

Vélemény Siklér Ferenc tudományos doktori disszertációjáról

1. Bevezető megjegyzések

Siklér Ferenc tézisében nehéz ionok és protonok nagyenergiás ütközéseit tanulmányozó részecskefizikai kísérletekben alkalmazott új kiértékelési módszerekkel és ezen új módszerek segítségével kapott eredmények értelmezésével foglalkozik. Munkájának az ad nagy jelentőséget, hogy a CERN Nagy Hadronütköztetője (röviden az LHC) elkészültével a proton-proton, proton-mag és mag-mag ütközéseket a korábbi kísérleteknél sokkal nagyobb energián és sokkal nagyobb ütközési frekvencián lehet tanulmányozni. Az eddigi kísérletek legszenzációsabb eredménye a Higgs-bozon létezésének kísérleti bizonyítéka. Az LHC több mint húsz éven át tartó kísérleti programjának még csak a kezdetén vagyunk. A közeljövőben a protonok ütközési energiája 14 TeV-ig emelkedik és további fontos eredményeket várunk a fundamentális részecskék és kölcsönhatásaik tulajdonságait illetően. A nagy energia és nagy ütközési frekvencián kapott hatalmas mennyiségű kísérleti adat kiértékelése a korábbi módszerek jelentős feljavítását és új módszerek kifejlesztését követelték és követelik meg.

A korábbi években a CERN LEP gyorsítóján (Nagy Elektron-Pozitron ütköztető) sikerült a Standard Elmélet helyességét a mérték kölcsönhatások szektorában a kvantum korrekciókkal együtt kísérletileg ellenőrizni. A LEP maximálisan elérhető ütközési energiája sem volt elég a Standard Elmélet által jóslott Higgs-bozont megtalálni. Az LHC és a hatalmas unvierzális detektorok (ATLAS, CMS, Alice, LHCb) megépítését éppen ez motiválta. A Higgs-bozon csak gyenge vagy a fermion tömeggel arányos Yukawa kölcsönhatásokban vesz részt. Így számottevően csak a nehéz elektro-gyenge mérték bozonokkal és a nehéz fermionokkal hat kölcsön. Mivel a protonok kölcsönhatásait az erős kölcsönhatás dominálja a Higgs-bozon keltését jelző végállapotok valószínűsége a domináns ütközési végállapotoknál mintegy

12-15 nagyságrenddel kisebb. A ritka keletkezési frekvencia igen nagy proton-proton ütközési frekvenciát (nagy nyaláb luminózitást) kíván, ami az LHC esetében már ugynevezett szimultán bekövetkező (pile-up) proton-proton ütközésekhez vezet. Ez az új kísérleti nehézség, mely az LHC esetében lép fel először, a részecsek nyomainak rekonstruálását jelentősen megnehezíti. Ez a példa már önmagában is jól illusztrálja, hogy a Sikler Ferenc tudományos munkája a modern kísérleti részecske fizika legújabb nagy jelentőségű problémáinak megoldásához járult hozzá. Kutatási eredményei a kis impulzusú és alacsony tévesztésű nyomkövetést, a kölcsönhatási pontok javított keresését és a javított pályaillesztésen alapuló részecskeazonosítást illetően igen fontos hozzájárulást jelentettek a CMS kollaboráció legutóbbi kísérleti programjának megvalósításához. Ugyancsak jelentős kutatási eredményei vannak a mag-mag és proton-proton ütközésekben megfigyelt részecskeszám eloszlások fenomenologikus leírásában. Ezek az eredményei fontos hozzájárulást adnak az erős kölcsönhatás által dominált inelasztikus szórási eseményeket leíró Monte Carlo modellek további javításához.

2. Főbb eredmények

Modern nagyenergiájú ütköztetőkön végzett kísérletek sikeréhez több fundamentális követelménynek kell eleget tenni. A nagy energia és nagy ütközési frekvencia mellett, kiváló tulajdonságokkal rendelkező sokoldalú detektorok kellenek az ütközésekben keletkezett végállapotok legjobb megfigyelésére. A detektor által rögzített adatokból a legeffektívebben kell rekonstruálni a végállapotokat és végül az így kapott adatokból egy adott fizikai mennyiség mért értékét a lehető legnagyobb pontossággal kell tudni megadni. Ez utóbbi munkát megkönnyíti, ha a megfigyelt szórási folyamatok precíz elméleti leírása rendelkezésre áll. A nagy transzverzális impulzusú ütközések sok fontos tulajdonságát a Standard Elmélet alapján perturbáció számításban nagy pontossággal meg lehet meghatározni. De az események teljes leírása általában nem lehetséges. E célból az elmúlt évtizedekben fenomenologikus Monte Carlo modelleket sikerült kifejleszteni. E modellek tesztelése és javítása igen fontos, mivel e modellek pontossága nagyban befolyásolhatja egy adott fizikai mennyiség kísérleti értékére adott hiba becslését. Sikler Ferenc sikeresen pozicionálta kutató munkáját a végállapotok optimálisabb rekonstruálásra irányuló kutatásokra és az ehhez szorosan kapcsolódó alacsony transzverzális impulzusú ütközések tanulmányozására. Eredményei fontosak és nemzetközileg nagy figyelmet keltettek, mert jelentősen hozzájárulnak a nagy ütköztető gyorsítókon végzett hadronfizikai kutatások sikeréhez. Eredményei sok vonatkozásban jelen-

tősek a nagyobb transzverzális impulzusú jelenségek tanulmányozásában is, mivel ezen ütközésekben is keletkeznek kis impulzusú hadronok.

A disszertáció 14 fejezetből áll. Az első három fejezet a CERN SPS NA49 kísérleti kollaborációban végzett kutatásokkal foglalkozik. A következő 11 fejezet az CERN CMS kollaborációban végzett kutatásait ismerteti. A 4. fejezet az LHC rövid leírását adja. Az 5. fejezet a pixel detektor segítségével elvégezhető nyomkövetés geometriai leírását és a szerző által kidolgozott javított algoritmusok segítségével kapott eredményeket foglalja magában. A disszertáció tematikus felosztás logikus, a szerteágazó nagy anyag összefogását 134 ábra és 12 táblázat segítségével, a legfontosabb adatok és a matematikai háttéranyag gondos és precíz leírásával sikerült elérni. A fejezetek tematikus felosztása jól megfelel a tézisekben nyolc pontban felsorolt eredményeknek. Bár sok publikációja kísérleti kollaborációkban született, számos egyéni publikációja miatt világosan be lehet azonosítani azokat a nagyjelentőségű tudományos eredményeket, amelyek teljes egészében Sikler Ferenc munkája.

Az alábbiakban illusztráció kedvéért felsorolok néhányat nagyszámú, a hadronfizikai kutatásokat alapvetően gyarapító eredményeiből.

- 1.) A nyomkövető algoritmusok javítására irányuló munkáját a CERN SPS gyorsítóján végzett NA49 kísérlet gáztöltésű detektoraiban megfigyelt nehéz ion ütközések tanulmányozásával kezdte. A detektorban megfigyelt pályák tisztaságát átfedő klaszterek, hamis vagy megtört pályák zavarják. Az adott ütközésben keletkező részecske szám növekedésével ezek a problémák egyre súlyosabbá válnak. Világos volt számára, hogy a rendelkezésre álló nyomkövető algoritmusok javítása nagyobb energiájú és frekvenciájú mag-mag ütközésekben lényegesen feljavíthatja adott fizikai mennyiség mérési pontosságát. Új módszert dolgozott ki a kettétört pályák egyesítésére, a kis impulzusú pályák újra egyesítésére, és átfedő klaszterek eltávolítására. Módszereit computer kódokban implementálta. Javított nyomkövető algoritmusát a NA61/SHINE kísérletek algoritmusai is felhasználják. További jelentős eredménye az azonosított töltött hadronok hozamának mérése proton-proton és ólom-ólom ütközésekben. Sikerült sok longitudinális és transzverzális eloszlást továbbá számos részecskehozamot megmérni. Egyik fontos kísérleti megfigyelés a ritkaság feldúsulás a mag-mag ütközésekben a proton-proton ütközésekhez viszonyítva. Egy másik fontos eredménye annak kimutatása, hogy a teljes hozamok hányadosainak függése a kölcsönhatási régió vastagságától nagyban független az ütköző részecskék típusától. Fontos kérdés, hogy vajon ez a skálázás érvényben marad-e az LHC proton-proton, proton-mag and mag-mag ütközésekben is?

- 2.) A CMS nyomkövető detektora szilícium alapú. A CMS kísérletekben csak a legbelső három réteget tartalmazó szilikon pixel detektorok alkalmasak alacsony transzverzális impulzusú részecskék nyomkövetésére. A korábbi években kifejlesztett nyomkövető módszer csak 1 GeV-nél nagyobb transzverzális impulzusú részecskék esetén volt alkalmazható. Ez jelentős eseményszám veszteséhez vezet azaz a keletkezett részecskék csak kis hányadát lehet így rekonstruálni. Ez komolyan hátráltatja a hadronfizikai tulajdonságok pontos mérését. Fontos eredmény, hogy ezt a problémát Sikler Ferenc kitartó kutatási munkája eredményeként sikerült eliminálni. Módosított hármas beütési algoritmussal sikerült elérnie, hogy a CMS detektorban rekonstruálni lehet alacsony transzverzális impulzusú pionokat, kaonokat és protonokat (0.1, 0.2 és 0.3 GeV küszöbértékig megfelelően). A módszer egyaránt alkalmazható nagy sűrűségű proton-proton ütközésekre, proton-mag és mag-mag ütközésekre.
- 3.) A pixelbeütésekből kiinduló pályák elérhetik a csikdetektorok belső rétegeit. Az így kapott információ segítségével lehetséges a hamis pályák részarányát csökkenteni, és így a nyomkövetés geometriai acceptanciáját és az algoritmus hatásfokát növelni. Több millió esemény szimulációjával a szerző meghatározta a nyomkövetés geometriai acceptanciájának és az algoritmus hatásfokának a rapiditás és a transzverzális impulzustól való függését.
- 4.) A szerző új módszert dolgozott ki a kölcsönhatási pontok javított megtalálására. Modern csoportosító módszereket alkalmazott (gauss keverék modell, k-átlagolás), melyek különösen a többszörös ütközésekkel járó események esetében eredményeztek jelentős javulást.
- 5.) A CMS kollaboráció keretében az 2.-4. pontokban említett javított algoritmusok segítségével $\sqrt{s} = 0.9, 2.36$ és 7 TeV tömegközépponti energiákon, nem egyszeresen diffraktív ütközések esetén a szerző meghatározta a töltött hadronok transzverzális impulzus és rapiditás szerinti eloszlásait. Ezek az eredmények fontos hozzájárulást adnak a kis impulzusú hadronok keletkezését leírni próbáló fenomenologikus modellek jobb megértéséhez.
- 6.) A detektált töltött részecskék azonosítása nagyon sok fizikai mennyiség mérésében alapvető fontosságú. Nyomkövető detektorokban a részecske azonosítást a részecskepálya mentén mért energialeadás mérésével kapjuk. A pontos részecske azonosítás megköveteli az energia veszteség, az ionizáció és a detektor outputjának részletes analízisét. Ez azt jelenti, hogy nem csak a trajektória átlagos energia veszteségét kell tanulmányozni, hanem differenciális energia veszteségeket kell

részletesen modellezni. Bár ez egy igen kiterjedt vizsgálatot kíván, adott detektor konfiguráció esetén a differenciális energia veszteség megértése után, további fizikai mennyiségek mint pl. a legvalószínűbb energia veszteség, vagy az energia veszteség valószínűségi eloszlásának a szélessége gyors algoritmust adhatnak a részecske azonosításra. A szerző részletes tanulmányokat folytatott releváns fizikai mennyiségek megtalálására és azok hasznosságának bizonyítására. Megmutatta, hogy az átlánosan használt levágott átlag helyett, előnyösen használhatjuk a részecskenyom menti energia veszteségek alkalmasan választott súlyozott átlagát. Részletes szimuláció segítségével optimalizálta a súlyokat és megmutatta, hogy a módszer sikeres mind szilikon mind gáz detektorok esetén. A súlyok szorosan kapcsolódnak az energiaveszteség-eloszlások alakjához. Az energiaveszteségen alapuló részecske azonosítás tisztaságát javítani tudta a részecske pályák Kálmán-filterre alapuló illesztésével.

- 7.) Analitikus energiaveszteség modellt kidolgozott ki, mely sikeresen írja le az energiaveszteséget a CSM szilikon detektora esetén. Megmutatta, hogy a detektorok érzékelő egységei által mért energialeadások segítségével meghatározhatjuk a pálya beütéseinek a koordinátáit és beütéshez tartozó klaszter energiáját. Az energialeadás pálya menti eloszlását egy egyszerű analitikus parametrizációval fittelte. Részletes szimulációk segítségével megmutatta, hogy a parametrizáció a korábbi eljárásoknál jobb eredményt adva sikeresen alkalmazható részecskék energiaveszteség-rátájának tanulmányozására és a detektorok erősítéseinek kalibrációjára.

3. Kérdések, megjegyzések

- 1.) Az NA49 kollaboráció a mag-mag ütközésekben ritkaság feldúsulást talált, amit szemi-kvantitativ meg lehet magyarázni kvark-gluon plazma kialakulásának feltételezése nélkül. Mit várunk ennek a kérdésnek a tisztázását illetően az LHC-en? Vannak olyan megfigyelhető eloszlások, amelyek segítségével a különböző mechanizmusok járulékát szeparálni lehet?
- 2.) Az irodalomban többféle Monte Carlo módszer került kidolgozásra a differenciális energia veszteség számolására, az ionizáció és detektor kimenetek meghatározására. A tézisben leírt eredmények a szerző által teljesen újra írt Monte Carlo programmon alapulnak vagy volt lehetőség korábbi Monte Carlo kódok részleges felhasználására? A Monte Carlo módszerrel meg lehet határozni differenciált valószínűségi sűrűség függvényt, ami függ a részecske impulzusától és az anyag vas-

tagságtól is. Mi az optimalizált súlyozott átlagok használatának előnye a tabulázott valószínűségi függvényértékekkel szemben?

- 3.) A proton-proton ütközésekben keletkezett hadronok számát fenomenologikus modellek alapján próbáljuk megbecsülni. Az első eredmények az LHC-én, amiben Sikler Ferencnek igen fontos hozzájárulása volt, azt mutatták, hogy az LHC adatok a várakozásnál erősebb energia függést mutatnak. Ez a fenomenologikus modellek revízióját követelte meg. A szerző véleménye szerint melyek azok a modellek, amelyek nagy valószínűséggel helyesen fogják megjósolni a keletkezett különböző töltött részecskék számát, azok rapiditás és transzverzális impulzusbeli eloszlását 14 TeV-en?
- 4.) A Tézis 5. Fejezetének utolsó előtti bekezdésében a p-p ütközésekben keltett részecskék transzverzális impulzus spektrumára kapott adatok sikeres parametrizálását a szerző az erős kölcsönhatások bizonyos részleteire vonatkozó elméleti sikerként értelmezi. Kérdésem ezzel kapcsolatban az, hogy milyen mértékben lehet a Tsallis-eloszlást és a gluon szaturációt az intuitív fizikai képen túlmenően a QCD alapvető törvényeivel kapcsolatba hozni.
- 5.) Néhány elírásra, pontatlanságra szeretném felhívni a figyelmet. A Tézis első oldalán a második bekezdésben "leptonok tömegével kapcsolatos" helyett pontosabb lenne azt írni "részecskék tömegével kapcsolatos ". A harmadik bekezdésben " napjaink legerősebb irányzatát " helyett "a nyolcvanas évek egyik érdekes irányzatát" talán megfelelőbb lenne. Tézis második oldalán a 2. Fejezet első paragrafus " a köztük lévő erő állandóan nő " helyett "a köztük lévő energia állandóan nő " kifejezés a korrekt. A harmadik oldalon a Tevatron kísérletek említésénél a CDF szerepel csak, a D0 kimaradt. Az ábrák legtöbbje igen gondosan van elkészítve. Nem mindig világos azonban az olvasó számára, mely ábrák készültek a disszertáció illusztrálására és melyek azok az ábrák, melyek megjelentek már korábbi publikációkban.

4. Összegzés

Sikler Ferenc a gáz és szilikon detektorok nyomkövető, kölcsönhatási vertexet kereső javított algoritmusai és a részecskepálya menti energiaveszteség eloszlásainak részleteire támaszkodó javított részecske azonosító módszerei igen fontos, új hozzájárulást adnak az SPS NA49 és a LHC CMS detektor kolla-

borációk tudományos programjának sikeres végrehajtásához. Az új módszerek alkalmazásával fontos eredményeket kapott elsősorban a hadronfizikát illetően. Eredményeinek kiemelkedő nemzetközi visszhangja van. Tudományos publikációi széleskörű ismeretekről és kezdeményezésről tesznek tanuságot. Siklér Ferenc részecskefizika detektorok építésében, mérési adatok kiértékelésében és hadronfizikai fenomenologikus modellek analízisében nagy fontosságú eredeti eredményekkel gazdagította a részecske fizikát. Eredményeit elfogadom és az MTA doktora fokozat odaitélését feltétel nélkül támogatom, a legmelegebben javaslom.

Budapest, 2013, október 3.

Kunszt Zoltán

a fizikai tudomány doktora