

# Kétrészecske-korrelációk vizsgálata a PHENIX kísérletben, valamint az EPOS modell alkalmazásával

Kovács László  
ELTE, Budapest

Magyar Magfizikus Találkozó 2024, Debrecen




**ELTE**  
EÖTVÖS LORÁND  
UNIVERSITY

# A korrelációs függvény

- Korrelációs függvény:  $C_2(p_1, p_2) = \frac{N_2(p_1, p_2)}{N_1(p_1)N_1(p_2)}$
- Egy-részecske impulzus eloszlás:  $N_1(p) = \int S(r, p) |\Psi_p(x)|^2 d^4x$
- Két-részecske impulzus eloszlás a Yano-Koonin formulával:

$$N_2(p_1, p_2) = \int S(x_1, p_1) S(x_2, p_2) |\Psi_{p_1-p_2}(x_1 - x_2)|^2 d^4x_1 d^4x_2$$

		
<p>Részecskekeltés fázistérbeli valószínűsége Milyen alakú?</p>	<p>Szimmetrizált két- részecske hullámfüggvény</p>	<p>Tér-idő koordináták</p>

# Bose-Einstein korreláció

- Bizonyos feltételek mellett:  $C_2(Q, K) \cong 1 + \left| \int S(r, K) e^{iQr} dr \right|^2$
- $C_2(Q, K)$ -ből  $S(r, K)$  rekonstruálható
- Vezessük be a térbeli korrelációs függvényt (térbeli páreloszlás):

$$D(r, K) = \int S\left(\rho + \frac{r}{2}, K\right) S\left(\rho - \frac{r}{2}, K\right) d^4\rho$$

- $r$ : Pár négyestávolsága
- $\rho$ : Pár átlagos téridővektora
- $K$ : Pár átlagos négyesimpulzusa

- Így a Bose-Einstein korrelációs függvény:

$$C_2(Q, K) = \int D(r, K) |\psi_Q(r)|^2 d^4r \cong 1 + \int D(r, K) e^{iQr} dr$$

Kísérlet

# A korrelációs függvény alakja

- Gauss-eloszlás általánosítása, a Lévy-eloszlás:

$$\mathcal{L}(\alpha, R; \mathbf{r}) = (2\pi)^{-3} \int d^3 \mathbf{q} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} e^{-\frac{1}{2}|\mathbf{q}R|^\alpha}$$

$\alpha = 2$   $\longrightarrow$  Gauss eloszlás

$\alpha = 1$   $\longrightarrow$  Cauchy eloszlás

- Centrális határeloszlás-tétel alapján:

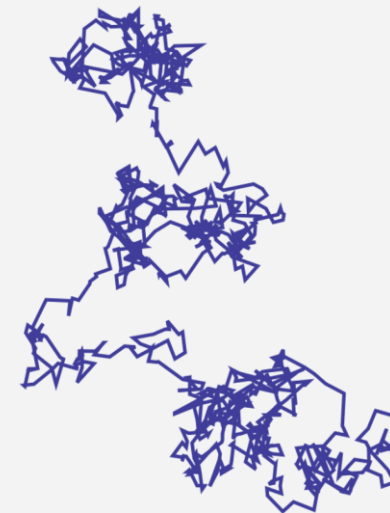
- Átlagos szabad úthossz állandó, szórása véges  $\longrightarrow$  Gauss ( $\alpha = 2$ )

- Növekvő szabad úthossz, szórás végtelen  $\longrightarrow$  Lévy ( $0 < \alpha < 2$ )

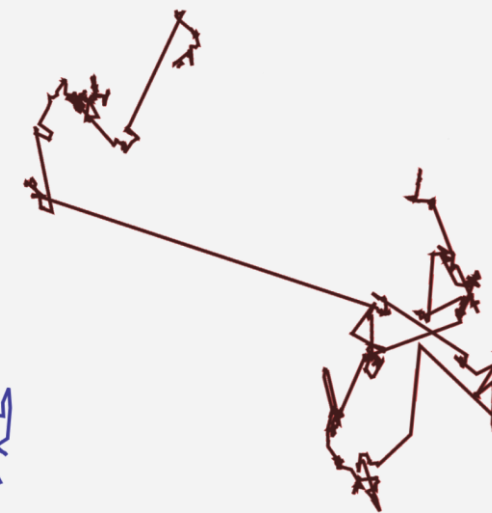
Gyorsan táguló rendszerben

**Hatványszerű lecsengés**

Normál  
diffúzió



Anomális  
diffúzió



R. Metzler, E. Barkai, J. Klafter, Phys. Rev. Lett. 82, 3563 (1999)

T. Csörgő, S. Hegyi, W.A. Zajc, Eur. Phys. J. C36, 67 (2004)

M. Csanád, T. Csörgő, M. Nagy, Braz. J. Phys. 37, 1002 (2007)

# Illesztés

$$C_2(Q) = [1 - \lambda + \lambda \cdot K_C(q_{inv}) \cdot (1 + e^{-|QR|^\alpha})] \cdot N \cdot (1 + \epsilon Q)$$

1D változó!

Coulomb-  
korrekció

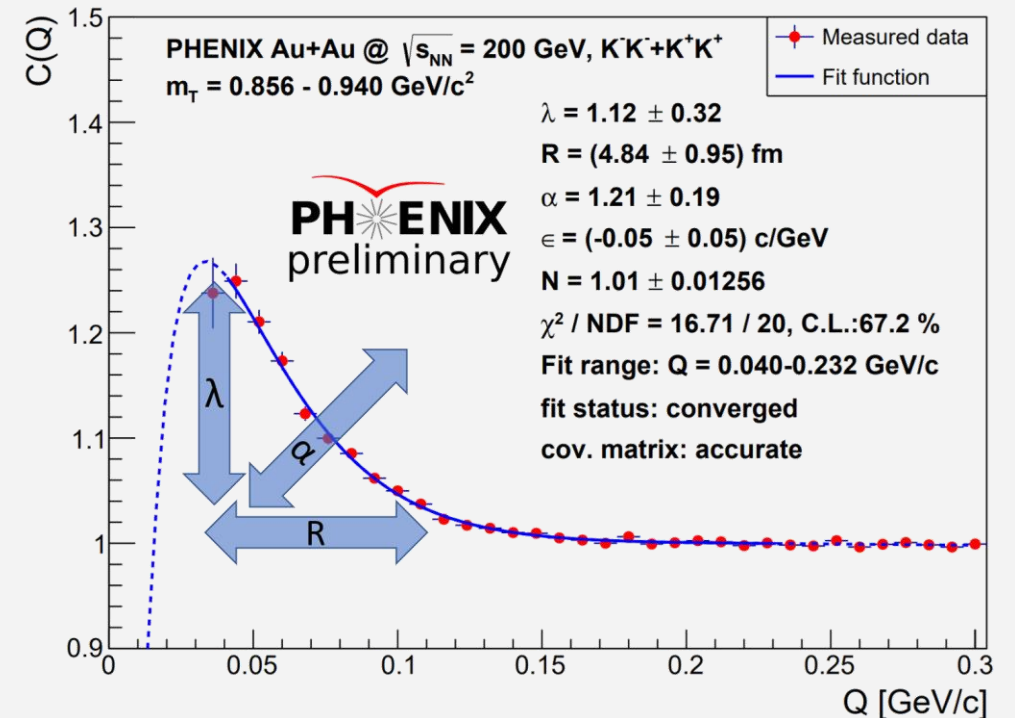
Lévy

Lineáris háttér

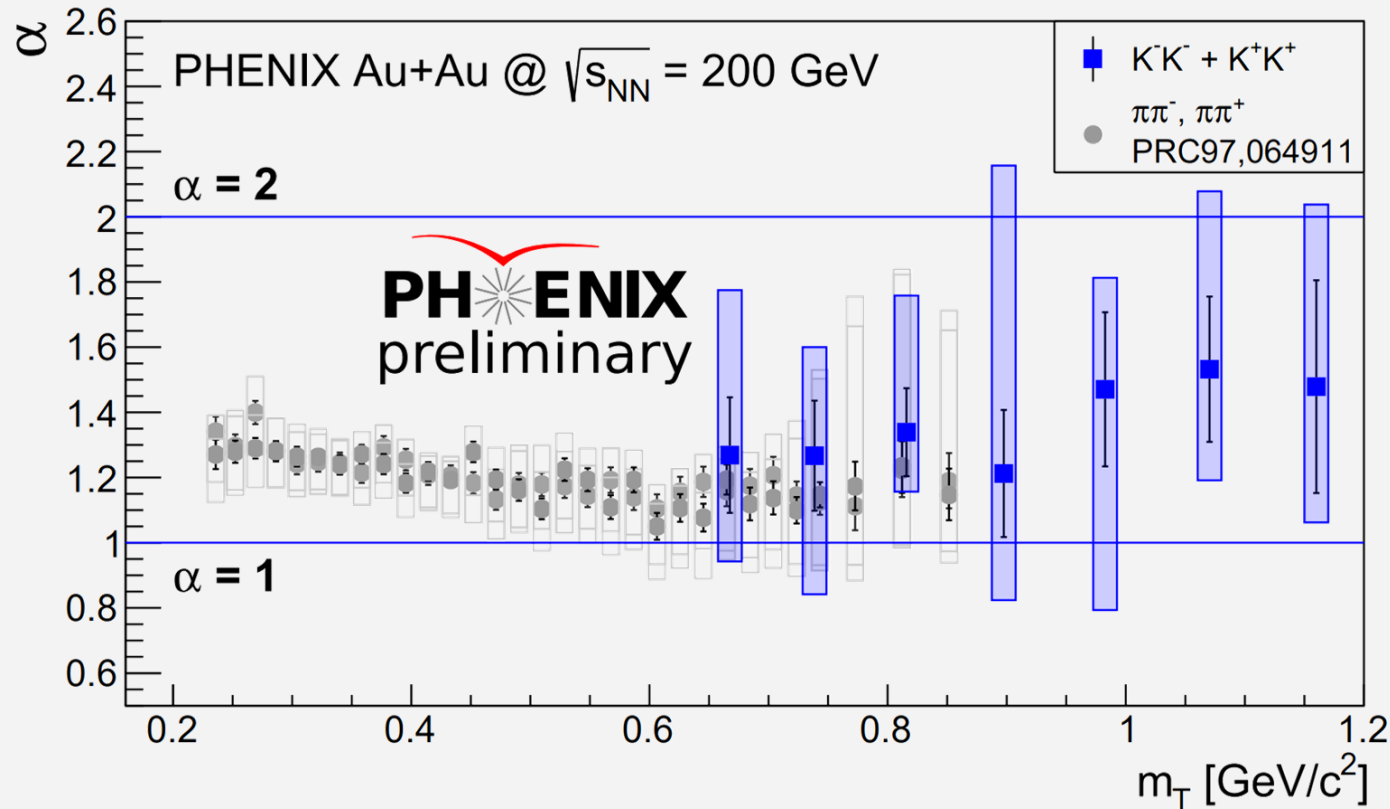
- $\lambda$ : korrelációs erősség
- $\alpha$ : Lévy-stabilitási index (a korr. fv. alakja)
  - anomális diffúzió határozza meg?
- $R$ : Lévy-skálaparaméter
  - térbeli forrás méretskálája, homogenitási hossz

$$K_T = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}$$

$$m_T = \sqrt{m^2 + (K_T/c)^2}$$



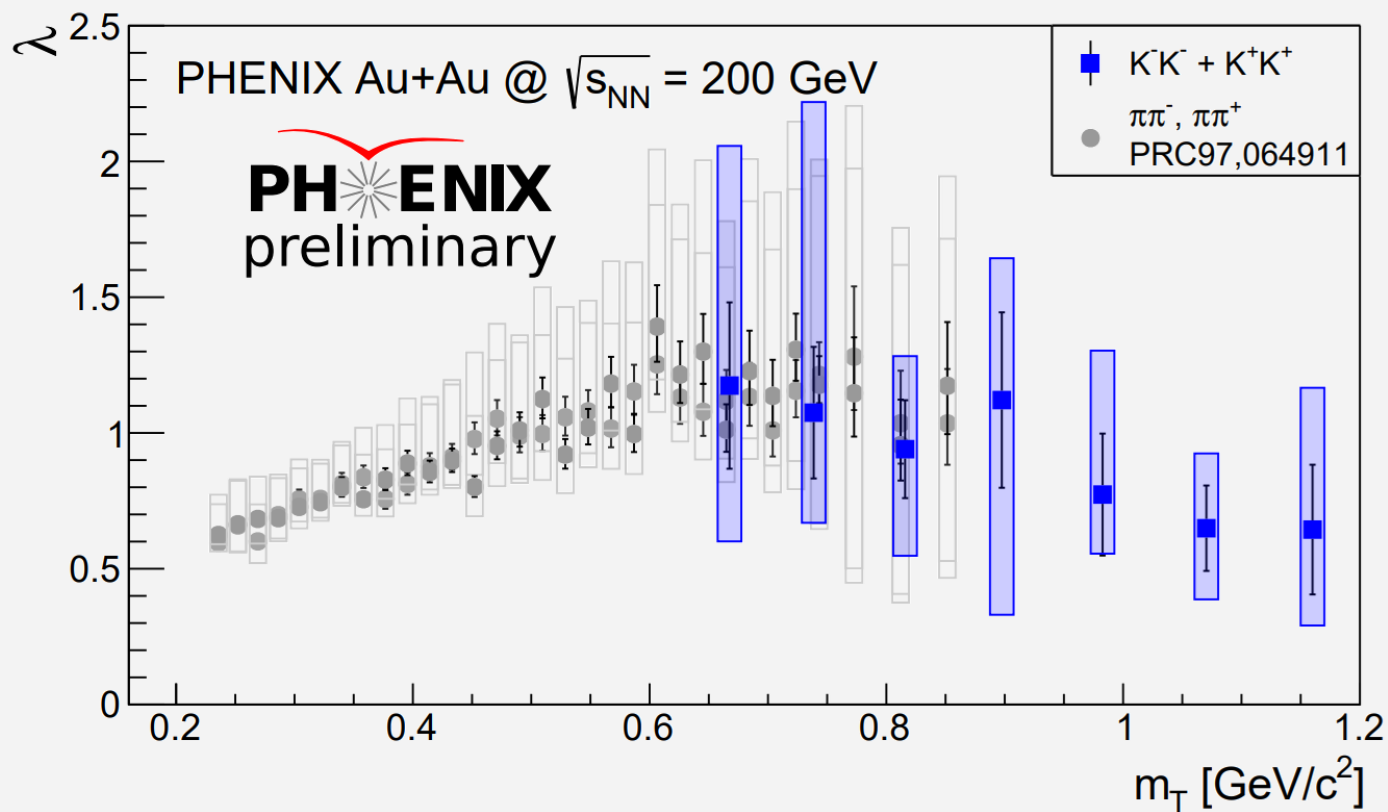
# Lévy-stabilitási index - $\alpha$



- Nem figyelhető meg jelentős transzverz tömeg függés
- Kaon  $\alpha$  konzisztens a pionokkal, gyenge  $\alpha(K) \geq \alpha(\pi)$  összefüggés
- Anomális diffúzió alapján:  
 $\alpha(K) < \alpha(\pi)$

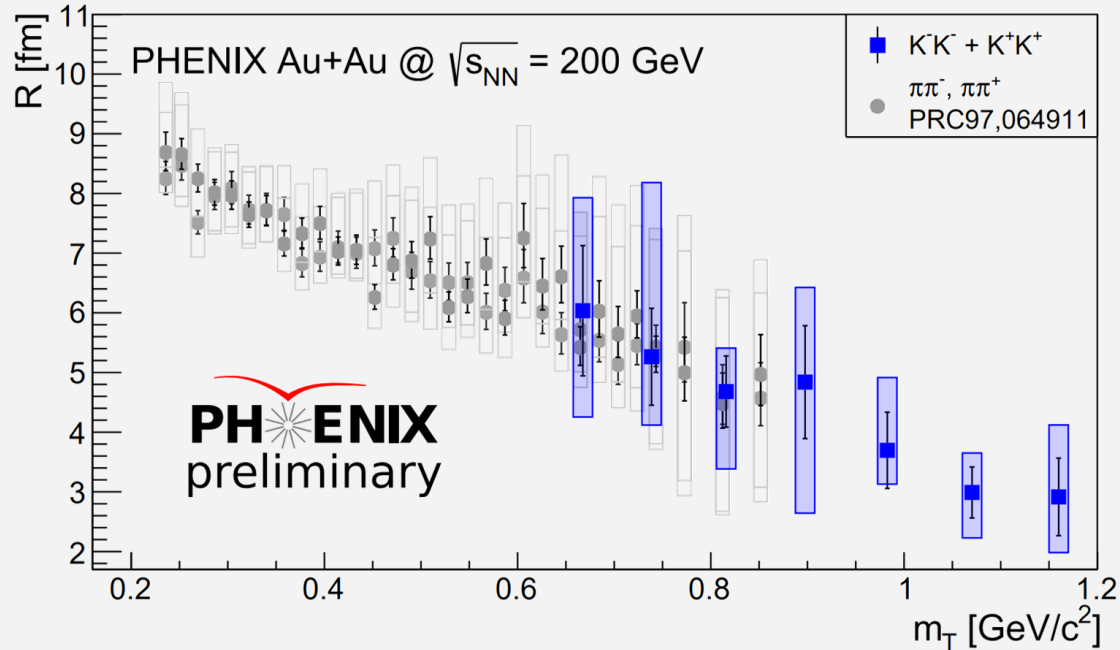
*M. Csanád, T. Csörgő, M. Nagy, Braz.J.Phys. 37 (2007) 1002*

# Korrelációs erősség - $\lambda$

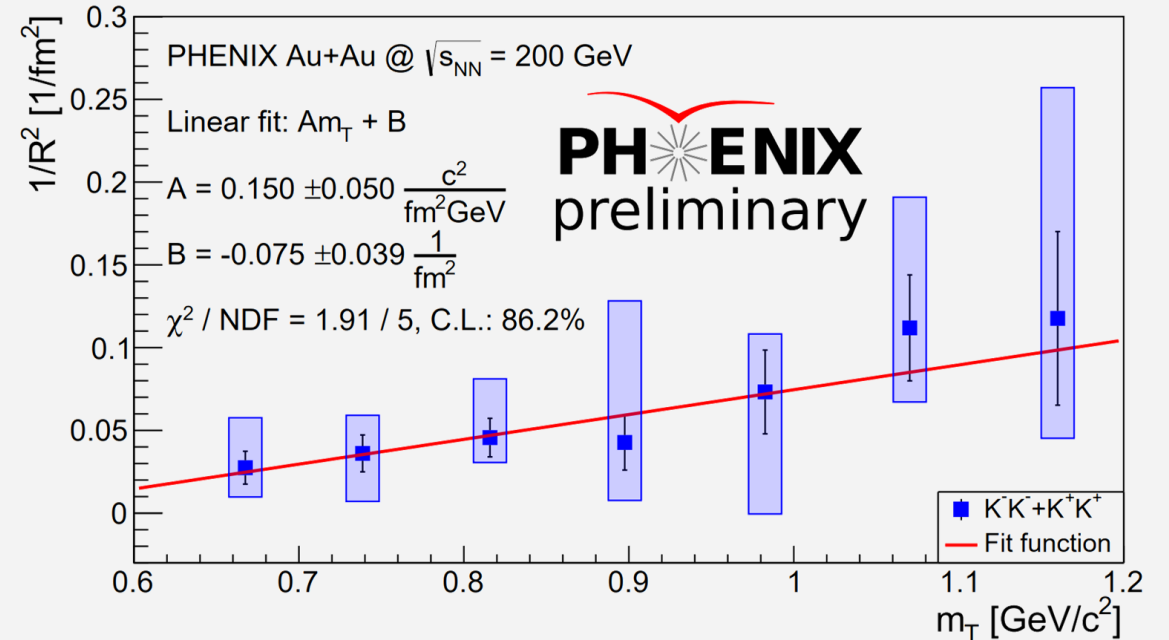


- $\lambda(\pi^\pm)$ : Növekvő trend
- $\lambda(K^\pm)$ : Csökkenő trend
- $m_T=0.7$  GeV/c<sup>2</sup>:  $\lambda(\pi^\pm) \approx \lambda(K^\pm)$
- Kaonok esetén a transzverz tömeggel történő csökkenést a romló PID okozhatja.

# Lévy-skálaparaméter - $R$



- Kaon eredmény konzisztens a pionokéval
- Csökkenő trend  $m_T$ -vel



- Hidrodinamika számítások szerint,  
Gauss alakú forrás esetén:  $\frac{1}{R^2} \propto m_T$   
*T. Csörgő, B. Lörstad, Phys. Rev. C54, 1390 (1996)*
- $\alpha < 2$  esetén is érvényes a lineáris skálázás



# EPOS modell

- A Bose-Einstein korreláció és térbeli korrelációs függvény kapcsolata

$$C_2(q, K) = \int D(r, K) |\psi_q(r)|^2 d^4r \cong 1 + \int D(r, K) e^{iqr} dr$$

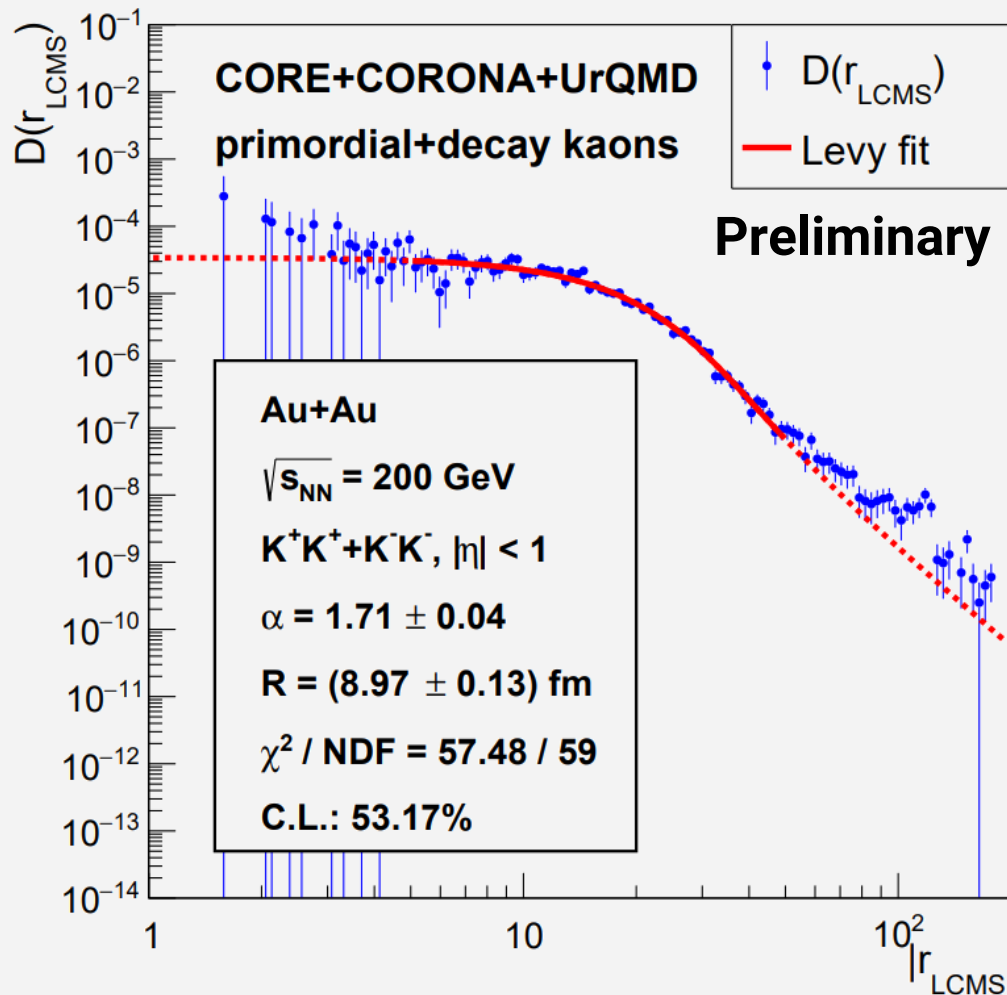
Kísérlet

Közvetlen információ

EPOS

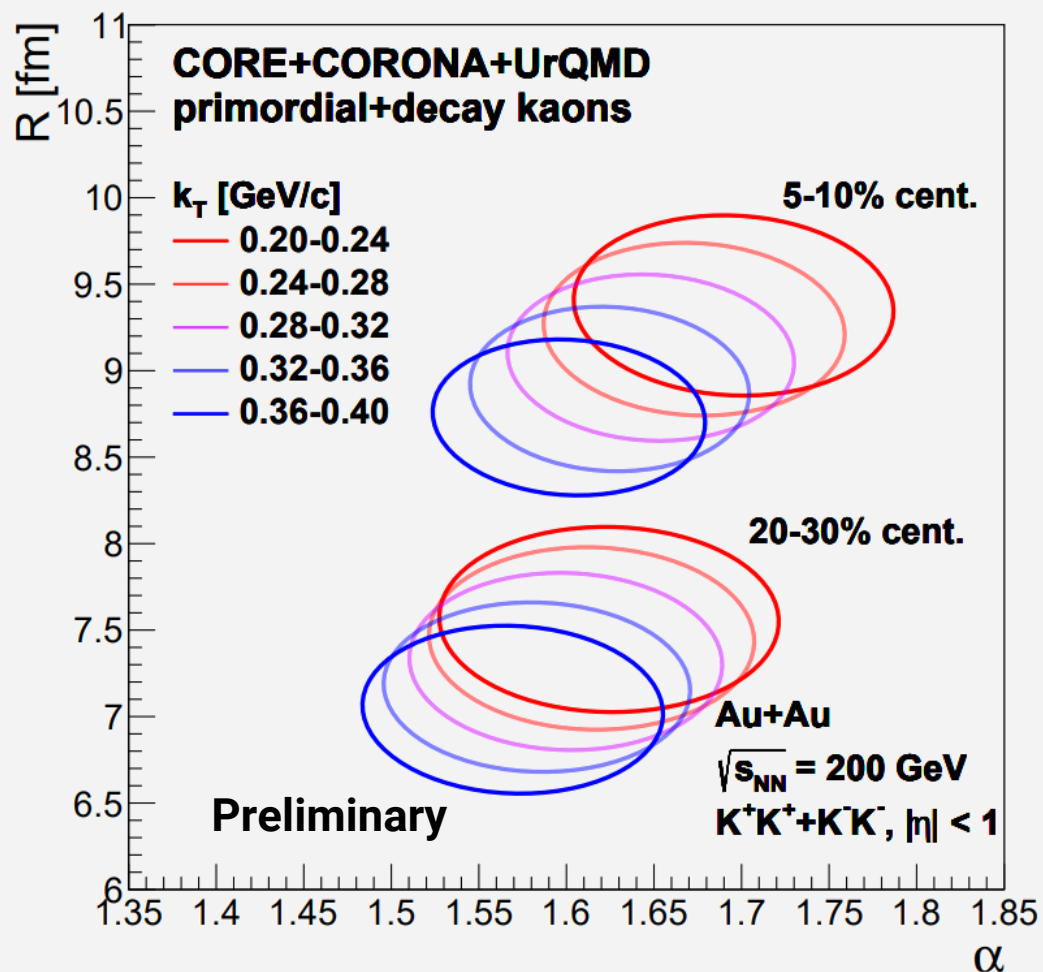
- Monte Carlo-módszeren alapuló eseménygenerátor
- A modell az alábbi fejlődési fázisokból áll:
  - Kezdeti szakasz (Gribov-Regge elmélet alapján)
  - Mag, korona divízió
  - Hidrodinamikai evolúció
  - Hadronizáció
  - Hadron újraszóródás (UrQMD)
  - Rezonancia bomlások

## EPOS - illesztés



- Mért 1 dimenziós változó:  

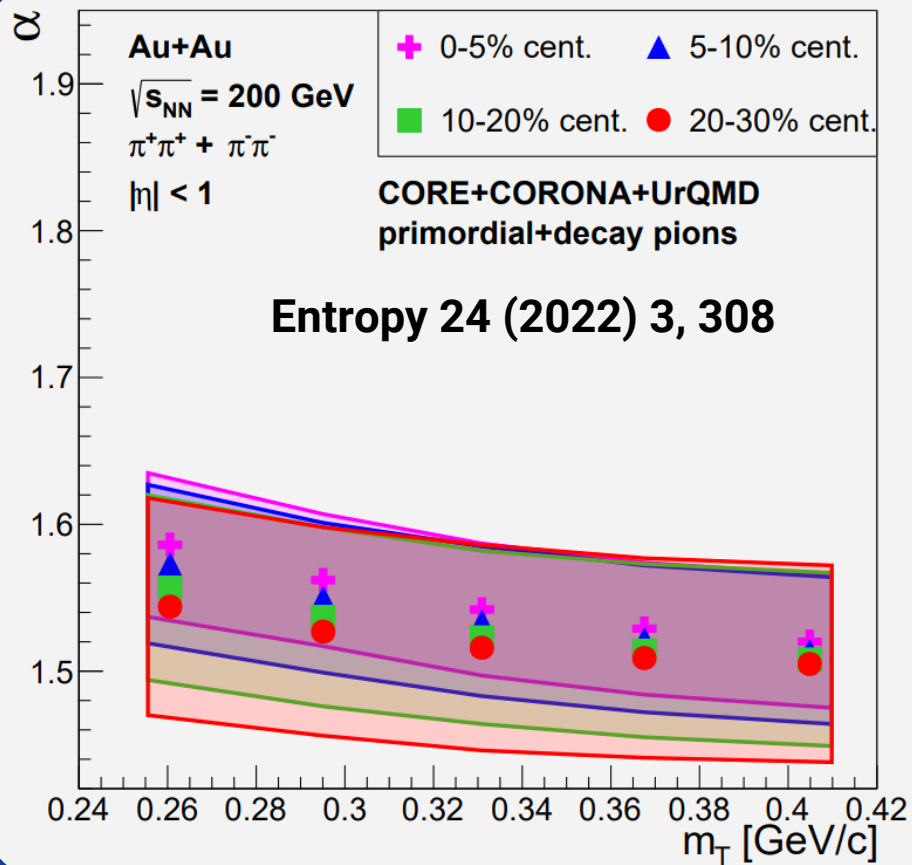
$$D(r_{\text{LCMS}}) = \int D(\mathbf{r}_{\text{LCMS}}, t) d\Omega_{\text{LCMS}} dt$$
 LCMS: Longitudinal co-moving system  
 (longitudinálisan együttmozgó rendszer)
- $D(r_{\text{LCMS}})$  hisztogramok illesztése Lévy függvénnel
- „Event-by-event” módszer
- Több ezer illesztés
- Ezekből kapott  $\alpha$  és  $R$  paraméterek eloszlásának vizsgálata

EPOS -  $1\sigma$  kontúr

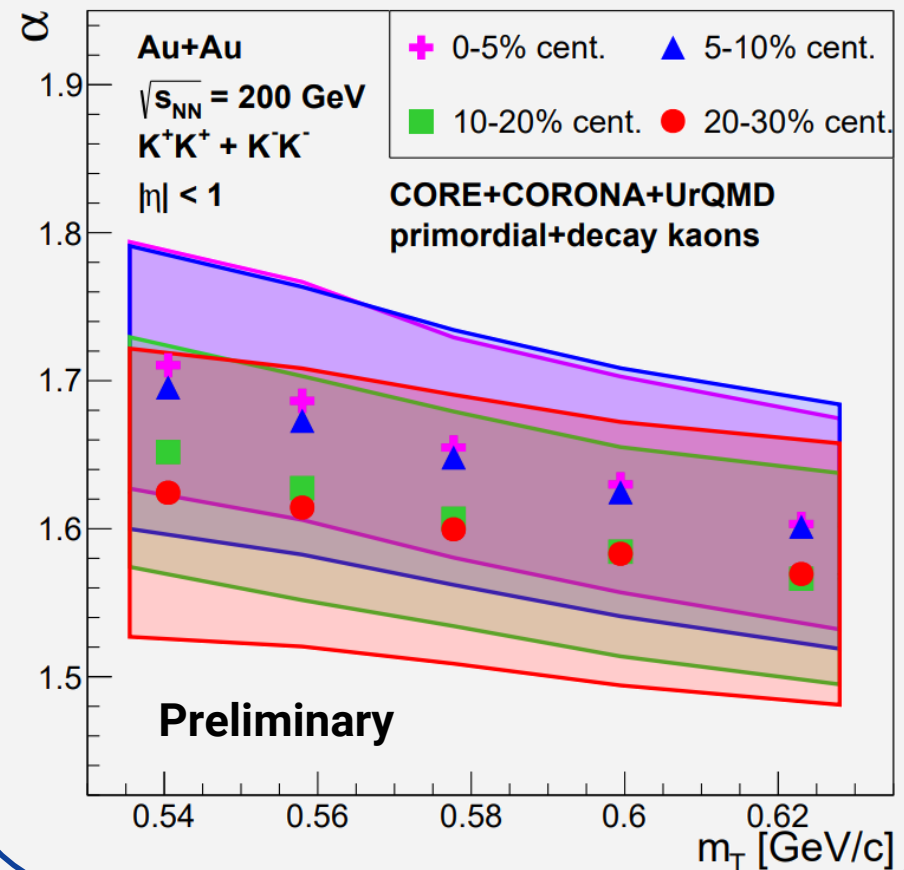
- $1\sigma$  kontúr  $\alpha$  és  $R$  paraméterekhez
- Normáloszlásból a paraméterek átlaga és szórása számolható
- Centralitás és transzverz tömeg függés vizsgálata

## EPOS – Pionok vs Kaonok

## Pionok

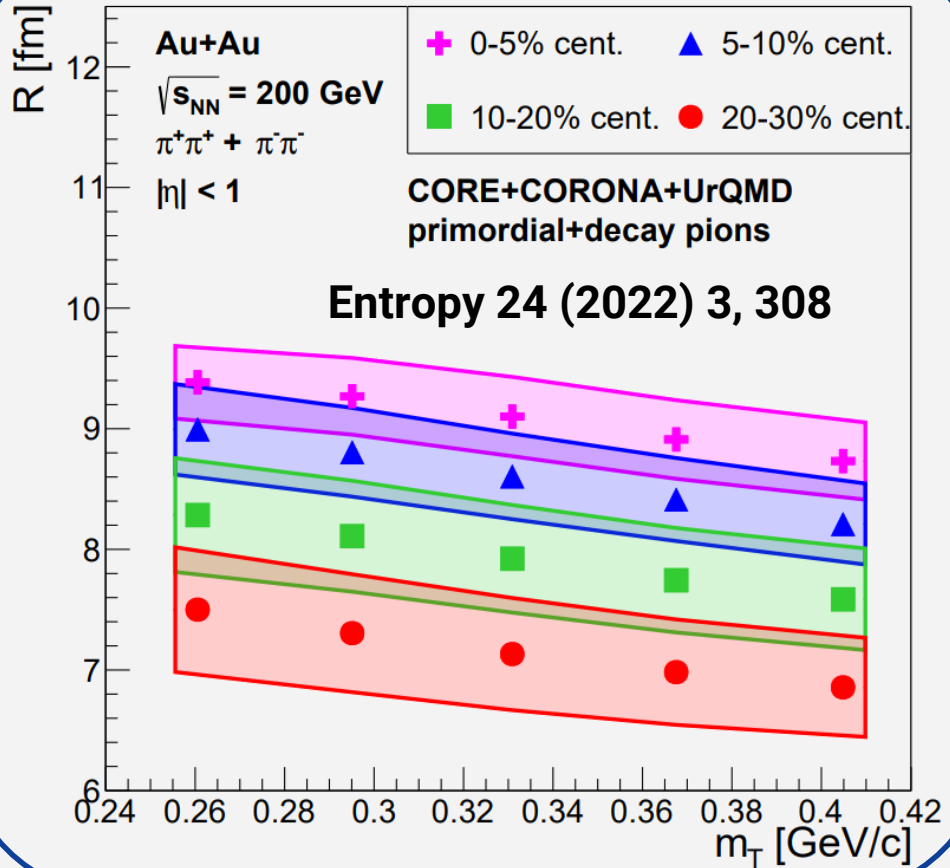


## Kaonok

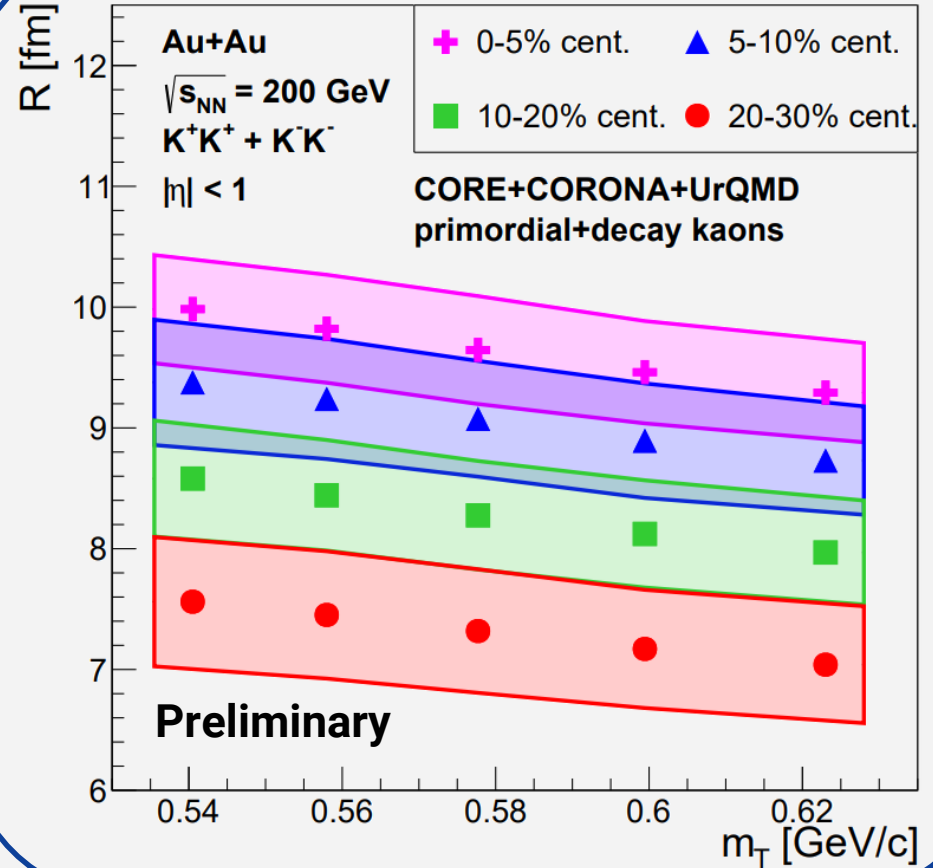


# EPOS – Pionok vs Kaonok

## Pionok



## Kaonok



# Összefoglalás

- A Bose-Einstein korrelációs fv. információt nyújt a forrásfüggvényről
- A korrelációk illesztése **Lévy függvénnyel** statisztikailag elfogadható
- Gausztól való eltérés okának feltárása: pion és kaon eredmények összehasonlítása
- Anomális diffúzió esetén a várt reláció:  $\alpha(K) < \alpha(\pi)$
- PHENIX kísérletben és az EPOS modellben egyaránt:  $\alpha(K) \geq \alpha(\pi)$
- Egyéb fizikai folyamatok befolyásolják  $\alpha$  értékét, **további vizsgálatok szükségesek**
- Lévy-skálaparaméter ( $R$ ): PHENIX-ben **kaon és pion eredmény konzisztens**, EPOS modellben azonban  $R(K) > R(\pi)$

Köszönöm a figyelmet!

Backup



# A PHENIX detektorrendszer felépítése

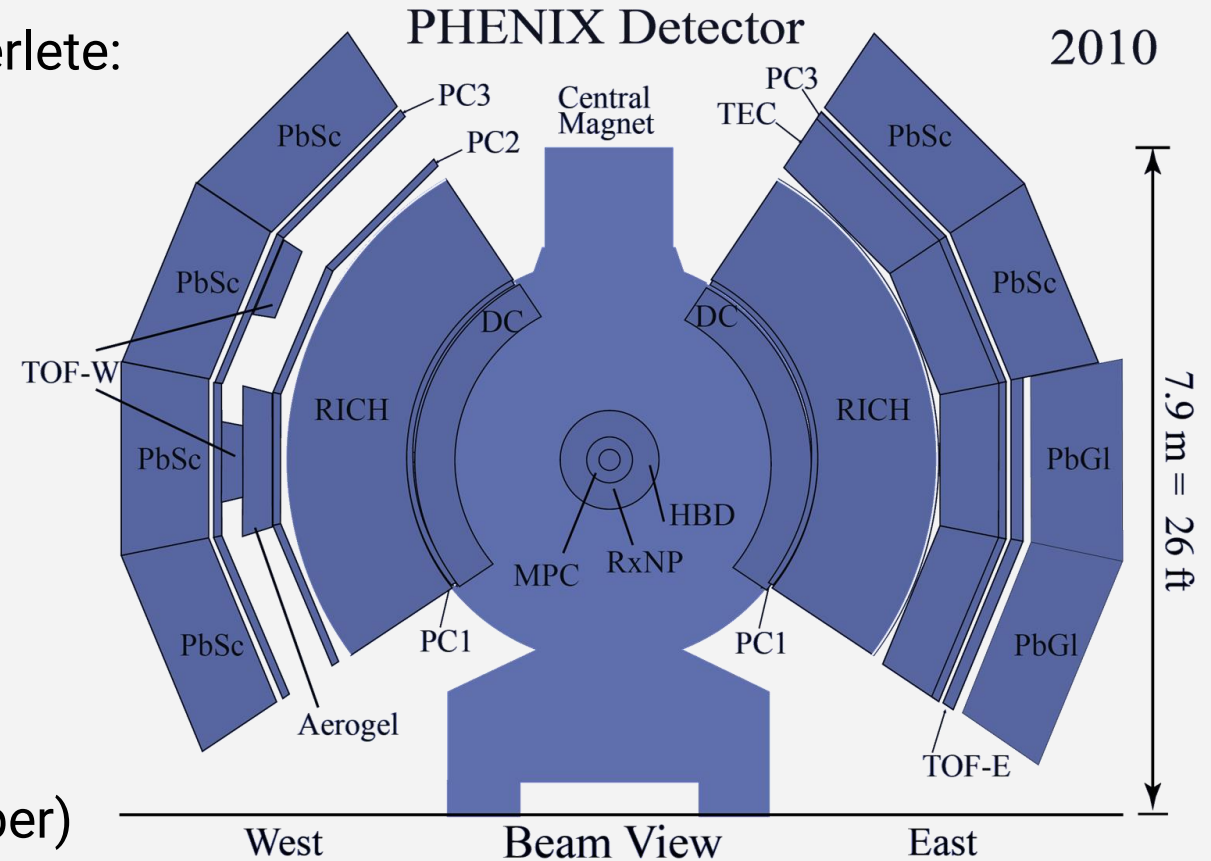
➤ RHIC (Brookhaven) részecskegyorsító 4 kísérlete:  
**PHENIX**, STAR, BRAHMS, PHOBOS

➤ Globális detektorok

- Jeleznek ha ütközést történt
- Ütközések pontos helye
- Centralitás

➤ Részecskék észlelése és azonosítása

- Elektromágneses kaloriméterek: fotonok energiája (PbSc, PbGI)
- Nyomkövető detektorok: töltött hadronok pályája (Pad és Drift Chamber)
- Repülési idő: TOF (hadron-azonosításhoz)
- Müon detektorok (MuTr, MuID)

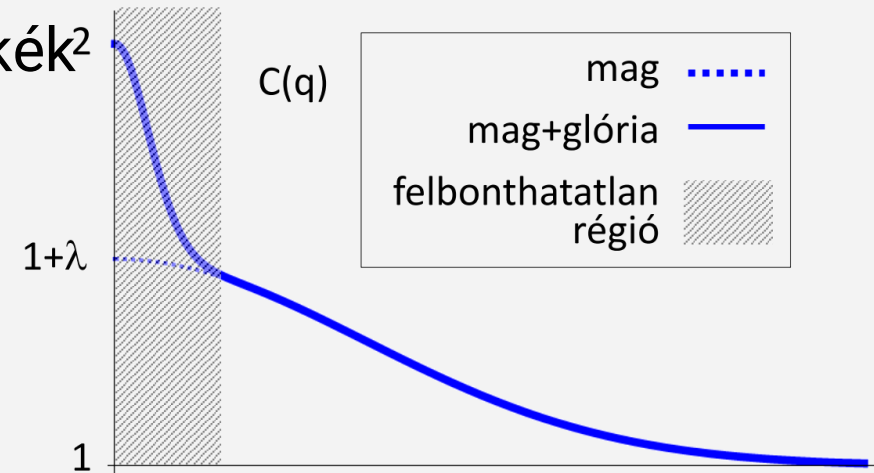
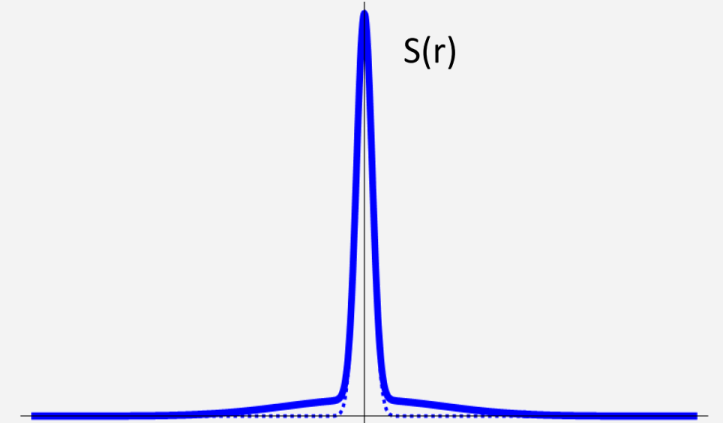


# Mag-glória modell

$$C_2(q, K) = 1 + e^{-q^2 R^2(K)} \longrightarrow \lim_{q \rightarrow 0} C_2(q, K) = 2$$

- $q_{\min}$  érték jellemzően 6-8 Mev/c<sup>2</sup> körüli
- Kis  $q$ -hoz tartozó értékek extrapolációból
- Mag: 10 fm, közvetlenül ütközés után kifagyott részecskék
- Glória: 1000 fm, bomlások során keletkezett részecskék<sup>2</sup>
- Fourier-transzformáció: forrásfüggvény nagy távolsághoz tartozó értéke kis  $q$ -hoz ad járulékot
- Glóriában keletkező részecskéket nem látjuk

$$C_2(q) = 1 + \lambda e^{-q^2 R^2} \longrightarrow \lambda = \left( \frac{N_{\text{mag}}}{N_{\text{mag}} + N_{\text{glória}}} \right)^2$$



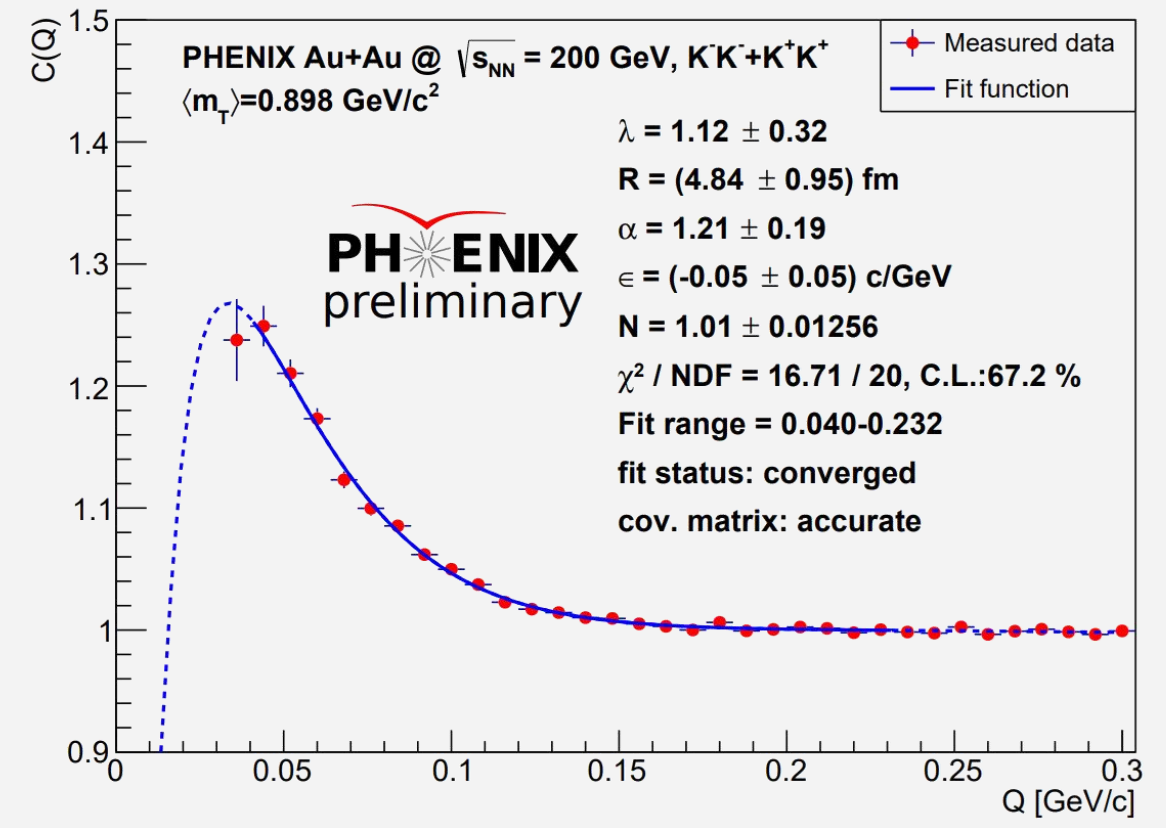
# Coulomb-korrekcio

- Coulomb-kölcsönhatást eddig nem vettük figyelembe
- Coulomb-potenciállal kiegészített kétrészecske Schrödinger-egyenlet megoldása nem síkhullám
- Számításokat bonyolítja, de numerikusan kezelhető

$$K(q; R, \alpha) = \frac{C_2(q; \lambda, R, \alpha)}{C_2^{(0)}(q; \lambda, R, \alpha)}$$

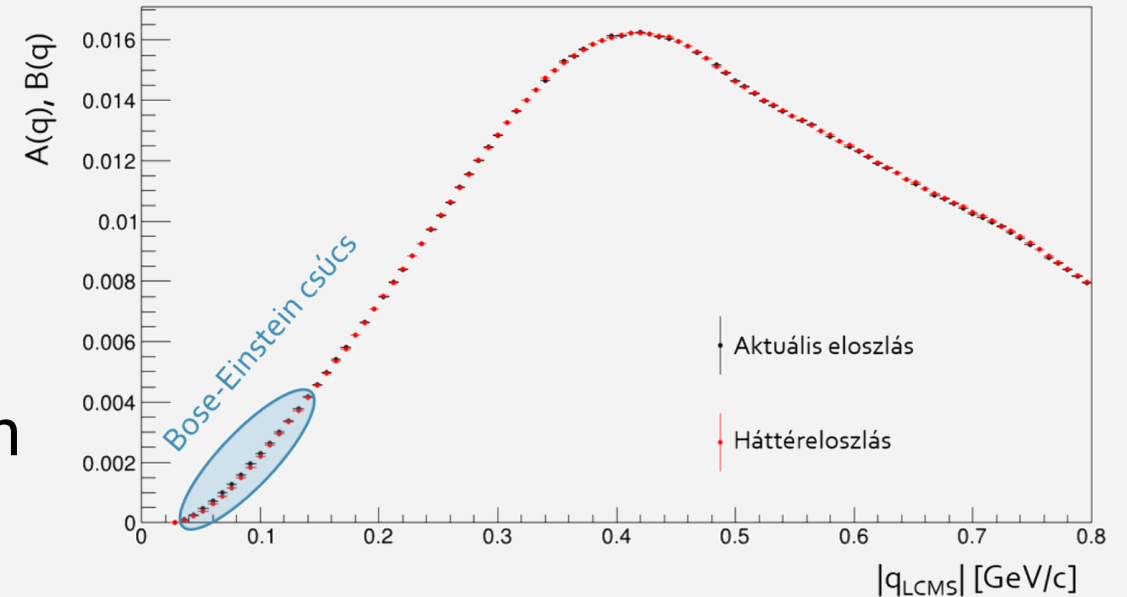
Coulomb-kcsh
Coulomb-kcsh nélkül

$$C_2(q; \lambda, R, \alpha) = [1 - \lambda + K(q; \alpha, R) \cdot \lambda \cdot \underbrace{(1 + e^{-|qR|^\alpha})}_{\text{Lévy}}]$$



# Hogy mérjük a korrelációs függvényt?

- HBT-jelenség mellett az eloszlás egyéb hatásokat is tartalmaz
- Ezek kiszűrésére:  
 $A(q,K)$  aktuális eloszlás  
 $B(q,K)$  háttéreloszlás
- Háttéreloszlás:  
különböző eseményekből, így nincs jelen a Bose-Einstein korreláció



$$C_2(q, K) = \frac{A(q, K)}{B(q, K)} \cdot \frac{\int B(q, K) dq}{\int A(q, K) dq}$$