

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

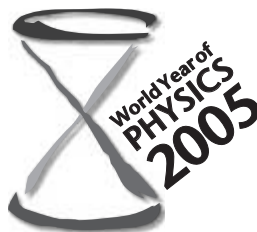
A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Physikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

8. szám

2005. augusztus

NEM ÉLHETÜNK



FIZIKA NÉLKÜL



LÁSSUK A RÉSZECSKÉKET!

Horváth Árpád
Budapesti Műszaki Főiskola
Számítógéptechnikai Intézet

A részecskefizika azon érdekes részét képezi a fizikának, melyben gyakran hallhatunk újabb és újabb, gyakran meglepő eredményekről, így nem véletlen, hogy a Nobel-díjak közül sok erről a területről kerül ki. Alaposabb tárgyalása során előkerülhetnek a XX. századi fizika eredményei: a tömeg–energia ekvivalencia, a relativisztikus tömegnövekedés, de az Ősrobbanás elmélete is. A részecskefizika Standard Modellje rendkívüli pontossággal írja le a részecskék világát, maga a modell viszont bonyolult matematikai hátteret feltételez.

Ahhoz, hogy a diákokhoz közel hozzuk a részecskék világát, segíthet, ha megmutatjuk nekik, hogyan történik a részecskék vizsgálata. Erre egyszerű lehetőség az immár magyarul is elérhető *CERN sajtó kezűleg* honlap, melynek révén vázlatos ismereteket kaphatnak a részecskék világról, beleköstölhetnek a CERN-nek, ennek a nagy európai mag- és részecskefizikai kutatóközpontnak a Nagy Elektron–Pozitron Ütköztető Gyűrűjén, a LEP-en dolgozó tudósok munkájába, és megmérhetik a részecskék világát leíró *Standard Modell* egyik alapvető állandóját, az erős kölcsönhatás csatolását, valamint következtethetnek a neutrínófajták, azaz a részecskecsaládok számára is. További ismeretek szerzésére pedig felhasználhatják az egyre bővülő nyomtatott és internetes irodalmat, melynek felkutatásához a honlap szintén segítséget nyújt. Jelen írásban az alapfogalmak tisztázása után megismerkedünk a *CERN sajtó kezűleg* honlappal.

A fizika világéve keretében tavasszal a legtöbb CERN tagországban – így Magyarországon is három helyszínen – méréseket végeztek az alább ismertetett honlap és program alapján. Ez utóbbiról bővebben a *Részecskefizikai diákműhely* című cikkben (ld. 294. o.) van szó.

Az alapvető kölcsönhatások és a Standard Modell

Négyféle alapvető kölcsönhatást ismerünk: az erős, az elektromágneses, a gyenge és a gravitációs erőt (*1. táblázat*). Ezek az elemi részek között hatnak közvetítő részecskék kicserélésével. Az elemi részek Standard Modellje szerint összesen 12féle elemi (tovább nem bontható) részecske – 6 lepton és 6 kvark – van, továbbá minden részecskének létezik az antirészecskéje is. A Standard Modellről a *Fizikai Szemle* 2003. áprilisi számában és a *Természet Világa* 2000-es *Mikrovilág* című különszámában is részletesen volt szó, ezért itt csak a továbbiakhoz szükséges elemeit emelem ki.

A *2. táblázat*ban az elemi részecskéket három családba soroltuk. A felső két sorban találhatóak a kvarkok, az alsó kettőben a leptonok. Az egyes sorokban jobbra haladva egyre nehezebb részecskék találhatóak. A hat kvark közül a legkönnyebb kettő – az *u* és a *d* – gyakori a természetben, mert ezek építik fel a protont és a neutron. Kvarkok szabadon nem léteznek, kötött állapotaikat hadronoknak nevezzük. A leptonokhoz tartozik az elekt-

1. táblázat		
Az alapvető kölcsönhatások, és közvetítő részecskék		
kölcsönhatás	közvetítő részecske	közv. részecske tömege (GeV/c ²)
erős	gluonok	0
elektromágneses	foton	0
gyenge	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	80,4, 80,4, 91,2
gravitáció	graviton	0

2. táblázat

Az elemi részecskék három családjá

1.	2.	3.
u, d	c, s	t, b
e, ν_e	μ , ν_μ	τ , ν_τ

ron és az elektron két nehezebb társa: a müon (μ) és a tau-részecske (τ), valamint a háromféle neutrínó.

Az erős kölcsönhatás csak a kvarkokra és a belőlük felépülő hadronokra hat, és azt a gluonok közvetítik (angolul *glue* = ragasztó). A kölcsönhatás erősségét egy számmal jellemezzük: az *erős kölcsönhatás csatolásával*. (Gyakran ezt csatolási állandónak nevezik, de ez erősen függ a kölcsönható részecskék energiájától, ezért mi a *csatolás* elnevezést használjuk.)

1983-ban a CERN proton–antiproton ütköztető gyűrűjében fedezték fel a gyenge kölcsönhatás közvetítő részecskéit, a W^\pm - és Z^0 -bozonokat, amiért *Carlo Rubbia* olasz és *Simon van der Meer* holland fizikus 1984-ben fizikai Nobel-díjat kapott. A W -részecskék tömege $80,4 \text{ GeV}/c^2$ (80,4 milliárd elektronvolt energia/fénysebesség-négyzet, $E = mc^2$ alapján), a Z -részecskéé $91,2 \text{ GeV}/c^2$, annyi, mint a 98-as tömegszámú technéciumatom tömege. (Egy nukleon tömege nagyjából $1 \text{ GeV}/c^2$.)

Még a felfedezés előtt rájöttek a kutatók, hogy a modell csak akkor írja le helyesen a valóságot, ha az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatást egy kölcsönhatás – az úgynevezett elektrogyenge kölcsönhatás – két változatának tekintjük. A gyenge kölcsönhatás csak azért megy végbe ritkábban, és azért kisebb a hatótávolsága, mert a közvetítő részecskéknek tömege van, méghozzá elég nagy. A Z - és W -részecskék felfedezése azért is nagy siker volt, mert ezeknek a részecskéknek a tömege egész pontosan az elektrogyenge kölcsönhatás elmélete által jósolt érték volt.

A Nagy Elektron–Pozitron Ütközőgyűrű és a jövő ütköztetői

A *Nagy Elektron–Pozitron Ütközőgyűrű* (*Large Electron–Positron Collider*, LEP) a CERN legfőbb gyorsítója volt 1989-től 2000-ig. Egymással szemben gyorsított elektron- és pozitronnyalábokat. Ezek energiáit kezdetben úgy állították be, hogy a gyenge kölcsönhatást közvetítő Z^0 -bozon tömegének megfelelő összenergiával, $91,2 \text{ GeV}$ -vel rendelkezzen az ütköző elektron és pozitron. Ezen az energián úgynevezett rezonancia jön létre, jelentősen megnövekedik a Z^0 keletkezésének valószínűsége. Ennek a bomlástermékeit figyelhetjük meg a LEP detektoraiiban. Később az energiát folyamatosan növelték, így lehetővé vált a W -pár (W^+ és W^- , 161 GeV), majd a Z^0 -pár keltése (184 GeV). Ezek tanulmányozása már nehezebb, mint az egy- Z -eseményeké.

A LEP-ben elektron- és pozitronnyalábok keringenek egymással szemben ugyanabban a csőben, kicsit eltérő pályán. A LEP gyorsító négy pontján található egy-egy

detektor, ahol az egymással szemben keringő elektron- és pozitronnyalábok pályája metszi egymást. Itt van esély rá, hogy elektron és pozitron ütközzék.

Érdeemes megemlíteni, hogy töltött részecskék körkörös gyorsításakor elektromágneses sugárzás, szinkrotronsugárzás lép fel. Azonos energián, kisebb tömegű részecskék esetén ez sokkal nagyobb veszteséget okoz (a veszteségarány a tömegarány negyedik hatványával fordítottan arányos). A LEP-en elektron gyorsítása esetén körönként 1 GeV veszett el ilyen módon. Sokkal nagyobb energiák érhetőek el protonok ütköztetésével. Az elektron–pozitron ütközés viszont sokkal tisztább folyamat, mint a hadronoké (protoné és antiprotoné), ugyanis a protonban három kvark mellett ott vannak az őket összetartó gluonok, valamint a rövid időtartamokra megjelenő (virtuális) kvark–antikvark párok, az elektron (pozitron) pedig elemi részecske, nem összetett. Emiatt a hadronütközések elemzése sokkal nehezebb, méréskor általában pontatlanabb értékeket kapunk. A LEP-nél lényegesen nagyobb energiájú körkörös elektrongyorsító építése gyakorlatilag lehetetlen a nagy energiaveszteségek miatt. A nagyobb energiák eléréséhez óriási lineáris gyorsítót kell építeni, amely nemzetközi összefogással lehetséges.

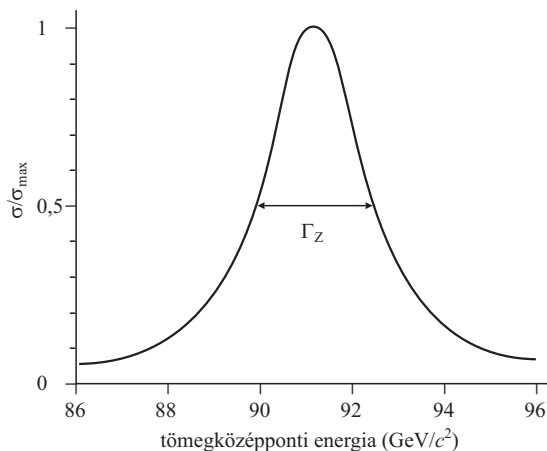
Jelenleg a *Hadronütköztető Gyűrű* (*Large Hadron Collider*, LHC) épül a LEP alagútjában, amely protonokat ütköztet majd protonokkal $7 \text{ TeV} = 7000 \text{ GeV}$ energiával protononként.

Az ütközés során keletkező részecskék észlelésére szolgáló detektorok több rétegből állnak. A belső rétegek vizsgálják a töltött részecskék pályáját. Bennük ismert nagyságú mágneses teret hoznak létre, amelyben az elektromos töltéssel rendelkező mozgó részecskékre Lorentz-féle erő hat, melynek hatására a részecskék pályája eltér az egyenestől. A pálya görbületéből megállapítható az itt áthaladó részecskék lendülete. Ezen kívül található két réteg, amely a részecskék összenergiáját hivatott mérni. Az elektromágneses kaloriméter az elektronokét, pozitronokét és fotonokét, a hadronkaloriméter a kvarkokból felépülő hadronokét. A legkülső réteg fogja fel a müonokat. A keletkezett neutrínók nem hagynak nyomot sehol, rájuk a hiányzó lendületből és energiából következtethetünk.

Az eseménytípusok és az erős csatolás meghatározása

A *CERN saját kezűleg* honlap a *Hands on CERN* honlap angol változatának magyar fordítása. A magyar fordítás létrejötté óta az eredeti honlap jelentősen frissült és bővült, több hasznos ábrával és animációval gazdagodott.

A honlap központi része az a JAVA program, amellyel a LEP eseményeit tudjuk vizsgálni: forgatni, nagyítani, berajzolni az egyes detektorrétegek helyét. A vizsgált események a LEP-nek a DELPHI nevű detektorából származnak. Az ütközésekben a pozitron és az elektron energiája külön-külön $45,6 \text{ GeV}$, így összenergiájuk megegyezik a Z -bozon nyugalmi energiájával, $91,2 \text{ GeV}$ -vel, emiatt nagy valószínűséggel ez a részecske keletkezik, amely azonban szinte azonnal tovább bomlik. Négyféle bomlás lehetséges. Keletkezhet ismét elektron–pozitron pár, mü-



1. ábra. A Z-bozon keletkezésének valószínűsége az energia függvényében az itt ábrázolt függvénnyel arányos. A függvény félértékszélességét nevezik rezonanciaszélességnek (Γ_Z). A rezonanciaszélesség annál nagyobb, mennél többféle bomlási lehetőség van, és fordítottan arányos a részecske élettartamával.

on és antimüon, tau-részecske és antitau-részecske, vagy keletkezhet egy kvark-antikvark pár.

Annak a valószínűsége, hogy Z-bozon keletkezik, a fenti energiánál a legnagyobb, de más energiáknál sem nulla. Az energia szerinti valószínűség a Breit-Wigner-féle rezonanciaképlet segítségével határozható meg, amelynek a grafikonja az 1. ábrán látható.

Az eseménynézegetőben lényegében ugyanazt az ábrát látjuk, mint a CERN-ben dolgozó fizikusok. Lehetőség van az egyes detektorrétegek határainak megjelenítésére, mellyel könnyebben meg tudjuk határozni a részecskenyom elhelyezkedését, és ezzel a részecsketípust.

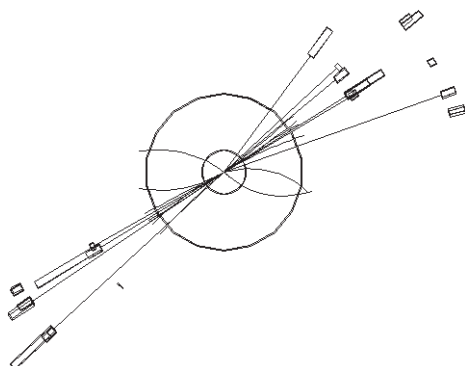
Hogyan tudjuk megkülönböztetni a különböző bomlási módokat? Az egyes részecsketípusok a detektor különböző rétegeiben különféle nyomokat hagynak. A lepton-eseményeket következőképpen lehet felismerni:

elektron-események: két nyom, amely az elektromágneses kaloriméterben (EMCal) végződik;

müon-események: két nyom, amely a müondetektorban (MuDet) végződik;

τ -események: 2, 4 vagy 6 töltött részecske-nyom.

2. ábra. Egy kétdzsetes esemény. A honlapon a két dzsetet két külön szín jelöli, itt a fekete-fehér képen más-más sötétségű a kettő. A sötét körök a részecskepálya vizsgálatát végző belső detektorréteg körvonalaikat mutatják. Jól látszik, hogy a töltött részecskék nyoma itt elhajlik a mágneses tér miatt. A külső részen levő hasábok nagysága a kaloriméterekben leadott energia nagyságával arányos. A bal alsó kereszt egy müon nyoma a müonkamrában.



A kvarkesemények során, mindkét kvarkból rengeteg hadron jön létre, a detektorban úgynevezett dzsetet (angolul *jet*) látunk: sok hadron nyomát nagyjából egy irányban (nevezhetnénk hadronpázmának is). Leggyakrabban két dzset jön létre, ekkor ezek ellentétes irányban haladnak, hiszen a lendület eredője nulla. Egy ilyen esemény fekete-fehér képe látható az 2. ábrán.

Kicsit ritkábban előfordul háromdzsetes esemény is. Létezése úgy magyarázható, hogy az egyik kvark egy nagy energiájú gluont bocsát ki, és ez hozza létre a harmadik dzsetet. A háromdzsetes események aránya tehát jellemzi az erős kölcsönhatás csatolását. A csatolás meghatározásához meg kell számolnunk a két- és háromdzsetes eseményeket ($N_{3\text{-dzset}}$, $N_{2\text{-dzset}}$), ami egyszerű, hiszen a kiértékelő programok szoftverei az úgynevezett dzsetkereső algoritmusokkal megtalálják az egyes dzseteket, és a program különböző színekkel jelölik azokat. A program egy paramétere, a felbontási paraméter jellemzi azt, hogy „milyen távol” lévő nyomokat tekintsen a program ugyanahhoz a dzsethez tartozó nyomnak. Minél nagyobb ennek a paraméternek az értéke, annál nagyobb a valószínűsége, hogy a program közeli dzseteket azonosnak vesz, például egy háromdzsetes eseményt kétdzsetesnek vél. Ez azonban szimulációval pontosan figyelembe vehető. A csatolási állandó értéke

$$\alpha_s = k \frac{N_{3\text{-dzset}}}{N_{2\text{-dzset}}},$$

ahol a k értéke függ az előbb említett felbontási paramétertől, annak függvényében egy grafikonról leolvasható.

Mivel véges számú eseményünk van, ezért az eredményt statisztikai hiba is terheli. A teljes hiba a következő módon számolható:

$$\frac{\Delta \alpha_s}{\alpha_s} = 0,1 + \frac{1}{\sqrt{N_{3\text{-dzset}}}} + \frac{1}{\sqrt{N_{2\text{-dzset}}}}.$$

A 0,1 a k hibájából származó tag. Már akár 100 esemény esetén is elfogadható az eredmény hibája. Az eseménynézegetőben összesen 1000 Z-eseményt vizsgálhatunk meg.

A részecskecsaládok számának kiszámítása

A mérés során szerzett adatokból meghatározhatjuk a részecskecsaládok számát is. Összesen nagyjából 20 millió eseményből határozták meg a LEP-en, hogy ez az érték $2,994 \pm 0,012$. Az ezrelékes relatív pontosság eléréséhez szükséges események száma elég nagy. Száz esemény esetén a hiba nagysága nagyjából 6 körül van, de tíz feletti érték is könnyen előfordulhat, ha a véletlen úgy hozza, hogy nagyon kevés elektron-eseményünk lesz. Ezer esemény esetén másfél körül, tízezer esemény esetén fél körül, százezer esemény esetén 0,17 körül van a hiba nagysága. Ebből jól látszik, hogy igen nagyszámú esemény vizsgálata szükséges.

A méréshez szükséges a Z-bozon tömege és bomlási szélessége (Γ_Z) is, melyeket a LEP-en az általunk tárgyalt

méréstől függetlenül meghatározták. A Standard Modell szerint az x ($x = e, \mu, \tau$, hadron, $n =$ nem látható = neutrínó) esemény előfordulásának N_x várható száma:

$$N_x = N k \Gamma_e \Gamma_x.$$

Itt az N az összes észlelt látható esemény száma, k egy állandó, amely függ a Z -bozon tömegétől és bomlási szélességétől, valamint az ütközés jellemzőitől: attól, hogy mennyi elektron és pozitron jön egymással szemben, mekkora a nyaláb keresztmetszete. Ennek értéke esetünkben $k = 5,964 \text{ GeV}^{-2}$. Az Nk szorzatot továbbiakban K -val jelölöm. A Γ_x az x bomláshoz tartozó bomlási szélesség, az összes bomlástípusra összegezve a Γ_x -eket a Γ_Z -t kapjuk.

Az N_e ismeretében a Γ_e érték kiszámolható, ennek ismeretében pedig a többi Γ_x érték is:

$$\Gamma_e = \sqrt{\frac{N_e}{K}}, \quad \Gamma_x = \frac{N_x}{\Gamma_e K}.$$

Ezek hibája az alábbi képletek szerint kapható:

$$\Delta \Gamma_e = \frac{1}{2\sqrt{K}}, \quad \Delta \Gamma_x = \frac{\Delta N_x}{\Gamma_e K} + \frac{N_x \Delta \Gamma_e}{\Gamma_e^2 K}.$$

Az $A_x = \Gamma_x / \Gamma_Z$ elágazási arányok, és azok ΔA_x hibái ebből kiszámíthatók a $\Gamma_Z = 2,495 \text{ GeV}$ -vel való osztással. A láthatatlan (neutrínós) események A_n arányát és annak ΔA_n hibáját a következőképp kapjuk:

$$A_n = 1 - (A_e + A_\mu + A_\tau + A_{\text{hadron}}), \\ \Delta A_n = \Delta A_e + \Delta A_\mu + \Delta A_\tau + \Delta A_{\text{hadron}}.$$

A Standard Modell alapján kiszámolható, hogy hány-szor annyi a neutrínók keletkezésének a valószínűsége, mint elektron–pozitron páré. Erre 1,979-et kapunk.

A neutrínótípusok és ezzel a részecskecsaládok száma tehát kiszámolható, ha az összes láthatatlan esemény arányát elosztjuk az egyfajta neutrínó arányával:

$$N_v = \frac{A_n}{1,979 A_e}, \quad \Delta N_v = \frac{\Delta A_n}{1,979 A_e} + \frac{A_n \Delta A_e}{1,979 A_e^2}.$$

Például ezer eseménynél, ha $N_e = 45$, $N_\mu = 46$, $N_\tau = 25$, $N_{\text{hadron}} = 884$, akkor $N_v = 3,284991$, $\Delta N_v = 1,547977$ értékeket kapunk.

További megjegyzések a honlapról

A mérések és a hibaszámítás részletei a honlapon megtalálhatóak a mérés menüpontban. Emellett a honlapon szerepel a mérés megértéséhez fontos összes ismeret leírása: az elméleti háttér (részecskék, kölcsönhatások), a gyorsítók működése, továbbá a detektorok felépítése és működése. Számos ábra segíti a megértést.

A magyarra fordított honlap az eredetinek nem egyszerű fordítása. A magyar változat tartalmazza az összes Nobel-díjas fizikust, akinek a részecskefizika elméleti vagy kísérleti ágához komolyabb köze van, valamint található benne egy kis alapfogalom-gyűjtemény is.

Jelentősen eltér az angolótól az irodalom- és honlapjegyzék is. Több magyar nyelvű irodalom található benne, mely hasznos olvasmány lehet a középiskolások és tanáraik számára is. Az egyes részecskefizikai kutatóintézetek magyar nyelvű leírását a *Wikipédia* nevű internetes lexikonban gyűjtöttem össze. Részletes leírás található benne a CERN-ről, a LEP és LHC gyorsítókról, valamint a témánktól távolabb eső neutrínófizikáról is. A *Wikipédia* egyik előnye egyben hátrány is lehet: bárki, akinek internetelérése van, szerkesztheti. A részecskefizikához kapcsolódó cikkeket rendszeresen figyelem, bővíttem. A bővítéshez szívesen veszek minden segítséget.

Hasznos honlapok

CERN saját kezűleg honlap:

<http://www.szgti.bmf.hu/fizika/cern-sajatkuzuleg>

Hands on CERN honlap:

<http://hands-on-cern.physto.se>

A *Wikipédia* CERN szócikke:

<http://hu.wikipedia.org/wiki/CERN>

BOLYGÓMOZGÁS ÉS GEOMETRIA II.: FEYNMAN

»ELVESZETT ELŐADÁSA«

P.A. Horváthy

Laboratoire de Mathématiques et de Physique Théorique
Université de Tours, Franciaország

Feynman „elveszett előadása”

A közelmúlt feltűnést keltő eseménye volt Feynman 1964-es előadásának publikálása [1]. Ebben a Nobel-díjas fizikus részben *Newton Principiáit* követve, részben – ahol azt nem érti – saját feje után, elemi geometriai módszerekkel vezet le a bolygómozgás törvényeit.

Fejtegetése helyenként intuitív és nem teljesen kidolgozott; talán ezért is maradt ki Feynman híres tankönyvsorozatából. Az előadást sokáig elveszettnek hitték; csak Feynman hagyatékának rendezése során bukkant elő pár kézzel firkantott feljegyzés. Gondolatmenete jó kiegészítés *Maxwell* előző cikkünkben [2] bemutatott geometriai közelítéseihez.