Εισαγωγή στη Σωματιδιακή Φυσική: Από το Ηλεκτρόνιο μέχρι το Higgs και το Μεγάλο Αδρονικό Επιταχυντή (LHC) στο CERN

Θεόδωρος Αλεξόπουλος*, ΕΜΠ

Κων/νος Φουντάς, Παν/μιο Ιωαννίνων

- Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών, ΕΜΠ

Theodoros.Alexopoulos@cern.ch

Σωματιδιακή Φυσική: Από το Ηλεκτρόνιο μέχρι το Higgs και το Μεγάλο Αδρονικό Επιταχυντή (LHC) στο CERN

- Αναδρομή από τις αρχές του εικοστού αιώνα όταν γεννήθηκε η Σωματιδιακή Φυσική (Φυσική Υψηλών Ενεργειών)- ανακαλύψεις, τεχνικές, τεράστια πρόοδος αλλά επίσης σύγχυση και λάθη.
- Το καθιερωμένο Μοντέλο – Τι γνωρίζουμε σήμερα για τον κόσμο και από τι έχει φτιαχτεί.
- Τα προβλήματα που απασχολούν την Φυσική Υψηλών Ενεργειών σήμερα.
- Το LHC και η αναζήτηση του σωματιδίου Higgs, της υπερσυμμετρίας (SUSY) …..

Σωματιδιακή Φυσική

- Η Σωματιδιακή Φυσική προσπαθεί να απαντήσει τα ακόλουθα ερωτήματα:
  - Από τι στοιχειώδη σωμάτια αποτελείται το σύμπαν?
  - Πώς αλληλεπιδρούν τα στοιχειώδη σωμάτια μεταξύ τους?

Σωματιδιακή Φυσική

Η Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων προσπαθεί να περιγράψει με ένα κοινό τρόπο τα σωματίδια και τις αλληλεπιδράσεις τους. Προσπαθεί να καθορίσει ποια σωματίδια είναι και ποιες αλληλεπιδράσεις είναι θεμελιώδεις.

Είναι επίσης γνωστή ως Φυσική των Υψηλών Ενεργειών μιας και το πιο συνηθισμένο εργαλείο είναι επιταχυντές πολύ μεγάλης ενέργειας. Μεγάλη ενέργεια σημαίνει και μεγάλο μέγεθος μιας και τα φορτισμένα σωματίδια που κινούνται σε κυκλική τροχιά

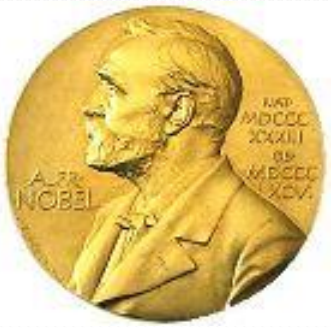
χάνουν ενέργεια ~ E^4/R ➔ μεγαλύτερη ενέργεια = μεγαλύτερη ακτίνα

Το αεροδρόμιο της Γενεύης

Ο επιταχυντής LHC έχει περιφέρεια 27 km. Δεν είναι ορατός από ψηλά επειδή βρίσκεται κάτω από το έδαφος σε βάθος μεταξύ 50 – 150 m. Τα μόνα ορατά σημεία είναι τα κτίρια στα 8 σημεία σύγκρουσης των σωματιδίων.

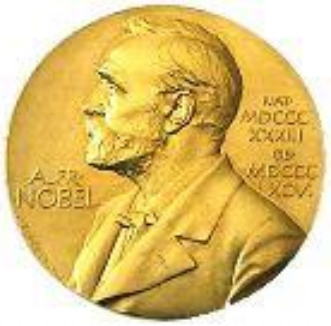
Ιστορία Φυσικής Υψηλών Ενεργειών–(1)

- **~50% Nobel σχετικά με ΦΥΕ**
- 1921 A. Einstein – φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μαζί με M.Planck (Nobel 1918) & Compton (Nobel 1927)
- 1922 Neils Bohr – δομή του ατόμου, κβάντωση ενεργειακών επιπέδων μαζί με τους Franck & Hertz (Nobel 1925) πείραμα
- 1927 Arthur Compton, Charles Thompson – photon scattering by electrons, discovery of cloud chambers
- 1929 Louis-Victor de Broglie – κυματική ιδιότητα των ηλεκτρονίων. Πείραμα Davisson & Thomson (Nobel 1937)
- 1932 Werner Heisenberg (Nobel 1933) Erwin Scroedinger & Paul Dirac : Κβαντική Θεωρία
- 1936 Carl Anderson – ανακάλυψη ποζιτρονίου. Προβλέφθηκε από την εξίσωση Dirac. Ανακάλυψη αντιπρωτονίου Segrè & Chamberlain (Nobel 195
- 1935 James Chadwick – ανακάλυψη νετρονίου
- 1939 Ernest Lawrence - Κύκλοτρο



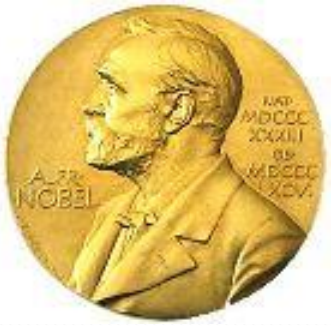
Ιστορία Φυσικής Υψηλών Ενεργειών–(2)

- 1945 Wolfgang Pauli – απαγορευτική αρχή. Ο Pauli προέβλεψε και την ύπαρξη του νετρίνο.
- 1948 P.M.S. Blackett ανάπτυξη του θαλάμου νεφών. Επίσης Donald Glaser ανάπτυξη θαλάμου φυσαλίδων (Nobel 1960) & Georges Charpak ανάπτυξη των πολυσυρματικών αναλογικών θαλάμων (Nobel 1992)
- 1949 Hideki Yukawa – μεσόνια. Το π-μεσόνιο του Yukawa ανακαλύφθηκε από τον Powell (nobel 1950)
- 1955 Willis Lamp & Polykarp Kusch – Μέτρηση της λεπτής υφής του υδρογόνου και της μαγνητικής ροπής του ηλεκτρονίου
- 1957 Chen Ning Yang & Tsung-Dao Lee – παραβίαση της parity σε ασθενείς αλληλεπιδράσεις.
- 1961 Robert Hofstadter – σκέδαση ηλεκτρονίων από πυρήνες. Gell-Mann – εδειξε ότι η υφή των αδρονίων είναι υπεύθυνη για το μεγάλο αριθμό μεσονίων και βαρυονίων (Nobel 1969). Δομή του νουκλεονίου από “partons” – Friedman, Kendall & Taylor (Nobel 1990).
- 1965 Feynman, Schwinger & Tomonaga – QED

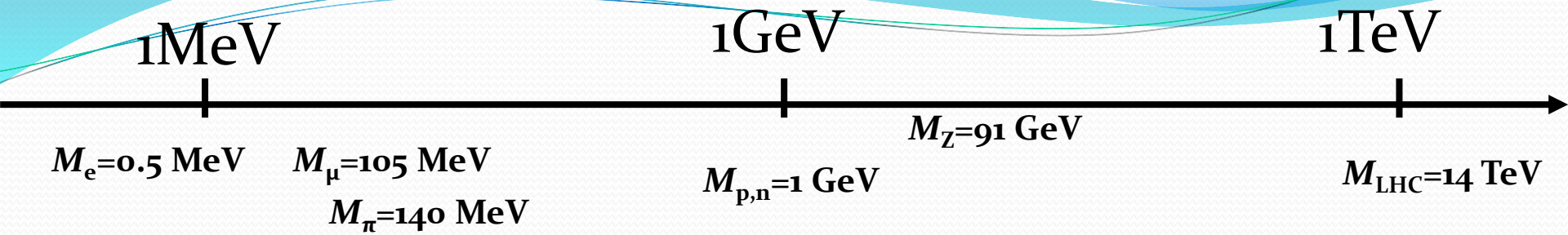


Ιστορία Φυσικής Υψηλών Ενεργειών–(3)

- 1976 Burton Richter & Sam Ting – ανακάλυψη του J/ψ
- 1979 Glashow Salam & Weinberg – Ενοποίηση ηλεκτρασθενών. ανακάλυψη των Z^o και $W^{+/-}$ - Rubbia & van der Meer (Nobel 1984). Ηλεκτρασθενής θεωρία – QFT 't Hooft & Veltman (Nobel 1999).
- 1980 James Cronin & Val Fitch – Παραβίαση της CP στα K
- 1982 Ken Wilson – Critical phenomena. Σύνδεση μεταξύ θεωριών πεδίου.
- 1995 Fred Reines, Martin Perl – ανακάλυψη του νετρίνου. Ανίχνευση του μ-νετρίνο – Lederman, Schwartz & Steinberger (Nobel 1988). Ταλαντώσεις νετρίνων – Ray Davis & Masatoshi Koshiba (Nobel 2002).
- 1999 Gerald 'tHooft, Martinus Veltman - quantum structure of electroweak interactions in physics
- 2004 David Gross, David Politzer & Frank Wilczek – QCD
- 2008 – Ypochiro Nambu, Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa - discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics
- 2013 Peter Higgs, Francois Englert – Higgs
- 2015 Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald - Neutrino oscillations
- 2017 Kip Thorne, Barry Barish - Gravitational waves



Μερικές σημαντικές μάζες/μονάδες



Για μήκη συνήθως χρησιμοποιούμε τις μονάδες:

- 1μm (10^{-6}m), π.χ. χωρική διακριτική ικανότητα ανιχνευτών
- 1nm (10^{-9}m), μήκος πράσινου φωτός λ=500nm
- 1A (10^{-10}m), μέγεθος του ατόμου
- 1fm (10^{-15}m), μέγεθος πρωτονίου

Για χρόνους, πρακτικές μονάδες είναι:

- 1μs (10^{-6}s), χρόνος ολίσθησης e σε 5 cm
- 1ns (10^{-9}s), σχετικιστικό e διανύει 30 cm
- 1ps (10^{-12}s), μέσος χρόνος ζωής του B μεσονίου

Φυσική πριν το 1900

«Δεν υπάρχει τίποτε το καινούργιο να ανακαλυφθεί πλέον... ότι απομένει πλέον είναι απλά μετρήσεις ακριβείας»

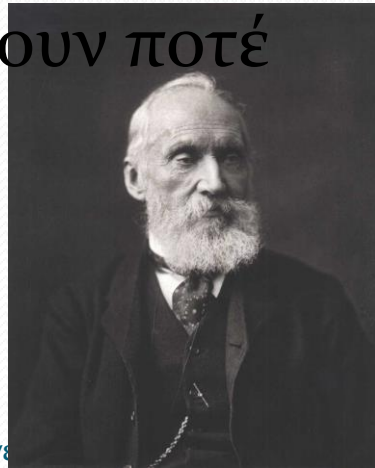
-Lord Kelvin, από την ομιλία του στο Βρετανικό συμβούλιο για την πρόοδο της επιστήμης, 1900

"Ακτίνες-X-rays θα αποδειχθεί ότι είναι ένα ψέμα"

-1896

"ούτε τα μπαλόνια και τα αεροπλάνα θα μπορέσουν ποτέ να δουλέψουν"

-1902 (ένα χρόνο πριν από την επιτυχημένη πτήση των αδελφών Wright)



Προβλήματα της Φυσικής πριν το 1900

- Ταχύτητα του φωτός
- Βαρυτική μάζα και μάζα αδράνειας
- Πηγή ενέργειας του Ηλίου
- Φάσμα του φωτός
- Σταθερότητα των ατόμων

Κατανοήθηκε με τη βοήθεια της Ειδικής Σχετικότητας

Κατανοήθηκε με τη βοήθεια της Κβαντομηχανικής

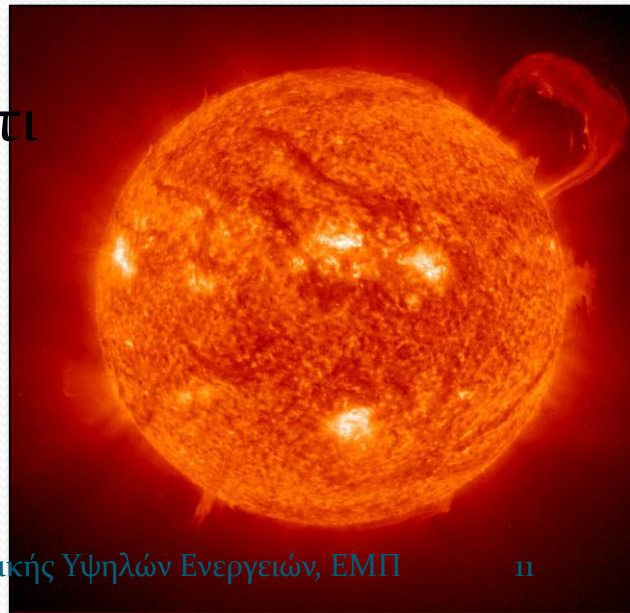
Προβλήματα της Φυσικής πριν το 1900

Από που αντλεί την ενέργεια του ο Ήλιος?

Οι φυσικοί πίστευαν ότι ο Ήλιος συρρικνώνεται οπότε μετατρέπει τη βαρυτική δυναμική ενέργεια σε θερμότητα και φως!

Αυτός ο μηχανισμός θα μπορούσε να παρέχει ενέργεια για ~25M χρόνια

Ήδη από το 1900, οι γεωλόγοι είχαν αποδείξει ότι η ηλικία της Γης (και του Ηλίου) ήταν πολύ μεγαλύτερη (~4.5B χρόνια)...



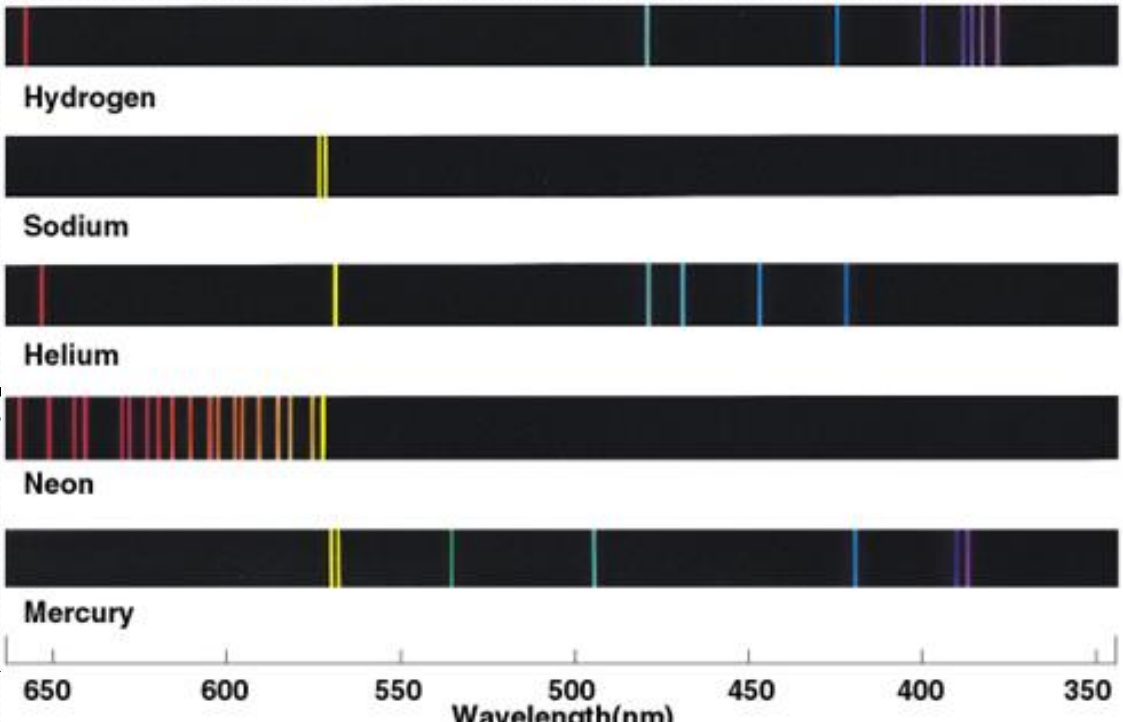
Προβλήματα Φυσικής πριν το 1900

Από που προέρχεται το φάσμα εκπομπής των αερίων?

Διαφορετικά χημικά στοιχεία παρατηρήθηκαν να εκπέμπουν σε διακριτά μήκη κύματος!

Αλλά τα θερμά αντικείμενα εκπέμπουν ακτινοβολία με συνεχή τρόπο

Και στις 2 αυτές περιπτώσεις δεν υπήρχε εξήγηση!

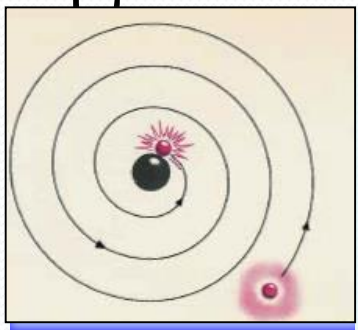


Προβλήματα Φυσικής πριν το 1900

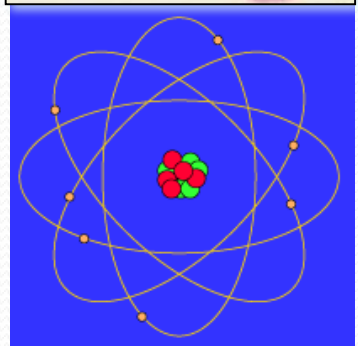
Γιατί τα άτομα δεν καταστρέφονται?

Αν και δεν είχαν καθαρή εικόνα του ατόμου, υπέθεταν ότι τα άτομα αποτελούνται από αρνητικά ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται κυκλικά γύρω από από ένα θετικό πυρήνα

Επίσης, γνώριζαν ότι φορτισμένα σωματίδια εκπέμπουν ενέργεια καθώς κινούνται στο πεδίο του θετικού πυρήνα

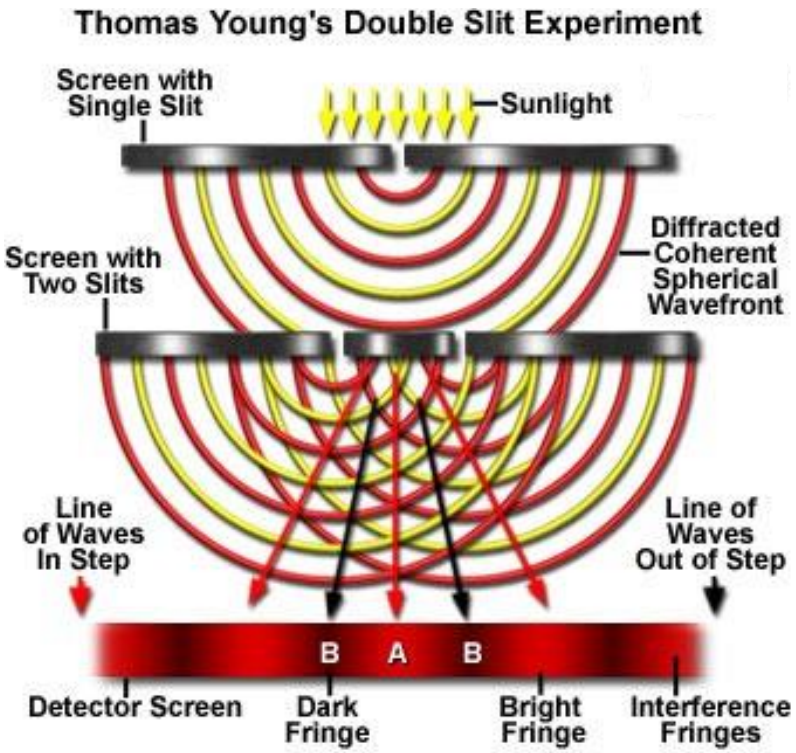


Με αποτέλεσμα, τα ηλεκτρόνια να πέφτουν στον πυρήνα.... Η ύλη θα πρέπει να είναι ασταθής!



Αναδρομή στα πρώτα βήματα της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών

Το φως παρουσιάζει κυματική φύση!



Thomas Young 1801

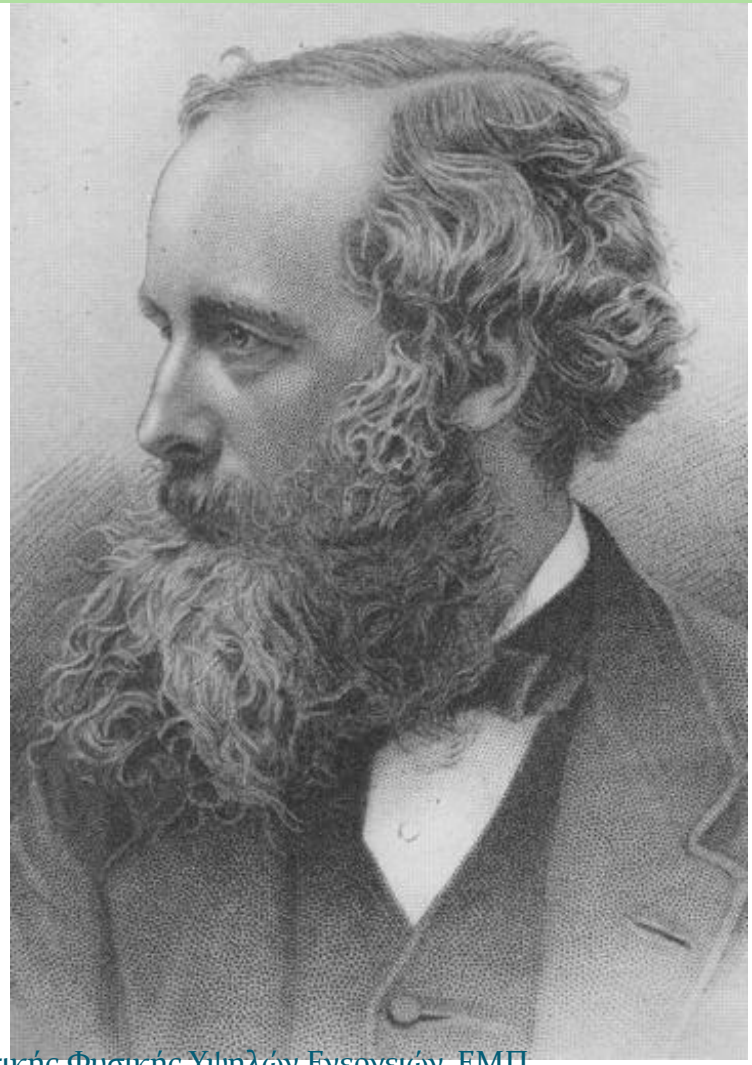
Ηλεκτρο-μαγνητισμός Ενοποίηση δυνάμεων?

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

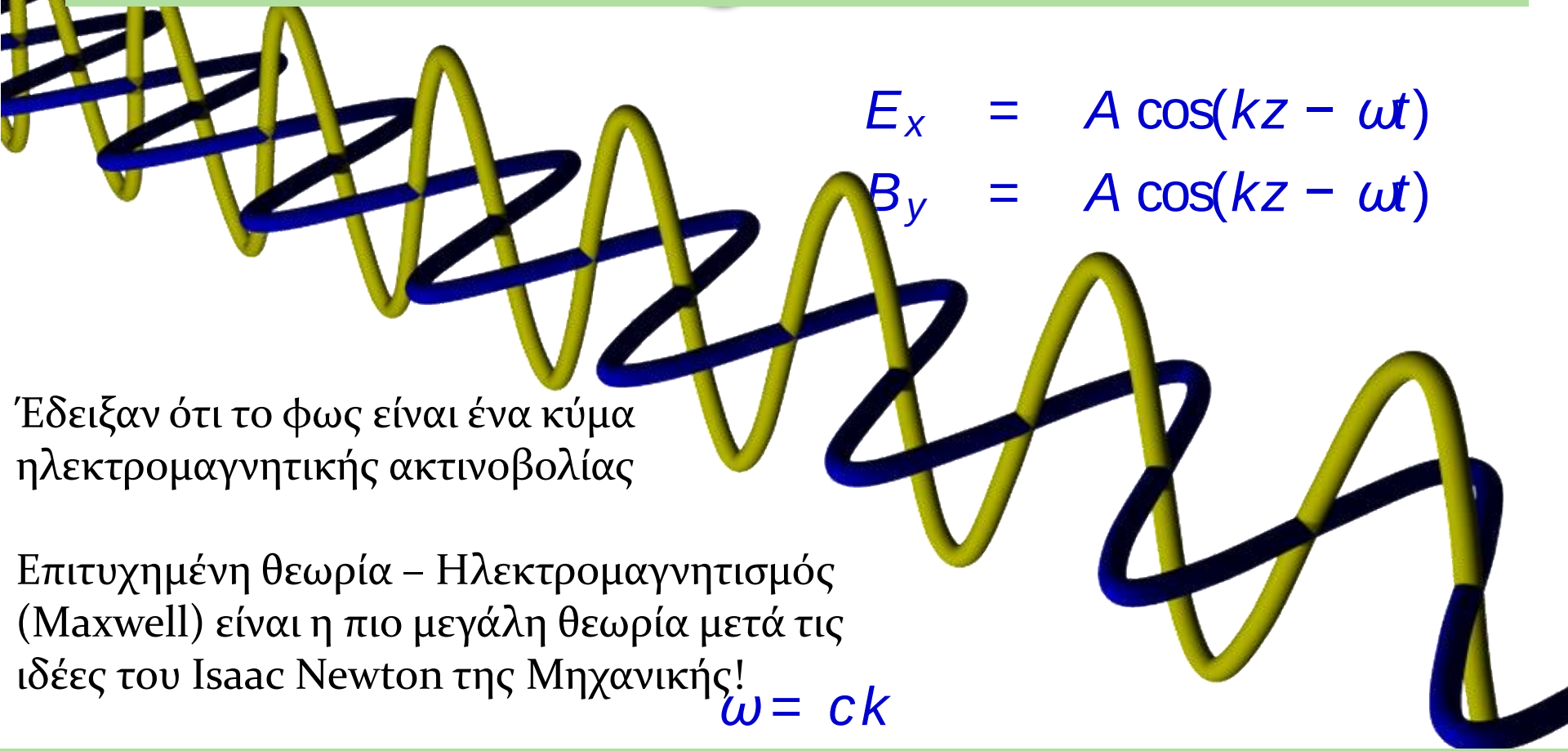
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c}\vec{J} + \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



Προβλέπει ΗΜ κύματα

Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα



$$E_x = A\cos(kz - \omega t)$$
$$B_y = A\cos(kz - \omega t)$$

Έδειξαν ότι το φως είναι ένα κύμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Επιτυχημένη θεωρία – Ηλεκτρομαγνητισμός (Maxwell) είναι η πιο μεγάλη θεωρία μετά τις ιδέες του Isaac Newton της Μηχανικής!

$$\omega = ck$$

Ταχύτητα φωτός ανεξάρτητη από την πηγή

Einstein

Αν η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή/αναλλοίωτη τότε ο χώρος και χρόνος θα πρέπει να μεταβάλλονται

Μετασχηματισμοί Lorentz

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x^\mu = (t, x, y, z)$$

$$x'^\mu = (\gamma(t - \frac{v}{c^2} x), \gamma(x - vt), y, z)$$

θέση & χρόνος δημιουργούν ένα τετράνυσμα

Τετρανύσματα

$$\vec{p} = \gamma\, m\, \vec{v}$$

$$p^{\mu} = (E/c, p_x, p_y, p_z)$$

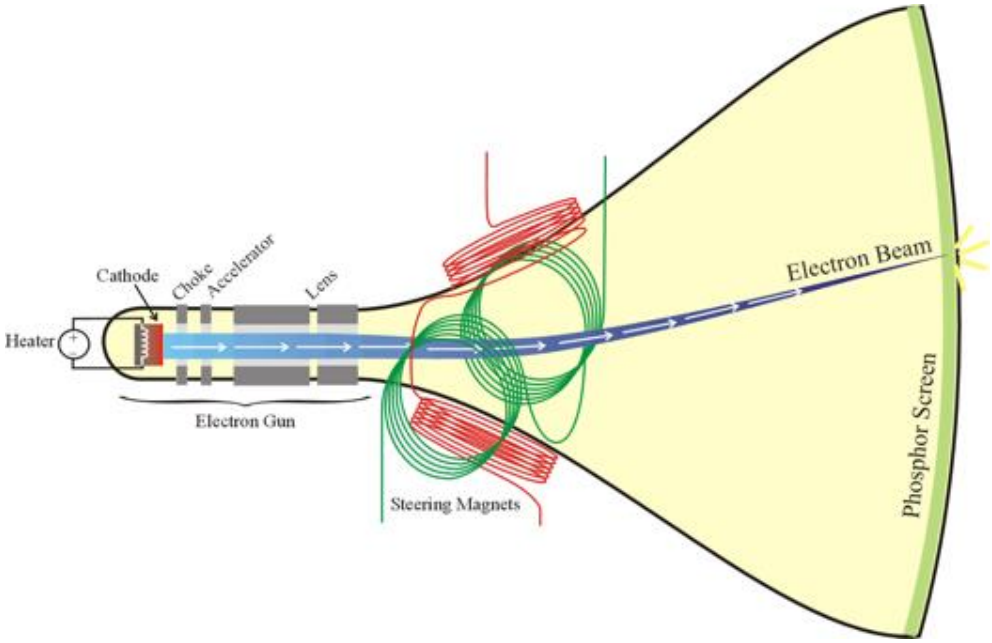
$$p^2 = p^{\mu} p_{\mu} = \frac{E^2}{c^2} - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 = m^2 c^2$$

$$E^2 = \vec{p}^{\,2} c^2 + m^2 c^4$$

$$E = \sqrt{\vec{p}^{\,2} c^2 + m^2 c^4}$$

$$\vec{p} = 0 \quad \rightarrow \quad E = m\, c^2$$

J.J. Thomson



Ανακάλυψη του e^- το 1897

Measurement of the electron mass: $m_e \sim M_H/1836$

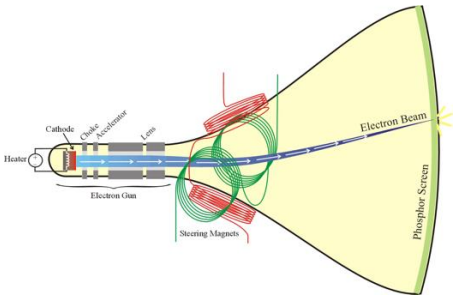
"Could anything at first sight seem more impractical than a body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen?" (J.J. Thomson)

Μια Μικρή Παρατήρηση

Στο τέλος του 19ου αιώνα η βασική έρευνα είχε μόλις ανακαλύψει το ηλεκτρόνιο. Τώρα καθώς βαδίζουμε στον 21ο αιώνα, δεν μπορεί κανείς να διανοηθεί τη ζωή χωρίς τα ηλεκτρόνια. Αυτά φέρνουν τον ηλεκτρισμό στα σπίτια μας, μεταφέρουν τη φωνή μας μέσα από τα τηλεφωνικά σύρματα και σχηματίζουν τις εικόνες που βλέπουμε στις οθόνες των τηλεοράσεων.

Ποιος ξέρει λοιπόν τι οφέλη θα φέρει η σημερινή <u>βασική έρευνα</u> στο ανθρώπινο γένος στα επόμενα 100 χρόνια.....

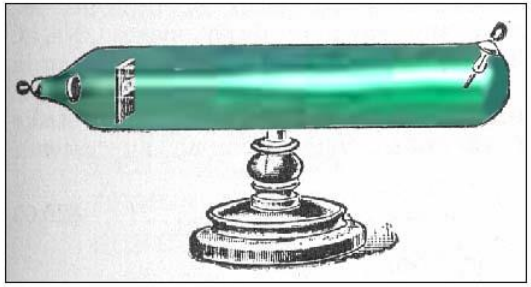
J.J. Thomson



discovered electron in 1897

Ηλεκτρόνια και Πρωτόνια

- Το 1897 Sir J.J. Thomson (Αγγλία) ανακάλυψε το Ηλεκτρόνιο μελετώντας την φύση των καθοδικών ακτινών.

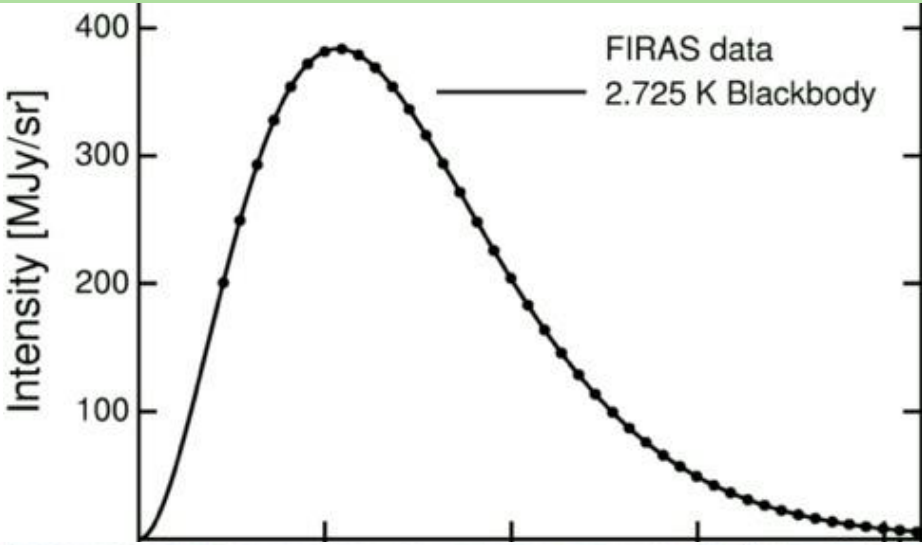


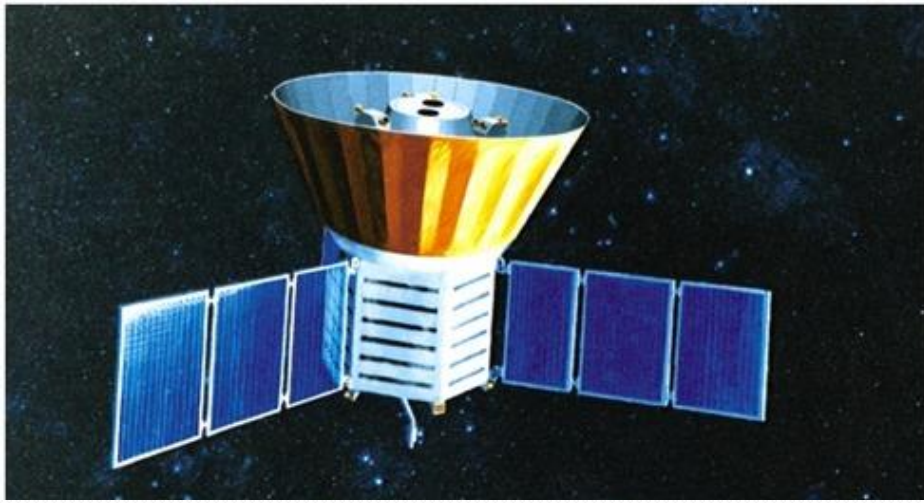
- Το 1919 ο Ernst Rutherford (Αγγλία), ανακάλυψε το Πρωτόνιο.....
- Μαθητής του J.J. Thomson
- Προσέφεραν 11 + 8 βραβεία Nobel

Κβαντομηχανική

Ακτινοβολία Μέλανους Σώματος

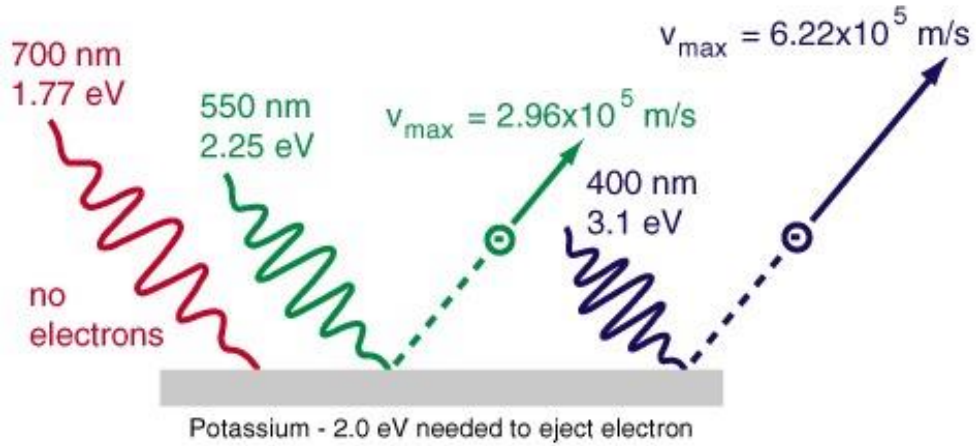
Planck





Ακτινοβολία προέρχεται από πολλούς ταλαντωτές που πάλλονται εκπέμποντας ενέργεια E= nhf

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο – Πρώτη ιδέα της κβαντομηχανικής



$$E = hf = \hbar 2\pi f = \hbar\omega$$

Εξήγηση (A. Einstein):

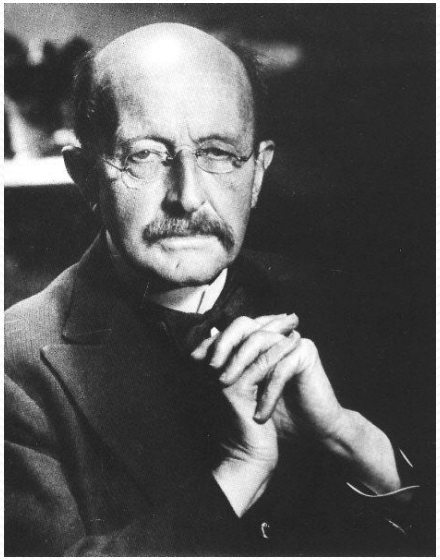
- φως αποτελείται από σωματίδια (φωτόνια

$E = hf$ (Planck constant h = 6.626 x 10 $^{-34}$ J s)

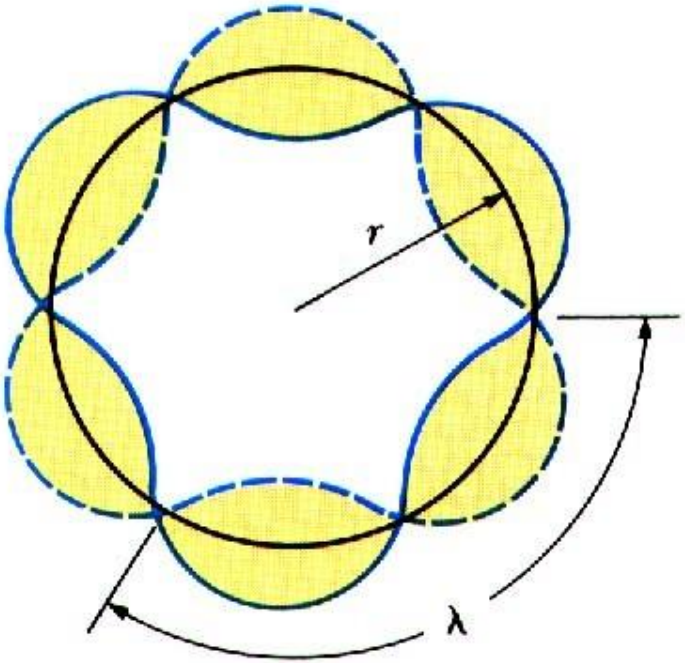
- Ενέργεια κατωφλίου $E_o = h\nu_o$: ενέργεια που απατείται για τη εξαγωγή ενός ηλεκτρονίου από το άτομο, εξαρτάται από το υλικό της καθόδου.

Το Φωτόνιο - γ

- Οι κβαντική θεωρία του φωτός θεμελιώθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα από τους Plank και Einstein (Γερμανία/Ελβετία)
- Το φώς είναι απλά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά παρουσιάζει και σωματιδιακή φύση (δυϊσμός).
- Το σωματίδιο του φωτός ονομάζεται φωτόνιο (γ)
- Το Φωτόνιο έχει μηδενική μάζα (άπειρη εμβέλεια) αλλά έχει ενέργεια: $E = h \times \nu$ (το h είναι μια σταθερά και το ν είναι η συχνότητα)

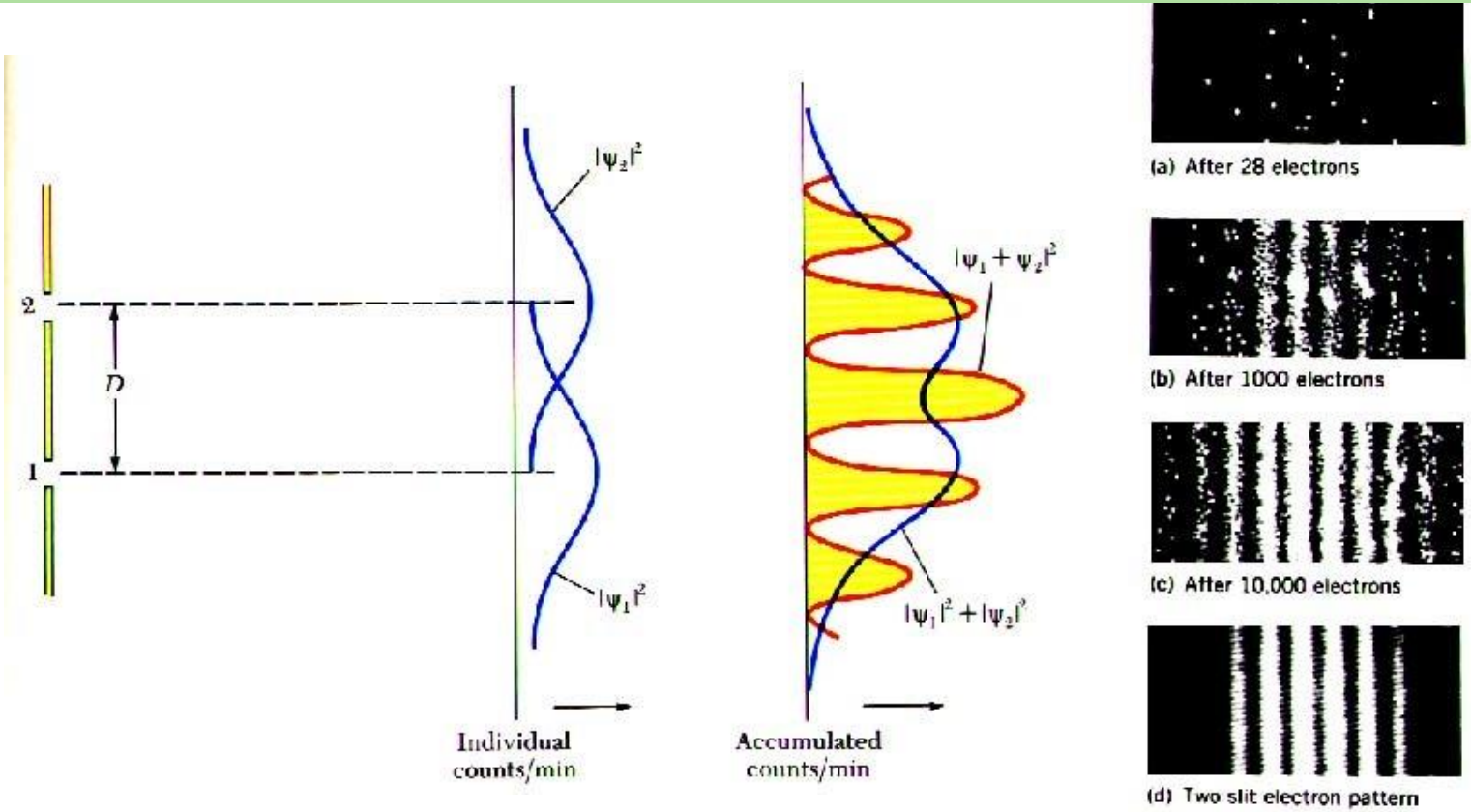


Bohr and de Broglie



e^- συμπεριφέρεται ως σωματίδιο, αλλά

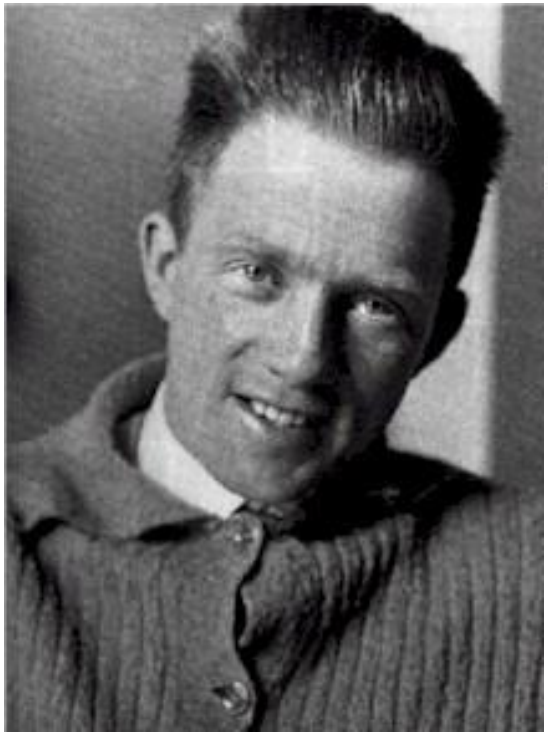
και σαν κύμα, πείραμα των δυο οπών



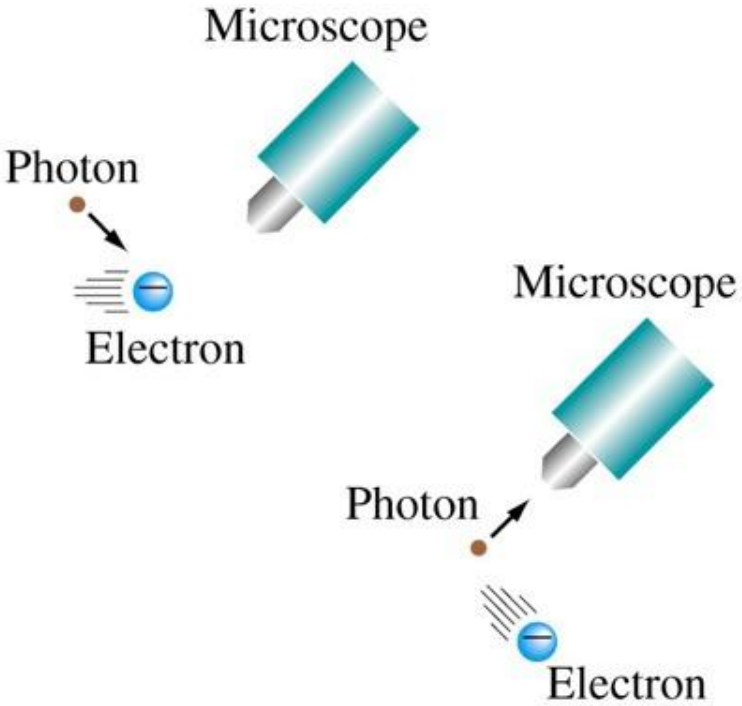
probability = | probability amplitude $|^2$

probability amplitude acts like a wave

Αρχή της αβεβαιότητας



Heisenberg



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

Αντισωματίδια

- Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της σχετικότητας στην κβαντομηχανική είναι η πρόβλεψη των αντισωματιδίων.
- κλασικά: $E=p^2/2m$ που οδηγεί στην εξίσωση του Schrödinger

$(E = p^2/2m)$

$(E \rightarrow i\hbar d/dt,$
$p \rightarrow -i\hbar d/dx)$

γραμμικό →

$$i\hbar \frac{\partial \Upsilon}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 \Upsilon$$

- Σχετικιστικά: $E^2=p^2c^2+m^2c^4$ που οδηγεί στην εξίσωση Klein-Gordon

2ου βαθμού →

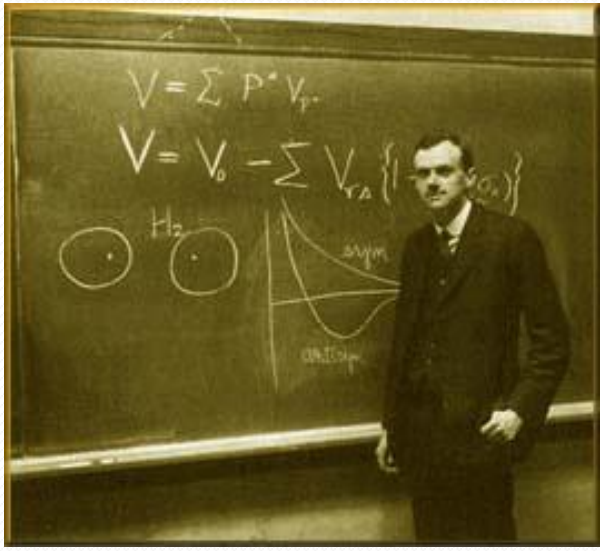
$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \Upsilon}{\partial t^2} = -\frac{\hbar^2}{2m}c^2\nabla^2 \Upsilon + m^2c^2\Upsilon \quad (E^2 = p^2c^2+m^2c^4)$$

οδηγεί σε θετικές και αρνητικές ενέργειες.

- αρνητικές ενέργειες αντισωματίδια με θετική ενέργεια
- όλα τα σωματίδια έχουν αντισωματίδια και συνήθως τα σημειώνουμε με μια παύλα πάνω από το σωματίδιο. πχ
  - όμως e^- και e^+, μ^- και μ^+
  - μερικά σωματίδια είναι τα αντισωματίδια του εαυτού τους πχ γ, π^0

Η εξίσωση του Dirac

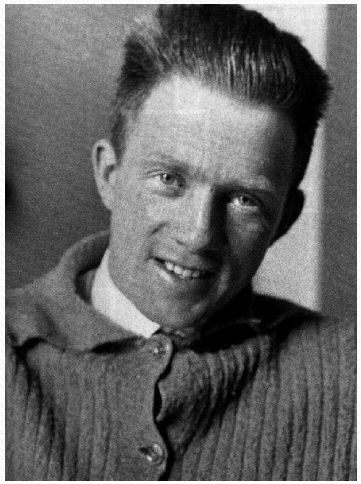
- Ο Dirac στην προσπάθεια του να συμβιβάσει την κβαντική μηχανική με την σχετικότητα εφεύρε μια εξίσωση που όχι μόνο περιέγραφε κβαντικά φαινόμενα/spin αλλά συγχρόνως ήταν συμβατή με την ειδική σχετικότητα του Einstein. $(E = (p^2c^2+m^2c^4)^{1/2}$



  - Η εξίσωσης της κβαντικής θεωρίας του Schrödinger και Heisenberg ήταν απλώς υποπερίπτωση της πιο γενικής εξίσωσης του Dirac.
  - Η εξίσωση του Dirac προέβλεπε το διπλό αριθμό σωματιδίων από ότι είχαν παρατηρηθεί στην φύση μέχρι το 1930. Προέβλεπε ότι για κάθε σωματίδιο θα πρέπει να υπάρχει και ένα αντί-σωματίδιο. Κάτι ανάλογο συμβαίνει σήμερα με την Υπέρ-συμμετρία….

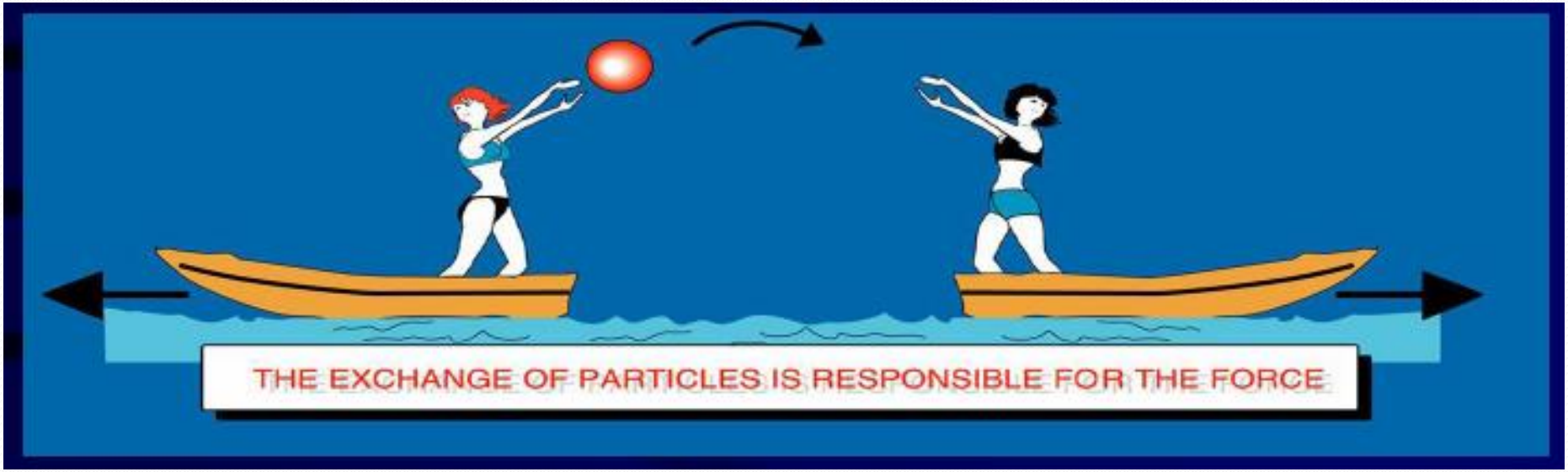
Η Φυσική το 1930 (α)

- Ο κόσμος αποτελείται από
  - Πρωτόνια - **p^+** (με μάζα ~ 2000 φορές μεγαλύτερη του ηλεκτρονίου και θετικό φορτίο)
  - Ηλεκτρόνια – **e^-** (αρνητικό φορτίο)
  - Φωτόνια – **γ** (μάζα = 0)
- Τα p^+ e^- αλληλεπιδρούν με ανταλλαγή φωτονίων βάση της θεωρίας της κβαντομηχανικής των:
  - Schrödinger (Austria), Bohr (Denmark), Heisenberg (Germany), Pauli (Germany)

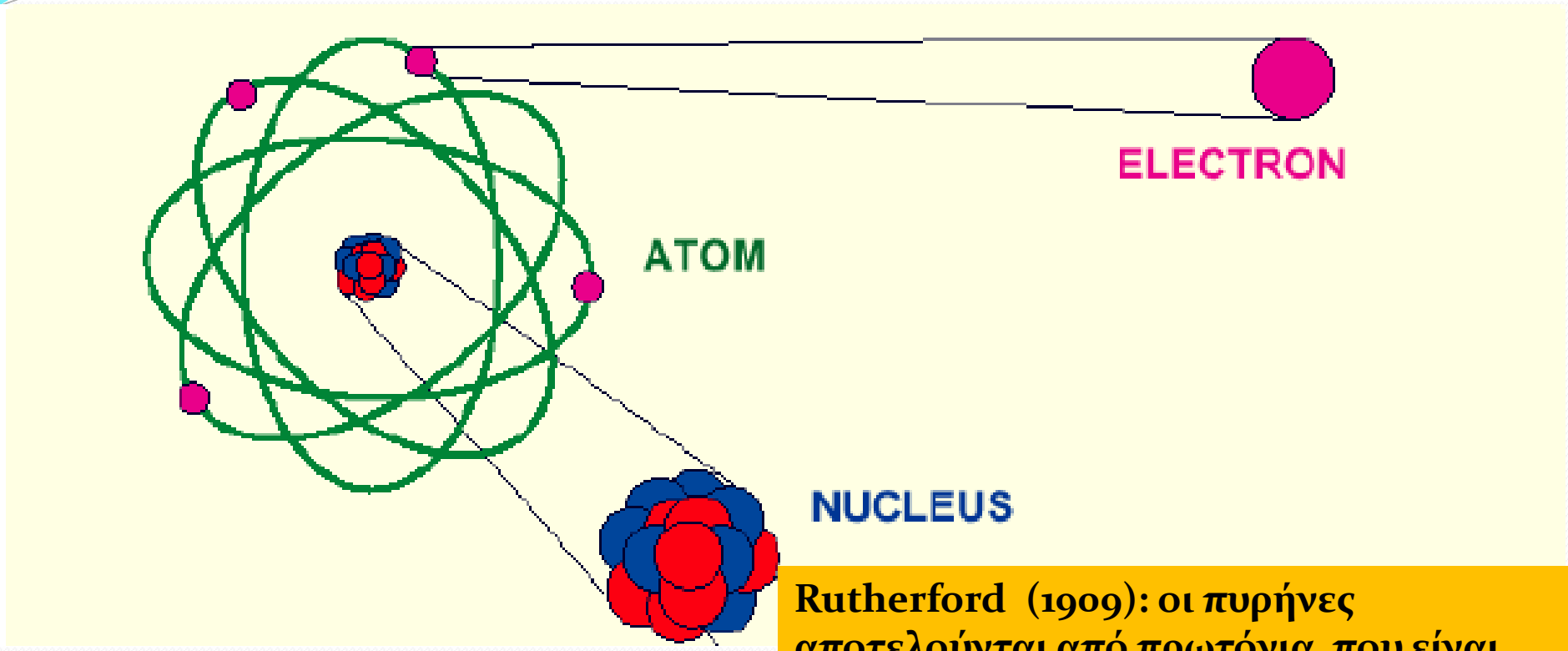


Η Φυσική το 1930 (β)

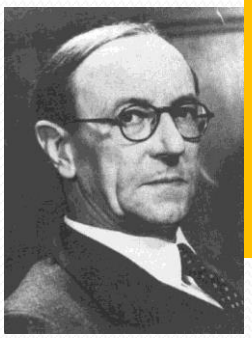
- Έτσι μπορούσαν να εξηγήσουν τα περισσότερα φαινόμενα και φάσματα των ατόμων με την Κβαντική Μηχανική.
- Η ανταλλαγή φωτονίων μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων είναι υπεύθυνη για την ηλεκτρομαγνητική δύναμη/αλληλεπίδραση.



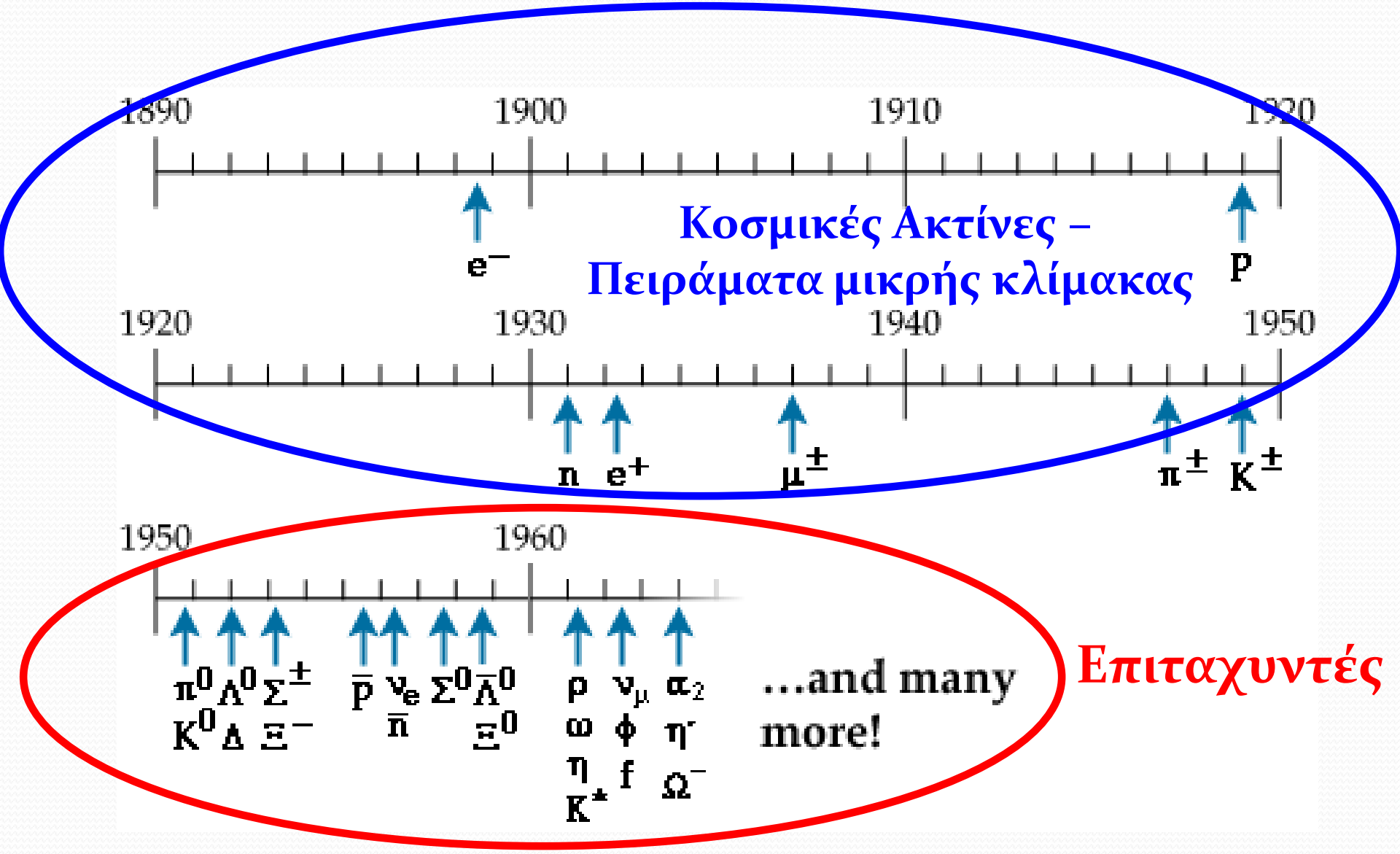
Η Φυσική το 1930 (γ)



Rutherford (1909): οι πυρήνες αποτελούνται από πρωτόνια που είναι θετικά φορτισμένα.
Chadwick (1932): ...και από Νετρόνια που εχουν την ίδια μάζα με τα Πρωτόνια αλλα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.

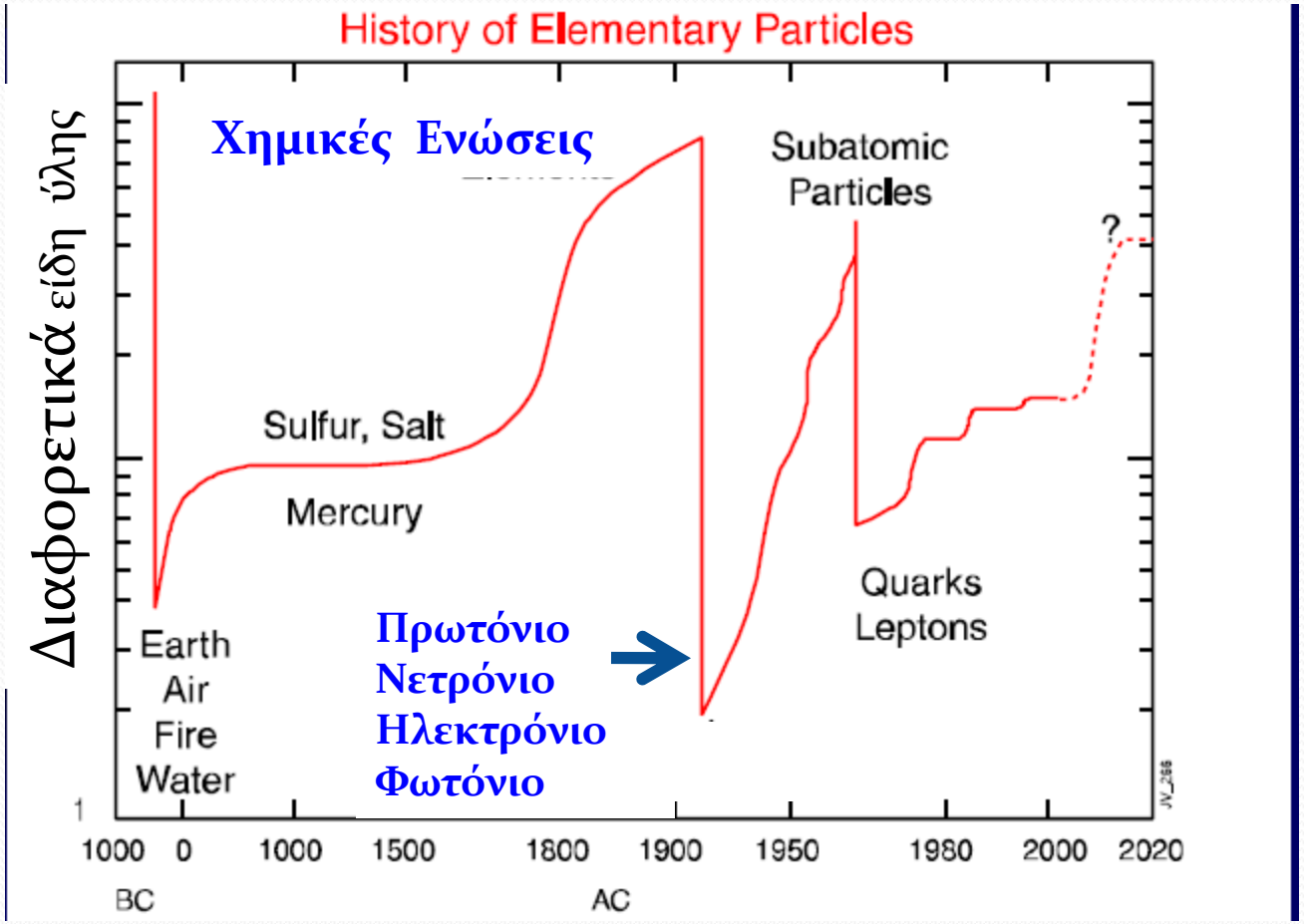


Στοιχειώδη Σωμάτια 1898-1964



Φυσική = Απλότητα

- Συνεπώς όλες οι χιλιάδες από άτομα και μόρια μπορούσαν να εξηγηθούν μόνο με 4 σωματίδια: το φωτόνιο το πρωτόνιο το νετρόνιο και το ηλεκτρόνιο.



Προβληματισμοί του 1930

- Η Κβαντική Θεωρία και Θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας δεν είχαν ενοποιηθεί δηλαδή **δεν υπήρχε ακόμα Σχετικιστική Κβαντική Θεωρία** που να περιγράφει σωμάτια που έχουν ενεργεία μεγαλύτερη από αυτή που προέρχεται από την μάζα τους ($E=mc^2$).
- **Η ραδιενέργεια** που είχε ανακαλυφθεί από τον Becquerel το 1896 δεν φαινότανε να ταιριάζει με τα παραπάνω και επιπλέον **δεν φαινόταν να υπακούει στην αρχή της διατήρησης της ορμής** (άσχημα νέα για τους φυσικούς της εποχής)
  - ${}^{A}Z \rightarrow {}^{A}(Z+1)+\beta^{-}$ + Έλλειμμα ορμής
  - Επιπλέον η ενέργεια των ακτινών β^{-} δεν ήταν διακριτή όπως θα περίμενε κανείς από διάσπαση σε δύο σωμάτια ούτε και είχε την ενέργεια που θα περίμενε κανείς αν τα β^{-} σωματίδια ήταν συστατικά του πυρήνα.
- Τι είδους δύναμη κρατάει τα πρωτόνια μαζί στον πυρήνα των ατόμων? Η δύναμη αυτή θα πρέπει να είναι ισχυρότερη της ηλεκτρομαγνητικής άπωσης που ασκούν μεταξύ τους. **Έτσι η τρίτη αλληλεπίδραση αυτή ονομάστηκε Ισχυρή Πυρηνική Αλληλεπίδραση.**
- Η δε θεωρία της βαρύτητας (Γενική Σχετικότητα, Einstein 1916) δεν ταίριαζε καθόλου με την Κβαντική Θεωρία (και ακόμα δεν ταιριάζει παρ' όλους τους τόνους από χαρτί και μελάνι έχουν ξοδευτεί έκτοτε).

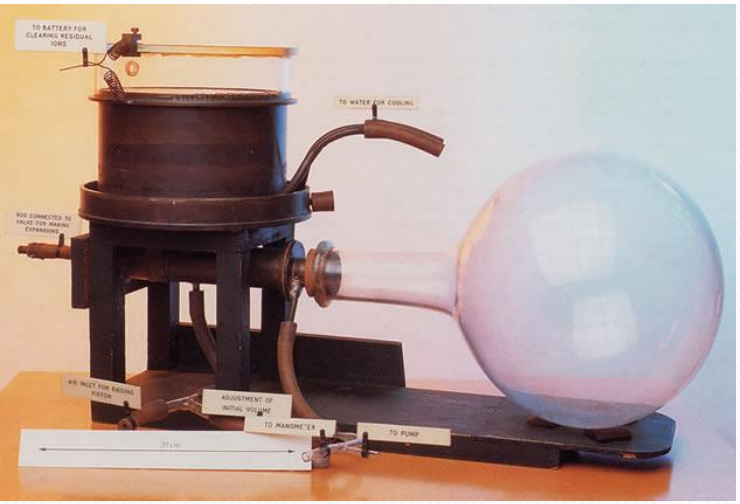
Ραδιενέργεια 1930

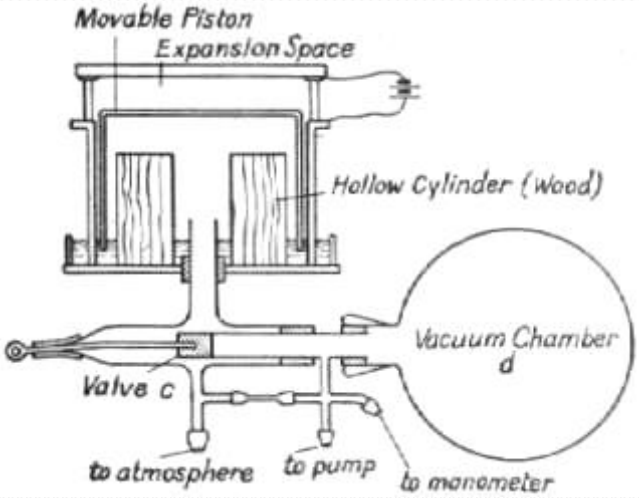
W. Pauli (Zürich, Schweiz)

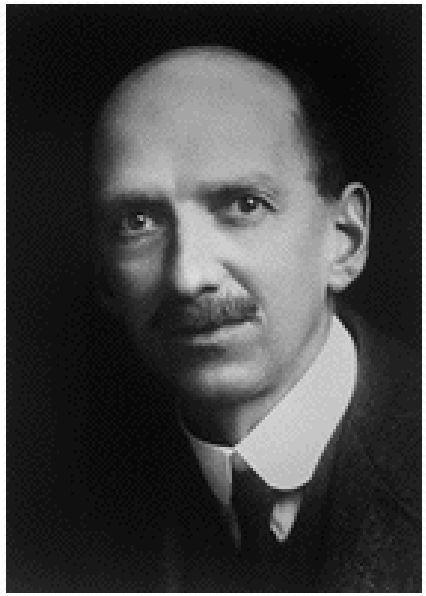
- **Την περίοδο αυτή κανένας φυσικός δεν είχε ιδέα ότι πίσω από τις ραδιενεργές μεταπτώσεις κρύβεται μια τέταρτη και άγνωστη μέχρι τότε αλληλεπίδραση, η Ασθενής Πυρηνική, η οποία είχε πολύ διαφορετικές ιδιότητες από τον Ηλεκτρομαγνητισμού και τη Βαρύτητας που ήταν ήδη γνωστές όπως είπαμε.**
- **Για την ώρα το πρόβλημα όλων ήταν η μη διατήρηση της ορμής που έφερνε όλη την Φυσική σε κρίση.**
- **Ο W. Pauli μας έβγαλε από το αδιέξοδο όταν πρότεινε την ύπαρξη του Νετρίνου, ενός ουδέτερου σωματιδίου με πάρα πολύ μικρή η μηδενική μάζα, πολύ ασθενή αλληλεπίδραση με άλλα σωμάτια το οποίο παράγεται στις ραδιενεργές μεταπτώσεις.**
- **Έτσι διεσώθη η αρχή της διατήρησης της ορμής αλλά οι φυσικοί τώρα έπρεπε να βρουν το μυστηριώδες νετρίνο. Πέρασαν πάνω από 20 χρόνια μέχρι να βρεθεί τελικά την δεκαετία του 50.**

Πειραματικές Διατάξεις του 1930

- Οι πειραματικοί φυσικοί της εποχής είχαν αρχίσει να κατασκευάζουν διατάξεις που τους επέτρεπαν να βλέπουν σωματίδια: Θάλαμοι Νέφωσης (Cloud Chamber) Μετρητές (Geiger-Miller Counters)



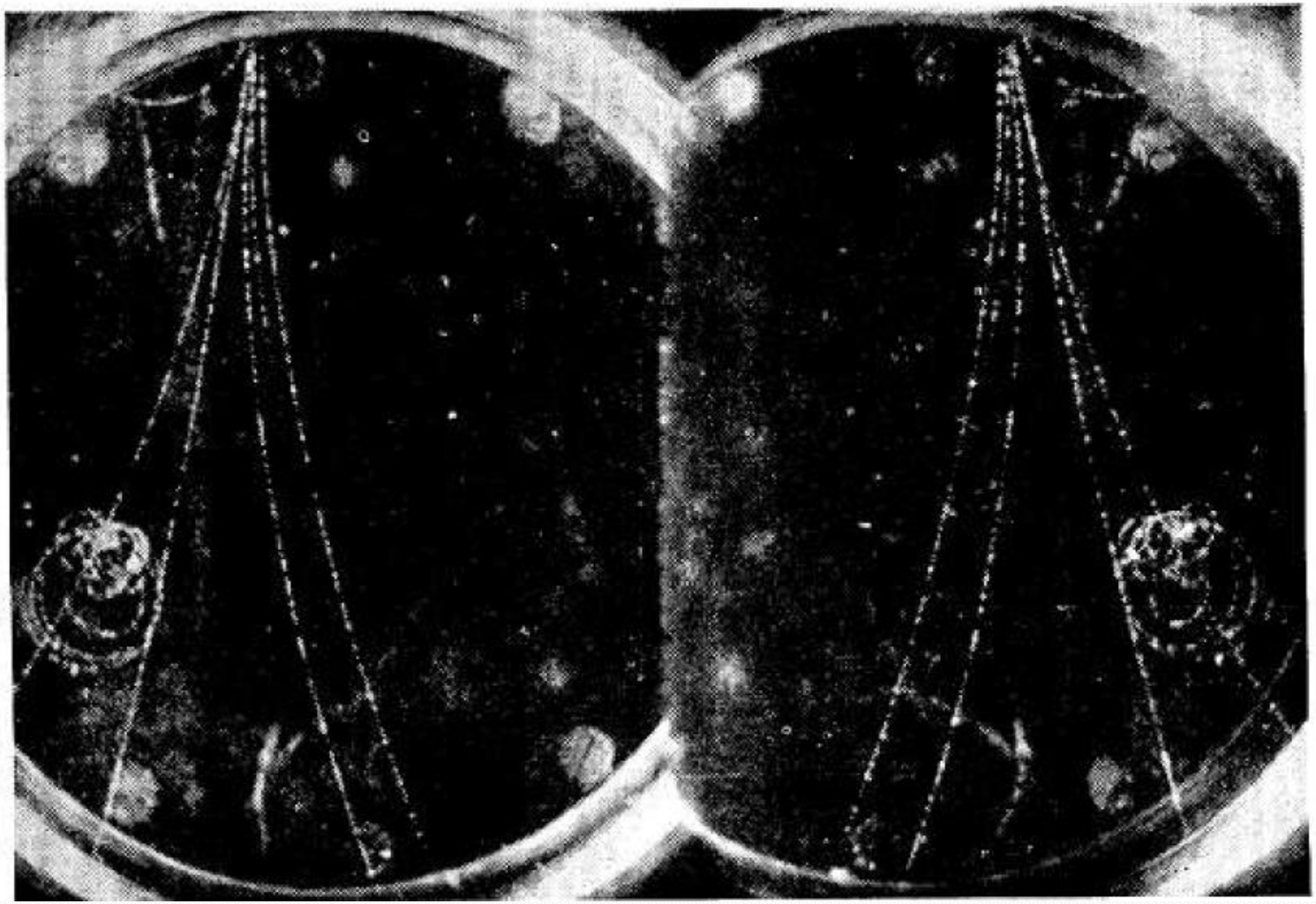




Wilson Cloud Chamber

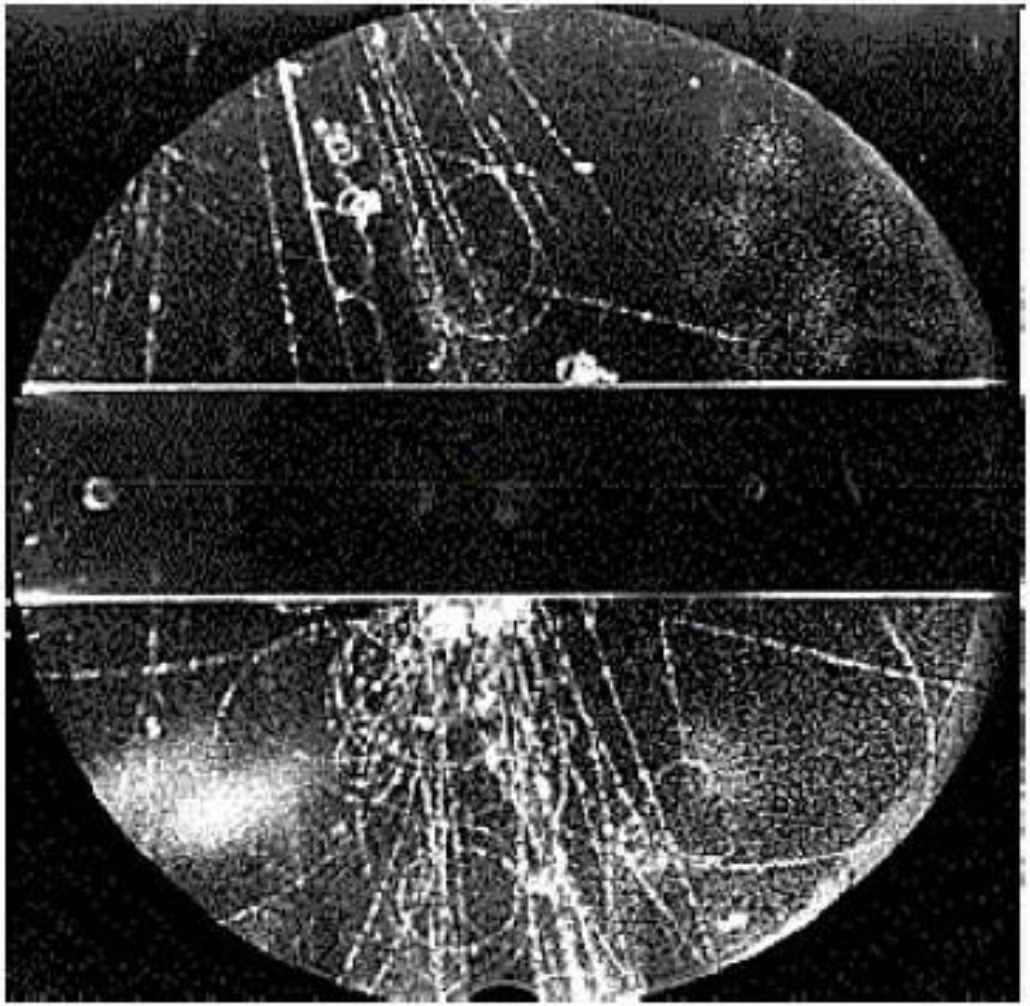
Φωτογραφίες Σωματιδίων

- Συνήθως οι Θάλαμοι χρησιμοποιούνταν σε συνδυασμό με φωτογραφικές μηχανές και μαγνητικό πεδίο



Φωτογραφίες Σωματιδίων

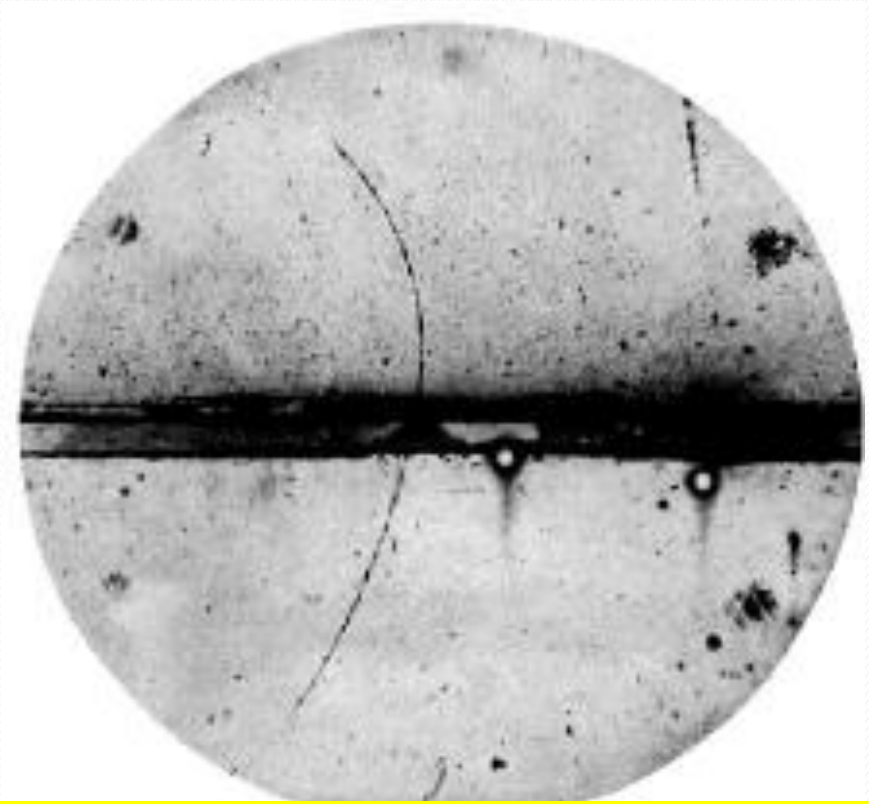
- Φύλα από μόλυβδο η άλλο μέταλλο χρησιμοποιούνται για να απορροφήσουν ενέργεια από το σωματίδια



Η ανακάλυψη του ποζιτρονίου

- Θρίαμβος της θεωρίας του Dirac !! Το ποζιτρόνιο είναι το αντί-σωμάτιο του ηλεκτρονίου και έχει τις ίδιες ιδιότητες με το ηλεκτρόνιο έκτος ότι είναι θετικά φορτισμένο.

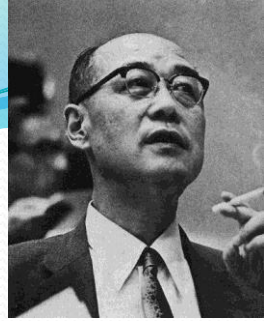
Carl Anderson at CALTECH, USA



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Το Αντι-Πρωτόνιο βρέθηκε το 1955 από ομάδα που συμμετείχε και ο Έλληνας Τ. Υψηλάντης

Ισχυρή Πυρηνική Αλληλεπίδραση

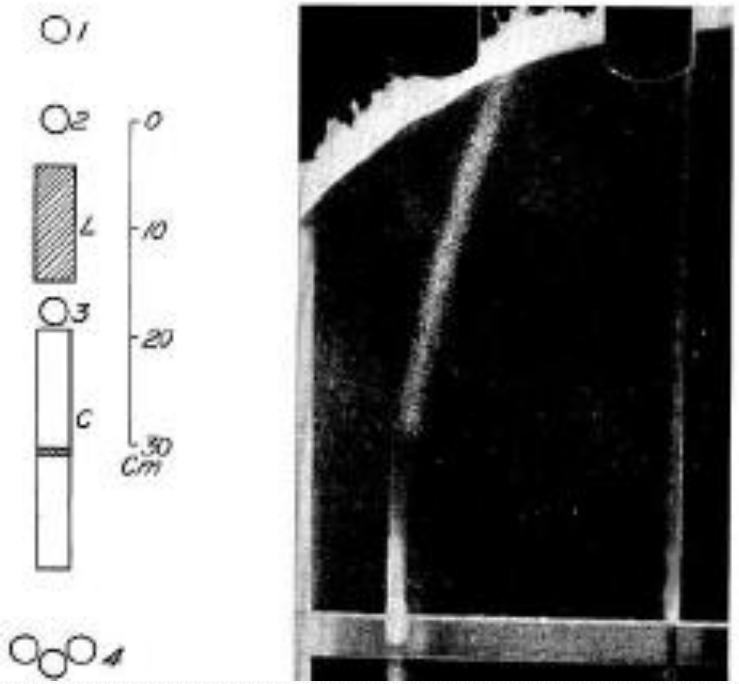


H. Yukawa (Japan)

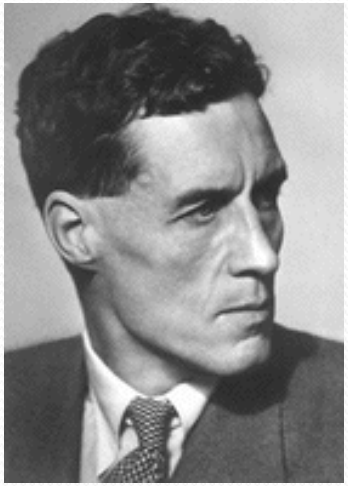
- Ο Ιάπωνας Φυσικός H. Yukawa πρότεινε ότι οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις που κρατούν τα πρωτόνια διαδίδονται διά μέσον ενός διαδότη που έχει μάζα (οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις έχουν πολύ μικρή εμβέλεια).
- Μάλιστα χρησιμοποιώντας την Κβαντομηχανική μπόρεσε να λογαριάσει τη μάζα αυτού το μεταδότη σε περίπου 200 MeV.
- Φυσικά απόμενε στους πειραματικούς φυσικούς να αποδείξουν ότι το σωματίδιο του κ. Yukawa υπάρχει και εκεί άρχισαν τα προβλήματα καθότι οι πειραματικοί βρήκαν πρώτα το λάθος σωματίδιο που δυστυχώς είχε μάζα που ήταν κοντά στην μάζα του Yukawa (106 MeV αρκετά κοντά αν λάβει κανείς υπόψη του την διακριτική ικανότητα των τότε πειραμάτων)

Ανακάλυψη του Μιονίου 1937

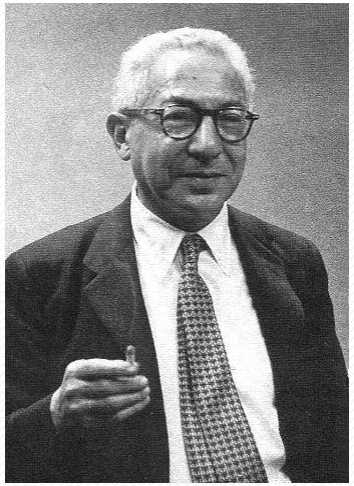
- **Ένα 'ηλεκτρόνιο' 200 φορές βαρύτερο από το ηλεκτρόνιο**
- Η ανακάλυψη έγινε δυνατή με τη χρήση τεχνικής που αναπτύχτηκε από τον P. Blackett ο οποίος σύνδεσε την φωτογραφική μηχανή με μετρητές Geiger Miller σε διάταξη trigger. Δηλαδή η μηχανή φωτογράφιζε μόνο όταν οι μετρητές Geiger Miller είχαν σήμα που έδειχνε ότι κάποιο φορτισμένο σωματίδιο πέρασε το θάλαμο.
- Το σωματίδιο έκπληξη που κανείς δεν το περίμενε ούτε το χρειαζόταν (**Who ordered this ? I.I. Rabi**)



Anderson (US)



Blackett(UK)



Rabi(US)

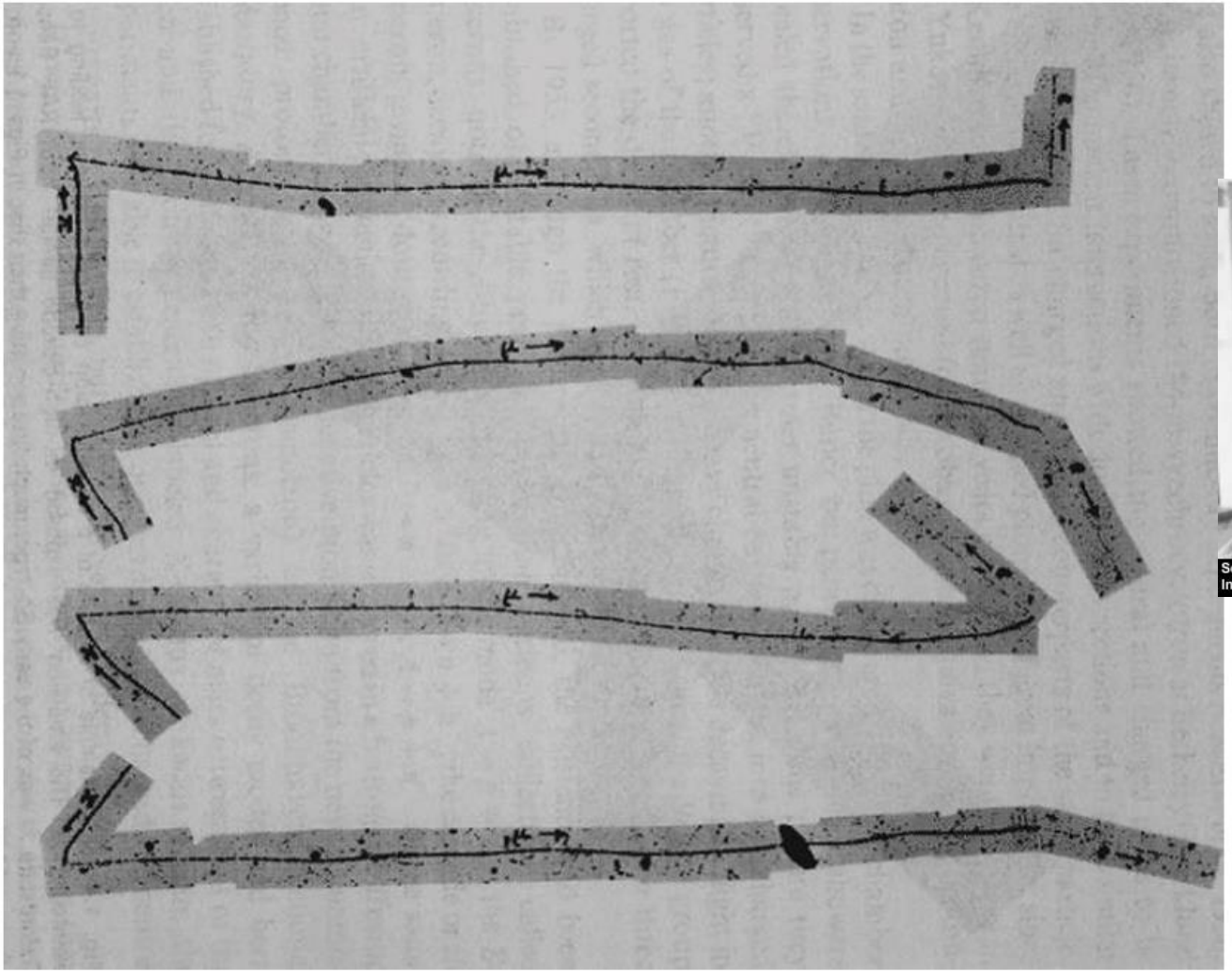
Η περιπέτεια με το Μιόνιο

- **Μην έχοντας άλλη χρήση για το Μιόνιο και επειδή η μάζα ταίριαζε οι Φυσικοί υπέθεσαν ότι αυτό πρέπει να είναι ο φορέας των ισχυρών αλληλεπιδράσεων.**
- Δυστυχώς ο Ιάπωνας φυσικός Tomonaga λογάριασε ότι αν το Μιόνιο ήταν ευαίσθητο στις ισχυρές αλληλεπιδράσεις θα έπρεπε να διασπάται πιο γρήγορα από ότι στο κενό όταν περνά μέσα από υλικά με βαρείς (μεγάλους) πυρήνες.
- Διάφορα πειράματα έγιναν και συνεχίστηκαν μέχρι το 1945 και ύστερα από αρκετά διαφωνούντα αποτελέσματα αποδείχτηκε ότι το μιονιο δεν έχει καμιά σχέση με τις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις.
- Το μιονιο επέμενε πεισματικά να είναι ένας αδελφός του ηλεκτρονίου απλώς λίγο παχύς (200 φορές).

Tomonaga

Πιόνια 1948

- **Ευτυχώς το σωμάτιο του Yukawa βρέθηκε στο Παν/μιο του Bristol (UK) από την ομάδα των Powel-Occialini:**



Occialini, Powel

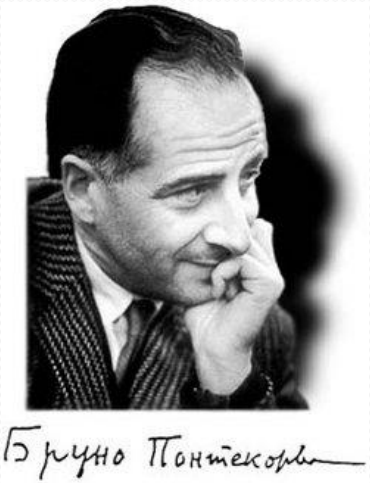
Σωματιδιακή Φυσική το 1948

- **Έτσι η κατάσταση το 1948 είχε ως εξής:**

  - **Σωμάτια με μεγάλη μάζα (~2000 ηλεκτρόνια) :**
    1. **Πρωτόνιο (p^+)**, με θετικό φορτίο και αλληλεπιδράσεις Ηλεκτρομαγνητική, Ισχυρή πυρηνική και Βαρύτητα.
    2. **Νετρόνιο (n),** ηλεκτρικά ουδέτερο αλλά με ισχυρή πυρηνική και βαρύτητα.
  - **Σωμάτια με μικρή σχετικά μάζα:**
    1. **Ηλεκτρόνιο (e^-), Ποζιτρόνιο (e^+), Μιόνιο($\mu^\pm$)** με θετικό αλλά και αρνητικό φορτίο. Το Ηλεκτρόνιο και τα Μιονια αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά. Το ηλεκτρόνιο ήταν συνδεδεμένο με ραδιενεργές μεταπτώσεις.
    2. **Νετρίνο ν** ουδέτερο σχετιζόμενο με ραδιενεργές μεταπτώσεις.
    3. **Πιόνιο $\pi^\pm$** με θετικό και αρνητικό φορτίο .

3 Σημαντικά Αποτελέσματα 1947-1949 (α)

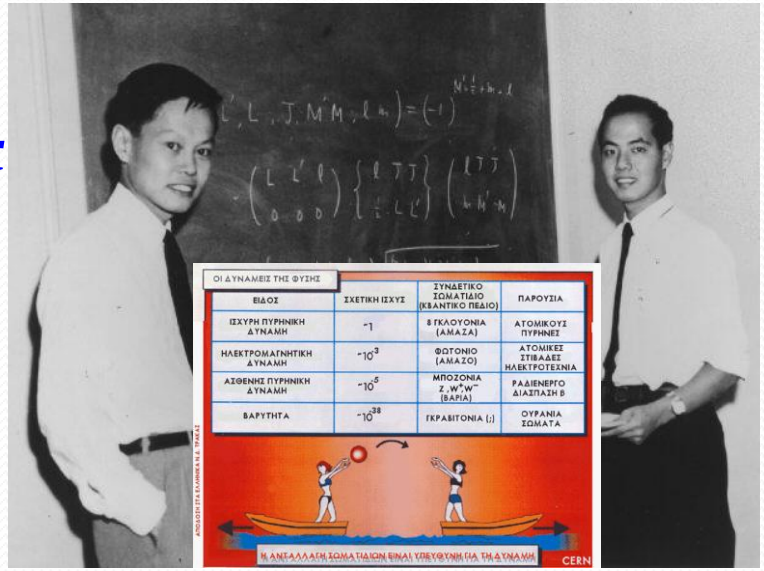
- **1947 B. Pontecorvo:**
  1. Εάν το μιόνιο δεν είναι το σωματίδιο του Yukawa τότε δεν χρειάζεται να έχει σπίν μηδέν και μπορεί να έχει σπίν ½.
  2. **Συνεπώς μπορεί να διασπαστεί σε 3 φερμιόνια αντί για δυο.**
- **1948 Διδακτορική Διατριβή J. Steinberger Επιβλέπων καθ. E. Fermi (Παν/μιο Σικάγου):**
  1. **Το μ^- διασπάται σε ηλεκτρόνιο και δυο νετρίνα: $\mu^- \rightarrow e^- \nu \nu$**
  2. **Όλοι πίστευαν στην αρχή ότι τα δυο νετρίνα είναι τα ίδια αλλά χρειάστηκε άλλη μια δεκαετία για να αποδειχτεί το αντίθετο.**



3 Σημαντικά Αποτελέσματα 1947-1949 (β)

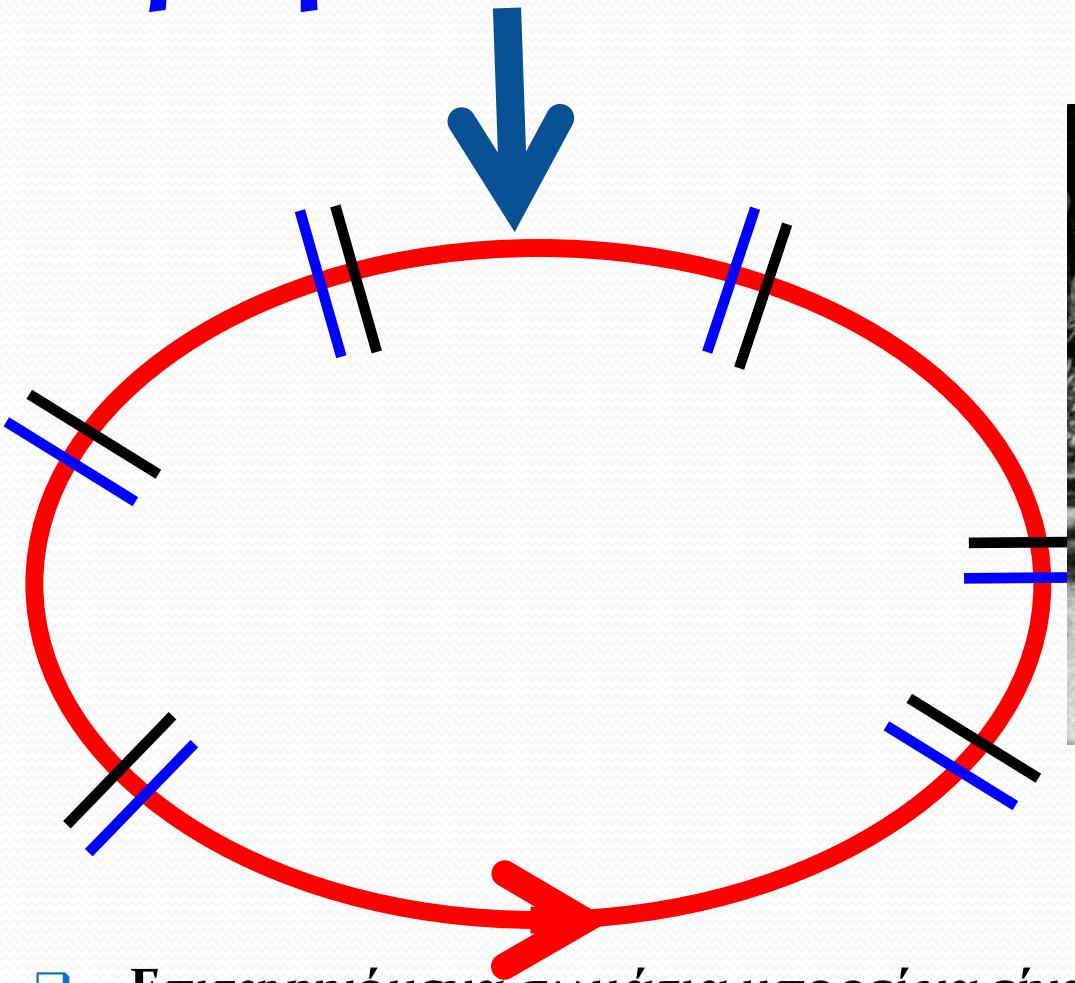
- **1949 Lee, Young, Rosenbluth:** Υπολόγισαν την σταθερά σύζευξης για **$\mu \rightarrow e^- \nu \nu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- \nu$, $Z \rightarrow (Z+1)\ e^-$** και τις βρήκαν να μην διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Ήταν όμως πολύ διαφορετικές από άλλες που είχαν να κάνουν με τον ηλεκτρομαγνητισμό και τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις. **Έτσι συμπέραναν ότι και οι τρεις είχαν να κάνουν με μία νέα αλληλεπίδραση, την ασθενή πυρηνική αλληλεπίδραση. Οι διαδότες W/Z ανακαλύφθηκαν 1983 (Nobel 1984, C. Rubia/ van der Meer).**

- **Συνεπώς έχουμε 4 είδη αλληλεπ**
  1. **Βαρύτητα**
  2. **Ασθενή Πυρηνική ($W^{\pm}/Z^{o}$)**
  3. **Ηλεκτρομαγνητισμό (φωτόνιο)**
  4. **Ισχυρή πυρηνική (γκλουόνιο)**



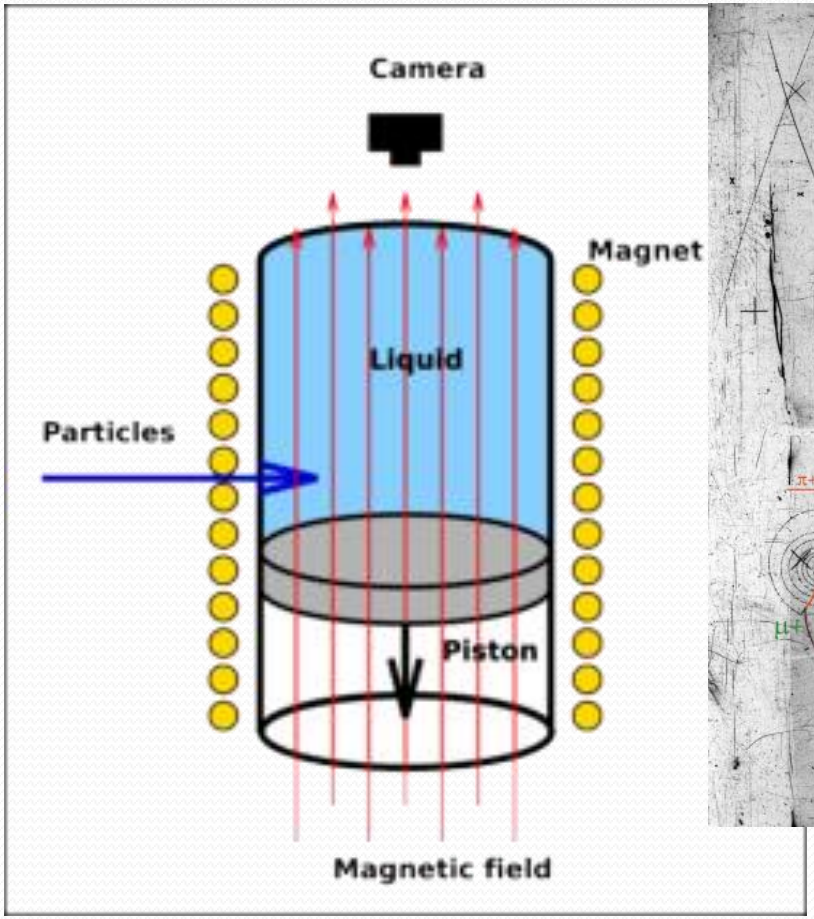
1950 - Επιταχυντές

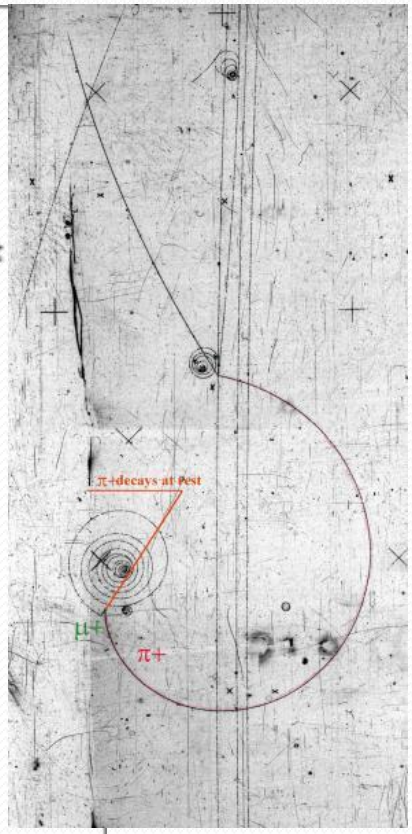
Μαγνητικό πεδίο B



- **Επιταχυνόμενα σωμάτια μπορεί να είναι**
  1. **πρωτόνια και αλλά βαριά σωμάτια (Αδρονικός επιταχυντής)**
  2. **Ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια**

1950 – 1960 Νέοι Ανιχνευτές



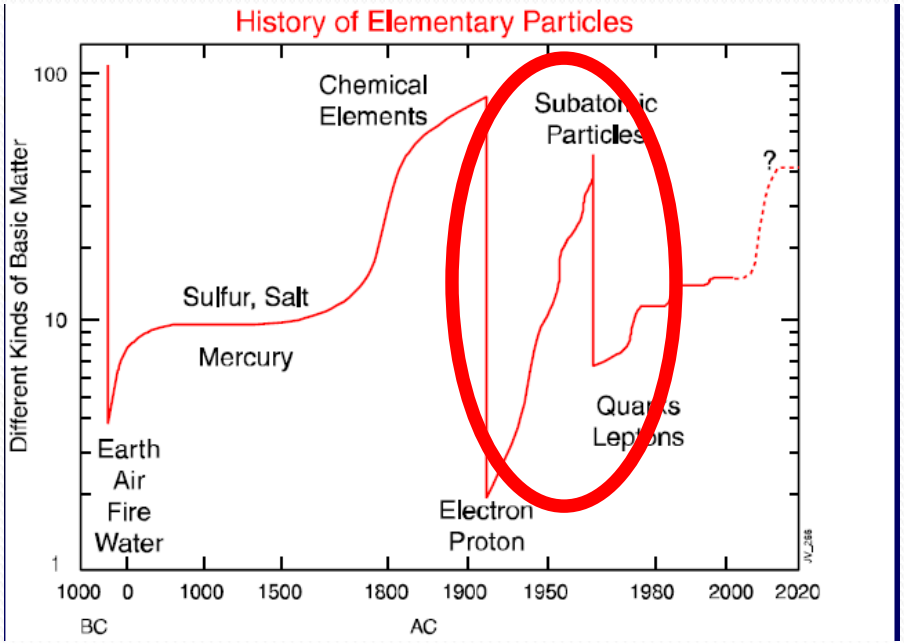


- **Θάλαμοι φυσαλίδων αντικατέστησαν τους θαλάμους νέφωσης**

Φυσική με Επιταχυντές

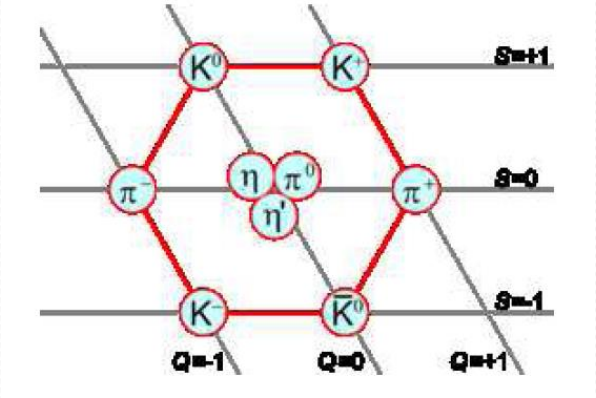
- **Οι επιταχυντές παρέχουν δέσμες με μεγάλη ένταση σωματιδίων έτσι έδωσαν τη δυνατότητα να μελετηθούν οι ιδιότητες των σωματιδίων που είχαν βρεθεί με κοσμικές ακτίνες και επέτρεψαν την ανακάλυψη μεγάλου αριθμού νέων σωματιδίων. Τα πιο σημαντικές ανακαλύψεις ήταν:**

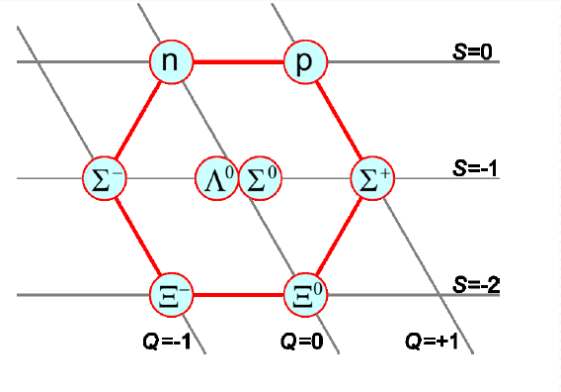
1. **3 ειδών νετρίνα, τα ν_e ν_μ, ν_τ και 3 ειδών 'ηλεκτρόνια' τα $e^\pm$, $\mu^\pm$, $\tau^\pm$ που όλα μαζί λέγονται λεπτόνια**
2. **Μια μεγάλη συλλογή βαρύτερων σωματιδίων όπως ρ, ω, ϕ, Ξ, Σ, Ω....**

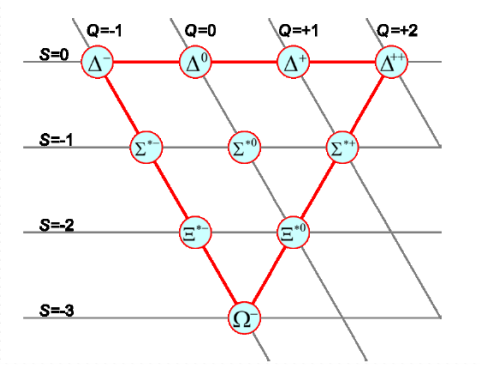


Κουάρκς (α)

- **Οι πληθώρα των σωματιδίων έγινε δυνατόν να εξηγηθεί με την θεωρία των Κουάρκς.**







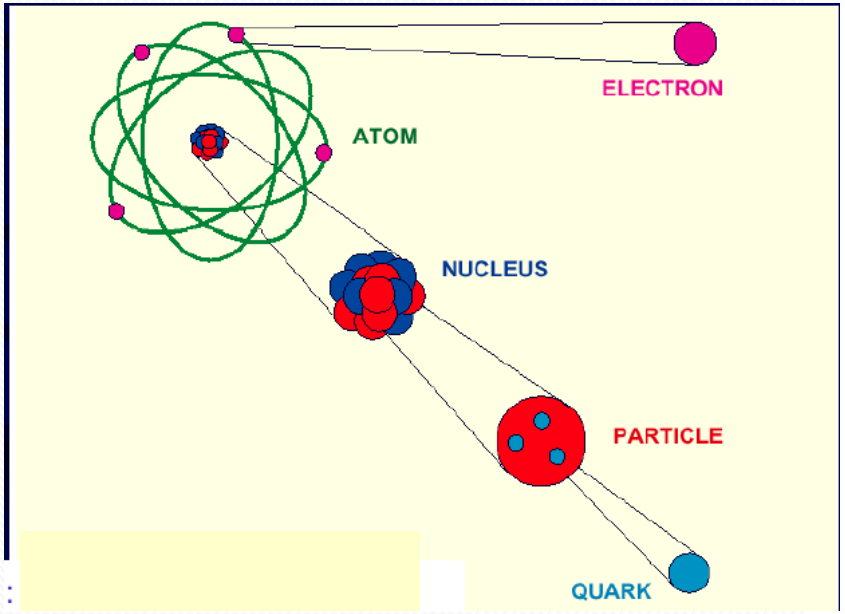
Murray Gell Mann

Nicolas Samios

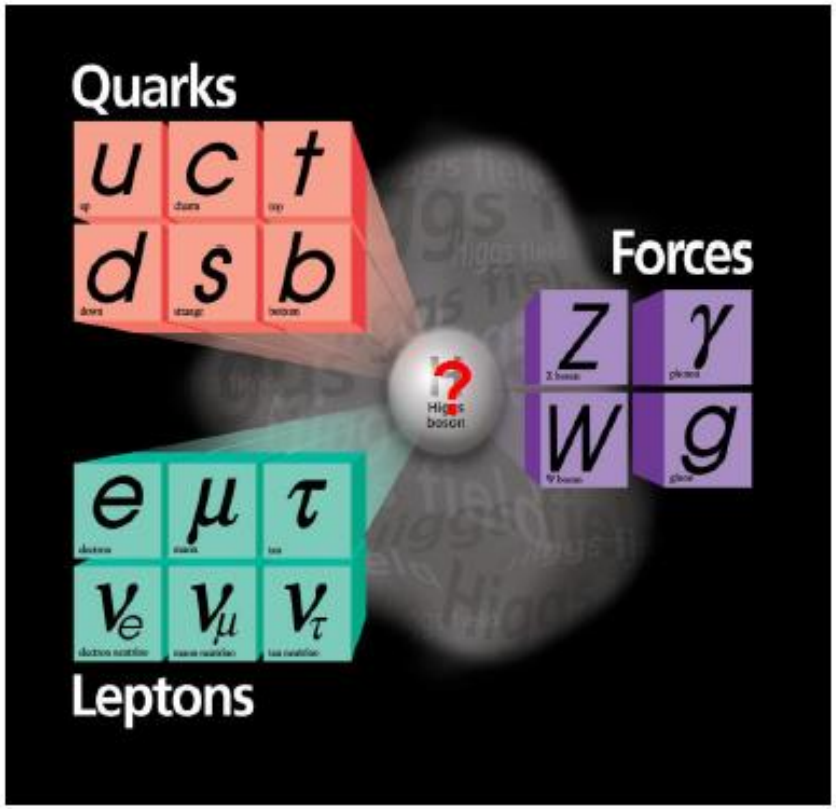
Κουάρκς (β)

- **Έτσι όλα τα βαριά σωμάτια αποτελούνται από Κουάρκς που έρχονται και αυτά όπως τα λεπτόνια σε ζευγάρια.**

1. **u (up) d (down)**
2. **c (charm) s (strange)**
3. **t (top) b (bottom)**



Το Καθιερωμένο Πρότυπο

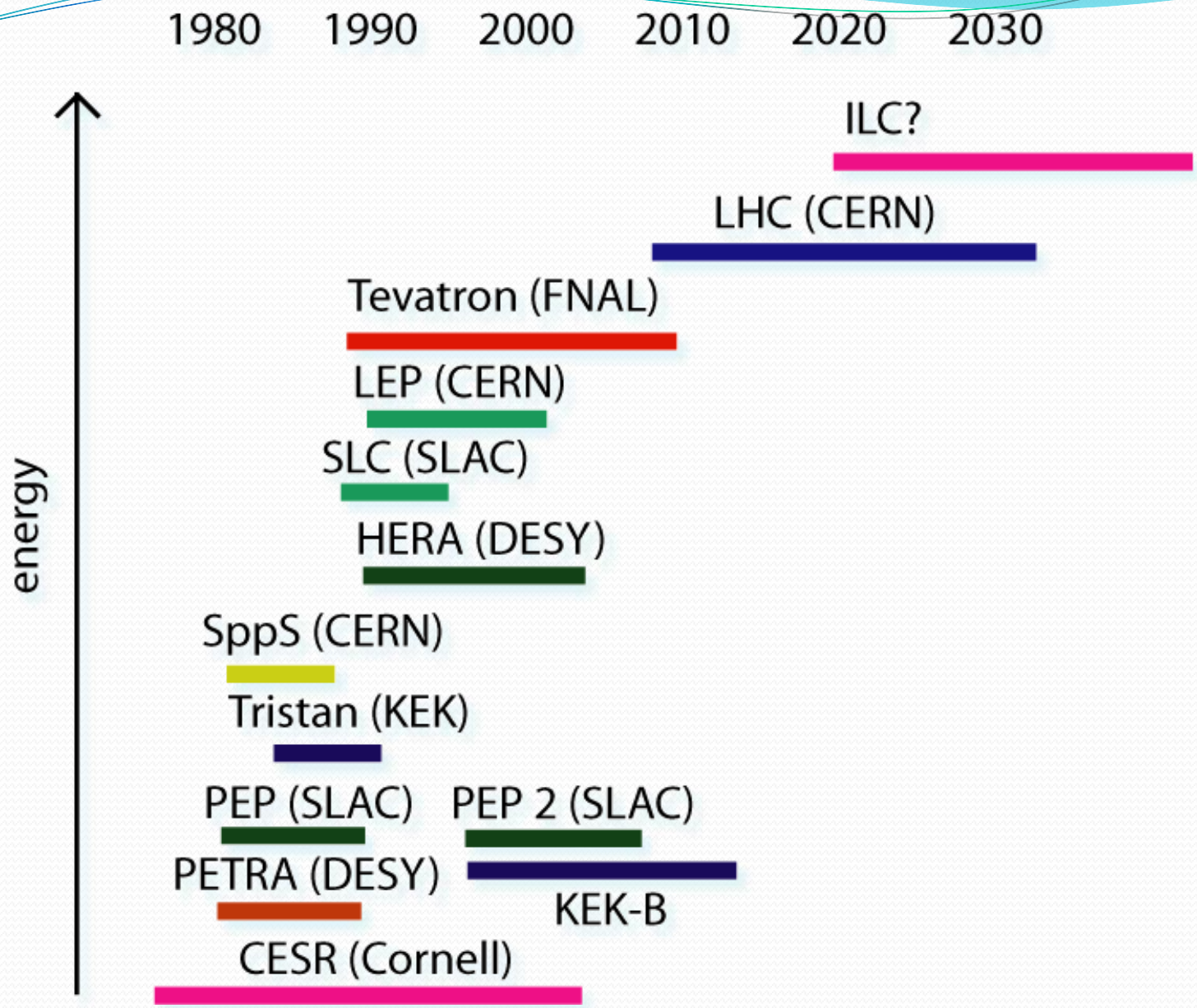


Έτσι έχουμε πάλι ένα σχετικά μικρό αριθμό σωματιδίων !!!

Το Σωματίδιο Higgs

- **Ήταν το μόνο σωματίδιο το οποίο προβλέπεται από το καθιερωμένο πρότυπο που δεν είχε ανακαλυφθεί ακόμα.**
- **Είναι απαραίτητο για να εξήγηση**
  1. **Γιατί τα κουάρκς και τα λεπτόνια έχουν μάζα.**
  2. **Για να κάνει όλες τις άλλες προβλέψεις συμβατές με τα πειραματικά δεδομένα των τελευταίων 30 ετών.**
- **Σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο πρέπει να έχει μάζα μικρότερη από ~TeV**
- **2 μεγάλα πειράματα στο CERN το ATLAS και το CMS έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την ανακάλυψη του σωματιδίου Higgs.**
- **Ένα νέο σωματίδιο ανακαλύφθηκε τον Ιούλιο του 2012 και μελέτες έκτοτε έδειξαν ότι είναι το σωματίδιο του Higgs.**

Μεγάλοι Επιταχυντές



Fermilab - ΗΠΑ

CERN - Ευρώπη

Ενεργός διατομή και Φωτεινότητα

- **“θεμελιώδης σχέση στις υψηλές ενέργειες”**

Η «ένωση» Φυσικής & Τεχνολογίας (engineering)

$$N = L\sigma\epsilon$$

Απόδοση

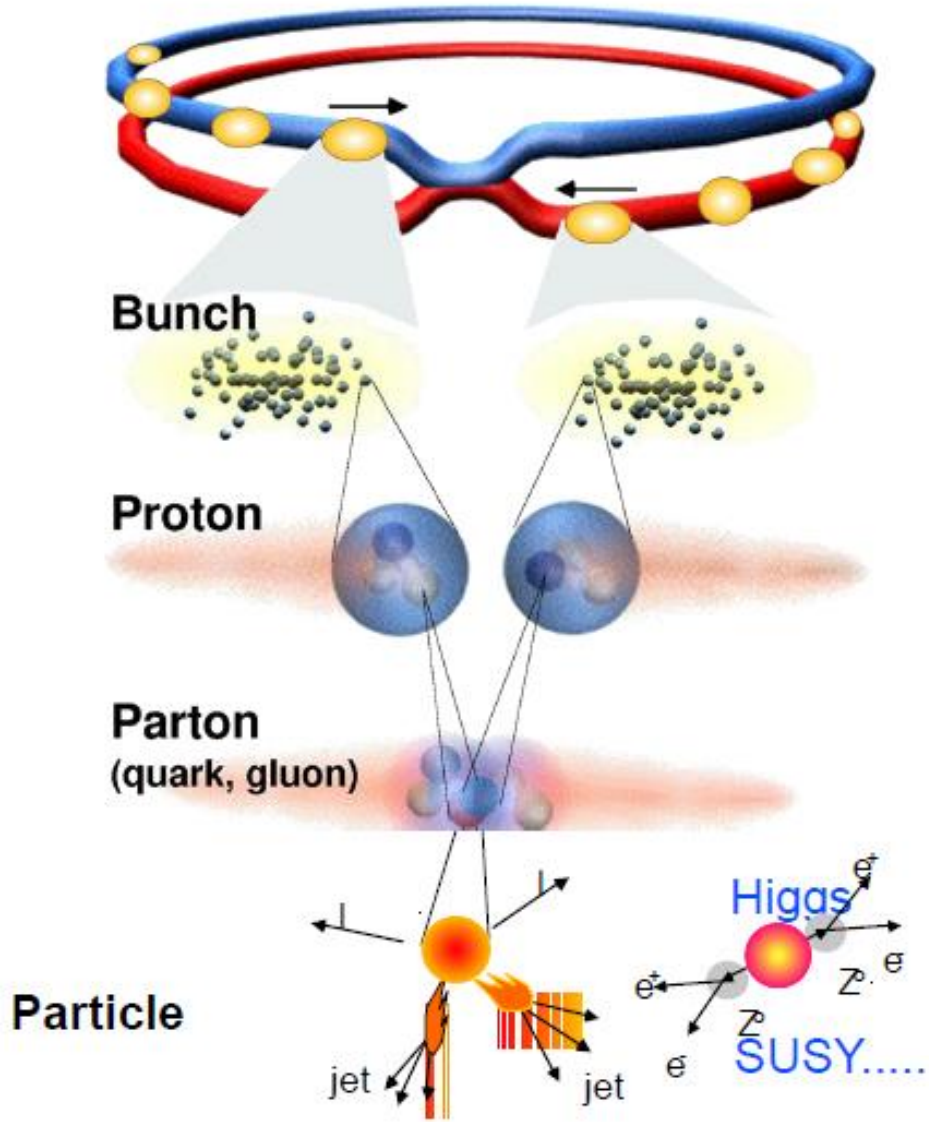
Αριθμός παρατηρημένων γεγονότων

Ολική φωτεινότητα (m^{-2})

Ενεργός διατομή (m^2)

- **φωτεινότητα: αριθμός ανά μονάδα σκεδαζόμενης επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου**

Το LHC

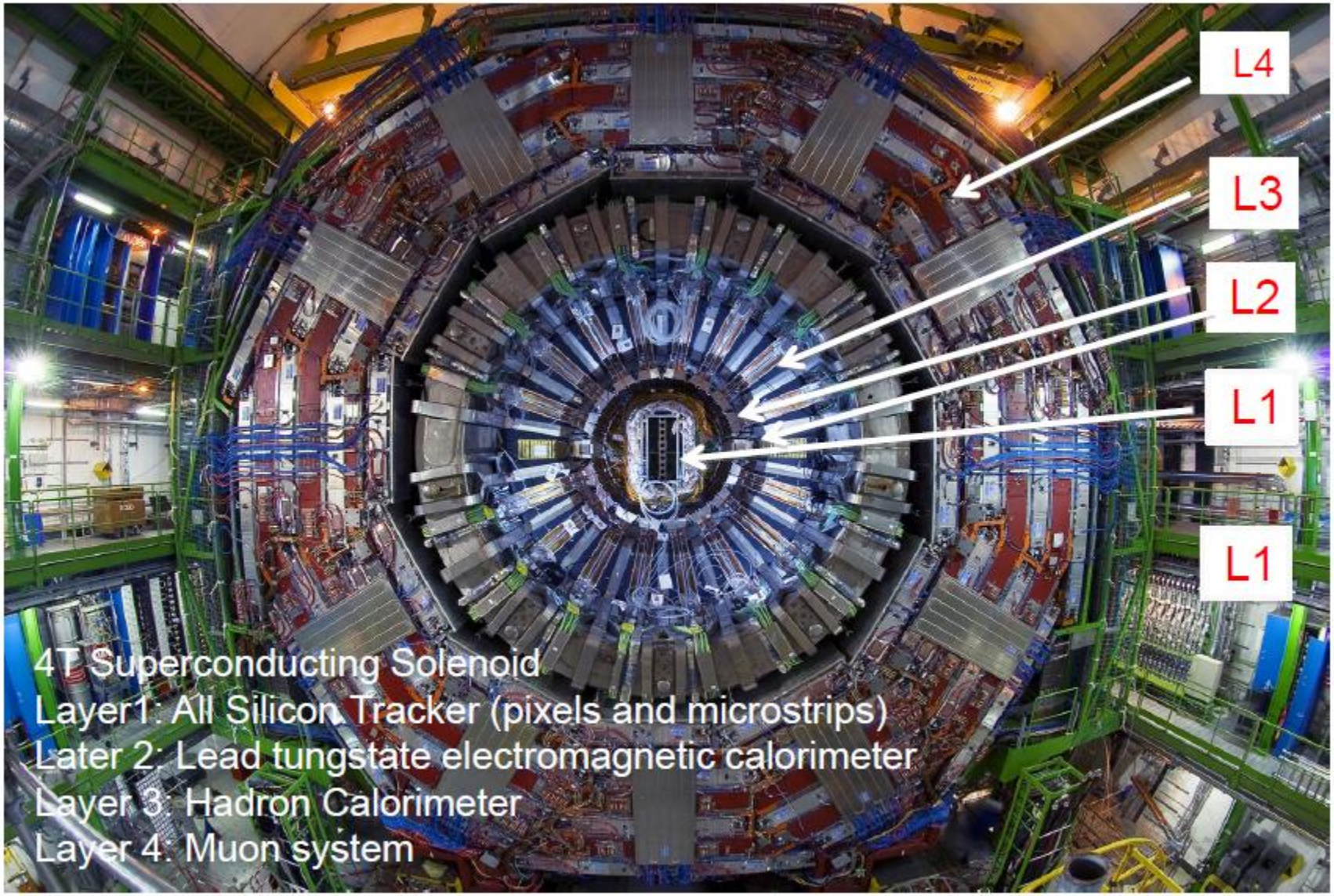


Proton - Proton	2808 bunch/beam
Protons/bunch	10^{11}
Beam energy	7 TeV (7×10^{12} eV)
Luminosity	$10^{34} cm^{-2} s^{-1}$
Crossing rate	40 MHz
Collision rate ≈	10^{7}-10^{9}

New physics rate ≈ .00001 Hz

Event selection:
1 in 10,000,000,000,000

Το Πείραμα CMS



το
ια.

τα

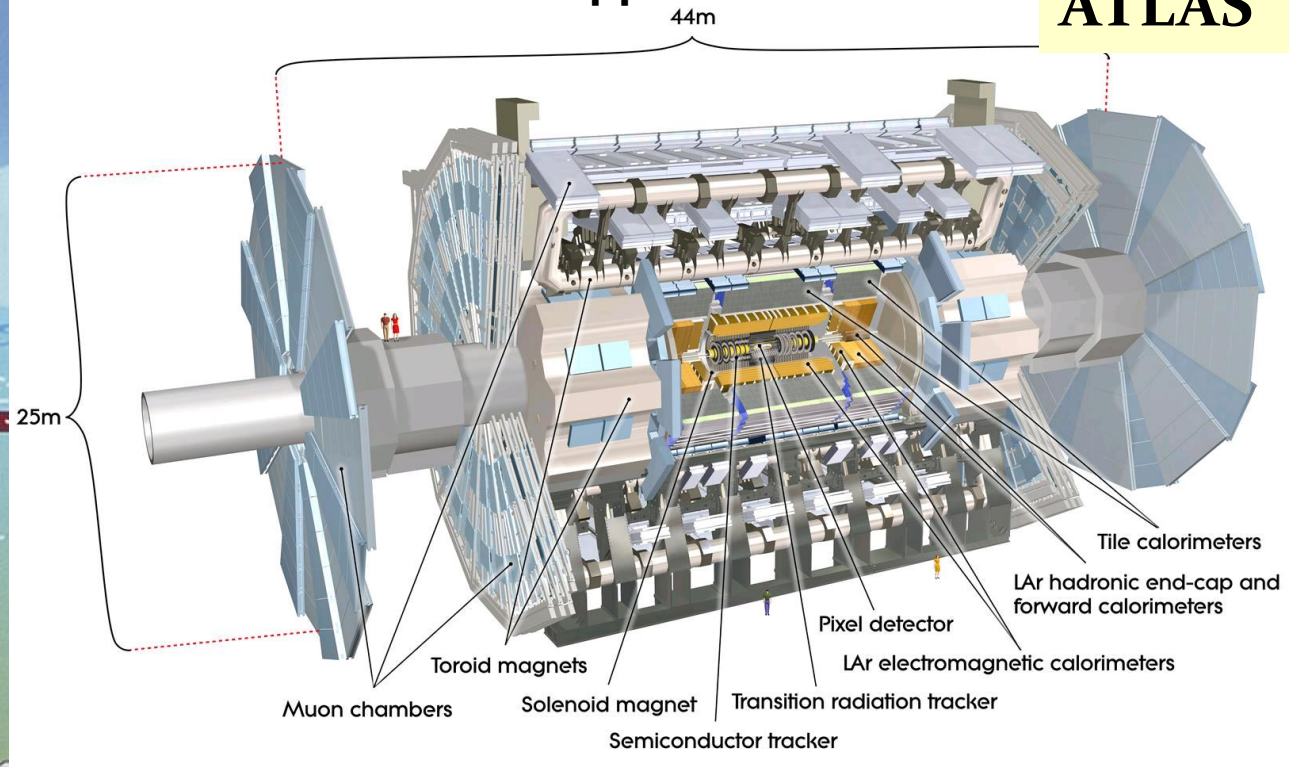
ATLAS Experiment

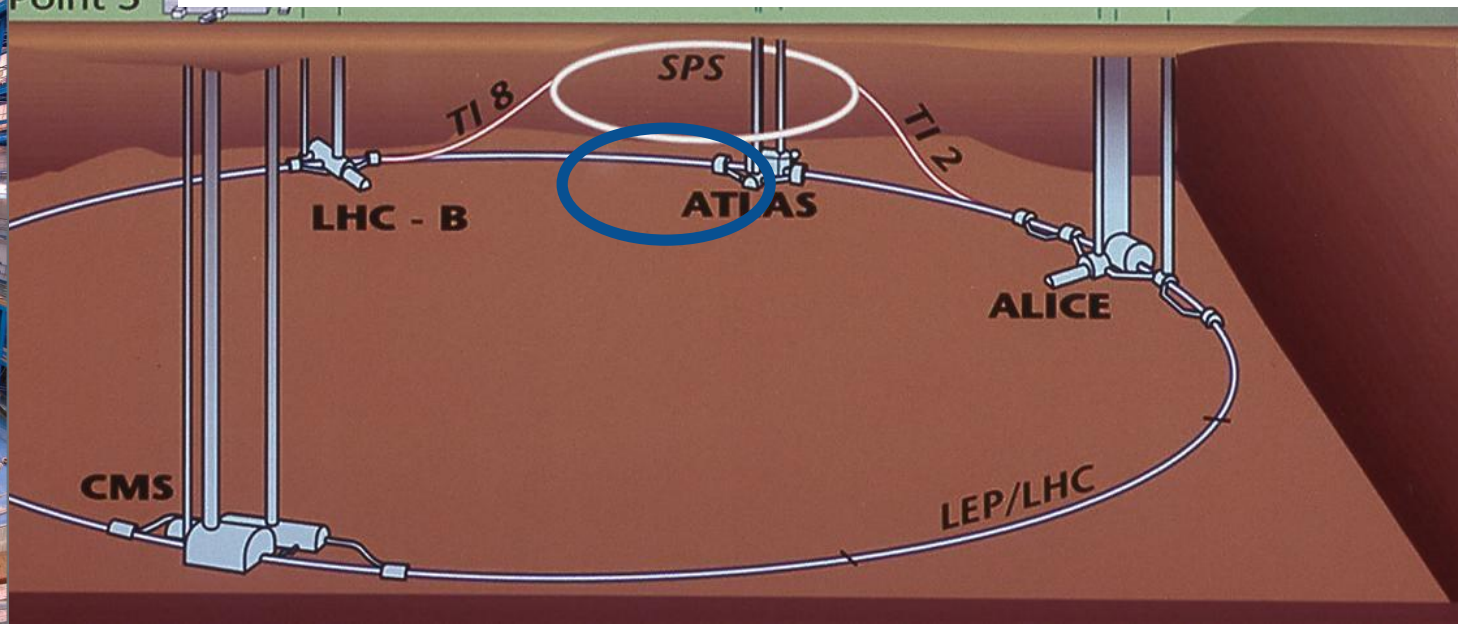
Diameter: 25 m
Length: 44 m
Weight: 7 kTonnes
~100 M electronic chs

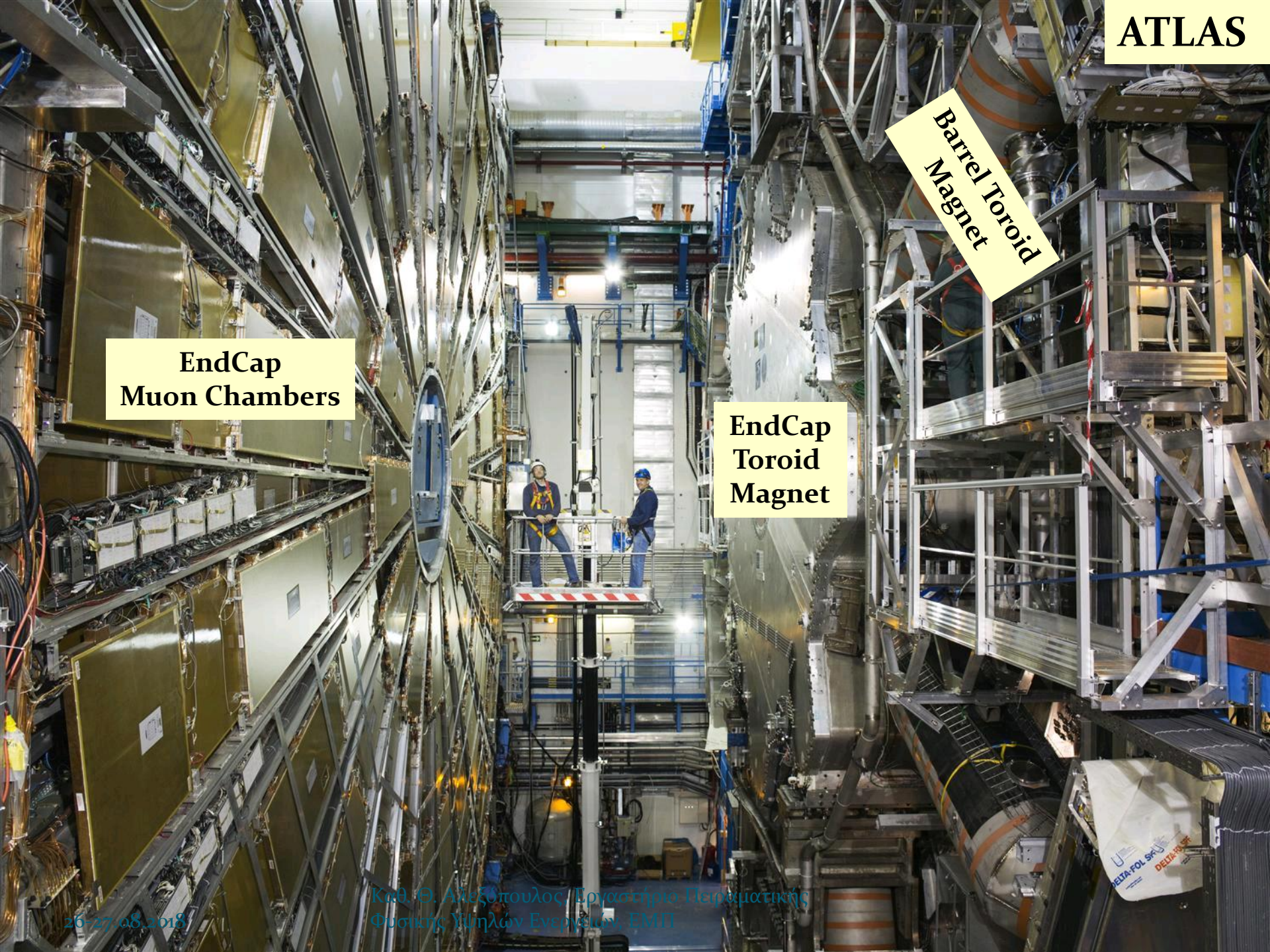
1150 MDT chambers
354 384 Tubes
214 Tonnes
725 m³ Gas Volume
5520 m² Chamber Area

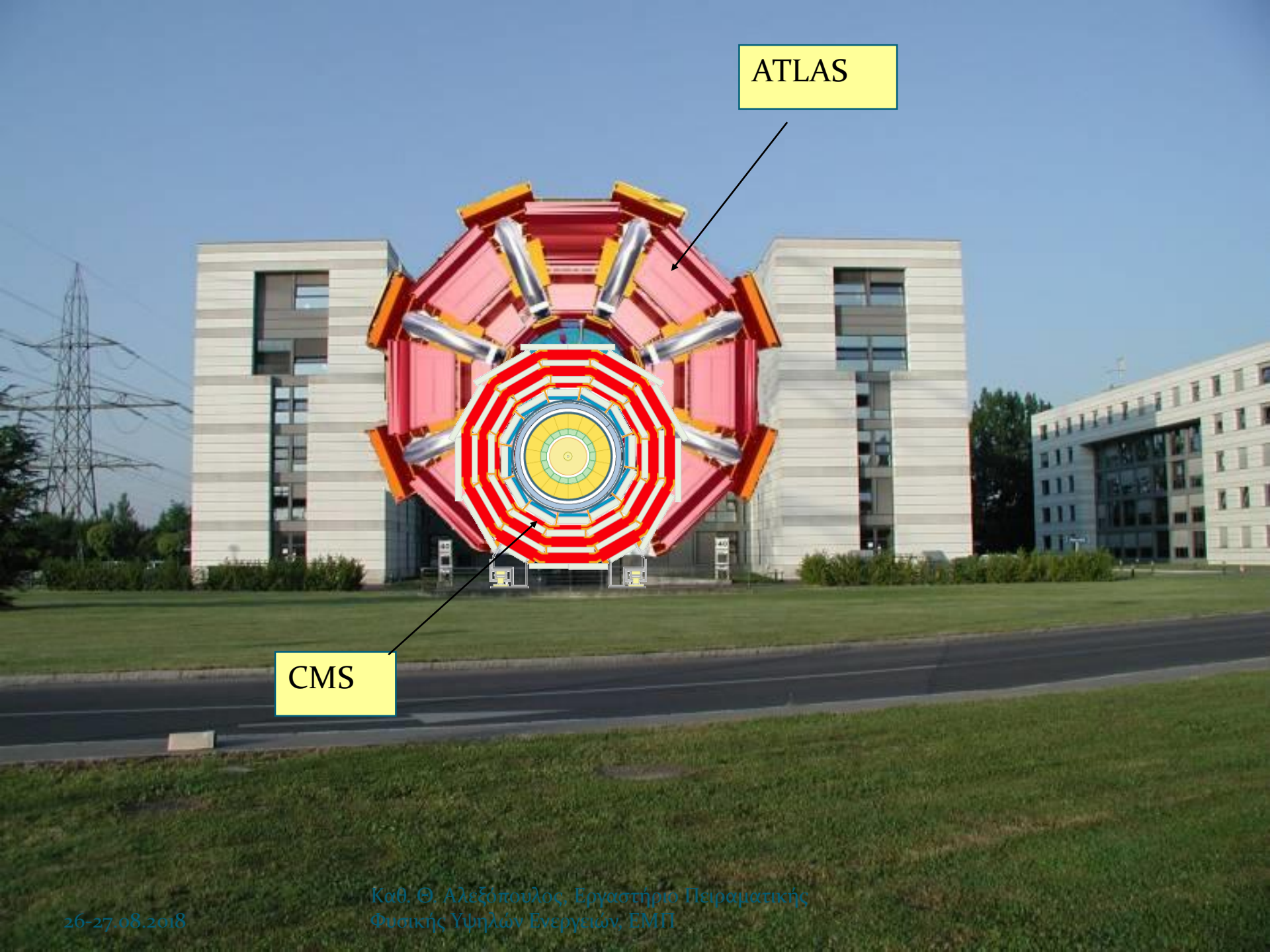
A **Toroidal** LHC **ApparatuS**

ATLAS



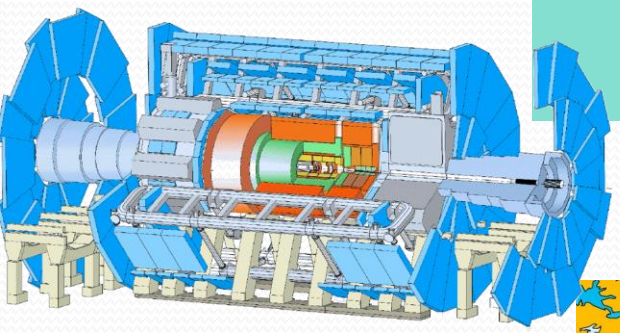



ATLAS
Barrel Toroid Magnet
EndCap Muon Chambers
EndCap Toroid Magnet

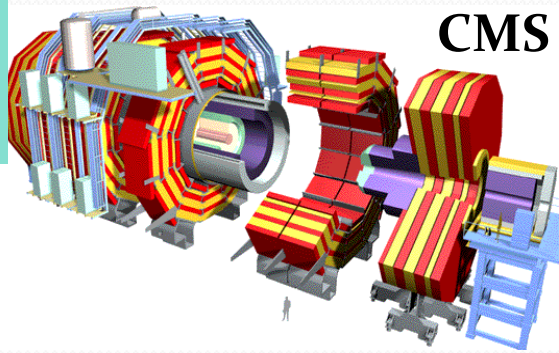

ATLAS
CMS

Challenge: Large, distributed community

ATLAS

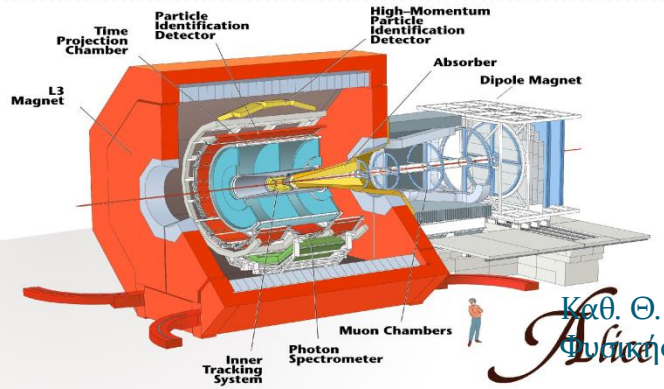


"Offline" software effort:
1000 person-years
per experiment

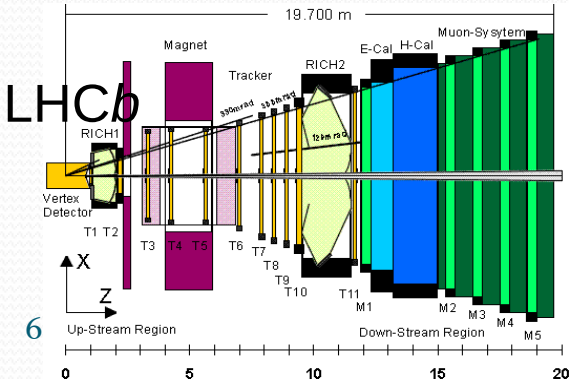


CMS

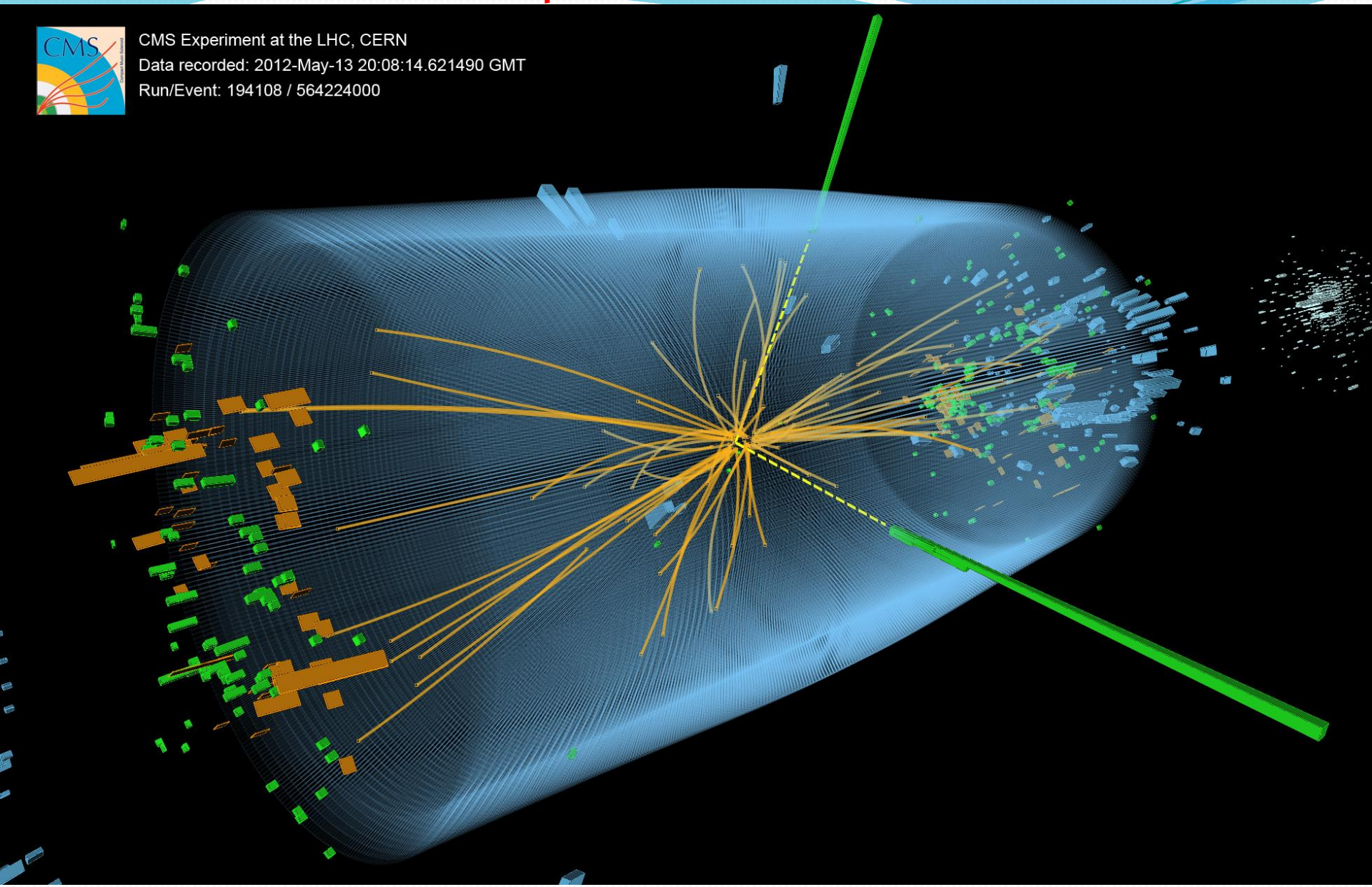
Software
life span:
20 years



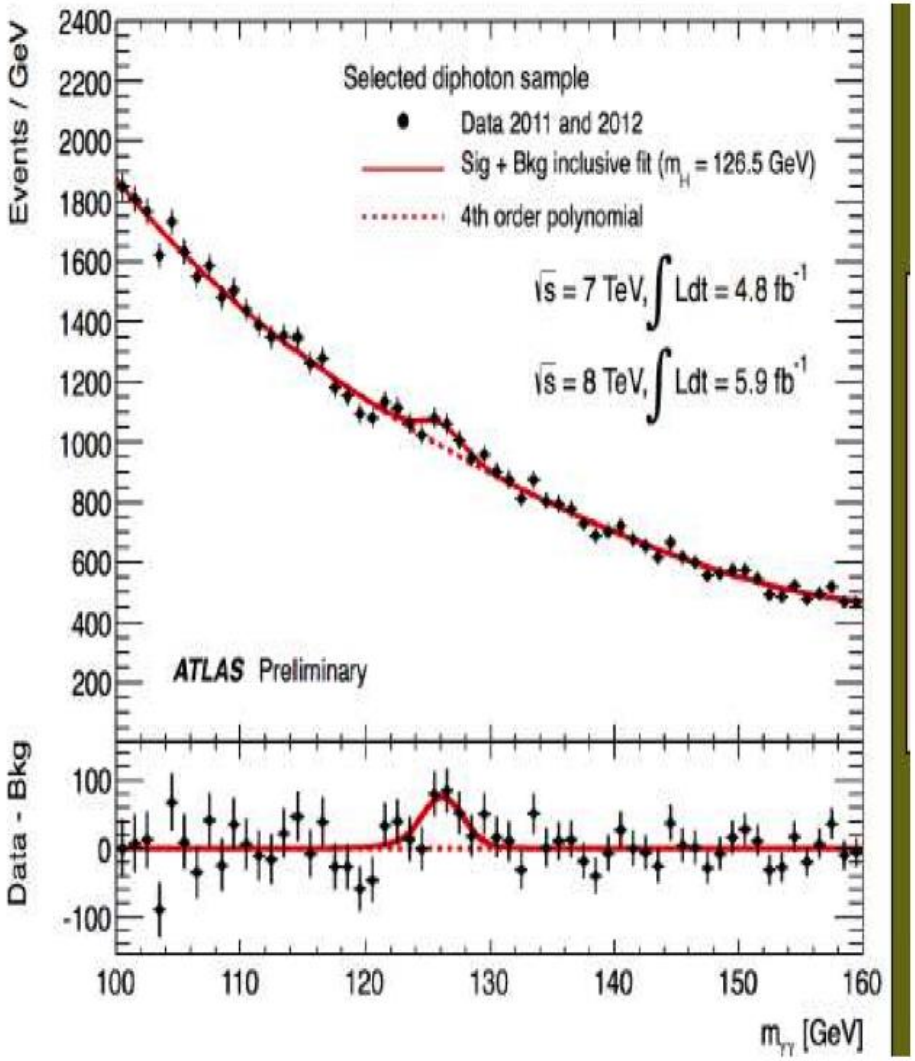
~ 5000 Physicists
around the world
- around the clock

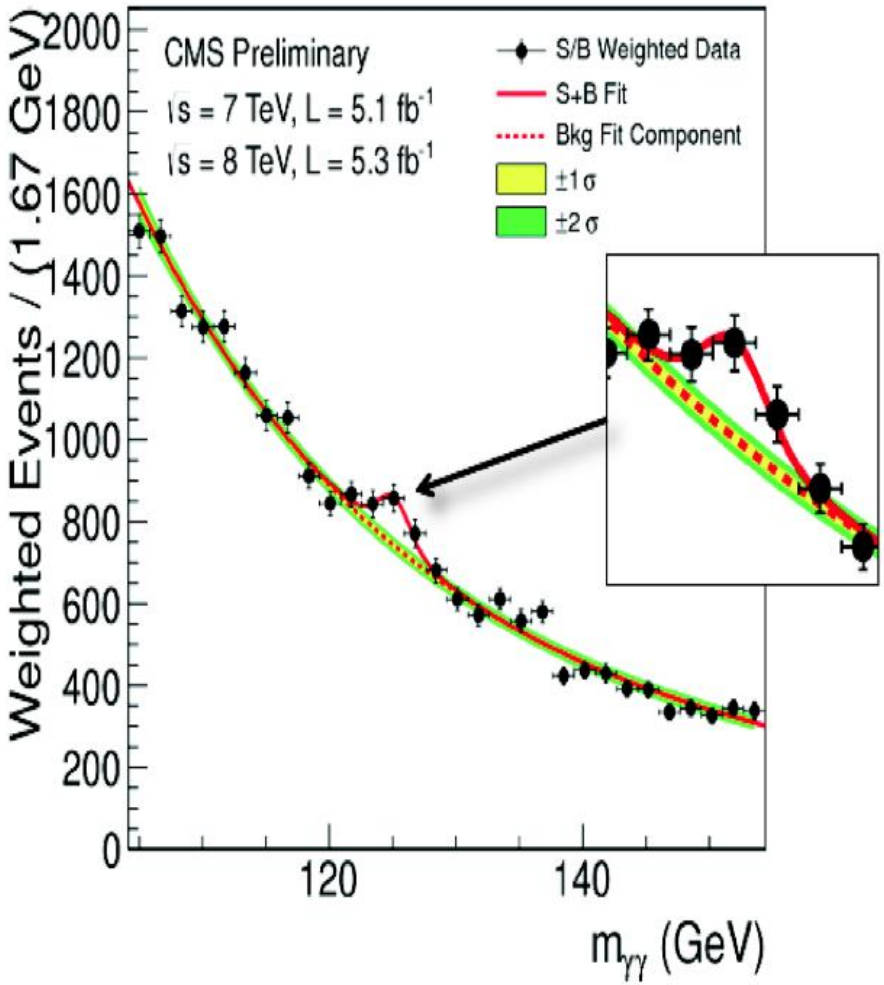


4 Ιουλίου 2012

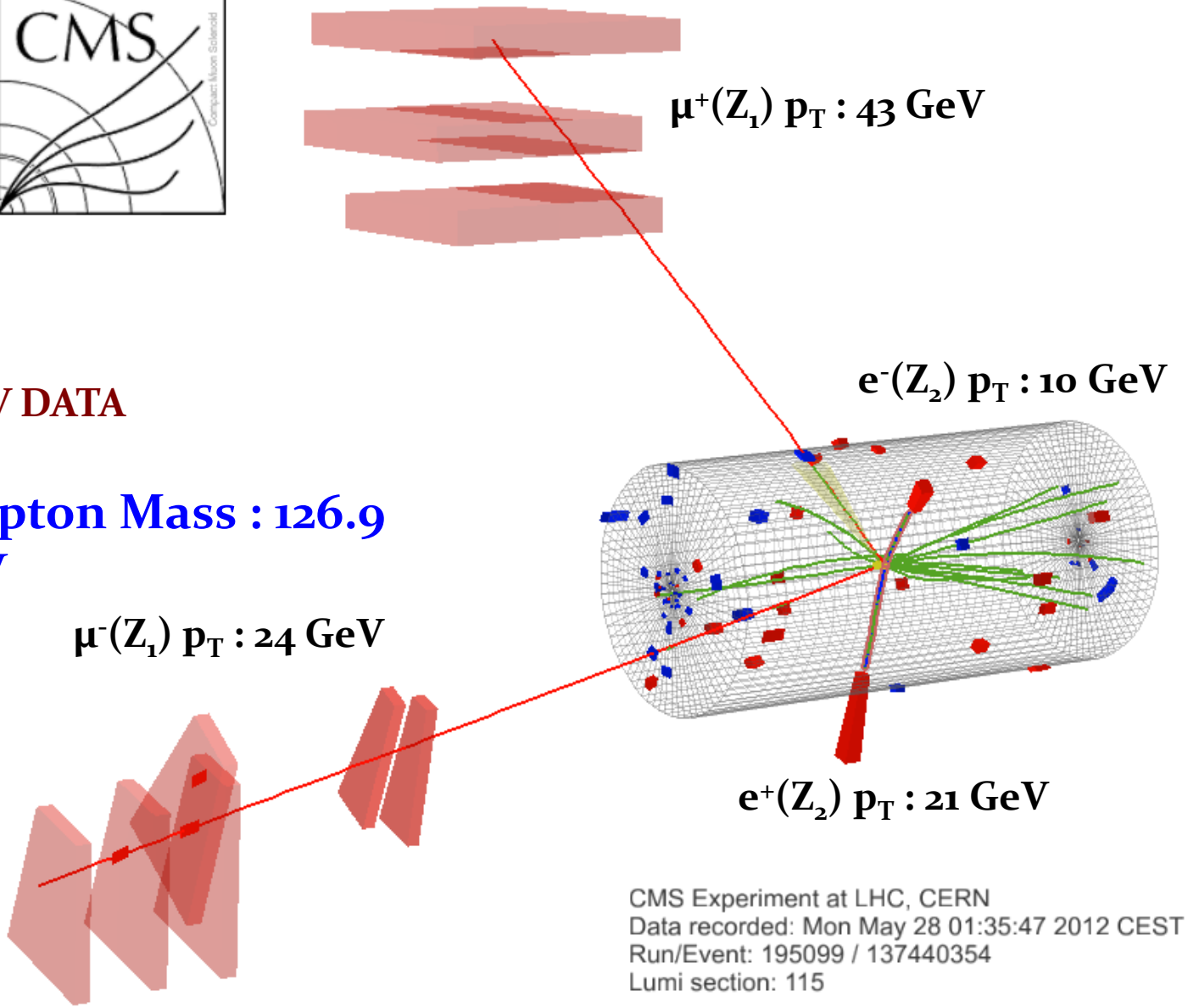


4 Ιουλίου 2012





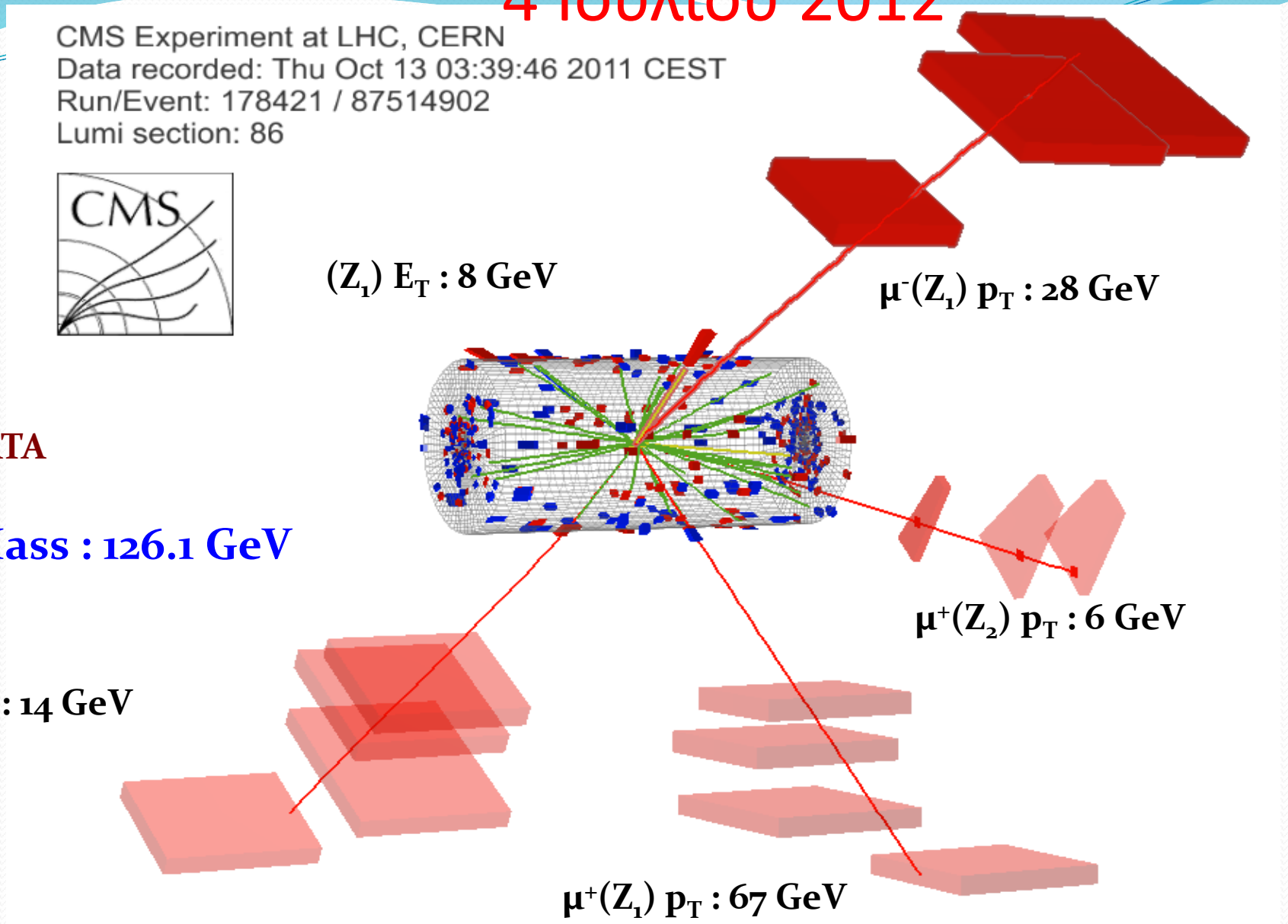
4 Ιουλίου 2012



8 TeV DATA

4-lepton Mass : 126.9 GeV

4 Ιουλίου 2012



7 TeV DATA

4μ+γ Mass : 126.1 GeV

Καθιερωμένο Πρότυπο (ΚΠ)

Αν και το ονομάζουμε μοντέλο, είναι μια υποψήφια θεωρία των στοιχειωδών σωματιδίων και των αλληλεπιδράσεών τους.

Χτίστηκε «πετραδάκι-πετραδάκι» τα προηγούμενα 50-60 χρόνια βασιζόμενο στα πειραματικά δεδομένα διαφόρων πειραμάτων και σε μερικές καινοτόμες θεωρητικές ιδέες.

Βασίζεται στο μαθηματικό υπόβαθρο της «Κβαντικής θεωρίας πεδίου» (QFT) η οποία θέτει μερικές βασικές/ειδικές ιδιότητες (συμμετρίες).

15 βραβεία Νόμπελ έχουν δοθεί για τις πειραματικές ή θεωρητικές ανακαλύψεις που βοήθησαν το ΚΠ

αρχή: 1936 και το πιο πρόσφατο: 2015!

1936: Ανακάλυψη του ποζιτρονίου, **Victor Frantz Hees & Carl David Anderson**

2013 & 2015: Ανακάλυψη του higgs – Ταλαντώσεις νετρονίων, **Peter Higgs, Francois Englert -- Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald**

Οι θεωρητικοί φυσικοί πολλές φορές έχουν προβλέψει την ύπαρξη νέων σωματιδίων και/ή νέες αλληλεπιδράσεις βασιζόμενοι στη γνώση των αλληλεπιδράσεών τους που τα κρατούν σε δέσμιες καταστάσεις. Τα πειράματα έχουν ανακαλύψει αυτά τα σωματίδια!

Άλλες φορές νέα σωματίδια και νέα φαινόμενα έχουν ανακαλυφθεί αναπάντεχα από τους πειραματικούς φυσικούς…

Με αποτέλεσμα να καθοδηγούν τη θεωρία επίσης!

Για παράδειγμα:

- **Το e^-:** ανακαλύφθηκε κατά λάθος αλλά ταίριαζε με τις συστηματικές παρατηρήσεις των προηγούμενων ετών: 1897-1899

- **Το e^+**: προβλέφθηκε από τη σχετικιστική κβαντομηχανική, P. Dirac

- **Το μ^-**: απλά «εμφανίστηκε» το 1936 από μόνο του αλλά συνέβαλε στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων

- **Το π^{+-}**: προτάθηκε από τον Yukawa (1935), ν: προτάθηκε από τον Pauli (1931), και τα δυο ανακαλύφθηκαν σε πειράματα το 1947.

- **Πυρήνες**: βρέθηκαν πειραματικά από τον Rutherford σε πειράματα σκέδασης (1911)

- **Κουάρκ u, d, s**: προτάθηκαν (1961) για να καταλάβουν τις ιδιότητες των σωματιδίων και να μπορέσουν να δημιουργήσουν ένα είδος περιοδικού πίνακα των στοιχειωδών σωματιδίων. Επιβεβαιώθηκαν πειραματικά σε πειράματα σκέδασης το 1966.

‘Στοιχεία’→ χημικές ενώσεις → μόρια → άτομα → πυρήνες → κουάρκ, λεπτόνια , ...

Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Τι πιστεύουμε σήμερα (προς το παρόν):

Στοιχειώδη σωματίδια είναι τα κουάρκ, τα λεπτόνια και τα μποζόνια βαθμίδας (φορείς αλληλεπιδράσεων): φωτόνιο, μποζόνια-W/Z, γκλουόνιο και....

το μποζόνιο higgs

Standard Model of

FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	–1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	–1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	–1

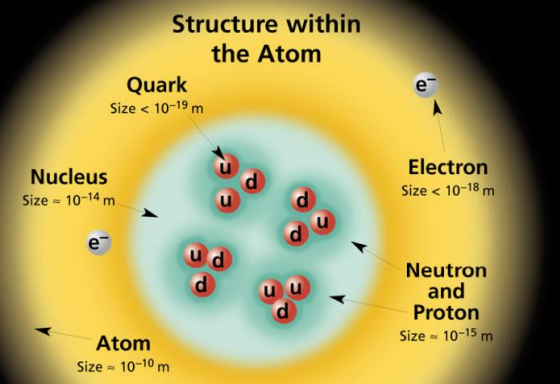
Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	–1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of ħ, which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s $= 1.05\times10^{-34}$ J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where 1 GeV = 10^9 eV = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	–1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and ***W*** and ***Z*** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq.

Residual Strong Interaction
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic (Electroweak)	Strong: Fundamental	Strong: Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
Strength relative to electromag for two u quarks at: 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	–1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	–1	1.672	3/2

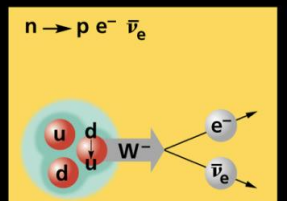
Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

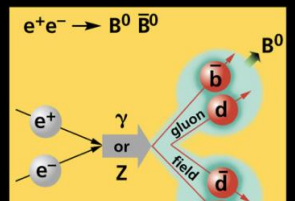
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2 .980	0

Matter and Antimatter
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or – charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ, and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

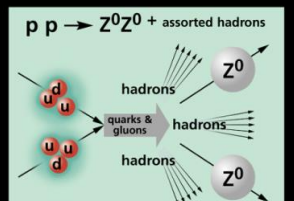
Figures
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are ***not*** exact and have ***no*** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.



An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and $\bar{B}^0$ mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



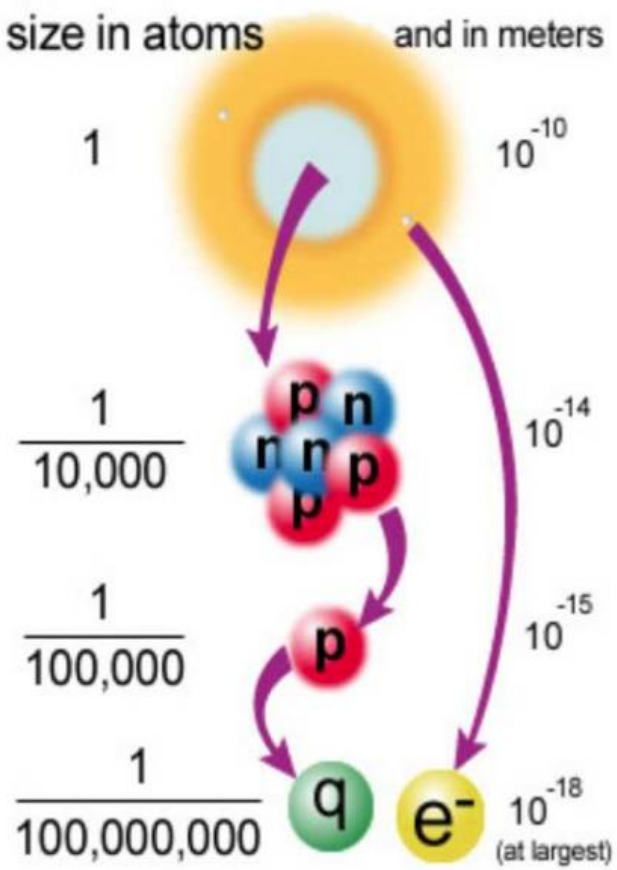
Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure
Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at
http://ParticleAdventure.org

This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:
http://CPEPweb.org

Οι νόμοι της φύσης (ΚΠ) που έχουμε βρει να δουλεύουν στο μικρόκοσμο, αποστάσεις 10^{-15} fm, και ακόμα σε μικρότερες αποστάσεις, φαίνεται να έχουν σχέση με φαινόμενα που συμβαίνουν σε κοσμολογικούς χρόνους (π.χ. κατά την αρχή του σύμπαντος) αλλά και σε κλίμακες αστρονομικών αποστάσεων (εκατομμύρια μέγα-pc, pc=$30{,}9 \times 10^{12}$ km=3,26 έτη-φωτός).



Οι θεμελιώδεις λίθοι της ύλης φαίνεται να φέρουν μια κλιμάκωση:

Άτομα ~ Angstrom = 10^{-10} m

Κουάρκ & λεπτόνια τα οποία είναι εκατοντάδες εκατομμύρια φορές πιο μικρότερα από τα άτομα πιστεύουμε ότι είναι σημειακά σωματίδια (προς το παρόν!)

Διάφορα σωματίδια φαίνονται θεμελιώδη σε διαφορετικές κλίμακες!

Προβλήματα της Σωματιδιακής Φυσικής

- Το Higgs +Υπερσυμμετρία+….
- Τα Νετρίνα και η μικρή Μάζα τους
- Γιατί το σύμπαν αποτελείται μόνο από ύλη με πολύ μικρό ποσοστό αντι-ύλης

Τεχνολογίες “spinoff”

- World Wide Web
- Ιατρική απεικόνιση (MRI, CAT, PET)
- Μεγάλης αποδοτικότητας υπεραγώγιμοι μαγνήτες
- Συστήματα υψηλού κενού
- Κρυογενικά συστήματα
- Υπολογιστές μεγάλων απαιτήσεων
- Γρήγορα ηλεκτρονικά

Κάλεσμα …….

Η επιστημονική κοινότητα ζει μοναδικές συναρπαστικές στιγμές ανακάλυψης νέων φαινομένων φυσικής με τη βοήθεια του Μεγάλου Αδρονικού Επιταχυντή LHC.

Ελπίζουμε ότι πολλοί από εσάς θα εμπνεύσετε στην τάξη σας τους

ΝΕΑΡΟΥΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥΣ/ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ,

που θα μας συνοδεύσουν σε αυτή την περιπέτεια των νέων ανακαλύψεων!!