

# «Από τα Quarks μέχρι το κύτταρο»

---

Κύκλοι Μαθημάτων Σύγχρονης Φυσικής  
Πρασιανάκης Γιώργος - Καραδημητρίου Μιχάλης



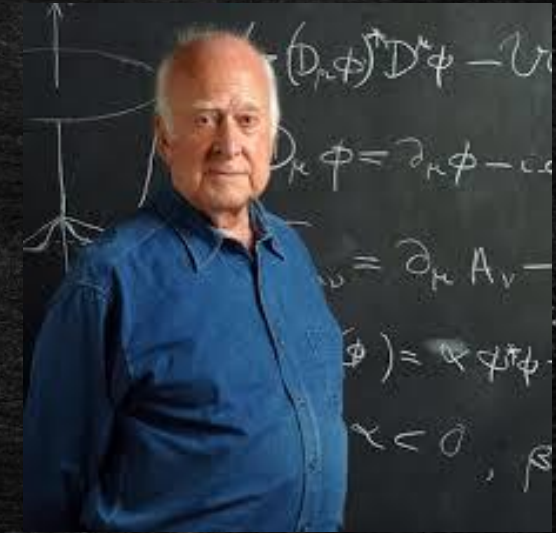
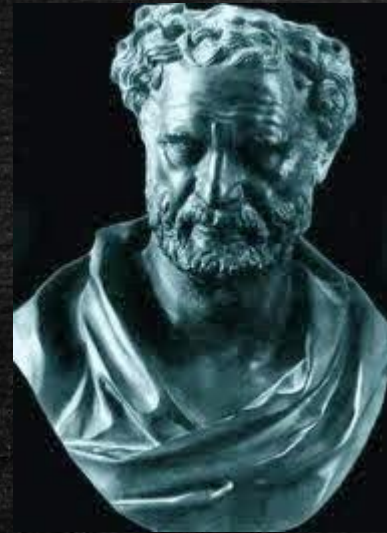
# Κάποιες ημερομηνίες...

Δημόκριτος (400 π.χ.)

**“νόμῳ γλυκὺ, νόμῳ πικρὸν, νόμῳ θερμὸν, νόμῳ ψυχρὸν, νόμῳ χροίῃ, ἔτεῃ δὲ ἄτομα καὶ κενόν”**

«κατὰ σύμβαση ὑπάρχει το γλυκὸ, κατὰ σύμβαση το πικρὸ, κατὰ σύμβαση το θερμὸ, κατὰ σύμβαση το ψυχρὸ, κατὰ σύμβαση το χρώμα, στην πραγματικότητα ὁμως ὑπάρχουν τα ἄτομα και το κενό.»

- ✓ Thomson (1897 μ.χ.): Ανακάλυψη του Ηλεκτρονίου
- ✓ Rutherford (1920 μ.χ.): Ανακάλυψη Πρωτονίου
- ✓ Chadwick (1932 μ.χ.): Ανακάλυψη Νετρονίου
- ✓ Murray Gell-Mann (1964 μ.Χ.): Ανακάλυψη Quarks
- ✓ LHC (2013 μ.Χ.): «ανακάλυψη» Μποζονίου Higgs





# Από τα Quarks στο κύτταρο

Κύτταρο  $\sim 10^{-5}$  m

DNA  $\sim 10^{-8}$  m

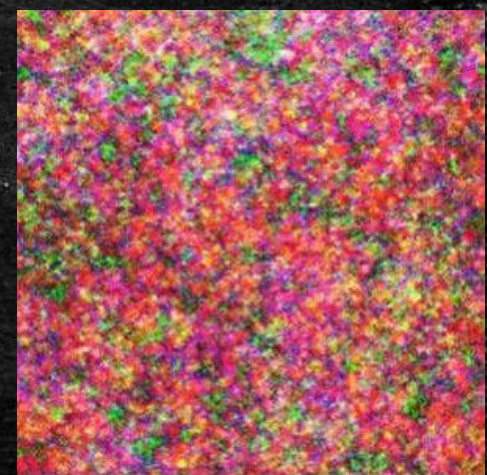
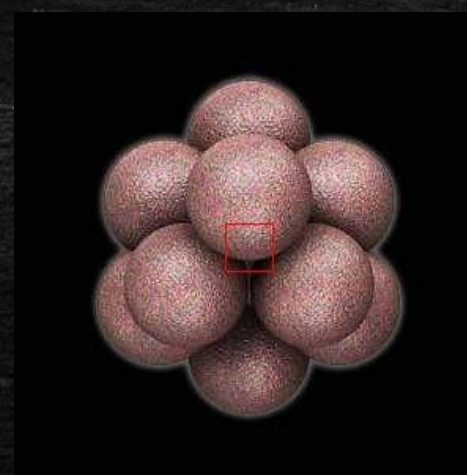
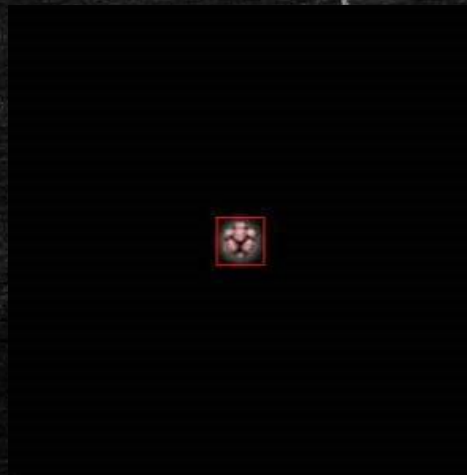
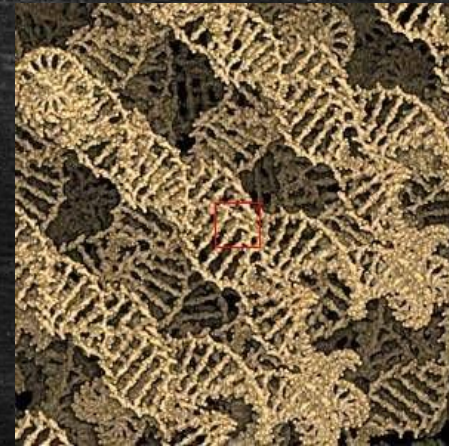
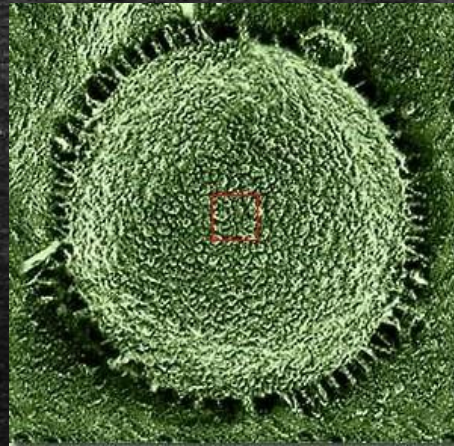
Άτομο  $\sim 10^{-10}$  m

Πυρήνας  $\sim 10^{-13}$  m

Πρωτόνιο  $\sim 10^{-15}$  m

Quarks  $\sim 10^{-16}$  m

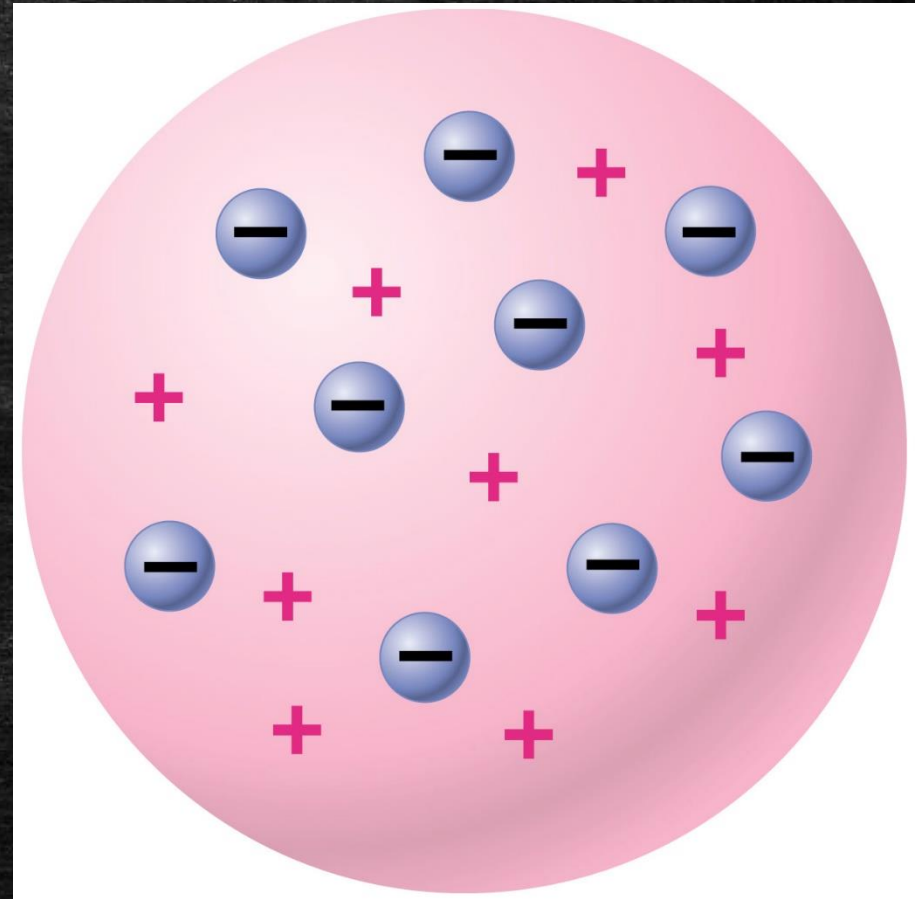
?????





# Ατομικό μοντέλο Thomson

- Για να είναι ηλεκτρικά ουδέτερη η ύλη θα πρέπει να υπάρχει ίση ποσότητα θετικού και ηλεκτρικού φορτίου.
- Ναι αλλά πως κατανέμονται αυτές οι ποσότητες?
- Ο Thomson πρότεινε το μοντέλο του «σταφιδόψωμου»
- Το θετικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο και τα ηλεκτρόνια είναι καρφισωμένα σαν σταφίδες στην επιφάνεια του θετικού φορτίου.
- **Θρίαμβος???** Μάλλον όχι....



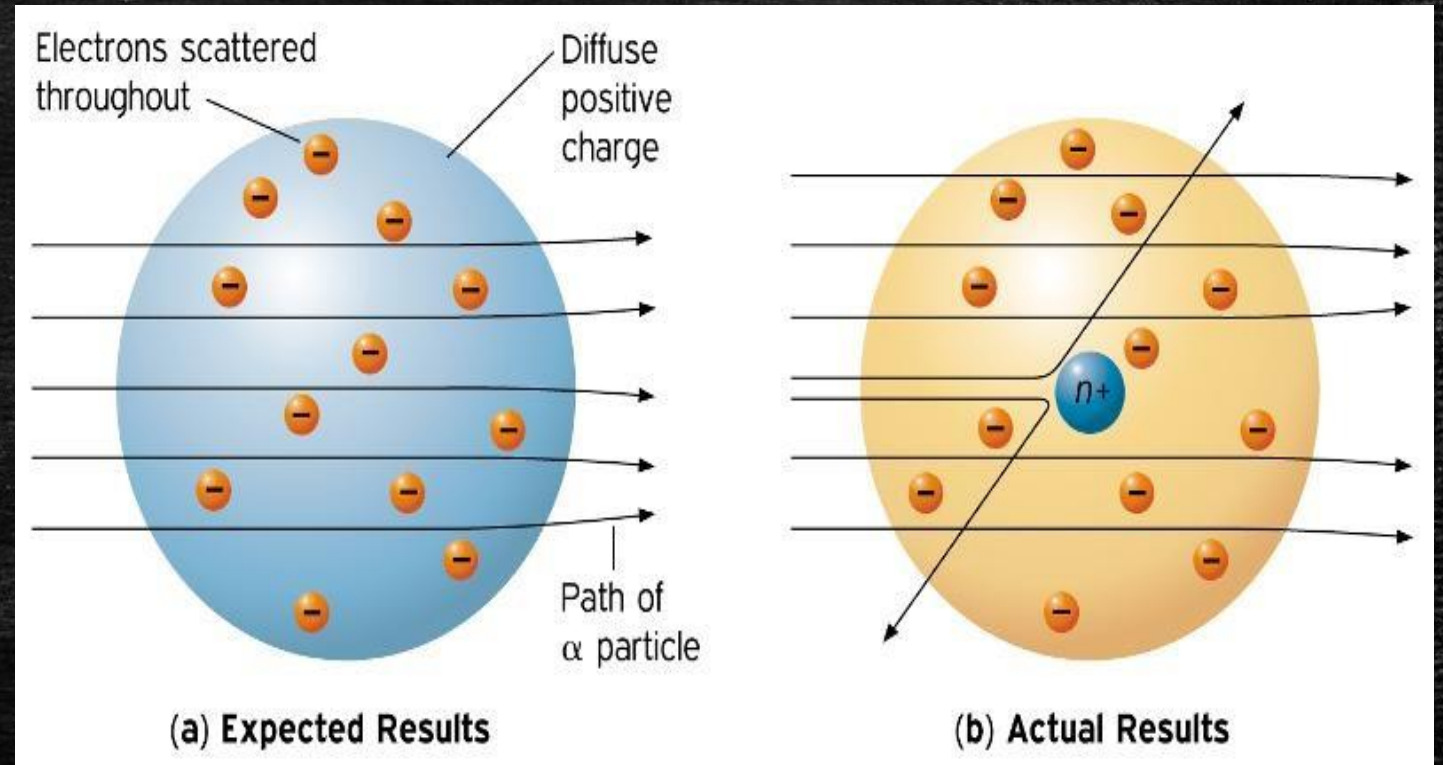


# Πείραμα Rutherford - 1920

Η αποτυχία της επιβεβαίωσης του μοντέλου του Thomson οδήγησε σε μία σπουδαιά ανακάλυψη.

- Το πρωτόνιο!!!

- Και το ταξίδι στο εσωτερικό του ατόμου συνεχίζεται.....





## Οι αντιφάσεις...

---

Το «πλανητικό μοντέλο» είναι ασταθές

- Τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα σύμφωνα με την κλασική 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.

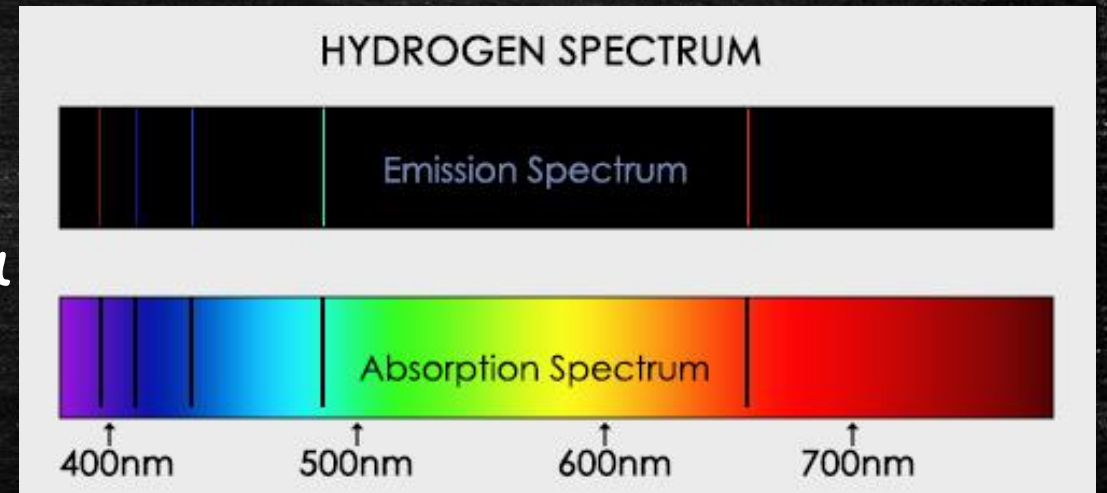


# Και άλλες αντιφάσεις...

## 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»*

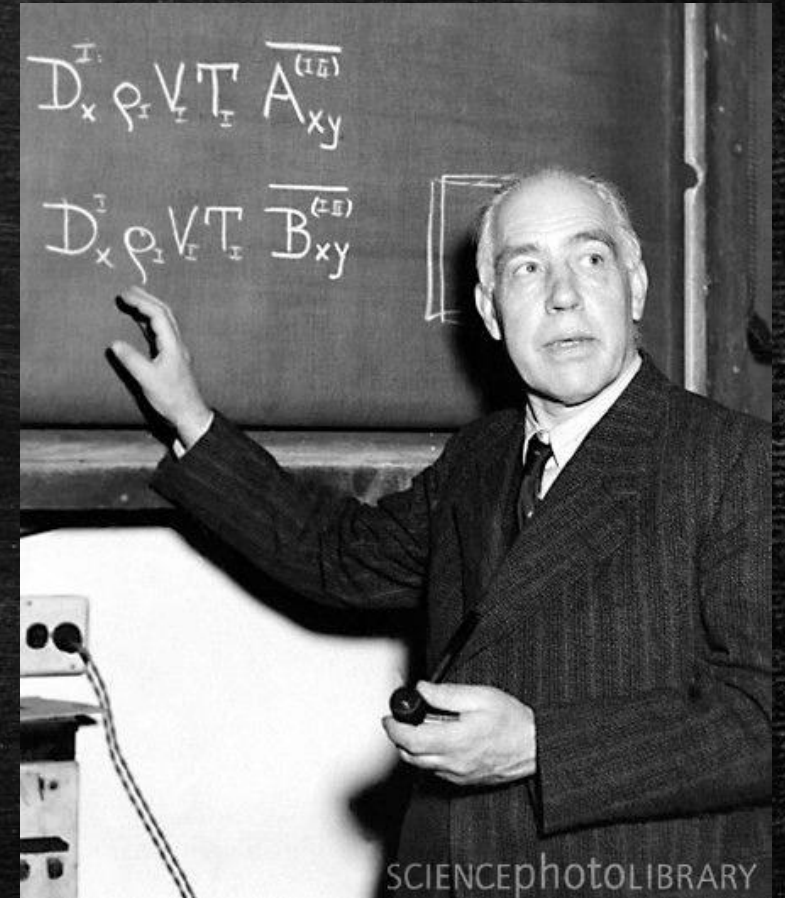




# Η Θεωρία του Bohr

"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)

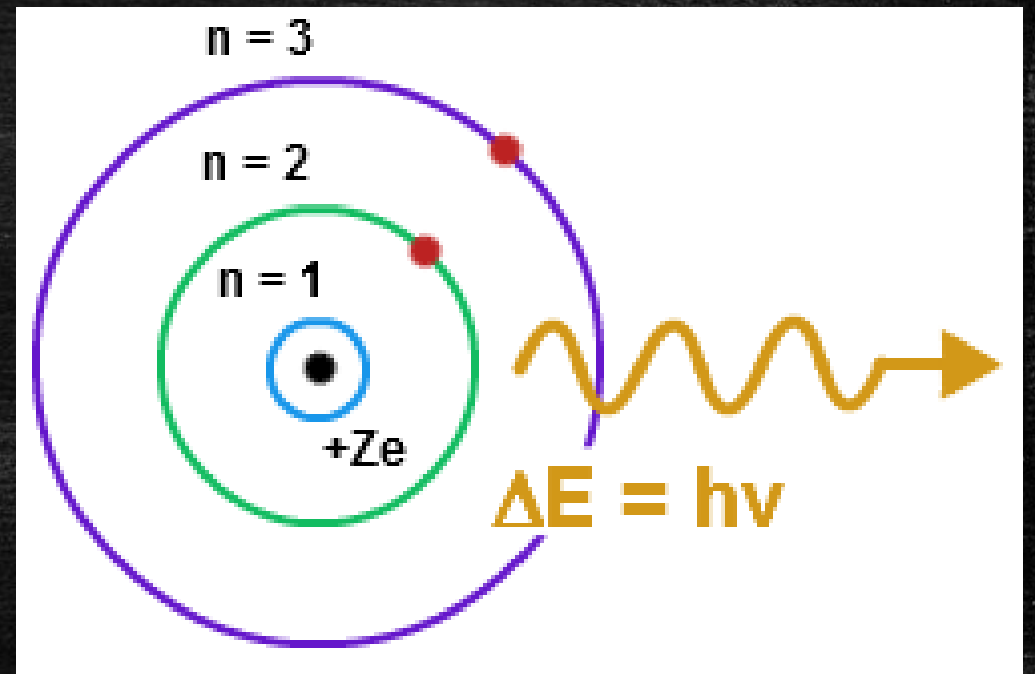




# Η θεωρία του Bohr για το άτομο Υδρογόνου

## Η 1<sup>η</sup> 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<sup>η</sup> 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!



# Ανακάλυψη του Νετρονίου - 1932

- Ο Chadwick πραγματοποίησε την διπλανή πειραματική διάταξη

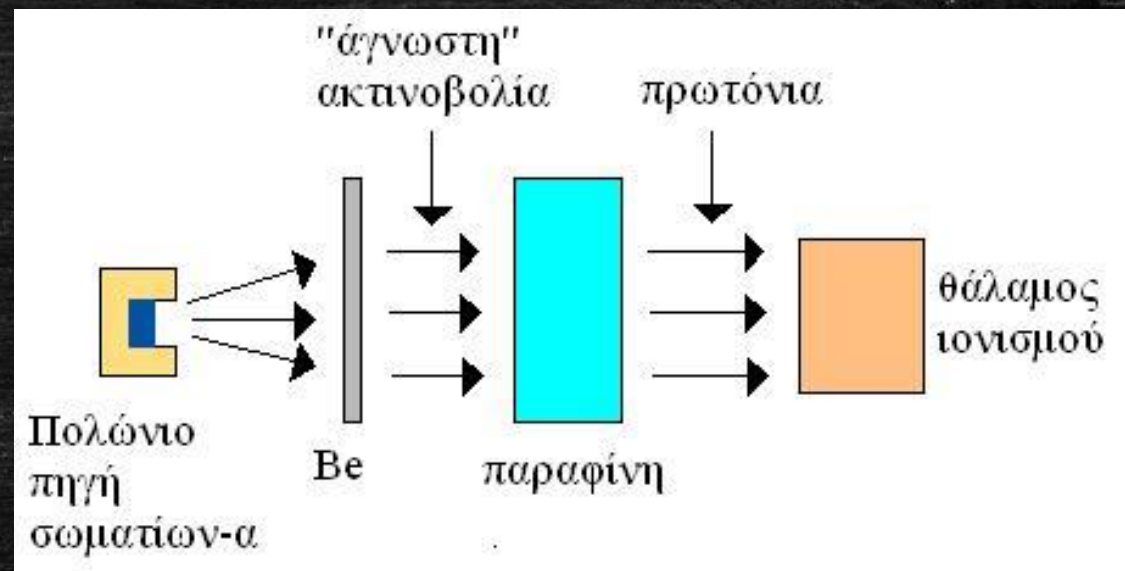
Η άγνωστη ακτινοβολία η οποία είναι ηλεκτρικά ουδέτερη εξάγει πρωτόνια από την παραφίνη.

Τα ηλεκτρόνια λόγω μεγέθους δεν είναι ικανά να εξάγουν τα πολύ μεγαλύτερα πρωτόνια.

$$m(p)=1837m(e)$$

**Άρα... τι ?**

Το συμπέρασμα είναι ότι εκτός από τα πρωτόνια στον πυρήνα υπάρχουν και ουδέτερα σωματίδια ίδιας μάζας. **Τα νετρόνια!!!!**





# Σταθερότητα του πυρήνα. Ένα δύσκολο πρόβλημα!

---

- Με την ανακάλυψη του πρωτονίου ανέκυψε ένα μεγαλύτερο πρόβλημα.
- Τι κρατάει τα πρωτόνια τόσο κοντά???
- Η άποψη της εποχής ήταν ότι εκτός από τα ηλεκτρονια που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα υπάρχουν και ηλεκτρόνια τα οποία συνυπάρχουν στον πυρήνα με τα πρωτόνια.



## Άτομο: Όχι τόσο α-τομο τελικά!!!

---

- Με τα πειράματα των Thomson, Rutherford, Chadwick αποδείχθηκε ότι το άτομο αποτελείται από μικρότερα συστατικά (πρωτόνια, νετρόνια, ηλεκτρόνια)
- Είναι αυτά τα έσχατα συστατικά του κόσμου μας?
- Και τι γίνεται τελικά με τη σταθερότητα του πυρήνα?
- Τα νετρόνια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα οπότε τι κρατάει τον πυρήνα σταθερό?
- Μάλλον ήρθε η ώρα να δούμε και το ρόλο των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους !!!



Αλληλεπιδράσεις + Σωματίδια = Κόσμος !

---

Τα «σωματίδια» συγκροτούν τη πρώτη ύλη (τούβλα) για την κατασκευή του κόσμου μας, αλλά χωρίς αλληλεπιδράσεις (κόλλα) δεν θα είχαμε αυτό το υπέροχο οικοδόμημα δηλαδή τον κόσμο μας!

«Πολλά σωματίδια ?? » + «Πολλές αλληλεπιδράσεις ??»

Πόσα ?

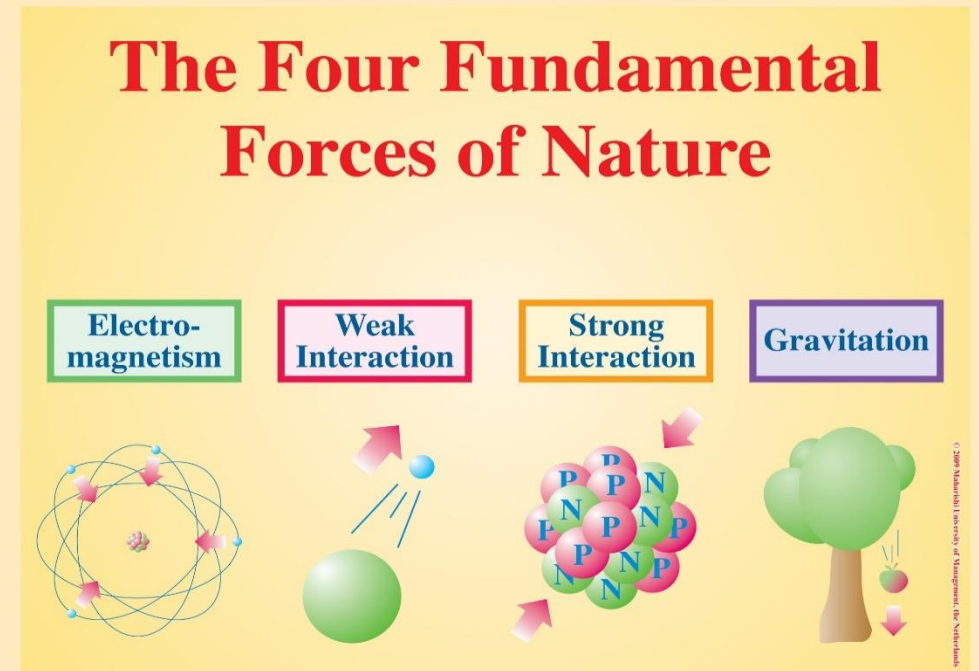
Πόσες?



# Ο κόσμος το 1932 !

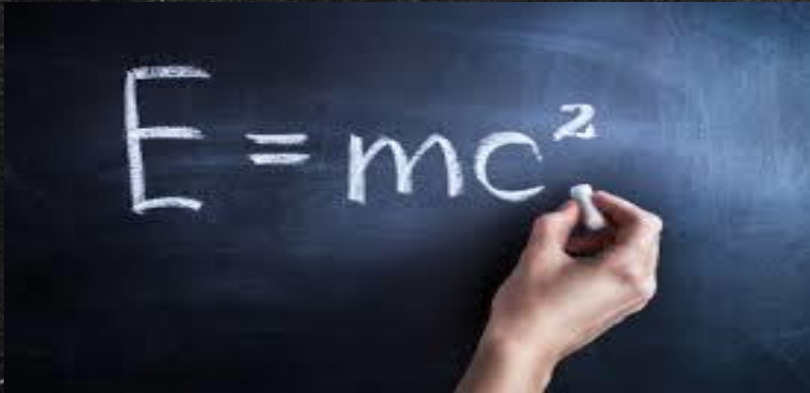
## «1932» – Τα «Στοιχειώδη» Σωματ<sup>α</sup>ια \*

Σωματ <sup>α</sup> ιο		Μάζα (MeV/c <sup>2</sup> )	Spin
Πρωτόνιο	p	938.3	1/2
Νετρόνιο	n	939.6	1/2
Ηλεκτρόνιο	e	0.511	1/2
Νετρίνιο	$\nu$	0	1/2
Φωτόνιο	$\gamma$	0	1
Αντισωματ <sup>α</sup> ια			





# «1932» - Κανόνες Επιλογής



Ισοδυναμία μάζας - ενέργειας

(A. Einstein - 1905)

Κάθε σωματίδιο έχει μια ενέργεια ηρεμίας που είναι ανάλογη της μάζας του...

Ο Κβαντικός αριθμός του spin κατατάσσει τα στοιχειώδη σωματίδια σε φερμιόνια (ημιακέραιο spin) και μποζόνια (ακέραιο spin)

(Διατηρούμενα μεγέθη πέραν από τα E, P, J)

είδος	σωμάτιο		Μάζα (MeV/c <sup>2</sup> )	spin	Q	B	L
αδρόνια	πρωτόνιο	p	938.3	1/2	1	1	0
	νετρόνιο	n	939.6	1/2	0	1	0
λεπτόνια	ηλεκτρόνιο	e	0.511	1/2	-1	0	1
	νετρίνιο	ν	0	1/2	0	0	1
	φωτόνιο	γ	0	1	0	0	0
αντισωματία							



# Και τα χρόνια περνούσαν... 1960 !

---

Πειράματα έφεραν στο φως και άλλα «στοιχειώδη» σωματίδια  
~ 300 νέα σωματίδια

**Λεπτόνια:**  $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$

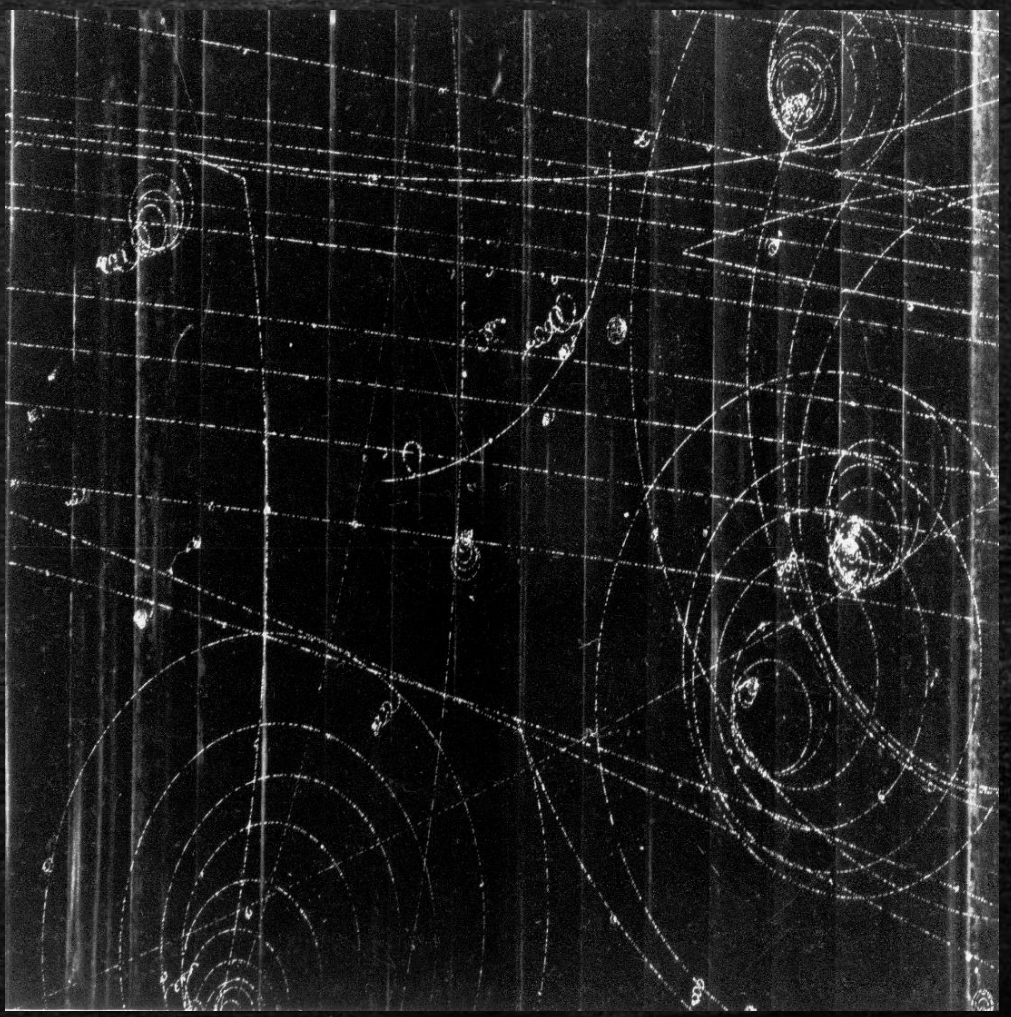
**Αδρόνια (Μεσόνια - Βαρυόνια):**  $\Lambda^0, \Sigma^\pm, \Delta^\pm, \Omega^-, \Xi^\pm, K^0, \rho^{\pm,0}, \varphi^0, \omega^0,$   
 $\pi^{0,\pm} \dots$

Μέχρι που εξαντλήθηκε το ελληνικό αλφάβητο...

Μάλλον κάτι πρέπει να γίνει!



# Ανίχνευση σωματιδίων σε θάλαμο φυσαλίδων





# Τα Quarks (1963) μια τάξη στο χάος...

Πείραμα: 1969 SLAC η πρώτη επιβεβαίωση συστατικών στο πρωτόνιο (αντίστοιχο πείραμα με εκείνο του Rutherford)

## Quarks

Name

up

charm

top

Symbol

$u$

$c$

$t$

Charge

$+\frac{2}{3}e$

$+\frac{2}{3}e$

$+\frac{2}{3}e$

down

strange

bottom

$d$

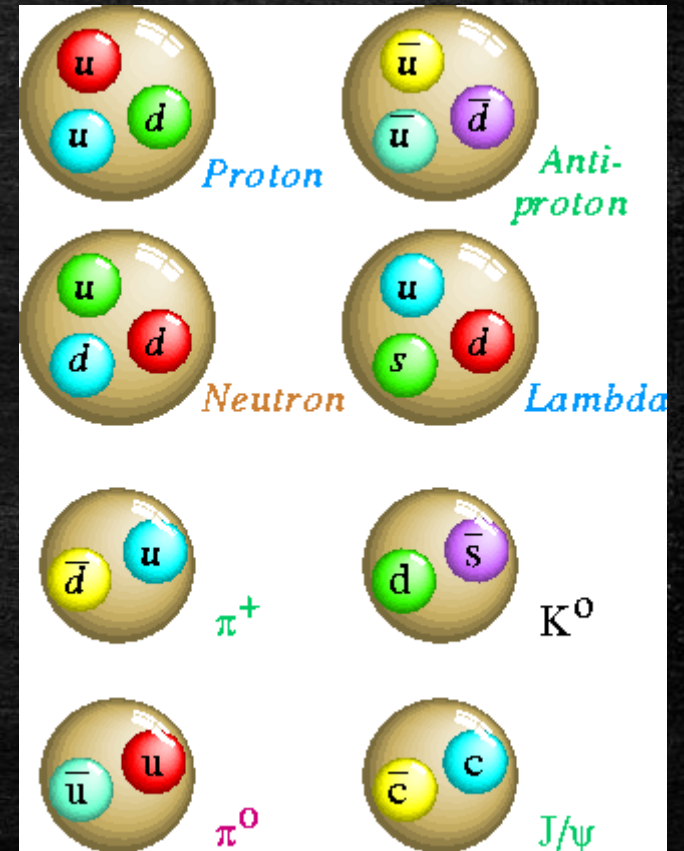
$s$

$b$

$-\frac{1}{3}e$

$-\frac{1}{3}e$

$-\frac{1}{3}e$





# Αλληλεπιδράσεις & φορείς

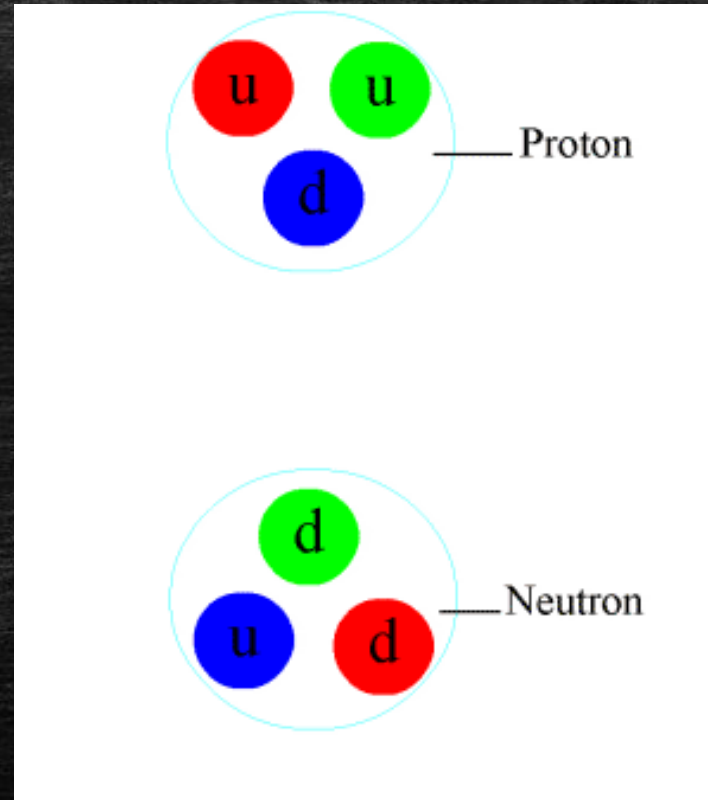
Όλες οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων της ύλης «μεταφέρονται» με την βοήθεια των σωματιδίων φορέων τους (μποζόνια)

Fundamental Forces				
<i>Strong</i>	<p>Force which holds nucleus together</p>	Strength <b>1</b>	Range (m) $10^{-15}$ (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, $\pi$ (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	<p>neutrino interaction Induces beta decay</p>	Strength $10^{-6}$	Range (m) $10^{-18}$ (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z_0$ , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		Strength $6 \times 10^{-39}$	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2



# Ισχυρή Πυρηνική αλληλεπίδραση

- ✓ Κρατάει ενωμένο το πυρηνικό «τσαμπί» αναγκάζοντας τα Quarks να φτιάχνουν ισχυρές δέσμιες καταστάσεις.
- ✓ Η εμβέλεια της περιορίζεται στο μέγεθος ενός μέσου πυρήνα.
- ✓ 137 φορές ισχυρότερη από την ηλεκτρομαγνητική δύναμη!
- ✓  $10^{38}$  φορές ισχυρότερη από την βαρυτική δύναμη.
- ✓ Φορέας το «Γλοιόνιο»
- \*Γλοιός - κόλλα στα Αρχαία Ελληνικά





# Ο χορός των «χρωμάτων»

Σύμφωνα με την QCD υπάρχει ένας ακόμα κβαντικός αριθμός, το «χρώμα» χαρακτηριστικός για τα Quarks και τα Γλοιόνια

➤ Κόκκινο (R)

➤ Πράσινο (G)

➤ Μπλε (B)

Δεν υπάρχουν άχρωμες καταστάσεις, δεν υπάρχουν ελεύθερα Quarks στην φύση

«Αν και το ηλεκτρικό σου φορτίο με απωθεί, με τρελαίνει το χρώμα σου!»

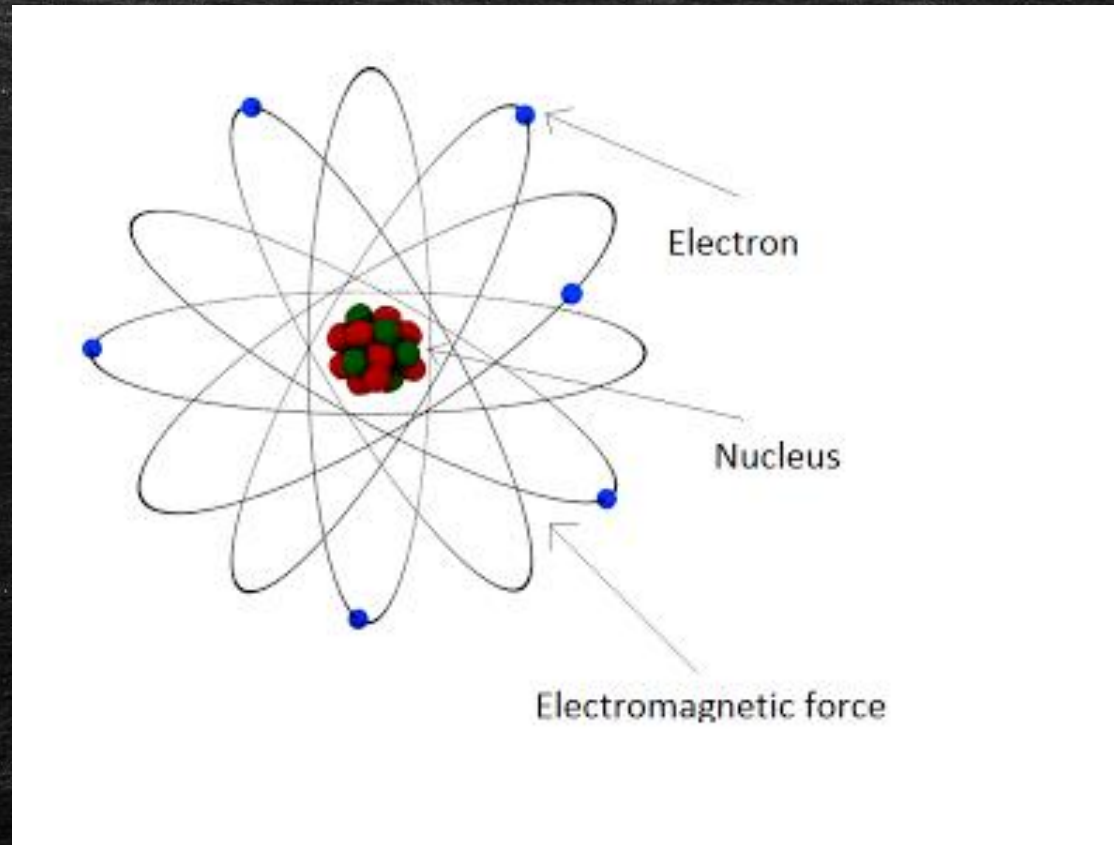


Και όμως έλκονται!



# Ηλεκτρομαγνητική Αλληλεπίδραση

- ✓ Υπεύθυνη για την δημιουργία του ατόμου, καθώς ασκείται ανάμεσα στον θετικό φορτισμένο πυρήνα και τα αρνητικά ηλεκτρόνια.
- ✓ Γενικότερα δρα ανάμεσα σε φορτισμένα σωματίδια.
- ✓ Η εμβέλεια της είναι άπειρη
- ✓ Φορέας της το «φωτόνιο»
- ✓ Κυρίαρχη δύναμη από την κλίμακα του ατόμου μέχρι τα ουράνια σώματα.





# Ασθενής Πυρηνική Αλληλεπίδραση

- ✓ Υπεύθυνη για την «μεταστοιχείωση» των πυρήνων (ραδιενέργεια)
- ✓ Φορείς τα «W, Z μποζόνια»

$T_{1/2} = 14.28 \text{ days}$   
 $Q = 1.71 \text{ MeV}$

Neutron decay via weak interaction

A neutron in  $^{32}_{15}\text{P}$  decays by  $W^-$  weak interaction. The weak interaction converts a down quark to an up quark, changing the neutron to a proton.

The decay process moves the phosphorus nucleus up one step in the periodic table to sulfur.

C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>
Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup> →	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>
Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>



# Βαρυτική Αλληλεπίδραση

- ✓ Η ασθενέστερη αλληλεπίδραση, σημαντική σε αστρικές κλίμακες. Δρα πάνω σε κάθε σώμα με μάζα, ενέργεια ή ορμή. Υπεύθυνη για την κίνηση των πλανητών γύρω από τον ήλιο, την δημιουργία αστρικών συμπλεγμάτων, γαλαξιών κλπ.
- ✓ Έχει άπειρη εμβέλεια
- ✓ Είναι πάντα ελκτική για αυτό και τίποτα δεν μπορεί να την «ακυρώσει».
- ✓ Φορέας το «Βαρυτόνιο»\*
- ✓ \*Δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμα... έρχεται σύντομα!!





# Το καθιερωμένο πρότυπο (??)

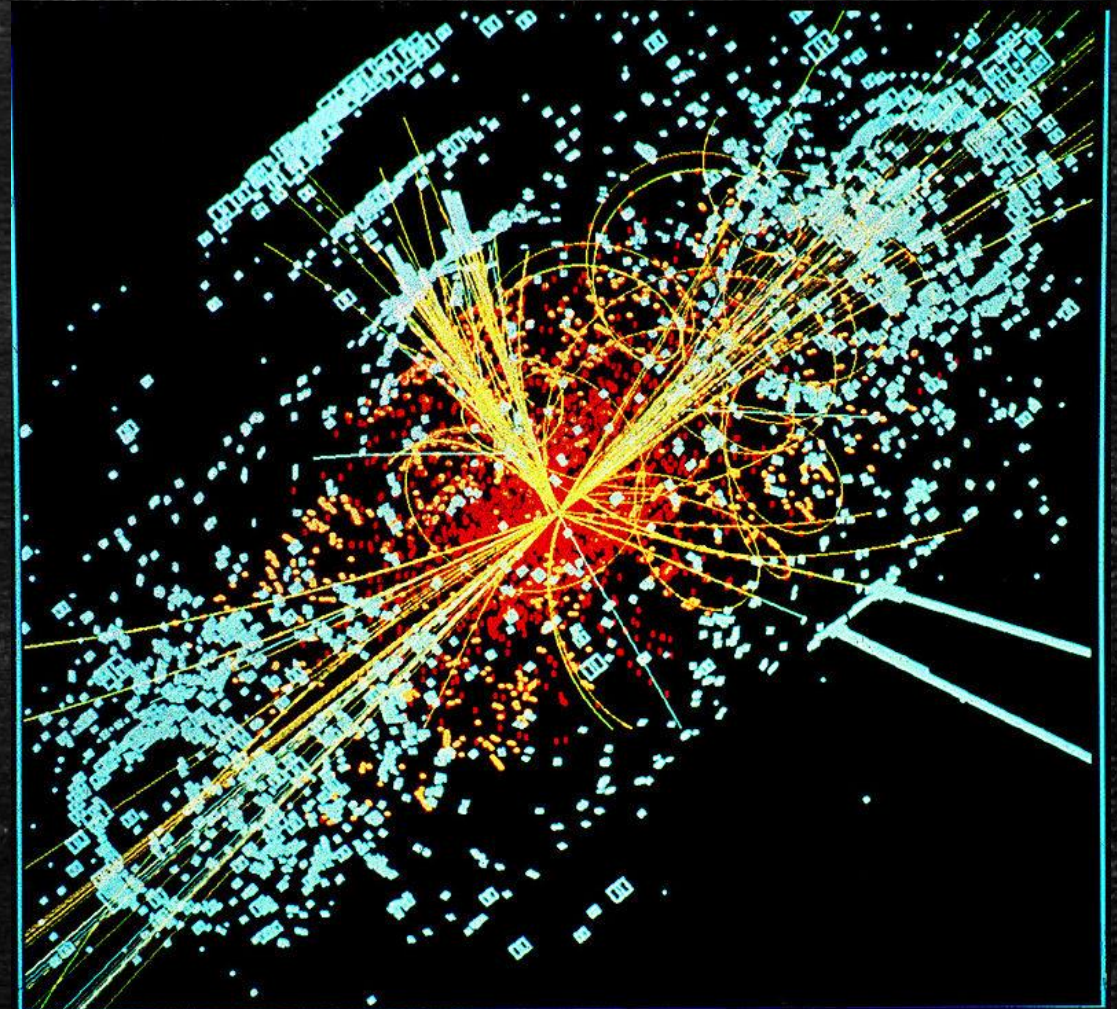
## STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES





# Σωματίδιο Higgs - «The God particle»

- ✓ Σωματίδιο που προβλέπει η θεωρία (1960) και μάλλον επαληθεύει το πείραμα (ATLAS - CMS, 4-7-2012)
- ✓ Το βαρύτερο μποζόνιο ( $\sim 125 \text{ GeV}$ )
- ✓ Ένα «παράξενο» σωματίδιο που διαφέρει από τα σωματίδια φορείς, όσο και τα σωματίδια ύλης (quarks και λεπτόνια), αλλά αλληλεπιδρά μαζί τους, δίνοντας του μάζα.
- ✓ Αν το σωματίδιο δεν υπήρχε η ύλη δεν θα είχε μάζα!

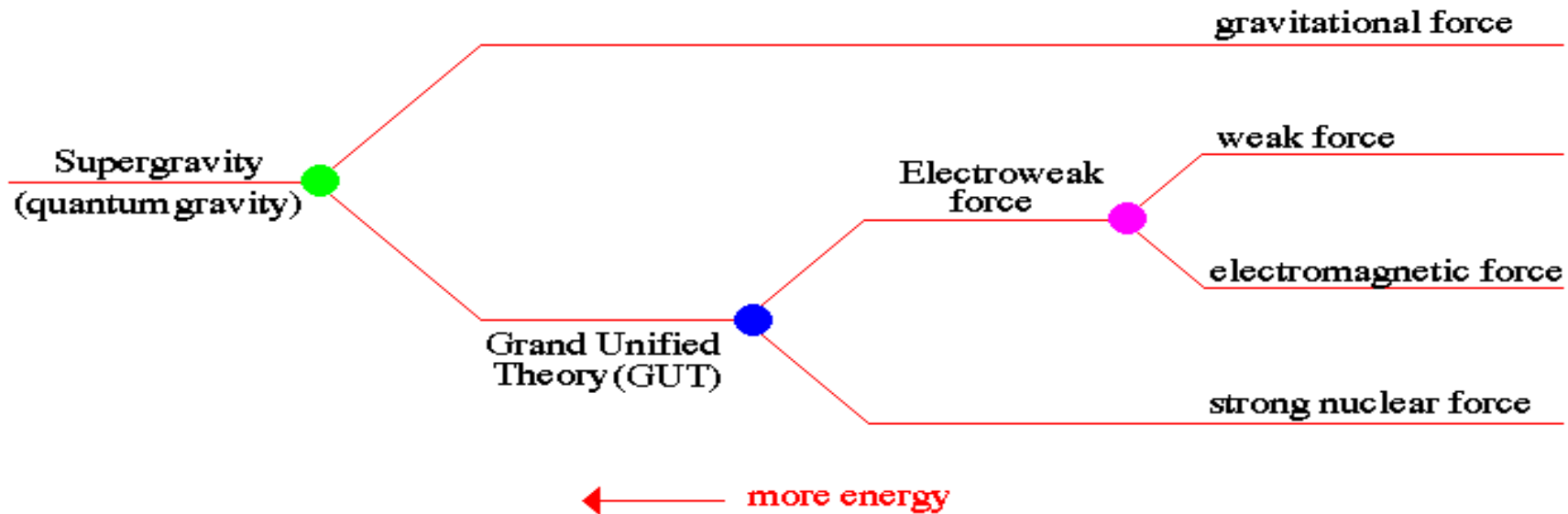




# Η θεωρία των πάντων!

## Unification

all the forces of Nature should be capable of being described by a single theory. But only at high energies should the behavior of the forces combine, this is called unification



before the unification point, the forces are indistinguishable and have symmetry. After the unification point, the forces act differently and the symmetry is broken.



Και πάλι πίσω στα 1900...

---

Η γέννηση της Κβαντικής Μηχανικής!!!



# 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

---

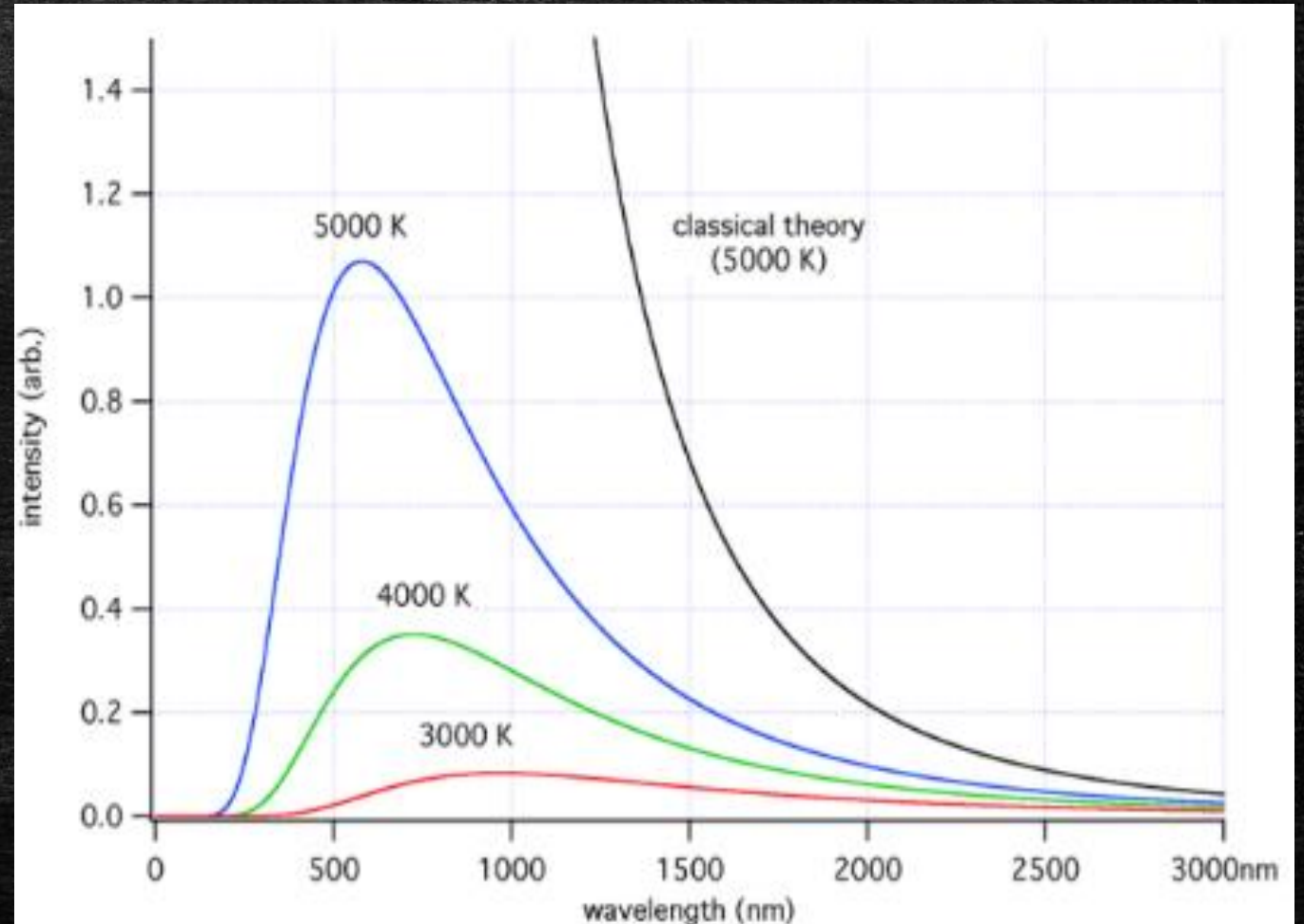
"Η Φυσική έχει πια λύσει τα θεμελιακά προβλήματα. Από τώρα και μπρος δεν θα είναι παρά απλή εφαρμογή των γενικών νόμων.

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

Kelvin, γύρω στο 1900

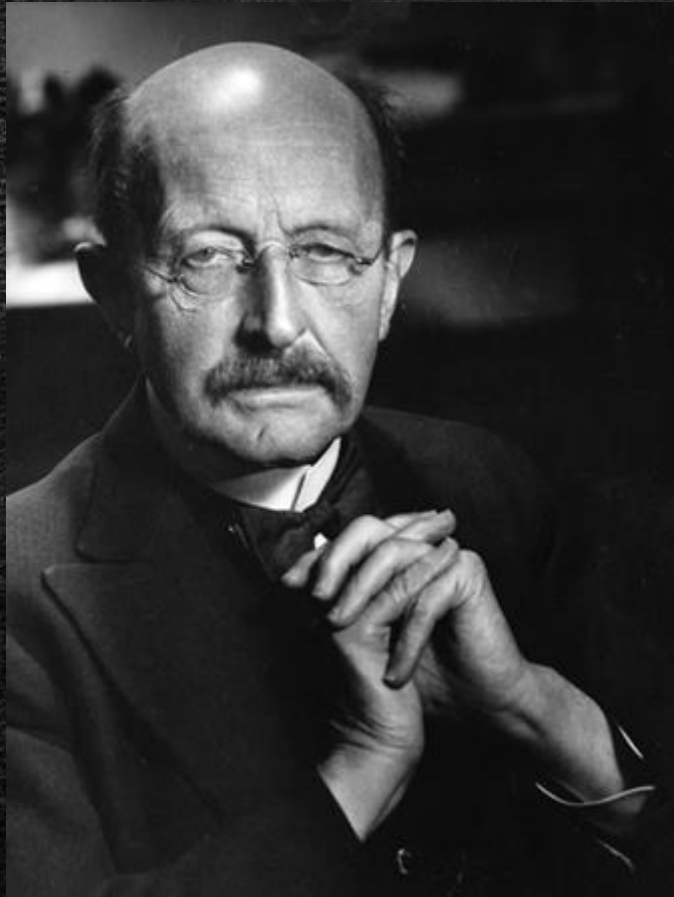


# Φασματική Κατανομή





# 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

$$E = h \cdot f$$

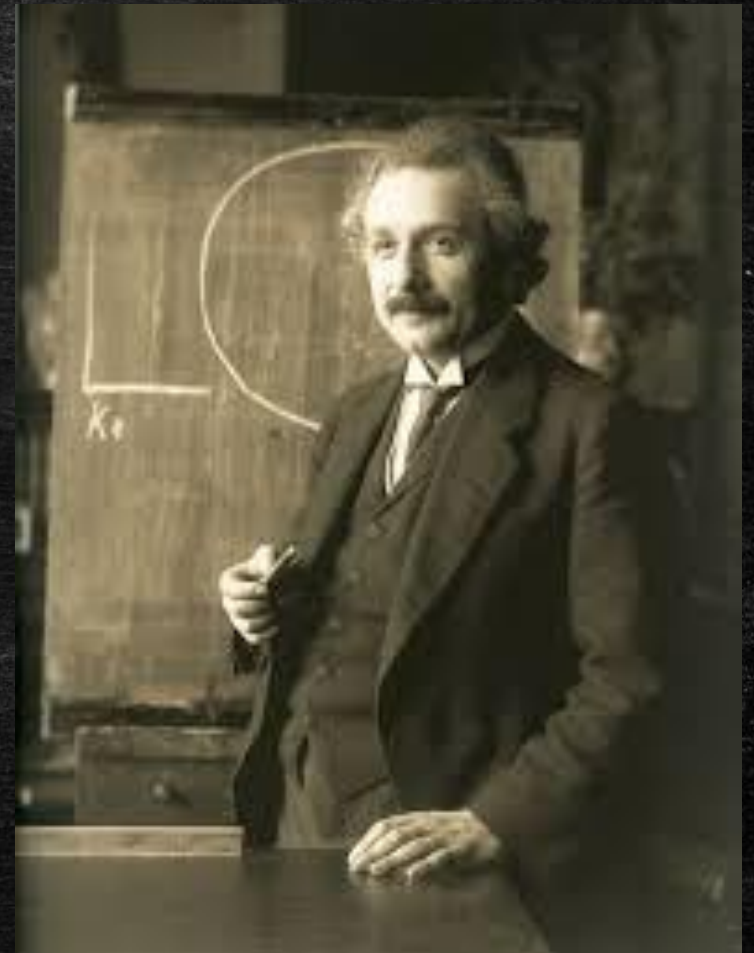
όπου  $h$  η σταθερά του Planck και  $f$  η συχνότητα της ακτινοβολίας.



# 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 διαφούνται και τα οποία μπορούν να παραχθούν ή να απορροφούν ως ολόκληρες μονάδες.

A. Einstein (1905)





# Κβαντική Ερμηνεία: Η υπόθεση των φωτονίων

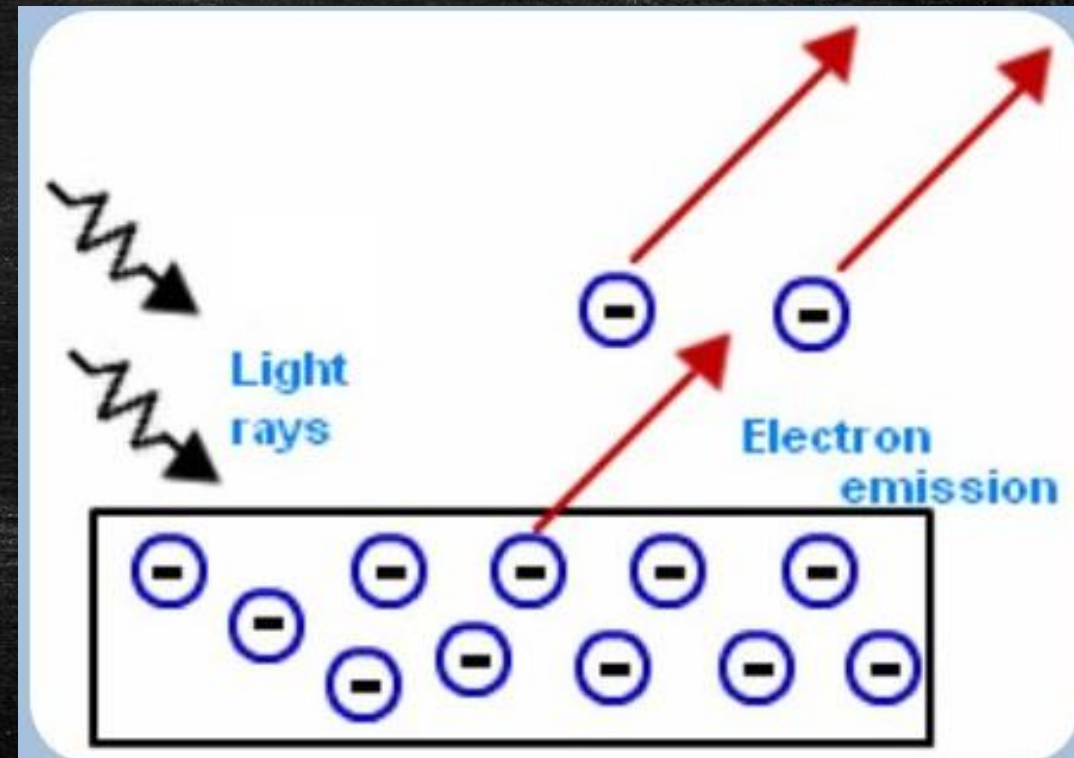
Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, αποτελείται από φωτόνια ενέργειας  $E = h \cdot f$

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:  $h \cdot f \geq W$





# 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.

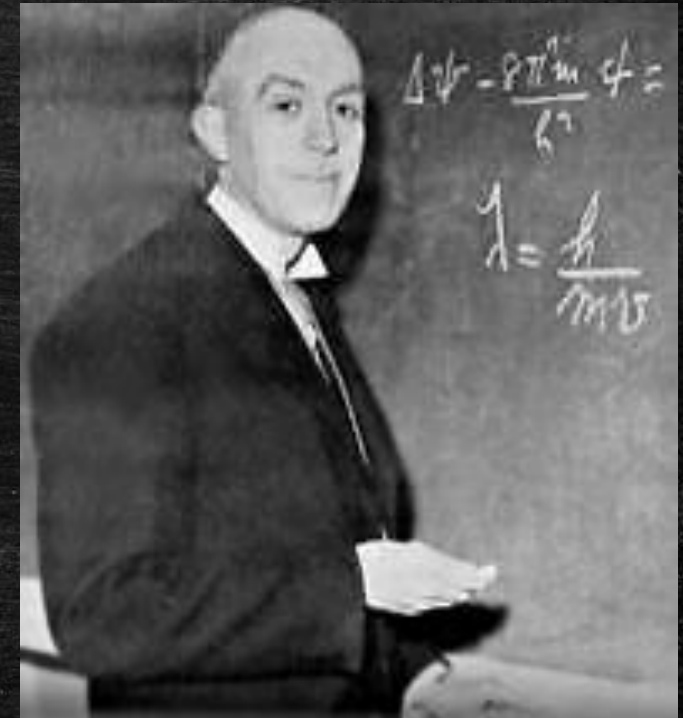


# Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός

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  $\lambda$  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)



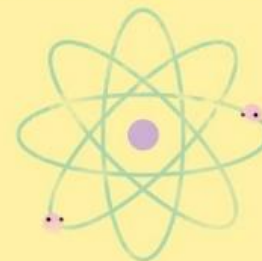
# Αρχή της Αβεβαιότητας

«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

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

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...

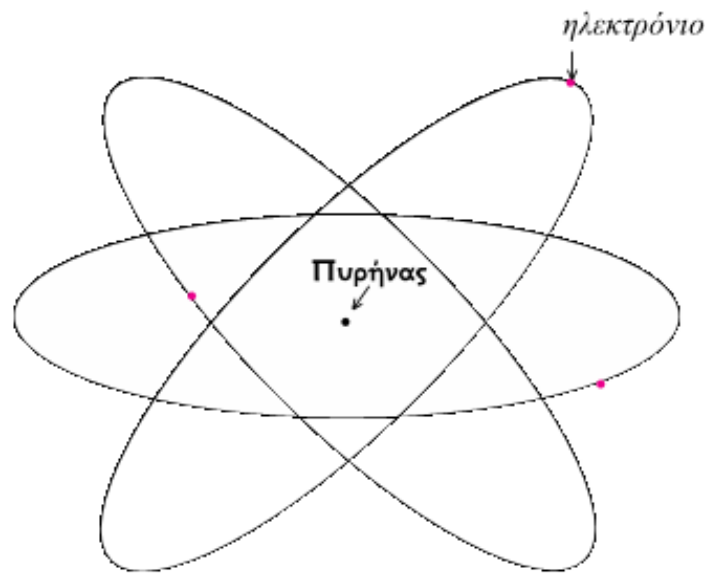
---

- 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]

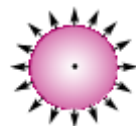
**Το 99,9999999999999 % του ατόμου είναι άδειος χώρος!**

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!



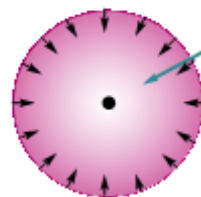
# Αβεβαιότητα = Σταθερότητα

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



(α)

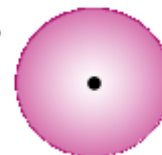
Το ηλεκτρόνιο είναι πολύ «στριμωγμένο» και αντιδρά στον υπερβολικό εντοπισμό του



(β)

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

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



(γ)

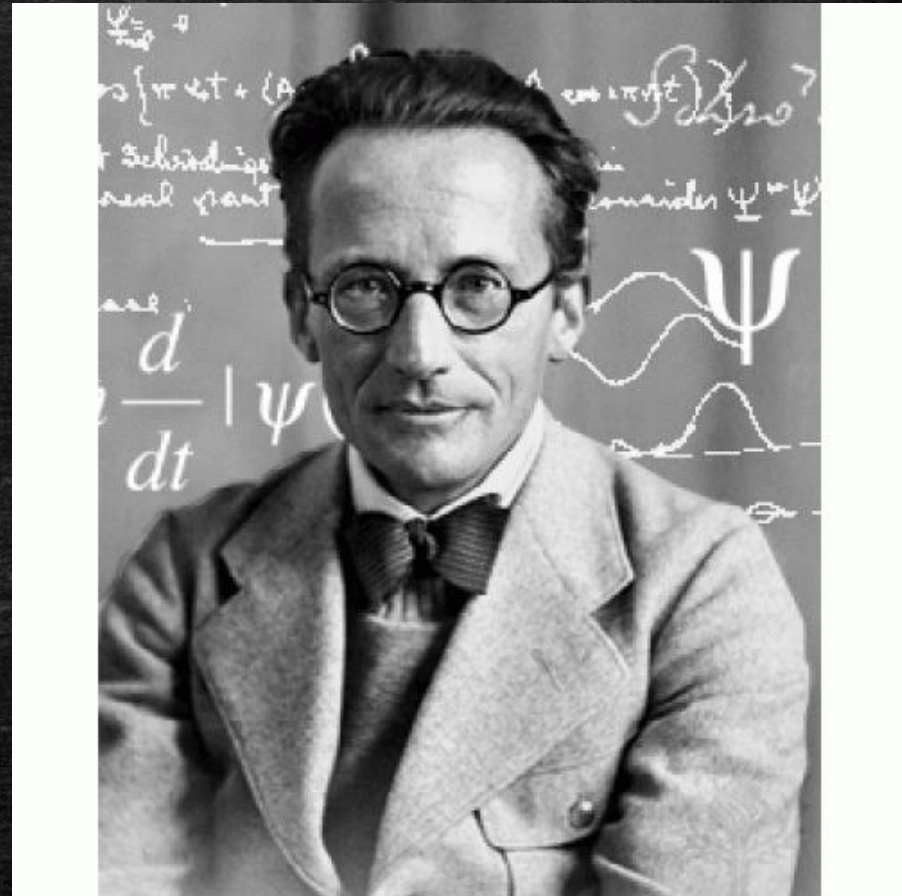
Η κατάσταση ισορροπίας (βέλτιστο μέγεθος)

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  $\Psi$ , που εξαρτάται από την θέση και τον χρόνο.
- Η κυματοσυνάρτηση  $\Psi$  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

- $\psi$  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.

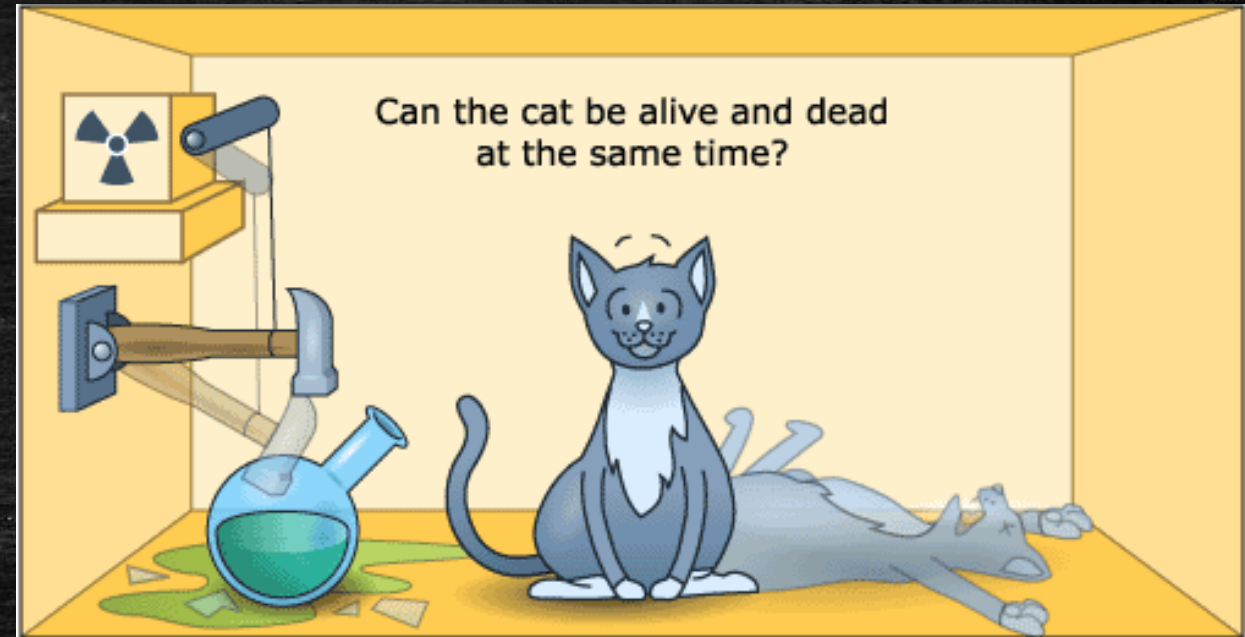


# Η γάτα του Schrodinger

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

Άρα κβαντικά η κατάσταση της γάτας περιγράφεται:

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







### SOLVAY CONFERENCE 1927

colourized by pastincolour.com

A. PICARD    E. HENRIOT    P. EHRENFEST    Ed. HERSEN    Th. DE DONDER    E. SCHRÖDINGER    E. VERSCHAFFELT    W. PAULI    W. HEISENBERG    R.H FOWLER    L. BRILLOUIN  
P. DEBYE    M. KNUDSEN    W.L. BRAGG    H.A. KRAMERS    P.A.M. DIRAC    A.H. COMPTON    L. de BROGLIE    M. BORN    N. BOHR  
I. LANGMUIR    M. PLANCK    Mme CURIE    H.A. LORENTZ    A. EINSTEIN    P. LANGEVIN    Ch.E. GUYE    C.T.R. WILSON    O.W. RICHARDSON

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL



## 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



## Επίλογος...

---

Η προσπάθεια για την κατανόηση του σύμπαντος αποτελεί ένα από τα ελάχιστα πράγματα που εξυψώνουν την ανθρώπινη φύση λίγο ψηλότερα από το επίπεδο της φάρσας και της δίνουν λίγη από τη μεγαλοπρέπεια της τραγωδίας ...

*Steven Weinberg*

*Nobel Φυσικής-1979*