

Részecskék osztályozása, köölcsönhatások, Standard Modell?

Mag-, **részecskefizika** és asztrofizika

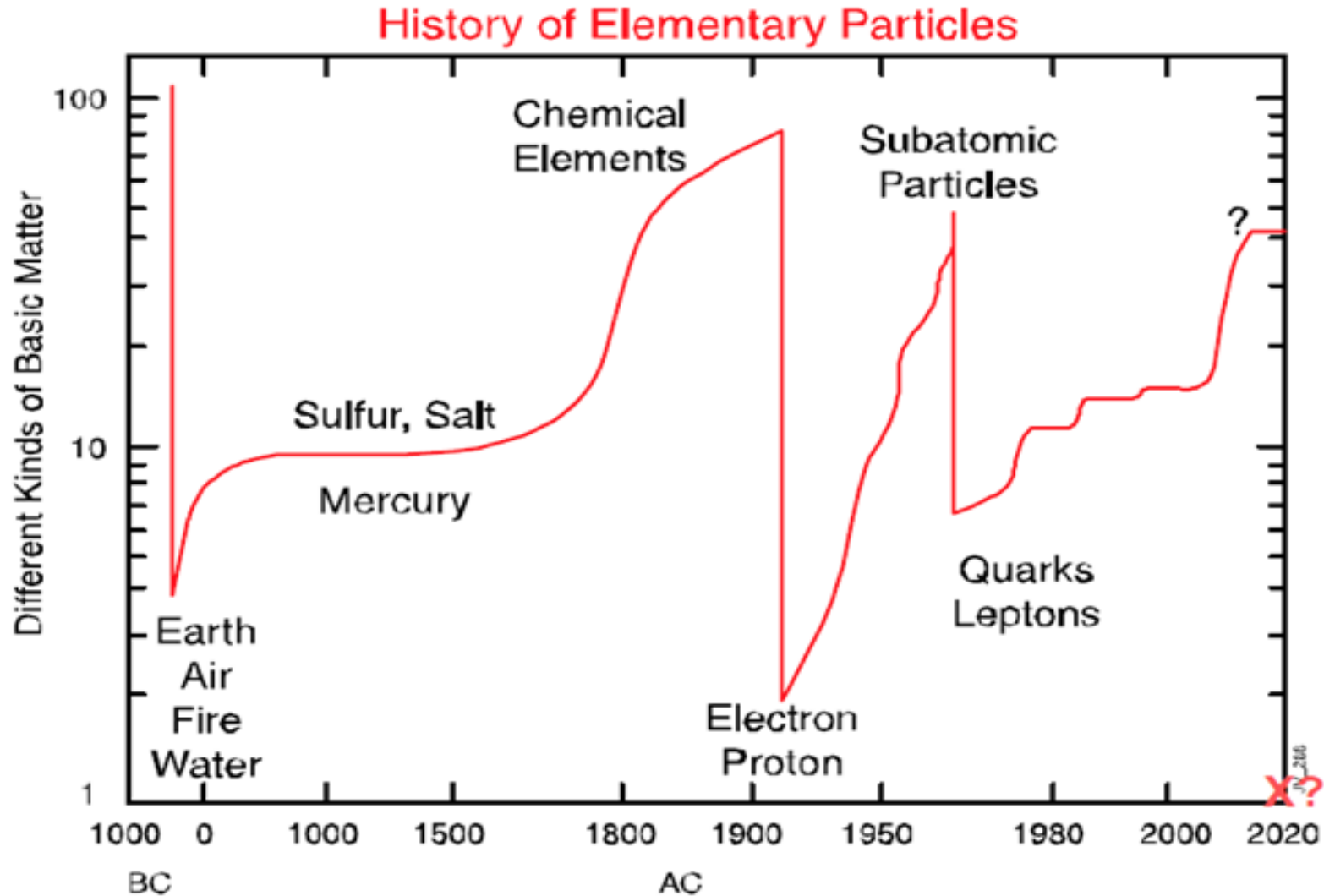
4. előadás

2018. október 2.

Köszönet Pásztor Gabriellának

<http://gpasztor.web.cern.ch/gpasztor/mrf2017>

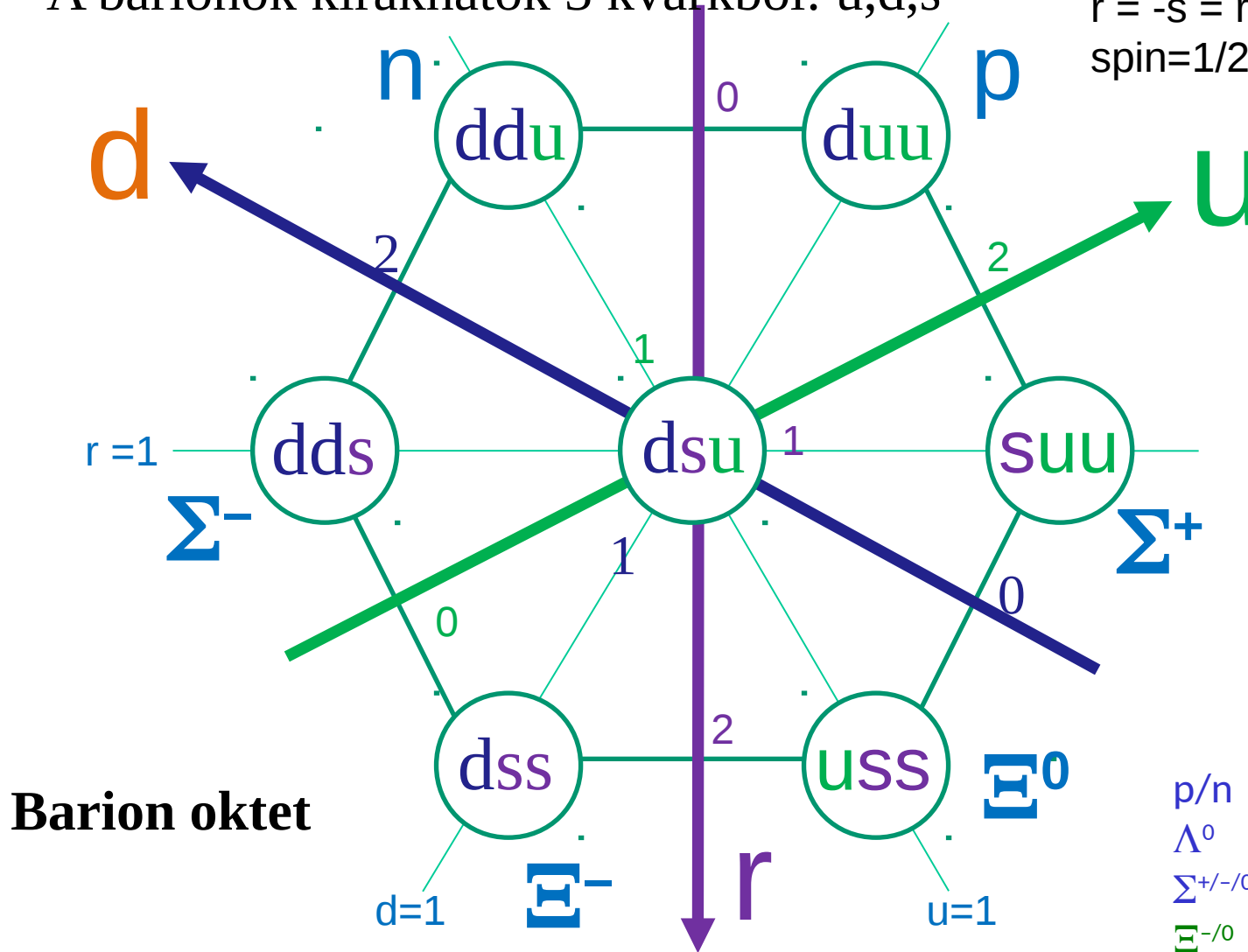
Az “elemi” részecskék története



Kvark-gondolat

A barionok kirakhatók 3 kvarkból: u,d,s

$r = -s =$ ritka kvarkok száma
spin=1/2



Barion oktet

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

Konstituens kvark tömegek:
 $m_u \lesssim m_d < m_s$

p/n	0	938-940 MeV
Λ^0	-1	1116 MeV
$\Sigma^{+/-/0}$	-1	1189-1197 MeV
$\Xi^{-/0}$	-2	1315-1322 MeV

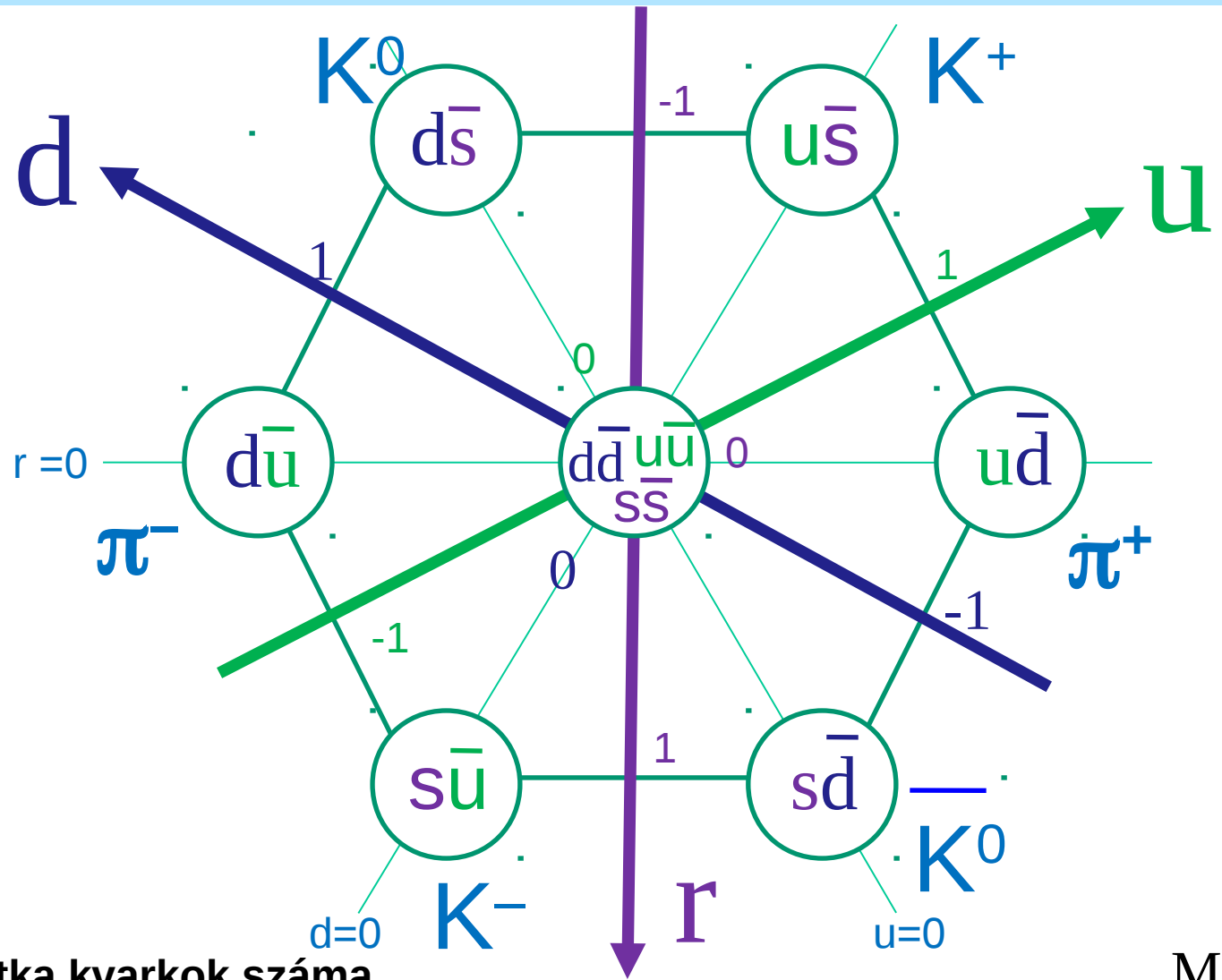
SU(3) csoport: 3 kvark: u, d, s

- 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)**

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

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

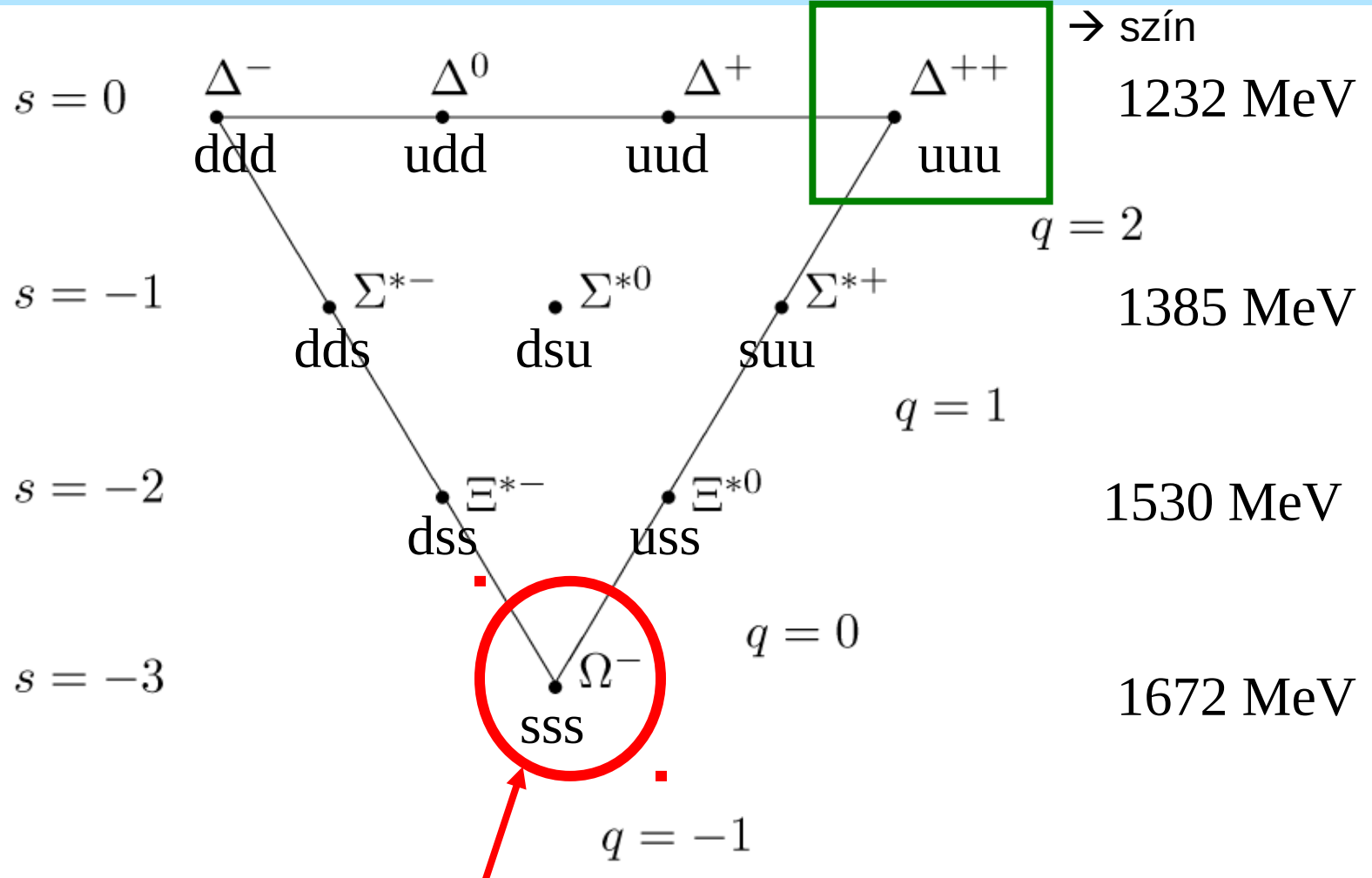
Mezonok osztályozása



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

Mezon oktet

Barionok 3/2 spinnel



Barion dekuplet

Ezzel a módszerrel jóslták meg a létét!
Felfedezése a kvark modell sikere volt!

A kvark-gondolat

Valami szabályosság! (Gell-Mann, Ne'eman, Nishijima 63-64)
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 barionokat (protonnál nehezebb részecskék) 3,
a mezonokat 2 ilyenből rakjuk össze

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

Gell-Mann – Nishijima formula

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

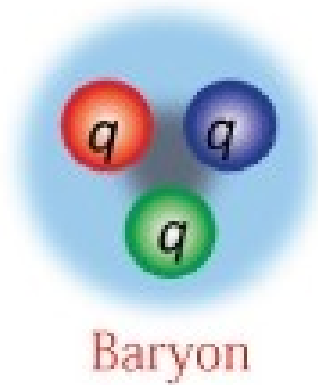
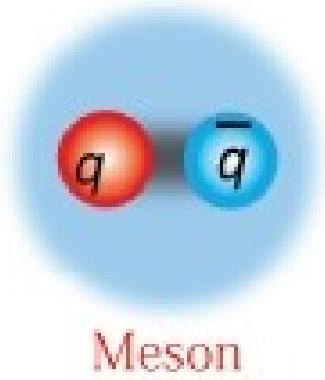
- Q : elektromos töltés
- $I_3 (T_3, T_z)$: izospin harmadik komponense
- S : ritkaság
- B : barionszám (három kvarkból álló részecskék)
- $Y=B+S$ neve: hipertöltés

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

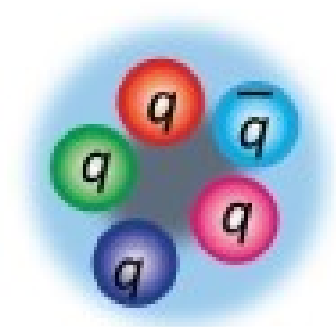
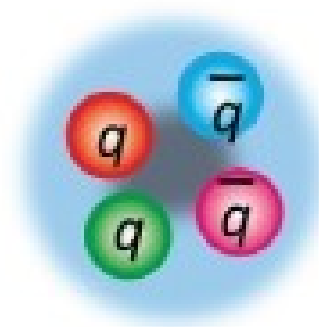
Izospin: mennyi hasonló tömegű részecskét találtunk

Hadronok = Barionok + Mezonok

Standard Hadrons



Exotic Hadrons



Korábban

Hadronok: kvarkok kötött állapotai

- Barionok (qqq), anti-barionok ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$), mezonok (qq)
- Rezonanciák felfedezése (1946-tól, kozmikus sugárzás, részecskegyorsítók)
- Kvarkmodell (1964 Gell-Mann, Zweig)
- Mélyen rugalmatlan e-N szórás (1968 MIT-SLAC, Friedman)
→ proton, neutron szerkezet

Elektron és társai

- Anti-elektron (1928-31 Dirac, 1932 Anderson) : pozitron
- Mezon (1936 Anderson, Neddermeyer, közepes $m_e < m < m_p$ tömegű)
 - Yukawa magerő közvetítő pionja? ✗ (1947)
 - Elektron nehezebb testvére: müon ✓

Ugorjunk vissza az időben...

Dirac-egyenlet antirészecskét jósol (1928-31)

Pozitron (1932 Anderson)

A magerő rövid hatótávolságú: közvetítő részecskéje az elektronnál nehezebb, a protonnál könnyebb (1934 Yukawa)

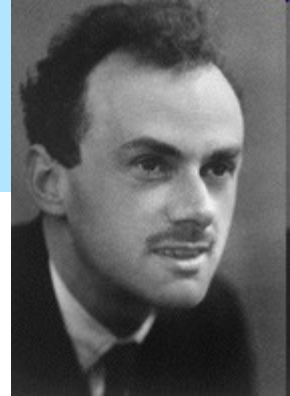
~~Mezotron (1936 Anderson, NedderMeyer)~~

Pí-mezonok, avagy pionok (1947 Powell)

A béta-bomlásban nem marad meg az energia (1931 Pauli)

Láthatatlan, új részecske: neutrínó (1954 Reines, Cowan)

Antirészecskék



- P. A. M. Dirac (1933 Nobel-díj)
- Dirac-egyenlet (1928): az elektron hullámfüggvényének relativisztikus mozgásegyenlete
- Megjósolta az antirészecskék létezését elméleti (matematikai) alapokon
- Megalkotta a modern kvantummechanikát
- A kvantum-elektrodinamika (QED) atyja
- Mágneses monopólus és elektromos töltés kvantumának kapcsolata (jóslat)
- Wigner Jenő sógora volt

Dirac-egyenlet (1928)- ismételés

- Első elméleti eredmény, amely a kvantummechanikával és a speciális relativitáselmélettel is összhangban volt

- A H színeképvonalainak teljes és pontos értelmezését adta

- Probléma: a Schrödinger-egyenlet NINCS összhangban a speciális relativitáselmélettel: $p^2/2m = E$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\phi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\phi.$$

- Relativisztikus sebességeknél a teljes energia így adható meg:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Beírva az operátorokat: $\mathbf{p} = \frac{\hbar}{i}\nabla = -i\hbar\nabla$

$$\left(-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2\right)\phi = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}\phi$$

$$E = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$$

ϕ relativisztikus skalár: komplex szám, amelynek a számszerű értéke minden vonatkoztatási rendszerben ugyanaz

- Másodfokú fokú deriváltak jelennek meg a térben és időben: megoldáshoz a kezdeti hfv és deriváltja is kell!
- Elsőfokú egyenlet kell, a kezdőfeltétel nem lehetett túlságosan tetszőleges, hiszen a hullámfv valószínűsősűrűséget kell, hogy jelentsen.

Dirac-egyenlet *

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \phi = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \phi$$

Vegyük a hullámoperátor „gyökét“, hogy elsőfokú legyen az egyenlet:

$$\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = (A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t)(A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t).$$

A kereszttagoknak el kell tűnni, ha beszorzunk... vagyis ez kell:

$$AB + BA = 0, \dots \quad A^2 = B^2 = \dots = 1.$$

A feltétel teljesíthető, ha A,B,C,D mátrixok! Azaz a hfv több komponensű!

Ekkor viszont a fenti hullámegyenlet „négyzetgyöke”:

$$(A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t)\psi = \kappa\psi \quad \kappa = mc/\hbar \quad (\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\partial_t^2)\psi = \kappa^2\psi.$$

A Dirac-egyenlet:

$$(A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t - \frac{mc}{\hbar})\psi = 0.$$

Dirac-egyenlet*

- Minimum 4 komponensre van szükség a megfelelő tulajdonságú rendszer leírásához → a hullámfgv. 4 komponensű
- Spin leírásához (Pauli fenomenológiai elmélete) csak 2 komponens kell!
- Itt mind a 4 komponens kielégíti a relativisztikus energia-impulzus relációt
- Négy komponens, **két** feles spinű részecskét ír le (elektron és... antielektron!)

∇ α, β : 4x4-es önadjungált mátrixok, átírható a **Dirac-egyenlet** ilyen formába:

$$D = \beta \quad (A, B, C) = i\beta\alpha_k$$

$$\left(\beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad \begin{aligned} \alpha_i^2 &= \beta^2 = I_4 \\ \alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i &= 0 \end{aligned}$$

- Ugyanez más formában:

$$\begin{pmatrix} mc^2 & c\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} \\ c\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} & -mc^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_- \end{pmatrix} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_- \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} 1_2 & 0 \\ 0 & -1_2 \end{pmatrix}$$

- Elsőfokú egyenlet!
- Jelentősége: megjósolja a pozitron (antielektron) létezését a felfedezése előtt!

Dirac-egyenlet kovariáns formája*

Vezessünk be új mátrixokat: $\gamma^0 = \beta$ $\gamma^k = \gamma^0 \alpha^k$.

Ekkor az eredeti Dirac-egyenlet
$$\left(\beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t)$$

átírható így:

$$\boxed{-i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi + mc\psi = 0.}$$

Ez a kovariáns alak, látszik hogy az idő és térkoordináták teljesen egyenrangúak.

A mátrixok

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & -I_2 \end{pmatrix}, \gamma^1 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_x \\ -\sigma_x & 0 \end{pmatrix}, \gamma^2 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_y \\ -\sigma_y & 0 \end{pmatrix}, \gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_z \\ -\sigma_z & 0 \end{pmatrix}.$$

antikommutálnak: $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$

σ_i -k a Pauli-mátrixok:

$$\sigma_1 = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

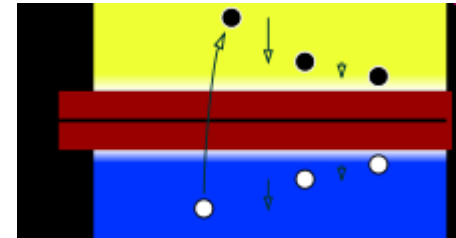
$$\sigma_2 = \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

A Dirac-tenger (1930)

- A vákuum negatív energiájú részecskékkel van tele
- A pozitron a Dirac-tengerben egy lyuknak tekinthető. Olyan, mintha pozitív töltése lenne
- Egy lyuk és egy elektron megsemmisítheti egymást: annihiláció
- A részecskeszám nem marad meg
- A mai kvantumtérelmélet (QFT) már nem teszi szükségessé a tenger feltételezését, a pozitron is valódi részecske
- Dirac: lyuk = proton
- Oppenheimer: nem lehet, ui. a H-atom túl gyorsan megsemmisülne
- Dirac, 1931: **léteznie kell** egy pozitív töltésű, de az elektronnal egyező tömegű részecskének
- Kísérleti bizonyíték egy évvel később

$$m^2 c^4 + p^2 c^2 = E^2$$
$$E = \pm mc^2.$$



A béta-bomlás energiaspektruma

Béta-bomló atommagok vizsgálata: ^{40}K , ^{14}C , ^3H , ^{214}Bi ...

- e/m meghatározás \rightarrow a keletkező részecske egy elektron
 - Az elektron energia mérése
 - (folyadékszintillátor, .mágneses.spektrométer)
- \rightarrow folytonos spektrum

Magyarázat: _Nem_kéttest-bomlás!

$A \rightarrow B + e + \dots$

Impulzus (Lendület) megmaradás:

kezdetben 0, végén kéttest-bomlás esetén: $p_B = p_e$ de ellentétes irányban

$Q = p^2/2m_B + p^2/2m_e$ ebből p adódik, és E_e kiszámolható, adott érték.

Ellentmond a megfigyelésnek.

Impulzusmomentum (Perdület) megmaradás:

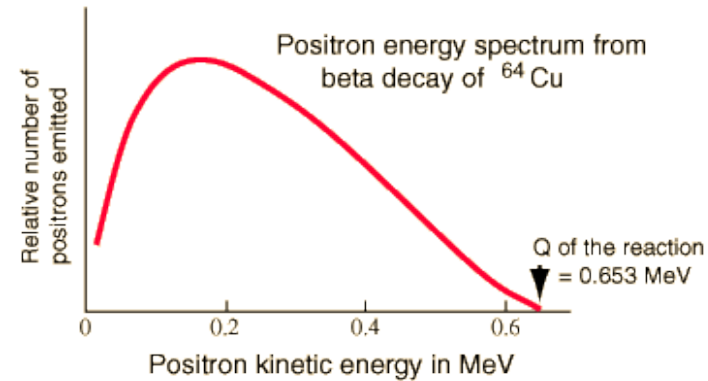
Ismerve a spineket (1925 Uchlenbeck) $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e$ esetén

spin: $0 \rightarrow 1 + 1/2$: nem lehetséges

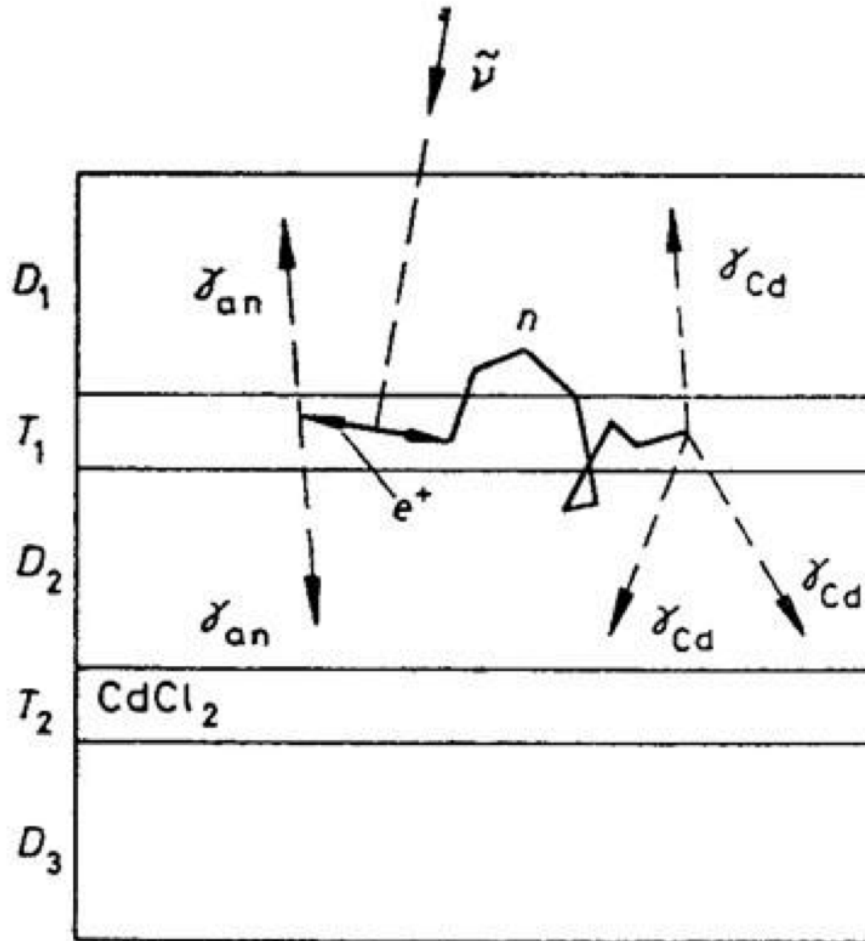
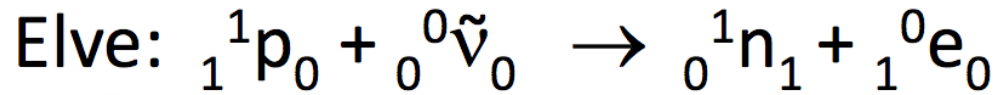
Nem csak az energia hiányzik, a perdület is!

Wolfgang Pauli 1931:

új részecske keletkezik, ami nem hat kölcsön a detektorokkal: **neutrínó**



Reines és Cowan kísérlete (1954)

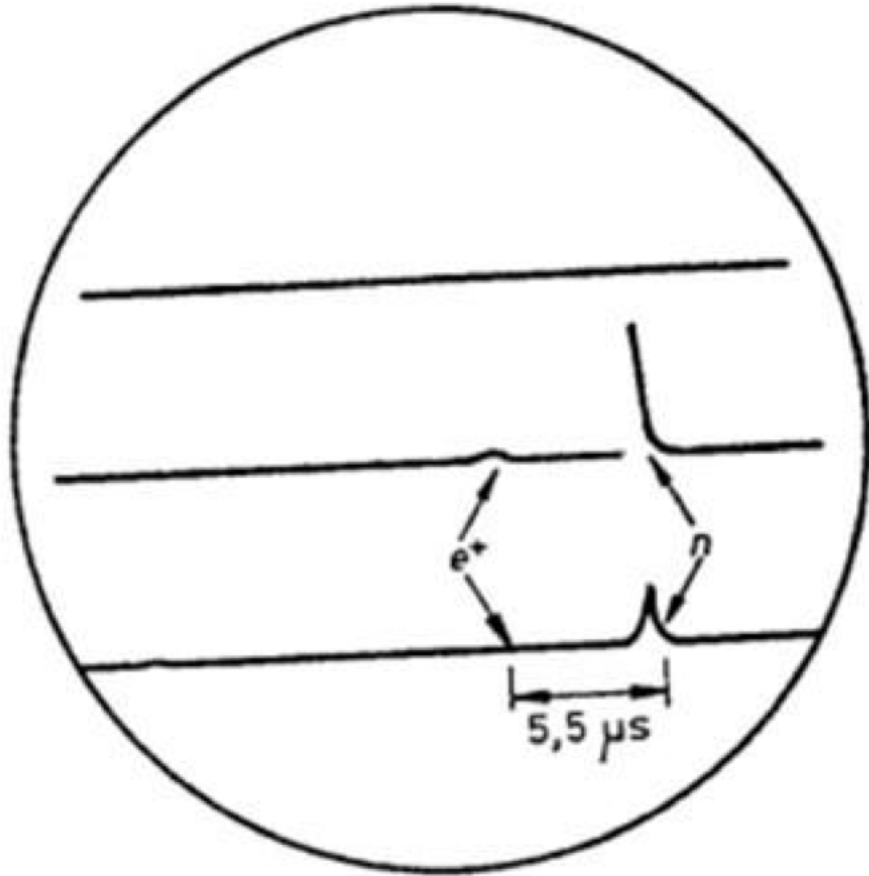


T1 és T2: CdCl₂-os víz.

D1, D2, D3: ~1 m³
folyadék szcintillátor.

1. Neutrínó-kölcsönhatásból származó pozitron lefékeződik,
2. majd annihilálódik egy elektronnal
3. A két 511 keV-es gammát a szcintillátorok detektálják

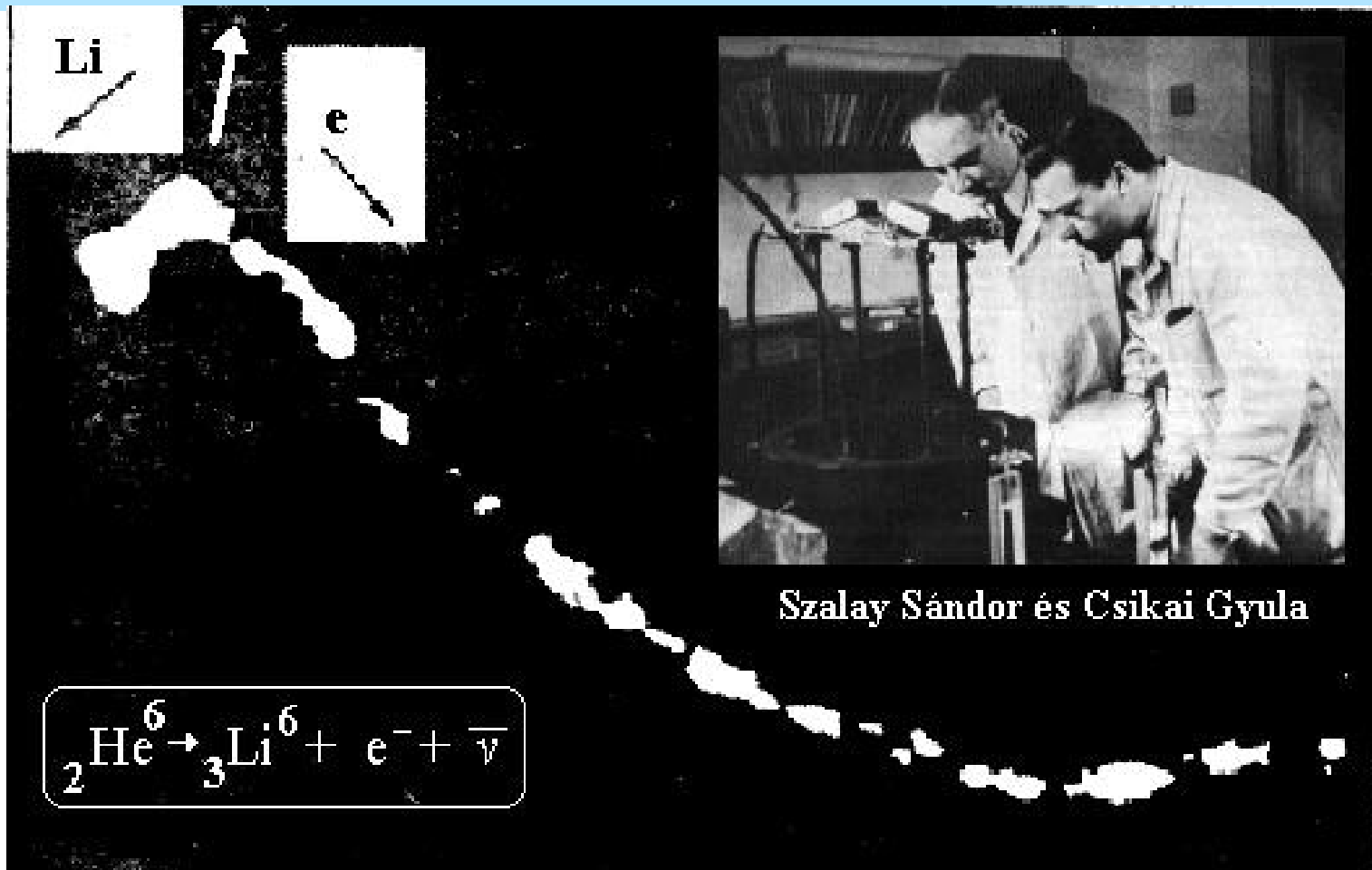
Reines és Cowan kísérlete (folyt.)



- A neutron - lefékezés után - befogódik a Cd atommagba, és **késleltetett gamma sugárzást** kelt.
- A fékezés miatti késleltetési idő kb. $6 \mu s$.
- **A késleltetett hármas** **koincidenciát** detektálva a neutrínók detektálhatók.

1400 óra mérés 4000 esemény $\sigma \rightarrow 10^{-43} \text{ cm}^2$

A Szalay–Csikai-kísérlet



A neutrínó „hílt helye”, ködkamrafelvétel, Debrecen, 1957

Vastag nyom – lítium, vékony az elektron, az összlendület nem 0

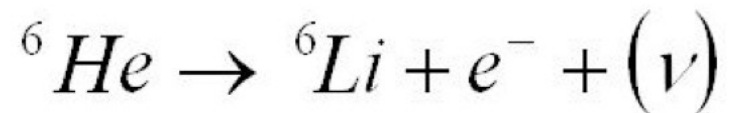
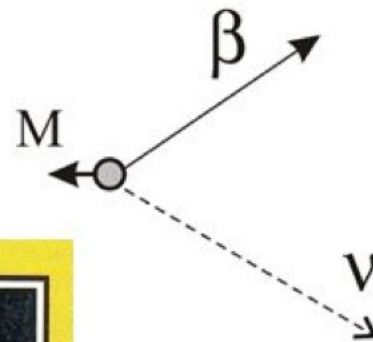
Kell, hogy legyen egy láthatatlan részecske is!

A Csikai-Szalay kísérlet (Debrecen)

Ha nincs neutrínó

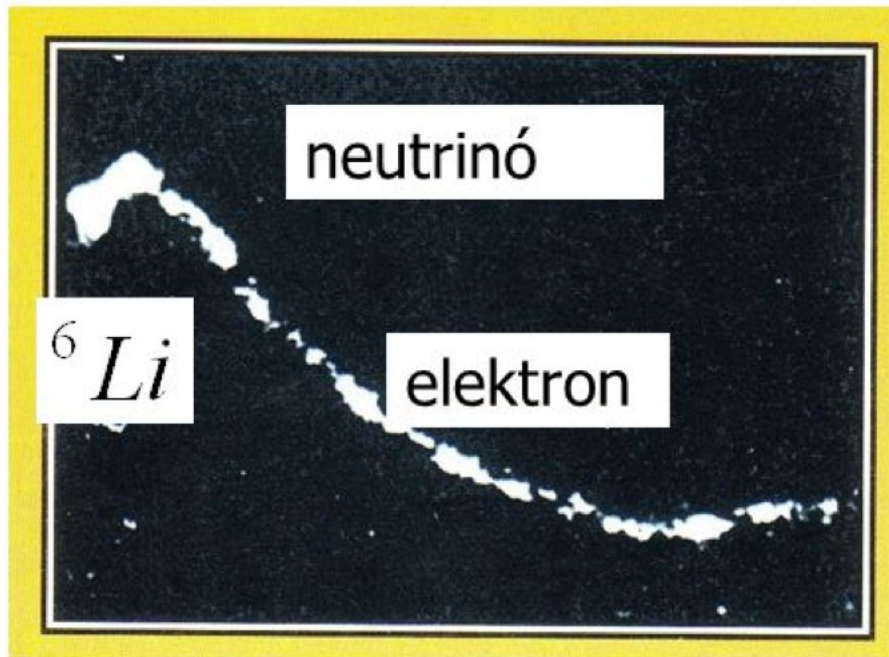


Ha van neutrínó



$$T_{1/2} = 0.8s$$

$$E_0 = 3.6\text{MeV}$$



Az impulzus megmaradása miatt a meglökött mag és a kilépő elektron iránya egy harmadik részecskére utalt!

Hány neutrínó van? Első lépés...

β^- -bomlás $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}$ anti-elektronneutrínó

β^+ -bomlás $^{19}\text{F} \rightarrow ^{19}\text{O} + e^+ + \nu$

Ugyanaz a részecske keletkezik-e a pozitronnal, mint az elektronnal? Nem!
Az egyik átalakítja a protont neutronná, a másik nem! (Reines-Cowan, Davis)

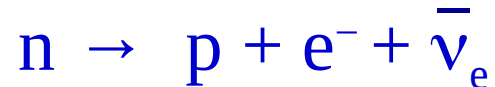
Kísérleti tapasztalat: elektronnal mindig az egyik neutrínó keletkezik, a pozitronnal mindig a másik, sose az egyik.

Ezt törvénnyel fejezzük ki: **megmarad a leptonszám**, a többi lehetséges de nem megvalósuló reakciót ez a megmaradási törvény tiltja meg.

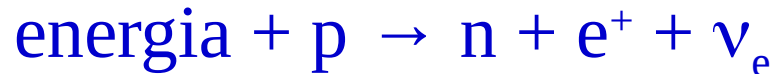
	e^-	e^+	ν	$\bar{\nu}$
leptonszám:	1	-1	1	-1

Béta-bomlás fajtái

- Negatív béta-bomlás:



- Pozitív béta-bomlás:



- Elektronbefogás:



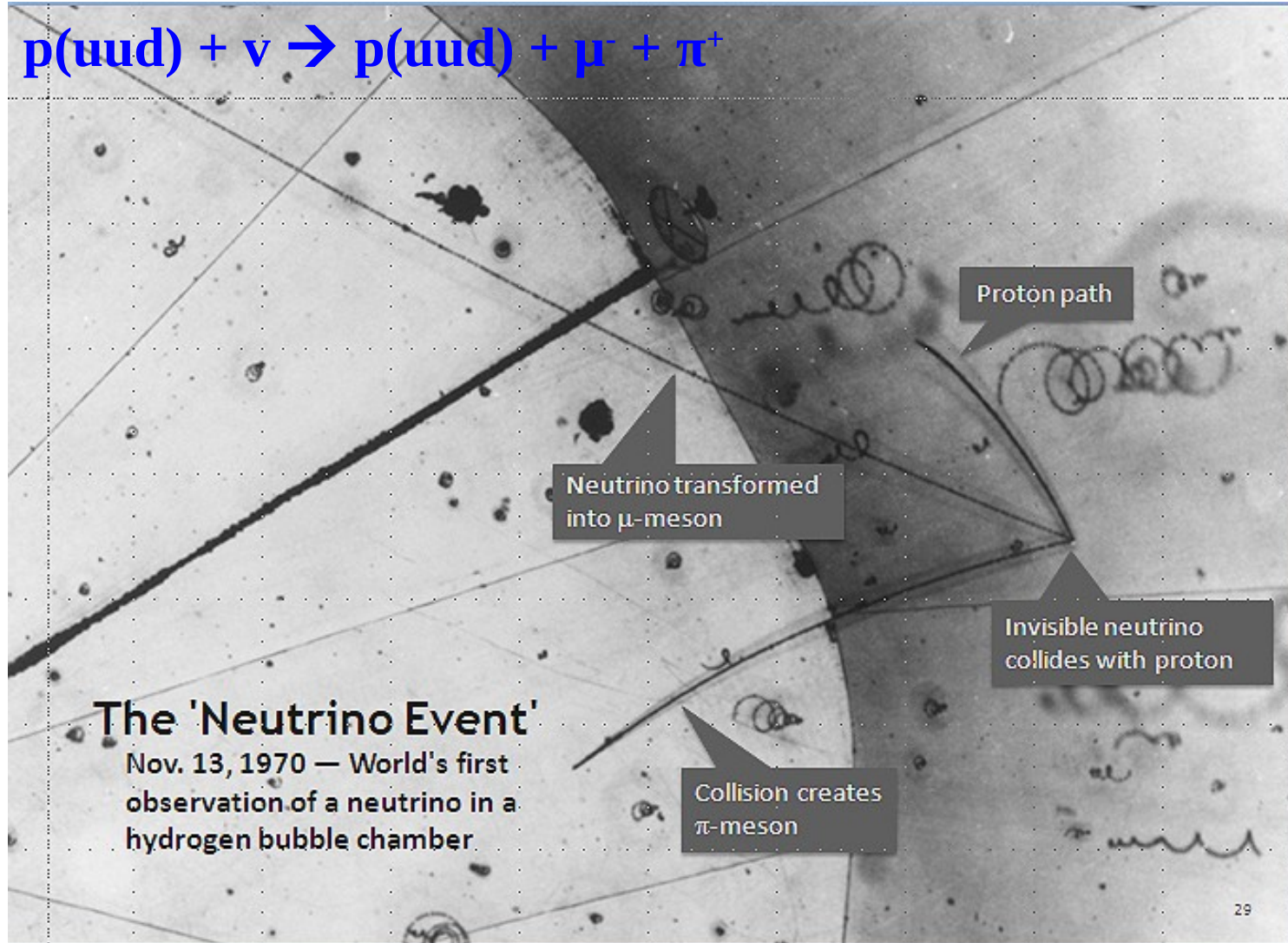
- Megmaradó mennyiségek:

leptonszám, töltés, barionszám

(azaz nukleonszám), spin, energia, impulzus

Neutrínó-megfigyelés buborékkamrával

1970 Zero Gradient Synchrotron's -12 foot bubble chamber



The 'Neutrino Event'

Nov. 13, 1970 — World's first observation of a neutrino in a hydrogen bubble chamber.

Pi-mezon (pion) bomlási lánc

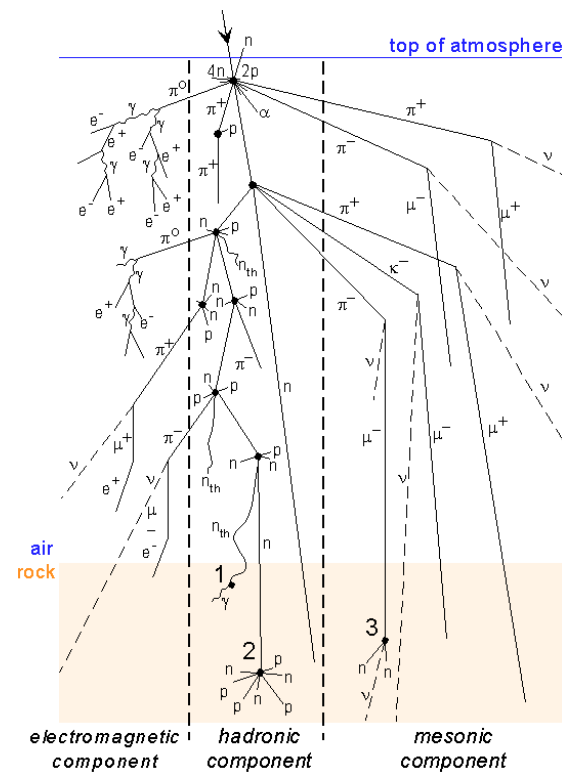
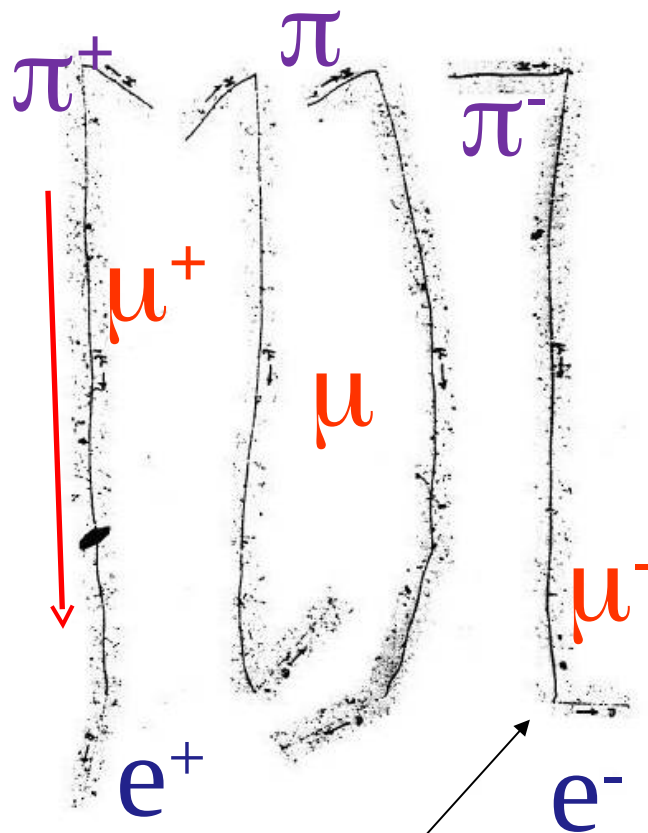
$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

$$mc^2 \approx 150 \text{ MeV}$$

keletkezés:
protonok ütközése
atommagokkal

hamar elbomlik müonra,
a pálya megtörik: láthatatlan vagy semleges
részecskék is vannak!



Leptonszám

Pi mezon bomlásakor az impulzusmegmaradás sérülni látszik
semleges részecske ν_{μ} (müonneutrínó) keletkezik

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu} \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}$$

A két neutrínó nem azonos: leptonszám megmaradás törvénye

A müon is bomlik:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu}$$

Elektronikus és müonikus (tau-) leptonszám is van

Külön – külön megmaradnak keltés-bomlási folyamatokban!

Oscilláció: íz-keveredés miatt nem! $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}$

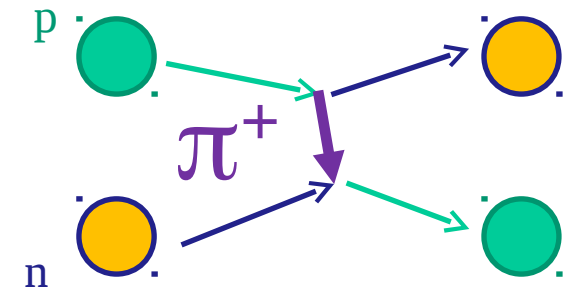
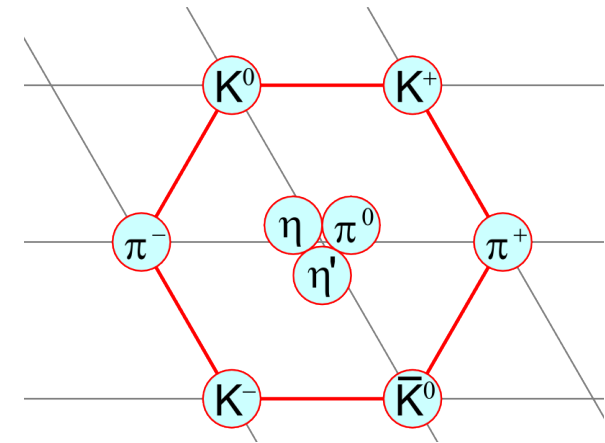
Pi-mezonok

Gyorsítóknál is könnyen elő lehet állítani, ha a felgyorsított proton kinetikus energiája nagyobb 200 MeV-nél
Elsőként 1948-ban Berkeley-i ciklotronban

Semleges pi-mezon felfedezése
(izospin=1, $T_z=-1,0,1$:
kell lennie egy semlegesnek is...)

Tömege kb. egyforma a töltött pion tömegével
(hasonlóan a neutron és a proton tömegéhez):
töltöttek: 139.57 MeV, semleges: 134.98 MeV

Yukawa – magerők közvetítője,
a magerők közvetítő részecske modellje
(minden kölcsönhatásra alkalmas)



A pí-mezon jóslat 1935

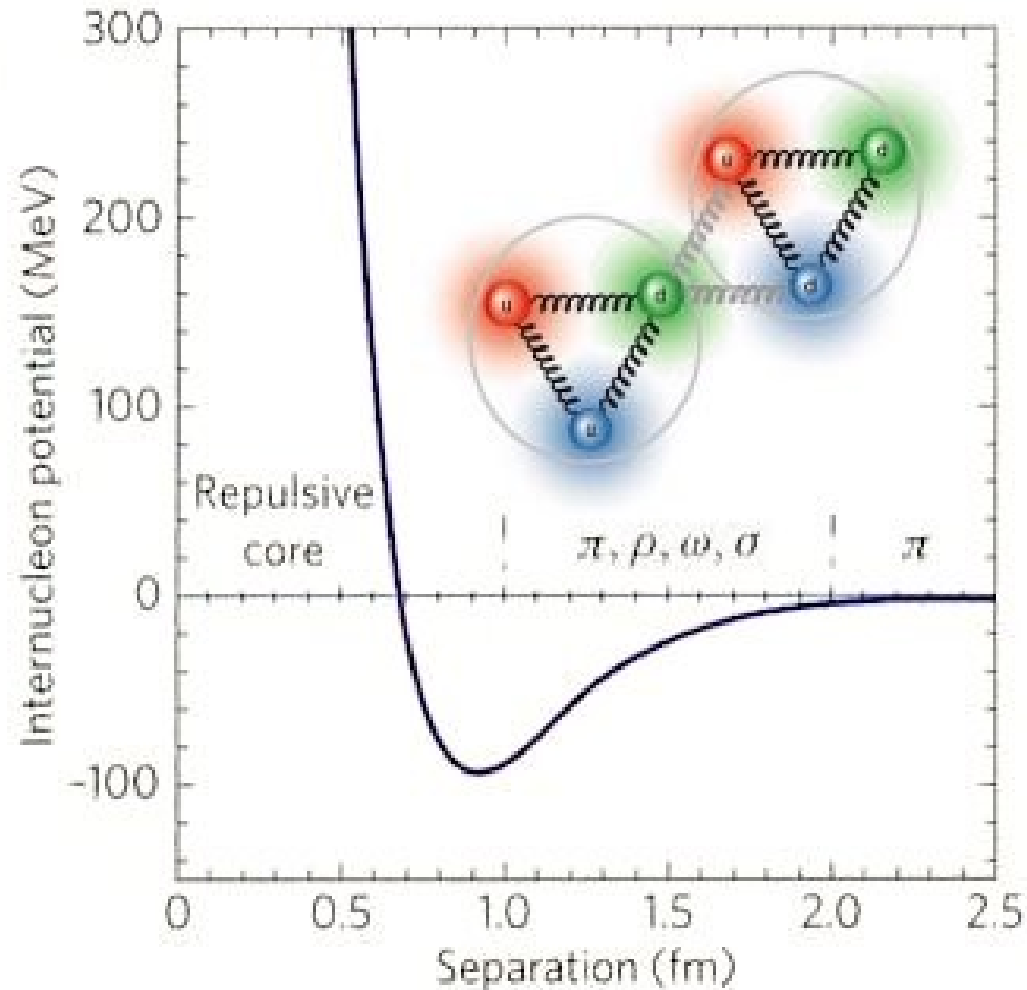


- Hideki Yukawa (Nobel-díj 1949)
- Az erős kölcsönhatás hatótávolsága kicsi
 - Ezt az atommag méretéből lehet látni
- Yukawa-potenciál: tömeges közvetítő részecske esetén

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mcr/\hbar}}{r}$$

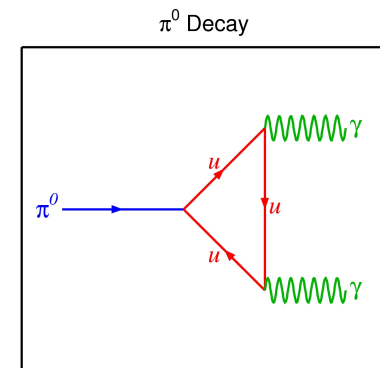
- $m=0$ határeset: Coulomb
- A közvetítő részecske tömege 100 MeV körüli kell hogy legyen a Heisenberg-féle határozatlansági relációt használva
- Hatótávolság a határozatlansági relációból:
 $d = ct = hc/\Delta E = hc/mc^2 = 1,3 \text{ fm}$, ha $mc^2 = 150 \text{ MeV}$
- Az egy évvel később felfedezett müont hitték a megjósolt pionnak (amíg ki nem derült hogy másféle bomlásai vannak, és nem is vesz részt az erős kölcsönhatásban)

Yukawa potenciál



Semleges pion felfedezése: 1950 *

- Yukawa: a proton-proton vonzásért a semleges pion a felelős.
- 1948, Oppenheimer: kozmikus sugárzás „soft component”: lassú elektronok és fotonok is vannak, ezek a π^0 bomlásából származnak
- 1949, Berkeley gyorsító: protonnyaláb céltárgyra ütközött, 175 MeV proton-energia esetén hirtelen megnőtt a fotonok által keltett elektron-positron párok száma.
- 1950: Berkeley, kétfotonos bomlásának megfigyelése (felfedezés) részecskegyorsítóban: elektron-szinkrotronból származó röntgensugárzás céltárgyon pionokat keltett, amelyek két fotonra bomlottak: ezeket koincidenciaméréssel találták meg. Az első instabil részecske gyorsítós felfedezése.
- Később kozmikus sugárzásban is megfigyelték (Bristol)



Az elemi részecskék

3 részecskecsalád:

(u,d, ν_e ,e)

(c,s, ν_μ , μ)

(t,b, ν_τ , τ)

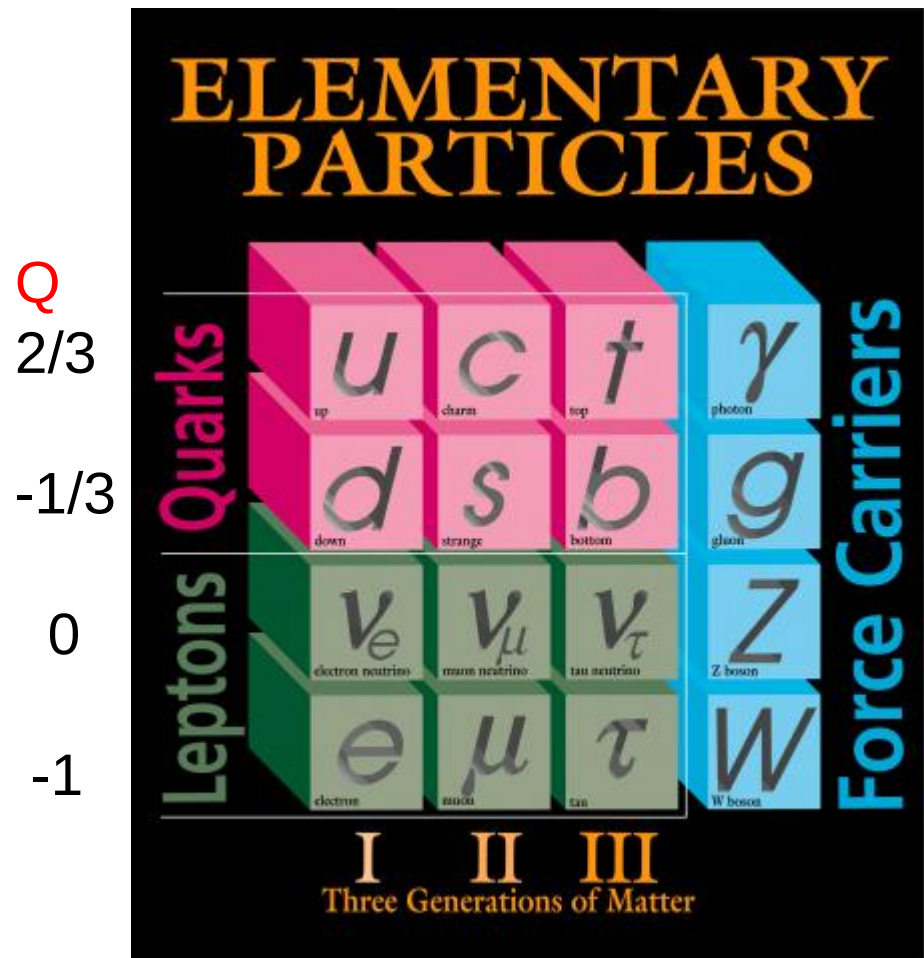
Kvarkok íze:

u, d, c, s, t, b

Leptonok íze:

e, μ , τ

ν_e , ν_μ , ν_τ



Fermilab 95-759

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: **leptonszám-megmaradás**

A kvarkok száma megmarad-e?

- **mezonok** $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

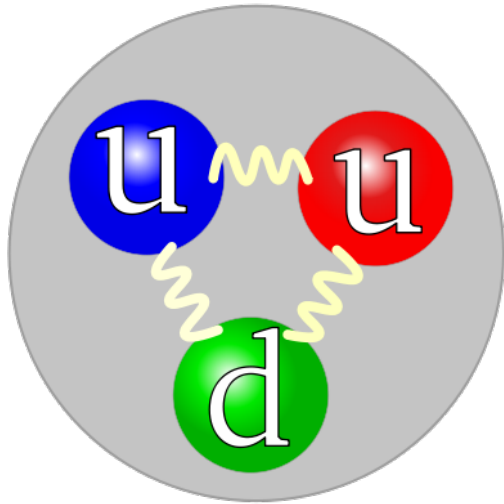
a kvark-antikvark párok eltűnhetnek leptonokká

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

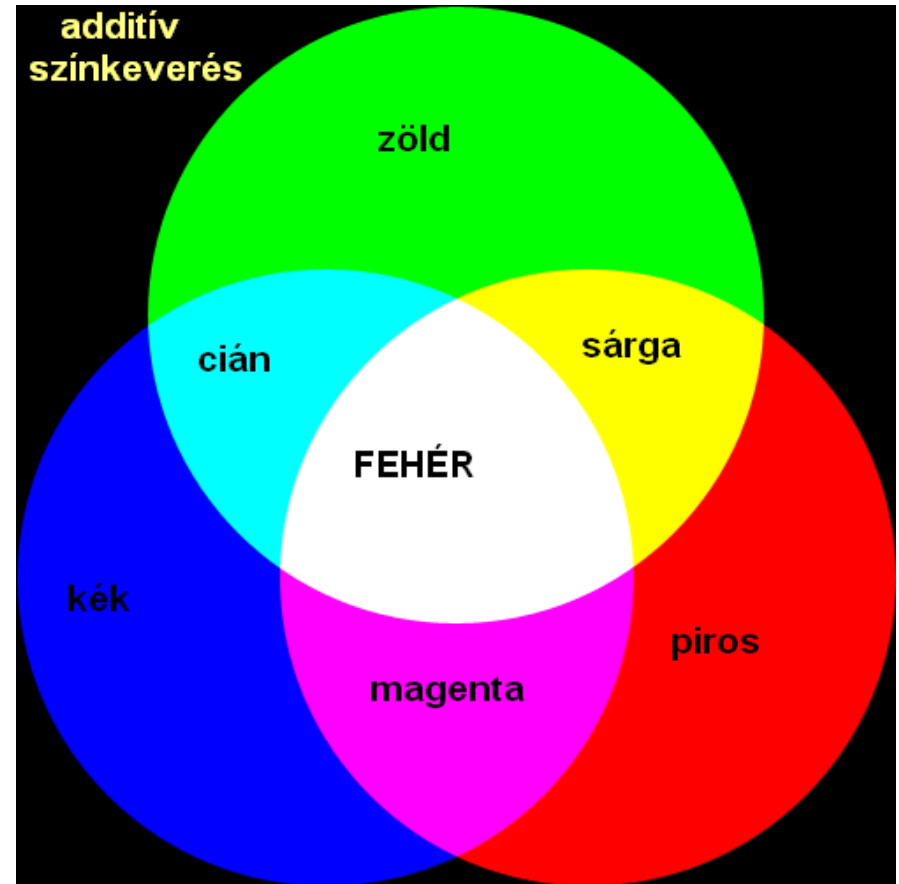
protonbomlást, barion \rightarrow mezon bomlást nem figyeltek meg
antiproton mellett mindig keletkezett egy proton is

BARIONSZÁM-megmaradás: a kvarkok barionszáma $1/3$, antikvarkoké $-1/3$

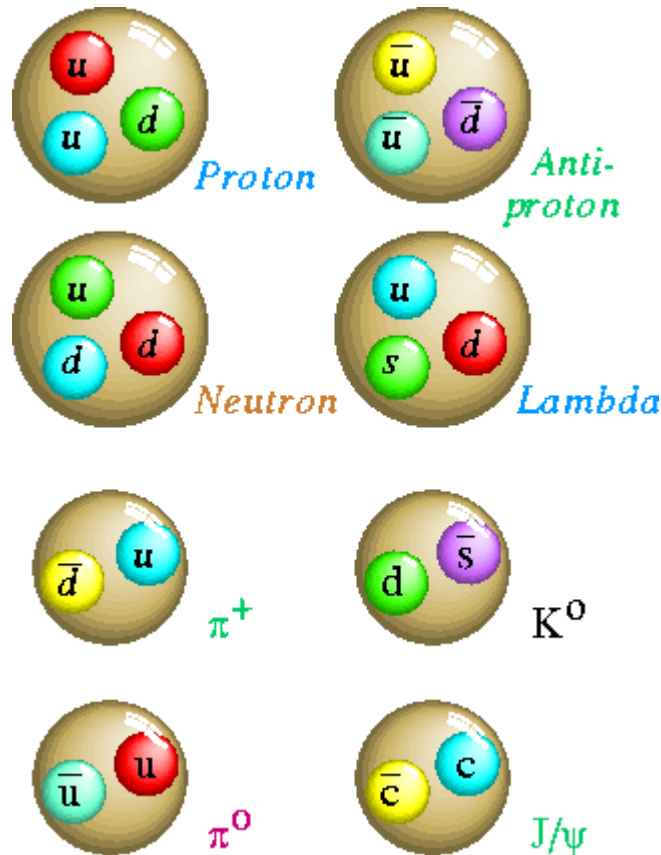
A kvarkok színe



A részecskék fehérek



A mikrorészecskék színösszetétele

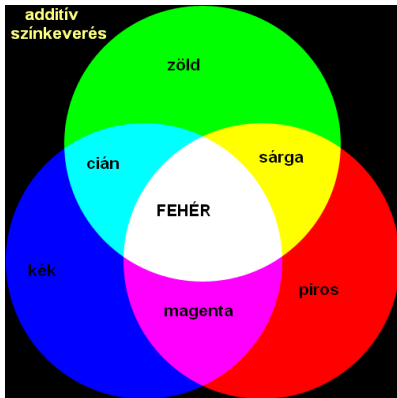


barionok PKZ

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 18 db
- Leptonok: $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ 6 db
- Ezek antirészecskéi +24 db
- Helicitás kvantumszám: + vagy - +42 db
 - Helicitás: spin és a lendület párhuzamos vagy ellentétes
 - Neutrínók: mindig bal-kezes neutrínó, jobb-kezes antineutrínó
 - Maximális paritássértés
- Közvetítő részecskék: foton, 8 gluon, W^+, W^-, Z 12 db
- Higgs 1 db
- Graviton?
- Összesen: $90 + 13 = 103$

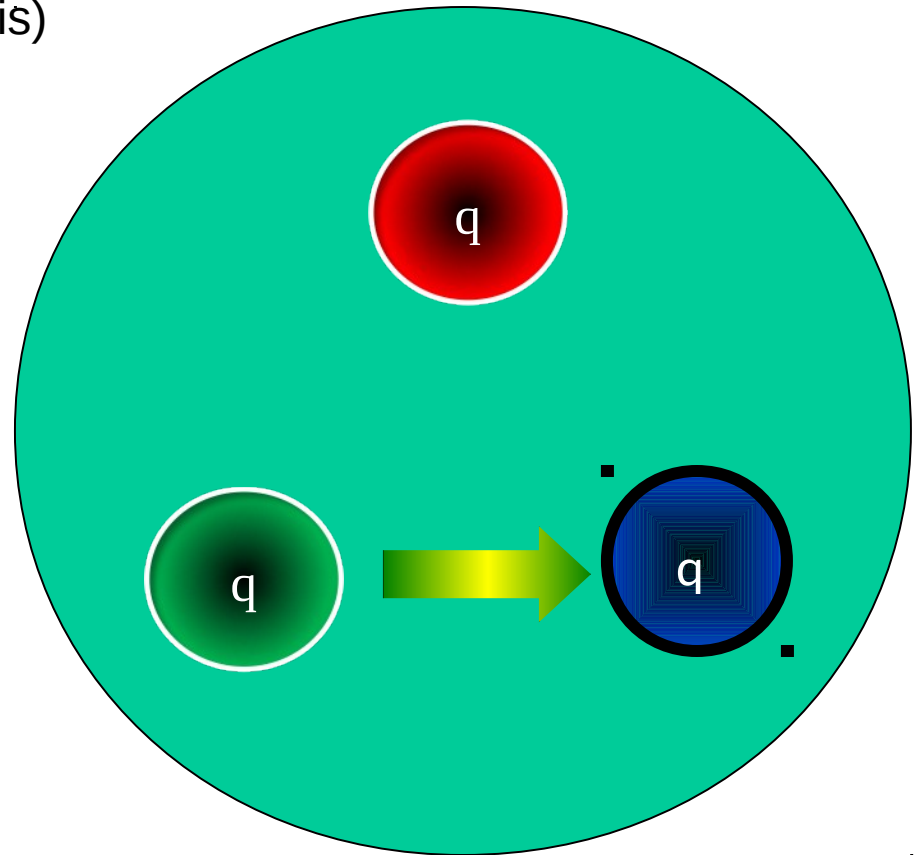
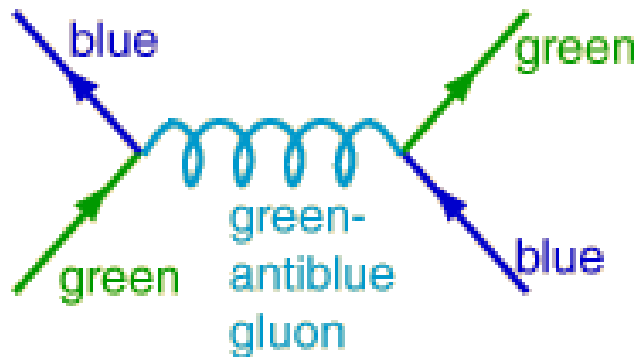
Kölcsönhatások

1. Gravitáció
2. Elektromágneses kölcsönhatás
3. Gyenge kölcsönhatás
 - kvarkok ízét változtatja
 - béta-bomlásnál részletesebben vizsgáljuk
4. Erős kölcsönhatás
 - kvarkok között hat, gluonok közvetítik
 - gluonok között hat
 - kvarkbezárás
- 4+ Mageró (nukleáris kölcsönhatás)
 - nukleonok között hat, színsemleges objektumok közvetítik
 - másodrendű erős kölcsönhatás
 - Mint a Van-der-Waals kölcsönhatás az elektromos térnél

A kvarkok kölcsönhatása

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

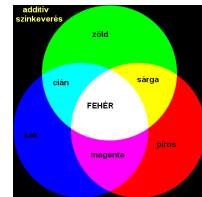
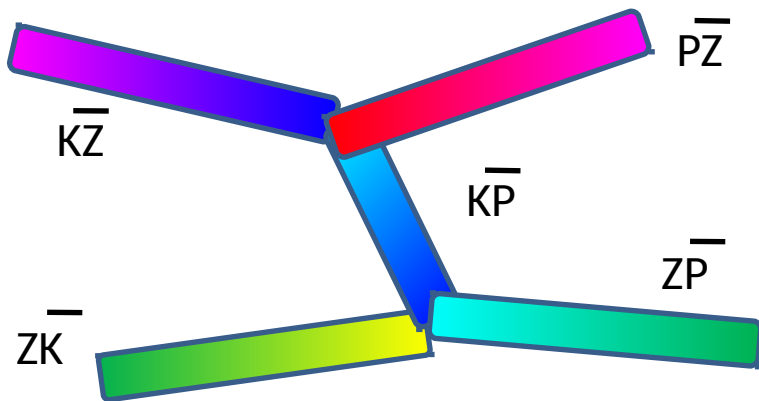
- színek között hat (így a kvarkok között is)
- gluonok közvetítik
- a gluonok nem fehérek!
- átalakítják a kvarkok színét, és egymással is kölcsönhatnak



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

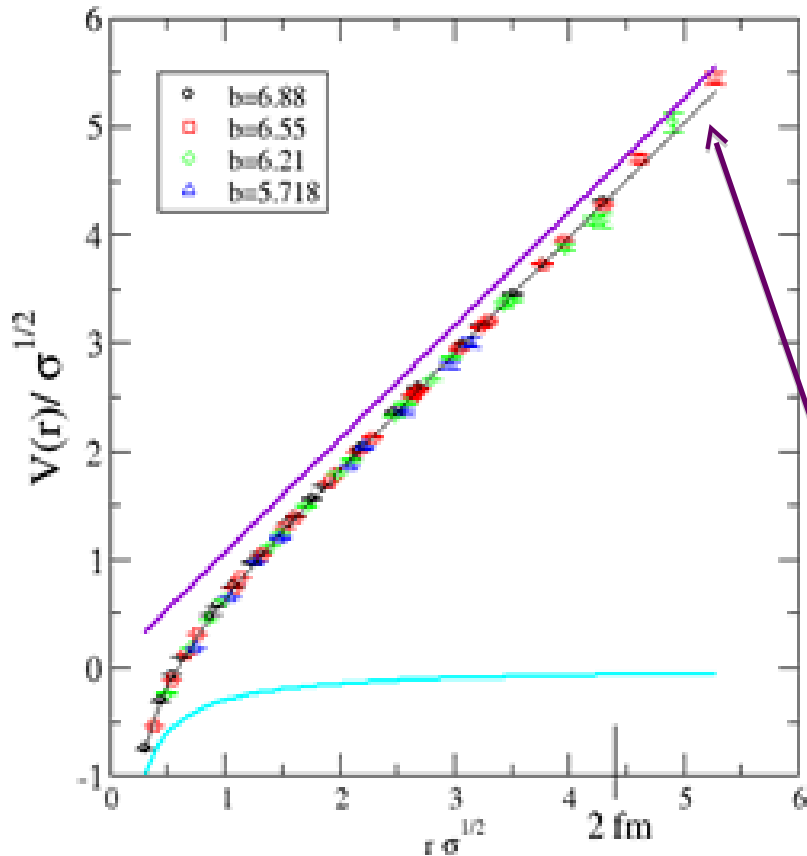
$$P\bar{K} \text{ vagy } Z\bar{P}$$

gluon kibocsátás / elnyelés
színmegmaradás

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

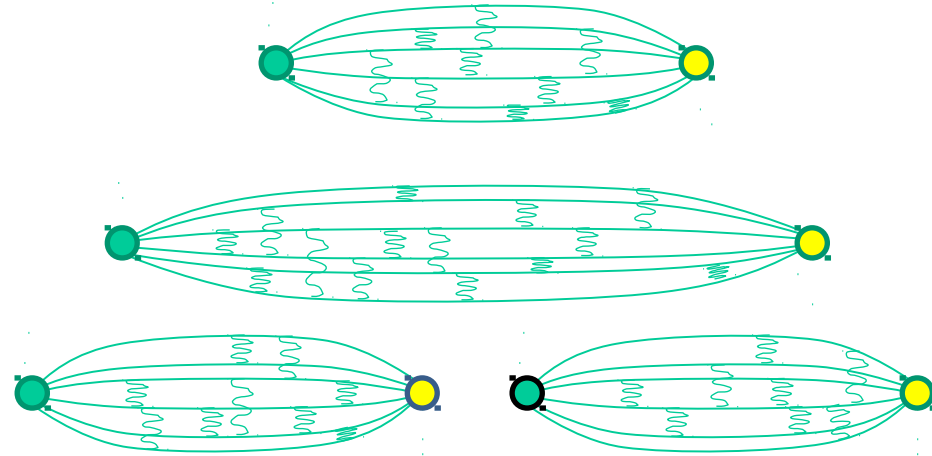
$K\bar{K}$, $P\bar{P}$, $Z\bar{Z}$ gluonokból csak két
lineáris kombináció van
(szuperpozíciók) \rightarrow 8 gluon

A kvark-antikvark potenciál

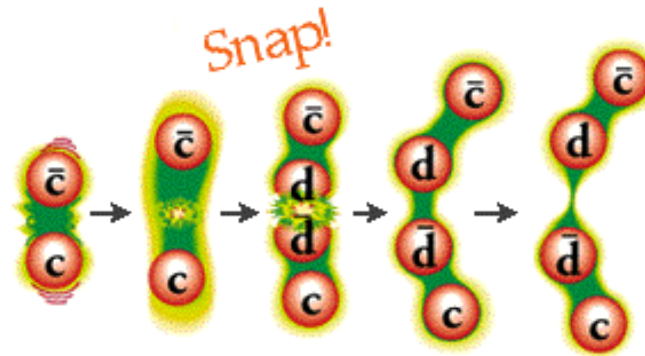


szabad kvarkot nem lehet létrehozni

Szín-tér-cső

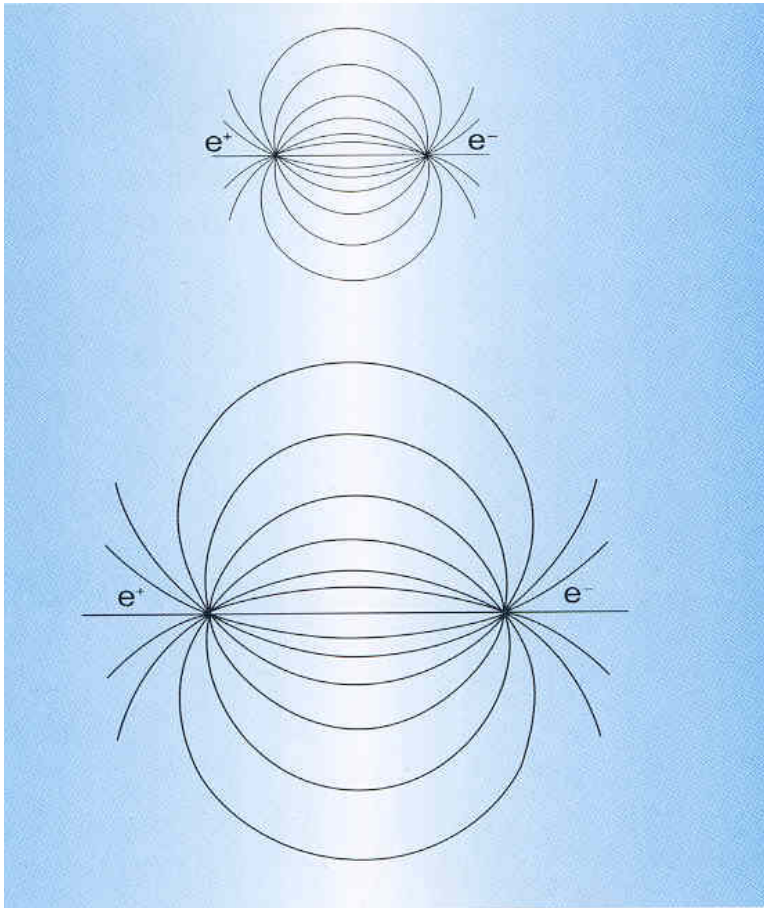


Kvarkbezárás

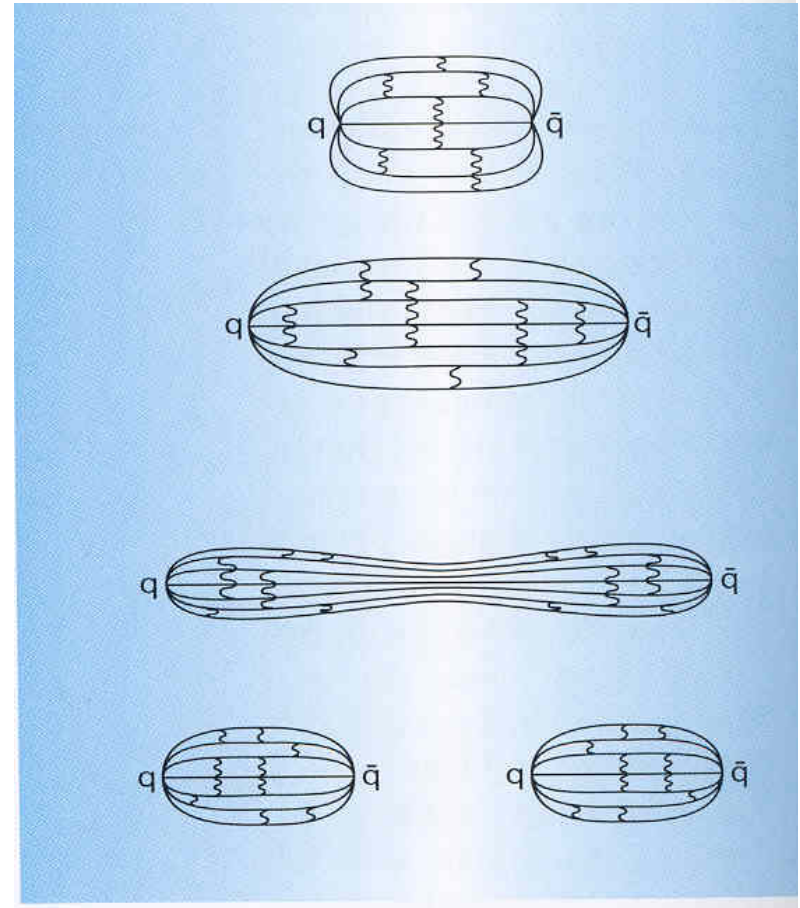


EM analógia

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.



2004-es Nobel-díj



David J. Gross

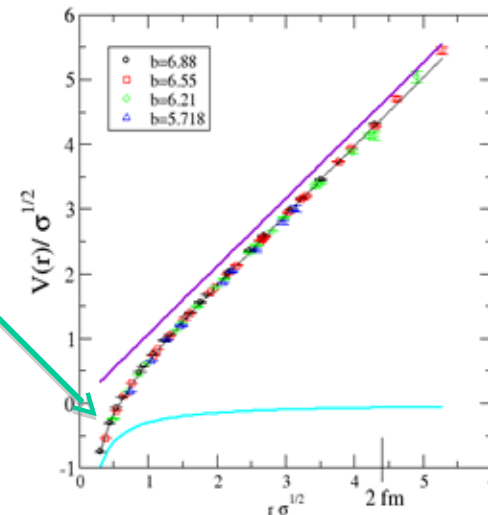
H. David Politzer

Frank

Wilczek

Aszimptotikus szabadság:

Nagy energiás
ütközésekben a kvarkok
szabadnak látszanak

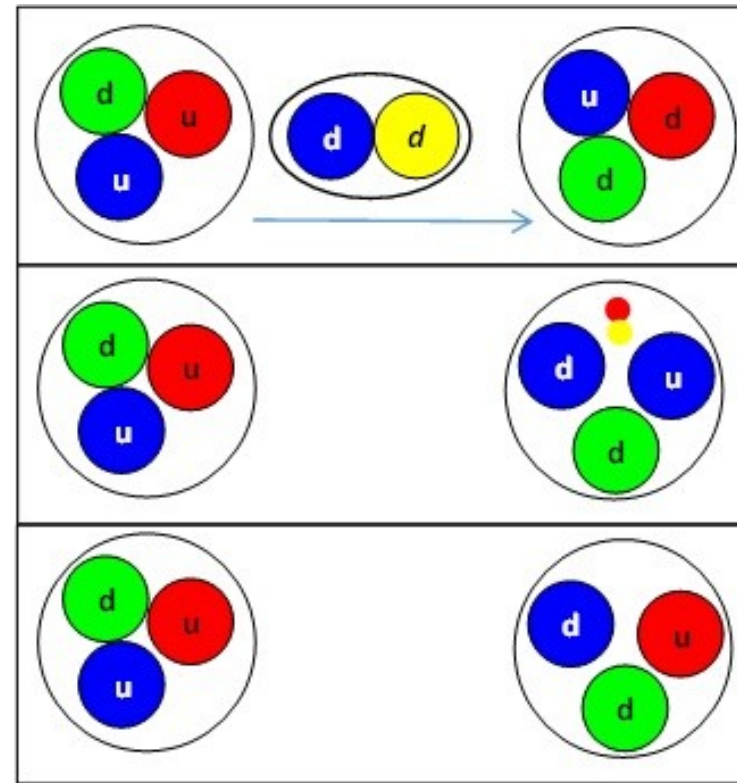
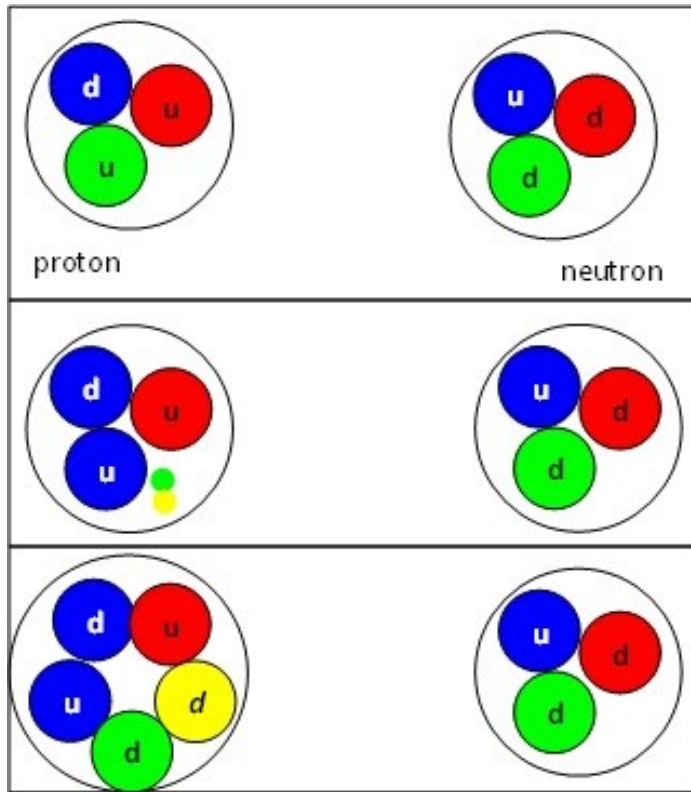


Hogyan képzeljük el a kölcsönhatásokat?

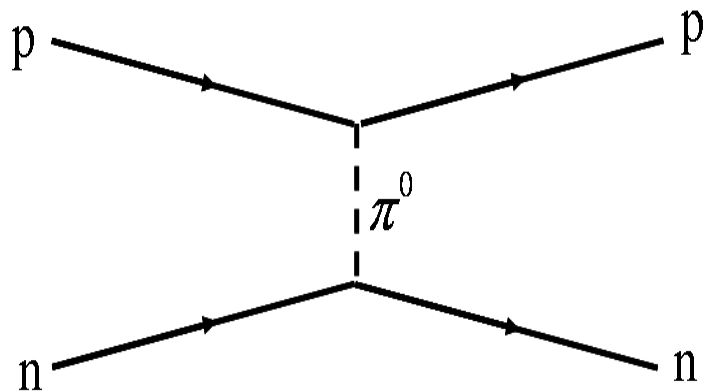
- A kölcsönhatást közvetítő virtuális (nagyon rövid élettartamú) részecskék adják át egyik részecskétől a másikig az impulzust, a töltést, ...



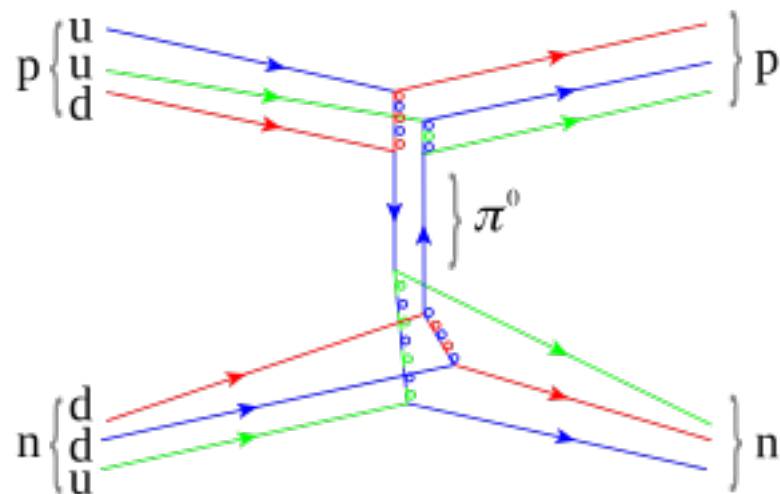
Hogyan tartja össze a pion a nukleonokat az atommagban?*



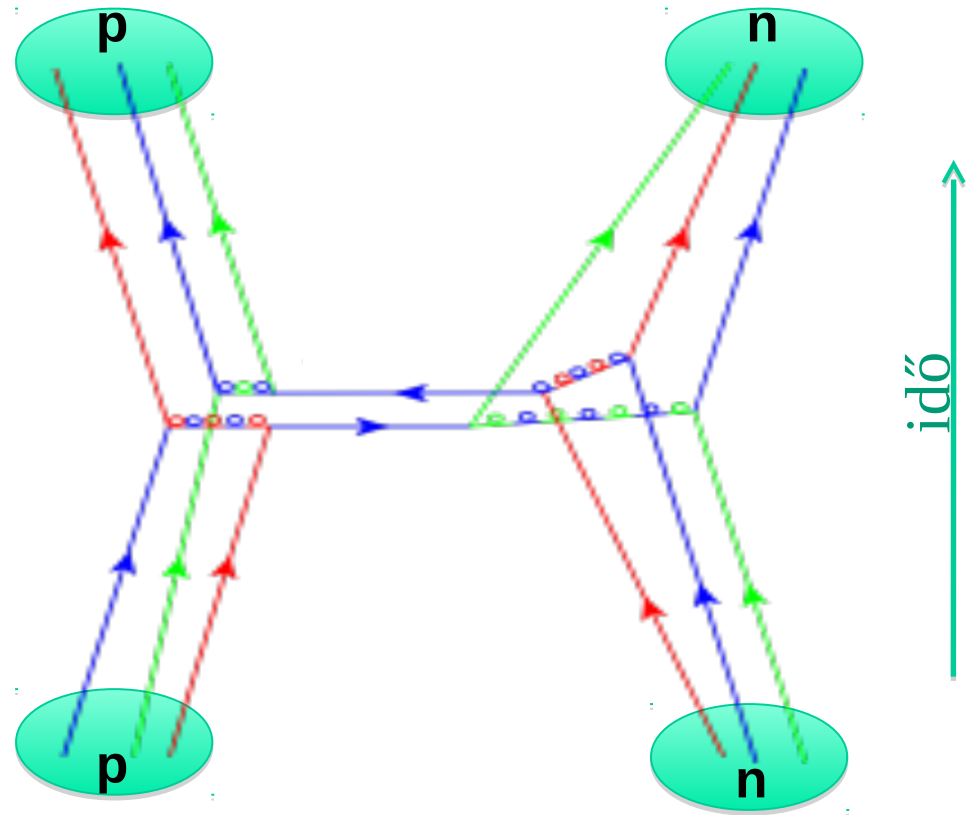
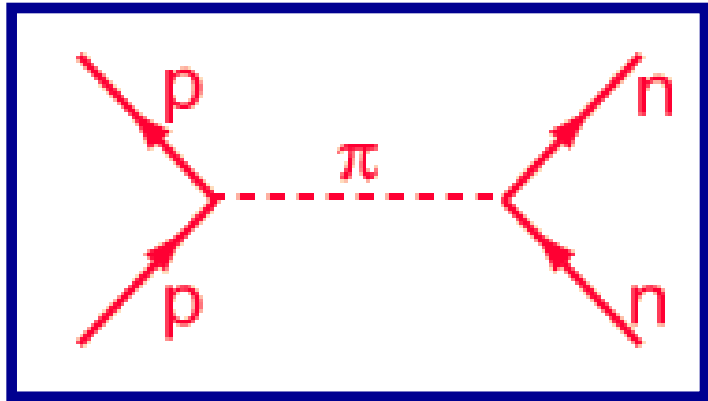
Hogyan tartja össze a pion a nukleonokat az atommagban?



A kvark-modell ismeretében:



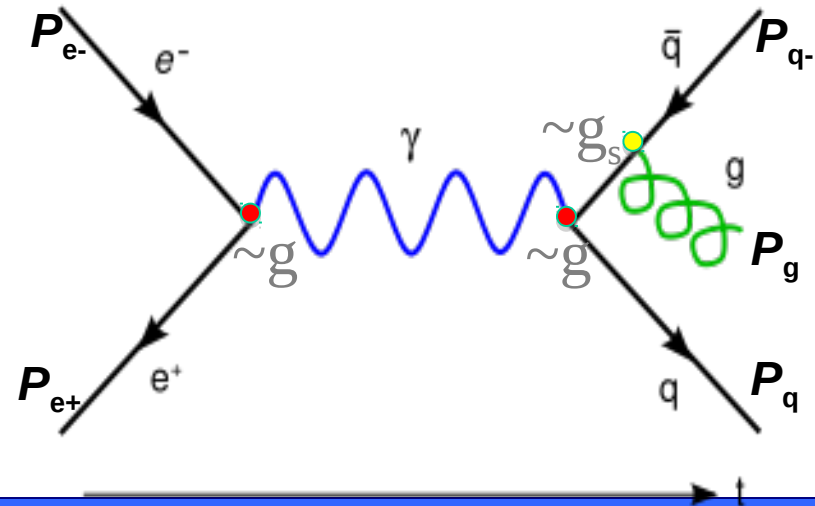
Hogyan tartja össze a pion a nukleonokat az atommagban?



Feynman diagrammok

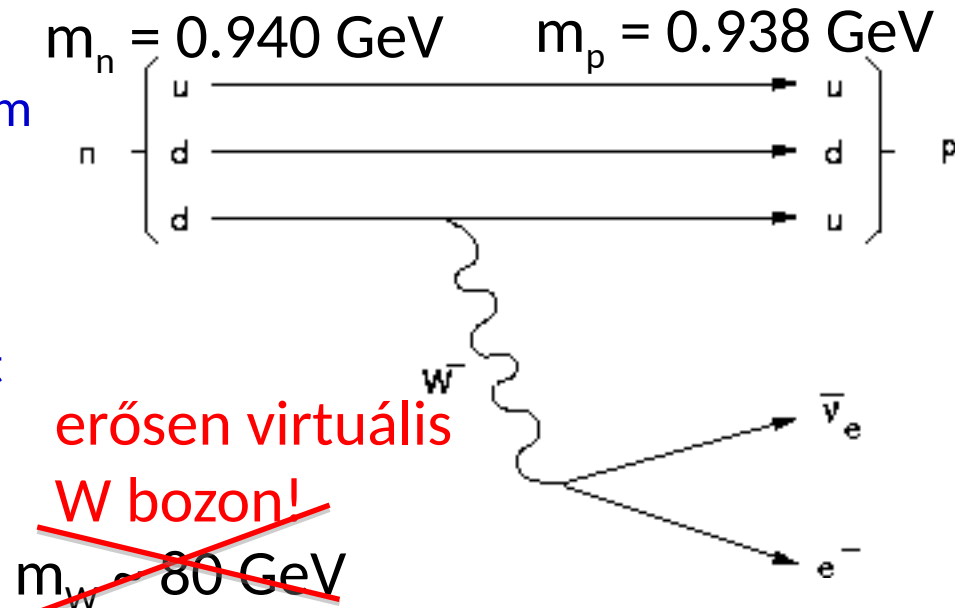
Képi megjelenítése a fizikai folyamatot leíró matematikai kifejezéseknek

- Minden részecskét más vonaltípus jelöl
- Szabad véggel rendelkező vonalak **valódi, megfigyelhető részecskéket**, egyik **vertexből** (részecskevonalak találkozási pontjából) a másikba futók **virtuális részecskéket** jelölnek
- Fermionoknál a részecskét és anti-részecskét a nyíl iránya különbözteti meg
- Minden vertexhez tartozik egy csatolási állandó
- Minden vertexben **energia/impulzus-, töltésmegmaradás** áll fenn (imp.momentum is)
- A Standard Modellt meghatározó **Lagrange függvény** írja le, milyen vertexek léteznek, milyen kölcsönhatások játszódhatnak le, milyen részecskéink vannak
- A részecske kvantumszámjai (pl. töltései) határozzák meg, mely kölcsönhatásban vesz részt



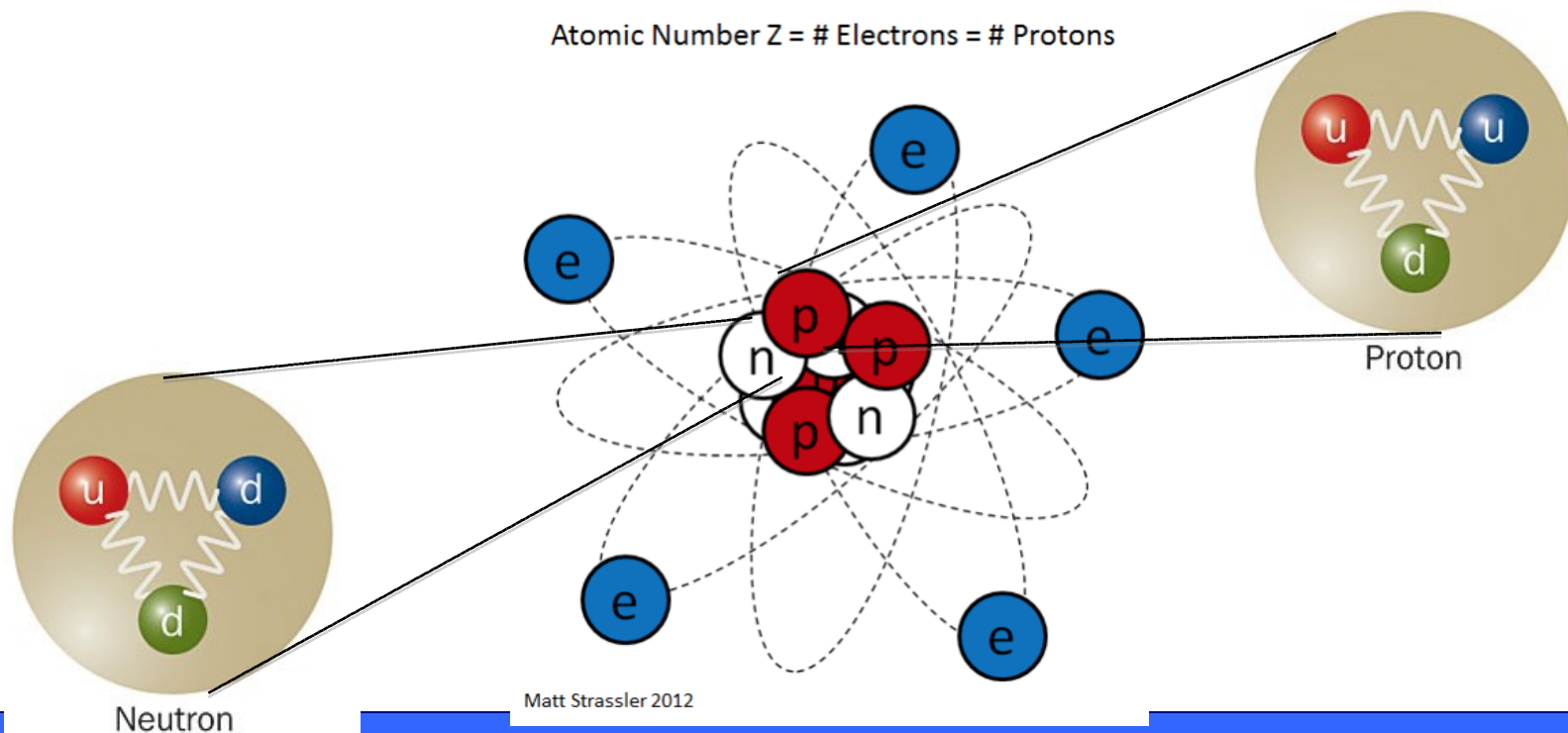
Virtuális részecskék

- Csupán nagyon rövid ideig léteznek
- Nem követik a $E^2=p^2c^2+m_0^2c^4$ összefüggést
- ... de a megmaradási törvényeket betartják!
- Energiájuk bizonytalan a Heisenberg-féle határozatlansági törvény szerint:
 $\Delta E \cdot \Delta t > h/4\pi$
- $m=0$ részecskék (pl. foton) virtuális formájának van tömege (a vákumtól kölcsönvett energiából)
- Közeli kapcsolatban állnak a kvantum fluktuáció fogalmával: tekinthetjük születésüket a kvantummechanikai mennyiségek várható érték körüli fluktuációjának következményeként



Hol vannak ezek az új nehezebb részecskék? Mit csinál a müon?

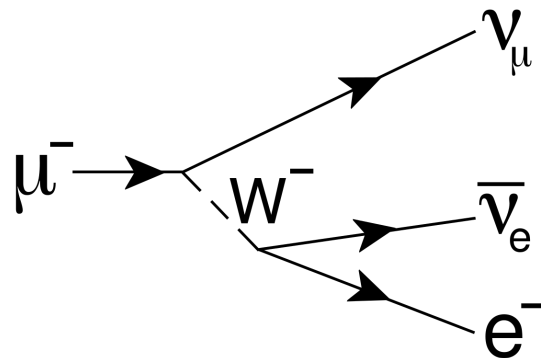
- Körülöttünk lévő anyag felépítéséhez nem igazán kelleneek: az 1. család (u,d kvarkok, e, ν_e) elég lenne
- Másodlagos kozmikus sugarakban, laboratóriumokban, ... van jelen a többi (spekuláció- neutroncsillagokban?)



Miért nem stabil a müon?

Miért stabil az elektron?

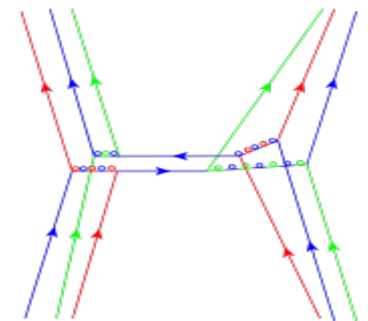
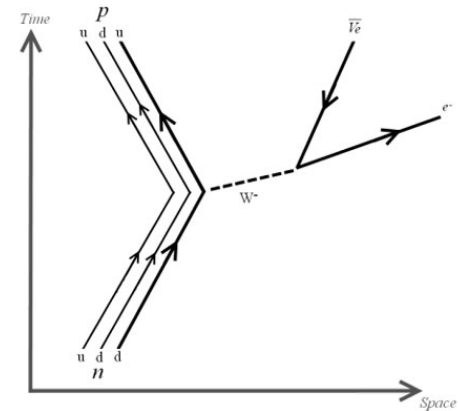
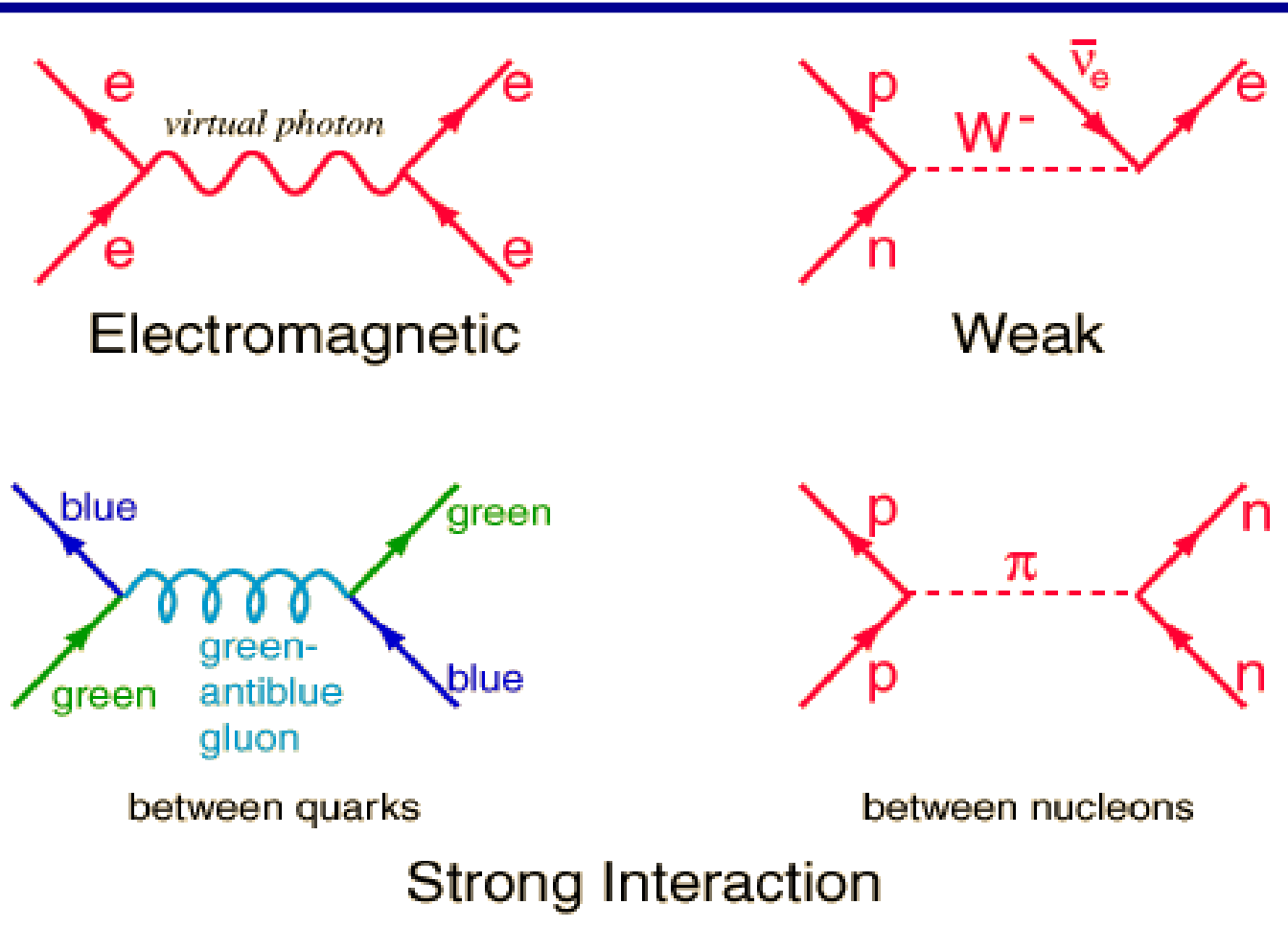
- A megmaradási szabályokat betartva az elektron nem tud elbomlani, a legkönnyebb töltött részecske
- Müon részt vesz a gyenge nukleáris kölcsönhatásban és van “fázistér” a bomlásához:
- Virtuális W bozonon keresztül bomlik...
 m_W nagy ($\sim 80 m_p$) \rightarrow müon élettartama hosszú



Kölcsönhatás közvetítő bozonok

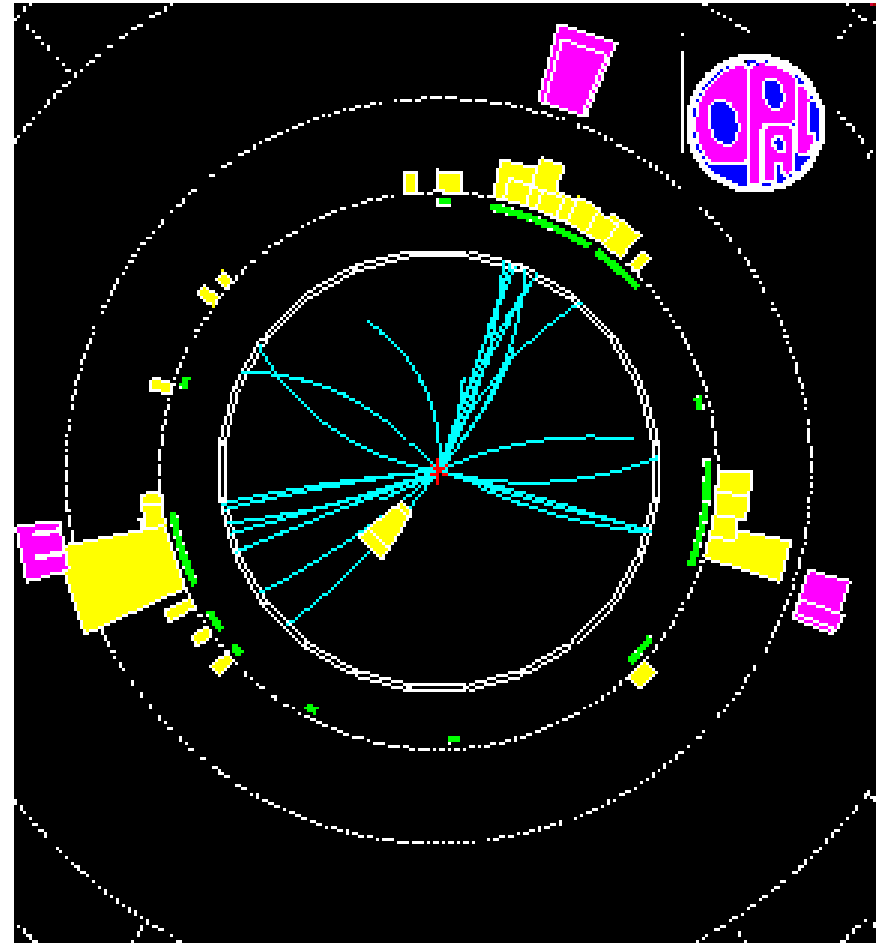
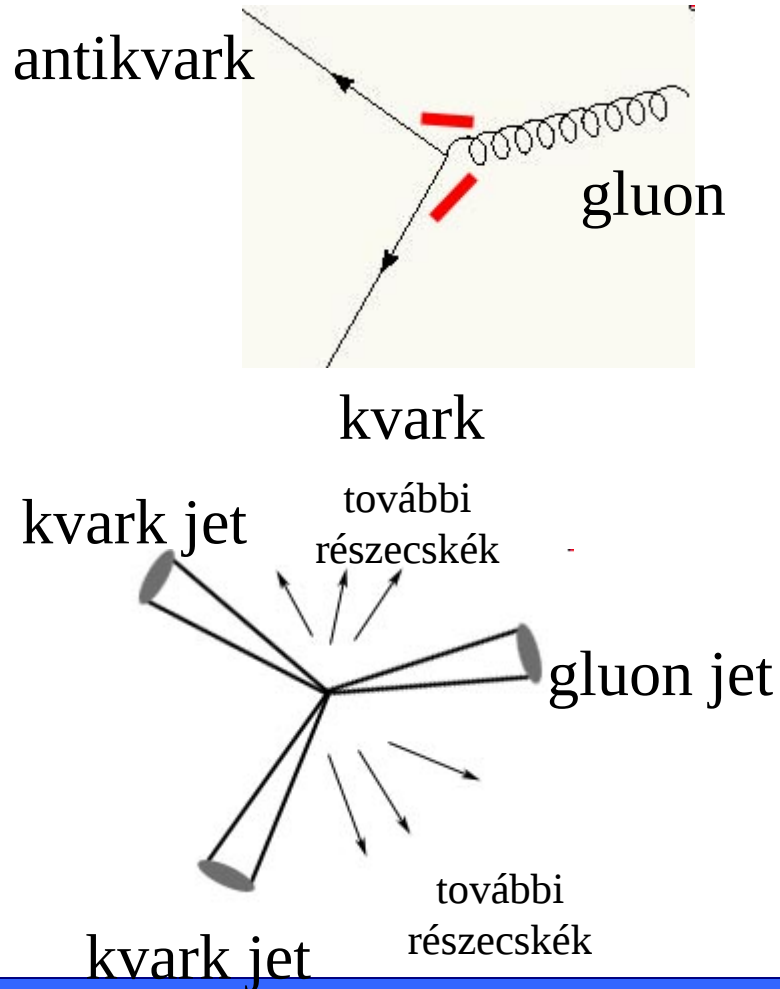
(Fermion: feles-spin, bozon: egész-spin)

γ, W^\pm, Z , gluonok: spin-1

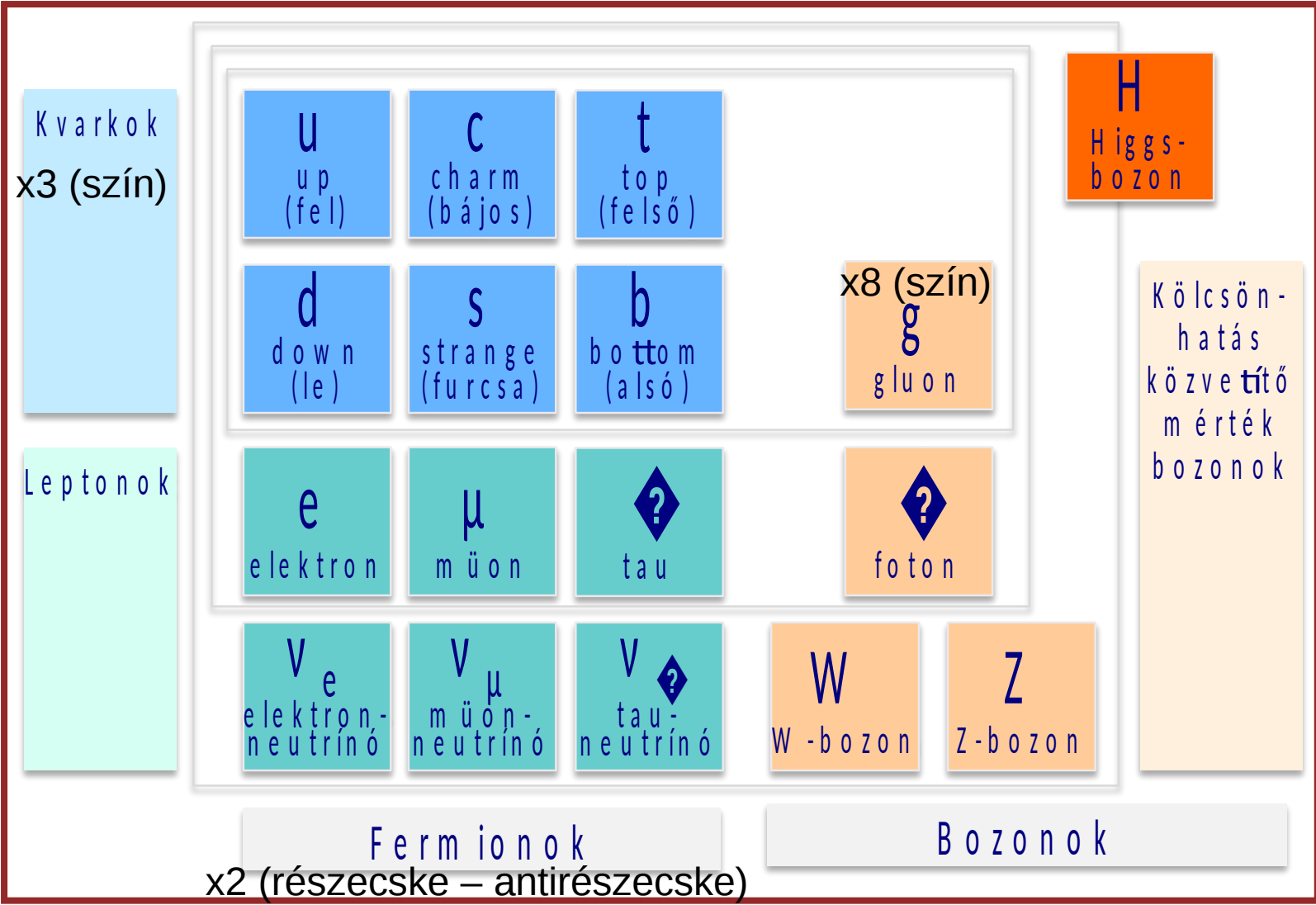


Gluonok: 1979

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

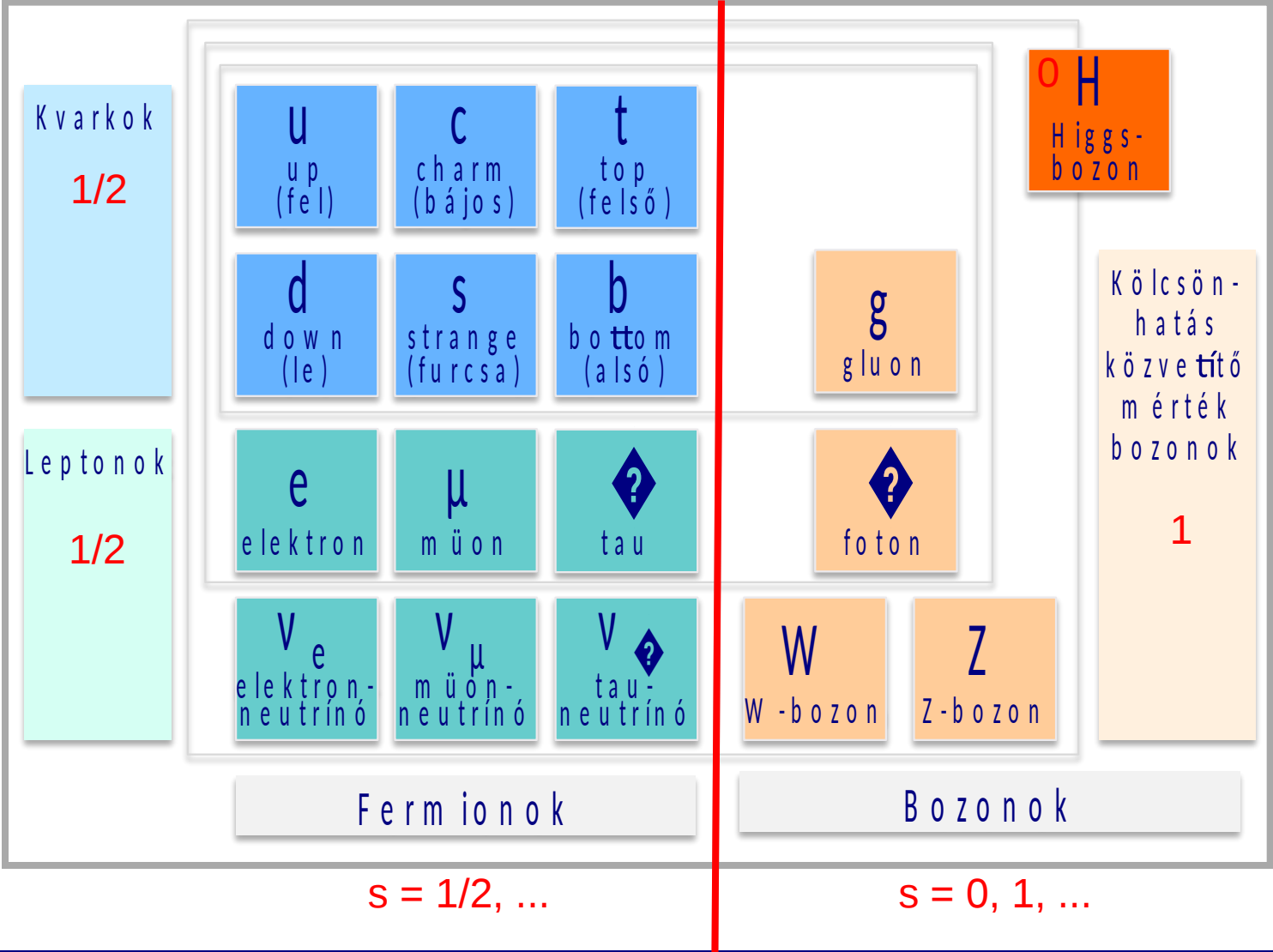


Elemi részecskék

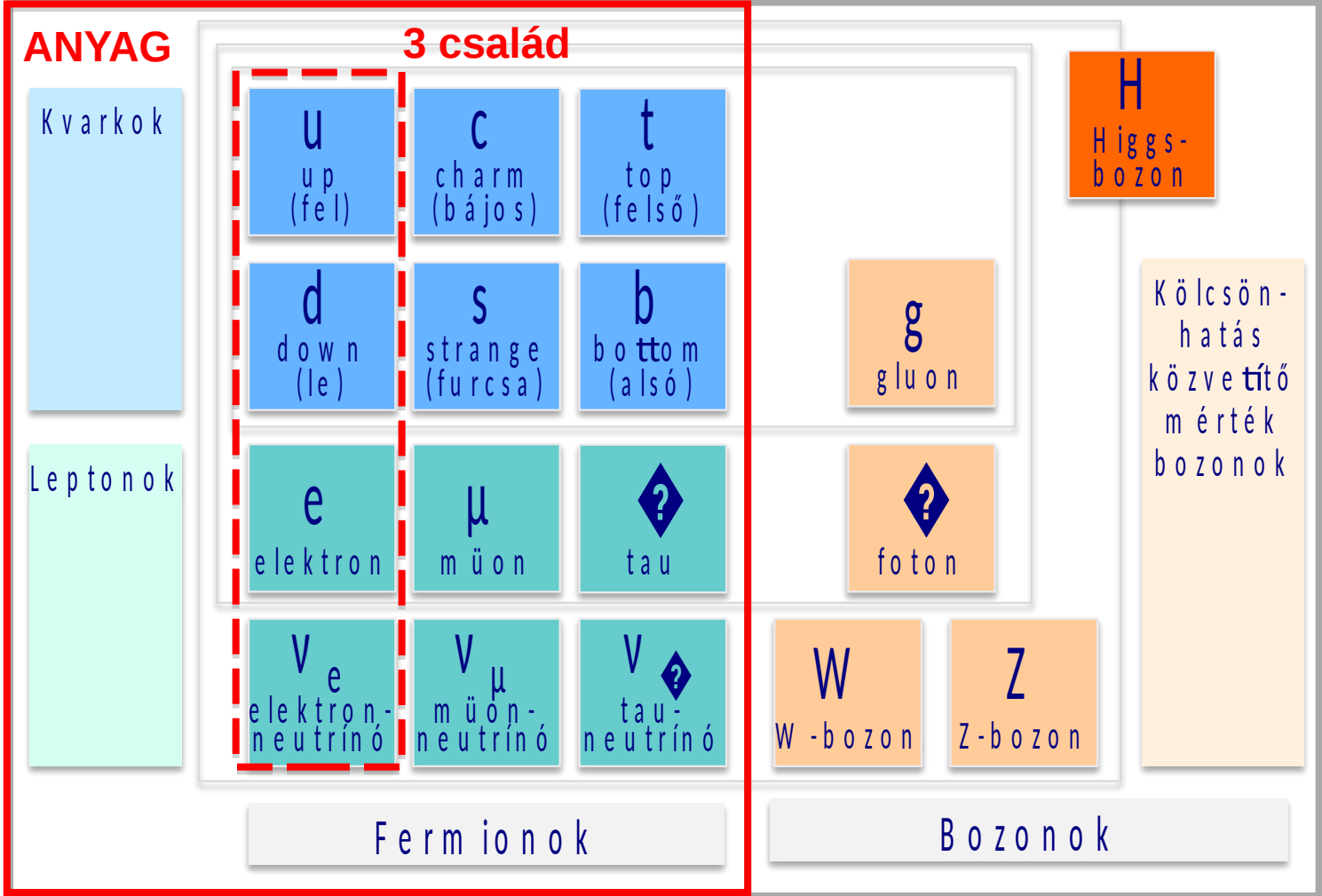


Elemi részecskék

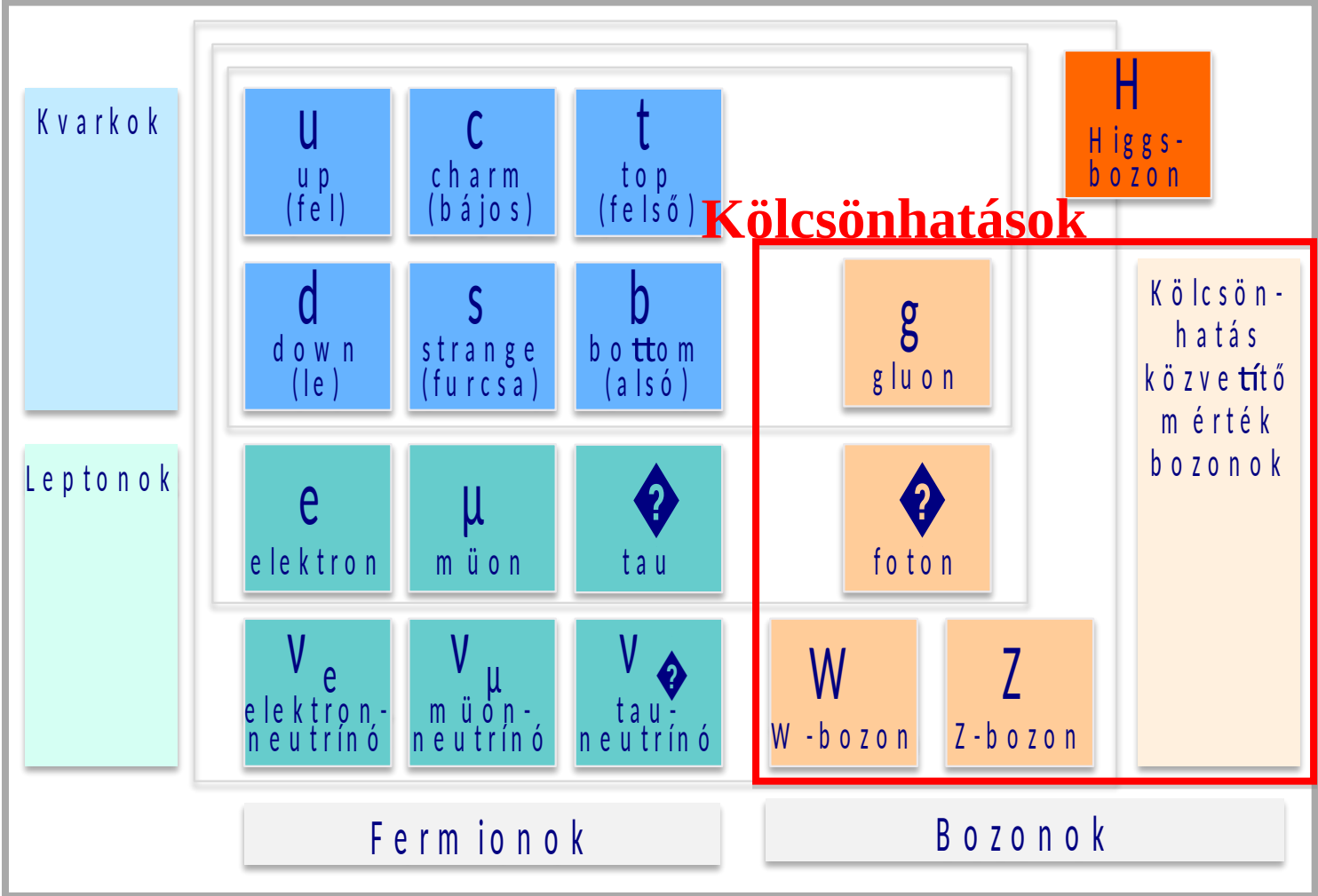
SPIN



Elemi részecskék

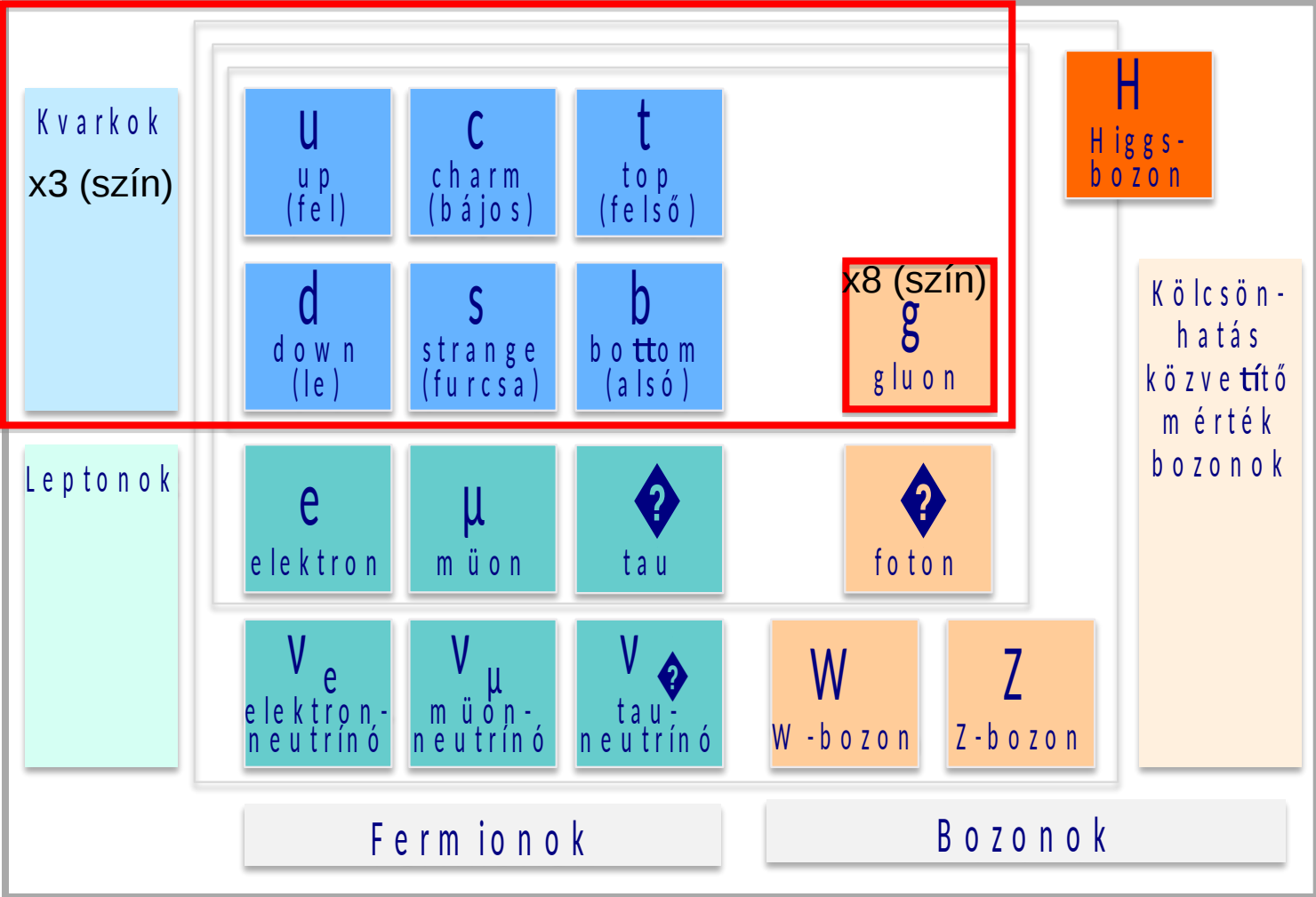


Elemi részecskék



Elemi részecskék

Erős kölcsönhatás
 csak a kvarkokra hat, bezárja őket a hadronokba (színtöltés)



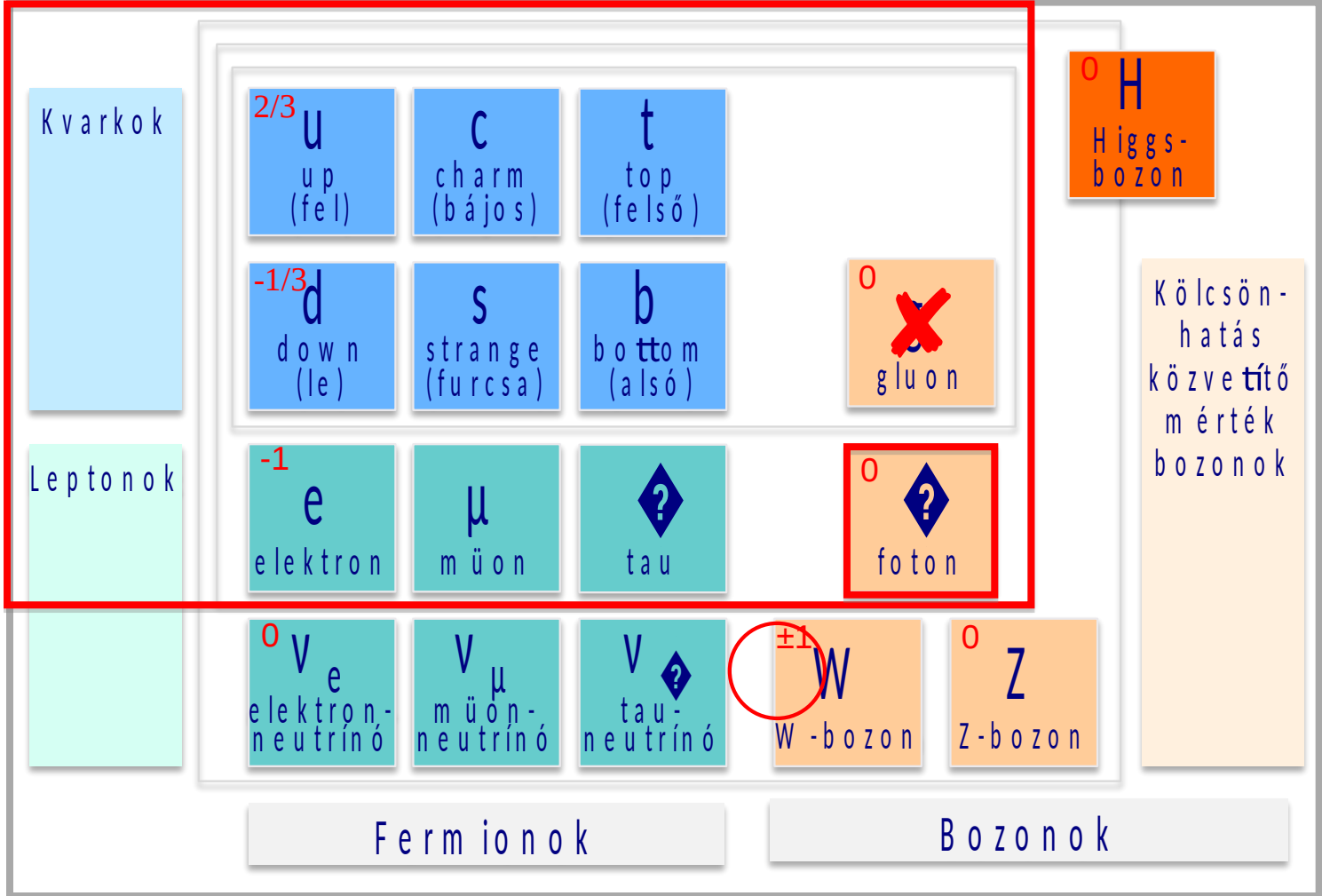
Elemi részecskék

Elektromágneses kölcsönhatás

az elektromosan töltött részecskékre hat

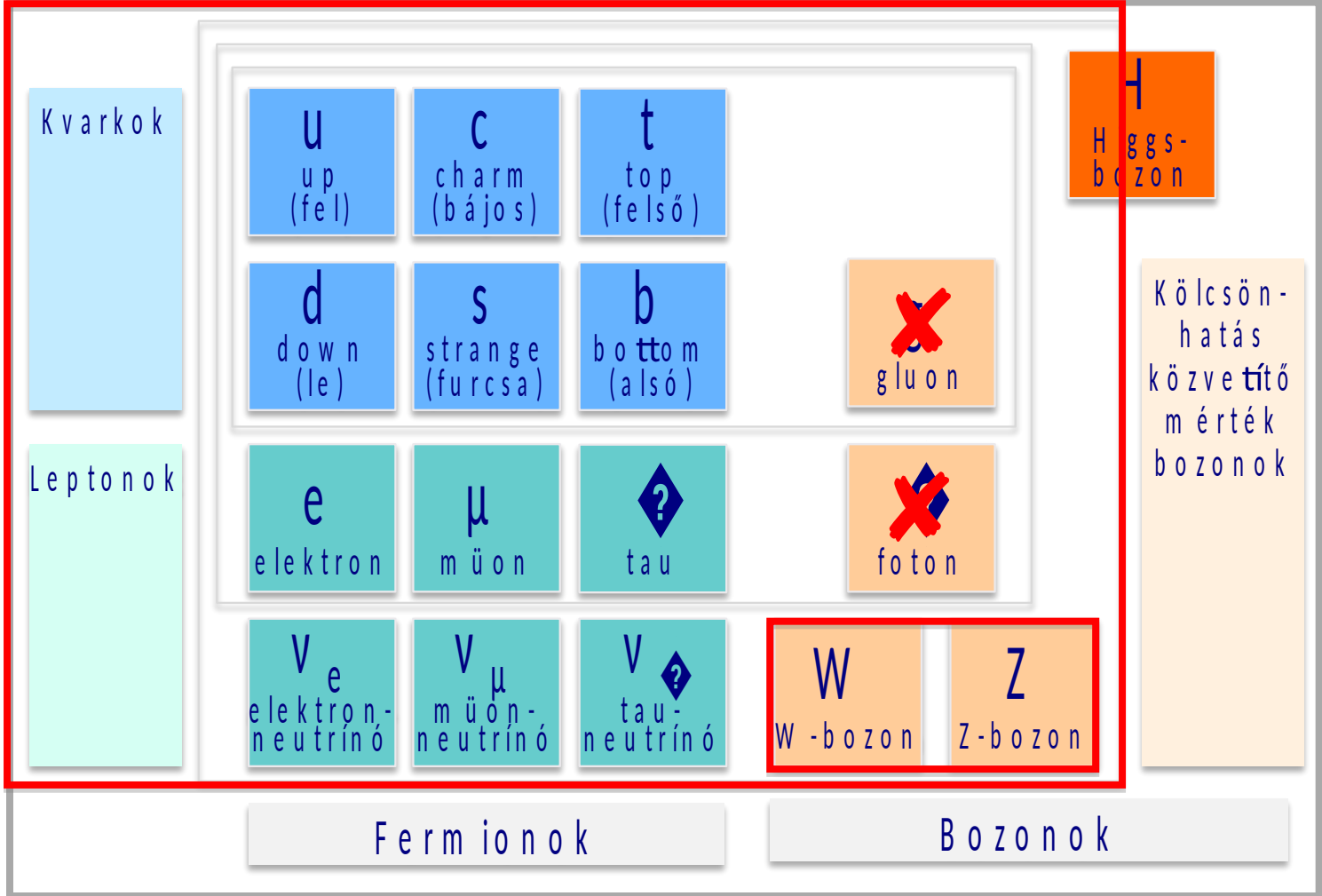
Érdekes: Egy családon belül a töltésösszeg 0

Töltéskvantálás



Elemi részecskék

Gyenge kölcsönhatás



A neutrínók csupán ezt érzik, így nagyon nehéz őket detektálni.

Elemi részecskék

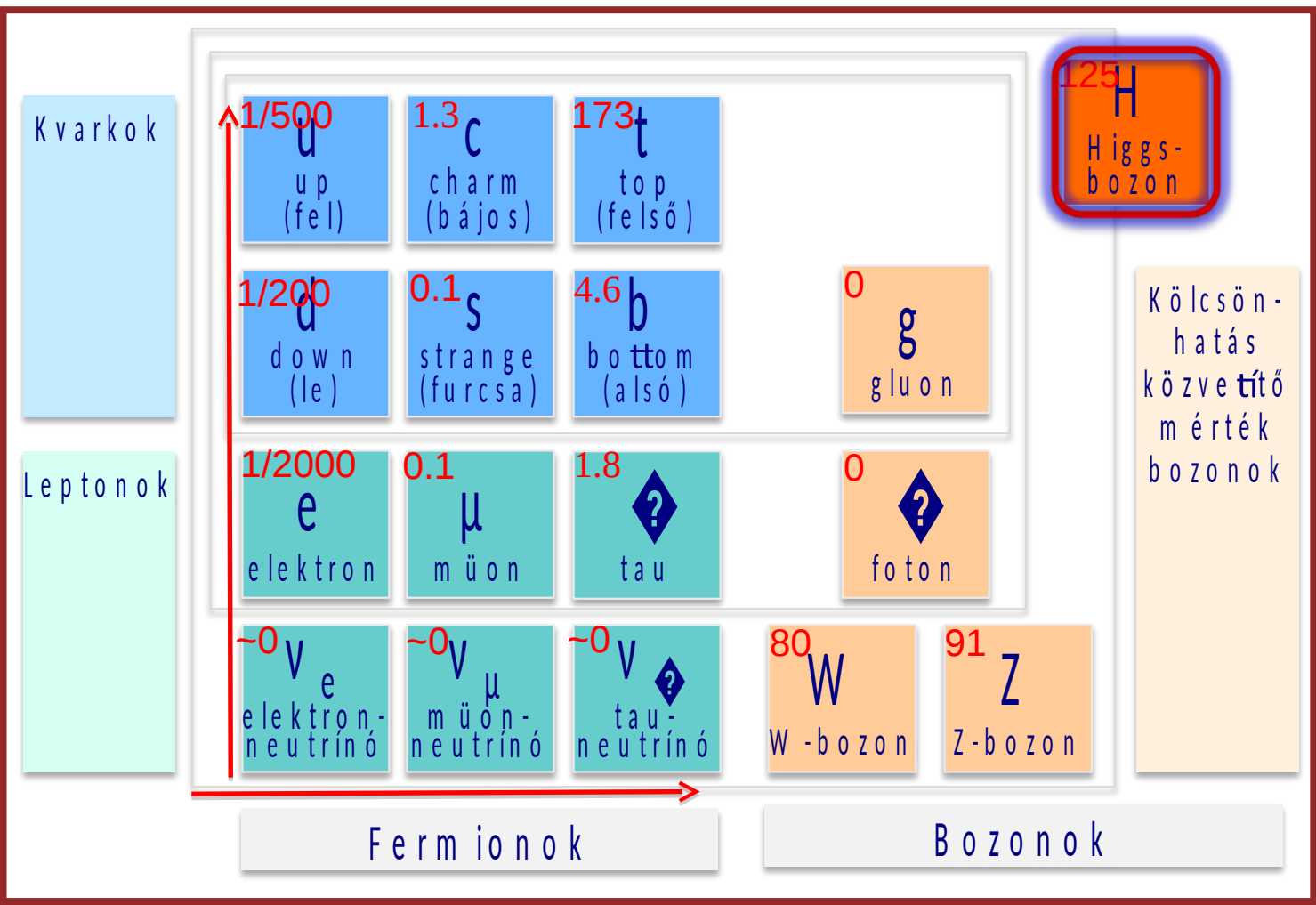
Tömeg (GeV/c²)

Óriási tömeg tartomány

legkönnyebb $\approx 10^{11}$
legnehezebb



Neutrínó tömeg:
 $m < 2 \text{ eV}$



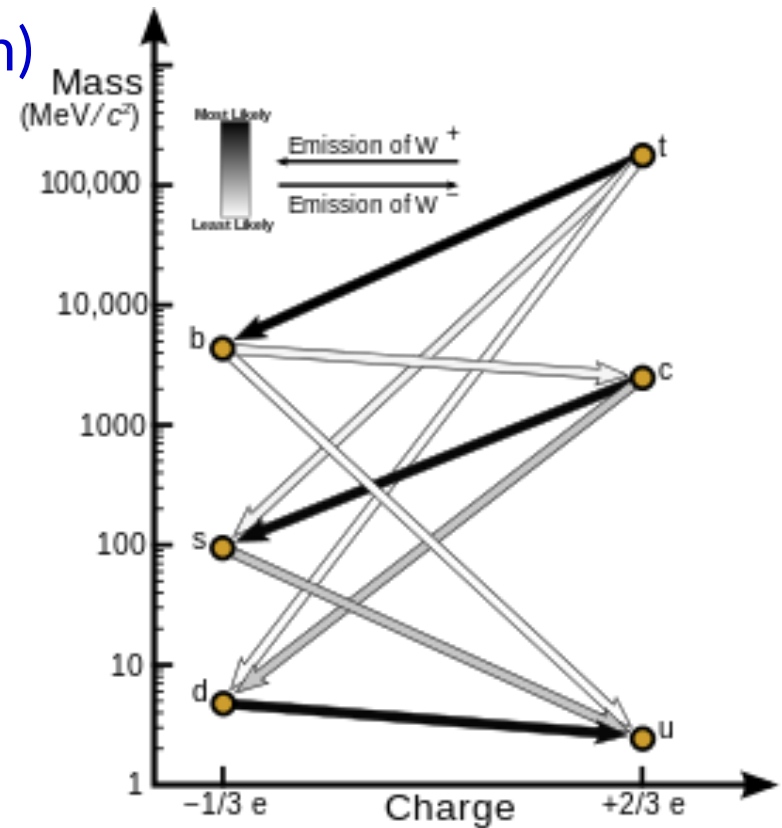
125
 H
 Higgs-bozon

Kvarkok, leptonok: összefoglalás

- Az 50-es / 60-as évek új részecske felfedezései elvezettek a kvark-modell megszületéséhez (Murray Gell-Mann, George Zweig, 1964)
- A felfedezett rezonanciák három kvark kombinációjából álltak elő: u, d, s
→ 3 kvark íz (angolul: flavour): $SU(3)_{\text{íz}}$
- Ma már tudjuk, hogy nem csupán 3 kvark íz van, hanem 6: u, d, s, c, b, t
- Kvarkok: azon spin-1/2 elemi részecskék, amelyek részt vesznek az erős kölcsönhatásban
- Leptonok: azon spin-1/2 elemi részecskék, amelyek nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban: e, μ , ... ν_e , ν_μ
- Az erős kölcsönhatás töltése: szín (angolul: color) → 3 kvark szín: $SU(3)_{\text{szín}}$
 - Színkeverés analógia: piros, kék, zöld; anti-színek: komplementer színek
- Kvarkoknak színe, anti-kvarkoknak anti-színe, a gluonnak (az erős kcsh. közvetítő bozonának) egy színe + egy anti-színe van ($3 \times 3 = 8 + 1$!)
- Csak színtelen állapotok figyelhetőek meg szabadon → kvark-bezárás
- Nagy energián (mélyen rugalmatlan szórásban) a nukleonokon belül a kvarkok szabadnak látszanak → aszimptotikus szabadság

Kölcsönhatási szabályok

- Energia, impulzus, impulzusmomentum megmaradás
- Elektromos töltés, színtöltés megmaradás
- Leptonszám megmaradás (folyamatban)
(leptonok +1, anti-leptonok -1)
- Barionszám megmaradás
(a kvarkok +1/3, anti-kvarkok -1/3)
- Megengedett bomlások a gyenge kcs-hal, a W bozon közvetítésével:
 $\tau \rightarrow \mu \rightarrow e$
 $t \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow s \rightarrow u$
- A megfigyelhető állapotok mindig színtelenek

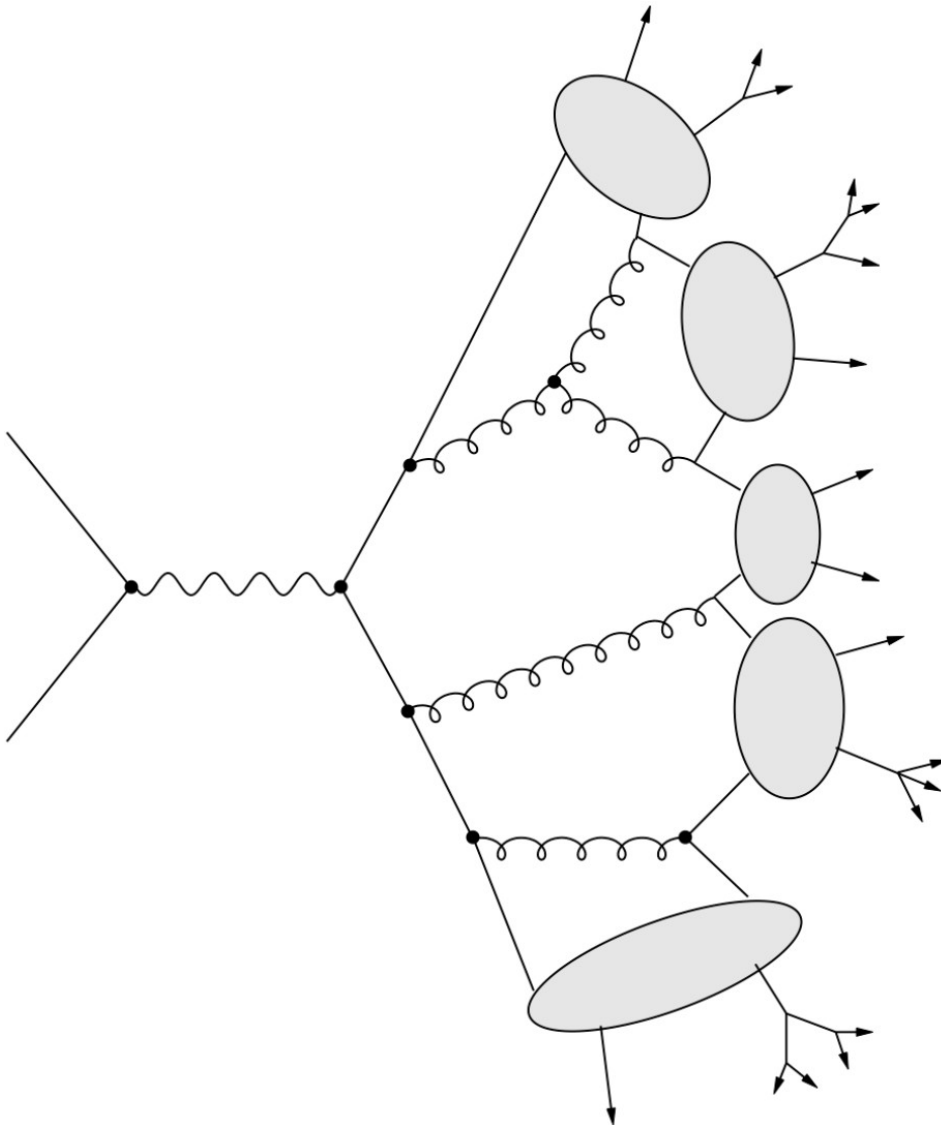


Jet-ek (részecskezár, hadronsugár)*

- A kvarkok és gluonok nem repülhetnek ki egyedül az ütközési pontból
- Helyette felöltöznek, hadronizálódnak, további kvarkokkal és antikvarkokkal
- Sok, majdnem egyirányba távozó hadront (bariont, mezont) látunk
- Sok pion lesz bennük, ez a legkönnyebb hadron
- Összenergiájuk a kezdeti kvark vagy gluon energiájára jellemző



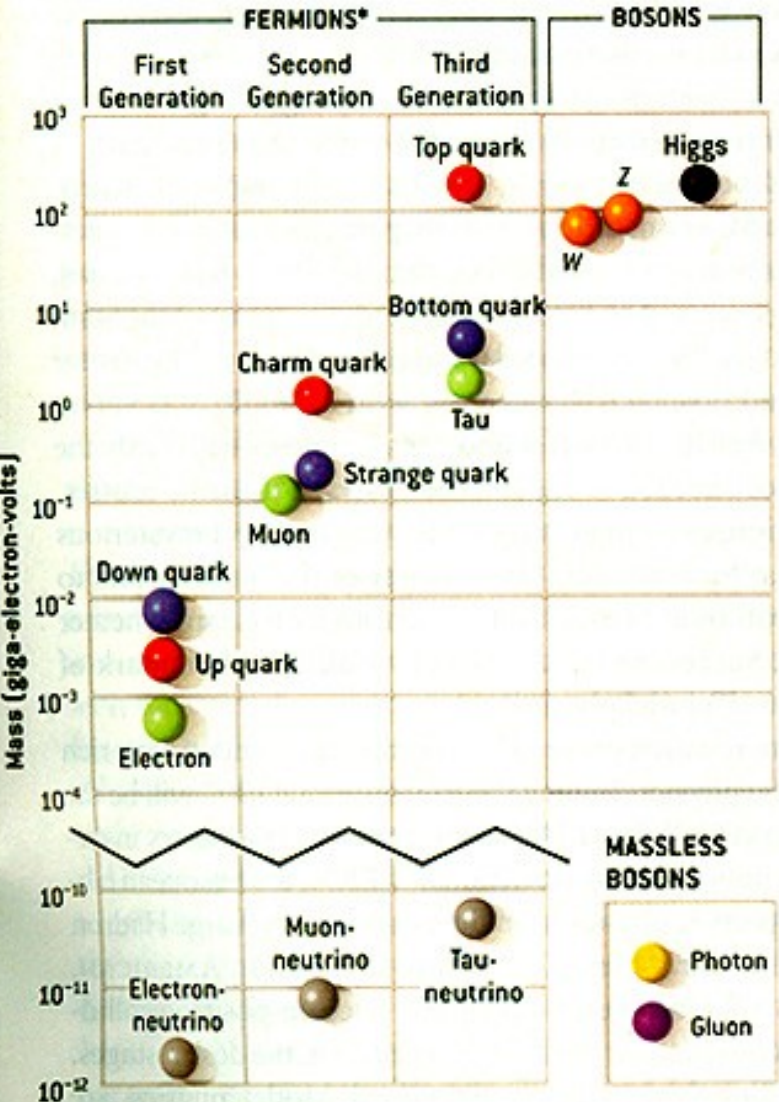
Hadronizáció*



- Parton zápor
- Gluon felhasadás
- Színtelen hadronok megszületése
- Hadronok bomlása

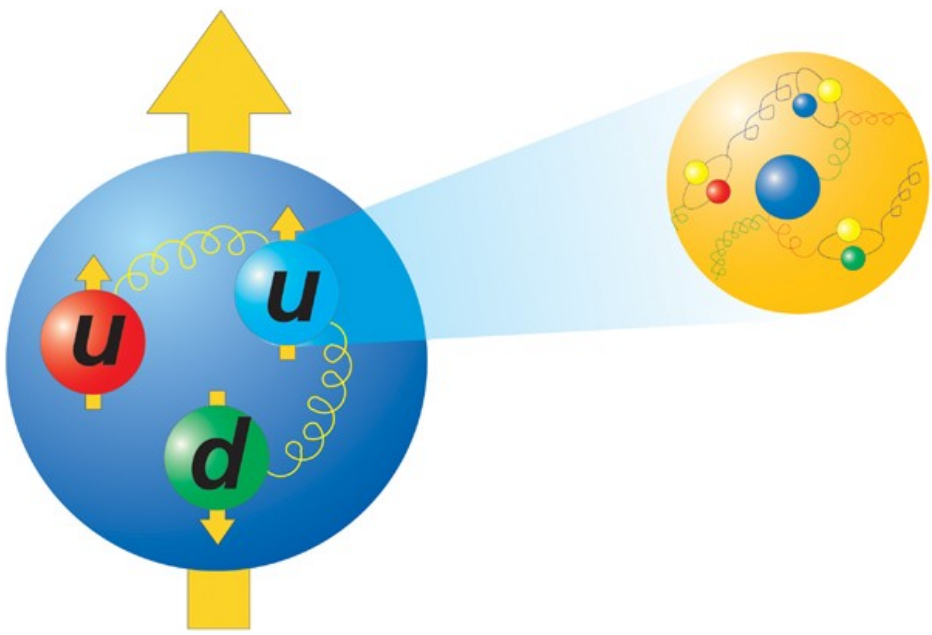
Miből áll egy mikrorészecske? 1.

Az elemi részecskék tömege



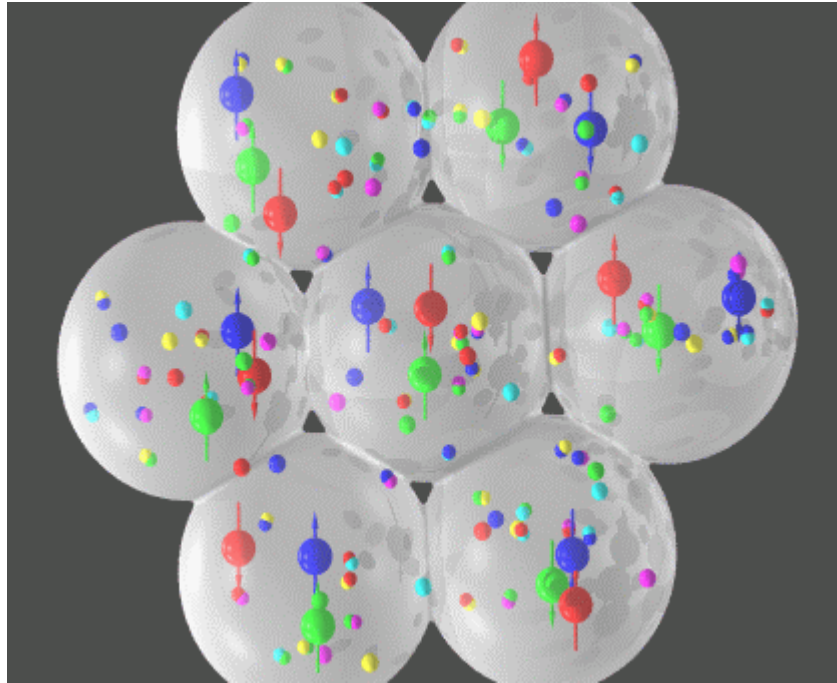
Csupasz kvarktömeg (5-10 MeV)

Hogyan lesz ebből 938 MeV?



Miből áll egy mikrorészecske? 2.

kvarkok és gluonok egy részecskében



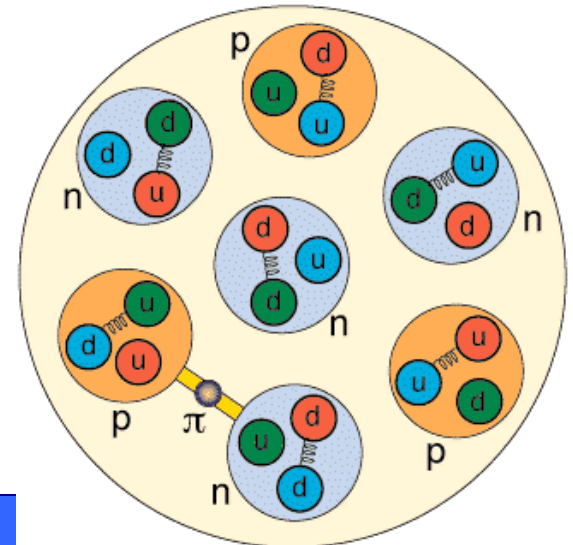
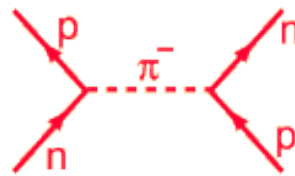
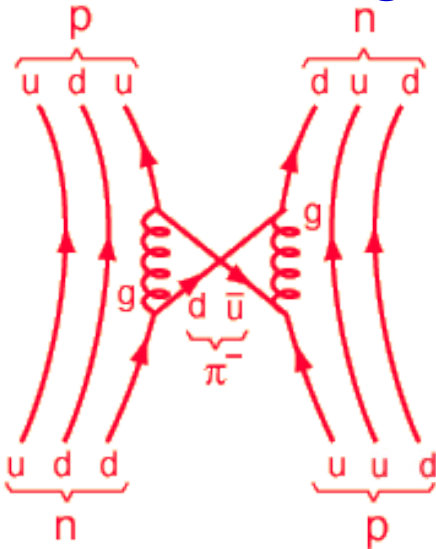
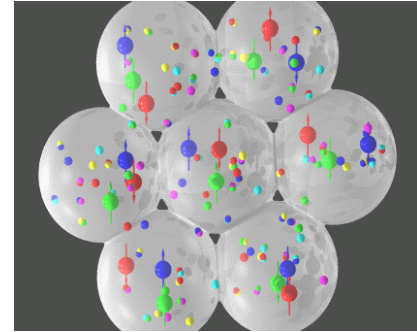
Erősen kölcsönható anyag egy „zsákban”

Erős kcsh – bezáró kcsh

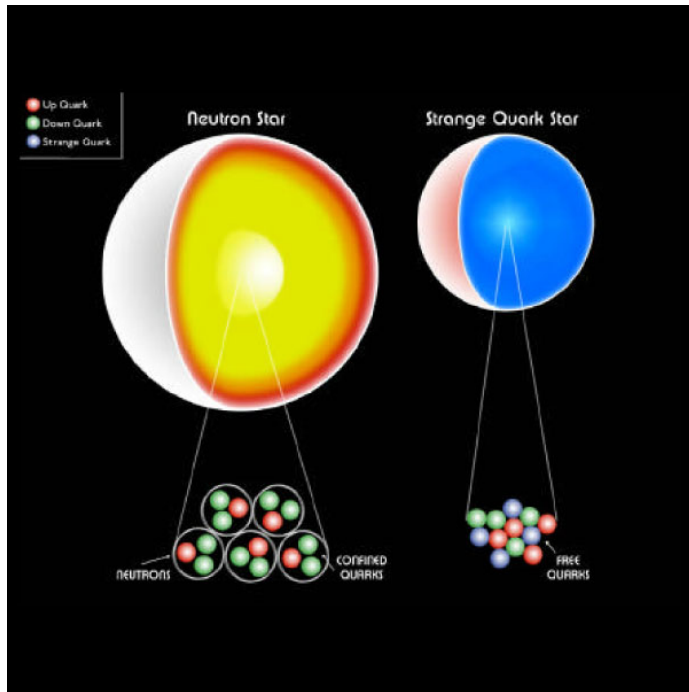
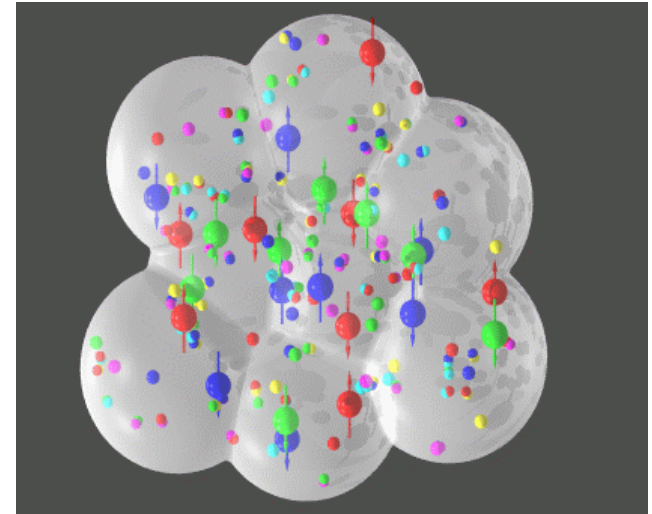
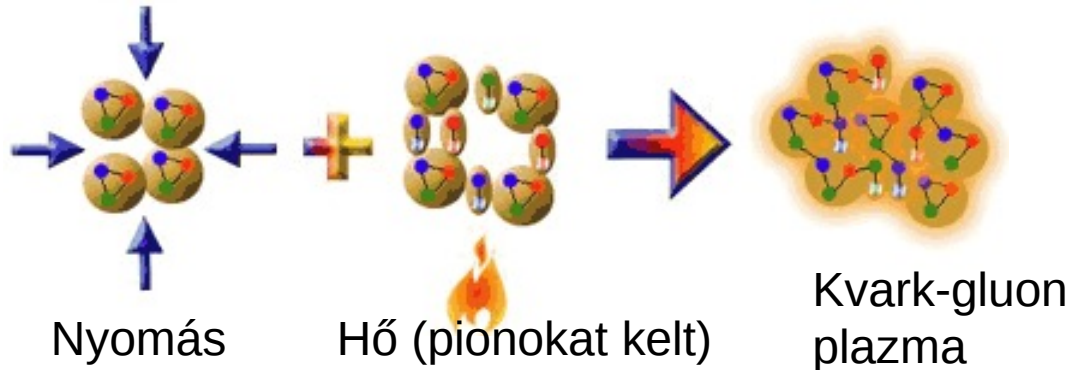
EM kcsh, magerő – nem bezáró kcsh (r nagy: lecseng)

Magerők és az erős kcsh. kapcsolata

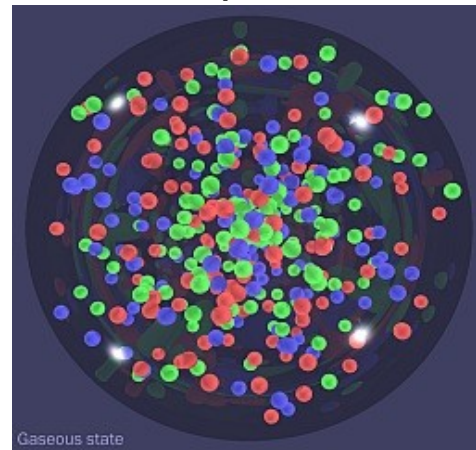
- Különböző nukleonba bezárt kvarkok is cserélhetnek gluonokat, vagy színnel rendelkező részecskét
- Amikor elhagyja a nukleont az objektum, már csak fehér lehet: legkisebb ilyen: π -mezon
- Erős kcsh – gluoncseré; Magerő - mezoncseré



Kvarkanyag*

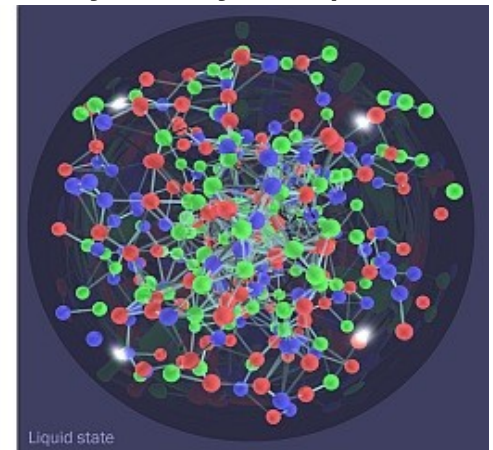


Gáz állapot



Gaseous state

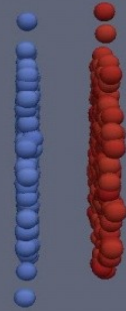
Folyékony állapot



Liquid state

Nehézion ütközések*

Lorentz-összehúzódt magok ütközése

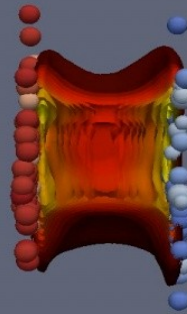


(a)

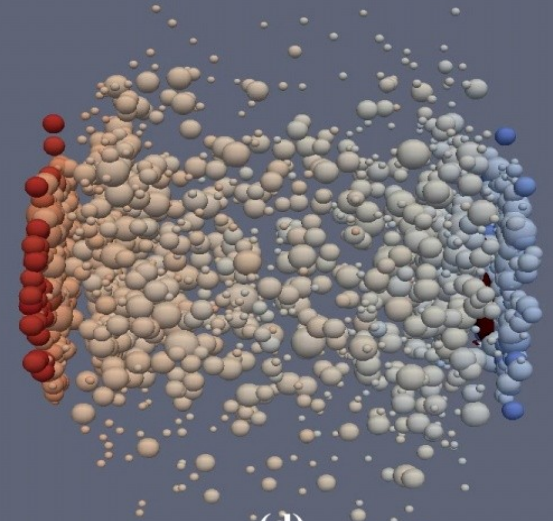


(b)

Protonok és neutronok felolvadnak egy rövid pillanatra, felszabadítva az alkotó elemeik, a kvarkokat és a gluonokat



(c)



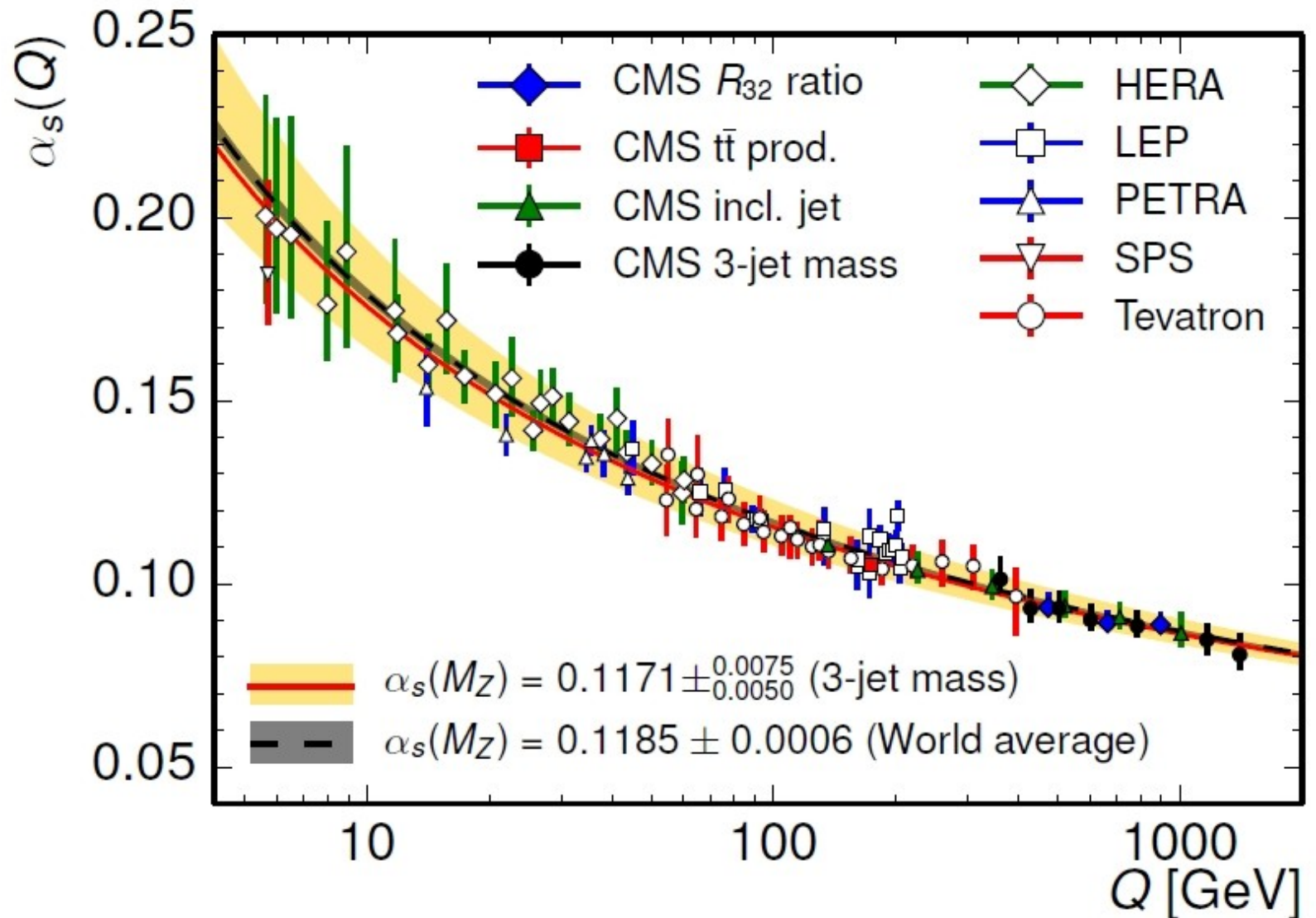
(d)

A QGP részecskék ezreire bomlik

Erős kölcsönhatás

- Nukleonokat tartja össze az atommagban
- Kvarkokat tartja össze a nukleonban
- (Tömegtelen) gluonok közvetítik, a gluon-kvark, gluon-antikvark és gluon-gluon kh-on keresztül
- A Kvantumszíndinamika írja le (nem-Abeli mértékelmélet, lokális szín (color)-SU(3) szimmetria .)
- Szín-bezárás: kvarkok közötti erő nem csökken a távolsággal (10000 N)
- Szabad kvarkok nincsenek, helyette jet-ek (részecskesugarak).
- Színes objektumok: kvarkok, gluonok, antikvarkok
- Részt vesznek benne: kvarkok, gluonok, hadronok (barionok: qqq, mezonok: qq)
- Az atommag tömegének nagy részét a QCD dinamika adja (nem az alkotóelemek tömege)
 - A kvarkok nyugalmi tömege a proton tömegének mindössze 1%-a
 - A fennmaradó tömeget a kvarkok kinetikus energiája és az azokat összekapcsoló gluon mezők energiája adja
- Csatolási állandó (kcs) erőssége csökken az impulzusátadás függvényében. Emiatt: perturbációszámítás (csak) nagy energiájú folyamatokra

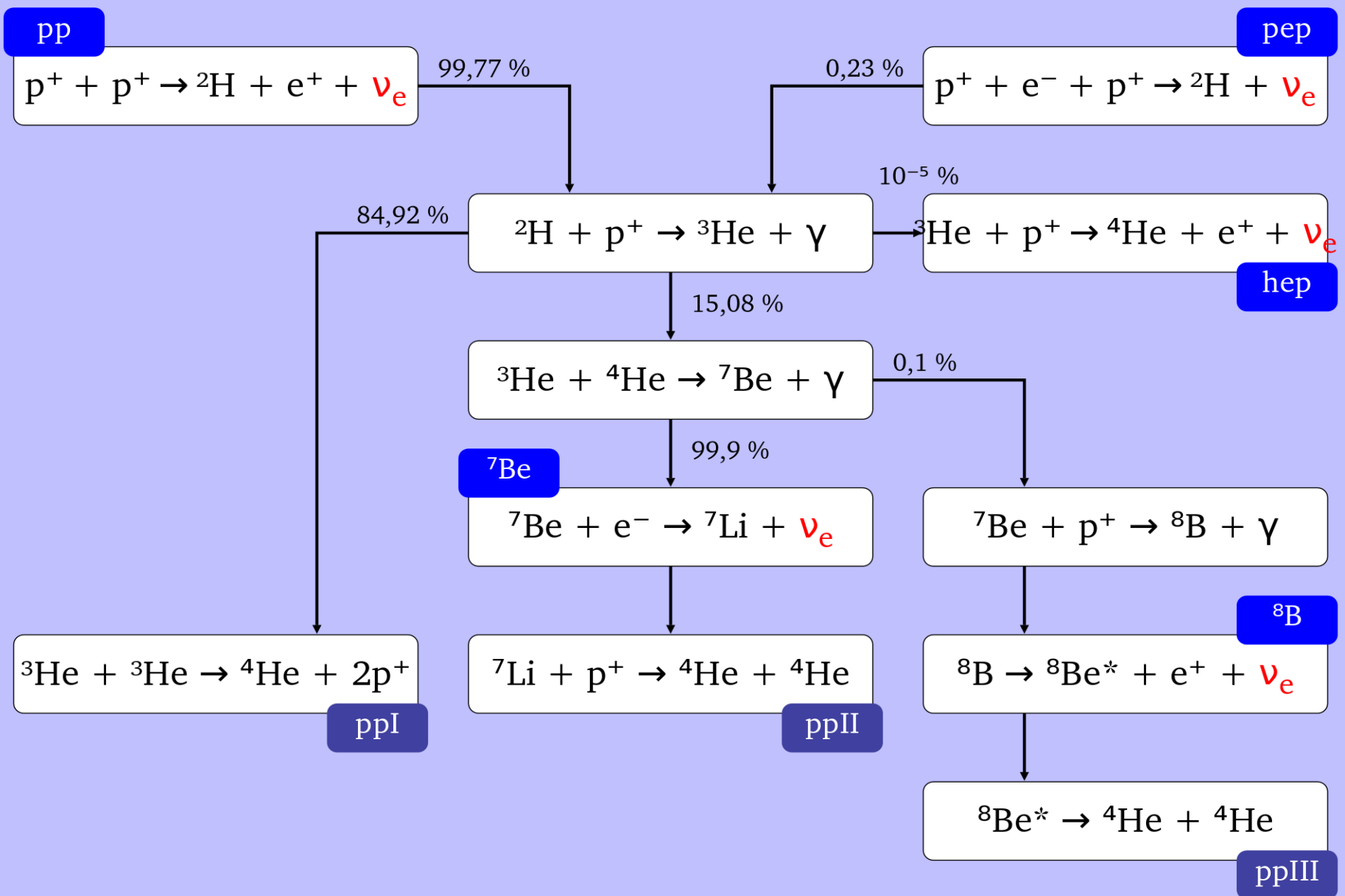
Erős kölcsönhatás csatolási állandója



Gyenge kölcsönhatás

- Radioaktivitásért és magfúzióért felelős (béta bomlás, Nap fúziós energiatermelése)
- Minden ismert fermionra ($1/2$ spin) hat: kvarkok, elektron, müon... neutrínók („jobbkezes” kivétel lehet)
- W^\pm (töltött áram), Z^0 (semleges áram) bozonok közvetítik
Nagy tömegűek (80-90 GeV, Higgs mechanizmus miatt)
→ Rövid hatótávolság
- Kvark ízváltásra is képes! (a többi kcsh. nem)
- Paritás és CP sértő!
- Nem hoz létre kötött állapotot!
- Neutrínók csak ebben vesznek részt

Energia termelés a Napban*



Elektromágneses kölcsönhatás

- (Tömegtelen) foton (γ -gamma) közvetíti
- Minden elektromosan töltött részecske részt vesz benne
- A leggyakoribb módja részecskék detektálásának (ionizáció)
- Atomok, molekulák felépítése. Kémia. Atomfizika. Szilárdtestfizika. Biológia.
- A speciális relativitáselmélet megszületéséhez vezetett. Fénysebesség.
- Kvantumelektrodinamika (QED) írja le. Relativisztikus térelmélet. Legpontosabb jóslatokat ez adja. Kis csatolási állandó, perturbációszámítás jól működik.
- Feynman-diagramok, renormálás, kvantumtérelmélet itt indultak útjukra.

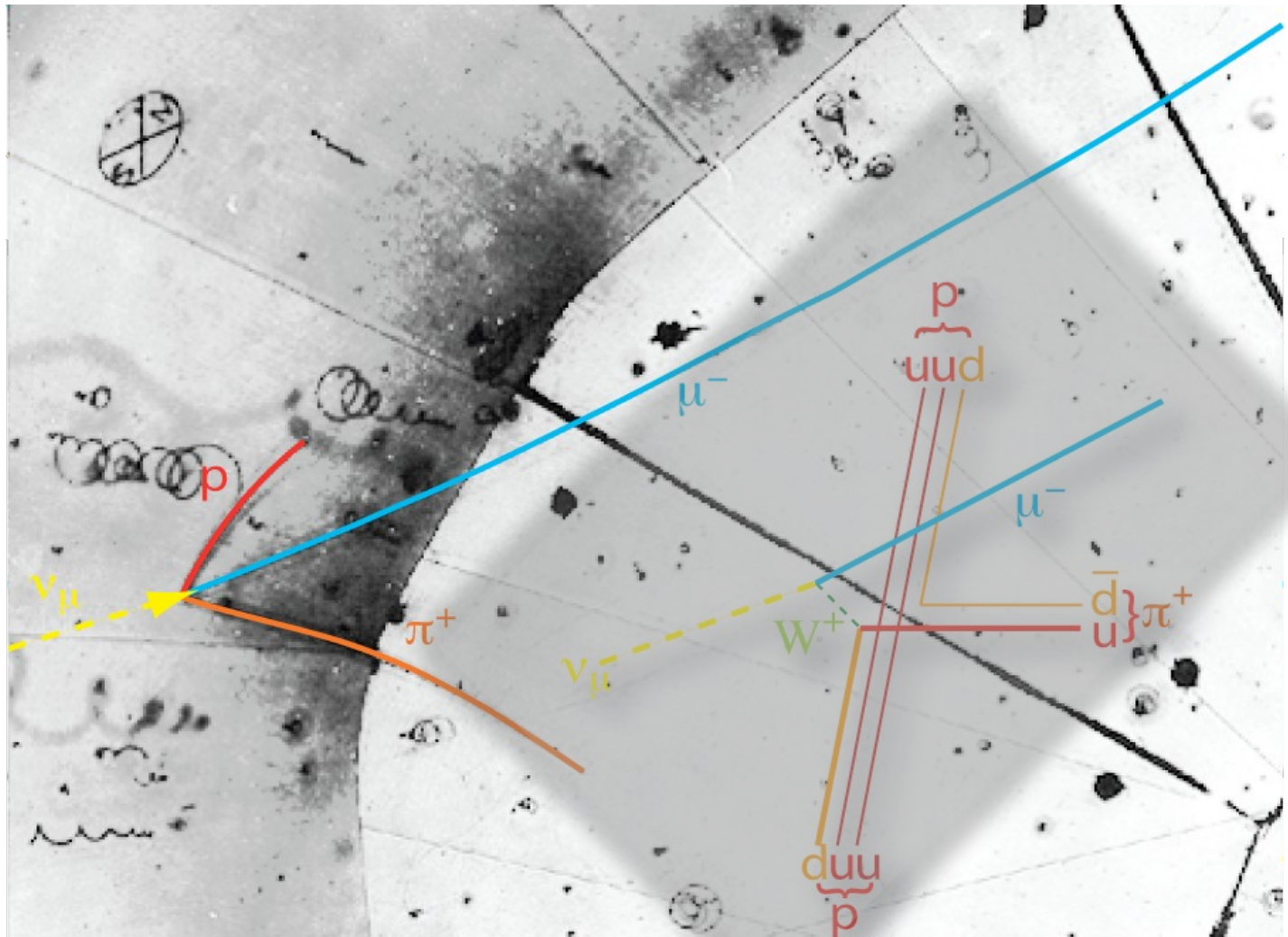
Elektrogyenge kölcsönhatás

- Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesített elmélete.
- Nagy energián (100 GeV) illetve nagy hőmérsékleten (10^{15} K) a két kh. egyesül
- Közvetítik: W^+, W^-, W^0, B^0 .
- Szimmetria spontán sérül (Higgs mechanizmus) kis energián (hőmérsékleten)
- A részecskefizikai **Standard Modell** része, a QCD-vel együtt

Gravitációs kölcsönhatás

- Csak vonzó lehet. Tömeges részecskék vesznek részt benne.
- Nagy méretű objektumokat tartja össze (Naprendszer, galaxisok, Föld, csillagok)
- Általános relativitáselmélet írja le, impulzus-energia tenzor Newton törvénye jó közelítés
- Kvantumtérelméleti leírásában a graviton közvetíti. Kis távolságskálákon (10^{-35}m) nem működik, kvantumosan ???
- Theory of everything? Húr-elmélet?
- Gravitációs sugárzás direkt detektálásának bejelentése 2016. február, Nobel-díj esélyes!
- Aktív kutatási terület az ELTE-n: LIGO (Atomfizikai Tsz.)

Neutrínó-megfigyelés buborékkamrával*



A pionok keletkezése a kozmikus sugárzásban*

$$n + p \rightarrow n' + p' + \pi^0$$

$$n + p \rightarrow n' + n + \pi^+$$

$$p + n \rightarrow p' + p + \pi^-$$

