

Az anyag dominanciája és a Higgs bozon

Higgs elmélete a tömeg születését szimmetriatörésre vezeti vissza. Kiindulópontja az anyag- és tömegmentes tér, melynek totális a szimmetriája. Ez alatt azt értjük, hogy minden pozíció és minden irány egyenértékű, továbbá ekvivalensnek tekinthető a két királis térgeometria is, vagyis fizikailag nem különböztetjük meg a jobb és balsodrású rendszereket. De fogalmazhatunk fordítva is: az anyagmentes tér pusztán fikció, amelyben nincs ami kijelölné a pozíciót, az irányt és a kiralitást. Higgs hipotézise a totálszimmetrikus üres teret metastabilisnak tekinti, vagyis a tér megindul valami felé, olyan állapotba, amely már megtöri ezt a szimmetriát. Ezt nevezzük **Higgs mezőnek**, amely megalkotja a tömeggel rendelkező ősi részecskét, az un. Higgs bozont, amelynek bomlása hozza létre a természetben megfigyelhető elemirészecskék világát saját tömegének átörökítésével. A Higgs bozon óriási tömeggel rendelkezik, amely az LHC kísérletek szerint $125 \text{ GeV}/c^2$, nincs viszont sem spinje, sem töltése. Az energiamegmaradás szempontjából úgy tekintjük a folyamatot, hogy a szimmetriatörés miatt a tér potenciális energiája csökken – 125 GeV értékkel, és ezt ellensúlyozza a képződő részecske saját energiája.

A Higgs mező koncepciójához a kvantumtér elmélet vezetett el, amely értelmezi a gyenge kölcsönhatás bozonjait, a W^+ , W^- és Z bozonokat. A relativitáselmélet egyik alaptétele, hogy minden kölcsönhatás sebességét a c fénysebesség határozza meg, és ez vonatkozik a gyengekölcsönhatás bozonjaira is. A fénysebességű mozgás csak nulla tömegű objektumoknak kiváltsága, az említett bozonok viszont jelentős tömeggel rendelkeznek. (Megjegyzés: a részecske fizika Standard Modelljében a nulla tömeg egy szimmetria elvből következik, amit mérték invarianciának neveznek.) Honnan származik akkor ez a tömeg, vetették fel a kérdést a részecske fizikusok? Erre született meg az a magyarázat, hogy létezik egy ősi részecske melynek bomlása adja át tömegét a megfigyelt részecskéknek. Szemléletes, bár nem precíz magyarázat szerint a tömeg a szimmetriatörés által képződő Higgs mezőben való mozgás fékező hatását írja le.

Az ősrobbanás elmélet szerint a Higgs bozon már az első másodpercben létrejött. A Standard Modell összegezi az átalakulás lépéseit. Ez a koncepció útjelző táblákat rak ki, amelyek megmondják, hogy melyek a megengedett átalakulások és melyek tiltottak különböző kvantumszámokkal megadott kiválasztási szabályok szerint. De nagyszámú elágazás is létrejön, melyek valószínűségét mátrixok foglalják össze. Ezek a mátrixok a kísérleti tapasztalatokat gyűjtik egybe, de nem tartozik hozzájuk *a priori* elmélet, emiatt nem is beszélünk Standard Elméletéről, csupán Standard Modellről.

Hogyan kapcsolható össze ez a koncepció a fénysebességű forgások elméletével, amely alternatív magyarázatot kínál a tömeg eredetére?

Gondolatmenetünket a kéttengelyű fénysebességű térforgásokra alapozzuk. A két forgás tengelyének metszéspontja kijelöl egy pontot a térben, és a tömeget oda helyezzük el mint tehetetlenéget a forgási centrum elmozdításával szemben. Hogyan illeszthető be ebbe a képbe a Higgs bozon is?

A fénysebességű mozgás dimenzióvesztési folyamat. Ennek másik típusa az egytengelyű körforgás, ezzel írjuk le a fotont, amely a forgástengely irányában is fénysebességgel halad. Ez kijelöl egy olyan hengert, amelynek felülete nulla, viszont véges sugárral rendelkezik. Ennek értelmében a foton egydimenziós alakzat a térben. A véges sugár magyarázza az $S = 1$ spin eredetét, viszont a körforgásnak csak tengelye van, nincs rajta jóldefiniált pont, ahol lokalizálna a tömeg és a töltés, ami arra vezet, hogy nem lép fel tömeg és töltés. Ezzel szemben az elektron és a többi fermion

kéttengelyű forgás, amelyhez nulla felületű gömb tartozik, ennek is véges a sugara, vagyis ez is egydimenziós alakzat. A kettős forgás magyarázza az $S = \frac{1}{2}$ spint.

Ugyanakkor hogyan lehetséges, hogy a Higgs bozon rendelkezik tömeggel, de mégis nulla a spinje? Ennek magyarázatához tovább kell lépni a forgáskonceptióban és bevezetni a háromtengelyű totálforgást. Ebben a forgásban mind a három, azaz az x, y és z tengely körül is fénysebességgel forog a tér. Ez már három térdimenzió elvesztését jelenti, vagyis a *Higgs bozon nulladimenziós alakzat*, egyetlen matematikai pont a térben, amelynek már nincs véges kiterjedésű sugara! Ha viszont nincs nyomatéki sugár, akkor a lendületnek sem lehet nyomatéka, vagyis nulla lesz a spin.

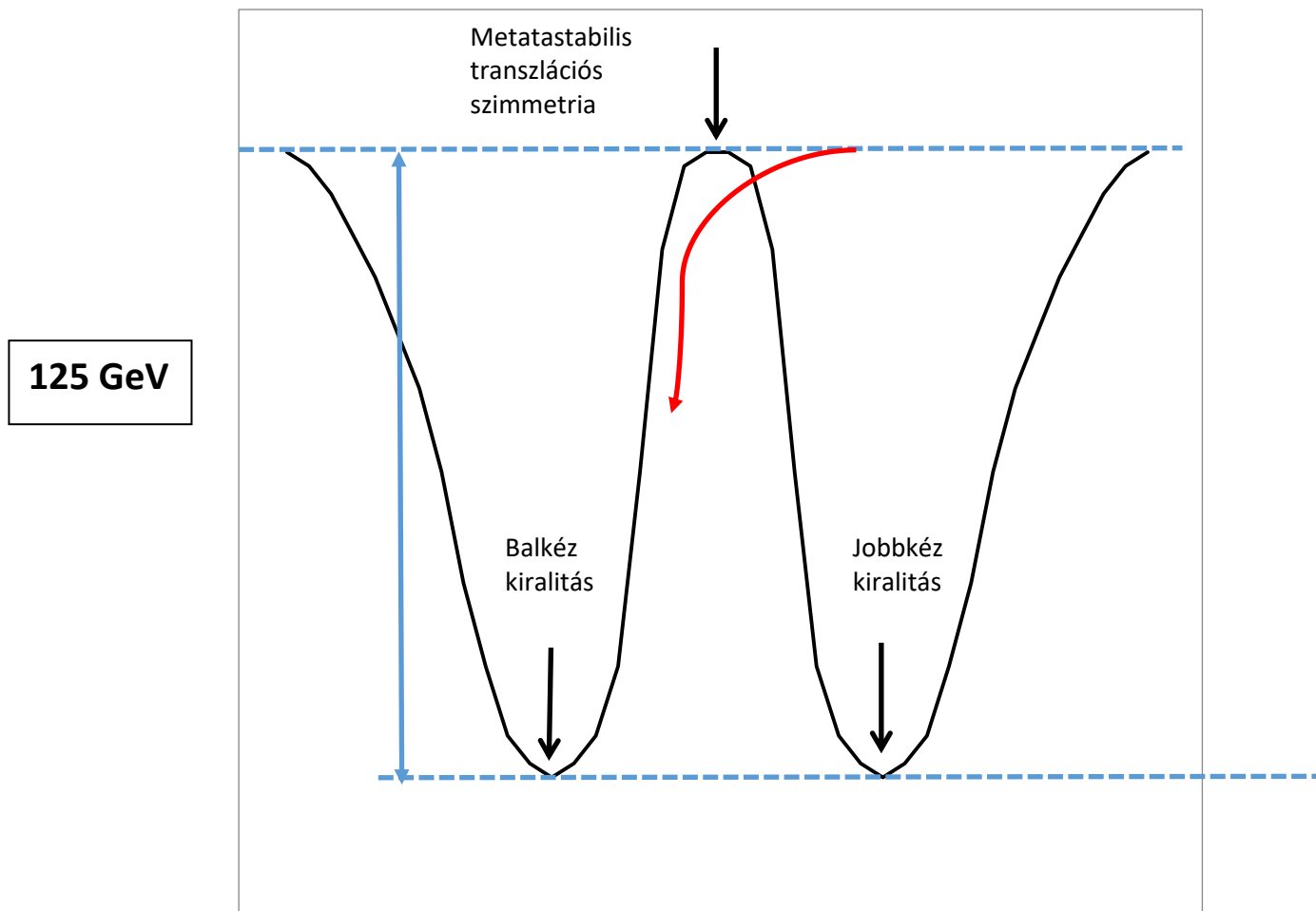
Higgs koncepciója nem tér ki arra, hogy milyen geometriaváltozás jön létre a szimmetriatöréskor. (A szakirodalom ezt mint az elektromágnes kölcsönhatás izospin szimmetriájának megtörését emlegeti, de ennek részletezésére itt nem térünk ki). A fénysebességű hármastengelyű forgás viszont erre is magyarázatot kínál: megszűnik ugyanis a térbeli pozíciók ekvivalenciája, vagyis a translációs szimmetria. Összhangban van a hármastengelyű forgással a Higgs bozon tulajdonított páros (pozitív) paritás, ami ekvivalenciát jelent a tér három iránya között. A másik következmény a királis szimmetria megtörése, amit a Standard Modell páros paritásként ír le. A fénysebességű totálforgás által definiált Higgs bozon esetén a három tengelyirány bal- és jobbsodrású geometriát is létrehozhat, a nagy kérdés, hogy melyik jön létre a részecske képződésekor, ez fogja predesztinálni, hogy a bomlási sor végén létrejövő stabilis termékek az anyagot felépítő protonok, neutronok és elektronok lesznek-e, vagy azok antirészecske párjai, az antiprotonok, antineutronok és pozitronok.

Mivel az üres tér triviálisan töltéssemleges, a képződő univerzumban is egyensúly van a pozitív és negatív töltések között. A Higgs bozon még töltéssemleges, töltésszétválás a bomlásakor történik meg. Haladhat a bomlás a W^- bozon irányában, ekkor proton és elektron lesz a végtermék, fordított esetben alakulnak ki az antiprotonok és pozitronok. A Z bozonnal induló bomlási ágban pedig vagy neutronok, vagy antineutronok lesznek a stabilis végtermékek.

A részecskefizika Standard Modellje részletesen tárgyalja a lehetséges bomlási sémákat, melyben a kvarkok is megjelennek, de ezeket a részecskéket közvetlenül nem lehet megfigyelni, kizárólag a hadronok (kvarkokból felépülő részecskék) belsejében léteznek.

A fénysebességű forgás modellben a W és Z bozonok tömege onnan származik, hogy ekkor az egytengelyű forgás sugara c sebességgel növekszik, amely táguló spirálist hoz létre, és ennek kezdőpontja jól definiált pozícióval rendelkezik, márpedig ezt a feltételt fogalmazzuk meg a tömeg kialakulásához. Ez a tömeg valójában képződési tömeg, amely gyorsan csökken, mert a tömeg és a növekvő sugár szorzata állandó. A tömeg elvesztése magyarázza a W bozon rendkívül rövid hatótávolságát és élettartamát.

Vajon más lenne az univerzum, ha az eredeti szimmetriatörés a fordított utat választotta volna? A válasz nem! A mostani világunkban kialakított definíció szerint abban az „antivilágban” antiproton, antineutron és a pozitron alkotná a legfontosabb építőköveket, viszont azok, akik abban a világban élnek ezeket a részecskéket tekintenék anyagnak, és ezeket a részecskéket definiálnák mint protonokat, neutronokat és elektronokat.



A Higgs potenciál „mexikói kalap” diagramja. Középen látható a metastabilis szimmetria állapot, amely kilép a balkezes kiralitás irányába, amit a piros nyíl mutat

Ilyeténképpen kapunk választ a modern kozmológia egyik dilemmájára, hogy miért dominál az anyag az antianyag felett. A dilemmát az okozza, hogy a párkeltési folyamatban szigorúan azonos mennyiségű anyagi és antianyagi részecskék (elektron és pozitron; proton és antiproton stb.) képződnek. A szabály alól nincs kivétel, mert ezt megkövetelik a megmaradási törvények, **még statisztikai különbség sem jöhet létre**. Ha azonos mennyiségű anyag és antianyag létezne, akkor teljes lenne az annihiláció és eltűnne az univerzum. Ez nem következik be az anyag dominanciája miatt, melynek oka a szimmetriatörés „kibillenési” iránya, vagyis a létrejövő Higgs bozon királis aszimmetriája.

Ellenőrizhető-e a Higgs bozon bomlási útja?

Végül vessük fel a kérdést, hogy lehetséges-e, legalább is elvben, kísérletileg kimutatni, hogy a Higgs bozon valóban a proton, neutron, elektron utat követi a bomlás során? Ennek érdekében gondoljuk végig, hogyan sikerült a Higgs bozon létezését bizonyítani. Ez egy rendkívül bonyolult kísérlet volt, bátran mondhatjuk, hogy a fizika történetének eddigi legnagyobb vállalkozása hozta meg a sikert. Az LHC kísérletekben hatalmas energiára kellett felgyorsítani proton nyalábokat, amelyeket ütköztettek egymással, így érték el a 125 GeV körüli tartományt. Minden egyes ütközésben száz körüli részecske képződött, melyek közül kellett kiválasztani olyan mintázatokat, amelyekből fel lehet ismerni azt a bomlási struktúrát, ami a Higgs bozonra jellemző. Magát a Higgs bozont ugyanis nem lehet detektálni rendkívül rövid élettartama miatt, és keletkezése is rendkívül kis hatásfokú, optimális esetben is egy a

tízmilliárdhoz a valószínűség. Külön nehézséget jelent, hogy nagyon sokféleképpen bomlik fel ez a részecske, de találtak két olyan bomlási mechanizmust, ami tipikus a Higgs bozonra. Ezekre fejlesztettek ki speciális detektorokat, az egyik az ATLAS, a másik a CMS projekt alapja lett, az előbbi két foton, az utóbbi négy lepton (elektron, müon, tauon) egyidejű detektálására alkalmas. A két projekt párhuzamosan futott és azonos eredményre vezetett: magas szignifikancia fokon lehetett a 125 GeV tartományban jeleket detektálni.

Hogyan lehet ezek alapján olyan kísérletet végrehajtani, amiből kiolvasható a proton, neutron és elektron felé vezető út? Kiválasztható például az elektron és a pozitron, amelyre megbízható módszerek vannak, hogy a képződő részecskeszámot meghatározzuk. Számukat össze lehet vetni az olyan ütközések esetén, amelyek energiája kisebb, illetve egyenlő 125 GeV-vel. Mivel azonban csak tízmilliárdod az esély a Higgs bozon képződésére, így alig fog változni a megfigyelhető arány az elektronok és pozitronok között. Javulhat a helyzet, ha hasznosítjuk az ATLAS illetve CMS projekt eredményeit az egyes ütközési mintázatok kiválasztásában. Esetleg készíthető egy fordított CMS detektor, ami a leptonok pozitív töltésű antirészecskéit detektálná a 125 GeV tartományban. Elvi lehetőség ugyan van a kérdés eldöntésére, de ennek kísérleti megvalósítása jelenleg még kétségesnek látszik.

Bp, 2023 október.