A p+p és a nehézion ütközések (ön)hasonló leírása

KASZA GÁBOR

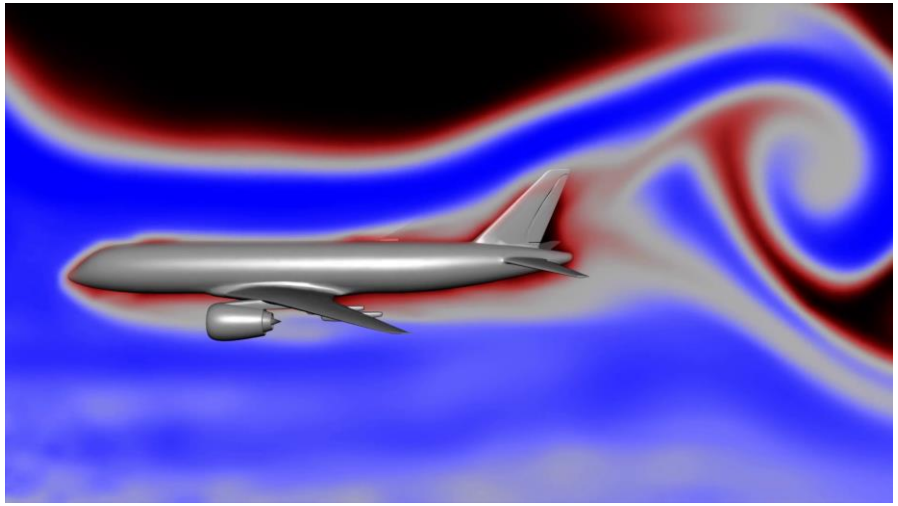
SIMONYI NAP, BUDAPEST

2019. 10. 18.

NKIFH No. FK-123842 & FK-123959
EFOP 3.6.1-16-2016-00001

Mire jó a hidrodinamika?

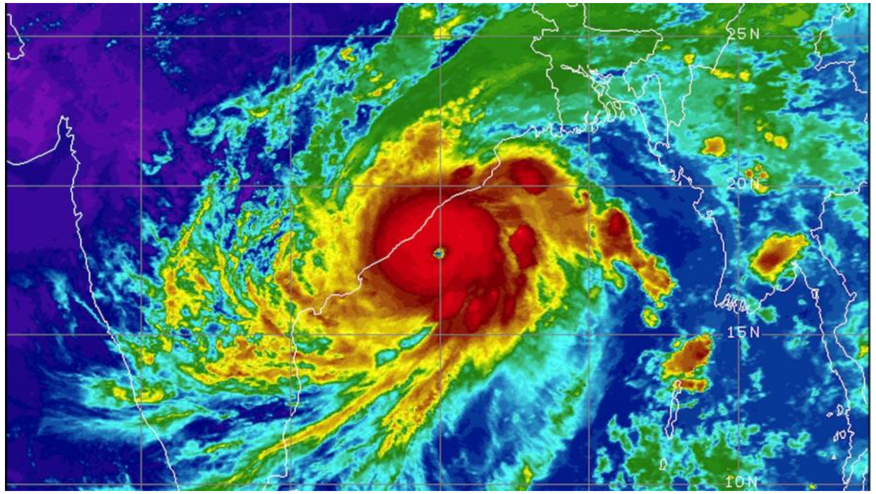
- Folyadékok mozgása, áramlása
- Módszerei gázok áramlására is alkalmazhatók, ha az áramlás sebessége < c_h
- Példák:
  - *repülőgépeken ébredő erők*
  - *időjárási mintázat előrejelzése*
  - *csillagközi térben lévő ködök vizsgálata*
  - *csillagok belső szerkezetének leírása*
  - *nukleáris fegyver robbanásának modellezése*
  - *Quark Gluon Plazma (QGP) leírása*



- Sok aspektusban különböző rendszerek: a hidro mégis jól működik minden esetben
- Miért ennyire hatásos a hidrodinamika?

Mire jó a hidrodinamika?

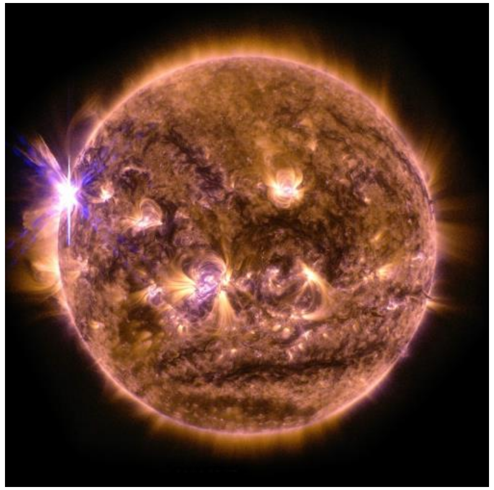
- Folyadékok mozgása, áramlása
- Módszerei gázok áramlására is alkalmazhatók, ha az áramlás sebessége < c_h
- Példák:
  - *repülőgépeken ébredő erők*
  - *időjárási mintázat előrejelzése*
  - *csillagközi térben lévő ködök vizsgálata*
  - *csillagok belső szerkezetének leírása*
  - *nukleáris fegyver robbanásának modellezése*
  - *Quark Gluon Plazma (QGP) leírása*



- Sok aspektusban különböző rendszerek: a hidro mégis jól működik minden esetben
- Miért ennyire hatásos a hidrodinamika?

Mire jó a hidrodinamika?

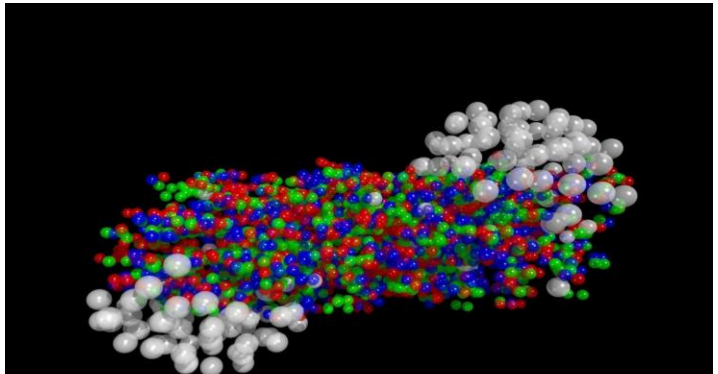
- Folyadékok mozgása, áramlása
- Módszerei gázok áramlására is alkalmazhatók, ha az áramlás sebessége < c_h
- Példák:
  - *repülőgépeken ébredő erők*
  - *időjárási mintázat előrejelzése*
  - *csillagközi térben lévő ködök vizsgálata*
  - *csillagok belső szerkezetének leírása*
  - *nukleáris fegyver robbanásának modellezése*
  - *Quark Gluon Plazma (QGP) leírása*



- Sok aspektusban különböző rendszerek: a hidro mégis jól működik minden esetben
- Miért ennyire hatásos a hidrodinamika?

Mire jó a hidrodinamika?

- Folyadékok mozgása, áramlása
- Módszerei gázok áramlására is alkalmazhatók, ha az áramlás sebessége < c_h
- Példák:
  - *repülőgépeken ébredő erők*
  - *időjárási mintázat előrejelzése*
  - *csillagközi térben lévő ködök vizsgálata*
  - *csillagok belső szerkezetének leírása*
  - *nukleáris fegyver robbanásának modellezése*
  - *Quark Gluon Plazma (QGP) leírása*



Nehézionok ütközése: átfedési tartományban létrejön a QGP

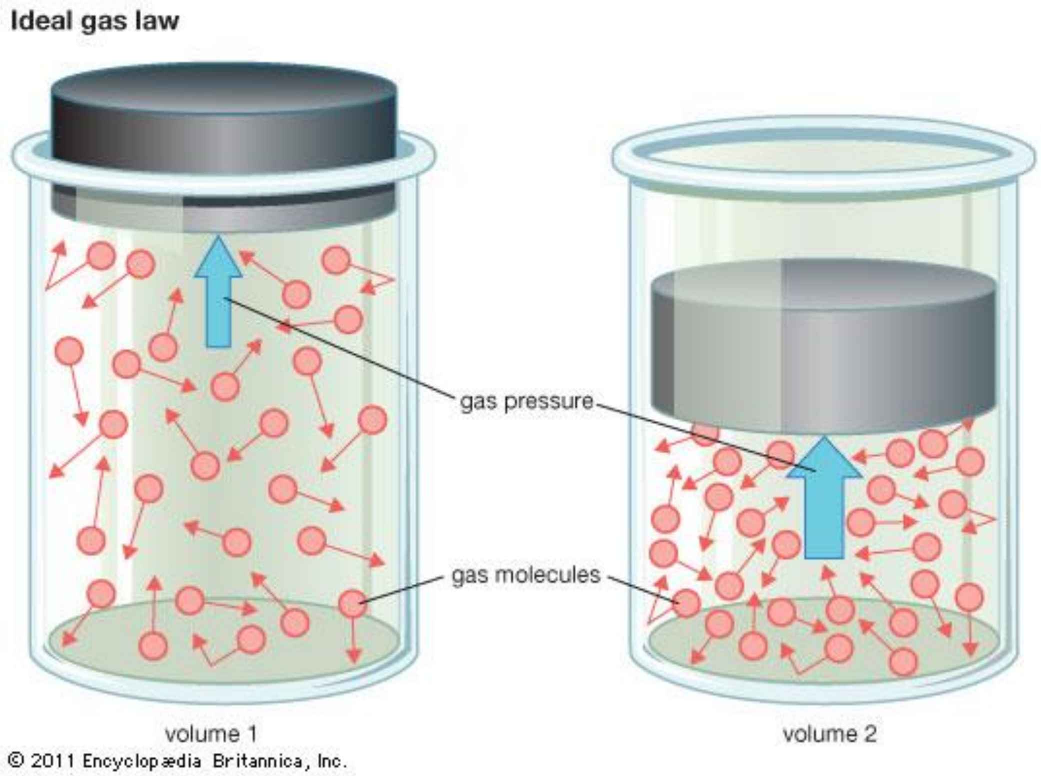
- Sok aspektusban különböző rendszerek: a hidro mégis jól működik minden esetben
- Miért ennyire hatásos a hidrodinamika?

Skálázó viselkedés

- Próbálkozzunk a megértéssel az ideális gáz példáján keresztül
- Ideális gáz állapotegyenlete:

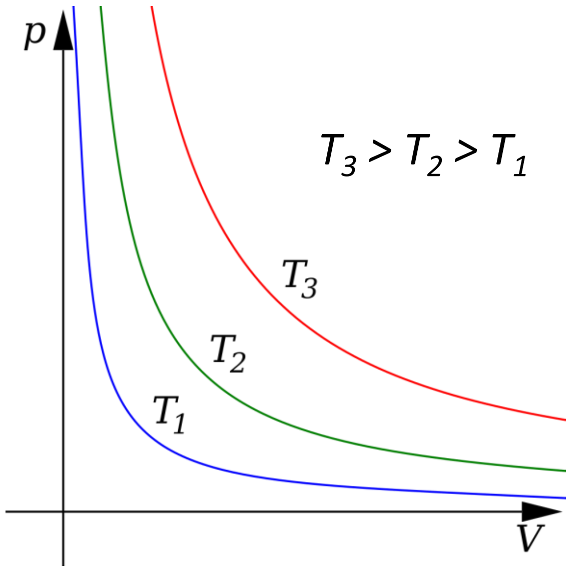
$$pV = Nk_BT$$

- p – nyomás
- V – térfogat
- T – hőmérséklet
- N – részecskeszám
- k_B – Boltzmann állandó



Skálázó viselkedés (izoterm példa)

- A konstans érték megkötést ad a lehetséges állapotokra
- Pl. izoterm esetben *p* és *V* nem vehet fel tetszőleges értéket: $pV = Nk_BT = konstans$
- Ám a hőmérséklet csak a szorzatuk értékét, nem magát a *p*-t és a *V*-t határozza meg
- Ha tudjuk a *p* értékét, az kölcsönösen meghatározza a *V* értékét (vagy fordítva)
- Tehát állandó hőmérsékleten elég tudni vagy a nyomást, vagy a térfogatot
- Ekkor egyértelműen meghatározható a rendszer állapota
- Ilyenkor azt mondhatjuk, hogy *a rendszer a hőmérséklettel skálázódik*

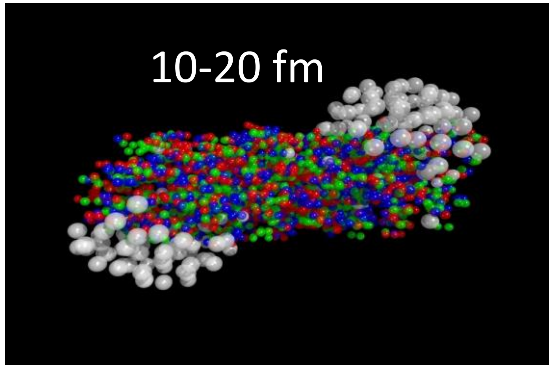


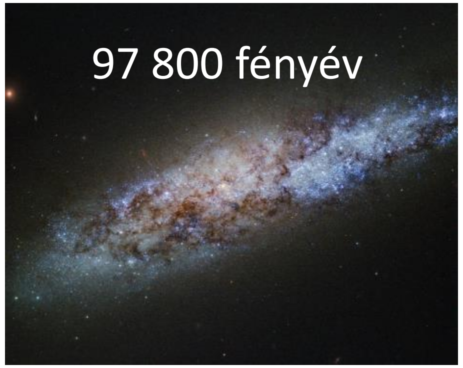
Skálázó viselkedés

- Mit mondhatunk akkor, ha *V*, *T* és *p* közül egyik sem állandó?

$$\frac{pV}{T} = Nk_B = konstans$$

- Tehát *V*, *T* és *p* ezen kombinációja egy ideális gáz esetében mindig konstans
- Az ideális gázok e törvénye bármilyen *N*-re igaz, amíg a rendszer statisztikusnak tekinthető!
- Ez a viselkedés a hidrónak általános jellemzője: *bármekkora rendszerre alkalmazható*
- „*A hidrodinamikának nincs belső skálája*"





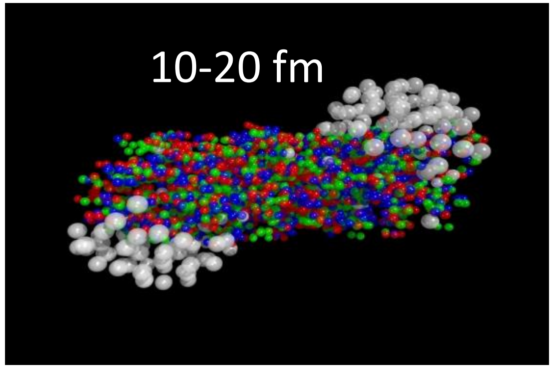
Skálázó viselkedés

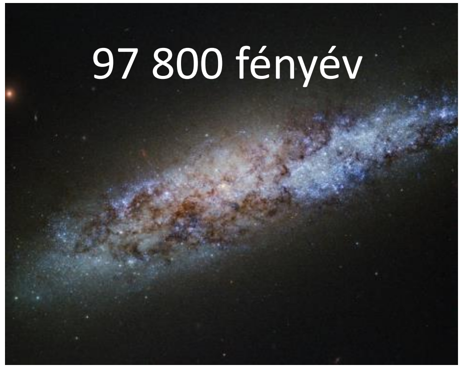
- Mit mondhatunk akkor, ha *V*, *T* és *p* közül egyik sem állandó?

$$\frac{pV}{T} = Nk_B = konstans$$

- Tehát *V*, *T* és *p* ezen kombinációja egy ideális gáz esetében mindig konstans
- Az ideális gázok e törvénye bármilyen *N*-re igaz, amíg a rendszer statisztikusnak tekinthető!
- Ez a viselkedés a hidrónak általános jellemzője: *bármekkora rendszerre alkalmazható*
- „*A hidrodinamikának nincs belső skálája*”

Nehézion fizikai analógiával is szemléltethető!





Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

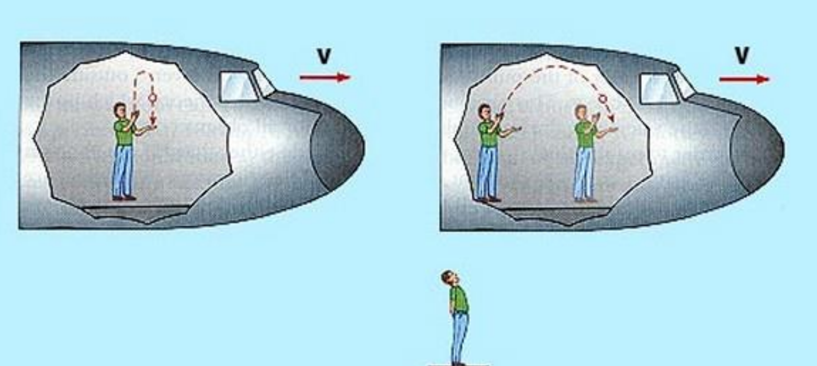
- Szükséges fogalmak: rapiditás, pszeudorapiditás, eloszlás

Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

- Szükséges fogalmak: ***rapiditás***, pszeudorapiditás, eloszlás
- Röviden: hiperbolikus koordináta-rendszer szögváltozója
- A rapiditás a sebességhez kapcsolódik:

$$y = \frac{1}{2}\log\left(\frac{c+v}{c-v}\right)$$

Ha v nagy → y is nagy
Ha v≈0 → y≈0



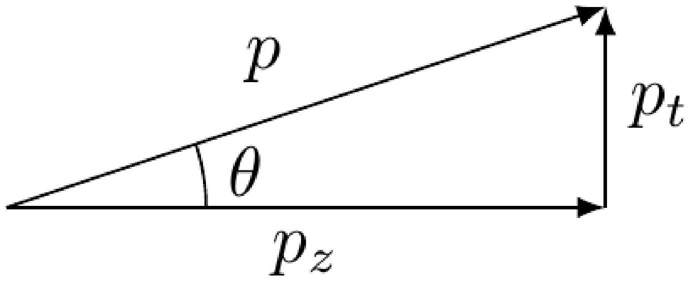
(ha *v* kicsi, az sebesség összeadás működik)

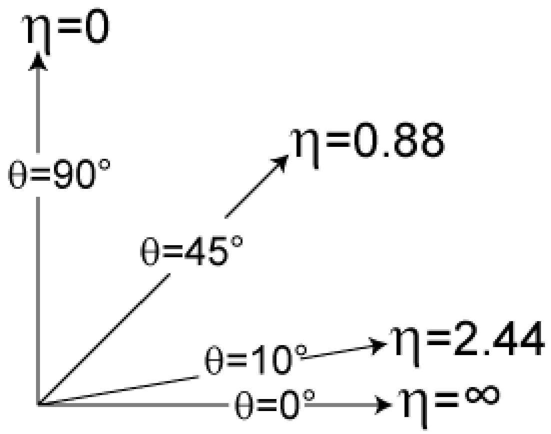
- Miért hasznosabb a rapiditás, mint a sebesség?
- Nagy sebességek esetén mozgó koordináta-rendszerek sebességének összeadása nem triviális

Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

- Szükséges fogalmak: rapiditás, *pszeudorapiditás*, eloszlás
- θ: a részecske impulzusa, és annak nyaláb irányú komponense által bezárt szög

$$\eta = -\log\left(\tan\left[\theta/2\right]\right)$$



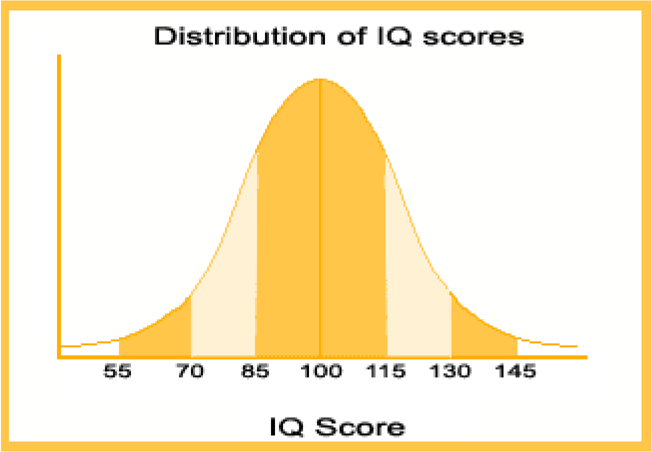


- Tehát a pszeudorapiditás a részecske haladásának az irányát jellemzi

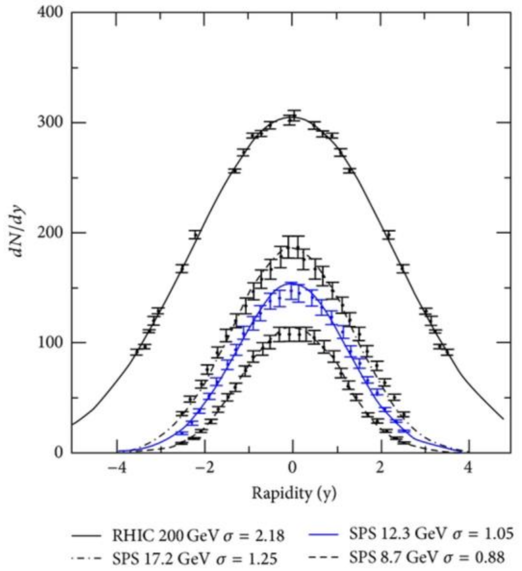
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

- Szükséges fogalmak: rapiditás, pszeudorapiditás, *eloszlás*
- Az eloszlás görbéjéből kiolvasható valamilyen „tulajdonság” gyakorisága

Az IQ eloszlása: a legtöbb ember 100 körüli IQ-val rendelkezik



Rapiditás eloszlás: a legtöbb részecske 0 körüli rapiditással keletkezik



Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

- Kiszámoltuk a részecskék rapiditás eloszlását az új, ~önhasonló hidro megoldásunkból:

$$\frac{dN}{dy} \approx \left.\frac{dN}{dy}\right|_{y=0} \cosh^{-\frac{1}{2}\alpha(\kappa,\lambda)-1}\left(\frac{y}{\alpha(1,\lambda)}\right)\exp\left(-\frac{m}{T_{\mathrm{eff}}}\left[\cosh^{\alpha(\kappa,\lambda)}\left(\frac{y}{\alpha(1,\lambda)}\right)-1\right]\right)$$

Fizikai paraméterek:
λ: gyorsulás mértéke
κ: hangsebességet jellemzi
T_{eff}: hadronok hőmérséklete
m: részecskék tömege

- Ha $|y| << 2+(\lambda-1)^{-1}$, közelítőleg Gauss alakra vezet:

$$\frac{dN}{dy} \approx \frac{\langle N\rangle}{(2\pi\Delta^2 y)^{1/2}}\exp\left(-\frac{y^2}{2\Delta^2 y}\right) \longrightarrow \frac{1}{\Delta^2 y} = (\lambda-1)^2\left[1+\left(1-\frac{1}{\kappa}\right)\left(\frac{1}{2}+\frac{m}{T_{\mathrm{eff}}}\right)\right]$$

- A fizikai paraméterek egy kombinációjától függ, amit az eloszlás szélessége határoz meg!
- Adott Δy-ra *a fizikai paraméterek függnek egymástól, nem vehetnek fel tetszőleges értéket*
- Ideális gáz izoterm példája: T meghatározta a pV szorzatot, de p-t és V-t külön-külön nem!
- Most *Δy meghatározza λ, m, T_{eff} és κ egy kombinációját, de különálló az értéküket nem*!

Csörgő, Kasza, Csanád és Jiang megoldása:
arXiv:1805.01427

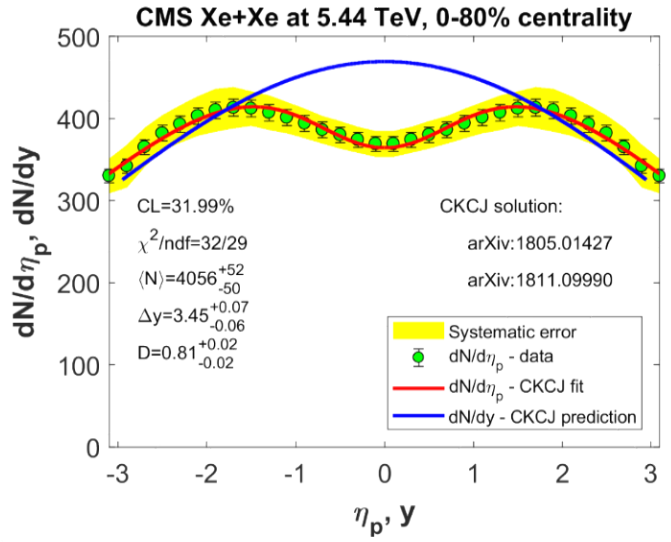
és néhány alkalmazása:
arXiv:1806.06794
arXiv:1811.09990

Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

- A rapiditás eloszlásból kiszámoltuk a pszeudorapiditás eloszlást is:

$$\frac{dN}{d\eta_p} \approx \frac{\langle N\rangle}{(2\pi\Delta^2 y)^{1/2}} \frac{\cosh(\eta_p)}{(D^2+\cosh^2(\eta_p))^{1/2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Delta^2 y}\right)\Bigg|_{y=y(\eta_p)}$$

- A pszeudorapiditás eloszlás a rapiditás eloszlás „nyomott” kistestvére → *D:* benyomodást méri



A piros görbe (pszeudorapiditás eloszlás) középen benyomódik a kék görbéhez (rapiditás eloszlás) képest.

K. G. , Csörgő T.:
[arXiv:1811.09990]
[arXiv:1910.03428]

Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

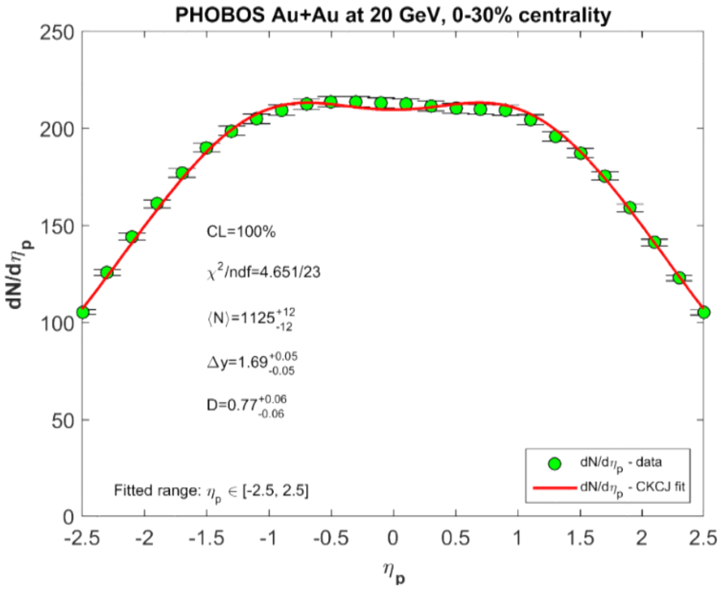
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428



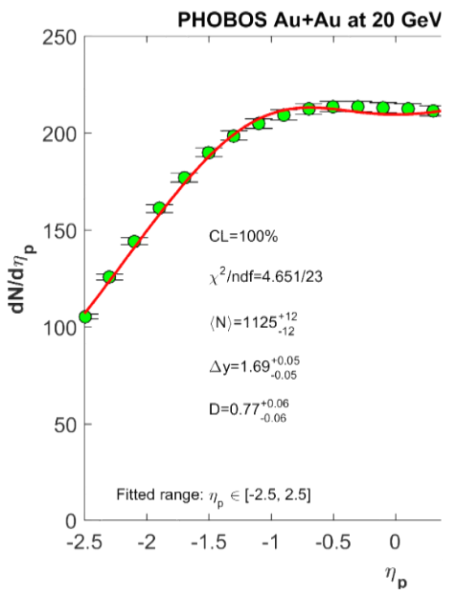
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

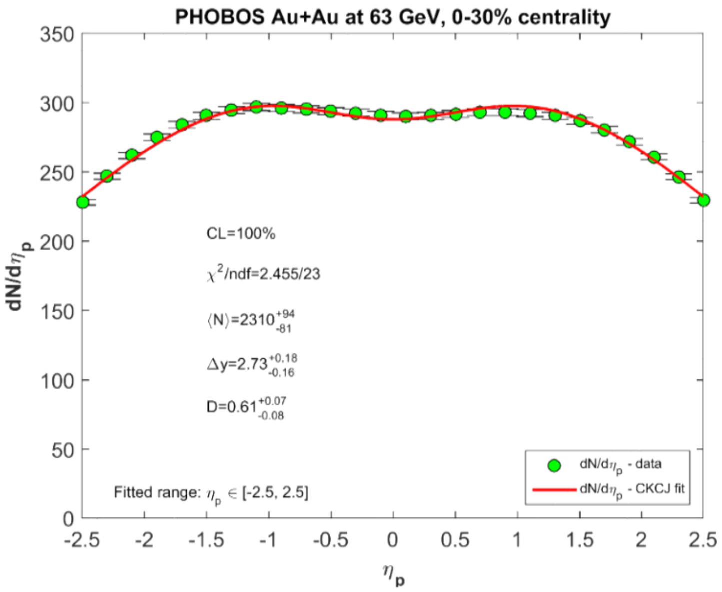
- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428





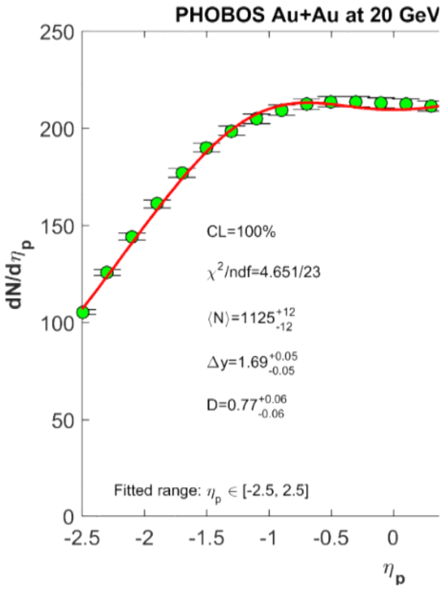
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

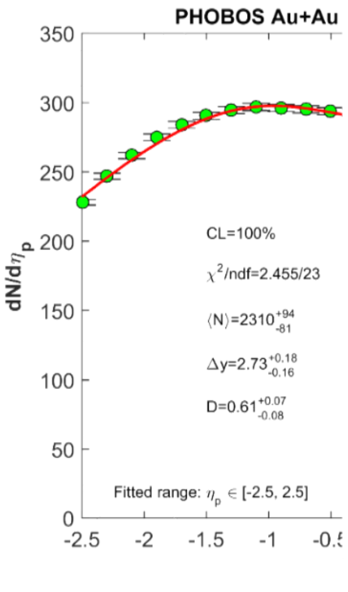
K. G. , Csörgő T.:

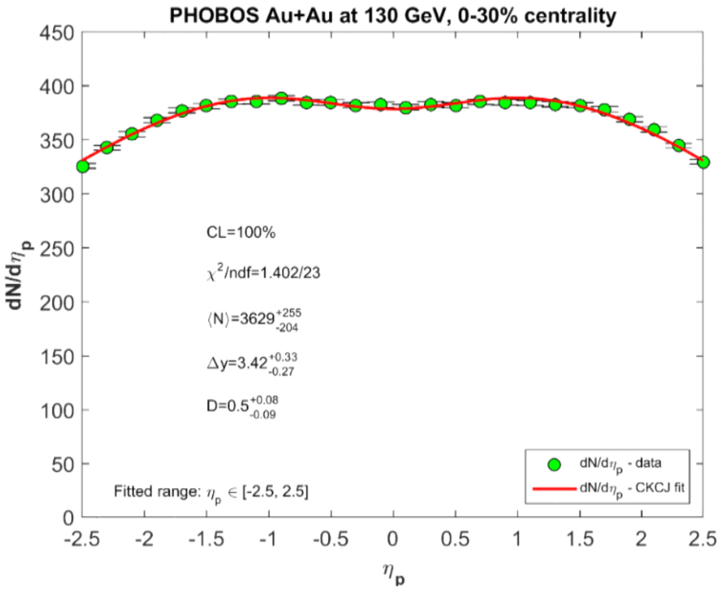
arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal







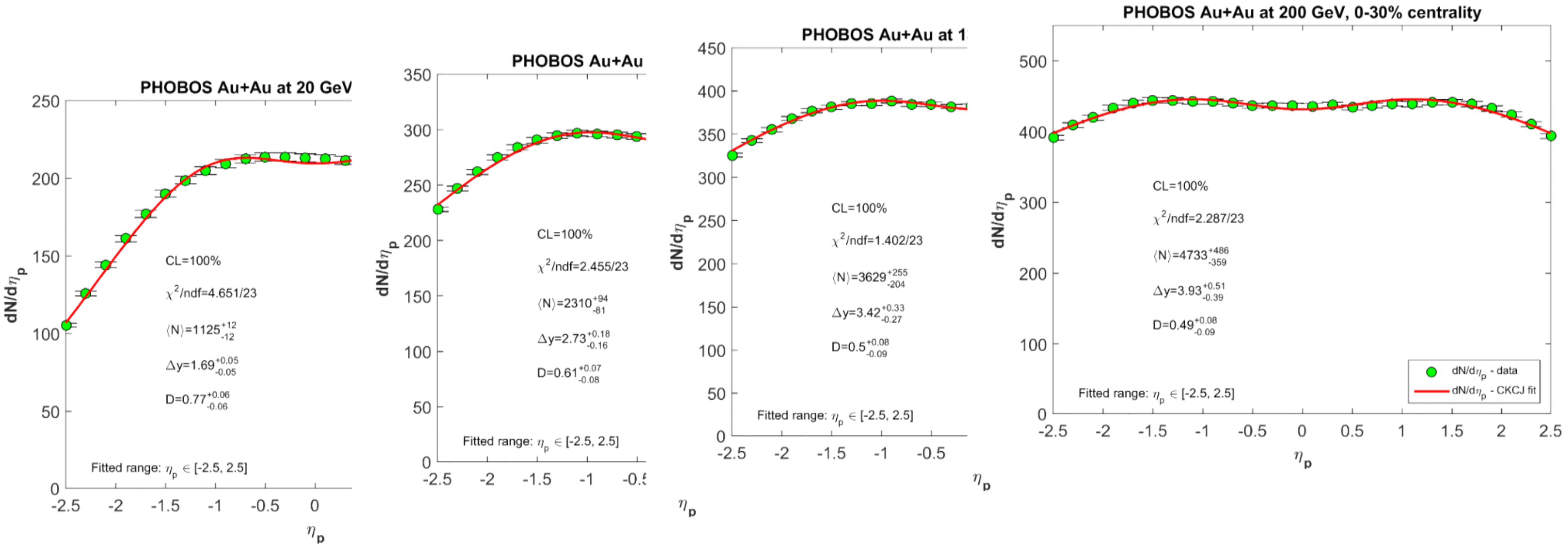
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

K. G. , Csörgő T.:

[arXiv:1811.09990](https://arxiv.org/abs/1811.09990)

[arXiv:1910.03428](https://arxiv.org/abs/1910.03428)

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal



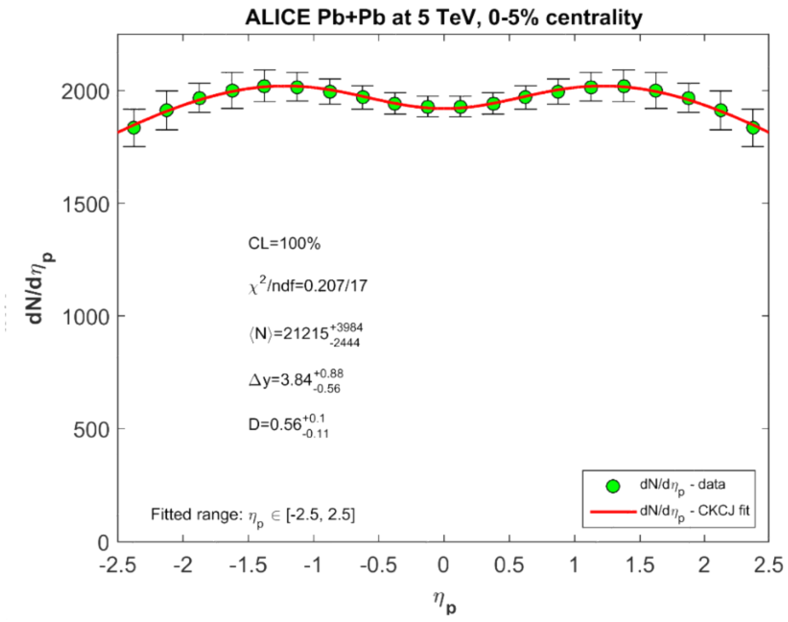
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

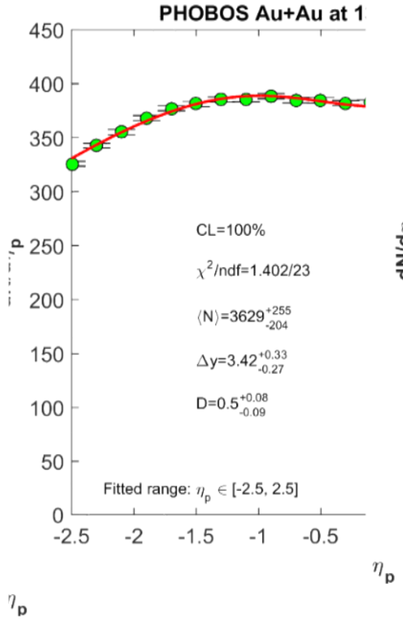
- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

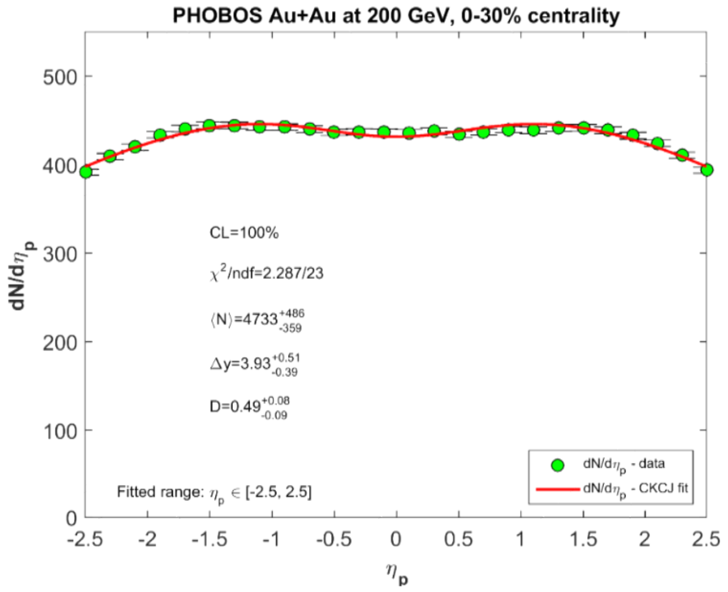
K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428







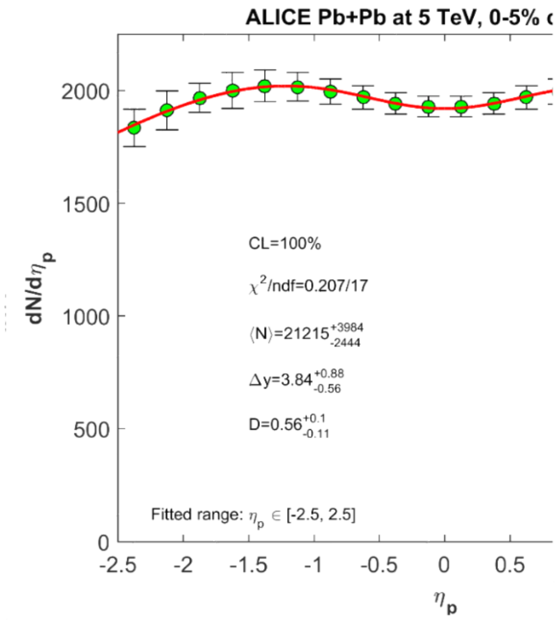
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

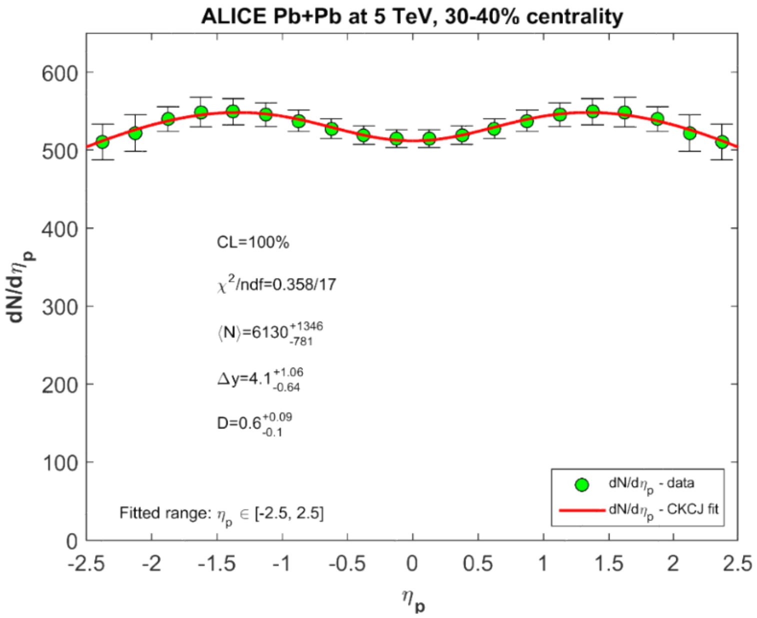
- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

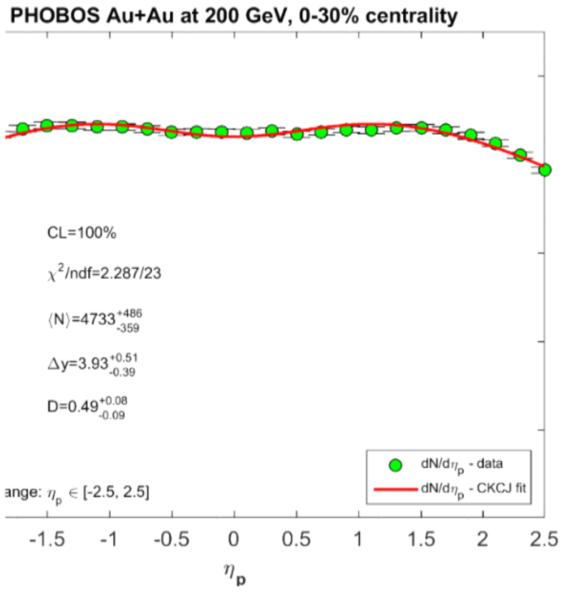
K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428







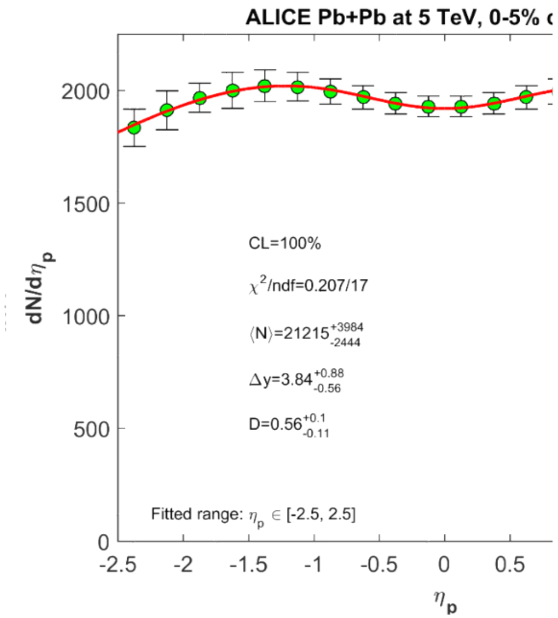
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

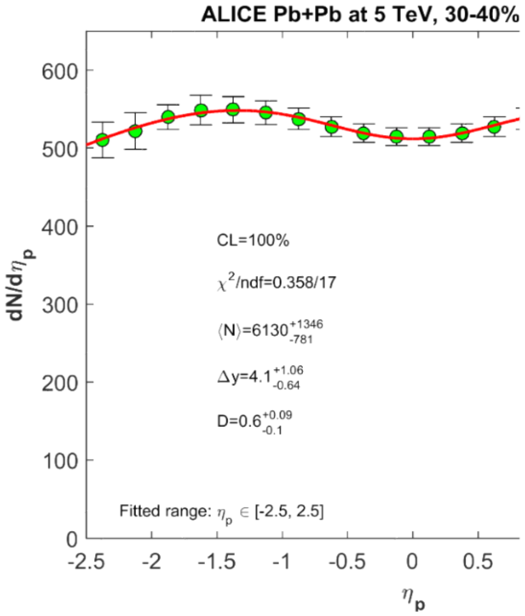
- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

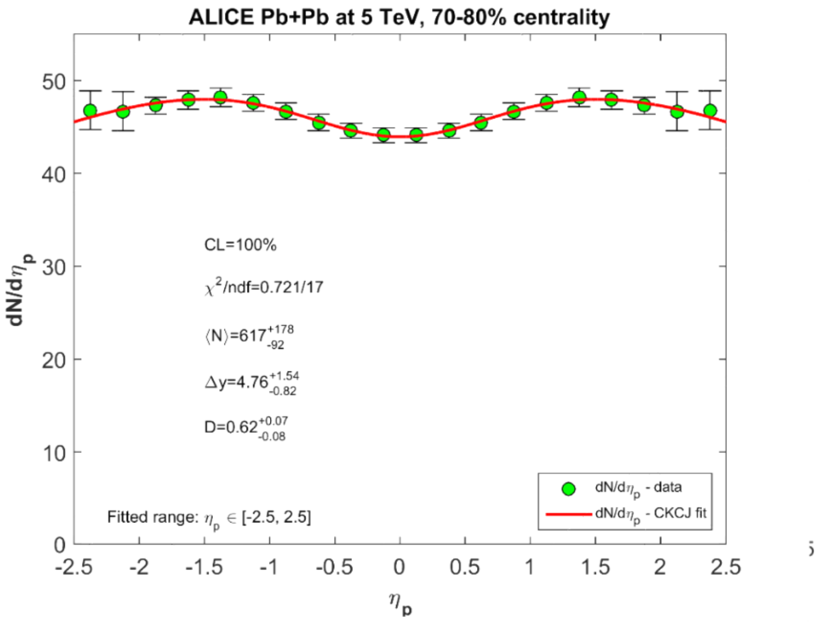
K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428







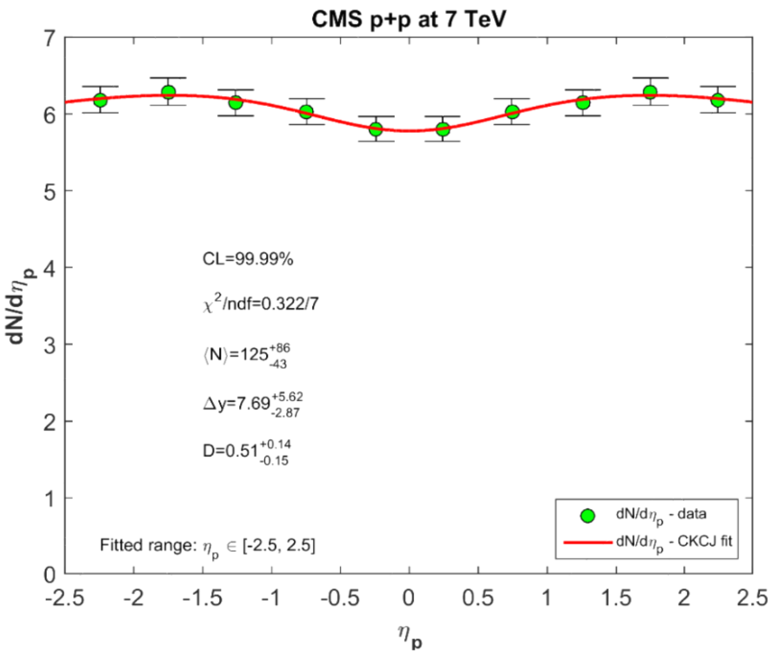
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

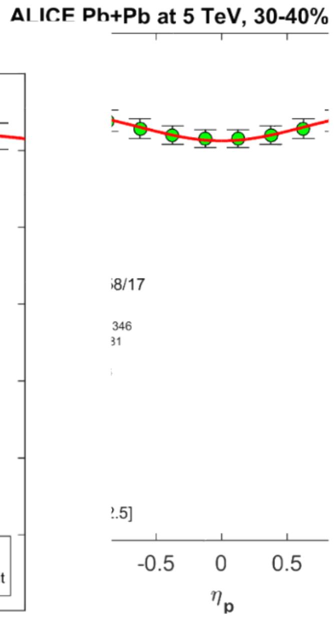
K. G. , Csörgő T.:

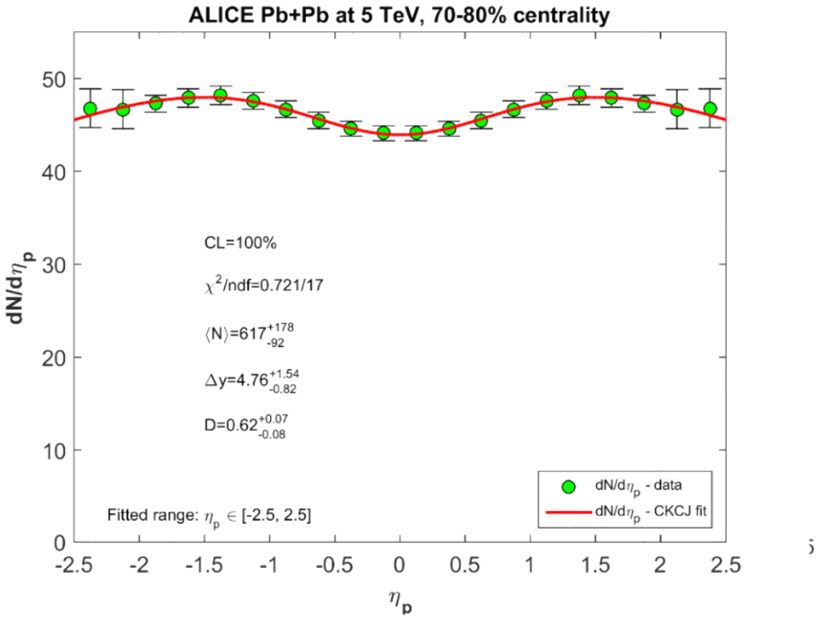
arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal







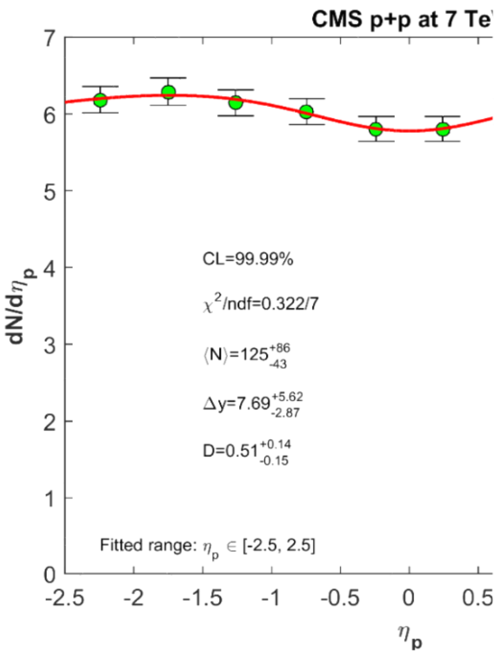
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

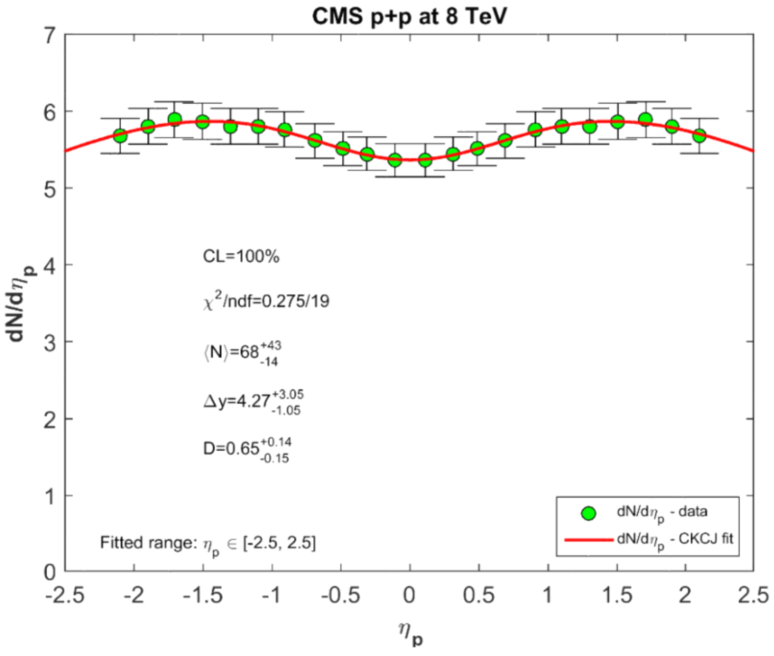
K. G. , Csörgő T.:

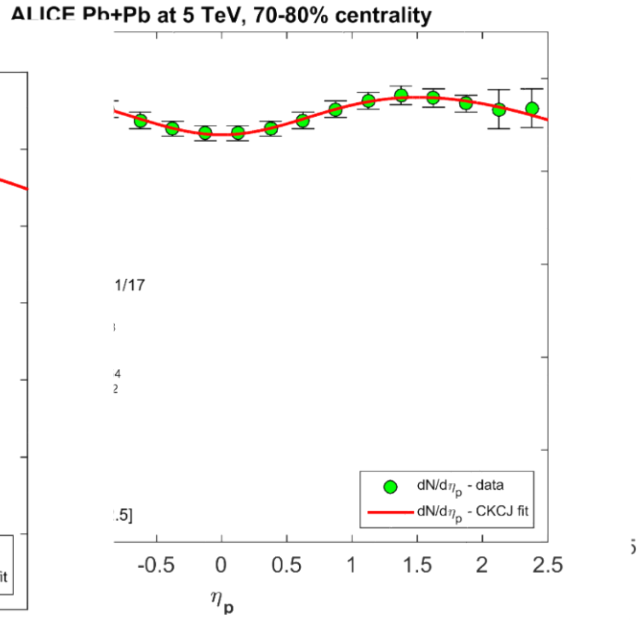
arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal







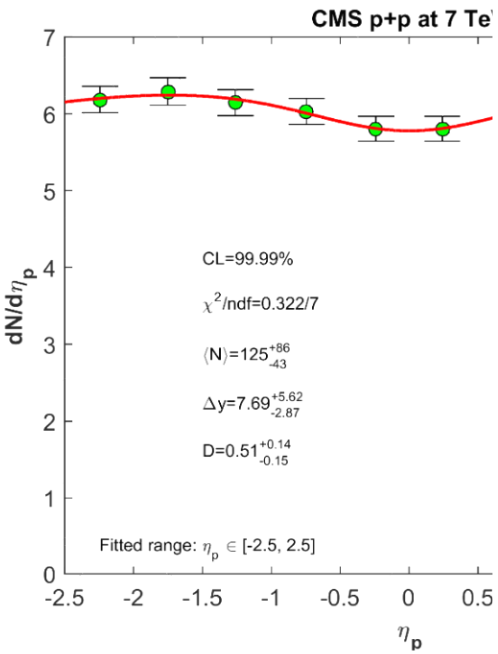
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

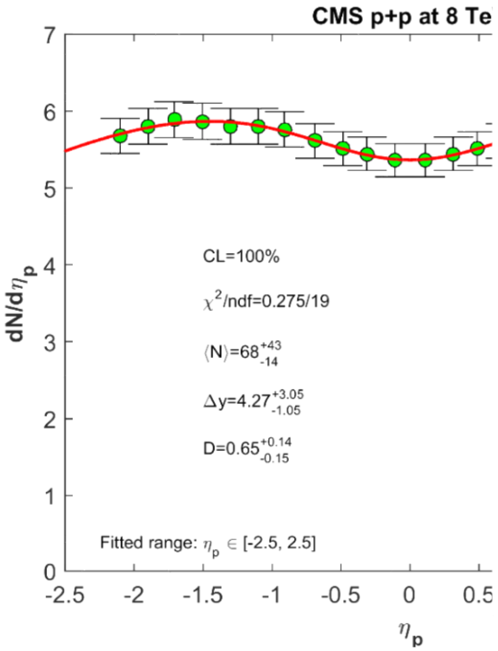
- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal

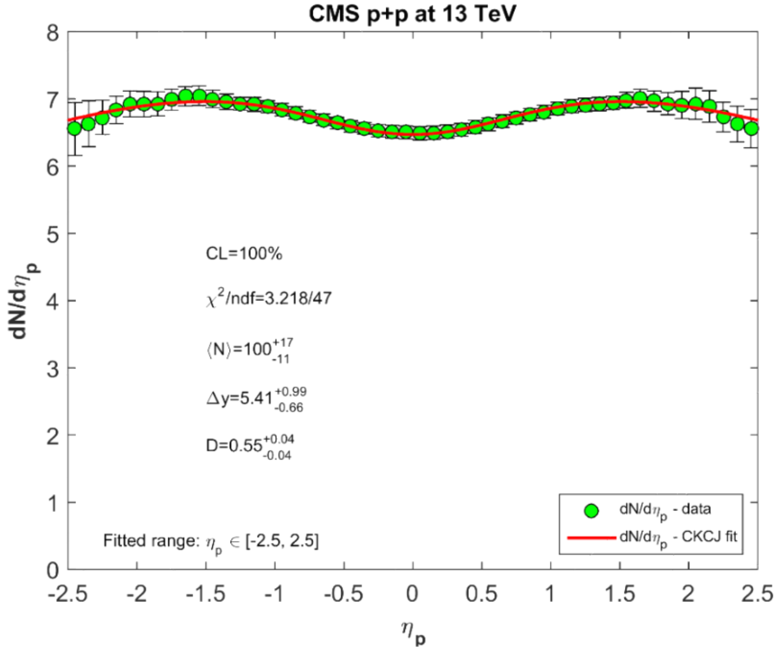
K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428







Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428

- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal
- Kis rendszerek (p+p) és nehézionok (Au+Au, Pb+Pb) ütközését egyaránt jól le tudjuk írni
- *Ismét megmutatkozik a skálaviselkedés*: nem számít a rendszer mérete, a hidro működik, sőt…

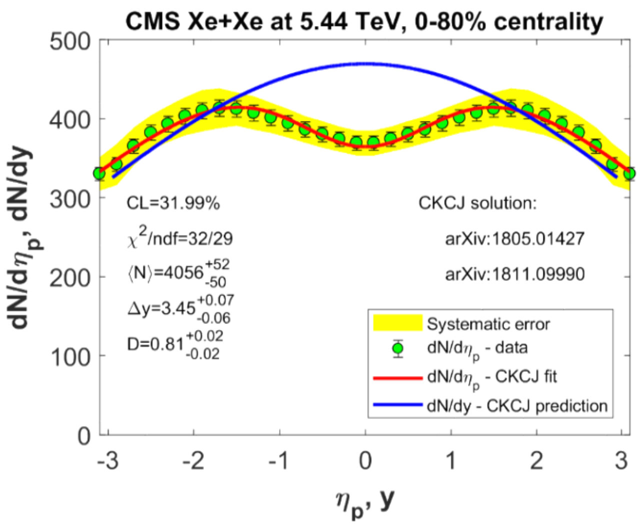
Skálázó viselkedés a nagyenergiás fizikában

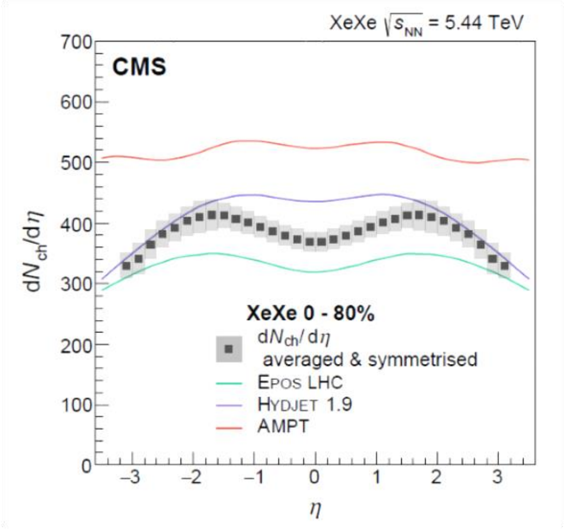
- Kérdés: megmutatkozik-e a skálaviselkedés az adatokon?
- Teszteltük az elméletünket: a kiszámolt görbét összevetettük az adatokkal
- Kis rendszerek (p+p) és nehézionok (Au+Au, Pb+Pb) ütközését egyaránt jól le tudjuk írni
- Ismét megmutatkozik a skálaviselkedés: nem számít a rendszer mérete, a hidro működik, sőt…

K. G. , Csörgő T.:

arXiv:1811.09990

arXiv:1910.03428





A közel önhasonló folyadékdinamikai számolásaink sikeresek, ott is ahol számos más modell nem.

CMS collab.: arXiv:1902.03603

Werner, Liu, Pierog: arXiv:hep-ph/0506232

Pierog, Karpenko, et all.: arXiv:1306.0121

Lokhtin, Snigirev: arXiv:hep-ph/0506189

Lin, Ko, et all.: arXiv:nucl-th/0411110

Miről árulkodik a hidrodinamika?

- Ha egy rendszer jól jellemezhető a hidrodinamikával, az a *kollektív viselkedés*ről árulkodik
- Ám a kollektív viselkedés nem csak folyadékokra igaz
- Amit látunk: p+p ütközések leírhatók kollektív rendszerként, így elképzelhető a QGP létrejötte
- Kérdés: detektálható-e a jet-elnyomás p+p ütközésekben?
- Illesztéseink alacsony c_s-re (≈0.35) utalnak, pontos értéke csak a skálaviselkedés sértésével adható meg
- Alacsony c_s folyadékot, vagyis a QGP létrejöttét engedi feltételezni
- Amit tanultunk: p+p és A+A ütközések egyaránt leírhatók *önhasonló* rendszerként, tehát nagyvonalakban a két rendszer *hasonló*.

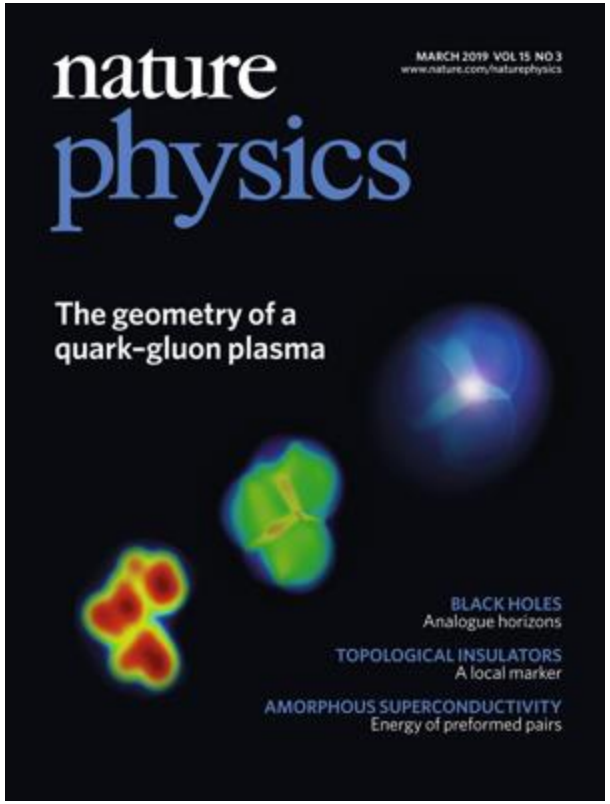
Miről árulkodik a hidrodinamika?

- Ha egy rendszer jól jellemezhető a hidrodinamikával, az a *kollektív viselkedés*ről árulkodik
- Ám a kollektív viselkedés nem csak folyadékokra igaz
- Amit látunk: p+p ütközések leírhatók kollektív rendszerként, így elképzelhető a QGP létrejötte
- Kérdés: detektálható-e a jet-elnyomás p+p ütközésekben?
- Illesztéseink alacsony c_s-re (≈0.35) utalnak, pontos értéke csak a skálaviselkedés sértésével adható meg
- Alacsony c_s folyadékot, vagyis a QGP létrejöttét engedi feltételezni
- Amit tanultunk: p+p és A+A ütközések egyaránt leírhatók *önhasonló* rendszerként, tehát nagyvonalakban a két rendszer *hasonló*.

A skálaviselkedés tehát e nagyságrendben is érvényben marad!

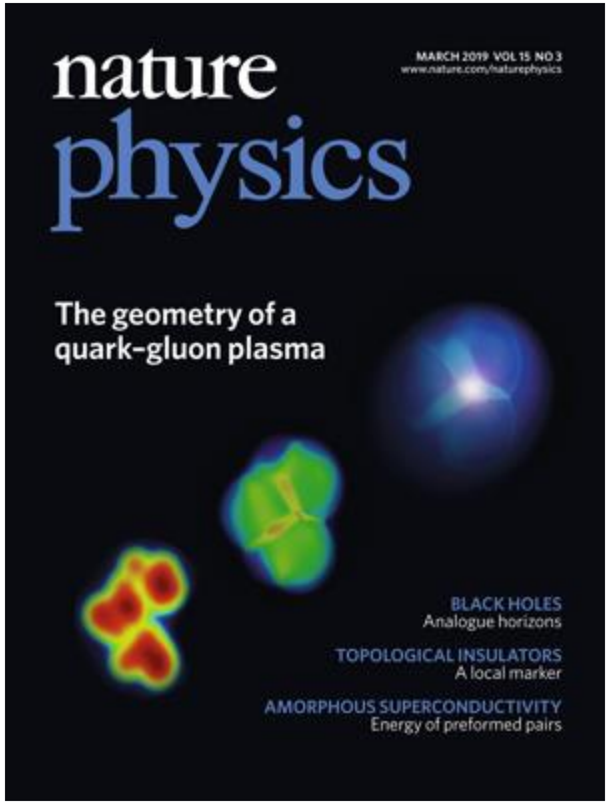
Mire jó a hidrodinamika, *a nehézionfizikában*?

- A hidrodinamikai viselkedés az A+A ütközésekben 2005 óta fő iránnyá vált.
- A p+A, d+A és He+A ütközésekben 2019 óta elfogadott. (Nature Physics címlap)
- A p+p ütközésekben még nem vált fő iránnyá, általánosan elfogadottá.
- Ám a p+A és p+p ütközéseket elválasztó nagyságrend sokkal kisebb, mint ami az Ősrobbanást és a Kis Bummokat választja el
- Ezért reméljük, hogy néhány éven belül a p+p ütközések hidrodinamikai leírása is fő iránnyá válik majd.



Mire jó a hidrodinamika, *a nehézionfizikában*?

- A hidrodinamikai viselkedés az A+A ütközésekben 2005 óta fő iránnyá vált.
- A p+A, d+A és He+A ütközésekben 2019 óta elfogadott. (Nature Physics címlap)
- A p+p ütközésekben még nem vált fő iránnyá, általánosan elfogadottá.
- Ám a p+A és p+p ütközéseket elválasztó nagyságrend sokkal kisebb, mint ami az Ősrobbanást és a Kis Bummokat választja el
- Ezért reméljük, hogy néhány éven belül a p+p ütközések hidrodinamikai leírása is fő iránnyá válik majd.



Köszönöm a figyelmet!

Csörgő-Kasza-Csanád-Jiang megoldás

- Rindler koordináták, sebesség mező: $(\tau, \eta_x) = \left(\sqrt{t^2 - r_z^2},\ \frac{1}{2}\ln\left[\frac{t+r_z}{t-r_z}\right]\right),\quad u^\mu = \left(\cosh\left(\Omega\right), \sinh\left(\Omega\right)\right)$
- 1+1 dimenziós, parametrikus megoldás:

Csörgő T., Kasza G., Csanád M., Jiang Z.: arXiv:1805.01427, arXiv:1806.06794

λ: gyorsulás mértéke (Hwa-Bjorken: *λ=1*)

↓

gyorsuló megoldás

↓

realisztikus *dN/dη*

$$\begin{aligned}
\eta_x(H) &= \Omega(H) - H, \\
\Omega(H) &= \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda-1}\sqrt{\kappa-\lambda}}\arctan\left(\sqrt{\frac{\kappa-\lambda}{\lambda-1}}\tanh\left(H\right)\right) \\
\sigma(\tau, H) &= \sigma_0\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^\lambda \mathcal{V}_\sigma(s)\left[1+\frac{\kappa-1}{\lambda-1}\sinh^2(H)\right]^{-\frac{\lambda}{2}}, \\
T(\tau, H) &= T_0\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{\frac{\lambda}{\kappa}} \mathcal{T}(s)\left[1+\frac{\kappa-1}{\lambda-1}\sinh^2(H)\right]^{-\frac{\lambda}{2\kappa}}, \\
\mathcal{T}(s) &= \frac{1}{\mathcal{V}_\sigma(s)}, \\
s(\tau, H) &= \left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^{\lambda-1}\sinh(H)\left[1+\frac{\kappa-1}{\lambda-1}\sinh^2(H)\right]^{-\lambda/2}
\end{aligned}$$