

## Az első három év a CMS kísérletben: mennyivel tudunk többet az erős kölcsönhatásról?

Mindenki nagy izgalommal várta a Nagy Hadronütköztető (LHC) beindítását és első ütközéseit 2009 novemberében. Bár a nagy kísérletek elsődleges célja a már régóta megjósolt Higgs-bozon megtalálása, valamint a feltételezett új fizika felfedezése volt, keltésük kis valószínűsége miatt ezekben a témakörökben nem várhattunk gyors eredményt.

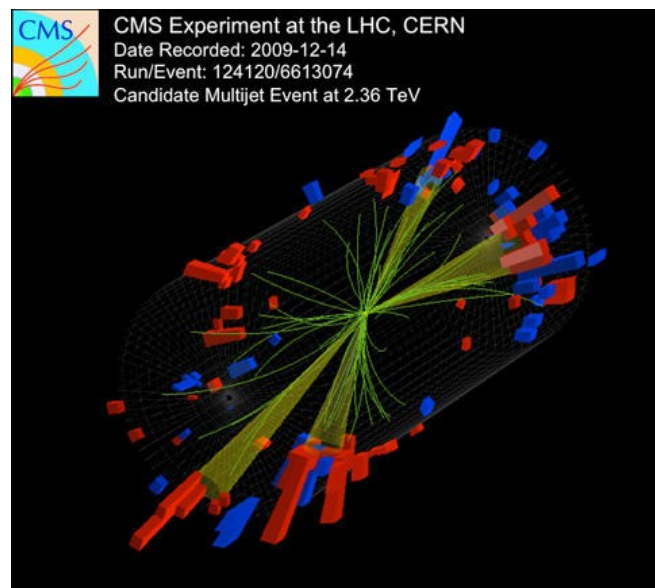
A részecskegyorsítás ekkora gyűrűben és ilyen nagy energián (teraelektronvolt, TeV) protonokkal könnyebben és takarékosan megoldható. Az egymás felé rohanó protonok pedig tele vannak szabad vagy virtuális kvarkokkal, illetve gluonokkal, melyek mind nagyon erősen kölcsönható részecskék. Így azt várjuk, hogy a nagyenergiás proton-proton ütközésekben jelentős mértékben a kvarkok és gluonok között lejátszódó folyamatok határozzák meg a kölcsönhatás kimenetelét: a keltett részecskék számát, eloszlásait, a közöttük levő kapcsolatokat, korrelációkat.

Érdemes megjegyeznünk, hogy a körülöttünk látható világ (bolygók, csillagok, galaxisok) tömegének legjavát az atommagok, tehát protonok és neutronok adják. Ezek a nukleonok tömegüket nem a Higgs-mezővel való kölcsönhatásból, hanem a nagyon könnyű kvarkokat a nukleonok belsejébe bezáró erőkből nyerik, vagyis a tömegük túlnyomórészt kötési energia. (A magfizikában is látunk erre példát, de ott a nukleonok közti vonzás minden esetben csökkenti a magok tömegét.)

### A legelső mérések

Kezdetben a gyorsító gyűrűi szinte teljesen üresek voltak, csak kevés számú, néhány milliárd protont tartalmazó protoncsomag keringett egymással ellentétes irányban. A proton kis hatásos felülete (hatáskeresztmetszete) miatt ilyenkor annak a valószínűsége, hogy egy nyalábkeresztezésben

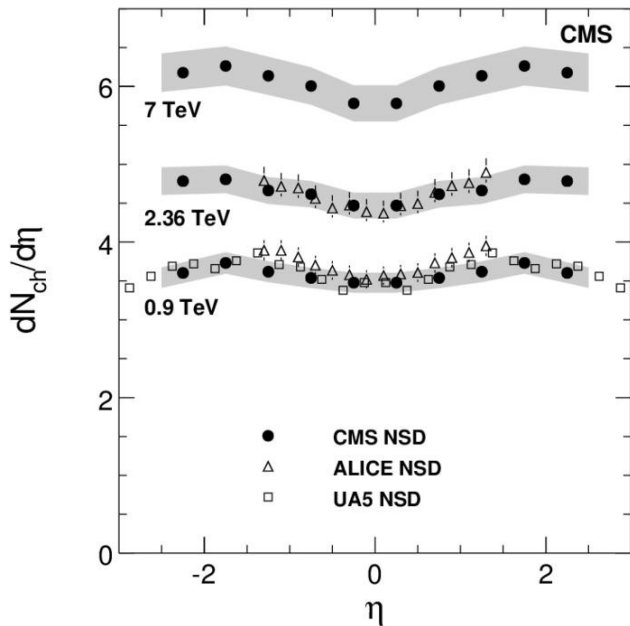
lássunk egy ütközést, nagyon alacsony volt. Kellott egy olyan jel, amely nagy biztonsággal megmondja, hogy ütközés történt. A feladatra legalkalmasabbnak a nyalábok tengelyéhez közel, a protonnyalábok irányához képest kis szögben elhelyezett szcintillációs – a töltött részecskéket fényfelvillanásokká, majd elektromos jelekké alakító – számlálók és a részecskék teljes energiáját felfogó detektorok (kaloriméterek) bizonyultak.



1. ábra: Egy megfigyelt proton-proton ütközés 2,36 TeV energián.

A keltett részecskék nagy része kis impulzusú. A szilícium alapú nyomkövető detektorokkal közülük a töltötteket tudjuk kimutatni (1. ábra), melyek javarészt töltött pionok, kaonok, protonok és antiprotonok. A CMS kísérlet kiértékelő szoftverét – a fent említett Higgs-es és egyéb célokat szem előtt tartva – főként a gyors, 1 GeV/c feletti nyalábvonalra merőleges impulzusú ( $p_T$ ) részecskékre fejlesztették ki. Az erős kölcsönhatás tanulmányozásához új pályakereső algoritmusokra és azok számítógépes programokba öltésére volt szükségünk. Egy alapos és részletes kutatómunkának

köszönhetően már a kirepülő töltött részecskék több, mint 85%-át nagy biztonsággal, kevesebb, mint 1%-nyi tévesztéssel detektáljuk.



2. ábra: A töltött részecskék pszeudorapiditás-eloszlása ( $\eta = -\ln \tan \theta/2$ , ahol  $\theta$  a polárszög) proton-proton ütközésekben, háromféle ütközési energián.

A mért néhány tízezer, majd néhány millió proton-proton ütközés kiértékelésével, a megfelelő hatások figyelembe vételével, kiszámítottuk a keltett töltött részecskék polárszög- és impulzuseloszlását (2. ábra; a részecskék hozama az azimutszögtől független). Az erős kölcsönhatás leírására vállalkozó – elméleti és számítógépes – modellekhez képest a 0,9 és 2,36 TeV-es energián ( $\sqrt{s}$ ) több és nagyobb átlagos impulzusú hadronokat találtunk. Az eltérések a modellek alkotóit a feltételezett elemi folyamatok átgondolására, egymáshoz képesti erősségének igazítására ösztönözték.

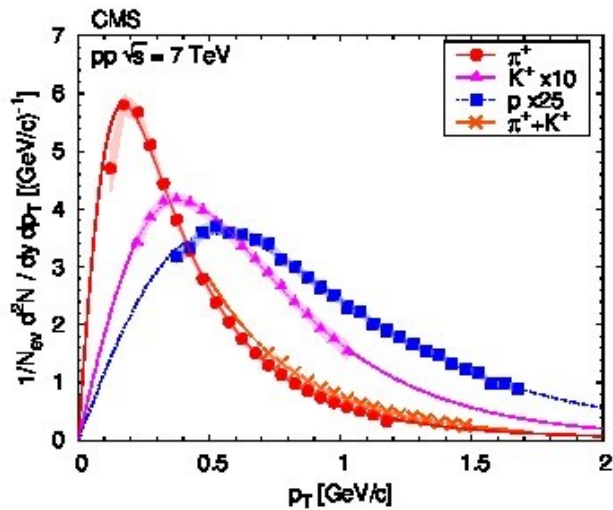
### A proton hatásos felülete

Ha a protonok kicsi, tömör biliárdgolyóként viselkednének, ütközést csak akkor kapnánk, ha középpontjuk legfeljebb egy átmérőnyi távolságban haladna el egymás mellett. Egy ilyen objektum hatásos felülete, hatáskeresztmetszete, a golyó vetületének felülete:  $r^2\pi$ , ahol  $r$  a golyó sugara. A mikrovilágban a hatáskeresztmetszet meghatározása nem ennyire egyszerű. Egyrészt a részecskék sugara változatos (az elektronok

például pontszerűnek, a protonokat viszont kiterjedt objektumoknak mutatkoznak), másrészt a kis távolságokon fellépő nagy erők miatt két ütköző részecske akkor is hatással lehet egymásra, ha a sugarukhoz képest egymástól messze haladnak el. Itt gondolhatunk a nagy hatótávolságú elektromágneses, vagy a kis távolságokon jelentős erős kölcsönhatásra is. Az előbbi adja a proton – új részecskéket nem eredményező – rugalmas, a második pedig az általunk is vizsgált rugalmatlan folyamatait. A fent említett kis szögben elhelyezett detektorok megszólalási gyakoriságának mérésével – a protonnyalábok kiterjedését figyelembe véve – a proton-proton ütközés rugalmatlan hatáskeresztmetszetére  $7 \text{ fm}^2$ -t kapunk, miközben a proton nagyjából  $1 \text{ fm}$ -s sugarából  $3 \text{ fm}^2$  adódna. Azt találtuk, hogy ez az érték az ütközés energiájának növelésével monoton nő.

### Hogyan azonosítunk részecskéket?

A CMS detektor kiválóan alkalmas nagyenergiájú fotonok, müonok és részecskenyalábok (jetek) felismerésére, de alacsony impulzuson – az ALICE kísérlettel szemben – nem rendelkezik többféle, egymást kiegészítő részecskeazonosítási lehetőséggel. Egy olyan módszert kellett kidolgoznunk, amely képes a proton-proton ütközés során keletkező lassabb részecskék szétválogatására. A nyomkövető detektoron átrepülő töltött részecskék az egymás után elhelyezett szilíciumrétegeken nyomokat hagynak: vezetési sávba gerjesztett elektronokat, valamint ezek pozitív képeit, a lyukakat. Az elektronokat kiolvassuk, elektromos jellé alakítjuk. A detektorban leadott energia ( $\Delta E$ ) az elektronok számával arányos, a kérdéses pályaszakasz hossza ( $\Delta x$ ) pedig ismert. Egy töltött részecske – impulzusától függően – legalább három, legfeljebb 35 rétegen halad át. A kapott  $\Delta E/\Delta x$  hányadosok megfelelő feldolgozásával az energiavesztés-ráta jól becsülhető, mely változóban a pionok és kaonok megfelelően elkülöníthetők  $1,0 \text{ GeV}/c$ , a pionok és protonok pedig  $1,6 \text{ GeV}/c$  impulzus alatt.



3.ábra: Töltött pionok, kaonok és protonok nyalábvonalra merőleges impulzusainak mért eloszlása proton-proton ütközésekben, valamint a Tsallis-Pareto-féle illesztés.

A 0,9, 2,76 és 7 TeV energián mért részecskespektrumok az ún. Tsallis-Pareto eloszlásokkal jól leírhatók (3. ábra), melyeket akkor kapjuk, ha két független rendszer entrópiája nem adható egyszerűen össze. Az eloszlások különösen alkalmasak a fizika világában megfigyelhető hatványfarkú, lassan lecsengő eloszlások illesztésére. Sikerük talán abban rejlik, hogy alkalmasak fraktálszerkezetű, valamint kaotikus jellegű dinamikai rendszerek leírására. Esetünkben egy proton-proton ütközés során a keltett részecskék a rendelkezésre álló teret véletlenszerűen, nagyon rövid idő alatt töltik be, így nincs lehetőségük egy termikus egyensúly kialakítására.

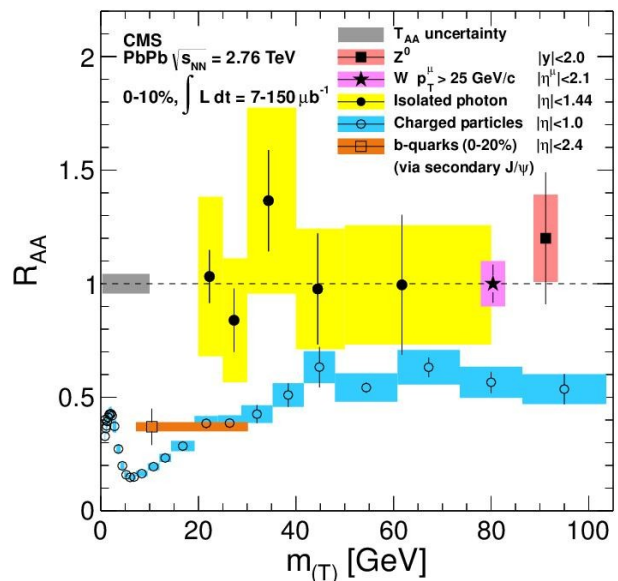
Korábbi, elektron-proton ütközésekben kapott adatok azt mutatják, hogy a gluonok sűrűsége a protonban az ütközési energia növelésével meredeken emelkedik. Mivel a proton mérete közben csak lassan nő, a gluonok sűrűsége egyre nagyobb lesz. (Ugyanakkor a gluonok közti egyre kisebb távolság miatt a kölcsönhatás gyengül és könnyen számolhatóvá válhat.) Mi szabhat a növekedésnek határt? Azt gondoljuk, hogy a gluonok sűrűsége egy határérték után nem nőhet tovább, nem lehet több gluont a protonba zsúfolni. A modell és annak kiterjesztései, variánsai sikeres alkalmazást nyertek a nagyenergiás nehézionfizikában is. A gluon-telítés ötletét felhasználva könnyen megérthetjük a

proton-proton ütközésekben mért részecskespektrumokat, melyeket megfelelő változó ( $p_T$  és  $\sqrt{s}$  hatványainak szorzata) függvényében ábrázolva – az összes mérési eredményünket leíró – univerzális görbét kapunk.

### Nehéz atommagok ütközései

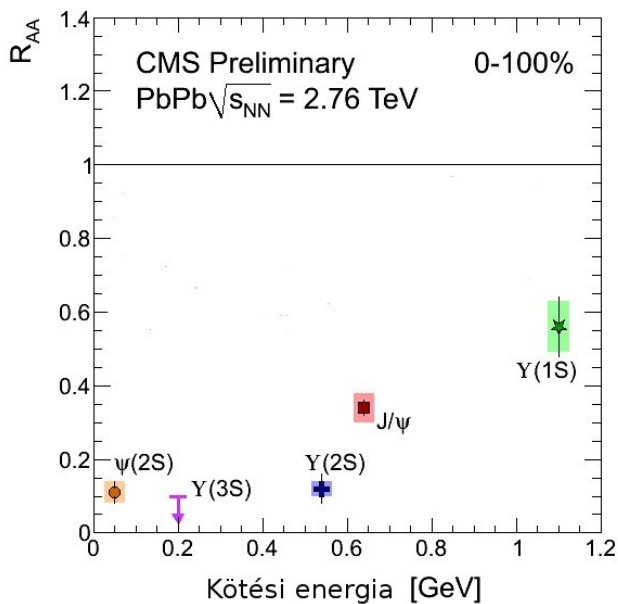
A CMS detektorral ólom atommagok ütközéseit is vizsgáljuk. Alacsonyabb energiákon végzett mérések arra utaltak, hogy különösen heves ütközések során az erős kölcsönhatás egy új, kollektív formáját figyelhetjük meg, ahol a kvarkok és gluonok egy nagyon forró és sűrű folyadékként viselkednek.

A sokrétű, változatos mérési eredmények közül itt csak az ütközésből kirepülő részecskék hozamával foglalkozunk. Ha egy ólom-ólom ütközés csak egyszerűen nukleon-nukleon ütközések egymásutánjából állna, a keltett részecskék eloszlásai a proton-proton mérésekből megjósolhatók lennének. Méréseink az mutatják, hogy a töltött hadronok, b kvarkok, vagyis az erős kölcsönhatásban részt vevő részecskék, a forró maganyagon áthatolva lefékeződnek (4. ábra). Ugyanakkor a többiek, például a fotonok, továbbá a W és Z bozonok bomlástermékei (elektronok, müonok, neutrínók) azon háborítatlanul át tudnak haladni.



4. ábra: A különféle részecskék lelassulása, elnyomása ( $R_{AA}$ ) ólom-ólom ütközésekben.

Azt találjuk, hogy bizonyos rezonanciák kisebb számban keletkeznek, ez különösen igaz a gyengén kötött, nehéz kvarkot és antikvarkját tartalmazó gerjesztésekre. A  $b\bar{b}$  összetételű  $Y(2S)$  és  $Y(3S)$ , valamint a  $c\bar{c}$ -ből álló  $\psi(2S)$  állapotokból – bizonyos impulzustartományban – mintegy tízszer kevesebbet látunk (5. ábra). A rezonanciákat egyik kis valószínűségű (néhány százalékos), de a CMS detektorban tisztán látszó, ellentétes töltésű müonpárra való bomlásuk segítségével azonosítjuk. A méréseket úgy értelmezhetjük, hogy a forró anyag a formálódó kötések felbontja, ezáltal a kvarkok más hadronokba kerülhetnek, vagy akár meg is semmisíthetik egymást. Ilyen módon megmérhetjük a keletkezett anyag hőmérsékletét.



5. ábra: Kvark-antikvark rezonanciák lelassulása, elnyomása ( $R_{AA}$ ) ólom-ólom ütközésekben.

### Érdekes kapcsolatok elemi és bonyolult ütközések között

Az ütközések során kibocsátott részecskéket párban is vizsgálhatjuk. Irányaik szöghelységeinek eloszlása  $\eta$ -ban és a  $\phi$  azimutuszögben segíthet a kölcsönhatás jobb megértésében. A gyors részecskék általában részecskenyalábokban fordulnak elő (hatalmas csúcs  $\Delta\eta=0$  és  $\Delta\phi=0$ -nál). Gyakran látunk

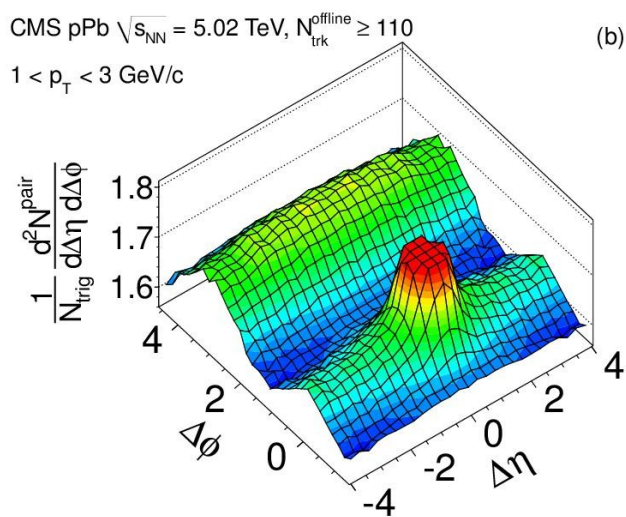
egymással ellentétes irányba elinduló részecskéket, melyek a kölcsönhatás alapvető okára, két nagy energiájú kvark összeütközésére utalnak (széles domb  $\Delta\phi=\pi$ -nél).

Ólom-ólom ütközésekben egy újabb struktúrát figyeltünk meg, egy  $\Delta\phi=0$ -nál előre és hátrafelé elnyúló hegyhátat, melyet a keletkezett részecskék sűrű anyagának folyása idézhet elő. Mindenkit meglepetésként ért, hogy hasonló alakzatot a nagyon sok (több, mint száz) részecskét eredményező proton-proton és proton-ólom ütközésekben is találtunk (6. ábra). Lehetséges, hogy néha az elemi ütközésekben is olyan anyagot hozunk létre, ami a bonyolult kölcsönhatásokban előállított közegre hasonlít?

### Összefoglalás

Láttuk, hogy adataink jó egyezést mutatnak egyszerű, a jelenségek egy megfelelő „köztes síkján” mozgó leírásokkal (gluon-telítés, részecskék lefékeződése, szöghelységi korrelációk). Úgy gondoljuk, hogy valóban megértettük a nehezen leírható erős kölcsönhatás bizonyos részleteit.

A megkezdett munka még korántsem zárult le, hiszen a hasonlóan fontos hadron-mag ütközések részletes kísérleti vizsgálata 2013-ban indul: ott is sok kérdés vár megválaszolásra.



6. ábra: Töltött részecskék szöghelységi korrelációja nagy részecskeszámú proton-ólom ütközésekben.