

4. félévi beszámoló

Major Péter (peter.major@cern.ch)

Fizika Doktori Iskola, Részecskefizika és csillagászat

Témavezető: Dr. Pásztor Gabriella
ELTE TTK Fizikai Intézet Atomfizikai Tanszék

Új részecskék keresése a CERN LHC CMS detektorával

2019. május 30.

1. Az előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése

Doktori képzésem alatt végzett munkám két nagy témakörre osztható szét, melyek az MSc-s diplomaunkám folytatásaként végzett fizikai analízis, a szuperszimmetrikus gluinó párkeltés keresése, valamint a precíziós fizika számára kitüntetetten fontos luminozitásmérés a CERN LHC CMS detektoránál.

1.1. Szuperszimmetrikus részecskék keresése foton + Higgs-bozon + hiányzó energia végállapotú folyamatokban

MSc szakdolgozatom témáját folytatva továbbra is dolgozom a Dr. Pásztor Gabriella és Bartók Márton doktorandusz által megkezdett szuperszimmetrikus (SUSY) részecskék utáni kutatásban. Ennek során egy olyan végállapotot vizsgálunk a CMS detektor 2016-ban gyűjtött $\sqrt{s} = 13$ TeV energiájú adataiban, melyben a szuperszimmetrikus általános mérték-közvetítés (GGM, General Gauge Mediation) model a kísérletileg elérhető paramétertartományának számottevő hányadában eseménytöbbséget jósol. Ezen végállapotot egy nagy energiájú foton, nagy hiányzó transzverzális energia és egy b kvarkokra bomló Higgs bozon jellemzi (GHbbMET).

Az új fizika kimutatásához a Standard Modell folyamatokból származó háttér minél pontosabb becslése szükséges. A második legnagyobb járulékot a $W+$ hadronsugár keletkezés adja, amikor a W bozon bomlásából származó leptonok a detektor egy érzéketlen részén keresztül távoznak, vagy az azonosító algoritmusok nem ismerik fel őket. Az én feladatom kezdetben ezen háttér in-situ adatok felhasználásán alapuló meghatározása volt.

A számítások során egy, a jel régiótól diszjunkt, leptont is tartalmazó kontroll régióból extrapoláltam a háttérrel vissza a leptont nem megengedő jel régióba. Ezt (a végállapotban leptont tartalmazó folyamatokat leíró, a CMS kísérlet által központilag biztosított) Monte Carlo adathalmazok segítségével tettem. A kontroll régiót kibővítettem, hogy hadronikusan bomló tau leptonokat is tartalmazzon (eredetileg csak elektronok és müonok jelenlétét vizsgáltam). Míg korábbi munkám során a fent említett GHbbMET végállapot egy általam választott és kinematikus változók segítségével meghatározott részén számítottam ki a kérdéses háttérrel, addig most a már folyamatban lévő analízishez kellett a kódot adaptálni mind paraméterekben, mind formailag, hogy minden háttér forrásból származó eseményszám becslése konzisztensen kezelhető legyen. A becslést ezért az analízis jel régióján kívül el kellett végezni az ebben az analízisben domináns QCD háttér kontroll régióira is.

Az analízis következő lépéseként a Monte Carlo algoritmus segítségével generált szuperszimmetrikus jelet és a mért Standard Modell hozzájárulást figyelembevéve statisztikai hipotézisvizsgálatot végeztem arra vonatkozólag, hogy a kísérlet érzékeny-e a keresett jelre adott SUSY részecske tömeg hipotézis esetén, azaz várhatóan felfedezhető vagy eseménytöbbséget hiányában kizárható-e a jel a kísérlet során. Több eltérő szuperszimmetrikus részecske hipotézist is vizsgálunk, melyeket a proton-proton ütközésben keltett szuperszimmetrikus részecske (gluinó ebben az esetben) és az NLSP (második legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske, amely a neutralinó ebben a mérésben) tömegek indexelnek. Így ki tudjuk számolni a várható felfedezési vagy kizárási tartományt a fizikai modellünk ezen két dimenziós paraméterterében.

A statisztikai analízis segítségével optimalizáltam a végállapoti tér particionálását is, hogy a várható kizárás maximális legyen. A feladat szintén magában foglalja az ezen funkciót ellátó egységes szoftver rendszer kifejlesztését és üzemeltetését, melyet a CMS által biztosított statisztikai program köré építettem. Az egyik legnagyobb kihívást a szisztematikus hibák implementációja okozta, melyből ebben a félévben is többre került sor.

Az analízis jelenleg az analízis note előkészítésének végső stádiumában jár, eredményeinket már prezentáltuk a fotonos SUSY analíziseket koordináló csoportnak. Most elsősorban az onnan gyűjtött visszajelzések alapján finomítjuk az analízist.

1.2. Luminozítás kalibráció

A luminozítás a részecskefizikai analízisek alapvető mennyisége, mely összeköti egy folyamat hatás-keresztmetszetét (geometriai valószínűségét) a várhatóan megfigyelt eseményszámmal, s mindemellett a precíziós analízisek szisztematikus hibájának egy fő forrása az LHC-n.

A van der Meer módszer (vdM szkén) azon luminozításmérő detektorok kalibrációját teszi lehetővé, melyek az abszolút luminozítást a detektor felületén keresztülhaladó effektív részecskefluxus segítségével határozzák meg. Az ilyen detektorok nagy népszerűségnek örvendenek a hadronütköztetőknél, ugyanis a leptonütköztetőkben használatos, rendszerint precízebb módszerek nem vihetők át a hadronos esetre az alacsony energiás QCD számolások nagy hibájából eredően. A CMS detektorban négy ilyen aldetektor egység üzemel.

A vdM kalibrációs módszer él bizonyos feltevésekkel, melyek nem teljesülnek maradéktalanul egy valódi gyorsító esetében, és jellemzően néhány tized százalékos hibát okoznak. A legfontosabb feltetelezés, hogy a nyaláb alak leírása faktorizálható x és y irányban. Ez az egyik legjelentősebb szisztematikus hiba forrás az abszolút luminozítás kalibráció során. A CMS kísérlet Luminozítás Csoportjában arra törekszünk, hogy a szükséges korrekciókat minél pontosabban meghatározzuk, és ezzel a bizonytalanságot minimálisra szorítsuk.

1.2.1. Detektorok vizsgálata

A doktori során egyik első feladatomban az volt, hogy vizsgáljam meg a módszert amivel az ún. nulla számláló detektorok statisztikus hibáját számítják. Ezt egy ideális detektort modellező, saját fejlesztésű szimulációval, majd egy egzakt elméleti modell felállítása után analitikusan is megtettem. A linearitási vizsgálatok után úgy döntöttünk, hogy az általam javasolt binomiális statisztikán alapuló hibaszámítási módszert alkalmazzuk a vdM kalibrációs eljárás során.

Következő feladatomban az lett, hogy kidolgozzak egy módszert a PLT szilícium pixel detektor sugárzási károsodásának nyomkövetésére. A PLT üzemeltetése közben többször is tapasztaltunk hirtelen változásokat az eredményekben a többi luminométer adataihoz képest, azonban ezt idejében észlelve lehetséges az effektust kompenzálni a magasfeszültség állításával.

A cél a pixel szintű információk vizsgálata és ezekből egy a határfokra jellemző mérőszám meghatározása volt. Az egyes pixelekben leadott elektronok számának eloszlását megfelelően pontos kalibráció hiányában nem sikerült felhasználnom, így a kevésbé ideális klaszter méret eloszlást vizsgáltam. Az ebből számolt új mérőszám általában jól mutatja a határfok változását (függetlenül egy másik luminométerrel való összehasonlítástól), bár prediktív ereje nem volt konzisztens. Az új mérőszám kiszámolását automatizáltam, és bár az LHC 2018-as hosszú leállítása előtt nem történt meg a módszer integrációja, offline azonban többször is használtuk.

1.2.2. VdM adatok analízisa

Doktorim során több módszert is kidolgoztam és vizsgáltam melyek célja, hogy megértsük és mérjük a nyalábok proton sűrűségfüggvényében megbúvó korrelációk hatását a vdM kalibrációra. A CMS 2017-ben először hajtott végre nagy szeparációjú, ún. offset szkent. Én kaptam a feladatot, hogy vizsgáljam meg ezeket az adatokat. Erre a célra kidolgoztam az offset szkén analízist, melynek 2018-as eredményeit idén publikáltuk.

Ezen eljárás ugrásszerű továbbfejlesztése az általam idén implementált "nyalábsűrűség-tomográfia" analízis amiről lentebb írok bővebben. Ebben az eljárásban nem csupán a luminométerek adatait használok fel, de a rekonstruált kölcsönhatási vertex eloszlások jellemző paramétereit is, ami sokkal bonyolultabb modellek illesztését teszi lehetővé.

Az offset szkén eljárás meglehetősen érzékeny volt a nyalábok elkúszására, ezért kifejlesztettem az eljárásnak azt a verzióját is, amely diagonális szkéneket használ, valamint egy olyan módszert,

ami ugyancsak a diagonális szkeneket felhasználva sokdimenziós illesztések nélkül is mérni tudja a nyalábok átlagos lineáris korrelációit.

1.2.3. CERN-i tanulmányutak

Doktorim alatt többször is töltöttem rövidebb időszakokat a CERN-ben, a 2018-as tanév második feléve alatt azonban végig ott tartózkodtam. Ezek az alkalmak remek lehetőséget biztosítottak azon külföldi kollégákkal való jobb kommunikációban, akikkel a mindenapokban azóta is dolgozok.

Kintlétem alatt részt vettem a 2018-as nehézion és proton-proton vdM szkenek lebonyolításában, több BRIL ügyeletet is vállaltam a CMS irányítóteremben, ahol az adatvalidációs szoftver javításában is segítettem. A nehézion vdM szken alkalmával javaslatomra először hajtott végre diagonális szkent a CMS. A hetente esedékes találkozóinkon több mint 20 alkalommal számoltam be az éppen esedékes feladataim státuszáról, ezen kívül a Luminozítás és a BRIL csoportok nevében én tarthattam a 2018-as luminozítás kalibráció eredményeiről szóló cikk approval előadását.

2. Luminozítással kapcsolatos munka az aktuális félévben

2.1. A nyalábsűrűség-tomográfia analízis kidolgozása

A korábbi félévekben behatóan foglalkoztam a nyalábok korrelációjának mérésével, és erre kidolgoztam az offset szken eljárást, ami egy vdM szken párt valamint egy az X, és egy az Y irányban eltolt szkent használ, hogy az egyidejű fitből következtetéseket vonjunk le a korrelációra vonatkozóan.

A 2018-as és 2017-es offset szken analízis világossá tette, hogy ugyan a módszerben rejlik potenciál, de korlátozott az információ, amivel dolgozik, a mérések pontosságát az illeszthető modellek bonyolultsága korlátozza. Az ATLAS egyik hasonló módszere, a "világító régió analízis" - mely a vdM szken közben gyűjtött vertex pozíció adatokat is felhasználja - szolgált inspirációul ahhoz, hogy hogyan vihetünk be több kényszert az analízisbe.

Ebben a félévben munkám nagy részét az tette ki, hogy kidolgozzam, implementáljam és teszteljem a CMS saját nyalábsűrűség-tomográfia analízisét.

A kód erősen moduláris és tetszőleges szken konfigurációkat támogat, vdM, offset és diagonális szkennek egyaránt felhasználhatók benne. Az eddigi tesztek alapján az eljárás kvantitatíven jobb fitteket produkál, mint az ATLAS által utoljára publikált eredmények.

A módszer továbbra is a tesztelési fázisban van, néhány szisztematikus korrekció implementálása és egy átfogó önkonzisztencia teszt elvégzése esedékes mielőtt a korrekciókat nyilvánossá tehetnénk.

Az elért eredményeket az LHC luminozítás napok alatt mutatjuk be június 4.-én (l.d. 1. ábra.).

2.2. A 2018-as luminozítás publikáció

A 2018-as adatok analíziséből írt kollaborációs [cikkünk](#) idén májusban került publikálásra. A cikk beszámol arról, hogy az általam végzett offset szken segítségével most először figyeltük meg a lineáris korrelációk változását az idő múlásával.

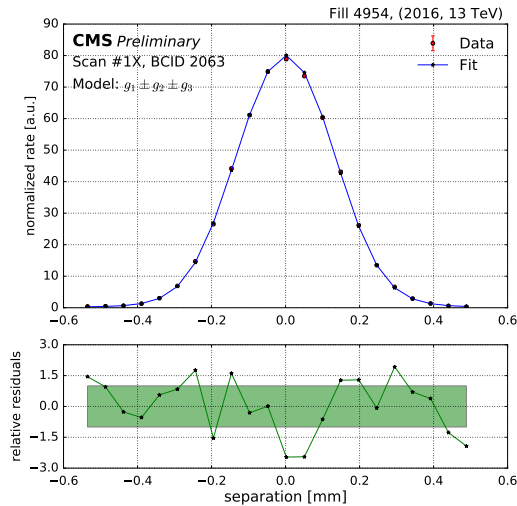
A cikk arra is felhívja a figyelmet, hogy a nyaláb leképező és az offset analízis eltérő korrekciókat jósol. Így amíg jobban meg nem értjük a különbséget, nem alkalmazunk korrekciót, csupán egy szisztematikus hibát rendelünk hozzá. Terveim szerint ez a különbség a nyalábsűrűség-tomográfia segítségével feloldhatóvá válik majd.

2.3. A 2018-as nehézion adatok

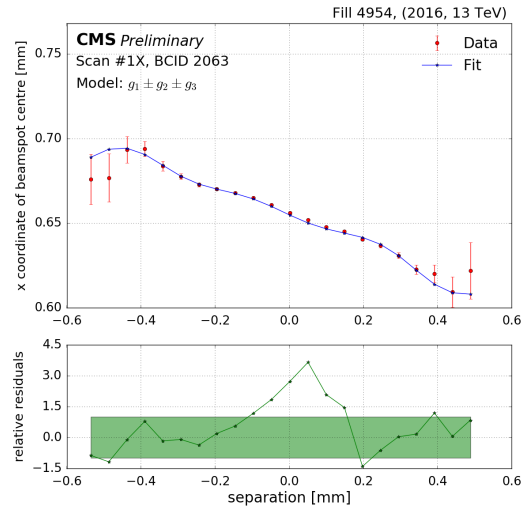
A vdM kalibráció során az LHC általában speciális nyalábkonfúciók mellett üzemel, amely beállítása időigényes folyamat. A nehézion ütközésekre szánt rövid idő következtében a szokásosnál keskenyebb nyalábokkal hajtottuk végre a kalibrációs eljárást, mely a nyomkövető detektor véges felbontása miatt lehetetlenné tette a vertex helymeghatározáson alapuló nyaláb leképező eljárás használatát.

Ugyanakkor a keskeny nyalábméret következtében az offset szken érzékenyebbé vált a nyaláb pálya esetleges elkúszásából adódó hibákra. Erre válaszul javaslatomra a CMS kísérlet először hajtott végre diagonális szkent, mely amellet, hogy az offset paraméterter egy új régióját mintavételezi, kevésbé érzékeny a kúszásra is.

Az adatok analízise még kezdeti fázisban van, azonban az általam kidolgozott módszer már így is szép eredményeket ad, és detektorokon átívelően konzisztens lineáris korrelációkat jósol. Néhány ezzel kapcsolatos ábra nemrégiben előzetes eredményként publikálhatóvá vált, hogy azokat a június 4.-én tartandó LHC Luminozítás Napok konferencián bemutathassuk (l.d. 2.ábra.).



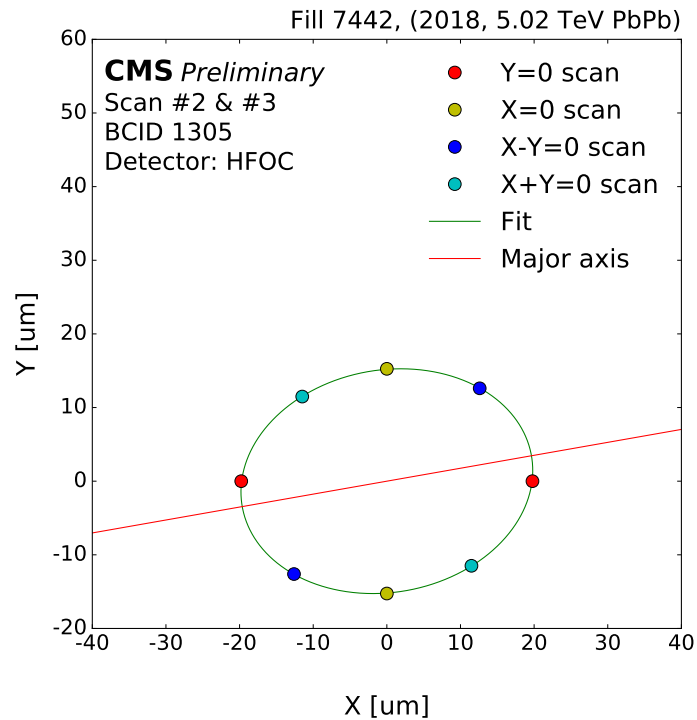
(a) Normált ráta



(b) Nyalábfolt X koordináta

1. ábra. Az ábrák a nyalábsűrűség-tomográfia analízis 10 különböző bementi adat típusa közül kettőt, a normalizált rátát és a nyalábfolt egyik kordinátáját, valamint a teljes adathalmaz egyidejű illesztésével kapott modell által jósolt értékeket mutatja. Ezeket rendre a piros pontok és a kék vonal jelöli.

Az eljárásban a következő lépés az offset analízis kiterjesztése diagonális adatokra, amivel a nemlineáris korrelációk becslésére is lehtëvé válhatna. A diagonális és nagyszeparációjú szkennek együttes használata akár bonyolultabb modellek illesztését is lehetővé teheti.

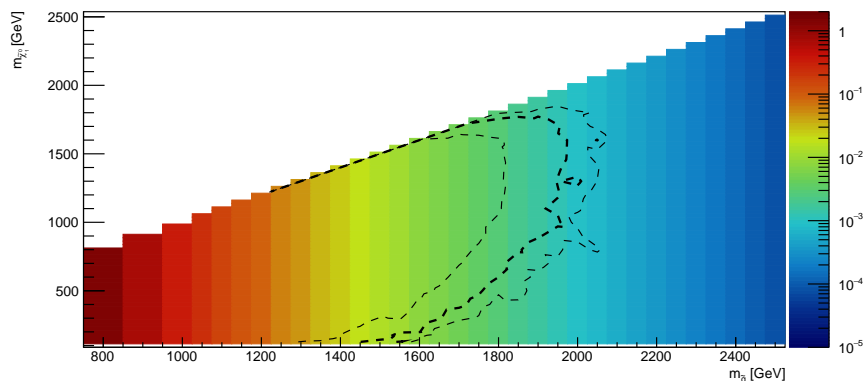


2. ábra. Az egy normális és egy diagonális szken párból kinyert szélességek (színes pontok) és a rájuk illesztett elipszoid (zöld vonal) szemlélteti a nyalábok konvolúciójából származó transzverzális eloszlásfüggvény elfordulását az X-Y síkban. A zöld vonal az eloszlásfüggvény 1σ -ás szintvonalának felel meg. A vörös vonal az ellipszoid nagytengelye, mely az észlelt elfordulást hivatott szemléltetni.

3. Az GHbbMET SUSY analízisrel kapcsolatos munka az adott félévben

Az analízisbe a félév során több új szisztematikus hiba figyelembevételét implementáltam, valamint új korrekciókat vezettem be. Ezek közé tartozik például az elektromágneses kaloriméter időzítésének eltolódásából adódó trigger probléma, az "L1 prefire" korrekciója.

Az implementált módosításokkal éppen az új statisztikai analízist végzem, hogy ellenőrizhessük a kizárt tartomány határára tett hatásukat.



3. ábra. Példa egy tipikus kizárási ábrára. A színek a vizsgált folyamat hatáskeresztmetszetét ([pb]) szimbolizálják, míg a vastag szaggatott vonalon belüli régiót várakozásaink szerint 95%-os szignifikancia mellett sikerül kizárnunk, ha csak a háttér járul hozzá az észlelt eseményekhez. A keskeny szaggatott vonalak a kizárási határ 1σ -ás hibaszámját szegélyezik. A vízszintes tengelyen a keletkezett gluínó, míg a függőlegesen az NLSP (neutralínó) feltételezett tömege szerepel.

4. Cikkek, poszterek, konferenciák és rendezvények a képzés során

4.1. Publikációk

- CMS Collaboration, "CMS luminosity measurement for the 2018 data-taking period at $\sqrt{s} = 13$ TeV", Technical Report CMS-PAS-LUM-18-002, CERN, Geneva, 2018.
- CMS Collaboration, "CMS luminosity measurement for the 2017 data-taking period at $\sqrt{s} = 13$ TeV", Technical Report CMS-PAS-LUM-17-004, CERN, Geneva, 2018.
- Publikálásra vár: Peter Major on behalf of the CMS Collaboration, "Search for supersymmetry in final states with photons and missing transverse momentum in pp collisions at 13 TeV using the CMS detector", Proceedings of Science, 2019

4.2. Konferenciák és rendezvények

- EPS-HEP2019: European Physical Society Conference on High Energy Physics, 10-17 Jul 2019, Ghent, Belgium:
A CMS Kollaboráció képviselőtáborában két **posztert** fogok bemutatni a luminositás kalibrációban elért eredményeinkről "Studies of the factorization of proton densities in van der Meer scans and its impact on precision luminosity measurements for CMS" és "Precision luminosity measurement of proton-proton collisions at the CMS experiment in Run 2" címmel.
- LHC Lumi Days 2019, 2019 június 4-5, Genf, Svájc:
reésztvevő.
- 27th Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, 2019. április 8-12, Torinó, Olaszország:
A 2019-es DIS konferencián parallel **előadást** tartottam a Higgs és Standard Modellen túli fizika

szekcióban *"Search for supersymmetry with photons and missing transverse momentum using the CMS detector"* címmel. Ebben az előadásban három, az előző DIS óta publikált CMS analízist mutattam be a hallgatóságának, valamint egy kombináció eredményét, mely négy korábbi analízis eredményeit használja fel, hogy korlátokat állítson fel az általános GGM szimmetriasértési modellben.

Az előadásból **konferenciaticikk** készül.

- CMS Plenary approvals for Moriond 2019, 2019. március 14, CERN, Genf, Svájc:
"CMS luminosity measurement for the 2018 data-taking period at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ", CMS preprint approval **előadása**.
- CMS Physics and Upgrade Week, 2018. október 1-5, Budapest :
Budapesten tartottuk a CMS Kollaboráció évente megrendezésre kerülő konferenciáját, melyre közel háromszáz kutató érkezett. Mint a **helyi szervezőbizottság tagja**, a konferencia ideje előtt és alatt résztvettem a megbeszélések és a társasági programok előkészítésében és kivitelezésében. *"2D Shape Reconstruction and XY Correlations in the 2018 CMS van der Meer Scans"* című **poszteren** mutattam be az offset szken analízis folyamatát és eredményeit a 2018-as júniusi vdM adatokon a tanulmány akkori állapotában. Ezen megbeszélés alkalmával hasonlítottuk össze az offset szken és a nyaláb leképező szken eredményeit.
- Részecskefizika határok nélkül, 2018. november 17, Budapest:
Az ELTE-n rendeztük meg a *"Részecskefizika határok nélkül"*, alapvetően középiskolásoknak szóló, fél napos **ismeretterjesztő programot**, amely több száz látogatót fogadott. A rendezvényen bemutattam az erre az alkalomra készített *"A legalapvetőbb építőelemek nyomában: A Standard Modell"* című **poszterem**, illetve a részecske azonosításról meséltem az érdeklődőknek. Részt vettem továbbá a doktori iskolás hallgatók képviselőjében egy **kerekasztal beszélgetésen** *"Fizikus diplomával a világban"* címmel, ahol a fizika szakról és a fizikus pályáról, az akadémiai és a versenyszférában dolgozó karrierjük különböző pontján járó fizikusokkal beszélgettünk és válaszoltunk a látogatók kérdéseire.
- 17. Zimányi Winter School on Heavy Ion Physics, Budapest, 2017. december 4 - 8:
"Search for Supersymmetry with photons in CMS at LHC (on behalf of CMS Collaboration)" **előadás**.
- CMS BRIL Upgrade and Luminosity Workshop, 2017. november 29 - december 1, Budapest:
helyi szervezőbizottság tagja.
- CMS Trigger Workshop, 2017. december 11-14, Belgrád:
résztvevő.