

## Nagy sűrűségű maganyag vizsgálata SIS energiákon

(47168 OTKA zárójelentés, 2009)

### A kutatások célja

A kutatások célja a relativisztikus ütközésekben létrejövő nagy sűrűségű maganyag kialakulásának és tulajdonságainak vizsgálata volt. Az ilyen irányú kutatásokban a 90-es évek eleje óta veszünk részt OTKA támogatással nemzetközi együttműködésben a FOPI Kollaboráció keretében, melynek jelenleg kb 15 intézmény a tagja. A kutatások kísérleti bázisa a darmstadti (Németország) GSI kutatóintézet SIS gyorsítója, mely a teljes tömegszám tartományban szolgáltat nehéz-ion nyalábot, a 0.1 – 2 AGeV energia tartományban. Az ütközésekben keletkező töltött részecskéket a FOPI detektorrendszerrel gyakorlatilag a teljes térszögben mérjük. Az általunk vizsgált nehéz-ion ütközésekben a normál magsűrűség kb háromszorosa alakulhat ki, ami lehetőséget ad a maganyag tulajdonságainak és az állapotegyenletnek a tanulmányozására. Egyúttal lehetőség nyílik arra is, hogy vizsgáljuk, miként módosítja a szabad kétrészecske kölcsönhatásokat a nukleáris közeg.

A korábbi évek kísérleteit az adatgyűjtő rendszer paramétereit által meghatározott viszonylag kis nyaláb intenzitáson végeztük, és elsősorban a kisebb energiákon létrejövő fragmentációs folyamatokat vizsgáltuk. Az itt tanulmányozható kollektív jelenségek (pl flow, stopping stb) fontos információkat adnak a reakciók leírásához, de nem elégségesek az állapotegyenlet meghatározásához. A maximális sűrűség az ütközés kezdeti szakaszában alakul ki, és csak rövid ideig marad fenn. Az ezt követő tágulás és kifagyás során kialakuló végállapotú eloszlások ezért a kezdeti sűrű fázishoz képest módosulnak. A nagyobb energián megfigyelhető ritka részecskék, melyek a nagy sűrűségű korai fázisban keletkeznek, lényegében eredeti állapotukat megőrizve jutnak ki az ütközésből. Emiatt, valamint azért, mert a küszöb körüli/alatti részecskekeltés különösen érzékeny a nukleáris közegre, a ritka részecskék vizsgálata meghatározó információt szolgáltat a maganyag tulajdonságairól. A jelen kutatásban a vizsgálatokat ezért erre a területre kívántuk kiterjeszteni, ezen belül elsősorban a kaon flow mérésekre, a ritka részecskék és rezonanciák keltésének vizsgálatára, valamint az esetleges (anti)kaonikus klaszterek kimutatására. Korábbi tapasztalataink alapján ehhez szükség volt a kísérleti

feltételek olyan módosítására, hogy lehetővé váljon a ritka részecskék azonosítását lehetővé tevő jobb felbontás, egyúttal pedig a megfelelő statisztika eléréséhez nagyságrenddel nagyobb nyaláb intenzitásoknál történő mérések kivitelezhetősége. Technikailag ez egy új repülési idő barrel-detektor kifejlesztését és rendszerbe állítását, a HELITRON detektor üzemmódjának átalakítását, valamint egy, a központi driftkamrába (CDC) telepítendő új szilikon tracking detektor rendszer (SIAVIO) kifejlesztését és üzembehelyezését igényelte.

A mérőrendszer fejlesztése és az új mérések végzése mellett folytatni kívántuk a korábbi kísérletek adatainak kiértékelését is. Ezen túlmenően csatlakozni szándékoztunk a GSI-ben tervezett új nagy gyorsítórendszer (FAIR) mellett létrehozandó CBM (Compressed Barionic Matter) projekt előkészítő munkáihoz.

## **Eredmények**

### **Korábbi mérések kiértékeléséből kapott eredmények.**

A nehéz-ion reakciókban egy mért esemény – a tömegtől és energiától függően – igen sok, esetleg száznál is több részecske adatait tartalmazza. Az esetenként több terabájtos adathalmazok feldolgozása, figyelembe véve, hogy a vizsgálandó folyamat jellegétől függően a releváns szabadsági fokok is többféleképp választhatók, igen idő- és munkaigényes. Ez magyarázza, hogy a projekt időszakában megjelent közlemények zöme korábbi mérésekhez (és OTKA projekthez) kapcsolódik. Az ezekben található eredmények rövid áttekintése: Igen széles tömeg- és energia tartományban ( Ca-40, Ru-96 és Zr-96, Au-197,  $E=0.4 - 1.9$  AGeV) vizsgáltuk a pion keltést szimmetrikus ütközésekben. Ennek során meghatároztuk a rapiditás eloszlásokat, a lefékeződést (stopping), polár anizotrópiát, pion multiplicitást, transzverzális impulzus eloszlást, a pozitív és negatív pionok hozamának ill. átlagos impulzusának hányadosát valamint az oldalirányú- és az elliptikus flow-t. Az adatokat transzport modell számításokkal hasonlítottuk össze, és meghatároztuk a vizsgált mennyiségek érzékenységét a maganyag állapotegyenletével kapcsolatban.

A Ru+Ru és Zr+Zr reakciókban vizsgáltuk az állapot egyenlet esetleges izospin függését. A pionkeltésben ilyen függést nem találtunk. A semleges és pozitív kaonok keltésnek relatív hozama ugyanakkor mutat ilyen függést, és a termikus modellel történő összehasonlítás a puha szimmetria-energia feltevést preferálja.

Realisztikusabb transzport számítások hasonló egyezést mutatnak, de itt az érzékenység kisebb.

Semleges ritka részecskék ( $K^0$  és  $\Lambda$ ) keltését vizsgáltuk 1.93AGeV-en a Ni+Ni reakcióban, és szinte a teljes fázis térben meghatároztuk a rapiditás eloszlásokat és a

Boltzmann meredekség paramétereiket. Míg a  $K^0$  adatok megegyeznek a korábbi  $K^+$  mérések eredményeivel, a  $\Lambda$  eloszlások eltérnek a protonokétól. Ez utóbbi a nem teljes lefékeződéssel kapcsolatos. Mind a  $K^0$ , mind a  $\Lambda$  hozam egyértelműen függ a centralitástól és arányos a résztvevő nukleonok számával, ami a többszörös szórások hatására utal a küszöb körüli semleges ritka részecskék keltésében.

A globális fékeződést és az oldalirányú flow-t határoztuk meg az energia és a rendszer méretének függvényében az  $E=0.09 - 1.93$  AGeV és  $Z=40 - 160$  tartományban. A legnehezebb Au+Au rendszerben a maximális fékeződés telítődést mutat a  $0.2 - 0.8$  AGeV tartományban, és mindkét oldalon leesik. A fékeződés mértéke szignifikánsan kisebb, mint amit teljes fékeződéskor várnánk, és erősen korrelált az oldalirányú flow értékével.

Ugyancsak az Au+Au rendszerben a fenti energiatartományban meghatároztuk az integrális és – elsőként – a differenciális elliptikus flow-t különböző centralitásoknál. Az adatokat mikroszkopikus transzport modell számításokkal hasonlítottuk össze. Az eredmények érzékenyek az állapotegyenletre, de a különböző számítások az energia függvényében eltérő következtetésekre vezetnek a kompresszibilitásra vonatkozóan.

A kollektív expanzió azimutális függését vizsgáltuk szimmetrikus ütközésekben. Meghatároztuk az átlagos fragment- és flow energiákat az Au+Au és Xe+CsJ rendszerekben a bombázó energia és a centralitás függvényében. Az eredmények jól egyeznek a BUU számításokkal a puha (soft) állapotegyenlet esetén.

A klaszter képződést vizsgáltuk  $0.4$  AGeV bombázó energián Ca+Ca, Ni+Ni, Zr+Zr, Ru+Ru, Xe+CsL és Au+Au centrális ütközésekben. Azt találtuk, hogy a  $Z>2$  klaszterek multiplicitása lineárisan nő a rendszer méretével, és egy olyan közepes rapiditású forrással kapcsolatos, melyet növekvő transzverzális sebességfluktuáció jellemez. A növekedés kb  $5.5$ -szörös a legkönnyebb és a legnehezebb rendszer között. Ezek az eredmények – QMD szimulációkkal összhangban – olyan ütközési folyamatra utalnak, melyben mintegy folyadékcseppek csapódnak ki egy táguló, fokozatosan hűlő nukleongázban. A tágulási dinamika, a kollektív radiális flow és a klaszter képződés a nukleon-nukleon szórás és az átlagtér kombinált hatásának az eredménye.

### **Technikai/metodikai fejlesztések**

A FOPI detektorrendszer legfontosabb eleme a CDC, mely a  $30^\circ$ -nál nagyobb polár szögben kilépő részecskéket detektálja. A részecske azonosítást (pl pion, kaon, proton szelekció) a CDC-t körülvevő, repülési idő detektor (ToF BARREL) segítségével végezzük. Az eredetileg szcintillátor rudakból álló BARREL hely- és

időfelbontása csak korlátozott pontosságú méréseket tett lehetővé, ezért egy új BARREL -t építettünk az általunk kifejlesztett MMRPC (Multi-strip Multi-gap Resistive Plate Counter) detektorokból. A BARREL 26 ún. szupermodulból áll, mindegyikben 5 db 4.6\*90cm felületű MMRPC 16 db jelszállal, ami a korábbinál egy nagyságrenddel jobb szögfelbontást ad. A teljes időfelbontás 100ps alatt van, ezzel a kaonok 1GeV/c impulzusig azonosíthatóak. Az új ToF rendszer tesztelésére 2007-ben került sor a Ni+Ni reakcióban 1.92AGeV energián. A hasonló technológiával működő detektorok közül ennek a legjobbak a tényleges működési paraméterei.

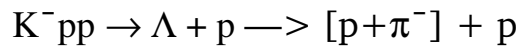
A 30°-nál kisebb szögekben a HELITRON driftkamra méri a reakció termékeket. Ebben a szögterületben a terhelés igen nagy, ami a hagyományos üzemmódban limitálja a használható nyalábintenzitást. A ritka részecskék vizsgálatához szükséges intenzitásoknál nagy tértöltés jön létre, a megfelelő erősítéshez szükséges magas potenciálfeszültségnél emiatt kumulálódó kisülések alakulnak ki, ami a kamra folyamatos működését ellehetetleníti. Ilyen esetben a potenciálfeszültséget le kell csökkenteni ahhoz, hogy tértöltés és a folyamatos kisülés megszűnjön. A nyaláb impulzusokban (spill) érkezik a targetre (kb 10 sec nyaláb, 5 sec szünet), így ez manuálisan megoldhatatlan feladat. Ezért azt a megoldást választottuk, hogy a kamra potenciálfeszültségét egy olyan speciális nagyfeszültségű tápegység szolgáltatja, aminek a kimenő feszültsége igen gyorsan (500V/s) két érték között kapcsolható. A kapcsolás kívülről vezérelhető: a gyorsító "spill vége" jele lekapcsolja a feszültséget a szükséges alacsonyabb értékre (kb -30%), majd egy speciális áramkör 1-2 sec múlva visszakapcsolja az üzemi feszültséget. Ezt az ún. ramping eljárást – amely egyébként látszólag teljesen ellentétben áll a konvencionális üzemeltetési móddal – 2005-ben próbáltuk ki először tényleges mérésben, és azóta is sikeresen alkalmazzuk.

### **A kaonikus klaszterek vizsgálata**

Néhány éve merült fel annak a lehetősége, hogy  $K^-$  keltéssel járó nehéz-ion ütközésekben az erősen vonzó  $K^-$  N kölcsönhatás következtében kis kiterjedésű, nagy kötési energiájú kaonikus kötött állapot (kaonikus klaszter, KNC) alakulhat ki. A  $K^-$  pp vagy  $K^-$  pd rendszer kimutatására több kísérletet végeztek, de az eredmények nem egyértelműek. Az általunk végzett Ni+Ni és Al+Al reakciókban is jelentkezik egy rezonancia a számítottéhoz közeli energián, de ez más mechanizmussal is értelmezhető.

A  $K^-$  pp fundamentális KNC nemcsak nehéz-ion ütközésekben, de a

$p+p \rightarrow K^+ + K^- pp$  reakcióban is létrejöhet, és a következőképp bomlik el:



Az esetleges  $K^- pp$  rendszerre az  $M_{inv}(\Lambda-p)$  invariáns tömeg és egyidejűleg az  $M_{inv}(pp-K^+)$  hiányzó tömeg adhat információt. A reakciónak a számítások szerint 3 – 4 GeV energia között maximális a hatáskeresztmetszete, ilyen proton energia jelenleg csak a GSI-ben elérhető. A reakcióban a  $K^+$  nagy szögben lép ki, így a CDC-ben detektálható, a  $K^- pp$  bomlásából származó két proton és a pion viszont a HELITRON által lefedett előre szögben. A kísérleti lehetőségeket több előmérésben vizsgáltuk, ezek eredményeként egy olyan szilikon tracking detektor beépítése szükséges, mely egyúttal az igen alacsony hatáskeresztmetszet miatt nélkülözhetetlen Lambda triggerként is működik. Ez azt jelenti, hogy a mérés során csak olyan eseményeket írunk fel, melyek tartalmazhatnak egy  $\Lambda$ -t is, így a háatteret jelentősen redukáljuk. Ez a rendszer – SIAVIO (Silicon  $\Lambda$  Vertexing and Identification Online) – elkészült, és 2008 folyamán sikeresen teszteltük. A folyékony hidrogén target 2009-ben lesz kész, ekkor kerül sor a fizikai mérésre, mely előreláthatólag három hetet vesz majd igénybe.

### **A pion + mag $\rightarrow$ kaon + hiperon reakció vizsgálata**

A GSI szekunder  $\pi^-$  nyalábjával 1.15GeV/c impulzusnál öt targetnél (C, Al, Cu, Sn és Pb) mértük a kaon +hiperon produkciót a pion+A reakcióban. A mérés 15 napig tartott, ez alatt a C és Pb targettel jó statisztikát sikerült gyűjtenünk, a másik három magra csak egy nagyságrenddel kisebbet. Ez a reakció a maganyagban történő pion+N  $\rightarrow$  K+Lambda reakcióról adhat információt, ami a magban történő kaon keltés egyik meghatározó folyamata. Elméleti számítások szerint a szabad nukleonon történő reakcióhoz képest a normál magsűrűség a hatáskeresztmetszetet jelentősen módosítja. Így ennek a reakciónak az ismerete igen fontos a nehéz-ion reakciókban történő kaonkeltés kvantitatív értelmezéséhez.

A vizsgált reakcióban pozitív és semleges kaonok keletkeznek, valamint  $\Sigma$  és  $\Lambda$  hiperonok. Mivel a  $\Sigma$  azonnal  $\Lambda$  - ra bomlik, a mért végállapotban csak  $\Lambda$ -k vannak. A kiértékelés eddigi szakaszában elsősorban a ( $K^0, \Lambda$ ) párok keltését vizsgáltuk, az eredmények a CDC-ben mért eseményekre vonatkoznak. A semleges kaonok egy ( $\pi^-, \pi^+$ ) párba bomlanak, a Lambdák pedig egy protonra és egy  $\pi^-$  - ra. A részecskék rekonstrukciója a megfelelő bomlástermékek invariáns tömegének képzésével történt. Ez lehetővé tette külön – külön a  $K^0$  és a  $\Lambda$  eloszlások ill. a keltési hatáskeresztmetszetek meghatározását, a négyes koincidenciák kiértékelésével pedig

a korrelációk vizsgálatát is.

A  $K^0$  keltés hatáskeresztmetszetének tömegszámfüggése egyértelműen felületi reakcióra utalt. A hatáskeresztmetszet lényegesen nagyobbak adódott, mint ami a szabad nukleonokkal (nulla magsűrűség) volna várható, de kicsit kisebb, mint amit az elmélet a normál magsűrűsége jósol. Ez is igen jól egyezik a reakció felületi jellegével.

Részletesebb analízis csak a jó statisztikájú Pb és C adatokkal volt végezhető. A két magra mért impulzuseloszlás hányadosában 200 – 250 GeV/c körül egy csúcs van, ami egy kb 20MeV erősségű taszító KN potenciálnak felel meg, de a jelenlegi transzport modellek nem reprodukálják az adatokat.

A szögeloszlás nem izotróp, és függ a target tömegétől: kis targetmagnál nagyobb a kisszögű emisszió valószínűsége: ez a  $K^0$  reabszorpcióra utal, ami a ritkaságmegmaradás miatt töltéscserével járó kaon – nukleon ütközésekből származhat. A mért fázistér kiterjeszhető, ha nemcsak a CDC-ben detektált részecskéket vizsgáljuk. Folyamatban van a HELITRON adatainak kiértékelése, valamint az olyan eseményeké, melyekben a bomlási termékeket különböző detektorokkal mérjük (pl a protont a HELITRON-ban, a piont a CDC-ben).

Folyamatban van továbbá a ( $K^+$ , Lambda) párok vizsgálata is. Ezen túlmenően azonban az eddigi eredmények alapján további mérések is szükségesek: egyrészt jó statisztikájú mérés valamilyen közepes magnál (pl Cu), másrészt egy mérési sorozat nagyobb impulzusnál (pl 1.7 GeV/c), ami lehetővé teszi a modellekkel történő teljesebb összehasonlítást. Mivel hamarosan elkészül a folyékony hidrogén target a kaonikus klaszter kísérlethez, a  $\pi^- + p \rightarrow K + \Lambda$  alapreakció mérése is lehetővé válik.

### **Al+Al centrális ütközések 1.9 AGeV energián**

A felújított nagy sebességű adatgyűjtő rendszerrel 2005-ben végzett kísérletben 300 millió centrális eseményt mértünk Al+Al ütközésekben 1.9 AGeV energián. Ezekből mintegy 100ezer  $K^0$  mezont és  $\Lambda$  hiperont rekonstruáltunk. Ezen ritka részecskék transzverzális tömeg eloszlásából meghatározott effektív hőmérséklet szisztematikusan kisebbnek adódott, mint a nem-ritka részecskéké. Ez arra utal, hogy nem jön létre egy átfogó termikus egyensúly, melyből minden részecske azonos módon fagyna ki. A ritka ill. nem ritka részecskék különböző fázistérbeli viselkedését mutatja az is, hogy a semleges K mezonok rapiditás sűrűség eloszlása lényegében megegyezik a töltött kaonokéval, de a Lambdáké sokkal keskenyebb mint a protonoké.

A nagy statisztika lehetővé tette a nehéz-ion reakciókban eddig nem mért  $\Sigma(1385)$  és

K(892) ritka rezonanciák elsőkénti kimutatását. A két mélyen küszöb alatti rezonanciát ( $E_{th}=2.33$  ill.  $2.75$  GeV) a  $(\Lambda, \pi^\pm)$  és  $(K^+, \pi^-)$  párok invariáns tömegeloszlásából rekonstruáltuk. Nagy tömegük miatt ezek a rezonanciák az ütközés korai szakaszában keletkeznek, így a sűrű és forró fázis tulajdonságait hordozzák. Mivel igen rövid az élettartamuk (kb  $5\text{fm}/c$ ), bomlásuk még a közegben bekövetkezhet. A  $\Sigma(1385)$  szélessége a számítások szerint a maganyagban megnő, de ennek kimutatására a mérési pontosság nem volt elegendő. Ugyanakkor, míg a  $\Sigma(1385)$  mért tömege megegyezett a névlegessel, a K(892) mért tömege kb  $12$  MeV-vel kisebbnek adódott. Ez az eltérés lehet az első kísérleti evidencia a vector mezon tömeg maganyagbeli módosulására ezen az energián.

A fentiekén kívül a  $(K^-, K^+)$  párok invariáns tömegeloszlását képezve meghatároztuk a  $\Phi$  mezon termelődését is. A CDC-ben (a BARREL-lel koincidenzában) kapott mintegy  $200$  db  $\Phi$  mezon lényegesen kevesebb, mint amit a korábban a Ni+Ni reakcióban kaptak száma alapján vártunk. Ezt csak részben magyarázza a kisebb magméret. Az eredmény értelmezéséhez szükséges a teljes  $K^-$  termelődés meghatározása, és a  $\Phi$  termelődéssel való összehasonlítása.

Ahogy fentebb említettük, a  $(\Lambda, p)$  párok invariáns tömegeloszlásában  $2.13$  GeV-nél szignifikáns csúcsot kaptunk. Ez, bár közel van hozzá, de különbözik a FINUDA kollaboráció által  $2.25$  GeV-nél kapott és kaonikus klaszternek tulajdonított csúcstól.

### **Ni+Ni centrális ütközések 1.9 AGeV energián**

Az új, nagy felbontású ToF BARREL detektorral kiegészített rendszerrel elsőként a Ni+Ni centrális ütközéseket mértük  $1.9$  AGeV energián. A 2007-ben végzett első kísérletben kb  $18$  millió eseményt gyűjtöttünk. A rendszer időfelbontása  $100$  ps alatt volt. A pozitív és negatív kaonok azonosítása a korábbi plasztik barrelhez képest lényegesen jobb lett, az impulzus határ  $1$  GeV/c-re, ill.  $0.8$  GeV/c-re nőtt. A  $K^+, K^-$  párok invariáns tömegeloszlásában szignifikáns  $\Phi$  mezon csúcsot kaptunk, a hozam  $(35 \pm 6)$  konzisztens a korábban kisebb statisztikával mért értékkel. 2008-ban nagyobb statisztika elérése céljából megismételtük a mérést, de a gyorsító problémái miatt csak kb  $50$  millió eseményt tudtunk gyűjteni. Ennek kiértékelése még folyamatban van, 2009-ben pedig újabb mérést tervezünk ezen a reakción.

### **Részvétel a CBM projektben**

Rendszeresen résztvettünk a GSI-ben a kb 2014-re létrehozandó FAIR gyorsítóberendezésnél tervezett CBM projekt előkészítő megbeszélésein. Ezek alapján az RMKI kutatóiból létrehoztunk egy csoportot, mely bekapcsolódott a

projekt tudományos előkészítő munkáiba. Elsősorban a tervezett igen nagy intenzitások miatt az on-line adatgyűjtéssel kapcsolatos újszerű követelmények elvi és gyakorlati kidolgozásában vesznek részt, valamint a fizikai kísérletek előkészítéséhez szükséges szimulációkban. Bár Magyarország hivatalosan nem tagja a FAIR-nek, remélhető, hogy a csoportnak a CBM vezetése által is elismert munkája megalapozza a FAIR különböző projektjeiben való szélesebbkörű magyar részvételt a későbbiekben.