

Doktori (PhD) értekezés tézisei
Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

**A CMS kísérlet Barrel Müon Helyzetmeghatározó
Rendszerének kalibrációja, validációja és
működtetése**

**Calibration, validation and operation of
the CMS Barrel Muon Position Monitoring
System**

Béni Noémi Tekla

Témavezető/Supervisor: Dr. Bencze György



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola
UNIVERSITY OF DEBRECEN
DOCTORAL SCHOOL OF PHYSICS
Debrecen, 2019

Készült
a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Részecskefizika programja keretében
az Atommagkutató intézetben

Prepared at
the University of Debrecen PhD School in Physics
and the Institute for Nuclear Research

1. Bevezetés

A doktori disszertáció célkitűzései

A doktori disszertáció célja a CERN (Európai Nukleáris Kutatási Szervezet, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) intézet Nagy Hadron Ütköztető (LHC, Large Hadron Collider) gyorsítójánál működő Kompakt Müon Szolenoid (CMS, Compact Muon Solenoid) kísérlet Barrel Muon Spektrométer pozíció meghatározó rendszerének építésével, validációjával és üzemeltetésével kapcsolatban végezett munkám ismertetése.

CERN, LHC, CMS

A CERN kutatóintézetet 12 európai ország alapította 1954-ben nem sokkal a második világháború után, azzal a céllal, hogy az európai fizikusok közösen dolgozhassanak a nukleáris technika békés felhasználásán. Mára a jelenleg 23 tagországot számláló intézet a világ legnagyobb tudományos laboratóriumává nőtte ki magát, amelynek elsődleges feladata különféle részecskenyalábok előállítása részecskefizikai kísérletek számára az évek során kiépült részecskegyorsító komplexum segítségével.

Az intézet legnagyobb gyorsítója, a 27 km területű LHC 2008 szeptemberében kezdte el működését 3.5+3.5 TeV energiájú proton nyalábokkal. A protonok energiája és luminozitása az évek alatt több lépésben emelkedett, míg a tervezett 2013-14-es hosszú leállás után elérte a 7+7 TeV energiát és a 10^{34} cm⁻²s⁻¹ luminozitás értéket.

Négy nagy kísérlet épült az LHC gyorsítón. Az ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) és a CMS úgynevezett általános célú detektorok, melyek széles spektrumú részecskefizikai programmal rendelkeznek. A másik két kísérlet közül az LHCb-nél (LHC-beauty) a b-kvarkokkal kapcsolatos, míg az ALICE-nél (A Large Ion Collider Experiment) a nehézion fizika kutatásán dolgoznak.

A CMS felépítése nagy általánosságban a klasszikus részecskefizikai kísérleteket követi. Különlegessége az erős, 3,8 T mágneses tér, amely lehetővé teszi a töltött részecskék kisebb sugarú pályára kényszerítését, ezáltal egy kisebb méretű, kompakt detektor építését (például az ATLAS-hoz hasonlítva). További sajátossága a müon detektálás hangsúlyossága. A robusztus müon spektrométer, párosítva a redundáns triggerelési lehetőségekkel garantálja az ütközésből eredő müonok röppályájának nagy hatásfokú, pontos mérését és a fizika számára ígéretes események kiválasztását.

A maximális hermeticitás érdekében a CMS középső hengeres „barrel” azaz „hordó” részét mindét oldalról úgynevezett „endcap” azaz „végdugó” tárcsák zárják le. A hordó rész öt nagy, egyenként $\sim 2,5$ m széles gyűrűből áll. A középső gyűrűben található a mágnes és a belső detektorok. A hordó régióban levő müon detektorok a gyűrűket alkotó vas-szerkezetbe beágyazva helyezkednek el. A végdugó rész mindkét oldalon három (a 2013-14-es hosszú leállás után négy) vastárcsából áll, amelyek egyben a végdugó régióban levő müon detektorok hordozó elemei. A legbelső lezáró tárcsán helyezkednek

el a müion detektorokon kívül a végdugó kaloriméterek is. A CMS moduláris kialakítása a kompakt felépítés fontos (és szükségszerű) következménye. A modularitás teszi lehetővé a nagy egységek mozgatását a kísérleti teremben, ezzel biztosítva hozzáférést a detektor elemekhez a karbantartási időszakban. A nagy egységek mozgatása speciális légpárnás és pneumatikus rendszer segítségével történik.

A barrel muon spektrométer

A barrel muon spektrométert alkotó 250 nagy méretű (jellemzően 2,5 m x 3 m) müion detektor kamra a 7 m sugarú, 14 m hosszú hordó régióban található. A pontos részecskefizikai analízis érdekében elengedhetetlen a kamrák egymáshoz képest elfoglalt pozíciójának szubmilliméter, illetve szubmilliradián pontosságú ismerete.

Mivel a detektorokat tartó vasszerkezet a hőmérsékleti ingadozások, valamint a nagy (3,8 T) mágneses tér hatására deformálódik, egy olyan helyzetmeghatározó rendszer épült, amely folytonosan méri a kamrák helyzetét és képes követni a beálló változásokat. Ezen pozíció információk ismerete elengedhetetlenül szükséges a megfelelő müion impulzus felbontás eléréséhez, amely minden olyan fizikai analízis során számít, ahol az ütközés során keletkező részecske bomlási folyamatának végállapotában müion részecske szerepel. Például ilyen a standard modell Higgs és Z bozon tömegeinek meghatározása, melyhez jó müion

impulzus mérés szükséges, amely erősen függ a müon detektorok geometriájának pontos ismeretétől. Ezért a müon helyzetmeghatározó rendszerrel szerzett pozíció-információkat a CMS geometriai korrekciójában veszik figyelembe a fizikai analizisek során.

A barrel müon helyzetmeghatározó rendszer

A barrel müon helyzetmeghatározó rendszer feladata a 250 nagyméretű hordó régióban levő müon kamra 6D pozíciójának folytonos mérése milliméter és milliradián alatti pontossággal.

Egy ilyen rendszer felépítését a rendszer mérete, a mérendő elemek száma és az elvárt pontosság mellett más tényezők is nehezítik. Ilyen például a sugárzási háttér, az említett erős mágneses tér, vagy olyan gyakorlati tényezők, mint az elemekhez való korlátozott hozzáférés (általában egyszer egy évben) valamint a rendszer költségeinek ésszerű keretek között tartása. A helyzetmeghatározó rendszerrel szemben támasztott legnagyobb követelmény az, hogy annak abszolút kamra-pozíció adatokat kell szolgáltatni, azaz minden mérésnél meg kell határozni a hordó régió müon kamráinak helyzetét a hordó rendszerében, és nem elégséges csupán a kamrák relatív elmozdulását detektálni. Ezek az abszolút pozíció adatok különösen fontosak a CMS adatgyűjtési periódusának indulása idején az évvégi leállások után, amikor a detektor elemek általában mozognak.

A barrel müon helyzetmeghatározó rendszer fejlesztése 1995-ben kezdődött. A szükséges előtanulmányok, a

koncepció kidolgozása és a tervezési munkák nagyjából hat évig tartottak. A rendszer megépítése, beszerelése és beüzemelése további hét évet vett igénybe. Figyelembe véve a rendszer komplexitását a létrehozásra szánt idő és az 1,3 MCHF-os költség teljeséggel indokolt, amit a CMS kollaboráció jóvá is hagyott.

A rendszer 2009 óta üzemel és szolgáltat mérési adatokat. A mérésből származó (nyers) adatok szolgálnak bemeneti információként az opto-geometriai rekonstrukciós szoftver számára, mely az egyes kamrák 6D pozícióját határozza meg a barrel muon spektrométer rendszerében. A rekonstrukció alapja egy olyan opto-geometriai modell, amely tartalmazza a helyzetmeghatározó rendszer elemeit és közöttük levő kapcsolatokat. Kétféle ilyen kapcsolat lehet az elemek között: kalibrált és mért. A kalibrált kapcsolatok távolság és orientáció adatok, amelyek a rendszer építése során az egyes elemek kalibrációja során kerülnek rögzítésre. A mért kapcsolatok a rendszer üzemeltetése során kapott mérési eredmények, amelyek a mi esetünkben a video kamera és LED fényforrás közötti kapcsolatok.

A fentebb említett kapcsolatok száma nagy mértékben meghaladja a rendszer szabadsági fokát, ezért a kalibrált és mért kapcsolatok együttesen egy nagyon erős és redundás hálózatot alkotnak, amely képes helyes pozíció adatokat szolgáltatni még úgy is, ha egy-két kapcsolat kiesik (ebben az esetben a kieső elem közelében lokálisan a pontosság csökkenhet).

Természetesen a rendszer létrehozása és üzemeltetése

egy egész csapat munkája, amelynek tagjai a Debreceni Egyetem, az ATOMKI (Debrecen), a Wigner RCP (Budapest, régebben KFKI-RMKI) együttműködésben a CERN intézettel és -egy dedikált feladathoz- a HEPHY (Bécs, Ausztria) intézettel. Debrecenben mostanáig két sikeresen megvédett doktori értekezés és 11 diploma dolgozat született, amelyek részben vagy egészben ehhez a témához kapcsolódnak. Ennek a csapatnak 2002 óta vagyok a tagja és részt vettem gyakorlatilag a projekt mindegyik fázisában. A doktori dolgozatba csak azokat a munkáimat vettem bele, amelyeknél a részvételem meghatározó volt.

A dolgozat felépítése

A dolgozat felépítése az alábbiakban foglalható össze: A bevezetés utáni első három fejezet (2-től 4-ig) leíró jellegű, amely segít megérteni a kitűzött feladatot, a megoldandó problémákat, valamint segít bevezetni a továbbiakban szükséges fogalmakat és információkat. Így a második fejezetben nagyon röviden bemutatásra kerül a CERN, az LHC és a CMS kísérlet. A harmadik fejezet a barrel muon spektrométréről szól, a továbbiak megértéséhez szükséges mélységben. Itt kerülnek megtárgyalásra a helyzetmeghatározás általános kérdései is. A negyedik fejezetben kerül sor a barrel muon helyzetmeghatározó rendszer részletes ismertetésére. A rendszer alapja a müon kamrákra szerelt több, mint 9000 LED-ről készült képsorozat, amelyet nagy méretű, mechanikailag stabil struktúrákra, az úgy nevezett MAB-okra (Module of the Alignment of the Barrel) szerelt

600 speciálisan megtervezett video-kamera (úgy nevezett kamera-doboz) rögzít. Maguk a MAB-ok (összesen 36 darab) a hordót alkotó vas-szerkezetre vannak felerőzítve. A képekben tárolt információ –megfelelő előfeldolgozás után– bemeneti adatként szolgál az opto-geometriai rekonstrukciós program számára. A rekonstrukciót végző, CMS fejlesztésű, COCOA nevű szimulációs és rekonstrukciós szoftver szintén ebben a fejezetben kerül bemutatásra.

Az utolsó öt fejezetben kerül sor azoknak a munkáimnak a részletes ismertetésére, amelyek a dolgozat érdemi anyagát képezik. Az ötödik fejezet a videoszenzorok minősítését, a hatodik és hetedik a kameradobozok és a MAB-ok kalibrációjával foglalkozik. A nyolcadik fejezet a teljes rendszer validációjával kapcsolatos munkákat írja le melyet más pozíció mérési adat összevetésével végeztem el. Az utolsó (kilencedik) fejezet a geometriai rekonstrukció eredményeit vizsgálja a barrel muon spektrométer deformációja szempontjából.

2. Új tudományos eredmények

A videoszenzorok minőségellenőrzése (5. fejezet)

A rendszerben alkalmazott videoszenzorok nagy száma miatt általános célú, nem képfeldolgozásra tervezett, olcsó szenzorok felhasználása vált szükségessé. Feladatom volt, hogy fejlesszek egy olyan módszert és eszközt, amely alkalmas a szenzorok tesztelésére és a megfelelő darabok

kiválasztására. A feladat magában foglalta a szenzorokkal kapcsolatos követelményrendszer kidolgozását, a kiválasztási kritériumok meghatározását, a megfelelő tesztelési eszköz megtervezését és megépítését, valamint a szenzorok tesztelését és kiválasztását.

Ezen feladat első részét a diplomamunkám keretében végeztem, mely a videoszenzor paramétereinek eltéréseinek vizsgálata az ideális esettől a LED fényforrás képe feldolgozási folyamatának Monte-Carlo szimulációjával.

1. tézispont:

Az előzetes szimulációs tanulmányok alapján kimutattam, hogy az erősítési tényező 15 % alatt és a sötét áram 10 (8 bites skálán) alatt tolerálható, de sötét vagy telített pixelek nem fogadhatók el. Meghatároztam továbbá a tesztelési eszközzel szemben támasztott követelményeket is. Ezen tanulmányok alapján megterveztem és felépítettem a tesztelésre használt összeállítást. Ennek keretében kidolgoztam egy egyszerű módszert a vizsgálni kívánt szenzorok 1 %-on belül egyenletes, de változtatható fényerősségű megvilágításának biztosítására. A munkám része volt az adatgyűjtő és vezérlő szoftver megírása, valamint a mérési eredményeket tartalmazó adatbázis tervezésében való részvétel. Összesen 712 videoszenzor tesztelését és kiválasztását végeztem el. Ennek 85 %-a bizonyult felhasználhatónak. Ez a magas arány igazolta azt a kezdeti ötletet, miszerint általános célú videoszenzorok használhatók a helyzetmeghatározó rendszerben.

A kameradobozok kalibrációja (6. fejezet)

A helyzetmeghatározó rendszer megfelelő pontosságának elérése érdekében szükséges az összeszerelt kameradobozok belső paramétereit egyenként megmérni, azaz kalibrálni. Feladatomban volt, hogy elkészítsem a kameradoboz megfelelő opto-geometriai modelljét, meghatározzam a kalibráláshoz szükséges pontosságot, megtervezem és felépítsem a kalibrációs mérőeszközt és elvégezem a kalibrálási méréseket.

2. tézispont:

Első lépésként meghatároztam a kamera-doboz opto-geometriai modelljét. Majd tanulmányoztam a modell paramétereivel kapcsolatos kalibrációs pontatlanságoknak a helyzetmeghatározó rendszerre gyakorolt hatását és meghatároztam a kalibrálással kapcsolatos pontossági követelményeket: $<10 \mu\text{m}$ a lencse-érzékelő távolságra, 3-4 mrad a szenzornak az optikai tengellyel bezárt szögére. Ezután a kamera-doboz opto-geometriai modelljéből és a leendő felhasználáshoz közeli optikai elrendezésből kiindulva COCOA szimulációval megterveztem és felépítettem a kameradoboz-kalibrációs padot, amely ismert helyzetű LED fényforrások képeinek analízisén alapul. A tervezés és kivitelezés ismét magában foglalta az adatgyűjtő és vezérlő szoftver elkészítését. A kalibrációs pad paramétereit metrológiai és földmérési módszerekkel sikerült a szükséges pontossággal meghatározni. Az elkészült eszköz segítségével megmértem (kalibráltam) a projektben használt összes kamera-dobozt, és a COCOA modell segítségével rekonstruáltam az egyes kamera-

dobozok belső paramétereinek értékeit. Az eredményeket a projekt adatbázisa tartalmazza.

A MAB-ok kalibrációja (7. fejezet)

A MAB-okkal kapcsolatos kalibrálási pontosságot (azaz a kameradobozok 6D-helyzetének megmérését a MAB koordináta rendszerében) csoportunknak egy korai tanulmánya meghatározta: $<100 \mu\text{m}$ translációkban, $<100 \mu\text{rad}$ forgatásokban. Feladatom ezeknek az adatoknak figyelembevételével a MAB kalibrációs pad megvalósítása volt.

3. tézispont:

A kamera-doboz kalibrálásával szerzett tapasztalatok alapján egy olyan összetett rendszert terveztem, amelyben egy lépésben meg tudjuk mérni a MAB összes kamera-dobozának helyzetét. Elvégeztem a teljes kalibrációs pad COCOA-szimulációját és geometria tudatos változtatásával sikerült optimalizálnom a pad felépítését. A kalibrációs pad megépítése csoportunk munkája volt, ezen belül rám hárult az adatgyűjtő és vezérlő szoftver elkészítése. A 36 darab MAB kalibrálása (szintén csoportmunka) után a feladatom volt a pad COCOA modelljének felhasználásával a kameradobozok helyzetének rekonstruálása a MAB rendszerében. A kapott eredményeket szintén az projekt adatbázisban tároljuk.

A rendszer validációja (8. fejezet)

A barrel muon helyzetmeghatározó rendszer nagyon összetett, ahol a végső eredményt (a muon kamrák helyzetét) hatalmas számú egyedi méréssel, utána a mért és kalibrált adatokat tartalmazó opto-geometriai rekonstrukciós eljárással, közvetett módon kapjuk meg. Ezért alapvető fontosságú annak bemutatása, hogy a kapott pozíciók az előre meghatározott pontosságon belül megfelelnek a valóságnak. Feladatom az volt, hogy egy olyan mérést dolgozzak ki és valósítsak meg, amely képes ellenőrizni a helyzetmeghatározó rendszer eredményeit.

4. tézispont:

Három mérést javasoltam a rendszer validációjához. Mindegyik közvetlen (és független) földmérési adatokkal való összehasonlításán alapult. Az elsőben a központi (YB0) gyűrűn levő MAB-ok 0 T mágneses térbeli méréseit használtam. A második esetben az YB0 gyűrűn található kamrákat vizsgáltam, szintén a 0 T mezőben. A harmadik módszernél a teljes hordó térfogatában elhelyezkedő MAB-ok 3,8 T mágneses mezőben mért pozícióit hasonlítottam össze. Feladatom volt a mérések megszervezése és elvégzése együttműködve a CERN-i földmérő csoporttal, majd a kapott adatok kiértékelése. Összesen 51 pontot (153 koordinátát) hasonlítottam össze, és mindegyik kitérő egybeesést mutatott. A rendszert az elvégzett tanulmányok után hitelesítettnek lehetett nyilvánítani.

A barrel muon spektrométer deformációs tanulmányai (9. fejezet)

A rendszer gyakorlatilag állandóan működött és mind a mai napig adatokat szolgáltat, azaz a kamra pozíció adatokat a CMS közösség számára. Ez a nagy mennyiségű adat lehetővé tette számomra, hogy megvizsgáljam a barrel muon spektrométer mechanikai egységként való viselkedését és megtaláljam a rendszer deformációjának jellemző tulajdonságait a CMS működése során. Ezek a tanulmányok a következő eredményekhez vezettek:

5. tézispont:

- Megmutattam, hogy a gyűrűk valódi formája eltér a tervezett (ideális) alaktól. A különbség (magasságban zsugorodás, oldal irányban tágulás) nagyjából kétszer akkora, mint a végelemezszámítások által a mágnes tervezése során becsült érték.
- A megépített helyzetmeghatározó rendszer statisztikai hibáját két egymást követő futtatás közötti különbségek szórása alapján határoztam meg. Ez az érték nagyságrendben $100 \mu\text{m}$ a translációs és $100 \mu\text{rad}$ forgatási irányban. Az ezeket az értékeket meghaladó standard eltérések tényleges kamra elmozdulások eredményei.
- Igazoltam, hogy a CMS bezárási procedura pontossága X és Y irányokban mm-es nagyságrendű.
- A Z-bar méréseinek elemzésével kimutattam, hogy

az első mágneses működés során a bezárás után a gyűrűk elmozdulnak az IP (interakciós pont) felé. Ez a mozgás a külső gyűrűknél akár több mm-et is elérhet.

- Kimutattam, hogy a mágnes kikapcsolásakor a gyűrűk elmozdulnak kifelé Z-irányban, de a mágnes újbóli bekapcsolásakor nagyjából visszatérnek az előző ciklus alatt elfoglalt helyzetbe.
- Megmutattam, hogy a kamrák helyzete a barrel muon spektrométerben stabilnak tekinthető egy mágneses cikluson belül (amikor a mágnes állandóan be van kapcsolva). Nagyon kis elmozdulások előfordulnak, valószínűleg a hőhatások következtében. Az egymást követő mágneses ciklusok kissé nagyobb elmozdulásokat okoznak, melynek oka a hőhatásokon kívül valószínűsíthetően a számos mechanikai csatlakozásnál fellépő rugalmatlan deformáció a mágnes ki-bekapcsolása miatt, de a kamrák az előző mágneses ciklushoz hasonló helyzetekben maradnak.

1. Introduction

The aim of the doctoral thesis

The aim of the PhD thesis is to describe my work on the construction, installation, validation and operation of the position monitoring (called also alignment) system of the Barrel Muon Spectrometer of the CMS (Compact Muon Solenoid) experiment located in the P5 experimental hall of the Large Hadron Collider (LHC) accelerator at CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

CERN, LHC, CMS

CERN, the European Organization for Nuclear Research near Geneva, Switzerland was established by 12 European countries in 1954 not long after the Second World War to unify European scientists working on the peaceful research in nuclear and particle physics. By now this international organization with presently 23 member countries has become the largest scientific laboratory serving for the whole world. Its primary function is to provide different kinds of particle beams for experimental physicists by means of its accelerator complex.

The largest CERN accelerator, the 27 km long circular LHC started its operation in September 2008, with proton beams at 3.5+3.5 TeV. Then the proton energy and the luminosity increased step by step and after the planned 2013-14 long shut-down reached 7+7 TeV and $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectively.

Four large experiments have been built at four interaction points of the LHC. The ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) and CMS are general purpose experiments studying many different questions of particle physics. There are two specialized experiments: the LHCb (LHC-beauty) investigates the b-quark related physics while ALICE (A Large Ion Collider Experiment) is specialized in the heavy ion physics.

The construction of the CMS in general follows the earlier, smaller scale experiments installed on collider type accelerators. The peculiarity of CMS is the strong (3.8 T) solenoid magnet. It causes a shorter bending radius for the charged particles thus allowing of building a detector with comparatively smaller volume, in other words a compact detector (compared e.g. to ATLAS). Another peculiarity of the CMS detector is the increased importance of the muon detection. A very powerful muon spectrometer with redundant triggering capabilities guarantees a highly performant trajectory measurement for the decay muons and an efficient selection of events relevant for physics studies.

To achieve the maximum hermeticity the central, cylindrical part of CMS called “Barrel” is closed by the “Endcaps” on both sides. The Barrel is composed of five wheels of ~ 2.5 m width each. The central wheel is holding the full solenoid with the inner detectors inside. The barrel muon detector chambers are embedded in the iron structure of the wheels. Each of the endcaps is composed of three (after the long 2013-14 shut-down four)

iron disks serving as return yoke in the endcap region and carrying the Endcap Muon detector chambers. The first (innermost) disk is also holding the endcap calorimeters. The modular construction of the CMS experiment is an important (and necessary) consequence of its compactness: the modularity makes it possible to move the big units in the experimental cavern and access the detector elements during maintenance. The heavy modules are moved on a pneumatic airpad system.

The barrel muon spectrometer

The Barrel Muon Spectrometer is composed of 250 large scale (typically 2.5 m x 3 m) particle detector chambers distributed over a cylindrical volume of 7 m in radius and 14 m in length. For the correct and efficient physics analysis of events recorded in the CMS experiment the positions of the barrel muon detector chambers have to be known with respect to each other with submillimeter-submilliradian precision.

Since the mechanical structure of the detector is deformed by the thermal effects and the applied strong (3.8 T) magnetic field, a position monitoring system was built which is able to run permanently and determine the actual positions of the barrel muon chambers. This position information is essential for a good muon momentum resolution which is needed for all physics analyses where the final state of the created particles are muons. For example the standard model Higgs boson and Z boson mass measurement is affected by the good muon momentum

measurement that is depending very much on the good geometry information of the muon detectors. Therefore the position information provided by the alignment system is used for corrections of the CMS geometry during the physics analysis.

The barrel muon position monitoring system

The task of the Position Monitoring System is therefore to locate the positions of the 250 barrel muon chambers and follow their movements with the required submillimeter and submilliradian precision.

Besides the considerable size, the large number of objects to be observed and the high precision required there are additional circumstances that make the system construction difficult. Such factors are the radiation background, the already mentioned strong magnetic field or practical aspects like the very limited access to the elements of the system (typically once per year) and the requirement to keep the cost reasonably low. It should be underlined that one of the most demanding requirements to the position monitoring system is that it has to be absolute in the sense that it should provide the positions of the barrel muon chambers in the barrel reference and not only detect displacements. The ability of the system to provide the absolute positions of the barrel muon detector chambers is especially important at the restart of the CMS operation after maintenance (typically once a year) during which the detector elements are usually moved.

The work on the barrel muon position monitoring

system started in 1995. The necessary R&D work, the development of the concept and the design of the system lasted six years. The construction, installation and commissioning took another seven years. Given the complexity of the system the total construction cost of 1.3 MCHF and the time spent was regarded as reasonable and has fully been endorsed by the CMS collaboration.

The system is operational and providing measured data since 2009. This raw data is the input for the geometry reconstruction of the 6D positions of the individual detector chambers inside the barrel muon spectrometer. The reconstruction is based on the opto-geometrical model describing the elements of the position monitoring system and the connections between them. Two types of connections are used: calibrated and monitored. The calibrated connections are fix distances and orientations between some of the elements and measured (calibrated) once during the construction. The monitored values are the results of the measurements during operation. In the Barrel Muon Position Monitoring System all the monitored connections are video-camera - LED pairs.

As the number of connections is considerably exceeding the number of degrees of freedom of the system, the calibrated and measured connections are composing a very robust and redundant network capable to work even in case of the failure of one or another element and provide correct position data (local decrease of precision around the failing element is possible).

Of course the whole work was done by a team composed

of members from the University of Debrecen, ATOMKI (Debrecen), Wigner RCP (Budapest, former Research Institute for Particle and Nuclear Physics) in collaboration with CERN and -for a dedicated task- HEPHY (Wien, Austria). So far two PhD and 11 diploma works fully or partially dedicated to the project have been defended in Debrecen. I am the member of this collaboration since 2002 and have taken part practically in all phases of the work. In this document I include only those tasks in which my participation was determinative.

Organisation of the dissertation

The dissertation is organized as follows:

The first three chapters (2 to 4) are descriptive, they help to explain the tasks and problems to be solved and introduce the necessary terms and information. Thus, in the second chapter CERN, LHC and CMS are introduced very briefly. The third chapter is describing the barrel muon spectrometer to the level necessary for understanding of the following chapters. The general questions of the alignment are also discussed here. The fourth chapter is devoted to the detailed description of the barrel muon position monitoring system. The system is based on images of LEDs installed on the chambers (>9000 LEDs altogether) taken by specifically designed videocameras called camera-boxes (600 altogether) mounted on large size stable structures called MABs (Modules of the Alignment of the Barrel). The MABs themselves (36 altogether) are fixed on the barrel yoke. The images are preprocessed and serving as input for the opto-geometrical

position reconstruction called COCOA. Also, the COCOA opto-geometrical simulation and reconstruction software developed by the CMS alignment group is introduced here.

The last five chapters are devoted to the detailed description of my work and to the results included in the PhD Thesis. Thus, in the fifth chapter the quality control of the video-sensors, in the sixth and seventh chapters the calibration of the camera-boxes and the MABs are described. The eighth chapter is devoted to the validation of the system by comparison to other available position data in CMS. The last (ninth) chapter is examining the results of the geometrical reconstruction from the point of view of the behaviour of the barrel muon spectrometer as a deforming unit.

2. New scientific results

Quality control of the videosensors (chapter 5)

Due to the large quantity of the videosensors used in the project the decision was to try to solve the construction using general purpose low-cost sensors not specifically designed for image processing. My task was to work out the test and selection method, to design and build the suitable test facility and execute the test and selection.

The first part of this work was included in my physics diplom thesis, in which I studied the impact of the deviations of the videosensor parameters from the ideal case by Monte-Carlo simulation of the LED-image detection process.

Thesis statement 1:

Based on the analysis of the results of the simulation, I showed that the gain uniformity below 15 % and the dark current below 10 (on a 8 bit scale) can be tolerated, but no empty or saturated pixels can be accepted. I also determined the requirements to the laboratory setup for the tests. Based on these studies I designed and built the laboratory setup and worked out a simple method to generate the illumination of the sensors to be tested with variable intensity keeping the uniformity below <1 %. Part of my work was also to write the DAQ software and control panel and participate in the development of the database which containing the results of the measurement. I performed the test and selection of 712 videosensors. 85 % of which was found to be usable for the project. This high ratio validated the initial idea to use general purpose sensors for the position monitoring project.

Calibration of the camera-boxes (chapter 6)

To obtain the necessary precision of the position monitoring system the internal parameters of the assembled camera-boxes had to be measured piece by piece i.e. calibrated. My task was to create the adequate geometrical model of the camera-box, to determine the required accuracy of the calibration, to design and build the calibration bench and perform the calibration.

Thesis statement 2:

Using a simple opto-geometrical model of the camera-box and the geometry in which the camera-boxes are intended to be used later I determined the requirements to the precision of the calibration by opto-geometrical (COCOA) simulation: $<10 \mu\text{m}$ for the lens-sensor distance, 3-4 mrad for the angles around the axes perpendicular to the optical axis of the camera-box. Then using the COCOA simulation again I designed and built a camera-box calibration bench based on the images of the LEDs. The design and construction included again the DAQ software and control panel. The parameters of the bench itself were measured in a metrology laboratory and by survey methods to guarantee the necessary precision. I measured (calibrated) all the camera-boxes used in the project with this calibration bench. Using the COCOA model reconstructed the values of the internal parameters of each camera-box and the results were stored in the alignment database.

Calibration of the MABs (chapter 7)

The required accuracy of the MAB calibration (i.e. the measurement of the 6D positions of the camera-boxes on the MABs) was determined by an early study of our group ($<100 \mu\text{m}$ in translations, $<100 \mu\text{rad}$ in rotations). My task was to realize the MAB calibration project.

Thesis statement 3:

Based on the experience obtained from the camera-box calibration I designed a complex setup measuring all the

camera-box positions of a MAB in a single step. I developed the COCOA model of the calibration setup and using the model I optimized the geometrical arrangement of the bench elements. The bench itself was built by the entire barrel muon alignment group in which I also took part. In particular, my job was to create the DAQ software with the control panel. The calibration of the 36 MABs was a group effort, but it was my job again using the COCOA model to reconstruct the values of the camera-box positions w.r.t. the MAB body. These results were stored in the alignment database.

Validation of the system (chapter 8)

The barrel muon position monitoring is a very complex system where the final result (the muon chamber positions) is obtained in an indirect way using a huge number of local measurements and the opto-geometrical reconstruction process containing measured and calibrated data. Therefore it is essential to show that the obtained positions are corresponding to the reality within the predetermined accuracy. My task was to figure out and realize a measurement that is able to validate the results obtained by the monitoring system.

Thesis statement 4:

I proposed three measurements for validation. All of them were based on comparison with direct (and independent) survey measurements. In the first, the YB0 MABs were used in 0 T magnetic field. In the second, the YB0 chambers were used again in 0 T field. In the third,

most complex measurement positions of several MABs located in the entire barrel volume were compared in 3.8 T magnetic field. It was my job to organize and perform the measurements (involving my colleagues from the alignment and survey) and then evaluate the obtained data. Altogether, 51 points (153 coordinates) were compared and all of them showed excellent coincidence. The system could be declared as validated.

Barrel muon spectrometer deformation studies (chapter 9)

The system was running practically permanently and provided data about the chamber positions to the CMS community. This large amount of data gave me the possibility to study the behaviour of the barrel muon system as a mechanical unit and find typical characteristics of its deformation during the CMS operation.

Thesis statement 5:

- I showed that the real form of the barrel wheels differs from the designed (ideal) shape. The difference (shrinking in height, expansion on the sides) is roughly twice as much as the value predicted by finite element analysis performed during the design of the magnet.
- I determined the statistical error of the Position Monitoring System by the standard deviation of the differences between two consecutive runs. This value is in the order of 100 μm in translations and 100 μrad

in rotation. Standard deviations exceeding these values are results of real chamber displacements.

- I demonstrated that the accuracy of the CMS closing procedure is at the mm level in X and Y.
- Analysing the Z-bar measurements I showed that during the first magnet operation after closure the barrel wheels are moving towards the IP (interaction point). This movement can reach up to several mm-s for the outer wheels.
- I showed that during the consecutive magnet cycles the wheels are moving in Z but roughly returning to the position they occupied at the previous cycle.
- I showed that the positions of the chambers in the Barrel Muon spectrometer can be regarded as stable inside a magnetic cycle (when the field is permanently on). Very small displacements are possible most probably due to thermal effects. Consecutive magnetic cycles are causing slightly bigger displacements but the chambers are remaining in positions close to those during the previous magnetic cycle.

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények / Publications related to the dissertation

- [1] N. Béni, on behalf of CMS experiment,
“Experiences with the Muon Alignment Systems of the
Compact Muon Solenoid Detector”,
Phy. Procedia **37**, (2012) 96-103
doi: 10.1016/j.phpro.2012.02.352
Impact factor: 0.000

- [2] S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration],
“The Performance of the CMS Muon Detector in
Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC”,
JINST **8** (2013) P11002
doi:10.1088/1748-0221/8/11/P11002
Impact factor: 1.526 (2013)

- [3] S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration],
“Aligning the CMS Muon Chambers with the Muon
Alignment System during an Extended Cosmic Ray
Run”,
JINST **5** (2010) T03019
doi:10.1088/1748-0221/5/03/T03019
Impact factor: 3.148 (2010)

- [4] S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration],
“Commissioning of the CMS Experiment and the
Cosmic Run at Four Tesla”,
JINST **5** (2010) T03001
doi:10.1088/1748-0221/5/03/T03001
Impact factor: 3.148 (2010)

- [5] S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration],
“The CMS Experiment at the CERN LHC”,
JINST **3** (2008) S08004.
doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08004
Impact factor: 0.821 (2008)
- [6] N. Béni, J. Pálinkás, P. Raics, Zs. Szabó, Z. Szillási,
G. Christian, J. Imrek, J. Molnár, D. Novák,
G. Székely, Gy. L. Bencze
“Completion of the muon barrel alignment system and
its integration into the CMS detector environment”,
Topical Workshop on Electronics for Particle Physics,
Naxos, Greece, 15 - 19 Sep 2008, pp.472-476 (CERN-
2008-008)
doi:10.5170/CERN-2008-008.472
Impact factor: 0.000
- [7] Gy. L. Bencze, N. Béni, J. Imrek, J. Molnár, D. Novák,
P. Raics, V. Sass, Zs. Szabó, G. Székely, Z. Szillási,
“Results and consequences of magnet test and cosmic
challenge of the CMS barrel muon alignment system”,
Topical Workshop on Electronics for Particle Physics,
Prague, Czech Republic, 03 - 07 Sep 2007, pp.407-410
(CERN-2007-007)
doi:10.5170/CERN-2007-007.407
Impact factor: 0.000
- [8] G. Székely, Z. Szillási, Gy. L. Bencze, N. Béni,
J. Imrek, J. Molnár, D. Novák, P. Raics, Zs. Szabó,
“Data acquisition and management in the calibration
processes of the CMS Barrel Muon Alignment
system”,

12th Workshop on Electronics For LHC and Future Experiments, Valencia, Spain, 25 - 29 Sep 2006, pp.525-528 (CERN-2007-001) doi:10.5170/CERN-2007-001.525

Impact factor: 0.000

- [9] D. Novák, A. Fenyvesi, J. Molnár, G. Székely, J. Végh, N. Béni, A. Kapusi, P. Raics, Zs. Szabó, Z. Szillási, Gy. L. Bencze,

“Integration study and first test results of the CMS Muon Barrel Alignment system”,

10th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments, Boston, MA, USA, 13 - 17 Sep 2004, pp.264-267 (CERN-2004-010)

doi:10.5170/CERN-2004-010.264

Impact factor: 0.000

- [10] N. Béni, Gy. L. Bencze, Z. Szillási, B. Ujvári
“Validation of the Barrel Muon Position Monitoring System”,

CMS Detector Note CMS DN-2018/025

Impact factor: 0.000



Nyilvántartási szám: DEENK/386/2019.PL
Tárgy: PhD Publiációs Lista

Jelölt: Béni Noémi
Neptun kód: U3S7DL
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10018383

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Időgen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (5)

1. **Béni, N.**, Bencze, G., Szillási, Z., Ujvári, B.: Validation of the Barrel Muon Position Monitoring System.
The Compact Muon Solenoid Experiment, Detector Note 2018, 1-13, 2018.
2. **Béni, N.**, The CMS Collaboration: The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC.
J. Instrum. 8 (11), 1-102, 2013. ISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/11/P11002>
IF: 1.526
3. Chatrchyan, S., Trócsányi, Z., Pálincás, J., Ujvári, B., Zilizi, G., Szabó, Z., **Béni, N.**, The CMS Collaboration: Aligning the CMS Muon Chambers with the Muon Alignment System during an Extended Cosmic Ray Run.
J. Instrum. 5 (T03019), 1-35, 2010. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03019>
IF: 3.148
4. Chatrchyan, S., Trócsányi, Z., Pálincás, J., Ujvári, B., Zilizi, G., Szabó, Z., **Béni, N.**, The CMS Collaboration: Commissioning of the CMS Experiment and the Cosmic Run at Four Tesla.
J. Instrum. 5 (T03001), 1-39, 2010. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03001>
IF: 3.148
5. Adolph, R., Fenyvesi, A., Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Pálincás, J., Székely, G., **Béni, N.**, Kapusi, A., Marian, G., Radics, B., Raics, P., Szabó, Z., Szillási, Z., Trócsányi, Z., Zilizi, G., The CMS Collaboration: The CMS experiment at the CERN LHC.
J. Instrum. 0803, 2008. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004>
IF: 0.821





Idegen nyelvű konferencia közlemények (5)

6. **Béni, N.**, The CMS experiment: Experiences with the Muon Alignment Systems of the Compact Muon Solenoid Detector.
Munich, Germany: *Physics Procedia*. 37, 96-103, 2012. ISSN: 1875-3892.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.352>
7. **Béni, N.**, Pálincás, J., Raics, P., Szabó, Z., Szillási, Z., Glenn, C., Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Székely, G., Bencze, G.: Completion of the Muon Barrel Alignment System and its integration into the CMS detector environment.
In: Topical Workshop on Electronics for Particle Physics. Ed.: Evelyne Dho, François Vasey, CERN, Geneva, 472-476, 2008, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290833246
8. Székely, G., Szillási, Z., Bencze, G., **Béni, N.**, Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Raics, P., Szabó, Z.: Data Acquisition and Management in the Calibration Processes of the CMS Barrel Muon Alignment System.
In: 12th Workshop on Electronics For LHC and Future Experiments. Ed.: M. Letheren, S. Claude, CERN, Geneva, 525-528, 2007, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290832881
9. Bencze, G., **Béni, N.**, Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Raics, P., Sass, V., Szabó, Z., Székely, G., Szillási, Z.: Results and Consequences of Magnet Test and Cosmic Challenge of the CMS Barrel Muon Alignment System.
In: Topical Workshop on Electronics for Particle Physics. Ed.: Sandra Claude, CERN, Geneva, 407-410, 2007, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290833048
10. Novák, D. I., Fenyvesi, A., Molnár, J., Székely, G., Végh, J., **Béni, N.**, Kapusi, A., Raics, P., Szabó, Z., Szillási, Z., Bencze, G.: Integration study and first test results of the CMS Muon Barrel Alignment system.
In: 10th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments. Ed.: Claude, Sandra, CERN, Geneva, 264-267, 2004, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290832379





További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

11. Makovec, A., Szillási, Z., **Béni, N.**, Molnár, J., Esposito, M., Bountempo, S., Cusano, A., Oetriccione, A., Zarrelli, M., Breglio, G., Saccomanno, A., Giordano, M., Chiuchiolo, A.: Cryogenic temperature measurement using epoxy and PMMA coated fiber bragg grating sensors.
Acta phys. Debr. **46**, 97-106, 2012. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

12. Arce, P., Barcala, J. M., Calvo, E., Ferrando, A., Josa, M. I., Molinero, A., Navarrete, J., Oller, J. C., Brochero, J., Calderón, A., Fernández, M. G., Gómez, G., González-Sánchez, F. J., Martínez, R. C., Matorras, F., Rodrigo, T., Scodellaro, L., Sobrón, M., Vila, I., Virto, A. L., Fernández, J., Raics, P., Szabó, Z., Trócsányi, Z., Ujvári, B., Zilizi, G., **Béni, N.**, Christian, G., Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Pálinkás, J., Székely, G., Szillási, Z., Bencze, G. L., Vesztergombi, G., Benettoni, M., Gasparini, F., Montecassiano, F., Rampazzo, M., Zago, M., Benvenuti, A., Reithler, H., Ruiz, Á. P., Jiang, C.: Motion of CMS detector and mechanical structures during Magnet Cycles and Stability Periods from 2008 to 2013 as observed by the Link Alignment System.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. **813**, 36-55, 2016. ISSN: 0168-9002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.01.002>
IF: 1.362
13. Berruti, G. M., Petagna, P., Buontempo, S., Makovec, A., Szillási, Z., **Béni, N.**, Consales, M., Cusano, A.: One year of FBG-based thermo-hygrometers in operation in the CMS experiment at CERN.
J. Instrum. **11** (3), P03007 (1-17), 2016. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03007>
IF: 1.22
14. Khachatryan, V., Pálinkás, J., **Béni, N.**, Molnár, J., Szillási, Z., Makovec, A., Raics, P., Trócsányi, Z., The CMS Collaboration: Search for new phenomena in monophoton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV.
Phys. Lett. B. **755**, 102-124, 2016. ISSN: 0370-2693.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2016.01.057>
IF: 4.807





15. Makovec, A., Berruti, G. M., Consales, M., Giordano, M., Petagna, P., Buontempo, S., Breglio, G., Szillási, Z., **Béni, N.**, Cusano, A.: Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN.
J. Instrum. 9 (03), C03040 (1-10), 2014. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/03/C03040>
IF: 1.399

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

16. Oláh, É., Ádám, P., **Béni, N.**, Hamar, G., Horváth, Á., Horváth, D., Jancsó, G., Jarosievitz, B., Lévai, P., Péntek, C., Sükösd, C., Szillási, Z., Trócsányi, Z., Ujvári, B., Vámi, T., Varga, D.: Particle physics education in Hungary.
Nucl. Part. Phys. Proc. 273-275, 2569-2571, 2016. ISSN: 2405-6014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.462>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 17,431

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
8,643**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2019.12.18.





Registry number: DEENK/386/2019.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Noémi Béni
Neptun ID: U3S7DL
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10018383

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (5)

1. **Béni, N.**, Bencze, G., Szillási, Z., Ujvári, B.: Validation of the Barrel Muon Position Monitoring System.
The Compact Muon Solenoid Experiment, Detector Note 2018, 1-13, 2018.
2. **Béni, N.**, The CMS Collaboration: The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC.
J. Instrum. 8 (11), 1-102, 2013. ISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/11/P11002>
IF: 1.526
3. Chatrchyan, S., Trócsányi, Z., Pálincás, J., Ujvári, B., Zilizi, G., Szabó, Z., **Béni, N.**, The CMS Collaboration: Aligning the CMS Muon Chambers with the Muon Alignment System during an Extended Cosmic Ray Run.
J. Instrum. 5 (T03019), 1-35, 2010. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03019>
IF: 3.148
4. Chatrchyan, S., Trócsányi, Z., Pálincás, J., Ujvári, B., Zilizi, G., Szabó, Z., **Béni, N.**, The CMS Collaboration: Commissioning of the CMS Experiment and the Cosmic Run at Four Tesla.
J. Instrum. 5 (T03001), 1-39, 2010. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03001>
IF: 3.148
5. Adolphi, R., Fenyvesi, A., Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Pálincás, J., Székely, G., **Béni, N.**, Kapusi, A., Marian, G., Radics, B., Raics, P., Szabó, Z., Szillási, Z., Trócsányi, Z., Zilizi, G., The CMS Collaboration: The CMS experiment at the CERN LHC.
J. Instrum. 0803, 2008. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004>
IF: 0.821





Foreign language conference proceedings (5)

6. **Béni, N.**, The CMS experiment: Experiences with the Muon Alignment Systems of the Compact Muon Solenoid Detector.
Physics Procedia. 37, 96-103, 2012. ISSN: 1875-3892.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.352>
7. **Béni, N.**, Pálinkás, J., Raics, P., Szabó, Z., Szillási, Z., Glenn, C., Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Székely, G., Bencze, G.: Completion of the Muon Barrel Alignment System and its integration into the CMS detector environment.
In: Topical Workshop on Electronics for Particle Physics. Ed.: Evelyne Dho, François Vasey, CERN, Geneva, 472-476, 2008, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290833246
8. Székely, G., Szillási, Z., Bencze, G., **Béni, N.**, Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Raics, P., Szabó, Z.: Data Acquisition and Management in the Calibration Processes of the CMS Barrel Muon Alignment System.
In: 12th Workshop on Electronics For LHC and Future Experiments. Ed.: M. Letheren, S. Claude, CERN, Geneva, 525-528, 2007, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290832881
9. Bencze, G., **Béni, N.**, Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Raics, P., Sass, V., Szabó, Z., Székely, G., Szillási, Z.: Results and Consequences of Magnet Test and Cosmic Challenge of the CMS Barrel Muon Alignment System.
In: Topical Workshop on Electronics for Particle Physics. Ed.: Sandra Claude, CERN, Geneva, 407-410, 2007, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290833048
10. Novák, D. I., Fenyvesi, A., Molnár, J., Székely, G., Végh, J., **Béni, N.**, Kapusi, A., Raics, P., Szabó, Z., Szillási, Z., Bencze, G.: Integration study and first test results of the CMS Muon Barrel Alignment system.
In: 10th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments. Ed.: Claude, Sandra, CERN, Geneva, 264-267, 2004, (CERN Yellow Reports: Conference Proceedings) ISBN: 9789290832379





List of other publications

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (1)

11. Makovec, A., Szillási, Z., **Béni, N.**, Molnár, J., Esposito, M., Bountempo, S., Cusano, A., Oetriccione, A., Zarrelli, M., Breglio, G., Saccomanno, A., Giordano, M., Chiuchiolo, A.: Cryogenic temperature measurement using epoxy and PMMA coated fiber bragg grating sensors.
Acta phys. Debr. 46, 97-106, 2012. ISSN: 1789-6088.

Foreign language scientific articles in international journals (4)

12. Arce, P., Barcala, J. M., Calvo, E., Ferrando, A., Josa, M. I., Molinero, A., Navarrete, J., Oller, J. C., Brochero, J., Calderón, A., Fernández, M. G., Gómez, G., González-Sánchez, F. J., Martínez, R. C., Matorras, F., Rodrigo, T., Scodellaro, L., Sobrón, M., Vila, I., Virto, A. L., Fernández, J., Raics, P., Szabó, Z., Trócsányi, Z., Ujvári, B., Zilizi, G., **Béni, N.**, Christian, G., Imrek, J., Molnár, J., Novák, D. I., Pálinkás, J., Székely, G., Szillási, Z., Bencze, G. L., Vesztergombi, G., Benettoni, M., Gasparini, F., Montecassiano, F., Rampazzo, M., Zago, M., Benvenuti, A., Reithler, H., Ruiz, Á. P., Jiang, C.: Motion of CMS detector and mechanical structures during Magnet Cycles and Stability Periods from 2008 to 2013 as observed by the Link Alignment System.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. 813, 36-55, 2016. ISSN: 0168-9002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.01.002>
IF: 1.362
13. Berruti, G. M., Petagna, P., Buontempo, S., Makovec, A., Szillási, Z., **Béni, N.**, Consales, M., Cusano, A.: One year of FBG-based thermo-hygrometers in operation in the CMS experiment at CERN.
J. Instrum. 11 (3), P03007 (1-17), 2016. EISSN: 1748-0221.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/P03007>
IF: 1.22
14. Khachatryan, V., Pálinkás, J., **Béni, N.**, Molnár, J., Szillási, Z., Makovec, A., Raics, P., Trócsányi, Z., The CMS Collaboration: Search for new phenomena in monophoton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV.
Phys. Lett. B. 755, 102-124, 2016. ISSN: 0370-2693.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2016.01.057>
IF: 4.807





15. Makovec, A., Berruti, G. M., Consales, M., Giordano, M., Petagna, P., Buontempo, S., Breglio, G., Szillási, Z., **Béni, N.**, Cusano, A.: Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN.

J. Instrum. 9 (03), C03040 (1-10), 2014. EISSN: 1748-0221.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/03/C03040>

IF: 1.399

Foreign language abstracts (1)

16. Oláh, É., Ádám, P., **Béni, N.**, Hamar, G., Horváth, Á., Horváth, D., Jancsó, G., Jarosievitz, B., Lévai, P., Péntek, C., Sükösd, C., Szillási, Z., Trócsányi, Z., Ujvári, B., Vámi, T., Varga, D.: Particle physics education in Hungary.

Nucl. Part. Phys. Proc. 273-275, 2569-2571, 2016. ISSN: 2405-6014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.462>

Total IF of journals (all publications): 17,431

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 8,643

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

18 December, 2019

