

VANNAK-E IGAZI ELEMI RÉSZECSKÉK?

Lovas István
Debreceni Egyetem

ABSZTRAKT

Azt a valamit, amit Demokritos atomnak nevezett, ma, a XXI. század elején elemi részecskének nevezzük, és feltételezzük, hogy nincs belső szerkezete és pontszerűen viselkedik. A „Standard Modell” szerint az elemi részecskéket a következőképpen csoportosítjuk. Van hat lepton és van hat kvark, amik $\frac{1}{2}$ értékű spint hordozó fermionok. Ezek játsszák az építőtéglák szerepét. Van egy foton, három gyenge bozon és nyolc gluon, amik 1 értékű spint hordozó bozonok, van továbbá négy Higgs bozon, amik spinje 0 értékű. Ezek a bozonok játsszák az összeragasztó malter szerepét.

Ezen részecskékből felépülő, „látható” testek a Világegyetem anyagának a 4 %-át alkotják.

Az anyag további 22 %-a a sötét anyag és 74 %-a a sötét energia.

Ezek mibenlétét még fel kell deríteni!

AZ ATOM

A görögök fogalmazták meg azt a kérdést, hogy lehet-e felezni a végtelenségig egy egyenes darabot.

Erre kétféle válasz adható. Az egyik: igen, ha az egyenes darab csupán a tudatunkban létező geometriai fogalom.

A másik, amit Demokritos fogalmazott meg: nem, ha az egyenes darabot egy valóságos anyagból készült pálca valósítja meg. Véges számú felezés után, egy tovább nem felezhető anyag darabhoz jutunk. Ez a tovább nem felezhető anyag darab az „atom”. Az atom fogalmáról sokat elmélkedtek, de azt a valamit, amit ma is atomnak hívunk, csak évszázadok után fedezték fel. A XIX században a vegyészek felderítették, hogy a Földön és környékén összesen 92 elem található. Az első a hidrogén, második a hélium, és végül a 92-ik az uránium. Ezen elemek legkisebb, tovább nem felezhető darabja a hidrogén atom, a hélium atom, s.i.t.

A XIX század végén kiderült, hogy az atom, ha nem is felezhető, de ezzel szemben magától osztódik. Becquerel felfedezte a rádióaktivitást, amelynek során az uránium tartalmú ásvány elektromosan pozitív (alfa), negatív (béta) és semleges (gamma) részecskéket képes spontán kibocsátani. Ezt követően Thomson felfedezte, hogy légritkított térben létrehozott elektromos kisülés során elektronnak elnevezett negatív részecske válhat le az atomról, amit azonosítottak a béta részecskével. Szükséges tehát megvizsgálni, hogy mi van az atomban.

A fizikatörténet jelentős eseménye volt az a kísérlet, amit Rutherford végzett el a XX. század elején, amelynek során vékony aranyfűst lemezt bombázott alfa részecskékkal és megmérte annak a gyakoriságát, hogy az alfa részecske az eredeti irányához képest θ szög alatt szóródjon.

Rutherford feltételezte, hogy az arany atomban a negatív elektronokon kívül pozitív töltések is vannak, hiszen az atom elektromosan semleges.

Az egyszerűség kedvéért azt is feltételezte, hogy az arany atomban is, és az alfa részecskében is a pozitív töltések pontszerűen kicsiny tartományra koncentrálódnak. Ezen az áron ki tudta számítani annak a valószínűségét, hogy az alfa részecske egy meghatározott θ szög alatt szóródjon. A szórás kísérlet során mért gyakoriságokat összehasonlítva az elméletileg számított valószínűségekkel, megdöbbentően jó egyezést talált. Csak a közel 180 fok alatti szórási eseményeknél talált számottevő eltérést. Könnyű belátni, hogy ezen események során az alfa részecske a lehető legközelebb halad el az atom középpontja mellett. Ebből levonta a következtetést, hogy a kísérlet és az elmélet közötti eltérés abból a hibából származik, hogy a pozitív töltéseket tartalmazó tartományt pontszerűen kicsinek tekintette. Ez a tartomány a valóságban kicsiny, de nem pontszerű. A pozitív töltéseket tartalmazó kicsiny tartomány az, amit, azóta, atommagnak hívunk. A Rutherford-féle kísérlet tehát elvezetett az atommag felfedezéséhez!

Erre a felfedezésre támaszkodva Bohr megalkotta az első realiztikus atommodellt:

A periodikus rendszer Z -ik helyén álló atom egy közel pontszerű atommagból áll, amelyben $+Z$ e elektromos töltés koncentrálódik, és amely mag körül Z darab $-e$ töltésű elektron helyezkedik el.

A Bohr modellre alapozott számítások sikerei és sikertelenségei elvezettek ahhoz a felismeréshez, hogy az atomok világában a klasszikus fizika törvényeinek egy része érvényét veszti: új elméleti alapokra és új fogalmakra van szükség! Ezek legtöbbször Heisenberg és Schrödinger fedezte fel. A mikrorészecskék leírására szánt elméletet hívják kvantummechanikának, ami mindig csak meghatározott számú részecskére alkalmazható.

KVANTUMMECHANIKA

Ezen „új fizika” kifejlesztésében igen sokan vettek részt, közülük is kiemelkedett Dirac, aki azt a célt tűzte ki, hogy az új kvantum fizikát összeötvözze, az Einstein-féle speciális relativitás elmélettel.

Ezt a célt el is érte. 1928-ban ugyanis egy olyan egyenletet talált, amelynek léteznek síkhullámszerű megoldásai, amelyeknél az E energia:

$$E = ((m c^2)^2 + (\mathbf{p} c)^2)^{1/2} = mc^2 + \mathbf{p}^2 / 2 m + \dots$$

A Dirac-egyenlet tehát **összhangban van az Einstein-féle formulával,**

azaz, az E energia, közelítőleg, a nyugalmi energiának (mc^2) és a kinetikus energiának ($\mathbf{p}^2/2 m$) az összege. (Itt \mathbf{p} -vel a lendületet (vagy impulzust), m -mel pedig a tömeget jelöltük.)

A Dirac-egyenletből, nem várt eredményként kiadódott, hogy az elektronnak létezik spinje, pontosabban létezik, egy $\frac{1}{2}\hbar$ és egy $-\frac{1}{2}\hbar$ vetülettel rendelkező, pályamozgástól független perdülete. (Itt $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, ahol h a Planck- állandó.)

Ezen kívül kiadódott, egy még kevésbé várt eredmény, nevezetesen az, hogy az elektronnak létezik a $-e$ töltésű állapota mellett, egy $+e$ töltésű állapota is, ez az elektron anti-részecskéje, amit pozitronnak neveztek el.

Anderson, 1932-ben, a kozmikus sugárzásban felfedezett egy, pozitív töltésű, részecskét, amit azonosítani lehetett a megjósolt pozitronnal.

Ebből a kísérleti eredményből világossá vált, hogy szükség van egy olyan elméletre, amely képes kezelni a részecskék keletkezését és eltűnését.

Ez az elmélet a kvantum-térelmélet, amit Wigner, Jordan, Dirac és mások dolgoztak ki.

KVANTUM-TÉRELMÉLET

A kvantumtérelméletben a Dirac-egyenlet szerepe megváltozott!

Többé nem egy darab elektron kvantummechanikai egyenlete, hanem az elektron tér „klasszikus” téregyenlete!

Olyan, mint a Maxwell-egyenletek. Ha a Maxwell egyenleteket kvantáljuk, akkor megjelennek a tér kvantumai a fotonok, amik kvantált adagokban járulnak hozzá a tér teljes energiájához, impulzusához és impulzusmomentumához.

Hasonlóképpen, ha kvantáljuk a „klasszikus” Dirac egyenletet, akkor megjelennek az elektron tér kvantumai az elektronok és a pozitronok, amik kvantált adagokban járulnak, hozzá az elektron tér energiájához, impulzusához, impulzusmomentumához és elektromos töltéséhez.

Miután Chadwick 1932-ben felfedezte a neutron, világossá vált, hogy a Z -ik rendszámú atommagban a Z darab pozitív töltésű hidrogén ionon, más néven protonon, kívül még N darab neutron található. Minthogy a neutron tömege közelítőleg megegyezik a proton tömegével, az atommag tömege közelítőleg $A=(Z+N)$ -szerese a proton tömegének. Ezt az összefüggést a tömeg-spektrometriai kísérletek az egész periodusos rendszerben igazolják.

1935-ben Yukawa felismerte, hogy az atommagban a protonok és a neutronok közötti vonzó kölcsönhatást egy olyan tér közvetíti, amely hasonlít az elektromágneses térhez, de amelynek van egy lényeges új vonása. Ez pedig az, hogy a tér kvantuma, (ami az elektromágneses tér esetén a foton), nem zérus tömegű, hanem 135 MeV-nek felel meg. Ez a tömeg az elektron 0.5 MeV-es és a proton 938 MeV-es tömege közé esik, ezért az új részecskét közepes tömege miatt mezonnak nevezték el. A megjósolt mezont a kozmikus sugárzásban keresték. Amit először találtak, az a korábban nem sejtett müon volt, ami sokban hasonlít a Yukawa által megjósolt közepes tömegű, pionnak elnevezett, mezonra. Miután felfedezték a piont, az a megnyugtató érzés terjedt el, hogy tudjuk, hogy miből áll az atommag, tudjuk, hogy mi tartja össze az alkatrészeit, tudjuk, hogy az atommagot elektronok veszik körül és az elektromágneses kölcsönhatás révén vonzódnak az atommaghoz. Így lesz semleges az atom.

De ne siessünk az örömmel! Úgy tűnik, hogy a tapasztalat nem igazolta Demokritost! Az atom sok, néha nagyon sok, alkatrészből áll. Ezen könnyű segíteni, ha bevalljuk, hogy nem Demokritos nevezte el a sok alkatrészt tartalmazó valamit atomnak, hanem mi.

ELEMI RÉSZECSKÉK

Demokritos atomnak azt nevezte, aminek már nincsenek további alkatrészei. Követve az ő példáját az „atom” szó helyett vezessük be az „elemi részecske” fogalmat és nevezzük „elemi részecskének” azokat az objektumokat, amelyeknek nincsenek további alkatrészei és ezért pontszerűen viselkednek.

Mik ezek az elemi részecskék?

Az eddig elmondottak szerint úgy tűnik, hogy három féle „elemi részecske” típus van:

- A nehezek (a barionok): a proton, a neutron, stb.
- A közepesek (a mezonok): a pion, stb.
- A könnyűek (a leptonok): az elektron, a müon, stb.

Wigner Jenő ismerte fel, hogy a barionok hordoznak egy, az elektromos töltéshez hasonló „valamit”, amit bariontöltésnek neveztek el, amire az elektromos töltéshez hasonlóan, megmaradási törvény érvényes. Ez azt jelenti, hogy a barionok részvételével zajló átalakulási folyamatok közül csak azok mehetnek végbe a természetben, amelyeknél a kezdő és a végállapot bariontöltése azonos. Példaként tekintsük a neutron bomlást!

neutron \rightarrow proton+ elektron + antineutrínó

Nyilván való, hogy az elektromos töltés megmaradásának törvénye teljesedik, hiszen mind a kezdő állapot, mind pedig a végállapot elektromosan semleges. A bariontöltés megmaradási törvénye ugyancsak teljesedik, mert mind a neutronnak, mind pedig a protonnak a bariontöltése +1, az elektronnak is és az antineutrínónak is a bariontöltése pedig zérus.

Wigner Jenő nyomdokain haladva, Marx György ismerte fel, hogy létezik még egy további megmaradó töltés is, ez pedig a leptontöltés. A neutron bomlás példáján illusztrálhatjuk a leptontöltés megmaradását is. A neutron és a proton leptontöltése egyaránt zérus. Az elektron leptontöltése +1 az antineutrínóé pedig -1. Megállapíthatjuk, hogy a neutron bomlás folyamata megengedett, mind az elektromos-, mind a barion-, mind pedig a leptontöltés megmaradásának törvénye szempontjából.

A XX század folyamán felfedezték, hogy a természetben létezik összesen 6, az elektronhoz bizonyos mértékben hasonló, részecske ezek a leptonok, amelyek legfontosabb tulajdonságait a következő táblázat (A leptonok táblázata.) foglalja össze.

leptonok

lepton töltés = 1

barion töltés = 0

elektromos töltés	-1	0
	elektron e ,	elektron neutrínó ν_e ,
	müon μ ,	müon neutrínó ν_μ ,
	tau τ ,	tau neutrínó ν_τ ,

A leptonok táblázata.

Murray Gell-Mann felfedezett egy modellt, aminek a segítségével meg lehet jósolni a barionok és a mezonok tulajdonságait.

„Definiáljunk” 6 különböző kvark-ot! A kvark szót egy delirium trémensben szenvedő, őrült regényhős találta ki. Ennek a hat kvarknak a legfontosabb tulajdonságait „A kvarkok táblázata” tartalmazza.

kvarkok:

lepton töltés = 0

barion töltés = $1/3$

elektromos töltés	$-1/3$	$+2/3$
	down d,	up u,
	strange s,	charm c,
	bottom b,	top t.

A kvarkok táblázata.

Látható, hogy elég őrült tulajdonságok fordulnak elő: pl. $1/3$ barion töltés, vagy $2/3$ elektromos töltés, stb.

Barionok

A kvarkokból, mint alkatrészekből, bariont lehet „gyártani”, ha veszünk három kvarkot és hagyjuk, hogy a közöttük működő erős-kölcsönhatás kötést hozzon létre köztük.

A létrejött objektum barion lesz, mert három kvark fejenként $1/3$ bariontöltéssel 1-es barion töltést eredményez. A kvarkok mindegyike $1/2$ spinnel rendelkezik.

Három kvark eredő spinje tehát vagy $1/2$ vagy $3/2$. Mindkét esetben a spin feles, tehát a végeredmény fermion, amire érvényes a Pauli-elv.

Mezonok

A kvarkokból úgy lehet mezont „gyártani”, hogy veszünk egy kvarkot és egy antikvarkot, és hagyjuk, hogy az erős kölcsönhatás, kötést hozzon létre köztük.

A létrejött objektum mezon lesz, mert a kvark $1/3$ barion töltését semlegesíti az antikvark $-1/3$ barion töltése. Az eredő barion töltés tehát 0. A kvark $1/2$ spinje összezsugorodva az antikvark $1/2$ spinjével, vagy 0, vagy 1 eredő spint eredményez. A keletkezett objektum 0 barion töltésű, egész spinű, bozon, úgy ahogy a mezonnak lennie kell.

Gell-Mann ezt a kvark modellt 1963-ban publikálta. Az akkori változat érvényben maradt mind a mai napig, csupán bővült. A modell 1963-ban helyesen írt le minden akkor ismert bariont és mezont, valamint megjósolta:

a háromszorosan ritka Omega bariont, amit kísérletileg egy éven belül megtaláltak.

Azóta az összes „új” barion és mezon beilleszkedik a modell keretei közé.

A kvark modellt Gell-Mann a közönséges kvantum mechanika keretei között fogalmazta meg. Ahhoz, hogy a Pauli-elvvel ne kerüljünk ellentétbe fel kellett tételezni egy új szabadsági fokot, a színt. A kvarkoknak három fajta színe lehet.

Ez lehetővé tette az erős kölcsönhatásnak, a kvantumszíndinamikának a helyes megfogalmazását.

FUNDAMENTÁLIS KÖLCSÖNHATÁSOK.

Az elektromágneses kölcsönhatás

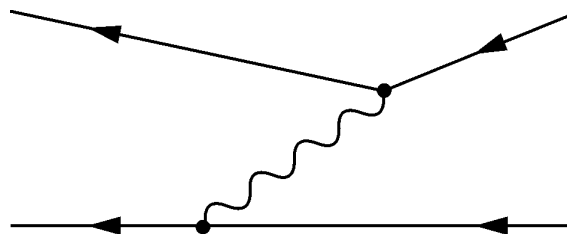
Az elemi részecskék között működő fundamentális kölcsönhatások közül legkorábban az elektromágneses kölcsönhatást ismerték fel még a klasszikus fizika korában. A kvantum-térelméletet az elektromágneses tér esetére dolgozták ki. Ezt általánosították az elektron térre, majd pedig összekapcsolták az elektromágneses térrel, figyelembe véve a két tér közötti kölcsönhatást. Ez lett a kvantumelektrodinamika a fizikatörténet egyik legnagyobb sikere, mind az alkalmazhatóság, mind pedig a pontosság tekintetében.

A kölcsönhatás lényegét a legszemléletesebben a Feynmann-féle gráfokkal lehet szemléltetni.

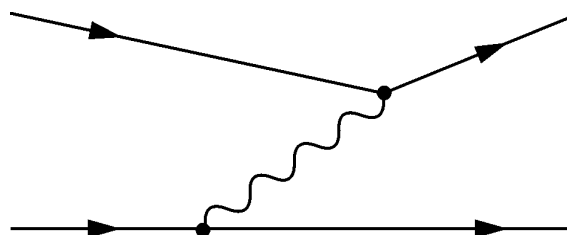
Az elektron tér két kvantuma (azaz két elektron, vagy két pozitron, vagy egy elektron és egy pozitron) közeledik egymáshoz. Ezeket nyilakkal szimbolizáljuk.

Az egyik elektron kibocsát egy elektromágneses kvantumot, azaz egy fotont, amit hullámos vonallal szimbolizálunk. Ezután a fotont elnyeli a másik elektron. Mind a foton emisszió, mind pedig a foton abszorpció során megváltozhat az elektronok impulzusa is és energiája is. Ezt a nyilak törésével szimbolizáljuk.

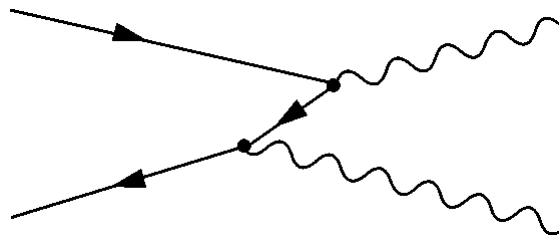
A foton csere a körülményektől függően, szaporán ismétlődhet.



Elektron-szóródás, elektronon, egy foton-cserével.



Pozitron-szóródás, pozitronon, egy foton-cserével.



Elektron-pozitron szétsugárzás két fotonra.

Erős kölcsönhatás

A barionok és a mezonok tanulmányozása során kiderült, hogy az őket felépítő kvarkok rendkívül erősen kötődnek egymáshoz. Ezt az erős kölcsönhatást nyolc fajta tér közvetíti, ezek a gluon terek, amelyek kvantumai a gluonok. Az erős kölcsönhatás legjellegzetesebb következménye a „kvark bezárás” jelensége. Ha egy barionból egy kvarkot akarunk eltávolítani, akkor a kimozdított kvark maga mögött egy rendkívül nagy energiasűrűségű gluon tér „kondenz csíkot” hoz létre. Ebben kvark-antikvark párok keletkezhetnek. Az utolsó pár kvarkja visszamarad a barionban, a többi kvark és antikvark pedig mezonokba szerveződik. Így a végeredmény az, hogy a kiindulási állapotban jelenlévő barion helyett megjelent egy új barion és keletkezett annyi mezon, amennyi a betáplált energiából tellett. A barion maradt barionnak. Ez olyan, mintha a kvarkot a barionból nem lehetett volna kiszakítani. A betáplált energia a keletkezett mezonok keltésére fordítódott.

Gyenge kölcsönhatás

A bétabomlás tanulmányozása során felismerték, hogy létezik egy olyan kölcsönhatás is, ami sokkal gyengébb, mint az elektromágneses, és amit három tér, közvetít, amelyek elektromos töltést is hordozhatnak. Ezen három tér kvantumai a W , Z^0 és W^+ gyenge bozonok, ezek a fotonnal analóg részecskék.

A gyenge kölcsönhatás egyaránt működik a leptonok és a kvarkok között.

A FUNDAMENTÁLIS KÖLCSÖNHATÁSOKAT KÖZVETÍTŐ BOZONOK

Elektromágneses kölcsönhatás: foton: γ ,

Gyenge kölcsönhatás: gyenge bozonok: W^+ , Z^0 , W^- ,

Erős kölcsönhatás: gluonok: $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8$.

A bozonok táblázata

A XX-ik század közepéig azt hittük, hogy a barionok is és a mezonok is szerkezet nélküli elemi részecskék.

A kvark modell megjelenésével ez a hit elszállt.

Jelenleg indíttatást érzünk arra, hogy az elemi részecskéket úgy definiáljuk, mint a leptonok, a kvarkok és a kölcsönhatásokat közvetítő bozonok együttesét, amelyekből az összetett mikrorészecskéket fel lehet építeni.

Az összetett mikrorészecskék, amelyek az építő blokkokkal állíthatók

párhuzamba:

a mezon,

a barion,

az atommag,

az atom,

és a molekula.

Ezek elemi fermionokból, azaz téglákból épülnek fel, amelyeket bozonok „ragasztanak” össze.

Nagyon valószínűnek látszik, hogy a fenti táblázatokban feltüntetett 6 lepton, 6 kvark és 12 bozon valóban igazi elemi részecske. De hasonlóképpen valószínű, hogy nem tudtuk felsorolni az összes elemi részecskét.

Ez számos sok ok miatt van így.

A gyenge bozonok maguk is összetettek. Mindegyik tartalmaz egy Higgs komponenszt és ezen kívül, létezni kell egy Higgs-skalárnak, amit még nem fedeztek fel.

Az itt elmondottakban teljesen elfelejtkeztünk a gravitációról, holott számos elmélet létezik, amelyek kapcsolatban vannak a gravitációval és újabb elemi részecskéket jósolnak, de ezek közül még egyet sem fedeztek fel.

Az égen forgó galaxisok forgási sebességét csak akkor lehet megérteni, ha feltételezzük, hogy a galaxisok az optikailag jól megfigyelhető anyagon kívül még nem-látható sötét anyagot is tartalmaznak. A sötét anyag az Univerzum teljes anyag sűrűségének 22 %-a, mibenlétéről mindaddig azonban csak spekulációk léteznek.

A kozmikus háttér-sugárzás tanulmányozásából kiderült, hogy az Univerzum geometriája átlagosan görbületmentes, azaz euklideszi.

Ekkor pedig az Univerzumban jelenlevő anyag sűrűsége egy jól meghatározott kritikus érték kell, hogy legyen. Ezzel szemben a látható anyag sűrűsége csak 4%-a kritikus értéknek. A hiányzó 74%-ot sötét energiának, vagy quintessenciának hívják, aminek tulajdonságairól, csak spekulációk léteznek, (de az nagyon sok).

Ezen írás címében megfogalmazott kérdésre tehát azt válaszolhatjuk, hogy igazi elemi részecskék bizonyára vannak és azok egy részét már sikerült felderíteni, de sok megválaszolatlan kérdés vetődött fel, amelyekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy jelenleg még nem ismerjük az összes elemi részecskét.

SZERZŐ

Lovas István, ATOMKI, KLTE, Debrecen

e-mail: lovas@ntp.atomki.hu