

LÁSZLÓ ANDRÁS

Erős kölcsönhatás kísérleti vizsgálata SPS energiákon

A Világegyetemben fellelhető alapvető kölcsönhatásokat mai ismereteink szerint alapvetően négy típusba lehet sorolni: a gravitáció, valamint az elektromágneses, a gyenge, és az erős kölcsönhatás. A gravitációt leginkább makroszkopikus testek közti kölcsönhatások során figyelhetjük meg, jelen van mindennapi életünkben is. Az elektromágneses kölcsönhatás leginkább a normál kémiai anyagok szintjén érhető tetten: ez felelős az anyag atomfizikai illetve molekulafizikai szerkezetéért. A gyenge kölcsönhatás az elektromágneses kölcsönhatással rokon természetűnek tekinthető, és legtípikusabban például az atommagokban levő nukleonok bétabomlásában érhető tetten, tehát már inkább részecskefizikai természetű ez az erő. A negyedik ismert kölcsönhatásfajta, az erős kölcsönhatás, amely az atommagban és az azt felépítő nukleonokon belül fellépő erőért felelős, azonban a részecskefizika egyik legkörülményesebben vizsgálható jelenségek köre. Ezen kölcsönhatástípus mai elfogadott elméletét QCD-nek (Quantum Chromo Dynamics-nak, kvantum-színdinamikának) nevezik, és a részecskefizika ma ismert legteljesebb elméletének, a Standard Modellnek rész-elmélete. A kvantum-színdinamika elnevezés arra utal, hogy az elmélet által feltételezett anyagi jellegű elemi részecskéinek, a kvarkoknak, három független ún. belső szabadsági foka van, amelyet történeti okokból három színnek nevez a szakmai zsargon. A kvantum-színdinamikában a fotonok analógiájaként szereplő közvetítő részecskék, a gluonok is rendelkeznek színtöltéssel.

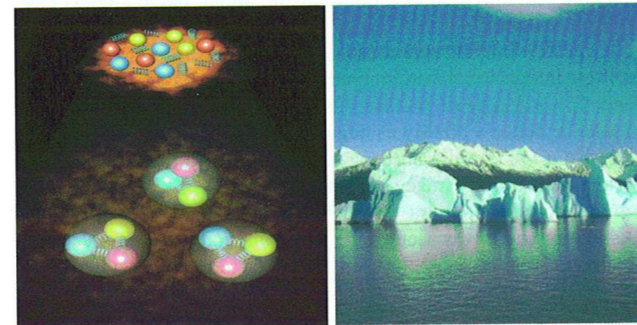
Az erős kölcsönhatás kísérleti vizsgálatának nehézségeit könnyebben megérthetjük, ha figyelembe vesszük a QCD alapvető összefüggéseit. Alapvető eredmény, hogy az elméletben megjelenő effektív csatolási állandó, mely a kölcsönhatás erősségét jellemzi, nagy értéket vesz fel – innen is ered e kölcsönhatástípus elnevezése. Emiatt az elmélet analitikus eszközökkel nehezen számolható, amely nem teszi egyszerűvé közvetlen összevetését kísérleti eredményekkel. További nehézség, hogy a QCD elemi részecskéi, a kvarkok és gluonok, az elmélet szerint közvetlenül nem megfigyelhetők, hanem csupán az ún. színsemleges kötött állapotok, a hadronok, amelyekben a három belső szabadsági fok ki van egyenlítő. Ez analógia szinten körülbelül annak felel meg, mintha a molekulafizikát olyan módon lennének kénytelenek tanulmányozni, hogy elvi okokból nem tudnák őket az elemibb atomokra feltörölni.

A vázolt kvarkbezárás jelensége tulajdonképpen úgy is szemléltethető, hogy elképzeljük, mi történne egy színsemleges hadron (pl proton, neutron) feltörésekor. Az elmélet szerint amikor a kötött állapotban létező egyik kvarkpárt megpróbáljuk szétválasztani, akkor a köztük levő kölcsönhatás még jobban felerősödik, és egy idő után új kvark-antikvark pár jelenik meg ezen nagy erőtér hatására, amely miatt csupán újabb hadronokhoz jutunk ahelyett, hogy a kezdeti egy hadront szét tudnánk hasítani. Ez a fajta viselkedés meglehetősen idegen a mindennapi tapasztalattól, mert a gravitációs, az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatásnak nincsenek ilyen tulajdonságai.

A QCD elmélete tartogat azonban egy másik érdekességet: az effektív csatolás, hasonlóan az elektromágneses és gyenge köl-

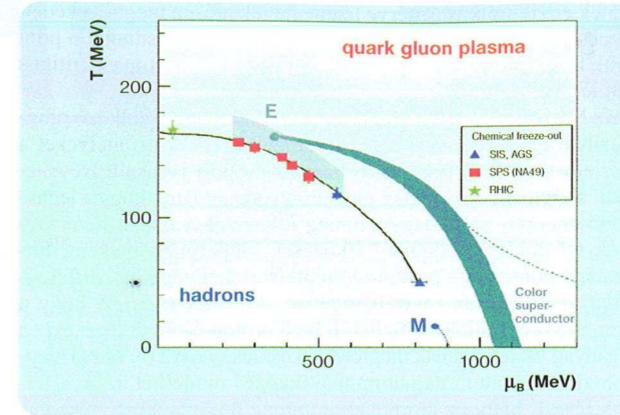
csonhatáshoz, függ a kölcsönhatásbeli impulzusátadás nagyságától. Történetesen, az elemi impulzusátadás növelésével csökken. Ezt a kvarkbezárás másik határeseteképpen is felfoghatjuk: amikor az erős kölcsönhatás elemi részecskéit nem szétválasztani, hanem minél inkább közelíteni szeretnénk, akkor köztük levő interakció lecsökken, mintha egy rugalmas gumiszalag két végén ülne a két elemi részecske. Ez azt sugalmazza, hogy ha nagy mennyiségű, hadronokba zárt erősen kölcsönható anyagot kis térfogatban összehozunk, és biztosítjuk, hogy az elemi részecskék közti impulzusátadás mindig nagy legyen (vagyis az anyagot felfűjtük), akkor az erős kölcsönhatás elemi részecskéi szabadon vándorolhatnak – egészen addig, míg ez a termodinamikai állapot fennáll. Az így létrejött hipotetikus anyagot nevezik kvark-gluon plazmának. Ha bizonyos körülmények között valóban létezik ez az újfajta fázisa az erősen kölcsönható anyagnak, felmerül a kérdés, hogy kísérletileg kimutatható-e a hadronikus anyag és a kvark-gluon plazma közötti fázisátmenet (1. ábra).

A nehezen számolható QCD elmélet egyes alapvető jósatai megközelíthetők ún. rácson végzett számolásokkal, melyben a tér-idő pontjai numerikus rácscsal vannak modellezve. Ezen rác-QCD



1. ábra. Hipotetikus fázisátmenet illusztrációja a hadronikus fázisból (bal oldali panel felső része) a kvark-gluon fázisba (bal oldali panel alsó része). A szokásos, elektromágneses kölcsönhatás dominálta anyagban is számos fázisátmenetet ismerünk, melyek analógiaként szolgálnak. Ilyen pl. a víz-jég fázisátalakulás (jobb oldali panel)

számítások segítségével elméleti jósálatot kaphatunk az erősen kölcsönható anyag fázisstruktúrájáról, mely valóban a kvalitatíve várt fázisátmenetet jósolja (2. ábra). A várakozás szerint a hadronikus és kvark-gluon fázis között egy elsőrendű fázisátmenet helyezkedik el, mely egy kritikus végpontban ér véget, ahol a fázisátmenet másodrendűvé válik. Felmerül a kérdés, hogy az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramjára vonatkozó jósálatok kísérletileg vizsgálhatók-e. A várakozás szerint a válasz igenlő: különböző méretű és fix-céltárgyas rendszerben 10–160 GeV/c nukleononkénti nyalábimpulzus mellett végzett atommag-atommag ütközésekben a jósolt kritikus pont környékére várjuk a végállapotokat. Ilyen



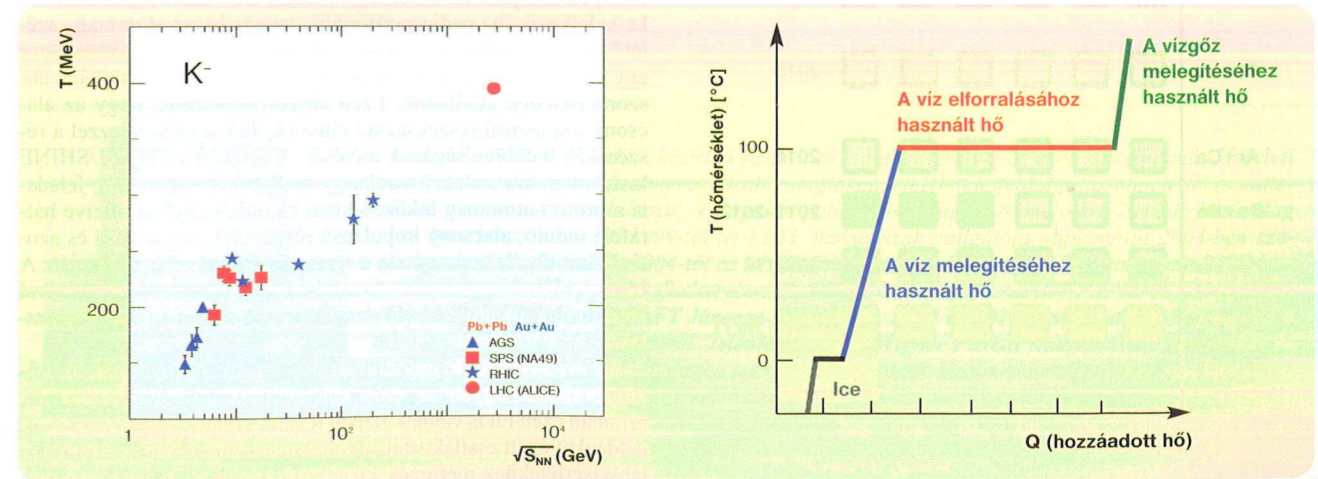
2. ábra. Rács-QCD számolások szerinti elméleti várakozás az erősen kölcsönható anyag fázisstruktúrájára. A két fázis között elsőrendű határ helyezkedik el (sötétszürke sáv), mely egy kritikus végpontban ér véget. Ha a jósolt helyes, a kritikus végpont körüli érdekes részecskék kísérletileg elérhetők az SPS gyorsítónál működő fix-céltárgyas kísérletek által átfogott tipikus energiatarományon (10–160 GeV/c nukleononkénti nyalábimpulzus)

ütközések vizsgálhatóak például a CERN-beli SPS részecskegyorsítónál üzemelő fix-céltárgyas kísérleteknél.

Kísérleti előzmények

Az eddig elérhető kísérleti eredmények a fenti gondolatmenet szempontjából biztatóak, vagy legalábbis elgondolkodtatóak. Ennek illusztrálására tekintsük meg az erősen kölcsönható anyag fűtési görbéjét. A fűtési görbe megkonstruálásához ismerni kell azt a kísérleti eredményt, hogy relativisztikus atommag-atommag ütközésekben a keletkezett részecskének a nyalábrányra merőleges szabadsági fokaiiban tárolt kinetikus energia (E_T) eloszlása exponenciális, azaz közelítőleg $\exp(-E_T/T)$ alakú. Egy ilyen exponenciális eloszlást Boltzmann-eloszlásnak is tekinthetünk, és T meredekségi paraméterét definiálhatjuk a spektrum hőmérsékletének (ez persze csak elnevezés). Elgondolkodtató kísérleti ered-

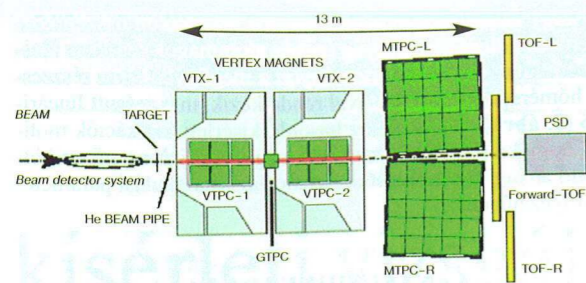
3. ábra. A megfigyelt T kaon-hőmérséklet alakulása nehézion ütközésekben a tömegközépponti energia függvényében (bal oldali panel). Érdekes, fázisátalakulásszerű viselkedést mutat, hasonlóan mint egy megszokott, elektromágneses kölcsönhatás által dominált anyag esetében is megfigyelhetjük (jobb oldali panel)



mény, hogy különböző tömegközépponti energiákon összeütköztetett erősen kölcsönható anyag (nehéz atommagok) érdekes fűtési görbét mutat: egy szűk tartományon a megfigyelt kaon részecskék T hőmérséklete egy platóval rendelkezik, míg másutt lineárisan nő (3. ábra). Ez, és ehhez hasonló kísérleti indikációk motiválják, hogy kísérletileg részletesen megvizsgáljuk az erősen kölcsönható anyag viselkedését a várható fázisátalakulási paraméterek környezetében.

Az NA61/SHINE kísérlet

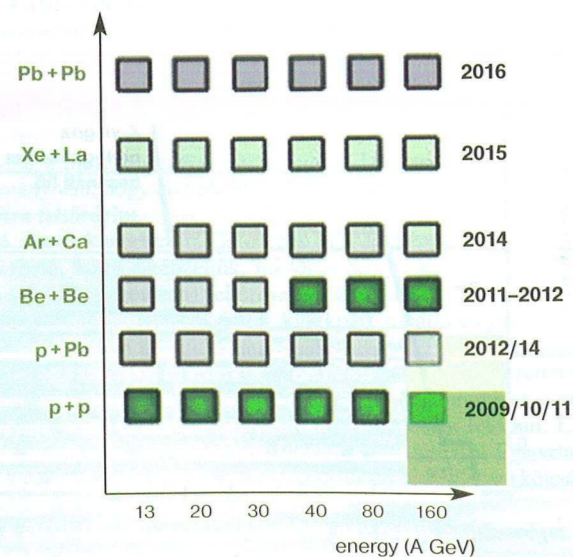
Az NA61/SHINE kísérlet [1] egy fix-céltárgyas elrendezésű nagy akceptanciájú hadron spektrométer a CERN SPS gyorsítójánál. Elnevezése (NA61) a CERN északi kísérleti telephelyére utal (North Area, 61-es sorszámú kísérlet ezen a helyen), illetve a kísérlet programjában foglalt fizikai témákra (Sps Heavy-Ion and Neutrino Experiment). Az SPS gyorsító segítségével különböző részecskenyalábokat (pion, kaon, proton) avagy ionnyalábokat (Be, Ar, Xe, Pb) vezethetünk a kísérlet fix céltárgyára, melynek anyaga igénynek megfelelően megválasztható. A spektrométer fő berendezéseit, mely 2 db 1,5 tesla erősségű szupravezető mágnesből, valamint 5 db 40 m³ össztérfogatú TPC kamrából (Time Projection Chamber, időprojekciós kamra) áll, melyeket eredetileg az NA49 nevű kísérlethez [2] építettek. A legfőbb berendezéseket a 4. ábra mutatja sematikusán. Az ábra bal oldalán látható belépő nyaláb előállítására már önmagában is komplex feladat: a hadronnyalábokat a 450 GeV/c impulzusú SPS-ből kapott protonnyalábnak egy berillium céltárgyon való konverziójával állítjuk elő. A könnyűion-nyalábokat az SPS-ből kapott nukleononként 160 GeV/c impulzusú ólom nyaláb berilliumon való fragmentációjával nyerjük. Mindkét nyaláb részecskéit komplex Cserevok-detektorokkal azonosítjuk, valamint további berendezésekkel monitorozzuk a nyaláb fókuszáltságát, és állítjuk elő a szükséges triggerjeleket, amelyek egy helyesen előállított nyalábrészecske érkezését jelzik. A nyalábrészecskék ezután a kísérlet céltárgyára kerülnek, melyben bizonyos valószínűséggel ütközéseket generálnak, melyek bekövetkezését speciális, ún. kölcsönhatási trigger detektorokkal jelezzük – ezek az adatfelvételt indítják. Az ütközésekben generált részecskék keresztülrepülnek a spektrométerrendszeren: elhajlanak a két 1,5 teslas mágnes terében, miközben a töltött részecskék röppályája 3 dimenzióban regisztrálódik az időprojekciós (TPC) kamrákban. A rekonstruált röppályák alakja a részecs-



4. ábra. Az NA61/SHINE kísérlet sematikus felépítése. Látható a nyalábvonal, a nyalábdetektorok, a céltárgy, a hajlítómágnesek (VTX-1,2), a részecskenyom-rögzítésre szolgáló időprojekciós kamra rendszer (VTPC-1,2, MTPC-L,R és GTPC), a repülési idő detektorok (ToF-L,R,F), és a nyaláb útjában álló kaloriméter (PSD)

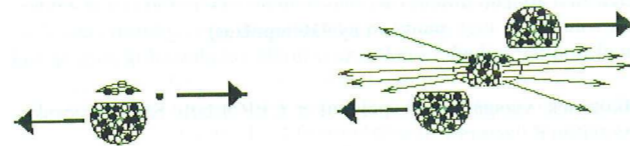
kék töltését és impulzusát közvetlenül elárulják, míg fajlagos ionizációjuk a sebességükre jellemző, amely által meghatározható a típusuk is bizonyos határok között. A TPC kamrák után elhelyezkedő repülési idő detektorok (ToF) közvetlen sebességmérést tesznek lehetővé, kiegészítve a részecskeazonosításhoz szükséges információkat. A nyalábvonal legutolsó berendezése a PSD kaloriméter, melynek szerepe az ütközés centralitásának meghatározása atommag-atommag ütközésekben oly módon, hogy az ütközésben részt nem vett maradék atommag energiáját megméri a nyalábhöz képest – ez megadja az ütközésben részt nem vett maradék atommag energiáhányadát, a detektor pontosságából következően ± 1 nukleon precizitással. A kísérlet fizikai programja jelentős részben a bevezetőben vázolt fizikai témát célozza: az erős kölcsönhatás fázisstruktúrájának feltérképezését oly módon, hogy különböző méretű közel szimmetrikus centrális atommag-atommag ütközéseket vizsgálunk különböző nyalábenergiákon (5. ábra), mintegy letapogatva az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramját a vélt kritikus pont elérhető környezetében. Ezen mérés során különböző, az eseményekre jellemző mennyiségeket vizsgálhatunk a fázisdiagram egyes pontjaiban. A kritikus pont jelen-

5. ábra. Az NA61/SHINE kísérlet sematikus ábrázolt programja energia – rendszerméret síkon az erősen kölcsönható anyag fázisstruktúrájának tanulmányozásához. Egy egységnyi négyzet szimbólum kb. egymillió regisztrált ütközést jelent. A zöld színnel jelölt szimbólumok azt jelentik, hogy a kérdéses adatsor már felvételre került



létenek egyik tipikus ismérve lenne, ha jelentősen megnövekedett részecskeszám fluktuációkat látnánk egy adott fázisdiagram pont körül, így kísérletileg felfedezhető vagy cáfolható volna a kritikus pont létezése.

Az NA61/SHINE kísérlet erős kölcsönhatással foglalkozó programjában egyéb méréseket is szeretnénk kivitelezni, melyeket a kísérletben aktívan részt vevő magyar csoport javasolt. Nevezetesen, szeretnénk viszonylag modellfüggetlenül látni, hogy a legnagyobb energiás atommag-atommag ütközések valóban nem foghatók fel nukleon-atommag ütközések szuperpozíciójaként. Ehhez nagy pontosságú proton-ólmag ütközéseket végzünk, differenciálva az ütközések centralitásában. Az elképzelés az, hogy a különböző centralitások mellett felvett proton-ólmag ütközéseket a maganyag vastagságának megfelelően összesúlyozva (6. ábra) megkaphatjuk egy atommag-atommag ütközés modelljét azzal a feltevéssel, hogy ez atommag-atommag ütközésekben nem történik semmi különös, vagyis az erősen kölcsönható anyag megmaradt a hadronikus fázisban. Ezt összehasonlítva a már meglévő centrális ólmag-ólmag ütközésekben mért részecskespektrumokkal viszonylag modellfüggetlenül következtethetünk a fázisátalakulás jelenlétére vagy jelen nem léte. Ebben a mérésben, a mérés ter-



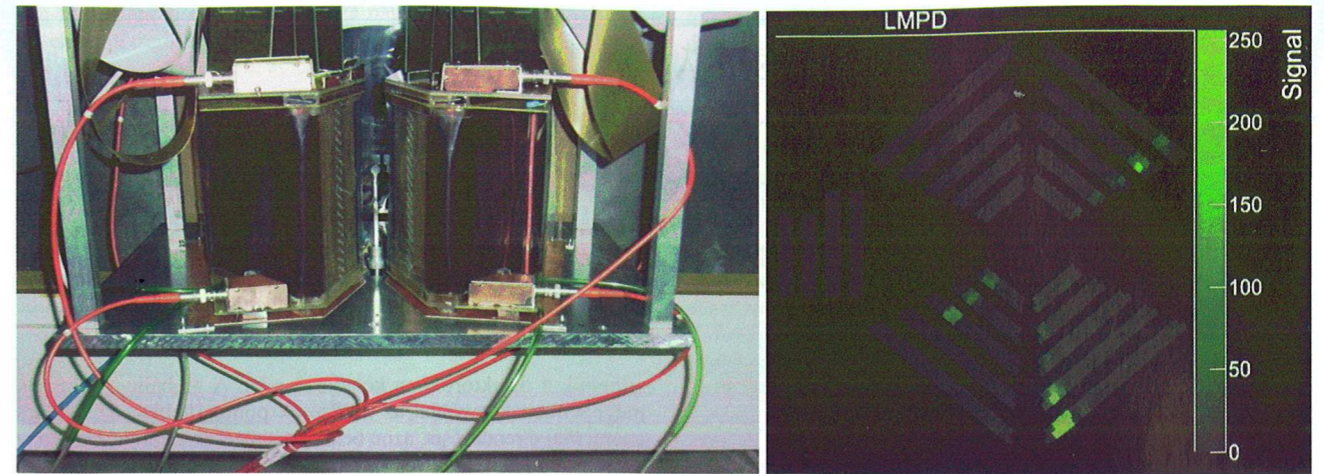
6. ábra. Atommag-atommag ütközések (jobb oldali panel) szimulációja nukleon-atommag ütközések szuperpozíciójával (bal oldali panel)

mészetenél fogva, kritikus szerepet kap az ütközési centralitás eseményenkénti meghatározása proton-atommag ütközésekben, mely kísérleti szempontból a mag-mag ütközések centralitás mérésével ellentétben nem egyszerű feladat.

A fent vázolt okokból a 2012-es évi proton-ólmag mérés során a kísérlet igen fontos részét képezte egy új, magyar fejlesztésű detektor, a kisimpulzusú részecskedetektor (Low Momentum Particle Detector, röviden LMPD).

A kisimpulzusú részecskedetektor közvetlenül a céltárgy mellett helyezkedik el, és a céltárgyból, azaz az atommag „szétrobbanásából” származó lassú részecskéket detektálja. Ezen kis impulzusú részecskék mérésének a hadronikus kölcsönhatások vizsgálatának szempontjából az a legfontosabb motivációja, hogy az ilyen részecskék száma érzékeny a proton-atommag kölcsönhatás centralitására. Azaz, ha az ütközés centrális, vagyis ha a proton középen találja el az atommagot, akkor több kisenergiás részecske keletkezik, ha pedig perifériális, vagyis ha az atommag „szélét” találja el, akkor kevesebb. A kisimpulzusú részecskedetektor egy kis időprojekciós kamra, amelyben különböző vastagságú abszorberretek találhatók. Ezen abszorberretek célja, hogy az alacsony impulzusú részecskéket elnyeljük, lehetővé téve ezzel a részecskék hatótávolságának mérését. A detektor az NA61/SHINE kísérletben közvetlenül a céltárgy mellett helyezkedik el, feladata a proton-atommag ütközésekben az oldalirányban, illetve hátrafelé induló, alacsony impulzusú részecskék detektálása és azonosítása a leadott energia és a részecske hatótávolsága alapján. A céltárgy felrobbanásából származó lassú protonok azonosításával detektorunk alkalmas lesz a vizsgált proton-atommag ütközés centralitásának meghatározására.

Az NA61/SHINE együttműködés kísérleti programjának középpontjában ugyan az erős kölcsönhatás tanulmányozása áll, azonban ezen túl is vannak fizikai témák. Jelentős kutatócsoportok például avégett csatlakoztak a kollaborációhoz, hogy neutrínonyaláb-kísérletekhez mérjenek kiegészítő adatokat. A Japánban mű-



7. ábra. A céltárgy-fóliát körülvevő LMPD detektor, az alacsony impulzusú részecskék detektálásához (bal oldali panel): az ólmagfólia-céltárgy jól látható az ábra középső részén, a céltárgy tartó rúd végén. Az LMPD detektor eseménykijelzője (jobb oldali panel): jól láthatók felülnevezetből a detektálási rétegek között elhelyezett abszorberekben megálló, véges hatótávolságú részecskék

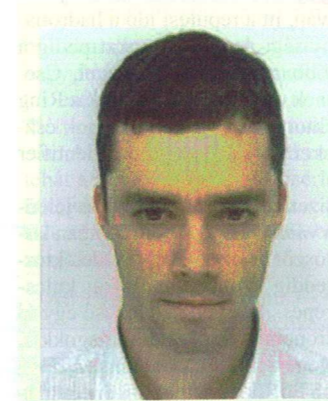
kódó T2K neutrínonyaláb-kísérlet például azon az elven alapul, hogy egy nagy áramú gyorsítóval 31 GeV/c impulzusú protonnyalábot állítanak elő, melyet egy szén céltárgyra vetítenek. A céltárgyon keletkező pionok és kaonok egy megfelelő részét kiválasztva hagyják őket elbomlani, melyek müon-neutrínókat generálnak. A keletkezett müon-neutrínó nyaláb fluxusát meg lehet mérni egy közeli detektorral, és a 300 km távolságban elhelyezkedő Super Kamiokande neutrínó obszervatóriummal, mely segítségével a 300 km-es úton a müon-neutrínók elektron-neutrínóba való átalakulását lehet laboratóriumi körülmények között tanulmányozni. A mért fluxusarányt azonban korrigálni kell a két detektor különböző látószögére, mely korrekció függ a proton-szén ütközésekben való pion- és kaonkeltés differenciális hatáskereszt-metszetétől. Ebben segít a T2K kísérletnek az NA61/SHINE, és ez jelentős motiváció volt a program elindításakor. Hasonló motiváció vezette az argentinai Pierre Auger kozmikus részecskefizikai obszervatóriumban dolgozó kollégákat: ebben az obszervatóriumban a nagyon nagy energiájú kozmikus részecskéket igyekeznek detektálni oly módon, hogy a légkörben keltett részecskezaporukat regisztrálják. A kozmikus részecske eredeti energiájának rekonstrukciójához azonban pontosan kell tudni a pionok és kaonok keletkezési differenciális hatáskeresztmetszetét pionok és kaonok levegő-atommagokkal való ütközése során. Az NA61/SHINE kísérlet kitűnő berendezésnek bizonyult ilyen jellegű referenciamérések kivitelezésére.

Az NA61/SHINE együttműködésben 24 tagintézet képviselteti magát 140 fővel, a világ legkülönbözőbb tájairól. Legjelentősebbek a lengyel nehézion-fizikai csoportok, valamint a német kozmikus fizikai és a magyar proton-atommag csoport, illetve a 2012-es évben csatlakozási szándékát fejezte ki 7, elsősorban neutrínófizika iránt érdeklődő csoport az Amerikai Egyesült Államokból. A magyar csoport (Wigner FK + ELTE) a viszonylagos kis létszáma ellenére a kísérletben kulcspozícióban van: a kísérleti program előkészítésében aktívan résztvettünk, a kísérlet kioldás elektronikája teljesen magyar építésű, üzemeltetési és karbantartás is mi végezzük, a kioldás szoftvert is mi írtuk, valamint igen jelentős a rekonstrukciós szoftverhez való hozzájárulásunk. Külön érdemes kiemelni a REGARD csoporttal szoros együttműködésben készült LMPD detektort, mely szintén teljesen hazai fejlesztésű.

Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy az NA61/SHINE kísérlet a már felvett, illetve a fizikai programjában szereplő még fel nem vett adataival egyedülálló lehetőséget biztosít az erősen kölcsönható anyag tanulmányozására egy igen érdekes energiatartományban. Emellett lehetőség nyílik egyéb, a hadronfizikával kapcsolatos segédmérésekre is.

IRODALOM

- [1] Az NA61/SHINE kísérlet weboldala: <http://na61.web.cern.ch>
 [2] Siklér Ferenc: Kísérletek a kvark-gluon plazma előállítására; Természet Világa – Mikrovilág (2000)



A szerző (1980) elsősorban kísérleti fizikus, fő kutatási területe az erős kölcsönhatás kísérleti vizsgálata a várható fázisátmenet körüli energiákon, emellett jelfeldolgozás-elmélettel és matematikai fizikával is foglalkozik. Válogatott publikációi száma 18, melyekre 2012-ig bezárólag 101 hivatkozás érkezett. 1999-től az ELTE fizikus szak hallgatója, diplomáját 2004-ben szerezte, részecskefizikából. 2004-től az ELTE doktori iskola hallgatója, PhD fokozatát 2008-ban védte meg, szintén részecskefizikai témában. 2008-ban elnyerte az MTA KFKI RMK1 Györgyi Géza-díját, 2011-ben az ELFT János János-díját. 2009 és 2012 között kutatói ösztöndíjas a CERN-ben, az NA61 kísérletnél. Jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóintézet Részecske- és Magfizikai Intézetének tudományos munkatársa. E-mail: laszlo.andras@wigner.mta.hu