

# Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére*

*CERN, 2014. aug. 18-22.*

*(Pásztor Gabriella helyett)*

**Horváth Dezső**

horvath.dezso@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest  
és ATOMKI, Debrecen

## 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, színekép  $\Rightarrow$  atomok  $\Rightarrow$  izotópok

Rutherford: atommag + elektron  $\Rightarrow$

proton, neutron, elektron

1930...60: sokszáz részecske

gerjesztett állapotok  $\Rightarrow$  belső szerkezet!

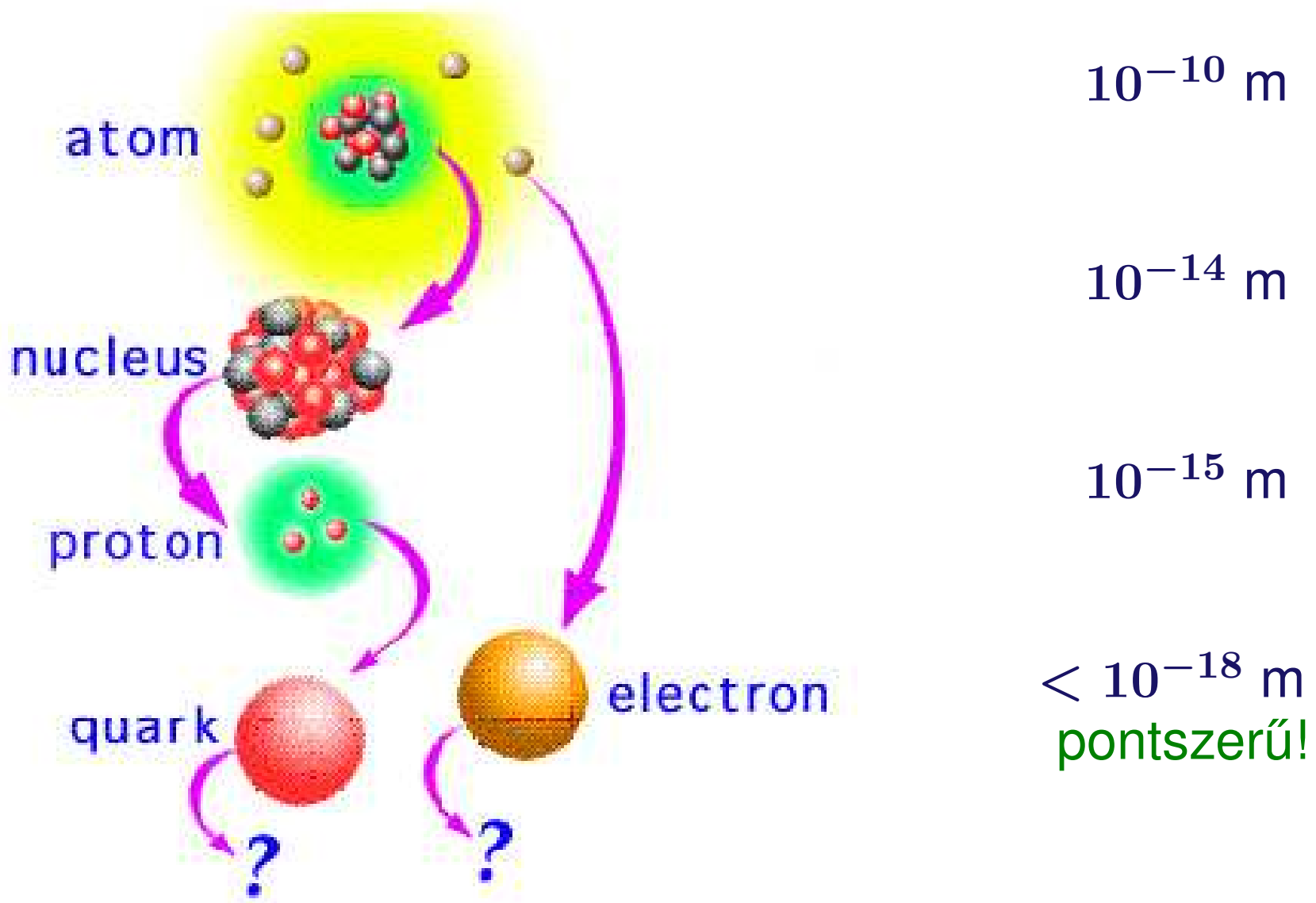
3 kölcsönhatás: származtatás???

1970 óta: Standard Modell (David Gross: anyagelmélet)

Pontszerű leptonok, kvarkok, mértékbozonok

Kölcsönhatások szimmetriákból

# Az atomtól a kvarkig



# A mikrovilág vizsgálata: energia

Planck-állandó:

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

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

Energia:

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

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}; 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV};$$

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

Einstein:

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

Heisenberg:

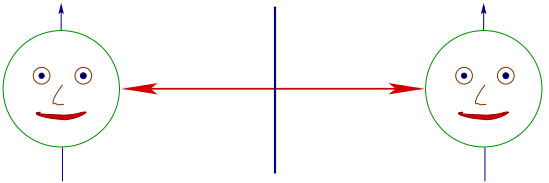
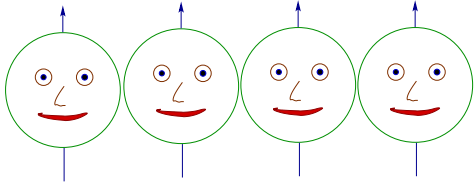
$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar/2; \quad \Delta p \cdot \Delta x \gtrsim \hbar/2$$

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

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

# Fermionok és bozonok

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

Tulajdonság	fermion	bozon
Spin	feles ( $\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \dots$ )	egész (0, 1, 2, ...)
Részecskeszám megmaradása	van	nincs
$\psi(1, 2) = \pm\psi(2, 1)$ Pauli-kizárás	— van	+ nincs
Kondenzáció	 nincs	 van

# Elemi (pontoszerű!) részecskék

Elemi fermionok:  
leptonok és kvarkok

Elemi bozonok:  
kölcsonhatások 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 -1
Kvarkok	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$

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

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

# Hadronok: összetett részecskék

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

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

$$Q = 0, \pm 1$$

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

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

Legkönnyebb barionok: nukleonok ( $J = \frac{1}{2}$ )

proton =  $(uud)$ , neutron =  $(udd)$ , antiproton =  $(\bar{u}\bar{u}\bar{d})$

Legkönnyebb mezonok: 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

- $\Delta^{++} = (u\uparrow u\uparrow u\uparrow)$  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  $\begin{pmatrix} R(ed) \\ G(reen) \\ B(lue) \end{pmatrix} \Rightarrow$  szín-töltés

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

# Analógia színlátással

Kvarkok kvantumszáma, erős kölcsönhatás töltése, „szín” csak elnevezés

Kvarkok színe	~ színlátás
Háromféle állapot	~ három alapszín
Antiszín	~ kiegészítő szín
$R+G+B =$ színtelen	~ $R+G+B =$ fehér
szín + antiszín = színtelen	~ szín + kieg. szín = fehér

# Színtelen kvarkállapotok

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

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 osztályozás

$$\sum Q = Q_\nu + Q_{\ell^-} + 3(Q_u + Q_d) = 0$$

















$\Rightarrow$  anomáliák eltűnnek

# Kölcsönhatások és közvetítő bozonjaik

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

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

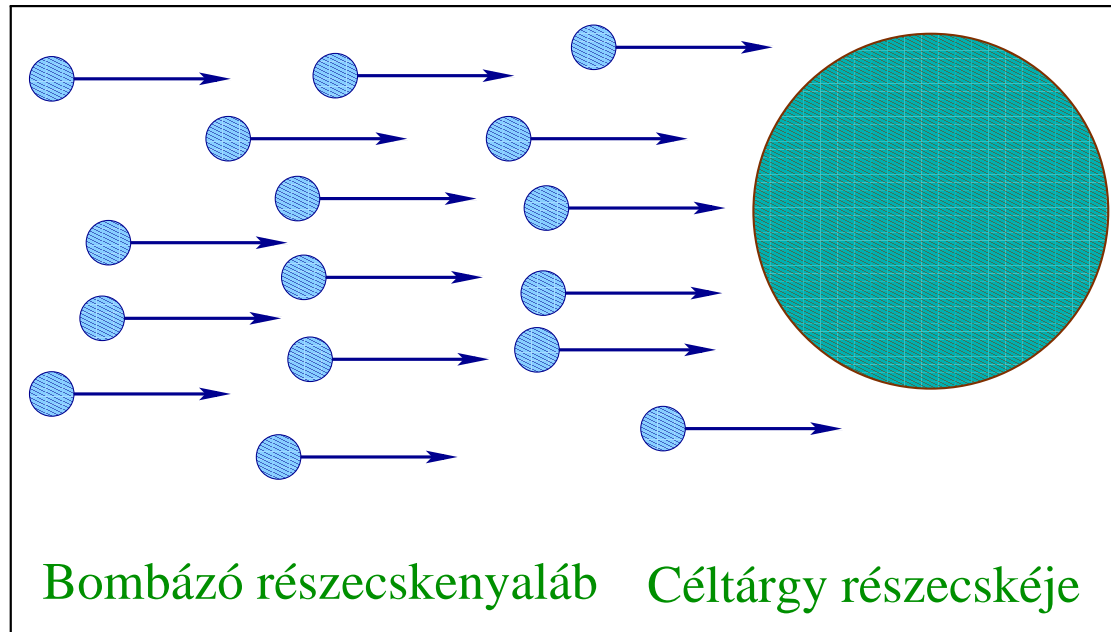
# A Standard Modell állatkertje

Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino $e$	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$	 $Z^0 W^\pm$
				 Higgs

The Standard Model

A. Pich - CERN Summer Lectures 2005

# Amit mérünk: hatáskeresztmetszet



$$\sigma = W/\Phi \quad \text{átmeneti valószínűség/fluxus}$$

Fluxus = bombázó részecske áramsűrűsége  
(sűrűség·sebesség):

$$\Phi = n_b \cdot v_b = \text{részecskeszám/felület/sec}$$

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



# Amit mérünk: rezonancia

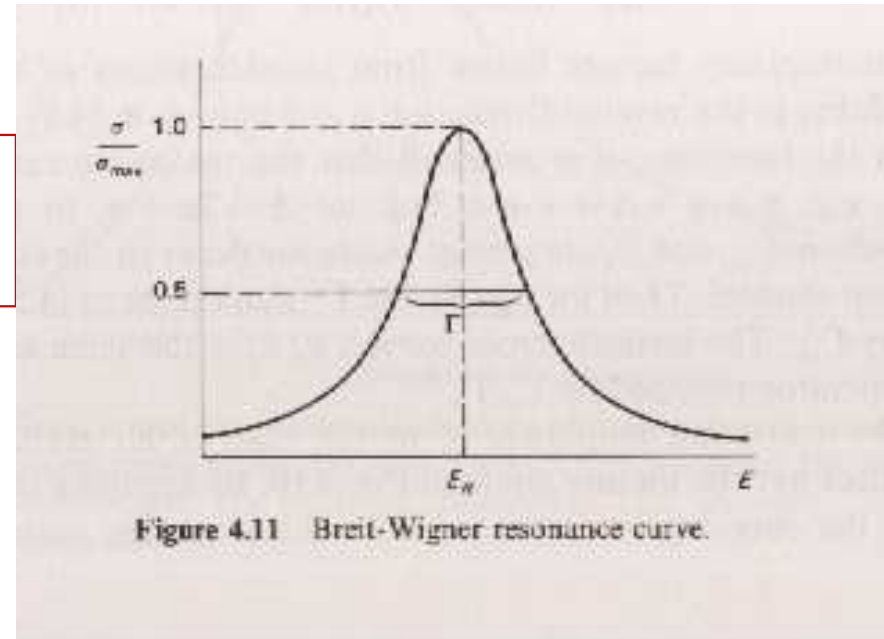
$\tau = \Gamma^{-1}$  élettartam  $\Rightarrow$  exp. bomlás:  $N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$

Valószínűségeloszlás:

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

Breit-Wigner-formula

$Mc^2$  } rezonancia { helye  
 $\Gamma$  } } szélessége



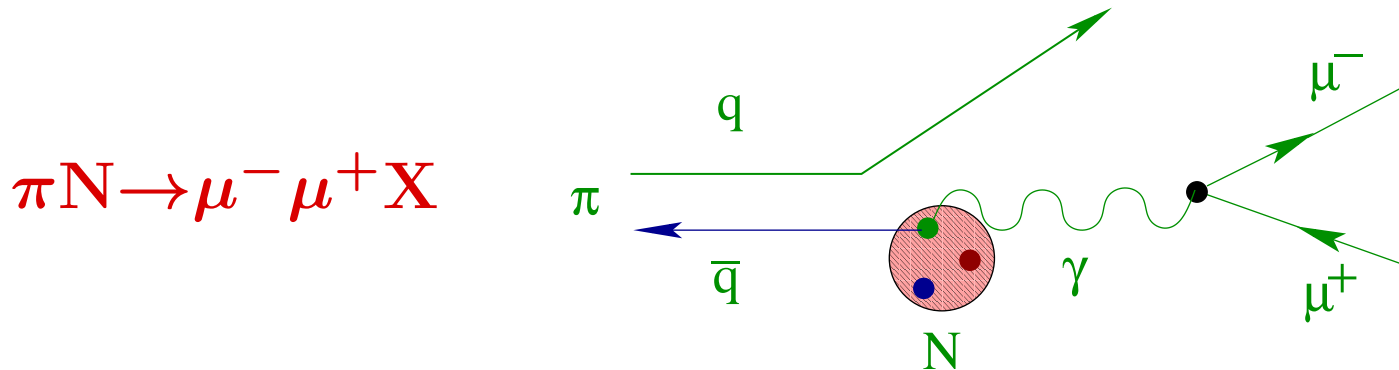
Lorentz-görbe

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



Kvark szóródik, antikvark befogódik

$$\begin{aligned}
 \pi^- &= (\bar{u}d) &>> \sigma \sim 18Q_u^2 = 18 \cdot \frac{4}{9} \\
 {}^{12}\text{C} &\sim (18u + 18d) &>> \sigma \sim 18Q_d^2 = 18 \cdot \frac{1}{9} \\
 \pi^+ &= (u\bar{d})
 \end{aligned}$$

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

# Hadronképződés hatáskeresztmetszete

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadronok})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sigma(\sum_i e^+e^- \rightarrow q_i\bar{q}_i)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} \sim \sum_i Q_{q_i}^2$$

Töltésnégyzettel és végállapotok számával arányos

$$\text{Nincs szín} \rightarrow R_0 = \sum_q Q_q^2;$$

$$3 \text{ szín van} \rightarrow R_3 = 3R_0$$

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

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

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

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

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

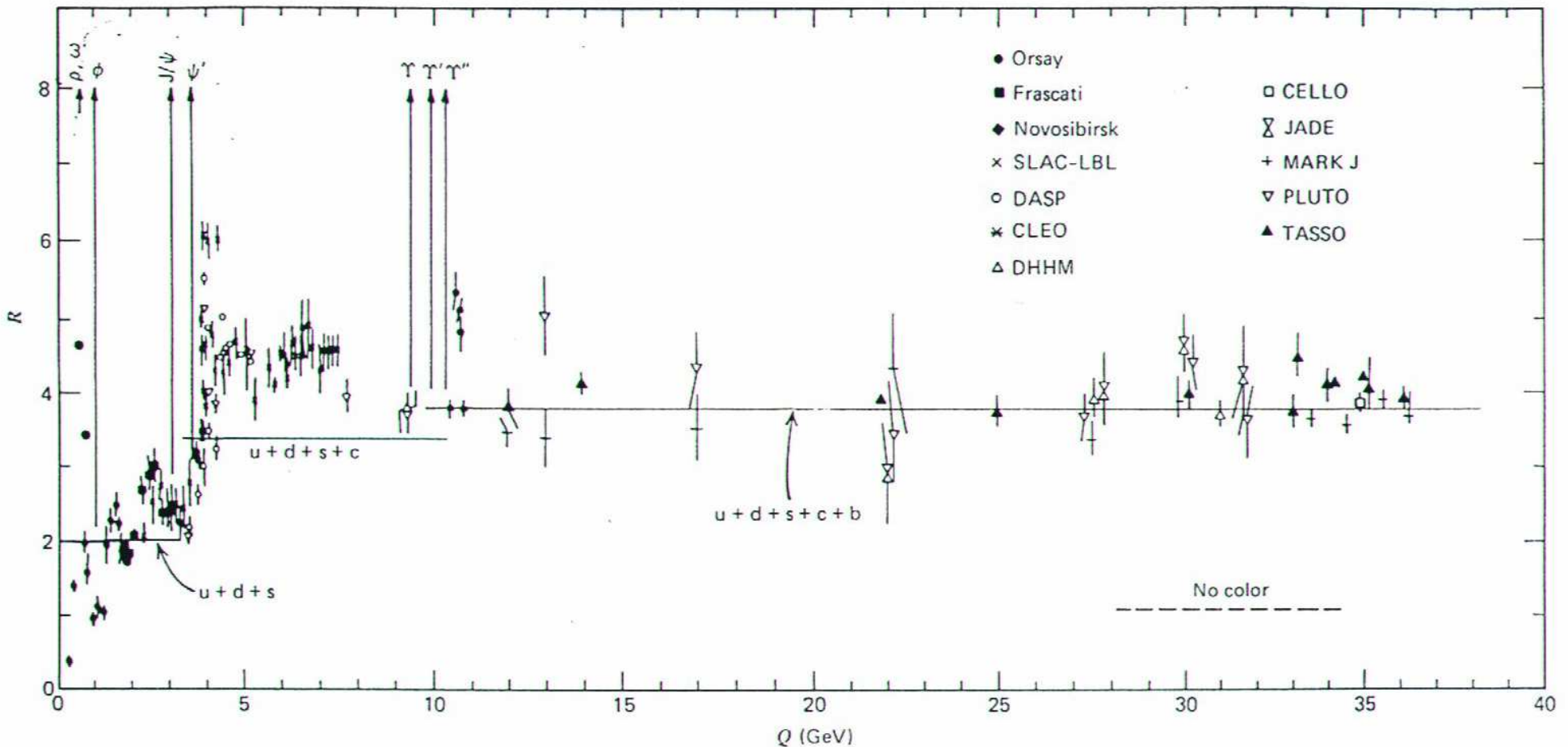


Fig. 11.3 Ratio  $R$  of (11.6) as a function of the total  $e^-e^+$  center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of  $0^-$  resonances just below or near the flavor thresholds.)

# B. A Standard Modell

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

# Szimmetriák

Részecskefizikában még fontosabbak, mint kémiában vagy szilárdtestfizikában

Emmy Noether (1882-1935):

Globális mértékszimméria	⇒ megmaradási törvény
Eltolás térben	⇒ impulzus (lendület)
Eltolás időben	⇒ energia
Forgatás	⇒ impulzusmomentum
Elektromágneses mérték-	⇒ töltés

Mértékelmélet:

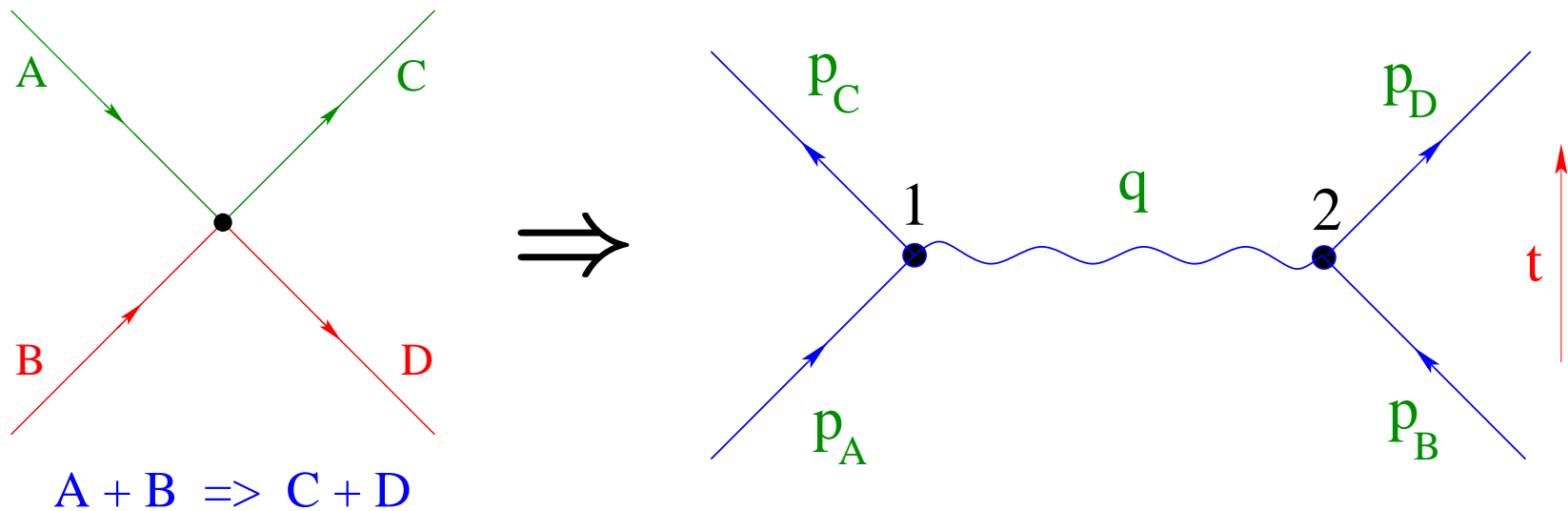
Lokális mértékszimméria ⇒ kölcsönhatás

Lokális szimméria: 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  $\Rightarrow$  virtuális

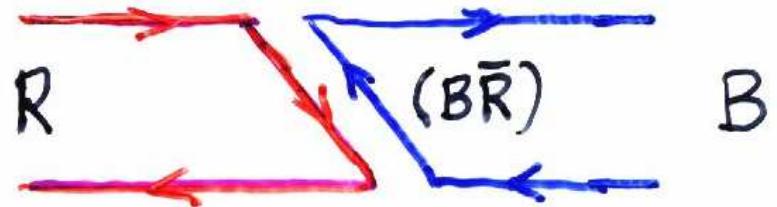
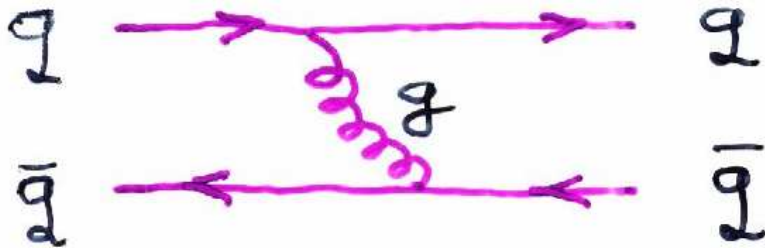
# Kvantumszíndinamika, QCD

## Szín-szín kölcsönhatás

Közvetítő: **gluon**,  $m = 0$ ,  $J = 1$

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

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



gluon  $\sim$  foton:  $m = 0$ ,  $J = 1$ ,  
de  $\gamma$  nem hordoz töltést

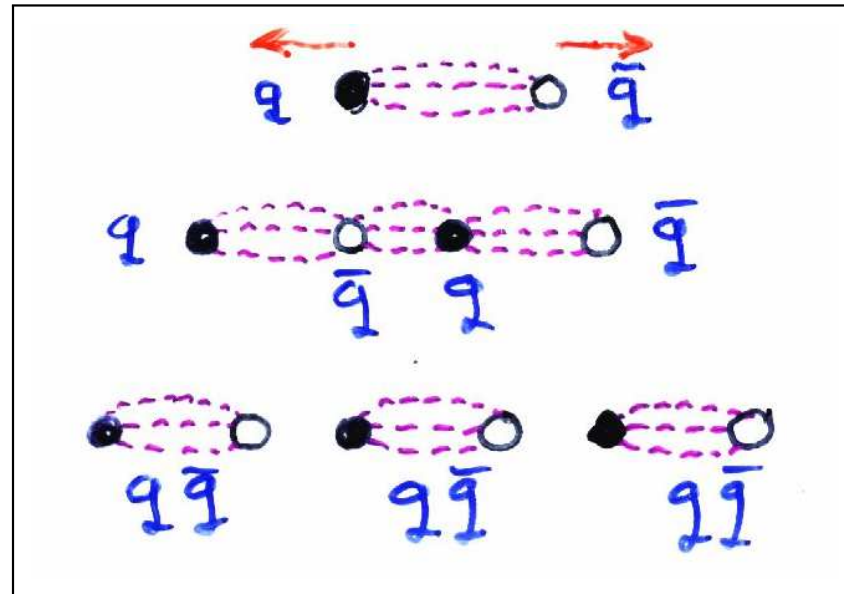
gluon két színt  $\Rightarrow$  g-g kölcsönhatás



# Fragmentáció, hadronizáció

Fragmentáció, hadronizáció:

Kvarkpárok keltése, amíg az energiából futja  
⇒ **nincs szabad kvark vagy gluon**



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

$M_{\text{proton}}$  *kijön* zérus-tömegű kvarkokból és gluonokból  
(Sükösd Csaba!)

# 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:  
 $m(W^\pm) = 80 \text{ GeV}$ ;  $m(Z^0) = 91 \text{ GeV!!}$   
és a fermionoknak is van tömege.

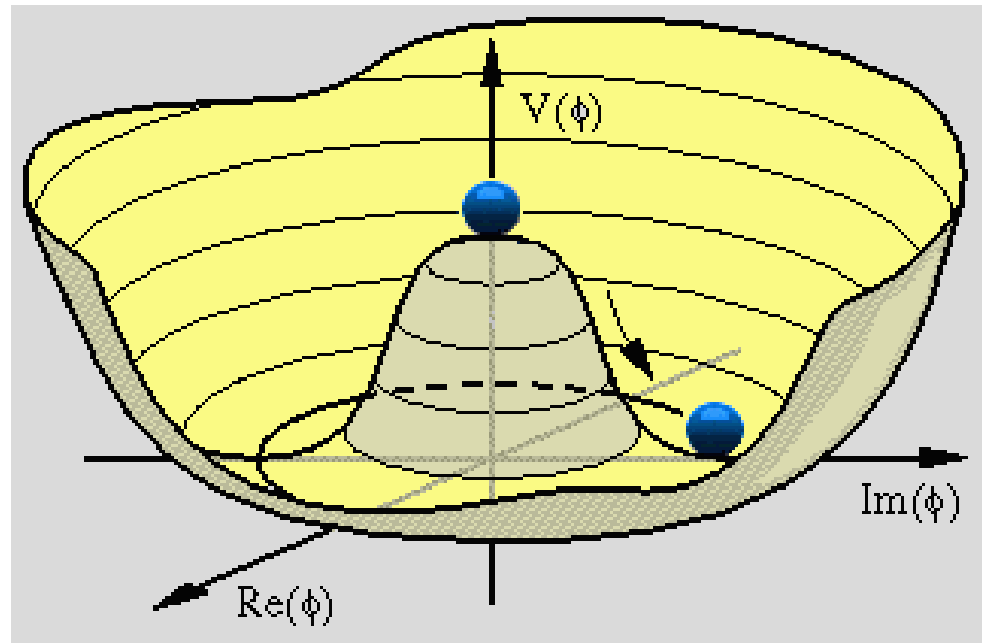
Ráadásul gyenge kh. elméletében végtelen tagok,  
zérus-spinű bozon létezése megszabadítana tőlük.

Mindent megold a Brout–Englert–Higgs-mechanizmus!

# A Brout–Englert–Higgs-mechanizmus

A Standard Modell BEH-mechanizmusa:

Vákuumban potenciál, amely elrontja a szimmetriát:  
Nem zérus részecskesűrűségnél lesz az energia minimális.



Hengerszimmetriát golyó legurulva spontán elrontja.  
Nem  $\Phi = 0$ -nál lesz a stabil állapota (minimális energiája)

# Spontán szimmetriasértés $\Rightarrow$ tömeg

Gyenge  
bozonok és  
fermionok  
tömege:  
kölcsonhatás  
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 *mellékterméke*

A részecskefizika legkeresettebb részecskéje, mivel a Standard Modell egyetlen hiányzó láncszeme **volt!**

Kísérletileg csak **az LHC-nál, 2012-ben** figyeltük meg,  
pedig az elmélet szerint léteznie **kellett**,  
mert rendbeteszi a divergenciákat.

LEP:  $m(H) > 114.4 \text{ GeV}$ , LHC:  $m(H) = 125 \text{ GeV}$

*„It was in 1972 ...  
that my life as a boson really began”*

Peter Higgs:

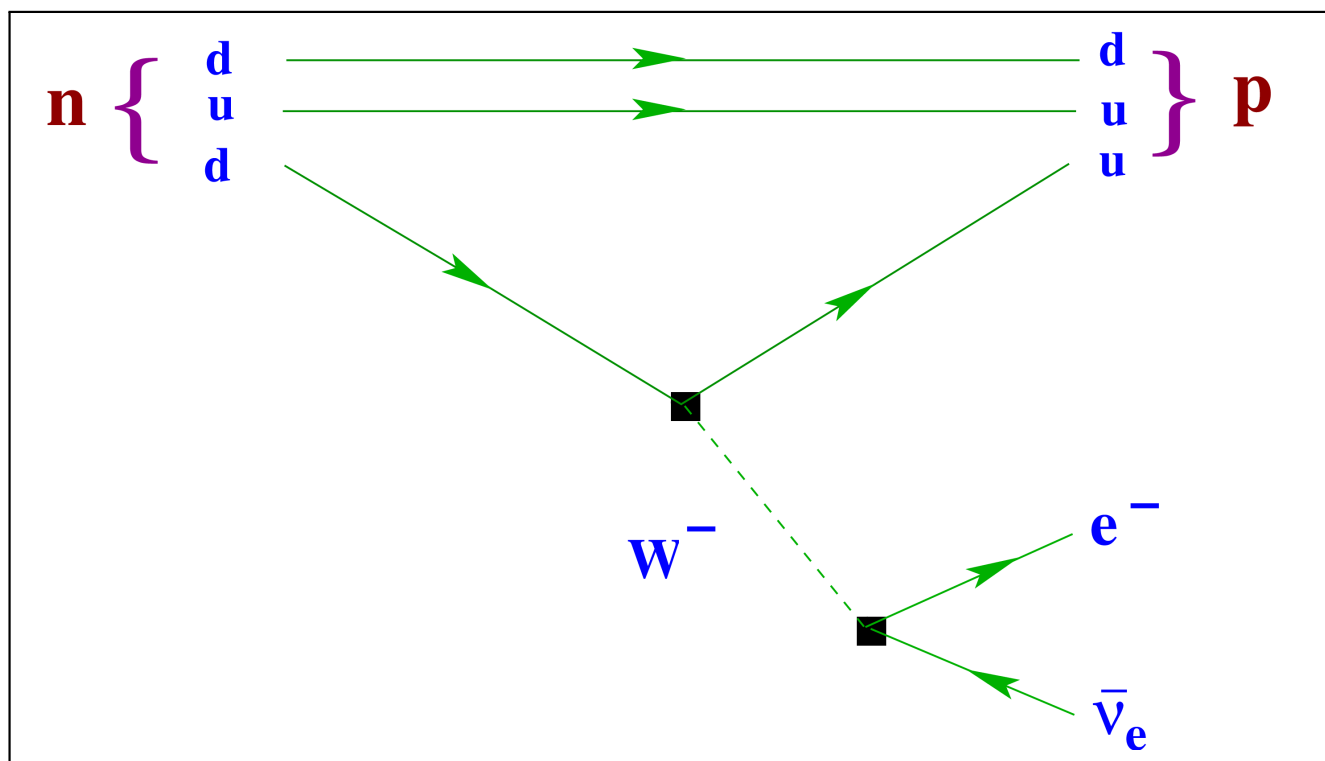
*My Life as a Boson: The Story of „The Higgs”,  
Int. J. Mod. Phys. A 17 Suppl. (2002) 86-88.*



# Elektrogyenge kölcsönhatás

Elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése  
a Higgs-mechanizmus jótékony közreműködésével

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



Neutronbomlás

# A Fizikai Szemle melléklete (2008 aug.)

## 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 elektroyenge kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jöllehet 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/c <sup>2</sup>	elektr. töltés	jel/íz	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés
u	0,003	2/3	ν <sub>e</sub>	< 10 <sup>-8</sup>	0
d	0,006	-1/3	e	0,000511	-1
c	1,3	2/3	ν <sub>μ</sub>	< 0,0002	0
s	0,1	-1/3	μ	0,106	-1
t	175	2/3	ν <sub>τ</sub>	< 0,02	0
b	4,3	-1/3	τ	1,7771	-1

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

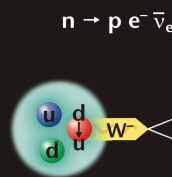
**Töltés:** az elektromos töltéseket a protontöltés egységében adjuk meg. A proton töltése 1,60 · 10<sup>-19</sup> Coulomb.

**Fermionikus hadronok**

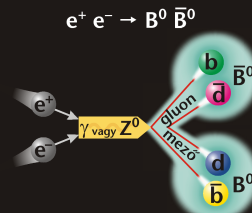
barionok (qqq) és antibarionok (q̄q̄q̄) – több száz ismert barion van				
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés	spin
p	uud	0,938	1	1/2
p̄	ūūd	0,938	-1	1/2
n	udd	0,940	0	1/2
Λ	uds	1,116	0	1/2
Ω	sss	1,672	-1	3/2

**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<sup>0</sup>-bozon, a γ-foton, vagy az η<sub>c</sub>-mezon, de a K<sup>0</sup>-kaon, mely két kvark-antikvark-párból áll, már nem.

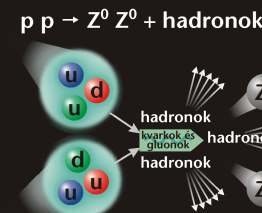
**Az ábrák** a jellemző fizikai folyamatokat csak szemléltetik, hozzájuk értelmes módon skálát rendelni nem lehet. A kékeszöld tartományok a gluonok felhőjét, illetve mezejét, a piros vonalak a kvarkok pályáját mutatják.



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



Nagy energiájú elektron-pozitron-ütkezésben (elektroyenge kölcsönhatás) B<sup>0</sup>-anti-B<sup>0</sup> keltése, γ-foton vagy Z<sup>0</sup>-bozon közvetítésével.



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

**A kölcsönhatások tulajdonságai**

tulajdonság	kölcsönhatás	erős		gyenge (elektroyenge)	elektromágneses (elektroyenge)	gravitációs (nem az SM része)
		alapvető	visszamaradó			
amire hat		színtöltés	lásd magyarázat	íz	elektromos töltés	tömeg, energia, lendület
ezek a részecskéik érzik		kvarkok, gluonok	hadronok	kvarkok, leptonok	elektr. töltöttek	minden
közvetítő részecske		gluonok	mezonok	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup> -bozon	γ-foton	graviton (még nem figyelték meg)
relatív erősség		25	-	0,8	1	10 <sup>-41</sup>
két up kvarkra		60	-	10 <sup>-4</sup>	1	10 <sup>-41</sup>
két proton az atommagban		-	20	10 <sup>-7</sup>	1	10 <sup>-36</sup>

**Bozonikus hadronok**

mezonok (q̄q) – több száz ismert mezon van				
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés	spin
π	uđ	0,140	1	0
K	sū	0,494	-1	0
ρ	uđ	0,770	1	1
B	dđ	5,279	0	0
η <sub>c</sub>	cđ	2,980	0	0

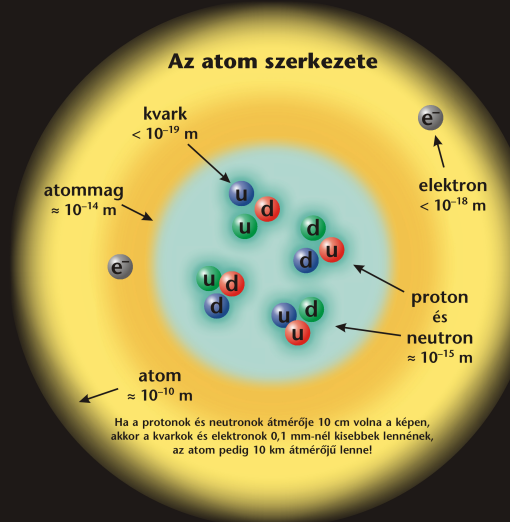
Az eredeti posztert a **Contemporary Physics Project** (<http://CPEPweb.org>) készítette. A magyar változat **Kármán Tamás** és **Somogyi Gábor** munkája.

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.



**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT  
az Eötvös Loránd Fizikai Társulat folyóirata



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

erős – szín (spin = 1)			elektroyenge (spin = 1)		
jel/név	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés	jel/név	tömeg GeV/c <sup>2</sup>	elektr. töltés
g	0	0	γ	0	0
W <sup>+</sup>	80,39	-1	W <sup>-</sup>	80,39	1
Z <sup>0</sup>	91,187	0	Z <sup>0</sup>	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 alkot egy bariont, vagy egy kvark-antikvark-pár alkot 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 spin  $\hbar$  egységekben adjuk meg, ahol  $\hbar = h/2\pi = 6,58 \cdot 10^{-25}$  GeVs = 1,05 · 10<sup>-34</sup> Js.

# Házi feladat

- Hányféle kvarkunk van?

Válasszunk: 3, 6, 9, 12, 18, 36

- Hányféle fundamentális elemi részecskénk van?

Válasszunk: 17, 21, 44, 52, 61, 109