

Müográfiai direkt probléma megoldása mérés optimalizáláshoz

Tudományos Diákköri Dolgozat

Stefán Boglárka Abigél
ELTE Geofizika MSc

Témavezetők:

Dr. Hamar Gergő
Wigner Fiz.Kut. Nagyenergiás Fizikai Osztály
REGARD L.Inn.Detektorfizika Csoport

Dr. Balázs László
ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

2022.10.



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	1
1.1. A müográfia rövid fejlődéstörténete és felhasználási területei	2
1.1.1. Kozmikus sugárzás	2
1.1.2. Régészeti felhasználás	3
1.1.3. Vulkánkutató	3
1.1.4. Üregkutató	4
1.1.5. Bányász	5
1.2. Részecskefizikai detektorok típusai	6
1.2.1. Emulziós detektorok	6
1.2.2. Szcintillációs detektorok	7
1.2.3. Gáztöltésű detektorok	7
1.3. Hazai müográf detektorok	8
1.3.1. Csoportban használt detektorok típusai	8
1.3.2. Detektor felépítése	8
1.3.3. A jelek digitalizálásának módszere, adatok struktúrája	8
1.3.4. A feldolgozáshoz használt programok	9
1.3.5. A mérésekben résztvevő detektorok paramétereinek jellemzése	9
1.4. A müográfiai adatfeldolgozás lépései, direkt feladat megoldás	13
1.5. A müográfiai inverzió nehézségei	13
1.6. St.Christoph bány	14
2. Eredmények	15
2.1. Fluxus	15
2.2. Koordináta-rendszerek	16
2.3. Effektív felület	18
2.3.1. 1D modell	18
2.3.2. Az effektív felület nyomkövető eljárástól való függése	19
2.3.3. 2D modell	21
2.4. Beütésszám	23
2.5. Döntés hatása a beütések számára	27
2.6. Mérési elrendezés optimalizálása	34
2.7. Közel-horizontális vagy nagyszögben érkező müonok vizsgálata	36
2.8. Borehole típusú detektor mérési elrendezésének modellezése	39
2.9. Konkrét területről származó mérés modellezése, és a mért, modellezett adatok összehasonlítása	41
3. Konklúzió	44
4. Köszönetnyilvánítás	45

1. Bevezető

A tudomány egy új dinamikusan fejlődő területe a müográfia, amely a kozmikus sugárzásból származó müon részecskék detektálásával képes roncsolásmentesen akár hegyméretű objektumok vizsgálatára.

Az egész világon több kutatócsoport is dolgozik ezen tudományterületen, a detektálásra alkalmas rendszerek tervezésén, illetve az adatok feldolgozásának finomításán. A technológia jelentős segítséget jelenthet több területen is, például: geofizika, építészet, régészet, vagy ipari felhasználás.

Geofizikában azért jelenthet átörést egyes esetekben, mivel a légkörből érkező müonok a Bethe-Bloch formula alapján a közet sűrűségével arányosan veszítenek energiájukból. A müonok detektálásával az előbb említett okoknál fogva az átvilágított közet sűrűségeloszlásról kapunk információt. Vulkánok kutatása esetén sokkal jobb felbontóképességgel rendelkezik mint az eddigi módszereink, biztonságosabban vizsgálható a vulkán belső dinamikája. De például mélyfúrású geofizikában is segítséget jelenthet, mivel nagyobb a behatolóképesége mint az eddigi módszereinknek.

A Wigner Fizikai Kutatóközpont Nagyenergiás Fizikai Osztályának REGARD csoportja kifejlesztett több olyan detektortípust, mely alkalmas terepi mérések során a beérkező müonok detektálására.[Oláh 2012][Varga 2016] Ezáltal nemzetközi szinten elismert csoporttá vált az évek során, mely a müográfia több hasznosítási területén is a világ élmezőnyébe tartozik.

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozati munkám során már az előző évi TDK-ban elkezdett majd a Szakdolgozatomban folytatott munkát vittem tovább, aminek hála a REGARD csoport által használt detektorok szerkezetét, működését, majd az adatfeldolgozás lépéseit és nehézségeit megismerhettem, illetve aktuális fejlesztésekben is részt vehettem.

Kutatómunkám fő célja egy olyan modell felállítása, mely a detektor és a mérést jellemző paraméterek, valamint a fluxus ismeretében kiszámítja a várt beütésszámokat, ezáltal képes méréstervezéssel kapcsolatos kérdéseket megválaszolni.

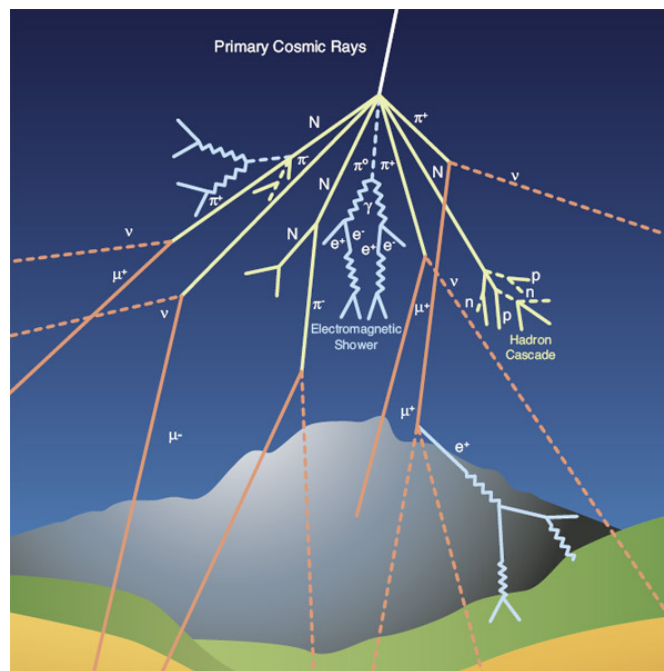
Kidolgozott modellem eredményeit összevetettem valós laboratóriumi kalibrációs mérések eredményeivel, és mind 1D szeleteken mind 2D térképeken megvizsgáltam helyességét. Ezután a modellt implementáltam C++ programnyelven is így tetszőleges bonyolult fluxustérképek illetve mérési helyszínek kezelését téve lehetővé. Terepi mérések közül a németországi St.Christoph bányában elvégzett mérési kampány egy elemére végeztem el az összehasonlítást.

Következő lépésként további effektusokat szeretnék beépíteni a direkt feladat megoldásba, ami megnöveli használható látószöget. Majd konkrét terepi méréseket tervezni, mérésidőket becsülni, detektor tervezéssel kapcsolatos kérdéseket vizsgálnék. Folytatásként át szeretném ültetni ezt a modellt felszíni mérési rendszerekre is.

1.1. A müográfia rövid fejlődéstörténete és felhasználási területei

1.1.1. Kozmikus sugárzás

A kozmikus sugárzás felfedezéséhez azon jelenség vezetett, hogy a magára hagyott, elektromosan töltött tárgyak töltést vesztenek. 1911-ben Victor Hess hőlégballonos kísérlete során bebizonyította, hogy a sugárzás mértéke a magassággal nő, ami a kozmikus eredetű sugárzás hipotézisét támasztotta alá.



1. ábra. Kozmikus sugárzás [CERN]

A további kísérletek alapján bebizonyosodott, hogy a kozmikus sugárzásban meg tudunk különböztetni elsődleges/primer részecskéket, illetve másodlagos/szekunder részecskéket. Egy kozmikus sugárzás keltette részecskezápór sematikus rajza látható az 1. ábrán. A primer részecskék többségét (90 százalék) protonok alkotják. Ezek jórészt nem mérhetőek a Föld felszínén, mivel a légkörben más atomokkal és molekulákkal való ütközések során kölcsönhatásokban vesznek részt, ezen folyamatok során jönnek létre a szekunder részecskék. Ilyenek például a pionok, kaonok és gamma-sugárzás, de a Föld felszínén a müon intenzitása a legjelentősebb zenitben. [Barna 2012]

A müon tulajdonságait tekintve egy nagy tömegű lepton, töltése egy elektronéval egyenlő, nyugalmi tömege 207-szer nagyobb az elektronénál, élettartama $2,2 \cdot 10^{-6}$ s, és fermion. Elektromos töltése miatt anyagon áthaladva energiát veszít a közeg sűrűségével arányosan [Sauli 1977]. A kozmikus müonok széles energiaspektrummal rendelkeznek, az energia nagyságtól függően 10–1000 m mélységbe lejuthatnak a felszín alá. A müon energiaveszteségét adott vastagságú anyagban a Bethe-Block formula írja le, ami alapján meg tudjuk mondani a müonok energiája szerint milyen mélyre képesek lehatolni.

Ezen tulajdonságainak köszönhetően alkalmas müográfiai, transzmissziós müontomográfiai mérések kivitelezéséhez. A müográfiában a részecskefizikai detektorok segítségével a müonok fluxusfüggő beütési számát és a trajektóriát, és bizonyos detektorokkal energiájukat tudjuk megmérni. Az adatfeldolgozás során a mért fluxusból az átvilágított tartomány felszíni geometriájának ismeretében meg tudjuk határozni a tartományon belüli közet közelítő sűrűség-eloszlását;

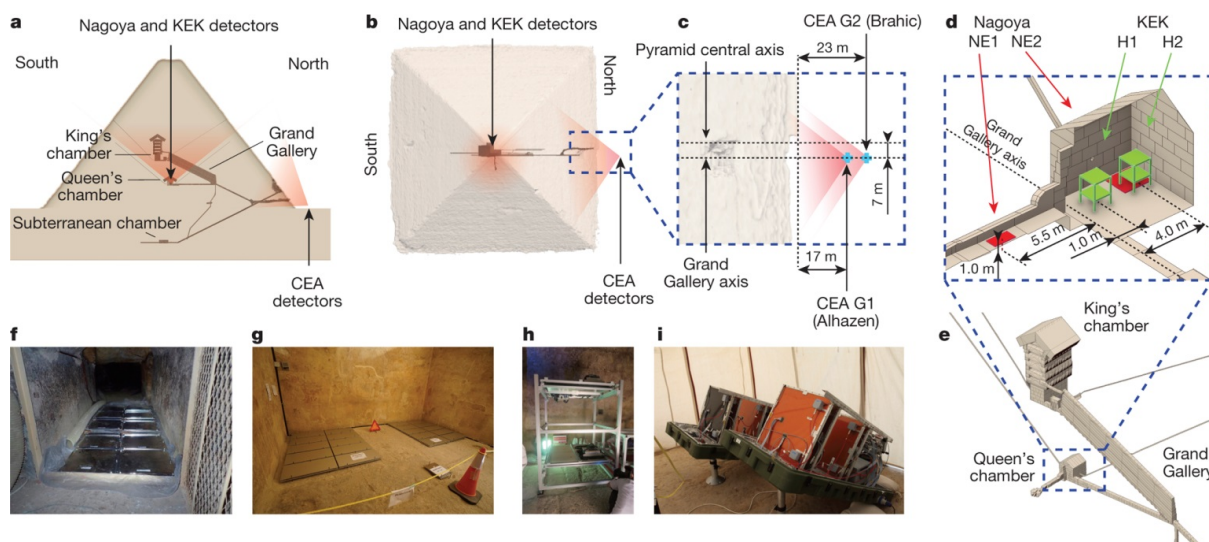
így a sűrűséganomáliák alapján ércetek, üregek helyzetét, és azok kiterjedését is képesek vagyunk rekonstruálni.

1.1.2. Régészeti felhasználás

Egyiptomban a gízai piramisok további vizsgálati lehetőségeként használták a müondetektorokat elsőként.

Először 1966-ban Luis W. Alvarez és csapata mért egy szikrakamra és szcintillátor segítségével a Kheprén piramisban [Alvarez 1970]. Képesek voltak kimutatni a piramis károsítása nélkül, hogy nem létezik 2 m-nél nagyobb ismeretlen üreg.

Majd a 2010-es években a Nagoya Egyetem csapata K. Morishima professzor vezetésével végzett kampányt emulziós kamrákkal Kheopsz piramisban, amibe még két csoport is becsatlakozott. A High Energy Accelerator Research Organization (KEK) csapata szcintillátor alapú detektorokkal, míg a Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) csapata mikromegás detektorokkal. [Moroshima 2017] (lásd: 2. ábra)



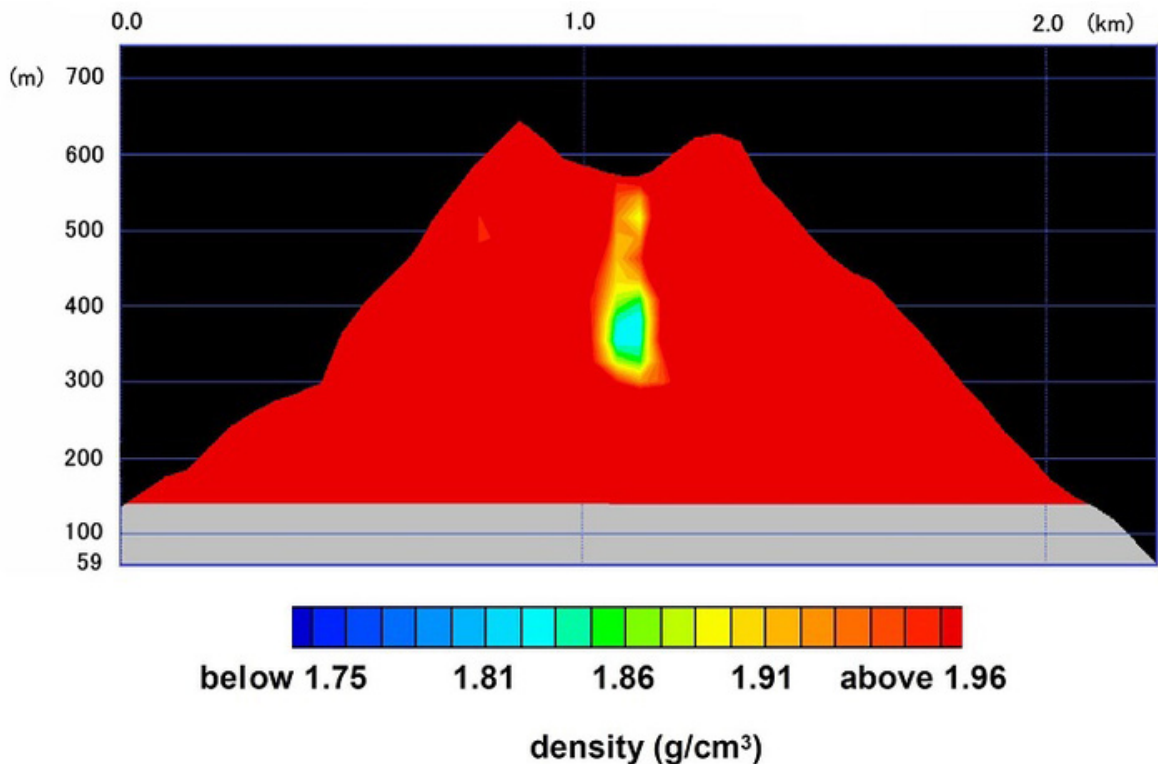
2. ábra. A Nagoya Egyetem mérései a Khufu piramisban [Moroshima 2017]

Érdemes megemlíteni, hogy Európában Olaszországban végeztek ilyen célzattal méréseket. [Saracino 2017] [Menichelli 2007]

1.1.3. Vulkán kutatás

Geofizikai szempontból a legérdekesebb területe a müográfia felhasználásának a vulkán kutatás, amivel számos csoport foglalkozik az egész világon, mivel vulkánok vizsgálata több szempontból is érdekes. Viszont társadalmilag is fontos, hiszen nagyon sok helyen lakott területet is veszélyeztethetnek kitöréseik során. Így a vulkánoknak elengedhetetlen a folyamatos monitorozása, hogy működésükről és jelenlegi aktivitásukról információkat tudjunk szerezni.

Hagyományos geofizikai kutatómódszerek közül a szeizmikus, kőzettani, vulkáni gázok kémiai összetételi és geoelektromos vizsgálatokat tudnak végezni információ szerzés céljából. A müográfiai mérések több szempontból is jobb tulajdonságokkal bírnak. Távolról is tudunk megfigyelést végezni minimális emberi beavatkozással (a mérés során csak a detektor ellenőrzéséhez és a gázpalackok cseréjéhez van szükség emberi beavatkozásra). További fontos tulajdonsága, hogy a vulkán felső néhány száz méterét relatíve jó felbontással lehet vizsgálni.



3. ábra. Satsuma-Iojima vulkán kis sűrűségű magmájáról készült kép[Tanaka 2010]

Jelentős információhoz tudunk így jutni a vulkán dinamikájával és szerkezetével kapcsolatban [Tanaka 2010], lásd pl. 3. ábra. A jövőben abban reménykednek, hogy a müográfia hozzájárulhat a kitörések előrejelzéséhez.

A Wigner FK REGARD csoportja és a Tokiói Egyetem Földrengés Kutatói Intézetének közös kollaborációjának köszönhetően jelentős magyar eredmények is vannak e területen. A Csoport által kifejlesztett detektorok kerültek telepítésre a Sakurajima japán vulkán lábánál. A kollaboráció során folyamatos megfigyelés alatt tartják a Sakurajima vulkánt Kyushun, ami a világon jelenleg a legnagyobb kísérlet, amely egy vulkán folyamatos müografikus monitorozására irányul. Méréseik során képesek voltak kimutatni a vulkán kürtőjében egy lávadugót. [Oláh 2019]

Érdemes megemlíteni, hogy a csoport bekapcsolódott az Etna vizsgálatába is.

1.1.4. Üregkutatás

A müográfia sokkal kisebb méretű anomáliák és szerkezeti változások kimutatására is alkalmas.

2012-ben indított a REGARD Csoport egy nagy mérésorozatot, amellyel a müográfának a speleológiában és üregkutatásban való felhasználhatóságát vizsgálta az általuk kifejlesztett CCC típusú detektorok segítségével. [Oláh 2012]

Első mérési helyszínnek Budán a Molnár János-barlangot választották, ami 95 százaléban vízzel elárasztott barlang. 100 százalékos páratartalomban és konstans hőmérsékleti viszonyok mellett sikeres mérést végeztek. Az adatok feldolgozása végén sikeresen visszakapták a hegy felszíni morfológiáját.

A következő célterületen, a Pilis-hegységben található Ajándék-barlangban 70 m mélyen mértek 2 hónapig egy feltáratlan terület alatt. A kiértékelések után arra a következtetésre jutot-

tak, hogy nincsen a feltáratlan területen ismeretlen barlangi járat.



4. ábra. Királylaki táróban folyik a mérés[Gilányi 2019]

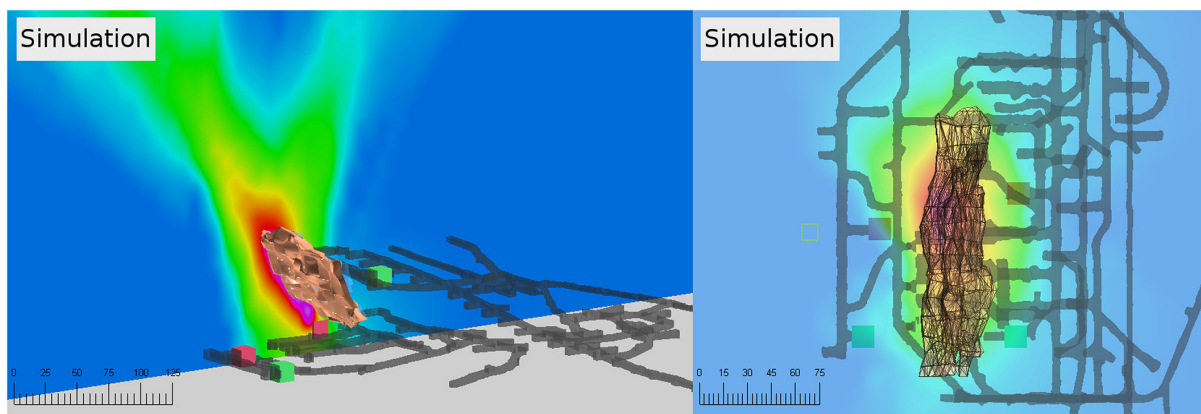
Majd a Sátor-hegyben kialakított Királylaki-táróban folytatódott a méréssorozat, mivel a tárolóból nyíló barlangot fedezték fel 2011-ben, és esetleges további járatrendszerek kimutatását tűzték ki célul. A 4. ábrán a táróban működő detektor látható. Első konklúziók alapján találtak üreget, ez alapján további nagy felbontású méréseket és fúrásokat végeztek [Surányi 2016]. Illetve inverzió és tomográfiát is vizsgáltak ezen adatok felhasználásával. A detektor jó szögfelbontása hozzájárul a müográfia finom térbeli felbontásához.

Párhuzamosan a Budai vár alatt is telepítettek detektorokat egy XVI. -XVII. sz.-i járat kimutatásának céljából.

Külföldön is zajlanak ilyen felhasználhatóságra irányuló kutatások. [Cimmino 2019]

1.1.5. Bányászat

2015-ben már volt bányászati célú mérés kozmikus sugárzásból származó müonokkal [Schouten 2018]. Douglas Schouten, Patrick Ledru által végzett mérések során az Athabasca régióbéli McArthur folyó völgyében található nagyobb uránérc-telepet térképezték fel. Itt már végeztek előzetes geoelektromos méréseket, amelyek alapján megállapították, hogy itt található a világ legnagyobb urán érctelepe. A müontomográf adatok segítségével meg akarták vizsgálni az eddigi geofizikai modell helyességét, illetve ezáltal a mérőeszközük használhatóságát. Berendezésük két szcintillátoros detektoron alapult. A müonok térszög szerinti beütésszámát detektálták, ezek alapján tudtak számolni müonintenzitást. A bánya táróiban több pontban elhelyezett detektorok adatainak feldolgozása után, képesek voltak egy 3D képet alkotni az urántest nagyságáról és elhelyezkedéséről. Inverzióból származó eredményeiket 5.ábrán látható. Mérések fontos tanúsága volt, hogy a háttérsugárzást korrigálni kell.



5. ábra. Inverzióból származó szintetikus müográfiái adatok[Schouten 2018]

1.2. Részecskefizikai detektorok típusai

A részecskefizikában a kifejlesztett detektorokat három feladatra használják:

- az észlelt részecske pályájának meghatározására,
- energiájának megmérésre,
- vagy töltésének, tömegének mérésére.

Az évek során rengeteg típust fejlesztettek ki; azokon belül az altípusok száma is számottevő. A müográfiához a detektoron áthaladó müon irányát kell meghatároznunk, tehát a pályát leíró paraméterek az érdekesek. A részecskefizikában kifejlesztett nyomkövető típusú detektorok alkalmasak ezen feladatra. A pálya meghatározása önmagában segíthet akár a részecskeazonosításban is. Ezen detektor típus főbb fajtái a következők:

- buborék és ködkamrák,
- **emulziós filmek**,
- **gáztöltésű detektorok**,
- **szcintillációs detektorok**,
- félvezető detektorok.

A használható detektorok körét tovább szűkíthetjük bizonyos feltételek alapján. Az első ilyen pont, hogy adatfeldolgozás szempontjából nagy hatásfokkal és kis háttérrel rendelkezzenek. Gyártási módszere elérhető és költséghatékony legyen. A fejlesztések során törekednek a terepi mérések tapasztalait figyelembe véve hordozható, energiatakarékos, felhasználóbarát műszereket tervezni. Ezek alapján három detektorra szűkül a müográfiára alkalmas műszerek száma: emulziós filmekre, szcintillációs és gáztöltésű detektorokra.

1.2.1. Emulziós detektorok

Az egyik legkorábban kifejlesztett detektortípus. Működése fotografikus módszeren alapszik. [Bradt 1948] A lemez adott vastagságú zselészerű réteggel rendelkezik, amiben ezüst-bromid vagy ezüst-klorid kristályok vannak, amik az áthaladó részecske hatására ionizálódnak, felszakadnak. Ha előhívjuk a filmet ezek mintázata előbukkan. Majd mikroszkóp segítségével lehetséges elemezni a pályákat és ionizációk mértékét. Nagyon jó a helyfelbontása ($0.2\mu m$).

Nagyon jól lehet olyan helyeken használni, ahol magas a sugárzás, mivel nem kell a működéséhez elektronika csak a feldolgozáshoz. Nagy hátránya az időigényes feldolgozás, nem triggerelhető, továbbá elég nagy háttérzajt is képes felvenni. A Nagoya-i Egyetem csoportja ilyen típusú detektorral mért a Kheopsz piramisban [Moroshima 2017].

1.2.2. Szcintillációs detektorok

Már 1903-ban a radioaktivitás felfedezésekor észlelték, hogy a cink-szulfid kristály sugárzás hatására fotont bocsát ki. De egészen 1940-ig a gáztöltésű detektorok háttérbe szorították őket, mivel csak α -sugárzást lehetett velük mérni. Végül a fotoelektron-sokszorozó csövek (Bay Zoltán) megjelenése indította el ennek a detektorcsaládnak a további fejlődését. [Bódizs 2006]

Működésük alappillére, hogy a keltett fotonok intenzitása egyenesen arányos a szcintillátorkristálynak átadott energiával. Így az áthaladó részecskék számát és energiáját is képesek mérni. A műszer hatásfokát nagyban befolyásolja a benne lévő kristály tulajdonságai.

Előnyeik közé tartozik ipusztriális előállításuk, nagy hatásfokuk, kis holtidejük. Hátrányuk, hogy helyfelbontásuk nem a legjobb, amit úgy lehet kompenzálni, hogy fizikai szegmen-tációt használnak, ami sok szcintillátorból álló rendszert jelent.

1.2.3. Gáztöltésű detektorok

Működésük során az ionizációt használják ki. A detektorban lévő gázt ionizálja az áthaladó részecske, a keltett elektronokat az elektromos tér segítségével gyűjtjük össze. Ezt a töltés-impulzust mérjük meg, ennek nagysága nagyban függ az alkalmazott térerősség nagyságától. A kimeneten megjelenő elektromos jel nagyságának térerősség függését jellemző görbét a gáztöltésű detektorok jelleggörbéjének nevezzük. [Bódizs 2006]

Ezen jelleggörbe felosztható hat darab egymástól élesen nem elválasztható tartományra. Ezek közül hármat használnak. Az első használható szakasz a telítési tartomány, ezt az ionizációs kamrák használják, itt csak a keletkező elektronokat gyűjtik össze, ami igen alacsony kimenőáramot jelent számunkra.

A második, a proporcionális tartományban a kamrára kapcsolt feszültség nagyságának köszönhetően, hogy az elsődleges ionizációból származó elektronokat olyan sebességre gyorsítja az anód előtt, hogy újabb gázatomokat ionizálnak további szabad elektronok keletkezzenek, s ők is további elektronokat hoznak létre. Tehát egy lokális elektronlavinát tapasztalhatunk a gázsokszorozás hatására. A sokszorozási tényező általában 10^3 - 10^6 nagyságrendű. Ebben a tartományban működő detektorok a proporcionális számlálók.

A harmadik, a GM tartomány esetén, az anódfeszültség akkora, hogy az elektronlavina kiterjed az egész anódszál hosszában. Itt működnek a Geiger-Müller-detektorok. [Bódizs 2006]

MWPC Azaz igény vezetett a sokszálas proporcionális kamra (MWPC, Multi-wire Proportional Chamber) megszületéséhez, hogy a részecske trajektóriájának pontjait meghatározzuk. George Charpak készítette el az első ilyen kamrát [Charpak 1970], amiért 1992-ben fizikai Nobel-díjat kapott.

A detektort két párhuzamos vezető lemez és közöttük egymással párhuzamosan elhelyezkedő vékony szálak alkotják. A szálakra pozitív feszültséget kapcsolva olyan elektromos tér jön létre, ami megteremti a lokális elektronlavinához szükséges feltételeket, és összegyűjti az ionizációból származó elektronokat a szálra, ugyanakkor a lemezekhez közel homogénnek tekinthető [Sauli 1977]. Emiatt a speciális tér miatt a lavina csak a közelben lévő szálon válik érzékelhetővé.

Előnye, hogy alacsony a gyártási költsége, jó helyfelbontással rendelkezik. Hátránya, hogy a szálakat feszesen kell tartani, amit feszítőkerettel érnek el. [Charpak 1970]

A proporcionális tartományban működnek még a MM és RPC típusú detektorok. [Andrea 2006] [Giometaris 1996]

1.3. Hazai müögráf detektorok

1.3.1. Csoportban használt detektorok típusai

Magyarországon a Wigner Fizikai Kutatóközpontban az Innovatív Detektorfejlesztő "Lendület" Kutatócsoport / REGARD csoport foglalkozik gáztöltésű, részecskefizikai detektorok kutatásával és fejlesztésével. Alaputatási és alkalmazott fizikai típusú felhasználási területekre, ahol legfőbb irány a müögráfiai leképezés.

1.3.2. Detektor felépítése

A Csoport alapvetően két detektor típust használ müögráfiára, mind a kettő a Charpak által kifejlesztett MWPC detektor továbbfejlesztett változata. Fontos megemlíteni, hogy a müon-pálya meghatározásához ezen detektorok több kamrából állnak. Detektorokat 1+1 dimenzióban szegmentált egységeken olvassuk ki, egyik koordináta a térformáló szálakból, másik a parkettákból/parketta-szálakból kapjuk meg.

Ezek a típusok a megfelelő mérési elrendezésben alkalmasak mind felszín feletti mind felszín alatti terepi mérésekre.

MWPC A REGARD MWPC detektor abban különbözik Charpak kamrájától, hogy a szálakra nem egységesen pozitív feszültséget kapcsolunk, hanem csak az érzékeny szálakra kapcsolunk pozitív feszültséget, míg a térformáló szálak 0 feszültségűek lesznek, ezáltal nem szükséges nehéz feszítőkeretet használni, de így is szükséges a szálsík és a katód között távolságot tartani. [Varga 2016]

CCC A Close Cathode Chamber kidolgozásánál a fő szempont az volt, hogy a nehéz feszítőkeretet kiiktathassák azáltal, hogy olyan detektort hoznak létre, mely nem érzékeny arra, ha a szálak közelebb kerülnek a katódhoz, ezáltal egy költséghatékonyabb verzót létrehozva. Ezt úgy oldották meg, hogy negatív potenciált kapcsolnak a térformáló szálakra, ez pedig érzéketlenné tette a kamrát az ellen, hogy a szálsík milyen távol található a katódtól. [Varga 2010]

1.3.3. A jelek digitalizálásának módszere, adatok struktúrája

A detektor kamráiban a kialakuló analóg jel digitalizálása a következőképpen történik. A kamrán áthaladó müon ionizálja a gázt, a keltett elektronok elektronlavinát indítanak, amit az összekötött érzékeny szálakról kivezetve erősítünk. Ha a jel nagysága nagyobb mint egy bizonyos küszöbérték, akkor küld egy triggerjelet az adatgyűjtő rendszer felé. Amennyiben a detektorban több kamra is jelzett egyszerre (koincidencia), tehát vélhetően müon haladt át, élesedik a jelkiolvasó rendszer, és elfogadjuk mint egy müoneseményt. A rendszer kis késleltetéssel elkezd mintavételezni, ezzel a térformáló szálakról (field wire) és parkettákról (pad) az áthaladó müon trajektóriájának kamrára eső X,Y koordinátákat kaphatjuk meg. Mintavételezés közben lefagyasztja a detektálást (busy), hogy az esetlegesen áthaladó új müonok ne zavarják a kiolvasást. A digitalizálás során minden szálnak megfelelő csatorna 1 bitet kap: 1-es, ha az a

szál megszólalt; 0-ás, ha nem. A kiolvasás során a biteket beépített shift-registerek juttatják a kiolvasóegységhez, ami egy SD kártyára egy fájlba kiírja az adatokat.

A nyers adatfájl adott struktúrával rendelkezik. [Hamar 2015] Magában a dokumentumban minden sor egy eseményt jelöl. A számsor első tagja az eseményazonosítást szolgálja. Utána az előző és a mostani esemény között eltelt idő következik. Majd kamránként a térformáló szálak és parketták digitalizált jelei. Ezeket követi a kamránként az érzékenyszálakon összegyűjtött töltések nagysága ADC egységekben. [Oláh 2011] Ha egy fájl mérete elér egy bizonyos nagyságot, a kiolvasó lezárja, tömöríti, majd nyit egy újat.

1.3.4. A feldolgozáshoz használt programok

A Csoport az adatfeldolgozáshoz két saját folyamatosan fejlesztés alatt álló programot használ, melyeket a megfelelő lépések elvégzésére dolgoztak ki.

A mérésekből származó adatok analízisét Hamar Gergő által írt *Regard-Muography-Tracking* programmal végezzük. Bemeneti fájlunk a nyersadatrendszert, az adott detektor geometriáját jellemző és analízishez szükséges további paramétereket tartalmazó fájlokat kell beadni. A program nem csak fluxust számolja ki, hanem rengeteg a detektort és a kamrákat egyenként jellemző információkat szolgáltat. Számomra az egyes mérések releváns adatait a beütésszám, fluxus és effektív felület jelentette, melyeket a modellem helyességének vizsgálatára használtam fel.

A másik Nyitrai Gábor által fejlesztett program segítségével tudunk az analízisből kapott adatokból sűrűség-hosszakat, illetve közet-hosszakat számolni. Két további funkcióval is rendelkezik. Egyszer a 3D-s lézeres letapogatásokból származó pontfelhőkből közet-hosszakat számol. Másik pedig, hogy adott sűrűség-hossz térképekből fluxustérképeket tud gyártani.

1.3.5. A mérésekben résztvevő detektorok paramétereinek jellemzése

Dolgozatom elkészítéséhez a REGARD csoport 3 detektorának mérési eredményeit használtam fel. A műszerek működési elve azonos volt, de a felhasználási területeiknek megfelelően specifikus kialakítással rendelkeznek.

Ebben a fejezetben a detektorokat jellemző geometriai, illetve mérés-specifikus paramétereket szedtem össze. Továbbá részletezem, hogy mely feladatrészekben használtam fel adataikat. Felhasználási területeiket is jellemzem.

A detektort jellemző geometriai paraméterek egyértelműen szükségesek a direkt probléma megoldásához:

- L_x, L_y - a detektor x, y irányú kiterjedése
- N_k - a kamrák száma a detektorban
- h - a detektor magassága
- a - a kamrák távolsága

A másik a mérés-specifikus paraméterek, amik a következők általánosan:

- K - megkövetelt beütésszám
- γ - a döntés szöge
- ω - a forgatás szöge
- η - a hatásfoka a detektornak adott mérés során

- t - mérés ideje
- F_0 - a $\cos^2$ fluxusmodellhez tartozó szorzó

MTL1

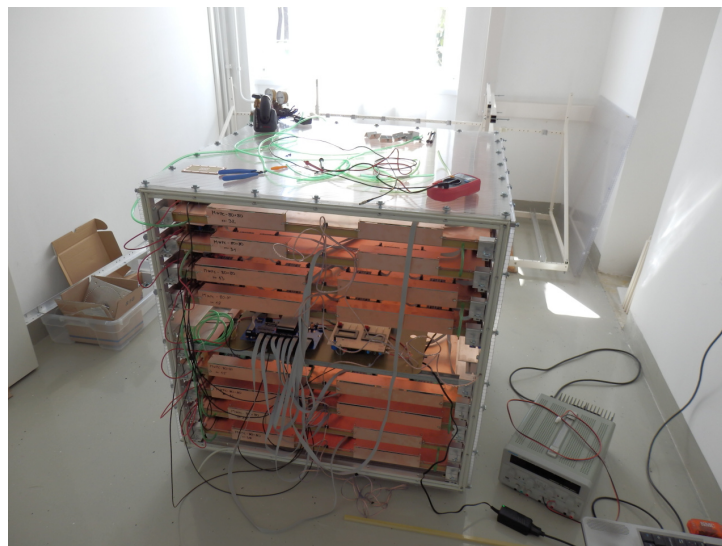
Az MTL1 müográf (lásd:6 ábra) méreteiből adódóan egy nagyobb effektív felülettel rendelkező detektor, ami jelentős előnyt jelent a mérés ideje szempontjából, viszont még könnyen szállítható. Elsősorban bányászati célú mérésekre tökéletesen alkalmas. MTL1-t az Esztramos táróban is használták (lásd: 7. ábra). Az MTL1 nevű műszer adatait a 2.1.,2.3.,2.4., 2.5., 2.7. fejezetekben használtam fel. Fenti adatait a 1. és 2. táblában gyűjtöttem össze.

	L_x [m]	L_y [m]	N_k [1]	h [m]	a [m]
MTL1	0.768	0.768	8	0.56	0.08

1. táblázat

Run	K [1]	γ [°]	η [1]	t [min]	$F_0[\frac{1}{m^2 sr s}]$
61	6	0	0.99	190	100
67	6	-29.9	0.99	216	100
66	6	-44.5	0.997	254	100
69	6	-59.9	0.99	315	100
72	6	-89.5	0.977	434	100

2. táblázat



6. ábra. Az MTL1 müográf laboratóriumi kalibrációs mérések tesztmérése egy nagyobb, tervezett átalakítás utáni próbamérés során.

MTS51

Mint az 8. ábrán jól látszik ezen típus az effektív felületet és méretét tekintve egy közepes MWPC detektor. Alagutakban történő méréseknél alkalmazzák. A St. Christoph bányában mért adatokból számolt fluxus térképet használtam fel a kódom teszteléséhez a 2.9. fejezetben. A detektor és mérés adatait a 3. és 4. táblák tartalmazzák.



7. ábra. MTL1 Esztramoson, telepítés közben



8. ábra. MTS51 rendszer a St. Christoph bánya tárójában

	L_x [m]	L_y [m]	N_k [1]	h [m]	a [m]
MTS51	0.512	0.512	8	0.3745	0.0535

3. táblázat

Run	K [1]	γ [°]	ω [°]	η [1]	t
37	6	-30	232.5	0.99	15d 4h

4. táblázat

BHD2

BHD2 detektorral és méréseivel kapcsolatos főbb paramétereket a 5., 6. táblák tartalmazzák.

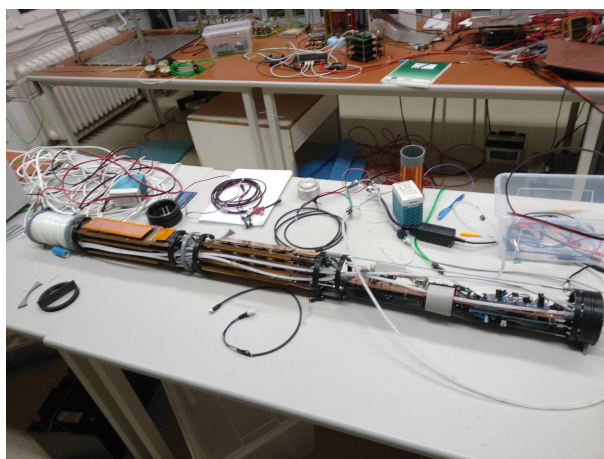
Mint az adatokból és a 9. képen látható egy sokkal kisebb műszerről van szó. Ez speciális felhasználási céljának tudható be, mivel kifejezetten mélyfúrású mérésekhez fejlesztette ki a csoport, innen ered a neve is BoreHole Detector /BHD/. Igen nagy reményeket táplálnak ezen típus felé, hiszen a fúrás sokkal nagyobb környezetéről kapunk információt bizonyos esetben mint a geofizikai szondák esetén. A CCC mellett szól az a tény is, hogy nem érzékeny a cased hole mérések esetén a fúrás fémbéléscsővére se. Alkalmazhatósága aktív kutatási terület.

	L_x [m]	L_y [m]	N_k [1]	h [m]	a [m]
BHD2	0.048	0.192	4	0.06	0.02

5. táblázat

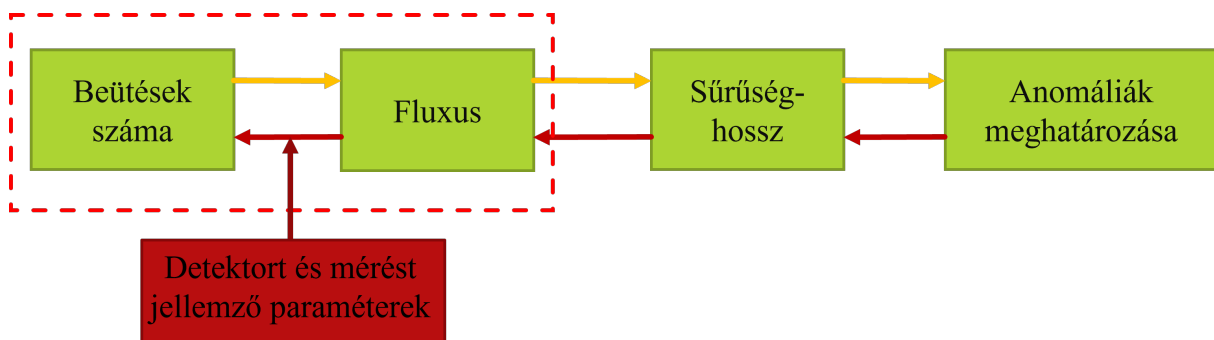
Run	K [1]	γ [°]	η [1]	t [min]	$F_0[\frac{1}{m^2 sr s}]$
70	3	90	0.97	11516	15

6. táblázat



9. ábra. A BHD2 detektor laborban

1.4. A müográfiai adatfeldolgozás lépései, direkt feladat megoldás



10. ábra. Adatfeldolgozás irányát a sárga nyíl jelöli, míg a piros az inverzió és a direkt feladat megoldást szemlélteti.

Az adatfeldolgozás első lépése, hogy a detektált beütésekre trajektóriákat illesztünk, a pályák és a beütések ismeretében fluxusszámítás történik. A fluxus minden egyes geológiai képződmény esetében arra jellemző lesz, mondhatni ez a közetfizikai mennyiségünk, amit közvetve határozunk meg. Majd fluxust áttanszformáljuk a térgeometriából megkapott közethosszak segítségével látszólagos sűrűség-hosszakra. A geológia ismeretében van egy átlagsűrűség modellünk, az ettől való eltérése a mért értékeknek lesz maga a hiányzó közethosszuk. Így kapjuk meg az anomáliákat.

TDK dolgozatom fő feladata, hogy a fluxus és a beütések száma között olyan modellt állítsak föl, mellyel képes legyek rekonstruálni a várható beütésszám értékeket, ha ismerem a mérési elrendezés geometriáját és a mérés paramétereit. Ennek fontossága abból ered, hogy a beütésszámok Poisson-eloszlást követnek, amiből következik, hogy az adatok szórása $\sqrt{N}$ lesz. Ennek hatása viszont a hibaterjedés következtében a további számítási eredmények bizonytalanságába is belefog szólni. Ezekből következik, hogy kulcsfontosságú kérdés, hogy megfelelő mennyiségű beütést detektáljunk. Ezek mennyisége viszont csökkenni is fog, mivel rögzítünk más nem müonok által okozott eseményeket is, amiktől meg kell szűrni az események halmazát. pl.: radioaktív háttérsugárzás, elektronikai zaj, detektorban keletkezett másodlagos részecskék, más kozmikus részecskék [Rábóczi 2022] Ezért az adatrendszert szűrni kell.

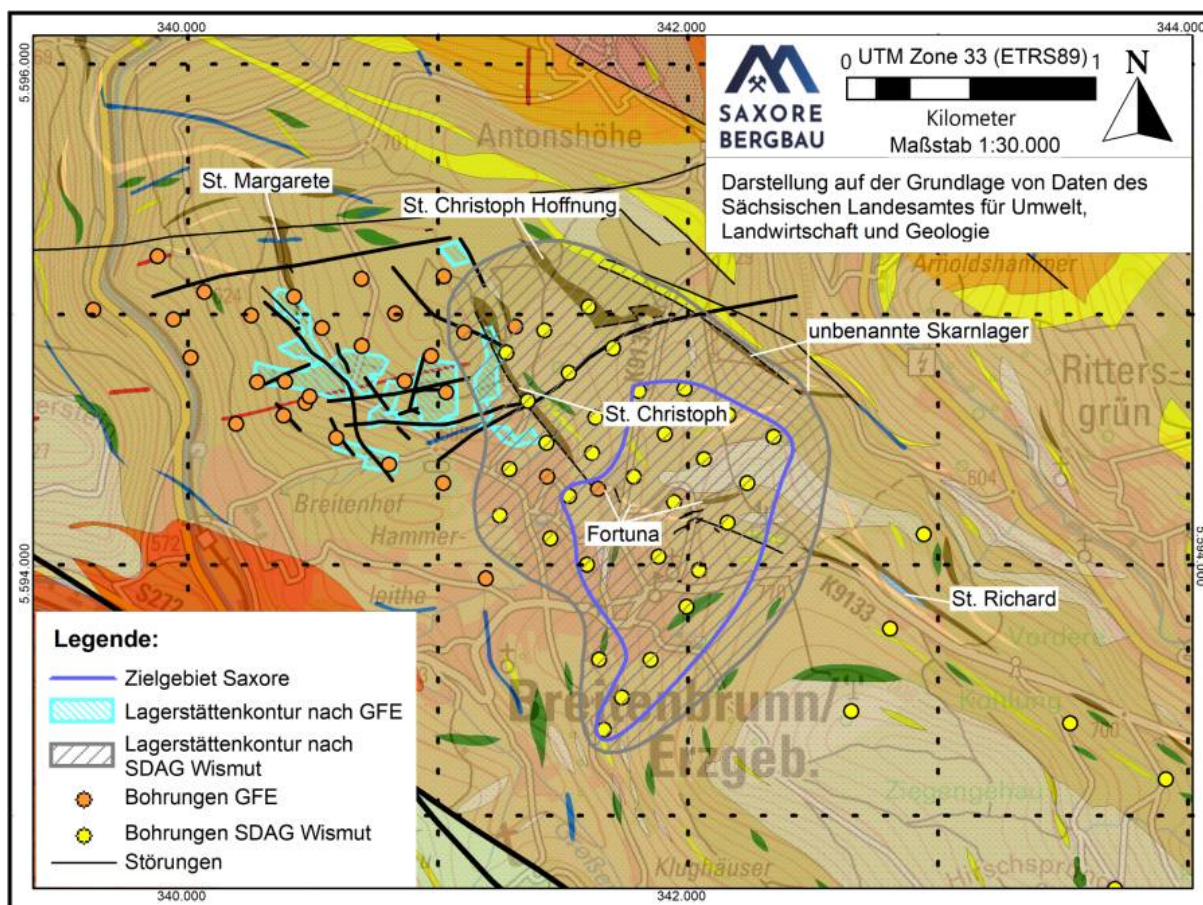
A modellem helyességét valós mérési adatokkal vizsgáltam meg, megnéztem felhasználhatóságának határait. A direkt feladatok megoldásával méréstervezéssel kapcsolatos kérdéseket is megválasoltam. Detektorfejlesztéssel kapcsolatos döntések meghozatalában is segítséget nyújthat.

Ezek után a modellt átültettem C++ nyelvre, hogy konkrét felszín alatti kampányból származó fluxustérképét felhasználva beütésszámokat szimulálhassak le vele.

1.5. A müográfiai inverzió nehézségei

A REGARD csoport Királylaki-tározóban mért kampányából származó adatrendszerre végzett el 2D inverziót, a sűrűségeloszlás közelítő rekonstrukcióját. Az előbb említett hibaterjedés miatt itt is jelentős szerepe van a megfelelő mennyiségű eseménynek. De mégis hogyan? Az inverzióknak ennél a kutatási módszer esetében több nehézséggel szembe kell néznie. Több az illesztendő pontunk, mint amennyi mérési pontunk van. A leképezés egyoldalú. Továbbá, ha kevés a rögzített esemény, akkor nagy lesz bizonyos sugárutakon a mérés bizonytalansága. Itt látszódik, hogy mennyire fontos a megfelelő mérési idő és elrendezés fontossága, amit meg tudunk mondani a direkt feladat megoldásának segítségével.[Balázs 2022/23]

1.6. St.Christoph bánya



11. ábra. A St. Christoph környéki terület térképe. Láthatók a fúrások és a vetőrendszer maga is. [SAXORE]

Egy együttműködésnek köszönhetően a REGARD csoportnak lehetősége nyílt a németországi Freiburg mellett található St. Christoph bányában egy kampányt lefolytatni. A C++ kódot ezen területről származó adatokra futtattam le próbaként.

A terület geológiáját tekintve 3 szkarn telep jelentős, ezek a nyugati Erzgebirge metamorf Variscusi egységébe vannak beágyazódva. Geokémiaailag jól elkülöníthetők gránitok és mikrogránitok. A magmás tevékenységekhez kapcsolódik a területen a magmás-hidrotermás különböző típusú formációk létrejötte, ilyenek a szkarnok, a greizenek, a polimetallikus tellérek, amik az előbb említett vulkáni intruziók körül alakultak ki, melyek az ércbányászat cél területeit jelentik.

A szkarn telepek az ÉNY-DK irányú Gera-Jáchymov vetőzónában helyezkednek el. A 3 fő szkarn egység van: a Pöhla-Globenstein, a Hämmerlein és a Tellerhäuser egység, ezeken belül található a Dreiberg és a Zweibach szkarn testek. [Lefebvre 2019]

A területen több fúrás és magmintavétel is történt a terület jobb feltárása érdekében.

2. Eredmények

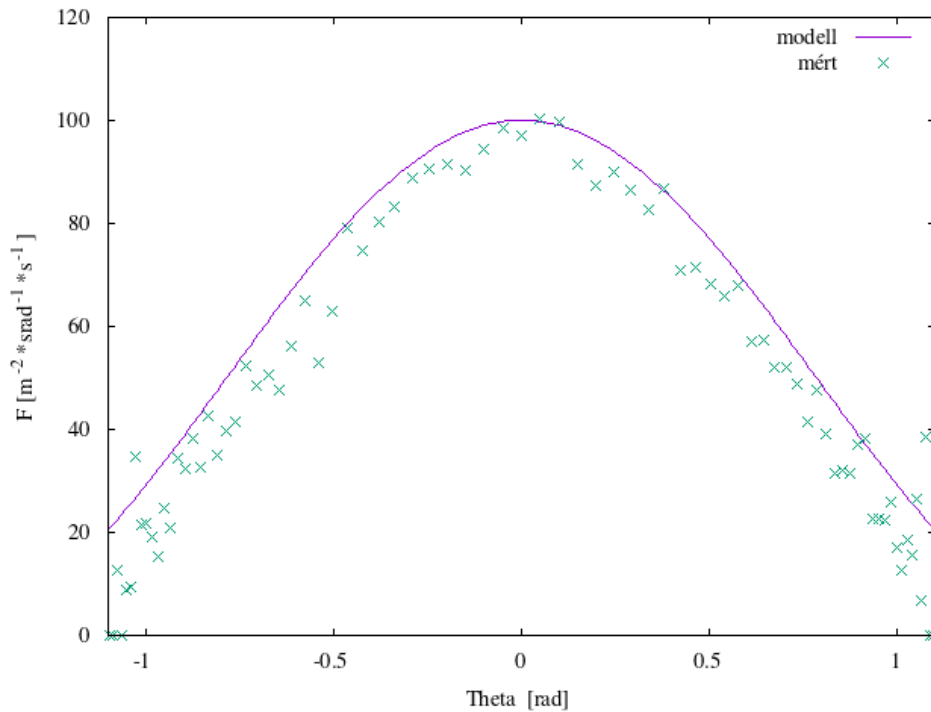
2.1. Fluxus

Mint 1.4. fejezetben tárgyaltam, a fluxus változása mint fizikai mennyiség a kulcsa a müográfiai képképzésnek. Maga a fluxus energia integrált formája az egységnyi idő alatt, egységnyi felületen és egységnyi térszögben beérkező részecskék száma az alábbi képlet alapján:

$$F = \frac{N}{tA_{eff}\Omega} \quad (1)$$

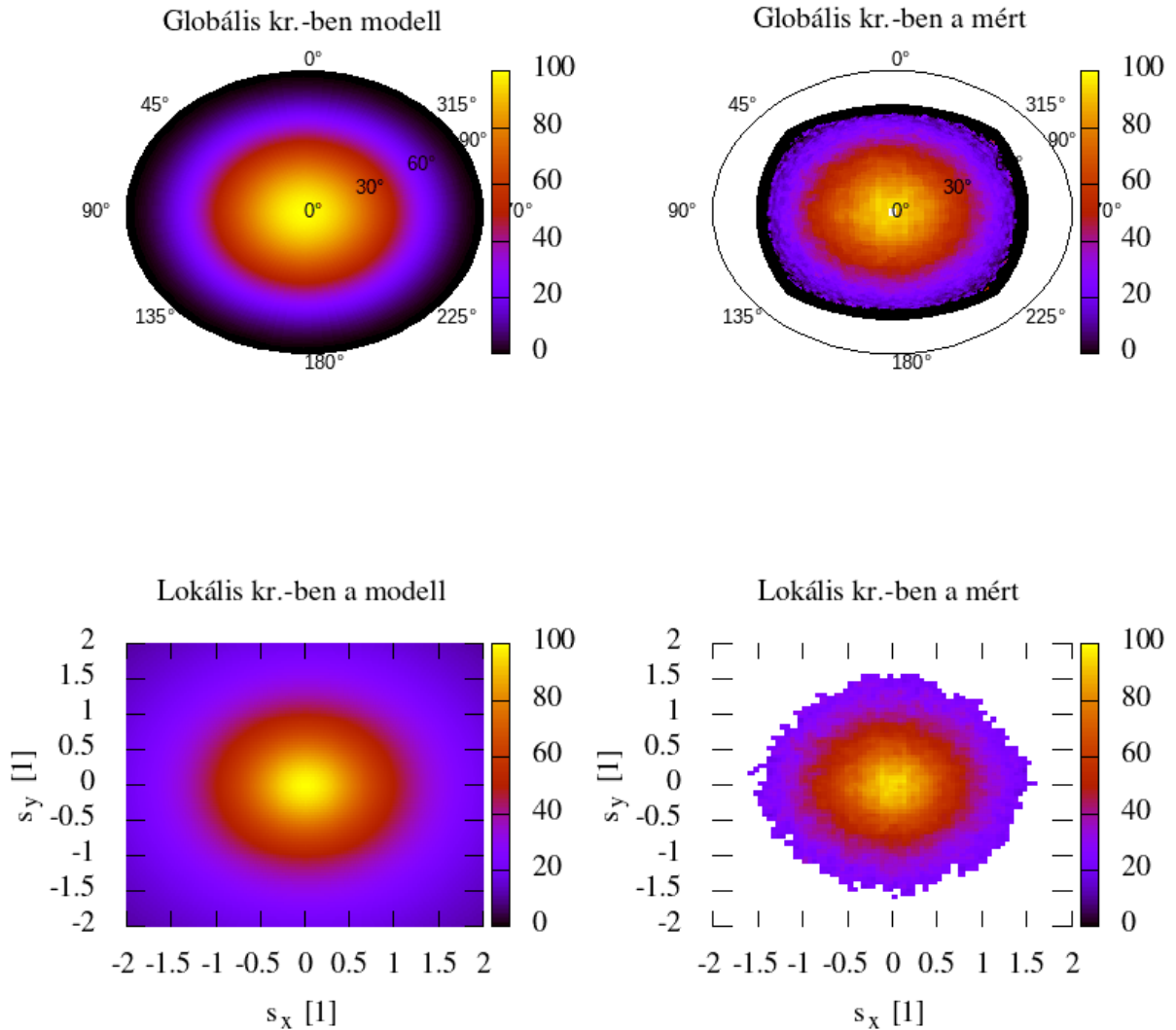
ahol F a fluxus, N a beérkező müonok száma, t a mérési ideje, A az effektív felület, Ω pedig a térszög.

A Föld felszíni müonfluxusra egy $F(\theta, \phi) = F_0 \cos^2(\theta)$ közelítéssel éltem, ahol F_0 a Föld felszínén zenitben mért értéke.[Bektasoglu 2013] Fontos referenciaszintnek tekintjük.



12. ábra. A fluxus 1D modelljének mért értékkel vett összehasonlítása.
Látható kisebb eltérés, de nem jelentős.

A 12. ábrán vettem a fluxus zenitben mért értékét, amit összehasonlítottam a modell eredményeivel az MTL1 detektor egy mérése esetén 1D-ben, látható jól fedti a kezdetleges modell az értékeket. Ugyanezt megtettem 2D esetén is, lásd: 13. ábra.



13. ábra. MTL1 detektor esetén a fluxus felszínen döntés nélkül. Az első sorban globális kr.-ben ábrázolva először a modell, majd a mért értékek. A következő sorban ugyanez csak lokális kr.-ben.

2.2. Koordináta-rendszerek

Először definiáltam milyen típusú koordináta-rendszerekben dolgoztam. Többféle koordináta-rendszert használok, aszerint melyik mennyiséget melyikben lehet elsődlegesen értelmezni.

Használtam egyszer egy globális koordináta-rendszert (kr.), mely egy földi kr.-hez kötött gömbi kr.. A globális kr.-t a zenit- (θ) és azimut-szöggel (ϕ) tudjuk jellemezni. A θ értéke a $[0^\circ : 90^\circ]$ tartományban mozog, a ϕ pedig $[0^\circ : 360^\circ]$ közötti értékeket vehet fel. A globális koordináta-rendszerben könnyű kifejezni a fluxust, továbbá itt tudok összehasonlításokat tenni egyes detektorok mérési adatai között.

A földi kr. esetén egy derékszögű kr.-ről beszélünk, melynek x tengelye NyK, y tengelye DÉ irányú, z tengelye pedig a Föld középpontjától elfelé mutat. Tehát egy balsodrású rendszerről

beszélhetünk.

A detektorhoz rögzített lokális koordináta-rendszer derékszögű, s_x , s_y meredekségekkel/slope érdemes jellemezni, mivel a detektornak ezen tér a természetes rendszere ahol a müon-pályákat értelmezzük. A müográf pozicionálása úgy történik, hogy a z tengely körül forgatást (ω), az x vagy y tengelyek körül pedig döntést (γ) tudunk végezni.

A globális- és lokális koordináta-rendszerek között az átváltás jól látható, hogy $\gamma = 0^\circ$ esetén $(\tan \theta)^2 = s_x^2 + s_y^2$ és $\tan \phi = s_y/s_x$ (lásd: 14.ábra). A döntési és forgatási szögeket is figyelembe véve, a koordináta-rendszerek közötti átváltás az alábbiak szerint alakul:

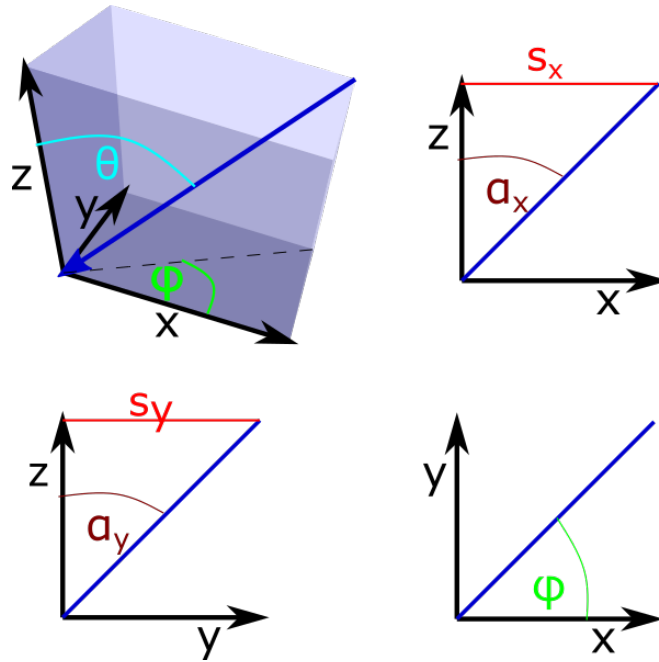
$$\theta = \arctan \sqrt{\tan^2(\arctan s_y - \gamma) + s_x^2} \quad (2)$$

$$\phi = \arctan(\tan(\arctan s_y - \gamma)/s_x) + \omega \quad (3)$$

$$s_x = \tan \theta \cos(\phi - \omega) = \tan \alpha_x \quad (4)$$

$$s_y = \tan(\arctan(\sin(\phi - \omega) \tan \theta) + \gamma) = \tan \alpha_y \quad (5)$$

A modellem eredményeit és mért értékeket mindkét rendszerben ábrázoltam, és összehasonlítottam.



14. ábra. Descartes, globális és lokáliskoordináta-rendszer ábrázolása $\gamma = 0^\circ$ esetén. A beérkező müon pályáját a kék nyíl jelöli a bal felső ábrán, a többin az adott síkra eső vetületeit szimbolizálják a kék vonalak.

2.3. Effektív felület

A korábban is nevezett "effektív felület" bevezését az indokolja, hogy a beérkezési szög növekedésével csökken azon felület nagysága, amin az adott szögből beérkező részecskéket detektálni vagyunk képesek, valamint a detektor hatásfoka nem mindig 100%. Tehát az effektív felület azon felület beérkezési szögre vett vetületének nagysága szorozva a hatásfokkal, amelyen az adott irányból érkező müonokat detektálni vagyunk képesek. A vetület miatt megjelenik egy $\cos \vartheta$ -s szorzó a lokáliskoordináta-rendszerben számolva, ahol most a ϑ a detektorhoz képest beérkezési szöget jelenti. Fontos, ha nem döntünk és nem forgatunk, csak abban az esetben lesz $\vartheta = \theta$.

2.3.1. 1D modell

Az adott beérkezési szöghöz tartozó effektív felület (A_{eff}), a detektor magassága ismeretében néhány szögfüggvény segítségével a következőképpen határozható meg, az 15. ábra jelöléseit használva:

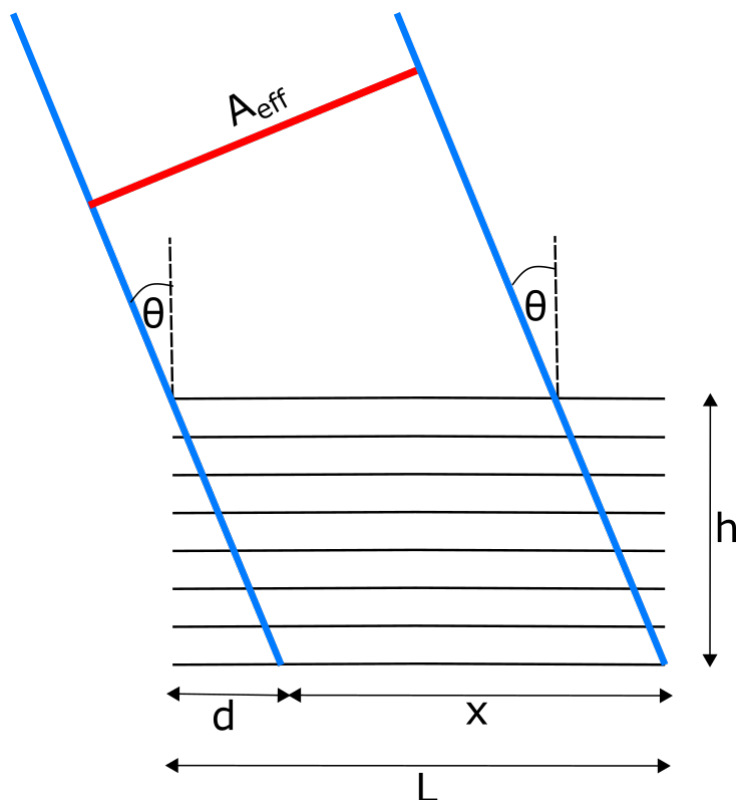
$$\frac{d}{h} = \tan \vartheta \quad (6)$$

$$d = h \tan \vartheta \quad (7)$$

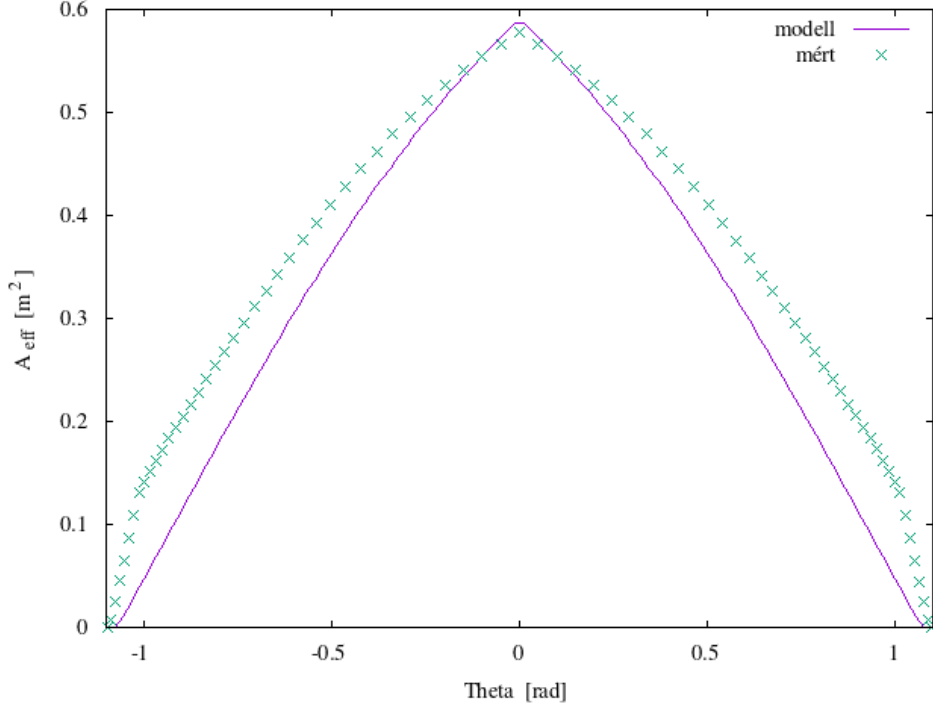
$$A_{eff} = x \cdot \eta = (L - d) \cos \vartheta \cdot \eta = (L - h \cdot \tan \vartheta) \cdot \cos \vartheta \cdot \eta \quad (8)$$

ahol η a hatásfokot, d a detektor vak részét, míg x az érzékeny részét jelöli.

Ezen nagyon egyszerűsített 1D modellt összevetettem konkrét mérési adatok egy szeletével, amit az 16. ábrán mutatok be. Nagyságrendileg jó egyezést ad, ám olyan mintha alulbecsülne a mért értékeket, amit egy plusz hatás okoz. Ennek az okát a 2.3.2. fejezetben vizsgálom.



15. ábra. 8 kamrából álló MTL1 detektor metszetábrája az effektív felület szemléltetéséhez.



16. ábra. Effektív felület 1D modellje mért értékkel együtt ábrázolva a beérkezés szöge szerint.

2.3.2. Az effektív felület nyomkövető eljárástól való függése

Itt érdemes egy kitérőt tennünk. Az A_{eff} nemcsak a beesési szögtől és helyétől változhat meg, hanem attól is, hogy pontosan mit tekintünk a detektoron áthaladó müon eseménynek. Praktikusra fordítva: mennyi kamrának kell megszólalnia ahhoz, hogy elhiggyük, hogy az egy egyenesbe eső pontok valóban egy müonnak a nyomvonalát képezik.

A detektor több kamrából áll össze, a kamrák alapvetően a beütések számait és helyeit detektálják, de egy ilyen rendszerben az összes kamra adatainak segítségével képesek vagyunk magát a müon pályáját is közelítőleg rekonstruálni. Viszont fontos szűrni, hogy mely adat-együttest tekintünk nagy valószínűséggel müoneseménynek. Egy kamrán áthaladó detektált részecske egy beütést generál, amik együttese határozza meg a nyomvonalat. Például egy 8 kamrából álló rendszernél nem szükségszerű, hogy a részecske mindegyiken átmenjen, egy 7-pontos vagy 6-pontos egyenes vonalú beütéssort nyugodtan vehetünk áthaladó müoneseménynek.

Ha megvizsgáljuk a 17. ábrát, látható az 1D modell esetén, hogyha kevesebb beütést követelek meg a rendszertől az effektív hosszhoz $2\delta L$ adódik hozzá.

A δL_k -t az előző fejezeten hasonlóan tudjuk levezetni:

$$\delta L_7 = a \cdot \tan \vartheta \quad (9)$$

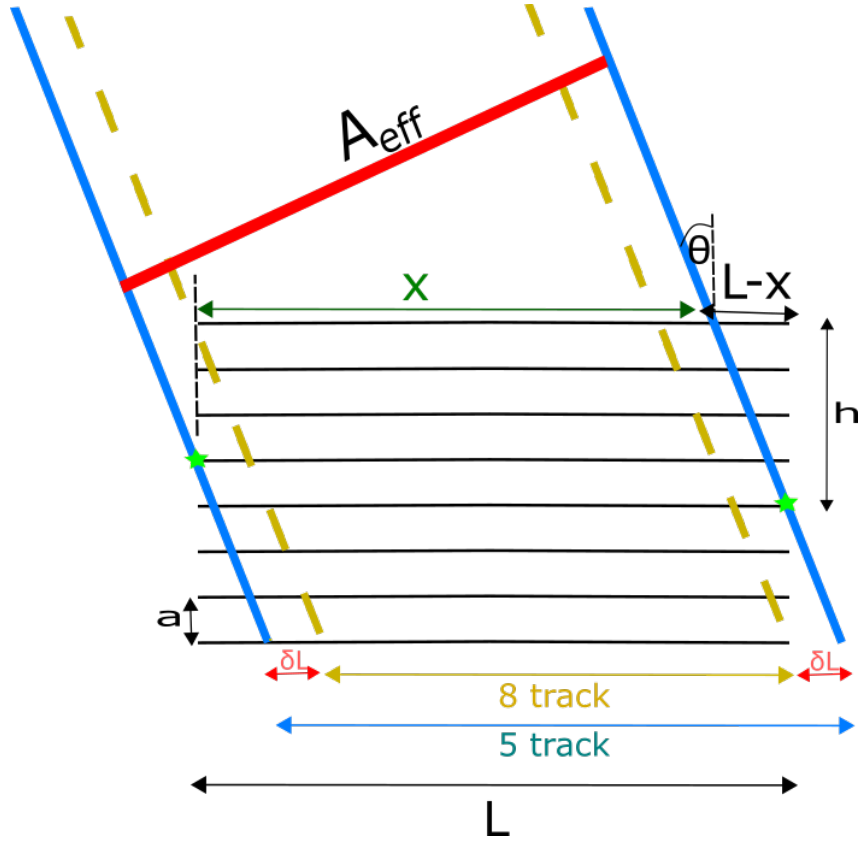
$$\delta L_6 = 2 \cdot a \cdot \tan \vartheta \quad (10)$$

$$\delta L_5 = 3 \cdot a \cdot \tan \vartheta \quad (11)$$

$$(12)$$

Általánosan, ha N_k rétegből legalább K darabot követelünk meg egy müoneseményhez:

$$\delta L_K = (N_k - K) \cdot a \cdot \tan \vartheta \quad (13)$$



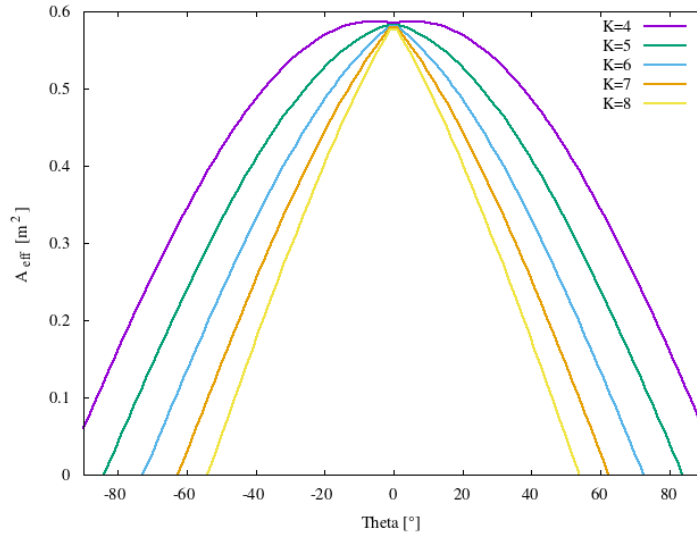
17. ábra. A detektor egy metszetébe egy 8 és 5 pontos részecskenyom berajzolva. Szépen látható az effektív felület változása annak hatására, hogy hány kamrát követelünk meg, hogy megszólaljon.

Ezen eredményt beépítve a 1D effektív felületbe ezt a képletet kapjuk:

$$A_{eff} = (L - h \cdot \tan \vartheta + 2 \cdot \delta L_K) \cdot \cos \vartheta \cdot \eta = (L - h \cdot \tan \vartheta + 2 \cdot (N_k - K) \cdot a \cdot \tan \vartheta) \cdot \cos \vartheta \cdot \eta \quad (14)$$

Különböző K értékek mellett kirajzoltattam a Gnuplotban a kapott függvényt. A 18. ábrán jól látható, hogy a K csökkentésének hatására növekszik azon térszögtartomány nagysága, mely irányából érkező müonokat képesek leszünk érzékelni.

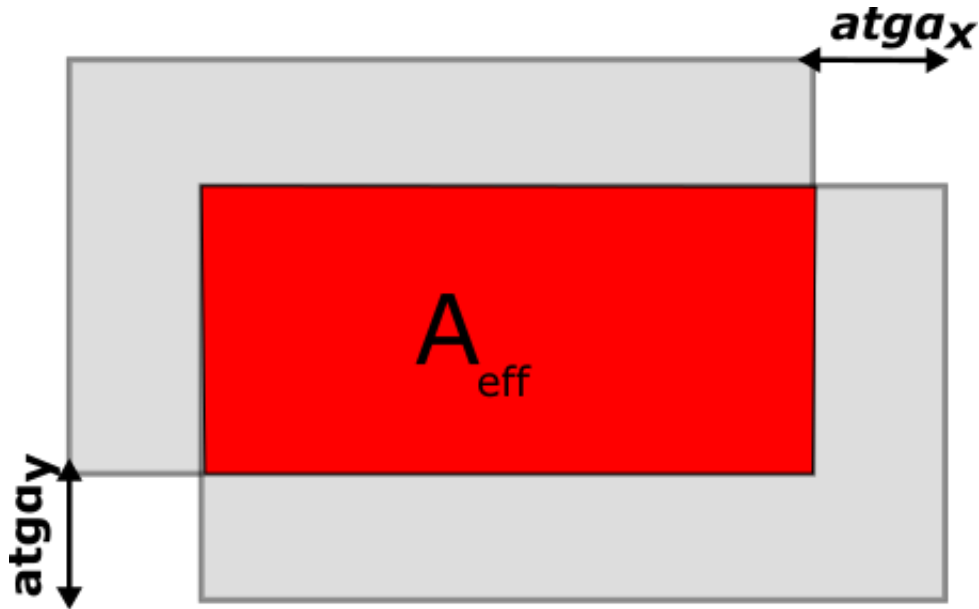
A 16. ábrán is ezen jelenség okoz különbséget.



18. ábra. Az effektív felület a beérkezési szög függvényében (θ). A 16. ábra jelenségét szépen leírja. A K csökkentésével a A_{eff} és a szögtartomány is növekszik.

2.3.3. 2D modell

2D modellben a megértéséhez érdekesebb a műion szemszögéből lerajzolni a dolgokat, ekkor olyan mintha az egymás felett lévő kamrák el lennének csúszva, s a kamrák metszete lesz az effektív felületünk. Fontos megemlíteni, hogy az itteni ϑ a detektorhoz képest vett beesési szög. Ez az elgondolás látható 19. ábrán, a pirossal színezett tartomány lesz az A_{eff} -ünk.



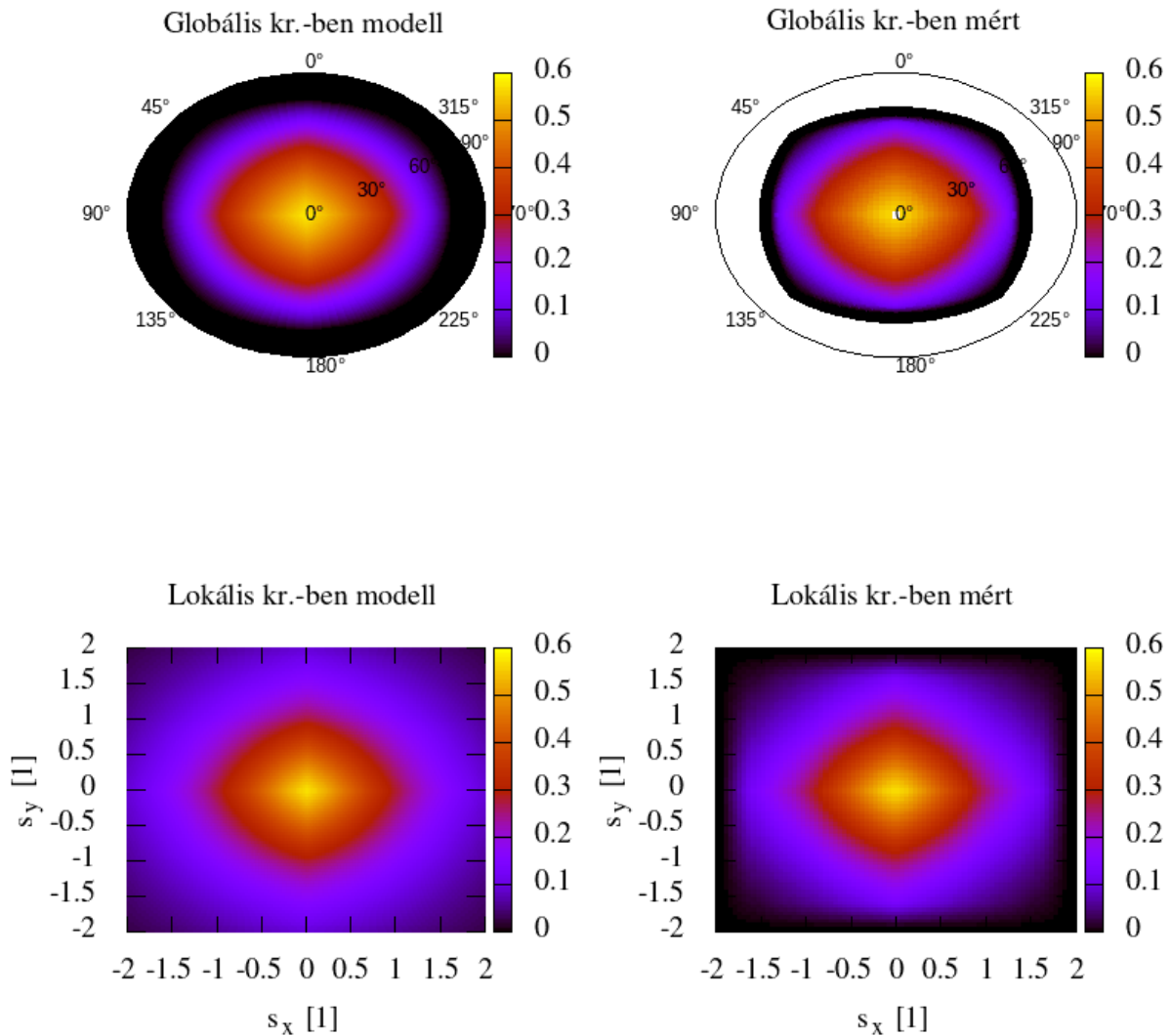
19. ábra. A műion szemszögéből a kamrák felülnézete. A pirossal jelölt terület lesz az A_{eff} .

Az eddigieket figyelembe véve az A_{eff} 2D-s alakja a következő:

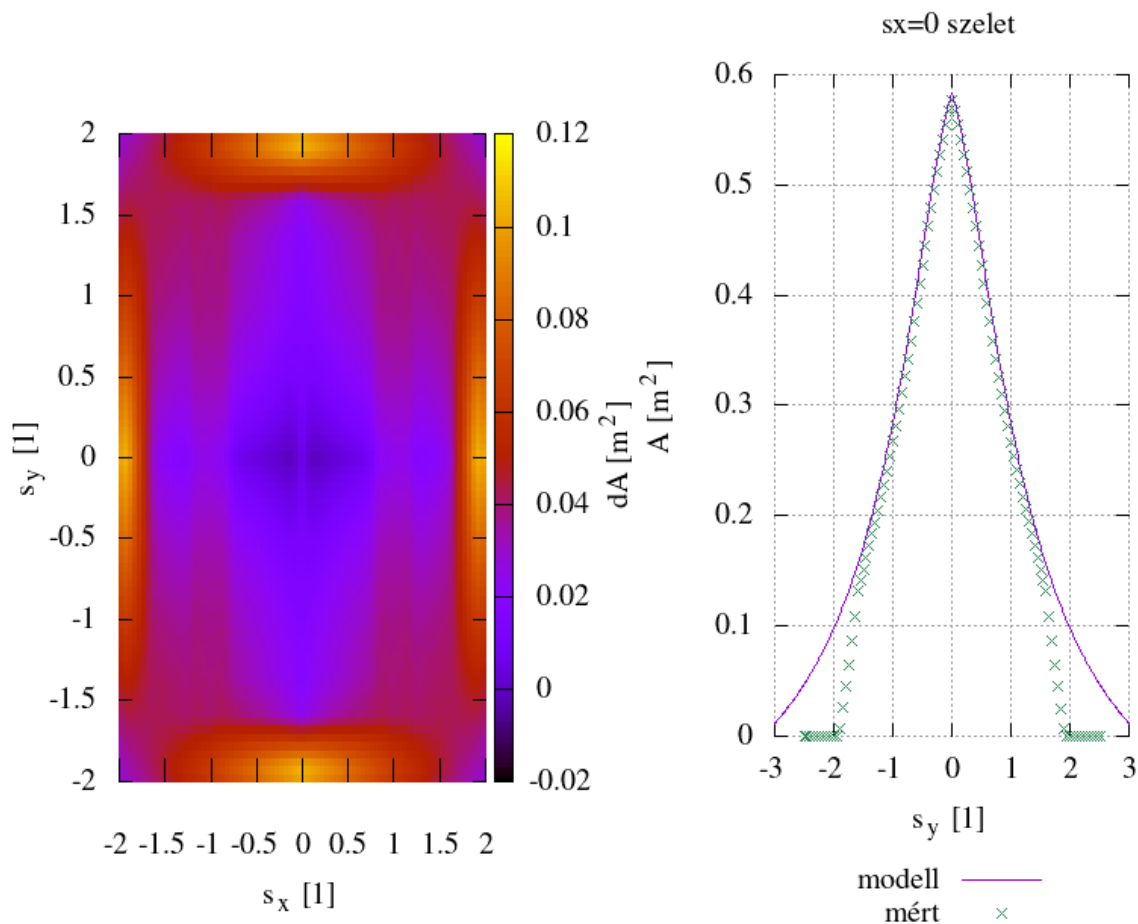
$$A_{eff} = (L_x - h \cdot s_x + 2 \cdot \delta L_{K_x}) \cdot (L_y - h \cdot s_y + 2 \cdot \delta L_{K_y}) \cdot \cos \vartheta \cdot \eta =$$

$$((L_x - h \cdot s_x + 2 \cdot (N_k - K) \cdot a \cdot s_x) \cdot (L_y - h \cdot s_y + 2 \cdot (N_k - K) \cdot a \cdot s_y)) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + s_x^2 + s_y^2}} \eta \quad (15)$$

Továbbra is az MTL1 adatait használtam feltételezésem helyességének vizsgálatára (lásd: 20. ábra). Az 21. ábrán látható összehasonlításokból arra a következtetésre jutottam, hogy két további effektus beépítésére is szükségünk lesz a későbbiekben, de mivel 45° -ig terjedő detektorhoz képesti beérkezési szögtartományt használunk nem okoz gondot. Az egyik effektust, az okozza, hogy egy kritikus szög után a műonhoz képest a detektorok elkezdenek kicsúszni egymás alól, ez okozza a nagy letörést. Míg az enyhe eltérést a kombinaturikai hatások okozza.



20. ábra. Az effektív felület mért és modellezet értékei globális és lokális kr.-ben (MTL1 0° -ban döntött mérése)



21. ábra. Bal ábra: A mért és modellezett érték különbsége szerepel. Látszik, hogy még mindig megjelenik valamilyen anomália a detektor szélein. Jobb ábra: Az 1D effektív felület szeleten látszik, hogy van egy markáns letörése a mért értékeknek, de már előtte enyhén utána pedig markánsan eltér a modell által számolt értékek. (MTL1 0°-ban döntött mérése) Az ezeket okozó két effektust a későbbiekben szeretném beépíteni modellembe, de mivel 45°-ig terjedő detektorhoz képesti beérkezési szögtartományt használunk, jelenleg elhanyagolhatónak tekinthető.

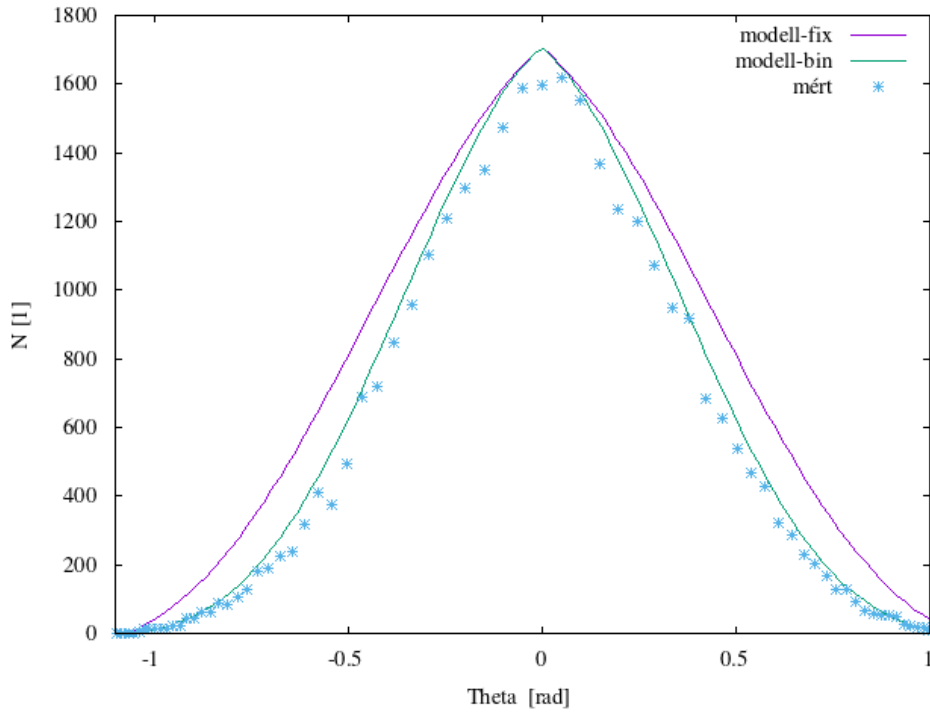
2.4. Beütésszám

A 1.4. fejezetben tárgyaltuk, hogy a hibaterjedés meghatározásához szükség van a beütések számára, ezáltal legfontosabb szerepe, hogy belőle meg tudjuk az adott anomália méréséhez szükséges időt becsülni.

A beütések számát az előzőekben tárgyalt mennyiségek segítségével fejezhetjük ki mind globális mind lokális rendszerben:

$$N = F \cdot t \cdot A_{eff} \cdot \Omega \quad (16)$$

Az A_{eff} már tartalmazza a teljes hatásfokot. A fenti képletben a Ω térszöget kétféleképpen is praktikus értelmezni: fix térszög esetén az anomália észlelhetőségét nézzük, míg a detektor-kr.-hez igazított esetben a nyers fluxussal vett közvetlen összehasonlítás a cél.



22. ábra. 1D metszet beérkező részecskék számából, 2 modell és a mért érték esetén (MTL1 detektor 0° -ban döntött detektor pozícióban). A modell-fix a fix térszöggel, míg a modell-bin a lokális kr.-hez igazított Ω -val számolt N . Jól látható, hogy a lokális koordináta-rendszerhez igazított térszög esetén szépen fedi a modell a mért értékeket.

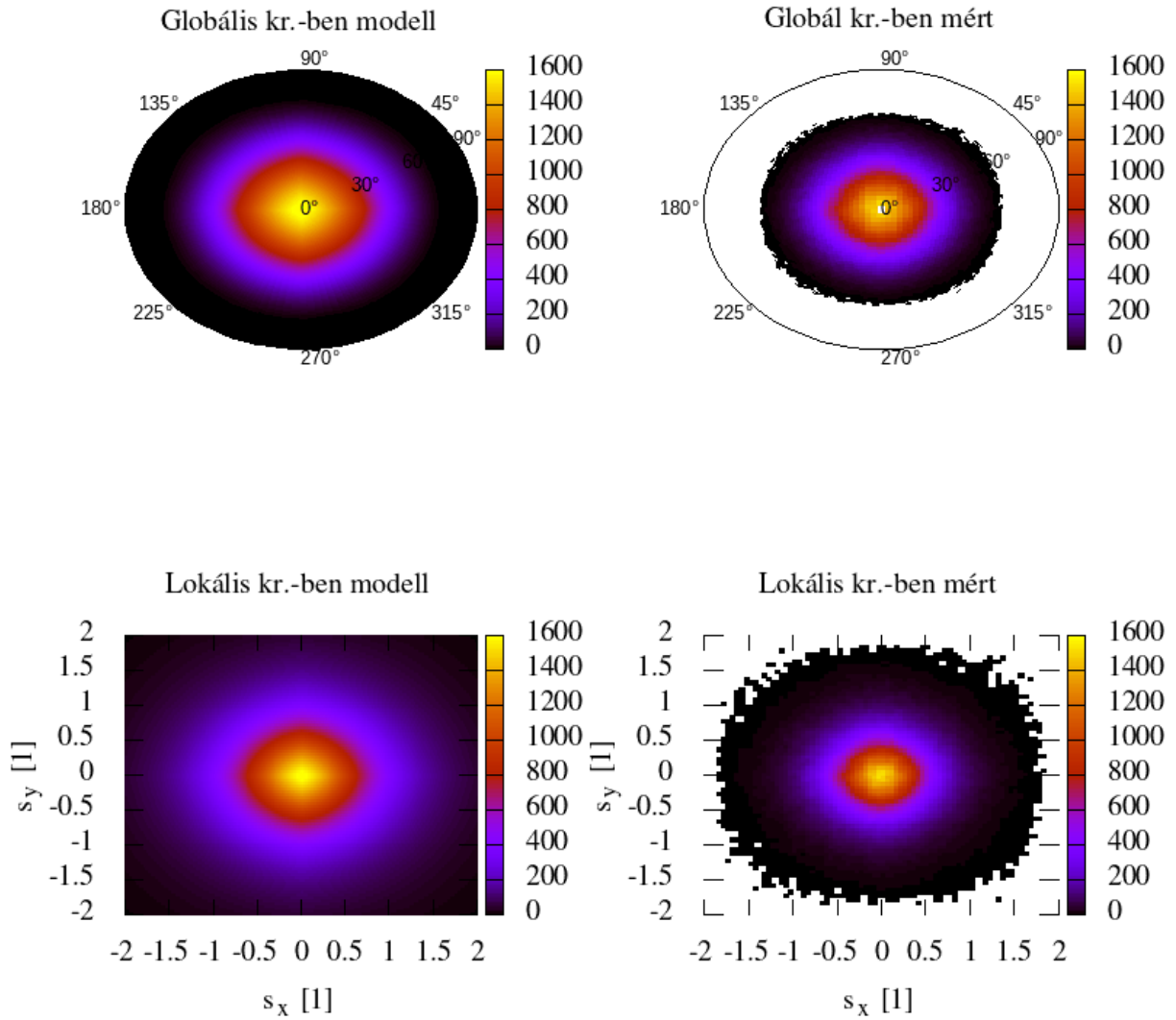
Az 22. ábrán jól látszik a két elképzelés közötti különbség; az igazított szépen rásimul a mért értékekre. A térszög tulajdonképpen megmutatja nekünk, hogy egy adott felület mekkorának látszik egy r sugarú gömb felszínén. A lokális kr. szerinti binezésben (irányszögtartomány szerinti felosztás) a térszög valós értéke függ a binmérettől (ds_x, ds_y), illetve a meredekségektől (s_x, s_y):

$$\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (17)$$

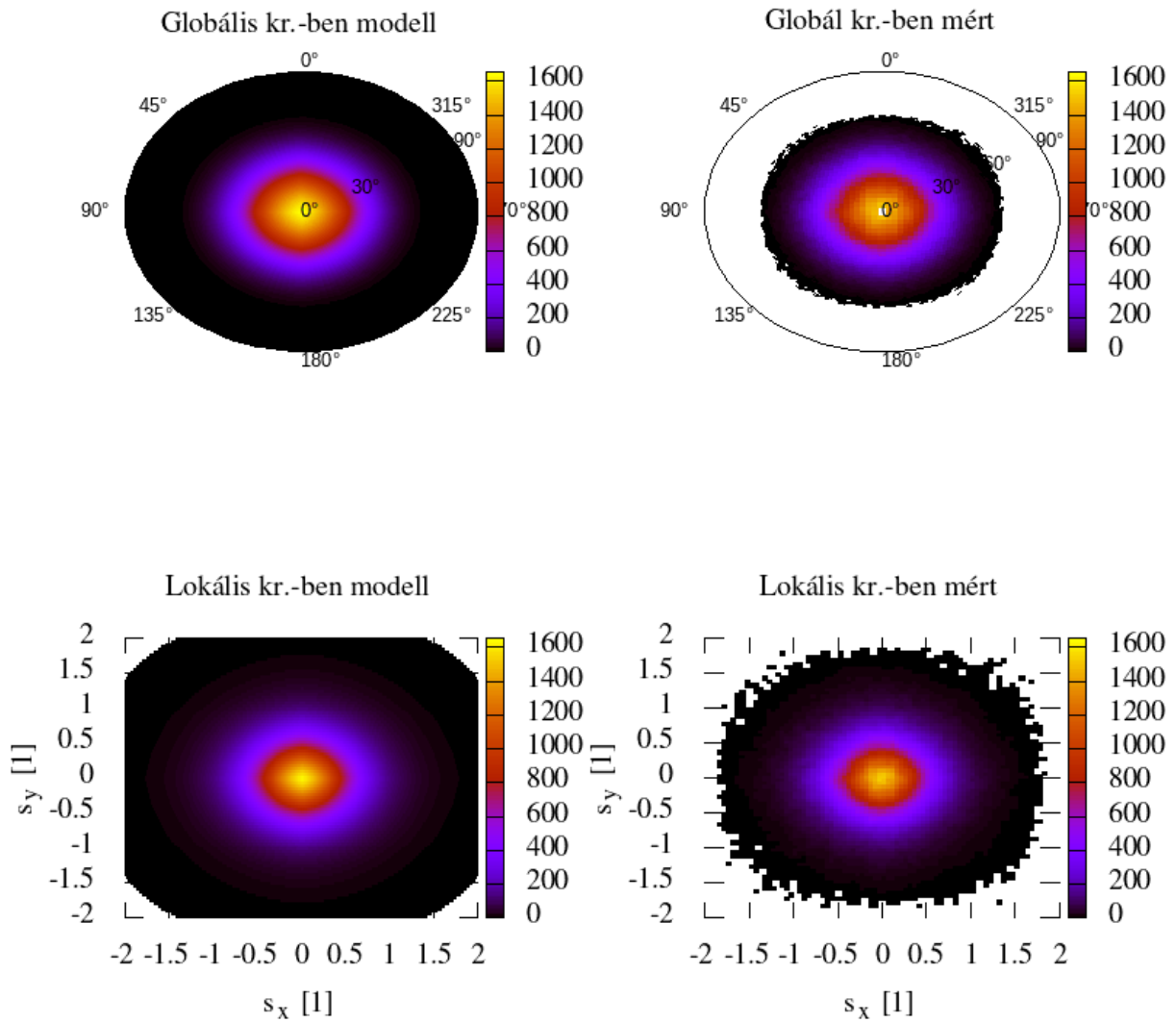
$$\Omega = \frac{ds_x \cdot ds_y}{(1 + s_x^2 + s_y^2)^{3/2}} \quad (18)$$

Tehát az N beütésre a 2D modellem a következő, ha a detektor kr.-hez igazított térszöget veszek, és $F = F_0 \cdot \cos \theta^2$ -t feltételezek:

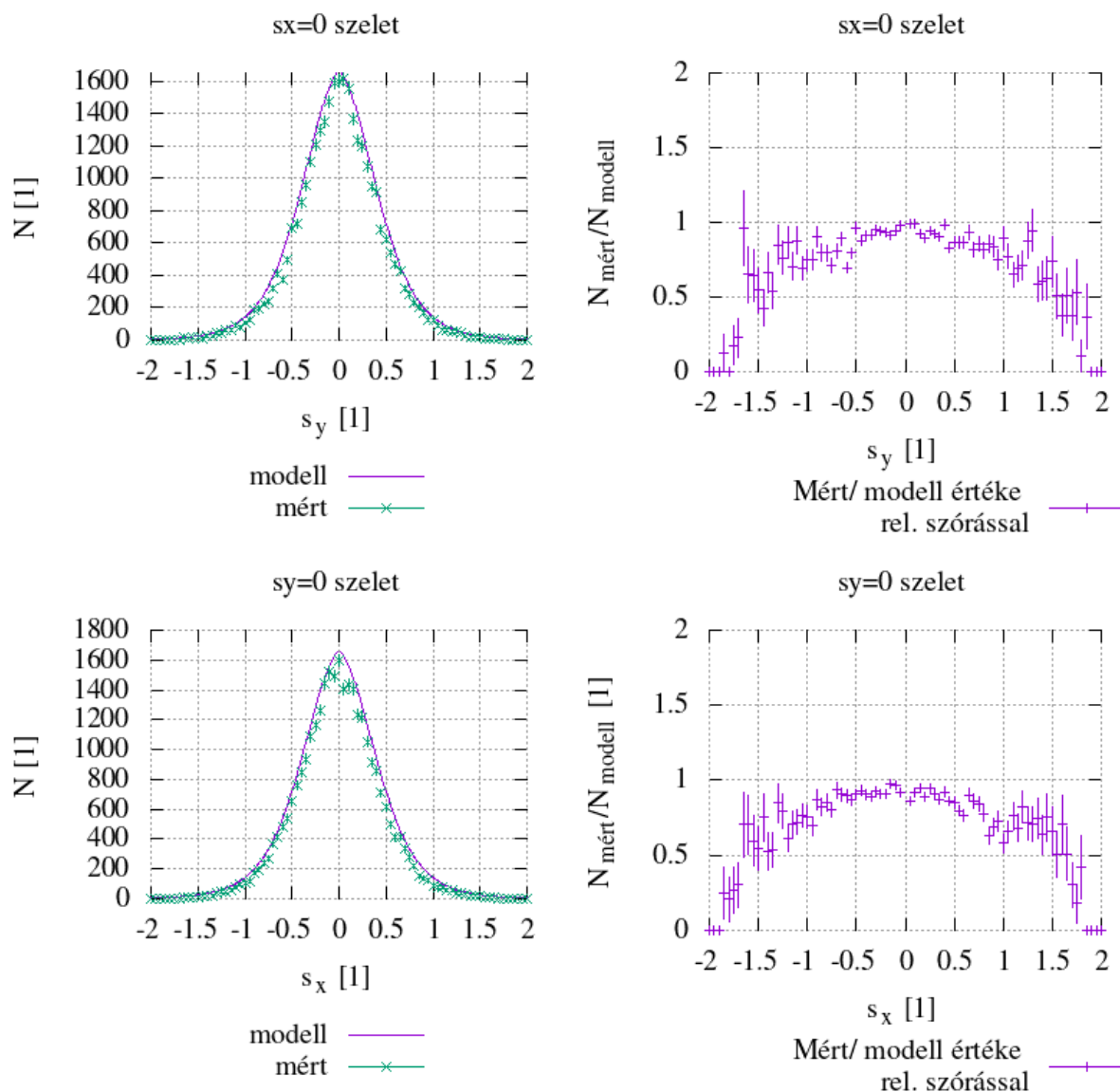
$$N = F_0 \cdot \cos \theta^2 \cdot t \cdot ((L_x - h \cdot s_x + 2 \cdot (N_k - K) \cdot a \cdot s_x) \cdot (L_y - h \cdot s_y + 2 \cdot (N_k - K) \cdot a \cdot s_y) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + s_x^2 + s_y^2}} \cdot \eta \cdot \frac{ds_x \cdot ds_y}{(1 + s_x^2 + s_y^2)^{3/2}} \quad (19)$$



23. ábra. MTL1 0°-os döntés beérkező részecskék száma fix térszöggel. Bal oszlop modell globális és lokális kr.-ben, jobb oldal mért értékek ugyanazokban a kr.-ekben. Szemmel láthatóan eltér a modell ebben az esetben a tapasztalattól, a Ω függése miatt .



24. ábra. MTL1 0°-os döntés beérkező részecskék száma lokális kr.-hez igazított térszöggel. Bal oszlop modell globális és lokális kr.-ben, jobb oldal mért értékek ugyanazokban a kr.-ekben. Sokkal jobban fedí a valóságot ez a modell.



25. ábra. 1D szeletek bal oldali oszlopban a kivágott szeletek a mért értékből plusz modell. Jól fedti a modell a valóságot. Jobb oldalon a mért és modell hányadosa relatív szórással ábrázolva. Itt pedig szépen 1-hez tartanak a hányadosok.

2.5. Döntés hatása a beütések számára

Ezeddig sikerült jó modellt felállítanom a beütések számának paraméterektől való függésére, és összehasonlíttam az MTL1 $\gamma = 0^\circ$ -os adataival. Következőekben döntött detektorokra jellemző direkt feladatokat oldottam meg, ahol a $\gamma \neq 0^\circ$, $\gamma = \{30^\circ, 45^\circ, 60^\circ\}$, és ezeket összehasonlítottam a mért értékekkel. Továbbra is MTL1 detektor kampányát használtam fel. Ez azért kulcsfontosságú, mert döntött detektorokkal fókuszálható a leképezési tartomány.

Vegyük sorra mit tapasztalhatunk az egyes mérésekre lebontva.

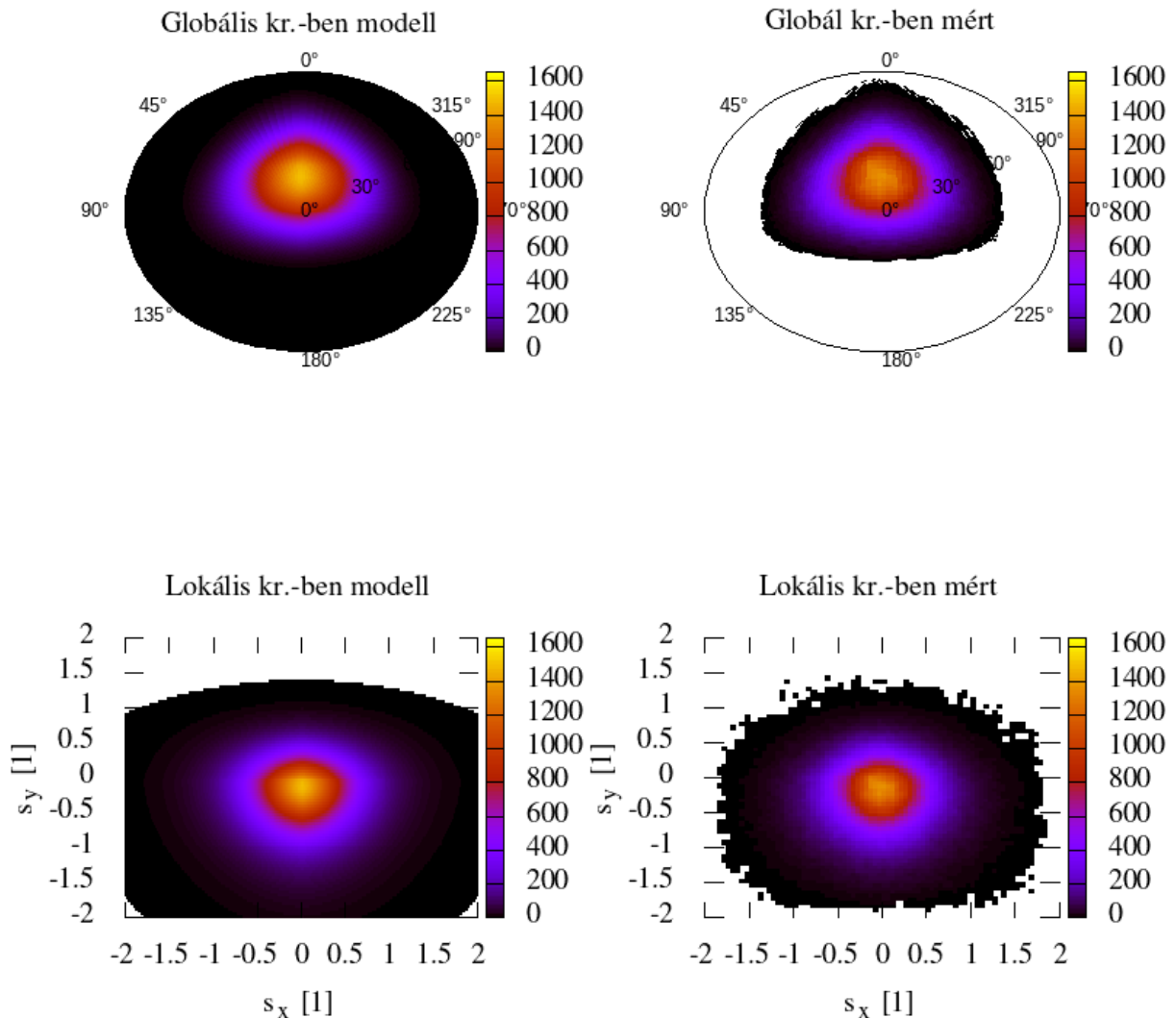
Döntés szöge 30° Ha megvizsgáljuk 27. ábra első oszlopán látható 2D ábrázolásból kivágott síkmetszeteket, akkor jó egyezést mutat a modellem számított értékei a mért értékekkel.

Ha a második oszlopban található hányados ábrázolásokat vizsgáljuk meg, akkor azt ve-

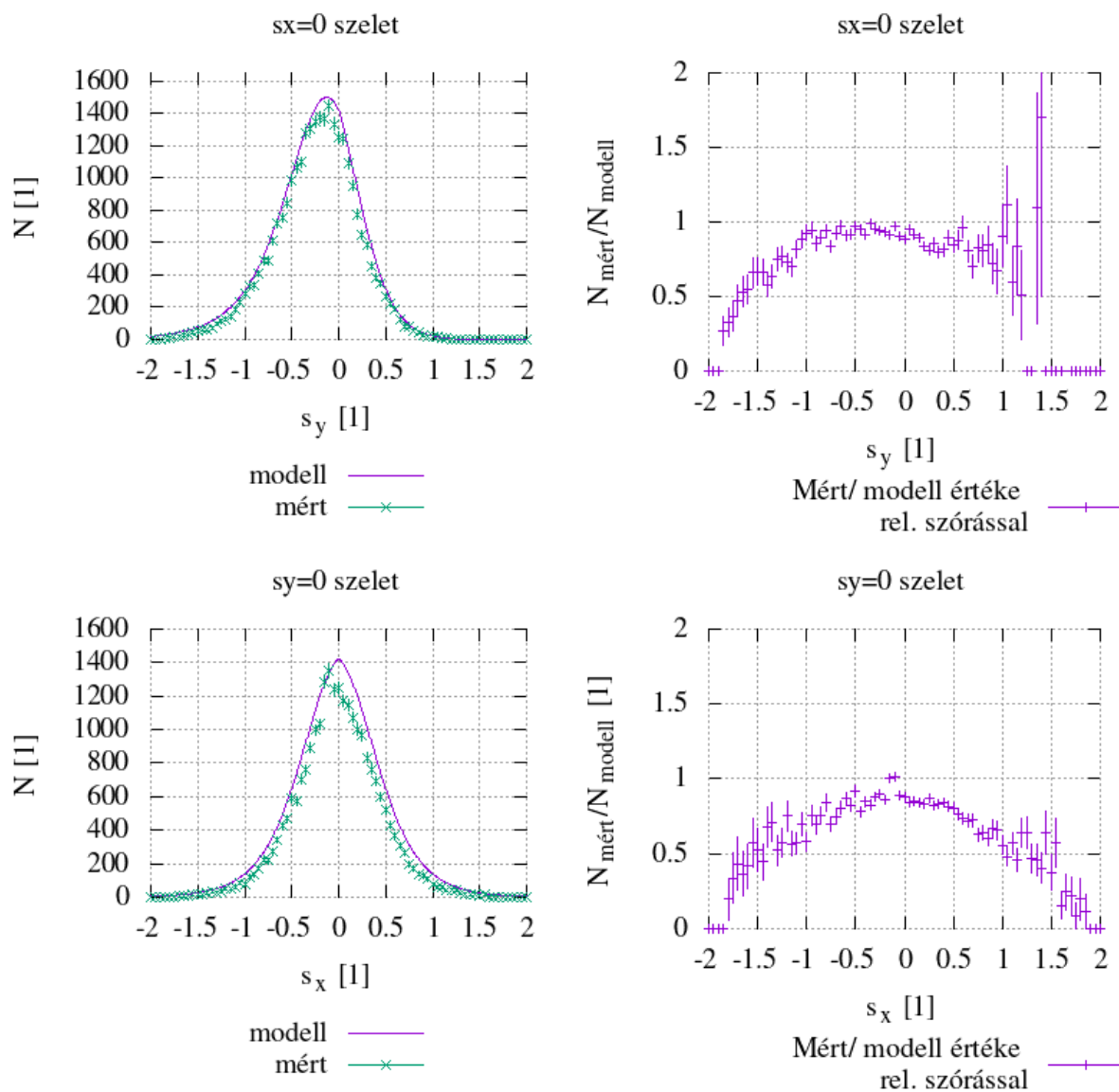
hetjük észre, hogy az $s_x = 0$ szelet esetén 1 körül fluktuál ez az érték, amit várunk. A döntés irányában lecsökkent a relatív szórás, míg ellentétesen megnövekedett. Az $s_y = 0$ esetén ugyanazt tapasztalhatjuk mint $\gamma = 0^\circ$ esetén szórások terén. Viszont sajnos egy részén felülbecsüli a modellem az értékeket.

A 2D 26. ábrán jól látszódik a detektor szögterományra való érzékenysége el kezd változni a γ döntés hatására annak irányába.

Ezen összehasonlítási sorrendet fogom követni a $\gamma = \{45^\circ, 60^\circ\}$ esetekben is.



26. ábra. Mtl1 30° -os döntés esetén a beütésszám 2D ábrázolása lokális és globális kr.-ben: mind lokális mind globális kr.-ben látszik, hogy az a szögteromány, amelyben a legtöbb a beütésszámot kapjuk eltolódik a döntés irányába.

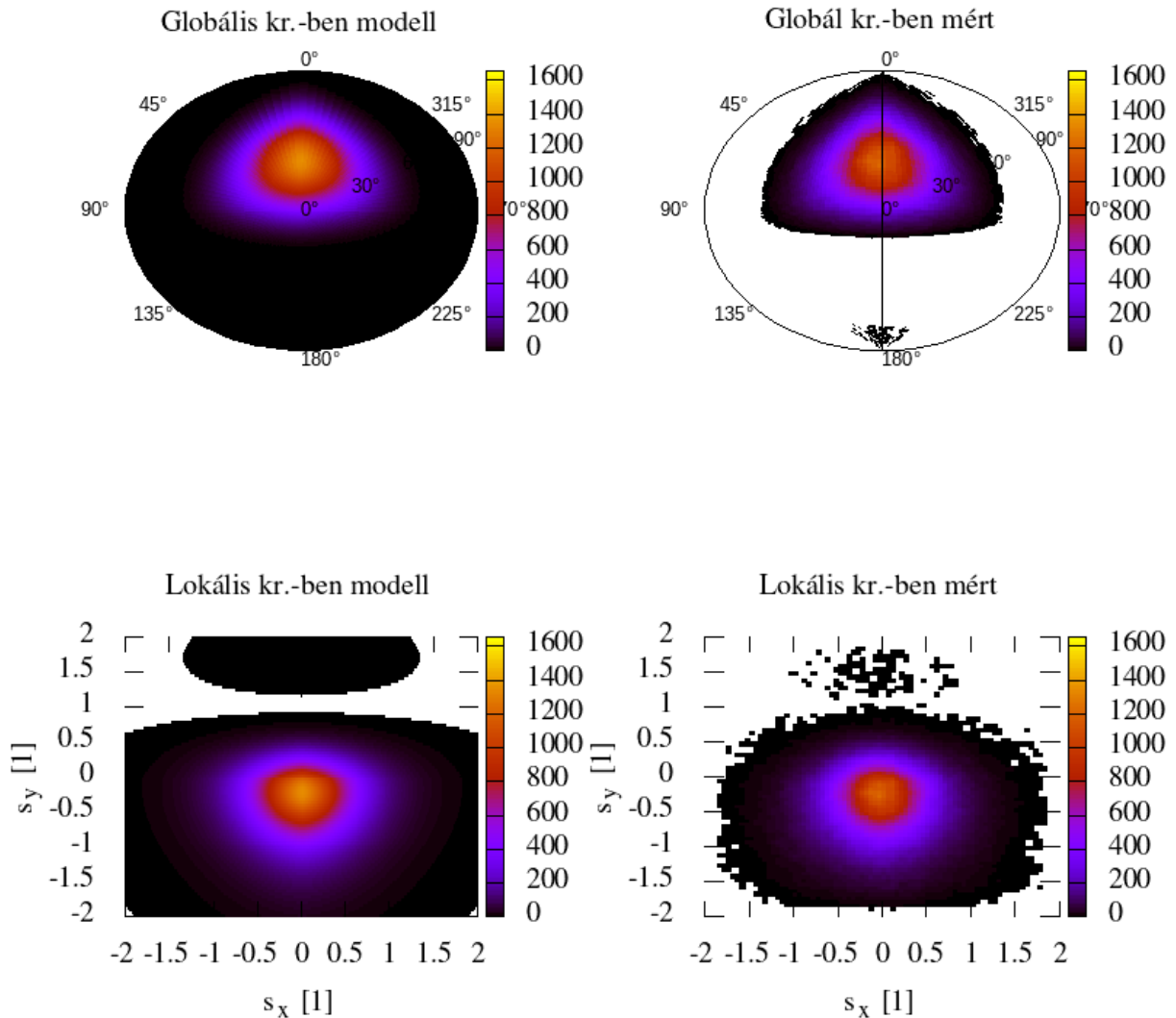


27. ábra. Mtl1 30°-os döntés esetén a beütésszámok egy síkmetszete lokális kr.-ben: $s_x = 0$ metszet esetén a modell jól fedi a mért értékeket. A mért/modell értéke 1 körül fluktuál, a szórás nagysága a döntés irányába lecsökkent, vele ellentétesen megnövekedett. Az $s_y = 0$ esetén a modell felülbecsli a mért értékeket, ez jól látszik a hányados illusztráción is.

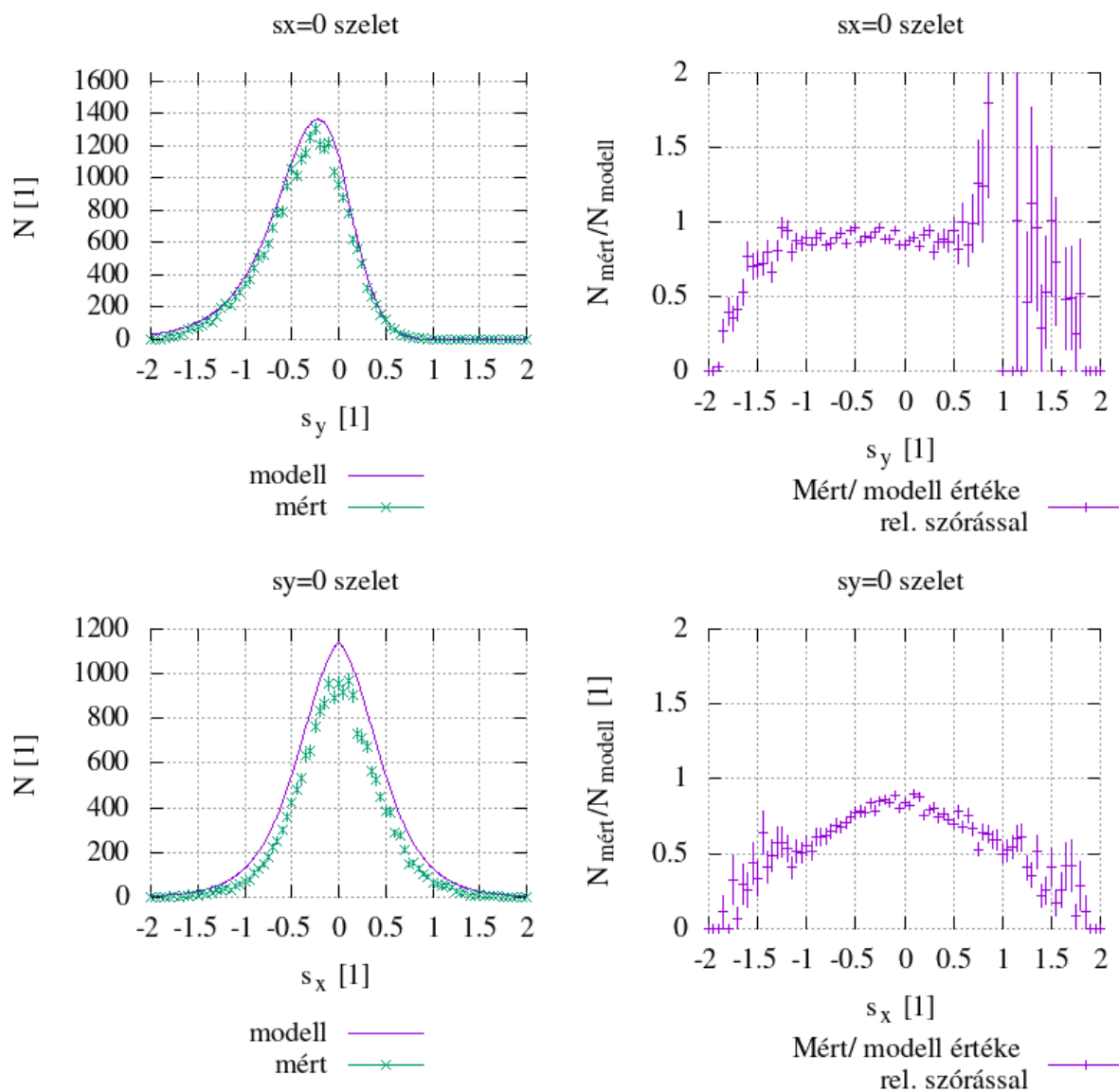
Döntés szöge 45° A 29. ábra bal felső alábráján észrevehető a modell 0 körül felülbecsüli a mért értékeket. Az alsó alábráján pedig a modell nagyobb értékeket mutat.

A jobb felsőn a $\gamma = 30^\circ$ -nál észrevett tendencia növekszik a relatív szórások esetén, s jól megfigyelhető a mért és a modell hányadosának alakulása. A jobb alsón pedig észrevehető a felülbecslés.

A 28. ábráin változott megint a szögtartomány érzékenységek, továbbá a detektor túloldalán is elkezdünk beütésszámokat érzékelni, ezért jelenik meg az a folt az ellenkező térszögben.



28. ábra. Mtl1 45° -os döntés esetén a beütésszám 2D ábrázolása lokális és globális kr.-ben: az eddigi tapasztalatoknak megfelelően a detektor érzékenysége változott; elkezd a detektor túloldalán is beütéseket detektálni, ezért jelenik meg a folt.

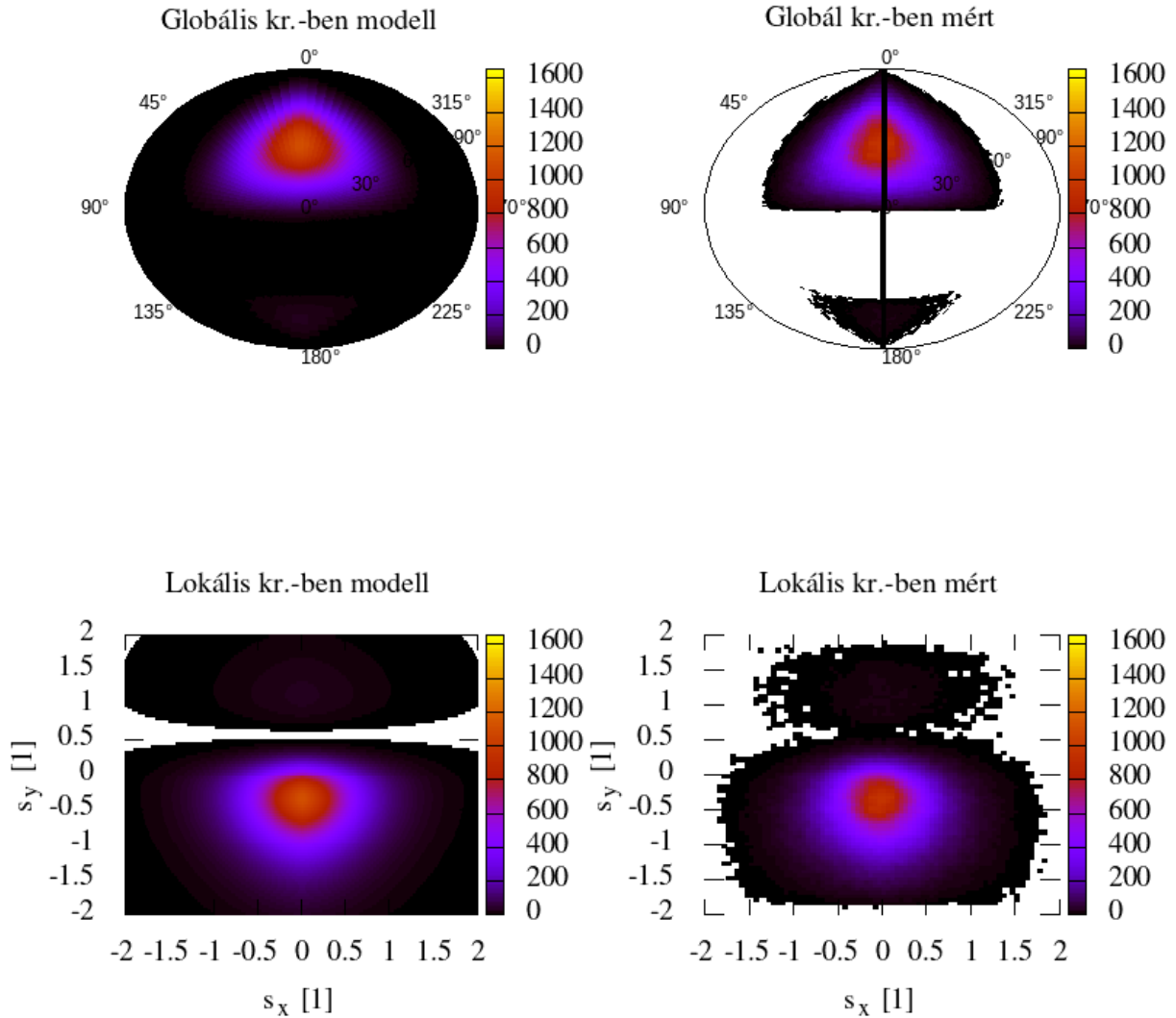


29. ábra. Mtl1 45°-os döntés esetén a beütésszámok egy síkmetszete lokális kr.-ben: a bal felső alábbián 0 körül felülbecsül a modell, viszont az alsón végig. A jobb felső esetében a 30°-nál tapasztalt tendencia érvényes. A bal alsón jól látszik az említett felülbecslés.

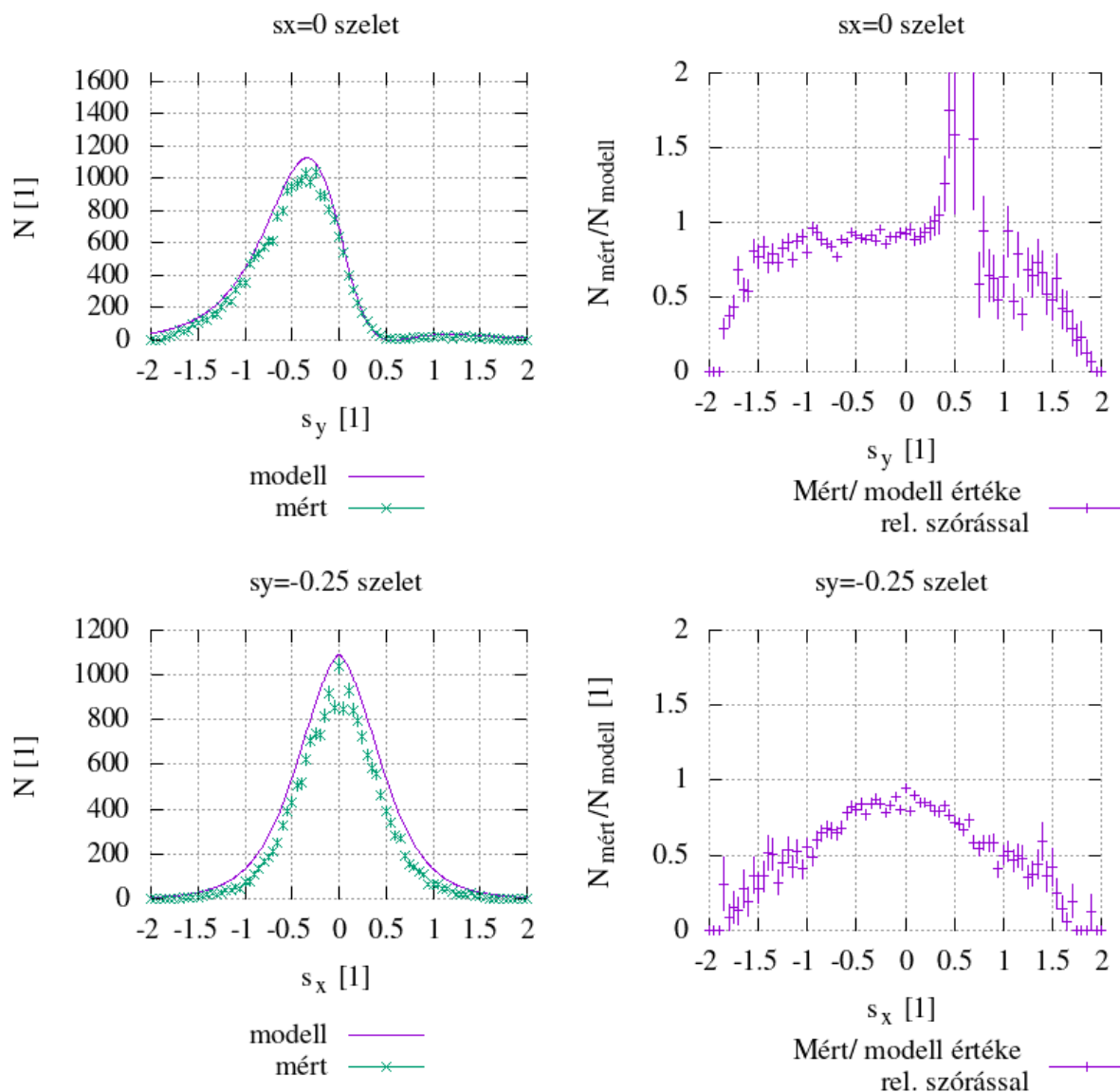
Döntés szöge 60° A 31-on felső ábráján látszik baloldalt, hogy $[-1.5:-0.5]$ -on a mért értékek nagyobbak, a jobb oldalon a $[0.5:1.5]$ -on elkezdd növekedni a relatív szórás nagysága.

Az alsó ábrán újra felülbecslés tapasztalható.

A 30. ábrán az előzőekben megfigyelt tendenciák érvényesek.



30. ábra. Mtl1 60° -os döntés esetén a beütésszám 2D ábrázolása lokális és globális kr.-ben: megint más szögtartományban a legérzékenyebb a detektor, illetve jobban látunk a túloldalon a 45° -hoz képest



31. ábra. Mtl1 60°-os döntés esetén a beütésszámok egy síkmetszete lokális kr.-ben: az $s_x = 0$ esetén a modell viszonylag jól illeszkedik, a hányados 1 körüli, a szórás pedig az előzőekben tapasztalt tendenciát követi. Az $s_y = -0.25$ szelet esetén megint csak felülbecslés tapasztalható, és ez a hányados ábrázoláson is jól látszik.

A fejezet összegzése Elmondható a mért értékek és a direkt feladatok megoldásából származó adatok összehasonlításából adódó tapasztalataim alapján, hogy az s_x tengely körüli döntés leginkább az s_y tengely menti beütésszámok markáns változásában érhető tetten. A döntés irányába megnő a beütések száma, ezáltal lecsökken a szórás és kevesebb ideig kell mérnünk ahhoz, hogy ugyanannyi legyen N , mintha $\gamma = 0^\circ$ –ban mértünk volna. A globális kr.-ben ábrázolt adatokon látszódik, hogy az érzékenység a döntés felé jelentősen megnő, míg a másik térszögben először érzéketlené válik, majd fokozatosan megnő. Továbbá a feltételezett fluxusunk nem teljesen egyezik a valódi fluxustérképpel, mivel az MTL1-el a laborban mértünk, és a nagy szögben érkező kisenergiás müonokat a földem már képes megszűrni.

2.6. Mérési elrendezés optimalizálása

Miután láttuk a döntések hatását, felmerült azon kérdés, hogy egy ismeretlen helyzetű anomáliát célzó 2 mérésből álló méréssorozat esetén, milyen döntési szögekkel mérjünk. Két lehetőség merült fel:

- először zenitben mérve annyi ideig, hogy azonosíthassuk az anomália pozícióját, majd annak irányába γ szögben döntve végzünk további vizsgálatokat vagy
- azonos ideig, két ellentétesen döntött ($\gamma_1; \gamma_2 = -\gamma_1$) detektorpozícióban mérünk és azok átlagát vizsgáljuk meg

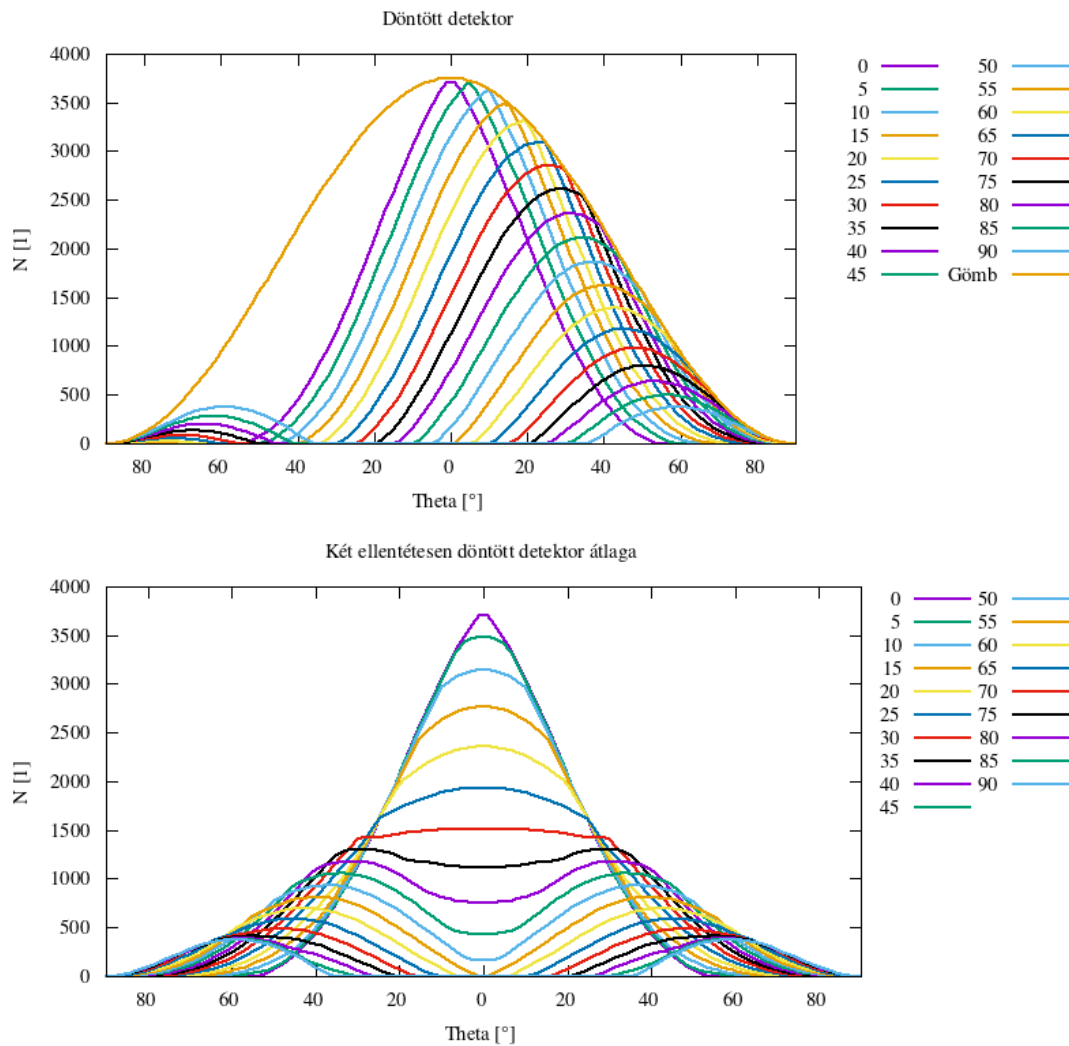
A meglévő modellem segítségével globális kr. egy szeletében ábrázoltam 5° -kénti döntés esetén azonos t idő mellett egy detektor értékeit és a két ellentétesen döntött detektor értékeinek átlagát (lásd:32. ábra).

A 32. ábra felső részén látható, hogy a berajzolt gömbszimmetrikus esetet az egy detektoros döntött mérés mindig érinti a döntési szögnel.

Ha az alsót nézzük meg, láthatóvá válik, hogy a két ellentétesen döntött detektor átlaga 30° -nál egy platót mutat, és zenitben mérthez képest nagyobb θ tartományon érzékenyebb. Viszont veszünk beütésszámot. A megfelelő binezésben összegezzük a beütéseket, amelyekből egyesített irány szerinti érzékenységet vizsgálhatjuk.

Összeségében elmondható, hogy van értelme két ellentétesen döntött detektorpozíciót használni. De azt fontos megjegyeznünk, hogy minden egyes esetben a terepi viszonyok döntenek el, melyik választás lesz az optimális az adott helyzetben.

A tárgyalt modellem segítségével a fenti vizsgálat folytatható akár több detektorpozíció esetén is.



32. ábra. A beütések számának változása a döntési szög függvényében polár ábrázolásból kivágtott szeleten. A döntési szög 5° -ként növekszik. A felső ábra az egy detektor esetén a modell, a második két ellentétesen döntött detektor esetén az N átlaga. Az elsőn jól látszik, hogy a gömb-szimmetrikus detektor elméleti görbáját mindig érinti a döntött detektor modellezett görbéje. A második esetén a $\gamma = 30^\circ$ esetén megjelenik egy plató, nagyobb térszögtartományban látunk, de a N kevesebb, mint egy detektor esetén.

2.7. Közel-horizontális vagy nagyszögben érkező müonok vizsgálata

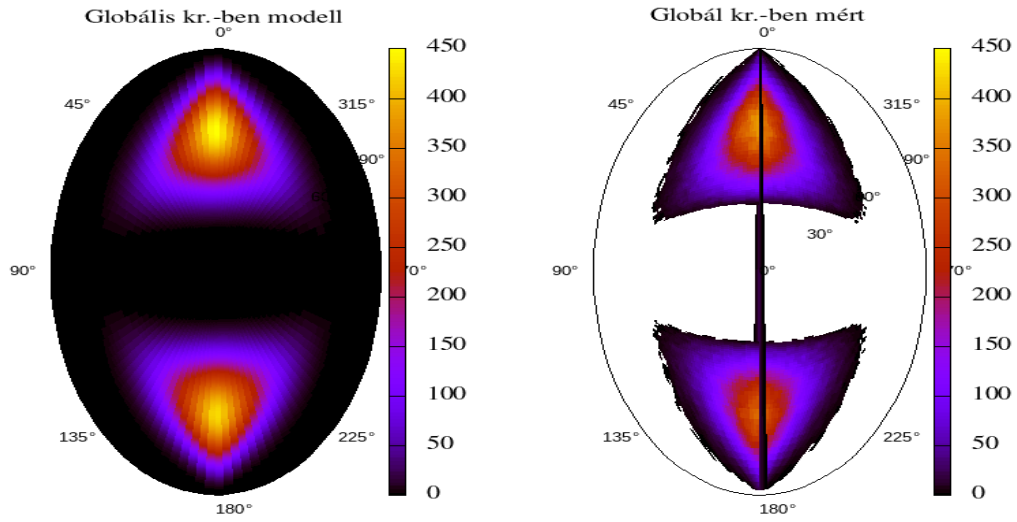
Az előző két fejezetben látható volt, hogy a mérések eredményeit nagyban befolyásolja a döntési szögek nagysága. Ennek speciális esete a közel függőlegesen elhelyezett detektor. Ezt a típusú méréselrendezést használjuk a vulkanológiai vizsgálatoknál, illetve a mélyfúrású geofizikában is ennek van értelme, hiszen a lyuk irányába nem szeretnénk látni.

A REGARD csoport mindkettőben érdekelt, előbbinél a Sakurajima méréseknél [Oláh 2019]. Utóbbi kapcsán nemrég elkészült az első BoreHole-Muograph-Tracker (BHD2) detektor, ami egy CCC detektorokból álló rendszer.

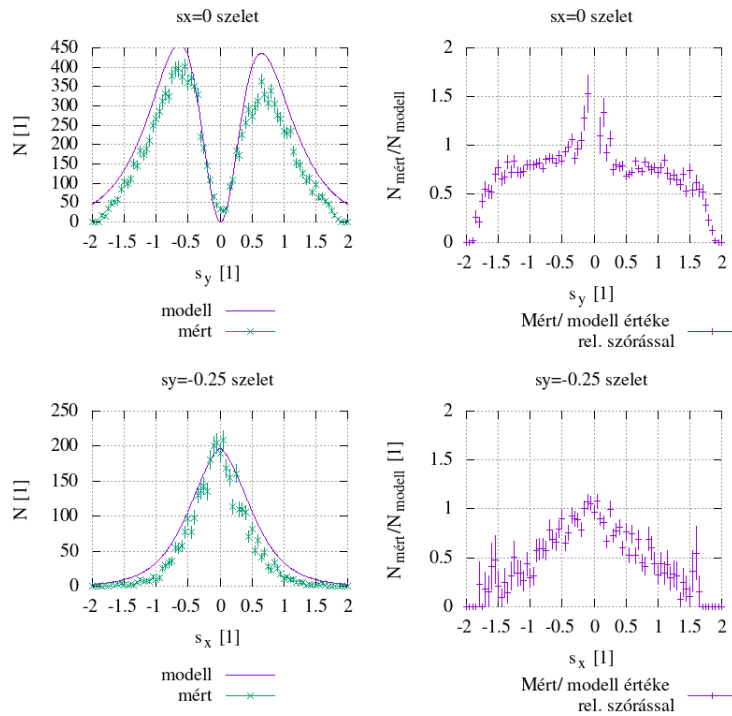
Ebben a fejezetben először megnéztem az MTL1 egy 90° -ban döntött mérés paramétereire illesztett direkt feladat megoldást, utána pedig a BHD2 Jánossy-aknában mért értékeit modelleztem le.

Látható az MTL1 esetén a 33a. és 33b.ábrán, hogy míg jó kvalitatív leírást ad a modell, kvantitatív értékben a vártnál nagyobb eltérés tapasztalható, ennek oka hogy a feltételezett $\cos^2$ -es fluxus a vizsgált szögtartományban már nem fedi kellő pontossággal a valóságot.

BHD2 detektor esetén ugyanez okozza a jelentős különbségeket 34a. és 34b.ábrán is. Viszont itt a Csoportban használt program segítségével le tudtam szimulálni a 20 m vastag kőzet fluxusát azáltal, hogy homogén, izotróp, egy rétegből állónak feltételeztem. Erre egy $\cos^2$ fluxust illesztettem, majd a kettőt összehasonlítottam. Ezek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az eddig használt fluxus $\theta > 60^\circ$ esetén már jelentősen eltér a valóságtól.

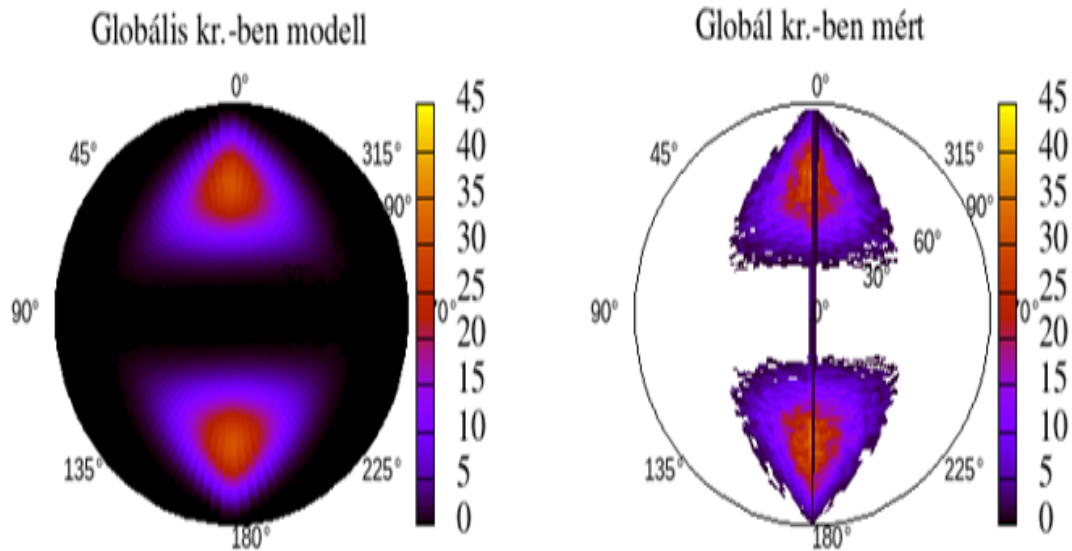


(a)

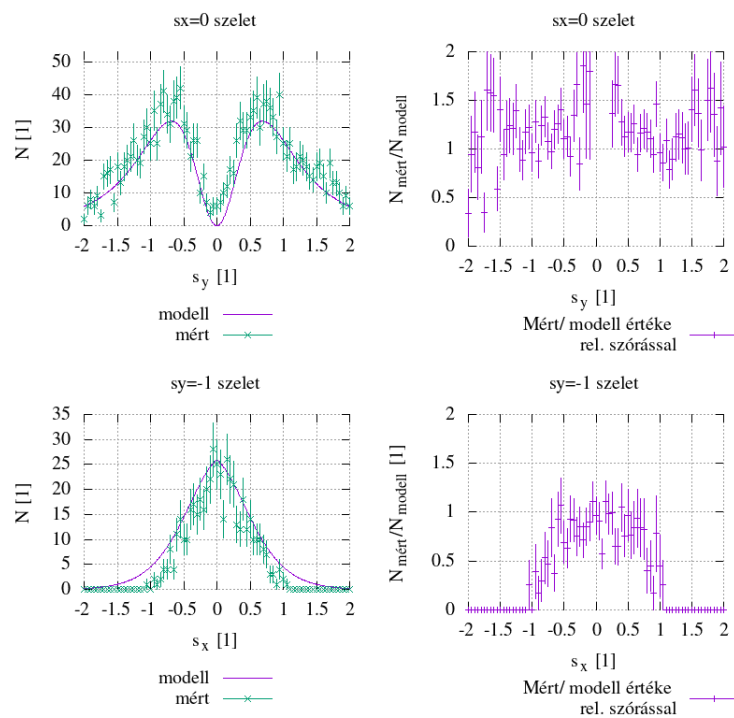


(b)

33. ábra. 33a.ábra: Mtl1 90°-os döntés esetén a modell és mért értékek globális kr.-ben ábrázolva. Szépen látható hogy a detektor mindkét oldala felől képes részecskéket detektálni. De észlelhető az is, hogy a modell nagyobb értékeket mutat mint a mért érték. 33b.ábra :Mtl1 90°-os döntés esetén a modell és mért értékek egy metszete a lokális kr.-ben relatív szórással ábrázolva. Itt még inkább láthatóvá válik, hogy a modell túllövi a mért értékeket. Ennek valószínűleg azaz oka, hogy a nagy szögben érkező kisenergiás müonokat megszűri a labor földmije plusz az első emelet.



(a)



(b)

34. ábra. 34a. ábra: BHD2 90°-os döntés esetén a modell és mért értékek globális kr.-ben ábrázolva. Itt is a fluxus lehet az oka annak, hogy nem egyeznek. Mivel ez a Jánossy-aknában mérték, itt már tudtam használni a Csoport programját a fluxus becslésére, itt már $\theta > 60^\circ$ értékeknél a $\cos^2$ -hez képest jelentős a különbség. 34b. ábra: BHD2 90°-os döntés esetén a modell és mért értékek egy metszete a lokális kr.-ben relatív szórással ábrázolva. Itt is jól látszódik az eltérés.

2.8. Borehole típusú detektor mérési elrendezésének modellezése

A BHD detektor kifejlesztése során felmerült azon ötlet, hogy egyszerre több detektorral mérjenek, mivel így időt tudnának megspórolni. Plusz, ha az első detektorhoz képest elforgatjuk az alatta lévőeket z tengely körül, így nagyobb térszöget vagyunk képesek lefedni. A mérési elrendezés sematikus rajza 35c. ábrán látható.

Megvizsgáltam, hogy 2 vagy 3 detektorral történő mérésnél, milyen szöggel legyenek elforgatva egymáshoz képest a detektorok.

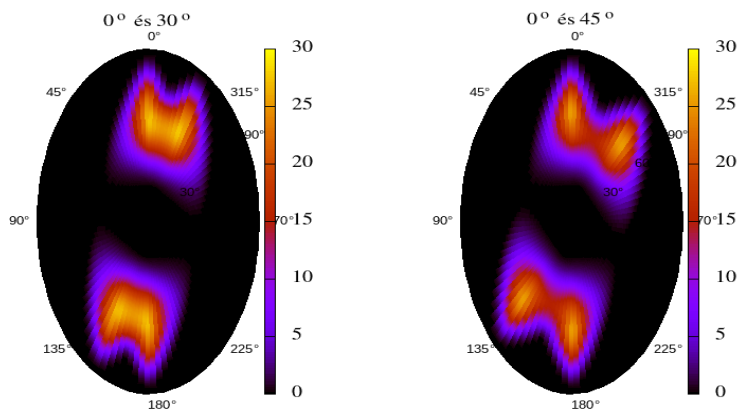
Értékes információ azon tény is, hogy a z tengely körüli forgatás annyit eredményez, hogy $\theta' = \theta$, $\phi' = \phi + \omega$. Ezáltal tudtam irányszerinti átlagukat venni:

$$N_2(\omega_2) = \frac{N + N(\omega_2)}{2} \quad (20)$$

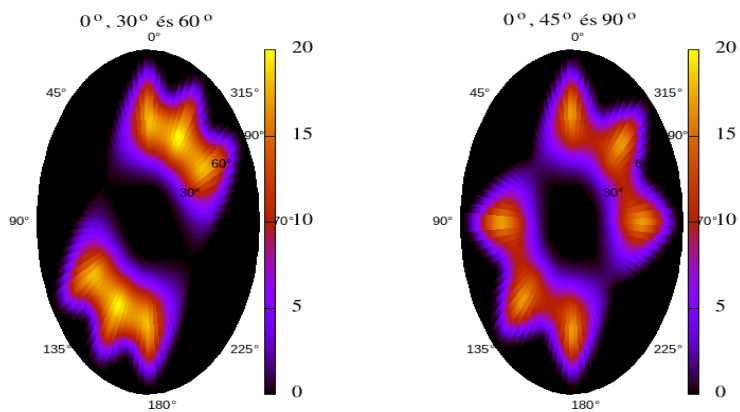
$$N_3(\omega_2, \omega_3) = \frac{N + N(\omega_2) + N(\omega_3)}{3} \quad (21)$$

Két detektor esetén (lásd:35a) látható az eredményeken, hogy a $n * 30^\circ$ ($n = 0, 1$) forgatási szög sokkal kedvezőbb számunkra, mivel megfelelő átfedés jön létre, ami prioritást élvez, bár a lefedett térszög kisebb lesz. Levonható az a következtetés, hogy a BHD esetén az ideális rendszer elemei z tengely körül 30° -onként vannak elforgatva.

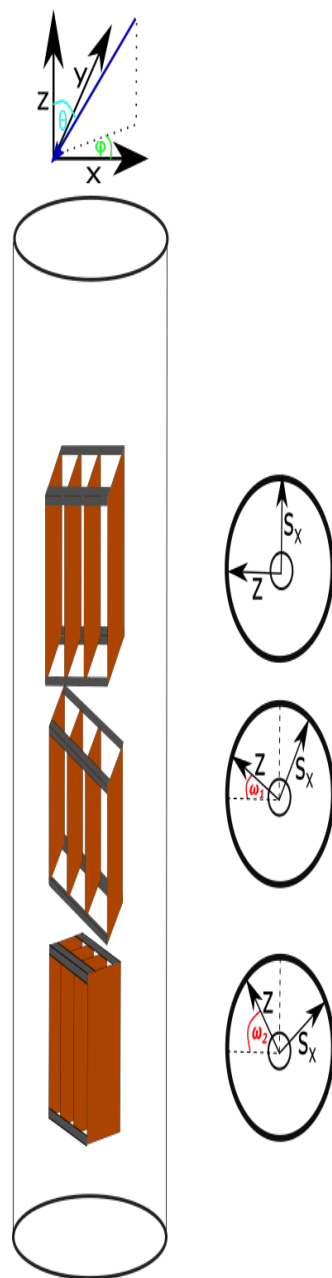
Ha megvizsgáljuk a három detektoros elrendezésre kapott direkt feladat megoldásokat az 35b. ábrán, látható, hogy a vizsgált térszög nagyságát egy újabb detektor beépítése természetesen megnöveli.



(a) Globális kr.-ben ábrázolt 2 detektor mérésének átlaga, ahol a forgatás szögei $\omega = 0^\circ, 30^\circ$ bal oldalon, jobb oldalon pedig $\omega = 0^\circ, 45^\circ$



(b) Globális kr.-ben ábrázolt 3 detektor mérésének átlaga, ahol a forgatás szögei $= 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ bal oldalon, jobb oldalon pedig $\omega = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$

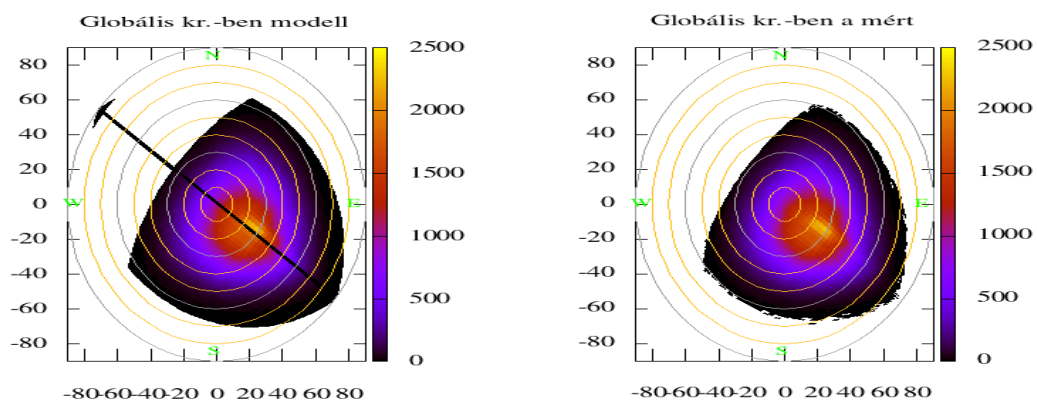


(c) Három Borehole típusú detektor ábrázolás fúrólukban, illetve a lokális kr.-ekkel és a globális kr.-rel ábrázolva

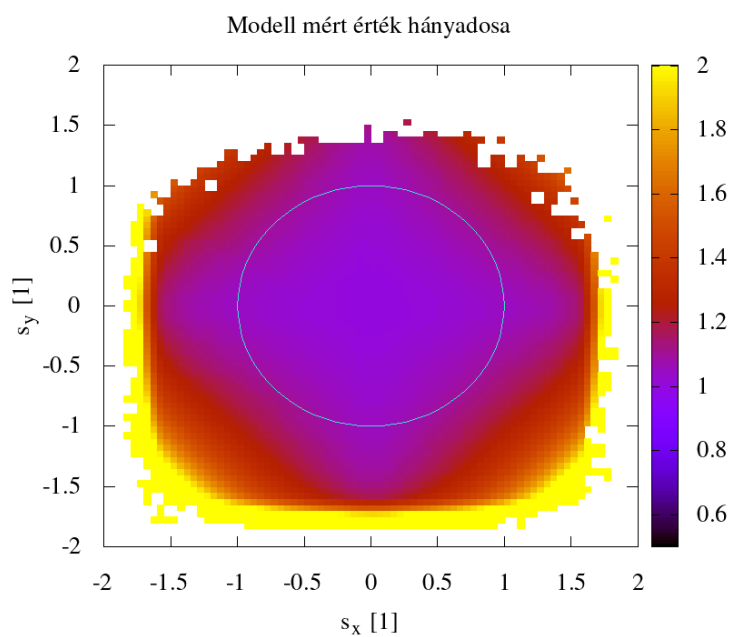
35. ábra. 3 komponensű fúróluk detektor vizsgálati eredményei

2.9. Konkrét területről származó mérés modellezése, és a mért, modellezett adatok összehasonlítása

Végül a modelleket implementáltam C++ nyelven is, mivel 2.7. fejezetben láthatóvá vált, hogy ahhoz, hogy tovább tudjam vizsgálni a direkt feladat megoldás helyességét már komplexebb fluxustérre van szükségem. A 1.3.5. és a 1.6. fejezetekben említett St. Christoph bányamérési adatait szimuláltam le vele. A 36a. ábrán már a globális kr.-ben ábrázolva láthatók az eredmények, 36b. ábra hányados ábrázolás. Látható, hogy a célunkat elértük 45° -on belül szépen hozza a mért értékeket (kék kör), a 37b. ábrán látható 1D szeleteken is jól megfigyelhető a kellő illeszkedés. Végezetül szóráshoz képesti eltérésünk is megfelelő a kívánt szögtartományon belül. (lásd:37a.) Az összehasonlítások eredményei alapján kijelenthetjük, hogy a direkt feladat megoldás a kért tartományon megfelelően működik. Tehát validáltam a modell helyességét, innentől kezdve más kampányok esetében is használható lesz.

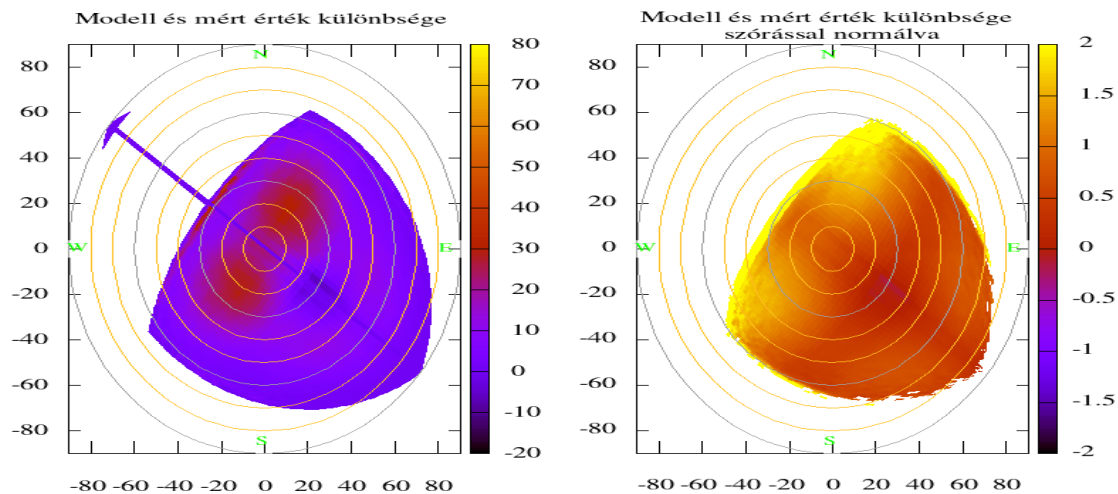


(a)

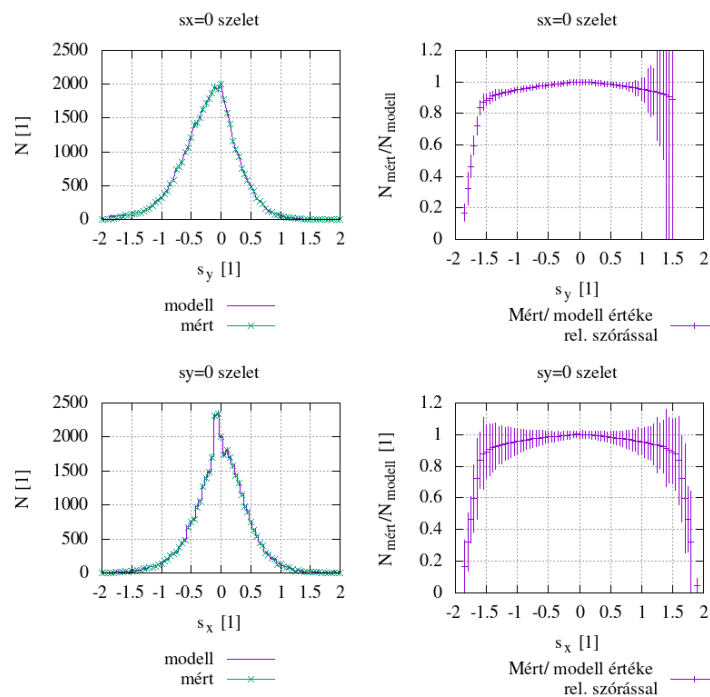


(b)

36. ábra. A 36a. ábrán a szimuláció és a mért értékek globális kr.-ben ábrázolva. A modell és mért érték hányados ábrázolásán látható (lásd:36b), hogy a 45° -os szögtartományon belül (kék kör) 1-hez tart.



(a)



(b)

37. ábra. 37a. ábra: Az Mts51 detektor adatainak különbsége, majd annak szórással normált változata. 37b. ábra: Ugyanennek az adatrendszerből kivágott 1D szeleteken is jól látszódik az illeszkedése a modellnek. A 2.3.3.fejezetben tárgyalt két effektus miatt tér el a széleken a két érték.

3. Konklúzió

A kozmikus sugárzásból származó müonok segítségével képesek vagyunk nagyméretű objektumok belső szerkezetét vizsgálni, legyen az geofizikai képződmény vagy ember által alkotott építmény, ezen képalkotási módszert nevezzük müográfiának. Világszerte elindult a terület aktív kutatása, beleértve a müonok észlelését lehetővé tévő részecskefizikai detektorok fejlesztését, az adatok feldolgozásának finomítását, illetve a módszer alkalmazhatóságának körét vizsgálják.

Magyarországon jelentős eredményeket ér el a Wigner Fizikai Kutatóközpontban működő Innovatív Detektorfejlesztő "Lendület" Kutatócsoport / REGARD csoport. Gázöltésű detektorok tervezésével foglalkoznak részecskefizikai és müográfiai mérésekhez. TDK munkám során ezen csoport munkájába kapcsolódhattam be, megismerhettem a gázöltésű detektorok működését és építésük metódusát. TDK dolgozatom fő célja az volt, hogy a beütésszám és a fluxus között egy modellt állítsak fel. Ezáltal, ha ismerem a geofizikai modellhez tartozó fluxustérképet, a detektort és a mérést jellemző paramétereket meg tudjam becsülni a várható beütésszámokat, ami meghatározza a mérés hosszát és az anomáliák adott szintű kimutathatóságát. A direkt feladatok megoldását összevetettem konkrét méréssorozatokból származó eredményekkel. Végül ennek a modellnek a segítségével mérésoptimalizálással kapcsolatos kérdéseket válaszoltam meg.

Megmutattam, hogy a modell jól illeszkedik a mért értékekkel, míg a fluxus közelítéséből adódóan néhol felülbecsüli. Ezt elvégeztem felszíni, felszín alatti, különböző döntési szöggel rendelkező mérések esetében egy nagy, közepes és egy kis felületű detektor adatait és eredményeit használva.

A detektorral végzett döntött mérésekkel kapcsolatos vizsgálatok arra mutattak rá, hogy képesek vagyunk a fókuszterület változtatására, az effektust a modellem kvantitatívan leírja. A fúrólyukba helyezhető detektor esetén megmutattam, hogy a 0° , 30° , 60° -kal elforgatott három-detektoros kombináció az optimális.

Végül átültettem a modellt C++ nyelvre, mivel a feltételezett $\cos^2$ -es fluxus nem volt elég a további vizsgálatokhoz, szükségem volt arra, hogy tetszőleges konkrét 2D fluxustérképet tudjak beolvasni. A St. Christoph bányában mért adatrendszer egy elemével hasonlítottam össze a kód eredményét. Validáltam, hogy a használt 45° -os szögtarományban működik a direkt feladat megoldására adott modellem és implementációm.

Jövőbeli terveim az említett két effektív felületet befolyásoló effektust beépíteni a kódba, mivel a trackek számának követelésénél kisebb értékekre akarunk lemenni, ami a használt detektorhoz képesti szögtartomány növekedését eredményezné. További konkrét mérések eredményeivel való összehasonlítás. Egy terepi kampány megtervezése, időbecslés, méréselrendezés meghatározása. Részletesebb vizsgálata a paraméterek illeszkedésének és a modell helyességének. Majd ezen modellt a felszín feletti mérési elrendezésre is át szeretném ültetni.

4. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a Wigner Fizikai Kutatóközpont REGARD csoportjának, hogy három évvel ezelőtt becsatlakozhattam munkájukba. Külön köszönet illeti két témavezetőmet. Hamar Gergőt, aki tudásom elmélyülését segítette, hogy folyamatosan új kihívások elé állított, és rengeteg tanáccsal látott el. Balázs Lászlónak, aki haladásom folyamatos monitorozását végezte, illetve további hasznos észrevételekkel látott el. A Csoport minden egyes tagjának és Családomnak.

A kutatást az OTKA-FK-135349, az ELKH-KT-SA-88/2021, és a TKP2021-NKTA-10 pályázatok támogatták.

Hivatkozások

- [Andrea 2006] A. Andrea et al.
The MRPC detector for the ALICE time of flight system: Final design and performances
Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 158:60 (2006)
- [Alvarez 1970] L.W. Alvarez et al.
Search for hidden chambers in the pyramids
Science 167, 832–839 (1970)
- [Balázs 2022/23] L.Balázs et al.
Muographic inversion in the exploration of cavity and low-density fractured zones – methodological issues
(Előkészítés alatt az EPSL-hez, addig REGARD belső dokumentum)
- [Barna 2012] B. Barna
A kozmikus sugárzás
Fizika BSc szakdolgozat, Szeged (2012)
- [Bektasoglu 2013] M. Bektasoglu et al.
Investigation of the zenith angle dependence of cosmic-ray muons at sea level
Pramana 80.5 (2013)
- [Bódizs 2006] D. Bódizs
Atommag sugárzások mérés technikái
Typotex (2006)
- [Bradt 1948] H. L. Bradt and B. Peters
Investigation of the Primary Cosmic Radiation with Nuclear Photographic Emulsions
Phys. Rev. 74, 1828 (1948)
- [CERN] <https://cds.cern.ch/images/CMS-PHO-GEN-2017-008-1>
- [Charpak 1970] G. Charpak
Evolution of the Automati Spark Chambers
Annual Review of Nuclear Science, 20, 195-254. (1970)
- [Cimmino 2019] L. Cimmino et al.
3D Muography for the Search of Hidden Cavities.
Scientific Reports 9, 2974 (2019)
- [Gilányi 2019] G. Gilányi
Müontomográf mérések modellezése
Szakdolgozat, ELTE (2019)
- [Giomataris 1996] Y. Giomataris et al.
MICROMEGAS: a high-granularity position sensitive gaseous detector for high particle-flux environments
Nucl. Instrum. Meth. A376 (1996) 29.
- [Hamar 2015] G. Hamar
User's Guide for the REGARD MuonTomograph RaspberryPi Based Data Acquisition

System
REGARD Internal note (2015)

- [Kiss 2011] G. Kiss
Sokszálas proporcionális kamrák fejlesztése részecskefizikai detektorokhoz
OTDK dolgozat, ELTE (2011)
- [Lefebvre 2019] Marie G. Lefebvre et al.
Skarn formation and tin enrichment during regional metamorphism: The Hämmerlein polymetallic skarn deposit
Lithos (2019)
- [Moroshima 2017] K. Moroshima et al.
Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons
Nature volume 552, pages 386 (2017)
- [Menichelli 2007] M. Menichelli et al.
A scintillating fibres tracker detector for archaeological applications
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 572, Issue 1, p. 262. (2007)
- [Oláh 2011] L. Oláh
Föld alatti üregek vizsgálata kozmikus részecskék segítségével
OTDK dolgozat, ELTE (2011)
- [Oláh 2012] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga
CCC-based muon telescope for examination of natural caves
Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 1 (2012) 229
- [Oláh 2017] L. Oláh, Sz. Balogh, G. Hamar, D. Varga, Á. Gera, G. Nyitrai, P. Pázmándi, G. Surányi
Képkalkotás Kozmikus Részecskék Nyomkövetésével
Fizikai Szemle 2017/03, (2017)
- [Oláh 2019] L. Oláh, H.K.M. Tanaka, T. Ohminato, G. Hamar, D. Varga
Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography
Geophys.Res.Let. 46 : 10417 (2019)
- [OPERA] OPERA Experiment
<http://operaweb.lngs.infn.it/spip.php?rubrique39>
- [Rábóczy 2022] B. Rábóczy
Müográfiai Képkalkotás Hátterének Vizsgálata
BSc Szakdolgozat, ELTE (2022)
- [Saracino 2017] G. Saracino et al.
Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples)
Scientific Reports (2017)

- [Sauli 1977] F.Sauli
Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers
Lectures given in the Academic Training Programme of CERN 1975-1976 (1977)
- [SAXORE] <https://www.saxorebergbau.com/projekte/projekt-rittersgruen/geologischer-ueberblick/>
- [Schouten 2018] D. Schouten, P. Ledru
Muon Tomography Applied to a Dense Uranium Deposit at the McArthur River Mine
Journal of Geophysical Research: Solid Earth 123 (2018) 10, 8637
- [Surányi 2016] G. Surányi, g. Molnár, G.G. Barnaföldi, G. Hamar, H.G. Melegh, Oláh, L., & Varga, D. (2016).
Locating of density anomalies using highly penetrating cosmic muons
Karsztfejlődés (2016) 203
- [Tanaka 2010] H. Tanaka et al.
Development of a portable assembly-type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma
Earth Planets Space, 62, 119-129. (2010)
- [Varga 2010] D. Varga, G. Hamar, G. Kiss
Asymmetric Multi Wire Proportional Chamber With Reduced Mechanical Tolerances
NIM (2010)
- [Varga 2016] D. Varga, G. Nyitrai, G. Hamar, L. Oláh
High efficiency gaseous tracking detector for cosmic muon radiography.
Advances in High Energy Physics (2016)