

# ANTIRÉSZECSKÉK?

Horváth Dezső – Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

és Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia

Trócsányi Zoltán – Eötvös Loránd Tudományegyetem, ELKH-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport, Budapest és Debreceni Egyetem, Debrecen

A *Fizikai Szemle* több cikkében is foglalkoztunk az antianyag előállításával és vizsgálatával mind kísérleti [1, 2], mind pedig elméleti [3] szempontból. Most az antirészecskék fizikájával kapcsolatos elméleti problémákat kívánjuk feszegetni és feltárni, erre utal a cím kérdőjele. Naivul megkérdezhethetnénk, hogy miután Dirac matematikailag megjósolta létüket és szinte azonnal meg is figyelték őket, a kísérletek pedig igazolták és azóta is igazolják az elméleti várakozásokat [4]: vajon hol rejtőzhet itt még probléma?

## A Dirac-egyenlet

Kétkelkedhetünk a tetszés tudományos hatékonyságában, de tény, hogy a szimmetriát általában szépnek látjuk, és a szimmetriák alapvető szerepet játszanak nemcsak a művészetben, de a természettudományokban is a biológiától és kémiától indulva, le egészen az elemi részecskék fizikájáig [5]. *Erwin Schrödinger* kvantummechanikai mozgásegyenlete nem tetszett Paul Diracnak, mert az energiát és az időt a lendülettől és helykoordinátáktól elválasztva kezelte, az pedig ellentmond az Einstein-féle speciális relativitáselmélet egységes téridőfogalmának. Dirac először egy négyzetes egyenletet írt fel az elektronra, de azt elvetette (abból lett később újra felfedezve a bozonok Klein-Gordon-egyenlete), és inkább négyzetgyököt vont belőle. Ide kívánczik *Richard Feynman* sokat idézett mondása: „Fiatal koromban Dirac volt a hősöm.



*Horváth Dezső* Széchenyi-díjas kísérleti részecskefizikus. 1970-ben végzett az ELTE-n, kutatásait Dubnában és Leningrádban kezdte, a kanadai TRIUMF, az amerikai BNL, a svájci Paul-Scherrer Intézet, az olasz INFN, majd a CERN következett. Budapest-Debrecen kutatócsoportokat szervezett CERN-kísérletekre. 2006 óta koordinálja a magyar fizikatanárok részecskefizikai oktatását a CERN-ben. Emeritus professzor, magántanárként részecskefizikát oktat a Debreceni és a kolozsvári Babeş-Bolyai Egyetemen.



*Trócsányi Zoltán* fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. *Demény András*sal társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv Mechanika részének, *Horváth Dezső*vel pedig a *Bevezetés az elemi részek fizikájába* című, 2019-ben angolul is megjelent tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire százezernél több független hivatkozást kapott.

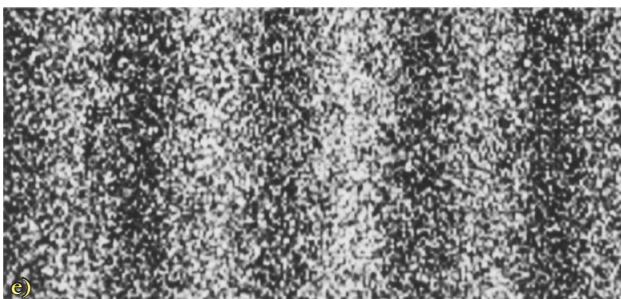
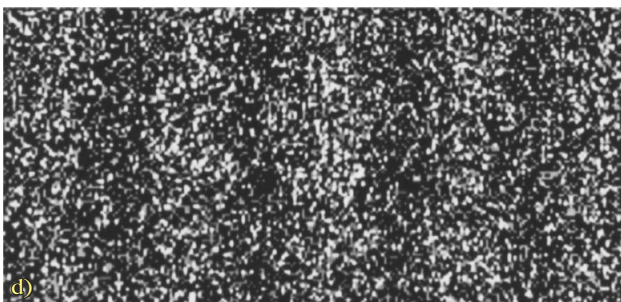
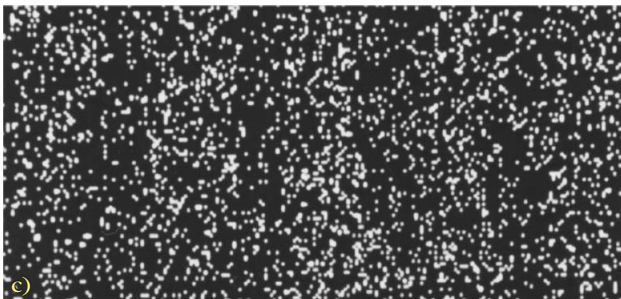
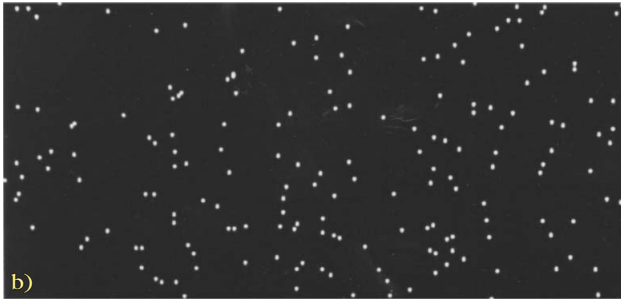
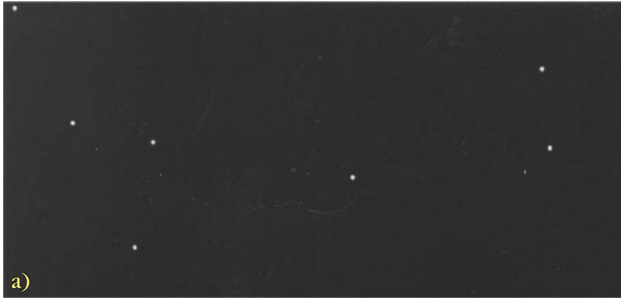
Új fizikai módszert talált ki, valóságos áttörést. Vette a bátorságot, hogy megtippelje egy egyenlet alakját, amelyet most Dirac-egyenletnek hívunk, és csak azután próbálja értelmezni.”

Dirac tehát 1928-ban közölt egy lineáris egyenletet, amely számot adott az elektron saját perdületéről, a spinről is. A kétféle spinállapotnak megfelelően kívül volt azonban még két, feleslegesnek látszó megoldása is: pozitív töltésű és negatív energiájú, azaz negatív tömegű elektron kétféle spinállapotban. Mivel negatív tömeg nem létezhet, Dirac ezt akkor virtuális elektronhiánynak értelmezte. Nyolc évvel később azonban kozmikus sugarakban *Carl Anderson* megfigyelt egy pozitív töltésű elektront, a pozitront, amely az elektron antirészecskéje kellett, hogy legyen. Fokozatosan kiderült, hogy valamennyi anyagi részecskénknek, az alapvető fermionoknak (*1. táblázat*) és a belőlük képezhető összetett részecskéknek, a hadronoknak létezik antirészecskéje ellentétes elektromos töltéssel, de egyébként azonos tulajdonságokkal. Érdekes volt az ezzel kapcsolatos Nobel-díjak logikája: Schrödinger és Dirac 1933-ban együtt kapták, miután Anderson kimutatta a pozitront, maga Anderson pedig három évvel később.

## Töltés

A töltés, amely a részecskéket és antirészecskéiket megkülönbözteti, nemcsak elektromos lehet, hiszen például a kvarkoknak színtöltése is van, amelyet az erős kölcsönhatáshoz kötünk, az antikvarkoknak pedig antiszínük van. Sok más töltésről szoktunk még beszélni, amelyek kevésbé közismertek, mint az elektromos töltés. Minthogy a töltés lényeges része az antirészecske meghatározásának, érdemes egy kicsit jobban körüljárni, mit értünk töltés alatt. Tesszük ezt azért is, mert az atom- és szubatomi fizikában elterjedt részecskefogalom és a klasszikus fizika ponttöltése könnyen a töltés félreértéséhez vezethet.

Közismert kísérlet, hogy elektronokkal egyenként is el lehet végezni a Young-féle kétréses kísérletet [6]. Az egyes elektronok az ernyőn pontszerűen jelennek meg, és jogosnak tűnik a kérdés: melyik résen haladt át az elektron? Azonban, ha sok elektronnal, de még mindig egyesével végezzük a kísérletet, akkor a fényhullámoknál is tapasztalt jellegzetes interferenciakép jelenik meg az ernyőn (*1. ábra*). A jelenség hagyományos értelmezése, hogy az elektronnak kettős, mind részecske-, mind hullámtermészete van. Azt is szoktuk mondani, hogy „az elektron elektromos töltése  $-e$ ,



1. ábra. Elektron interferenciája két résen; a)–e): egyre több elektron haladt át a réseken.

ahol  $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$  C (pontosan rögzítettük ezen az értéken) az oszthatatlan elemi töltés”, ami vélhetően az elektron részecsketermészetéhez köthető. Ha ez így van, akkor ismét felmerülhet az eredeti kérdés, kicsit átfogalmazva: melyik résen ment át az elektron töltése?

A paradoxon következetes feloldására a részecskefizika mezőelmélete ad választ, amely szerint az elektronok között ható erőt az elektromágneses mező – vagy általánosabban *a fermionok között ható erőt mértékmezők* – közvetíti, és a töltések *csatolások a fermionok részecskeárama és a mértékmező között*. A csatolás erősségét a töltés nagysága (például az elektromágnes erőnél az elektron esetében  $-1$ , az  $u$ -kvark esetében pedig  $+2/3$ ) és a csatolási paraméter – például az elektromosságban az  $e$  elemi töltés – szorzata adja. A két résen a részecskeáram halad át, nem a töltés.

A kvantumelméletben a jelentéssel bíró számokat kvantumszámoknak hívjuk és operátorok sajátértékeit jelentik, ami igaz az elemi részecskék töltéseinek nagyságát jellemző számokra is. A részecskefizikai standard modell többféle kölcsönhatást ír le, és mindegyikhez különböző töltésoperátorok tartoznak. Az elemi mezők sokféle töltésoperátor sajátállapotai meghatározott sajátértékkel (1. táblázat). Az elektronmező például nem nulla sajátértékű sajátállapota az elektromos töltés operátorának (sajátértéke  $-1$ ), a gyenge izospin harmadik komponense  $T_3$  operátorának ( $-1/2$ ), a hipertöltés  $Y$  operátorának ( $-1/2$ ), az  $L$  leptonszám-operátornak ( $+1$ ); a zárójelekben mindenhol a sajátértékek szerepelnek. Továbbá triviális (nulla sajátértékű) sajátállapota a színtöltés  $t$  operátorának, a barionszám  $B$ , az erős izospin harmadik komponense  $I_3$  operátorának és a kvarkíz-operátoroknak. Az antirészecskékre vagy *antimezőkre valamennyi sajátérték ellentétes előjelű*.

A kölcsönhatásokról nem beszélve az antirészecskék pontosan ugyanolyanok, mint a megfelelő részecskék, csupán minden töltésük a részecske töltésének éppen  $(-1)$ -szerese. Ebben meg is nyugodhatnánk, ha nem lennének kölcsönhatások. Például a gyenge kölcsönhatás sért bizonyos töltésszimmetriákat. Nyilvánvaló tehát, hogy az antirészecske fogalmát érdemes alaposabban körüljárni.

## Megvannak az antirészecskék!

Az antirészecskék a fermionokra vonatkozó Dirac-egyenlet negatív energiájú megoldásai, tehát valamennyi fermionnak – az elemieknek és az összetetteknek egyaránt – létezik antirészecskéje. A bozonokra nem érvényes a Dirac-egyenlet, ezért rájuk elvileg nem is értelmezhető a fogalom. A mezonok ugyan bozonok, de kvarkokból, tehát fermionokból állnak. Ezért ha egy mezonban a kvarkot antikvarkra, az antikvarkot meg kvarkra cseréljük, az eredeti mezon antirészecskéjét kapjuk. Ilyen pár például a negatív és pozitív pion:  $\pi^- = [\bar{u}d]$  és  $\pi^+ = [u\bar{d}]$ , ahol  $u$  és  $d$  a két legkönnyebb kvark és az antirészecskét felülvonás jelzi. Szokták a gyenge kölcsönhatást közvetítő  $W^+$  és  $W^-$  bozont is egymás antirészecskéinek tekinteni, ami a felületes antirészecske-fogalom szerint lehetséges, de *valójában értelmetlen csakúgy, mint az a gyakran olvasható kijelentés, hogy a foton a saját antirészecskéje*.

1. táblázat								
Leptonok és kvarkok								
	1. család	2. család	3. család	$q$	$T_3$	$y$	$B$	$L$
leptonok	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	0 -1	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$	-1	0	+1
kvarkok	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0

Leptonok és kvarkok, az alapvető fermionok (anyagi részecskék) három családja.  $q$  az elektromos töltés sajátértéke,  $T_3$  a gyenge izospin harmadik komponenséé, amely a párok alsó és felső fermionjait azonosító kvantumszám,  $y = 2(q - T_3)$  pedig az  $Y$  hipertöltés operátorának sajátértéke.  $B$  és  $L$  a barionokat és leptonokat azonosító kvantumszám:  $B$  a kvarkokra harmados, mert három kvark alkot egy bariont,  $L$  viszont a leptonokra egész. A fermionokat a gyenge kölcsönhatás balkezes (L, left) párokba rendezi és az erős kölcsönhatástól eltérően azonosítja a részecskék fajtáját, amit a kvarkok megvesszőzése jelöl.

mérési adatokkal, a  $CPT$ -invariancia legsúlyosabb bizonyítéka. Tekintsük példaként az elektron-positron szétsugárzást (2. ábra) két fotonra: egyszerű tükrözéssel megkapjuk belőle a foton Compton-szóródását elektronon, és ezt az eljárást gyönyörűen igazolják a mérések.

A Dirac-egyenletbeli negatív tömeget a részecskefizika standard modellje egyszerűen kezeli: részecskékkel számol antirészecske helyett és a  $t$  idő és az  $E$  energia kapcsolataira hagyatkozva az időtükrözést komplex konjugálással kombinálja. Mivel a nyugvó részecske energiája  $e^{iMt}$  alakban jelenik meg, az  $i \rightarrow -i$  konjugálás a  $t \rightarrow -t$  időtükrözéskor minden más változatlanul hagyása mellett megőrzi az  $M$  tömeg eljölét.

## Negatív energia?

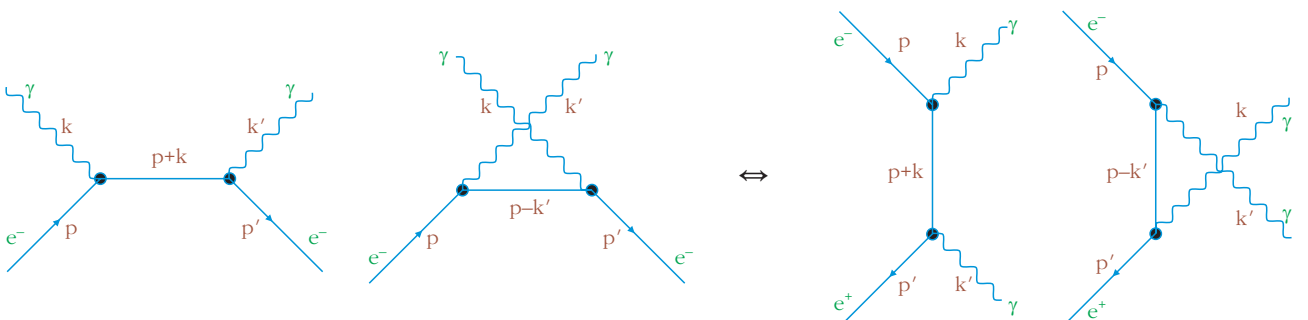
Jó, tudjuk, hogy milyenek az antirészecskék, meg is figyeltük azokat, de negatív energiájuk – ami nyugalmi állapotban negatív tömeget feltételez – hogyan értelmezhető? A fizika egyik alaptörvénye a  $CPT$ -invariancia [1, 5], amely kimondja, hogy három tükrözés egyidejű végrehajtásakor a mikrorészecskék mérhető tulajdonságai nem változnak meg. A három transzformáció a töltésmegfordítás (operátorának jele  $C$ , mint charge), amely részecskéből antirészecskét készít, a térkoordináták tükrözése ( $P$  paritás) és az időmegfordítás ( $T$ , mint time). E tükrözések operátorait a fermionmezőkön értelmezzük jól meghatározott matematikai egyenletekkel. Ebből egyrészt azonnal következik, hogy a töltéseken kívül a részecske és antirészecskéje tulajdonságai azonosak, de az is, hogy kísérleti szempontból egy mozgó antirészecske kezelhető téridőben ellenkező irányban haladó részecskének. Ezt a részecskereakciókat leíró egyenletek, a Feynman-gráfok alaposan ki is használják, és az, hogy az így végzett számítások eredménye a lehető legpontosabban egyezik a

## Mennyire egyformák?

A standard modell tényleg kimondja részecske és antirészecske egyenértékűségét? Ez elvben következik a  $CPT$ -invarianciából, de csak szabad részecskére. Mi a helyzet a kölcsönhatásokkal? Részecske és antirészecske tömege azonos, tehát igaz a gravitációra. A szín-szín, szín-antiszín és antiszín-antiszín kölcsönhatás azonos, tehát igaz az erős kölcsönhatásra is. Az elektromágnességnél már van egy kis csavar, ugyanis – a kölcsönhatások között egyedülálló módon – azonos előjelű töltések taszítják egymást, de a kétféle (pozitív, illetve negatív) töltés egyforma erővel, tehát ott is rendben van a dolog.

Mint mindenütt, a gyenge kölcsönhatás itt is beleszól a levesbe. A paritásértés [5, 7] miatt ugyanis a béta-bomlás, mint például a müoné ( $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$  és  $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ ) balkezes (azaz általában a mozgásirányukkal ellentétesen, balra polarizált) részecskéket és jobbkézes antirészecskéket *termel*, ami nyilvánvaló különbséget jelent közöttük. Felmerül a kérdés, vajon nem kellene-e az antirészecskét  $C$  helyett  $CP$ -transz-

2. ábra. A foton-szóródás elektronon (bal oldalt) és a pozitron-szétsugárzás két fotonra (jobbra) Feynman-gráfja, az idő vízszintesen balról jobbra halad. Elforgatással megkapjuk egyikből a másikat. A fotonok sorrendje felcserélhető, ezért kell két folyamat összege mindkét esetben. Az antirészecskét téridőben ellenkezőleg mozgó részecskéként kezeljük, nyíla ezért mutat ellenkező irányba.



formációval definiálnunk? Az békén hagyná a többi kölcsönhatást, hiszen azokat nem érinti a paritás változása. Sajnos azonban az sem működik, mert a gyenge kölcsönhatás még a  $CP$ -invarianciát is sérti [1, 7, 8], és a  $CPT$ -invariancia teljesülése miatt sérti az időtükrözést is.

## Steril neutrínók?

A neutrínók mindenféle kivételek, és természetesen a gyenge erő kiralitása (bal- és jobbkezes állapotok megkülönböztetése) [7] miatt. A standard modell ezt egyszerűen lekezeli: feltételezi, hogy neutrínók tömege nulla, és azzal az egész problémakört a szőnyeg alá söpri. Azonban ez látszólag tönkre is teszi a modellt, hiszen a neutrínók ízrezgésének felfedezése megmutatta, hogy nekik is van tömegük. A neutrínószektoron kívül azonban ez általában nem rontja el a számításokat, mert a neutrínó tömege az észlelhetőség határán van, közvetlenül nem is sikerült megmérni, csak az interferenciában és azon keresztül az ízrezgésükben megjelenő, nagyon kicsi tömegkülönbségüket [9]. Ráadásul a neutrínókra a standard modellben csak egyféle erő hat, a gyenge. Az ízrezgéseket viszont általában annak tulajdonítjuk, hogy az adott részecskére kétféle erő hat, és azokhoz különböző sajátállapotok tartoznak, emiatt a neutrínónak nem is lenne szabad ízváltozást mutatniuk.

Belenyugodhatunk-e, hogy tömeges a neutrínó? Nincs más lehetőségünk, de ez azonnal kinyit egy Pandora-szelencét. A *tömeges neutrínónak* – ellentmondásban a standard modellel – *kell lennie jobbkezes, az antineutrínójának pedig balkezes változata*, a gyenge erő viszont csak az egyikre hat. A *gyenge erő dublettjében csak balkezes részecske és jobbkezes antirészecske szerepelhet*, ezért a standard modell állatseregletéhez hozzá kell adnunk szinglett állapotokként a jobbkezes fermionokat és a balkezes antifermionokat, amelyek a standard modellben a neutrínók kivételével valóban léteznek. A kvarkok esetében ezeknek csak erős és elektromágneses, az elektromosan töltött leptonokéban pedig csak elektromágneses kölcsönhatásuk van. A standard modell szerint viszont a jobbkezes neutrínónak és a balkezes antineutrínónak nincs töltött leptonpárja, és semmiféle kölcsönhatásban nem vehet részt, steril neutrínónak hívjuk. Ezt az elképesztő problémát a legegyszerűbben úgy lehet megoldani, ha a standard modellhez újabb, nagyon gyenge kölcsönhatást adunk. Többek között ezen dolgozik cikkünk egyik szerzője is [10].

Látjuk tehát, hogy neutrínó és antineutrínó a töltésmegfordításon túl is különbözhet egymástól. Ezt a problémát megoldaná, ha a neutrínó a saját töltéskonjugáltja, azaz antirészecskéje (*Ettore Majorana* után Majorana-részecske) volna. Ezt semmi nem tiltja a standard modellben, és egy érdekes jelenséghez vezetne, a neutrínómentes kettős béta-bomláshoz, ami-

kor az egyik bomlás neutrínót, a másik antineutrínót bocsátana ki, de a két folyamat kompenzálja egymást. Több ilyen reakció is lehetséges, és jó néhány kísérlet keresi, mindeddig sikertelenül.

## Sötét anyag?

Tudvalevő, hogy a Világegyetem gravitáló energiájának mintegy negyed része a galaxisok körül gomolygó, elektromágneses és erős erővel szemben közömbös sötét anyag, amelynek mennyisége a csillagokban és kozmikus porban, gázban tartózkodó anyag sokszorososa. A standard modellben ilyen részecske nem létezik. Az ismert neutrínók nem lehetnek, mert bár trilliónyi van belőlük, és a számuk a csillagok aktivitásával állandóan növekszik, a tömegük és ezzel hozzájárulásuk az Univerzum tömegéhez elhanyagolható. Ráadásul gyakorlatilag fénysebességgel röpködnek, tehát nem alkothatnak lassan mozgó felhőt a galaxisok körül.

A részecskefizikusok egyik kedvenc elmélete a standard modell kiterjesztésére a szuperszimmetria, amely feltételezi, hogy az alapvető fermionok és bozonok párban léteznek, azonos tulajdonságokkal, csak a spinjük különböző. A legkönnyebb ilyen semleges fermion, lehet például a foton vagy a Z-bozon szuperszimmetrikus partnere, nem tud hova lebomlani, de a szuperszimmetria sérülése miatt elegendően nagy lehet a tömege, hogy a sötét anyag alkatrésze lehessen. Jogos azonban a kérdés, hogy egy fermionnak kell legyen antirészecskéje, amíg a bozonoknak nincs. Hogy megőrizzük a számszerű megfeleltetést, fel kell tételeznünk, hogy a sötét anyagot Majorana-részecske alkotja, tehát a saját antirészecskéje. Ez persze azt is jelenti, hogy ütközéskor szétsugározással megsemmisülnek, ami megmagyarázza, miért nem sűrűsödnek a galaxisok magjában.

Van azonban másik jelölt is a sötét anyag részecskéjére: a steril neutrínó, ha elegendően nagy a tömege. Ez is a standard modell egyik kiterjesztése: olyan mechanizmust feltételez, amelyben a szokásos neutrínóknak sokkal nagyobb tömegű steril párja van, és az alkothatja a sötét anyagot.

## Összegzés

A standard modell, a részecskefizika rendkívül sikeres elmélete kicsit csuklik, amikor az antirészecskékről van szó. A probléma forrása az, hogy a standard modellben csak balkezes neutrínók és jobbkezes antineutrínók szerepelnek az elemi részecskék között, tehát a neutrínó és az antineutrínó a töltésmegfordításon túl is különbözik. Ezt a problémát a standard modell nem oldja meg. Mondhatjuk azt is, hogy az antineutrínót a többi részecskéhez hasonlóan a jól definiált töltéskonjugáltként értelmezzük, és feltételezzük, hogy a valóságban létezik balkezes antineutrínó is, de nem látjuk, mert arra a mikroszkopikus skálán

elhanyagolható gravitáció kivételével nem hatnak az ismert erők (steril). Ezen kívül a standard modell nem tud számot adni a neutrínók tömegéről és a Világ-egyetem sötét anyagáról, de valamennyi problémája megoldható, és nyilván meg is oldjuk majd, új kölcsönhatás vagy szimmetria bevezetésével.

## Irodalom

Valamennyi idézett cikk – az [5] tankönyv kivételével – teljes egészében megtalálható a világhálón.

1. Horváth Dezső: Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásértés 50 éve. *Fizikai Szemle* 57/2 (2007) 47.
2. Horváth Dezső: Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben. *Fizikai Szemle* 54/3 (2004) 90.
3. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában – a 2008. évi fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* 58/2 (2008) 417.
4. P. A. Zyla et al. [Particle Data Group]: Particle physics review. *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020 (2020) 083C01; <http://pdg.web.cern.ch/pdg>
5. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részek fizikájába*. Második, javított és bővített kiadás. TypoTex, Budapest, 2021.
6. O. Donati, G. P. Missiroli, G. Pozzi, An experiment on electron interference. *American Journal of Physics* 41 (1973) 639; <https://doi.org/10.1119/1.1987321>.
7. Horváth Dezső: Az elképesztő gyenge erő (kölcsönhatási furcsaságok). *Fizikai Szemle* 71/9 (2021) 294.
8. Radics Bálint, Trócsányi Zoltán: A CP-sértés nagysága a lepton-szektorban. *Fizikai Szemle* 71/3 (2021) 81.
9. Trócsányi Zoltán: Neutrínók interferenciája. *Fizikai Szemle* 66/6 (2016) 182.
10. T. J. Kärkkäinen, Z. Trócsányi: Nonstandard interactions and sterile neutrinos in super-weak U(1) extension of the standard model. *J. Phys. G* 49 (2022) 045004.