

# OTKA NK62044

## Tematikus OTKA Pályázat

### Zárójelentés

#### Nehézion ütközésekben nagy transzverzális impulzussal keletkezett töltött hadronok azonosítása és vizsgálata a CERN LHC ALICE kísérletben

- Időtartam: **2006. Március 1 – 2009. Február 28.**
- Kutatóhely: **MTA KFKI RMKI, Részecske és Magfizikai Kutatóintézet  
Elméleti Főosztály**
- Témavezető: **Lévai Péter (MTA KFKI RMKI)**
- Résztevő kutatók: **Barnaföldi Gergely Gábor (MTA KFKI RMKI)  
Boldizsár László (MTA KFKI RMKI)  
Dénes Ervin (MTA KFKI RMKI)  
Doleschall Pál (MTA KFKI RMKI)  
Futó Endre (MTA KFKI RMKI)  
Fodor Zoltán (MTA KFKI RMKI)  
Hernáth Szabolcs (MTA KFKI RMKI)  
Lukács Béla (MTA KFKI RMKI)  
Molnár Levente (MTA KFKI RMKI / CERN)  
Pálla Gabriella (MTA KFKI RMKI)  
Révai János (MTA KFKI RMKI)  
Varga Dezső (ELTE TTK)**
- Résztevő diákok: **Agócs András Gábor (MTA KFKI RMKI / ELTE TTK)  
Hamar Gergő (MTA KFKI RMKI)  
Kovács Levente (MTA KFKI RMKI / ELTE TTK)  
Li Lin Zhu (MTA KFKI RMKI / Wuhan Egyetem)  
Novitzky Norbert (MTA KFKI RMKI)  
Pochybova Sona (MTA KFKI RMKI / ELTE TTK)**
- WEB-oldal: **<http://alice.kfki.hu>**

## Bevezetés

Az OTKA által támogatott kutatási tervünk fő célja az volt, hogy a 2006 – 2009 időtartam alatt aktívan részt vegyünk a CERN LHC gyorsítónál (Nagy Hadronütköztető – Large Hadron Collider) az ALICE együttműködés keretei között folytatott proton-proton és nehézion ütközések fizikáját vizsgáló kísérleti és elméleti fizikai kutatásokban.

Magyarország 1992 óta tagja a CERN kutatóközpontnak. 1996 óta vesz részt magyar csoport az ALICE együttműködésben, ahol ultrarelativisztikus nehézion ütközésekben kívánják a kutatók előállítani és megvizsgálni az anyag olyan nagy energiasűrűségű állapotait, amelyek 14 milliárd évvel ezelőtt a korai Univerzumban léteztek és napjainkban talán csak a nagy tömegű neutroncsillagok belsejében találhatóak meg. Egyik ilyen állapot az úgynevezett kvark-gluon plazma (QGP).

Az ALICE együttműködésben jelenleg 29 ország kutatóintézetéből több mint 1000 kutató dolgozik. **A magyar csoport az MTA KFKI Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézetben működik, jelenleg 23 tagból áll. A csoport nagy része fiatal, 3 fő 40 év alatti post-doc, további 5 fő jelenleg írja PhD dolgozatát és 6 fő az ELTE-n végzi a fizikus MSc. szakot.**

Az ALICE-Budapest csoport fő kutatási tevékenysége a nagy impulzusú részecskék kísérleti detektálásához és azonosításához kapcsolódik. Tagja vagyunk a HMPID (High Momentum Particle Identification Detector) együttműködésnek, amely berendezés töltött pionokat, kaonokat, protonokat és antiprotonokat azonosít a  $p_T < 5$  GeV/c transzverzális impulzus tartományban. Ez a detektor 2007 során az elsők között került installálásra, és 2008-2009 során sikeresen vett részt az ALICE kozmikus tesztekben és a fizikai adatgyűjtésben. Csoportunk másik kísérleti tevékenysége a tervezett VHMPID (Very High Momentum Particle Identification Detector) kifejlesztéséhez kapcsolódik. A detektor célja, hogy kiterjesszük a töltött részecskék azonosításának és szétválogatásának tartományát a  $p_T = 5 - 20$  GeV/c transzverzális impulzus tartományra is.

A kísérleti tevékenység mellett a nagy impulzusú hadronok keletkezésének elméleti vizsgálatával is foglalkozunk. Ezek a hadronok várhatóan nagyon fontos információkat hordoznak a nehézion ütközésben keletkezett nagy energiasűrűségű térrészről, az ott kialakult QGP állapotról. A plazma állapot tulajdonságainak megállapításához elengedhetetlenül szükséges a töltött részecskék tulajdonságainak pontos ismerete, csak úgy mint pontos detektálásuk, szétválogatásuk. Ezért is fontos a VHMPID detektor kifejlesztése és beépítése az ALICE detektor-komplexumba. Ugyanakkor fontos, hogy elméletileg is ismerjük az ütközésben kialakuló részecskék tulajdonságait, a kvark-gluon plazma szignatúrák jellegzetességeit. Kutatási tervünk megvalósítása során ezt az elmélet és kísérlet közötti szoros szinergiát kívántuk megvalósítani.

Az LHC elindulását, a fizikai program végrehajtásának kezdetét eredetileg 2008 őszére tervezték a CERN-ben, s így 2009 elejére már kiértékelt fizikai eredmények megjelenésére számítottunk a proton-proton ütközésekben. Az első nehézion ütközéseket pedig 2009 tavaszára vártuk. Az LHC gyorsító 2008 szeptember elején elindult, a 450 GeV-es proton nyalábok egymással szembe futottak. Az első  $\sqrt{s} = 900$  GeV-es proton-proton ütközések 2008. szeptember 11-én jelentek meg az ALICE ütközési centrumában, s ezzel nagyon közel kerültünk a fizikai program elindulásához. Azonban a fizikailag releváns adatok további gyűjtését 2008. szeptember 19-én megakadályozta a gyorsító

mágneseit hűtő rendszer meghibásodása. A hibák elhárítása több mint egy évet vett igénybe. Végül 2009. november 23-án jöttek létre újra proton-proton ütközések. Ekkorra az LHC gyorsító már megbízhatóan működött. 2009 december elején  $\sqrt{s}=2.36$  TeV-es ütközési energia előállításával a CERN-i berendezés a világ legnagyobb gyorsítójává vált, 2010 elején pedig 50 %-os teljesítménnyel, 7 TeV-es ütközési energián kezdett el működni.

Az LHC elindulásában bekövetkezett eltolódás természetesen módosította az OTKA pályázatunkban eredetileg felvázolt program végrehajtását, de érdemben nem változtatta meg. A beszámolónkból ugyan hiányoznak a tervezett fizikai analízisekről szóló beszámolók, illetve a fizikai analízisek eredményeiből született cikkek (ezek megjelenése 2010-ben várhatóak, az OTKA projektünk lezárása után), azonban az egy éves eltolódás lehetőséget biztosított a VHMPID detektor fejlesztésének felgyorsítására, a VHMPID installálási lépéseinek átdolgozására, csakúgy, mint az elméleti számolások és szimulációk kiterjesztésére. Összességében a kutatási programunk nem változott, a hangsúlyok változtak.

Jelen beszámolónkkal át kívánjuk fogni az eredetileg tervezett 2006. Március 1 – 2009. Február 28 közötti kutatási időszakot. Ezen időszak alatt kutatási tevékenységünk anyagi fedezetét főként az OTKA NK 62044 pályázat adta. Ugyanakkor kiegészítő támogatást nyújtott az OTKA által elfogadott IN71374 nemzetközi kiegészítő pályázat (2007. Január 1 – 2008. December 31), valamint az OTKA és az NKTH által támogatott H07C – 74164 utazási pályázat (2008. Június 1 – 2009. Május 31). A CERN ALICE együttműködésben való részvételünk folytatásának anyagi támogatását az OTKA NK 77816 (2009. Május 1 – 2013. Április 30) pályázat nyújtja.

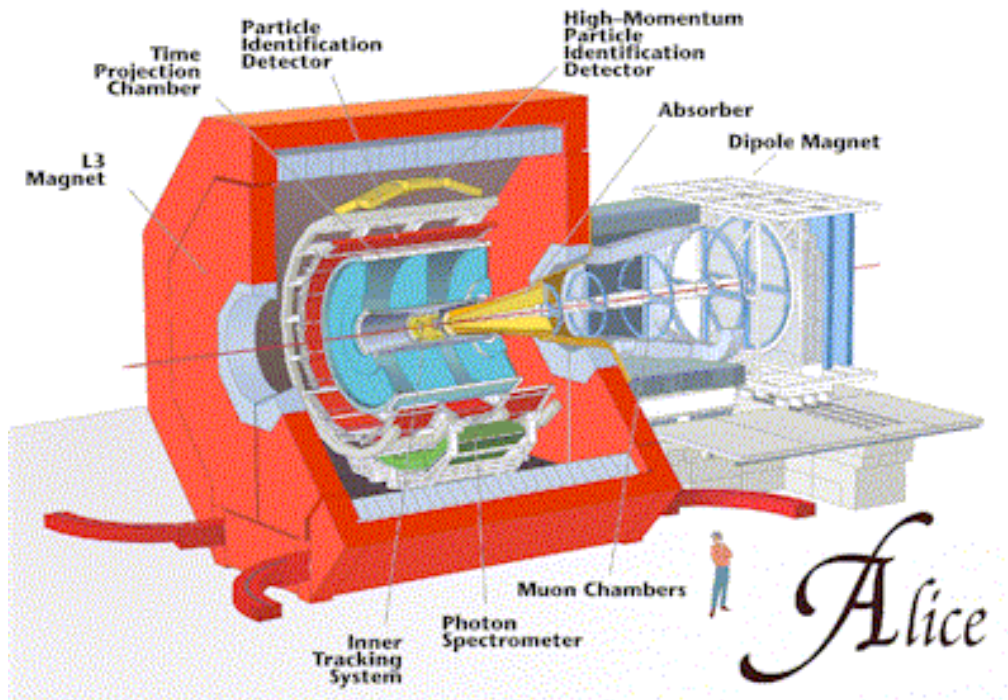
Végeredményként a projekt **három éve alatt 40 tudományos publikációt** jelentettünk meg. Közöttük **24 referált folyóiratban megjelent cikk (összesített impakt faktor: 68) található**, 9 cikk konferencia proceedingekben került publikálásra, 3 konferencia proceedingset szerkesztettünk (melyek megrendezésében aktívan részt vettünk) és 2 további tudományos cikk valamint 2 konferencia poszter született. A cikkek között egyetlen cikk [1] olyan, amelynek nagy számú szerzője van és ALICE kollaborációs cikk. A többi cikk néhány szerzős, a kutatócsoportunk közvetlen munkáján és eredményein alapulnak. Az elmúlt 3 év alatt törekedtünk arra, hogy eredményeink jól követhetően publikálásra kerüljenek, bár a kísérleti fejlesztések esetén ez nagyon nehéz feladat.

A magyar ALICE csoport hivatalos létszáma jelenleg 23 fő, a résztvevők többsége ezen OTKA projektben tevékenykedik, de hosszabb-rövidebb időre, egyes részfeladatok megoldásánál, nem-ALICE-os kollégák is csatlakoztak a projekthez. Külön ki szeretném emelni, hogy a csoport tevékenysége vonzó a fiatalok számára: Agócs András, Hamar Gergő és Novitzky Norbert az MSc diplomamunkáját a csoportban írta. Jelenleg Agócs András, Bencédi Gyula, Hamar Gergő, Kovács Levente és Sona Pochybova PhD hallgatók, dolgozatuk témája szorosan kapcsolódik a csoportunk kutatási tevékenységéhez. Novitzky Norbert külföldön folytatta PhD tanulmányait, Li Lin Zhu kínai vendégdiák pedig a magyar csoporthoz csatlakozott egy időre.

A továbbiakban a legfontosabb munkatervi pontokra lebontva röviden bemutatjuk a pályázatunk 3 esztendeje alatt elért legfontosabb kísérleti és elméleti eredményeinket.

## A, Az ALICE HMPID detektor hardware és software fejlesztése [1, 4, 12, 14, 26, 36] (1.5 FTE)

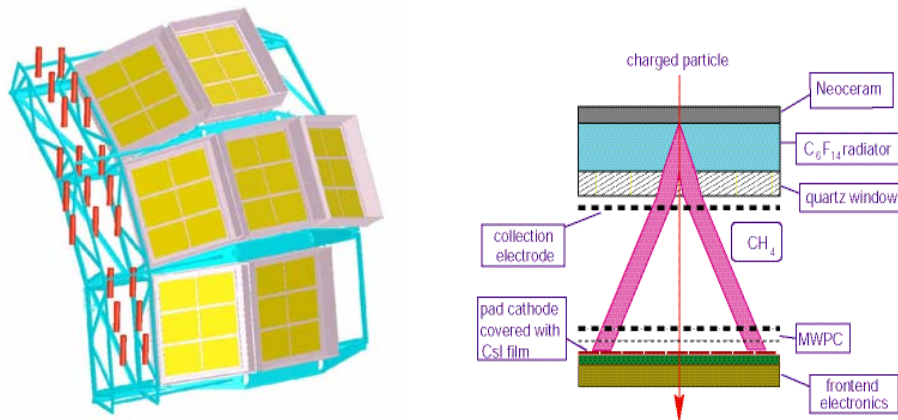
2006-ban az elsődleges célunk az volt, hogy megerősítsük a magyar csoport jelenlétét a CERN LHC ALICE együttműködésben és elindítsuk azokat a kutatási és fejlesztési témákat, amelyeket az OTKA pályázatunkban korábban felvázoltunk. Egyik fő kutatási és fejlesztési tevékenységünk az ALICE detektor-komplexum HMPID ("High Momentum Particle Identification Detector") egységének végső beüzemeléséhez, az ALICE-ban való installálásához, és a közvetlen mérések elindításához kapcsolódott.



1. Ábra: A HMPID detektor az ALICE detektor-komplexum felső részében, a TPC kamra és az L3 mágnes között található (az ábrán sárgára színezve) és a központi rapiditás mintegy 5 %-át fedi le.

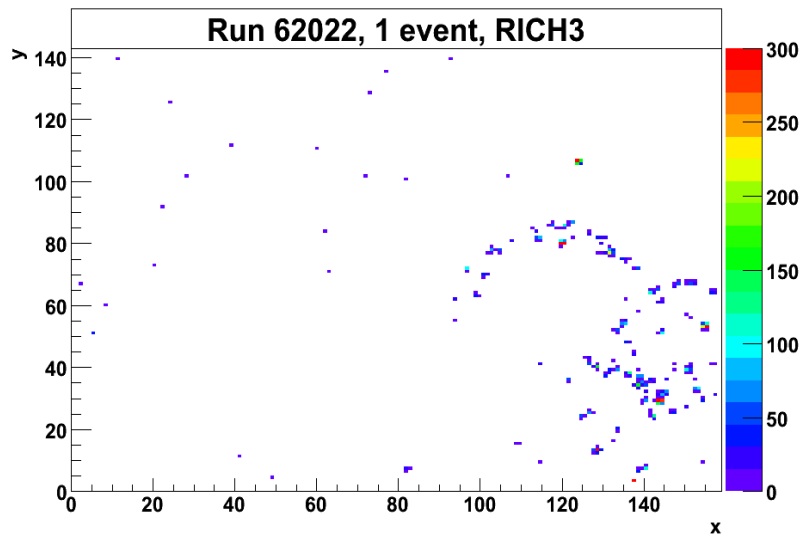
A HMPID detektor feladata az ALICE detektor részecske azonosítási képességének kiterjesztése, a töltött hadronok (pionok, kaonok, protonok és antiprotonok) azonosítása és szétválogatása minden egyes ütközésben az 5 GeV/c impulzusig bezárólag [1]. Ezt a feladatot a Cherenkov sugárzás tulajdonságainak felhasználásával végzi el a detektor: a radiátor anyaga a nagy törésmutatójú folyékony állapotú freon-származék, a  $C_6F_{14}$  (perfluorohexán), amelyben ultraibolya fotonokat keltenek a nagy impulzusú töltött hadronok. A néhány cm vastag folyadékban keletkezett Cherenkov-gyűrű sugara függ a töltött részecske sebességétől. Miután a TPC detektor és a mágneses tér segítségével meghatározhattuk a részecske impulzusát, ezért a gyűrű sugarának megméréssel meg

tudjuk határozni a nagy impulzusú részecske tömegét is, s így el tudjuk dönteni, hogy milyen típusú [4].

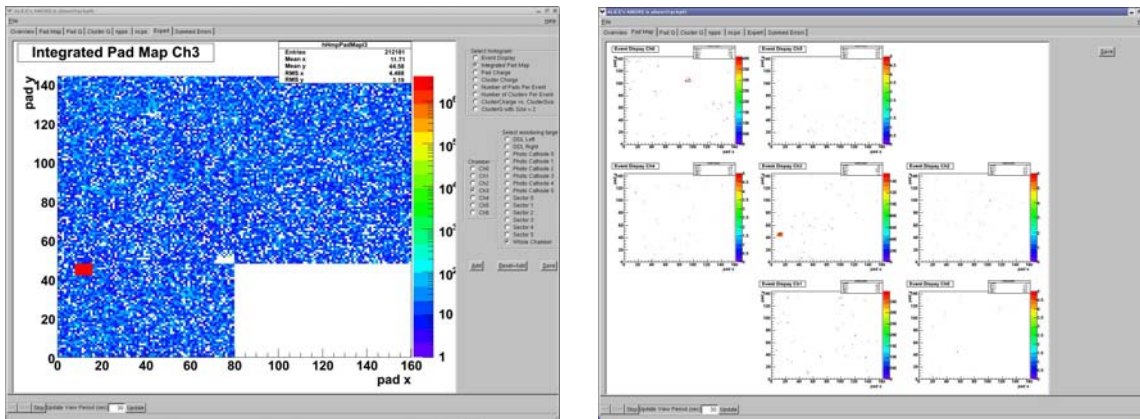


2. ábra: A HMPID detektor 7 modulja, összesen  $12 \text{ m}^2$  (bal oldali ábra). A  $\text{C}_6\text{F}_{14}$  radiátor anyagban a nagy sebességű töltött részecske által létrehozott Cherenkov gyűrű és annak detektálása (jobb oldali ábra).

2006 nyarán részt vettünk a HMPID föld felszíni végső összeszerelési munkálataiban, így a detektor gázrendszerének tesztelésében, a kiolvasó elektronika tesztelésében és beszerelésében, valamint a detektor végső helyére történő beszerelésében. A HMPID föld alatti installálására 2006 szeptemberében került sor. Bekapcsolódtunk a HMPID rekonstrukciós szoftverének fejlesztésébe. A 2007 elején kozmikus sugárzással elvégzett tesztek eredményeinek kiértékelése közben kiderült, hogy a részecske azonosító szoftver további fejlesztést igényel. Egy kollégánk teljes munkaidőben ezen a kérdéskörön dolgozott az olasz kollégákkal együttműködve. Az elkészített szoftvert a 3. és 4. ábrák illusztrálják.



3. ábra: Kozmikus eredetű nagy energiás töltött részecskék nyomai a HMPID detektorban. Jól láthatóak az ultrabolya fotonok által létrehozott Cherenkov-körök.

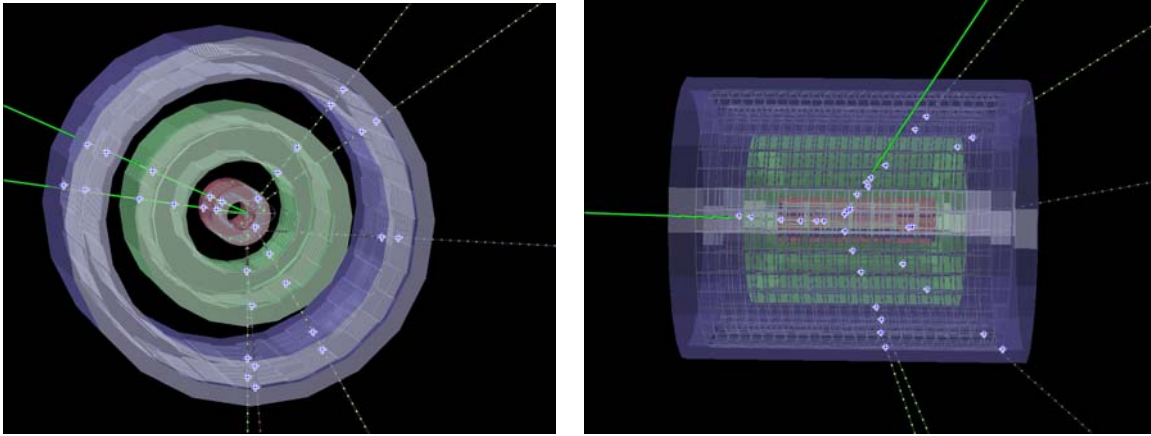


4. ábra: A HMPID detektor minőség ellenőrző szoftverének (data quality monitoring) számítógépes felülete a HMPID 7 db moduljával. Ezt a szoftvert használtuk a 2008-as adatgyűjtés során (és azóta is), akkor kozmikus részecskéket használva forrásul.

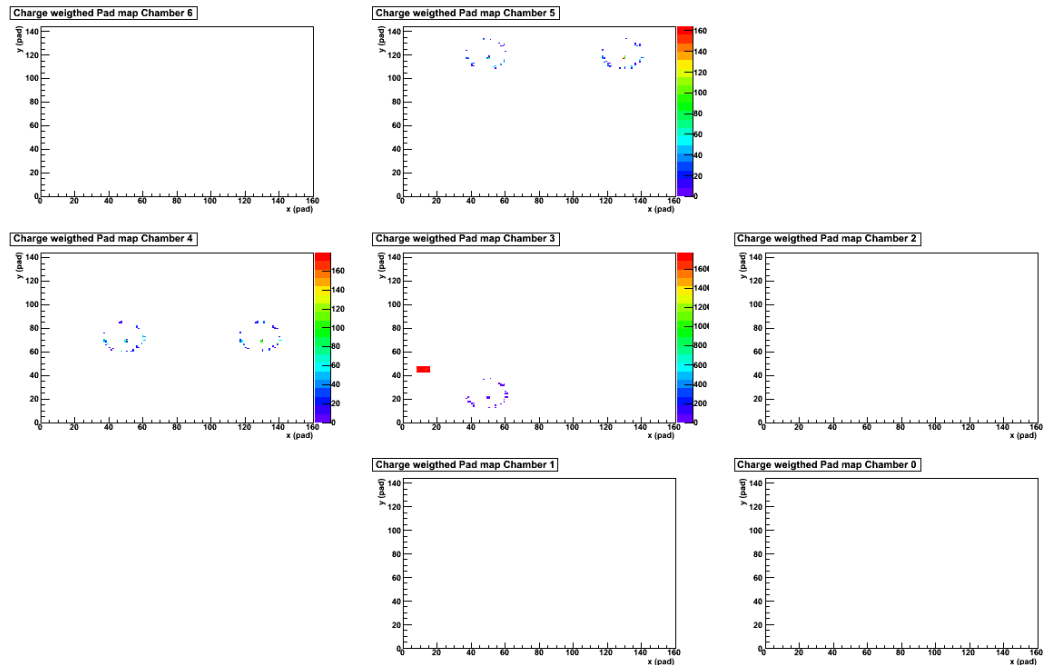
A HMPID detektor 2006 szeptemberében került beállításra az ALICE detektor keretén. Csoportunk részt vett a beállítás előtti fázisban a kiolvasó kártyák installálásában, ellenőrzésében, majd a beállítás utáni tesztelésükben. Csoportunk egyik tagja (Molnár L.) HMPID koordinátorként tevékenykedett az adatgyűjtésre való felkészülés során valamint a kozmikus részecskéket használó teszt-időszakokban is, amelyek 2007 decemberben, 2008 márciusban és 2008 júniusban zajlottak [12, 14]. Miután a HMPID metán gázt is használ, ezért csoportunk 3 tagja speciális tréningen vett részt és a továbbiakban SLIMOS-ként (“Shift Leader in Matters of Safety”) is tevékenykedhettek az ALICE detektornál. Csoportunk tagjai bekapcsolódtak a HMPID detektor adatainak off-line analízisét előkészítő program-fejlesztő tevékenységbe is, különös tekintettel a elsődleges adatanalízisre, az adattovábbítás és adatkezelés minőségbiztosítására. Ezek a tevékenységek a projekt teljes ideje alatt és még azután is folytak.

Az első proton nyalábok 2008 szeptember 10-én érkeztek meg az ALICE detektorhoz. Az 5. ábra mutatja az egyik első proton-proton ütközéses eseményt, amit az ALICE detektor rögzített. Csoportunk 3 tagja vett részt a kísérletekben azokban a napokban, főként a HMPID adatgyűjtéshez, az adatgyűjtés minőségbiztosításához járultak hozzá. Illetve Molnár L. továbbra is HMPID Run Koordinátor-ként tevékenykedett.

A jól indult proton-proton ütközéses kísérletek a mágneses rendszer szeptember 11-én történt meghibásodása következtében leálltak, az LHC megjavítása, újraindítása több mint egy évet vett igénybe, és végül 2009. novemberében indultak újra a proton-proton kísérletek. OTKA projektünk 2009. februárban lezárult, de természetesen mi továbbra is részt vettünk a HMPID felügyeletében, az adatkezelő szoftverek továbbfejlesztésében, a 2009-ben végrehajtott tesztek lebonyolításában. Ennek eredményeként a HMPID detektor működőképes maradt és a 2009 év végi mérésekbe gond nélkül be tudott kapcsolódni.



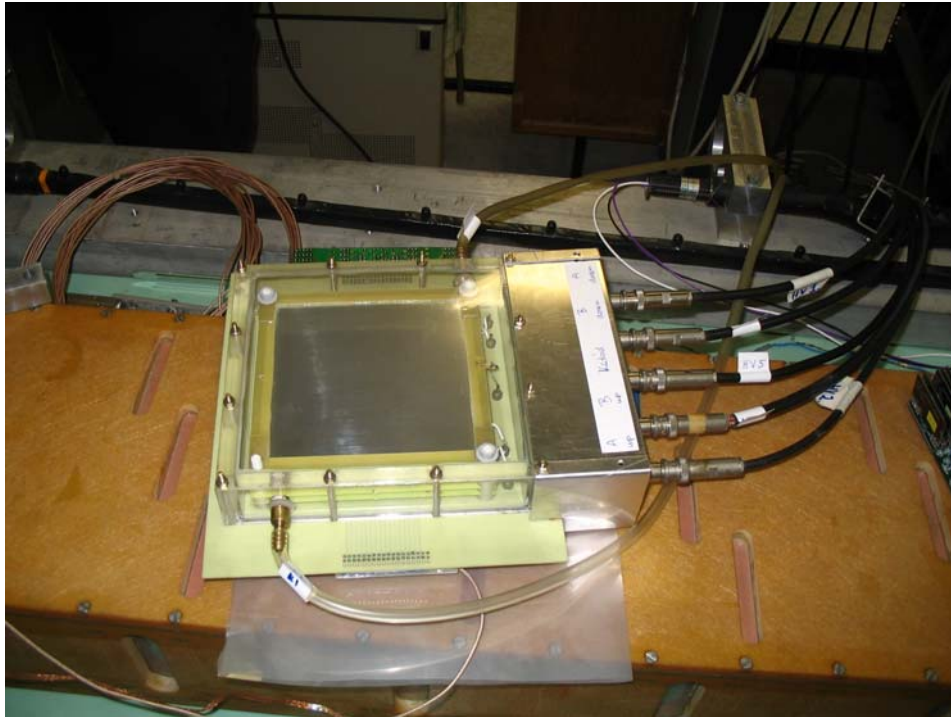
5. ábra: Az egyik első proton-proton ütközés az ALICE detektorban  $\sqrt{s}=900$  GeV energián. A bal oldalon előlről, a jobb oldalon oldalról láthatjuk a detektorok számítógépes illusztrálását, valamint az újonnan keletkezett töltött részecskék pályájának rekonstrukcióját. Az ITS, TPC és TOF aldetektorokat eltérő színezés jelzi.



6. ábra: Nagy impulzusú töltött részecskék (valószínűleg pionok) nyomai a HMPID detektor moduljaiban, ahogy azt az egyik első proton-proton ütközésnél láthattuk.

## 2. A VHMPID (Very High Momentum Particle Identification Detector) fejlesztése [6, 12, 13, 17, 18, 26, 36]

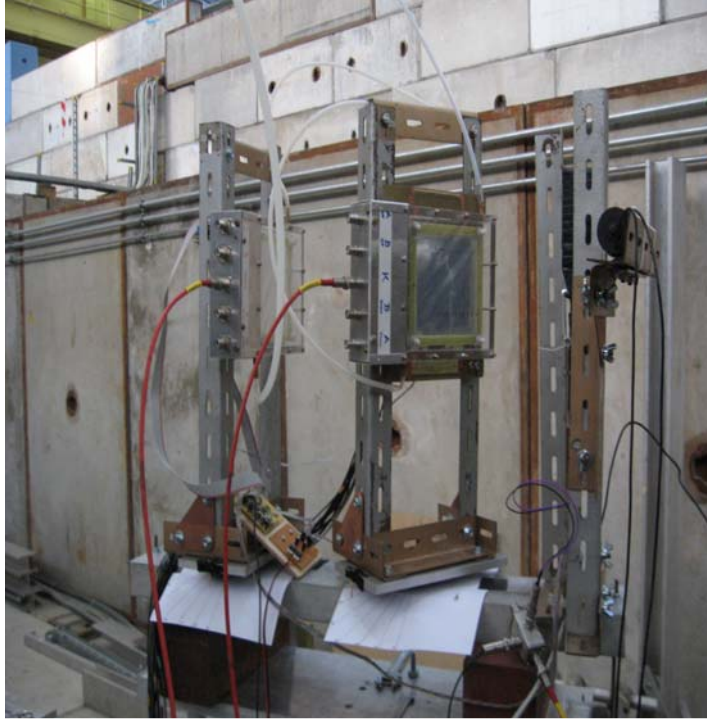
Az OTKA projekt anyagi támogatásának köszönhetően 2006 elején elkezdhattuk aktív részvételünket a VHMPID detektor kifejlesztésében, amely során az OTKA projekt 3 éve alatt olasz, mexikói, orosz és amerikai kollégákkal működtünk együtt. A VHMPID a közeljövőben az ALICE egyik újonnan beépített, továbbfejlesztett aldetektora lesz, amely két, jól elkülönülő részből tevődik össze: egyrészt egy nagyon gyors válaszidejű trigger-egységből, amely azt dönti el, hogy az adott esemény során áthaladt-e 5 – 20 GeV/c impulzusú töltött részecske a detektoron; másrészt egy a TIC-alapú ("Threshold Imaging Cherenkov") gáz-detektor egységből, amellyel a nagy energiájú töltött részecske által keltett Cserenkov sugárzást fogjuk fel, és amellyel eldöntjük, hogy pion, kaon, proton vagy antiproton volt a látott nagy impulzusú részecske. Az RMKI-ban beindítottunk egy mérő laboratóriumot, amelyet alkalmassá tettünk gáz-detektorok bemérésére. Beszereztünk vékony és vastag GEM-lapokat ("Gas Electron Multiplier"), és megépítettünk egy kisméretű, tesztelésre alkalmas GEM-alapú detektort.



7. ábra: 10x10 cm<sup>2</sup>-es GEM lapokból összeállított triggerdetektor prototípus az RMKI detektor laboratóriumában összeállítva

Az RMKI-ban radioaktív mintával (alfa- és beta-sugárforrásokkal) teszteltük a megépített egységet, elkészítettük a szükséges előerősítőket és kiolvasó rendszert. Ezek a vizsgálatok egyrészt a trigger-egység kifejlesztését készítették elő, másrészt a TIC egységénél is GEM-detektorok felhasználása tűnik a legegyszerűbb megoldásnak a részecskék azonosításánál. Az összeállított berendezést 2006 novemberében a CERN-ben, 6 GeV-es töltött pion-nyalámban teszteltük.





8. ábra: A CERN-ben összeállított mérés a PS gyorsító nyalábcarnokában.

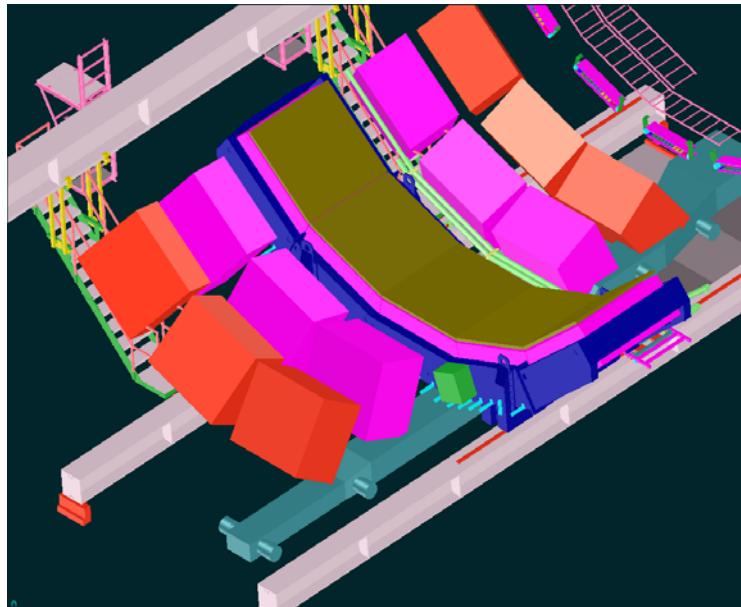
A GEM-detektor tulajdonságait, működési paramétereit a CERN-ben kimértük, ezek feldolgozása 2007 során megtörtént. A teszt során nyert tapasztalatok alapján továbbfejlesztettük a kiolvasó elektronikát és többek között sikerült csökkentenünk az előerősítők zajszintjét. Felkészültünk új típusú ReTGEM-lapok ("Resistive-TGEM") itthoni bemérésére. A teszteket 2007 nyarán végeztük el a CERN-ben, az eredményeket lepublikáltuk [17,18] Az újratervezett triggerregységgel 2008 májusában újabb tesztméréseket végeztünk a CERN-ben a PS gyorsítónál előállított 6 GeV-es töltött pionnyalámban.

Ezen fejlesztések és mérések eredményeképp kialakult egy konkrét terv a VHMPID megvalósításáról, egyrészt a trigger elektronika kialakításáról (9. ábra), másrészt a trigger egység és a gáz egység egymáshoz képest történő geometriai elrendezéséről (lásd 10. ábra). A trigger egység megvalósítása során alapvető fontosságú, hogy a berendezés képes legyen 1.2 mikromásodpercen belül un. L0-szintű trigger adni, azaz jelezni, hogy a VHMPID detektor acceptanciájába egy közepes impulzus értéknel nagyobb impulzusú részecske ( $p > 3 - 4 \text{ GeV}/c$ ) érkezett. Másrészt L1-szinten, azaz 6.5 mikromásodpercen belül meg kell tudnunk mondani, hogy a beérkezett részecske impulzusa meghaladja-e az általunk igazán érdekesnek vélt 9 GeV/c határimpulzust, mert  $\text{C}_4\text{F}_{10}$  töltés esetén előlött az érték fölött tudjuk a kaont és a point elkülöníteni Cherenkov sugárzásuk alapján. A tervezett berendezés elméletileg, az elektronikai alkatrészek és a geometriai elrendezés alapján képes ezeket az időparamétereket nyújtani, azonban a projekt során az elektronikai egység gyakorlati megvalósítása jelentős erőfeszítésbe került.



A projektünk harmadik évében a nagyméretű detektorok megvalósíthatóságát vizsgáltuk. Kiderült, hogy a GEM-alapú detektorok kis méretben kiválóan megfelelnek a VHMPID céljaira, a méret növelésével azonban technikai problémák lépnek föl (hőtermelés elvezetése, vezetékek elhelyezése, holt területek megnövekedése). Ez a probléma már az  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ -es méret esetén is jelentkezik, a VHMPID detektor  $1.3 \times 1.3 \text{ m}^2$ -esre tervezett elemeinél pedig hatványozottan. Ezért a projektünk utolsó hónapjaiban párhuzamosan egy új detektor típussal, a közel-katódos gáزدetektorokkal (CCC: Close Cathode Chamber) kezdtünk el kísérletezni. Ez a kutató-fejlesztő tevékenység lett az alapja egy NKTH-OTKA K+F projektnek, amely 2009-ben támogatást kapott (CK 77815 projekt) és nagy aktivitással el is indult. A résztvevő kollégák a GEM-ek és a CCC-k gyakorlati alkalmazását, felhasználhatóságát keresik, ide sorolva a VHMPID detektort is.

2008-ban született egy terv a VHMPID elhelyezkedése az ALICE detektor-rendszeren belül, ezt mutatja a 11. ábra. A CERN-beli mérnökök a közepén elhelyezkedő PHOS detektor két oldalára tervezték a 12 db modulból álló VHMPID detektort.

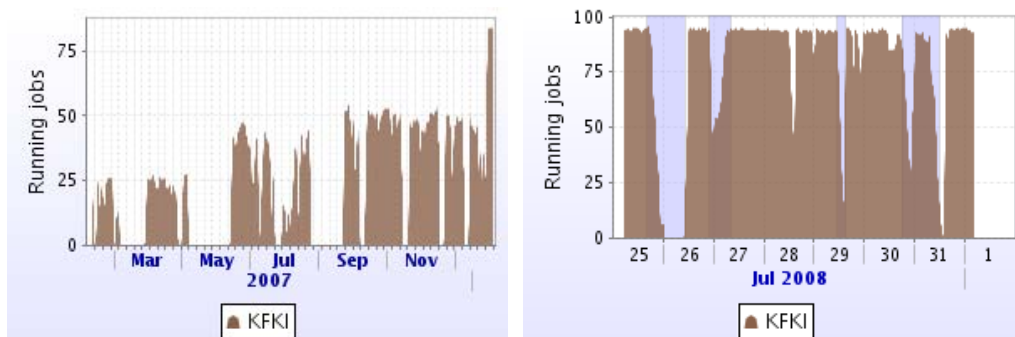


11. ábra: A VHMPID moduljainak (3-3 piros és 3-3 rózsaszín doboz) elhelyezkedése a PHOS detektor két oldalán, az ALICE detektor komplexum alsó részében, a TPC-n kívül.

A kísérleti fejlesztések, a trigger detektor megvalósíthatóságának tanulmányozása szorosan összekapcsolódott a nagy impulzusú részecskék keletkezésének elméleti vizsgálatával, a várható részecske hozamok, kettős beütések konkrét, detektor specifikus vizsgálatával [6, 13]. A kísérleti munkát nagyban segítette a 2007-ben Jyväskyläban, 2008-ban Tokajban, 2009-ben Prágában megrendezett High-pT Physics at LHC workshop-sorozat [12, 26, 36], az ott elhangzott előadások és lefolytatott szakmai diskussziók. Az OTKA projekt anyagi támogatásának köszönhetően a magyar csoport sok fiatal tagja tudott részt venni ezeken a workshopokon.

### 3. A Tier-2 szintű RMKI ALICE GRID-központ fejlesztése és számítógépes szimulációs tevékenységünk

Mind a HMPID detektor off-line adatkiértékelése, mind a VHMPID tervezési, méretezési munkálatai kiterjedt szimulációs tevékenységet követelnek meg, amelyet CERN kompatibilis környezetben kell elvégeznünk. Ezért 2006-ban az RMKI GRID egységében létrehoztuk a 18 PC-ből álló ALICE VO-t, amely lehetővé tette, hogy az ALIROOT, ALIEN és GEANT környezetekben végezzük el a szimulációs számításokat. (A 18 db 3 GHz CPU és 2 GB RAM-mal rendelkező PC-ből 6-ot az OTKA pályázatunkból, 12-t NKTH pályázatból szereztünk be.) A GRID egységünk a saját számolásaink elvégzésén kívül aktív része volt az akkor 2100 CPU-ból álló ALICE GRID egységnek. A szimulációs feladatok közül 2006-ban főként a nagy energiájú trigger berendezés méretezéséhez kapcsolódó számolásokra koncentráltunk. Elsőként építettünk be TGEM lapokat az ALIROOT szimulációs rendszerébe. Elkészítettük a VHMPID triggerdetektorának ALIROOT kompatibilis szimulációs modelljét, mellyel optimalizálni tudjuk a berendezés végleges szerkezeti felépítését, meghatározhatjuk a detektor működésének paramétereit. Emellett elkezdtük a VHMPID gáz egységében keletkező Cserenkov sugárzás detektálásához kapcsolódó szimulációkat is.



12. ábra: Az ALICE együttműködés WEB-ről elérhető MONALISA GRID-erőforrás követő rendszerének ábrái, amelyek a KFKI RMKI-ban található ALICE GRID egység aktivitását mutatja 2007-ben és 2008 közepén.

2007 folyamán 55 CPU-ra fejlesztettük az ALICE GRID RMKI-beli egységét, majd sikerült további 12 db 4-magos CPU-egységet installálnunk. Így 2007 végére 103 CPU-ból állt az ALICE GRID egységünk. 2008 közepére az ALICE GRID egység tárterületét 40 TB-ra sikerült fejlesztenünk, amellyel szintén tartani tudtuk a vállalt kötelezettségeinket. A CPU-kat és hard diszkeket külső támogatással (MTA, NKTH) szereztük be, az OTKA-ból biztosítottuk a CPU-nkénti 2 GB RAM memóriát (amely az ALICE GRID egyik alapkövetelménye), valamint a menetközben tönkremenő egységek pótlását. A teljes ALICE GRID 2008-ban kb. 12000 CPU-ból állt, a felvállalt 1 %-os részesedésünket tartani tudtuk.

## **4. Nagy impulzusú hadronok keletkezésének elméleti vizsgálata pp és PbPb ütközésekben [2, 3, 5, 7-12, 15, 16, 19-36, 38-40]**

A HMPID detektor a  $p_T < 4-5$  GeV/c, a VHMPID detektor a  $3$  GeV/c  $< p_T < 15$  GeV/c impulzus ablakban végzi a töltött részecskék szétválasztását. Míg a HMPID működési tartományában hidrodinamikai modellek alapján nagy pontossággal megjósolhatóak a részecske keletkezési hozamok, addig a VHMPID detektor abba az érdekes tartományba nyúlik bele, ahol hidrodinamikai, kvark-koaleszcencia és perturbatív QCD-n alapuló fragmentációs modellek együttes alkalmazására van szükség. Ezeket az elméleti számolásokat, az elméleti modellek továbbfejlesztését Budapesten végezzük a VHMPID együttműködés számára, ebből a tevékenységből születtek elméleti publikációink egy része. További elméleti eredményeket kaptunk a nagy impulzusú hadronok keletkezésének újszerű vizsgálata során. De folytattuk a már budapesti hagyománynak tekinthető kvark-koaleszcenciás vizsgálatokat is. A továbbiakban az elméleti eredményeinket alcsoportokba rendezve ismertetjük.

### **4.1 Hadron produkció és korreláció proton-proton ütközésekben [5, 7, 9, 29, 32, 33, 39]**

A nehézion ütközésben keletkező kvark-gluon plazma tulajdonságainak megértéséhez nagyon pontosan kell ismernünk a proton-proton ütközések eredményét, az ott zajló részecske keltő mechanizmusokat, mert csak így tudjuk beazonosítani azokat a kollektív jelenségeket, amelyek a nehézion ütközésekre, a QGP állapot megjelenésére lesznek jellemzőek. Ezért vizsgáljuk részletesen és minél nagyobb pontossággal a proton-proton ütközéseket. Továbbá a gyorsító éves üzemidejéből 10 hónapig proton-proton ütközésből gyűjthetünk adatokat, s csak 1 hónap lesz nehézion. Ezért célszerű is a proton-proton ütközések vizsgálata. Miután nagy lesz a luminozítás és várhatóan óriási mennyiségű adat szalagra rögzítése történik meg, ezért nagyon ritkán előforduló események is jó statisztikával vizsgálhatóvá válnak, mint például a nagyon nagy hadron multiplicitást eredményező ütközéseké.

Az elmúlt három év alatt elméletileg megvizsgáltuk a proton-proton ütközésben keletkező nagy impulzusú hadronok spektrumát, megállapításokat tettünk a di-hadron korrelációkra [5, 7] és a proton/pion arányokra a jet-kúpszögeken belül [9, 29]. PYTHIA szimulációk segítségével megvizsgáltuk a nagy multiplicitású pp ütközésekben a jet-kúpszögekbe eső részecske keltést és az azon kívüli részecske produkciót (ezt nevezzük "underlying event"-nek, annak multiplicitás függését [32,33]. Ritkán, de előfordul 3-jet keletkezés, s ezen események tanulmányozásán keresztül közelebb kerülhetünk a kvark és gluon jetek kísérleti megkülönböztetéséhez, amely egy nagyon nehéz feladat [39]. Ezeket az eredményeket jórészt perturbatív QCD alkalmazásával, illetve a PYTHIA és a HERWIG ütközést szimuláló kódok segítségével kaptuk.

#### **4.2 A kezdeti állapotok tulajdonságai (pA, dA), hatásuk a nehézion ütközésekre [3, 10, 15, 16, 22, 24, 25, 28, 31]**

A proton-proton ütközésektől a nehézion-nehézion ütközések tanulmányozásához egy közbenső lépés vezet: a proton-atommag és a könnyűion-nehézion ütközések részletes vizsgálata. Így közelebb kerülhetünk azon állapotok megértéséhez, amelyek a nehézion ütközések kezdeti pillanatában uralkodnak, s akkor pontosabb képet kapunk a kollektív állapotok (vagy az annak vélt állapotok) kialakulásáról, tulajdonságairól. Ezért vizsgáljuk intenzíven az un. kezdeti állapotokat, a partonok eloszlás függvények atommagokban történő megváltozásának következményeit. Ezen vizsgálatok elvégzéséhez kiváló lehetőséget biztosítanak a RHIC gyorsítóban elvégzett deuterium-arany ütközések eredményei.

Megvizsgáltuk a nagy részimpulzussal rendelkező partonokra érvényes eloszlás-függvények módosulásából (EMC-effektus) eredő változásokat [3], a dAu ütközésekben keletkező pionok spektrumából kiolvastuk az árnyékolás és a többszörös parton szórási hatását [15, 22, 28], és megvizsgáltuk a könnyűion-nehézion ütközéseket is [16, 31]. A kapott eredményeket beépítettük pQCD alapú modelljeinkbe és számolások segítségével megbecsültük az említett effektusok, hatások nagyságát LHC energián [10, 24, 25].

Ezekkel az eredményekkel felvértezve nagy pontosságú számolásokat tudunk nehézion ütközésekre végezni, méghozzá széles energiatartományban, ideértve az LHC által elérhető maximális 5.5 ATeV nehézion ütközési energiát is.

#### **4.3 A végállapotú kölcsönhatások vizsgálata nehézion ütközésekben [2, 11, 23, 35]**

A széles körben elfogadott nézet szerint a nehézion ütközésekben keletkező nagy energiájú kvarkok és gluonok a forrásai a nagy energiás hadronoknak ( $p > 10$  GeV/c), a hadronok ezen kvarkok és gluonok fragmentációja során keletkeznek. Ha nehézion ütközésben forró, sűrű, sok színes részecskét (kvarkot és gluont) tartalmazó plazma állapotot hozunk létre, akkor az azon keresztül haladó nagy energiás kvarkok és gluonok indukált gluon sugárzást szenvednek el, és jelentős mértékben elveszítik az energiájukat. Ez nevezzük "jet-quenching"-nek. Az energia persze megvan, a kisugárzott gluonok növelik az alacsony energiájú hadronok számát. A jet-quenching effektus kvalitatív vizsgálatával megállapíthatjuk a nehézion ütközésben keletkező forró anyag tulajdonságait, sőt jet-tomográfiát is tudunk végezni, a geometriáról, a töltéseloszlásról is kaphatunk információt. RHIC energián nagyon erősen jelentkezett ez az effektus, és azt várjuk, hogy LHC energián is markánsan fellép. Ezért részletesen vizsgáltuk ezt a végállapotú kölcsönhatást a RHIC adatok alapján.

Megvizsgáltuk a jet-quenching hatását a nehézion ütközésben mérhető kaon/pion arányra RHIC energián [2], elemeztük a nagy longitudinális részecskékre gyakorolt hatását [11] és az effektus ütközési energiától való függését [23]. A vizsgálatok eredményeit beépítettük pQCD kódunkba, ennek eredményeként rendelkezünk egy nagyon megbízható, többszörösen leellenőrzött programmal, amely LHC energián megbízható jóslatokat ad a nehézion ütközésekben várható hadron spektrumokra. Egy ilyen program nagyon fontos, mind a kísérleti szimulációk, mind az elméleti vizsgálatok szempontjából.

A pQCD vizsgálatokkal párhuzamosan megvizsgáltuk az erősen kölcsönható, közel-termális végállapotokat leíró módszerek alkalmazhatóságát a nehézion ütközésekben mért hadron-spektrumokra. A Tsallis-eloszlás alkalmazásával végrehajtott elemzésünk [35] azt mutatta, hogy a kapott eredmények, a meghatározott paraméterek szisztematikus energiatartományon függenek – főként az alacsonyabb SPS energiákon. A RHIC eredmények esetében a meghatározandó paraméterek már nehezen voltak lokalizálhatóak. Érdekes kérdés, hogy ha megjelennek az LHC eredmények, akkor azok mit fognak mutatni – tervezzük az elemzés megismétlését.

#### **4.4 Hadron termelés kvark koaleszcenciával** [ 19, 20, 21, 27, 34]

A közepes impulzusú részecskék hozamának meghatározásakor, a termikus és a pQCD által leírt fragmentációs folyamatok határán belép még egy csatorna: a nagy számban jelenlévő alacsonyabb impulzusú kvarkok koaleszcenciája magasabb impulzusú hadronok keletkezéséhez vezet, ezzel a közepes impulzusú ( $2 < p < 6-8$  GeV/c) hadronokra vonatkozó kísérleti eredmények megértése eléggé komplex feladattá válik. Ezzel a területtel, a kvark-koaleszcenciás folyamatok vizsgálatával is foglalkoztunk, különös tekintettel a véges szélességgel rendelkező hadron-rezonanciák keletkezésének a jobb megértését megcélózva. Ez a kérdés mind a HMPID, mind a VHMPID detektor mérései szempontjából kiemelt fontosságú, ezért is foglalkoztunk vele elméletileg.

Egyrészt megvizsgáltuk a ritkaság kvantumszámmal rendelkező hadron-rezonanciák keletkezésének leírását. Továbbfejlesztettük a korábban on-shell hadronokra kifejlesztett koaleszcencia számításokat [19, 20] és a nagy számú kísérleti adat segítségével finomítottuk a modellünket, hogy reprodukálni tudjuk a mért ritka részecske hozamokat [21,27]. A sikeres továbbfejlesztés után a nehezebb bájos kvarkokat tartalmazó bájos mezonokat és barionokat, azok keletkezését kezdtük vizsgálni és meghatároztuk a különböző rezonanciák hozamát [34]. A bájos részecskék szélességei, azok anyagban történő esetleges megváltozása külön érdekessé teszi ezeket a vizsgálatokat. Amennyiben az LHC energián sikerül nagy számban detektálni ezeket a nehéz hadronokat, akkor korábbi eredményeink további vizsgálatok alapjául szolgálhatnak.

#### **4.5 Részecskekeletkezés időfüggő intenzív terekben** [30, 38, 40]

A perturbatív-QCD fragmentációs függvényeinek, a kvark-koaleszcenciás folyamatok, a közel-termikus eloszlások alkalmazásán alapuló modelleken túl foglalkoztunk egyéb részecske keletkezési mechanizmusok vizsgálatával is. Ilyen például az időfüggő intenzív terekben fellépő, a Schwinger-mechanizmushoz közel álló folyamat, amely során nem-perturbatív leírás alkalmazásával juthatunk el az újonnan keletkezett részecskék (ebben az esetben kvark-antikvark párok) eloszlásának meghatározásához. Mivel feltételezhetjük, hogy a nehézion ütközések kezdeti pillanatában olyan erős chromo-elektromos és chromo-mágneses terek jönnek létre, hogy az intenzív térből fermion-antifermion illetve bozon-párok keletkeznek, ezért van létjogosultsága ezen módszer vizsgálatának. Ezért egy kinetikus párkeltési modellben megvizsgáltuk, hogy az erős terek intenzitásának időbeli változása miként befolyásolja a keletkezett részecskék eloszlását. A vizsgálatot

korábban elvégeztük erős ábeli terekre, most megismételtük a számolásainkat SU(2) nem-ábeli tér kialakulása esetén is [30]. Azt az eredményt kaptuk mindkét esetben, hogy realisztikus időfejlődést feltételezve polinomiális transzverzális impulzus spektrum alakul ki a fermionokra, illetve a bozonokra. Ez azért érdekes, mert így nehéz elkülöníteni a pQCD által leírt jet-fragmentációs folyamatokban és a párkeltési folyamatokban keletkező részecskéket, azaz elképzelhető, hogy nagyon magas impulzusnál ez a két folyamat egymással felcserélhető. Megkezdjük az SU(3) terek vizsgálatát is, amely még realisztikusabb a kvarkok és a gluonok keletkezése szempontjából. Ugyanakkor megvizsgáltuk a könnyű és ritka kvark-antikvarkok keletkezését, majd a jóval nehezebb bájos (charm) és a nagyon nehéz bottom kvark-antikvark pár keletkezését. Azt a meglepő eredményt kaptuk, hogy az erős terek kialakulásához rendelhető karakterisztikus idő csökkenése (ez az ütközési energia növekedésével köthető össze) elmossa a kvarkok tömege közötti különbséget és előfordulhat, hogy a maximális LHC energián az újonnan keletkezett nehéz kvarkok száma már nem lesz elnyomva a sokkal könnyebb könnyű és ritka kvarkok számához képest [38, 40]. Azaz a nehéz kvarkok keletkezésének vizsgálatával információt kaphatunk a nehézion ütközés nagyon korai szakaszának (pillanatának) időbeli lefolyásáról.

A felsorolt elméleti eredmények önmagukban is érdekesek. Azonban igazán érdekessé az LHC nehézion programjának elindulása után, az első kísérleti adatok megjelenése után válnak majd.

## 5. Nemzetközi kapcsolatok

Mint a nemzetközi ALICE együttműködés tagja, csoportunk tagjai folyamatosan kapcsolatot tartanak az ALICE más csoportjainak tagjaival. Kiemelkednek az olasz, mexikói, CERN-beli és USA-beli kapcsolataink, amelyek a HMPID és a tervezett VHMPID detektor kapcsán egyébként is nagyon szorosak, napi szintűek. Finn és CERN-es kollégákkal együtt 2007. márciusban Jyvaskylaban (Finnország) megrendeztük a "2nd International Workshop on High-pT physics at LHC" nemzetközi workshopot [12], majd annak sikerén felbuzdulva 2008 márciusában Tokajban [26], majd 2009 februárban Prágában [36] folytattuk a nagy impulzusú részecskékre és azok detektálására fókuszált tanácskozást (a következő Mexico Cityben kerül megrendezésre 2010-ben). A csoport tagjainak részére a workshopokon való részvételt az OTKA támogatás tette lehetővé. 2007 májusában az olasz kollégákkal együtt egy VHMPID-miniszimpoziumot rendeztünk Budapesten. Az évek során eredményeinkről előadásokat tartottunk a CERN-ben megrendezett ALICE-heteken, a különböző európai helyeken megrendezett (Münster, Utrecht, Prága) ALICE Physics Week-en. Továbbá a csoport tagjai beszámolhattak eredményeikről a Lőcsén (Szlovákia) megrendezett Strange Quark Matter 2007 konferencián, valamint a Quark Matter 2008 konferencián (Jaipur, India, 2008 Febr.), ahol poszttereken foglaltuk össze a HMPID és a VHMPID detektornál elért eredményeinket [6,14].



A beszámolóban összefoglalt eredményeket értük el a kutatás három éve alatt, amelyre az OTKA hathatós anyagi támogatása nélkül nem lett volna lehetőségünk.

2009 őszén sikeresen elindult a CERN LHC, várhatóan 2010 őszén az első nehézion ütközések is létrejönnek és az ALICE detektor mellett dolgozó kutatócsoportok – köztük a magyar csoport – elkezdhetik a kvark-gluon plazma tulajdonságainak kísérleti vizsgálatát. A mellékelt beszámolóval szeretnénk volna alátámasztani, hogy az MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet Elméleti és Részecskefizikai Főosztályán tevékenykedő kutatókból és az ELTE TTK-n, valamint annak Doktori Iskoláján tanuló diákokból álló csapat rendelkezik mind a szükséges elméleti háttérrel, mind a megkövetelt kísérleti felkészültséggel, hogy a továbbiakban is sikeresen vegyen részt a CERN LHC mellett folyó nemzetközi kutatási programban. Természetesen az OTKA anyagi támogatása nélkül nem tudnánk kutatásainkat folytatni, az Univerzum őszanyagának vizsgálatát megcélzó nemzetközi erőfeszítésekben részt venni. Remélhetőleg sikerült bebizonyítanunk, hogy a csoport jól használta föl az eddigi támogatást és a továbbiakban is méltó az anyagi támogatásra.

A zárójelentést összeállította: Lévai Péter (MTA KFKI RMKI),  
a magyar ALICE csoport vezetője