

ULTRAKÖNNYŰ RÉSZECSKÉK NYOMÁBAN

Joerg Jaeckel – Heidelbergi Egyetem

Axel Lindner, Andreas Ringwald – Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY)

Az új elemi részek, különösen a sötét anyag alkotórészei utáni kutatás eddigi próbálkozásai eredménytelennek bizonyultak. Ezért a fizikusok szokatlan stratégiákat is ajánlanak. Első látásra hibetelenül egyszerű kísérletekkel igyekeznek az ultrakönnnyű axionok és rokonaik nyomára bukkanni.



2012 júliusában a CERN LHC fizikusainak egy új elemi részecske, a Higgs-bozon megtalálásáról szóló beszámolója a lapok címdoldalára került. Azon túl, hogy az elemi részek standard modelljének régen keresett utolsó alkotóelemét sikerült megtalálni, a felfedezés bizonyítéka a fizikusok által az új részecskék keresésére javasolt stratégia, az óriásgyorsítók építése helyességének. Azonnal felvetették a még nagyobb energiájú gyorsítók konstrukciójának megfontolását is.

Ez a siker azonban elfedi, hogy az LHC mindaddig adós maradt a megépítéséhez fűződő másik várakozás, a sötét anyag alkotórészei felfedezésének teljesítésével. Az áttörést esetleg meghozhatja a még magasabb ütközési energiák elérése 2015 elején. Az elméleti és kísérleti fejlődés az ellentétes irányban, a szélsőségesen könnyű részecskék keresése irányában is sokat ígér.

Már a Higgs-részecske felfedezése előtt egyértelmű volt, hogy a standard modell a bennünket övező tartományban nagy pontossággal és sikeresen írja le az anyag alapvető szerkezetét. Mindmáig egyetlen laboratóriumi kísérlet sem mutat szignifikáns eltérést a jóslataitól. A kiváló egyezés a Higgs-részecske tulajdonságai tekintetében is meggyőző. Ettől függetlenül a fizikusok keresik a standard modellen túli világ megnyilvánulását, hiszen többek között, a csillagászati megfigyelések szerint a Világegyetem gravitáló anyagának csak 15%-át alkotják a szokásos elemi részecskék. Az anyag oroszlánrészét (85%-át) a sötét anyagnak kell tulajdonítani. Annak alkotórészeiről alkalmasint csak annyit tudunk, hogy igen gyengén hatnak kölcsön a fénnel és a standard modell egyéb részecskéivel. Ennek ellenére a sötét anyag részecskéinek jelenlétét a Világegyetemben nem lehet „megúsni”. A galaxisok, mint a mi Tejútrendszerünk is, a sötét anyag részecskéinek gravitációs hatása eredményeképpen létrejött óriási anyagcsomósodások belsejében alakultak ki.

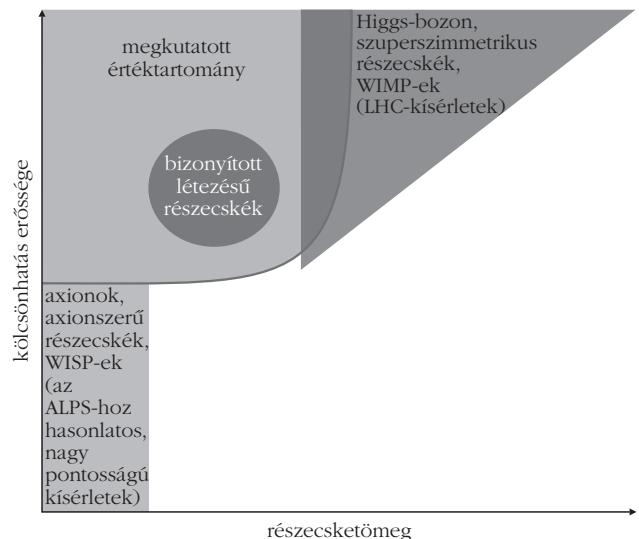
De mi alkotja a sötét anyagot és mi az oka, hogy mindaddig nem akadtunk közvetlenül a nyomára? Két válasz kínálja magát. Az egyik szerint ezek a részecskék

túlságosan nagy tömegűek, a másik szerint csak igen ritkán lépnek kölcsönhatásba a szokásos kozmikus anyaggal. Ha nincs szerencsénk, akár mindkét tulajdonsággal rendelkezhetnek. Az extrém nagy tömegű részecskék létéről extrém nagy energiájú folyamatokban lehet meggyőződni. Az egyéb anyagokkal alig kölcsönható részecskék kimutatására extrém találmányosságú precíziós mérésekre van szükség. Nem valószínű, hogy a két követelménynek egyidejűleg eleget lehet tenni laboratóriumi mérésekben.

Vadászat a „félénkekre”

Az utóbbi két évtizedben a részecskefizikusok a néhez részecskékre koncentráltak. Az elméletek közül az úgynevezett szuperszimmetrikus elméletek fejlesztésével foglalkoztak, amely a standard modellen túl részecskék egész rajának létezését jósolják, köztük kifejezetten nagytömegűeket. Az LHC építésének megkezdése is azzal kecsegtetett, hogy a teraelektronvoltos energiatartományba eső részecskék létezése kísérletileg igazolható lesz. A kutatók szemében különösen vonzónak tűnt az úgynevezett WIMP-ek (magyar fordításban „gyengén kölcsönható nagytömegű részecskék”) felfedezésének esélye. A rövidítés beszélő névvé változott, mivel „wimp” az amerikai angolban „félénk embert” jelent (1. ábra).

1. ábra. Hol kereshetők az ismeretlen elemi részecskék? A viszonylag kis tömegek és erős kölcsönhatások tartományát már elég alaposan átkutatták (ezt mutatja a bal felső terület). Az LHC-nál és más nagyenergiás kísérleteknél a kutatók nagy tömegű ismeretlen részecskéket, köztük WIMP-eket keresnek (a jobb felső tartomány). Egyre nő azon kísérletek száma is, amelyek a bal alsó tartományt kutatják át WISP-ekre vadászva. Ezek a WIMP-ekhez hasonlóan a sötét anyag lehetséges alkotórészei.



A 2015. évi Marx György emlékelőadás témáját feldolgozó cikket az előadó, A. Ringwald professzor és a *Spektrum der Wissenschaften* folyóirat szerkesztősége bocsátotta a *Fizikai Szemle* rendelkezésére. Az eredeti, német nyelvű cikk 2014 júniusában jelent meg. Fordította Patkós András.



A sötét anyagot alkotó részecskék között továbbra is a WIMP-eket tekintik a legfontosabb jelölteknek, bár az elérhető energiatarományban nem adtak jelet létezésükről. Talán az LHC ez évtől megemelt energián működő 27 km-es kerületű gyorsító gyűrűjében nyomukra akadnak.

A gyorsítós megközelítés mellett a fizikusok a kozmoszban is kutatnak WIMP-ek után. Ezzel a feladattal föld alatti detektorok sorát építették, amelyek a LUX, XENON, DAMA és COGENT neveket viselik, ám mindeddig nem jutottak meggyőző bizonyítékokra. Némelyikük látni vél bizonyos jeleket, de az egyes detektorok összehasonlításában a jelzések ellentmondásosnak bizonyultak.

Mindezek miatt eljött az idő, hogy mintegy az előzőek kiegészítésére, ultrakönnnyű részecskék kutatásával is foglalkozzanak. Ilyen kísérleti program példája az USA-ban megvalósított Axion Sötét Anyag Kísérlet (Axion Dark Matter Experiment – ADMX). Az elméleti fizikusok is egyre határozottabb előrejelzéseket képesek kiolvasni modelljeikből. A sötét anyag könnyű alkotórészeire javasolt jelöltek listája elég hosszúra nőtt. Ezekre a részecskékre a WISP rövidítés az elterjedt szakmai megnevezés, ami szintén beszélő megnevezés, hiszen „wispy” a könnyed vagy a leheletszerű szavakkal fordítható magyarra (WISP – weakly interacting slim particles – gyengén kölcsönható karcú részecskék). Ezek a részecskék sokban emlékeztetnek a neutrínókra, amelyeket sokáig a sötét anyag fontos jelöltjeinek tartottak. Ám kiderült, hogy a kozmikus neutrínók nagyenergiájú folyamatokban keletkeznek és túl gyorsan átszáguldanak az Univerzumon, semhogy hatásosan részt vehetnének a galaxisok kialakulásában. A WISP-ek ezzel szemben igen lassú mozgásúak és így ideális csirái lehetnek a nagyobb tömegcsomósodásokhoz vezető nehézségi erőtöbbletnek.

A talán legjobban megértett WISP-jelölt az axion, amelynek feltételezett tulajdonságaival már több mint 20 éve foglalkoznak a kutatók. Az axion létezésére vonatkozó javaslat megszületésének megértéséhez egy kis kitérőt kell tenni.

Az elemi részek fizikája majdnem teljes egészében szimmetriaelvekre épül. Ezen elvekből következtek a hatóerőkre és megmaradási tételekre is. Például az energia megmaradásának közismert törvénye a fizikai törvények időfüggetlenségének következménye. Ez konkrétan azt jelenti, hogy egy most elvégzett kísérlet és annak akármikor a jövőben elvégzett ismétlése kötelezően ugyanarra az eredményre vezet. Ez a fizika egyik legalapvetőbb összefüggése, amelyet a 20. század elején *Emmy Noether* fizikus és matematikus ismert fel.

Az axion létezése az időhöz kapcsolható másik szimmetriával függ össze, az idő előjelének megfordításával, az időtükrözéssel. Az időtükrözésre szimmetrikus fizikai törvényeket annak alapján ismerhetjük fel, hogy egy fizikai folyamatról készült filmet visszafelé levetítve olyan folyamatot látunk, amelynek bekövetkezését a szóban forgó fizikai törvény szintén

lehetségesnek mutatja. Ha egy megfigyelőnek csak a filmet mutatjuk, nem tudja eldönteni, melyik irányban telt az idő. Ennek egy hétköznapi példája a film, amely két egymással labdázó személyről készült. Ha csak a két személyre koncentrálunk (és a filmen látható környezetüktől eltekintünk) nem dönthető el, hogy előre vagy hátrafelé forog a filmszalag. Ám az idő előjelének megfordítására a makroszkopikus események általában nem változtatlanok, miután energiájuk egy része az idő előrehaladásával hővé alakul. Például egy pattogó gumilabda egyre alacsonyabbra pattan fel, amelynek megfigyelésével az idő iránya egyértelműen megállapítható.

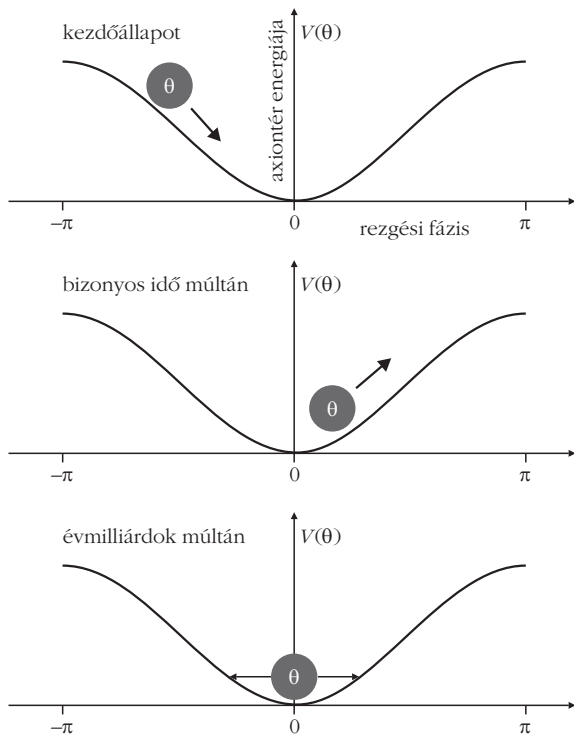
Az erős kölcsönhatási erő nem sérti az időtükrözési szimmetriát

Az időtükrözési szimmetria a standard modellben is szerepet kap. Az általa leírt három elemi kölcsönhatás közül az elektromágnesesről bebizonyították, hogy az időtükrözésre szimmetrikus. Ezzel szemben mind a gyenge kölcsönhatási, mind az erős kölcsönhatási elméletben van olyan paraméter, amelynek megválasztásától függ, hogy a kölcsönhatás sérti-e ezt a szimmetriát. Nulla értéke esetén a kölcsönhatás változatlan az idő előjelének megváltoztatására, egyébként bekövetkezik a szimmetria sérülése. A meglepő, hogy a gyenge kölcsönhatás elméletében a szimmetria sérül, az erős kölcsönhatásban pedig nem. Azért furcsa ez, mert nem világos, hogy a kvarkok, amelyek mindkét kölcsönhatásban részt vesznek, miért nem viszik át a szimmetriasértést a gyengéről az erős kölcsönhatásra.

Erre a felvetésre mindeddig a legelegánsabb választ az 1970-es évtized végén *Roberto Peccei* és *Helen Quinn* adta. Azt vizsgálták, mi történne a részecske-mentes vákuum energiájával, ha az időtükrözési szimmetriát sértő paraméter értéke nullától különböző értékeket vehetne fel. Arra a meglepő következtetésre jutottak, hogy amennyiben a paraméter időben változhat, akkor valamely idő elteltével energetikailag olyan állapot alakulna ki, amelyben az erős kölcsönhatás eredményeként a szimmetriasértő paraméter értéke nullára áll be.

Két Nobel-díjas, *Steven Weinberg* és *Frank Wilczek* hamarosan felismerték e mechanizmus egy kikerülhetetlen következményét. Egy dinamikailag változó paraméter maga is gerjeszthető és gerjesztései részecskéként viselkednek. Ez hasonló ahhoz, ahogy az elektromágneses tér gerjesztései a részecske jellegű fotonok. Tehát Peccei és Quinn megfontolásainak következménye egy új részecske létezése is, amely részecskének Wilczek, eléggé el nem ítéhetően, egy amerikai mosószer, az axion nevét adta. Indoklásnak az hozható fel, hogy az axion mintegy „megtisztítja” a nukleáris erőt az időtükrözés szimmetriáját sértő paramétértől.

Az axion tulajdonságait szinte teljes mértékben meghatározza az elmélet. Az egyetlen szabad paramé-



2. ábra. Amennyiben az axionrészecskék léteznek, akkor azok a θ -val jelölt axionmező kvantumai. Közvetlenül az Ősrobbanás után e tér energiája nagyon nagy volt (legfelső ábra), amit követően a mező az energia minimuma felé fejlődött. Ám a potenciálgödör túloldalán majdnem újból elérte a kiindulási energia nagyságát (középső ábra). A rezgésében tárolt energia nagyságával arányban van az Univerzumban található axionok sűrűsége. Ma, az Ősrobbanás után 14 milliárd évvel csak egy kis amplitúdójú oszcilláció maradt vissza (alsó ábra). De ez még mindig köbcéntiméterenként kerekem egymilliárd axion jelenlétére elegendő energiát hordoz a Tejút tartományában.

ter az axiont jellemző energiaskála. Ez a skála meghatározza az axion tömegét is, továbbá az axion és a standard modell részecskéi közötti kölcsönhatás erősségét is. Minél nagyobb a kölcsönhatást jellemző energiaskála, annál kisebb az axion tömege és annál gyengébb a kölcsönhatás is.

A laboratóriumi kísérletekből és a csillagászati mérésekből egyaránt az derült ki, hogy az axionok hatásának jellemző energiaskálája nagyobb 10^9 GeV-nél, azaz az LHC energiájának százezerszeresénél. Ehhez jellemzően az elektronvolt század és milliomod része közötti tartományba eső tömeg tartozik, ami viszont az elektron tömegének nagyjából milliárdod része. Tehát az axion ultrakönnyű, azaz a WISP-ek tipikus példánya.

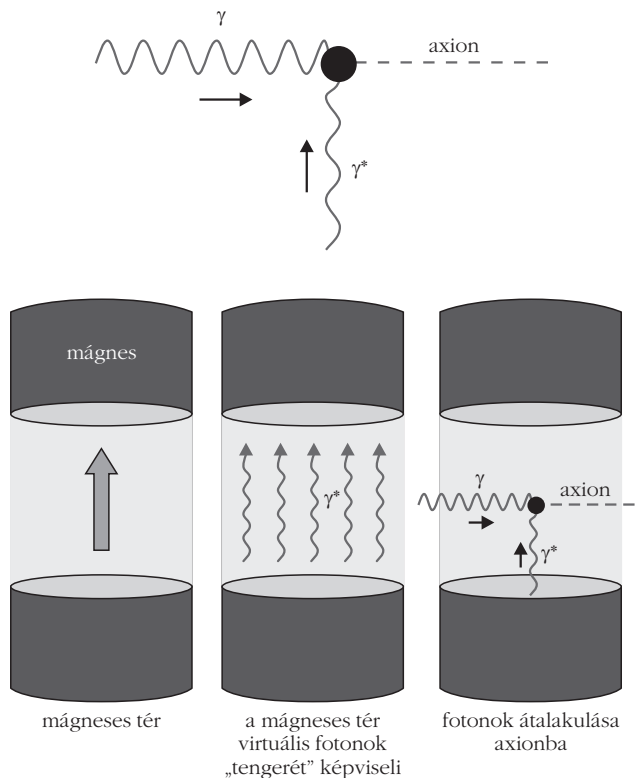
Az axiontér a minimumhoz tart

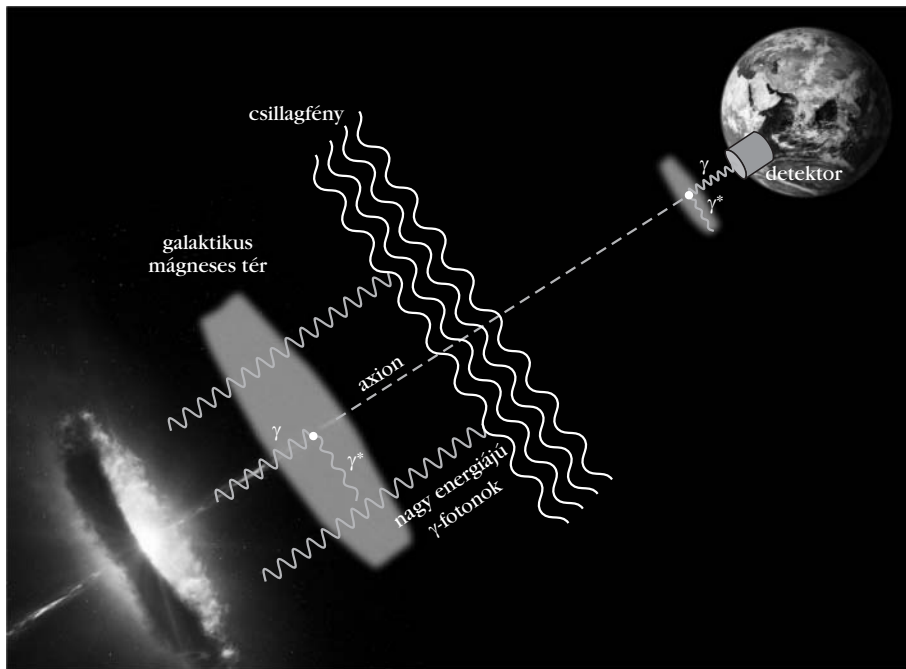
Ahhoz, hogy az axion a sötét anyag lényeges alkotórésze legyen, az szükséges, hogy elég nagy koncentrációban legyen megtalálható. Milyen mechanizmus vezethet ilyen helyzetre? Vegyük szemügyre a korai, nagy energiasűrűséggel jellemzett forró Univerzumot! Ha az axiontér valóban létezik, akkor ebben a korai szakban nagy energiával jellemzett állapotban találha-

tó, egyben a nullától különböző átlagértékű állapota sérti az időtükrözési szimmetriát. Miközben az Univerzum lehűl, minden alrendszerének energiáját igyekszik minimalizálni. Az axiontér, amelyet matematikailag egyetlen számparaméterrel, θ -val jellemeznek, szintén az energia minimuma által kijelölt értéke felé tart. Mozgása természetesen nem áll le a $\theta = 0$ pontban, hanem túllő a célján és a minimum túlsó felén újból növekvő energiájú állapotokba jut. Úgy mozog mint egy golyó egy emelkedő oldal falú tálban. Azután visszafordul és a másik oldalon lendül túl (2. ábra).

E rezgés energiája szorosan összekapcsolódik az Univerzumban ma megtalálható axionrészecskék számával. Az Univerzum tágulásának hatására az axiontér rezgése csillapodik. A csillapodás ütemét az Univerzum anyagának sűrűsége határozza meg. Ez még 14 milliárd évvel az Ősrobbanás után is akkora, hogy az oszcillációban megmaradt energia kiadhatja a sötét anyag jelentős részét. Bár tömegük kicsi, de nagyon nagy számuk révén mód van a sötét anyag szerepének eljátszására. Galaktikus környezetünk minden köbcéntiméterében átlagosan több, mint egy milliárd axionrészecske lenne található.

3. ábra. Felül: az axionok és az axionszerű részecskék, az úgynevezett ALP-ok külső elektromágneses térben (γ^*) át tudnak alakulni fotonná és vissza. Alul: a szinusz jellegű vonalak az ábrában a fotonoknak felelnek meg. Ezek a fotonok nagyon rövid élettartamú, azaz virtuális fotonok (γ^*), a szaggatott vonal pedig az axionra utal. Az ábrásort balról jobb felé olvasva, mintha két foton találkozásakor egy axion keletkezne. Az egyik foton egy erős lézerből származik, az érdetlenebb virtuális foton a mágneses tér szolgáltatja. A mágneses térerőt nagyszámú virtuális foton alkotta „tenger” jelenlétével lehet értelmezni. A harmadik magyarázó ábra a laboratórium kísérletek jellemző elrendezését mutatja, amelynek során a laboratóriumban keltenek axiont. Az ábrát ellenkező irányba is lehet olvasni, ami az axionok fizikailag szintén megengedett bomlásának felel meg.

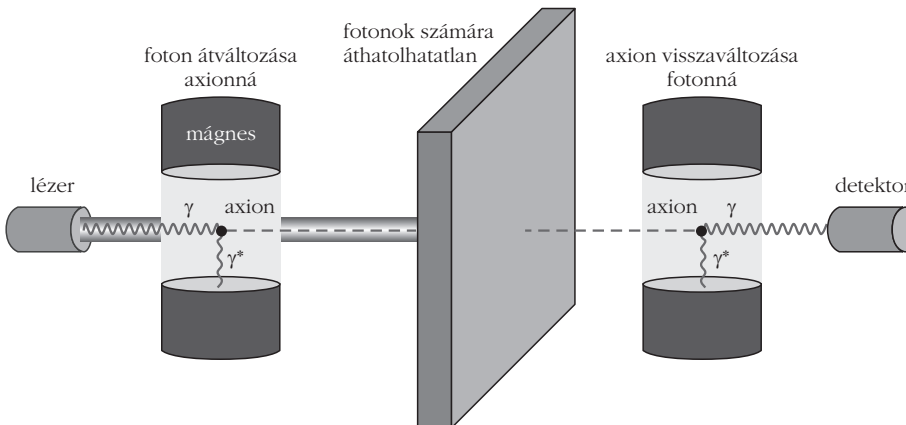




4. ábra. Nagyenergiájú fotonok az aktív galaxismagokból ritkán jutnak el a Földre. Ugyanis útközben a szokásos csillagfény fotonjaival kölcsönhatásban elektron-pozitron párrá alakulnak. Am néhányan „varázssapkát” öltve mégis átkelhetnek az Univerzumon. Erős galaktikus mágneses térben axionokká alakulva kölcsönhatás nélkül tehetnek meg óriási távolságokat. Amennyiben a Föld közelében bekövetkezik visszaalakulásuk fotonná, akkor ezt a nagyenergiás fotonot észlelni lehet.

Tehát a WISP-ek létezésére elég jó elméleti alapokat ismerünk, de létezik-e bármiféle kísérleti jelzés, ami ugyancsak erre utal? Bizonyos asztrofizikai megfigyelések akár így is értelmezhetők. Feltűnő például a távoli galaxisokból hozzánk elérő nagyenergiájú fotonok áramának valószínűtlenül nagy értéke. Miután az aktív galaxismagokban vagy neutroncsillagokban szélsőséges körülmények között ilyen fotonok keletkeznek, az úrben megtett útjuk során kölcsönhatásba léphetnek az átlagos csillagok fényét alkotó kisebb energiájú fotonokkal (3. ábra, felül). Azonban ennek során általában elektron-pozitron párrá – és nem axionná(!) – alakulnak, így annak a legnagyobb az esélye, hogy nem érik el a Földet.

5. ábra. Az ALPS jellegű kísérletben a DESY kutatói lézert fényt irányítanak egy átlátszatlan falra. A fal előtt a fényrészecskék egy mágneses térben haladnak keresztül, amelynek során a lézert fény egy fotonja (γ) a mágneses tér egy virtuális fotonjával (γ^*) axionná alakul. Ez áthalad a falon, ami mögött újfént észlelhető fotonná (γ) alakul. Mindkét átváltozási folyamat igen kis valószínűségű. Ennek megfelelően trükkösen tervezték meg ezeket a kísérleteket.

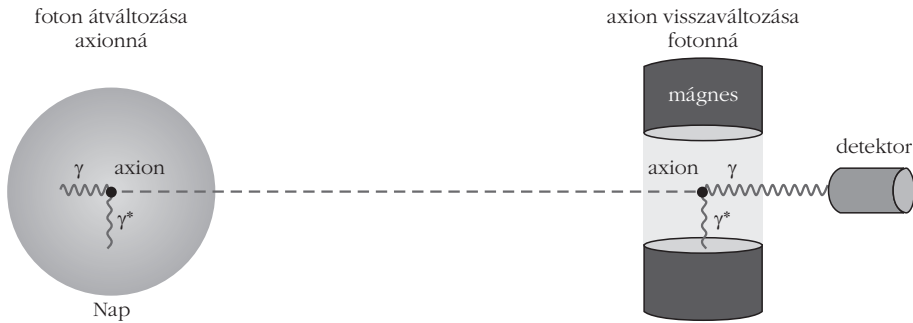


A legújabb megfigyelések szerint azonban a csillagfény egyáltalán nem áll olyan áthatolhatatlan „falként” a nagyenergiájú fotonok útjába, amilyent a számítások jeleznek. A WISP-ek erre a rejtélyre egyszerű megoldást kínálnak. Bizonyos körülmények között a fotonok átalakulhatnak könnyű axionszerű részecskékké, majd a Föld közelében visszaalakulnak fotonná. Útjuk során a WISP-ek nevékhöz híven a fotonoknál sokkal gyengébben hatnak kölcsön a csillagfényvel, azaz intenzitásuk nem csökken a szokásos elektrodinamikai számításokat követve. A WISP a foton láthatatlanná tevő egyfajta „varázssapka” (4. ábra).

Még inkább spekulatív a Naphoz hasonló csillagok végállapotának, a fehér törpe csillagoknak hűlésére vonatkozó mérések során fellépő ellentmondás „magyarázata”. Ezek a csillagok ugyanis – a megfigyelések szerint – a csillagok elfogadott elméletéből számítottnál gyorsabban hűlnek, ami valami járulékos sugárzás jelenlétével lenne magyarázható. Egyes elméleti fizikusok szerint ez a sugárzás akár WISP-sugárzás is lehet, amely alig ütközve, energiavesztés nélkül szállíthat el energiát a fehér törpe magjából.

A fenti szerepek által megkövetelt kis kölcsönhatási intenzitás azonban nem lehet kisebb a sötét anyag alkotórészétől elvárt kölcsönhatási erősségnél. A különböző folyamatokhoz igényelt kölcsönhatási képességet csak az egyes folyamatok részleteinek kidolgozása után lehet megbízhatóan megbecsülni, ami még sok elméleti és megfigyelési munkát követel.

Eközben laboratóriumi körülmények között is meg kell kísérlni e részecskék előállítását és vizsgálatát. Ehhez olyan kísérleteket kell tervezni, amelyekben a megfigyelni kívánt események szélsőségesen ritkán következnek be. Például a fotonoknak axionba történő oda- és visszaalakulása nagyon kis valószínűséggel megy végbe. A szerzők közül ketten (Linder és Ringwald) olyan kísérletet fejlesztenek a DESY laboratóriumában, amelyben fényt kívánnak észlelni egy, a fotonok számára teljesen átlátszatlan fal mögött (5. ábra).



6. ábra. A Nap belsejében uralkodnak a legkedvezőbb viszonyok az axionok keltésére. A fény-falon-át kísérletektől eltérően a CERN-ben épített CAST-hoz hasonló kísérletek a napaxionok detektálható fotonokká történő visszaalakítására koncentrálnak az erőforrásaikra.

Ez az ALPS-kísérlet (Any Light Particle Search). Intenzív lézertérbe vezetnek erős mágneses térbe (5. ábra) és abban bíznak, hogy a lézertér egy fotonja a mágneses mezőt alkotó virtuális fotonok egyikével kölcsönhatásba lép és axionná alakul. Ezt a fal nem tartóztatná fel. A fal mögött újra erős mágneses térbe lépve az előbbi kölcsönhatás fordítottja bizonyos valószínűséggel újra fotonná alakítja az axiont, amit azután detektálni lehet. Arról lehet felismerni, hogy a „jó” fotonról van szó, hogy energiája és polarizációja a falhoz érkező lézertér fotonjaival azonos lesz. Ezen az elven más WISP-eket is lehet keresni.

Ez a kísérlet annál jobban működik, minél nagyobb a másodpercenként érkező fotonok száma. A DESY-nél folytatott ALPS-I kísérlet jelenleg a leghatékonyabb a műfajában. A túlsó oldalon akkor is felismeri a megfelelő fotont, ha 100 másodpercenként jön egy. Egy 1 kW teljesítményű lézertől körülbelül 10^{24} foton érkezik ez alatt az idő alatt. Ha minden 1000 milliárdból egy átalakul axionná, akkor a túloldalon egy milliárd axion halad, amelyből azt remélik, hogy egy visszaalakul fotonná.

Az ALPS-I kísérlet része egy bonyolult optikai rezonátor is, amelynek révén a lézertér a fal előtt sokszor oda-vissza verődik. Ennek révén a fotonok újra és újra átfutnak a mágneses téren, ezzel megsokszorozva az axionná alakulás esélyét. E tükrözési trükkkel a 4 wattos lézertér a 1200 W teljesítményű lézertér fotonnyalábjának fényerejével válik egyenértékűvé.

Végül, a most építés alatt álló ALPS-II érkezik majd el abba a tartományba, ahol remény van az új részecskék megtalálására. Ez a berendezés egy 150 kW teljesítményű lézertérrel fog dolgozni, amelynek nyalábját 20 mágnesből álló rendszerrel létrehozott mágneses téren vezetik át. Ezen kívül – speciálisan ehhez a kísérlethez – egy nagy érzékenységű szupravezető foton-detektort is terveztek, továbbá az ALPS-II-ben is alkalmazzák a rezonátortükröt. Mindezek révén az ALPS-II olyan részecskéket is képes észlelni, amelyek ezerszer gyengébben hatnak kölcsön az anyaggal, mint amit az ALPS-I képes kimutatni. Az első próbaméréseket 2015-re tervezik, a teljes üzem 2018-ra indul be. A feltételezett asztrofizikai csodasapka létezése ekkor eldőlné: ha az axion az asztrofizikai nagyenergiás-foton-többlet magyarázatához feltételezett paraméterekkel rendelkezik, akkor az ALPS-II mérése pozitív eredményt hoz.

Lehet, hogy a Nap az ideális helyszíne az axionok keltésének?

Még érzékenyebbek azok a kísérletek, amelyeknél nincs szükség a fenti folyamat első felére, azaz a fotonok WISP-be alakulásának előidézésére. Helioszkópoknak hívják azokat az eszközöket, amelyekkel a Napban keletkező WISP-ekre vadásznak a kutatók (6. ábra).

A WISP-keltésre különösen kedvezőek a feltételek a Napban, ahol megszámlálhatatlan foton nyüzsög erős elektromágneses térben. A Nap magjából az ott keletkező WISP akadálytalanul jut el a laboratóriumba, ahol így csak az előző kísérlet második felét kell megvalósítani. A jelenleg létező legjobb helioszkóp a CERN Axion Solar Telescope (CAST) nevet viseli. 2020-tól pedig megkezdheti működését az International Axion Observatory (IAXO).

A világűrben nagyszámú axion ér el bennünket, ha valóban ezek alkotják a sötét anyag jelentős részét. Ezek észlelésére a helioszkópoknál jóval érzékenyebb eszközökre van szükség. A leginkább előrehaladott kísérletet, amely a világűr axionjainak észlelését tűzte ki céljává, jelenleg a University of Washington ADMX rövidítésű (Axion Dark Matter Experiment) kísérlete képviseli Seattle-ben. Európában a már említett IAXO lehetőségeit vizsgálják a világűr axionjai észlelésére.

Zárásul le kell szögezni, hogy a legtöbb kutató véleménye szerint a sötét anyagot nehéz részecskék alkotják. De arra is elég jó érvek vannak, hogy a sötét anyag alkotórészei között nagyon könnyű, gyengén kölcsönható részecskéket is találhatunk.

