Trócsányi Zoltán

Az elveszett szimmetria nyomában

- a 2008. évi fizikai Nobel-díj

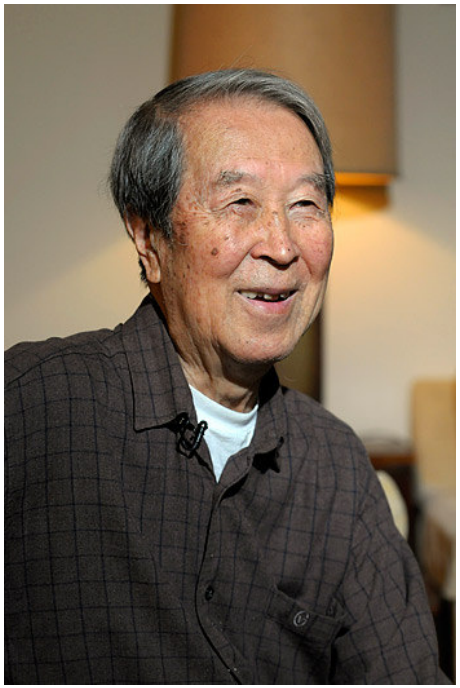
Nobel-díj átadás 2008. december 10.

A Fizikai Nobel-díj érme:

„Inventas vitam juvat excoluisse per artes”

Kik felfedezéseikkel jobbítják a világot

Fizikai Nobel-díj 2008



Joichiro Nambu
(E. Fermi Inst)

Makoto Kobayashi
(KEK, Tsukuba)

Toshihide Masakawa
(Kyoto University)

„a szubatomi fizika spontán szimmet-riasértésének felfedezéséért"

„a sérült szimmetria felfedezésért, mely legalább három kvarkcsalád létezését jósolja"

Vegyítsed enyvvel, vagy kőporban főzd,
Bocsásd rá sáskák falánk hadát,
Fő elv lebegjen szemed előtt
Ne bontsd meg a szimmetriát!

Lewis Caroll

Az előadás anyaga olvasható a
Fizikai Szemle 2008. decemberi számában

Klasszikus építészek szerettek szimmetrikus épületet tervezni

A szimmetrikus arcokat szépnek találjuk

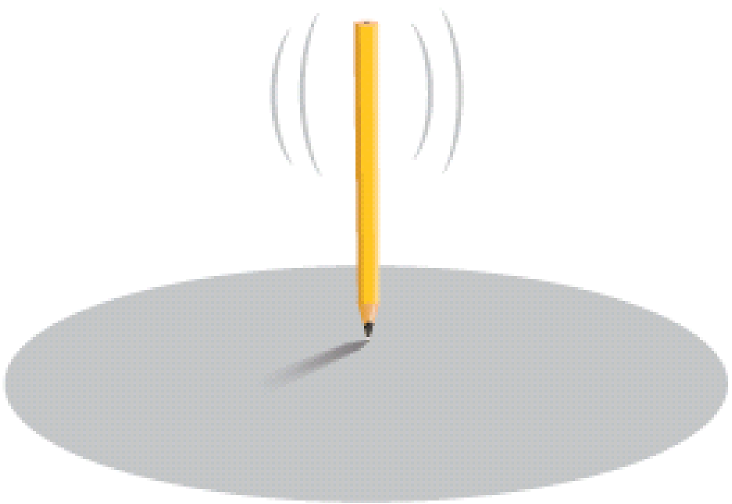
...az aszimmetrikusokat nem

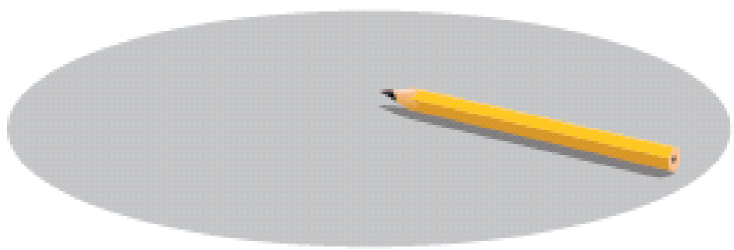
Klasszikus építészek szerettek szimmetrikus épületet tervezni,

… és azt megtörni

Klasszikus építészek szerettek szimmetrikus épületet tervezni,
… és azt megtörni

- talán babonából: a tökéletes szimmetria nem lehet tartós
- Például a hegyén egyensúlyozott ceruza állapota forgásszimmetrikus, de labilis, ha feldől az alapállapot a szimmetriát spontán sérti





Szimmetria a fizikában

- Jelenségek szimmetrikusak
  - például billiárdgolyók ütközésének filmje fordítva is lejátszható:

    szimmetrikus az idő tükrözésével (T) szemben
- $T^2=1$, diszkrét szimmetria
- Léteznek folytonos szimmetriák
- Noether-tétel: Minden folytonos szimmetriához megmaradó mennyiség tartozik

  (energia, lendület, perdület megmaradása a tér-idő transzformációkból)

Szimmetria a részecskefizikában

- Belső szimmetria: fizikai mező transzformációjához kapcsolódó szimmetria
  - például az elektronmező fázisa szabadon választható

    szimmetrikus globális U(1) transzformációval szemben ⟶

    elektromos töltés megmaradó mennyiség
- Hermann Weyl felfedezése: ha a szimmetria lokális (mértékszimmetria), akkor az elméletben megjelenik egy másik fizikai mező, a mértékmező, amely a részecskék közötti kölcsönhatást közvetíti

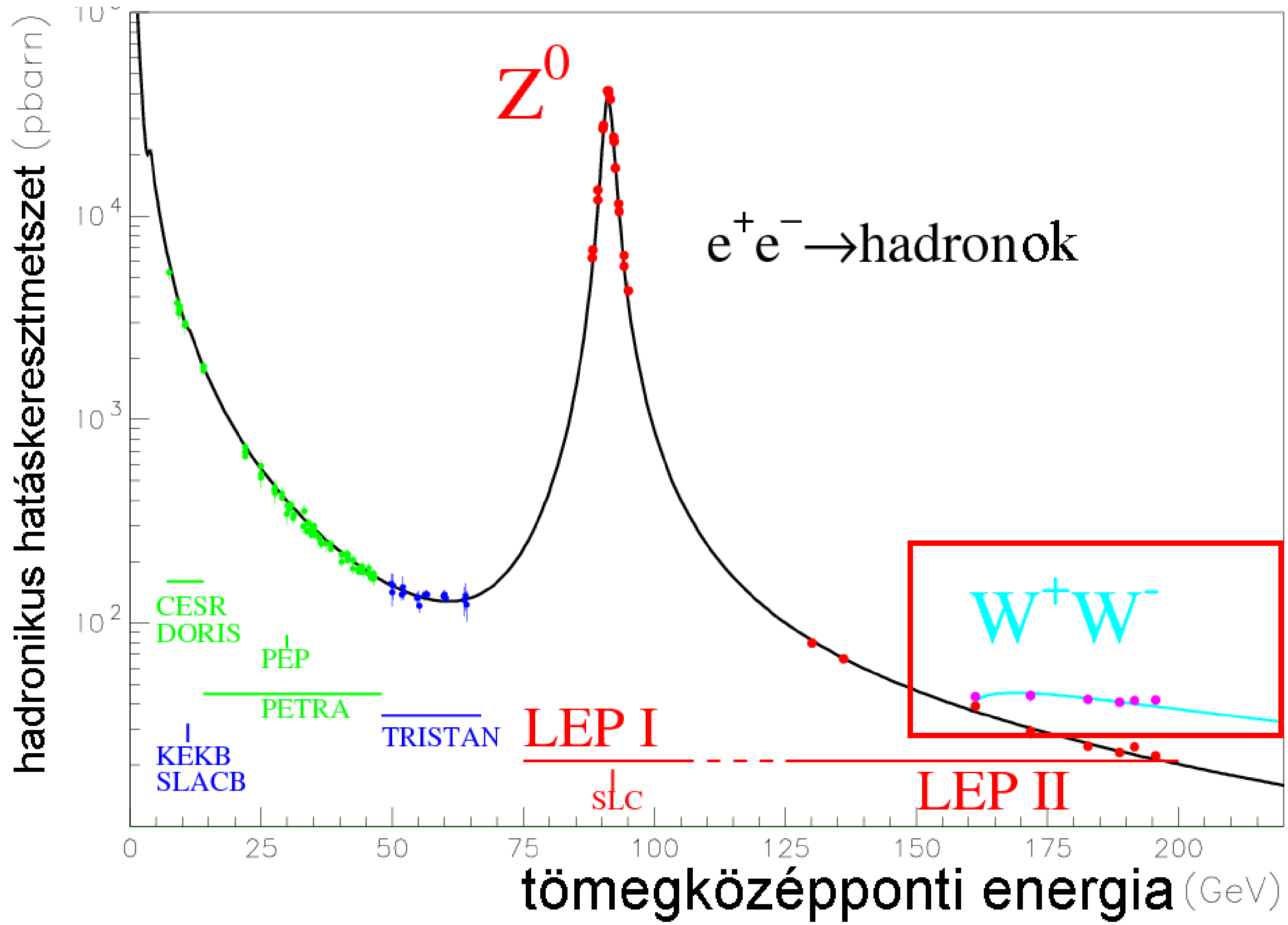
Szimmetria a részecskefizikában

- Mértékszimmetria legszebb/leggazdaságosabb elméletépítési elv
  - Megmagyarázza a kölcsönhatások eredetét
  - Könnyen kvantálható
  - A mértékszimmetriára épülő Standard modell az erős, elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egységes kvantum-mezőelméleti leírása, szimmetriacsoportja

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

  - A SM a részecsekfizikai szóráskísérletekben gyűjtött mérési adatok nagy pontosságú leírását szolgáltatja. $\longrightarrow$ a SM helyes (?)

SM jóslatok és kísérleti eredmények



Az elektrogyenge szimmetria nem tapasztalható

Tömeggel rendelkező részecskéket leíró elmélet nem lehet $SU(2)_L \times U(1)_Y$ szimmetrikus

$$\Updownarrow$$

Az összes fermion, a mértékterek elemi gerjesztései közül három tömeges

Csak az erős és EM kölcsönhatás közvetítőinek nulla a nyugalmi tömege $\Longrightarrow$
A tapasztalt szimmetria $SU(3)_c \times U(1)_{EM}$

A mai részecskefizika legfontosabb nyitott kérdése

- Hogyan marad rejtve az elektrogyenge szimmetria?
- Mi az $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \longrightarrow SU(3)_c \times U(1)_{EM}$ szimmetriasérülés oka?
- Honnan nyerik az **elemi** részecskék tömegüket?

Kiút (?): spontán szimmetriasértés

A természeti törvények szimmetriáját a megfigyelhető jelenségek nem feltétlenül tükrözik:
pl. a kölcsönhatásokat leíró törvények szimmetriáját az alapállapot (vákuum) sérti

(feldőlt ceruza)

A spontán szimmetriasértés nem új keletű a kvantumfizikában

- Ferromágnesség Heisenberg-féle elmélete
- Szupravezetés BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) elmélete

Nem relativisztikus alkalmazások

- A mezőelmélet relativisztikus

Yoichiro Nambu: spontán szimmetriasértés a (relativisztikus) szubatomi fizikában

- Szupravezetés BCS-elmélete alapján
  - $SU(2)_L \times SU(2)_R$ szimmetrikus térelméleti modell a nukleonok közötti kölcsönhatás leírására
  - Megmutatta, hogyan lehet a spontán szimmetriasértést kvantum-mezőeléméletben megfogalmazni
- Az ötlet lett korszakalkotó
- A valószínűnek tartott megvalósulás a Higgs-mechanizmus…

Az LHC célkitűzése a Higgs-bozon kísérleti kimutatása

Az LHC alagút

Diszkrét szimmetriák a részecskefizikában

- Időtükrözés (T, $T^2 = 1$)
- Tértükrözés (P, $P^2 = 1$)
  - lendület $\longrightarrow$ - lendület, spin $\longrightarrow$ spin

  $\Longrightarrow$ helicitás $\longrightarrow$ - helicitás
- Töltéstükrözés (C, $C^2 = 1$)
  - részecske $\longrightarrow$ antirészecske
  - (neutrínó, antineutrínó ugyanaz, vagy más?)

Részecskék piciny golyók?

- Newtoni mechanika szimmetrikus
  - időtükrözéssel
  - tértükrözéssel

  szemben
- Tsung-Dao Lee, Chen-Ning Yang, 1956:
  - tértükrözés sérül!
- Leon Ledermann kísérlete egyszerűbb:

  szénben megállított pionok bomlásában keletkező leptonok helicitását mérték
  - pion spinje lendülete nulla $\Longrightarrow$ vagy mindkét bomlástermék balkezes, vagy mindkettő jobbkezes

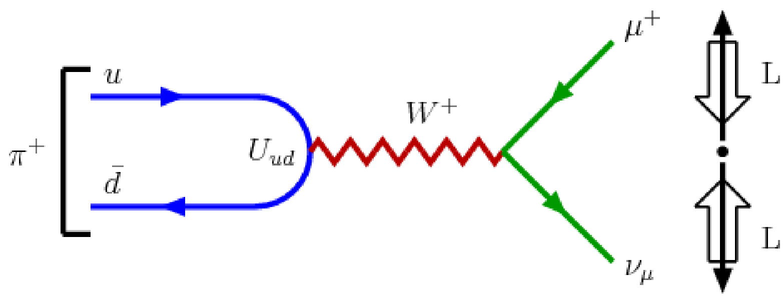
Fermionok és ábrázolásaik dimenziója, ill. kvantumszámaik a Standard modellben

1. család	2. család	3. család	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$	Q
$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix}$	3	2	1/6	$\begin{matrix} 2/3 \\ -1/3 \end{matrix}$
u_R	c_R	t_R	3	1	2/3	2/3
d_R	s_R	b_R	3	1	-1/3	-1/3
$\begin{pmatrix} \nu_L^{(e)} \\ e_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_L^{(\mu)} \\ \mu_L \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_L^{(\tau)} \\ \tau_L \end{pmatrix}$	1	2	-1/2	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$
e_R	μ_R	τ_R	1	1	-1	-1
$(\nu_R^{(e)}$	$\nu_R^{(\mu)}$	$\nu_R^{(\tau)}$	1	1	0	$0)$

Folyamatok leírására Feynman-gráfok

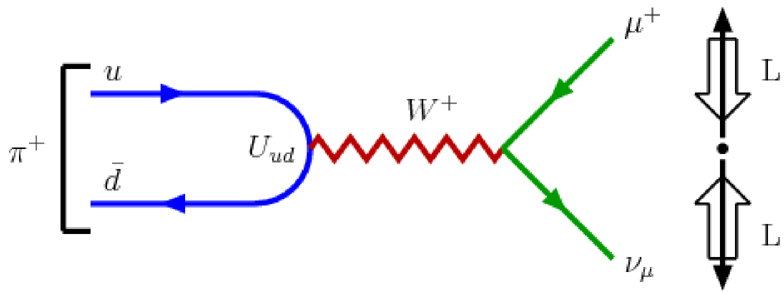
- Fermionok: folytonos irányítású egyenes vonal
  - fermionok jobbra
  - antifermionok balra
- Mértékbozonok: irányítás nélküli nem-egyenes vonalak:
  - foton hullámos
  - W, Z bozonok fűrész
  - gluonok hurkolt
- Kölcsönhatás: egy pontban összefutó három (két fermion- és egy bozon-) vonal
- W-vel töltött, a többivel semleges áram

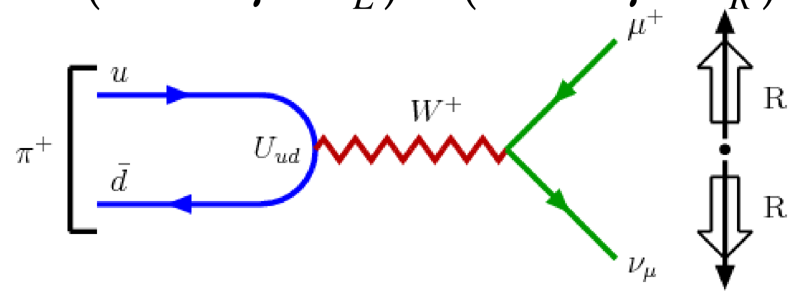
$$\pi \longrightarrow \mu \nu_{\mu}$$



$$\pi \longrightarrow \mu \nu_\mu$$

$$P\left(\pi^+ \to \mu^+ \nu_L\right) = \left(\pi^+ \to \mu^+ \nu_R\right)$$



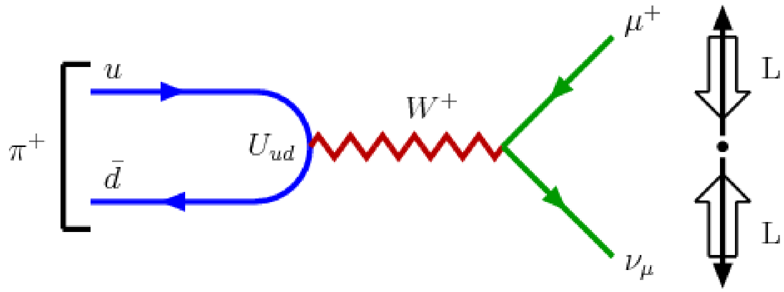


$$\Gamma\left(\pi^+ \to \mu^+ \nu_L\right) \neq 0$$

$$\Gamma\left(\pi^+ \to \mu^+ \nu_R\right) = 0$$

A gyenge kölcsönhatásban a tértükrözési szimmetria sérül

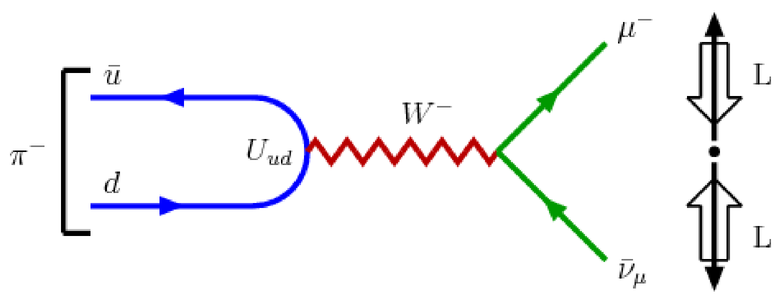
$$\pi \longrightarrow \mu \nu_{\mu}$$



$$\Gamma\left(\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} \nu_{L}\right) \neq 0$$

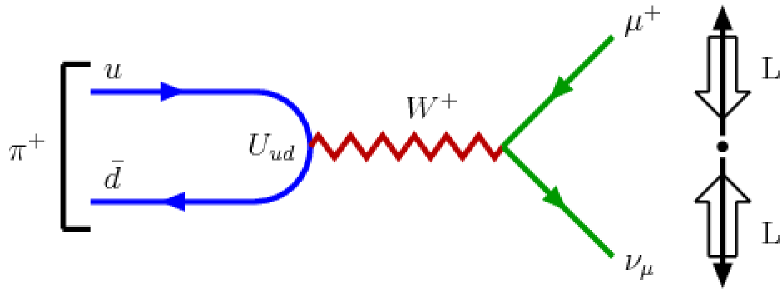
A gyenge kölcsönhatásban a töltéstükrözési szimmetria sérül

$$C\left(\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} \nu_{L}\right) = \left(\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} \overline{\nu}_{L}\right)$$



$$\Gamma\left(\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} \overline{\nu}_{L}\right) = 0$$

$$\pi \longrightarrow \mu \nu_\mu$$

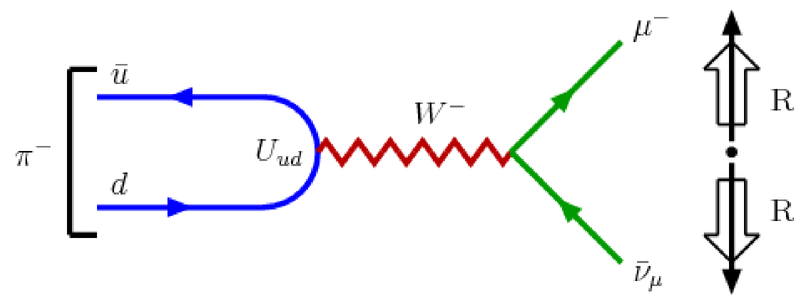


A gyenge kölcsönhatásban
a tér-

$$\Gamma\left(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_L\right) \neq 0$$

$$CP\left(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_L\right) = \left(\pi^- \rightarrow \mu^- \overline{\nu}_R\right)$$

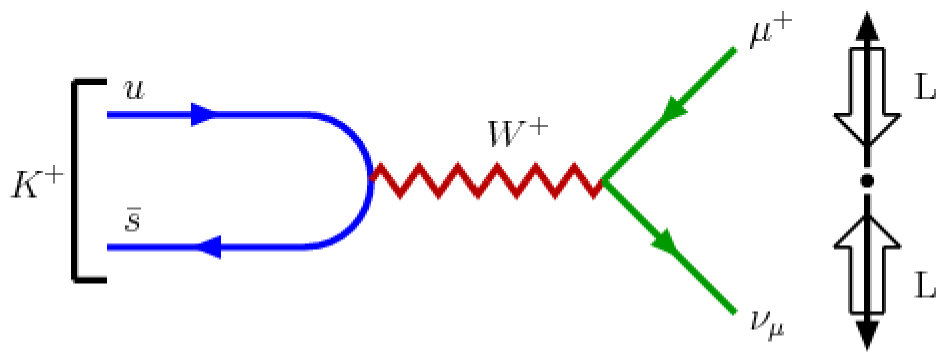
és töltéstükrözési
szimmetria érvényes



$$\Gamma\left(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_L\right) = \Gamma\left(\pi^- \rightarrow \mu^- \overline{\nu}_R\right)$$

Ismert fermionok a hőskorban

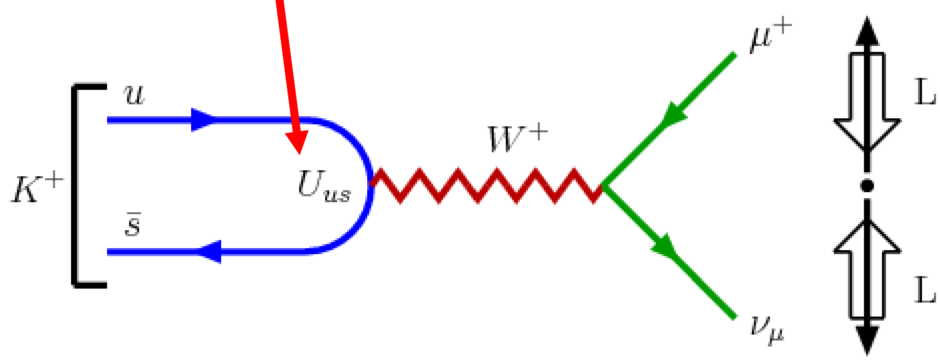
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \qquad\qquad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c\,? \\ s \end{pmatrix}$$



Új áramok helyett Cabbibo-keveredés

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \qquad \begin{aligned} d' &= d\cos\theta_C + s\sin\theta_C \\ s' &= -d\sin\theta_C + s\cos\theta_C . \end{aligned}$$

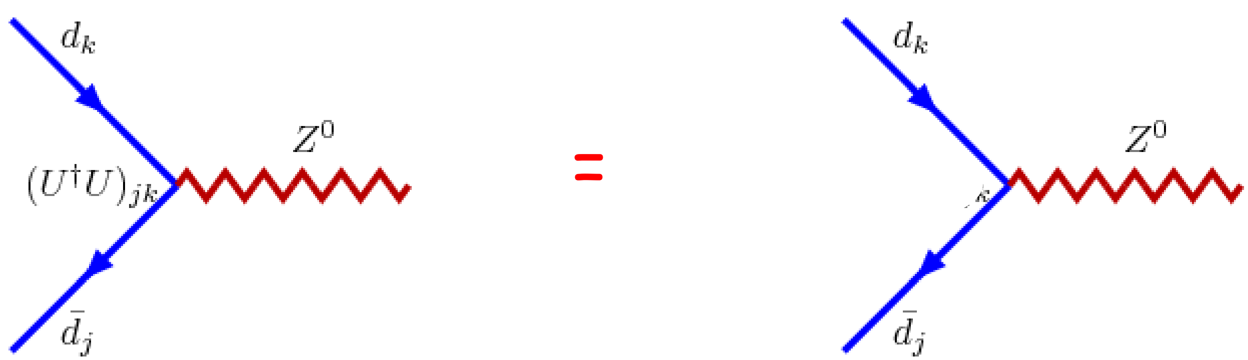
$$\begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} \\ U_{cd} & U_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_C & \sin\theta_C \\ -\sin\theta_C & \cos\theta_C \end{pmatrix} \qquad \frac{\Gamma\left(K^+ \to \mu^+\nu_\mu\right)}{\Gamma\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_\mu\right)} \propto \sin^2\theta_C$$



Csak a töltött áramban!

Ízcserélő semleges áramok elkerülése

Legyen U unitér!



Egy Nobel-díjas számolás

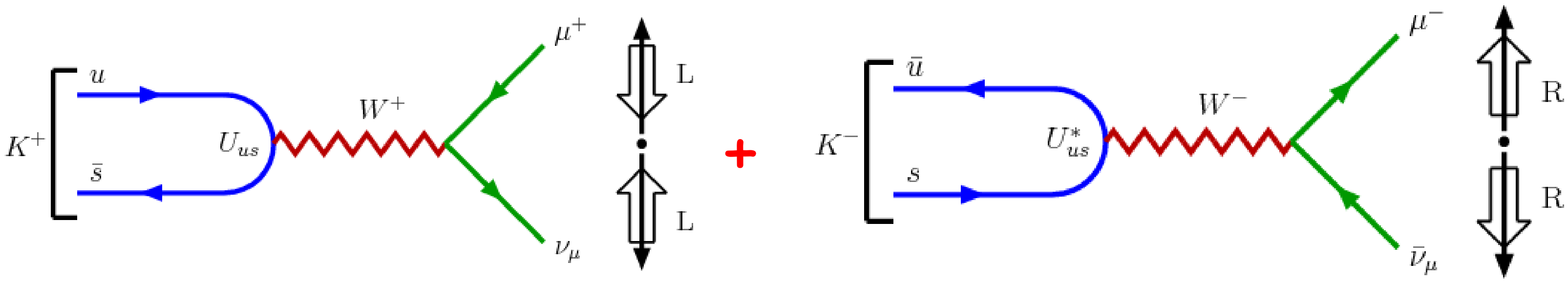
- NxN unitér mátrixnak N^2 független paramétere van
- U_{CKM} 2N kvarkállapotot köt össze, melyek közül 2N-1 db szabadon választható, marad

  N^2-2N-1 = $(N-1)^2$ független paraméter
- Lehet-e ez mind valós?

  Nem, ha legalább három kvarkcsalád van!
- NxN ortogonális mátrixnak N (N-1)/2 független paramétere van
- U-nak $(N-1)^2$ - N (N-1)/2 = (N-1) (N-2)/2 komplex fázisa van.
- Cabbibo: N=2, nincs komplex fázis
- Kobayashi-Maskawa: N=3, egy komplex fázis

A Standard modellben U komplex – na és?

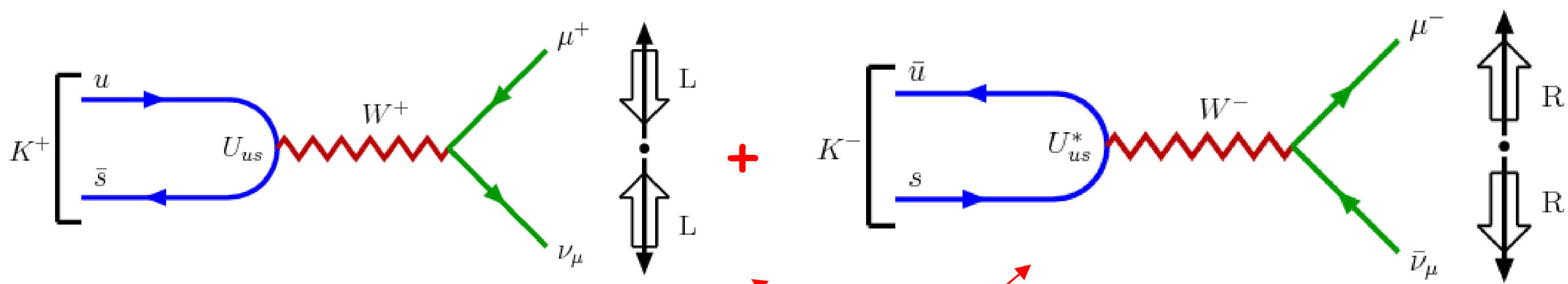
- Komplex U esetén a CP szimmetria sérül
- Eredeti elmélet:

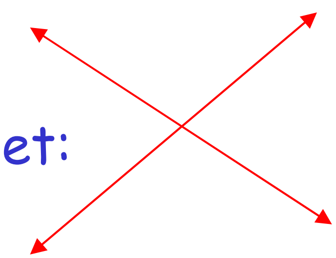


A Standard modellben U komplex – na és?

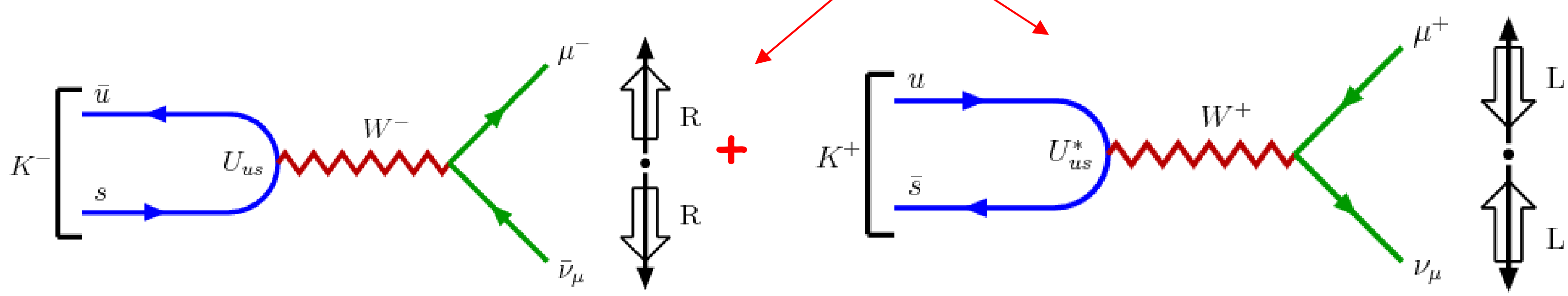
- Komplex U esetén a CP szimmetria sérül

- Eredeti elmélet:





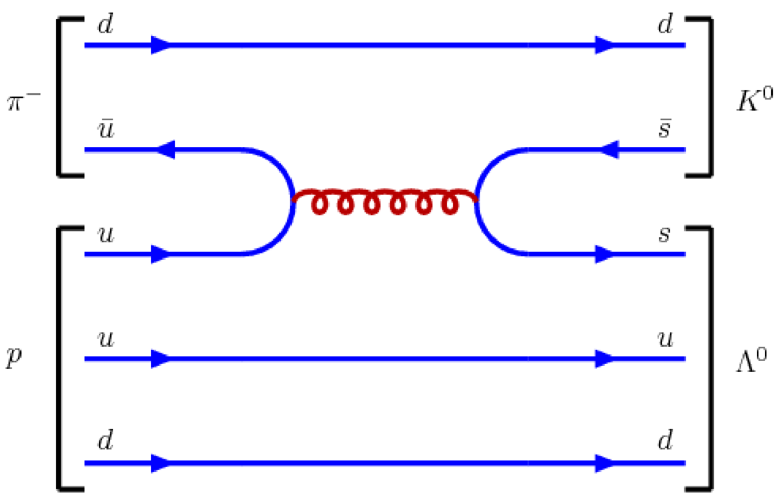
- CP tükrözés után az elmélet:



CP sértés a semleges kaonok bomlásában

- Kétféle semleges kaon előállítása:

$$\pi^- \rightarrow K^0 \Lambda^0 \qquad \pi^+ \rightarrow \overline{K}^0 K^+ p$$



$$\tau\left(K_S^0 \rightarrow 2\pi\right) = 0.9 \times 10^{-10}\,\mathrm{s}$$

$$\tau\left(K_L^0 \rightarrow 3\pi\right) = 0.5 \times 10^{-7}\,\mathrm{s}$$

- A kísérletben előállított kétféle semleges kaon K_S és K_L keveréke?

CP sértés a semleges kaonok bomlásában

- $2\pi^0$ tértükrözésre szimmetrikus (P = +1), tehát CP=+1
- $3\pi^0$ tértükrözésre antiszimmetrikus (P=-1), tehát CP=-1

$$CP\,K^0 = \overline{K}^0 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{ll} K_S^0 = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(K^0 + \overline{K}^0\right) & CP = +1 \\ K_L^0 = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(K^0 - \overline{K}^0\right) & CP = -1 \end{array}$$

- Igen jó közelítéssel teljesül, de

$$BR\left(K_L^0 \to \pi^+\pi^-\right) \cong 10^{-7}\,\mathrm{s}$$

(Christienson, Cronin, Fitch, Turlay (1964)

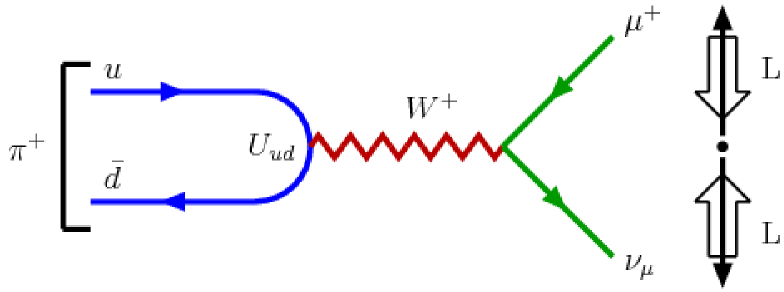
Megerősítést nyert a B_S bomlásokban

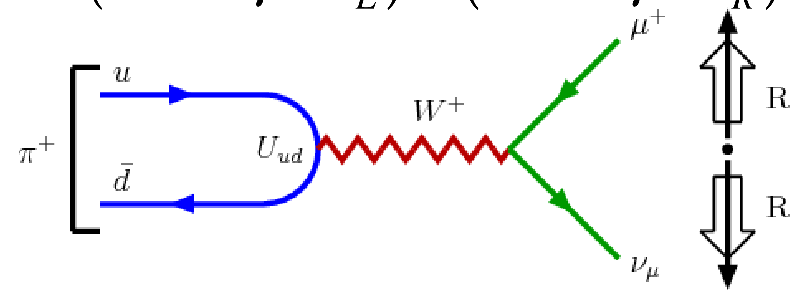
Köszönöm a figyelmet!

...és várjuk a 2009. évi díjesőt!

$\pi \longrightarrow \mu\nu_\mu$

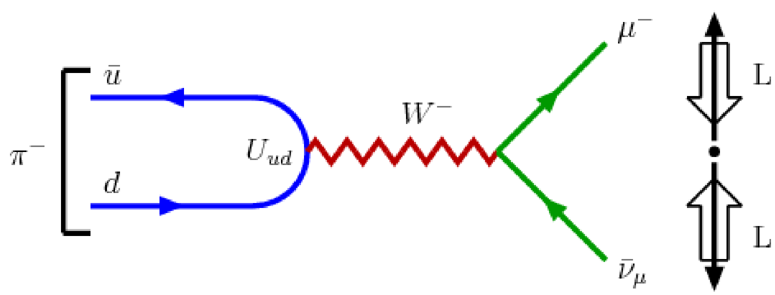
$$P\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_L\right) = \left(\pi^+ \to \mu^+\nu_R\right)$$

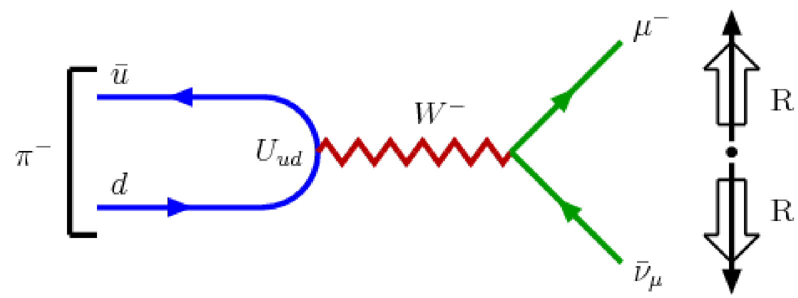




$$\Gamma\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_L\right) \neq 0 \qquad \Gamma\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_R\right) = 0$$

$$C\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_L\right) = \left(\pi^- \to \mu^-\overline{\nu}_L\right) \qquad CP\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_L\right) = \left(\pi^- \to \mu^-\overline{\nu}_R\right)$$





$$\Gamma\left(\pi^- \to \mu^-\overline{\nu}_L\right) = 0 \qquad \Gamma\left(\pi^+ \to \mu^+\nu_L\right) = \Gamma\left(\pi^- \to \mu^-\overline{\nu}_R\right)$$