

ビームエネルギー走査実験で探る QCD相構造

原子核実験グループ 野中俊宏

2025年12月16日

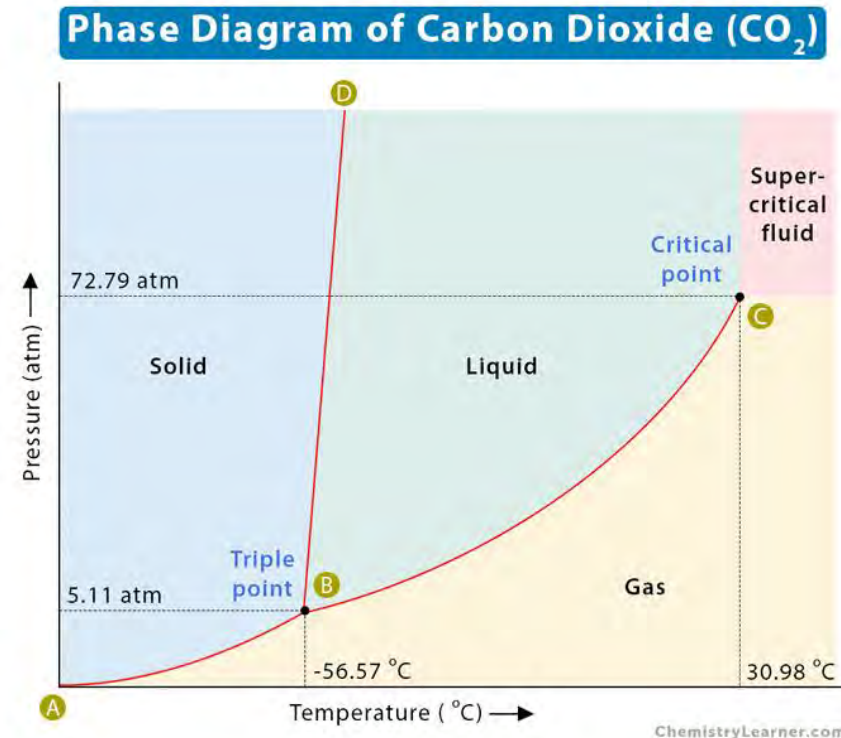
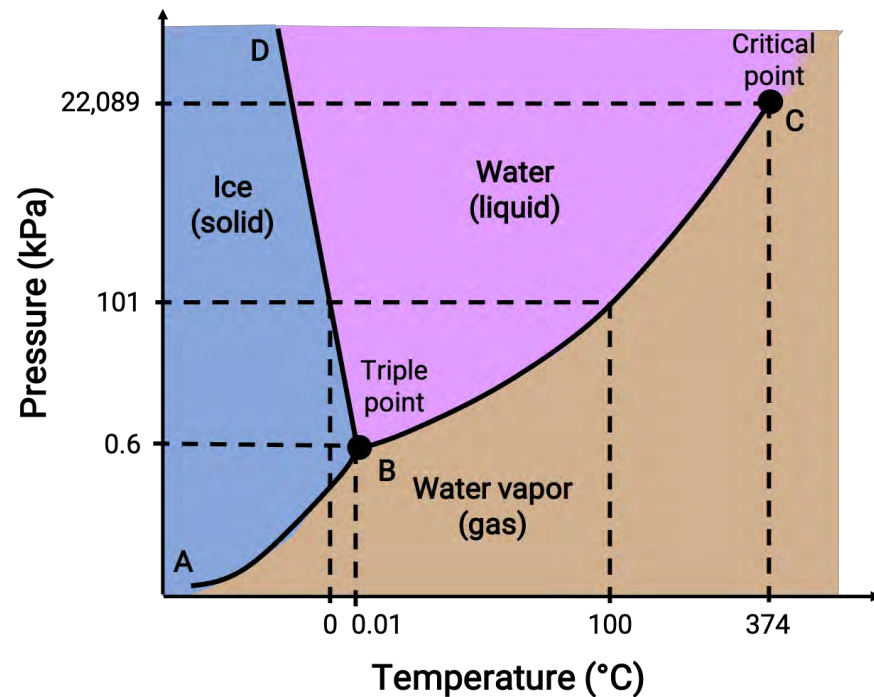


Outline

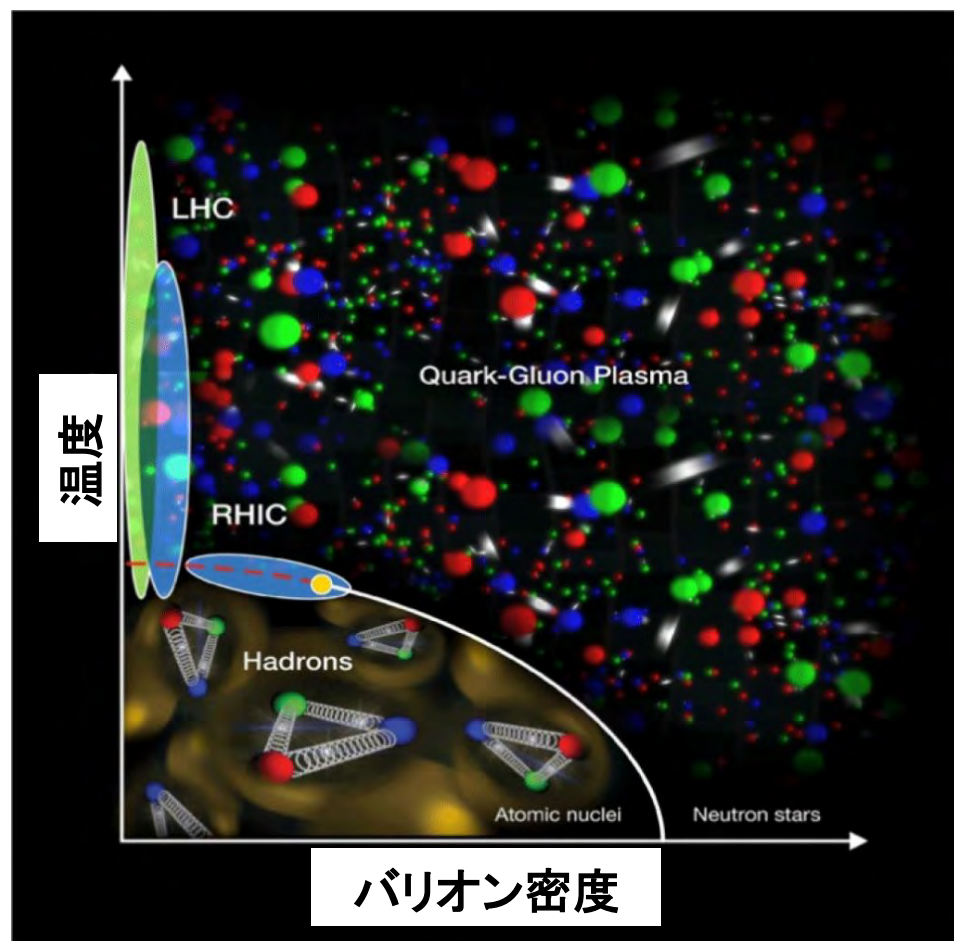
- QCD相図とBeam Energy Scan
- ゆらぎについて
- 実験結果
 - BES-I & BES-II
 - 固定標的実験
- 将来展望

身近な物質の相図

- 様々な物質の状態が温度・密度の関数として理解されている。
- 1次相転移、臨界点など。



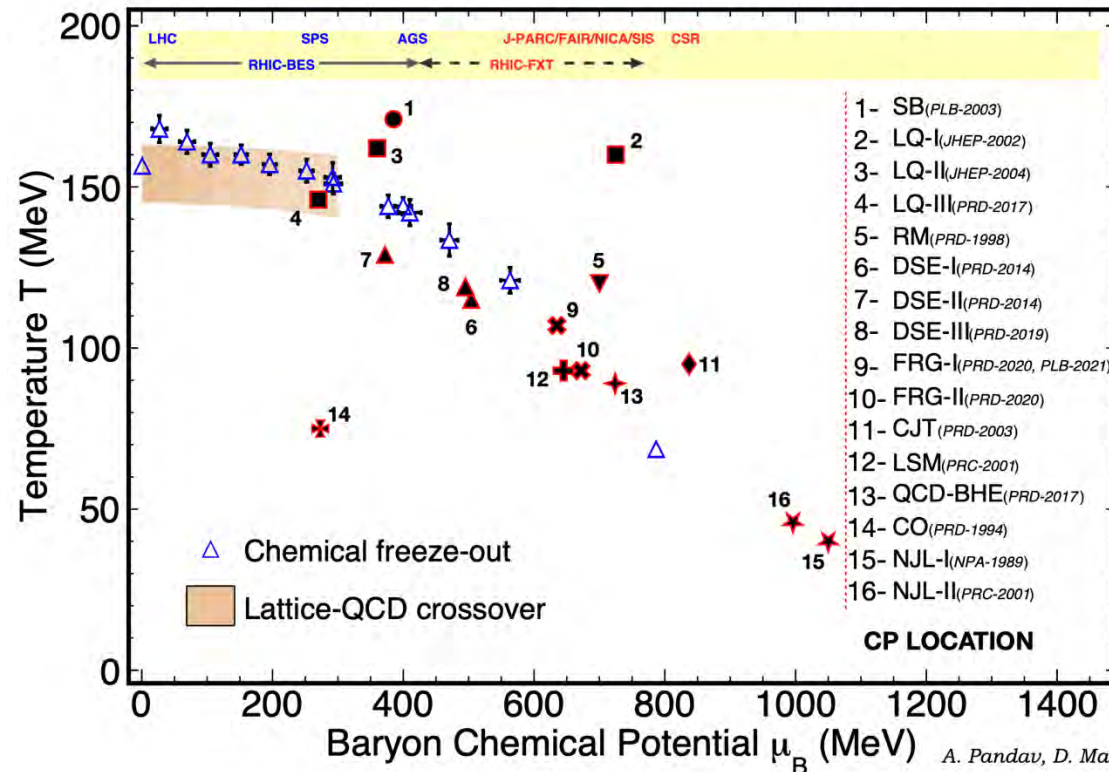
原子核物質の相図



- ゼロ密度ではクロスオーバーであることが第一原理計算によって示されている。
 - Y. Aoki et al, Nature 443,675(2006)
- 高密度領域では1次相転移が現れる？もしそうなら、クロスオーバーと切り替わる「QCD臨界点」も存在するはず。
- ただ、QCD相図は実験的にはほぼ何も分かっていない。。(左図はただのイメージ図)
- 実験的にQCD相図を探索するにはどうすれば良いか？

QCD: 量子色力学, Quantum ChromoDynamics

QCD臨界点(理論予測)



- Lattice calculations at high μ_B suffer from sign problem
- Effective models have several underlying assumptions/ approximations

A. Pandav, QM2023

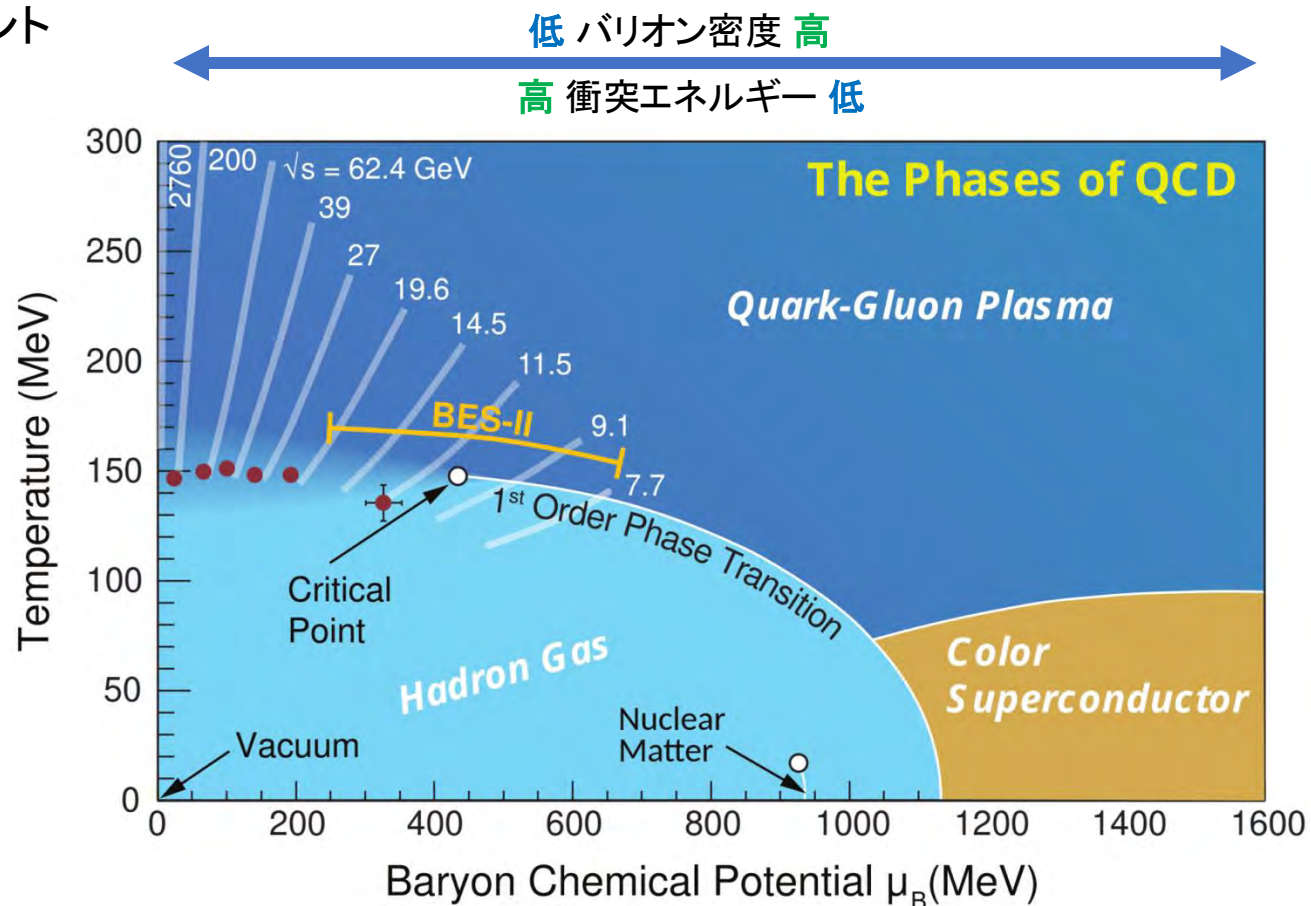
□ Theory predictions vary wildly in $\mu_B - T$ plane. **Experimental search very important.**

Beam Energy Scan (BES)

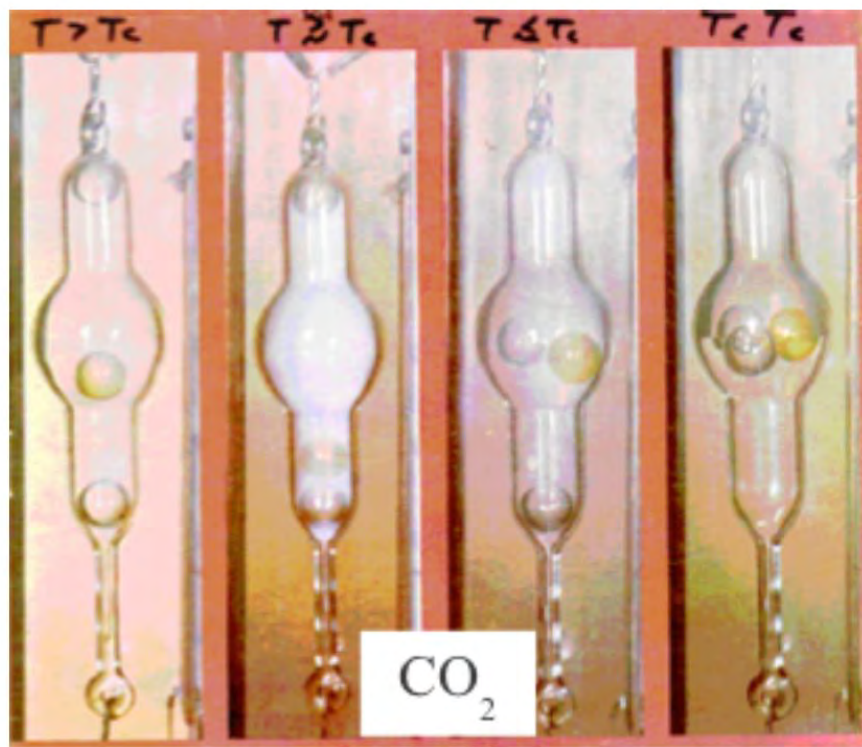
- 衝突エネルギーを変化させることで、系の密度をコントロールすることが可能！
- ビームエネルギー走査実験
 - 第一期(BES-I): 2010-2017
 - 第二期(BES-II): 2019-2021

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	No. of events (million)	T_{ch} (MeV)	μ_B (MeV)
200	238	164.3	28
62.4	47	160.3	70
54.4	550	160.0	83
39	86	156.4	160
27	30	155.0	144
19.6	15	153.9	188
14.5	20	151.6	264
11.5	6.6	149.4	287
7.7	3	144.3	398

2010-
2017



臨界点とゆらぎ

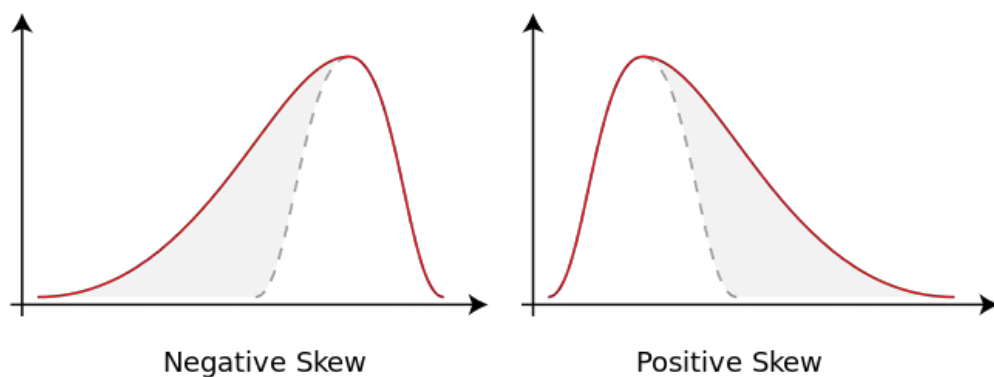


- 臨界点近傍では相関長や感受率が発散し、系全体が一斉に強くゆらぐ。
- 臨界濁り(critical opalescence)と呼ばれる光散乱として観察される。
- これまで運動量や粒子数の2次ゆらぎの測定が行われてきたが、それらしい信号は得られていない。
→ 保存量の非ガウスゆらぎへの挑戦

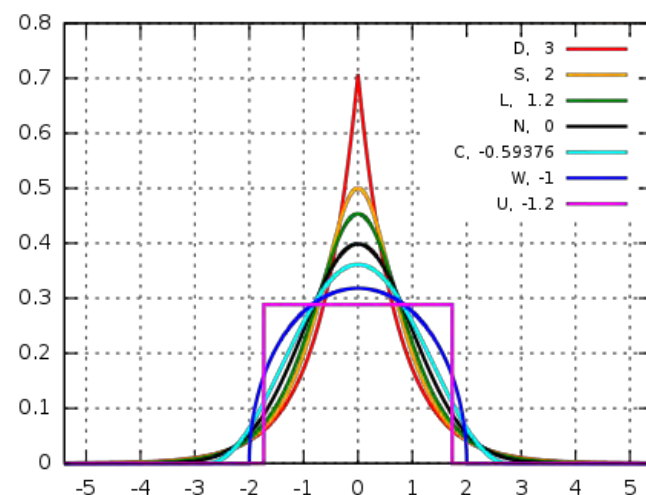
ゆらぎとは

- 分布の形を特徴づける量。モーメントやキュムラント。
 - 1次ゆらぎ: Mean (M), 平均値
 - 2次ゆらぎ: Standard deviation (σ), 標準偏差

3次ゆらぎ: Skewness (S), 歪度



4次ゆらぎ: Kurtosis (κ), 尖度



キュムラント

- n次キュムラント: キュムラント母関数のn階微分。

$$C_1 = \langle N \rangle, \quad C_2 = \langle (\delta N)^2 \rangle \quad \delta N = N - \langle N \rangle$$

$$C_3 = \langle (\delta N)^3 \rangle \quad C_4 = \langle (\delta N)^4 \rangle - 3 \langle (\delta N)^2 \rangle^2$$

$$C_5 = \langle (\delta N)^5 \rangle - 10 \langle (\delta N)^2 \rangle \langle (\delta N)^3 \rangle$$

$$C_6 = \langle (\delta N)^6 \rangle + 30 \langle (\delta N)^2 \rangle^3 - 15 \langle (\delta N)^2 \rangle \langle (\delta N)^4 \rangle$$

- トリビアルな体積依存性を持つため、取り扱いやすい。

$$C_n(X + Y) = C_n(X) + C_n(Y)$$

- 体積依存性をキャンセルするため、異なる次数同士の比を取る。

$$S\sigma = \frac{C_3}{C_2} \quad \kappa\sigma^2 = \frac{C_4}{C_2}$$

保存量のゆらぎ

STAR, PRL105.022302(2010)

- 衝突前後で値が変わらない量
- 正味バリオン数、正味電荷、正味ストレンジネス

$$\Delta N_q = N_q - N_{\bar{q}}, \quad q = B, Q, S$$

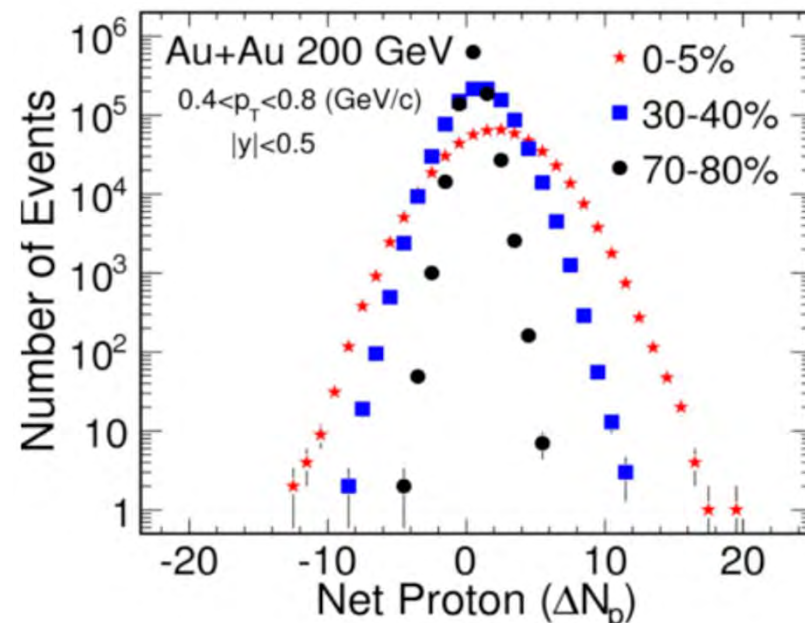
- これらの量をヒストグラムに詰め、それを何百万回もの衝突事象について繰り返し、その分布のキュムラントを測定。
- 高次のキュムラントほど系の相関長に敏感。

$$C_2 = \langle (\delta N)^2 \rangle_c \approx \xi^2 \quad C_4 = \langle (\delta N)^4 \rangle_c \approx \xi^7$$

$$C_3 = \langle (\delta N)^3 \rangle_c \approx \xi^{4.5}$$

M. A. Stephanov, PRL102.032301(2009), PRL107.052301(2011)

M. Asakawa, S. Ejiri, and M. Kitazawa, PRL103.262301(2009)



- 感受率の比と直接比較可能。

$$S\sigma = \frac{C_3}{C_2} = \frac{\chi_3}{\chi_2} \quad \kappa\sigma^2 = \frac{C_4}{C_2} = \frac{\chi_4}{\chi_2} \quad \chi_n^q = \frac{1}{VT^3} \times C_n^q = \frac{\partial^n p/T^4}{\partial \mu_q^n}, \quad q = B, Q, S$$

保存量のゆらぎ

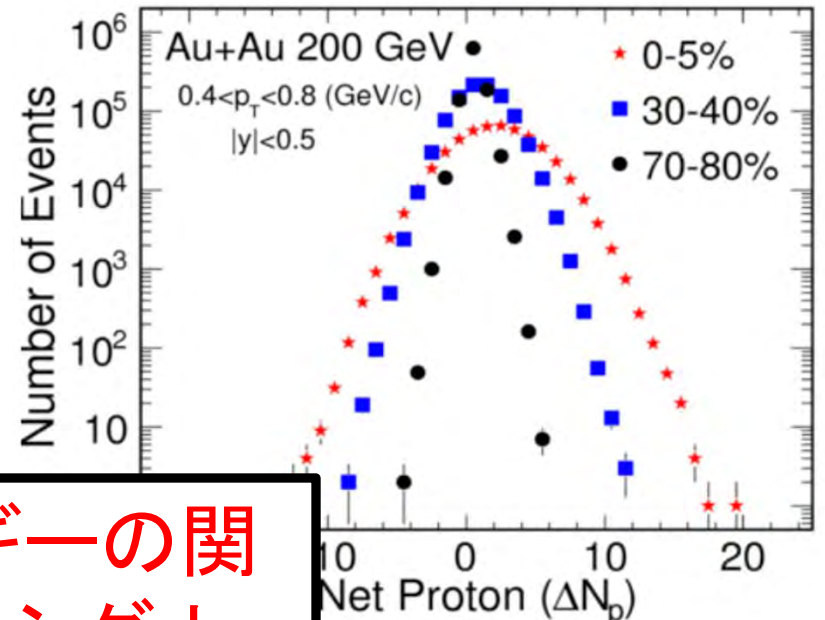
STAR, PRL105.022302(2010)

- 衝突前後で値が変わらない量
- 正味バリオン数、正味電荷、正味ストレンジネス

$$\Delta N_q = N_q - N_{\bar{q}}, \quad q = B, Q, S$$

- これらの量をヒストグラムに詰め、それを何百万回もの衝突事象について繰り返し、その分布のキュムラントを測定。

- 高次 **高次キュムラントの比を衝突エネルギーの関数として測定。臨界点の周りで大きいシグナルを期待。**

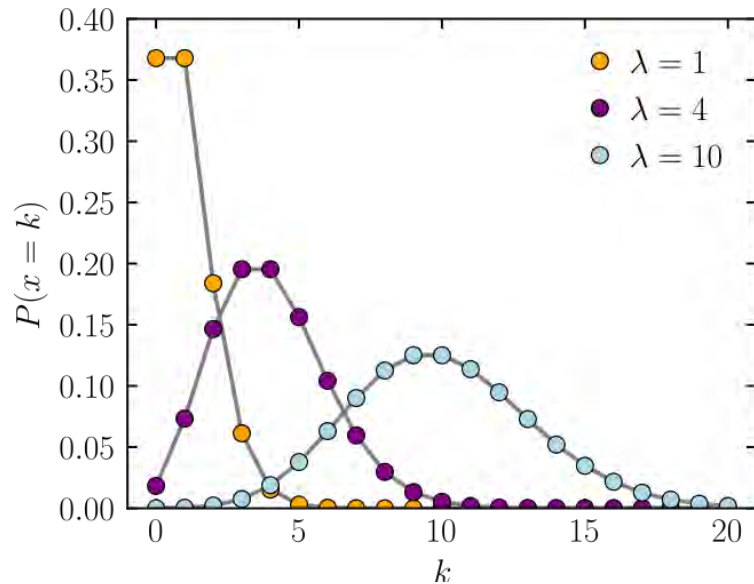


(2009), PRL107.052301(2011)
awa, PRL103262301(2009)

- 感受率の比と直接比較可能。

$$S\sigma = \frac{C_3}{C_2} = \frac{\chi_3}{\chi_2} \quad \kappa\sigma^2 = \frac{C_4}{C_2} = \frac{\chi_4}{\chi_2} \quad \chi_n^q = \frac{1}{VT^3} \times C_n^q = \frac{\partial^n p/T^4}{\partial \mu_q^n}, \quad q = B, Q, S$$

統計的なゆらぎ



ポアソン分布

$$P_{\lambda}(m) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}$$

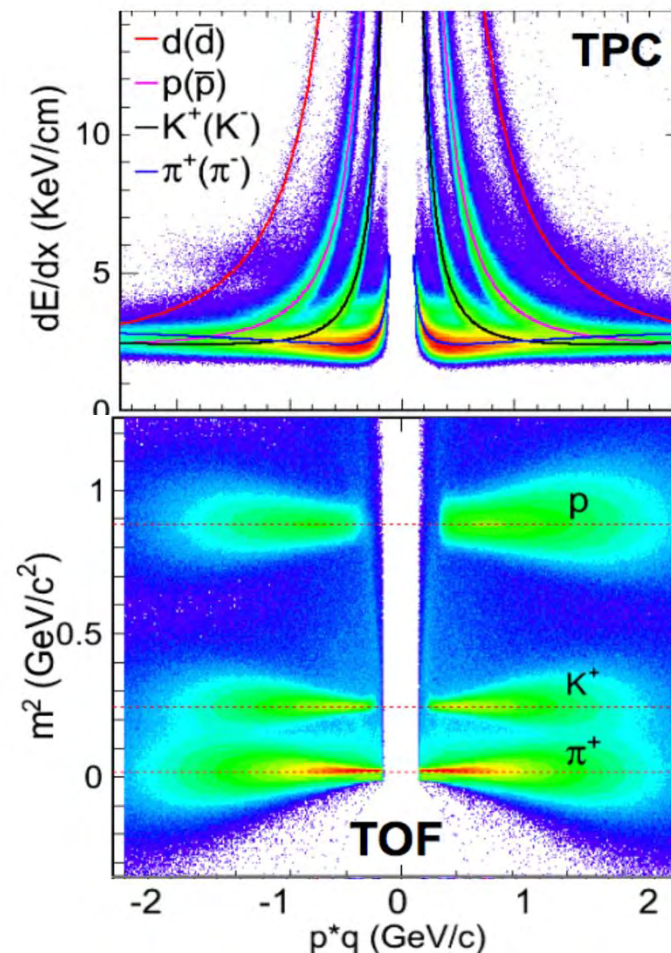
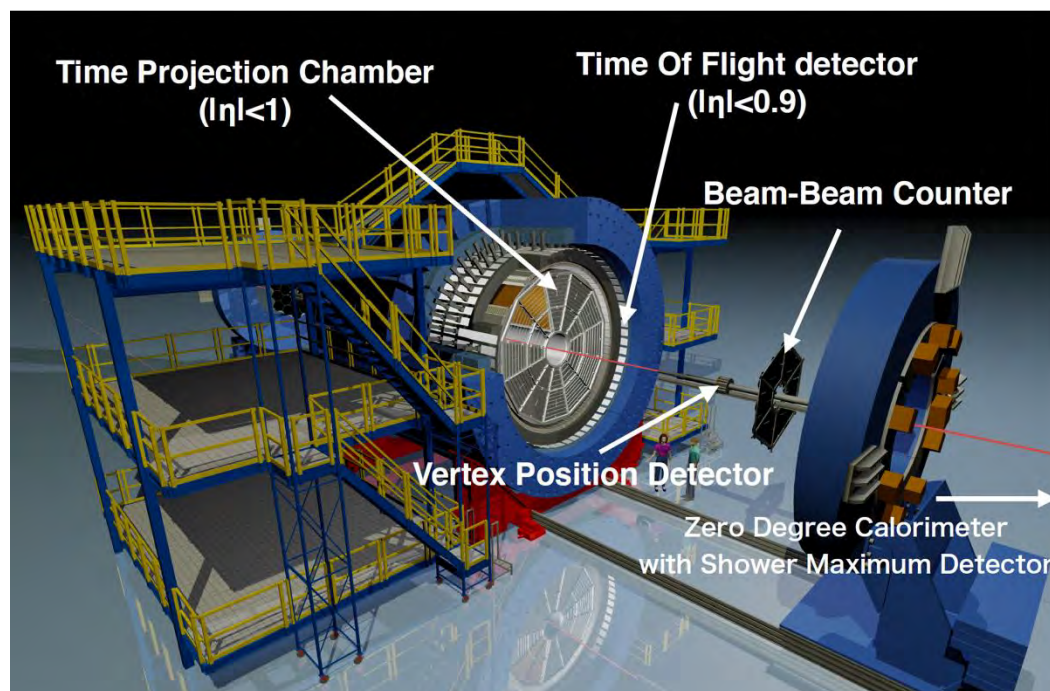
- ポアソン分布: 滅多に起こらない出来事が任意の時間・空間あたりに起こる回数。
 - 全ての次数のキュムラントが平均値 λ と等しい。最も素朴な確率分布。
- 粒子数と反粒子数がそれぞれ独立なポアソン分布に従う時、正味粒子数分布はスクラム分布に従う。
 - 奇数次キュムラント: $\lambda_1 - \lambda_2$
 - 偶数次キュムラント: $\lambda_1 + \lambda_2$
 - $C_4/C_2 = 1$ からのずれが見えれば面白い!

スクラム分布

$$S_{\lambda_1, \lambda_2}(m) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) I_m \left(2\sqrt{\lambda_1 \lambda_2} \right)$$

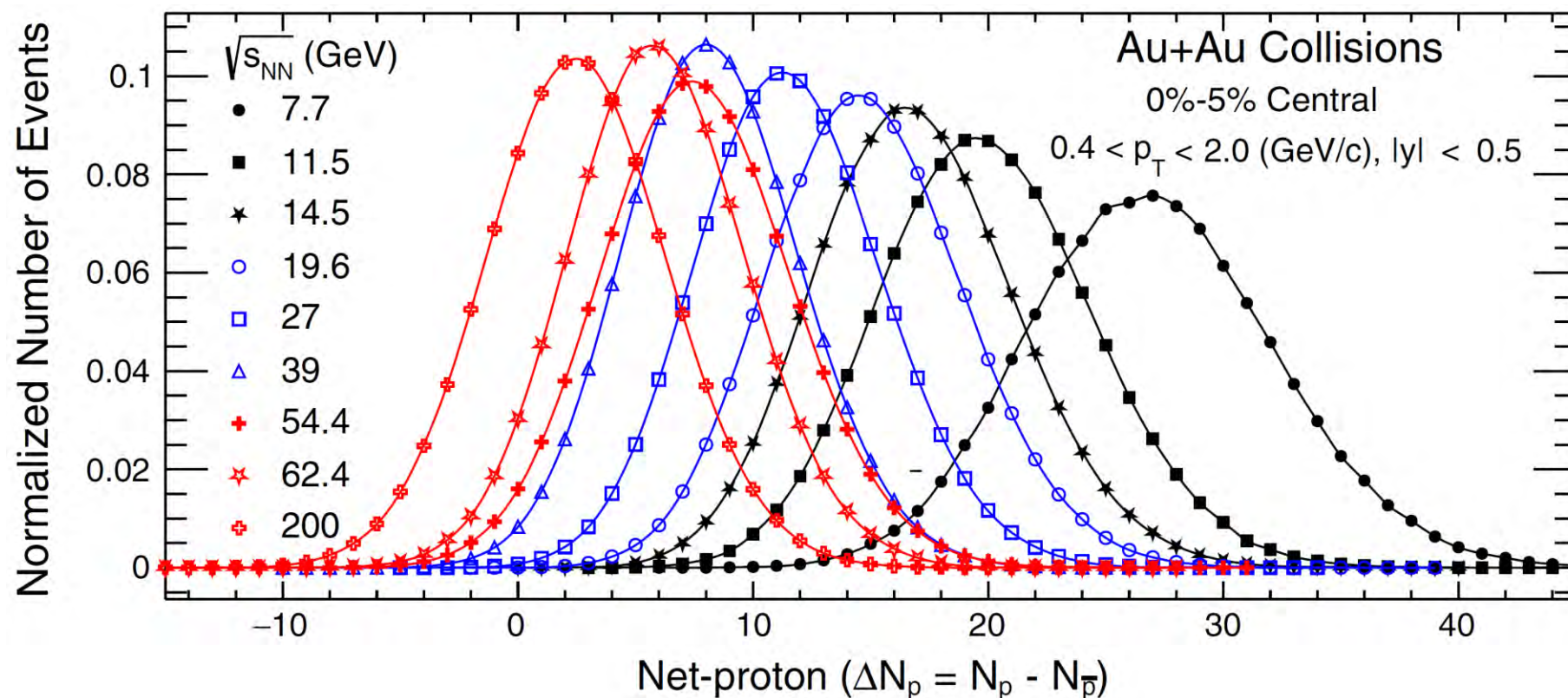
Solenoidal Tracker At RHIC (STAR)

- 広く一様なアクセプタンス
- 高い粒子識別能力



正味陽子数分布

- これらの分布のキュムラントを計算すれば良い。。訳ではない！



STAR, PRL126.092301(2021), PRC104.024902(2021)

Experimental challenges

- Detector efficiency correction

- **Binomial distribution**

- M. Kitazawa and M. Asakawa, *PRC86.024904(2012)*, A. Bzdak and V. Koch, *PRC86.044904(2012)*, X. Luo, *PRC91.034907(2016)*,
 - T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, *PRC95.064912(2017)*, X. Luo and T. Nonaka, *PRC99.044917(2019)*

- **Non-binomial distribution**

- T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, *NIMA906 10-17(2018)*
 - S. Esumi, K. Nakagawa, T. Nonaka, *NIMA987.164802(2021)*

- Initial volume fluctuation

- M. I. Gorenstein and M. Gaździcki, *PRC84.014904 (2011)*, V. Skokov, B. Friman, and K. Redlich, *PRC88.034911 (2013)*
 - X. Luo, J. Xu, B. Mohanty, N. Xu, *J. Phys. G40.105104 (2013)*, P. Munzinger, A. Rustamov, and J. Stachel, *NPA960.114 (2017)*
 - T. Sugiura, T. Nonaka, and S. Esumi, *PRC100.044904 (2019)*

- Pileup events

- S. Sombun et al, *J.Phys.G45.025101(2018)*, P. Garg and D. Mishra, *PRC96.044908(2017)*
 - T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, *NIMA984.164632(2020)*, Y. Zhang, Y. Huang, T. Nonaka, X. Luo, *NIMA1026.166246(2022)*

- Identity method

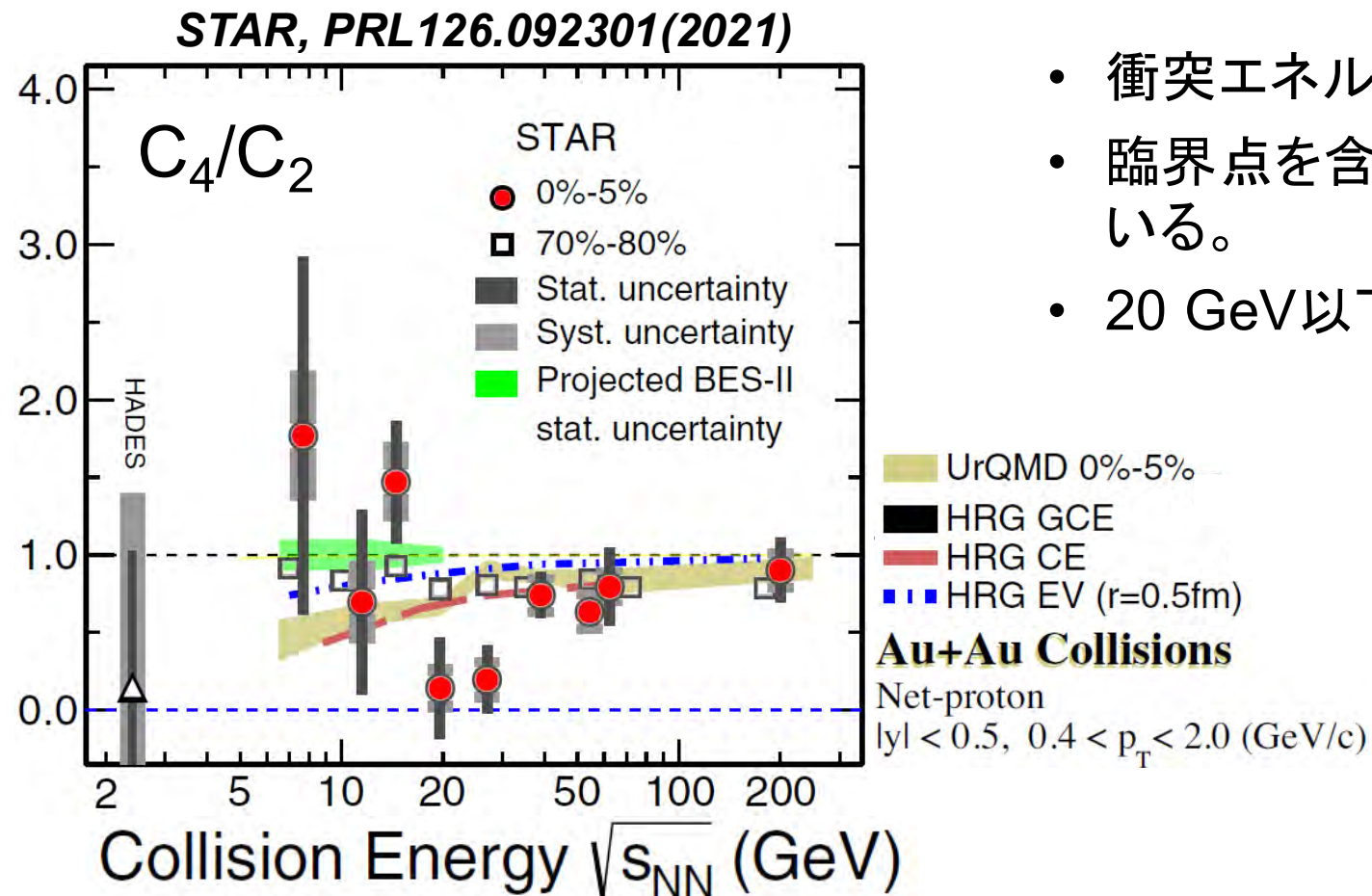
- M. Gaździcki, K. Grebieszko, M. Maćkowiak, and S. Mrówczyński, *PRC83.054907 (2011)*
 - A. Rustamov and M. I. Gorenstein, *PRC86.044906 (2012)*, M. I. Gorenstein, *PRC84.024902 (2018)*
 - M. Arslanovic and A. Rustamov, *NIMA946.162622 (2019)*

- More to be resolved...

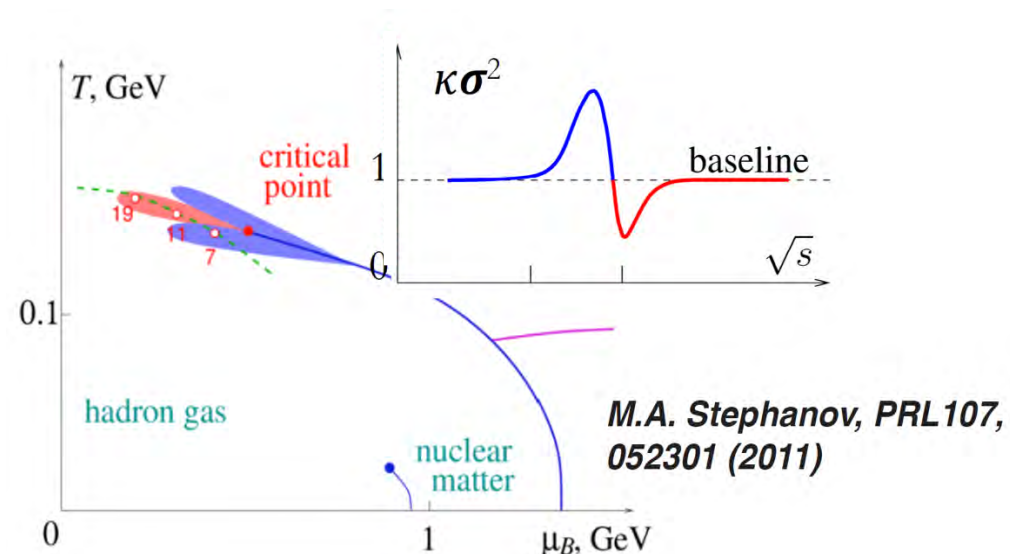
- Net-proton≠net-baryon, purity correction, acceptance dependence for comparison with theory,

***Not all important studies are listed here**

正味陽子数4次ゆらぎ from BES-I



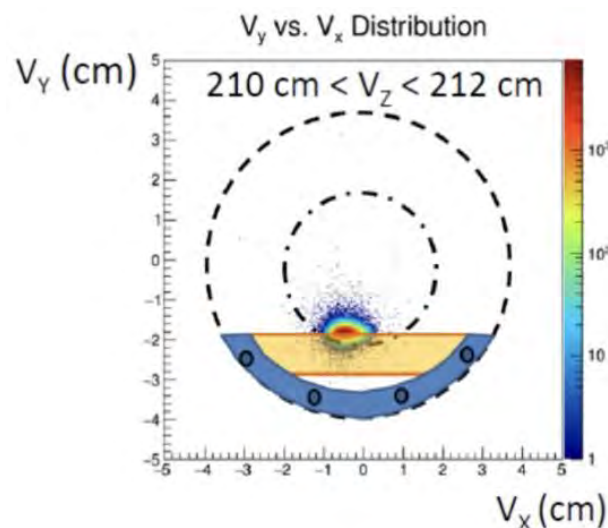
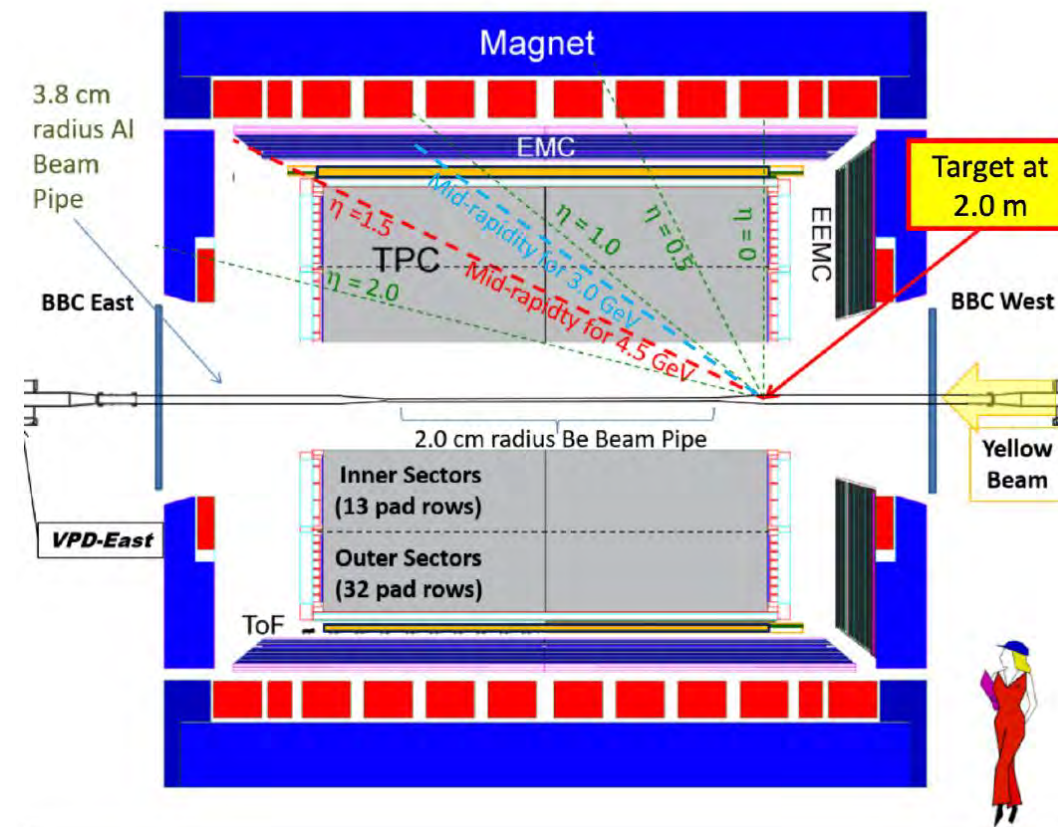
- 衝突エネルギーに対して非単調な依存性。
- 臨界点を含めたモデル計算の結果と非常に似ている。
- 20 GeV以下の誤差はいまだ大きい→BES-II



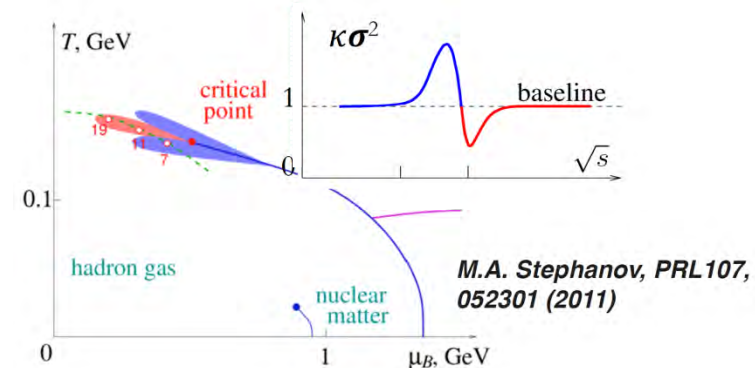
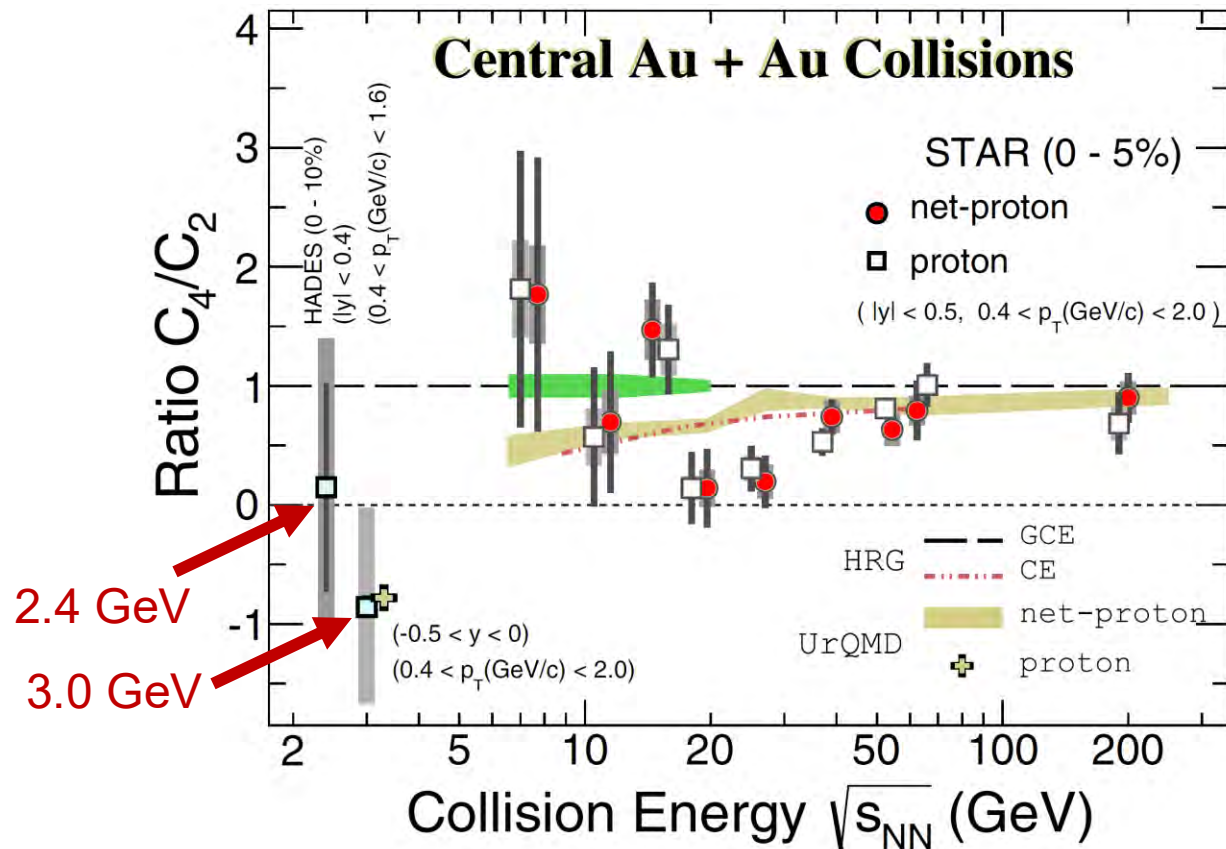
固定標的実験 (FXT)

- 片側の標的を固定することで、低エネルギー・高バリオン密度におけるデータの収集が効率的に。

FXT mode : $\mu_B = 750$ MeV @ 3GeV



陽子数4次ゆらぎ from FXT



- 3 GeVではハドロン輸送模型と定量的に一致。
- この衝突エネルギーで生成される物質はハドロンガス。
- 臨界点は3 GeV以上にしか存在し得ない！

HADES, PRC102.024914(2020)

STAR, PRL128.202303(2022), PRC107.024908(2023)

Beam Energy Scan phase II

Collider Runs			
Sl. no.	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	No. of collected events (millions)	μ_B (MeV)
1	200	380	25
2	62.4	46	75
3	54.4	1200	85
4	39	86	112
5	27	585	156
6	19.6	595	206
7	17.3	256	230
8	14.6	340	262
9	11.5	257	316
10	9.2	160	372
11	7.7	104	420
BES-II collider results ready			

Events used for net-proton
fluctuation studies (Collider runs)
BES-II vs BES-I

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	Events BES-I (10 ⁶)	Events BES-II (10 ⁶)
7.7	3	45
9.2	-	78
11.5	7	110
14.5	20	178
17.3	-	116
19.6	15	270
27	30	220

A. Pandav, CPOD2024

- BES-I の10~18倍の統計
- 新しい衝突エネルギー
 - 9.2, 17.3 GeV

$$3 \leq \sqrt{s_{NN}} \text{ (GeV)} \leq 200 \rightarrow 750 \geq \mu_B \text{ (MeV)} \geq 25$$

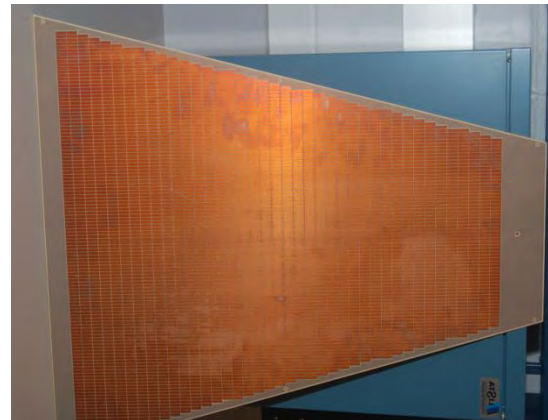
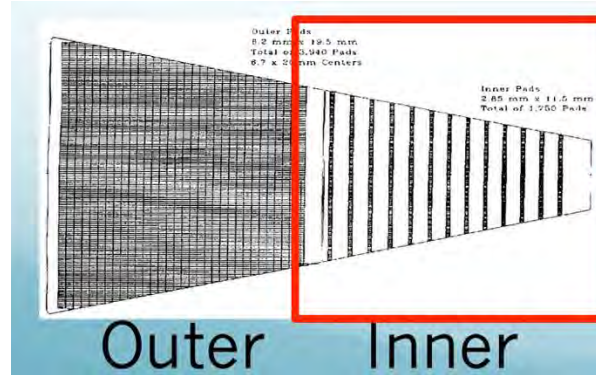
High precision, widest μ_B coverage to date

Detector upgrades



iTPC:

- Improves dE/dx
- Extends η coverage from 1.0 to 1.6
- Lowers p_T cut-in from 125 to 60 MeV/c
- Ready in 2019

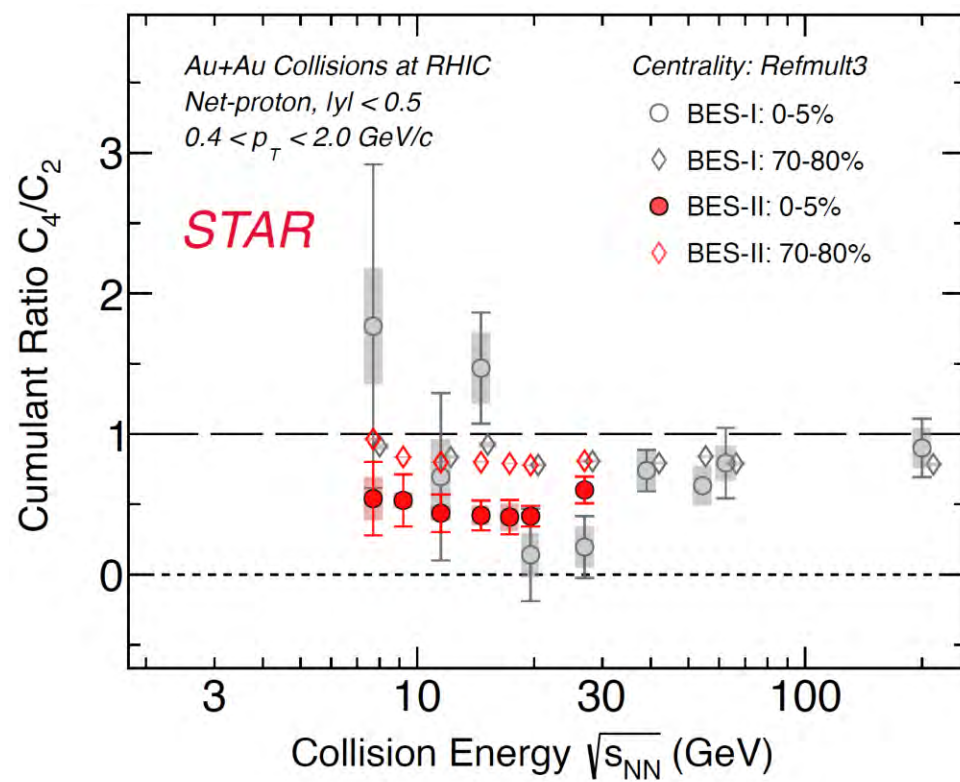


元々スカスカだった内側の読み出しパッドを敷き詰めることで、

- 1) エネルギー分解能向上
- 2) $|\eta| < 1.0 \rightarrow |\eta| < 1.6$
- 3) $p_T > 125 \text{ MeV/c} \rightarrow p_T > 60 \text{ MeV/c}$

BES-I vs BES-II

A. Pandav, CPOD2024



Deviation between BES-II and BES-I data

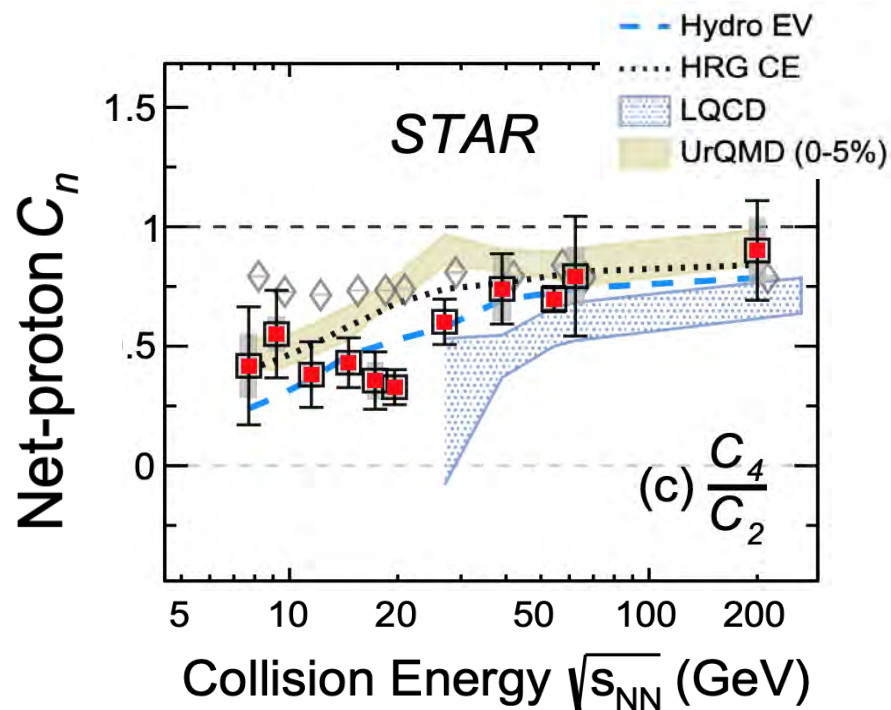
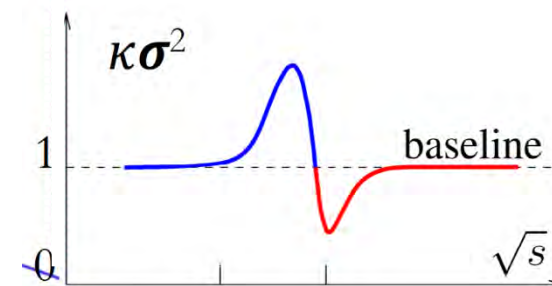
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	0-5%	70-80%
7.7	1.0σ	0.9σ
11.5	0.4σ	1.3σ
14.6	2.2σ	2.5σ
19.6	0.7σ	0.0σ
27	1.4σ	0.2σ

- 誤差の範囲内でとても良い一致。

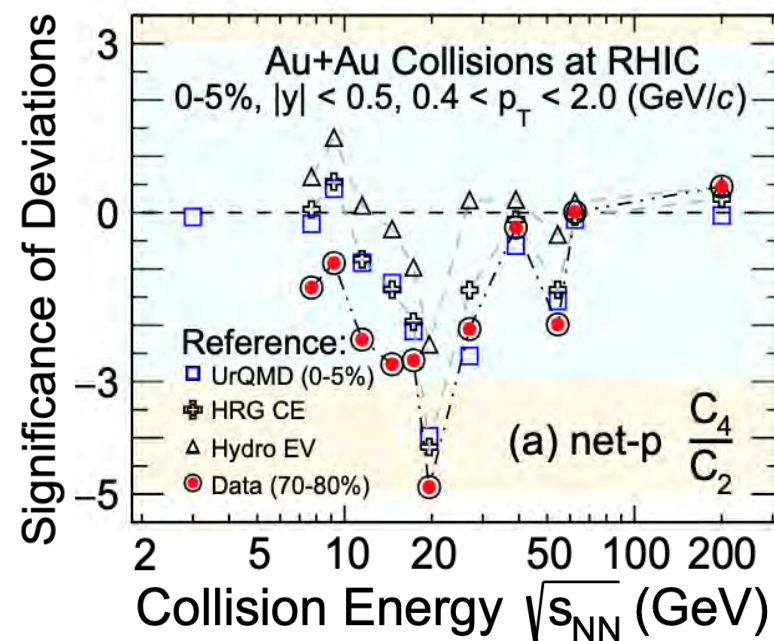
理論計算との比較

- 19.6 GeV付近で理論計算からの抑制：臨界点の兆候？
- 臨界点を含んだ動的なモデル計算が必要。

M.A. Stephanov, PRL107,
052301 (2011)



STAR, PRL135.142301(2025)



Recently published online

STAR, PRL135.142301(2025)

Physical Review Letters

Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees Press About Editorial Team RSS

FEATURED IN PHYSICS EDITORS' SUGGESTION GO MOBILE ACCESS BY UNIVERSITY OF TSUKUBA

Precision Measurement of Net-Proton-Number Fluctuations in Au + Au Collisions at RHIC

B. E. Aboona⁵⁷, J. Adam¹⁷, L. Adamczyk³, I. Aggarwal⁴⁴, M. M. Aggarwal⁴⁴, Z. Ahammed⁶⁵, A. K. Alshammri³³, E. C. Aschenauer⁷, S. Aslam²² et al. (STAR Collaboration)

Phys. Rev. Lett. **135**, 142301 – Published 29 September, 2025
DOI: <https://doi.org/10.1103/9l69-2d7p>

Citations 27

Abstract

We report precision measurements on cumulants (C_n) and factorial cumulants (κ_n) of (net) proton number distributions up to fourth order in Au + Au collisions over center-of-mass energies $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\text{--}27$ GeV from phase II of the Beam Energy Scan program at RHIC. (Anti)protons are selected at midrapidity ($|y| < 0.5$) within a transverse momentum range of $0.4 < p_T < 2.0$ GeV/c. Relative to various noncritical-point model calculations

<https://physics.aps.org/articles/v18/164>

VIEWPOINT

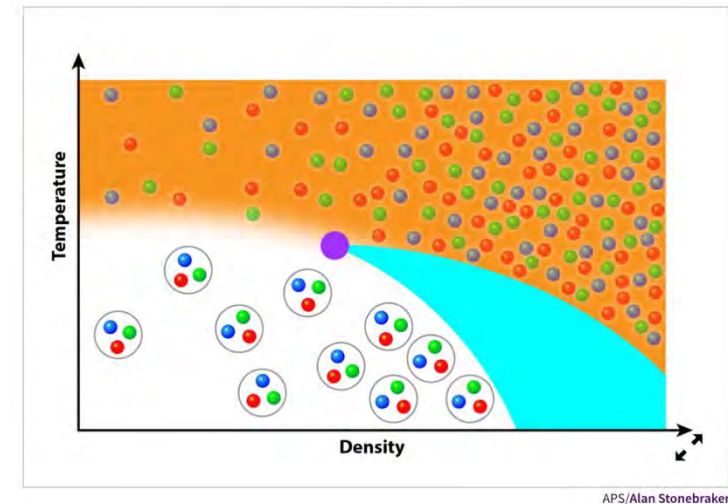
Criticality in Nature's Strongest Force

Jacquelyn Noronha-Hostler

Department of Physics, University of Illinois Urbana-Champaign, Champaign, US

September 29, 2025 • *Physics* 18, 164

Experiments at the Relativistic Heavy Ion Collider give the first hints of a critical point in the hot quark-gluon “soup” that is thought to have pervaded the infant Universe.



APS/Alan Stonebraker

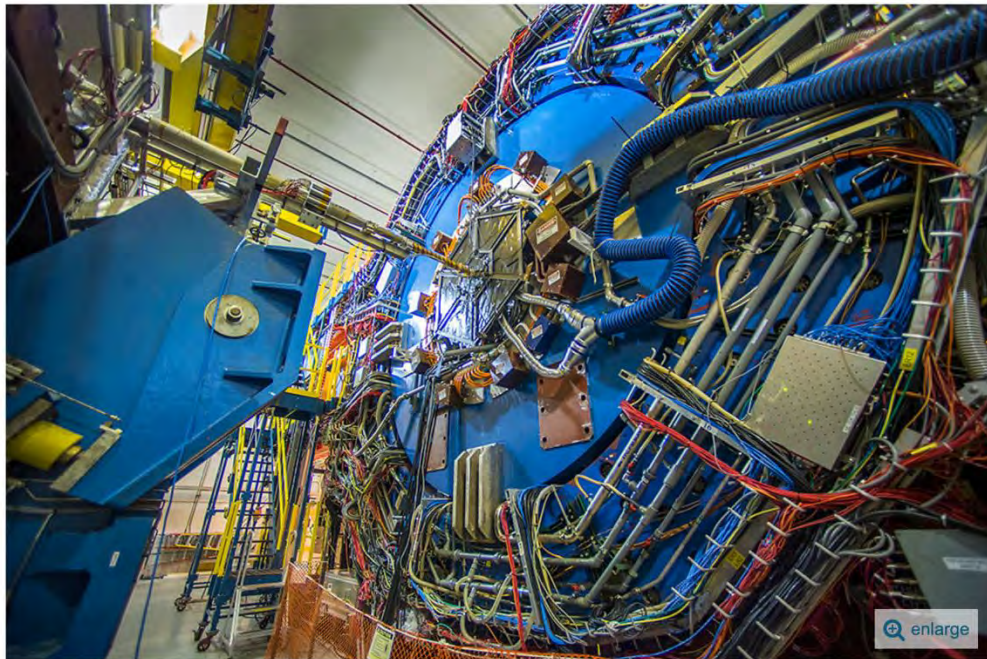
プレスリリース

<https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=122555>

More Signs of Phase-change 'Turbulence' in Nuclear Matter

STAR Collaboration unveils most precise data yet in search for a 'critical point' in nuclear phase transitions

September 29, 2025



<https://www.tsukuba.ac.jp/journal/technology-materials/20251001140000.html>

TSUKUBA JOURNAL

NEWS EVENTS STUDENTS ALUMNI AWARDS

医療・健康

テクノロジー・材料

生物・環境

社会・文化

テクノロジー・材料

金原子核衝突実験により理論的に予測される量子色力学臨界点の存在を示唆

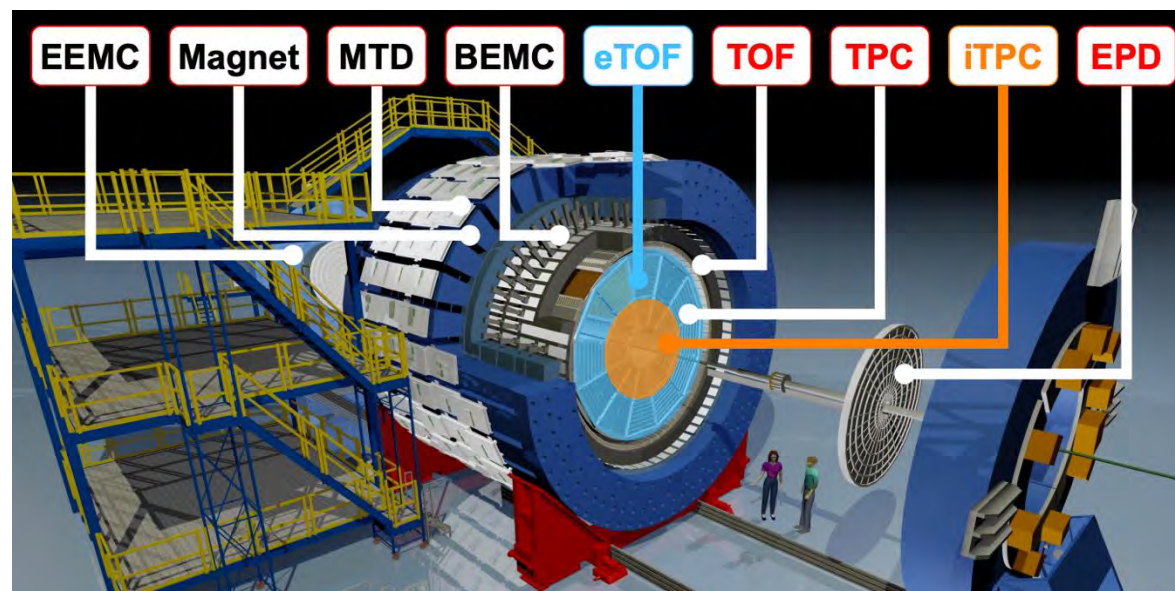
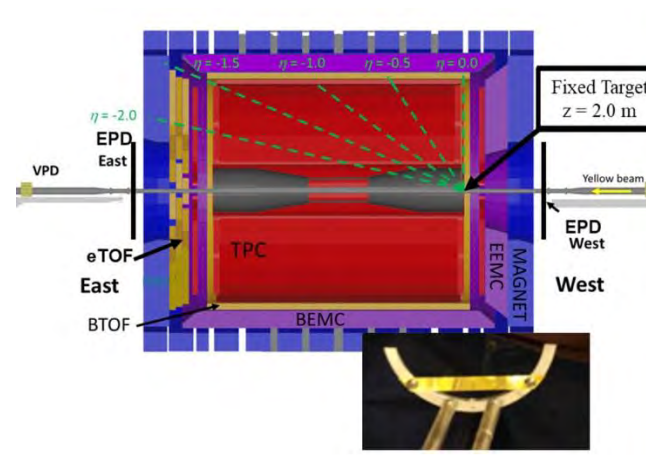
2025.10.01

国際共同実験プロジェクト「STAR実験」で、RHIC (相対論的重イオン衝突型加速器) において金原子核衝突実験を行い、「正味陽子数の4次ゆらぎ」を測定し、その結果、理論的に存在が予測されている量子色力学 (QCD) 臨界点特有のパターンを確認しました。

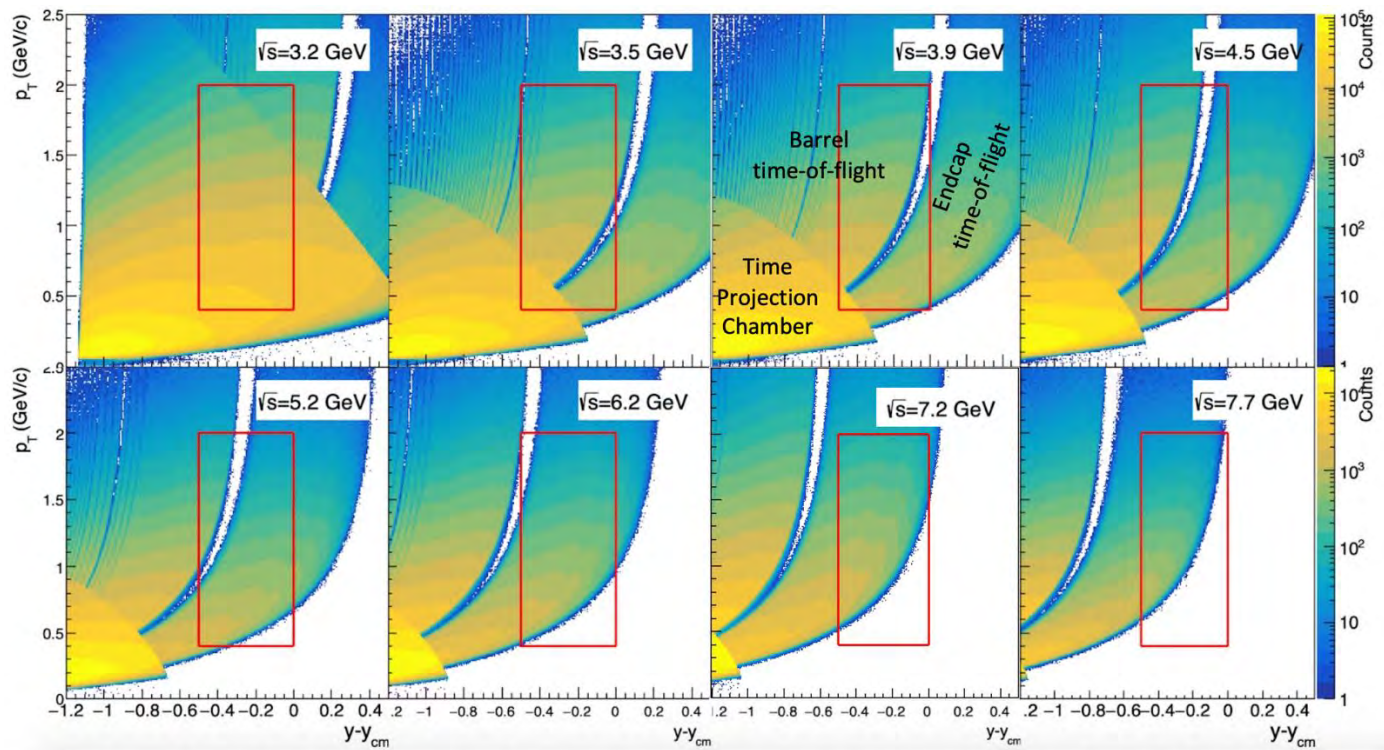
固定標の実験

- End-cap TOF (e-TOF) from CBM.
- $1.55 < \eta < 2.2$

Fixed-Target Runs			
Sl. no.	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	No. of collected events (millions)	μ_B (MeV)
1	13.7 (100)	50	280
2	11.5 (70)	50	316
3	9.2 (44.5)	50	372
4	7.7 (31.2)	260	420
5	7.2 (26.5)	470	440
6	6.2 (19.5)	120	490
7	5.2 (13.5)	100	540
8	4.5 (9.8)	110	590
9	3.9 (7.3)	120	633
10	3.5 (5.75)	120	670
11	3.2 (4.59)	200	699
12	3.0 (3.85)	260 + 2000	750



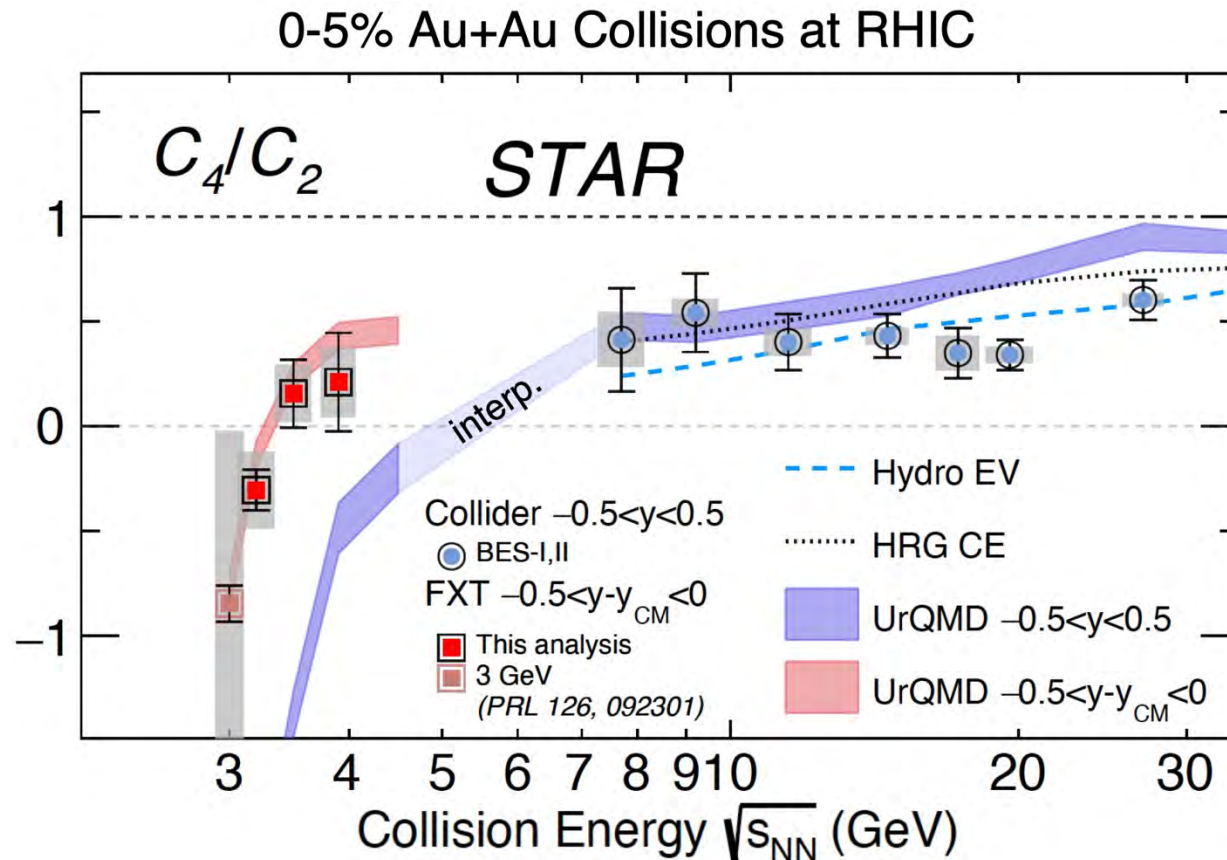
アクセプタンス



- 衝突エネルギーが高くなると、midrapidityがカバーできなくなる。
- 測定は4.5 GeVまで。
- TOF – eTOF 間のギャップはどうにもならない、UrQMDで考慮に入れる。

Z. Sweger, HAWAII23

衝突エネルギー依存性



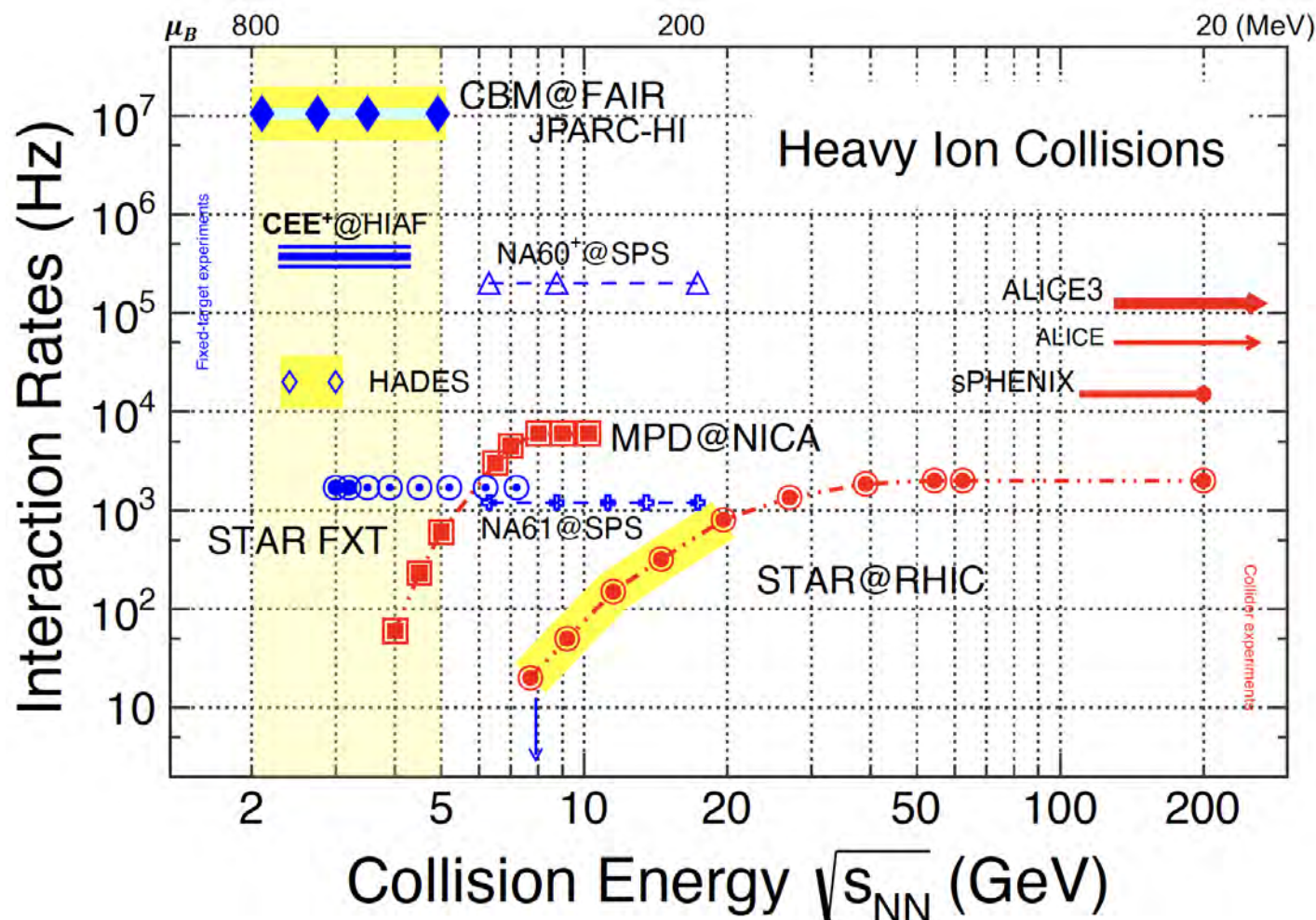
Z. Sweger, QM25

- UrQMDと良く一致。
- 4.5 GeVの結果は論文で。



- RHICは今年度25周年で運転を終了する予定。
- データ解析は今後10年以上続きます。

将来計画

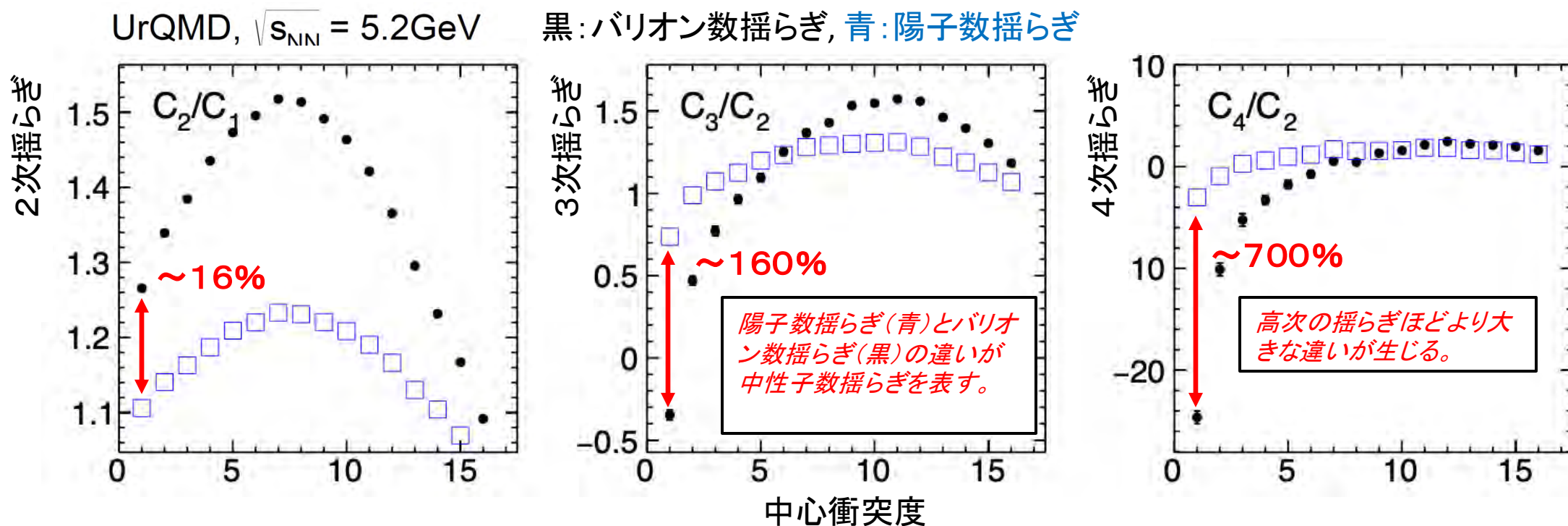


- Future experiments for QCD critical point search focusing on high baryon density region.
 - FAIR @Germany
 - HIAF @China
 - NICA @Russia
 - J-PARC @ Japan

WHBM2024, Nu Xu

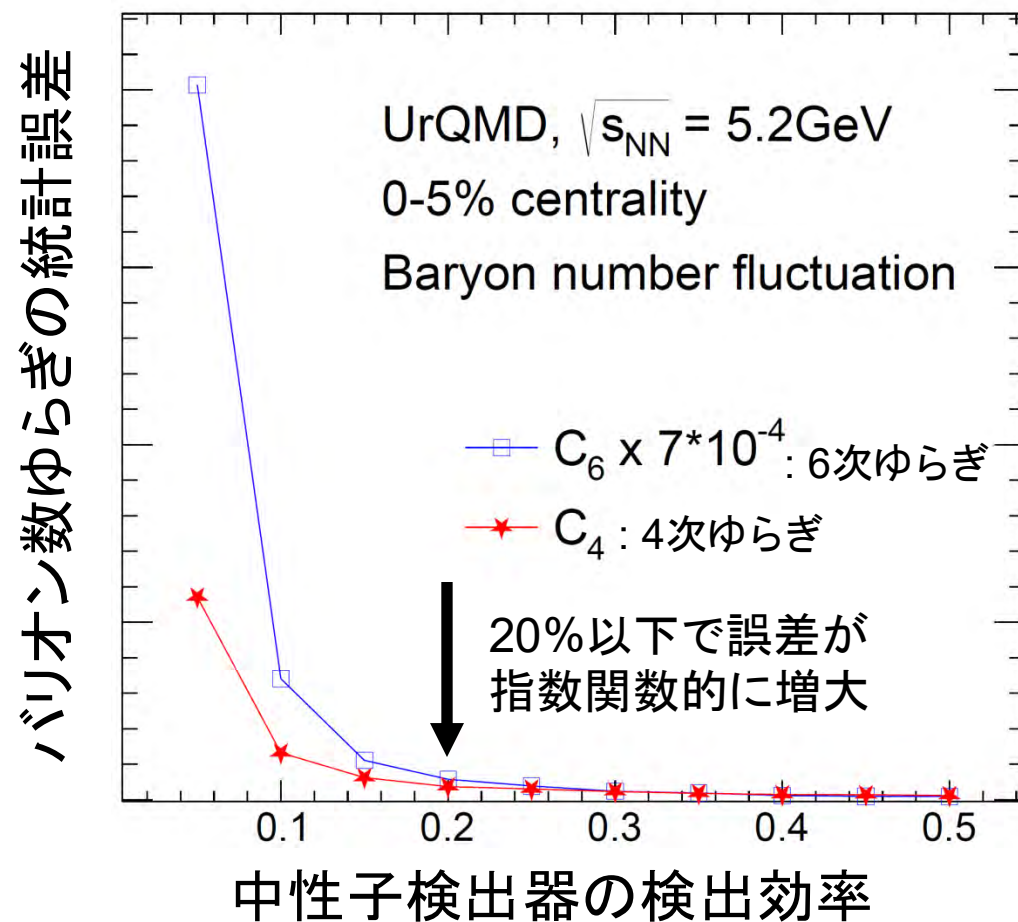
陽子数≠バリオン数

- ほんとは中性子を含んだバリオン数のゆらぎを測りたいが、既存の実験では無理。
- 衝突エネルギー >10 GeV では補正可能。 *M. Kitazawa and M. Asakawa, PRC86.024904(2012)*



中性子検出器？

ハドロン輸送模型によるシミュレーション



- 検出効率20%以下で統計誤差が急激に増大。
- PHENIX-TOFのシンチレーションカウンタを再利用する方向で、検出器シミュレーションによるデザインの最適化を進めている。

まとめ

- 陽子数4次ゆらぎが19.6 GeVで理論計算から有意に抑制。
- 固定標的実験(3.0-3.9 GeV)の結果はUrQMDと一致。
 - 臨界点が存在するとすれば 3.9 GeV から 7.7 GeVの間？
 - 4.5 GeVでの追加実験の可能性。
- 中性子測定が今後の課題。

Thank you for your attention