

# Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

**ΦΥΣ 331**

Φθινόπωρο 2023

**Διδάσκων:**

**Φώτης Πτωχός**

**e-mail:** Ptochos.Fotios@ucy.ac.cy

**Τηλ:** 22.89.2837

**Γραφείο:** B235 – ΘΕΕ02 – Τμήμα Φυσικής

# Γενικές Πληροφορίες

- **Ώρες/Αίθουσα διδασκαλίας:**
  - Τρίτη Παρασκευή 09:00 – 11:00
  - Αίθουσα: B230
- **Φροντιστήρια/Απορίες**
  - Τετάρτη 11:00 – 12:00 B230
  - Οι συναντήσεις της Τετάρτης θα είναι ένας συνδυασμός για λύσεις ασκήσεων και παραδόσεων
- Ιστοσελίδα του μαθήματος:  
<http://ptohos.github.io/phy331/phy331.html>

# Βιβλιογραφία

## Βιβλία σε αγγλική έκδοση:

\* Introduction to Elementary Particle Physics – D. Griffiths

\* Introduction to High Energy Physics – D. Perkins

Particle Physics - B.R Martin και G. Shaw

Introduction to Elementary Particle Physics – A. Bettini

Particle Physics in the LHC era – G. Barr et al.

\* Modern Particle Physics – M. Thomson

\* Quarks and Leptons – F. Halzen and A. D. Martin

Concepts of Particle Physics – K. Gottfried and V. Weisskopf

\* Collider Physics – V. Barger and R. Phillips

## Βιβλία σε ελληνική έκδοση:

Εισαγωγή στην Φυσική Υψηλών Ενεργειών – D. Perkins

Εισαγωγή στα Στοιχειώδη Σωματίδια & Κοσμολογία – Ι. Δ. Βέργαδος και Η.

Τριανταφυλλόπουλος

## Βαθμολογία

Η αξιολόγησή σας θα βασιστεί στα ακόλουθα:

- ❑ **30%** : ασκήσεις κατ'οίκον (8 συνολικά)
- ❑ **30%** : 1 πρόοδος (120 λεπτών) – Κυριακή 15 Οκτώβρη 11:00-13:00
- ❑ **40%** : τελική εξέταση ή παρουσίαση κάποιου θέματος

## Κατ'οίκον εργασίες

- ❑ Εργασίες για το σπίτι θα σας δίνονται σύμφωνα με το πρόγραμμα
- Καθυστερημένες λύσεις δεν θα γίνονται δεκτές
- ❑ Συνεργασία μεταξύ σας επιτρέπεται και ενθαρρύνεται αλλά ο καθένας επιστρέφει την δική του οργανωμένη λύση
  - Πανομοιότυπες λύσεις δεν θα βαθμολογούνται

# Ύλη του μαθήματος

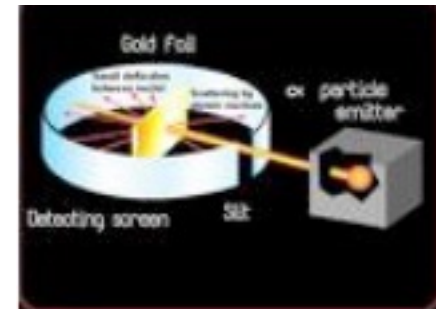
- ❑ Εισαγωγή και Θεμελιώδη σωματίδια
  - Ιστορική Αναδρομή
  - Quarks, λεπτόνια, φωτόνια
  - Φυσικές μονάδες, κινηματική
- ❑ Επισκόπηση του Καθιερωμένου Πρωτύπου
  - Ηλεκτρομαγνητικές, ασθενείς και ισχυρές αλληλεπιδράσεις
- ❑ Συμμετρίες
  - Ομοτιμία, C, CP, CPT, Isospin, G-ομοτιμία
- ❑ Σχετικιστική κινηματική
- ❑ Ανιχνευτές και Επιταχυντές
- ❑ Διαγράμματα Feynman
- ❑ Εξίσωση Dirac
- ❑ Κβαντική ηλεκτροδυναμική
- ❑ Βαθιά ανελαστική σκέδαση
- ❑ Κβαντική χρωμοδυναμική
- ❑ Φορτισμένες και Ουδέτερες Ασθενείς αλληλεπιδράσεις
  - ταλαντώσεις γεύσης
- ❑ Θεωρίες Βαθμίδος
  - Αυθόρμητο σπάσιμο συμμετρίας / Μηχανισμός Higgs

# Ιστορική Αναδρομή - θεμελίωση του ατομικού μοντέλου

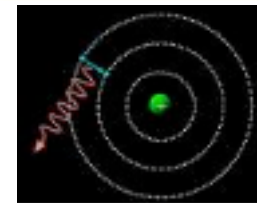
**5<sup>ος</sup> π.χ. αιώνας** Η ιδέα του ατόμου αναπτύχθηκε από τον Δημόκριτο  
Αρκετά αρχαία σχολεία φιλοσοφίας Hindu στην Ινδία



**1897** Ο JJ Thomson ανακαλύπτει ότι στις καθοδικές ακτίνες, ο λόγος φορτίου/μάζα,  $q/m$  = σταθερός και ότι  $q/m \gg q/m$  ιόντα  
Ανακάλυψη του ηλεκτρονίου και η διατύπωση του ατομικού μοντέλου του «σταφιδόψωμου»

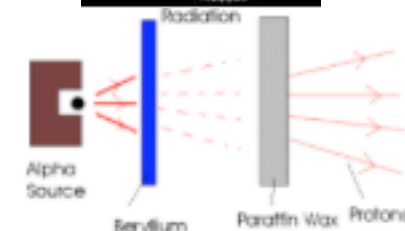


**1911** Παρατήρηση μεγάλων γωνιών σκέδασης α-σωματιδίων από λεπτά φύλλα χρυσού που οδηγεί τον Rutherford στην διατύπωση της θεωρίας ενός συμπαγούς πυρήνα με όλη τη μάζα του ατόμου συγκεντρωμένη στον πυρήνα. Ανακάλυψη πρωτονίου - Αρχή της σωματιδιακής φυσικής υψηλών ενεργειών και σκεδάσεων



**1914** Διατύπωση του τροχιακού μοντέλου ατόμου υδρογόνου από τον Bohr και υπολογισμός του φάσματος εκπομπής

**1932** Ανακάλυψη του νετρονίου από τον Chadwick και επίλυση του προβλήματος διαφοράς ατομικού αριθμού και ατομικής μάζας καθώς και του σπιν του αζώτου

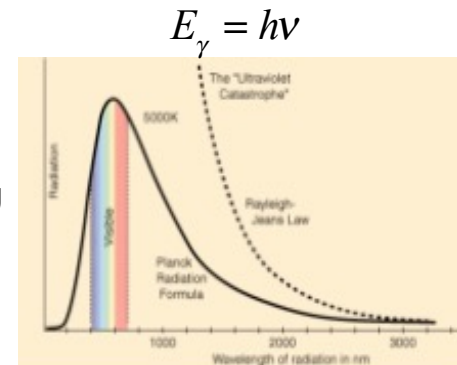


# Ιστορική Αναδρομή – Το φωτόνιο

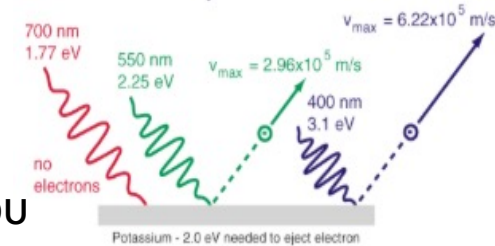
**1704** Σωματιδιακή Θεωρία φωτός από τον Newton – μικρές σφαίρες που κινούνται γρήγορα και σκεδάζονται ελαστικά

**1800** Κυματική θεωρία φωτός από τον Young

**1899** Διατύπωση της κβαντικής φύσης της ακτινοβολίας μελανού σώματος από τον Planck. Η ακτινοβολία εκπέμπεται σε μονάδες  $h\nu$

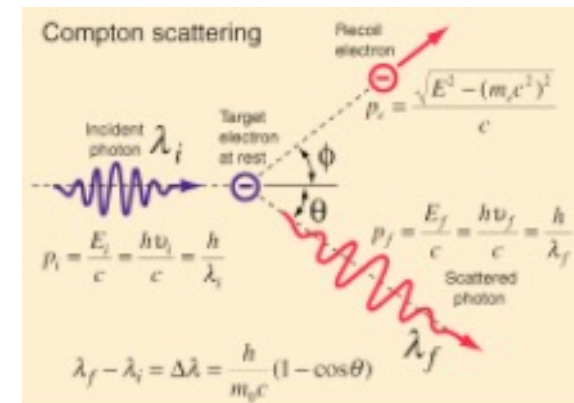


**1905** Εξήγηση φωτοηλεκτρικού φαινομένου με την θεώρηση των κβαντικών πακέτων ala Planck - Einstein



**1916** Επιβεβαίωση της θεωρίας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Millikan και μέτρηση του  $h$  με ακρίβεια 0.5%

**1923** Ο Compton παρατηρεί τη μετατόπιση του μήκους κύματος ακτίνων-x όταν σκεδάζονται από ηλεκτρόνια  
Επιβεβαίωση της ύπαρξης αλλά και σωματιδιακής φύσης των φωτονίων





## Ιστορική Αναδρομή – Πλήρης εικόνα του κόσμου

1920'ς Με την ανακάλυψη του φωτονίου και την ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής, η εικόνα του σύμπαντος φαινόταν πλήρης:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat sitting}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cat lying}\rangle$$

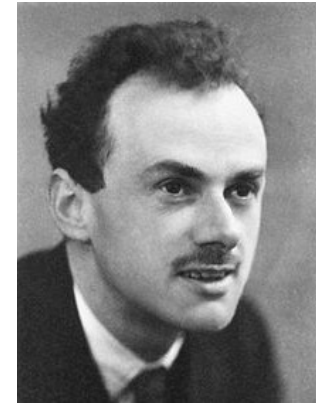
Μερικές γάτες ήταν θυμωμένες και άκεφες αλλά τίποτα περισσότερο

Έλειπε μια σχετικιστική εξίσωση Schrödinger

## Ιστορική Αναδρομή – Dirac και αντισωματίδια

- 1927** Ο Dirac συνδυάζει Κβαντική Μηχανική και ειδική σχετικότητα για τη διατύπωση της εξίσωσης:

$$H\Psi(\vec{r},t) \equiv i\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{r},t) = (-i\vec{a} \cdot \nabla + \beta m)\Psi(\vec{r},t)$$

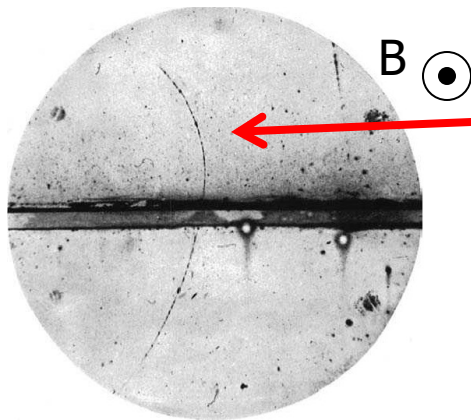


Δυο λύσεις για την κυματοσυνάρτηση (εφόσον  $E^2 = p^2 + m^2$  δέχεται δυο λύσεις για την ενέργεια – θετική και αρνητική)

Η λύση της εξίσωσης απαιτεί σωματίδιο με αρνητική ενέργεια

Ο Dirac θεώρησε ότι η κατάσταση του κενού αποτελείται από μια θάλασσα ηλεκτρονίων με αρνητική ενεργεια. Διεγέρσεις της θάλασσας θα φαινόταν σαν οπές θετικού φορτίου θετικής ενέργειας (**περισσότερα αργότερα**)

- 1932** Ανακάλυψή του ποζιτρονίου από τον Anderson σε κοσμική ακτινοβολία μέσα σε θάλαμο νέφωσης



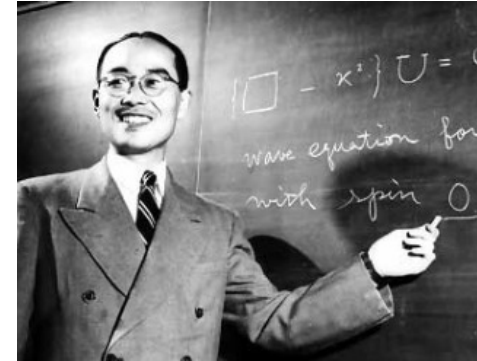
Η καμπύλωση είναι ταυτόσημη με αυτή του ηλεκτρονίου (άρα ο λόγος  $q/m$  ίδιος) αλλά αντίθετο πρόσημο !



# Ιστορική Αναδρομή - Ισχυρή δύναμη και μεσόνια

**1935** Τι κρατά τα συστατικά του πυρήνα συγκεντρωμένα δεδομένου του ασύμβατου της δύναμης Coulomb?

Διατύπωση της θεωρίας για την πυρηνική δύναμη από τον Yukawa – ύπαρξη σωματιδίων αναταλλαγής (μεσόνια)

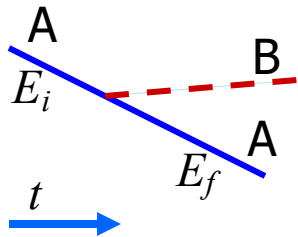


Οι δυνάμεις δεν παρατηρούνται σε μεγάλες αποστάσεις  
Επομένως η μεταφορά της δύναμης μέσω σωματιδίου με μάζα. **Ποιά μάζα?**

Αν ένα σωματίδιο A εκπέμπει ένα σωματίδιο B που απορροφάται από άλλο σωματίδιο, τότε η ενέργεια δεν διατηρείται γιατί το εκπεμπόμενο σωματίδιο έχει μικρή ενέργεια, τουλάχιστον όσο η μάζα του

$$\begin{aligned} \text{Έστω το A είναι σε ηρεμία: } E_i = m_A c^2 &\Rightarrow E_f \geq m_A c^2 + m_B c^2 \\ \Rightarrow \Delta E = E_f - E_i &\geq m_B c^2 \end{aligned}$$

**Αρχή της αβεβαιότητας:** Μπορεί να παραβιαστεί η αρχή διατήρησης της ενέργειας αν είμαστε γρήγοροι:  $\Delta E \Delta t \approx \hbar$



Ο μικρότερος χρόνος συμβαίνει αν το ανταλλασσόμενο σωματίδιο κινείται με ταχύτητα  $c$

Αν η εμβέλεια της δύναμης είναι  $r_0$  τότε  $\Delta t = r_0 / c$  και επομένως:

$$m_B c^2 \approx \hbar / \Delta t \approx \hbar c / r_0 \Rightarrow m_B \approx \hbar / (r_0 c) \quad \text{Για } r_0 = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \Rightarrow m_B \approx m_p / 5$$

# Ιστορική Αναδρομή – Ανακάλυψη του ~~μ-μεσόνιου~~ ΛΕΠΤΟΝΙΟΥ

**1932** Δυο είδη τροχιών ανακαλύφθηκαν από τον P. Kunze, σε πειράματα κοσμικής ακτινοβολίας

Μη κατανοητή η προέλευση των τροχιών αυτών

**1937** Anderson (ξανά) και Neddermeyer κατηγοροποίησαν τα δυο είδη τροχιών. Σωματίδια που δεν χάνουν πολύ ενέργεια και είναι διεισδυτικά.

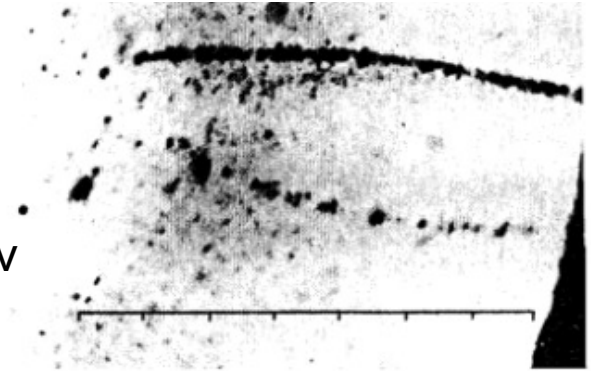
Ανακάλυψη του **mesotron** (μ-μεσόνιο)

**1945** Αν το μιονίο είναι το Yukawa μεσόνιο και εφόσον το  $p$  είναι θετικό, το  $\mu^-$  θα απορροφηθεί από τα άτομα ( $p+n$ ) ενώ τα  $\mu^+$  θα διασπαστούν

**1945** Conversi, Pancini και Piccioni, κοίταξαν για την διαφορά, χρησιμοποιώντας συστοιχία θαλάμων αερίου και απορροφητές μέσα σε μαγνητικό πεδίο

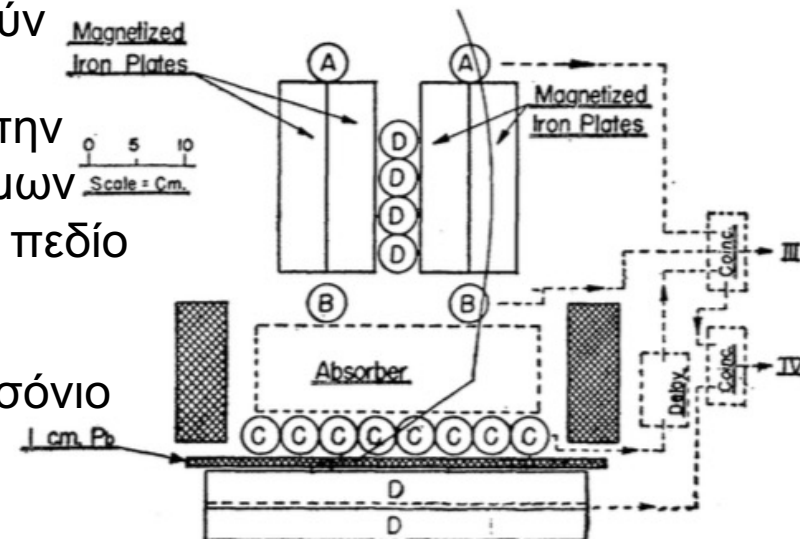
Καμία διαφορά των δυο περιπτώσεων δεν παρατηρήθηκε. Επομένως το  $\mu$  δεν ήταν μεσόνιο

I.I. Rabi " who ordered this? "



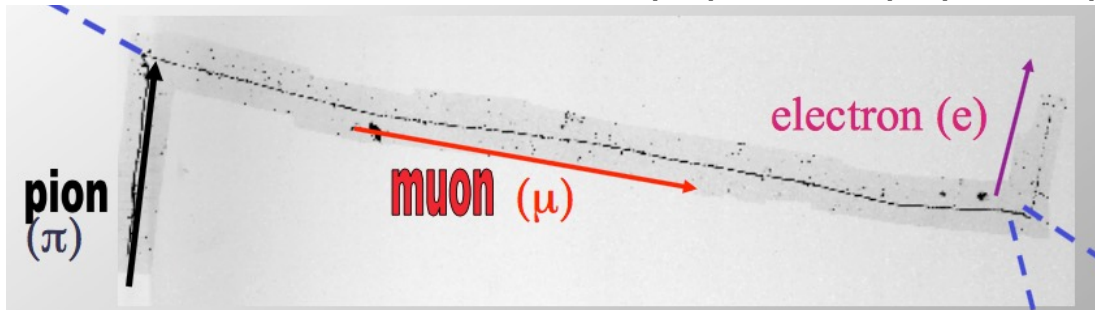
"The other double trace of the same type (figure 5) shows closely together the thin trace of an electron of 37 MeV, and a much more strongly ionizing positive particle with a much larger bending radius. The nature of this particle is unknown; for a proton it does not ionize enough and for a positive electron the ionization is too strong. The present double trace is probably a segment from a "shower" of particles as they have been observed by Blackett and Occhialini, i.e. the result of a nuclear explosion".

Kunze, P., Z. Phys. 83, (1933) 1



## Ιστορική Αναδρομή – Ανακάλυψη μεσόνιων

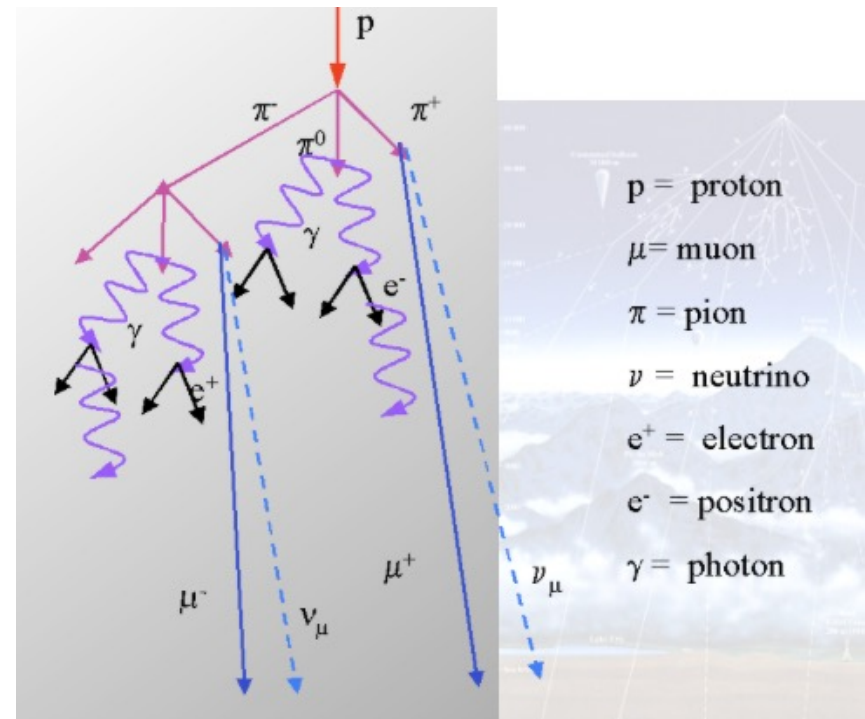
**1946** Ανακάλυψη των φορτισμένων πιονίων σε φωτογραφικό γαλάκτωμα κατά την διάσπασή τους σε μίονια και την ακόλουθη διάσπαση σε ηλεκτρόνιο Powel και Occhialini σε πειράματα σε μεγάλο υψόμετρο στα Γαλλικά Πυρηναία



Τα ουδέτερα πιόνια ανακαλύφθηκαν το 1956

Πλήρης σχεδόν εικόνα των συστατικών της κοσμικής ακτινοβολίας

Ωστόσο δεν υπήρχε συνεκτική εξήγηση



# Ιστορική Αναδρομή – Νετρίνο



**1930** Ραδιενέργεια παρατηρήθηκε ότι είχε σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρονίων και κάποιες φορές ποζιτρονίων

Η ενέργεια των ηλεκτρονίων ωστόσο ήταν μικρότερη από αυτή που θα αντιστοιχούσε σε διάσπαση 2-σωμάτων  $A \rightarrow B + e$

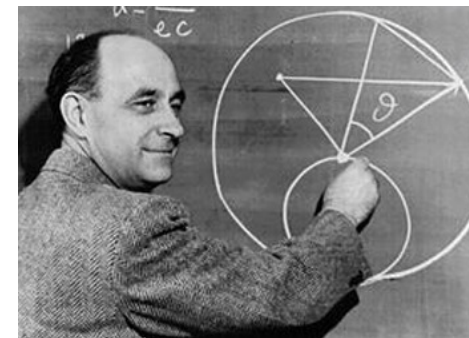
$$m_A c^2 = \sqrt{m_B^2 c^4 + \underbrace{(E_e^2 - m_e^2 c^4)}_{\text{}} } + E_e \Rightarrow m_A c^2 - E_e = \sqrt{m_B^2 c^4 + (E_e^2 - m_e^2 c^4)}$$

Για διάσπαση σε 2-σώματα η ορμή είναι ίδια  $p_e = p_B$

$$\Rightarrow m_A^2 c^4 + E_e^2 - 2m_A E_e c^2 = m_B^2 c^4 + E_e^2 - m_e^2 c^4$$

$$E_e = \frac{m_A^2 - m_B^2 + m_e^2}{2m_A} c^2$$

Η ιδέα του αγνοούμενου ουδέτερου σωματιδίου προτάθηκε από τον Pauli



**1933** Ο Fermi πρότεινε την θεωρία της β-διάσπασης με την υιοθέτηση του νετρίνο

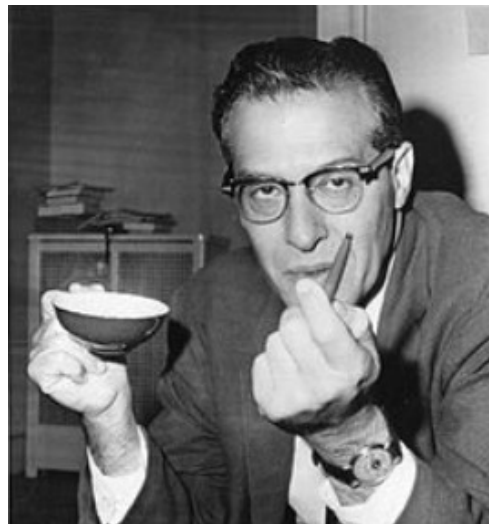
**1959** Ανακάλυψη του νετρίνο (ηλεκτρονίου) από τους Cowan και Reines

**1962** Ανακάλυψη του νετρίνο σε διασπάσεις πιονίων. Τα νετρίνο πέφτοντας σε στόχους δημιουργούν  $\mu$  και όχι  $e$  - Διαχωρισμός  $\nu_\mu$  και  $\nu_e$  - Steinberger, Lederman, Schwartz

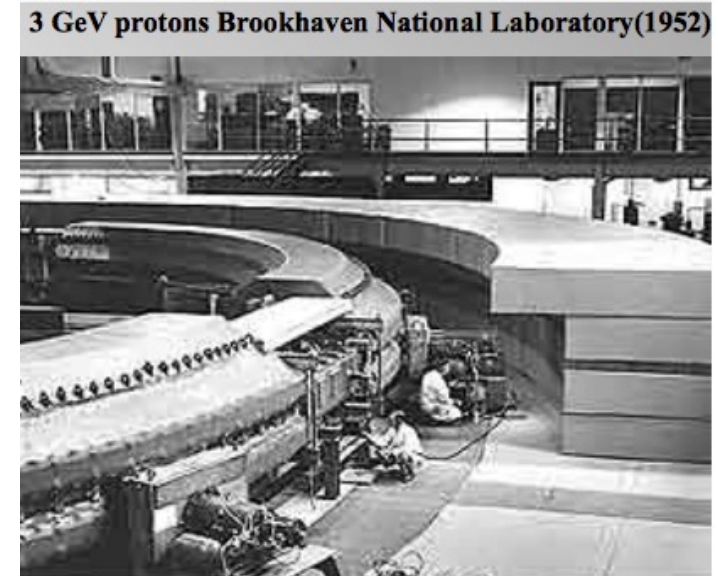
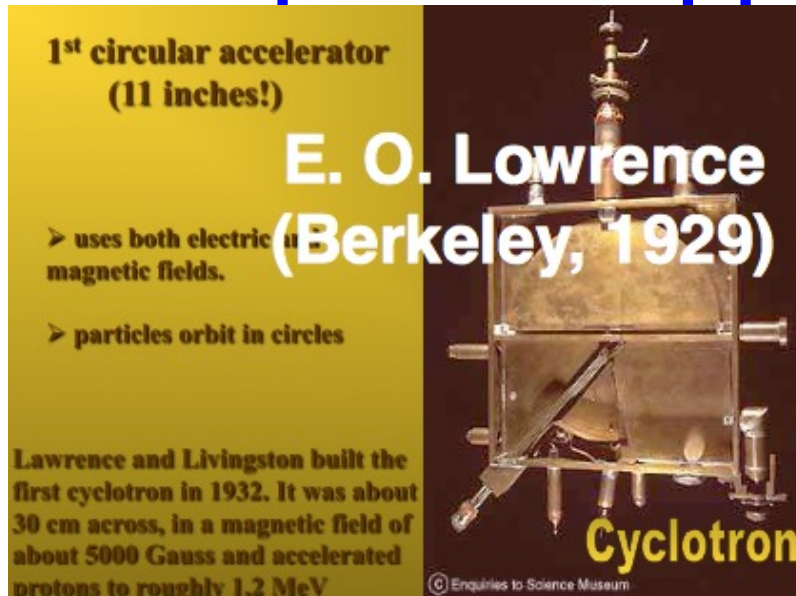


# Ιστορική Αναδρομή – QED

**1950** Feynman, Schwinger and Tomonaga διατυπώνουν μια συνεκτική θεωρία για τις αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων-φωτονίων με βάση τις ιδέες της κβαντικής θεωρίας.  
Γέννηση της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής



# Ιστορική Αναδρομή – Από την κοσμική ακτινοβολία στο εργαστήριο

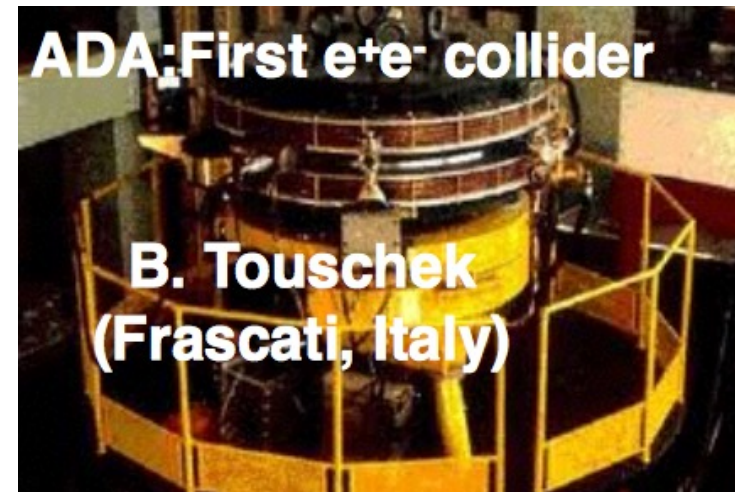


Σωματίδια επιταχύνονται μέσα σε σωλήνα κενού και έρχονται σε σύγκρουση με στόχο

Διαπίστωση ότι σύγκρουση δεσμών σωματιδίων προσφέρει μεγαλύτερη ενέργεια κέντρου μάζας

Επιταχυντές σωματιδίων μετατράπηκαν σε συγκρουστήρες σωματιδίων

Ανακάλυψη νέων σωματιδίων, νέων φαινομένων (C, CP, P παραβιάσεις)





## Ιστορική Αναδρομή – Strange σωματίδια

1946 Η σωματιδιακή φυσική ήταν κατανοητή – Τίποτα νέο να ανακαλυφθεί

1947 Rochester και Butler ανακαλύπτουν το ουδέτερο καόνιο σε φωτογραφία κοσμικής ακτινοβολίας  $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

1949 Ο Powell ανακαλύπτει  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$

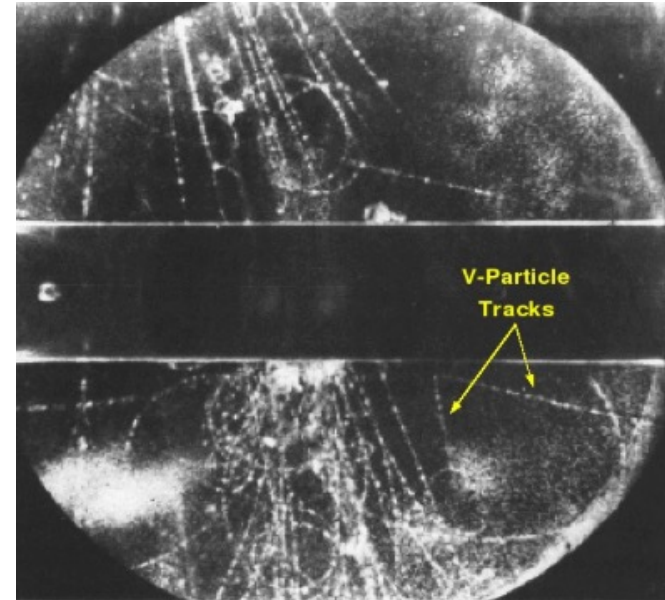
1950 Ο Anderson ανακαλύπτει  $\Lambda \rightarrow p \pi^-$

1953 Το Betatron στο Berkeley και Cosmotron στο Brookhaven παράγουν strange σωματίδια στο εργαστήριο

Μυστήρια σχετικά με τα σωματίδια αυτά:

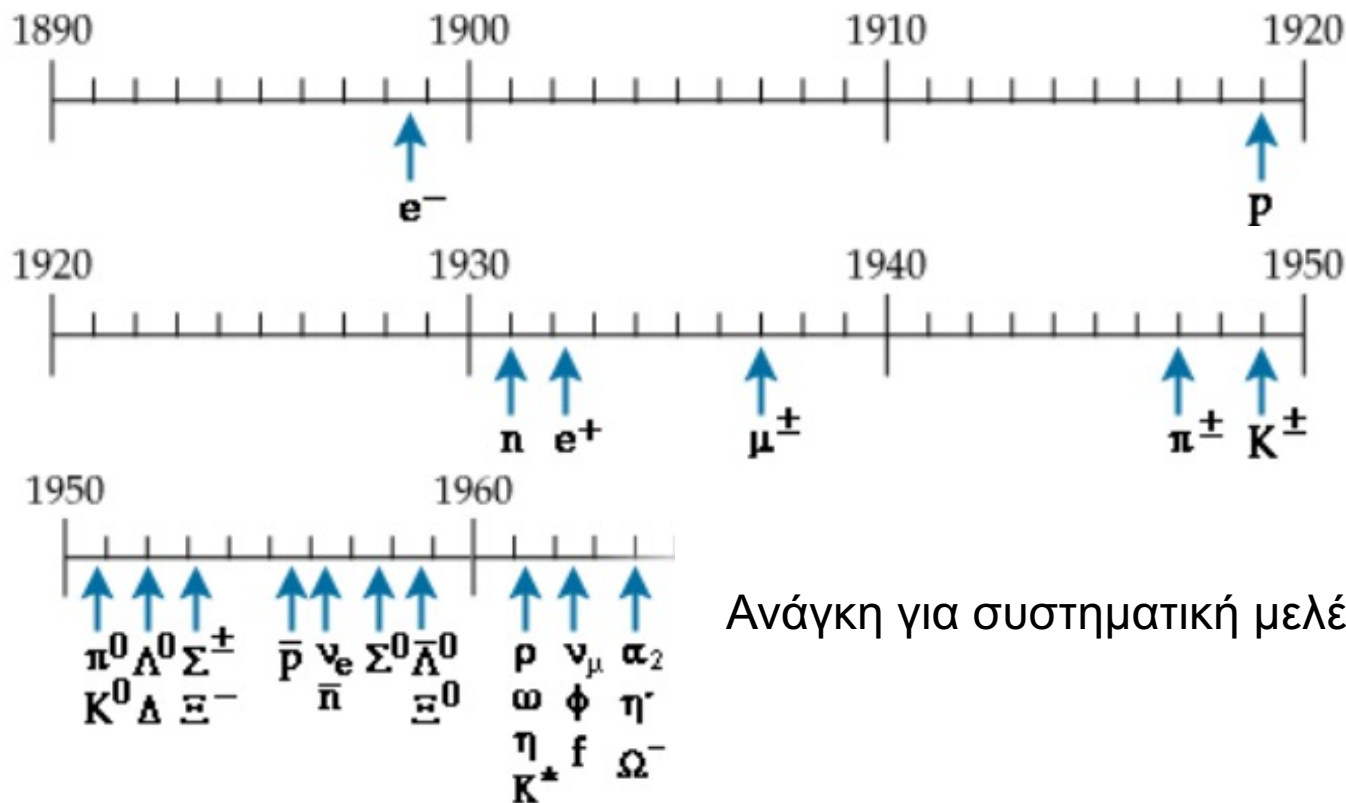
- Πάντοτε παράγονται ανά ζεύγη
- Δυο σωματίδια της ίδιας μάζας, με αντίθετη ομοτιμία. Το ένα διασπάται σε 2 πιόνια και το άλλο σε 3 πιόνια

Οι Gell-Mann και Nishijima πρότειναν την διατήρηση ενός νέου κβαντικού αριθμού (strangeness). Διατηρείται από ισχυρές αλληλεπιδράσεις όχι όμως τις ασθενείς



## Ιστορική Αναδρομή – Πριν τη δεκαετία του '70

1950-1970 Ανακάλυψη μεγάλου αριθμού σωματιδίων

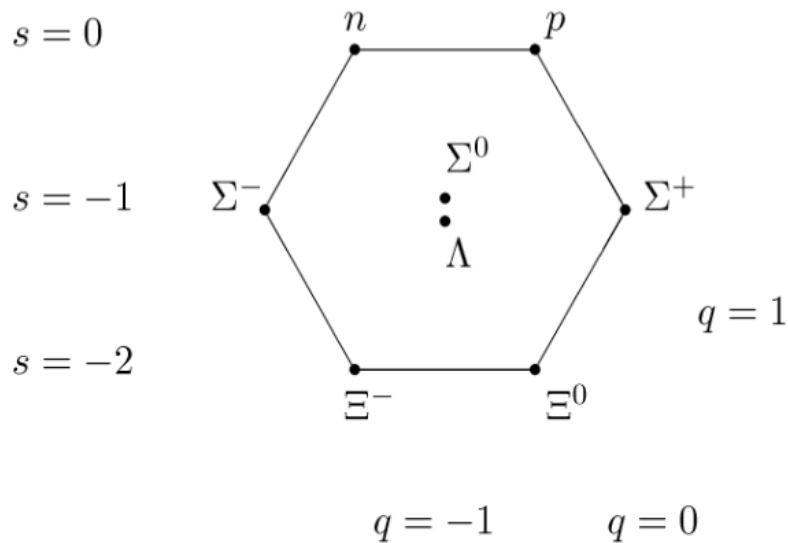


Ανάγκη για συστηματική μελέτη και κατανόηση

# Ιστορική Αναδρομή – Ομαδοποίηση σωματιδίων

**1961** Gell-Mann προσαρμόζει την πλειάδα των σωματιδίων σε απλές θεωρητικές δομές

Οι δομές αυτές εξηγούνται αργότερα από θεωρία ομάδων και την θεώρηση των quarks



# Ιστορική Αναδρομή – Quarks?

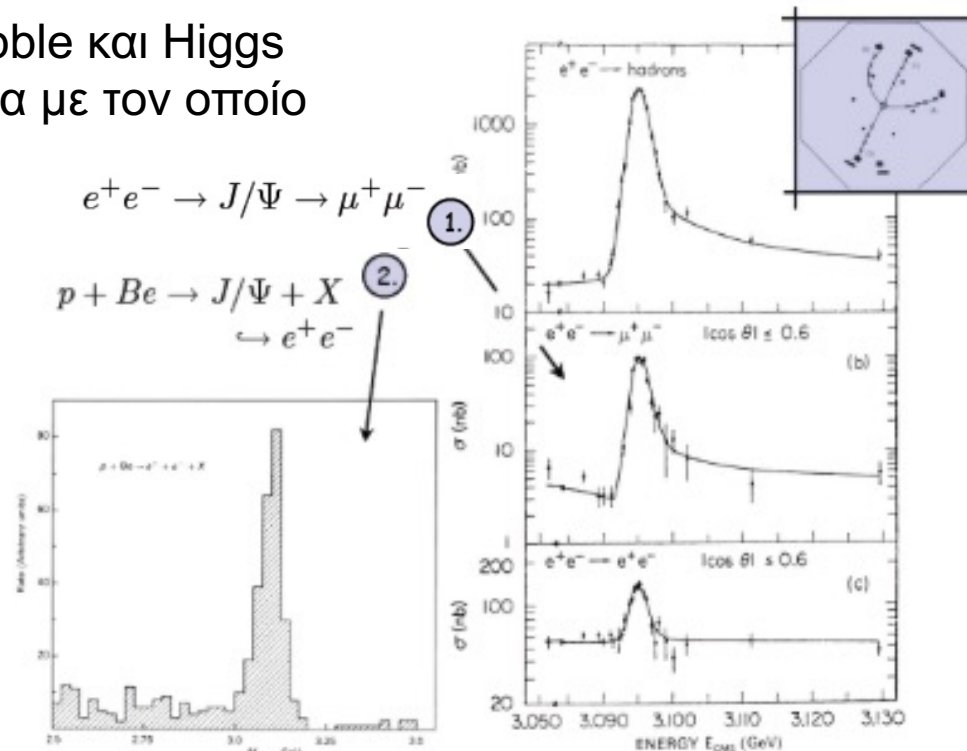
**1964** Gell-Mann και Zweig προτείνουν ότι όλα τα γνωστά σωματίδια αποτελούνται από quarks και anti-quarks τα οποία θεωρούν σαν τοπικές κβαντικές ποσότητες (αριθμούς) και όχι σωματίδια

Κανένας δεν τους πιστεύει – θεωρώντας ότι είναι ένα μαθηματικό τέχνασμα για να εξηγήσει το μοντέλο της κατάταξης

Τουλάχιστον μέχρι το 1974

**1964** Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Kibble και Higgs προτείνουν ένα μηχανισμό σύμφωνα με τον οποίο τα σωματίδια αποκτούν μάζα. Αποτελεί αντικείμενο μελέτης για τα επόμενα 45 χρόνια

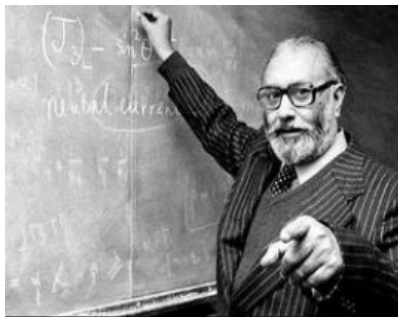
**1974** Ανακάλυψη του charm quark μέσω της ανακάλυψης του J/ψ μεσονίου. Επιβεβαίωση του μοντέλου των quarks και θεμελίωσή τους σαν σωματίδια



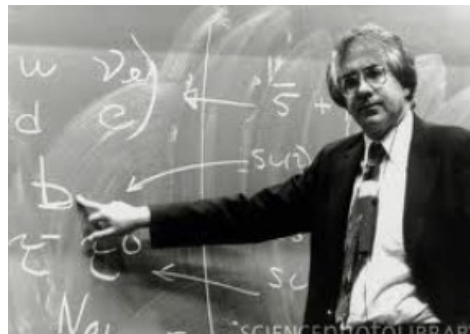
## Ιστορική Αναδρομή – Καθιερωμένο Πρώτυπο (SM)

**1970's** Gell-Mann και Feynman προτείνουν την θεωρία των ισχυρών αλληλεπιδράσεων που την ονομάζουν κβαντική χρωμοδυναμική εισάγοντας ταυτόχρονα έναν νέο κβαντικό αριθμό, το **χρώμα**

**1970's** Βελτιωμένη κατανόηση των ασθενών αλληλεπιδράσεων οδηγεί στην ενοποίηση τους με τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις και την δημιουργία της ηλεκτρασθενούς αλληλεπίδρασης



Salam



Glashow

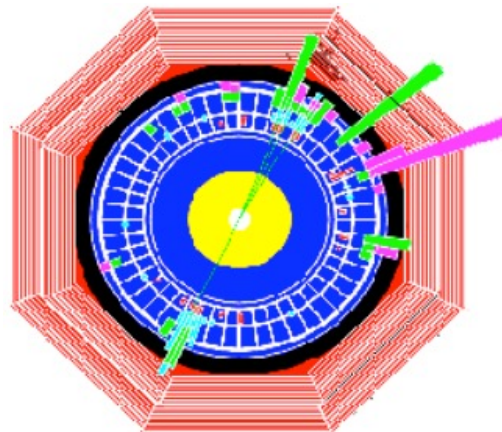
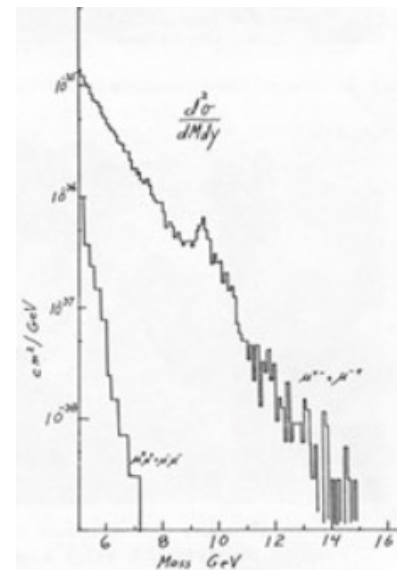
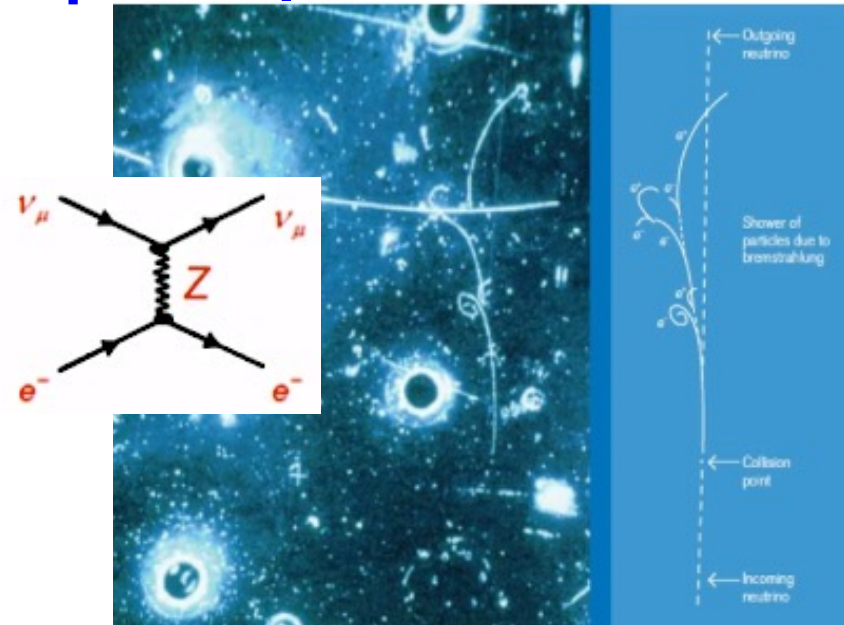


Weinberg

# Ιστορική Αναδρομή – Περισσότερα σωματίδια

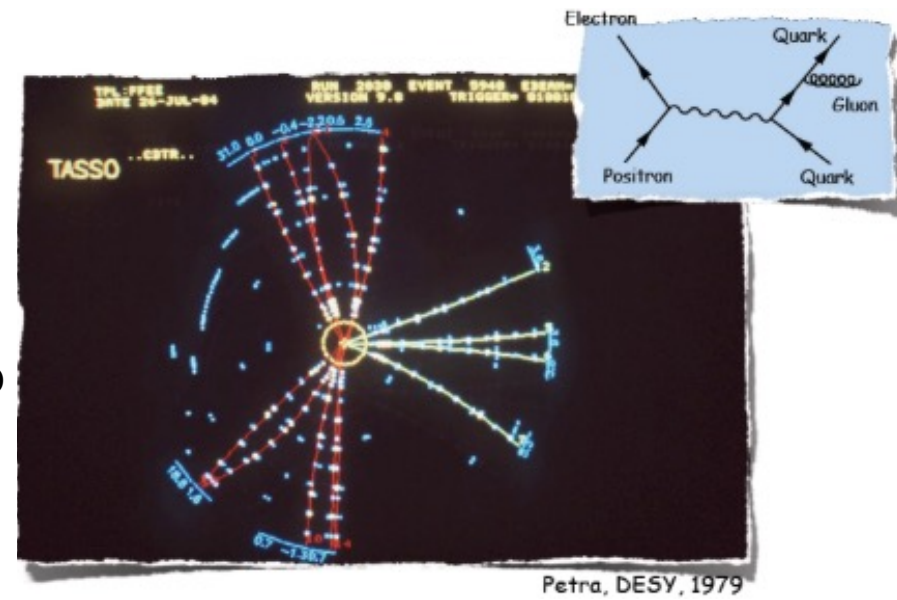
**1973** Ανακαλύπτονται τα ουδέτερα φορτισμένα ρεύματα αλληλεπιδράσεων – Gargamelle/CERN

**1975** Ανακάλυψη του τ-λεπτονίου στο SLAC



**1978** Ανακάλυψη b-quark μέσω της ανακάλυψης του Υ μεσονίου-Fermilab

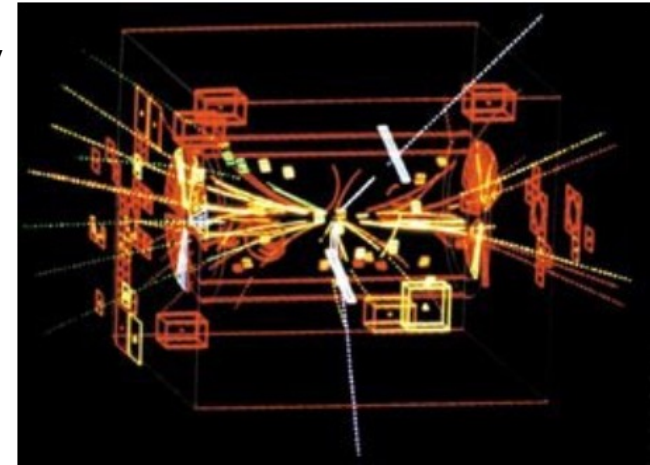
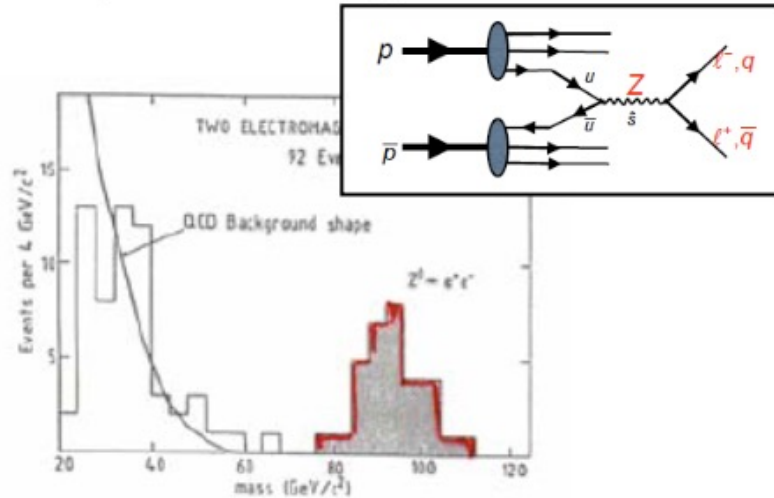
**1979** Ανακάλυψη του gluon, στο DESY





# Ιστορική Αναδρομή – Επιβεβαίωση του SM

**1983** Ανακάλυψη των  $W^\pm$  και  $Z^0$ , φορέων των ασθενών αλληλεπιδράσεων, στο UA1 και UA2 - CERN



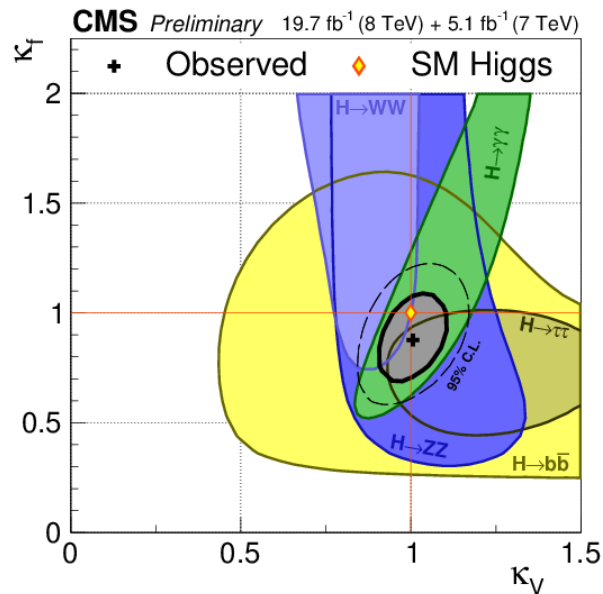
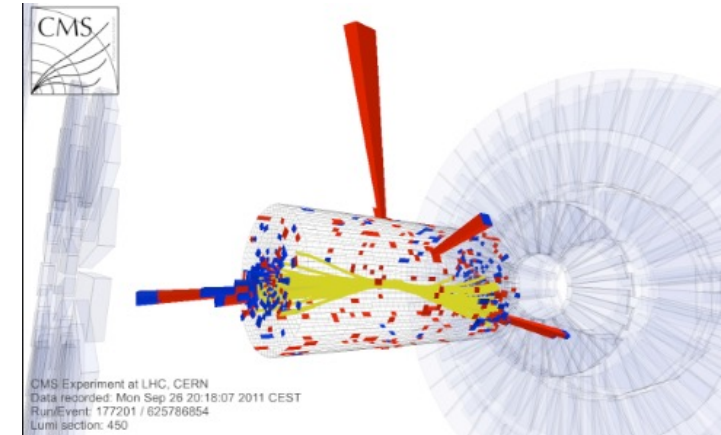
**1995** Ανακάλυψη του top quark με μάζα 172 GeV από τα πειράματα CDF και D0 στο Fermilab



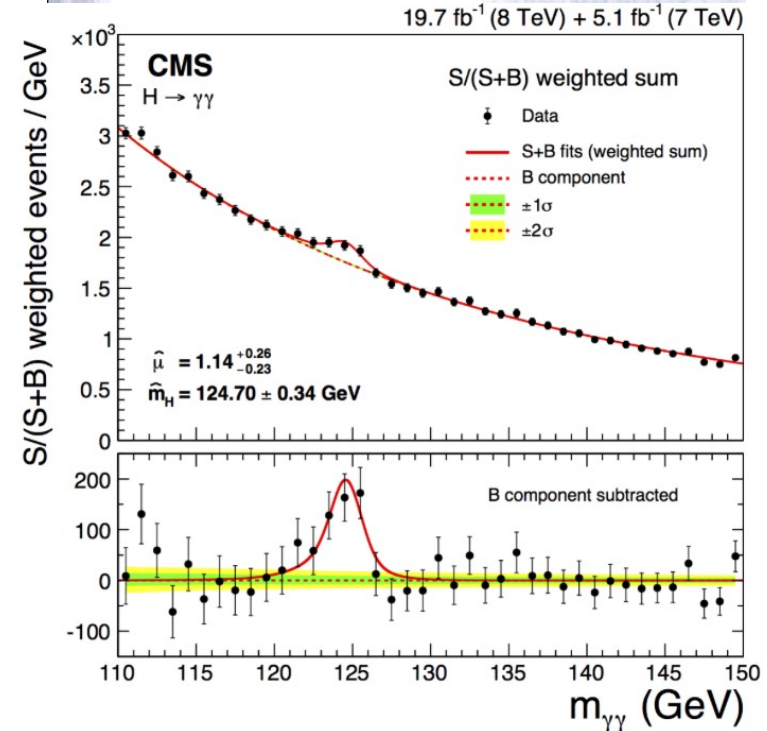
# Ιστορική Αναδρομή – Οι τελευταίες ανακαλύψεις

**1998** Ανίχνευση ταλαντώσεων μεταξύ γεύσεων νετρίνο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα νετρίνο έχουν μάζα

**2012** Ανακάλυψη του μποζονίου Higgs με μάζα  $\sim 125$  GeV από τα πειράματα CMS και ATLAS στο CERN



Συμβατότητα σύζευξης του Higgs με φερμιόνια και μποζόνια ως προς το αναμενόμενο από SM





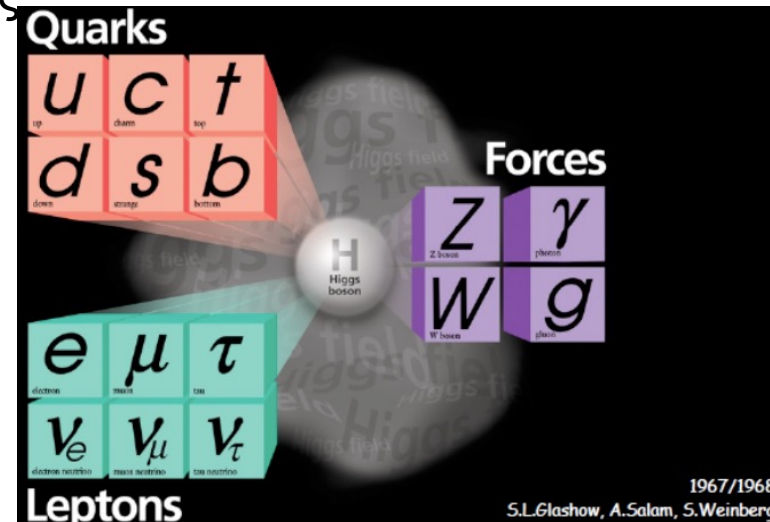
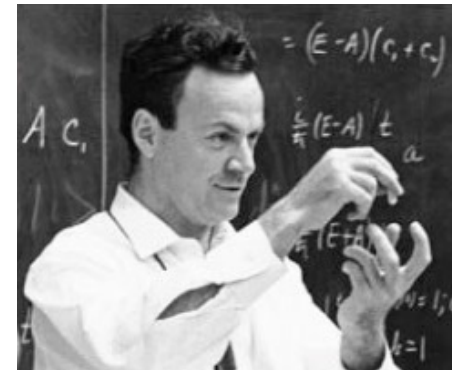
# Ιστορική Αναδρομή – Κατανόηση

**2015** Πολύ καλή κατανόηση της υπάρχουσας κατάστασης συμπληρώνει το μοντέλο

Μετά από 50+ χρόνια έχουμε μια κβαντική θεωρία,  
**το μοντέλο !**

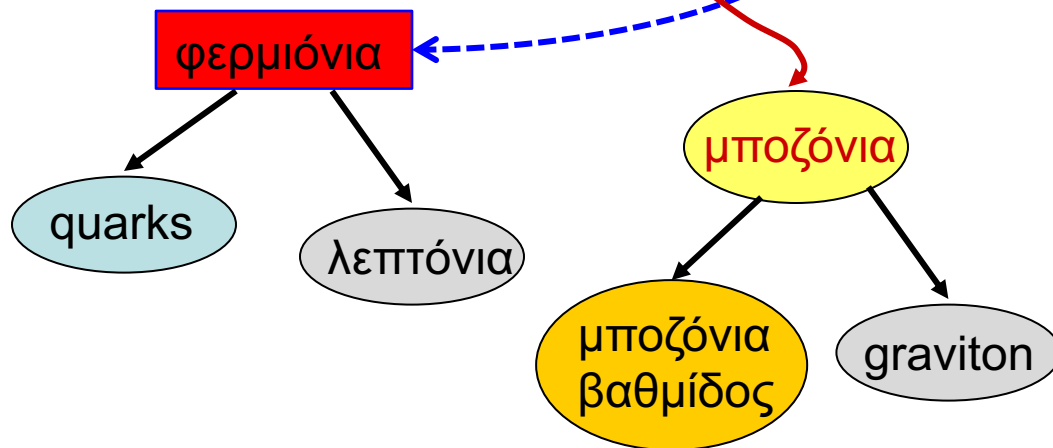
που εξηγεί με μεγάλη ακρίβεια πως όλα τα σωματίδια της ύλης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης

Η βαρύτητα εξακολουθεί να περιγράφεται από την γενική σχετικότητα του Einstein, μια κλασική θεωρία, αλλά εξακολουθεί να δουλεύει πολύ καλά αφού οι επιδράσεις της βαρύτητας είναι πολύ ασθενείς



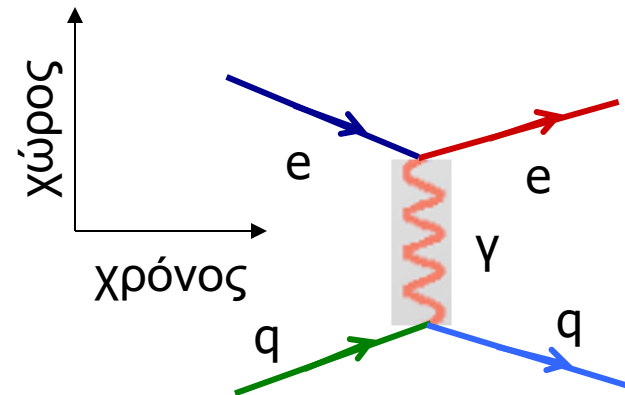
# Στοιχειώδη σωματίδια – Η συνολική εικόνα σήμερα

- Το σύμπαν αποτελείται από σωματίδια ύλης που συγκρατούνται μεταξύ τους με σωματίδια φορείς **δυνάμεων**



- Οι αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων περιγράφονται από την κβαντομηχανική και ειδική θεωρία της σχετικότητας
- Τα σωματίδια δεν είναι πραγματικά σωματίδια αλλά πεδία

## Διαγράμματα Feynman



Ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα quark ενός πυρήνα μέσω ανταλλαγής ενός φωτονίου (ηλεκτρομαγνητική δύναμη)

Οι ευθείες γραμμές, οι κυματιστές και οι κορυφές αντιπροσωπεύουν μαθηματικό όρο στον υπολογισμό της αλληλεπίδρασης

# Στοιχειώδη σωματίδια – Η συνολική εικόνα σήμερα

ΛΕΠΤΟΝΙΑ

QUARK

Μποζόνια Βαθμίδος

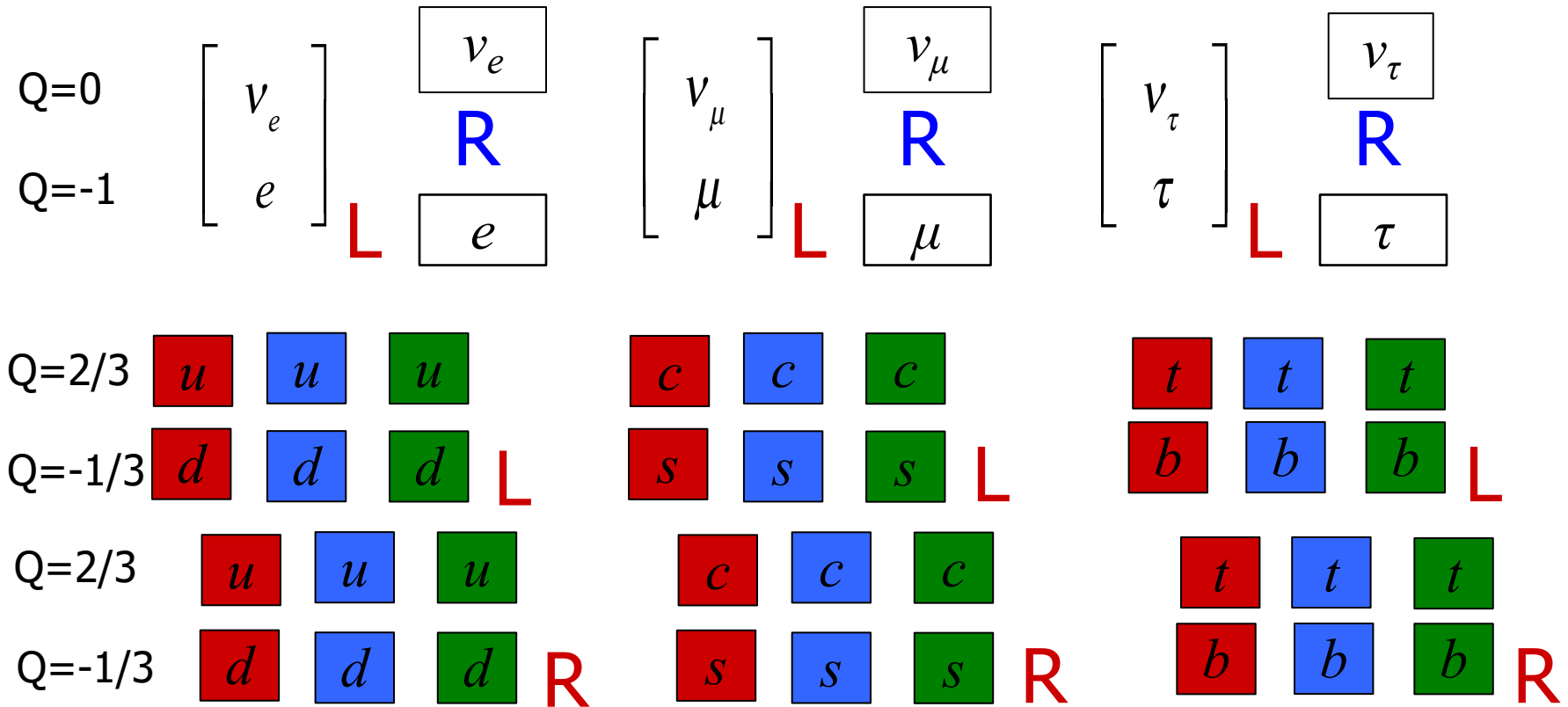
# Στοιχειώδη σωματίδια – Η συνολική εικόνα σήμερα

$$\begin{array}{l}
 Q=0 \\
 Q=-1
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{c} \nu_e \\ e \end{array} \right] \\
 \left[ \begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu \end{array} \right] \\
 \left[ \begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau \end{array} \right]
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \boxed{\nu_e} \\
 \text{R} \\
 \boxed{e}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \boxed{\nu_\mu} \\
 \text{R} \\
 \boxed{\mu}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \boxed{\nu_\tau} \\
 \text{R} \\
 \boxed{\tau}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{L} \\
 \text{L} \\
 \text{L}
 \end{array}$$

## QUARK

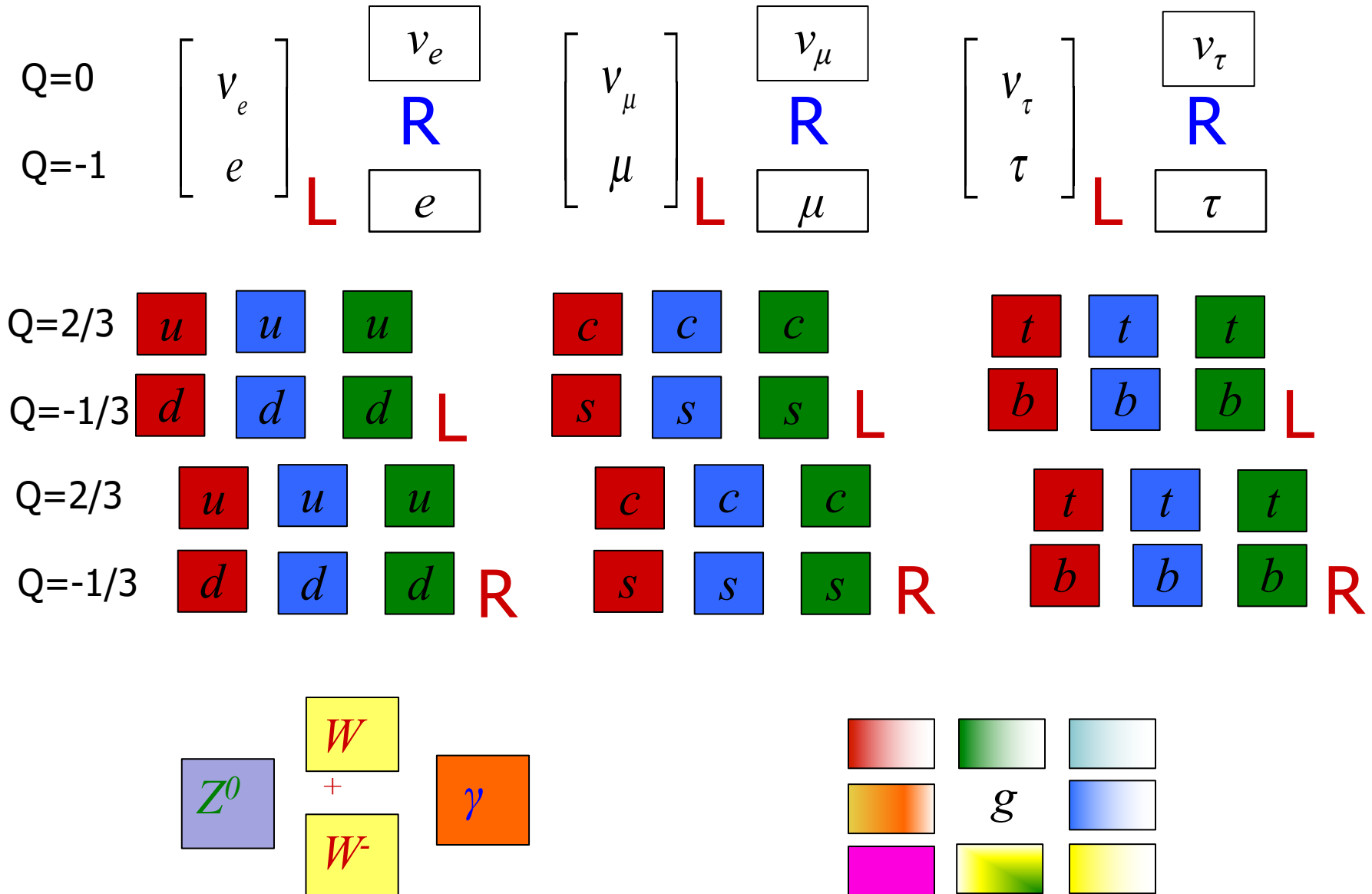
## Μποζόνια Βαθμίδος

# Στοιχειώδη σωματίδια – Η συνολική εικόνα σήμερα



## Μποζόνια Βαθμίδος

# Στοιχειώδη σωματίδια – Η συνολική εικόνα σήμερα



# Η εικόνα των σωματιδίων σήμερα

	Λεπτόνια			Quarks		
	Σωματίδιο	Q	M (GeV/c <sup>2</sup> )	Σωματίδιο	Q	M (GeV/c <sup>2</sup> )
1 <sup>η</sup> γενεά	e	-1	0.0005	d	-1/3	0.003
	$\nu_e$	0	$<10^{-9}$	u	+2/3	0.003
2 <sup>η</sup> γενεά	$\mu$	-1	0.106	s	-1/3	0.1
	$\nu_\mu$	0	$<10^{-9}$	c	+2/3	1.3
3 <sup>η</sup> γενεά	$\tau$	-1	1.78	b	-1/3	4.5
	$\nu_\tau$	0	$<10^{-9}$	t	+2/3	173

1<sup>η</sup> γενεά

$\nu_e$

$e^-$

d

u

2<sup>η</sup> γενεά

$\nu_\mu$

$\mu^-$

s

c

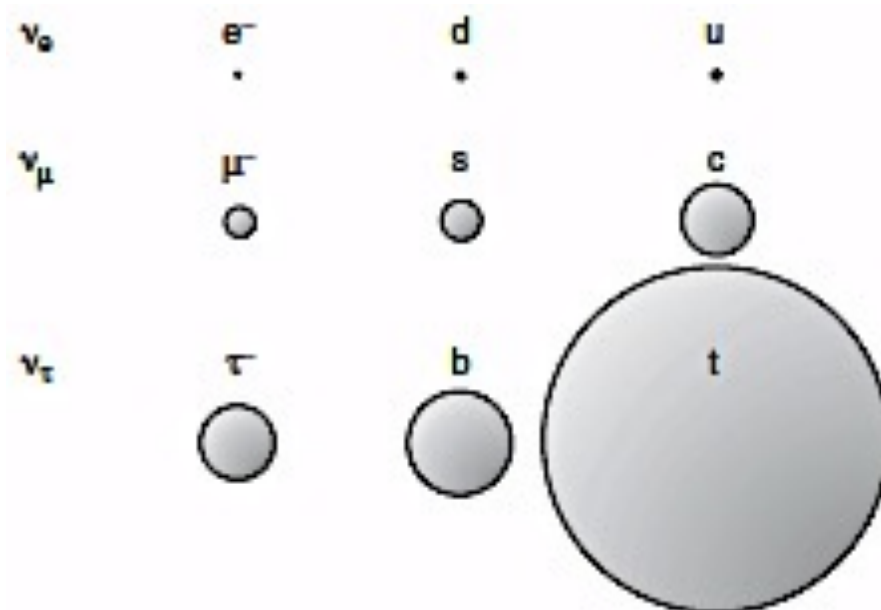
3<sup>η</sup> γενεά

$\nu_\tau$

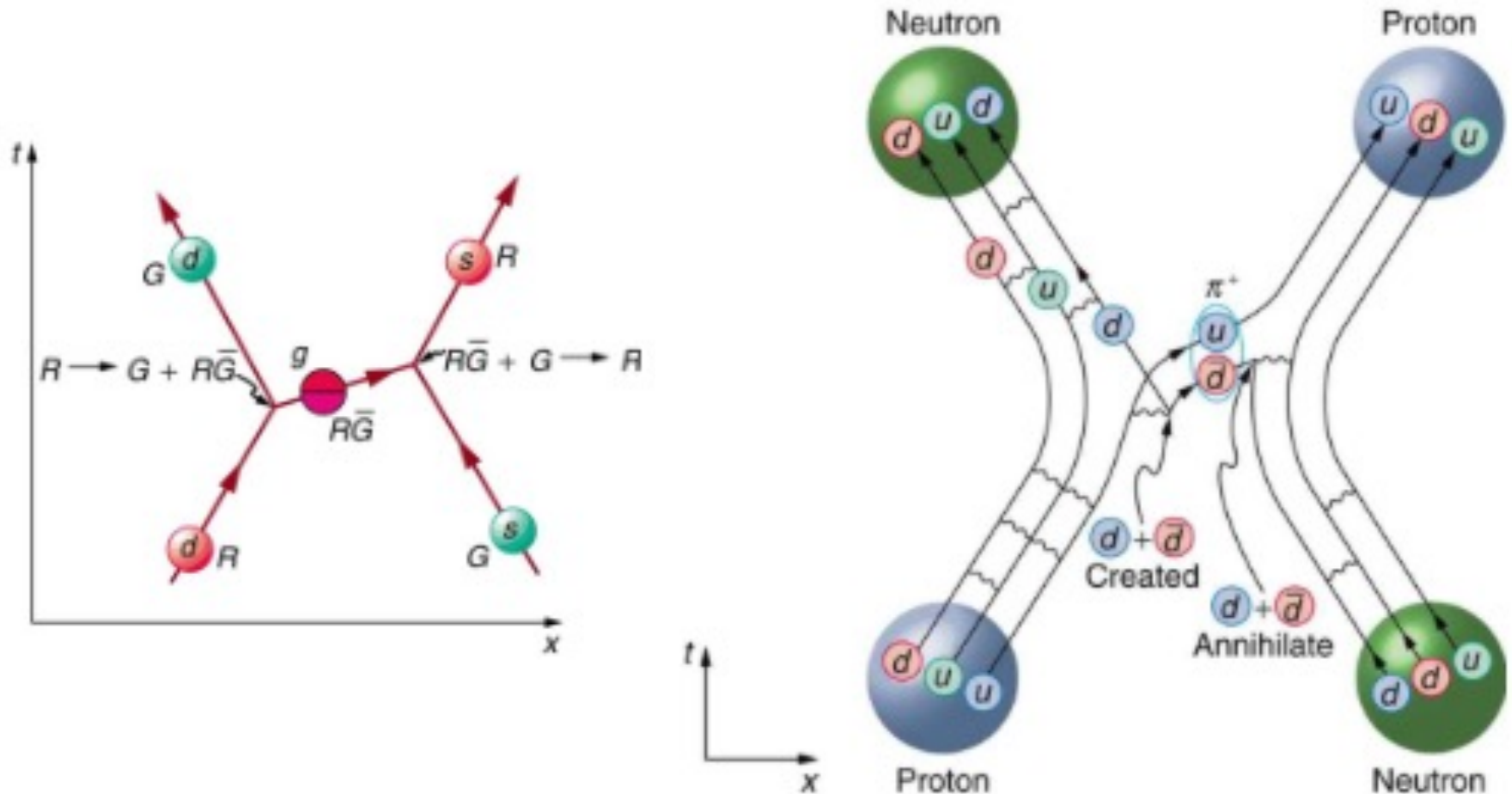
$\tau^-$

b

t



# Αλληλεπιδράσεις quark – quark και quark - gluon





# Παράμετροι του S.M.

## Πειραματικός προσδιορισμός

3 σταθερές σύζευξης	$g_s$	$e$	$\sin\theta$	
4 CKM παράμετροι	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	και $\delta$
2 μάζες μποζονίων	$m_Z$	$m_H$		
3 μάζες λεπτονίων	$m_e$	$m_\mu$	$m_\tau$	
6 μάζες quark	$m_u$	$m_d$	$m_s$	$m_c$ $m_b$ $m_t$

18 ελεύθερες παράμετροι

Δεν υπάρχει πρόνοια για μάζες νετρίνο

$$m_W^2 = \frac{1}{2} g^2 \rho_0^2$$

$$m_Z^2 = \frac{1}{2} (g^2 + g'^2) \rho_0^2$$

$$m_H^2 = 4\lambda \rho_0^2$$

$$g = e / \sin \theta_W$$

$$g' = e / \cos \theta_W$$

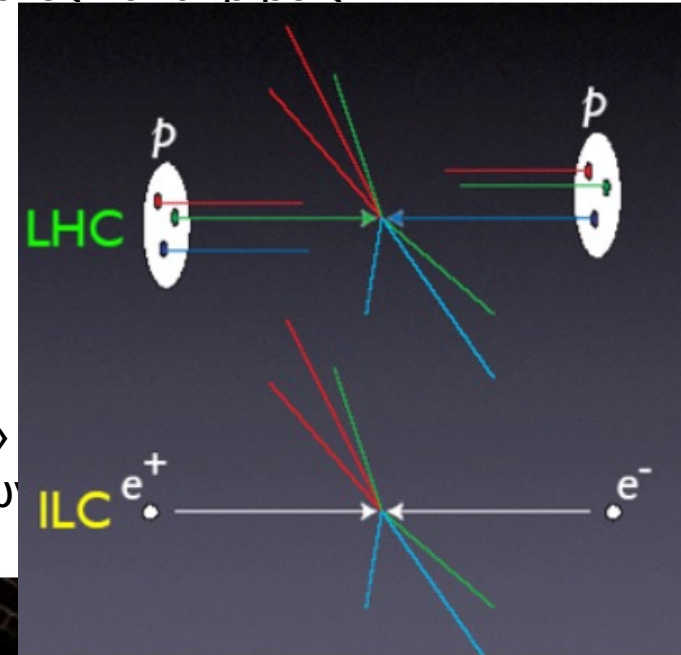
$$m_f = c_f \rho_0$$

# Ανακάλυψη ως προς Μέτρηση

Η ιστορική αναδρομή έδειξε ότι η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων περιέχει εποχές ανακαλύψεων, ακολουθούμενες από προσεγμένες και ακριβείς μετρήσεις με σκοπό την κατανόηση των φαινομένων

Σε κάθε περίπτωση, η βαθύτερη αυτή κατανόηση, έδωσε περισσότερη πληροφορία και οδήγησε σε νέες ανακαλύψεις

Σε μεγάλο βαθμό, αυτό οφείλεται στους αδρονικούς επιταχυντές όπου πολλές ενδιαφέρουσες διεργασίες πραγματοποιούνται σε περιβάλλον με πολύ «θόρυβο» από άλλα σωματίδια, ενώ στους επιταχυντές λεπτονίων ( $e^+e^-$ ) το περιβάλλον είναι ιδιαίτερα καθαρό



# $e^-e^+$ συγκριτικά με αδρονικό επιταχυντή

