

Lovas István

Betekintés az elemi részecskék világába

2008 decemberében három fizikus kapott Nobel-díjat: Yoichiro *Nambu*, Makoto *Kobayasi* és Toshihide *Maskawa*. Mindhárman a részecskefizika területén elért eredményeikért kapták a rangos kitüntetést. A három japán közül Y. Nambu állampolgára az Egyesült Államoknak is.

Előljáróban leszögezzük, hogy ebben az írásban csak azoknak a fizikai problémáknak a körvonalait ismertetjük, amelyeket a díjazottak sikeresen megoldottak. A megoldás részleteit ugyanis lehetetlen ismertetni a tudományterületen nem jártas olvasók számára, mert ahhoz a modern elméleti fizika teljes matematikai arzenáljára lenne szükség. Már a Nobel-díj Bizottság indoklása is olyan szakkifejezéseket használ, amelyek távolról sem közismertek, ezért későbbre halasztjuk annak a megfogalmazását, hogy miért is ítelték oda a Nobel-díjakat, és a cikk további része azt a célt szolgálja, hogy ez a megfogalmazás érthető legyen. Ezért először a középiskolás fizika tankönyv idevágó fogalmait ismételjük át.

A bennünket körülvevő világ megismerése már akkor megkezdődött, amikor az ember még a gyűjtögető életmód szintjén volt. Azóta fontosak azok a kérdések, hogy „Miből van?” „Mi van benne?” A földművelés és az állattenyésztés korának a kezdetén a tapasztalati úton történő ismeretszerzés folyamata még fontosabb lett, és felgyorsult. Amikor a fogalmi megismerés kezdetei felől érdeklődünk, akkor az ógörögöket szokták emlegetni. Ebből az időszakból ismert az a kérdés, hogy lehet-e korlátlanul felezni egy egyenes szakaszt. Igen, vagy nem? Ha az egyenes szakasz egy elvont matematikai vonal, akkor az ismételt felezésnek semmi sem állja az útját.

A válasz tehát: igen.

Ha azonban az egyenes szakaszt egy anyagdarab, mondjuk egy pálca valósítja meg, akkor a kérdést nem olyan könnyű megválaszolni. Demokritosz nevét azért őrizte meg a történelem, mert ő amellet foglalt állást, hogy a felezést nem lehet korlátlanul folytatni, mert előbb-utóbb elérünk oda, hogy az utolsó felezés után visszamaradó darabnak már más lesz az anyagi minősége. Elérkeztünk az anyag tovább nem osztható darabjához.

Ez az atom.

A kérdésre a válasz tehát: nem!

Az aranycsinálás módját és a bölcsek követ kereső alkímisták az évszázadok során számtalan hasznos ismeretet derítettek fel az anyagról, a modern atomfo-

galom kialakulása azonban a 20. századig váratott magára. A kémikusok fáradhatatlan munkájának eredményeként kiderült, hogy a Földön és a csillagokban összesen 92 különböző elem található, a hidrogéntől kezdve a héliumon át, (amelyet a Nap spektrumában fedeztek fel) egészen az urániumig. Az elemeket szépen el lehetett rendezni a híres, Mengyelejev-féle periódusos rendszerben. Eleinte azt hitték, hogy minden elemnek létezik egy legkisebb, tovább már nem osztható darabja, ami az illető elem atomja. Amikor azonban sikerült az atomok tömegét megmérni, kiderült, hogy a legtöbb elemnek van néhány különböző tömegű atomja. Ezeket hívják izotópoknak, mert a periódusos rendszernek ugyanazon helyéhez (izo topos) tartoznak, de különböző a tömegük.

Rutherford 1911-ben, egy zseniális kísérlet során radioaktív anyagból kijövő alfa-részecskékkel bombázott egy vékony arany lemezt, és megfigyelte az alfa-részecskék szóródását, azaz irányváltozását. Azt is mondhatnánk, hogy fény helyett alfa-sugárzással, szem helyett pedig alfa-detektorral „nézte meg” az arany atomot.

Zseniálisnak azért nevezzük ezt a kísérletet, mert egy évszázad múltán egész életünk tele lett olyan eszközökkel, mint az elektron-mikroszkóp, a tomográf, a Röntgen-kamera, stb. stb., amelyek a Rutherford-módszer egyre újabb „alkalmazásai”. Rutherford ebből a kísérletből arra a következtetésre jutott, hogy azok az alfa-részecskék, amelyek nagy szög alatt szóródtak, az arany atomnak a közepe táján ütköztek össze egy viszonylag nagy tömegű, nagy elektromos töltésű, kicsiny méretű anyagdarabbal. Azóta ezt a valamit atommagnak hívjuk. Nem sokkal később kiderült, hogy az alfa-sugárzás nem csak arra képes, hogy szóródjon, hanem arra is, hogy alkatrészeket lökjön ki az atomból. Ekkor fel lehetett tenni az ősi kérdést: „Miből van?” „Mi van benne?” A kilökött alkatrészek között találtak elektromosan semleges részecskéket is, amelyek tömege közelítőleg megegyezett a proton tömegével. (Protonnak hívjuk a legkönnyebb atommagot, ami a hidrogén atomnak a magja, aminek $+e$, azaz egységnyi pozitív elektromos töltése van, és amit hidrogén ionnak is neveznek.)

E felfedezés után nem sokkal vált világossá, hogy az atom közepén koncentráltan helyezkedik el Z darab $+e$ töltésű proton és N darab semleges neutron. Ezek alkotják az atom magját, ami körül Z darab $-e$ töltésű elektron „kering”. Az atom tehát semleges, mert ugyanannyi benne a pozitív és a negatív töltésű részecskék száma.

Az atomfizika egyik kiemelkedő felfedezése volt a Pauli-elv felismerése, ami azt mondja ki, hogy egy jól definiált kvantumállapotban legfeljebb csak egy elektron lehet. (Jól definiált kvantumállapotnak nevezzük azt az állapotot, amelyben az öt jellemző fizikai mennyiségeknek minimális a bizonytalansága.) Azokat a részecskéket, amelyekre érvényes a Pauli-elv, fermionoknak nevezzük. Ilyenek az elektron, a proton, a neutron és mindazok a részecskék, amelyek spinje, azaz a saját tengely körüli perdülete, a h Planck-állandónak és az $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ számok valamelyikének a szorzata.

Azok a részecskék, amelyeknek spinje a Planck-állandó egész számú többszöröse, alkotják a bozonok családját. A bozonokra nem érvényes a Pauli-elv!

Megismételjük, mert nagyon fontos, hogy a fermionokra érvényes Pauli-féle kizárási elv annyit mond ki, hogy egy jól definiált kvantumállapotban a részecskeszám vagy nulla, vagy egy, de kettő, vagy több nem lehet.

Ebből következik, hogy a fermionok alkotják az anyag építőköveit, „hiszen ahol van egy építőkö, ott másik már nem lehet!”

Már a 19. század végén felfedezték a rádióaktivitás különböző fajtáit. Ezek közül a béta-bomlás az, amikor az atommagból elektron távozik. Később derítették ki, hogy az elektron nem egyedül távozik, hanem egy furcsa részecske társaságában, amelyet anti-neutrínónak neveznek.

A világegyetemben nagyon sok fajta atom fordul elő, amelyek legtöbbször rövid élettartamú, azaz előbb vagy utóbb elbomlik. A leggyakoribb atom a hidrogén. Ez azért van, mert a magja, a proton a legkevésbé hajlamos a bomlásra. Wigner Jenő volt az, aki kereste az okát ennek a nagyfokú stabilitásnak, és arra a következtetésre jutott, hogy a proton azért stabil, mert hordoz egy, az elektromos töltéshez hasonló töltést, ez a bariontöltés, amire megmaradási törvény érvényes. Az atommagok alkatrészei elbomolhatnak egymásba, de csak úgy, hogy a bariontöltés értéke ne változzon.

Ez a magyarázata a világegyetem fennmaradásának.

A kozmikus sugárzás tanulmányozása és a nagyenergiás gyorsítókkal végzett kísérletek elvezettek ahhoz a felismeréshez, hogy nagyon sok különböző olyan részecske van, amely bariontöltést hordoz. Ezek a barionok, és ezeknek létezik az antirészecskéje is, amelynek az elektromos töltése és a bariontöltése is ellentétes előjelű. Kiderült továbbá az is, hogy nagyon sok olyan részecske létezik, amelyek zérus bariontöltést hordoznak és közepes tömegűek, ezek külön kategóriát alkotnak, ezek a mezonok. Megállapították, hogy a barionok mind fermionok, a mezonok pedig mind bozonok. A barionok és a mezonok együtt alkotják a hadronok családját.

Marx György ismerte fel, hogy a leptonoknak is van egy sajátos töltése, amire megmaradási tétel érvényes. (Leptonnak nevezzük az elektront, a müont és a tauont, valamint a hozzájuk társított három neutrínót.)

Nagyon fontos felismerés volt, hogy a sokféle hadron között sok van, amely igazából „csak” a gerjesztett állapota valamely már ismert hadronnak. Ebből arra a felismerésre jutottak, hogy a hadronok azért gerjeszthetők, mert nem pontszerű, szerkezet nélküli objektumok, hanem valahogy alkatrészekből vannak felépítve, és ezért képesek energiát felvenni, illetve leadni.

Murray Gell-Mann ezen hipotetikus alkatrészeket *quark*-oknak nevezte el. Amikor Gell-Mann 1963-ban először írta le azt a szót, hogy quark, senkinek sem volt fogalma a világon arról, hogy mi helye van ennek az ismeretlen szónak egy tudományos cikkben. A lábjegyzetből derült ki, hogy egy delirium tremensben szenvedő alkoholista szokta az abszintet *quart* egység helyett *quark* egységben

rendelni a sarki csapszékben, de még ez az alkoholista sem létezett a valóságban, csak egy dús fantáziájú prózaíró tudatában.

Gell-Mann óvatosságból választott ilyen furcsán nevet egy eladdig ismeretlen részecskének, mert ő maga sem kötött volna nagy összegű fogadást az ügyben, hogy van-e értelme a *quark* (kvark) szó által takart fogalomnak, vagy nincs. A kvark ugyanis Gell-Mann szerint egy olyan részecske, amelynek az elektromos töltése az e töltésegységnek vagy egyharmada, vagy kétharmada, a barion-töltése pedig a bariontöltés egységének az egyharmada. Gell-Mann nem is állította, hogy a harmad töltést hordozó kvark magányosan előfordul a természetben. Ehelyett azt állította, hogy három kvark kötött állapota már értelmes képződmény lehet, mert az elektromos töltése egész számszorosa az e töltés egységnek, és a barion töltése $+1$. Három kvark együtt tehát egy bariont alkothat:

$$(\text{kvark1, kvark2, kvark3}) = \text{barion}(1,2,3)$$

Emellett még az is igaz, hogy egy kvark és egy antikvark kötött állapotának ugyancsak van értelme, mert az 0 bariontöltést hordoz, és az elektromos töltése egész szám. Ez tehát megfelelhet egy mezonnak:

$$(\text{kvark1, antikvark2}) = \text{mezon}(1,2)$$

Az elmúlt félévszázadban a kvark fogalom a modern fizikatörténet egyik legzseniálisabb felfedezésének bizonyult, és létezésében ma már kételkedni dőreség lenne. Gell-Mann eredetileg három fajta kvark létezését tételezte fel, nevezetesen az u (up), a d (down) és az s (strange) kvarkét. Azért ezeket, mert ezekből ki tudta kombinálni az addig ismert hadronokat. A kvarkmodell fényes sikert ért meg, amikor 1964-ben kísérletileg előállítottak egy olyan, korábban nem ismert bariont, az omega bariont, ami három s kvarkból épül fel, aminek létét a kvarkmodell jóslta meg:

$$(\text{strange1, strange2, strange3}) = \Omega(1,2,3).$$

Érdeemes megjegyezni, hogy most a megismerésnek egy szokatlan változatával találkoztunk, amikor nem azt kérdeztük, hogy „Miből van?” vagy „Mi van benne?”, hanem azt kérdeztük, hogy „Mi lenne belőle, ha ezeket az alkatrészeket összehoznánk?” Azt lehet mondani, hogy itt a természetkutató szerepét a tervező mérnök vette át.

Nemsokára találtak egy olyan mezont, ami egy c kvarkból (charm) és egy anti- c kvarkból épül fel. Érdeemes megemlíteni, hogy a c kvark létezését előre nem jóslta meg senki, „véletlenül” találták meg.

Az anyagban előforduló részecskék egy részét „véletlenül,” azaz nem célirányosan találták meg. Ilyen például a proton, az elektron, az atommag, a müon, a

c-kvark stb. Egy másik részét viszont tudatosan, azaz célirányosan keresték, mert létüket a korábban megismert tényekből ki lehetett következtetni az elmélet segítségével. Ilyenek például a neutrínó, a mezon, az antirészecskék stb.

A különböző módszerekkel és célokkal végrehajtott kutatások eredményeképp 1964 végéig ismertté vált négy kvark és négy lepton:

$$(u, d, c, s) \text{ és } (\nu_e, e, \nu_\mu, \mu).$$

Ezeket elrendezhetjük a következő ábra I. és II. oszlopában.

Ezek mellett felfedezték mindegyik antirészecskéjét is. Itt említjük meg, hogy a leptonoknak van leptontöltése, amit Marx György fedezett fel. A lepton töltés hasonlít az elektromos töltéshez és a bariontöltéshez, amire megmaradási törvény érvényes.

	I.	II.	III.		
Kvarkok	u	c	t	2/3	1/3
	d	s	b	-1/3	1/3
Leptonok	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	0
	e	μ	τ	-1	0

1. ábra.: A fermionok generációi

Az utolsó előtti oszlopban a részecskék elektromos töltését, az utolsó oszlopban pedig a barion töltését tüntettük fel.

Vizsgáljuk most a fermionok részvételével zajló azon bomlási folyamatokat, amelyeket a gyenge kölcsönhatás vezérel.

Ha egy adott kezdőállapotból induló bomlási folyamat több csatornán keresztül vezet el a végállapothoz, akkor a teljes bomlási valószínűség az egyes parciális valószínűségek összege. A szükséges számításokat azonban csak akkor tudjuk elvégezni, ha ismerjük az összes lehetséges közbenső állapotot. Ha ez nem áll fenn, akkor a számítások inkonzisztensek lesznek. Ha feltételezünk bizonyos eddig nem ismert csatornákat, akkor az inkonzisztencia megszüntethető, és ily módon eddig nem ismert részecskék fedezhetők fel.

Ilyen módszerrel Makoto Kobayasi és Toshihide Maskawa megjósolták a III. fermion generáció létezését. Ennek a generációnak a tagjai a top-kvark (t), a bottom-kvark (b), a tau-neutrino (ν_τ) és a tauon (τ).

$$(t, b, \nu_\tau, \tau).$$

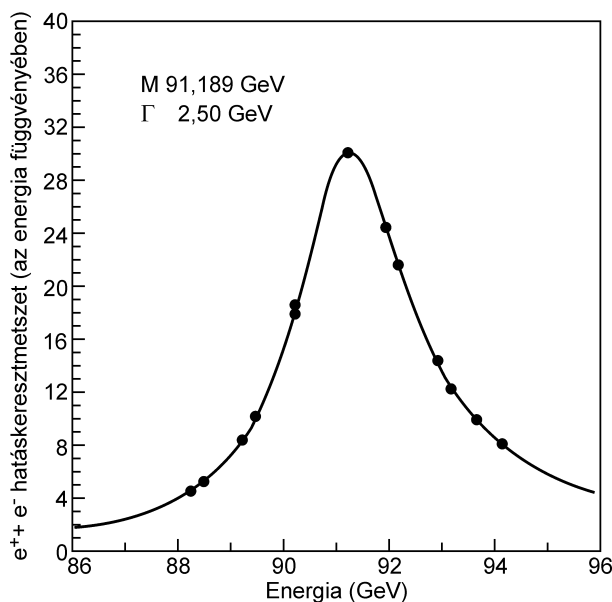
A Nobel-díj Bizottság ezt az eredményt jutalmazta a 2008. évi Nobel-díjjal.

A III. generációra vonatkozó jóslás nem csak a létezésre vonatkozó kijelentés volt, hanem egy sor kvantitatív összefüggés is, amelyek helyességét az elvégzett kísérletek pontosan igazoltak.

Teljesen természetes az a kérdés, hogy nem léteznek-e további generációk. A válasz erre a kérdésre határozott nem, amit a gyorsítóknál elvégzett kísérletek és az asztrofizikai megfigyelések sora támaszt alá.

Ezen kísérletek közül csak egyet említünk: a Z^0 rezonancia vizsgálatát.

A Z^0 közbenső bozon tanulmányozása során megmérték annak a hatáske- resztmetszetét, hogy elektron és pozitron ütközése során Z^0 keletkezzék, miköz- ben az elektron-pozitron pár E tömegközépponti energiáját folytonosan változ- tatták, a Z^0 nyugalmi energiájának a környezetében. A kísérlet egy gyönyörű rezonanciagörbét eredményezett, aminek a közepe megadja a Z^0 nyugalmi töme- gét. A rezonanciagörbe szélességét pedig egy összeg határozza meg, amely ösz- szegnek annyi tagja van, ahány fajta fermion pár fordulhat elő a folyamat végál- lapotában. (2. ábra.) Figyelembe véve az I., a II. és a III. generációban előfordu- ló összes lehetőséget, eredményül a mért rezonancia-szélességet kapták, ami azt jelenti, hogy nincs több elemi fermion.



2. ábra.

Nem volna ildomos elhallgatni, hogy a szakma nem volt elégedett a Nobel- díj Bizottság döntésével, mert volt több kiváló elméleti fizikus, akik lényegesen elősegítették a díjazott eredmény létrejöttét. Különösen Nicola Cabbibo nevét hiányolták. Én is velük értek egyet.

Nézzük most *Yoichiro Nambu Nobel-díjjal jutalmazott munkásságát.*

Az atommagban jelenlévő protonok és neutronok igen erősen kötődnek egy- máshoz. Az atomban az atommag elektronokat köt magához. Az atomokból mo-

lekulák, a molekulákból sejtek, a sejtekből élőlények épülnek fel, akik várat is képesek építeni.

Az építőkövekből akkor lehet várat építeni, ha rendelkezésre áll valamilyen ragasztó anyag. A részecskefizikai kutatások során kiderült, amint már említettük, hogy a természetben létezik egy olyan részecskecsalád is, amelyre nem érvényes a Pauli-elv. Ez a bozonok családja. Ezekből a bozon típusú részecskékből a fermionok összeragasztásához annyi épül be, amennyire éppen szükség van. (A vár építéshez is annyi malteret használnak, amennyi éppen szükséges.) Az építőkövek közti „kölsönhatást” a malter teremti meg. A fermionok közti kölsönhatást bozonok közvetítik.

A körülöttünk előforduló folytonosan sok fajta test között végtelen sokféle kölsönhatás képzelhető el. Ha azonban megpróbáljuk a különböző kölsönhatásokat egyszerűbb kölsönhatások kombinációjára visszavezetni, arra a szinte hihetetlen következtetésre jutunk, hogy az összes megfigyelhető kölsönhatás visszavezethető négy fundamentális kölsönhatásra. Ez a négy alapozó kölsönhatás: a GRAVITÁCIÓS, a GYENGE, az ELEKTROMÁGNESES és az ERŐS kölsönhatás.

A gravitációs kölsönhatás igen fontos, hiszen ez tartja össze a Földet, a Naprendszert, a Tejutat, a Galaxisokat és az egész Világegyetemet. Ennek ellenére most a gravitációra nem fordítunk figyelmet, mert abban biztosak vagyunk, hogy csak égitest kiterjedésű rendszereknél lehet valódi szerepe.

A másik három fundamentális kölsönhatás közül a fizikatörténetben először az elektromágneses kölsönhatás törvényeit sikerült feltárni. Clark Maxwell ismerte fel, hogy csak akkor lehet a helyes törvényeket megfogalmazni, ha az elektromos- és a mágneses jelenségeket leíró törvényeket összekapcsoljuk. Ezek lettek a híres Maxwell-egyenletek, amelyekről kiderült, hogy léteznek hullámszerű megoldásai, ami azt jelenti, hogy mind az elektromos, mind pedig a mágneses mező periódikusan változik térben is és időben is.

Hertz kísérletek segítségével bebizonyította, hogy ilyen hullámok tényleg léteznek a természetben. Ezek a rádióhullámok, amelyek csak a hullámhossz tekintetében különböznek a látható fényhullámoktól, a nagy áthatoló képességű Röntgen-sugárzástól, illetve a nagy energiájú gamma-sugárzástól.

Az elektromosan töltött, illetve a mágneszettséget hordozó testek között a kölsönhatást ezek a hullámok közvetítik. Nagyon hasonlít a helyzet ahhoz, mint amikor rádiósok adó-vevő rádiók által kibocsátott és felfogott rádióhullámok segítségével kommunikálnak egymással. Max Planck 1900-ban vette észre, hogy az elektromágneses hullámok által továbbított energia meghatározott adagokba van koncentrálódva. Az energia adag nagysága $h\nu$, ahol ν a hullám rezgésszáma, h pedig egy konstans szám, aminek Planck-állandó a neve. Ezt az energia adagot később fotonnak nevezték el, de hívják fénykvantumnak is. A foton a bozon típusú részecskék leggyakoribb fajtája. Ez a „legősibb” részecske, hiszen

*„Kezdetben mondá az Úr: Fiat lux! (azaz Legyen világosság!)
És lőn világosság!”*

A fermionok közötti kölcsönhatás dinamikusan valósul meg. A fermionok bozonokat cserélgetnek, mintha labdázának.

Vizsgáljuk most a gyenge kölcsönhatást, ami a legegyszerűbb formában az atommag béta-bomlásánál jelentkezik. Amint már említettük, a béta-bomlás során a bomló mag egy elektront és egy anti-neutrinót bocsát ki. Erre a legegyszerűbb példa a neutron bomlása. Sokáig azt hittük, hogy a tér-időben egy jól meghatározott pontban, „itt és most” megy végbe a neutron eltűnése is, valamint a visszamaradó proton, illetve a keletkező elektron és anti-neutrinó megjelenése is. Ezt a szakzsargonban úgy szokták kifejezni, hogy a gyenge kölcsönhatást zérus hatótávúnak hittük.

Az azonban már viszonylag korán kiderült, hogy egy ilyen zérus hatótávú kölcsönhatás elméletének kidolgozása leküzdhetetlen nehézségekbe ütközik.

Ennek a gondnak a megszüntetésére feltételezték, hogy a gyenge kölcsönhatás nem zérus hatótávú. Azaz feltételezték, hogy a bomlás során a bomló részecske eltűnése és a keletkező részecskék megjelenése nem egyetlen tér-idő pontban, hanem két közeli tér-idő pontban következik be, amely pontokat egy „közbenső bozon” vonala köti össze.

Ez a közbenső bozon közvetíti a gyenge kölcsönhatást.

Kérdés, hogy hányféle közbenső bozon létét kell feltételeznünk?

A neutron bomlása esetén a közbenső bozonnak negatív töltésűnek kell lenni, hogy a visszamaradó protonnal együtt zérus töltést eredményezzen, ami szükséges ahhoz, hogy az elektromos töltés megmaradásának törvénye teljesedhessen. A negatív töltésű W^- közbenső bozon halad a második tér-idő pontig, és ott, és akkor elbomlik egy leptonpárra, pontosabban egy negatív elektronra és egy semleges anti-neutrinóra.

Ennek a folyamatnak a megfordítottja is bekövetkezhet, amikor proton bomlik el. Ez akkor lehetséges, ha a protonnak az energiája nagyobb, mint a neutron nyugalmi energiája. A proton bomlásakor visszamarad egy neutron, és kibocsátásra kerül egy pozitív W^+ közbenső bozon, ami halad a második tér-idő pontig, ahol elbomlik egy pozitív töltésű pozitronra és egy neutrínóra.

Az eddigiek alapján elképzelhető, hogy létezik egy elektromosan semleges Z^0 közbenső bozon is. Ez lehetővé teszi, hogy egy ütköző elektron-pozitron pár az első tér-idő pontban keltsen egy Z^0 közbenső bozont, ami a második tér-idő pontban egy fermion-antifermion párt kelt.

Az eddigiekben elmondottak nem alkotnak egy kvantitatív elméletet, csupán egy fenomenológikus modell körvonalait adják. Az elmúlt évtizedek során kiváló elméleti fizikusok sora próbálta meg a gyenge kölcsönhatás elméletét erre a fenomenológikus modellre alapozva megalkotni. A sikeres megoldás Standard Modell néven vált ismertté.

Mielőtt rátérnénk a Standard Modell ismertetésére, bizonyos előkészületekre van szükségünk.

A fizikai jelenségek térben és időben zajlanak, leírásukhoz koordináta-rendszert és órát (x,y,z,t) kell választanunk. A fizikai törvények függnak az (x, y, z, t) változóktól. Térjünk most át egy másik (x, y, z, t) koordináta rendszerre!

Transzformáljuk az igaz fizikai törvényeket is az új rendszerbe. Ha az új rendszert a négyes téridő eltolásával, vagy elforgatásával választjuk ki, akkor az igaz fizikai törvények matematikai alakja változatlan marad.

„Az igazság ugyanis nem függhet attól, hogy honnan nézzük!”

Az ilyen transzformációkat, amelyek a törvényt önmagába viszik át, szimmetria-transzformációknak nevezzük. Ha egy eddig ismeretlen törvényt próbálunk megszerkeszteni, akkor gondoskodni kell arról, hogy a szimmetria-transzformációk a feltételezett törvényt önmagába transzformálják. Vigyázat, ez nem elégséges, de szükséges feltétele annak, hogy a „törvényjavaslat” helyes lehessen.

Még a 19. században ismerte fel Lorentz, hogy az elektromágneses mezők leírására egy $A_\mu(x)$ négyes-vektort célszerű bevezetni, ahol μ ($=0,1,2,3$) és $(x=x,y,z,t)$ a négyes tér-idő egy pontját jelenti. Kiderült, hogy az $A_\mu(x)$ vektorpotenciál segítségével megfogalmazott törvényeknek van egy különleges szimmetria-transzformációja, amit lokális mérték-transzformációnak szokás nevezni:

$$A'_\mu(x) = A_\mu(x) + d_\mu f(x),$$

ahol $f(x)$ tetszőleges skalár függvény, aminek $d_\mu f(x)$ a deriváltja. Ha áttérünk a vesszőtlen $A_\mu(x)$ vektorpotenciálról a vesszősre $A'_\mu(x)$, akkor a törvény alakja nem változhat.

Igazából az elektrodinamika törvényeinek a lényege ebbe a szimmetriába van kódolva. Ha nem ismernénk a Maxwell-egyenleteket, de tudnánk, hogy azoknak önmagukba kell transzformálódnia a fenti lokális mértéktranszformáció során, akkor ki tudnánk találni a Maxwell-egyenleteket.

Térjünk vissza a gyenge kölcsönhatás problémájához! Tételezzük fel, hogy a gyenge kölcsönhatás elméletében szerepelnek az $A_\mu(x)$ elektromágneses potenciálhoz hasonló

$$W^+_\mu(x), W^-_\mu(x) \text{ és } Z^0_\mu(x)$$

„gyenge vektorpotenciálok.” Ezekre is leszármaztathatóak a Maxwell-egyenletekhez hasonló egyenletek. Megköveteljük, hogy ezek is legyenek invariánsak bizonyos lokális mérték-transzformációkkal szemben.

Idáig a klasszikus elméletet építettük. Most arra van szükség, hogy áttérjünk a kvantumelméletre.

Ha ezt meg tesszük, akkor nagy csalódás ér bennünket, mert kiderül, hogy a kvantált $W^+_\mu(x)$, $W^-_\mu(x)$ és $Z^0_\mu(x)$ mezőkhöz tartozó részecskéknek a nyugalmi tömege zérus.

A zérus nyugalmi tömegű részecske viszont végtelen hatótávú kölcsönhatást közvetít, ami a gyenge kölcsönhatás esetén biztosan ki van zárva.

Mit tegyünk?

Ahhoz, hogy véges lehessen a bozonok tömege, a mértékszimetriát kellene elrontani!

De hogyan? Erre a kérdésre talált helyes útmutatást Y. Nambu! Ezért kapta meg a Nobel-díjat.

Először nézzünk egy szemléletes példát a spontán szimmetria-sérülésre!

Gondoljunk el egy vékony, rugalmas fémpálcát, amit függőlegesen felállítunk egy asztalra. Ha a pálcát elforgatjuk a tengelye körül, nem történik semmi, mert a tengely szimmetriatengely. Ha a pálcát F erővel függőlegesen lefelé nyomni kezdjük, előbb nem történik semmi, de amikor elérkezünk egy kritikus F_{kr} értékhez, a pálcá hirtelen kihajlik valamilyen irányba.

A tengely körüli forgás-szimmetria megsérül. A kihajlás teljesen véletlenül történik valamelyik irányba, de ez az irány már nem lesz egyenértékű a többi iránnyal. Azt szoktuk mondani, hogy a szimmetria spontán sérült meg. Hasonló jelenség fordul elő a mágnesség kapcsán, a szupravezetés körében, és még számos más jelenségnél.

Y. Nambu tudatában született meg az a gondolat, hogy a spontán szimmetria sérülése előfordulhat a részecskefizikában is.

Ahhoz, hogy ez a gondolat tényleg célba érhessen, fel kellett tételezni, hogy létezik további négy $\varphi_i(x)$ ($i=1,2,3,4$) független skalármező. (Míg a vektormezőnek annyi komponense van, mint ahány dimenziója van a téridőnek, azaz négy, a skalármezőnek mindig csak egy komponense van!) Tegyük fel továbbá, hogy ezek a skalármezők csatolódnak a jelenlevő mezőkhöz, úgy, hogy a rendszernek egy bizonyos lokális mértéktranszformáció szimmetria-transzformációja legyen.

Ha a skalármezők önkölcsönhatást is hordoznak, akkor a lokális mérték-szimmetria spontán megsérülhet! Ennek következtében egy-egy skalár „betársul” egy-egy vektorba, és közben három közbenső bozon tömeget nyer.

Ezt követően kísérletileg bebizonyították, hogy a három gyenge bozon, a W^+ , a W^- és a Z^0 tényleg létezik. Sikerült meghatározni mindhárom tömegét is, amelyek értéke nemhogy zérus lenne, hanem váratlanul nagynak bizonyult:

$$M(W^+) = 80.330 \text{ GeV}/c^2$$

$$M(Z^0) = 91.187 \text{ GeV}/c^2$$

$$M(W^-) = 80.330 \text{ GeV}/c^2$$

Az így lezármaztatott elméletből ki lehetett számítani szinte az összes eddig elvégzett nagy pontosságú kísérlet eredményét, és megdöbbentő egyezést lehetett találni.

Van azonban egy óriási probléma! Nevezetesen az, hogy a négy skalár mezőből három betársult a három vektormezőbe, de „gazda nélkül” maradt a negyedik skalármező. Ezt nevezik Higgs-skalárnak, aminek eddig nem sikerült a nyomára jutni. Régóta hisszük, hogy a Higgs részecske igen nagy tömegű, és azért nem lehetett eddig megtalálni. Erős reményt fűzünk ahhoz, hogy a genfi CERN új gyorsítója, a Large Hadron Collider (a Nagy Hadron Ütköztető) energiája elegendő lesz a Higgs-skalár létének kimutatásához, és ez lesz az elmélet legnagyobb sikere.

A 27 km területű LHC a múlt évben elkészült, és el is indították. Gyorsított is részecskéket! A kutatók szinte lélegzetvisszafojtva várták a pillanatot, amikor a végleges üzemmódra át lehet kapcsolni. Mielőtt ez bekövetkezett volna, egy váratlan hiba folytán kilyukadt a cseppfolyós hélium tartály fala, és a nélkülözhetetlen hűtőfolyadék egy része megszökött. A gyorsítót le kellett állítani, és el kellett kezdeni a hiba keresését, majd pedig a gyorsító javítását. A szakemberek azt remélik, hogy ennek az évnek a derekán újra lehet indítani a kísérletet.

Be kell vallanunk, hogy az itt igen vázlatosan elmondott történetnek páratlanul sok szereplője volt. Csak a nevek, még pedig híres nevek, felsorolása is megnövelné a nyomdaköltséget. A Nobel-díj odaítélése után a „szakma” zajos méltatlankodásba csapott. Nem azért, mert tagadta volna bárki is Nambu elsőségét, hanem azért, mert méltánytalannak érezték, hogy olyan sok kiváló és fontos szerepet játszó részese a sikernek elismerés nélkül maradt.

No, de a Nobel-díjat sem illik aprópénzre váltani!

Fontosabb irodalom magyar nyelven

SIMONYI KÁROLY: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat. Budapest, 1986.

TRÓCSÁNYI ZOLTÁN: *A standard modell Higgs-bozonja nyomában az LHC-nél*. Fizikai Szemle, LVII. évfolyam, 2007. 8. szám, 253. oldal.

HORVÁTH DEZSŐ: *A részecskefizika anyagelmélete: a Standard modell*. Fizikai Szemle, LVIII. évfolyam, 2008. 7-8. szám, 241. oldal.

TRÓCSÁNYI ZOLTÁN: *Az eltűnt szimmetria nyomában*. Fizikai Szemle, LVIII. évfolyam, 2008. 12. szám, 417. oldal.