

ΟΙ ΔΟΜΙΚΟΙ ΛΙΘΟΙ

Τα στοιχειώδη σωμάτια και οι αλληλεπιδράσεις τους

Θεόδωρος Ν. Τομαράς

Χρήσιμη βιβλιογραφία

- ***Concepts of Modern Physics*** by A. Beiser (McGraw Hill, 1987). Κεφάλαιο 14.
(Το βιβλίο αυτό έχει μεταφραστεί στα Ελληνικά.)
- ***Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*** by R.Eisberg and R.Resnick (John Wiley, 1985). Κεφάλαια 17, 18.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΦΥΣΙΚΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΒΑΣΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ:

Ποιά είναι τα έσχατα συστατικά της ύλης;
Οι αλληλεπιδράσεις τους

ΙΣΤΟΡΙΑ: ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ
NEWTON
MAXWELL

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ

ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΣΧΕΤΙΚΑ: Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΧΡΟΝΟΥ
Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ

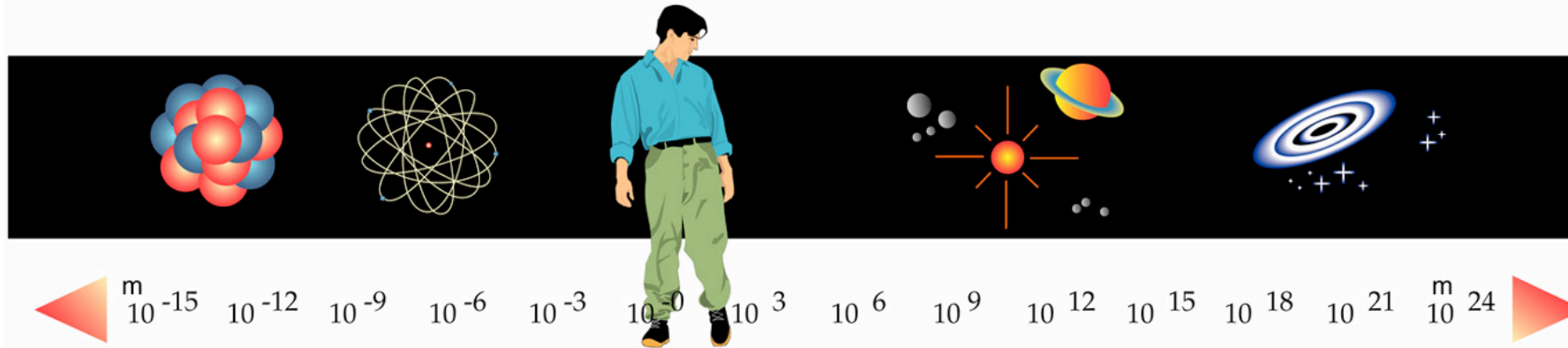
ΚΟΣΜΟΛΟΓΙΑ

La physique des particules étudie la matière dans ses dimensions les plus petites.

Particle physics looks at matter in its smallest dimensions.

L'astrophysique étudie la matière dans ses dimensions les plus grandes.

Astrophysics looks at matter in its largest dimensions.



Microscopes
Microscopes

Jumelles
Binoculars

Telescopes optiques & radio
Optical & radio telescopes

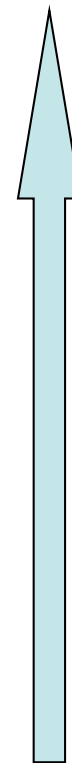
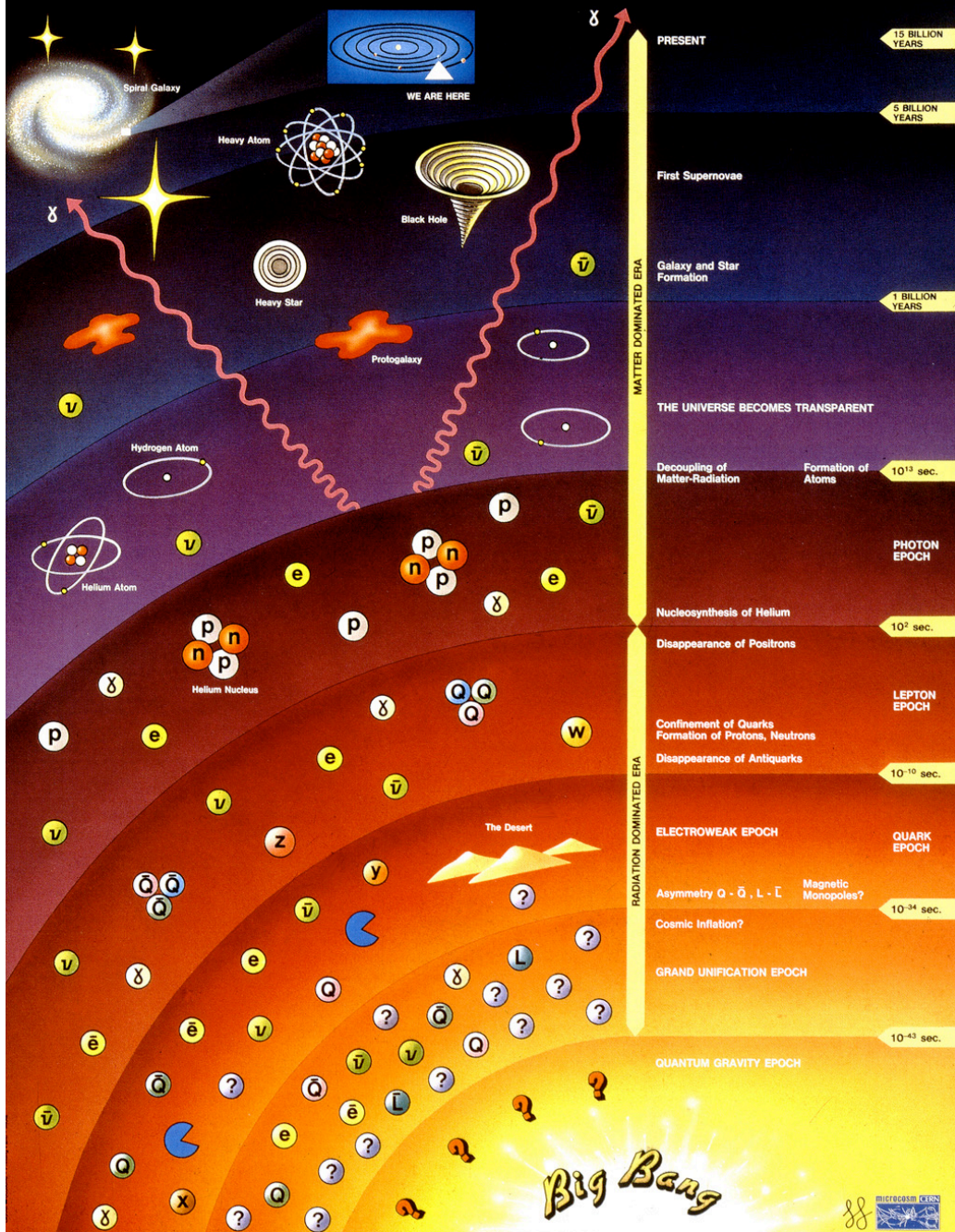
Accélérateurs
et détecteurs
Accelerators
and detectors

L'oeil nu.
Naked eye

THE TWO FRONTIERS OF PHYSICS

LES DEUX FRONTIERES DE LA PHYSIQUE

History of the Universe



$t > 10^{-20}$ sec
Standard Model

Υπερενοποιημένες θεωρίες ???
Πληθωριστικό Σύμπαν ???

Κβαντική βαρύτητα ???

Τα εργαλεία της έρευνας

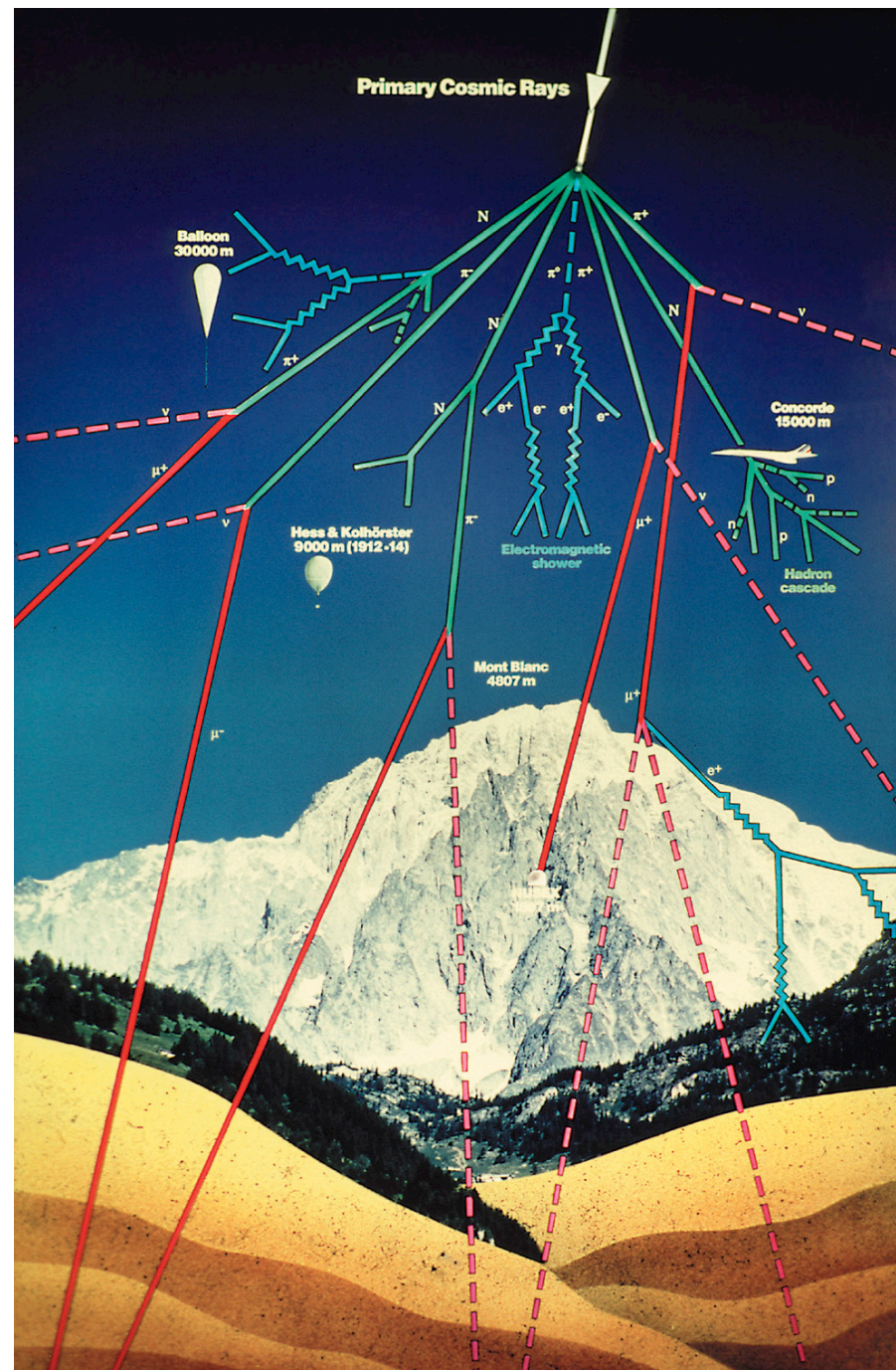
- Νεαρό Σύμπαν (έμμεσα)
- Κοσμικές ακτίνες
- Επιταχυντές
- Άλλα πειράματα

Θεωρία



Πείραμα

A. Κοσμικές ακτίνες



B. Επιταχυντές: Η αρχή

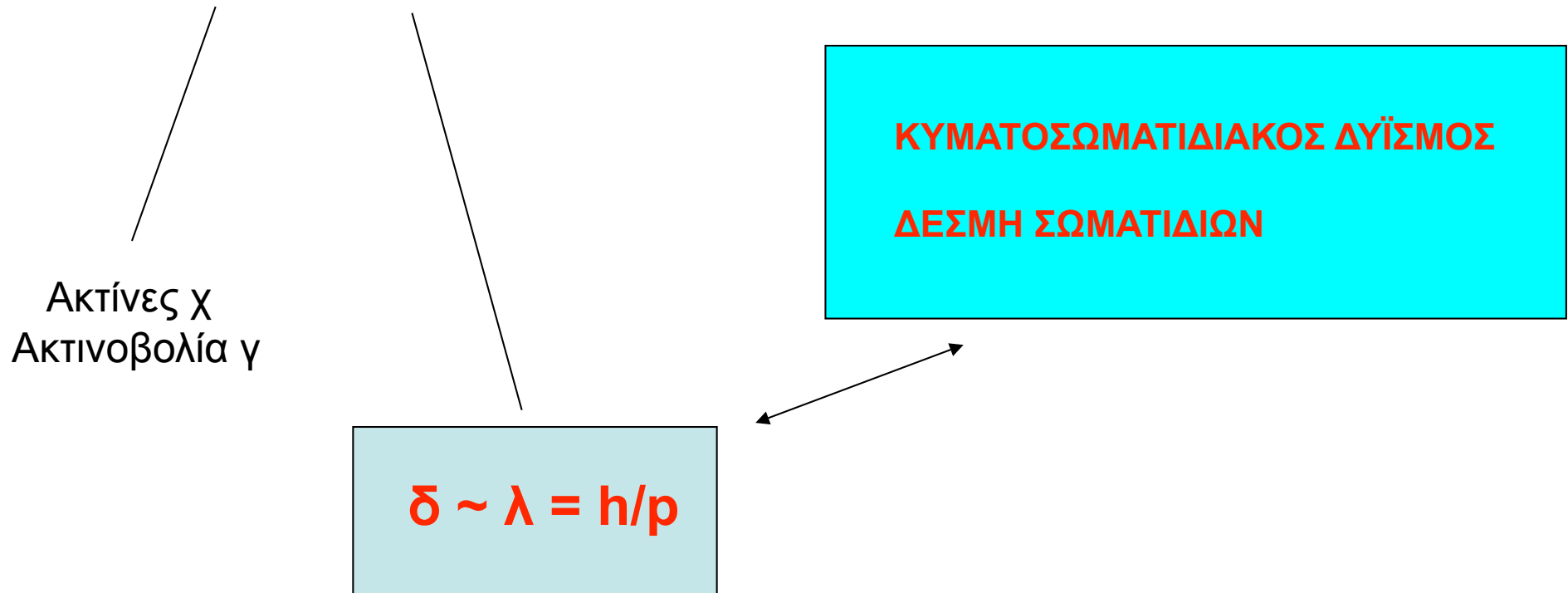


Πως εξετάζουμε την ύλη

1) Δια γυμνού οφθαλμού...οχι μεγάλη πρόοδος

$$\delta \sim \lambda \sim 5000 \text{ \AA} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

2) Μικραίνω το μήκος κύματος



Rutherford (1911) – Το μοντέλο του ατόμου



Δέσμη σωματίων-α σε φύλλο χρυσού

$$E \sim 5 \text{ MeV} \quad m \sim 4 \times 10^3 \text{ MeV} / c^2$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = E \rightarrow v^2 = 2E/m \sim 25 \times 10^{-4} c^2$$

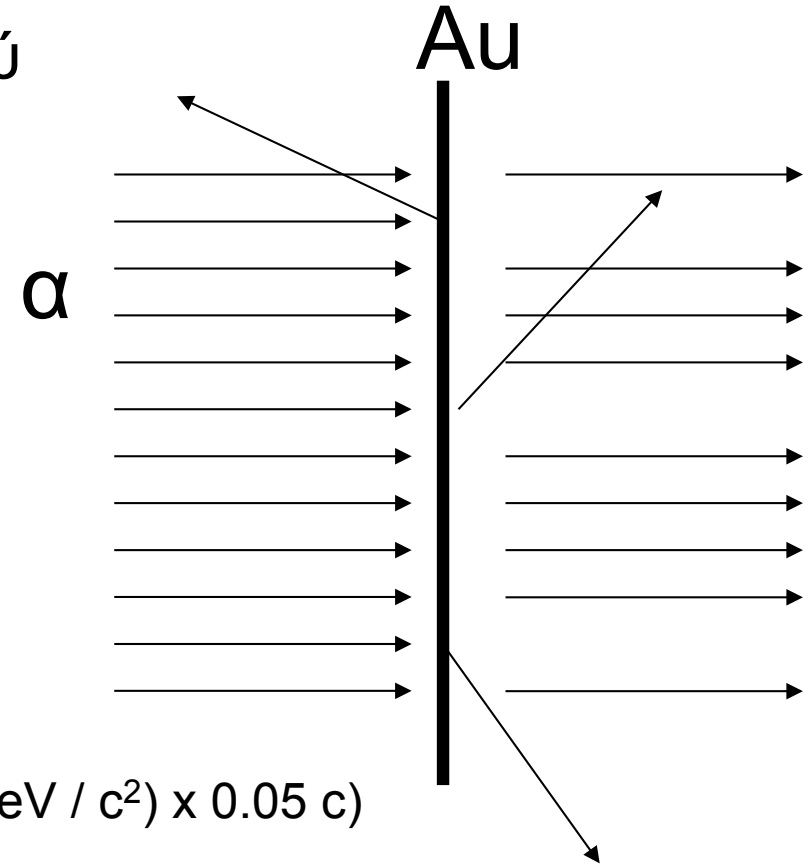
$$\rightarrow v/c \sim 0.05 \ll 1$$

Επομένως: $p = m v$

$$\delta \sim \lambda = h / p \sim (4.14 \times 10^{-15} \text{ eV sec}) / (4 \times 10^3 (\text{MeV} / c^2) \times 0.05 c)$$

$$\sim 20 \times 10^{-24} \text{ c sec}$$

$$\sim 80 \text{ Fermi}$$



«...ετεί δ' άτομα και κενόν.»
Δημόκριτος

ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΕΣ

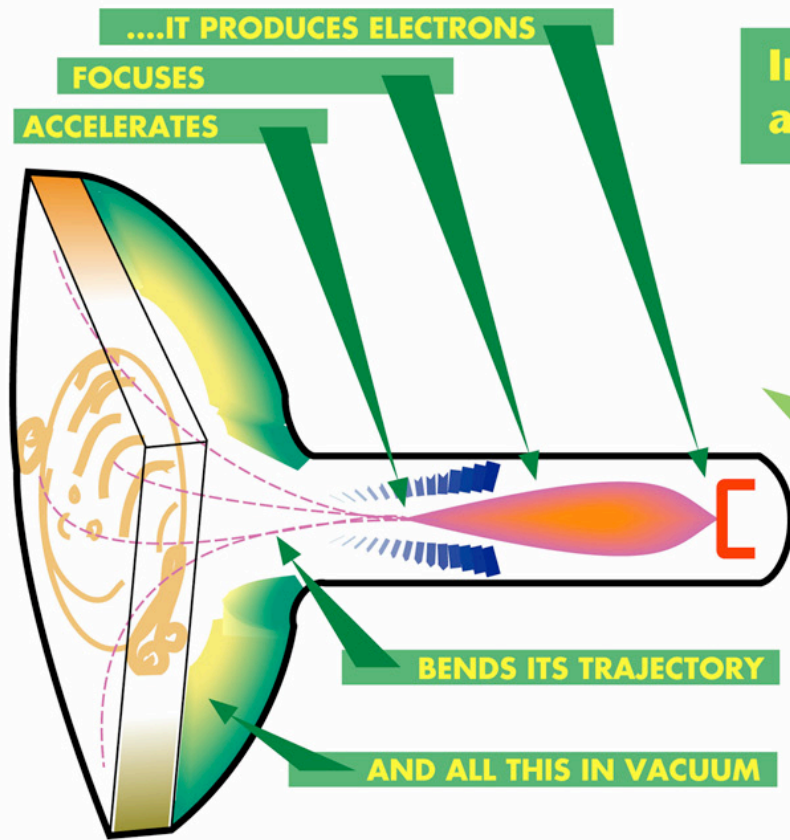
A. ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΣΤΟΧΟΥ

Stanford Linear Accelerator Center (**SLAC**)

B. ΣΥΓΚΡΟΥΟΜΕΝΩΝ ΔΕΣΜΩΝ

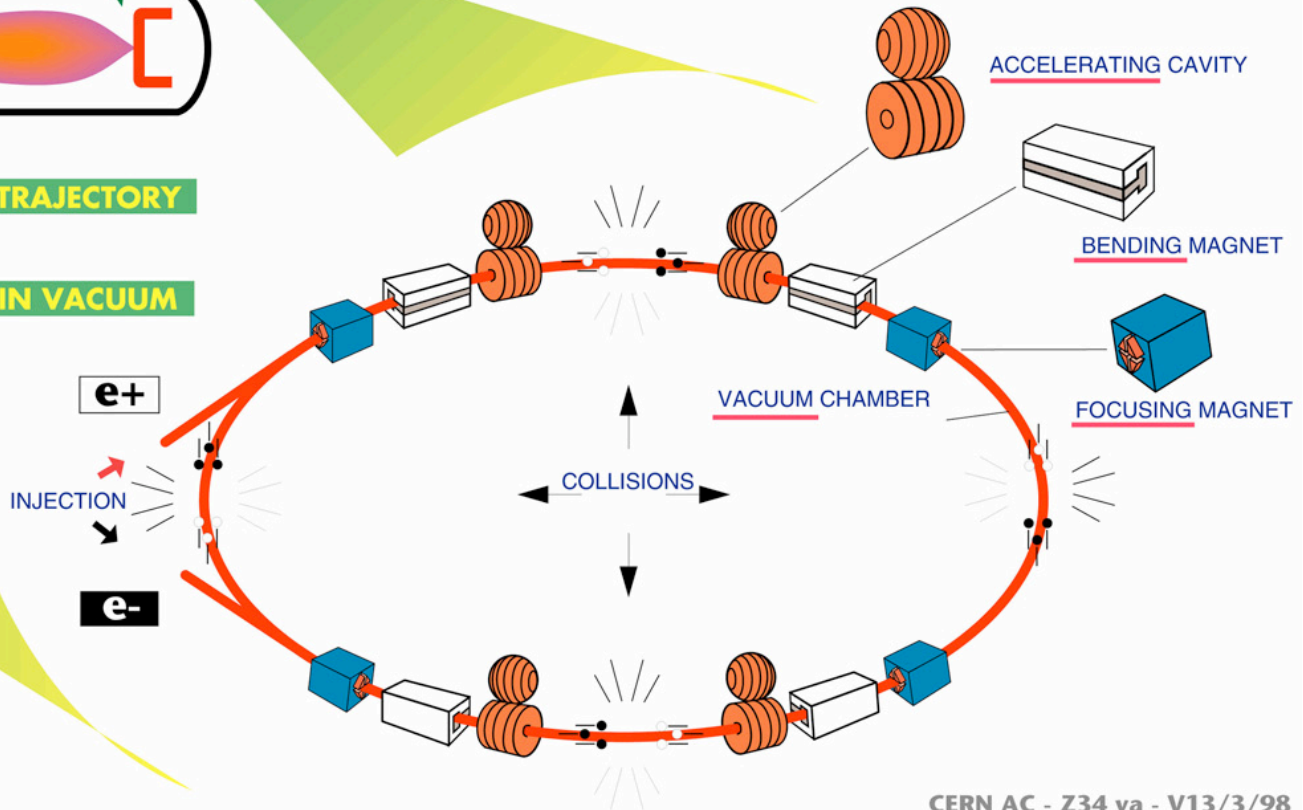
Centre European pour la Recherche Nucleaire (**CERN**)

DID YOU KNOW YOUR TELEVISION SET IS AN ACCELERATOR ?



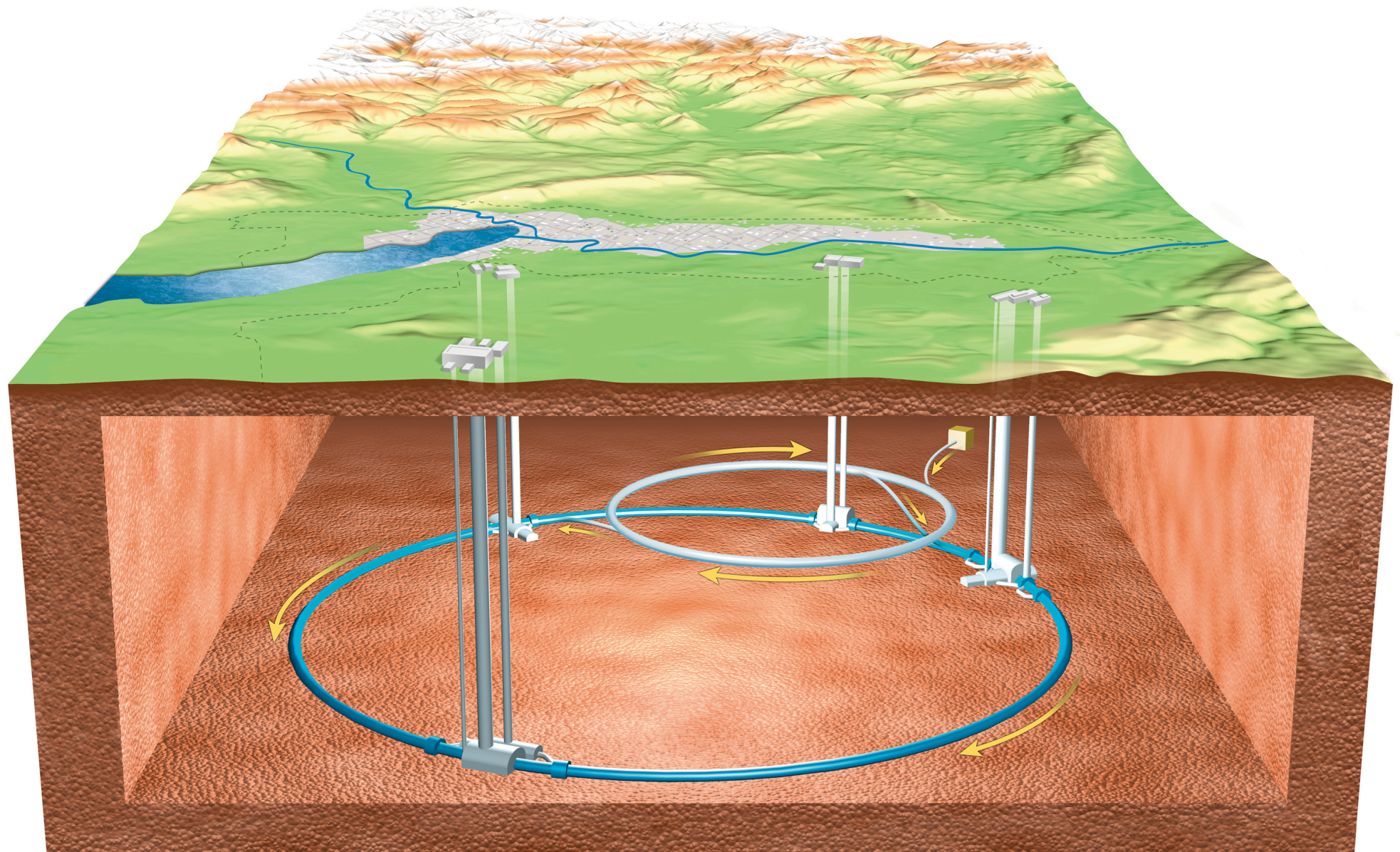
In your TV set, the electrons are accelerated to 20000 volts.

In LEP, they are accelerated to 100 000 000 000 volts.

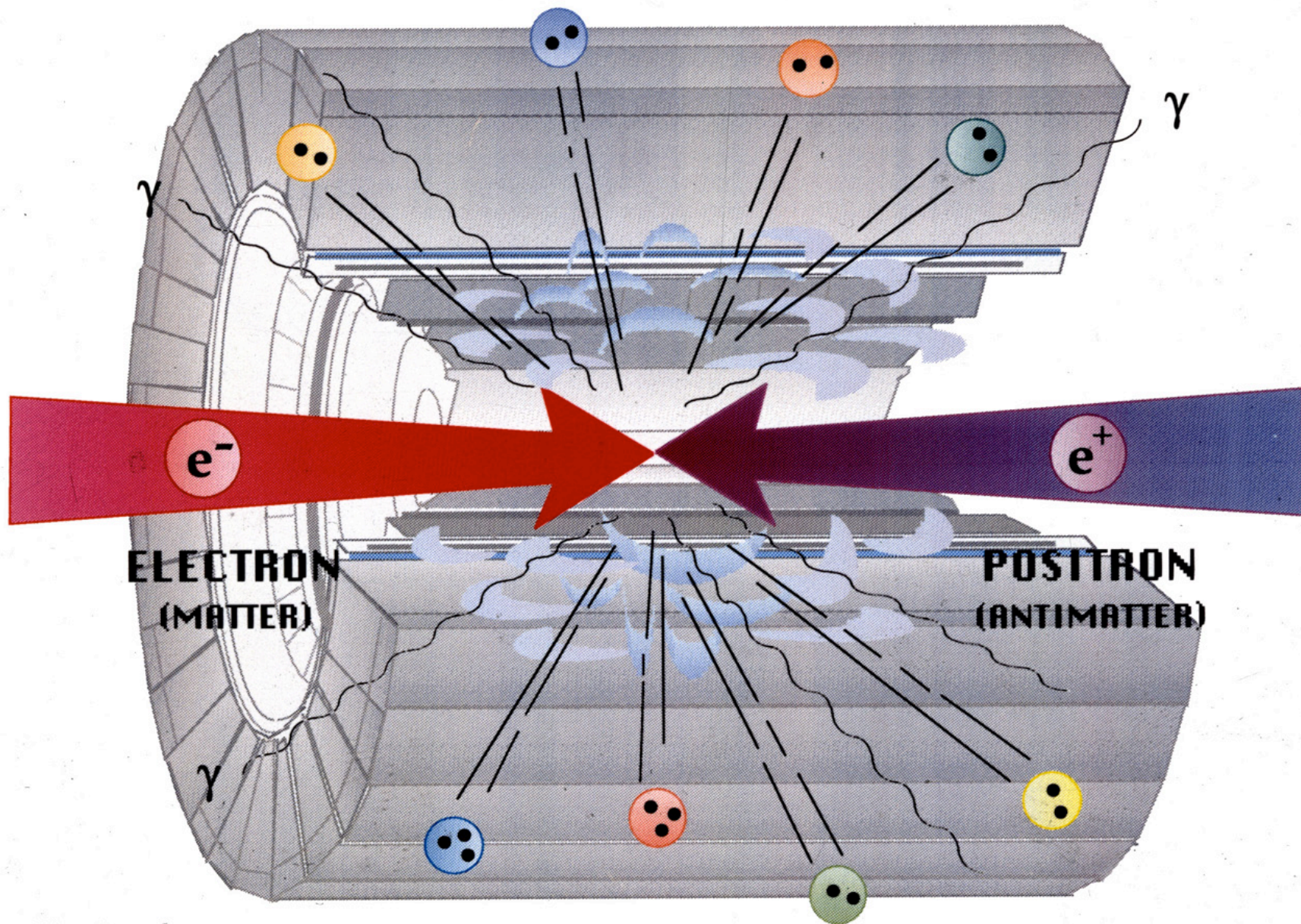




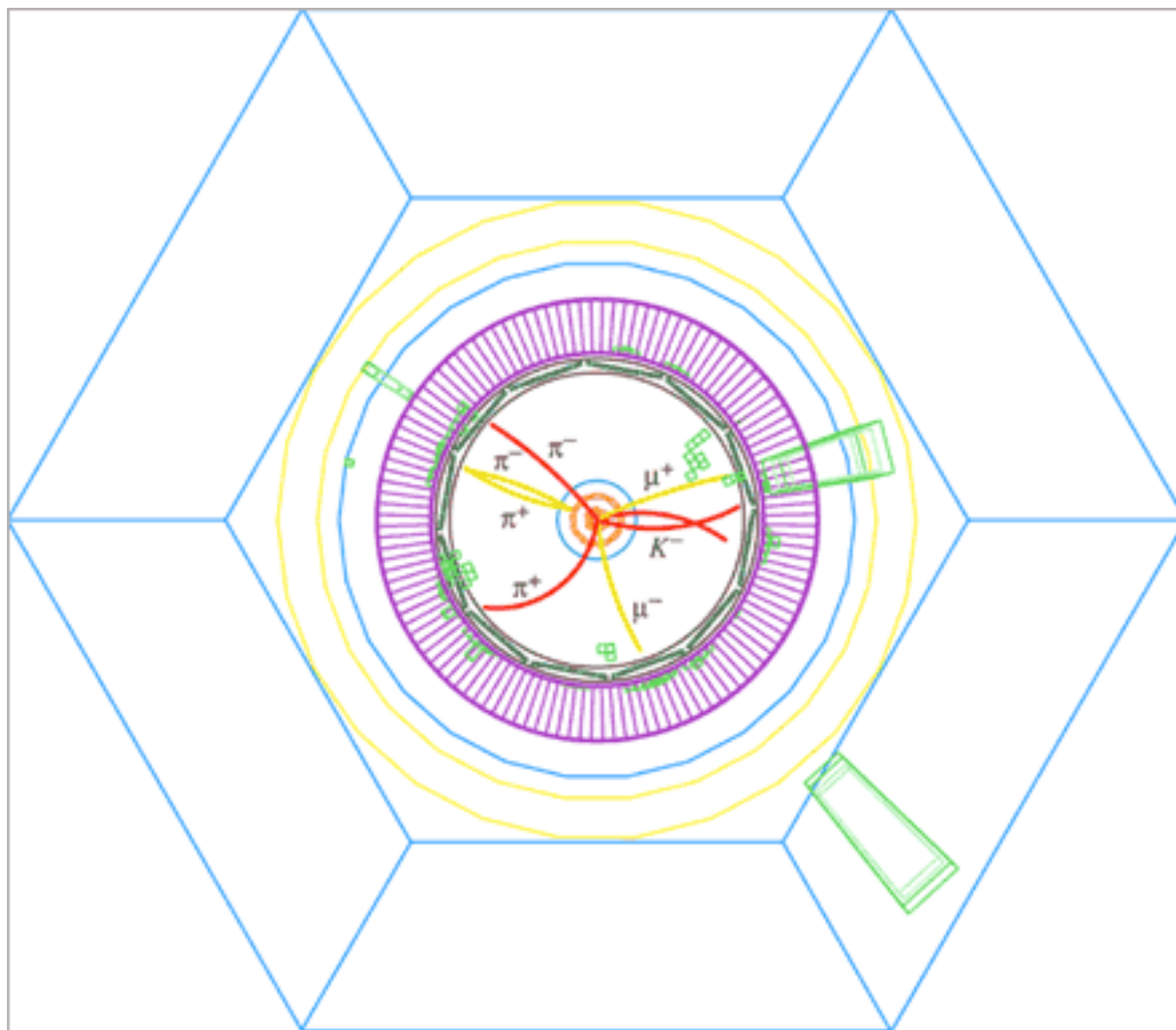








Eliane Onursal



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Σύντομη περιγραφή της
μεθοδολογίας

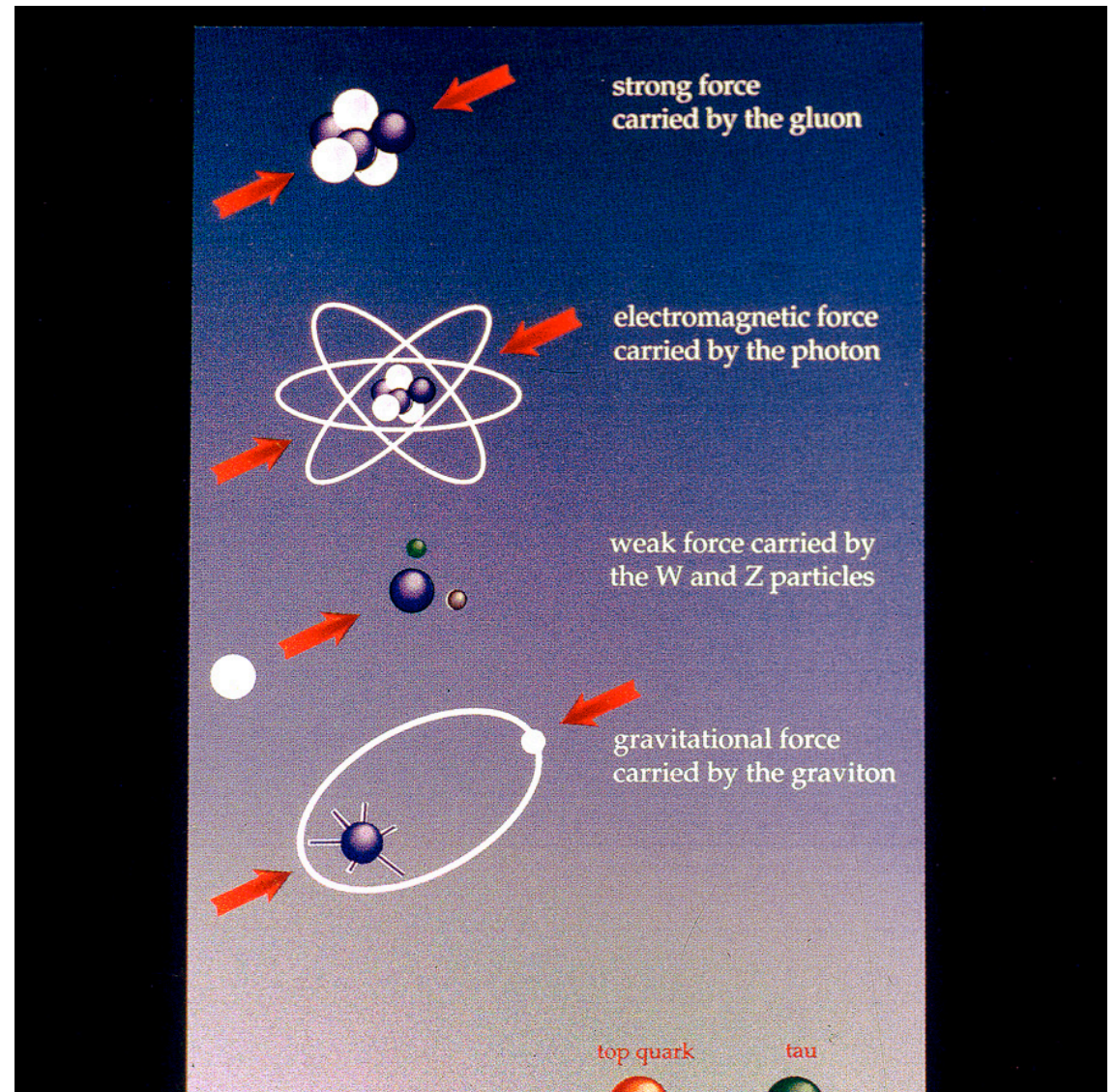
Βασικές έννοιες

Πώς έμοιαζε ο Κόσμος το...«1932»

«1932» – Τα «Στοιχειώδη» Σωματ^α*ία

Σωματ ^α ιο		Μάζα (MeV/c ²)	Spin
Πρωτόνιο	p	938.3	1/2
Νετρόνιο	n	939.6	1/2
Ηλεκτρόνιο	e	0.511	1/2
Νετρίνιο	ν	0	1/2
Φωτόνιο	γ	0	1
Αντισωματ ^α ια			

«1932» - Οι 4 Δυνάμεις



Αντιδράσεις σωματιδίων



ΕΠΙΤΡΕΠΤΕΣ: $e^+ e^- \rightarrow p \bar{p}$, $\nu n \rightarrow e p$

$e^+ e^- \rightarrow \nu \bar{\nu}$, $\bar{\nu} p \rightarrow \bar{e} n$

.....

ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ: $\nu p \rightarrow e^+ n$, $p p \rightarrow e^+ e^+$

$p \rightarrow e^+ \gamma$, $e \rightarrow \nu \gamma$, $e \rightarrow \gamma \gamma \gamma$

.....

Μελέτη πυρήνων: p και n ταυτόσημα ως προς την πυρηνική δύναμη. Νουκλεόνιο.

Τάξη στο...χάος;;

«1932» – ΚΑΝΟΝΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ



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

είδος	σωμάτιο		Μάζα (MeV/c ²)	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
	νετρίνο	ν	0	1/2	0	0	1
	φωτόνιο	γ	0	1	0	0	0
αντισωματάρια							

Ισοτοπικό σπιν (Heisenberg 1930)

Spin: $\Psi_e = \begin{pmatrix} e_{\uparrow} \\ e_{\downarrow} \end{pmatrix}$ $s=1/2$
 $s_z = +1/2, -1/2$

$\Psi_N = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$ $I=1/2$
 $I_3 = +1/2, -1/2$

Η πυρηνική δύναμη διατηρεί τα I και I_3

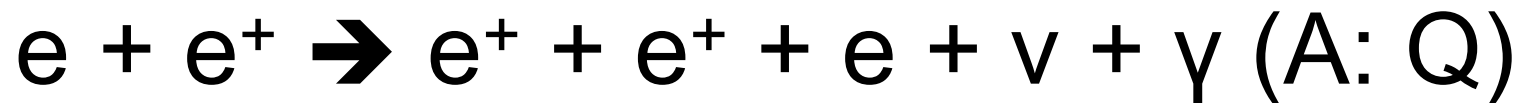
Χρησιμότητα

*

- **Η ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΛΗΣ**

Το e και το p δεν διασπώνται (λόγω Q, B)

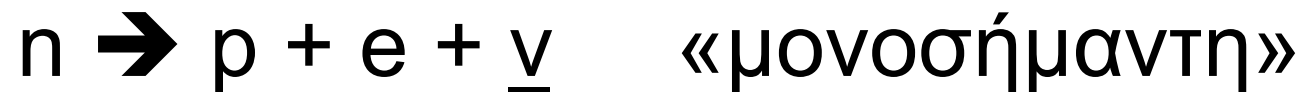
- **Ε**πιτρεπτές και **Α**παγορευμένες αντιδράσεις



- Σωματίο που λείπει από αντίδραση

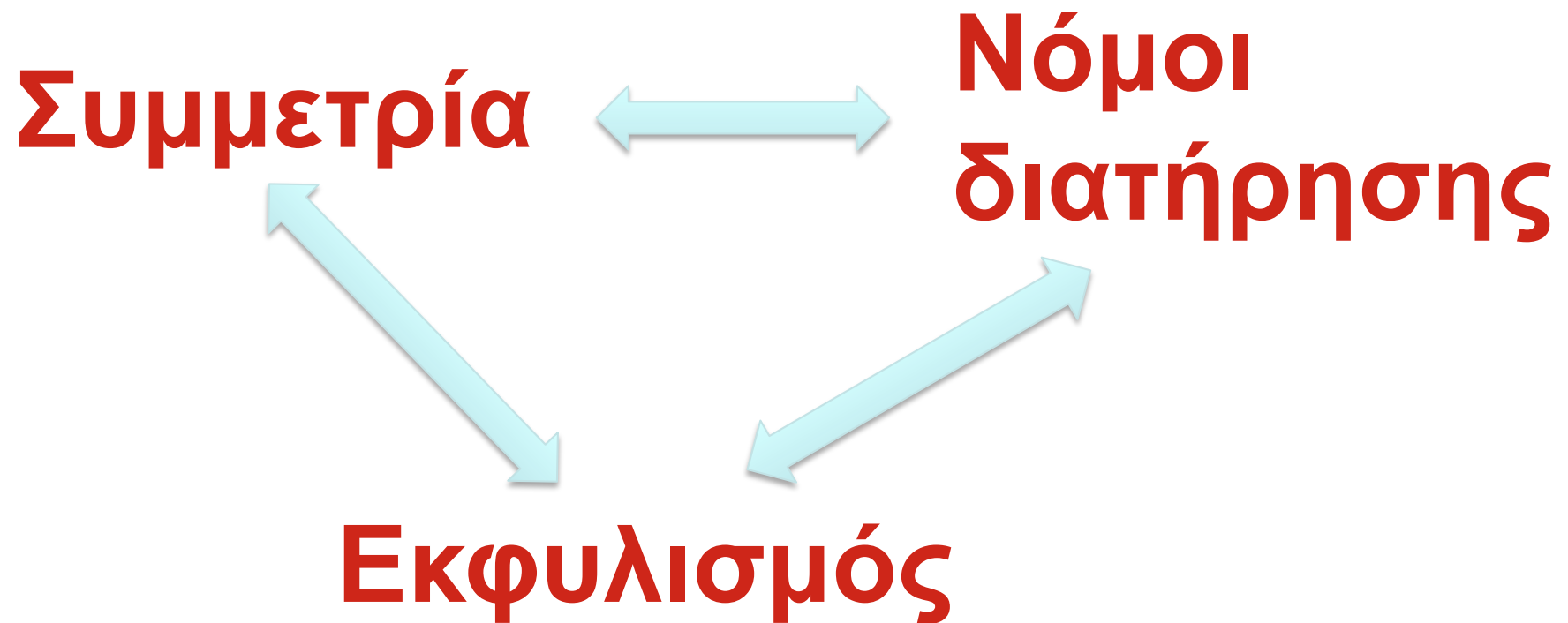


- Διάσπαση νετρονίου



«Βαθύτερη Κατανόηση;;»

Συμμετρία στη Φυσική



Θεώρημα Noether

Συνεχής Συμμετρία



Νόμος Διατήρησης

Παραδείγματα...

**I. Διατήρηση Ορμής
και
Συμμετρία Μετατοπίσεων
στο Χώρο**

1. Δύο σώματα σε 1 διάσταση και δυναμικό $V(x-x')$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m'v'^2 + V(x - x')$$

Εξισώσεις κίνησης

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{dV}{d(x-x')} \frac{\partial(x-x')}{\partial x} = -\frac{dV}{d(x-x')},$$

$$m \frac{d^2x'}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x'} = -\frac{dV}{d(x-x')} \frac{\partial(x-x')}{\partial x'} = +\frac{dV}{d(x-x')}$$

◆ Διατήρηση ορμής

$$\frac{d}{dt} \left(m \frac{dx}{dt} + m' \frac{dx'}{dt} \right) = \frac{d}{dt} (mv + m'v') \equiv \frac{dP}{dt} = 0$$

◆ Συνεχής συμμετρία

$$x \rightarrow x + a, \quad x' \rightarrow x' + a$$
$$E(x + a, x' + a) = E(x, x')$$

2. Ελεύθερο σώμα στο χώρο

$$E = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2$$

$$m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = 0$$

- ◆ Διατήρηση ορμής

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) \equiv \frac{d\mathbf{P}}{dt} = 0$$

- ◆ Συμμετρία

$$x \rightarrow x + a, \quad y \rightarrow y + b, \quad z \rightarrow z + c$$

3. Δύο σώματα στο χώρο με $V=V(\mathbf{r}-\mathbf{r}')$

$$E = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2 + \frac{1}{2}m'\mathbf{v}'^2 + V(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$$

$$m\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = -\partial_{\mathbf{r}}V \quad m\frac{d^2\mathbf{r}'}{dt^2} = -\partial_{\mathbf{r}'}V = +\partial_{\mathbf{r}}V$$

◆ Διατήρηση ορμής $\frac{d}{dt}(m\mathbf{v} + m'\mathbf{v}') \equiv \frac{d\mathbf{P}}{dt} = 0$

◆ Συνεχής συμμετρία

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r} + \mathbf{a}, \quad \mathbf{r}' \rightarrow \mathbf{r}' + \mathbf{a}$$

4. ΑΝΤΙΘΕΤΑ: Σώμα σε δυναμικό $V(x)$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + V(x)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = - \frac{dV}{dx}$$

◆ Δεν υπάρχει P τέτοιο που: $\frac{dP}{dt} = 0$

◆ Δεν υπάρχει συμμετρία $x \rightarrow x+a$

5. Σώμα στο χώρο παρουσία «τοίχου»

Εστω ότι ο ανακλών τοίχος είναι το επίπεδο y - z

◆ Συμμετρίες $y \rightarrow y + a, \quad z \rightarrow z + b$

Ενώ ο μεταμύς $x \rightarrow x + c$: δεν είναι συμμετρία

◆ Διατήρηση ορμής $\frac{dP_y}{dt} = 0, \quad \frac{dP_z}{dt} = 0$

$$\frac{dP_x}{dt} \neq 0$$

II. Διατήρηση Στροφορμής και Συμμετρία Στροφών στο Χώρο

1. Σώμα σε κεντρικό δυναμικό

$$E = \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2 + V(r)$$

Εξίσωση κίνησης: $m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -V'(r) \hat{\mathbf{r}}$

◆ Διατήρηση στροφορμής

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{r} \times m\mathbf{v}) = m\mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -mV'(r)\mathbf{r} \times \hat{\mathbf{r}} = 0$$

◆ Συμμετρία: Στροφές $\mathbf{r} \longrightarrow \mathbf{r}' : r' = r$

$$E(\mathbf{r}', \mathbf{v}') = E(\mathbf{r}, \mathbf{v})$$

2. Σώμα στο χώρο παρουσία «τοίχου»

Εστω ότι ο τοίχος είναι το επίπεδο y - z

◆ Συμμετρίες $y \rightarrow y + a, \quad z \rightarrow z + b$
 $\phi \rightarrow \phi + \gamma$ (Στροφές περί τον x)

◆ Διατήρηση ορμής $\frac{dP_y}{dt} = 0, \quad \frac{dP_z}{dt} = 0$
 $\frac{dL_x}{dt} = 0$

**III. Διατήρηση φορτίου
και
Συμμετρία «Στροφών» στο
Χώρο των Κυματοσυναρτήσεων**

1. Ηλεκτρόνιο σε δυναμικό

Κυματοσυνάρτηση του e: $\psi(\mathbf{x}, t)$

$$E = \int dV \psi^*(\mathbf{x}, t) \left(\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{x}) \right) \psi(\mathbf{x}, t)$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi, \quad E = \int dV \psi^*(\mathbf{x}, t) H(\hat{\mathbf{p}}, \mathbf{x}) \psi(\mathbf{x}, t)$$

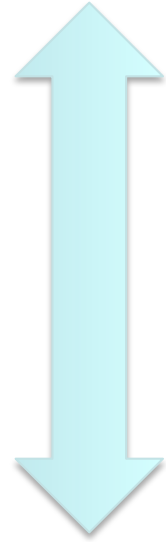
Διατήρηση φορτίου:

$$\frac{dQ}{dt} = 0, \quad Q = e \int dV \psi^*(\mathbf{x}, t) \psi(\mathbf{x}, t)$$

Συμμετρία: Στροφή στο μιγαδικό χώρο των κυματοσυναρτήσεων

$$\begin{aligned} \psi &\longrightarrow e^{i\alpha} \psi \\ E(e^{i\alpha} \psi) &= E(\psi) \end{aligned}$$

Νόμος Διατήρησης



Εκφυλισμός

Π.χ. Σωματίο σε κεντρικό δυναμικό

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + V(r) \quad \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

$(\mathbf{p} \rightarrow \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar \nabla)$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \quad \hat{\mathbf{L}} = -i\hbar \mathbf{r} \times \nabla$$

Νόμος διατήρησης: $[\hat{H}, \hat{\mathbf{L}}] \equiv \hat{H}\hat{\mathbf{L}} - \hat{\mathbf{L}}\hat{H} = 0$

Εκφυλισμός: Εστω $\psi : \hat{H}\psi(\mathbf{x}, t) = E\psi(\mathbf{x}, t)$

Τότε: $\hat{H}(\hat{\mathbf{L}}\psi) = \hat{\mathbf{L}}\hat{H}\psi = E(\hat{\mathbf{L}}\psi)$

ψ και $\hat{\mathbf{L}}\psi \neq \psi$: ίδια ενέργεια

ΣΥΝΕΧΗΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ

Θεωρία
Ομάδων



Θεμελιώδης
κατάσταση
συμμετρική



Διατηρούμενο
μέγεθος

(Noether)

(Goldstone)

E, P, J, Q, B, L,

Λίγα για Θεωρία Ομάδων

- $O = \{G, \bullet\}$ $G = \{a, b, c, \dots\}$
- Για κάθε a, b στο $G \rightarrow a \bullet b$ στο G
- Μοναδιαίο στοιχείο e στο G : $e \bullet a = a \bullet e = a$ για κάθε a
- Αντίστροφο a^{-1} του a : $a \bullet a^{-1} = a^{-1} \bullet a = e$ για κάθε a

- $a \bullet b = b \bullet a$ για κάθε a, b (**Abelian** group)
- Υπάρχουν a, b : $a \bullet b \neq b \bullet a$ (**non-Abelian**)

Παραδείγματα: (α) Στροφές περί σταθερό άξονα (Αβελιανή)

(β) Στροφές στο χώρο (μη Αβελιανή).

(γ) Αλλαγή φάσης στη κυματοσυνάρτηση (Αβελιανή).

(δ) $(\mathbb{R}, +)$ είναι Αβελιανή ομάδα.

(ε) Αντιστρέψιμοι πίνακες $n \times n$ με πράξη τον πολ/σμό.

(στ) Το σύνολο $\{1, -1\}$ με πράξη τον πολλαπλασιασμό.

Μεθοδολογία

I. Από τη Χαμιλτονιανή ενός συστήματος βρίσκω τις συμμετρίες και από εκεί τον εκφυλισμό του φάσματος.

π.χ. Μελέτη ατόμου H.

II. Από το φάσμα συμπεραίνω για τις συμμετρίες της Χαμιλτονιανής του συστήματος.

π.χ. Ανακάλυψη των κουάρκς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣ ΤΑ QUARKS

Τα «Στοιχειώδη» Σωματίδια
γύρω στο `60

.....Τα **QUARKS** (1963)



Με τα χρόνια: Περί τα **300** ακόμα σωμάτια.....

Λεπτόνια: e , ν_e , μ , ν_μ , τ , ν_τ

Αδρόνια



Μεσόνια

($s=0, 1, \dots, 6$)

π^0 , π^\pm , K^0 , K^\pm , η^0

ρ^0 , ρ^\pm , ω^0 , ϕ^0 ,

J/ψ ,

Βαρυόνια

($s=1/2, \dots, 11/2$)

p , n , Σ^\pm , Σ^0 , Ξ^\pm , Ξ^0 , Λ^0

$\Xi^{*\pm}$, Ω^- , Δ^{++} ,

Δ^+ , Δ^0 , Δ^- , Σ^{*+} , ...

Είναι όλα αυτά στοιχειώδη???

Ανακάλυψη νέων σωματίων

$$\pi^{-} + p \rightarrow K^{0} + \Lambda^{0}$$

$$K^{0} \rightarrow \pi^{+} + \pi^{-}$$

$$\Lambda^{0} \rightarrow \pi^{-} + p$$

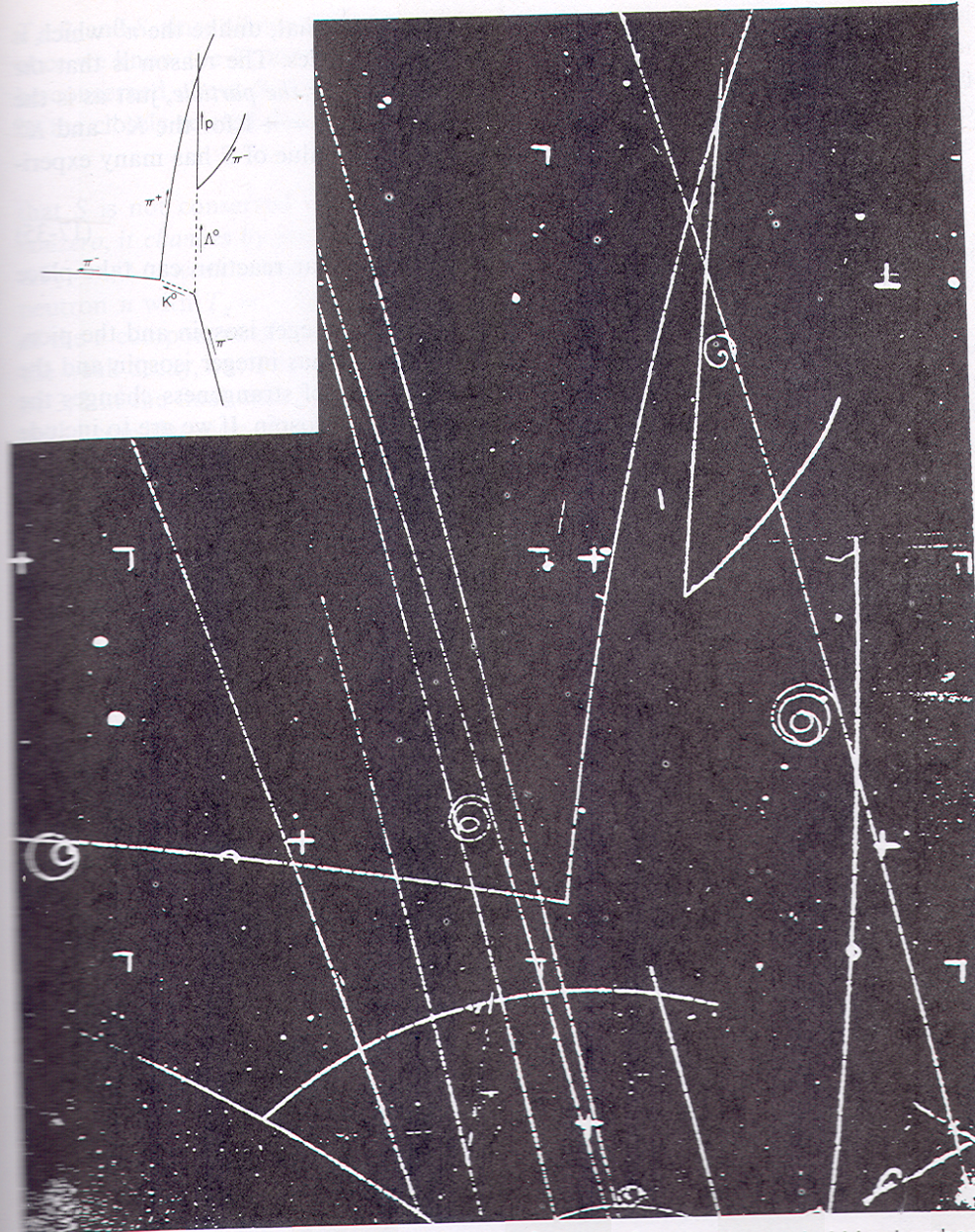
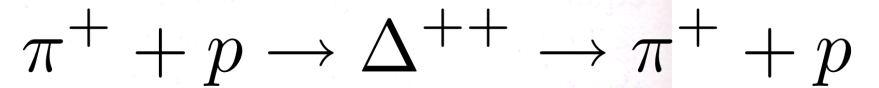
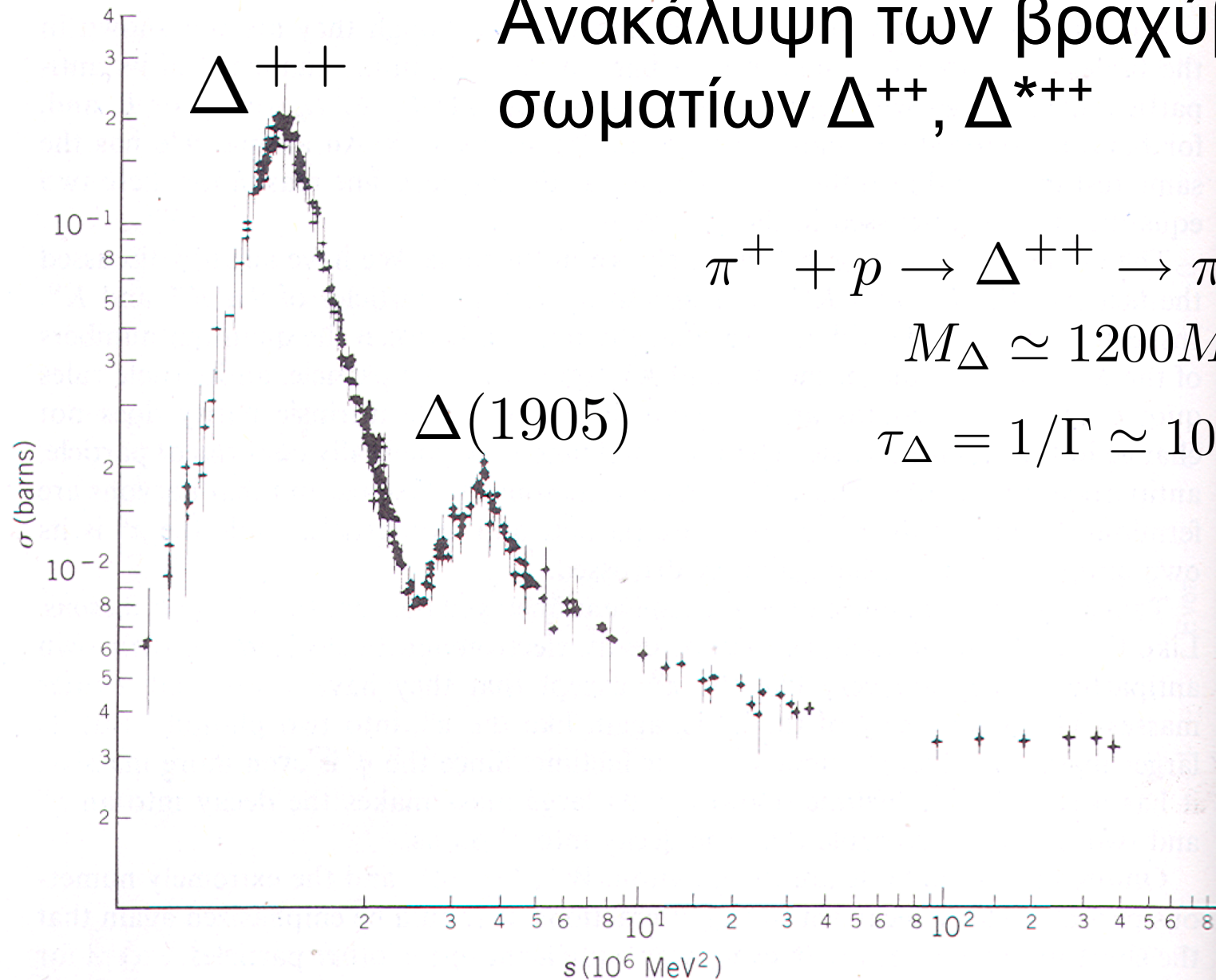


Figure 17-19 The associated production of a Λ^0 and a K^0 in a hydrogen bubble chamber. An incident π^- interacts with a p of the liquid hydrogen filling the chamber. The K^0 decays into a π^+ and a π^- . The Λ^0 decays into a p and a π^- . The production takes place through the strong interaction, but the decays each utilize the weak interaction. The curvature of each particle in the applied magnetic field is used to identify the particle. (Courtesy Lawrence Berkeley Laboratory)

Ανακάλυψη των βραχύβιων σωματίων Δ^{++} , Δ^{*++}



$$M_{\Delta} \simeq 1200 \text{ MeV}/c^2$$

$$\tau_{\Delta} = 1/\Gamma \simeq 10^{-23} \text{ sec}$$

Figure 17-20 The elastic scattering cross section for π^+ mesons on protons, as a function of the square of the total center-of-mass energy of the system. Note the peaks in the cross section which are the pion-nucleon resonances—or short-lived baryons—described in the text.

ΒΗΜΑ 1: Η Παραδοξότητα (S)

- Τα «παράξενα» σωματρία παράγονται «ισχυρά» από συγκρούσεις «συνήθων» σωματίων (p, n, π, ...) πάντα σε ζευγάρια.
- Στη συνέχεια διασπώνται πολύ αργά (ασθενώς).

π.χ. $\pi + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ με $\sigma \approx 10$ mbarn

$\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p$ και $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ με $\tau \approx 10^{-10}$ sec !!

Συμπέρασμα: Υπάρχει κβαντικός αριθμός, η ΠΑΡΑΔΟΞΟΤΗΤΑ, που διατηρείται από την ισχυρή αλληλεπίδραση, ενώ μπορεί να παραβιάζεται από την ασθενή.

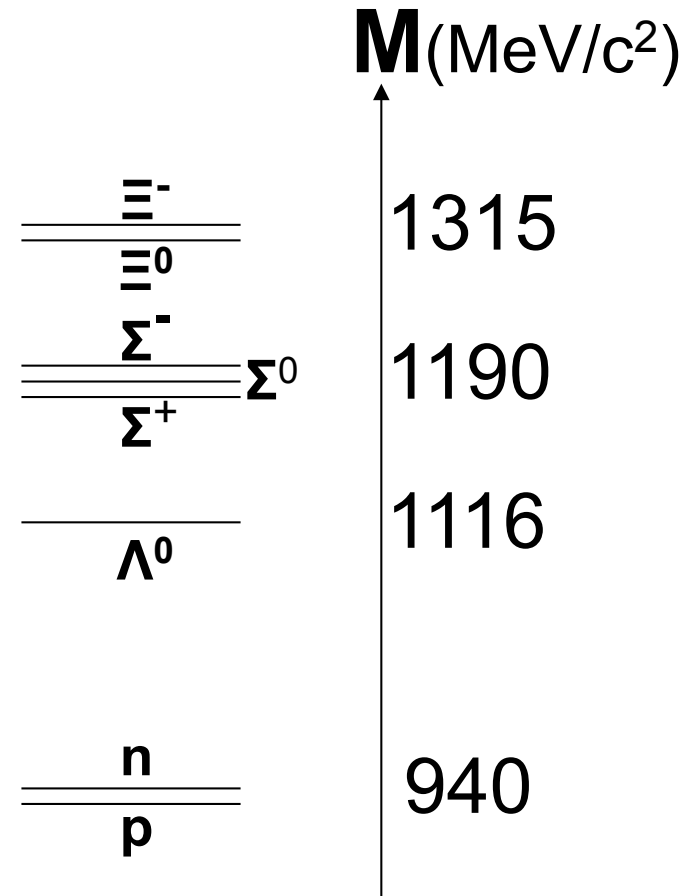
π.χ. $S(K^0) = -S(\Lambda^0) = 1$, $S(p) = S(\pi) = 0$

ΒΗΜΑ 2: Το φάσμα των σωματίων

“Σωματία” = ιδιοκαταστάσεις της
«Χαμιλτονιανής **H** του Κόσμου»

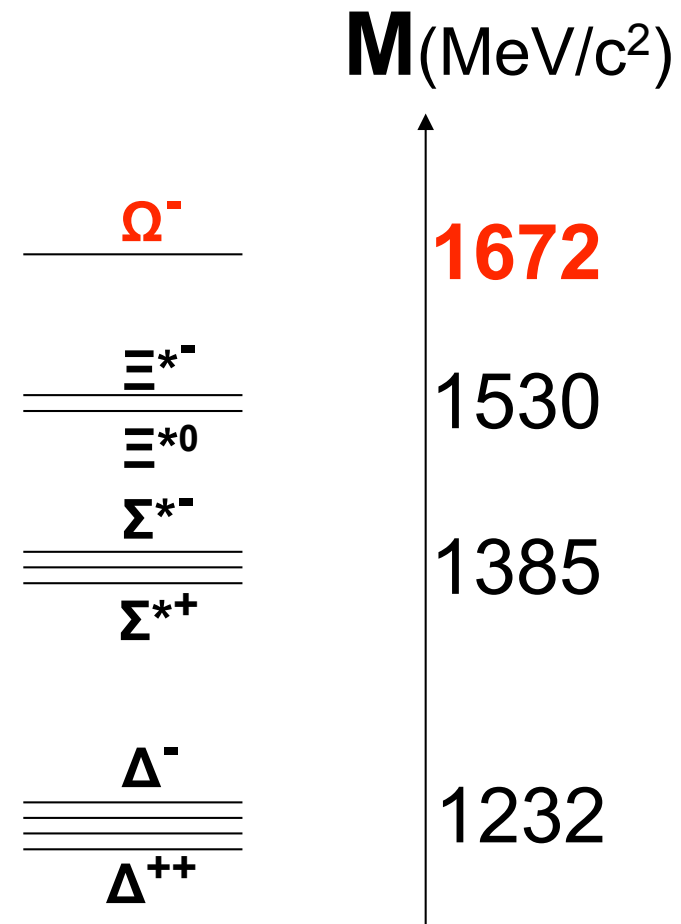
Φάσμα της **H** για αδρόνια
8άδες και «**10**»άδες

Το φάσμα των βαρυονίων ($B=1$) με σπιν $1/2$



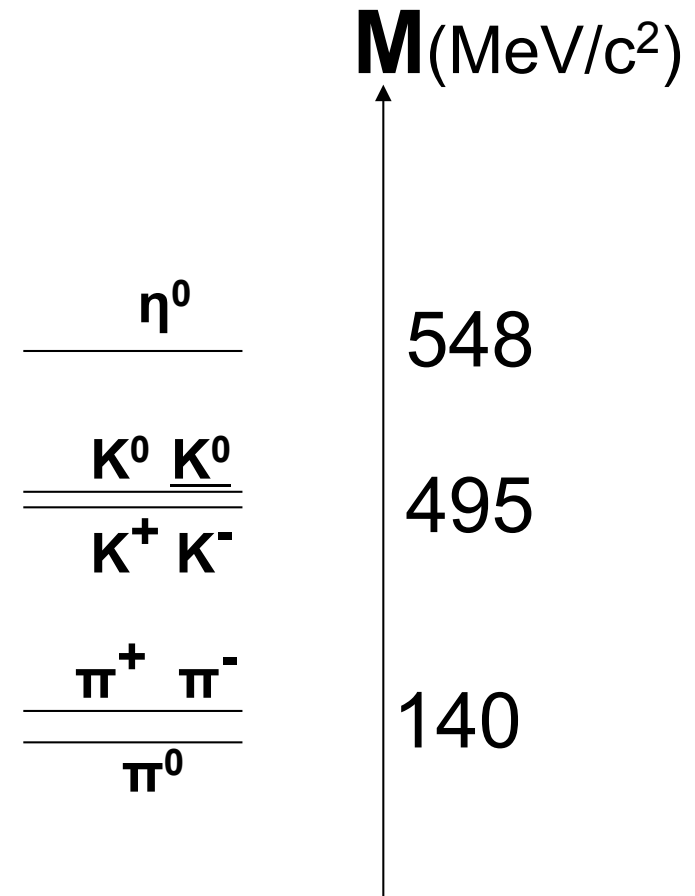
Τα αντιβαρυόνια ($B=-1$) έχουν το ίδιο φάσμα

Το φάσμα των βαρυονίων ($B=1$) με σπιν $3/2$



Τα αντισωματάρια ($B=-1$) έχουν το ίδιο φάσμα

Το φάσμα των **μεσονίων** με **σπιν 0**



Παρόμοιο είναι και το φάσμα των μεσονίων με **σπιν 1**, μόνο με μεγαλύτερες μάζες.

Η εικόνα θυμίζει π.χ. αυτήν του
φαινομένου Zeeman,....

is placed in a weak external magnetic field.

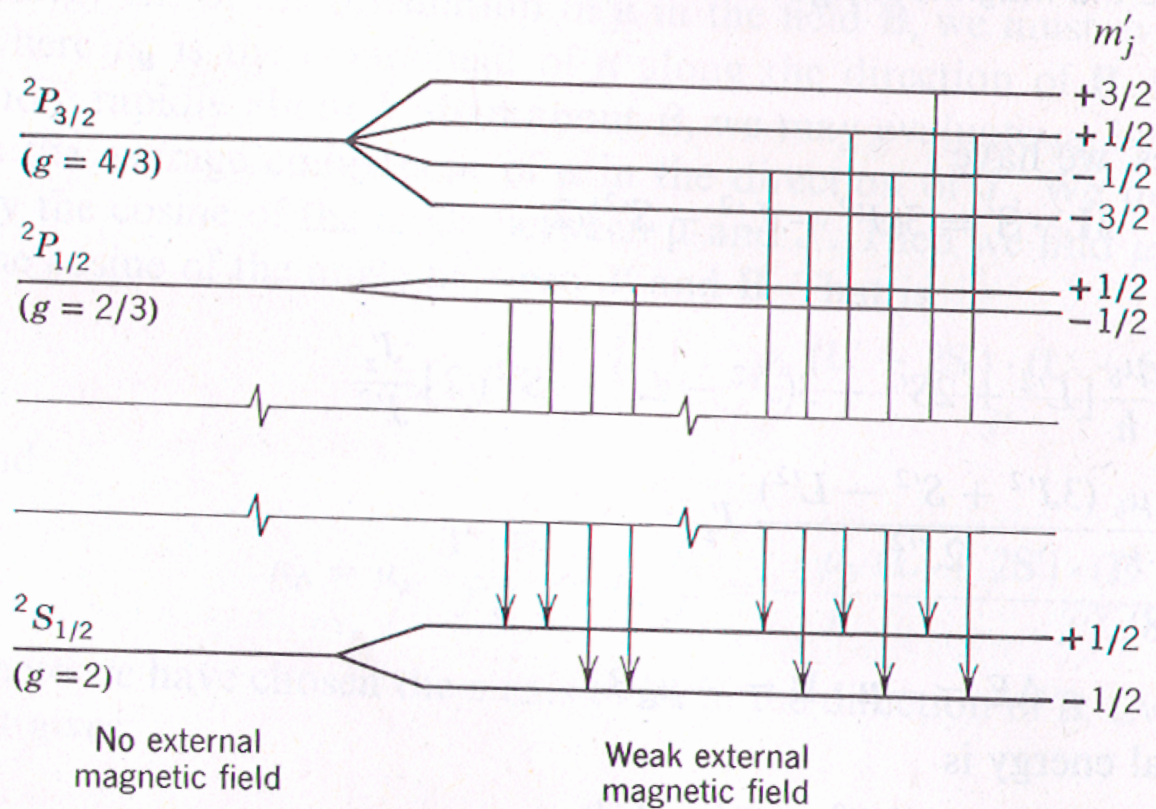


Figure 10-11 The Zeeman splittings of the ${}^2P_{1/2,3/2}$ first excited state levels of sodium, and of its ${}^2S_{1/2}$ ground state level. The transitions allowed by the selection rules are shown. Compare the resulting spectral lines with those shown in Figure 10-9.

Φαινόμενο Zeeman

Λίγο Φ3

- Ατομικά φάσματα

Εξίσωση Schroedinger $H\Psi=E\Psi$

π.χ. Σωματίο σε δυναμικό $V(r)$: $H=\mathbf{p}^2/2m+V(r)$

- Συμμετρίες – Διατηρούμενα μεγέθη – Κβαντικοί αριθμοί – Χαρακτηρισμός καταστάσεων

π.χ. τυχόν κεντρικό δυναμικό: H, L^2, L_z, S^2, S_z

Καταστάσεις: $(n, l, m_l), m_s, -l \leq m_l \leq l, m_s = -1/2, +1/2$

- $E=E(n,l)$, ανεξάρτητη από το m_l και το m_s

Φαινόμενο Zeeman

Ομογενές μαγνητικό πεδίο

Μερική άρση του εκφυλισμού

$$H = H_{\text{sym}} - \mu \cdot B$$

Η ΑΣΚΗΣΗ ΕΔΩ ΕΙΝΑΙ:

- Απο αυτό το κομμάτι του φάσματος της Χαμιλτονιανής καλούμαι να μαντέψω τη συμμετρία της.

Κατι σαν αρχαιολόγος.....

ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ ΤΟ ΕΞΗΣ **ΑΝΑΛΟΓΟ**: Από τα ατομικά φάσματα παρουσία μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο Zeeman), καλείστε να μαντέψετε την ύπαρξη στο «βάθος» σφαιρικής συμμετρίας.

ΒΗΜΑ 3: ΙΣΟΤΟΠΙΚΟ ΣΠΙΝ

- Τα φάσματα δείχνουν δύο χαρακτηριστικές κλίμακες – αποστάσεις ενεργειακών σταθμών.
- Όπως τα (p,n) αποτελούν δυάδα του ισοτοπικού σπιν ($I=1/2$), έτσι και τα υπόλοιπα σωμάτια έχουν $I=0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ με $-I \leq I_3 \leq I$

Όπως ξέρουμε από την πυρηνική φυσική:
η ισχυρή δύναμη διατηρεί το ΙΣΟΤΟΠΙΚΟ ΣΠΙΝ

Table 17-1. Particles that are Stable or Decay either Weakly or Electromagnetically

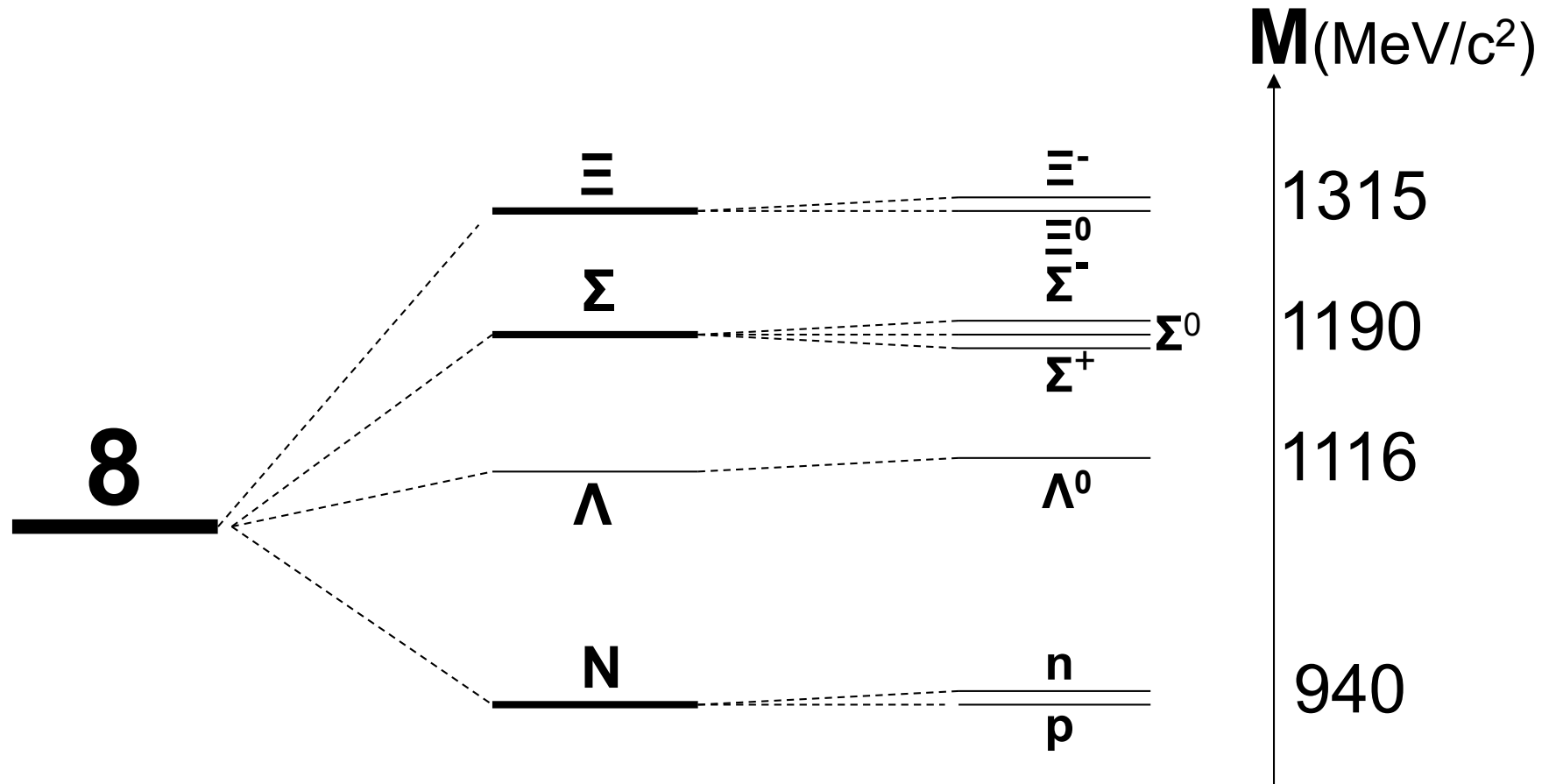
Generic Name	Particle Symbol	Rest Mass (MeV/c ²)	Lifetime (sec)	Charge Q	Intrinsic Spin s	Lepton Number $L_e, L_\mu, \text{ or } L_\tau$	Baryon Number B	Intrinsic Parity P	Isospin T	Isospin z component T_z	Strangeness S
Photon	γ	0	stable	0	1	0	0	Odd	0, 1	0	0
Leptons	ν_e	0	stable	0	1/2	+1	0				
	ν_μ	0	stable	0	1/2	+1	0				
	ν_τ	0	stable	0	1/2	+1	0				
	e^-	0.511	stable	-1	1/2	+1	0				
	μ^-	105.7	2.2×10^{-6}	-1	1/2	+1	0				
	τ^-	1784	5×10^{-13}	-1	1/2	+1	0				
Mesons	π^+	139.6	2.6×10^{-8}	+1	0	0	0	Odd	1	+1	0
	π^0	135.0	8×10^{-17}	0	0	0	0	Odd	1	0	0
	π^-	139.6	2.6×10^{-8}	-1	0	0	0	Odd	1	-1	0
	K^+	493.8	1.2×10^{-8}	+1	0	0	0	Odd	1/2	+1/2	+1
	K^0	497.8	(8.9×10^{-11}) and	0	0	0	0	Odd	1/2	-1/2	+1
	\bar{K}^0	497.8	5.2×10^{-8}	0	0	0	0	Odd	1/2	+1/2	-1
	K^-	493.8	1.2×10^{-8}	-1	0	0	0	Odd	1/2	-1/2	-1
	η^0	549	8×10^{-19}	0	0	0	0	Odd	0	0	0
	η'	958	2×10^{-21}	0	0	0	0	Odd	0	0	0
Baryons	p	938.3	stable	+1	1/2	0	+1	Even	1/2	+1/2	0
	n	939.6	925	0	1/2	0	+1	Even	1/2	-1/2	0
	Λ^0	1116	2.6×10^{-10}	0	1/2	0	+1	Even	0	0	-1
	Σ^+	1189	8.0×10^{-11}	+1	1/2	0	+1	Even	1	+1	-1
	Σ^0	1192	6×10^{-20}	0	1/2	0	+1	Even	1	0	-1
	Σ^-	1197	1.5×10^{-10}	-1	1/2	0	+1	Even	1	-1	-1
	Ξ^0	1315	2.9×10^{-10}	0	1/2	0	+1	Even	1/2	+1/2	-2
	Ξ^-	1321	1.6×10^{-10}	-1	1/2	0	+1	Even	1/2	-1/2	-2
	Ω^-	1672	8.2×10^{-11}	-1	3/2	0	+1	Even	0	0	-3

Ο 8-απλός δρόμος (The eightfold way)

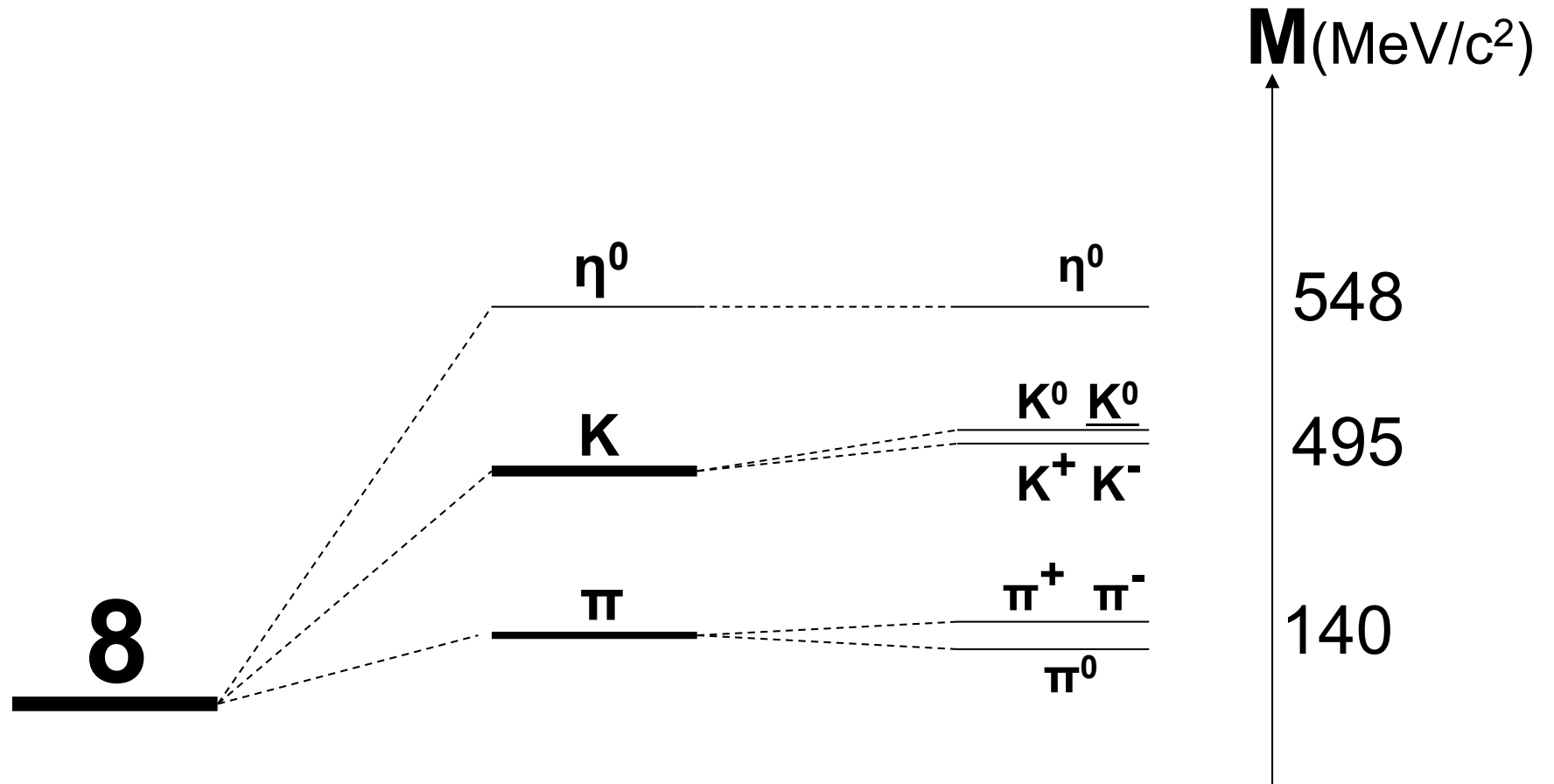
Τα **QUARKS**

M. Gell-Mann, G. Zweig 1963

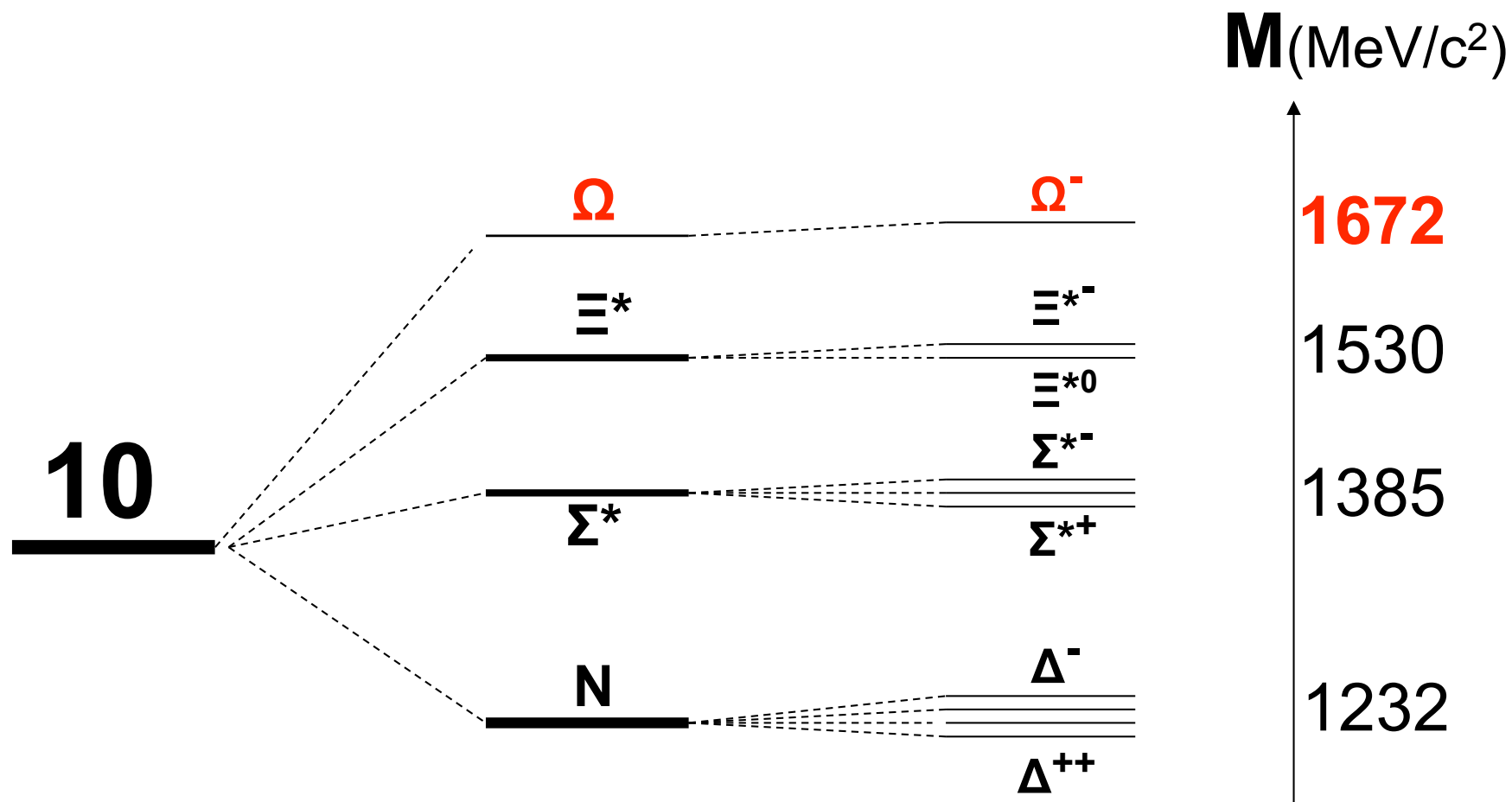
Τα βαρυόνια με σπιν 1/2



Τα μεσόνια με σπιν 0



Τα βαρυόνια με σπιν 3/2



Ορίζω το **Υπερφορτίο**:

$$Y \equiv B + S$$

και τοποθετώ τα γνωστά αδρόνια (μεσόνια και βαρυόνια χωριστά) στο επίπεδο I_3 - Y

Προκύπτουν κανονικά εξάγωνα!!
και κάποια άλλα.... (βλ. στα βιβλία)

Αυτά υποδεικνύουν **συμμετρία $SU(3)$**

Ισχύει:
$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2}$$

SU(3)

Απο τη θεωρία ομάδων προκύπτει οτι:

- Οι **8**άδες υποδεικνύουν συμμετρία **SU(3)**

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0(\text{SU}(3)) + \mathbf{H}_1(\text{SU}(2)) + \mathbf{H}_2(\text{EW})$$

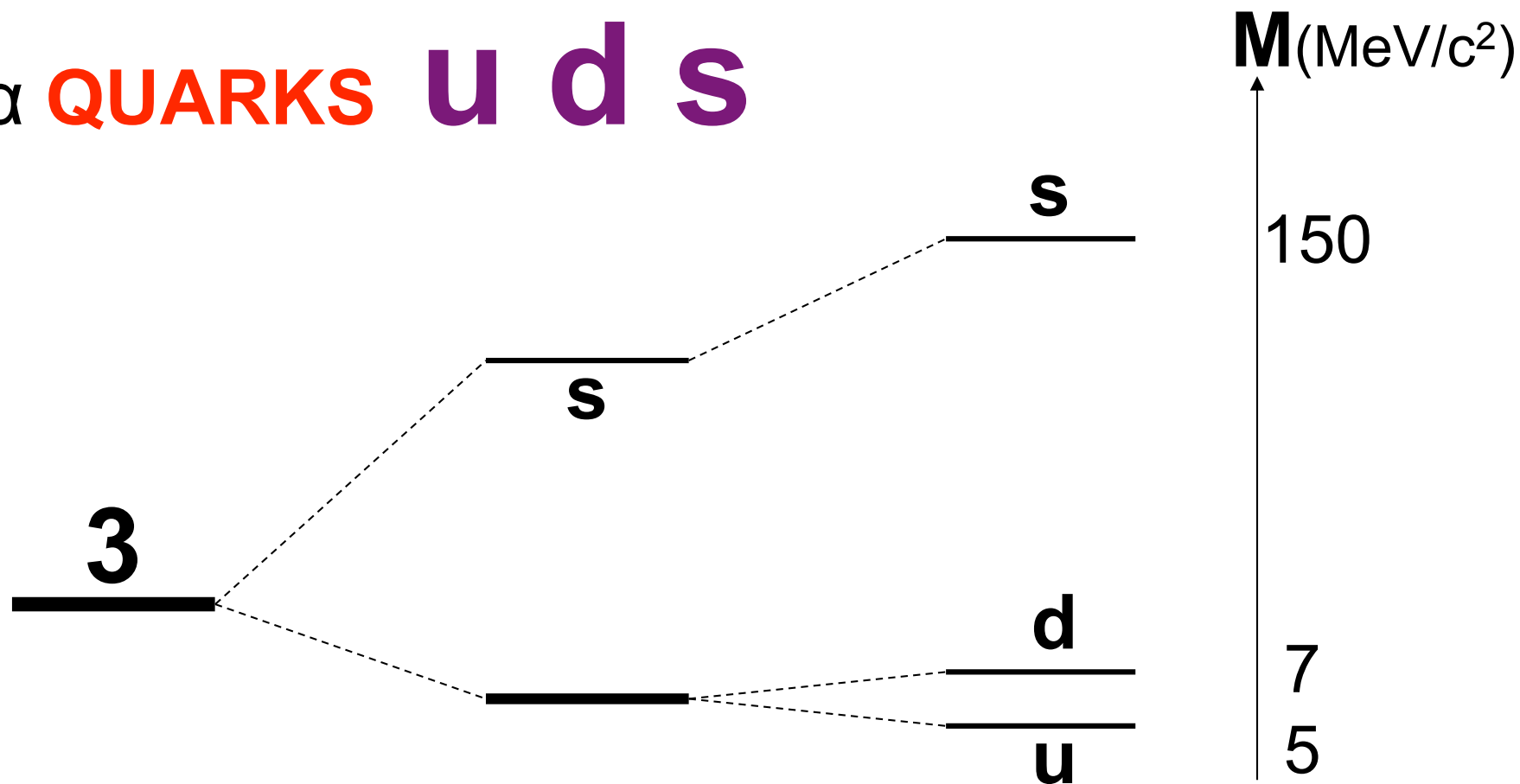
$$\mu\epsilon \quad |\mathbf{H}_2| \ll |\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_1|$$

Ομως, για να είναι σωστό αυτό θα πρέπει:

- 1.** Να υπάρχει το **10_o** σωματίο της **10άδας**
- 2.** Να υπάρχει **3-** και **3-άδα** από τις οποίες να φτιάχνονται όλα τα άλλα σωματία

ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΘΕΩΡΙΑΣ:

1. Τα **QUARKS** **u d s**



Τα **ANTIQUARKS** έχουν τις ίδιες μάζες

*

Σωματίο	Q	B	L
u	2/3	1/3	0
d s	-1/3	1/3	0
ν_e	0	0	1
e	-1	0	1

+ τα αντισωματίά τους

2. Τα συστατικά των Αδρονίων

- $p = (uud)$
- $n = (udd)$
- $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$
- $\Lambda^0 = (uds)$
- $\Delta^{++} = (uuu)$
- $\Delta^+ = (uud)$
-
- $\pi^+ = (u\bar{d})$
- $\pi^- = (\bar{u}d)$
- $K^+ = (u\bar{s})$
- $K^- = (\bar{u}s)$
- $\rho^+ = (u\bar{d})$
-

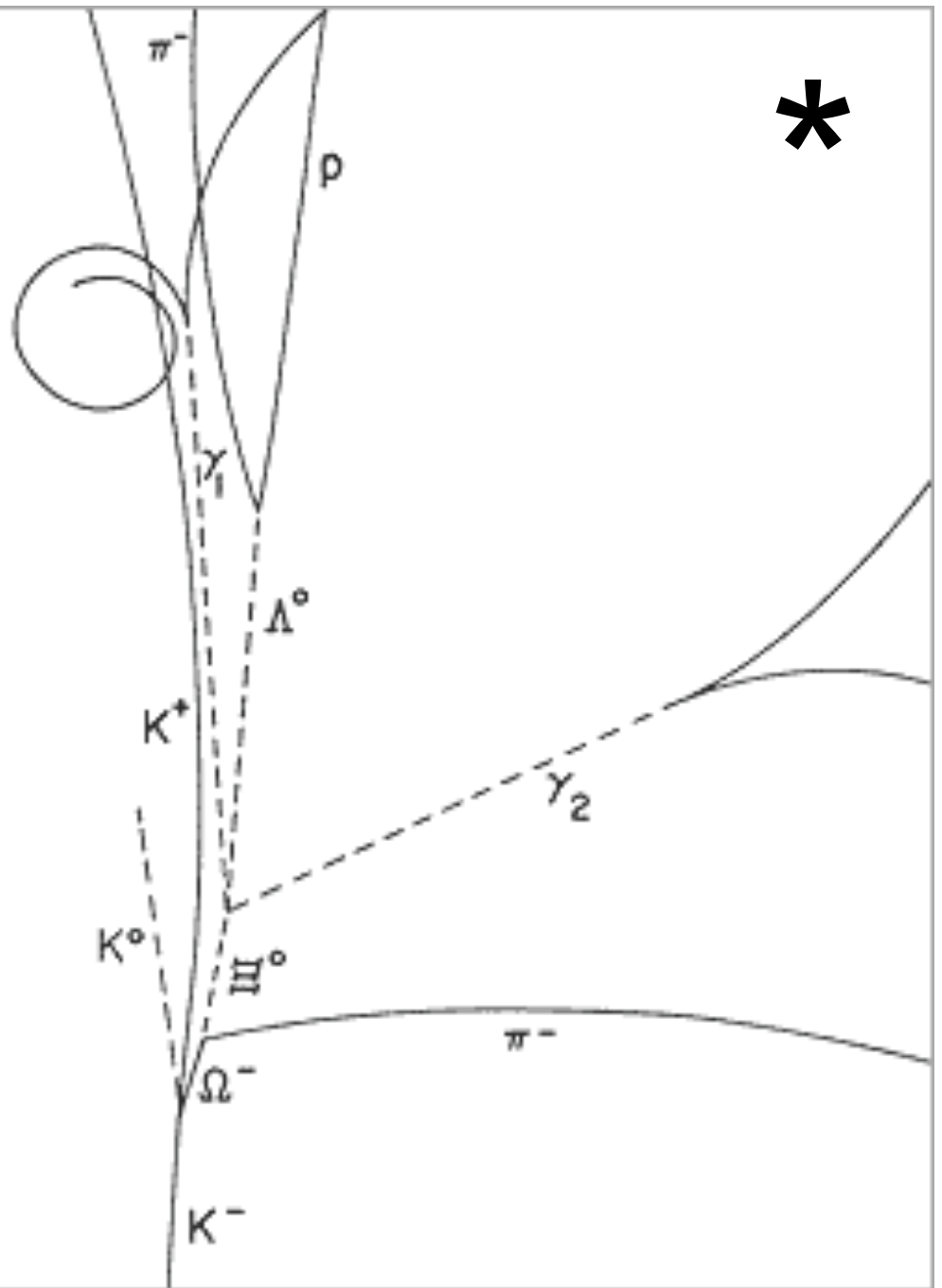
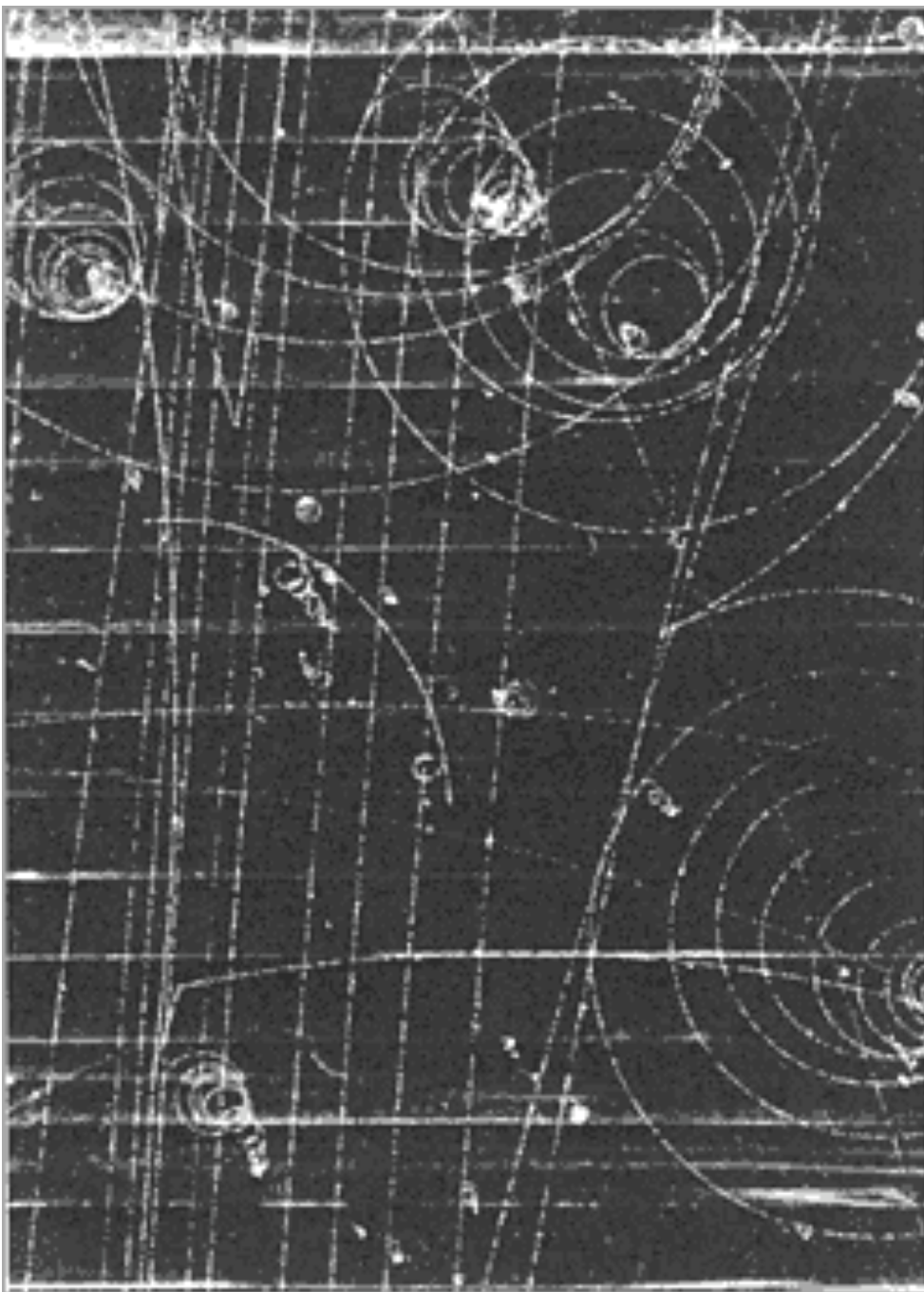
3. Πού είναι το 10ο της **10**;

$$S=-3 \rightarrow (sss)=\Omega^-$$

Μπορεί να βρεθεί σύντομα;;

ΝΑΙ!! Παράγεται εύκολα και διασπάται δύσκολα!!

Πείραμα: (1964) Ω^- (N. Samios et al)



Το βαρυόνιο Ω^- (sss)

$(K^- + p \rightarrow \Omega + K^+ + K^0)$

Και τα QUARKS...

Πείραμα: (1969) SLAC η πρώτη επιβεβαίωση συστατικών **u** και **d** στο πρωτόνιο (αντίστοιχο του πειράματος Rutherford)

s(s) στα «παράδοξα» σωμάτια

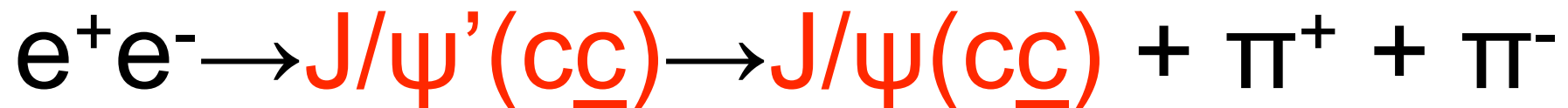
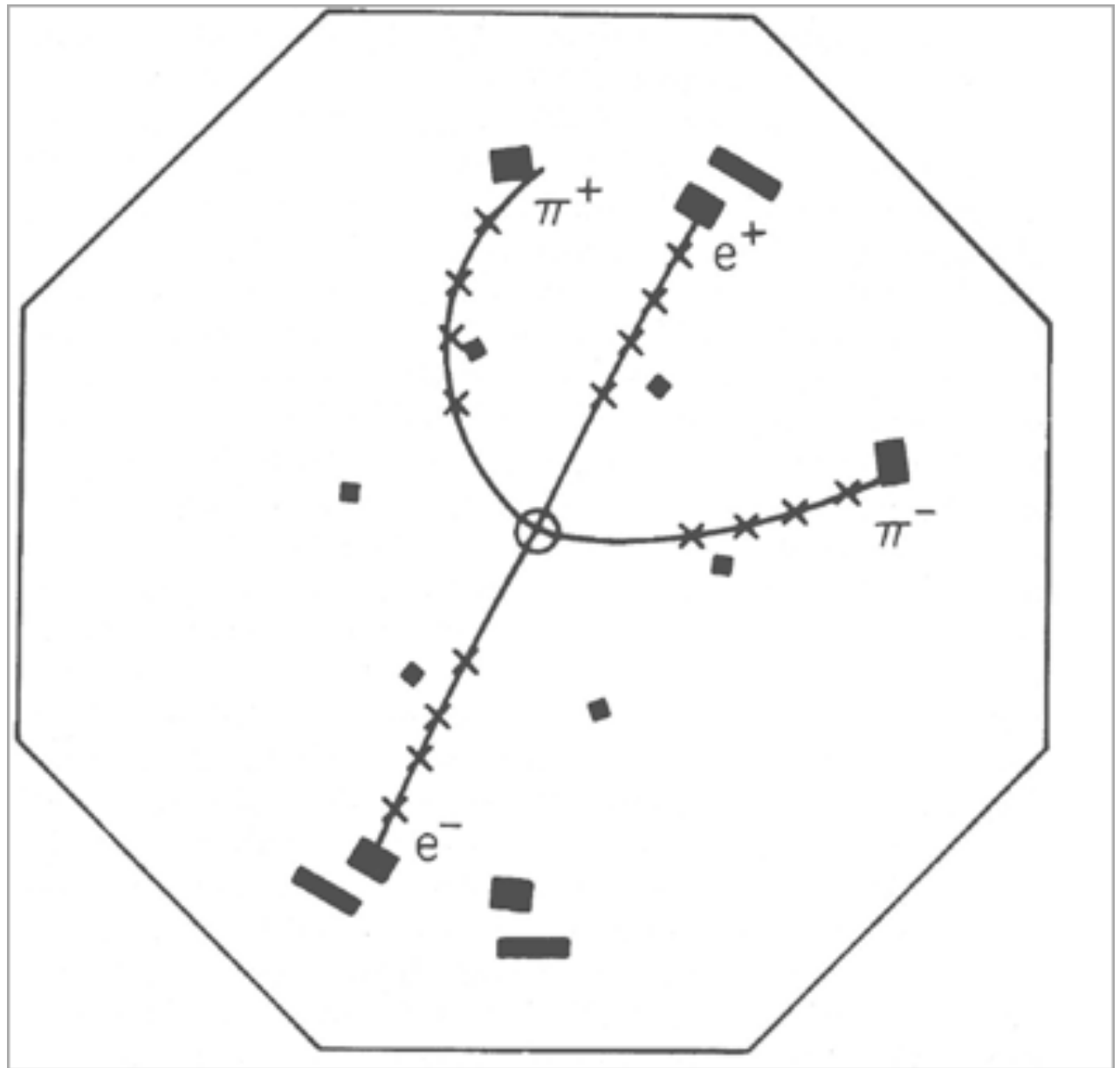
(1974) J/ψ (**c**harm)

(1996) FermiLab (**t**op)

ΘΡΙΑΜΒΟΣ!!!

Glashow
Iliopoulos
Maiani (1970)

Πείραμα:
Ting
Richter (1974)



ΟΜΩΣ...ΠΡΟΒΛΗΜΑ:

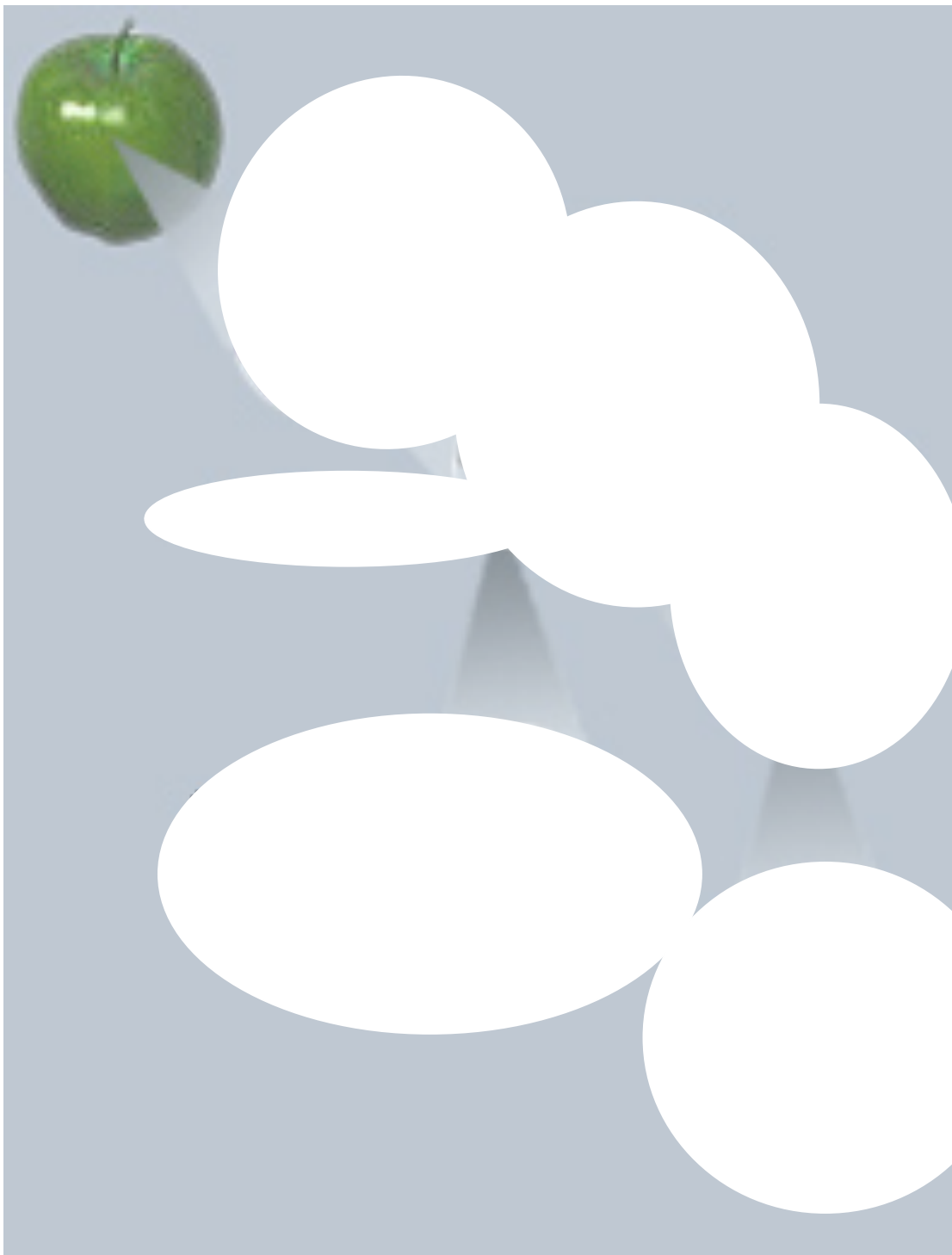
- $\Omega^- = (sss)$
- $(J=3/2, L=0)$ συμμετρική κατάσταση
- Παραβιάζει την απαγορευτική αρχή του Pauli !!!

Η ΛΥΣΗ:

Εισάγω ένα **νέο κβαντικό αριθμό** («χρώμα»)
Τα quarks έχουν 3 καταστάσεις χρώματος

$$\Omega^- = (\mathbf{s} \mathbf{s} \mathbf{s})$$

Ητοι: « $\Omega^- + \text{Pauli} \rightarrow \mathbf{X} \mathbf{P} \mathbf{\Omega} \mathbf{M} \mathbf{A}$ »



Βαρυτική δύναμη

Ηλεκτρομαγνητική

Πυρηνική → Ισχυρή
→ Ασθενής

??

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

TO STANDARD MODEL

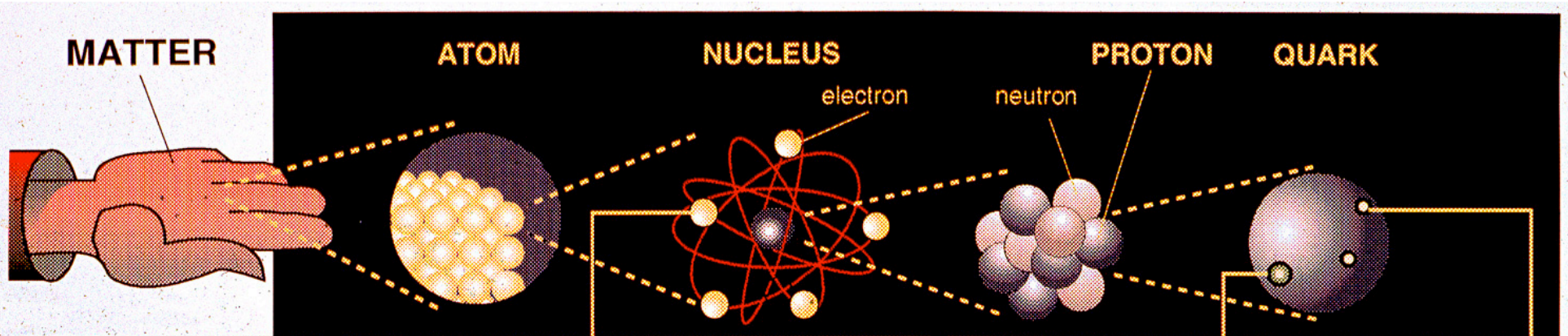
Τα Στοιχειώδη Σωματία
και οι
Αλληλεπιδράσεις τους
σήμερα (2011)



1. ΣωματΙΑ Υλης

Λεπτόνια	ν_e	ν_μ	ν_τ	S
	e	μ	τ	P
				I
Quarks	u u u	c c c	t t t	N
	d d d	s s s	b b b	1/2

ΑντισωματΙΑ : αντίθετο φορτίο, χρώμα



ALL ORDINARY MATTER BELONGS TO THIS GROUP.

LEPTONS	
electron Electric charge -1 . Responsible for electricity and chemical reactions	electron neutrino Electric charge 0 . Rarely interacts with other matter.

QUARKS	
up Electric charge $+2/3$. Protons have 2 up quarks Neutrons have 1 up quark	down Electric charge $-1/3$ and one down quark. ... and two down quarks.

THESE PARTICLES EXISTED JUST AFTER THE BIG BANG.

NOW THEY ARE FOUND ONLY IN COSMIC RAYS AND ACCELERATORS.

muon A heavier relative of the electron.	muon neutrino Created with muons when some particles decay.
tau Heavier still.	tau neutrino Not yet observed directly.

charm A heavier relative of the up.	strange A heavier relative of the down.
top Heavier still, recently observed.	bottom Heavier still.

ANTIMATTER
 Each particle also has an antimatter counterpart ... sort of a mirror image.



Σωματίο	Q	B	L *
u c t	2/3	1/3	0
d s b	-1/3	1/3	0
$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$	0	0	1
e μ τ	-1	0	1

+ τα αντισωματίά τους

ΜΑΖΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΙ ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ ΤΩΝ QUARKS



	«M» (GeV/c ²)	I	I ₃	S	C	B	T
u	0.3	1/2	1/2	0	0	0	0
d	0.31	1/2	-1/2	0	0	0	0
s	0.5	0	0	-1	0	0	0
c	1.5	0	0	0	1	0	0
b	4.8	0	0	0	0	-1	0
t	174	0	0	0	0	0	1

2. ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ και τα Σωματία Φορείς

ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Yang – Mills 1954

**ΟΛΕΣ ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΗ ΦΥΣΗ
ΕΧΟΥΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ**

Ανάδειξη του ρόλου της ΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ

Ο χώρος της Φυσικής έγινε μία αφηρημένη μαθηματική έννοια και μόνο ένα μέρος της, ο τριδιάστατος φυσικός χώρος, είναι κατ' ευθείαν προσιτός στις αισθήσεις μας.

Σε συνδυασμό με την **Κβαντομηχανική** προκύπτει

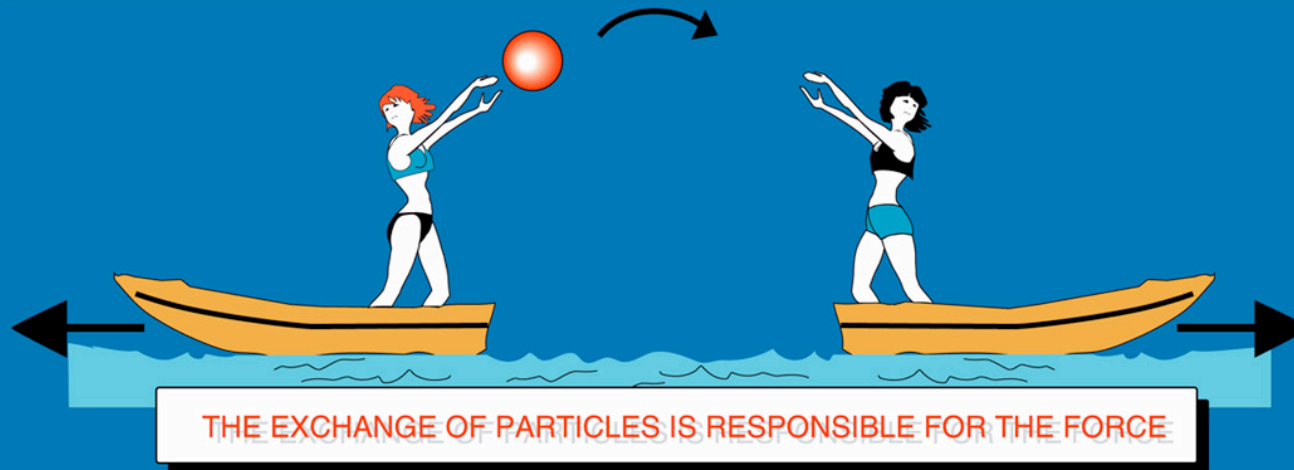
Κοινός μηχανισμός – **Όλες οι δυνάμεις είναι δυνάμεις ανταλλαγής σωματίων φορέων**





The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES





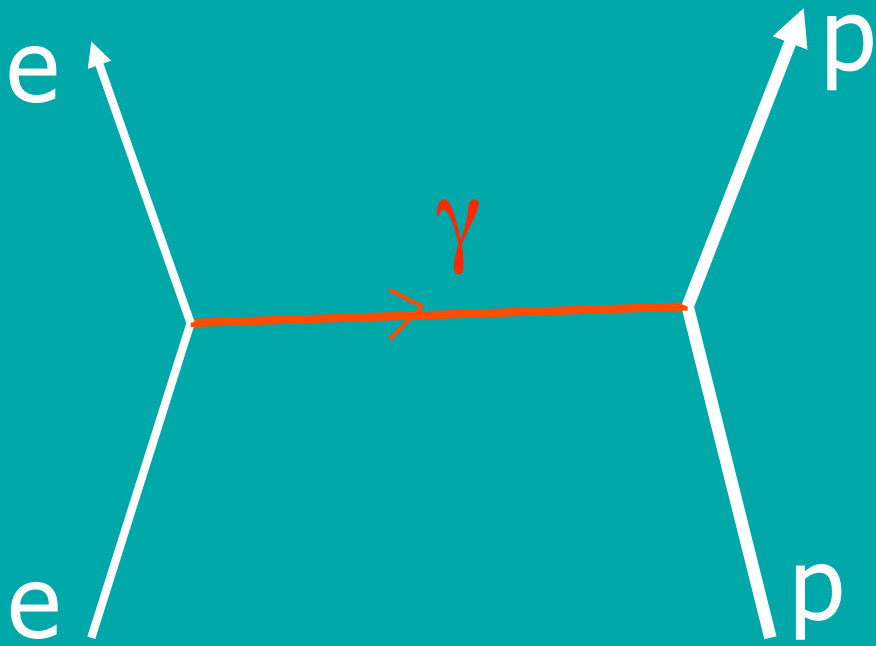
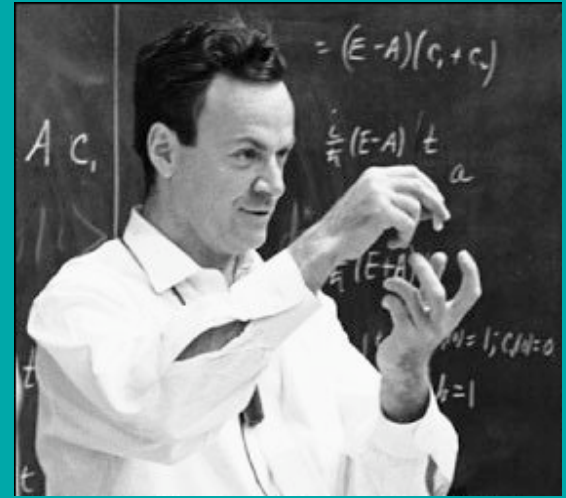
2. ΣΩΜΑΤΙΑ ΦΟΡΕΙΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ *

ισχυρή	$\begin{matrix} \underline{GG} & \underline{GB} & \underline{GR} \\ \underline{BG} & \underline{BB} & \underline{BR} \\ \underline{RG} & \underline{RB} & \underline{RR} \end{matrix}$ $(\underline{GG} + \underline{BB} + \underline{RR} = 0)$	8 gluons	S P I N 1	
ηλεκτρομαγνητική	γ $W^+ \quad W^- \quad Z^0$ H	φωτόνιο Higgs		S=0
βαρυτική	h	βαρυτόνιο		S=2

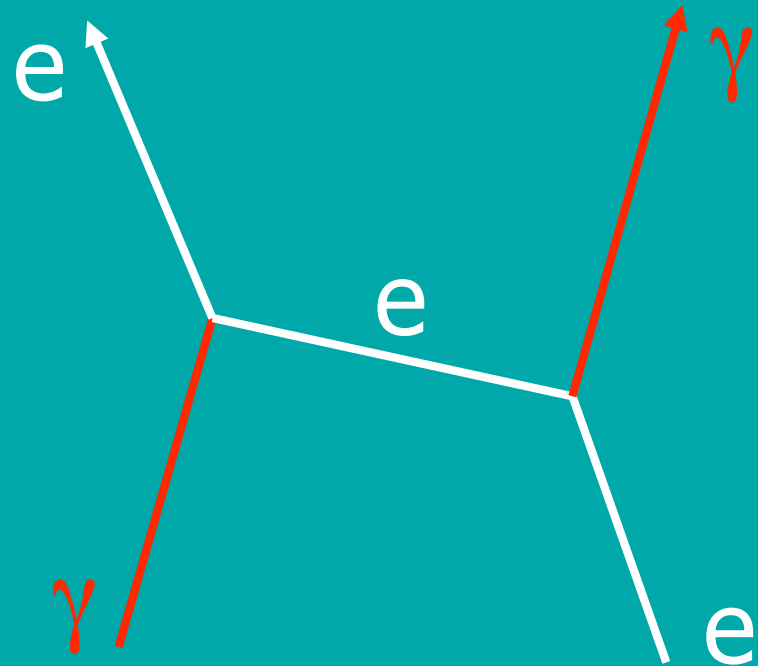
*

α. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ

Σωματίδια με ηλεκτρικό φορτίο



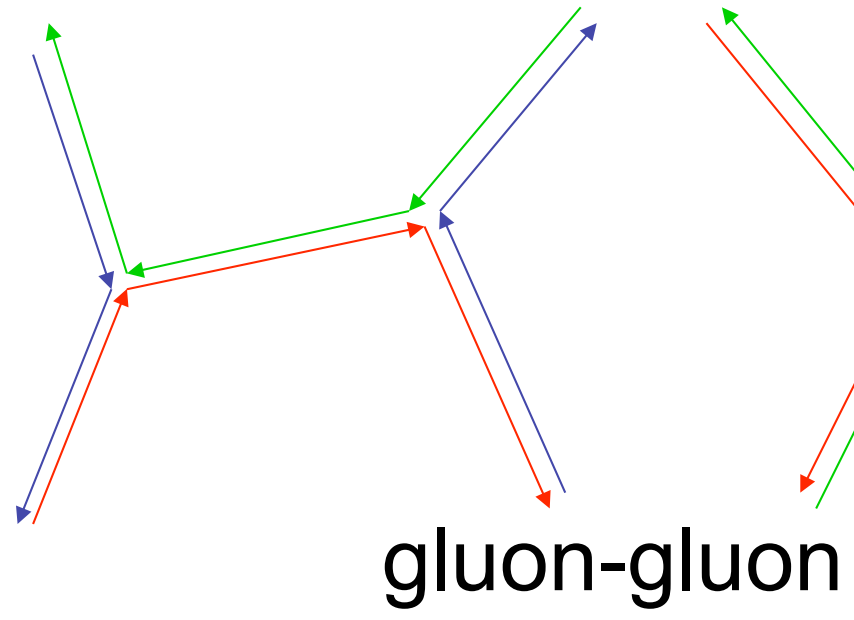
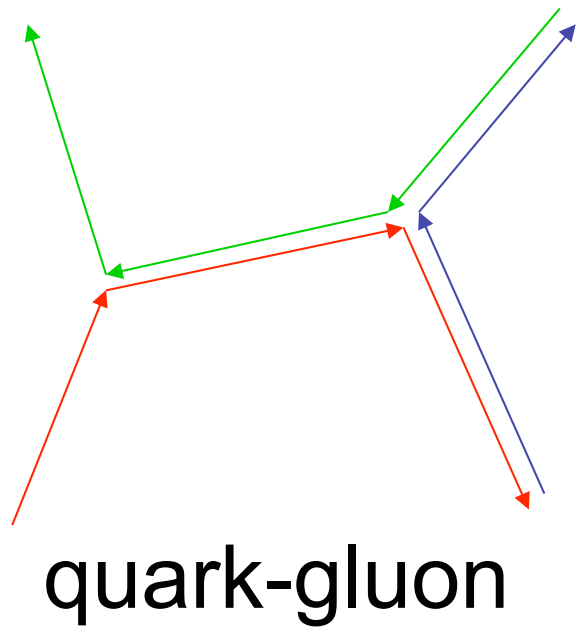
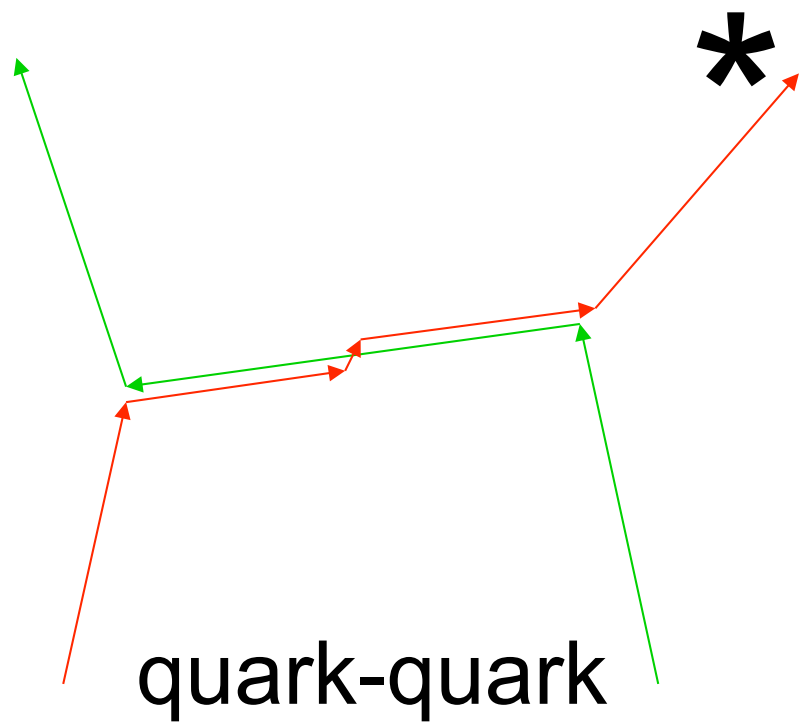
$M_\gamma=0$, $Spin=1$



β. **ΙΣΧΥΡΗ**

Ανάμεσα σε
έγχρωμα σωμάτια

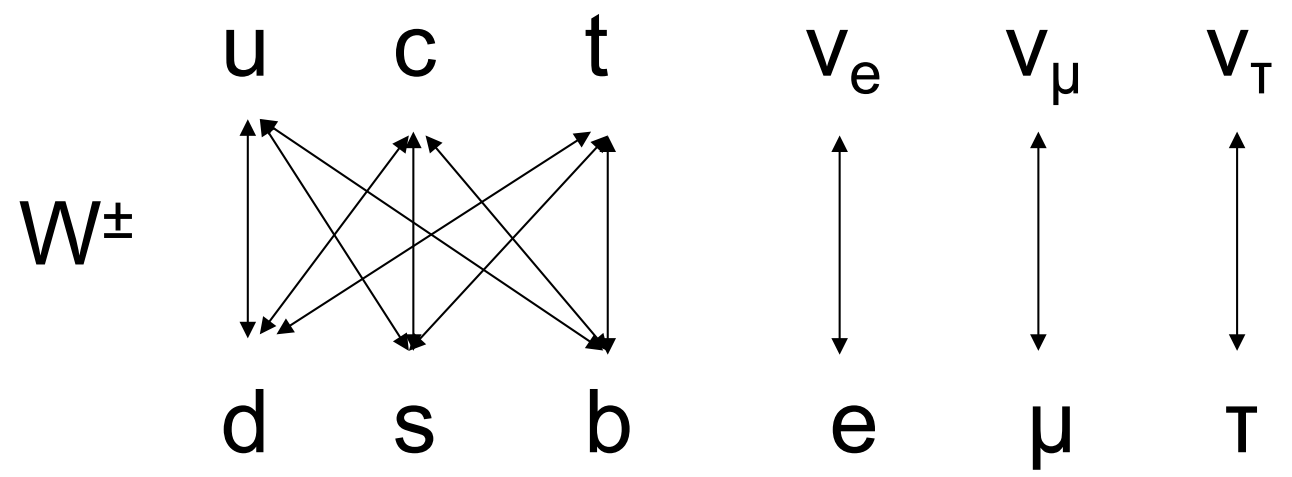
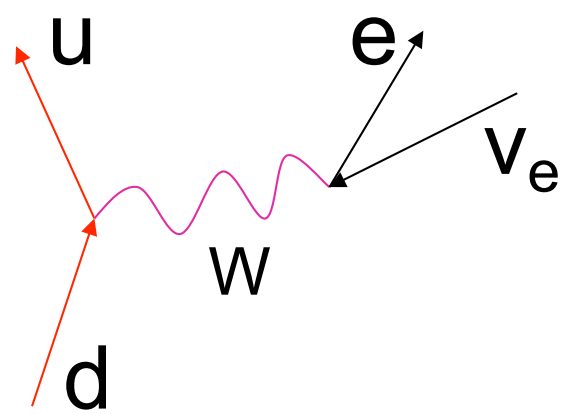
$M_{\text{gluon}}=0$ spin=1



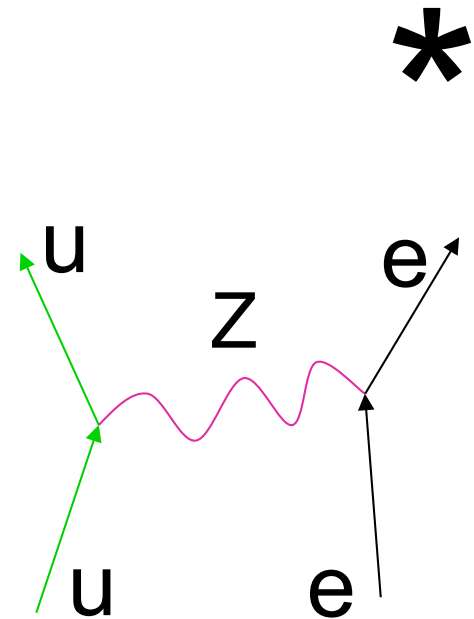
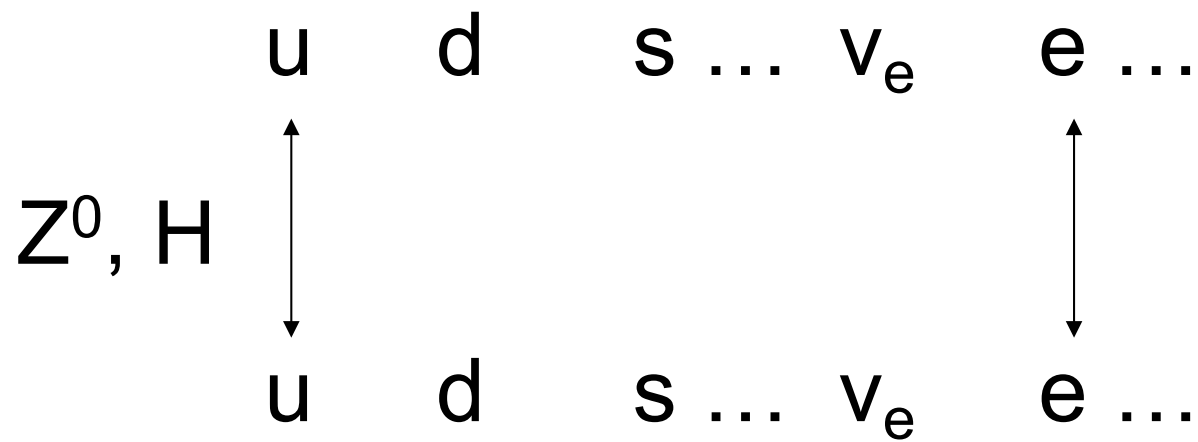


γ. Α Σ Θ Ε Ν Η Σ

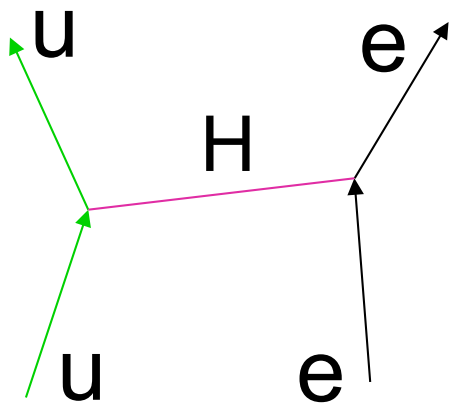
Η μόνη που **μπορεί να αλλάξει το είδος του σωματίου**



Spin=1, $M_W \sim 83 \text{ GeV}/c^2$



Spin_Z=1, M_Z ~ 91 GeV/c²



Spin_H=0

M_H=????

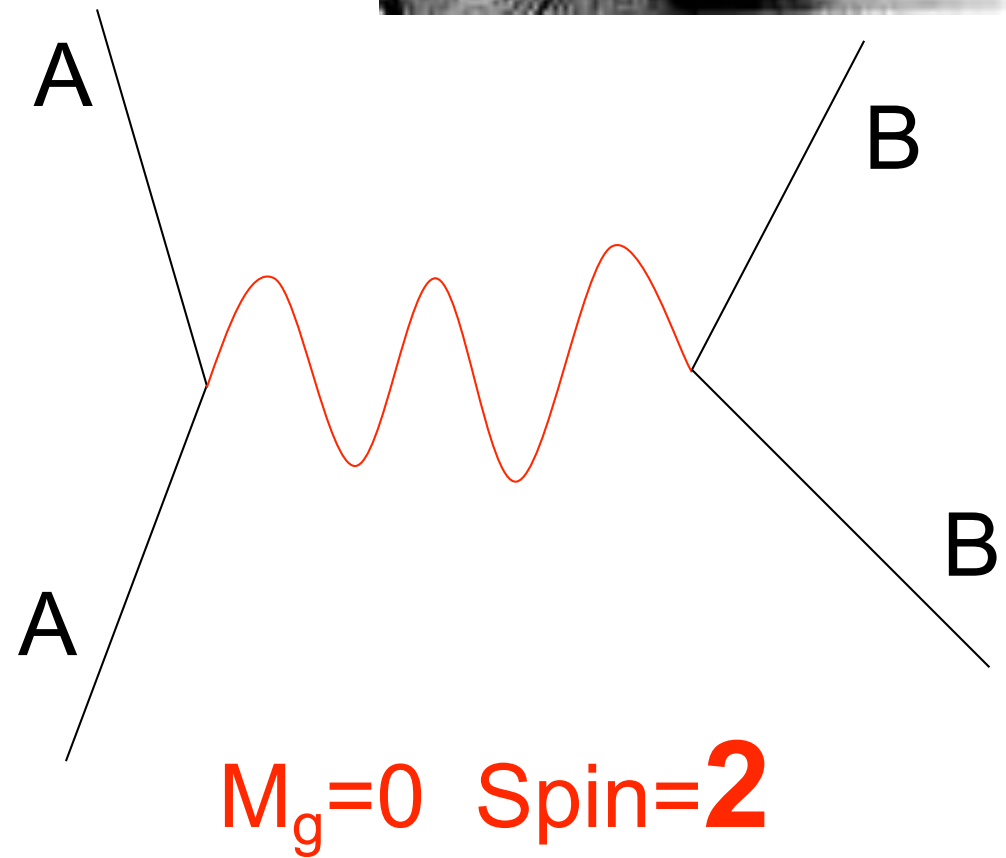
LHC

δ. ΒΑΡΥΤΙΚΗ (Einstein)



Παγκόσμια δύναμη

Τα σωμάτια
ΔΕΝ αλλάζουν



ΣΥΝΕΧΗΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ

Θεωρία
Ομάδων



Θεμελιώδης
κατάσταση
συμμετρική



Διατηρούμενο
μέγεθος

(Noether)

E, P, J, Q, B, L,



Θεμελιώδης
κατάσταση
μη συμμετρική



ΣωματΙΑ με
μάζα=0

(Goldstone)

Φωνόνια, κύματα σπιν,
πιόνια,

ΝΟΜΟΙ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΛΛ/ΣΕΩΝ *



	Βαρυτική	Ισχυρή	Ηλ/κή	Ασθενής
Q	✓	✓	✓	✓
B	✓	✓	✓	✓
L	✓	✓	✓	✓
S	✓	✓	✓	X ($\Delta S=0, \pm 1$)
I	✓	✓	X	X
I₃	✓	✓	✓	X
P	✓	✓	✓	X (!!!)
C	✓	✓	✓	X
CP	✓	✓	✓	X

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

1. ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ *

ΕΙΔΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (I)

- Αντίδραση που έχει μόνο αδρόνια και δεν παραβιάζει τίποτε είναι **ισχυρή**



- Αν μια αντίδραση παραβιάζει έναν ή περισσότερους από τους κβαντικούς αριθμούς S, I₃, P, C, CP, είναι **ασθενής**.

ΕΙΔΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (II)



- Μια αντίδραση που παραβιάζει μόνο το I είναι **ηλεκτρομαγνητική ή ασθενής**.



- Μια αντίδραση στην οποία συμμετέχει νεutrino ή αντineutrino είναι **ασθενής**.



- Μια αντίδραση στην οποία συμμετέχει φωτόνιο είναι **ηλεκτρομαγνητική**.



Αν μια αντίδραση δεν παραβιάζει τίποτε;;

2. Ιδιότητες της Ισχυρής Δύναμης

Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΔΡΟΝΙΩΝ



**Μόνο ΑΧΡΩΜΕΣ ελεύθερες
καταστάσεις στη Φύση.
Έχουν μέγεθος ~ 1 fermi**

- $[q_1 q_2 q_3]$ • $[q_1 \bar{q}_2 + q_1 \bar{q}_2 + q_1 \bar{q}_2]$
- Ελεύθερα quarks: ΟΧΙ
- Ελεύθερα gluons: ΟΧΙ
- **glueballs**: κατ' αρχήν ΝΑΙ

Βαρυόνια ($q_1 q_2 q_3$)

$$B=1, L=0$$

*

(**u****u****d**)

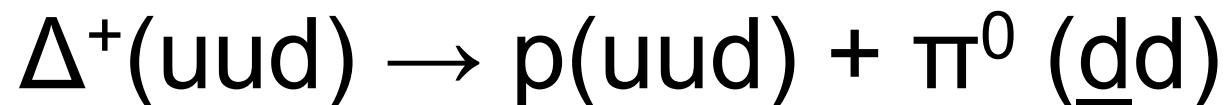
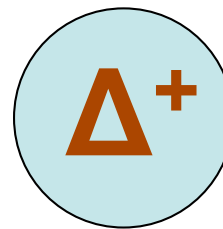
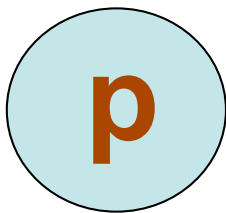
$$Q=2/3+2/3-1/3=1$$

$$S=0+0+0=0$$

$$\text{Spin}=1/2, 3/2, 5/2, \dots$$

$$M \sim 0.94 \text{ GeV}/c^2$$

$$M \sim 1.232 \text{ GeV}/c^2$$



(udd)

$$B=1, L=0$$

*

$$Q=2/3-1/3-1/3=0$$

$$S=0+0+0=0$$

$$\text{Spin}=1/2, 3/2, 5/2, \dots$$

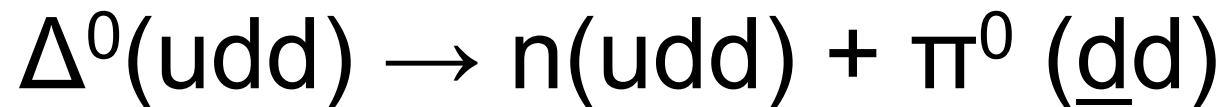
$$M \sim 0.94 \text{ GeV}/c^2$$

n

$$M \sim 1.23 \text{ GeV}/c^2$$

Δ^0

.....



(sss) $B=1, L=0, Q=-1/3-1/3-1/3=-1$

$S=-1-1-1=-3$ *

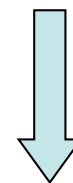
spin=3/2, 5/2, ... $I=0$

$M \sim 1.67 \text{ GeV}/c^2$

.....

? Ω^-

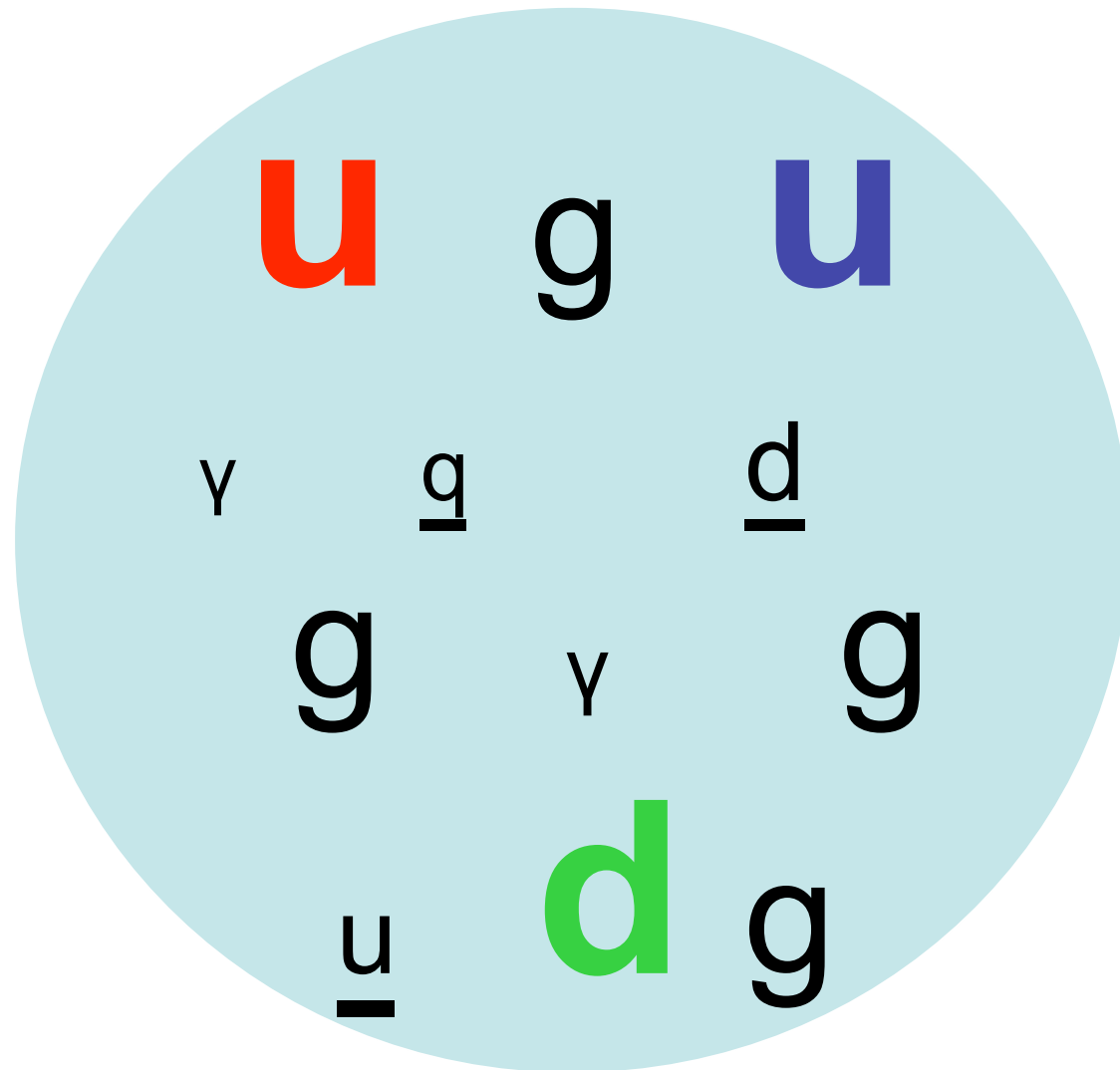
Pauli (?)



$\Omega^-(sss) \rightarrow \Lambda^0(uds) + K^-(\underline{u}s)$
ασθενής !!

X P Ω M A

Πρωτόνιο



Μεσόνια ($q\bar{q}$)

$B=0, L=0$ *

spin=0, 1, 2, ...

- spin=0

($u\bar{d}$) $Q=+1, S=0, M=...$ π^+

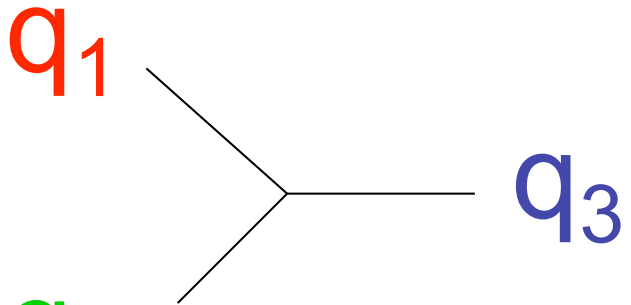
($\bar{u}d$) π^-

($s\bar{u}$) $Q=-1, S=-1, M=...$ K^-

- spin=1 ($u\bar{d}$)= ρ^+ ($\bar{u}d$)= ρ^- ($s\bar{u}$)= K^{*+}

Ας προσπαθήσουμε να απομονώσουμε ένα quark

*



$$B \rightarrow B' + M$$

q_2

$$\gamma + p \rightarrow p + \pi$$

q_1



q_2

q_1



q_2

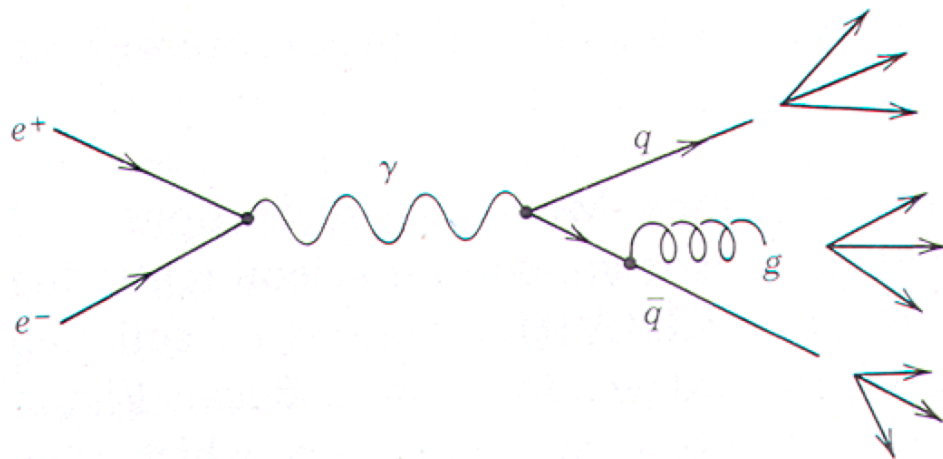
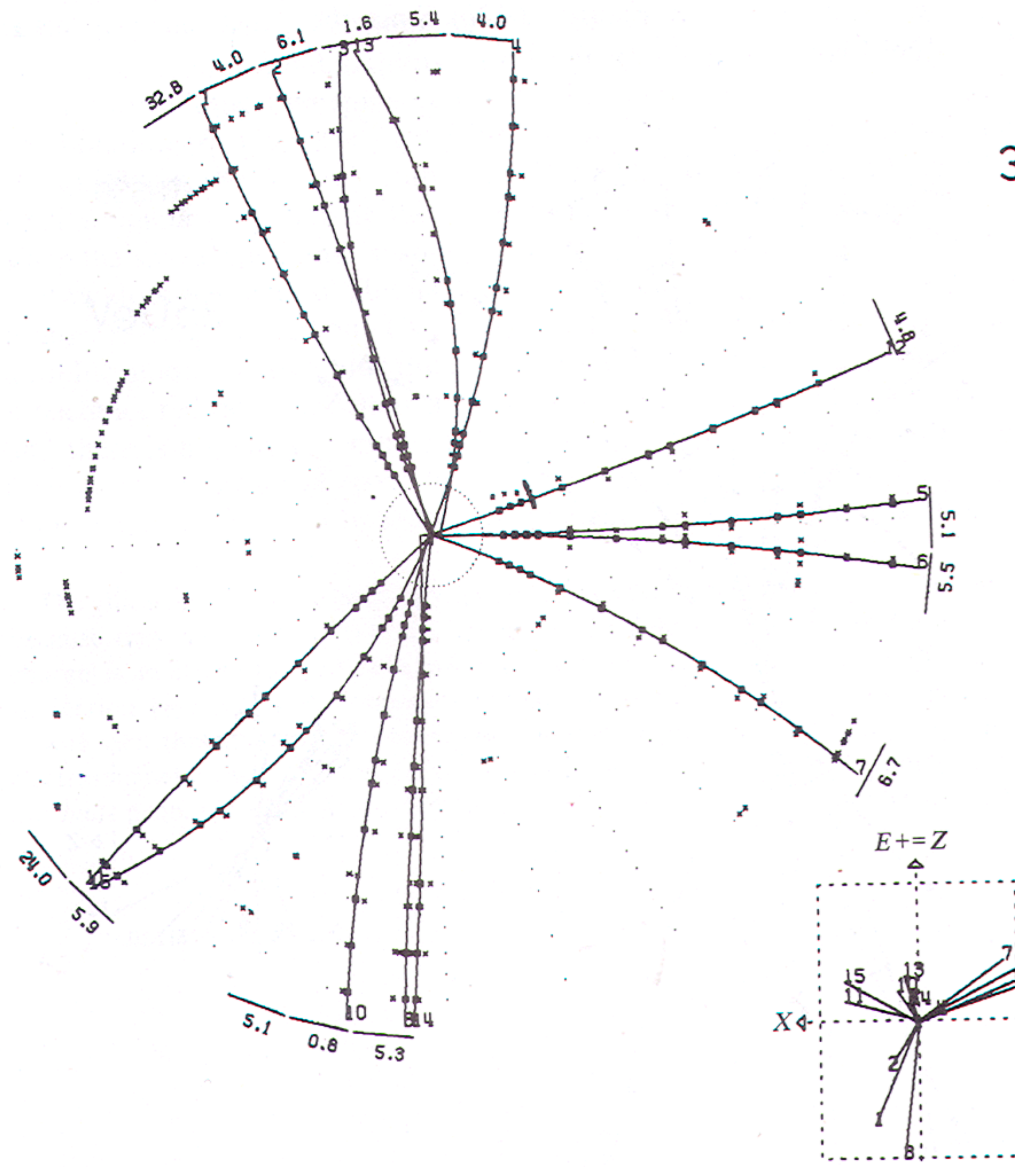


Figure 18-19 Gluon emission in e^+e^- production of a quark-antiquark pair. At large center of mass energies this process gives three jets of hadrons.

TASSO

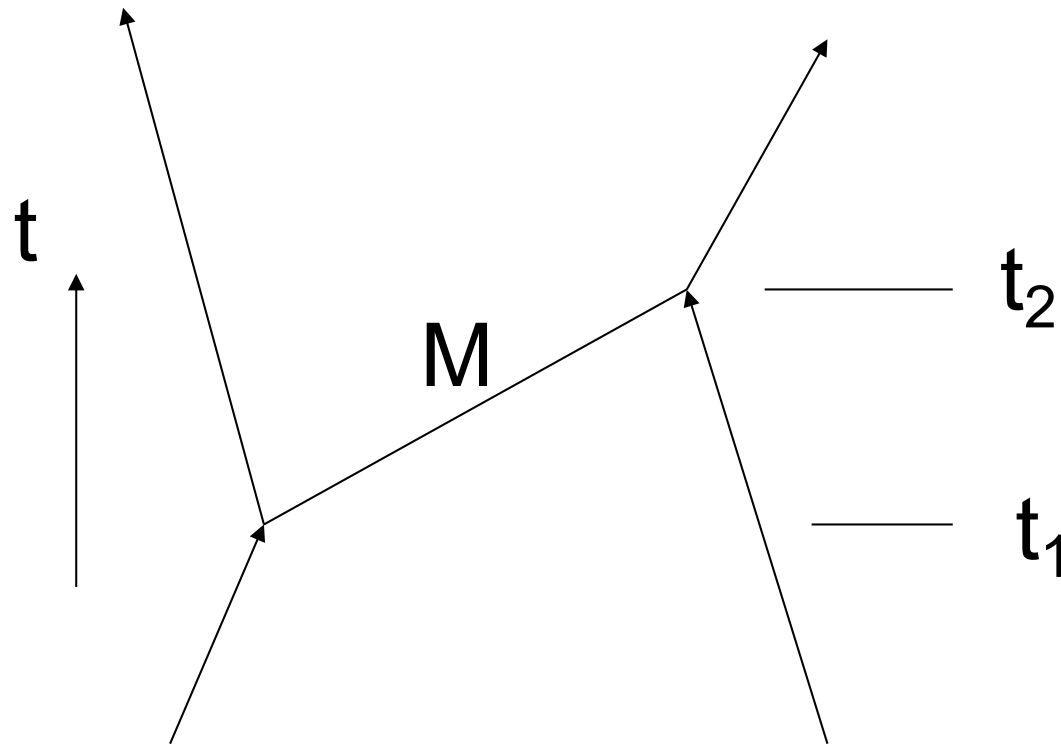
35GeV



36152

Figure 18-20 Example of a three-jet event in e^+e^- collisions at PETRA (Hamburg), as found in the TASSO detector.

3. ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΑΛΛΩΣΗΣ με φορέα μάζας M *



$$\Delta E \sim Mc^2$$

$$\Delta E(t_2 - t_1) \sim \hbar$$

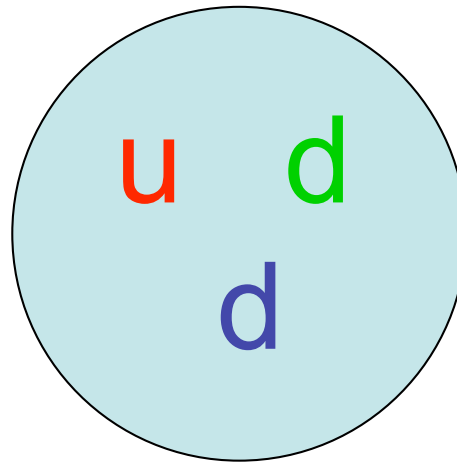
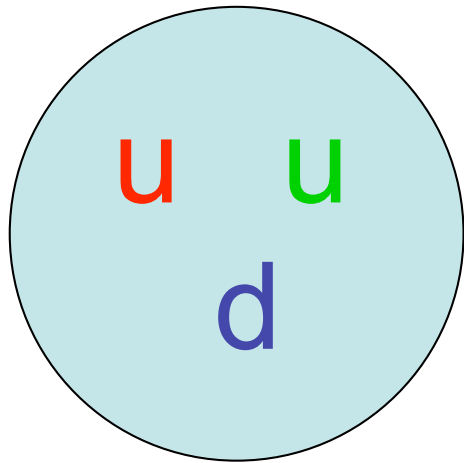
$$t_2 - t_1 \sim \hbar/Mc^2$$

Εμβέλεια:

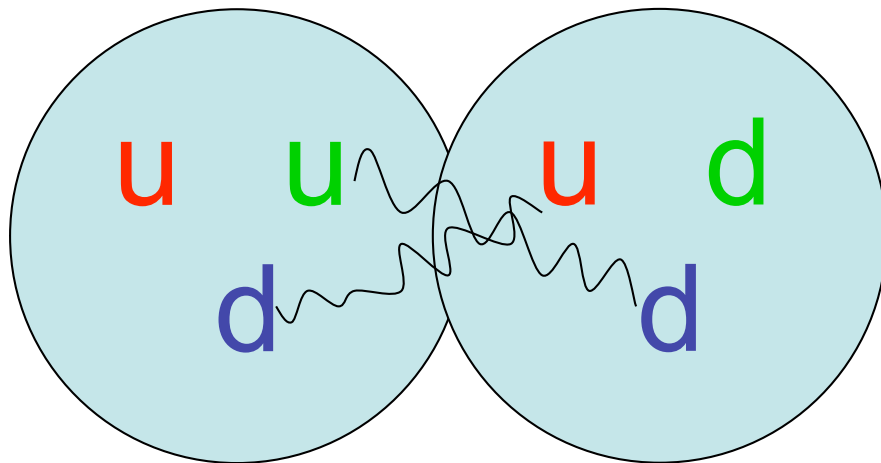
$$l \sim c(t_2 - t_1) \sim \frac{\hbar}{Mc}$$

$$l_{weak} \sim 10^{-15} cm, \quad l_{em} = l_{grav} = \infty$$

A1. Εμβέλεια ισχυρής πυρηνικής δύναμης *



$$\mathbf{F} \simeq \mathbf{0}$$



$$\mathbf{F} \neq \mathbf{0}$$

εμβέλεια ~ 1 fermi

4. **ΕΝΤΑΣΗ** αλληλεπίδρασης



Ενταση αλληλεπίδρασης σχετίζεται με την ενεργό διατομή αν είναι σκέδαση, ή τον μέσο χρόνο ζωής αν πρόκειται για διάσπαση.

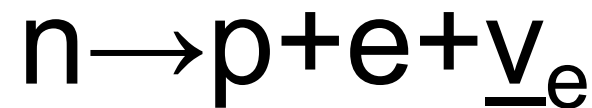
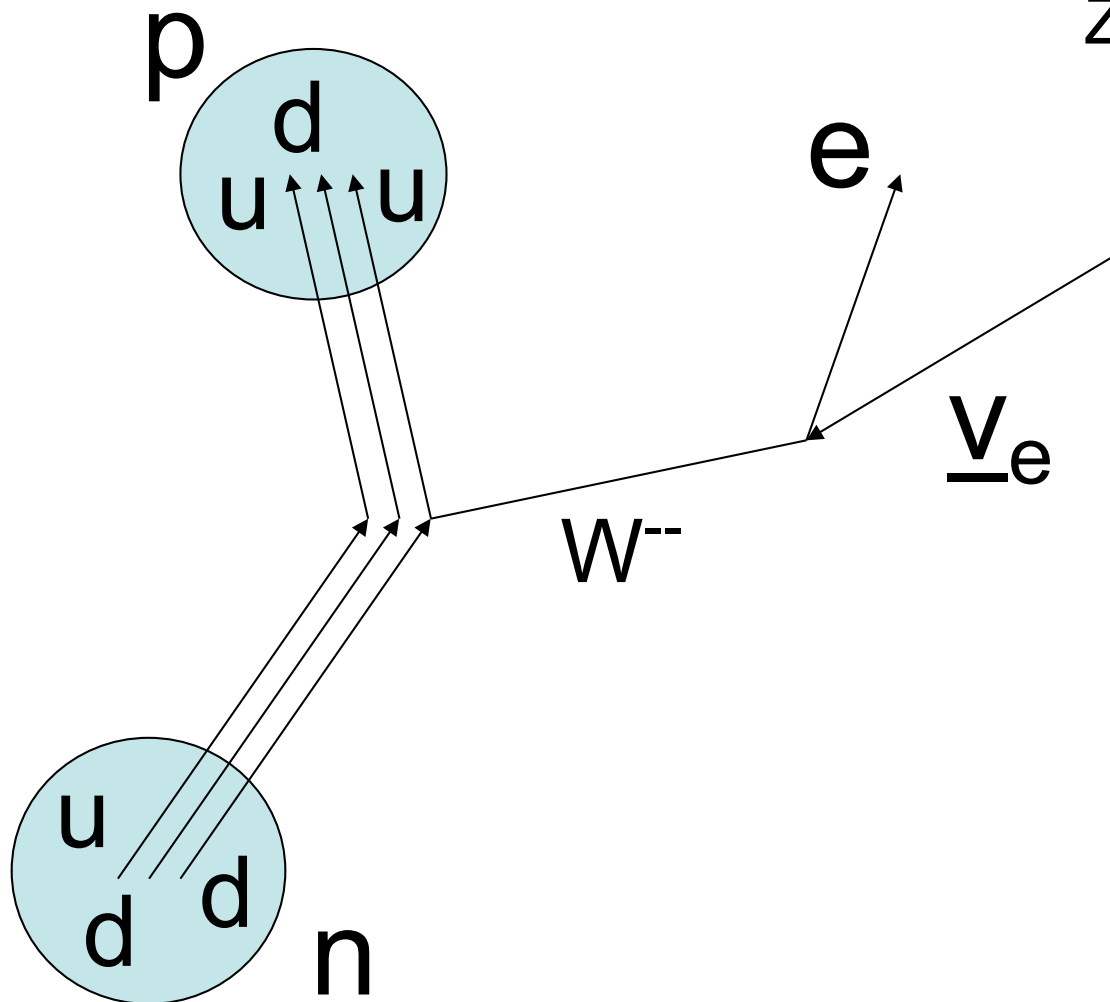
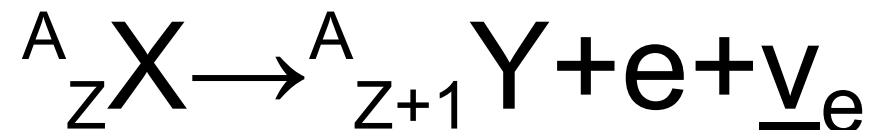
Και αντίστροφα. Αν γνωρίζω το είδος της αλληλεπίδρασης που είναι υπεύθυνη για μία αντίδραση, τότε μπορώ να εκτιμήσω την **ενεργό διατομή της ή τον μέσο χρόνο ζωής**, αν πρόκειται για διάσπαση.

Επίσης, γνωρίζω ότι ο αντίστοιχος φορέας θα υπεισέρχεται στην αναπαράσταση της αντίδρασης με **διάγραμμα Feynman**

5. Περιγραφή ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

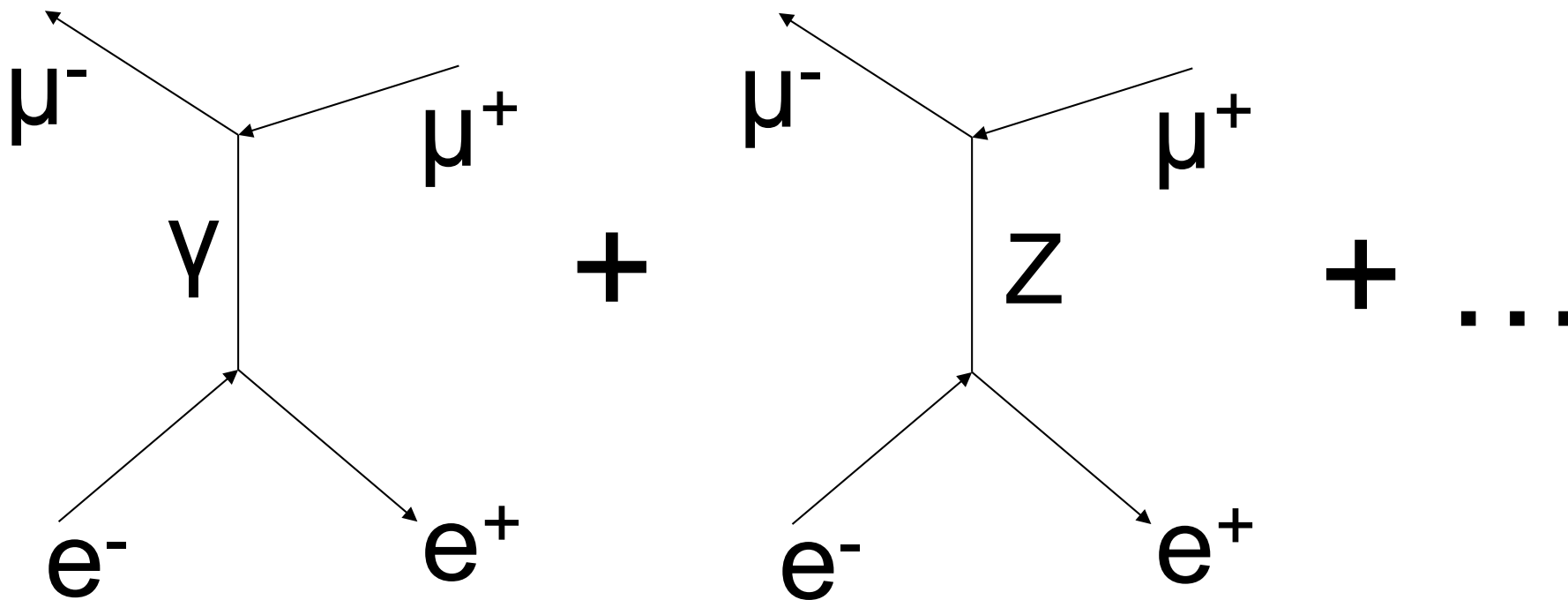
*

5α. Ραδιενέργεια-β

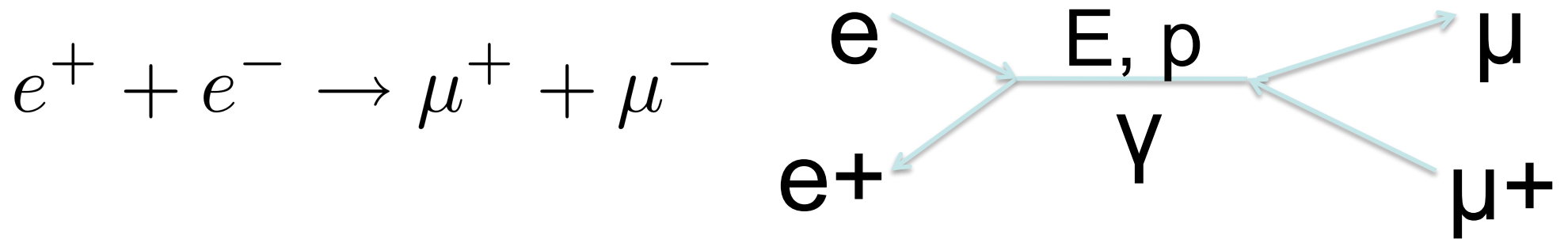


$$5\beta. e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

*



5γ. Κάθε διάγραμμα συμβολίζει και έναν υπολογισμό πλάτους πιθανότητας



$$\mathcal{M} = [\bar{v}(E_2, p_2, s_2) \gamma^\mu u(E_1, p_1, s_1)] \frac{e^2}{E^2 - p^2} [\bar{u}(E_3, p_3, s_3) \gamma_\mu v(E_4, p_4, s_4)]$$

$$\mathcal{M} \sim \frac{(\psi_{e^+}^* V^\alpha \psi_e) (\psi_\mu^* V^\alpha \psi_{\mu^+})}{E^2 - p^2 c^2}, \quad V^\alpha = e \gamma^0 \gamma^\alpha$$

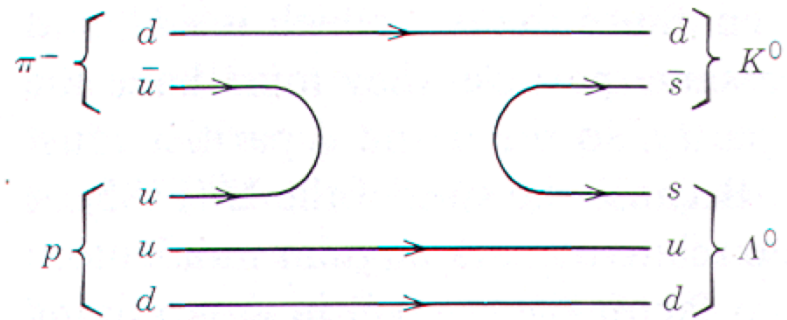
Amplitude = (ampl. $ee^+ \rightarrow \gamma$) \times (ampl. of γ propagation) \times (ampl. $\gamma \rightarrow \mu\mu^+$)

$$\sigma \simeq \frac{4\pi\alpha^2}{3E_{cm}^2}, \quad E_{cm} \gg m_\mu \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi} \simeq \frac{1}{137}$$

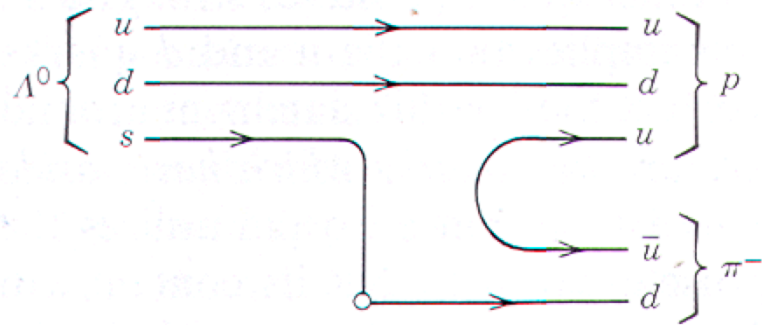
5δ. Άλλες αντιδράσεις

*

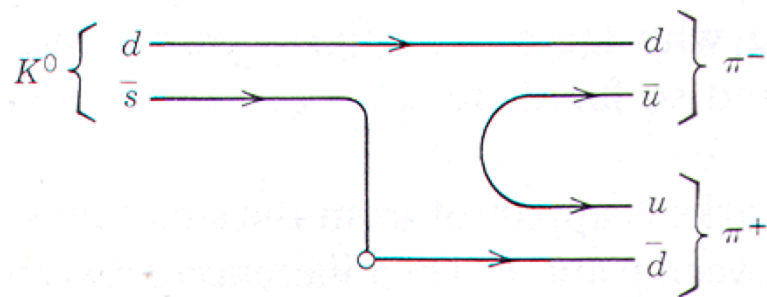
- $e^+ + e^- \rightarrow p(uud) + \underline{p}(\underline{uud})$
- $\Delta^{++}(uuu) \rightarrow p(uud) + \pi^+(u\underline{d})$
- $\pi^-(\underline{u}d) + p(uud) \rightarrow \Lambda^0(uds) + K^0(d\underline{s})$
- $\Lambda^0(uds) \rightarrow p(uud) + \pi^-(d\underline{u})$



(a)



(b)



(c)

Figure 18-9 Quark flow diagrams showing (a) strangeness conservation (production of an $s\bar{s}$ pair of quarks) in the strong reaction $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ and strangeness violation in the weak decays (b) $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ and (c) $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$. In the decays the weak interaction is represented by a circle, but this will be treated more completely in Section 18-8.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

ΕΠΙΤΥΧΙΑ !!!

ΑΝΟΙΚΤΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

ΕΝΤΥΠΩΣΙΑΚΗ ΕΠΙΤΥΧΙΑ

A. Ο,τι έχει υπολογιστεί θεωρητικά επαληθεύεται από το πείραμα

- Μαγνητική ροπή e $1:10^{12}$
- Μάζες φορέων ασθενών αλ/σεων $1:10^4$
- Κίνηση πλανητών $1:10^6$

B. Άλλες προβλέψεις

Ω^- , W^\pm , c , ν ,..., αντισωματάρια
παραβίαση parity,.....

Ανοικτά ερωτήματα (2011)

- ◆ 25 παράμετροι
- ◆ Κβάντωση ηλεκτρικού φορτίου
- ◆ 3+1 διαστάσεις του χωρόχρονου
- ◆ Ενταση των αλληλεπιδράσεων
- ◆ Κβαντική βαρύτητα
- ◆ 8 γλοιόνια, 3 ασθενείς φορείς, 1 φωτόνιο

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΙΔΕΕΣ (2011)

- Ενοποιημένες θεωρίες
- Υπερσυμμετρία
- Θεωρία χορδών
- Επιπλέον διαστάσεις
- D-brane worlds
- Μίνι μελανές οπές

ΤΙ ΕΛΠΙΖΟΥΜΕ ΝΑ ΜΑΣ ΠΕΙ Ο LHC

Σωματίο Higgs
Υπερσυμμετρία

TeV scale gravity and LED

Επιπλέον διαστάσεις
Μίνι μελανές οπές

Kaluza
Klein
Antoniadis
Bachas
Kiritsis
Tomaras
Mironov
Morozov
Dimopoulos
Arkani-Hamed
Dvali

.....

.....