

Az axion mint sötét anyag

Katz Sándor

ELTE Elméleti Fizikai Tanszék

Borsányi Sz., Fodor Z., J. Günther, K-H. Kampert, T. Kawanai, Kovács T., S.W. Mages,
Pásztor A., Pittler F., J. Redondo, A. Ringwald, Szabó K.

[Nature 539 \(2016\), 69](#)

Atomoktól a csillagokig, ELTE, 2018



Vázlat

- 1 Bevezetés
- 2 Az erős CP probléma
- 3 Az axion
- 4 Az axion tömege
- 5 Összefoglalás

Bevezetés

Oldjunk meg két érdekes problémát egy ötlettel!

1 **Sötét anyag**

Mi adja az Univerzum tömegének 27 %-át?

2 **Erős CP probléma**

Az erős kölcsönhatásnak van egy rejtélyes szimmetriája, amit nem értünk

- A 70-es években egy hipotetikus részecskét javasoltak a 2. probléma megoldására → [axion](#)
- Megoldhatja ez a sötét anyag problémáját is?
- Ha megfelelő a tömege, akkor igen!

A sötét anyag

A világegyetem összetétele

68% sötét energia

27% sötét anyag

5% „szokványos”/látható anyag

A sötét anyag és sötét energia mibenléte mindmáig kérdéses

Látható anyag:

- a részecskefizikai standard modell részecskéi és kötött állapotai
- zömében atomok és atommagok
- tömege 99,9%-ban a neutronok és protonok tömegéből jön
- a standard modell ezek tömegét megmagyarázza

Sötét energia

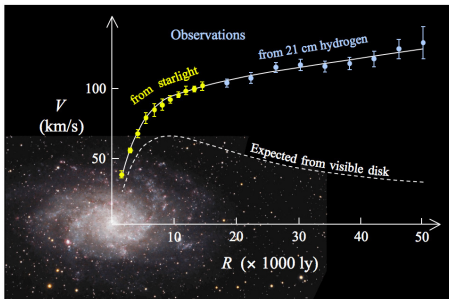
az univerzum gyorsuló tágulásáért felelős

A sötét anyag

Honnan tudjuk, hogy léteznie kell?

A galaxisokban a csillagok sebessége megmérhető.

Eltér a várakozástól.



A növekvő sebesség arra utal, hogy van még valami, aminek a gravitációs hatását látjuk.

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: $g_e = 2,0023193043617(15)$

elmélet: $g_e = 2,00231930428$

Szimmetriák a természetben

szimmetria:

olyan transzformáció, melyre a természet törvényei érzéketlenek.

Szimmetriák a természetben

szimmetria:

olyan transzformáció, melyre a természet törvényei érzéketlenek.

- térbeli eltolás

Szimmetriák a természetben

szimmetria:

olyan transzformáció, melyre a természet törvényei érzéketlenek.

- térbeli eltolás
- időbeli eltolás
- forgatások
- áttérés másik inerciarendszerre
- belső szimmetriák (pl. elektromos potenciál eltolása)

Szimmetriák a természetben

szimmetria:

olyan transzformáció, melyre a természet törvényei érzéketlenek.

- térbeli eltolás
- időbeli eltolás
- forgatások
- áttérés másik inerciarendszerre
- belső szimmetriák (pl. elektromos potenciál eltolása)
- tükrözések?
 - C : részecske - antirészecske cseréje
 - T : időtükrözés
 - P : tértükrözés

Tértükrözés

Fordítsuk meg a térkoordináták előjelét!

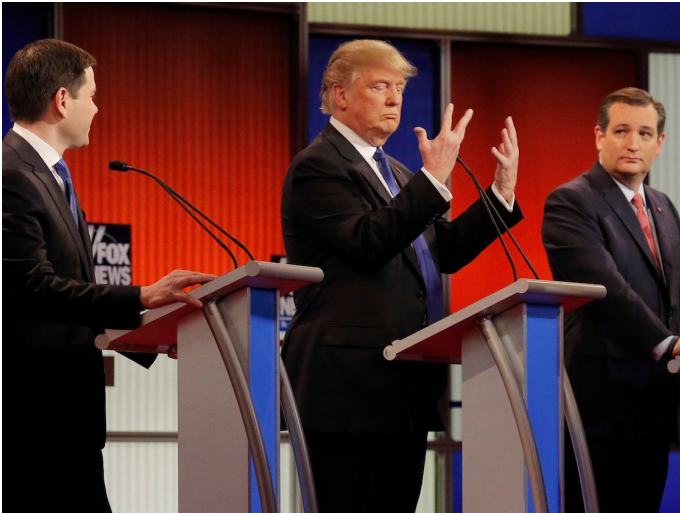
$$x \rightarrow -x \quad y \rightarrow -y \quad z \rightarrow -z$$

Felcseréli a jobb- és balkezes részecskéket / jelenségeket



Szimmetriája-e ez a fizikai törvényeknek?

Szimmetria-e a tértükrözés?



Szimmetria-e a tértükrözés?

Az elemi részecskék saját perdülete a mozgás irányához képest lehet bal- illetve jobbkezes:

Left

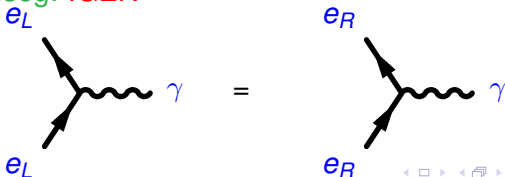


Right



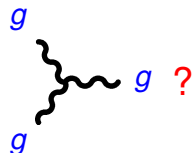
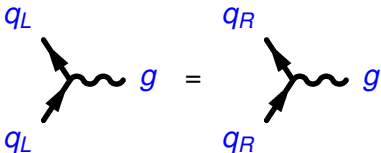
A tértükrözés a kettőt felcseréli ($L \leftrightarrow R$).
Invariánsak-e erre a fizikai törvények?

Elektromágnesség: **IGEN**

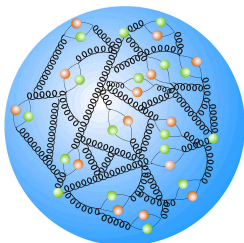


Szimmetria-e a tértükrözés?

Erős kölcsönhatás:



Kísérlet:

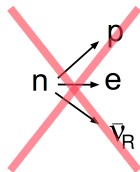
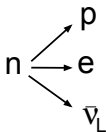


- a neutron töltéseloszlása szimmetrikus
- nincs elektromos dipólmomentuma
- tértükrözésre invariáns

Szimmetria-e a tértükrözés?

Gyenge kölcsönhatás:

β bomlás



Maximálisan sérti a tértükrözést!

nincs jobbkezes neutrínó

Erős CP probléma:

Ha a természetnek nem szimmetriája a tértükrözés, akkor az erős kölcsönhatásnak miért az?

Az erős kölcsönhatás kvantumtérelmélete

kvantumtérelmélet:

részecskék \leftrightarrow mezők rezgései

fotonok \leftrightarrow E, B mezők rezgései, EM hullámok

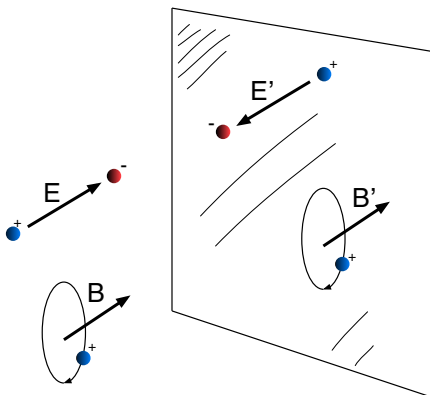
erős kölcsönhatás:

kvarkok & gluonok: elektronhoz & fotonhoz hasonló részecskék

gluonok \leftrightarrow E, B -hez hasonló mezők rezgései

Hogyan hat ezekre a tértükrözés?

Elektromos és mágneses terek transzformációja



\underline{E} megfordul (vektor), \underline{B} nem (axiál vektor)!
 $\underline{E} \cdot \underline{B}$ előjelet vált

Az erős CP probléma

Ha a gluonok energiája függne $\underline{E} \cdot \underline{B}$ -től (pl. $\Theta \cdot \underline{E} \cdot \underline{B}$ alakban) \rightarrow az erős kölcsönhatás nem lenne invariáns a tértükrözésre

A tapasztalat szerint (l. neutron) nincs ilyen függés ($|\Theta| < 10^{-10}$)

Miért ilyen kicsi (0?) Θ értéke?

Megoldási javaslat (Peccei-Quinn, 1977):

legyen Θ is egy mező

Θ rezgései egy új részecskét írnak le \rightarrow axion

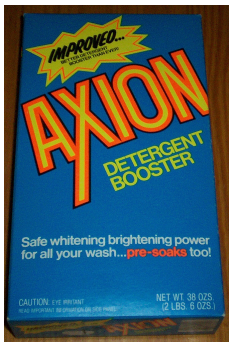
Megmutatható, hogy Θ a nulla körül rezeg, átlagos értéke 0.

Az axion oszcillációja

Az axion tömege a potenciál görbületével kapcsolatos
A rezgésekben tárolt energia adhatja a sötét anyagot

Honnan jön az axion neve?

- axiál szimmetriával kapcsolatos jelenségről van szó
- egy nehéz problémától (erős CP) próbálunk megszabadulni
- egy jó mosószer mindent eltüntet
- Frank Wilczek adta az *axion* nevet



Az axion tömege

Tételezzük fel, hogy minden sötét anyag axion
+
számoljuk ki a fenti potenciált az Univerzum teljes története során

→ az axion tömeg meghatározható

módszer:

Monte-Carlo szimuláció:

Számítógéppel generált \underline{E} , \underline{B} mezőkön kell meghatározni
 $Q = \underline{E} \cdot \underline{B}$ tipikus értékeit

Óriási számítógépigény!

Számítógépes infrastruktúra



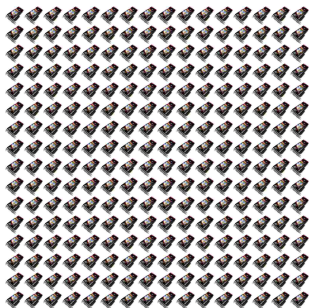
Juqueen rendszer Jülichben

- 458752 mag
- 6 Pflop/s elvi teljesítmény
- 2 Pflop/s elérhető Monte-Carlo számításokkal

Mi a közös a részecskefizikában és a számítógépes játékokban?



Számítógépes infrastruktúra



GPU klaszter az ELTE-n

- 387072 mag
- 1.1 Pflop/s elvi teljesítmény
- 78 Tflop/s elérhető

Monte-Carlo integrálás

Q eloszlásának meghatározása

Fő nehézség

megmutatható, hogy $Q = \underline{E} \cdot \underline{B}$ átlaga a téridőre egész szám nagy hőmérsékleten Q szinte mindig 0, csak néha 1

A Monte-Carlo eljárás során alig lesz olyan \underline{E} , \underline{B} , melyre $Q \neq 0$

Q eloszlásának meghatározása

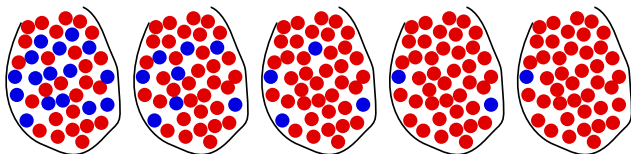
Fő nehézség

megmutatható, hogy $Q = \underline{E} \cdot \underline{B}$ átlaga a téridőre egész szám nagy hőmérsékleten Q szinte mindig 0, csak néha 1

A Monte-Carlo eljárás során alig lesz olyan \underline{E} , \underline{B} , melyre $Q \neq 0$

Illusztráció

kék ($Q = 1$) és piros ($Q = 0$) golyók zsákban, nagy T -n kevés kék mennyi a kék/piros arány véletlen mintavétel alapján?

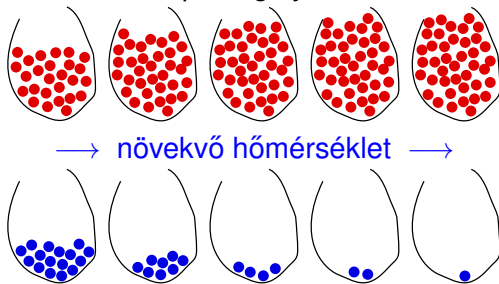


→ növekvő hőmérséklet →

Q eloszlásának meghatározása

Lehetséges megoldás

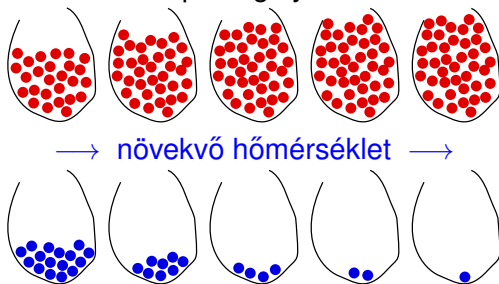
Válogassuk szét a kék és piros golyókat!



Q eloszlásának meghatározása

Lehetséges megoldás

Válogassuk szét a kék és piros golyókat!



Külön-külön meghatározhatjuk a kék/piros golyók számának változását

az arány nagyon nagy T -n is meghatározható!

Az axion tömegére becslés adható: $m_A \gtrsim 28 \mu\text{eV} = 5.5 \cdot 10^{-11} m_e$

az axion sötét anyag kialakulása

Összefoglalás

- Az axion két problémára is megoldást jelenthet
 - lehetséges sötét anyag részecske
 - megmagyarázza, miért invariáns az erős kölcsönhatás a tértükrözésre
- Monte-Carlo szimulációkkal meghatározható az axion potenciálja
- Feltételezve, hogy minden sötét anyag axion:
→ axion tömeg megbecsülhető: $m_A \gtrsim 28 \mu\text{eV}$
- Az axionok kísérleti keresése jelenleg is zajlik