

Η Κβαντική «επανάσταση» !

Κύκλοι Μαθημάτων Σύγχρονης Φυσικής

Δρ. Μιχάλης Καραδημητρίου

www.perifysikhs.com

Η Φυσική στο γύρισμα του Αιώνα

"Όλοι οι θεμελιώδεις νόμοι και δεδομένα της φυσικής επιστήμης έχουν ήδη ανακαλυφθεί και είναι τόσο σταθερά εδραιωμένοι ώστε η πιθανότητα να ανατραπούν κάποτε, σαν αποτέλεσμα νέων ανακαλύψεων, είναι τελείως μακρινή."

A. Michelson, γύρω στο 1900

Η Φυσική στο γύρισμα του Αιώνα

"Η Φυσική έχει πια λύσει τα θεμελιακά προβλήματα. Από τώρα και μπρος δεν θα είναι παρά απλή εφαρμογή των γενικών νόμων.

Μένουν βέβαια μερικά θεματάκια, που δεν έχουμε κατανοήσει πλήρως: Η κατανομή του μέλανος σώματος, οι φασματικές γραμμές των αερίων..."

Kelvin, γύρω στο 1900

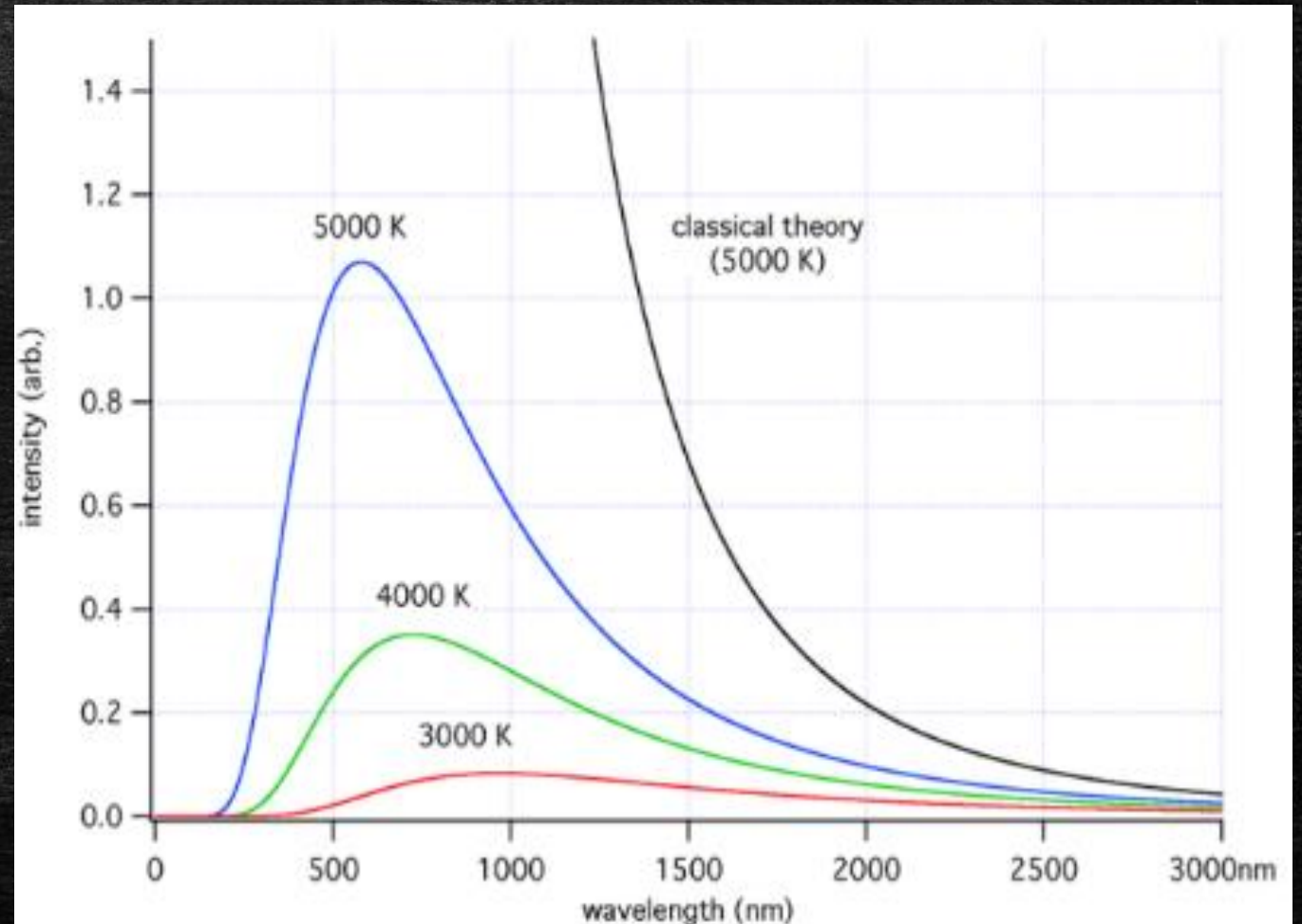
Τα «Θεματάκια» που αναζητούν εξήγηση...

Το Μέλαν Σώμα  κάθε υλικό που έχει την ιδιότητα να απορροφά τελείως την Η/Μ ακτινοβολία οποιασδήποτε συχνότητας.

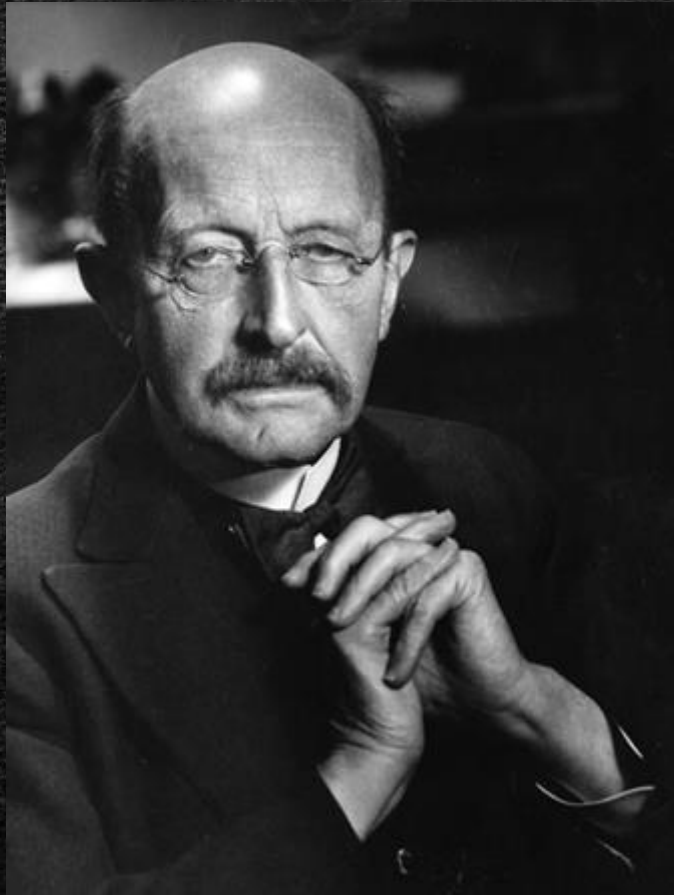
Ακτινοβολία Μέλανος σώματος  η ακτινοβολία που εκπέμπουν όλα τα σώματα όταν θερμανθούν.

«Όλα τα πυρακτωμένα αντικείμενα με την ίδια θερμοκρασία, εκπέμπουν την ίδια ακριβώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία»

Φασματική Κατανομή



Κβαντική Ερμηνεία – Η υπόθεση του Planck



Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα «μέλαν» σώμα είναι κβαντωμένη. Ο μόνες επιτρεπόμενες τιμές είναι ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας

$$E = h \cdot f$$

όπου h η σταθερά του Planck και f η συχνότητα της ακτινοβολίας.

Τα «θεματάκια» που αναζητούν εξήγηση...

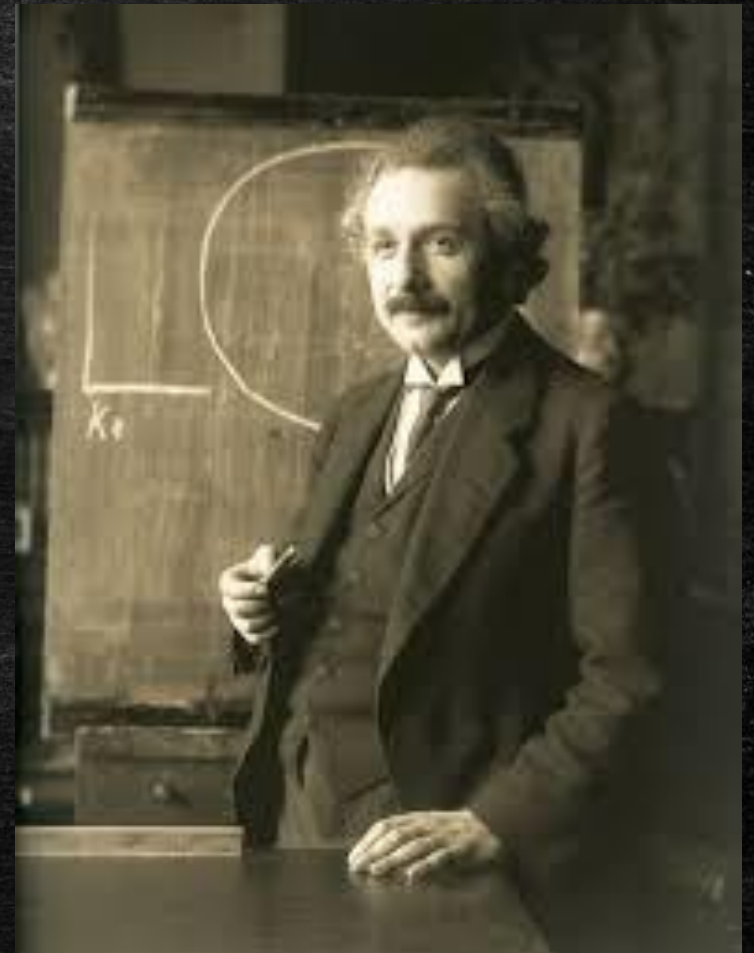
Το **Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο**  εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο ,που προκαλείται από την πρόσπτωση φωτεινής ή υπεριώδους ακτινοβολίας στην επιφάνεια του.

- Η εκπομπή των ηλεκτρονίων γίνεται μόνο όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια οριακή τιμή.
- Η ενέργεια των «φωτοηλεκτρονίων» δεν εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας αλλά μόνο από την συχνότητα της.

Κβαντική Ερμηνεία: Η υπόθεση των φωτονίων

Η ενέργεια μιας φωτεινής ακτίνας που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή δεν είναι συνεχώς κατανεμημένη στον χώρο, αλλά αποτελείται από ένα πεπερασμένο αριθμό ενεργειακών "κβάντων", που είναι τελείως εντοπισμένα στον χώρο χωρίς να διαφρούνται και τα οποία μπορούν να παραχθούν ή να απορροφούν ως ολόκληρες μονάδες.

A. Einstein (1905)



Κβαντική Ερμηνεία: Η υπόθεση των φωτονίων

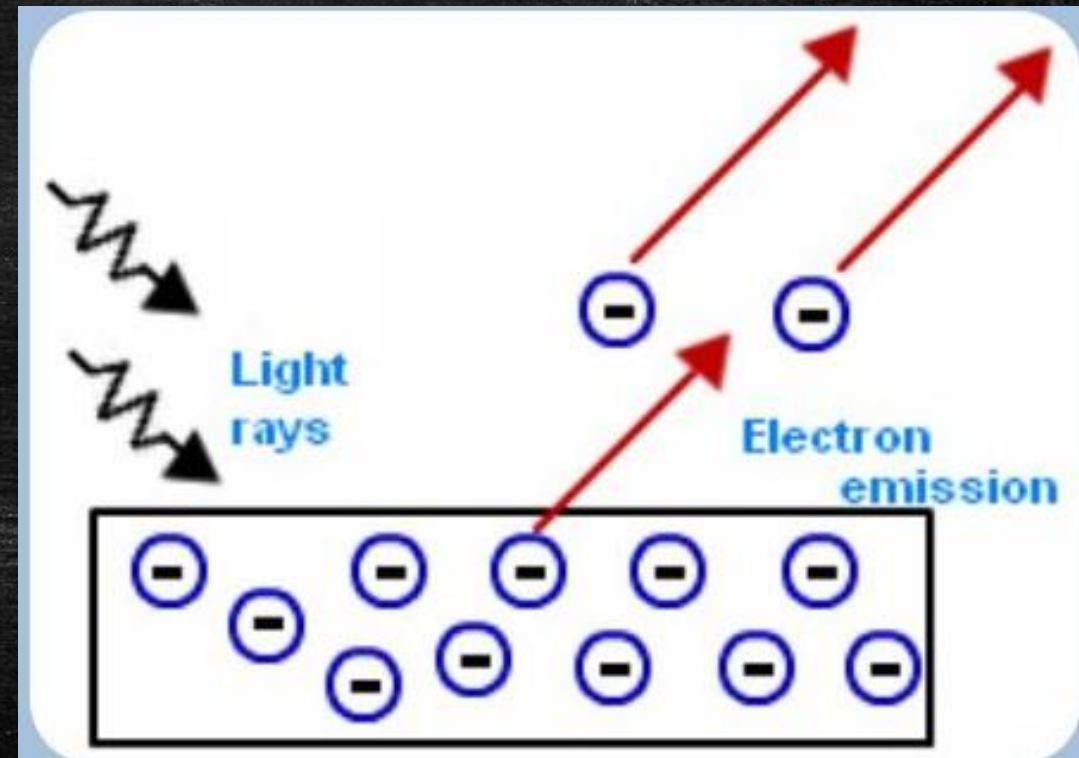
Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αποτελείται από φωτόνια ενέργειας $E = h \cdot f$

Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein

$$h \cdot f = W + K$$

Όπου W το έργο εξαγωγής του μετάλλου και K η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων

Για την εξαγωγή πρέπει: $h \cdot f \geq W$

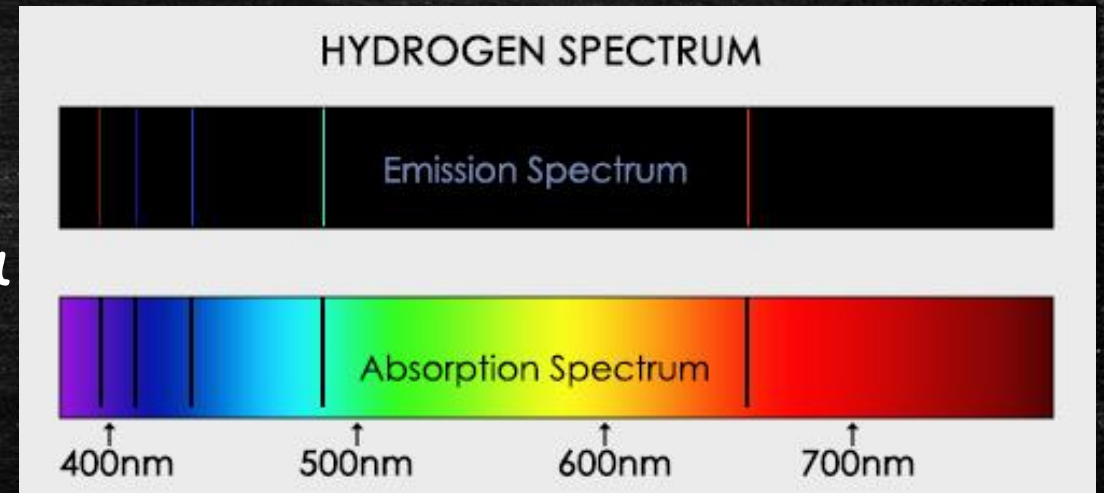


Τα «θεματάκια» που αναζητούν εξήγηση...

Το μυστήριο των Ατομικών Φασμάτων

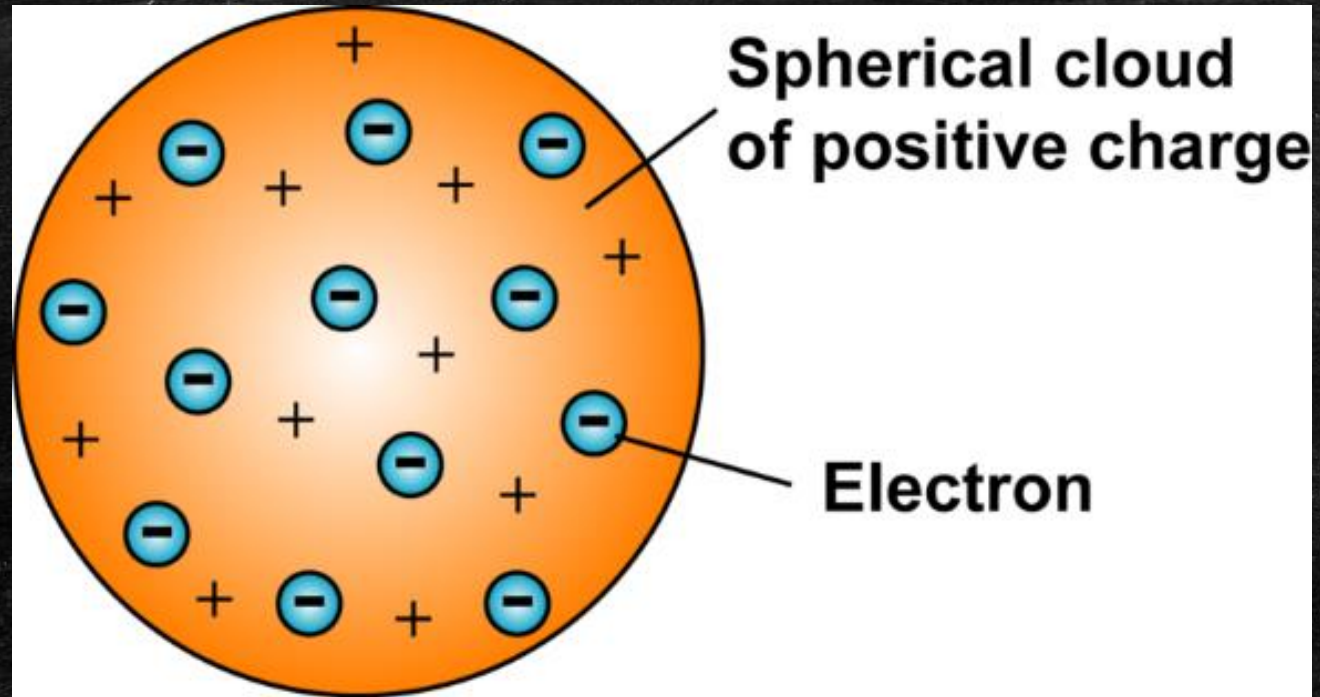
Τα ατομικά φάσματα είναι γραμμικά, δηλαδή περιέχουν μόνο ορισμένες φασματικές γραμμές που διαφέρουν τρομερά από άτομο σε άτομο.

«Το άθροισμα ή η διαφορά δύο παρατηρούμενων συχνοτήτων θα είναι επίσης παρατηρούμενη συχνότητα»



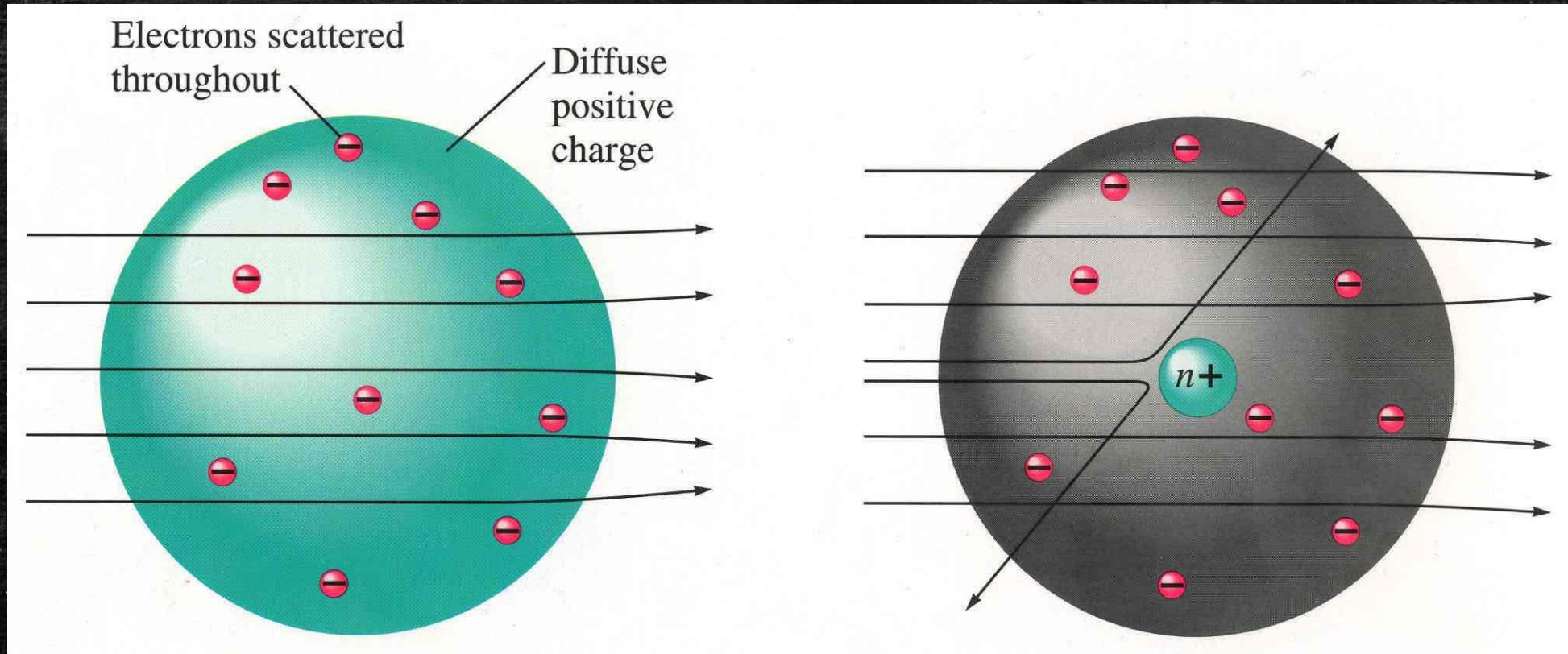
Ατομικό Μοντέλο στα 1900...

Το «Σταφιδόψωμο» του Thomson (1897)



Ατομικό Μοντέλο στα 1900...

Το «Πλανητικό Μοντέλο» του Rutherford (1911)



Οι αντιφάσεις...

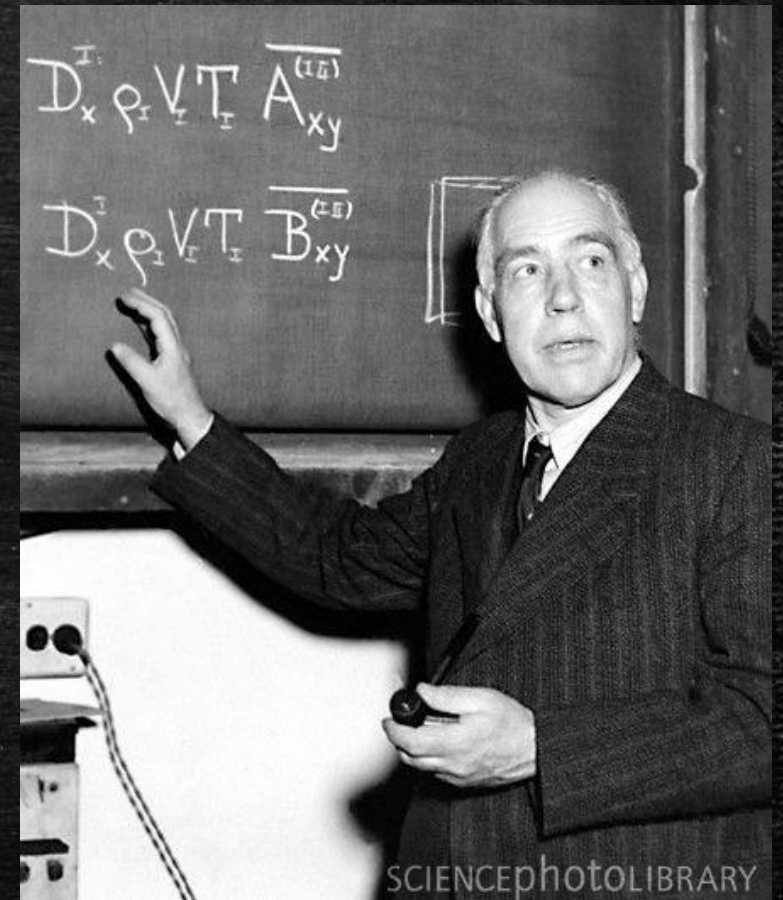
Το «πλανητικό μοντέλο» είναι ασταθές

- Τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα σύμφωνα με την κλασσική θεωρία θα ακτινοβολούν, αφού η κυκλική κίνηση είναι επιταχυνόμενη. Άρα θα χάνουν συνεχώς ενέργεια μέχρι την οριστική τους κατάρρευση (εκτιμώμενος χρόνος κατάρρευσης $\sim 10^{-10} \text{ sec}$)
- Στο ατομικό επίπεδο συμβαίνουν τουλάχιστον ένα δισεκατομμύριο κρούσεις ανά δευτερόλεπτο ανάμεσα στα άτομα, αυτό θα είχε ως συνέπεια τα ηλεκτρόνια να αλλάζουν συνεχώς τροχιές ή να φεύγουν τελείως από το άτομο. Άρα τα άτομα δεν θα είχαν σταθερή χημική συμπεριφορά και τα φάσματα εκπομπής θα άλλαζαν συνεχώς.

Η Θεωρία του Bohr

"Αφετηρία μου δεν ήταν καθόλου η ιδέα ότι το άτομο είναι ένα πλανητικό σύστημα σε μικρή κλίμακα και σαν τέτοιο ότι διέπεται από τους νόμους της αστρονομίας. Ποτέ δεν πήρα αυτή την αναλογία κατά γράμμα. Αφετηρία μου ήταν μάλλον η σταθερότητα της ύλης. Ένα καθαρό θαύμα από τη σκοπιά της κλασσικής φυσικής."

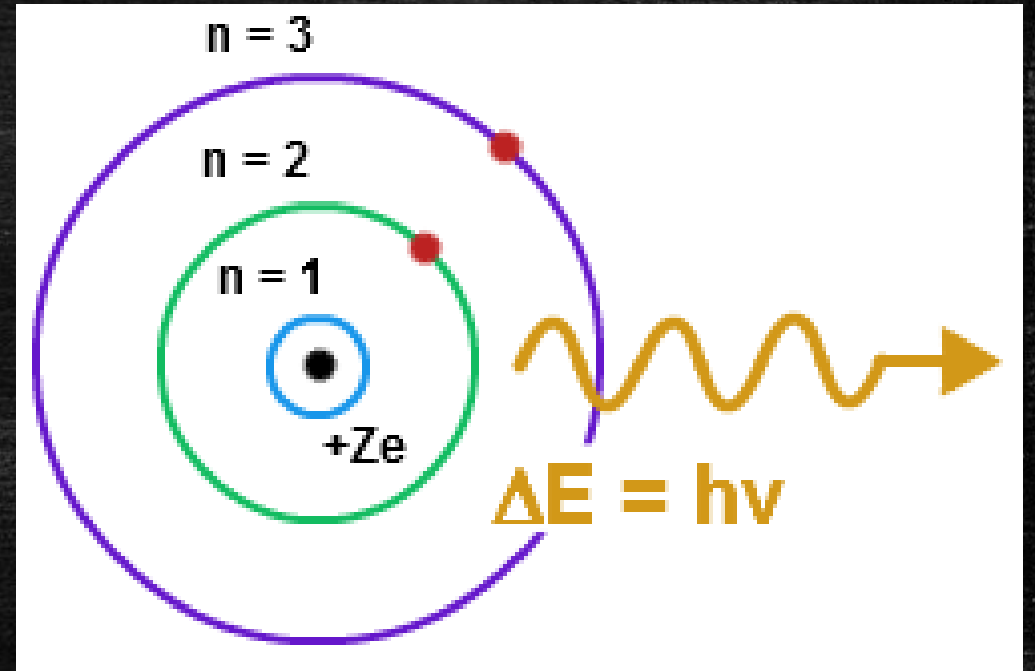
N. Bohr (1913)



Η θεωρία του Bohr για το άτομο Υδρογόνου

Η 1^η Συνθήκη

- ❑ Οι ενεργειακές καταστάσεις των ατόμων είναι κβαντωμένες.
- ❑ Ακτινοβολία εκπέμπεται μόνο κατά την μετάβαση του ατόμου από μια ανώτερη σε μια κατώτερη ενεργειακή στάθμη,
- ❑ Η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου καθορίζεται από την μεταβολή της ενέργειας.



Η Θεωρία του Bohr για το άτομο Υδρογόνου

Η 2^η Συνθήκη: «Επιτρέπονται μόνο εκείνες οι κυκλικές τροχιές, για τις οποίες η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σύγχρονης σταθεράς του Planck.»

- Η θεωρία προβλέπει σωστά τα πειραματικά αποτελέσματα για το μέγεθος του ατόμου του Υδρογόνου και το έργο Ιονισμού!
- Η θεωρία εξηγεί το ανεξήγητο «γραμμικό φάσμα» του ατόμου.
- Η κβάντωση είναι το κλειδί για την ατομική σταθερότητα!

Οι ιδέες της Κβαντικής Μηχανικής

- Η κβάντωση
- Ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός
- Αρχή της Αβεβαιότητας
- Το κύμα Πιθανότητας

Κβάντωση = Κυματική συμπεριφορά

- Το υπόδειγμά της χορδής: μέσα στο μήκος L της χορδής πρέπει να χωράει ένας ακέραιος αριθμός ημικυμάτων.

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ όπου } n = 1, 2, 3, \dots$$

- Οι επιτρεπόμενες συχνότητες f_n της χορδής είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους f_0 .

$$f_n = \frac{v}{2L} \cdot n = f_0 \cdot n = f_0, 2f_0, 3f_0, \dots$$

- Μήπως η κβάντωση των ενεργειακών καταστάσεων στα άτομα είναι αποτέλεσμα κάποιου είδους κυματικής συμπεριφοράς των ηλεκτρονίων;

Κβάντωση = σταθερότητα

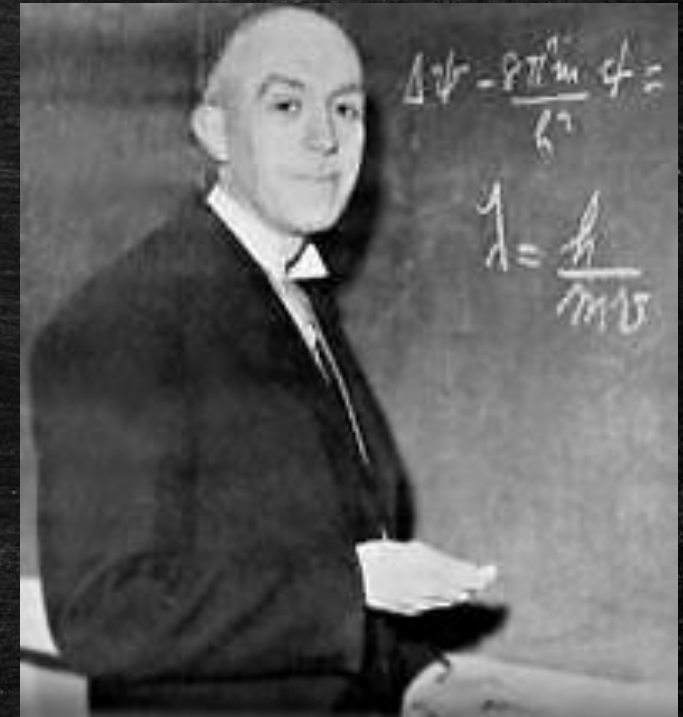
Το άτομο στην «θεμελιώδη» του κατάσταση δεν μπορεί να αλλάξει διότι ούτε πιο κάτω μπορεί να πάει, αφού είναι στην χαμηλότερη επιτρεπτή τροχιά, ούτε όμως και πιο πάνω δεν μπορεί να πάει γιατί η πρώτη «διεγερμένη» κατάσταση είναι ενεργειακά πολύ ψηλότερα από την θεμελιώδη και το ηλεκτρόνιο δεν έχει την ενέργεια να «πηδήσει» εκεί πάνω.

Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός

Είχα τελείως πεισθεί ότι ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός που ανακαλύφθηκε από τον Einstein στη θεωρία του για τα φωτεινά κβάντα είναι απόλυτα γενικός και εκτείνεται σε όλη την φυσική πραγματικότητα.

Έτσι μου φαινόταν σίγουρο ότι η κίνηση ενός σωματιδίου οποιουδήποτε είδους (φωτόνιο, ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο κ.λ.π.) συνοδεύεται πάντα και από την διάδοση ενός κύματος.

L. De Broglie (1932)



Κυματοσωματιδιακός δυισμός

Όλα τα φυσικά σωματίδια έχουν και κυματική συμπεριφορά παράλληλα με την σωματιδιακή. Είναι σωματίδια και κύματα ταυτόχρονα.

Οι σχέσεις που συνδέουν τα σωματιδιακά χαρακτηριστικά E και p με τα κυματικά f και λ είναι οι:

$$f = \frac{E}{h} \quad , \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

Αρχή της Αβεβαιότητας

Ίσως η μεγαλύτερη ανακάλυψη του 20ου αιώνα και σίγουρα από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις όλων των εποχών.

«Το αληθινό νόημα της σταθεράς του Planck είναι ότι αποτελεί ένα παγκόσμιο μέτρο της απροσδιοριστίας, που λόγω της αρχής του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού, είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό των φυσικών νόμων.»

W. Heisenberg (1926)



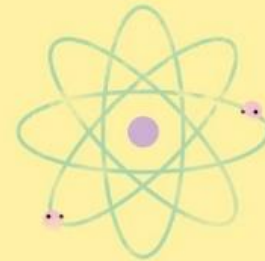
Αρχή της Αβεβαιότητας

«Το γινόμενο της αβεβαιότητας στην μέτρηση της θέσης, επί την αβεβαιότητα στην μέτρηση της ταχύτητας είναι περίπου σταθερό.»

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Είναι αδύνατον να μετρήσεις ταυτόχρονα την θέση και την ορμή ενός σωματιδίου όπως το ηλεκτρόνιο.

THE UNCERTAINTY PRINCIPLE



Said one electron to another, "Where are you?"

"I'm certain that I'm over here!" said the other.

"How fast can you get here?"

"That," said the electron, "I couldn't tell you."

Η αντίσταση στον εντοπισμό

$$\text{Κινητική Ενέργεια σωματιδίου : } K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$$

$$\text{Αρχή Αβεβαιότητας: } \Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar \Rightarrow \Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta x}$$

$$K \approx \frac{\hbar^2}{2m \Delta x^2}$$

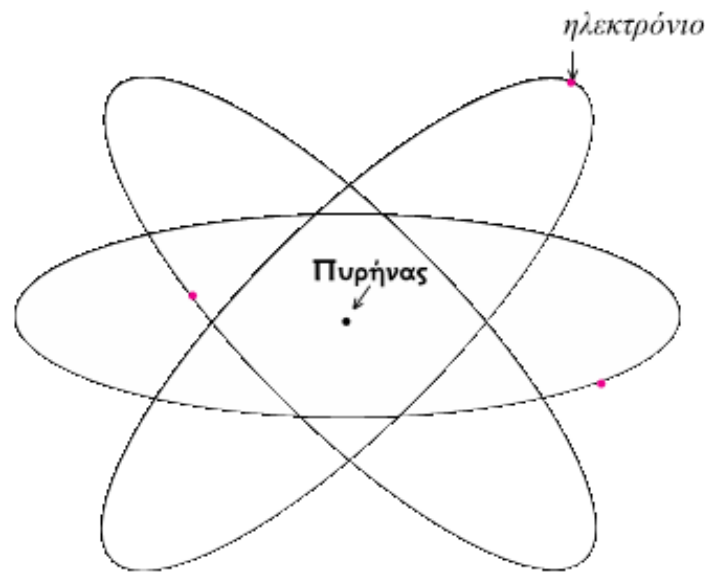
Όσο μικρότερη γίνεται η «φυλακή» ενός κβαντικού σωματιδίου, τόσο «ζωηρότερο» γίνεται το σωματίδιο. Όσο περισσότερο το «στριμόχνουμε» τόσο περισσότερο «αντιδρά» και «αγριεύει». Τα κβαντικά σωματίδια είναι υποχρεωμένα να αντιστέκονται στην φυλάκιση.

Η αντίσταση στον εντοπισμό & 2 μυστήρια...

- Ο πυρήνας είναι «ενεργειακός γίγαντας» γιατί είναι «νάνος μεγέθους». Ο πυρήνας είναι εκατό χιλιάδες φορές μικρότερος από το άτομο, άρα τα πυρηνικά σωματίδια είναι εγκλωβισμένα σε μια μικροσκοπική φυλακή. Ο Ήλιος μας φωτοβολεί εδώ και 4 δις χρόνια και θα συνεχίσει για άλλα 7 δις χρόνια, γιατί το «καύσιμο» του είναι πυρηνικό!
- Το μέγεθος του ατόμου είναι σταθερό, παρά το τεράστιο ενδοατομικό κενό, τα ηλεκτρόνια δεν πέφτουν στον πυρήνα αλλά αντιστέκονται σε κάθε προσπάθεια μείωσης του ατομικού όγκου.

Το κούφιο άτομο

ΕΙΚΟΝΑ 1: Το κούφιο άτομο



Ακτίνα πυρήνα: 10^{-15} m

[Μερικά τετράκις εκατομμυριοστά του μέτρου]

Ακτίνα ατόμου: 10^{-10} m

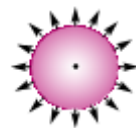
[Το άτομο είναι εκατό χιλιάδες φορές μεγαλύτερο από τον πυρήνα]

Το 99,9999999999999 % του ατόμου είναι άδειος χώρος!

Αν, ας πούμε, ο πυρήνας ήταν σαν κεφάλι καρφίτσας στη σέντρα του Ολυμπιακού Σταδίου, τα ηλεκτρόνια (πολύ-πολύ μικρότερα από κεφάλι καρφίτσας) θα βρίσκονταν κάπου στις τελευταίες κερκίδες!

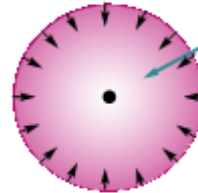
Αβεβαιότητα = Σταθερότητα

Πώς η αρχή της αβεβαιότητας εξηγεί το μυστήριο της ατομικής σταθερότητας και του μεγέθους των ατόμων



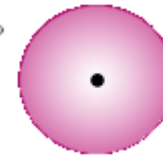
(α)

Το ηλεκτρόνιο είναι πολύ «στριμωγμένο» και αντιδρά στον υπερβολικό εντοπισμό του



(β)

Το ηλεκτρόνιο είναι πολύ «χαλαρό» και η έλξη του πυρήνα το ξανατραβά προς τα μέσα.



(γ)

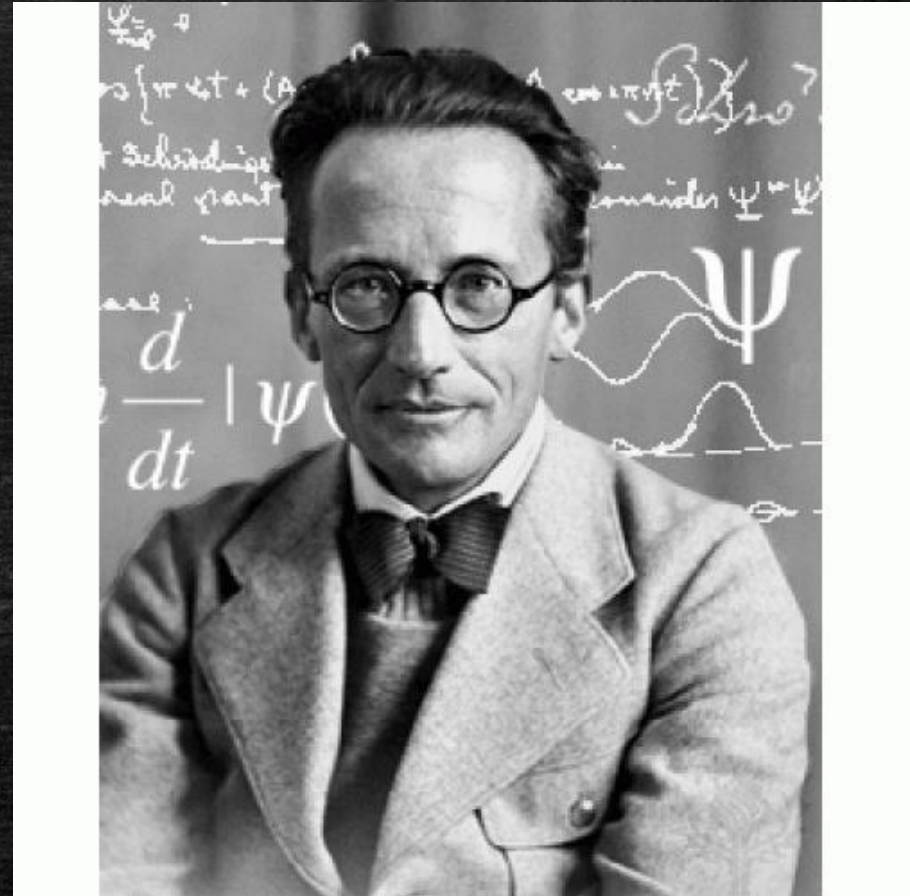
Η κατάσταση ισορροπίας (βέλτιστο μέγεθος)

«νέφος πιθανότητας» του ηλεκτρονίου (δηλ. κάπου «εκεί μέσα» είναι το ηλεκτρόνιο)

Το ηλεκτρονικό «μπαλλάκι» —το λεγόμενο «νέφος πιθανότητας» του ηλεκτρονίου— δεν μπορεί να γίνει ούτε υπερβολικά μικρό (διότι τότε αυξάνεται υπερβολικά η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου), ούτε όμως και πολύ μεγάλο (διότι τότε μένει «αναξιοποίητη» η έλξη από τον πυρήνα. Το άτομο «ισορροπεί» —δηλαδή επιτυγχάνει **ελάχιστη ενέργεια**— όταν έχει ένα βέλτιστο μέγεθος.

Από τον Newton στον Schrodinger

Η αποδοχή της «κυματικής φύσης» των σωματιδίων απαιτεί και μια Μαθηματική εξίσωση που θα περιγράψει τα «υλικά κύματα», όπως η εξίσωση του Νεύτωνα περιγράφει τις κινήσεις των σωμάτων.



Από τον Ντετερμινισμό στην Πιθανοκρατία

- Η κίνηση των Υλικών συστημάτων δεν περιγράφεται μέσω της τροχιάς τους, όπως στην κλασσική μηχανική, αλλά μέσω μιας κυματικής συνάρτησης Ψ , που εξαρτάται από την θέση και τον χρόνο.
- Η κυματοσυνάρτηση Ψ μας δίνει πληροφορίες για την πιθανότητα να βρεθεί ένα σωματίδιο σε κάποια θέση ή την πιθανότητα να μετρήσουμε μια τιμή για ένα φυσικό μέγεθος.
- Η κατάσταση ενός συστήματος μπορεί να περιγράφεται από μια επαλληλία καταστάσεων με αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης.

Η εξίσωση του Schrodinger

For a single particle in three dimensions:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x, y, z) \psi$$

where

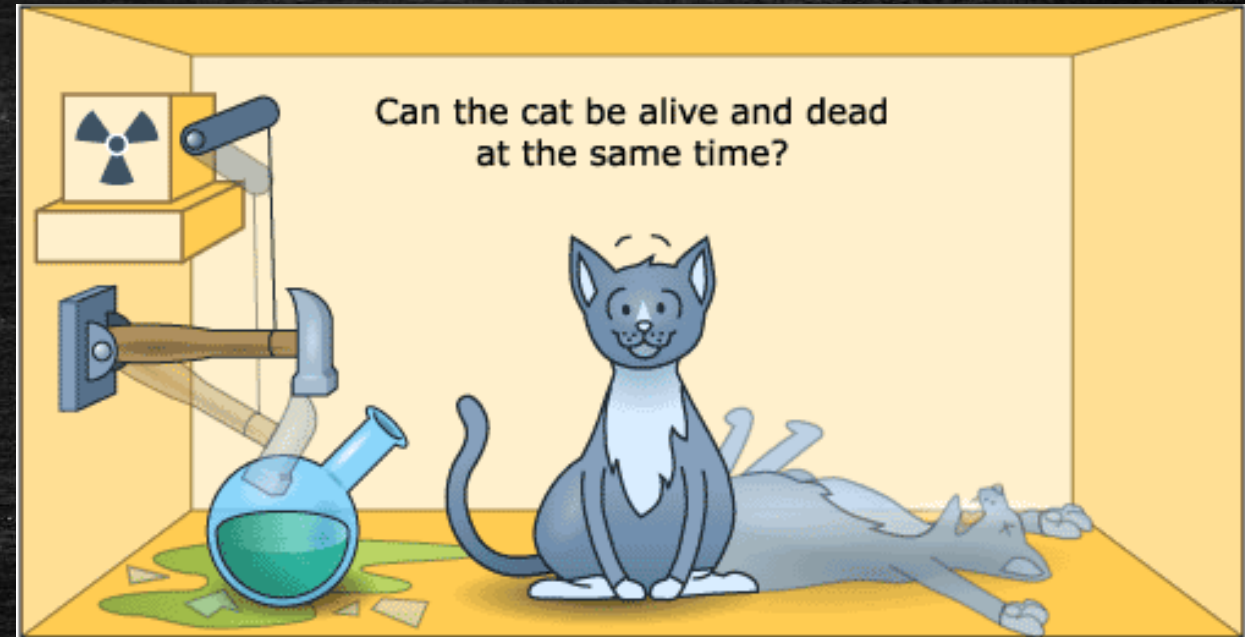
- ψ is the wavefunction, which is the amplitude for the particle
- m is the mass of the particle.
- $V(x,y,z)$ is the potential energy the particle has at each position.

Η γάτα του Schrodinger

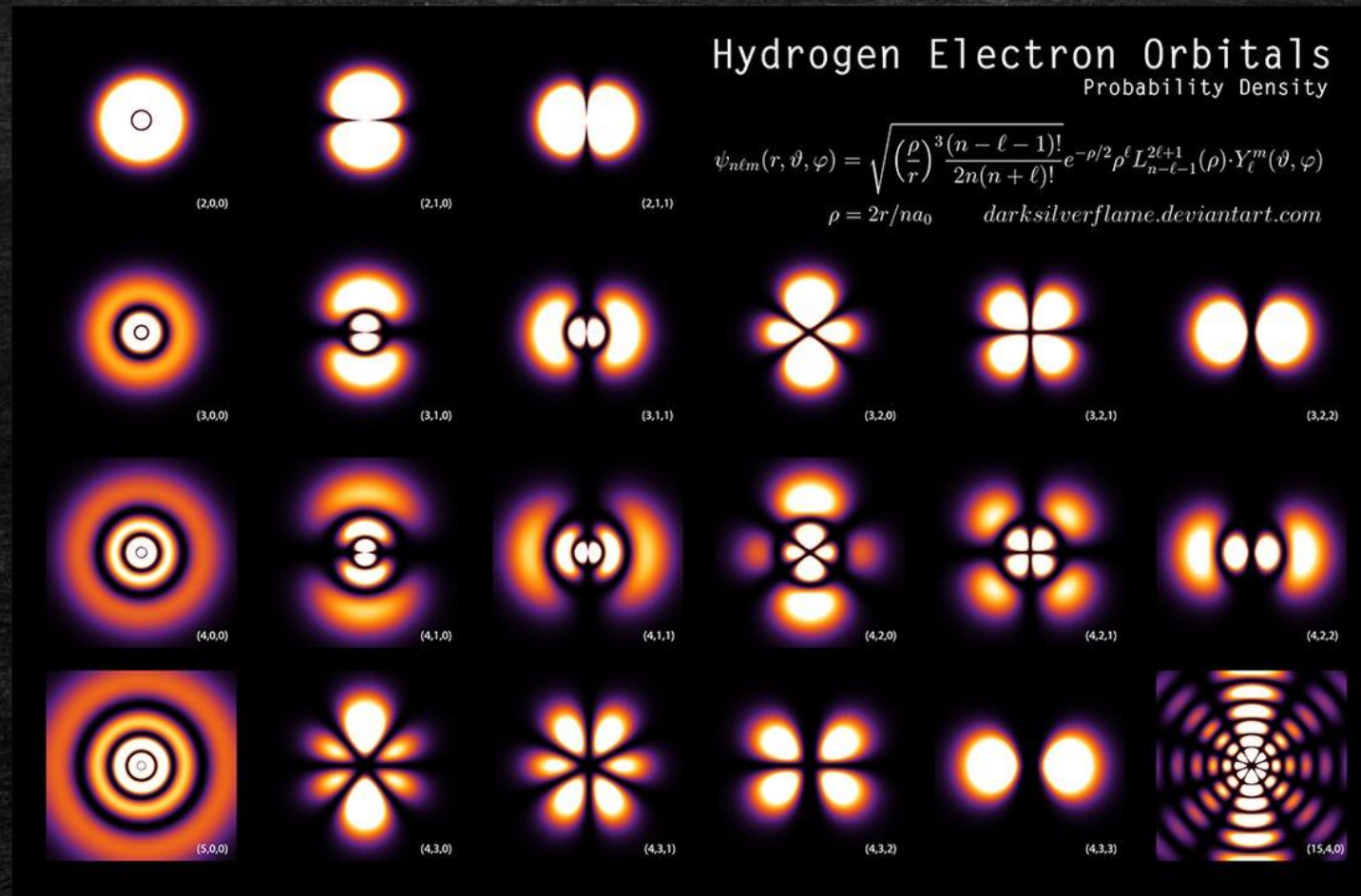
Οι πιθανές καταστάσεις της γάτας είναι να είναι ζωντανή ή να έχει πεθάνει εξαιτίας του δηλητηρίου.

Άρα κβαντικά η κατάσταση της γάτας περιγράφεται:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_{\text{alive}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_{\text{dead}}$$



Οι λύσεις για το άτομο του Υδρογόνου

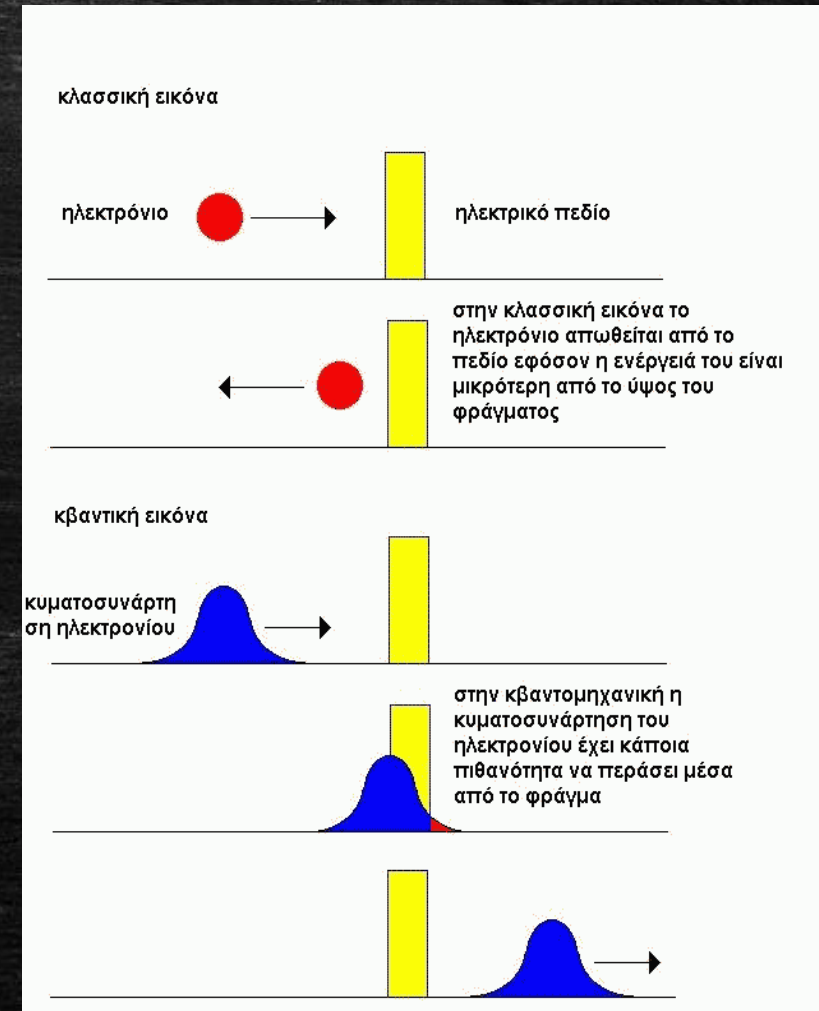


Κάποιες Εφαρμογές...

Το φαινόμενο της σήραγγας - διάβαση σε κλασσικά απαγορευμένες περιοχές.

«Τα κβαντικά σωματίδια έχουν την δυνατότητα να διασχίσουν κλασσικά απαγορευμένες περιοχές πεπερασμένης έκτασης και να συνεχίσουν την κίνηση τους στην άλλη πλευρά».

Η πυρηνική σύντηξη στο εσωτερικό των άστρων είναι αποτέλεσμα της «Κβαντικής σήραγγας» !!



Κάποιες Εφαρμογές...

Κβαντικοί Υπολογιστές!

Το πέρασμα από τα bits στα quantum - bits !!

Η μνήμη ενός κλασικού ψηφιακού υπολογιστή αποτελείται από bit τα οποία μπορούν να αναπαραστήσουν την τιμή 1 ή 0. Γενικά ένας κβαντικός υπολογιστής με n q-bits μπορεί να βρίσκεται σε αυθαίρετη υπέρθεση των έως 2^n δυνατών καταστάσεων ταυτόχρονα, ενώ ένας κλασικός υπολογιστής μπορεί να βρίσκεται μόνο σε μια από αυτές τις καταστάσεις κάθε στιγμή.

Διάλογοι τις εποχής...

- Η όλη υπόθεση (του Bohr) είναι σαν παραμύθι... Όλα αυτά είναι καθαρή τρέλα. Pauli
- Όμως παρ' όλο που είναι τρέλα έχει μια μέθοδο μέσα της. Heisenberg
- Αν αυτά τα καταραμένα κβαντικά άλματά πρόκειται στ' αλήθεια να παραμείνουν στην φυσική, τότε εγώ μετανιώνω που ανακατεύτηκα ποτέ μου με την κβαντική θεωρία. Schrodinger
- Δεν γίνεται ο Θεός να παίζει ζάρια. Einstein

Ευχαριστώ πολύ....



«...Νομίζω πως μπορώ να πω με σιγουριά ότι κανένας δεν καταλαβαίνει την κβαντική μηχανική...»

Richard Feynman