

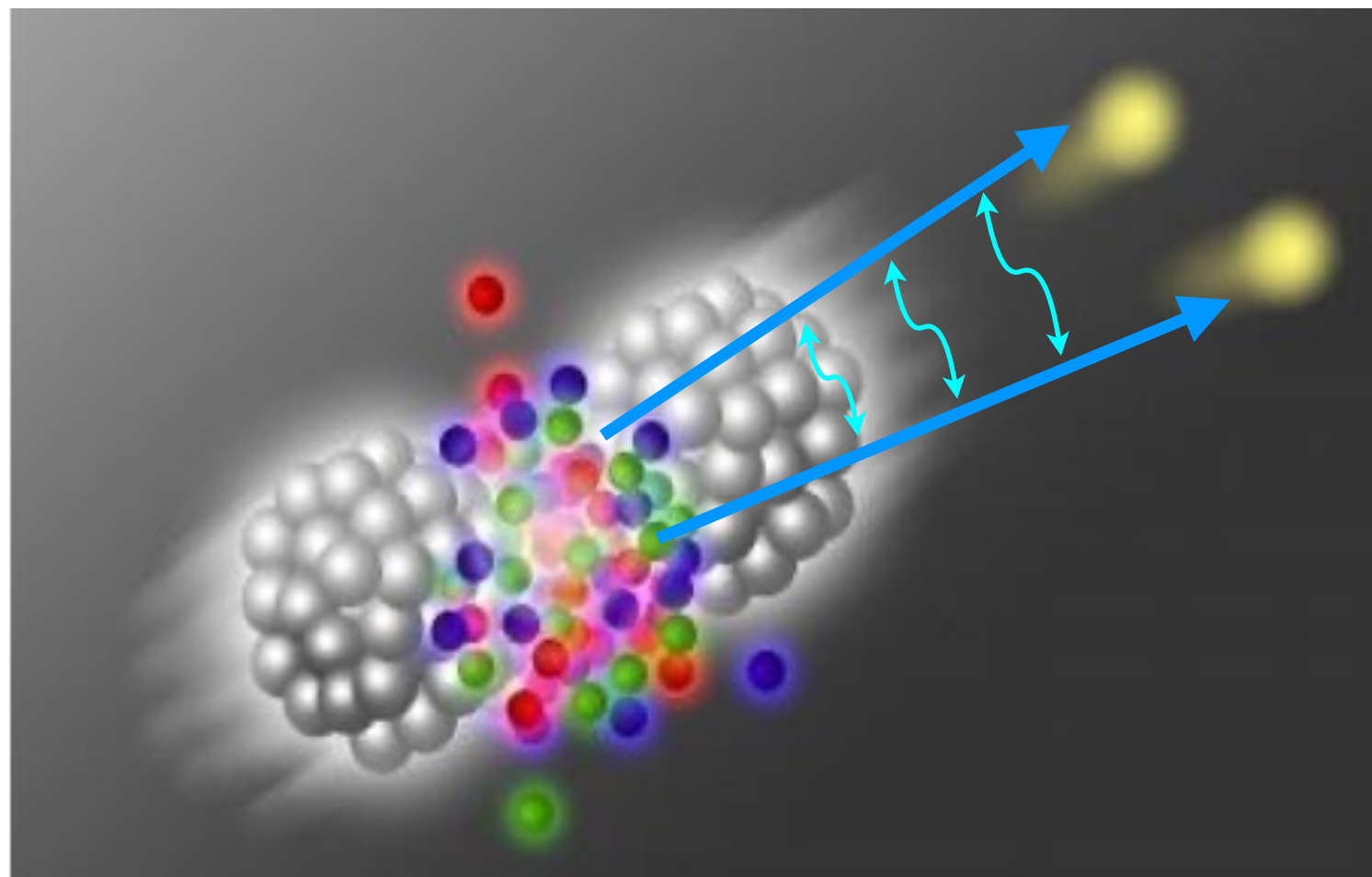
フェムトスコピーで探る系の時空発展と ハドロン間相互作用

新井田 貴文



第42回 Heavy Ion Pub 研究会 @京都大学, 3/26/2025

フェムトスコピーとは？



“Femtoscscopy”は、Lenickyによって導入された言葉で、
femtometerスケールのオブジェクトをscopeするという意味。

$\text{fm} \sim 10^{-15} \text{ m}$

$\text{fm}/c \sim 10^{-23} \text{ s}$

Lednicky and Lyuboshits (1990)

Lednicky, nucl-th/0212089 (2002)

Lisa et al. Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.55(2005)357

“HBT”は、同種 2 粒子の運動量相関測定を指すが、

“femtoscscopy”は、非同種 2 粒子相関も含めて、より広い意味で使われている。

Hanbury Brown and Twiss (HBT) 効果

NATURE November 10, 1956 VOL. 178

A TEST OF A NEW TYPE OF STELLAR INTERFEROMETER ON SIRIUS

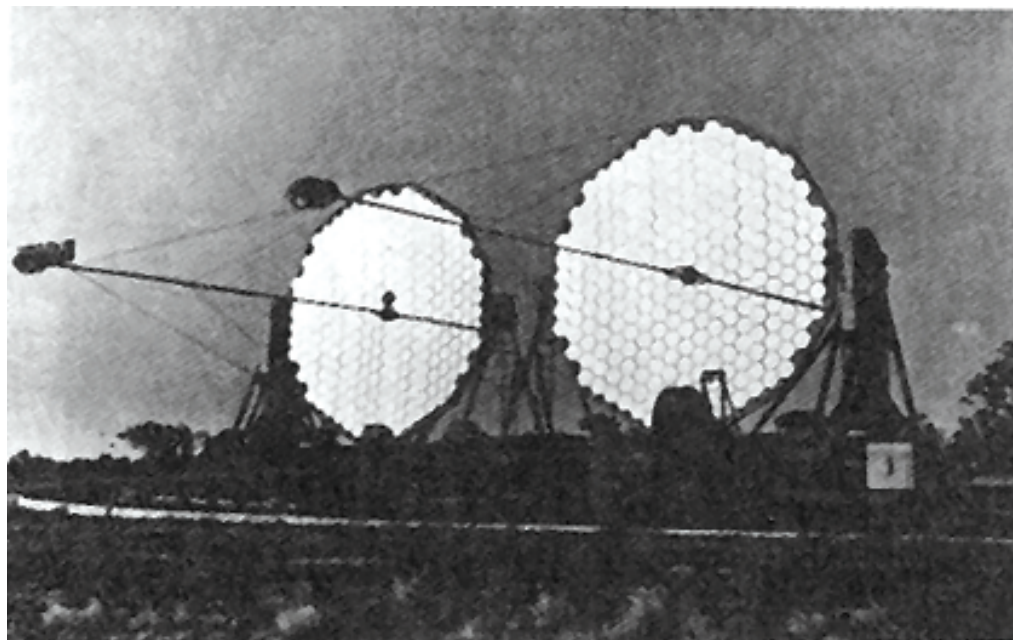
By R. HANBURY BROWN

Jodrell Bank Experimental Station, University of Manchester

AND

DR. R. Q. TWISS

Services Electronics Research Laboratory, Baldock



Pict. from Padula, BJP35 (2004)

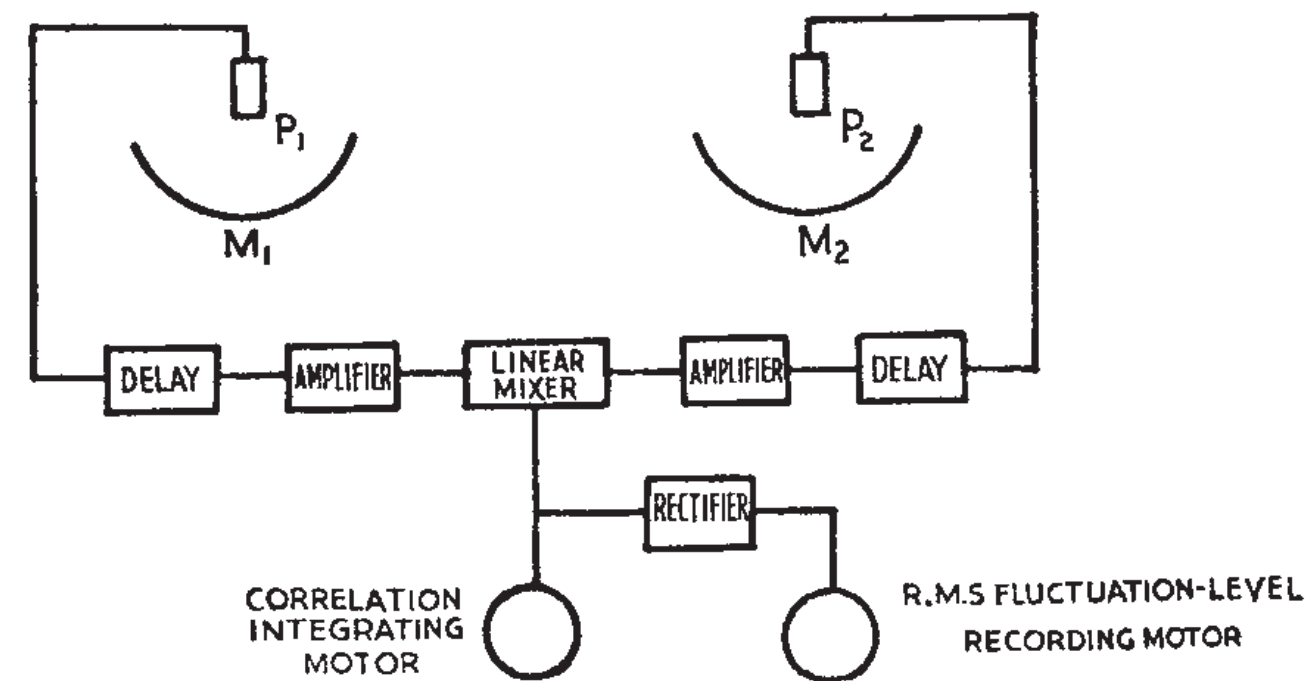


Fig. 1. Simplified diagram of the apparatus

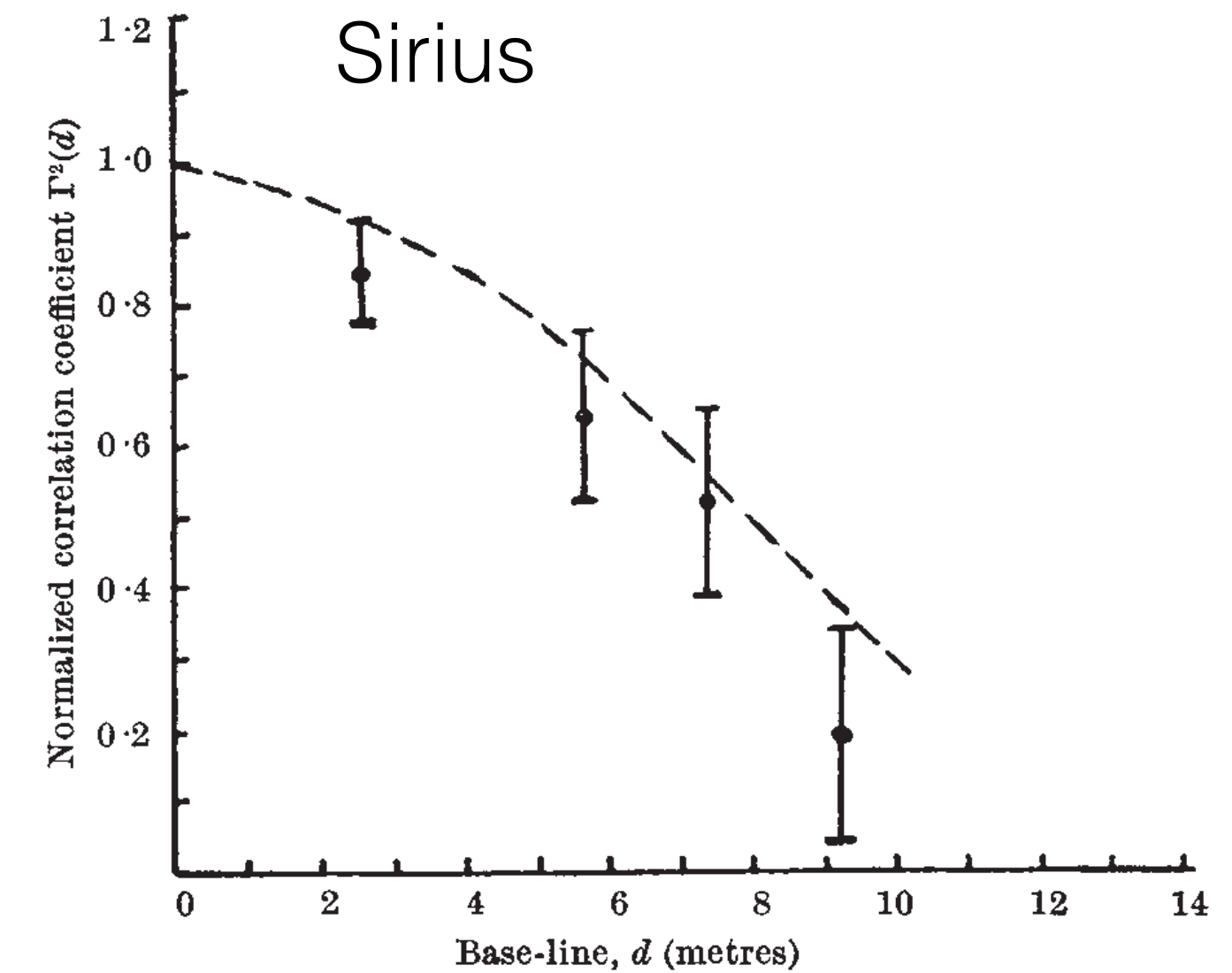


Fig. 2. Comparison between the values of the normalized correlation coefficient $\Gamma^2(d)$ observed from Sirius and the theoretical values for a star of angular diameter $0.0063''$. The errors shown are the probable errors of the observations

1956年 Hanbury BrownとTwissは電波強度干渉の測定により星の大きさ（視直径）を求めた。
シリウスを始めとして、32個の星の視直径を測定した
→ Hanbury-Brown and Twiss (HBT)効果と呼ばれる

Golhaber-Goldhaber-Lee-Pais (GGLP) 相関

PION-PION CORRELATIONS IN ANTIPROTON ANNIHILATION EVENTS

Gerson Goldhaber, William B. Fowler, Sulamith Goldhaber,
T. F. Hoang, Theodore E. Kalogeropoulos, and Wilson M. Powell

July 14, 1959

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 120, NUMBER 1

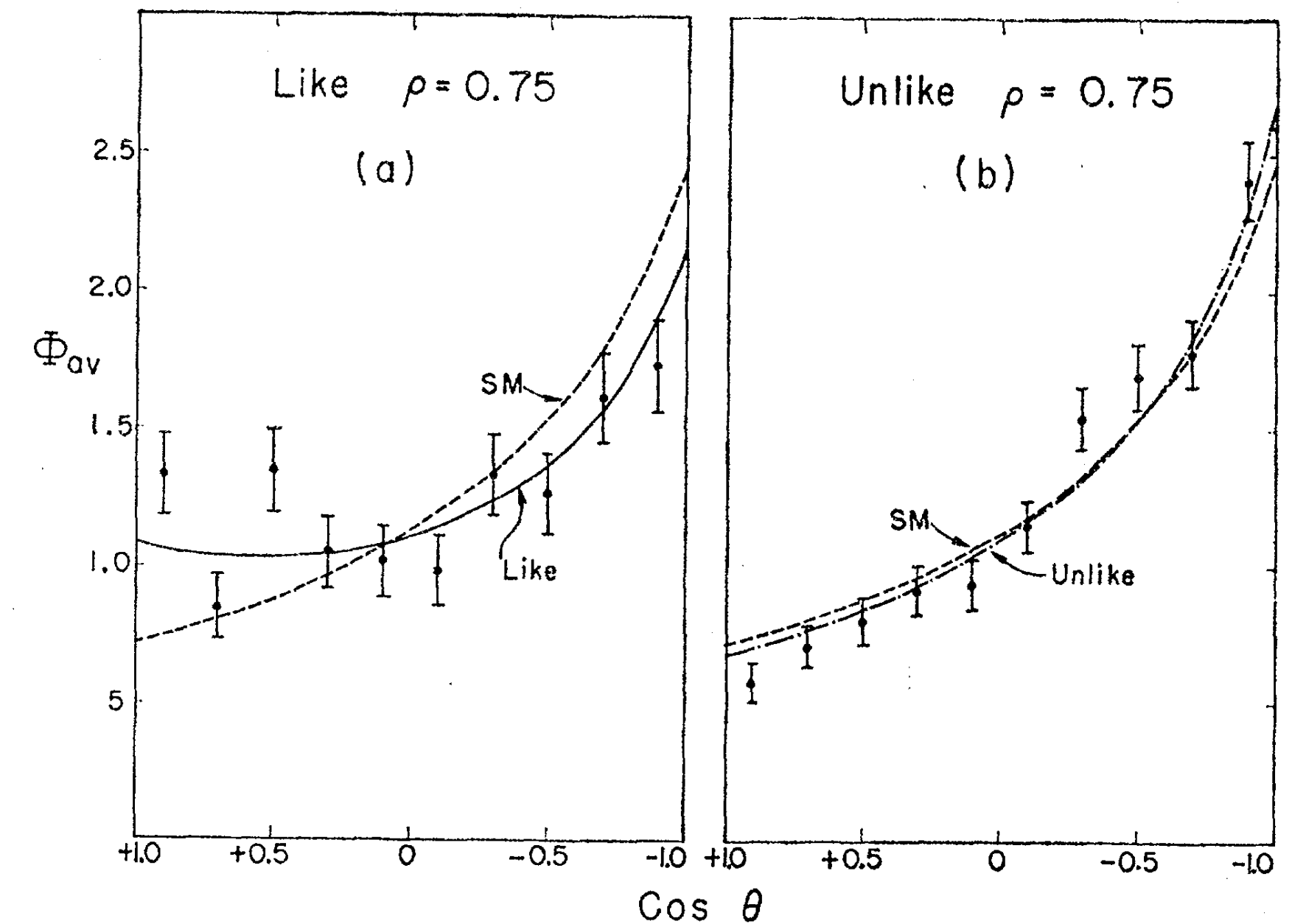
OCTOBER 1, 1960

Influence of Bose-Einstein Statistics on the Antiproton-Proton Annihilation Process*

GERSON GOLDHABER, SULAMITH GOLDHABER, WONYONG LEE, AND ABRAHAM PAIS†
Lawrence Radiation Laboratory and Department of Physics, University of California, Berkeley, California
(Received May 16, 1960)

$$\psi(12) = \iint |\phi^S(1,2)|^2 \exp[-(r_1^2 + r_2^2)/2\lambda] d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2$$
$$\approx 1 + \exp(-s^2), \quad s = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| \lambda^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{Gaussian}), \quad \rho = 2.15\lambda^{\frac{1}{2}}.$$

with “radius” ρ of the interaction volume



HBTとは独立に、Goldhaber et al. は $p\bar{p}$ 対消滅反応における $\rho^0(\rightarrow\pi^+\pi^-)$ 探索の中で、
pionペアの角度相関が同符号と異符号で異なることを発見。

→ Golhaber-Goldhaber-Lee-Paisにより、Bose-Einstein相関による量子統計効果であることがわかった。

相関関数

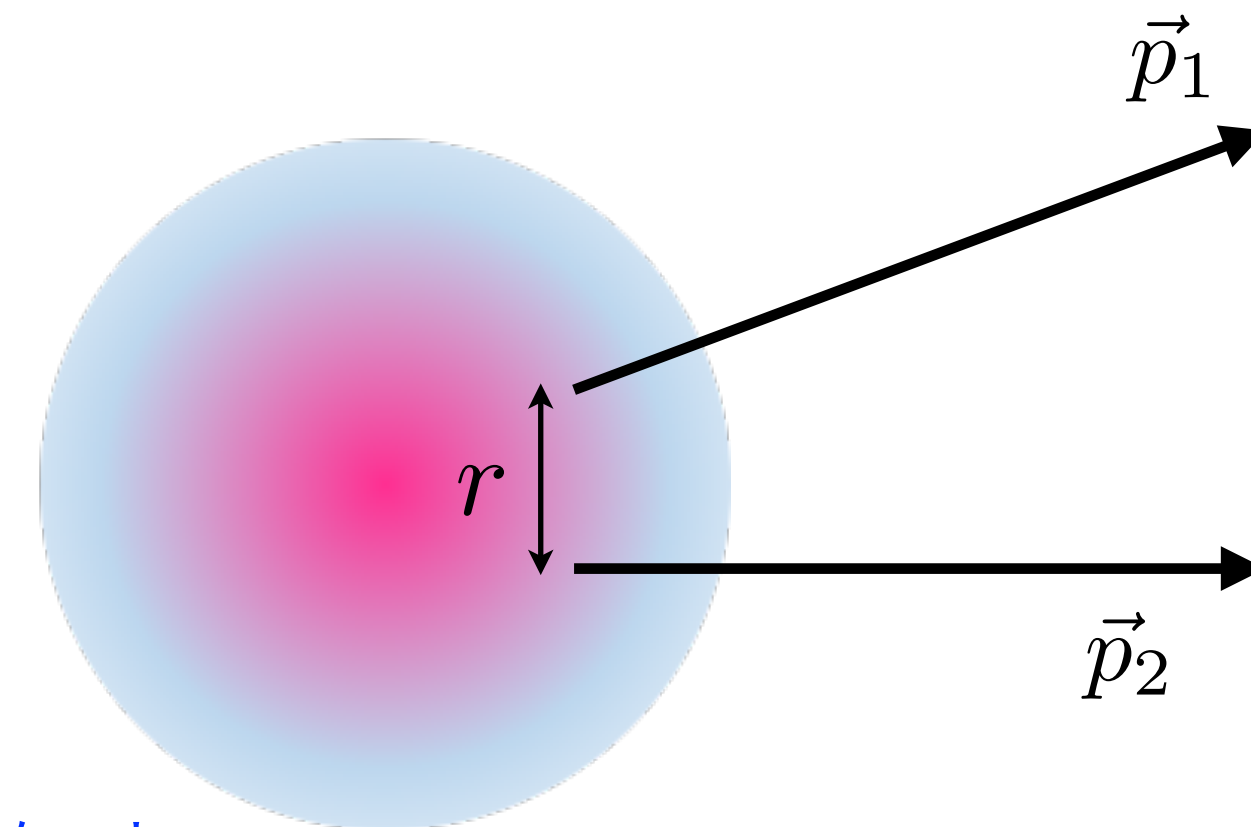
相関関数Cの定義：

$$C(q) = \int S(r) |\Psi(r, q)| d^3 r$$

→ emission ソース関数 (基本的にはガウス関数を仮定)

→ 2粒子系の波動関数

終状態相互作用 (Coulomb, 強い相互作用) を含む



$$q = p_1 - p_2$$

$$= \sqrt{|\vec{p}_1 - \vec{p}_2|^2 - (E_1 - E_2)^2} \equiv q_{\text{inv}}$$

相関関数

相関関数Cの定義：

$$C(q) = \int S(r) |\Psi(r, q)| d^3 r$$

$\Psi(r, q) \propto e^{i\mathbf{r} \cdot \mathbf{q}}$ とし、ガウスソース関数を仮定すると、

$$C(q) = 1 \pm |\tilde{S}(q)|^2 \quad \text{"~"はフーリエ変換を表す}$$

$$= 1 \pm e^{-q^2 R^2}$$

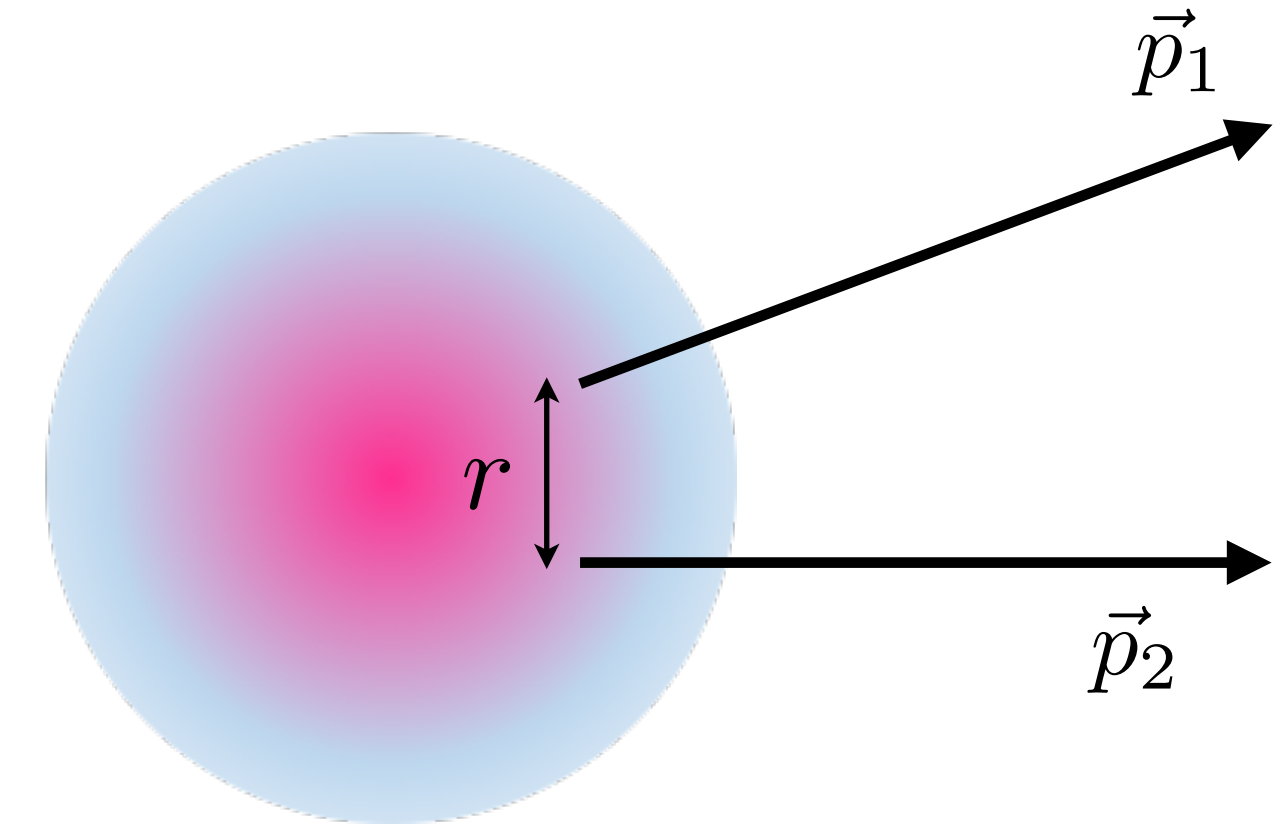
$$\rightarrow 1 \pm \lambda e^{-q^2 R^2}$$

HBT半径や

Gaussianソース半径と言ったりする

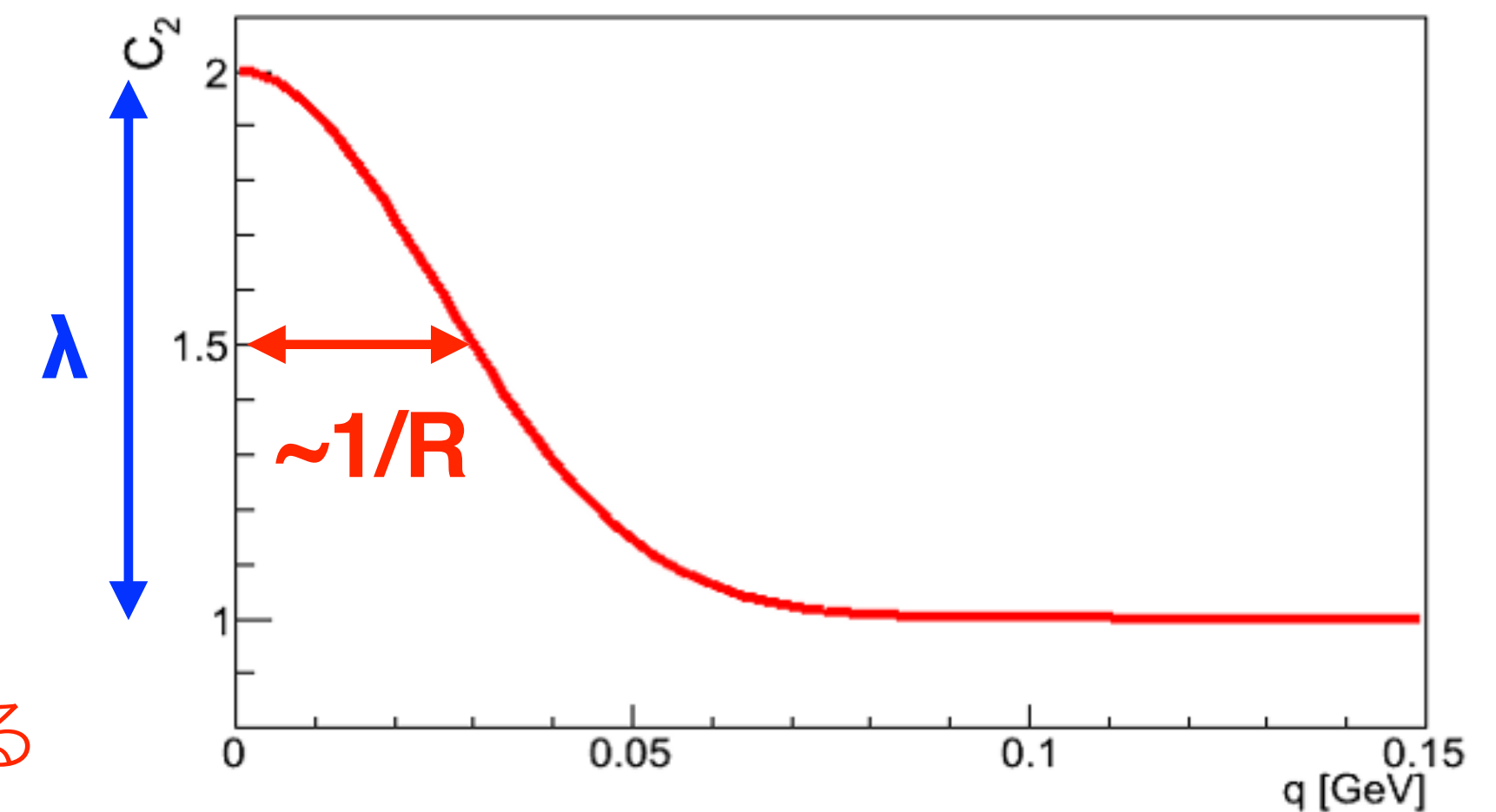
λ パラメータ (chaoticity/incoherence parameter)

purityや実験の(ペア)カットにも強く依存



$$q = p_1 - p_2$$

$$= \sqrt{|\vec{p}_1 - \vec{p}_2|^2 - (E_1 - E_2)^2} \equiv q_{\text{inv}}$$



相関関数

実験的な定義は

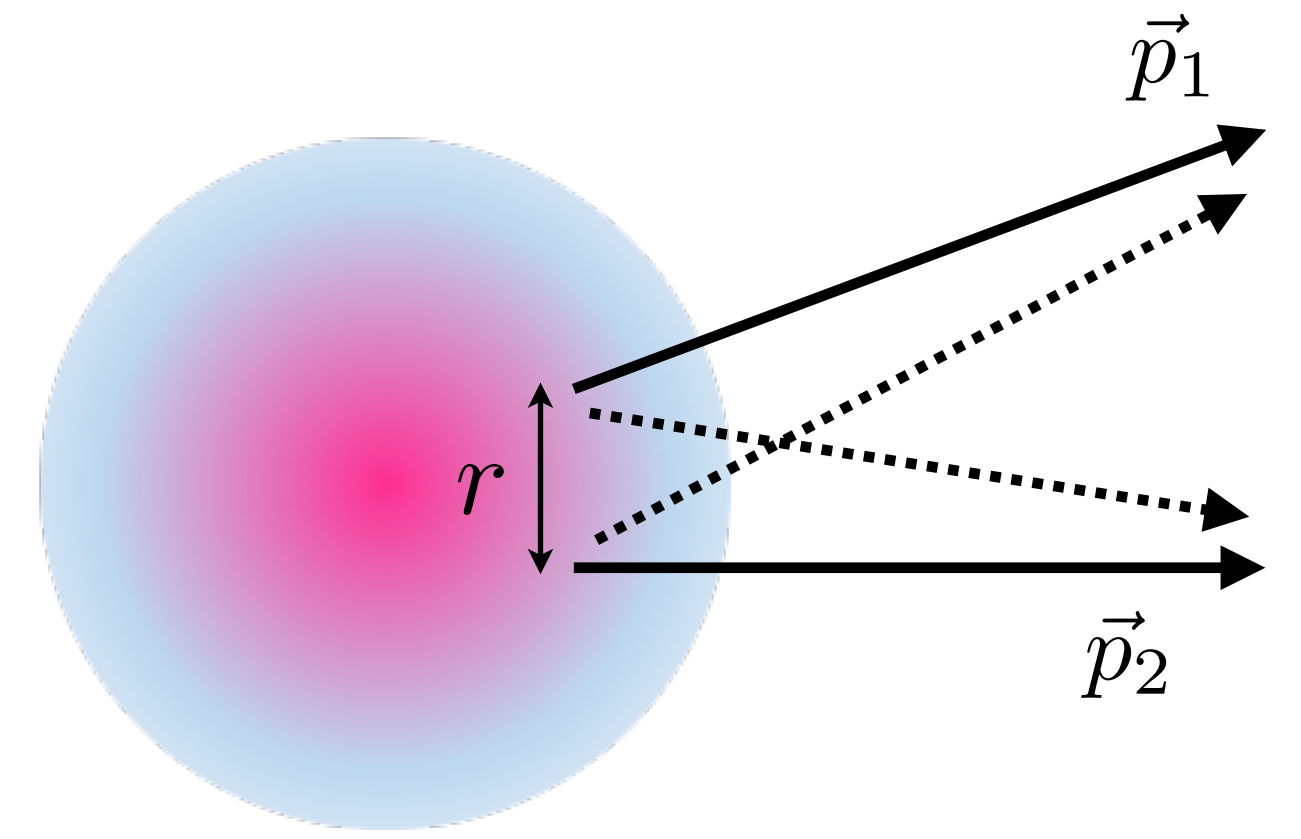
$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \frac{P(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{P(\mathbf{p}_1) \cdot P(\mathbf{p}_2)}$$

: 2粒子を同時に検出する確率
: 1粒子を独立に検出する確率の積

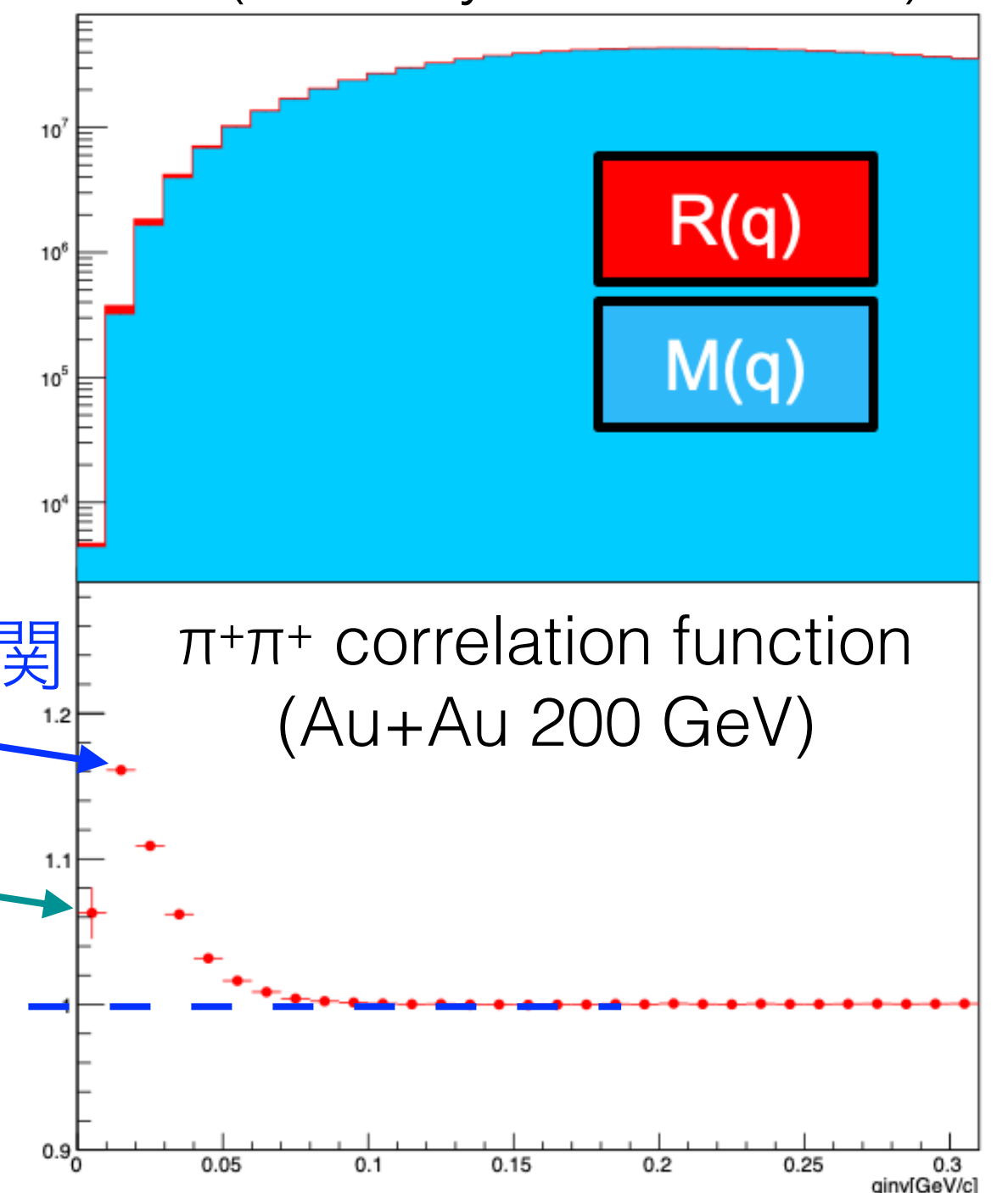
$$= \mathcal{N} \frac{A(q)}{B(q)}$$

: 同一イベント内での相対運動量分布 (物理相関を含む)
: 異なるイベントからくる2粒子の相対運動量分布
(物理相関を含まず、検出器等の効果のみ含む)

規格化係数 (大きな q で無相関($C=1$)になるように設定される)



(from my PhD thesis...)

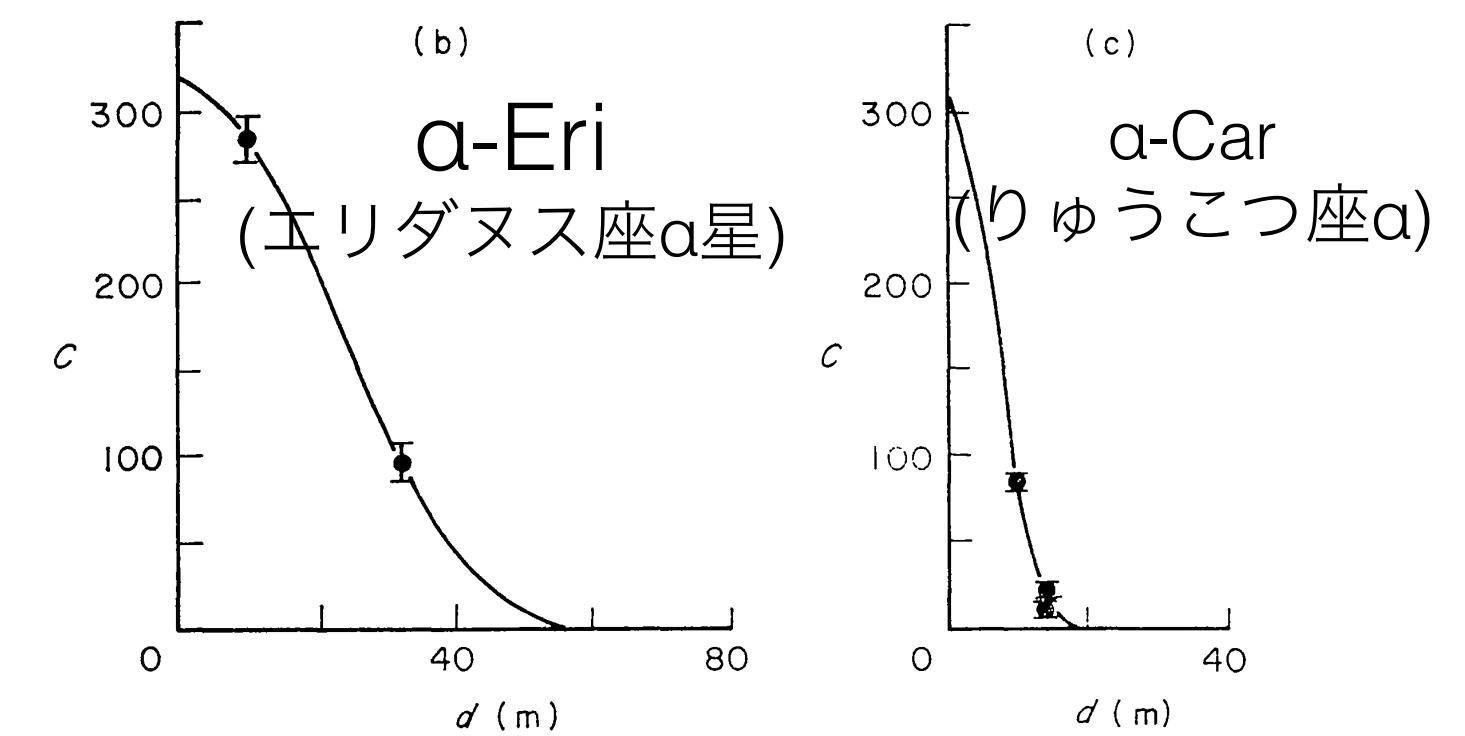
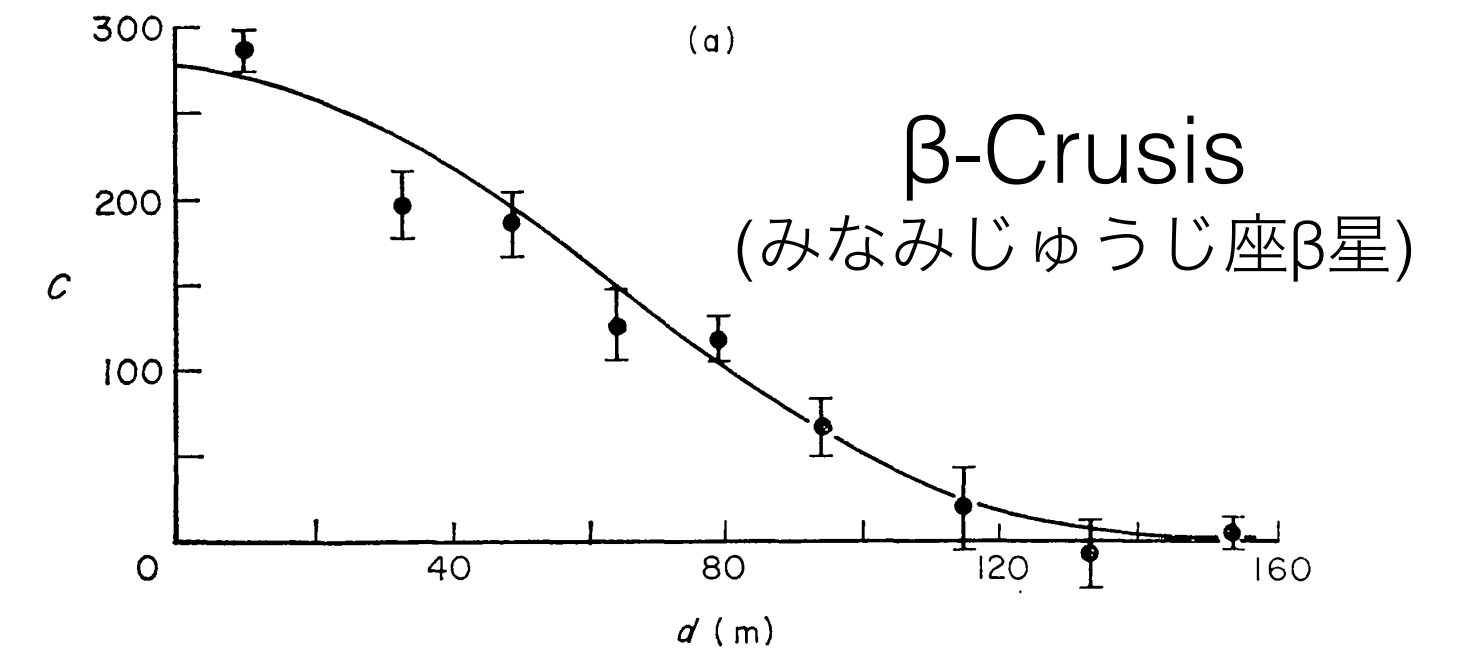
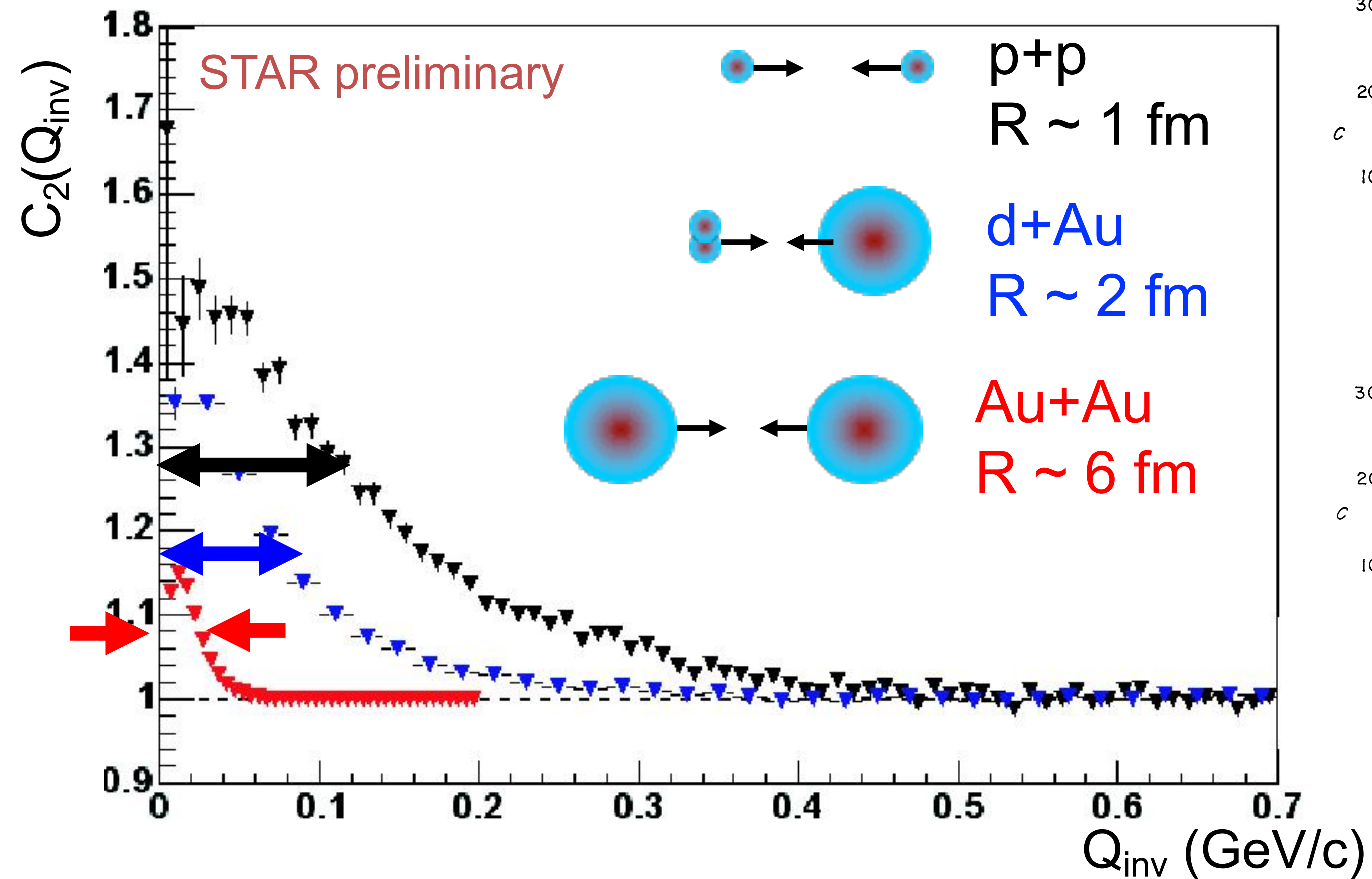


HBT(Bose-Einstein)相関

クーロン斥力

1

C(q): 実験データ

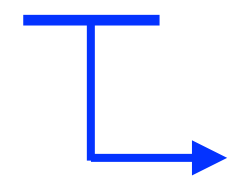


Hanbury Brown et al. (1967)

確かに、衝突システムサイズが大きいほど、 $C(q)$ の幅は小さくなっている

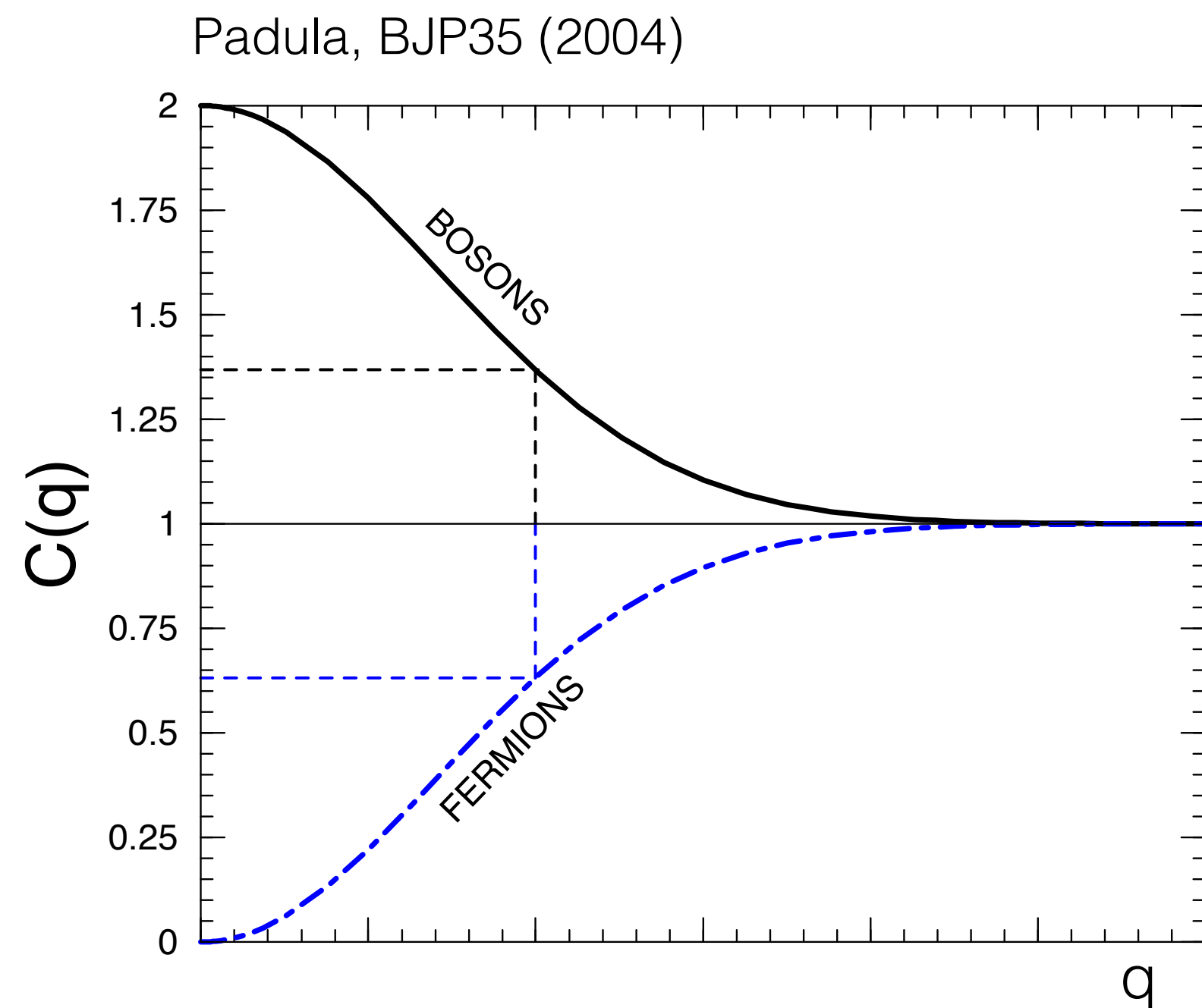
相関関数 *Boson vs. Fermion*

$$C(q) = 1 \pm \lambda e^{-q^2 R^2}$$

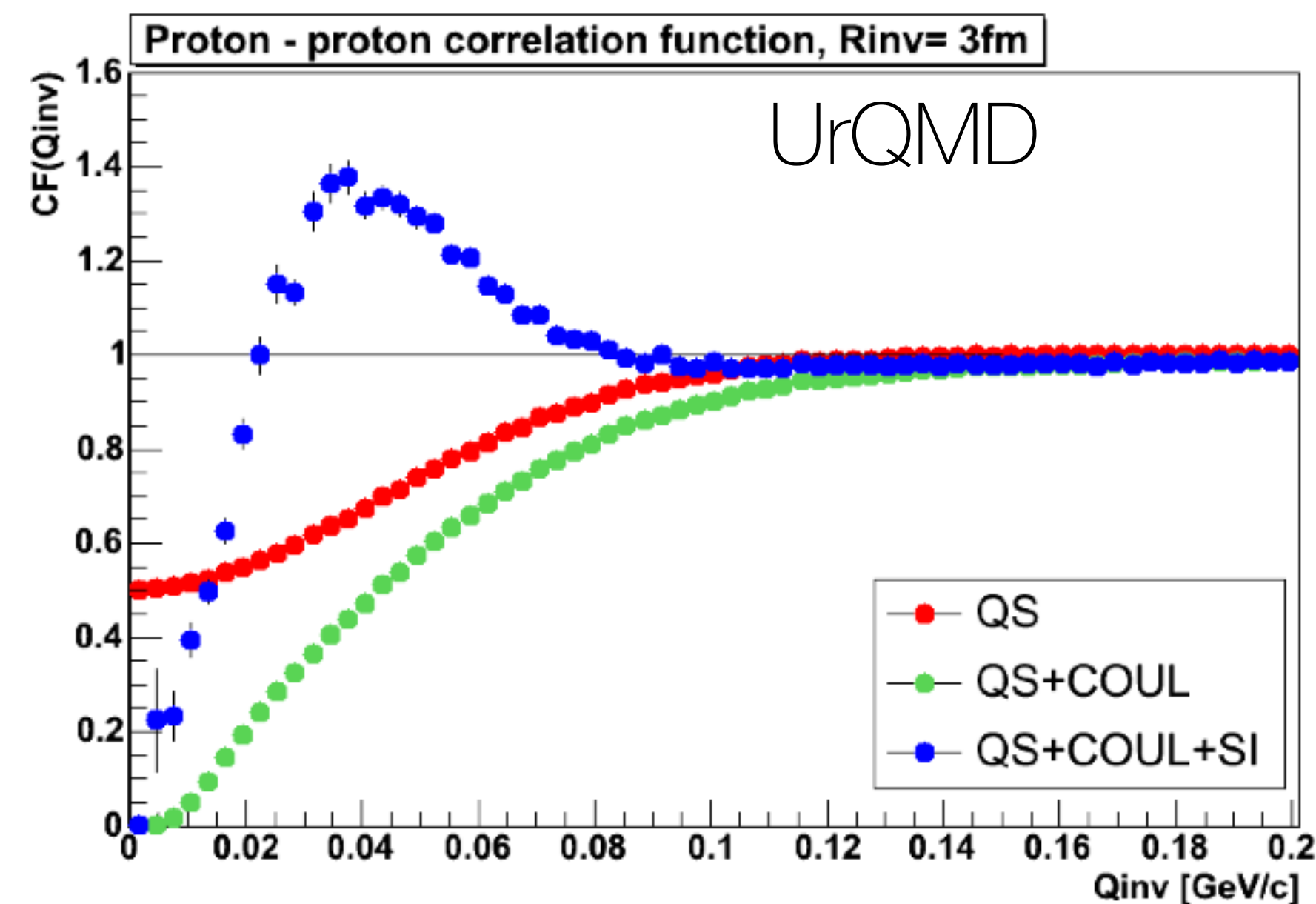


+はBoson、-はFermion

波動関数の対称化（反対称化）からくる



H. Zbroszczyk, Zymanyi School (2021)



x_1, x_2

p_1, p_2

e.g. proton-proton相関では、QS (Quantum Statistics) だけでなく、

クーロン斥力、強い相互作用 (引力)が $C(q)$ に寄与

$P_1(p)$

なぜフェムトスコピー？

QGP→ハドロンガスが1次相転移の場合、
エントロピー保存のためにハドロンガスの体積または
系の持続時間の増大が予測される

Pratt, PRD33, 1314 (1986)
Bertsch, NPA498 (1989) 173

$$S_{\text{total}} = s_{\text{QGP}} V_{\text{QGP}} = s_{\text{H}} V_{\text{H}}$$

$$\frac{\tau_{\text{H}}}{\tau_{\text{c}}} = \frac{s_{\text{QGP}}}{s_{\text{H}}} = \frac{d_{\text{QGP}}}{d_{\pi}}$$

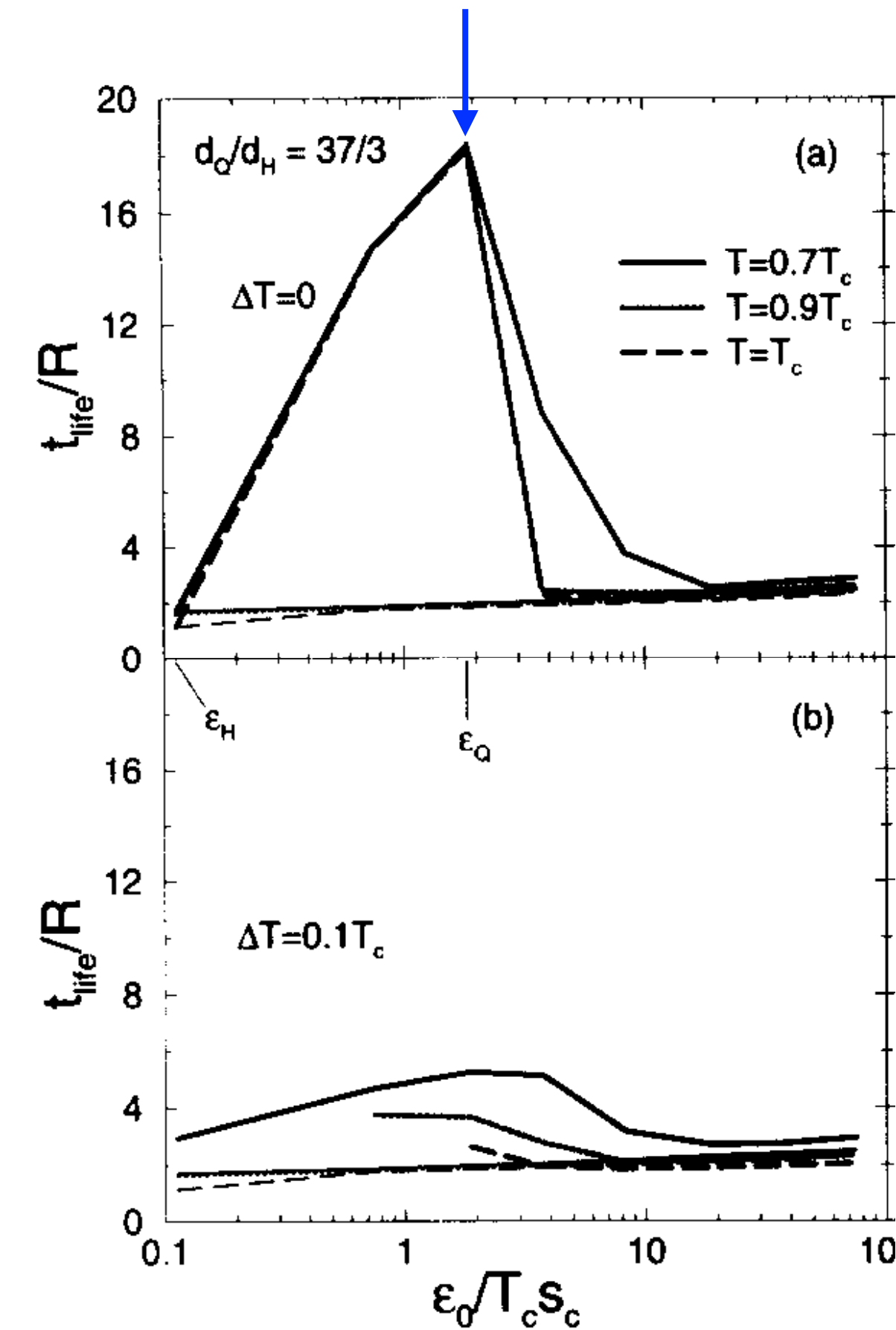
s: エントロピー密度

d: 自由度

$\tau_{\text{c(H)}}$: 相転移が起こる(終わる)時の時間

Yagi, Hatsuda, and Miake, Cambridge UP. (2005)

系の寿命が臨界点付近でピークを持つ



Rischke and Gyulassy, NPA608 (1996) 479

時間情報はどうやって調べる??

C(q)の3次元への拡張

Pratt, PRD33, 1314 (1986)
 Bertsch, Gong and Tohyama, PRC37,1896 (1988)
 Bertsch, NPA498, (1989)173

Bertsch-Pratt Parameterization (“Out-Side-Long”) を用いた解析

Longitudinal Center of Mass System (LCMS)系での解析： $p_{z1}+p_{z2}=0$

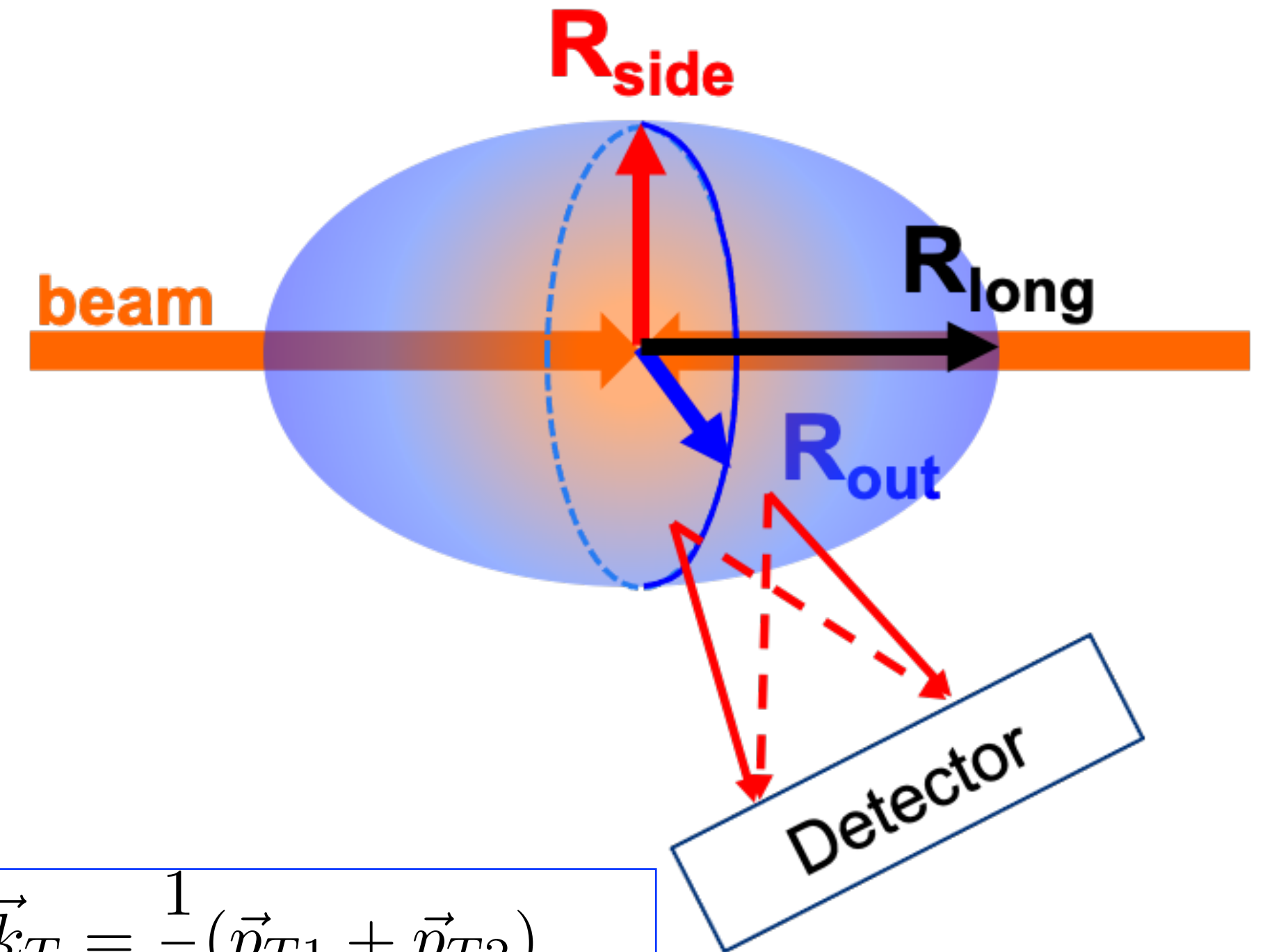
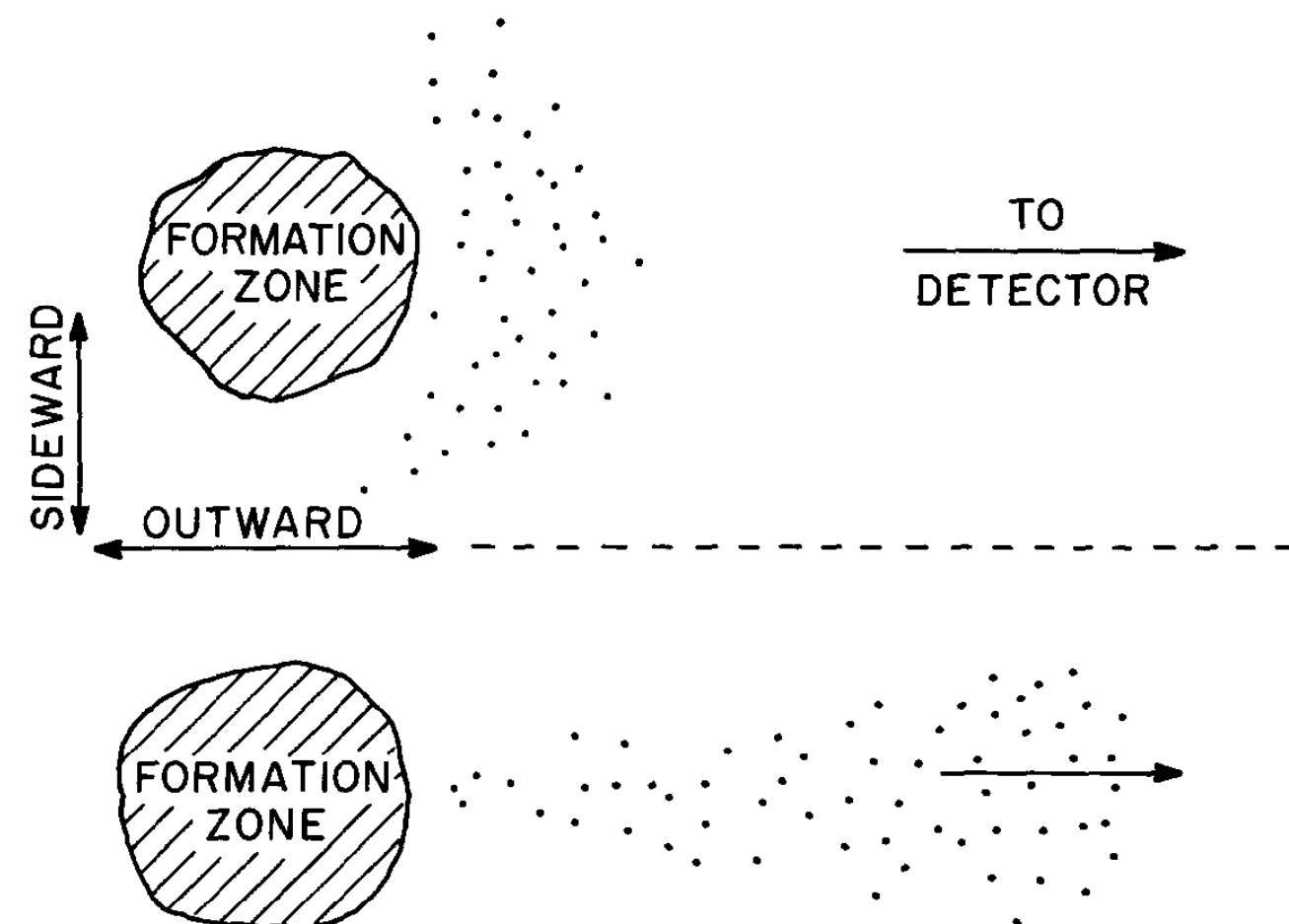
$$C(q) = 1 + \lambda e^{-R^2 q^2}$$

$$= 1 + \lambda e^{-R_{\text{side}}^2 q_{\text{side}}^2 - R_{\text{out}}^2 q_{\text{out}}^2 - R_{\text{long}}^2 q_{\text{long}}^2 - \sigma_t^2 q_0^2}$$

$$q_0 \stackrel{\text{LCMS}}{\approx} \beta_T q_{\text{out}}$$

$$\approx 1 + \lambda e^{-R_{\text{side}}^2 q_{\text{side}}^2 - \underbrace{(R_{\text{out}}^2 + \beta_T^2 \sigma_t^2)}_{R_{\text{out}} \text{と置き直す}} q_{\text{out}}^2 - R_{\text{long}}^2 q_{\text{long}}^2}$$

R_{out} と置き直す



$$\vec{k}_T = \frac{1}{2}(\vec{p}_{T1} + \vec{p}_{T2})$$

$$\vec{q}_{\text{out}} \parallel \vec{k}_T, \vec{q}_{\text{side}} \perp \vec{k}_T$$

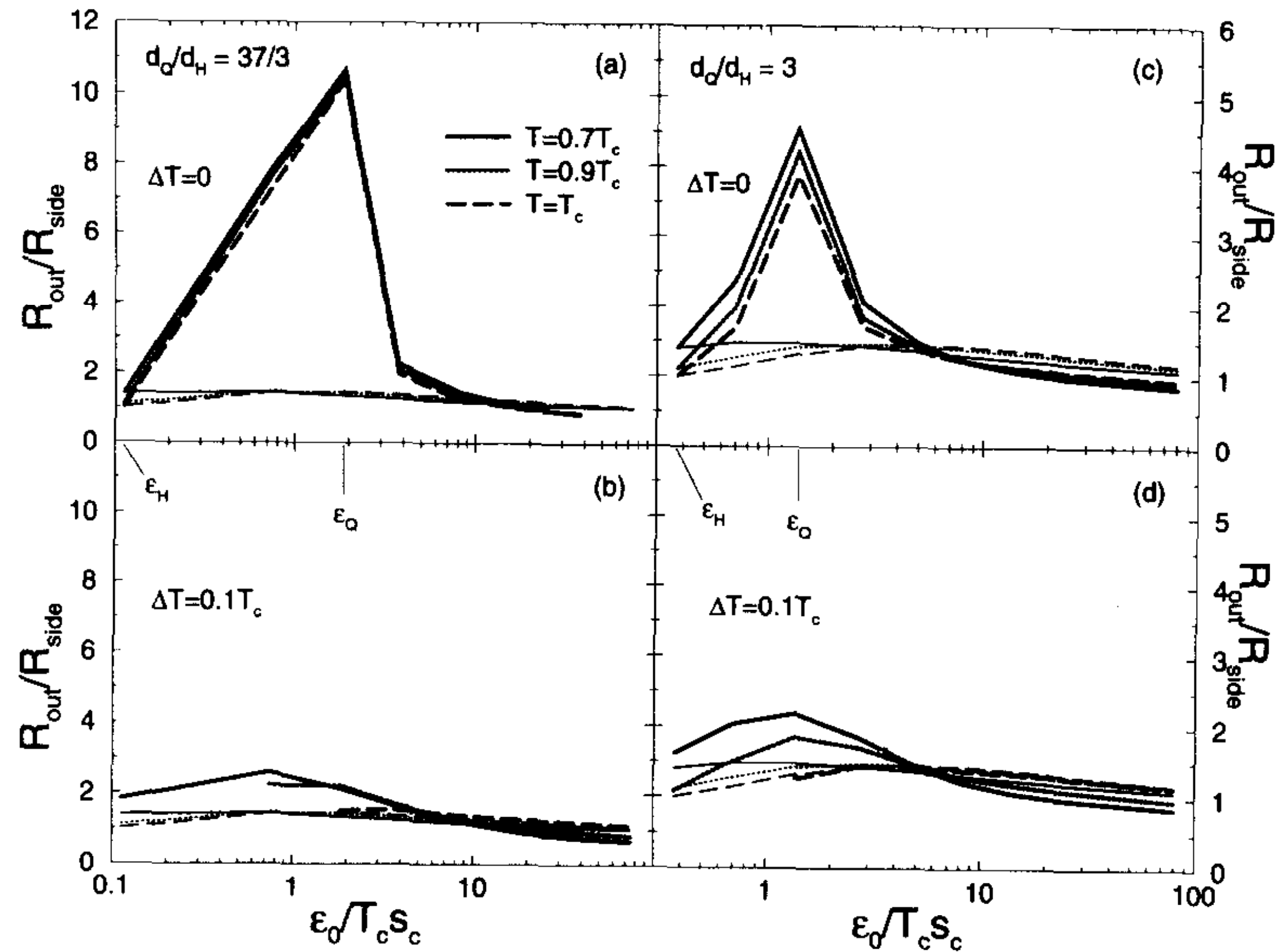
$$\vec{q}_{\text{long}} \parallel \text{beam}$$

時間情報 (粒子放出の持続時間)は R_{out} から得られる！

＊Yano-Koonin paraなど他の解析手法もある

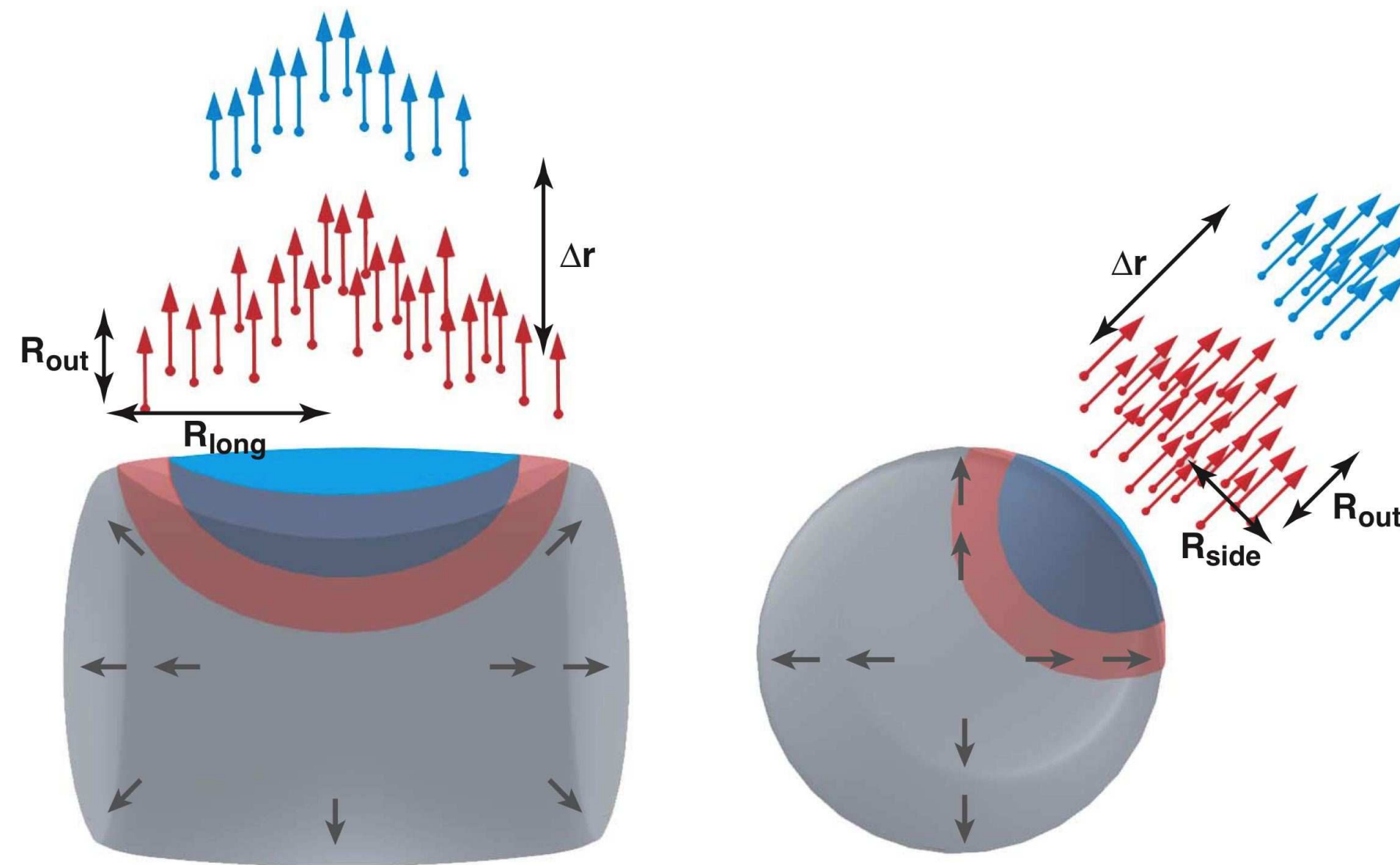
R_{out}/R_{side} ratio

Rischke and Gyulassy, NPA608 (1996) 479



1次相転移を仮定した場合、 R_{out}/R_{side} はピークを臨界点でピークを作る

膨張している系



膨張している系 (radial flowなどx-p相関がある場合) では、
粒子源全体の大きさを測定してない！
ある速度である方向に飛んできた粒子群のサイズや形を見ている。

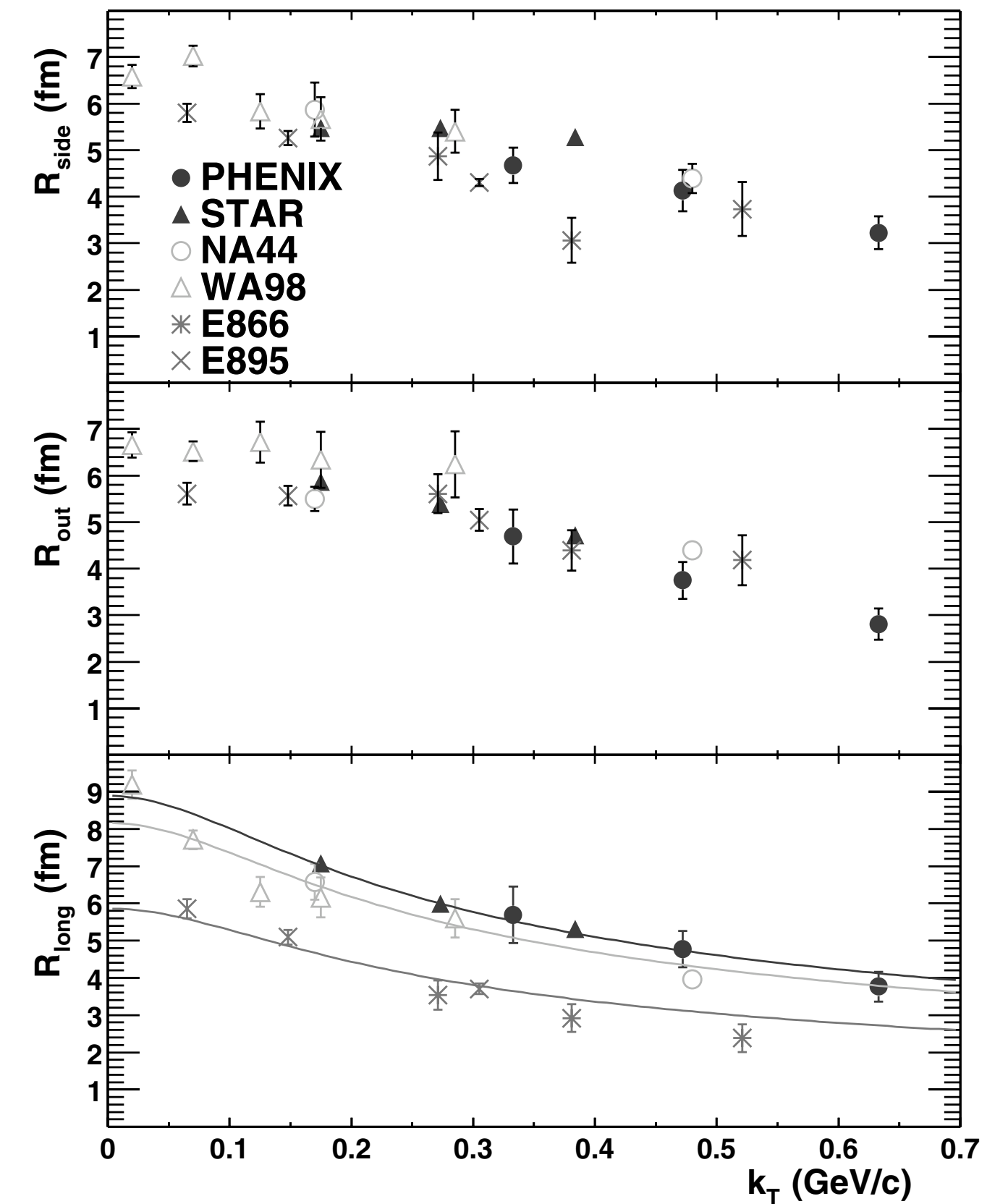
“Length of homogeneity”

Akkelin and Sinyukov, PLB356(1995)525

逆にHBT半径に強い運動量依存があるなら、系の膨張を示すとも言える (小さい系との関連)。

$\beta_T \rightarrow 0$ or $T \rightarrow \infty$ なら、 $R_{HBT} = R_{geom}$

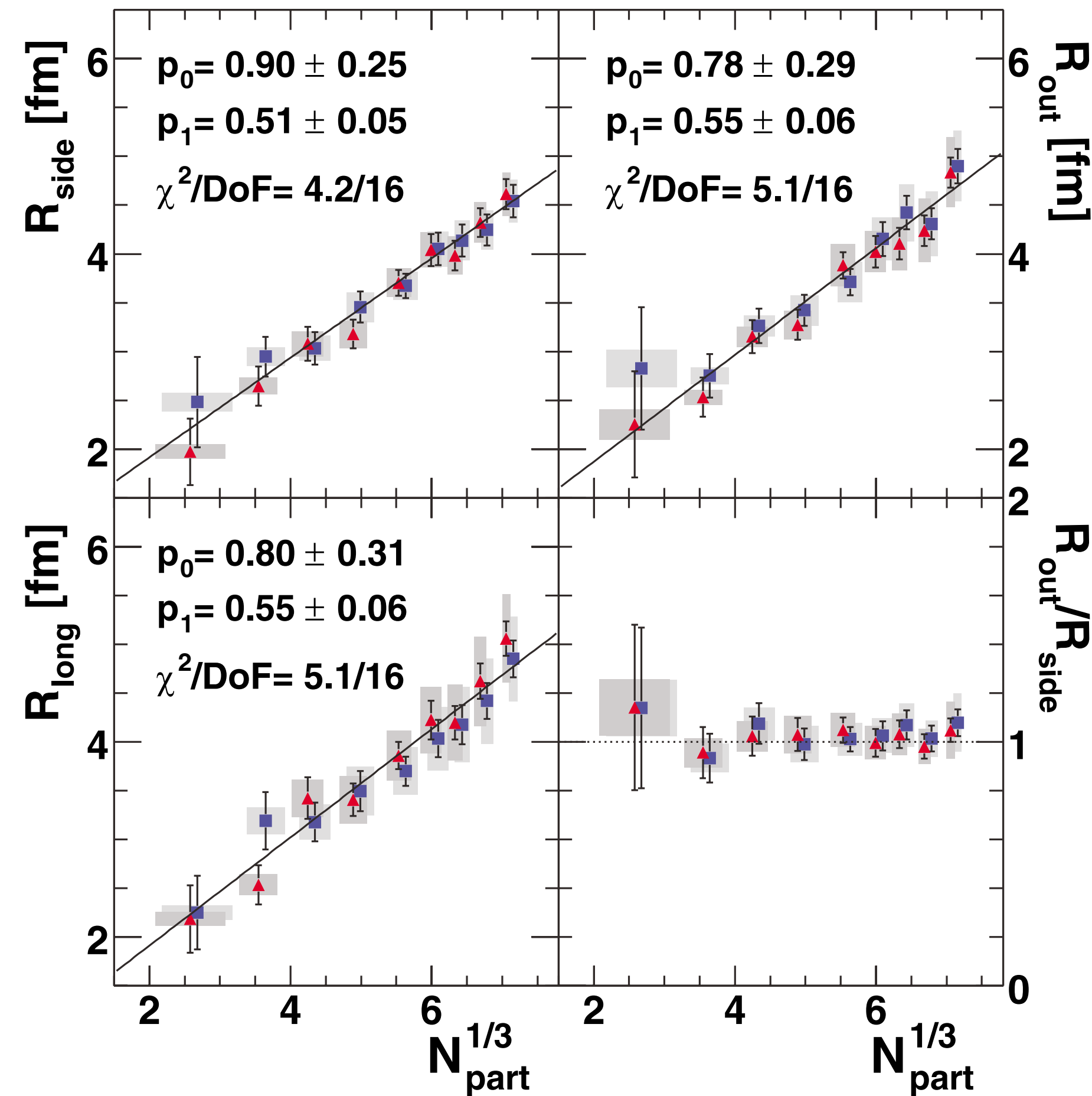
PHENIX, PRL88, 192302 (2002)
Au+Au 130 GeV



$$k_T = \left| \frac{1}{2} (\vec{p}_{T1} + \vec{p}_{T2}) \right|$$

*RHIC*における *pion* HBT (Centrality依存性)

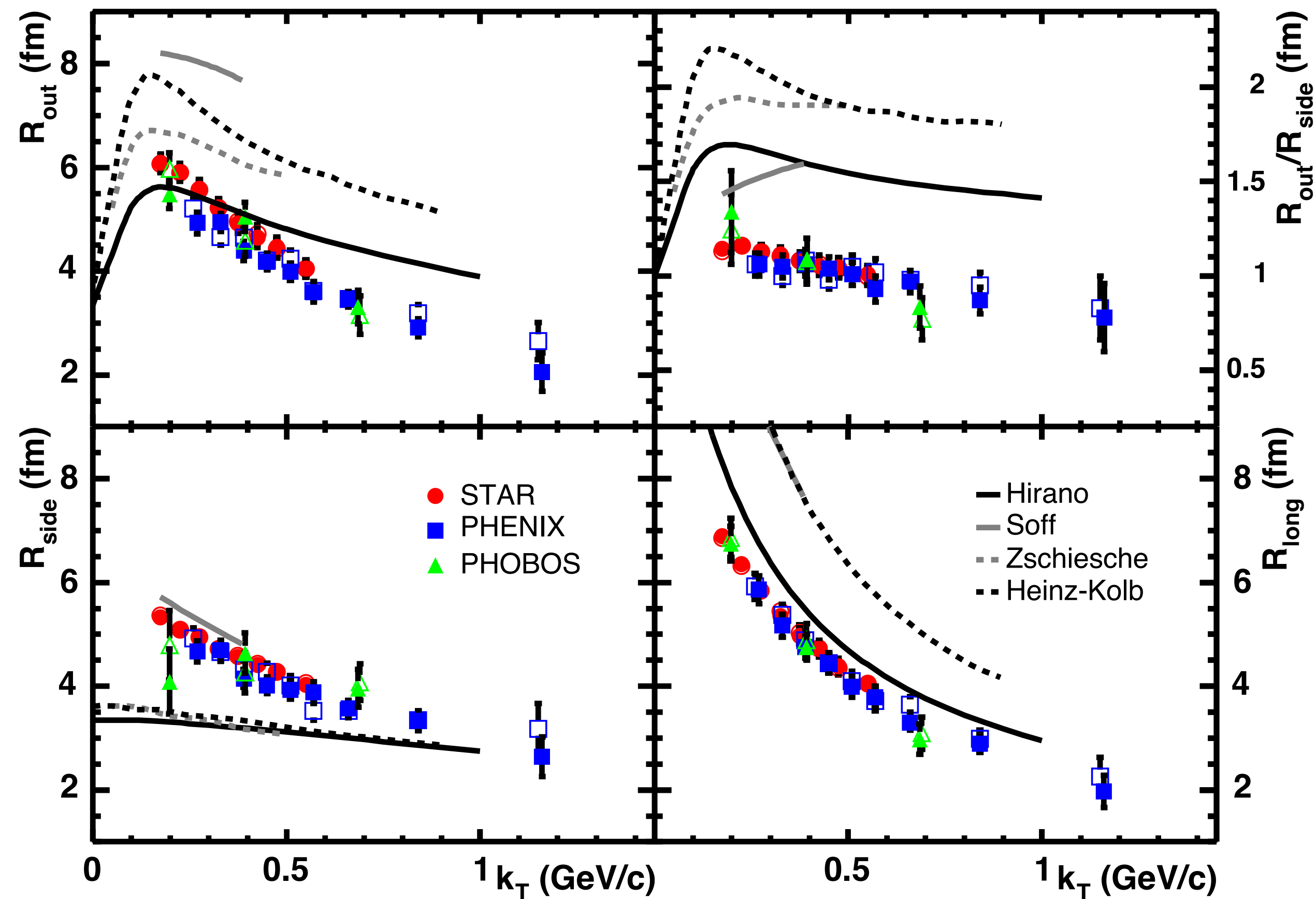
PHENIX, PRL93, 152302 (2004)



- HBT半径が N_{part} の1/3乗に比例する
 N_{part} を系の体積と思うと、 $N_{\text{part}}^{1/3}$ は半径に対応する
- 横軸を $(dN/d\eta)^{1/3}$ にしても同じ傾向が見られる
(後で出てきます)

RHICにおける *pion* HBT (k_T 依存性)

Lisa et al. Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.55(2005)357



- 1 次相転移もしくはクロスオーバーを取り入れた流体モデルがデータを再現できなかった

- また、ナイーブな予想とは異なり、 $R_{out}/R_{side} \sim 1$ 瞬間的な粒子放出??

→ "HBT puzzle" と呼ばれた

HBT puzzle の解決

PRL **102**, 232301 (2009)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

wee.
12 JU

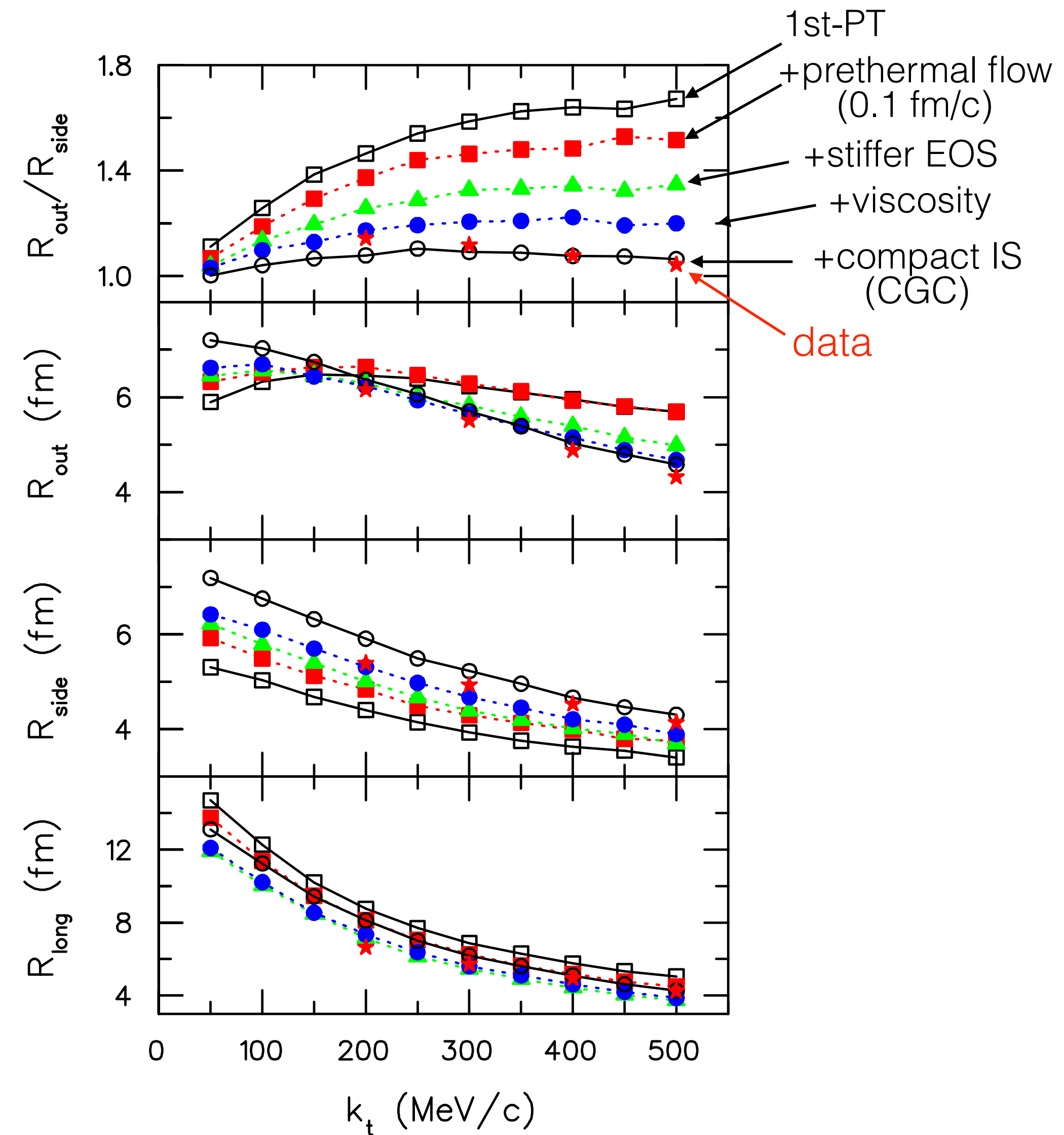
Resolving the Hanbury Brown–Twiss Puzzle in Relativistic Heavy Ion Collisions

Scott Pratt

Department of Physics and Astronomy, Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824, USA
(Received 20 November 2008; revised manuscript received 8 April 2009; published 8 June 2009)

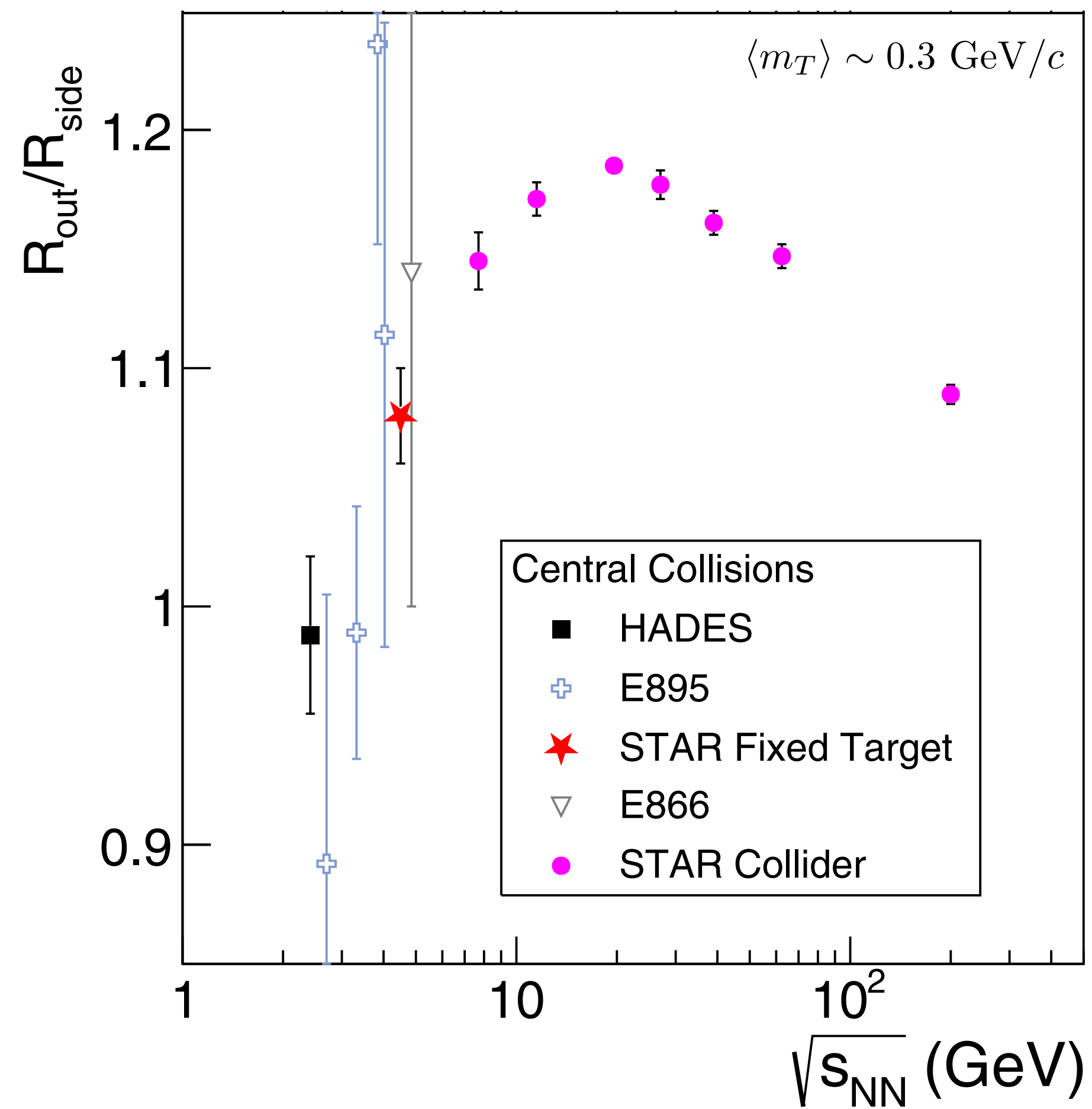
Two particle correlation data from the BNL Relativistic Heavy Ion Collider have provided detailed femtoscopic information describing pion emission. In contrast with the success of hydrodynamics in reproducing other classes of observables, these data had avoided description with hydrodynamic-based approaches. This failure has inspired the term “HBT puzzle,” where HBT refers to femtoscopic studies which were originally based on Hanbury Brown–Twiss interferometry. Here, the puzzle is shown to originate not from a single shortcoming of hydrodynamic models, but the combination of several effects: mainly prethermalized acceleration, using a stiffer equation of state, and adding viscosity.

S. Prattがprethermal flowやEOS, viscosityなどを入れることで実験データを再現できることを示した！

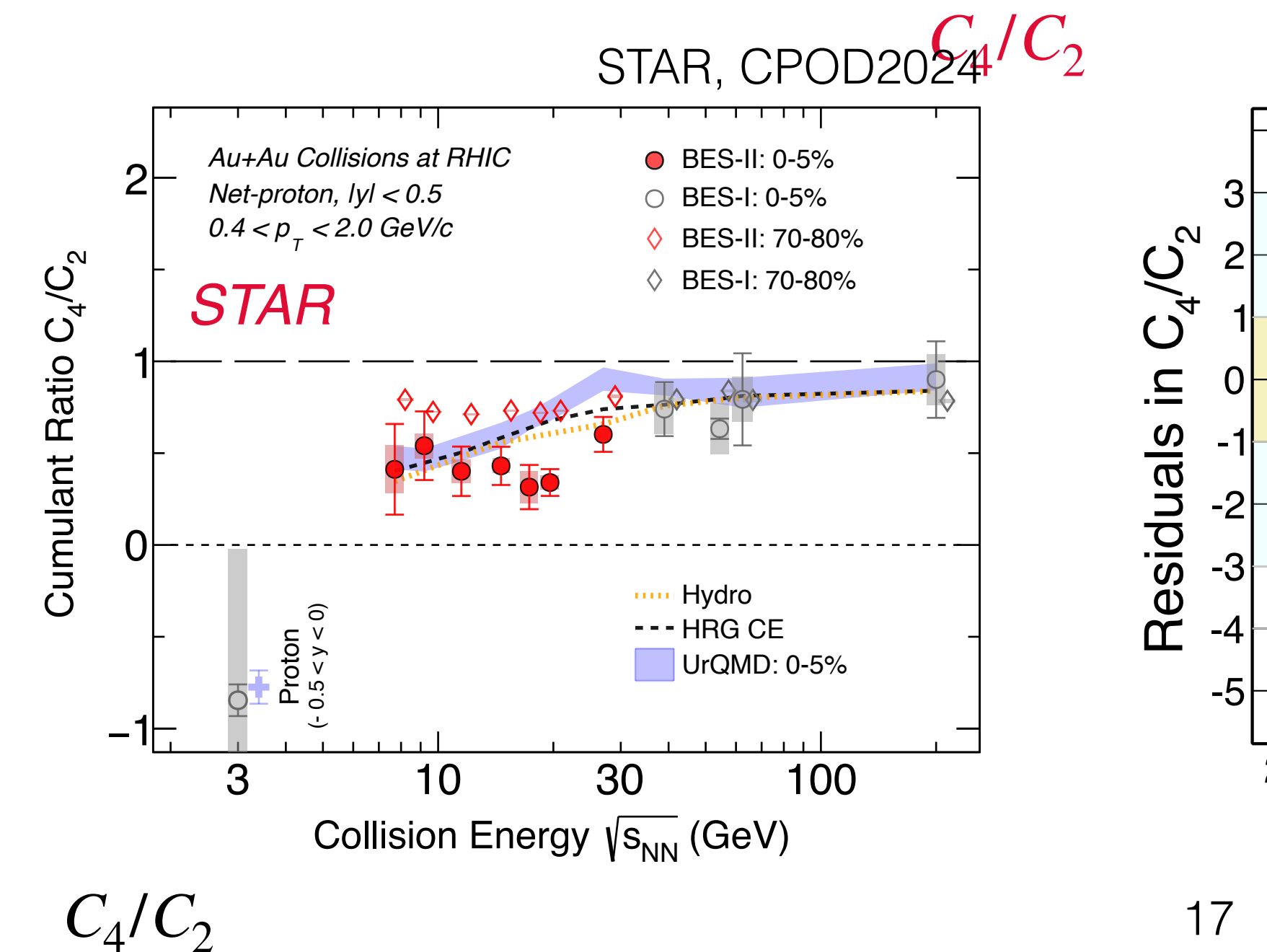
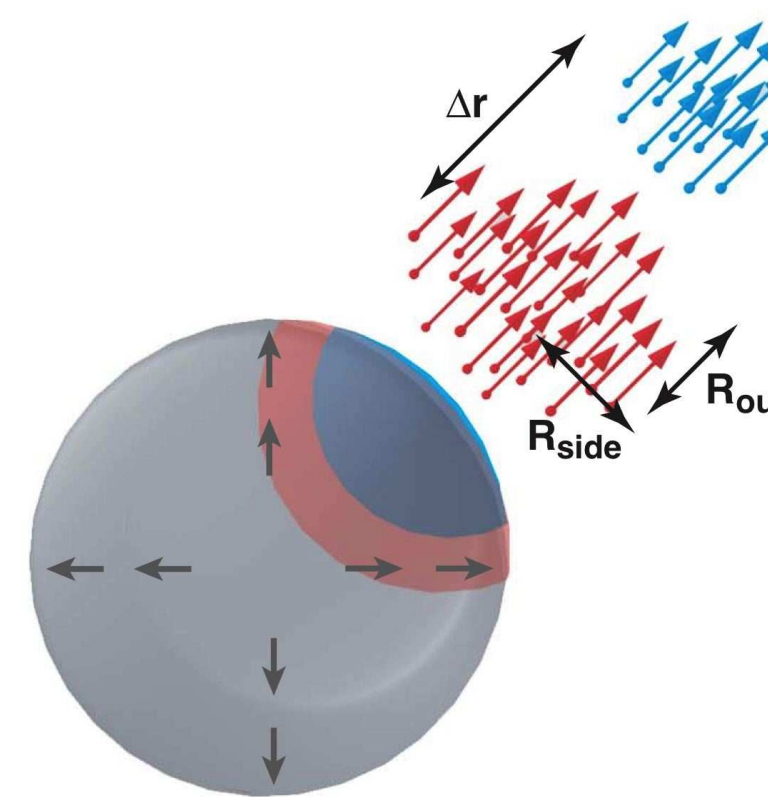


R_{out}/R_{side} vs. beam energy

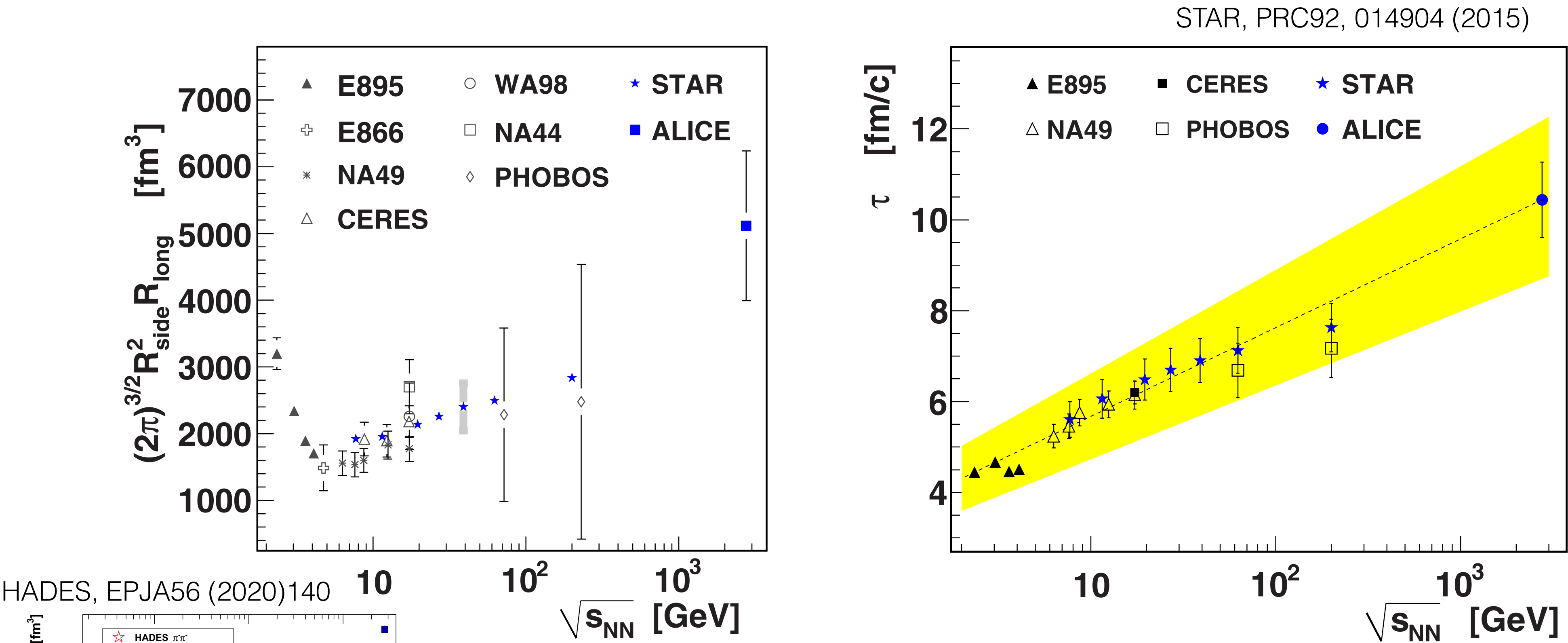
STAR, PRC103, 034908 (2021)



- $\sqrt{s_{NN}} = 20$ GeV付近でピークとなっている。
状態方程式の軟化を示す？
- 臨界点探索のため測定されたBES-II 正味陽子数揺らぎ (4次と2次のキュムラント比)も同じくらいのエネルギーで非単調な振る舞い (ベースラインからのずれ)



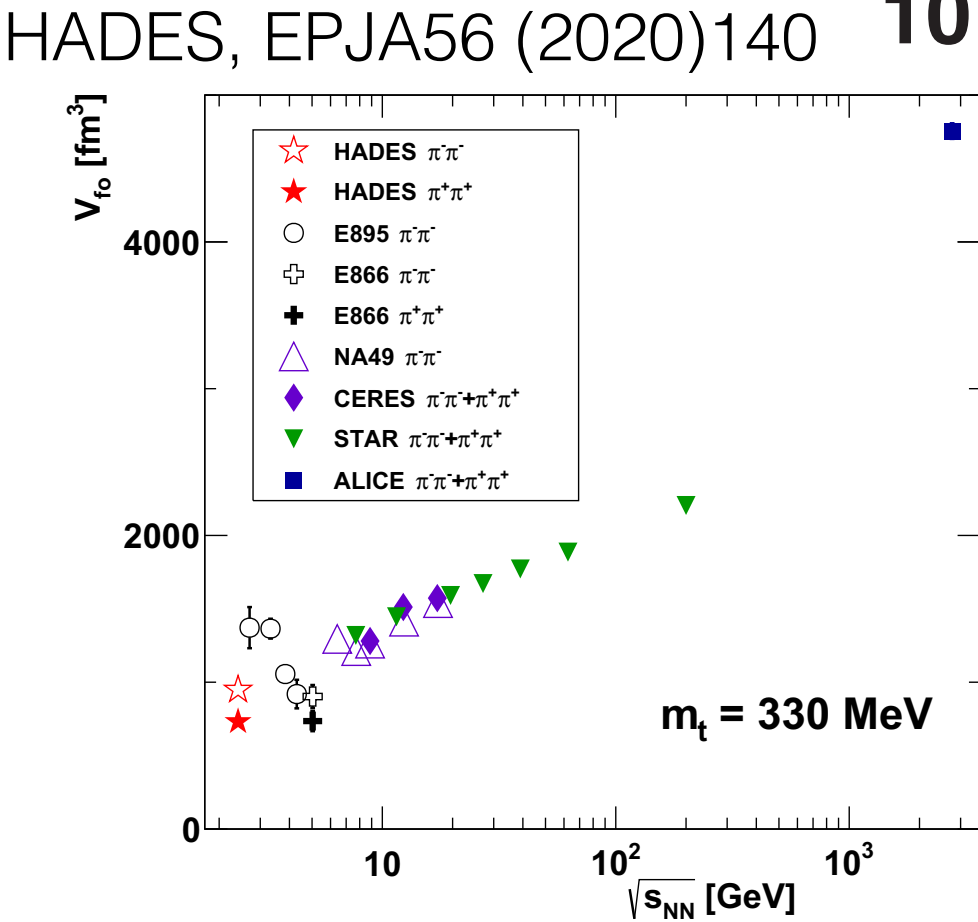
系の体積と寿命



$$R_{\text{long}} = \tau \sqrt{\frac{T}{m_T} \frac{K_2(m_T/T)}{K_1(m_T/T)}}$$

τ : 系の寿命

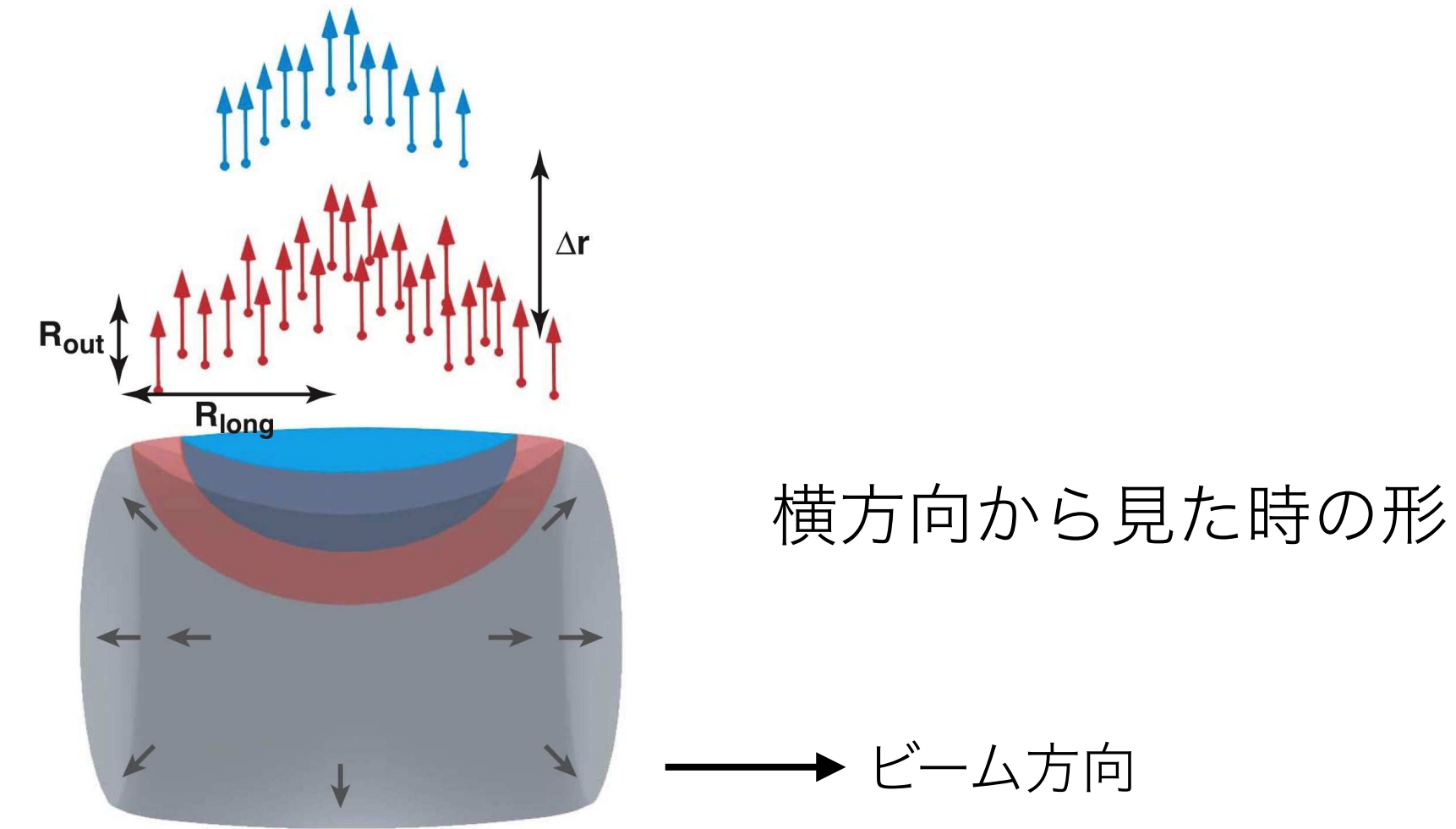
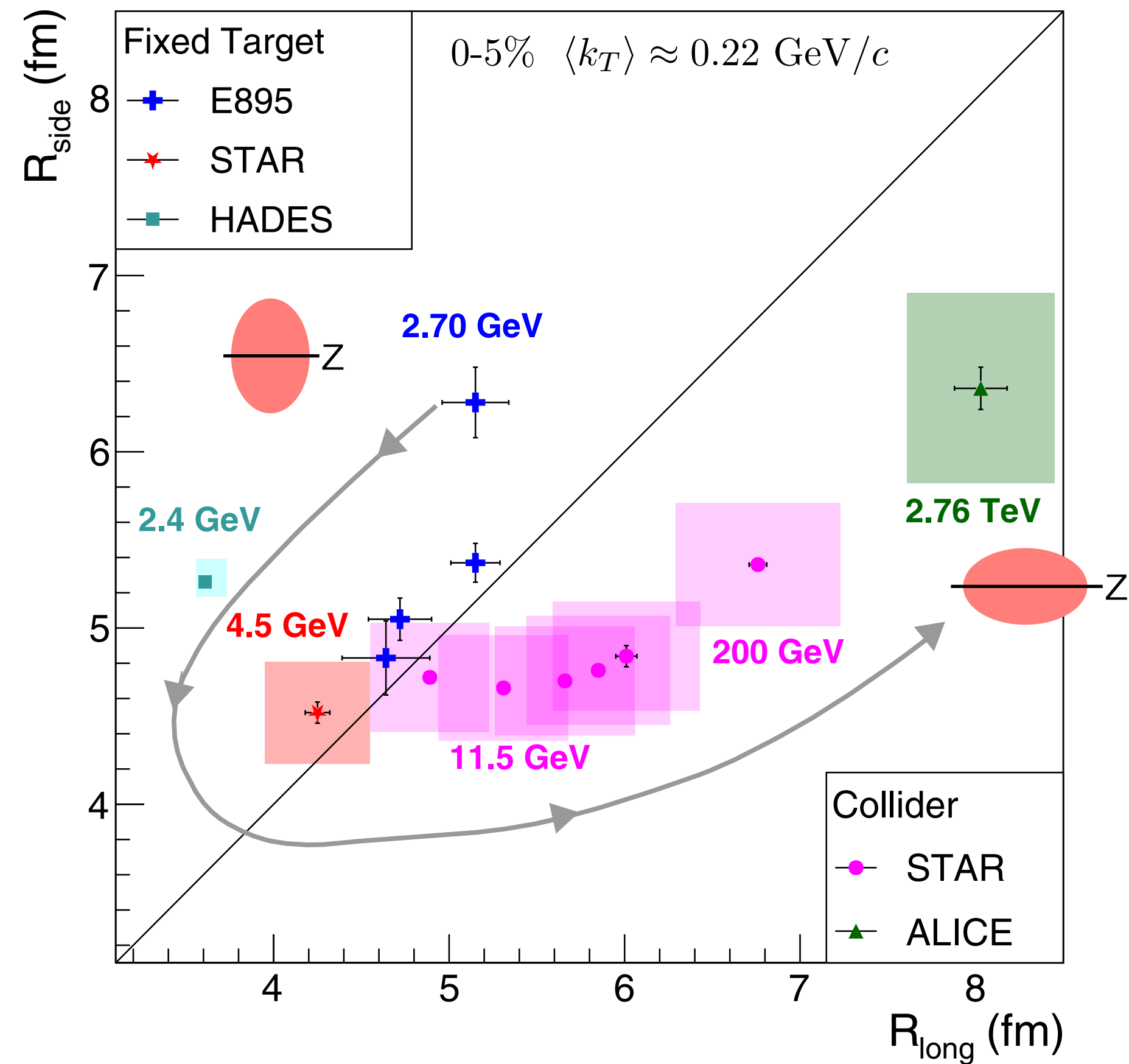
$$m_T = \sqrt{k_T^2 + m^2}$$



- Fireballの体積はRHICからLHCで約2倍になっている
- (R_{long} の m_T 依存性から得られる) 系の寿命 τ は、数GeVから200 GeVで約2倍に。200 GeVからLHCエネルギーに行くと、約1.4倍になる。

系の形

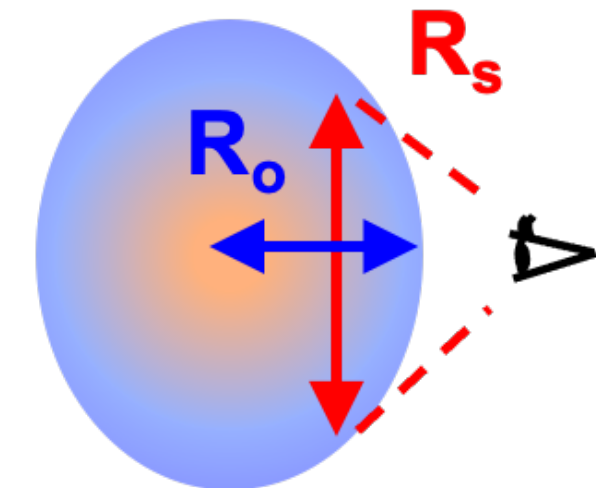
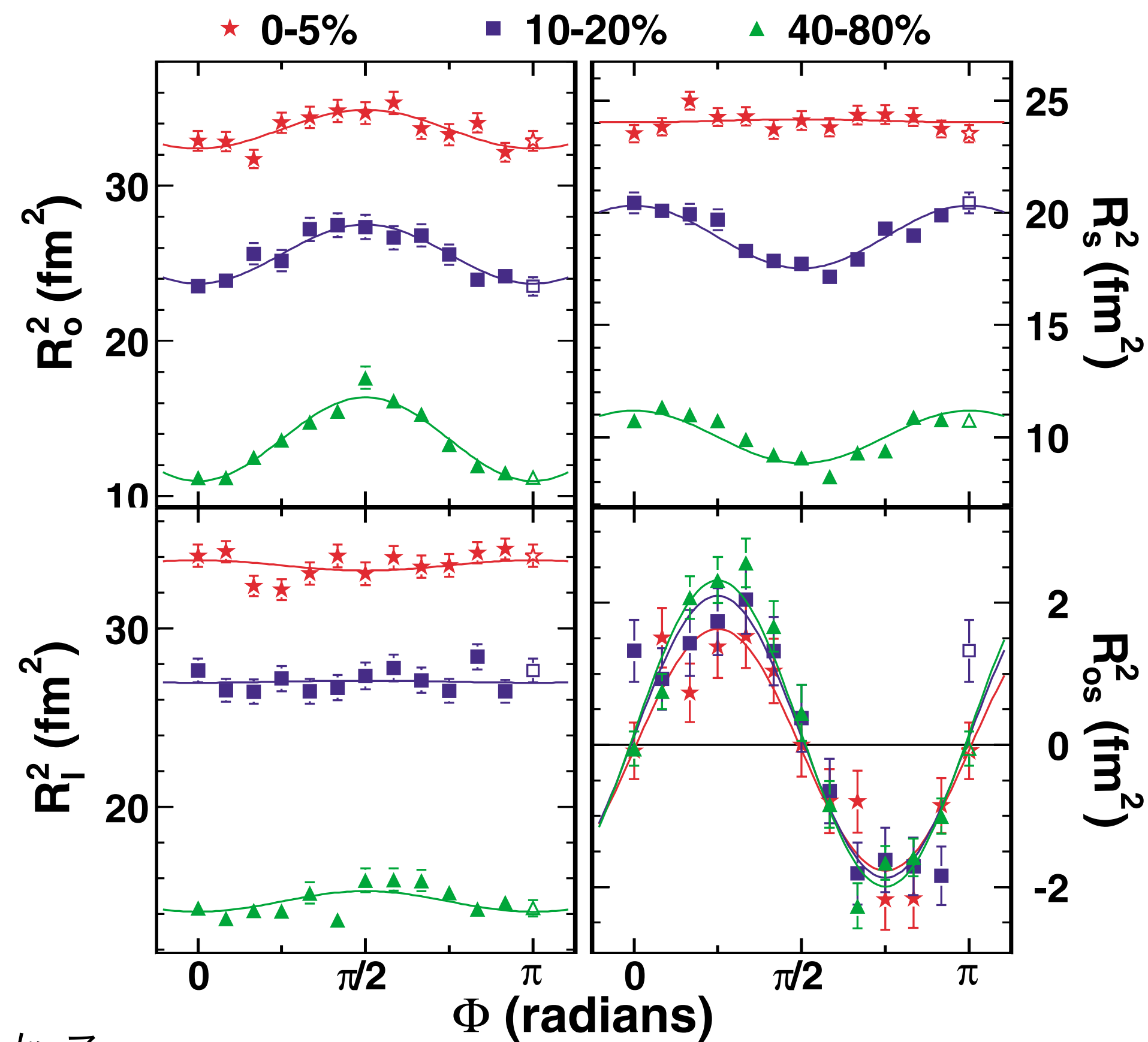
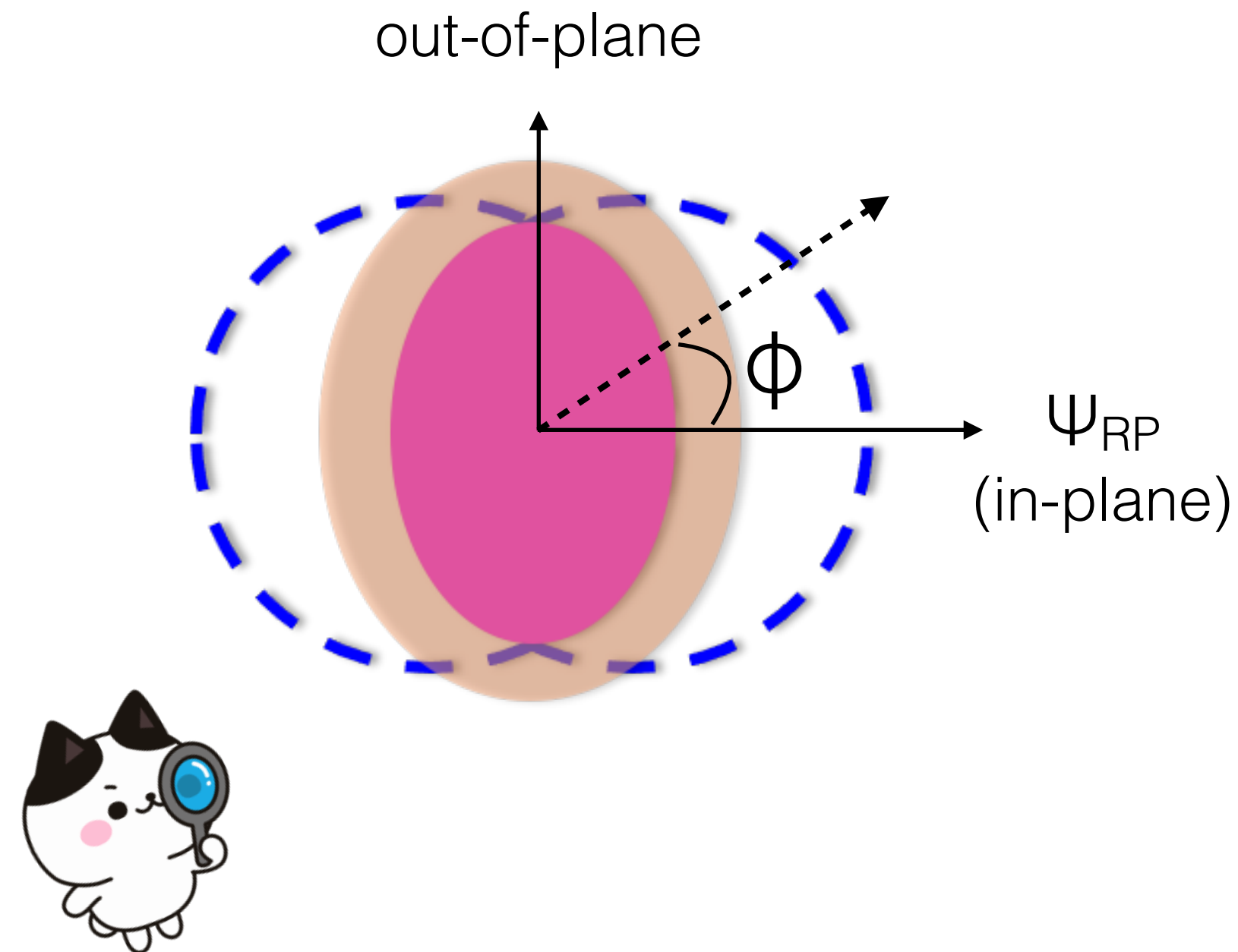
STAR, PRC103, 034908 (2021)



- AGSからRHIC、RHICからLHCへとエネルギーを上げると“oblate”から“prolate”シェイプへと変化。
→ nuclear stoppingからnuclear transparency、
高エネルギーではlongitudinal boost invariant、の描像と一致。
- 大体、4.5 GeVがその変化の中間点。

系の形（方位角依存性）

STAR, PRL93, 012301 (2004)

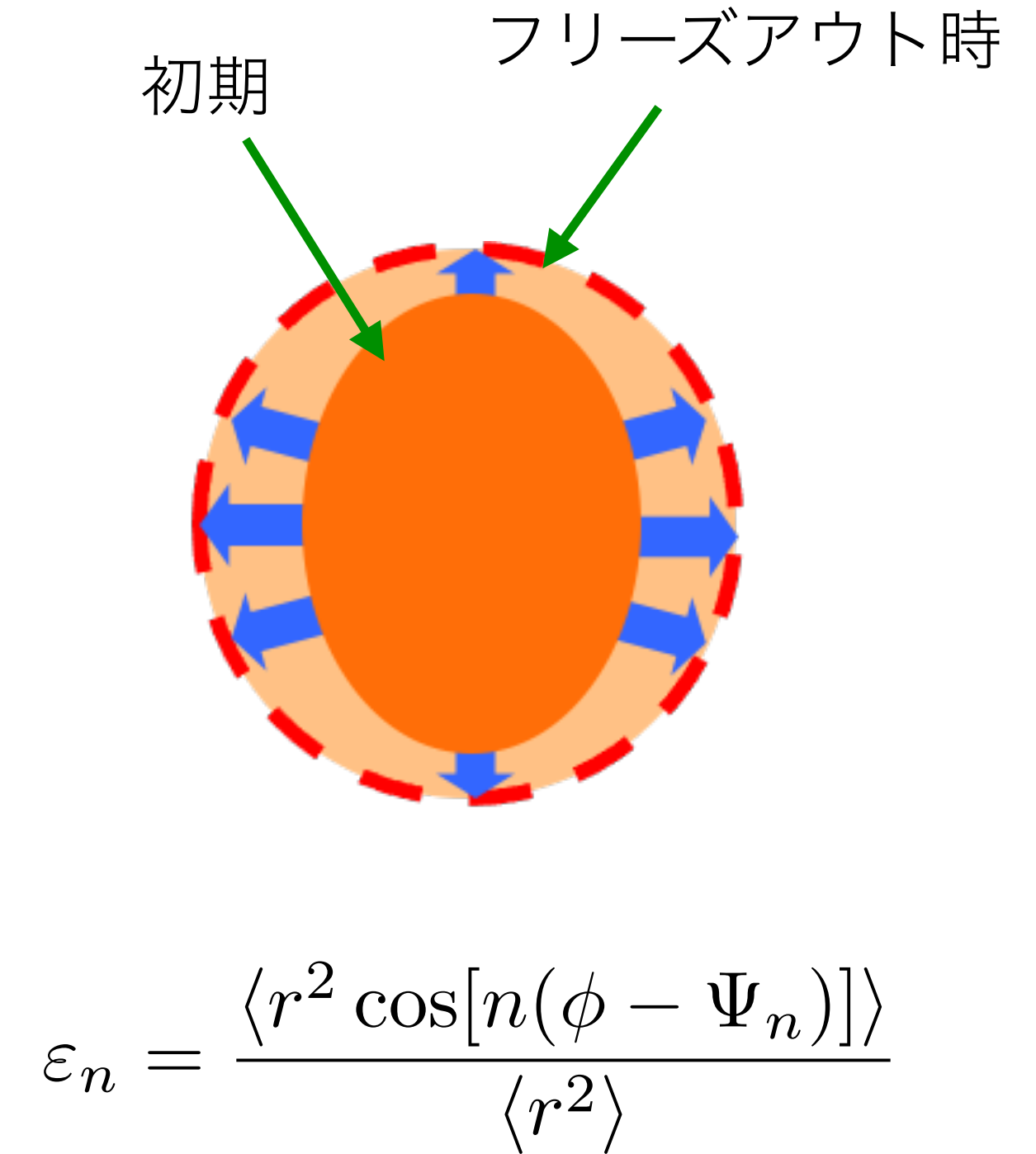
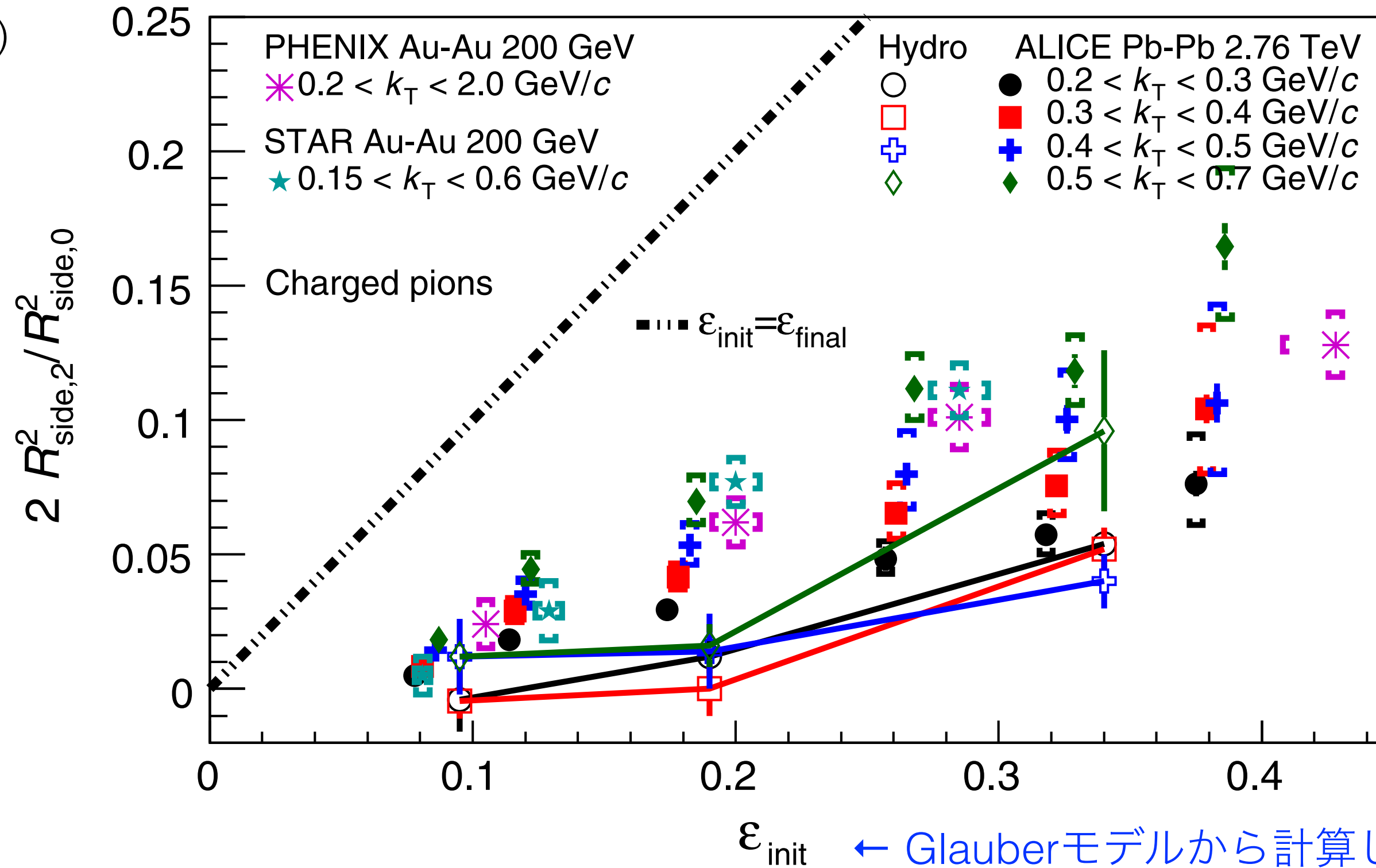


- 中心衝突から周辺にいくと、振幅が大きくなる。
→ 楕円形状が見えている。楕円が反転する前にフリーズアウトしているとも言える

初期 vs. 終状態における楕円率

STAR, PRL93, 012301 (2004)
 PHENIX, PRL112, 222301 (2014)
 ALICE, PRL118, 222301 (2017)

HBT測定から見積もられる
 フリーズアウト時の楕円率 ϵ_{final}

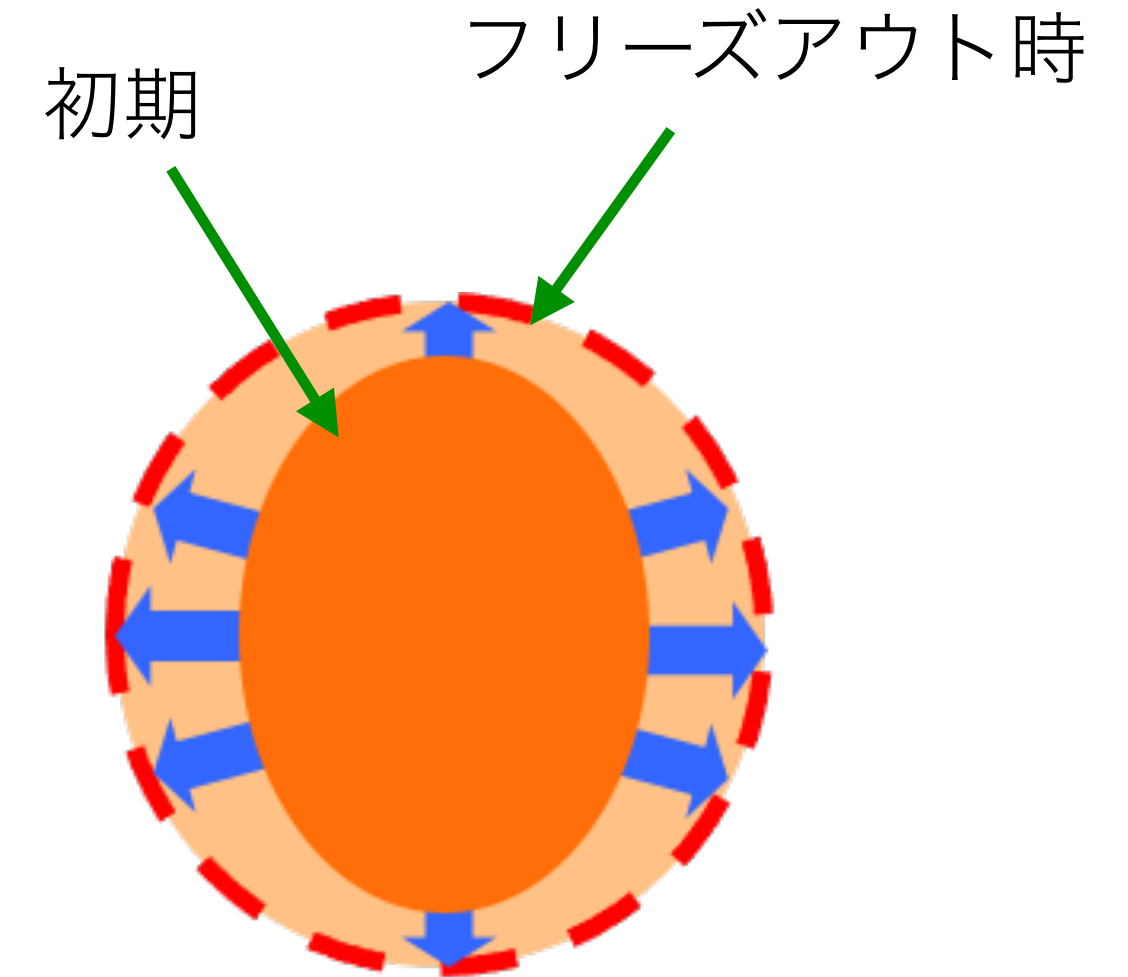
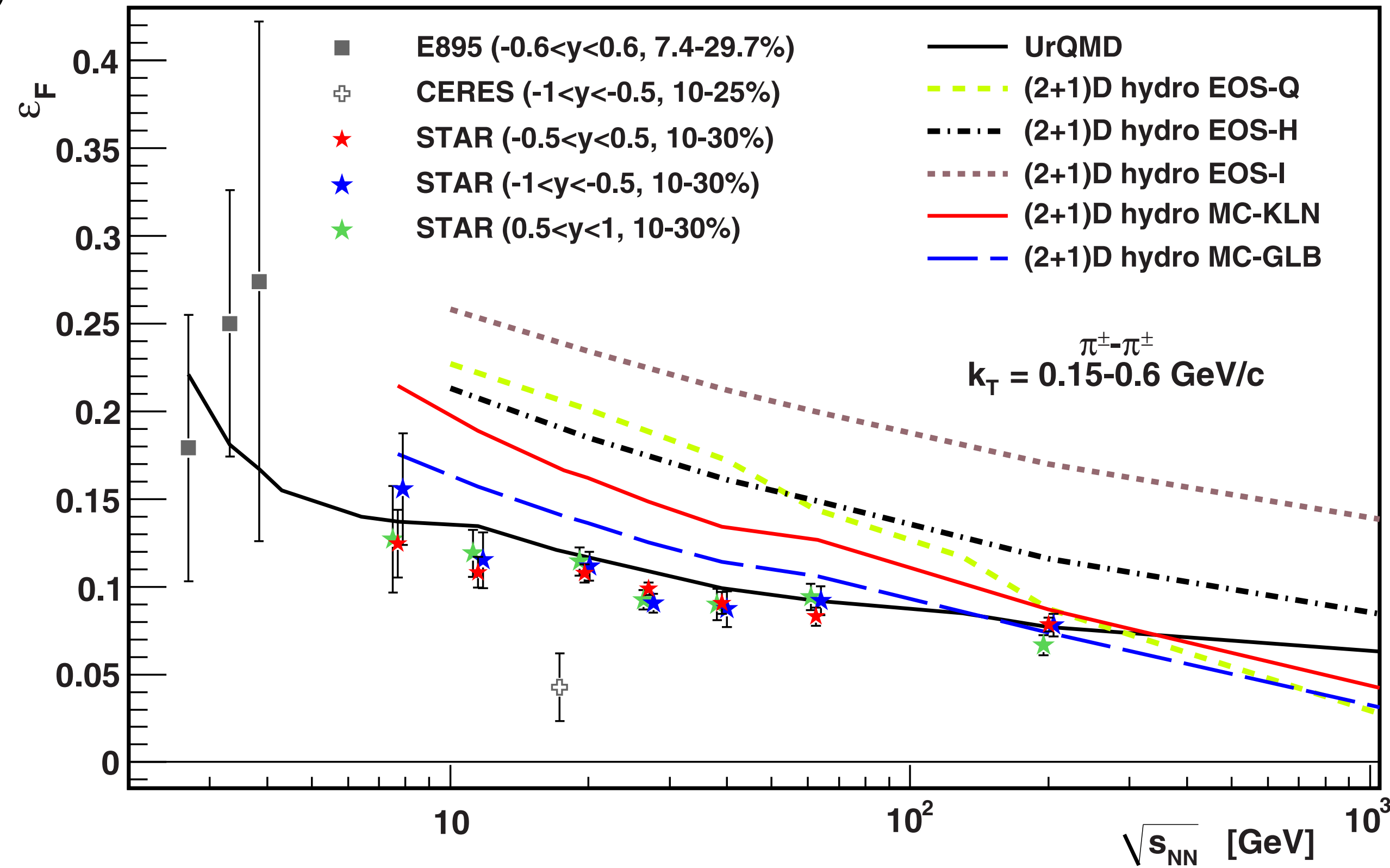


- フリーズアウト時の楕円率は、衝突初期に比べて小さくなっている。
 ただし、球形 ($\epsilon=0$) や符号が変わるほどではない。←膨張の強さと寿命の関係にもよる
- low kT 極限であれば、dynamicalな影響は少ない。~30%程度の誤差はある。

Retiere and Lisa, PRC70, 044907 (2004)

終状態における楕円率 v_2 vs. エネルギー

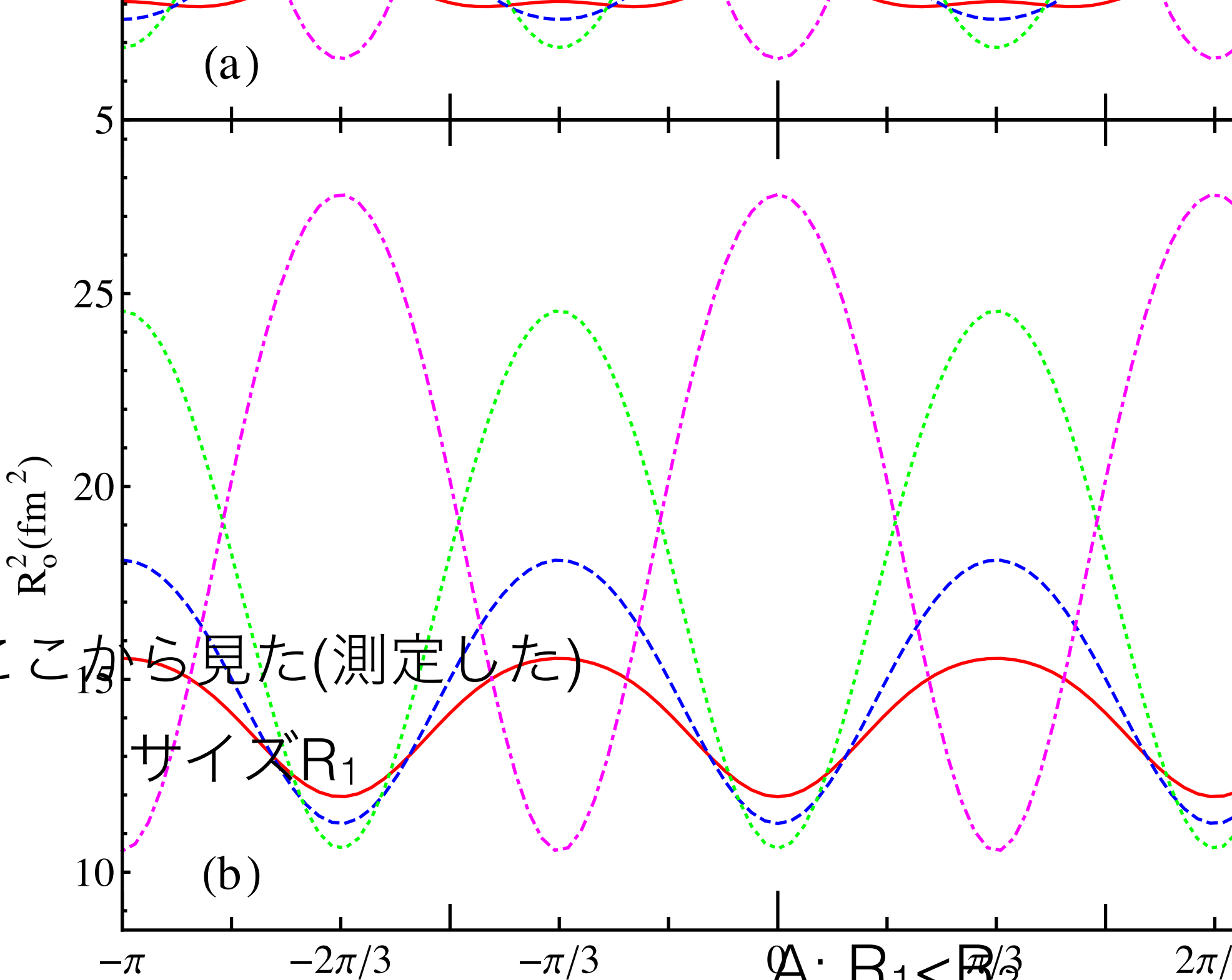
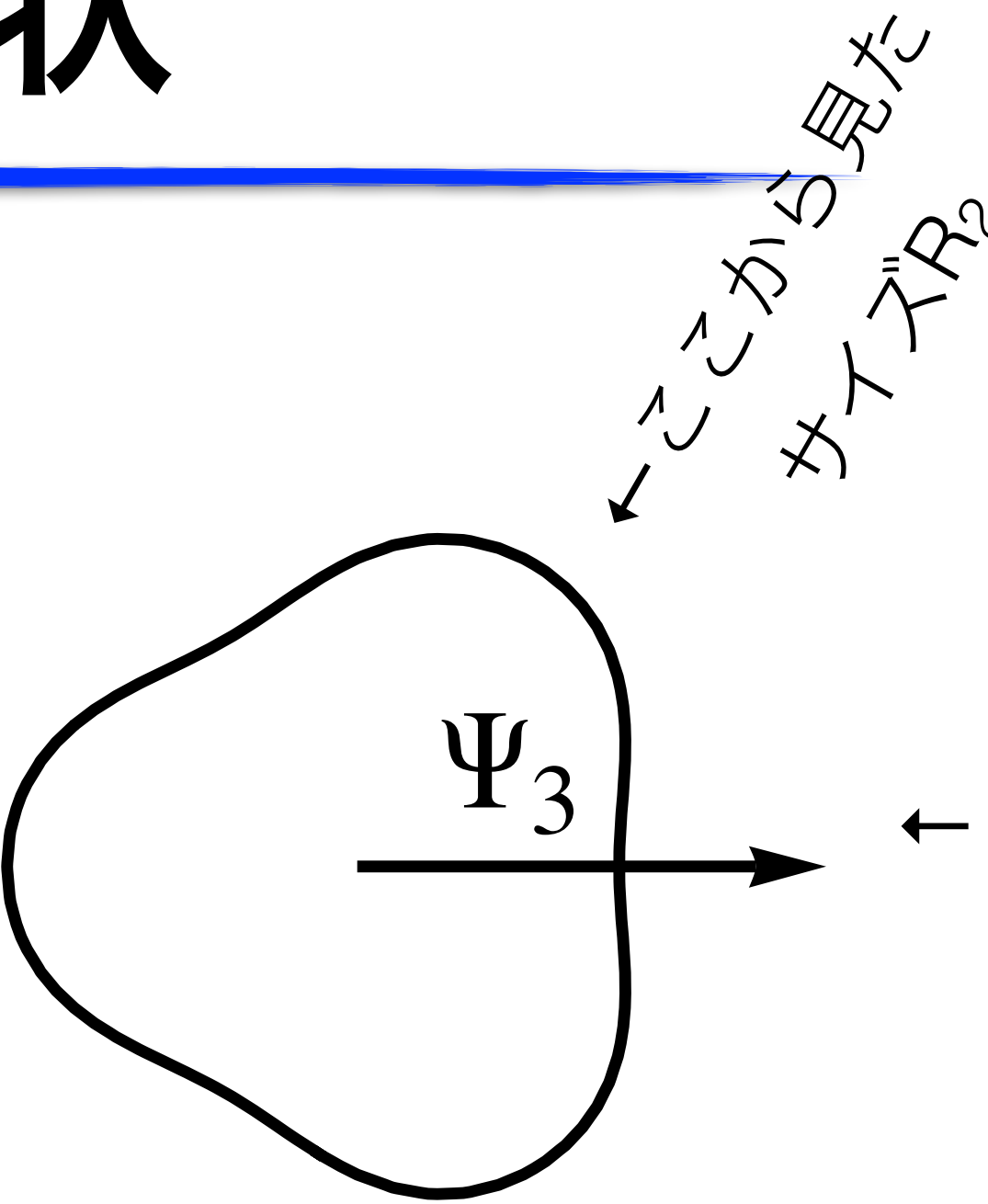
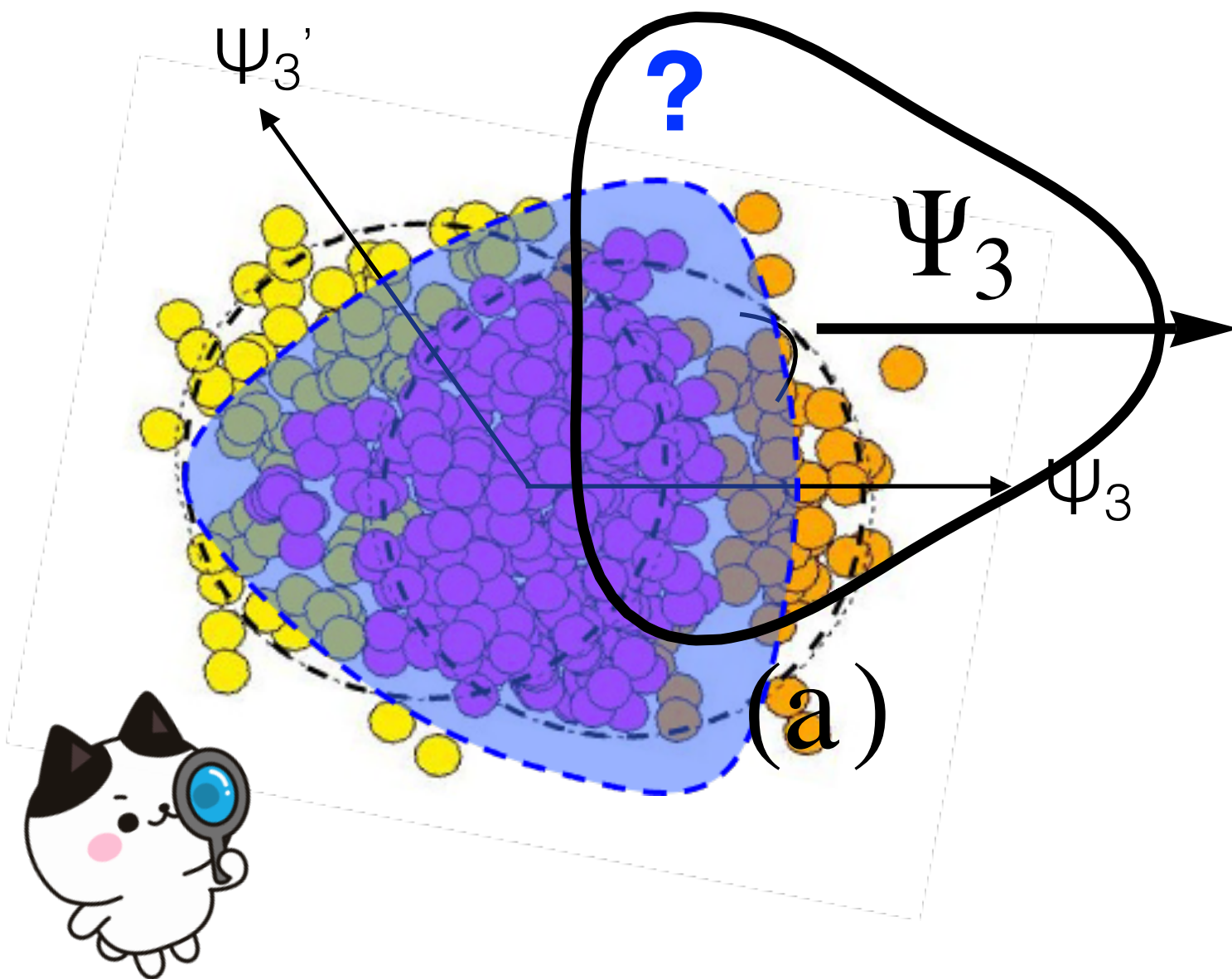
STAR, PRC92, 014904 (2015)



- フリーズアウト時の楕円率は、エネルギーが高くなると (より強い膨張により) 小さくなっている
- 状態方程式や初期条件にも敏感

Retiere and Lisa, PRC70, 044907 (2004)

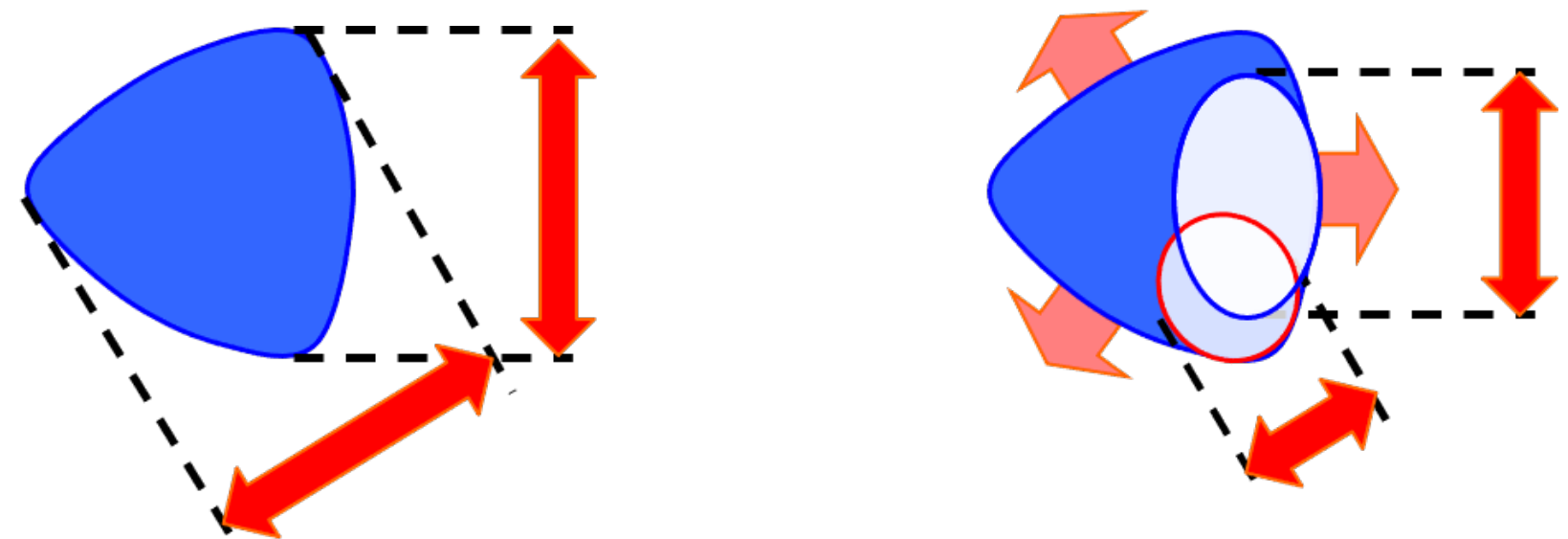
初期揺らぎによる形状



突然ですが、Q. R_1 と R_2 はどちらが大きいですか？

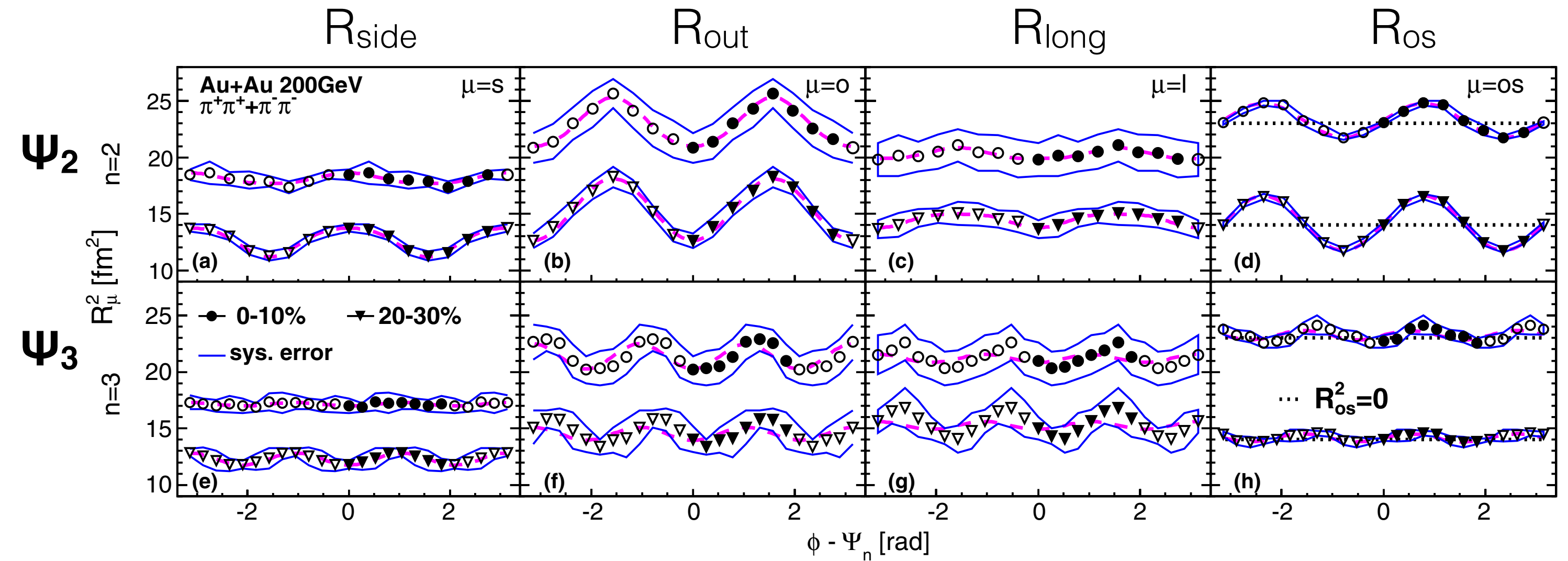
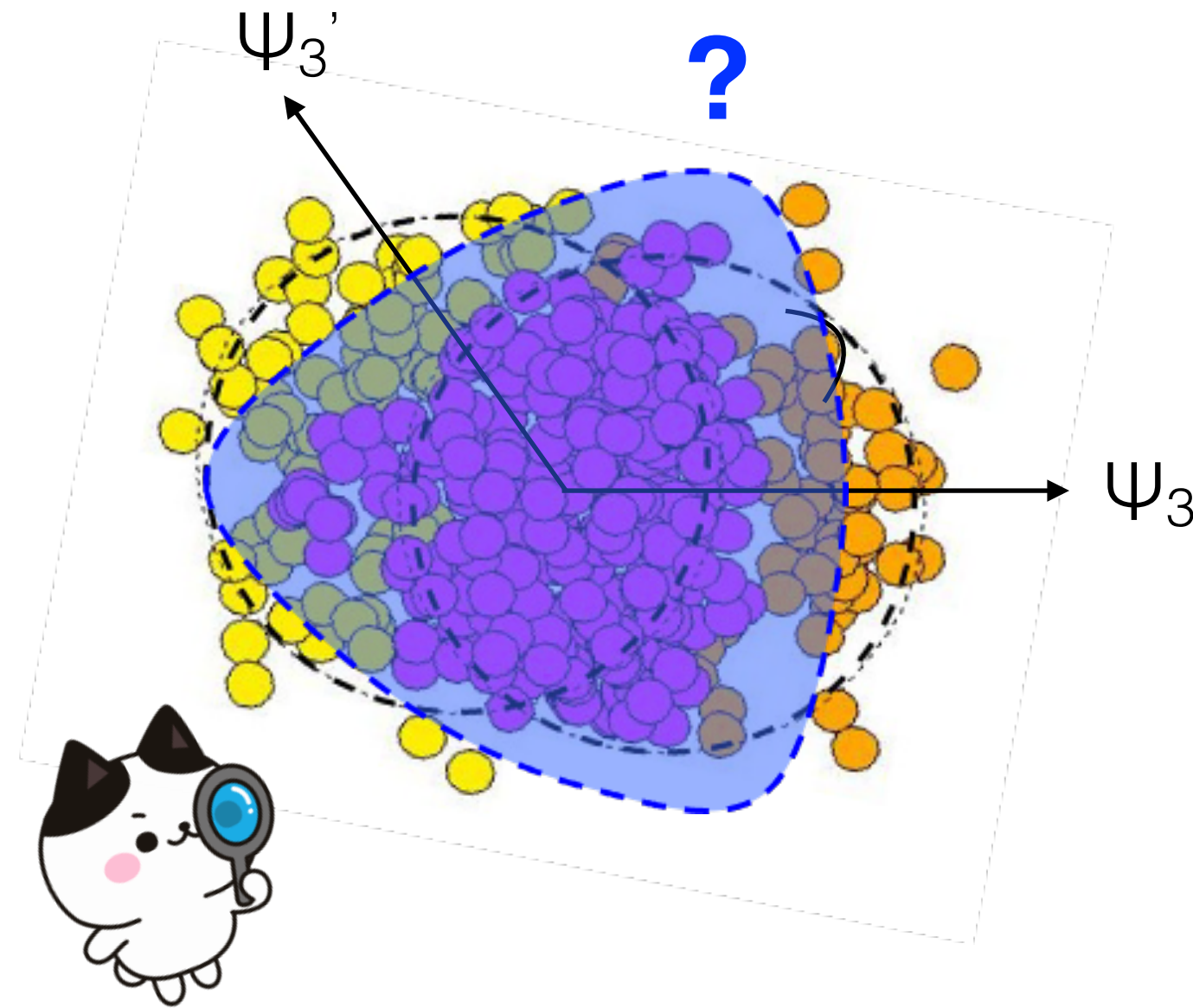
- A: $R_1 < R_2$
- B: $R_1 > R_2$
- C: $R_1 = R_2$

答えは... BまたはC (ケースバイケース。Aもあり得る...)

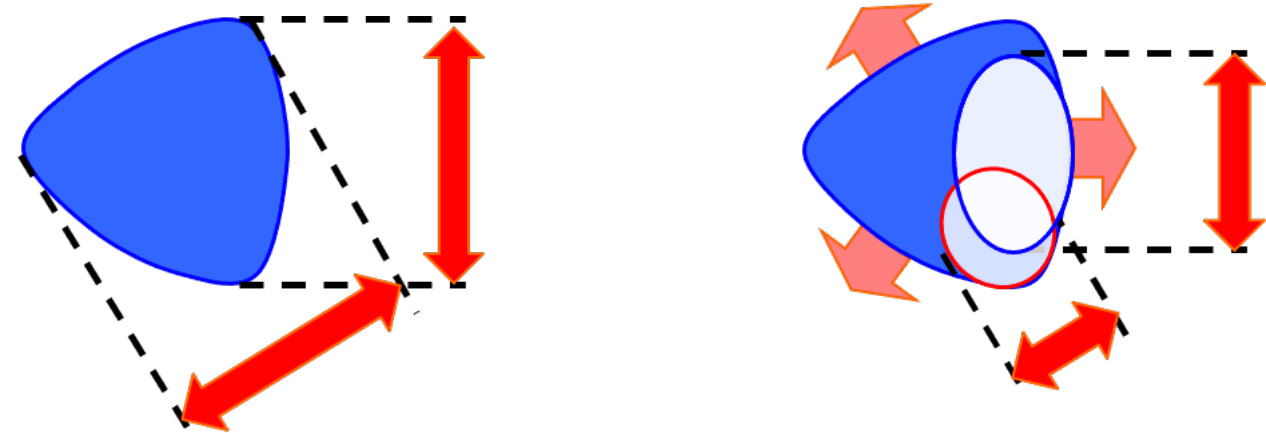


v_3 平面に対する方位角依存性

PHENIX, PRL112, 222301 (2014)
(my thesis work...)



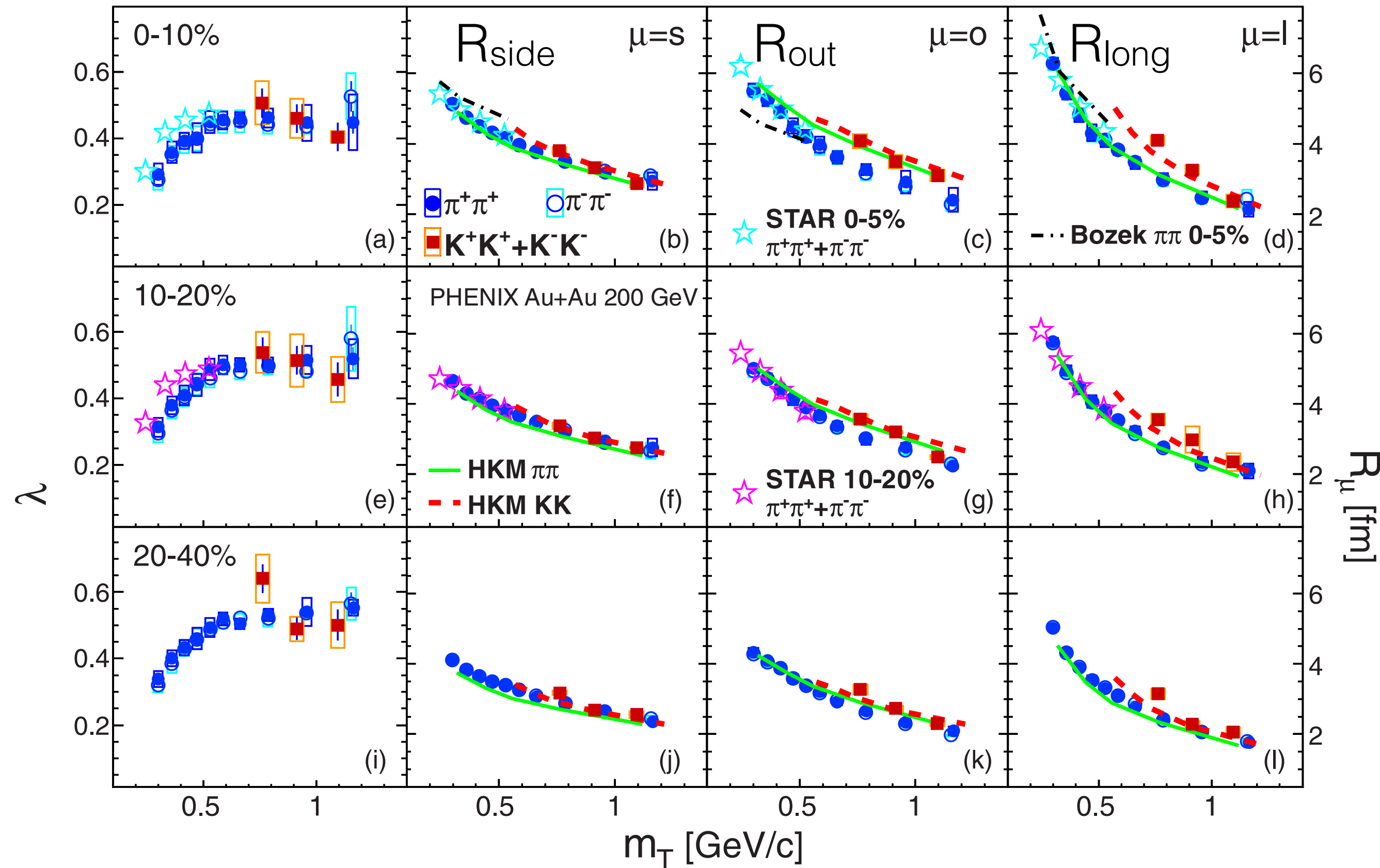
- 2次と異なり、静的な系では三角形は見えない！膨張してる系では見えるはず。
- R_{side} はほぼフラット。 R_{out} の強い振幅は β_3 (anisotropy in velocity field)による。
- 終状態における ϵ_3 はほぼゼロ（初期の三角形は消えている）



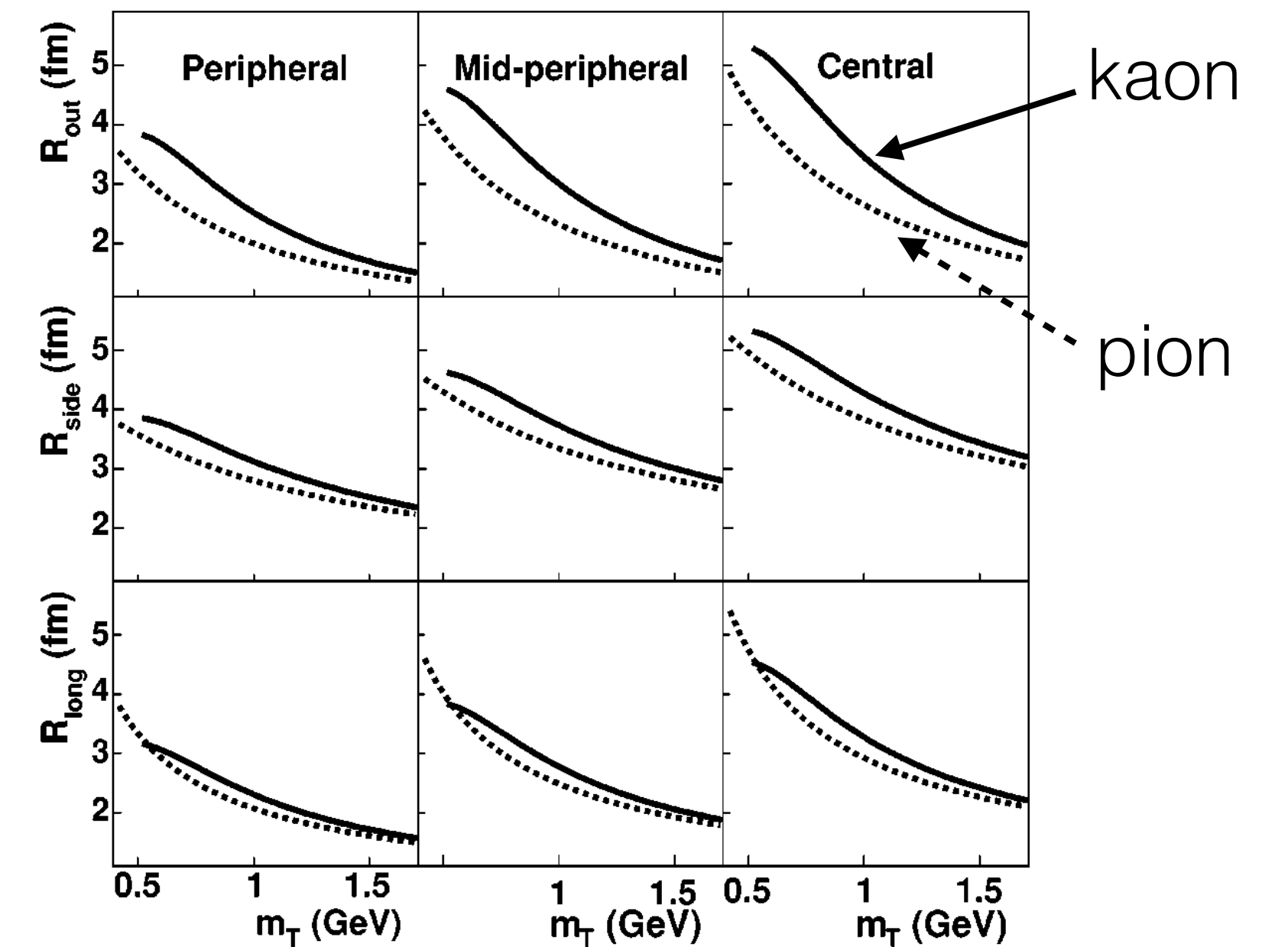
ALICEでも同様の結果が報告されている：PLB785(2018)320

kaon HBT

PHENIX, PRC92, 034914 (2015) (my thesis work...)



Retiere and Lisa, PRC70, 044907(2004)



$$k_T = \left| \frac{1}{2}(\vec{p}_{T1} + \vec{p}_{T2}) \right|$$

$$m_T = \sqrt{k_T^2 + m^2}$$

- HBT半径は m_T に近似的にスケールするが、中心衝突では明らかにbreakしている (k_T の方がスケールする)。
- ALICEのAA/ppでも同様の結果。ALICE, PRC96,064613(2017)
- Blast-Wave modelでもそもそも m_T scalingは成り立っていない

Analysis with Levy source function

より一般化したLevy安定分布関数 ($\alpha=2$: Gauss, $\alpha=1$: Cauchy)

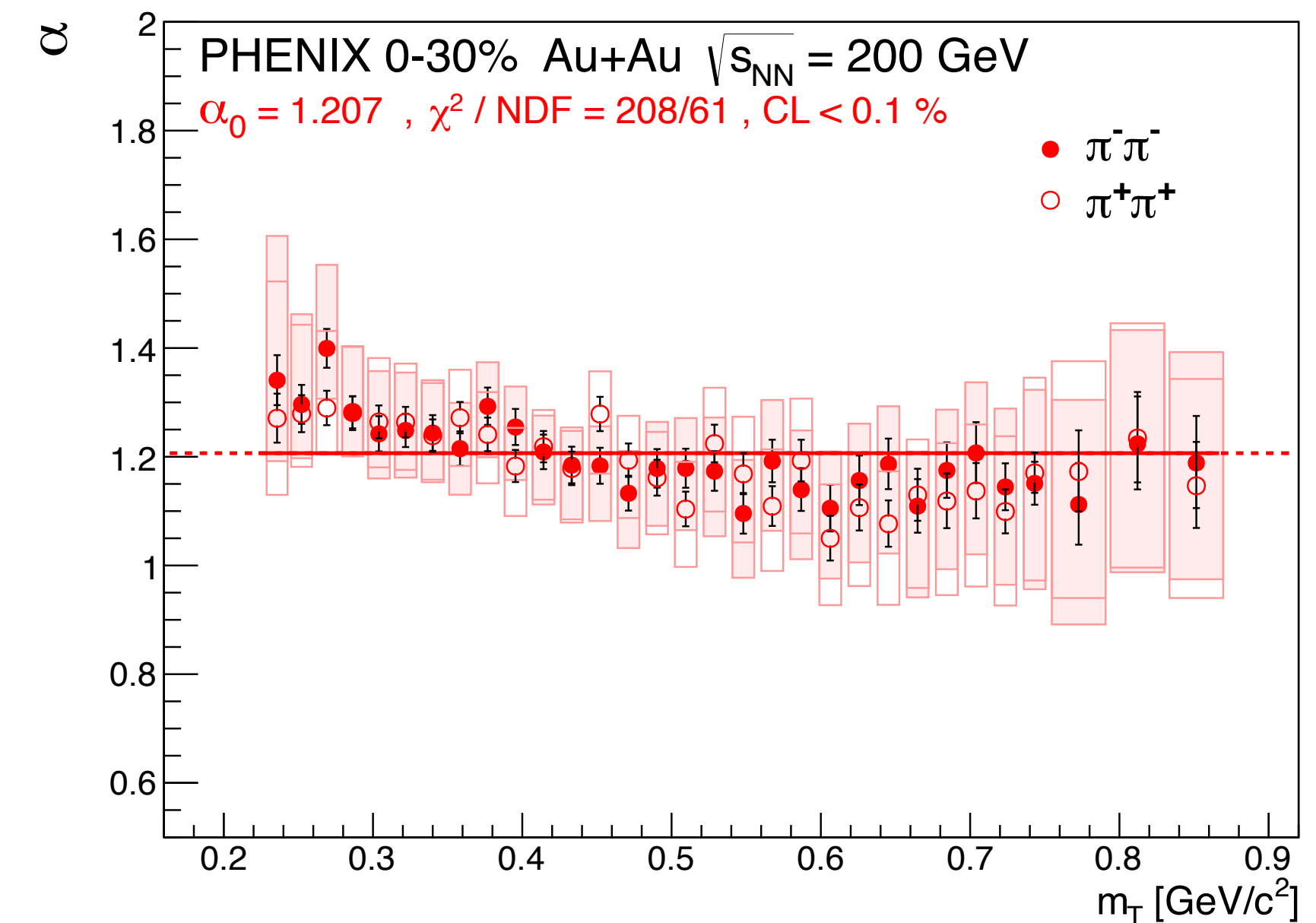
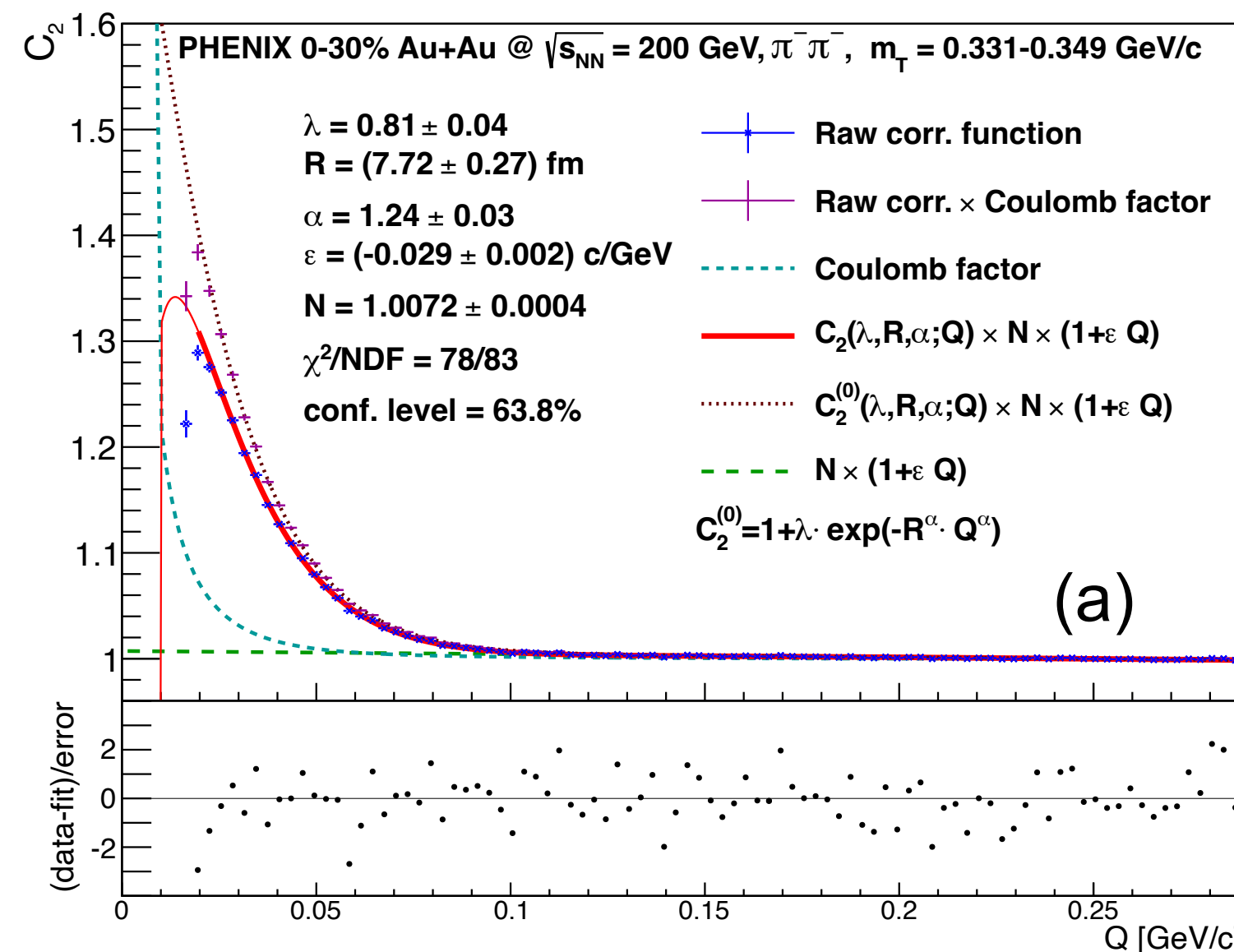
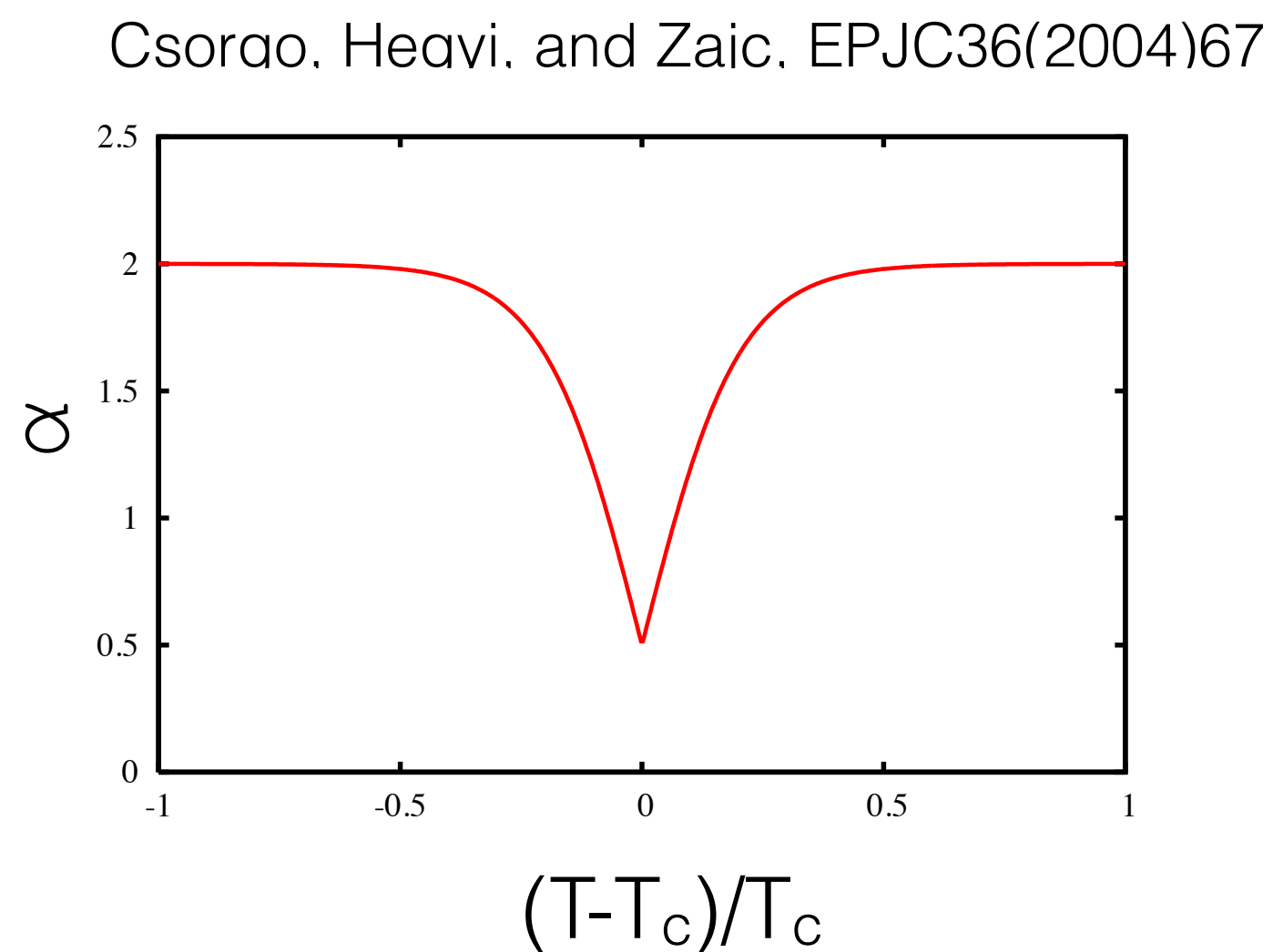
$$C_2(q) \cong 1 + \left| \int S(r) e^{iqr} \right|^2$$

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

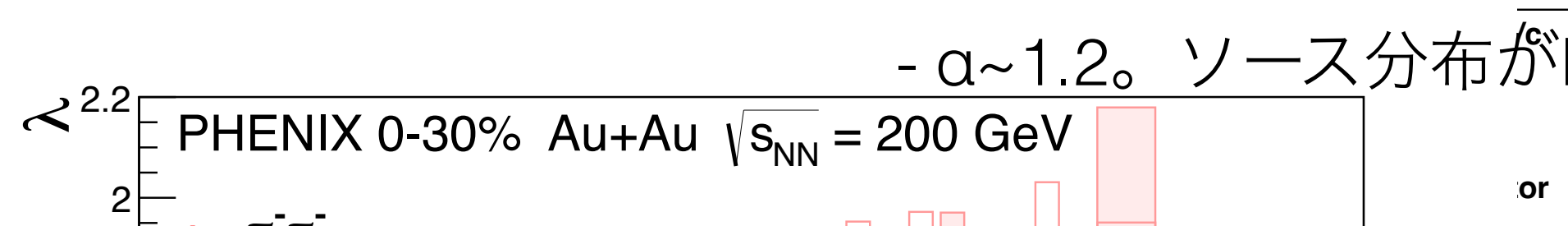
α parameter here

Levy index α は、non-Gaussian度を表し、
CP近傍で大きく変化すると予測されている

PHENIX, PRC97, 064911(2018)



- $\alpha \sim 1.2$ 。ソース分布がNon-Gaussianであることを示す。



ソースイメージング

Brown and Danielwicz, PRC64, 014902 (2001)
Danielwicz and Pratt, PRC68, 034907 (2003), PRC75, 034907 (2007)

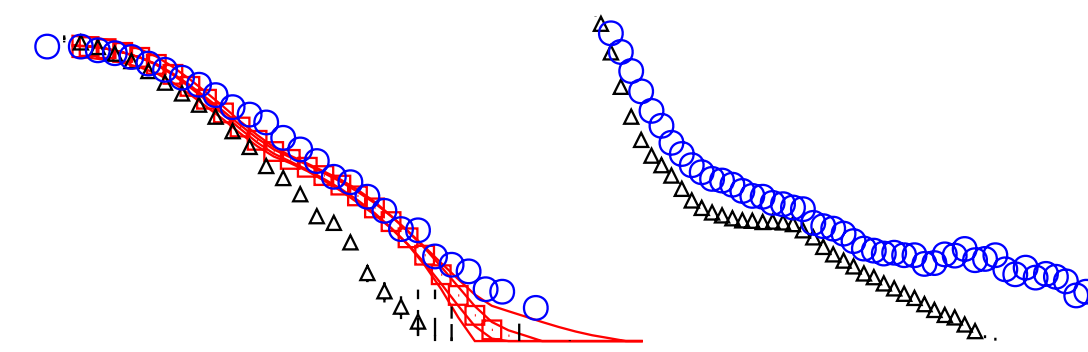
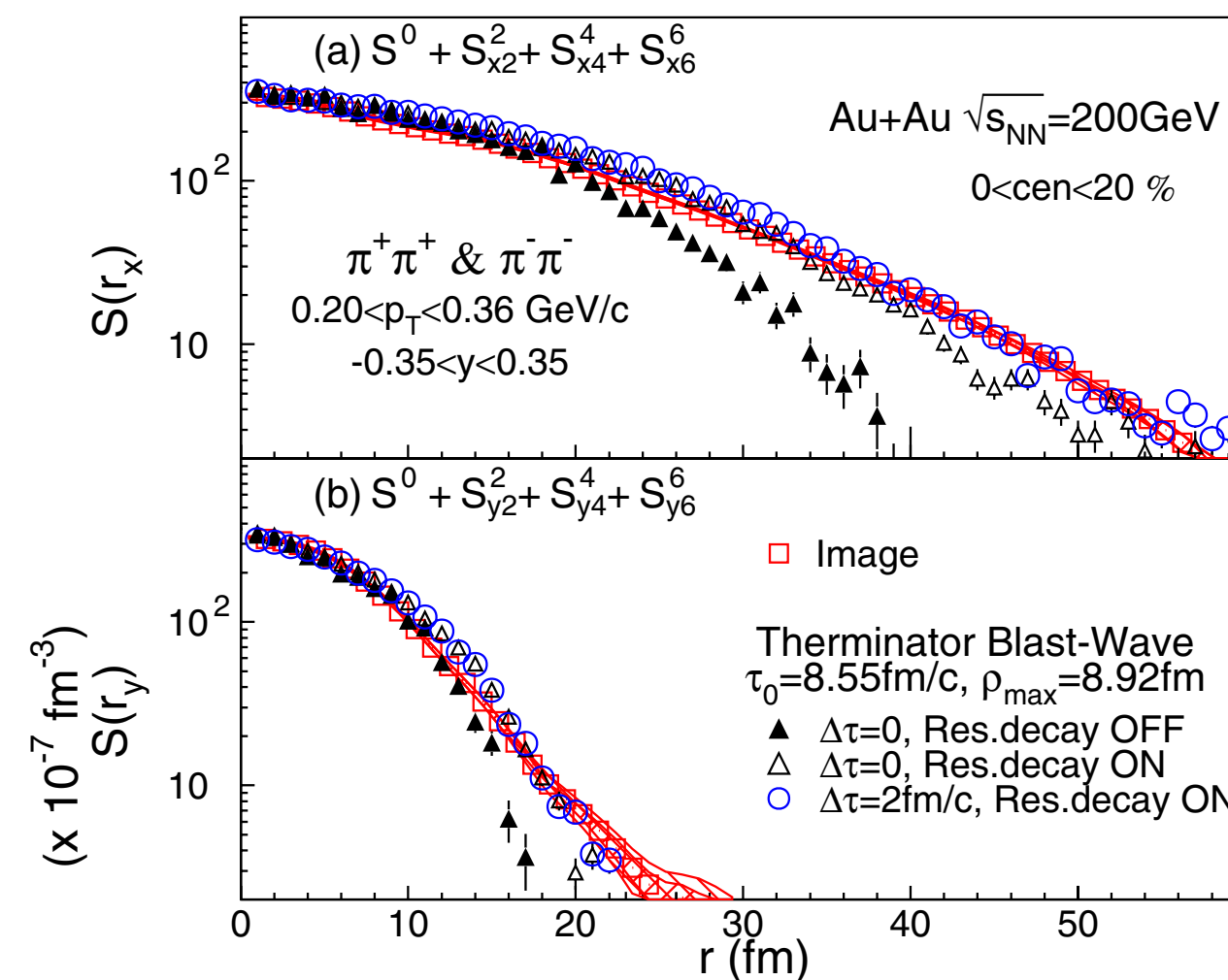
$$C(\mathbf{q}) - 1 \equiv R(\mathbf{q}) = \int [|\phi(\mathbf{q}, \mathbf{r})|^2 - 1] S(\mathbf{r}) d\mathbf{r},$$

$$C(\mathbf{q}) - 1 \equiv R(\mathbf{q}) = \sum_{l, \alpha_1, \dots, \alpha_l} R_{\alpha_1, \dots, \alpha_l}^l(q) A_{\alpha_1, \dots, \alpha_l}^l(\Omega_{\mathbf{q}}),$$

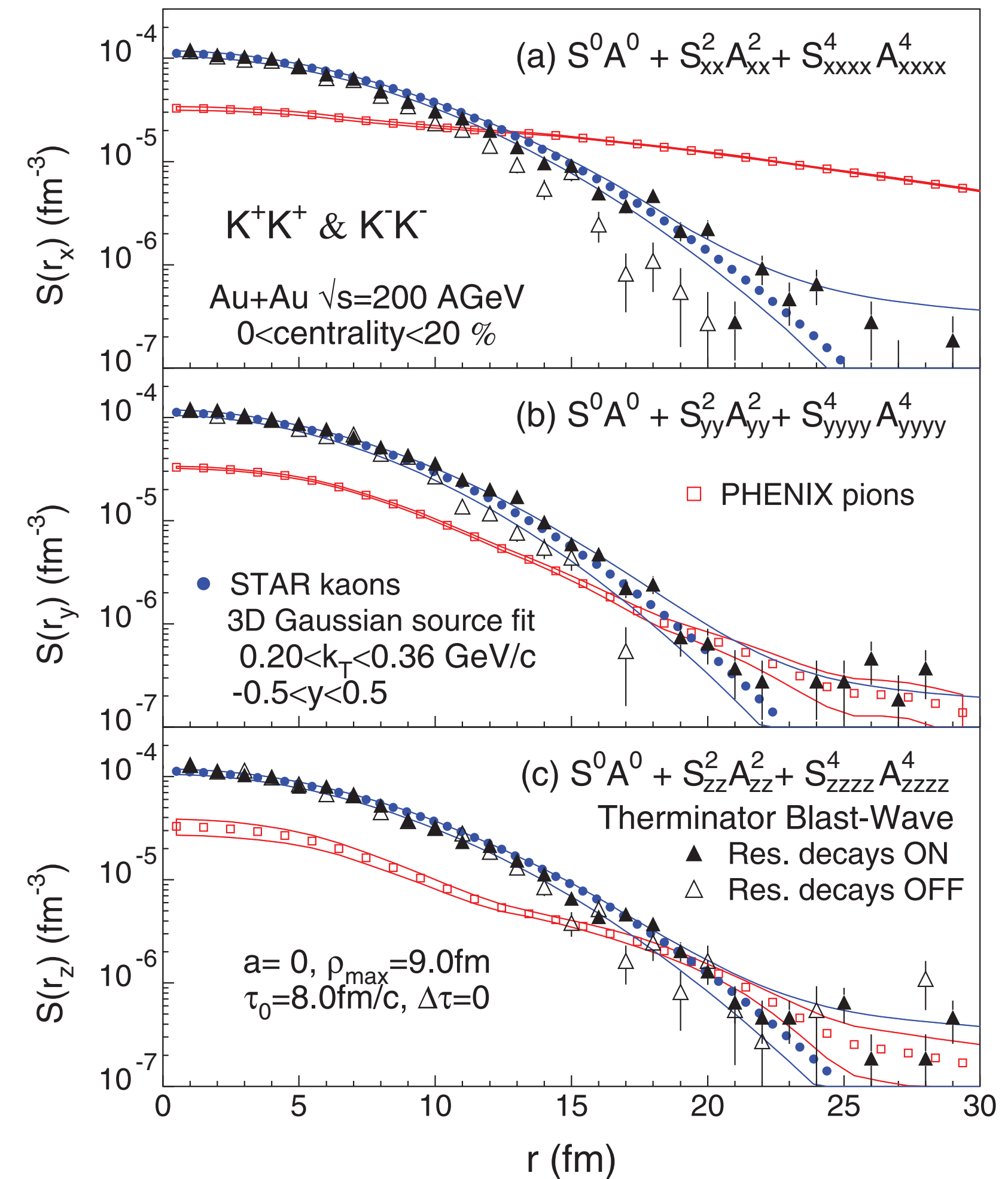
$$S(\mathbf{r}) = \sum_{l, \alpha_1, \dots, \alpha_l} S_{\alpha_1, \dots, \alpha_l}^l(r) A_{\alpha_1, \dots, \alpha_l}^l(\Omega_{\mathbf{r}}).$$

相関関数を球面調和関数展開し、逆変換して
ソース関数 $S(r)$ を”イメージング”する解析手法。

- pionソース分布は共鳴粒子崩壊によるテールを持つ
- kaonソース分布にはほぼテールは無い

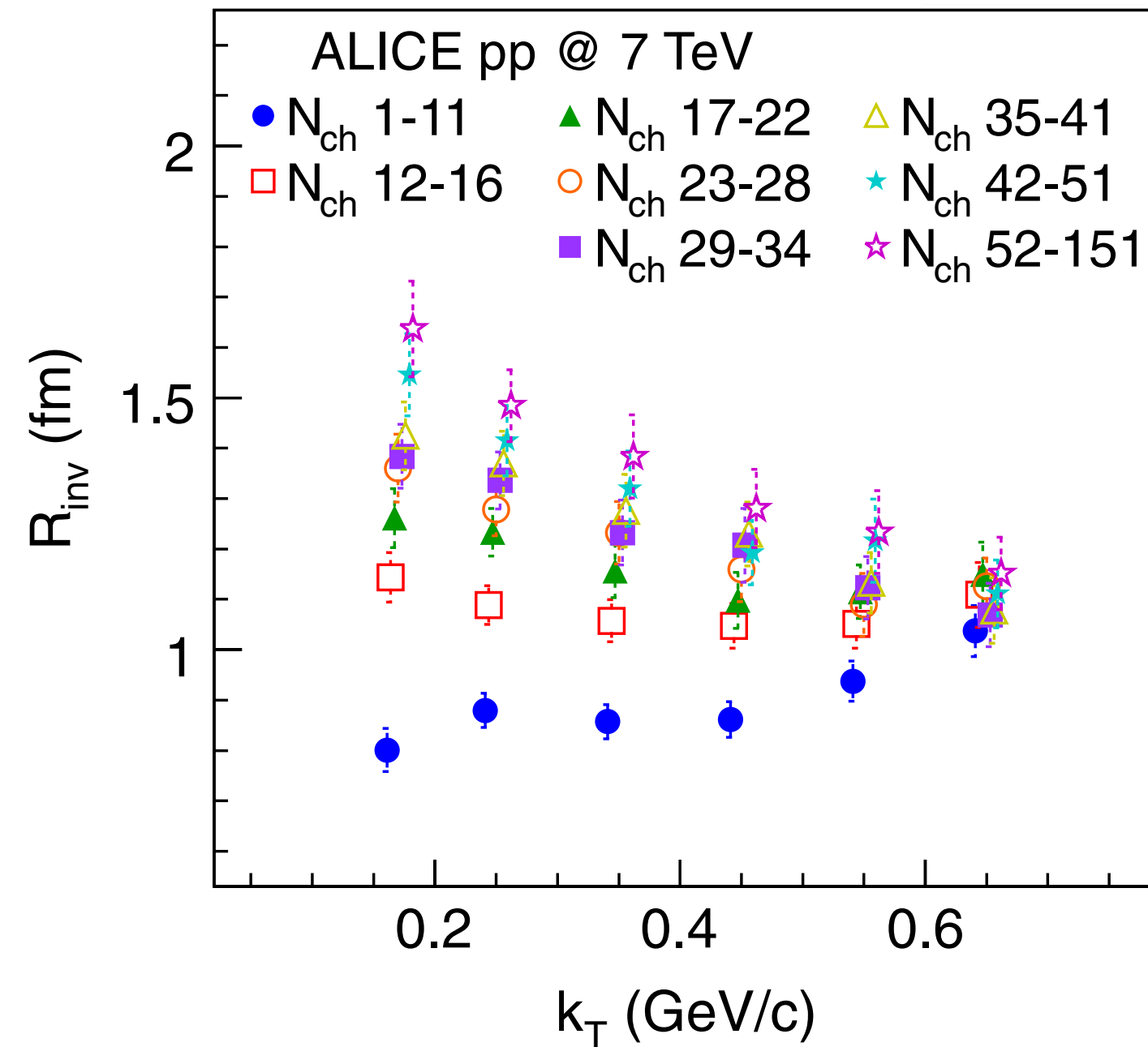


PHENIX, PRL100, 232301 (2008)
STAR, PRC88, 034906 (2013)



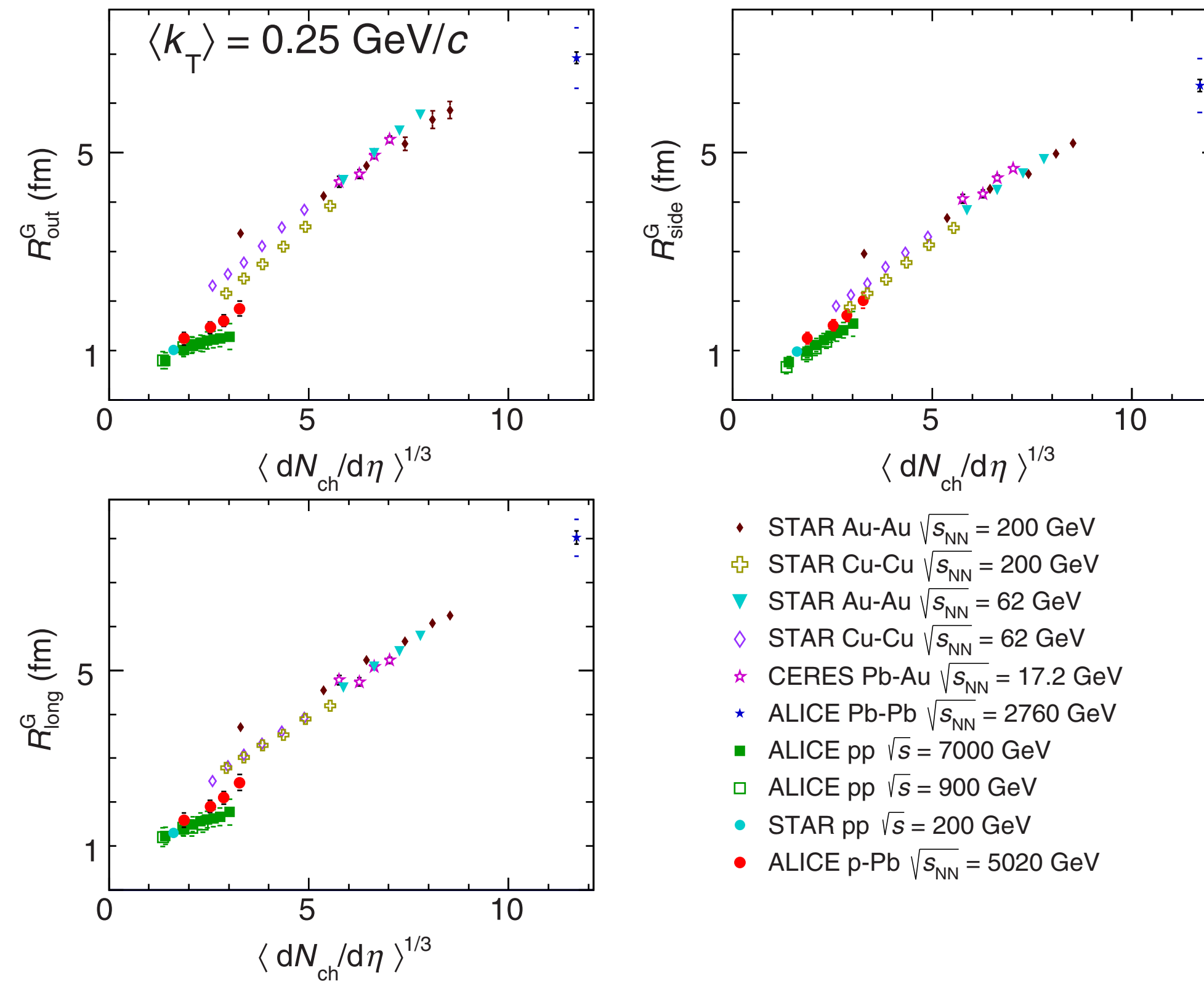
小さい系でのHBT

ALICE, PRD84, 112004 (2011)



低粒子多重度から高粒子多重度にいくと、
 正の傾きorフラットから、AAと同じ負の傾きへ
 →position-momentum相関 (collectivity?)

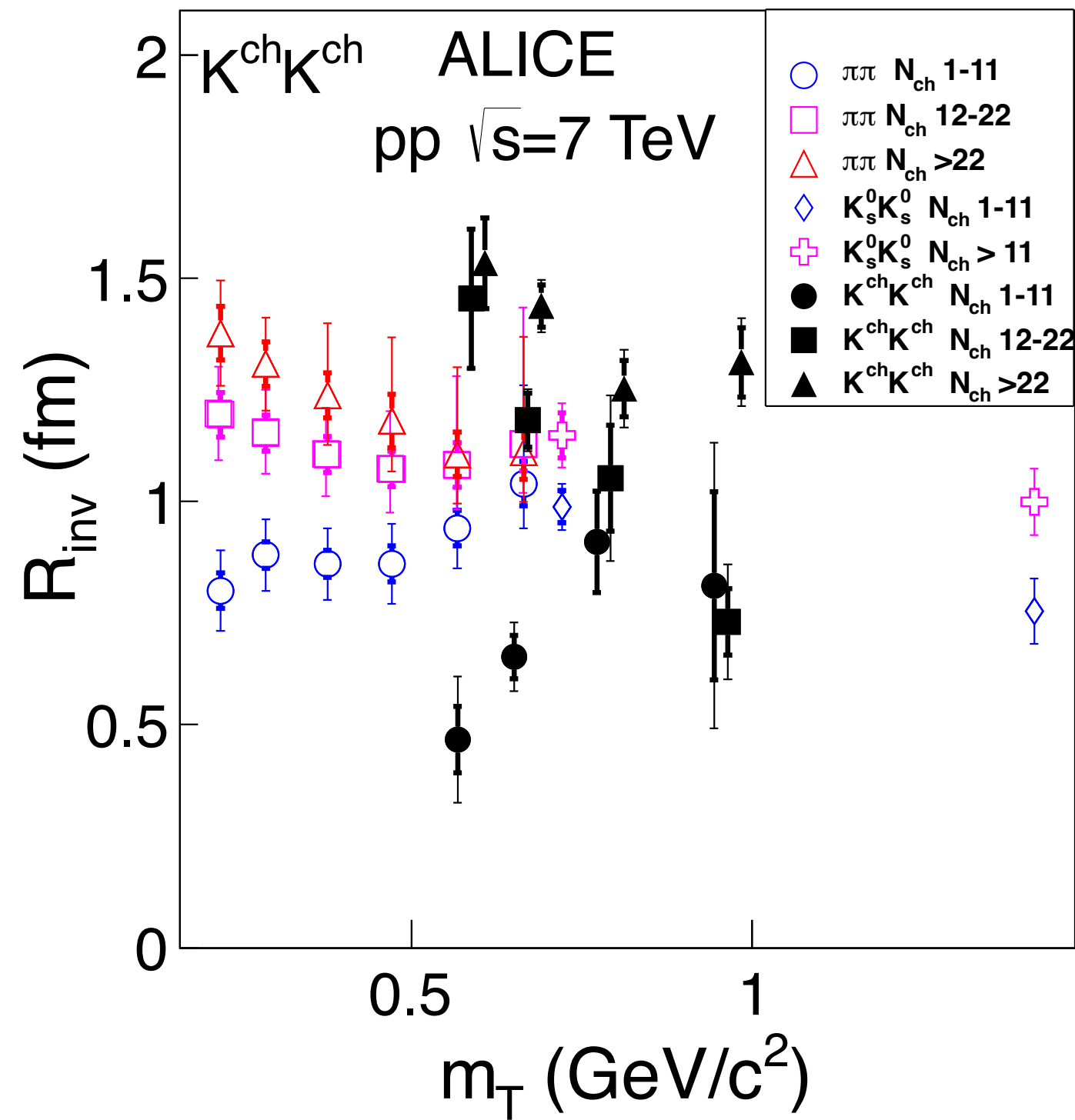
ALICE, PRC91, 034906 (2015)



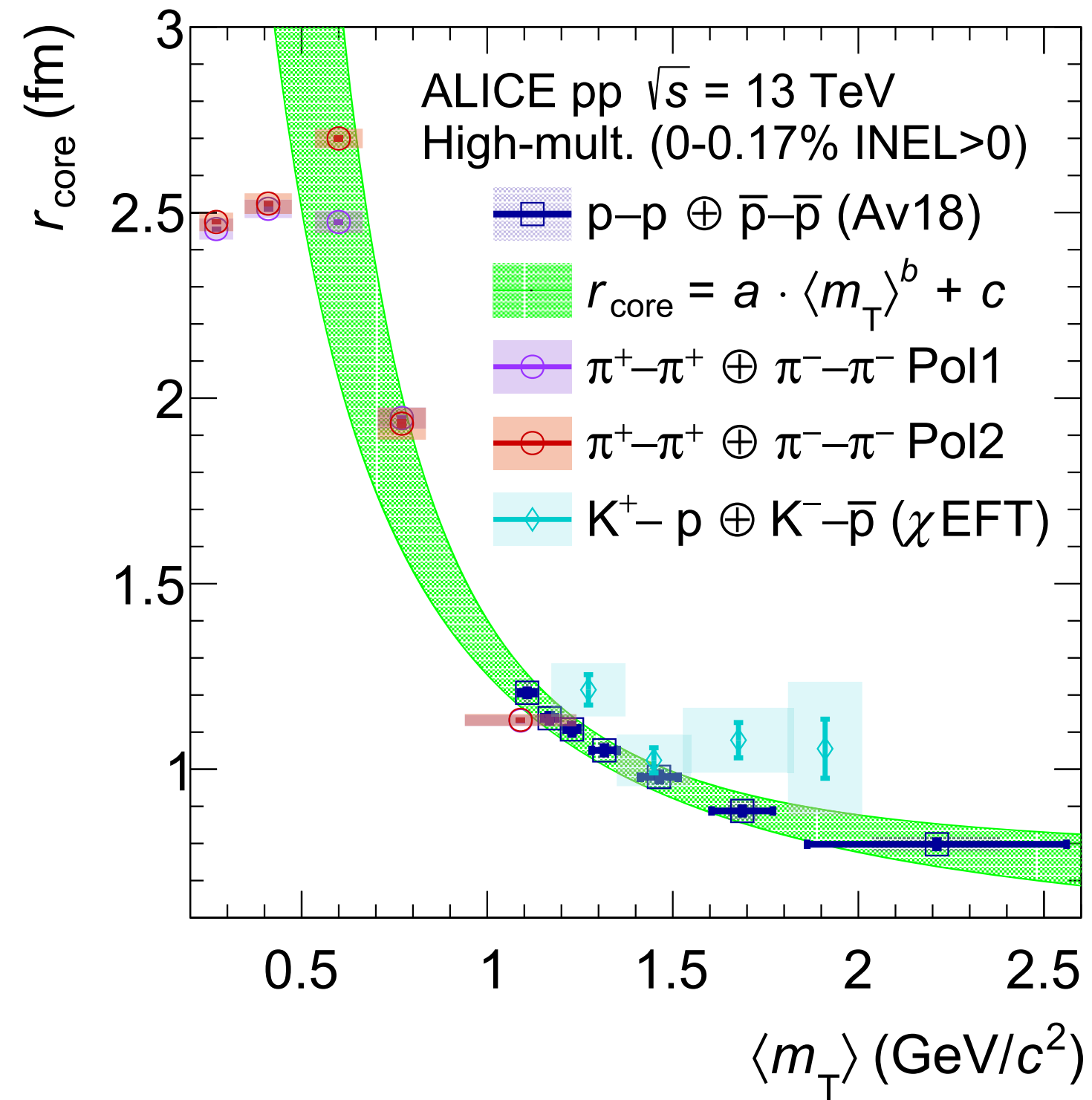
どの衝突系 & $\sqrt{s_{NN}}$ も $(dN/d\eta)^{1/3}$ にスケールする。
 ppはやや傾きが異なる

小さい系でのHBT

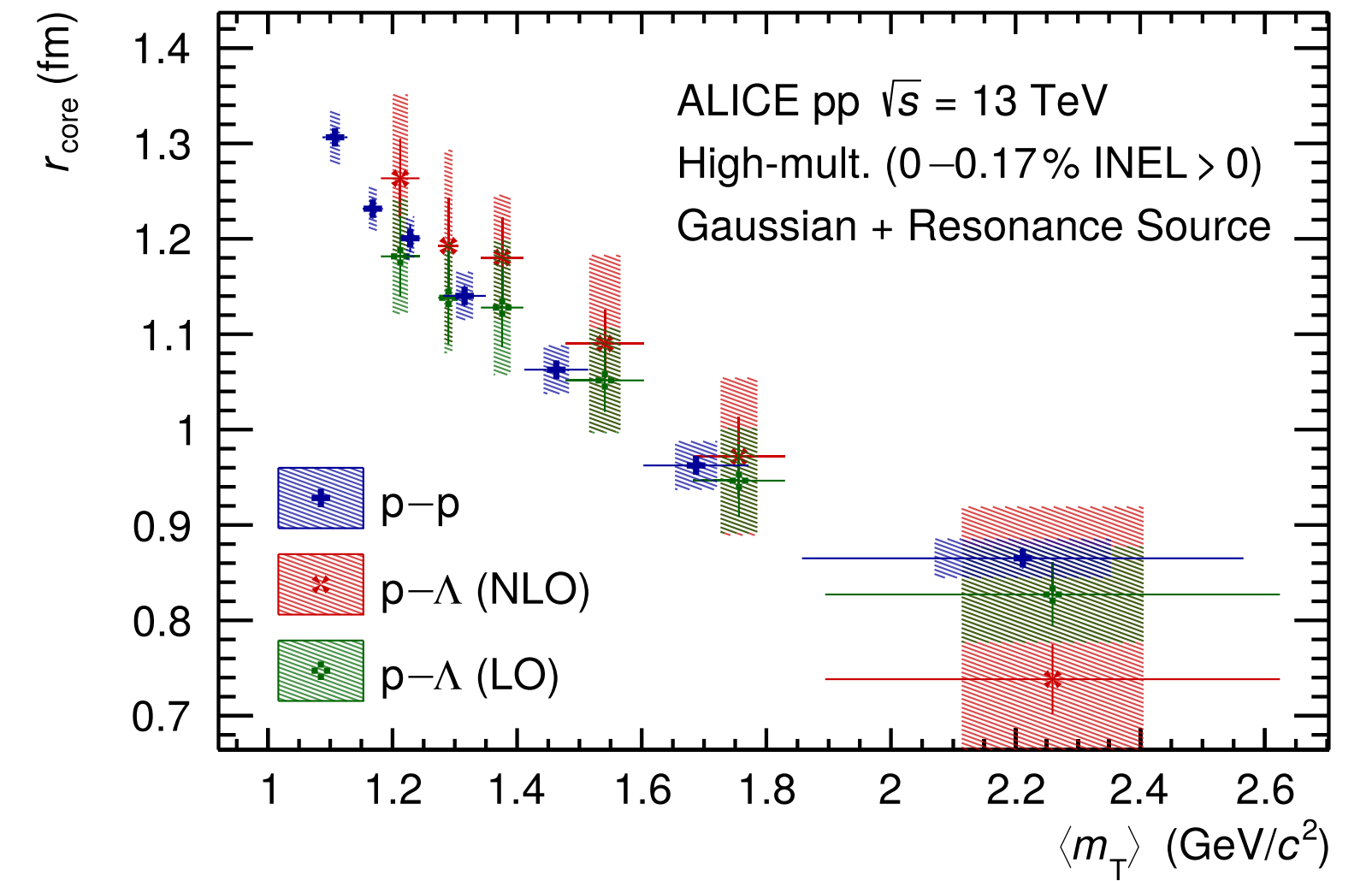
ALICE, PRD87, 052016 (2013)



ALICE, EPJC85(2025)198



ALICE, PLB811(2020)135849



pp衝突でも m_T スケーリングは、あくまでラフなスケーリング（に見える）。

pionとprotonは合っていそう。

Non-identical femtoscopy e.g. πK

Lednický et al., PLB373 (1996) 30

ELSEVIER

Physics Letters B 373 (1996) 30–34

How to measure which sort of particles was emitted earlier and which later

R. Lednický¹, V.L. Lyuboshitz², B. Erasmus, D. Nouais

“Catch up”: Longer interaction, stronger correlation

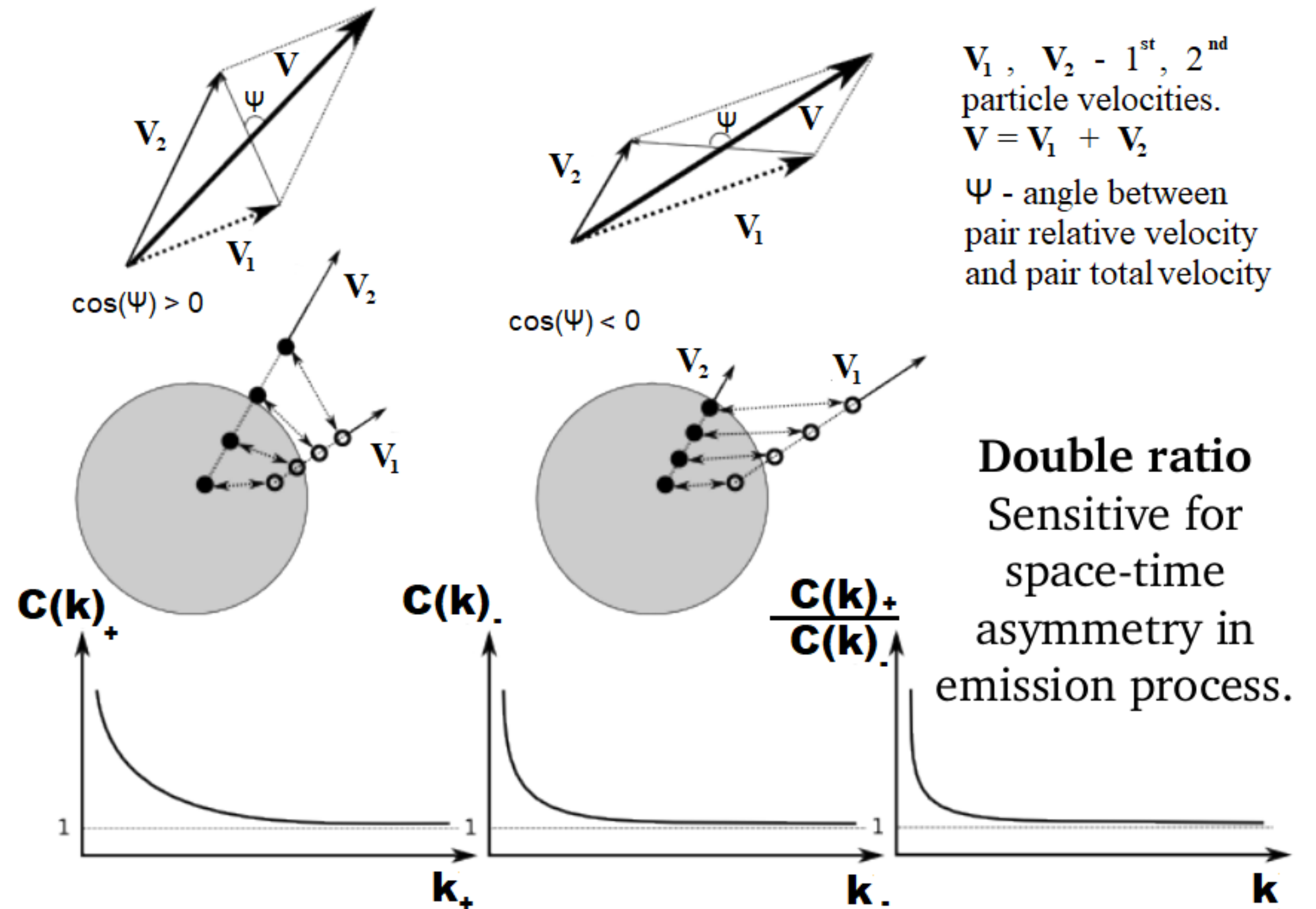
$$C_+ : \vec{v}_{\text{pair}} \cdot \vec{k}_\pi^* > 0$$

pionがkaonを追いかける場合

“Run away”: Shorter interaction, weaker correlation

$$C_- : \vec{v}_{\text{pair}} \cdot \vec{k}_\pi^* < 0$$

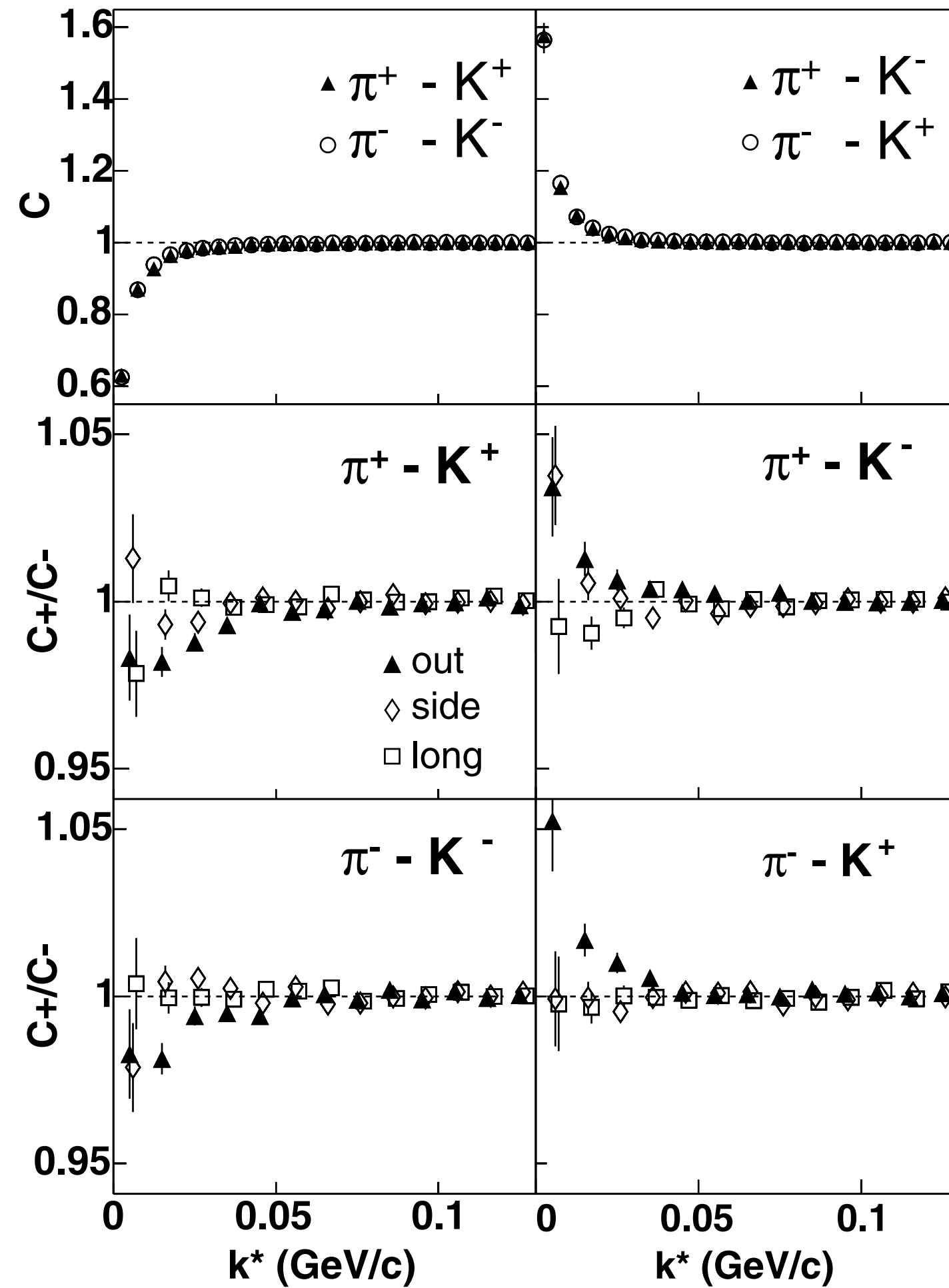
pionがkaonに追いつかない（離れていく）場合



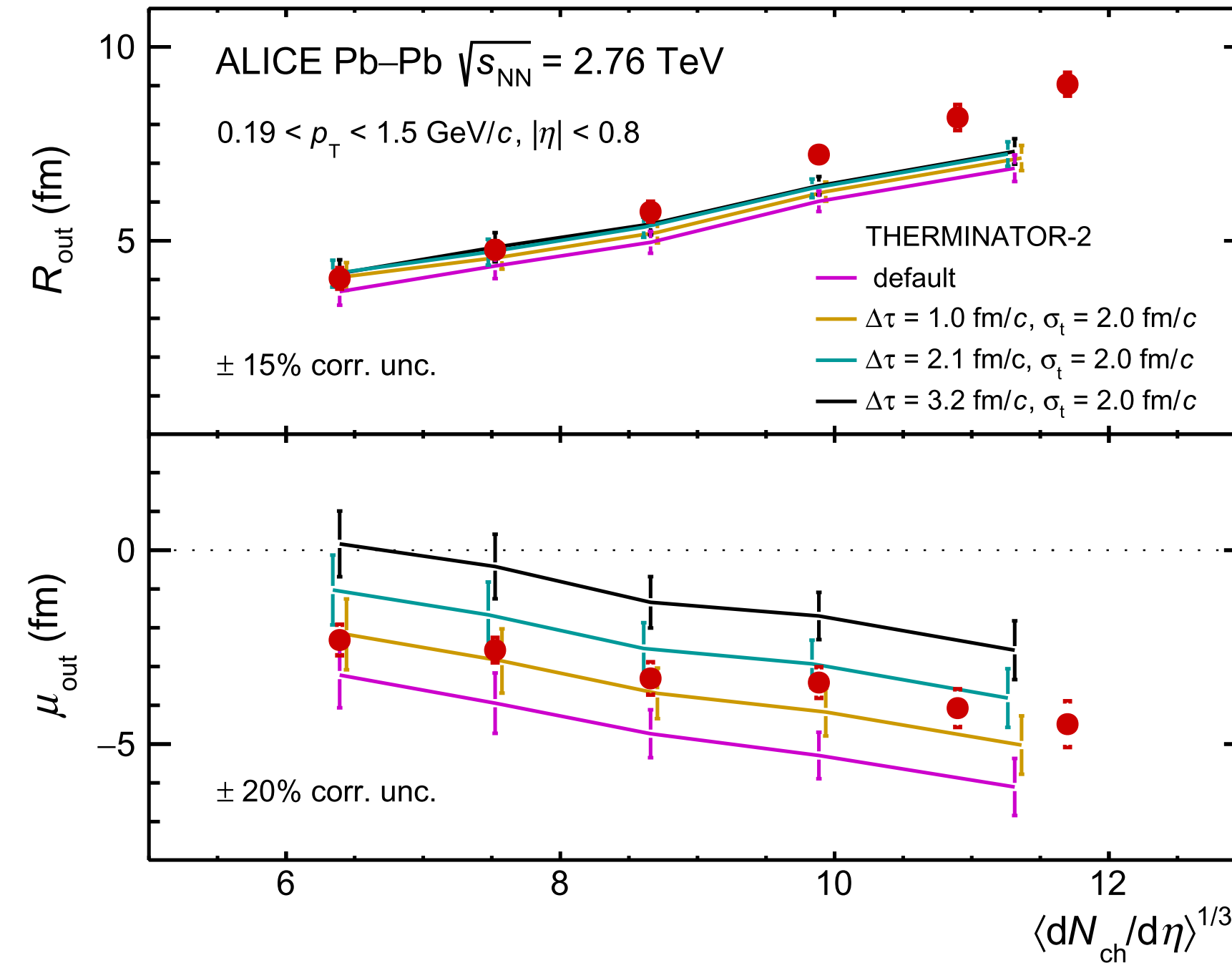
もし、pionとkaonが同じ場所(時間)から放出されるなら、
 C_+/C_- のdouble ratioは、1になる。粒子放出点の“space-time asymmetry”を探る手法。

Non-identical femtoscopy

STAR, PRL91, 262302 (2003)



ALICE, PLB813, 136030 (2021)



emission asymmetry parameter μ_{out}

$$S(\mathbf{r}) \propto \exp \left(-\frac{[r_{out} - \mu_{out}]^2}{2R_{out}^2} - \frac{r_{side}^2}{2R_{side}^2} - \frac{r_{long}^2}{2R_{long}^2} \right),$$

pionはkaonより中心から放出される、あるいはpionが時間的に後から放出される

ハドロン間相互作用の研究へ

$$C(q) = \int \underbrace{S(r)}_{\text{emission ソース関数 (基本的にはガウス関数を仮定)}} \underbrace{|\Psi(r, q)|}_{\text{2粒子系の波動関数}} d^3 r$$

終状態相互作用 (Coulomb, 強い相互作用) を含む

ソース分布関数の情報はある程度わかってきた。Coulomb相互作用も計算できるので、強い相互作用 (YN, NN, 3体 相互作用)をプローブする研究がここ数年で爆発的に増えている。特にALICE実験。(以前からもあったが)

プチ調査

2025/3/25の時点での検索

ALICE論文＋“femto” or “interaction” or “Bose”で検索
36本の論文がヒット。そのうち2019年以降では、
23/25の論文がハドロン間相互作用に関するもの。
(proceedingsは除く。多少抜けはあるかも。)

36 results [cite all](#) Citation Summary ☐ [Most Recent](#) ☐

Investigating the $p\text{-}\pi^\pm$ and $p\text{-}p\text{-}\pi^\pm$ dynamics with femtoscopy in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV #1
[ALICE Collaboration](#) • [Shreyasi Acharya](#) ([Clermont-Ferrand U.](#)) et al. (Feb 27, 2025)
e-Print: [2502.20200](#) [nucl-ex]
[pdf](#) [cite](#) [claim](#) [reference search](#) [2 citations](#)

Studying the interaction between charm and light-flavor mesons #2
[ALICE Collaboration](#) • [Shreyasi Acharya](#) ([Clermont-Ferrand U.](#)) et al. (Jan 24, 2024)
Published in: *Phys.Rev.D* 110 (2024) 3, 032004 • e-Print: [2401.13541](#) [nucl-ex]
[pdf](#) [DOI](#) [cite](#) [datasets](#) [claim](#) [reference search](#) [19 citations](#)

Common femtoscopic hadron-emission source in pp collisions at the LHC #3
[ALICE Collaboration](#) • [Shreyasi Acharya](#) ([Clermont-Ferrand U.](#)) et al. (Nov 24, 2023)
Published in: *Eur.Phys.J.C* 85 (2025) 2, 198 • e-Print: [2311.14527](#) [hep-ph]
[pdf](#) [DOI](#) [cite](#) [datasets](#) [claim](#) [reference search](#) [15 citations](#)

Femtoscopic correlations of identical charged pions and kaons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with event-shape selection #4
[ALICE Collaboration](#) • [Shreyasi Acharya](#) ([Clermont-Ferrand U.](#)) et al. (Oct 11, 2023)
Published in: *Phys.Rev.C* 109 (2024) 2, 024915 • e-Print: [2310.07509](#) [nucl-ex]
[pdf](#) [DOI](#) [cite](#) [datasets](#) [claim](#) [reference search](#) [4 citations](#)

Exploring the Strong Interaction of Three-Body Systems at the LHC #5
[ALICE Collaboration](#) • [Shreyasi Acharya](#) ([Clermont-Ferrand U.](#)) et al. (Aug 30, 2023)
Published in: *Phys.Rev.X* 14 (2024) 3, 031051 • e-Print: [2308.16120](#) [nucl-ex]
[pdf](#) [DOI](#) [cite](#) [datasets](#) [claim](#) [reference search](#) [24 citations](#)

Accessing the strong interaction between Λ baryons and charged kaons with the femtoscopy technique at the LHC #6
[ALICE Collaboration](#) • [Shreyasi Acharya](#) ([Clermont-Ferrand U.](#)) et al. (May 30, 2023)
Published in: *Phys.Lett.B* 845 (2023) 138145 • e-Print: [2305.19093](#) [nucl-ex]
[pdf](#) [DOI](#) [cite](#) [datasets](#) [claim](#) [reference search](#) [23 citations](#)

K_s^0 相関

d / B k

荷電 π 中間子、K中間子ペアでは、クーロン相互作用が支配的で、
強い相互作用は無視できるほど小さい。interaction range ~ 0.2 fm。 Bowler, Z.Phys.C39, 81(1988)

K_s^0 ペアでは、クーロン相互作用はなく、強い相互作用の影響を考慮する必要あり。

STAR, PRC74,054902(2006)

ALICE, PRC96, 064613(2017)

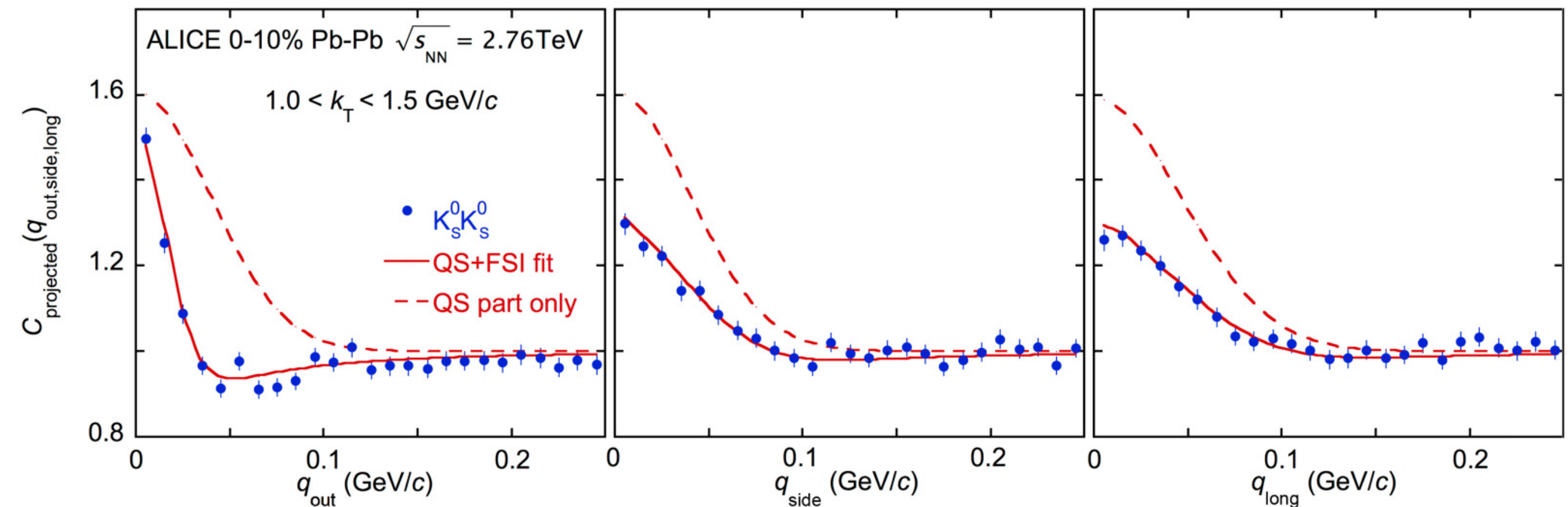
$$|K_s^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle),$$

$$|K_s^0 K_s^0\rangle = \frac{1}{2}(|\underline{K^0 K^0}\rangle + |\underline{K^0 \bar{K}^0}\rangle + |\underline{\bar{K}^0 K^0}\rangle + |\underline{\bar{K}^0 \bar{K}^0}\rangle).$$

Bose-Einstein相関 (QS)

s-wave scattering.

$f_0(980) \rightarrow K^0 \bar{K}^0$, $a_0(980) \rightarrow K^0 \bar{K}^0$ のカップリングが支配的



$$C_L(Q_{\text{inv}}) = \lambda C'(Q_{\text{inv}}) + (1 - \lambda)$$

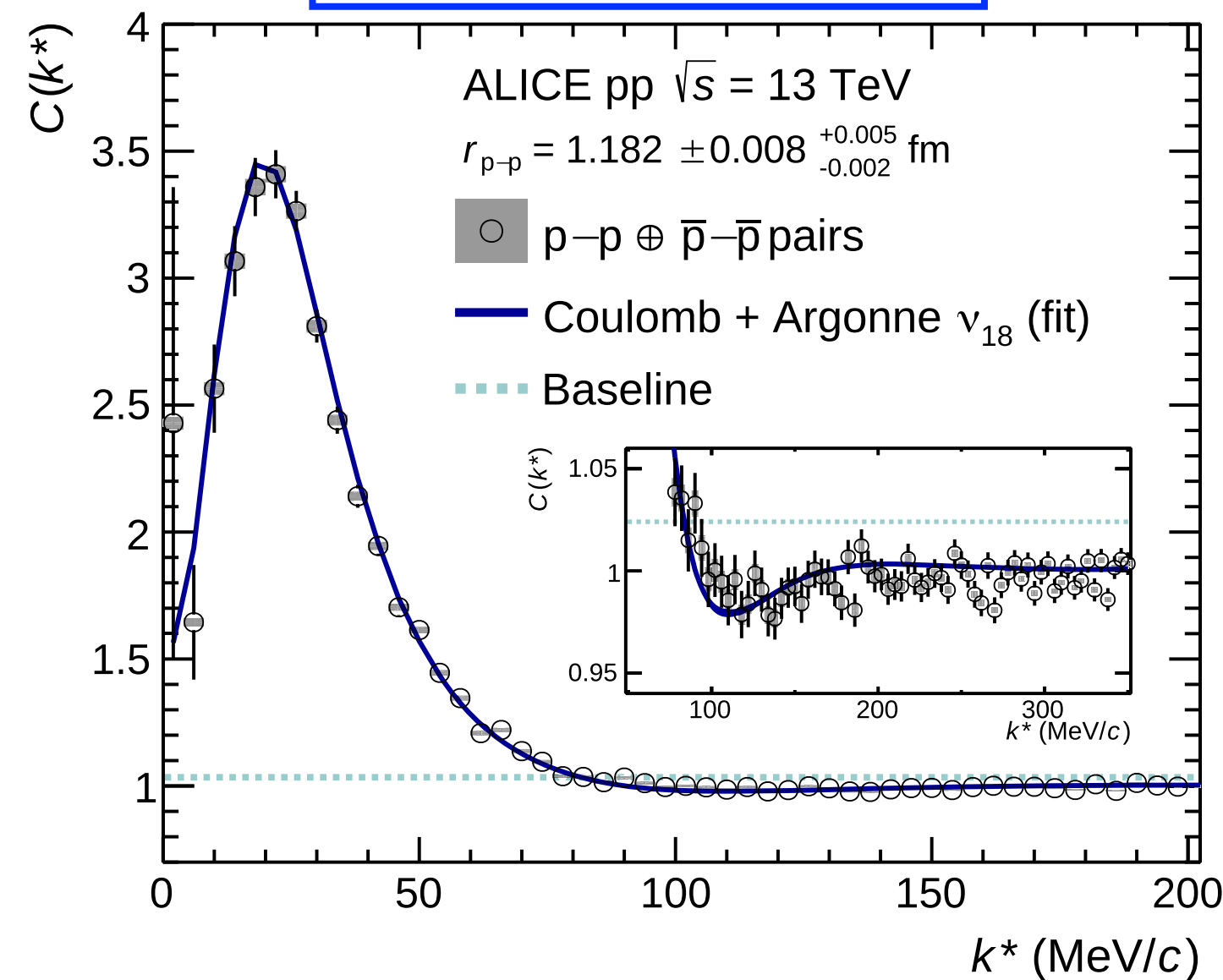
where

$$C'(Q_{\text{inv}}) = 1 + e^{-Q_{\text{inv}}^2 R^2} + \alpha \left[\left| \frac{f(k^*)}{R} \right|^2 + \frac{4\Re f(k^*)}{\sqrt{\pi} R} F_1(Q_{\text{inv}} R) - \frac{2\Im f(k^*)}{R} F_2(Q_{\text{inv}} R) \right]$$

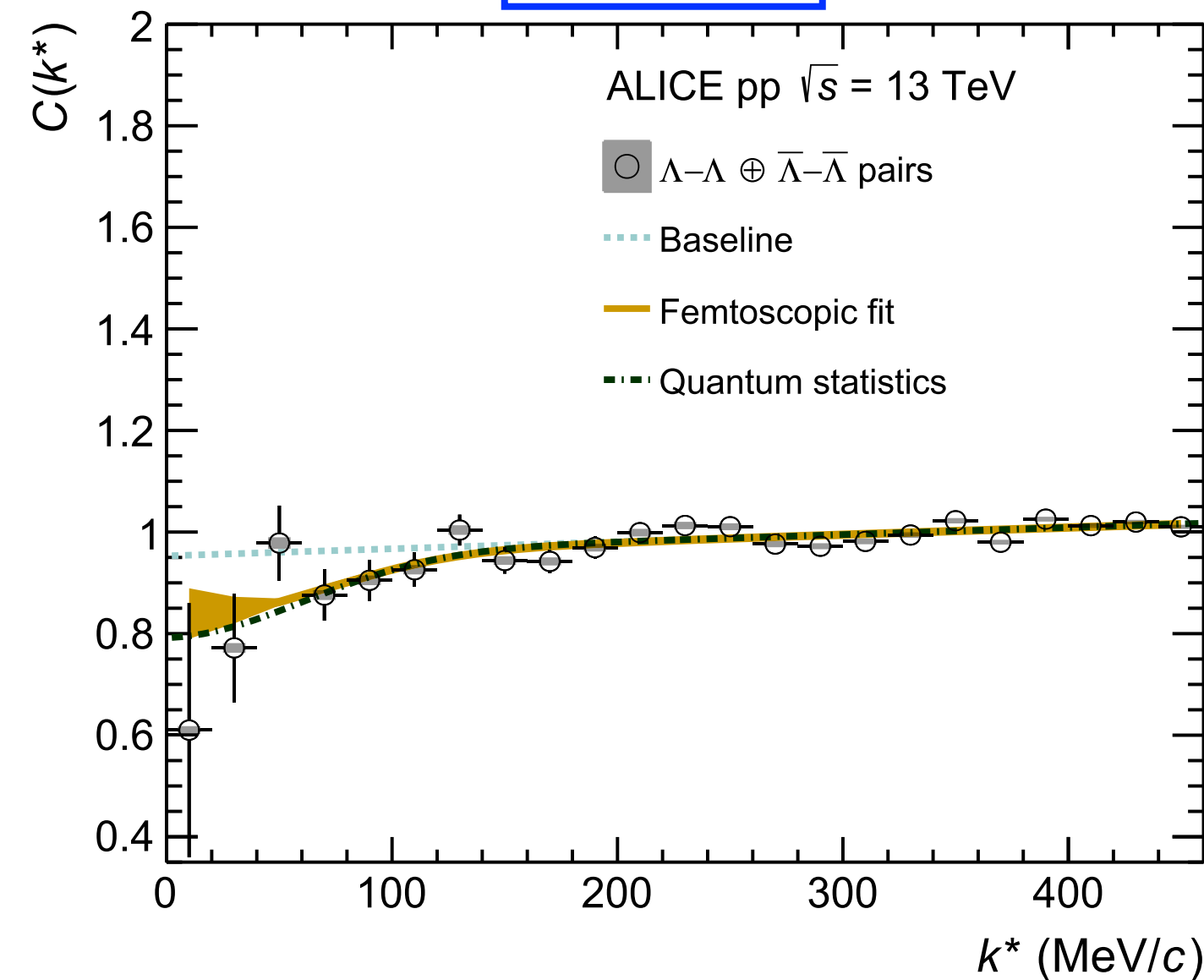
バリオン相関

ALICE, PLB797(2019)134822

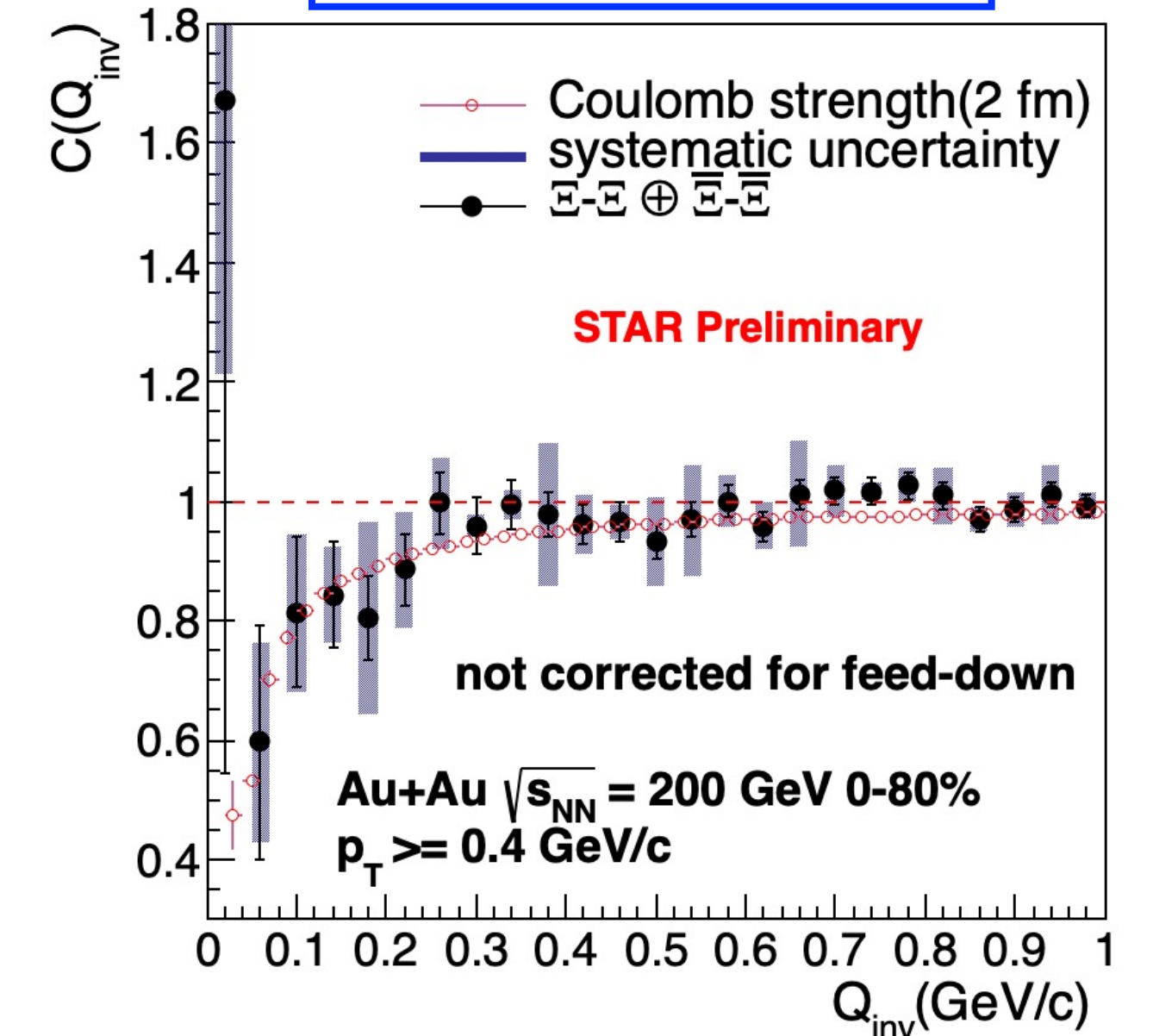
proton-proton相関
QS + SI + Coulomb



Λ - Λ 相関
QS + SI



三-三相関
QS + SI + Coulomb



バリオン相関なので、Fermi-Dirac Quantum Statistics (QS) = 負の相関

- pp相関では、attractiveなStrong Interaction (SI)とrepulsiveなCoulombが支配的
- $\Lambda\Lambda$ 相関では、ほぼQSと一致 (SIが無くてもデータを説明できる)
- 三相関では、dataとCoulomb相互作用がほぼ一致。QSとSIがちょうどキャンセル？

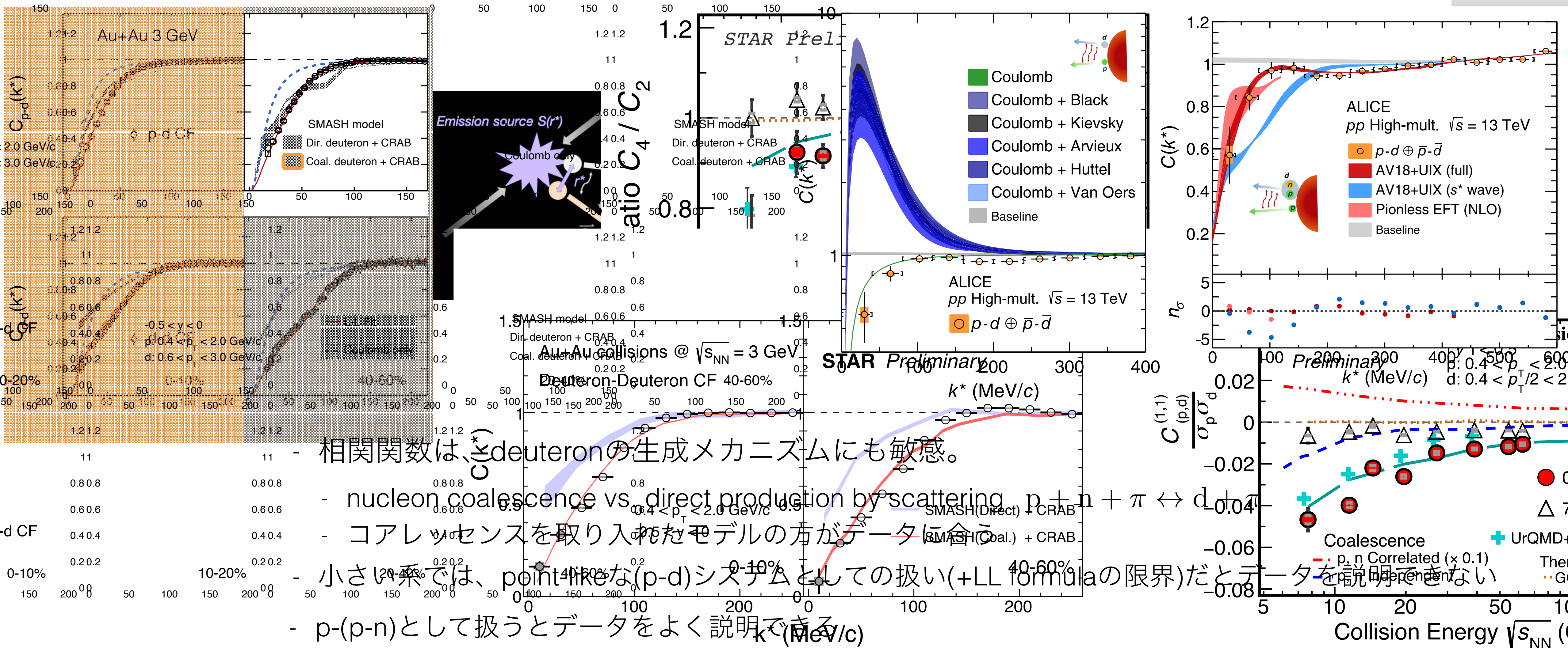
(大きな誤差 & feed-down補正していないのであくまで定性的な議論)

M. Isshiki, EPJ Web.Conf.259(2022)11015
SQM2021, ATHIC2021

軽い原子核 p - d , d - d 相関

STAR, arXiv:2410.03436

ALICE, PRX14,031051(2025)



まとめ

フェムトスコピー (HBT/GGLP相関) は粒子放出源の時空間分布の広がりを探るためのツールとして非常に有用であり、これまでに多くの研究がなされてきた。

- ▶ 1次元から3次元解析へ、 π 中間子から他の粒子相関へ、さらに異種粒子相関へ
- ▶ 3次元解析することで、系のサイズだけでなく形や時間情報、膨張の強さ、速度プロファイルなどを調べることが可能
- ▶ ハドロン間相互作用やダイバリオン探索のために、フェムトスコピーが再び脚光を浴びている
- ▶ 今回触れられなかったトピックや今後の展望など
 - ▶ Initial tilt (ビーム軸に対するシステムの傾き)とdirected flowとの関連
 - ▶ (Direct) Photon HBT (QGPサイズを直接測定！PHENIXやALICEでpreliminary studyはあるが、論文はまだのはず？)
 - ▶ バリオンの3次元解析
 - ▶ 様々なハドロン間相互作用、散乱パラメータの制限 (本日の黒木さんのトーク、過去の大西さんのトーク)