

Nukleáris modifikáció 17.3 GeV nukleononkénti tömegközépponti energián, a CERN-NA49 kísérletben

Ph.D. értékezés nyilvános vitája

László András

MTA KFKI RMKI, Részecskefizika Főosztály, Erős Kölcsönhatás Osztály

laszloa@rmki.kfki.hu

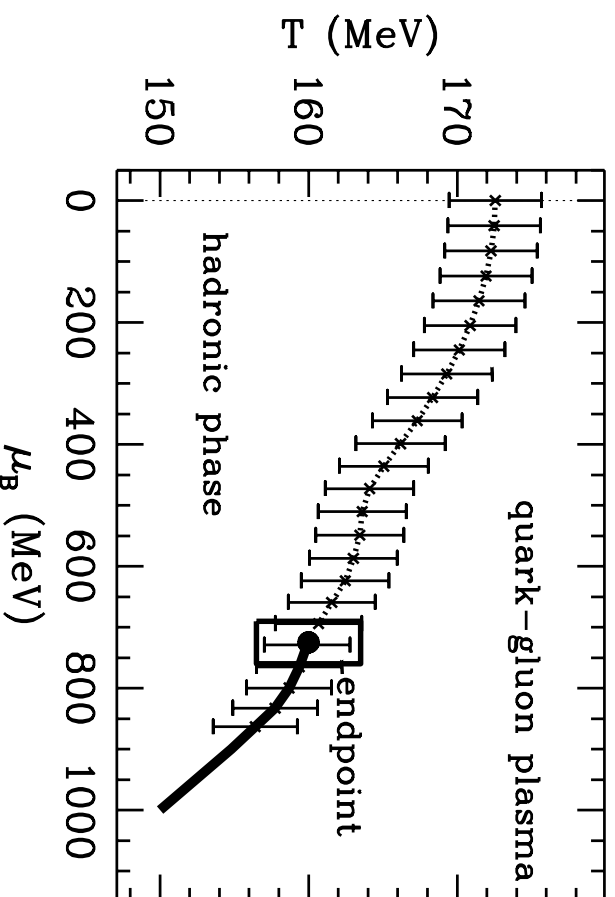
Fizika Doktori Iskola (Vezető: Dr. Horváth Zalán)

Részecskefizika és Csillagászat Program (Vezető: Dr. Csikor Ferenc)

Témavezető: Dr. Vesztergombi György

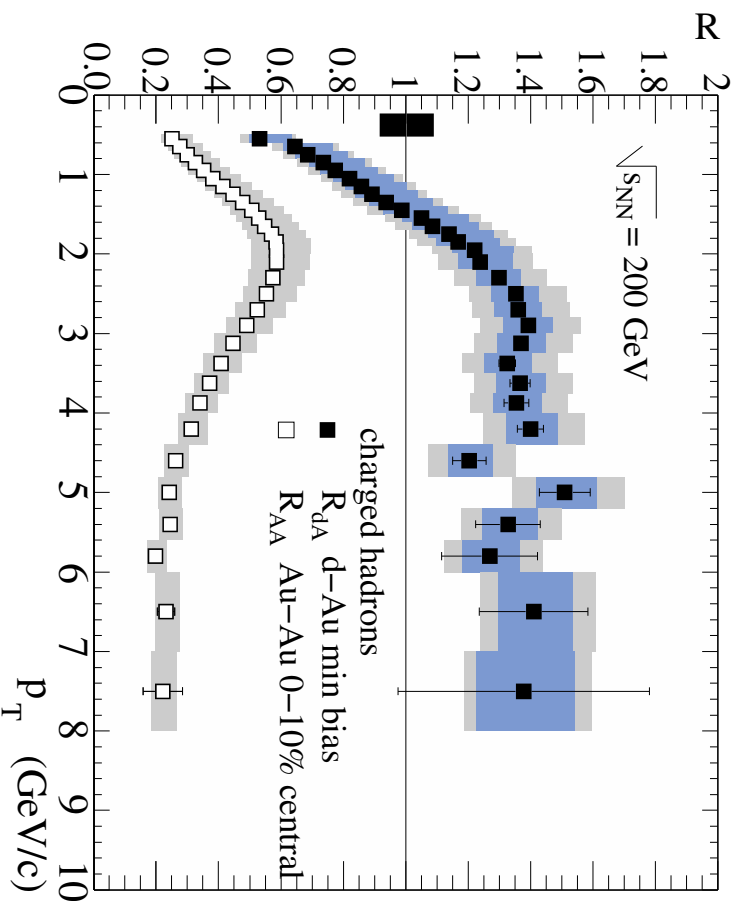
ELTE-TTK, 2008 június 20.

- Egyik elemi kölcsönhatás: az *erős kölcsönhatás*.
PI magerőkért, hadronikus kölcsönhatásokért felel.
- Erős kölcsönhatást mai ismereteink szerint leíró modell: QCD.
- Perturbatívén csak nagy impulzusátadásoknál számolható
(nagy effektív csatolás), de rácson numerikusan is megoldható.



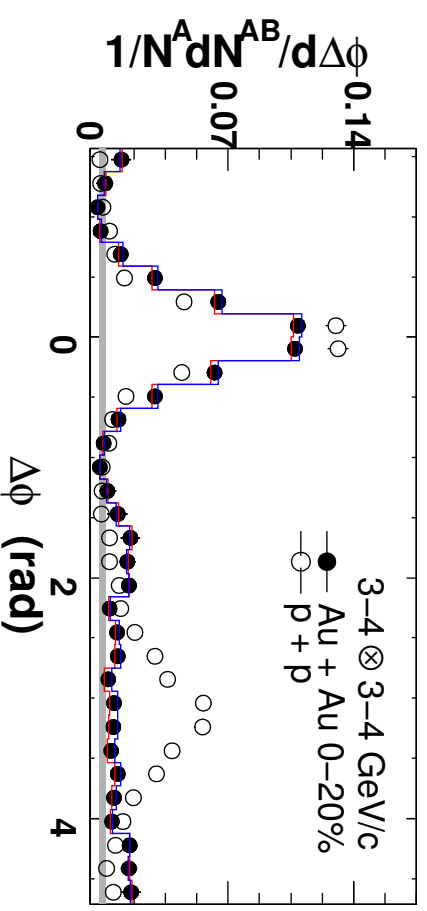
- Rács-QCD jóslat: különböző fázisok. Hadronikus, QGP. Kísérletileg?

- Vizsgálható: p+p, p+A, A+A ütközés, ahogy egyre nagyobb a rendszer.



RHIC eredmények

↙ (200 GeV/nukleonpár) ↘



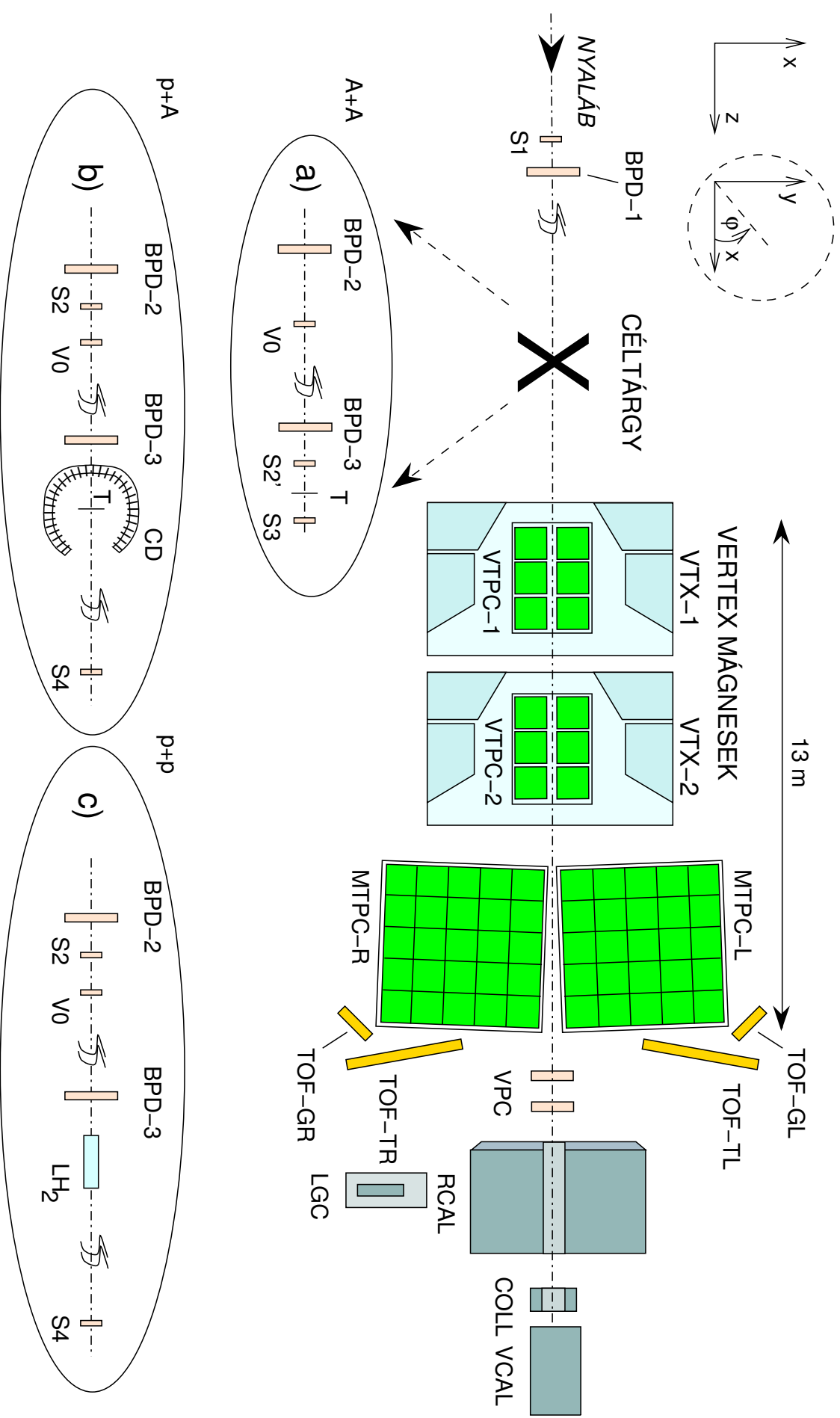
Kevesebb a részecske

Kevesebb az ellenoldali részecske

nagy transzverz impulzusnál, ha több az elemi ütközés (nagyobb a rendszer).

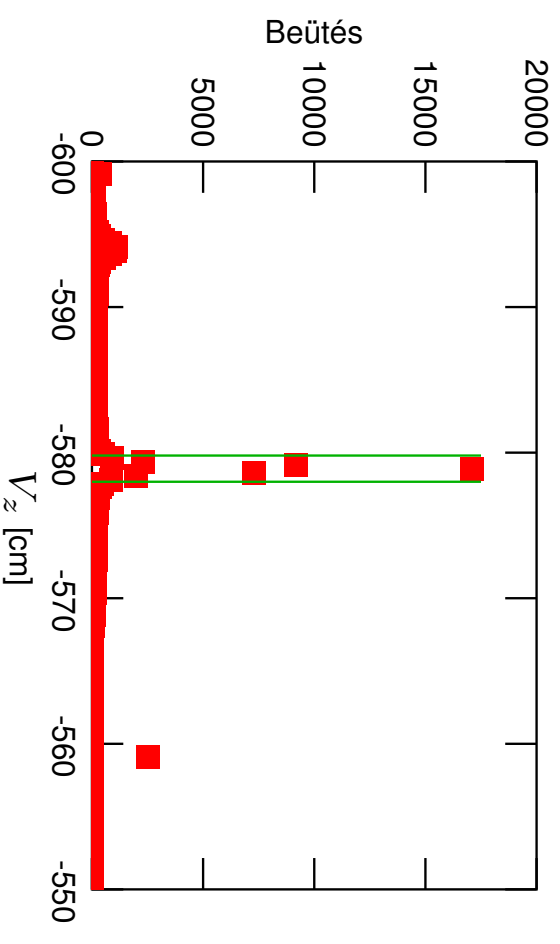
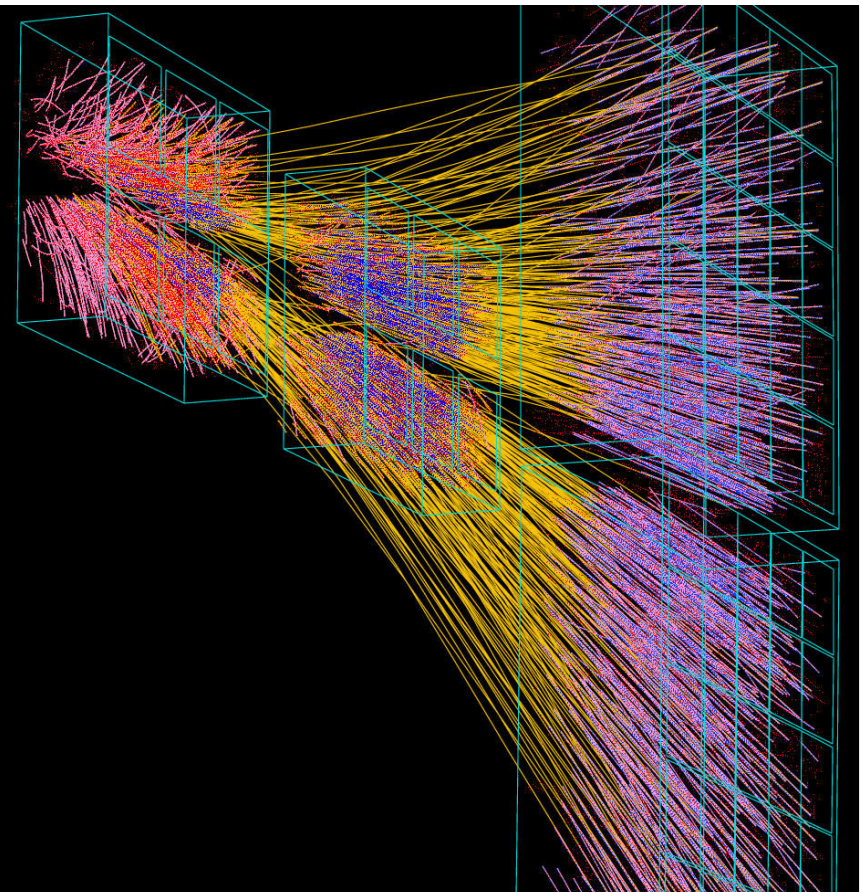
- Valami megállítja a részecskéket? QGP okozhatja?
- Milyen az energiafüggése e jelenségeknek?!

A CERN-SPS gyorsító H2 nyalábkievezetésénél egy fix-céltárgyas kísérlet.



Különböző nyalábokkal, céltárgyakkal sokféle ütközés.

Legnagyobb nyalábenergia nehézionnál: 158 GeV/nukleon. Ezzel: Pb+Pb, p+Pb, p+p 17.3 GeV/nukleonpár nukleon-nukleon t.k.p. energián.



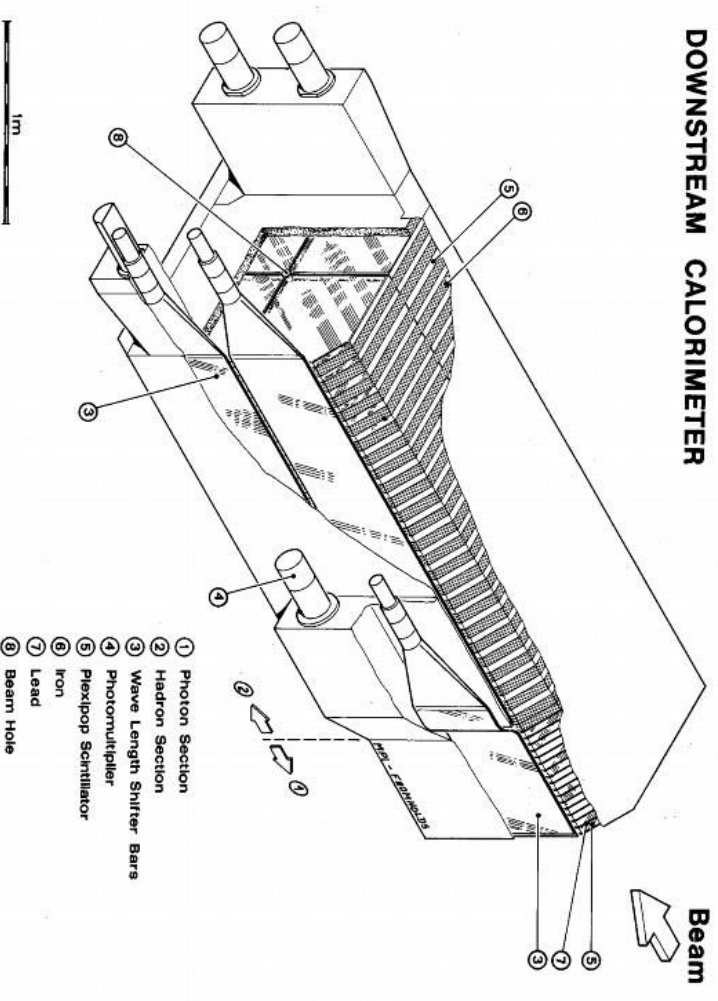
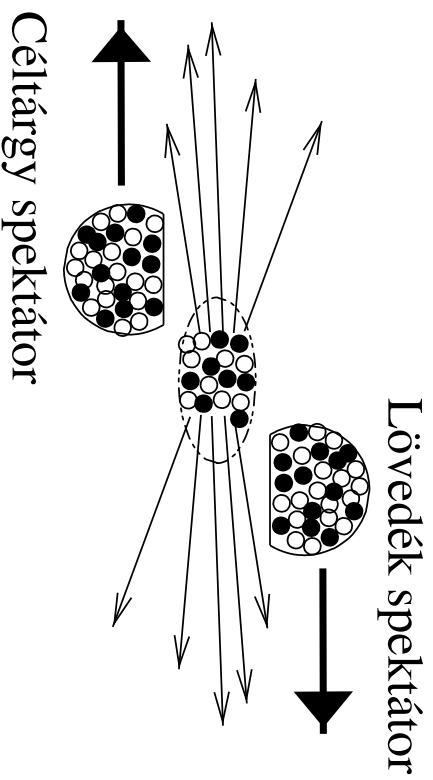
Tisztítás után felhasználható adatsor:

Pb+Pb	p+Pb	p+p
830 k (centr.)	1.8 M	4.8 M
1.4 M (közepes)		
200 k (perif.)		

Az ütközési centralitás mérése: lövedék spektátor energia meghatározásával.

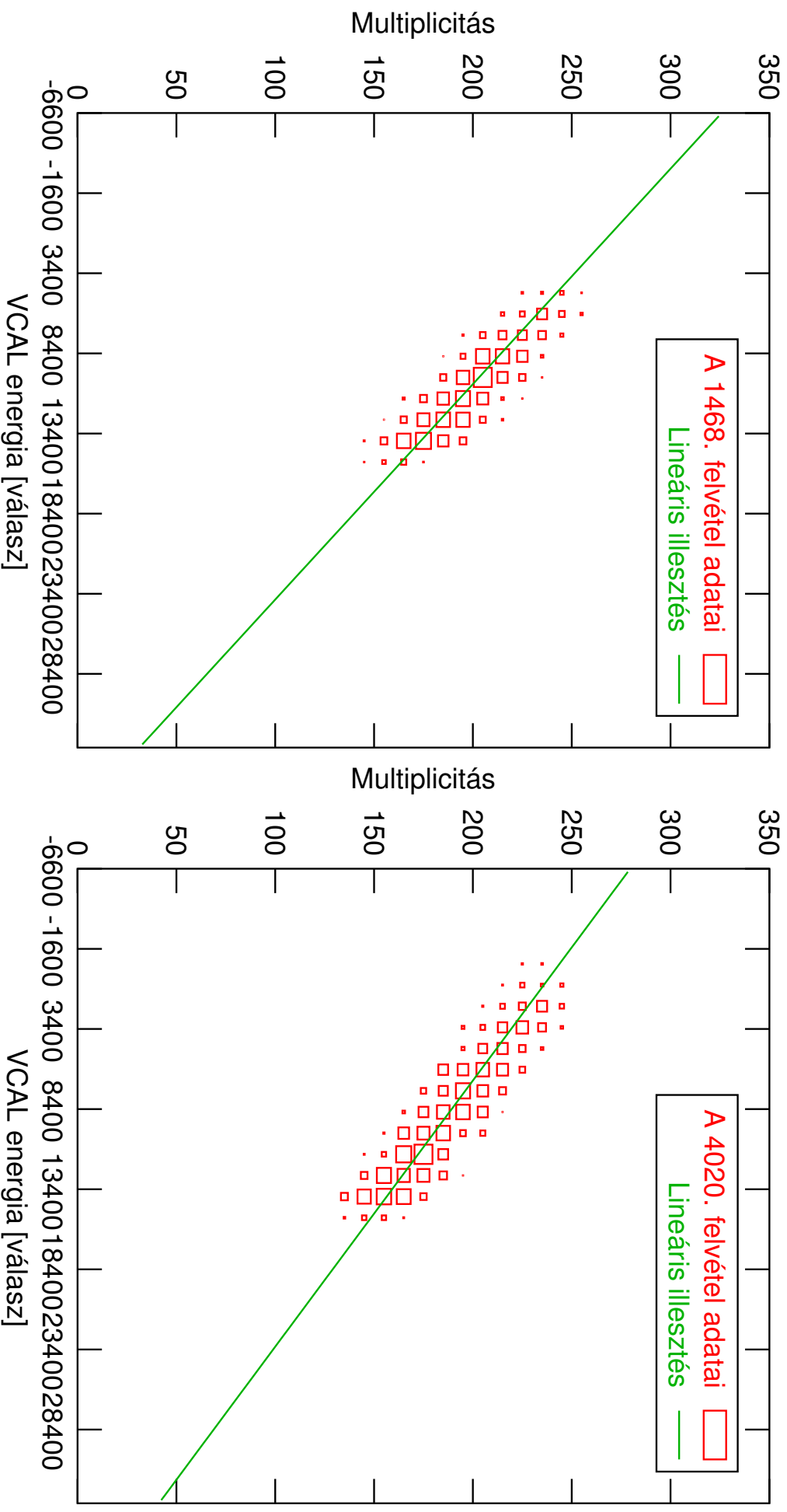
T.k.p. rendszerben:

Vétő Kaloriméter segítségével.



1. A Vétő Kaloriméter kalibrációja

Vétő Kaloriméter relatív kalibrációja a töltött részecskék számával való korreláció alapján.

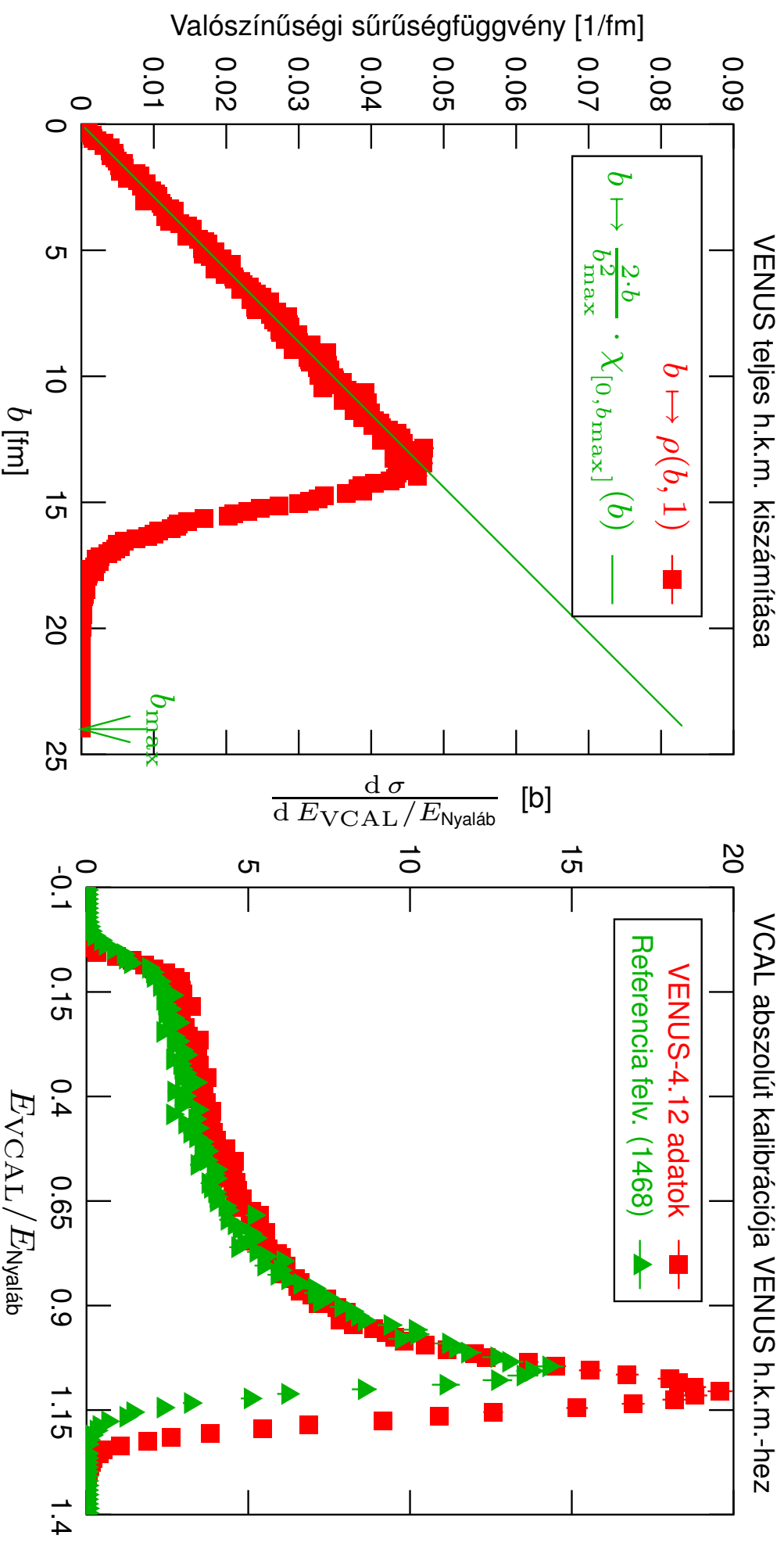


$E_{VCAL}(\text{felvétel}) \mapsto a_{\text{felvétel}} \cdot E_{VCAL}(\text{felvétel}) + b_{\text{felvétel}}$ alakú lineáris parametrizáció.

$$E_{VCAL, \text{korrigált}}(\text{felvétel}) = \left(E_{VCAL}(\text{felvétel}) - \frac{b_{\text{referencia}} - b_{\text{felvétel}}}{a_{\text{felvétel}}} \right) \cdot \frac{a_{\text{felvétel}}}{a_{\text{referencia}}}$$

1. A Vétő Kaloriméter kalibrációja

Vétő Kaloriméter összevetése VENUS modellel.

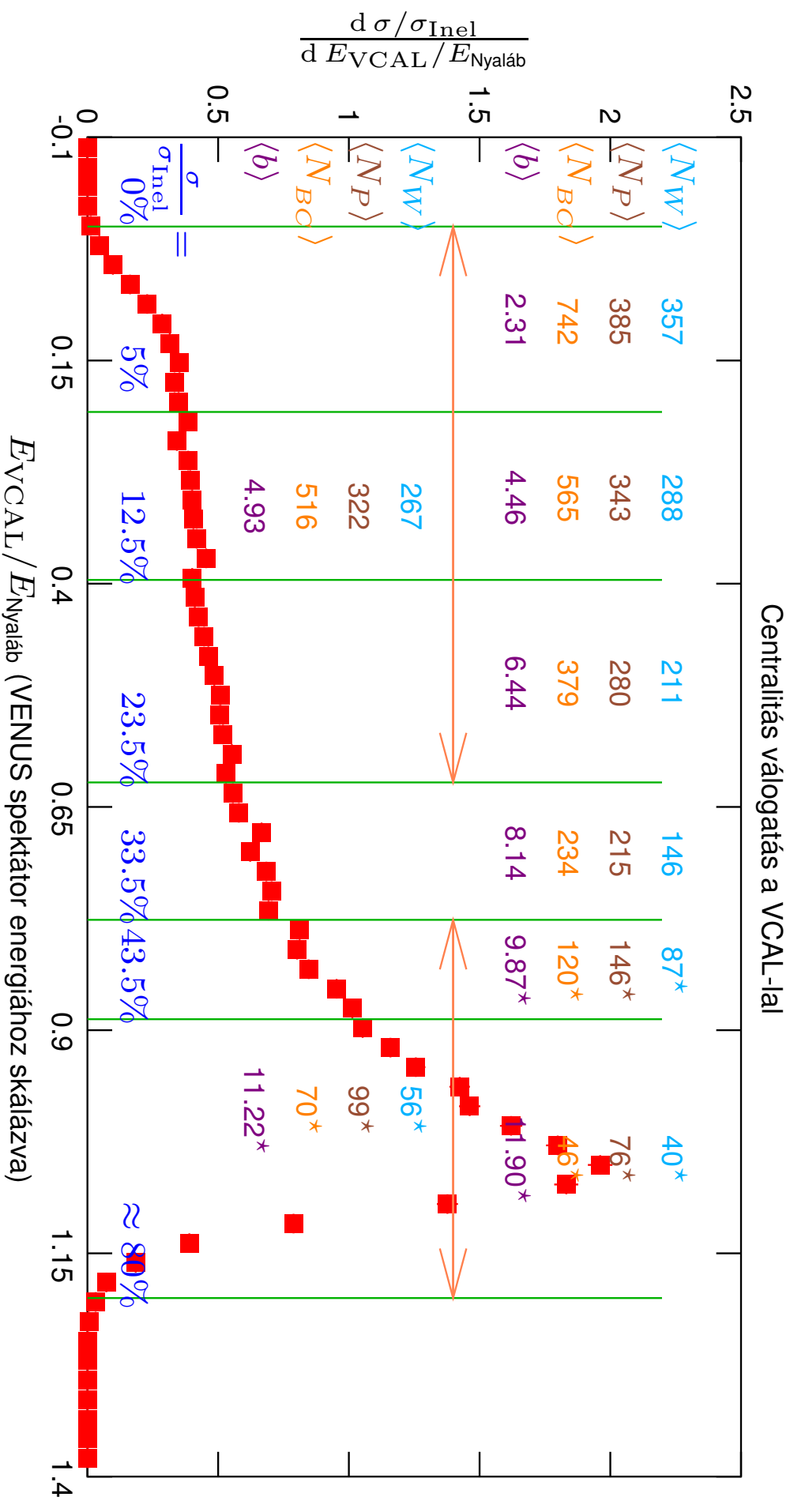


Trigger h.k.m. mérhető a felvett események között átszaladt események számának eloszlásából.

VENUS h.k.m. számolható az ütközési paraméter eloszlásából.

1. A Vétő Kaloriméter kalibrációja

Számolhatóvá válnak az ütközések átlagos geometriai jellemzői.



Centralitás ablakok: teljes inelasztikus h.k.m. (7.15 b) %-ában megadva.

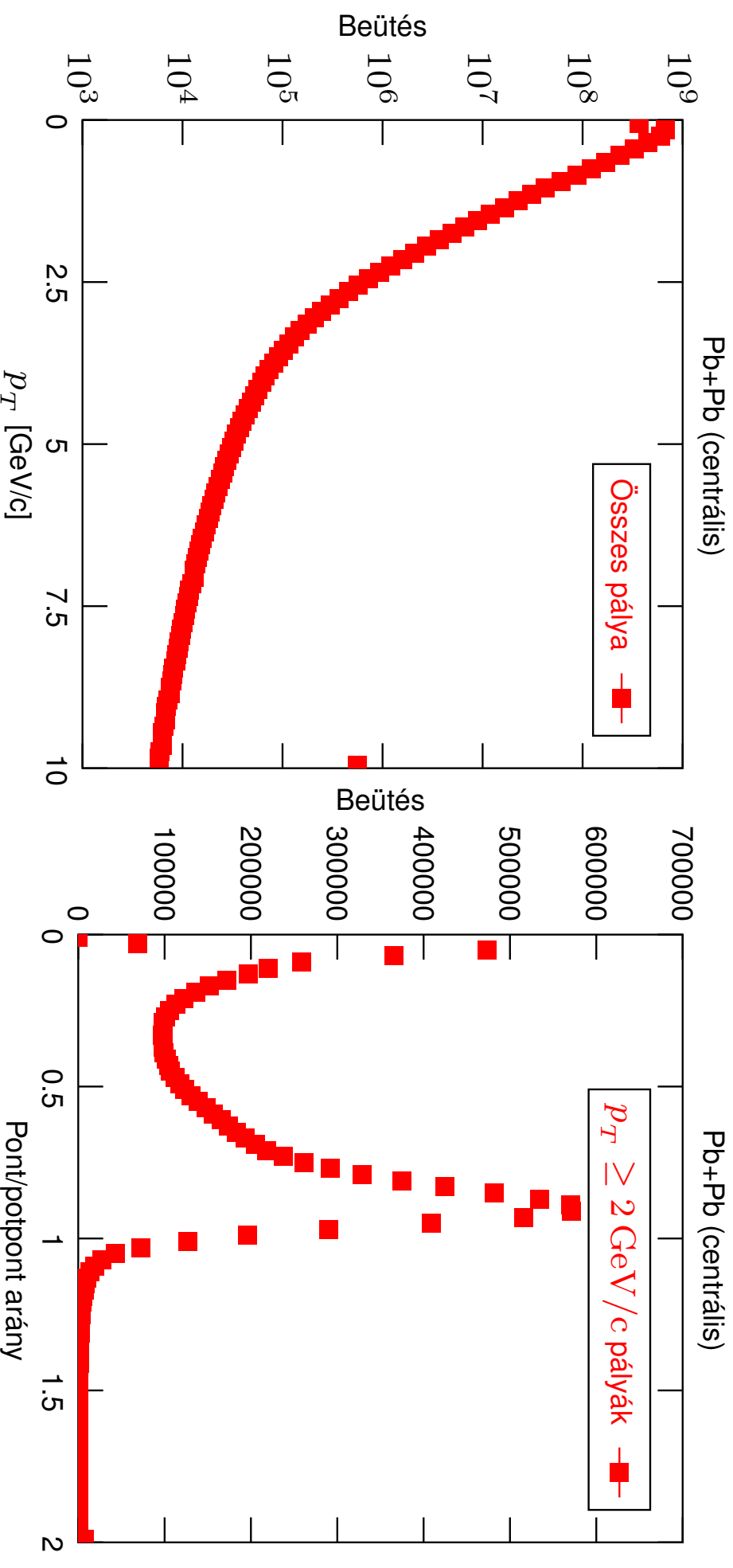
N_W (meglökött nukleonok száma), N_{BC} (bináris ütközések száma) VENUS

+ empirius VCAL energia eloszlással számolva az egyes ablakokban.

2. Nagy transzverz impulzusú részecskék rekonstrukciója

Fix-céltárgyas kísérlet, nagy röppályasűrűség a merőlegesen kirepülő részecskéknél.

Rossz jel/zaj viszony a rekonstruált nagy transzverz impulzusú részecskéknél.

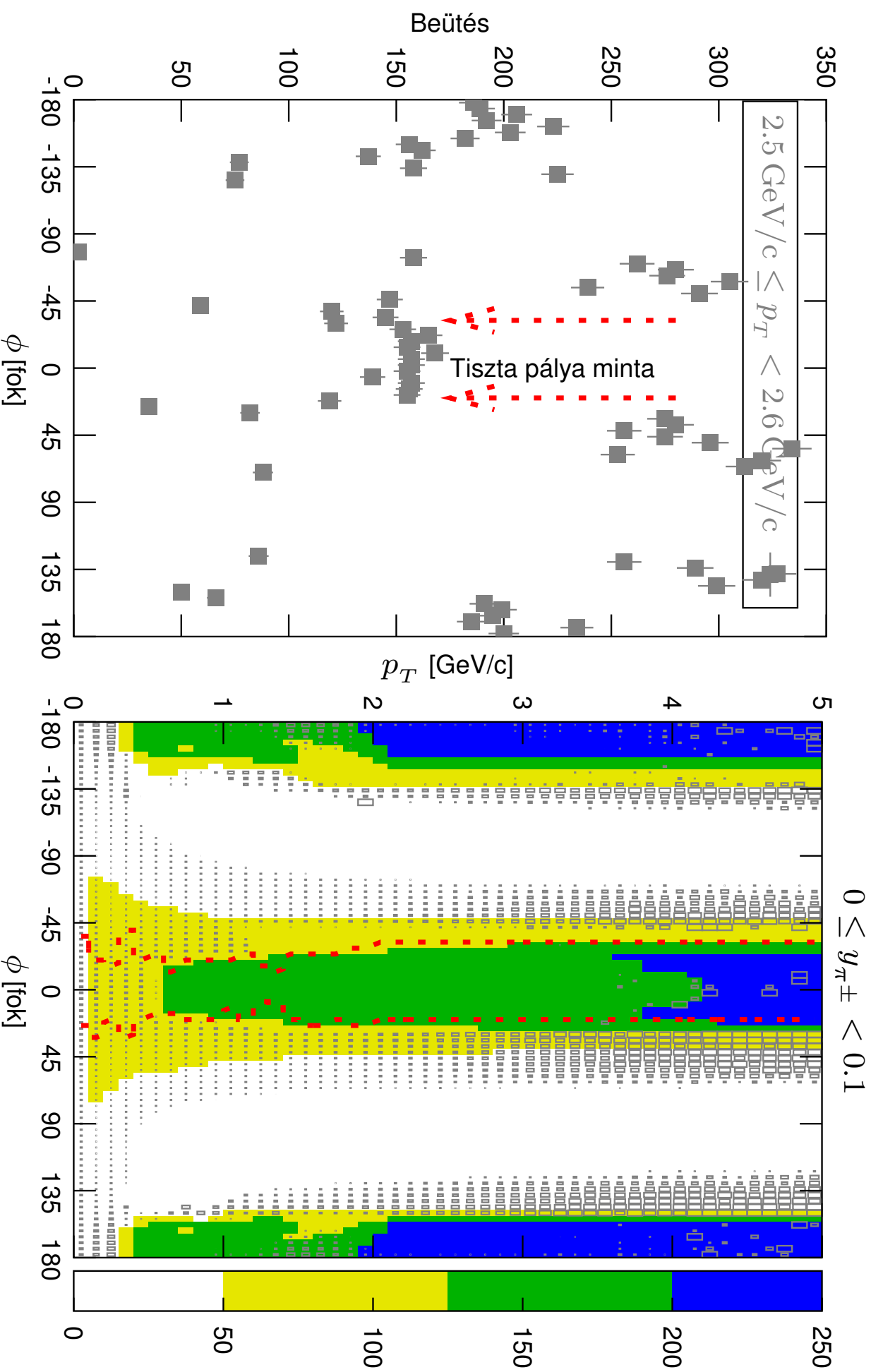


Pontosan mi a háttér forrása?

Hogyan lehetne megtisztítani a mintát statisztikai torzítás nélkül?

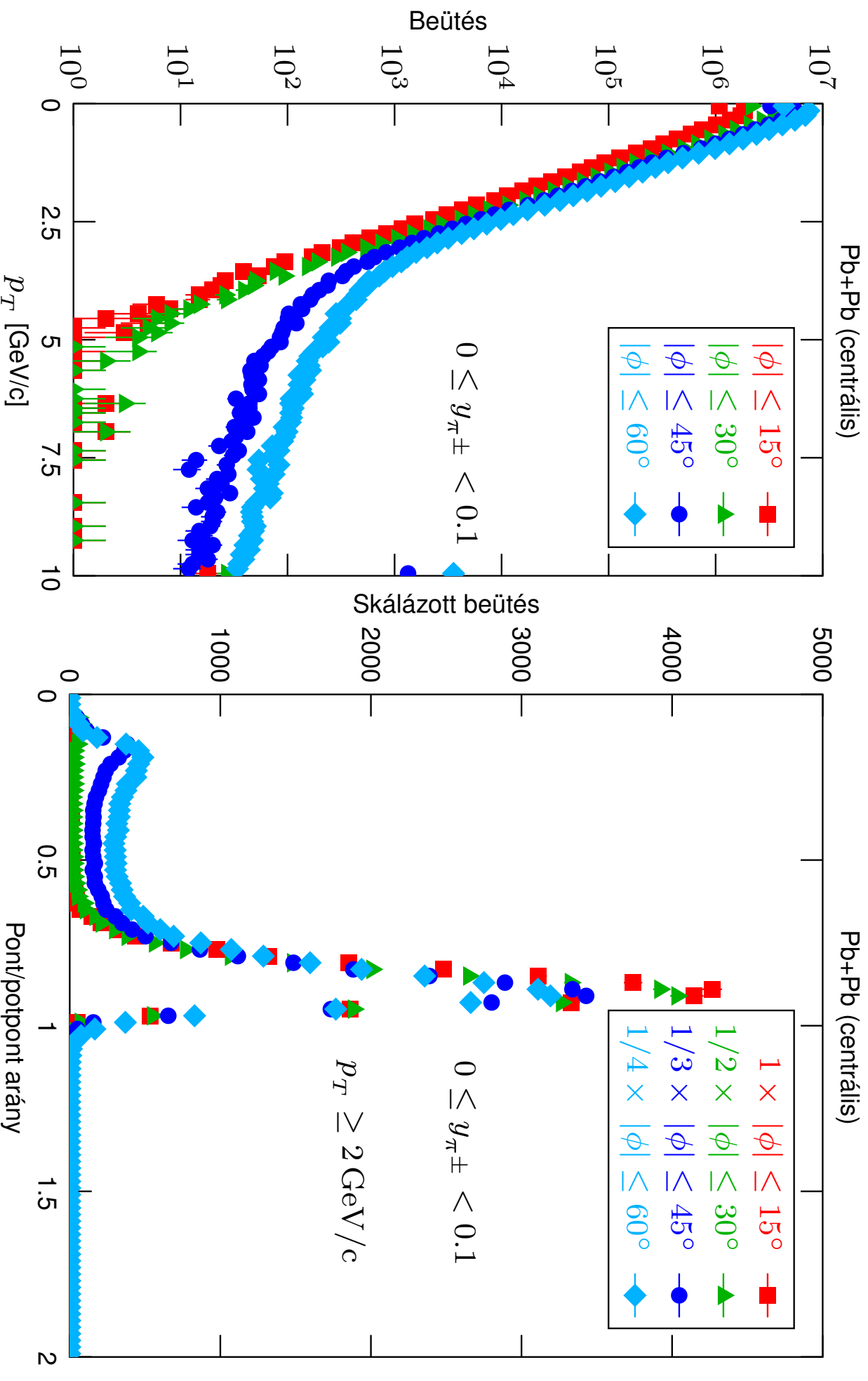
2. Nagy transzverz impulzusú részecskék rekonstrukciója

Megoldás: nem folytonos pályák kizárása + (y, p_T) -függő töltéskorrigált-azimut vágás.



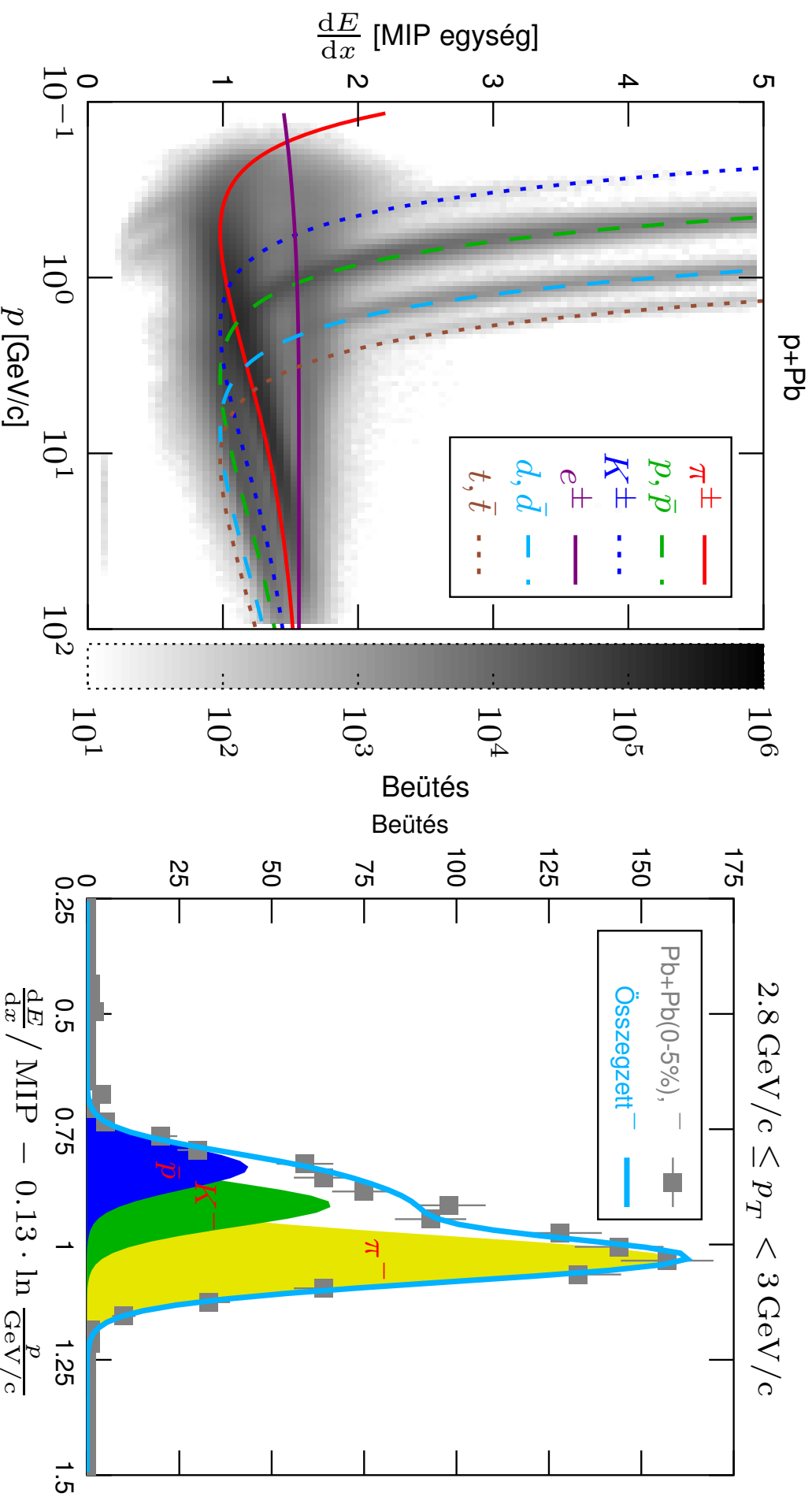
2. Nagy transzverz impulzusú részecskék rekonstrukciója

Sikeresen rekonstruálhatók így a nagy p_T -s részecskék $y = 0$ körül.



3. Azonosított töltött hadron spektrumok meghatározása

Rapiditás: $-0.3 \leq y \leq 0.7$. Centralitás: (0-5)%, (12.5-23.5)%, (33.5-80)%. p+Pb és p+p is.



Részecskeazonosítás fajlagos ionizációval ($\frac{dE}{dx}$).

A detektor tulajdonságai az alkalmazott vágások esetén:

Gyk. 0% hamis-pálya szennyezés, impulzustér felbontást 1% majorálja

$\left(\frac{\Delta(p)}{p}\right) \approx 10^{-4} \frac{p}{\text{GeV}/c}$, impulzus skála bizonytalanság kisebb 0.1%-nál, hatékony részecskeazonosítás (tip. $\frac{dE}{dx}$ felbontás: 3 – 6%).

Szisztematikus bizonytalanságok:

Korrekciónál figyelembe vett effektusok (finomhangolt korrekciók):

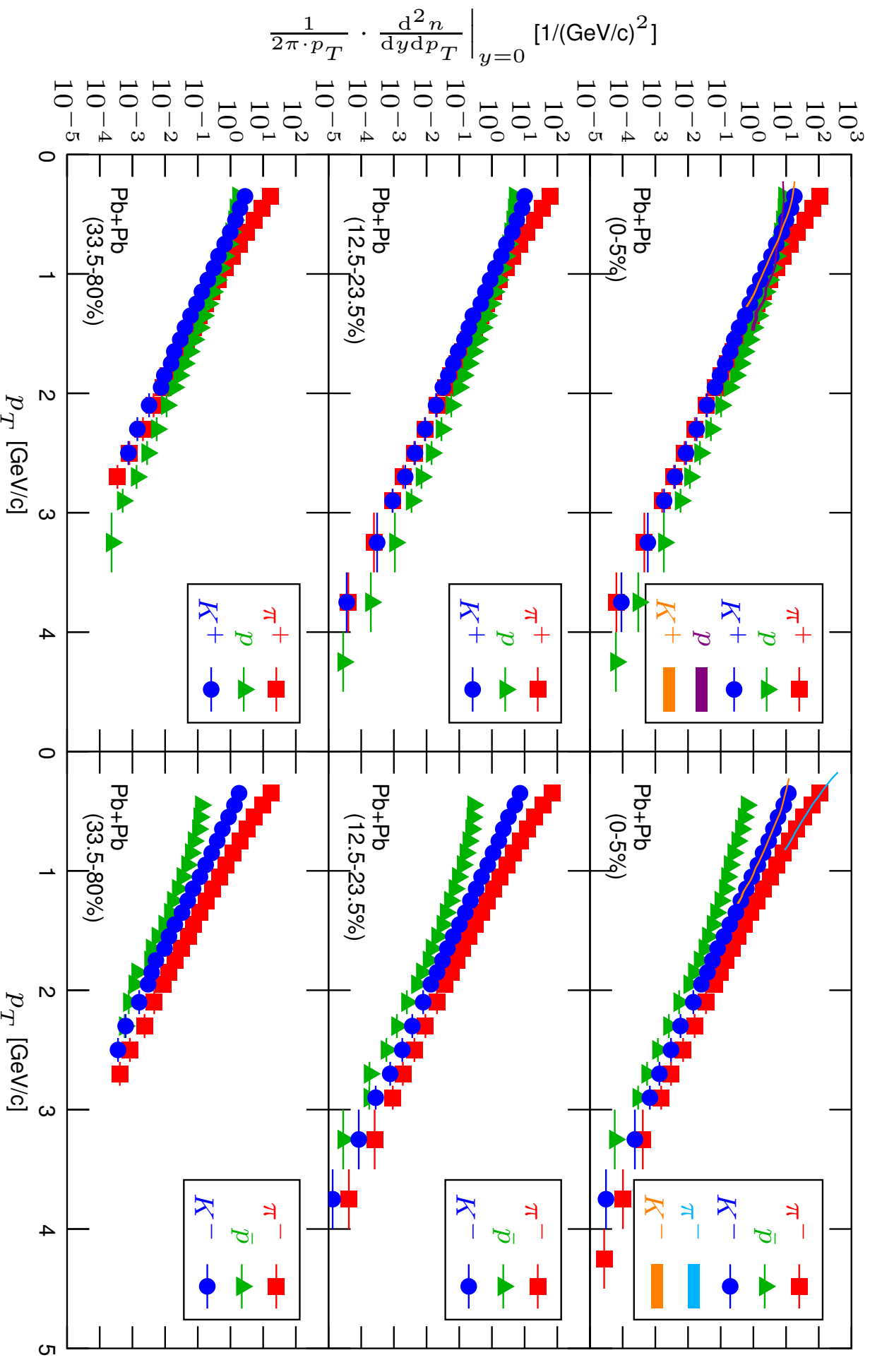
- geometriai akceptancia (100 – 1000%),
- rekonstrukciós veszteség (10% alatt),
- bomlási veszteség (20-tól 0%-ig),
- bomló részecskékből szennyezés (5–30%),
- céltárgyon kívüli ütk.-ből szennyezés (5%).

tipus	$\frac{dE}{dx}$ alak	akc.	f.d.	f.d. alak	kvadr. össz.
π^+	1%	2%			2.2%
π^-	1%	2%			2.2%
p	1%	2%	3%		3.7%
\bar{p}	2%	2%	3%	5%	6.5%
K^+	4%	2%			4.5%
K^-	1%	2%			2.2%

p+Pb, p+p: még 5% a trigger-torzításból.

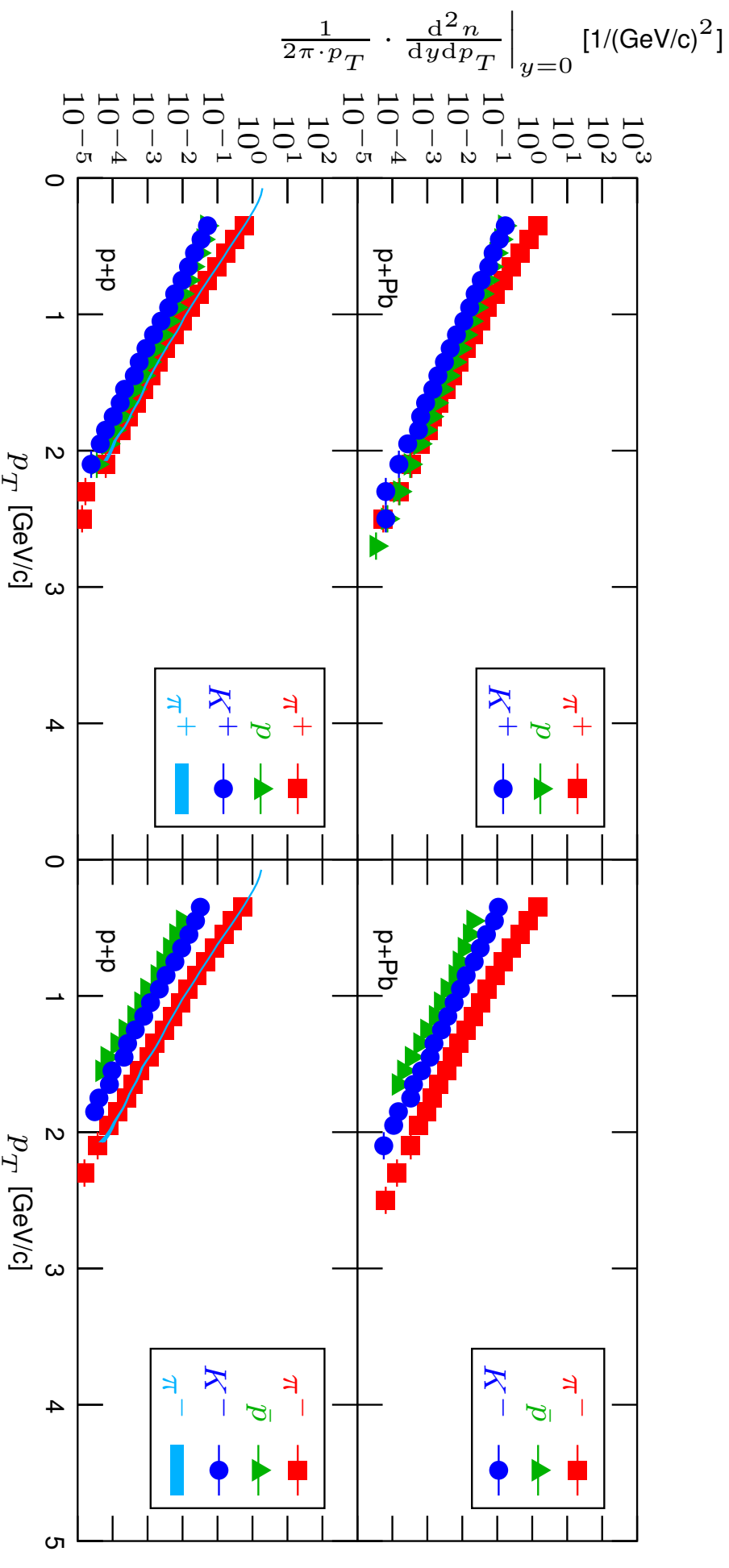
3. Azonosított töltött hadron spektrumok meghatározása

Invariáns hozamok Pb+Pb ütközésekben:



3. Azonosított töltött hadron spektrumok meghatározása

Invariáns hozamok p+Pb és p+p ütközésekben:



- Keményebb spektrumúak a barionok.
- Mezon spektrumok hasonló keménységűek (p+p, p+Pb-ben \bar{p} is hasonló).

4. Semleges pion spektrum meghatározása

Egyéb részecskék, pl π^0 -ak impulzuseloszlása is érdekes ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$).

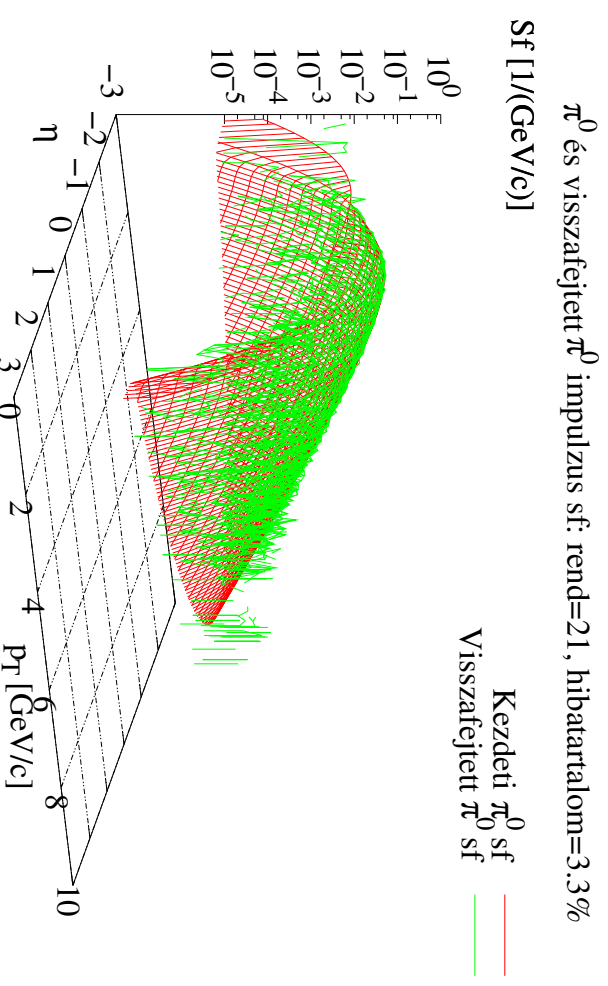
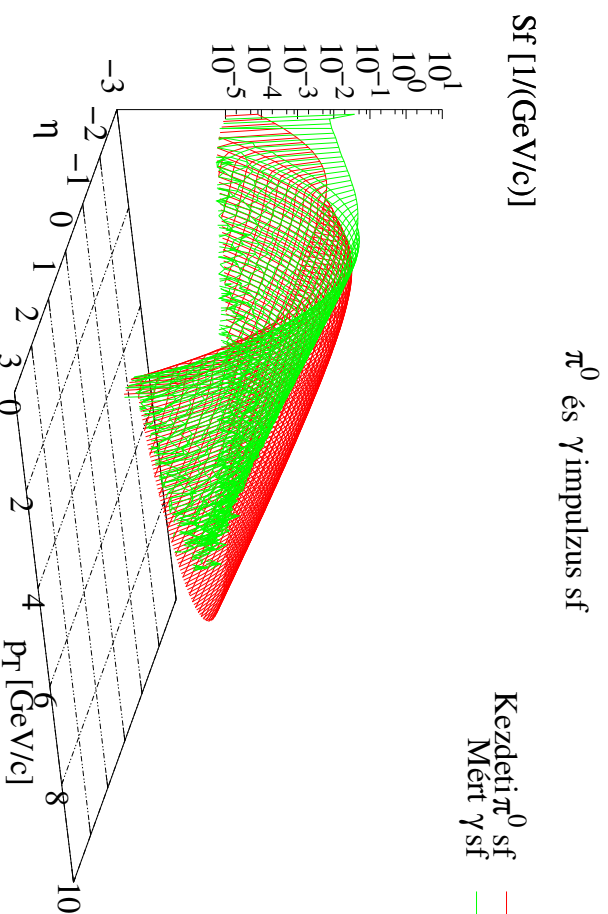
Kis γ -detektálási valószínűség \Rightarrow közvetlen γ párosítás nem ad elég statisztikát.

Lehetséges: $\rho_\gamma(\vec{k}) = \int \hat{\rho}_{\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma}(\vec{k}|\vec{p}) \rho_{\pi^0}(\vec{p}) d^3p$ integráloperátor invertálásával visszanyerjük ρ_{π^0} -t (spektrum-visszafejtés).

Spektrum-visszafejtés: általában nem megoldott. Speciális esetekben (pl konvolúció) igen.

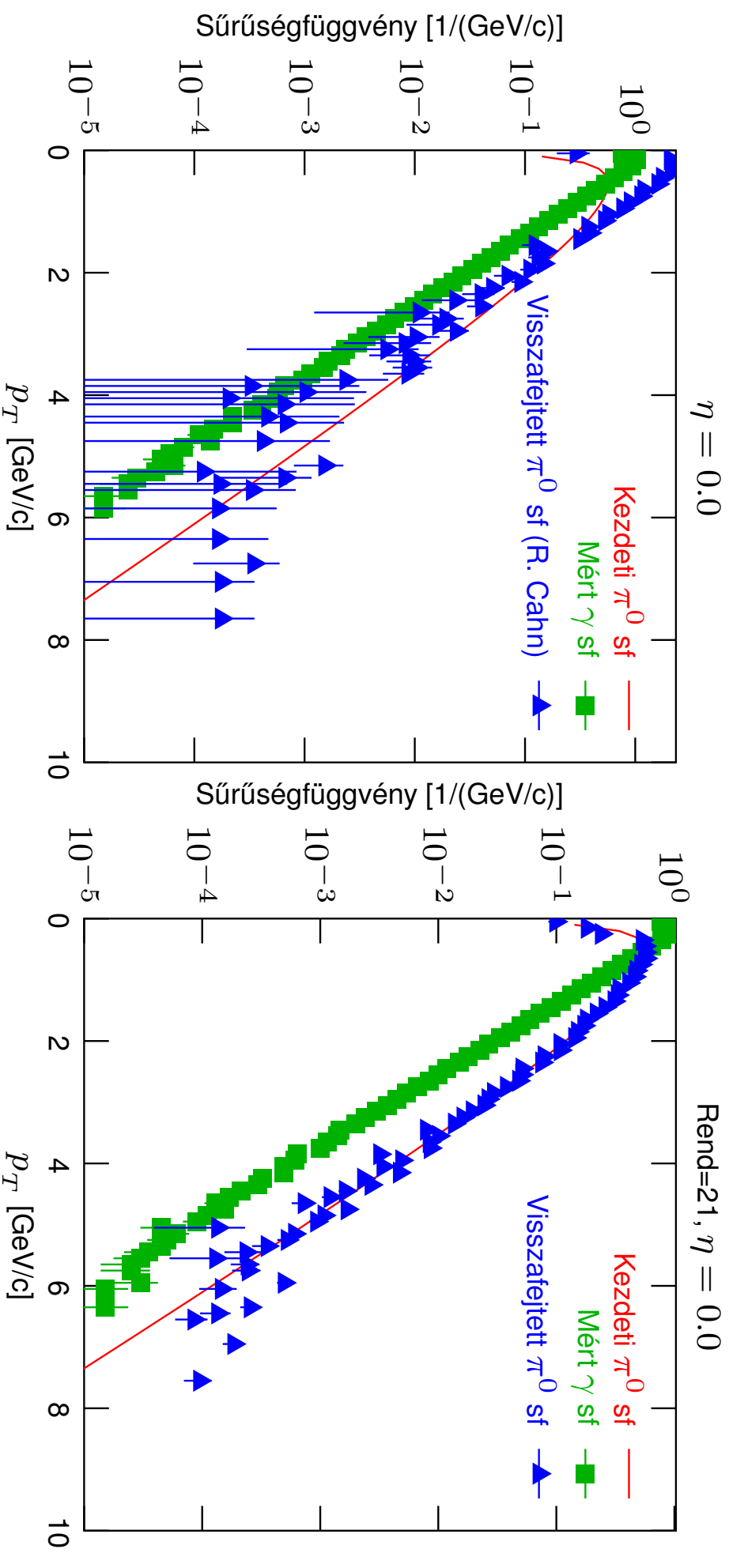
Az általános spektrum-visszafejtés problémára egy robusztus iteratív eljárást dolgoztam ki

(konvergencia tételek a módszerre...). Demo:



4. Semleges pion spektrum meghatározása

Összehasonlítás régebbi indirekt módszerekkel (R. Cahn, ISR adatokra fejlesztette ki).



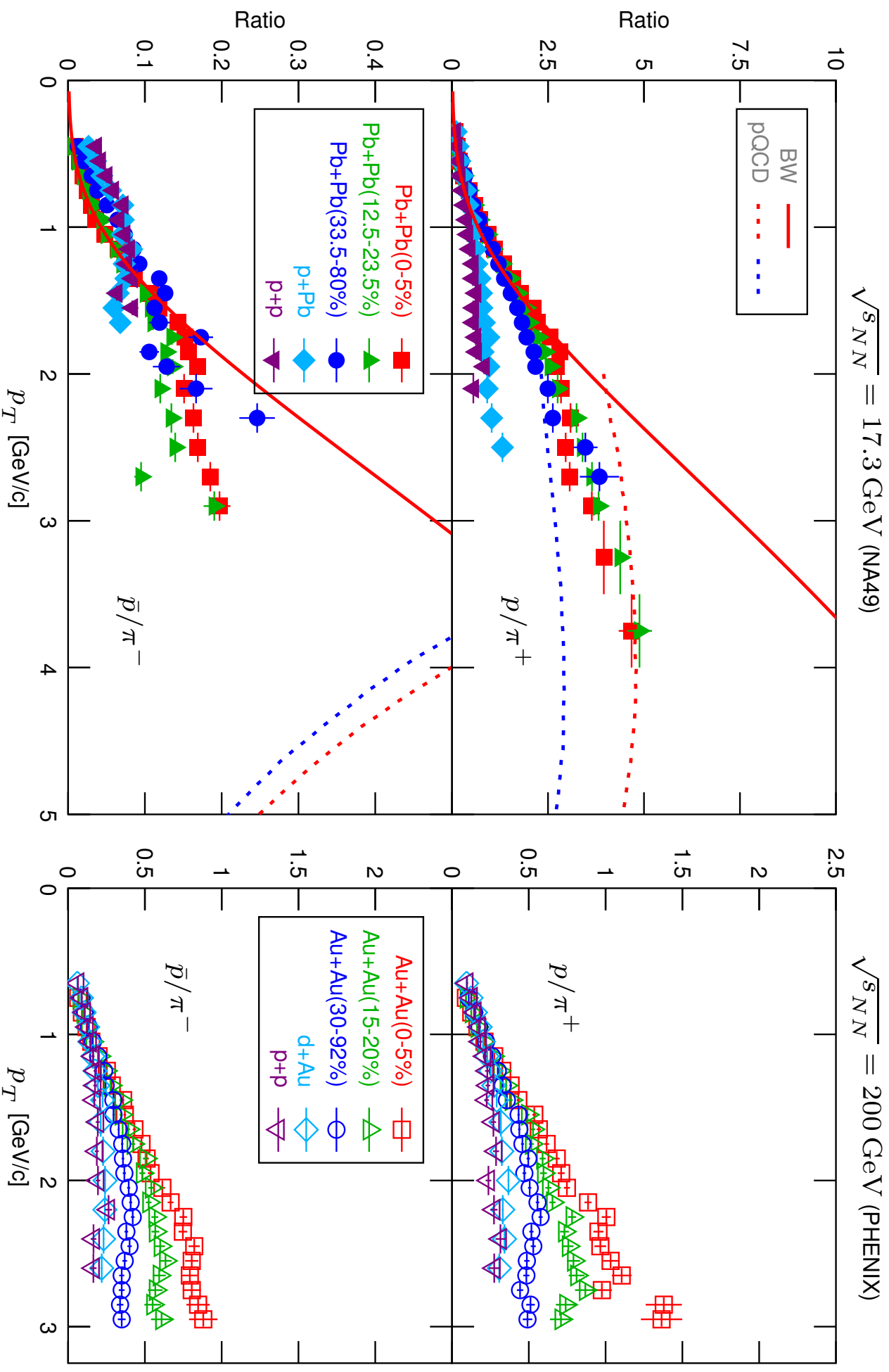
A módszer általában is érdekes jelfeldolgozási szempontból: nincs más ismert általánosan alkalmazható robusztus módszer a spektrum-visszafejtésre.

NA49-ben a statisztika túl kicsinek bizonyult ehhez a vizsgálathoz.

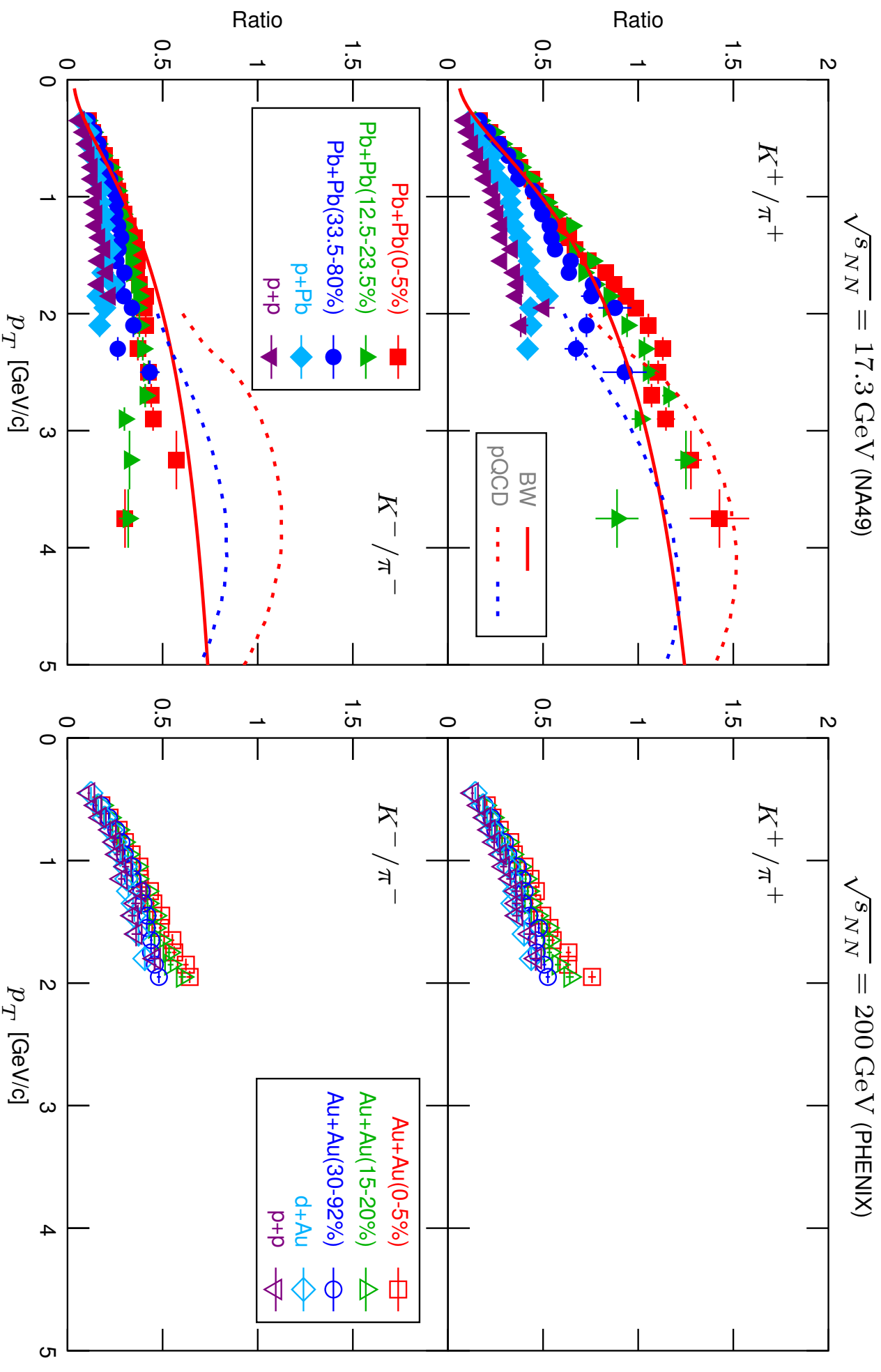
Összevetés modellekkel és magasabb energiás adatokkal

- Lökéshullám (BW) paramerizáció. Hipotézis: részecskék közös termikus forrásból származnak; a forrás tágulása tömegfüggő kékeltolódást okoz. E_T spektrumokra és HBT sugarakra való illesztés kis p_T -n.
Kis p_T : jó (illesztés). Nagy p_T : nem illik az adatokra mint várható.
(F. Retiere, M. A. Lisa: Phys. Rev. **C70** (2004) 044907.)
- pQCD-alapú energiaveszteség modellek.
Nem írja le a keltett-baron/mezon arányokat. Még nem perturbatív?
(X.-N. Wang: Phys. Lett. **B595** (2004) 165.)
- A nagy p_T -s részecskéelnyomódás és részecskéarányok energiatfüggése.
(S. S. Adler *et al.* (PHENIX Coll.): Phys. Rev. **C69** (2004) 034910,
S. S. Adler *et al.* (PHENIX Coll.): Phys. Rev. **C69** (2006) 024904.)

5., 6., 7.: Lökéshullám-kép, pQCD érvényesség, elnyomódás energiatfüggése



5., 6., 7.: Lökéshullám-kép, pQCD érvényesség, elnyomódás energiatfüggése



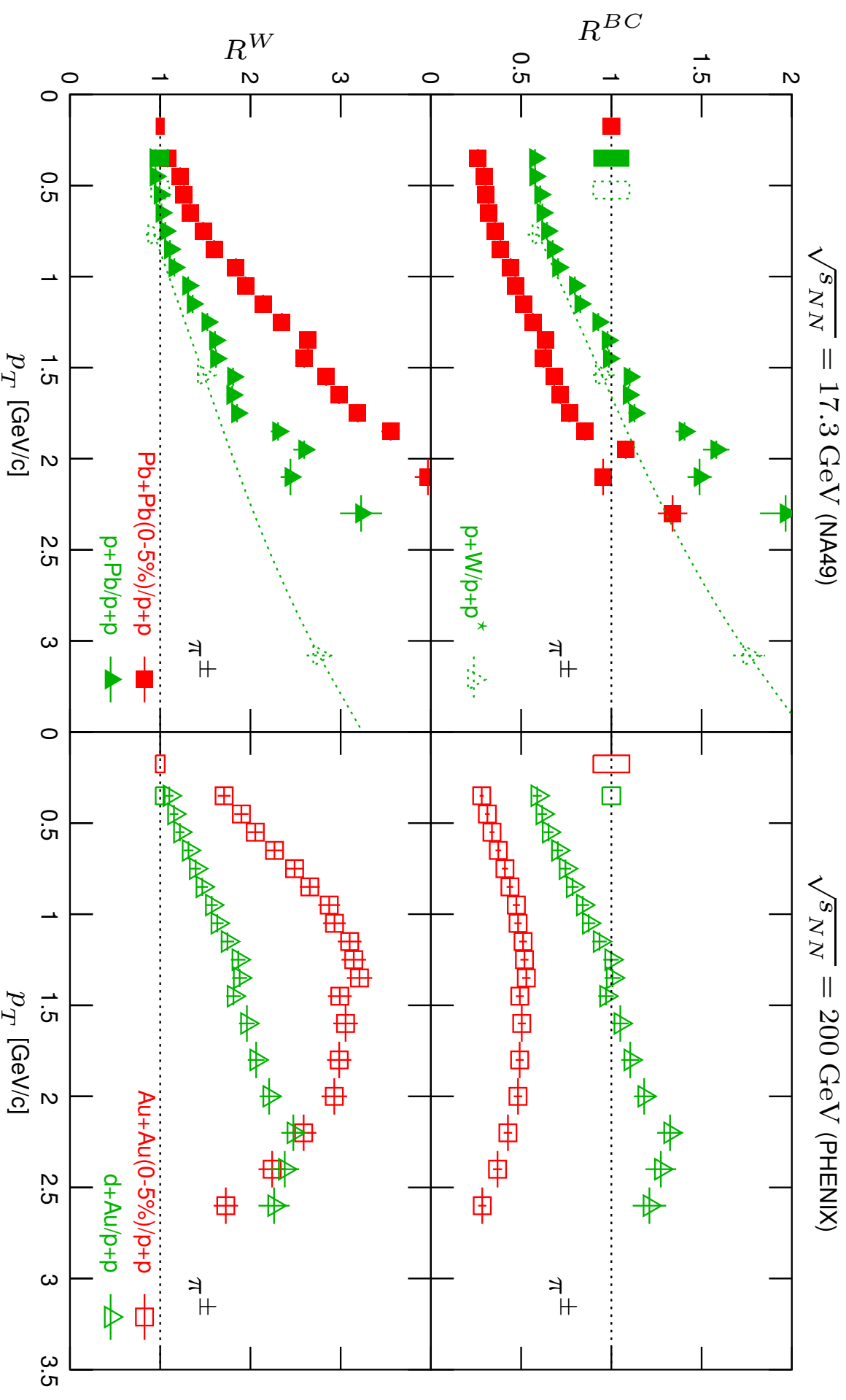
Nukleáris modifikációs faktorok

Definíció:

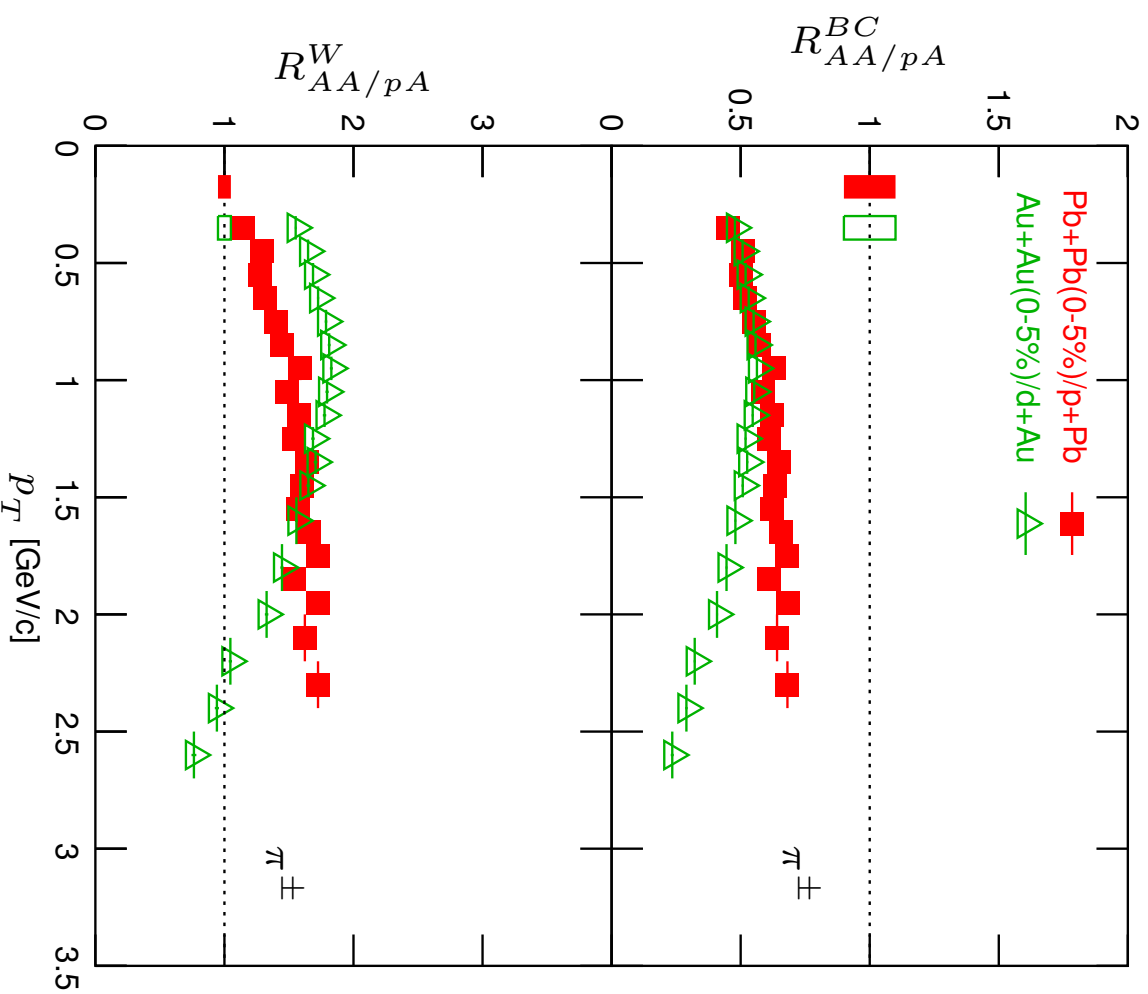
$$R_{A+B/C+D} := \frac{N(C+D)}{N(A+B)} \cdot \frac{\text{Hozam}(A+B)}{\text{Hozam}(C+D)}.$$

Itt N normalizációs faktor, amely a részecskeprodukción rendszermérettel való skálázására jellemző. Szélsőséges esetek: bináris ütközések illetve a meglökött nukleonok átlagos száma a megfelelő centralitás tartományra és $A+B$ illetve $C+D$ reakcióra.

R_{AA} , R_{pA} energiatfüggése. (p+W/p+p: D. Antreasyan *et al.*, Phys. Rev. **D19** (1979) 764.)



Az R_{AA}/p_A energiatfüggése.



Többszörös szórás (Cronin) kifaktorizálására:

R_{AA}/p_A -t tekintjük.

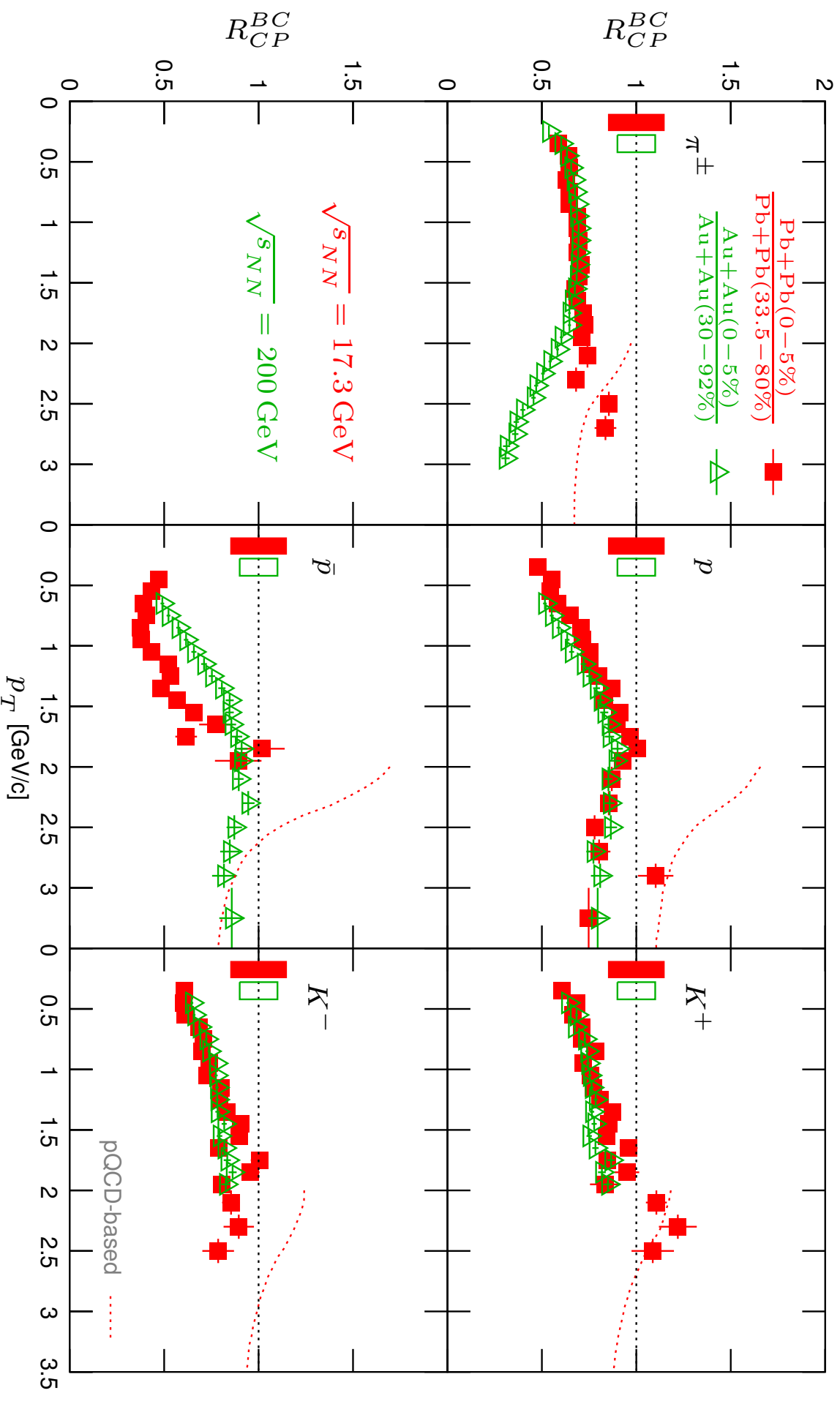
Pb+Pb(0-5%)/p+Pb:

$$\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$$

Au+Au(0-5%)/d+Au:

$$\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$$

Az R_{CP}^{BC} energiatüggése, különböző részecskékre.



Tézispontok (7)

1. **A Veto Calorimeter kalibrációja:** [1, 5] (referált), [6, 7, 8, 10, 11, 12] (egyéb).
2. **Nagy transzverz impulzusú részecskék rekonstrukciója:** [1, 3, 4, 5] (referált), [6, 7, 8, 9, 12, 13, 15, 16] (egyéb).
3. **Azonosított töltött hadron spektrumok meghatározása:** [1] (referált), [9] (egyéb).
4. **Semleges pion spektrum meghatározása:** [2] (referált), [14] (egyéb).
5. **Kollektív viselkedés alacsony transzverz impulzuskorlátoknál:** [3] (referált), [13, 15] (egyéb).
6. **Perturbatív QCD közelítés alkalmazhatóságának vizsgálata nagy transzverz impulzusú részecskék termelésénél:** [3] (referált), [13, 15] (egyéb).
7. **Nagy transzverz impulzusú részecskék elnyomódásának energiafüggése:** [1] (referált).

Referált folyóiratban megjelent kapcsolódó publikációk (5)

- [1] A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„*High Transverse Momentum Hadron Spectra at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV, in Pb+Pb and p+p Collisions, Measured by CERN-NA49*”; *Physical Review* **C77** (2008) 034906.
- [2] A. László:
„*A Robust Iterative Unfolding Method for Signal Processing*”;
Journal of Physics **A39** (2006) 13621.
- [3] A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„*High $p(T)$ Spectra of Identified Particles Produced in Pb Plus Pb Collisions at 158 GeV/nucleon Beam Energy*”; *Nuclear Physics* **A774** (2006) 473.
- [4] T. Schuster, A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„*High $p(T)$ Spectra of Identified Particles Produced in Pb+Pb Collisions at 158 A GeV Beam Energy*”; *Journal of Physics* **G32** (2006) S479.
- [5] A. László *et al.* (the NA49 Collaboration):
„*New Results and Perspectives on R_{AA} Measurements Below 20 GeV CM-energy at Fixed Target Machines*”; *International Journal of Modern Physics* **E16** (2007) 2516.

További kapcsolódó cikkek és fontosabb előadások (11)

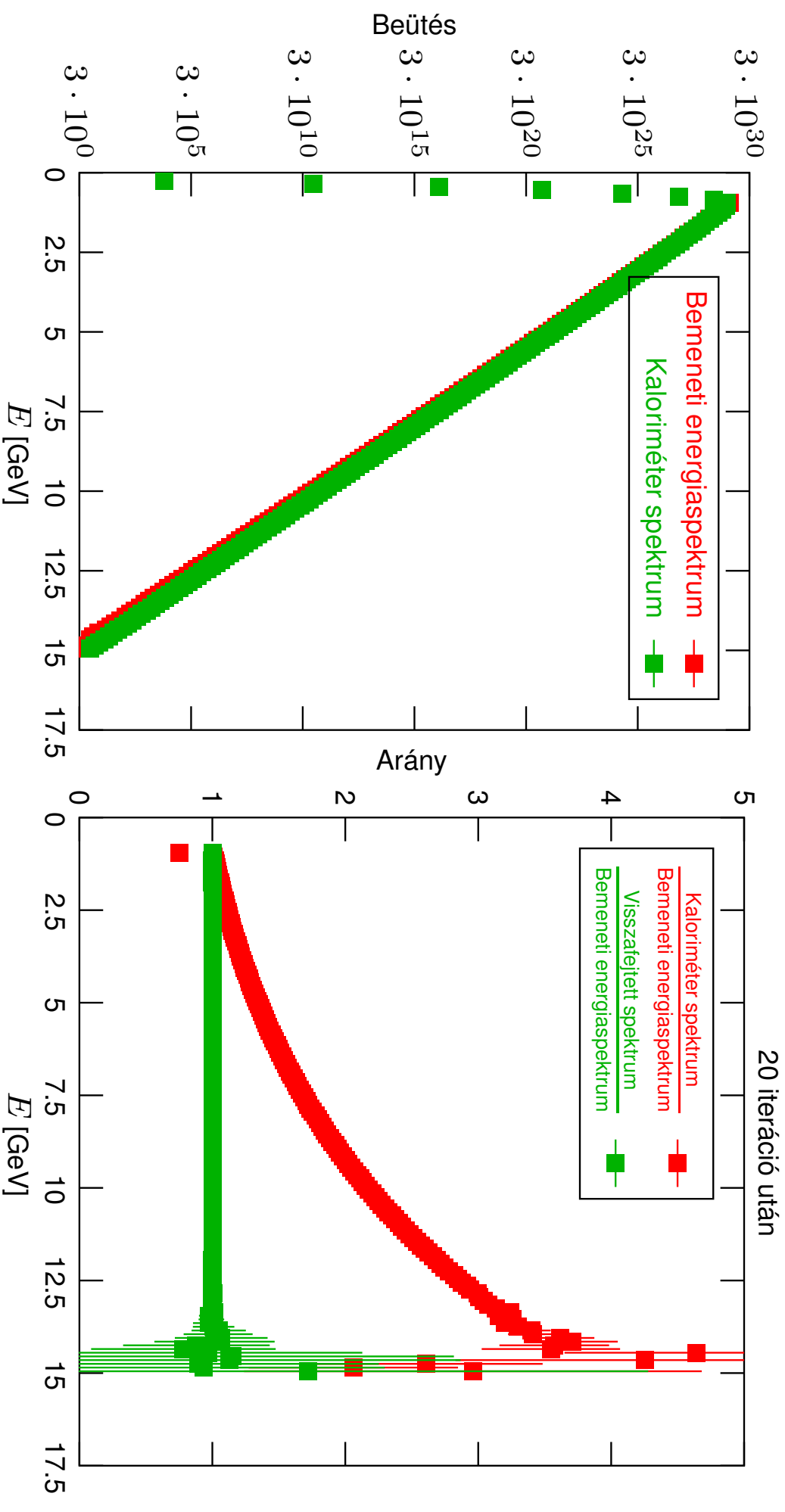
- [6] A. László *et al.* (the NA61 Collaboration):
„*Study of Hadron Production in Collisions of Protons and Nuclei at the CERN SPS*”,
NA49-future Letter of Intent (2006), 2.2 és 4.2. fejezetek
[CDS : CERN-SPSC-2006-001, SPSC-I-235].
- [7] A. László *et al.* (the NA61 collaboration):
„*Study of Hadron Production in Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at the CERN SPS*”,
NA49-future Proposal (2006), 2.2, 3.5.3 és 4.2. fejezetek
[CDS : CERN-SPSC-2006-034, SPSC-P-330].
- [8] A. László *et al.* (the NA61 Collaboration):
„*Additional Information Requested in the Proposal Review Process*”,
Addendum to the NA49-future Proposal (2007), 8. fejezet
[CDS : CERN-SPSC-2007-004, SPSC-P-330].

- [9] A. László:
„*High Transverse Momentum Identified Charged Particle Yields in 158 GeV / nucleon Pb+Pb Collisions*”,
NA49 Technical Note (2007) [EDMS : 879787].
- [10] A. László:
„*Calculating Mean Values of Collision Parameters as a Function of Centrality*”,
NA49 Technical Note (2007) [EDMS : 885329].
- [11] A. László:
„*Time-dependence Calibration of the Veto Calorimeter*”,
NA49 Technical Note (2006) [EDMS : 815907].
- [12] A. László (for the NA61 Collaboration):
„*NA61/SHINE at the CERN SPS*”,
Meghívott előadás a Critical Point and Onset of Deconfinement konferencián (Darmstadt, 2007);
Proceedings of Science **CP0D07** (2007) 054.

- [13] A. László:
„*High p_T Spectra of Identified Particles Produced in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s} = 17.3 \text{ GeV/nucleon}$ ”;
Meghívott előadás a Heavy Ion Forum-on (CERN, 2006).*
- [14] A. László:
„*Deconvolution of Noisy Data*”;
Előadás a Zimányi Winter School-on (Budapest, 2006).
- [15] A. László:
„*High p_T Spectra of Identified Particles Produced in Pb+Pb Collisions at 158 GeV/nucleon Beam Energy*”;
Előadás a RHIC Winter School-on (Budapest, 2005).
- [16] László András:
„*Nagy transzverz impulzusú azonosított töltött részecskék 17.3 GeV/nukleon tömegközépponti energián*”;
Előadás a Magfizikus Találkozón (Jávorkút, 2006).

Példa a detektorfelbontásnak spektrumtorzító hatására (példa ábra [14]-ből).

Ennek eliminálása spektrum-visszafejtéssel.



($T = 200$ MeV-es fiktív Boltzmann-eloszlás mérése, CMS-ECAL segítségével).

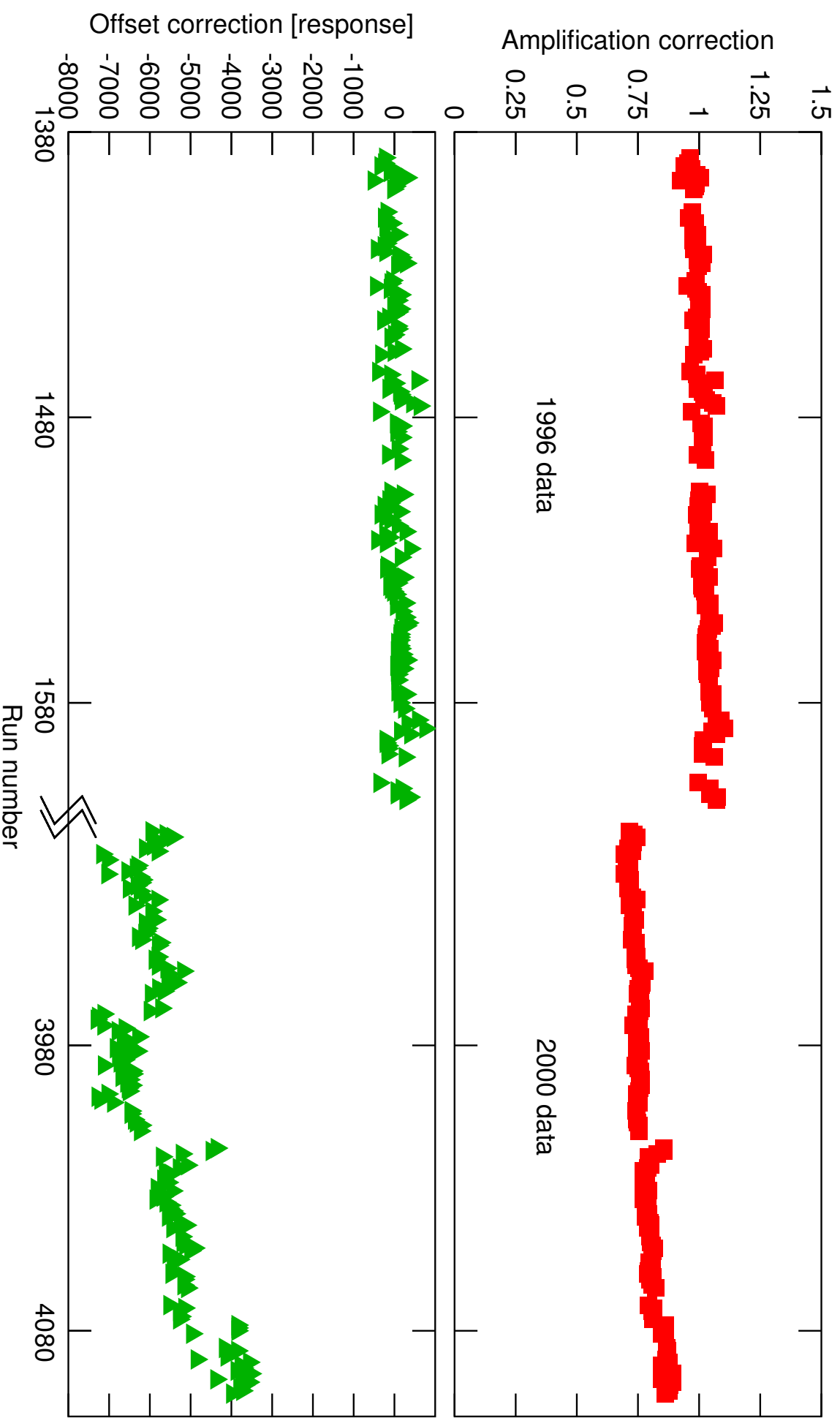


Figure 15: Time-dependence correction parameters of VCAL energy scale.

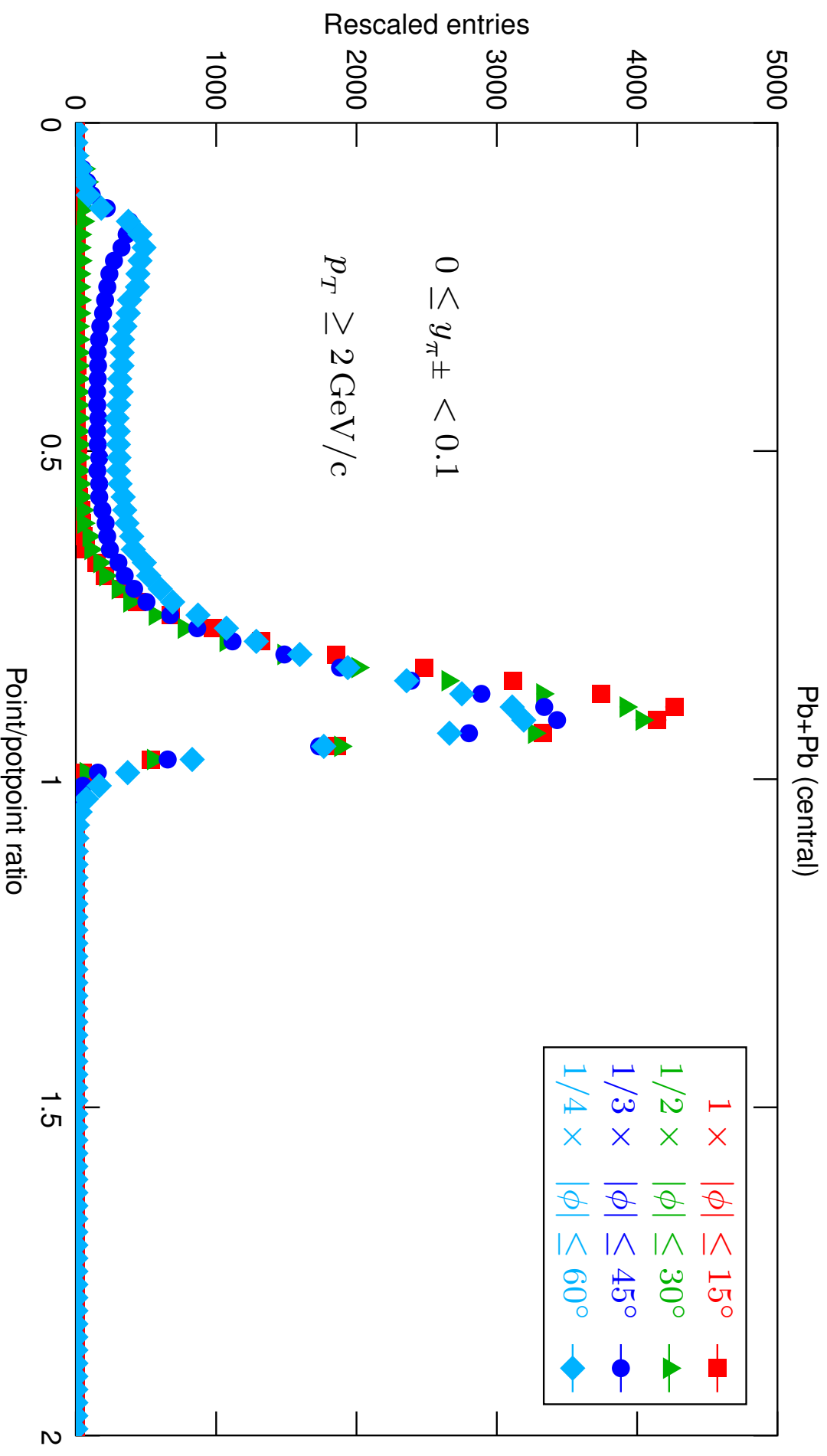


Figure 32: Point/potpoint distributions in $0 \leq y_{\pi^\pm} < 0.1$ slice for $p_T \geq 2 \text{ GeV}/c$, with different $|\phi|$ cuts – discontinuous tracks rejected.

particle type	acceptance correction	feed-down yields	feed-down shapes	quadratic sum
π^\pm	2%			2.0%
p	2%	3%		3.6%
\bar{p}	2%	3%	5%	6.2%
K^\pm	2%			2.0%

Table 6: Systematic error sources for Pb+Pb particle production spectra.

„... The fully corrected particle spectra in Pb+Pb carry the cumulative systematic uncertainties, listed in Table 6, while the p+Pb and p+p particle spectra carry additional 5% systematic errors, originating from the uncertainties of the trigger bias, discussed in Section 6.2. ... ”

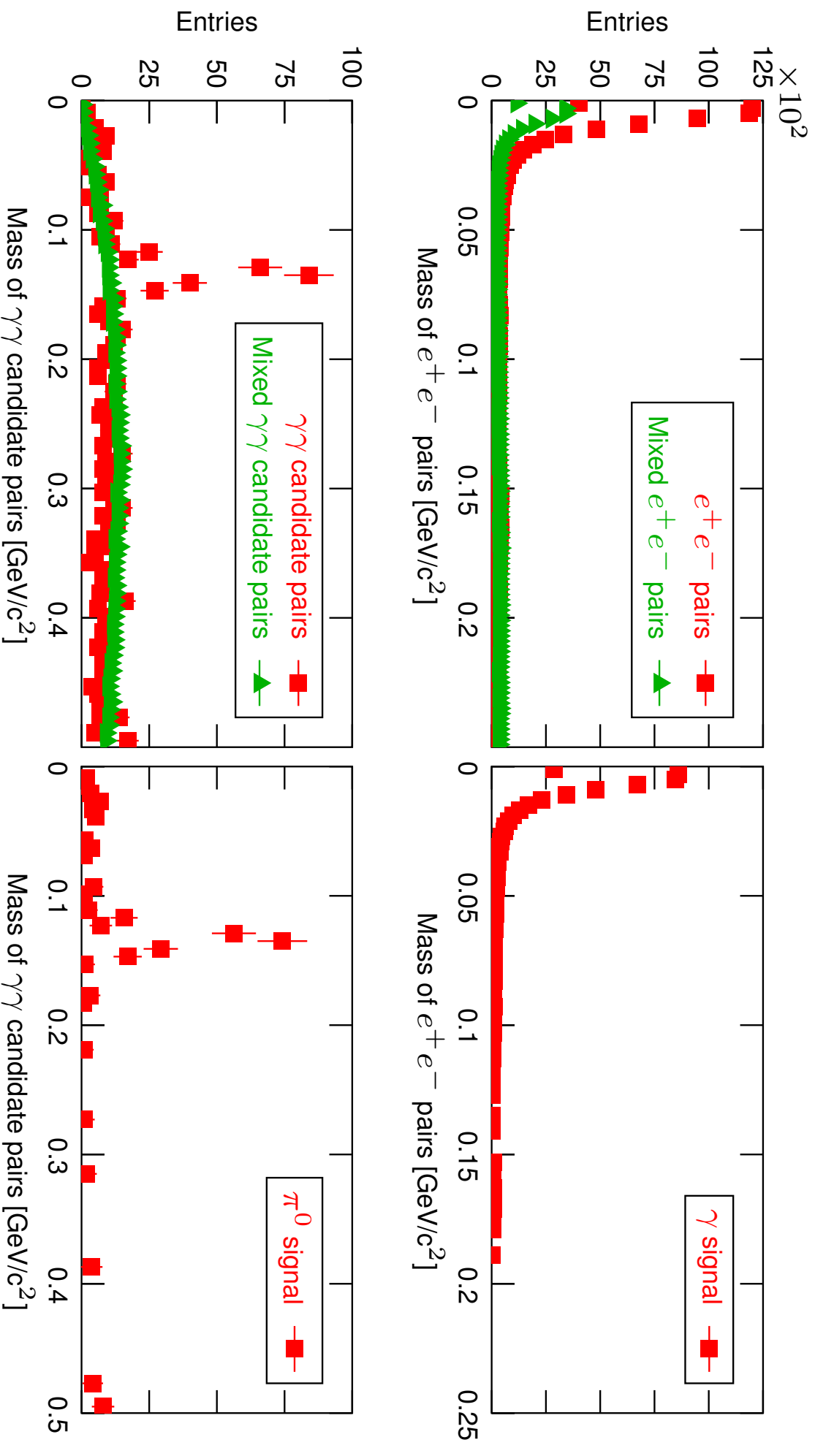


Figure 56: The mass spectrum of γ particles, reconstructed from e^+ , e^- track pairs (upper panels), and of π^0 particles, reconstructed from $\gamma\gamma$ candidate pairs (lower panels), in p+Pb events.

Tézispontok (7)

1. **A Veto Calorimeter kalibrációja.** Eljárást dolgoztam ki a Veto Calorimeter időbeli degradációjának korrigálására, amely a spektátor energia és a detektált részecskeszám korrelációjának abszolút voltán alapul [1-11]. Továbbá a pontos abszolút kalibrációra is kidolgoztam egy módszert, és kimutattam, hogy a Glauber-moddellen alapuló VENUS szimuláció a mért spektátor energiával jó egyezésben van. Emiatt a fizikai érveléseknél használatos, a centralitással kapcsolatos mennyiségek szisztematikus hibái elegendően alacsonnyá válnak [10]. Az eredményt sok NA49 publikáció felhasználta, többek között [1, 5, 6, 7, 8, 12].
2. **Nagy transzverz impulzusú részecskék rekonstrukciója.** Az NA49 kísérletben a $2\text{ GeV}/c$ transzverz impulzus fölötti részecskék nem rekonstruálódtak tökéletesen: kihívást jelentettek a rekonstrukciós veszteségek illetve a sok tévesen rekonstruált részecske miatti háttér. Erre a problémára megoldást találtam, mely a nem folytonos pályák kizárásán és egy szigorú, optimalizált 3 dimenziós impulzustér vágáson alapul [9]. Ez a dolgozat egyik kulcs lépése, gyakorlatilag az összes publikáción felhasználja [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16], mely után a részecskeprodukción mérhető a kísérlet statisztikai határáig ($4.5\text{ GeV}/c$ transzverz impulzusig, centrális Pb+Pb esetén).

3. Azonosított töltött hadron spektrumok meghatározása. Finomhangolt korrekciós

eljárásokat dolgoztam ki a nyers π^\pm , p , \bar{p} , K^\pm spektrumok különböző effektusokra való korrigálására, melyek után az említett részecskék inkluzív produkciós transzverz impulzus spektruma nulla rapiditás körül elérhetővé válik p+p, p+Pb és Pb+Pb reakciókban, $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ tömegközépponti energián [9]. A teljesen korrigált eredmények, melyek kb 5% pontosságúak, az [1] kísérleti cikkben kerültek publikálásra.

4. Semleges pion spektrum meghatározása. Az inkluzív π^0 spektrum meghatározására egy

indirekt módszert dolgoztam ki, amely valószínűségi keverési operátorok invertálásán alapul. Ezen általános valószínűségszámításbeli / funkcionálanalízisbeli probléma megoldására kidolgoztam egy robusztus iteratív matematikai módszert, melyre bizonyos esetekben a konvergenciát analitikusan bizonyítottam. Erre vonatkozó eredményeimet a [2] matematikai cikkben publikáltam. Továbbá a [14] előadásomban felhívtam a figyelmet a nagy-energiás kalorimetrikus mérések problémájára: bár az energiafelbontás ebben a határesetben ideálissá válik, a meredek spektrumokat a kaloriméter mégis torzíja, melyre azonban a [2] cikkben közölt módszer megoldást kínál. Megvizsgáltam továbbá a nem ideális impulzusefelbontás hatását a nagy transzverz impulzusú töltött részecske analízisemben is, amely jelentős potenciális szisztematikus hibaforrás lehet meredek

spektrumok esetén, azonban a becsült hiba kisebbnek bizonyult az egyéb szisztematikus hibáknál.

5. **Kollektív viselkedés alacsony transzverz impulzusnál.** Kimutattam, hogy a részecskeprodukciónál a kis transzverz impulzus tartományban ($< 1.5 \text{ GeV}/c$) jól reprodukálható a lökéshullám-képpel [3, 13, 15], amely termikus jellegű részecske-emissziót feltételez egy cilindrikusan táguló forrásból. Nagy transzverz impulzusnál azonban ez a kinematikai kép túl nagy barion/mezon arányt jósol, amely rámutat a kollektív mozgás csökkent szerepére nagy transzverz impulzusok esetében.

6. **Perturbatív QCD közelítés alkalmazhatóságának vizsgálata nagy transzverz impulzusú részecskék produkciójára.** A keltett-barion/mezon arányok meghatározása után az eredményeket összevetettem perturbatív QCD jóslatokkal [3, 13, 15]. Az összehasonlítás arra enged következtetni, hogy $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ energián még a kb $4 \text{ GeV}/c$ transzverz impulzusú részecskék sem tisztán perturbatív úton keletkeznek, mert a perturbatív QCD modell nagyon eltérő barion/mezon arányt jósol. A kísérleti eredményeket a $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ energián felvett RHIC eredményekkel összevetve azt tapasztaltam, hogy a nettó-barion/mezon arány egy centralitástól nem függő energia és transzverz impulzusbeli faktorizációt mutat.

7. Nagy transzverz impulzusú részecskék elnyomódásának energiafüggése. A

perturbatív QCD jóslatok a mért nukleáris modifikációs faktorokat kvalitatíve jól visszaadják.

Kísérleti eredményeimet a $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ energián felvett RHIC eredményekkel

összevetve azt tapasztaltam, hogy a RHIC energián mérhető centrális / periferális elnyomás nem csökken le ugrásszerűen a $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$ energia felé, épp ellenkezőleg: a mért modifikációs görbék igen hasonlóak a két nagyon különböző energián [1], bár a töltött pion elnyomás mértéke kisebb az alacsonyabb energiás esetben.