

## KÉZZEL FOGHATÓ RÉSZECSKÉK NEM CSAK A RÉSZECSEKEFIZIKA OKTATÁSÁHOZ

Komáromi Annamária

Szent István Király Zeneművészeti Szakközépiskola, Budapest

Részecskefizikát külön fejezetként oktatni középiskolában – kiváltképpen szakközépiskolában – nem áll módunkban, annak ellenére, hogy fizika egy különlegesen érdekes, fejlődő és kutatott területéről van szó. Ezért tanóraba úgy próbálok becsempészni, hogy a fizika más-más területeinek tanítása közben adok egy-egy kis ízelítőt ebből a témakörből. Úgy vélem, ezáltal közelebb kerülök ahhoz a célomhoz, hogy a diákok átérizzék a különböző területek közötti kapcsolatokat és komplex „fizikai világkép” alakuljon ki bennük.

Évekkel ezelőtt – a Mérei Ferenc Fővárosi Pedagógiai Intézet szervezésében – szakmai műhelyfoglalkozáson vettem részt, ahol az előadó a részecskefizikáról nem csupán beszélt, hanem egy bőröndből előhúzza mutatta be különböző részecskéket ábrázoló kis figurákat. Annyira megtetszett, hogy eldöntöttem: én is szeretnék egy ilyen készletet. Tekintettel az igen borsos árra, elhatároztam, hogy nem megveszem, hanem inkább saját magam tervezem meg a kis figurákat, de úgy, hogy a kis figurák érzékeltesék a részecskék jellemzőit. A továbbiakban bemutatom az elkészült részecskefigurákat, s azt, miként tudom használni azokat az oktatásban.

### Az univerzum sötét része

Először néhány szót a táskáról, amelyet a részecskék tárolására készítettem. Az első alkalommal, amikor a fizikaórára beviszem a „dark matter” feliratú fekete táskámat (1. ábra), elmondom a diákoknak, hogy a fizika jelenlegi eredményei szerint a világegyetem 68,3%-át az a sötét energia teszi ki, amelynek létét 1998 óta fogadják el a világegyetemet kutató kozmológusok, 26,8%-a sötét anyag és mindössze 4,9% a hagyományos értelemben vett anyag [1]. A diákok részéről teljes joggal felmerülhet a kérdés, hogy ezt milyen kísérleti, mérési eredmények alapján állítják a tudósok. Elmondom nekik, hogy ezeket az arányokat legutóbb a Planck-űrszonda (2. ábra) mérési adatainak kiértékelésével kapták meg. Az űrszondát az ESA

A cikk színes változata letölthető a folyóirat honlapjáról: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/1512/KomaromiA.pdf>, lásd a QR-kódot.

A <http://fizikaiszemle.hu> honlap mellékletek menüpontjában megtalálható és letölthető az elemi részecskék és az alapvető kölcsönhatások Standard modelljét bemutató poszter.



1. ábra. A részecskék tárolására szolgáló „sötét anyag”.

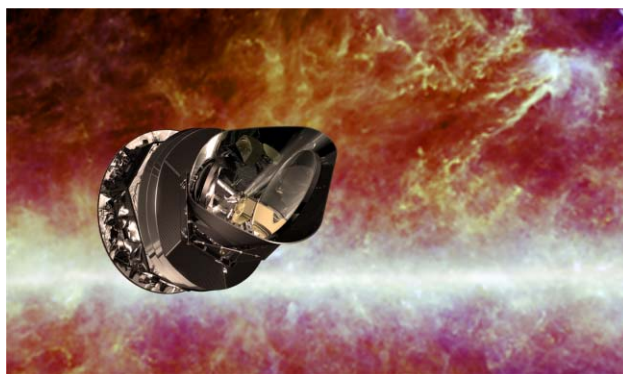
– azaz az Európai Űrügynökség, amelynek idén novemberben hazánk is teljes jogú tagja lett – állította pályára, ilyen jellegű megfigyelések céljából.

Az érdeklődőbb diákoknak még elmondom, hogy a kozmológusok szerint a sötét energia egyenesen oszlik el a térben, nyomása negatív (azaz „szívó hatása” van), ezért az univerzum gyorsulva tágul.

### Az elektron, a proton, a neutron és építőelemeik

Az elektront szemléltető figurát (3. ábra) már az elektromos áram tanításakor érdemes bemutatni. Az elektron felfedezésének tanításakor a táskából ismét

2. ábra. A Planck-űrszonda a kozmikus háttérsugárzás feltérképezésére. [www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/Planck\\_on\\_course\\_for\\_safe\\_retirement](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Planck_on_course_for_safe_retirement)





3. ábra. Az elektront szemléltető figura.

előkerül a kis gömbölyű részecske. Elmondom a diákoknak, hogy a két szem alá azért nem száj, hanem egy hullámvonal került, mert – kísérletileg is bizonyított – az elektronnak hullámtermészete is van. Az elektron tervezésekor azért fektettem erre hangsúlyt, mert ez az elsőként bemutatásra kerülő részecske. A többi részecskénél – ez után – a kettős természet már könnyebben elfogadható. Mindig megjegyzem, hogy az elektron tovább már nem osztható, így elemi részecske. Fontosnak tartom a diákok figyelmét felhívni arra, hogy – a középiskolában tanított kémiában valamilyen értelemben az elektronnal egyenrangú részecskének, mint atomi összetevőnek tekintett – proton és neutron már nem elemi részecskék, ugyanis mindkettőjüket 3-3 kvarknak nevezett elemi részecske alkotja. Itt a figurák segítségével bemutatom, hogyan épül fel a proton két up és egy down kvarkból, hogy végül kijöjjön a töltések összegeként a +1 töltés (4. ábra), illetve a neutronnál két down és egy up kvarkból kialakul az elektromosan semleges neutron. A két kvark megkülönböztetésére az up kvarknál frizurát, a down kvarknál szakállt terveztem. Az up és down kvarkok alakját olyan körcikknek választottam, amelyekből 3 darab (5. ábra) együtt alkot egy egészet (protont vagy neutront). Elmondom a diákok-

5. ábra. A kialakult proton, ahol a kvarkokat a „gluonpárna” fogja össze.



4. ábra. A proton elemi „építőpárnáskái”: a két up és egy down kvark.

nak, hogy ezen kvarkok színeit nem véletlenül választottam pirosnak, kéknek és zöldnek, hiszen – az elektromos és spintöltés (perdület) mellett – a kvarkoknak még úgynevezett színtöltésük is van, és ezek összege a fehéret kell kiadja. Így említem meg nekik a kvantum-színdinamika fogalmát, amely a részecskefizika hangsúlyos kutatási területe. Itt lehet rámutatni, hogy – bár sokan még csak nem is hallottak e tudományterület létezéséről – a szuperszámítógépek felhasználásának jelentős területe ez a kutatás.

A protonok tárgyalásakor képzeletben elhagyhatjuk bolygónkat és megemlíthetjük a DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) műholdat (6. ábra), amely 2004 nyara óta kering bolygónk körül 730 km magaságú poláris, közel napszinkron pályán, és így detektálni tudja a sugárzási övezetekből érkező elektronokat és protonokat. Fontos, hogy a diákokban a proton és az elektron fogalma ne csak az atom alkotórészeként legyen jelen, hiszen a napkitörések során nagy mennyiségű töltött részecske érheti el a Föld környezetét és légkörét. A kedvezőtlen üridőjárás, azaz e

6. ábra. A DEMETER-űrszonda.





7. ábra. A PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) műszer. [http://pamela.roma2.infn.it/index.php?option=com\\_mjfrontpage&Itemid=159](http://pamela.roma2.infn.it/index.php?option=com_mjfrontpage&Itemid=159)

részecskék megzavarhatják a körülöttünk keringő – például távérzékelő, távközlő – műholdak elektronikai rendszerét. A 2005. január 20-i napkitörés során olyan erőteljes fluxusú protonkilökődés történt, amely 15 perc alatt érte el a Földet, szemben az átlagos 2 napnyi időtartammal [2].

A diákok között mindig vannak, akik már hallottak az antirészecskékről is. Megemlíthetjük, hogy antirészecskékkel nem csak a részecskegyorsítóknál találkozhatunk, hiszen 2011-ben nagy számban sikerült a proton antirészecskéjét, az antiprotonot is detektálni az – egy orosz műhold fedélzetén működő – olasz PAMELA műszerrel (7. ábra). A mérések szerint ezeket az antiprotonokat a Föld mágneses tere a belső Van Allen-övben csapdába ejti.

## Részecskék „ragasztóanyaga” – a gluon

A proton és neutron összeállításánál a kis tartópárnával utalok a gluon nevére, kölcsönhatást közvetítő bozonra (8. ábra), és elmondom, hogy a fekete párna az összetartó, „ragasztó” gluont szimbolizálja. Ekkor újra megmutatom, hogy a harmad körcikknek választott up és down kvarkok éppen a gluonpárnába illeszkednek, s így alkotják a protont és a neutronot.

Természetesen jelentősen egyszerűsítet a modellem, hiszen nem beszélek arról, hogy nyolcféle gluon van, nekik is van „színük”, azaz színtöltésük, továbbá léteznek még úgynevezett tengerkvarkok is a protonban, illetve a neutronban. Ezek megbeszélésére normál órán nincs idő, ez kifejezetten csak szakkörön lehetséges. Azt viszont megjegyzem, hogy kvarkok szabadon, önmagukban csak a világegyetem kialakulásának kezdeti időszakában léteztek, jelenleg természetes körülmények között már csak kötött állapotban fordulnak elő. Az univerzum ezen kezdeti korszakát,



8. ábra. A „ragasztó” gluont szimbolizáló fekete párna.

amikor a kvarkok még szabadon léteztek az úgynevezett kvark-gluon plazmában, részecskegyorsítóknál lehet reprodukálni. Kvar-k-gluon plazmát először az Amerikai Egyesült Államokban épített RHIC-ben (Relativistic Heavy Ion Collider) tudtak kimutatni. Megemlíthetjük, hogy ezt a kvark-gluon plazmát sokáig gázként képzelték el, de kiderült, hogy olyan folyadéként viselkedik, amelyben nincs belső súrlódás. A részecskegyorsítóban létrehozott kvark-gluon plazma vizsgálata rendkívül nehéz, és csak közvetett módon lehetséges. Ennek egyik oka, hogy csak  $10^{-24}$  s ideig tartható fenn, és – ugyanúgy, mint az univerzum – tágul, közben hűl [3].

## A müön és a piramisok

A következő részecske, a müön a speciális relativitáselmélet tanításánál jut főszerrephoz, amikor elmondjuk, hogy a Földön is érzékelhető müönök az idődilatáció bizonyítékai. Ekkor már megmutatom a Standard modell hivatalos táblázatát és az általam tervezett figurák beillesztésével készült képét (színes ábra az első belső borítón), hogy el lehessen képzelni a müön helyét a már megismert kvarkok és elektron mellett.

9. ábra. A müön, a dupla szájjvonal a mintegy 200-szoros elektron-tömegre utal.



bozonok (kölsönhatások)

2,4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	1,27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	171,2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> foton
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> elektron-neutrínó	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> müön-neutrínó	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau-neutrínó	91,2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z-bozon
0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> müön	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W<sup>±</sup></b> W-bozon

kvarkok

leptonok



Jelmagyarázat: a részecske tulajdonságait leíró téglalapban középén a részecske jele, fölötté nyugalmi tömege, balra elektromos töltése, alatta spinje, alul pedig teljes neve.



10. ábra. A Nap-piramis Mexikóban. [http://multkor.hu/20080707\\_osi\\_titkokat\\_keresnek\\_a\\_mexikoi\\_nappiramis\\_alatt](http://multkor.hu/20080707_osi_titkokat_keresnek_a_mexikoi_nappiramis_alatt)

A müönt (9. ábra) a kozmikus sugárzás összetevőinek vizsgálata során 1937-ben *Carl Anderson* és PhD tanítványa, *Seth Neddermayer* fedezte fel. „Néhéz elektronnak” is nevezhetnénk, hiszen töltése az elektronnal megegyező, de tömege annak 200-szorososa. A kozmikus sugárzásnál beszélhetünk elsődleges és másodlagos sugárzásról. A müonok ebben a másodlagos sugárzásban találhatók, sebességük megközelíti a fény sebességét. Tudott, hogy a világűrben a kozmikus részecskék eloszlása irányfüggetlen. A Földön megfigyelt müonokra ez nem igaz, ugyanis ha a függőlegessel bezárt szöget növeljük, a müonok száma csökken. Ennek oka az, hogy a Föld felszínére merőlegesen a legvékonyabb a légkör vastagsága. Mérések alapján megállapítható, hogy az észlelt müonfluxus ingadozása egy nap folyamán 3%-nál nem több, tehát napszaktól független, a Nap nem befolyásolja. A Föld felszínén állva másodpercenként 5-10 müon halad át rajtunk, de ez az egészségre ártalmatlan. A müonok földi jelenléte az idődilatació – lásd *Einstein* speciális relativitáselmélete – kísérleti bizonyítéka, hiszen 2,2  $\mu\text{s}$  alatt elektronra és neutrínókra bomlanak, így – ha az idő számukra ugyanúgy telne, mint a földi megfigyelők számára – nem érhetnék el a Föld felszínét. Érdekességként elmondható, hogy a müonok olykor hasznos segítőitársai a régészeknek. 1966-ban például *Luis W. Alvarez* és munkatársai egy 1,8 m<sup>2</sup> felület müondetektort helyeztek el a Kefren-piramis alá fúrt kamrában. E detektor segítségével a piramis falának megbontása nélkül információkat kaptak a piramisban levő üregekről. Ilyen módon akár az esetlegesen elrejtett kincseskamrákat is meg lehet keresni. A mérés elve azon alapszik, hogy ismert a müonfluxus mélységfüggése a felszín alatt, tehát ha az előzetes számításoknál kevesebb müont detektálunk, egy üreg jelenlétére következtethetünk. Hasonló kutatásokat végeznek Mexikóban a világ harmadik legnagyobb piramisa, a 65 m magas Nap-piramis belső szerkezetének feltárására (10. ábra).

Megemlíthetjük az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet és az ELTE által közösen fejlesztett gáztöltésű müondetektort, amely extrém körülmények között is használható és előállítása sem költsé-



11. ábra. A Molnár János termálbarlang Budán. <http://label.web.cern.ch/label/MolnarJanos.html>

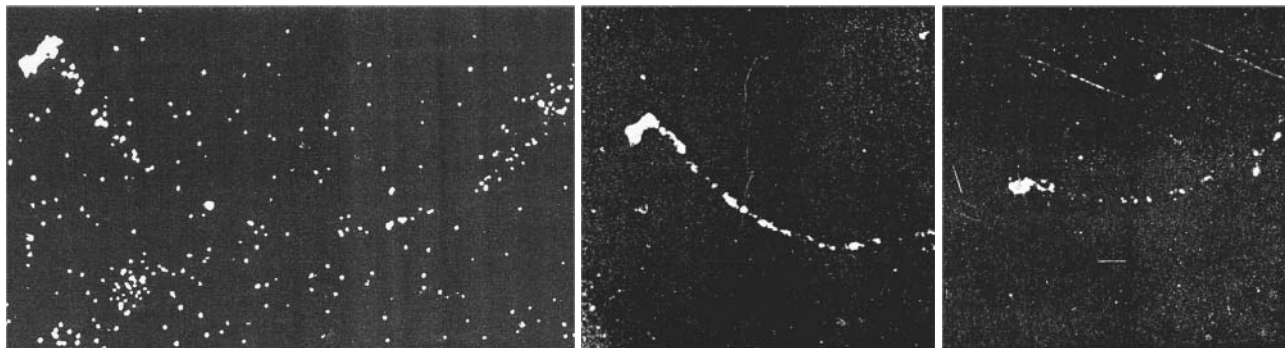
ges. Budapesten, a II. kerületi Molnár János termálbarlang (11. ábra) járatainak feltérképezéséhez a detektort közel 100%-os páratartalmú környezetben kellett használni. A műszert 2011-ben helyezték el, 3 hónapra a barlangot légmentesen lezárták, hogy biztosítsák a megfelelő működéshez szükséges, egyenletes 60%-os páratartalmat [4].

## A tau-részecske

Az elektron és müon mellett néhány szót érdemes ejteni a tau-részecskéről (12. ábra) is, amely szintén a Standard modell egyik leptonja. Ezt a részecskét 1975-ben fedezték fel a kaliforniai SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) részecskegyorsítóban. (A SLAC a világ legnagyobb lineáris részecskegyorsítója, 3,2 km hosszú, ezért tervezésekor a Föld alakját is figyelembe kellett venni.) A felfedezés érdekessége, hogy az nem közvetlenül történt, hanem a tau létezésére a bomlási folyamat energiamérlegének hiányából lehetett következtetni. Elektromos töltése az elektron töltésével megegyező. Élettartama  $10^{-13}$  s, tömege körülbelül kétszerese a protonénak. Ez az egyetlen olyan lepton, amely hadronokká is képes bomlani. Felfedezéséért *Martin Lewis Pell* 1995-ben Nobel-díjat kapott.

12. ábra. A tau-részecske, a tripla szávjonal a részecske extrém nagy tömegére utal.





13. ábra. Az első sikeres felvételek a neutrínó magvisszalökő hatásáról (J. Csikai: Photographic evidence for the existence of the neutrino – *Nuovo Cimento* 5 (1957) 1011).

## A neutrínó-család – amely közelebb visz minket az Ősrobbanás megértéséhez

A neutrínók elektromosan semleges részecskék. Detektálni nehéz, mert a gravitációs kölcsönhatáson kívül csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. Az elektronnak megfelelően az első részecskeszakadályba tartozik az elektron-neutrínó, majd a másodikba a müon párja a müon-neutrínó és végül a harmadik család tagjaként a tau-neutrínó. (A tau-neutrínót csupán 2000-ben sikerült közvetlenül megfigyelni a Chicago melletti levő Tevatron részecskegyorsítóban.) A neutrínó létezését *Wolfgang Pauli* jósolta meg 1930-ban, a  $\beta$ -bomlás vizsgálatakor. A  $\beta$ -bomlás során látványosan nem teljesült az energiamegmaradás törvénye, így Pauli feltételezte, hogy még egy részecskének kell keletkeznie. Közvetlen kísérleti kimutatása 1956-ban sikerült, amelyért 1995-ben – a tau-részecskét felfede-

14. ábra. A három féle neutrínó.



ző Pell-lel együtt – kapott Nobel-díjat *Frederick Reines*. Pauli, amikor értesült a kísérleti bizonyítékról, választáviratában a következőt írta: „Köszönöm az üzenetet, minden megérkezik annak, aki tudja, hogy hogyan kell rá várni.” Fontos megjegyezni, hogy két magyar kutatónak, *Csikai Gyulának* és *Szalay Sándornak* – szintén 1956-ban – ködkamrában sikerült kimutatnia és fényképfelvételeken rögzítenie a neutrínó magvisszalökő hatását (13. ábra). Ezeket a felvételeket 1957-ben publikálták.

A neutrínó az anyaggal gyengén hat kölcsön, gyakorlatilag nem nyelődik el benne, mindenben áthatol. Ezért szellemrészecskének is szokták nevezni. Az általam készített figurák fehér színűkkel és kísérteties alakjukkal is ezt érzékeltetik (14. ábra). Tömege az elektron tömegének 1/2000 részénél is kisebb. Elektromosan semleges, nem hat rá az elektromos és mágneses mező, így a keletkezési helyétől egyenes vonalban érkezik az észlelési ponthoz, megtartva az információt keletkezése körülményeiről mind az impulzus, mind az energia tekintetében. Ebből adódik, hogy előszeretettel használják geofizikai és csillagászati kutatásokban is.

A Föld-neutrínó anti-elektronneutrínó, amely a Föld belsejében található urán és tórium bomlási sorok radioaktív izotópjainak  $\beta$ -bomlásakor keletkezik. 2004-ben mértek először a Föld belsejéből érkező Föld-neutrínókat föld alatti neutrínódetektorral. Ezek a neutrínók nagyban hozzásegítik a tudósokat, hogy jobban megismerjék a Föld belsejében lezajló folyamatokat. A geofizikusok szerint eljön az idő, amikor háromdimenziós komputertomográfiai felvételekhez hasonló képeket lehet készíteni a Föld belsejéről. A Föld-neutrínó segítségével a Föld mágnességének eredetét is hatékonyabban lehet vizsgálni, ezenkívül ellenőrizni lehet vele a különböző geofizikai modelleket. A mérések a modellek helyességét igazolják.

A Nap-neutrínókat is megemlíthetjük tanításunk során, amelyekkel kapcsolatban a középiskolás diákok sok érdekes kutatási eredményt gyűjthetnek össze.

Még egy érdekesség a neutrínók témakörében. Jelenleg a legősibb fény, amit észlelni lehet az Ősrobbanás után 380 000 évvel keletkezett. Ennek oka, hogy ekkor csatolódt le az elektromágneses sugárzás az



15. ábra. A foton, mint részecske.

anyagról. Volt viszont egy másik sugárzás is, ami már jóval korábban lecsatolódott. A neutrínók már 2 másodperc után szabadon mozoghattak és ezért elképzelhető, hogy a neutrínók segítségével az univerzum keletkezése utáni két másodperccel történt eseményekről is szerezhettünk ismereteket. Ennek megvalósítása még a jövő kihívása [5].

## Fény a sötétségben – a foton

A részecskéket szimbolizáló figurák közül a fotót (15. ábra) akkor mutatom be, amikor a fényelektromos jelenség kapcsán eljutunk a fény kettős természetéig. Úgy vélem, ezzel a kézbe fogható kis bábuval a diákoknak könnyebben befogadhatóvá válik a fény részecsketermészete. Itt jegyzem meg, hogy minden részecske hátoldalra felírtam a töltését, spinjét (perdületét) és a spin paritását.

## Újra a kvarkokról

Térjünk vissza a kvarkok világába. Az up és down kvark mellett fontos szerep jut a strange (ritka, furcsa) kvarknak is (16. ábra). Murray Gell-Mann, aki 1963-ban először beszélt a kvarkokról, ezen három elemi rész segítségével fel tudta építeni az akkor ismert több száz részecskét. Ez ekkor még csak elméleti spekuláció volt, hiszen a kvarkok létezését kísérletileg csak 1968-ban bizonyították a SLAC-ban. Itt és az Egyesült Államok keleti partján levő Brookhaven gyorsítóban 1974-ben egyszerre találták meg a – korábban már szintén megjósolt – charm kvarkot is (16. ábra). A charm és anticharm együtt al-

kotja az akkor felfedezett J/psi mezont. Itt érdemes megállni és megjegyezni, hogy a kvarkok vagy hárman alkotnak egy hadront, ilyenkor hívjuk őket bariónoknak, vagy egy kvark és egy antikvark alkot egy hadront, ebben az esetben mezon a nevük. Fontos szabály, hogy a hadronokba zárt kvarkok összetöltése az elektron töltésének csak egész számú többszöröse, színeik összege csak fehér lehet, azaz piros és kék meg zöld, vagy egy szín és antiszíne. Az antianyag létezését P. A. M. Dirac elméleti úton jósolta meg az energiára általa felírt egyenlet egyik lehetséges megoldásaként.

Mindössze négy évvel később 1933-ban Carl Anderson a kozmikus sugárzást vizsgálta ködkamrában és azonosította az antielektront, elterjedtebb nevén a pozitront. A fizikusok munkáját dicséri, hogy a CERN-ben, az Európai Részecskefizikai Kutatóintézetben mért eredmények alapján ma már kijelenthetik, hogy a proton és az antiproton tömege közötti különbség annál is kisebb, mintha az Eiffel-torony tömegét akaránk megmérni úgy, hogy egyszer rászállt egy dongó, egyszer pedig nem.

Megjegyzem, a diákok számára ez a hasonlat sokkal érzékletesebb, hatásosabb, mintha a 10 hatványai-val fejeznék ki a különbséget. Nem igazán tudnak – és megkockáztatom, hogy mi sem – különbséget tenni 10 egyik vagy másik nagyon kicsi, illetve nagyon nagy kitevőjű hatványa között [6].

A bottom vagy ritkábban használt, de lényegesen szebb nevén beauty kvarkot (17. ábra) 1977-ben fedezték fel a Chicago közelében levő Tevatron ré-

16. ábra. A strange (ritka, furcsa) és párja a charm kvark.



17. ábra. A legnehezebbek: a bottom (beauty) és a top kvark.





18. ábra. Két, kölcsönhatást közvetítő részecske a Z- és a W-bozon.

szecskegyorsítóban, amely a CERN Nagy Hadronütköztetőjének 2008-as üzembe helyezéséig a világ legnagyobb energiájú részecskegyorsítója volt. 1995-ben ugyanitt figyelték meg a hatodik, a top kvarkot (17. ábra). A kvarkoknál is beszélhetünk – hasonlóan a leptonokhoz – első (up, és down), második (charm és strange) és harmadik (top és bottom) részecskecsaládról. E kvarkcsaládok – hasonlóan a már említett elektronhoz, müonhoz és tau-részecskéhez – egyre nehezebbek, a figurák számvonalainak száma most is erről árulkodik. A harmadik részecskecsaládba tartozó top kvark tömege a proton tömegének 175-szöröse. Jegyezzük meg, hogy a részecskék esetében a tömeget nem a szokásos kilogrammban adják meg, hanem az Einstein-féle tömeg-energia ekvivalencia egyenlet alapján  $eV/c^2$ -ben fejezik ki! Így a proton tömege  $1 \text{ GeV}/c^2$ , a top kvark tömege  $175 \text{ GeV}/c^2$ . Lényeges hangsúlyozni, hogy ez a nyugalmi tömeget fejezi ki, hiszen a részecskegyorsítóban a relativisztikus tömegnövekedést is figyelembe kell venni. A megtárgyalt hat kvark kapcsán lezárásul elmondhatjuk, hogy 2008-ban az a három japán elméleti fizikus kapta meg a Nobel-díjat, akik megjósolták, hogy 6 kvarktípusnak kell lennie a természetben.

## A legújabb felfedezés: a Higgs-bozon és a többiek

A kvarkok és leptonok tárgyalása után a Standard modell hiányzó elemei, a bozonok következnek. Elmondom a tanulóknak, hogy a természetben négy alapvető kölcsönhatás van és ezek közül háromban kölcsönhatást közvetítő részecskéként szerepelnek a Standard modell bozonjai. Az erős kölcsönhatás tartja össze az atommagot, illetve a protont és neutronot alkotó kvarkokat. E kölcsönhatás közvetítő részecskéi a már korábban említett gluonok. A második, elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéje a foton, amelyet a részecskefizikában  $\gamma$ -részecskének hívnak. A gyenge kölcsönhatás nehezebben magyarázható el, a radioaktív bomlásoknál lehet megérteni, a  $\beta$ -bomlás vizsgálatakor ismerték meg. Közvetítő részecskéi a W- és Z-bozonok (18. ábra). A negyedik, mindenki által jól ismert alapvető kölcsönhatásnál, a gravitációs kölcsönhatásnál eddig nem találtak közvetítő részecskét, de ennek elle-

nére nevet már adtak neki, ez lenne a graviton.

Elérkeztünk a legizgalmasabb részecskéhez, a Higgs-bozonhoz (19. ábra), amelynek létezését Peter Higgs jósolta meg még a hatvanas években és kísérleti kimutatására 2012 nyaráig kellett várni. Ez az anyagi részecskék (kvarkok és leptonok), továbbá az említett kölcsönhatásokat közvetítő részecskék mellett egy harmadik típusú ré-

szecskének tekinthető. Tulajdonképpen egy kvantummező, amellyel való kölcsönhatásként kap a többi részecske tömeget – a Standard modell szerint. Középszintű oktatásban nem, érdekességképpen viszont lejátszhatjuk a Higgs-bozon – a CERN fizikusai által lekottázott – dallamát, amely úgy született, hogy a kísérlet során mért különböző energiaértékeknek különböző hangmagasságokat feleltettek meg.

## További megjegyzések az általam tervezett részecskékhez

A gyenge kölcsönhatás vizsgálatakor derült ki, hogy a kvarkok és leptonok 3 részecskecsaládba sorolhatók. Az első családba tartozók a legkönnyebbek, ezt a figurákon az egyszeres számvonal, vagy hullámvonal jelzi, ha kézbe vesszük a bábukat, érezzük, hogy nagyon könnyűek. A második részecskecsalád elemeinél már dupla számvonalat (hullámvonalat) terveztem és a tömőanyag is nehezebb, ahogy a valóságban is nehezebb részecskékről van szó. A harmadik részecskecsaládnál ennek megfelelően hármasszámvonal (hullámvonal) látható és a tömőanyag itt a legnehezebb. Az antianyagot mindössze egy bábuval szemléltetem (20. ábra), hiszen céloom kifejezetten a Standard modell részecskéinek bemutatása volt, de számítógép képernyőjén könnyen láthatjuk bármelyik részecske antirészecskéjét is a „a színek invertálása” vagy a „negatív-készítés” menüponttal.

19. ábra. A Standard modell 2012-ig kísérletileg hiányzó részecskéje, a Higgs-bozon.







20. ábra. A piros up kvark és antirészecskéje az „antipiros” – invertált piros színű – antiup kvark.

által meghirdetett *Fizika a tudományokban és művészetekben* versenyen.

#### Irodalom

1. [http://www.urvilag.hu/urcsillagaszat\\_europaban/20130325\\_az\\_osrobbanas\\_nyoma\\_nagy\\_felbontasal](http://www.urvilag.hu/urcsillagaszat_europaban/20130325_az_osrobbanas_nyoma_nagy_felbontasal)
2. [http://www.urvilag.hu/hazai\\_kutatohelyek\\_es\\_uripar/20101113\\_nagyenergiaju\\_reszecskek\\_vizsgalata\\_a\\_plazmaszferaban](http://www.urvilag.hu/hazai_kutatohelyek_es_uripar/20101113_nagyenergiaju_reszecskek_vizsgalata_a_plazmaszferaban)
3. [http://atomfizika.elte.hu/magreszfiz/birogabor\\_nemext.pdf](http://atomfizika.elte.hu/magreszfiz/birogabor_nemext.pdf)

## A részecskék sikere

A 2012/13-as tanévben három szolfézs-szakos tanítványom első helyezést ért el a részecskék és fizikai tulajdonságaik – középiskolai szinten elvárható – ismeretetésével a Mérei Ferenc Fővárosi Pedagógiai Intézet

4. Barnaföldi G. G., Bencédi Gy., Hamar G., Melegh H., Oláh L., Surányi G., Varga D.: Kincskeresés kozmikus müonokkal – avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban. *Fizikai Szemle* 61/12 (2011) 401–407.
5. <http://www.csillagaszat.hu/hirek/ko-korai-vilagegyetem/ko-kozmikus-hattersugarzas/meg-kozelebb-az-osrobbanashoz/>
6. <http://www.nature.com/nature/journal/v475/n7357/full/nature10260.html>