

Kvarkok, elemi részecskék, köölcsönhatások

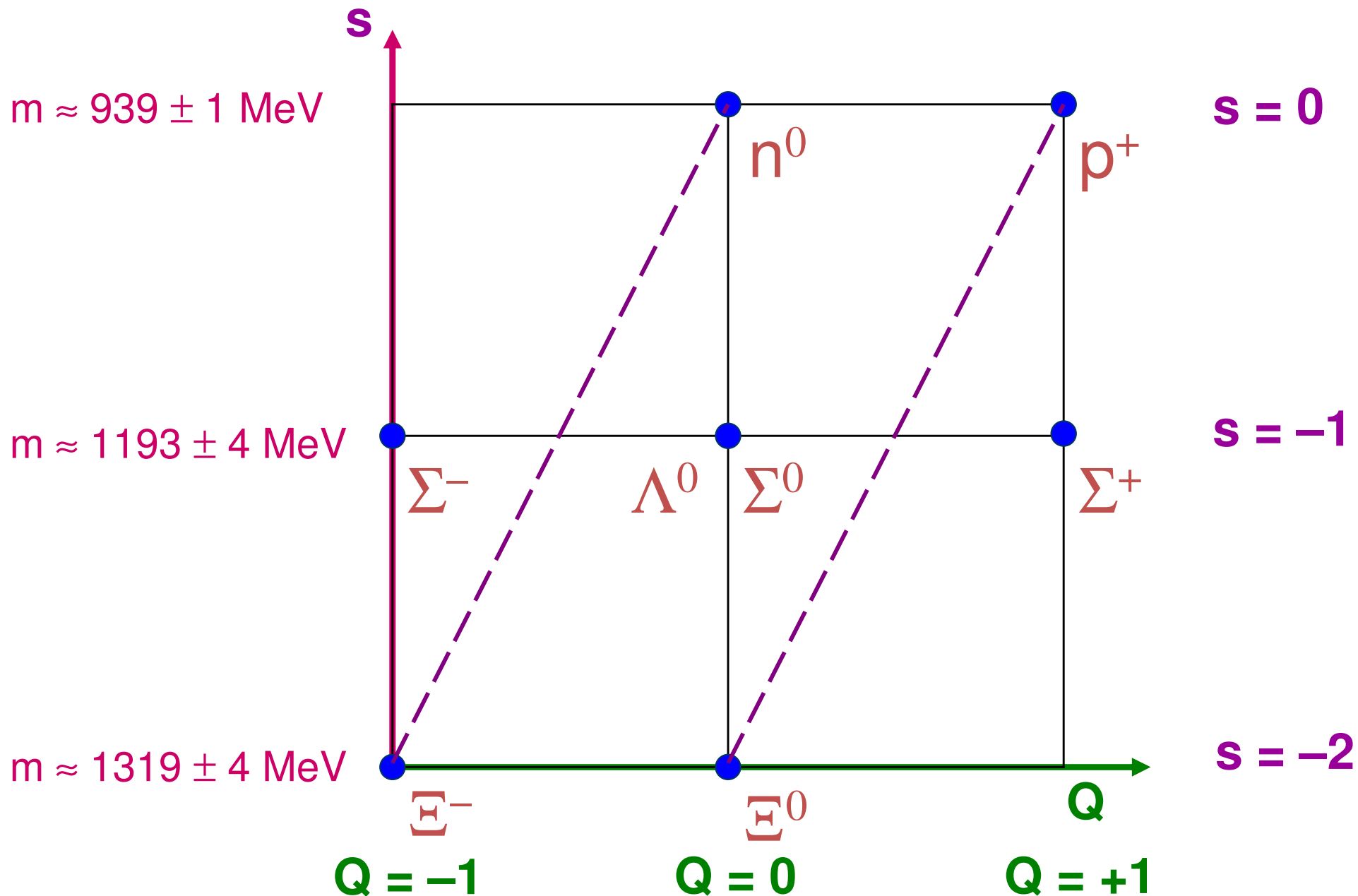
Atommag és részecskefizika

4. előadás 2011. március 8.

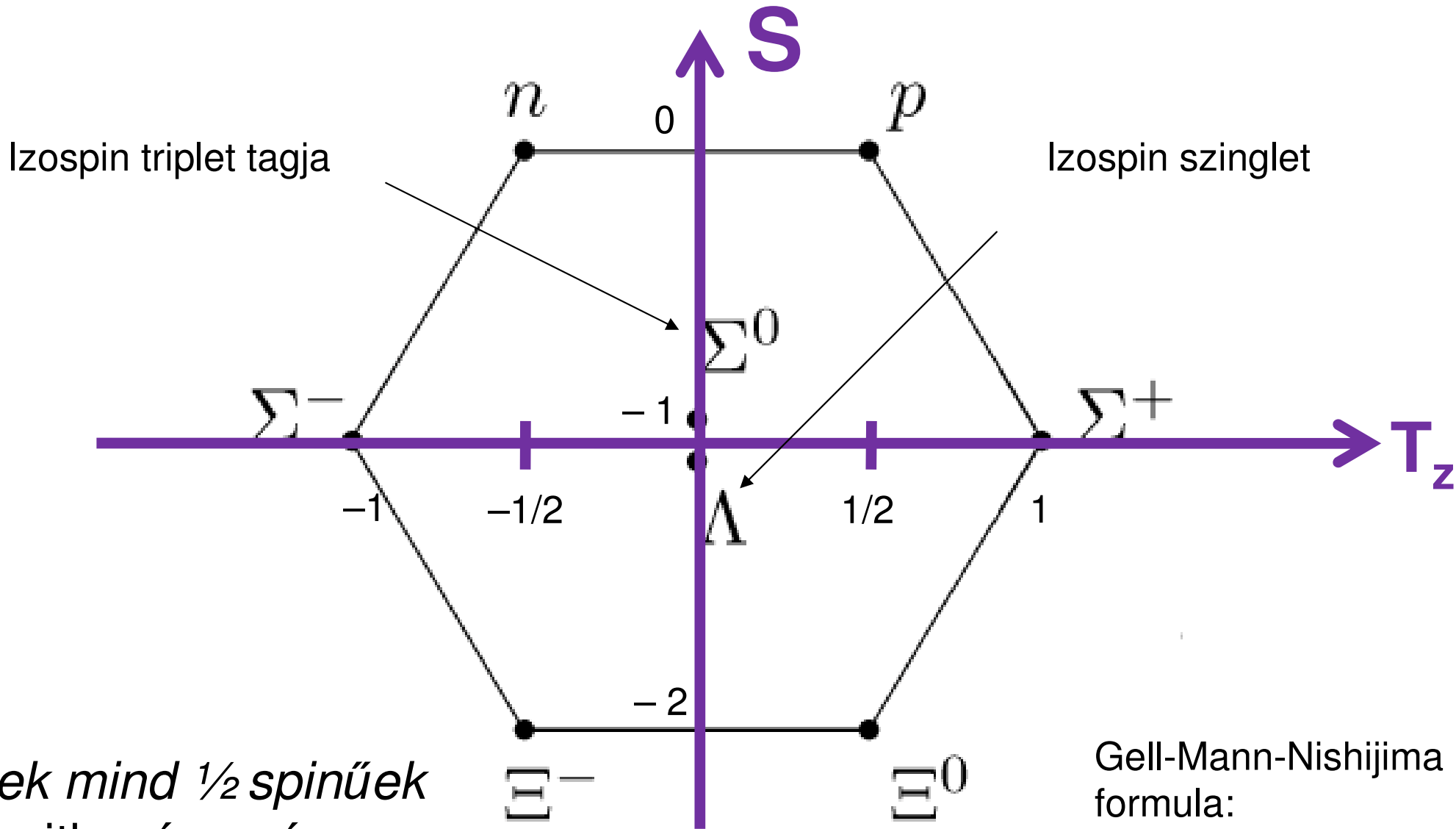
Új részecskék

- K^0, \bar{K}^0, K^+, K^- ± 1 kb. 500 MeV
- Λ^0 -1 kb. 1116 MeV
- $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$ -1 kb. 1190 MeV
- Ξ^-, Ξ^0 -2 kb. 1320 MeV
- Ω^- -3 kb. 1672 MeV

A nehezebb részecskék osztályozása



A nehezebb részecskék (barionok) osztályozása



Ezek mind $1/2$ spinűek

S = ritkaság-szám

T_z = izospin harmadik komponense

Gell-Mann-Nishijima formula:

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S).$$

Gell-Mann – Nishijima formula

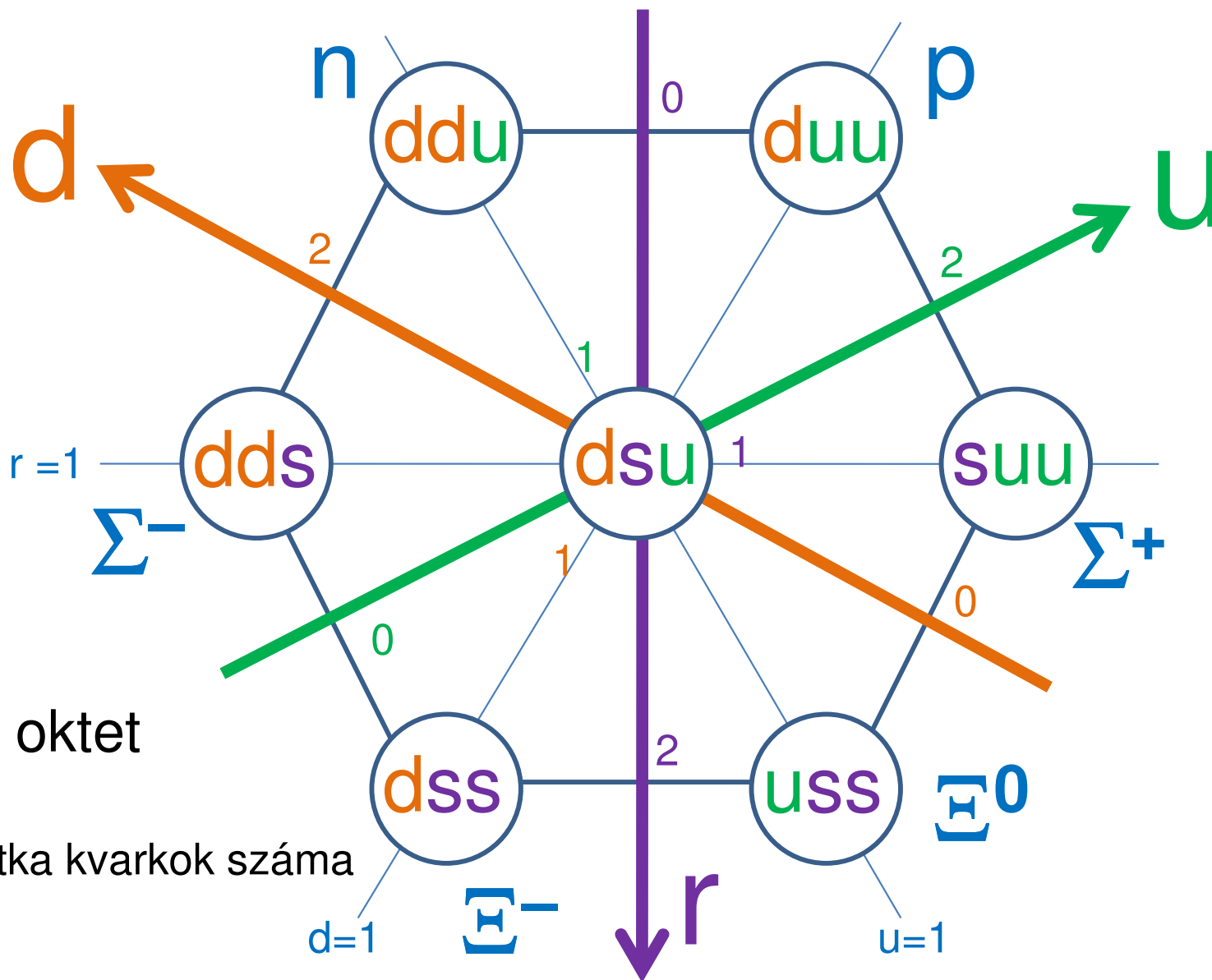
$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S).$$

- Q : elektromos töltés
- I_3 : izospin harmadik komponense
- S : ritkaság
- B : barionszám (három kvarkból álló részecskék)
- $Y=B+S$ neve: hipertöltés

$$B = \frac{1}{3} (n_q - n_{\bar{q}}),$$

Kvark-gondolat

A részecskék kirakhatók három kvarkból: u,d,s



Barion oktet

$r = -s =$ ritka kvarkok száma
 $\text{spin} = 1/2$

	T_z	s
u	+1/2	0
d	-1/2	0
s	0	-1

A kvark-gondolat

Van valami szabályosság! (Gell-Mann, Ne'eman, Nishijima)
Építőkövek ritkasága és izospin harmadik komponense alapján előállítható ez a hatszög szerkezet. (Nobel-díj: 1969).

Igazából: csoportelméleti probléma.

Három építőkö van:

- ritka építőkö, **jele s (strange)**,
r=ritka építőkö száma, $r=-s$, ahol s a korábban definiált ritkaság-szám
- nem ritka építőkö, de T_z -je 1/2, **jele u (up)**
- nem ritka építőkö, de T_z -je -1/2, **jele d (down)**

A nehéz részecskéket 3, a közepeseket 2 ilyenből rakjuk össze

S és T_z összeadó mennyiségek, a bemutatott összeállítás mellett minden, eddig kísérletben tapasztalt S és T_z kijön.

A mezon neve		kvarkok	Tömeg (GeV/c ²)	átlagos élettartam	elektromos töltés (e)
pozitív pion	π^+	$\bar{d}u$	0,139	$2,6 \cdot 10^{-8} \text{s}$	+ 1
negatív pion	π^-	$d\bar{u}$			- 1
semleges pion	π^0	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	0,135	$8,3 \cdot 10^{-17} \text{s}$	0
pozitív kaon	K^+	$u\bar{s}$	0,494	$1,2 \cdot 10^{-8} \text{s}$	+ 1
negatív kaon	K^-	$\bar{u}s$			- 1
semleges kaon	K^0	$d\bar{s}$	0,498	$5,2 \cdot 10^{-8} \text{s}$ és $8,9 \cdot 10^{-11} \text{s}$	0
anti-kaon	\bar{K}^0	$s\bar{d}$			0
J-pszí	J/Ψ	$c\bar{c}$	3,097	$0,8 \cdot 10^{-20} \text{s}$	0
üpszilon	Y	$b\bar{b}$	9,460	$1,3 \cdot 10^{-20} \text{s}$	0
eta-null	η^0	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$	0,547	10^{-22}s	0

Kvarkok kvantumszámjai

elektromos töltés $Q(u)=x$, $Q(d)=y$

$$Q(\text{proton})=1=2x+y, \quad Q(\text{neutron})=0=x+2y$$

$$Q(p-2n)=1-2 \times 0 = -3y=1 \quad \rightarrow \quad y = -1/3 \rightarrow x = 2/3$$

tört töltés! (és az elektron tényleg elemi)

$$Q(\Xi^0)=Q(uss)=0 \rightarrow Q(s) = -1/3$$

	u	d	s
izospin harmadik komponense (T_z)	1/2	-1/2	0
izospin (T)	1/2	1/2	0
ritkaság (s)	0	0	-1
spin	1/2	1/2	1/2
elektromos töltés (Q)	2/3	-1/3	-1/3

A kvarkok kvantumszámjai

1. Az izospinek harmadik komponensei pont kijönnek:

$$p = uud \quad 1/2+1/2-1/2=1/2$$

$$n = udd \quad 1/2-1/2-1/2=-1/2$$

$$\Sigma^+ = suu \quad 0+1/2+1/2=1$$

2. Az elektromos töltés: $p=uud \quad 1=2x+y \quad \rightarrow 1=x+1/3 \rightarrow x=2/3$
 $n=udd \quad 0=x+2y \rightarrow 1=3(x+y) \quad y=-1/3$

tört töltések!

$$\Sigma^+=suu \quad 1=z+4/3 \rightarrow z=-1/3$$

$$Q(u)=2/3, Q(d)= -1/3, Q(s)= -1/3$$

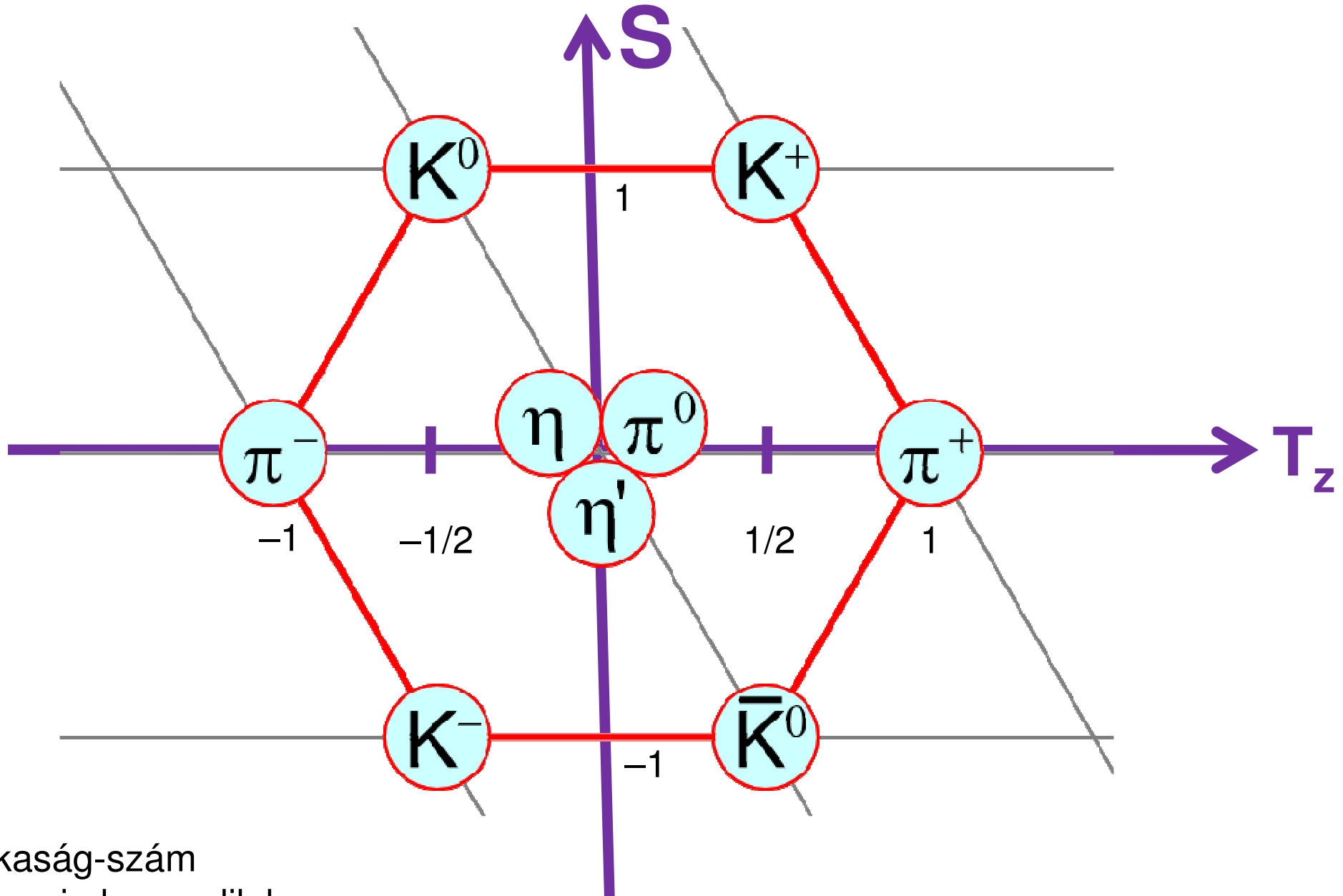
3. ritkaság kvantumszám: u: 0, d: 0, s: (-1)

4. spin = 1/2, (mint minden más elemi részecskének)

Érdekesség: dsu (középen) lehet két részecske is. Ez $T_z=0$ állapotú részecske. Tartozhat $T=1$ -hez és $T=0$ -hoz is. A $T=1$ uds három kb. azonos tömegű részecskéből az egyik (ezek neve is azonos: Σ).

A különbség a tömegükön kívül, hogy a kvarkok másként rendeződnek el bennük. (Egyfajta gerjesztett állapotnak is hívhatjuk.) Σ^0 bomlása: $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$

A közepes tömegű részecskék osztályozása (mezonok)



S = ritkaság-szám

T_z = izospin harmadik komponense

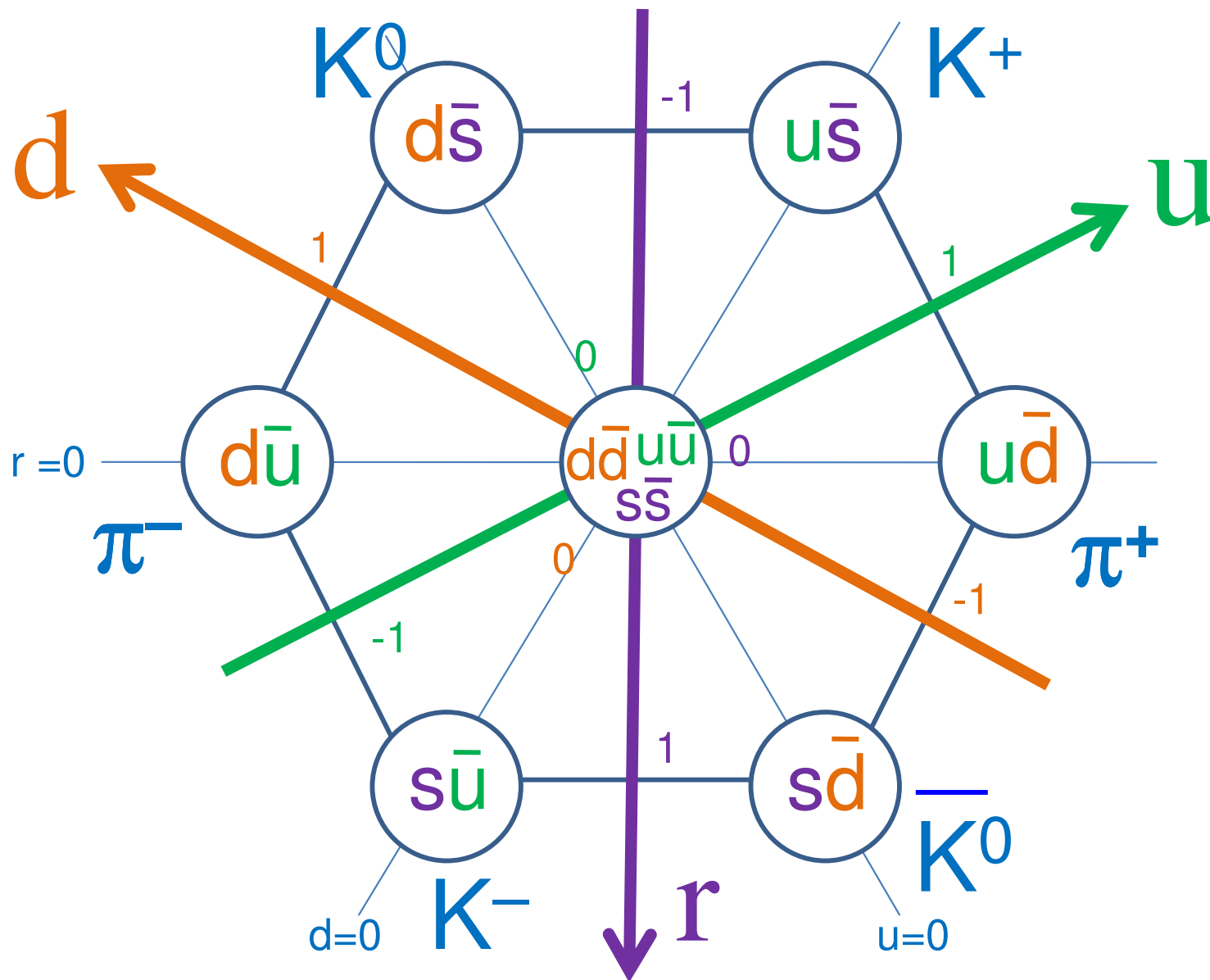
SU(3) csoport: 3 kvark: u, d, s

- Fundamentális ábrázolás: **3** (kvark)
- Komplex konjugált ábrázolás: $\bar{3}$ (antikvark)
- **Egy kvark és egy antikvark 9-féle módon párosítható:**
- Triviális ábrázolás: **1** (szinglet)
- Adjungált ábrázolás: **8** (oktet)

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

A kvark u, d vagy s mivolta a kvark íze (flavour), SU(3) az íz-szimmetria csoport

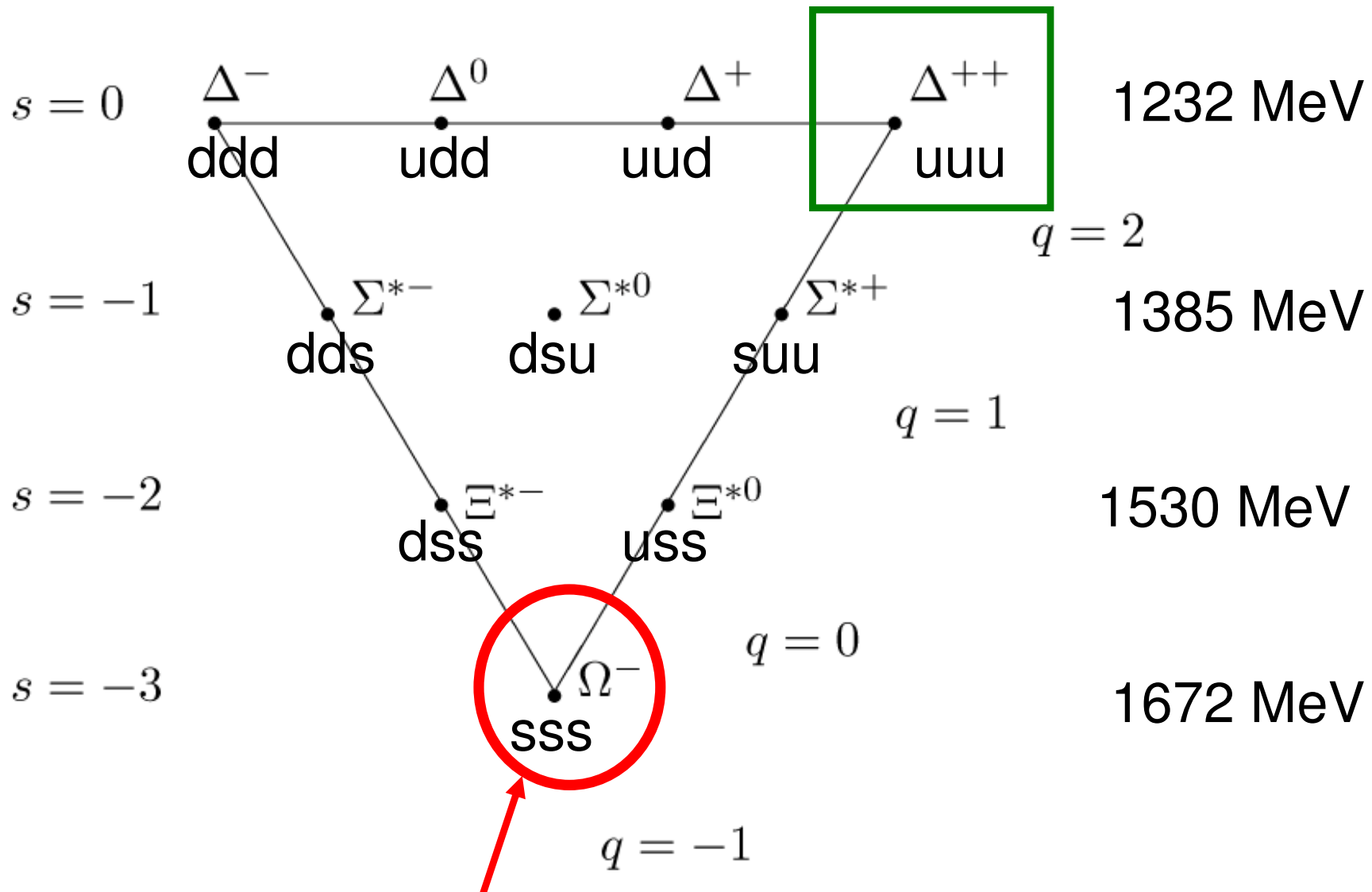
A közepes tömegű részecskék osztályozása



$r = -s =$ ritka kvarkok száma
 spin=0

Mezon oktet

Nehéz részecskék (barionok) 3/2 spinnel



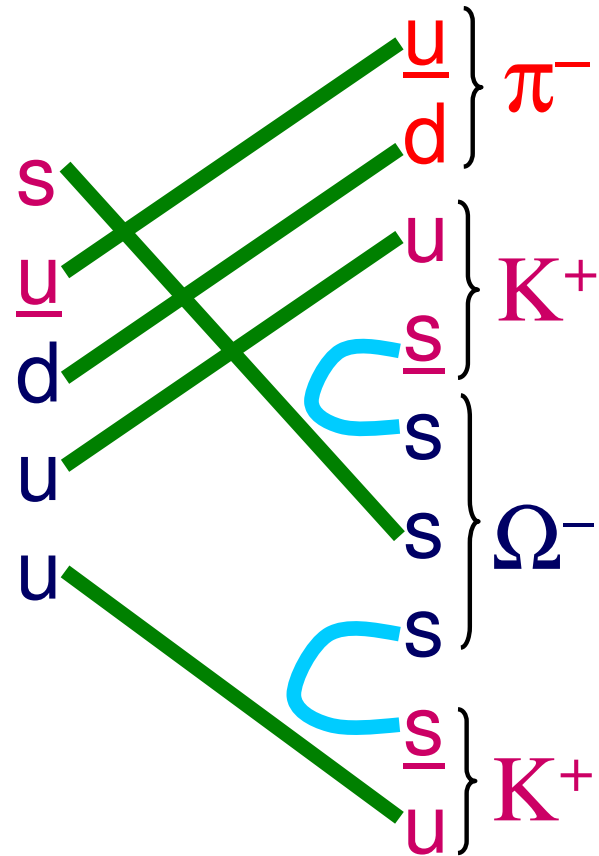
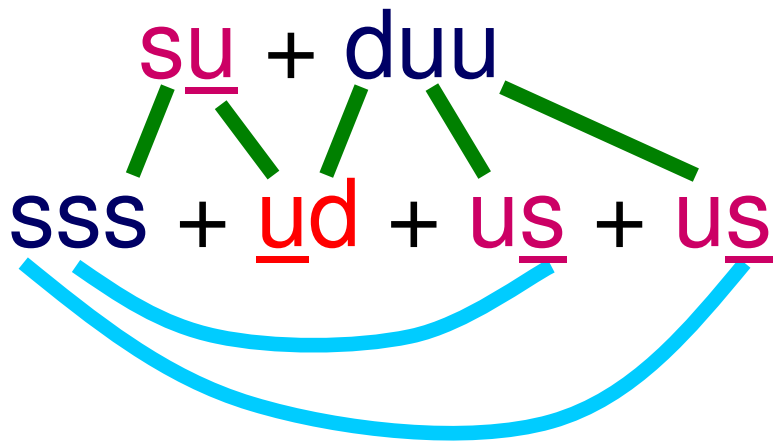
Barion dekuplet

Ezzel a módszerrel jóstolták meg a létét!

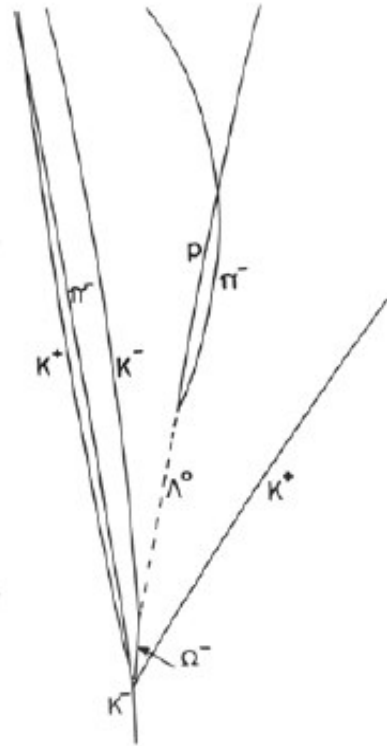
$$\Delta^{++}(uuu)$$

- A három feles spinű u kvark spinje egyirányba mutat (teljes spin = $3/2$)
- Pályaimpulzusmomentum: 0
- Teljesen szimmetrikus állapot (hullámfgv)
- Pauli-elv: nem lehetnek egy kvantumállapotban (antiszimmetrikus kell)!
- Kell, hogy legyen egy eddig ismeretlen kvantumszámuk, amely megkülönbözteti őket: **SZÍN**
- Ebben antiszimmetrikusak lesznek az állapotok

Reakciók a kvark-képben 1.



Múlt órán volt:



mechanizmus:

két $s\underline{s}$ keltés

az új m_0 -t a E_{kin} fedezi

Reakciók a kvark-képben 2.

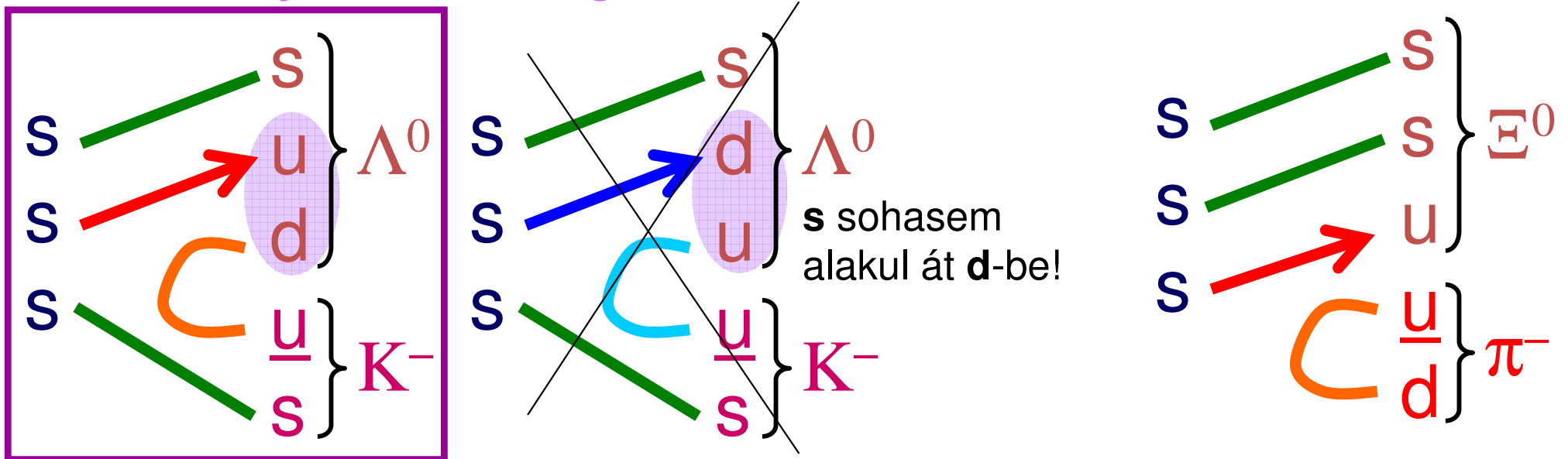
$$\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + K^-$$

$$SSS \rightarrow dsu + \underline{s}\underline{u}$$

melyik valósul meg?

$$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$$

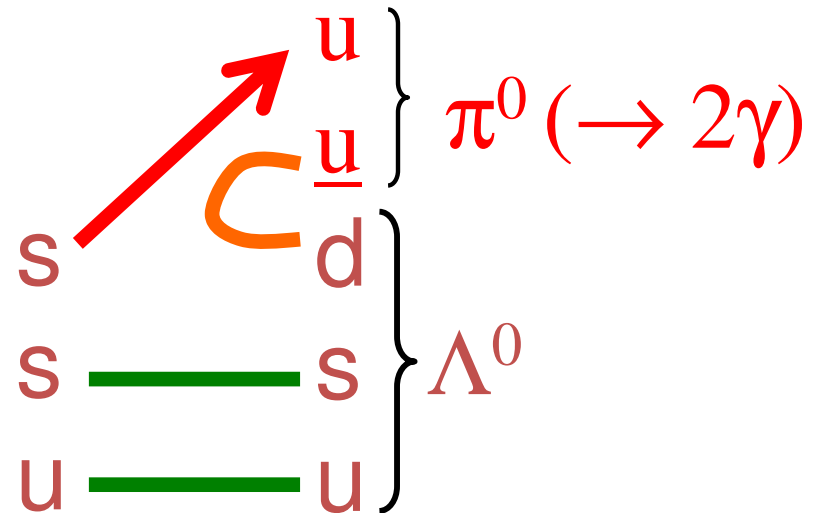
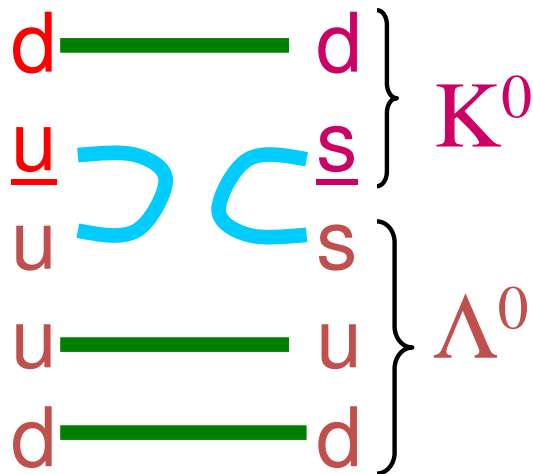
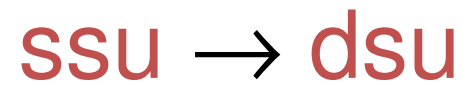
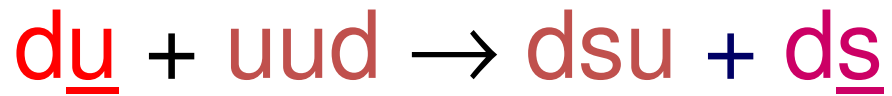
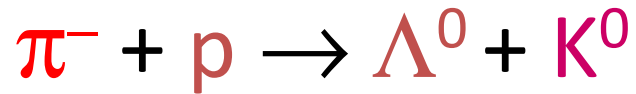
$$SSS \rightarrow SSu + \underline{d}\underline{u}$$



mechanizmus: spontán bomlás

átalakulás $s \rightarrow u$, (**gyenge bomlás**) eltűnik egy ritka kvark: $\Delta r=1$
 új m_0 -t ($u\bar{u}$) a tömegkülönbség $(m_s - m_d)c^2$ és a kötés erősödése fedezi

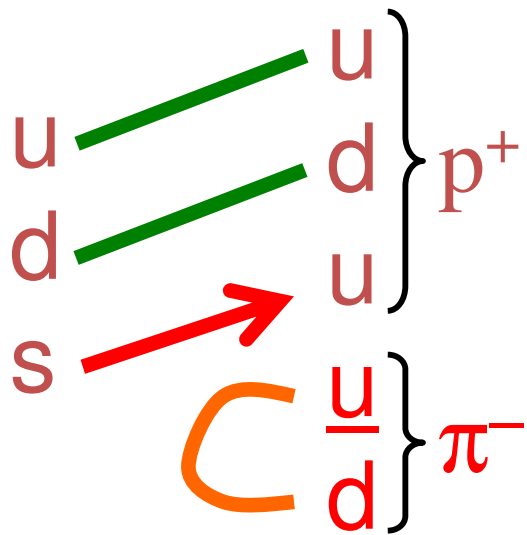
Reakciók a kvark-képben 3.



Reakciók a kvark-képben 4.

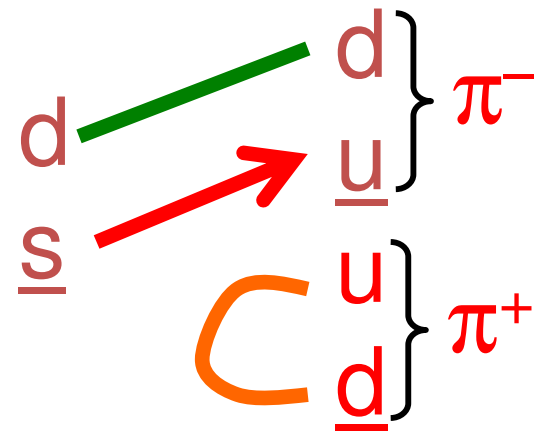
$$\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$$

$$uds \rightarrow udu + \underline{d\bar{u}}$$



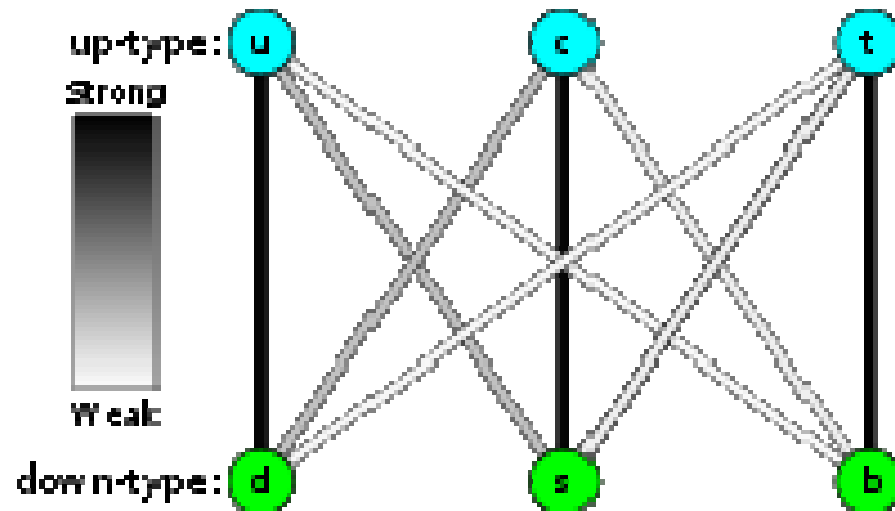
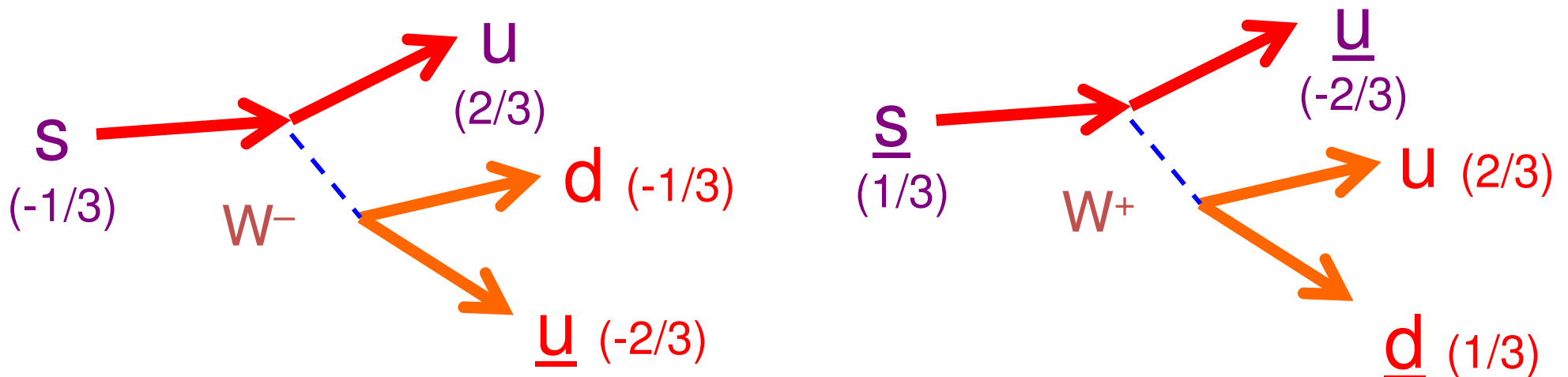
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$d\bar{s} \rightarrow \underline{d\bar{u}} + d\bar{u}$$



A ritkaság megváltozása

Az s kvark u -ba alakul, és megváltozik a ritkaság
ezt a **gyenge** kölcsönhatás közvetíti



Mikrorészecskék felépítése

Az elektronnál nehezebb részecskék tulajdonságait a kvarkmodell jól adja vissza. Az **elektron** nincs benne a rendszerben! Ez másfajta részecske. A kvarkokból álló **mikrorészecskék** és a **kvarkok** összefoglaló neve:

HADRONOK

(Érdekes, az elektronnál és a müonból nem lehet mikrorészecskéket előállítani. Ezek nem kötődnek egymáshoz olyan erősen.

Pl. a μ^-e^+ rendszer inkább egy atomhoz hasonlít.)

A közepes tömegű részecskék **kvark-antikvark** párból állnak, nevük ezentúl: **MEZONOK** $q\bar{q}$

A nehezebb tömegű részecskék **három kvarkból** állnak, nevük ezentúl: **BARIONOK** qqq

(Később találtak a könnyebb barionoknál nehezebb mezonokat is.)

A barion-oktett felépítéséhez használt kvarkok a mezon-nonettnél is mindent pontosan visszaadnak. A kvarkmodell tényleg jól működik.

A mezonoknál a középső pontban három részecske lehet, de az $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$ állapotok kvantummechanikai szuperpozíciói lesznek a detektálható részecskék. $T=1 (u\bar{u}+d\bar{d})^*(...)$

$$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}} \quad \frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}} \quad 135 \text{ MeV}$$
$$574 \text{ MeV}$$

Hadronok

Mezonok $q\bar{q}$

$K, \pi, \eta, \rho, \Upsilon, J/\psi, \dots$

Barionok qqq

nukleonok n, p



hiperonok Σ, Ξ

Ω

rezonanciák Δ, Ξ^*, \dots

és antirészecskék

Mikrorészecskék gerjesztett állapotai

- proton (uud) spinje $\rightarrow s=1/2$ 
- gerjesztett állapot $\rightarrow s=3/2$ 
- 3 db 1/2-es izospin összege: $T=3/2$

$$T_z = \quad 3/2 \quad 1/2 \quad -1/2 \quad -3/2$$



$$1/2 + 1/2 + 1/2$$

u u u

$$Q = 3 \cdot 2/3 = 2 \quad 4/3 - 1/3 = 1 \quad 2/3 - 2 \cdot 1/3 = 0 \quad -1$$

++

+

0

-

$$T_z = T_{z1} + T_{z2} + T_{z3}$$

Δ rezonanciák

Rezonanciák előállítása

$\pi^+ + p$ ütközés

hatáskeresztszete:

rezonanciacsúcs

részecskének értelmezzük: Δ^{++}

$\pi^+ + n$, $\pi^- + p$, $\pi^- + n$ reakciókban szintén van rezonancia azonos energiánál.

Δ rezonanciák: Δ^- , Δ^0 , Δ^+ , Δ^{++}

$T(\pi)=1$, $T(p)=1/2$

$T(\pi+p) = 1 \otimes 1/2 = 3/2 \oplus 1/2$

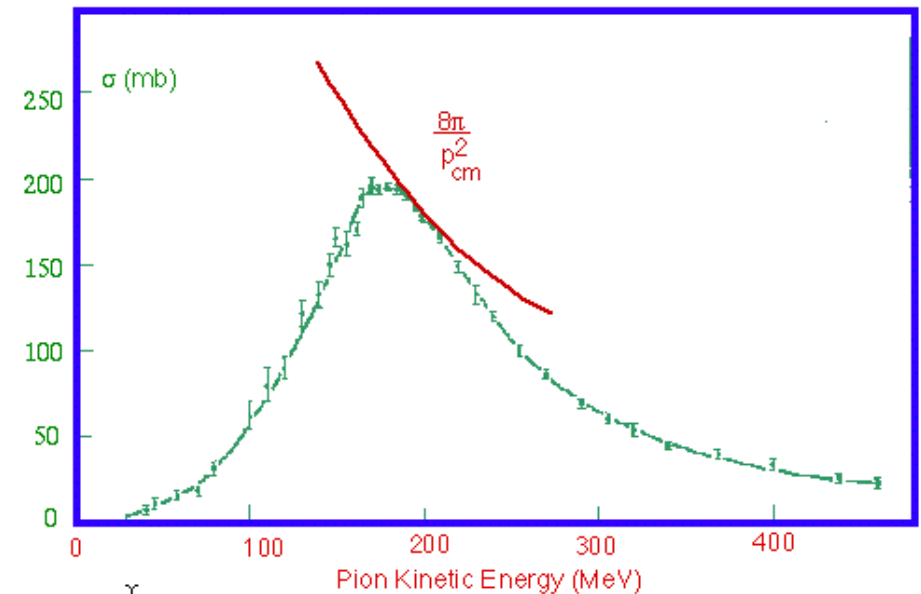
Ennek a 4 z komponense

$938\text{MeV} + 139\text{MeV} + 190\text{MeV} =$

$= 1267\text{ MeV} = M_{\Delta} c^2 + E_{tkp}$

1232 MeV

$\pi^+ p$ total cross section: $\Delta^{++}(1236)$



Mass: $M = 1232\text{ MeV}$

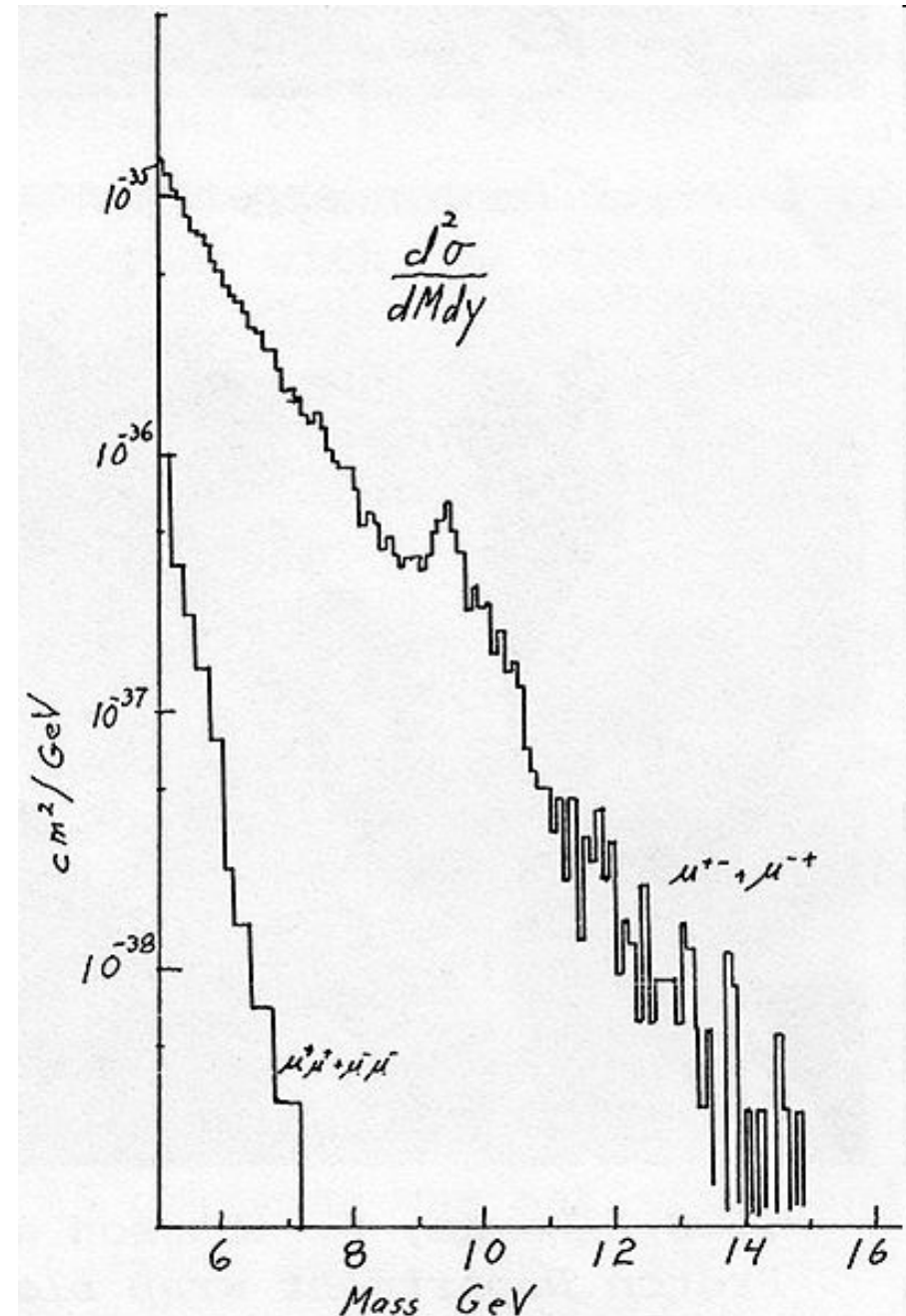
Full Width: $\Gamma = 120\text{ MeV}$

Spin: $3/2$

Branching Ratio : $BR(\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p) = 99.5\%$

Egy híres rezonanciacsúcs: Y részecske

- $b\bar{b}$ állapot
- Egy új kvark...



A rezonanciák élettartama

Heisenberg-határozatlanság reláció: $\tau\Gamma = h$
a részecske élettartama * rezonancia
szélessége kb. a Planck-állandó

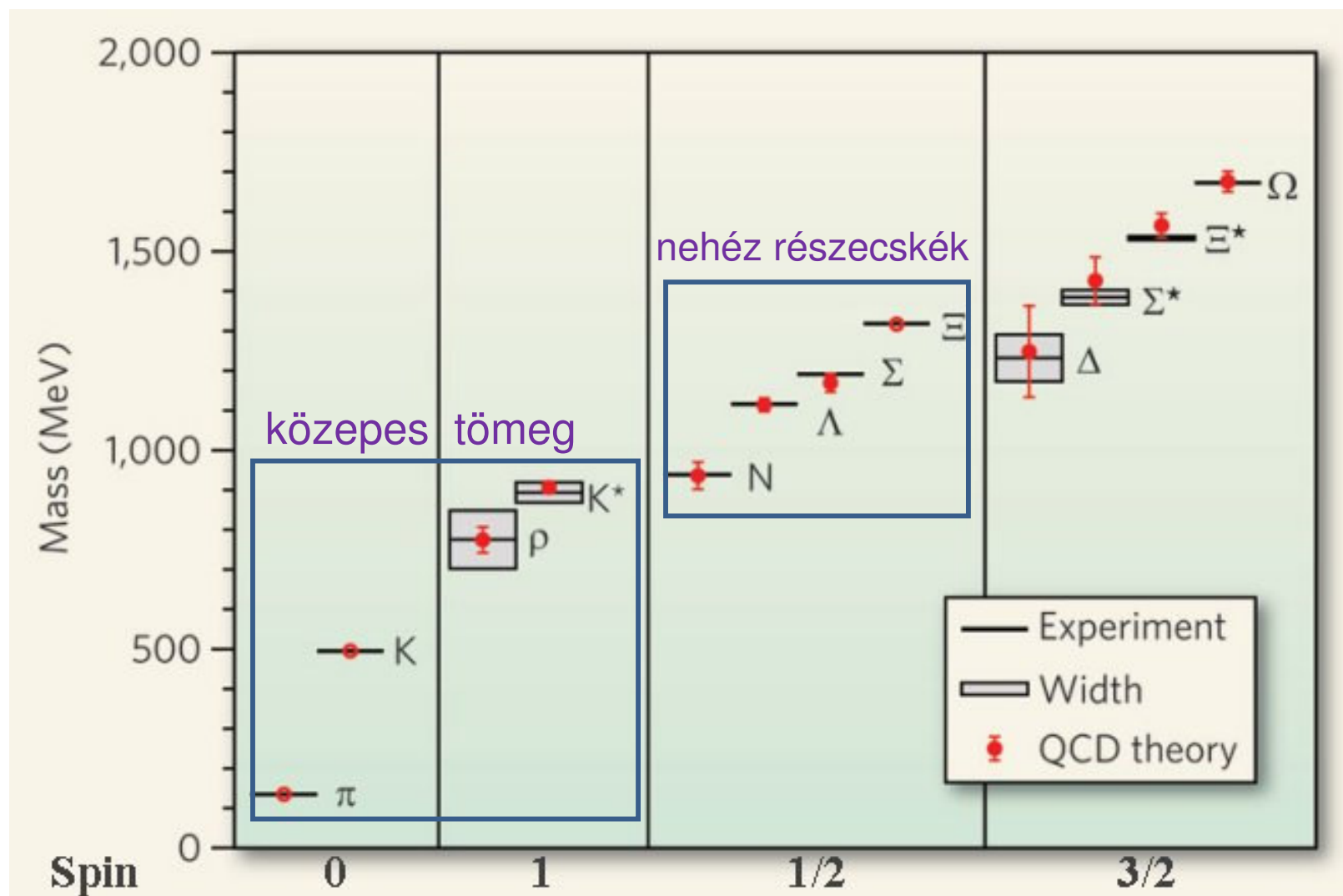
Az állapot élettartama:

$$\begin{aligned}\tau &= h/\Gamma = hc/\Gamma c = 197 \text{ MeVfm}/120 \text{ MeV} \cdot c = \\ &= 1,6 \text{ fm}/3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 0,54 \cdot 10^{-23} \text{ s}\end{aligned}$$

magfizikai időskála: egysége amíg a fény áthalad a nukleonokon
 $t_0 = s/v = 10^{-15} \text{ m}/3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$

A rezonanciák élettartama rövid, néhány időegységnyi

A mikrorészecskék tömegspektruma



izospin (T): hány kb. azonos tömegű részecskét fedeztek fel az adott tömegnél.

Az elektron – proton szóródás

- $E = 1 \text{ MeV}$ $\lambda = hc/\sqrt{(E^2 - mc^2)} \cong 200 \text{ fm}$
Rutherford-szórás relativisztikusan Mott-szórás
- $E = 10 \text{ MeV}$ $\lambda \cong hc/E \cong 20 \text{ fm}$

még pontszerűnek látszik a proton

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\vartheta) = \frac{d\sigma}{d\Omega}\Big|_{Ruth.} F(q)$$

- $E = 100 \text{ MeV}$ $\lambda \cong 2 \text{ fm}$

az atommag szerkezete már látszik,

alakfaktor

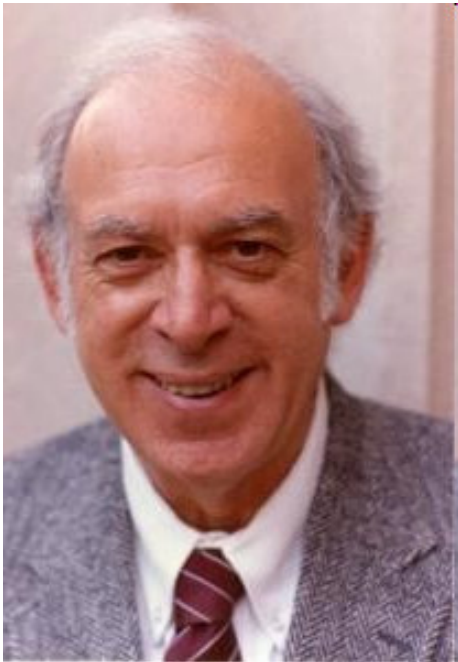
- $E = 10 \text{ GeV}$ $\lambda \cong 0,02 \text{ fm}$ (10^{-17} m)

a proton belső szerkezete is már érezhető, de 150 MeV felett bonyodalom: új részecskék keletkezése megengedett, rugalmatlan szórás, térelméleti leírás (MSc-ben) → szerkezetfüggvény

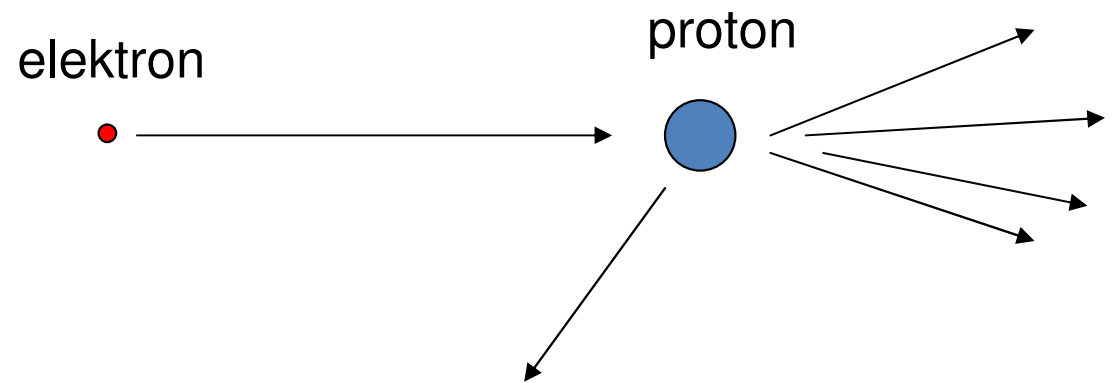
A kvarkok létét alátámasztotta a mért szerkezetfüggvény, így ez a kvarkmodell egyik kísérleti bázisa.

A kvarkok létezésének kísérleti igazolása

1968-69: szórás kísérletek Stanfordban: a protonnak belső szerkezete van!



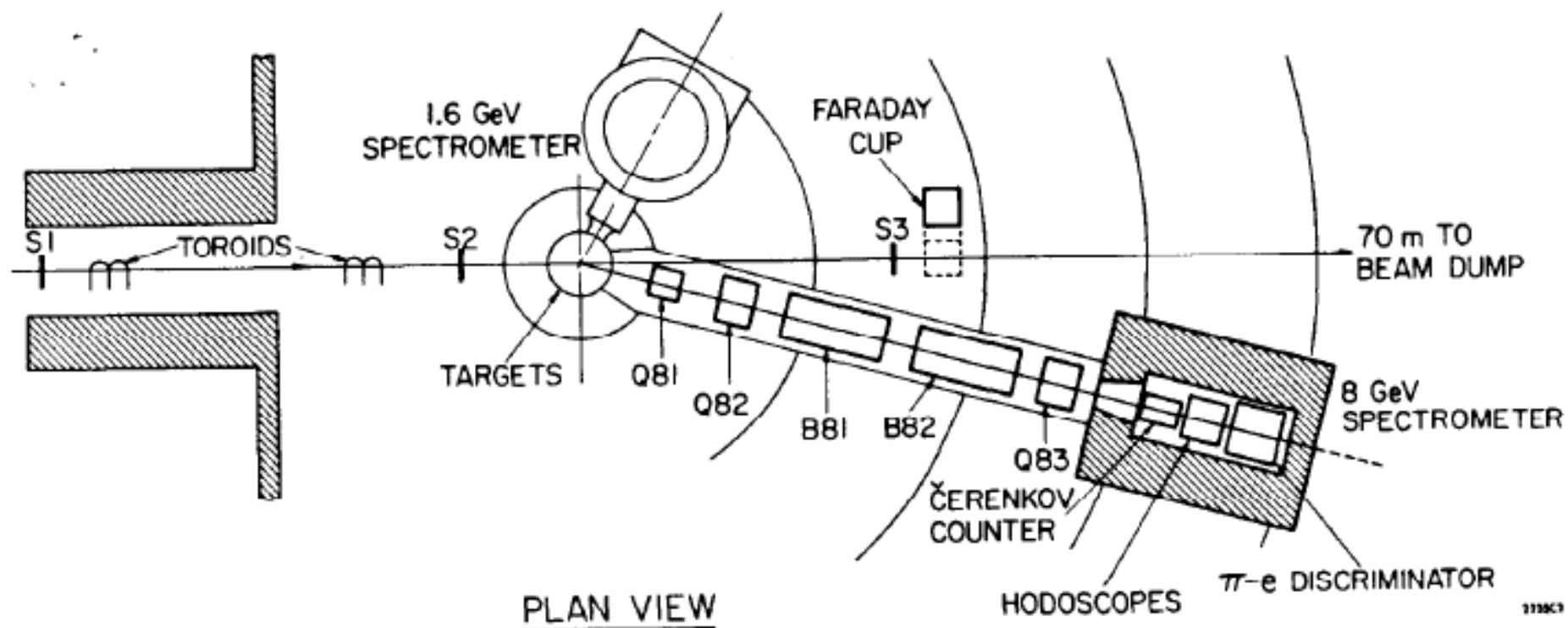
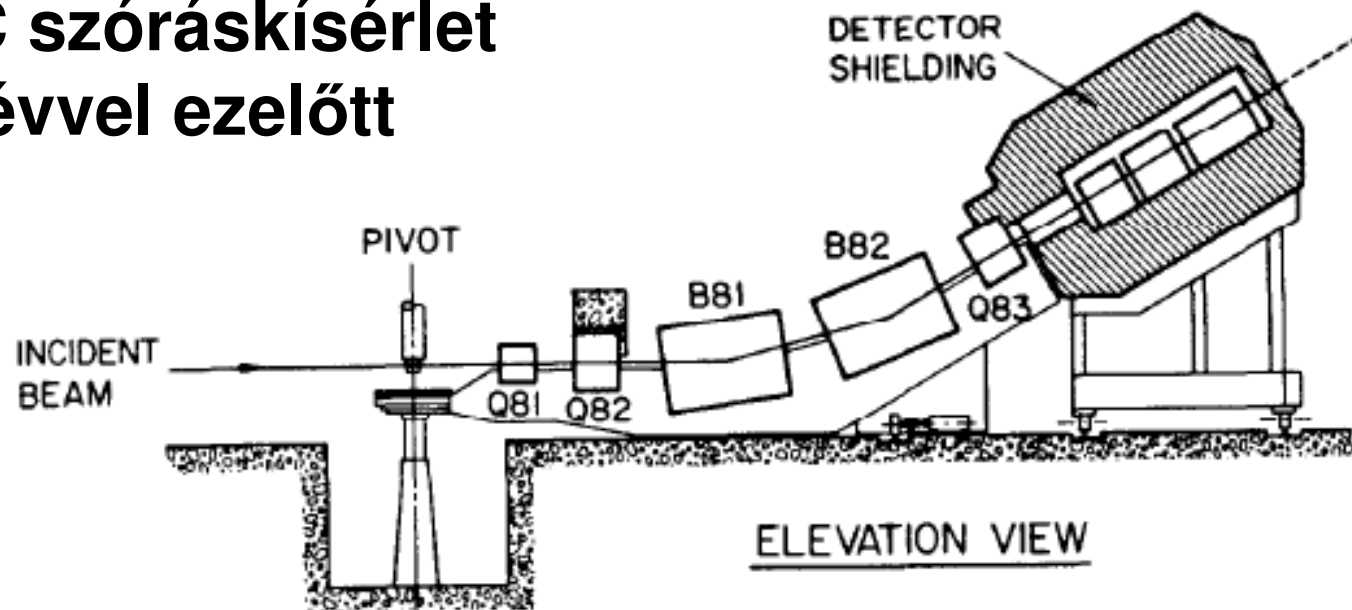
Jerome I. Friedman (1930-)
Nobel-díj: 1990



gyakran különösen nagy szögben is szóródnak az elektronok! ez csak akkor lehet, ha a protonban vannak apró alkotórészek.

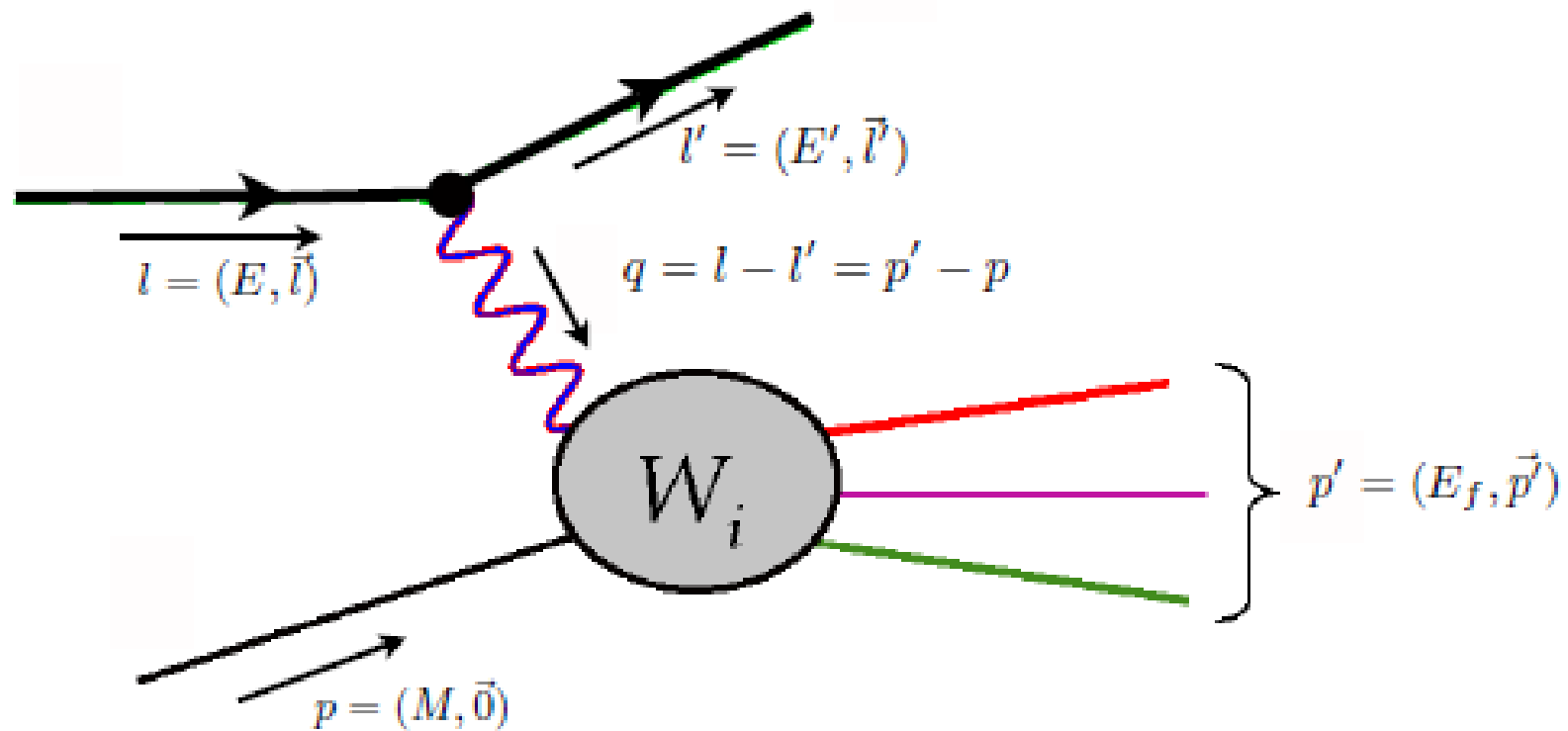
Hasonló a Rutherford-kísérlethez!

MIT-SLAC szórás kísérlet negyven évvel ezelőtt



Mélyen rugalmatlan szórás

DIS – deep inelastic scattering

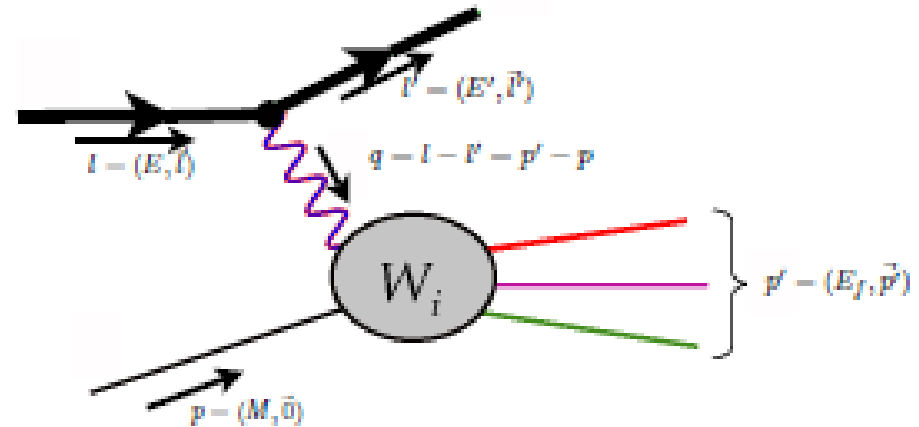


$$\nu = E - E'$$

$$Q^2 = -q^2 = -(p - p')^2 = -M^2 - p'^2 + 2M(M + \nu)$$

Bjorken-x változó

RUGALMAS ütközés esetén:



$$p'^2 = M^2 \rightarrow$$

$$Q^2 = -q^2 = -(p - p')^2 = -M^2 - p'^2 + 2M(M + \nu) = 2M\nu$$

Tehát

$$x_B = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

“Bjorken - x”

az elasztikus ütközéstől való
eltérés

Bjorken skálázás

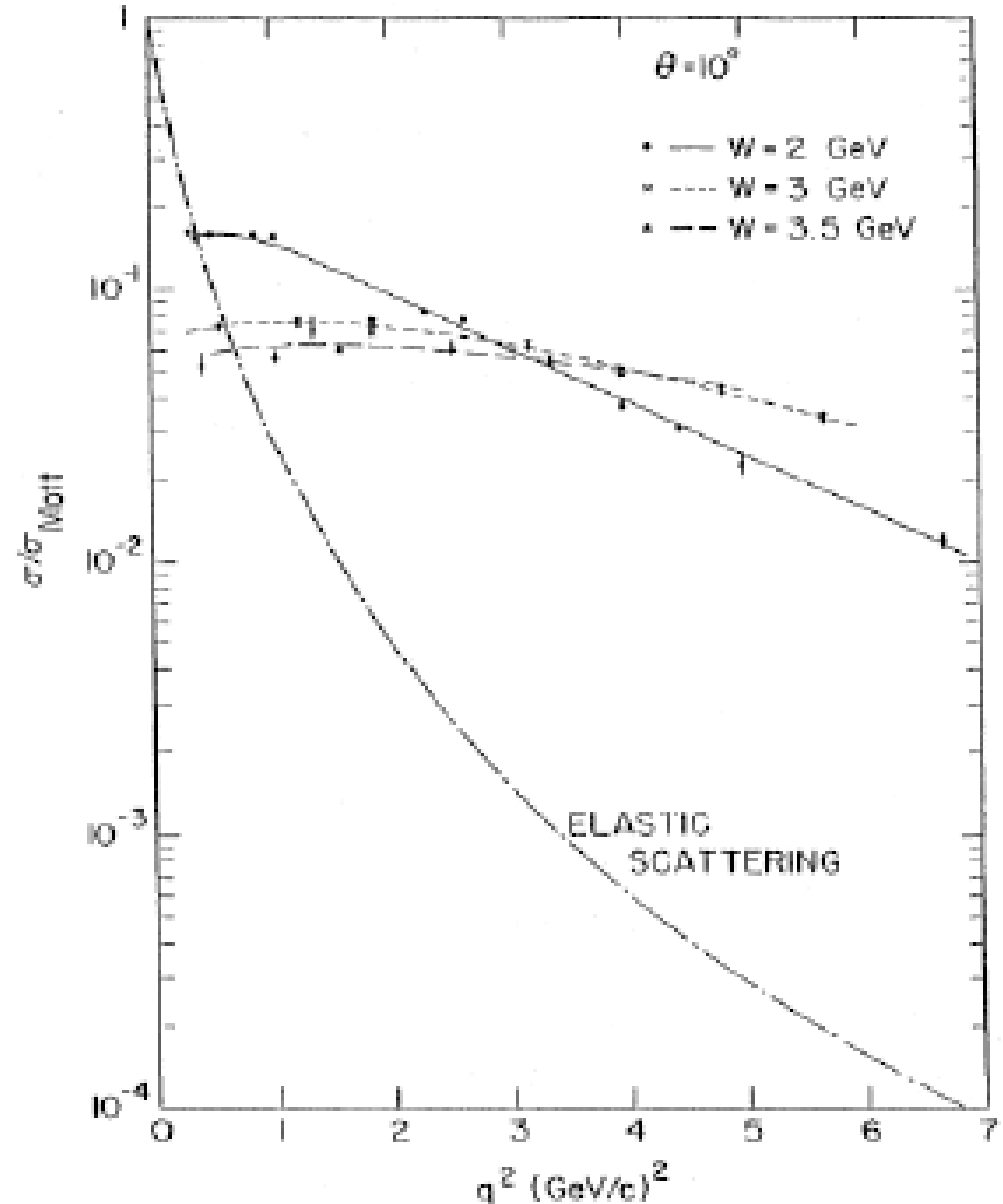
- Ha a szóródás $\frac{1}{2}$ spinű részecskéken történik, akkor a struktúrafüggvények csak x -től függenek, Q -tól külön nem.

$$\frac{d\sigma}{dQ^2 d\nu} = \frac{4\pi a^2}{Q^4} \frac{E}{E'} \left(W_2(Q^2, \nu) \cos^2(\theta/2) + 2W_1(Q^2, \nu) \sin^2(\theta/2) \right)$$

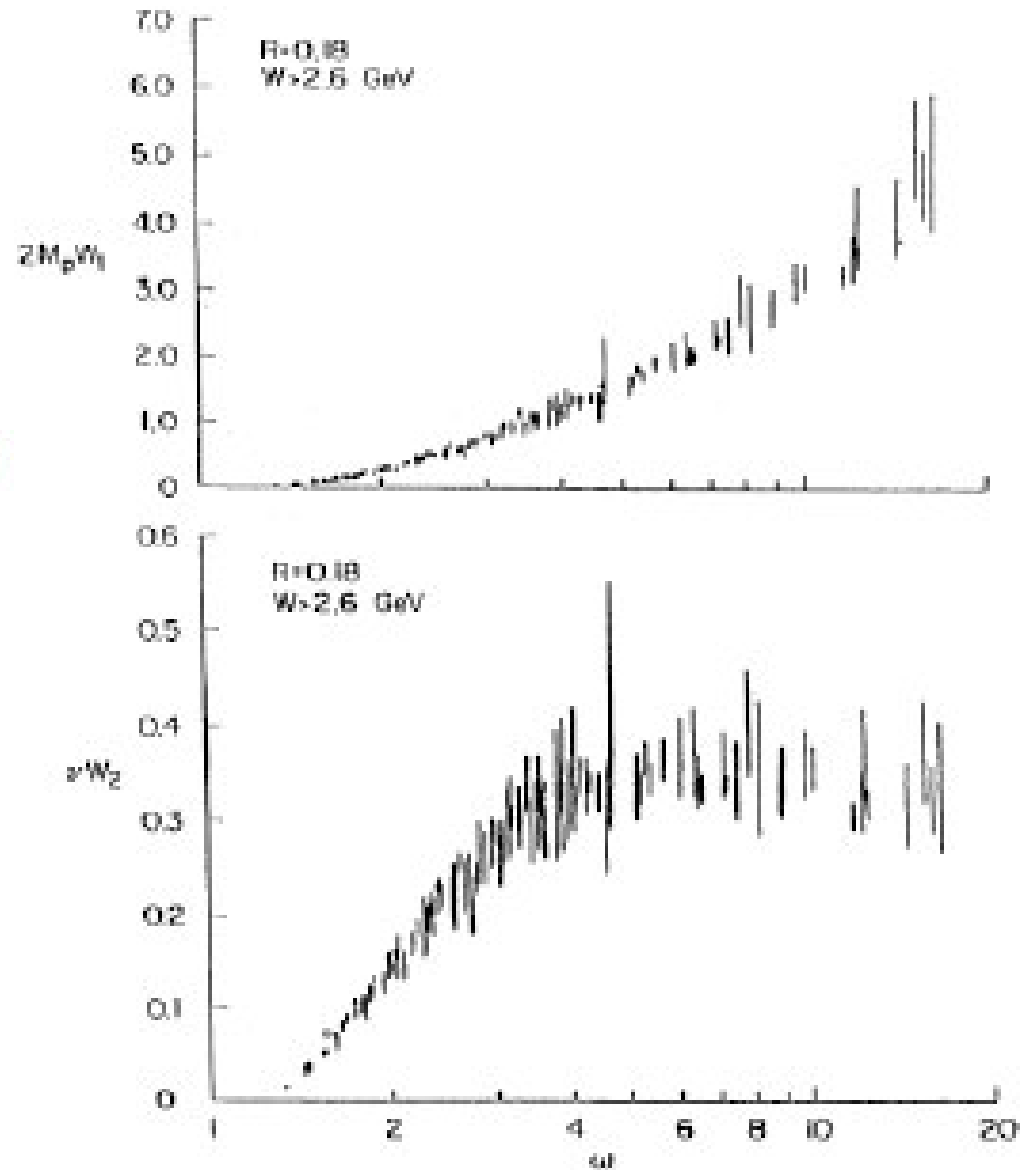
$$W_2(Q^2, \nu) = e_q^2 \delta\left(\nu - \frac{Q^2}{2M}\right) \quad W_1(Q^2, \nu) = e_q^2 \frac{Q^2}{4M^2} \delta\left(\nu - \frac{Q^2}{2M}\right)$$

Kísérlet tényleg ezt mutatta!

- MIT-SLAC kísérlet
- Egyenletes töltéeloszlás alapján meredeken csökkenő függvényt vártak
- Ezzel szemben, sokkal nagyobb hatáskeresztmetszete ket mértek nagy impulzusátadásnál

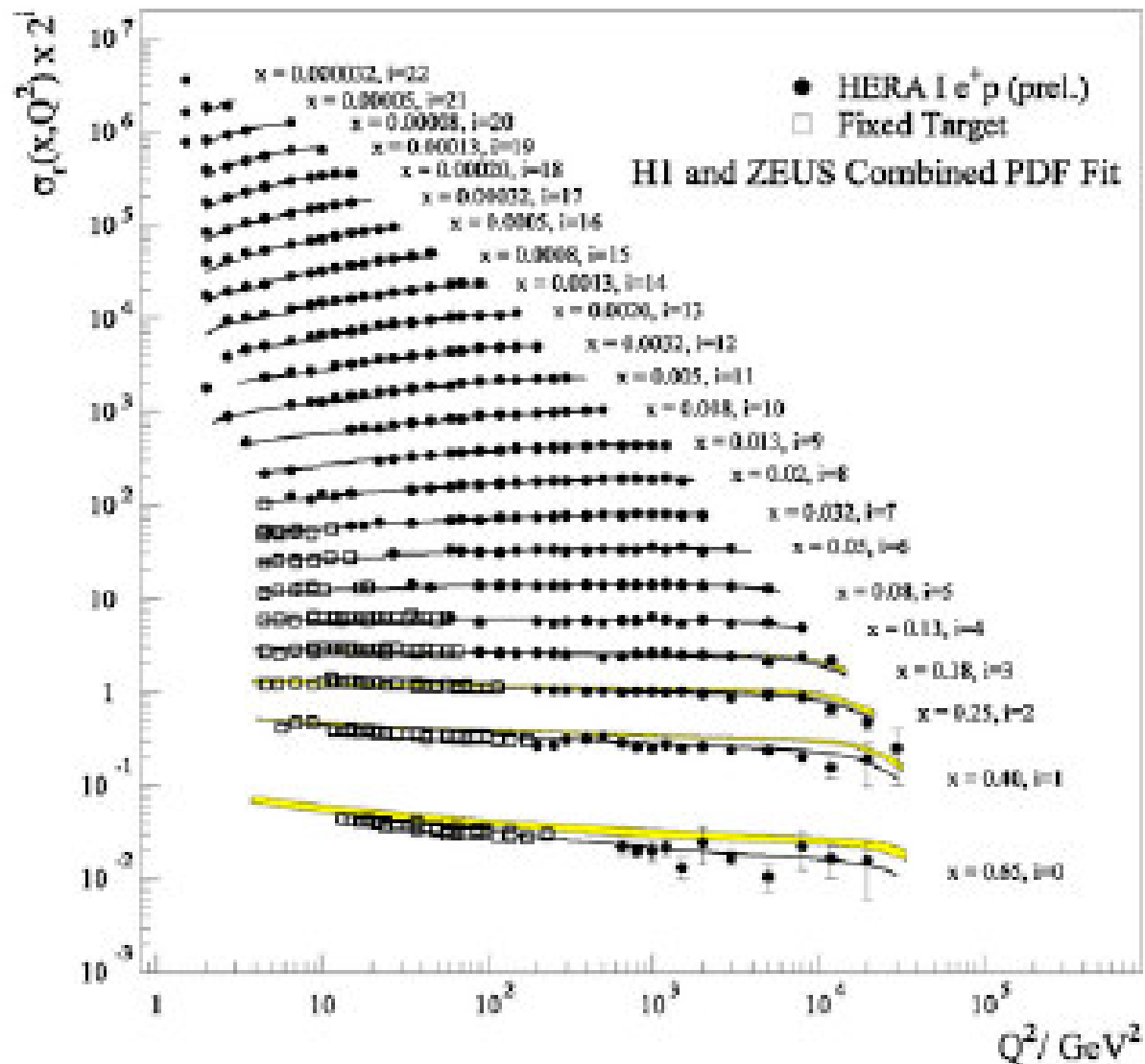


Bjorken-skálázás is igaz



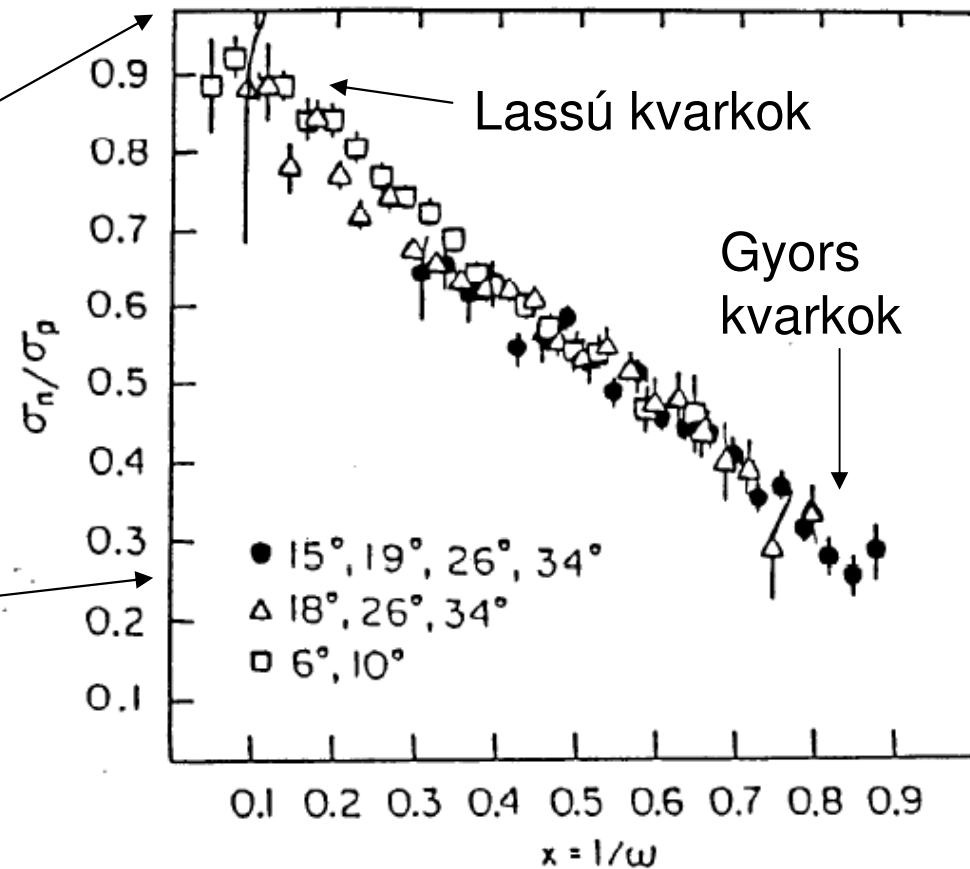
HERA: modern adatok

- Skálázás sérül egy kicsit

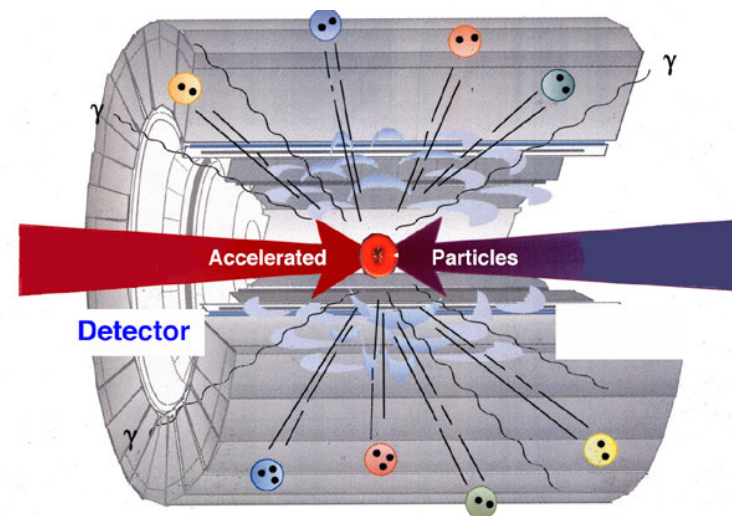
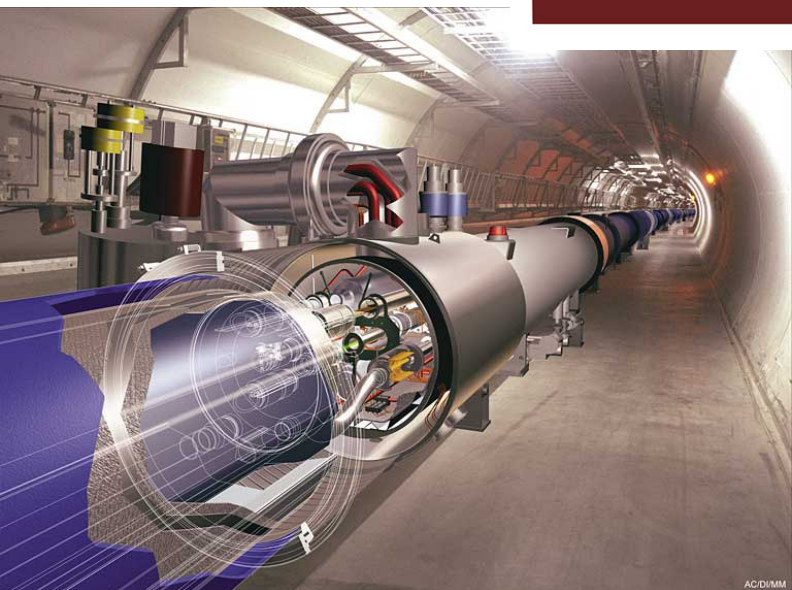
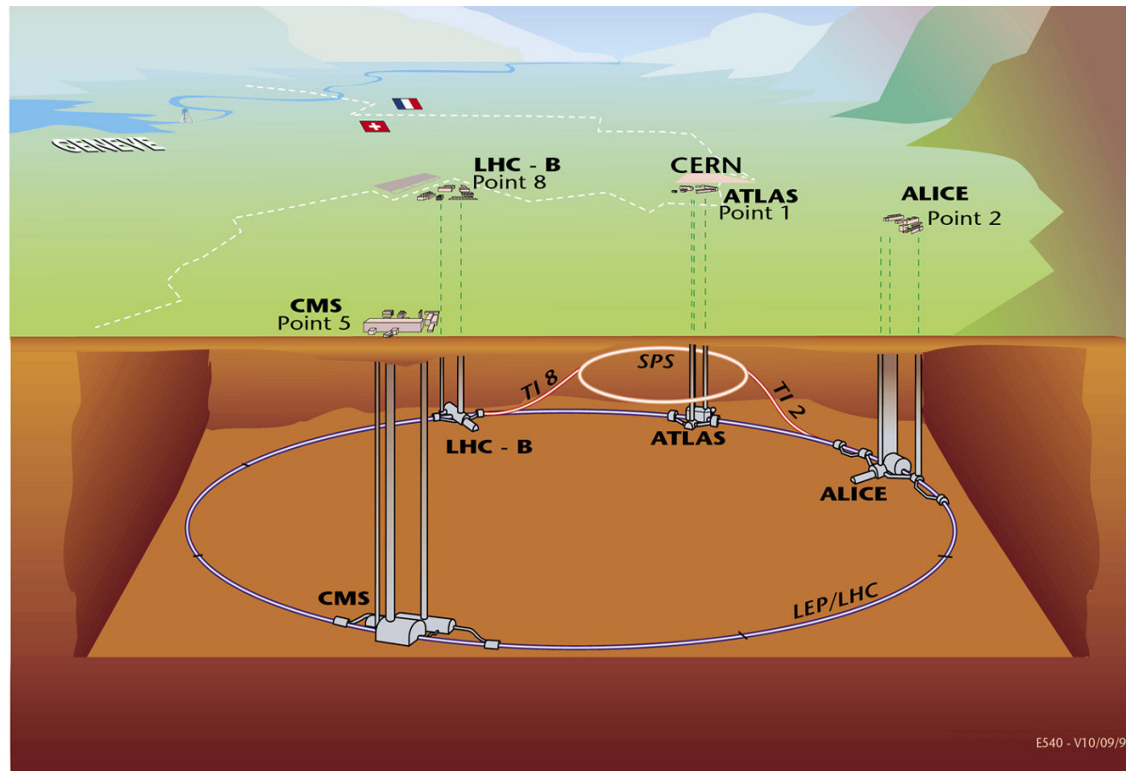


Elektronokkal bombázott n, p

- Neutron: u, d, d, kvark töltések négyzetösszege:
 $(2/3)^2 + (1/3)^2 + (1/3)^2 = 2/3$
- Proton: u, u, d
 $(2/3)^2 + (2/3)^2 + (1/3)^2 = 1$
- *Tenger* kvarkok: ugyanaz a p és n esetén,
 $q\bar{q}$ párok $\rightarrow 1$
- Ha a p-ban a d, a n-ban az u kvark a leggyorsabb:
 $(1/3)^2 / (2/3)^2 = 1/4$

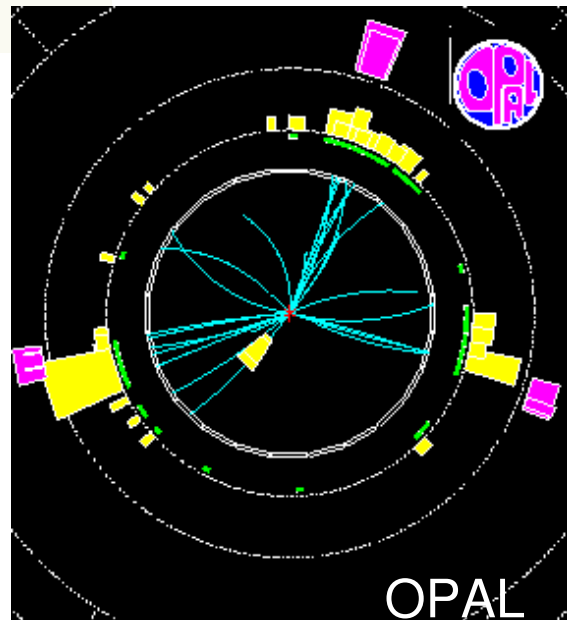
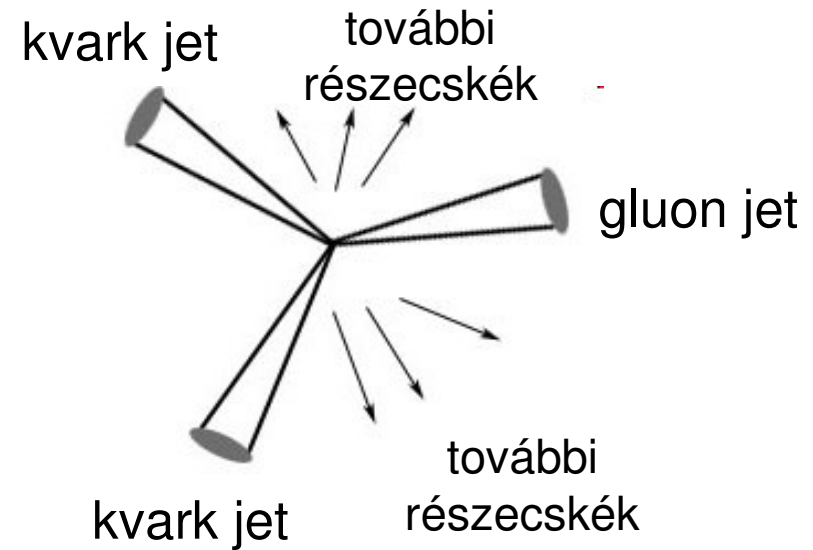
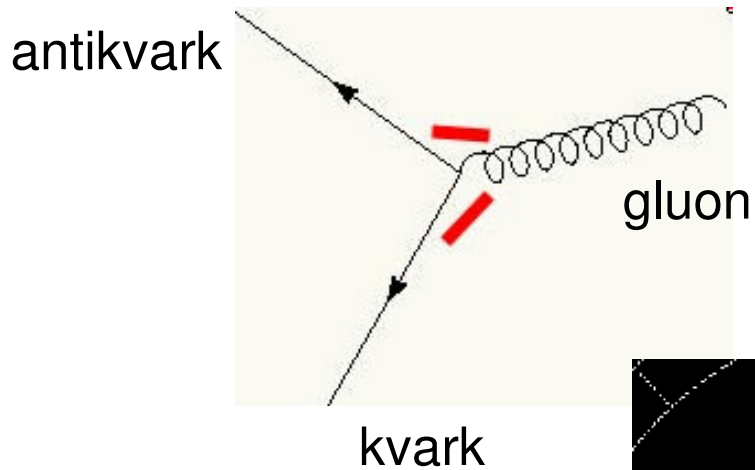


Ütköző nyalábok



Gluonok: 1979

- Három-jet események bizonyítják a létét
- Elektron-pozitron ütközések, PETRA kísérlet, Hamburg

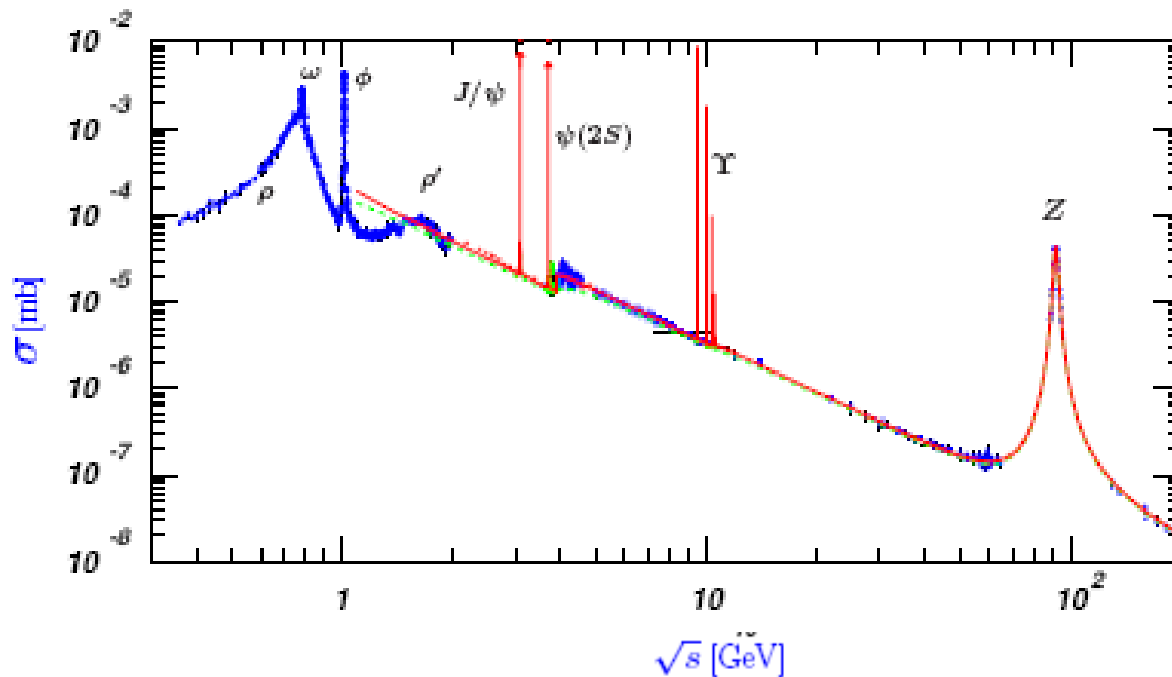


elektron – pozitron ütközések

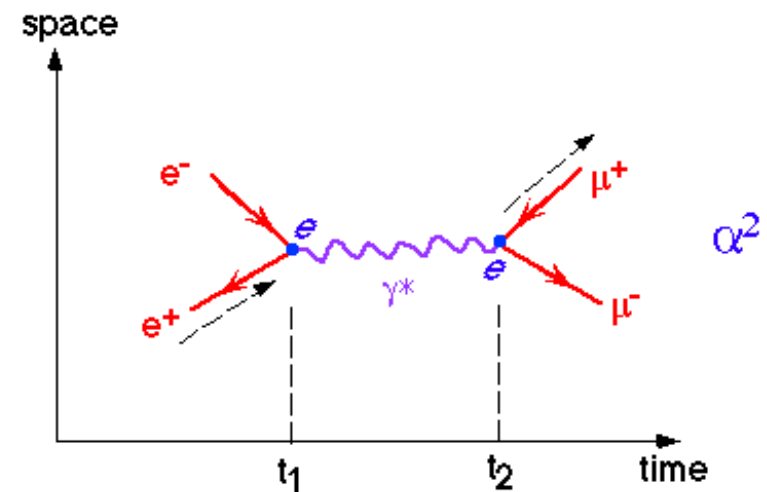
CERN LEP 27 km körgyűrű

hatáskeresztmetszet – részecske keletkezéssel járó reakciók száma
 $s^{1/2} \cong 2E$ a bombázó energia GeV-ben

$\sigma = 10^{-9}$ barn, nagyon kicsi, 1 barn = 100 fm², egy atommag km., sok
ütközés kellett



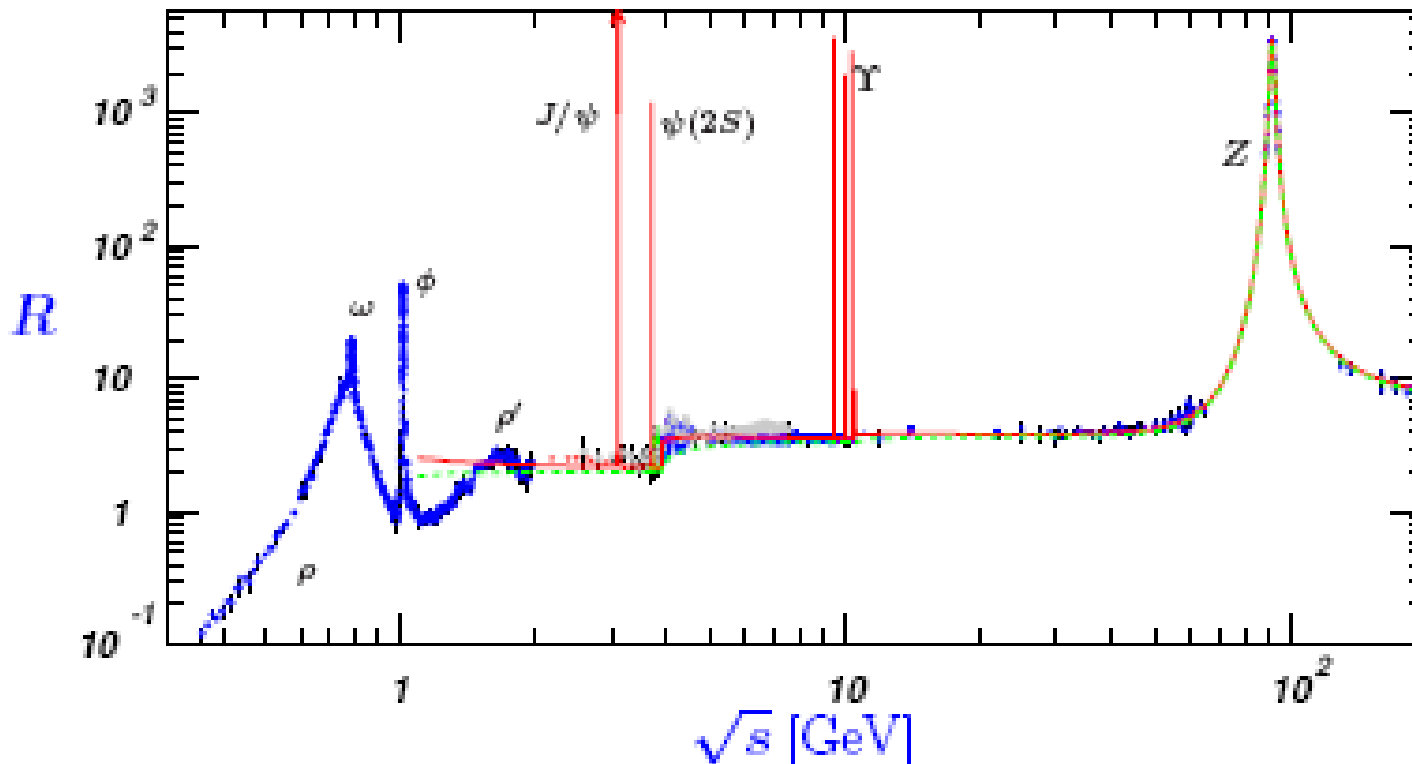
Egy alapvető folyamat



eredmény: hatványfgv szerint csökkenő hkm, ugrások, rezonanciák

elektron – pozitron ütközések

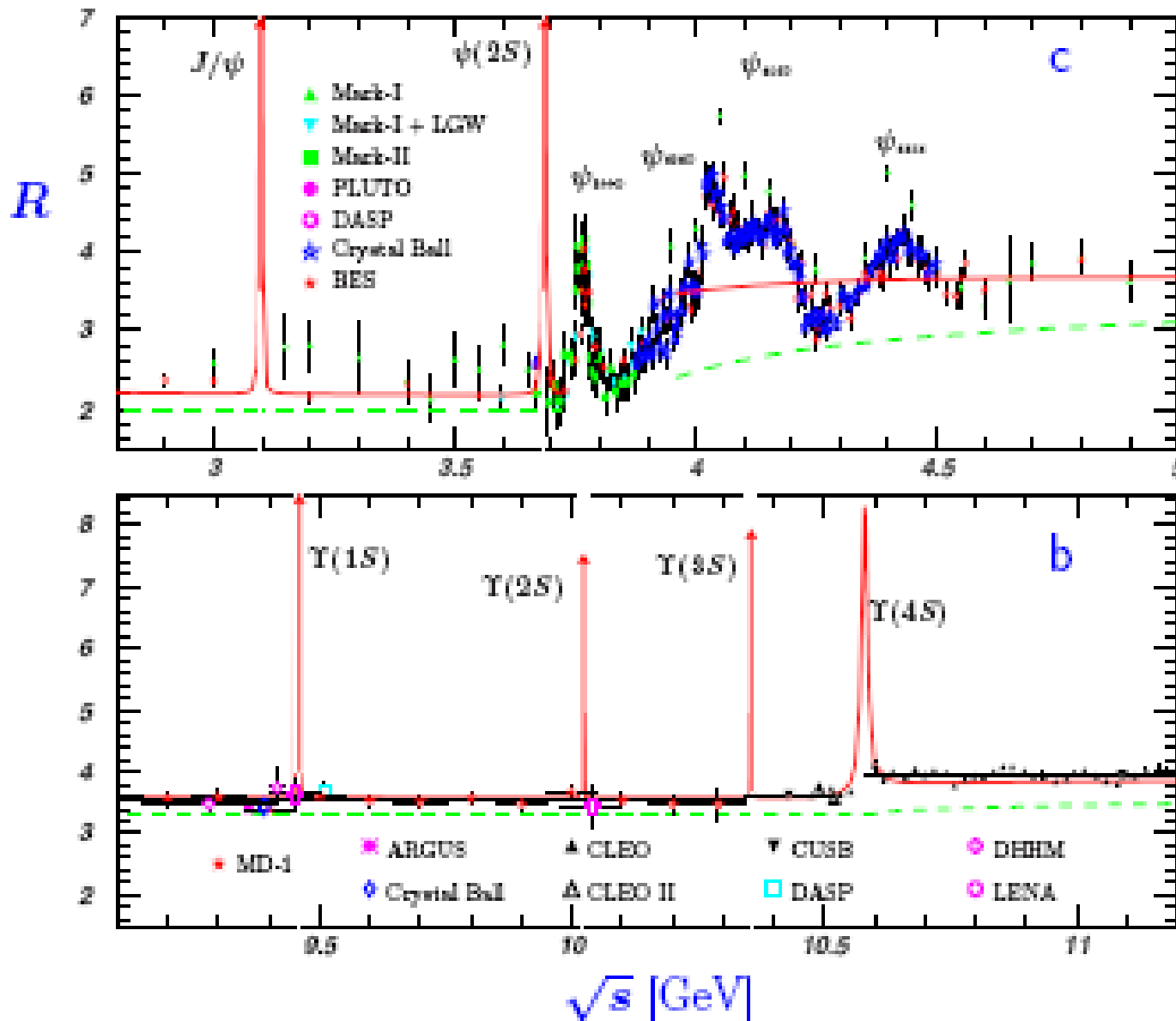
- részecskék keletkezésével járó reakciók/ $\mu^- \mu^+$ keletkezésének aránya:



$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum e_q^2 = N_c \frac{11}{9}$$

lépcsők: új, nehéz kvarkok is keletkeznek! Csúcsok: új részecskék, pl.
 $\phi(\underline{s}\underline{s})$, $J/\psi(\underline{c}\underline{c})$, $Y(\underline{b}\underline{b})$

elektron – pozitron ütközések

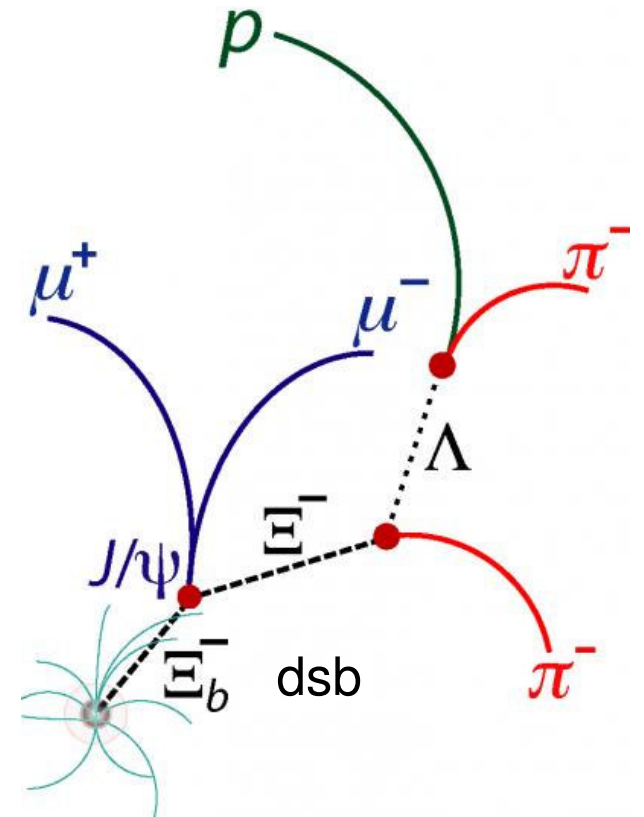
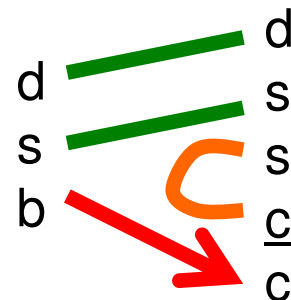
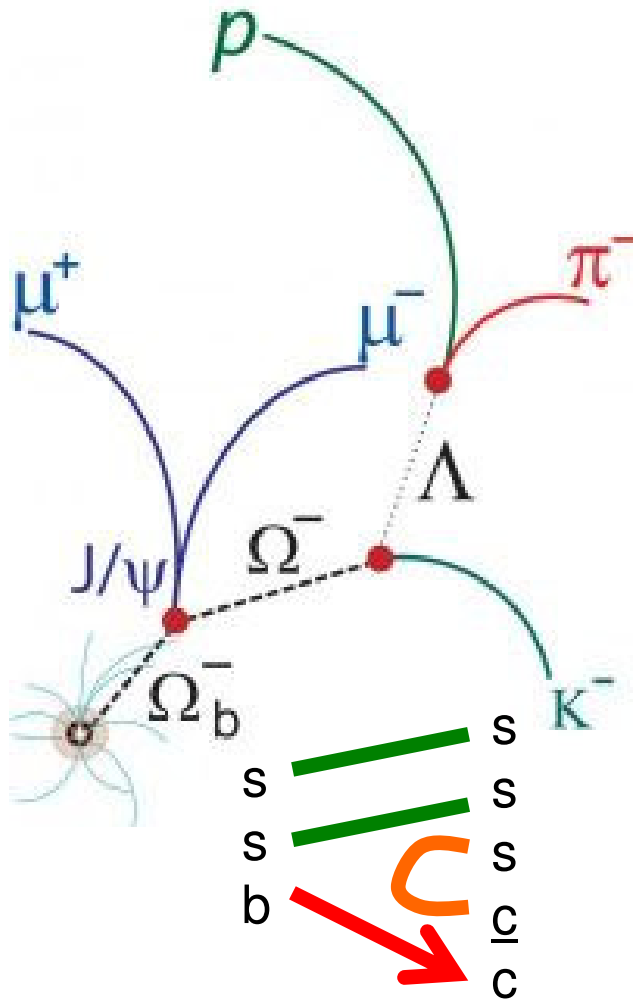


lépcsők: új, nehéz kvarkok is keletkeznek! Csúcsok: új részecskék, pl.
 $\phi(ss)$, $J/\psi(cc)$, $Y(bb)$

nehéz kvarkok 1.

$$\Omega_b^- \rightarrow \Omega^- + J/\psi$$

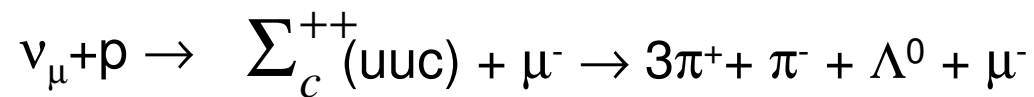
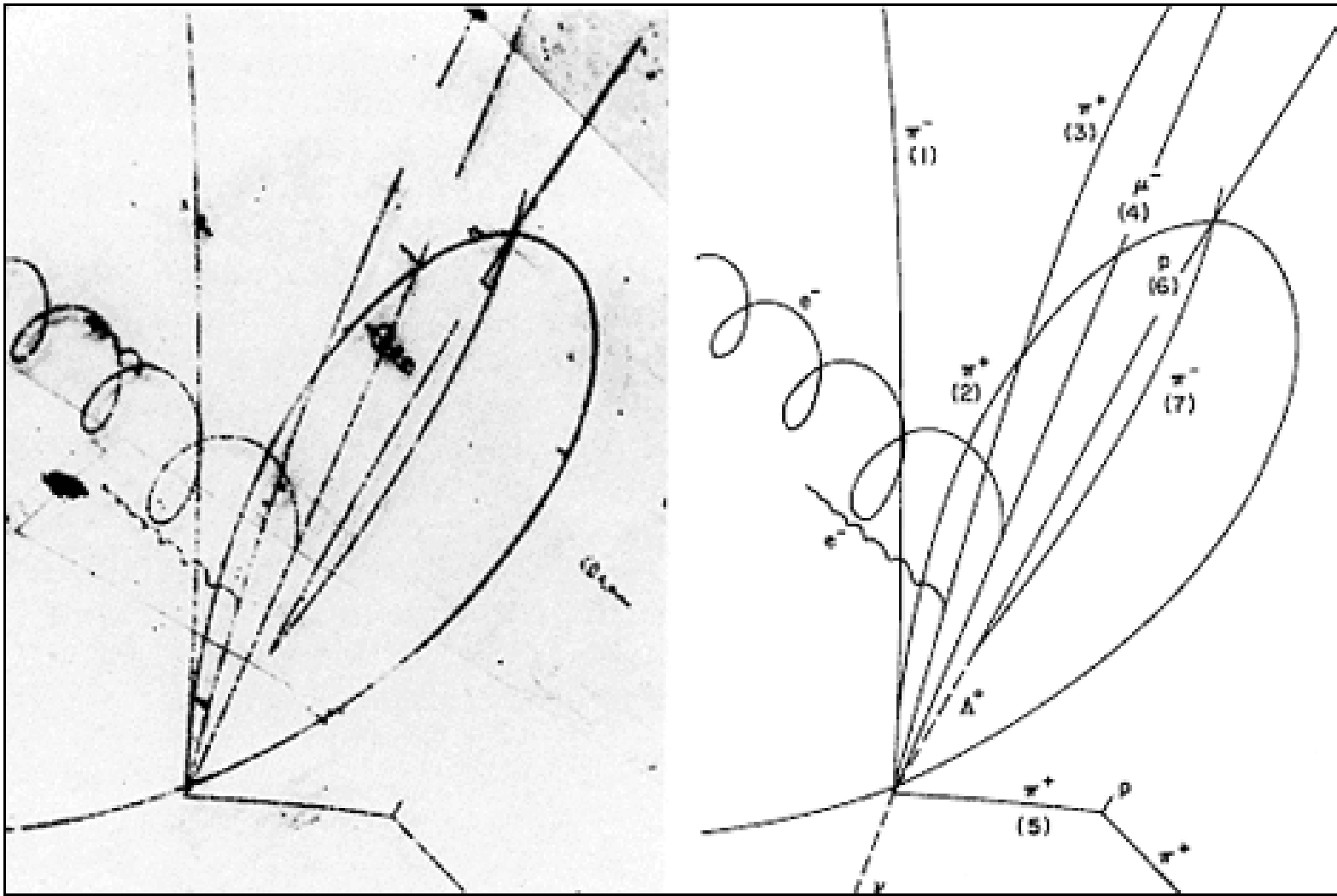
$$\Xi_b^- \rightarrow \Xi^- + J/\psi$$



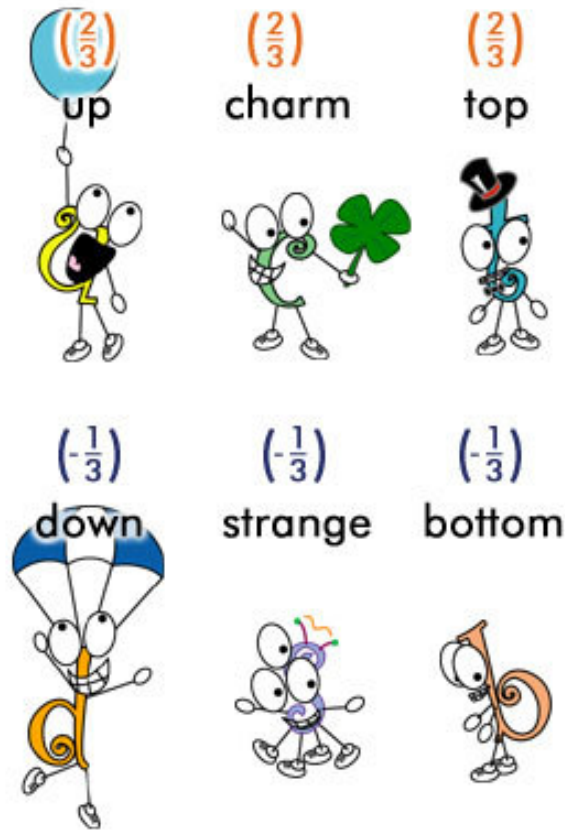
A b kvark is gyengén bomlik, c kvarkba alakul

nehéz kvarkok 2.

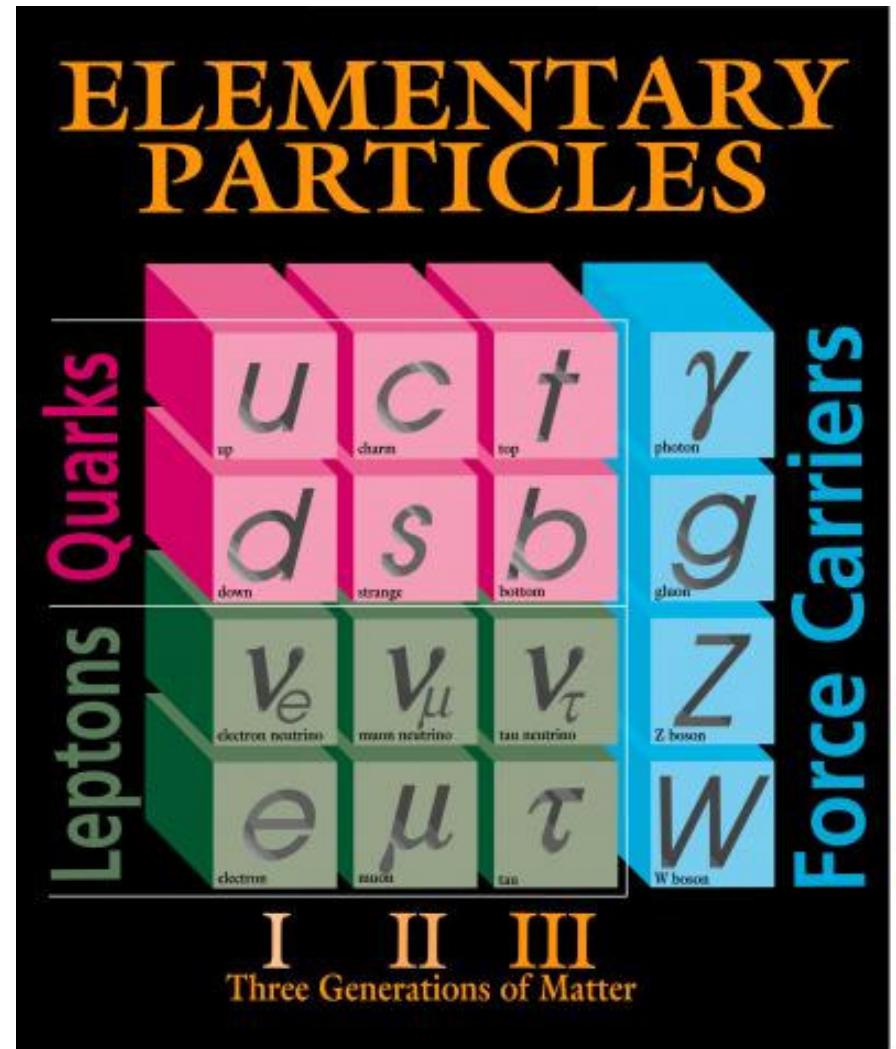
lepton – proton ütközés: gyenge kölcsönhatás → proton egyik kvarkjának íze megváltozhat



Az elemi részecskék



Q
 $\frac{2}{3}$
 $-\frac{1}{3}$
 0
 -1



kvarkok íze: u, d, c, s, t, b

3 részecskecsalád: (u, d, ν_e, e) (c, s, ν_μ, μ) (t, b, ν_τ, τ)

Átalakulhatnak-e egymásba?

- **kvarkok** $t \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow s \rightarrow u$

spontán az idő fejlődésével megfelelő reakciókban, **az íz változhat**

- **leptonok** $\tau \rightarrow \mu \rightarrow e$

az elektron nem bomlik el, pozitron mellett mindig keletkezik egy e^-
a megfelelő neutrínók mindig keletkeznek: **leptonszámmegmaradás**

A kvarkok száma megmarad-e?

- **mezonok** $K^- \rightarrow \mu^- + \nu_{\mu}^{\sim}$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_{\mu}^{\sim}$

a kvark-antikvark párok eltűnhetnek leptonokká

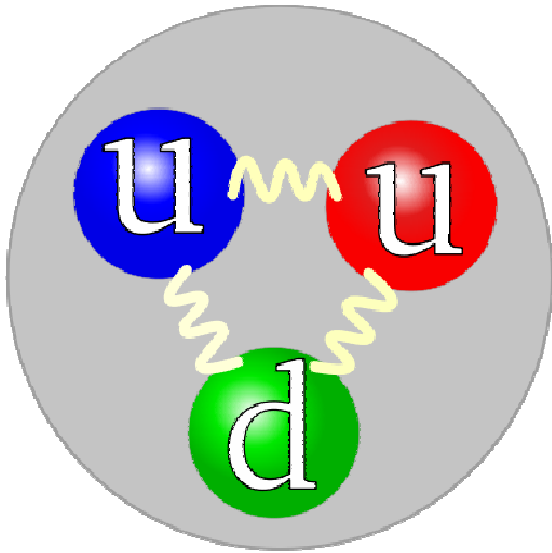
- **barionok** $\Omega \rightarrow \Xi \rightarrow \Lambda \rightarrow n \rightarrow p$

protonbomlást még nem figyeltek meg, barion \rightarrow mezon bomlást sem
antiproton mellett mindig keletkezett egy proton is

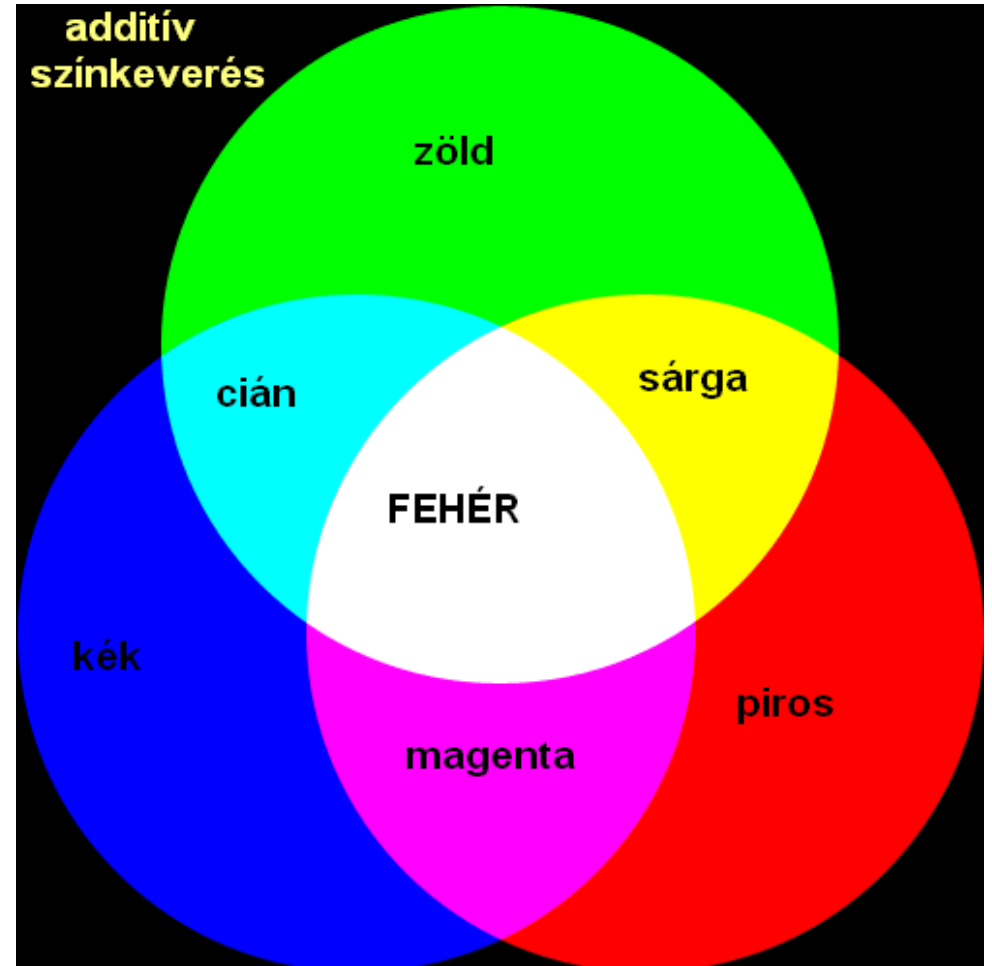
BARIONSZÁM megmaradás

a kvarkok barionszáma $1/3$, antikvarkoké $-1/3$

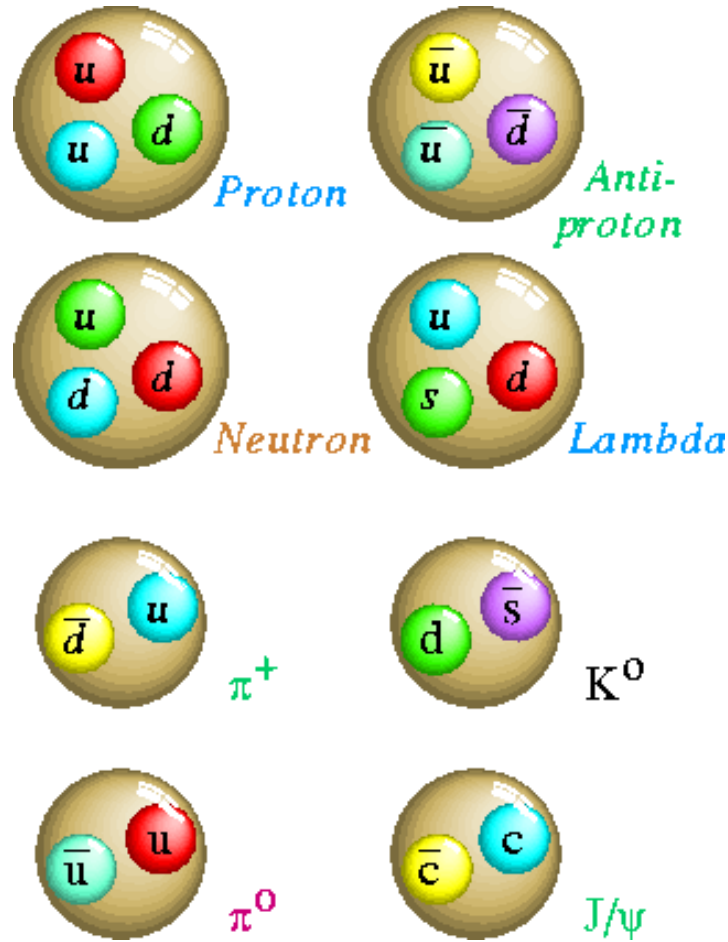
A kvarkok színe



A részecskék fehérek



A mikrorészecskék színösszetétele



barionok PKZ

antibarionok CSM

mezonok

PC, KS, ZM

A részecskékben a színek összege FEHÉR

Hány elemi részecske van?

- kvarkok: u, d, s, c, t, b u, d, s, c, t, b u, d, s, c, t, b 18db
- leptonok 6 db
- ezek antirészecskéi +24 db
- van helicitás kvantumszám is, mindezen részecskékből kettő van: + és – helicitású
- helicitás: spin és a lendület párhuzamos vagy ellentétes
- összesen 96 db elemi részecske + a közvetítő részecskék: foton, gluon, W, Z, graviton, (Higgs)

Kölcsönhatások

1. erős kölcsönhatás

- kvarkok között hat, gluonok közvetítik
- gluonok között hat
- kvarkbezárás

2. magerő (nukleáris kölcsönhatás)

- nukleonok között hat, színsemleges objektumok közvetítik
- másodrendű erős kölcsönhatás

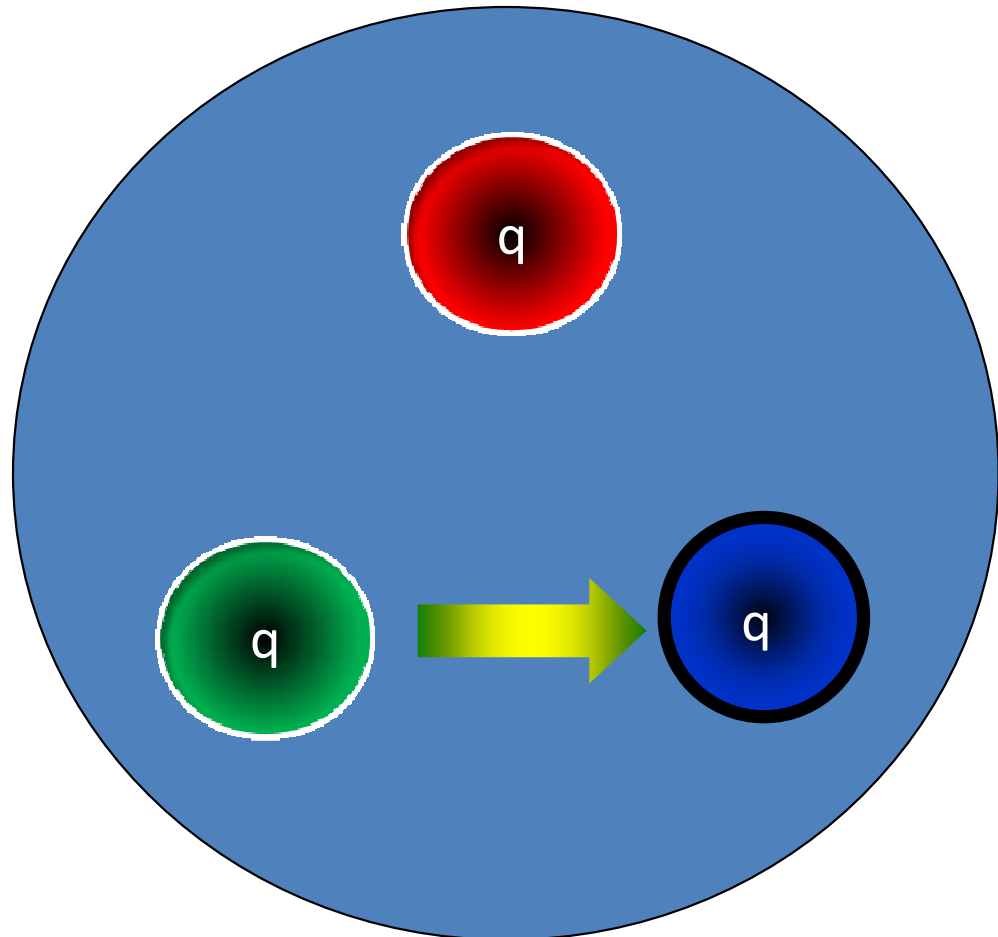
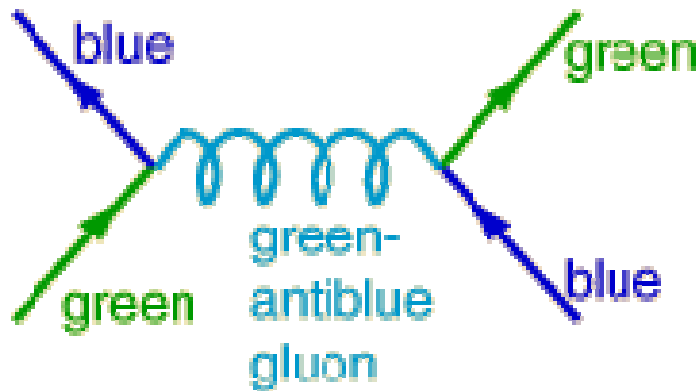
3. gyenge kölcsönhatás

- kvarkok ízét változtatja
- béta-bomlásnál részletesebben vizsgáljuk

A kvarkok kölcsönhatása

A két $2/3$ töltésű u kvark nagyon taszítja egymást az EM kölcsönhatással.
Valami összetartja a protonban a kvarkokat: **erős kölcsönhatás**

- színek között hat (így a kvarkok között is)
- gluonok közvetítik
- a gluonok nem fehérek!
- átalakítják a kvarkok színét, és egymással is kölcsönhatnak



A gluonok kölcsönhatása

Erős kölcsönhatás : kvantumszíndinamika
gluonok cseréje közben a szín megmarad!
Igazi elmélet csoportelméleten alapul.
Most szemléletesen nézzük!

A színes 0 tömegű gluonok is
gluont cserélnek, így hatnak kölcsön

8 gluon van,

egyszerűsített képben 8 színük van:
szín-antiszín keverék a színük

$P\bar{K}$ vagy $Z\bar{P}$

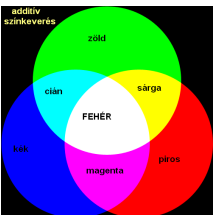
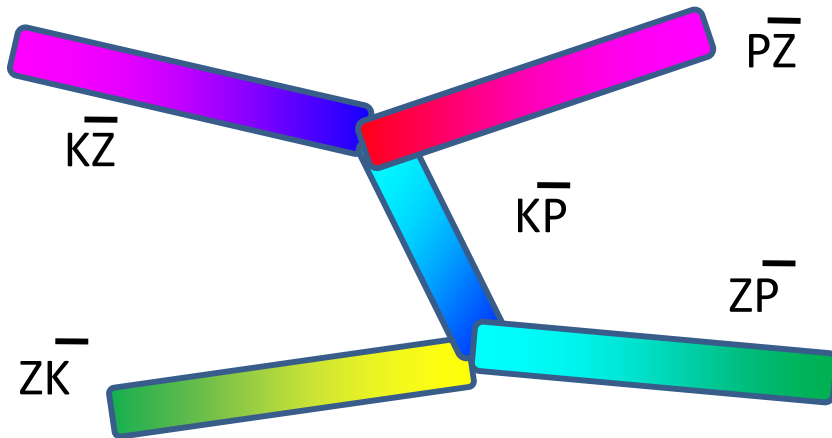
gluon kibocsátás / elnyelés

színmegmaradás

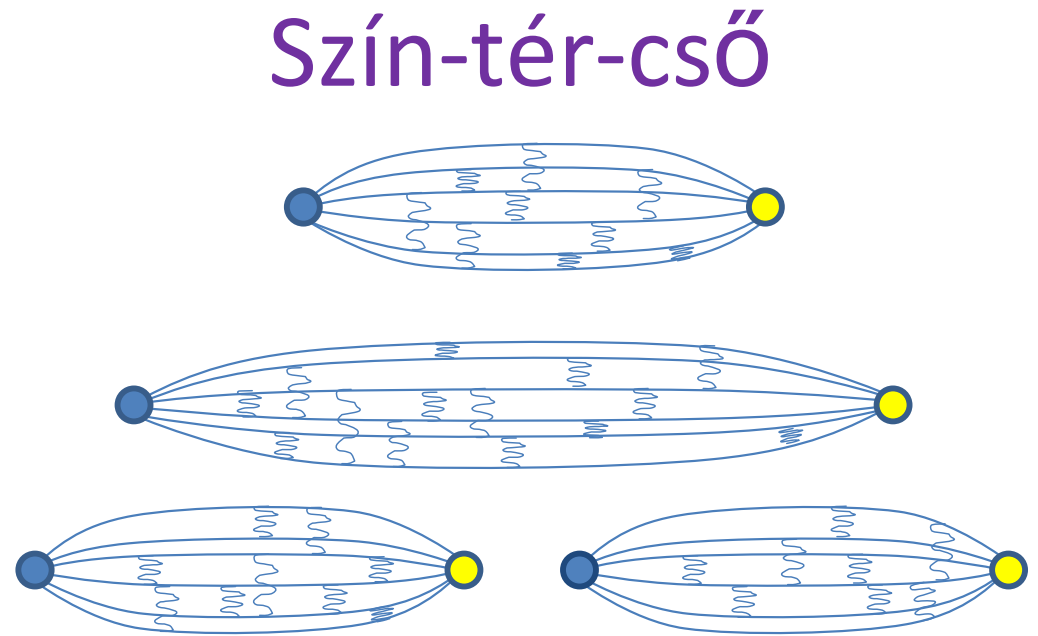
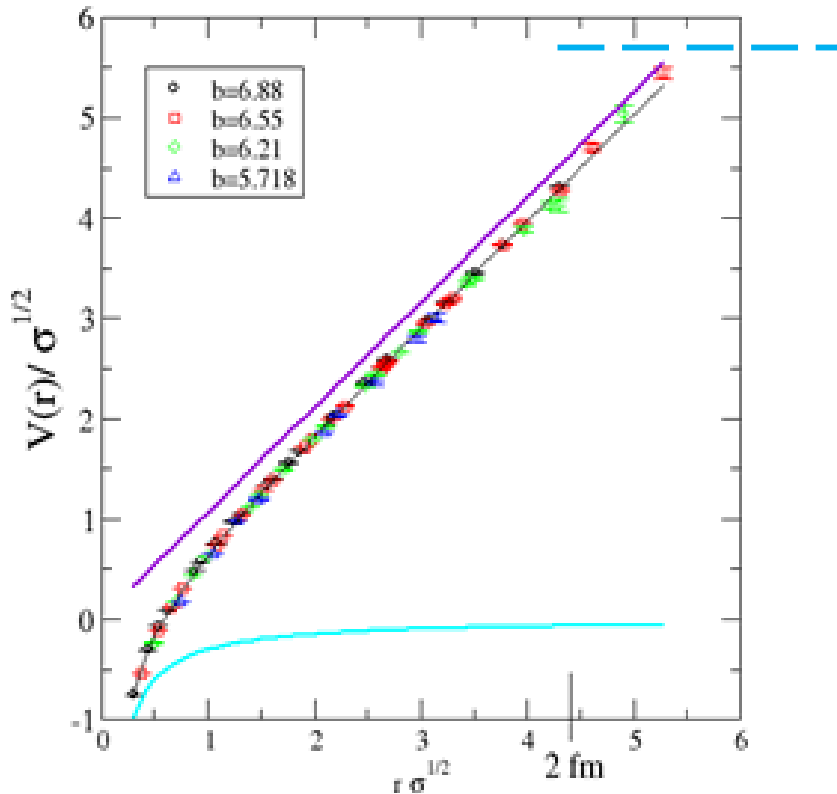
$$K\bar{Z} = K\bar{P} + P\bar{Z}$$

$$Z\bar{K} + K\bar{P} = Z\bar{P}$$

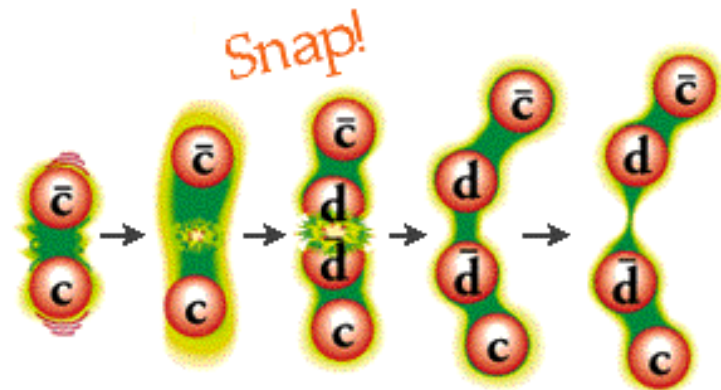
$K\bar{K}$, $P\bar{P}$, $Z\bar{Z}$ gluonokból csak két
lineáris kombináció van,
(szuperpozíciók)



A kvark-antikvark potenciál



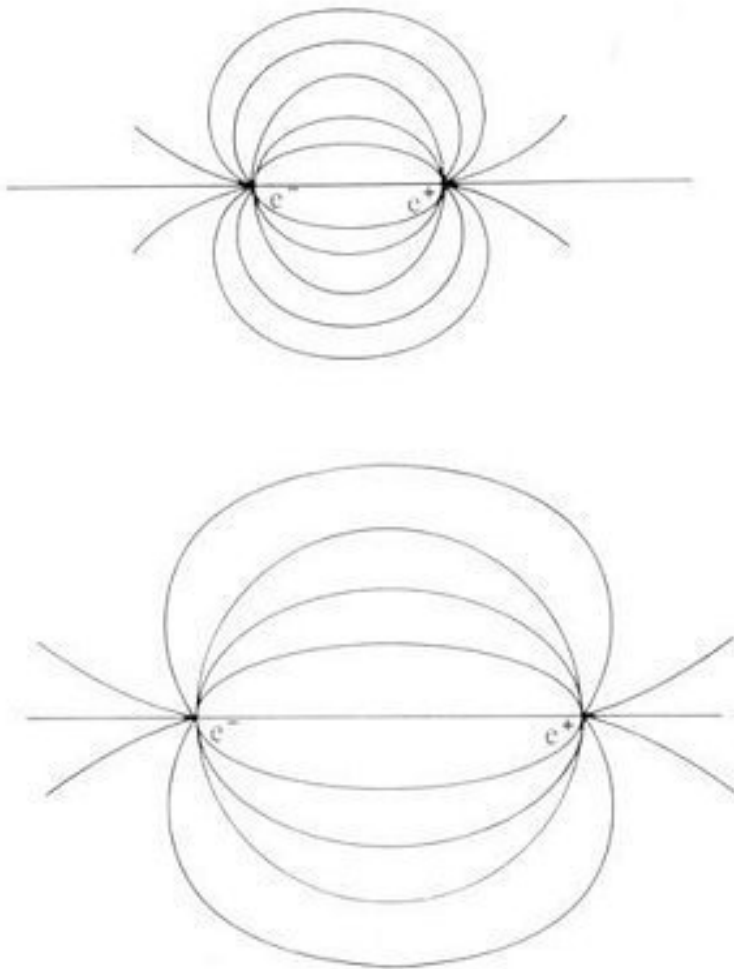
Kvarkbezárás



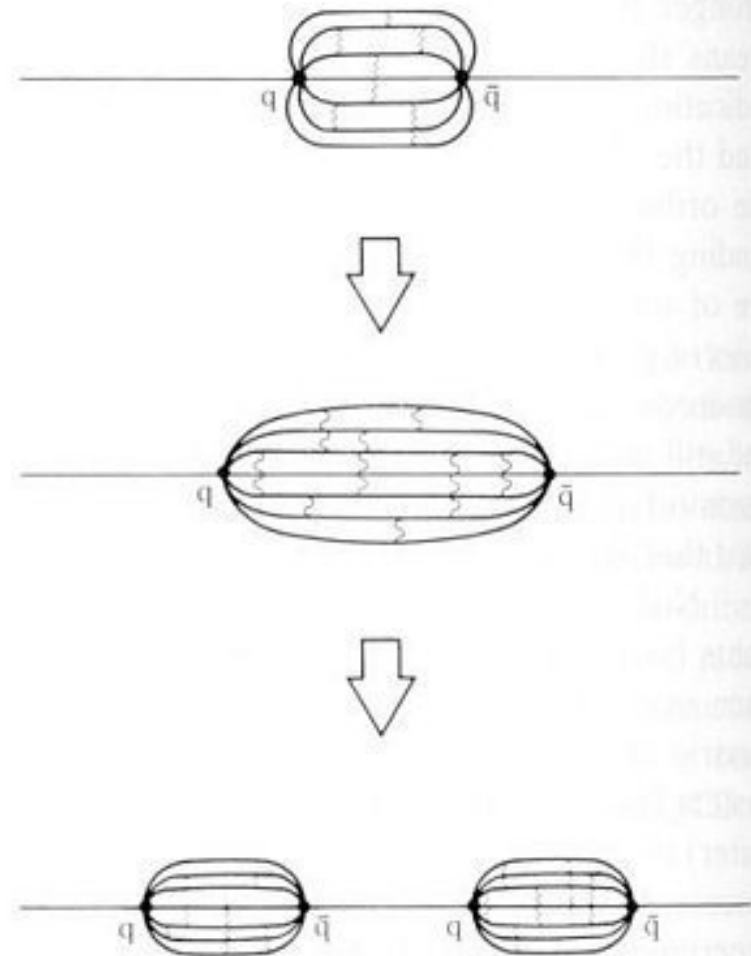
szabad kvarkot nem lehet létrehozni

EM analógia

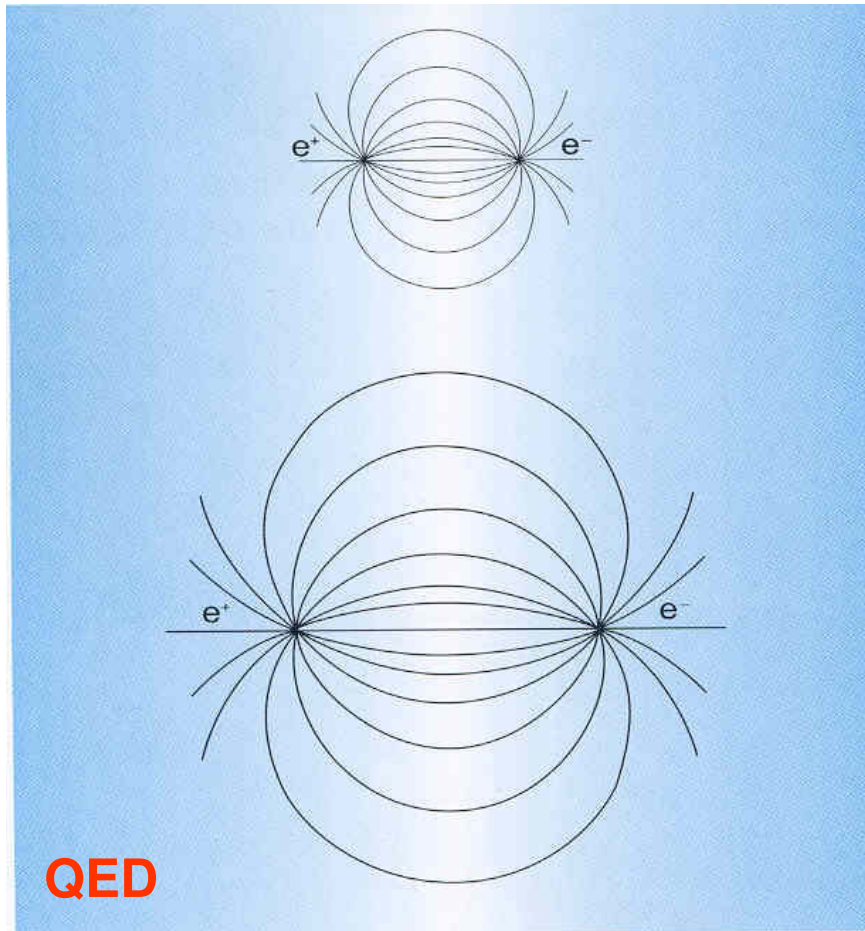
Electric field lines spread out as the electric charges are separated.



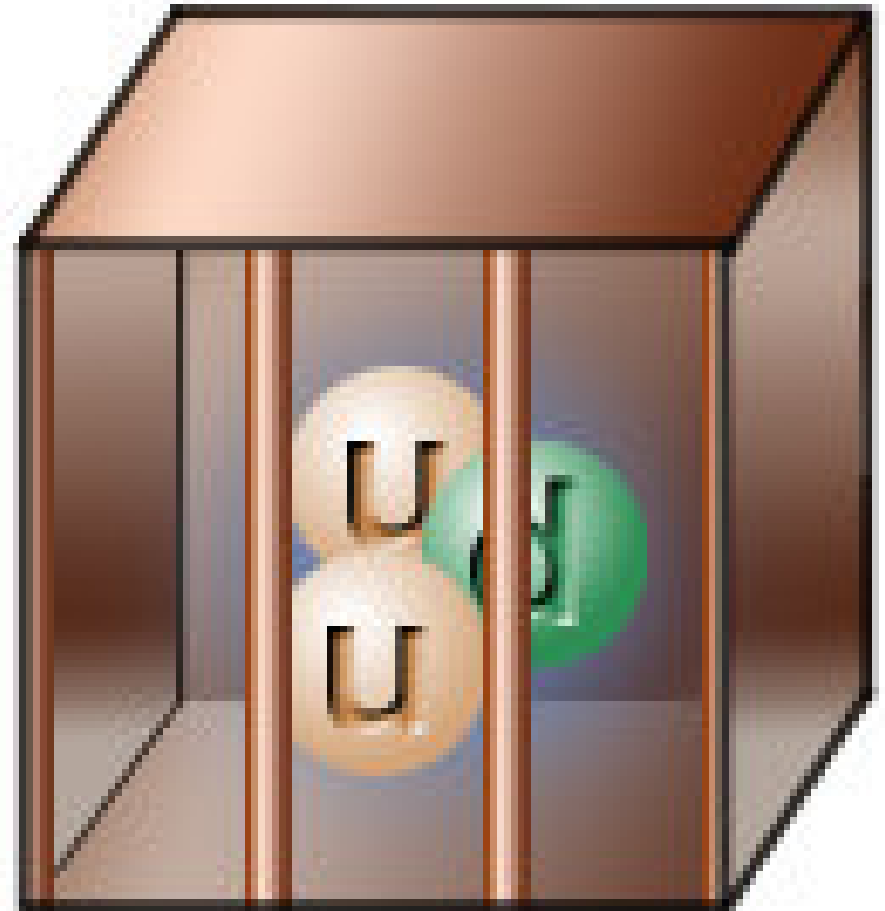
Colour force lines between quarks are collimated into a tube-like shape and do not spread out as the quarks are separated. Eventually a single tube will split into two when the force applied has completed enough work.



Kvarkbezárás – asszimptotikus szabadság



ELEKTRODINAMIKA
Elektromosság, töltések



KVANTUMSZÍNDINAMIKA
Erős kölcsönhatás, kvarkok

... ma már nincsenek szabad kvarkok...

2004-es Nobel-díj



David J. Gross

H. David Politzer

Frank Wilczek

aszimptotikus szabadság

Nagy energiás ütközésekben a kvarkok
szabadnak látszanak