

Az NK-81447 sz. OTKA-pályázat lezáró beszámolója, 2010-2013

A Nagy hadron-ütköztető (LHC) rendben elindult 2009 végén és 2010-12 folyamán végig működött, bár az eredetileg tervezettnél alacsonyabb energiánál, 2010-11-ben 7 TeV-es, 2012-ben 8 TeV-es proton-proton ütközésekkel. Nehézion-fizikai programját 2010 és 2011 utolsó két hetében Pb-Pb ütközésekkel, 2013 elején pedig p-Pb ütközésekkel biztosította. Az eltelt 3 év alatt az LHC luminozitását 12 nagyságrenddel sikerült növelni, és ennek eredményeképpen a CMS kísérlet 2012 végén már hetente több adatot gyűjtött, mint a TEVATRON kísérletei működésük 20 éve alatt. Csoportunk működése csoportmegbeszéléseink

<http://www.grid.kfki.hu/twiki/bin/view/CMS/WeeklyBudapestDebrecenMeetings>

honlapján nyomon követhető. Konkrét témáink leírásának olvasásánál tehát ezekre az előadásokra is érdemes rápillantani, azokban rengeteg információ található. Elnézést kérünk, amiért a beszámoló az átlagnál hosszabb: 4 magyar intézményből összeállt, igen nagy csoportunk többféle témával és fejlesztéssel foglalkozott a CMS együttműködésen belül.

1. A Standard modell ellenőrzése

1.1 Kvantum-színdinamika és nehézion-fizika

A magyar CMS-csoport egyik legsikeresebb teljesítménye a kvantum-színdinamika (QCD) vizsgálatához fűződik. A beszámolási időszakban Veres Gábor (ELTE) benyújtotta és megvédte, Siklér Ferenc (Wigner FK) pedig benyújtotta MTA-doktori dolgozatát, kettejük témavezetésével Krajczár Krisztián elkészítette PhD és Zsigmond Anna MSc dolgozatát. A részletekért érdemes a csoportmegbeszéléseinken tartott előadásaik anyagát megnézni.

Vezető szerepet játszottunk a töltött hadronok impulzus- és szögeloszlásának mérésében 7 TeV-es p-p ütközésekben. A kapott hadronsűrűség a modellek által jóvalnál meredekebb energiatartományra utal, de gluon-szaturációs modellekkel jól leírható. Aktívan részt vettünk a 2010 novemberében és decemberében az első ólom-ólom ütközések adatfelvételében, monitorozásában: a gyakori események tulajdonságainak vizsgálatában vezető szerepet játszottunk. Nemcsak a BSC trigger, hanem a teljes első szintű trigger rendszer adaptálásáért, a határfokok nyomon követéséért is a csoportunk volt a felelős. Továbbá részt vettünk 2011 novemberében és decemberében az ólom-ólom ütközések, majd a 2012 szeptemberi és 2013 januári-februári első proton-ólom adatok felvételében és az eseményválogatás előkészítésében.

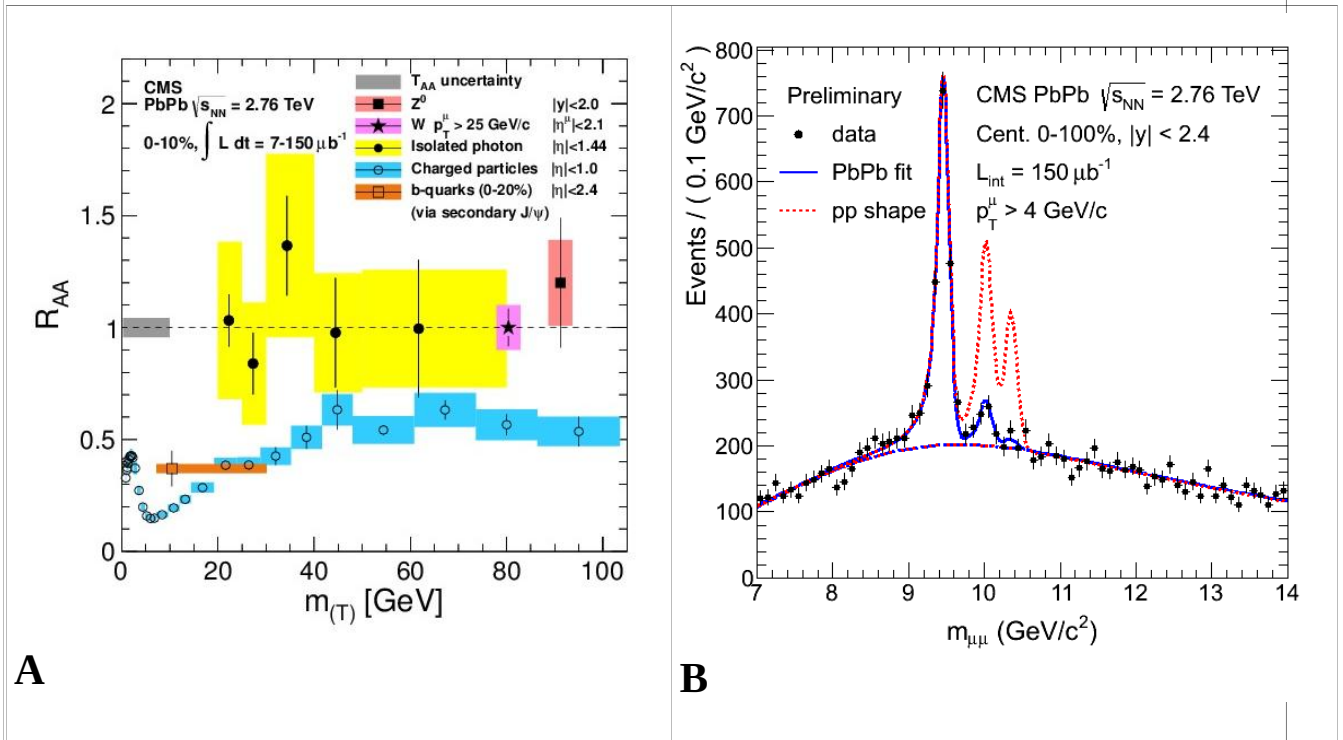
A töltött hadronok multiplicitás-eloszlásának mérésénél alkalmaztuk a korábban proton-proton ütközésekben már sikeres pixel-számlálás módszerét. Az előzetes mérési eredményeket a Quark Matter 2011 konferencián mutattuk be [1], amelyet az eredmények publikációja követett [2].

A 2,76 TeV-es Pb-Pb ütközésekben mért hadronmultiplicitás centralitásfüggése nagyon jó közelítéssel megegyezik az alacsonyabb (RHIC) energiákon mért centralitásfüggéssel (egy skálafaktor erejéig). A periférikus Pb-Pb ütközésekben a nukleonpárokra vetített multiplicitás kompatibilis a pp ütközésekben mért multiplicitással. A hadronsűrűség centralitásfüggése jól leírható egy parton szaturációs modellel. A középrapiditásbeli hadronsűrűség ütközési energia függvényében megfigyelt változása hatványfüggvénnyel illeszthető.

Részt vettünk a töltött részecskék nukleáris módosulási tényezőjének mérésében [3], amelynek

eredményeit a Hard Probes 2012 konferencián mutattuk be [4]. A mérés szerint az alacsony merőleges impulzusú részecskékből (1-5 GeV/c) Pb-Pb ütközésekben hétszer kevesebb keletkezik ("elnyomódnak") p-p ütközésekhez képest (1A ábra), míg nagyobb p_T esetén az elnyomás kisebb, a 40-100 GeV/c tartományra kétfőre csökken, de a jelenség mindvégig megmarad.

Részt vettünk a jet-részecske korrelációk kiértékelésében Pb-Pb ütközésekben, ahol meghatároztuk a nyomkövetés teljesítményét, valamint a végső eredmények megfelelő szisztematikus bizonytalanságait [5]. Azt kaptuk, hogy centrális nehézion-ütközésekben a jetek több alacsony impulzusú (< 3 GeV/c) részecskét tartalmaznak, mint p-p kölcsönhatásban. Ugyanakkor periférikus ütközésekben a tartalmazott alacsony p_T -s részecskék száma mérési hibán belül megegyezik a p-p-ben mértekkel.



1. ábra. A: A különféle részecskék lelassulását jellemző nukleáris módosulási tényező (R_{AA}) ólom-ólom ütközésekben, a részecskék transzverzális tömegének, illetve tömegének függvényében. **B:** Müonpárok invariáns-tömeg eloszlása ólom-ólom ütközésekben, az Y rezonanciacsalád tömegtartományában. A mért pontokat figyelembe vevő, mindhárom állapotot tartalmazó illesztést (kék folytonos görbe), valamint a proton-proton ütközések Y(1S)-re átskálázott eloszlását (pontozott piros görbe) ábrázoltuk.

Részt vettünk a Y részecske és gerjesztett állapotai relatív és abszolút elnyomásának analízisében, ahol a quarkonium állapotok egymás utáni megolvadását látjuk [6] (1B ábra). Elvégeztük a Z bozon keltési valószínűségének meghatározását Pb-Pb ütközésekben, a 2011-ben felvett nagy eseményszámú adatokon [7]. A mérések a vezető rend feletti (next-to-leading-order, NLO) számolásokkal összehasonlítva azt mutatják, hogy a Z bozonok keltését a nehézion ütközésekben keletkező erősen kölcsönható anyag nem befolyásolja. Ennek számszerűsítése a Z bozonok nukleáris módosulási faktora, amit a 2013-as nagy eseményszámú proton-proton referencia adatok felhasználásával mértünk meg, illetve kiegészítettük a Z bozonok müonpárba való bomlásának

mérését az elektronpárok mérésével is [8].

Elkészítettük az első p-Pb ütközések felvételekor [9,10] alkalmazott trigger menüket, továbbá az eseményválogatás és más eseményjellemzők ellenőrzésével hozzájárultunk a kétrészecske-korrelációk méréséhez [11]. Ezek az eredmények megmutatták, hogy a nagy multiplicitású p-p ütközésekben kimutatott hosszútávú korrelációk megjelennek a nagy multiplicitású p-Pb ütközésekben is, még nagyobb erősséggel. Ez a felfedezés a nehézion-fizikai közösség érdeklődésének középpontjába került, és pontos eredete még magyarázatra vár.

Vezető szerepet játszottunk a töltött részecskék nukleáris módosulási faktorának és a részecskekeltés „forward-backward” aszimmetriájának mérésében p-Pb ütközésekben [12]. A nukleáris módosulási faktor $p_T > 25$ GeV/c esetén emelkedik és eléri az 1.3-1.4-es értéket nagy p_T mellett. A mérés összhangban áll az ólommagban várt „anti-shadowing” jelenségével, de a növekedés mértéke nagyobb, mint a modellek előrejelzései. Az eredményekről elsőként a Hard Probes 2013 konferencián számoltunk be 2013 novemberében. A p-Pb ütközésekben vizsgált jet-párok nem mutattak ugyan a nehézion-ütközésekhez hasonlóan p_T -aszimmetriát, viszont a jet-párok normált pszeudorapiditás-eloszlása határozottan a nukleáris parton-eloszlás függvények módosulását jelzi [13].

Siklér Ferenc és Veres Gábor a CMS kísérlet QCD és Nehézion [14,15,16] csoportját vezette (convener), míg Krajczár Krisztián a spektrumokkal foglalkozó alcsoport irányítója lett. Siklér Ferenc a CMS kísérlet publikációs bizottságában a nehézionos cikkek publikációra való felkészítésében vett részt. A CMS kísérlet erős kölcsönhatással foglalkozó (QCD), kisszögű szórások mérésére specializálódott (FSQ), valamint nehézionfizikával foglalkozó (HIN) kiértékelő csoportjaiban összesen több, mint húsz publikáció előkészítésében töltöttünk be belső bíráló bizottsági (tag vagy elnöki) szerepet. A CERN-ben nyári diákok dolgoztak és ösztöndíjasok dolgoznak a vezetésünkkel.

Részt vettünk a ritka kvarkokat tartalmazó azonosított részecskék (semleges kaonok) eloszlásainak mérésében 0,9 és 7 TeV-es pp ütközésekben. Kidolgoztunk egy mérési eljárást a teljes inelasztikus p-p hatáskeresztmetszet mérésére, amelyet azután alkalmaztunk is az adatelemzésben. Elvégeztük az azonosítatlan hadronok szögeloszlásának mérését Pb-Pb ütközésekben. Az alkalmazott módszer a proton-proton ütközésekben már bevált ún. pixel-számlálás módszere volt.

A magyar CMS-csoport nehézionos eredményei komoly szerepet játszottak abban, hogy Veres Gábor a CERN-ben állást kapott, Siklér Ferenc pedig a CERN egyik legfontosabb tudományos bizottsága, a nem-LHC kísérleteket ellenőrző és elbíráló SPSC tagja lett; mindkét eset első a magyar fizikusok CERN-es kapcsolataiban.

1.2. Hármás mértékbozon-csatolások vizsgálata

A Standard Modell fontos ellenőrzését teszi lehetővé a gyenge kölcsönhatáshoz kapcsolódó hármás mértékcsatolások vizsgálata. Ehhez tovább fejlesztettük az analizáló programokat, főként szimulációk elemzésével. Vizsgálatainkból kiderült, hogy a meglevőnél jóval több adatra lesz szükség a fizikai tanulmányokhoz (Hidas Pál előadásai), ezt a témát a jövőben várható hatalmas adattömeg birtokában folytatjuk majd.

1.3. A Higgs-bozon felfedezése

Ez a 2012. év legnagyobb eredménye. A CMS valamennyi fizikai eredménye a résztvevők együttes erőfeszítésének köszönhető, az egyes publikációk ezért valamennyi aktív résztvevő nevét tartalmazzák. Ahogy időnként elhangzik, majdnem mindegy, hogy a spektrumokat konkrétan ki rajzolja fel, mindannyian kellünk hozzá. Több nagy előrelépés történt pályázatunk idején a Higgs-bozon keresésében: 2011-ben sikerült behatárolnunk, 2012-ben megfigyelnünk, majd 2013-ban azonosítanunk a Standard Modell eme utolsó, korábban még meg nem figyelt alkatrészét. A CMS-együtműködés lehetővé tette, hogy a Wigner FK és az ATOMKI három előadótermében, nagy érdeklődés mellett, egyenes adásban vehessük a Higgs-bozon első megfigyelésével kapcsolatos előadásokat, amelyeket 2012. július 4-én a CMS és az ATLAS együtműködés szóvivői tartottak a CERN-ben. Az előadásoknak óriási volt a sajtóvisszhangja, számos TV, rádió és újság interjúvolta meg csoportunkat ebben a témában. A végső adatelemzésben a CMS-együtműködés mintegy 700 tagja vett részt, de nem születhetett volna meg, természetesen, valamennyi közreműködése nélkül. Miután látszott, hogy valószínűleg meglesz a Higgs-bozon, együtműködésünk minden más elemzést félretett, hogy a Higgs-elemzéshez szükséges adatok és szimulációk időben elkészüljenek a Melbourne-i HEP konferenciára. A magyar csoport, például, komoly szerepet játszott a pixel- és a müondetektor működtetésében; az előbbinek valamennyi, az utóbbinak a leptonos eredményekben volt kulcsszerepe. A Higgs-bozon kereséséről sokan közülünk tartottak előadásokat, Horváth Dezső a CMS képviselőjében több nemzetközi konferencián is, a keresés statisztikus módszereiről összefoglaló cikket is írt [20] és a Typotex kiadó megrendelésére magyar nyelvű könyvet [21]. Francois Englert és Peter W. Higgs 2013-as fizikai Nobel-díjának indoklásában megemlíti az ATLAS és CMS kísérletek eredményeit, azt tehát egy kicsit mi is sajátunknak tekinthetjük.

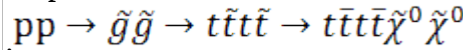
2. Szuperszimmetria keresése

A Standard Modell gyönyörűen leír valamennyi eddig mért részecskefizikai adatot, de számos elméleti hiányosságtól szenved. Nem ad számot a Világegyetem sötét anyagáról, a gravitációs kölcsönhatásról, a jobb-bal és anyag-antianyag aszimmetriáról, meglehetősen ad-hoc teremt meg az elemi fermionok tömegét, nem tudja egyesíteni az erős, az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatást, habár közelíti egymáshoz nagy energián, nem magyarázza meg a neutrínó-oszcillációt és matematikai problémái is vannak, mint például az ún. *hierarchia-probléma*. A fenti problémák megoldására számos modelljavaslat született, közülük a *szuperszimmetria* a legnépszerűbb. Sajnos, az elméletileg megjósolt szuperszimmetrikus részecskék közül még eddig egyet sem sikerült megfigyelni, keresésük az LHC egyik legfontosabb feladata.

Miután a Tevatron és az LHC kísérletei az addig favoritnak számító minimális szupergravitációs modell valamennyi kiválasztott tesztpontját 2011-re kizárták, megindultak a lehető legáltalánosabb, kevésbé modellfüggő keresések (Horváth Dezső előadásai a honlapon). Részt vettünk olyan szuperszimmetrikus részecskék keresésére irányuló adatértékelésekben [17-19], amelyben az események tartalmaznak egy izolált leptont (műont vagy elektront), több nagy transzverzális impulzusú hadronos részecskezáport, amelyek közül legalább kettő b-kvark bomlásából ered, és hiányzó transzverzális energiát. A 2012-ben rögzített, 8 TeV tömegközépponti energiájú proton-proton ütközések adatainak feldolgozása során 19.4 fb^{-1} integrált luminozitású eseményhalmazt elemeztünk.

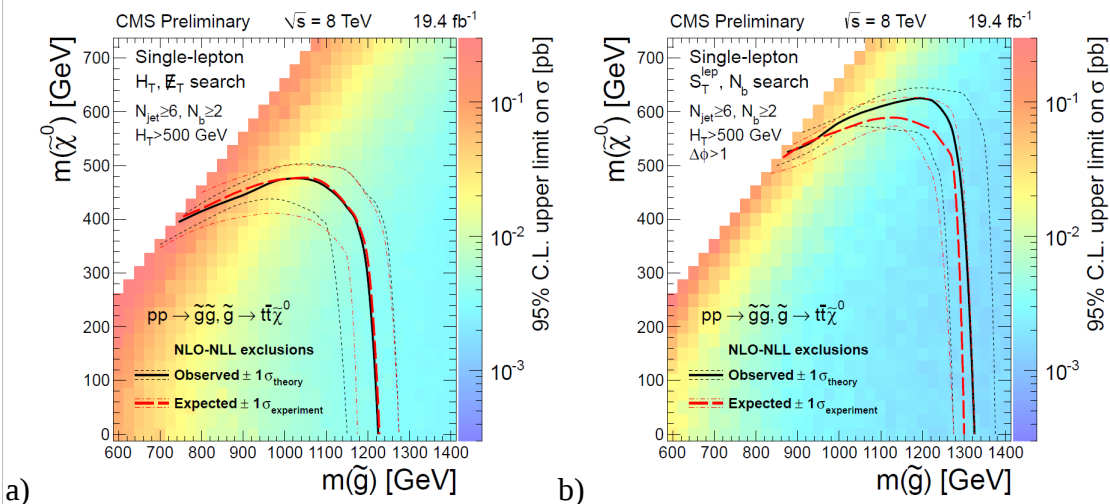
A szuperszimmetriának egy olyan egyszerűsített modelljét vizsgáltuk, amelyben a proton-proton ütközések során gluínó pár keletkezik, majd mindkét gluínó top kvarkra és annak szuperpartnerére, skalár top-ra bomlik. A skalár top tovább bomlik top kvarkra és az ebben a modellben legkönnyebb

szuperszimmetrikus részecskének számító neutralínóra.



Az esemény-kiválasztás az adatgyűjtéskor valós időben, egy gyors adatkiértékelő (trigger) rendszerrel történik. Esetünkben a trigger-rendszer egy leptont, hadron-záporokat, és hiányzó transzverzális energiát követelt meg. Az adatkiértékeléshez a leptonok rekonstrukciós, azonosítási, és kiválasztási hatásfokainak megméréseivel, valamint a háttérbecsléskor megjelenő szisztematikus bizonytalanságaik meghatározásával járultunk hozzá. A hatásfokok mérését Z-bozonok leptonikus bomlását tartalmazó eseményekben végeztük az úgy nevezett „tag-and-probe” módszerrel. Minden kiválasztott eseményben megköveteltünk egy pontosan („tag”), és egy elégségesen („probe”) felismert, ellentétes töltésű leptonokból álló párt, amely invariáns tömege a Z-bozon névleges tömege körül, 40 GeV szélességű ablakba esett. Mivel ilyen párok tartalmazhatnak nem Z-bozonok bomlásából származó háttérrel is, ezért a párok tömeg-eloszlásait jel+háttér görbével illesztettük meg. A háttér levonása után, a hatásfokot a pontosan felismert „probe” leptonokat tartalmazó párok és az összes pár számának arányként kaptuk.

A háttérbecslésekhez képest nem találtunk eseménytöbbletet a megfigyelt adatban. A gluínó párkeltés hatáskeresztmetszetére vonatkozó kizárási határokat az egyszerűsített modell paraméterterében, 95%-os konfidencia szint megszabásával számítottuk. A statisztikus bizonytalanságot Poissonként, a szisztematikus bizonytalanságokat pedig log-normális eloszlásokkal modelleztük. A várt eseményhozam szisztematikus bizonytalansága a hiányzó transzverzális energia skálájának, a „pile-up” súlyozásnak, a b-kvark azonosítás skálafaktorának, a luminozítás-mérésnek, a lepton-rekonstrukciónak, és a trigger hatásfokok számításainak a bizonytalanságaiból származik, és minden egyes paraméter-pontra külön lett számítva. A várt és a megfigyelt kizárási határokat az 2. ábra mutatja.



2. ábra: Kizárási tartományok az egyszerűsített modell paraméterterében a) a lepton spektrum és b) a $\Delta\phi$ módszerekkel. A megfigyelt (1σ elméleti) és a várt (1σ kísérleti) kizárási határok kontúrjai szintén fel vannak tüntetve.

A továbblépéshez a jelenleginél jóval nagyobb luminozításra lesz szükség, amelyet a

továbbfejlesztett LHC 2015-től biztosítani fog. Erről a témáról Horváth Dezső több nemzetközi konferencián tartott meghívott előadást, Aranyi Attila, Kapusi Anita, Karancsi János és Veszprémi Viktor pedig nemzetközi és hazai CMS-megbeszéléseken.

3. A CMS észlelőrendszerének üzemeltetése és fejlesztése

Ez valamennyi kísérleti csoport fő feladata. A müon-csoportunk sikeresen üzemben tartotta a CMS barrel-müon-detektorának optikai összeigazító rendszerét (Szillási Zoltán, Ujvári Balázs, Bencze György és Béni Noémi előadásai). Folyamatosan részt vett a CMS általános detektor-ellenőrző rendszerének (Detector Control System, DCS) fejlesztésében és üzemeltetésében. Béni Noémi és Szillási Zoltán kidolgozták a CMS rendszeres biztonsági ellenőrzésének rendszerét is, erről a CMS részére kézikönyvet írtak és számos előadást tartottak (Béni Noémi előadása). Hagyományosan részt veszünk a CMS szíve, a pixel detektor üzemeltetésében, ezt honorálandó Veszprémi Viktor lett a pixel-csoport egyik vezetője, mellette Karancsi János és Radics Bálint vett részt ebben a munkában, erről rendszeresen tartanak előadásokat. Hála a 2012 tavaszán a Wigner FK RMI-ben üzembe helyezett CMS adatminősítő állomásunknak, a csoport nagyobb része, Agócs Ádám, Hajdu Csaba, Hidas Pál, Karancsi János, Krajczár Krisztián, Krizsán József, Siklér Ferenc, Veszprémi Viktor, Vesztergombi György és Zsigmond Anna részt vett a nyomkövető rendszer összeigazítási munkájában (tracker alignment) és az adatok off-line minősítésében, erről több előadást is tartottak. Többen részt veszünk a közvetlen adatgyűjtésben az adatellenőrzés (Data Quality Monitoring) terén is, Karancsi János és Horváth Dezső sok ilyen műszakot teljesített. Bekapcsolódtunk a CMS észlelőrendszerének az LHC hosszú leállásai alatt tervezett megújításába is: a müon- és pixel-csoportunk részt vesz a tervezésben. Elkezdtünk egy új témát is, a detektorelemek állapotának ellenőrzését optikai módszerekkel (Makovec Alajos, Béni Noémi és Szillási Zoltán).

3.1. A Pixel detektor üzemeltetése és kalibrációja

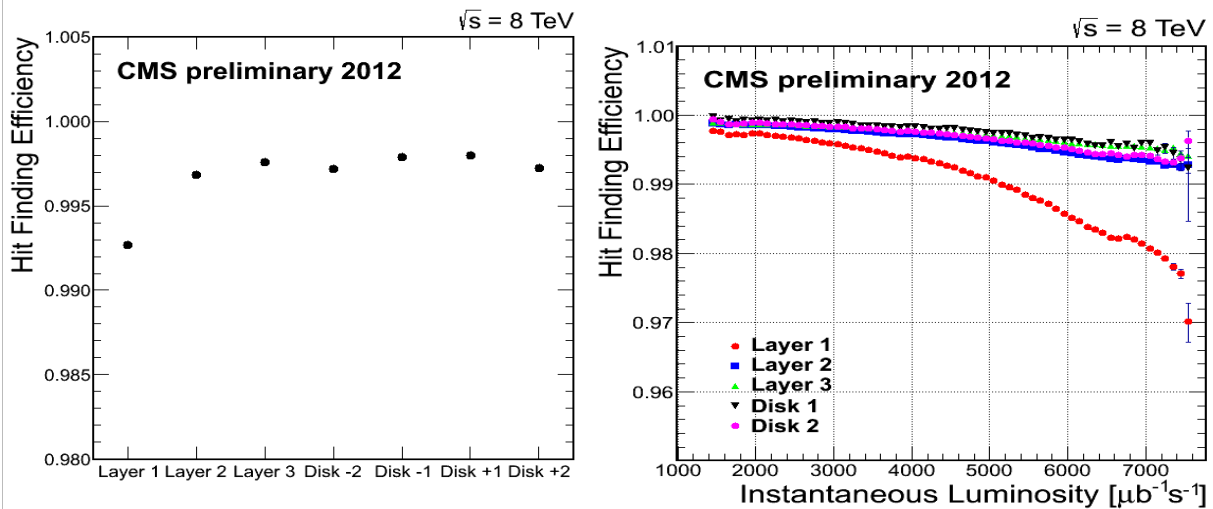
Részt vettünk a CMS pixel-detektorának üzemeltetésében és kalibrációjában 2010. és 2013. között. Ennek része volt a Nagy Hadron-ütköztetőn felvett, detektor-szintű adatok kiértékelése, a használt szoftverek fejlesztése, továbbá az együttműködés által előírt detektorügyleti és adatminőség-ellenőrző műszakok elvégzése. Az utóbbiak immáron a Wigner Fizikai Kutatóközpontban is elvégezhetőek voltak az ott létrehozott és 2012-ben átadott CMS adatellenőrző állomáson.

Megmértük a szenzor beütési határfokát (3/a ábra) [22]. A határfok ismerete nélkülözhetetlen a detektor működésének nyomon követésében [22-23], és a szenzorok jövőbeni felújításának tervezésében [24]. A 2011-ben és 2012-ben gyűjtött adatok feldolgozásával azonosítottunk egy magas kitöltöttség mellett jelentkező, tervezésből fakadó dinamikus határfokvesztést (3/b ábra). 2013-ban kifejlesztettünk egy olyan módszert, amellyel ugyanez a hatás a CMS szimulációban is elérhető. Bebizonyítottuk, hogy a módszer működőképes, valamint jó egyezést mutat valódi adatokkal összehasonlítva.

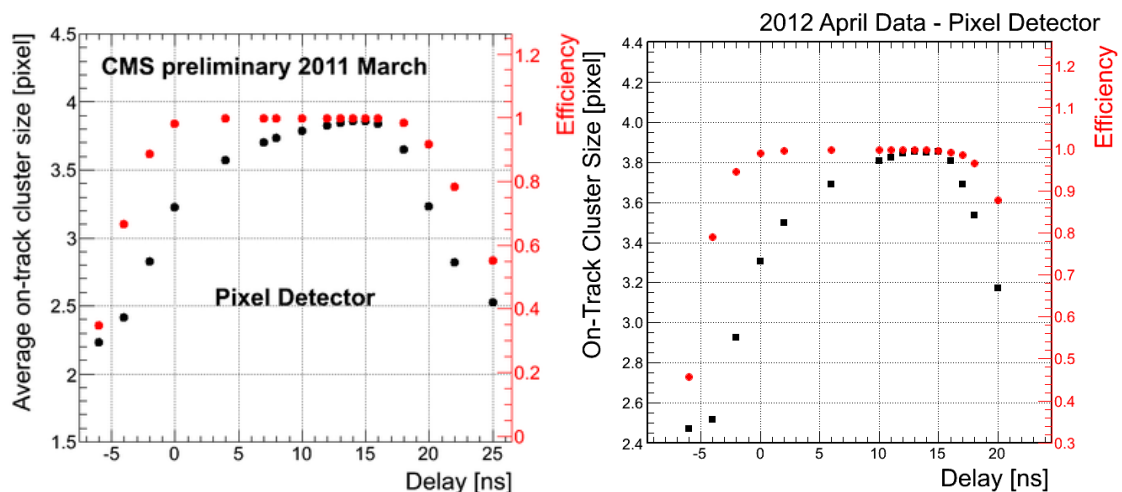
2010 és 2012 között mi végeztük a detektor időzítésének kalibrációját [22]. A adatkiolvasások közötti 25 ns-os időintervallumon belül a beütési határfok és a klaszterek átlagos méretének maximalizálásával meghatároztuk a detektor órajelének optimális fázisát (4. ábra). Ellenőriztük, továbbá, a detektor egyes komponenseinek összehangoltságát is.

Az LHC első adatgyűjtési periódusának egészében nyomon követtük a pixel detektor

sugárkárosodását [26]. Egy-egy hosszabb besugárzási periódus után, a szenzorra kapcsolt előfeszítettség különböző értékei mellett hatásfok-méréseket végeztünk (3. ábra). A maximális hatásfok elérésének pontja jelzi a szenzor teljes kiürítéséhez szükséges előfeszítettség értékét, ami arányos a szenzor anyagának effektív szennyezettségével.

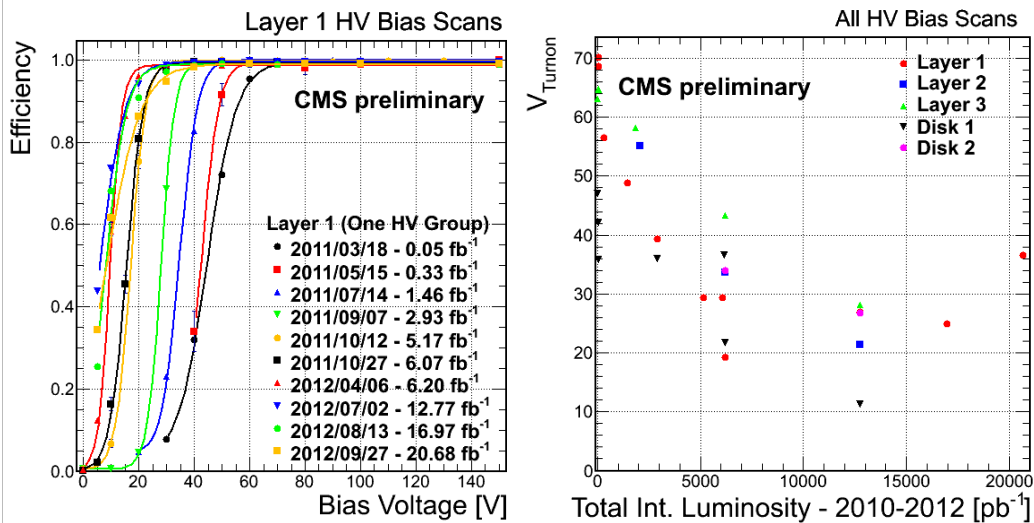


3. ábra: Észlelési hatásfok a) a pixel-detektor különböző rétegeiben és b) a pillanatnyi luminozitás függvényében 2012-ben.



4. ábra: Az átlagos klaszterméret (fekete) és beütési hatásfok (piros) a késleltetési idő függvényében a) 2011-ben és b) 2012-ben.

A pixel detektor kalibrációs adatbázisának karbantartását 2012 augusztusa óta mi látjuk el. A kalibrációs adatok között megtalálhatjuk az üzemképtelen detektor-modulok listáját, a beütésekben keletkezett töltések kiolvasása közben történő mágneses eltérések szögét (Lorentz-szögek), a mért részecskék beesési pontjának meghatározásához szükséges klaszteralakokat leíró pixelsablonokat, és a lineáris energia-kalibrációban használt paraméterek értékeit. Ezeket rendszeresen ellenőriztük, és a szimulációkhoz használt adatbázisokat megfelelően frissítettük.



5. ábra: a) A legbelső rétegen mért hatásfok az előfeszítettség függvényében 2011 és 2012 között elvégzett mérésekben. b) A 99%-os hatásfok eléréséhez szükséges feszültség az integrált luminozitás függvényében a detektor különböző rétegein.

3.2. A nyomkövető detektorok helyzet-meghatározása

2012-2013-ban részt vettünk a CMS (Szilikon Pixel és Strip) nyomkövető rendszer elemeinek szoftveres helyzet-meghatározásában, amellyel hozzájárultunk a részecske-nyomok helyreállítási pontosságának növeléséhez. Mi határoztuk meg a pixel detektor 2012-es kezdeti pozícióját kozmikus sugárzási adatok segítségével. Majd az év második felében nyomon követtük a detektorelemek helyzetének időbeli változását, valamint ellenőriztük a globális lézeres helyzet-meghatározás eredményét. Végezetül, 2013-ban újra elkészítettük a 2011-es és 2012-es év Monte Carlo szimulációjához szükséges detektorpozíciókat [27] (lásd Hidas Pál, Veszprémi Viktor és Vesztergombi György előadásait)

3.3. A müon-kamrák helyzetmeghatározása

A pályázatban megjelölt feladatok egyike a barrel müon kamrák pozíció monitor rendszerének működtetése, a mérési adatok folyamatos feldolgozása és szolgáltatása a fizikai analízis számára, az adatfeldolgozás módszereinek fejlesztése és pontosítása.

A pályázati időszakban a munka a kitűzött tervek mentén haladt. Induláskor a korábbi OTKA-támogatással elkészült hardver már folyamatosan szolgáltatott adatokat, így a munka ténylegesen arra irányult, hogy az adatokból kinyerhető kamra-pozíció értékek minél pontosabbak legyenek, illetve, hogy a kamra-pozíció adatok a mérés után minél gyorsabban rendelkezésre álljanak a kiértékelő program memória-igényének és futási idejének lecsökkentésével. Mindezt részben a kiértékelés alapjául szolgáló modell optimalizálásával, a feldolgozó szoftver és az adatokhoz való hozzáférés célszerűsítésével, magas fokú automatizálásával, részben a tapasztalatok alapján szükségesnek ítélt számítástechnikai kapacitás biztosításával sikerült elérni. Végeredményben az elért pontosság 0,5 mm illetve 0,5 mrad, és a 250 barrel müon kamra részletes pozíció-adatai a mérés kezdete után 1 nappal hozzáférhetőek. Ezek a paraméterek teljességgel kielégítik a

rendszerrel szemben támasztott elvárásokat. A rendszer az LHC 2012-es tervezett leállásáig folyamatos üzemelés mellett több mint 5000 teljes mérési ciklust teljesített [28-31].

A pozíció-monitor elsődleges feladata természetesen a kamra-pozíció adatok szolgáltatása, az elmozdulások jelzése. A mérési eredmények analízise azonban ezen túlmenően általános következtetések levonására is alkalmas volt. Ezek a kiegészítő tanulmányok számos információval szolgáltak a rendszer illetve a CMS-detektor működésével kapcsolatban. Sikeresen kimutatták, hogy a CMS-detektor barrel részében az összezárás utáni első mágnes-bekapcsoláskor 2 mm nagyságrendű nyaláb-irányú rugalmatlan összehúzódás következik be, majd minden egyes mágnes-ciklus alatt szintén 2 mm nagyságrendű rugalmas összehúzódás mérhető. Ez utóbbinál megfigyelhető egy nagyjából 24 órás relaxációs idő is. Szintén megfigyelhető a barrelt alkotó gyűrűk önálló mozgásából, deformációjából eredő kollektív kamra-elmozdulás. Mindezzel együtt a CMS barrel-t nagyfokú időbeli stabilitás jellemzi, ami kétségtelenül megkönnyíti a hosszabb idejű mérési statisztikákon alapuló fizikai analízist, növeli annak pontosságát.

Külön tanulmány foglalkozott a nagy elemszámú pozíció-monitor rendszer redundanciájával, egyes esetleg meghibásodó alkatrészek hatásával a kamra-pozíció mérésének pontosságára. Sikeresen kimutatták, hogy lokálisan 5-10%-os veszteség sem teszi lehetetlenné a mérési eredmények kiértékelését, bár a kieső terület környékén levő kamrák pozíció meghatározási pontossága csökken. Elosztott hibák esetében a rendszer redundanciája képes a hiányzó adatokat kompenzálni.

Meg kell említeni, hogy a CMS – és általában a nagy részecskedetektorok – kettős pozíció monitor rendszerrel dolgoznak. Az egyik egy megépített célberendezés mérésein, a másik az ütközések során keletkező részecskék röppályájának statisztikai elemzésén nyugszik. A két módszer kiegészíti egymást: az előbbi bármikor azonnali adatokat szolgáltat a hardver rendszer által elérhető pontossággal, az utóbbi hosszabb időn át gyűjtött adatokra támaszkodik (és arra a hardver információra, hogy közben nem történt releváns elmozdulás), de általában pontosabb. Viszont a röppálya módszer a müon-kamrák hat szabadsági foka közül (a CMS barrel müon detektor esetében) csak háromra tud adatot adni, a többi hárommal kapcsolatban kizárólag a hardver rendszer képes adatokat szolgáltatni. A két rendszer egymással összevethető adataiból az üzemelés során kitűnt, hogy a nagyfokú globális egyezés mellett egy kisméretű (mm nagyságú) torziós eltérés (úgynevezett twist-effect) mutatkozik a CMS tengelye mentén.

Az LHC tervezett leállása alkalmat adott az eddigi tapasztalatok összegzésére és a szükségesnek érzett javítások és fejlesztések előkészítésére illetve megvalósítására. Ez a munka jelen pályázat lezárásával nem ér véget, hanem folytatódik a már elfogadott OTKA-K109703/109803 konzorciális pályázatok által támogatott időszakban is.

A felújítás-továbbfejlesztés célja hármas: a rendszer pontosságának további növelése, a twist-effect további vizsgálatának megteremtése és egyes kritikus elemek üzem közbeni javíthatóságának biztosítása. Technikailag ez azt jelenti, hogy a már meglévő 600 mellé még 40 video-szenzort szerelünk fel, a rendszer kulcselemét alkotó 36 nagyméretű merev struktúrát (az úgynevezett MAB-okat) több és megbízhatóbb konstrukciójú, földmérő technikával a CMS bezárása, sőt a mágnes bekapcsolása után is megfigyelhető céltárggyal látjuk el, valamint a video-szenzorok kiolvasását végző miniszámítógépeket a CMS barrel gyűrűk belsejéből a perifériára helyezük át. Mindezeknek a változtatásoknak az összköltsége nagyságrendileg 40000 CHF, aminek túlnyomó részét sikerült az OTKÁ-n kívüli forrásokból biztosítani, miközben a gyártási-előszerelési munka nagyobb hányada a Wigner FK-nál történt.

A CMS részéről igény mutatkozik arra, hogy a barrel müon rendszernél szerzett tapasztalatokat az endcap müon rendszer pozíció monitor üzemelésénél illetve adatainak kiértékelésénél is hasznosítsuk, segítve ezzel a témán dolgozó, zömében amerikai csoportokat, miközben ők jobban koncentrálnának a röppálya-módszerrel történő kiértékelésre. Komolyan vizsgáljuk a bekapcsolódás lehetőségeit, annál is inkább, mivel az endcap müon rendszerek nagyobb rapiditású tartományokra való kiegészítése fokozottan veti fel a pozíciópontosság iránti igényeket.

A CMS pozíció-monitorral kapcsolatos munkáról folyamatosan beszámoltunk a CMS-Alignment csoport heti rendszerességű ülésein továbbá a magyar CMS csoport szemináriumain.

A CMS müon rendszerrel kapcsolatos munkaterv része volt a barrel müon kamrákon belüli drift-sebesség monitorozására szolgáló drift-monitor kamra építésében való együttműködés az Aachen RWTH intézettel. Ebben a témában feladatunk az adatgyűjtő rendszerrel kapcsolatos hardver és szoftver fejlesztése volt. Ez a munka a pályázat első időszakában a rendszer telepítésével és beüzemelésével eredményesen lezárult.

3.4. Környezeti jellemzők mérése szenzorokkal

A pályázati időszak alatt sikerült újabb témákba is bekapcsolódnunk, további gyümölcsöző együttműködések kiépíteni illetve ezek alapjait lerakni. Ezek közül az „S4CMS” és a „CMS Fiber Optic Sensor” témák azok, amelyben már eredményekről is be tudunk számolni [32-35].

Az S4CMS (Sensors for CMS) a CMS környezeti paramétereit mérő szenzorok adatainak egységes stílusú megjelenítésére alkalmas PVSS alapú grafikus szoftver, amely a CMS vezérlőtermében a detektort üzemelő kollégák munkáját segíti, a különböző csoportok által üzemeltetett környezeti szenzorok integrálását teszi lehetővé. A felhasználónak lehetősége van különböző nézeteket megnyitni, lehetőség van geometriai elhelyezkedés szerinti grafikus megjelenítésére különböző nézetekben, amelyekben a detektor környezetéről készült ábrák segítik a felhasználót. Ezekben a nézetekben a detektoron, illetve a detektor földalatti aknáiban felszerelt szenzorok megjelenítésére van lehetőség.

A S4CMS szoftver fejlesztéséhez csoportunk 2009-ben csatlakozott, és mára a fő fejlesztőnek számít. Feladatunk a szoftver folyamatos üzemeltetése és fejlesztése, valamint az újonnan felszerelt szenzorok integrálása. Mára már több mint 200 szenzor tartozik a rendszerhez, amelyek nyolc különböző környezeti paramétert mérnek (hőmérséklet, páratartalom, harmatpont, nyomás, nyomáskülönbség, folyadék, távolságmérő, mechanikai feszültség).

A CMS Fiber Optic Sensor csoport munkájába szintén 2009-ben kapcsolódtunk be. Ez a csoport egy innovatív rendszer, FBG (Fiber Bragg Grating) szenzorokra épülő, környezeti paramétereket mérő rendszer kiépítésén és a CMS-beli alkalmazásán dolgozik. Kezdetben csak néhány tíz szenzor került felszerelésre: 10+10 hőmérsékletet mérő szenzor az úgynevezett Tracker bulkhead-en, valamint tíz mechanikai feszültséget mérő szenzor a HF detektort tartó platformon és annak lábain. 2011-ben újabb 60 hőmérsékletet mérő szenzor került beszerelésre a CMS detektor földalatti aknájában levő galériákra és a függőleges aknájának falára.

Az LHC mostani leállása alatt újabb típusú, nagyjából 60 páratartalom mérésre és ugyanannyi hőmérséklet mérésre alkalmas szenzor kerül beszerzésre a CMS Tracker detektor régiójában. Ez a detektor a sugárkárosodás csökkentése érdekében mínusz 10 °C alatti hőmérsékleten üzemel.

Ezért a környezeti hőmérséklet megugrása és emellett a kondenzáció elkerülése érdekében mind a hőmérséklet, mind pedig a páratartalom folytonos mérése különleges fontosságú. Bár egy FBG szenzor önmagában még nem érzékeny a relatív páratartalomra, alkalmazhatunk azonban olyan – esetünkben poliimid - bevonatot a szálakon az FBG-k környezetében, amely a páratartalom megváltozására méretváltozással reagál, így közvetve alkalmas páratartalom mérésére. 56 db páratartalom- és 56 db hőmérsékletmérő szenzort már installáltunk a Tracker detektorba, további 16-16 szenzor telepítésre vár.

Csoportunk szervesen kapcsolódik a fent említett projekthez, végigkísérve annak minden lépését: Folyamatosan részt veszünk a szenzorok tesztelésében, amely magában foglalja az új szenzorok kísérleti elrendezésbe való telepítését, az alkalmazott klímakamrákban végzett, kalibrációs és ellenőrző ciklusok végrehajtását, az eredmények analízisét és az ehhez szükséges számítástechnikai eljárások kidolgozását. Jelentős szerepünk volt a megfelelő kalibrációs eljárás kidolgozásában, amellyel a megkövetelt relatív páratartalom-mérési pontosság ($\pm 3\%$) elérhető. A Trackerrel kapcsolatos eredményeinket a CMS Tracker LS1 meetingeken (CERN) heti rendszerességgel bemutattuk.

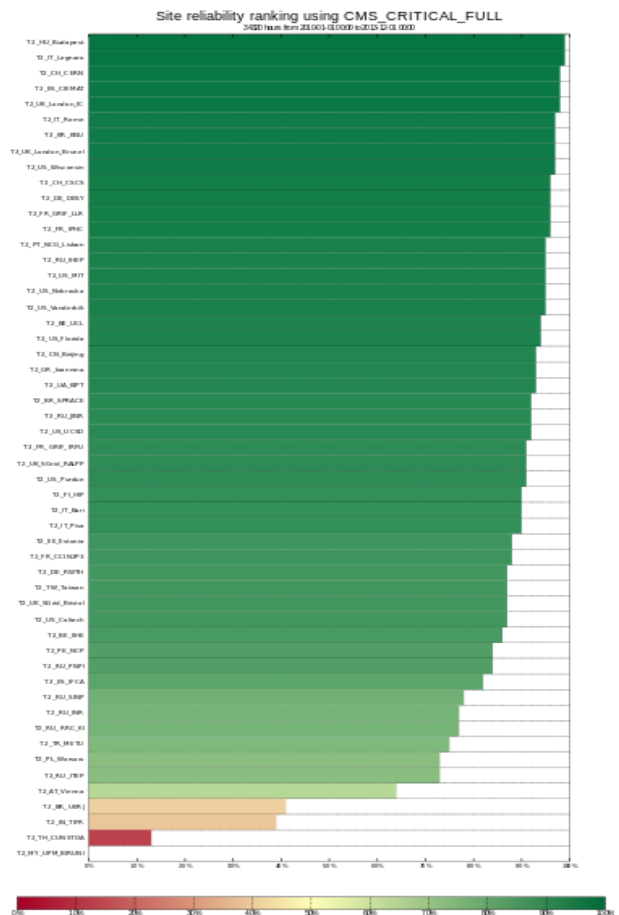
Eredményeinket az is visszaigazolja, hogy a szenzorok CMS-be való telepítése mára egy elfogadott projekt. Ennek keretében a felsoroltakon kívül további, nagyjából 500 darab, hőmérséklet mérésére alkalmas szenzor kerül felszerelésre a CMS müon endcap régiójában az RPC müon detektorok hőmérsékletének mérésére.

Csoportunk felügyeleti műszakok teljesítésével is részt vett a CMS detektor üzemeltetésében. A csoport tagjai a munkánk fő tevékenységéből eredően a barrel müon kamrák (DT aldetektor) üzemeltetésében vállaltak szerepet, de ezen kívül a detektor központi rendszeréhez tartozó DCS (a CMS aldetektorainak technikai felügyelete) shifteket is vállaltunk, valamint „CMS Technical Coordination” telefonügyeletet is teljesítettünk.

A fenti munka eredményei részleteiben is nyomon követhetők a magyar CMS-csoport honlapján Bencze György, Béni Noémi, Makovec Alajos, Szillási Zoltán, Ujvári Balázs és Zilizi Gyula előadásában

3.4. Grid-hálózat üzemeltetése

A Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) az LHC kísérletek szimulált adatainak előállítását, illetve a mért adatok tárolását, feldolgozását és kiértékelését végző, öt kontinenst átölelő, elosztott számítógépes rendszer. A WLCG budapesti T2-es szintű állomása több, mint egy



6. ábra. CMS Tier-2 állomások rangsora, 2010-13.

évtizede üzemel a Wigner FK területén, kapacitásának kétharmadát a CMS kísérletnek dedikálva. Így mintegy 350 processzor mag és 250 TB merevlemezes tár szolgálja folyamatosan a CMS-t, azon belül elsődlegesen a Wigner FK-ban dolgozó kutatókat.

Jelen pályázatból a következő fontosabb fejlesztéseket végeztük: a rendszer felügyeletét ellátó, hét évnél idősebb gépek cseréje, 80TB-nyi merevlemez cseréje és bővítése, ill. 64 új, korszerű CPU mag üzembeállítása. Ennek is köszönhető, hogy a pályázat idején első helyre kerültünk a CMS T2 állomásai rendelkezésre állási rangsorában: a 6. ábrán a 2010. elejétől a pályázat végéig terjedő időszakokra vonatkozó rangsor látható. A Tier-2-k közötti feladatmegosztás keretében a Monte Carlo generálás mellett elsősorban a QCD-csoportot támogatjuk, de a magyar résztvevők igénye szerint más jellegű adatokat (TGC, SUSY, pixel, alignment) is letöltünk feldolgozás céljára (Hajdu Csaba, Hernáth Szabolcs és Szeberényi Ágnes előadásai). Ugyancsak a beszámolási időszakban indult el a Baross Gábor-pályázat alapján megépült CMS Tier-3 állomás az ATOMKI-ban (Ecsedi Kornél előadása). Valószínűleg komoly szerepe volt Tier-2 állomásunk sikerének abban, hogy a CERN 31 pályázó közül a Wigner FK-nak ítélte a kihelyezett Tier-0 állomást, amelyet 2013-ban üzembe is helyeztek.

3.5. Adatminősítő munka

A pályázat keretében sikeresen megépítettük és használatba vettük a Wigner FK RMI CMS-állomását, amely mostantól folyamatos lehetőséget nyújt a tracker-rendszer adatainak az eseményrekonstrukció előtti minősítésére, ehhez régebben a CERN-be kellett utazni. Csoportunk 2012-13 folyamán 60 nyolcórás tracker-offline műszakot teljesített a CMS-állomáson. Teljesítettünk ezen kívül igen sok központi felügyeleti műszakot is háromféle munkakörben: detektorvezérlési, biztonsági és online adatellenőrző műszakokban, mindehhez, természetesen, továbbra is a CERN-be kellett utazni.

4. Publikációk és hivatkozások

A beszámolási időszak alatt 403 referált nemzetközi publikációnk jelent meg a témakör legrangosabb folyóirataiban (Phys. Rev. Lett., Phys. Lett. B, J. High Energy Phys., Eur. Phys. J. C, Phys. Rev. D és J. Instr.), mintegy 2200-3000 szerzővel; azokra már 15000 fölé hivatkozás érkezett. A Higgs-bozon megfigyelésével kapcsolatos CMS-cikkre, amelyben 21 magyar szerző van a közel 3000 között, az eltelt másfél év alatt 2000-nél több hivatkozás történt. Részvételünkkel több száz nemzetközi konferencia-előadást jegyeztek és számos ismeretterjesztő cikket is írtunk. Az alábbi jegyzékben csak a meghatározó részvételünkkel született publikációk szerepelnek.

Irodalom

[1] Krisztián Krajczár and the CMS Collaboration, „Charged hadron multiplicity and transverse energy densities in PbPb collisions from CMS”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 38 (2011) 124041

[2] CMS Collaboration, „Dependence on pseudorapidity and centrality of charged hadron production in PbPb collisions at a nucleon-nucleon centre-of-mass energy of 2.76 TeV”, JHEP 08 (2011) 141

[3] CMS Collaboration, „Study of high- p_T charged particle suppression in PbPb compared to pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 2.76$ TeV”, Eur. Phys. J. C 72 (2012) 1945

Internal reference: Edward Wenger, André Yoon, Frank Ma, Krisztián Krajczár, CMS AN-2012/015

[4] Krisztián Krajczár for the CMS Collaboration, „Measurement of charged particle R_{AA} at high p_T in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with CMS”, arXiv:1208.6218; proceedings of the Hard Probes 2012 conference, 2012

[5] CMS Collaboration, „Detailed characterization of jets in heavy ion collisions using jet shapes and jet fragmentation functions”, CMS PAS HIN-12-013, 2012

[6] CMS Collaboration, „Observation of sequential Y suppression in PbPb collisions” Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 222301, Internal reference: Nuno Leonardo et al. incl Anna J Zsigmond, CMS AN-2011/455

[7] CMS Collaboration, „Z boson production with the 2011 data in PbPb collisions” CMS PAS HIN-12-008, 2012, Internal reference: Lamia Benhabib, Anna J Zsigmond, Michael Gardner, Raphael G. d. Cassagnac, CMS AN-2012/085

[8] CMS Collaboration, „Z-boson production via the electron and muon channels in PbPb collisions at 2.76 TeV”, CMS PAS HIN-13-004, 2013

[9] Ferenc Siklér, „CMS plans for p-Pb data taking”, pA@LHC Workshop, Geneva, 4-8 June 2012

[10] Carlos Salgado et al incl Ferenc Siklér, „Proton-nucleus collisions at the LHC: Scientific opportunities and requirements”, J. Phys. G 39 (2012) 015010

[11] CMS Collaboration, „Observation of long-range near-side angular correlations in proton-lead collisions at the LHC”, Phys. Lett. B 718 (2013) 795-814
Internal reference: Yen-Jie Lee et al incl Krisztián Krajczár, CMS AN-2012/352

[12] CMS Collaboration, „Charged particle nuclear modification factor and pseudorapidity asymmetry in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV with CMS”, CMS PAS HIN-12-017, 2013

[13] CMS Collaboration, „Study of dijet momentum-balance and pseudorapidity distributions in pPb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy = 5.02 TeV”
CMS AN-2012/473, CMS-PAS-HIN-13-001.

[14] Gábor Veres, „Overview of results on jets from the CMS collaboration”
Quark Matter 2012, 13-18 Aug 2012, Washington D.C. USA.

[15] Gábor Veres, „HI Physics Results from CMS”, La Thuile 2012: XXVI Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, 26 Feb-3 Mar 2012, La Thuile, Valle d'Aosta, Italy.

[16] Gábor Veres, „Heavy ions: jets and correlations”, EPS HEP 2013 Stockholm, 18-24 Jul 2013, Stockholm (Sweden)

[17] CMS Collaboration, “Search for supersymmetry in final states with a single lepton, b-quark jets, and missing transverse energy in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, Phys. Rev. D87 (2013) 052006, CMS-SUS-11-028, CERN-PH-EP-2012-316, arXiv:1211.3143 [hep-ex],

doi:10.1103/PhysRevD.87.052006

amely a következő belső jegyzeteket foglalja össze:

CMS Collaboration, „Search for supersymmetry in events with a single lepton and jets using templates”, CMS-PAS-SUS-11-027;

CMS Collaboration, „Search for Supersymmetry in Final States with a Single Lepton, B-jets, and Missing Transverse Energy in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, CMS-PAS-SUS-11-028;

V. Veszprémi, et al., „Reconstruction, identification, and trigger efficiencies for SUSY searches in the single lepton channel in 2011”, AN-2011/536

[18] CMS Collaboration Collaboration, “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in events with a single lepton, jets, and missing transverse momentum”, Eur.Phys.J. C73 (2013) 2404, CMS-SUS-12-010, CERN-PH-EP-2012-348, arXiv:1212.6428 [hep-ex],

doi:10.1140/epjc/s10052-013-2404-z

amely a következő belső jegyzeteket foglalja össze:

CMS Collaboration, „Search for supersymmetry in events with a single lepton, jets, and missing transverse momentum using a neural network”, CMS-PAS-SUS-11-026;

CMS Collaboration, „Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in events with a single lepton, jets, and missing transverse momentum”, CMS-PAS-SUS-12-010;

V. Veszprémi, et al., „Reconstruction, identification, and trigger efficiencies for SUSY searches in the single lepton channel in 2011”, AN-2011/536

[19] CMS Collaboration, “Search for supersymmetry in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV in events with a single lepton, large jet multiplicity, and multiple b jets”, benyújtva a Phys. Lett. B-be, CMS-SUS-13-007, CERN-PH-EP-2013-209, arXiv:1311.4937 [hep-ex]

amely a következő belső jegyzeteket foglalja össze:

CMS Collaboration, „Search for supersymmetry in pp collisions at $s = 8$ TeV in events with a single lepton, multiple jets and b-tags”, CMS-PAS-SUS-11-007;

V. Veszprémi, J. Karancsi et al., „Reconstruction, identification, and trigger efficiencies for SUSY searches in the single lepton channel in 2012”, CMS Note AN-2013/035

[20] D. Horváth (on behalf of the CMS Coll.), „Search for the Higgs-boson: A Statistical Adventure of Exclusion and Discovery”,

Proceedings of CCP-2013, CMS Note CR-2013/266; arXiv:1310.6839 [hep-ex], 2013.

[21] Horváth Dezső: „A Higgs-bozon”, Typotex, 2013, 104 o.

[22] V. Veszprémi, J. Karancsi, „Performance of the CMS pixel detector timing and synchronisation using LHC beam data in Run 1”, belső CMS jegyzet: AN-2013/378;

V. Veszprémi, J. Karancsi, „Efficiency measurement of the CMS pixel detector in proton-proton collisions of Run 1 at the LHC”, belső CMS jegyzet: AN-2013/379.

[23] V. Veszprémi for the CMS Collaboration, „Operation and performance of the CMS tracker”, CERN-CMS-CR-2013-437, benyújtva a Journal of Inst.-be

[24] CMS Collaboration, “Description and Performance of the CMS Track and Primary Vertex Reconstruction”, Journal of Inst.-be lesz benyújtva, CMS PAPER TRK-11-001

[25] A. Dominguez, "CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade", CERN-

LHCC-2012-016, CMS-TDR-11, ISBN 978-92-9083-380-2

[26] V. Veszprémi, J. Karancsi et al., „Irradiation Effects on the CMS Pixel Detector in Run I”, belső CMS jegyzet: AN-2013/365

[27] CMS Collaboration, „Alignment of the CMS Tracker with Large Hadron Collider Data”, CMS-TRK-11-002-001 (<https://cds.cern.ch/record/1620299?>), Journal of Inst.-be lesz benyújtva

[28] Balázs Ujvári: „Experimental Investigations of High Energy Particle Collisions at LEP and LHC”. PhD értekezés, Debreceni Egyetem, 2012

[29] B. Ujvári et al., „CMS Barrel Muon Alignment: Influence of Missing MABs on DT - positioning Accuracy.” CMS-NOTE-2012-005.

[30] Noemi Beni, on behalf of CMS experiment: „Experiences with the Muon Alignment Systems of the Compact Muon Solenoid Detector,” Proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2011), 8-14 June 2011 Chicago, USA, Physics Procedia, 37, (2012) 96-103 (doi: 10.1016/j.phpro.2012.02.352) MUO-11-001.

[31] The CMS collaboration: „The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV at the LHC”, 2013 JINST 8 P11002 (doi:10.1088/1748-0221/8/11/P11002).

[32] Zoltán Szillási, Salvatore Buontempo, Noémi Béni, Giovanni Breglio, Andrea Cusano, Armando Laudati, Michele Giordano, Andrea Saccomanno, Dmitry Druzhkin, Andromachi Tsiros: „One Year of FOS Measurements in CMS Experiment at CERN”, Proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2011), 8-14 June 2011 Chicago, USA, Physics Procedia, Volume 37, (2012) Pages 79-84 (doi: 10.1016/j.phpro.2012.02.360)

[33] Saccomanno, A.; Laudati, A.; Szillasi, Z.; Beni, N.; Cutolo, A.; Irace, A.; Giordano, M.; Buontempo, S.; Cusano, A.; Breglio, G.: „Long-Term Temperature Monitoring in CMS Using Fiber Optic Sensors, Sensors Journal, IEEE, 12 (2012) 3392-3398 (doi: 10.1109/JSEN.2012.2205989)

[34] Marco Esposito, Salvatore Buontempo, Angelo Petriccione, Mauro Zarrelli, Giovanni Breglio, Andrea Saccomanno, Zoltan Szillasi, Alajos Makovec, Andrea Cusano, Antonella Chiuchiolo, Marta Bajko, Michele Giordano: „Fiber Bragg Grating sensors to measure the coefficient of thermal expansion of polymers at cryogenic temperatures”. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 189, 15 January 2013, Pages 195-203 (doi: 10.1016/j.sna.2012.09.016)

[35] N. Béni et al. (S4CMS group): „S4CMS: A combined monitoring of sensors in CMS experimental site”, 12th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD10), 7-10 June 2010 Siena, Italy., Nuclear Physics B – Proceedings Supplements, 215 (2011), 359-361 (doi:10.1016/j.nuclphysbps.2011.04.053)

[36] CMS Collaboration, „Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, Phys.Lett. B716 (2012) 30-61; JHEP 1306 (2013) 081; Science 338 (2012) 1569-1575.