



HUN
REN



Milyen messzire láthatunk a múltba charm hadronokkal nagyenergiás hadronütközésekben?

Gyulai L., Bíró G., Vértesi R., Barnaföldi G.G.

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Eötvös Loránd Tudományegyetem

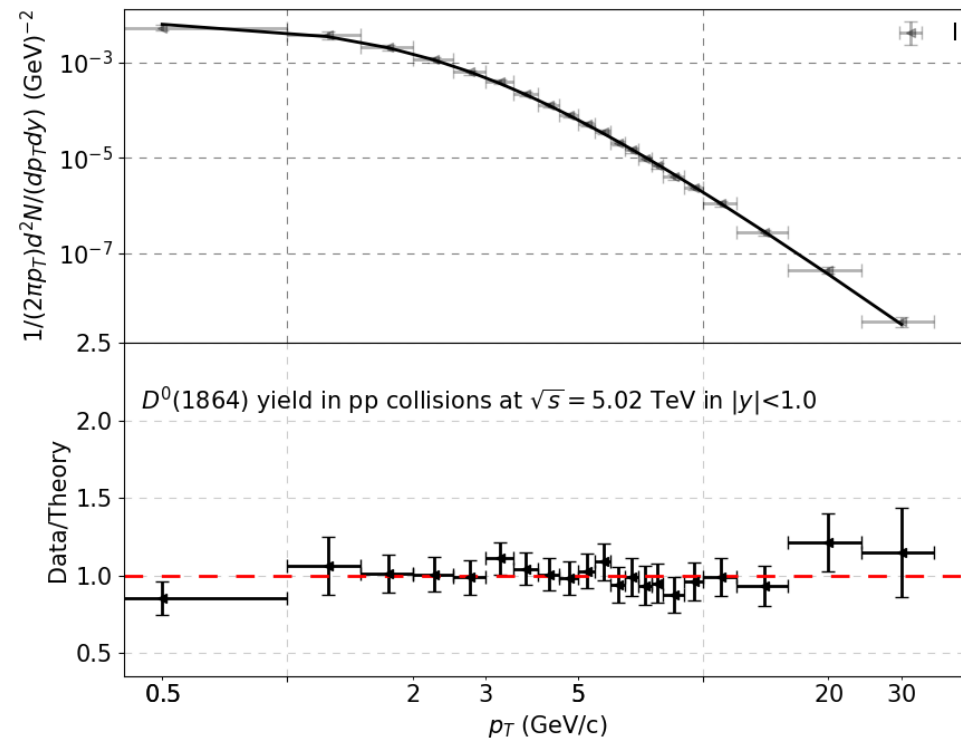
Magyar Magfizikus Találkozó 2024

2024.09.03

Nem-extendív statisztikus modell

Azonosított részecskék spektruma:

- Kis- p_T rész:
 - lágysz részecske keletkezés
 - exponenciális (Boltzmann-Gibbs) eloszlás
 - termális egyensúlyból eredő
- Nagy- p_T rész:
 - Keletkezés parton-záporból
 - Hatvány-eloszlás jellegű
 - perturbatív QCD által leírható folyamatok



Tsallis-Pareto eloszlás összekapcsolja ezt a két részt egy keretrendszerben:

$$\left. \frac{d^2 N}{2\pi p_T dp_T dy} \right|_{y \approx 0} = A m_T \left[1 + \frac{q-1}{T} (m_T - m) \right]^{-\frac{q}{q-1}}$$

Motiváció

A könnyű hadronokat (π , K , p , Λ , Φ , Σ , Ξ , Ω) már korábban megvizsgáltuk a nem-extenzív statisztikus leírásban különböző ütközési rendszerek és multiplicitások mellett [1]

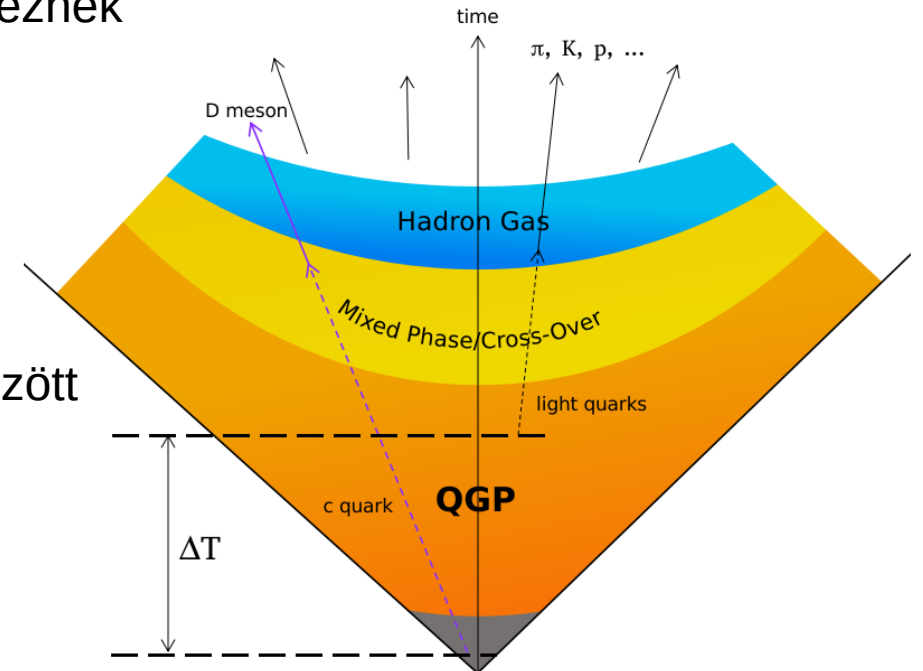
[1] J.Phys.G **47** (2020) 10, 105002

Az újabb kutatásunkban [2] kibővítettük a vizsgált részecskék listáját a c-kvarkot tartalmazó D mezonokkal, amelyek nagyrészt az ütközések korai fázisaiban keletkeznek

[2] J.Phys.G **51** (2024) 8, 085103

A céljaink:

- Ellenőrizni, hogy a D-mezonok Tsallis-statisztikát követnek-e
- Megtalálni hasonlóságokat a könnyű- és nehéz-kvark hadronok között
- Ki tudjuk-e mutatni a különböző keletkezési időskálákat



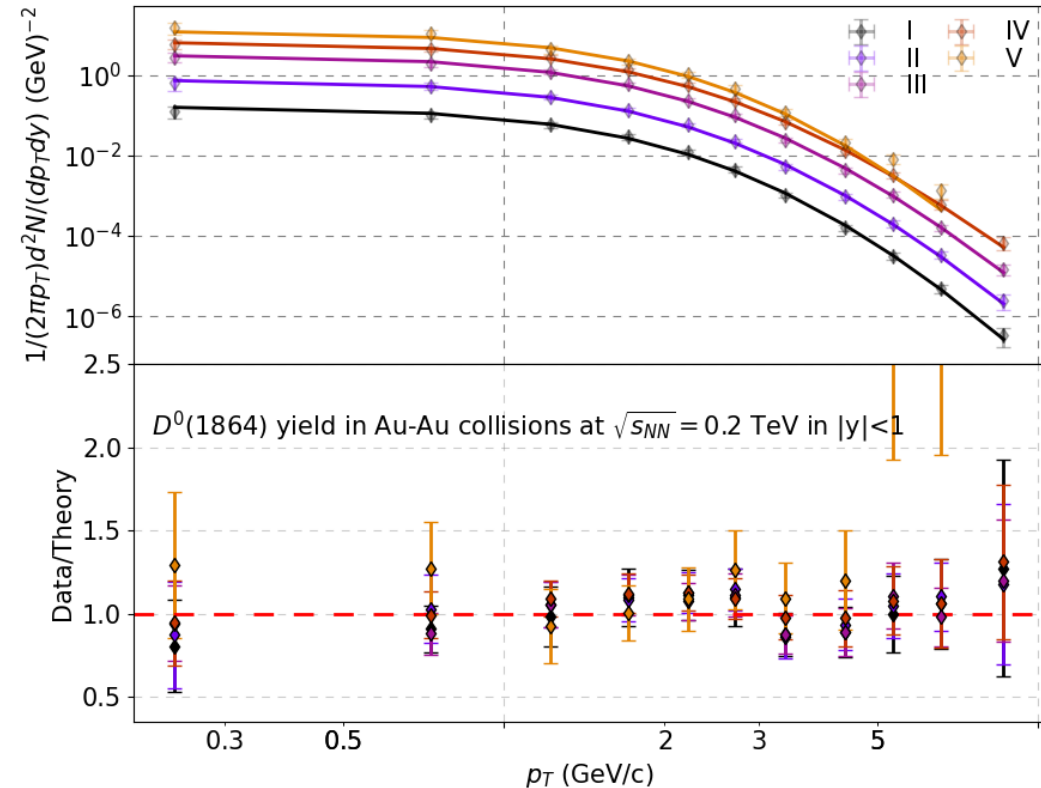
Vizsgált adatok

Multiplicitás-inkluzív (minimum bias) spektrumok:

- ALICE, pp, 5.02 TeV - D^0 , D^+ , D^{*+}
- ALICE, pp, 7 TeV - D^0 , D^+ , D^{*+}
- ALICE, pPb, 5.02 TeV - D^0 , D^+ , D^{*+}

Centralitás (multiplicitás) függő:

- ALICE, PbPb, 2.76 TeV - D^0
centralitások: 0-20%, 40-80%
- STAR, AuAu, 200 GeV - D^0
centralitások: 0-10%, 10-20%, 20-40%, 40-60%, 60%-80%



[J.Phys.G 47 (2020) 10, 105002] könnyű-hadron spektrumaival hasonlítjuk össze

Termodinamikai konzisztencia

A vizsgált modellünk teljesíti a termodinamika első törvényét:

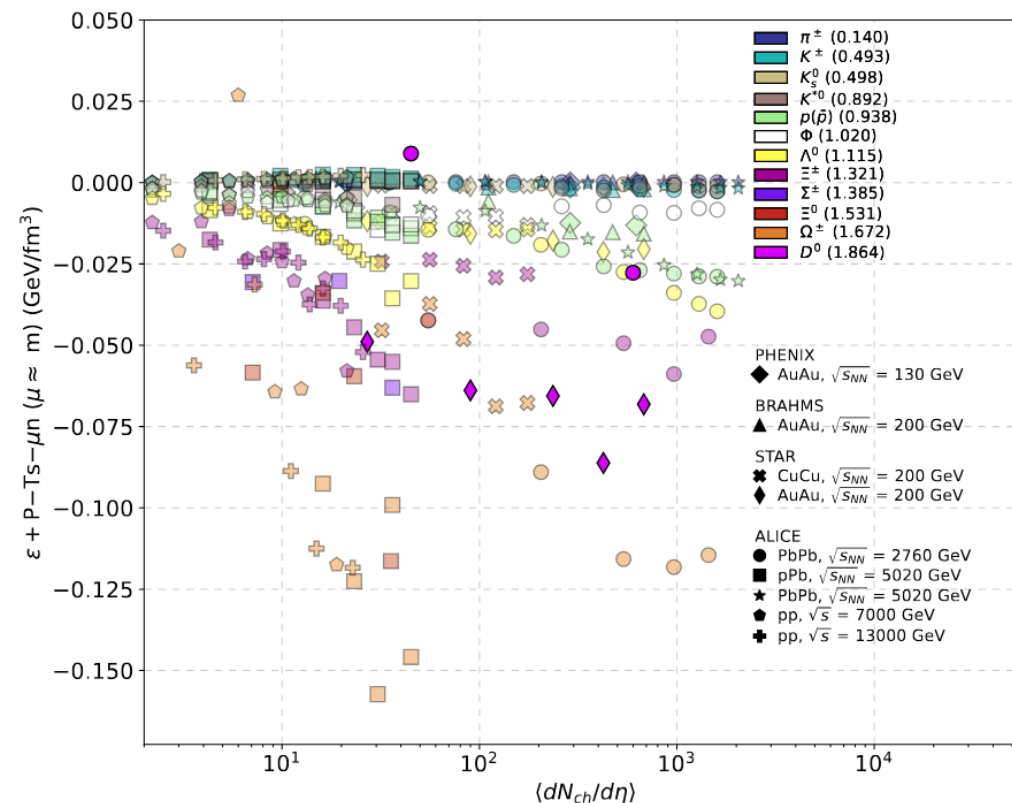
$$\epsilon + P - Ts - \mu n = 0$$

A termodinamikai változókat ki lehet fejezni a Tsallis-Pareto eloszlás segítségével

Minden vizsgált pontnál ellenőrizhető a termodinamika első törvényének teljesülése

A D-mezonok esetén az eltérés 8% alatt van

Tsallis-Pareto keretrendszer minden hadron esetében jelentős javulás mutat a Boltzmann-Gibbs statisztikával szemben



Tsallis-hőmérő

Tapasztalat: a töltött-hadron multiplicitás a Tsallis elméletben leírható egy negatív binomiális eloszlással

A jelenlegi adatok ezt alátámasztják

A keletkezett részcskék multiplicitását "n"-nel jelölve:

$$T = \frac{E}{\langle n \rangle},$$
$$q = 1 - \frac{1}{\langle n \rangle} + \frac{\Delta n^2}{\langle n \rangle^2}$$

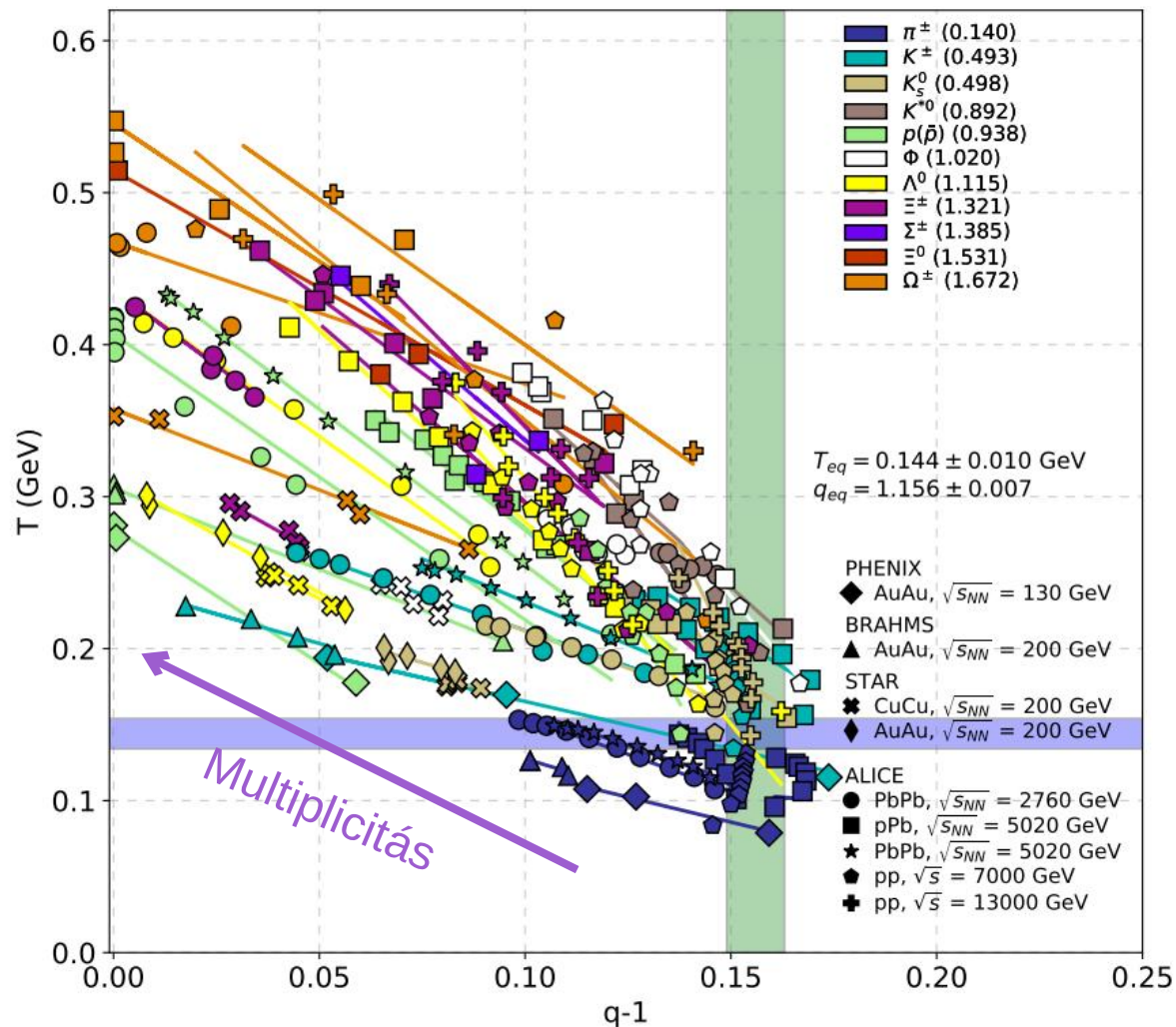
T és q paraméterek nem függetlenek:

$$T = E (\delta^2 - (q - 1)) \quad \frac{\Delta n^2}{\langle n \rangle^2} := \delta^2$$

Tapasztalatok a könnyű hadronokról

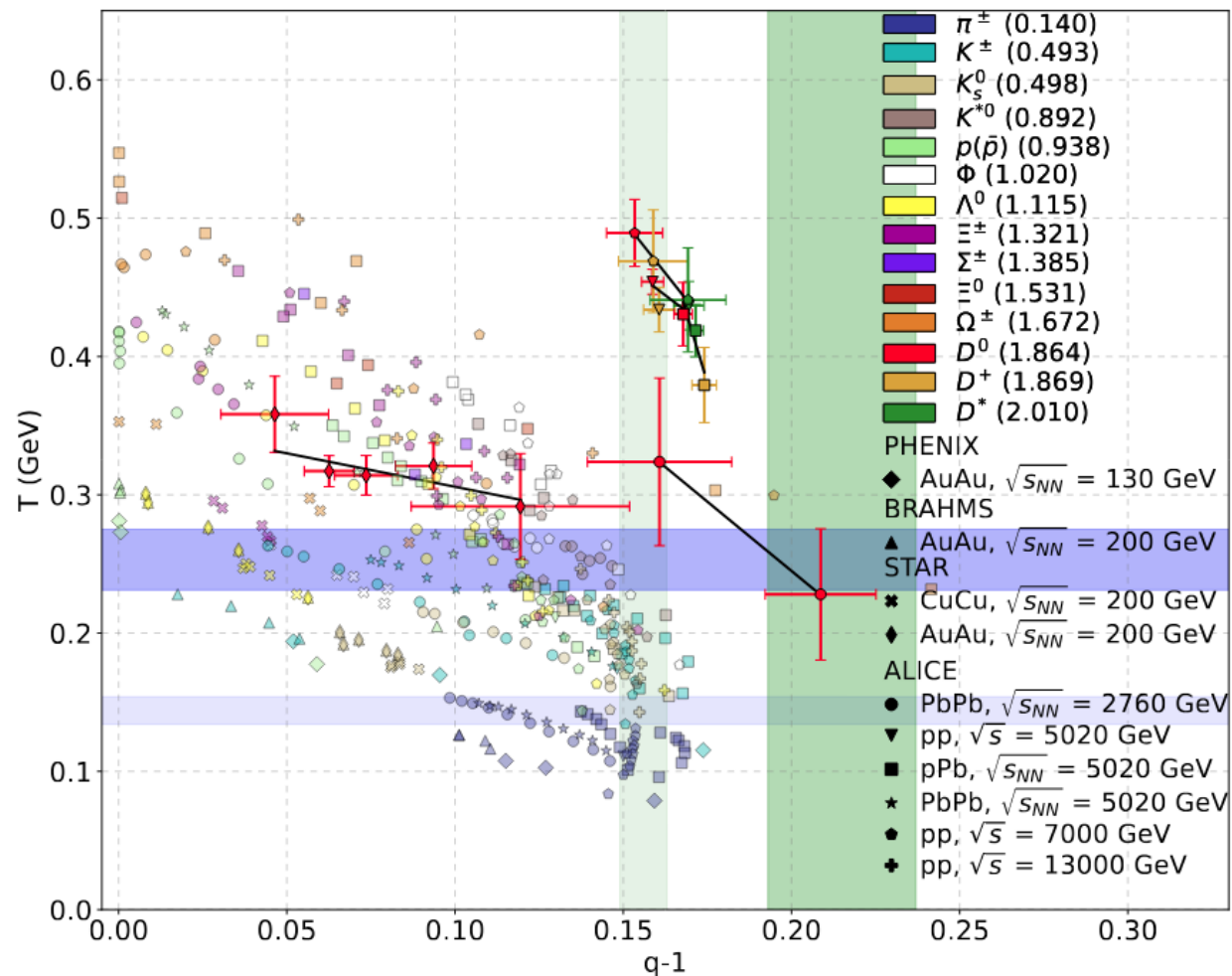
- Erős függés az esemény multiplicitásától
- Tömeg szerinti rendeződés, erősebb a nehezebb részecskék esetében
- A multiplicitás csökkenésével az összes pont a $T_{eq} \approx 0.14$ GeV és $q_{eq} \approx 1.15$ felé tart

$$T = E (\delta^2 - (q - 1))$$



D mezonok a Tsallis-elméletben

- Erős függés az esemény multiplicitásától
- A tömeg szerinti rendeződés még erősebb a könnyű hadronokhoz képest
- Az ütközési energiától való függés nyilvánvalóbb, a könnyű hadronokkal szemben
- Itt is tapasztalható a csoportosulás, viszont a “közös pont” el van tolva a könnyű részcskékhez képest



$$T = E (\delta^2 - (q - 1))$$

Tsallis-hőmérő

- A D-mezon rendszer energiája (E) nagyobb
- Fluktuációk (δ^2) is erősebbek

Megillesztve az E- $E\delta^2$ pontokat, meghatározhatóak a “közös pont” értékek: T_{eq} (tengelymetszet) és q_{eq} (meredekség)

$$T = E (\delta^2 - (q - 1)) \quad \frac{\Delta n^2}{\langle n \rangle^2} := \delta^2$$

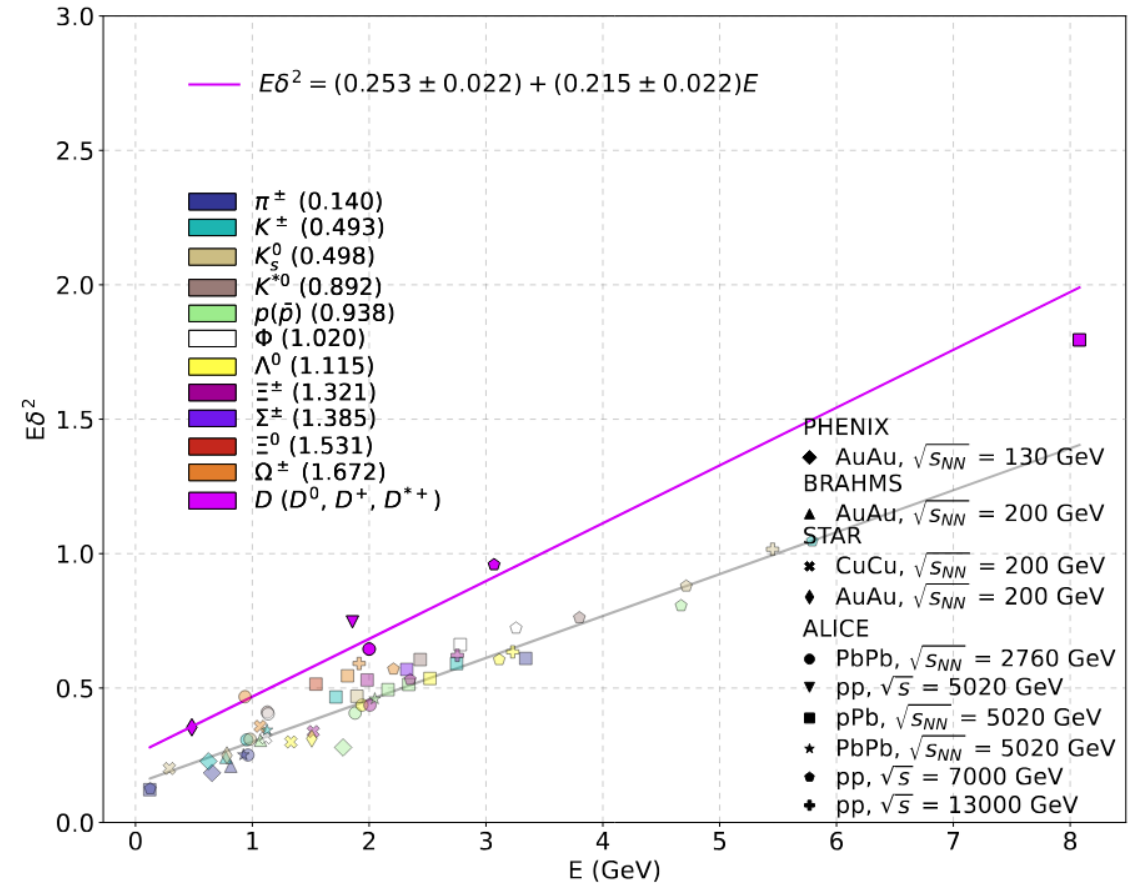
Könnyű részecskék: $T_{eq} \approx 0.14$ GeV és $q_{eq} \approx 1.15$

Nehéz részecskék: $T_{eq} \approx 0.25$ GeV és $q_{eq} \approx 1.21$

Nehéz hadronok esetén a spektrumok nagyobb hőmérsékletet és erősebb nem-extenzivitást tükröznek

$$\Delta T_{eq} \approx 0.11 \text{ GeV}$$

$$\Delta q_{eq} \approx 0.06$$



Könnyű- és nehéz-kvark hadronok keletkezésének időskálája

A Bjorken-modell lehetőséget ad az időskálák és a hőmérséklet összekötésére:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{T_0}{T} \right)^3$$

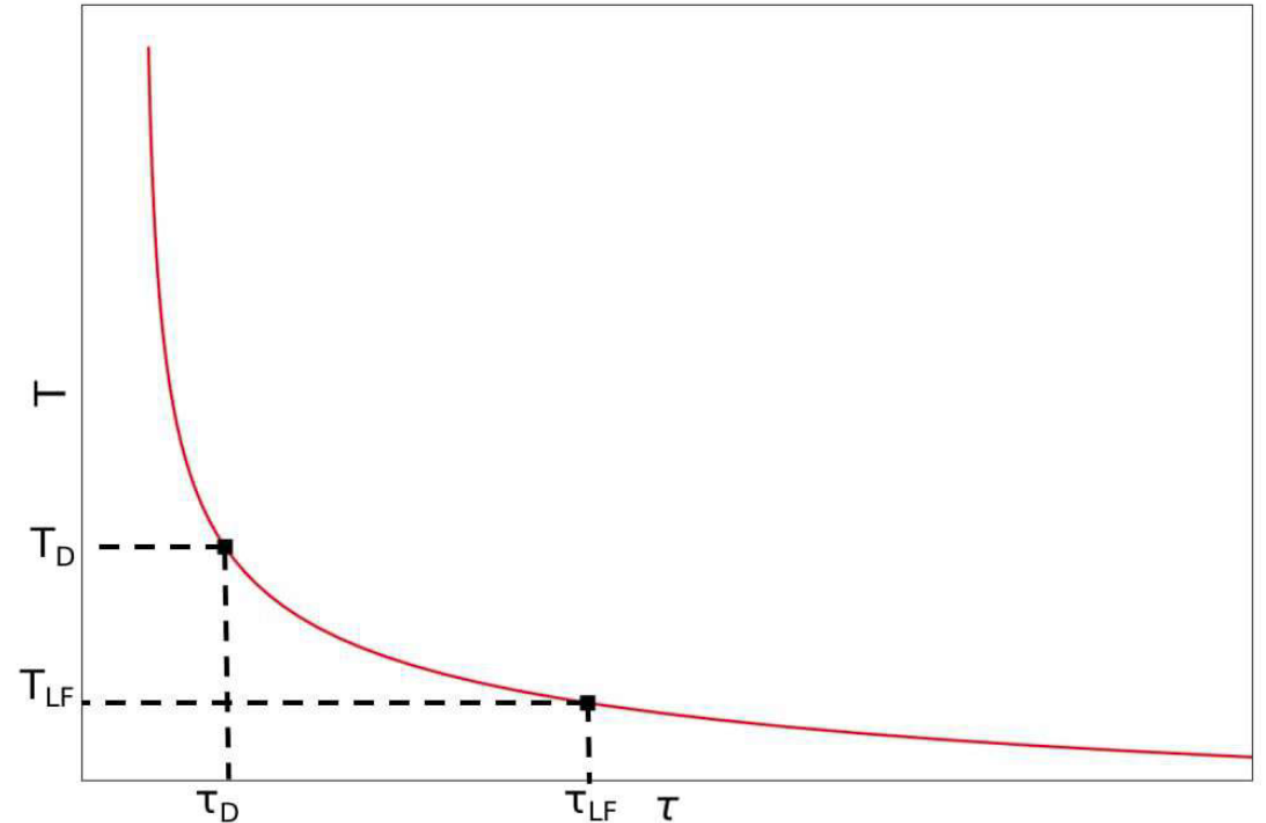
Ez a modell független a termodinamikai leírástól

Ezzel kifejezhetjük a D-mezonok és a könnyű hadronok keletkezéséhez tartozó időskálák közötti függést:

$$\tau_D = \tau_{LF} \left(\frac{T_{LF}}{T_D} \right)^3$$

A T_{eq} értékeket behelyettesítve:

$$\tau_D = (0.18 \pm 0.06) \tau_{LF}$$



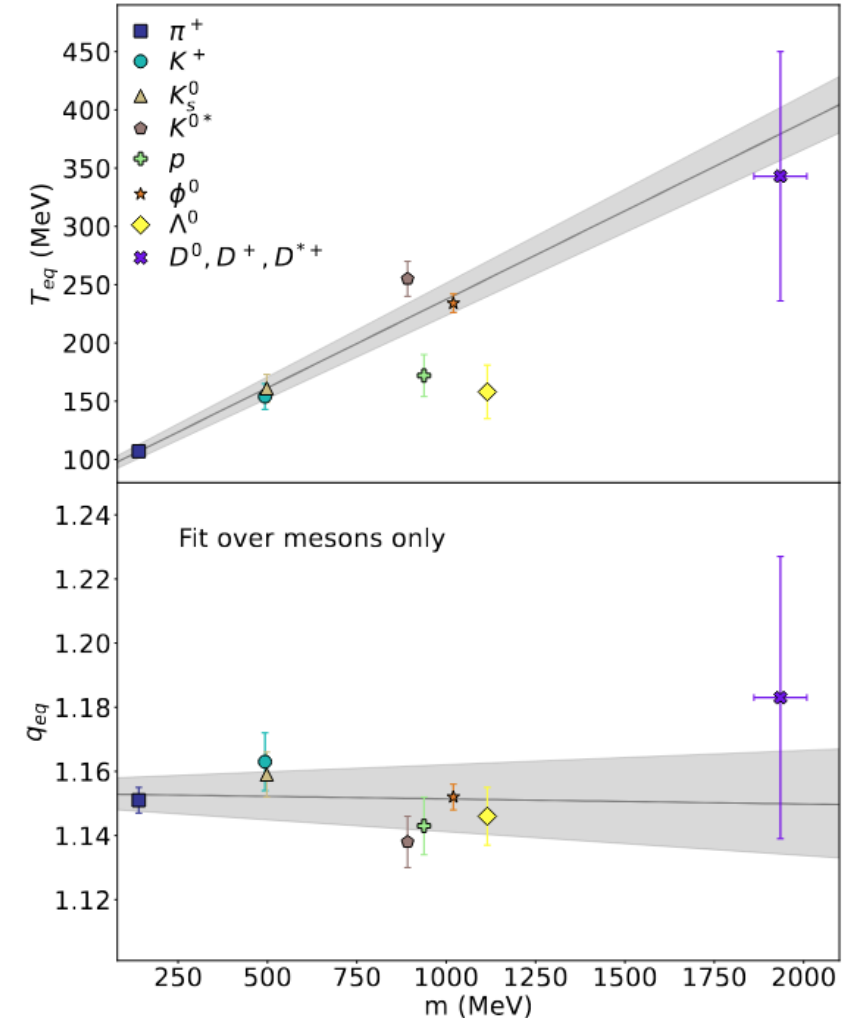
Hadronok fajtánkénti vizsgálata (új eredmények, csak LHC adatok)

IJMPA folyóirathoz beküldve

A mezonok “közös pont” hőmérséklete egyenletesen növekszik a mezonok tömegével

A barionok “közös pont” hőmérséklete alacsonyabb a hasonló tömegű mezonokhoz képest

A “közös pont”-hoz tartozó nem-extenzivitás paramétere nem mutat szignifikáns tömegfüggést



Hadronok fajtánkénti vizsgálata (új eredmények, csak LHC adatok)

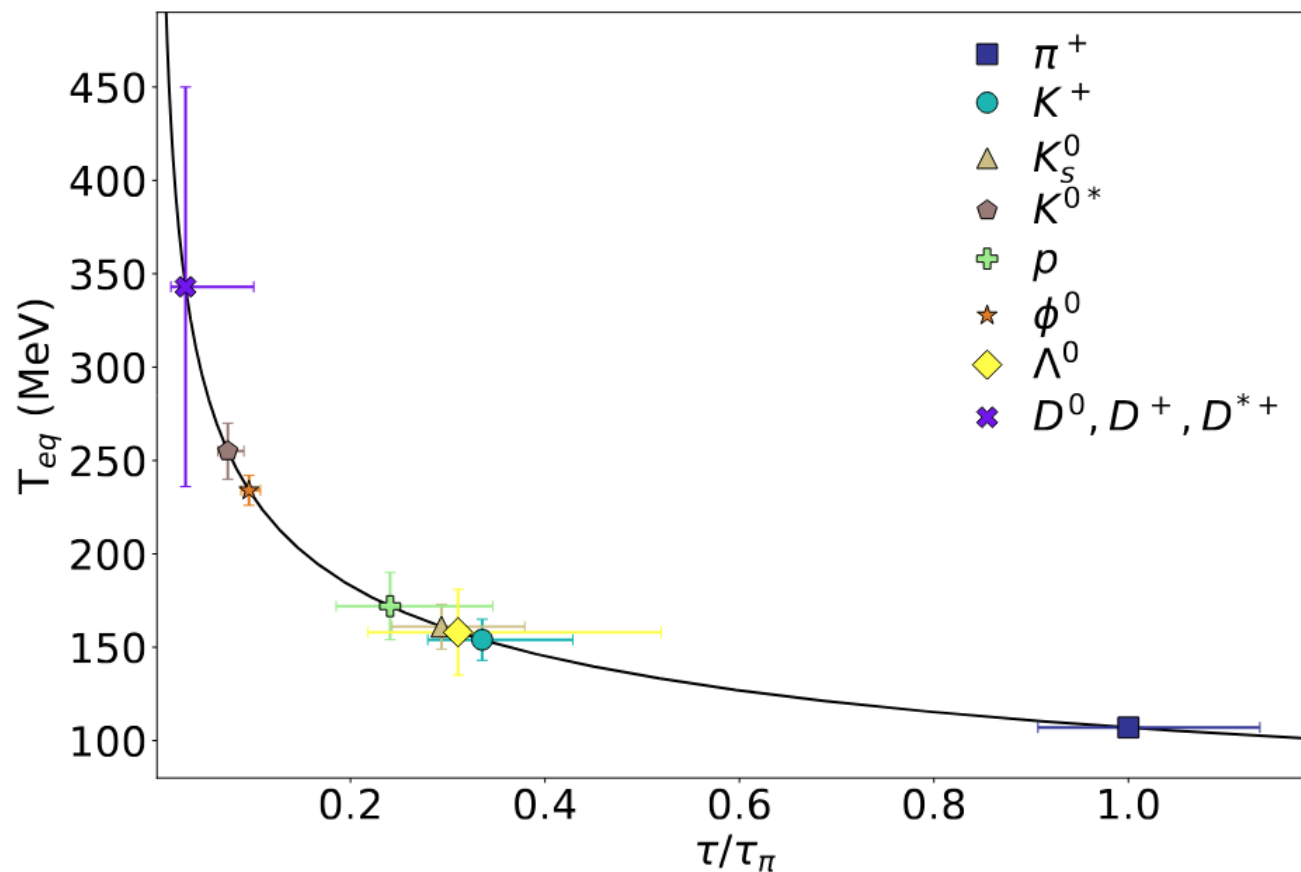
IJMPA folyóirathoz beküldve

A pionok spektruma a többi hadronokhoz képest sokkal később formálódik

Mezonok tömeg szerint rendeződnek (könnyebb mezonok spektrumai később alakulnak ki)

Nehezebb barionok a hasonló tömegű mezonokhoz képest későbbi időpontokban formálódnak

A D-mezon spektrum kialakulási ideje ~30-szor rövidebb a pionoknál



Összefoglaló

- Kiterjesztettük a nem-extenzív statisztikus modellt nehéz kvarkot tartalmazó D-mezonokra
- Megvizsgáltuk az ALICE és a STAR kísérletben megmért D-mezon spektrumokat: pp, p-A, A-A $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV-től 7 TeV-ig, multiplicitás-inkluzív, illetve multiplicitás-függő adatokból
- A D-mezon spektruma a teljes p_T -tartományban jól leírható a Tsallis-Pareto eloszlással
- Sok hasonlóság a könnyű és a nehéz-kvark hadronok viselkedése között:
 - a multiplicitás- és az ütközési rendszer-függő effektusok
 - tömeg-rendeződés
 - pontok csoportosulása alacsony multiplicitás felé
- A D-mezon spektruma korábban alakul ki a könnyű hadronokhoz képest, $\tau_D = (0.18 \pm 0.06)\tau_{LF}$
- A mezonspektrumok kialakulásának ideje tömegfüggő

Köszönöm a figyelmet!