

# A RÉSZECSEFIZIKA REJTŐZKÖDŐ SZIMMETRIÁI

Patkós András  
ELTE Atomfizikai Tanszék

Az atommagok kötési energiájára vonatkozó minimális információ birtokában javasolta 1932-ben *Werner Heisenberg*, hogy a proton és a neutron valójában ugyanannak a részecskének két különböző elektromos töltésű állapota, amelyek a magerők szempontjából megkülönböztethetetlenek. *Fogalmazható úgy is, hogy a nukleonok két töltésállapotát egymásba átvivő transzformáció alkalmazása – az elektromágneses erő kikapcsolása esetén – változatlan tulajdonságú atommaghoz vezet.* A kétállapotú rendszer kvantumállapotait a fermionok impulzuszórájú állapotjaival állította párhuzamba, és a nukleon két töltésállapotának jellemzésére bevezette az izotópus spin (ma *izospin*) tulajdonságát. Öt évbe telt míg a magreakciók hatásereztetszeteinek részletes kísérleti tanulmányozását követően 1937-ben *Wigner Jenő*, illetve *Edward Condon* és munkatársai kimondták a reakcióba lépő atommagok teljes izospinjének megmaradási tételét. *Emmy Noether* tétele alapján a megmaradási tételek szimmetriákhoz kapcsolódnak, azaz a magerők Hamilton-operátorának az izotópus SU(2) spintranszformációkkal való felcserélhetősége volt az első, nem téridő-szimmetriához kapcsolódó, úgynevezett *belső szimmetria* példája a szubatomi kölcsönhatások körében. *A belső izospin-szimmetria révén a neutron- és a protonállapot tetszőleges komplex együttbátós lineárkombinációjával megvalósuló kvantumállapot teljes jellemzése megadható!* A téridőben végzett szimmetria-transzformációk kvantumszintű megvalósulásáról a tükrözési szimmetria sérülése felfedezésének 50. évfordulója kapcsán olvashattak ismertetést a *Szemle* olvasói [1]. Jelen cikk további tárgya a belső szimmetriák felfedezésének és megvalósulásuk módjának bemutatása.

1954-ben jelent meg a kvantumtérelmélet egyik kiemelkedő hatásúnak bizonyult publikációja *Chen Ninh Yang* és *Robert Mills* tollából (1. ábra). Bevezetésében a szerzők a magerők addigra sokszorosan ellenőrzött izospin-szimmetriáját értékelve a következőket írják: „Az izotópus spin irányának nincs fizikai jelentése. A proton és a neutron megkülönböztetése teljesen önkényes. Ennek az önkényes lépésnek azonban korlátot szab, hogy amint a tér egyetlen pontján megállapodunk a neutron- és a protonállapotokat azonosító definícióban, egyetlen más téridőpontban sem alkalmazhatunk eltérő definíciót.” Az izotópus spintranszformációk alkotta szimmetriát ezért ma *globális szimmetriaként* említjük. „Úgy látjuk, hogy ez a tulajdonság ellentmond a lokális térelmélet alapkoncepciójának” – zárják a szerzők a kutatásaikat ösztönző megállapításaik ismertetését.

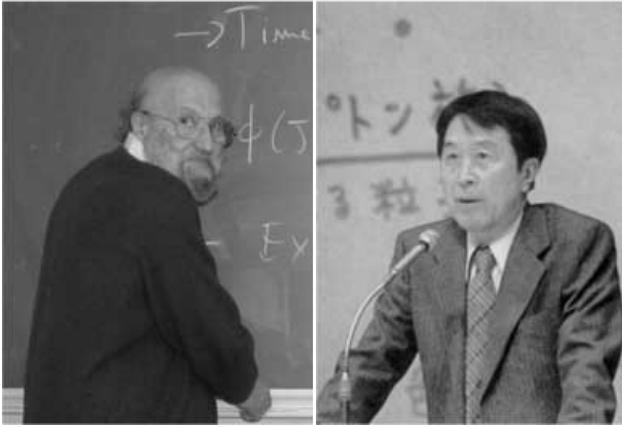
A cikk az MTA Fizikai Tudományok Osztálya 2007. december 12-i ülésén és a 2008. évi Statisztikus Fizikai Napon tartott áttekintő előadások alapján készült.

A Yang–Mills-cikk olyan matematikai konstrukciót mutat be, amelyben helyről-helyre elvégzett különböző izoforgatásokkal szemben invariáns az elmélet. *Tebát a kiinduló nukleonállapotot helyről-helyre más(!) proton-neutron lineárkombinációba vihetnénk át, anélkül, hogy megváltoznának a kapott állapot magfizikai tulajdonságai.* A nukleonok közötti kölcsönhatást közvetítő vektorterek bevezetésével biztosítható ez a lokális invariancia. Az elegáns matematikai konstrukció ellenére a szerzők csalódottan zárták cikküket. Ugyanis éppen a lokális szimmetria követelménye miatt az erőterkvantumok egységnyi izotópus spinnel rendelkező (azaz elektromosan is töltött), zérus tömegű részecskék lennének, amilyenek azóta sem ismeretesek. Az izospin-szimmetria kvantumtérelméleti tárgyalásának első próbálkozása időlegesen kudarcot vallott, a részecsefizikai szimmetriák utáni kutatás az ötvenes évek második felében új kiindulási pontot keresett.

*Yoichiro Nambu* és *Giovanni Jona-Lasinio* (2. ábra) 1961-ben tette közzé modelljét a nukleonok közötti erős (nukleáris) kölcsönhatás leírására, amelyet bevalottan a szupravezetés nagyszerű elmélete motivált. A fenti problémák miatt kihagyták a kölcsönhatást közvetítő erőter mibenlétének kérdését, helyette egy új, elbűjtött szimmetria jelenlétére igyekeztek érget találni. Arra a teljes formai hasonlóságra hívták fel a figyelmet, amely a szupravezető alapállapot kvázirészecske-gerjesztései, azaz a kvázi-elektronok és -lyukak közötti csatolás, valamint a Dirac-egyenlettel leírt feles spinű részecskék bal- és jobbcsavarodású spinállapotai között a tömegük révén létrehozott csatolás között áll fenn. E formai megfeleltetés alapján vettek bátorságot arra, hogy különálló SU(2) szimmetria-transzformációt javasoljanak a balcsavarodású és a jobbcsavarodású fermionokhoz. *Tebát a balcsavarodású és a jobbcsava-*

1. ábra. Chen Ninh Yang és Robert Mills



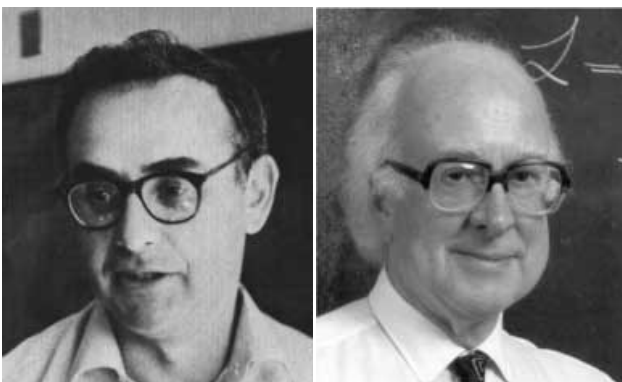


2. ábra. Giovanni Jona-Lasinio és Yoichiro Nambu

rodású állapotokat önálló részecskéként kezelték, és a proton-neutron felcserélő transzformációt egymástól függetlenül alkalmazták a bal- és a jobbkezes világban. A javaslat igazi vonzerőt jelentő hozadéka az volt, hogy a szupravezetés mintájára ez esetben is jelentkezik egy könnyű kollektív gerjesztés, amelyet Yukawa pionjával lehetett azonosítani.

A javasolt  $SU(2)_{\text{bal}} \times SU(2)_{\text{jobb}}$  szimmetria a nukleonok közel  $1 \text{ GeV}/c^2$  nagyságú tömege miatt igencsak durván sérül (a balcsavarodású protonállapot egyetlen femtoszekundum alatt átalakul jobbcavarodású állapotba, miközben egzakt szimmetria esetén a két független állapot külön-külön örökéletű lenne). Elvárható azonban, hogy valamely, a természeti jelenségekben valóban meglévő szimmetriát esetleg sértő hatás csak kis korrekciót adjon a részecskék tulajdonságaihoz. A szerzők tanácsstalanságot jelző megállapítással zárják cikküket: „Nagyon zavarba ejtő lenne, ha a feltételezett szimmetria *ad hoc* módon sérülne.” A helyzet zavarosságára jellemző, hogy kisebb tömegű (a szimmetriát kevésbé sértő) alkotórészek keresésének kényszerétől vezérelve arra utalnak, hogy talán valamilyen értelemben a nukleonoknak a neutrínókéval egyezik a tömege. Az erős kölcsönhatási energia vezethet a tapasztalt lényeges eltérésre. Ez akkor erőltettnek hatott, de visszatekintve kétségtelenül helyes előérzet nyilvánult meg benne. Ebben a stádiumban gyanús lehetett, hogy a javasolt szimmetria (mai neve a görög csavar szóból származó királis szim-

4. ábra. Jeffrey Goldstone és Peter Higgs



3. ábra. Murray Gell-Mann előadást tart *Szépség és igazság a fizikában* címmel 2007 márciusában

metria) talán nem is jelenik meg a természetben, pusztán a részecskéket minden áron rendszerezni vágyva kényszerítjük az elméletre.

Időben párhuzamosan, 1960-ban vizsgálta Murray Gell-Mann (3. ábra) és Maurice Lévy a nukleonok vektoráramának (elektromos áramának) és axiálvektoráramának eltérő viselkedését. Az előbbi közismerten megmarad, utóbbi megmaradása sérül. A szerzők a megmaradást sértő mennyiség és a pionokat leíró térmennyiség kapcsolatát visszatükröző elméleti modelleket javasoltak. Pion–nukleon-modelljükben (az ún. lineáris szigma-modellben) a Nambu–Jona-Lasinio által javasolt királis szimmetria-transzformációkra az invarianciát egy új skalár részecske (a szigma-részecske) bevezetésével lehetett biztosítani. Bár megjegyezték, hogy ennek a skalár mezőnek nem-zérus várható értéke érdekes értelmezést kínál a nukleontömeg eredetére, igazi kutatókhoz méltó szépséggel hozzátették: „Csak akkor lehet ezt a tömeggenerálást kielégítőnek tekinteni, ha az összes elemi rész tömegét ezzel lehet értelmezni.” Nem rokonszenveztek különösebben saját modelljükkel, hiszen zárásul azt írták: „A szigma-modell, annak ellenére, hogy van néhány érdekes tulajdonsága ... nagyon természetellenes. Egy olyan részecskét vezet be, a szigmát, amelynek létezésére nincs semmiféle kísérleti utalás. Ez nem kerülhető meg azzal, hogy nagyon magas tömeget társítunk vele, mivel ilyen, a szigma és a pionok közötti különbséget okozó mechanizmust nem ismertünk.” Ma fehér holló ritkaságú az elméleti fizikusok körében az empíriához való ilyenfokú ragaszkodás.

A szigma-mezon létezését a legutóbbi időkig nagyon bizonytalannak tartották a kísérleti részecskefizikusok. Tömegét példa nélkül álló módon a részecskefizikai táblázatokban a  $400\text{--}1200 \text{ MeV}/c^2$  tartományban óriási bizonytalansággal adták meg. Az elmúlt három-négy évben ez a helyzet jelentősen változott, immár a legvalószínűbb tömegértéket az alsó határ közelében rögzítik, ami a pionok tömegének még így is majdnem négyszerese.

A tömeghierarchia hátterére Jeffrey Goldstone (4. ábra bal oldala) mutatott rá 1961-ben, amikor bebizonyította, hogy amennyiben valamely, folytonos paraméterrel jellemezhető, belső szimmetriával rendelke-

ző potenciálban kialakuló alapállapot nem invariáns a transzformációra (*spontán szimmetriasértés*), akkor a szimmetriasértés irányára „merőleges” szabadsági fokok tömeg nélküliek (mai nevükön Nambu–Goldstone-bozonok), a sértés irányába eső szabadsági fokok pedig tömegesek. Akár a Nambu–Jona-Lasinio-modell, akár a Gell-Mann–Lévy-modell szimmetriasértő alapállapotának gerjesztéseként fellépő pionok zérus tömegűek. Kis, nem-nulla tömegük azzal értelmezhető, hogy maga a potenciál mégsem teljesen változatlan a királis transzformációkra. A szigma-tér, amelynek nullától különböző alapállapotai várható értéke a királis szimmetria spontán sérülése miatt jelenik meg, a pionoknál jóval nagyobb tömegű lehet. A spontán szimmetriasértést – amelyre újfent a kondenzált anyagok jelenségköre (mágnesség, szupravezetés, szuperfolyékonyság) szolgáltat példákat – fogadták el a nukleonok nagy tömegét generáló dinamikai folyamatként. Ám a nagy szimmetriasértés továbbra is megkérdőjelezte a szimmetria létét.

Még mielőtt az erős kölcsönhatás igazi, a rejtélyt is megoldó szabadsági fokait feltárták volna, Goldstone ideája már megtermékenyítette a Yang–Mills-elmélet alkalmazhatóságát makacsul kereső kutatók gondolkodását. *Peter Higgs* (4. ábra jobb oldala) 1964-ben a mágneses térbe helyezett szupravezetőbe csak kis mértékben behatolni képes mágneses tér példáját általánosította relativisztikus modellekre. Az azóta az ő nevét viselő, az elektromágneses potenciálokkal kölcsönható Higgs-mezőre feltételezte, hogy alapállapotában spontán szimmetriasértésből származó nem-zérus várható értéke van. Ennek hatására az eredetileg tömegmentes vektortér kvantumjai („fotonok”) tömegessé válnak. A Nambu–Goldstone-bozonok alakulnak át a tömeges vektorterek longitudinális polarizációjú komponenseivé. Megjegyezhető, hogy Higgs első cikkében csak a könnyű kollektív gerjesztések *eltűnésére*, azaz a Goldstone-tétel sérülésére mutatott rá. A szupravezető analógiát tanulmányozva néhány hónappal később jött rá, hogy az eredmény egyben tömeges fotonok létét jósolja. Még pedig olyan módon, amely őrizi az elmélet lokális szimmetriáját. (Azt, hogy egy lokális szimmetria nem sérülhet spontán módon, *S. Elitzur* bizonyította 1975-ben.)

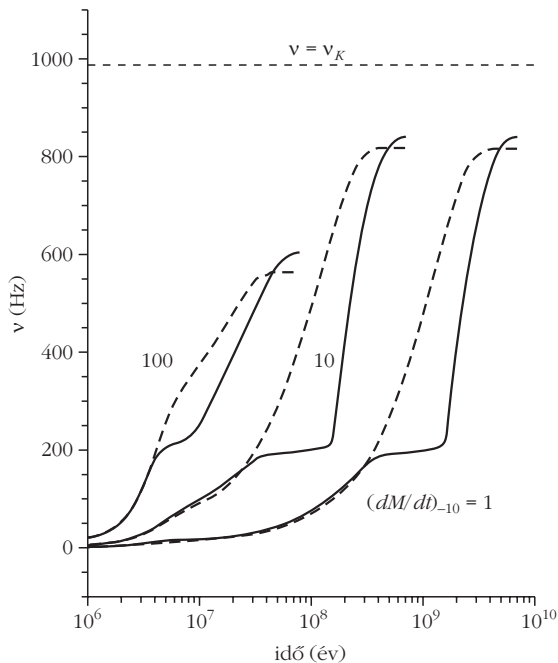
Higgs felfedezése újrakezdte a nyomozást a Yang–Mills-terek részecskefizikai szerepe után. Nagy, 100 GeV/c<sup>2</sup> körüli tömeggel rendelkező, elektromosan töltött vektortereket a gyenge kölcsönhatások erőreiként régóta kerestek a béta-bomlás igen sikeres Fermi-elméletében jelentkező ellentmondások kiküszöbölésére. Az 1960-as évek közepén *Sheldon Glashow*, illetve *Abdus Salam* tisztázta, hogy az elektromágneses kölcsönhatások vektortereit a balcsavarodású fermionok gyenge(!) izospin-tulajdonságára ható SU(2)<sub>bal</sub>, valamint a gyenge hipertöltéssel társítható U(1) lokális szimmetriacsoport direkt szorzatával szemben invariáns elmélet 4 vektortérével kell azonosítani. Az erre a szimmetriára alapozott kvantumtérelmélet kezeléséhez nélkülözhetetlen matematikai vizsgálatokat *Ludvig Faddejev* és *Viktor Popov* kezdték el

1967-ben. Munkájukra alapozva a nem-ábeli szimmetriájú kvantumelmélet Feynman-szabályait *Gerald t’Hooft* és *Martinus Veltman* dolgozták ki. Az első sikeres részecskefizikai számításokat *Steven Weinberg* végezte el. A hetvenes évek elejére kidolgozott egységes elektromágneses-térelmélet a Higgs-jelenséget kihasználva lényegében megvalósította Yang és Mills eredeti gondolatát. Éppen csak az erős kölcsönhatások helyett az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatások, azaz az elektromos töltés, a gyenge izospin és a gyenge hipertöltés tulajdonságait értelmező Standard Modell megalkotásához jutottak.

Az erős kölcsönhatások végleges elméletének megszületéséhez a hatvanas évek elején javasolt kvarkmodell egyik kikerülhetetlen ellentmondása vezetett el. A kétféle (u, d) kvark kötött állapotaként értelmezett nukleonok teljes hullámfüggvénye három tényező szorzata: egyik tényező a kvarkok erős izospinritkaság tulajdonságait jellemző valószínűségi amplitúdó, a másik a térbeli forgásállapotot írja le, végül a háromdimenziós térbeli elhelyezkedés valószínűségi amplitúdóját adja meg a harmadik tényező. Az elemi részecskék osztályozása arra a meghökkentő eredményre vezetett, hogy a teljes hullámfüggvény akkor illeszkedik a legjobban a megfigyelt tulajdonságokhoz, ha az a kvarkok permutálására szimmetrikus. Ez ellentmond a lokális térelméletek spinstatistika-tételének, amely szerint a feles spinű kvarkok kötött állapotainak hullámfüggvénye az alkotórészek felcserélésére teljesen antiszimmetrikus! 1965-ben *Oscar Greenberg*, valamint függetlenül *Moo-Yung Han* és *Yoichiro Nambu* a paradoxon feloldására egy új szimmetria, a „szín”-szimmetria feltételezését javasolták. Ennek szimmetriacsoportja az SU(3)<sub>szín</sub>. Kell a három független állapotra épülő szimmetria, mert a Pauli-elv teljesülését az biztosítja, ha a proton három kvarkalkotórészének különböző a „színe”! *A feltételezett szimmetria a különböző színű kvarkok egymásba transzformálásával keletkező állapotok változatlan tulajdonságát emelte alapelvvé.*

Az 1969–70-ben elvégzett SLAC–MIT-kísérletben megállapították, hogy a kvarkok létező szabadsági fokok, nemcsak részecskeosztályozást segítő matematikai absztrakciók. 1972-ben *Murray Gell-Mann*, *Heinrich Leutwyler* és *Harald Fritsch* kiválasztási szabályként deklarálták, hogy csak a *színtranszformációkra változatlan* színszingletek létezhetnek. E tulajdonságokat a „szín” globális szimmetriatulajdonságát általánosító SU(3)<sub>szín</sub> lokális szimmetriájú elmélet megoldásából remélték levezetni, *amelyben tehát helyről-helyre függetlenül végezhető színtranszformáció.* Ennek az elméletnek, a kvantum-kromodinamikának (QCD) közvetítő erőterkvantumai, amelyeket gluonoknak hívunk, az eredeti Yang–Mills-javaslatnak megfelelően zérus tömegűek és „színtöltés”-sel rendelkeznek. A kvarkbezárás tulajdonsága miatt csak a nukleonok méreténél jóval kisebb tartományokban zajló jelenségek tükrözik létezésüket. Az elmélet paramétereit a megfigyelésekkel összevetve becslés adható az egyébként soha önmagukban meg nem figyelt kvarkok tömegértékeire. Az u- és a

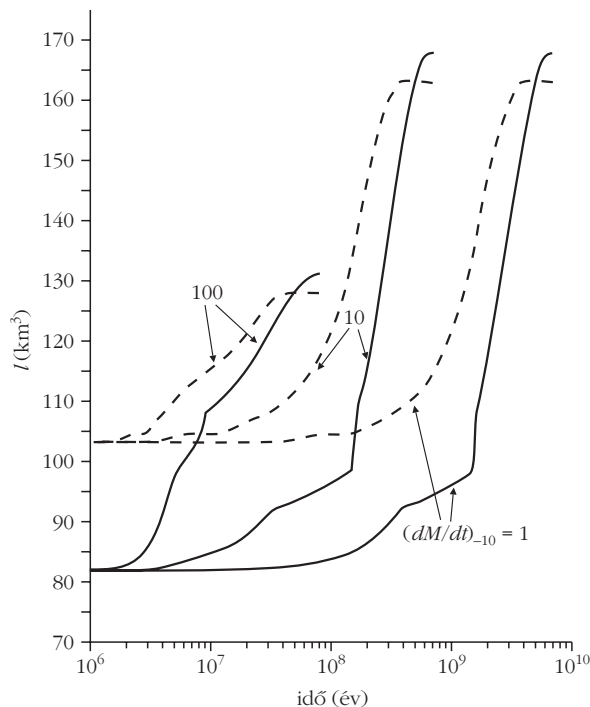
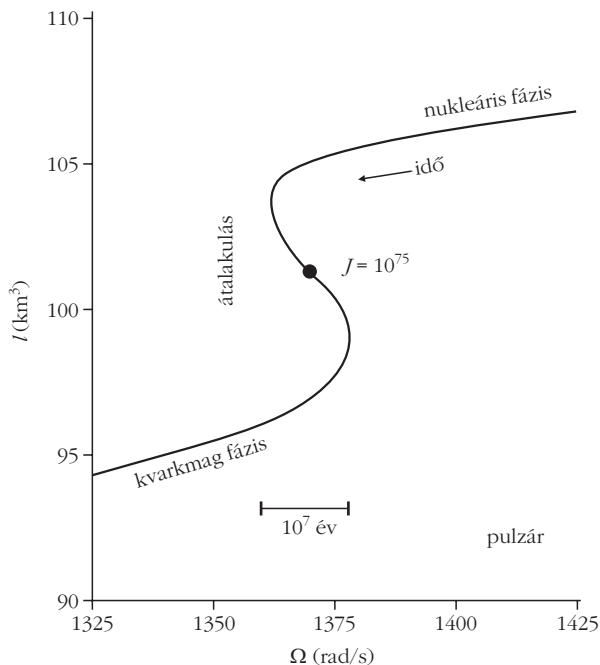




7. ábra. A frekvencia változása az anyagelnyelés következtében a neutroncsillag létrejöttét követően. A frekvencia növekedésének időbeli lezajlása az anyagelnyeléssel párosuló impulzusmomentum-elnyelés következtében, modellszámítások alapján három különböző anyagelnyelés-ráta esetén (rendre  $dm/dt = 10^{-10}, 10^{-9}, 10^{-8}$  nap-tömeg/év). A szaggatott vonal tiszta neutronanyag esetén, a folytonos a kvarkmaggal rendelkező kompakt csillag esetét mutatja.

nem haladja meg. Ismertek azonban a naptömeg kétszeresét elérő neutroncsillagok is. Elkerülhetetlennek tűnő gravitációs instabilitásuk kivédésének egyik lehetséges magyarázata az, hogy magjukban a szuperfolyékony állapotú neutronanyagnál jóval puhább (összenyomhatóbb) nagysűrűségű kvarkanyag van jelen.

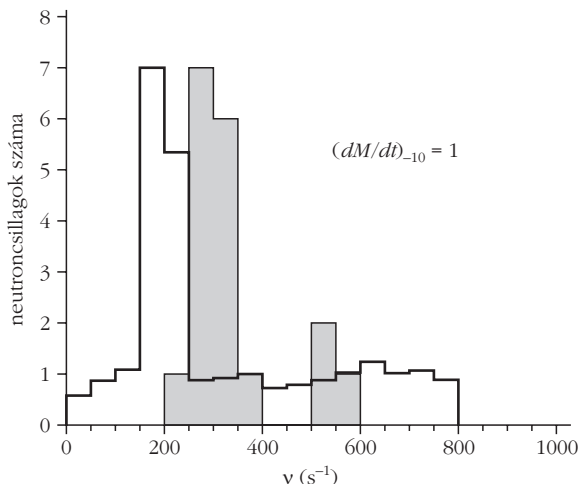
9. ábra. A tehetetlenségi nyomaték alakulása a hibrid csillag fázisaiban. Hibrid csillag esetében a frekvencia a fázisváltás során lassul, miközben a tehetetlenségi nyomaték növekszik. Ez az átmenet körülbelül 10 millió évig tart.



8. ábra. A neutroncsillag tömegére és sugarára normált ( $\text{km}^3$  egységben mért) tehetlenségi nyomaték időbeli változása. A növekvő forgási frekvencia hatására az anyageloszlás radiálisan kiterjed. A kiterjedés üteme lényegesen függ a csillag magjában elhelyezkedő anyag állapotegyenletétől. A tisztán neutronanyagból álló csillagban a tehetetlenségi nyomaték folyamatosan nő (szaggatott vonal), míg belső fázisátalakulás esetén a növekedés üteme lassúbb, esetleg stagnálhat is (folytonos vonal).

A kettős rendszerben található neutroncsillagok partnerüktől folyamatosan anyagot (tömeget és impulzusmomentumot) nyelnek el. E folyamat eredménye a felpörgés, amelynek becsült ideje százmillió év, ha az anyagelnyelés üteme évente a Nap tömegének egymilliárdod része. Az impulzusmomentum növekedése megszlik a forgási frekvencia (7. ábra) és a tehetlenségi nyomaték (8. ábra) növekedése között. A frekvencia növekedése az eredetileg kvarkanyagot is tartalmazó neutroncsillagokra nagyjából tízmillió éves időszakra megakad, stagnál. Az ok a csillag belsőjében csökkenő nyomás hatására a kvarkanyag normális neutronanyaggá történő fokozatos átalakulása (9. ábra). Glendening és Weber a különböző pörgési frekvenciájú pulzások megoszlását kívánta modellezni, feltételezve, hogy a neutroncsillagok az időben egyenletesen keletkeznek. Egyéb hatás híján egy pillanatfelvételen a neutroncsillagok nagyjából egyenletes frekvenciaeloszlást mutatnának. A stagnáló szakasz léte viszont a stagnálási frekvenciatartományban észlelhető objektumok számának feldúsulásában tükröződik. A megfigyelt objektumok frekvencia szerinti eloszlásában 300 Hz környékén meg is figyelhető egy csúcs, amelyet egyszerű kvark-állapot-egyenletből származó modellszámításokban 200 Hz körül találnak meg a szerzők (10. ábra).

A talált hatásnak létezik más magyarázata, tehát az nem végleges érv a kvarkfázis megvalósulása mellett. A gondolatmenetnek viszont van következménye a magányos neutroncsillagok sugárzási impulzusmomen-



10. ábra. A milliszekundumos neutroncsillagok frekvencia szerinti eloszlásának összehasonlítása Glendenning és Weber modelljével. A megfigyelések néhány évvel ezelőtt világos csúcsot mutattak a 300 Hz körüli tartományban, amelyet elég jól reprodukál a belső kvarkmag neutronanyagga történő átalakulásakor stagnáló frekvenciára alapozott modell (szimulációjából a csúcs 200 Hz körül adódik).

tum-vesztéssel együtt járó lepörgési folyamatára is. A csökkenő centrifugális hatás miatt fokozatosan növekvő kvarkfázis az anomálishan nagy tömegű neutroncsillagok lepörgésében is okozhat egy stagnáló szakaszt. Mindmáig azonban nem találtak erre mutató evidenciát.

A nagysűrűségű, erősen kölcsönható anyag állapotegyenletének vizsgálata a kvarkanyag számos termodinamikai fázisát tárta fel az elmúlt évtizedben, amelyek teszteléséhez a megfigyelt csillagászati kompakt objektumok növekvő számától és jellemzésük növekvő pontosságától várunk meggyőző információkat.

#### Irodalom

1. Horváth Dezső: Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásértés 50 éve. *Fizikai Szemle* 57/2 (2007) 47.
2. Trócsányi Zoltán: A kvantum-szindinamika szerepe a nagyenergiájú részecskeütközések értelmezésében. *Fizikai Szemle* 57/3 (2007) 73.
3. Fodor Zoltán: Az erős kölcsönhatás fázisdiagramja. *Fizikai Szemle* 56/2 (2006) 42.
4. Fodor Zoltán, Katz Sándor: Volt-e (van-e) fázisátmenet a Big Bang (Little Bang) során. *Fizikai Szemle* 56/12 (2006) 393.

## SARKÍTOTT FÉNNYEL A VIKINGEK NYOMÁBAN AZ ÉSZAKI-SARKVIDÉKEN

A polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételeinek kísérleti vizsgálata

Horváth Gábor, Barta András, Hegedüs Ramón, Pomozi István, Suhai Bence  
Eötvös Egyetem, Fizikai Intézet, Biológiai Fizika Tanszék, Biooptika Laboratórium

Susanne Åkesson  
Lundi Egyetem, Állatökológiai Tanszék, Lund, Svédország

Benno Meyer-Rochow  
Jacobs Egyetem, Biológiai Intézet, Bréma, Németország és  
Oului Egyetem, Állattani Intézet, Oulu, Finnország

Rüdiger Wehner  
Zürichi Egyetem, Állattani Intézet, Zürich, Svájc

Az i.sz. 900 és 1200 közötti időszakban az Atlanti-óceán északi részeit a vikingek uralták, akik mágneses iránytű nélkül is kiválóan tájékozódtak a nyílt vizeken. Amikor sütött a Nap, egy speciális napórával határozták meg az égtájak irányát. Májig rejtélynek számított azonban, hogy felbős vagy ködös időben, amikor nem látható a napkorong, miként navigáltak. Egy 1967-ből származó, széles körben elterjedt és elfogadott hipotézis szerint ködös vagy felbős időben a vikingek az égbolt-polarizáció segítségével tájékozódhattak azon rovarokhoz hasonlóan, amelyek az égboltfény polarizációirányának mintázatából következtetik ki a felbők mögötti napkorong irányát. A feltételezések szerint a vikingek az égboltfény polarizációirányát lineáris polárszűrőként működő kristályokkal állapíthatták meg, amelyeket

„napkőként” emlegetnek a viking legendáriumban, de pontos mibenlétük ismeretlen. Habár a vikingek égbolt-polarimetrikus navigációjáról szóló hipotézis egy sokat idézett, híres elmélet, napjainkig teljesen nélkülözötte a kísérleti alapokat, aminek következtében nagyszámú hívője mellett számos szkeptikus tagadója is létezik. Cikkünkben azon égbolt-polarimetriai és laboratóriumi pszichofizikai méréseink eredményeit foglaljuk össze, amelyekben a polarimetrikus viking navigáció légköroptikai feltételeit vizsgáltuk Tunéziában, Finnországban, az Északi-sarkvidéken és Magyarországon.

### A viking napóra, mint iránytű

A vikingek egyik fő hajózási útvonala a 61. északi szélességi körön húzódott, amely mentén Norvégia és Grönland között hajóztak (1. ábra). Grönlandon a

A cikk az ELTE Ortway Kollokviumán 2007. szeptember 27-én Horváth Gábor által tartott azonos című előadás írott változata.