

Az elemi részecskék titkainak feltárása a CERN LEP és LHC ütköztetőinél

Exploring the secrets of elementary particles
at the CERN LEP and LHC colliders

Tézisfüzet

Dr. Pásztor Gabriella

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Fizikai Intézet

Magyar Tudományos Akadémia
XI. Fizikai Tudományok Osztálya

Budapest
2023. október

1 A kutatások előzménye: Részecskefizika a 21. század fordulóján

A természet alapvető működésének eddigi legpontosabb leírását a legkisebb elérhető távolságokon, illetve a legnagyobb elérhető energiasűrűségeken a részecskefizika standard modellje (SM) adja. Az elmúlt 60 évben kifejlesztett elméletet nagyrészt kísérletileg is igazolták. Az SM a négy ismert alapvető kölcsönhatásból csupán hármát ír le: az elektromágneses, a gyenge és az erős kölcsönhatásokat, amelyek az Univerzum látható struktúráit alkotó elemi részecskék között hatnak kis távolságon.

A standard modell az $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ mértékcsoporton alapuló relativisztikus kvantumtérelmélet. A Brout-Englert-Higgs mechanizmusra (BEH) támaszkodik, hogy az $U(1) \times SU(2)$ elektrogyenge (EW) szimmetriáját alacsony energiáknál a kvantumelektrodinamika $U(1)$ mértékcsoportjára sértse. A szimmetriasértés három nagy tömegű gyenge mértékbozon, a W^\pm és Z^0 bozonok, valamint egy skalárrészecske, a Higgs-bozon (H^0) megjelenéséhez vezet. Az anyag-részecskék, a töltött leptonok (ℓ) és az erősen kölcsönható kvarkok (q) a Higgs-mezővel való Yukawa-csatoláson keresztül kapják tömegüket.

Az elmélet konzisztens és várhatóan igen nagy energiáskáláig érvényes effektív térelmélet (EFT). Nem lehet azonban a végső szó a részecskefizikai folyamatok leírásában, mivel számos megfigyelést magyarázat nélkül hagy. Ezek közül a legfontosabbak a sötét anyag jelenléte és az anyag-antianyag aszimmetria mértéke az univerzumban; a gravitációs és a mértékkölcsönhatások energiáskálája közötti óriási különbség, amely finomhangolást követel meg az elektrogyenge skála stabilizálásához (hierarchia- vagy természetességi probléma); és a kicsi, de nem nulla neutrínótömegek.

A 21. század elejére a Nagy Elektron-Pozitron (LEP) ütköztető mellett – és a világ más tájain – működő kísérletek az SM számos előrejelzését pontosan ki tudták mérni, azonban a BEH-mechanizmus legfontosabb bizonyítéka, a Higgs-bozon továbbra is elérhetetlen maradt. A részecskefizikus közösség ezért – a meglévő kísérleti adatok optimális kiaknázásán túl – a következő generációs gyorsító, a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) megépítésén dolgozott a CERN-ben, a világ legnagyobb részecskefizikai laboratóriumában.

2 Célkitűzések: Hol vannak a standard modell érvényességének határai?

A karrierem során számos területen végeztem kísérleti kutatásokat azzal a céllal, hogy hozzájáruljak a nemzetközi erőfeszítésekhez, amelyek a **standard modell ellenőrzésére, érvényességi tartományának feltérképezésére** és az **SM-en túlmutató jelenségek felfedezésére** irányultak nagy energiájú részecskeütköztetők segítségével.

A 2000-es évek elején a **jövő megalapozására** vettem részt az LHC gyorsítónál működő **CMS** (Compact Muon Solenoid) **kísérlet nyomkövető detektorának megépítésében** [1–4] és a következő generációs lineáris ütköztető tervezésében [5–8]. Eközben, fő célkitűzésemet szem előtt tartva, tovább kutattam **az SM határai**, az "új fizika" nyomai, például a **szuperszimmetria (SUSY) megnyilvánulásai** [9–13] és **extra térbeli dimenziók jelei** [14–16] után a LEP gyorsító nagy mennyiségű, $\sqrt{s} = 189 - 209$ GeV elektron-pozitron ütközési energián gyűjtött adatainak felhasználásával az **OPAL** (Omni-Purpose Apparatus at LEP) **kísérletben**. 2003-ban az OPAL fizikakoordinátorának választottak azzal a feladattal, hogy elősegítsem és szakmailag irányítsam a **LEP ütköztető tudományos örökségét** képező, lehető legpontosabb, illetve legszeleesebb területet lefedő eredmények elkészítését és **közzétételét** [13, 17–21].

Az LHC elindulásakor 2008-ban, hogy betekintsek az addig **feltáratlan, rekord energiájú folyamatok fizikájába** az új berendezés által kitért ablakon át, az ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) kísérlethez csatlakoztam. A **Higgs-bozon** és más **egzotikus részecskék** régóta várt **felfedezésének** előkészítésére, elsőként az ismert fizikai folyamatok (inkluzív lepton- [22] és nagy tömegű Drell–Yan leptonpárkeltés [23]) újbóli megalapozására koncentráltam a $\sqrt{s} = 7$ TeV energiájú proton-proton ütközésekben. Ezen túlmenően, a **mérések érzékenységeinek optimalizálása** érdekében, elsődleges hozzájárulásom volt az elektronok [24–26] és fotonok [27] rekonstrukciójának javításához, majd részt vettem a **$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$ Higgs-bozon felfedezési csatorna [28] elemzésében**.

2012 nyarán, miután az ATLAS- és a CMS-kísérletek közösen bejelentették a Higgs-bozon felfedezését [29, 30] az addig rögzített $\sqrt{s} = 7 - 8$ TeV adatok feldolgozása alapján, a célkeresztbe az **új bozon tulajdonságainak pontos mérése** került. 2013-ban Nobel-díjat kapott François Englert és Peter Higgs, mivel az LHC-együttműködésekkel egyre több kísérleti bizonyítékot szolgáltatunk arra, hogy az új részecske valóban úgy viselkedik, ahogy az egy SM Higgs-bozontól elvárható [31–36].

2015-ben a CERN-ben eltöltött 15 év után az MTA Lendület programjával tértem haza Magyarországra, hogy egy **új kísérleti részecskefizikai kutatócsoportot** hozzak létre az Eötvös Loránd Tudományegyetemen (ELTE-n). Az SM részecsketartalmának teljessé tétele után ismét az ismeretlen felfedezése vonzott. A nemzeti stratégiának megfelelően a CMS-kísérlethez csatlakoztam, hogy ott folytassam a vadászatot új jelenségek, az SM-en túli elmélet bizonyítékai után a megemelt $\sqrt{s} = 13$ TeV energiájú pp adatokban, ahogy korábban is, két egymást kiegészítő irányt követve. Egyrészt **szuperszimmetrikus részecskék és a titokzatos sötét anyag közvetlen keresését** [37, 38], másrészt **precíziós Standard Modell méréseket** [39–41] céloztam meg. Kiemelendő a **gyenge mértékbozon-párkeltés és -szórás tanulmányozása** [42–46], amelyet már az OPAL- és ATLAS-kísérletekben elkezdtem [14, 47].

A tudományos célokat metodológiai újítások, a fontos kísérleti kihívások meg-

válaszolása támogatja. Ezért játszottam kulcsszerepet az ATLAS- és CMS-kísérletek triggercsoportjában, ahol a **méréseket lehetővé tevő gyors, valós idejű eseménykiválasztás optimalizációjára** összpontosítottam [48–50].

Az adatmennyiség növekedésével a CMS tudományos eredményeinek pontosságát jelentősen korlátozta a luminozitásmérés bizonytalansága, így ennek csökkentése központi fontosságúvá vált. Ekkor vállaltam vezető szerepet a CMS **precíziós luminozitásmérési** [51] erőfeszítéseiben, majd a CMS BRIL (Beam Radiation, Instrumentation and Luminosity) rendszer üzemeltetésében és hasznosításában [52, 53]. Ezen munka kapcsán belekóstoltam az **intenzív részecske-nyalábok fizikájába** [54], amelynek részletes leírása elengedhetetlen a kitűzött 1%-os luminozitás pontosság eléréséhez. A **jövő előkészítésére**, az LHC várhatóan 2029-ben induló, nagy luminozitású (HL-LHC) fázisához [55–59] kapcsolódó **detektorfejlesztéseket** irányítom a BRIL-projektben 2020 óta.

Az itt bemutatott eredmények többségét nagy nemzetközi együttműködések keretében értem el, gyakran diákokkal és fiatalabb kollégákkal együtt dolgozva és őket vezetve. Ez négy PhD fokozat sikeres megszerzéséhez vezetett a Genfi Egyetemen¹, valamint 7 TDK, 20 BSc és 7 MSc dolgozat is készült, többségükben az ELTE-n. A nagy együttműködésekben belső szakértők követik nyomon a tudományos eredmények születését, ami hosszú hónapokig, néha akár évekig tartó közös munkát, együtt gondolkodást jelent. A kísérlethez való személyes hozzájárulást jellemzően vezetői pozíciókkal, nemzetközi konferenciaelőadások, fontos tudományos beszámolók megtartásával ismerik el, amelyekre az alábbiakban hivatkozom. Külön listába foglalva korlátozott elérésű belső dokumentumokat is megjelölök, amelyek szerzőlistája csak az eredményekhez közvetlenül hozzájáruló szerzőket tartalmazza (számozásuk [89]-nél kezdődik).

3 Vizsgálati módszerek: Kísérleti eszközök és módszerek fejlesztése az LHC-n

A részecskeütköztetőkből rejlt teljes tudományos potenciál kiaknázásához elengedhetetlenek a modern detektorok, a jó minőségű adatfelvétel, a pontos eseményrekonstrukció és kifinomult elemzési módszerek. Hozzájárultam ezek fejlesztéséhez, valamint elért pontosságuk meghatározásához. A tevékenységek, amelyeket az alábbiakban közlök, a kísérleti kutatások alapját képezik, és jelentős hatással voltak (és vannak) az együttműködések tudományos eredményeire, amelyek ezek nélkül nem is születhetnének meg.

¹A Genfi Egyetem Mag- és Részecskefizikai Tanszékének (DPNC) szokásai miatt hivatalos társtémavezetője csak az utolsó PhD-dolgozatnak lettem, amelynek szerzője E. Benhar Nocioli. A Robichaud-Véronneau, M.C.R. Mora Herrera és K. Nikolics dolgozatában betöltött szerepemet a tanszékvezető levele igazolja.

A CMS szilíciumcsík nyomkövető detektor adatátvittele, kiolvasó elektronikája

A szilíciumcsík nyomkövető detektor [1] a CMS-kísérlet szívében a pixeldetektorral együtt biztosítja a töltött részecskék pályájának és a kölcsönhatási csomópontoknak a pontos rekonstrukcióját. Az egyik fontos eredményem a detektor és a központi adatgyűjtő rendszer közötti adatátvitelhez használt formátum újradefiniálása volt, ami 20% sávszélesség-megtakarítást hozott [2][89].

A szilíciumcsík-érzékelők jeleit kiolvasó APV25 vegyes analóg-digitális alkalmazáspecifikus integrált áramkör működésének ellenőrzéséhez szükséges elektronikai tesztek és a detektormodul tervezését előkészítő termomechanikai mérések elvégzése után, kulcsszerepet játszottam az APV25-öt is tartalmazó detektorközeleli nyomtatott áramkör (front-end hybrid) és az elektromos áramköri vonalakat a szenzor szilíciumcsíkjaihoz illesztő elem (pitch adapter) összeszerelésében. Ehhez hozzátartozott az összeszerelő robot szoftverének fejlesztése, a szerszámok tervezéséhez való hozzájárulás, valamint a gyártási és minőségbiztosítási eljárások kidolgozása. Ez utóbbiak elengedhetetlenek egy megbízható, alacsony meghibásodási valószínűségű nyomkövető detektor megépítéséhez [3, 60], ami elsőrendű fontosságú, hiszen az esetleges javításokat csak a gyorsító hosszú leállási időszakai alatt lehet elvégezni.

Elektron- és fotonrekonstrukció az ATLAS-kísérletben

Elektronok és fotonok (e/γ) bőségesen keletkeznek elektrogenye folyamatokban, így az LHC legtöbb mérésének alapvető elemei. Az ATLAS-kísérletben rekonstrukciójuk a szilícium-alapú és gáztöltésű nyomkövető detektorokra, továbbá a folyékony argont használó elektromágneses kaloriméterre (ECAL) támaszkodik. Optimalizáltam az ECAL klaszterkereső algoritmusát, hogy növeljem a hatékonyságát kis lendületű elektronok esetében, és csökkentsem a többszörösen rekonstruált részecskék arányát. Megmértük az elektronok azonosításának hatásfokát, energiakalibrálásának pontosságát és az energia- és lendületmeghatározás egyezésének mértékét, elsősorban $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ bomlások segítségével. Irányítással egy új címke-és-szonda (tag-and-probe) módszert dolgoztunk ki, amely pszeudo-sajátidő illesztés [61] segítségével becsli a közvetett, azaz b-hadron bomlásokon keresztüli J/ψ keletkezésből származó elektronok hozzájárulását, amely kis transzverzális lendületnél (p_T) a mérési bizonytalanság egyik fő forrása [25][90].

Főszerkesztője és kapcsolattartója voltam az elektronrekonstrukció hatásfokáról és pontosságáról szóló első ATLAS publikációnak [24][91], és vezető szerepet játszottam az LHC első futási periódusa (Run 1) során az ATLAS elektron- és fotonrekonstrukció hatékonyságának további vizsgálataiban is [25–27][92, 93]. Ez a munka nagy hatással volt az SM Higgs-bozon keresésére a fontos négyleptonos csatornában [28, 29, 31, 35] (és sok más SM mérésre és új fizika keresésre), és előhírnöke volt annak is, hogy belső szakértőként közvetlenül hozzájáruljak különböző LHC mérések finomításához, ahol elektronok és fotonok jelennek meg a végállapotban [47, 62–66].

Triggerfejlesztés és triggerstratégia az LHC-n

Az LHC tudományos programjának sikere a hatékony és megbízható valós idejű eseménykiválasztáson (trigger) múlik, amely a 40 MHz-es ütközési frekvenciáról néhány kHz-re csökkenti a későbbi pontos elemzésekhez rögzítendő adatok mennyiségét. Az ATLAS-kísérletben a magas szintű trigger (High Level Trigger, HLT) üzembehelyezésének kezdeti előkészítése és a teljesítménymérésekhez szükséges $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ triggerstratégia meghatározása után, 2013-tól 2015-ig az ATLAS e/γ Trigger Signature Group vezetője voltam. Ekkor én koordináltam az összes tevékenységet ezen a területen, beleértve a többváltozós analízis technikán alapuló, ún. likelihood-módszert alkalmazó elektrontriggerek úttörő fejlesztését és üzembe helyezését, amelyek egyenletesebb és magasabb hatásfokot és 20% sávzsélesség-megtakarítást eredményeztek [49]. Ez lehetővé tette a triggerek p_T küszöbértékének alacsonyan tartását, és ezáltal például a gyenge W-, Z- és Higgs-bozon folyamatok kiválasztási hatásfokának növelését, az egyre növekvő pillanatnyi luminozítás mellett. Optimalizáltam az első szintű, hardver-alapú trigger algoritmusának paramétereit, és megterveztem az első e/γ topologikus triggereket. Egyik legnagyobb hatású hozzájárulásom ezen a területen, hogy meghatároztam a második futási ciklus (Run 2) e/γ triggerstratégiáját [48], amely lefedte az ATLAS-kísérlet teljes proton-proton tudományos programját.

2016 – 2018 között a CMS e/γ HLT koordinátoraként a fő elektrontrigger kiválasztási algoritmusok újraoptimalizálását és az aktív triggerek listájának (triggermenü) meghatározását vezettem, valamint felülvizsgáltam a triggerhatásfok-méréseket [50][94]. A standard modell munkacsoport triggerkoordinátoraként alakítottam a triggerstratégiát, és hozzájárultam új triggerek kifejlesztéséhez: például QCD tanulmányokhoz nagy kiterjedésű hadronzápor-triggerrel, illetve két- és hárombozon-mérésekhez több objektumot tartalmazó lepton-foton kevert végállapot jelenlétét igénylő triggereket dolgoztam ki egy-egy kollégával.

A továbbfejlesztett ATLAS és CMS triggerek közvetlen hatással voltak az SM mérések és az új fizika keresés érzékenységére, így jelentősen hozzájárultak a kísérleti programhoz [65].

Precíziós luminozításmérés a CMS kísérletben és nyaláb-nyaláb kölcsönhatások vizsgálata

A luminozítás a részecskeütköztetők kulcsfontosságú paramétere, amely a gyorsító teljesítményének egyik mérőszáma. A kísérletekben – a megfigyelt eseményszám arányossági tényezőjeként – minden hatáskeresztmetszet-mérés és új részecske keresés szisztematikus bizonytalanságához hozzájárul. 2018 óta vezető szerepet játszom a CMS-kísérlet luminozításmérési erőfeszítéseiben a speciális mérési időszakok tervezésétől a végső eredmények publikációjáig [67, 68]. Megjelenésekor az addigi legpontosabb luminozítás-mérést értük el nagy intenzitású hadronütköztetőn a 2016-os proton-proton adatfelvételi időszakra [51, 68][95], amelyre a szisztematikus bizonytalanság 1,2%. A mérés legkritikusabb idősza-

kában a CMS luminozítás munkacsoportját vezettem, és a publikálásig vezető szerepet játszottam a projektben. Hozzájárultam a szisztematikus hibák három fő forrásának vizsgálatához: a nyaláb-nyaláb kölcsönhatások modellezéséhez [54], a transzverzális nyalábsűrűség nem-faktorizálhatóságából és az LHC eltérítő mágnesek hosszúságskála kalibrációjából adódó korrekciók meghatározásához. Ezek az eredmények egy kettes faktorral javították az elért pontosságot, és így globális hatással vannak a CMS Együttműködés legpontosabb SM hatáskeresztmetszet méréseire [41].

A nyaláb-nyaláb kölcsönhatásokról kevés szerzős közlemény is született [54], amelyben elsősorban a hatás betatronoszillációs paraméter (hangolás) függésének, illetve a nyalábalak és -szélesség változásának vizsgálatához járultam hozzá.

A luminozításmérés pontosságának egyik korlátja a detektorok válaszában időbeli stabilitása. Ezért is fontos a gyűjtött adatok minőségének szigorú ellenőrzése. Kidolgoztunk egy felügyelet nélküli gépi tanulási algoritmuson alapuló adatminőség ellenőrzési módszert a CMS PLT (Pixel Luminosity Telescope) detektor beütési térképeinek elemzésére, amely előre jelezheti a kialakulóban lévő működési problémákat [52].

Mint a BRIL detektorrendszer projektmenedzsere, 2021 óta irányítom 14 technikai rendszer optimális működtetését és adatainak kiaknázását. Ezek a rendszerek felelősek a nyalábidőzítésnek és a részecskecsomagok tulajdonságainak meghatározásáért, a nyalábvesztések folyamatos ellenőrzéséért és, szükség szerint, az érzékeny nyomkövetődetektor-elemek védelme érdekében a nyaláb biztonságos lekapcsolásáért, a luminozítás és a nyaláb-indukált háttér méréséért, valamint a földalatti kísérleti csarnokban a sugárzási környezet nyomon követéséért és szimulációjáért. A CMS detektorok felkészítéséről az LHC harmadik adatgyűjtési időszakára (Run 3) tudományos közleményben számoltunk be, amelyben a BRIL fejezet egyik szerzője, szerkesztője voltam [53].

Luminozításmérő és nyalábdiagnosztikai rendszer fejlesztése a HL-LHC CMS-detektorához

A nagy luminozitású LHC működési körülményei (200 p-p ütközés csomagtalálkozásonként) jelentősen nehezebbek lesznek a mainál. A precíziós fizikai program követelményei – különösen a W-, Z- és Higgs-bozonok, valamint a top kvark tulajdonságainak mérése érdekében – pedig csak szigorodni fognak. Ezért dolgozott ki a CMS BRIL projekt egy ambiciózus korszerűsítési programot, amely része a CMS detektor szinte teljes megújításának [58]. Kezdetben hozzájárultam a stratégia [57] meghatározásához a legpontosabb luminozításmérés elérése érdekében, és szerzője, felelős szerkesztője voltam a koncepcionális tervezési jelentés [55] megfelelő fejezetének.

Ezután BRIL Upgrade Group koordinátorként a műszaki tervezési jelentés (TDR) [56] elkészítését vezettem, amely magába foglalta a nyalábdiagnosztikai és sugárzásmérő rendszerek megújítását is. Különösen az alrendszerek terveinek belső BRIL, majd a CMS Együttműködés egészére kiterjedő felülvizsgálatáért,

később az LHCC (LHC Experiments Committee) általi jóváhagyási folyamatért voltam szakmai felelős.

Jelentős hozzájárulásom volt továbbá a dedikált, szilíciumlapka-érzékelőn alapuló luminozításdetektor, az FBCM (Fast Beam Conditions Monitor) optimalizálásához. Szimulációs tanulmányokat vezettem a pontos luminozítás- és nyaláb-indukált háttér méréshez adaptált TEPX (Tracker Endcap Pixel) detektorban a várható háttér modellezéséhez. A TDR könyvből két fejezetet én írtam, és szerkesztőként az összeset felülvizsgáltam. A javasolt rendszer várhatóan 1%-os pontosságot fog biztosítani a luminozítás meghatározására, ahogyan azt a Higgs-bozon keletkezés hatáskeresztmetszetének legpontosabb mérése a gluonfúziós csatornában megköveteli [56].

4 Új tudományos eredmények: A részecskefizika standard modelljén innen és túl

A részecskefizika alapvető elméletének feltérképezése érdekében két egymást kiegészítő módszert követtem: a standard modell folyamatainak méréseiben az elméleti előrejelzésektől való finom eltérések után nyomoztam, és új egzotikus jelenségek, nehéz részecskék közvetlen megjelenését kerestem. Az eredményeket az alábbi a tézispontokban foglalom össze.

A standard modell ellenőrzése

S1 Inkluzív elektron- és müon keletkezés differenciális hatáskeresztmetszetének mérése nehéz kvarkok bomlásaiban

Az LHC kezdeti $\sqrt{s} = 7$ TeV energiájú, alacsony luminozítású adatai lehetővé tették, hogy az ATLAS detektorral megvizsgáljuk az inkluzív elektron- és müonkeltést a leptonok transzverzális lendületének függvényében [22]. A $W/Z/\gamma^*$ hozzájárulás kivonása után a differenciális hatáskeresztmetszetek jó egyezést mutattak a nehézkvark-keltésre vonatkozó elméleti előrejelzésekkel, amelyeket perturbatív kvantumszíndinamikai vezető utáni rendű (next-to-leading order, NLO) számítások kis lendületű és kollinearitás gluonkibocsájtásra vezető utáni rendben felösszegzett logaritmikus (next-to-leading-log, NLL) korrekciójával kaptak. Ezek voltak az első olyan eredmények, amelyek kimutatták az NLL felösszegzés szükségességét nehéz kvarkok keletkezésének vizsgálatánál.

Én voltam a belső dokumentáció szerkesztője [96], dolgoztam az elektron rekonstrukció optimalizálásán kis transzverzális lendület esetén [24][91, 97], és én végeztem el a detektorhatások statisztikus korrekcióját (unfolding), valamint a mérések értelmezését, az elmélettel való összevetését. A méréshez kidolgozott módszerek szolgálták kiindulópontként az elnyomható, nem

izolált leptonokat tartalmazó háttér becsléséhez a $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- e^+ e^-$ analízisben (lásd az S2 tézispontot).

S2 A standard modell Higgs-bozon felfedezése és tulajdonságainak mérése

A LEP-en végzett izgalmas és alsó tömegkorlátot eredményező Higgs-bozon-keresés után [13], az LHC program fő célja és eddig legfontosabb eredménye az SM Higgs-bozon felfedezése [29, 30] volt.

Első hozzájárulásom a kis transzverzális lendületű elektronok rekonstrukciójának javítása, felismerési hatékonyságuk vizsgálata [25, 26][90–92, 98] volt, ami kiemelkedő fontosságú a $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ mérésben. Ezután egy új háttérbecslési módszer [99] kifejlesztését vezettem, amely elsősorban a $Z + \text{hadronzapor}$ folyamat hozzájárulásának a meghatározására irányult a $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- e^+ e^-$ keresésben [28, 35][100, 101], és később a Higgs-bozon tulajdonságainak mérésében [69, 70]. A módszer kifejezetten a gyenge, félig leptonos b-hadron bomlásokból származó, nem izolált elektronok hozzájárulásának pontosabb meghatározását célozta meg.

Szakértőként részt vettem az eleinte a várttól eltérő eredményeket adó $H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell^+ \nu_\ell \ell^- \bar{\nu}_\ell$ mérés [62] ellenőrzésére létrehozott munkacsoportban, illetve a $H \rightarrow \gamma\gamma$ analízisben központi szerepet játszó fotonazonosítás hatékonyságának vizsgálatában [27].

A kétbozonos Higgs-bozon bomlások vizsgálatának eredményei szolgáltatták az adatokat az új skalár részecske csatolásainak meghatározásához. A mért értékek jó egyezést mutattak az előrejelzésekkel egy 125 GeV tömegű SM Higgs-bozon esetére [31, 35, 36][101–106].

A Higgs-keltés dinamikájának jobb megértéséhez a végállapot tulajdonságainak, a megjelenő leptonok és hadronzaporok eloszlásainak vizsgálata segít hozzá. Egy PhD hallgató munkáját irányítva meghatároztam a fiduciális (azaz a detektor által lefedett fázistérhez tartozó) hatáskeresztmetszetet a négy-leptonos csatornában. Hozzájárultam a differenciális hatáskeresztmetszet méréséhez több kinematikai változó, valamint az eseményben megjelenő hadronzaporok számának és transzverzális lendületének függvényében [34][107], elsősorban a háttér hozzájárulásának és az ehhez kötődő szisztematikus bizonytalanság meghatározásával. Az eredmények pontosságát elsősorban a rendelkezésre álló eseményszám korlátozta, amelyen belül jó egyezést láttunk az elmélettel.

A Higgs-bozon kimutatását az igen ritka $pp \rightarrow t\bar{t}H$ együttes keletkezésben jelentős háttér is nehezítette. Amikor a Higgs-bozon fotonpárra bomlik, a háttér fő forrása a $pp \rightarrow t\bar{t}\gamma$ folyamat. Én vezettem a belső ellenőrzését a $t\bar{t}\gamma$ keletkezést elsőként kimutató mérésnek [64], amely az SM előrejelzésével jól egyező hatáskeresztmetszet értéket adott.

Ezek a mérések teljessé tették a részecskefizika standard modelljét, amely az egyik legrészletesebben ellenőrzött és legsikeresebb modell [65], annak ellenére is, hogy számos asztrofizikai és laboratóriumi megfigyelésre nem ad magyarázatot.

S3 Mértékbozonok párkeltésének és szórásának tanulmányozása

A Higgs-bozon gyenge mértékbozonokhoz tartozó csatolásainak az SM előrejelzésektől való kis eltérése is jelentősen befolyásolná a longitudinális mértékbozon-szórás hatáskeresztmetszetét nagy lendületátvitelnél [71]. Így a mértékbozon-szórás vizsgálata [72] az elektrogyenge szimmetriasértés és az új fizika érzékeny tesztje. Három CERN-kísérletben dolgoztam a kétbozon-állapotok keletkezésének tanulmányozásán, és a hatáskeresztmetszetüket hipotetikus befolyásoló új fizikai folyamatok megszorításán. Az OPAL-kísérletben $\sqrt{s} = 190 - 209$ GeV energián ZZ [14, 15], az ATLAS detektorral $\sqrt{s} = 7$ TeV-en $W\gamma$ és $Z\gamma$ [47], végül a CMS-ben elsősorban $\sqrt{s} = 13$ TeV-en ZZ [43, 44], $W^+ W^-$ [45] és $W\gamma$ [46] párok keletkezését vizsgáltam. Az SM előrejelzéseivel való gondos összehasonlítás után, mivel nem figyeltünk meg eltéréseket, korlátokat adtunk meg az anomális hármas vagy négyes mértékbozon-csatolásokra, amelyek többsége megjelenésekor az addigi legszigorúbb volt.

Az ATLAS- és CMS-kísérletekben elsősorban az eredményeket felülvizsgáló belső bizottság tagjaként járultam hozzá a mérésekhez, illetve az elektron-foton és a standard modell csoportok triggerfejlesztéseinek és -tanulmányainak vezetésével.

Meghatároztuk a ZZ-párok hadronzáporokkal együttes keletkezésének differenciális hatáskeresztmetszetét $\sqrt{s} = 8$ és 13 TeV energián [42, 73], és megfigyeltük négy töltött lepton ritka, két hadronzáporral (jet, j) kísért elektrogyenge keletkezését $\sqrt{s} = 13$ TeV energián [43, 44]. Ehhez a ritka négyes mértékcsatoláson keresztüli mértékbozon-szórás folyamat is ad járulékot. Elsőként mutattuk ki a $W^+ W^- + jj$ [45] végállapot elektrogyenge keletkezését, és vizsgáltuk a $W\gamma + jj$ [46] folyamat differenciális hatáskeresztmetszetét, illetve annak elektrogyenge komponensét. A 8-dimenziós standard modell effektív térelmélet, az ú.n. SMEFT Lagrange-sűrűségében $\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i c_i^{(4)} \mathcal{O}_i^{(8)} / \Lambda^4$ megjelenő $c_i^{(4)}$ Wilson-együtthatókra meghatározott 95% konfidenciatartományok több esetben is az eddigi legszigorúbbak.

Gyenge mértékbozon-párok igen ritkán, de keletkezhetnek egyetlen proton - proton ütközésen belül lejátszódó két parton-parton ütközésben (kettős partonszórásban) is, ahol mindegyik parton-parton kölcsönhatás egy gyenge bozont eredményez. A $pp \rightarrow W^\pm W^\pm$ kettős partonszórás folyamat tanulmányozása lehetőséget ad a proton struktúrájának jobb megismerésére, ugyanis az effektív hatáskeresztmetszet, amely összeköti az egyszeres és

a többszörös szórási hatáskeresztmetszeteket, arányos a kölcsönható partonok közötti átlagos transzverzális távolság négyzetével. A témavezetéssel született mérés eredménye [74][108] információt ad a Monte Carlo szimulációkban az elsődleges nagy lendületátadású folyamaton túli, ún. mögöttes esemény leírásához is.

S4 Drell-Yan leptonpárkeltés vizsgálata

A leptonpárkeltés [39–41] pontosan mérhető az LHC-nél, és így kiváló ellenőrzéséül szolgál a magasabb rendű perturbatív számításoknak. Az ATLAS-kísérlet adataiban $\sqrt{s} = 7$ TeV energián megmértük a Drell-Yan differenciális hatáskeresztmetszetet kételektron-végállapotban az elektronpár tömegének függvényében, és összehasonlítottuk különböző elméleti előrejelzésekkel [23, 75]. Hozzájárultam a nagy p_T -jú elektronok érzékelésének hatásfokméréséhez egy új leptonizolációs kritériumot alkalmazó címke-és-szonda módszer kidolgozásának irányításával. Elkészítettem a szisztematikus bizonytalanságok meghatározását és az eredményeknek az elméleti modellekkel való összehasonlítását szolgáló Monte Carlo szimulációkat. Továbbá a mérést részletesen leíró belső dokumentum [109] szerkesztője is voltam. A FEWZ 3.1 numerikus kód előrejelzései a spektrum alakjára összhangban voltak a méréssel, bár az adatok minden vizsgált partoneloszlás-függvény (PDF) esetén szisztematikusán az elmélet felett helyezkedtek el. Az elméleti leírás vezető utáni második rendű (NNLO) kvantumszíndinamikai számításokat vezető utáni rendű (NLO) elektrogyenge korrekciókkal és vezető rendű foton-indukált korrekciókkal egyesítette, figyelembe véve az egybozon-keltést követő valódi W- és Z-bozon-kibocsájtást is. Kimutattuk, hogy a tömegspektrum érzékeny a PDF-ekre, különösen az antikvarkok kevésbé ismert eloszlására nagy x -nél, ahol x a proton lendületének a kölcsönható parton által hordozott hányadát adja meg.

A nagy kétlepton-tömeeggel jellemzett tartomány érzékeny az új fizika jelenlétére is. Hasonló elemzési technikákat alkalmaztunk nehéz egzotikus rezonanciák [76][110] keresésére, és korlátokat állítottunk fel új, $s = 1$ spinű, SM-szerű csatolásokkal rendelkező Z' -bozonok keletkezésére, valamint $s = 2$ spinű Randall-Sundrum gravitonokat és több más hipotetikus részecskét tartalmazó modellek paramétereire is (lásd az N3 tézispontot).

Részt vettem a tömeghéjhoz közeli Z-bozonok keletkezési hatáskeresztmetszete paraméterezésében megjelenő szögegyütthatók mérésének előkészítésében $\sqrt{s} = 8$ TeV energián [41, 77].

A CMS-kísérlethez való csatlakozásom után, az LHC második futási szakaszában a Drell-Yan folyamat vizsgálatában először a standard modell munkacsoport triggerkoordinátoraként [50][94] működtem közre az elektron triggererek tisztaságának, hatásfokának emelésével, valamint a speciális alacsony eseményhalmazódású adatok rögzítéséhez szükséges triggermenü megtervezésével. Ezen adatok egyik fontos célja a W-bozon tömegének

pontos meghatározásához szükséges kiegészítő Z-bozon mérések elvégzése [41]. Ezután a hatáskeresztmetszet-mérés domináns kísérleti szisztematikus bizonytalanságának csökkentésére koncentráltam, amelynek forrása az adatmennyiség integrált luminozitásának ismerete. A 2016-ban $\sqrt{s} = 13$ TeV energián gyűjtött adatokra ezt 2,5%-ról 1,2%-ra sikerült javítani [51, 68][95]. Ebben jelentős szerepet játszott a nyaláb-nyaláb kölcsönhatások mélyebb megértése és a szükséges korrekciók pontos meghatározása [54].

Egzotikus nehéz részecskék keresése

N1 Töltött Higgs-bozonok keresése

Az SM különböző kiterjesztései, köztük a népszerű, nagy energiáknál szuperszimmetriát feltételező modellek, két komplex skalárdublettre kibővített Higgs-sektort és ezzel töltött Higgs-bozonok megjelenését jósolják. Ezek megfigyelése az SM-en túli fizika megdönthetetlen jele lenne. A LEP gyorsító második fázisában (LEP2) az OPAL-kísérletben az $e^+e^- \rightarrow H^+H^-$ folyamat utáni kutatásokban vezető szerepet játszottam. Mivel nem figyeltünk meg az SM háttér jóslatán túli eseménytöbbséget az $\sqrt{s} = 189 - 209$ GeV energiájú adatokban, modellfüggetlen korlátot adtunk meg a töltött Higgs-bozonok párkeltésének hatáskeresztmetszetére a vizsgált bomlási módok esetén. Az I. és II. típusú két-Higgs-dublett (2HDM(I) és 2HDM(II)) modellekben értelmezve ezeket, alsó tömegkorlátokat származtattunk a bozonok tömegére. A bozonos $H^\pm \rightarrow A^0W^{\pm*}$ bomlást is megengedő 2HDM(I) esetén ez 57 – 87 GeV közé, míg a csupán nehézfémpárókra való bomlást jósoló 2HDM(II) esetén 76 – 91 GeV közé esett a modell paramétereitől függően [9].

Az OPAL Együttműködés képviselőjeként részt vettem abban a kislétszámú munkacsoportban, ahol a négy LEP-kísérlet eredményeit kombináltuk, és ezáltal az alsó tömegkorlátokat 73 – 90 GeV-re és 80 – 94 GeV-re emeltük [20, 78]. Ezek az eredmények ma is fontosak, mivel az alacsony tömegű töltött Higgs-bozonok észlelése különösen nagy kihívást jelent az LHC számára a magas háttér miatt.

N2 Standard modellen túli semleges Higgs-bozonok keresése

Egy kiterjesztett Higgs-sektor több semleges Higgs-bozont is tartalmazna. Két Higgs-dublett és CP-őrző Higgs-kölcsönhatások esetén egy SM-szerű CP-páros (h^0), egy nehezebb CP-páros (H^0) és egy CP-páratlan (A^0) bozon jelenik meg. A LEP2 teljes adathalmazát felhasználva számos célzott keresés született ezek kimutatására. Ezekhez elsősorban tanácsadóként, belső bírálóként, illetve 2004-től az OPAL Együttműködés fizikakoordinatoraként járultam hozzá. Azokat foglalom össze alább, amelyeknél jelentős hozzájárulásom volt az eredményekhez.

Az $e^+e^- \rightarrow h^0 Z^0$ Higgs-sugárzási folyamat során keletkező h^0 bomlásából származó kis ($\lesssim 10$ GeV) tömegű A^0 bozonok párkeltését ($h^0 \rightarrow A^0 A^0$) egy célzott analízissel kerestük. Ebben az A^0 tömegtartományban az $A^0 \rightarrow b\bar{b}$ bomlás kinematikailag tiltott, így a hagyományos, b-hadronzápor-címkézésre támaszkodó keresés elveszti érzékenységét. Az eredményeket modellfüggetlen módon, valamint a referenciaként tekintett, CP-őrző, a skalár-t-kvark bal-jobb állapotkeveredését elnyomó "no-mixing" minimális szuperszimmetrikus standard modell (MSSM) kereteiben értelmeztük. Az utóbbi esetben a teljes vizsgált paraméterter, amely a h^0 tömegére 45 – 85 GeV közötti, az A^0 tömegére 2,0 – 9,5 GeV közötti értékeket enged meg, kizárásra került [13, 79].

A nem szuperszimmetrikus, CP-őrző 2HDM(II) modellek, amelyekben az öt Higgs-bozonon kívül nincsenek további új részecskék, újfajta mérések kidolgozását követelték meg. Ezek a Higgs-bozonok könnyű kvarkokra való bomlásait célozták meg ízfüggetlen hadronzápor-kiválasztás segítségével. $\sqrt{s} = 189$ GeV energián elsőként tették lehetővé a 2HDM paraméterterének részletes átvizsgálását és a modellek jelentős részének kizárását [80], kombinálva a korábbi $b\bar{b}$ és $\tau^+ \tau^-$ Higgs-bomlások utáni kutatás eredményeivel. A 190 – 209 GeV-es adatok feldolgozásával pedig az elérhető fázistér nagy részét lefedtük: a h^0 tömegére 52 – 98 GeV közti, az A^0 tömegére 62 – 130 GeV közti alsó korlátot adtunk meg [21, 81].

SUSY modellekben a Higgs-bozon a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecskére (LSP, χ) is bomolhat, amely – mérsékelt feltételezésekkel, mint az R-paritás-őrzés – egy kiváló sötétanyag-jelölt. Ekkor a Higgs-sugárzási folyamatot követő Higgs-bozon bomlás "láthatatlan" ($h^0 \rightarrow \chi\chi$), például MSSM neutralínópárokat ad az MSSM-ben, és így nagy hiányzó lendület jelenik meg az eseményben. A kiválasztott $h^0 Z^0$ -jelölt eseményekben a Z-bozon domináns hadronos bomlásait rekonstruálva kiszámolt hiányzó tömeg eloszlás statisztikus elemzése 108 GeV-es alsó korlátot adott a Higgs-bozon tömegére, a láthatatlan bomlás ágarányára 100%-ot feltételezve [82]. Hasonló korlátokat kaptunk a Higgs-bozonok több lépcsős, közel láthatatlan bomlása esetén is.

A négy LEP-kísérlet semleges Higgs-bozon keresési eredményeit kombináltuk [13, 19, 21], hogy a Higgs-bozon keletkezési hatáskeresztmetszetére minél szigorúbb végső korlátokat adjunk meg minden vizsgált eseménytopológia esetén. Ezeket értelmeztük mind CP-őrző, mind CP-sértő MSSM referencia-modellekben. A CP-őrző MSSM esetében a modell paraméterterének nagy részét kizártuk, a CP-sértő esetben lényegesen gyengébb korlátokat határoztunk meg. Abszolút korlátokat állapítottunk meg a két Higgs-dublett vákuum-várhatóértékének arányára ($\tan \beta$), és néhány referencia-modellben a semleges Higgs-bozonok tömegére is.

A LEP eredmények adták az LHC Higgs-keresések kiindulópontját mind a töltött, mind a semleges Higgs-bozonok esetében [4]. Eddig az LHC-

n végzett kiterjedt kutatások ellenére sem sikerült az SM-en túli Higgs-állapotot megfigyelni.

Az SM Higgs-bozon felfedezésével az egzotikus bomlási módok vizsgálata is érdekessé vált. Az ATLAS detektorral $\sqrt{s} = 7$ TeV energián végeztünk egy ilyen mérést, feltételezve, hogy a WH együttes keletkezést követően a hipotetikus Higgs-bozon egy rejtett szektor részecskéire bomlik, majd ezekből kollimált elektronzárók keletkeznek. Tanácsadóként, a belső szakértői ellenőrzés kezdetétől vettem részt a munkában, ahol a legnagyobb kihívást az ATLAS detektor érzékenységének meghatározása és optimalizációja jelentette erre a ritka és különleges fizikai objektumra. A várt háttérrel összehangban, csupán egyetlen elektronzárót tartalmazó eseményt észleltünk, így korlátot határoztunk meg az elsődleges kölcsönhatási csomópontból kilépő elektronzáró-végállapot keletkezési hatáskeresztmetszetére a megfigyelt 125 GeV értékhez közeli Higgs-bozon tömeget feltételezve [63].

N3 Extra dimenziókat posztuláló modellek kutatása

Számos a hierarchia problémával vagy a gravitációs és a mértékkölcsönhatások egyesítésével foglalkozó modell jósolja a jól ismert 3+1 dimenzió fölött további térbeli ("extra") dimenziók létezését, amelyek nagyenergiájú részecskeütköztetőknél jellegzetes jelenségekhez vezethetnek [6].

Tanulmányozva az OPAL-kísérletben megfigyelt $e^+e^- \rightarrow ZZ$ differenciális hatáskeresztmetszet függését a Z bozon keletkezési szögétől, korlátokat határoztam meg Arkani-Hamed, Dimopoulos és Dvali (ADD) alacsony energiakálájú kvantumgravitációs modelljére, amely nagy (mm alatti) térbeli extra dimenziók létezését is megengedi. Ekkor Kaluza-Klein gravitonok s-csatornás cseréje járulhat hozzá a kétbozon- és kétlepton-végállapotok keletkezéséhez. Megszorításokat adtam az elmélet ultraiobolya levágási paraméterére (M_S), amely várhatóan a D-dimenziós ($D > 4$) térben érvényes Planck-skálával azonos nagyságrendű [14]. A kétfoton- és kétlepton-végállapotok tanulmányozásával elért eredményekkel kombinálva, $M_S > 0,80$ (0,90) TeV korlátot állapítottam meg az SM és graviton folyamatok interferenciájából származó korrekció előjelét leíró $\lambda = -1$ (+1) [15] választás mellett.

Bár eddig nem figyeltek meg kontaktkölcsönhatás-jellegű korrekciót az SM-hez, ha ez egy jövőbeni létesítmény adataiban megnyilvánul, a folyamat részletes tulajdonságainak tanulmányozása lényeges információkat fog szolgáltatni a jelenségért felelős fizikáról. Feltételezve, hogy egy $\sqrt{s} = 0,5 - 1$ TeV-es e^+e^- lineáris ütköztetőn jelenik meg egy ilyen eltérés leptonpárkeltésben, megvizsgáltam több olyan lehetséges modellt, amelyből ez származhatna, többek között nagy és TeV-skálájú extra dimenziókkal rendelkező elméleteket és kompozit lepton modelleket. Megmutattam, hogy a mért hatáskeresztmetszetek és szögeloszlások segítségével ezek a modellek nagy megbízhatósággal megkülönböztethetőek [7].

A Randall-Sundrum (RS) modellben a görbült extra dimenzió méretének ingadozása stabil értéke körül egy új skalárrészecske, a radion megjelenéséhez vezet, amely keveredhet az azonos kvantumszámokkal rendelkező SM Higgs-bozonnal. Ez a Higgs-csatolások jelentős eltolódását eredményezné az SM-ben vártakhoz képest. A hipotetikus radion közvetlenül gluonpárokhoz is csatolódik, így bomlástermékei jelentős hányadát gluonokból születő hadronzárók teszik ki. Elvégeztük az első átfogó radionkeresést. Ennek során az SM Higgs-bozon hagyományos bomlási csatornáira kapott megszorításokat ízfüggetlen, illetve bomlási mód független elemzések eredményeivel kombináltuk az OPAL adataiban. Az RS modell paramétereinek függvényében alsó korlátokat adtunk meg a Higgs- és a radion-szerű állapot tömegére [21, 83].

Az LHC magas ütközési energiájával és luminozitásával új ablakot nyithat az SM-en túli jelenségekre [65]. Mint a belső ellenőrző bizottság tagja, részt vettem az RS modell által jósolt $s = 0$ és $s = 2$ spinű rezonanciák keresésében a CMS-kísérletben. Vizsgáltuk gluonfúziós, s -csatornás Drell-Yan és mértékbozon-fúzió keresztüli párkeltésüket is, feltételezve, hogy bomlásukból ZZ vagy ZW mértékbozonpárok keletkeznek. A vizsgált végállapotban egy Z bozon neutrínópárra bomolva jelentős hiányzó lendületet, a másik bozon pedig kvarkpárra bomolva egy jellegzetes, alstruktúrával rendelkező széles hadronzárót kelt. Mivel nem figyeltünk meg eseménytöbbletet, az adatokat radiont, W' bozont, illetve gravitont tartalmazó modellekben értelmeztük, és alsó korlátot állapítottunk meg a bozonok tömegére az 1,2 – 4,0 TeV tartományban [84]. Ez a mérés kiegészíti a korábban tárgyalt kétlepton-rezonanciák utáni kutatást [76].

N4 R-paritás-sértő szuperszimmetrikus részecskék és leptokvarkok keresése a LEP-en

Az SM részecskék SUSY partnereinek keresése legtöbbször feltételezi, hogy a folyamat során az R-paritás megőrződik [12, 16]. Ezt egyrészt az R-paritás-sértő csatolások szorzatára ismert erős korlátok motiválják, másrészt pedig az igény egy megfelelő sötétanyag-jelöltre a modellben. Az R-paritás sértése azonban megengedett lehet, amennyiben csak egyetlen ilyen csatolás tér el szignifikánsan a nullától. Ezek a modellek ezután változatos végállapotokat jósolnak a jellegzetes hiányzó lendület megjelenése nélkül, mivel az LSP ekkor nem stabil [11].

Hadronos végállapotokban skalárfermionok párkeltése és közvetlen vagy többlepcős (közvetett) R-paritás-sértő bomlásai után kutattam. A teljes LEP2 adatok alapján modellfüggetlen felső korlátot adtam a skalárfermionok párkeltési hatáskeresztmetszeteire tömegük függvényében, valamint a CMSSM (Constrained MSSM) keretében alsó tömeghatárokat a 74 – 100 GeV tartományban, a skalárfermion izétől és a feltételezett nullától eltérő R-paritás-sértő csatolás típusától függően [10].

Az elektroyenge kölcsönhatás generáció- és multiplettszerkezetének szimmetriája motiválja a leptokvark (LQ) állapotok bevezetését. Ezek bomlásai esetén hasonló kísérleti ismertetőjegyeket várunk, mint a skalárfermionok R-paritás-sértő bomlásainál. Korábbi munkám tapasztalatait felhasználva két kapcsolódó elemzés belső ellenőrzését végeztem el. A skalár- és vektor-LQ-k párkeltésének keresése 93 – 102 GeV-es alsó korlátot adott az LQ tömegekre mindhárom generáció esetén. Ezek közel esnek a kinematikai határokhoz, kivéve a $-1/3$ elektromos töltésű skalár LQ-k esetén, ahol az adatok pozitív statisztikus fluktuációja miatt eseménytöbbletet észleltünk [85]. A kinematikai korlátok kiterjeszthetők az első generációs LQ-k egyedüli keletkezésének figyelembevételével elektron - foton ütközésekben ($e\gamma \rightarrow qLQ$), ahol a fotont egy nyalábelelektron bocsátja ki. A csatolási erősség – tömeg síkban nagy területeket zártunk ki. Elektromágneses erősségű csatolások esetén az alsó tömegkorlát 121 – 188 GeV-ig terjed a LQ típusától függően [86].

Bár a szuperszimmetriát, extra térbeli dimenziókat vagy új kölcsönhatásokat feltételező modellek által megjósolt egzotikus jelenségek kutatása a LEP-en [21] nem hozott úttörő felfedezéseket, eredményeink ma is meghatározóak, mivel az SM problémáinak megoldására javasolt kiterjesztett modellek jelentős részét kizártuk velük.

N5 Szuperszimmetrikus részecskék keresése az LHC-n

Az LHC rekord (jelenleg $\sqrt{s} = 13,6$ TeV) ütközési energiájával egyedülálló lehetőséget ad arra, hogy fényt derítsünk az SM mögötti alapvető elméleti leírásra. Ezért a CMS-kísérlet az SM-en túli jelenségek közvetlen keresésére széles programmal rendelkezik [59, 87, 88], amelyben elsősorban témavezetőként és belső bírálóként vettem részt.

A nagy tömegű t-kvark és szuperpartnere várhatóan különleges szerepet játszik az elektroyenge szimmetriasértésben. Ráadásul egy könnyű skalár-t-kvark természetesen megjelenik a t-kvark erős Yukawa-csatolásából eredő jelentős skalár-t-kvark bal-jobb állapotkeveredés miatt egy széles paramétertartományban. Csoportom ezért összpontosít a skalár-t-kvarkok keletkezésének kutatására. Közvetlen és gluínóközvetítésű skalár-t-kvark párkeltést vizsgáltunk teljesen hadronos végállapotban, lefedve a paramétertartomány azon részét is, ahol a skalár-t-kvark és a legkönnyebb SUSY részecske, a neutralínó tömege között kicsi az eltérés ("tömörített tömegspektrum"). Ez a régió különösen érdekes, mivel megfelelő sötétanyag-sűrűséget jósol, és kísérletileg nehezen elérhető, így még nyitva áll. Új, mély neurális hálózatokon alapuló, hadronosan bomló t-kvarkok és W-bozonok azonosítására szolgáló algoritmusokat, valamint – tömörített tömegspektrum esetén – a b-kvarkok azonosítására kis lendületű részecskék bomlására optimalizált másodlagos kölcsönhatási csomópont rekonstrukciót alkalmaztunk. A hatáskeresztmetszetekre meghatározott felső korlátokból a SUSY-részecskék

tömegére jelentősen javított kizárási tartományokat adtunk meg, amelyek a közvetlenül keletkező skalár-t-kvarkok esetében 1,31 TeV-ig, a skalár-t-kvarkokra bomló gluínók esetében pedig 2,26 TeV-ig terjednek [37][111]. A skalár-t-kvark és a neutralínó közötti mindössze 10 GeV tömegkülönbség esetén 600 GeV feletti alsó tömegkorlátot értünk el minden vizsgált egyszerűsített SUSY modellben.

Az elektrogyenge mértékbozonok partnerei, a gédzsínók is elérhetőek lehetnek kinematikailag az LHC-n, és az eddigi megszorítások a tömegeikre jelentősen gyengébbek, mint a színes részecskékére. A tömörített tömegspektrumú topológiák, ahol a neutralínó LSP és a megfigyelhető párban keletkező szuperszimmetrikus részecske közötti tömegkülönbség kicsi, kísérleti szempontból itt is kihívást jelentenek, mivel az LSP-vel együtt keletkező SM-részecskék kis lendülettel rendelkeznek. Ilyen SUSY-tartományok esetén, a kutatás érzékenységének javítása érdekében egy új elemzést végeztünk el, amely mértékbozon-fúzió kereszttüli csardzsínópár és csardzsínó-neutralínó keltést céloz meg. A nagy hiányzó transzverzális lendületű, nulla vagy egy leptont, és egy előre-hátra szórt hadronzáporpárt tartalmazó végállapot vizsgálatával egy korábban elérhetetlen paramétertartományt fedtünk le, ahol a tömegkülönbség csupán néhány GeV és a keletkezett gédzsínó tömege 100 GeV felett van. SUSY-jel hiányában a legkönnyebb csardzsínó és a második legkönnyebb neutralínó tömegére 112 (215) GeV-es alsó korlátot adtunk meg 1 (30) GeV tömegkülönbség esetén [38].

A fent bemutatott eredmények két évtizedet ölelnek fel, egy olyan időszakot, amely alapjaiban változtatta meg a részecskefizikát. A legfontosabb, hogy az LHC-n felfedeztük a Higgs-bozont, ami teljessé tette a részecskefizika standard modelljének részecsketartalmát. Azonban a nagy energián is érvényes alapvető elméletről tanúskodó új egzotikus részecskefizikai jelenségek gyors felfedezéséhez fűzött remény nem teljesült. Így tovább kell folytatnunk az SM határainak szisztematikus feltérképezését, amihez egyre összetettebb berendezésekre és elemzési módszerekre van szükség. Ez az igény motiválja a globális, nemzetközi megakollaborációk működését és az LHC továbbfejlesztését.

2015-ös hazatérésem óta az a célom, hogy az ELTE-n olyan kutatócsoportot építsek ki, amelynek hozzájárulása kiemelkedik és hosszú távon fenntartható a közel 2400 szerzőt (több mint 4000 résztvevőt) összefogó CMS Együttműködésben. Ebből a szempontból a BRIL detektorrendszer projektmenedzseri pozíciója, a HL-LHC-re a detektor korszerűsítésben [58] betöltött irányító szerepem, és jelenlétem a CMS vezető testületeiben nem csupán kiegészítik tudományos részecskefizikai eredményeinket, hanem különösen fontosak, hiszen jelentősebb hangot adnak a kísérlet jövőjének, rövid- és hosszútávú stratégiájának alakításában is [59].

5 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények és nyilvános dokumentumok

A "*" -gal jelölt saját publikációim nem szerepelnek számozott tézispontban (S1–S4, N1–N5): ezek a célkitűzések felvázolásához és a vizsgálati módszerek fejlesztésében elért eredményekhez tartoznak.

- [1] * S. Chatrchyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “The CMS experiment at the CERN LHC,” *JINST*, vol. 3, S08004, 2008. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [2] * K.W. Bell, J.A. Coughlan, C. Foudas, K. Gill, N. Marinelli, G. Pásztor, and I.R. Tomalin, “User Requirements Document for the Final FED of the CMS Silicon Strip Tracker,” CERN, Geneva, CMS-NOTE-2001-043, Sep. 2001. <https://cds.cern.ch/record/687365>.
- [3] * G. Pásztor, “The CMS silicon strip tracker,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 842, no. 1, P. D. Barnes, M. D. Cooper, R. A. Eisenstein, H. van Hecke, and G. J. Stephenson, Eds., pp. 1067–1069, 2006. DOI: 10.1063/1.2220455. arXiv: physics/0602117.
- [4] G. Pásztor, “Discovery potential for Higgs bosons beyond the SM,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 110, R. Barlow, Ed., p. 072032, 2008. DOI: 10.1088/1742-6596/110/7/072032. arXiv: 0802.1000 [hep-ex].
- [5] * G. Aarons *et al.* [incl. G. Pásztor], “International Linear Collider Reference Design Report Volume 2: Physics at the ILC,” A. Djouadi, J. Lykken, K. Moenig, Y. Okada, M. Oreglia, and S. Yamashita, Eds., Sep. 2007. arXiv: 0709.1893 [hep-ph].
- [6] G. Pásztor and T. G. Rizzo, “Report of the Snowmass subgroup on extra dimensions,” *eConf*, vol. C010630, N. Graf, Ed., P333, 2001. arXiv: hep-ph/0112054.
- [7] G. Pásztor and M. Perelstein, “Exploring new physics through contact interactions in lepton pair production at a linear collider,” *eConf*, vol. C010630, N. Graf, Ed., P315, 2001. arXiv: hep-ph/0111471.
- [8] G. Pásztor, “Electroweak and Alternative Theories — Summary,” Presented at ECFA International Linear Collider Workshop, 14-17 November 2005, Vienna, Austria., 2005. <https://agenda.linearcollider.org/event/7154/#48-ewalt>.
- [9] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for Charged Higgs Bosons in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 189-209$ GeV,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 72, p. 2076, 2012, CERN-PH-EP-2008-016. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-2076-0. arXiv: 0812.0267 [hep-ex].
- [10] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for R parity violating decays of scalar fermions at LEP,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 33, pp. 149–172, 2004. DOI: 10.1140/epjc/s2004-01596-8. arXiv: hep-ex/0310054.

- [11] G. Pásztor, “Search for R-parity violating decays of supersymmetric particles at LEP,” *Int. J. Mod. Phys. A*, vol. 16S1B, K. K. Gan and R. Kass, Eds., pp. 781–785, 2001. DOI: 10.1142/S0217751X01008084. arXiv: hep-ex/0012007.
- [12] G. Pásztor, “Search for gauginos and gauge mediated SUSY breaking scenarios at LEP,” *PoS*, vol. HEP2005, G. Barreira, Ed., p. 346, 2006. DOI: 10.22323/1.021.0346. arXiv: hep-ex/0512054.
- [13] G. Pásztor, “Search for SM and MSSM Higgs bosons at LEP,” in *11th International Conference on Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions (SUSY2003)*, Mar. 2004. arXiv: hep-ex/0403049.
- [14] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Study of Z pair production and anomalous couplings in e^+e^- collisions at \sqrt{s} between 190 GeV and 209 GeV,” *Eur. Phys. J.*, vol. C32, pp. 303–322, 2003. DOI: 10.1140/epjc/s2003-01467-x. arXiv: hep-ex/0310013.
- [15] G. Pásztor, “Study of ZZ production at LEP at $\sqrt{s} = 183 - 209$ -GeV,” *Int. J. Mod. Phys. A*, vol. 16S1A, K. K. Gan and R. Kass, Eds., pp. 311–314, 2001. DOI: 10.1142/S0217751X01006784. arXiv: hep-ex/0012008.
- [16] G. Pásztor, “Search for supersymmetry, extra dimensions and exotic phenomena at LEP,” *Frascati Phys. Ser.*, vol. 27, M. Greco, Ed., pp. 665–680, 2002. arXiv: hep-ex/0210015.
- [17] * S. Schael *et al.* [incl. G. Pásztor], “Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance,” *Physics Reports*, vol. 427, pp. 257–454, 2006, arXiv: hep-ex/0509008. DOI: 10.1016/j.physrep.2005.12.006.
- [18] * S. Schael *et al.* [incl. G. Pásztor], “Electroweak Measurements in Electron-Positron Collisions at W-Boson-Pair Energies at LEP,” *Physics Reports*, vol. 532, pp. 119–244, 2013, arXiv:1302.3415 [hep-ex]. DOI: 10.1016/j.physrep.2013.07.004.
- [19] S. Schael *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for neutral MSSM Higgs bosons at LEP,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 47, pp. 547–587, 2006. DOI: 10.1140/epjc/s2006-02569-7. arXiv: hep-ex/0602042.
- [20] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for Charged Higgs bosons: Combined Results Using LEP Data,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 73, p. 2463, 2013. DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2463-1. arXiv: 1301.6065 [hep-ex].
- [21] G. Pásztor, “The LEP testimony: Exotic searches and studies,” in *41st Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories*, May 2006, pp. 247–261. arXiv: hep-ex/0605095.
- [22] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurements of the electron and muon inclusive cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B*, vol. 707, pp. 438–458, 2012. DOI: 10.1016/j.physletb.2011.12.054. arXiv: 1109.0525 [hep-ex].

- [23] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of the high-mass Drell–Yan differential cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B*, vol. 725, pp. 223–242, 2013. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.07.049. arXiv: 1305.4192 [hep-ex].
- [24] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Electron performance measurements with the ATLAS detector using the 2010 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 72, p. 1909, 2012. DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1909-1. arXiv: 1110.3174 [hep-ex].
- [25] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Electron reconstruction and identification efficiency measurements with the ATLAS detector using the 2011 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 74, no. 7, p. 2941, 2014. DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2941-0. arXiv: 1404.2240 [hep-ex].
- [26] M. Aaboud *et al.* [incl. G. Pásztor], “Electron efficiency measurements with the ATLAS detector using 2012 LHC proton-proton collision data,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 77, no. 3, p. 195, 2017. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4756-2. arXiv: 1612.01456 [hep-ex].
- [27] M. Aaboud *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of the photon identification efficiencies with the ATLAS detector using LHC Run-1 data,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 76, no. 12, p. 666, 2016. DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4507-9. arXiv: 1606.01813 [hep-ex].
- [28] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ with 4.8 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS,” *Phys. Lett. B*, vol. 710, pp. 383–402, 2012. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.005. arXiv: 1202.1415 [hep-ex].
- [29] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 1–29, 2012. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.020. arXiv: 1207.7214 [hep-ex].
- [30] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “A particle consistent with the Higgs Boson observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider,” *Science*, vol. 338, pp. 1576–1582, 2012. DOI: 10.1126/science.1232005.
- [31] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Lett. B*, vol. 726, pp. 88–119, 2013, [Erratum: *Phys.Lett.B* 734, 406–406 (2014)]. DOI: 10.1016/j.physletb.2014.05.011. arXiv: 1307.1427 [hep-ex].
- [32] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data,” *Phys. Lett. B*, vol. 726, pp. 120–144, 2013. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.08.026. arXiv: 1307.1432 [hep-ex].

- [33] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of the Higgs boson mass from the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ channels with the ATLAS detector using 25 fb^{-1} of pp collision data,” *Phys. Rev. D*, vol. 90, no. 5, p. 052004, 2014. DOI: 10.1103/PhysRevD.90.052004. arXiv: 1406.3827 [hep-ex].
- [34] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Fiducial and differential cross sections of Higgs boson production measured in the four-lepton decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector,” *Phys. Lett. B*, vol. 738, pp. 234–253, 2014. DOI: 10.1016/j.physletb.2014.09.054. arXiv: 1408.3226 [hep-ex].
- [35] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurements of Higgs boson production and couplings in the four-lepton channel in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D*, vol. 91, no. 1, p. 012006, 2015. DOI: 10.1103/PhysRevD.91.012006. arXiv: 1408.5191 [hep-ex].
- [36] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Constraints on the off-shell Higgs boson signal strength in the high-mass ZZ and WW final states with the ATLAS detector,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 75, no. 7, p. 335, 2015. DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3542-2. arXiv: 1503.01060 [hep-ex].
- [37] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for top squark production in fully-hadronic final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$,” *Phys. Rev. D*, vol. 104, no. 5, p. 052001, 2021. DOI: 10.1103/PhysRevD.104.052001. arXiv: 2103.01290 [hep-ex].
- [38] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for supersymmetry with a compressed mass spectrum in the vector boson fusion topology with 1-lepton and 0-lepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$,” *JHEP*, vol. 08, p. 150, 2019. DOI: 10.1007/JHEP08(2019)150. arXiv: 1905.13059 [hep-ex].
- [39] G. Pásztor, “Electroweak measurements with the CMS experiment,” in *52nd Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Italy, 25 Mar - 1 Apr 2017*, E. Auge, J. Dumarchez, and J. Tran Thanh Van, Eds., ARISF, Jun. 2017, pp. 43–46. <https://cds.cern.ch/record/2268199>.
- [40] G. Pásztor, “Hard QCD Measurements at the LHC,” in *28th International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (LP17): Guangzhou (Guangdong), China, August 7-12, 2017*, Singapur: WSP, 2020, pp. 221–240. DOI: 10.1142/9789811207402_0015. <https://cds.cern.ch/record/2313534>.
- [41] G. Pásztor, “Precision tests of the Standard Model at the LHC with the ATLAS and CMS detectors,” *PoS*, vol. FFK2019, p. 005, 2020. DOI: 10.22323/1.353.0005.

- [42] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of differential cross sections for Z boson pair production in association with jets at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV,” *Phys. Lett. B*, vol. 789, pp. 19–44, 2019. DOI: 10.1016/j.physletb.2018.11.007. arXiv: 1806.11073 [hep-ex].
- [43] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of vector boson scattering and constraints on anomalous quartic couplings from events with four leptons and two jets in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B*, vol. 774, pp. 682–705, 2017. DOI: 10.1016/j.physletb.2017.10.020. arXiv: 1708.02812 [hep-ex].
- [44] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Evidence for electroweak production of four charged leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B*, vol. 812, p. 135992, 2021. DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135992. arXiv: 2008.07013 [hep-ex].
- [45] A. Tumasyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Observation of electroweak W+W– pair production in association with two jets in proton-proton collisions at $s=13\text{TeV}$,” *Phys. Lett. B*, vol. 841, p. 137495, 2023. DOI: 10.1016/j.physletb.2022.137495. arXiv: 2205.05711 [hep-ex].
- [46] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Observation of electroweak production of $W\gamma$ with two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Lett. B*, vol. 811, p. 135988, 2020. DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135988. arXiv: 2008.10521 [hep-ex].
- [47] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurements of $W\gamma$ and $Z\gamma$ production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector at the LHC,” *Phys. Rev. D*, vol. 87, no. 11, p. 112003, 2013, [Erratum: Phys.Rev.D 91, 119901 (2015)]. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.112003. arXiv: 1302.1283 [hep-ex].
- [48] * M. Aaboud *et al.* [incl. G. Pásztor], “Performance of the ATLAS Trigger System in 2015,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 77, no. 5, p. 317, 2017. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4852-3. arXiv: 1611.09661 [hep-ex].
- [49] * G. Pásztor, “The Upgrade of the ATLAS Electron and Photon Triggers towards LHC Run 2 and their Performance,” in *Meeting of the APS Division of Particles and Fields (DPF2015)*, Nov. 2015. arXiv: 1511.00334 [hep-ex].
- [50] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Electron and photon reconstruction and identification with the CMS experiment at the CERN LHC,” *JINST*, vol. 16, P05014, 2021. DOI: 10.1088/1748-0221/16/05/P05014. arXiv: 2012.06888 [hep-ex].
- [51] A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Precision luminosity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in 2015 and 2016 at CMS,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 81, p. 800, 2021. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09538-2. arXiv: 2104.01927 [hep-ex].

- [52] * E. Ayala *et al.* [incl. G. Pásztor], “The Pixel Luminosity Telescope: a detector for luminosity measurement at CMS using silicon pixel sensors,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 83, no. 7, p. 673, 2023. DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11713-6. arXiv: 2206.08870 [physics.ins-det].
- [53] * A. Hayrapetyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Development of the CMS detector for the CERN LHC Run 3,” CERN, Geneva, 2023, Submitted to JINST. arXiv: 2309.05466 [physics.ins-det]. <https://cds.cern.ch/record/2870088>.
- [54] A. Babaev, T. Barklow, O. Karacheban, W. Kozanecki, I. Kralik, A. Mehta, G. Pásztor, T. Pieloni, D. Stickland, C. Tambasco, R. Tomas, and J. Wanýzyk, “Impact of beam-beam effects on absolute luminosity calibrations at the cern large hadron collider,” Jun. 2023, Accepted by *Eur. Phys. J. C* on 26 Oct 2023. arXiv: 2306.10394 [physics.acc-ph].
- [55] * A.M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor as author and chapter editor], *The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors: Conceptual Design*, G. Auzinger, A. Dabrowski, P. Lujan, and D. Stickland, Eds. Geneva, Jan. 2020. <http://cds.cern.ch/record/2706512>.
- [56] * A. Tumasyan *et al.* [incl. G. Pásztor as author, chapter editor and editor], *The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation Instrumentation and Luminosity Detectors*, G. Auzinger, A. Dabrowski, P. Lujan, G. Pásztor, and D. Stickland, Eds. Geneva, Jul. 2021, approved by the LHCC, final version dated Dec. 2021. <http://cds.cern.ch/record/2759074>.
- [57] G. Pásztor, “Precision luminosity measurement with the CMS detector at HL-LHC,” *PoS*, vol. ICHEP2020, p. 864, 2021. DOI: 10.22323/1.390.0864.
- [58] G. Pásztor, “The Phase-2 Upgrade of the CMS Detector,” *PoS*, vol. LHCP2022, p. 045, 2023. DOI: 10.22323/1.422.0045.
- [59] G. Pásztor, “CMS Status Report,” Presented at the 150th LHC Experiments Committee (LHCC) Meeting - OPEN Session., 2022. <https://indico.cern.ch/event/1156732/#102-cms-status-report>.
- [60] G. Pásztor, “The CMS Silicon Strip Tracker experience,” Presented at ECFA International Linear Collider Workshop, SiLC Satellite Meeting, 18 November 2005, Vienna, Austria., 2005. <https://agenda.linearcollider.org/event/7184/#1-cms-experience>.
- [61] * G. Pásztor, “Measurements of vector-meson production with the ATLAS detector,” Sep. 2011, In proceedings of the 19th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Newport News, VA, USA, 11 - 15 April 2011. <https://cds.cern.ch/record/1379524>.

- [62] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for the Higgs boson in the $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, p. 111802, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.111802. arXiv: 1112.2577 [hep-ex].
- [63] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for WH production with a light Higgs boson decaying to prompt electron-jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with the ATLAS detector,” *New J. Phys.*, vol. 15, p. 043009, 2013. DOI: 10.1088/1367-2630/15/4/043009. arXiv: 1302.4403 [hep-ex].
- [64] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Observation of top-quark pair production in association with a photon and measurement of the $t\bar{t}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector,” *Phys. Rev. D*, vol. 91, no. 7, p. 072007, 2015. DOI: 10.1103/PhysRevD.91.072007. arXiv: 1502.00586 [hep-ex].
- [65] G. Pásztor, “Recent ATLAS results and preparations for Run 2,” in *22nd International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP2015)*, Feb. 2016. arXiv: 1602.01536 [hep-ex].
- [66] * A. M. Sirunyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Study of jet quenching with isolated-photon+jet correlations in PbPb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *Phys. Lett. B*, vol. 785, pp. 14–39, 2018. DOI: 10.1016/j.physletb.2018.07.061. arXiv: 1711.09738 [nucl-ex].
- [67] G. Pásztor, “CMS luminosity calibration of 2017 data @ 13 TeV,” First public presentation of the results for the experts of the LHC community at the Meeting of the LHC Luminosity Calibration and Monitoring Working Group, 14 May 2018, CERN, Geneva, Switzerland., 2018. <https://indico.cern.ch/event/728180/#1-cms-2017-luminosity-analysis>.
- [68] G. Pásztor, “Precision luminosity measurement in p-p collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV in 2015 and 2016 at CMS,” First public presentation of the results for the experts of the LHC community at the Meeting of the LHC Luminosity Calibration and Monitoring Working Group, 12 Apr 2021, virtual., 2021. <https://indico.cern.ch/event/1017986/#1-precision-cms-luminosity-mea>.
- [69] G. Pásztor, “Measurement of the properties of the Higgs-like boson in the $Z \rightarrow 4\ell$ channel,” Presented at Aspen 2013 – Higgs Quo Vadis, 10–16 Mar 2013, Aspen Center for Physics, Colorado, USA., 2013. <https://indico.cern.ch/event/202554/contributions/391230/>.
- [70] G. Pásztor, “New results in Higgs physics at the LHC,” Presented at FFK 2015 – International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants, 12–16 Oct 2015, Budapest, Hungary., 2015. <https://indico.cern.ch/event/346913/contributions/1751336/>.

- [71] G. Pásztor, “Hints for new physics from SM precision measurements: experimental investigation of vector boson scattering,” Highlights from the Winter 2021 topical meeting on VBS, presented at Physics beyond the Standard Model: Modern Approaches, ELFT Winter School 2021, Budapest., Feb. 2021. http://hector.elte.hu/iskola20/slides/Gabriella_Pasztor_iskola20.pdf.
- [72] J. Baglio *et al.* [incl. G. Pásztor], “VBSCan Mid-Term Scientific Meeting,” in *VBSCan Mid-Term Scientific Meeting*, Apr. 2020. arXiv: 2004.00726 [hep-ph].
- [73] G. Pásztor, “Multiboson production at LHC,” Presented at Blois 2018 – 30th Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology, 3–8 June 2018, Blois, France., 2018. <https://indico.cern.ch/event/677667/contributions/2996188/>.
- [74] A. Tumasyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Observation of same-sign WW production from double parton scattering in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 131, p. 091 803, 9 Sep. 2023. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.091803. arXiv: 2206.02681 [hep-ex]. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.131.091803>.
- [75] G. Pásztor, “Recent results from ATLAS,” Presented at the Meeting of the PDF4LHC: Parton Distribution Functions for the LHC forum, 7 December 2012, CERN, Geneva, Switzerland., 2012. <https://indico.cern.ch/event/218983/contributions/449672/>.
- [76] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for high-mass resonances decaying to dilepton final states in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP*, vol. 11, p. 138, 2012. DOI: 10.1007/JHEP11(2012)138. arXiv: 1209.2535 [hep-ex].
- [77] G. Aad *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of the angular coefficients in Z-boson events using electron and muon pairs from data taken at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector,” *JHEP*, vol. 08, p. 159, 2016. DOI: 10.1007/JHEP08(2016)159. arXiv: 1606.00689 [hep-ex].
- [78] P. Bock *et al.* [incl. G. Pásztor], “Searches for Higgs bosons: Preliminary combined results from the four LEP experiments at \sqrt{s} approximately 189 GeV,” in *1999 International Europhysics Conference on High-Energy Physics*, Jul. 1999.
- [79] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for a low mass CP-odd Higgs boson in e^+e^- collisions with the OPAL detector at LEP2,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 27, pp. 483–495, 2003. DOI: 10.1140/epjc/s2003-01139-y. arXiv: hep-ex/0209068.

- [80] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Two Higgs doublet model and model independent interpretation of neutral Higgs boson searches,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 18, pp. 425–445, 2001. DOI: 10.1007/s100520000544. arXiv: hep-ex/0007040.
- [81] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Flavor independent h^0A^0 search and two Higgs doublet model interpretation of neutral Higgs boson searches at LEP,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 40, pp. 317–332, 2005. DOI: 10.1140/epjc/s2005-02122-4. arXiv: hep-ex/0408097.
- [82] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for invisibly decaying Higgs bosons in $e^+e^- \rightarrow Z^0h^0$ production at $\sqrt{s} = 183 - 209$ GeV,” *Phys. Lett. B*, vol. 682, pp. 381–390, 2010. DOI: 10.1016/j.physletb.2009.09.010. arXiv: 0707.0373 [hep-ex].
- [83] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for radions at LEP2,” *Phys. Lett. B*, vol. 609, pp. 20–34, 2005, [Erratum: Phys.Lett.B 637, 382 (2006)]. DOI: 10.1016/j.physletb.2006.04.045. arXiv: hep-ex/0410035.
- [84] A. Tumasyan *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for heavy resonances decaying to $Z(\nu\bar{\nu})V(q\bar{q}')$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” 1, 2022, p. 012004. DOI: 10.1103/PhysRevD.106.012004. arXiv: 2109.08268 [hep-ex].
- [85] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for pair produced leptoquarks in e^+e^- interactions at $\sqrt{s} = 189 - 209$ GeV,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 31, pp. 281–305, 2003. DOI: 10.1140/epjc/s2003-01325-y. arXiv: hep-ex/0305053.
- [86] G. Abbiendi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for single leptoquark and squark production in electron photon scattering at $\sqrt{s_{ee}} = 189$ GeV at LEP,” *Eur. Phys. J. C*, vol. 23, pp. 1–11, 2002. DOI: 10.1007/s100520100859. arXiv: hep-ex/0106031.
- [87] G. Pásztor, “Beyond the (already observed) Higgs,” Presented at Zimányi Winter School, 2–6 Dec 2013, Budapest, Hungary., 2013. <https://indico.cern.ch/event/286124/contributions/1638490/>.
- [88] G. Pásztor, “Searches for supersymmetry with gauge-mediated symmetry breaking,” Presented at Blois 2018 – 30th Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology, 3–8 June 2018, Blois, France., 2018. <https://indico.cern.ch/event/677667/contributions/2994483/>.

A tézispontokhoz kapcsolódó korlátozott elérésű dokumentumok

- [89] G. Pásztor, “Output Data Format and On-Line Data Compression Algorithms for the CMS Tracker FED,” CERN, CMS IN-2001/029, Aug. 2001, Access restricted to CMS members.

- [90] C. Anastopoulos *et al.* [incl. G. Pásztor], “Supporting document on electron performance measurements using the 2011 LHC proton-proton collision data,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2012-1023, Mar. 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [91] M. Agustoni *et al.* [incl. G. Pásztor], “Electron energy scale in-situ calibration and performance,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2011-263, Oct. 2011, Access restricted to ATLAS members.
- [92] J. Alison *et al.* [incl. G. Pásztor], “Supporting document on electron efficiency measurements using the 2012 LHC proton-proton collision data,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2014-024, ATL-COM-PHYS-2013-1295, May 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [93] D. Adams *et al.* [incl. G. Pásztor], “Recommendations of the Physics Objects and Analysis Harmonisation Study Groups 2014,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2014-451, Jul. 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [94] D. Bhowmik *et al.* [incl. G. Pásztor], “Performance of e/γ reconstruction and identification with the CMS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV,” CERN, Geneva, CMS-AN-2020-075, Dec. 2020, Access restricted to CMS members.
- [95] A. Babaev *et al.* [incl. G. Pásztor], “Luminosity normalization precision and stability of CMS data taken in 2015 and 2016,” CERN, Geneva, CMS-AN-17-240, Nov. 2020, Access restricted to CMS members.
- [96] M. Backes *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of the inclusive electron cross-section from the decays of heavy flavour hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV: Supporting Document,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2012-056, ATL-COM-PHYS-2011-164, Apr. 2012, Access restricted to ATLAS members.
- [97] M. Aharrouche *et al.* [incl. G. Pásztor], “Expected electron performance in the ATLAS experiment,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2010-126, ATL-COM-PHYS-2010-208, Nov. 2010, Access restricted to ATLAS members.
- [98] C. Anastopoulos *et al.* [incl. G. Pásztor], “Improved electron reconstruction in ATLAS using the Gaussian Sum Filter-based model for bremsstrahlung: supporting documentation,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2012-164, Apr. 2012, Access restricted to ATLAS members.
- [99] S.H. Abidi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Event Selection and background estimation for the measurement of the properties of the Higgs particle in the four lepton decay channel with the ATLAS detector,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2014-032, ATL-COM-PHYS-2013-1599, Oct. 2014, Access restricted to ATLAS members.

- [100] T. Alexopoulos *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for the Standard Model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ^{(*)}$ with 4.8 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2011-1715, Apr. 2012, Access restricted to ATLAS members.
- [101] S.H. Abidi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurements of the mass and signal strength of the Higgs particle in the four lepton decay channel with the ATLAS detector using Run 1 data,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2014-026, ATL-COM-PHYS-2014-007, Oct. 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [102] C. Anastopoulos *et al.* [incl. G. Pásztor], “Updated results and measurements of properties of the new Higgs-like particle in the four lepton decay channel with the ATLAS detector. Mass and signal strength measurement,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2013-144, May 2013, Access restricted to ATLAS members.
- [103] C. Anastopoulos *et al.* [incl. G. Pásztor], “Four lepton decay channel with production mechanism specific signatures: study of the Higgs-like particle at 125 GeV and searches for additional resonances,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2013-145, May 2013, Access restricted to ATLAS members.
- [104] C. Anastopoulos *et al.* [incl. G. Pásztor], “Updated results and measurements of properties of the new Higgs-like particle in the four lepton decay channel with the ATLAS detector. Spin and CP measurement,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2013-146, May 2013, Access restricted to ATLAS members.
- [105] S.H. Abidi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Study of the 125 GeV SM-like Higgs boson properties using production mechanism specific signatures in the $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ channel,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2014-033, ATL-COM-PHYS-2013-1663, Nov. 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [106] Higgs width measurement group, HSG2, HSG3, HSG7 [incl. G. Pásztor], “Constraints on the off-shell Higgs coupling and the Higgs boson width using diboson events,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2014-408, Jun. 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [107] S.H. Abidi *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of inclusive and fiducial differential cross-sections of the Higgs boson in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$ decay channel using 20.3 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ pp collision data at the ATLAS detector,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2014-027, ATL-COM-PHYS-2014-056, Oct. 2014, Access restricted to ATLAS members.
- [108] M. Dunser, A. Hinzmann, K. Csenge, M. Ankita, and G. Pásztor, “Double-parton scattering studies in same-sign WW production with full Run2 dataset,” CERN, Geneva, CMS AN-20-136, Feb. 2022, Access restricted to CMS members.

- [109] L. Aperio-Bella *et al.* [incl. G. Pásztor], “Measurement of the high-mass Drell-Yan differential cross-section in the di-electron final state: Supporting Document,” CERN, Geneva, ATL-COM-PHYS-2012-519, Mar. 2013, Access restricted to ATLAS members.
- [110] C. Amelung *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for high-mass dilepton resonances in 5 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$,” CERN, Geneva, ATL-PHYS-INT-2012-073, ATL-COM-PHYS-2012-111, ATL-COM-PHYS-2012-177, Sep. 2012, Access restricted to ATLAS members.
- [111] R. Cavanaugh *et al.* [incl. G. Pásztor], “Search for top squark production in fully-hadronic final states in proton-proton collisions at 13 TeV,” CERN, Geneva, CMS AN-19-016, Jun. 2020, Access restricted to CMS members.