

A CP-SZIMMETRIASÉRTÉS KÍSÉRLETI MEGFIGYELÉSE NEUTRÍNÓÍZ-OSZCILLÁCIÓKBAN

Radics Bálint
Institute for Particle Physics and Astrophysics
ETH Zürich, Svájc

A *Tokai-to-Kamiokande* (T2K) kísérlet nemrég tette közzé azokat az eredményeket, amelyek alapján a neutrínók ízátalakulásai során [1] (a leptonok közül először) a CP-szimmetriasértés [2, 3] jeleit mutathatják. Az elemi részecskék világában a szimmetriasértés jelensége ma már nem meglepő. Azonban a gyenge kölcsönhatásban résztvevő neutrínóknak mindig is különleges szerepük volt a természet alapvető építőköveinek megismerésében. A neutrínók egy sor különleges kölcsönhatási és szimmetriasértési tulajdonsággal rendelkeznek. Bár az anyaggal csak a gyenge kölcsönhatáson keresztül lépnek kapcsolatba, az Univerzumban a fotonok után a második legsűrűbben előforduló elemi részecskék. Már csak ezért is fontos kérdés, hogyan mérték meg ezt a jelenséget, milyen újabb tulajdonságaikra kezd fény derengeni a kísérletekben, illetve tágabb összefüggésben ezeknek milyen jelentőségük van.

Szimmetriák, szimmetriasértés, neutrínók

A makroszkopikus, emberi méretskálán megszokott, főleg vizuálisan elképzelt világunkban a szimmetria jelensége intuitív: tükrözéshez, elforgatáshoz vagy hasonló geometriai transzformációhoz kötődik. Beszélhetünk diszkrét (például tükrözés), illetve folytonos (elforgatás, eltolás) szimmetriatranszformációkról, amelyek az adott tárgyat vagy a geometriai alakzatot önmagába viszik át. Bár a geometriai szimmetria jelensége több ezer éve ismert a matematikában, az absztrakt szimmetriatranszformációk területe (a *Csoportelmélet* keretében) a tudomány viszonylag fiatal területe. Ennek ellenére a mikroszkopikus világban az elmúlt száz évben felfedezett kvantummechanikai jelenségek, a relativitáselmélet vagy az elemi részecskék és kölcsönhatásaik osztályozása absztrakt szimmetriák felismerése mentén történt. Léteznek elemi kölcsönhatások, amelyek pontos szimmetriatulajdonságokkal rendelkeznek és ez alapján tárgyalhatók. De



Radics Bálint az ETH Zürich kutatója. Kutatási területe a részecskefizikai standard modellen túli jelenségek tanulmányozása neutrínóoszillációkban, antianyagot létrehozó, illetve sötét anyagot direkt és indirekt módon kereső kísérletekben.

léteznek olyan kölcsönhatások is, amelyek éppen ellenkezőleg, inkább bizonyos szimmetriák megsértése révén nyernek fontos szerepet az osztályozásban (például a tértükrözési szimmetria vagy szakszóval *paritássértés* a gyenge kölcsönhatás esetén). A szimmetriák megléte, részleges vagy teljes hiánya a természetben (legalábbis ameddig nincs egy alapvetőbb elmélet) csak kísérleti úton állapítható meg.

Nem csak a mikroszkopikus, hanem a nagy méretskálán is megjelenik egyfajta szimmetriasérülés. A fizika egyik nagy rejtélye az Univerzumban megfigyelhető anyag-antianyag aszimmetria jelensége: amíg Világegyetemünkben alig van antianyag, addig anyag van bőven. Bár nem értjük a jelenség okát, hálásak lehetünk neki; ha ez a szimmetria nem sérülne az anyag és az antianyag egyenlő mennyiségben lenne jelen, és az élet sosem alakulhatott volna ki. *Andrei Sakharov* orosz fizikus javaslata alapján [4] néhány szükséges feltétel teljesülése esetén kialakulhat olyan Világegyetem, amelyben az anyag-antianyag szimmetria ilyen mértékben sérülhet. Ezen feltételek egyike olyan elemi folyamat léte, amelyben a CP-transzformációval szembeni szimmetria nem teljesül. Ezért van fontos jelentősége, hogy a neutrínók esetén is nem csupán fennáll ez a további szimmetriasérülés, de arra utaló kezdeti jelek is vannak, hogy a szimmetriasérülés elegendően nagy lehet, hogy a nagy méretskálákon tapasztalt anyag-antianyag aszimmetriát megmagyarázza [5].

Bármely elemi részecskét az antirészecskéjévé változtat, ha a töltésének előjelét megfordítjuk (töltés-, vagy C-tükrözés). Részecskék időben-térben lezajló szórási folyamatait áttranszformálhatjuk antirészecskék azonos szórási folyamataira, ha egyszerre elvégezzük a töltéstükrözést és időben, térben tükrözzük a koordinátarendszerünket (T- és P-tükrözések). Mikroszkopikus méretskálán minden folyamat szimmetriát mutat ezzel a kombinált (CPT) transzformációval szemben [6]. A P- és CP-szimmetriasértés jelenségét már megfigyelték részecskefizikai kísérletekben [7].

A CP-sértést mind a semleges Kaon, B- és D-mezon részecskék esetén megtalálták. A CP-sértést a kvarkszektorban a gyenge kölcsönhatási folyamatok magyarázzák. Azonban a kvarkoknál a szimmetriasérülés mértéke nem elegendően nagy ahhoz, hogy a Sakharov-feltételeken keresztül az Univerzumban megjelenő anyag-antianyag aszimmetria fokát helyesen megjósolja. Mindenesetre egy fontos mintául szolgál ahhoz, hogy feltételezzük: a CP-szimmetriasértés máshol is megjelenhet, és talán egyszer magyarázatot adhat az Univerzumban megfigyelhető anyag-antianyag

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13} \exp(-i\delta_{CP}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13} \exp(i\delta_{CP}) & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

1. táblázat			
Az $A \rightarrow B$ átalakulási folyamat és diszkrét szimmetriatranszformált verziói			
szimmetria-transzformáció	folyamat	szimmetria-transzformált folyamat	Természetben sérül-e?
T	$A \rightarrow B$	$B \rightarrow A$	sérül
CP	$A \rightarrow B$	$\bar{A} \rightarrow \bar{B}$	sérül
CPT	$A \rightarrow B$	$\bar{B} \rightarrow \bar{A}$	nem sérül

aszimmetriára. A P- és a CP-szimmetriákkal szemben a CPT-szimmetria sérülésére eddig még nem találtak kísérleti bizonyítékot. Ez azt is jelenti, hogy ha a CPT-szimmetria megmarad, de a CP-szimmetria sérül, akkor a T-szimmetriának is sérülnie kell.

A neutrínók a tértükrözési szimmetriát sértik: csak balkezes neutrínók, illetve jobbkezes antineutrínók léteznek. Azt is tudjuk, hogy a töltéstükrözési szimmetriát is sértik: egy balkezes neutrínót a töltéskonjugálási¹ transzformáció egy balkezes antineutrínóba transzformálna, de mindeddig csak jobbkezes antineutrínókat találtak a kísérletekben. A kombinált CP-transzformáció viszont egy balkezes neutrínót a megfelelő, fizikailag létező jobbkezes antineutrínóba viszi át. Ezért a neutrínók elvileg ideális részecskék a CP-transzformált folyamatok vizsgálatára. Sakharov CP-szimmetriasértési tesztjét oly módon lehet (például a neutrínókkal) kísérletileg elvégezni, hogy A kezdeti állapoti részecske valamely $A \rightarrow B$ átalakulási folyamatát összehasonlítjuk az \bar{A} antirészecske $\bar{A} \rightarrow \bar{B}$ folyamatával. Az 1. táblázat mutatja be a lehetséges folyamatokat és szimmetriatranszformált változatukat.

A szimmetriatulajdonságaikon kívül még egy érdekes tulajdonságuk is kiemeli a neutrínókat a többi részecske közül: a *neutrínóíz-oszcilláció* (magyar szakszóval *neutrínóíz-rezgés*) jelensége [8].

Neutrínók ízoscillációja

Az elmúlt 30 évben kísérletek sora erősítette meg a neutrínóíz-rezgés jelenségét [9–11]. A neutrínók között (a kvarkokhoz hasonlóan) megjelenik a keveredés jelensége: a neutrínók egymással összekeveredve vesznek részt a gyenge kölcsönhatásban. A keveredés miatt a tömeg-sajátállapotuk (ami alapján egy szabad neutrínó mozgásegyenletét fel lehetne írni, \mathbf{v}_m) nem egyezik az ízsajátállapotukkal (ami alapján egy neutrínó

kölsönhatását le lehetne írni, \mathbf{v}). A kísérletekben a hozzájuk tartozó töltött leptonokkal a gyengetöltött-áram-kölcsönhatásokban azonosított neutrínók (neutrínóíz szerint ν_e : elektronneutrínó, ν_μ : müonneutrínó, ν_τ : tau-neutrínó) a különböző tömegű szabad neutrínók valamilyen szuperpozíciójából tevődnek össze. A tömeg- és ízsajátállapotok bázisai közötti transzformációt egy 3×3 -as mátrix, U adja meg, amelynek elemeit jelenleg csak kísérletileg tudjuk meghatározni. Ezt a mátrixot *Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata* (PMNS) mátrixnak nevezi a tudomány. A kvarkszektorban egy azonos szerepű mátrix, a *Cabibbo–Kobayashi–Maskawa* (CKM) mátrix [12, 13] adja meg a keveredés mértékét. Azonban az elmúlt évtizedek kísérletei azt mutatják meg, hogy a neutrínószektorban a kvarkokhoz képest a keveredés mértéke sokkal nagyobb, ami nagyobb CP-szimmetriasértést is megengedhet.

A PMNS-mátrix elemeit elméletileg nem tudják megmagyarázni, viszont létezik rá egy parametrizáció, amelynek segítségével a kísérletileg fontos változókat vizsgálni lehet. A PMNS-mátrix (lásd az 1. egyenletet az oldal tetején) három különböző mátrix szorzatára bontható, amelyek mindegyike saját keveredési szöggekkel rendelkezik (θ_{13} , θ_{23} , θ_{12} , az indexek a tömeg-sajátállapotot jelölik), illetve egy komplex fázis adja meg a CP-szimmetriasértés nagyságát, δ_{CP} .²

Ezek alapján egy neutrínó tömeg-sajátállapot terjedését üres térben a következő közönséges differenciálegyenlet-rendszerrel írhatjuk le az ízsajátállapotban:

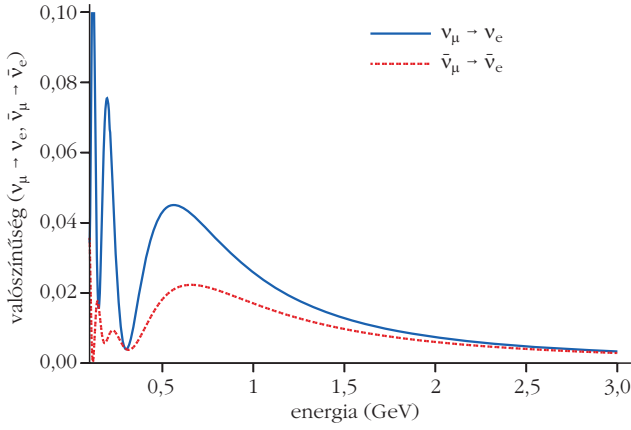
$$i \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{2E} U \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3^2 \end{pmatrix} U^+ \mathbf{v}, \quad (2)$$

ahol $\mathbf{v} = (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ az ízbázisban kifejezett állapotvektor, E a neutrínó energiája, U a PMNS-mátrix, m_1^2 , m_2^2 és m_3^2 a három neutrínócsalád tömegsajátértékeinek négyzetei,³ i pedig a komplex képzetes egység. Az egyenletet a komplex számok terén kell számolni, mert a 3×3 -as PMNS-mátrix általában komplex értékekkel rendelkezhet. Ahogy a példában is láthatjuk, ha a két bázis egybeesne, akkor a tömegmátrix csak diagonális tagokkal rendelkezne, minden neutrínóíz egymástól függetlenül terjedne a térben. Az U PMNS-

²Ezt a fázisszöveget Dirac-fázisnak is nevezik, szemben a Majorana-fázisszövegekkel, amelyekről ebben a cikkben nem lesz szó.

³Neutrínóoszcillációt tanulmányozó kísérletekben csak a tömegnégyzetek különbségeit lehet megmérni. Ezért a három tömegnégyzet különbségét kétféleképpen is lehet jelölni. A két jelölést normál, illetve invertált tömeghierarchiának nevezik. Léteznek kísérletek, például radioaktív izotópok β -bomlási mérései, amelyekkel a neutrínók tömegét próbálják megbecsülni.

¹Bár a neutrínóknak elektromos töltése nincs, de fermion, és fermionokra a töltéskonjugálási transzformáció pontosan definiálható.



1. ábra. Müonneutrínók elektronneutrínókká ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, folytonos görbe), illetve müon-antineutrínók elektron-antineutrínókká ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, szaggatott görbe) való átalakulási valószínűsége az energiájuk függvényében 300 kilométeres távon, $\delta_{CP} = -\pi/2$ értékkel számolva.

mátrix azonban keveredést visz a rendszerbe, ezért nem-diagonális elemek is megjelennek a neutrínók térbeli-időbeli mozgása során. Ha a *Particle Data Group* [14] kiadványából a keveredési szögeket és egy tetszőleges δ_{CP} fázis értékét behelyettesítjük az egyenletbe, majd ezt a kezdetiérték-problémát megoldjuk például egy tisztán müonneutrínó (vagy müon-antineutrínó) kiinduló ízállapotból ($\mathbf{v}(t=0) = (0, 1, 0)$) különböző energiákra, akkor egy íztérben rezgő megoldást kapunk; terjedésük során megváltozhat a neutrínók íze. Egy konkrét $L \approx 300$ km hosszúságú terjedési távolságot feltételezve (feltesszük, hogy a neutrínók közel fénysebességgel terjednek), az 1. ábrán annak valószínűségét ábrázoljuk, hogy egy kezdeti müonneutrínó elektronneutrínóvá (illetve egy müon-antineutrínó elektron-antineutrínóvá) alakult át a körülbelül 300 kilométeres táv megtétele után, $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \mathbf{v}(t=0) \rangle|^2$ ($P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = |\langle \bar{\nu}_e | \bar{\mathbf{v}}(t=0) \rangle|^2$). Az ábrán látható, hogy az első ízrezgési maximum (jobbról tekintve) 0,6 GeV energia körül található. Látható, hogy az antineutrínók esetén más görbét kapunk. Itt válik fontossá, hogy az egyenletben a 3×3 -as U mátrix komplex lehet. Ezt a már fentebb említett δ_{CP} fázis segítségével parametrizálják, amelyet a kísérletben szabadon hagynak és a mért adatokra illesztik. Az ábrán a $\delta_{CP} = -\pi/2$ értékhez tartozó görbék láthatók. Ha a természetben ez az érték valósulna meg, akkor egy olyan kísérlet, amely mind létrehozni, mind észlelni is tudna 0,6 GeV energiájú (anti)neutrínókat, várhatóan különbséget látna a két folyamat között csupán az elektronneutrínók és az elektron-antineutrínók számát figyelembe véve (a megfelelő müonneutrínó és müon-antineutrínó kezdeti ízállapotokra normálva). Ezt a jelenséget használják ki a neutrínóíz átalakulását mérő kísérletek a δ_{CP} paraméter becslésénél. Egy részecskegyorsító berendezés segítségével (anti-)neutrínónyalábot állítanak elő. A nyaláb forrásához közeli berendezésben detektálják és regisztrálják a kezdeti (többnyire müonneutrínó) ízállapotbeli neutrínók típusát, majd egy távolabbi detektorban az ízátalakulás utáni neutrínókat észlelik. A két észlelésben az egyes neutrínófajták számait összevetve lehet

megbecsülni nem csak a δ_{CP} paraméter, de néhány további PMNS-mátrixparaméter értékét is.

Közelítő képletekkel is ki lehet számolni az neutrínók átalakulási valószínűségét két tetszőleges neutrínóíz között a neutrínók energiájának és a távolság függvényében:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sum_{j,k} U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2 E}\right), \quad (3)$$

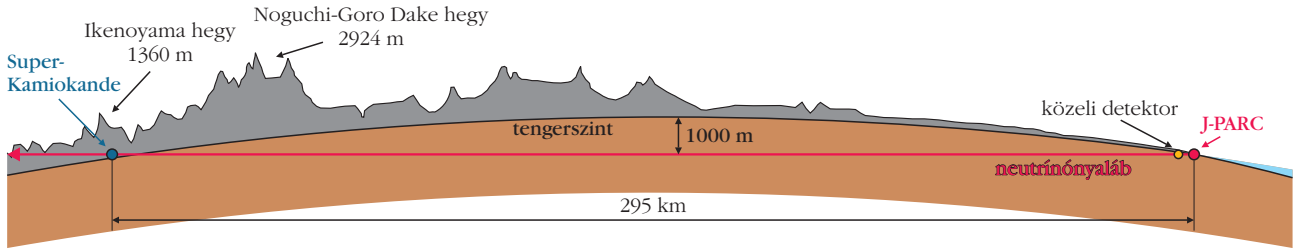
ahol U a már említett PMNS-mátrix, α, β jelöli a neutrínóíz-, j és k a neutrínó tömeg-sajátállapotot, L a távolságot, Δm_{jk}^2 pedig a tömeg-sajátállapotok négyzetei közötti különbséget. Azonban ez a képlet csak az üres térbeli terjedésre helyes ebben a formában. A kísérletekben használt neutrínónyalábok a Föld felszíne alatt haladnak a közeli és távolabbi detektorok között. Ezért egy több száz kilométeres táv megtétele közben a neutrínók nem teljesen elhanyagolható valószínűséggel kölcsönhatnak a Földkéregben levő anyaggal is. Egy tetszőleges anyagsűrűség-eloszlás esetén azonban már egyszerű képlettel nem fejezhető ki a neutrínóíz-rezgés valószínűsége két pont között. Ebben az esetben a (2) egyenlet egy taggal kiegészül, amely figyelembe veszi a neutrínók terjedésük közbeni kölcsönhatását is az anyaggal:

$$i \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{2 E} U \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3^2 \end{pmatrix} U^\dagger + 2\sqrt{2} G_F N_e(t) E \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{v}, \quad (4)$$

ahol N_e a hely- vagy időfüggő elektronsűrűség a Föld kérgében, ahol a neutrínó halad, és G_F a Fermi csatlakozási állandó [15–17]. A jelenleg futó kísérletekben ez a járulékos tag elhanyagolható. Azonban a neutrínóoszillációs kísérletek következő generációja esetén, amelyek több mint 1000 kilométeres távolságon mérik az ízátalakulás valószínűségét, ezt a járulékos tagot majd figyelembe kell venni.

A CP-szimmetriasértés mérése neutrínóíz-oszcillációkban

Jelenleg két kísérlet méri a neutrínók oszcillációját gyorsítókkal előállított neutrínónyaláb segítségével: a Japánban található, 295 km távolságon mérő T2K mellett (2. ábra) az Észak-Amerikában futó *NuMI Off-Axis ν_e Appearance* (NOVA, 810 km távolságon) [18], a *Fermilab* közelében. A neutrínókísérletek jellegzetessége, hogy nem tudják közvetlenül detektálni a neutrínókat.



2. ábra. A Japánban futó T2K kísérletben a neutrínókat a J-PARC kutatóintézetben hozzák létre, Tokaiban. A neutrínónyaláb forrásától a közelebbi detektor (ND280) 280 méterre található, míg a távolabbi detektor (Super-Kamiokande) 295 km-re található (forrás: [19]).

Azonban a detektort felépítő anyagokban lévő atommagokon szóródnak,⁴ és a neutrínó-atommag kölcsönhatások végállapotában egy töltött lepton, valamint egyéb mezonok és barionok keletkezhetnek, amelyeket már észlelni lehet. Másik érdekesség, hogy a neutrínónyaláb forrásának közelében elhelyezett detektorban a neutrínó-kölcsönhatások hozama még elég nagy ahhoz, hogy az átalakulás előtti nyaláb tulajdonságait (neutrínóíz-összetétel) pontosan megmérjék. Ebben a detektorban a neutrínó-kölcsönhatások végállapotában keletkezett részecskék fajtájából, energiájából, irányából, illetve az atommagok (főleg szén és oxigén) szerkezetének és eloszlásának ismeretében osztályozni tudják a neutrínóeseményeket. A forrástól több száz kilométerre elhelyezett detektorban azonban a neutrínók hozama már rendkívül alacsony. Éppen ezért ez a távolabbi detektor mindig óriási méretekkel rendelkezik. Az alacsony kölcsönhatási hozamot nagy méretekkel lehet kompenzálni.

A legfontosabb szórási folyamat, amellyel a neutrínókat észlelik (a fent említett 0,6 GeV energián) a töltött áram kvázieleasztikus szórás (CCQE) egy nukleonon



ahol „n” a neutron, „p” pedig a proton. Ebben a példában a végállapotú müon detektálásából és a detektorban lévő atommagok eloszlásának ismeretéből elvileg ki lehet számolni a kezdeti állapotú neutrínó energiáját (lásd 1. ábra):

$$E_{\nu} = \frac{m_f^2 - (m_i - E_b)^2 - m_l^2 + 2(m_i - E_b)E_l}{2(m_i - E_b - E_l + p_l \cos \theta_l)}, \quad (6)$$

ahol m_f a végállapotbeli nukleon tömege, m_i a kezdeti állapotú nukleon tömege, m_l a töltött lepton tömege, E_b a nukleon kötési energiája az atommagban, p_l , E_l és θ_l a lepton impulzusa, energiája és a neutrínónyalábbal bezárt szöge (külön detektorok feladata a neutrínónyaláb irányának pontos monitorozása). Azonban – több okból is – a neutrínóenergia meghatározása bonyolultabb. A valódi nyalábban a neutrínók energiája alacsonyabb és magasabb is lehet. 1 GeV ütközési energia körül keletkezhet egy töltött π -mezon is a kölcsönhatás végállapotában, $\nu_{\mu} + n/p \rightarrow \mu^{-} + \pi^{+} + p/n$. Ennél még magasabb energián pedig több töltött π -mezon is kelet-

kezhet, vagy mélyen rugalmatlan szórási folyamat is végbemehet, amelyben a nukleon teljesen felbomlik. E folyamatokban a végállapot pontos detektálása és osztályozása kísérletileg már nehezebb. Ezért a nehezen rekonstruálható folyamatokat közelítő módszerekkel modellezzük, és járulékaikat az adatokból becsülik meg. Jelenleg a neutrínó-atommag kölcsönhatás pontos modellezése a legnagyobb szisztematikusan bizonytalanság a neutrínóoszillációs kísérletekben [20].

A T2K kísérlet által közölt eredmények szerint a CP-szimmetriasértési δ_{CP} paraméterre kapott intervallum $3\text{-}\sigma$ (99,7%-os) bizonyossággal kizárja a 0 és π értékeket (az intervallum ciklikus) a normál tömeghierarchiában. Az adatok szerinti legvalószínűbb becsült érték -108° , közel a maximális szimmetriasértés $\delta_{CP} = -\pi/2$ értékéhez. A részecskefizikában elfogadott bizonyosság 99,999% ($5\text{-}\sigma$ szintű kizárás) lenne, de erre még várnunk kell. Azonban, a CP-sértésre utaló jelek elegendően megalapozzák a várakozást a további neutrínóoszillációs kísérletek eredményeire. Két, ebben az évtizedben induló kísérlet kifejezett célja elegendő adatot gyűjteni a jövőben a CP-sértés felfedezéséhez, és a δ_{CP} fázis pontos megméréséhez, amely hatalmas lépés lenne az elemi részecskék tudományában. Az egyik közülük a Super-Kamiokande következő generációja, a *Hyper-Kamiokande* [21]. A másik pedig Észak-Amerikában a *Deep Underground Neutrino Experiment* (DUNE) kísérlet [22]. Ezek az új kísérletek azonban nem csak a neutrínóíz-oscilláció paramétereinek mérésére lesznek hivatottak, hanem egyebek mellett a proton bomlási folyamatának keresésére, vagy szupernóvák robbanásából származó neutrínók detektálására is tervezték őket.

A neutrínók 1956-ban történt felfedezésük óta mindig is nagy mértékben járultak hozzá a mikroszkopikus világban érvényes részecskefizikai modellek kialakításához. A következő évtizedben talán arra is választ kapunk, hogy mekkora szerepet játszhatnak az Univerzum történetének formálásában.

Irodalom

1. Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration): Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos. *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 1562.
2. K. Abe et al. (T2K collaboration): Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations. *Nature* 580 (2020) 339.
3. K. Abe et al. (T2K collaboration): Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target. *Phys. Rev. Lett.* 121 (2018) 171802.

⁴A neutrínók az elektronhéjon is szóródnak, de sokkal kisebb valószínűséggel.

4. A. D. Sakharov: Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the Universe. *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 5 (1967) 32.
5. G. C. Branco, R. G. Felipe, F. R. Joaquim: Leptonic CP violation. *Rev. Mod. Phys.* 84 (2012) 515.
6. Horváth Dezső: Szimmetriák az elemi részecskék világában. *Fizikai Szemle* 53 (2003) 122.
7. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában – a 2008.évi fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 417.
8. Trócsányi Zoltán: Hogyan tegyük láthatóvá a láthatatlant? *Magyar Tudomány* 187 (2016) 478.
9. B. Pontecorvo: Mesonium and anti-mesonium. *Zh. Eks. Teor. Fiz.* 33 (1957) 549.
10. B. Pontecorvo: Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge. *Zh. Eks. Teor. Fiz.* 34 (1957) 247.
11. Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata: Remarks on the Unified Model of Elementary Particles. *Progr. Theoret. Phys.* 28 (1962) 870.
12. N. Cabibbo: Unitary Symmetry and Leptonic Decays. *Phys. Rev. Lett.* 10 (1963) 531.
13. M. Kobayashi, T. Maskawa: CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction. *Progr. Theoret. Phys.* 49 (1973) 652.
14. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group): Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D* 98 (2018) 030001.
15. L. Wolfenstein: Neutrino oscillations in matter. *Phys. Rev. D* 17 (1978) 2369.
16. L. Wolfenstein: Neutrino oscillations and stellar collapse. *Phys. Rev. D* 20 (1979) 2634.
17. S. P. Mikheyev, A. Yu. Smirnov: 3ν oscillations in matter and solar neutrino data. *Physics Letters B* 200 (1988) 560–564.
18. P. Adamson et al. (NOvA Collaboration): Constraints on Oscillation Parameters from ν_e Appearance and ν_μ Disappearance in NOvA. *Phys. Rev. Lett.* 118 (2017) 231801.
19. C. V. C. Wret: *Minimising systematic uncertainties in the T2K experiment using near-detector and external data*. Imperial College London (2018).
20. J. A. Formaggio, G. P. Zeller: From eV to EeV: Neutrino cross sections across energy scales. *Rev. Mod. Phys.* 84 (2012) 1307.
21. K. Abe et al. (Hyper-Kamiokande): Hyper-Kamiokande Design Report. (2018) arXiv: 1805.04163 [physics.ins-det].
22. R. Acciarri et al. (DUNE): Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE): Conceptual Design Report, Vol. 1: The LBNF and DUNE Projects. FERMI-LAB-DESIGN-2016-01 (2016) arXiv: 1601.05471 [physics.ins-det].