# Bevezetés a részecskefizikába

## *Előadássorozat fizikatanárok részére (CERN, 2008. aug. 18-20.)*

**Horváth Dezső**

horvath@rmki.kfki.hu.

MTA KFKI Részecske– és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest
és ATOMKI, Debrecen

# Bevezetés a kísérleti részecskefizikába 1

## Vázlat

### A. Elemi részecskék

- Fermionok és bozonok
- Kvarkok és leptonok
- Összetett részecskék: mezonok és barionok
- Színes kvarkok
- Elemi kölcsönhatások
- A kvarkok töltése és színe: kísérlet

### B. A Standard Modell

- Szimmetriák és megmaradási törvények
- Mértékszimmetriák és kölcsönhatások
- Kvantumelektrodinamika és a foton
- Kvantumszíndinamika és a gluon, kvarkbezárás
- Higgs-mechanizmus
- Elektrogyenge kölcsönhatás

# Előszó

A (részecske)fizika egzakt tudomány:

- Pontos matematikai formalizmuson alapszik.
- A fizikai *fogalmak* mérhető mennyiségek, a szavak csak mankók.
- Elmélet érvényes, ha mérhető mennyiségeket számol, és az eredmény egyezik kísérlettel.

Az előadásom szavai mögött pontos matematika és kísérleti tapasztalat van.

Ha zavarosnak hat, az én hibám, nem az elméleté...

**Tessék kérdezni!**

# Elemi részecskék

## Elemi (és egyre elemibb) részecskék

Anaximenész: Föld — víz — tűz — levegő

Mengyelejev: Kémiai elemek
periodicitás, színkép $\Rightarrow$ atomok $\Rightarrow$ izotópok

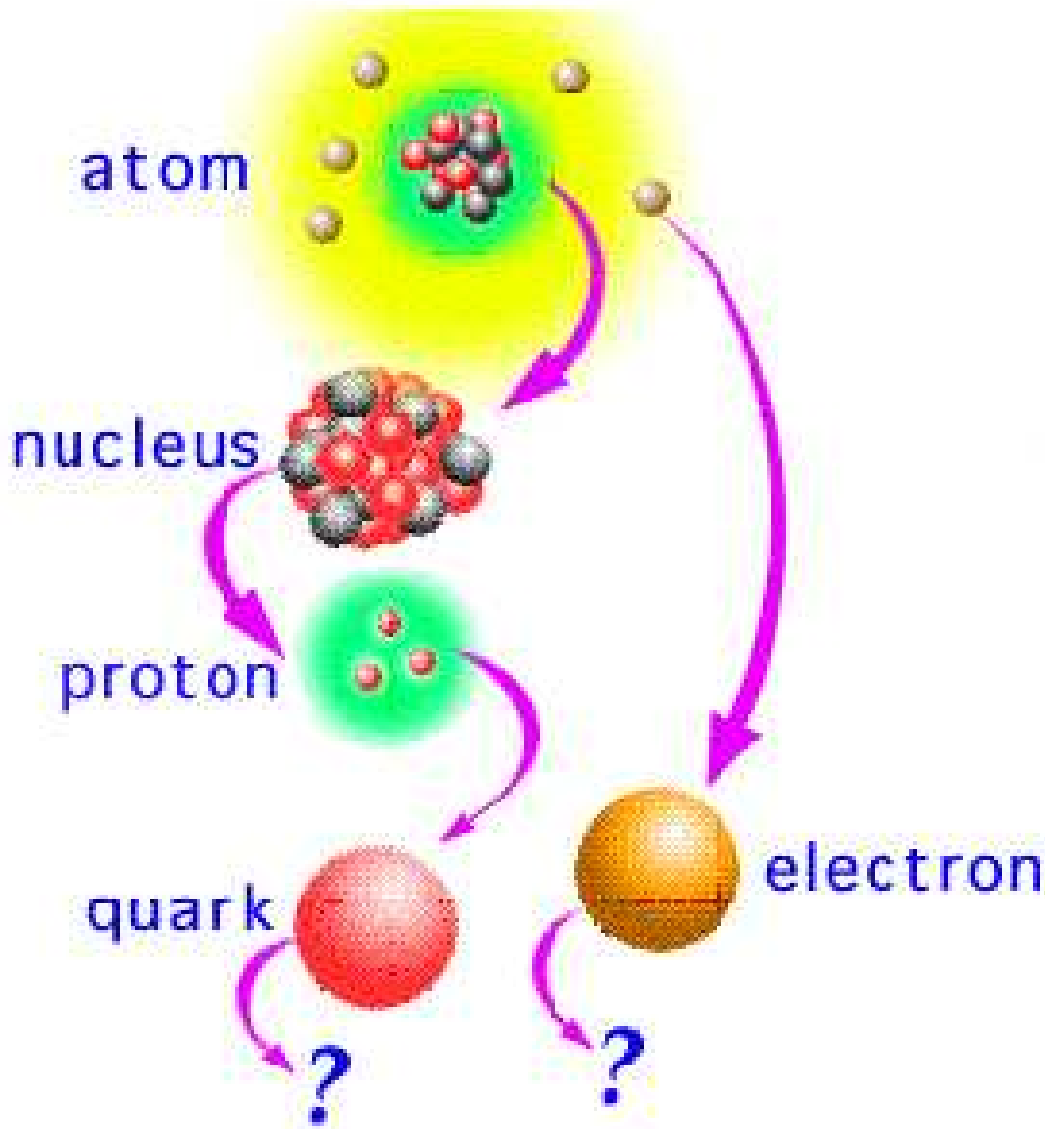
Rutherford: atommag + elektron $\Rightarrow$
proton, neutron, elektron

1930...60: sokszáz részecske
gerjesztett állapotok $\Rightarrow$ belső szerkezet!
3 kölcsönhatás: származtatás???

1970 óta: Standard Modell (David Gross: anyagelmélet)
Pontszerű leptonok, kvarkok, mértékbozonok

Kölcsönhatások szimmetriákból

# Az atomtól a kvarkig




$10^{-10}$ m

$10^{-14}$ m

$10^{-15}$ m

$< 10^{-18}$ m
pontszerű!

# A mikrovilág vizsgálata: energia

Planck-állandó:

$\hbar = h/(2\pi) = 1,055 \cdot 10^{-34}\mathrm{J} \cdot \mathrm{s} = 1$

Fénysebesség: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s $= 1$

Energia:

1 eV = kinetikus energia ($e^-$, $\Delta U$ = 1 V)

1 keV = $10^3$ eV; 1 MeV = $10^6$ eV;

1 GeV = $10^9$ eV; 1 TeV = $10^{12}$ eV

Einstein:

$E = mc^2 \Rightarrow [m] =$ GeV/$c^2$ = GeV

Heisenberg:

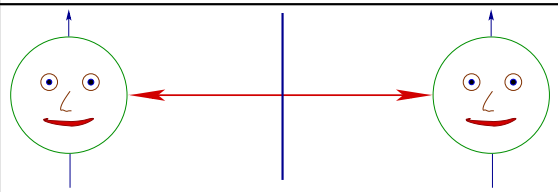
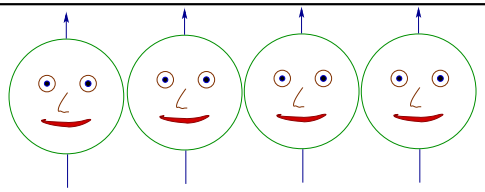
$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar/2; \quad \Delta p \cdot \Delta x \gtrsim \hbar/2$

| Tárgy | méret, m | energia |
|---|---|---|
| kicsi | $10^{-3}$ | |
| baktérium | $10^{-5}$ | |
| $\lambda$(fény) | $10^{-7}$ | 1 eV |
| atom | $10^{-10}$ | 1 keV |
| atommag | $10^{-14}$ | 1 GeV |
| elektron | $10^{-18}$ | 1 TeV |

Nagyobb energia $\Rightarrow$ kisebb távolság $\Rightarrow$ mélyebb szerkezet

# Fermionok és bozonok

Legfontosabb tulajdonság: spin (perdület) =
saját impulzusmomentum $\hbar = h/(2\pi)$ egységben

| Tulajdonság | fermion | bozon |
|---|---|---|
| Spin | feles ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$ ...) | egész (0, 1, 2, ...) |
| Részecskeszám megmaradása | van | nincs |
| Pauli-kizárás | van | nincs |
| Kondenzáció |  nincs |  van |

# Elemi (pontszerű!) részecskék

Elemi fermionok:
leptonok és kvarkok

Elemi bozonok:
kölcsönhatások közvetítői
+ Higgs-bozon

# Elemi fermionok $(S = \frac{1}{2})$

| | 1. család | 2. család | 3. család | töltés |
|---|---|---|---|---|
| Leptonok | $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$ | $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$ | $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$ | $0$<br>$-1$ |
| Kvarkok | $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ | $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$ | $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$ | $+\frac{2}{3}$<br>$-\frac{1}{3}$ |

Tömeg családdal $\nearrow$ nő; kvarkbomlás: $\downarrow$, majd $\nwarrow$

$(\ )_L$: gyenge kölcsönhatás sérti a paritás-szimmetriát
$\Rightarrow$ balos részecskepárok és jobbos antirészecskepárok

# Hadronok: összetett részecskék

Spin: $J = \sum_q \frac{1}{2}$ + pályamom. (1, 2, ...)

Mezonok = $q\bar{q}$-állapotok: $J = 0$, 1, ... (bozonok)

$Q = 0,\ \pm 1$

Barionok = qqq-állapotok: $J = \frac{1}{2},\ \frac{3}{2},\ \ldots$ (fermionok)

$Q = 0,\ \pm 1,\ \pm 2$

Nukleonok: $J = \frac{1}{2}$

proton = (uud), neutron = (udd) alapállapot

Pionok: $J = 0$

$$\pi^+ = (u\bar{d}),\quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}),\quad \pi^- = (d\bar{u})$$

# Színes kvarkok

## Bajok a kvarkmodellel

- $\Delta^{++}$ = (u↑u↑u↑)  3 azonos fermion, Pauli-kizárás??
- Mi tartja össze a hadronokat?
- Miért csak ($q\bar{q}$) és (qqq) hadronok, miért nincs szabad kvark?

**Új kvantumszám: 3 szín** $\begin{pmatrix} R(ed) \\ G(reen) \\ B(lue) \end{pmatrix}$

- $\Delta^{++}$ kvarkjai különböző kvantumállapotban
- Kvarkok között erős, vonzó szín–szín kölcsönhatás
- Csak színtelen állapotok szabadok (kvarkbezárás)

# Analógia színlátással

Kvarkok kvantumszáma, „szín” csak elnevezés

| Kvarkok színe | $\sim$ színlátás |
|---|---|
| Háromféle állapot | $\sim$ három alapszín |
| Antiszín | $\sim$ Kiegészítő szín |
| R+G+B = színtelen | $\sim$ R+G+B = fehér |
| szín + antiszín = színtelen | $\sim$ szín + kieg. szín = fehér |

# Színtelen kvarkállapotok

Mezon = $(\mathrm{q}\overline{\mathrm{q}})$; barion = qqq; antibarion = $(\overline{\mathrm{qqq}})$

q kvarkok azonosak vagy különbözők.

Bizonyíték:

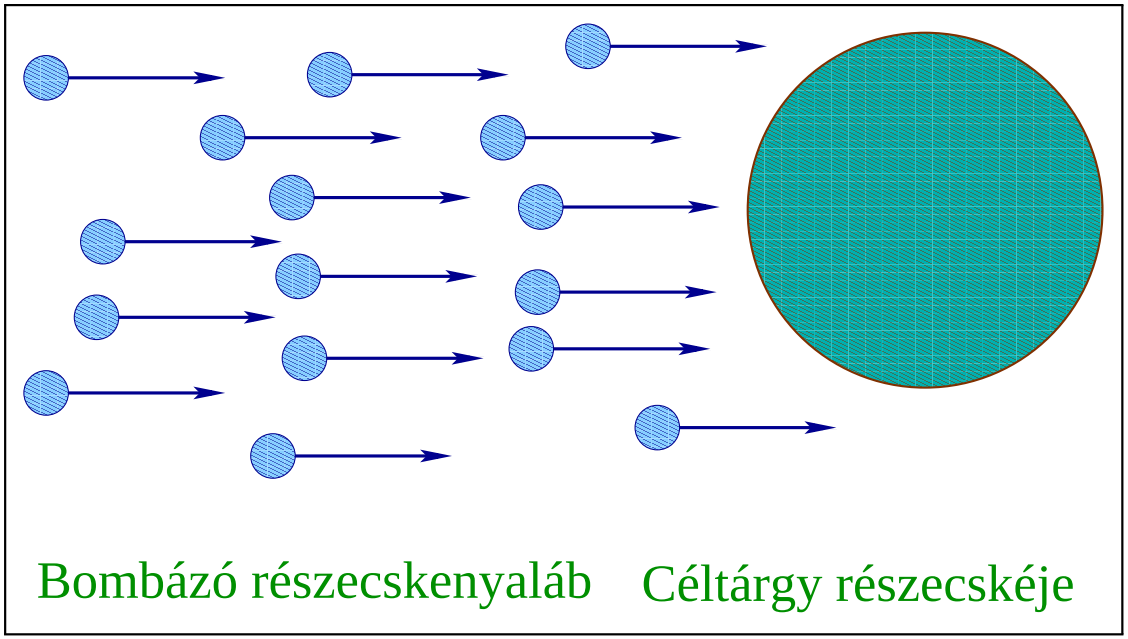
- Mindent magyaráz
- Összes lehetséges kvarkállapot létezik
- Nem találtunk lehetetlent (pl. $Q > 2$)
- Nem látunk több-kvarkos állapotot (dibarion, pentakvark?)
- Családokban össztöltés $\sum Q = Q_\nu + Q_{\ell^-} + 3(Q_u + Q_d) = 0 \Rightarrow$ anomáliák eltűnnek

# Kölcsönhatások és közvetítő bozonjaik

| Kölcsön-hatás | erősség | potenciál | hatótáv | élettartam | bozon | $m_0$ GeV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Erős | 1 | $\sim R$ | $1\ \mathrm{fm}$ $\sim 1/m_\pi$ | $10^{-23}$ s ($\Delta \to p\pi$) | 8 gluon | 0 |
| El-mágn. | $10^{-2}$ | $\sim 1/R$ | $\infty$ | $10^{-20} - 10^{-16}$ s ($\pi^0 \to \gamma\gamma$) | foton | 0 |
| Gyenge | $10^{-7}$ | $\sim \frac{1}{R} e^{-\frac{R}{R_0}}$ | $< 1\ \mathrm{fm}$ $R_0 \sim \frac{\hbar}{M_W c}$ | $> 10^{-12}$ s ($\pi^- \to \mu^- \overline{\nu}$) | $W^\pm$ $Z^0$ | 80 91 |
| Gravitáció | $10^{-38}$ | $\sim \frac{1}{R}$ | $\infty$ | | graviton | 0 |

$r$(proton) = 0,8 fm  1 fm = $10^{-15}$ m

# Amit mérünk: hatáskeresztmetszet




$\sigma = W/\Phi$ átmeneti valószínűség/fluxus

Fluxus = bombázó részecske áramsürüsége (sűrűség·sebesség):

$\Phi = n_b \cdot v_b$ = részecskeszám/felület/sec

$\sigma$ egysége: 1 barn $= 10^{-28}$ m$^2$ (1 pb $= 10^{-40}$ m$^2$)

# Amit mérünk: rezonancia

$\tau = \Gamma^{-1}$ élettartam $\Rightarrow$ exp. bomlás: $N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$

Valószínűségeloszlás:

$$|\chi(E)|^2 = \frac{1}{(E - Mc^2)^2 + \Gamma^2/4}$$

Breit-Wigner-formula

$$\left.\begin{matrix} Mc^2 \\ \Gamma \end{matrix}\right\} \text{rezonancia} \left\{\begin{matrix} \text{helye} \\ \text{szélessége} \end{matrix}\right.$$

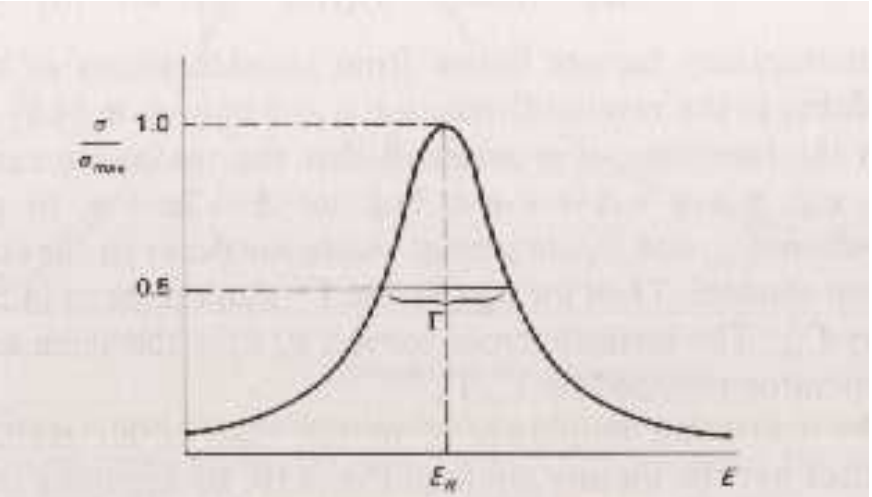


Figure 4.11 Breit-Wigner resonance curve.

Lorentz-görbe

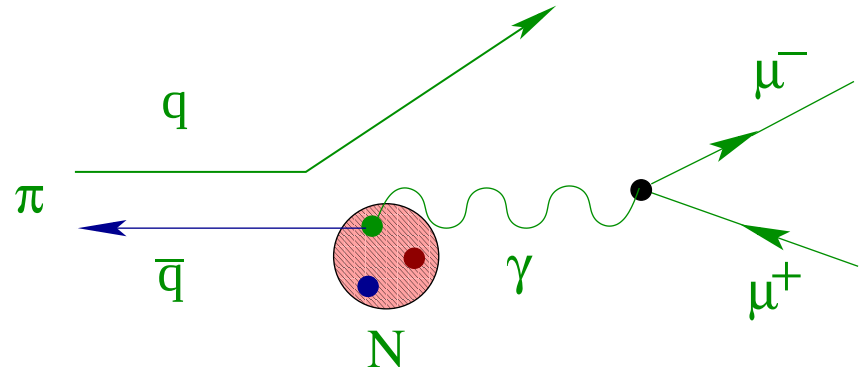
Új részecske felfedezése:
rezonancia a tömegnek megfelelő ütközési energiánál

# A kvarkok töltése: $\frac{2}{3}$ és $-\frac{1}{3}$ ?

Kvark ad-hoc, nyakatekert, szabadon nem létezik

Példa: elektromágneses pionszórás nukleonon

$\pi N \to \mu^- \mu^+ X$




Kvark szóródik, antikvark befogódik

$$\pi^- = (\bar{u}d)$$
$$^{12}C \sim (18u + 18d)$$
$$\pi^+ = (u\bar{d})$$

$$> \sigma \sim 18 Q_u^2 = 18 \cdot \frac{4}{9}$$
$$> \sigma \sim 18 Q_d^2 = 18 \cdot \frac{1}{9}$$

$$\frac{\sigma(\pi^- C \to \mu^+ \mu^- ...)}{\sigma(\pi^+ C \to \mu^+ \mu^- ...)} \approx 4 \sim \text{kísérlet}$$

# Hadronképződés hatáskeresztmetszete

$$R = \frac{\sigma(\mathrm{e^+e^- \to hadronok})}{\sigma(\mathrm{e^+e^- \to \mu^+\mu^-})} = \frac{\sigma(\sum_i \mathrm{e^+e^- \to q_i\overline{q_i}})}{\sigma(\mathrm{e^+e^- \to \mu^+\mu^-})} \sim \sum_i Q^2_{\mathrm{q_i}}$$

Töltésnégyzettel és végállapotok számával arányos

Nincs szín $\to R_0 = \sum_{\mathrm{q}} Q^2_{\mathrm{q}}$;

3 szín van $\to R_3 = 3R_0$

Energia $[E_{CM}(\mathrm{e^+e^-})]$ függvényében
(ahogy a csatornák nyílnak):

{u, d, s}: $R_0 = (2/3)^2 + 2 \cdot (1/3)^2 = 2/3;$ $R_3 = 2$

{u, d, s, c}: $R_0 = 2 \cdot (2/3)^2 + 2 \cdot (1/3)^2 = 10/9;$ $R_3 = 10/$

{u, d, s, c, b}: $R_0 = 2 \cdot (2/3)^2 + 3 \cdot (1/3)^2 = 11/9;$ $R_3 = 11/$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \longrightarrow \text{hadronok})}{\sigma(e^+e^- \longrightarrow \mu^+\mu^-)}$$

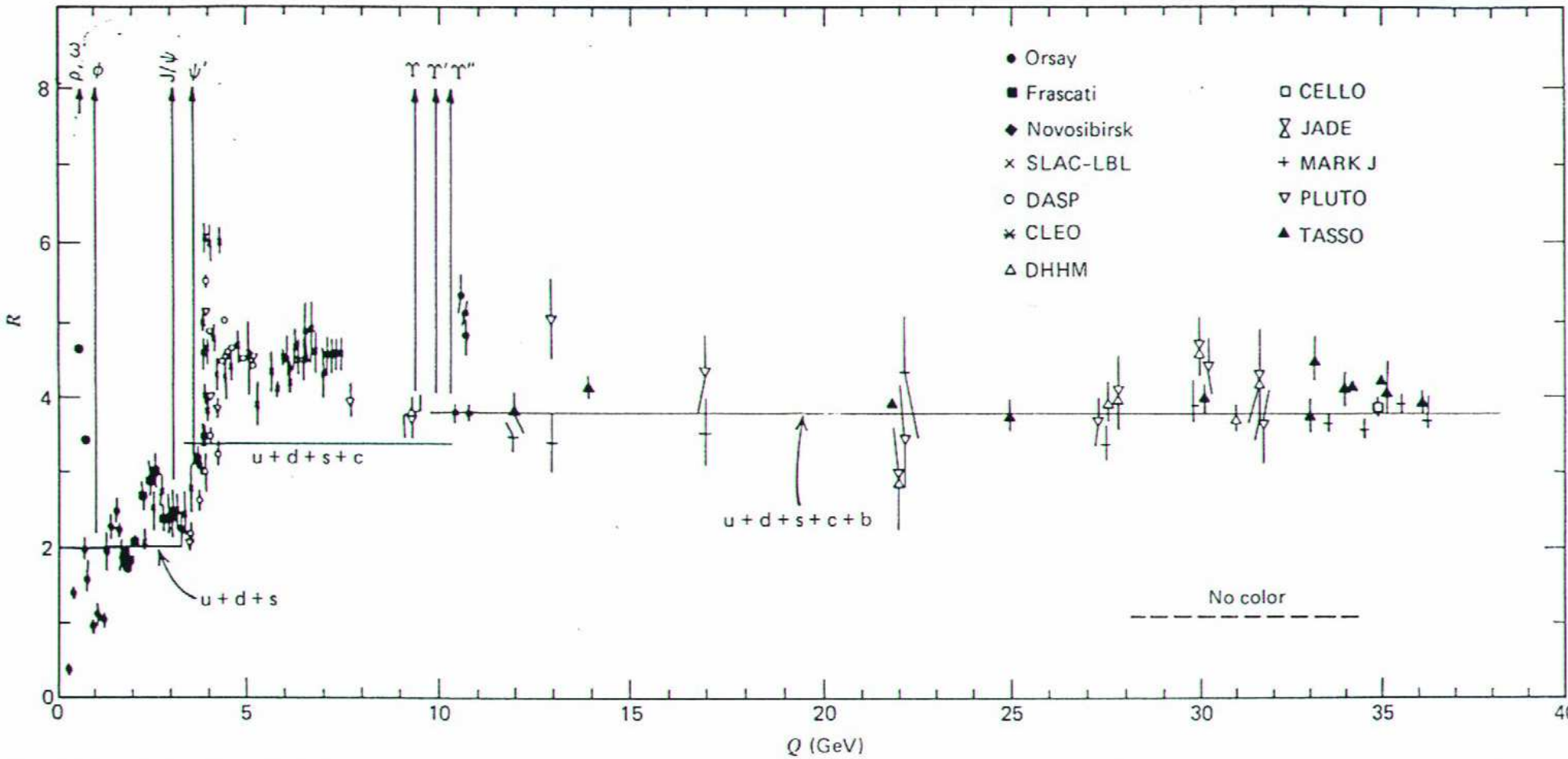



**Fig. 11.3** Ratio $R$ of (11.6) as a function of the total $e^-e^+$ center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of narro $1^-$ resonances just below or near the flavor thresholds.)

# B. A Standard Modell

- Szimmetriák és megmaradási törvények
- Mértékszimmetriák és kölcsönhatások
- Kvantumelektrodinamika és a foton
- Kvantumszíndinamika és a gluon, kvarkbezárás
- Higgs-mechanizmus
- Elektrogyenge kölcsönhatás

# Szimmetriák

Részecskefizikában még fontosabbak, mint kémiában vagy szilárdtestfizikában

Noether–tétel:

| | | |
|---|---|---|
| Globális mértékszimmetria | $\Rightarrow$ | megmaradási törvény |
| Eltolás térben | $\Rightarrow$ | impulzus (lendület) |
| Eltolás időben | $\Rightarrow$ | energia |
| Forgatás | $\Rightarrow$ | impulzusmomentum |
| Elektromágneses mérték- | $\Rightarrow$ | töltés |

Mértékelmélet:

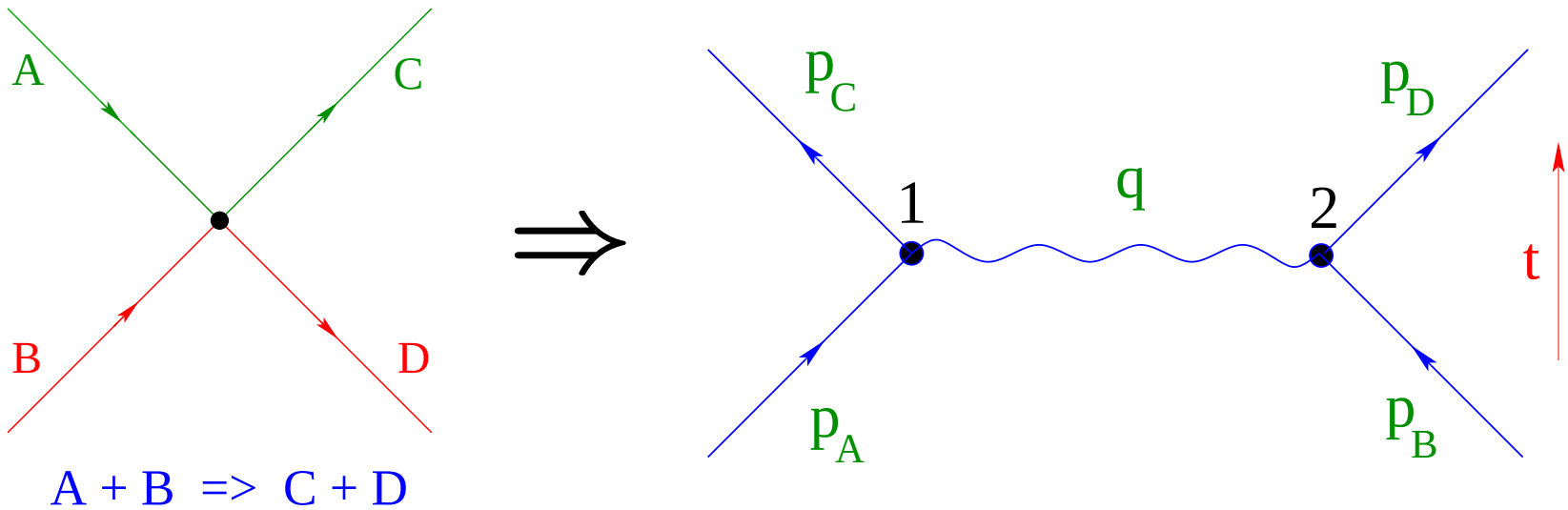
Lokális mértékszimmetria $\Rightarrow$ kölcsönhatás

Lokális szimmetria: pontról pontra meghatározott módon módosuló

# Kvantumelektrodinamika

Az elektromágneses jelenségek kvantumelmélete

Töltött részecskék szóródása egymáson:




Leírás: foton $q$ impulzust visz át A-ról B-re

Feynman-gráf: recept valószínűség kiszámítására

*Belső* foton, nem észlelhető ⇒ virtuális

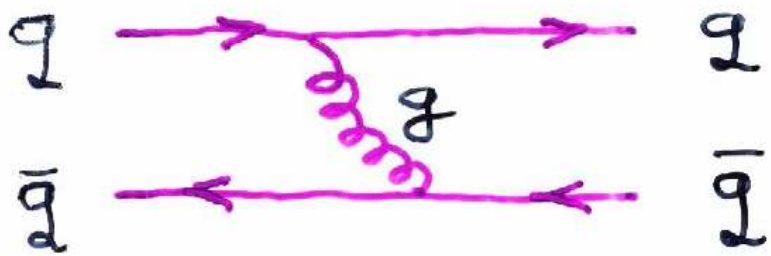
# Kvantumszíndinamika, QCD

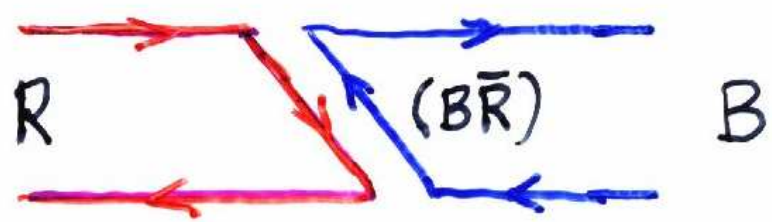
## Szín-szín kölcsönhatás

Közvetítő: gluon, $m = 0, \quad J = 1$

Színt hordoz: $R\overline{R},\ G\overline{G},\ B\overline{B},\ R\overline{G},\ R\overline{B},\ G\overline{R},\ B\overline{R},\ B\overline{G}$

de $\frac{1}{\sqrt{3}}(R\overline{R} + G\overline{G} + B\overline{B}) = 1 \Rightarrow$ 8 független




gluon $\sim$ foton: $\quad m = 0, \quad J = 1,$

de $\gamma$ nem hordoz töltést

gluon két színt $\Rightarrow$ g-g kölcsönhatás

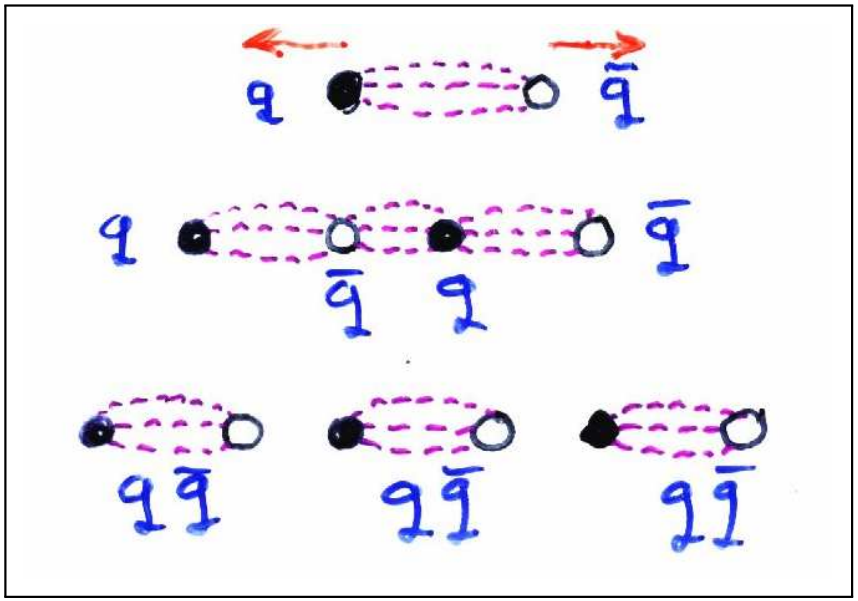
# Fragmentáció, hadronizáció

Fragmentáció, hadronizáció:

Kvarkpárok keltése, amíg az energiából futja

$\Downarrow$

nincs szabad kvark vagy gluon




*szakadó gluonszál* $\Rightarrow V \sim R$ (rugó-potenciál)

$M_{\text{proton}}$ *kijön* zérus-tömegű kvarkokból és gluonokból

# Mérték-kölcsönhatások elmélete

Pontszerű fermion (pl. elektron) mozog lokális (mérték)szimmetriájú térben.

Háromféle lokális szimmetria, három mértékkölcsönhatás: elektromágneses, gyenge és erős (szín-)
Háromféle mértékbozon közvetíti

Fermionok és mértékbozonok mind zérus-tömegűek: foton és 8 gluon rendben.

De 3 gyenge bozon nehéz:
$m(\mathrm{W}^{\pm}) = 80$ GeV; $m(\mathrm{Z}^{0}) = 91$ GeV!!
és a fermionoknak is van tömege.

Ráadásul gyenge kh. elméletében végtelen tagok, zérus-spinű bozon létezése megszabadítana tőlük.

Mindent megold a Higgs-mechanizmus!

# Spontán szimmetriasértés ⇒ tömeg

Gyenge bozonok és fermionok tömege: kölcsönhatás Higgs-térrel

Higgs-bozon: Higgs-tér elemi kvantuma

David J. Miller és CERN: http://www.hep.ucl.ac.uk/∼djm/higgsa.html

# A Higgs-bozon

A spontán szimmetriasértés *melléktermére*

A részecskefizika legkeresettebb része, mivel

a Standard Modell egyetlen hiányzó láncszeme

Kísérletileg nem figyeltük meg,

az elmélet szerint léteznie kell

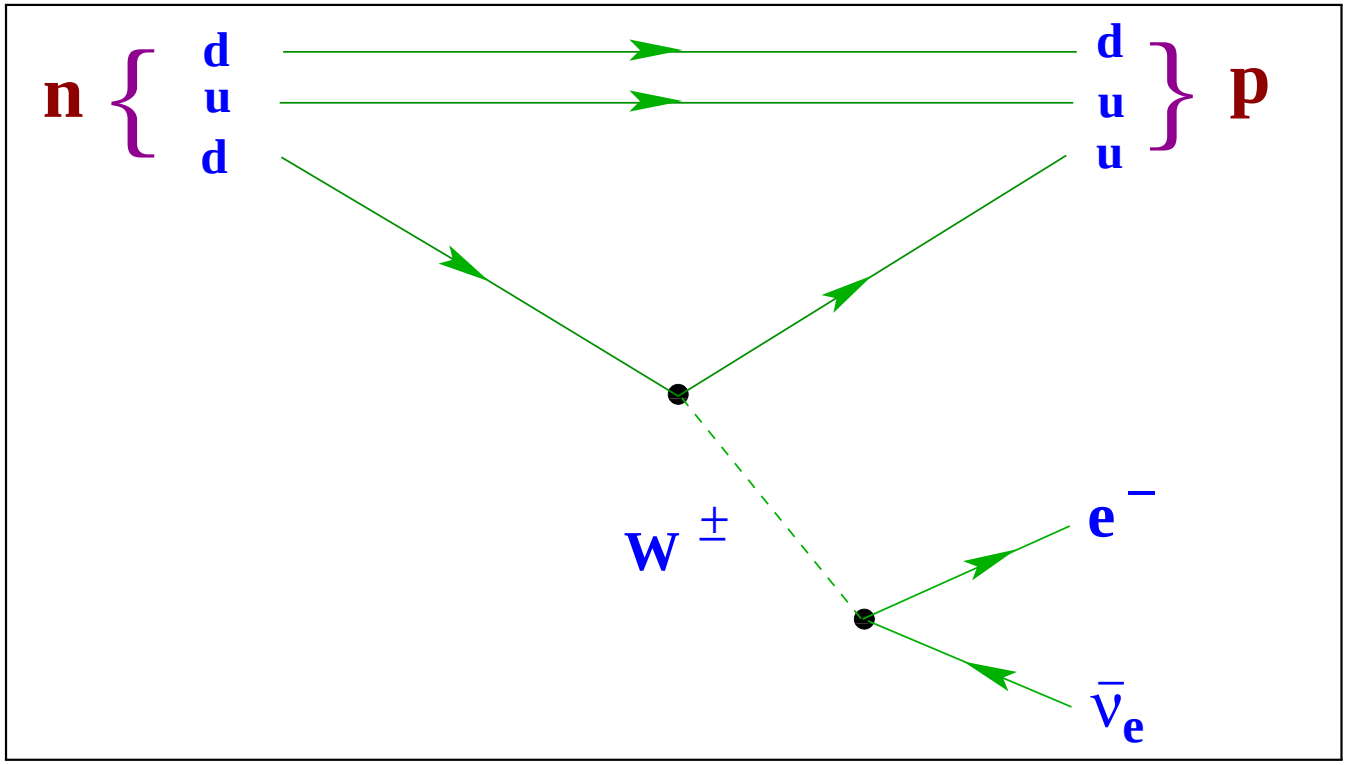
mert tömeget teremt és rendbeteszi a divergenciákat

*It was in 1972 ... that my life as a boson really began*
(Peter Higgs: Int. J. Mod. Phys. A **17** Suppl. (2002) 86-88.)

# Elektrogyenge kölcsönhatás

Elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése
a Higgs-mechanizmus jótékony közreműködésével

Eredmény: zérus-tömegű foton és nehéz Z, $W^+$, $W^-$




Neutronbomlás

# Az augusztusi Fizikai Szemle melléklete

# AZ ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK

## Standard Modellje

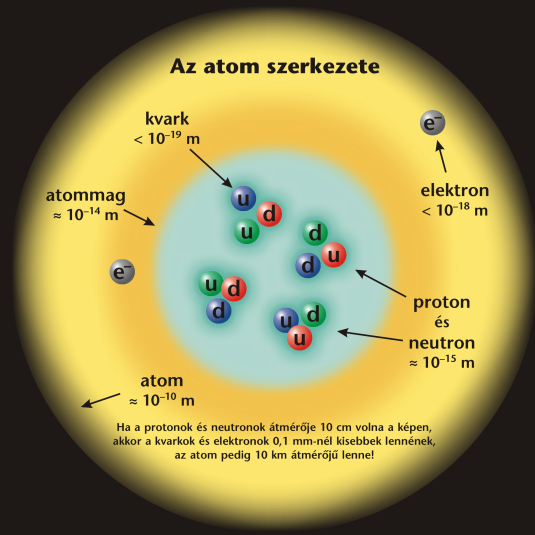
**Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legpontosabb ismereteinket összegzi a Standard Modell, amely az erős és egyesített elektrogyenge kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard Modellnek.**

### Fermionok – az anyag építőkövei, spinjük: 1/2, 3/2, 5/2 ...

| kvarkok (spin = 1/2) | | | leptonok (spin = 1/2) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| jel/íz | tömeg GeV/c² | elektr. töltés | jel/íz | tömeg GeV/c² | elektr. töltés |
| u up | 0,003 | 2/3 | $\nu_e$ elektron neutrínó | $< 10^{-8}$ | 0 |
| d down | 0,006 | –1/3 | e elektron | 0,000511 | –1 |
| c charm | 1,3 | 2/3 | $\nu_\mu$ müon neutrínó | < 0,0002 | 0 |
| s strange | 0,1 | –1/3 | μ müon | 0,106 | –1 |
| t top | 175 | 2/3 | $\nu_\tau$ tau neutrínó | < 0,02 | 0 |
| b bottom | 4,3 | –1/3 | τ tau | 1,7771 | –1 |

**Tömeg:** a részecskefizikában az energiát elektronvoltban (eV), a tömeget GeV/$c^2$ egységekben ($E = mc^2$) mérik. 1 GeV = $10^9$ eV = $1{,}60 \cdot 10^{-10}$ J. A proton tömege 0,938 GeV/$c^2$ = $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg.

**Töltés:** az elektromos töltéseket a protontöltés egységében adjuk meg. A proton töltése $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.




### Bozonok – a kölcsönhatások közvetítői, spinjük: 0, 1, 2 ...

| erős – szín (spin = 1) | | |
|---|---|---|
| jel/név | tömeg GeV/c² | elektr. töltés |
| g gluon | 0 | 0 |

| elektrogyenge (spin = 1) | | |
|---|---|---|
| jel/név | tömeg GeV/c² | elektr. töltés |
| γ gamma-foton | 0 | 0 |
| $W^-$ W-bozon | 80,39 | –1 |
| $W^+$ W-bozon | 80,39 | 1 |
| $Z^0$ Z-null bozon | 91,187 | 0 |

**Színtöltés:** a kvarkok és gluonok „színtöltést" hordoznak. A kvarkok három-, a gluonok nyolcféle „színűek" lehetnek. Kvarkok és gluonok szabadon nem létezhetnek. Őket a színtöltések között ható alapvető erős kölcsönhatás kétféleképpen kötheti össze színsemleges hadronokba: vagy három kvark alkothat egy bariont, vagy egy kvark–antikvark-pár alkothat egy mezont.

**A visszamaradó erős kölcsönhatás** a színsemleges nukleonok – vagyis az atommagot alkotó neutronok és protonok – között hat (ez felelős a „magerőkért"), jellegében a Van der Waals-kölcsönhatáshoz hasonlít.

**A spin** a részecske saját perdülete. A spint $\hbar$ egységekben adjuk meg, ahol $\hbar = h/2\pi = 6{,}58 \cdot 10^{-25}$ GeVs = $1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Js.

### Fermionikus hadronok

| barionok (qqq) és antibarionok ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) – több száz ismert barion van | | | | |
|---|---|---|---|---|
| jel/név | kvark-össz. | tömeg GeV/c² | elektr. töltés | spin |
| p proton | uud | 0,938 | 1 | 1/2 |
| $\bar{p}$ anti-proton | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | 0,938 | –1 | 1/2 |
| n neutron | udd | 0,940 | 0 | 1/2 |
| Λ lambda | uds | 1,116 | 0 | 1/2 |
| Ω omega | sss | 1,672 | –1 | 3/2 |

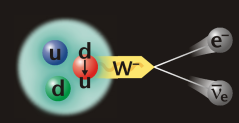
**Antianyag:** a részecskének általában van „antirészecskéje", amely azonos tulajdonságú, de ellentétes töltésű, mint a részecske. Néhány elektromosan semleges részecske egyben saját antirészecskéje is. Ilyen a $Z^0$-bozon, a γ-foton, vagy az $\eta_c$-mezon, de a $K^0$-kaon, mely $d\bar{s}$ kvark–antikvark-párból áll, már nem.

**Az ábrák** a jellemző fizikai folyamatokat csak szemléltetik, hozzájuk értelmes módon skálát rendelni nem lehet. A kékeszöld tartományok a gluonok felhőjét, illetve mezejét, a piros vonalak a kvarkok pályáját mutatják.

### A kölcsönhatások tulajdonságai

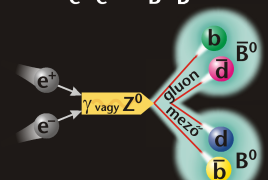
| kölcsönhatás / tulajdonság | erős: alapvető | erős: visszamaradó | gyenge (elektrogyenge) | elektromágneses (elektrogyenge) | gravitációs (nem az SM része) |
|---|---|---|---|---|---|
| amire hat | színtöltés | lásd magyarázat | íz | elektromos töltés | tömeg, energia, lendület |
| ezek a részecskék érzik | kvarkok, gluonok | hadronok | kvarkok, leptonok | elektr. töltöttek | minden |
| közvetítő részecske | gluonok | mezonok | $W^-$, $W^+$, $Z^0$-bozon | γ-foton | graviton (még nem figyelték meg) |
| relatív erősség két up kvarkra, $10^{-18}$ m | 25 | – | 0,8 | 1 | $10^{-41}$ |
| relatív erősség két up kvarkra, $3 \cdot 10^{-17}$ m | 60 | – | $10^{-4}$ | 1 | $10^{-41}$ |
| két proton az atommagban | – | 20 | $10^{-7}$ | 1 | $10^{-36}$ |

$n \to p\, e^- \bar{\nu}_e$



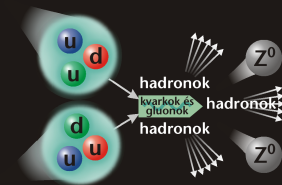

Egy neutron protonra, elektronra és antineutrinóra bomlik egy virtuális W bozon (gyenge kölcsönhatás) közvetítésével. Ez a béta-bomlás.

$e^+ e^- \to B^0 \bar{B}^0$




Nagy energiájú elektron–pozitron-ütközésben (elektrogyenge kölcsönhatás) $B^0$–anti-$B^0$ keletkezése, γ-foton vagy $Z^0$-bozon közvetítésével.

$p\, p \to Z^0\, Z^0$ + hadronok




Nagy energiájú, erősen kölcsönható protonok ütközésekor keletkezhetnek hadronok és más részecskék, például Z-bozonok.

### Bozonikus hadronok

| mezonok ($q\bar{q}$) – több száz ismert mezon van | | | | |
|---|---|---|---|---|
| jel/név | kvark-össz. | tömeg GeV/c² | elektr. töltés | spin |
| $\pi^+$ pion | $u\bar{d}$ | 0,140 | 1 | 0 |
| $K^-$ kaon | $s\bar{u}$ | 0,494 | –1 | 0 |
| $\rho^+$ ró-mezon | $u\bar{d}$ | 0,770 | 1 | 1 |
| $B^0$ B-null mezon | $d\bar{b}$ | 5,279 | 0 | 0 |
| $\eta_c$ eta-c mezon | $c\bar{c}$ | 2,980 | 0 | 0 |


Az eredeti posztert a **Contemporary Physics Project** (http://CPEPweb.org) készítette. A magyar változat **Kármán Tamás** és **Somogyi Gábor** munkája.

Megjelent a **Fizikai Szemle** mellékleteként, tetszőleges méretre nagyítható változata letölthető a http://fizikaiszemle.hu honlapról.

Köszönetünket fejezzük ki a megjelenést támogató **Paksi Atomerőmű Zrt.**-nek.



mindig paksi atomerőmű



Fizikai Szemle
MAGYAR FOLYÓIRAT
az Eötvös Loránd Fizikai Társulat folyóirata