

HOGYAN ÉPÍTIK FEL A KVARKOK A RÉSZECSKÉKET?

TAKÁCS ÁDÁM

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Elméleti Fizikai Osztály*Kulcsszavak:* részecskefizika — kvantumszindinamika — Standard Modell — kvarkok és gluonok — CERN — hadronizáció — Milleniumi probléma — húrmodell — kvark-gluon plazma

1. BEVEZETÉS

Miből állnak az atommagok? Ha megmérjük a tömegüket és töltésüket, rájövünk, hogy azok nem függetlenek. Arra jutunk, hogy az atommag pozitív elektromos töltésű protonokból és semleges neutronokból áll. Atommagokat ütköztetve egymásnak, protonokat és neutronokat szakíthatunk ki, így megmérhetjük azok tulajdonságait is. Rájövünk, hogy nem elég összeadni az alkotók tömegét, a kölcsönhatásukat is figyelembe kell venni. Az így fejlődő modellünkkel ezután megjósolhatjuk milyen mag keletkezne, ha protonokat és neutronokat kevernénk össze. Egy szinttel lejjebb is feltehetnénk az eredeti kérdést: miből áll a proton? Hasonlóan, eljutunk a kvarkokhoz és gluonokhoz, de ezeknél a részecskéknél komoly problémába ütközünk.

Képzeljünk el azt a kiforgatott helyzetet, hogy milyen lenne, ha ismernénk a protonokat, neutronokat, sőt a kölcsönhatásukat is, azonban az atommagokat mégsem tudnánk az elmélettel felépíteni. Nem tudnánk mondjuk megjósolni, hogy milyen atommagot kapnánk ha két protont és három neutront kevernénk össze. Még kellemetlenebb lenne, ha már a kvarkokat, gluonokat is ismernénk, de az atommagok kialakulását még mindig nem tudnánk kiszámolni. Szerencsére az atommagokra ez nincs így, de egy szinttel lejjebb, a kvarkokkal már igen. Nem tudjuk hogyan állnak össze a kvarkok protonná. Előfordulnak efféle buborékok egy elméletben: látszólag minden tapasztalatot meg tud magyarázni, bonyolultakat is, viszont „egyszerű” problémák magyarázata mégis hiányzik. A 2000-ben, Millenniumi problémák néven a 7 legfontosabb megoldatlan, ehhez hasonló problémát gyűjtötték össze. Többségük matematikai, fizikai, de van köztük informaticai is. A kvarkokra vonatkozó probléma a „Yang–Mills elméletek tömeg ugrása”, ami a részecskék kvarkokból való összeállásának folyamatát magyarázná meg. Erről lesz szó a továbbiakban.

2. A KVANTUMSZÍNDINAMIKA

A hadronokat a kisebb kvarkok és gluonok alkotják. Ilyen például a proton és a neutron is. Az elektronban ezzel szemben nincsenek kvarkok, így az elemi részecske. A kvarkokat, gluonokat és a köztük lévő kölcsönhatást leíró elmélet a kvantumszindinamika. Az elmélet szerint a kvarkoknak és gluonoknak színtöltésük van, ami nagyon hasonló az elektromos töltéshez, de háromféle van belőle: *piros* és *antipiros*, *zöld* és *antizöld* és *kék* és *antikék*, tehát minden pozitív-negatív töltéshez tartozik egy szín is. Jelenleg 6-féle, kvarkot ismerünk: *u*, *d*, *s*, *c*, *b* és *t*-kvarkot. A kvantumszindinamikát már a 60-as évek

óta ismerjük és használjuk, sőt az elmélet jóslatait naponta tesztelik, az olyan kísérleti eszközök, mint a CERN Nagy Hadronütköztetője (az LHC), vagy az amerikai Relativisztikus nehéz-ion ütköztető (a RHIC). Eddigi tapasztalataink alapján mondhatjuk, hogy jól ismerjük és jól is működik az elméletet, noha önmagában egy darab kvarkot vagy gluont sem sikerült megfigyelnünk. A fenti példánál maradva, meg tudjuk csinálni, hogy kilökünk az atommagból egy protont és megvizsgáljuk, annak az egynek a méretét, tömegét vagy az elektromos töltését. A kvarkokkal és gluonokkal ezt nem tudtuk megtenni, sőt a kvantumszindinamika azt jósolja, hogy ez nem is lehetséges. Az elmélet szerint a kvarkok csak párban, vagy csoportban figyelhetők meg. Ha megpróbálnánk egy kvarkot erővel kivenni egy proton belsejéből, a vákuum új kvark és antikvark pár hozna létre a távolodás helyén és végül egy összetett kvark-antikvark pár maradna a kezünkben. A folyamat elképzelésére később látunk egy példát, a 4. ábrán. Tehát, a vizsgálni kívánt kvarkunk egy összetett részecskébe, hadronba záródik. Ezt a jelenséget neveltük kvarkbezárásnak, míg magát a folyamatot, hadronizációnak.

Bár nem tudjuk a kvarkokat és gluonokat önmagukban vizsgálni, bizonyíthatjuk, hogy léteznek. Részecskegyorsítókkal, elektronokat lőtték a sokkal nagyobb méretű protonokra, amelyek visszapatánásáról kiderült, hogy a proton nem gömbszerű, hanem kis csomók vannak benne, a három kvark: két *u* és egy *d*-kvark. Azt, hogy miért nem figyelhetők meg a kvarkok és gluonok önmagukban, nem tudjuk, hogy miért van, de ez nem jelenti azt, hogy rossz az elméletünk. Például azt sem tudjuk, hogy a gravitáció miért vonz és sosem taszít, mégis tudjuk miként épül fel egy galaxis. Az alap kutatások feladata éppen az ilyen elvont kérdések tisztázása.

A kvarkok és gluonok megismeréséhez részecskéket gyorsítunk és ütköztetünk össze: elektronokat, protonokat, vagy nagyobb, arany és ólom atommagokat. Ha ezt elég nagy energiával tesszük, akkor az atommagokból, protonokból és neutronokból kvarkok és gluonok szakadnak ki, információt adva a kölcsönhatásairól. A kiszakadt kvarkok a kvarkbezárás miatt a vákuumból még több kvark-antikvark párt keltenek és hadronokká állnak össze, vagyis hadronizálnak. Ez alól még nem láttunk kivételt, mondjuk egy ott maradt kvarkot a detektorban. A kvantumszindinamika jósolja a kvarkbezárást, azonban annak pontos folyamatát, a hadronizációt máig nem sikerült az első törvényekből származtatni. Nem tudjuk megmondani például, hogy egy adott kvark pontosan milyen hadronba fog záródni, vagy mi határozza ezt meg. Ez egy kellemetlen helyzet, mivel a részecskefizikát leíró Standard Modellel, ami a kvantumszindinamika mel-

lett a részecskék minden más kölcsönhatását tartalmazza, ennél sokkal de sokkal bonyolultabb folyamatokat is ki tudunk számolni és mérésekkel igazolni. Mégis, ezt az elemi folyamatot nem tudjuk leírni. Emiatt került be a probléma a Milleniumi problémák közé.

Természetesen, az utóbbi évtized felfedezéseihez, mint például a Higgs részecskéhez szükség volt olyan információkra, hogy miként formálják meg a kvarkok a hadronokat, emiatt a részecskefizikusok modelleket dolgoztak ki, hogy közelítsék a valóságot. Ez azonban nem oldotta meg az eredeti problémát. Olyan ez, mintha látnánk, hogy víz gyűlik fel a hajónk alján, a lyukat is látnánk, de folt híján csak a vizet mernénk ki.

A kvantumszindinamikáról és annak határaitól tovább tájékozódhatunk a Természet Világa és a Fizikai Szemle lapokban, valamint az Atomcsill¹ online elérhető előadásából.

3. A HADRONIZÁCIÓ LEÍRÁSA

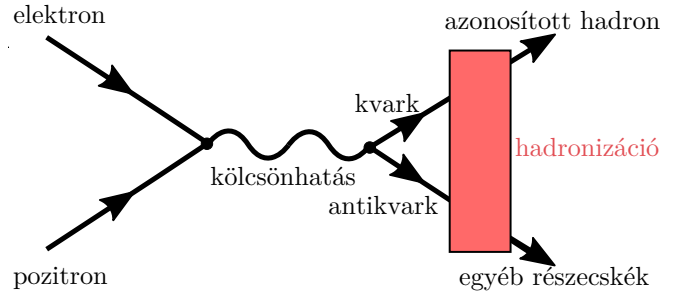
A hadronizációt leíró, modelleknek két nagy csoportja van: az egyikben csak a statisztikáját írjuk le a bezáródás folyamatának, például azt, hogy mekkora valószínűséggel záródik egy bizonyos típusú kvark, mondjuk u -kvark, a protonba vagy valamilyen más hadronba. Más modellek egyszerűsítik a kvarkok kölcsönhatásait, így ki lehet számolni belőlük, hogy egy adott kvark hogyan formálja meg egy hadront. Mindkét megközelítés gyengesége, hogy szorosan nem a kvantumszindinamikához kapcsolódnak, további plusz feltételezések vannak bennük és kísérleti adatok kellene ahhoz, hogy beállítsák az elmélet paramétereit, amelyek száma nem kevés. Ezek segítségével viszont, olyan dolgokat lehet kiszámolni, hogy milyen típusú hadronok keletkeznek az ütközés során és milyen ezen a típusok aránya, amelyeket mérésekkel tesztelhetünk².

3.1. A hadronizáció statisztikus leírása

A statisztikus leírás során nem vagyunk kíváncsiak arra, hogy mi a kvarkok bezáródásának pontos folyamata, csupán a lehetséges kimenetek valószínűségére. Például arra, hogy egy adott típusú kvark vagy gluon, mekkora valószínűséggel fog valamilyen hadronba záródni. Ezeket a valószínűségeket nem tudjuk kiszámolni a kvantumszindinamikából, de becslést tudunk rájuk adni. Például, a kvarkok nagyobb valószínűséggel záródnak olyan hadronba, ami két kvarkból áll, mint abba, ami háromból, hiszen a kvarkok egy párt könnyebben találnak, mint kettőt. Tudjuk azt is, hogy nagyobb tömegű részecskéket nehezebb létrehozni a vákuumból, mint könnyűeket, így azt várjuk, hogy a nehezebb kvarkok, mint c , b vagy t -kvark kevesebbszer fog előfordulni, így azok a hadronok is, amelyekben ilyen kvarkok vannak. Ezeket a sejtéseket igazolják a kísérleti eredmények. Leggyakrabban pionokat (u és d -kvark keveréke) és kaonokat (d és s -kvark keveréke) találnak. Ezek a legkönnyebb kvarkokat és azokból is csak kettőt tartalmaznak. A protonokban és neutronokban három-három kvark van (uud és udd), így jóval ritkábbak, ahogy a L/Ψ nevű részecske is (c és $anti-c$ keveréke), ami két nehéz kvarkot tartalmaz. Logikus kérdés, hogy ha a pionokat és kaonokat egyszerűbb

¹ <http://www.atomcsill.elte.hu/>

² Ideális esetben ezeket a kvantumszindinamika első törvényeiből kellene tudnunk meghatározni.



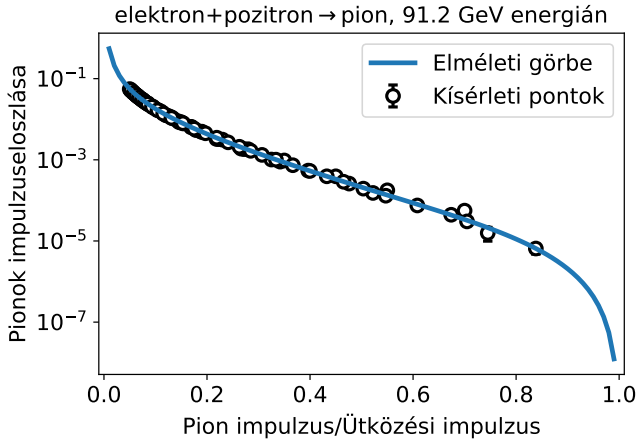
1. ábra. Elektron-pozitron ütközés részecskefizikai ábrázolása diagrammal. Ha elég nagy az ütközési energia, kvarkok keletkeznek a vákuumból, amelyek hadronizálnak. Kísérletek során azonosítani tudják a kimenő hadronokat a töltésük és tömegük segítségével, ami fontos adat a hadronizáció megértéséhez.

létrehozni az ütközésekben, akkor a világunkat miért a protonok és neutronok építik fel? Ez azért van, mert a pion és kaon nem stabil részecske, kevesebb, mint egymilliomod másodperc alatt bomlanak el, míg a proton jelen tudásunk szerint stabil.

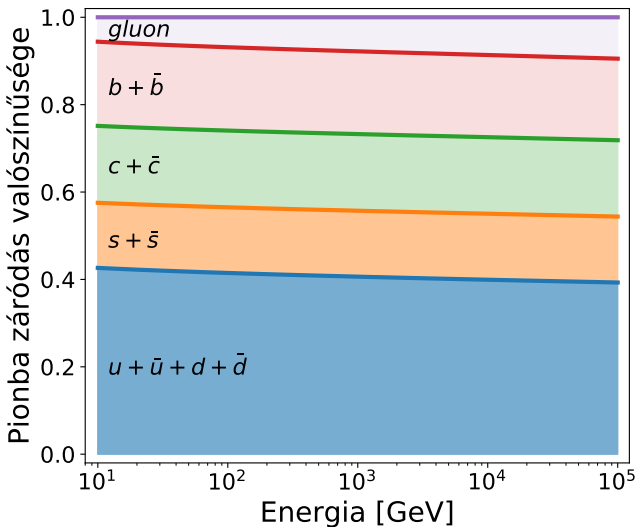
Ha elég nagy energiával elektront és pozitront ütköztetünk össze (1. ábra), a vákuumból kvarkok keletkeznek. A hadronizáció miatt ezek a kvarkok hadronokba záródnak, amelyek típusát és a típusok arányát kísérletileg mérhetjük. Más részről, a Standard Modell segítségével ki tudjuk számolni, hogy mi annak a valószínűsége, hogy az ütközésben, adott típusú kvark keletkezik. Felteesszük, hogy valamilyen valószínűségi eloszlás szerint ez a kvark hadronba fog záródni, amelyet tudják a fenti említett becsléseinket. Az eloszlásokat jellemezni tudunk néhány paraméterrel, mint a bezáródás valószínűség várható értéke és annak szórása. Például, mi annak a valószínűsége, hogy egy u -kvark pionba fog záródni. Ezekkel az eloszlásokkal kiszámolhatjuk a fenti reakciót, amely végeredménye függ az említett paramétereiktől. Ezután a paramétereiket úgy választják meg, hogy a kiszámolt értékek minél jobban visszaadják a kísérletben mért eredményeket. Minél kevesebb paraméter tartalmaz a modellünk, ami jól adja vissza a kísérleti eredményeket, annál jobb. A leggyakoribb ilyen eloszlások 3 paramétert tartalmaznak, így pion esetén a 6-féle kvark plusz a gluon, egyenként 3, összesen $(6+1) \times 3 = 21$ paramétert ad, amit be kell állítani. Különböző, megfontolásokkal csökkenteni lehet a paraméterek számát 15 körülire, például az elektromos töltés és a kvarkok típusának szimmetriáinak figyelembevételével. Hasonló mennyiségű paraméter kell kaonra, protonra vagy egyéb hadronra. Ez nagyon sok paraméter, viszont a meghatározásuk után meg tudjuk mondani, hogy mekkora valószínűséggel, mi fog történni az ütközés után.

A paraméterek ismeretében kiszámolhatjuk azt, hogy az elektron-pozitron ütközésben keletkezett pionoknak mi lesz az impulzus szerinti eloszlása, ami a 2. ábrán látható. Az elméleti görbe a beállított paraméterekkel láthatóan jól adja vissza a kísérletileg mért adatokat.

Érdekes mennyiség, amit kiszámolhatunk a valószínűségi eloszlások segítségével, hogy egy adott hadronba mekkora valószínűséggel záródik egy kvark. Ha a valószínűségi leírásunk jól működik, akkor azoknak a kvarkoknak lesz a legnagyobb járuléka, amelyek eleve a had-

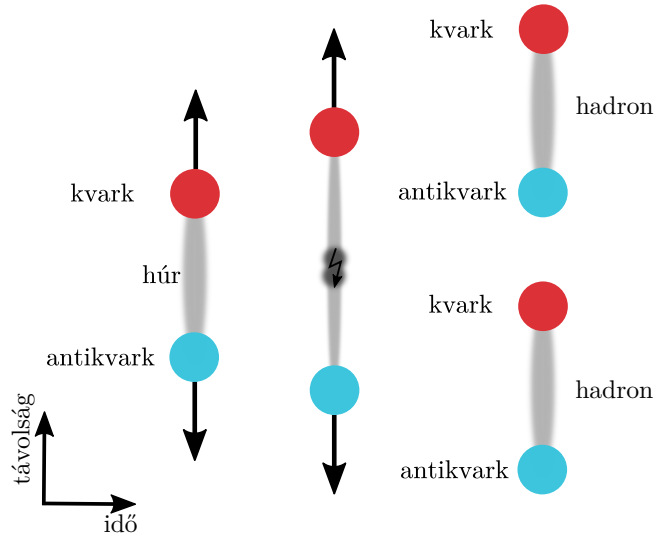


2. ábra. Elektron-pozitron ütközésben keletkezett pionok impulzus szerinti eloszlása 91.2 gigaelektronvolt ütközési energián. Ez az energia több, mint az 500-szorosa a pion nyugalmi tömegének. A fekete pontok a kísérletileg mért értékek, a kék vonal pedig a beállított paramétereket tartalmazó, valószínűségi eloszlásokkal számolt elméleti görbe. A fél-logaritmikus skálán látható, hogy nagyobb impulzussal lényegesen kevesebb pion keletkezik az ütközésben.



3. ábra. Különböző kvarkok pionba záródásának valószínűségei különböző energiákon. Az energiaskála értelmezéséhez: a pion tömege 0.14 GeV, a RHIC részecskegyorsító 200 GeV, míg az LHC 14 000 GeV energiára gyorsít. Ahogy nő az energia, a pionba egyre nő annak a valószínűsége, hogy a nehezebb kvarkok és a gluon is a pionba fog záródni. Felülvonal jelzi az antikvarkokat.

ront alkotják. A kvantumszindinamika azt jósolja, hogy ezeken kívül, a hadronokban más kvarkok is jelen lehetnek, igaz nagyon rövid ideig, mint egy zajos háttér. A 3. ábrán a kvarkok pionba záródásának valószínűségei láthatók összeadva, különböző energiákon. Az ábra teteje az 1-nél van, hiszen összességében a kvarkoknak és a gluonoknak a pion 100%-át adják. Tudjuk, hogy a piont u és d -kvark építi fel és látható, hogy összességében ezek adják a legnagyobb járulékot. Az is látható, hogy a fel-



4. ábra. A húrmodellben, ha túlnyújtjuk a húrt, elszakad és a végein új kvark-antikvark pár keletkezik, így formálva meg a hadronokat.

építő kvarkokon kívül más kvarkok is jelen vannak, sőt nehéz kvarkok és a gluon is. Az is látható, hogy ezeknek az arányoknak gyenge az energiafüggése.

Az ábrák elkészítéséhez az egyik legnépszerűbb statisztikus modellt használtam alapul, amelynek eredményei online elérhetők³. A durhami egyetem minden részecskefizikai kísérlet eredményét összegyűjtötte online, amiket egy új projekt részeként szabadon vizsgálhatunk, és ábrázolhatunk online⁴. Innen vannak a kísérleti pontok a 2. ábrán.

3.2. A hadronizáció dinamikai leírása

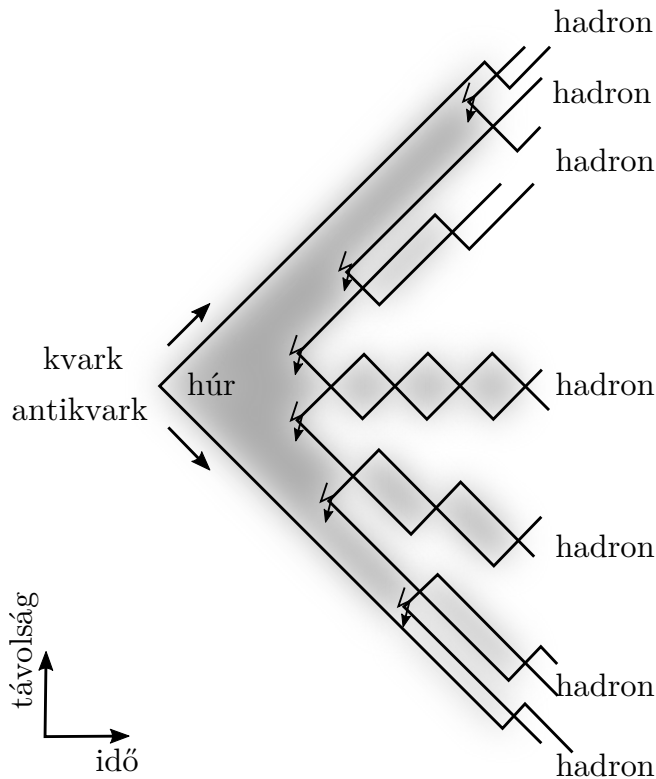
A hadronizáció leírásának egy másik típusa az, amikor a kvarkok és gluonok között valamilyen közelítő kölcsönhatást teszünk fel az eredeti helyett, amelyből ki tudjuk számolni azokat a valószínűségeket, mint a statisztikai leírásnál. A legelterjedtebb, a húrmodell⁵. Ebben a modellben azt teszik fel, hogy a kvarkok között húrok vannak, amelyek megnyúlnak, amikor a kvarkok eltávolodnak egymástól. Ha a húrban túl nagy a feszültség, elszakad és az új végpontjain egy-egy kvark antikvark keletkezik. Ha az új részrendszereknek marad elég energiája, a húrok ismét megnyúlnak és elpattannak, ha nem, a húrral összekapcsolt kvarkok hadronokba záródtak. Egy illusztráció látható a húrok elszakadásáról a 4. ábrán. A 5. ábrán egy konkrét hadronizációs folyamat látható, több szakadással, a folyamat hagyományos ábrázolásmódjában.

Ebben a modellben is kiszámolhatunk olyan mennyiségek, amelyek kísérletileg is mérhetők, ezekkel lehet beállítani a modell paramétereit. Például a húrok erejét vagy azt, hogy milyen feszültségnél szakadnak el. A paraméterek száma nem sokkal kevesebb a statisztikai leírásnál, viszont lényeges különbség, hogy egy konkrét folyamaton van a hadronok keltésére és bezáródására. Ismerve a paramétereiket, lemodellezhetjük egy egész részecskeüt-

³ <http://research.kek.jp/people/kumanos/ffs.html>

⁴ <https://hepdata.net>

⁵ A húrmodellnek semmi köze a húrelmélethez.



5. ábra. A kvark-antikvark pár összetett hadronizációs folyamata. A szürkére színezett húrok többször is elszakadhatnak, így egy kvark-antikvark párból több hadron is keletkezhet, amelyek a végén rezgőmozgást végeznek.

közést és nyomon követhetjük miként viselkednek a kvarkok és gluonok ebben az egyszerűsített képben.

A világon néhány kutatócsoport azzal foglalkozik, hogy a részecskefizikában ismert kölcsönhatásokat beírják egy számítógépes programba és így leszimulálják azt, amit a részecskeütközések során látnánk⁶. Itt, toldozva, foltozva úgy egészítik a kódot, hogy minél jobban egyezzenek az eredményeik a kísérletekkel, és lehetőleg minél kevesebb plusz paramétert tegyenek bele. Az ilyen programokat részecskefizikai eseménygenerátornak nevezik és fontos szerepük van a kísérletek megtervezésénél: várható eredményeket tudjuk velük előre megbecsülni, hogy eléggé érzékenyek-e a műszerek ahhoz, hogy kimutassuk, amit akarunk. A legelterjedtebb a PYTHIA⁷ kód, ami proton-proton ütközésekre specializálódott, míg a magyar kutatók által is fejlesztett HIJING a nehezebb, atommag-atommag ütközésekre. A PYTHIA, a húrmodellt használja, de támogatja a statisztikus leírás használatát is. A programok ingyenesek, példaprogramjai között híres mérések szimulációit próbálhatjuk ki alapszintű programozási ismeret segítségével.

4. ÖSSZEGZÉS ÉS KITEKINTÉS

A hadronizáció megértése egy nyitott kérdés. Az itt bemutatott modellek csak közelítése annak, amit a kvantumszíndinamikával kellene tudnunk kiszámolni. Ameddig a valós problémát megoldják azonban ezek a modellek nélkülözhetetlenek. Fontosak mind a kísérletek tervezésénél és az eredmények kiértékelésénél. Mára eljutottunk odáig, hogy olyan pontosan vagyunk képesek mérni, hogy új hadronizációs modellekre van szükségünk, például a kvark-gluon plazma vizsgálatához.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző kutatásait az Emberi Erőforrások Minisztériuma Új Nemzeti Kiválóság Programja és az OTKA K120660 támogatja.

⁶ Ez a módszer eltér a rácstérelméleti számolásoktól, amelyeket szuperszámítógépeken végeznek.

⁷ <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>