

# Lepton-párok és vektor mezonok két-foton keltésének vizsgálata a LEP ütköztető L3 detektorával

Doktori értekezés tézispontjai

**DEBRECZENI Gergely**

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

Gergely.Debreczeni@cern.ch

**Fizika Doktori Iskola**

(Vezető: Dr. Horváth Zalán)

**Részecskefizika és Csillagászat Program**

(Vezető: Dr. Csikor Ferenc)

**Témavezetők:**

**Vesztergombi György**

Eötvös Loránd Tudományegyetem - Atomfizika tanszék, KFKI-RMKI

**Maria Novelle Kienzle-Focacci**

European Organisation for Nuclear Research (CERN), University of Geneva

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Budapest

2008



# 1 Bevezetés

A klasszikus elektrodinamika szerint a fénysugarak kölcsönhatás nélkül, a Maxwell-egyenletek linearitásából származtatható szuperpozíció elvét követve keresztezik egymást. Egészen más a helyzet a kvantum-elektrodinamika keretein belül.

Nagy energiával rendelkező fotonok fermion párokba fluktuálnak és ezek a fermion párok már kölcsönhathatnak más fotonokkal, így megvalósítva a foton-foton kölcsönhatást. Az ilyen folyamatok hatáskeresztmetszete rendkívül kicsi kis energiákon (például a látható fény energia-tartományában). A tárológyűrűs részecskeütköztetők nagyenergiás elektron-pozitron nyalábjainak sugárzási terében azonban már találhatóak elegendően nagy energiával rendelkező (virtuális) fotonok. Ezen fotonok túlnyomó többsége az elektronnyalábbal párhuzamosan sugárzódik ki, evvel egy effektív fotonnyalábot hozva létre, amely lehetővé teszi a foton-foton ütközések kísérleti megvalósítását.

A két-foton kölcsönhatások tanulmányozása már évtizedek óta folyik. A nagyenergiás elektron-pozitron ütköztetők segítségével a két-foton folyamatok gazdag választékának tanulmányozására nyílt lehetőség. A LEP ütköztetőt egyedülállóvá teszi az is, hogy segítségével olyan fázistértartományokban is lehetőség nyílik mérések elvégzésére, amelyek máshol nem elérhetők.

A két-foton reakciók a LEP2 meghatározó - legnagyobb hatáskeresztmetszettel rendelkező - folyamatai. A töltött lepton párok keltésének tanulmányozásával széles kinematikai tartományokban ellenőrizhetjük az  $\mathcal{O}(\alpha^4)$  rendű QED számításokat. Ezek a reakciók az  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$  és a  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\tau^+\tau^-$  folyamatok.

Legalacsonyabb rendben 36 Feynman diagram írja le a  $e^+e^-$  párok és 12 a  $\mu^+\mu^-$  valamint a  $\tau^+\tau^-$  párkeltés folyamatokat. A  $\mu^-$  és  $e^-$  párok keltésének vizsgálatával nem csak a QED számításokat ellenőrizhetjük nagy pontossággal, hanem tanulmányozásuk rendkívül fontos a detektorok alacsony energiás viselkedésének megértésében és más két-foton folyamatok analizálásában. A  $\tau$  párok vizsgálatával pedig annak elektromos és mágneses momentumát határozhatjuk meg. Ezen folyamatokat leíró hatáskeresztmetszet faktorizációs

tulajdonságai miatt, a két foton luminozítás függvény segítségével a  $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$  folyamatok amplitudója is megmérhető.

A mezonok egész spinnel rendelkező erősen kölcsönható részecskék. Minden ismert mezon egy db kvark-antikvark párból - az úgynevezett valencia kvarkokból - valamint kvark-antikvark párok és virtuális gluonok "tengeréből" áll. A vektor mezonoknak páratlan paritásuk és 1-es spinjük van, a kvark és antikvark spinje párhuzamos, így a vektor mezonok és a foton kvantumszámái megegyeznek ( $(J^{PC} = 1^{--})$ .) Ilyen vektor mezonok például a  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $J/\Psi$  részecskék.

A vektor mezonok két foton által való keltésének vizsgálata hosszú és érdekes múlttal bír. A vektor mezon dominancia elvétől kezdve, a pontszerű foton-gluon csatoláson, a t-csatornás faktorizációs és a "semi-hard" közelítéseken, valamint az általánosított Brodsky-Lepage modellen keresztül, az újabb "color-dipole" elméletekig rengeteg próbálkozás született ezen folyamatok leírására és megértésére. A  $\gamma\gamma \rightarrow \rho^0\rho^0$ ,  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  és  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  reakciók vizsgálatával és a nehezen értelmezhető  $\gamma\gamma \rightarrow f_2f_2$  folyamat megfigyelésével pontosíthatjuk ezirányú ismereteinket. Az inkluzív két foton  $J/\Psi$  keltés analizálásával pedig többek között a foton gluon tartalmáról kaphatunk információkat.

## 2 Célkitűzések

A dolgozat elsődleges célkitűzése a két-foton részecskekeltési mechanizmusok tulajdonságainak jobb megismerése, feltárása.

Ezen célok egyike a töltött lepton-párok két-foton keltési hatáskeresztmetszetének pontos megmérése. Ezt a mérést elsőként végeztem el ilyen nagy energiákon.

Második célunk a két-foton ütközésekben létrejövő könnyű vektor mezonok tulajdonságainak és keletkezésük mikéntjének vizsgálata, ezáltal is gazdagítva és pontosítva ezzel kapcsolatos tudásunkat.

Célkitűzéseink között szerepel továbbá az inkluzív két-foton  $J/\Psi$  keltés

---

megfigyelése és vizsgálata. Ezt a mérést még csak egyetlen kísérlet végezte el, tehát minden további megfigyelésnek óriási fontossága lehet az eredményeik ellenőrzésében.

Az imént felsorolt motivációk vezéreltek kutatómunkám során. A dolgozatban ismertetem kísérleti eredményeimet és azok értelmezését, az alkalmazott módszereket, a vizsgált reakciókra vonatkozó számos elméleti modellt és Monte Carlo programokat, a használt eszközöket és berendezéseket, a detektort és az LHC Gridet is beleértve.

### 3 Alkalmazott módszerek

A disszertációban ismertetett tanulmányok és eredmények a LEP ütköztető L3 detektora 1996-tól 2000-ig a 161-208 GeV  $e^+e^-$  tömegközépponti energiatartományban regisztrált adatainak elemzésén alapulnak. Ezen időszakban az ütköztető megfigyelt integrált luminozitása mintegy  $610 \text{ pb}^{-1}$  volt.

A két-foton folyamatok egy fontos tulajdonsága, hogy míg az  $e^+e^-$  rendszer invariáns tömegét egyértelműen meghatározza a nyaláb energiája, a két-foton rendszer invariáns tömege ( $W_{\gamma\gamma}$ ) folyamatosan változhat. Ez a tény teszi lehetővé, hogy az események számos tulajdonságát  $W_{\gamma\gamma}$  függvényeként is meghatározzuk exkluzív reakciók esetében.

A töltött leptonpárokat a TEC-ben (Time Expansion Chamber)<sup>1</sup> hagyott két nyomvonaluk és a hozzájuk tartozó, az elektromágneses kaloriméterben keltett záporaik segítségével azonosítjuk.

Néhány GeV-nél nagyobb energiával rendelkező elektronokat egyértelműen azonosíthatjuk az elektromágneses kaloriméterben keltett záporuk alakjának vizsgálatával, de a kisenergiás elektronok megfigyelése és azonosítása alternatív módszerek alkalmazását követeli meg. Az analízis során kifejlesztettem

---

<sup>1</sup>A TEC, a Time Expansion Chamber egy speciális TPC (Time Projection Chamber), de annál finomabb térbeli felbontással rendelkezik. Az L3 detektor központi részén helyezkedik el a nyomvonalak és a másodlagos vertexek rekonstrukciójában játszik fontos szerepet.

egy neurális hálókön alapuló részecskeazonosítási módszert amelyet később sikeresen felhasználtam az inkluzív  $J/\Psi$  keltés tanulmányozásakor.

A müonok – miután nyomvonalat hagytak a TEC-ben – kirepülnek a detektorból és csak a müonkamrákban hagynak jeleket maguk után. A kozmikus müonok hamis eseményeket kelthetnek a detektorban. Az ilyen események kiszűrését az ütközés pillanata körüli időablakok alkalmazásával tehetjük meg. Más folyamatokból származó háttéreseemények járuléka elhanyagolható két-foton lepton-pár keltés esetén.

Míg a töltött pionok a  $dE/dx$  tulajdonságaik és az általuk keltett elektromágneses és hadronikus záporok alapján azonosíthatók, a semleges pionokat az elektromágneses kaloriméterben detektált bomlástermék fotonjaikból rekonstruáljuk.

A vektor mezonokat a pion és lepton bomlástermékeik segítségével azonosítjuk. Általánosságban elmondható, hogy ezen folyamatok vizsgálatakor a mérések pontosságát a nagyon kicsi hatáskeresztmetszet mellett döntően a kombinatorikus háttér járuléka és az elméleti bizonytalanságok határozzák meg.

A mért eloszlásokat és eredményeket Monte Carlo programok jóslataival vetettük össze minden esetben. A "semi-hard" közelítést alkalmazva az exkluzív  $\rho^0$ -pár keltésre, kiszámoltam várható  $\gamma\gamma \rightarrow \rho^0\rho^0$  hatáskeresztmetszetet a kísérlet számára elérhető fázistértartományban. Ez lehetővé tette a kísérleti eredmények és az elmélet közvetlen összehasonlítását, amely jelentős eltérést mutatott.

Az időszakosan nem vagy hibásan működő aldetektorok miatt a mérési adatsorban jelen levő hamis adatszegmensek kiszűrését a nagy pontosságot igénylő mérések esetén elvégeztük.

Az analízis folyamán nagyrészt az L3 detektor központi részeinek adatait dolgoztuk fel, kivéve a müon párok keltésének vizsgálatakor ahol a müon kamrák és a szcintillátorok szerepe volt fontos. A rutinszerű adatfeldolgozási feladatok mellett számos technikai problémát is meg kellett oldanunk, mint például a TEC hibás szimulációja következtében fellépő határfok ko-

rreakciókat, kozmikus müonok kiszűrését, kisenergiás újrakalibrálást, kisenergiás részecskeazonosítást.

Habár a feldolgozott adatok mennyisége nem számottevő a nemsokára induló LHC kísérletekéhez képest, feldolgozása mégis jelentős számítási kapacitást igényel. A vizsgálatok során az EGEE Grid infrastruktúrát használtam, amelynek fejlesztésében aktívan részt vettem és meghatározó szerepet játszottam. Az általam (is) fejlesztett és koordinált Grid konfigurációs szoftverkomponens a Grid legszélesebb körben installált programcsomagja, amely ma 5 kontinens több, mint 250 számítógépközpontjának mintegy 60.000 számítógépén fut.

## 4 Tézispontok

A dolgozat eredményei a következő tézispontokba csoportosíthatók:

1. **Töltött lepton-pár keltés hatáskeresztmetszetének meghatározása két-foton ütközésekben.** Megmértem a  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$  és a  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$  folyamatok hatáskeresztmetszetét számos  $e^+e^-$  tömegközépponti energián (161-208 GeV). A két-foton luminozitásfüggvény segítségével meghatároztam a  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$  és a  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  hatáskeresztmetszeteket is a két-foton invariáns tömeg ( $W_{\gamma\gamma}$ ) függvényeként. Az eredmények pontos egyezést mutatnak a  $\mathcal{O}(\alpha^4)$  rendű QED számításokkal és elengedhetetlenek a detektor kisenergiás viselkedésének megértéséhez valamint más két-foton folyamatok vizsgálatához. Ezt a mérést elsőként végeztem el ilyen energiákon. Publikációk: [4,5,6]
2. **A két-foton ütközések  $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  végállapotának vizsgálata.** A  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  folyamat tanulmányozása, hatáskeresztmetszetének megmérése, a járulékot adó folyamatok amplitudójának meghatározása. A kvázi-valós fotonok exkluzív, diffraktív  $\rho$ -pár keltés hatáskeresztmetszetének viszonylag nagy eseményszámmal rendelkező adatsoron való meghatározása. A hatáskeresztmetszet  $t$  függését – amely

a diffraktív folyamatok fontos jellemzője – is meghatároztam, valamint kiszámítottam azt, a "semi-hard" közelítést alkalmazva a mérés számára elérhető fázistértartományban.

A mérési adatok és az elméleti számítások között tapasztalt eltérés megkérdőjelezi a "semi-hard" közelítés alkalmazhatóságát a mérés fázistértartományaiban. Publikációk:[3]

3. **A két-foton ütközések  $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  végállapotának vizsgálata.** A  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$  folyamatot tanulmányoztam és számos tulajdonságát meghatároztam. Az mérési eredményeket elméleti számításokkal vetettem össze. Publikációk: [1,2]
4. **A  $\gamma\gamma \rightarrow f_2(1270)f_2(1270)$  folyamat megfigyelése.** Ezt a reakciót nem igazán magyarázzák meg a jelen elméleti munkák, tehát minden új kísérleti eredmény, beleértve a detektálás tényét és a vizuális hatáskeresztmetszetet is nagy érdeklődésre tart számot. Publikációk: [1,3]
5. **Az inkluzív  $J/\Psi$  keltés megfigyelése és a vizuális hatáskeresztmetszet meghatározása.** A mérés sikerének titka egy alternatív kisenergiás részecskeazonosító eljárás kifejlesztése volt. Ezt a mérést korábban csak egyetlen kísérlet végezte el. A  $J/\Psi$  részecskét leptonikus bomlástermékei segítségével azonosítottam. Publikációk: [8]

## 5 Publikációk

1. P. Achard et al., including G. Debrezeni, *Analysis of the  $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$  and  $\pi^+\pi^0\pi^-\pi^0$  final states in quasi-real two-photon collisions at LEP.*, Physics Letters B **638**, Issues 2-3, 6 July **2006**, p128-139
2. P. Achard et al., including G. Debrezeni, *Measurement of exclusive  $\rho^+\rho^-$  production in mid-virtuality two-photon interactions and study of the  $\gamma\gamma^* \rightarrow \rho\rho$  process at LEP*, Physics Letters B **615**, Mar **2005**, p19-30



- 
3. P. Achard et al., including G. Debreczeni, *Measurement of exclusive  $\rho^0\rho^0$  production in mid-virtuality two-photon interactions at LEP*, Physics Letters B **604**, Issues 1-2, 16 December **2004**, p48-60
  4. P. Achard et al., including G. Debreczeni, *Muon-pair and tau-pair production in two-photon collisions at LEP*, Phys. Lett. B **585**, Issues 1-2, 8 April **2004**, p53-62
  5. G. Debreczeni *Lepton pair production and vector meson studies*, L3 General Meeting, 23 jun, **2003**, Geneva
  6. G. Debreczeni, D. Haas *Charged lepton pair production in 2-photon collisions*, L3 Internal Note #2747, **2002**
  7. G. Debreczeni *Untagged  $\rho\rho$  production* L3 Analysis Week, **2002**, Aachen <http://web.physik.rwth-aachen.de/harm/L3meeting/program/index.html>
  8. G. Debreczeni *Inclusive  $J/\Psi$  production in 2-photon collisions (feasibility study)* L3 2GWG Note (paper copy only)

## 6 További cikkek és konferenciaelőadások

1. G. Debreczeni et al., *Energy resolution and the linearity of the CMS forward quartz fibre calorimeter pre-production-prototype (PPP-I)*, **2004** J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **30** N33-N44
2. G. Debreczeni *The Grid and the HEP experiments. Why ?*, Dutch High School Teacher Program, **2008**, Geneva
3. G. Debreczeni et al., *YAIM 4 - the Grid configuration tool*, (Poster), Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP), 2-7 sep **2007**, Victoria
4. G. Debreczeni *Data processing in high energy physics experiments*, Fizikus Teli Iskola, **2007**, Gyenesdias

5. G. Debreczeni *A Webtől a Grid-ig* , Hungarian High School Teacher Program, **2006**, Geneva
6. G. Debreczeni *Grid, virtualisation and HPC computing in high energy physics*, Matematikai Intezeti Szeminarium, KLTE, **2006**, Debrecen
7. G. Debreczeni *From web to the Grid*, International High School Teacher Program, **2006**, Geneva
8. G. Debreczeni *How to improve Grid security with certificate proxy restrictions*, Enabling Grids for e-Sciences in Europe, (EGEE), Middleware Security Group, 02-08 oct **2007** , Budapest
9. G. Debreczeni et al., *YAIM, a modular configuration management tool for the Grid* , Enabling Grids for e-Sciences in Europe (EGEE), SA1 allhands meeting, 11-15 jun **2007** , Stockholm
10. G. Debreczeni *The LHC Grid* , ECFA European Committee For Future Accelerators, Restricted meeting, 18 September **2006**, Debrecen
11. G. Debreczeni et al., *A HunGrid bemutatása és alkalmazása levegőszennyeztség előrejelzésére*, Networkshop 2005, 30 march **2005**, Szeged
12. G. Debreczeni *Establishment and maintenance of the HunGrid Virtual Organisation*, Enabling Grids for e-Sciences in Europe (EGEE), 18-22 April **2005**, Athens
13. G. Debreczeni et al., *A CERN LHC-Grid rendszerének telepítése az RMKI-ban*, Networkshop 2004, 5-7 April, **2004**, Győr
14. G. Debreczeni *Future grid technologies in high energy particle physics*, RHIC Winter School, 1-3 dec, **2004**, Budapest
15. G. Debreczeni *Magyar lehetőségek a CERN LHC GRID-ben.* , Networkshop 2003 , 14-17 april **2003**, Pécs