



A kvark-gluon plazma legkisebb cseppjeinek keresése nehéz kvarkokkal

- Mérések és modellek -

Vértesi Róbert

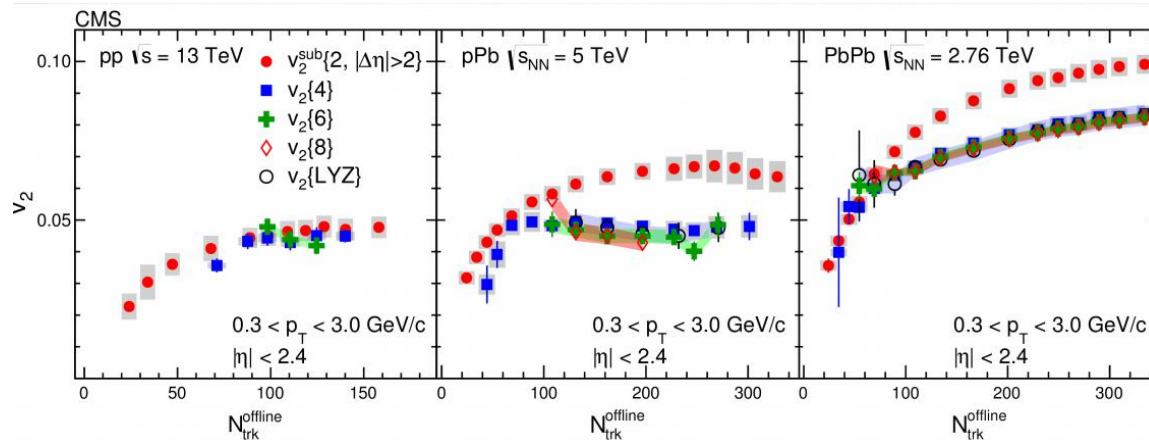


Hadronfizika / ALICE-Budapest csoport

Kollektivitás kis rendszerekben

- **RHIC:** A forró maganyag tökéletes folyadékként viselkedik
=> **erősen csatolt kvark-gluon plazma (sQGP)**
- **LHC: Kollektivitás kis rendszerekben (pp, p-Pb),**
ha az eseményaktivitás (pl. végállapotú multiplicitás) magas

CMS, Phys. Lett. B 765 (2017) 193



- **Kollektivitás = hosszútávú sokrészecske-korrelációk (pl. $v_n\{n\}$)**
Nem feltétlenül jelent hidrodinamikai evolúciót!

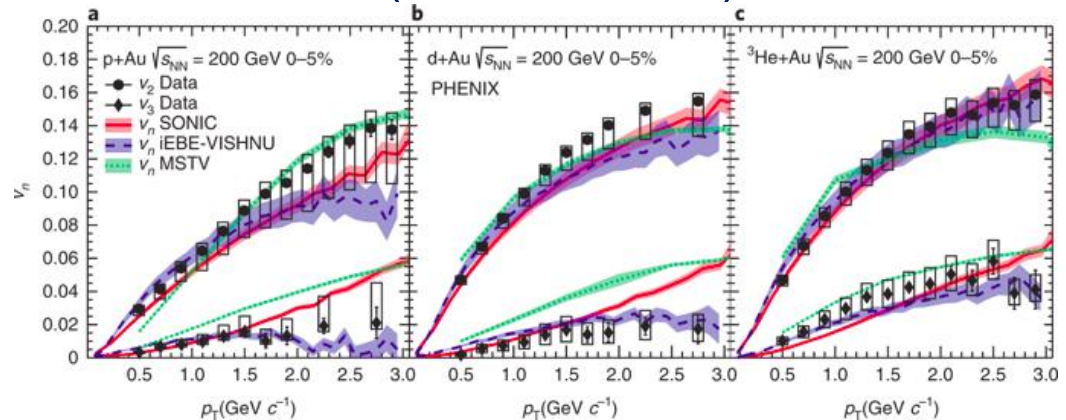
Van-e hidrodinamikai evolúció?

- PHENIX 2018:** p-Au, d-Au, He-Au ütközések összehasonlítása a hidrodinamikát preferálja más modellekkel (színfluxuscső) szemben

$$v_2^{p+Au} < v_2^{d+Au} \approx v_2^{^3\text{He}+Au}$$

$$v_3^{p+Au} \approx v_3^{d+Au} < v_3^{^3\text{He}+Au}$$

Nature Physics 15, 214 (2019)



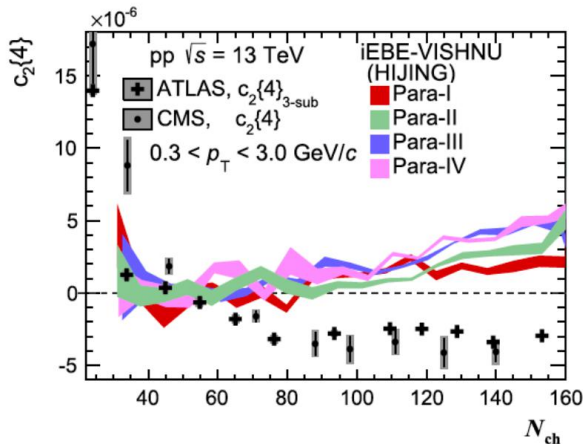
- Kumuláns előjele eltér a hidrodinamikai modell jóslataitól => ?

W. Zhao et al., PLB 780 (2018) 495

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}}$$

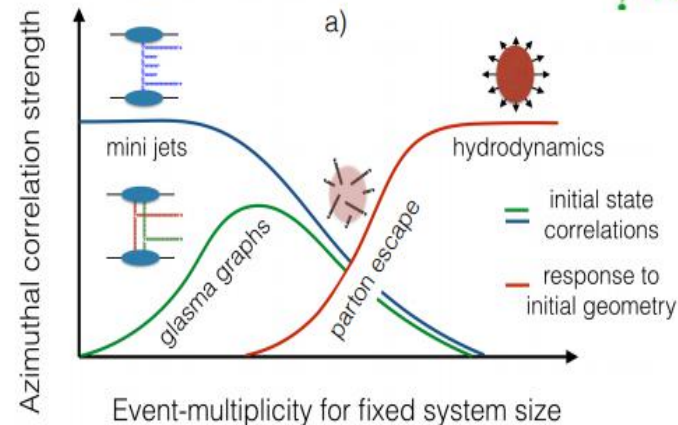
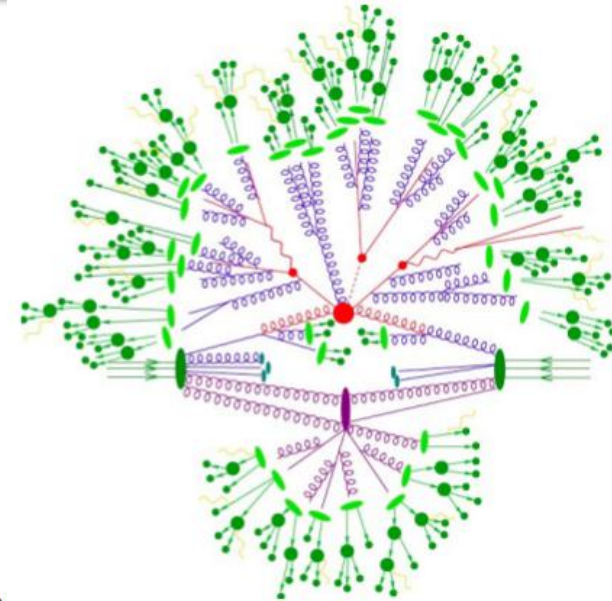
$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}$$

...



Forró QGP vagy hideg QCD?

- **Lehet-e QGP kis rendszerekben?**
 - 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)
eg. [Schlichting, arXiv:1601.01177](#)
 - szín-újrarendezés (MPI modell része)
eg. [Ortiz-Bencédi-Bello, J.Phys.G 44 \(2017\)](#)



Nehéz kvarkok keletkezése és fragmentációja

- **Nehéz kvarkot tartalmazó hadronok keletkezése:**

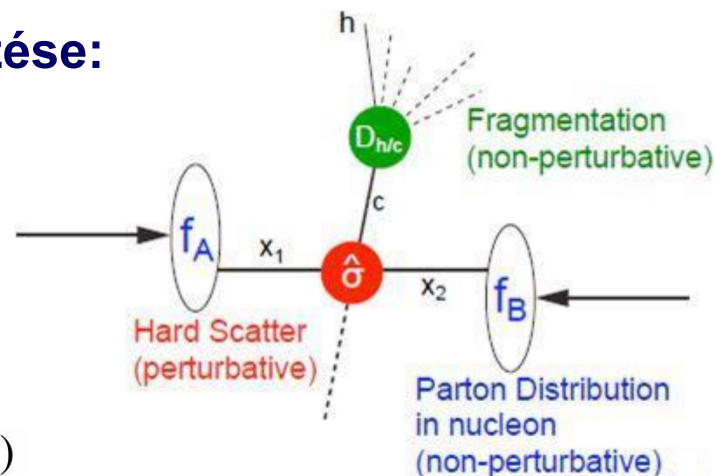
- Partoneloszlás-függvény (PDF)
- Kemény szórás
- Fragmentáció

- Faktorizációs hipotézis: ezek függetlenek!

$$\sigma_{hh \rightarrow H} = f_a(x_1, Q^2) \otimes f_b(x_2, Q^2) \otimes \sigma_{ab \rightarrow q\bar{q}} \otimes D_{q \rightarrow H}(z_q, Q^2)$$

Feynman-x:

$x_i = p_{\parallel}^A / p_{\parallel, \max}^A$
 Q : impulzusátadás



- A fragmentációs függvényeket hagyományosan univerzálisnak szokás tekinteni

Nehéz kvarkok keletkezése és fragmentációja

- **Hozamok: a pQCD modellek elsődleges tesztje**

- Nehéz kvarkok: $m_{c,b} \gg \Lambda_{\text{QCD}}$
→ Perturbatív alacsony impulzuson is
- Színtöltés hatása: nehézkvark-jet
=> könnyű jet (többnyire gluon)

- **Jetszerkezet és szögkorrelációk**

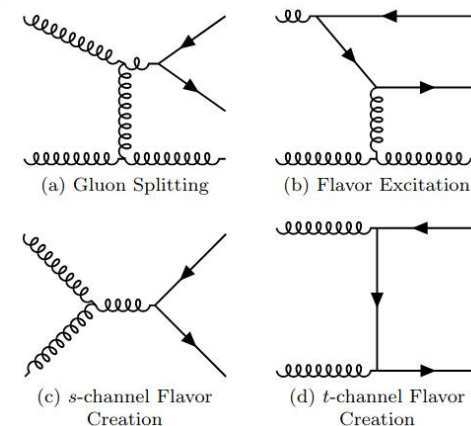
- Tömegfüggés (“tiltott kúp”)
- QCD folyamatok elkülönítése
 - LO ízkeltés => NLO gluonhasadás és ízgerjesztés
=> háttér folyamatok
 - Lehetőség a jetszerkezet módosulásának vizsgálatára

- **Mezonok és barionok összehasonlítása**

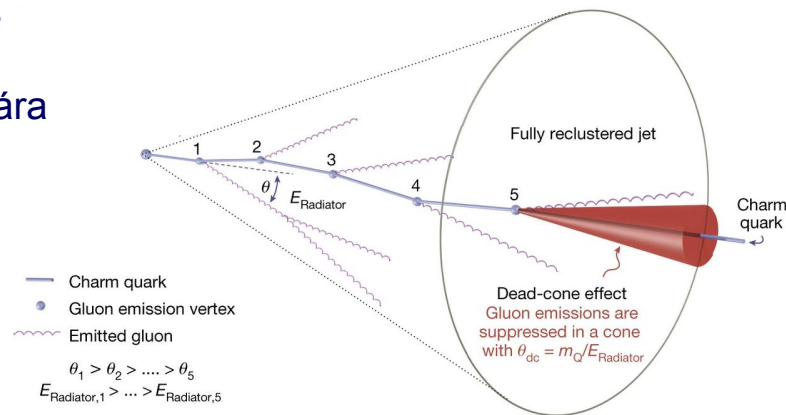
- Fragmentációs modellek tesztje
- Tiltott kúp hatás

- **Eseményaktivitás-függő jellemzők**

- **komplex vákuum-QCD és forró QGP hatása**



Ilten et al., PRD 96 (2017) 5, 054019



ALICE, Nature 605 (2022) 440

LHC ALICE

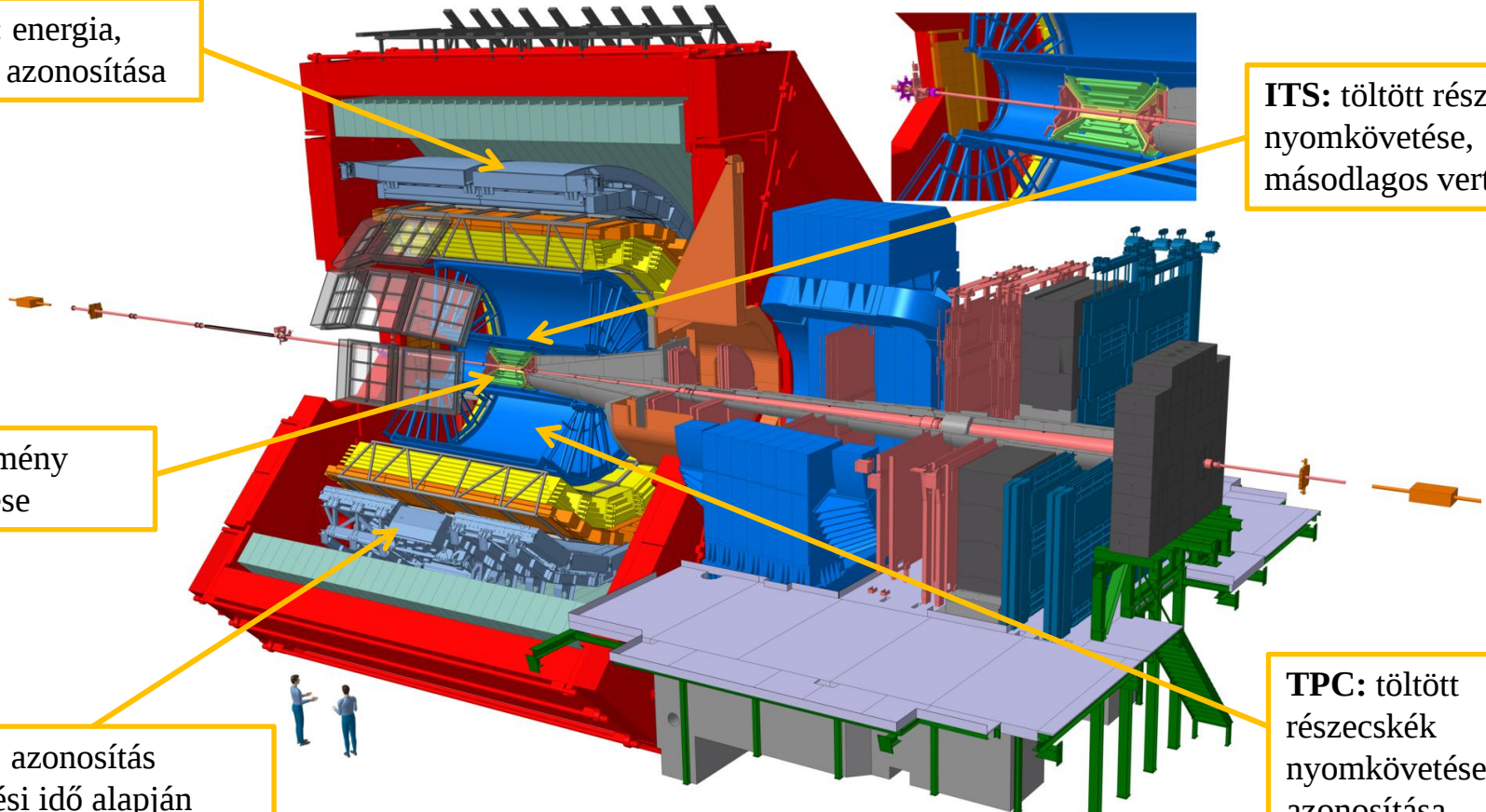
EMCal: energia,
elektron azonosítása

ITS: töltött részecskék
nyomkövetése,
másodlagos vertex

V0: esemény
jellemzése

TOF: azonosítás
repülési idő alapján

TPC: töltött
részecskék
nyomkövetése,
azonosítása



Nehéz kvark kísérleti rekonstrukciója

(charm & beauty)

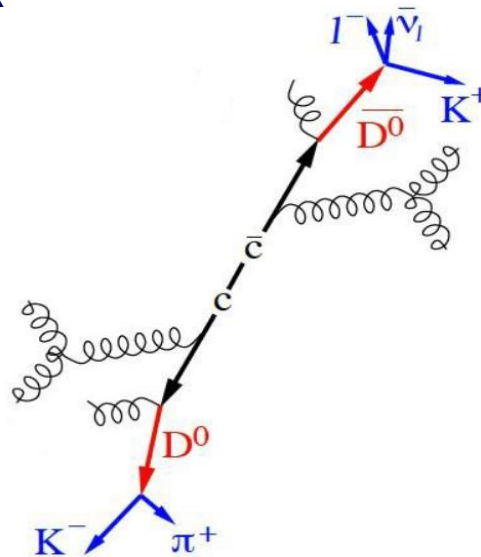
Szemileptonos csatorna

- $c, b \rightarrow \mu$
- $c, b \rightarrow e$

(charm)

Hadronos bomlások

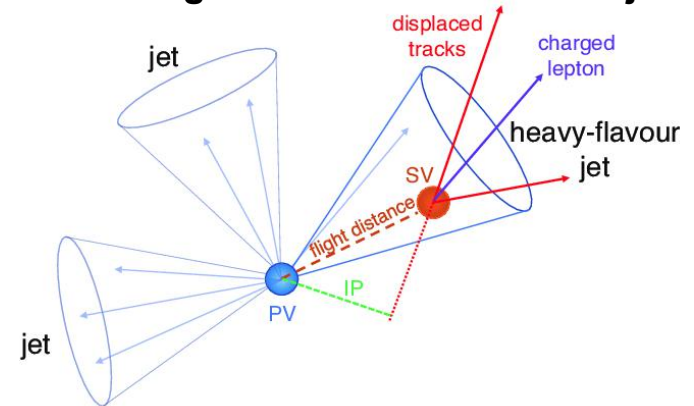
- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$
- $D^{*+} \rightarrow D^0 (\rightarrow K^- \pi^+) \pi^+$
- $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$
- $D_S^+ \rightarrow \Phi (\rightarrow K^+ K^-) \pi^+$
- $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$
- $\Lambda_c^+ \rightarrow p K_S^0 (\rightarrow \pi^+ \pi^-)$
- $\Xi_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+$
- $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi^- \pi^+ \pi^+$
- $\Sigma_c^{0,++} \rightarrow \Lambda^+ \pi^{\pm}$
- $\Omega_c^0 \rightarrow \Omega^- \pi^+$



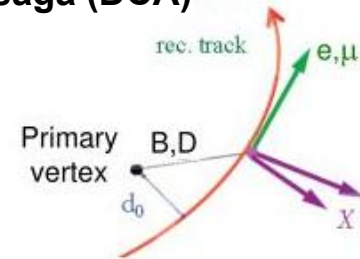
(charm & beauty)

Azonosítás a bomlás helye alapján

- Másodlagos vertex rekonstrukciója

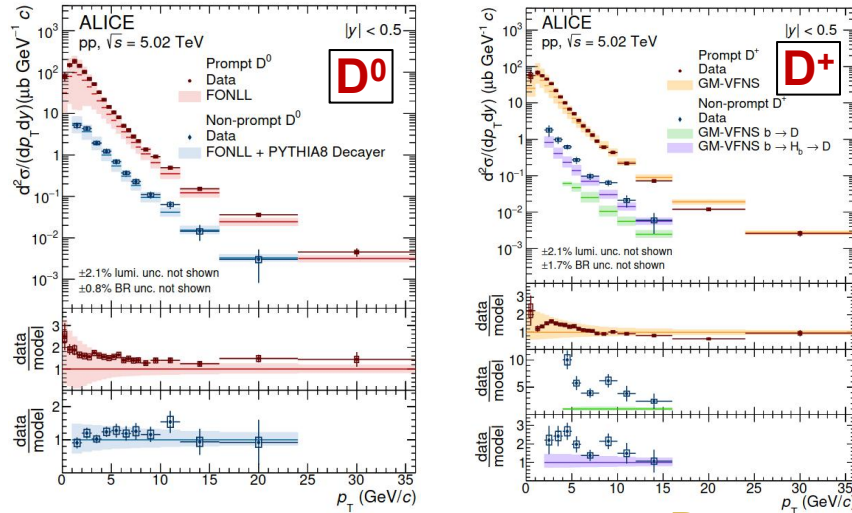


- Pálya elsődleges vertextől mért távolsága (DCA)



charm és beauty: precíziós mérések (pp)

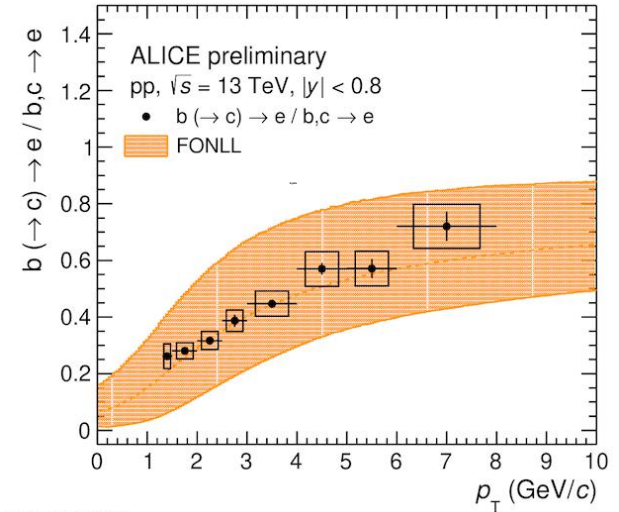
prompt D, non-prompt D(<B)



HEP 05 (2021) 220

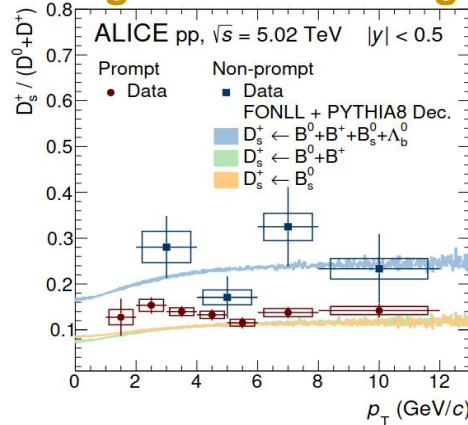
FONLL: JHEP 05 (1998) 007
JHEP 03 (2001) 006,
GM-VFNS: JHEP 05 (2018) 196,
JHEP 12 (2017) 021

c, b decay electrons



ALI-PREL-503667

strange vs. non-strange D

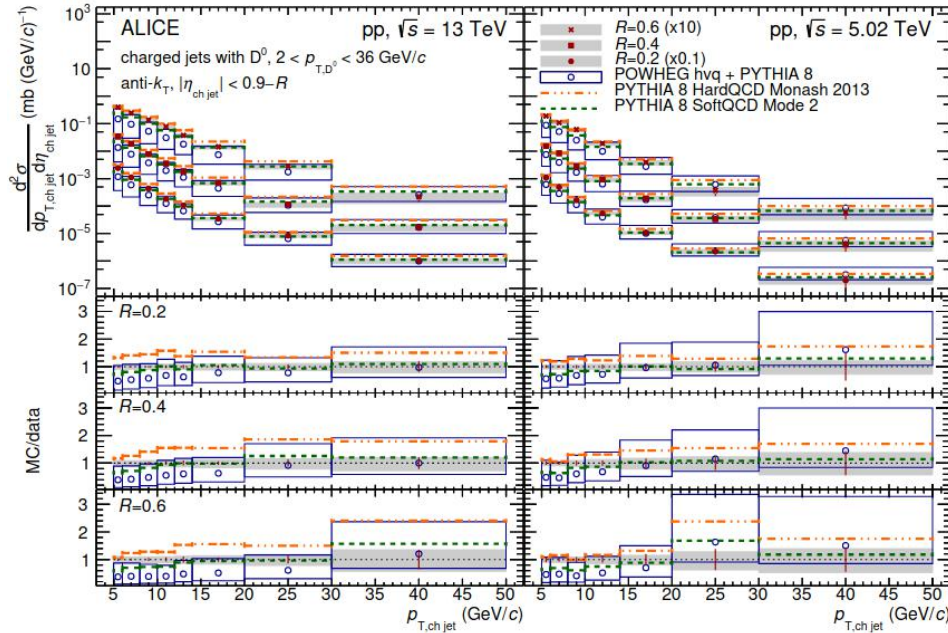


A pQCD modellek részletgazdag tesztje

- Prompt D mezonok keletkezését általánosságban jól értjük, non-prompt esetében van eltérés
- Beauty-elektron hányadot jól leírják a modellek
- Az adat erős megkötéseket ad a modellekre**

Nehézkvark-jetek keletkezése (pp)

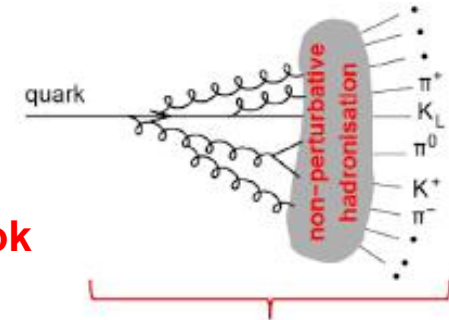
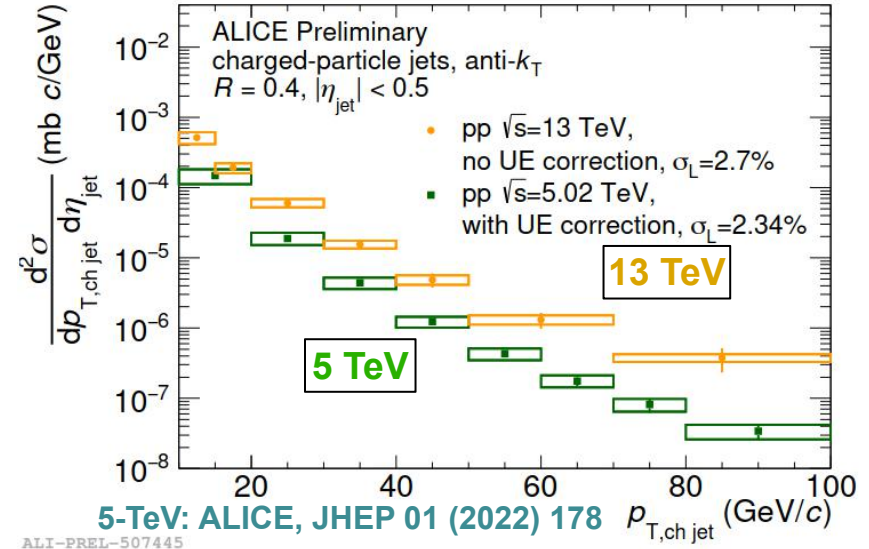
D-jetek - rekonstruált D mezon a jetkúpban



CERN-EP-2022-070

- **Nehéz kvarkok jetekké fragmentálódnak**
- Erős megkötések a modellekre => **ízfüggő jet-tulajdonságok**
- *Referencia a maganyag-módosulás kimutatásához*

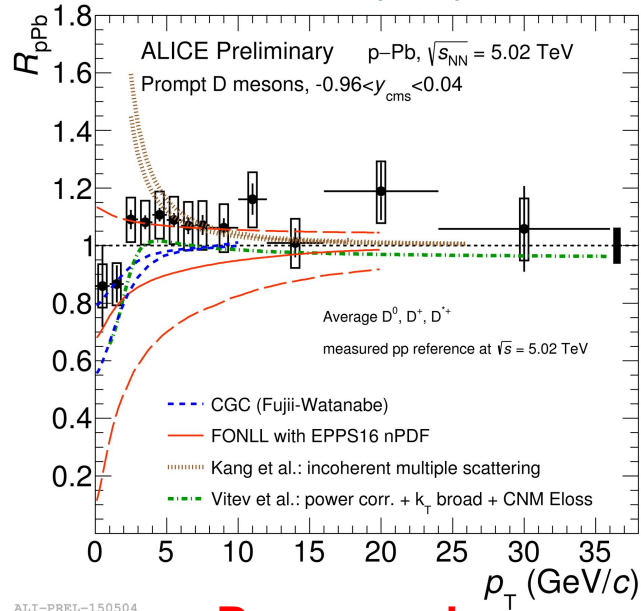
b-jetek - másodlagos vertex alapján



Fragmentation = Parton shower + hadronization

p-Pb - Hideg vagy forró maganyag?

JHEP 2019 (2019) 92

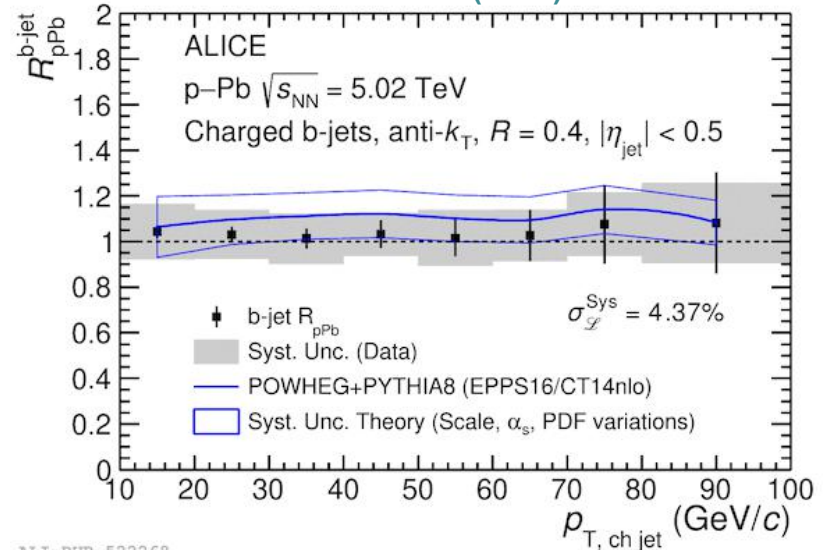


ALI-PREL-150504

D mezonok

$p_T \approx 0$ -től mérve

JHEP 01 (2022) 178



ALI-PUB-522268

b-jetek

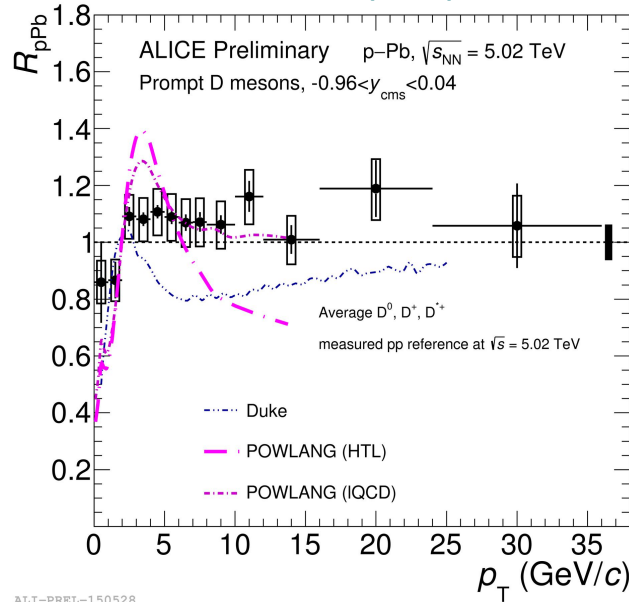
első mérés $10 < p_T < 100$ GeV/c tartományban

- R_{pPb} hibán belül egységnyi
- Modellek: hideg maganyag hatásai

=> A hideg maganyag nem okoz jelentős nukleáris módosulást

p-Pb - Hideg vagy forró maganyag?

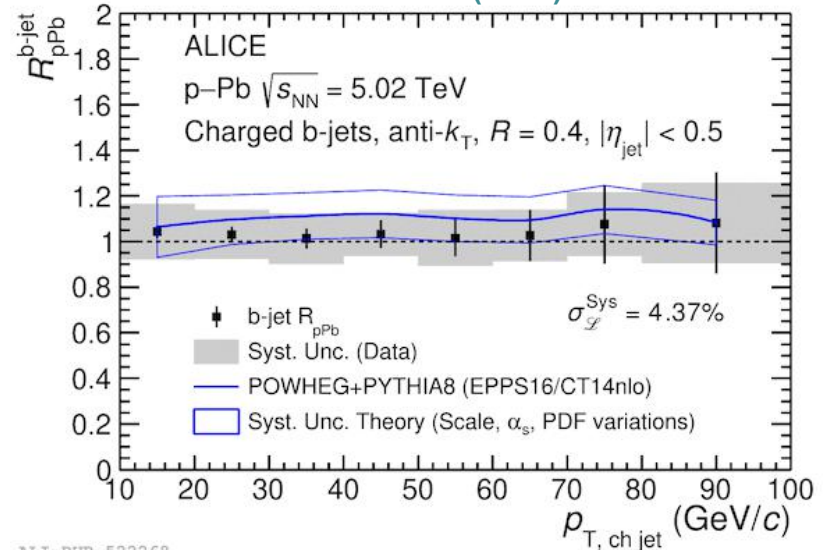
JHEP 2019 (2019) 92



D mezonok

$p_T \approx 0$ -től mérve

JHEP 01 (2022) 178



b-jetek

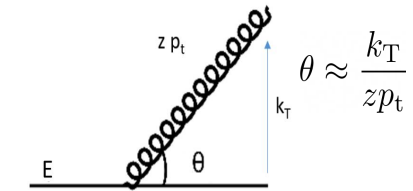
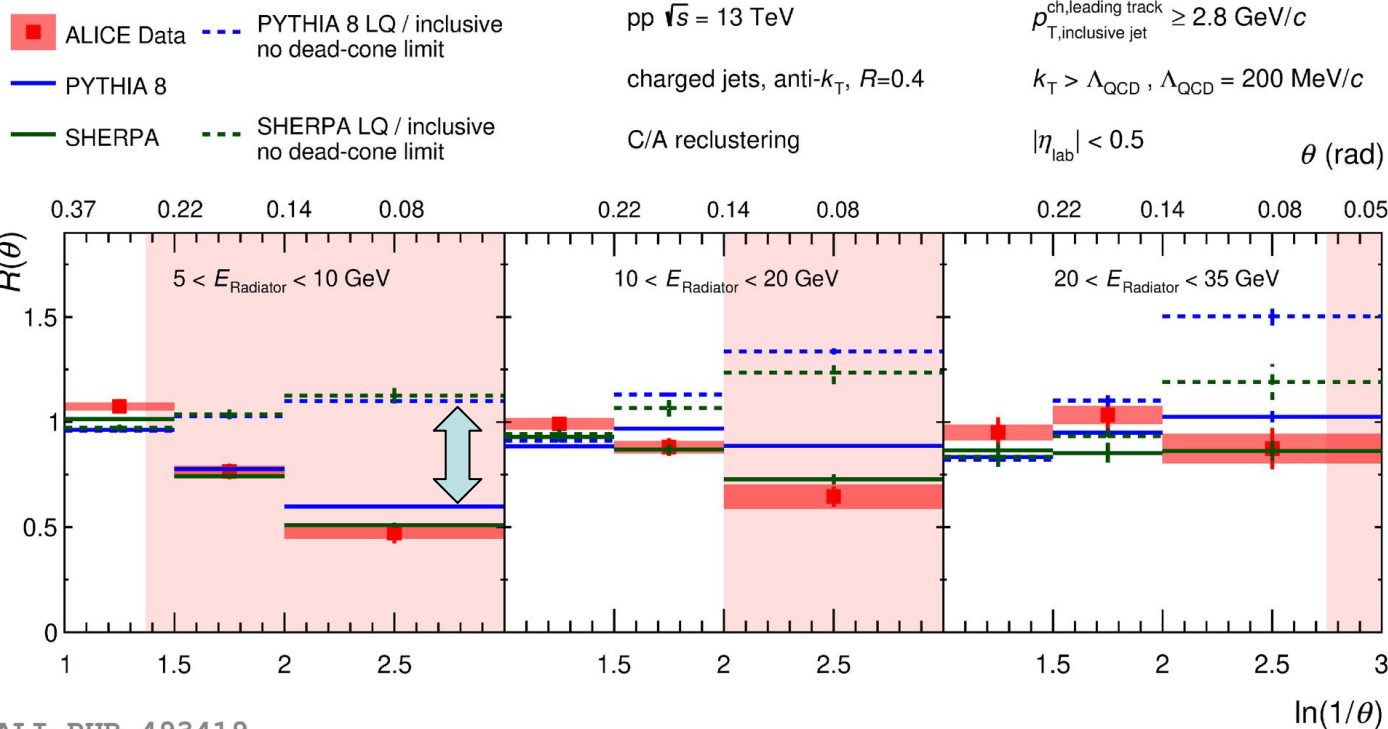
első mérés $10 < p_T < 100$ GeV/c tartományban

■ R_{pPb} hibán belül egységnyi

- Modellek: QGP csepp - marginális egyezést mutat

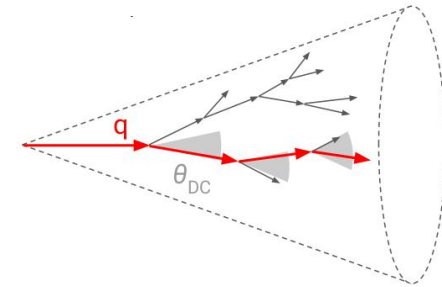
=> Nem zárható ki a forró maganyag jelenléte p-Pb ütközésben

Nehézkvark-fragmentáció: a tiltott kúp



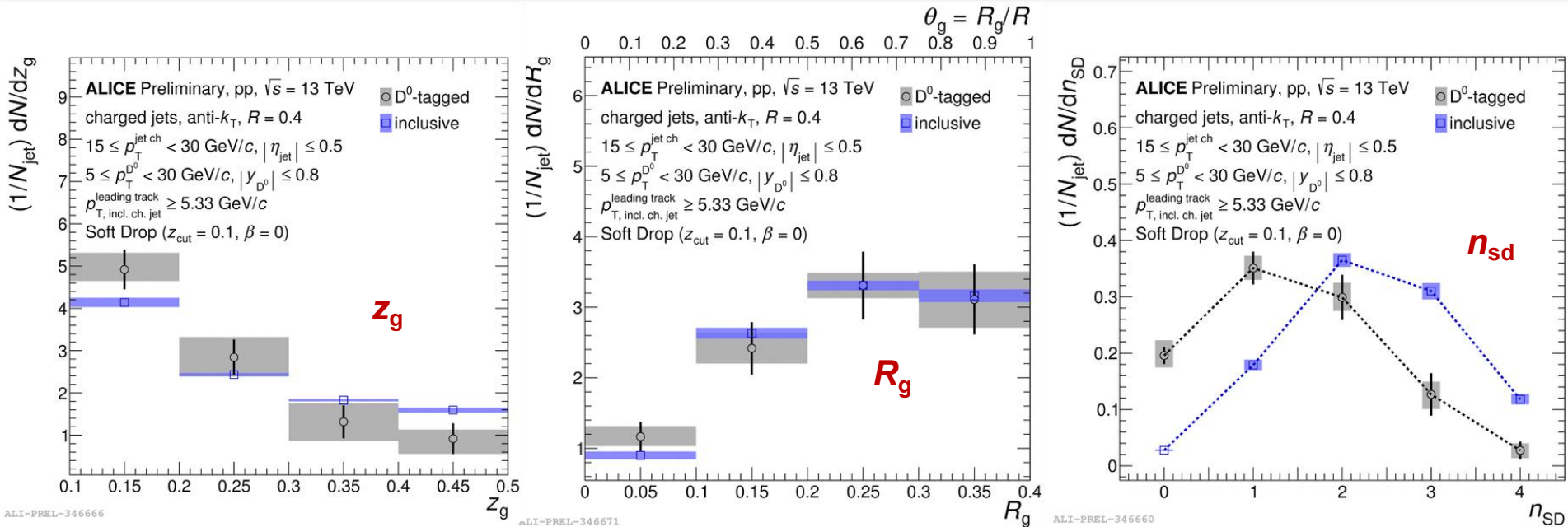
$$\theta < \theta_{\text{DC}} = \frac{m_q}{E_q}$$

Nature 605 (2022) 440

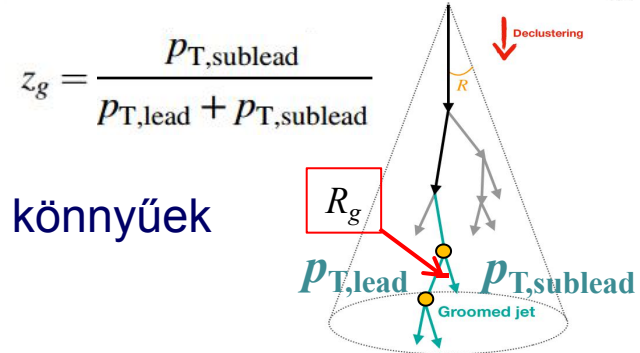


- **D-mezont tartalmazó és inklúzív jetek aránya $\ln(1/\theta)$ függvényében ($\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$)**
- Signifikánsan kevesebb kisszögű elágazás D-t tartalmazó jetek esetében
 $\Rightarrow$ **A tiltott kúp (dead cone) első közvetlen kimutatása** hadron-ütközésekben
- A jelenség a sugárzó részecske energiájának növelésével csökken ($\rightarrow \theta > m_q/E_q$)

charm fragmentáció: D-jetek szerkezete



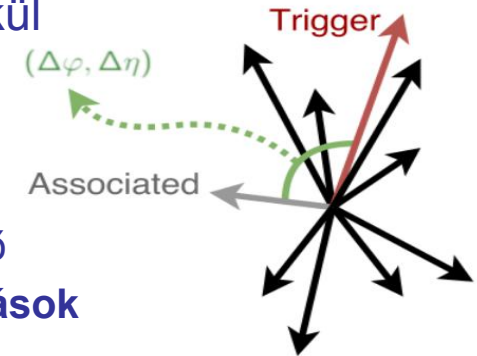
ALICE-PUBLIC-2020-002



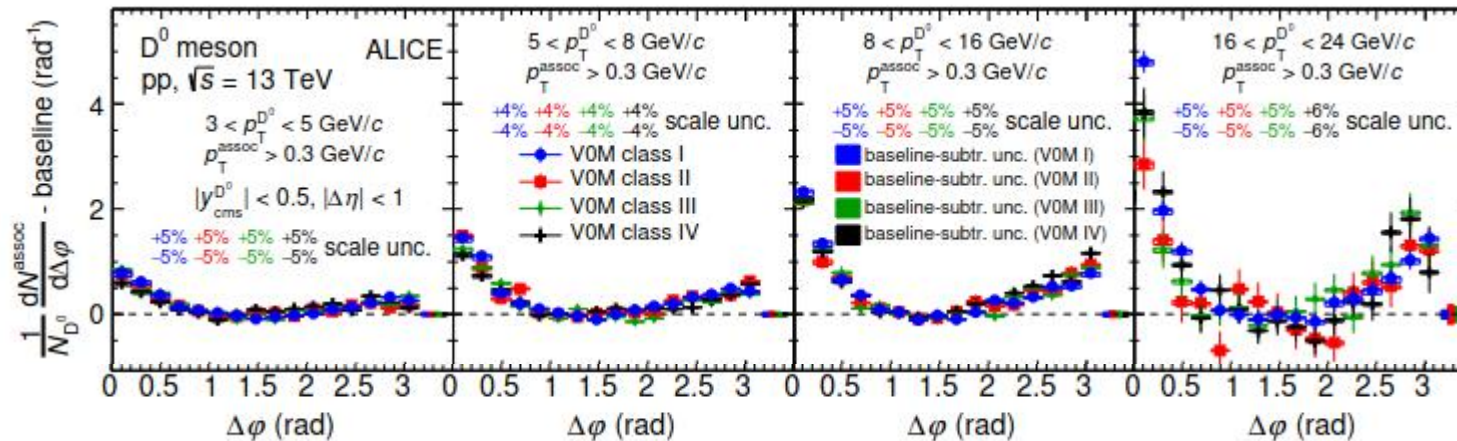
- D⁰-t tartalmazó jetek “groomed” szerkezete**
pp $\sqrt{s} = 13$ TeV, $z_{\text{cut}} = 0.1, \beta = 0$
- n_{SD} : c-jetek jellemzően kevesebbszer ágaznak el, mint a könnyűek
- ⇒ **Konzisztens a keményebb fragmentációval**
(tiltott kúp és szintöltés hatása)

c keltés és -fragmentáció: D-h korrelációk

- **Korreláció:** információ a jetszerkezetről jet-rekonstrukció nélkül
 - Alacsony impulzusnál is használható
 - **Triggeroldali** (Near-side) szögkorrelációs csúcs: elsősorban a nehézkvark-jet fragmentáció
 - **Átellenes oldali** (away-side) csúcs: túloldali (recoil) jetre jellemző
 - Más effektusok: **háttéreseemény, kezdeti- és végállapoti sugárzások**



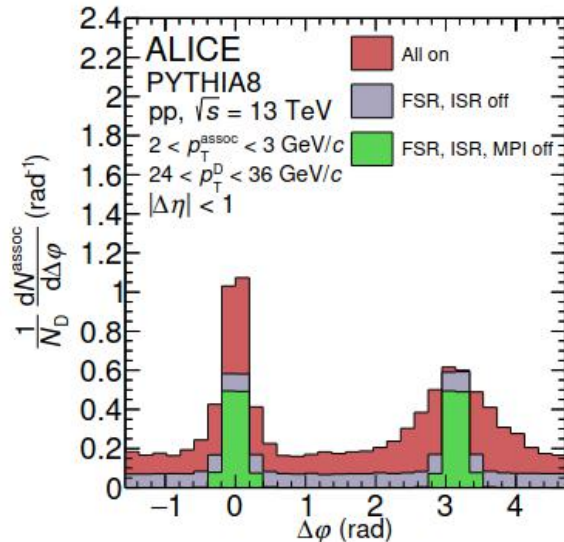
ALICE, EPJ C 82 (2022) 335



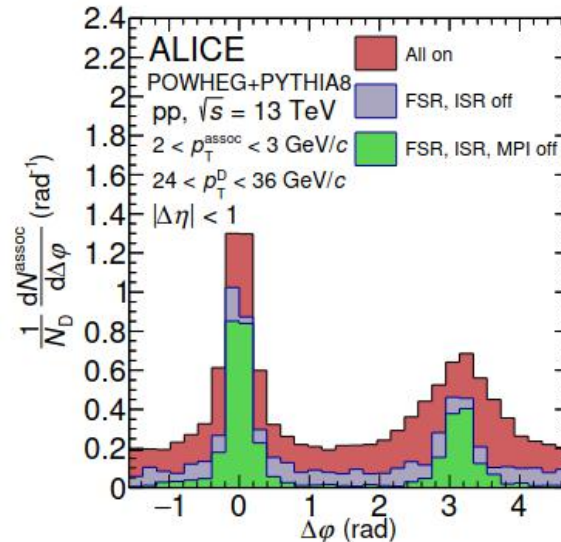
- Nincs szignifikáns függés a végállapoti eseményaktivitástól (V0 multiplicitás)

c keltés és -fragmentáció: D-h korrelációk

ALICE (incl. E.Frajna), EPJ C 82 (2022) 335



LO mátrixelem + ISR + FSR



NLO mátrixelem + ISR + FSR

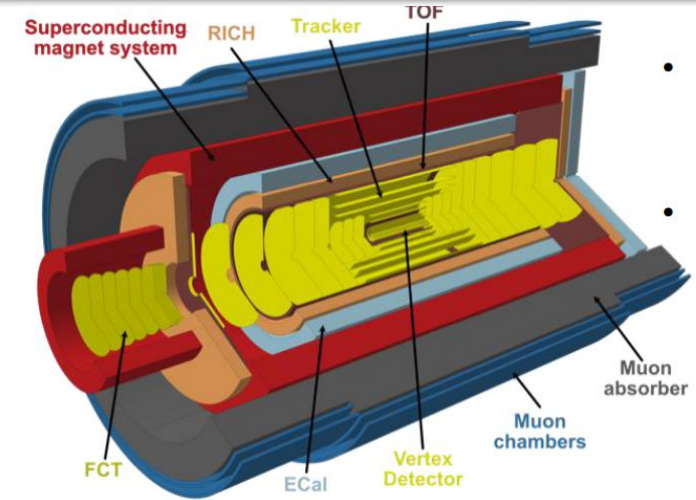
- Partonszintű folyamatok elkülönítése ALICE szimulációkban:
 - **Trigger- és átelles oldali csúcsok:** sugárzások eltérő szerepe LO és NLO szimulációkban
 - Sokparton-kölcsönhatás szerepe a háttéresemény kialakításában

charm-charm korrelációk az ALICE3-ban

ALICE 3: a jövő detektora [-> Barnaföldi G. G.]

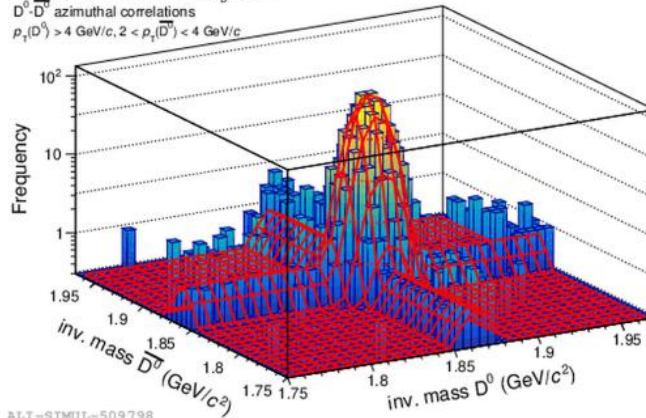
D. Adamová et al., 1902.01211

- D0-D0bar korrelációk pontos mérése
- Az egyes nehézkvark-keltő pQCD folyamatok elkülönítése lehetségessé válik (ízeltés, gluonhasadás, ízgerjesztés)
- Szimulációk -> Tanulmány előkészületben



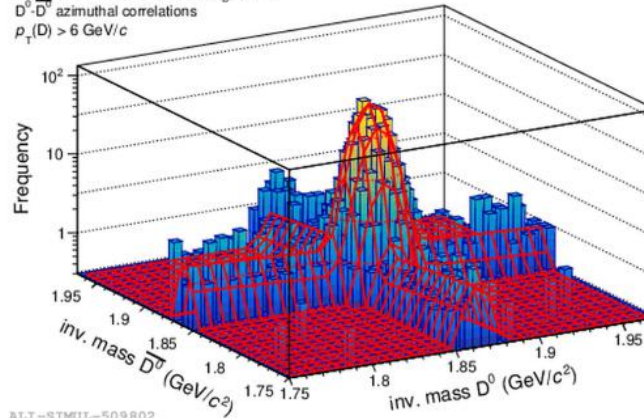
E.Frajna (ALICE), Quark Matter 2022

ALICE 3 study, $L_{\text{int}} = 3 \text{ nb}^{-1}$
PYTHIA 8.2, pp, $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, $|y_0| < 1.44$
 D^0 - $\bar{D}^0$ azimuthal correlations
 $p_T(D^0) > 4 \text{ GeV}/c$, $2 < p_T(\bar{D}^0) < 4 \text{ GeV}/c$



ALI-SIMUL-509798

ALICE 3 study, $L_{\text{int}} = 3 \text{ nb}^{-1}$
PYTHIA 8.2, pp, $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, $|y_0| < 1.44$
 D^0 - $\bar{D}^0$ azimuthal correlations
 $p_T(D) > 6 \text{ GeV}/c$

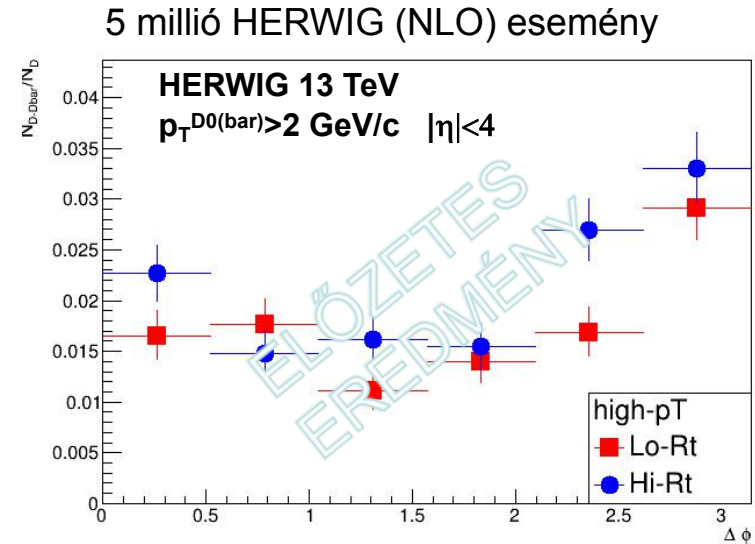
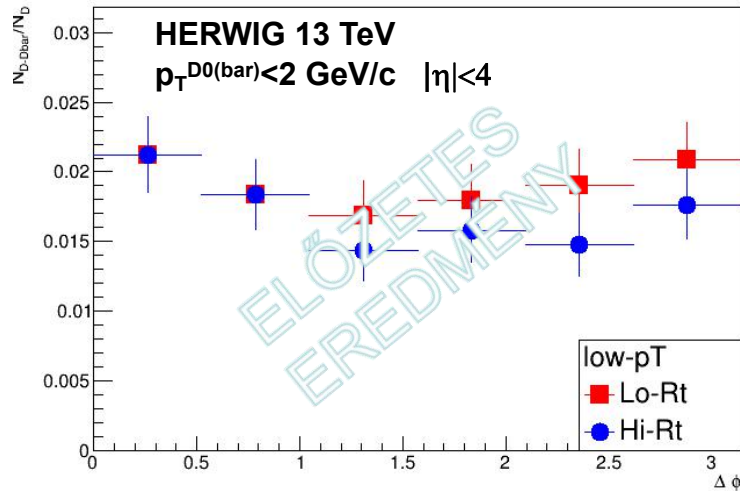


ALI-SIMUL-509802

charm-charm korrelációk: eseményjellemzők

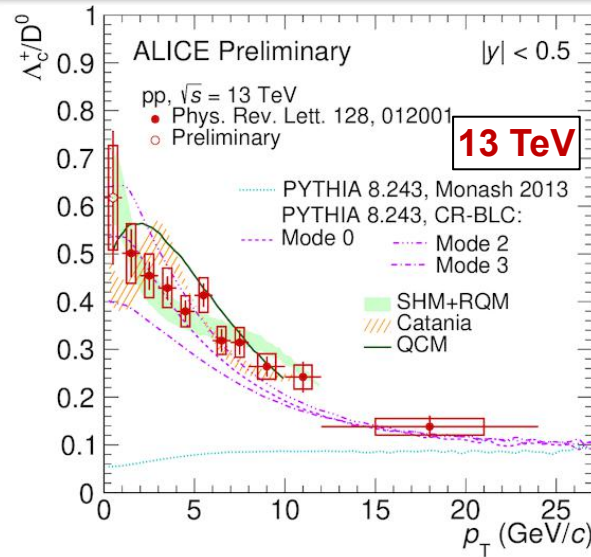
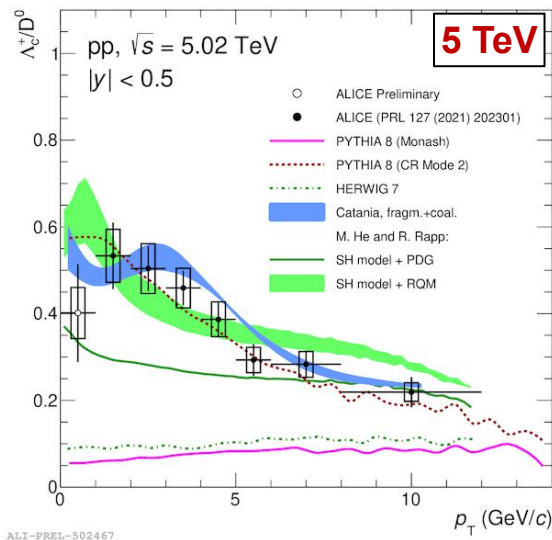
- A D^0 - $D^{0\text{bar}}$ -korrelációk eseményjellemzők szerinti vizsgálata lehetőséget nyújt az egyes QCD keltési folyamatok jellemzőinek megértésére

Frajna E., Horváth A., V.R.



- Háttéreseemény-aktivitás szerinti elkülönítés (példa)
=> Sokparton-kölcsönhatások intenzitására jellemző
- Intenzív háttéreseemény mellett erősebb nagy- p_T -s csúcsok látszanak
=> A háttéreseemény módosító hatása a kemény nehézkvark-keltő folyamatokra

Charm barionok fragmentációja - Λ_c^+

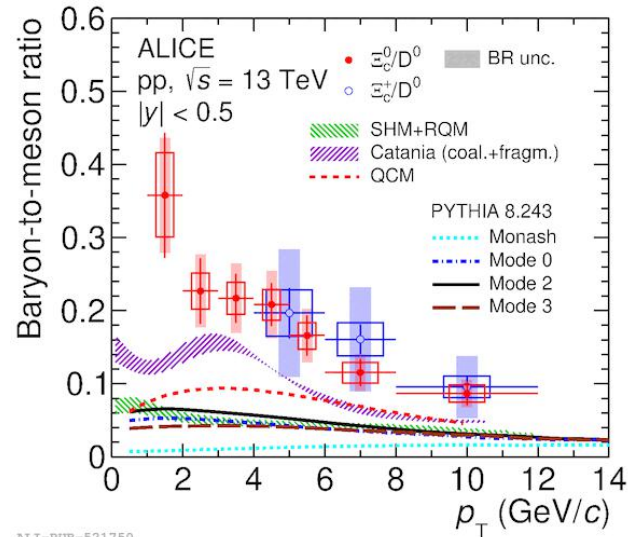


- **A charm baryon - mezon arányok a hadronizáció érzékeny próbái**

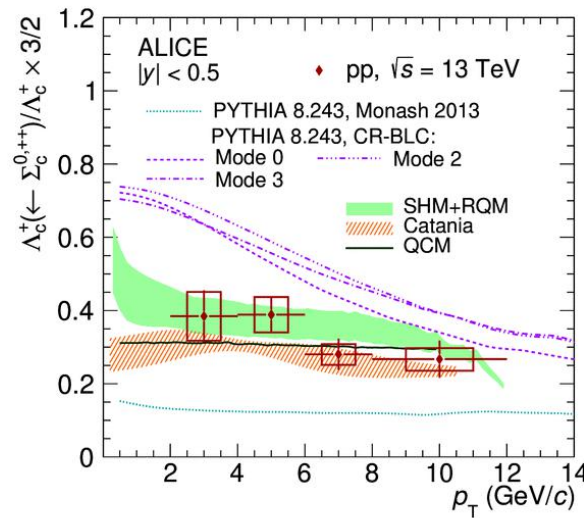
- A Λ_c^+/D^0 arányokat alulbecslik faktorizáción és ee ütközésekből mért partoneloszlás-függvényeken alapuló modellek => **A nehézkvark-fragmentáció nem univerzális!**
 - **PYTHIA 8 CR-BLC:** szín-újrarendezés színhúr-elágazásokkal
[JHEP 1508 \(2015\) 003](#)
 - **Catania:** fragmentáció charm és könnyű kvarkok koaleszcenciájával
[PLB 821 \(2021\) 136622](#)
 - **SH model + RQM:** stat.hadr. model gerjesztett charm-barion állapotokkal
[arXiv:1902.08889](#)
 - **QCM:** azonos sebességű kvarkok koaleszcenciája statisztikus súlyokkal
[EPJ C 78 no. 4, \(2018\) 344](#)

charm barionok fragmentációja - Ξ_c , Σ_c , Ω_c

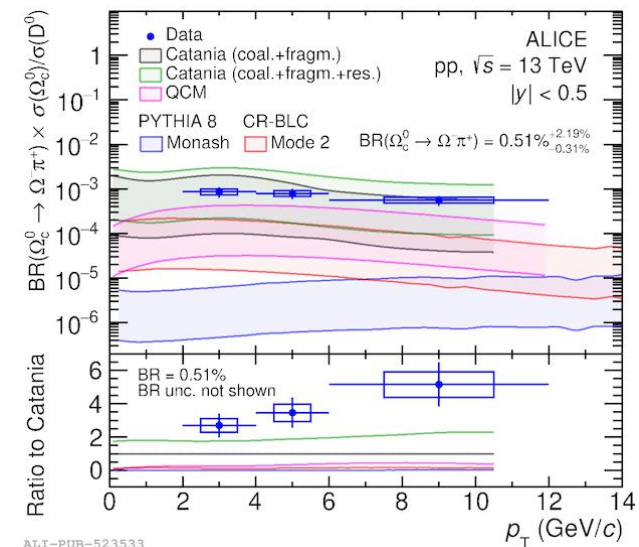
Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 012001



JHEP 10 (2021) 159

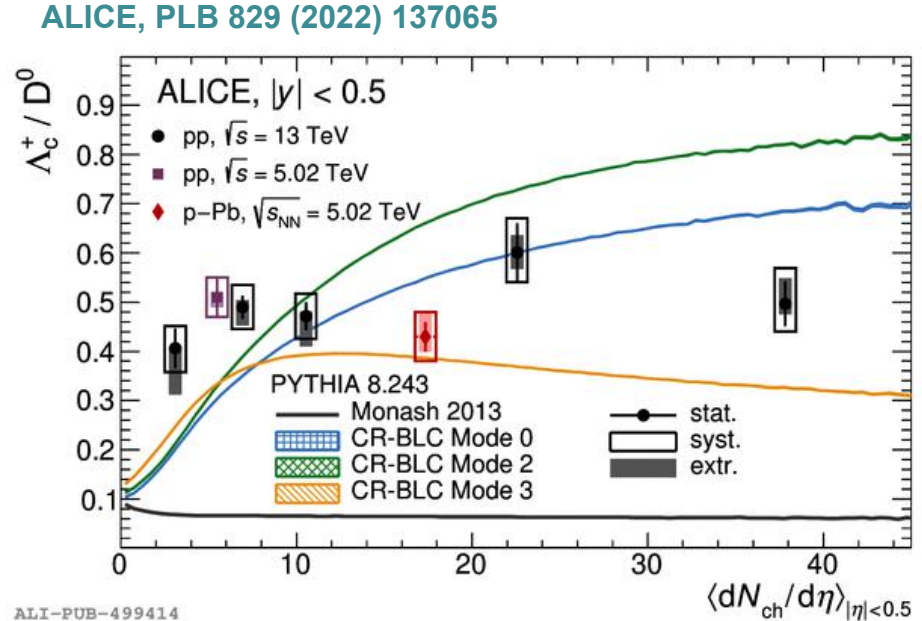
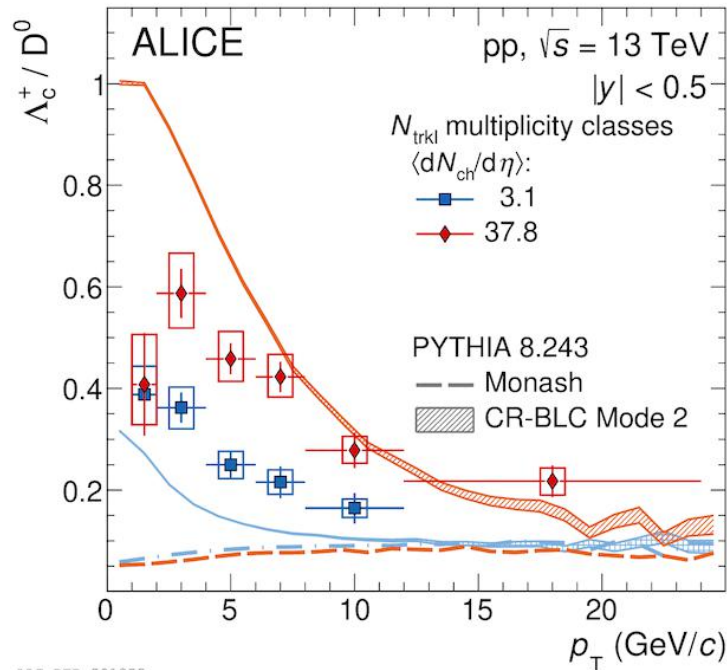


arXiv:2205.13993



- **A charm baryon -mezon arányok a hadronizáció érzékeny próbái**
- A nehezebb charm-barion állapotokat még kevésbé értjük
 - $\Xi_c^{0,+}$: modell jóslatai túl alacsonyak
 - $\Sigma_c^{0,++}$: csak izospinben különbözik Λ_c^+ -i-től, de fontos bomlási forrása annak
A PYTHIA8-CR BLC (színhúr-elágazások) felülbecsli
 - Ω_c^0 : a legjobb leírást a Catania (koaleszcencia) modell adja

Multiplicitásfüggő Λ_c^+ -keltés



- **Közepes impulzusnál a Λ_c^+/D^0 növekmény multiplicitással növekszik**

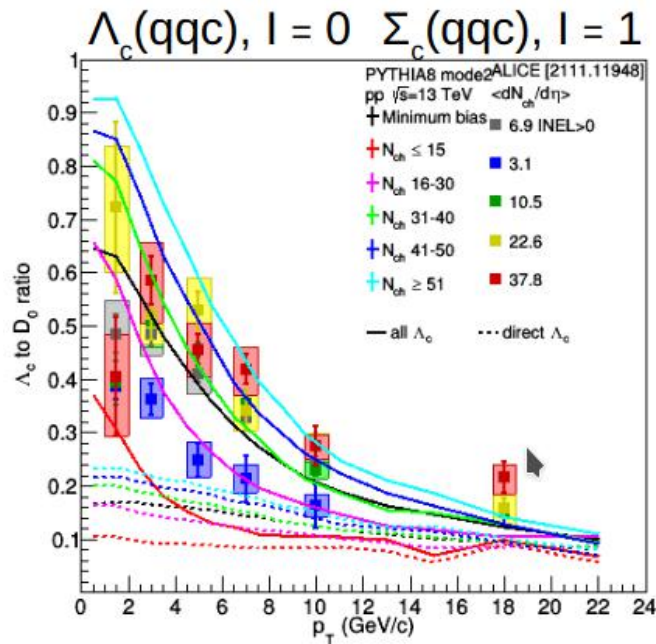
- 5.3σ for $1 < p_T < 12$ GeV/c

- **A p_T -integrált Λ_c^+/D^0 növekmény nem függ a multiplicitástól**

- (energiától és ütköző rendszertől függetlenül)

=> A növekmény pusztán a charm hadronok impulzus-átrendeződéséből fakad?

Eseményaktivitás-függés a CR-BLC modellben



Varga Z., ISMD 2022 előadás
<https://indi.to/7RvmV>

ALICE Λ_c^+ adat:
arXiv:2111.11948

N_{ch} : $|\eta| < 0.5$ $p_T > 150$ MeV
töltött végállapotú hadronok száma

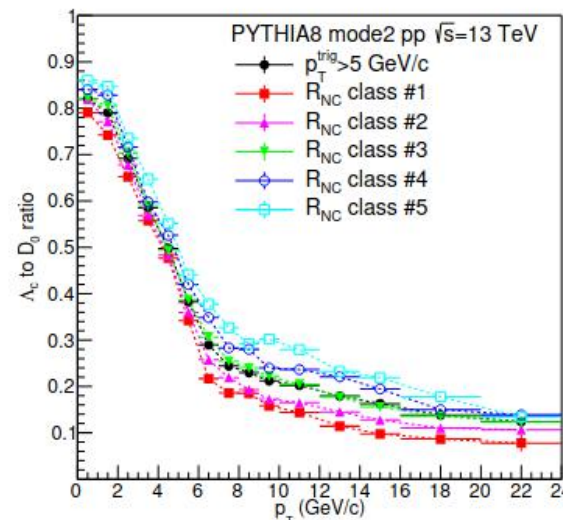
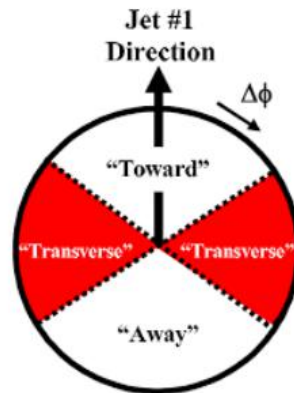
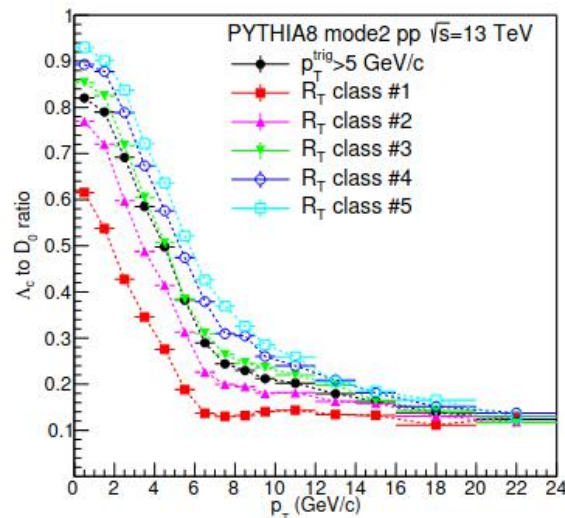
- **Közepes impulzusnál a Λ_c^+/D^0 növekmény multiplicitással növekszik**

- A PYTHIA színhúr-elágazásos modell kvalitatívan leírja a mérést
- Izospintól függően más növekmény figyelhető meg

Megállapítható-e a növekmény forrása célzott eseményjellemzők használatával?

Eseményaktivitás-függés a CR-BLC modellben

Z. Varga, R.V., J. Phys. G 49 (2022) 075005



▪ Háttéreseemény aktivitása szerint

$$R_T = N_{CH}^{\text{transverse}} / \langle N_{CH}^{\text{transverse}} \rangle$$

transzverz régió: $\pi/3 < |\Delta\phi| < 2\pi/3$

- Szignifikáns különbség
a $2 < p_T < 8$ GeV/c tartományban

▪ Jet-régió aktivitása szerint

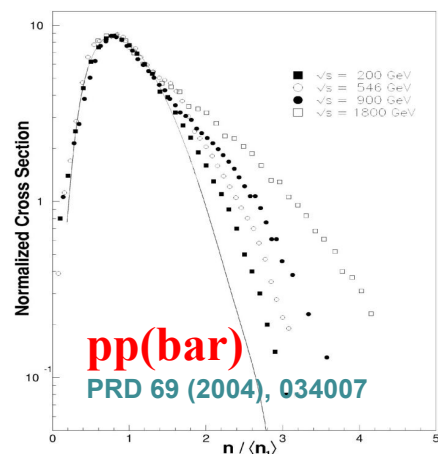
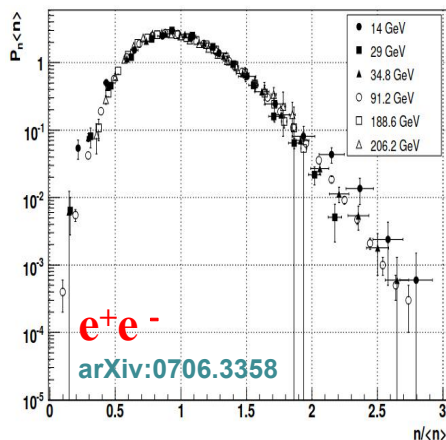
$$R_T = N_{CH}^{\text{transverse}} / \langle N_{CH}^{\text{transverse}} \rangle$$

jet-régió: $\sqrt{(\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2)} < 0.5$

- Nincs jelentős különbség a
 $2 < p_T < 8$ GeV/c tartományban

- **A színhúr-elágazás modellben a növekményt a sokparton-kölcsönhatás okozza**
- **Az LHC Run3 fázisában ideális lehetőség a modellek közti különbségtételre**

KNO-skálázás a jeten belül



- KNO skálázás: multiplicitáseloszlások $\sqrt{s}$ -sel skáláznak
Koba-Nielsen-Olesen, NPB 40, 317 (1972); Polyakov, Sov.Phys.JETP 32, 296 (1971)
- Azonban magas $\sqrt{s}$ -nél a skálázás nem érvényesül
 - A skálázás sértésének mechanizmusa nem teljesen ismert
 - Sokparton-kölcsönhatás? Walker PRD 69, 034007 (2004)
 - Átfedő színhúrok? Abramovsky et al., arXiv:0706.3358

- **A KNO-skálázás egyetlen jeten belül helyreáll !**

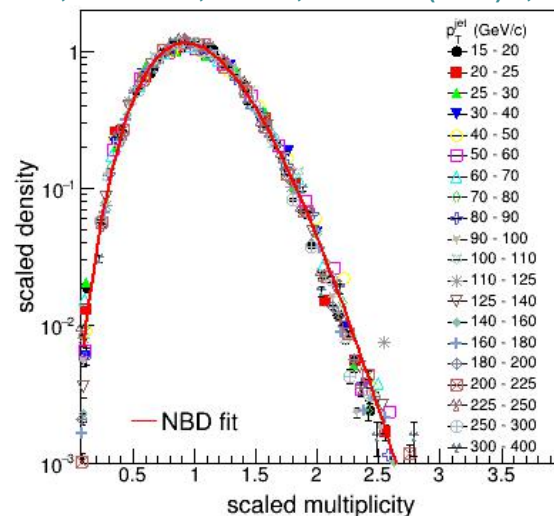
(energiaskála: jet- p_T)

=> sérülése jetek közti hatás eredménye

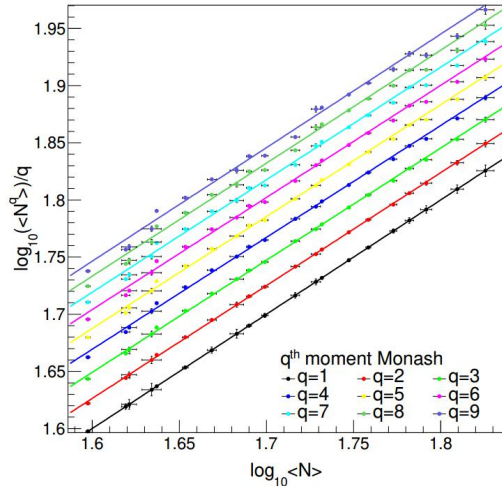
Negatív binomiális parametrizáció

$$P_N = \frac{\Gamma(Nk + a)}{\Gamma(a)\Gamma(Nk + 1)} p^{Nk} (1 - p)^a$$

V.R., Gémes A., B.G.G., PRD 103 (2021) 5, L051503



Nehézkvark-jetek: keletkezés, fragmentáció



- Az eloszlás q . momentuma

$$\langle N^q \rangle = \sum_{N=1}^{\infty} P_N N^q$$

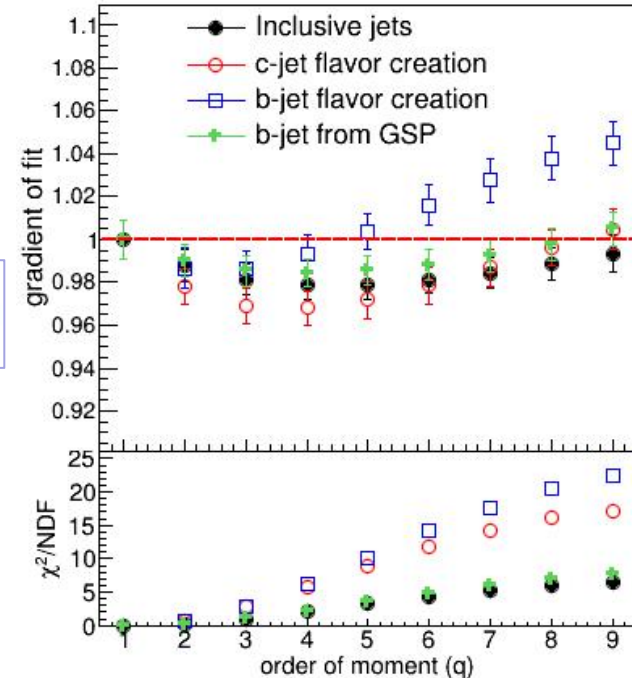
- Skálázás:

$$\langle N^q(p_T^{\text{jet}}) \rangle = \lambda^q(p_T^{\text{jet}}) \langle N^q(p_0) \rangle$$
$$\lambda(p_0) = 1$$

- A skálázás 5%-on belül teljesül különféle jetekre
- LO** ízkeltés: Az inklúzív jetektől a tömeg függvényében eltérés van
- NLO** gluonhasadás a könnyű (többnyire gluon-) jeteket követi

=> **A skálázás a kezdeti kemény folyamatból ered**

- Later development of jets has less influence, as multiplicity is not driven by fragmentation



Z. Varga, R.V., Symmetry 14 (2022) 1379

Összefoglalás

- **Kollektivitás kis rendszerekben**
 - Hidrodinamikai evolúció? Komplex vákuum-QCD hatások? Van-e QGP?
- **Vizsgálat eszköze: nehéz kvarkok**
- **Hozamok mérése**
 - pp: a pQCD modellek precíziós tesztje
 - p-Pb: módosulás a maganyagban. Lehetséges a forró csepp, de nem valószínű
- **Nehézkvark-jetek szerkezete.**
 - Tiltott kúp első kimutatása. Kiindulópont a vákuum-QCD hatások módosításának megértéséhez.
- **Korrelációk**
 - Ideális eszköz a partonszintű folyamatok elkülönítésére.
 - ALICE3: eseményjellemzők => kollektivitás eredete
- **Λ_c/D^0 növekmény:**
 - Univerzalitás sérülni látszik. Eseményjellemzők => vákuum-QCD modell választása
- **KNO-skálázás eredete: kezdeti kemény folyamatok**

Köszönöm a figyelmet!