

# Az elemi részecskék fizikája: a Standard Modell és ami azon túl van

Katz Sándor

ELTE Elméleti Fizikai Tanszék

Atomcsill, 2025. április 3.



# Vázlat

- 1 Bevezetés
- 2 Szimmetriák
- 3 A modern fizika születése
- 4 A Standard Modell
- 5 ... és ami azon túl van
- 6 Összefoglalás



# Bevezetés

## Az elméleti fizika célja

- a természetben megfigyelt jelenségeket leíró matematikai modellek megalkotása
- ezen modellek segítségével a kísérletek minél pontosabb értelmezése
- új jelenségek előrejelzése, jóslása

# Bevezetés

## Az elméleti fizika célja

- a természetben megfigyelt jelenségeket leíró matematikai modellek megalkotása
- ezen modellek segítségével a kísérletek minél pontosabb értelmezése
- új jelenségek előrejelzése, jóslása

## Milyen a jó elmélet?

- egyszerű, elegáns
- kevés olyan paraméterrel rendelkezik, melyeket a kísérletekhez kell illesztenünk.

# Bevezetés

## Az elméleti fizika célja

- a természetben megfigyelt jelenségeket leíró matematikai modellek megalkotása
- ezen modellek segítségével a kísérletek minél pontosabb értelmezése
- új jelenségek előrejelzése, jóslása

## Milyen a jó elmélet?

- egyszerű, elegáns
- kevés olyan paraméterrel rendelkezik, melyeket a kísérletekhez kell illesztenünk.

## Fontos vezérlőelv: szimmetriák

# Szimmetriák a természetben

A fizikai törvények nem függnek a megfigyelőtől

- attól, hogy hol vagy mikor végzem a mérést
- attól, hogy milyen koordináta rendszert használok az egyenletek leírásához

# Szimmetriák a természetben

## A fizikai törvények nem függenek a megfigyelőtől

- attól, hogy hol vagy mikor végzem a mérést
- attól, hogy milyen koordináta rendszert használok az egyenletek leírásához

## Szimmetriák:

- olyan transzformációk, melyekre invariánsak a fizikai törvények és az azokat leíró egyenletek
- típusai:
  - a téridő szimmetriái
  - egyéb (belső) szimmetriák

# A téridő szimmetriái

# A téridő szimmetriái

- térbeli eltolás

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **hol** végezzük a mérést

# A téridő szimmetriái

- **térbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **hol** végezzük a mérést

- **időbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **mikor** végezzük a mérést

# A téridő szimmetriái

- **térbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **hol** végezzük a mérést

- **időbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **mikor** végezzük a mérést

- **térbeli forgatás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **merre** néz a berendezés

# A téridő szimmetriái

- **térbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **hol** végezzük a mérést

- **időbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **mikor** végezzük a mérést

- **térbeli forgatás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **merre** néz a berendezés

- **áttérés egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerre**

Galilei transzformáció?

# A téridő szimmetriái

- **térbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **hol** végezzük a mérést

- **időbeli eltolás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **mikor** végezzük a mérést

- **térbeli forgatás**

A mérési eredménynek nem illik attól függenie, hogy **merre** néz a berendezés

- **áttérés egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerre**

Galilei transzformáció?

- **tértükrözés?**

- **időtükrözés?**

# Belső szimmetriák

Léteznek olyan transzformációk, melyekre invariánsak a fizikai törvények, de nem a téridőt transzformálják

Egyszerű példa:

- Helyzeti energia:  $E_h = mgh$ . Mérhető mennyiség?

# Belső szimmetriák

Léteznek olyan transzformációk, melyekre invariánsak a fizikai törvények, de nem a téridőt transzformálják

Egyszerű példa:

- Helyzeti energia:  $E_h = mgh$ . Mérhető mennyiség?  
Nem. Csak az erőt vagy a munkát lehet mérni

# Belső szimmetriák

Léteznek olyan transzformációk, melyekre invariánsak a fizikai törvények, de nem a téridőt transzformálják

## Egyszerű példa:

- Helyzeti energia:  $E_h = mgh$ . Mérhető mennyiség?  
Nem. Csak az erőt vagy a munkát lehet mérni
- Gravitációs potenciál:  $\Phi = gh$  nullpontja tetszőleges  
 $\Phi \rightarrow \Phi + \text{konstans}$  szimmetria

# Belső szimmetriák

Léteznek olyan transzformációk, melyekre invariánsak a fizikai törvények, de nem a téridőt transzformálják

## Egyszerű példa:

- Helyzeti energia:  $E_h = mgh$ . Mérhető mennyiség?  
Nem. Csak az erőt vagy a munkát lehet mérni
- Gravitációs potenciál:  $\Phi = gh$  nullpontja tetszőleges  
 $\Phi \rightarrow \Phi + \text{konstans}$  szimmetria
- Elektromosságban hasonlóan: az  $E, B$  terekhez tartozó potenciál nem mérhető, van egy eltolási szimmetriája

# Megmaradó mennyiségek

A legtöbb szimmetriához tartozik egy megmaradó fizikai mennyiség

## Néhány példa

- térbeli eltolás → lendület (impulzus)

# Megmaradó mennyiségek

A legtöbb szimmetriához tartozik egy megmaradó fizikai mennyiség

## Néhány példa

- térbeli eltolás → lendület (impulzus)
- időbeli eltolás → energia

# Megmaradó mennyiségek

A legtöbb szimmetriához tartozik egy megmaradó fizikai mennyiség

## Néhány példa

- térbeli eltolás  $\rightarrow$  lendület (impulzus)
- időbeli eltolás  $\rightarrow$  energia
- forgatás  $\rightarrow$  perdület (impulzusmomentum)

# Megmaradó mennyiségek

A legtöbb szimmetriához tartozik egy megmaradó fizikai mennyiség

## Néhány példa

- térbeli eltolás → lendület (impulzus)
- időbeli eltolás → energia
- forgatás → perdület (impulzusmomentum)
- elektromágnesség szimmetriája → elektromos töltés

# Megmaradó mennyiségek

A legtöbb szimmetriához tartozik egy megmaradó fizikai mennyiség

## Néhány példa

- térbeli eltolás → lendület (impulzus)
- időbeli eltolás → energia
- forgatás → perdület (impulzusmomentum)
- elektromágnesség szimmetriája → elektromos töltés

## Fordítva is sokszor hasznos:

megmaradó mennyiségek sokszor szimmetriára utalnak.

# Elméleti fizika a 19. század végén

A 19. század végén az elméleti fizikát sokan lezártnak gondolták

- klasszikus mechanika
- klasszikus elektrodinamika
- hőtan, termodinamika, statisztikus fizika alapjai

Csak néhány "apróság" nem stimmelt...

# A modern fizika születése: a relativitáselmélet

- A Maxwell egyenletekben szereplő  $E, B$  terek furcsán transzformálódnak mozgó rendszerre való áttéréskor  
→ Lorentz transzformáció (19. század vége)

# A modern fizika születése: a relativitáselmélet

- A **Maxwell egyenletekben** szereplő  $E, B$  terek furcsán transzformálódnak mozgó rendszerre való áttéréskor  
→ **Lorentz transzformáció** (19. század vége)
- **Einstein:** ez általánosan érvényes és a **téridő szimmetriája** minden inerciarendszer ekvivalens, köztük a Lorentz transzformáció visz át  
→ **speciális relativitáselmélet** (1905)

# A modern fizika születése: a relativitáselmélet

- A **Maxwell egyenletekben** szereplő  $E, B$  terek furcsán transzformálódnak mozgó rendszerre való áttéréskor  
→ **Lorentz transzformáció** (19. század vége)
- **Einstein:** ez általánosan érvényes és a téridő szimmetriája minden inerciarendszer ekvivalens, köztük a Lorentz transzformáció visz át  
→ **speciális relativitáselmélet** (1905)
- nem inerciarendszerekre is általánosítható  
→ **általános relativitáselmélet** (1915)

# A modern fizika születése: kvantummechanika

- A fény kettős természete:
  - egyrészt elektromágneses hullám (Maxwell egyenletek)
  - másrészt részecske (fotoelektromos effektus, 1905)

# A modern fizika születése: kvantummechanika

- A fény kettős természete:
  - egyrészt elektromágneses hullám (Maxwell egyenletek)
  - másrészt részecske (fotoelektromos effektus, 1905)
- minden más részecske is hasonlóan viselkedik (1924)

# A modern fizika születése: kvantummechanika

- A fény kettős természete:
  - egyrészt elektromágneses hullám (Maxwell egyenletek)
  - másrészt részecske (fotoelektromos effektus, 1905)
- minden más részecske is hasonlóan viselkedik (1924)
- Az elektront nem egy  $\underline{x}(t)$  pálya, hanem egy  $\Psi(\underline{x}, t)$  hullámfüggvény írja le
- $|\Psi|^2$  az elektron megtalálási valószínűsége (1926)

# A modern fizika születése: kvantummechanika

- A fény kettős természete:
  - egyrészt elektromágneses hullám (Maxwell egyenletek)
  - másrészt részecske (fotoelektromos effektus, 1905)
- minden más részecske is hasonlóan viselkedik (1924)
- Az elektront nem egy  $\underline{x}(t)$  pálya, hanem egy  $\Psi(\underline{x}, t)$  hullámfüggvény írja le
- $|\Psi|^2$  az elektron megtalálási valószínűsége (1926)
- az elektron egyszerre lehet több klasszikus állapot (pl. hely) szuperpozíciójában!

# A modern fizika születése: kvantummechanika

- A fény kettős természete:
  - egyrészt elektromágneses hullám (Maxwell egyenletek)
  - másrészt részecske (fotoelektromos effektus, 1905)
- minden más részecske is hasonlóan viselkedik (1924)
- Az elektront nem egy  $x(t)$  pálya, hanem egy  $\Psi(x, t)$  hullámfüggvény írja le
- $|\Psi|^2$  az elektron megtalálási valószínűsége (1926)
- az elektron egyszerre lehet több klasszikus állapot (pl. hely) szuperpozíciójában!
- a szimmetriák és fizikai mennyiségek között sokkal mélyebb kapcsolat (Wigner, 1931)

# kvantummechanika + relativitáselmélet

Egyesítsük a kettőt!

Tegyük a kvantummechanikát Lorentz invariánssá!

Mi baj történhet?

# kvantummechanika + relativitáselmélet

Egyesítsük a kettőt!

Tegyük a kvantummechanikát Lorentz invariánssá!

Mi baj történhet?

- Klein-Gordon egyenlet (1926):  
a valószínűségi értelmezés nem működik →
- Dirac egyenlet (1928)

# kvantummechanika + relativitáselmélet

Egyesítsük a kettőt!

Tegyük a kvantummechanikát Lorentz invariánssá!

Mi baj történhet?

- Klein-Gordon egyenlet (1926):  
a valószínűségi értelmezés nem működik →
- Dirac egyenlet (1928)

Nehézségek

- negatív energiás megoldások → antirészecskék
- → nem lehet szigorúan véve egy részecskét leírni

# Kvantumtérelmélet

A kvantummechanika és a Lorentz szimmetria matematikailag konzisztens összebékítése nem is olyan egyszerű!

→ **kvantumtérelmélet**

- elemi részecskék: mezők rezgései
- Pl. a foton az  $E$ ,  $B$  terek rezgése (EM hullám)

# Kvantumtérelmélet

A kvantummechanika és a Lorentz szimmetria matematikailag konzisztens összebékítése nem is olyan egyszerű!

→ **kvantumtérelmélet**

- elemi részecskék: mezők rezgései
- Pl. a foton az  $E$ ,  $B$  terek rezgése (EM hullám)

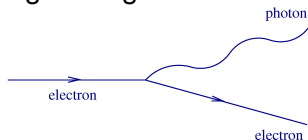
De vannak jó hírek is:

- a részecskék közti lehetséges kölcsönhatásokat a szimmetriák teljes mértékben meghatározzák!
- hihetetlen prediktív erő

# Vissza a szimmetriákhoz

## Milyen szimmetriák vannak még?

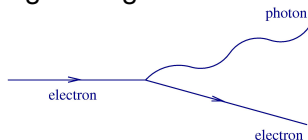
- töltésmegmaradás  $\leftrightarrow$  elektromágneses potenciál szimmetriája
- ez egy kölcsönhatást enged meg:



# Vissza a szimmetriákhoz

## Milyen szimmetriák vannak még?

- töltésmegmaradás  $\leftrightarrow$  elektromágneses potenciál szimmetriája
- ez egy kölcsönhatást enged meg:



- ez a **kvantum-elektrodinamika (QED)**, 1930-40-es évek
- két paramétere van: az elektron tömege ( $m_e$ ) és a finomszerkezeti állandó ( $\alpha \approx \frac{1}{137}$ )

# Az erős kölcsönhatás

## Izospin szimmetria

- a pionok ( $\pi^0, \pi^\pm$ ) tömege nagyon hasonló

# Az erős kölcsönhatás

## Izospin szimmetria

- a pionok ( $\pi^0, \pi^\pm$ ) tömege nagyon hasonló
- a neutron és a proton tömege is hasonló

## Van-e benne rendszer?

# Az erős kölcsönhatás

## Izospin szimmetria

- a pionok ( $\pi^0, \pi^\pm$ ) tömege nagyon hasonló
- a neutron és a proton tömege is hasonló

## Van-e benne rendszer?

- kvark modell (1964):  $u, d$  kvarkok (később  $s, c, b, t$  is)
- $\pi^0 = \bar{u}u - \bar{d}d$ ,  $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $p = uud$ ,  $n = udd$ , stb.

# Az erős kölcsönhatás

## Izospin szimmetria

- a pionok ( $\pi^0, \pi^\pm$ ) tömege nagyon hasonló
- a neutron és a proton tömege is hasonló

## Van-e benne rendszer?

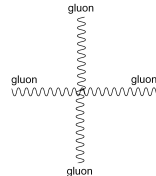
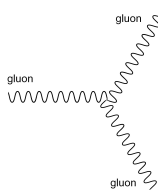
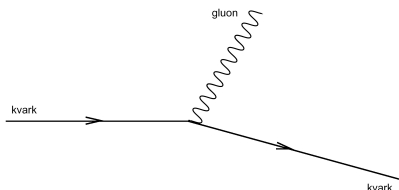
- kvark modell (1964):  $u, d$  kvarkok (később  $s, c, b, t$  is)
- $\pi^0 = \bar{u}u - \bar{d}d$ ,  $\pi^+ = u\bar{d}$ ,  $p = uud$ ,  $n = udd$ , stb.
- rengeteg részecske tulajdonságai megérthetők egy új (közelítő) szimmetria bevezetésével

# Az erős kölcsönhatás II

- A kvarkoknak van egy további szabadsági foka: **szín**
- → egy újabb szimmetria, ami a három színt keveri:  **$SU(3)$**

# Az erős kölcsönhatás II

- A kvarkoknak van egy további szabadsági foka: **szín**
- → egy újabb szimmetria, ami a három színt keveri:  **$SU(3)$**
- ez 3 kölcsönhatást enged meg:



- ez a **kvantum-színdinamika (QCD)** (1973), az erős kölcsönhatás kvantumtérelmélete

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés  
1956 óta tudjuk, hogy nem szimmetria. Nincs jobbkezes neutrínó

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés  
1956 óta tudjuk, hogy nem szimmetria. Nincs jobbkezes neutrínó
- $C$ : részecske - antirészecske cseréje

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés  
1956 óta tudjuk, hogy nem szimmetria. Nincs jobbkezes neutrínó
- $C$ : részecske - antirészecske cseréje  
ez sem szimmetria, nincs balkezes antineutrínó

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés  
1956 óta tudjuk, hogy nem szimmetria. Nincs jobbkezes neutrínó
- $C$ : részecske - antirészecske cseréje  
ez sem szimmetria, nincs balkezes antineutrínó
- $CP$ : együtt majdnem jó, de kicsit ez is sérül (1964)

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés  
1956 óta tudjuk, hogy nem szimmetria. Nincs jobbkezes neutrínó
- $C$ : részecske - antirészecske cseréje  
ez sem szimmetria, nincs balkezes antineutrínó
- $CP$ : együtt majdnem jó, de kicsit ez is sérül (1964)
- $T$ : időtükrözés  
ez sem szimmetria, annyira sérül, mint  $CP$

# Tükrözések

- $P$ : tértükrözés  
1956 óta tudjuk, hogy nem szimmetria. Nincs jobbkezes neutrínó
- $C$ : részecske - antirészecske cseréje  
ez sem szimmetria, nincs balkezes antineutrínó
- $CP$ : együtt majdnem jó, de kicsit ez is sérül (1964)
- $T$ : időtükrözés  
ez sem szimmetria, annyira sérül, mint  $CP$
- $CPT$ : mai tudásunk szerint szimmetria  
→ részecskék és antirészecskék tömege azonos

# A gyenge kölcsönhatás

## $\beta$ bomlás

- $n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}$
- olyan kölcsönhatás írja le, mely összekapcsolja a kvarkokat az elektronnal és neutrínóval

# A gyenge kölcsönhatás

## $\beta$ bomlás

- $n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}$
- olyan kölcsönhatás írja le, mely összekapcsolja a kvarkokat az elektronnal és neutrínóval
- ehhez is egy szimmetria tartozik  $\rightarrow$
- az izospinhez hasonló, két részecskét transzformál ( $u, d$  vagy  $e, \nu$ ):  $SU(2)$

# A gyenge kölcsönhatás

## $\beta$ bomlás

- $n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}$
- olyan kölcsönhatás írja le, mely összekapcsolja a kvarkokat az elektronnal és neutrínóval
- ehhez is egy szimmetria tartozik  $\rightarrow$
- az izospinhez hasonló, két részecskét transzformál ( $u, d$  vagy  $e, \nu$ ):  $SU(2)$
- sérti a tértükrözési szimmetriát, csak balkezes részecskékre hat
- összekeveredik az elektromágnességgel: elektrogyenge elmélet (1967)



# A részecskefizika Standard Modellje

A **Standard Modell** a fermionok és bozonok közti összes kölcsönhatást leírja

**Az elmélet szimmetriái + ellentmondás-mentesség**  
a kölcsönhatásokat egyértelműen meghatározza  
→ ebben rejlik a részecskefizika prediktív ereje/precizitása

# A részecskefizika Standard Modellje

A Standard Modell a fermionok és bozonok közti összes kölcsönhatást leírja

Az elmélet szimmetriái + ellentmondás-mentesség  
a kölcsönhatásokat egyértelműen meghatározza  
→ ebben rejlik a részecskefizika prediktív ereje/precizitása

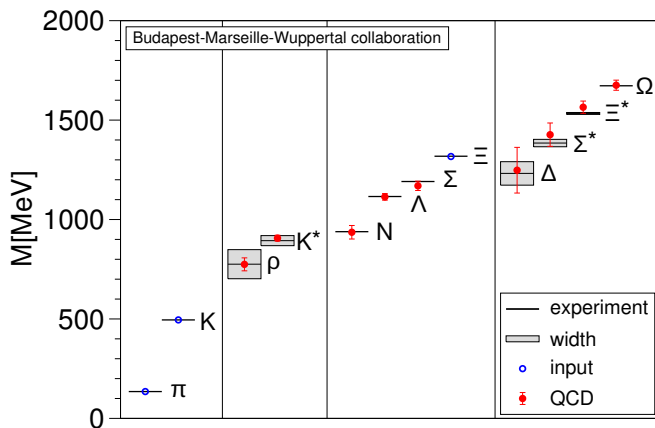
Példa:

elektron mágneses térben:  $\Delta E = -\mu B$ ;  $\mu = \frac{eS}{2m} \cdot g_e$   
 $g_e$ : elektron giromágneses faktora

kísérlet:  $g_e = 2,0023193043618(5)$

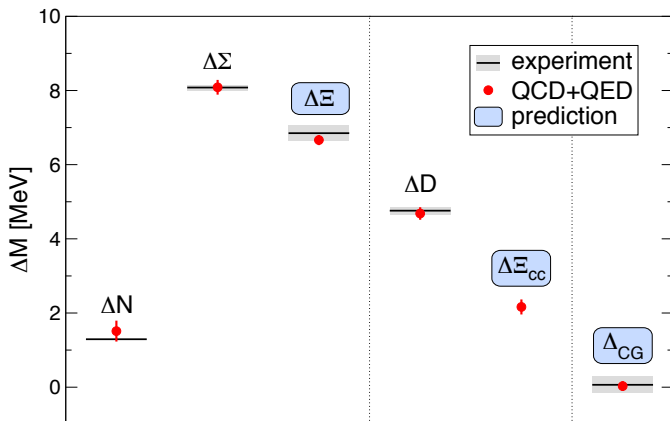
elmélet:  $g_e = 2,0023193043633(15)$

# További két példa



A Standard Modell helyesen leírja a hadronok tömegét ...

# További két példa



és a köztük levő parányi különbségeket is

# Mi van a Standard Modellen túl?

## Teljes-e a Standard Modell?

### Kísérleti problémák:

- a sötét anyagot / sötét energiát nem magyarázza
- a neutrínók tömegét nem magyarázza
- a világegyetemben megfigyelt anyag-antianyag aszimmetriát nem magyarázza

# Mi van a Standard Modellen túl?

## Teljes-e a Standard Modell?

### Kísérleti problémák:

- a sötét anyagot / sötét energiát nem magyarázza
- a neutrínók tömegét nem magyarázza
- a világegyetemben megfigyelt anyag-antianyag aszimmetriát nem magyarázza

### Elméleti problémák (részben esztétikaiak):

- a gravitációs kölcsönhatást nem tartalmazza
- nagy energiákon nem működik
- túl sok paramétert tartalmaz
- több finomhangolást tartalmaz

# Mi van a Standard Modellen túl?

Hogyan fedezhetjük fel a SM-en túli fizikát?

Két fő lehetőség:

# Mi van a Standard Modellen túl?

Hogyan fedezhetjük fel a SM-en túli fizikát?

Két fő lehetőség:

- 1 nagy energiás ütközésekkel új részecskék keltése
  - ez a legegységelműbb jele az új fizikának
  - egyelőre nincs ilyen kísérleti jel

# Mi van a Standard Modellen túl?

Hogyan fedezhetjük fel a SM-en túli fizikát?

Két fő lehetőség:

① nagy energiás ütközésekkel új részecskék keltése

- ez a legeggyértelműbb jele az új fizikának
- egyelőre nincs ilyen kísérleti jel

② precíziós kísérletek

- új részecskék és kölcsönhatásaik alacsony energiás jelenségeket is befolyásolhatnak
- nagyon pontos méréssel kimutatható, ha a SM nem elég
- kevésbé konkrét, mint a direkt felfedezés

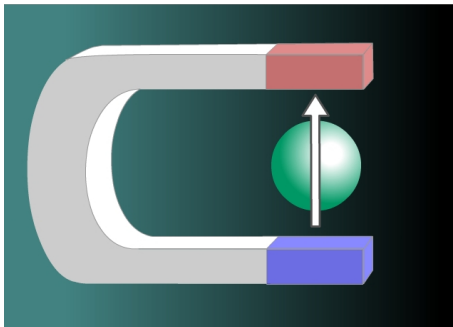
# Elméleti fizika a Standard Modellen túl

## Hogy járul hozzá mindehhez az elmélet?

- jóslatok új részecskékre és kölcsönhatásokra
  - pl. esztétikai megfontolások alapján
  - új szimmetriák, pl. szuperszimmetria
  - új kölcsönhatások, neutrínó tömegek megértése, stb.
  - gravitáció: ált.rel szimmetriája + kvantummechanika ?
- a precíziós mérésekhez nagyon pontos elméleti számítások is kellenek
  - konkrét példa: [műon mágneses momentuma](#)

# A müon mágneses momentuma

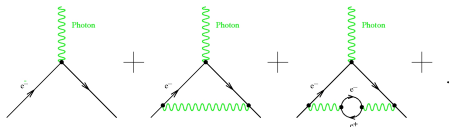
Hogyan változik a müon energiája mágneses tér hatására?



$$\delta E = -g \cdot \frac{e}{2m} \cdot \vec{S} \cdot \vec{B}, \quad g \approx 2$$

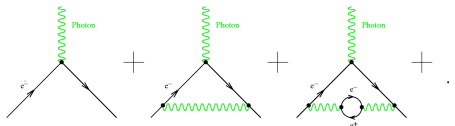
# Elmélet

Szokásos eljárás, sorfejtéssel:

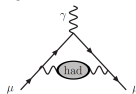


# Elmélet

Szokásos eljárás, sorfejtéssel:



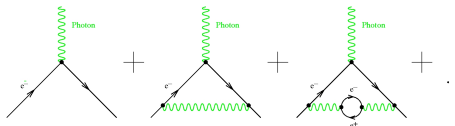
Nehézség: erős kölcsönhatás járuléka:



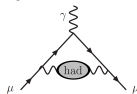
Új részecskék és kölcsönhatások is így járulhatnak hozzá  $g$ -hez.

# Elmélet

Szokásos eljárás, sorfejtéssel:



Nehézség: erős kölcsönhatás járuléka:



Új részecskék és kölcsönhatások is így járulhatnak hozzá  $g$ -hez.  
Korábbi elméleti eredmény (2006):

$$g_{\text{th}} = 2.0023318362(9)$$

$$g_{\text{exp}} = 2.0023318412(4)$$

Jelentős eltérés! Új fizika?

# Új eredmény

Az erős kölcsönhatás járuléka meghatározható nagyon pontos Monte-Carlo szimulációkkal [2021, 2024]  
és összevethető a kísérlettel (Fermilab, 2023)

$$g_{\text{th}} = 2.00233184038(76)$$

$$g_{\text{exp}} = 2.00233184118(44)$$

Összhang a kísérlet és elmélet között,

új fizikához nagyobb pontosság kell.

# Összefoglalás

- az elméleti fizikában mindig fontos szerepet játszottak a szimmetriák
- a 20. században ez vált az egyik legfontosabb vezérlőelvvé
- a részecskefizika Standard Modellje a kísérletek nagyon pontos leírását adja
- mégis tudjuk, hogy hiányos
- az elmélet és kísérlet egyaránt fontos a következő lépés megtalálásához