

Kutatásunk munkatervében az erős kölcsönhatás nagyenergiájú elemirész-ütközésekben való vizsgálatát tűztük ki célul elsősorban elméleti oldalról, de részben kísérletileg is. Az éves bontásban felírt kilenc pontból ötöt maradéktalanul, kettőt részben kettőt nem teljesítettünk, ellenben két új kutatási területen lényeges eredményeket értünk el. A részleges, illetve nem teljesítés oka, amint alább részletezzük, egyrészt a kutatás során felmerült, előre nem látott nehézségek megoldása miatti késedelem, másrészt a kutatási időszak alatt a kutatás nemzetközi élvonalának érdeklődésében beállt változások hatására történő témaváltoztatás volt. Alább pontokba szedve felsorolom az elért kutatási eredményeket. Itt csak a legfontosabb következtetéseket említem meg, további részletek a megjelent tudományos közleményekben olvashatók. Az egyes pontok után zárójelben megadom a kutatásban döntő szerepet játszó személyek kezdőbetűit.

1. Célul tűztük ki olyan általános módszer kidolgozását, amellyel bármely, az erős kölcsönhatás által is szabályozott elemirész-folyamat hatáskeresztmetszetéhez az első sugárzási korrekciók (NLO pontosságú számolás) meghatározhatók. Az irodalomban eredetileg csak nulla-tömegű partronokra javasolt „dípól levonási sémát” általánosítottuk olyan folyamatokra, amelyekben tömeges partronok (kvarkok, skvarkok, gluinók) is részt vesznek. Különös figyelmet fordítottunk az ún. kvázi-kollináris kinematikai tartományra, ahol ugyan a valós partonsugárzást leíró hatáskeresztmetszet véges, de a partronok tömege (M) és az ütközés nagyenergiás skálája (Q) hányadosának logaritmusával ($\ln M/Q$ -val) arányos, így nagyenergián logaritmikusan divergáló járulékot jelent. A valós partonsugárzást leíró hatáskeresztmetszetet a kvázi-kollináris tartományban is analitikusan közelítő levonási tag definiálásával sikerült elérni, hogy a módszert megvalósító numerikus program egyformán jól viselkedik mind a $Q \sim M$, mind a $Q \gg M$ kinematikai tartományokban, továbbá a program az $M=0$ paraméterérték választása esetén visszaadja a korábban kiszámolt nulla-tömegű közelítésben kapott eredményeket. Az elért eredmények jelentőségét mutatja, hogy a módszert leíró közlemény mára 40 (ebből 32 független) hivatkozást kapott. (TZ)
2. Kutatási témánk volt a tömeghéjon kívüli (virtuális) foton-foton ütközés kísérleti és elméleti tanulmányozása. A két ütköző virtuális foton igen nagy energiájú elektron-positron-szórásban keletkezik. A LEP gyorsító működésének második részében a Z -bozon tömegénél sokkal nagyobb tömegközépponti energián működött, ahol már a Z -keltés nem olyan kizárólagosan uralkodó folyamat, így lehetőség nyílt a foton-foton szórás hatáskeresztmetszetének megmérése (megfelelő szelekciós vágásokkal ki lehetett válogatni a foton-foton-szórási eseményeket a többi közül). A mérés el is végeztük, azonban kiderült, hogy a jel és háttér szimulálására használt Monte Carlo program abban a kinematikai tartományban, ahol a foton-foton eseményeket ki tudjuk válogatni a többi közül, nem elegendően pontos az adatok leírására. A hiba javítása jelentősen késleltette a mérés befejezését. Jelenleg a kutatási eredményeket közlő cikk az OPAL belső szerkesztőbizottsága előtt van, ami a közlésre való előkészítés utolsó előtti lépése. (UB)
3. Elméletileg érdekes volt a foton-foton szórás hatáskeresztmetszetéhez a sugárzási korrekciók meghatározása, ugyanis a mért hatáskeresztmetszet sokkal nagyobbak bizonyult a perturbációszámítás legalacsonyabb rendű közelítésében kapott jóslatnál. Számításainkban az kaptuk, hogy a teljes hatáskeresztmetszethez az NLO sugárzási korrekciók nem nagyok (mintegy 7%). Jelentős sugárzási korrekciókat (mintegy 50%) kaptunk a teljes foton-foton tömegközépponti energia (W) szerinti eloszlás nagy- W tartományában, illetve más változók eloszlásának a fázistér széléhez közeli tartományában. Minthogy a számolt sugárzási korrekciók nem voltak elegendők, hogy az elméleti jóslat közelebb kerüljön a mérési eredményhez, kiszámítottuk a t -csatornás gluoncserét tartalmazó négy-kvark végállapotok járulékát is. Az ilyen négy-kvark végállapotok formálisan az $O(\alpha_s^2)$ rendű második sugárzási korrekciók közé tartoznak, azonban az ilyen rendű járulékot adó Feynman diagramok mértékinvariáns részhalmaza ad járulékot, és így a teljes $O(\alpha_s^2)$ rendű korrekciók kiszámítása nélkül önmagukban is értelmes fizikai eredményt adnak. Azt kaptuk, hogy ezek a korrekciók lényegesen közelebb hozzák az elméleti jóslatot a kísérleti eredményhez, de LEP energiákon még további korrekciók figyelembevétele is szükséges.

(TZ)

4. A HERA gyorsítón való leptokeltéses (mélyen rugalmatlan elektron-proton-szórás) három-jet végállapotokhoz is kiszámítottuk a sugárzási korrekciókat. Számolásokat végeztünk mind a három-jet hatáskeresztmetszetre mind pedig három-jet alakváltozók differenciális eloszlására. A számolások részleteit és eredményeit közöltük. A munkának nagy visszhangja lett a HERA kísérleti csoportjaiban az elméleti jóslataink egy részét összehasonlították a mért adatokkal és nagyon jó egyezést találtak. Az újabb jóslataink összevetése a mérések eredményeivel folyamatban van. Az általunk kifejlesztett számítógépes program jelenleg is mindennap használják mind a H1, mind a ZEUS kísérleti együttműködés kutatói. (NZ, TZ)
5. A hadronütközésekben való két fotonból és egy jetből álló végállapot kísérleti vágásokkal nem eltüntethető háttér a Higgs+jet Higgs-bozon-keletkezést jelző folyamathoz, ezért hatáskeresztmetszetének lehető legpontosabb elméleti jóslása a hadrongyorsítókon (például az épülő LHC-n) való Higgs-kereséshez nélkülözhetetlen. Ehhez a folyamathoz is kiszámoltuk a sugárzási korrekciókat. Általában nagy korrekciókat kaptunk. Például a fotonpár invariáns tömege szerinti eloszlás esetén a korrekció nagyobb lehet mint 100%, ha a fotonokat nagyon szűk izolációs kúpban választjuk szét a hadronoktól, ami azt sugallja, hogy a perturbációszámítás eredménye csak bizonyos kinematikai tartományokban (például meglehetősen nagy izolációs kúp esetén) lehet megbízható. A számításokhoz használt Monte Carlo program feltehetően akkor válik majd gyakran használatossá, ha az LHC megkezdí működését. (NZ, TZ)
6. A hadronütközésekben való három-jet-keletkezés elméleti leírása a perturbatív kvantumszín-dinamika egyik központi kérdése. Sikerült kiszámítanunk a sugárzási korrekciókat, és kidolgoztuk a részletes fenomenológiát. Kiszámítottuk az exkluzív három-jet hatáskeresztmetszetet, illetve néhány három-jet alakváltozó (transzverzális döfet, transzverzális jet-kiszéledés, vezető jet transzverzális energiája) differenciális eloszlását. Azt kaptuk, hogy a sugárzási korrekciók figyelembevétele jelentősen csökkenti a nemfizikai (renormálási és faktorizációs) skáláktól való függést, és így javítja az elméleti jóslat megbízhatóságát. A kísérleti adatokkal való összevetés azt mutatta, hogy elméleti jóslatunk jól leírja a mért hatáskeresztmetszeteket. A kifejlesztett számítógépes programot, mint egyetlen megbízható program a TEVATRON kísérleteinél mindennapos használatban van. A munka jelentőségét mutatja a közlemény 2003-ban jelent meg, és azóta 38 (34 független) hivatkozás kapott. (NZ)
7. Célkitűzésünk volt a lepton-proton-ütközésben való fotokeltéses három-jet keletkezés hatáskeresztmetszetéhez a sugárzási korrekciók meghatározása. Bár a számítógépes program elkészült, a vele való számítások elvégzésére és a munka leírására nem volt lehetőségünk, pedig a HERA kísérleti csoportjai többször kifejezték érdeklődésüket a munka iránt. (NZ, TZ)
8. Jelentős erőfeszítéseket tettünk a második sugárzási korrekciók számítása elméletének kidolgozása érdekében. A feladat lényegesen nehezebbnek bizonyult a kezdeti várakozásainknál, eddig csupán részeredményeket tudtunk elérni. Sikerült felderítenünk a faszintű QCD mátrixelemek teljes szingularitási szerkezetét abban a kinematikai tartományban, ahol egyszerre két parton válik feloldhatatlanná a többtől. Sikerült továbbá meghatároznunk hogyan viselkednek a mátrixelemek azokban az átfedő tartományokban, amelyek az egyszeresen illetve a kétszeresen feloldatlan kinematikai tartományok közös része. Az eredmények jelentőségét mutatja, hogy bár csak a kutatás záró évében sikerült a közölni a számítások leírását, máris 8 független hivatkozás van rá az irodalomban. A közölt eredményeket felhasználva sikerült egy általános levonási sémát felírni, amelyet numerikusan ki is próbáltunk az elektron-positron hadronikus szétsugárzásban való három-jet keletkezés hatáskeresztmetszetének NNLO pontosságú (vezető rend + első + második sugárzási korrekciók) kiszámítására. A program működik, de az eredmények közléséhez még további analitikus és numerikus munkára van szükség. Ebből következik, hogy célkitűzéseink két utolsó pontját még nem sikerült megvalósítani, a munka tovább folytatódik. (TZ, SG)

9. Az önálló kutatáson kívül részt vettünk az OPAL kísérleti együttműködés tagjai által végzett adatkiértékelés eredményeinek közlésre való előkészítésében: részben szerkesztőbizottsági munkában, részben a megírt cikkek véleményezésében. Összesen 53 OPAL közlemény jelent meg az OTKA témaszám feltüntetésével, amelyek közül csak azt a 16-t adtam meg a kutatás honlapján, amelyeknek a közlésre való előkészítésében részt vettünk. (UB, TZ)
10. Említésre méltó még, hogy a pályázat terhére felkért programszervező (convener) voltam az EPSHEP 2003 konferencia *Hard QCD* szekcióján. (TZ)

A kutatási időszak alatt megjelent új eredmények hatására két új témát kezdtünk, amelyek a nemzetközi kutatások homlokterébe kerültek. Ezek a témák nem szerepeltek a kutatási tervben, ezért röviden indoklom a témaválasztást, és az eredmények ismertetését is részletesebben adom meg.

1. Az egyik új témában új utat nyitottunk az első QCD sugárzási korrekciók tisztán numerikus módon való meghatározásához. Mint ismeretes, egy m db jetet tartalmazó végállapot esetén az első sugárzási korrekciók kiszámításához kétféle Feynman gráfok járulékait kell összegezni: (a) $m+1$ végállapotot tartalmazó faszintű gráfok járulékait (az ún. valós korrekció) és (b) m végállapotot tartalmazó egyhurok gráfok járulékait (az ún. virtuális korrekció). Az egyhurok gráfok járulécai analitikus képletének meghatározása rendkívül bonyolult, amit jól mutat, hogy míg faszinten már nyolc végállapotot tartalmazó parton esetén is ismerjük a QCD amplitúdókat, addig egyhurok szinten a jelenlegi világrekord négy végállapotot tartalmaz (virtuális bozon bomlása négy partonba). Faszintű amplitúdók esetén a számításokat megkönnyíti, hogy nem kell a szükséges amplitúdók analitikus kifejezését meghatározni, hanem lehet közvetlenül a Feynman-gráfokat numerikusan kiértékelni. Az egyhurok amplitúdók esetén hasonló eljárásra eddig nem volt példa az irodalomban, mert az egyhurok gráfok négy dimenzióban mind ultraibolya, mind infravörös szingularitásokat tartalmaznak. Az analitikus számolás során előbb regularizáljuk a szinguláris integrálokat úgy, hogy a dimenziószám komplex függvényeként kezelve az integrálokat, azokat $4-2\epsilon$ dimenzióba analitikusan elfolytatjuk, amikor a szingularitások ϵ -pólusaiként jelennek meg az amplitúdók analitikus kifejezésében. Amint azonban említettem, analitikusan eddig csak legfeljebb 5-pont gráfokat sikerült kiszámítani.

Az új kutatási témánkban kidolgoztunk egy általános eljárást egyhurok QCD mátrixelemeknek (amplitúdó-négyzet) a Feynman gráfokból való közvetlen numerikus kiértékelésére. Az általunk kifejlesztett módszer alapja, hogy a szingularitásokat integrandus szinten gráfról gráfra levonjuk és az így kapott regularizált integrandus numerikusan integrálható. A szinguláris járulékok integrálját analitikusan ki tudjuk számítani és felösszegezve az összes gráfra egyszerű, általános alakba tudtuk írni. Az így regularizált integrál véges, de numerikus kiszámítása nehéz, mert az integrál egy 4-dimenziós integrál a komplex térben és az integrandus továbbra is tartalmaz integrálható szingularitásokat. A numerikus integrált úgy kell elvégezni, hogy ezeket a szingularitásokat elkerüljük, ami a 4-dimenziós térben nem könnyű, mert általános módon lehetetlen az integrandus szingularitás-szerkezetét azonosítani. Egy m -pont gráf esetén célszerű bevezetni m darab Feynman-paramétert és $(4+m)$ -dimenziós komplex térben elvégezni az integrált. Azáltal, hogy szétterítettük a szingularitásokat egy nagyobb dimenziós térben, az integrál szerkezetét egyszerűsíteni tudtuk. A numerikus módszerünk előnye, hogy nem bonyolítja az integrálok algebrai szerkezetét mesterségesen redukciós képletek (szokásos eljárás a m -pont integráloknak n -pont integrálok kombinációjaként való felírására, ahol $n < m$) alkalmazásával. Az általános eljárást a JHEP folyóiratban közzétettük, jelenleg konkrét folyamatokra való alkalmazásán dolgozunk. Sikerült kiszámolnunk 5- és 6-pont skalárfüggvényeket, és a teljes egyhurok mátrixelemeket hat külső fotont tartalmazó folyamathoz. (Jellemző, hogy a 6-foton 1-hurok mátrixelemekről számolás nélkül lehet tudni, hogy végesek. A redukciós eljárás a véges eredményt szinguláris integrálok bonyolult összegeként írta fel, a mi eljárásunkkal közvetlenül megkapjuk a véges értéket.) (NZ)

2. A másik új kutatási területünkön egy az irodalomban meglehetősen lezártnak gondolt, bár komoly hiányokat tartalmazó témakörben kíséreltünk meg újítást: új partonzápor

algoritmust dolgoztunk ki. A partonzápor programok széles körben használatosak nagyenergiás elemirész folyamatok szimulálása céljából. Az ilyen programoknak az előnye a véges rendű perturbációs számításokkal szemben, hogy a valódi elemi ütközések sokkal hűbb leírását adják, hiszen a végállapotot nem néhány parton jelenti, hanem hadronok sokasága, ahogyan az események a részecskedetektorokban valójában megjelennek. Habár a partonzápor algoritmusok a QCD faktorizációs tulajdonságaira épülnek, a velük nyert eredményeket nem tekinthetjük elméleti jóslatnak, mert szabad, illesztendő paramétereket tartalmaznak. Az elmúlt évben azon dolgoztunk, hogy olyan algoritmust írjunk le, amellyel a kapott eredményeket elméleti jóslatnak tekinthetjük.

A feladatnak két része van. Egyrészt a partonzápor algoritmusokat illesztenünk kell a véges rendű perturbációs számítás eredményéhez, másrészt magát az algoritmust szeretnénk javítani. A Born-szintű számolások és a partonzápor illesztésére már több eljárást is leírtak az irodalomban, azonban az NLO jóslatoknak a partonzáporhoz való illesztésére még nem található általános megoldás. A kutatási támogatás ideje alatt lépéseket tettünk egy általános módszer kidolgozására, az első eredményeket a JHEP folyóiratban közöltük. Az eljárás kidolgozása során jöttünk rá, hogy maguk a létező partonzápor algoritmusok is javításra szorulnak, amin jelenleg is dolgozunk.

Olyan partonzápor algoritmust szeretnénk felírni, amely nem tartalmaz illesztendő paramétereket és így a vele számolt hatáskeresztmetszetek elméleti jóslatnak tekinthetők. Egy ilyen algoritmusnak jónéhány alapvető feltételt kell teljesítenie: 1) az algoritmusnak Lorentz-kovariánsnak kell lennie, 2) a vezető logaritmusokat az erős csatolás szerinti sorfejtés minden rendjében helyesen kell figyelembe vennie, 3) vezető logaritmust követő logaritmusokat legalább vezető-szín közelítésben helyesen kell figyelembe vennie a csatolás szerinti sorfejtés minden rendjében, 4) a lágy-gluon kibocsátást helyesen kell kezelnie legalább vezető-szín közelítésben, 5) a partonzápor minden lépésében a fázisteret pontosan kell kezelni 6) az infravörös levágáson kívül más levágási paraméter nem szerepelhet, 7) az algoritmusnak gördülékenyen kell együttműködnie véges rendű perturbációs számításokkal. A feltételeket, teljesítő algoritmust a 2005. évi Ringberg Nemzetközi Műhelyen mutattuk be. A megadott tulajdonságokkal rendelkező parton algoritmusoknak lényeges tulajdonságuk, hogy az rájuk épülő programok eseménygenerátorként működnek, ami azt jelenti, hogy minden esemény súlya egy. Ezáltal nagyon fontos eszköz lehet a kísérleti fizikusok számára az észlelő-berendezés kalibrálása és az események szimulációja céljából. Jelenleg az algoritmust megvalósító programon dolgozunk. (NZ)