Μετασχηματισμοί Lorentz

- Σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας οι νόμοι της φυσικής είναι ανεξάρτητοι από το αν το σύστημα αναφοράς κινείται ή είναι ακίνητο.

$x'=\gamma(x-vt)$, $y'=y$, $z'=z$, $t'=\gamma(t-vx/c^2)$

$x=\gamma(x'+vt')$, $y=y'$, $z=z'$, $t=\gamma(t'+vx'/c^2)$

$\gamma=(1-v^2/c^2)^{-1/2}$

1. Η σχετικότητα του ταυτόχρονου

$t_A=t_B \rightarrow t'_A = t'_B+\gamma v(x_A-x_B)/c^2$

2. Συστολή του μήκους

$L=L'/\gamma$

Κινούμενα αντικείμενα φαίνονται μικρότερα

3. Διαστολή του χρόνου

$T=\gamma T'$

Κινούμενα ρολόγια πάνε πιο αργά

4. Πρόσθεση ταχυτήτων

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{\Delta x'+v\Delta t'}{\Delta t'+(v/c^2)\Delta x'}=\frac{(\Delta x'/\Delta t')+v}{1+(v/c^2)(\Delta x'/\Delta t')}$$

$$u=\frac{u'+v}{1+(u'v/c^2)}$$

$c+c=c$

Γ. Τσιπολίτης

Τετραδιανύσματα

Για ευκολία ορίζουμε το τετραδιάνυσμα του χωρο-χρόνου x^μ , μ=0, 1, 2, 3

$$x^0 = ct\ , \quad x^1 = x\ , \quad x^2 = y\ , \quad x^3 = z$$

ο μετασχηματισμός του Lorentz γράφεται:

$$x^{0'} = \gamma(x^0 - \beta x^1)$$

$$x^{1'} = \gamma(x^1 - \beta x^0)$$

$$x^{2'} = x^2$$

$$x^{3'} = x^3$$

$$x^{\mu'} = \sum_{\nu=0}^{3} \Lambda_\nu{}^\mu x^\nu \qquad (\mu = 0, 1, 2, 3)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \gamma & -\gamma\beta & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x^{\mu'} = \Lambda_\nu{}^\mu x^\nu$$

Τετραδιανύσματα

Παρότι οι συντεταγμένες αλλάζουν από το ένα σύστημα συντεταγμένων από το ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο όμως το μέγεθος

$$I \equiv (x^0)^2-(x^1)^2-(x^2)^2-(x^3)^2=(x^{0\prime})^2-(x^{1\prime})^2-(x^{2\prime})^2-(x^{3\prime})^2$$

παραμένει αναλλοίωτο (ανάλογο είναι το $r^2=x^2+y^2+z^2$ σε στροφές)

θα μπορούσαμε να γράψουμε την αναλλοίωτη ποσότητα σαν $\sum_{\mu=0}^{3} x^\mu x^\mu$

για να αποφύγουμε την ύπαρξη του " - " εισάγουμε την "μετρική"

$$g_{\mu\nu}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

`

$$I=g_{\mu\nu}\, x^\mu\, x^\nu$$

ορίζουμε σαν "συναλλοίωτο (covariant)" το 4-διάνυσμα $x_\mu \equiv g_{\mu\nu}\, x^\mu$

συνεπώς $I= x_\mu\, x^\mu$

ανταλλοίωτο (contravariant)

Γ. Τσιπολίτης

Τετραδιανύσματα

- έχοντας σαν πρότυπο το 4-διάνυσμα του χωροχρόνου ορίζουμε ένα οποιοδήποτε 4-διάνυσμα, a^μ, σαν ένα αντικείμενο που έχει 4 συντεταγμένες και μετασχηματίζεται σαν $\mathbf{a^{\mu\prime} = \Lambda_\nu{}^\mu a^\nu}$

επίσης ορίζουμε το συναλλοίωτο και ανταλλοίωτο 4-διάνυσμα

συναλλοίωτο : $a_\mu = g_{\mu\nu} a^\nu$ ανταλλοίωτο : $a^\mu = g^{\mu\nu} a_\nu$

$g^{\mu\nu}$ είναι g^{-1} αλλά $g^{\mu\nu} = g_{\mu\nu}$

ορίζουμε το εσωτερικό γινόμενο δύο 4-διανυσμάτων, a^μ και b^μ την ποσότητα

$$a \cdot b \equiv a_\mu b^\mu = a^\mu b_\mu = a^0 b^0 - a^1 b^1 - a^2 b^2 - a^3 b^3$$

$$a \cdot b = a^0 b^0 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$$

$$a^2 \equiv a \cdot a = (a^0)^2 - \mathbf{a}^2$$

$a^2 > 0 \rightarrow a^\mu$ "timelike"

$a^2 < 0 \rightarrow a^\mu$ "spacelike"

$a^2 = 0 \rightarrow a^\mu$ "lightlike"

για τα συναλλοίωτα αλλάζει ο ορισμός

Ενέργεια και Ορμή

- έστω ότι κινούμαστε με ταχύτητα κοντά στο c. για καποιο ακίνητο παρατηρητή στο έδαφος ο στοιχειώδης χρόνος είναι dt ενώ για μας είναι dt/γ. Για τον δικό μας χρόνο (proper time) έχουμε

$$d\tau = dt/\gamma$$

από τον ορισμό της ταχύτητας έχουμε υ=dx/dt.

Ορίζουμε την δική μας "proper" ταχύτητα : $\eta \equiv dx/d\tau$ δηλαδή $\eta = \gamma\upsilon$

(για την ταχύτητα στο S έχουμε dx/dt και στο S' dx'/dt'. για την "proper" ταχύτητα μόνο ο αριθμητής αλλάζει γιατί το dτ είναι αμετάβλητο)

Ορίζουμε το 4-διάνυσμα της ταχύτητας:

$$\eta^{\mu} = \frac{dx^{\mu}}{d\tau}$$

$$\eta^{0} = \frac{dx^{0}}{d\tau} = \frac{d(ct)}{(1/\gamma)dt} = \gamma c \qquad \rightarrow \qquad \eta^{\mu} = \gamma(c, \upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$$

$$\eta_{\mu}\eta^{\mu} = \gamma^2(c^2 - \upsilon_x^2 - \upsilon_y^2 - \upsilon_z^2) = \gamma^2 c^2 (1 - \upsilon^2/c^2) = c^2$$

Ενέργεια και Ορμή

- Αν ορίσουμε την ορμή με τον κλασσικό τρόπο mu τότε η ορμή δεν διατηρείται στους μετασχηματισμούς Lorentz.
- Μπορούμε να "σώσουμε" τη διατήρηση της ορμής ορίζοντάς την $p \equiv m\eta$
- Από τη στιγμή που η "proper" ταχύτητα είναι 4-διάνυσμα το ίδιο είναι και η ορμή

$$p^\mu = m\eta^\mu$$

για τη "χωρική" συντεταγμένη έχουμε

$$\vec{p} = \gamma m \vec{\upsilon} = \frac{m\vec{\upsilon}}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$$

για τη χρονική συνταταγμένη έχουμε $p = \gamma mc$

Ορίζουμε: $E = \gamma mc^2$ άρα η 0 συντεταγμένη της ορμής είναι E/c

άρα $p^\mu = (E/c, p_x, p_y, p_z)$

$$\rightarrow \quad p_\mu p^\mu = E^2/c^2 - \mathbf{p}^2 = m^2c^2$$

Ενέργεια και Ορμή

- σχετικιστική ενέργεια

$$E=\gamma mc^2=\frac{mc^2}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}=mc^2\left(1+\frac{1}{2}\frac{\upsilon^2}{c^2}+\frac{3}{8}\frac{\upsilon^4}{c^4}+\cdots\right)$$

- σχετικιστική κινητική ενέργεια

$$T=mc^2(\gamma-1)=\frac{1}{2}m\upsilon^2+\frac{3}{8}m\frac{\upsilon^4}{c^2}+\cdots$$

- σχετικιστική μάζα

$$m_{rel}\equiv\gamma m$$

Κρούσεις

- Κλασσικά
  - διατηρείται ΠΑΝΤΑ η ορμή, $\vec{p}$
  - διατηρείται ΠΑΝΤΑ η μάζα
  - Μερικές φορές διατηρείται η κινητική ενέργεια
  - διατηρείται ΠΑΝΤΑ η συνολική ενέργεια

  - Σχετικιστικά
    - διατηρείται ΠΑΝΤΑ η ορμή, $\vec{p}$
    - Μερικές φορές φορές διατηρείται η μάζα
    - Μερικές φορές διατηρείται η κινητική ενέργεια
    - διατηρείται ΠΑΝΤΑ η συνολική ενέργεια

ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ Η 4-ΟΡΜΗ

Διατηρούμενες vs Αναλλοίωτες ποσότητες

- Λέμε ότι μια ποσότητα διατηρείται όταν σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων παραμένει η ίδια πριν και μετά από κάποιο γεγονός
- Λέμε ότι μια ποσότητα είναι αναλλοίωτη όταν παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από το σύστημα συντεταγμένων
- Η ενέργεια είναι διατηρούμενη ποσότητα αλλά δεν είναι αναλλοίωτη
- Η μάζα είναι αναλλοίωτη ποσότητα αλλά δεν είναι διατηρούμενη

Παραδείγματα

- Στο πείραμα BABAR συγκρούονται δέσμες e^- (9 GeV) με δέσμες e^+ (3.1 GeV)
  - ποιες είναι οι ταχύτητες των συγκρουόμενων σωματιδίων;

m_e=0.511 MeV και E=γm → γ_-=17600 γ_+=6070

αλλά

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow \beta = \sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}} \simeq 1 - \frac{1}{2\gamma^2}$$

$$\upsilon_- = (1-10^{-9})c$$
$$\upsilon_+ = (1-10^{-8})c$$

ποιες είναι οι ενέργειες στο κέντρο μάζας(CM)

- βρίσκουμε την ταχύτητα του CM με την απαίτηση

$$\upsilon_- = \upsilon_+$$

- Υπολογίζουμε τις ταχύτητες των e^+ e^-
- Υπολογίζουμε τις ενέργειες

Χρονοβόρο !!

Χρησιμοποιούμε αναλλοίωτα μεγέθη για να πάμε από το σύστημα του εργαστηρίου στο CM

Εύκολο / Κομψό !!

ποιες είναι οι ενέργειες στο κέντρο μάζας(CM);

- στο CM έχουμε:

$$p_{e^-} = (E_{CM-}, \vec{p}_{CM-}) \qquad p_{e^+} = (E_{CM+}, \vec{p}_{CM+})$$

το αναλλοίωτο μέγεθος είναι:

$$\left(p_{e^-} + p_{e^+}\right)^2 = (2E_{CM}, 0)^2 = 4E_{CM}^2$$

- στο σύστημα του εργαστηρίου

$$p_{e^-} = (E_-, \vec{p}_-) \qquad p_{e^+} = (E_+, \vec{p}_+)$$

άρα $$\left(p_{e^-} + p_{e^+}\right)^2 = p_{e^-}^2 + p_{e^+}^2 + 2p_{e^-} \cdot p_{e^+} = m^2 + m^2 + 2(E_- E_+ - \vec{p}_- \cdot \vec{p}_+)$$

$$\simeq 2\left(E_- E_+ + |\vec{p}_-||\vec{p}_+|\right)$$

$$\simeq 4\, E_- E_+$$

$$E_{CM} = \sqrt{E_- E_+} = \sqrt{(9\ \text{GeV})(3.1\ \text{GeV})} = 5.3\ \text{GeV}$$

Πειράματα σταθερού στόχου vs συγκρουομένων δεσμών

- στο BaBar (9+3.1)=12.1 GeV ενέργεια δέσμης μας δίνει (2×5.3)=10.6 GeV ενέργεια στο CM
- Πόση ενέργεια πρέπει να έχει μια δέσμη ώστε να παράγει την ενέργεια του CM σε πείραμα σταθερού στόχου;
- τα 4-διανύσματα είναι: $\left(m,\vec{0}\right)$ και $\left(E,\vec{p}\right)$

$$\left(p_{e^-}+p_{e^+}\right)^2 = m^2+m^2+2\left[\left(m,\vec{0}\right)\cdot\left(E,\vec{p}\right)\right] \simeq 2Em$$

- άρα

$$2\,E\,m=4\,E_{CM}^2 \quad \Rightarrow \quad E = 10^5\ \text{GeV}$$

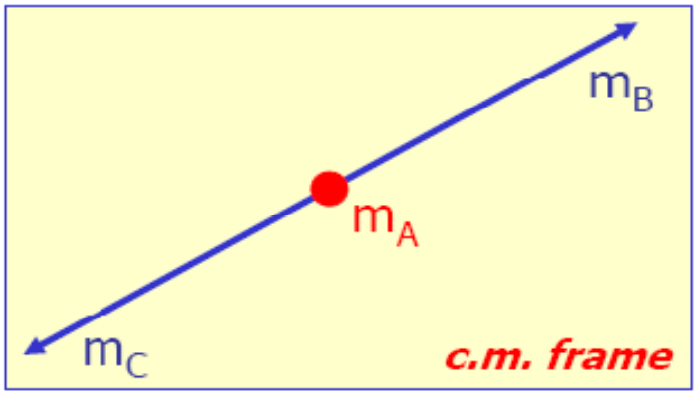
Διάσπαση σωματιδίων

- πριν:

$$p_A = (m_A, \vec{0})$$

- μετά:

$$p_B = (E_B, \vec{p}), \quad p_C = (E_C, -\vec{p})$$



$$E_C = \sqrt{m_C^2 + p^2} = \sqrt{m_C^2 + E_B^2 - m_B^2}$$

$$m_A = E_B + \sqrt{m_C^2 + E_B^2 - m_B^2} \quad \Leftrightarrow$$

$$(m_A - E_B)^2 = m_C^2 + E_B^2 - m_B^2 \Leftrightarrow$$

$$m_A^2 - 2m_A E_B = m_C^2 - m_B^2 \Leftrightarrow$$

$$E_B = \frac{m_A^2 + m_B^2 - m_C^2}{2m_A}$$

$\pi \rightarrow \mu + \nu$ **διάσπαση σε 2 σωματίδια**

- στο σύστημα CM τα σωματίδια βγαίνουν σε 180°
- τα 4-διανύσματα είναι $p_\pi=(m_\pi,\vec{0})$, $p_\mu=(E_\mu,\vec{p})$ και $p_\nu=(E_\nu,-\vec{p})$
- διατήρηση 4-ορμής $p_\pi=p_\mu+p_\nu$

$$p_\mu=p_\pi-p_\nu$$

$$p_\mu^2=\left(p_\pi-p_\nu\right)^2$$

$$m_\mu^2=p_\pi^2+p_\nu^2-2p_\pi\cdot p_\nu$$

$$m_\mu^2=m_\pi^2+0-2m_\pi E_\nu$$

$$\Rightarrow \quad E_\nu=\frac{m_\pi^2-m_\mu^2}{2m_\pi}$$

$\pi \rightarrow \mu + \nu$ διάσπαση σε 2 σωματίδια

- με τον ιδιο τρόπο

$$p_\nu = p_\pi - p_\mu$$

$$p_\nu^2 = \left(p_\pi - p_\mu\right)^2$$

$$0 = p_\pi^2 + p_\mu^2 - 2p_\pi \cdot p_\mu$$

$$0 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi E_\mu$$

$$\Rightarrow \quad E_\mu = \frac{m_\pi^2 + m_\mu^2}{2m_\pi}$$

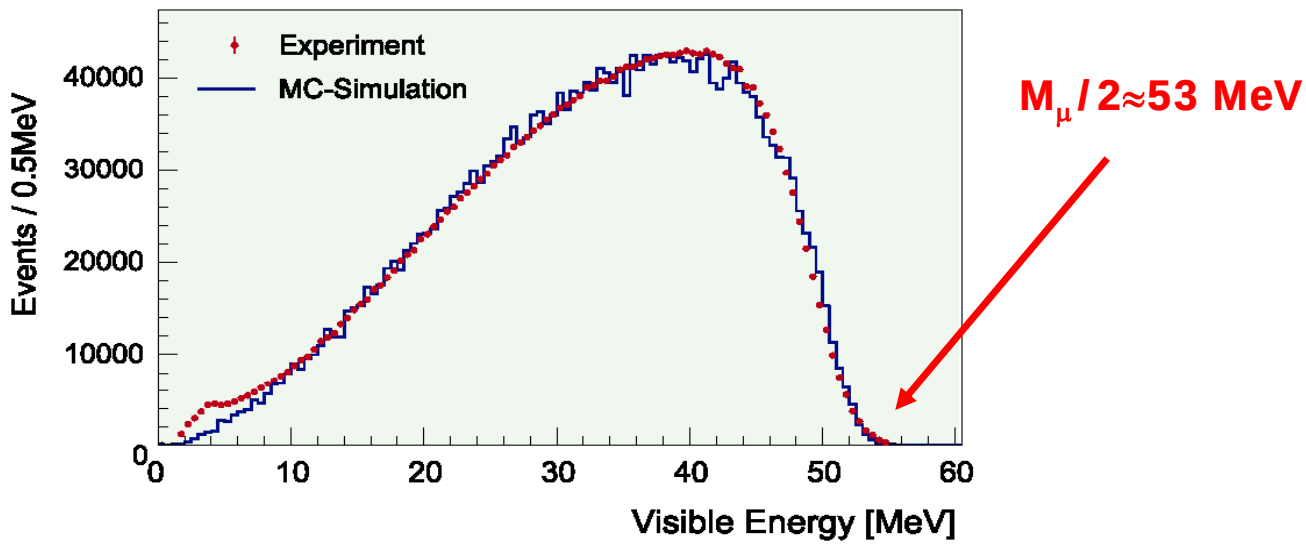
$$E_\nu + E_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} + \frac{m_\pi^2 + m_\mu^2}{2m_\pi} = m_\pi$$

διάσπαση σε 3 σωματίδια

πχ $$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

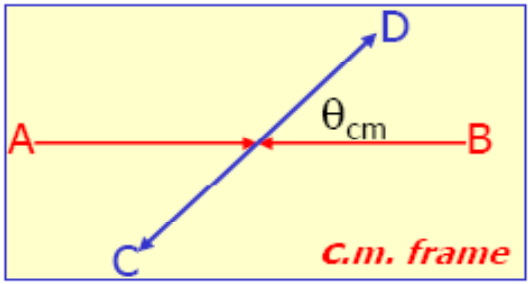
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

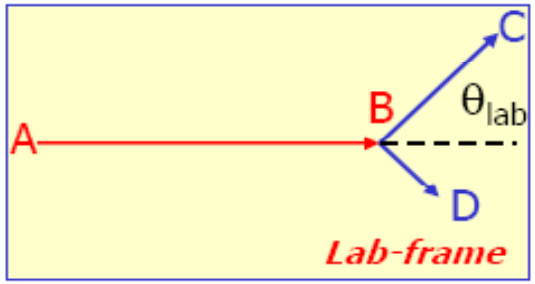
- οι ενέργειες των σωματιδίων της τελικής κατάστασης στο CM δεν είναι μοναδικές.
- η παρατήρηση της ενέργειας του ηλεκτρονίου έπαιξε σημαντικό ρόλο στην υπόθεση για την ύπαρξη του νετρίνο



Μεταβλητές Mandelstam

- Η αντίδραση $A+B \rightarrow C+D$ χαρακτηρίζεται από 2 μεταβλητές





στο CM E_A^{CM} & θ_{CM} στο lab E_A^{lab} & θ_{lab}

$$s = (p_A + p_B)^2 = (p_C + p_D)^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2E_A E_B - 2\vec{p}_A \cdot \vec{p}_B$$

$$t = (p_A - p_C)^2 = (p_B - p_D)^2 = m_A^2 + m_C^2 - 2E_A E_C + 2\vec{p}_A \cdot \vec{p}_C$$

$$u = (p_A - p_D)^2 = (p_B - p_C)^2 = m_A^2 + m_D^2 - 2E_A E_D + 2\vec{p}_A \cdot \vec{p}_D$$

- μεταβλητές που παραμένουν αμετάβλητες σε μετασχ. Lorentz

Μεταβλητές Mandelstam

$$s + t + u = 3p_A^2 + p_B^2 + p_C^2 + p_D^2 + 2p_A\left(p_B - p_C - p_D\right)$$

$$= p_A^2 + p_B^2 + p_C^2 + p_D^2$$

$$= m_A^2 + m_B^2 + m_C^2 + m_D^2$$

χρήσιμες εκφράσεις για τις s, u, t

lab : $p_A = \left(E_A, \vec{p}_A\right) \equiv \left(E_A, +\vec{p}\right)$ & $p_B = \left(m_B, \vec{0}\right)$

Ενέργεια του A: $s = \left(p_A + p_B\right)^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2E_A m_B$

$$E_A = \frac{\left(s - m_A^2 - m_B^2\right)}{2m_B}$$

Μεταβλητές Mandelstam

CM : $p_A = (E_A, \vec{p}_A) \equiv (E_A, +\vec{p})$ & $p_B = (E_B, \vec{p}_B) \equiv (E_B, -\vec{p})$

ενέργεια CM: $E = E_A + E_B = \sqrt{(E_A + E_B)^2} = \sqrt{s}$

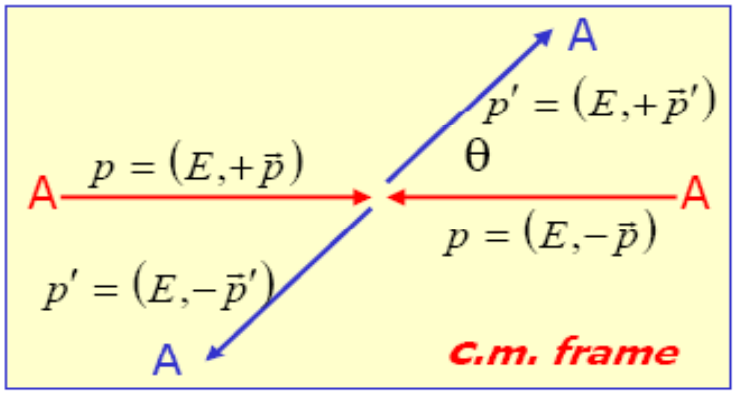
Ενέργεια του A: $E_A = \dfrac{(s + m_A^2 - m_B^2)}{2\sqrt{s}}$

για $A + A \to A + A$ στο CM

$$s = 4(p^2 + m^2)$$

$$t = -2p^2(1 - \cos\theta)$$

$$u = -2p^2(1 + \cos\theta)$$



Γ. Τσιπολίτης

Φερμιόνια & Μποζόνια

Φερμιόνια

Στατιστική Fermi-Dirac

spin ημιακέραιο $\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \frac{5}{2}\hbar \cdots$

δύο ταυτόσημα φερμιόνια, 1 & 2 έχουν αντισυμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

$$\Psi(1,2) = -\Psi(2,1)$$

Μποζόνια

Στατιστική Bose-Einstein

spin ακέραιο $0\hbar, 1\hbar, 2\hbar \ldots$

δύο ταυτόσημα μποζόνια , 1 & 2 έχουν συμμετρική κυματοσυνάρτηση στην εναλλαγή

$$\Psi(1,2) = \Psi(2,1)$$

Φερμιόνια & Μποζόνια

- εξάρτηση της ολικής κυματοσυνάρτησης από χωρικές συντεταγμένες και spin

$$\Psi = \Psi_a(\chi\acute{\omega}\rho o\upsilon)\cdot\Psi_b(spin)$$

$\Psi_a(1,2)=(-1)^{\ell}\cdot\Psi_a(2,1)$ — ℓ: κβαντικός αριθμός στροφορμής

$\Psi_b(1,2)=+\Psi_b(2,1)$ — παράλληλα ομόρροπα spin

$\Psi_b(1,2)=-\Psi_b(2,1)$ — παράλληλα αντίρροπα spin

Φερμιόνια	Μποζόνια
ℓ άρτιο → παράλληλα αντίρροπα	ℓ άρτιο → παράλληλα ομόρροπα
ℓ περιττό → παράλληλα ομόρροπα	ℓ περιττό → παράλληλα αντίρροπα

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

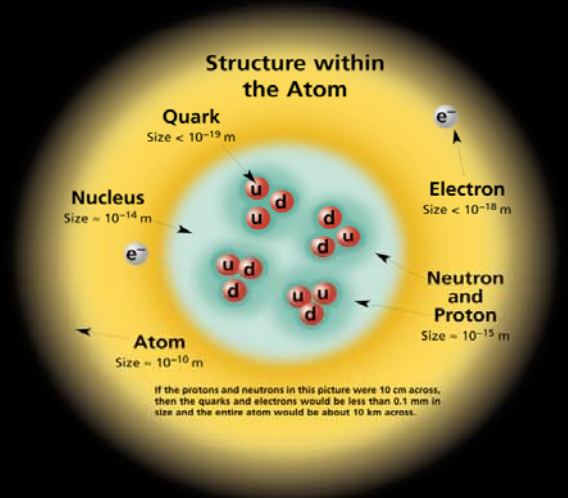
Quarks spin = 1/2

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 $\hbar$, 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.



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.

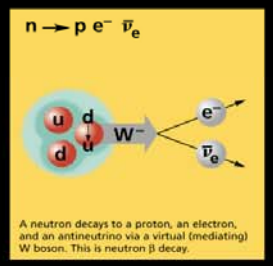
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	−1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	−1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

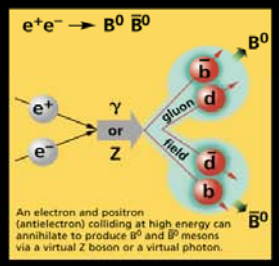
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	−1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

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.

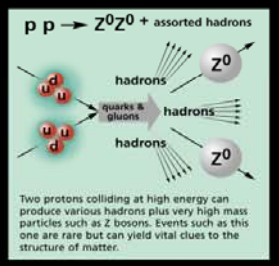
Figures
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are *not* exact and have *no* meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



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

Η Δομή του Ατόμου
Κουάρκ μέγεθος <10^-18 m
Πυρήνας μέγεθος ≈10^-10 m
Ηλεκτρόνιο μέγεθος <10^-18 m
Πρωτόνιο και Νετρόνιο μέγεθος ≈10^-15 m
Ατομο μέγεθος ≈ 10^-10 m
e⁻
e⁻
u
d

Οι Ιδιότητες των Αλληλεπιδράσεων

Αλληλεπίδραση / Ιδιότητα	Βαρύτητα	Ισχυρή: θεμελιώδης	Ισχυρή: ενισχυόμενη
επιδρά σε:	μάζα = ενέργεια	φορτίο χρώματος	Δες το σημείωμα για την Ενισχυόμενη Ισχυρή δύναμη
σωματίδια που επιδρά:	όλα	κουάρκ, γλουόνια	αδρόνια
σωματίδια φορείς:	βαρυτόνια	γλουόνια	μεσόνια
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: 10^{-18} m	10^{-41}	25	δεν ισχύει για κουάρκ
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: $3\ 10^{-17}$ m	10^{-41}	60	
για δύο πρωτόνια σε:	10^{-36}	δεν ισχύει για αδρόνια	20

Αλληλεπίδραση / Ιδιότητα	Ασθενής (ηλεκτροασθενής)	Ηλεκτρομαγνητική
επιδρά σε:	γεύση	ηλεκτρικό φορτίο
σωματίδια που επιδρά:	κουάρκ, λεπτόνια	ηλεκτρικά φορτισμένα
σωματίδια φορείς:	W W Z	γ
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: 10^{-18} m	0.8	1
ισχύς ως προς την Η-Μ για δύο u κουάρκ σε: $3\ 10^{-17}$ m	10^{-4}	1
για δύο πρωτόνια σε:	10^{-7}	1

Βασικά συστατικά φερμιονίων

- πειραματικά έχουν βρεθεί δύο θεμελιώδη φερμιόνια:

Κουάρκ & Λεπτόνια

Κουάρκ	Λεπτόνια
κλασματικά φορτία (+2/3|e|, -1/3|e|)	φορτία 0,+/-|e|
6 γεύσεις (flavor) – u,d,c,s,t,b	e,ν_e μ,ν_μ τ,ν_τ
Η/Μ, ισχυρές, ασθενείς	Η/Μ και ασθενείς

Fundamental Fermions

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

The word "quark" comes from Joyce's Finnegan's Wake: "Three quarks for Muster Mark". When Gell-Mann proposed quarks, only the u,d, and s quarks were thought to exist, and even then only as mathematical constructs.

10

Γ. Τσιπολίτης