



QCD hatáskeresztmetszet mérések az OPAL és ATLAS detektorokkal

Ph.D. értekezés tézisei

Ifj. Krasznahorkay Attila

Témavezetők: Dr. Horváth Dezső,
Dr. Thorsten Wengler

Debreceni Egyetem
Természettudományi és Technológiai Kar
Debrecen, 2008

1. Bevezetés

Az Univerzum alapvető összetevőiről és törvényeiről szerzett ismereteink hatalmas mértékben kibővültek az elmúlt évtizedekben a legnagyobb elérhető energiákon végrehajtott kísérleteknek köszönhetően. A nagy számú megfigyelésből egy elmélet született, amely minden megfigyelt jelenséget meg tud magyarázni, a Részecskefizika Standard Modellje – röviden csak Standard Modell.

Amíg a Standard Modellt kísérleti megfigyelések nagy száma támasztja alá, van néhány hiányossága is. Néhány jelentősebb problémát a következők szerint lehet összefoglalni:

- Hogyan jön létre az elemi részecskék tömege? A mérték-szimmetriák, amelyekre a Standard Modell épül, nem engedik meg a részecskéknek, hogy tömeggel rendelkezzenek. A Standard Modell a megfigyelt részecsketömegeket lokális szimmetria-sértéssel magyarázza, amely tömeget generál a részecskéknek. „Melléktermékként” ez a modell megjósolja a Higgs részecske létezését, amelyet eddig még nem sikerült kísérletileg megfigyelni.
- Lehetséges vajon az elektrogyenge és az erős kölcsönhatást – és talán még a gravitációt – egységes elméletben leírni? A megfigyeléseink azt mutatják, hogy az elemi kölcsönhatások növekvő energiánál egyre hasonlóbba válnak egymáshoz. A Standard Modell jelenlegi formájában nem tudja leírni az erőknél ezt az egyesítést.
- Mi alkotja a sötét anyagot? A kozmológiai megfigyelések azt mutatják, hogy az általunk látható anyag az univerzum anyagának csupán a 15%-át adja. A maradék 85%, amelynek a gravitációs erejét tudjuk csak megfigyelni, jelenleg láthatatlan számunkra. A Standard Modell pedig nem szolgál magyarázattal a létezésére.

Sok elmélet létezik pillanatnyilag, amely megoldást kínál a fenti problémákra. Talán a legelfogadottabbak a szuperszimmetria (SUSY) elméletek. Miközben ezek az elméletek megoldást nyújtanak a fentebb említett problémákra, egyúttal mindaddig nem látott részecskék és kölcsönhatások létezését is megjósolják.

Az elmúlt évtizedek minden részecskefizikai kísérletét úgy tervezték, hogy velük ellenőrizhessék a Standard Modell jóslatait egyre magasabb energiákon, és hogy a Standard Modellen túli fizika nyomait kereshessék. A Nagy Elektron–Pozitron ütköztető (LEP) szolgáltatta az első precíziós méréseket a gyenge kölcsönhatás bozonjairól, és működési ideje alatt a Standard Modell sok folyamatának vizsgálatára használták.

2003-ban csatlakoztam az egyik, LEP-hez épített kísérlet munkájához, az OPAL kísérlethez. A kétfoton-csoportban kezdtem dolgozni, ahol nagyenergiás fotonok kölcsönhatását vizsgáltam.

A valaha épített legnagyobb energiájú részecske gyorsító – a Nagy Hadron Ütköztető (LHC) – most lép végső beindítási fázisába. Az LHC fő célja, hogy megtalálja a Higgs bozont – vagy hogy bizonyítsa, nem létezik –, igazolja a Standard Modell jóslatait a legmagasabb energiákon, és keresse a megjósolt új részecskéket és kölcsönhatásokat.

2004-ben váltam az ATLAS kollaboráció tagjává, amely az LHC legnagyobb kísérletét építi, az ATLAS detektort. Az ATLAS-on belül a trigger-csoporthoz csatlakoztam, leginkább az első-szintű és a müon-triggeren dolgoztam, majd bekapcsolódtam a bottom- és top-kvark fizikájával foglalkozó csoportok munkájába.

2. A Standard Modell vizsgált folyamatai

2.1. Foton–foton kölcsönhatások

A foton a kvantum-elektrodinamika (QED) mértékbozonja, amely az elektromágneses erő közvetítéséért felelős a töltött részecskék között. A QED kölcsönhatásokban a fotont pontszerű, szerkezet nélküli objektumnak tekinthetjük, amelyet *direkt* vagy *csupasz* fotonnak is nevezünk. Mivel a QED ábeli mértékelmélet, a foton nem rendelkezik öncsatolással, és jelenlegi ismereteink szerint nincs tömege.

Amíg a direkt foton nem mutat szerkezetet, a Heisenberg-féle határozatlansági reláció értelmében a foton megszegheti az energiamegmaradás tételét rövid időre. Ezen időn belül a foton felbomolhat egy fermion–antifermion párra, amely ugyanazokat a kvantum számokat hordozza, mint maga a foton. Hogyha ezen fluktuáció közben az egyik fermion kölcsönhat egy mértékbozonon keresztül egy másik részecskével, akkor a fermiont ki lehet szabadítani a fotonból, ami által a foton *felbomlik*, és feltárja a szerkezetét. A LEP gyűrűnél a foton–foton kölcsönhatásokat a következő folyamatban lehetett vizsgálni:

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X, \quad (1)$$

ahol mindkét bejövő elektron kibocsát egy virtuális fotont, amelyek létrehozhatnak egy X végállapotot, az elektronok pedig nem semmisülnek meg a kölcsönhatásban.

2.2. Ritka B-mezon bomlások

A B-hadron keltés várható keresztmetszete hatalmas lesz az LHC-nél. A várakozás az, hogy körülbelül minden századik proton–proton ütközés fog

egy $b\bar{b}$ kvark-párt létrehozni. Ez lehetőséget fog adni sok precíziós mérés elvégzésére b kvarkokkal, ugyanakkor nagyon kis valószínűségű B-mezon bomlások megfigyelését is lehetővé teszi. A legkönnyebben megfigyelhető bomlások a következők:

$$B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^- (X). \quad (2)$$

Az ilyen bomlások ízcserélő semleges áramokat (FCNC) kívánnak, ezért nagyon kicsi a valószínűségük a Standard Modellben. Mindazonáltal a Standard Modell sok kiegészítése megemeli a bomlások valószínűségét azzal, hogy több csatornát biztosít a bomláshoz. Ez azt jelenti, hogy a Standard Modell jóslataitól való minden eltérés a bomlási valószínűségekben fontos utalás lehet *új fizika*¹ létezésére. Ezen ritka bomlások bomlási valószínűségeinek nagy pontosságú méréséhez az eseményválogatás határfokát nagy pontossággal kell meghatározni.

2.3. Top-kvark fizika

Az LHC egy „top-kvark-gyár” lesz, és a várakozások szerint $t\bar{t}$ kvark-párok millióit fogja létrehozni. Ez új korszakot nyit majd a top-kvarkkal kapcsolatos precíziós mérésekben.

A top-kvark a $Q = 2/3$ és $T_3 = +1/2$ kvantumszámokkal rendelkező tagja annak az izospin-dupletnek, amely a bottom-kvarkot is tartalmazza. Ez a legutóbb (1995) felfedezett elemi részecske, bár létezését a Standard Modell már a bottom-kvark felfedezése (1977) óta sugalmazta. A top-kvark hatalmas tömege (172 GeV) azt sugallja, hogy különleges szerepet játszhat a természetben, különösen a különböző „*új fizika*” elméletekben.

A $t\bar{t}$ kvark-pár keletkezési hatáskeresztmetszetének mérése egyike lesz az első dolgoknak, amelyet a korai LHC adatokkal teszünk. Sok számolás létezik erre a hatáskeresztmetszetre, mind $\sigma_{t\bar{t}} \approx 820$ pb értéket jósolnak. Egy ilyen abszolút keletkezési hatáskeresztmetszet-méréshez az eseményválogatás minden lépését alapos ellenőrzés alatt kell tartani.

3. A kísérletek

Minden modern, általános célú részecskefizikai kísérlet alapelve hasonló. Kölcsönhatást hoznak létre részecskék között azáltal, hogy részecske-nyalábokat ütköztetnek egymással, vagy egy részecskenyalábot álló céltárgyra vezetnek. Ezután a kirepülő részecskék minden tulajdonságát rögzítik különféle detektorok segítségével. A doktori munkám keretében két ilyen detektor-rendszernek, az OPAL-nak és az ATLAS-nak a kollaborációjában dolgoztam.

¹Minden, a Standard Modell által le nem írt folyamatra *új fizika* néven hivatkozom.

3.1. Az OPAL detektor

Az OPAL (Omni-Purpose Apparatus for LEP) volt az egyike a négy detektor-rendszernek, amelyet a LEP gyorsító számára építettek. Általános célú detektor volt, amelyet úgy terveztek, hogy az e^+e^- ütközésekben történő kölcsönhatások széles körét tudja vizsgálni. A detektort először 1989-ben használták, ettől kezdve kisebb felújításokkal, egészen a LEP gyorsító 2000-es bezárásáig üzemelt.

A detektor-rendszernek a következő típusú al-detektorai voltak az elektronok és pozitronok ütközésében keletkező részecskék tulajdonságainak vizsgálatához:

- A töltött részecskék nyomait nagy pontosságú driftkamrák rendszere rögzítette. Hogy a kölcsönhatsi ponthoz közel a nyomokat nagy pontossággal lehessen rögzíteni, szilícium mikro-vertex detektort építettek be a nyomrögzítő detektorok legbelső elemeként.
- Az elektronok és fotonok teljes energiáját, aktív anyagként ólomüveget használó, elektromágneses kaloriméter mérte.
- A hadronok teljes energiáját hadron-kaloriméter határozta meg, ami a mágneses teret vezető vasmagot használta abszorbensnek, sokszálas detektorokat téve a vaslemezek közé.
- A detektort elhagyó müonok pályáját a detektor külsejét beborító müon-detektorok rögzítették.

3.2. Az ATLAS detektor

Az ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) egyike az LHC számára épített két általános célú detektornak. A fő célja, hogy lehetővé tegye a Standard Modell Higgs bozonjának észlelését az LHC által keltett 14 TeV-es proton–proton ütközésekben. Ezen kívül a detektor célja egyéb – új – jelenségek vizsgálata is.

A detektor fő részei a következők:

- A töltött részecskék pályáit a belső detektor (Inner Detector) rögzíti pixel- és szilícium-microstrip detektorokkal, kiegészítve egy átmeneti-sugárzás-detektorral.
- Az elektronok és fotonok energiáját ólom – folyékony argon alapú kaloriméter határozza meg.

- A hadronok energiáját két különböző típusú detektor méri. A detektor hordó-részében ólomból és szcintillátor lapokból álló mintavevő detektor van. A detektor nyalábközeli régióiban folyékony argonnal működő detektorelemek végzik ezt a feladatot.
- A müonok impulzusát a toroidális mágneses terekben történő eltérülésükkel mérjük. A müonok nyomait különböző típusú gázdetektorok rögzítik.

Az eseményválogatás nagy fontosságú az LHC-nél a gyorsító által kelteett események nagy hozama miatt. Annak érdekében, hogy csak azokat az eseményeket rögzítsük, amelyek a legnagyobb eséllyel segítenek új jelenségek felfedezéséhez, az ATLAS 3-szintű triggerrendszert használ. Ez a rendszer választja ki azt a 200 eseményt a másodpercenként keletkező 40 millióból, amelyeket későbbi analízisre eltárolunk.

4. Eredmények

A doktori dolgozatom tudományos eredményeit a következő pontokban foglalom össze:

1. **Több fejlett eljárást próbáltam ki arra, hogy a foton–foton kölcsönhatásokból származó eseményeket elválasszam a domináns háttér-folyamatoktól az OPAL kísérletben. Úgy találtam, hogy a legmegbízhatóbb eljárás a nagyenergiás foton–foton események kiválasztására egy likelihood-alapú válogatás volt [1].**

A LEP magas tömegközépponti energiájánál az olyan eseményeket, amelyekben egy alacsony transzverzális impulzusú (p_T -jú) hadronzár (jet) található, a két-fotonos kölcsönhatások dominálják. Ez nagyon megkönnyíti az olyan két-foton események kiválogatását, amelyekben $p_T^{\text{jet}} < 10$ GeV jet található. Azokat az eseményeket azonban, amelyekben $p_T^{\text{jet}} > 20$ GeV jet található, erősen uralják a $Z^0/\gamma^* \rightarrow q\bar{q}$ események. Ezért különös gonddal kellett eljárni a nagyenergiás két-foton események kiválogatásakor.

Megvizsgáltam egy neurális hálón alapuló esemény-válogató kód teljesítményét (amelyet az OPAL b-fizikai csoportja használt), és egyet, amely maximális valószínűségi eloszlási függvényeket használ. Összehasonlítottam ezeket egy esemény-szintű mennyiségekre tett vágásokra alapuló eseményválogatási eljárás teljesítményével. A maximális valószínűségi eloszlási függvényeket használó válogatási eljárás bizonyult a legstabilabbnak, sokkal jobb jel-háttér arányt biztosítva, mint az egyszerű vágás-alapú válogatás, amelyet az OPAL két-foton csoportja általánosan használt.

2. Meghatároztam az inkluzív jet-keletkezési hatáskeresztmetszetet foton–foton üközésekben az OPAL kísérlet 1998 és 2000 között gyűjtött adataiból [1,4].

Analizáltam az OPAL által 1998 és 2000 között, $\sqrt{s_{ee}} = 189 - 209$ GeV tömegközépponti energián gyűjtött adatokat, amely összesen 593 pb^{-1} integált luminozitásnak felel meg.

A foton–foton eseményeket az előző pontban leírtak szerint válogattam ki, majd meghatároztam az inkluzív jet-keletkezési hatáskeresztmetszetet azzal, hogy kivontam a becsült megmaradó háttérrel a p_T^{jet} eloszlásból, és normáltam azt az adatminta teljes luminozitásához.

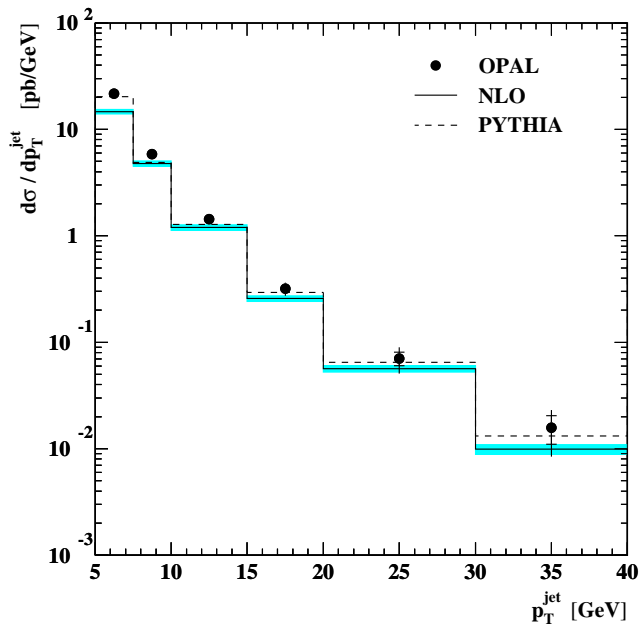
Különös gonddal kellett eljárni az eredmény szisztematikus bizonytalanságainak megbecsülésekor. A becslés figyelembe vette többek között az elektromágneses kaloriméter energiakalibrációjának bizonytalanságát, a háttérlevonás várható bizonytalanságát és az eseményszелеkciós vágások megválasztásából adódó bizonytalanságot. Végül, hogy össze lehessen hasonlítani a meghatározott hatáskeresztmetszetet az első sugárzási korrekciós (NLO) számítások eredményeivel, megbecsültem a hadronizációs korrekciókat, amelyeket az NLO görbékre kell alkalmazni.

Jó egyezést találtam a mérési eredmények és a számolások által előrejelzett hatáskeresztmetszetek között. A mért hatáskeresztmetszet egy NLO QCD számolás eredményéhez hasonlítva látható az 1. ábrán.

3. Meghatároztam a hamis első-szintű (Level-1) két-müon-triggerrek számát az ATLAS detektorban, amelyek a müon detektor-kamrák átfedéseiből adódnak. Az optimális beállításokat alkalmazva kiszámítottam a várható hamis Level-1 két-müon-triggerrek gyakoriságát, és meggyőződtem egy B-fizikai mintán, hogy ez a konfiguráció nem rontja le a detektor fizikai teljesítményét [3,5–7].

A B-fizikai események kiválasztása az LHC-nál nem lesz könnyű feladat. Ezek az események általában nem keltenek nagy transzverz impulzusú leptonokat vagy jet-eket, vagy összességében nagy energialeadást a detektorban. Az első-szintű trigger felépítése miatt nem használhatunk összetett szignatúrákat ezeknek az eseményeknek a kiválasztására, ami bizonyos B-fizikai események triggerelését az LHC magas luminozitása mellett lehetetlenné teszi. Azonban az olyan csatornákat, amelyek két kis transzverzális impulzusú müont keltenek a végállapotukban, még a legmagasabb tervezett luminozitás ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) mellett is lehetséges lesz hatékonyan kiválogatni elfogadható trigger-hozam mellett.

A detektor müonokkal szembeni érzékenységének maximalizálása érdekében a müon-kamrák sok helyen átfednek egymással. Az első-szintű trigger



1. ábra. Inkluzív jet-keletkezési differenciális hatáskeresztmetszet, $d\sigma/dp_T^{\text{jet}}$, minden $|\eta_{\text{jet}}| < 1.5$ jet-re, NLO és PYTHIA 6.221 Monte Carlo jóslatokhoz hasonlítva.

tervezéséből kifolyólag egyetlen müont több „müon jelölt”-ként észlelhetünk, ha a müon egy ilyen átfedési tartományon megy keresztül. Több lehetőség is van az ebből származó hamis két-müon trigger-jelek kezelésére. Az én feladatom volt, hogy az ATLAS első szintű müon-triggerének részét képező „Muon to CTP Interface” (MuCTPI) elemének a konfigurációját elkészítsem a hamis két-müon jelek elnyomásához.

Az optimális beállítások elkészítéséhez nagy számú, úgynevezett egymüon eseményt kellett analizálnom. Ezek olyan események, amelyek egyetlen müon kiszökését jelentik a detektorból, a detektor teljes válaszát szimulálva. Kiszámítottam a várható hamis két-müon triggererek hozamát a MuCTPI használatával és anélkül, amellyel megmutattam hogy az ilyen események gyakorisága 70%-kal csökkenthető. A megmaradó hamis két-müon triggererek pedig kezelhetők a magas-szintű triggerben (HLT).

Fontos, hogy ellenőrizzük a trigger-válogatás hatását abbéli képességünkre, hogy meg tudjunk mérni különböző mennyiségeket. Megvizsgáltam az első-szintű trigger átfedés-kezelésének hatását a $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \Phi$ és $B^+ \rightarrow J/\psi(\mu^+ \mu^-) K^+$ bomlások kiválogatására. Azt találtam, hogy az átfedés-kezelés nem jár káros hatással ezen események kiválogatására, és az első-szintű trigger által keltett hatásokat korrigálni lehet a különböző fizikai eloszlásokban.

4. **Kiszámítottam a müion-trigger-láncok várható hatásfokát az ATLAS kísérletben olyan események kiválogatására, amelyek egy top kvark-pár ($t\bar{t}$) bomlását tartalmazzák. Azt találtam, hogy az ATLAS egy-müion triggerre képes a $t\bar{t}$ eseményeket nagy hatékonysággal kiválogatni elfogadható trigger-hozam mellett [7].**

Az LHC $t\bar{t}$ párok példa nélkül álló nagy számával fogja ellátni a kísérleteit. Ezen események kiválasztásának trigger-hatásfokait fontos már az LHC indulásánál megérteni, hogy lehetőség nyíljon precíziós hatáskeresztmetszet-mérésekre.

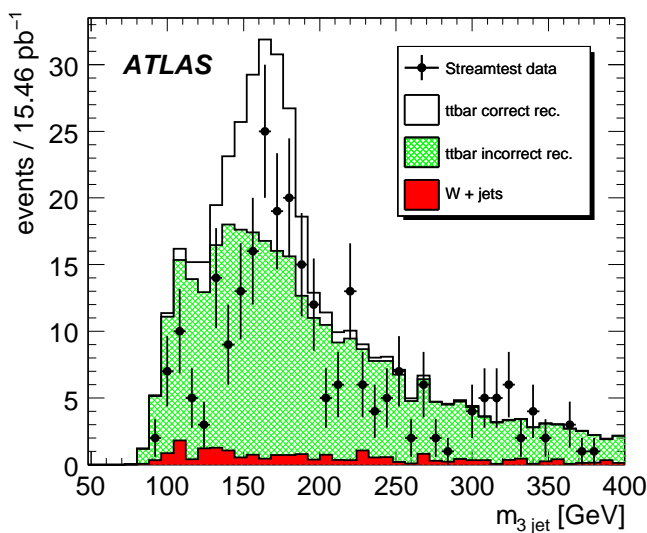
Felhasználhatjuk az ATLAS egy-lepton triggerreit a szemi-leptonikus $t\bar{t}$ bomlások – olyan bomlások, ahol az egyik top kvark bomlásából keletkező W egy leptonra és egy neutrínóra bomlik – kiválasztására a bomlásban keletkező leptonok kemény p_T spektrumának köszönhetően. Az ATLAS mindhárom trigger-szintjének hatásfoka leírható azzal, ha meghatározzuk a trigger hatásfokát, hogy bizonyos tulajdonságokkal rendelkező szimulált vagy rekonstruált müion kiválasszon.

Végül pedig bemutattam egy mesterségesen kevert Monte Carlo mintán, hogyan használhatjuk a trigger-hatásfok méréseket egy egyszerű top-kvark-pár-keltési hatáskeresztmetszet analízisben.

A különböző trigger-konfigurációkhoz kiszámított trigger-hatásfokokat felhasználva bemutattam egy leegyszerűsített $t\bar{t}$ rekonstrukciós és hatáskeresztmetszet-analízisben, hogy a trigger-hatásfok hogyan vehető figyelembe a $\sigma_{t\bar{t}}$ produkciós hatáskeresztmetszet kiszámolásában. A 2. ábra mutatja az analízisem által rekonstruált hadronikusan elbomló top-kvarkok tömegspektrumát rendes Monte Carlo mintákon és egy speciális Monte Carlo keverék-mintán, amelyet „*streamtest*” adatnak nevezek.

Az értekezés tárgyában referált folyóiratokban megjelent publikációk

- [1] G. Abbiendi *et al.* [OPAL Collaboration, 208 authors including A. Krasznahorkay], „*Inclusive Jet Production in Photon-Photon Collisions at $\sqrt{s_{ee}}$ from 189 to 209 GeV*”, Phys. Lett. B **658** (2008) 185–192
- [2] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration, 2926 authors including A. Krasznahorkay], „*The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*”, Journal of Instrumentation (JINST) **3** S08003 (2008), <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003>



2. ábra. A rekonstruált top-kvark tömeg-eloszlásának összehasonlítása „*streamtest*” adatok valamint $t\bar{t}$ és $W + \text{jet}$ Monte Carlo-k között.

- [3] S. Ask *et al.* (22 authors including A. Krasznahorkay), „*The ATLAS central level-1 trigger logic and TTC system*”, *Journal of Instrumentation (JINST)* **3** P08002 (2008), <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/P08002>

Az értekezés tárgyában megjelent egyéb publikációk

- [4] A. Krasznahorkay *for the OPAL Collaboration*, „*High momentum hadron and jet production in photon-photon collisions at LEP2*”, Proc. of the 15th Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Munich, April 2007, <http://dx.doi.org/10.3360/dis.2007.173>
- [5] A. Krasznahorkay *for the ATLAS and CMS Collaborations*, „*Outlook for b physics at the LHC in ATLAS and CMS*”, Proc. of the 15th Int. Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Munich, April 2007, <http://dx.doi.org/10.3360/dis.2007.167>
- [6] S. Haas *et al.* (10 authors including A. Krasznahorkay), „*The octant module of the ATLAS level-1 muon to central trigger processor interface*”, Proc. of the 12th Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments (LECC 2006), Valencia, Spain, 25-29 Sep 2006, pp.319–322

- [7] The ATLAS Collaboration (2926 authors including A. Krasznahorkay), „*Expected Performance of the ATLAS Experiment, Detector, Trigger and Physics*”, CERN-OPEN-2008-020, Geneva (2008), megjelenés alatt

Valamint társszerzője vagyok több, mint 40 egyéb tudományos közleménynek.