

Hadronfizika a CMS detektorral

OTKA K 48898, 2005 – 2009, zárójelentés

Az elért eredményeket három részre osztottuk. Az 1. részben a kifejlesztett új adatkiértékelési módszereket, vizsgálatokat mutatjuk be. Ezt követi a CMS kísérlet hardveréhez, valamint a trigger rendszerhez való hozzájárulás (2. rész), majd a LHC-n a CMS kísérlet keretében 2009 novemberében induló hadronfizikai program előkészítéséhez, megalapozásához végzett munka, illetve eredményeinek részletes bemutatása (3. rész). A zárójelentés a több, mint négy éves munka hatásaival, összegzésével folytatódik (4. rész), majd két melléklettel (A: belső publikációk és B: előadások nemzetközi konferenciákon) és a hivatkozások jegyzékével zárul. A szövegbeli referenciák mind a projekt keretében készült saját, javarészt egy- vagy első szerzős publikációkra mutatnak.

1. Kiértékelési módszerek

1.1. Töltött részecskék nyomkövetése (kis p_T , kis tévesztés)

A CMS kísérletben a töltött részecskék nyomainak (track) rögzítését szilícium-pixelekkel és -csíkokkal végezzük. Ez eddig használatos nyomkövető módszer csak a $p_T > 1$ GeV/ c tartományban működött, tehát a hadron ütközésekben keletkezett részecskéknek csak töredékét rekonstruálta. Kidolgoztunk egy új módszert, amely a pixelek segítségével képes a kis p_T -jú részecskék rekonstruálására [1, 2]. Egy tracket három pixel beütés definiál. A harmadik beütés keresését egy ötletes, geometriai alapokon nyugvó eljárásra cseréltük. Így a CMS detektor akceptanciáját 100, 200 és 300 MeV/ c -ig toltuk le, rendre pionokra, kaonokra és protonokra. A folyamat során hibás trackek (tévesztések) állhatnak elő, főként kis p_T esetén. A szilíciumban keletkezett beütések alakja, mérete híven tükrözi a részecske áthaladásának irányát, így a hibák nagyon jól kiszűrhetők: részarányuk p-p ütközésben a százalékos szint alatt marad, de még Pb-Pb kölcsönhatásban $p_T > 400$ MeV/ c esetén is az 5%-os szint alatt tartható [3, 4]. Végeredményben mintegy 80-90%-os akceptancia és hatásfok érhető el, a rekonstruált részecskék p_T felbontása pedig 2% körül alakul. Az új módszer széles körben alkalmazható. Először is a néhány 100 MeV/ c -ig terjedő hatásosság lehetővé teszi a részecske eloszlások és hozamok mérését (inkluzív fizika). A kísérlet többi analízis csoportjának is fontos: Higgs események háttérének lecsökkentése a mögöttes (underlying) események, valamint a minimum bias események kölcsönhatási pontjának meghatározásával; elliptikus folyás korrekciója; D^* -fizika a lassú pion detektálásával; stb (exkluzív fizika).

1.2. Töltött részecskék azonosítása (dE/dx)

Egy töltött részecske detektorban leadott beütéseinek – az egyes energialeadásainak – mérésével a sebességfüggő dE/dx érték becsülhető. A szilícium alapú detektorban leadott energia felhasználásával kidolgoztunk egy, a részecskék azonosítására és hozamuk statisztikus meghatározására szolgáló módszert (dE/dx mérések levágott átlagolása). Így a pionok és kaonok spektruma 0,8 GeV/ c alatt, a protonoké pedig 1,5 GeV/ c alatt jól meghatározhatóvá vált, 7-9% becsült szisztematikus hibával [5, 6].

Az eredményeken javítani is tudtunk, mert levágott átlagolás a lineáris becslések körében tovább volt javítható, így a felbontás akár 15%-kal is jobb lehet. A módszer mind a szilícium

alapú detektorokra, mind a gáztöltésű kamrákra működik. Az eljárás lényege az, hogy az egyes energiaveszteségeket sorba rendezzük, majd pontos mikroszkópikus simuláció segítségével meghatározzuk az optimális súlyokat, amelyek minimalizálják a lineáris kombináció átlagának szórását. A vezető kutató szakdolgozója (Szeles Sándor) ezzel a munkával [7] a 2009-es OTDK konferencián második díjat kapott.

1.3. Semleges, gyengén bomló részecskék (V^0 -ák) és konvertált fotonok

Bár a semleges részecskék nem hagynak beütéseket a pixel detektorban, töltött bomlástermékeik révén felismerhetők lesznek. A kis p_T -jú részecskék rekonstrukcióját felhasználva olyan, ellentétes töltéssel rendelkező trajektóriákat (helixeket) kellett keresnünk, amelyek közel egy pontban találkoznak, a pár összipulzusvektora pedig az esemény kiindulópontjába mutat. Ez az új módszer a gyengén bomló K_S^0 , Λ és $\bar{\Lambda}$ részecskék nagy részét megtalálja, továbbá alkalmas a nyalábcsővön és az első pixel hengerben elektron-positron párrá konvertált fotonok felismerésére [8]. A bomlások segítségével a mágneses tér, a konverziók nyomon követésével pedig a részecskék útjában levő anyag is nagy pontossággal mérhető, tehát kalibrációs alkalmazásaink is vannak. A módszer a több ritka kvarkot tartalmazó rezonanciákra (Ξ^- , Ω^-) viszonylag egyszerűen kiterjeszthető.

1.4. π^0 impulzuseloszlásának meghatározása

A nagyenergiás részecske ütközésekben keletkező π^0 részecskék detektálása a bomlástermékeikből történik ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$). A rekonstrukció szokásos módszere az, hogy az eseményben detektált fotonokat az összes lehetséges kombinációban párosítják, majd az impulzuspárok-ból nyugalmi tömeget számolnak azzal a hipotézissel, hogy a fotonok egy bomlásból keletkeztek. A kombinatorikai háttérrel eseménykeverési módszerekkel határozzák meg. Nehézion ütközésekben a kombinatorikai háttér, illetve a detektor betöltöttségének megnövekedése miatt a π^0 rekonstrukciós hatásfoka alacsony. Ezért kifejlesztettünk egy indirekt módszert, amely az egyedi fotonok impulzuseloszlásából nyeri ki a π^0 spektrumot.

A bomlásból származó fotonok impulzuseloszlása a π^0 spektrumból egy valószínűségi keveréssel, egy integráloperátorral származtatható. Ha a fotonok túlnyomó része π^0 bomlásból származik (ez jó közelítéssel igaz), akkor a π^0 eloszlást elvben rekonstruálhatjuk úgy is, hogy a mért foton spektrumon kiértékeljük ennek az operátornak az inverzét. Ennek az eljárásnak az a nehézsége, hogy nincs az irodalomban ismert általános módszer egy valószínűségi keverési operátor inverzének meghatározására. Erre az általános valószínűségelméleti és mérés-technikai problémára sikerült átfogó megoldást találni [9]. A kidolgozott módszer egy iteratív eljárás, amely a válaszfüggvény ismeretében a mért eloszlásból visszaállítja az ismeretlen spektrumot. Speciálisan, konvolúció esetében megbízhatóbban működik, mint a hagyományos dekonvolúciós módszerek.

1.5. Egyéb vizsgálatok

A $\rho(770)$, a $K^*(892)$ és a $\phi(1020)$ mezonokat töltött hadronos bomlásaik során, a bomlástermékek invariáns tömege alapján tudjuk rekonstruálni [10]. A kapott csúcsok szignifikanciája a kaonok dE/dx -en alapuló szétválasztásával jelentősen növelhető. Részletesen megvizsgáltuk a rezonanciák reflexióját (egyik vagy mindkettő bomlástermék félreazonosítása), ennek hatását egymás invariáns tömegspektrumának alakjára.

2. Hardver, triggerek

Csoportunk hozzájárult CMS kísérlet hardverének építéséhez a nyaláb szcintillációs számlálók (Beam Scintillation Counters, BSC) fejlesztésével, beépítésével, tesztelésével [11]. A BSC segítségével létrehoztunk alacsony szintű triggereket (level-1), melyek képesek lesznek jó hatásfokkal és nagyon alacsony tévesztéssel minimum bias és nyaláb-halo kölcsönhatások kiválasztására. Kifejlesztettünk magas szintű szoftveres triggereket (high level trigger, HLT), melyek egy vagy két pixel trackre érzékenyek: ezek fogják adni a hadronspektrumokhoz használt események triggereit.

3. Hadronfizika

3.1. Proton-proton ütközések

Az LHC-nál először 2009 novemberében figyelhetünk meg proton-proton ütközéseket $\sqrt{s}=900$ GeV, majd 7 TeV tömegközépponti energián. A CMS kísérlet a kutatócsoportjait – a szimulált adatok segítségével – a közöbön álló mérésekre, első analízisekre készíti fel, melyek közül kettőt a pályázat keretében mi dolgoztunk ki.

Töltött hadronok eloszlásának mérése. A minimum bias proton-proton ütközések számára biztosított ~ 10 Hz-es trigger sáv szélességgel az első néhány hétben több millió eseményt tudunk felvenni. Ez már lehetővé teszi a töltött hadronok spektrumának megmérését a nyomkövető detektor akceptanciájában és a $0,2 \text{ GeV}/c < p_T < 20 \text{ GeV}/c$ tartományban. A munka során [5] kidolgoztuk a töltött részecskék nyomkövetését a fent említett széles impulzustartományban, felhasználva a pixeles és a csíkokból álló szilícium detektorokban hagyott beütéseket is. A módszer iteratív, mert felhasználja az első futás során meghatározott kölcsönhatási pontot vagy pontokat (nagy intenzitás és átlapoló ütközések esetén). Véletlen triggerrel használva az inelasztikus proton-proton ütközések mintegy 88%-át meg tudjuk figyelni. A tévesztéseket nagymértékben csökkentette, hogy a beütések alakjának és a trajektória irányának kompatibilitását is megköveteltük. Meghatároztuk a detektor geometriai akceptanciáját, a módszer algoritmikus hatásfokát, a többszörös azonosítás, valamint a tévesztés részarányát. Több más korrekciót is kellett alkalmaznunk: trigger hatásfok, másodlagos részecskék, gyengén bomló részecskékből származó járulékok levonása, az impulzus felbontása. A részecskék azonosítására, illetve hozamuk statisztikus meghatározására szolgáló módszerrel a pionok, kaonok és protonok spektruma is mérhető lesz kis impulzuson, 7-9% becsült szisztematikus hibával [6, 12]. Mivel a gyorsító luminozitását független mérésekből nagy pontossággal tudjuk, az ütközési gyakoriság mérésével az inelasztikus hatáskeresztmetszet is mérhető. Az eseményenkénti multiplicitás-eloszlás, a keletkezett részecskék számának és átlagos p_T -jének energiafüggése is vizsgálható lesz, utat nyitva egyes részecskekeltési modellek, skálázás vizsgálatához [4].

Töltött hadronok számának mérése. A fenti módszer csak akkor működik, ha a töltött részecske p_T -je 100 MeV/ c -nél nagyobb. Emiatt, valamint az eredmények független ellenőrzése céljából, a keletkezett részecskék rapiditás-eloszlásának mérésére egy másik módszert is kidolgoztunk [13]. Ez a detektor speciális geometriáját használja fel: minden eseményben a szilícium alapú nyomkövető rendszer három hengeres rétegében levő beütéseket számolja meg. A kölcsönhatási pont ismeretében a beütések helyéből az átmenő részecske rapiditása (η) kiszámítható. Az analízisben korrigálni kellett a mágneses térben felcsavarodó és így több beütést is hagyó részecskékre, a nem a kölcsönhatási pontból jövő részecskékre (bomlástermékek, vagy másodlagos ütközések termékei), valamint a trigger hatásfokára is. A háttér

hatékonyan csökkenthető volt, ha megköveteltük, hogy a beütésekben eladott energiavesztés megfeleljen a részecske várható haladási irányának. Végeredményben a töltött részecskék rapiditáseloszlása a $-2,5 < \eta < 2,5$ tartományban mintegy 8-10% becsült szisztematikus hibával mérhetővé vált [14].

3.2. Nehézion ütközések

A munka másik nagy része a 2010 őszére várható Pb-Pb ütközésekre való felkészülés volt [3, 15, 16, 17, 18]. Az eredmények összefoglalása a [19] referenciában található meg (eddig 103 hivatkozás), melynek közreműködői és szerkesztői voltunk. A 3. fejezet (Low p_T hadron spectra, szerk: Siklér Ferenc) a részecskék pixel alapú rekonstrukciójával, valamint a semleges hadronok és konvertált fotonok azonosításával, a 7.2 és 7.3 fejezet (High p_T hadrons, szerk: Veres Gábor) pedig a nagy p_T -s hadronok eloszlásával és a jet fragmentációs függvény meghatározásával foglalkozik.

Jetfizika, jet fragmentációs függvények. A RHIC gyorsítónál a nagy transzverzális impulzusú részecskék mennyiségéből és korrelációjából kiderült, hogy ezek jelentős energiavesztést szenvednek, amikor az ütközésben keletkezett anyagon áthaladnak. A CMS kísérlet nagy ütközési energiáján a jetek keletkezési hatáskeresztmetszete nagyon megnő, és az önálló jetek 50 GeV transzverz energia fölött elkülöníthetők lesznek még a több tízezer egyéb keletkező részecske ellenére is. 10000 Pb-Pb ütközésben már elég jet keletkezik, hogy a transzverz energia spektrumuk mérhető legyen 100-150 GeV-ig. Ehhez kidolgoztuk a jetenergia korrekcióját a háttér-energia levonásával, megvizsgáltuk a rekonstrukció hatáskorát, a hibás jetek rekonstrukciójának valószínűségét és az energiafelbontást, egy egyszerű szimuláció segítségével [20, 21]. Ebben az ismert, illetve kisebb energiákról extrapolált hatáskeresztmetszeteket vettük figyelembe.

A hadronkeltés nagy p_T -n történő elnyomása (ultranagy energiájú nehézion-ütközésekben) az anyagban áthaladó partonok energiavesztésének egyik legfontosabb megfigyelhető mennyisége. Az LHC-n a nukleáris modifikációs faktor (R_{AA}) méréseit néhány 100 GeV/ c -ig akarjuk majd kiterjeszteni. Ahhoz, hogy ez a nagy transzverz impulzus elérhető legyen, egy olyan triggerre volt szükségünk, amely elősegíti a nagy p_T -s részecskék megfigyelését, kiválasztását. A jet hatáskeresztmetszetek alapján meghatároztuk a detektor által érzékelt csatornák gyakoriságait. Kidolgoztunk egy új, stabil és modell-független módszert, amely egy kaloriméter alapú, a jetek transzverz energiájának (E_T) mérésén alapuló triggerrel használható. Ennek segítségével megbecsültük az így elérhető p_T tartományt: $0,5 \text{ nb}^{-1}$ összegyűjtött luminozitás esetén, több trigger-lépcső alkalmazásával, a felső határt az eredetileg lehetséges 90 GeV/ c helyett 200 GeV/ c -ig tudtuk kitolni [20, 21, 22].

A nehézion-ütközésben keletkezett jetek összetett szerkezetűek, a bennük foglalt töltött részecskék energiaeloszlása, a fragmentációs függvény képet adhat a keletkezett anyag tulajdonságairól. Sűrű és forró anyagban haladó partonok energiát vesztenek így a később keletkező hadronok is lassabbak lesznek. A kísérlet kalorimétereinek felhasználásával megmutattuk, hogy ez a hatás jól látható periférikus és centrális Pb-Pb ütközésekben mért fragmentációs függvények összehasonlításából. Ehhez szükségünk volt a következő eszközök kidolgozására: egy a jetekre érzékeny trigger, a jetmentes háttér megfelelő levonása, valamint a kis impulzusú részecskék rekonstrukciója [23].

4. Az eredmények hatása

Összefoglalva a CMS kísérlet képessé vált széles impulzustartományban, azonosított részecskékkel végzett fizikára is, így jelentősen hozzá tud járulni az LHC-n tervezett hadronfizikai kutatásokhoz.

A korábbi, a CERN SPS-nél és a BNL RHIC-nél szerzett tapasztalatok felhasználásával, valamint az új kiértékelési módszerek segítségével aktívan tudtuk a CMS kísérlet fizikai programját alakítani. A részeredményeket először a detektor és analízis csoportok találkozóin (<http://indico.cern.ch>, Siklér Ferenc: 155, Gábor Veres Gábor: 39, Krajczár Krisztián: 46 előadás) ismertettük. Ezek először mintegy 20 belső cikkben (A. rész), majd 25 publikációban jelentek meg. Az elért eredmények a csoportnak nagy vizibilitást hoztak, ezt jól tükrözi a mintegy 20 előadásunk nemzetközi konferenciákon (B. rész).

A kis transzverz impulzusú részecskéknél elért eredményekre alapozva csoportunk két első CMS publikációban is döntő szerepet játszik: a töltött hadronok számának (vezetők: Veres Gábor, Yen-Jie Lee [MIT]), valamint a töltött hadronok eloszlásának mérése (vezetők: Siklér Ferenc, Krajczár Krisztián).

A munka elismeréseként a vezető kutató két évig volt a kísérlet QCD kis- p_T -s alcsoportjának egyik vezetője, majd a 2010-2011 évekre a CMS QCD analízis csoport vezetőjének (convenor) választották.

A. Csoportunk belső cikkei [CMS]

Szerző	Cím	Belső cikk
F. Siklér	Hadronic physics with the CMS experiment	CMS CR-2005/006
F. Siklér	The p+A capabilities of CMS	CMS CR-2006/001
G. I. Veres	Heavy Ion Physics at the LHC with CMS	CMS CR-2006/032
F. Siklér	Reconstruction of low p_T charged particles with the pixel detector	CMS AN-2006/100
F. Siklér	Reconstruction of V0s and photon conversions with the pixel detector	CMS AN-2006/101
K. Krajczár, G. I. Veres et al	Estimating the statistical reach for the charged particle nuclear modification factor in jet triggered heavy ion events	CMS AN-2006/109
F. Siklér	Low p_T Hadronic Physics with CMS	CMS CR-2007/007
K. Krajczár, F. Siklér, G. I. Veres et al	Physics TDR Addendum: High Density QCD with Heavy Ions (chapter 3)	Physics TDR Addendum
C. Roland, G. I. Veres, K. Krajczár	Simulation of Jet Quenching Observables in Heavy Ion Collisions at The LHC	CMS CR-2007/008
F. Siklér	High Density QCD Physics with Heavy Ions in CMS	CMS CR-2007/023
F. Siklér	Soft probes of high density QCD physics with CMS	CMS CR-2007/057
F. Siklér, K. Krajczár	Measurement of charged hadron spectra in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=14$ TeV	CMS AN-2007/021, PAS QCD-07-001
F. Siklér	Soft physics capabilities of CMS in p-p and Pb-Pb	CMS CR-2008/011
F. Siklér	Towards the measurement of charged hadron spectra in CMS	CMS CR-2008/077
K. Krajczár	Measuring nuclear modification factors at high- p_T using jet triggers	CMS CR-2008/080
K. Krajczár, F. Siklér et al	The 2008 CMS Computing, Software and Analysis Challenge (section 9.5.1)	CMS IN-2008/044

folytatás a következő oldalon

folytatás az előző oldalról

Szerző	Cím	Belső cikk
K. Krajczár, G. I. Veres	Pseudorapidity distributions of charged hadrons in minimum bias p-p collisions at 14 TeV	CMS AN-2008/018, PAS QCD-08-004
F. Siklér	First physics with hadrons and the underlying event at CMS	CMS CR-2009/002
F. Siklér	CMS: minimum bias studies	CMS CR-2009/041
G. I. Veres	Measurements of high- p_T probes in heavy ion collisions at CMS	CMS CR-2009/231
K. Krajczár	Charged particle spectra at CMS	CMS CR-2009/234

B. Nemzetközi konferenciák [CMS]

Előadó	Cím	Konferencia	Hely	Időpont
F. Siklér [T]	Hadronic physics with the CMS experiment	"RHIC School 04", 4th Budapest Winter School on Heavy Ion Physics	Budapest, Hungary	1-3 Dec 2004
G. I. Veres [T]	Bulk hadron production at high rapidities	Quark Matter 2005 Conference	Budapest, Hungary	4-9 August 2005
F. Siklér [T]	The p+A capabilities of CMS	Workshop on Proton-Nucleus Collisions at the LHC	CERN	25-27 May 2005
G. I. Veres [T]	Heavy Ion Physics at the LHC with CMS	Strangeness in Quark Matter 2006,	UCLA, Los Angeles	26 Mar 2006
F. Siklér [P]	Low p_T Hadronic Physics with CMS	Quark Matter 2006 Conference	Shanghai, China	14-20 Nov 2006
C. Roland, G. I. Veres, K. Krajczár [P]	Simulation of Jet Quenching Observables in Heavy Ion Collisions at the LHC	Quark Matter 2006 Conference	Shanghai, China	14-20 Nov 2006
F. Siklér [T]	Low p_T hadronic physics with CMS	Zimányi 2006 Winter School	Budapest, Hungary	11-13 Dec 2006
F. Siklér [T]	Heavy Ion Physics with CMS	Moriond QCD and Hadronic interactions	La Thuile, Italy	17-24 Mar 2007
F. Siklér [T]	Soft probes of high density QCD physics with CMS	International Conference on Strangeness in Quark Matter	Levoca, Slovakia	24-29 Jun 2007
F. Siklér [T]	Soft probes of high density QCD physics with CMS	Zimányi 2007 Winter School	Budapest, Hungary	5-7 Dec 2007

T = előadás, P = poszter

folytatás a következő oldalon

folytatás az előző oldalról

Előadó	Cím	Konferencia	Hely	Időpont
K. Krajczár [T]	Jet physics in Heavy-ion collisions at the LHC with CMS	Zimányi 2007 Winter School	Budapest, Hungary	5-7 Dec 2007
F. Siklér [T]	Soft physics capabilities of CMS in p-p at 14 TeV and Pb-Pb at 5.5 TeV	Quark Matter 2008 Conference	Jaipur, India	4-10 Feb 2008
F. Siklér [T]	Towards the measurement of charged hadron spectra in CMS	High p_T physics at LHC	Tokaj, Hungary	16-19 Mar 2008
K. Krajczár [T]	Measuring nuclear modification factors at high- p_T using jet triggers	High p_T physics at LHC	Tokaj, Hungary	16-19 Mar 2008
F. Siklér [T]	First physics with hadrons and the underlying event at CMS	Physics at LHC 2008	Split, Croatia	29 Sep - 4 Oct 2008
F. Siklér [T]	The study of the minimum bias events	MPI@LHC'08	Perugia, Italy	27-31 Oct 2008
G. I. Veres [P]	Jet quenching studies in CMS	PANIC08	Eilat, Israel	9-14 Nov 2008
K. Krajczár [P]	QCD Studies with CMS	PANIC08	Eilat, Israel	9-14 Nov 2008
G. I. Veres [T]	Preparation for the first p+p physics with the CMS experiment and the plans of the CMS Heavy Ion group	Zimányi Winter School on Heavy Ion Physics	Budapest, Hungary	25-28 Nov 2008
G. I. Veres [T]	Correlation and multiplicity measurements from RHIC to the LHC	4th International workshop on High- p_T physics at LHC'09	Prague, Czech Republic	4-7 Feb 2009
G. I. Veres [T]	Measurements of high- p_T probes in heavy ion collisions at CMS	Quark Matter 2009	Knoxville, TN	30 Mar - 4 Apr 2009
K. Krajczár [T]	Charged particle spectra at CMS	EPSHEP09	Krakow, Poland	16-22 Jul 2009

T = előadás, P = poszter

Hivatkozások

- [1] F. Siklér, „Reconstruction of low p_T charged particles with the pixel detector,” *CMS AN* **2006/100** .
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/FerencSikler/AN2006_100.pdf.
- [2] F. Sikler, „Low $p(T)$ hadronic physics with CMS,” *Int. J. Mod. Phys.* **E16** (2007) 1819–1825, [arXiv:physics/0702193](https://arxiv.org/abs/physics/0702193).
- [3] F. Sikler, „High Density QCD Physics with Heavy Ions in CMS,” [arXiv:0705.3538](https://arxiv.org/abs/0705.3538) [nucl-ex].

- [4] F. Sikler, „Soft physics capabilities of CMS in p-p and Pb-Pb,” *J. Phys.* **G35** (2008) 104150, [arXiv:0805.0809 \[nucl-ex\]](#).
- [5] F. Siklér and K. Krajczár, „Measurement of charged hadron spectra in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 14$ TeV,” *CMS AN 2007/021*, *CMS PAS QCD-07-001* .
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/BudapestGroup/AN2007_021.pdf.
- [6] F. Sikler, „Towards the measurement of charged hadron spectra in CMS,” *PoS HIGHPTLHC* (2008) 011.
http://pos.sissa.it//archive/conferences/076/011/HIGH-pTLHC_011.pdf.
- [7] S. Szeles, „Optimization of energy loss measurement for silicon trackers,” vol. CERN Summer student session lecture. 2008.
- [8] F. Siklér, „Reconstruction of V0s and photon conversions with the pixel detector,” *CMS AN 2006/101* .
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/FerencSikler/AN2006_101.pdf.
- [9] A. László, „A robust iterative unfolding method for signal processing,” *J. Phys. A: Math. Gen.* **39** (2006) 13621–13640, [arXiv:math-ph/0601017 \[math-ph\]](#).
- [10] G. Patay, „Optimization of energy loss measurement for silicon trackers,” vol. CMS Week, HI Meeting. 2006.
- [11] A. J. Bell and G. I. Veres, „The Beam Scintillator Counter Trigger System for CMS,” *CMS IN 2009/xxx* .
<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/BudapestGroup/bscVeres.pdf>.
- [12] F. Sikler, „First physics with hadrons and the underlying event at CMS,” *PoS 2008LHC* (2009) 037.
http://pos.sissa.it//archive/conferences/055/037/2008LHC_037.pdf.
- [13] K. Krajczár and G. I. Veres, „Pseudorapidity distributions of charged hadrons in minimum bias p-p collisions at 14 TeV,” *CMS AN 2008/018*, *CMS PAS QCD-08-004* .
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/BudapestGroup/AN2008_018.pdf.
- [14] K. Krajczar, „Measurement of charged particle spectra in pp collisions at CMS,” *PoS EPS-HEP* (2009) 062.
- [15] F. Sikler, „Hadronic physics with the CMS experiment,” *Acta Phys. Hung.* **A25** (2006) 57–63, [arXiv:hep-ph/0504259](#).
- [16] F. Sikler, „Soft probes of high density QCD physics with CMS,” *J. Phys.* **G35** (2008) 044045, [arXiv:0710.1874 \[nucl-ex\]](#).
- [17] G. I. Veres, „Heavy ion physics at the LHC with CMS,” *J. Phys.* **G32** (2006) S567–S570.
- [18] G. I. Veres, „Measurements of high- p_T probes in heavy ion collisions at CMS,” [arXiv:0907.4814 \[nucl-ex\]](#).
- [19] CMS Collaboration, E. . d’Enterria, David G. *et al.*, „CMS physics technical design report: Addendum on high density QCD with heavy ions,” *J. Phys.* **G34** (2007) 2307–2455.
- [20] M. Ballintijn, C. Loizides, I. Lokhtin, K. Krajczar, C. Roland, A. Snigirev, and G. I. Veres, „Estimating the statistical reach for the charged particle nuclear modification factor in jet triggered heavy ion events,” *CMS AN 2006/109* .
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/BudapestGroup/AN2006_109.pdf.

- [21] C. Roland, G. I. Veres, and K. Krajczar, „Simulation of jet quenching observables in heavy ion collisions at the LHC,” *Int. J. Mod. Phys.* **E16** (2007) 1937–1942, [arXiv:nucl-ex/0702057](https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0702057).
- [22] K. Krajczar, „Measuring nuclear modification factors at high- p_T using jet triggers,” *PoS HIGHPTLHC* (2008) 025. http://pos.sissa.it/archive/conferences/076/025/HIGH-pTLHC_025.pdf.
- [23] K. Krajczár, „Jet fizika a CMS detektorral az LHC nehézion-ütközéseiben,” *ELTE TTK, Budapest* (2007) . https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/BudapestGroup/thesis_krisztian.pdf.