

Jetek multiplicásfüggő módosulása LHC-energiájú p+p ütközésekben

arxiv:1805.03101



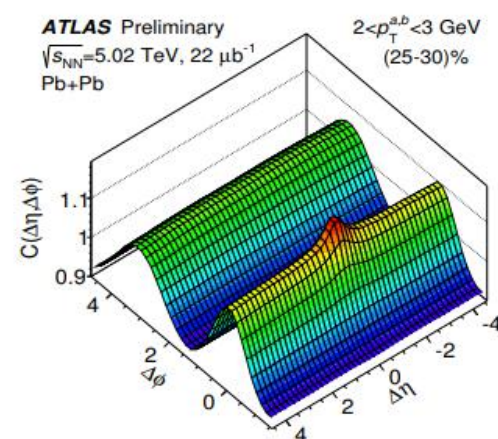
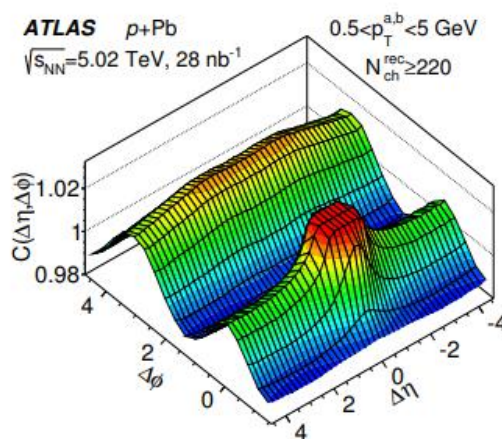
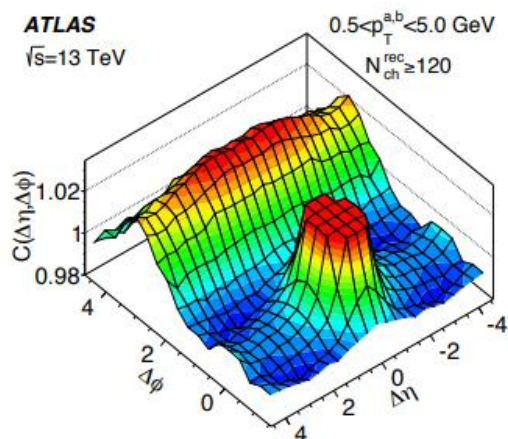
Vértesi Róbert

vertesi.robert@wigner.mta.hu

Varga Zoltán
Barnaföldi Gergely



Kollektivitás kis rendszerekben

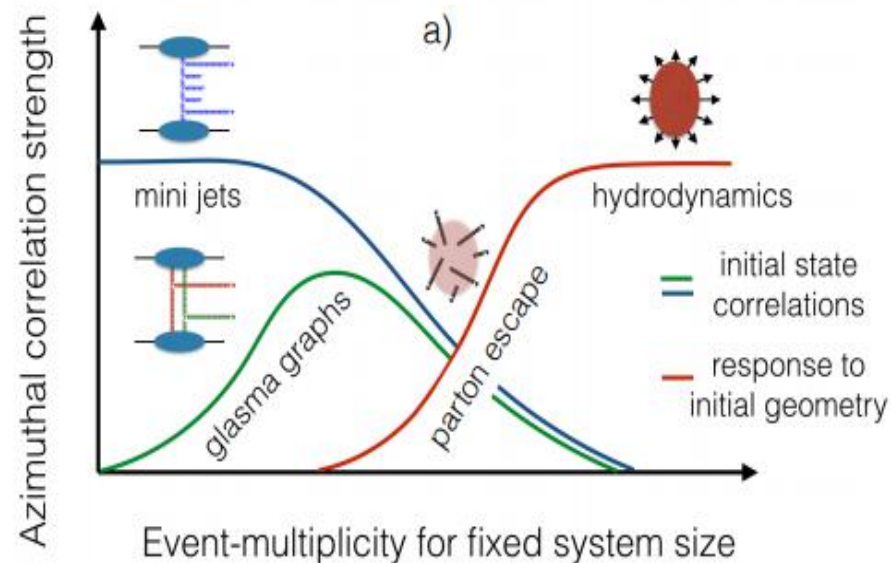


- Magas multiplicitású p+p ütközések az LHC energiáin:
Meglepő tapasztalatok!
 - Hosszútávú korrelációk
pl. [ATLAS, Nucl. Phys. A932, 357 \(2014\)](#)
 - Jelentős azimutális anizotrópia (v_n , "folyás")
pl. [L. Yan, J. Y. Ollitrault, Phys. Rev. Lett. 112, 082301 \(2014\)](#).
 - Nehéz kvarkok (c,b) keletkezésének lineárisnál erősebb függése az esemény multiplicitásától
[ALICE Collaboration, JHEP 1608, 078 \(2016\)](#).

Kollektivitás kis rendszerekben

- Nagy rendszerek: a kollektív viselkedést a kvark-gluon plazma (QGP) jelenlétének tulajdonítjuk
- Lehet, hogy **van QGP kis rendszerekben is?**
 - Energiasűrűség megvan-e hozzá?
 - Lehet-e bármiféle termalizáció?
- Jelenlegi képünk:
 - A kollektív viselkedéshez **nem szükséges feltétel a QGP**
 - Vákuum-QCD effektusok a kemény-lágy átmenet határán produkálhatnak ilyet
 - **Sokparton-kölcsönhatás** (Multiple-Parton Interactions, MPI) A nehézíz-növekményt kvalitatíve megmagyarázza

S. Schlichting, arXiv:1601.01177



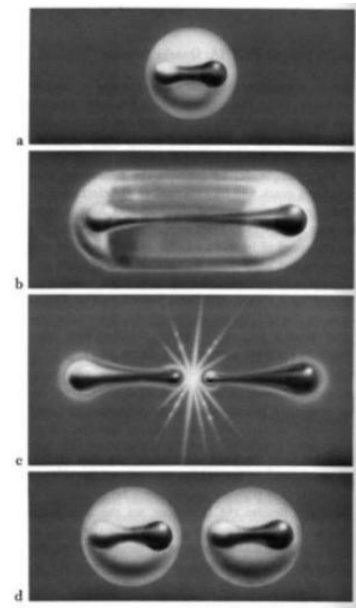
A partontól a jetig

- **QCD: kvarkbezárás**

- Potenciál: húrmodell, $U \sim \sigma r$ ($\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$)

- **Fragmentáció**

- Távolodó parton \rightarrow felhalmozódó energia \rightarrow $q\bar{q}$ párkeltés
 - Ismétlődik, ameddig van elég energia
 - QCD parton \leftrightarrow hadronok kollimált nyalábja

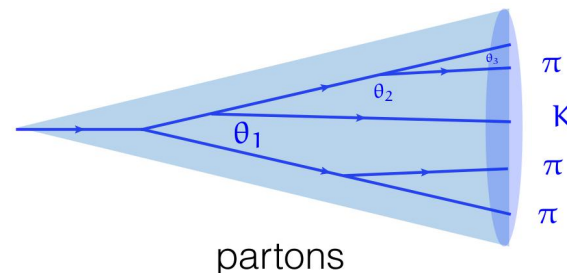


[illustration from Fritzsche]

- **Jet** - kísérlet-elmélet interfész

- rekonstrukciós eljárás definiálja
 - hadronok klaszterizálása
 - R "rezolúciós paraméter" (\sim kúp sugara)

Jet virtuality
 $Q \equiv E \theta_{jet}$

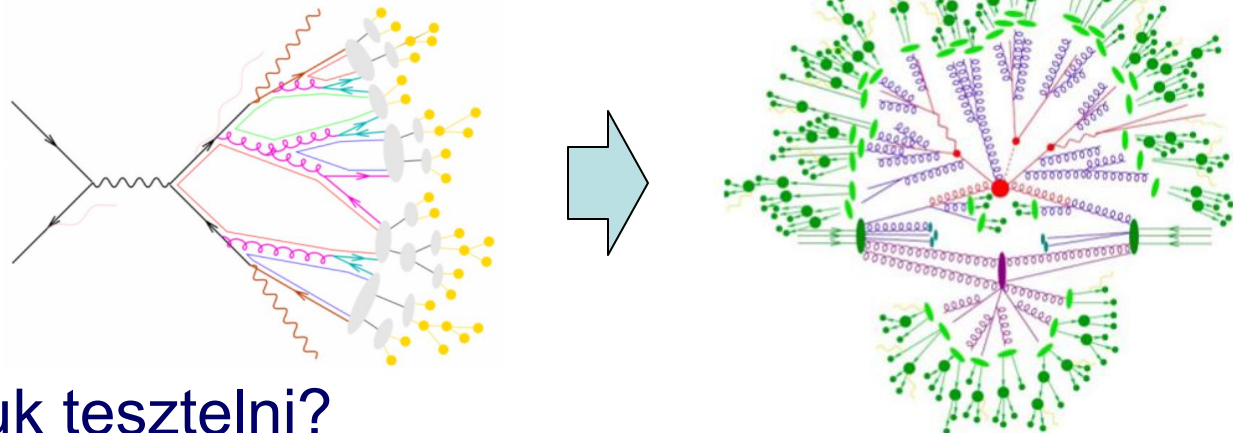


$Q_0 \sim \Lambda_{QCD}$

hadrons

Jet módosulása

- A jet módosulása a QGP alapvető bizonyítéka...
 - A pp ütközésekben észlelt QGP-szerű jelenségek megkérdőjelezzik a pp, mint jó referencia szerepét
 - A jet elnyomódása nem várható jelentős térfogatú QGP nélkül
Azonban...
 - A jetek kifejlődését befolyásolhatják a kemény-lágy határon lévő folyamatok (pl. MPI)



- Hogyan tudjuk tesztelni?

Keressük a jetszerkezet nemtriviális módosulását

Szimuláció és jet-rekonstrukció

- p+p ütközések $\sqrt{s} = 7$ TeV tömegközépponti energián
- PYTHIA 8.2 eseménygenerátor
 - CTEQ6.6 PDF set-ek, minden kemény QCD folyamat
 - **Hangolási beállítások (tune):**
 - **Monash** (alapértelmezett) - átfogó hangolás LHC adatokra
 - **Monash*** - korábbi CUETP8M1, háttéreseményre (UE) alapozva
 - **4C** - szintén alapvető LHC mennyiségekre és UE-re hangolva
 - **Sokparton-kölcsönhatások (MPI):** be- és kikapcsolás
 - **Szín-újrarendezés (Color Reconnection, CR):**
 - 0: MPI-alapú séma (PYTHIA-alapértelmezett),
 - 1: QCD-re alapuló, húrhossz-minimalizáló séma
 - 2: gluon-mozgatási séma
 - off*: nem használjuk
- **Teljes jet rekonstrukciója, $R=0.7$ (utólagos, Fastjet)**
 - anti-kT (alapértelmezett) algoritmus
 - Cambridge-Aachen algoritmus
 - kT algoritmus

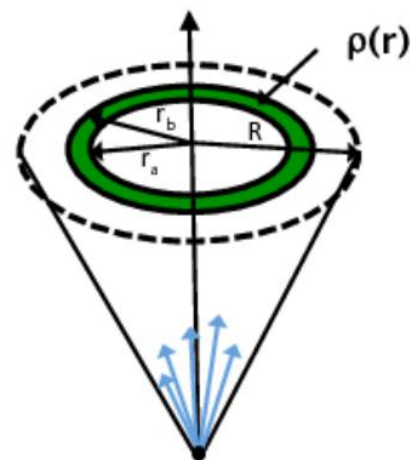
Jetszerkezeti mennyiségek

- Differenciális jetszerkezet

$$\rho(r) = \frac{1}{\delta r} \frac{1}{p_T^{\text{jet}}} \sum_{r_a < r_i < r_b} p_T^i$$

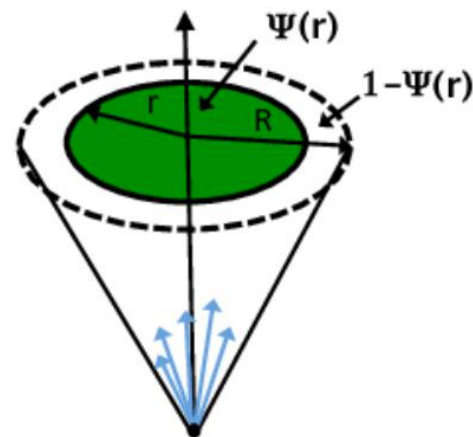
$$r_i = \sqrt{(\phi_i - \phi_{\text{jet}})^2 + (\eta_i - \eta_{\text{jet}})^2}$$

CMS, JHEP 06, 160 (2012).



- Integrált jetszerkezet

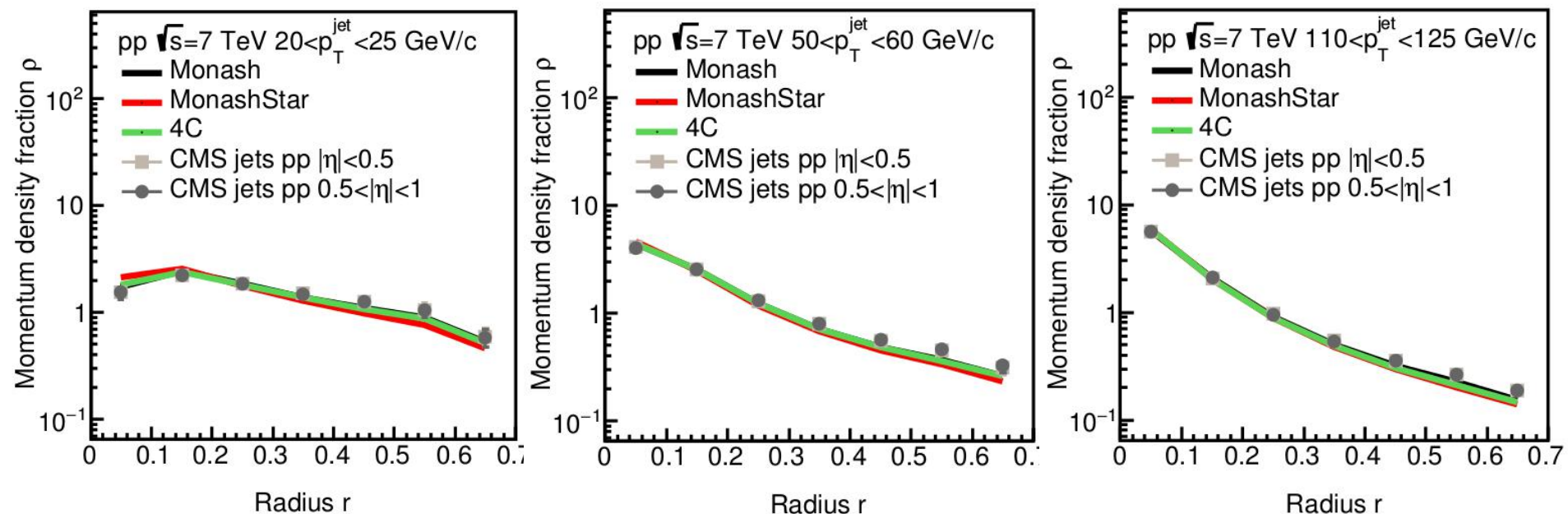
$$\psi(r) = \frac{1}{p_T^{\text{jet}}} \sum_{r_i < r} p_T^i$$



$$\psi(R) = \int_0^R \rho(r') dr' = 1$$

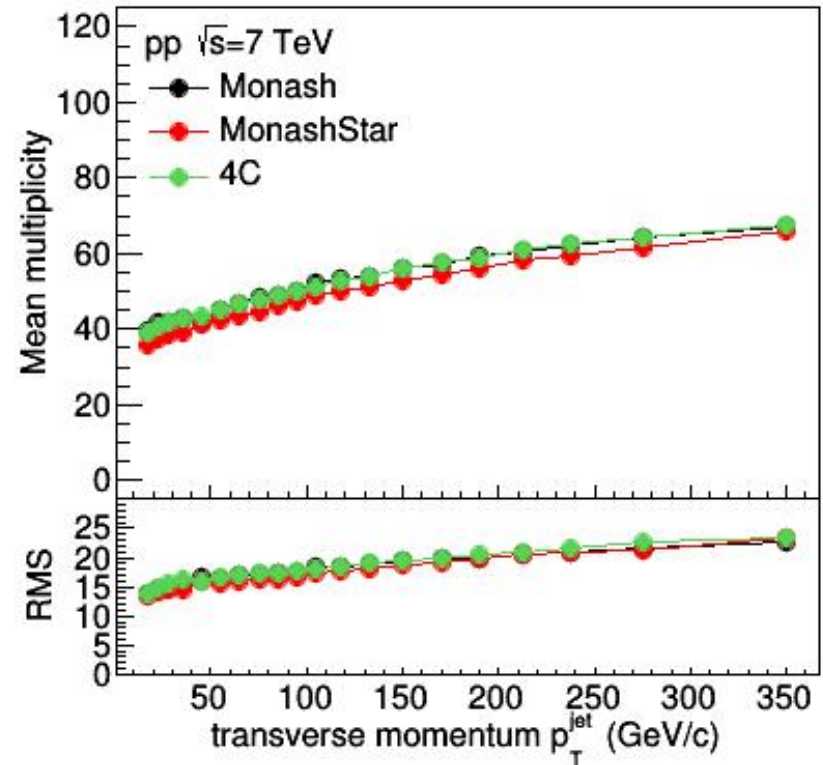
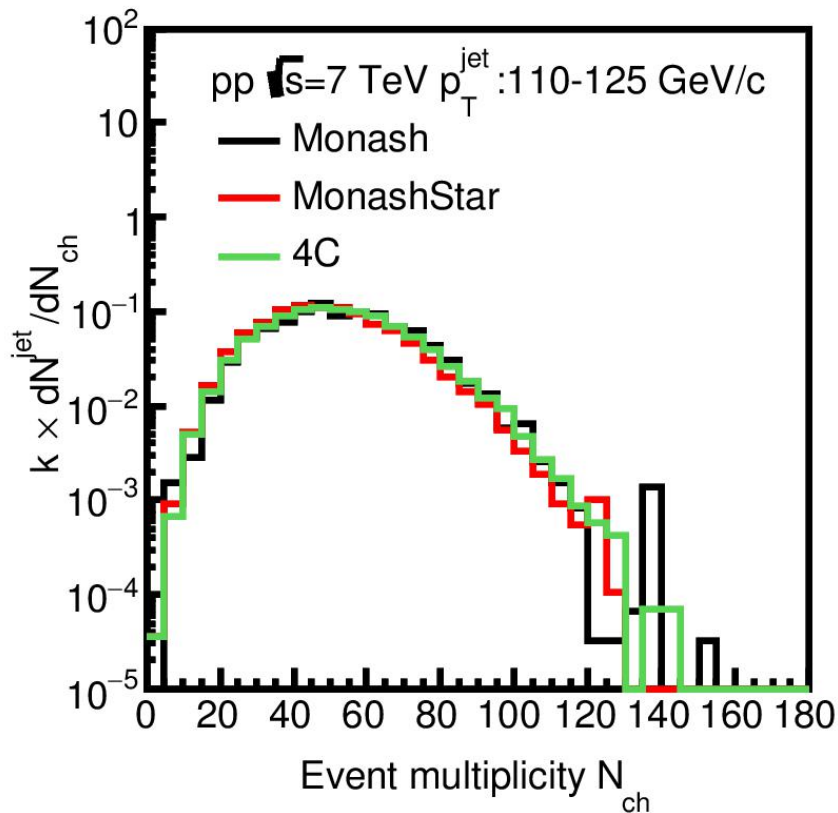
Validáció CMS adatokon

CMS, JHEP 06, 160 (2012).



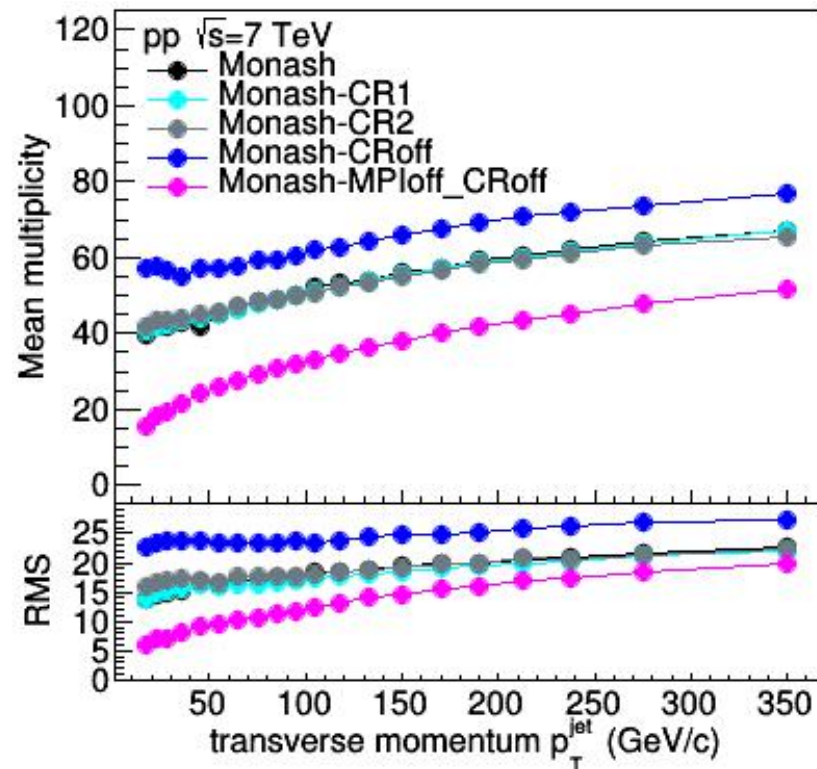
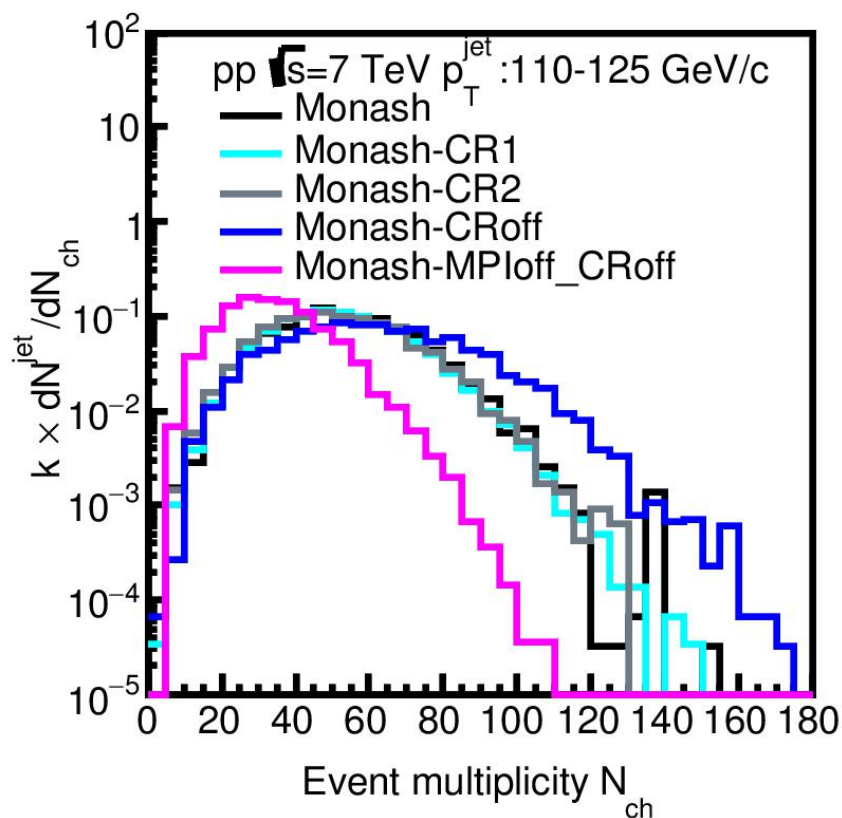
- A három "gyári" beállítás mérési bizonytalanságon belül reprodukálja a 7 TeV energiájú CMS $|y| < 1$ p+p adatokat
- A teljes $15 < p_T < 400$ GeV/c tartományon (fent 3 példa)

Töltőtrészecske-multiplicitás



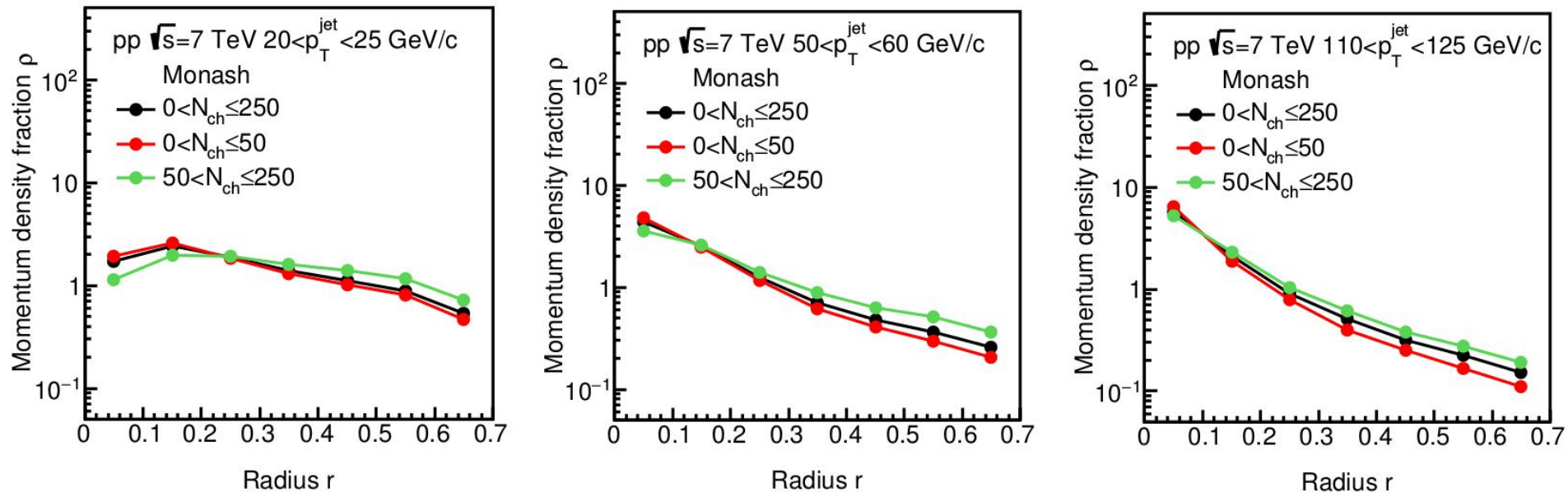
- A három "gyári" beállítás hasonló eseménymultiplicitásfüggést mutat (mindegyiket adatokra hangolták)
- A p_T -vel emelkedik az átlagos multiplicitás

Töltőtrészecske-multiplicitás



- A különböző CR-sémák szintén hasonló N_{ch} eloszlást adnak
- Az MPI:off és CR:off beállítások nem fizikaiak
 - MPI:off (CR:off) esetében alacsonyabb átlagos multiplicitás
 - CR:off (MPI:on) esetében magasabb

Jetszerkezet eltérő multiplicitásokon



- A $\rho(r)$ differenciális jetszerkezet multiplicitásfüggése

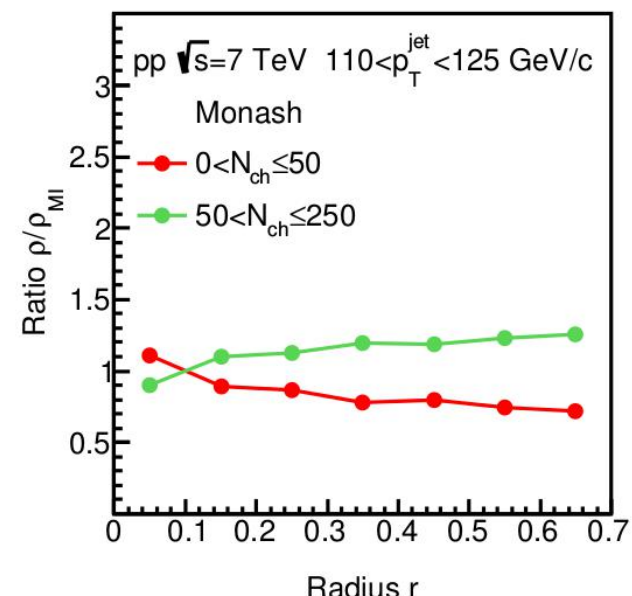
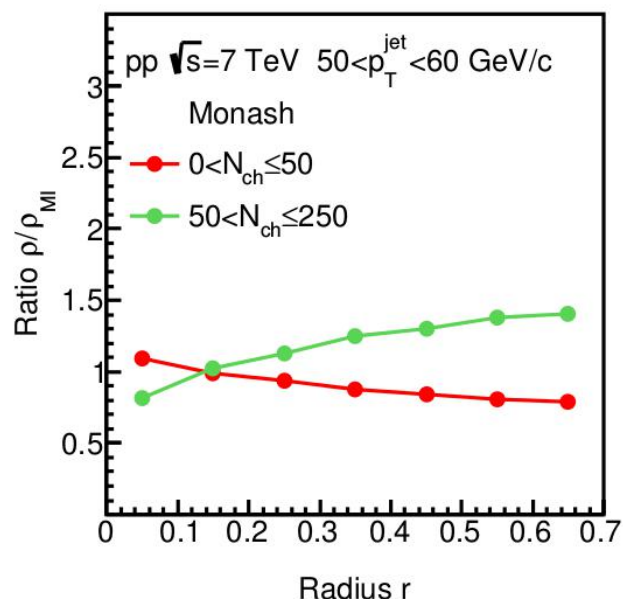
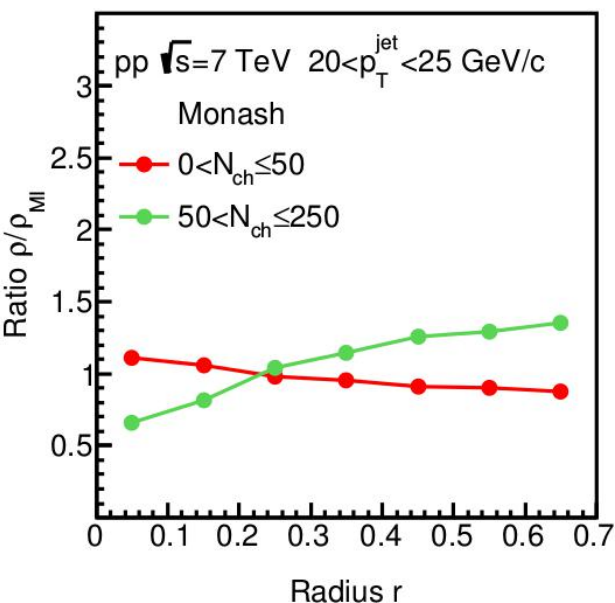
- $\rho_{\text{any-Nch}} \equiv \rho_{\text{MI}} ; \rho_{\text{low-Nch}} ; \rho_{\text{high-Nch}}$

Megj.: "multiplicitás-integrált" (MI) annyit jelent, hogy nincsen külön N_{ch} -ra vonatkozó szelekció

- Amit látunk, arra számítottunk:

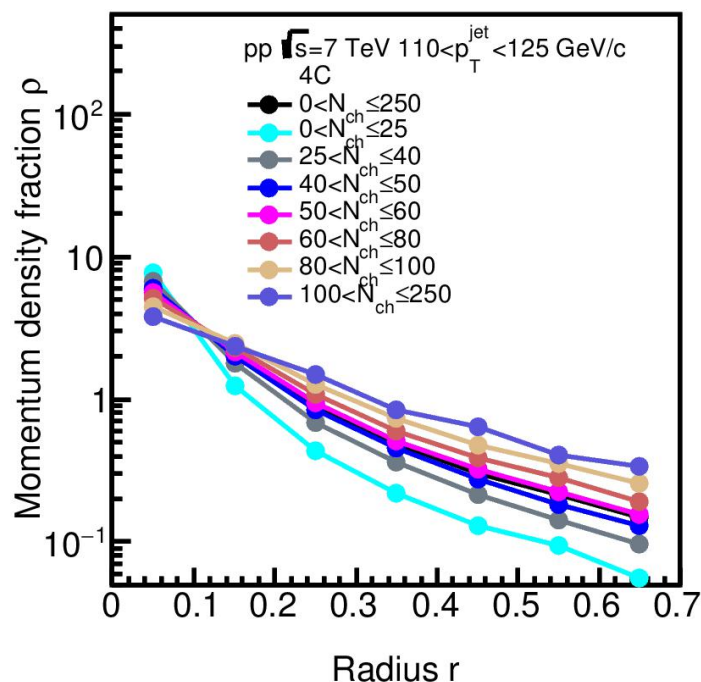
- N_{ch} korrelál a jetbeli részecskék számával, ami korrelál a $\rho(r)$ -val
 - Alacsony multiplicitású jetek keskenyebbek a magas mult.-nál

Jetszerkezet eltérő multiplicitásokon

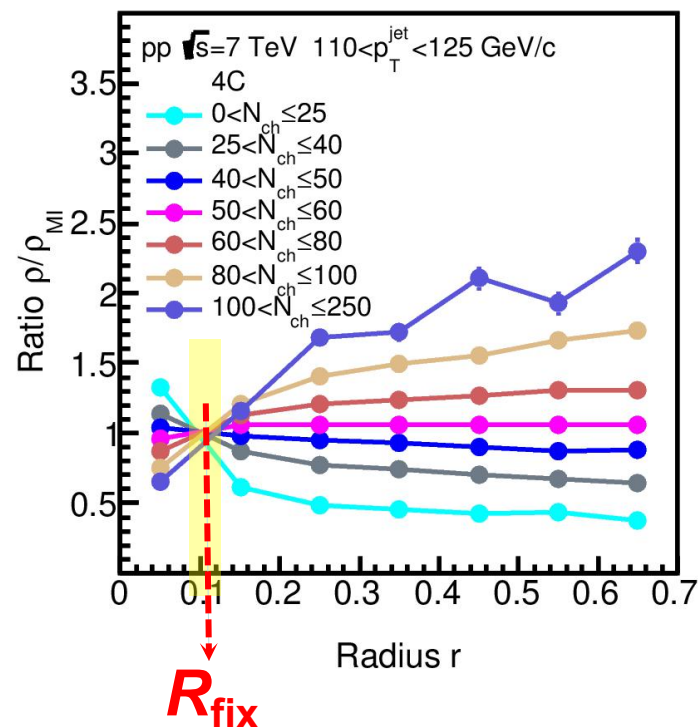
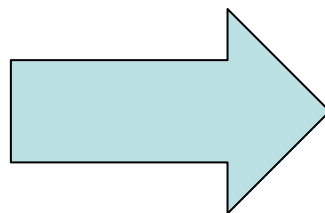


- Alacsony és magas multiplicitású jetek szerkezete, MI-hoz viszonyítva
 - A két görbe: $\rho_{\text{low-Nch}}/\rho_{\text{MB}}$ és $\rho_{\text{high-Nch}}/\rho_{\text{MB}}$
- A két görbe 1-nél metszi egymást (triviálisan)
- Változás a p_T -vel: magasabb impulzusú jetek keskenyebbek

Több multiplicitásosztály esete

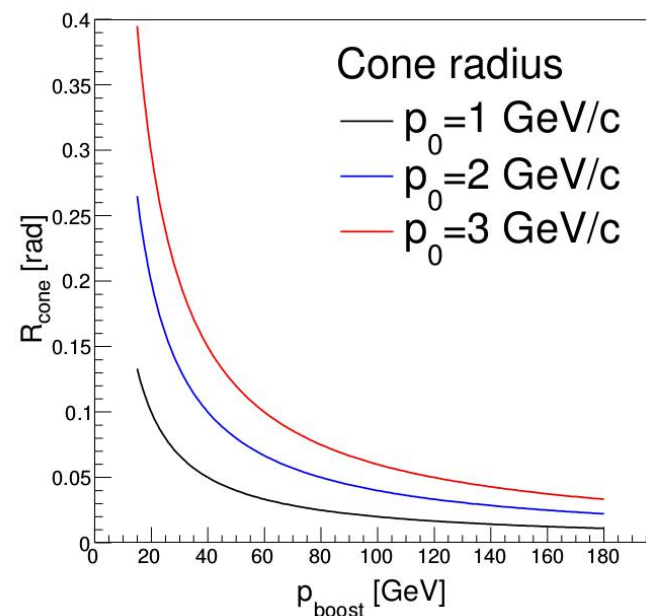
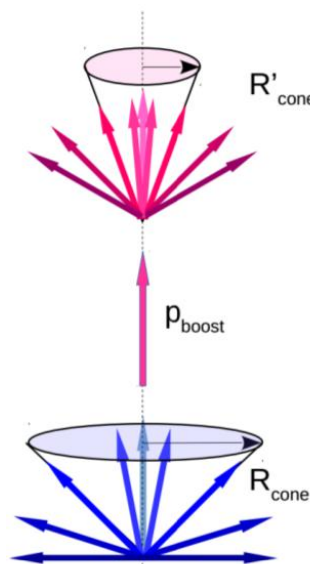
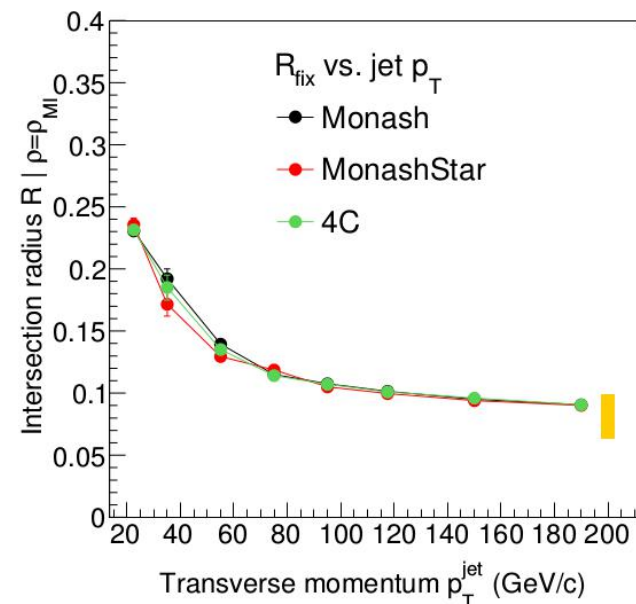


Divide by
multiplicity-
integrated $\rho(r)$



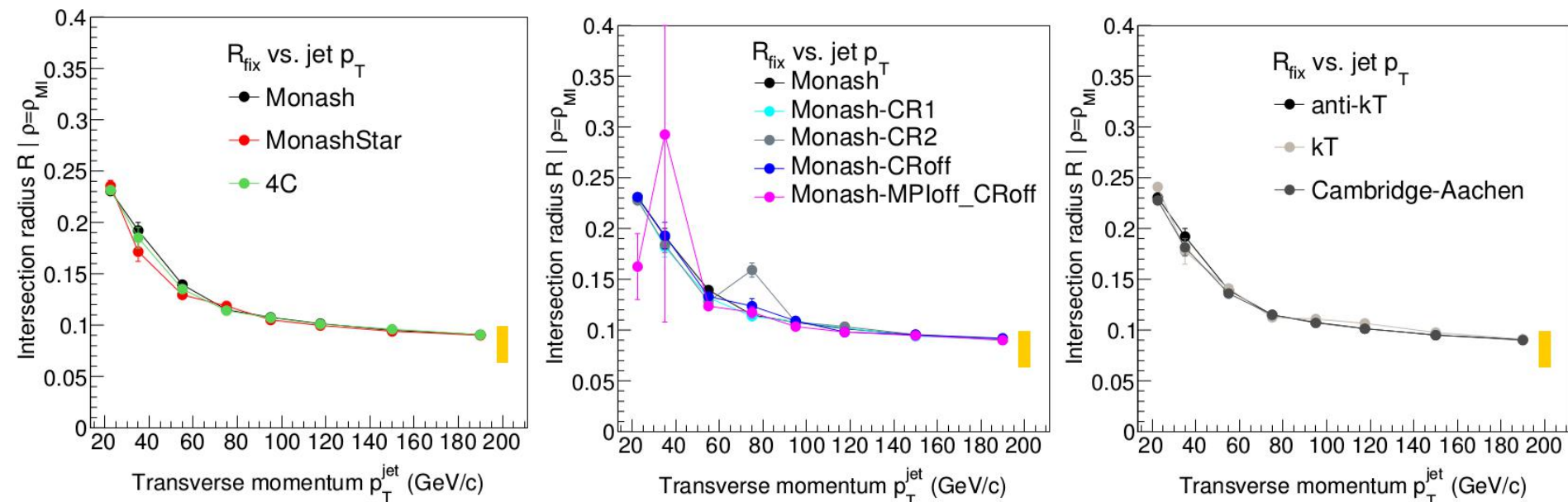
- Több multiplicitásosztály (8): minden egyes görbe ugyanott metszi egymást
- Ez nem nyilvánvaló megfigyelés -> "fixpont", R_{fix}
- Hogyan függ az impulzustól?
- Milyen erősen függ a szimulációs beállításoktól?

R_{fix} függése a jet impulzusától



- Egy egyszerű modellel próbáltuk megérteni $R_{\text{fix}}(p_T)$ alakját
 - Feltételeztünk egy egyforma, p_0 impulzusú részecskékből álló jetet
 - A tengely mentén p_{boost} impulzussal felgyorsítottuk
- Magas p_T : kvalitatívan leírjuk a kapott görbét
- Alacsony p_T : a jet mérete korlátos az R paraméter és a parton-splitting szöglevágása miatt, ilyen korlát a modellünkben nincs

R_{fix} - mennyire általános jelenség?

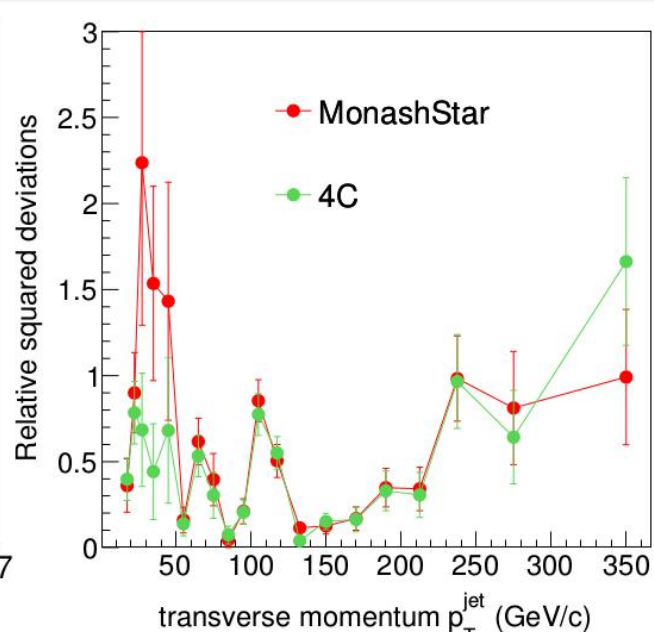
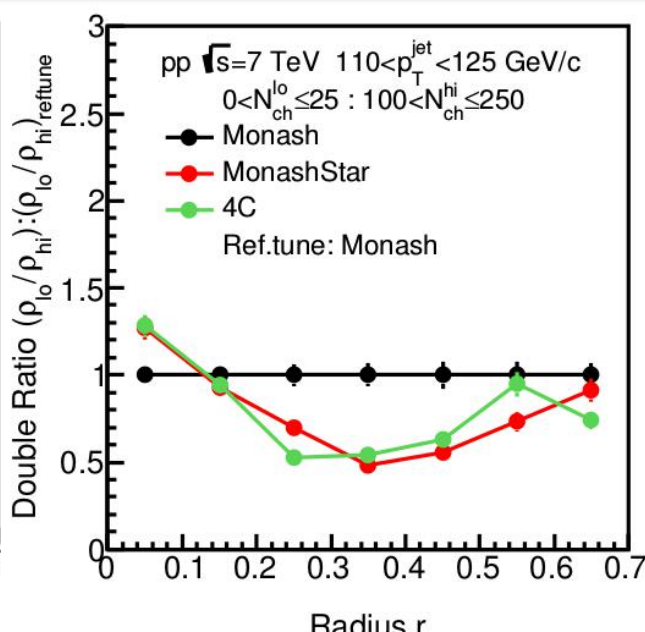
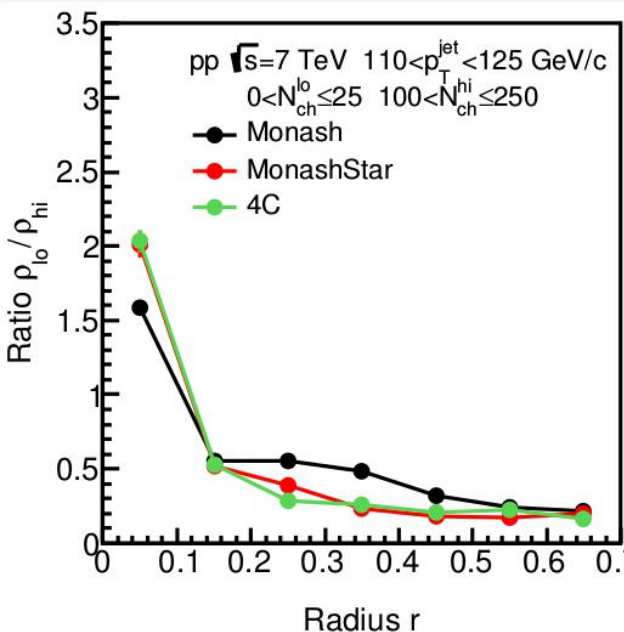


■ R_{fix} nem függ... (a mérési hibán túl)

- A PYTHIA hangolástól (Monash, Monash*, 4C)
- A CR sémától, illetve a CR és MPI ki-bekapcsolásától
Az MPI:off nagyon eltérő fizikát, UE-t jelent!
- Klaszterizáló algoritmustól (k_T , anti- k_T , Cambridge-Aachen)
Ezek nagyon különbözően rekonstruálják a jetet!

Vajon igaz lesz-e ez nehézion-ütközésben is?

Hangolások: p_T -függés



■ Különböző hangolások $\rho_{low-Nch}/\rho_{high-Nch}$ arányai

■ **Kettős hányados** (adott p_T -n)

■ Triviális multiplicitástorzítás kiesik

■ Szignifikáns effektus látszik adott p_T -ablakokban

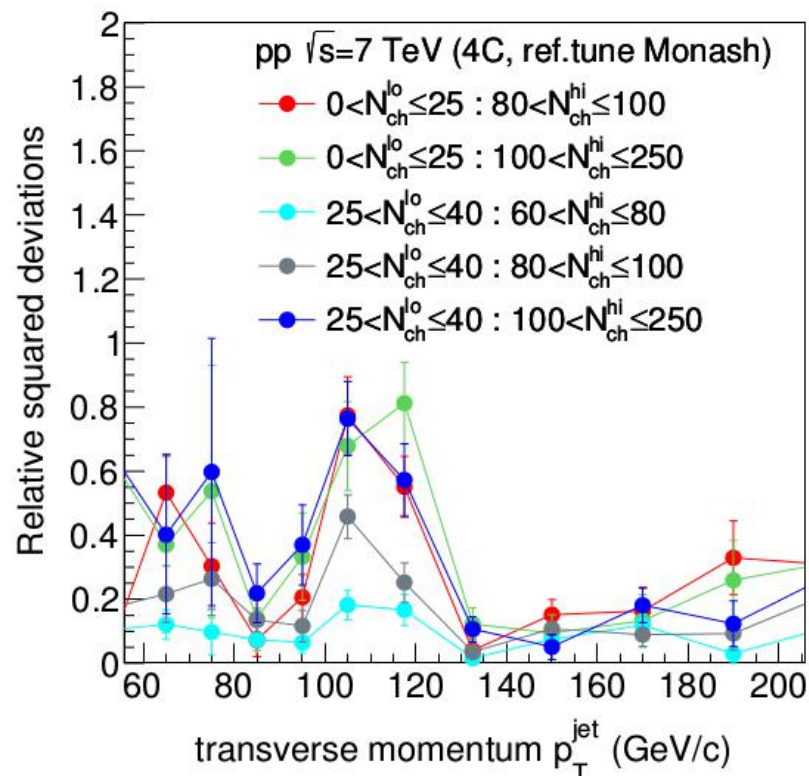
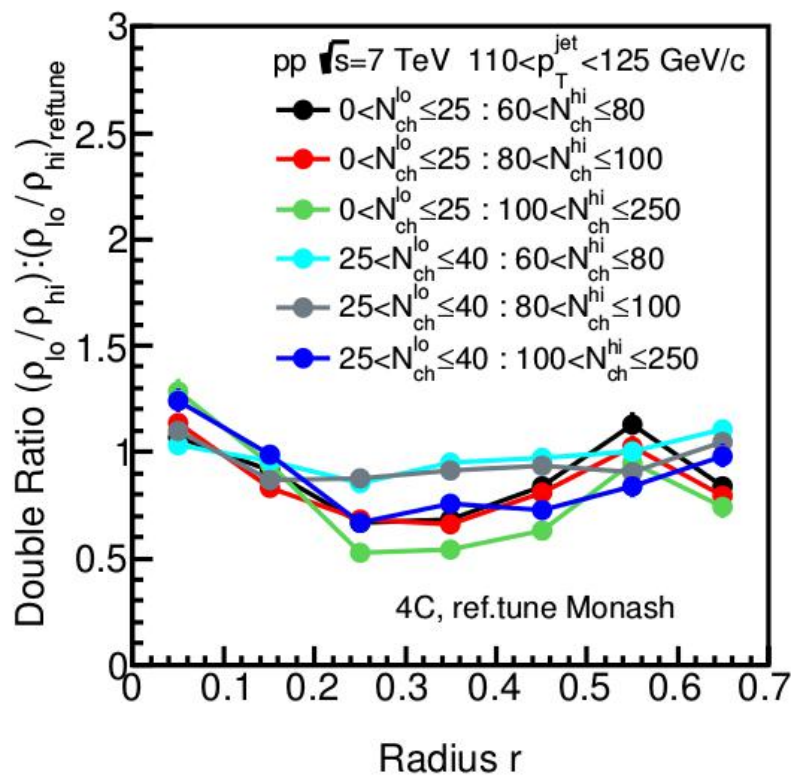
■ Az effektus mértéke **2-es faktor** is lehet!

$$DR(r) = \frac{(\rho_{low}/\rho_{high})}{(\rho_{low}/\rho_{high})_{ref.tune}}$$

■ A p_T -függés nem triviális

$$RSD = \sqrt{\sum_{0 < r_i < R} (DR(r_i) - 1)^2}$$

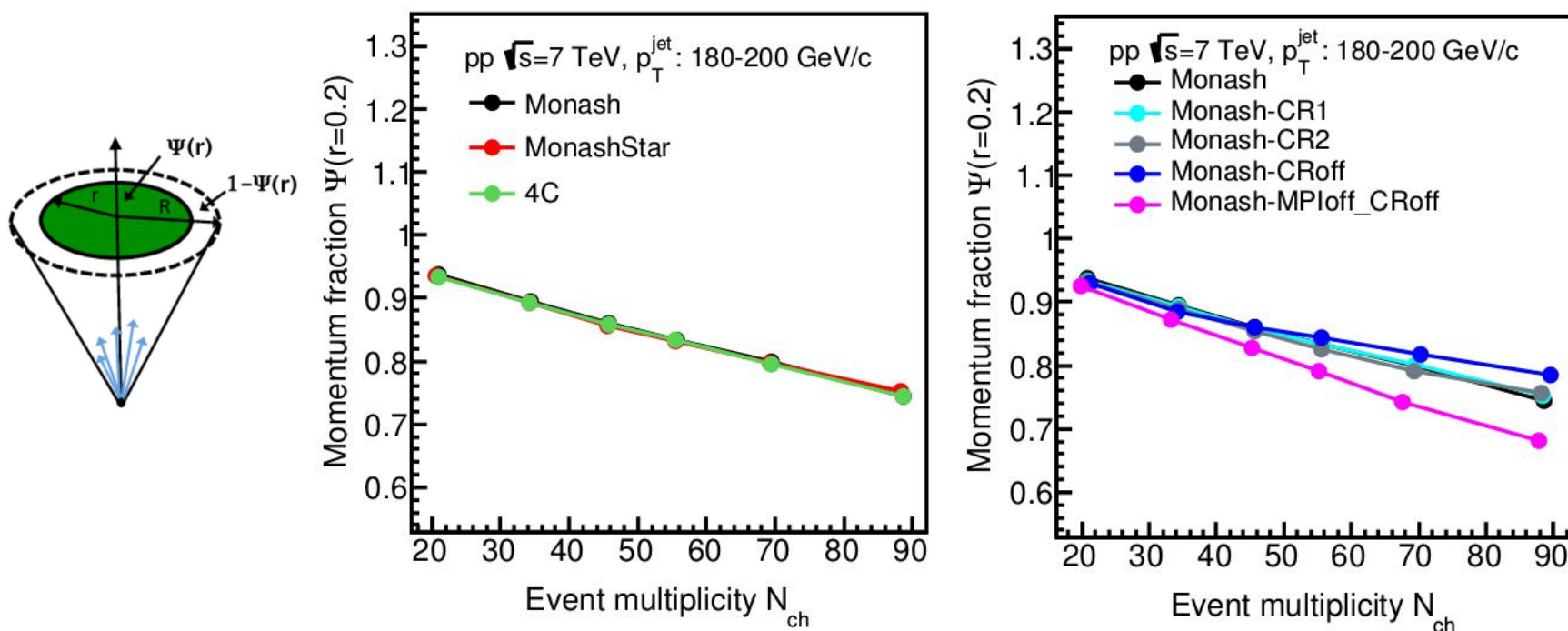
Hangolások: több N_{ch} tartomány



- Az eltérések számos $\{N_{ch}\text{-low}, N_{ch}\text{-high}\}$ párosban láthatóak
 Statisztikusan független minták => nem fluktuáció!
- Az eltérés mértéke a távoli N_{ch} -tartományokra nagyobb

A modellek érzékeny tesztje a $\rho(r)$ vs. N_{ch} , p_T

Integrált jetszerkezet vs. N_{ch} ($r=0.2$)



- Nincs különbség a 3 "gyári" hangolás, sem a CR-sémák közt
- **Az MPI:off lényegesen eltér a többitől magas N_{ch} -nál**
 - nem magyarázható binelési effektussal

Az MPI jetszerkezetet módosító hatása

- **Vigyázat: részben a háttéreseemény (UE) módosulása miatt!**

Összefoglalás és kitekintés

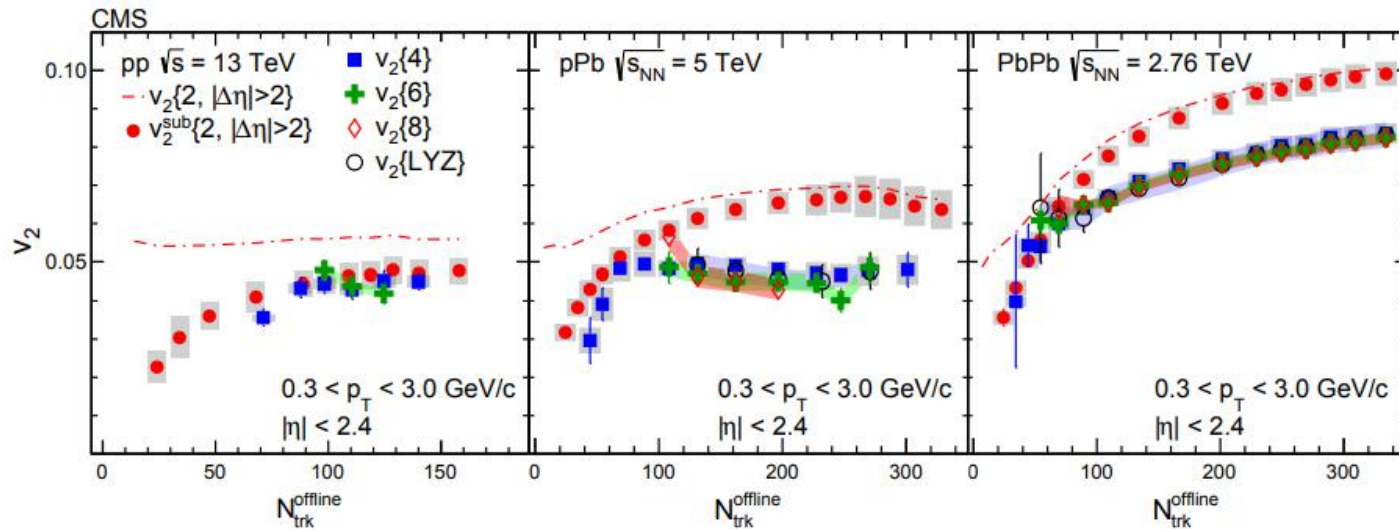
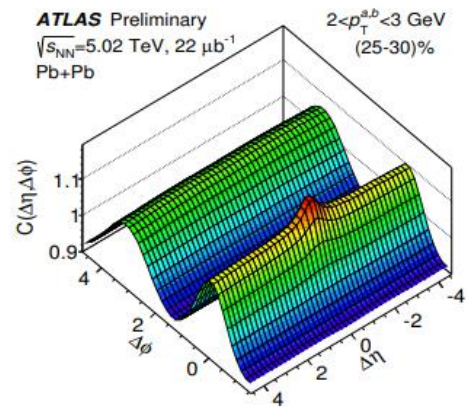
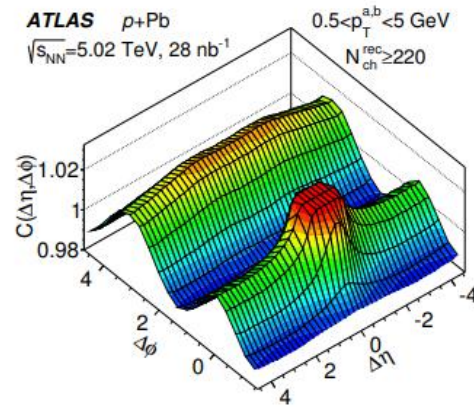
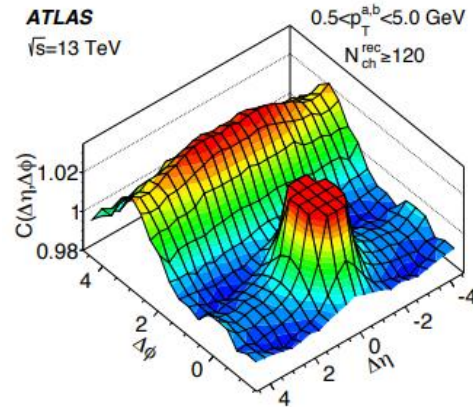
- Multiplicitásfüggő jetszerkezeti mérések LHC energiájú p+p ütközésekben: **a MC modellek érzékeny tesztje**
 - Lehetőség amúgy jól teljesítő modellek közti differenciálásra
 - **Szükség lenne magas p_T -s adatokra** (megvalósítható)
- A jetszerkezetet a sokparton-kölcsönhatás nemtriviális módon befolyásolja
 - A háttéreseemény (UE) pontosabb szerepe tisztázandó
 - Folyamatban: **Kevésbé UE-érzékeny mennyiségek** vizsgálata
 - Folyamatban: **Nehézkvark-jetek** vizsgálata folyamatban
- Javasoltunk egy **multiplicitásfüggetlen jetméret-definíciót**
 - Érdekes az R_{fix} -jelenség léte/nemléte nehézion-ütközésekben
 - Folyamatban: HIJING++ **számolások a maganyag hatásával**

...folytatása következik :)

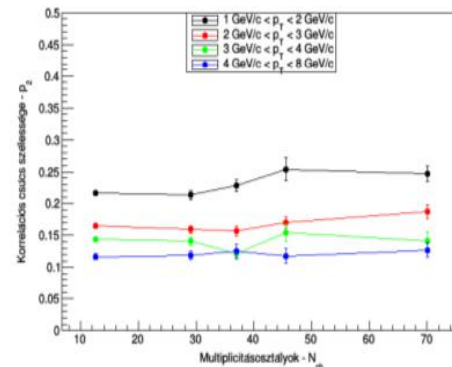
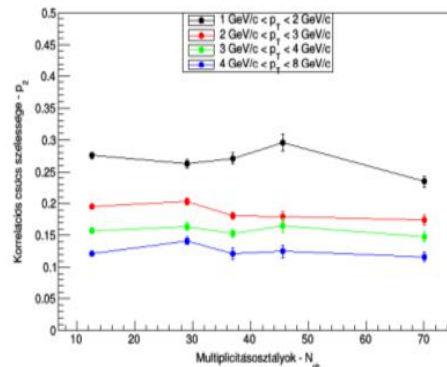
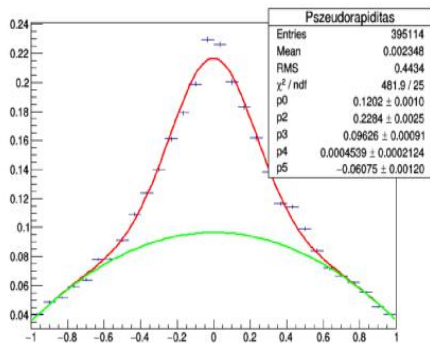
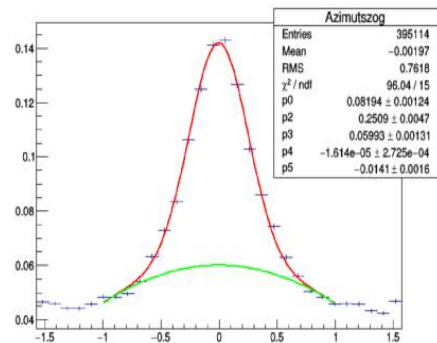
Köszönöm a figyelmet!

A szerzők köszönik továbbá a segítséget
Jana Bielčíková
Yaxian Mao
Kovács Miklós
kollégáknak

Correlations and v_2



h-h correlations, near-side Gaus+p2 fit

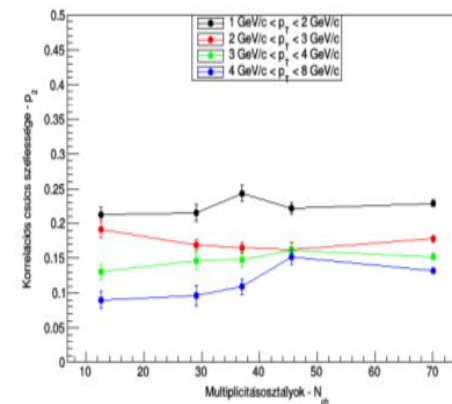
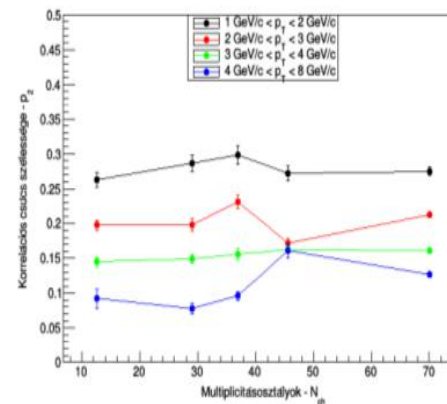
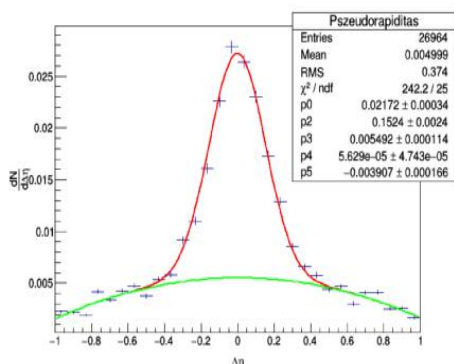
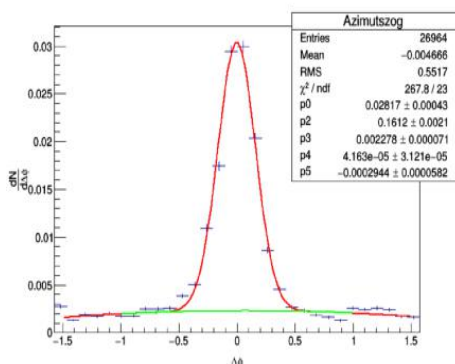


(a) $\Delta\phi$ -irány
1 GeV/c < p_T < 2 GeV/c ; 50 < N_{ch}

(b) $\Delta\eta$ -irány
1 GeV/c < p_T < 2 GeV/c ; 50 < N_{ch}

(a) $\Delta\phi$ -irány , MPI: off , CR: off

(b) $\Delta\eta$ -irány , MPI: off , CR: off



(c) $\Delta\phi$ -irány
4 GeV/c < p_T < 8 GeV/c ; 50 < N_{ch}

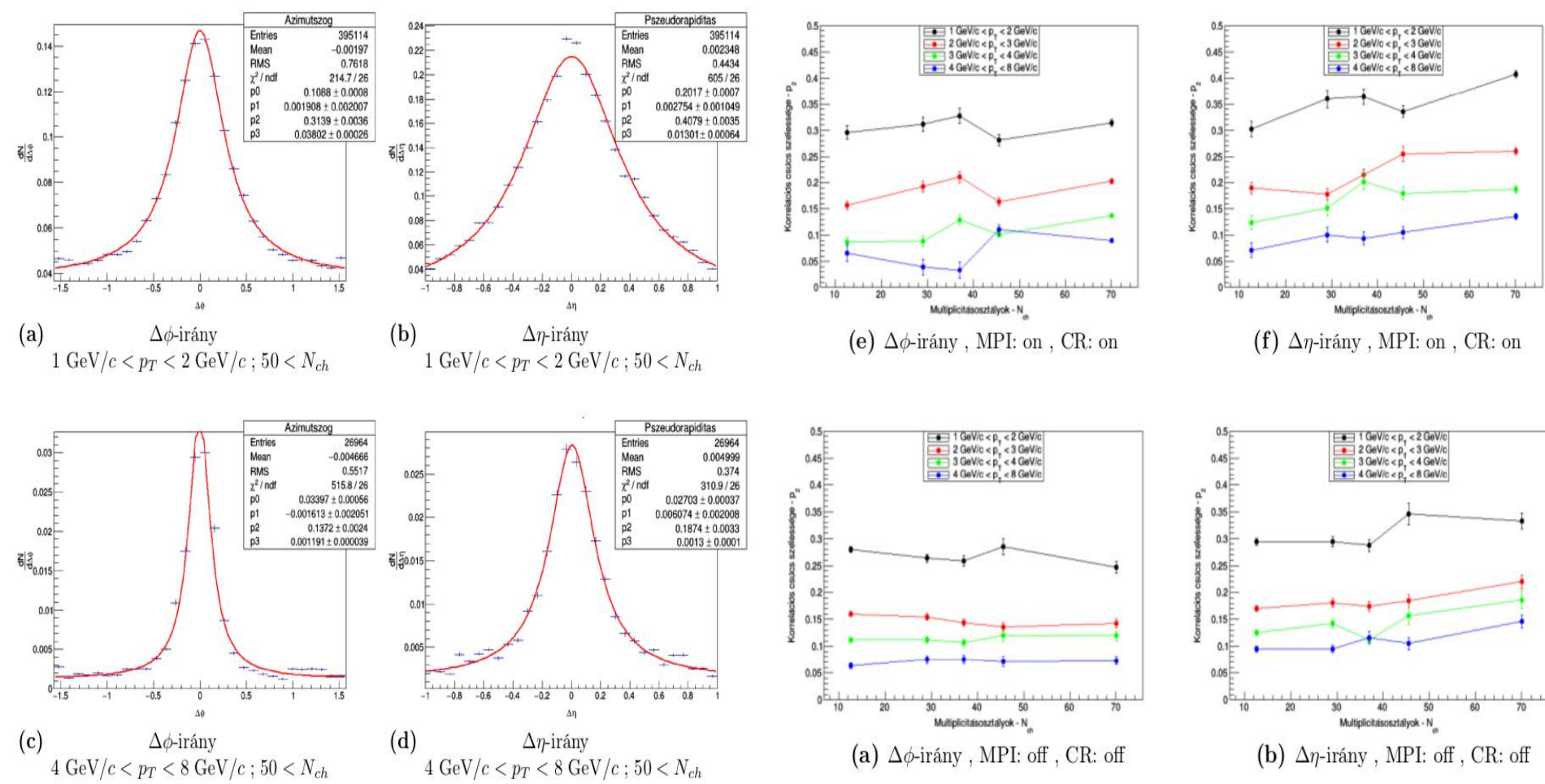
(d) $\Delta\eta$ -irány
4 GeV/c < p_T < 8 GeV/c ; 50 < N_{ch}

(e) $\Delta\phi$ -irány , MPI: on , CR: on

(f) $\Delta\eta$ -irány , MPI: on , CR: on

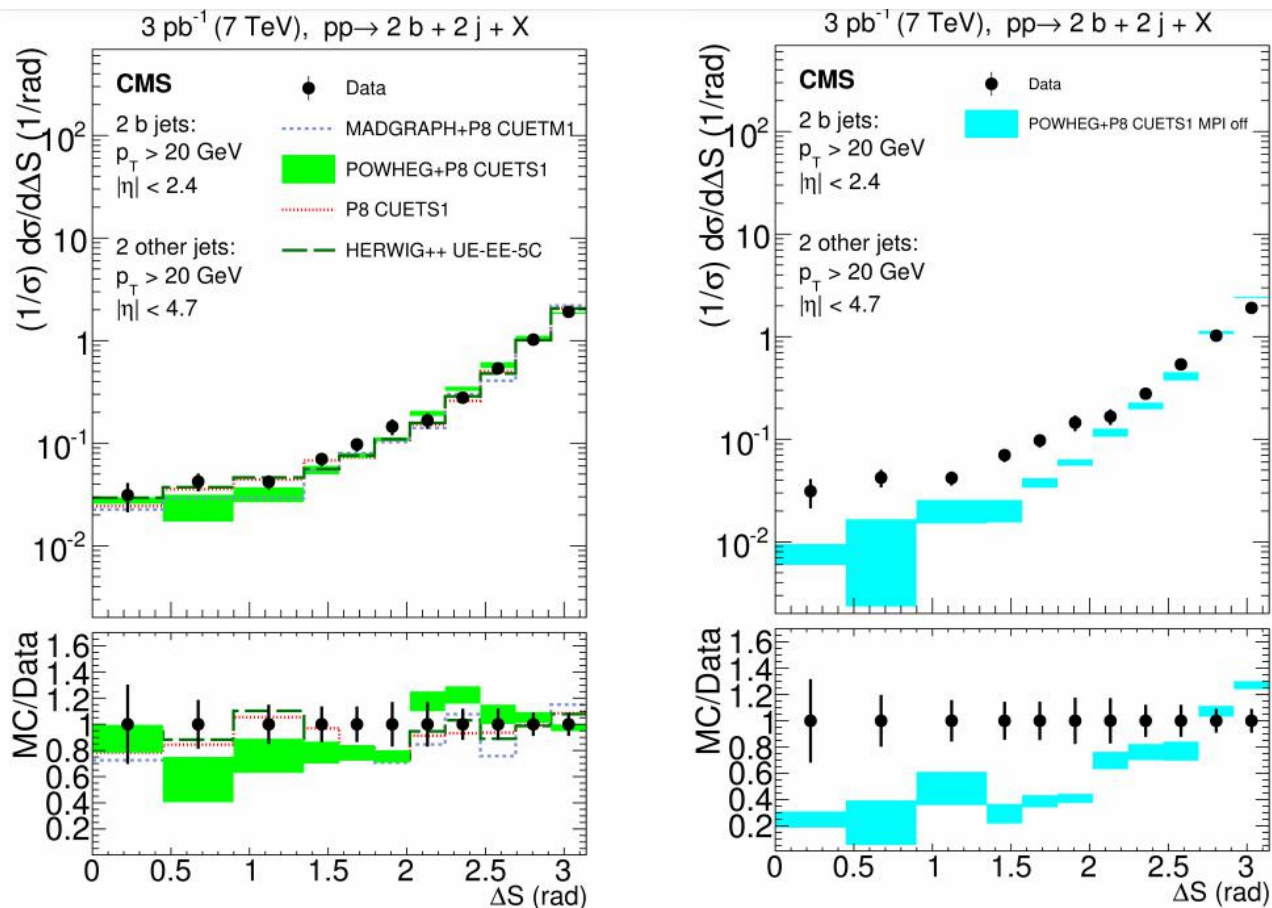
- Peak mostly includes fragmentation components,
- Long-range initial stage is in the parabolic background
- Broadening by MPI moderate

h-h correlations, near-side Cauchy fit



- Peak includes early-stage and fragmentation components
- Sizeable broadening by MPI

CMS 2j+2b dijet azimuthal angle ΔS



CMS, PRD94, 112005 (2016)

- Sensitive to MPI
- Robust regarding UE, choice of simulations