

Bevezetés a részecskefizikába

*Előadássorozat fizikatanárok részére
(CERN, 2007)*

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.



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!

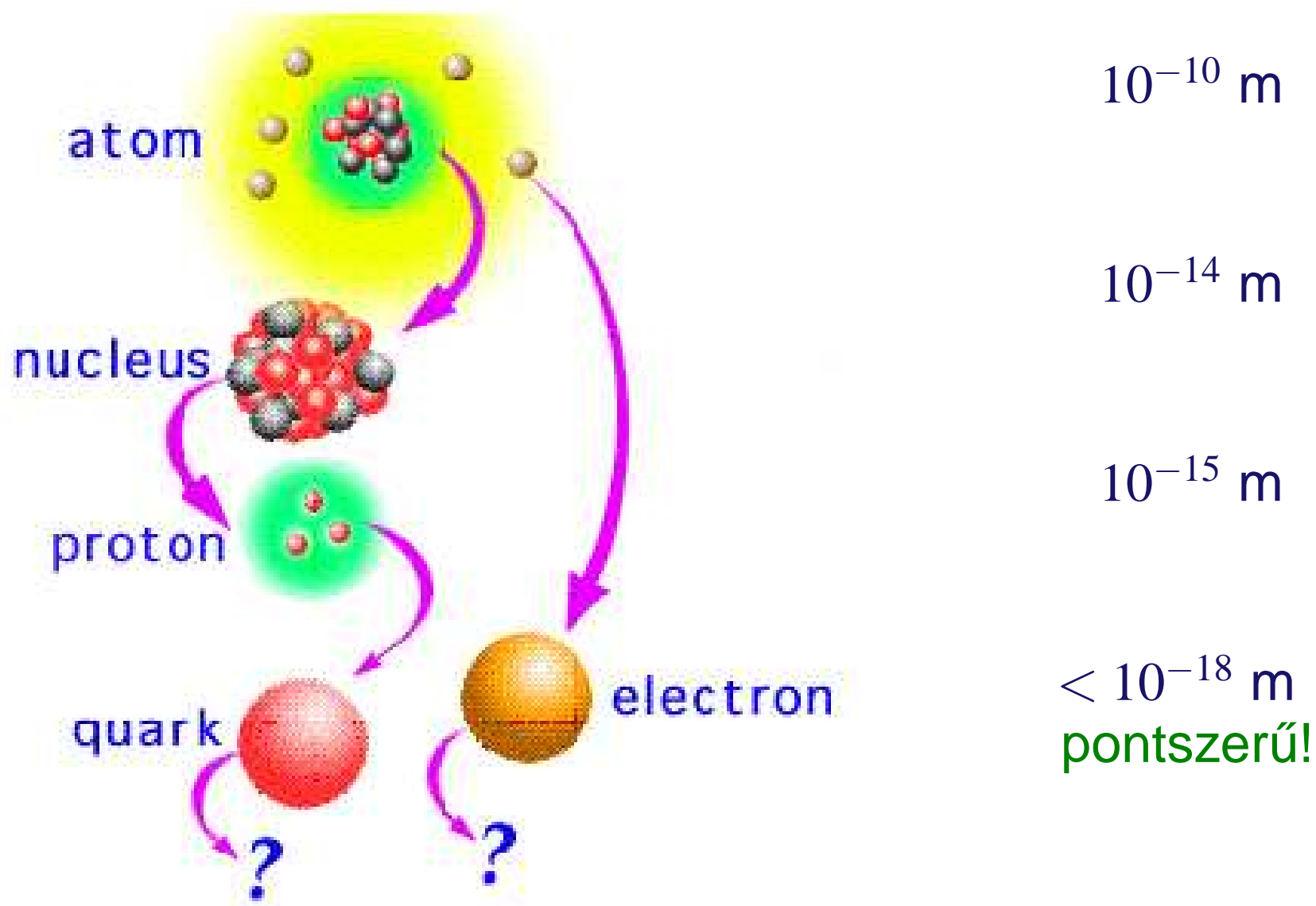
3 kölcsönhatás: származtatás???

1970 óta: Standard Modell (David Gross: anyagelmélet)
pontoszerű 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

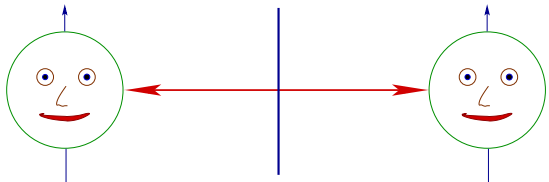
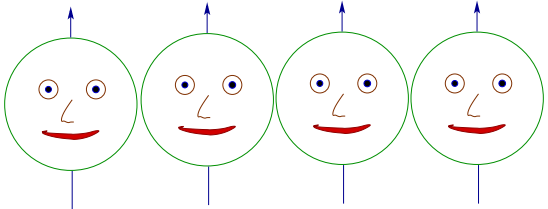
Tárgy	méret, m	energia
kicsi	10^{-3}	
baktérium	10^{-5}	
λ (fény)	10^{-7}	1 eV
atom	10^{-10}	1 keV
atommag	10^{-14}	1 GeV
elektron	10^{-18}	1 TeV



Fermionok és bozonok

Legfontosabb tulajdonság:

spin (perdület) = saját impulzusmomentum \hbar egységben

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

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 ↗ nő; kvarkbomlás: ↓, majd ↖

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

Hadronok: összetett részecskék

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

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

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

$$Q = 0, \pm 1, \pm 2, B = 1 \quad (\text{barionok})$$

Nukleonok:

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

$$J = \frac{1}{2}, B = 1$$

Pionok ($J = 0, B = 0$):

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

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 $\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$

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

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 osztótlés
 $\Sigma Q = Q_v + Q_{\ell^-} + 3(Q_u + Q_d) = 0 \Rightarrow$ anomáliák eltűnnek

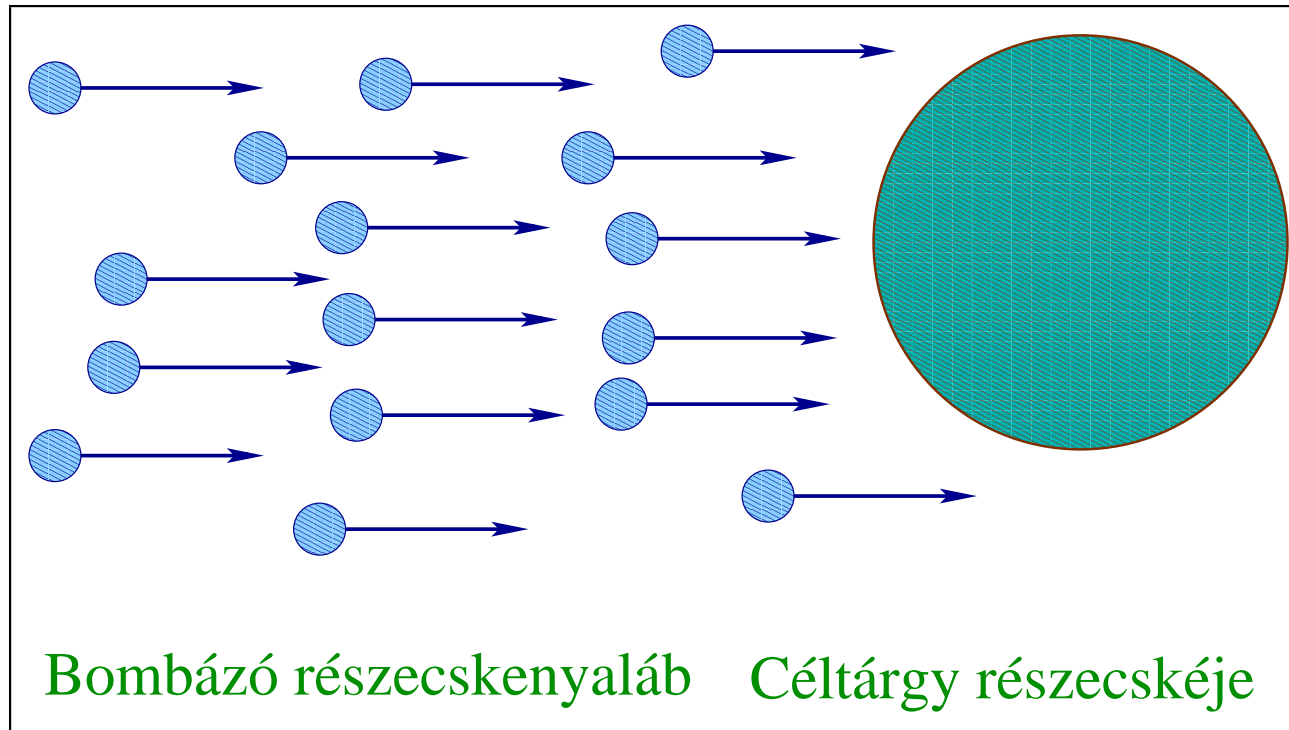
Kölcsönhatások és közvetítő bozonjaik

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

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



Amit mérünk: hatáskeresztmetszet



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

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

Fluxus = részecskék sűrűsége \times sebessége nyalámban:

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

Amit mérünk: rezonancia

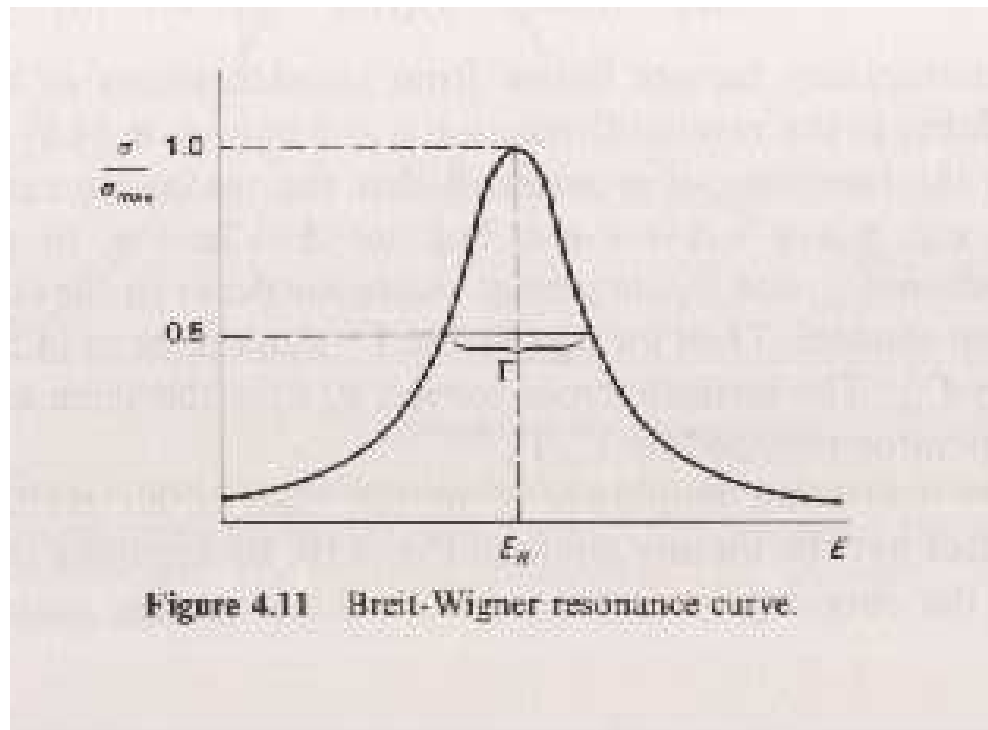
$\tau = \Gamma^{-1}$ élettartam \Rightarrow exp. bomlás: $N(t) = N_0 e^{-\Gamma t}$

Valószínűségeloszlás:

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

Breit-Wigner-formula

$\left. \begin{matrix} M \\ \Gamma \end{matrix} \right\}$ rezonancia $\left\{ \begin{matrix} \text{helye} \\ \text{szélessége} \end{matrix} \right.$



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, de egyetlen modell (Nambu!) és kísérlet igazolja

Semleges mezonok elektromágneses bomlása

$$V^0 = (q\bar{q})$$

$$\Gamma(V^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-) \sim Q_q^2$$



$$\rho(770) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$$

$$\omega(782) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$$

$$Q_q^2 = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{2}{3} - \left(-\frac{1}{3}\right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{2}$$

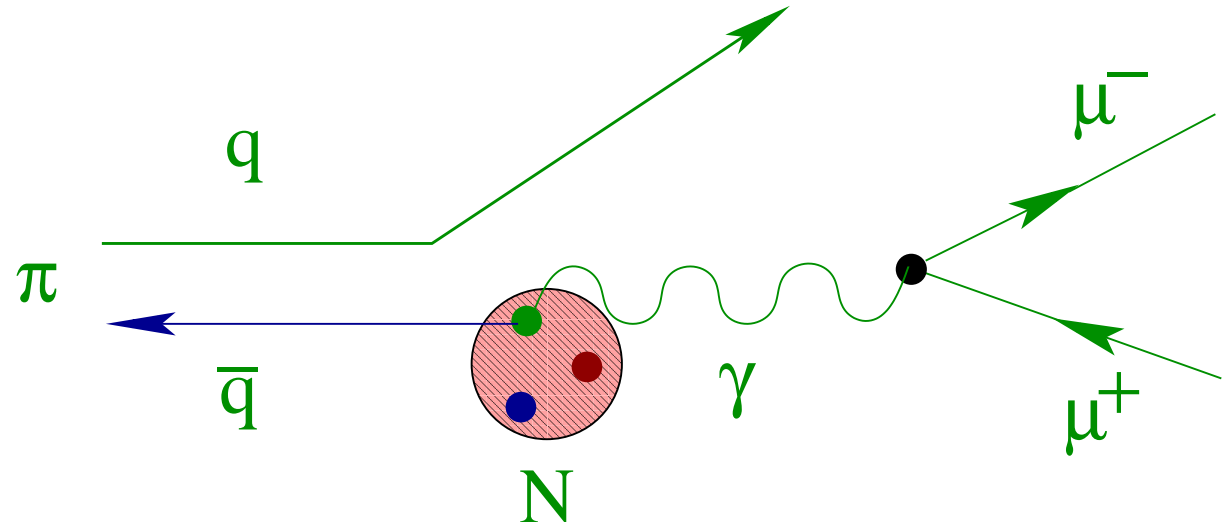
$$Q_q^2 = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{18}$$

$$\Gamma_e(\rho) : \Gamma_e(\omega) \sim 9 : 1 \quad \text{mért arány} \sim 11 : 1$$

$$\text{de pl. } 1 : 1 \text{ ha } Q_u = 1; Q_d = 0$$

Elektromágneses pionszórás nukleonon

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



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

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

Hadronképződés hatáskeresztmetszete

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

Lehetséges 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:

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

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

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

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

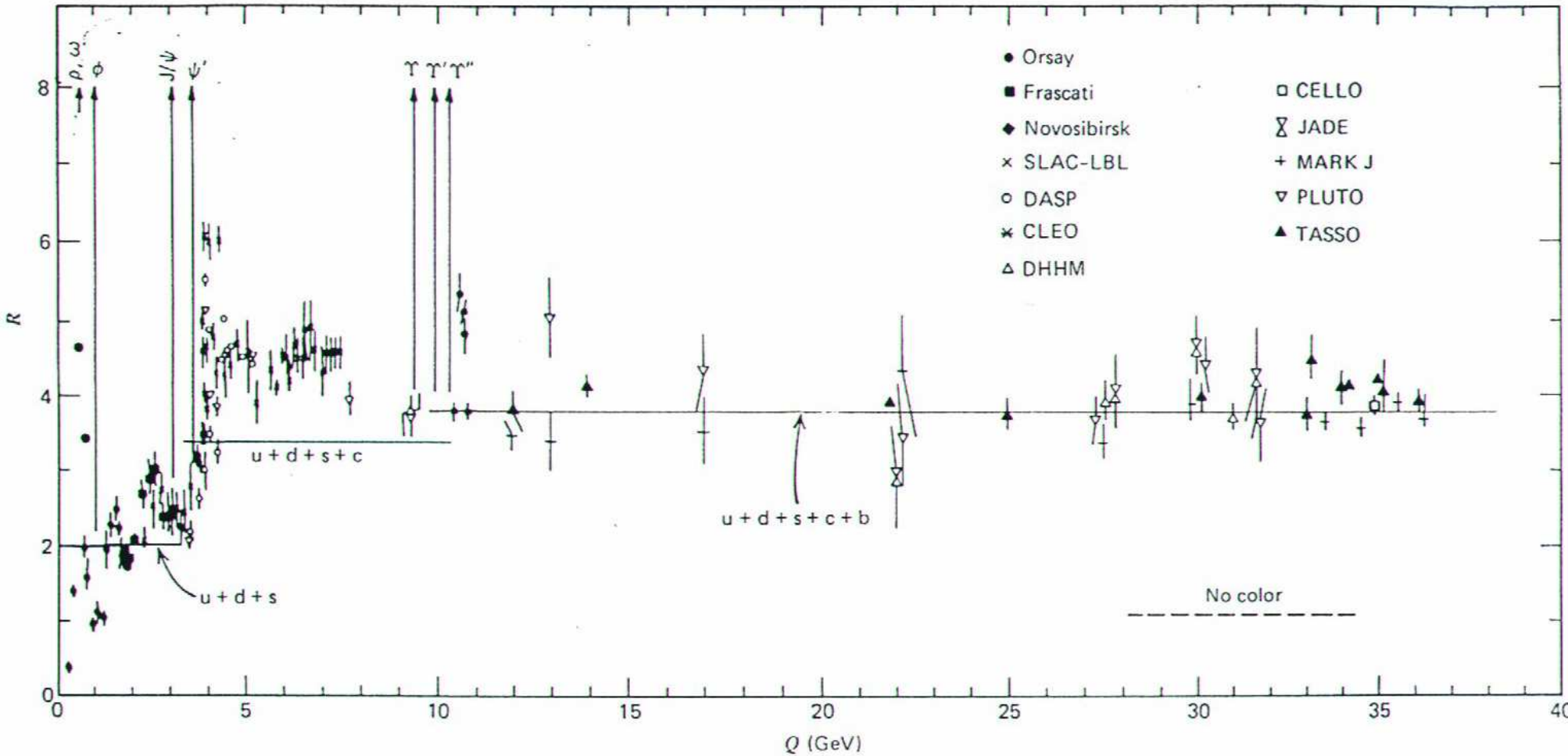


Fig. 11.3 Ratio R of (11.6) as a function of the total e^-e^+ center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of $q\bar{q}$ resonances just below or near the flavor thresholds.)

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

Noether-tétel:

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

Mértékelmélet:

Lokális szimmetria ⇒ kölcsönhatás

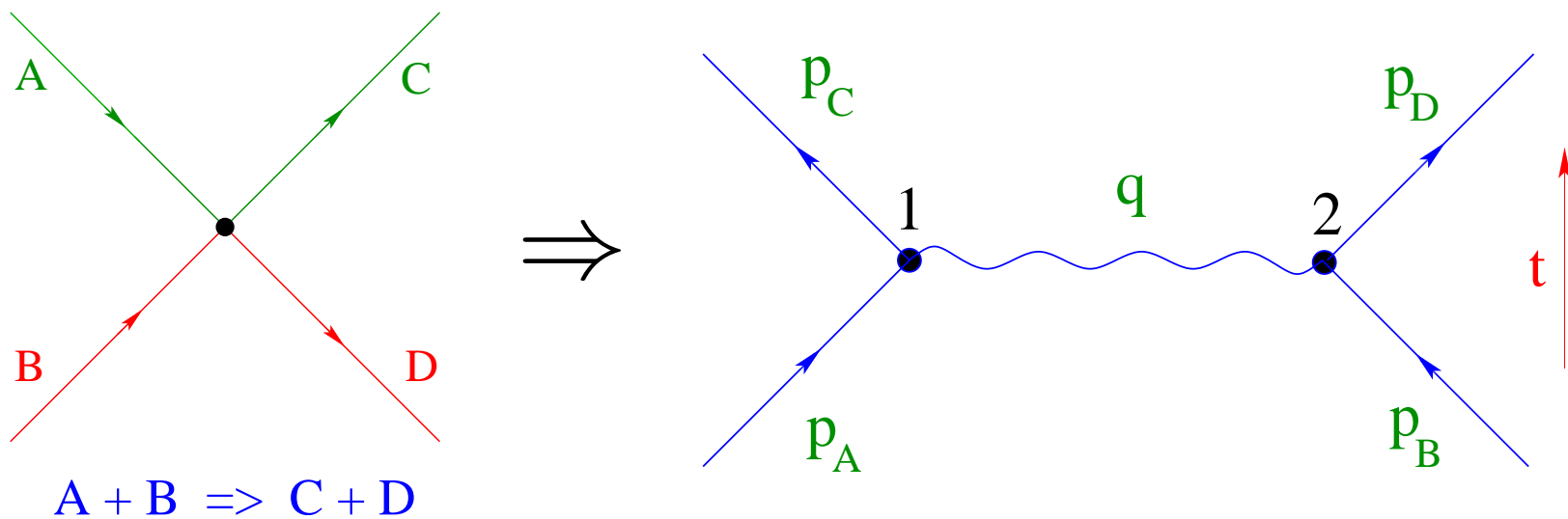
Lokális szimmetria: pontról pontra meghatározott módon módosuló



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 \Rightarrow virtuális

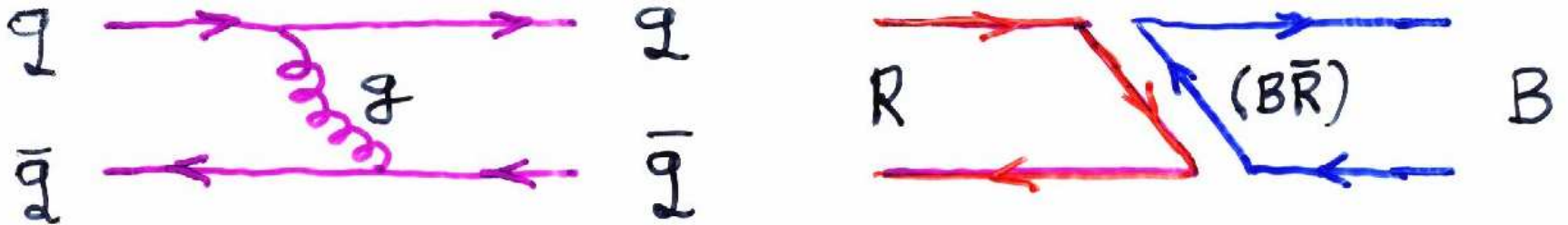
Kvantumszíndinamika, QCD

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 , J , de γ nem hordoz töltést

gluon két színt \Rightarrow g-g kölcsönhatás $\Rightarrow V(r) \sim r$

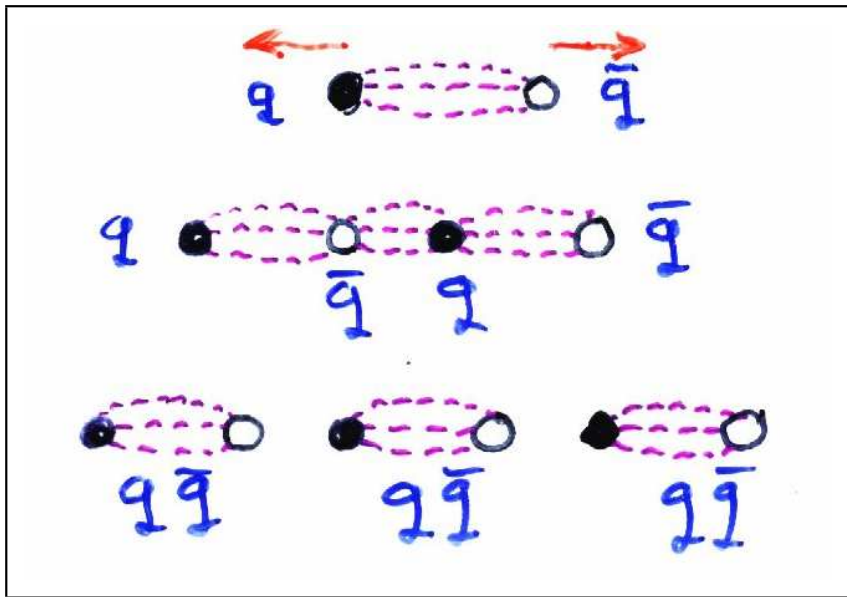
Fragmentáció, hadronizáció

Fragmentáció, hadronizáció:

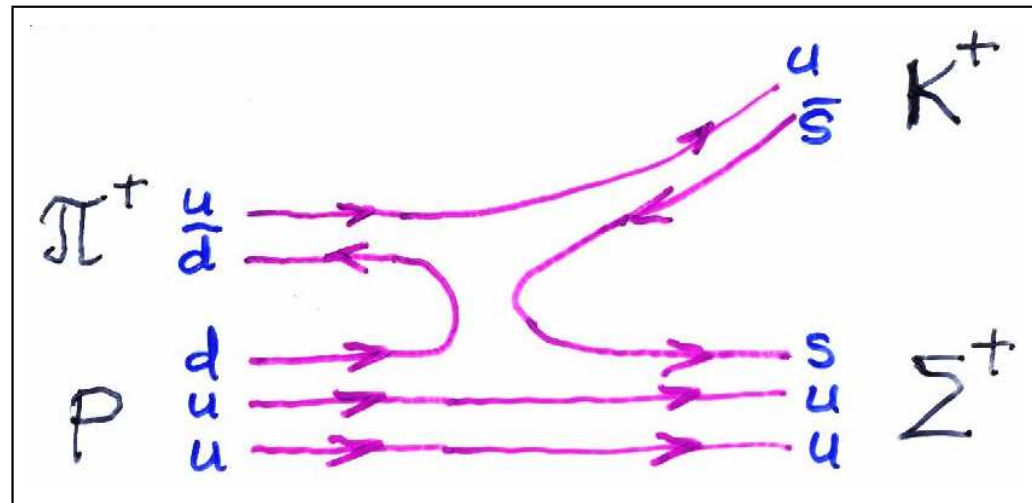
Kvarkpárok keltése, amíg az energiából futja



nincs szabad kvark vagy gluon



szakadó gluonszál



Példa: $p\pi^+ \rightarrow K^+\Sigma^+$
kvarkvonalakkal

Mérték-kölcsönhatások elmélete

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

Lokális szimmetria \Rightarrow speciális (*kovariáns*) deriválás

Háromféle lokális szimmetria, három kölcsönhatás:
elektromágneses, **gyenge** és **erős** (szín-)

Mértékbozonok mind zérus-tömegűek:
foton és 8 gluon rendben.

De 3 gyenge bozon nehéz:

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

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

Megoldás: Higgs-mechanizmus



Spontán szimmetriasértés \Rightarrow tömeg

Gyenge
bozonok
tömege



Higgs-
bozon



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

A Higgs-bozon

A spontán szimmetriasértés *mellékterméke*

A részecskefizika legkeresettebb része, mivel a Standard Modell egyetlen hiányzó láncszeme

Kísérletileg nem figyeltük meg,
az elmélet szerint léteznie kell

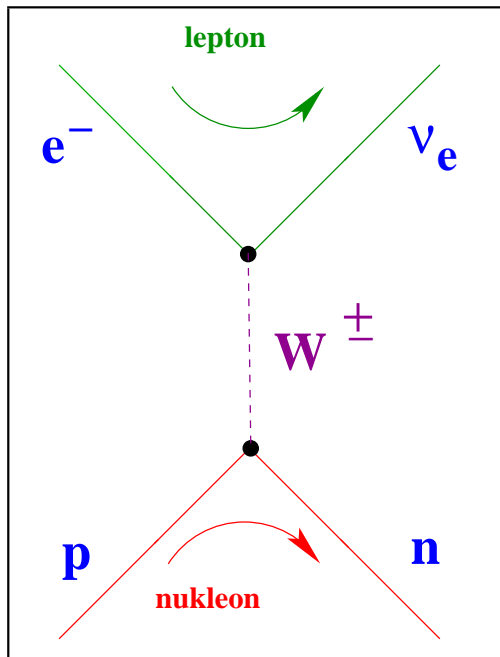
mert tömeget teremt és rendbeteszi a divergenciákat

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

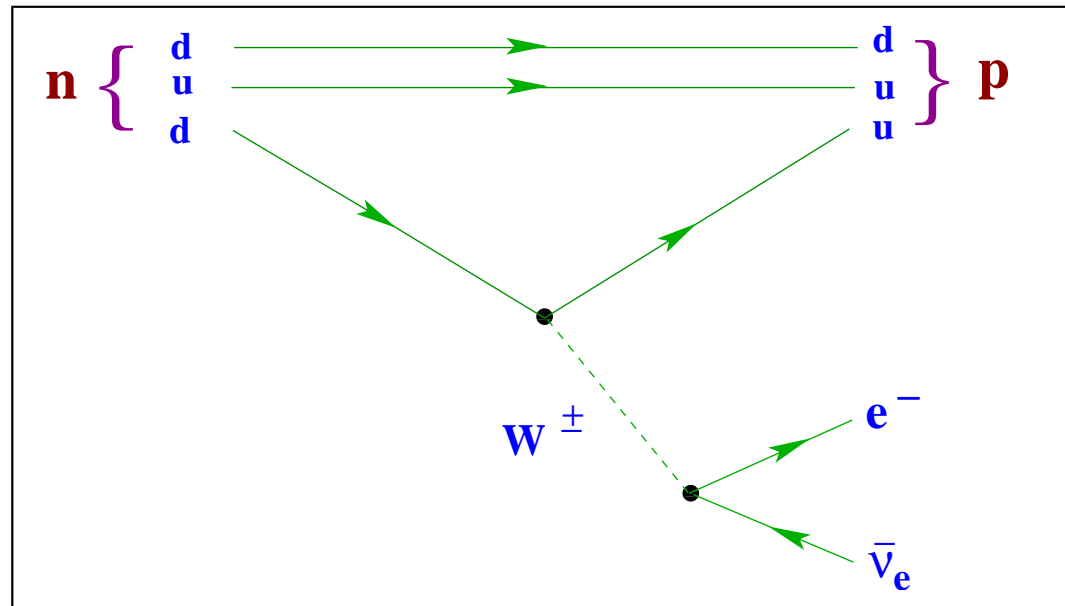
Elektrogyenge kölcsönhatás

Elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítése
a Higgs-mechanizmus jótékony közreműködésével

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



















Standard Modell:
áram-áram
kölcsönhatás



neutronbomlás

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