

Magyar technikai export a CERN-be

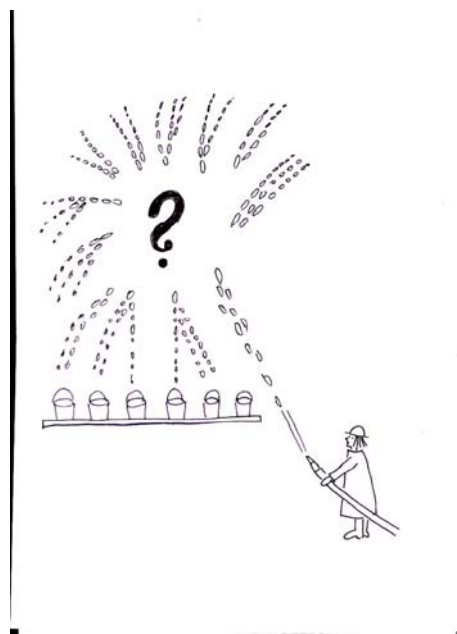
Dénes Ervin és Vesztergombi György

A szerkesztőség felkérése szerint ennek a cikknek az lett volna az eredeti címe, hogy „Technika-import a CERN-ből”. Bár az elvárások szerint valóban ez tűnik valószínűbbnek, az előkészítés során éppen ennek az ellenkezője derült ki. A CERN-beli tagságunk éppen azt katalizálta, hogy az ottani igények kielégítésére magyar technikát fejlesszünk ki, és mi exportáljunk a CERN-be. Azt ugyan nem lehet mondani, hogy ez a magyar ipar számára tömeges megrendelésekben jelentkezett, de legalább a fizikusok és hozzájuk közelálló mérnökök agya egy kissé beindult, aminek a hatása valószínűleg csak lassabban gyűrűzik majd be a magyar technikai és oktatási kultúrába.

A részeg tűzoltó

Hogy pontosabban megérthessünk mik is azok a technikai újdonságok, amelyekkel a CERN-ben jelentkezünk, érdemes először a kályhától elindulni. A CERN a kísérleti részecskefizika vezető kutatási centruma a világon, bár Amerikában az összpontenciál egészében nagyobb, de ilyen koncentrált anyagi, szellemi és adminisztratív bázissal rendelkező más intézet nincs még a világon. Maga a tudományág is mind témájában, mind pedig technikájában annyira eltér a köznapitól, hogy talán legjobban egy metaforával lehetne jellemezni, mit és hogyan kutatnak a fizikusok a CERN-ben. Az még csak közismert, hogy valami igen-igen parányi részecskékről van szó, de hogy itt valóban

mindenképp felülmúlóan apró micsodáknak a tulajdonságait kell feltárni, azt az alábbi kissé blődnek tűnő hasonlattal lehet érzékeltetni. A rajzon (1. ábra) látható „részeg tűzoltó” a *sötétben* egy ismeretlen tárgy körvonalait próbálja felderíteni a róla visszapattanó vízcseppek segítségével, azért részeg az illető, mert józan emberről ilyen botorságot nem illik feltételezni, és azért tűzoltó, mert neki van fecskendője. A megoldást, hogy mi lehet a kérdőjel mögött, a cikk végén áruljuk el, így reméljük, hogy az olvasás izgalmát addig fenn tudjuk tartani.



Ábra 1

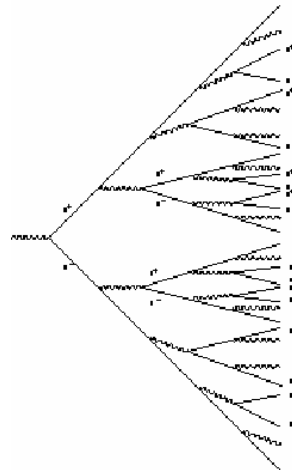
A részecskefizikai kísérlet alapelemei

Bár a fenti hasonlatot valóban csak viccnek szántuk, de azért a helyzet a

valóságban sem sokkal könnyebb. A jelen kísérletek célja az atommagok belsejének a kutatása oly módon, hogy ismert részecskékkel véletlenszerűen bombázzuk a megfelelő magokat és a szórt, leszakadó vagy visszaverődő alkatrészeket *részecskedetektoroknak* nevezett gyűjtő tartályokban próbáljuk összeszedni. A problémát növeli, hogy általában a begyűjthető részecskék is már egy korábbi részecske bomlásából eredő darabkák, vagyis nem közvetlenül az eredeti kölcsönhatásból erednek. Tudjuk, hogy a mikrofizikában teljesen más szabályok (kvantum mechanika törvényei) érvényesülnek és az *első kvantumugrás* a mérés során, hogyan alakítsuk át ezeket a kvantumos jeleket makroszkopikusan érzékelhető jelenséggé. A töltött részecskék a jelenlétüket a közegen való áthaladás közben általában ionizáció vagy a szcintillátorokban gerjesztett fény, illetve elég nagy sebesség esetén átlátszó közegen Cserenkov sugárzás segítségével árulják el. Vagy az ionizáció termékeit vagy a fotonok által az úgynevezett fotókatódon keltett elektronokat lehet azután makroszkopikus szinten megfigyelni. A részecskepálya detektorok esetén olyan kicsi az energiaveszteség, hogy az adott részecske szinte érintetlenül hagyja el a detektort. Ezekben a detektorokban mágneses tér alkalmazásával a részecskék impulzusát lehet mérni. Ettől a „roncsolásmentes” vizsgálattól eltérően a kaloriméterekben a bejövő részecske teljes egészében megsemmisül elektromágneses vagy hadronikus záport keltve a részecske típusa szerint. A 2. ábrán egy foton által keltett zápor sematikus képe látható.

A lényeg az, hogy a sokszoros lavinaszerű ütközés során minden nemzedékben kb. megkétszereződik a

párkeltéssel létrehozott részecskék (fotonok és e^+ vagy e^-) száma. Ez a folyamat addig tart, amíg a közbülső fotonok energiája a párkeltési küszöb (kb 1 MeV) alá süllyed. Vagyis az 1 GeV-es (ill. 1 TeV-es) fotonból kb. 1000 (ill. 1 000 000) részecske lesz. Proton vagy pion esetén bonyolultabb a záporok kifejlődése, de a végeredmény lényegében hasonló, csak ott többféle végtermék lehetséges. Mivel a zápor végén lévő részecskék száma arányos a bejövő részecske össz-energiájával, ezért csak ezek számával arányos jelet kell majd generálni. Hogy hogyan lehet ezt csinálni, arra későbbiekben két konkrét magyar vonatkozású példát fogunk mutatni.



Ábra 2

Végül is a helyzetmérő vagy kalorimetrikus detektorok legvégén megjelenik egy makroszkopikusan már megfigyelhető legalább ezer elektron által generált jel. Ezt a jelet kell a zajos háttérből kihalászni és lehetőleg torzításmentesen erősítve továbbítani. A kísérleti részecskefizikában az egy külön művészet, hogyan lehet ezeket a hiper-érzékeny analóg jeleket kezelni. Ezt a feladatot a „front-end” elektronika látja

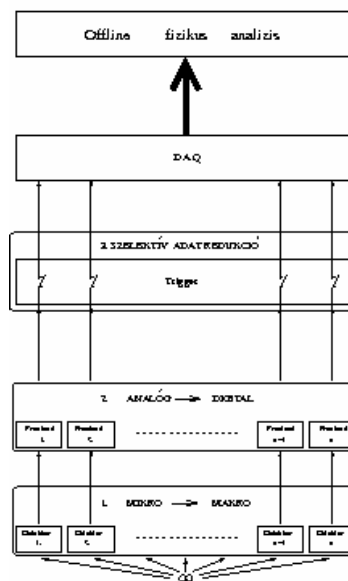
el, amelynek egy speciális verzióját szintén egy magyar példán fogjuk konkretizálni. Ez a kísérleti részecskefizika *második kvantumugrása*, amelynek eredményeként már digitális információ formájában kerülne rögzítésre az összes bejövő jel.

Általában olyan nagy a bejövő információ mennyisége, hogy azt nem tudjuk közvetlenül a számítógépek tárolójába vinni, szükség van a bejövő információk szűrésére. Az egyes csatornában felgyűlt jelek közül csak azokat engedjük tovább, amelyek egy számunkra érdekes kölcsönhatásra, eseményre utalnak. Ennek a feladatnak a megoldása a *trigger elektronikára* hárul, amely szintén nem triviális feladat, mivel a front-end elektronika pufferei általában csak néhány száz nanomásodpercig őrzik a korábbi adatokat. Ha addig nincs döntés, akkor az az adat elveszik. Itt van a *harmadik kvantumugrás*, amelyet a gyakorlatban általában több fokozatban valósítanak meg (first-, second- és high-level trigger). Néhány egyszerű magyar vonatkozású példával itt is szolgálhatunk.

A kísérleti folyamat további lépéseinél már nem beszélünk ugyan „kvantumugrásokról”, de azért azok is igen-igen fontosak. Egy modern kísérletben többszáz ezer aktív csatorna van, vagyis amikor megjelenik a TRIGGER-jel, hogy most ezt az eseményt rögzíteni kell, akkor mindenkinek egyszerre kell akcióba lépni, nehogy a rendkívül rövid ideig a közbenső pufferekben tárolt információ eltűnjön. Ez az adatgyűjtő rendszer, angol rövidítéssel DAQ (Data-Acquisition) feladata, amelyek

realizálása terén különleges eredményekkel büszkélkedhetünk.

Az adatgyűjtő DAQ az információt a későbbi offline feldolgozás számára megfelelő adatbázisban tárolja. Bármilyen meglepő a fizikusok számára éppen ez az utólagos feldolgozás jelenti a legnagyobb kihívást, amelyről egy későbbi alkalommal szintén érdemes lenne kissé részletesebben mesélni. Az adatokat néhány hét alatt be lehet gyűjteni, de igazi feldolgozására, megértésére sokszor több év sem elegendő. Persze a tudomány történetében ez nem újdonság, Kepler is az adatfelvétel után csak évekkel később jött rá, hogy a Mars ellipszis pályán kering. A kísérleti folyamat sematikusan a 3. ábrán látható, az elmúlt tíz év alatt a magyarok minden egyes elem készítésében aktív szerepet játszottak csak éppen azok különböző kísérletekben kerültek alkalmazásra. A következőkben ezeket a mozaikokat egybegyűjtve létrehozzuk az első komplett magyar (virtuális) kísérletet a CERN-ben.



Ábra 3

Cserenkov detektorok

Az első magyar CERN-ben felállított detektor a Siklér Ferenc cikkében leírt Grid Time-of-Flight (GTOF) volt az NA49 kísérletben. Itt magát a detektort is teljes egészében mi raktuk össze, de ebben a cikkben ennek csak a TOF elektronikájára koncentrálnak majd. Az NA49 kísérlet következő fázisában azt tervezzük, hogy az OPAL kísérletből leszerelt ólomüveg blokkokat fotonok detektálására fogjuk felhasználni. Az ólomüveg egy klasszikus anyag, amely a kalorimetria szempontjából két fontos tulajdonsággal rendelkezik: nagy a fajsúlya (több mint 5 g/cm^3) és átlátszó kb. 1.5-es törésmutatóval, ezért ideális a 2. ábrán bemutatott elektromágneses zápor által keltett Cserenkov-sugárzás segítségével a fotonok energiájának a mérésére. A szcintillátorokban megjelenő fotonokkal szemben a Cserenkov-fotonoknak van egy óriási előnye, mégpedig az, hogy a részecske áthaladásának pillanatában keletkeznek, míg a másik esetben a gerjesztett állapotok csak bizonyos időközönként bomlanak le. A Cserenkov-fotonok ezen tulajdonsága fontos szerepet játszik az eddigi legnagyobb szabású magyar részvétellel folyó detektor építésében az LHC gyorsítóra készülő CMS kísérlet Very Forward Kaloriméterében. Ezen feladat megoldásán több mint tíz éve dolgozunk, először a spanyolokkal együtt PPC gázkamrákkal próbálkoztunk, de végül is az amerikaiak által javasolt kvarcszálalás Cserenkov-detektor mellett tettük le a garast, amelyre az egyik főindok éppen a jelek gyorsasága volt, mivel az LHC-n olyan környezetben kell dolgozni, ahol átlagban minden nanomásodpercben történik egy esemény vagyis az időzítés pontosságának is ilyen nagyságrendbe

kell esnie. Ez VF kaloriméter az extrém követelmények miatt más szempontból is világrekordnak számít. Kis túlzással azt lehet mondani, hogy olyan erősen sugárzó környezetben kell működnie, amely az atomreaktorok közvetlen közelében van. Ennek következtében a teljes környezet erősen fel fog aktiválódni és gyakorlatilag hónapokra megközelíthetetlenül válik, ha egyszer működésbe kerül. Vagyis a VF kalorimétert csak olyan anyagból lehet készíteni, amely kibírja ezt a sugárzási terhelést. Az átlátszó anyagok közül ezt a feltételt legjobban a kvarc elégíti ki, az ólomüveg például napok alatt besárgulna és elvesztené átlátszóságát. A detektor végső szerkezetét az a körülmény determinálja, hogy igen nagy energiájú (néhány száz GeV-től több TeV-ig) részecskéket kell detektálni, ugyanakkor pedig érzéketlennek kell lennie a radioaktivitásból származó alacsony energiájú bomlástermékekre. Körülbelül olyan a helyzet, mint a napfogyatkozás megfigyelésekor: kormozott üveget kell használni, csak a lényeges információt hordozó jeleket szabad átengedni. Ezt a szűrést úgy érzük el, hogy vékony kvarcszálakat fűzünk hatalmas vastömbökbe, amelyek sűrűsége biztosítja az elektromágneses zápor gyors kifejlődését, viszont fényjelet csak az össztömeg 1%-t kitevő kvarcszálakból kapunk. A feladat elvileg egyszerűnek tűnik, csak akkor döbbenünk meg, amikor kezünkbe „vesszük” a $3 \times 3 \times 1.65$ köbméteres kb. 120 tonnás vas darabot és megpróbálunk bele 1 millió hajszálvékony kvarcszálal befűzni. Ezen a feladaton dolgozott egy közös amerikai-orosz és egy magyar csoport egymással versenyezve 1996 és 2000 között. Az ortodox módszer szerint olyan modulokból kell a kalorimétert összerakni, amelyek gravírozott

lemezekből állnak. A magyar „ribbon” javaslat sima lemezeket használva éppen a rendkívül drága gravírozást kerülte volna el a további előnnyel együtt, hogy két legyet ütve egy csapásra rögtön a szálak befűzését is megoldotta volna. Mindkét fél elkészítette a prototípusát, a magyar az 15 ezer svájci frankba, az amerikai-orosz pedig 300 ezer svájci frankba került, bár a két modul detektálási minősége gyakorlatilag azonos volt. A tudományos együttműködésben szokásos módszer szerint a résztvevő intézetek vezetői szavaztak, hogy melyik változatot fogadják el, ahol sajnos kisebbségben maradtunk. De a történetnek itt nincs vége. Amikor meg kellett kezdeni a sorozatgyártást, akkor eltört a gravírozó gép és a szakemberek nem vállalták, hogy ezzel a módszerrel teljesíthetők az eredeti tervben leírt követelmények. Az újabb szavazáson persze a magyar javaslatot megint elvetették egy teljesen új lényegesen bonyolultabb, drágább, kisebb felbontást adó, de esztétikailag igen „sexy” terv javára (4. ábra). Itt a gravírozási sűrűséget a felére csökkentették, ami azt jelentette, hogy a detektoronként befűzendő szálak száma negyedére csökkent, azaz a kettő együtt végül is fél millióra jött ki. A befűzést persze mint feladatot természetesen a magyar csoportra osztották ki, ugyanis mi nem tudunk kvarcszálát gyártani az amerikaiak helyett, a vas megmunkálás pedig az uráli korábbi atombomba gyártó cég specialitása. Arra viszont büszkének lehetünk, hogy így implicite hozzájárulhattunk a szovjet hadiipar békés célra való átprofilírozásához, ahol szerencsére a ceppet az amerikaiak fizették. Az külön rémregény, hogy hogyan sikerült ezt a feladatot megoldanunk, de a cikk írásának pillanatában csak azért vagyunk 95%-os

készültségi állapotban, mert augusztus óta az amerikaiakra várunk, hogy szállítsák a még hiányzó kvarcszálakat. De még így is csak ez az egyetlen subdetektor a CMS kísérletben, amely félévvel jár a megállapított határidő előtt.



Ábra 4

Front-end elektronika

Azt hiszem az előzőek (GridTOF, VF) meggyőzően bizonyítják, hogy tudunk detektort építeni. A következő lépésben azt szeretnénk bizonyítani, hogy újra az NA49 kísérletbeli GridTOF példáját véve elő tudunk analóg detektor elektronikát is állítani. Bizonyos értelemben a szűkös pénzügyi feltételeink voltak a főosztónzők, hogy megint a saját utunkat járjuk. Az NA49 kísérletben van egy másik fajta, ún. Tile-TOF rendszer is, amely csempeszerű elrendezést valósít meg, mivel azt a gazdag marburgi egyetem finanszírozta, ezért megengedhették maguknak, hogy az analóg elektronikát is a drága FASTBUS rendszerben építsék. Nekünk csatornánként a felénél kevesebb pénzből kellett ugyanazt a problémát megoldani, ezért minden egyes részlem esetén gondosan felmértük a piacot és végsőkéig alkudoztunk az árról. Az úgynevezett CFD elektronika esetén

azonban a piacon akkor nem volt más választék, ezért kapóra jött a KFKI-ban Biri Jánosék csoportjától jövő ajánlat, hogy ők képesek ezt maguk is megépíteni. Sőt az ő egységeik a lényegesen olcsóbb, de-facto világszabvány VME rendszerbe lesznek illeszthetők. Hát ez igazából megint minimum két légy volt egy csapásra (később meglesz a harmadik légy is!). Hogy ne csak a piszkos pénzügyekről legyen szó, érdemes néhány szóban összefoglalni, hogy mi is ez a titokzatos, drága Constant Fraction Discriminator (CFD). Az elvet a lehető legegyszerűbb esetben két háromszög jel esetén mutatjuk be. A TOF repülési idő detektor jóságát az szabja meg, hogy milyen pontosan tudjuk az időt mérni. A CERN SPS gyorsítónál levő energiákon minden picomásodperc számít! Ahhoz, hogy a jel érkezési idejét mérni tudjuk valahogy az elektronika tudtára kell adni, hogy MOST érkezett. Ezt a legegyszerűbb úgy észrevenni, hogy akkor indítjuk a mérést, amikor a jel elért egy bizonyos küszöbértéket. A detektorból jövő jelek, bár alakra hasonlóak, de az amplitúdóban jelentősen eltérnek, ezért az egzaktul egyszerre induló, de különböző amplitúdójú jelek között a küszöb elérésekor akár 1 ns eltérés is lehet. A detektorból jövő jelek, bár alakra hasonlóak, de az amplitúdóban jelentősen eltérnek, ezért ahogy azt, ahogy az 5. ábra mutatja a jel kezdetét jelentő t_0 helyett a t_A ill. t_B beérkezési időpontokat fogjuk mérni, amelyek között akár 1 ns eltérés is lehet. Egyszerű technikai trükkel orvosolni lehet ezt a problémát, ahogy azt az 5. ábra további részei demonstrálják. Ha a jelet két részre osztjuk kb. 2:1 arányban és a nagyobbikat adott (Δ) idővel késleltetjük, majd ebből kivonjuk a kisebbiket, akkor az eredő jel először

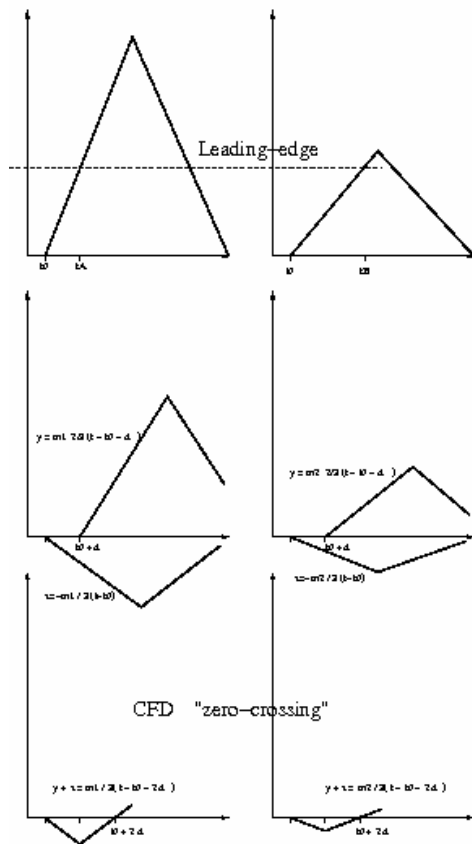
negatívba megy, de alulról felfelé menve a nulla átmenet ideje a tényleges t_0 -hoz képest amplitúdótól függetlenül mindig ugyanaz lesz. Háromszögjelek esetén ez egzaktul ki is számolható. A jelek felfutó élei:

$$y = \alpha m x \quad \text{és} \\ z = (1-\alpha) m (1-\Delta),$$

$y + z = 0$ feltételből az általános megoldás:

$$x_0 = (1-\alpha)/(1-2\alpha) \Delta,$$

amely $\alpha=1/3$ esetén $x_0=2\Delta$ -t ad. Valóságos jelek esetén persze nem ilyen ideális a helyzet, de a CFD jó közelítésben követi az elméleti becslést. Az elv egyszerű, de a megvalósítás azért nem triviális. Ezt jelzi az a tény is, hogy a magyar VME-CFD kártya évekig egyedül álló volt a maga nemében. A legnagyobb sikert az jelentette, hogy amikor az NA49 kísérletben továbbfejlesztés gyanánt megduplázták a Tile-TOF rendszert, akkor már a magyar VME-CFD-t választották, hiszen azért ők sem ellenségei a saját pénzüiknek. Ez azt jelentette, hogy a Grid-TOF-ban 400, a Tile-TOF-ban 1000 magyar CFD elektronikus csatorna került alkalmazásra és máig is teljes megelégedésre működik.



Ábra 5

Trigger

A kísérletben a harmadik elvi ugrás a triggerelés. Itt már tényleg döntő lehet a fizikus ötletessége ill. kreativitása, mert vagy az adatgyűjtés sebességét lehet megsokszorozni, vagy olyan jelenségeket lehet hozzáférhetővé tenni, amelyek másképp nemigen jönnének elő.

Az isospin a legrégebb ismert szimmetria az erős kölcsönhatások fizikájában, ezért azt lehetne hinni, hogy már mindent tudunk róla. Ha viszont megnézzük a rendelkezésre álló mérési adatokat gyakorlatilag csak protonnyalábos eredményeket találunk az irodalomban. A neutronnyalábos

eredményekre néhány vagy protonnyalábos deuteron targeten, vagy deuteronnyalábos hidrogéntargeten végzett kísérletből következtek. Vagyis nagyobb energiákon gyakorlatilag nincs szisztematikus mérés az isospin szimmetria következményeinek vizsgálatára. Az NA49 kísérletben Varga Dezsőnek támadt az az ötlete, hogyan lehetne tetszőlegesen nagy energiájú tiszta neutronnyalábot minimális eszközökkel előállítani. Az ötlet lényege, hogy a deuteronnyalábos kísérletet ki kell egészíteni egy megfelelően szelektív triggerrel. Ezen trigger nélkül 2000-ben végzett mérésben 1 millió esemény közül csak 65% tartalmazott tényleges dp kölcsönhatást, amelyek közül csak 42%-ban történt tiszta np ütközés, ahol az off-line analízisben sikerült azonosítani a deutériumból kiszakadt *spectator proton*t, amely ténylegesen nem vett részt a kölcsönhatásban. Így végül csak az eredeti események negyede maradt a tényleges fizikai analízisre. A szelekciót -az utólagos off-line helyett- a mérés során prompt on-line is elvégezhetjük, ha egy 2 cm átmérőjű szcintillátor detektort helyezünk a pontosan ismert helyen pontosan ismert energiával áthaladó *spectator proton* útjába, ezzel az egyszerű trükkel megnégyszerezhetjük a statisztikát, ami valóban kritikus lehet, ha csak 1 hét mérési idő áll rendelkezésre az egyébként szükséges 1 hónap helyett.

Az előző np trigger már egy primitív példa arra, hogy hogyan láthatunk bele egy atommag, a deuteron belsejébe. Ugyanis a *spectatorok* szerint szelektálva egyértelműen megállapítható, hogy pp , np vagy dp (azaz a deutérium mindkét nukleonja

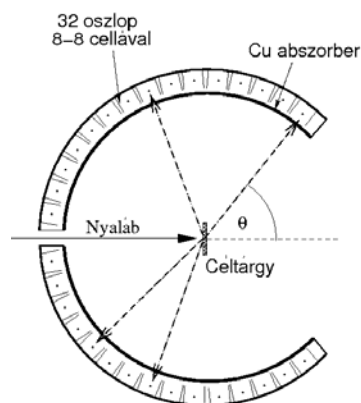
ütközött a target protonnal) esemény történt. A módszer bizonyos értelemben bonyolultabb magok esetére is általánosítható, H.G. Fischer irányítása alatt magyar diákok készítették el az úgynevezett Centrality Detektort (CD), amely segítségével tényleg meglehetősen közvetlen bepillantást nyerhetünk proton-atommag szórások esetén a magok belsejébe, vagyis a CD bizonyos értelemben úgy működik, mint egy hihetetlenül nagyfelbontású mikroszkóp, amely fermi nagyságrendű távolságokat nagyít fel cm-esre, azaz 10^{13} -szorosára.

Közismert, hogy az atommagok nukleonokból (Z protonból és N neutronból) állnak, amikor egy proton próbál a magon áthatolni, akkor mivel annak az átmérője lényegesen kisebb az $A=Z+N$ nukleont tartalmazó magnál, ezért a tényleges ütközésben a target-nukleonoknak csak egy kisebb hányada tud részt venni (6. ábra). A centrality trigger lényege, hogy on-line képes meghatározni, hogy hány ilyen egyedi kölcsönhatás történt. Minél inkább telibe találja a proton a magot, annál több az ilyen elemi ütközések száma, vagyis annál vehemensebb a kölcsönhatás minél nagyobb a centrality, azaz minél nagyobb a jel a CD-ben. Már több millió ilyen eseményt sikerült begyűjteni, de az off-line analízis java még hátra van. A 6. ábrán látható Centrality Detector körbe veszi a céltárgyat, így a visszalökött alacsony energiájú úgynevezett „gray” protonokat detektálja. Ebben a több száz elektródát magyar diákok forrasztották be.



Ábra 6

A spectator proton és egyéb nyalábirányba szórt részecskék detektálására szolgál a GAP-TPC, amely szintén jelentős magyar hozzájárulással készült (7. ábra).



Ábra 7

Adatkiolvasás detektorokból

A modern gyorsítóknál zajló nagyenergiás kísérletekben a sokszor több százezer elektromosan aktív csatorna jelét a detektortól a több száz méterre levő feldolgozó számítógépekhez kell juttatni lehetőleg minél gyorsabban. Ilyen nagy távolság esetén optikai jelátvitel a legcélszerűbb. Általában soros kapcsolat valósul meg, amikor több csatornát egyesítve egyetlen

optikai szálon történik az adatátvitel. Ennek oka, hogy mivel a fény keltéséhez és érzékeléséhez lézerre és optikai érzékelő diódára van szükség, több párhuzamos kábel esetén túl drága lenne az átvitel, nem beszélve a lézerek meghajtásához szükséges teljesítményigényről. Ahhoz, hogy egy kicsit közelebbről megértsük milyen nehézségeket kell itt megoldani, érdemes az átvitel finomabb részleteit is kicsit közelebbről szemügyre venni.

Soros átvitel esetén például fellép a következő probléma: ha fény érkezik a diódára az 1-es bitnek, ha nem jön fény, az 0-as bitnek felel meg. De hánynak? Ehhez pontosan tudnunk kell, hogy milyen órajellel dolgozik a küldő oldal. Ha biztosítjuk, hogy a bitek kellő gyakorisággal váltsák egymást, pl. sose jöjjen 6-nál több azonos bit egymás után, akkor az órajel helyreállítható. A kellően gyakori bitváltás egy matematikai trükkkel, az ún. 8/10 bitkódolással érhető el. Ekkor egy bájtban tárolható 256 különböző bitkombináció mindegyikét egy 10 bites jelsorozatnak feleltetjük meg. Olyannak, hogy semelyik kódban ne fordulhasson elő 6-nál több egymást követő azonos bit, még a bájtok érintkezésénél sem. Ezen kívül, az 1024-féle 10 bites kódok között van néhány olyan ún. speciális karakter, mely olyan bitkombinációt tartalmaz, mely semmilyen más adatabájt belsejében, sem azok határára nem fordul elő. Ilyen bájtoknak az adat közé való beiktatásával a fogadó oldal biztosan megtalálhatja a bájt-határokat a soros bitfolyamban.

A detektor és a kiolvasó számítógép közötti kapcsolat fennálláshoz a vonalon állandóan mennie kell a fent leírt szinkronizáló jeleknek. Adatátvitelkor is, időnként szükség van ilyen jelekre. Ezért

az adatot blokkokba, ún. keretekbe szokták rendezni. Egy keret hossza maximálisan akkora lehet, hogy a küldő és fogadó oldal közti órajel-szinkronizáció a keret átvitele alatt ne romoljon el. A keretek között speciális karakterek mennek a vonalon, melyek a szinkronizáción kívül másra is használhatók: pl. fogadóképesség jelzésére, hibadiagnosztikára, stb. Ezekre az információkra mindkét oldalon szüksége van, a küldőnek is tudnia kell, hogy fogadóképes-e a másik oldal. Ezért két optikai vonalra, ún. duplex linkre van szükség, még egyirányú adatátviteli igény esetén is.

A fent leírt módon történő adatátvitellel először a 90-es évek elején találkoztunk, mikor a KFKI, a CERN és a genfi HP együttműködése keretében létrejött, dr. Rubin György vezette csoport egy Fibre Channel alapú adatátviteli rendszert ellenőrző műszert (FC teszter) fejlesztett ki. Az ekkor elterjedőben lévő Fibre Channel szabvány a fentebb leírt alapokon működő adatátviteli rendszert határozott meg. A szabvány pontosan specifikálta a keretek hosszát, a speciális karakterek jelentését, és azt a folyamatot (az ún. protokollt), hogy vonalon történő valamilyen eseményre milyen válasz várható, illetve milyen választ kell adni. Akkoriban egyre több Fibre Channel alapú eszköz fejlesztése kezdődött el, s ebben nyújtott segítséget az FC teszter. Az elkészült berendezést 1994-es a washingtoni és 1996-os san-diegoi-i Supercomputing konferencián és kiállításon mutattuk be. Miután időközben úgy alakult, hogy a Fibre Channel eszközöket leginkább rövid távú (pl. számítógép-diszk) kapcsolatokra használják, a teszter további fejlesztését amerikai cégek vették át. Nekünk viszont nagyon jó

tanulási lehetőség volt a technika elsajátítására és tapasztalatszerzésre a nemzetközi együttműködés terén.

A KFKI-CERN-HP együttműködés során nagy tapasztalatot szereztünk az optikai adatátviteli szabványok területén, valamint elsők között sajátítottunk el egy ma már elterjedt tervezési technikát: a programozható logikai eszközök használatát. Ma boltban kapható kész eszközök állnak rendelkezésre, melyek elvégzik a 8/10 bites, a soros/párhuzamos és az elektromos/optikai átalakítást. Az adatátviteli berendezés tervezőjének a feladata csupán az átküldendő adatok kialakítása és a beérkező adatok értelmezése, azaz a protokoll megvalósítása. Ehhez régebben diszkrét logikai eszközökből felépített hálózatot terveztek. Ezt felépítették, kipróbálták, s ha kellett a ciklust kezdték előről. A programozható logikai eszközökkel viszont a tervező a saját asztali számítógépén tervezi meg a szükséges áramköröket, azok működését a számítógépen szimulálja és a kész „programot” letölti a programozható egységbe. Így a tervezés-kipróbálás-módosítás ciklus számottevően gyorsabbá és olcsóbbá vált. Régebben egy új eszköz fejlesztése a hardver legyártását és a szoftver kifejlesztését jelentette. Ma a hardver a tulajdonképpen a nyomtatott áramköri lap (NYÁK) megtervezését, legyártását és arra a programozható logikai eszközök felszerelését jelenti. Ezután következik a programozható eszközbe a tényleges áramkör, az ún. firmware letöltése. Végül a szoftver biztosítja a berendezés és a számítógép kapcsolatát. Az így kialakított berendezés könnyen módosítható: a firmware-t és a szoftvert kell kicserélni az esetleges újabb

verzióra. Mindkettőhöz csupán számítógépre van szükség.

AZ FC teszteren történt tapasztalatszerzés után nekiálltunk speciálisan nagyenergiájú kísérletek adatkiolvasását szolgáló berendezések fejlesztésének. Az első ilyen feladatunk az S-Link kifejlesztése volt. A S-Link-et a cerni LHC berendezés több kísérletéhez egységes adatkiolvasó rendszernek szánták. Fibre Channel alapú, egyirányú (detektortól a számítógéphez irányuló) link volt. Első verzióját a fenti magyar csoport fejlesztette ki, s a továbbfejlesztett változatokat azóta is magyar cégek gyártják. Eddig több száz ilyen csatorna került leszállításra a világ minden részén. Az SPS COMPASS kísérlet teljes adatgyűjtő-rendszere S-Linken alapul. Ma az S-Linket főleg az LHC ATLAS kísérlet és a kísérletben részvevő tudományos intézmények használják.

A DDL

Az ALICE kísérlet úgy döntött, hogy kiolvasó rendszerét maga fejleszti ki, az FC teszter és az S-Link kifejlesztésével ismertté vált magyar csoport és a CERN együttműködésében. Az ALICE detektor részdetektorait a mérések előtt konfigurálni kell. Ehhez nagymennyiségű adat letöltése szükséges. A kiolvasó rendszernek képesnek kell lennie nagy sebességgel adatot átvinni mindkét irányban.

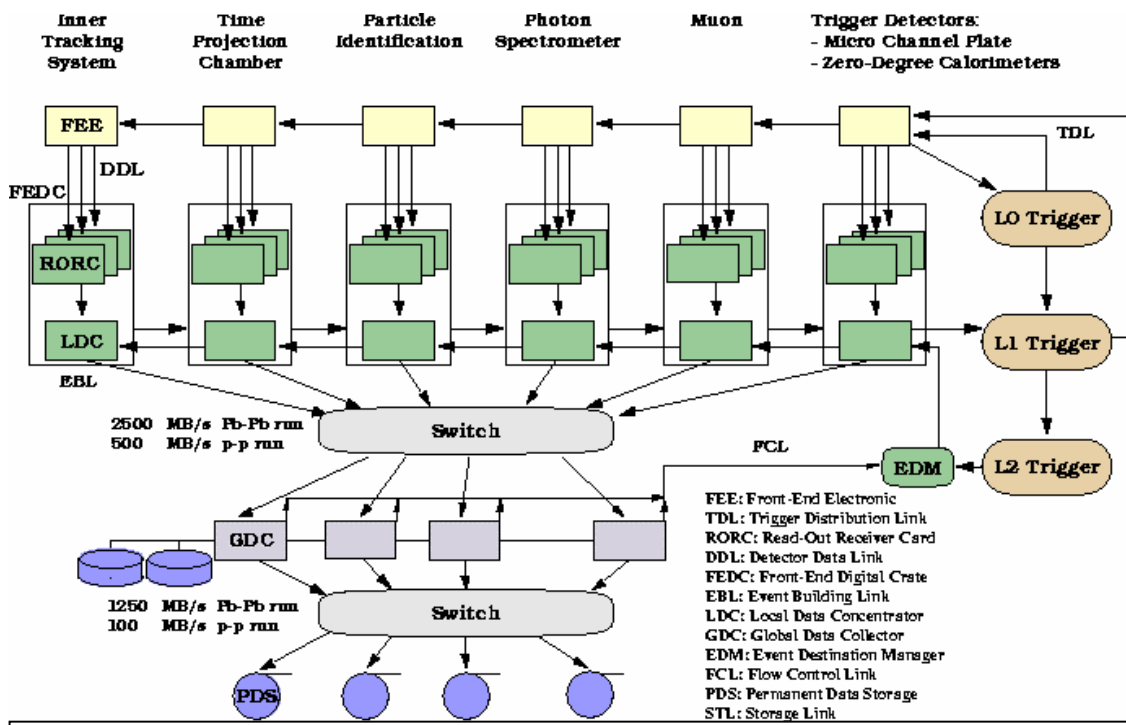
Az ALICE detektor arra lesz „kiélezve”, hogy az ólom-ólom ütközés során nagyon rövid időre létrejövő kvark-gluon plazma nyomaiból minél többet megtaláljon. Egy ütközés során közel

15 000 kirepülő új részecske is keletkezhet. Az ALICE részdetektorai Pb-Pb ütközések során átlagosan több mint 86 MByte adatot szolgáltatnak. A különböző esemény típusok gyakoriságát figyelembe véve, az ALICE detektor egészében kb. 25 Gbyte adatot szolgáltat másodpercenként, és ez nagyjából ugyanannyi, mint amennyit 100 000 Encyclopedia Britannica tartalmaz.

A kifejlesztésre kerülő adatkiolvasó rendszert Detector Data Link-nek, röviden DDL-nek nevezték el. A 8. ábrán láthatjuk az ALICE kísérlet adatgyűjtő rendszerének (DAQ) blokk-vázlatát. Láthatjuk, hogy a DDL szerepe kulcsfontosságú, minden részdetektor ezen keresztül juttatja el a kísérleti adatokat az ún. Local Data Concentrator-ba, az adatgyűjtés első

lépcsőjeként szereplő számítógépre. A rendszerben a DDL a leggyorsabb adatátvivő egység. Átlagban 25 Gbyte adatot kell másodpercenként szállítania. Az LDC-ből már „csak” 2,5 Gbyte/s sebességgel kerülnek az összeállított események a Global Data Concentrator-ba, ahonnan 1,25 Mbyte/s-el kerülnek mágneses adathordozóra az off-line feldolgozáshoz. (Az LDC-ben történő nagyon gyors adat-összerendezés is jelentős kihívás, ami szintén megérne egy külön cikket).

A rendszer mintegy 400 kétirányú, 2,5 Gbit/s sebességű száloptikai adatátviteli vonalat tartalmaz. A DDL fő feladata a detektorban keletkező információ átvitele a 200 m távolságra lévő számítóközpontba. Emellett, a detektor elektronikus egységeinek a számítóközpontból történő távvezérlését



Ábra 8: az ALICE adatgyűjtő rendszere

és táv-tesztelését szintén a DDL-en keresztül látják el. Ugyancsak a DDL segítségével konfigurálják a detektorokat, azaz töltik le, pl. azokat a küszöbértékeket, melyeket a detektor a mérés során az adatmennyiség csökkentésére figyelembe vesz. A DDL következő főbb technikai követelményeknek kellett hogy megfeleljen: rendkívül alacsony bit-hibaarány az adatátvitel során, az adatátviteli hibák nagybiztonságú felderítése, az alacsony szintű nagyenergiájú részecske- és elektromágneses sugárzásokkal szembeni nagyfokú tűrőképesség, tolerancia a mágneses térrel és az elektromos zavarokkal szemben, nagy megbízhatóság, hosszú élettartam (10 év), kis méret és elektromos fogyasztás és végül, de nem utolsó sorban, nem túl magas ár.

Csoportunk 1997 óta dolgozik a DDL fejlesztésén. A fentebb leírt szigorú követelményeknek sikerült eleget tenni. Jelenleg (2004 vége) a DDL-nek a részdetektorokhoz történő integrálása folyik.

A DDL 4 fő részből áll:

1. A forrás egység (angolul Source Interface Unit, röviden SIU), amit a detektorhoz illesztnek. Az illesztő felület pontosan definiált, a definíció része a DDL specifikációnak.
2. A maximum 200 méter hosszú duplex optikai kábel.
3. A cél egység (angolul Destination Interface Unit, röviden DIU), ami fogadja a detektorból érkező adatot.
4. A számítógépbe helyezhető fogadó kártya (angolul Read-Out Receiver Card, röviden RORC), ami a DIU-tól átveszi az adatot és a számítógép

memóriájába juttatja. A DIU és a RORC közti illesztő felület szintén része a DDL szabványnak.

Fejlesztettünk olyan RORC kártyát, ahova a DIU csatlakoztatható és olyan verziót is, ahol a RORC-ra rá lett integrálva egy vagy két DIU.

A SIU és a DIU közötti kábelben a fényjelek szállította információ 2,5 Gbits/s sebességgel halad. Mivel a 8 bit/10 bit konverzió miatt egy byte itt 10 bitnek felel meg, ez a sebesség 250 MByte/s-t jelent. Beszámítva a keretek között menő speciális karaktereket, a hasznos adatok sebessége a vonalon 200 MB/s fölött van. Ez 400 DDL esetén bőven elegendő a 25 Gbyte/s-al keletkező adatok átviteléhez.

A detektor elektronikája 200 Mbyte/s sebességgel adja az adatot a SIU-nak. Ez ugyanezzel a sebességgel kerül a DIU-ba. A jelentkező következő probléma: hogyan lehet ezzel a sebességgel a számítógép memóriájába juttatni az információt?

A probléma megoldásának hardver és szoftver oldala van. A hardver oldalon megtalált megoldás: a PCI bus használata. A PCI (Peripheral Component Interconnect) szabványban definiált sínrendszer ma már elterjedt összekötési módja a személyi számítógépek belső egységeinek. Segítségével 64 bit vihető át 66 MHz sebességgel, azaz maximálisan 528 Mbyte/s sáv szélesség érhető el két számítógép-komponens között. Ez több mint kétszerese a számunka szükséges sebességnek. Ezért a RORC kártyát úgy terveztük, hogy az a fogadó számítógép PCI buszához csatlakoztatható legyen. Ezek után ún. közvetlen memória eléréssel (Direct Memory Access,

röviden DMA) az adat a RORC-ból az LDC memóriájába juttatható, a maximális sebességgel, feltéve, hogy más nem használja a PCI buszt. Ez a feltevés jogos, hiszen az LDC kimondottan az adatgyűjtésre van „kiélezve”, a PCI buszért legfeljebb a különböző DDL vonalak versengenek. Ha egy PCI buszra maximum két DDL csatornát kötünk, a megkívánt sávszélesség folyamatosan rendelkezésre áll.

Hardver szempontból tehát 200 Mbyte/s sebességgel írható az adat a memóriába. De milyen címre? És honnan tudja a felhasználói program, hogy adat érkezett?

A Linux operációs rendszerhez hozzáadtunk egy olyan modult, mely lehetővé teszi, hogy az operációs rendszeren kívül lefoglaljunk egy folytonos memória-területet, mely mind a PCI buszról, mind a felhasználói programokból elérhető. A RORC-ba pedig létrehoztunk egy belső memóriát, melybe fizikai memória címek és blokk hosszak tehetők a PCI buszon keresztül. Így az adatgyűjtő program az adatgyűjtés megkezdése előtt feltöltheti ezt a RORC memóriát. Az adatgyűjtés folyamán, bármikor is érkezik a detektorokból az esemény a DDL-n keresztül a RORC-ba, a RORC a következő szabad címre betölti azt a memóriába, függetlenül attól, hogy a számítógép éppen mivel foglalkozik és anélkül, hogy annak működését megszakítaná. Így az esemény a DDL és a PCI által lehetővé tett maximális sávszélességgel bekerül a számítógép memóriájába.

Az esemény betöltése után a RORC egy szintén előre megadott címre letesz

néhány bajt információt, ami jelzi, hogy az esemény a memóriában van, közli annak hosszát és esetleg egyéb diagnosztikai információt. Az eseményépítő program ezt a memóriacímet figyeli, amikor a következő eseményre szüksége van. Mivel csak a memóriához fordul, nem használja a PCI buszt, nem hátráltatja az események memóriába írását.

A DDL számára követelmény volt az alacsony hiba-előfordulási valószínűség, illetve az esetleges hibák detektálása. Ezt a gyártó által garantáltan alacsony valószínűséggel hibázó alkatrészek és sugárzási környezetben is jól működő programozható eszközök felhasználásával, valamint hibajavító-hiba felismerő firmware készítésével érhetjük el. A DDL részei közül a SIU közvetlenül a detektorhoz csatlakozik, így radioaktív sugárzásnak lesz kitéve. Ennek mértéke előre számítható, becsülhető. A SIU prototípust sugárzásnak tehetjük ki és ellenőrizhetjük, hogy helyesen működik-e. Különböző ravasz firmware-ekkel ki tudjuk mutatni, hogy az esetleg hiba melyik alkatrészben keletkezett, s ezt az alkatrészt sugárzástűrőre cserélhetjük ki. Sugárzási szempontból a legkényesebb alkatrész a programozható logikai eszköz. Sugárzás hatására hibázhat vagy akár el is romolhat a beleírt program. Ezért a nagyon fontos a megfelelő eszköz kiválasztása és gondos tesztelése.

A hiba detektálására a SIU-ban párhuzamos adat-utakat alakíthatunk ki és ellenőrizhetjük, hogy nincs-e eltérés az adatok között. Az adatkeretek végére a SIU ellenőrző számot tesz, amit a DIU szintén kiszámol és összevet a SIU-tól kapott értékkel. Így az esetlegesen

fellépő hibákat nagyon nagy valószínűséggel észre vesszük.

A DDL prototípusok gyártását magyar cégek végezték és várhatóan – mivel minden idevonatkozó ismeret mi birtokunkban van – a kísérlethez szükséges 400 DDL linket is magyar cégek fogják gyártani.

Szoftver

A teljesség kedvéért megemlíjtük, hogy az off-line analízishez szükséges szoftverek készítésében is nagy találmányokról tettek tanúbizonyságot a magyar doktorandusok. Siklér Ferenc megreformálta és ezzel használhatóvá tett az alakfelismerő algoritmust, Veress Gábor módszere lehetővé tette világrekord pontosság elérését a dE/dx ionizáció mérésben, Barna Dániel a Vzerók, a semleges strange-részecskék felkutatására talált ki teljesen egyéni effektív algoritmust és Varga Dezső analízisével képes volt feltámasztani egy már nyugdíjba vonulni látszó kalorimétert, korábban nem sejtett új utakat nyitva meg a neutronok detektálásában az NA49 kísérleten belül.

Összefoglalás, a virtuális magyar detektor

Összefoglalóan valóban elmondhatjuk, hogy a CERN-ben tényleg létezik egy virtuális magyar kísérlet, amelynek részei:

Detektorelemek:

- VF kvarcszálas TeV energiás kaloriméter
- GTOF repülési idő spektrométer
- LG ólomüveg mátrix $\square 0$ részecskék detektálására

Front-end elektronika:

- CFD precíziós analóg diszkriminátor VME-rendszerben

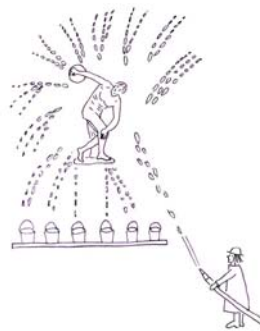
Trigger elektronika:

- Neutron-nyaláb trigger
- Centrality trigger

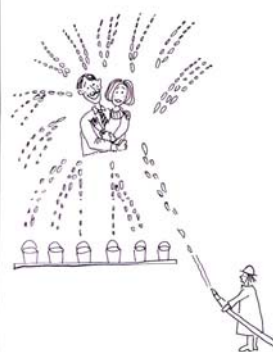
On-line adatgyűjtés:

- S-Link és DDL rendszerek

Végezetül megadjuk a cikk elején feltett rejtvény megoldását. A 9. és 10. ábrán két megoldás látható: az egyik a proton-proton, a másik a proton-deuteron szórást próbálja szimbolizálni.



Ábra 9



Ábra 10

