

ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

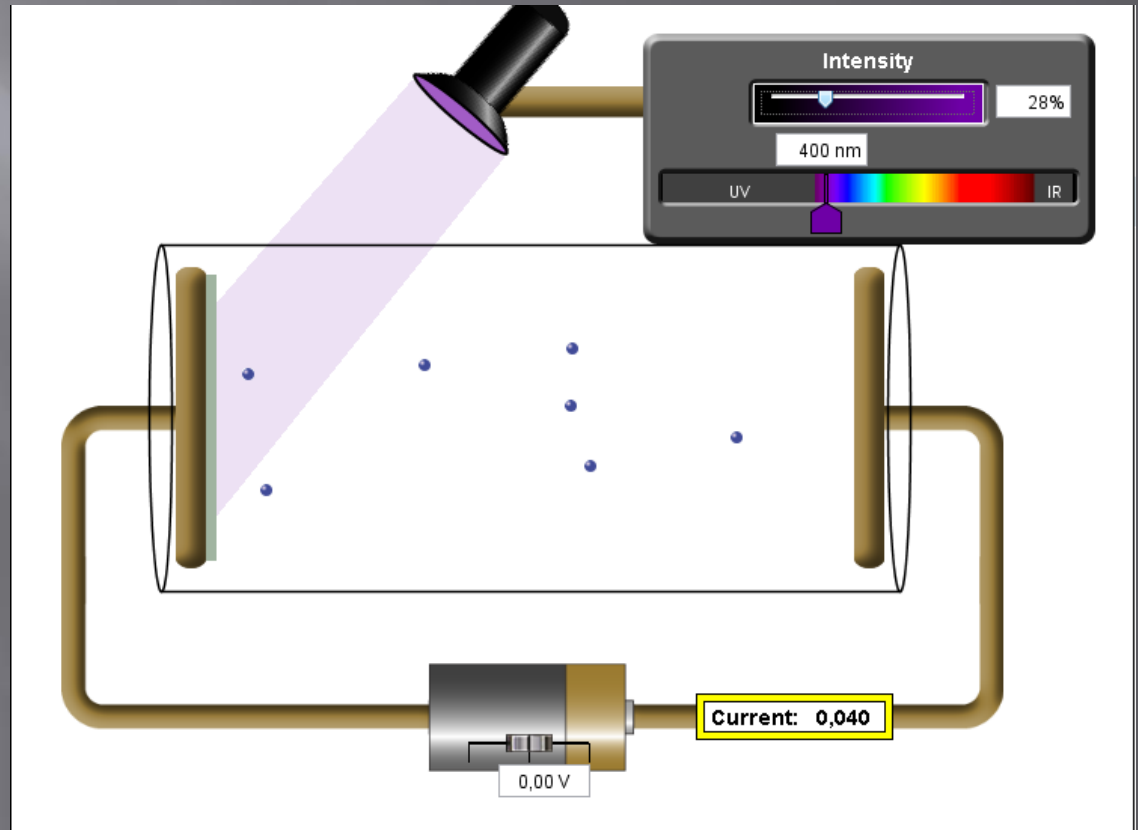
Χάρης Βάρβογλης
Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.

Οι αρχές

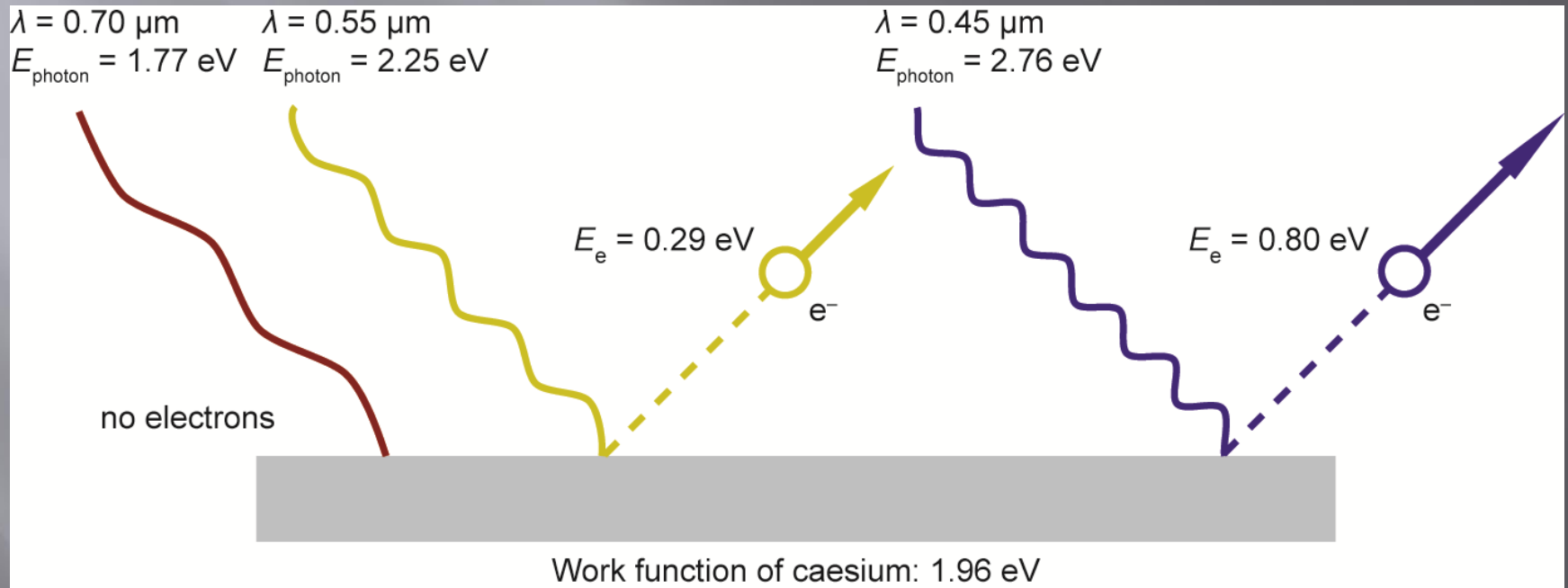
- ▣ Η Κβαντομηχανική αρχίζει με την ιδέα του Max Planck (1858-1947) ότι η «υπεριώδης καταστροφή» είναι δυνατό να αποφευχθεί αν δεχθούμε ότι η Η/Μ ακτινοβολία **εκπέμπεται ασυνεχώς** σε «πακέτα» (τα “quanta”).
- ▣ Ο όρος **quantum** προέρχεται, κατά πάσα πιθανότητα, από την Ιατρική (**quantum satis**, QS, η **απαραίτητη ποσότητα**), και χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τους Mayer και Helmholtz, που ήταν γιατροί, για να περιγράψει ποσότητες θερμότητας.
- ▣ Ο Planck χρησιμοποίησε τη λέξη για να περιγράψει ποσότητες ύλης και ηλεκτρισμού.
- ▣ Ο όρος **κβάντο φωτός** εισήχθη από τον **Einstein** το 1905, στην περίφημη δημοσίευσή του που ερμήνευε το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

▣ Το ρεύμα εξαρτάται όχι μόνο από τη **ροή του φωτός** και από τη **διαφορά δυναμικού**, αλλά επίσης και από το **χρώμα!**



Πειραματικά αποτελέσματα



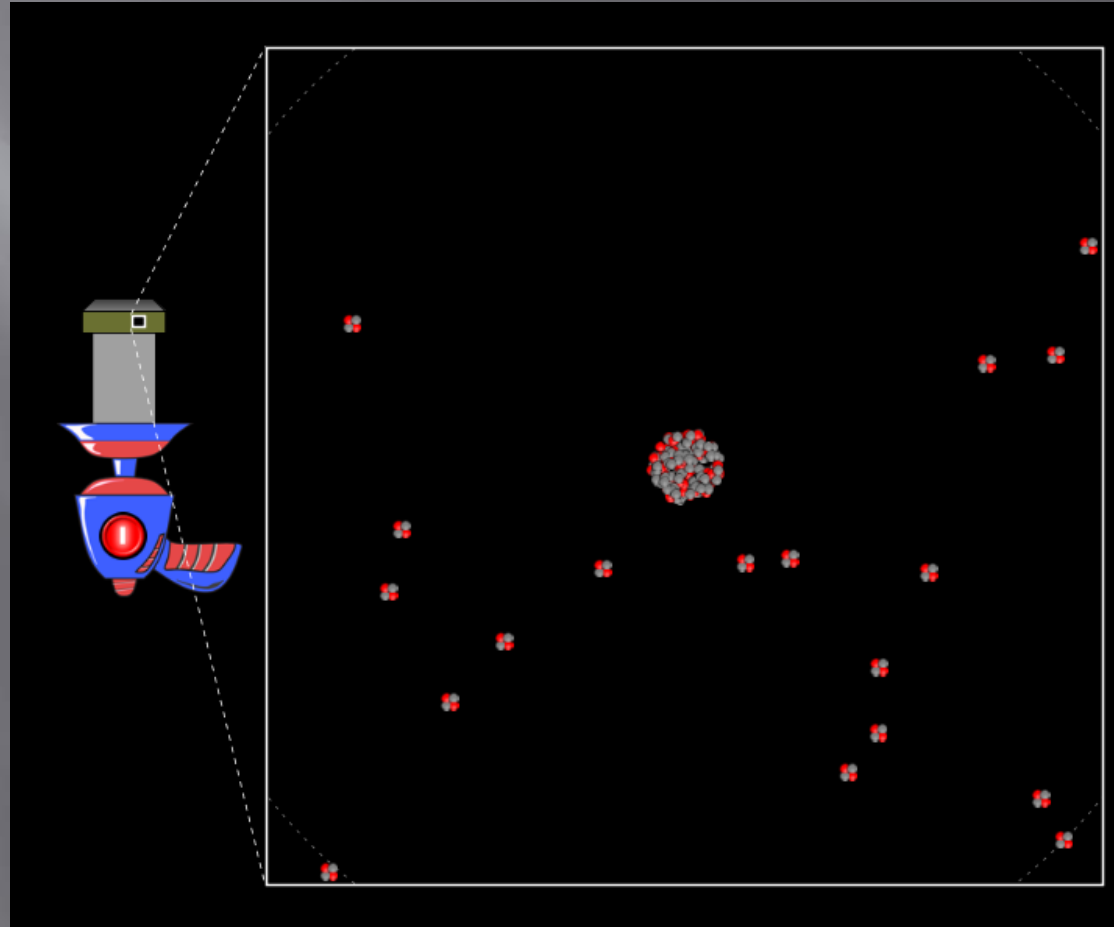
“Παλαιά” Κβαντική Θεωρία (ΠΚΘ) Rutherford

▣ Το πείραμα σκεδασμού του Rutherford έδειξε ότι τα άτομα έχουν ένα μικρό πυρήνα, ενώ τα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από αυτόν.

■ Σε αντίθεση με το μοντέλο του «σταφιδόψωμου» του J.J. Thomson.

▣ Τα ηλεκτρόνια δεν είναι δυνατό να παραμένουν ακίνητα. Πρέπει να κινούνται!

▣ Ο Rutherford πρότεινε το μοντέλο του «ηλιακού συστήματος».



Ernest Rutherford (1871-1937)

- ▣ Γεννήθηκε στη Νέα Ζηλανδία.
- ▣ Πήρε τι Βραβείο Νομπέλ 1908 στη Χημεία, επειδή
 - «ανακάλυψε την έννοια της ραδιενεργού ημι-ζωής, απέδειξε ότι η ραδιενέργεια συνδέεται με τη μεταστοιχείωση ενός χημικού στοιχείου σε ένα άλλο και επίσης διαχώρισε τη ραδιενέργεια σε ακτίνες-α και -β, αποδεικνύοντας ότι οι πρώτες είναι άτομα ηλίου.»
- ▣ Αλλά είναι γνωστός ως ο «πατέρας» της Πυρηνικής Φυσικής.
- ▣ Το 1911 οι μαθητές του Hans Geiger και Ernest Marsden έκαναν το **πείραμα του φύλλου χρυσού**.
- ▣ Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένο σε έναν πυρήνα, αντίθετα από το μοντέλο του J.J. Thomson (σταφιδόψωμο).

Rutherford - II

- ▣ Ο Rutherford είχε μεγάλη επιρροή στα επιστημονικά πράγματα της εποχής του και στην επιλογή των βραβείων Νομπέλ.
- ▣ Πρότεινε του ακόλουθους υποψήφιους για το βραβείο Νομπέλ Φυσικής (ΒΝΦ = Βραβείο Νομπέλ Φυσικής)
 - 1912: John H. Poynting
 - 1918: Charles G. Barkla (1917 ΒΝΦ)
 - 1919/22: Niels Bohr (1922 ΒΝΦ)
 - 1924/26/27: Charles T. R. Wilson (1927 ΒΝΦ)
 - 1929: Owen W. Richardson (1929 ΒΝΦ)
 - 1930: Chandrasekhara V. Raman (1930 ΒΝΦ)
 - 1935: James Chadwick (1935 ΒΝΦ)
 - 1937: John D. Cockroft and Ernest T. S. Walton (και οι δύο 1951 ΒΝΦ)

Rutherford - III

- ▣ Ενδιαφέρουσες λεπτομέρειες:
- ▣ Ο μαθητής του Henry Moseley θα έπαιρνε κατά πάσα πιθανότητα το ΒΝΦ του 1917, αλλά σκοτώθηκε στην Καλλίπολη.
- ▣ Τότε ο Rutherford πρότεινε έναν άλλο μαθητή του, τον Charles Glover Barkla, αναφέροντας ως ένα από τα «προσόντα» του ότι *δεν πίστευε στα φωτόνια*! Παρόλο που ο Barkla είχε μόνο 1 πρόταση, ενώ οι συνυποψήφιοί του, Einstein και Planck, είχαν από 6 ο καθένας, το βραβείο απονεμήθηκε στον Barkla.
- ▣ Η συνέχεια δεν δικαίωσε καθόλου την επιλογή της επιτροπής. Στα τελευταία χρόνια του ο Barkla διατήρησε την έδρα του, ως καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου, υπό τον όρο ότι δεν θα επιβλέπει υποψήφιους διδάκτορες!

ΠΚΘ: Bohr-Sommerfeld - I

- ▣ Ο Bohr πρότεινε (1913) το αξίωμα της κβάντωσης και εισήγαγε τον 1^ο κβαντικό αριθμό (*κύριο κβαντικό αριθμό*), την «ακτίνα» της (κυκλικής) τροχιάς του ηλεκτρονίου).
- ▣ Η θεωρία του ερμήνευε τα βασικά χαρακτηριστικά του φάσματος του υδρογόνου, αλλά όχι την λεπτή υφή.
- ▣ Λίγους μήνες αργότερα ο Sommerfeld εισήγαγε τον 2^ο κβαντικό αριθμό (*αξιμουθιακό αριθμό*), ο οποίος περιέγραφε τις ελλειπτικές τροχιές και ερμήνευε την λεπτή υφή του φάσματος
 - αποτέλεσμα του σχετικιστικού υπολογισμού της κινητικής ενέργειας (βλέπε παρακάτω).

ΠΚΘ: Bohr-Sommerfeld - II

- ▣ Μετά την παρατήρηση του φαινομένου Zeeman, εισήχθη ένας τρίτος κβαντικός αριθμός (*μαγνητικός αριθμός*).
- ▣ Τελικά ο Sommerfeld εισήγαγε τον 4^ο κβαντικό αριθμό (*spin*), για να ερμηνεύσει την υπέρλεπτη υφή του φάσματος.
- ▣ Το 1917 ο Einstein πρότεινε τους δικούς του *κανόνες κβάντωσης*, που βασίζονται στην έννοια των *συζυγών μεταβλητών* της Μηχανικής του Hamilton και, συγκεκριμένα, στις μεταβλητές *δράσης-γωνίας*.
- ▣ Η Παλιά Κβαντική Θεωρία (ΠΚΘ), στην πλήρη μορφή της, μπορούσε να ερμηνεύσει τα φάσματα των υδρογονοειδών ατόμων.
- ▣ Τότε ο Heisenberg διατύπωσε την *αρχή της αβεβαιότητας* και όλα άλλαξαν.

Niels Bohr (1885-1962)

- ▣ Πήρε Διδακτορικό (PhD) με τον Rutherford.
- ▣ Διατύπωσε τον πρώτο κανόνα κβάντωσης της Παλιάς Κβαντικής Θεωρίας.
- ▣ Δημιούργησε στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης την καλύτερα, πιθανότατα, ερευνητικό ομάδα στην Κβαντική Φυσική.
- ▣ Η ερμηνεία του για την εξίσωση του Schrödinger και τη λύση της θεωρείται σήμερα η πιο αποδεκτή φυσική ερμηνεία της Κβαντομηχανικής και είναι γνωστή ως η «ερμηνεία της Κοπεγχάγης».

Arnold Sommerfeld (1868-1951)

- ▣ Εισηγάγε τον 2^ο και τον 4^ο κβαντικό αριθμό.
- ▣ Επέβλεψε τα διδακτορικά 4 φυσικών που πήραν στη συνέχεια βραβεία Nobel (Heisenberg, Pauli, Debye, Bethe).
- ▣ Προσέλαβε ως μεταδιδακτορικούς ερευνητές 3 φυσικούς που πήραν στη συνέχεια βραβεία Nobel (Pauling, Rabi, von Laue).
- ▣ Προτάθηκε 81 φορές (!) για βραβείο Nobel.
- ▣ Αλλά δεν τιμήθηκε ποτέ με αυτό το βραβείο.

Νέα Κβαντική Θεωρία (ΝΚΘ)

Werner Heisenberg (1901-1976)

- ▣ Το 1925 ο Heisenberg «δανείστηκε» την ιδέα του *μη-αντιθετικού πολλαπλασιασμού* από τα αφηρημένα Μαθηματικά και τη Θεωρία του Hamilton (αγκύλες Poisson – Άλγεβρα Lie).
- ▣ Ο Max Born, ο κριτής για τη δημοσίευση της εργασίας, αναγνώρισε ότι τα καταλληλότερα μαθηματικά «αντικείμενα» που έχουν αυτήν την ιδιότητα είναι οι *πίνακες*. Έτσι εμφανίστηκε η *Μηχανική των Πινάκων*.
- ▣ Ο Born έγραψε πάνω σε αυτήν την ιδέα μια εργασία μαζί με τον πρώην μαθητή του, Pascual Jordan, η οποία δημοσιεύθηκε μόλις 2 μήνες μετά από την εργασία του Heisenberg.
- ▣ Αργότερα οι τρεις τους δημοσίευσαν μια εργασία από κοινού.
- ▣ Ο Heisenberg δημοσίευσε το 1927 το περίφημο αποτέλεσμα του για την *αρχή της αβεβαιότητας*.
- ▣ Έπειτα από αυτό, η ΠΚΘ ήταν νεκρή, αφού η ιδέα της τροχιάς δεν είχε πια νόημα.

Νέα Κβαντική Θεωρία

Erwin Schrödinger (1887-1961)

- ▣ Μη συμβατικός τρόπος ζωής.
- ▣ Δημοσίευσε την εργασία του για την εξίσωση Schrödinger (ΔΕΜΠ) τον Ιανουάριο του 1926.
- ▣ Αργότερα την ίδια χρονιά (Μάιος 1926) έδειξε την ισοδυναμία της προσέγγισής του με αυτήν του Heisenberg.
- ▣ Επινόησε το περίφημο «νοητικό» πείραμα (gedanken experiment) με την «γάτα του Schrödinger».
- ▣ Ακραία εφαρμογή: «Είναι η Σελήνη στη θέση της, όταν δεν την κοιτάζει κανείς;» (David Mermin, Physics Today, 1985).
- ▣ Ανέκδοτο: Heisenberg , Schrödinger και τροχονόμος ☺.

Heisenberg vs. Schrödinger

- ▣ Ο φορμαλισμός του Schrödinger, που βασίζεται στην κυματική εξίσωση, είναι ο πιο διαδεδομένος. Ο φορμαλισμός του Heisenberg, που βασίζεται στην έννοια των κβαντικών αλμάτων, ήταν καινοτομικός αλλά πιο δύσκολος στον μαθηματικό χειρισμό.
- ▣ Η διαφορά των φορμαλισμών αντανακλά τις διαφορετικές απόψεις τους για την ερμηνεία της Κβαντομηχανικής.
- ▣ Ο Schrödinger ήταν περισσότερο **ρεαλιστής** και συμφωνούσε με την άποψη του Einstein ότι **η τυχαιότητα δεν είναι επιθυμητή** στην περιγραφή της υπο-ατομικής Φυσικής.
- ▣ Ο Heisenberg ήταν περισσότερο **υποστηρικτής της Ερμηνείας της Κοπενχάγης για την Κβαντομηχανική**, η οποία θεωρεί την υπο-ατομική τυχαιότητα ως ένα εγγενές χαρακτηριστικό του υπο-ατομικού κόσμου, πραγματικά την «καρδιά» της Κβαντικής Θεωρίας.

Σχέση μεταξύ της αναπαράστασης Heisenberg και Schrödinger

- ▣ Και οι δύο αναπαραστάσεις αναφέρονται σε απεικονίσεις διανυσματικών χώρων.
- ▣ Η εικόνα του Schrödinger υποδηλώνει έναν «ενεργό» μοναδιαίο (unitary) μετασχηματισμό. Το *καταστατικό διάνυσμα μετασχηματίζεται*, αλλά *όλοι οι τελεστές είναι σταθεροί εν χρόνω* (εκτός και αν περιέχουν τον χρόνο ως μεταβλητή). Τα διανύσματα βάσης δεν αλλάζουν.
- ▣ Η εικόνα του Heisenberg υποδηλώνει τον ισοδύναμο παθητικό μοναδιαίο μετασχηματισμό. Το *καταστατικό διάνυσμα είναι σταθερό*. Όμως τα *διανύσματα βάσης αλλάζουν*, και επομένως οι τελεστές αλλάζουν επίσης.

Ο Feynman για την Κβαντομηχανική - Ι

So now you know what I'm going to talk about. The next question is, will you *understand what I'm going to tell you*?... No, you're not going to be able to understand it.

It is my task to convince you *not to turn away because you don't understand it*. You see, my physics students don't understand it either. That is because *I don't understand it*. Nobody does....

It's a problem that physicists have learned to deal with: they've learned to realize that whether they like a theory or they don't like a theory is *not the essential question*. Rather, it is whether or not the theory gives predictions that agree with experiment.

It is not a question of whether a theory is philosophically delightful, or easy to understand, or perfectly reasonable from the point of view of common sense....

QED: The Strange Theory of Light and Matter (1985)

Ο Feynman για την Κβαντομηχανική - II

Λοιπόν, γνωρίζετε για τι πρόκειται να σας μιλήσω. Η επόμενη ερώτηση είναι, *θα καταλάβετε αυτά για τα οποία θα σας μιλήσω*; Όχι, δεν θα μπορέσετε να τα καταλάβετε.

Ο σκοπός μου είναι *να σας πείσω να μην φύγετε επειδή δεν τα καταλαβαίνετε*. Βλέπετε, ούτε οι μαθητές μου της Φυσικής τα καταλαβαίνουν. Κι αυτό επειδή *εγώ δεν τα καταλαβαίνω*. Κανείς δεν τα καταλαβαίνει...

Είναι ένα πρόβλημα που οι φυσικοί έμαθαν να ζουν μαζί του: κατάλαβαν ότι *το βασικό ερώτημα* δεν είναι το αν τους αρέσει μια θεωρία ή όχι. Το βασικό ερώτημα είναι το αν η θεωρία δίνει ή όχι προβλέψεις που συμφωνούν με τα πειράματα.

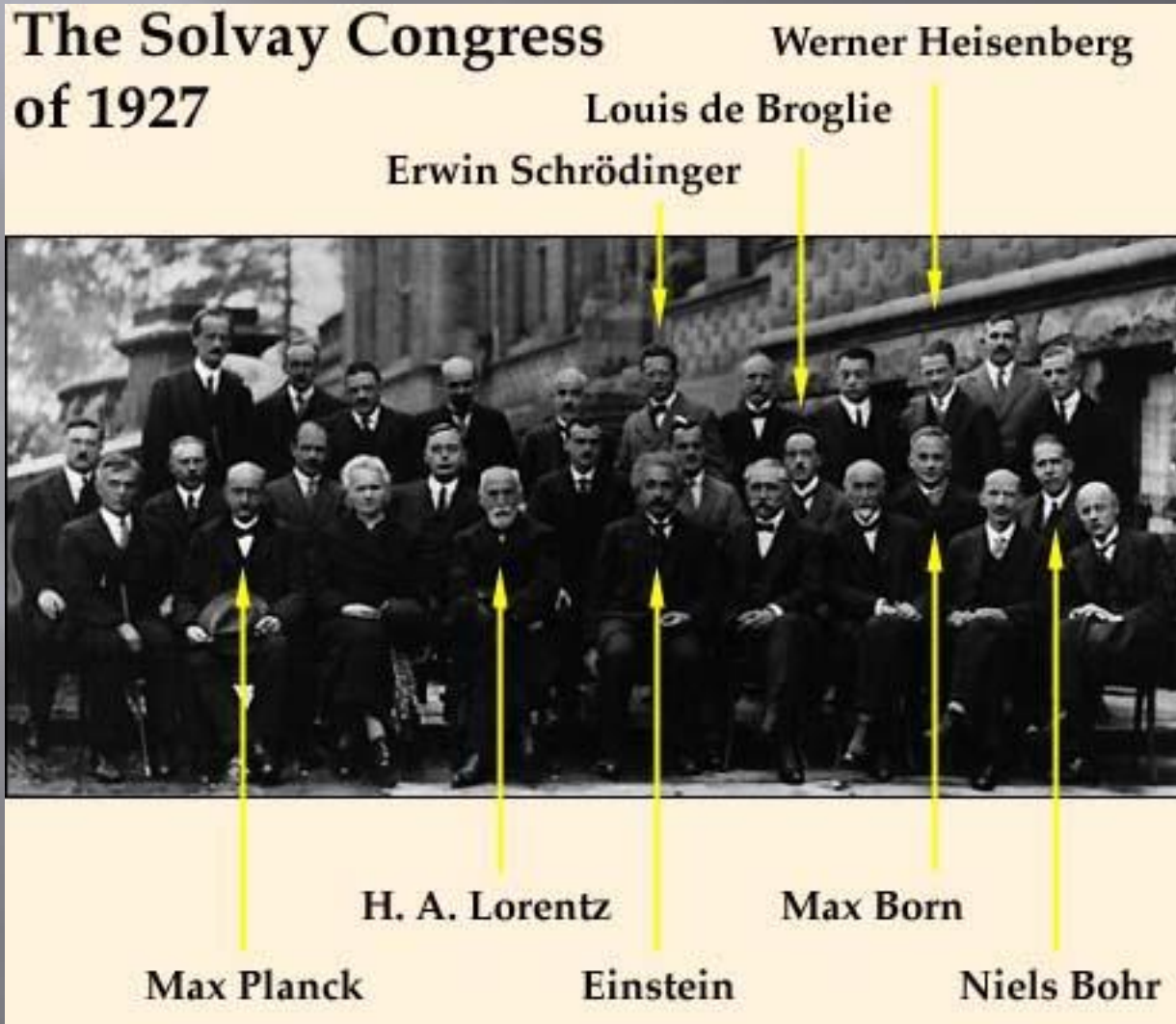
Δεν έχει σημασία αν μια θεωρία είναι φιλοσοφικά γοητευτική, ή εύκολη στην κατανόηση, ή απόλυτα λογική από την οπτική γωνία της κοινής λογικής...

QED: The Strange Theory of Light and Matter (1985)

Αρχή της συμπληρωματικότητας

- ▣ Ερμηνεία της Κοπεγχάγης
- ▣ Παράδειγμα: το φως είναι σωματίδια **ΚΑΙ** κύματα;
 - ΟΧΙ! Είναι **ΕΙΤΕ** σωματίδια **ΕΙΤΕ** κύματα!
- ▣ Δεν μπορούμε να μετρήσουμε *στο ίδιο πείραμα* ΚΑΙ σωματιδιακές ΚΑΙ κυματικές ιδιότητες!
- ▣ Κατά τον ίδιο τρόπο, δεν μπορούμε να μετρήσουμε ταυτόχρονα ΚΑΙ θέση ΚΑΙ ταχύτητα (ορμή), επειδή η μέτρηση της θέσης επηρεάζει την ορμή!
- ▣ Αυτό δεν συμφωνεί με την Αριστοτελική λογική!
 - Το πρόβλημα είναι δικό μας, όχι της Φύσης!
- ▣ Παρόμοια φιλοσοφικά ερωτήματα εμφανίζονται στη Σχετικότητα
 - Ακόμη χειρότερα στην Κβαντική Βαρύτητα (π.χ. βλέπε το βιβλίο του Susskind για την εικόνα που έχει ο ορίζοντας γεγονότων για έναν παρατηρητή «στο άπειρο» και έναν σε ελεύθερη πτώση).

Ποια ερμηνεία της Κβαντομηχανικής είναι η «σωστή»;



Διαμάχη Einstein – Bohr

▣ 5th Συνέδριο Solvay (1927)

- Einstein: ταυτόχρονη μέτρηση της θέσης (σχισμή) και της ορμής (ανάκρουση στον τοίχο) ενός ηλεκτρονίου στο νοητικό πείραμα των δύο σχισμών.

- Bohr: Πώς μετράτε την ορμή του τοίχου;

▣ 6th Συνέδριο Solvay (1930)

- Einstein: ταυτόχρονη μέτρηση χρόνου και ενέργειας (νοητικό πείραμα του «κρεμασμένου» κουτιού του Einstein, από το οποίο διαφεύγει 1 φωτόνιο).

- Bohr: Πώς ζυγίζετε το κουτί; (Equivalence principle!)

▣ 1935

- Einstein: νοητικό πείραμα EPR

- Η απάντηση του Bohr ήταν «συγκεχυμένη» (σύμφωνα με τον Bell), αλλά βλέπε και τη σχετική διαφάνεια στην ενότητα της Σχετικότητας!

Παράδοξο EPR-I

- ▣ Θεωρίες των «κρυμμένων» μεταβλητών
 - ▣ Υπάρχουν και άλλες μεταβλητές, πέραν αυτών που γνωρίζουμε ότι περιγράφουν ένα φυσικό σύστημα.
 - ▣ Η άγνοια των τιμών αυτών των μεταβλητών μας οδηγεί στο -ψευδές- συμπέρασμα ότι η εξέλιξη του συστήματος είναι τυχαία.
- ▣ Το 1964 ο Βορειο-ιρλανδός φυσικός John Stewart Bell δημοσίευσε το περίφημο θεώρημά του, σύμφωνα με το οποίο μια θεωρία που στηρίζεται στον **ρεαλισμό**, την **τοπικότητα** και την **ελευθερία** δεν μπορεί να συμφωνεί με όλες τις προβλέψεις της Κβαντομηχανικής.
 - ▣ **Ρεαλισμός**: τα «φανταστικά» πειράματα είναι ισοδύναμα με τα «πραγματικά».
 - ▣ **Τοπικότητα**: τοπική αιτιοκρατία (στο πλαίσιο της ΕΘΣ)
 - ▣ **Ελευθερία**: μπορούμε να ορίσουμε διατάξεις μέτρησης ανεξάρτητες από την εσωτερική κατάσταση του συστήματος που μετράμε.

Παράδοξο EPR-II

- ▣ Σύμφωνα με το θεώρημα του Bell, αν υπάρχει μια θεωρία, σαν τη *Θεωρία των Κρυμμένων Μεταβλητών*, που ικανοποιεί τις 3 προϋποθέσεις του θεωρήματος, τότε θα πρέπει να ισχύουν ορισμένες *ανισότητες*.
- ▣ Τα πειράματα που έγιναν το 1972, 1981 και το 2015 έδειξαν ότι οι ανισότητες αυτές παραβιάζονται
 - ▣ Με ορισμένους «αστερίσκους»!
- ▣ Κατά τον Bell, αν ΔΕΝ παραβιάζονταν, θα οδηγούμαστε, μοιραία, στο συμπέρασμα ότι τα πάντα είναι προδιαγεγραμμένα:
 - ▣ Όχι μόνο οι αποφάσεις μας για το ποια πειράματα θα πραγματοποιήσουμε
 - ▣ Αλλά και ποια θα είναι τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων!