

Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére
(CERN, 2009. aug. 17-21.)*

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, színekép \Rightarrow atomok \Rightarrow izotópok

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

1930...60: sokszáz részecske

gerjesztett állapotok \Rightarrow belső szerkezet!

3 kölcsönhatás: származtatás???

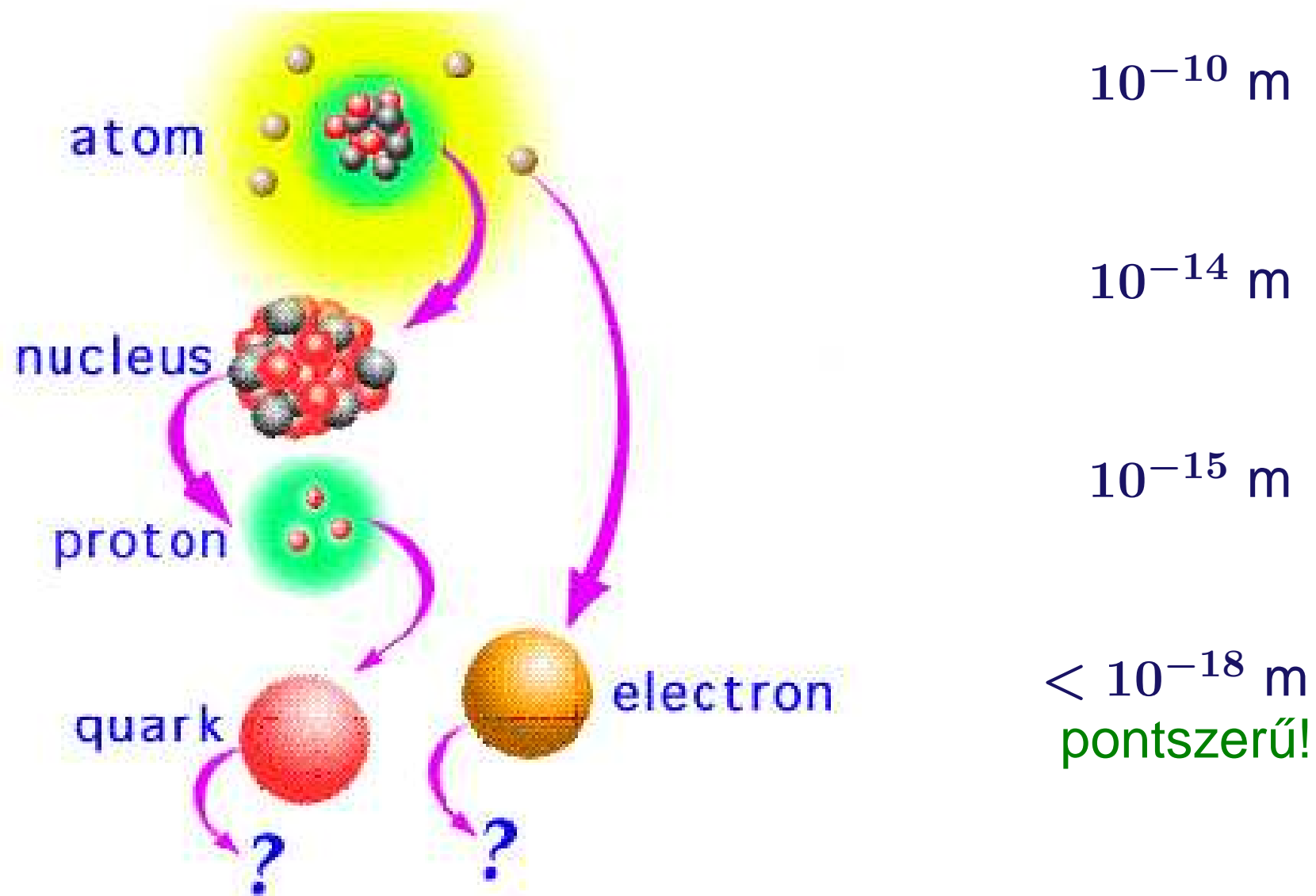
1970 óta: Standard Modell (David Gross: anyagelmélet)

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:

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

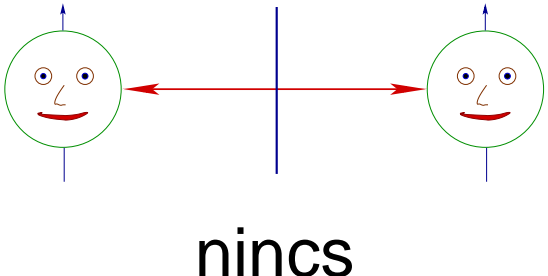
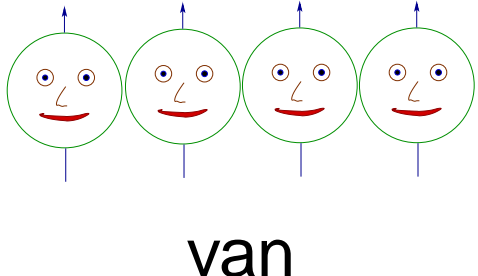
Nagyobb energia \Rightarrow kisebb távolság \Rightarrow mélyebb szerkezet

Tárgy	méret, m	energia
kicsi	10^{-3}	
baktérium	10^{-5}	
λ (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
Pauli-kizárás	van	nincs
Kondenzáció	 nincs	 van

Elemi (pontoszerű!) részecskék

Elemi fermionok:
leptonok és kvarkok

Elemi bozonok:
kölsönhatások közvetítói
+ 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)

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

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

- $\Delta^{++} = (u\uparrow u\uparrow u\uparrow)$ 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

- Δ^{++} 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 = $(\bar{q}\bar{q}\bar{q})$

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 osztóltés

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

\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}	$\sim 1/R$	∞	$10^{-20} - 10^{-16}$ 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}	$\sim \frac{1}{R}$	∞		graviton	0

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



A Standard Modell állatkertje

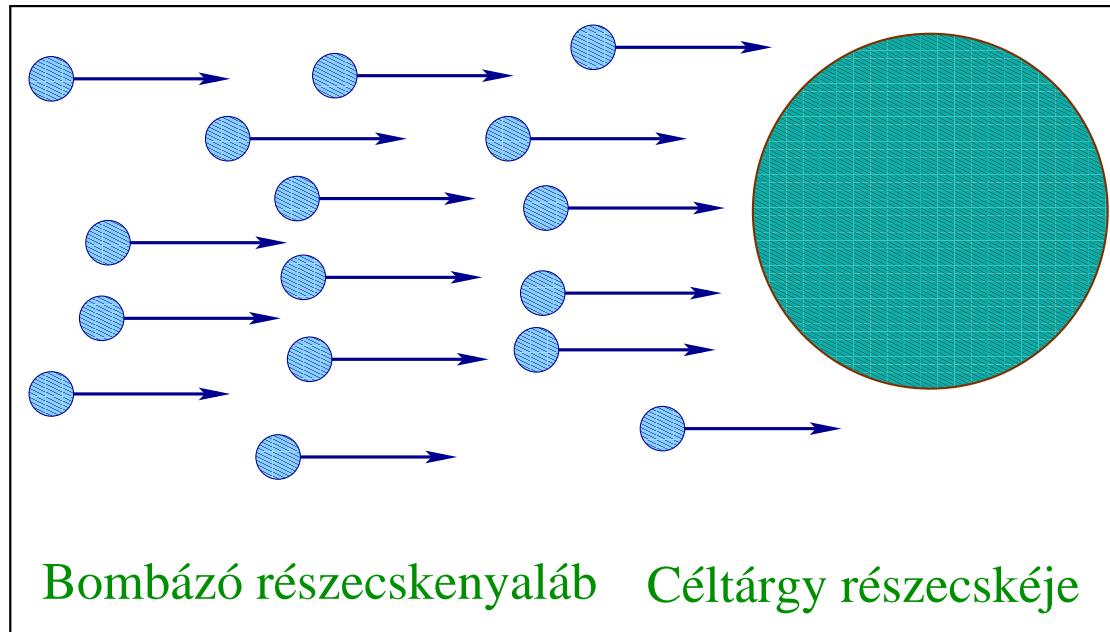
Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino e	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ	 $Z^0 W^\pm$
				 Higgs

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):

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

σ egysége: 1 barn = 10^{-28} m² (1 pb = 10^{-40} m²)



Amit mérünk: rezonancia

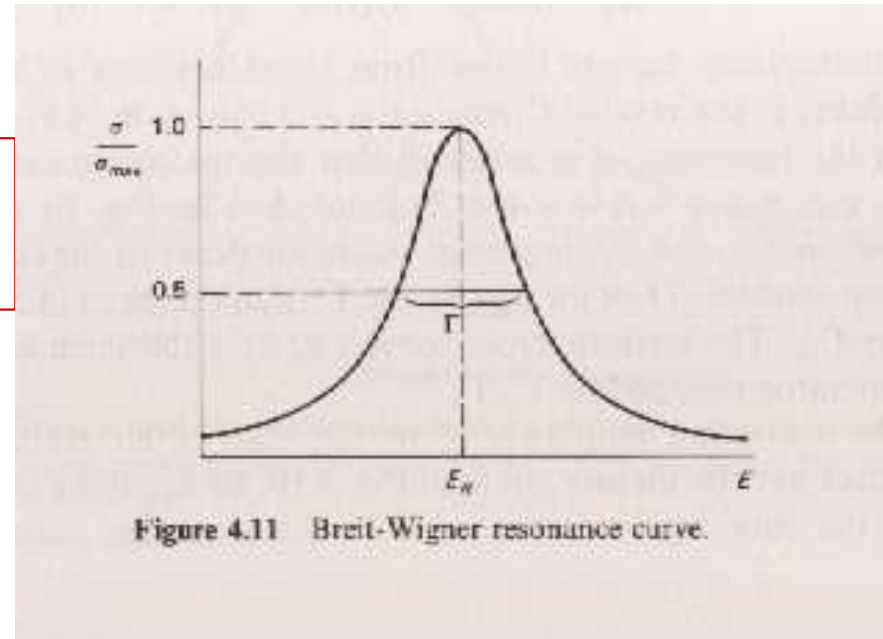
$\tau = \Gamma^{-1}$ élettartam \Rightarrow exp. bomlás: $N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$

Valószínűségeloszlás:

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

Breit-Wigner-formula

Mc^2 } rezonancia { helye
 Γ } } szélessége



Lorentz-görbe

Új részecske felfedezése:
rezonancia a tömegnek megfelelő ütközési energiánál

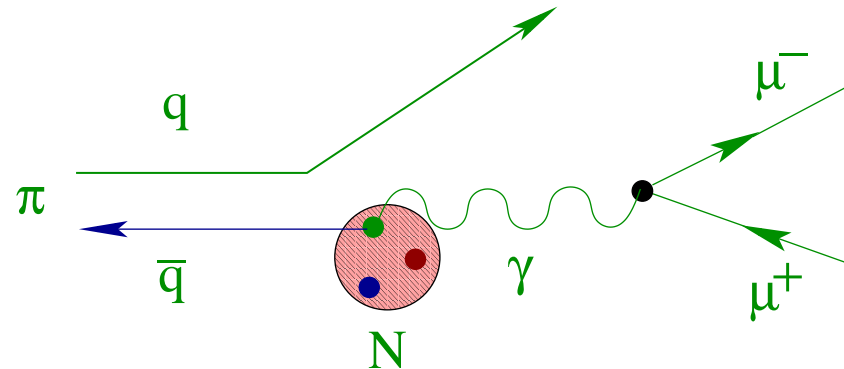


A kvarkok töltése: $\frac{2}{3}$ és $-\frac{1}{3}$?

Kvark ad-hoc, nyakatekert, szabadon nem létezik

Példa: elektromágneses pionszórás nukleonon

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



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):

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

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

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



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

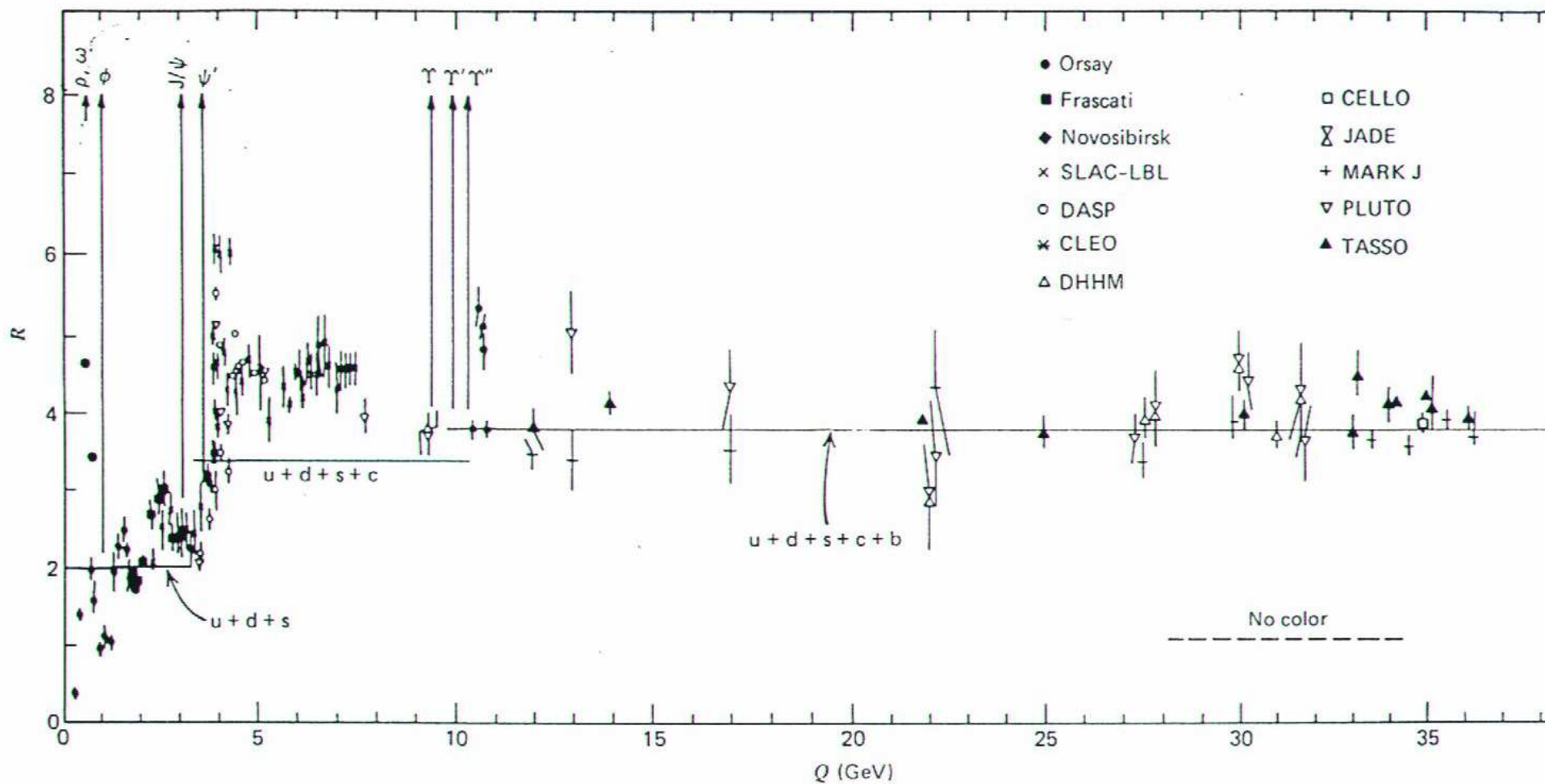


Fig. 11.3 Ratio R of (11.6) as a function of the total e^-e^+ center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of 1^- resonances just below or near the flavor thresholds.)



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

Mértékelmélet:

Lokális mértékszimméria ⇒ kölcsönhatás

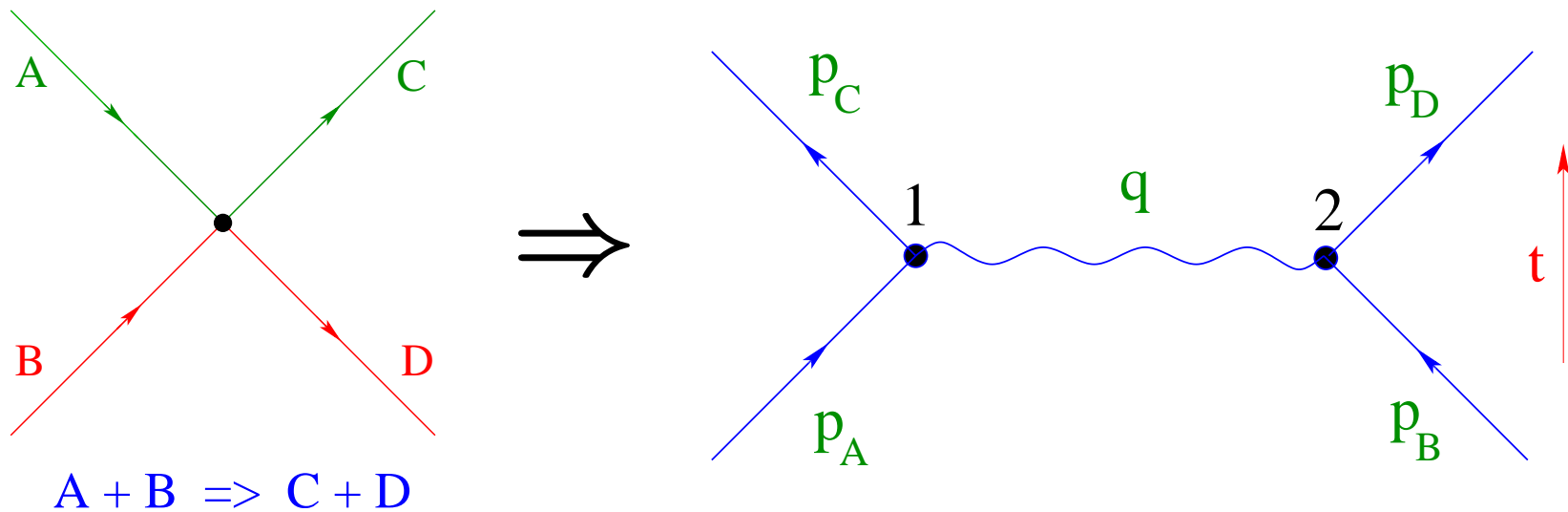
Lokális szimméria: pontról pontra meghatározott módon módosuló



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

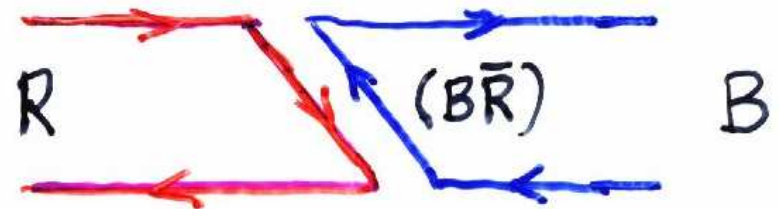
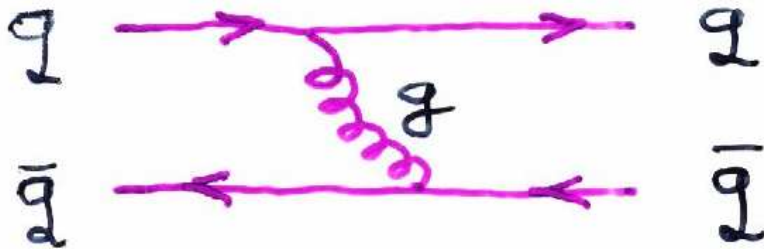


Kvantumszíndinamika, QCD

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 γ nem hordoz töltést

gluon két színt \Rightarrow g-g kölcsönhatás

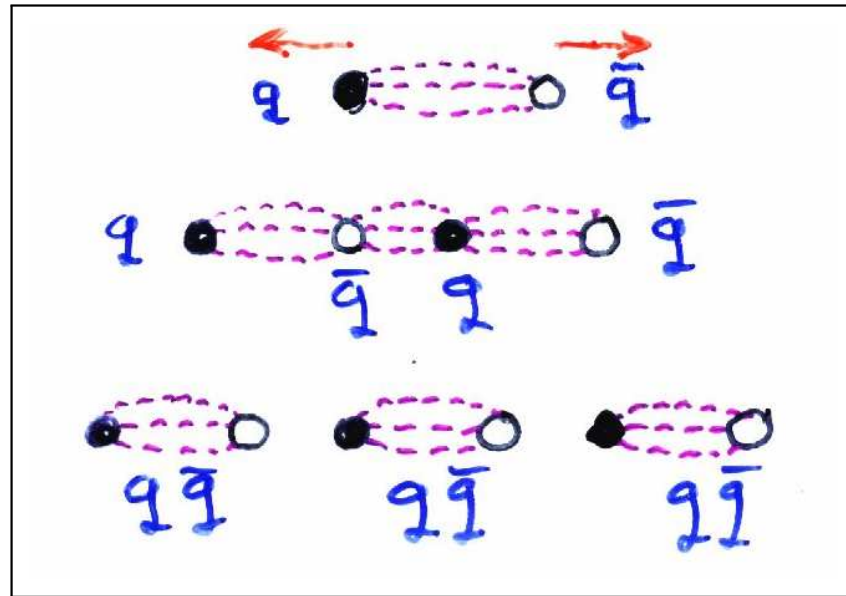
Fragmentáció, hadronizáció

Fragmentáció, hadronizáció:

Kvarkpárok keltése, amíg az energiából futja



nincs szabad kvark vagy gluon



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

M_{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:

$$m(W^\pm) = 80 \text{ GeV}; m(Z^0) = 91 \text{ GeV}!!$$

és a fermionoknak is van tömege.

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

Mindent megold a Higgs-mechanizmus!



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

Kísérletileg (még?) nem figyeltük meg,

LEP: $M(H) > 114.4 \text{ GeV}$

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:

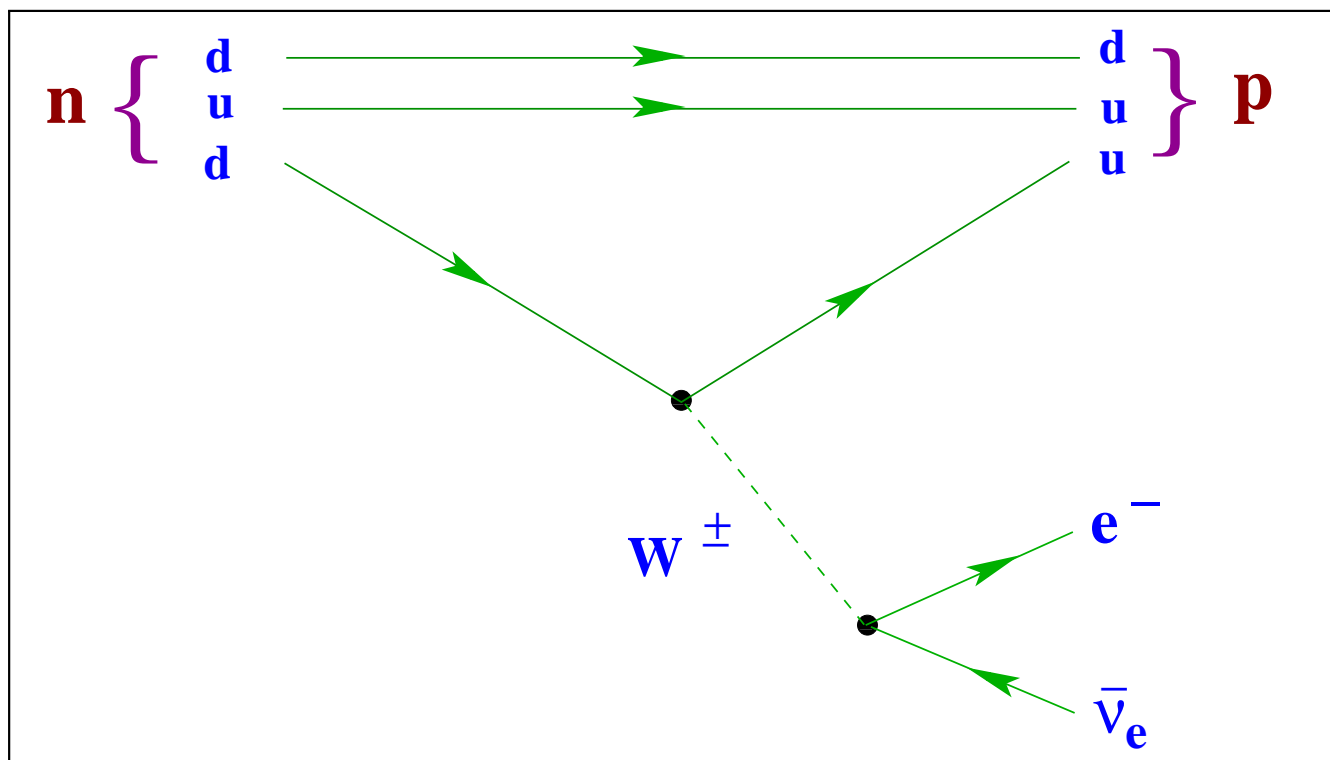
*My Life as a Boson: The Story of „The Higgs”,
Int. J. Mod. Phys. A 17 Suppl. (2002) 86-88.*



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

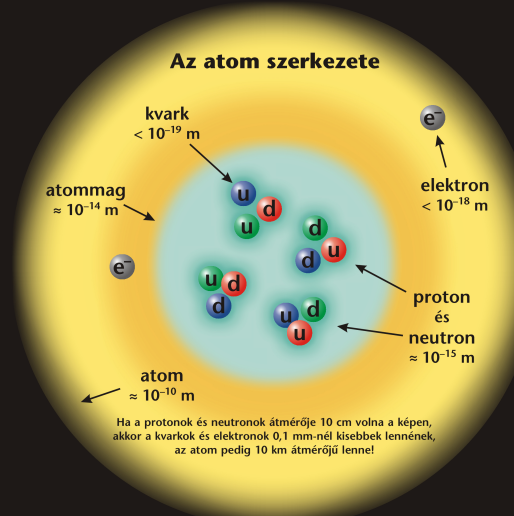
Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legpontosabb ismereteinket összegzi a Standard Modell, amely az erős és egyesített elektromgyenge kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard Modellnek.

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

kvarkok (spin = 1/2)			leptonok (spin = 1/2)		
jel/íz	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	jel/íz	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés
u up	0,003	2/3	ν _e elektron neutrínó	< 10 ⁻⁸	0
d down	0,006	-1/3	e elektron	0,000511	-1
c charm	1,3	2/3	ν _μ müion neutrínó	< 0,0002	0
s strange	0,1	-1/3	μ müion	0,106	-1
t top	175	2/3	ν _τ 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/c² egységekben ($E = mc^2$) mérik. 1 GeV = 10⁹ eV = 1,60 · 10⁻¹⁰ J. A proton tömege 0,938 GeV/c² = 1,67 · 10⁻²⁷ kg.

Töltés: az elektromos töltéseket a protontöltés egységében adjuk meg. A proton töltése 1,60 · 10⁻¹⁹ Coulomb.



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

erős – szín (spin = 1)			elektromgyenge (spin = 1)		
jel/név	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	jel/név	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés
g gluon	0	0	γ gamma-foton	0	0
W ⁻	80,39	-1	W ⁺ W-bozon	80,39	1
Z ⁰	91,187	0	Z ⁰ Z-null bozon	91,187	0

Szín-töltés: a kvarkok és gluonok „szín-töltést” hordoznak. A kvarkok három-, a gluonok nyolcféle „színűek” lehetnek. Kvarkok és gluonok szabadon nem létezhetnek. Őket a szín-töltések 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.

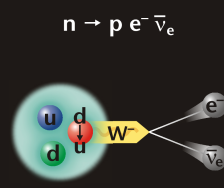
A spin a részecske saját perdülete. A spin \hbar egységekben adjuk meg, ahol $\hbar = h/2\pi = 6,58 \cdot 10^{-25}$ GeVs = 1,05 · 10⁻³⁴ Js.

Fermionikus hadronok

barionok (qqq) és antibarionok (q̄q̄q̄) – több száz ismert barion van				
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	spin
p proton	uud	0,938	1	1/2
anti-proton	ūūū	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 Z⁰-bozon, a γ-foton, vagy az η_c-mezon, de a K⁰-kaon, mely d̄s kvark-antikvark-párból áll, már nem.

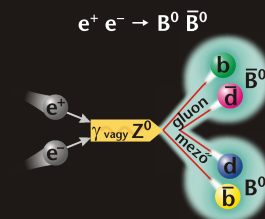
Az ábrák a jellemző fizikai folyamatokat csak szemléltetik, hozzájuk értelmes módon skálát rendelni nem lehet. A kékeszöld tartományok a gluonok felhőjét, illetve mezejét, a piros vonalak a kvarkok pályáját mutatják.



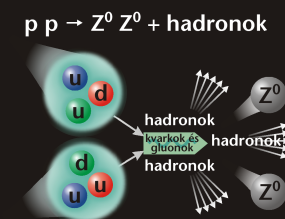
Egy neutron protonra, elektronra és antineutrínóra bomlik egy virtuális W-bozon (gyenge kölcsönhatás) közvetítésével. Ez a béta-bomlás.

A kölcsönhatások tulajdonságai

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



Nagy energiájú elektron–pozitron-ütközésben (elektromgyenge kölcsönhatás) B⁰-anti-B⁰ keltése, γ-foton vagy Z⁰-bozon közvetítésével.



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

Bozonikus hadronok

mezonok (q̄q) – több száz ismert mezon van				
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	spin
π ⁺ pion	uđ	0,140	1	0
K ⁺ kaon	sū	0,494	-1	0
ρ ⁺ ró-mezon	uđ	0,770	1	1
B ⁰ B-null mezon	dđ	5,279	0	0
η _c eta-c mezon	cđ	2,980	0	0

Az eredeti posztert a **Contemporary Physics Project** (<http://CPEPweb.org>) készítette. A project 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.