

# SZIMMETRIÁK ÉS SÉRTÉSÜK A RÉSZECSKÉK VILÁGÁBAN

## – A PARITÁSSÉRTÉS 50 ÉVE

Horváth Dezső  
MTA KFKI RMKI, Budapest és ATOMKI, Debrecen

### Tükrözési szimmetria és paritás

Ahogy egy korábbi cikkemben [1] leírtam, a részecskefizikában a szimmetriák mindenütt jelen vannak: a kölcsönhatások tulajdonságaiban, a megmaradási törvények háttérben, az összetett részecskék szerkezetében. A szimmetriasértések szerepe ugyanilyen jelentős: a részecskefizika Standard Modellje szerint a részecskék az elektromos kölcsönhatás szimmetriájának „spontán sérülése” következtében nyernek tömeget, és ennek a „spontán sérülési” mechanizmusnak a mellékterméke a részecskefizika talán legmisztikusabb objektuma, a Higgs-bozon.<sup>1</sup> Ezt a hipotetikus részecskét még egyetlen kísérletben sem sikerült „láthatóvá” tenni, de létezése elengedhetetlenül fontos az elmélet szempontjából: lehetővé teszi a mérhető folyamatok valószínűségeinek közelítő, perturbatív, számítását (hacsak nem bizonyul túlságosan „nehéznek”).

A részecskefizika három alapvető tükrözési szimmetriája, a töltés, a tér és az idő tükrözésével kapcsolatos. A  $P$  tértükrözés ellenkezőjére fordítja a térkoordináták előjelét, ami annak felel meg, mintha a rendszert a szokásos jobbkezes koordináta-rendszer helyett balkezesben írnánk le. A  $T$  időtükrözés az időkoordinátát fordítja ellenkezőjére. A  $C$  töltéstükrözés részecskéből antirészecskét csinál: valamennyi töltés típusú kvantumszám előjelét megfordítja.

Egy függvény páros, ha változójának előjelét megfordítva, tükrözve, értéke nem változik, páratlan, ha azonos abszolút érték mellett előjelet vált. Páros függvény, például,  $f(x) = A \cos x$  és páratlan  $f(x) = A \sin x$ .

A részecskék állapotfüggvényeinek tanulmányozásánál kiderült, hogy a párosság vagy *paritás* jellemző tulajdonságuk, amely az ütközési és bomlási reakciók során általában megőrződik. Az  $\ell$  mellékkvantumszámra gerjesztett hidrogénállapot hullámfüggvénye, például, a tértükrözés hatására változatlan abszolút érték mellett egy  $(-1)^\ell$  szorzót kap, azaz a paritása  $(-1)^\ell$ . Mivel a legegyszerűbb  $E1$  fotonátmenet  $\Delta\ell = 1$  változást jelent, a fotonhoz a paritás megmaradását feltételezve a  $P_\gamma = -1$  negatív paritás rendelhető. A többi részecskének is van saját paritása, a fermionok jellegzetessége, hogy részecske és antirészecske pari-

tása ellentétes előjelű. Sok-sok megfigyelésből leszűrve a tapasztalatot a paritást megmaradó fizikai mennyiségként fogadták el.

Mivel összetett rendszerekben az alkotórészek paritásai összeszoródnak, a kvark + anti-kvark kötött állapotként leírható mezonok alapállapotban (amikor a kvarkok egymáshoz képesti mozgásának impulzusmomentuma zérus) negatív paritással rendelkeznek; az esetleges  $L$  relatív impulzusmomentum, a hidrogénatomhoz hasonlóan, a kötött állapot saját-impulzusmomentumához  $(-1)^L$  szorzóval járul.

A fizika jelenlegi állása szerint a három tükrözés együttes alkalmazása nem változtatja meg egy fizikai rendszer mérhető tulajdonságait, azaz egy szabad antirészecske matematikailag úgy kezelhető, mint egy elektron és időben visszafelé mozgó részecske. Az elektron és antirészecske, a pozitron kétfotonos annihilációját úgy írjuk le, mintha egy elektron megjelenne, kibocsátana két foton, majd térben és időben kihátrálna a képből. A  $CPT$ -invariancia a térelmélet egyik alaptétele, sértéséhez olyan alapvető fizikai feltevésekről kellene lemondanunk, mint a Lorentz-invariancia vagy a kauzalitás.

### A paritássértés felfedezése

A paritássértés felfedezése a  $\tau$ - $\theta$  paradoxonnak köszönhető. Megfigyeltek két részecskét, amelyek valamennyi tulajdonsága azonos volt a paritásuk kivételével, a  $\tau^+$ -mezon ugyanis gyenge kölcsönhatásban két  $\pi$ -mezonra (pionra), amíg a  $\theta^+$  három pionra bomlott. Figyelembe véve a pion negatív paritását, ez a  $\tau^+$ -nak pozitív, a  $\theta^+$ -nak negatív paritást adott.

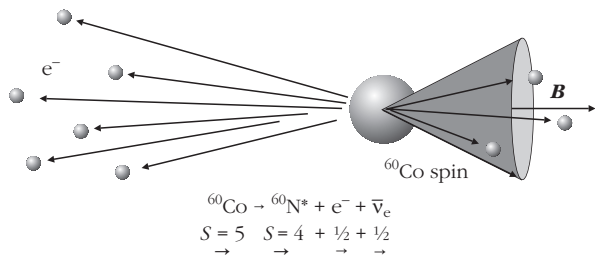
Tsung-Dao Lee és Chen-Ning Yang (1. ábra) a fenti kérdés megoldását keresve 50 évvel ezelőtt megvizsgálta [2] a paritásmegmaradás kísérleti bizonyítékait és megállapította, hogy valamennyi elektromágneses jelenségeken alapul. Feltételezték, hogy a  $\tau^+$  és a  $\theta^+$  ugyanaz a részecske (azt ma  $K^+$  mezonnak hívjuk), viszont a gyenge kölcsönhatás sérti a paritás-megmaradást, és javasoltak néhány kísérletet a pari-

1. ábra. Tsung-Dao Lee, Chen-Ning Yang és Chien-Shiung Wu



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2006. május 27-i közgyűlésén elhangzott előadás alapján.

<sup>1</sup> Elemi részecskéink fermionok és bozonok, amelyeket  $J = S\hbar$  saját-impulzusmomentumuk ( $S$  spinjük) különbözteti meg: az összetett részecskéket (mint például a proton, a neutron vagy a pion) alkotó kvarkok, valamint a leptonok, (mint az elektron, a müon, a neutrínók)  $S = \frac{1}{2}$  spinű fermionok. A bozonok spinje egész, ilyenek a fermionok közötti kölcsönhatást közvetítő  $S = 1$  spinű részecskék (például a foton). A Higgs-bozon spinje zérus,  $S = 0$ .



2. ábra. C.S. Wu kísérlete: A mágneses térben orientált  $^{60}\text{Co}$  izotóp béta-bomlásánál az elektronok túlyomórészt a mágneses térrel ellenkező irányban lépnek ki, ami a tükrösszimmetria, azaz adott esetben a paritásmegmaradás sértését jelenti.

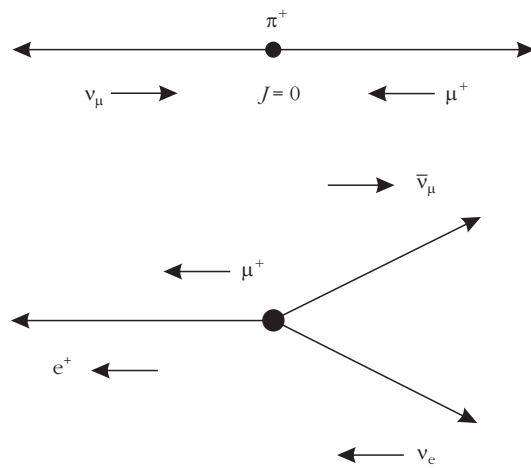
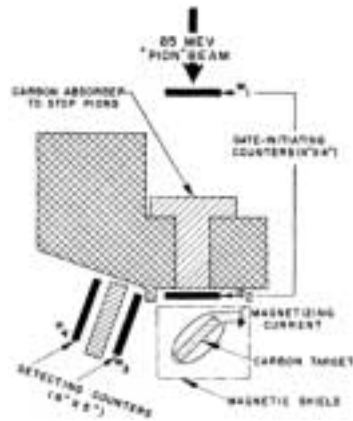
tássértés ellenőrzésére. A kísérleti ellenőrzés azonnal megkezdődött, és igazolta a paritásértést; Lee és Yang még 1957-ben megkapta a Nobel-díjat. (Elfilozófálhatunk azon, hány cikk kell a Nobel-díjhoz: általában egy, ha az elég jó.)

Az első kísérlet *Chien-Shiung Wu* asszony (1. ábra) nevéhez fűződik [3].  $^{60}\text{Co}$  izotópot mágneses térbe helyezve lehűtöttek csaknem az abszolút zérus hőmérsékletre (0,1 K alá). A  $^{60}\text{Co}$  mag instabil, béta-bomlással a  $^{60}\text{Ni}$  izotóp gerjesztett állapotává alakul, azaz egyik neutronja protonra, elektronra és antineutrínóra bomlik:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ . Mivel a  $^{60}\text{Co}$   $S = 5$ , a  $^{60}\text{Ni}$   $S = 4$ , a kirepülő elektron és antineutrínó pedig  $S = 1/2$  spinnel rendelkezik, a megmaradási törvények előírják, hogy a végállapotú részecskék impulzusmomentuma a  $^{60}\text{Co}$ -é irányába mutasson (2. ábra). A mágneses tér a  $^{60}\text{Co}$  impulzusmomentumát beállítja, a hűtés pedig a rezgését minimalizálja, a kirepülő elektron impulzusmomentuma (spinje) tehát a mágneses tér irányába fog mutatni. A neutrínó spinje, elhanyagolhatóan kicsi tömege miatt, párhuzamos az impulzusával. A paritásmegmaradás itt tükrösszimmetriát feltételez, akkor tehát az elektronok valamennyi irányban egyforma valószínűséggel repülnek, annak sértése viszont valamelyik irányt előnyben fogja részesíteni.

Az eredmény megdöbbenetete a fizikusvilágot: az elektronok túlyomórészt a mágneses térrel ellenkező irányban léptek ki (2. ábra), ami azt jelentette, hogy a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti a tükrösszimmetriát és a paritás megmaradását: a mozgásiránnyal szemben (balra) polarizált részecskéket és a mozgásirányban (jobbra) polarizált antirészecskéket részesíti előnyben. *Wolfgang Pauli* az eredmény hallatán kijelentette: *Nem tudom elbinni, hogy Isten balkezes!*

Az ugyancsak a Columbia-egyetemen dolgozó *Leon Lederman* csoportja, hallván a Wu-kísérlet első eredményeiről, sokkal egyszerűbb mérésbe kezdett [4]. Pozitív pionokat állítottak meg szénben. A pionok gyenge kölcsönhatásban elbomlanak müonok ki-

3. ábra. Lederman kísérlete [4]: A szénben lefékeződő pionok bomlásánál keletkező müonok lelassulnak és a mágneses térben precesszáva időben változó irányban bocsátják ki a bomlási pozitronokat, ami a tükrözési szimmetria és paritásmegmaradás sértését jelenti.



4. ábra. A  $\mu\text{SR}$ -módszer alapja: a pozitív pion polarizált müonra bomlik; a müon bomlásánál keletkező pozitron elsősorban a müon polarizációs irányában lép ki, és precessziós frekvenciája a mágneses tér erősségével arányos.

bocsátásával,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ . A müonok polarizáltak keletkeznek: mivel a pion spinje zérus és a keletkező leptonoké  $1/2$ , az impulzusmegmaradás miatt a müon és a neutrínó spinje egymással szemben fog állni. A müon bomlása is gyenge kölcsönhatás,  $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \nu_\mu$ , és ha nincs tükrösszimmetria, a pozitronok a müon polarizációs irányában fognak kilépni. A müonok mágneses térben precesszálnak, azaz a spinjük kis mágnesként forog, a pozitronokat tehát a tükrösszimmetria sértése esetén a rögzített helyzetű detektor időben változó intenzitással észleli. Amint a 3. ábra mutatja, a kilépő pozitronok valóban a müon spinjének irányát követik, a paritás tehát nem marad meg ebben az esetben sem.

A Lederman-kísérlet néhány nap alatt igazolta a paritásértés elméletét, a szerzők azonban nem közölték eredményüket addig, amíg a Wu-csoport is el nem készült. Így a két cikk, [3] és [4] a *Physical Review* ugyanazon számában, egymást követve jelent meg; Wuék Lee-nek és Yangnak mondtak köszönetet az elméletért, míg Ledermanék Lee-nek az elmélet elmagyarázásáért és Wunak előzetes eredménye közléséért. Nem sokkal később *Telegdi Bálint* kísérlete is igazolta a gyenge kölcsönhatás paritásértését.

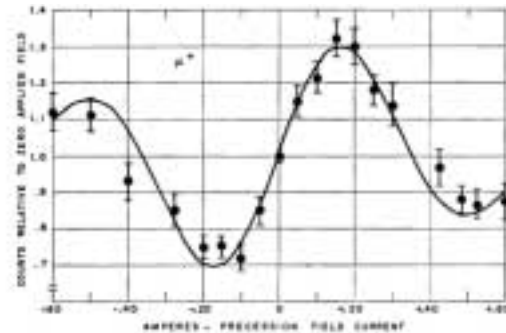
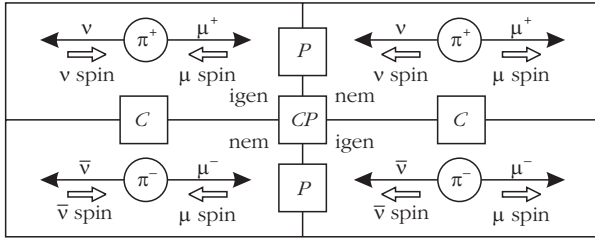


Fig. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution  $1 - \frac{1}{2} \cos^2 \theta$ , with counter and gate-width resolution folded in.



5. ábra. A pionbomlás tükrözési szimmetriája: a gyenge kölcsönhatás sajátállapotait – balra polarizált neutrínó és jobbkézes antineutrínó – a CP-tükrözési szimmetria kapcsolja össze, a töltés- és paritás-szimmetria önmagában nem teljesül.

A Lederman-kísélet messzemenően túlmutatott a paritásvértés igazolásán: nemcsak sikerült megmérniük a müon mágneses momentumát, de alapjául szolgált a ma már széles körben elterjedt szilárdtestfizikai-kémiai vizsgálati módszernek, a  $\mu$ SR-nek. A rövidítés jelentése hármas: müonspin-rezonancia, -rotáció és -relaxáció. A módszer elve az, hogy a polarizált müonok precessziós frekvenciája,

$$\omega = \frac{eB}{m_\mu c},$$

a müon helyén méri a  $B$  mágneses teret (rotáció). Ez jellegzetes értékeket vehet fel bizonyos kitüntetett pontokban, például rácshibákban vagy kémiai gyökökkel kötésben (rezonancia). A müon depolarizációs ideje (relaxáció) is jellemzi a közeg mágneses tulajdonságait.

### A CP-sértés felfedezése

Mint korábban említettem, a paritásvértés felfedezése megrázta a fizikusközösséget, és arra indította, hogy olyan, addig abszolútnak tekintett szimmetriát is ellenőrizzen, mint a töltés és a tér együttes tükrözésével szembeni viselkedést kifejező CP-invariancia. A CP-tükrözés hatását az 5. ábra illusztrálja: a pozitív és negatív pion lehetséges bomlásai közül a gyenge kölcsönhatás paritásvértő volta csak azokat engedi meg, amelyekben balra polarizált neutrínó és jobbra polarizált antineutrínó keletkezik; ezeket az állapotokat a CP-szimmetria kapcsolja össze. Vegyük észre, hogy a müonok polarizációja ennek ellentmond: az impulzusmomentum megmaradása azt diktálja, hogy a két keletkező fermion spinje ellenkező irányba mutasson, de a (csaknem) zérus tömegű neutrínóé csak a mozgás egyenesébe eshet. A paritásvértés maximális volta vezet tiszta végállapotokra.

A  $\tau$ - $\theta$  paradoxon tehát megoldódott, a két részecske azonosnak bizonyult és K-mezon (kaon) lett a neve. Négyféle állapota van:  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$  és anti- $K^0$  ( $\bar{K}^0$ ). Az elektromosan semleges  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$  részecskék egyedülálló lehetőséget kínál-

nak a CP-szimmetria megmaradásának ellenőrzésére. Ha igaz a CP-szimmetria, akkor pozitív(negatív) CP-sajátállapot pozitív(negatív) CP-sajátállapotba bomlik. A  $K^0$  és  $\bar{K}^0$  részecskék egyike sem CP-sajátállapot,  $CPK^0 = \bar{K}^0$ . (A CP-tükrözés itt egy a jelen cikk témáján kívül eső, egyedül az erős kölcsönhatás által „tiszteltben tartott” kvantumszám, a „ritkaság” előjelét változtatja az ellenkezőjére.) CP-sajátállapotok a kettő kombinációi lesznek:

$$K_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0); \quad K_2^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0).$$

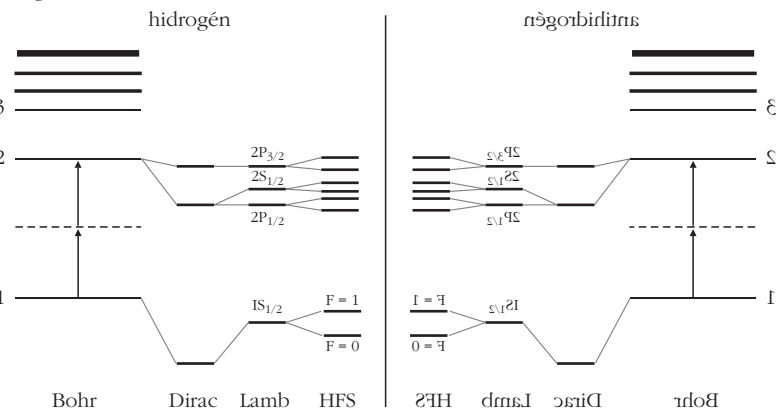
A CP-tükrözés hatására  $K_2$  előjelet vált, míg  $K_1$  nem, tehát  $K_1$  CP-pozitív,  $K_2$  pedig CP-negatív állapot.

A K-mezonok gyenge bomlása pionokat eredményez. Mivel a pion CP-negatív, a  $K_1$  kettő, a  $K_2$  három pionra tud bomlani (egy piont az impulzusmegmaradás tilt). A háromrészecskés bomlás valószínűsége sokkal kisebb, ezért a  $K_2$  élettartama csaknem 3 nagyságrenddel hosszabb, mint a  $K_1$ -é. Ha tehát semleges kaonokat keltünk, és elég sokáig várunk (például hosszú nyalábvezetékben röptetve), a rövid élettartamú  $K_1$  elbomlik, és csak a hosszú élettartamú  $K_2$  marad meg a részecskenyalámban. Christenson, Cronin, Fitch és Turlay 1964-ben kimutatták [5], hogy az így nyert tiszta  $K_2$  is tud – ha nagyon ritkán is – két pionra bomlani, ami azt jelenti, hogy a gyenge kölcsönhatás a CP-szimmetriát is sérti, nemcsak a P tükrözési szimmetriát, bár a paritásvértéssel ellentétben a CP-sértés igen gyenge. Ennek az igen kicsi effektusnak a kimutatásáért Cronin és Fitch is Nobel-díjat kapott, igaz, csak 1980-ban.

### A CPT-szimmetria ellenőrzése

Senki sem kételkedik komolyan a CPT-invariancia érvényességében, hiszen az elméleti fizika egyik alaptételéről van szó. Ugyanakkor a paritás- és a CP-sértés felfedezése szinte kötelezővé teszi valamennyi szimmetriatörvényünk lehető legpontosabb kísérleti

6. ábra. Hidrogén és antihidrogén spektruma. A  $2S-1S$  átmenet különösen alkalmas a CPT-invariancia ellenőrzésére, mivel csak két fotonnal gerjeszthető, ezért hosszú az élettartama, keskeny a vonala, és egymással szemben haladó fotonok esetén a hőmozgásból eredő vonalszélesedés is csökkenthető.



ellenőrzését. Kézenfekvő kísérlet részecske és antirészecske tulajdonságainak összehasonlítása. A *CPT*-szimmetria eddigi legpontosabb ellenőrzése a semleges kaon és antikaon tömegének mérése: relatív különbségük  $10^{-18}$ -nál kisebbnek adódott. Igen pontosak korunk lézerspektroszkópiái mérései (*J.R. Hall* és *T. Hänsch* ezért kapott 2005-ben Nobel-díjat), így a hidrogén és antihidrogén spektrumának összehasonlítása is igen ígéretes (6. ábra).

A CERN antiproton-lassító berendezése a *CPT*-invariancia kísérleti ellenőrzésére épült, és jelenleg három kutatócsoport is (ALPHA, ASACUSA és ATRAP) antihidrogén-spektroszkópia előkészítésével foglalkozik. A japán-osztrák–magyar ASACUSA emellett antiprotonokat fogat be atomi pályákra, és lézerspektroszkópia segítségével tanulmányozza az antiproton átmeneteit. Ebből is igen precíz összehasonlításra nyílik lehetőség az antiproton és a proton tömege és töltése között.

## Elveszett szimmetriák?

Amint láttuk, a *CPT*-szimmetria alapvető, abszolút és a fizika jelenlegi állása szerint nem sérül. Láttuk, hogy a gyenge kölcsönhatás az alapvető tükrözési szimmetriák közül kettőt is sért, a paritás-szimmetriát maximálisan, a *CP*-invarianciát viszont csak parányit.

A részecskefizika mai elmélete, a *Standard Modell* a kölcsönhatásokat bizonyos szimmetriák eleve feltételezéséből származtatja (amelyeket aztán, mint említettük, mégis sérteni kell). Kimagasló sikere ellenére, hiszen az összes máig rendelkezésre álló részecskefizikai mérési adatot kitűnően leírja, komoly nehézségekkel küszködik. Nem tudja magába integrálni a gravitációs kölcsönhatást, nem ad számot a Világegyetem tömegének jelentős részét kitevő, rejtélyes sötét anyagról, és nem magyarázza világunk furcsa aszimmetriáit: miért nincsenek antianyag-galaxisok, és a gyenge kölcsönhatás miért éppen a balra polarizált részecskéket kedveli.

A fenti problémákat talán megoldja a *szuperszimmetria* elmélete, amely feltételezi, hogy minden fermionnak és minden bozonnak létezik azonos tulajdonságokkal rendelkező párja a másik csoportban, tehát például az elektronnak ( $S = 1/2$ ) van egy hasonló tömegű és töltésű  $S = 0$  spinű partner részecskéje. Ez a szimmetria alacsony energián biztosan sérül, hiszen ezeket a részecskéket hiába kerestük az eddigi gyorsító kísérletekben, nem sikerült megfigyelnünk őket. Ha léteznek, a tömegük a hidrogénatoménak legalább százszorosa. Maga a modell viszont rendkívül vonzó, mert pontos számításokat tesz lehetővé, nem mond ellent az eddigi megfigyeléseknek és megoldja a Standard Modell – legalábbis, bizonyos – problémáit. A sötét anyag, például, magyarázható a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske létezésével. A modell szerint ugyanis nagyenergiájú részecske-ütközésekben keletkezhetnek szuperszimmetrikus részecske–antirészecske párok, de azok, miután szétrepültek, a meg-

maradási törvények miatt csak újabb szuperszimmetrikus részecske kibocsátásával tudnak bomlani. Így a legkönnyebb ilyen részecske stabil lesz, de elektromosan semleges lévén, nem észlelhető, csak a gravitációs hatásán keresztül.

Befejezésül idézem a Nobel-díjas *Frank Wilczek* igen mély megfigyelését *Elveszett szimmetriák nyomában* című cikkéből, amely a *Nature* a fizika évének szentelt számában jelent meg [6]: „A fizika alapvető egyenletei több szimmetriával rendelkeznek, mint az aktuális fizikai világ.” Valóban, láttunk több szimmetriát, amely segít a matematikai formalizmus felépítésében, de sérül: a térbeli tükrözését és a *CP*-szimmetriát sérti a gyenge kölcsönhatás, a Higgs-mechanizmus spontán szimmetriasértése segít a tömegképződésben és az elektromos és gyenge kölcsönhatás egyesítésében, az alacsony energián nyilvánvalóan sérülő szuperszimmetria pedig segít a Standard Modell elméleti nehézségeinek megoldásában.



A szerző hálásan köszöni *Tóth Kálmán* segítő tanácsait a szimmetriák tárgyalásával kapcsolatban. A témához kapcsolódó kutatásokat az OTKA T042864 és T046095 és az EU FP6 509252 (RIPNP-GRID) és 031688 (EGEE2) jelű pályázatai támogatják.

## Irodalom

1. Horváth D., Szimmetriák az elemi részecskék világában, *Fizikai Szemle* 53/4 (2003) 122–127
2. T.-D. Lee, C.-N. Yang, Question of Parity Conservation in Weak Interactions, *Physical Review* 104 (1956) 254–258
3. C.S. Wu és társai, Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay, *Physical Review* 105 (1957) 1413–1414
4. R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich, Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon, *Physical Review* 105 (1957) 1415–1417
5. J.H. Christensen, J. Cronin, V. Fitch, R. Turlay, Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K_2^0$  Meson, *Physical Review Letters* 13 (1964) 138–140
6. F. Wilczek, In search of symmetry lost, *Nature* 433 (2005) 239

