

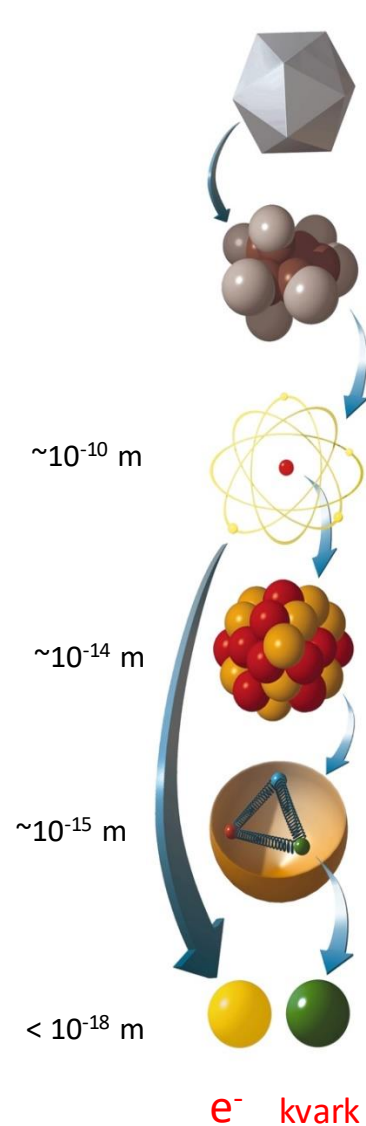
Részecskefizika

Ujvári Balázs

Debreceni Egyetem, Fizikai Intézet, IK, Atomki...

HTP2024

Elemi részek rövid története

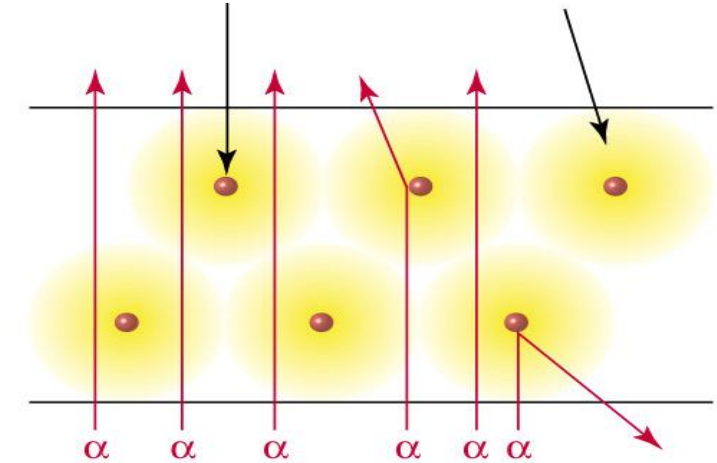
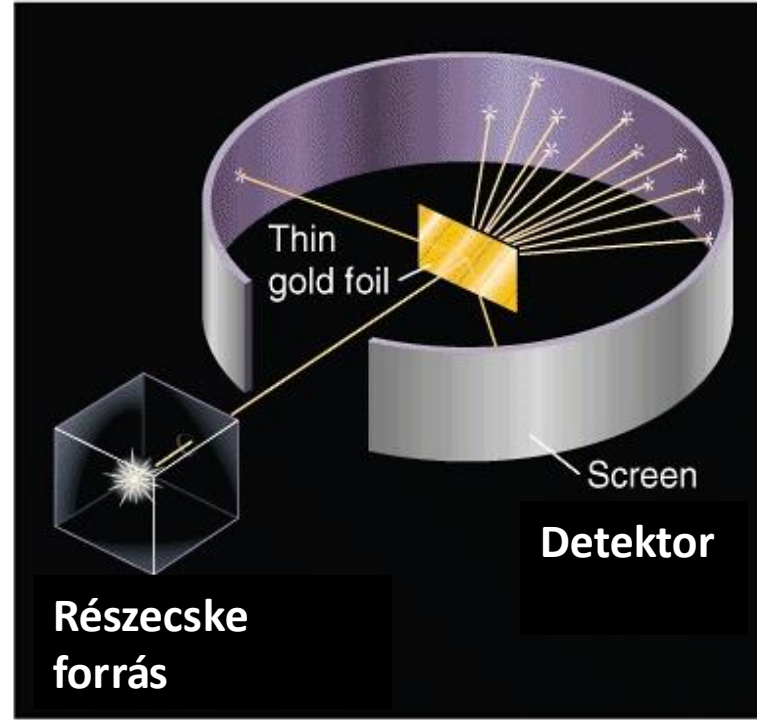
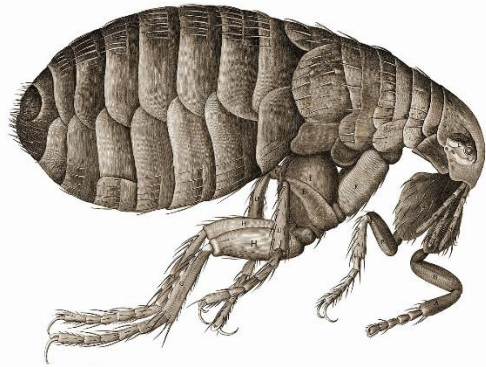


- I.e. 6. évszázad, India (föld, tűz, víz, levegő)
- I.e. 5. évszázad, Görögország, Leukipposz, majd i.e. 450, Démokritész
- I.e. 4. évszázad Arisztotelész
- 1805, John Dalton: modern **atom**elmélet (kémiai megközelítés)
- 1827, Robert Brown: kis részecskék véletlenszerű mozgása folyadékban (végre látunk valamit)
→ 1905, Albert Einstein: molekulák lökdösik
- 1869, Dmitri Mengyelejev: kémiai elemek periódusos rendszere
- 1897, J.J. Thomson: *katódsugárzás q/m mérése* → **elektron**, minden atom része
- 1909, Ernest Rutherford: α részecskék szórása vékony arany fólián → atommag
- 1919, Rutherford, A többi atommag a hidrogén atommag töltésének egész számú többszörösei, **proton**
- 1913, Henry Moseley: atommag töltés = periódusos rendszerbeli pozíció
- 1913, Niels Bohr: atom modell kvantált elektronpályákkal (színképvonalak)
- 1932, James Chadwick alfa bombázással nagy hatótávú sugárzás jön létre ami nem gamma: **neutron**
- 1924, Louis de Broglie: részecske – hullám kettősség
- 1964, Murray Gell-Mann és George Zweig: **kvarkok**



Felfedezés módszerei

- Szórás kísérletek

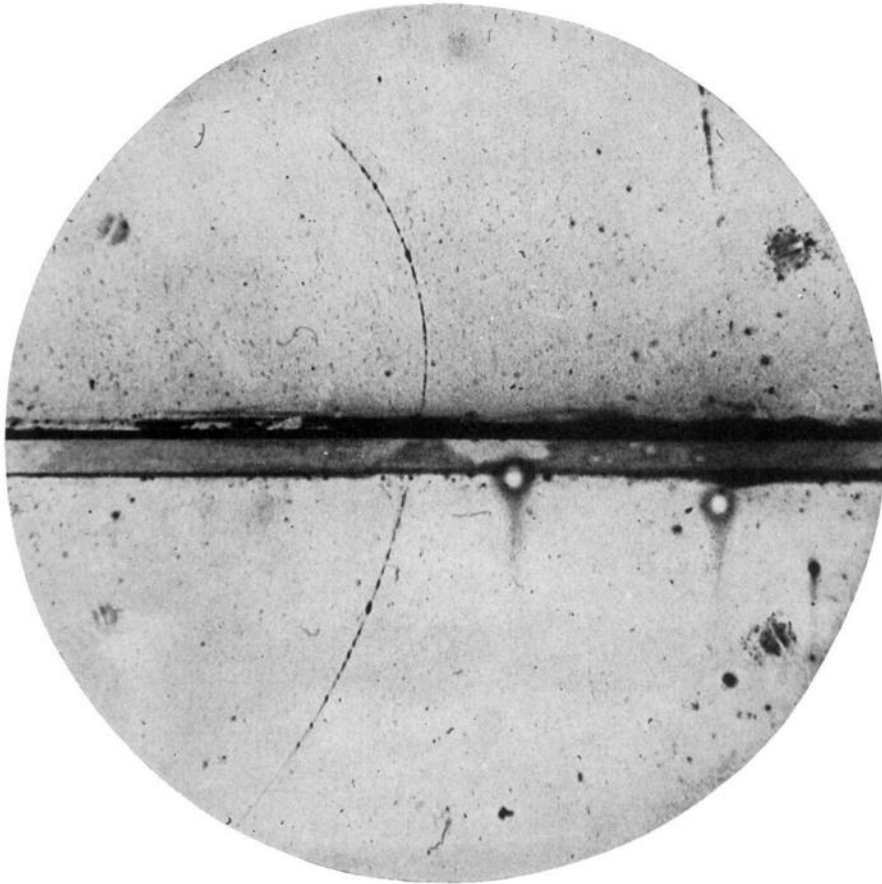


- Következtetés a megfigyelt rendszerek tulajdonságaiból
tömeg, spin, élettartam,...

Carl D. Anderson 1932

The Positive Electron

Dirac 1928-ban megjósolta: Einstein relativitáselméletéből következik, hogy az univerzumban minden részecskének van egy megfelelő antirészecskéje, amelyek mindegyike ugyanolyan tömegű, mint ikertestvére, de ellentétes elektromos töltéssel rendelkezik.



Cloud chamber: alkohol gőzben túltelített vízgőz, ha egy részecske áthalad, vízcseppek keletkeznek és a nyoma látható marad, le lehet fényképezni. A mágneses tér miatt hajlik a pályájuk, az impulzust és a töltés előjelét lehet mérni, a pálya hosszából (stopping distance) kizárta a protont. A közepén lévő ólom lassított, más a görbület fent és lent.

FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho = 2.1 \times 10^5$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

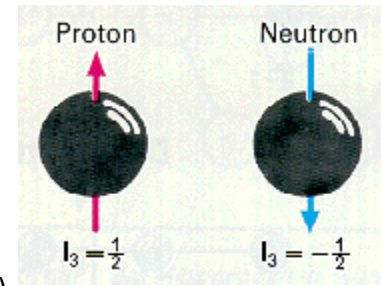
1936 Nobel-díj 31 évesen!

Izospin

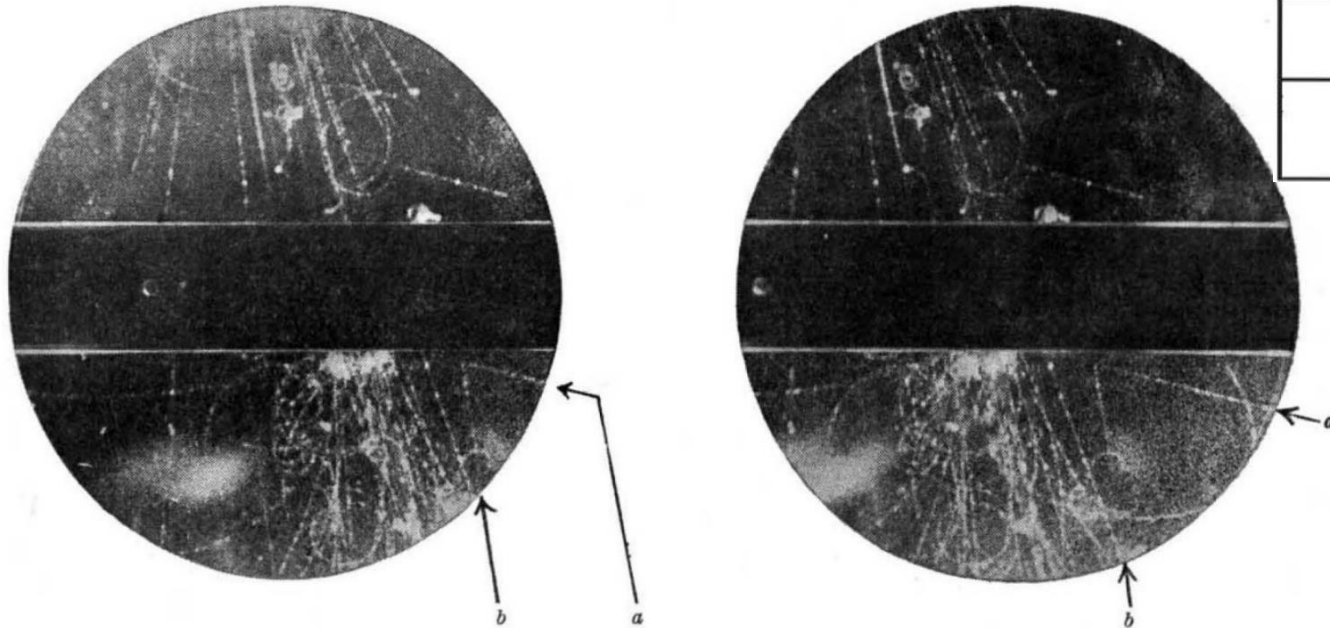
- Heisenberg, 1932
- Az erős kölcsönhatás szempontjából a proton és a neutron (épp felfedezték) felcserélhető (kötési energia ${}^3\text{H}$ és ${}^3\text{He}$ közt nagyon hasonló)
- Tekintsünk el töltésüktől
- Hasonlóan értelmezhetjük, mint az elektron spinjét
- A proton és a neutron egy részecske, $\frac{1}{2}$ az izospinje, ami be tud állni felfele ($I_3=+1/2$) és lefele ($I_3=-1/2$)
- I a teljes izospin, és az I_3 izospinkomponens
- Hogyan adom meg a fenti esetre:

- $Q = N(p)$
- $B = N(p) + N(n)$
- $I_3 = (N(p) - N(n))/2$

$$\left. \begin{array}{l} \bullet Q = N(p) \\ \bullet B = N(p) + N(n) \\ \bullet I_3 = (N(p) - N(n))/2 \end{array} \right\} \rightarrow I_3 = Q - B/2$$



Új részecskék a kozmikus sugárzásban - 1947



Photograph	H (gauss)	α (deg.)	Track	p (eV./c.)	Δp (eV./c.)	Sign
1	3500	66.6	a	3.4×10^8	1.0×10^8	+
			b	3.5×10^8	1.5×10^8	-
2	7200	161.1	a	6.0×10^8	3.0×10^8	+
			b	7.7×10^8	1.0×10^8	+

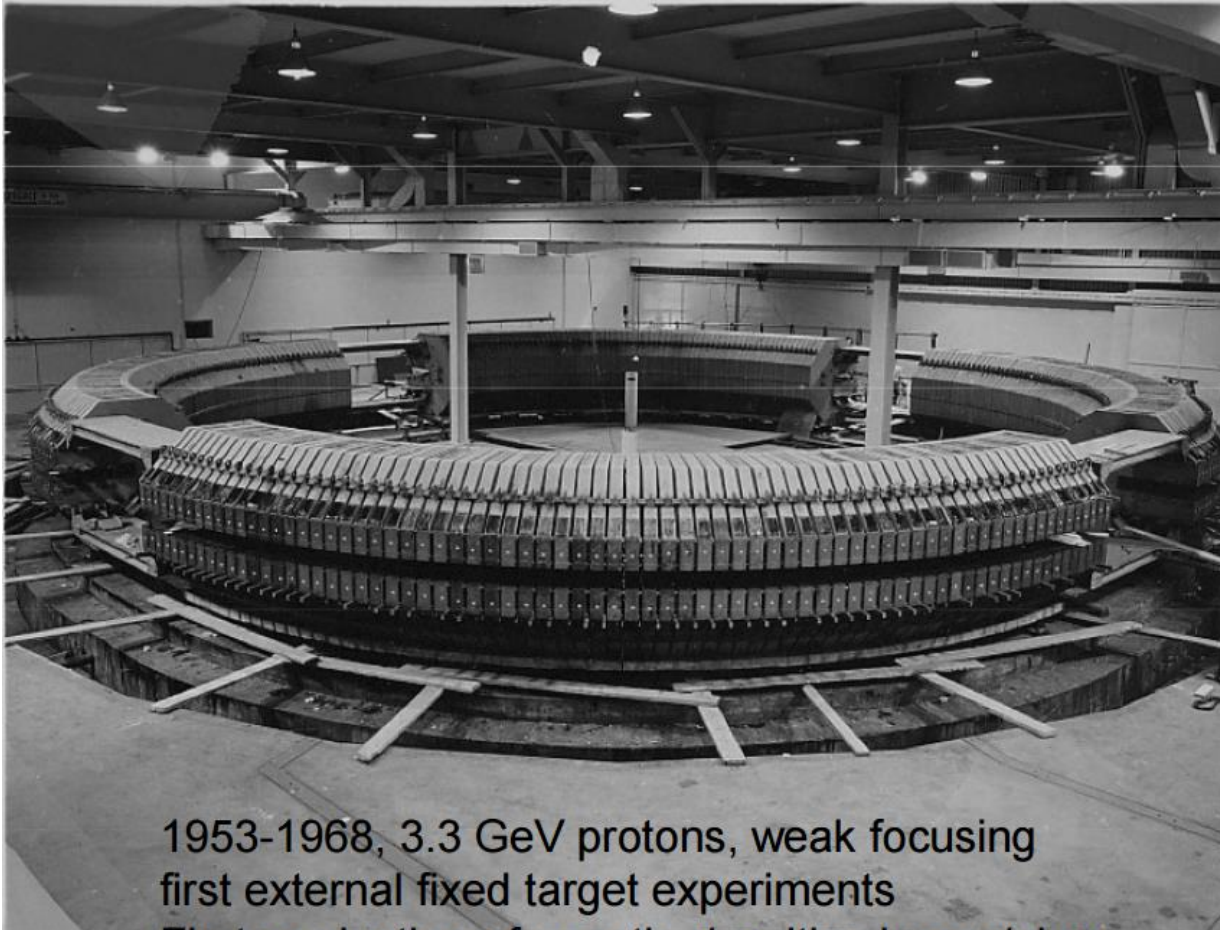
Ekkor már ismerték a pionokat, de még azt gondolták, hogy az atommagokban ők kötik össze a nukleonokat (ebben az évben fedezték fel, mint részecskét)

Fentről jön egy töltött kozmikus részecske, az ólom céltárgy után egy ideig nincs nyom (semleges), majd két pion, V-alak-ban.

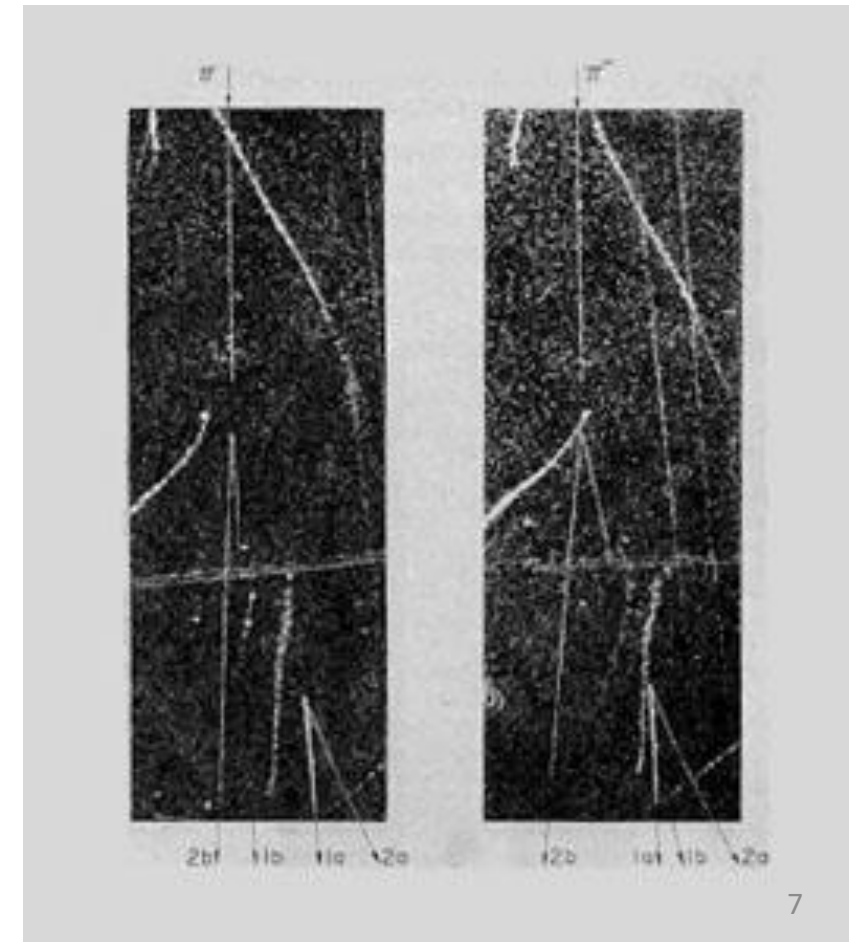
A Pireneusokban végezték a kísérletet, ez a két kép készült.

Ritkaság

- A Cosmotron/BNL (1953 proton 3GeV) megfigyelt új részecskéket (később: kaonok, hiperonok), amik erős kölcsönhatásban keletkeznek, de gyenge kölcsönhatással bomlottak.

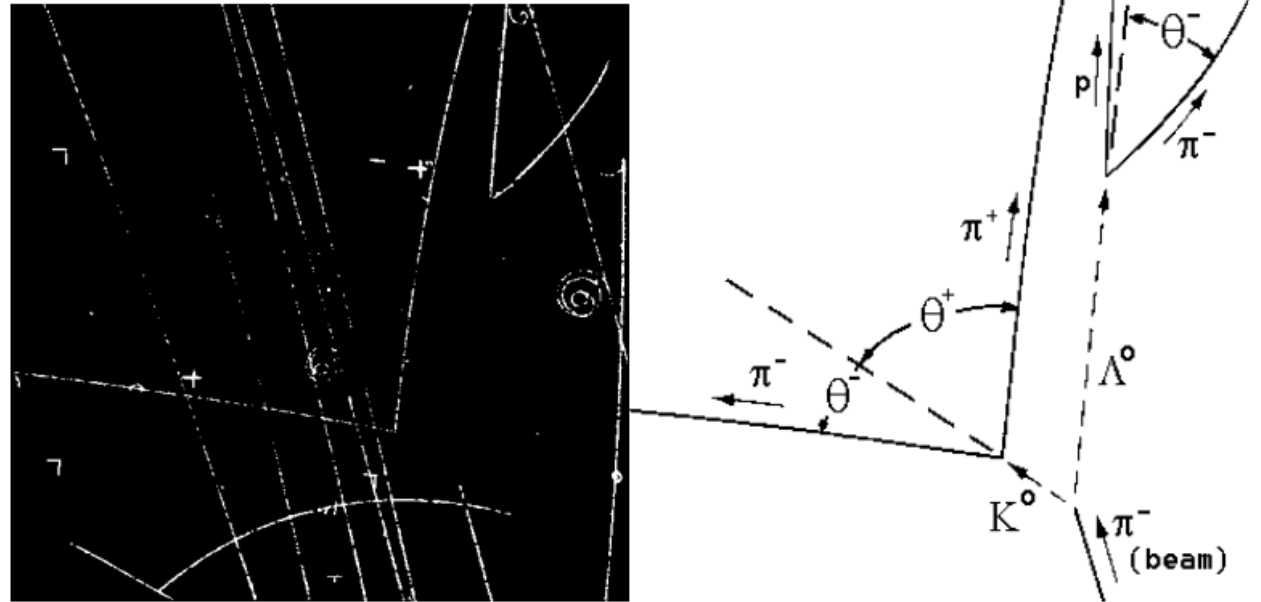


1953-1968, 3.3 GeV protons, weak focusing
first external fixed target experiments
First production of negative/positive kaons/pions



Ritkaság

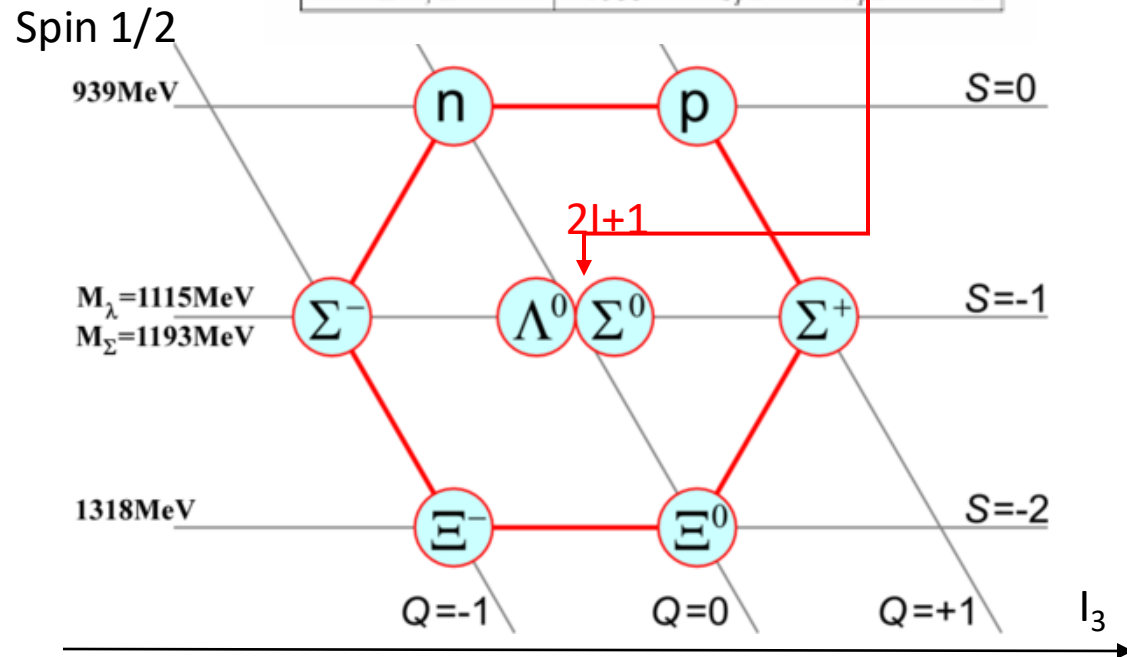
- A megértéshez tudni kell a kölcsönhatás élettartalmát, hogyan azonosítok egy részecskét
 - Kell megfelelő gyorsító
 - Detektor
 - Kiértékelési algoritmusok
 - Több tízezer fotó
- Minden új fizika a megfelelő eszközökkel és módszerekkel kezdődik!



Ritkaság

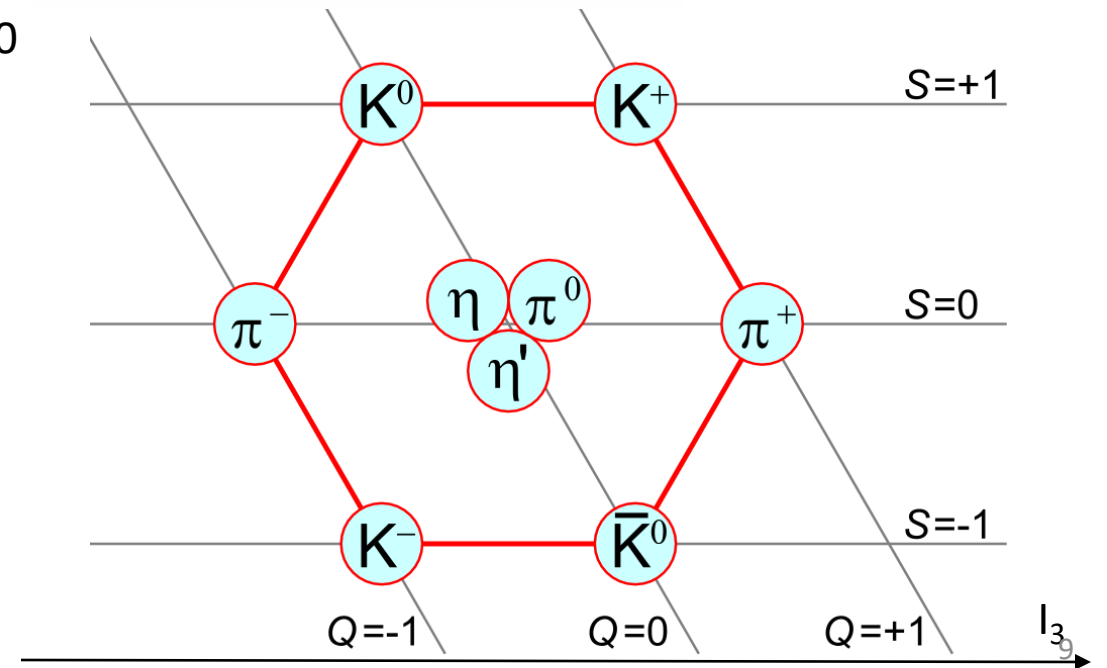
- Bevezették a ritkaságot (S)
- Hipertöltés: $Y = B + S \rightarrow I_3 = Q - Y/2$

Baryons	$\langle \text{Mass} \rangle$	J^P	I	S
p, n	938.9	$1/2^+$	$1/2$	0
Λ	1116	$1/2^+$	0	-1
$\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$	1193	$1/2^+$	1	-1
$\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$	1232	$3/2^+$	$3/2$	0
Ξ^-, Ξ^0	1318	$1/2^+$	$1/2$	-2
$\Sigma^{*-}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}$	1385	$3/2^+$	1	-1
Ξ^{*-}, Ξ^{*0}	1533	$3/2^+$	$1/2$	-2

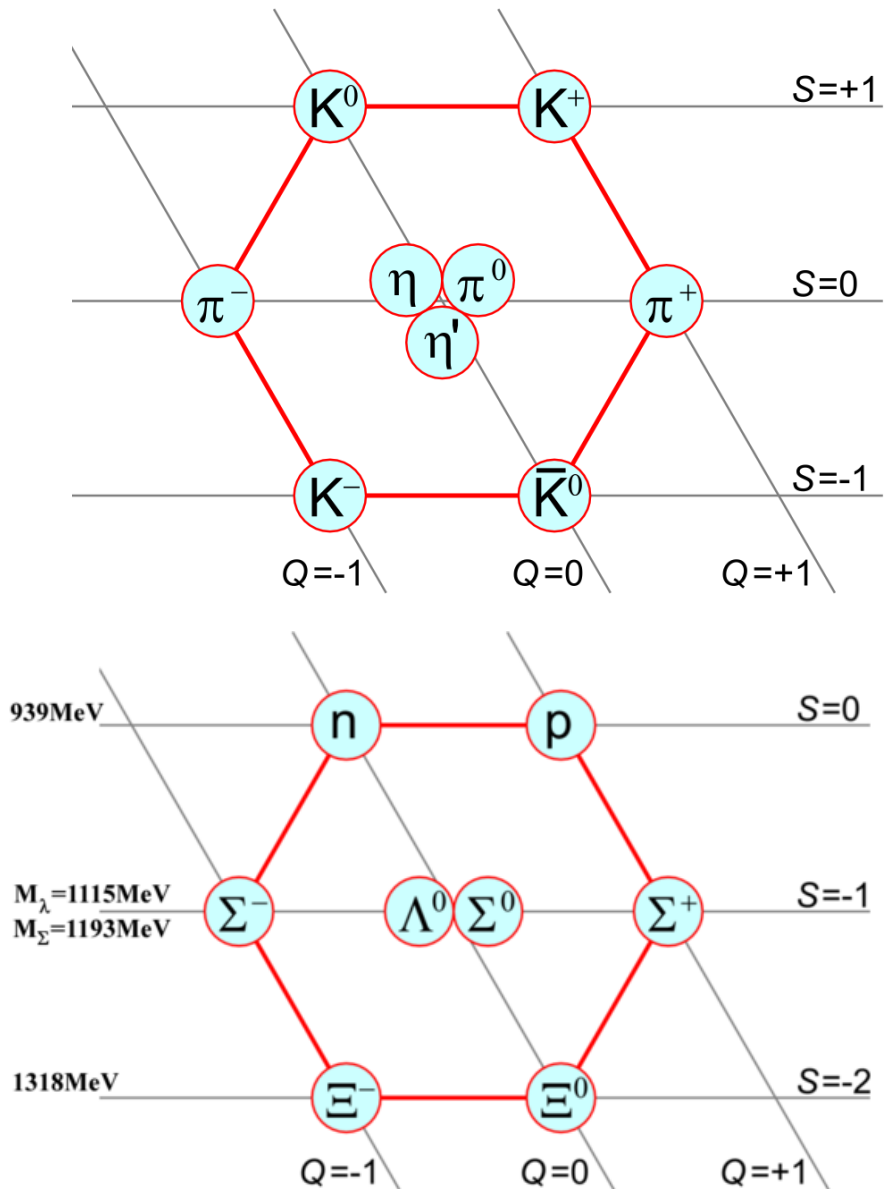


Mesons	$\langle \text{Mass} \rangle$	J^{PC}	I	S
π^-, π^0, π^+	138.0	0^{-+}	1	0
K^0, K^+	495.7	0^{-}	$1/2$	+1
K^-, \bar{K}^0				-1
η	547.3	0^{-+}	0	0
ρ^-, ρ^0, ρ^+	770.0	1^{--}	1	0
ω	781.9	1^{--}	0	0
K^{*0}, K^{*+}	893.7	1^{-}	$1/2$	+1
K^{*-}, \bar{K}^{*0}				-1
η'	957.8	0^{-+}	0	0
ϕ	1019.5	1^{--}	0	0

Spin 0



Részecske állatkert (particle zoo)



- Willis Lamb, in his 1955 Nobel Prize Lecture, joked that he had heard it said that “the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a 10,000 dollar fine.”

Kvark-modell

- 1964, Gell-Mann rendszerezi a részecskéket, bevezeti a ritkaság (strangeness) kvantumszámot, és megjósolja az $\Omega^- = (sss)$ létezését (1969, Nobel-díj)

Azt javasolja Zweiggel párhuzamosan,

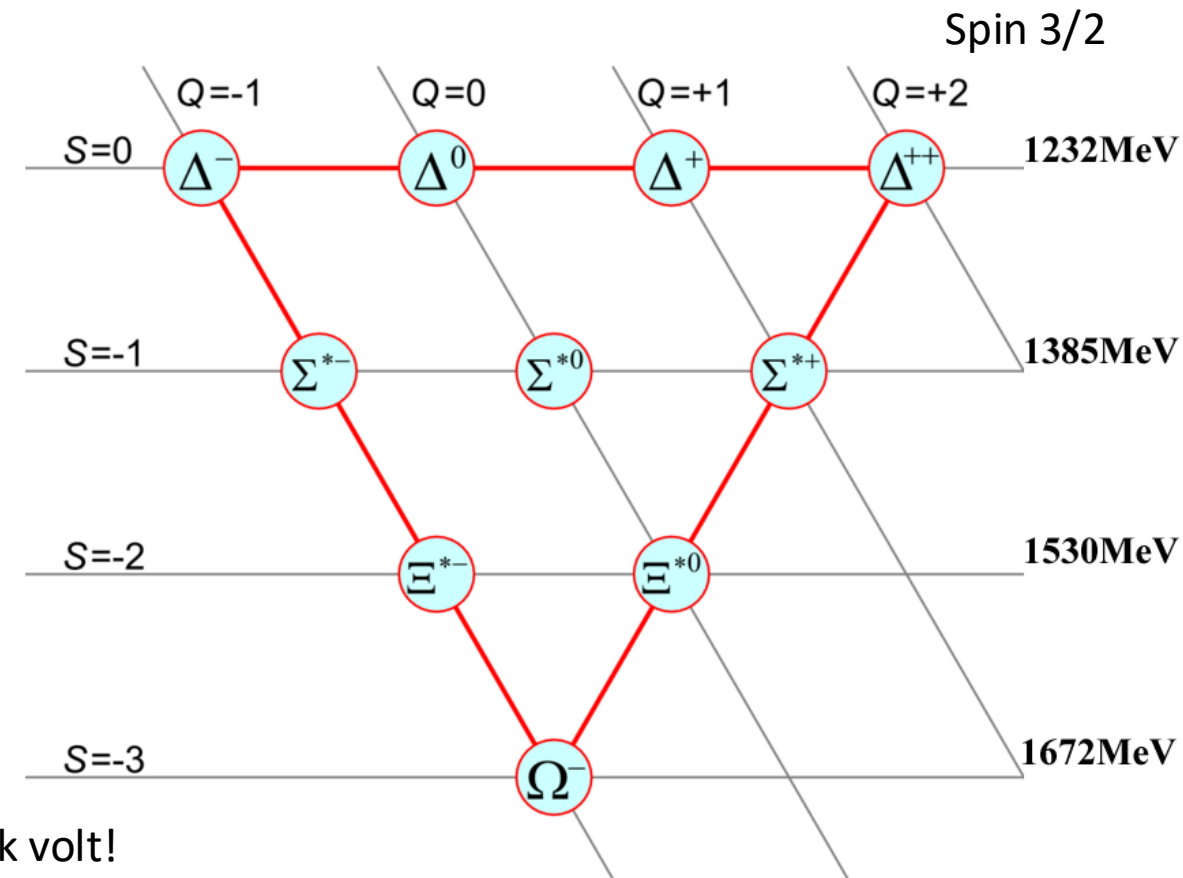
hogy a sok hadron egyszerűen

felépíthető három elemi

részecskéből, a kvarkokból

1964, Brookhaven, Ω^- felfedezése

a megjósolt tulajdonságokkal



A kvarkok spinje alig kap szerepet pl a proton spinjében, mákunk volt!

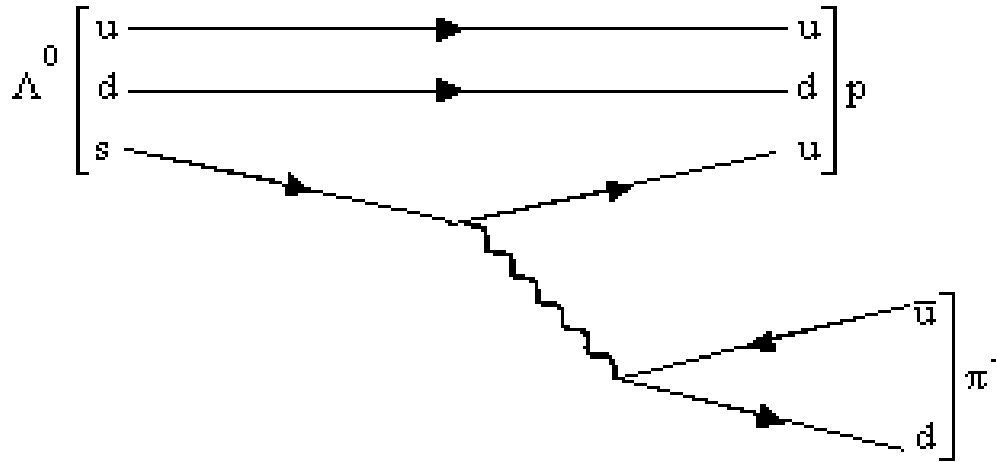
1987 proton spin crisis ... EIC@BNL 2030+ próbálja megválaszolni

Kvark

Three **quarks** for Muster Mark!
 Sure he has not got much of a bark
 And sure any he has it's all beside the mark.

James Joyce: Finnegan ébredése

A quark (kvark) kifejezés a hark! (hé!)
 és a quart (negyedgallonos sör)
 szavak összevonásával jött létre



uuu -- Δ^{++}
 uud -- Δ^+
 udd -- Δ^0
 ddd -- Δ^-

suu -- Σ^{*+}
 sud -- Σ^{*0}
 sdd -- Σ^{*-}

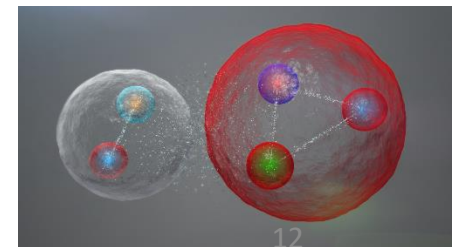
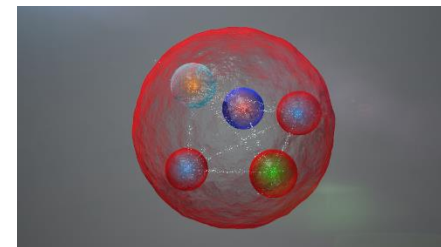
$$\pi^0 = (\bar{u}u - \bar{d}d) / \sqrt{2}$$

$$\eta' \approx (\bar{u}u + \bar{d}d + \bar{s}s) / \sqrt{3}$$

$$\eta \approx (\bar{u}u + \bar{d}d - 2\bar{s}s) / \sqrt{6}$$

$\bar{d}u$ -- π^+
 $\bar{d}s$ -- \bar{K}^0
 $\bar{u}d$ -- π^-
 $\bar{u}s$ -- K^-
 $\bar{s}u$ -- K^+
 $\bar{s}d$ -- K^0

ssu -- Ξ^{*0}
 ssd -- Ξ^{*-}
 sss -- Ω^-



Elméletek - kísérletek

Kísérleti és elméleti fizikusok közös erőfeszítése szükséges a világ megértéséhez.

Elméleti fizikus:

- Új elméleteket alkot felhasználva régi és új ötleteket, hogy megmagyarázza a természetben (kísérletekben) észlelt jelenségeket
- Nagy pontosságú számításokat végez, amelyek összehasonlíthatók a mérési eredményekkel

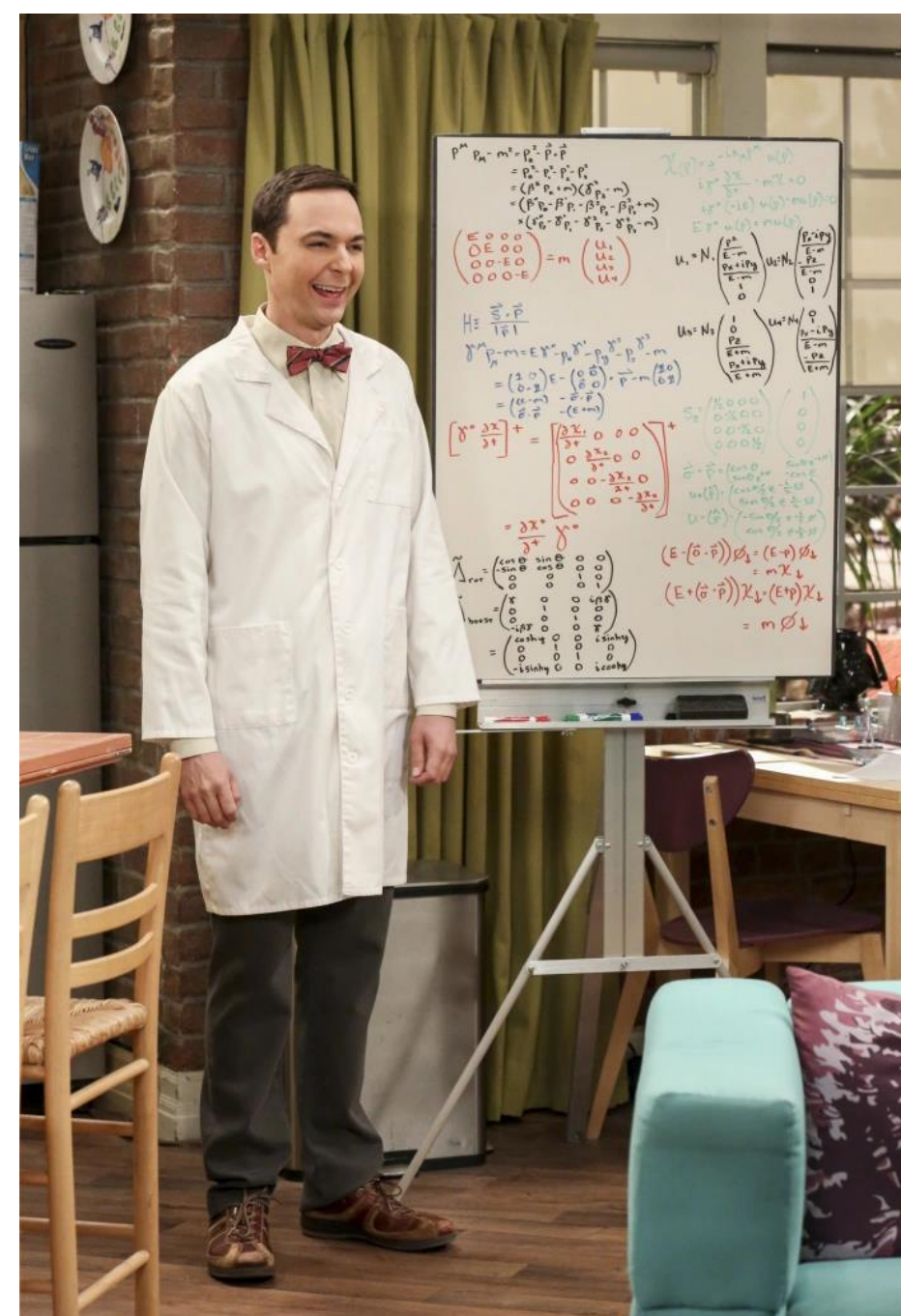
Kísérleti fizikus:

- Megfigyeli a világot, kísérleteket tervez és végez
- Egyre pontosabb mérési adatokat szolgáltat, melyek szembeállíthatók az elméletek jóslataival
- Néha váratlan eredményekbe botlik, amelyek egészen új magyarázatot igényelnek

SZUSSZ

Agymenők

- David Saltzberg (UCLA – CMS ...) több évadon keresztül tudományos tanácsadója volt a The Big Bang Theory című sorozatnak.
- Néhány évad után a tudósok elkezdték saját kutatásaikat benyújtani, hogy azok megjelenjenek a táblákon. Még ha csak a háttérben szerepeltek is, a táblákon látható adatok valódi egyenletek és elméletek voltak.



- Lagrange-egyenlet

Elméleti mechanika ismétlés

Általános koordinátákat akarok használni, hogy ne kelljen a koordináta-rendszerrel foglalkozni.

Az adott rendszer fizikáját egyben tartalmazza

$$L \equiv T - V.$$

$$L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}kx^2.$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x}$$

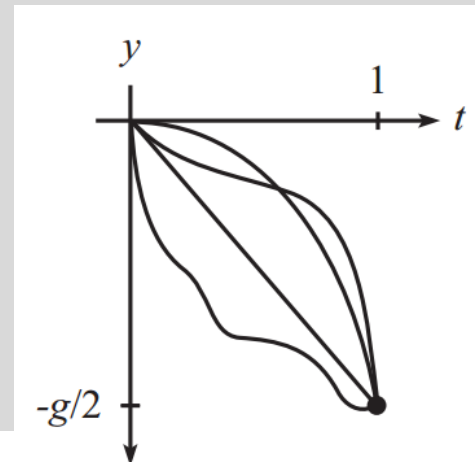
$$m\ddot{x} = -kx$$

Definiáljuk a hatást

$$S \equiv \int_{t_1}^{t_2} L(x, \dot{x}, t) dt.$$

a részecske úgy fog mozogni, hogy ezt a hatást minimalizálja

Azért esik le $s=g/2 \cdot t^2$ szerint egy test, mert így lesz minimális a hatás. Tömör és **elegáns** leírás.



$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$$

$$H(p, q) = \sum_{i=1}^f p_i \cdot \dot{q}_i - L(q, \dot{q})$$

Globális szimmetriák

- Forgatásra, eltolásra nem változhat a fizika
- Nem változhat az egyenlet alakja, ha egy álló koordinátarendszerből áttérek egy mozgóba Galilei, Lorentz transzformációval
- Noether-tétel (1915): minden folytonos globális szimmetriához tartozik egy megmaradó mennyiség (ha több paraméteres, akkor ahány paramétere van)
 - idő-eltolás \rightarrow energia megmaradás
 - térbeli-eltolás \rightarrow impulzus megmaradás
 - forgás \rightarrow impulzusmomentum megmaradás
- Ezek a kvantummechanikában megmaradó kvantumszámként jelennek meg

külső szimmetria

Belső szimmetriák

- $\psi(x)$ hullámfüggvény a kvantummechanikában

QM ismétlés

KM-ban a teljes energia a kinetikus és a potenciális

QM-ban a részecskék hullámfüggvények

Felírom a Schrödinger-egyenletet.

Ennek a megoldásai (sajátfüggvényei) lesznek a megvalósult hullámfüggvények, a sajátértékek ezeknek az energiái.

	Kinetic Energy + Potential Energy = E	
Classical Conservation of Energy Newton's Laws	$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E$	Harmonic oscillator example.
Quantum Conservation of Energy Schrodinger Equation	$\frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}kx^2$	The energy becomes the Hamiltonian operator
In making the transition to a wave equation, physical variables take the form of "operators".	$H \rightarrow \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{2}kx^2$	The form of the Hamiltonian operator for a quantum harmonic oscillator.
	$H\Psi = E\Psi$	Wavefunction
		Energy "eigenvalue" for the system.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \Psi(x) = E\Psi(x)$$

$$\Psi_n(y) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} H_n(y) e^{-y^2/2}$$

First four harmonic oscillator normalized wavefunctions

$$\Psi_0 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-y^2/2}$$

$$\Psi_1 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{2}y e^{-y^2/2}$$

$$\Psi_2 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2}}(2y^2 - 1)e^{-y^2/2}$$

$$\Psi_3 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{3}}(2y^3 - 3y)e^{-y^2/2}$$

$$\alpha = \frac{m\omega}{\hbar} \quad y = \sqrt{\alpha} x$$

Hermite polinomok

Belső szimmetriák

- $\psi(x)$ hullámfüggvény a kvantummechanikában
- Minek van fizikai jelentése $|\psi(x)|^2$

$$|-2|^2 = |2|^2$$

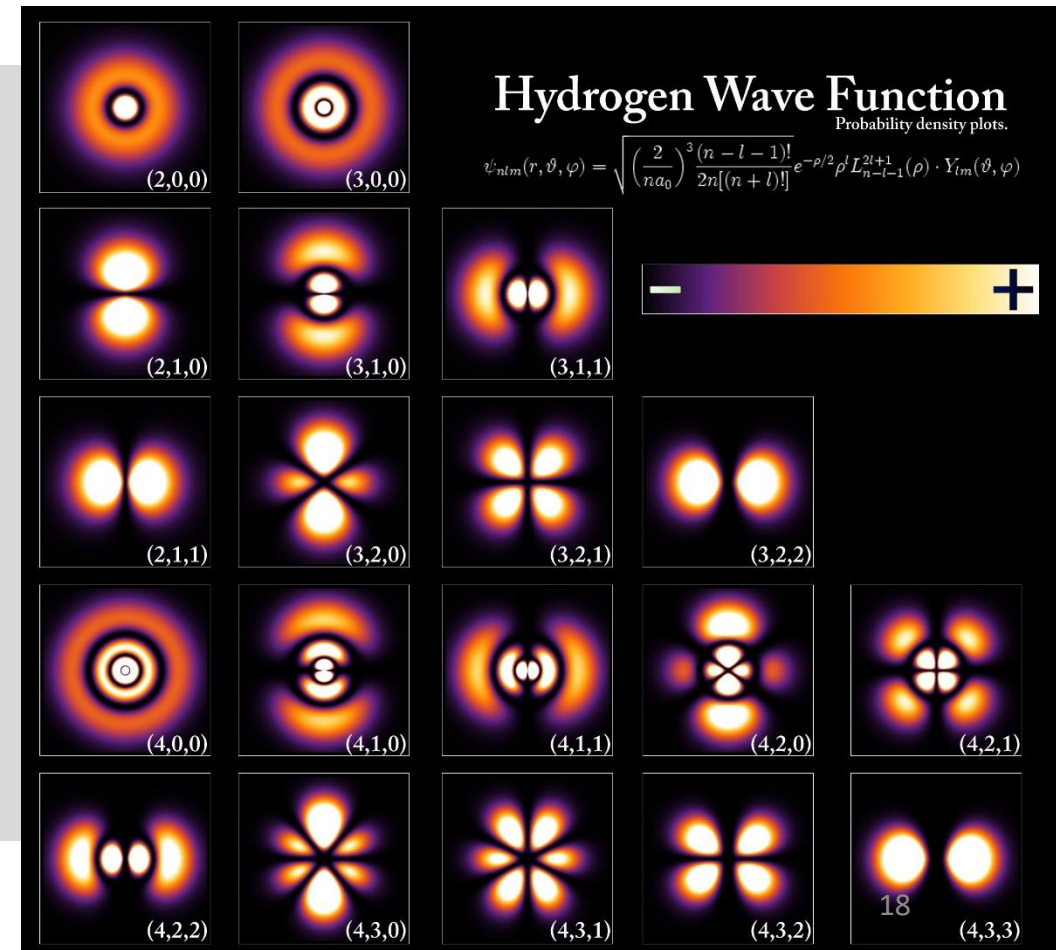
Hidrogén atom elektronjainak hullámfüggvényei

Ezeknek a hullámfüggvények megfelelő műveletekkel megadják a kvantumszámokat.

Főkvantumszám n

Mellékkvantumszám l

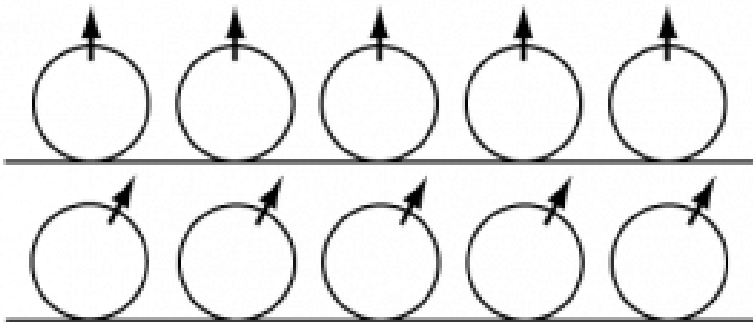
Mágneses kvantumszám m_l



Szünet

Belső szimmetriák

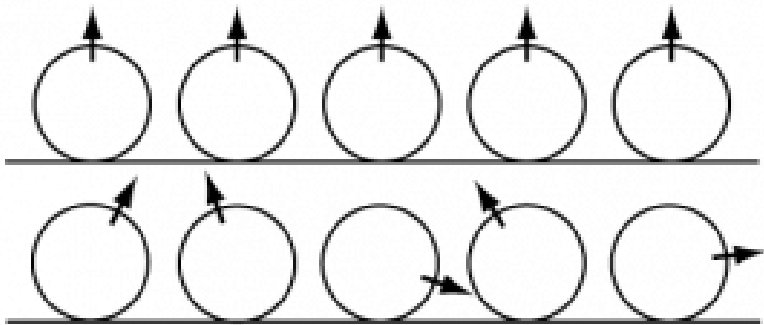
- Globális belső szimmetria $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \psi(x)$
- $\psi(x)$ hullámfüggvény a kvantummechanikában
- Minek van fizikai jelentése $|\psi(x)|^2$ valószínűségi sűrűségfüggvény
- $|\psi(x)|^2 = \psi(x)^* \psi(x) \rightarrow e^{-i\alpha} \psi(x) e^{i\alpha} \psi(x)$
- Noether-tétel (1915): minden folytonos szimmetriához tartozik egy megmaradó mennyiség (ha több paraméteres, akkor ahány paramétere van)
- Töltött részecskék belső fázisterében forgatás \rightarrow fermion töltés megmaradása



Belső szimmetriák

Amennyiben feltételezzük, hogy a belső szimmetria lokális, úgynevezett mértékszimmetria - például az elektronmező fázisa a tér-idő minden pontjában szabadon választható meg $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \psi(x)$ -, akkor az elméletben megjelenik egy másik fizikai mező, a *mértékmező*, amely a részecskék közötti kölcsönhatást közvetíti.

Például az elektron esetén a mértékmező az elektromágneses mezővel azonosítható. Ilyen módon a lokális szimmetria egy teljes, az elektron és az elektromágneses mező kölcsönhatását leíró elméletet, az elektrodinamikát eredményezi. U(1)



Elektron + lokális belső szimmetria

- Lagrange-egyenlet

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}(\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi$$

Elméleti mechanika ismétlés

Általános koordinátákat akarok használni, hogy ne kelljen a koordináta-rendszerrel foglalkozni.

Az adott rendszer fizikáját egyben tartalmazza

$$L \equiv T - V.$$

$$L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}kx^2.$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x}$$

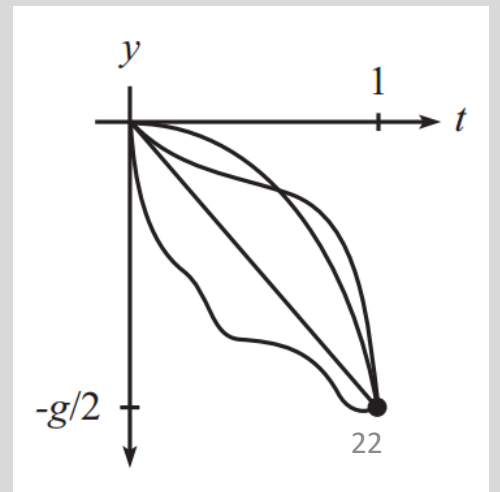
$$m\ddot{x} = -kx$$

Definiáljuk a hatást

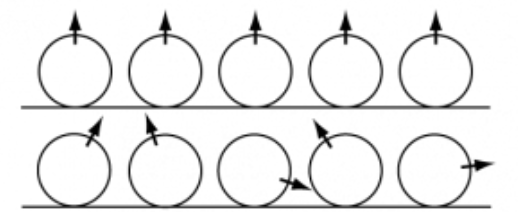
$$S \equiv \int_{t_1}^{t_2} L(x, \dot{x}, t) dt.$$

... úgy fog mozogni, hogy ezt a hatást minimalizálja

Azért esik le $s=g/2*t^2$ szerint egy test,
mert így lesz minimális a hatás.
Tömör és **elegáns** leírás.



Elektron + lokális belső szimmetria

$$\psi' = e^{ie\phi(x_\mu)}\psi$$


- Lagrange-egyenlet

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}(\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi$$

- Lokális belső transzformáció

$$\psi' = e^{ie\phi(x_\mu)}\psi$$

- Deriváljuk le $\partial_\mu\psi' = \partial_\mu(e^{ie\phi(x)}\psi) = ie(\partial_\mu\phi(x))e^{ie\phi(x)}\psi + e^{ie\phi(x)}\partial_\mu\psi$

- Hoppá $\mathcal{L} = \bar{\psi}'(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi' = \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi - e\bar{\psi}(\gamma^\mu\partial_\mu\phi(x))\psi$

- Semmi pánik $A'_\mu = A_\mu - \partial_\mu\phi(x) \quad \partial_\mu \rightarrow \mathcal{D}_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$

- Lagrange $\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu\mathcal{D}_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}, \quad F^{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi$$

Kinetikus tag

$$-m\bar{\psi}\psi$$

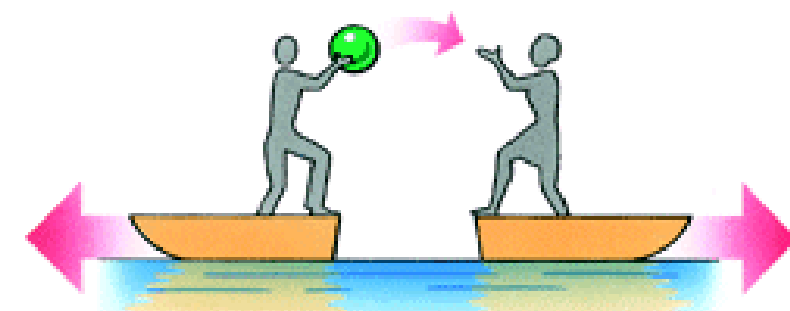
Tömegtag

$$-e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu$$

Kölcsönhatás a mértékbozonnal

$$-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$$

Mértéktér kinetikus tagja

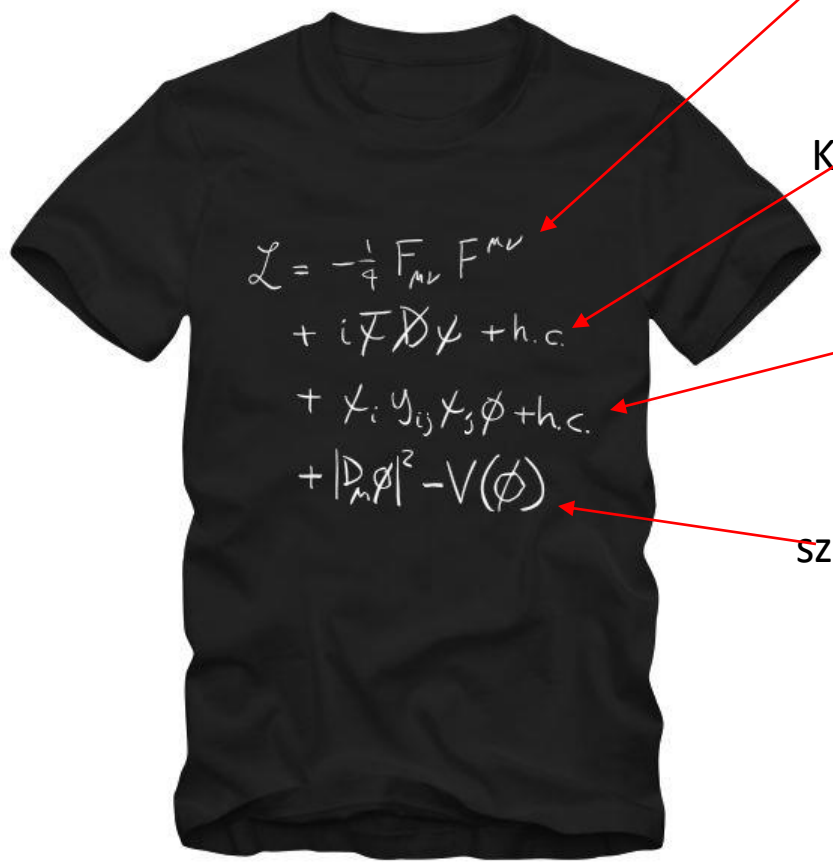


U(1) -> EM kh, foton

Standard Modell – mi az egyenlet?

- Amit fel lehet venni és elmagyarázni bárkinek
- és amit nem

SU(3)xSU(2)xU(1)



erők

Kölcsönhatás, kinetikus tag

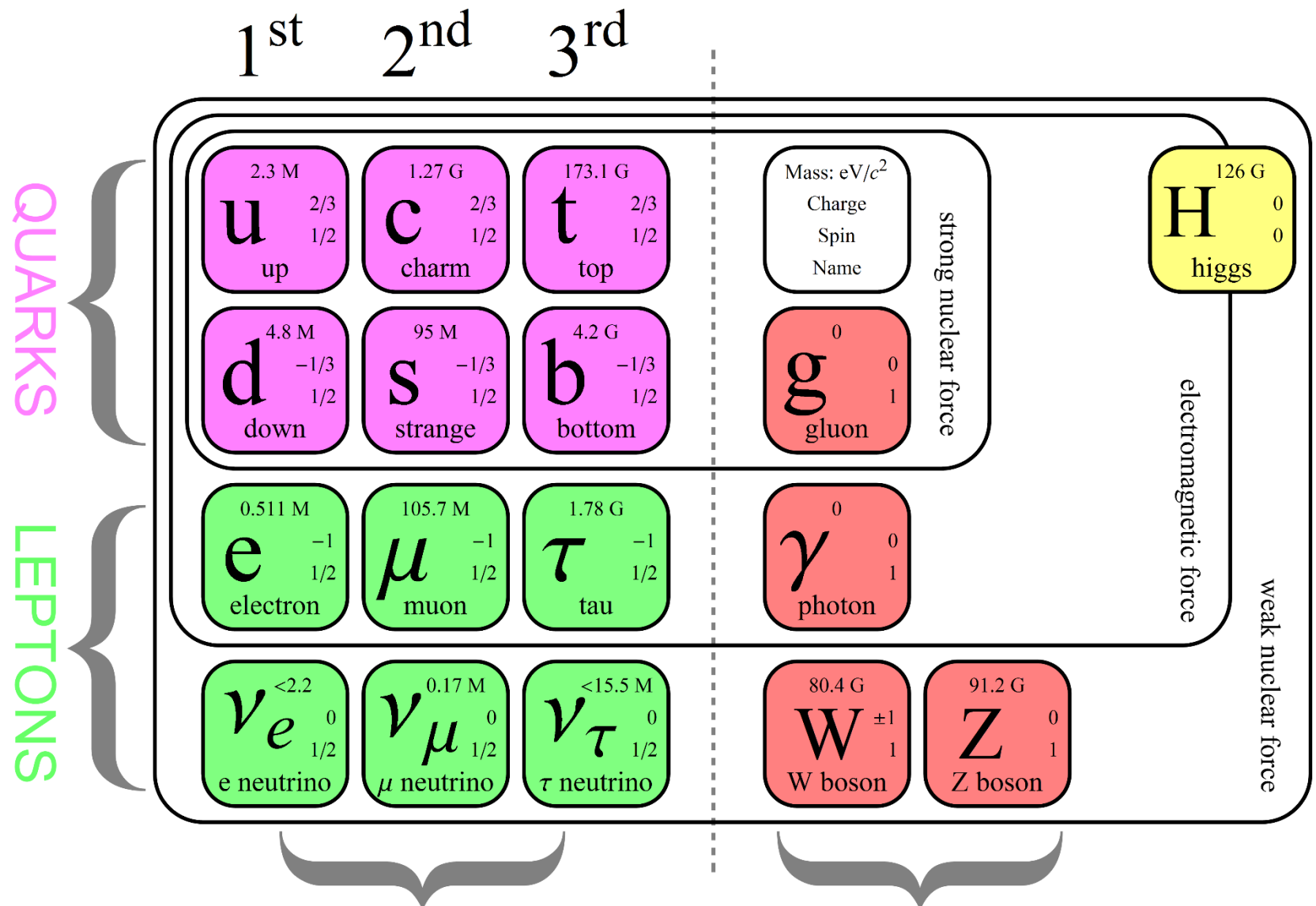
Tömegtag

szimmetriasértés

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

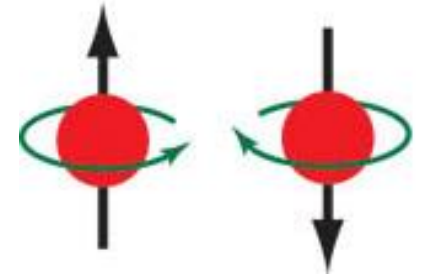
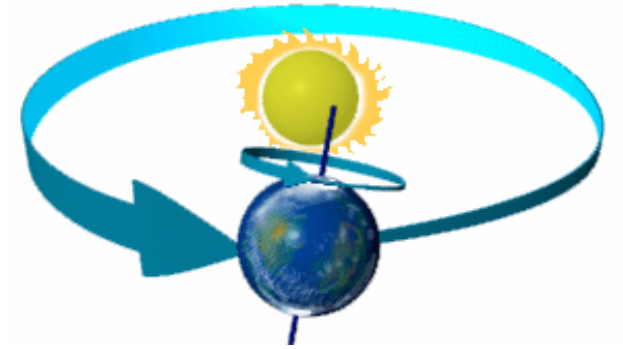
$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\ & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \\ & \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\ & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\ & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\ & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\ & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\ & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\ & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\ & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\ & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\ & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\ & g^1 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\ & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\ & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\ & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_\kappa^j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\ & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_\kappa^j) + \\ & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_\kappa^j) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_\kappa^j) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\ & \gamma^5) u_\kappa^j) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\ & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\ & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\ & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\ & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^5 - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\ & ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0] \end{aligned}$$

Standard Modell – miből áll

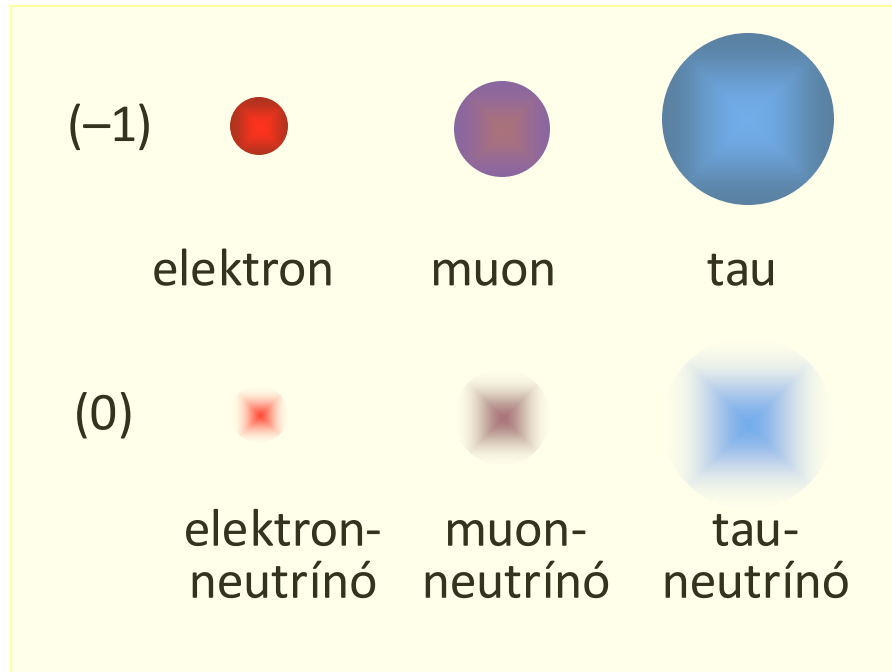


Fermionok és bozonok

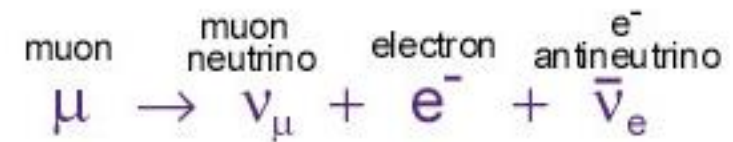
- Spin: belső impulzus-momentum
- Analógia:
Föld forgása a tengelye körül → spin
Föld keringése a Nap körül → pályamomentum
- Elemi részecskék esetében a spin nem köthető forgáshoz, hanem egy belső tulajdonság!
- Kvantum-rendszerekben az impulzusmomentum kvantált, egész (0,1,2...) és fél-egész (1/2,3/2..) értékeket vehet fel
- A lehetséges értékel száma $2s+1$
- Fermionok: fél-egész spinű részecskék az elektron, a proton, a neutron 1/2-spinű
- Bozonok: egész spinű részecskék pl. a foton, a pion 1-spinű
- Alapvető különbség a viselkedésük, a fermionok kizárhatók egymást (elektronhéjak), a bozonok nem, sőt, bizonyos esetekben kedvező azonos állapotban lenniük



Leptonok

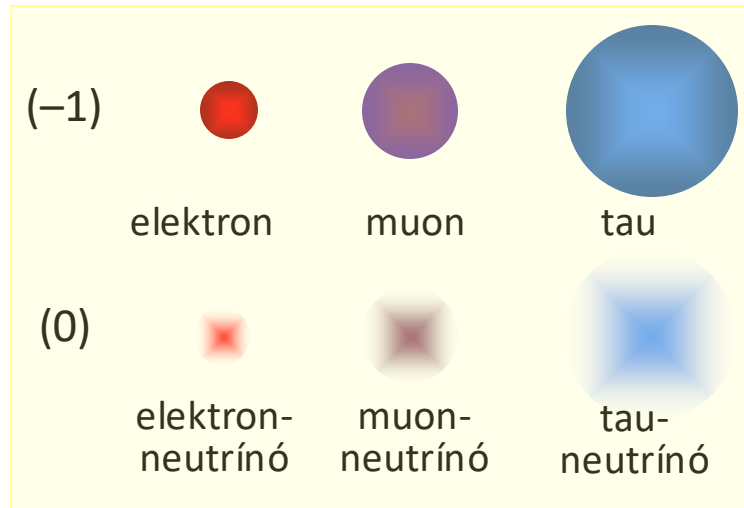


- Elektromosan töltött leptonok: a negatív töltésű elektron és nehezebb társai
- A nehéz töltött leptonok elbomlanak, például

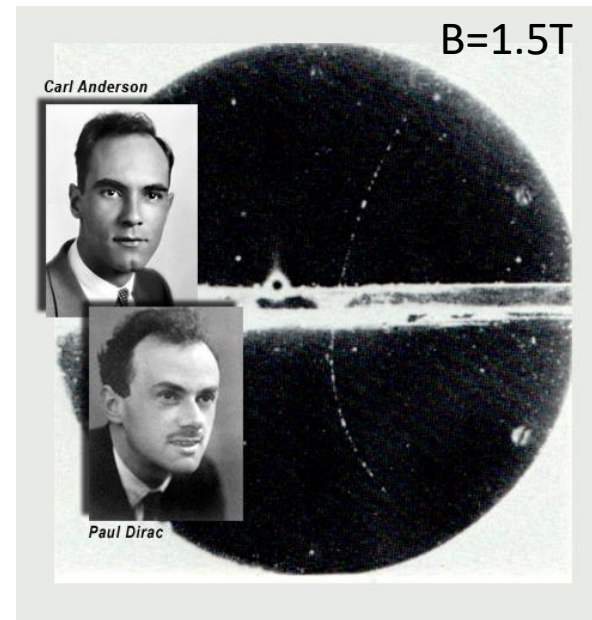
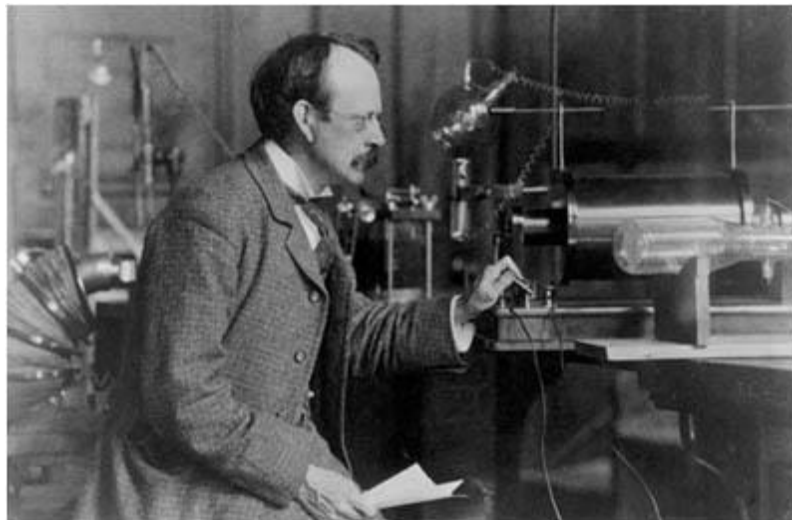


- Semleges neutrínók: nagyon könnyűek (sokáig 0-tömegűnek tartották őket) és nehezen észlelhetők
- A neutrínók nagyon gyengén hatnak kölcsön, jelenlétükre fizikai folyamatokban általában a hiányzó energia és impulzus utal (←energia és impulzus megmaradás!)

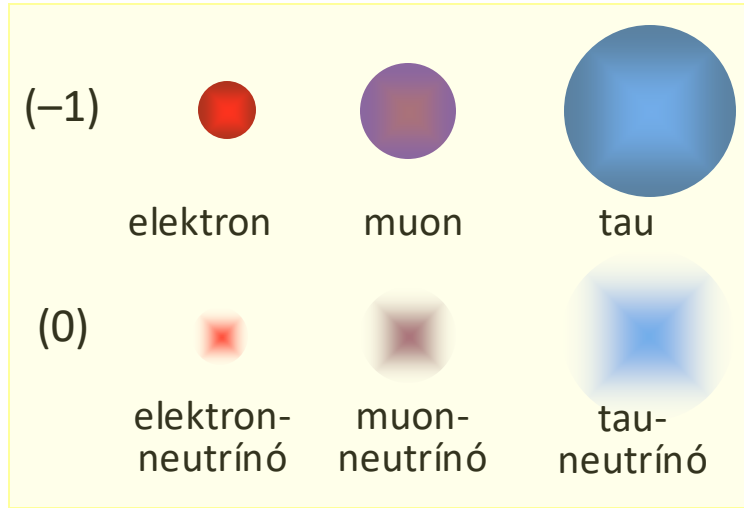
Leptonok



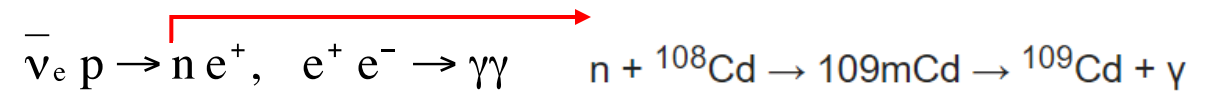
- 1897, J.J. Thomson, katódsugárzás vizsgálata: elektron
- Carl Anderson, kozmikus sugarak vizsgálata ködkamrával
 - 1932, pozitron, az elektron anti-részecske társa
 - 1936, muon (eleinte “ μ -mezon”, azt hitték, hogy az erős kölcsönhatás akkoriban hitt közvetítő részecskéjét találta meg)
 - 1945 B-29-esekre épít detektort



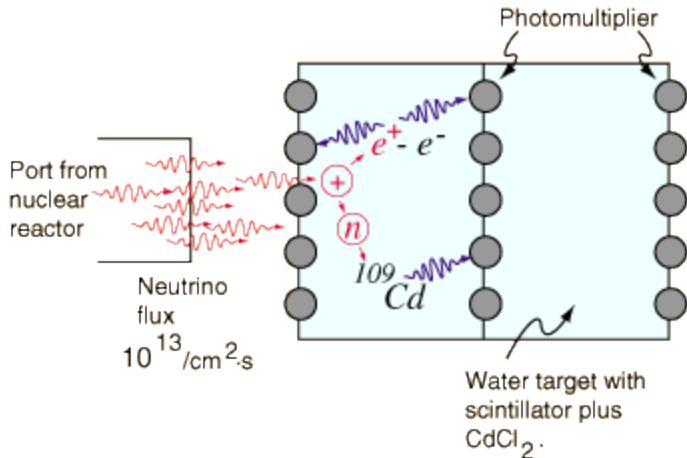
Leptonok



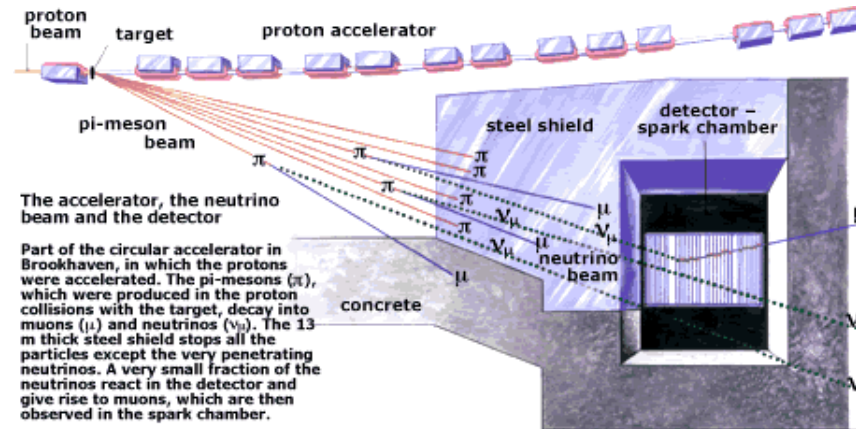
- 1930, Wolfgang Pauli, β -bomlás magyarázata, a neutrínó hipotézis
- 1956, C. Cowan & F. Reines, reaktor anti-neutrínó kimutatása vízzel teli detektorral (neutron (reaktorból) befogás + pozitron megsemmisülés)



- 1962, L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger, Brookhaven AGS neutrínó nyaláb: müon neutrínó



Delayed coincident detection of γ from ${}^{109}\text{Cd}$ with pair of γ 's from $e^+ e^-$ annihilation.



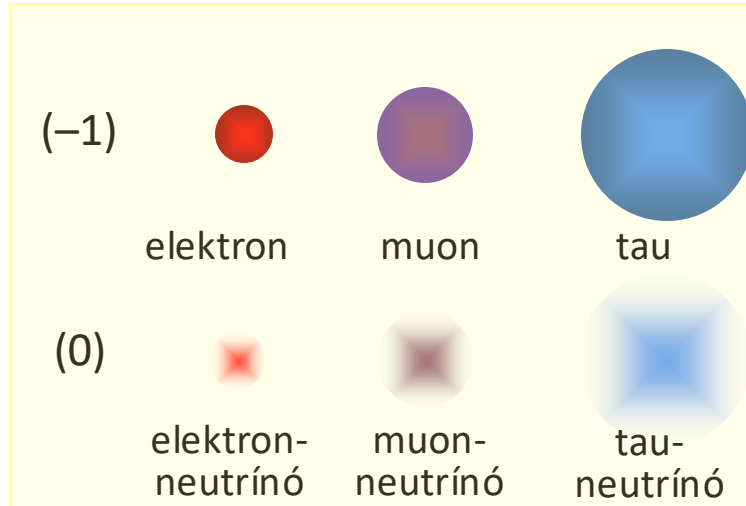
The accelerator, the neutrino beam and the detector

Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in Scientific American, March 1963.



Leptonok



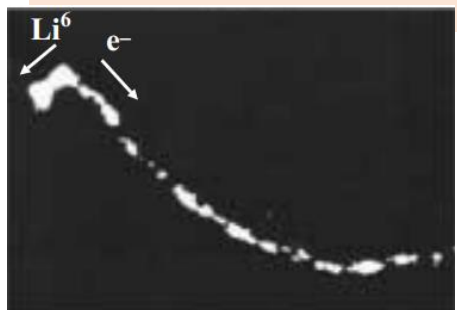
Magyar vonatkozás:

1957, Szalay Sándor és Csikai Gyula:

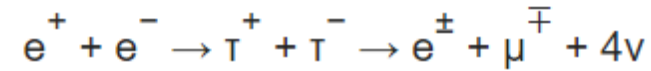
Anti-neutrínó észlelés ${}^6\text{He}$ β -bomlásában

[http://epa.oszk.hu/00300/00342/00185/pdf/Fi](http://epa.oszk.hu/00300/00342/00185/pdf/FizSzem_EPA00342_2005_10_356-361.pdf)

[zSzem_EPA00342_2005_10_356-361.pdf](http://epa.oszk.hu/00300/00342/00185/pdf/FizSzem_EPA00342_2005_10_356-361.pdf)

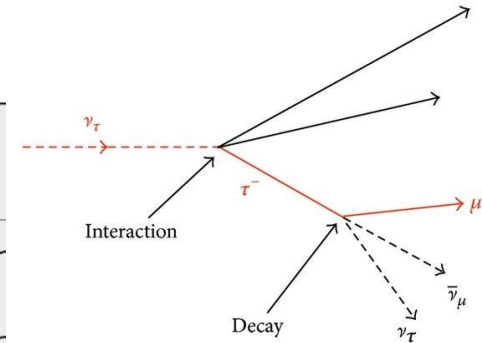
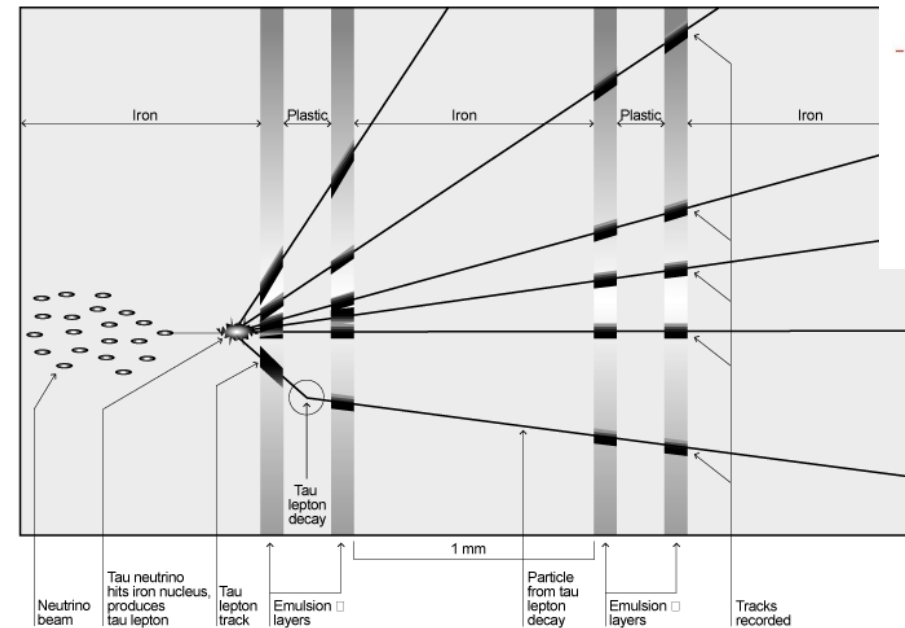


- 1974-77, M.L. Perl et al. (SLAC-LBL), SPEAR e^+e^- ütköztetőnél $e^+e^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp + E_{\text{hiányzó}}$ események kizárásos alapon: tau



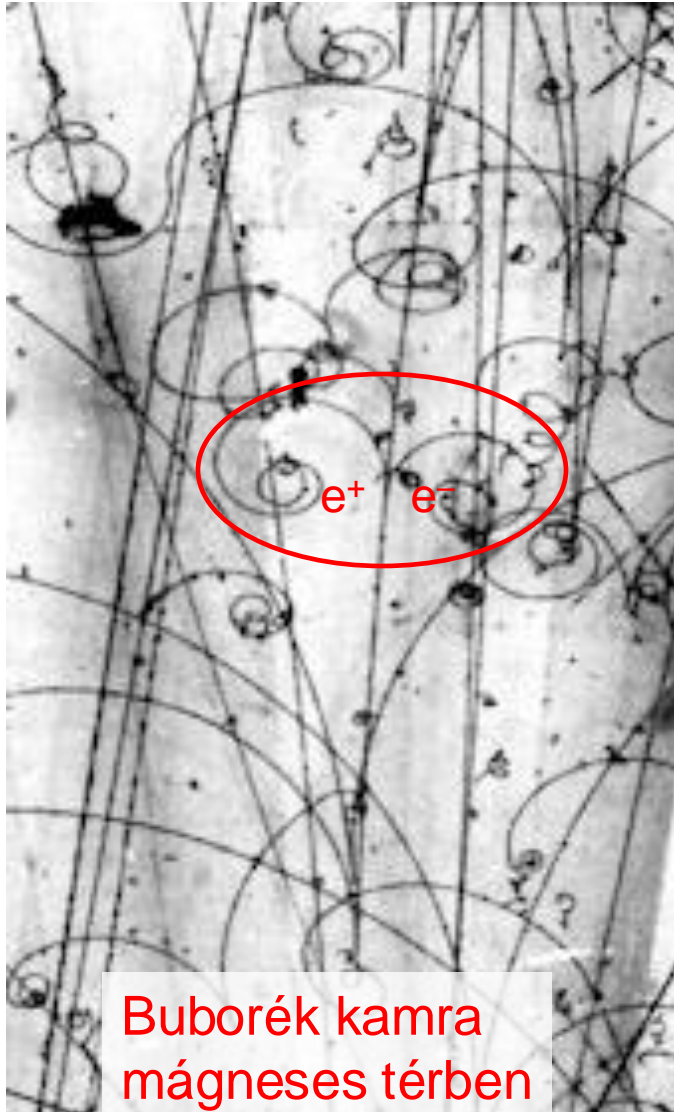
- 2000, DONUT kollaboráció (FNAL): tau neutrínó

Detecting a Tau Neutrino

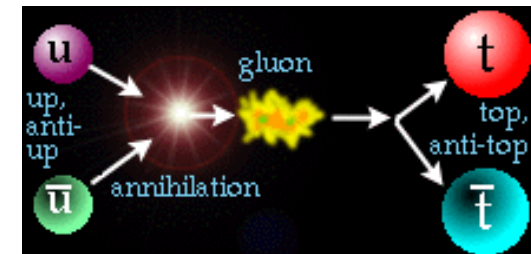


Of one million million tau neutrinos crossing the DONUT detector, scientists expect about one to interact with an iron nucleus.

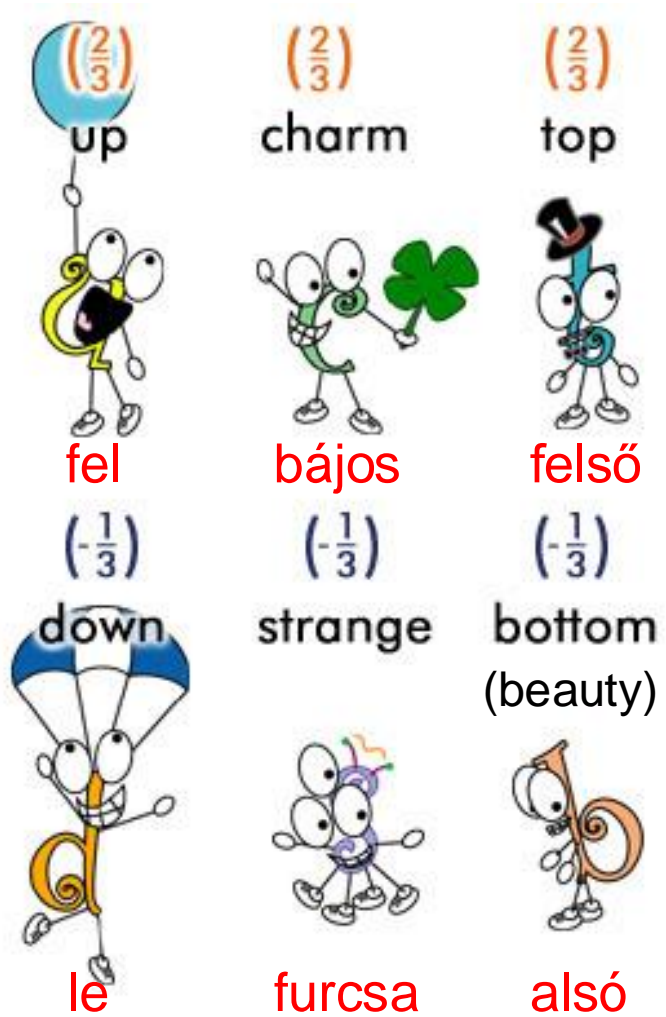
Anyag és anti-anyag



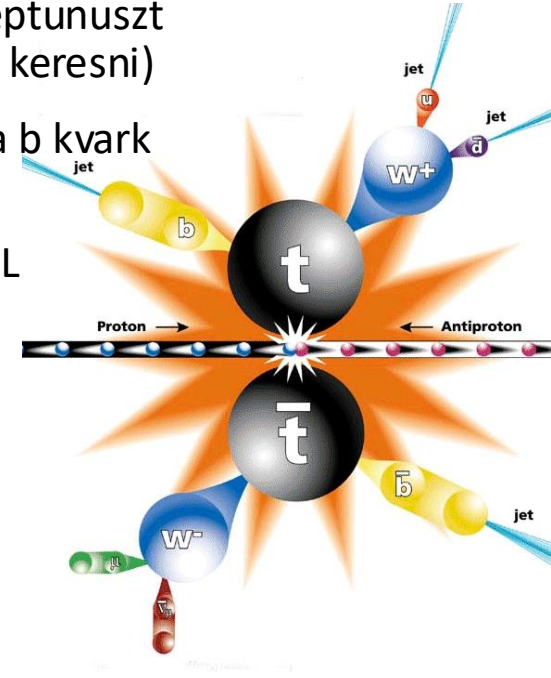
- Dirac-egyenlet negatív energiájú megoldása (1928)
- Minden részecskének van egy anti-részecske párja, amely mindenben megegyezik vele csak a töltése ellentétes:
proton (+) anti-proton (-)
elektron (-) pozitron (+)
- Gravitáció azonosan hat részecskékre és anti-részecskékre, mivel tömegük azonos
- A természetben β -bomlásban és kozmikus sugarak hatására a föld légkörében is keletkeznek
- Pozitron felfedezése kozmikus sugarak vizsgálatával (C. Anderson, 1932)
- Ha egy részecske és egy anti-részecske találkozik, energia felszabadulása közben megsemmisülnek
- Az univerzum születésekor azonos számban keletkeztek részecskék és anti-részecskék.



Kvarkok

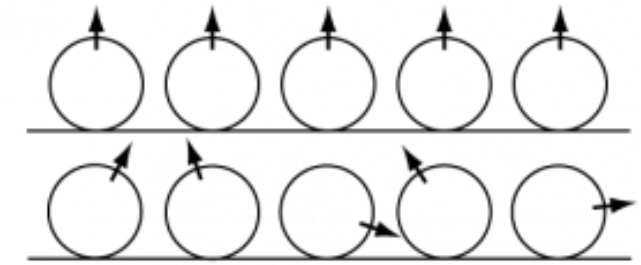
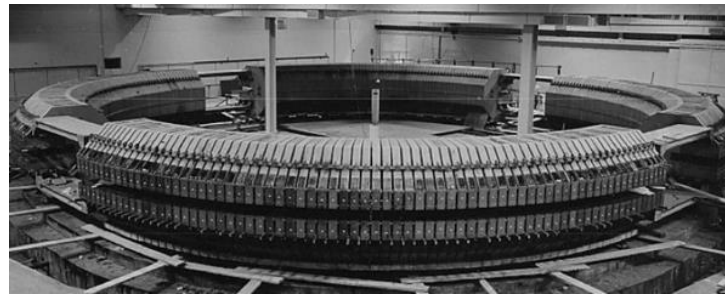


- 1964: M. Gell-Mann és G. Zweig felismeri, hogy a rengeteg részecske-ütköztetésben megfigyelt új részecske, megmagyarázható csupán három elemi alkotórész az u, d és s kvarkok létevel
- 1970: S. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani megjósolja a c kvark létezését, ami megmagyarázza a K_0 bomlásának a problémáját (mint amikor a Neptunusz az Uránusz pályájának a zavaraiól kezdték el keresni)
- 1973: M. Kobayashi, T. Maskawa megjósolja a b kvark létezését
- 1974: c kvark egyidejű felfedezése az USA BNL (S. Ting et al.) és SLAC (B. Richter et al.) laboratóriumaiban
- 1977: b kvark felfedezése a FNAL-ban (USA)
- 1995: t kvark felfedezése a FNAL-ban



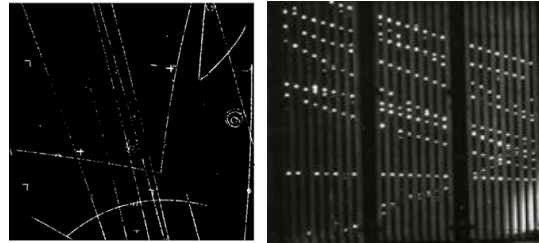
Szünet

Mi volt eddig?



$$L \equiv T - V. \quad L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}kx^2.$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x} \quad m\ddot{x} = -kx$$

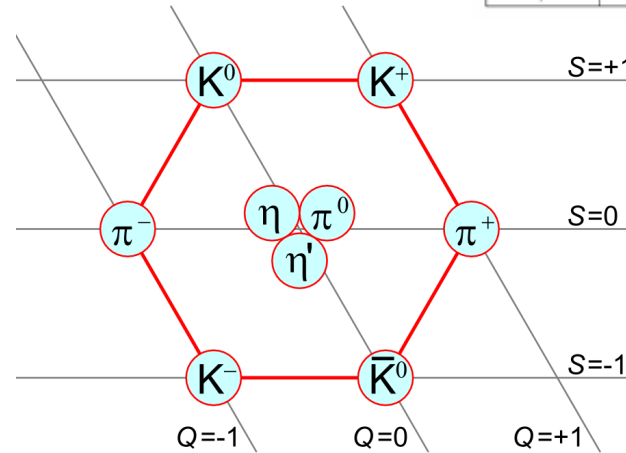
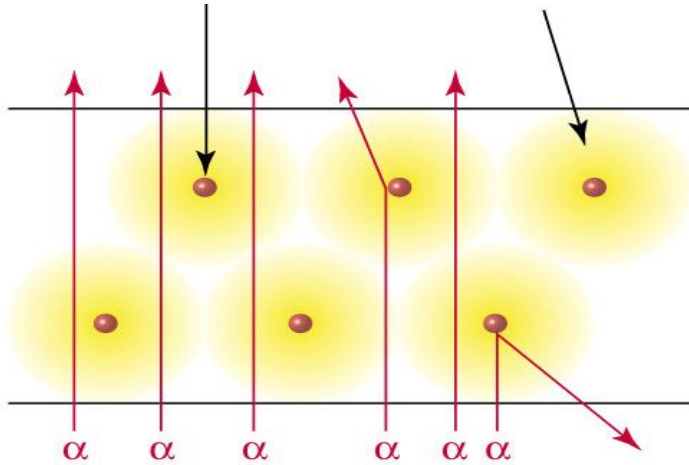


Mesons	$\langle \text{Mass} \rangle$	J^{PC}	I	S
π^-, π^0, π^+	138.0	0^{-+}	1	0
K^0, K^+	495.7	0^{-}	1/2	+1
K^-, \bar{K}^0				-1
η	547.3	0^{-+}	0	0
ρ^-, ρ^0, ρ^+	770.0	1^{--}	1	0
ω	781.9	1^{--}	0	0
K^{*0}, K^{*+}	893.7	1^{-}	1/2	+1
K^{*-}, \bar{K}^{*0}				-1
η'	957.8	0^{-+}	0	0
ϕ	1019.5	1^{--}	0	0

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}(\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi$$

U(1) \rightarrow EM, foton

idő-eltolás \rightarrow energia megmaradás



Mass: eV/c ²	Spin	Name	strong nuclear force	electromagnetic force	weak nuclear force
2.3 M	2/3	u up			
1.27 G	2/3	c charm			
173.1 G	2/3	t top			
4.8 M	-1/3	d down			
95 M	-1/3	s strange			
4.2 G	-1/3	b bottom			
0.511 M	-1/2	e electron			
105.7 M	-1/2	μ muon			
1.78 G	-1/2	τ tau			
<2.2	0	ν_e e neutrino			
0.17 M	1/2	ν_μ μ neutrino			
<15.5 M	1/2	ν_τ τ neutrino			
80.4 G	+1	W W boson			
91.2 G	0	Z Z boson			
126 G	0	H higgs			

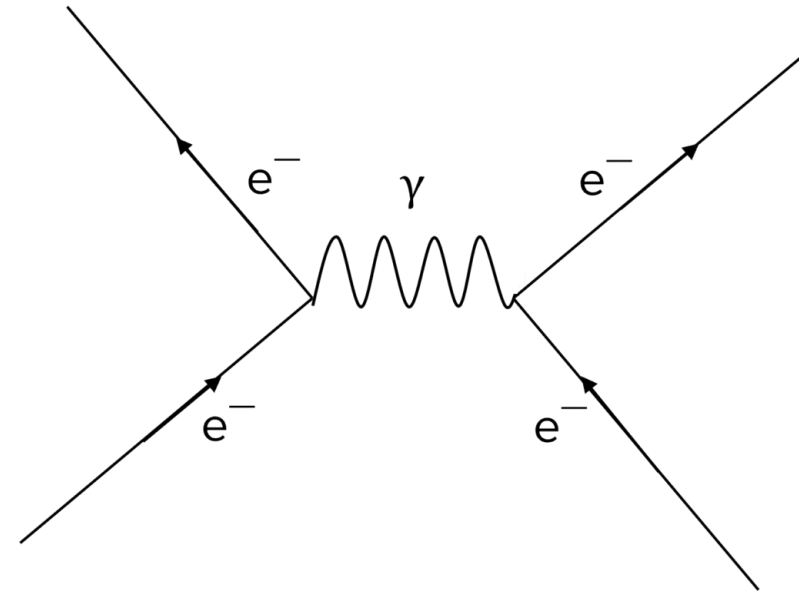
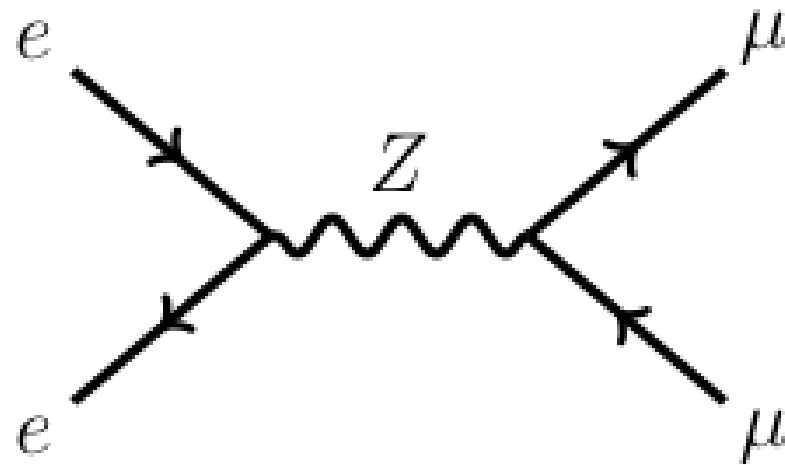
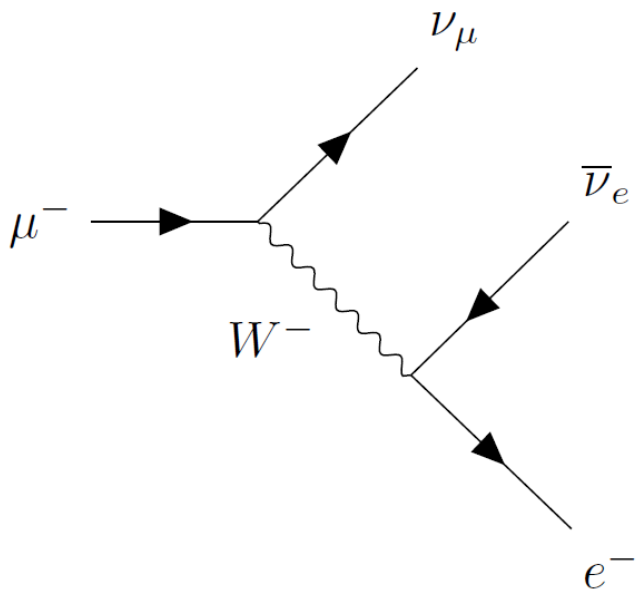
Hydrogen Wave Function

Probability density plots.

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]}} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) \cdot Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

SU(2) x U(1) szimmetria

Az U(1) eszempufftatáshoz hasonlóan feltételezhetünk bonyolultabb szimmetriákat, amik a W, Z mértékbozonok bevezetésével járnak. A mérések alapján azt találták, hogy nincs külön elektromágneses és gyenge kölcsönhatás, hanem egy SU(2)xU(1) szimmetria van mögöttük, ez az elektrogyenge kölcsönhatás.



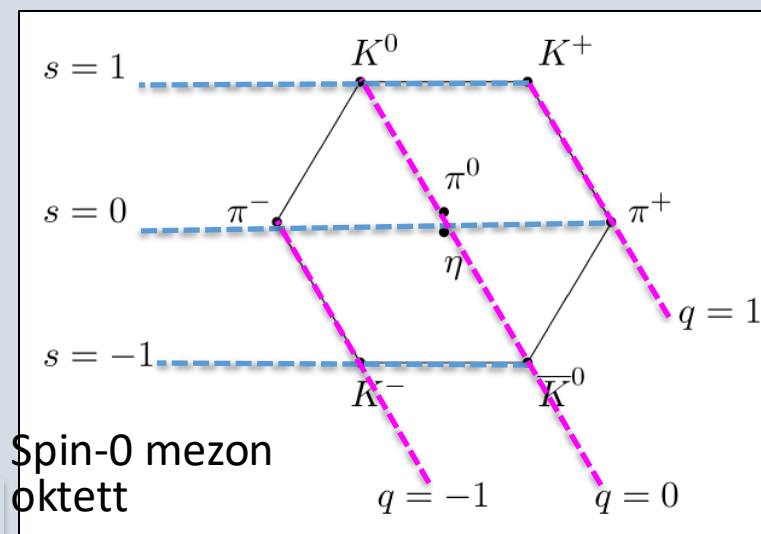
A kvarkok színe

Problémák a kvark modellel

- $\Delta^{++} = (u\uparrow u\uparrow u\uparrow)$
3 azonos fermion, mi van a Pauli-kizárással?
- Mi tartja össze a hadronokat?
- Miért csak (qq) és (qqq) hadronok vannak?
- Miért nincs szabad kvark?

Mezonok: kvark – antikvark pár

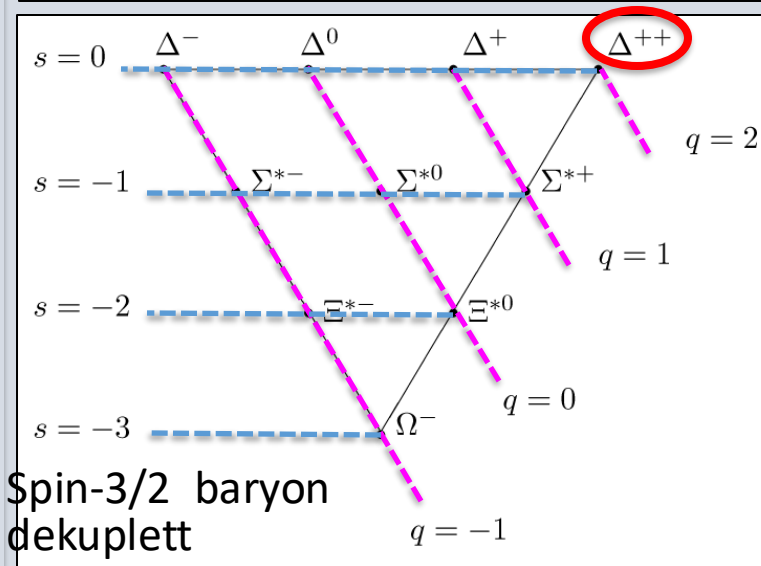
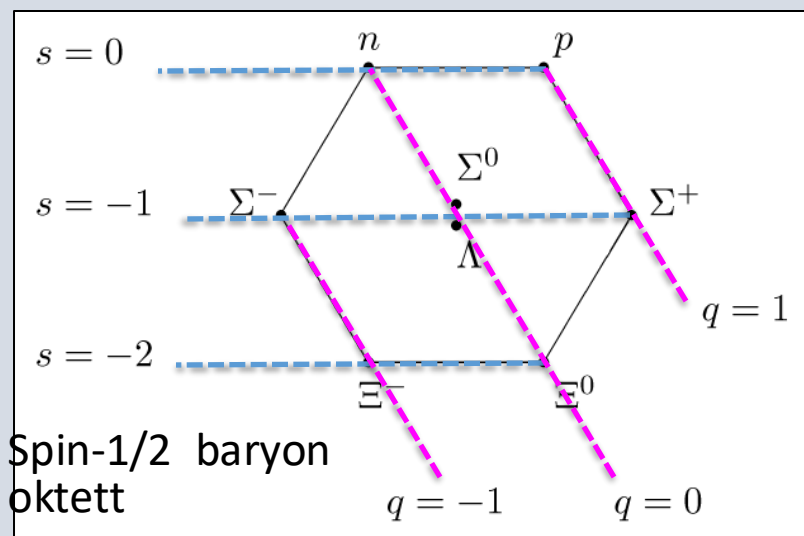
Barionok: három-kvark állapot



A HADRONOK RENDSZEREZÉSE

q:
elektromos
töltés

s:
strange-
kvark szám



SU(3)xSU(2)xU(1)

A kvarkok színe

Problémák a kvark modellel

- $\Delta^{++} = (u\uparrow u\uparrow u\uparrow)$
3 azonos fermion, mi van a Pauli-kizárással?
- Mi tartja össze a hadronokat?
- Miért csak (qq) és (qqq) hadronok vannak?
- Miért nincs szabad kvark?

Új kvantumszám, a "szín" bevezetése: **Red, Green, Blue** \Rightarrow szín-töltés
(kvantum szín dinamika, QCD [quantum color dynamics])

Δ^{++} kvarkjai különböző (színű) kvantumállapotban vannak
A kvarkok között erős szín-szín vonzás van (a szín az erős kölcsönhatás töltése)
Csak színtelen állapotok szabadok (kvarkbezárás)

Analógia a színlátással: 3 erős kölcsönhatás állapot \sim 3 alapszín
(anti-szín \sim kiegészítő szín, színtelen állapot \sim fehér)

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = U(x)\psi(x) = e^{i\frac{\alpha_k(x)}{2}\lambda_k} \psi(x)$$

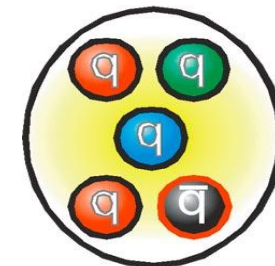
$$\begin{matrix} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_1} & \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_2} & \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_3} & \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_4} \\ \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_5} & \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_6} & \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}}_{\lambda_7} & \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}}_{\lambda_8} \end{matrix}$$



Normal baryon



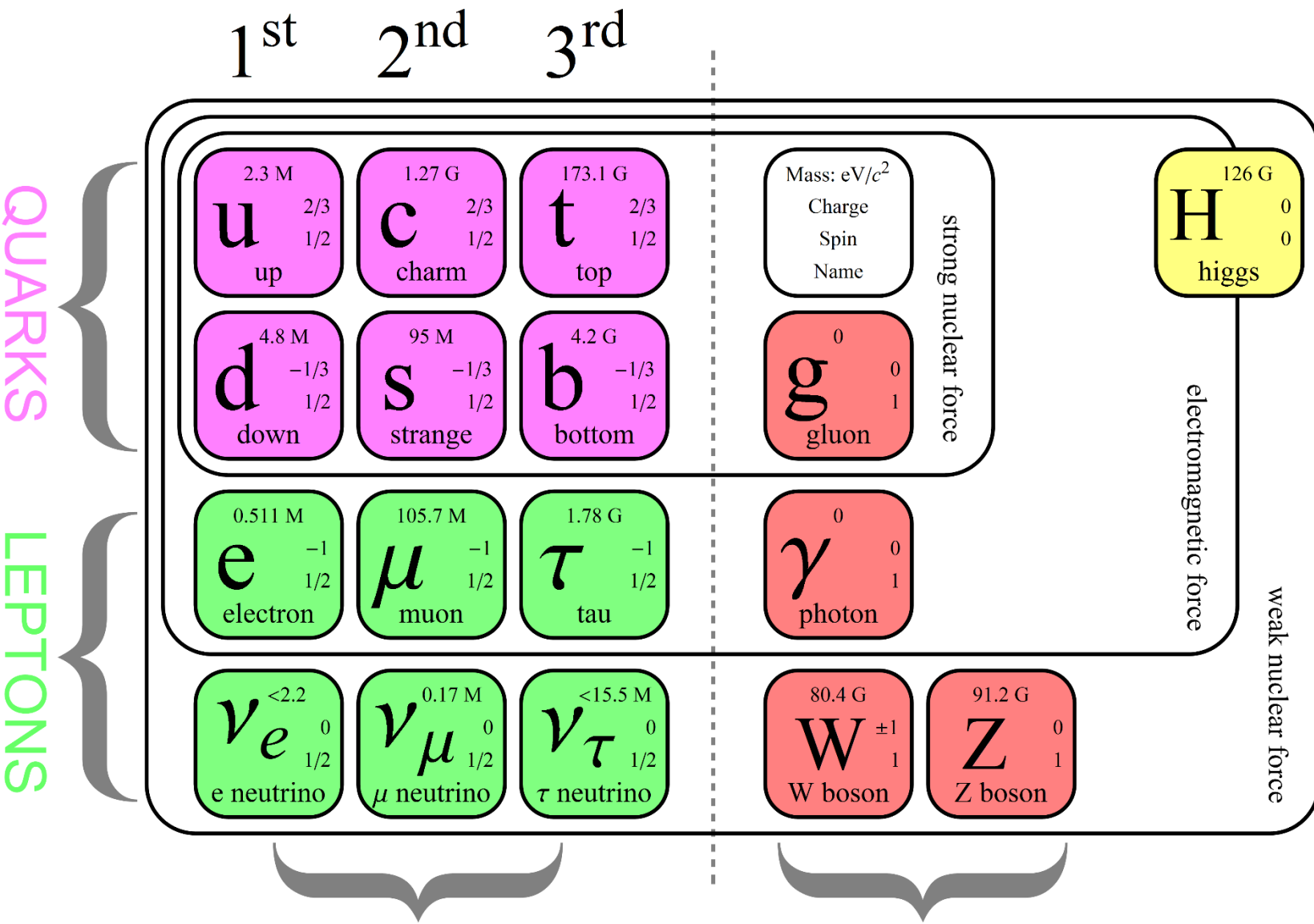
Normal meson



Pentaquark



Tetraquark



FERMIONS

Bevezetés a részecskefizikába HTP2022
GAUGE BOSONS

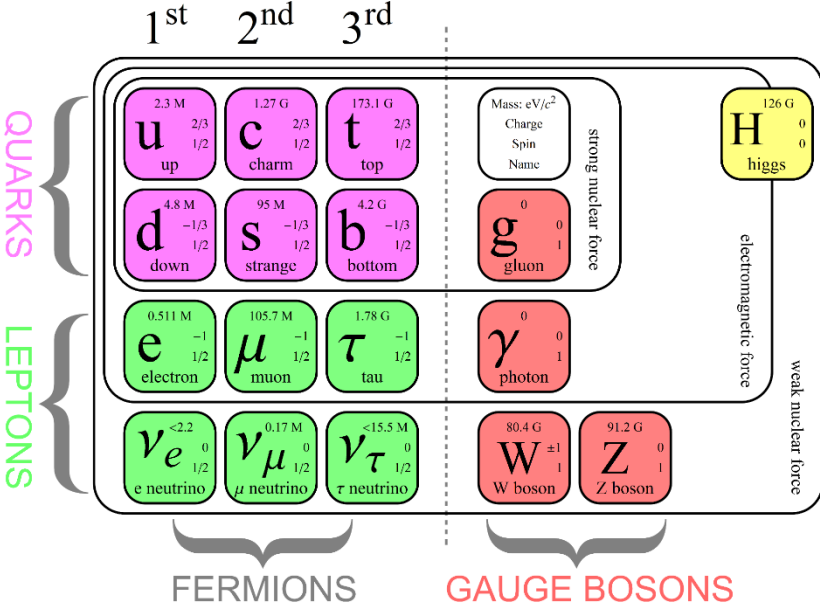
$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi$$

Kinetikus tag

$$-e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu$$

Tömegtag

$$-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$$



Kölcsönhatás a mértékbozonnal **itt a foton**

Nem azt mondjuk, hogy itt ekkora az elektromos térerősség, a kölcsönhatást fotonok cseréjével adom meg.

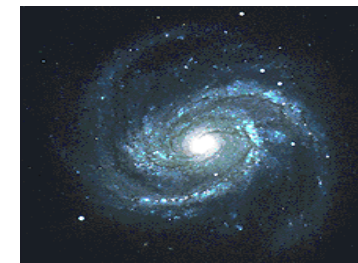
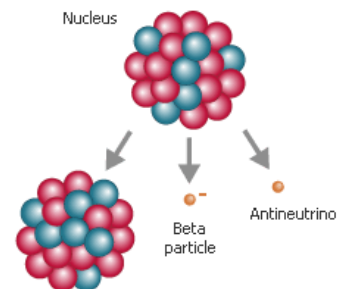
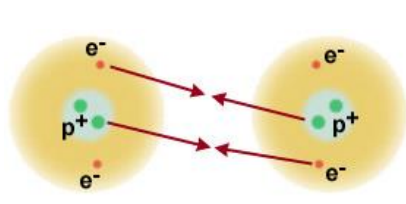
A kölcsönhatásnak van **forrása**, itt ez az elektromos töltés.

Mértéktér kinetikus tagja

Elemi kölcsönhatások, erők

	Elektromágneses γ	Erős g	Gyenge W,Z	Gravitációs (Graviton?)
<i>Forrás</i>	<i>Elektromos töltés</i>	<i>szín</i>	<i>Gyenge izospin</i>	<i>tömeg</i>
<i>Példák</i>	<i>Atomok, molekulák Optikai és elektromos berendezések Telekommunikáció</i>	<i>Nukleonok (és más hadronok) Magfúzió a csillagokban</i>	<i>Neutron bomlás $n \rightarrow p^+ e^- \nu_e$ Radioaktív β-bomlások Energiatermelés a csillagokban</i>	<i>Eső tárgyak Égitestek, galaxisok, fekete lyukak</i>
<i>Potenciál</i>	$\sim 1/r$	$-a/r + b r$	$\sim e^{-m_V r} / r$	$\sim 1/r$
<i>Hatótávolság</i>	∞ ($F \sim 1/r^2$)	Rövid ($1 \text{ fm} \sim 1/m_\pi$)	Rövid ($< 1 \text{ fm}$)	∞ ($F \sim 1/r^2$)
<i>Élettartam</i>	$10^{-20} - 10^{-16} \text{ s}$ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	10^{-23} s $\Delta \rightarrow p\pi$	$> 10^{-12} \text{ s}$ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	

1 fm = 10^{-15} m
 $R_{\text{proton}} = 0.8 \text{ fm}$



AZ ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK Standard Modellje

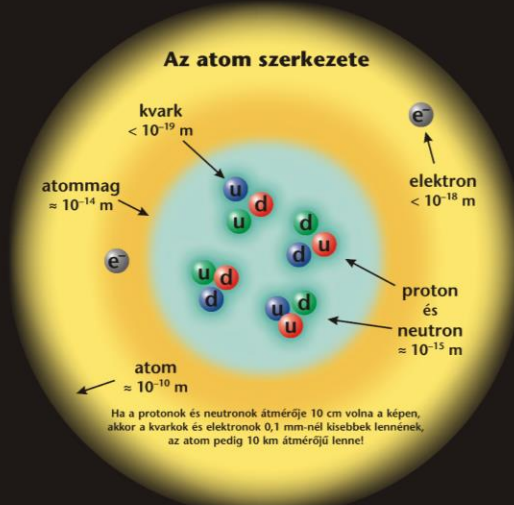
Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legfontosabb ismereteinket összegzi a Standard Modell, amely az erős és egyesített elektromyenge kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard Modellnek.

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

kvarkok (spin = 1/2)			leptonok (spin = 1/2)		
jel/iz	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	jel/iz	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.



Ha a protonok és neutronok átmérője 10 cm volna a képen, akkor a kvarkok és elektronok 0,1 mm-nél kisebbek lennének, az atom pedig 10 km átmérőjű lenne!

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

erős – szín (spin = 1)			elektromyenge (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 ⁻ W-bozon	80,39	-1
			W ⁺ W-bozon	80,39	1
			Z ⁰ Z-null bozon	91,187	0

Színültetés: a kvarkok és gluonok „színültétést” hordoznak. A kvarkok három-, a gluonok nyolcféle „színűek” lehetnek. Kvarkok és gluonok szabadon nem létezhetnek. Őket a színültetések között ható alapvető erős kölcsönhatás kétféleképpen kötheti össze színsemleges hadronokba: vagy három kvark alkothat egy bariont, vagy egy kvark-antikvark-pár alkothat 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 spint ħ egységekben adjuk meg, ahol ħ = h/2π = 6,58 · 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
p̄ anti-proton	ūūđ	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 d s 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 mezéjét, a piros vonalak a kvarkok pályáját mutatják.

A kölcsönhatások tulajdonságai

kölcsönhatás tulajdonság	erős		gyenge (elektromyenge)	elektromágneses (elektromyenge)	gravitációs (nem az SM része)
	alapvető	visszamaradó			
amire hat	színültetés	lásd magyarázat	íz	elektromos töltés	tömeg, energia, lendület
ezek a részecskék 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	10 ⁻¹⁶ m	–	0,8	1	10 ⁻⁴¹
	3·10 ⁻¹⁷ m	–	10 ⁻⁴	1	10 ⁻⁴¹
két proton az atommagban	–	20	10 ⁻⁷	1	10 ⁻³⁶

Bozonikus hadronok

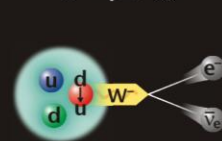
mezonok (q̄q) – több száz ismert mezon van				
jel/név	kvark-össz.	tömeg GeV/c ²	elektr. töltés	spin
π ⁺ pion	uđ	0,140	1	0
K ⁺ kaon	sū	0,494	-1	0
ρ ⁺ ró-mezon	uđ	0,770	1	1
B ⁺ B-null mezon	dđ	5,279	0	0
η _c eta-c mezon	cđ	2,980	0	0

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

Megjelent a **Fizikai Szemle** mellékleteként, tetszőleges méretre nagyítható változata letölthető a <http://fizikaiszemle.hu> honlapról.

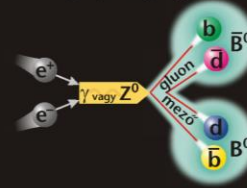
Köszönetünket fejezzük ki a megjelenést támogató **Paksi Atomerőmű Zrt.**-nek.

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$



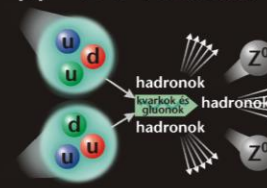
Egy neutron protonra, elektronra és antineutrínóra bomlik egy virtuális W-bozon (gyenge kölcsönhatás) közvetítésével. Ez a béta-bomlás.

$$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$$



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

$$p p \rightarrow Z^0 + \text{hadronok}$$



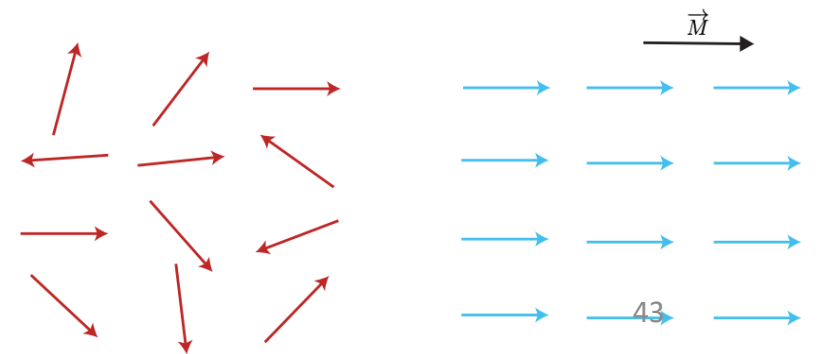
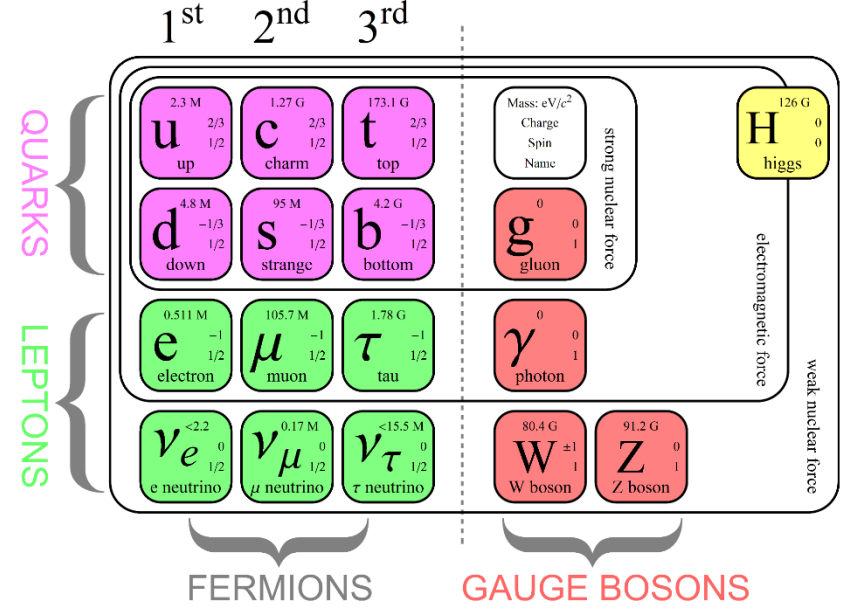
Nagy energiájú, erősen kölcsönható protonok ütközésekor keletkezhetnek hadronok és nehéz részecskék, például Z⁰-bozonok.

Miért kell a Higgs-bozon?

1995: t kvark felfedezése a FNAL-ban
 2000, DONUT kollaboráció (FNAL): tau neutrino
 Mindent felfedeztek, a kölcsönhatás szimmetriákra visszavezetve, kész vagyunk.
 DE: A lokális szimmetriák nem engedik, hogy tömegük legyen az elemi részecskéknek, a kvarkoknak és leptonoknak, valamint a kölcsönhatásaikat közvetítő mértékbozonoknak, az ugyanis **sértené** a kölcsönhatást létrehozó szimmetriát.
 EM és erős kölcsönhatás rendben volna, hisz a foton és a gluon tömege nulla.
 A kis tömegű kvarkok, leptonok se okoztak gyakorlati problémát, de az, hogy a W, Z tömeg nélküli legyen!

Bizonyos számításoknál már felmerült, hogy kell (?) egy skalár (0 spinű) részecske.

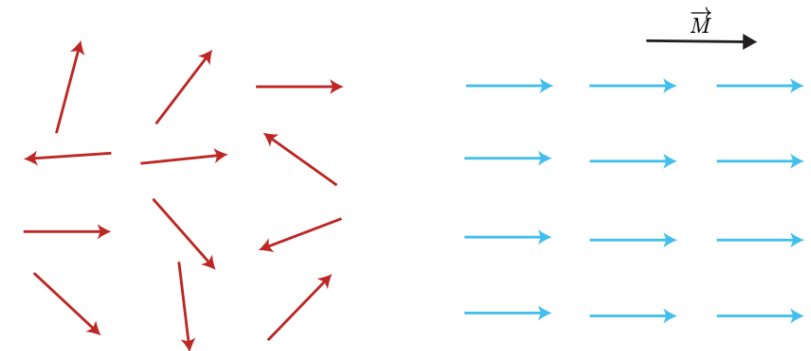
Szimmetria sérülését is megfigyelhetjük
 pl. mágneses domének beállása esetén → spontán szimmetriasértés
 Az egyenleteket szimmetrikusak maradnak, csak az alapállapot nem.



Nincs spontán szimmetriasértés mexikói kalap nélkül

Analógia: Emberke a sombrérón

- A sombréro csúcsán ülő emberke szemével a világ teljesen kör (forgás) szimmetrikus
- A természet törvényei is szimmetrikusak (példánkban a gravitáció számára nincs kitüntetett irány)
- A csúcsról azonban bármilyen kicsi fluktuáció (remegés) kibillentheti emberkénket, aki egy véletlen irányban csúszik le a kalap karimájára
- Helyzete a karimán immár sérti a rendszer szimmetriáját, noha a természet törvényei szimmetrikusak maradnak (nincs kitüntetett irány)
- A szimmetriából csak annyi marad, hogy a potenciálv részecske erőhatás nélkül mozoghat.



Gyakorlatban mit jelent

Feltételezzük, hogy a világunk üres terét kitölti egy mező, amely elrontja a vákuum szimmetriáit, ennek a potenciálja

$$\mathcal{L} = -F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + D^\mu \phi D_\mu \phi^* - \mu^2 \phi \phi^* - \lambda (\phi \phi^*)^2.$$

Felírom a lecsúszott emberke környezetében

Visszahelyettesítve, tömeges mértéktér,

és lesz tömeges komponense a Higgs-mezőnek (v -vel arányos)



$$\phi(x) = (\rho(x) + v)e^{i\xi(x)}$$

Ez még érthető is, a potenciál hozzáadása:

$$L \equiv T - V. \quad L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}kx^2. \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{\partial L}{\partial x} \quad m\ddot{x} = -kx$$

Csak a rugónál volt egy hétköznapi megfoghatóság, ami itt már elveszik.

Még néhány megjegyzés

- A Higgs-mező megjelenése lehetővé teszi, hogy az egyenletekbe tömegtagokat írjunk anélkül, hogy elrontanánk a kölcsönhatások szimmetriáit, ebben az értelemben a Higgs-mező nem hozza létre, csak megengedi a tömegeket.
- A makroszkopikus világunk tömege nem a Higgs-mechanizmusnak köszönhető, hiszen a proton és a neutron tömegében az őket alkotó elemi részecskék, a kvarkok tömegjáruléka igen kicsiny, néhány százaléknyi, a legnagyobb része a kvarkok nukleonon belüli energiájának tulajdonítható.
- Más mezőknek van forrása EM->töltés ... Higgs-mezőnek nincs, pontosabban nincs külső forrása, önmaga a forrás.

Higgs-bozon keresése

Korábbi kísérletek kizártak tartományokat, ahol nem lehet:

A 4 LEP-kísérlet eredményeinek statisztikus összegzése azt mutatta,

hogy a Standard Modell Higgs-bozonjának,

ha egyáltalán létezik, 95% megbízhatóság (konfidencia) mellett 114,4 GeV feletti tömeggel kell rendelkeznie.

Az elméleti fizikusok kiszámolták az egyes csatornák

Valószínűségét:

$H \rightarrow ZZ$

- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$: "Golden channel"
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l\nu\nu$: Nagy tömegre
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2lqq$: Nagy tömegre

$H \rightarrow WW$

- $H \rightarrow WW \rightarrow 2l\nu\nu$: Legérzékenyebb
- $H \rightarrow WW \rightarrow 2lqq$: Leggyakoribb

$H \rightarrow \gamma\gamma$

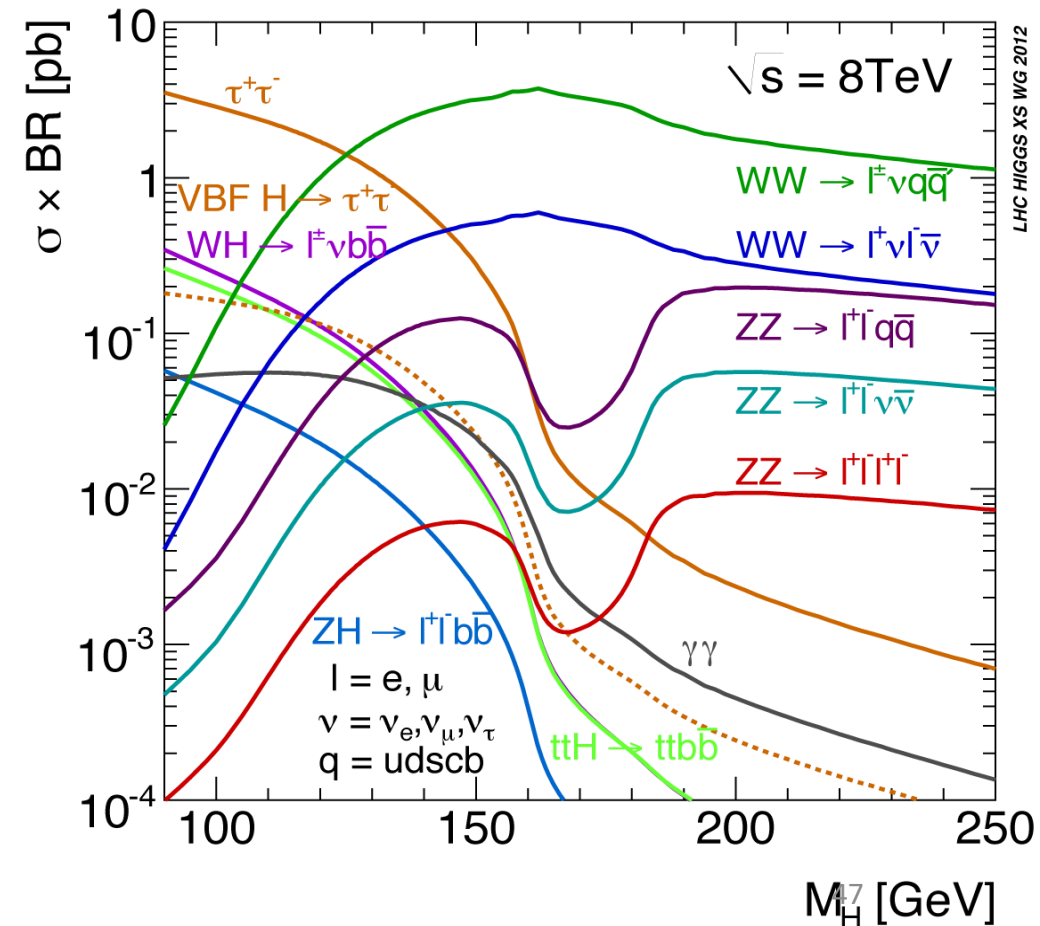
- Ritka, kis tömegre a legjobb

$H \rightarrow \tau\tau$

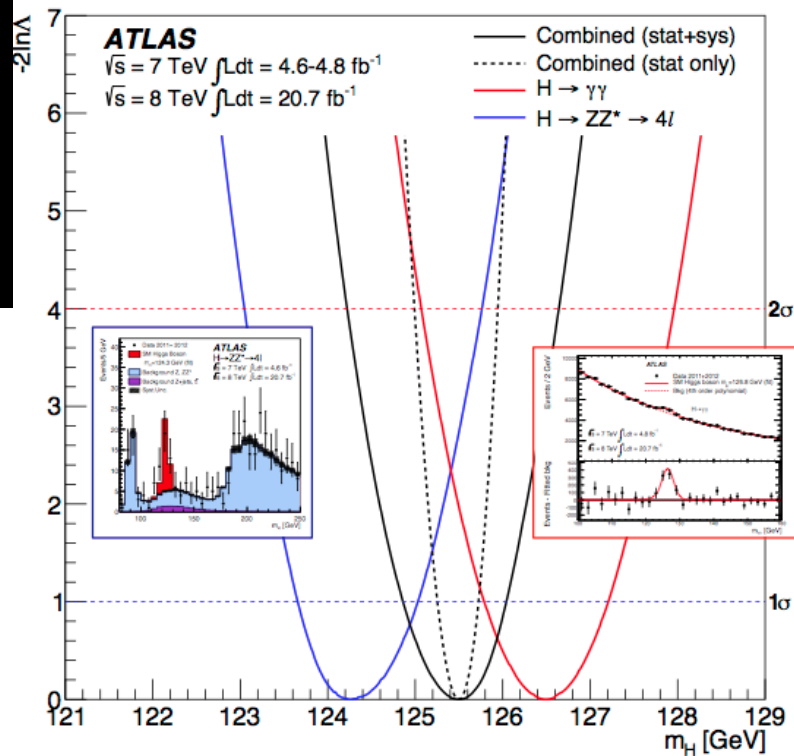
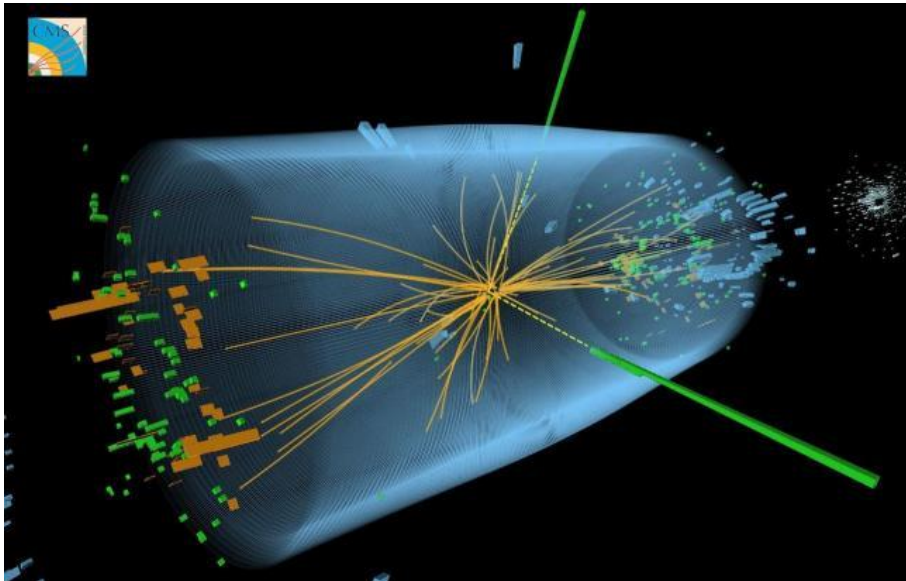
- Ritka, kis tömegre kedvező jel/háttér arány

$H \rightarrow bb$

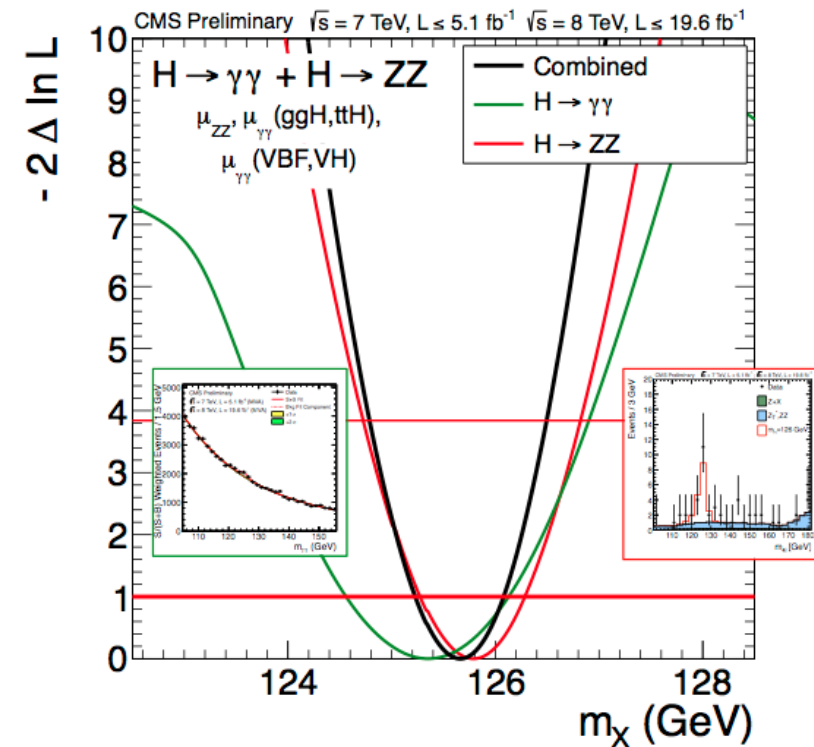
- ttH , ZH , WH , hasznos de nehéz a jelentős háttér miatt



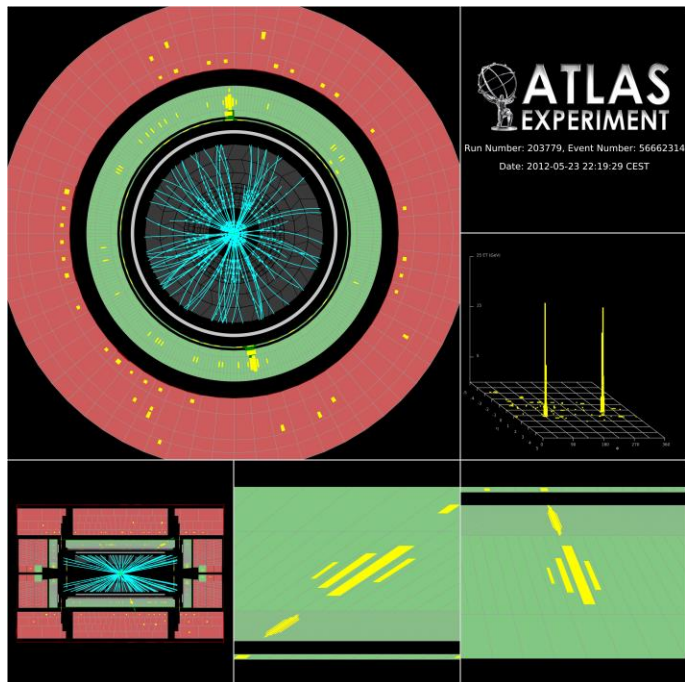
Higgs-bozon felfedezése



ATLAS: $M_H = 125.5 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.6_{\text{sys}} \text{ GeV}$

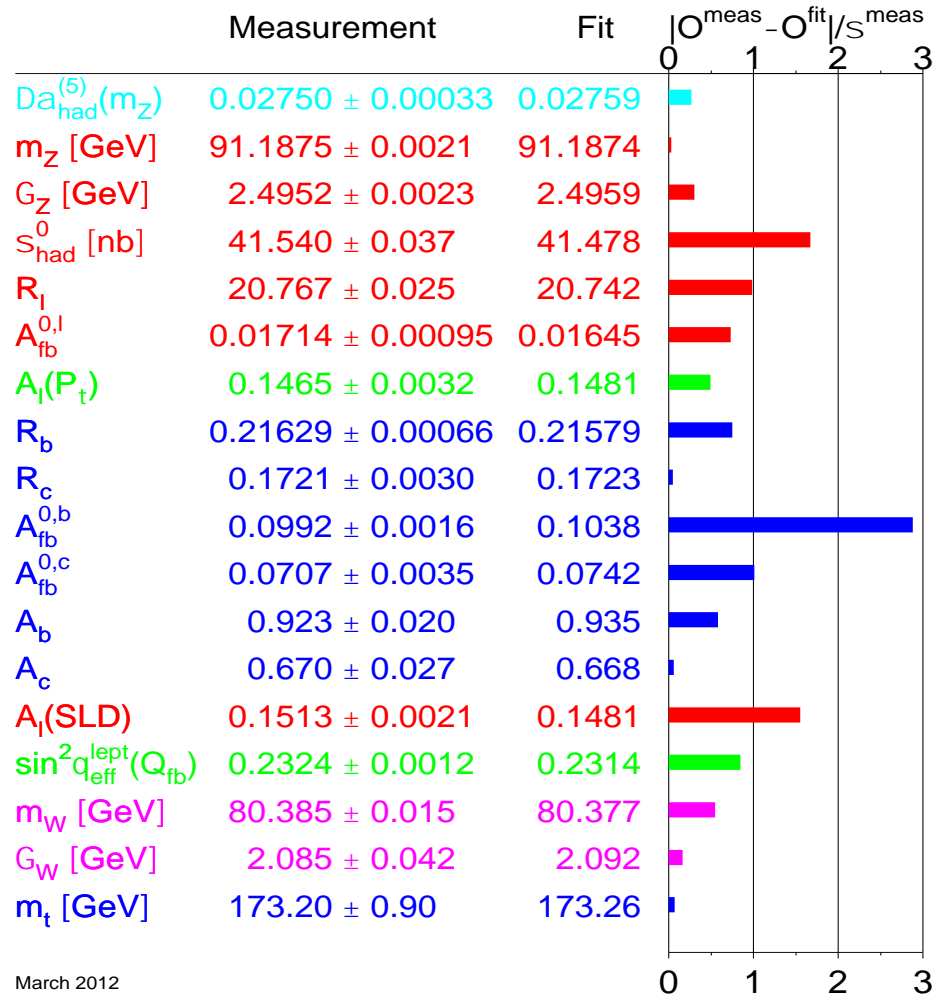


CMS: $M_H = 125.7 \pm 0.3_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}} \text{ GeV}$



A Standard Modell sikere

|mért – elmélet| / mérési pontosság



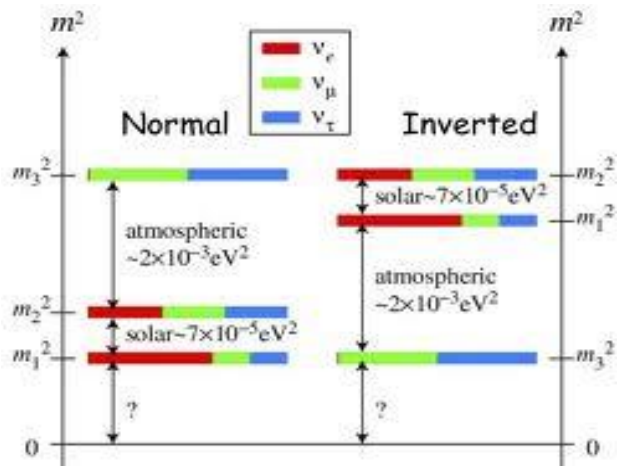
March 2012

- Sok kísérlet (ALEPH, DELPHI, L3, OPAL @ LEP, D0, CDF @ Tevatron, SLD, ...) számos eredményének kombinációja
- Kevés kilógó eredmény
- Legnagyobb különbség jelenleg az $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b}$ előre-hátra aszimmetriája

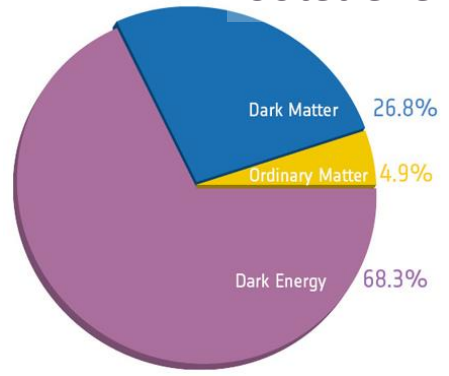
A Standard Modelen túl

A Standard Modell immár teljes a Higgs-bozonnal és még mindig kitűnően működik. Sok nyitott kérdés azonban túl mutat rajta és egy alapvetőbb elméletet igényel!

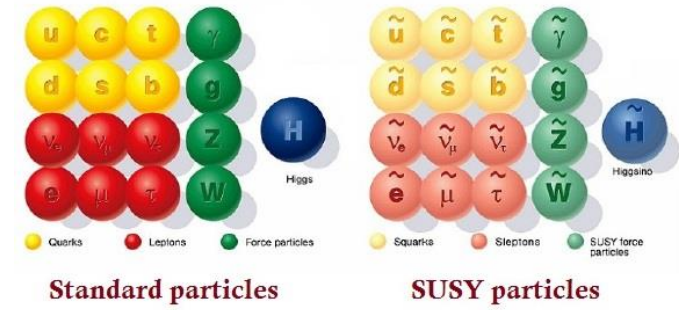
Sötét anyag?
Sötét energia?



Neutrínó tömegek?

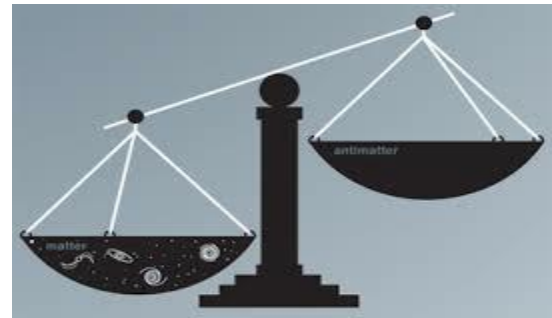


SUPERSYMMETRY

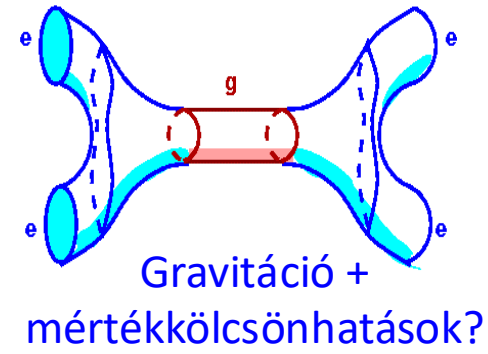
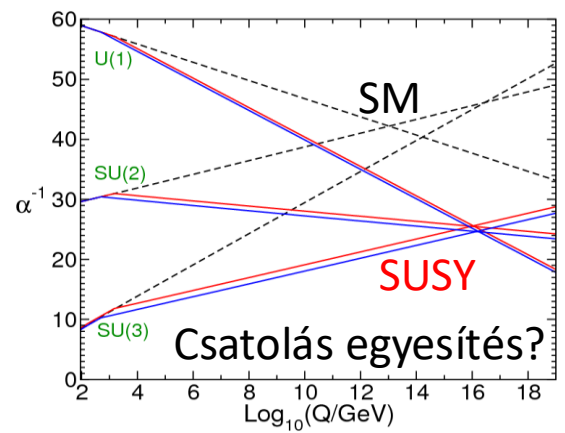


Standard particles

SUSY particles



Anyag – antianyag aszimmetria?



Amit nem magyaráz meg a Standard Modell

- Gravitáció nem illik a másik három kölcsönhatás rendszerébe
- A három kölcsönhatás erőssége növekvő energián konvergál, de nem találkozik egy pontban. Megvalósítható a kölcsönhatások nagy egyesítése?
- Miért van 3 fermion család?
- Miért ilyen a töltéskvantálás: $Q_e = -Q_p$, $Q_d = Q_e/3$, $Q_u = -2Q_e/3$?
- Miért olyan különböző a részecskék tömege?
- Miért olyan kicsi de mégsem nulla a neutrínók tömege?
- Miért alakult ki az anyag - anti-anyag aszimmetria?
- Mi alkotja a világegyetem nagy részét kitevő sötét anyagot?
- Mi a sötét energia?