

FELFEDEZŐ RÉSZECSEKEFIZIKA A CERN-BEN: AZ ELEKTROGYENGE BOZONOKTÓL A TITOKZATOS SÖTÉT ANYAGIG

Pásztor Gabriella

ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: gabriella.pasztor@ttk.elte.hu

A múlt nagy felfedezései: a gyenge kölcsönhatás anatómiája

Az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet, a CERN történelme már a kezdetektől szorosan összekapcsolódik az elektrogyenge kölcsönhatás vizsgálatával.

Az első gyorsítót, a Szinkrociklotront 1957-ben adták át. Első jelentős visszhangot kiváltó eredménye a töltött pionok ritka bomlásának kimutatása volt elektronra és neutrínóra már 1958-ban, az axiálvektor-áramon alapuló elméleti leírás ellenőrzése során. A gyenge erő hatására végbemenő folyamat legpontosabb elméleti előrejelzésével összhangban, amely a standard modell $V-A$ (vektor-axiálvektor) áramán alapul, az elektronos és müonos pionbomlások gyakoriságának aránya $B(\pi \rightarrow e\nu)/B(\pi \rightarrow \mu\nu) \approx 1,23 \cdot 10^{-4}$. Ennek mérése szép igazolása a gyenge kölcsönhatás balkezes természetéből adódó „helicitáselnyomásnak” a lendület- és perdületmegmaradás miatt.

A kísérleti adatok egyre növekvő gazdagsága mellett az 1960-as évek óriási elméleti fejlődést hoztak. Sheldon Glashow már 1961-ben felvetette, hogy az elektromágneses és a gyenge erők egyesíthetők egy közös keretben, ha a már korábban elképzelt töltött közvetítő részecskék (W^\pm) mellett egy nehéz, elektromosan semleges részecske (Z^0) is létezik, amelynek tömege körülbelül $100 \text{ GeV}/c^2$. A továbblépéshez a fordulatot a Robert Brout és François Englert, valamint tőlük függetlenül Peter Higgs által 1964-ben javasolt BEH-mechanizmus hozta, amely megmutatta, hogy a közvetítő részecskéknek tömege lehet, ha létezik egy skalármező, amelynek értéke egy spontán szimmetriasértés után az üres térben sem nulla. Higgs azt is felvetette, hogy ekkor megjelenik egy új különleges skalár- (nulla spinű) részecske, amelyet ma Higgs-bozon (H) néven ismerünk. 1967-re Steven Weinberg és Abdus Salam sikeresen integrálták a BEH-mechanizmust Glashow modelljébe, létrehozva az elektrogyenge kölcsön-

hatás egységes elméletét, amelynek legfontosabb jóslata a gyenge semleges áramok létezése volt.

1973 ezek után két óriási felfedezést hozott, megszilárdítva a fiatal modellt. Az elméleti áttörést Gerard 't Hooft és Martinus Veltman bizonyítása hozta arról, hogy az elektrogyenge modell renormálható, azaz minden lehetséges fizikai folyamat valószínűsége 0 és 1 között esik. Ez biztosítja, hogy az elmélet matematikai ellentmondástól mentes legyen. A kísérleti oldalon pedig a CERN-ben a Gargamelle-együttműködés egy óriási buborékkamrát müon-neutrínó-nyalábbal bombázva kimutatta a neutrínók szóródását atomi elektronokon és más részecskéken a visszalökődő töltött részecskék megfigyelésével (2. ábra az [1] cikkben). A folyamat ritkaságát jól jelzi, hogy több mint 1 millió fényképen csupán három $\nu_e e \rightarrow \nu_e e$ szórási eseményt fedeztek fel. Ezzel a semleges gyenge erő, illetve közvetve a Z-bozon mint közvetítő felfedezése megtörtént. Néhány évvel később, 1979-ben Glashow, Weinberg és Salam megkapja a Nobel-díjat. Elméletük pedig, kibővítve az erős kölcsönhatással, standard modell [2] néven máig rendkívül sikeres karriert mondhat magáénak, meglepően pontosan leírva a laboratóriumi megfigyeléseket.

Bár a Gargamelle-eredményekből meg lehetett becsülni az új közvetítő részecskék tömegét ($m_W \approx 60-80 \text{ GeV}/c^2$ és $m_Z \approx 75-95 \text{ GeV}/c^2$), közvetlen felfedezésükre 1983-ig kellett várni, hiszen ehhez egy új nagy energiájú ütköztető építésére volt szükség. Mivel a protonok összetett, dinamikus szerkezettel rendelkező objektumok, amelyek kvarkokból és az őket összetartó gluonokból állnak, az ütközésben a proton kinetikus energiájának csupán egy része hasznosulhat új nehéz részecskék keltésére. Ezért Carlo Rubbia meggyőzte a CERN tanácsát, hogy alakítsák át a frissen átadott maximum 450 GeV energiát elérő Szuper Protonszinkrotron (SPS) gyorsítót, amit hagyományos álló céltárgyas kísérletekhez terveztek. A cél egy modern proton-antiproton ütközőgyűrű megépítése volt, amely $\sim 600 \text{ GeV}$ energiájával már elegendő számú ritka W- és Z-bozon termeléséhez vezethetett.

Ehhez egy fontos technológiai kihívást is le kellett győzni: megfelelően intenzív antiprotonnyalábot kellett létrehozni. A holland gyorsítófizikus Simon van der Meer már 1972-ben publikálta a sztochasztikus nyalábhűtés elvét, amellyel a nyalábcsoomagokban utazó részecskék helyét és impulzusát lehetett közel tartani egymáshoz, és ezzel a csomagot erősen fókuszálni. Az ötlet egyszer-



Pásztor Gabriella részecskefizikus, az MTA-ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport vezetője, az ELTE Atomfizikai Tanszék oktatója. Fő kutatási területe a részecskefizika standard modelljén túlmutató jelenségek vizsgálata. Tagja a CERN LHC CMS együttműködés vezető testületének. A BRIL nyalábmegfigyelő és luminozitásmérő rendszer projektmenedzserként modern mérőberendezések működtetését, tervezését és megépítését irányítja. Korábban az ATLAS kísérletben részt vett a Higgs-bozon felfedezésében. Az OPAL Együttműködés fizikakoordinátoraként irányította a LEP-adatok végső feldolgozását, a kísérlet tudományos örökségének publikálását.

rú: a nyalábcsoomagokban az egyes részecskék (vagy részecskecsoportok) pozícióját és lendületét megméri, és ezeket az értékeket elektromos jelekké átalakítva előküldik a gyűrű átellenes pontjára, hogy a megfelelő statisztikai alapon kiszámolt korrekciókat alkalmazhassák a részecskék megérkezésének időpontjában az ideális sebességértékek eléréséhez. Ez a módszer tette lehetővé az SPS előgyorsítóiban a megfelelően fókuszált, jó minőségű antiprotonnyaláb előállítását.

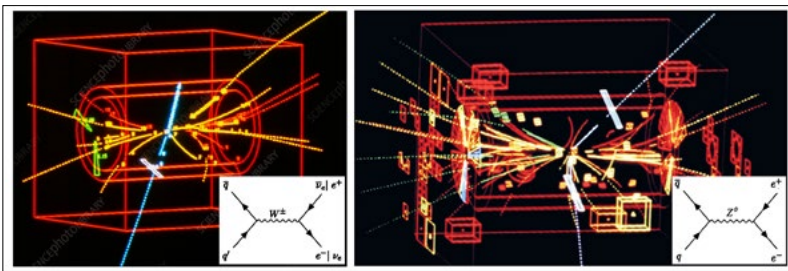
1981-ben lépett működésbe a Szuper Proton-Antiproton Szinkrotron (Sp̄pS, és két évvel később a W- és Z-részecskéket felfedezte az UA1 (Rubbia vezetésével) és az UA2 kísérlet, amelyek neve az angol „underground area” avagy földalatti terület rövidítéséből származik. A közvetítő részecskéket elsősorban elektronos bomlásaik alapján ismerték fel: $W \rightarrow e\nu$ és $Z \rightarrow e^+e^-$, ahogy az 1. ábra mutatja. Ennek oka, hogy műionokra az UA1 detektor lendületfelbontása az érdekes ~ 40 GeV/c tartományban csupán 20% volt (míg az UA2 nem is rendelkezett műiondetektorral). Összehasonlítva, az elektronok energiefelbontása a kaloriméterben nagyjából 2,5%-os volt. Az 1983-as felfedezést egy évvel később követte Rubbia és Van der Meer

Nobel-díja. Rubbia később a CERN főigazgatójaként 1989 és 1993 között jelentős erőfeszítéseket tett a mai csúcserendezés, a Nagy Hadronütköztető megvalósításáért, amelynek megépítését 1994-ben hagyták jóvá.

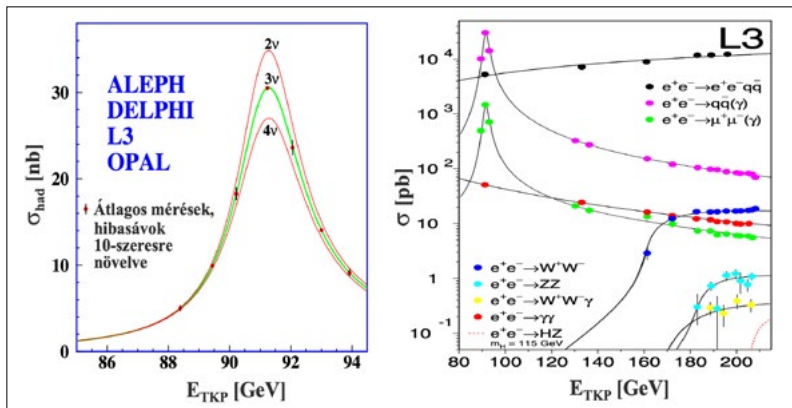
Az 1. ábra kapcsán érdemes egy másik úttörő technológia felfedezést is megemlíteni, amely lehetővé tette a töltött részecskék útjának észlelését elektronikusan, nagy térfogatban. 1968-ban George Charpak a CERN-ben fejlesztette ki a sokszázas proporcionális kamrát (MWPC-t), amelyben a nagy energiájú részecskék ionizálják a kamrában lévő gázmolekulákat. Az így szabaddá váló elektronokat egy elektromos mező párhuzamosan futó huzalokra irányítja, amelynek közelében elektronlavina alakul ki, felerősítve az elektromos jelet. A száakra beérkező töltések eloszlását vizsgálva meghatározható a részecskék pontos nyomvonala. Charpak újítása, amiért 1992-ben vehette át a Nobel-díjat, lehetővé tette az első modern részecskefizikai detektorrendszerek megépítését.

A Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (LEP) már az Sp̄pS ötlete, illetve a W- és Z-bozonok felfedezése előtt tervezés alatt állt, hogy elemi részecskék (e^+e^-) tiszta kölcsönhatásaiban pontosan megvizsgálhassa a gyenge erőt közvetítő részecskék tulajdonságait, és az akkori remények szerint felfedezhesse a standard modell szívében álló Higgs-bozont. A 27 km körületű, 100 mélyen fekvő föld alatti alagútban elhelyezett tárológyűrű nyalábenergiája 44 GeV és 104,5 GeV között változott 1989-től 2000-ig terjedő pályafutása alatt. Megmérve az $e^+e^- \rightarrow Z, WW, ZZ$ folyamatok hatáskeresztmetszeit (többek között) a tömegközépponti energia függvényében (2. ábra) és tanulmányozva a Z és W bomlási folyamatait, a négy LEP-együttműködés szigorúan ellenőrizte a standard modell jóslatait, és megszorította annak lehetséges kiterjesztéseit. Mintegy 17 millió Z-bozon-esemény feldolgozásával a Z tömegét ($m_Z \approx 91,2$ GeV/c²) 0,002%-os pontossággal, a könnyű neutrínófajták számát pedig a Z-rezonancia pontos alakjának vizsgálatával kisebb mint 0,3% pontossággal 3-ban határozták meg.

Magyarország 1992-es hivatalos belépése a CERN tagállamai közé megnyitotta az utat a hazai intézmények kutatói előtt az intenzív együttműködés számára. A LEP L3 és OPAL együttműködéseiben jelentős szerepet játszottunk mind detektorfejlesztési, mind adatfeldolgozási projektekben. Ekkor indult el a szívemhez közel álló kísérleti kutatási irány a standard modellen túli fizika felé, amelyről cikkem második felében írok



1. ábra. Bal oldal: egy $W \rightarrow e\nu$ esemény képe: a kék részecskenyom a W-bomlásból származó elektronhoz tartozik, amellyel más részecske nem tart egyensúlyt, hiszen a csak gyenge erőt érző neutrínó nyom nélkül távozik a detektorból, a kék nyílal jelölt hiányzó lendületet hagyva maga után. Jobb oldal: az első Z-bozon-keletkezés észlelése az UA1 kísérletben 1983-ban: a két fehér részecskenyom egy elektron-pozitron párt jelöl a Z bomlásából. A nagy központi driftkamrában megjelenő többi nyom mindkét képen alacsony lendületű részecskéktől származik, amelyek a közvetítő bozonokkal együtt keletkeztek a proton-antiproton ütközésben



2. ábra. Bal oldal: az $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow$ hadronok folyamat hatáskeresztmetszete a LEP tömegközépponti energiájának függvényében. A színes vonalak az elmélet jóslatát mutatják 2, 3 és 4 könnyű neutrínófajta esetén. Jobb oldal: a különböző elektrogyenge folyamatok hatáskeresztmetszete a tömegközépponti energia függvényében. A mérések (pontok bizonytalanságzakkal) jó egyezést mutatnak a standard modell jóslataival a teljes energiatartományban öt hatáskeresztmetszet-nagyságrenden át. A hatáskeresztmetszet feltüntetett mértékegységei: 1 nb (pb) = 10^{-37} (10^{-40}) m²

majd. Az óriási erőfeszítések és az utolsó év izgalmai ellenére sem fedezett fel új elemi részecskét a LEP [3]: a természet túl magasra választotta ehhez a Higgs-bozon tömegét. A LEP azonban pontos méréseivel képes volt megjósolni az akkor még fel nem fedezett elemi részecskék, a Higgs-bozon és a legnehezebb t-kvark tömegét, ezzel megszilárdította a standard modellt, kizárta annak számos kiterjesztését, és előkészítette a terepet az LHC számára.

A jelen izgalmai: a skalárszektor rejtélyei

A LEP alagútjában elhelyezett LHC protonok és nehéz ionok sűrű csomagjait gyorsítja rekordenergiára (jelenleg 6,8 TeV). 2009-ben egy rövid próbafutással kezdte évtizedeken átívelő működését, amely 2041 végéig biztosított. Az LHC fő céljai között szerepelt az elemi részecskéknek tömeget adó elektrogyengeszimmetria-sértés mechanizmusának tanulmányozása, a Higgs-bozon felfedezése és tulajdonságainak pontos mérése, valamint a standard modell nagy energián érvényes kiterjesztésének felkutatása.

A Higgs-bozon 2012-es felfedezése az LHC ATLAS és CMS kísérleteiben, amelyről már sokszor olvashattunk a *Fizikai Szemle* hasábjain is [4–7], új korszakot nyitott a részecskefizikában. A Nobel Bizottság is kiemelte a CERN-kísérletek szerepét, amikor a díjat mindössze egy évvel később Englert és Higgs számára ítélte oda (Brout 2011-ben elhunyt). A standard modell immár részecske tartalmát tekintve teljes, és pontosan számot ad a méréseinkről. Válaszokat azonban annál kevesebbet nyújt nyitott kérdéseinkre. Hogyan, hát, tovább?

A Higgs-bozon egy új kísérleti eszköz is kezünkben. Segítségével feltérképezhetjük a skalármező potenciális energiáját [8]. A 2030 körül induló Nagy Luminozitású LHC (HL-LHC) a rendelkezésünkre álló adatmennyiséget egy évtized alatt megtízszerezi majd, megnyitva az utat a különösen ritka Higgs-önkölcsonhatások vizsgálata felé, amely közvetlenül szondázza a skalárpotenciálban megjelenő, eddig kísérletileg meg nem szorított skalár-önkölcsonhatási erősség paraméterét. Ezzel mélyebb ismereteket szerezhetünk az elektrogyenge fázisátalakulás természetéről, az univerzum korai fejlődéséről és stabilitásáról, feszegetve a jól ismert ősi kérdéseket: honnan jöttünk és hová tartunk?

Az LHC adataiban anomáliák és egzotikus jelenségek után kutatva kíváncsian keressük, vajon mi bújik meg a standard modell mögött. Felbukkannak új részecskék, az új fizikai modell hírnökei, a titokzatos sötét anyag alkotói? Megmutatkoznak új szimmetriák, rejtett térbeli dimenziók [9], új kölcsönhatások? Sikerül egyesítenünk ezek segítségével az ismert kölcsönhatásokat, ahogyan azt Glashow, Salam és Weinberg (számos más kutató segítségével) megtette az elektrogyenge kölcsönhatás esetén? Felfedezzük új forrásait az anyag-antianyag aszimmetriának ritka folyamatokban? Megannyi, még megválaszolatlan kérdés áll a jelen és jövő kutatói előtt [10–12].

Nem véletlen, hogy számos új projektet készít elő a nagyenergiás fizikusok közössége a CERN koordinációjával. Trócsányi Zoltán cikkében [13] az Európai Részecskefizikai Stratégia középpontjában álló tervezett ütköztetőgyűrű (Future Circular Collider, FCC) nyújtotta lehetőségekről ír, elsősorban a Higgs-bozonok fizikája körüli kérdésekre összpontosítva. A továbbiakban mi pedig az egyik legégetőbb kérdés, a sötét anyag természetének felderítésére irányuló erőfeszítéseket járjuk körül.

A jövő ígérete: a sötét anyag¹

A kozmológia standard Λ -CDM modellje szerint az univerzum csupán 5%-át teszi ki az általunk ismert anyag (elsősorban hidrogén és hélium), 25% hideg, azaz a fénysebességnél jelentősen lassabban haladó sötét anyag (cold dark matter, CDM), 70% pedig a gyorsuló tágulásért felelős sötét energia, amit a kozmológiai állandó (Λ) ír le.

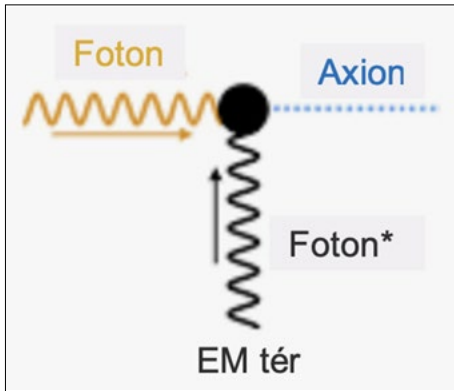
Az univerzum energiájának domináns anyagformája titokzatos sötétségbe burkolódik, hiszen nem nyel el vagy bocsát ki elektromágneses sugárzást, és csupán gravitációs hatásából következtethetünk létezésére; például a galaxisok forgásának sebességgörbéit vagy a fény elhajlását tanulmányozva nagy galaxishalmazok körül.

De mi lehet a sötét anyag? Rengeteg lehetséges, a megfigyelésekkel összhangban lévő modell létezik, amelyek igen széles tömeg- és kölcsönhatási erősségtartományt fednek le: a gyengén kölcsönható nehéz ($m \sim \text{TeV}/c^2$) részecskéktől (weakly interacting massive particle, WIMP) a több nagyságrenddel erőtlenebbül kölcsönható könnyű (akár $m \sim \mu\text{eV}/c^2$) részecskékig (feebly interacting particle, FIP). Éppen ezért érdemes azt is megvizsgálni, hogy a jelöltek milyen más nyitott kérdésre tudnak választ adni.

FIP-jelöltek

A FIP-jelöltek leghíresebbike, az axion [15] az erős kölcsönhatás egy rejtélyére kínál megoldást. A kvantummechanikai totalitárius elv szerint: minden kötelező, ami nem tilos. Hasonlóan a gyenge kölcsönhatáshoz, ahol sérül az ún. CP- (töltéstükrözés \times tértükrözés) szimmetria, erre a standard modell az erős kölcsönhatás esetén is ad lehetőséget. A mérések azonban azt mutatják, hogy a részecskék és antirészecskék ugyanúgy viselkednek az erős kölcsönhatásban. Felmerül tehát a kérdés, mi akadályozza meg a CP-sértő folyamatok lejátszódását az erős kölcsönhatás során. Roberto Peccei és Helen Quinn szerint a válasz: egy új szimmetria. Hasonlóan a Higgs-bozon eredetéhez az elektrogyengeszimmetria-sértésben, ennek az új szimmetriának a sérülése egy új részecskének, az axionnak a megjelenéséhez vezet, ami szintén skalárbozon.

¹ A szerző 2024. május 15-én elhangzott, az MTA 197. közgyűléséhez kapcsolódó, a CERN 70. születésnapja tiszteletére rendezett tudományos rendezvényen elhangzott előadása, a [14] alapján.



3. ábra. Axionkeletkezés fotonból elektromágneses térben

Az axion nagy mennyiségben keletkezhetett a korai univerzumban, és így jelentős komponense lehet a sötét anyagnak. Kimutatható lehet a galaxisok sötétanyagkoronájában, de ma is keletkezhet fotonokból a csillagok (például a Nap) belsejében vagy laboratóriumban, erős elektromágneses térben (3. ábra).

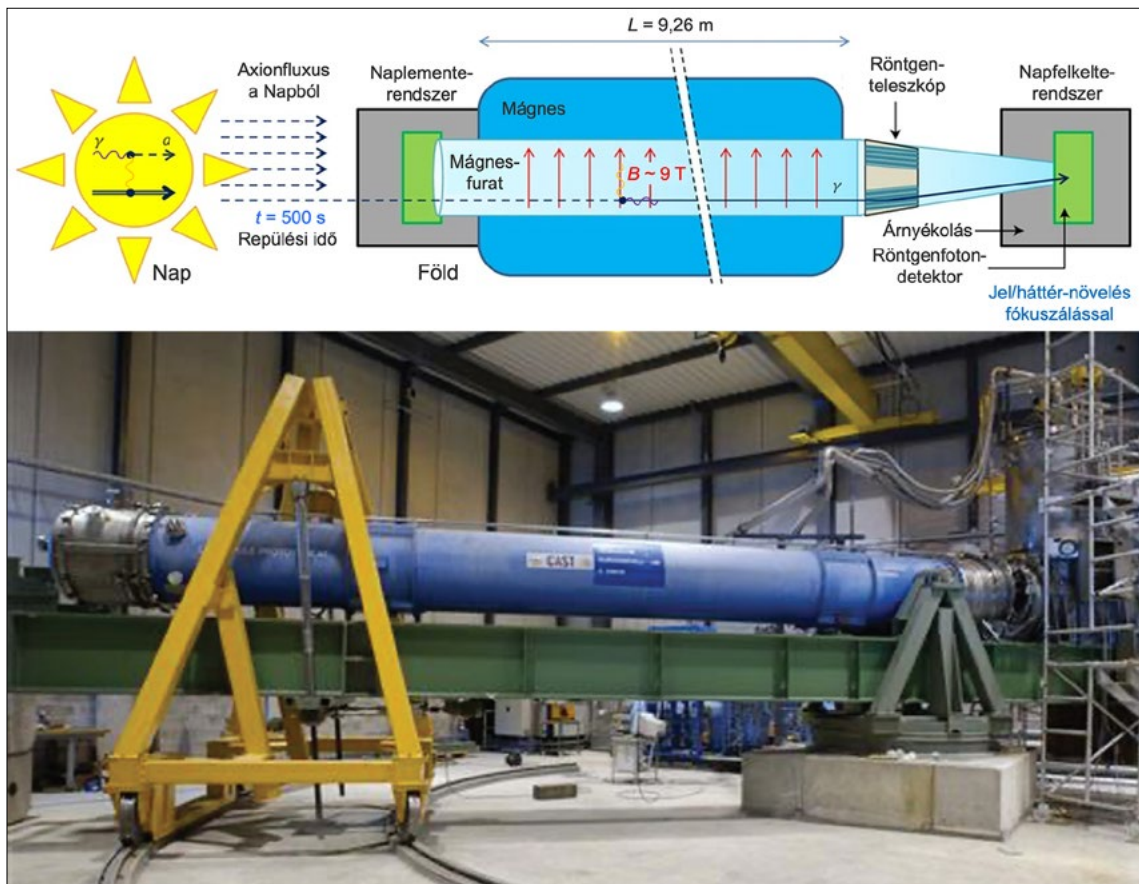
A CERN Axion-Napteleszkópja (CERN Axion Solar Telescope, CAST) a Napban keletkező axionokat kutatja, egy LHC-hez tervezett szupravezető dipólusmágnes nyálbocsövet használva távcsőnek, amivel követhető a Nap mozgása napkelte és napnyugta idején (4. ábra). A mágnesben röntgenfotonokká alakuló axionokat egy fókuszáló tükörrendszer juttatja el a teleszkóp végén lévő detektorba.

Az eredmény a várt háttérnek megfelelő, azaz nem észleltek több beütést, amikor a mágnes a Napra néz. Ebből korlátokat adtak meg az axion tömegére és csatolására a fotonhoz (5. ábra).

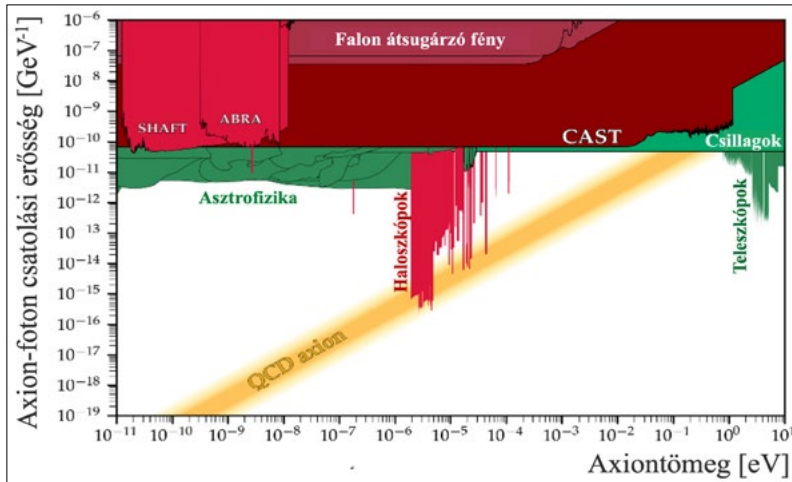
A Budapest–Wuppertal rácstérelméleti együttműködés számításai szerint az axion tömege 28 és 1500 $\mu\text{eV}/c^2$ között várható, ahol a kisebb értéknél az axion teszi ki a sötét anyag 100%-át, míg a nagyobb értéknél csupán 1%-át. A következő generációs axionkísérlet, a Nemzetközi Axion Observatórium (International Axion Observatory, IAXO) [16] jelentős részét lefedi majd ennek a tartománynak; elődjéhez hasonlóan mind a Nap, mind a Tejút sötétanyag-koronája felől érkező axionokat kutatva.

A WIMP-ek

A lehetséges sötétanyag-spektrum másik végén találjuk a WIMP-eket. A termikus kifagyási (freeze-out) modell szerint a korai univerzumban a részecskék termikus egyensúlyban voltak (6. ábra). A hőmérséklet csökkenésével a nehéz részecskék keletkezési valószínűsége mérséklődött, és a tágulás okozta sűrűségcsökkenés következtében a részecske-ütközések száma is ritkult; így a sötétanyag-megsemmisülés gyakorisága visszaesett. Ez

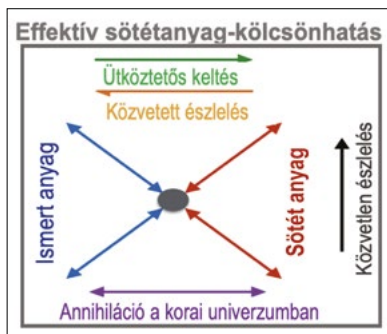


4. ábra. Fent: egy helioszkóp elvi vázlatja: a Napból érkező axionok a fénytől elzárt erős mágneses térben fotonokká alakulnak, amelyeket egy detektorral érzékelünk. Alul: a CAST (CERN Axion Solar Telescope) fényképe



5. ábra. Korlátok az axion tömegére és csatolási erősségére a fotonhoz különböző kísérletek-ből. Az erős kölcsönhatás CP-problémáját megoldó paramétertartomány sárgával van jelölve

zel „kémiaailag szétcsatolódtak” a többi részecskétől, és sűrűségük változását az Univerzum tágulási sebessége határozza meg. A modell visszaadja a szükséges sötétanyag-sűrűséget $m \approx 0,1-1 \text{ TeV}/c^2$ tömegű részecskékre, ha azok kölcsönhatási erőssége megfelel a gyenge kölcsönhatásának. Ez az eredmény, párosítva azzal, hogy ilyen részecske számos jól motivált standardmodell-kiterjesztésben megjelenik, illetve kísérletileg több módon is tanulmányozható, a „WIMP-csoda” néven ismert.



6. ábra. A sötét anyag kölcsönhatása a standard modell részecskéivel a korai univerzumban és a különböző észlelési módszerek esetén

A standard modell egyik legnépszerűbb kiterjesztése egy új „szuperszimmetriát” (SUSY) feltételez nagy energián a feles spinű fermionok és az egész spinű bozonok között. Ekkor minden ismert részecskének lesz egy (eddig nem észlelt) partnere azonos kvantumszámokkal, kölcsönhatásokkal de $\hbar/2$ -vel eltérő spinnel és (a szimmetria sérülése miatt alacsony energián) különböző tömeggel. A SUSY modellek számos nyitott kérdésre kínálnak választ, amelyek bemutatása külön cikket igényelne. Minimális feltételek megkövetelése esetén, a legkönnyebb SUSY-részecske remek WIMP sötétanyagjelölt: mind elektromosan, mind az erős kölcsönhatás szempontjából semleges, stabil, és tömege a $\sim \text{TeV}$ tartományba esik. Az eddigi kísérletek eredményei (köztük a LEP és az LHC mérései) természetesen megszorításokat adnak a SUSY modellek lehetséges paramétereire, azonban azoknak még így is széles tartománya nyitva áll.

A sötét anyag keresése

De hogyan is kutathatjuk a sötét anyag létezését? Három egymást kiegészítő módszert alkalmazunk (6. ábra).

- Közvetlen észlelés: a körülöttünk száguldó sötétanyag-részecskék szóródhatnak egy detektor anyagában, megütközve annak atomjait, amit észlelhetünk.
- Közvetett észlelés: a világűrben ritkán, de találkozhatnak sötétanyag-részecskék, és megsemmisülhetnek energiájukat részecskepárok formájában kisugározva. Nagy energiájú fotonok, neutrínók, antirészecskék észlelésének gyakoriságát vizsgálva a Földön vagy a világűrben, kimutatható lehet ezen folyamat hozzájárulása. A CERN-ben

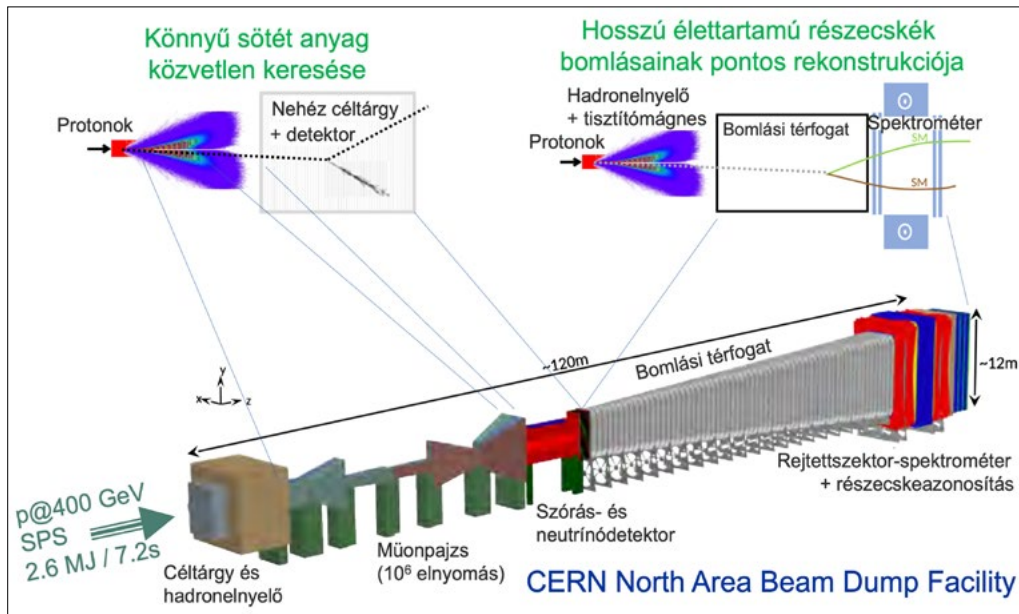
található a Nemzetközi Űrállomáson működő AMS2 (Alpha Magnetic Spectrometer) asztró-részecskefizikai kísérlet (6. ábra a [17] cikkben) irányítóterme. A kísérlet pozitronok és antiprotonok spektrumát vizsgálva kutatja a sötét anyag természetét.

- Részecskeütköztetők mint sötétanyaggyárak: kereshetjük sötétanyag-részecskék megjelenését a CERN (HL-)LHC-ben [9], FCC-ben vagy más jövőbeli berendezések nagy energiájú ütközéseiben, ahol a felszabaduló kinetikus energiából új nehéz részecskék keletkezhetnek.

Ez utóbbi esetben a fő kísérleti kihívást az jelenti, hogy a sötét anyag gyakorlatilag nem hat a detektor anyagára, tehát azt közvetlenül nem tudjuk észlelni, csupán a vele együttesen keletkező részecskéket. Ehhez a lendületmegmaradást hívjuk segítségül. Kiszámolva az eseményben megjelenő részecskék lendületének vektoriális összegét, meghatározhatjuk a fellépő egyensúlyhiányt, amit a távozó nem kölcsönható sötétanyagjelöltnek tulajdoníthatunk (7. ábra). Természetesen a standard modell által leírt folyamatok is hagyhatnak hasonló nyomot a detektorban. Gondoljunk a neutrínóra, amely a sötét anyaghoz hasonlóan alig van hatással az ismert anyagra. A feladatunk az, hogy meghatározva a standard modellből várt események számát, megállapítsuk, hogy a kísérleti adatok mutatnak-e eseménytöbbletet.

Az LHC kutatásai (a Higgs-bozon felfedezése óta) nem mutattak ki még új egzotikus részecskéket. Azonban eddig csupán a tervezett adathalmaz nagyjából 10%-át gyűjtöttük össze. A gyorsító és a detektorrendszerek megújítása után, 2030-tól indul a HL-LHC szakasz, amely új lehetőséget ad a ritka folyamatok felfedezésére.

Természetesen az is előfordulhat, hogy a részecskék túl nehezek ahhoz, hogy kimutassuk őket az LHC-n, és az FCC-re vagy más jövőbeli gyorsítóra vár ez az izgalmas feladat. Sőt, az is lehet, hogy a részecskék túl erőtellenül hatnak az anyagra, és ezért kerülték el eddig kíváncsi szemünket. Ez utóbbi esetben izgalmas új esemény-



9. ábra. A SHiP nyálábtemető kísérlet a CERN SPS mellett könnyű sötétanyag-részecskék és szupergyengén kölcsönható rejtetszektorbeli részecskék után kutat majd

a részecskefizika fejlődéséhez. A CERN számos korszakalkotó felfedezéssel vitte előre a tudományt, amelyek közül a három elektroyenge nehéz bozon felfedezését emeltem ki. Széles programja az olyan óriás gyorsítók mellett, mint a (HL-) LHC vagy az FCC, számos ezeket kiegészítő kisebb projektet is tartalmaz. A sötét anyag témakörére fókuszálva ezek közül az axion- és nyálábtemető kísérleteket tárgyaltuk, amelyek az új fizikát jósoló modellek más-más csoportját célozzák meg.

Természetesen mindig felmerül a kérdés, hogy mi lesz a következő nagy áttörés. Vajon a sorozat ismét egy új bozonnal folytatódik? A sötét anyag részecskéjével, netán a rejtett szektorban megbúvó közvetítővel, vagy éppen a superpartnerek egyikével? A lehetőségek skálája már-már zavarba ejtő, és csupán a kísérleti adatok mutathatják meg számunkra az utat a természet alapvető törvényeinek, az univerzum múltjának és jövőjének mélyebb megértése felé.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Péli Zoltánnak, akinek a Magyar Tudományos Akadémián 2024. május 15-én elhangzott előadásából [21] is szemezgetett a cikk első részének megírásához, valamint az NKFIH TKP2021-NKTA-64 és K_22 143460 kutatási támogatásáért.

Irodalom

1. Pei Wenna: A neutrínók fizikája. Fizikai Szemle, 2024/11, 375. (ebben a számban)
2. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. Fizikai Szemle, 2008/7–8, 246.
3. Igó-Kemenes Péter: Emlékezés. Fizikai Szemle, 2012/10, 328.
4. Pásztor Gabriella: Higgs-vadászat @ CERN. Fizikai Szemle, 2012/10, 358.
5. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejteltelmei – 1. rész: a Higgs-bozon keresése. Fizikai Szemle, 2021/2, 37.
6. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejteltelmei – 2. rész: a Higgs-bozon megfigyelése. Fizikai Szemle, 2021/3, 84.
7. Veszprémi Viktor: A Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? Fizikai Szemle, 2020/4, 118.
8. Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán: Metastabil világegyetem. Fizikai Szemle, 2023/02, 40.
9. Pásztor G.: Rejtett dimenziók nyomában az ATLAS detektorral, Természet Világa, 144 (2013) I. különszám, „Mikrovilág-2012” 53–58.
10. Pásztor Gabriella: Az Univerzum titkai és a Nagy Hadronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában. Fizikai Szemle, 2023/2, 43.
11. Trócsányi Zoltán: A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. Fizikai Szemle, 2022/9, 269.
12. Trócsányi Zoltán: Hol tart a részecskefizika? Fizikai Szemle, 2019/7–8, 233.
13. Trócsányi Zoltán: Részecskefizikai kutatási lehetőségek a CERN tervezett gyorsítógyűrűjén. Fizikai Szemle, 2024/11, 388. (ebben a számban)
14. Pásztor Gabriella: A sötét anyag keresése, előadás elhangzott az MTA 197. közgyűlési programsorozatának 2024. május 15-i „FCC és 70 éves a CERN” című rendezvényén. <https://indico.cern.ch/event/1417749/>
15. Patkós András: Axion-elektrodinamika. Fizikai Szemle, 2022/12, 386.
16. IAXO Collaboration: Armengaud E., et al.: Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO). JCAP 06 (2019) 047.
17. Horváth Dezső: Mi az antianyag és hova tűnt? Fizikai Szemle, 2024/11, 369. (ebben a számban)
18. Pásztor Gabriella: Jelek a standard modellen túlról? Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvarkkeresés a Nagy Hadronütköztetőn. Fizikai Szemle, 2023/2, 48.
19. CODEX-b Collaboration: Aielli G., et al.: The Road Ahead for CODEX-b. arXiv:2203.07316
20. Alekhin S., et al.: A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case. Rept. Prog. Phys. 79 (2016) 12, 124201, arXiv:1504.04855.
21. Péli Zoltán: Elektroyenge fizika. Az előadás elhangzott az MTA 197. közgyűlési programsorozatának 2024. május 15-i „FCC és 70 éves a CERN” című rendezvényén. <https://indico.cern.ch/event/1417749/>