

VAN-E AZ ELEMI RÉSZESKÉKNEK TÖMEGÜK?

Trócsányi Zoltán

az MTA rendes tagja,
Debreceni Egyetem TTK Fizikai Intézet
MTA–DE Részecskefizikai Kutatócsoport
trocsanyi.zoltan@atomki.mta.hu

2013. október 8-án jött a hír, hogy a 2013. évi fizikai Nobel-díjat két elméleti fizikus, a belga *François Englert* és a brit *Peter W. Higgs* (1. ábra) kapta „annak a jelenségnek elméleti előrejelzéséért, amely megmagyarázza az elemi részecskék tömegének eredetét, és amelynek érvényességét az elmúlt évben megerősítette a CERN Nagy Hadronütköztetőjének (LHC) ATLAS- és CMS-kísérletei által talált új részecske felfedezése”. Mit jelent ez az indoklás? Mit jelentenek az *elemi részecske* és *tömeg* fogalmak? Mindkettőről van hétköznapi elképzelésünk, de vajon egybeesnek-e azzal, amit a tudomány ért rajtuk?

Amikor a gyümölcsösnél vásárolunk egy kilogramm almát, tulajdonképpen anyagmennyiséget kérünk. Jól tudjuk, hogy a tömeg és az anyagmennyiség kapcsolatban állnak egymással, hiszen ha kétszer nagyobb tömegű almát kérünk, akkor kétszer tovább fogyaszthatjuk. A kívánt tömeg meghatározása pedig mérlegben történik, amelynek működése valójában több fizikai törvény együttes alkalmazásán alapszik. Többek között azon, hogy tudjuk, a Föld a testek tömegével arányos vonzóerővel hat a testekre. Hétköznapijaink nyugodt megéléséhez ennyi ismeret elegendő is. Azonban rögtön bajba jutunk,

ha e gondolatokat valamely szélsőséges irányba elkezdjük kiterjeszteni.

Tekintsünk például egy kb. 10 cm oldalélű kockát valamely folytonosnak látszó anyagból, például jégből, amelynek tömege pontosan egy kilogramm. Ha feleannyi jégre van szükségünk, akkor a tömböt megfelezzük, közülük egyiknek a tömege fél kilogramm. Meddig folytatható ez az eljárás? Néhány vágás után akadályba ütközünk. Hamarosan nem lesz a mérlegünk elegendően pontos, hogy meg tudjuk mérni, az új fél darab tömege valóban fele-e az eredetinek. Így abban sem lehetünk biztosak, hogy az anyag mennyisége valóban egyenes arányosságban van



1. ábra • François Englert (balról) és Peter Higgs (jobbról) 2012. július 4-én, a CERN-ben az új részecske megfigyelésének bejelentésekor.

a tömegével, ha a kicsi testek irányába mozdulunk. A hétköznapi tömegfogalom nem alkalmazható nagyon nagy testekre sem, hiszen a Föld tömegét úgy nem lehet meghatározni, hogy mérlegre tesszük, de a Nemzetközi Űrállomáson még egy fogkefe tömegét sem. Ahhoz, hogy olyan, talán kicsit szokatlan kérdésekre, hogy *Mekkora a Föld tömege?*, vagy *Mekkora egy elektron tömege?*, vagy *Hogyan lehet meghatározni egy liter víz tömegét a Marson?* válaszolni tudjunk, e fogalmakat olyan tudományos igénnyel kell meghatározni, hogy kérdéseinkre minden körülmények között választ tudjunk adni, illetve meg tudjuk fogalmazni, hogy milyen körülmények között nem alkalmazhatóak ismereteink a válaszok megadására.

Mai világunkban a kényelmet szolgáló eszközök túlnyomó többsége a részecskék fizikájának megértését célzó erőfeszítések „mellékterméke”. A „legkisebb” jelentése korra változik, az észlelőberendezéseink felbontásától függ. Amíg a fényt használtuk a mikrovilág felderítésének eszközeként, a legkisebb közvetlenül látható szerkezet a mikrométeres tartományba esett. Ennél kisebb méretekről is lehetett ismereteket szerezni, közvetett módon a spektroszkópia felhasználásával. Ehhez már szükség volt egy matematikai modellre is, amelynek segítségével kapcsolatot lehet teremteni a mért sugárzási spektrum és például az atom szerkezete között. A korszakot jellemző legkisebb méretek az atomi méretek voltak.

A mikrovilág megismerésében áttörést jelentett az a felfedezés, hogy nem csak fényt, hanem részecskéket is lehet apró szerkezetek felderítéséhez használni. A közvetlen megfigyelésnek részecskére alapuló eszköze az elektronmikroszkóp, amellyel nanométeres tartományban lehet az anyag szerkezetét fel-

térképezni. Ennél kisebb méretek feloldásának eszköze a részecskegyorsító, amely ismét közvetett ismereteket szolgáltat. Használatához ismét matematikai modellre van szükség, amelynek segítségével számszerű becslést lehet adni részecskeütközéses események különböző végállapotainak gyakoriságára. A modell jóságát a valódi kísérletekben bekövetkező végállapotok megszámlálásával lehet ellenőrizni. A 20. század elején így sikerült *Ernest Rutherfordnak* munkatársaival felfedezni az atommagot. Aranyfóliát bombáztak hélium atommaggal. A kísérlet értelmezése vezetett az atomról alkotott képünkhöz: a hihetetlenül kicsi, femtométeres (10^{-15} m) nagyságú atommag körül elektronok keringenek a mag méretéhez képest akár óriási távolságra is: az atom százezerszer nagyobb a magjánál (ha futballpálya méretűnek képzeljük az atomot, az atommag gombostűfejnyi a közepén).

Robert Hofstadternek, a Rutherfordéhoz hasonló összeállítású kísérletekkel sikerült rájönnie, hogy az atommag is tovább bontható *protonokra* és *neutronokra* (összefoglaló néven *barionokra*). Ebben a kísérletben a bombázó részecske nagy energiára gyorsított elektron volt. (Fénysebességhez közeli sebességgel mozgó részecske gyorsításakor nem a sebessége nő, hanem az energiája.) Hasonló szóródásos kísérlettel azt is felfedezték, hogy a proton és neutron sem elemi részecske, hanem *kvarkokból* épül fel. A proton két darab *u* és egy *d*, míg a neutron két *d* és egy *u* kvarkból áll. Az általunk ismert anyag felépítéséhez tehát három eleminek ismert részecske szükséges: *u* és *d* kvark, valamint elektron. A 20. század közepén azonban a kozmikus sugárzásban, majd később laboratóriumi kísérletekben jó néhány új, részben az ismert barionokra, részben az elektronokra hajazó részecskét találtak. Kiderült, hogy a barionok-

ra hasonlító részecskék két nagy csoportba sorolhatók. Az egyikben három kvark kötött állapotai találhatóak (ezek a barionok), a másikban pedig egy kvark és egy antikvark kötött állapota (ezek a mezonok). A barionok és mezonok tömege a részecskék között viszonylag nagy, ezért ezeket összefoglaló néven *hadronoknak* nevezik. Az elektronra hasonlító részek mind elemiek és viszonylag könnyűek, ezek neve *lepton*. (2. ábra)

Az elemi részecskéket erők tartják össze, rendezik változatos kötött állapotokba. Az erőket *mezők* közvetítik. E mezők közül az elektromos és mágneses mezővel már mindenki találkozott. Hatásukra az elektromos töl-

téssel bíró részecskék lendülete megváltozik, tehát erővel hatnak rájuk. Minthogy az elektromosan töltött részecske önmaga is mező forrása, így a töltött részecskék mező közvetítésével lépnek kölcsönhatásba. Az elektromágneses erőt közvetítő sugárzásról tudjuk, hogy önmaga is képes lendületet és energiát szállítani. Gondoljunk csak a nap sugárzására, amely bőrünket melegíti. Az ilyen tulajdonságú sugárzást nevezzük *mezőnek*.

Négyféle alapvető *kölcsönhatást* ismerünk a természetben: *tömegvonzás, elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatások*. Az első kettővel találkozunk a makroszkopikus világunkban is. A gyenge kölcsönhatás felelős az anyag

Az anyagi részecskék
három családja (fermionok)

	I	II	III	
tömeg	2,4 MeV	1,7 GeV	171,2 GeV	0
töltés	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
név	u up	c charm	t top	y foton
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
kvarkok	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e elektron-neutrínó	ν_μ műon-neutrínó	ν_τ tau-neutrínó	Z⁰ Z-bozon
	0,511 MeV	1,507 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
leptonok	e elektron	μ műon	τ tau	W[±] W bozon

bozonok (kölcsönhatások)

2. ábra • A standard modell elemi részecskéi: balról jobbra három oszlopban az építőkövek három családja, a felső két sorban a kvarkpárokkal, az alsó sorban a leptonpárokkal. Az atomok az első oszlop elektromosan töltött részecskéiből épülnek fel. A negyedik oszlopban vannak az erőket közvetítő részecskék, a nulla tömegű fotonok és gluonok, és a nehéz W és Z bozonok.

A táblázatban nincs feltüntetve a közelmúltban felfedezett Higgs-bozon.

radioaktív bomlásáért. Az erős kölcsönhatás csak a kvarkok között hat, és köti azokat hadronokba. A tömegvonzás a többi háromhoz képest elhanyagolhatóan kicsi, így az elemi részek világában nem játszik szerepet. Esetében az erőhöz köthető mezőt közvetlenül nem sikerült kimutatni. A másik három kölcsönhatás esetében a mező létezéséről annak elemi megnyilvánulásának észlelése segítségével győződhetünk meg. Egy mező elemi megnyilvánulása meghatározott energiát és lendületet szállító részecske, például a *foton*. Ugyanígy az elemi anyagrészek is anyagmezők elemi megnyilvánulásának tekinthetők. A matematikai modell, amelynek segítségével a részecskeütközések végállapotainak gyakorisága megbecsülhető, az anyag- és erőmezők kvantumelmélete. E mezők kitöltik a teret, elemi megnyilvánulásaik a részecskék.

A mezők kvantumelmélete bonyolult matematikai egyenletekkel írható le, amelyek megjegyzésére csak annak van esélye, aki napi szinten foglalkozik velük. Elegendően hosszasan tanulmányozva őket, rájöhettünk, hogy a bonyolult egyenleteket különleges szimmetriatulajdonságok jellemzik. A szimmetriák egy része könnyen érthető. Azt fejezik ki, hogy a tér és idő kezdőpontja szabadon megválasztható. Hasonlóan szabadon választhatjuk koordináta-rendszerünk tengelyeinek irányát. Érezzük, hogy ennek így is kell lennie, hiszen egy részecskeütközési kísérlet kimenetele nem függhet attól, hogy Genfben vagy Debrecenben végezzük el, attól sem, hogy mikor, és attól sem, hogy milyen irányból tekintünk rá. E választási szabadságot az elméletnek is tükröznie kell.

A 20. század végére így alakult ki a részecskefizikai standard modell (SM). A SM olyan mezők kvantumelmélete, amelyeknek részecskéit pontszerűnek képzeljük, mert az eddigi

eszközaink feloldóképességének határán belül nem találtunk semmilyen kisebb szerkezetre utaló nyomot. 2012-ig kétfajta elemi részecskét, építőköveket (például elektron) és a köztük fellépő erőket közvetítő részecskéket (ragasztókat, mint például a foton) ismertük. Érdekes megfigyelés, hogy az építőkövek mindegyike fermion, a ragasztók pedig bozonok. (A fermionok perdülete $\frac{1}{2}$, a bozonoké pedig 1 a redukált Planck-állandó egységében mérve.) A fermionok három családba csoportosíthatók. Egy családnak tartozik egy kvarkpár és egy leptonpár. A párok tagjainak elektromos töltése éppen egy elektron töltésével különbözik. A családok egymásnak ismétlődései ugyanazokkal a tulajdonságokkal, csupán a részecskék tömege különbözik.

Hoppá! Mit is értünk egy részecske tömegén? Az nyilvánvaló, hogy még stabil részecskét sem lehet mérlegre tenni, nemhogy bomlót, amely a másodperc törtrésze alatt más részecskékké alakul. Iskolai tanulmányaink szerint „a tömeg a testek tehetetlenségének mértéke”. A tömeg tudományos igényű meghatározása még hétköznapi testek esetén is bonyolult. Legyen itt elég annyi, hogy más testekkel kölcsönhatásba kerülő adott próbatest sebességének megváltozása a tömegével fordítva arányos. Az elemi részecskék tömegét is úgy lehet értelmezni, mint a részecskét jellemző olyan paramétert, amelynek nagysága befolyásolja, hogy mi történik a más részecskékkel kölcsönhatásba kerülő elemi részecskével. Tehát függ tőle a részecskeütközések kimenetele.

De térjünk vissza az elemi részek elméletéhez. A SM mezőelméletének vannak olyan kevésbé kézzelfogható szimmetriái is, amelyek nem a téridő kezdőpontjának vagy a koordinátatengelyek irányításának szabad választásával, hanem a mezők más tulajdonságának

szabad választásával kapcsolatosak. Például az egy családba tartozó kvarkpár tagjait egymásba alakíthatjuk, az egyenletek ettől nem változnak. Ugyanez a szimmetria vonatkozik a leptonokra is. Szaknyelven azt mondjuk, hogy az egyenletek nem változnak a „belső tér” forgatásakor.

A szimmetriaelvekre épülő elmélet sokkal egyszerűbben megjegyezhető. Elég csak a szimmetriát megjegyezni, az egyenletek szinte maguktól adódnak. Hasonlóan ahhoz, mint a tetszőleges irányítású tengely körüli elforgatással szemben szimmetrikus test, azaz a gömb egyetlen adattal, a sugarával egyértelműen megadható. A hasonló, de a forgatásokkal szemben nem szimmetrikus emberfej pontos leírásához rengeteg adatra van szükség. A belső térbeli forgatásokkal szemben szimmetrikus SM is nagyon kevés adattal megadható, de van vele egy nagy probléma.

Nyilvánvaló, hogy ha a részecskének van tömegük, akkor az egymásba forgathatóság szimmetriája sérül. A SM szimmetriákra épülő elméletében a részecskének nem lehet tömegük. Márpedig van, sőt mint fentebb említettük, a családok között éppen a részecskék különböző tömege tesz különbséget. Ez az a pont, amikor az olvasó joggal vág közbe: *Tessék? Hogyan lehet az elmélet egyszerre szimmetrikus is, és a benne szereplő részecskének tömegük is?* Nos, e kérdés megválaszolásáért adták 2013-ban a fizikai Nobel-díjat.

Természetesen elfoglalhatnánk azt az álláspontot is, hogy a részecskének van tömegük, így a szimmetriákra alapuló elmélet nem lehet helyes. Azt csupán a lusta elméleti fizikusok találták ki, mert nem tudták megjegyezni a bonyolult egyenleteket. Ez az álláspont teljesen elfogadható, noha nem magyarázná meg azokat a kísérleti megfigyeléseket, hogy különböző részecskékkal lejátszódó bizonyos

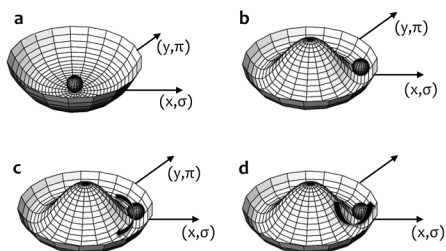
folyamatok gyakorisága miért azonos. A szimmetrikus elméletben ez kézenfekvő, hiszen a részecskék egymásba forgatásával a szimmetrikus elmélet nem változik. Az igazi adu ász a szimmetrikus elmélet mellett a 2012-ben felfedezett új részecske.

1964-ben előbb *Robert Brout* és *François Englert*, majd két hónappal később, tőlük függetlenül *Peter W. Higgs* jelentettek meg egy-egy közleményt egy olyan jelenség matematikai leírásával, amely lehetővé teszi, hogy egy szimmetrikus kvantum-mezőelméletben hogyan lehet az elemi részecskék tömegét értelmezni. A kulcs egy különleges tulajdonságú mező (amelyet később a fizikusközösség *Brout-Englert-Higgs-mezőnek*, röviden *BEH-mezőnek* keresztelt) létezésének feltételezése. A többi mező nagyságának várható értéke üres térben nulla. Nem úgy a *BEH-mezőé*, amelynek értéke még üres térben sem nulla. A standard modellben szereplő nulla tömegű részecskének a speciális relativitáselmélet szerint fénysebességgel kellene mozogniuk, és így nem képezhetnének olyan kötött rendszert, mint például egy atom, tehát mi sem létezhetnénk. A részecskék azonban kölcsönhatnak a mindent kitöltő *BEH-mezővel*, ami mintegy „lelassítja” azokat. A lassulás mértéke következetesen értelmezhető úgy, mintha a részecskének tömegük lenne. Ha a *BEH-mező* hirtelen megszűnne, a részecskék fénysebességgel szétszaladnának, és a világban mindenféle szerkezetű anyagi csoportosulás megszűnne. A *BEH-mező* segítségével az egyenletek belsőterbeli forgatásokkal szembeni szimmetriája megőrizhető úgy, hogy a szimmetria számunkra láthatatlanná válik (a részecskék tömege miatt).

Jelenlegi világképünk szerint a Világegyetem az ősrobbanásban keletkezett szimmetrikus állapotban, amelyben a részecskének nem

volt tömegük. A BEH-mező is szimmetrikus állapotban volt, azaz üres térben értéke nulla. Úgy lehet ezt elképzelni, mint egy borospohárba tett golyó, amelynek a legalacsonyabb energiájú állapota (a mezőelméletben ez az üres tér) a pohár közepén, legalul van. Itt a golyó stabil egyensúlyi állapotban van, ha kitérítjük egyensúlyából, és magára hagyjuk, akkor visszatér oda. Képzeljük most el, hogy a golyó legalul van, amikor hirtelen középen kinő egy, a pohár függőleges forgástengelyére nézve forgásszimmetrikus púp. A golyó továbbra is egyensúlyban marad, de ez az egyensúly labilis. Bármilyen kicsi hatás kitéríti a golyót egyensúlyi helyzetéből, az legördül a púp oldalán a gödörbe, véletlenszerűen választott irányba. (3. ábra) Az új alapállapot sérti a forgásszimmetriát. A BEH-mező értéke pedig a legkisebb energiájú állapotban sem lesz nulla. Ezt a jelenséget nevezik spontán szimmetriasértésnek, amelynek kvantum-mezőelméleti megfogalmazásáért kapott *Joicsiró Nambu* 2009-ben megosztott fizikai Nobel-díjat. De akkor mit díjaztak 2013-ban?

A pohárbeli golyónak kétféle elemi gerjesztése van: egy sugárirányban, és egy arra merőlegesen, a pohárbeli körkörös gödör mentén. Az utóbbihoz nincs szükség energiabefektetésre, hiszen a gödör alján mindenhol ugyanakkora a golyó helyzeti energiája. A mezőelméletben az ennek megfelelő elemi gerjesztés a nulla tömegű ún. Goldstone-részecske (létezésük lehetőségét *Jeffrey Goldstone* jósolta meg). Sugárirányban azonban energiát kell befektetni a golyó kimozdításához. A BEH-mezőelméletben az ennek megfelelő elemi gerjesztés a tömeges Higgs-bozon. A pohárbeli púp kinövésének megfelelő változás a BEH-mezőnek a Világegyetem hűlése miatt bekövetkező halmazállapot-változása (ahhoz hasonlóan, ahogy a víz megfagy). A halmazállapot-válto-



3. ábra • A Higgs-potenciál modellezése: a – szimmetrikus fázis; b – szimmetriasértett fázis; c – Goldstone-gerjesztés a sértett fázisban; d – Higgs-gerjesztés a sértett fázisban.

zás olyan BEH-mezőt kíván, amelynek négy elemi gerjesztése van. Ezek közül spontán szimmetriasértés során háromnak nem lesz tömege – ezek a Goldstone-bozonok, egynek pedig lesz, ez a Higgs-bozon. Az ún. BEH-mechanizmus azt mutatja meg, hogyan egyesül az eredetileg nulla tömegű, a gyenge kölcsönhatást közvetítő három részecske és a három Goldstone-bozon, és lesz belőlük három tömeges, kísérletileg megfigyelhető bozon (W^+ , W^- és Z). E mechanizmus elméleti megjósolásáért ítélték meg az idei díjat.

Vajon miért éppen most, közel ötven évvel az elméleti jóslat után díjazták az eredeti munkákat? A szimmetriákra, azok spontán sérülésére és a BEH-mechanizmusra épülő SM sok jóslatát nagy pontossággal igazolták a mérések az elmúlt fél évszázadban, különösen a múlt század utolsó évtizedében működő nagy elektron-pozitron gyorsító kísérletei. Nem sikerült azonban megfigyelni az elmélet jóslatát, a nullánál nagyobb tömegű Higgs-bozont. Miért? Azért, mert az elmélet csak annyit jósolt, hogy a tömege nem nulla, de azt nem, hogy mennyi. Így a keresésére irányuló erőfeszítések ahhoz hasonlíthatók,

hogy egy homokkal megtöltött versenyuszodában kell találnunk néhány különleges homokszemet, amelyek például tökéletes gömb alakúak, de a méretükről fogalmunk sincs. A 21. század technikájára volt szükség ahhoz, hogy a keresés sikerrel járjon. A CERN LHC gyorsítójának kísérletei másfél ezerbillió proton–proton ütközés végállapotát vizsgálva csak statisztikusan, de hét 9-es (99,99999%-os) biztonsággal bizonyítani tudták egy soha korábban nem észlelt részecske létezését, amelynek tulajdonságai a SM által jósolt Higgs-bozon tulajdonságaival egyeznek.

A Higgs-bozon felfedezése igazolja a BEH-mező létezését és az elemi részek tömegének forrását. Mindez az elemi részecskékre vonatkozik. A mi tömegünk túlnyomó többségét adó barionok nem elemiek, és tömegük jelentős részének nem a BEH-mező a forrása. A BEH-mező nélkül azonban a barionokat alkotó kvarkoknak nem lenne tömegük, és így nem tudnának kötött rendszert alkotni, tehát végső soron mi sem létezhetnénk.

Kulcsszavak: *részecskefizika, kölcsönhatások elmélete, tömeg eredete, Higgs-bozon, Nobel-díj*

