

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD thesis

**Nagyenergiájú részecskeütközések kísérleti
vizsgálata a LEP és az LHC gyorsítónál**
**Experimental Investigations of
High Energy Particle Collisions at LEP and LHC**

Ujvári Balázs

Témavezető / Supervisor: Dr. Trócsányi Zoltán



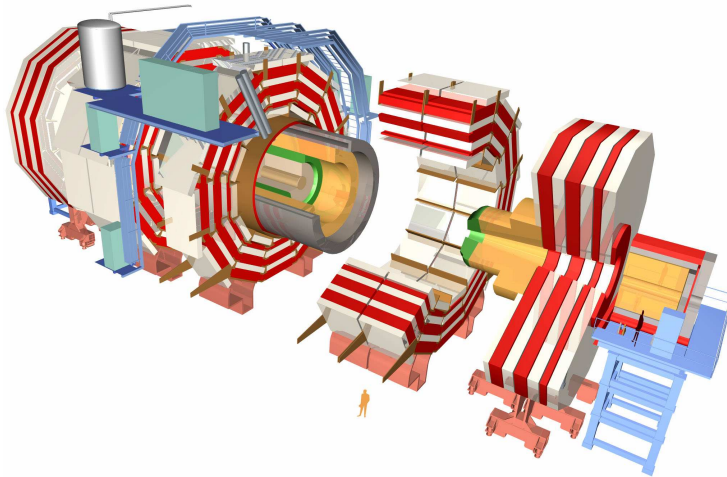
Debreceni Egyetem
Fizika Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen
PhD School in Physics

Debrecen, 2012

1. CMS Bevezetés

A CMS egy részecskedetektor, amit az LHC nagyenergiájú ütközései során keletkező részecskék megfigyelésére terveztek.



1. ábra. A CMS detektor

A legtöbb új részecske keresését célzó kísérleti analízis előnyben részesíti azokat a végállapotokat, még ha a valószínűségük kicsi is, amelyekben fotonok és leptonok vannak. Ezek azonosítása és mérése fontos szerepet játszik a CMS analíziseiben is. Ennek megfelelően a CMS detektornak két alapvető feltételt kell teljesíteni:

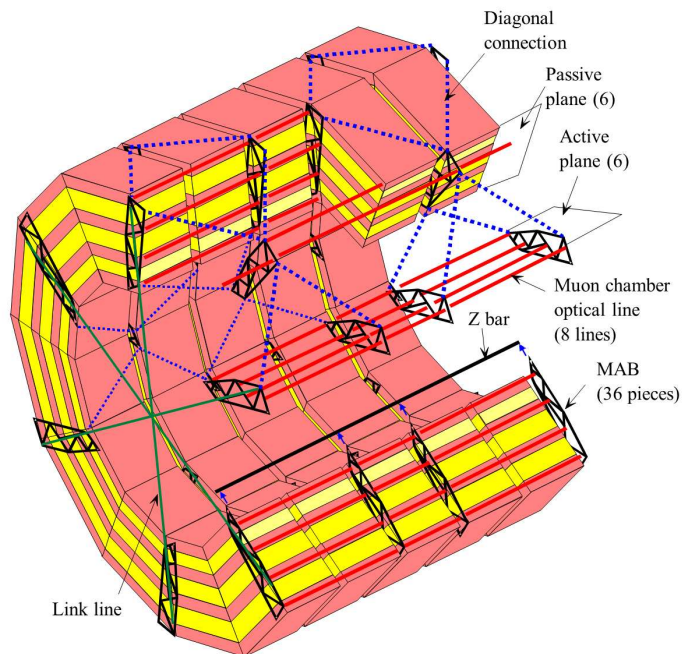
1. Az elektromágneses kaloriméterek jó energia-feloldása, a két foton és két elektron rendszer tömegének pontos meghatározása (1%-os pontossággal 100 GeV-nél)
2. Jó müon-azonosítás és impulzus-meghatározás széles impulzus-tartományban az $|\eta| < 2.5$ régióban és a két müon rendszer tömegének a pontos meghatározása (1% -os pontossággal 100 GeV-nél)

A CMS detektor Müon-hordó Rendszere müon kamrák 4 rétegből (station) áll a hordó mind az 5 kerekében a visszatérítő tekercsként is funkcionáló vas

szerkezeti elemek között. Egy müon kamra több réteg gáztöltésű drift kamrákból (drift tube, DT) áll. A drift kamrák képezik a rendszer alapvető érzékeny elemeit.

2. CMS Célok

A drift kamrák mozgása a CMS működése során, a mágnes ki- és bekapcsolása, hőmozgás és a szerkezet fáradása miatt az elvárt $100\text{ }\mu\text{m}$ -es ($r - \Phi$ -ben) pontosságot meghaladja. A kamrákat ezért optikai eszközökkel szereltük fel, amelyekkel a müonok mozgását állandóan nyomon lehet követni. Ez a helymeghatározás a müonok pályájának utólagos korrekcióját teszi lehetővé.



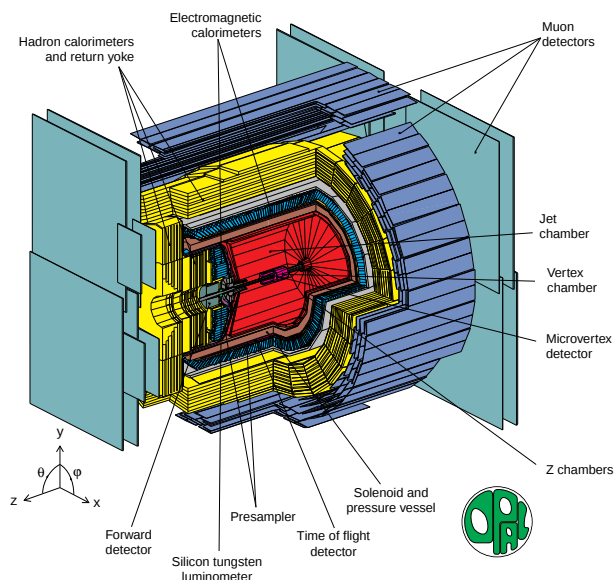
2. ábra. A Müon-hordó Helymeghatározó Rendszer.

A teljes Müon-hordó Helymeghatározó Rendszer (2. ábra) 12 párhuzamos síkra bontható (6 aktív és 6 passzív síkra). Az aktív síkokon kapcsolódik a Link Rendszerhez, ami a belső Tracker és a külső Müon Rendszer egymáshoz viszonyított helymeghatározását biztosítja.

A drift kamrák anódszámainak helyét közvetlenül nem lehet megmérni működés közben, ezért a kamrákra felszerelt villákon lévő LED-eket a MAB-okra (Module for Alignment of Barrel) felszerelt kamerákkal figyeljük meg. A LED-ek helyzetét a kamera szenzorján kialakított képük középpontja segítségével határozzuk meg. A teljes rendszer (10000 LED, 250 kamra, 36 MAB és 600 kamera) igen összetett, ezért nagy szükség volt a rekonstrukció automatizálására.

3. OPAL Bevezetés

Az OPAL (3. ábra) egy általános célú detektor volt 1989 és 2000 között a LEP-nél. A CMS-hez hasonlóan célja a gyorsítója által előállított ütközések során keletkező események széles körének rekonstrukciója volt.

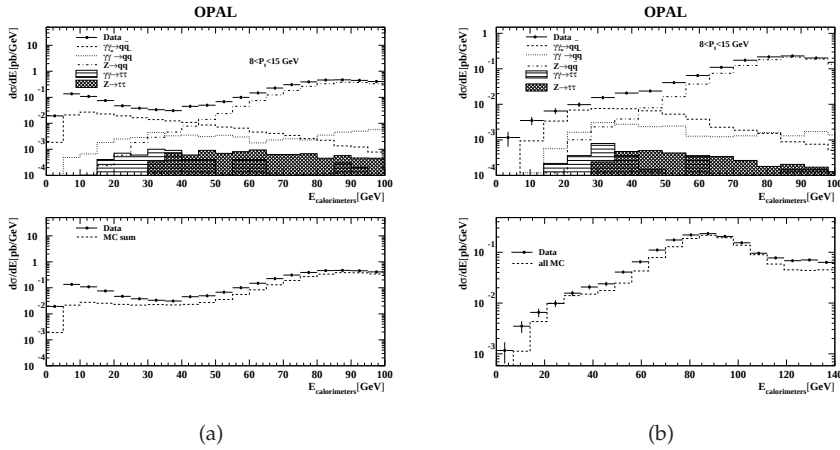


3. ábra. Az OPAL detektor

A LEP elektronokat ütköztetett pozitronokkal. A nagy energiájú nyalábot körülvevő virtuális foton-felhő miatt lehetőséget nyújtott széles energiaspektrumú virtuális fotonnyalábok ütközéseinek tanulmányozására is. A foton nagy energiákon fermion párrá fluktuálhat. Ha a fermion kvark, akkor a foton-foton kölcsönhatás eredményeként hadronok keletkeznek. Mivel a foton-foton kölcsönhatás hatáskeresztmetszete a nyaláb energiájával növekszik, a LEP második fázisában (LEP2) nagy statisztikájú adathalmaz állt rendelkezésre.

4. OPAL Célok

A kísérleti részecskefizikában általános probléma a valódi eloszlások meghatározása a mért részecske-impulzusok és a kísérlet paramétereinek alapján. Az általam mért töltött részecskék transzverzális impulzus- és pszeudorapiditás-eloszlását korrigálni kell az esemény szintű vágások, a detektor véges pontossága és a véges detektáló képessége miatt. Ezeket a korrekciókat a Monte Carlo (MC) szimulációk alapján hajtottam végre, amelyek tartalmazzák a detektor szimulációját és a teljes rekonstrukciós láncot.



4. ábra. Energialeleadás az ECAL és HCAL kaloriméterekben azokra az eseményekre, melyekben a legnagyobb transzverzális impulzus a töltött részecskékre 8 és 15 GeV közt van, nem használva (a) és használva (b) a $|d_0| < 0.15 \text{ cm}$ vágást.

Azt vettem észre, hogy legalább egy nagy ($8 < p_T < 15$ GeV) transzverzálisimpulzusú töltött részecskét tartalmazó események esetén jelentős eltérés és csúcsszerű eloszlás található 10 GeV környékén az adatok és a MC szimulációk kaloriméterekben leadott energiájának az eloszlásában (4(a). ábra). Az eltérés magyarázható azzal, hogy a szimulációk mindig a korábbi kísérletek alapján lettek felparaméterezve, de ha egy eseményben van egy nagy transzverzális impulzusú nyom, akkor elvárható, hogy az esemény nagy energiát hagyjon a kaloriméterekben, és ne adjon egy többletet kis energiáknál. Munkám során céлом volt az eltérések minimalizálása csupán szelekciós vágások bevezetésével.

5. Új CMS Eredmények

1. COCOA bemenő fájl generátor

A COCOA (CMS Object-oriented Code for Optical Alignment) egy C++ nyelven megírt, a CMS szoftverrendszerébe ágyazott program, amely képes a kamrák és a MAB-ok helyzetét és forgását mért adatok alapján előállítani. Munkám során kidolgoztam egy módszert, amely az adatminőségi (Data Quality Monitoring, DQM) programelemeket használva összegyűjti a használható centroidokat, és a kalibrációkat, konfigurációkat egy adatbázisból kiolvastva létrehozza a COCOA számára futtatható bemeneti fájlt, majd ezt lefuttatja. A rekonstrukcióinkat a nyomokon alapuló (track based) helymeghatározással összevetve érvényesnek fogadta el az kollaboráció. A kozmikus mérések, továbbá a 2010, 2011-es adatgyűjtések analízisének ezt vették figyelembe. 2012-ben a nyomokon alapuló helymeghatározás lett az elsődleges, ettől kezdve a mi rekonstrukcióinkkal vetették azt össze a jóváhagyásukhoz. Az utóbbi 3 év minden müon-impulzust használó analízise támaszkodott a módszeremmel rekonstruált hardveres helymeghatározásra.[1,2]

2. Hiányzó MAB esettanulmány

Az előbbi módszerem lehetővé tette, hogy különféle rekonstrukciókkal jobban megértsük és bizonyítani tudjuk a rendszerünk robosztusságát [3,4]. Az egyik kritikus kérdés, a hiányzó MAB-ok esetén fellépő hatások. Ennek a tanulmányozásához egy MAB-okat tekintve hiánytalan mérést (2010.07.03) rekonstruáltam, majd eltávolítottam belőle 4 hiányzó MAB-ot és újra rekonstruáltam. A két kiértékelés relatív különbségeit megvizsgálva azt kaptam, hogy csupán a hiányzó MAB-ok környékén tapasztal-

ható elmozdulás és elfordulás, amelyeknek a mértéke megengedi a müon momentumának az elvárt pontossággal való meghatározását.

6. Új OPAL Eredmények

1. Részecskenyom ütközési ponttól mért távolságán alapuló vágás

Egy, a csoportomban még nem használt, vágást vezettem be a két-foton mérések javítására. A d_0 impakt paraméteren (a részecskenyom előjeles távolsága az ütközési ponttól) javasoltam vágást, a $|d_0| < 0.15$ cm feltételt. Bebizonyítottam, hogy ezzel a vágással nagyobb tisztaság érhető el azoknál az eseményeknél, amelyek tartalmaznak egy nagy transzverzális impulzusú nyomot, tipikusan 8 GeV-nél nagyobbat (4(b). ábra) [5]. Munkám következményeként a további analízisekben, a jet analízisben is, az egész csoport alkalmazta ezt a vágást.

2. Töltött hadronok inkluzív hatáskeresztmetszete

Megmértem a töltött hadronok inkluzív hatáskeresztmetszetét a transzverzális impulzus és a pszeudorapiditás függvényében. A 183-209 GeV-ig terjedő tömegközépponti energiájú adatokkal dolgoztam, az eredményt összehasonlítottam a másodrendű (NLO = next-to-leading order) perturbatív QCD-ben végzett számítások eredményeivel, továbbá a másik hasonlóan általános célú LEP detektor, az L3 méréseivel. Az L3 pár évvel korábban jelentős eltérést tapasztalt az elméleti számításoktól.

Az NLO számítások jóslata a $p_T > 10$ GeV-es tartományban a legnagyobb invariáns tömegű intervallumokban jelentősen eltér a méréstől. A PHOJET és PYTHIA jel MC programok jóslatai, hasonlóan az NLO számítás-hoz, ebben a tartományban a mérés alatt vannak.

A méréseimből látható, hogy az OPAL mérése meredekebben esik a nagy transzverzális impulzus esetén, mint az L3 mérése. Mindkét kísérlet esetén van eltérés az NLO QCD számításhoz képest nagy transzverzális impulzusnál, de az OPAL mérést jobban leírja, mint az L3-ét [6].

Az eltérés értelmezésére máig nem született megnyugtató válasz. Talán a jövő lineáris e^-e^+ ütköztetői adják majd meg.

1. CMS Introduction

CMS is a particle detector (Fig. 1) that is designed to see a wide range of particles produced in high-energy collisions in the LHC. As most of the searches are preferentially conducted using final states that contain isolated leptons and photons, despite the smaller branching ratios, their identification and measurement play a critical role in CMS analyses. Therefore two important detector requirements are the:

1. Good electromagnetic energy resolution, good diphoton and dielectron mass resolution (1% at 100 GeV),
2. Good muon identification and momentum resolution over a wide range of momenta in the region $|\eta| < 2.5$ and good dimuon mass resolution (1% at 100 GeV).

The barrel muon system of the CMS detector consists of 4 stations in each of the 5 wheels of the detector, integrated in the return yoke of the magnet, each muon station consists of several layers of aluminium drift tubes (DT), which is the basic sensitive element of the chambers.

2. CMS Goals

Stability of the muon chambers at the $100\ \mu\text{m}$ level is not guaranteed during detector operation, due to the magnet cycle, thermal motions and structural fatigue. To reach the required precision of the track measurements during movements of the detector elements, the detector is instrumented with an optical alignment system, which allow continual measurement of the chamber position. The alignment information is used for off-line correction in track reconstruction.

The full system is segmented in 12 Φ -planes (6 active and 6 passive alignment planes), the active planes are connected to the Link system. The Link system is designed to relate the position monitoring systems of the inner tracker and muon detectors. Fig. 2 shows the muon alignment scheme. The position of the anode wires cannot be monitored directly. Instead, the positions of light sources rigidly fixed to the barrel muon chambers are monitored by the cameras mounted on the MABs (Module for Alignment of Barrel). The position of a light source is determined by the calculation of the centroid of the light intensity distribution falling on the sensor of the camera. Due to the large number

of elements (600 cameras on 36 MABs and ~ 10000 LEDs on the 250 DTs) it was necessary to automate the reconstruction.

3. OPAL Introduction

OPAL (Omni Purpose Apparatus for LEP) was a multipurpose apparatus (Fig. 3) designed to reconstruct efficiently and identify all types of events. The OPAL experiment took data from 1989 until 2000, and the detector was dismantled in 2001.

The LEP collider was a good source of photons emerging in the electron and positron beams. The high energy electron and positron beams radiated photons, and thus produced a beam of high energy photons. Photons at high energy can fluctuate into a fermion pair. If they fluctuate into a pair of quarks the final states are hadrons. The total hadronic cross-section of the photon-photon interaction increases with increasing beam energy. Therefore, at LEP2 good statistics of data was accessible.

4. OPAL Goals

The classic problem in experimental particle physics is how to find the true distributions from the measured properties of tracks and calorimetric deposits knowing the experimental apparatus. The measured transverse momentum and pseudorapidity distributions of charged hadrons have to be corrected for the losses due to event and track selection cuts, the acceptance and the resolution of the detector. This is done using the MC samples which were processed by the full detector simulation and reconstruction chain. During my data analysis, I realized that with the standard two-photon selection cuts there was an inexplicable discrepancy and a peak-like distribution in the $5 < E_{\text{calorimeters}} < 20$ GeV energy region (Fig. 4(a)).

If there is at least one track with such a high transverse momentum it was also expected to have larger contribution in the calorimeters or at least not an excess at low energy but a slowly increasing distribution from low to high energy. In order to achieve my main goal, the measurement of the total hadronic cross section in photon-photon collisions, I also needed to improve the event selection for getting rid of this discrepancy.

5. New CMS Results

1. COCOA input file generator

CMS Object-oriented Code for Optical Alignment (COCOA) is a C++ software that is able to reconstruct the positions, angular orientations, and internal optical parameters of the chambers and MABs. I created a method that automates the collection of input parameters for COCOA and runs the reconstruction. The method is based on the DQM (Data Quality Monitoring) conditions collects the relevant centroids, and with the configurations and calibrations from databases, composes the COCOA input file. I validated my reconstructions using track alignment. My method was used in the cosmic ray run and in 2010 and 2011 in every analysis which used the muon positions. In 2012 the track alignment was validated by our reconstruction. During these three years, all searches with muon final states used my reconstructions [1,2].

2. Missing MAB study

Based on my reconstruction method, I performed several reconstructions to understand and demonstrated the robustness of our system [3,4]. In order to study the effect of the missing measurements by the missing MABs, I reconstructed a validated run with all MABs and without the 4 missing ones. This run was taken on 07.03. 2010., when all the 36 MABs were still operational.

The differences show only the local displacements and rotations. I showed that, with the observed displacements and rotations in the region of the missing MABs, the reconstruction of the muon momentum with the expected precision is feasible using our alignment results.

6. New OPAL Results

1. Impact parameter cut

I improved the data selection by introducing a cut on the impact parameter, $d_0 < 0.15$ cm, the radial distance of nearest approach of the track to the primary vertex. I demonstrated that one can reach higher purity of the events, where there is at least one track with high transverse momentum (typically larger than 8 GeV) [5]. After my study, the impact

parameter cut was among the starting selection cuts in jet analyses at the OPAL Two-Photon Group.

2. Inclusive production of charged hadrons

I measured the inclusive production cross section of charged hadrons in the collisions of quasi-real photons ($e^+e^- \rightarrow e^+e^- + X$) using the OPAL detector at LEP. The data were taken at e^+e^- centre-of-mass energies from 183 to 209 GeV. I compared the differential cross-sections as a function of the transverse momentum and the pseudorapidity of the hadrons to theoretical calculations of up to next-to-leading order (NLO) in the strong coupling constant α_s . I compared the data to the measurement by the L3 Collaboration, in which a large deviation from the NLO predictions is observed.

The NLO calculation lies significantly below the data for transverse momenta greater than about 10 GeV, which can be reached in the highest invariant mass range only. The predictions of PHOJET and PYTHIA at high transverse momentum are similar to the NLO calculation.

From this comparison it is evident that the distributions measured by OPAL fall more rapidly towards high transverse momenta than those measured by L3, leading to a disagreement between the two experiments at high transverse momenta and a better description of the OPAL data by NLO QCD than by the L3 data [6].

Probably the next e^-e^+ linear collider will resolve these discrepancies.

7. Az értekezés témakörében írt tudományos közleményeim / Relevant publications

1. CMS Collaboration, Aligning the CMS Muon Chambers with the Muon Alignment System during an Extended Cosmic Ray Run, JINST 5 T03019 (2010).
Impact factor: 3.148 (2010)
2. CMS Collaboration, Performance of CMS muon reconstruction in pp collision events at $\sqrt{s} = 7$ TeV, JINST 7, P10002 (2012)
Impact factor: 1.869 (2011)
3. B. Ujvari *et al.* [CMS Barrel Muon Alignment] CMS Barrel Muon Alignment: Influence of Missing MABs on DT-positioning Accuracy. CMS NOTE-2012/005
Impact factor: 0.000
4. B. Ujvari *et al.* [CMS Barrel Muon Alignment], HW alignment, Muon Workshop 21.03.2012.
Impact factor: 0.000
<https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=46&sessionId=5&resId=1&materialId=slides&confId=180656>
5. B. Ujvari *et al.* [OPAL Collaboration], Inclusive production of charged hadrons and jets in photon-photon collision at LEP2, Nuclear Physics B Proceedings Supplement **184** (2008) 117-121.
Impact factor: 0.000
6. B. Ujvari *et al.* [OPAL Collaboration], Inclusive production of charged hadrons in photon-photon collisions, Physics Letters B **651** (2007) 92-101.
Impact factor: 4.189 (2007)