίων με κάποια κυματική συνάρτηση Ψ ανάλογη

Ανάλογα και τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στις θέσεις των μεγίστων όπου το 2 κύματα Ψ_1 και Ψ_2 κατά De Broglie των ηλεκτρονίων που διέρχονται από τις 2 σχισμές συμβάλλουν ενισχυτικά.

δηλ. τα ηλεκτρόνια είναι σωματάρια αλλά δεν ακολουθούν κάποια τροχιά όπως μακροσκοπικά σώματα (π.χ. σκάγια) για να φθάνουν στο πέτασμα

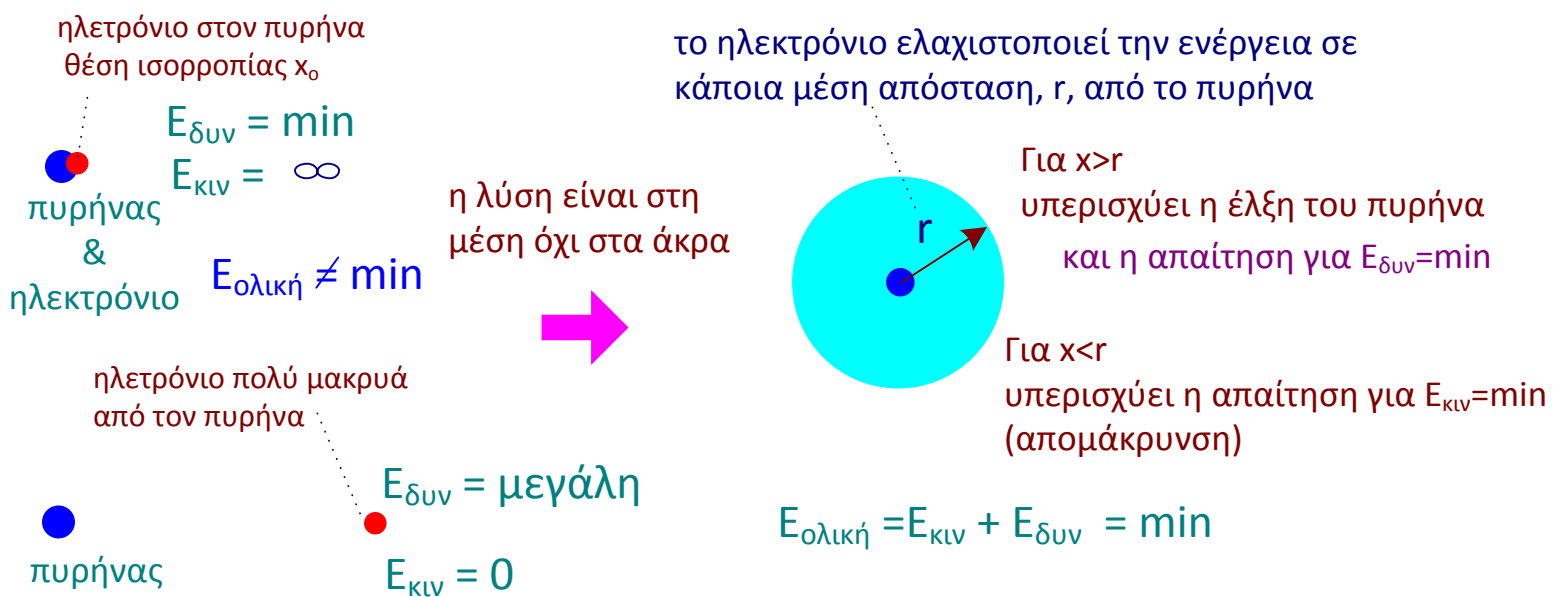
Αν τα ηλεκτρόνια ακολουθούσαν κάποια τροχιά τότε δεν θα πέρανε την εικόνα περίθλασης

Η εικόνα της περίθλασης μας επιβάλλει να περιγράψουμε τη κίνηση των ηλεκτρονίων με κάποια κυματική συνάρτηση Ψ ανάλογη της μετατόπισης y των κυμάτων

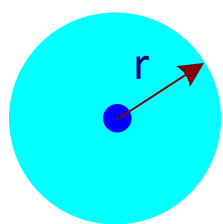
Η κυματική συνάρτηση Ψ δεν έχει κάποια φυσική σημασία όμως το $P = |\Psi|^2$ φανερώνει τη πιθανότητα να βρούμε το ηλεκτρόνιο σε κάποια θέση όπως το $I = Cy^2$ εκφράζει την ένταση του κύματος

Δηλ στο πέτασμα μετρούμε την ένταση I του κύματος που είναι ανάλογη της y^2

ή τον αριθμό των ηλεκτρονίων που συνδέεται με την πιθανότητα P να βρούμε τα ηλεκτρόνια σε κάποια θέση του πετάσματος



Να βρεθεί η ελάχιστη ενέργεια για το άτομο του υδρογόνου χρησιμοποιώντας την αρχή της απροσδιοριστίας.



$$\Delta P \cong \hbar / \Delta x = \hbar / r$$

Αρχή απροσδιοριστίας

0 ακίνητο άτομο

$$(\overline{P})^2 = (\overline{P})^2 + \Delta P^2 \quad (\overline{P})^2 = \Delta P^2$$

$$E_{\kappa\iota\nu} = \Delta P^2 / 2m \cong \hbar^2 / 2mr^2$$

Το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται στο εσωτερικό μιάς νοητής σφαίρας ακτίνας $r = \Delta x$ γύρω από το πυρήνα

$$E_{\text{ολική}} = E_{\kappa\iota\nu} + E_{\delta\upsilon\nu} \cong \hbar^2 / 2mr^2 - e^2 / r$$

$$E_{\text{ολική}} = \min \quad \text{για} \quad r = \hbar^2 / me^2 \quad E_{\min} = me^4 / \hbar^2$$

ακτίνα Bohr

ίση με αυτή που προβλέπει η θεωρία του Bohr

Αν η κατάσταση του συστήματος

περιγράφεται από το

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

μπορεί να σημαίνει πχ πως

και κάθε ηλεκτρόνιο έχει 50% πιθανότητα να διέλθει από τη σχισμή 1 ή 2

Τότε λέμε πως το ηλεκτρόνιο ευρίσκεται στην υπέρθθεση από δύο διαφορετικές πορείες ταυτόχρονα, δηλ. να διέρχεται από τη σχισμή 1 και από τη σχισμή 2 ταυτόχρονα

Στην ουσία το σωματίο ηλεκτρόνιο περιγράφεται από μία κυματοσυνάρτηση που διέρχεται και από τις 2 σχισμές και όχι το σωματίο.

Γενικότερα και η $\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2$ περιγράφει

τη κατάσταση του συστήματος

και σημαίνει πως κάθε ηλεκτρόνιο έχει πιθανότητα

$|c_1|^2$ να διέλθει από τη σχισμή 1

$|c_2|^2$ να διέλθει από τη σχισμή 2

Δηλ. ισχύει η

Αρχή επαλληλίας

με

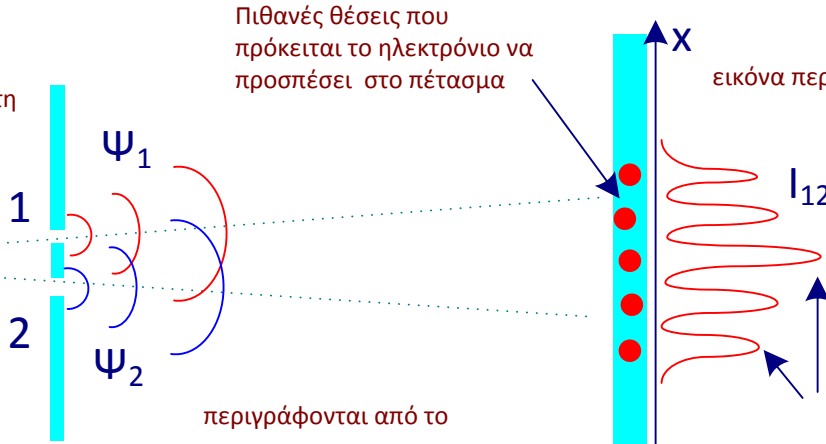
$$|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$$

Κυματοσωματίδια

αντί για τη τροχιά του ηλεκτρονίου τώρα η πιθανότητα να βρεθεί κάπου το ηλεκτρόνιο μπορεί να περιγράψει τη κίνησή του

Κάθε ηλεκτρόνιο έχει 50% πιθανότητα να διέλθει από τη σχισμή 1 ή 2

Πηγή ηλεκτρονίων



Πιθανές θέσεις που πρόκειται το ηλεκτρόνιο να προσπέσει στο πέτασμα

η πιθανότητα περιγράφεται με μία κυματοσυνάρτηση

η ένταση I_{12} του συνολικού κύματος τη συμβολής των 2 κυμάτων Ψ_1, Ψ_2

$I_{12} = C \Psi_{12}^2$ περιγράφει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που πέφτουν στις διάφορες θέσεις του πετάσματος

περιγράφονται από το

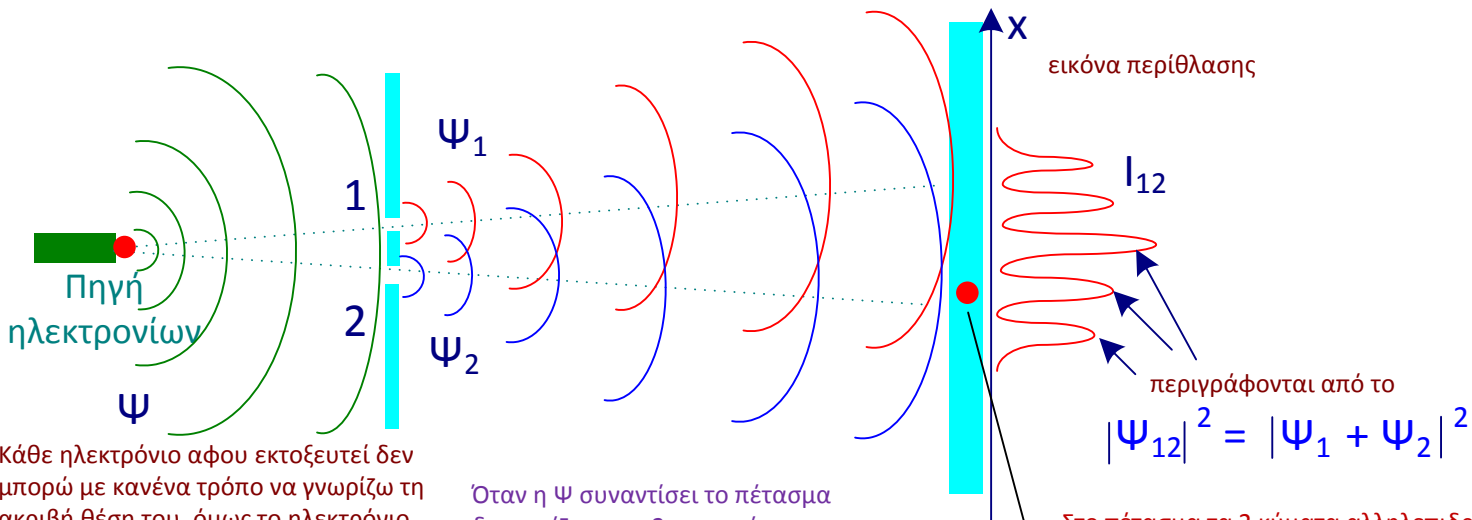
$$|\Psi_{12}|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

δηλ. σαν την ένταση I_{12} του συνολικού κύματος που φαίνεται να προκύπτει από τη υπέρθεση ή συμβολή 2 συνιστουσών κυμάτων Ψ_1, Ψ_2 που εκπέμπονται από τις σχισμές 1, 2 της κυματοσυνάρτησης των σωματίων

μέγιστα μεγάλη πιθανότητα τα ηλεκτρόνια για να προσπέσουν

Ακόμα κι αν τα ηλεκτρόνια εκτοξεύονται ένα-ένα, τότε πάλι παίρνουμε την εικόνα περίθλασης...

...τότε η κυματοσυνάρτηση Ψ_{12} του ηλεκτρονίου αποτελούμενη από την υπέρθεση των συνιστουσών κυμάτων Ψ_1 και Ψ_2 κατόπιν της συμβολής τους καθορίζει σε ποια θέση στο πέτασμα έχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί



Κάθε ηλεκτρόνιο αφού εκτοξευτεί δεν μπορώ με κανένα τρόπο να γνωρίζω τη ακριβή θέση του, όμως το ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται σα κύμα και όχι σαν σωματίο και περιγράφεται από τη κυματοσυνάρτησή του Ψ η οποία επεκτείνεται σε όλο το χώρο

Όταν η Ψ συναντήσει το πέτασμα διαχωρίζεται σε 2 συνιστώσες ...
...και το ηλεκτρόνιο λέμε ότι είναι στη υπέρθεση 2 καταστάσεων Ψ_1 και Ψ_2 ...

..δεν μπορώ γνωρίζω αν το ηλεκτρόνιο πέρασε από τη μια ή την άλλη σχισμή ή αν πέρασε και από τις 2!!!

Το ηλεκτρόνιο στο δρόμο του προς το πέτασμα είναι κύμα και όχι σωματίδιο, δηλ. το ηλεκτρόνιο ως κύμα πέρασε και από τις 2 σχισμές.

εικόνα περίθλασης

I_{12}

$$|\Psi_{12}|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$$

Στο πέτασμα τα 2 κύματα αλληλεπιδρούν με το πέτασμα και τότε αποκαλύπτεται ο σωματιδιακός χαρακτήρας του ηλεκτρονίου αφήνοντας ένα αποτύπωμα σε μια τυχαία θέση από τις θέσεις όπου η ένταση $I_{12} = |\Psi_{12}|^2$ της συμβολής των 2 κυμάτων έχει μέγιστο

Τι συμβαίνει με τη διαδικασία της μέτρησης?

...τότε λέμε ότι έχουμε κατάρευση της κυματοσυνάρτησης $\Psi_1=0$ και έτσι το ηλεκτρόνιο δεν είναι πλέον στη υπέρθεση 2 καταστάσεων Ψ_1 και Ψ_2

Αν τοποθετήσω ανιχνευτή ακριβώς μετά τη σχισμή 2....
..αφού αποκαλύπτεται ότι το ηλεκτρόνιο δεν πέρασε από την 1 αλλά από τη 2, παύει να υπάρχει σε υπέρθεση 2 καταστάσεων και έτσι συμπεριφέρεται πλέον σαν σωματίο. Άρα $\Psi_1=0$ και $\Psi_{12}=\Psi_2$

Αν ο ανιχνευτής ευρίσκεται ακριβώς μετά τη σχισμή 2....
..αφού αποκαλύπτεται ότι το ηλεκτρόνιο δεν πέρασε από την 2 αλλά από τη 1, παύει να υπάρχει σε υπέρθεση 2 καταστάσεων και έτσι συμπεριφέρεται πλέον σαν σωματίο. Άρα $\Psi_2=0$ και $\Psi_{12}=\Psi_1$

Αν τοποθετήσω ανιχνευτή ακριβώς μετά τη σχισμή 1....
...τότε η κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου αλληλεπιδρά με τον ανιχνευτή και έχουμε κατάρευση της κυματοσυνάρτησης $\Psi_1=0$ και έτσι το ηλεκτρόνιο δεν είναι πλέον στη υπέρθεση 2 καταστάσεων Ψ_1 και Ψ_2

..αφού αποκαλύπτεται ότι το ηλεκτρόνιο δεν πέρασε από την 1 αλλά από τη 2, παύει να υπάρχει σε υπέρθεση 2 καταστάσεων και έτσι συμπεριφέρεται πλέον σαν σωματίο. Άρα $\Psi_1=0$ και $\Psi_{12}=\Psi_2$

Η εικόνα της περίθλασης θα καταστραφεί

..κατόπιν το ηλεκτρόνιο θα ταξιδέψει σαν σωματίο και θα φθάσει στη περιοχή απέναντι από τη σχισμή 2 όπως και όταν σχισμή 2 ήταν κλειστή και η εικόνα της συμβολής θα καταστραφεί

Η εικόνα της περίθλασης θα καταστραφεί...

Το ηλεκτρόνιο θα ταξιδέψει σαν σωματίο και θα φθάσει στη περιοχή απέναντι από τη σχισμή 1 όπως και όταν σχισμή 1 ήταν κλειστή και η εικόνα της συμβολής θα καταστραφεί

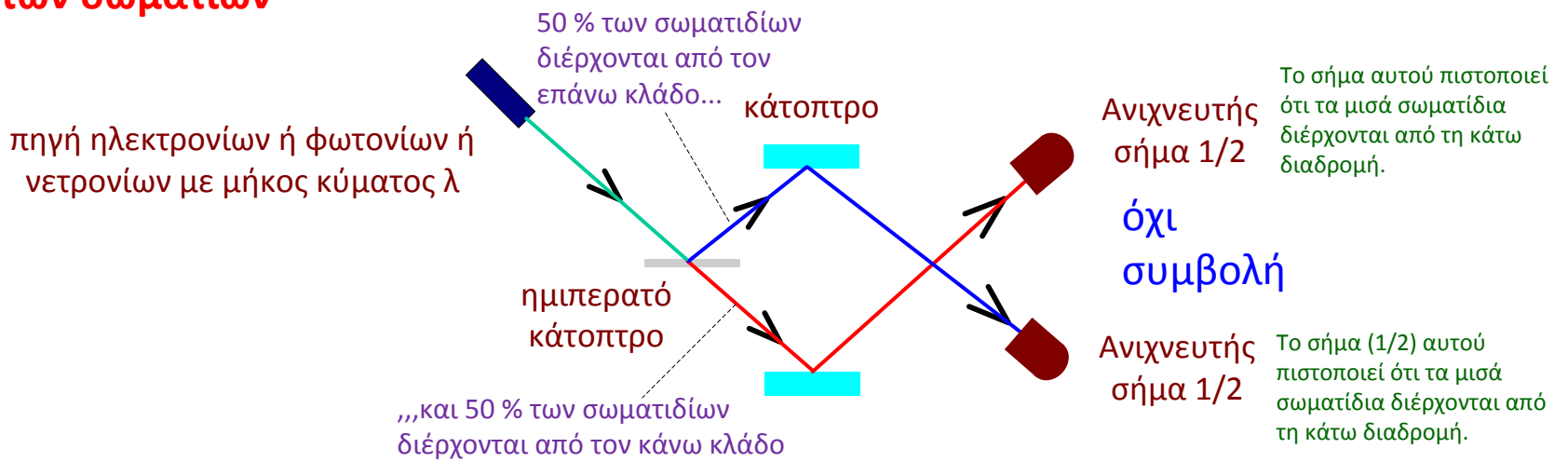
Η εικόνα της περίθλασης θα καταστραφεί.

Το ηλεκτρόνιο θα ταξιδέψει σαν σωματίο και θα φθάσει στη περιοχή απέναντι από τη σχισμή 2 όπως και όταν σχισμή 1 ήταν κλειστή και η εικόνα της συμβολής θα καταστραφεί

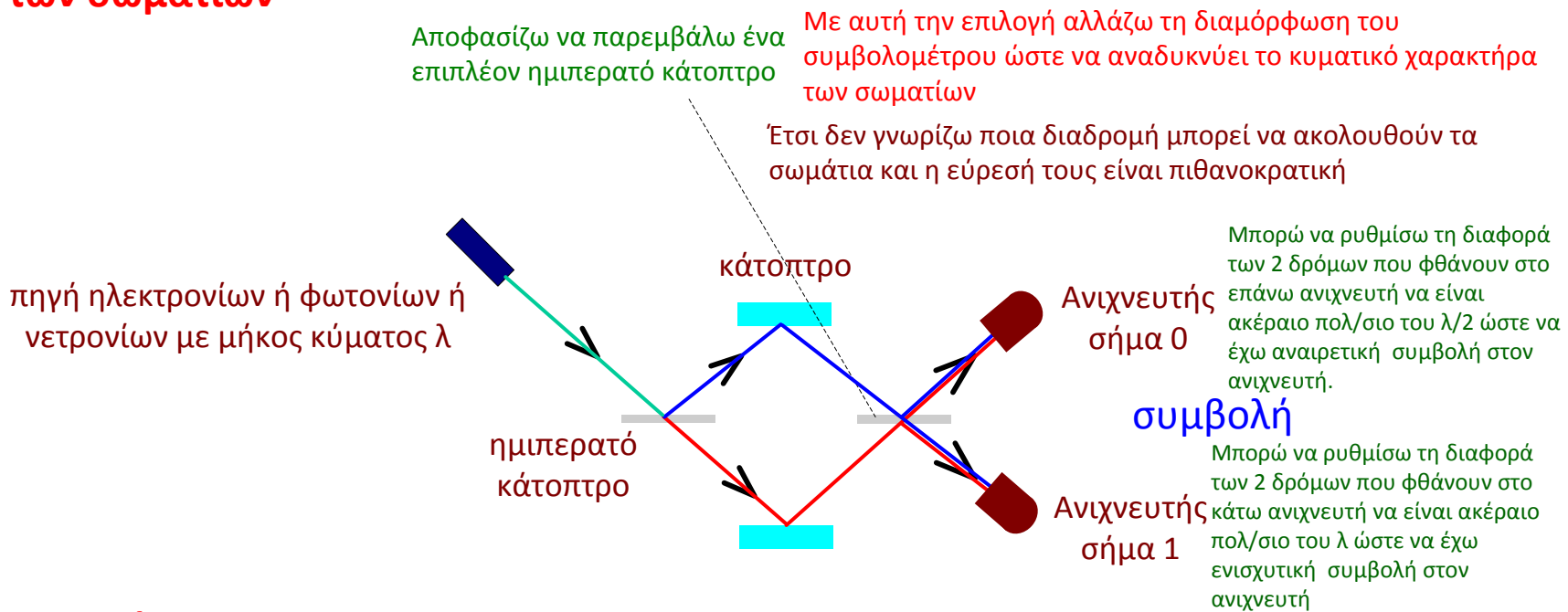
Εναλλακτικό πείραμα των 2 σχισμών

Συμβολόμετρα φωτός ή σωματιδίων

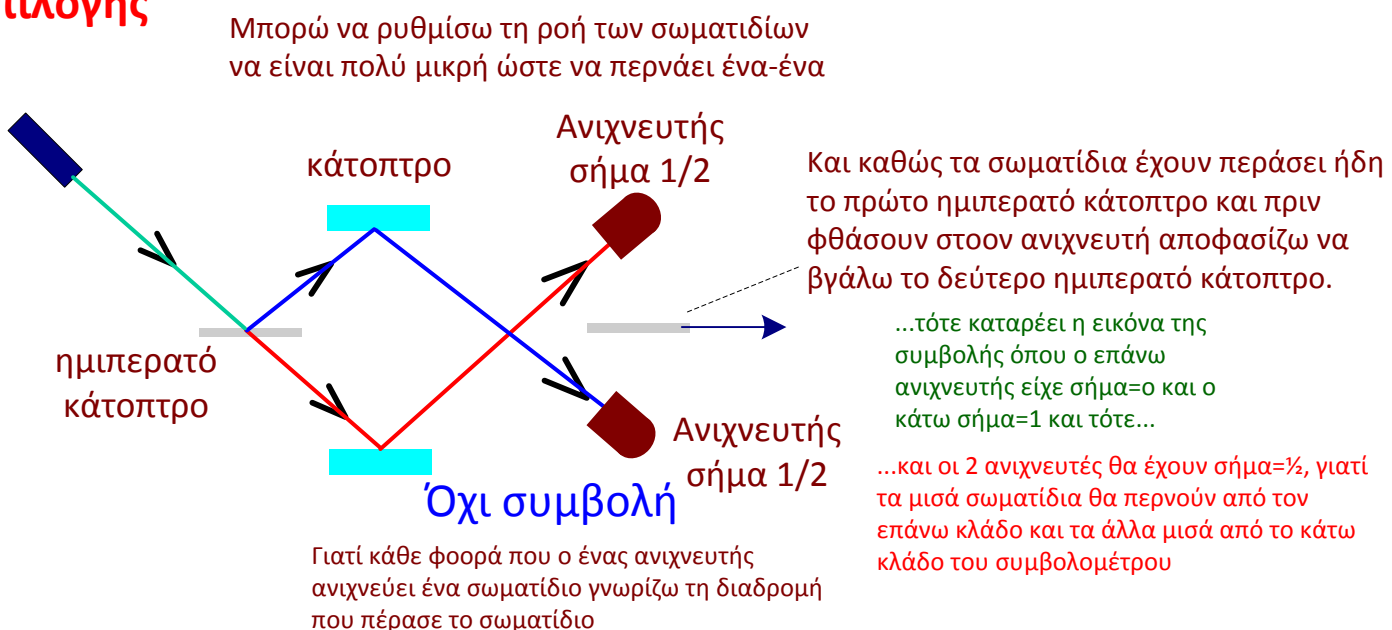
Διαμόρφωση του συμβολομέτρου αναδुकνύει το σωματιδιακό χαρακτήρα των σωματίων



Διαμόρφωση του συμβολομέτρου αναδुकνύει το κυματικό χαρακτήρα των σωματίων

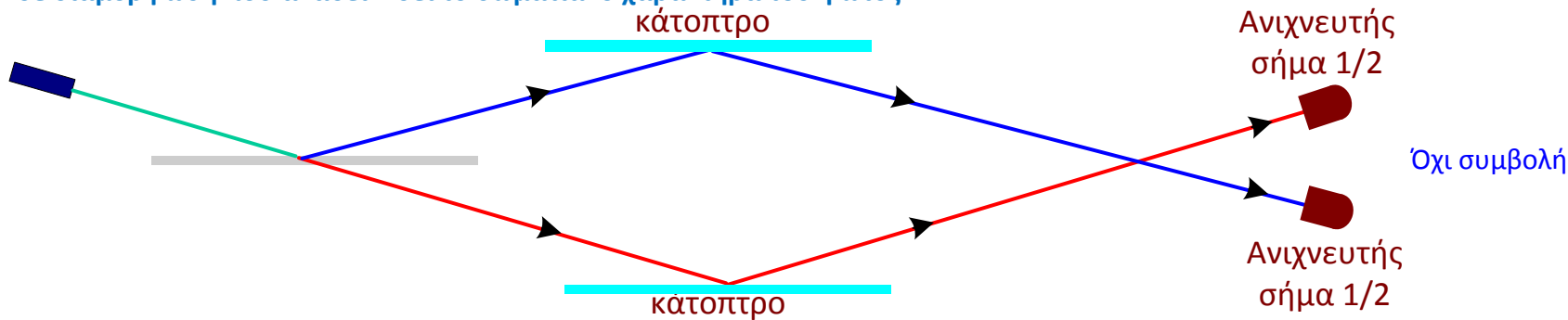


Πείραμα καθυστερημένης επιλογής

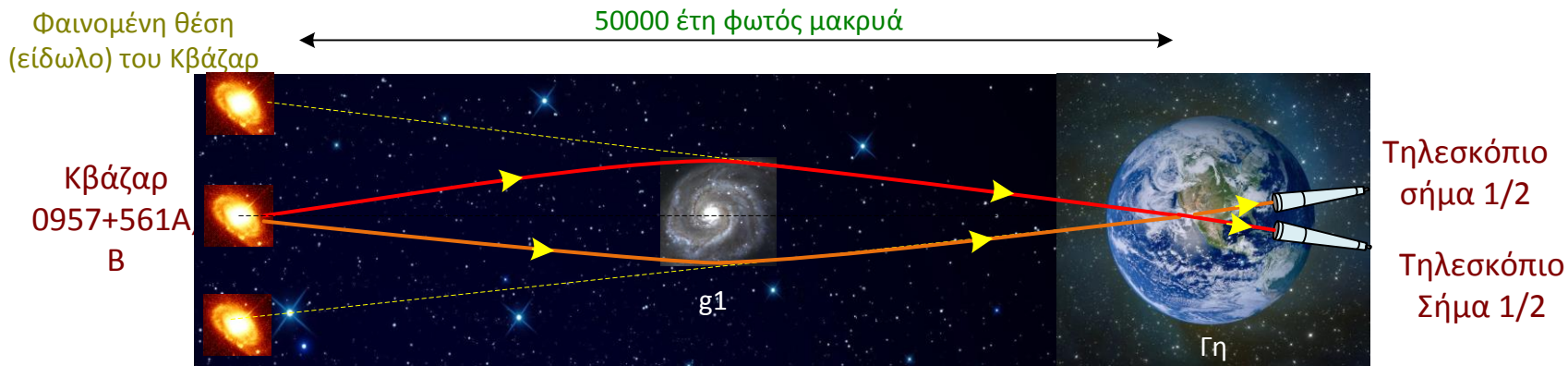


Πείραμα καθυστερημένης επιλογής σε κοσμική κλίμακα

Συμβολόμετρα φωτός στο εργαστήριο σε διαμόρφωση που αναδεικνύει το σωματιακό χαρακτήρα του φωτός

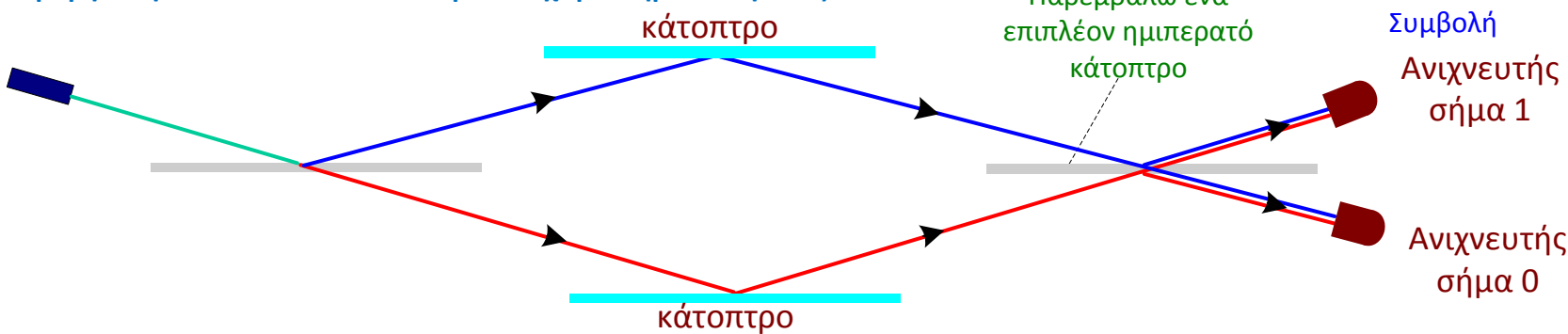


Συμβολόμετρα φωτός σε κοσμική κλίμακα στο διάστημα που αναδεικνύει το σωματιακό χαρακτήρα του φωτός

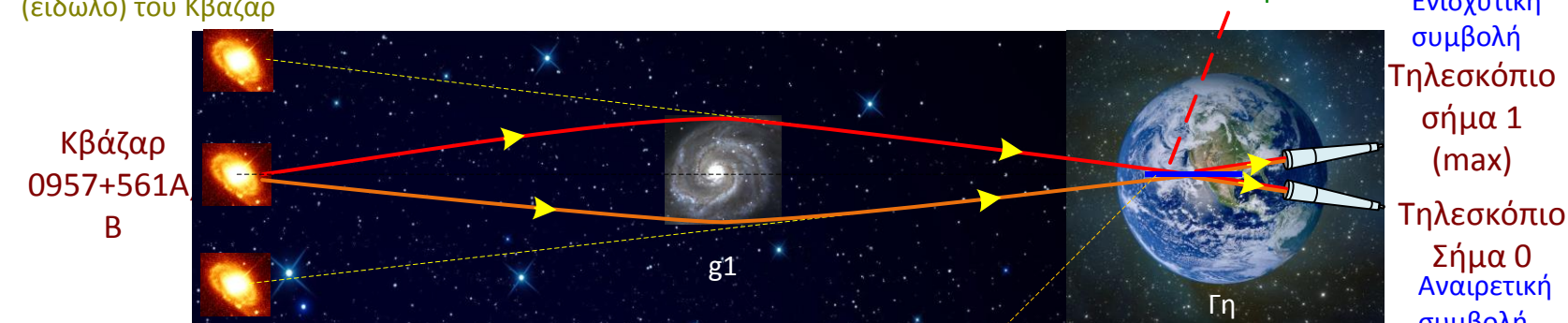


Γαλαξίας δρασα βαρυτικός φακός g1 κάμπτοντας το φως από το Κβάζαρ
 Διαδραματίζει το ρόλο των 2 κατόπτρων του συμβολομέτρου

Συμβολόμετρο φωτός στο εργαστήριο σε διαμόρφωση που αναδεικνύει το κυματικό χαρακτήρα του φωτός



Συμβολόμετρο φωτός σε κοσμική κλίμακα στο διάστημα που αναδεικνύει το κυματικό χαρακτήρα του φωτός



με την επιλογή μας να βάλουμε το ημιπερατό κάτοπτρο μπορούμε να επιρρεάσουμε την επιλογή που έγινε χιλιάδες έτη φωτός πριν και να προκαλέσουμε αλλαγή της συμπεριφοράς του φωτός από σωματιδιακή σε κυματική

έννοια του χρόνου ψευδαίσθηση ?
 ζούμε σε άχρονο σύμπαν ?

εμείς θεατές παρατηρητές της ιστορίας σου σύμπαντος?

ένα ταξίδι αντίστροφα στο χρόνο

Η ελεύθερη βούλησή μας και επιλογές μας είναι πάντα συμβατές με την εξέλιξη του σύμπαντος.

Τα στοιχειώδη σωματίδια έχουν μία ιδιότητα που λέγεται spin

η ιδιότητα αυτή σχετίζεται με το πως φαίνεται το σωματίο από διαφορετικές διευθύνσεις στο χώρο

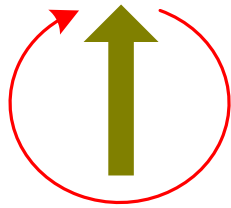
Spin 0



A

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με οποιαδήποτε περιστροφή

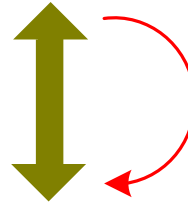
Spin 1



B

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με περιστροφή κατά 360°

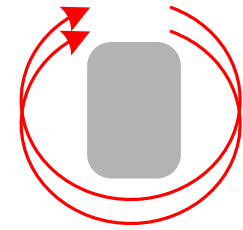
Spin 2



Γ

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με περιστροφή κατά 180°

Spin 1/2



Δ

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με περιστροφή κατά $2 \times 360^\circ$

Όλα τα σωματίδια στο σύμπαν κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες

Σωματίδια ύλης

με

Spin 1/2

πρωτόνια, νετρόνια, ηλεκτρόνια,

Τα σωματίδια αυτά υπακούουν στην

αρχή του Pauli

δεν επιτρέπει σε δύο σωματίδια να ευρισκονται στην ίδια κατάσταση και να περιγράφονται από την ίδια Ψ .

αλλιώς τα σωματίδια θα κατέρρεαν σε μια κατάσταση μεγάλης πυκνότητας δεν θα σχηματίζονταν καλά ορισμένα πρωτόνια, νετρόνια και διαφορετικά άτομα

χωρίς αυτή την αρχή δεν θα σχηματιζόταν η τεράστια ποικιλία της ύλης στη φύση

Σωματίδια-φορείς αλληλεπίδρασης

με

Spin 0, 1 & 2

φωτόνια, βαρυτόνια, π-μεσόνια, W^+ , W^- , Z

τα σωματίδια αυτά ανταλλάσσονται μεταξύ των σωματιδίων ύλης παράγοντας τις δυνάμεις (ηλεκτρομαγνητικές, βαρυτικές, ησχυρές & ασθενείς πυρηνικές)

τα σωματίδια αυτά δεν υπακούουν στην αρχή του Pauli

Η δύναμεις μεταξύ

σωματιδίων

(ηλεκτρομαγνητικές, βαρυτικές, ησχυρές & ασθενείς πυρηνικές)

παράγονται με την ανταλλαγή σωματιδίων φορέων-αλληλεπίδρασης



φωτόνια, βαρυτόνια, π-μεσόνια, W^+ , W^- , Z

Παραγωγή απωστικής δύναμης

πολύ χοντρικά σύμφωνα με μία κλασική εικόνα παριστάται με :

με εκπομπή από το A & απορρόφηση από το B σωματιδίου φορέα-αλληλεπίδρασης

F

A

B

F

με ανάκρουση στο A προκαλεί την F

με κρούση στο B προκαλεί την F

42-15

Μη τοπικότητα χαρακτηριστικό του κβαντικού κόσμου

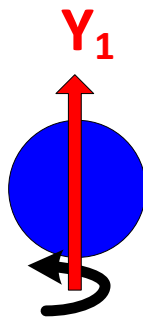
Παρατηρήτης και σύμπαν ενιαίο σύνολο που αλληλεπιδρά

Παρατήρηση-μέτρηση προκαλεί
κατάρρευση κυματοσυνάρτησης

λόγω της αλληλεπίδρασης

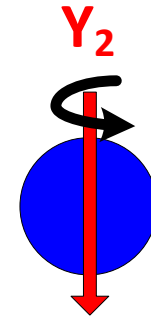
Μέτρηση spin ηλεκτρονίου

δίνει 2 πιθανά
αποτελέσματα



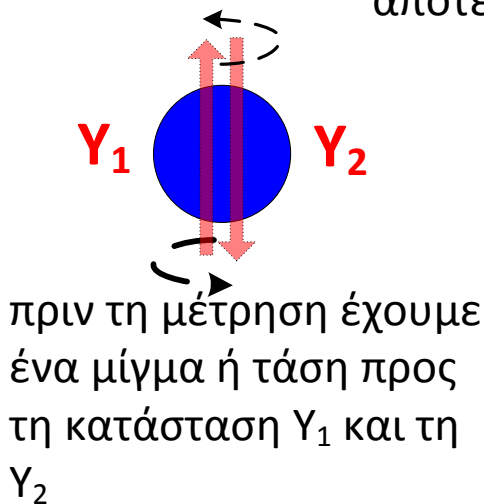
spin up
50%

ή



spin
down
50%

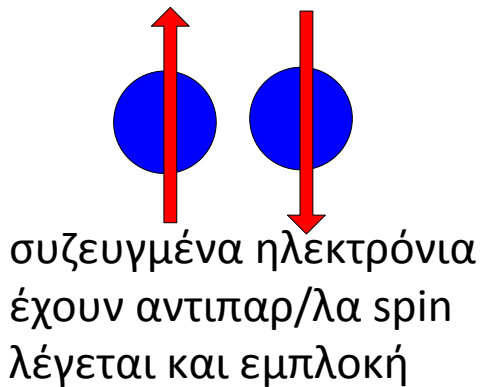
με τη μέτρηση έχουμε κατάρρευση
της κυματοσυνάρτησης σε Y_1 ή Y_2



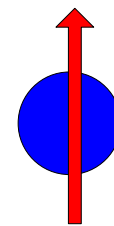
πριν τη μέτρηση έχουμε
ένα μίγμα ή τάση προς
τη κατάσταση Y_1 και τη
 Y_2

Πείραμα EPR

κατόπιν τα
απομακρύνω
πολύ μακριά
πχ στη Γη και
στη Σελήνη

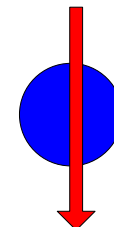


συζευγμένα ηλεκτρόνια
έχουν αντιπαρ/λα spin
λέγεται και εμπλοκή



Αν μετρηθεί
spin up Y_1
στη Γη

τότε
αυτόματα



θα μετρηθεί
spin down
στη
Σελήνη Y_2

δεν διαδίδεται πληροφορία
ακαριαία αλλά το ζεύγος των 2 ηλεκτρονίων
είναι ένα αδιάσπαστο όλον

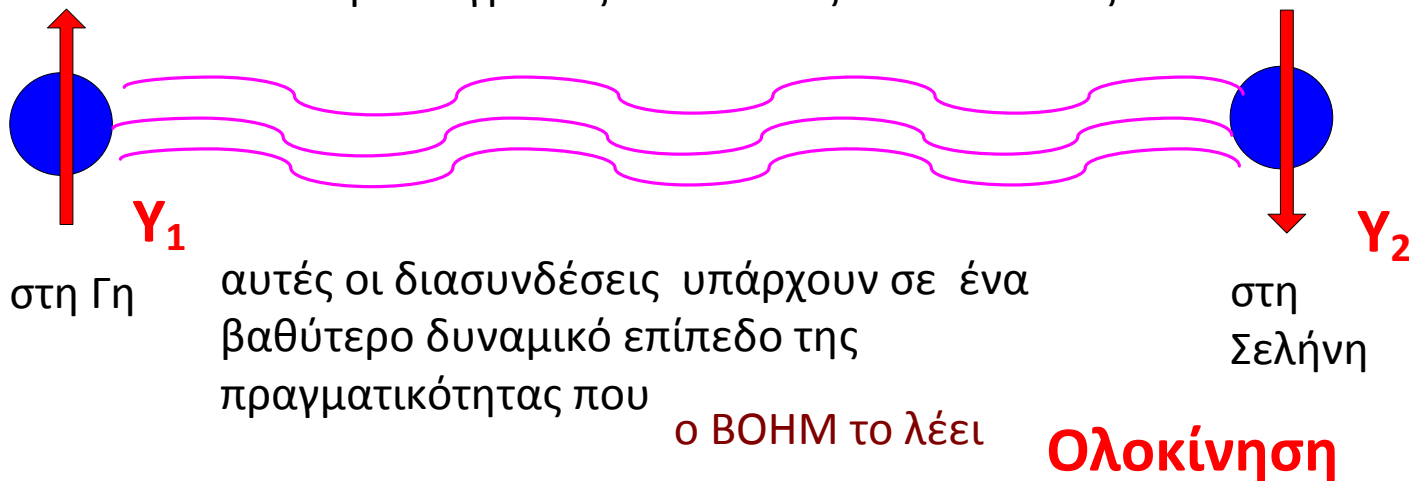
Προαιρετικό

Η εξήγηση είναι σε βαθύτερο
δυναμικό επίπεδο διασύνδεσης
που ο BOHM το λέει **Ολοκίνηση**

συνδέει όλα τα
πράγματα στο
σύμπαν

αναδιπλωμένη τάξη

Αν και τα 2 ηλεκτρόνια στο πείραμα EPR είναι πολύ μακριά
συνδέονται με στιγμιαίες και τοπικές διασυνδέσεις



Μέσα από την αναδιπλωμένη τάξη της ολοκίνησης
ρέουν οι μορφές του υλικού σύμπαντος
το μέρος και το όλον αναδρούν

κάθε μέρος του σύμπαντος να περιέχει και το όλον

Κβαντικό δυναμικό

καθοδηγεί τα σωματίδια σαν
ραδιοφάρος

μεταφέρει πληροφορία από το περιβάλλον παρέχοντας
άμεσες μη τοπικές συνδέσεις των κβαντικών συστημάτων

Αναδιπλωμένη τάξη ένας ωκεανός πάνω του το
σύμπαν είναι σα παφλασμός

Ενέργεια κενού χώρου

Αρχή αβεβαιότητας

είναι αδύνατον να μετρηθεί η ακριβής τιμή
του spin και της θέσης ενός σωματιδίου

άρα δεν υπάρχει κενό

άν υπήρχε θα γνωρίζαμε την ακριβή θέση και
το spin ταυτόχρονα (που δεν υπάρχουν)

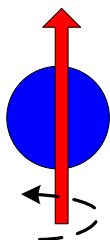
Κβαντικό κενό

ένα σύνολο από εικονικά σωματίδια ύλης αντιύλης που
αλληλοκαταστρέφονται **κβαντικές διακυμάνσεις**

Κβαντικοί υπολογιστές

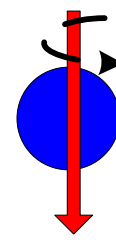
Κβαντικό bit

Μπορεί να είναι π.χ. Το Spin Ηλεκτρονίου ή το spin πυρήνων ατόμων



Up spin

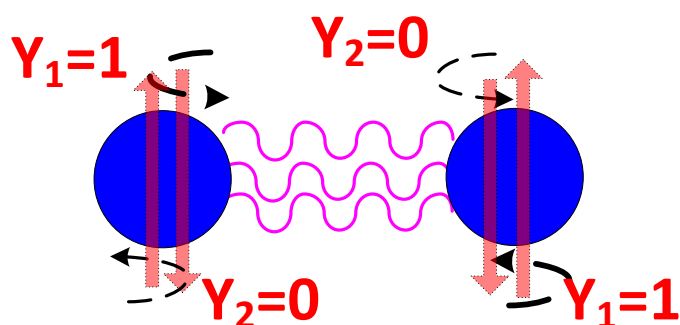
Μπορεί να αντιστοιχεί στη κατάσταση $Y_1=1$



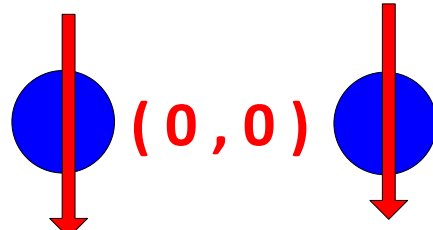
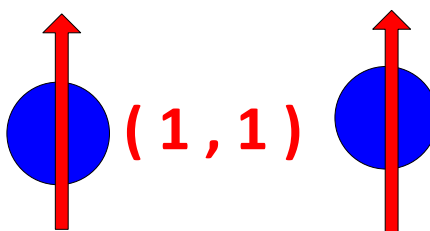
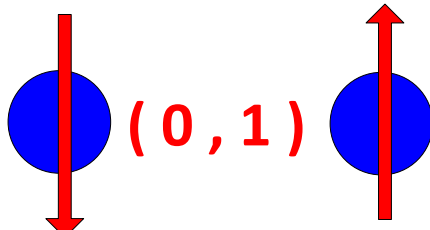
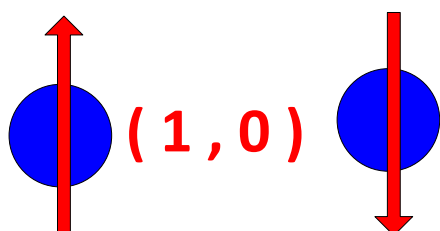
down spin

Μπορεί να αντιστοιχεί στη κατάσταση $Y_2=0$

Συζευγμένα ηλεκτρόνια σε εμπλοκή



Βρίσκονται σε υπέρθεση 4 δυνατών καταστάσεων του Spin



Με βάση την υπέρθεση μπορεί να κατασκευαστούν πολύπλοκοι κβαντικοί αλγόριθμοι και να γίνουν παράλληλοι πολύπλοκοι υπολογισμοί ανεβάζοντας την υπολογιστική ισχύ σε κολοσιαία επίπεδα.

Δηλ. από 2 κβαντικά Bit πέρνουμε 8 διαφορετικούς Συνδιασμούς = 2^2

Το πρόβλημα παραμένει να πως θα αποτραπεί η αποσυνοχή. Γιαυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές υπέρψυκτων ατόμων με Laser ή τεχνικές NMR (μαγνητικού συντονισμού).

Ετσι αποκλείονται μικροί φορητοί κβαντικοί υπολογιστές

Ανάλογα από 3 κβαντικά Bit πέρνουμε 16 διαφορετικούς συνδιασμούς = 2^3 , από 3 Bit 2^4 Συνδιασμούς, κ.ο.κ.

Μέχρι σήμερα έχουν φτιαχτεί κβαντικοί υπολογιστές με μόνο 50 bit

Ερωτήσεις στη κυματική φύση της ύλης

1. Πως μπορεί να υπάρξει σωματίο (όπως το φωτόνιο) το οποίο να έχει μάζα ηρεμίας μηδέν;
2. Ποια ήταν η υπόθεση του De Broglie;
3. Να δείξετε πως η υπόθεση του De Broglie εξηγεί την αφθαίρετη υπόθεση του Bohr για την κβάντωση της στροφορμής των ηλεκτρονίων στο άτομο.
4. Πως αποδείχτηκε πειραματικά ότι η υπόθεση του De Broglie για τα ηλεκτρόνια ήταν αληθής;
5. Περιγράψτε το πείραμα των Davisson-Germer και το τι αποδείχτηκε με αυτό;
6. Τι είναι περίθλαση του φωτός και τι περίθλαση των ηλεκτρονίων;
7. Ποια είναι η συνθήκη για το πρώτο ελάχιστο στη περίθλαση ακτίνων από μια σχισμή;
8. Πως προκύπτει η αρχή της απροσδιοριστίας για σωματία όπως τα ηλεκτρόνια με βάση το πείραμα της περίθλασης που υφίστανται αυτά δια μέσου μιας σχισμής;
9. Πως χρησιμοποιείται η έννοια του κυματοπακέτου και της υπέρθεσης κυμάτων για να περιγράψουμε τη θέση του ηλεκτρονίου. Γιατί μεγάλο εύρος κυματοπακέτου απαιτεί μικρό εύρος κυμάτων σε υπέρθεση καθώς και το αντίθετο;
10. Περιγράψτε πως προκύπτει η αρχή της απροσδιοριστίας με βάση την έννοια του κυματοπακέτου.
11. Περιγράψτε την αρχή της αβεβαιότητας στην ενέργεια.
12. Εξηγείστε πως η αρχή της αβεβαιότητας εξασφαλίζει τη σταθερότητα των ατόμων καθώς και το γεγονός ότι το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να βρεθεί στο πυρήνα όπως προβλέπει η κλασική φυσική;

Ερωτήσεις γενικές σε όλα τα κεφάλαια

1. Ποιά πειράματα και γιατί δεν μπορούσαν να εξηγηθούν σύμφωνα με τις κλασικές απόψεις της φυσικής και έφεραν τις ρογμές στο οικοδόμημα της κλασικής φυσικής ;
2. Πως εξηγήθηκε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η εκπομπή μέλανος σώματος ;
3. Πως εξηγήθηκαν τα γραμμικά φάσματα απορρόφησης και εκπομπής των αερίων σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr και ποιές ενέργειες προβλέπει για το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου ;
4. Ποιά ήταν η πρόταση του De Broglie ;
5. Πως μπορεί να υπάρξει σωματίο με μάζα ηρεμίας $m=0$;
6. Πως εξηγείται το αυθαίρετο πρότυπο του Bohr για το άτομο υιοθετώντας τη πρόταση του De Broglie;
7. Πως διαπιστώθηκε ότι η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν μπορεί να περιγραφεί με κάποια τροχιά ;
8. Γιατί δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με μεγάλη ακρίβεια τη τροχιά ενός ηλεκτρονίου ;
9. Πως διατυπώθηκε η αρχή της απροσδιοριστίας δεχόμενη και τη κυματική φύση των σωματιδίων ;
10. Πως μπορούμε να περιγράψουμε τη κίνηση του ηλεκτρονίου αφού δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την έννοια της τροχιάς ;
11. Γιατί τα ηλεκτρόνια στα άτομα δεν πέφτουν στο πυρήνα ;
12. Ικανοποιείται η αρχή της ελάχιστης ενέργειας για το ηλεκτρόνιο στο άτομο αν ναι πως ;
14. Πότε και γιατί τα σωματίδια μπορούν να εμφανίζουν διάκριτες κβαντισμένες ενέργειες και γιατί σε αυτές δεν περιλαμβάνεται η μηδενική ενέργεια ;
15. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Schrodinger να βρείτε τις στάθμες ενέργειας σωματιδίου σε κουτί.