

# Lássuk a részecskéket!

Horváth Árpád

Budapesti Műszaki Főiskola

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Főiskolai Kar

Számítógéptechnikai Intézet

8000 Székesfehérvár, Budai út 45.

Telefon: (06) 22/316-260 125-ös mellék

Email: ahorvath@szgti.bmf.hu

Honlap: www.szgti.bmf.hu/harp

**Kivonat**— A fizika világevének alkalmából európa több országában végeznek majd párhuzamosan részecskefizikai méréseket középiskolások az alább bemutatott honlap és program segítségével. A mérésekkel párhuzamosan megismerkednek a részecskefizika nagy pontossággal ellenőrzött modelljével, a standard modellel, és a részecskefizikai kutatások eszközeivel: a gyorsítókkal és a detektorokkal. A mérés a CERN-beli LEP gyorsító adatait megjelenítő JAVA programmal történik. A mérés során meghatározható az erős kölcsönhatás csatolása és a részecskecsaládok száma.

A részecskefizika egy olyan érdekes részét képezi a fizikának, melyben gyakran hallhatunk újabb és újabb, gyakran meglepő eredményekről. A Nobel-díjak közül sok erről a területről kerül ki. Előkerülhetnek alaposabb tárgyalása során 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 háttérrel rendelkezik.

Ahhoz, hogy a diákokhoz közel hozzuk a részecskék világát, segíthet, ha megmutatjuk nekik, hogyan történik a részecskék vizsgálata. Erre egy nagyszerű lehetőség az immár magyarul is elérhető *CERN sajátkezüleg* honlap, amellyel vázlatos ismereteket kaphatnak a részecskék világáról, belekóstolhatnak a CERN-nek, a nagy európai mag- és részecskefizikai kutatóközpontnak a nagy elektron–pozitron ütköztetőgyűrűjén, a LEP-en dolgozó tudósok munkájába, és megmérhetik a részecskék világát leíró *standard modell* egyik alapvető állandóját, az erős kölcsönhatás csatolását, valamint következtethetünk 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 sajátkezüleg honlappal.

A következő év lesz a fizika éve, a relativitáselmélet megszületésének centenáriuma. Tavasszal a legtöbb CERN tagországban méréseket végeznek a CERN-sajátkezüleg különböző nyelvű változataival. Ezek a mérések a CERN 18 tagországának 80 intézetében zajlanak 2005. március 7. és március 18. között. Magyarországon Debrecenben és Székesfehérváron lesznek mérések. Szívesen segíték hasonló program megszervezésében más helyszíneken.

I. táblázat. Az alapvető kölcsönhatások, és közvetítő részecskék

kölcsönhatás	közvetítő	tömeg (GeV/c <sup>2</sup> )
erős	gluonok	0
elektromágneses	foton	0
gyenge	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup>	80,4; 80,4; 91,2
gravitáció	graviton	0

## AZ ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK ÉS A STANDARD MODEL

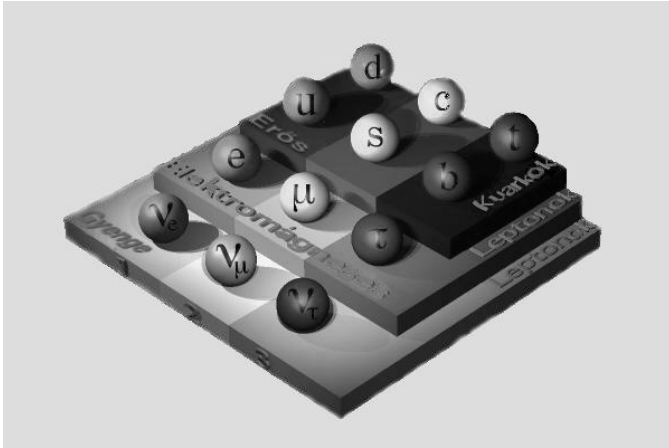
Négyféle alapvető kölcsönhatást ismerünk, az erős, az elektromágneses, a gyenge és a gravitációs erőt. Ezek az elemi részek között hatnak közvetítő részecskék kicserélésével. Az elemi részek standard modellje szerint összesen 12 féle elemi (tovább nem bontható) részecske, 6 lepton és 6 kvark van, továbbá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

A II. táblázatban találhatóak, az elemi részecskék, melyeket három családba sorolhatunk. A fenti két sorban találhatóak a kvarkok, az alsó kettőben a leptonok. Az egyes sorokban jobbfelé 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 állapotukat hadronoknak nevezzük. A leptonokhoz tartozik az elektron, és az elektron két nehezebb társa: a müon ( $\mu$ ) és a tau-részecske ( $\tau$ ), valamint a háromféle neutrínó.

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

II. táblázat. Az elemi részecskék három családja

1.	2.	3.
$u$	$c$	$t$
$d$	$s$	$b$
$e$	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$



1. ábra. A részecskék és kölcsönhatások kapcsolata. Egy ábra a honlapról.

1983-ban a CERN proton–antiproton ütköztetőgyűrűjében 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 technécium atom 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 elektromgyenge kölcsönhatás – két változatának tekintjük. A gyenge kölcsönhatás csak azért megy végbe ritkábban, és azért kisebb a hatótávolsága, mert a közvetítőrészecskéknek 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 elektromgyenge kölcsönhatás elmélete által jósolt érték volt.

#### A NAGY ELEKTRON–POZITRON ÜTKÖZŐGYŰRŰ ÉS A JÖVŐ ÜTKÖZTETŐI

A nagy elektron–pozitron ütközőgyűrű ( $LEP = \text{Large Electron–Positron Collider}$ ) a CERN legfőbb gyorsítója volt 1989-től 2000-ig, 11 éven keresztül. 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 detektoraiban. Később az energiát folyamatosan növelték, lehetővé vált a  $W$ -pár ( $W^+$  és  $W^-$ ,  $161 \text{ GeV}$ ) majd a  $Z^0$ -pár keltése ( $184 \text{ GeV}$ ). Ezek tanulmányozása már nehezebb, mint az egy- $Z$ -eseményeké.

A LEP-ben egymással szemben keringenek elektron- és pozitronnyalábok 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.

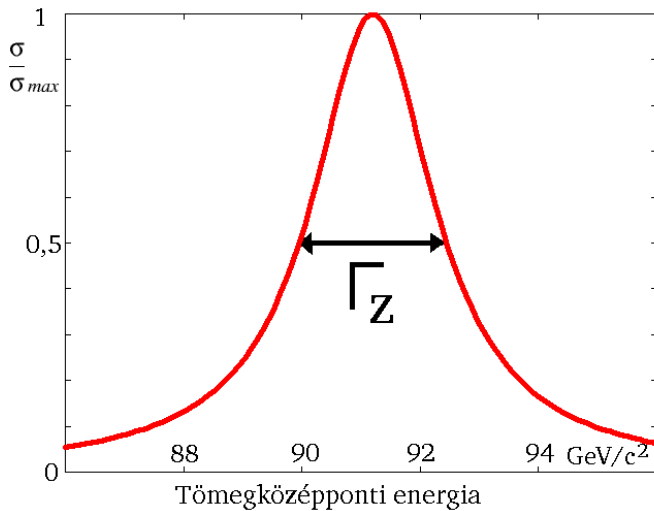
Érdeemes megemlíteni, hogy töltött részecskék körkörös gyorsításakor elektromágneses sugárzás, úgynevezett szinkrotron sugárzás lép fel. Azonos energián kisebb tömegű részecskék esetén ez sokkal nagyobb veszteséget okoz (a veszteségarány a tömegarány negyedik hatványával fordítottan arányosan). A LEP-en elektron gyorsítása esetén körönként  $1 \text{ GeV}$  vesztett el ily módon. Sokkal nagyobb energiák érhetőek el protonok ütköztetésével, az elektron–pozitron ütközés viszont sokkal tisztább folyamat, mint a hadronoké (protoné, antiprotoné), ugyanis a protonban három kvark mellett ott vannak az őket összetartó gluonok valamint rövid időtartamokra megjelenő (úgynevezett 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 energiavesztések miatt. A nagyobb energiák eléréséhez óriási lineáris gyorsítót kell építeni, amely nemzetközi összefogással lehetséges.

Jelenleg a nagy hadronütköztető-gyűrű ( $LHC = \text{Large Hadron Collider}$ ) 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 elektromágneses töltéssel rendelkező mozgó részecskékre Lorentz-féle erő hat, amelynek hatására a részecskék pályája az egyenestől eltér. 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 sajátkezüleg honlap a *Hands on CERN* honlap angol változatának magyarítása. A fordítás óta az eredeti honlap



2. ábra. A Z-bozon keletkezésének valószínűsége az energia függvényében az itt ábrázolt függvénnyel arányos. A függvény félérték szélességét nevezik rezonanciaszélességnek ( $\Gamma_Z$ ). A rezonanciaszélesség annál nagyobb, mennél többféle bomlási lehetőség van, és fordítottan arányos a részecske élettartamával.

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, berajzoltani 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 GeV, így összenergiájuk megegyezik a Z-bozon nyugalmi energiájával 91,2 GeV-vel, emiatt nagy valószínűséggel ez a részecske keletkezik, amely szinte azonnal tovább bomlik. Négyféle bomlás lehetséges. Keletkezhet ismét elektron–pozitron pár, keletkezhet müon és antimüon, keletkezhet tau-részecske és antitau-részecske, vagy keletkezhet egy kvark–antikvark pár.

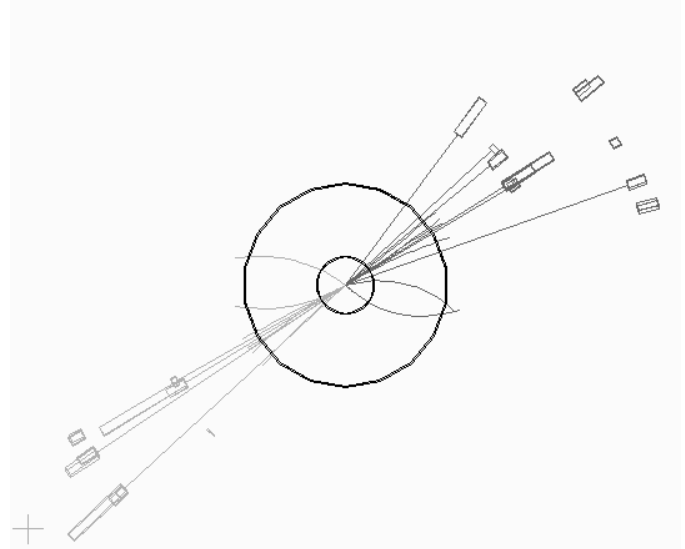
Annak a valószínűsége, hogy Z-bozon keletkezik, a fenti energiánál a legnagyobb, de más energiáknál sem nulla. Az energia szerinti valószínűség a Breit–Wigner rezonanciaképlet segítségével határozható meg, amelynek a grafikonja a 2. ábrán látható.

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? A detektor különböző rétegeiben különféle nyomokat hagynak az egyes részecsketípusok.

A leptoneseményeket következőképpen lehet felismerni:

- elektron-események: két nyom, amely az elektromágneses kaloriméterben (EMCal) végződik
- müon-események: két nyom, amely a müon detektorban (MuDet) végződik



3. ábra. Egy két-dzsetes esemény. A honlapon a két dzsetet két külön szín jelöli, itt a fekete-fehér képen más sötétségű a kettő. A sötét körök a részecskepálya vizsgálatát végző belső detektorréteg körvonalait 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.

- $\tau$  (tau)-események: 2, 4 vagy 6 töltött részecske-nyom

A kvarkesemények során, mindkét kvarkból rengeteg hadron jön létre, a detektorban úgynevezett *dzsetet* (angol írásmódja jet) látunk: sok hadron nyomát nagyjából egyirányban (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 3. ábrán.

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

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

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 eseménynézetekben összesen 1000 Z-eseményt vizsgálhatunk meg.

#### A RÉSZECSEKESALÁDOK 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 3. A 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 ( $\Gamma_Z$ ) is, melyeket a LEP-en az általunk tárgyalt méréstől függetlenül meghatároztak. A standard modell szerint az  $x$  ( $x = e, \mu, \tau, \text{hadron}, n = \text{nem látható} = \text{neutrínó}$ ) esemény előfordulásának  $N_x$  várható számára:

$$N_x = Nk\Gamma_e\Gamma_x.$$

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  $k = 5,964 \frac{1}{\text{GeV}^2}$ . Az  $Nk$  szorzatot továbbiakban  $K$ -val jelölöm. A  $\Gamma_x$  az  $x$  bomláshoz tartozó bomlási szélesség, az összes bomlástípusra összegezve a  $\Gamma_x$ -eket a  $\Gamma_Z$ -t kapjuk.

Az  $N_e$  ismeretében a  $\Gamma_e$  érték kiszámolható, ennek ismeretében pedig a többi  $\Gamma_x$  érték is:

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

Ezek hibája az alábbi képletek szerint kapható:

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

Az  $A_x = \frac{\Gamma_x}{\Gamma_Z}$  elágazási arányok, és azok  $\Delta A_x$  hibái ebből kiszámíthatóak a  $\Gamma_Z = 2,495\text{GeV}$ -vel való osztással. A láthatatlan (neutrínós) események  $A_n$  arányát és annak  $\Delta A_n$  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 hányszor annyi neutrínó 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:

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

Például ezer eseménynél, ha  $N_e = 45$ ,  $N_\mu = 46$ ,  $N_\tau = 25$ ,  $N_{\text{hadron}} = 884$ , akkor  $N_\nu = 3,284991$ ,  $\Delta N_\nu = 1,547977$  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 és a detektorok felépítése és működése. Sok jó ábra segíti a megértést.

A magyarított 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 alapfogalomgyűjtemény is.

Jelentősen eltér az angolótól az irodalom és honlapjegyzék, 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 internet elérése van, szerkesztheti. A részecskefizikához kapcsolódó cikkeket rendszeresen figyelem, bővíttem. A bővítéshez szívesen veszek segítséget.

#### HASZNOS HONLAPOK

- CERN sajátkezüleg honlap: <http://www.szgti.bmf.hu/fizika/cern-sajatkezuleg>
- Hands on CERN honlap: <http://hands-on-cern.physto.se>
- A Wikipédia CERN szócikke: <http://hu.wikipedia.org/wiki/CERN>
- A Wikipédia neutrínó szócikke: <http://hu.wikipedia.org/wiki/neutrínó>
- A fizika világévének honlapja (WYP): <http://wyp.teilchenphysik.de>