

MIÉRT ÉRDEMES EGYRE PONTOSABBAN MEGMÉRNI FIZIKAI ADATOKAT, AVAGY A NEUTRON SÖTÉT TITKA

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet

A legezotikusabb elemi kölcsönhatás a 19. század végén jelentkezett először a radioaktív sugárzás *béta*-komponenseként, amelyről hamarosan kiderült, hogy egyes atommagokból kibocsátott elektronokból áll. Egészen az 1930-as évekig tartotta magát az a felfogás, hogy az atommagok izotópjait a protonokkal együtt létező bizonyos számú elektron alkotja. A vita azt követően érte el csúcspontját, amikor 1932-ben *Chadwick* kimutatta a neutron létezését, majd azt, hogy a szabad neutron nagyjából 15 perces élettartammal protont és elektront tartalmazó végállapotba bomlik el. Ez a megfigyelés látszólag azokat támogatta, akik a neutron proton és elektron instabil kötött állapotának gondolták. Ám a bomlás energiamérlege az energia megmaradásának sérülésével fenyegetett, amelyet *Pauli* egy harmadik bomlástermék létezésének javaslatával orvosolt, a kizárólag igen gyengén kölcsönható neutrínóval. A neutronbomlás megértésének vágya vezette *Fermi* az általa *gyenge kölcsönhatásnak* keresztelt új erőhatás feltételezésére és a neutronbomlás első elméletének megalkotására. Az erőhatás erősségét meghatározó egyetlen paramétert, a Fermi-állandót a neutron élettartamának mérésével állapították meg.

A szabad neutron élettartama ma is a standardizált részecskefizikai elmélet egyik kísérleti oszlopa, bár az eredeti Fermi-elmélet számos lényeges kiegészítést kapott. Érthető, hogy több módszerrel is folyamatosan törekedtek pontosabb meghatározására, de a közelmúltig a mérsékelt érdeklődést kiváltó rutinszerű kutatások között tartották számon. Ám két független módszerrel történt meghatározásában a szisztematikus bizonytalanságok kiküszöbölésére az elmúlt két-három évtizedben tett erőfeszítések oda vezettek, hogy immár 4 standard eltérésnyi a távolság az élettartamok körülbelül 1%-ban eltérőnek mért értékei között. Ez azt jelenti, hogy a két módszerrel folytatott mérések eredményeinek egyezésére 10^{-4} -nél kisebb az esély.

Erről az úgynevezett neutronrejtélyről szeretnék alább beszámolni. De miért is fontos a neutron élettartamának minél pontosabb ismerete?



Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektromos anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

A neutron-élettartam meghatározásának kozmológiai jelentősége

A szigorúan részecskefizikainak tűnő információ meghatározóan befolyásolja a könnyű elemek előfordulási gyakoriságát az Univerzumban. Ez azért alapvetően fontos adatsor, mert az ősrobbanás (az Univerzum korai forró állapota) egykori létezésére vonatkozó első tudományos érvet a feltételezett robbanást követő tágulással egyidejűleg az első 20 percben végbeménő magreakciókból kialakuló forró D, ^3He , ^4He , ^7Li keverék összetételének a megfigyelt értékekkel történt összevetése szolgáltatta. Ezen ismeretek jelentik mindmáig a Világegyetemről nyert, az ősrobbanás pillanatához legközelebbi információkat.

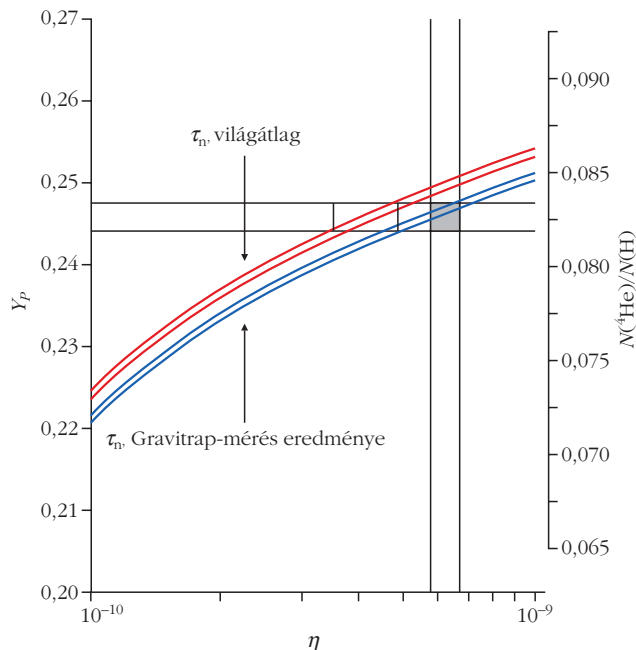
A megfigyeléseknek az ős-nukleosintézis jóslataival történő összevetését a csillagokban zajlott folyamatok módosító hatása nehezíti. A hidrogén után második leggyakoribb előfordulású ^4He esete annyiban „könnyű”, hogy gyakorisága a csillagok fúziós folyamatai révén időben monoton nő. Megfigyelésének receptje ennek megfelelően olyan tartományokban végzett spektrálemzés, amelyben a ^7Li -nél nagyobb atomszámú magok előfordulása a lehető legkisebb. Erre a mérésre a HII jelzésű, ionizált hidrogénfelhőkből álló kék galaxisok tűnnek a legalkalmasabbnak. A legfrissebb publikált mérés a „szennyező” nehezebb elemeket eltérő, de nagyon kis mértékben tartalmazó 16 tartomány elemzéséből származik. Az eredmények lehetővé teszik a zérus „szennyező-tartalomhoz” történő extrapolációt. A héliumba beépült nukleonok sűrűségét az n_b teljes barionsűrűséghez viszonyítva adják meg:

$$X_{4\text{He}} = \frac{4 n_{4\text{He}}}{n_b} = 0,2449 \pm 0,0040$$

(a csillagászok ezt a hányadost Y_p -vel szokták jelölni).

Az alfa-részecskében 2 neutron van, így a héliumban megőrzött neutronok gyakorisága ezen adat fele. Szabad állapotban a neutronok már rég elbomlottak, a többi könnyű elembe beépülve pedig mindössze 10^{-5} nagyságrendű járulék adódik a neutron előfordulási gyakoriságához. Tehát $X_{4\text{He}}$ primordiális előfordulása a neutron teljes kozmikus előfordulására hordoz információt.

A neutron és a proton állandósultan akkor jelent meg az Univerzum objektumai között, amikor a hőmérséklet 1 GeV (körülbelül 10^{13} K) alá csökkent. A proton- és a neutronsűrűségek közötti termodinami-



1. ábra. Az alfa-részek primordiális előfordulási gyakorisága a fotonokhoz viszonyított barionsűrűség η függvényében A. P. Szerebrov számítása szerint. A vízszintes sáv a ${}^4\text{He}$ akkor elfogadott megfigyelési értéke és hibája. A függőleges sáv η új mérésekkel összeférő tartományát mutatja.

kai egyensúly a gyenge kölcsönhatások révén egészen a kifagyási hőmérsékletig, $T_F \approx 0,28$ MeV-ig (körülbelül $3 \cdot 10^9$ K) fennmaradt. A kifagyáskor a neutron kissé nagyobb tömege ($\Delta m = 1,29333205(51)$ MeV) miatt eltérő Boltzmann-tényezőik hányadosa szabta meg arányukat, ami

$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T_F}\right) \approx 1/6 \approx 0,17$$

volt. A primordiális magreakciók akkor indultak be, amikor a deuteronmag stabilná vált a hőfürdő fotonjainak hasító hatásával szemben ($T \approx 0,078$ MeV). A magreakciókat leíró reakcióegyenletek hálózatának integrálása határozza meg a könnyű magokba beépült végső neutrongyakoriságot, $X_n \approx 0,125$.

Korunk a precíziós csillagászat időszaka, a csillagászok a közeljövőben (körülbelül másfél évtizeden belül) remélik elérni az elemek előfordulási gyakoriságainak ezrelék pontosságú megfigyelését.

Bár szokás a primordiális nukleoszintézis teljes végbemenését a $T = 0,01$ MeV (10^8 K) hőmérséklethez kötni, a 10^{-3} pontosságú gyakorisági elméleti jóslathoz $T \approx 6 \cdot 10^7$ K-ig kell követni a reakcióegyenletek megoldását. Az elméleti előrejelzések szisztematikus hibájának leszorítása számos részfolyamatnak is jóval pontosabb tárgyalását igényli. A legjelentősebb hibaforrást a szintézis kezdeti neutronkoncentrációját meghatározó τ_n neutron-élettartam értékében 2005-öt követően felismert bizonytalanság jelenti. Ennek hatását jól érzékelteti az akkor közölt új mérési eredmények egyik vezető szerzőjének, A. P. Szerebrovnak 2007-es cikkéből származó ábra, amelyen jól látszik

az akkor új technikaként használt gravitációs csapdás élettartammérés eredményének hatása a ${}^4\text{He}$ kozmikus gyakoriságának számított értékére, összevetve a neutron-élettartamra korábban elfogadott világátlagból számított előfordulási gyakorisággal.

Az 1. ábra azt a közismert tényt is ábrázolja, hogy a ${}^4\text{He}$ gyakoriságát egyetlen fizikai adat befolyásolja, a fénylő anyag energiasűrűségének részaránya az Univerzum teljes anyagsűrűségében. Az ábrán látható függvénykapcsolatot megfordítva elmondható, hogy a ${}^4\text{He}$ előfordulásának pontos megfigyelésével a fénylő anyag egészének előfordulási gyakoriságára végezhető mérés!

Az eltelt másfél évtizedben a neutron-élettartamra vonatkozó mérési eredmények – a két eltérő mérési módszer szerint – két nagy csoportra oszlottak. A továbbiakban a két mérési módszert ismertetem, majd a szignifikáns eltérés „magyarázatára” hivatott elméleti elképzelésekből adok ízelítőt.¹

Neutron-élettartam meghatározása lassú neutronárammal

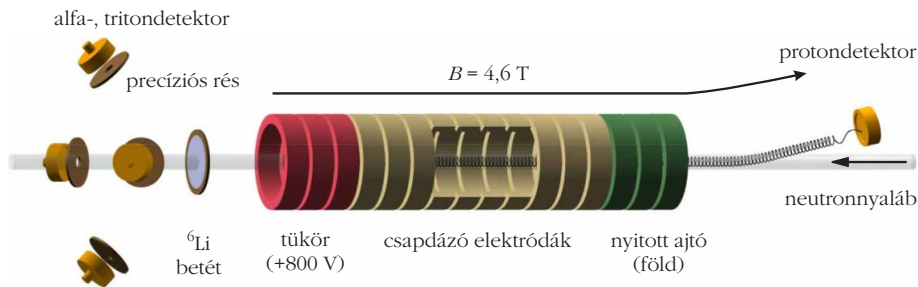
A klasszikusnak nevezhető módszert használták már a szabad neutron béta-bomlásának első kvantitatív vizsgálatában is, 1950-ben *Snell, Pleasonton* és *McCord* az Oak Ridge Graphite Reactornál és tőlük függetlenül *Robson* a Chalk River reaktornál Kanadában. A kor technikáját használva mindkét mérés arra jutott, hogy a neutron élettartama 10 és 30 perc közé esik.

A mérési elv: lassú (termikushoz közeli sebességű) neutronnyaláb elnyelési rátáját mérik valamilyen abszorbens anyagon egyidejűleg a bomlást szenvedett neutronokból származó töltött részecskéket (elektron vagy proton) is detektálva. A kettőből származó eredményeket kombinálva Robson eredménye az élettartamra 1110 ± 220 s volt.

Az első mérési eredmények pontosságán jelentős javítást értek el *Christensen* és munkatársai a Risø reaktornál Dániában, 1971-ben. Ők a bomlási elektronokat mágneses tér alkalmazásával a szcintillációs detektorlapokhoz „vezették”. Ezzel a bomlástermékek észlelését lényegében hibamentessé tették. A dán kutatók τ_n -re 918 ± 14 s eredményt közöltek.

A Sussexi Egyetem (UK), az ILL (Laue-Langevin Intézet, Grenoble, Franciaország) és a NIST (National Institute of Standards & Technology, USA) kutatóiból szervezett csoport négy évtizede tökéletesíti mérőberendezését (2. ábra). A bomlásból származó protonokat a neutronnyaláb körül elhelyezett henger-elektrodákkal létrehozott hosszanti feszültségcsapdában tartják a cső belső térfogatában, míg a tengelyvel párhuzamos mágneses térrel eléri, hogy a protonok radiálisan sem távolodnak el. A neutronnyalábból 10 ms hosszúságú időszakokban gyűjtik a

¹Ajánlott irodalom a kísérletek részletei iránt érdeklődőknek: F. E. Whitfeldt: Measurements of the neutron lifetime. *Atoms* 6/4 (2018) 70. (MDPI)



2. ábra. A Sussex-ILL-NIST berendezés vázlatja. A jobbról érkező neutronáramot növekvő elektromos feszültségű gyűrűsoron vezetik keresztül, amelyek az átrepülés közbeni bomlásból származó protonokat csapdába ejtik. A protonokat a csapda kapujának időnkénti kinyitásával vezetik a detektorokhoz, az átrepülő neutronokat pedig magreakcióval detektálják.

bomlási protonokat, amelyeket a csapdát egyik végén körülbelül 8 μ s-nyi időre „kinyitva” (a feszültséget nullára csökkentve) számolnak meg a protondetektorokkal. Ezt a ciklust ismétlik az adatgyűjtés statisztikájának növeléséhez. A neutronokat a nyaláb haladási irányában elhelyezett lítiumtartalmú anyagban végbemenő $n+{}^6\text{Li}$ magreakciókban keletkező α -részecskékkal detektálták.

A módszer hibája a neutrondetektálásra használt Li-sűrűség és az $n+{}^6\text{Li}$ reakció hatáskeresztmetszetének hiányos ismeretéből adódik. Mindez 2,5 s bizonytalanságot okoz az élettartam becslésében. Első méréseiket 2005-ben közzétették, majd 2013-ban újraértékeltek a mérési módszer megnövelt pontosságú hibaelemzése után. Eredményük: $\tau_n = (887,7 \pm 1,2 [\text{stat.}] \pm 1,9 [\text{syst.}] \text{ s}$. Az első hiba a statisztikus ingadozásokból ered, amelyet egyre több adat gyűjtésével lehet csökkenteni. A második hiba csökkentéséhez a mérőrendszerben zajló folyamatok még pontosabb megismerésére van szükség. Fejlesztési folyamatban lévő mérésükkel 1 s-ra kívánják lecsökkenteni a szisztematikus hibát.

Egyidejűleg folyik egy újabb berendezés fejlesztése is, amelyben erősebb mágnes, nagyobb neutronfluxust befogadni képes csapda és abban homogénabb protoneloszlás elérésével az élettartam meghatározásának bizonytalanságát 0,1 s-ra tervezik csökkenteni.

Legújabb független fejleményként megemlítem, hogy a japán J-PARC gyorsítónál 2016-ban indítottak el egy kísérletet, amelynek szintén a 0,1 s bizonytalanság elérése a végső célja. 2018-ban előzetes eredményt közöltek: $896 \pm 16 \text{ s}$.

Neutron-élettartam mérése ultrahideg neutronokkal

Ultrahidegnek azokat a neutronokat nevezik, amelyek mozgási energiája kisebb 100 nano-eV-nál (hőmérsékletük kisebb 1 mK-nél, de Broglie-hullámhosszuk nagyobb 100 nm-nél). Érdekes véletlen, hogy az ilyen energiájú neutronokat hosszú időre csapdázták alkalmas anyagból készült „dobozokban”. Például az alacsonyenergiás neutron koherens szóródásából származó kölcsönhatási energia sokféle anyagon 100-300 neV, ami a neutron – ilyen anyagból készült do-

boz falain történő – teljes visszaverődésére vezet. Mágneses momentumának kölcsönhatási energiája erős inhomogén mágneses terekkel körülbelül 60 neV/tesla, így mágneses csapdáza is lehetséges. Végül nehézségi potenciális energiája a Föld gravitációs terében körülbelül 100 neV, ami jól kihasználható a neutronok függőleges csapdázására. Mindezen jelenségek felismerése alapján az

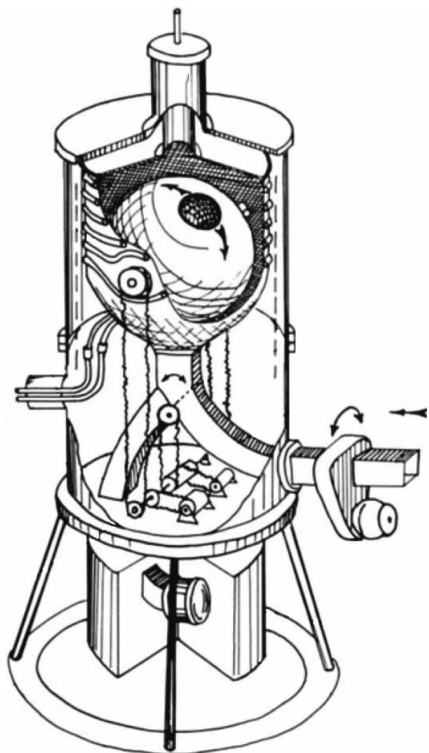
1970-es évek elején kezdték el az ultrahideg neutronok számának – bomlás miatt bekövetkező – időbeli csökkenésére alapozott élettartam-mérési kísérleteket.

A mérés elve és az élettartam kiszámítására használt képlet nagyon egyszerű. Exponenciális bomlástörvényt feltételezve két egymást követő időszakokban megméri a dobozban lévő neutronok számát és a csökkenés üteméből számítják ki a neutron élettartamát. Tehát ez esetben nem szükséges a bomlástermékek észlelése. És éppen ez a lényeges különbség!

A gyakorlati kivitelezés során először, az anyagfelületről való teljes visszaverődés jelenségére alapozva, speciális anyagból készült dobozt használtak csapdaként. Az ennek falán lévő szennyezések azonban abszorpciós veszteségre vezetnek. Továbbá, a falról visszapatannó neutronok – a fal magasabb hőmérséklete miatt – extra mozgási energiára tehetnek szert, ami meghaladhatja a fal állította potenciálgát magasságát és az ilyen neutron kiszökik a dobozból. Végül a hullámként viselkedő neutron bizonyos mélységig behatol a doboz falába és ott el is nyelődhet. Így a mért élettartam a valódi bomlási jelenség mellett további eltűnési járulékokat is kap.

Ezen hibaforrások kiküszöbölésére egy, elsőként Szentpétervárott megvalósított gravitációs csapdás berendezést telepítettek át, majd fejlesztették tovább Grenoble-ban (3. ábra). Neutronokkal történt feltöltése után kissé oldalt fordították a berillium-borítású, 15 K-re lehűtött gömb alakú edényt, hogy a tetején lévő nyíláson keresztül a nagyobb energiájú neutronok eltávozhassanak. A visszamaradt neutronok mozgási energiája kevés volt a gravitációs potenciálgát átugrásához. 2005-ben a korábbi kísérleteknél lényegesen kisebb hibájú, ám a lassú neutronárammal történő mérés eredményétől lényegesen (körülbelül 9 másodperccel) eltérő eredményt publikáltak: $(878,5 \pm 0,7 [\text{stat.}] \pm 0,3 [\text{syst.}] \text{ s}$. Ez az eltérés lett a neutron-élettartam-rejtély kezdőpontja.

A legutóbbi mérést, amelynek eredményét 2018-ban publikálták, teljes mértékben Grenoble-ban végezték egy új, a korábbinál ötször nagyobb térfogatú, tetején nyitott félgömbben gravitációsan csapdázott neutronokkal. Az eredmény 3 másodperccel megnőtt, $\tau_n = (881,5 \pm 0,7 [\text{stat.}] \pm 0,6 [\text{syst.}] \text{ s}$, de még mindig fennáll a közel négyszeres standard eltérés a két módszerrel nyert élettartamok között.



3. ábra. A neutronok gravitációs csapdájának eredeti orosz építésű példánya. Könnyen felismerhető a neutronokat tároló, kissé oldalt fordítható gömb alakú edény nyílással a tetején. A neutronok a nyíl irányából érkeznek és vezetősővön keresztül töltik fel a gömböt. A többi alkatrész a gömb környezettől való szigetelését és az ultrahideg tulajdonság fenntartását szolgálja.

Az ideálisan falmentes kísérlethez polarizált neutrongázt kell használni, amelyet inhomogén mágneses tér alkalmazásával mágneses „pallackba” zárnak. Ezt a technikát a legtokéletesebben megvalósító eszköz jelenleg Los Alamosban üzemel (4. ábra). A berendezés falán elhelyezett mágneskonfigurációval hozzák létre a neutronok mágneses momentumával kölcsönható inhomogén bezáró mágneses teret. A „rossz” spinállású és a túl nagy mozgási energiájú neutronok elszöknek a térfogattól, így hosszabb pihentetés után állandósul a felülről nyitott félgömbben elhelyezkedő neutronok száma. Ezek depolarizációját 6,8 T erősségű homogén térrel akadályozták meg.

²Ajánlott áttekintés az aktuális elméleti és kísérleti helyzetről: B. Fornal, B. Grinstein: *Neutron's Dark Secret*. arXiv:2007.13931 (2020. július 27.).

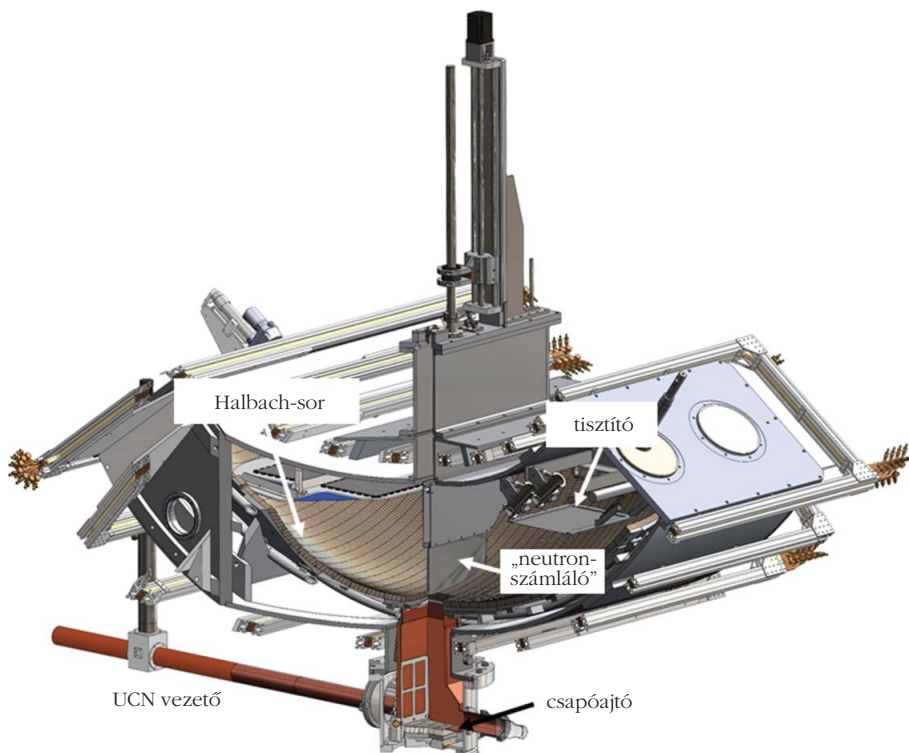
A tárolási idő végén a neutronok számát egy beeresztett, bórbevonatú falban bekövetkező reakcióban keletkező α -részecskék okozta lumineszcencia segítségével számlálták meg. A technikai újítások révén csak 0,24 s becsült szisztematikus hiba maradt vissza, amelynek oka az edény falainak termikus rezgéséből származó neutronfűtés.

A kétféle módon megmért, és legfeljebb 10 s szisztematikus hibájú eredmények a pontosság előrehaladásával egyértelműen elváltak egymástól. A lassúneutronáramos mérések világátlaga $\tau_n = 888,1 \pm 2,0$ s, míg a csapdázott ultrahideg neutronosoké $\tau_n = 879,37 \pm 0,58$ s. Az eltérés okát a kísérleti fizikusok eddig még meg nem értett szisztematikus effektusokban remélik megtalálni.

Új fizikát feltételező elméleti fizikai értelmezési kísérlet és ellenőrzése²

Az elméleti fizikusok oldaláról az elmúlt másfél évtizedben számos magyarázó javaslat született új fizika feltételezésével. A legnagyobb visszhangot *Fornal* és *Grinstein* 2018-ban tett javaslata kapta. Ők feltételezték, hogy a neutron bomlásakor a gyenge kölcsönhatási reakció mellett egzotikus részecskébe is történhet bomlás. Így pusztán a proton észlelésére korlátozódva látszólag ritkábban (hosszabb élettartammal) bomlik a neutron. A neutron más bomlási csatornáját is feltételezve, a mért élettartamok eltéréseiből az ismeretlen bomlási módusra 1%-os relatív gyakoriság adódik.

4. ábra. A Los Alamos-i gravitációs neutroncsapda. A jól felismerhető félgömb alakú tányér oldalát befedő mágnessorral (Halbach-sor) állítják elő a tányér falától távoltartó inhomogén mágneses teret. A leereszthető gát („neutronszámláló”) falában bekövetkező magreakcióval számlálják meg a meghatározott benntartózkodási idő után megmaradt neutronokat. A feltöltés az alul látható vezetősővön keresztül történik.



Kísérletileg legkönnyebben az a feltevés ellenőrizhető, amely egy semleges sötétanyag-részecskét kísérő gamma-sugárzást tételez fel. A sötétanyag-részecske tömege nagyobb kell legyen a proton és az elektron tömegkülönbségénél, hogy ez a „magyarázat” ne kerüljön ellentmondásba a protonstabilitásra vonatkozó igen pontos eredményekkel.

Ha ez a folyamat létezik, akkor a neutron egzotikus bomlása révén atommagokban is bekövetkezhetne hasonló átalakulás eggyel alacsonyabb atomszámú, ám változatlan rendszámú magba (hiszen ebben a folyamatban a nukleonok száma állandó protonszám mellett eggyel csökken). E lehetőség kizárásának követelményéből, az alkalmas izotópok tömegtáblázatát átvizsgálva, a ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be}$ átmenet hiányából az egzotikus bomlásban keletkező sötét részecske tömegére 937,900 MeV nagyságú alsó korlátot vontak le.

A feles spinű χ sötétanyag-részecskét vagy egy γ -foton vagy egy ϕ sötét bozon kísérheti. Végül a következő reakciók elemzését végezték el:

$$n \rightarrow \chi + \gamma, \quad n \rightarrow \chi + \phi, \quad n \rightarrow \chi + e^+ + e^-.$$

A kísérő foton energiájára a nehéz χ fermionra vonatkozó tömegkorlát és az energiamegmaradás alapján:

$$0,782 \text{ MeV} < E_\gamma < 1,664 \text{ MeV}$$

megengedett tartomány adódik. Az elektron-pozitron végállapotú pár virtuális foton révén jöhet létre, így a fenti korlátok lefordíthatók a pár teljes energiájára is. Természetesen ez a bomlás, ha létezik, a csapdázott neutronokra is fellép. Ezt felismerve az elméleti felvételt követő egy hónapon belül germániumdetektort is hozzáépítettek a Los Alamos-i kísérlet berendezése köré. Ám a várt jel nem jelentkezett.

A tisztán sötét részecske-párba történő bomlás lehetősége persze még megmaradt. Számos további elméleti magyarázó próbálkozást közöltek, de egyelőre egyikre sincs bizonyíték.

A két mérési eljárás közötti szisztematikus eltérés technikai vagy fizikai okának megtalálása mind az alapvető kölcsönhatások fizikája, mind a kozmológia számára izgalmas kihívás, alapvető ismeretet rejt a gyenge kölcsönhatás természetét illetően, és tisztázása nyilván nem igényel dollármilliárdokat!