

# チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理：基礎・最先端・課題・展望」

19-21 August 2019

理化学研究所 和光地区

Asia/Tokyo timezone

## 将来展望

郡司 卓

東京大学原子核科学研究センター

# 主な参考文献

## 日本の核物理の将来レポート

<https://indico2.riken.jp/event/862/>

## 日本の核物理の将来レポート第2期

[リンク\(まだ最終版ではありません\)](#)

## Hot QCD white paper

<https://arxiv.org/pdf/1502.02730.pdf>

## CERN Yellow Report

<https://arxiv.org/abs/1812.06772>

2.5 高エネルギー重イオン衝突による物理  
Physics of High Energy Heavy Ion Collisions

高エネルギー重イオン衝突による物理ワーキンググループメンバー<sup>1</sup>

実験

郡司 卓	GUNJI Taku	代表、東京大学原子核科学研究センター
中條 達也	CHUJO Tatsuya	副代表、筑波大学
江角 晋一	ESUMI Shinichi	筑波大学
大山 健	OYAMA Ken	Heidelberg University
坂井 信吾	SAKAI Shingo	Lawrence Berkeley National Laboratory
坂口 貴男	SAKAGUCHI Takao	Brookhaven National Laboratory
志垣 賢太	SHIGAKI Kenta	広島大学
下村 真弥	SHIMOMURA Maya	Iowa State University
鳥井 久行	TORII Hisayuki	東京大学原子核科学研究センター
蜂谷 崇	HACHIYA Takashi	理化学研究所

理論

平野 哲文	HIRANO Tetsufumi	上智大学
福岡 健二	FUKUSHIMA Kenji	慶応大学

世話人

早野 龍五	HAYANO Ryugo	東京大学
-------	--------------	------

6 高エネルギー重イオン衝突による物理  
Physics of High Energy Heavy Ion Collisions

高エネルギー重イオン衝突による物理ワーキンググループメンバー<sup>1</sup>

実験

郡司 卓	GUNJI Taku	代表、東京大学原子核科学研究センター
中條 達也	CHUJO Tatsuya	副代表、筑波大学
江角 晋一	ESUMI Shinichi	筑波大学
小沢 恭一郎	OZAWA Kyoichiro	高エネルギー加速器研究機構
坂井 真吾	SAKAI Shingo	筑波大学
坂口 貴男	SAKAGUCHI Takao	Brookhaven National Laboratory
佐甲 博之	SAKO Hiroyuki	JAEA 先端基礎研究センター
志垣 賢太	SHIGAKI Kenta	広島大学
下村 真弥	SHIMOMURA Maya	奈良女子大学
轟木 貴人	TODOROKI Takahito	Brookhaven National Laboratory
中込 宇宙	NAKAGOMI Hiroshi	筑波大学
新井田 貴文	NIIDA Takafumi	Wayne State University
蜂谷 崇	HACHIYA Takashi	理化学研究所
八野 哲	YANO Satoshi	広島大学
山口 頼人	YAMAGUCHI Yorito	理化学研究所
渡辺 陽介	WATANABE Yosuke	筑波大学

理論

北沢 正清	KITAZAWA Masayuki	大阪大学
野中 千穂	NONAKA Chiho	名古屋大学
平野 哲文	HIRANO Tetsufumi	上智大学
福岡 健二	FUKUSHIMA Kenji	東京大学
藤井 宏次	FUJII Hirotsugu	東京大学

世話人

早野 龍五	HAYANO Ryugo	東京大学
-------	--------------	------

The Hot QCD White Paper:  
Exploring the Phases of QCD at RHIC and the LHC

A White Paper on Future Opportunities in Relativistic Heavy Ion Physics

February 11, 2015

Abstract

The past decade has seen huge advances in experimental measurements made in heavy ion collisions at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and more recently at the Large Hadron Collider (LHC). These new data, in combination with theoretical advances from calculations made in a variety of frameworks, have led to a broad and deep knowledge of the properties of thermal QCD matter. Increasingly quantitative descriptions of the quark-gluon plasma (QGP) created in these collisions have established that the QGP is a strongly coupled liquid with the lowest value of specific viscosity ever measured. However, much remains to be learned about the precise nature of the initial state from which this liquid forms, how its properties vary across its phase diagram and how, at a microscopic level, the collective properties of this liquid emerge from the interactions among the individual quarks and gluons that must be visible if the liquid is probed with sufficiently high resolution. This white paper, prepared by the Hot QCD Writing Group as part of the U.S. Long Range Plan for Nuclear Physics, reviews the recent progress in the field of hot QCD and outlines the scientific opportunities in the next decade for resolving the outstanding issues in the field.

arXiv:1502.02730v1 [nucl-ex] 9 Feb 2015

CERN

CERN-LPCC-2018-07  
December 18, 2018

Future physics opportunities for high-density QCD  
at the LHC with heavy-ion and proton beams

Report from Working Group 5 on the Physics of the HL-LHC, and Perspectives at the HE-LHC

Editors:  
Z. Citron<sup>3,4</sup>, A. Dainese<sup>24</sup>, J.F. Grosse-Oetringhaus<sup>6</sup>, J.M. Jowett<sup>6</sup>, Y.-J. Lee<sup>53</sup>, U.A. Wiedemann<sup>6</sup>, M. Winn<sup>33,43</sup>

Chapter coordinators:  
A. Andronic<sup>52</sup>, F. Bellini<sup>6</sup>, E. Bruna<sup>26</sup>, E. Chapon<sup>6</sup>, H. Dembinski<sup>51</sup>, D. d'Enterria<sup>6</sup>, I. Grabowska-Bold<sup>4</sup>, G.M. Innocenti<sup>6,53</sup>, C. Loizides<sup>51</sup>, S. Mohapatra<sup>13</sup>, C.A. Salgado<sup>38</sup>, M. Verweij<sup>68,101</sup>, M. Weber<sup>74</sup>

Contributors:  
J. Aichelin<sup>71</sup>, A. Angerami<sup>48</sup>, L. Apolinario<sup>35,44</sup>, F. Arleo<sup>45</sup>, N. Armesto<sup>38</sup>, R. Arnaldi<sup>26</sup>, M. Arstrand<sup>19</sup>, P. Aze<sup>24</sup>, R. Bailhache<sup>39</sup>, S.A. Bass<sup>16</sup>, C. Bedda<sup>99</sup>, N.K. Behera<sup>36</sup>, R. Bellwied<sup>28</sup>, A. Beraud<sup>26</sup>, R. Bi<sup>53</sup>, C. Bierlich<sup>50,59</sup>, K. Blum<sup>6,103</sup>, A. Borrisov<sup>52</sup>, P. Braun-Munzinger<sup>17</sup>, R. Bruce<sup>6</sup>, G.E. Bruno<sup>65</sup>, S. Bufalino<sup>66</sup>, J. Castillo Castellanos<sup>33</sup>, R. Chatterjee<sup>100</sup>, Y. Chen<sup>6</sup>, Z. Chen<sup>69</sup>, C. Cheshkov<sup>31</sup>, T. Chujo<sup>97</sup>, Z. Conesa del Valle<sup>5</sup>, J.G. Contreras Nuno<sup>14</sup>, L. Cunqueiro Mendez<sup>61</sup>, T. Dahms<sup>38</sup>, N.P. Dang<sup>92</sup>, H. De la Torre<sup>54</sup>, A.F. Dobrin<sup>70</sup>, B. Doenigus<sup>39</sup>, L. Van Doremalen<sup>99</sup>, X. Du<sup>77</sup>, A. Dubla<sup>17</sup>, M. Dumancic<sup>103</sup>, M. Dyndal<sup>15</sup>, L. Fabbietti<sup>76</sup>, E.G. Ferreira<sup>38</sup>, F. Fionda<sup>35</sup>, F. Fleuret<sup>45</sup>, S. Floerchinger<sup>19</sup>, G. Giacalone<sup>52</sup>, A. Giannanco<sup>81</sup>, P.B. Gossiaux<sup>71</sup>, G. Graziani<sup>23</sup>, V. Greco<sup>82</sup>, A. Greife<sup>69</sup>, F. Grosa<sup>68</sup>, M. Guillebaud<sup>7</sup>, T. Gunji<sup>10</sup>, V. Guzey<sup>20,64,90</sup>, C. Hadjidakis<sup>30</sup>, S. Hassami<sup>34</sup>, M. He<sup>26</sup>, I. Helenius<sup>80,90</sup>, P. Huo<sup>75</sup>, P.M. Jacobs<sup>47</sup>, P. Janus<sup>1</sup>, M.A. Jebraumci<sup>6,39</sup>, J. Jia<sup>4,75</sup>, A.P. Kalweit<sup>8</sup>, H. Kim<sup>12</sup>, M. Klasen<sup>52</sup>, S.R. Klein<sup>47</sup>, M. Klusek-Gawenda<sup>21</sup>, J. Kremer<sup>1</sup>, G.K. Krinitsa<sup>81</sup>, F. Krizek<sup>2</sup>, E. Kryshen<sup>64</sup>, A. Kurkela<sup>6,73</sup>, A. Kusina<sup>21</sup>, J.-P. Lansberg<sup>30</sup>, R. Lea<sup>96</sup>, M. van Leeuwen<sup>60,99</sup>, W. Li<sup>69</sup>, J. Margutti<sup>69</sup>, A. Marin<sup>17</sup>, C. Marquet<sup>9</sup>, J. Martin Blanco<sup>45</sup>, L. Massacrier<sup>30</sup>, A. Mastroiello<sup>86</sup>, E. Maurice<sup>45</sup>, C. Mayer<sup>21</sup>, C. McGinn<sup>53</sup>, G. Milhano<sup>6,35,44</sup>, A. Milov<sup>103</sup>, V. Minissale<sup>29</sup>, C. Mironov<sup>53</sup>, A. Mischke<sup>49</sup>, N. Mohammadi<sup>6</sup>, M. Mulders<sup>6</sup>, M. Murray<sup>91</sup>, M. Narain<sup>5</sup>, P. Di Nezza<sup>28</sup>, A. Nisati<sup>25</sup>, J. Noronha-Hostler<sup>70</sup>, A. Ohlson<sup>19</sup>, V. Okorokov<sup>58</sup>, F. Ohness<sup>72</sup>, P. Paakkinen<sup>30</sup>, L. Pappalardo<sup>85</sup>, J. Park<sup>4</sup>, H. Paakkinen<sup>29,95</sup>, C.C. Peng<sup>67</sup>, H. Pereira Da Costa<sup>23</sup>, D.V. Perepelitsa<sup>84</sup>, D. Peresunko<sup>37</sup>, M. Peters<sup>53</sup>, N.E. Pettersson<sup>93</sup>, S. Piano<sup>27</sup>, T. Pierog<sup>40</sup>, J. Pires<sup>17,35</sup>, M. Ploskon<sup>47</sup>, S. Plumari<sup>42</sup>, F. Prino<sup>26</sup>, M. Puccio<sup>22</sup>, R. Rapp<sup>17</sup>, K. Redlich<sup>17,98</sup>, K. Reygers<sup>3</sup>, C.L. Ristea<sup>37</sup>, P. Robbe<sup>43</sup>, A. Rossi<sup>4</sup>, A. Rustamov<sup>17,19,85</sup>, M. Rybar<sup>13</sup>, M. Schaumann<sup>6</sup>, B. Schenke<sup>4</sup>, I. Schienke<sup>46</sup>, L. Schoeffel<sup>34</sup>, I. Selyuzhenkov<sup>17,58</sup>, A.M. Sickles<sup>89</sup>, M. Siever<sup>10</sup>, P. Silva<sup>6</sup>, T. Song<sup>57</sup>, M. Spousta<sup>11</sup>, J. Stachel<sup>19</sup>, P. Steinberg<sup>4</sup>, D. Stocco<sup>71</sup>, M. Strickland<sup>41</sup>, M. Strikman<sup>63</sup>, J. Sun<sup>78</sup>, D. Tapia Takai<sup>91</sup>, K. Tatar<sup>53</sup>, C. Terrevol<sup>88</sup>, A. Timmins<sup>88</sup>, S. Trogolo<sup>95</sup>, B. Trzeciak<sup>99</sup>, A. Trzupek<sup>21</sup>, R. Ulrich<sup>40</sup>, A. Uras<sup>31</sup>, R. Venugopalan<sup>4</sup>, I. Vitev<sup>49</sup>, G. Vujanovic<sup>62,102</sup>, J. Wang<sup>53</sup>, T.W. Wang<sup>53</sup>, R. Xiao<sup>67</sup>, Y. Xu<sup>16</sup>, C. Zampolli<sup>8,22</sup>, H. Zanoli<sup>79</sup>, M. Zhou<sup>75</sup>, Y. Zhou<sup>59</sup>

\* deceased

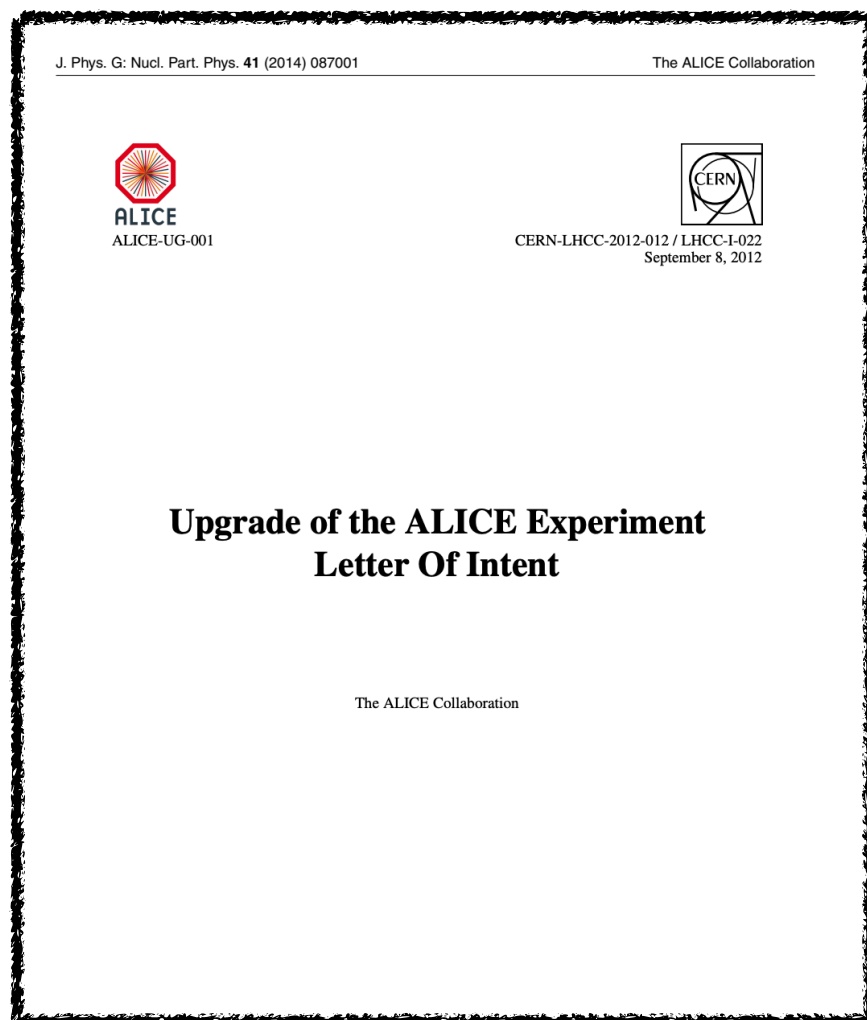
arXiv:1812.06772v1 [hep-ph] 17 Dec 2018



# 主な参考文献

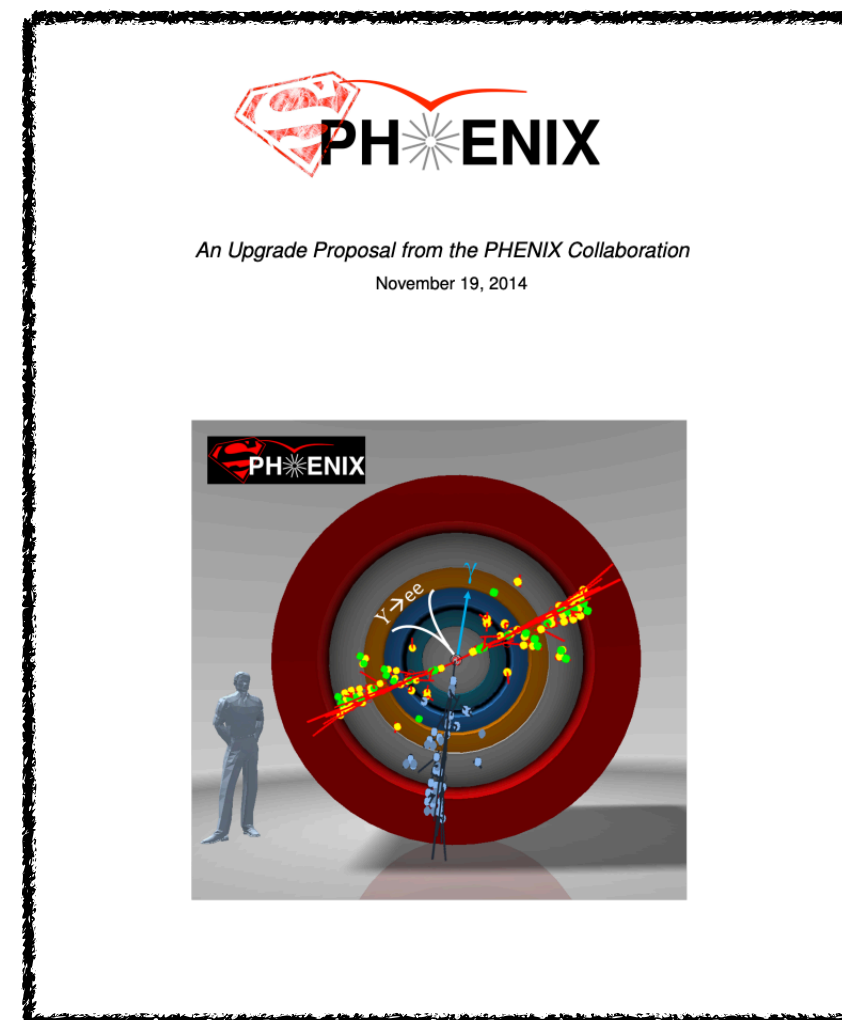
ALICE upgrade  
LoI

[リンク](#)



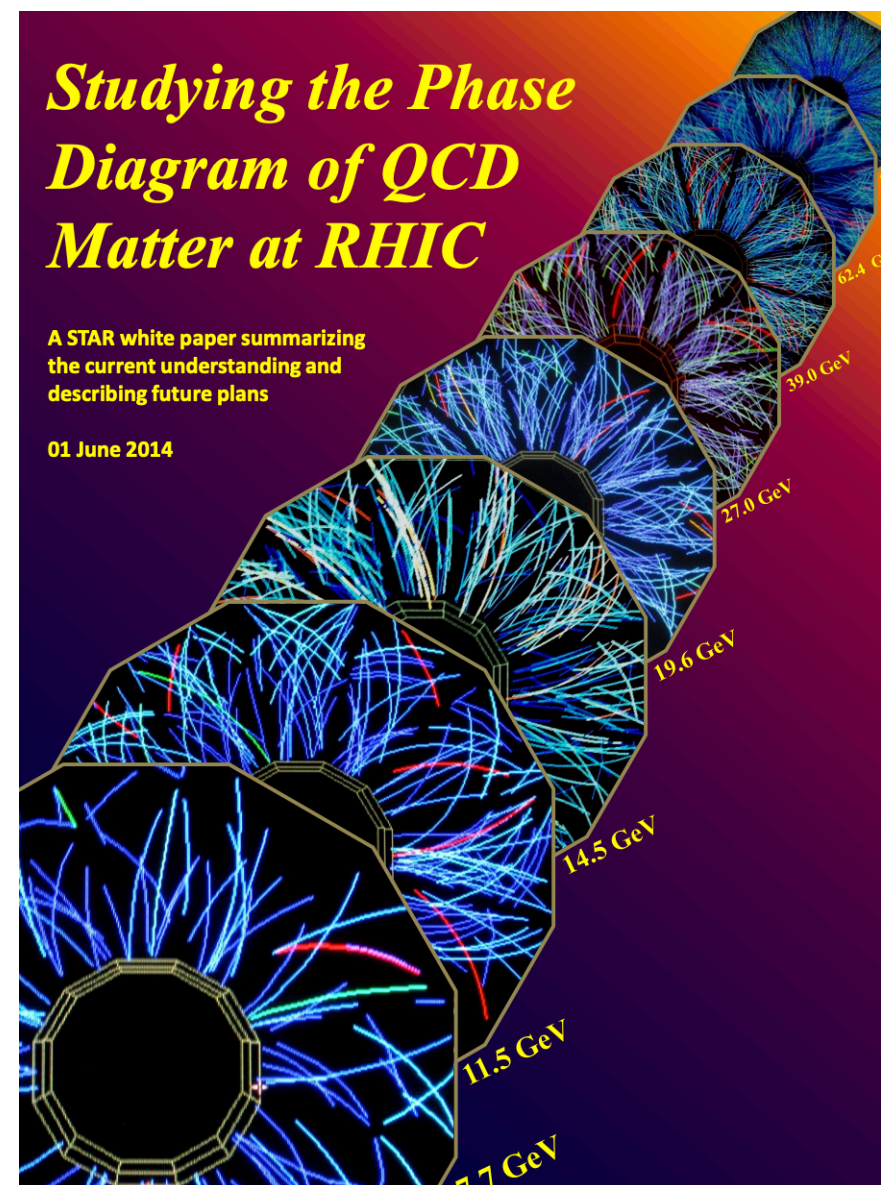
sPHENIX  
proposal

<https://arxiv.org/abs/1501.06197>



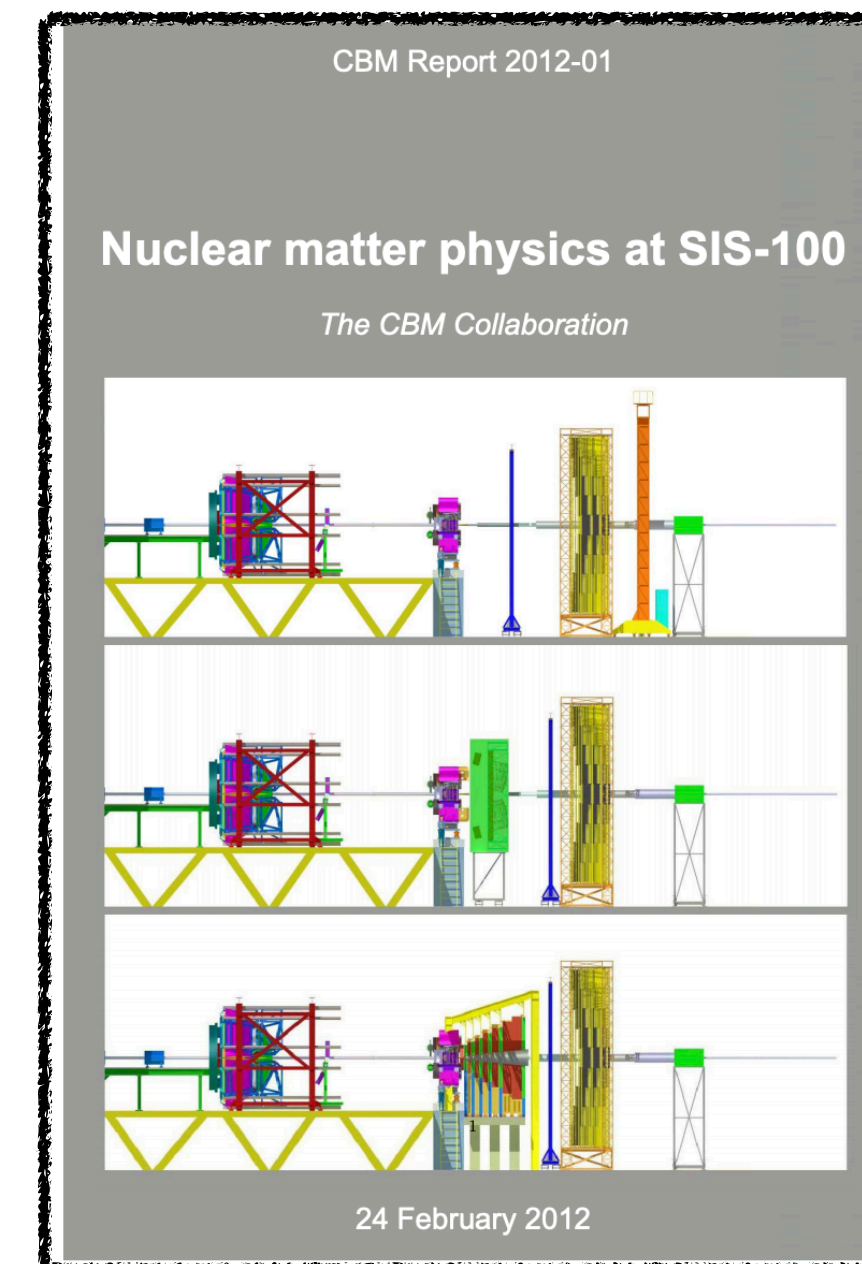
STAR  
BES-II

[リンク](#)



FAIR-CBM@SIS100

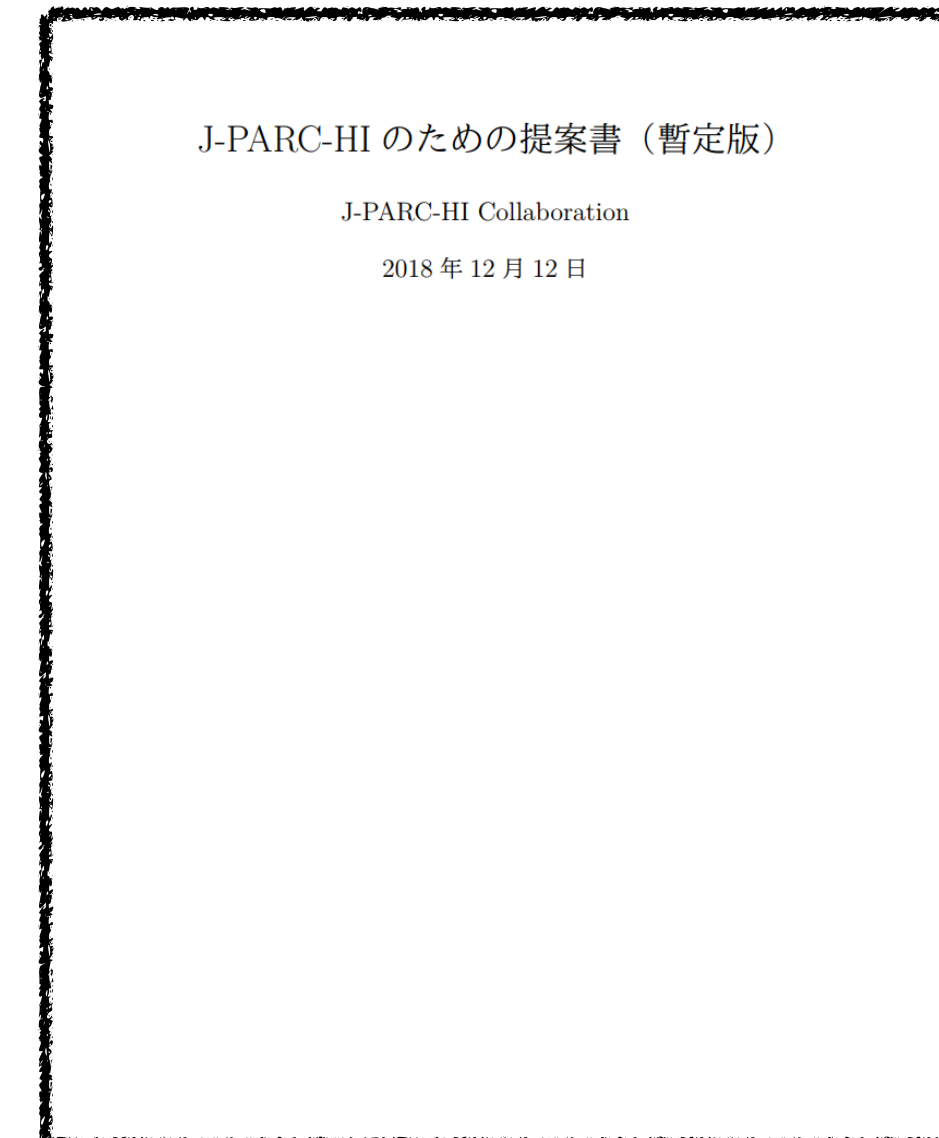
[リンク](#)



[CBMのLoIへのリンク](#)

J-PARC-HI

[リンク](#)



# 関連する質問

2. 他の物性系ではないようなQCD, QGPならではの新奇な現象はないのか？その現象が実験的にも見つけられる可能性が期待できるか？
3. 日本グループは2030年（LHC-Run5）以降の実験ビジョンをもっているのか。
13. 現在試験段階の検出器があれば、その利点や展望など気になります
21. 系の熱伝導度や電気伝導度などの量を実験で測定することは可能か？
22. CMEやCVEが実験的に発見されたとしてその後の展開はあるのか？
26. QGPについてどこまでわかっているか、さらに将来何を知りたいのか？
38. (small systemにおいて)次に何を実験的に測ればいいのか。
41. J-PARC-HIの進展と、期待されていること。
45. 重イオン衝突実験を行う粒子加速器は今後も際限なく建設が続き、巨大化、高コスト化が進んでいくのでしょうか。続いていく場合、費用対効果は保たれるのでしょうか。
47. 10年、20年後のトピックは何であるのか？
53. 小さい系でのQGP生成を詳細に調べることで熱化（流体化）時間を定量的に求めることはできるか？また熱化や流体化のメカニズムを実験的に検証することは可能か(長相関や電磁プローブ?)?
54. QGP物性が流体で理解できたとすれば、その先に得られる知見はなんだろうか。



# 関連する質問

- 69. 10年後のトピックは何であるのか？
- 84. colour superconductorにアプローチするアイデアとしてどのようなものがあるか
- 87. 今後QGPの物理はどのような方向に向かっていくべきなのか？
- 88. 他の強相関係との類似性や普遍性。もしくは、QCDという点で異なるが、重イオン衝突だけでしか分からないことはあるのか？
- 90. この分野の目指す方向性。どんな大きな発見を目指し、10年後はどんなテーマを推進すべきか
- 98. J-PARC HIの必要性、有用性を議論したい。
- 106. 格子QCD相図の臨界点が見つかることは、その後の物理にどのような影響をもたらすのでしょうか？
- 109. 粘性などの輸送的性質ではなく、QGPの平衡状態としての特質を表すような物理量の解析は実験ではされていないのか？もし現状では難しいのなら何をどうしたら可能になるのか？
- 112. より高密度側のQCD物性にはアプローチできないのか？
- 113. QGPや原子核衝突にそろそろ飽きてきませんか？飽きないための思考法や取り組みを教えてください。

# つまり

「高エネルギー重イオン物理の将来」

どんな面白いテーマがあるのか？

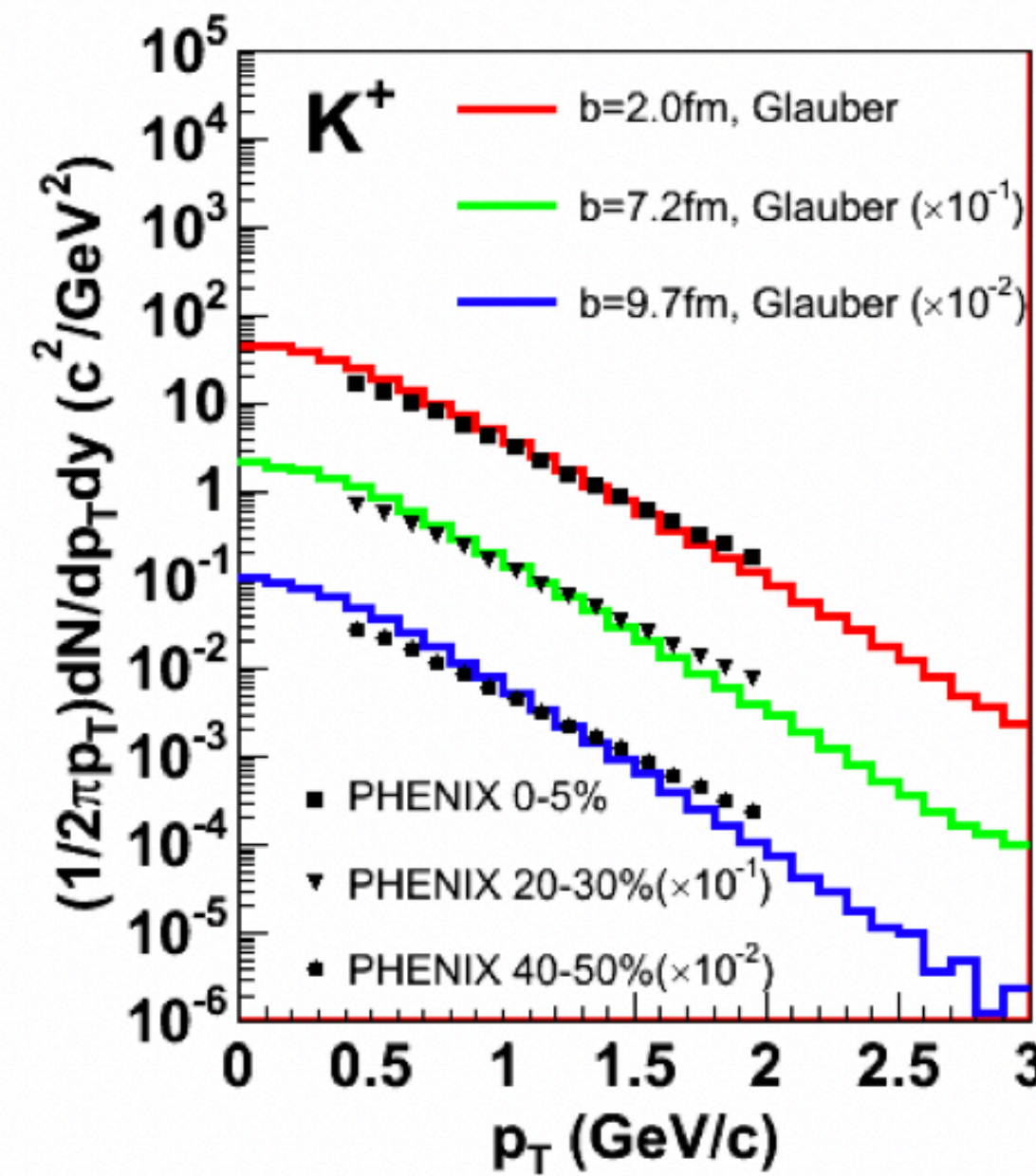
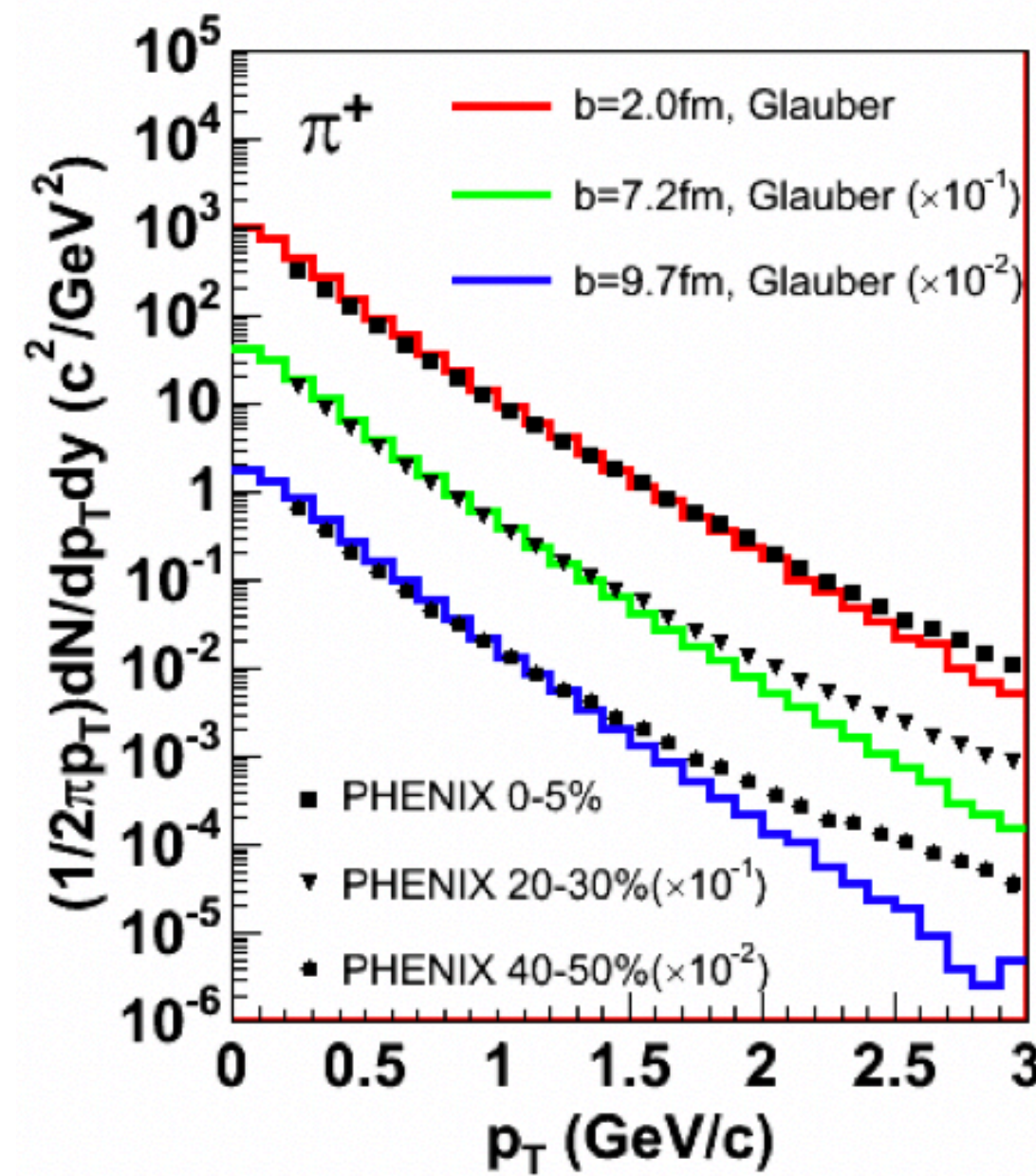
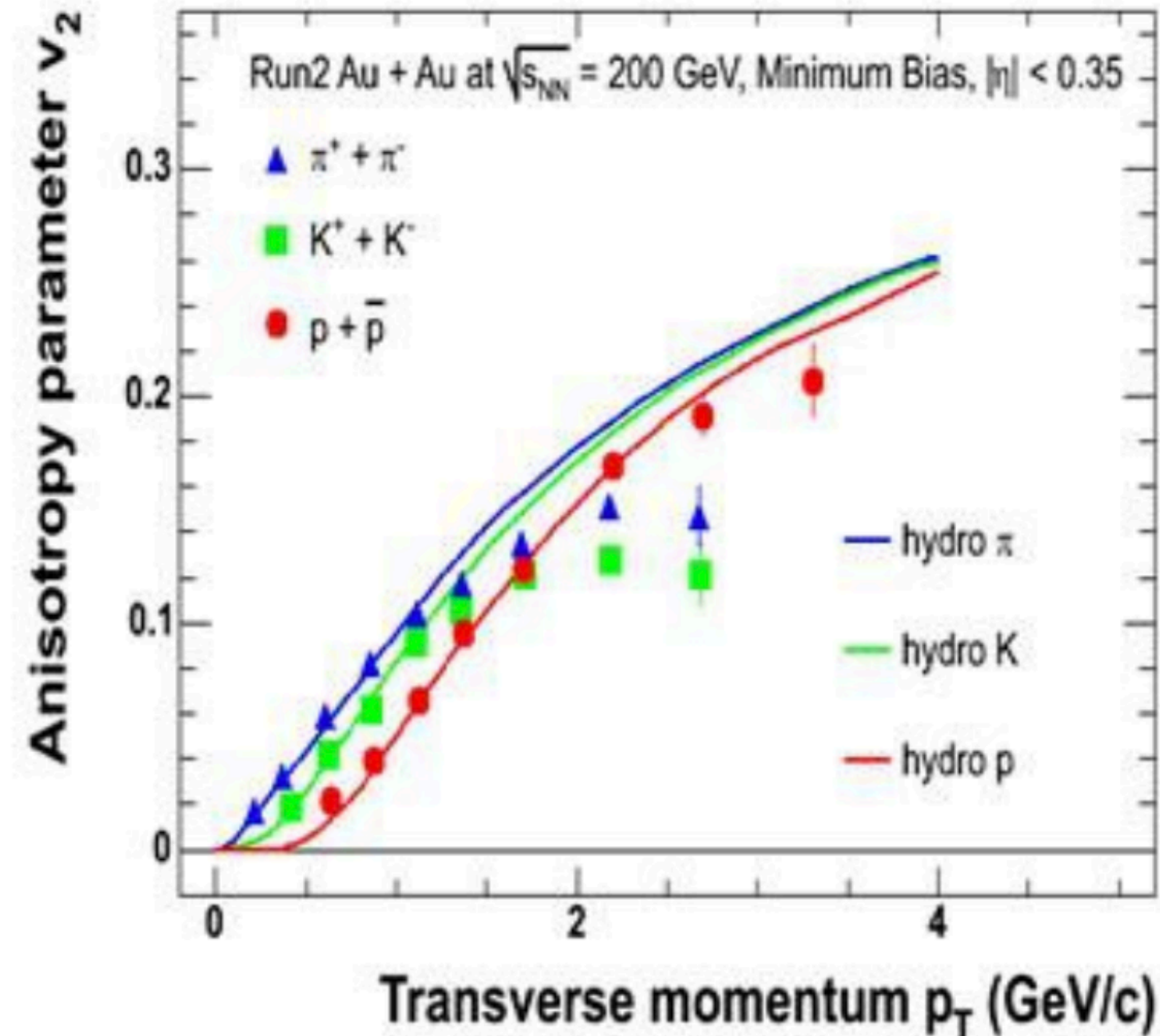
どこを目指す？何を明らかにする？何を測る？



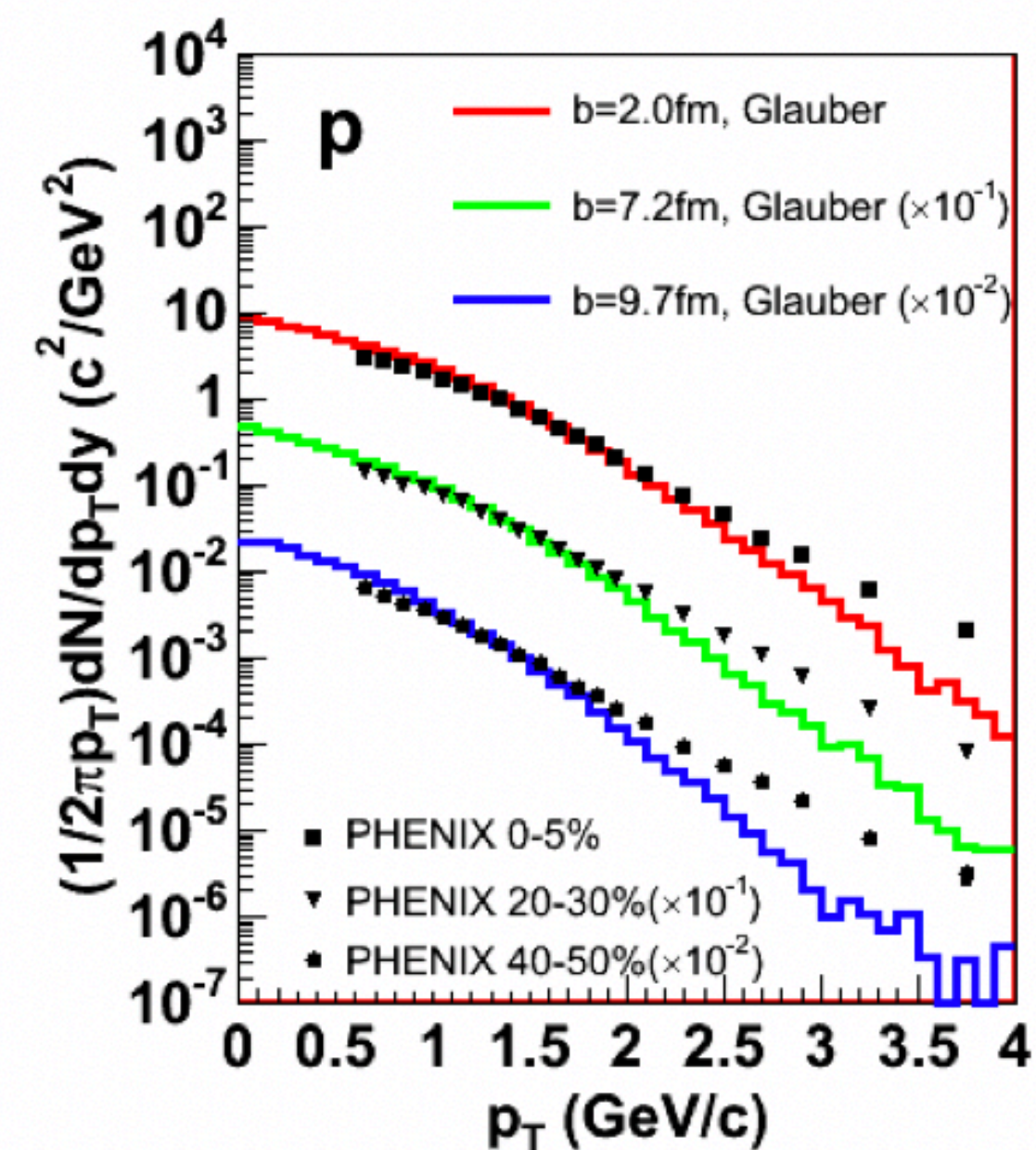
# これまでに分かったこと

## ① 重イオン衝突の時空発展に流体力学が使える

Hydro; Phys. Rev. C 67 (03) 044903  
v2; Phys. Rev. Lett. 91 182301 (2003) PHENIX



T. Hirano and Y. Nara PRC69 034908 (2004)



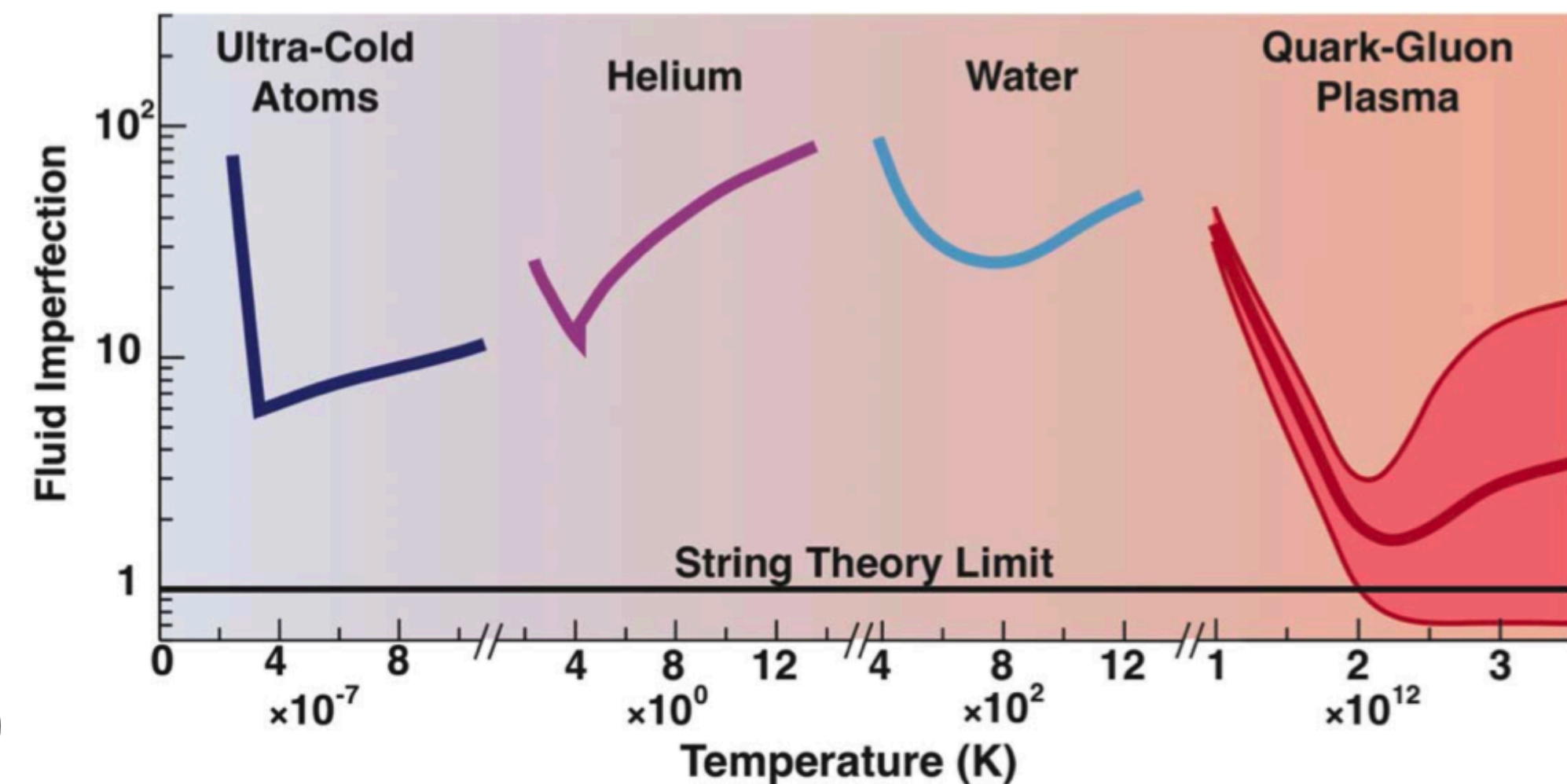
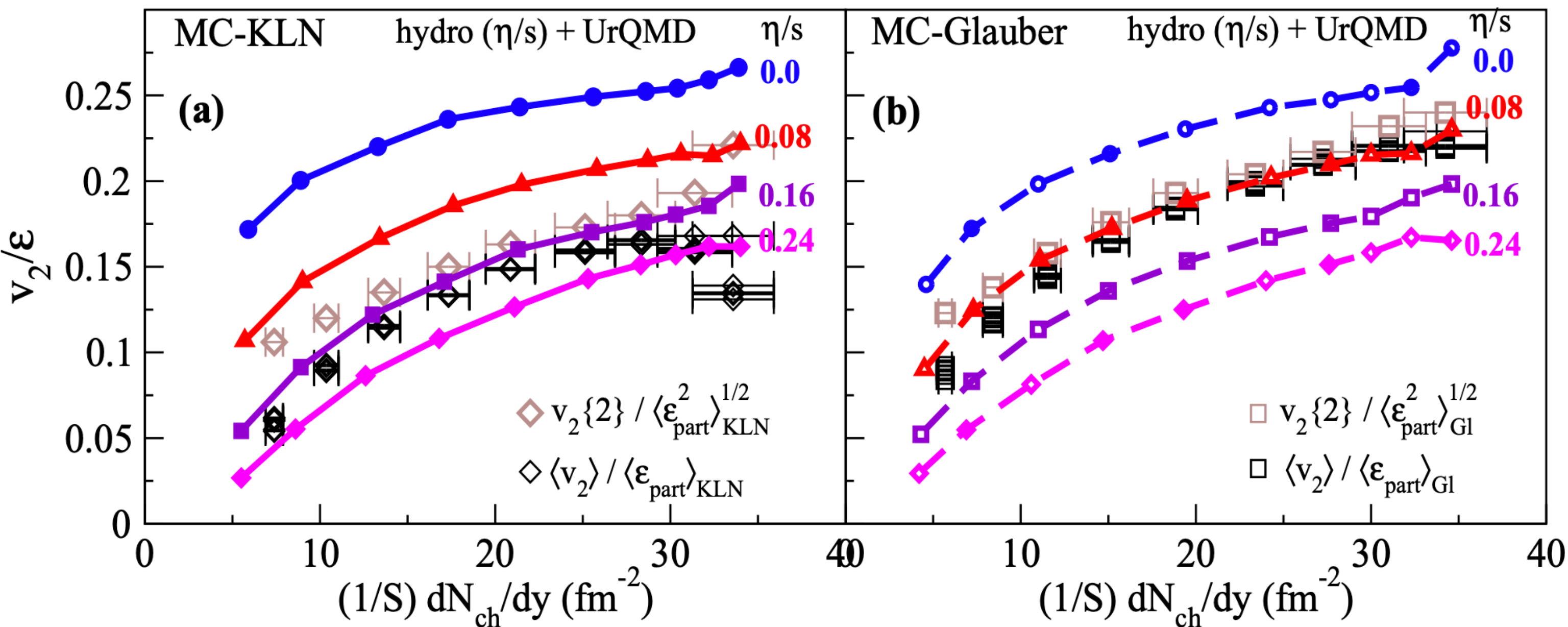


# これまでに分かったこと

## ② 重イオン衝突でできたQGPは強結合のようである

$$\frac{1}{4\pi} < \frac{\eta}{s} < \frac{3}{4\pi}$$

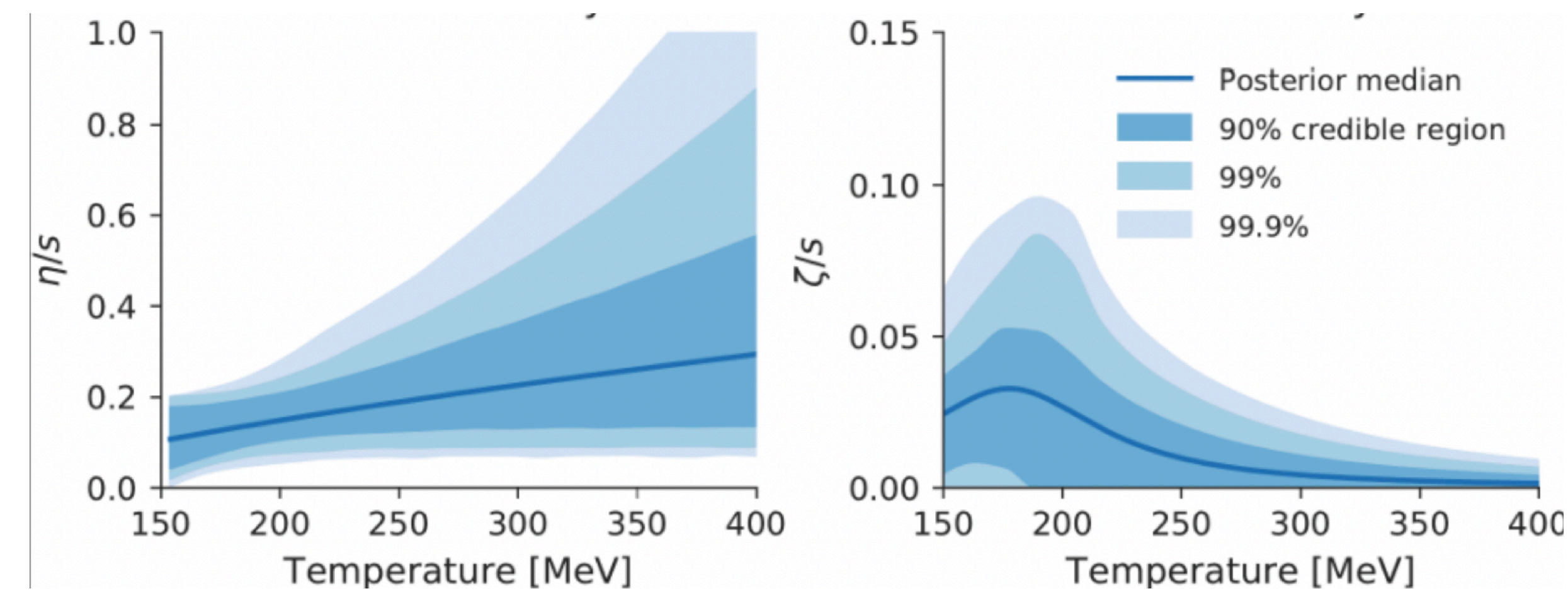
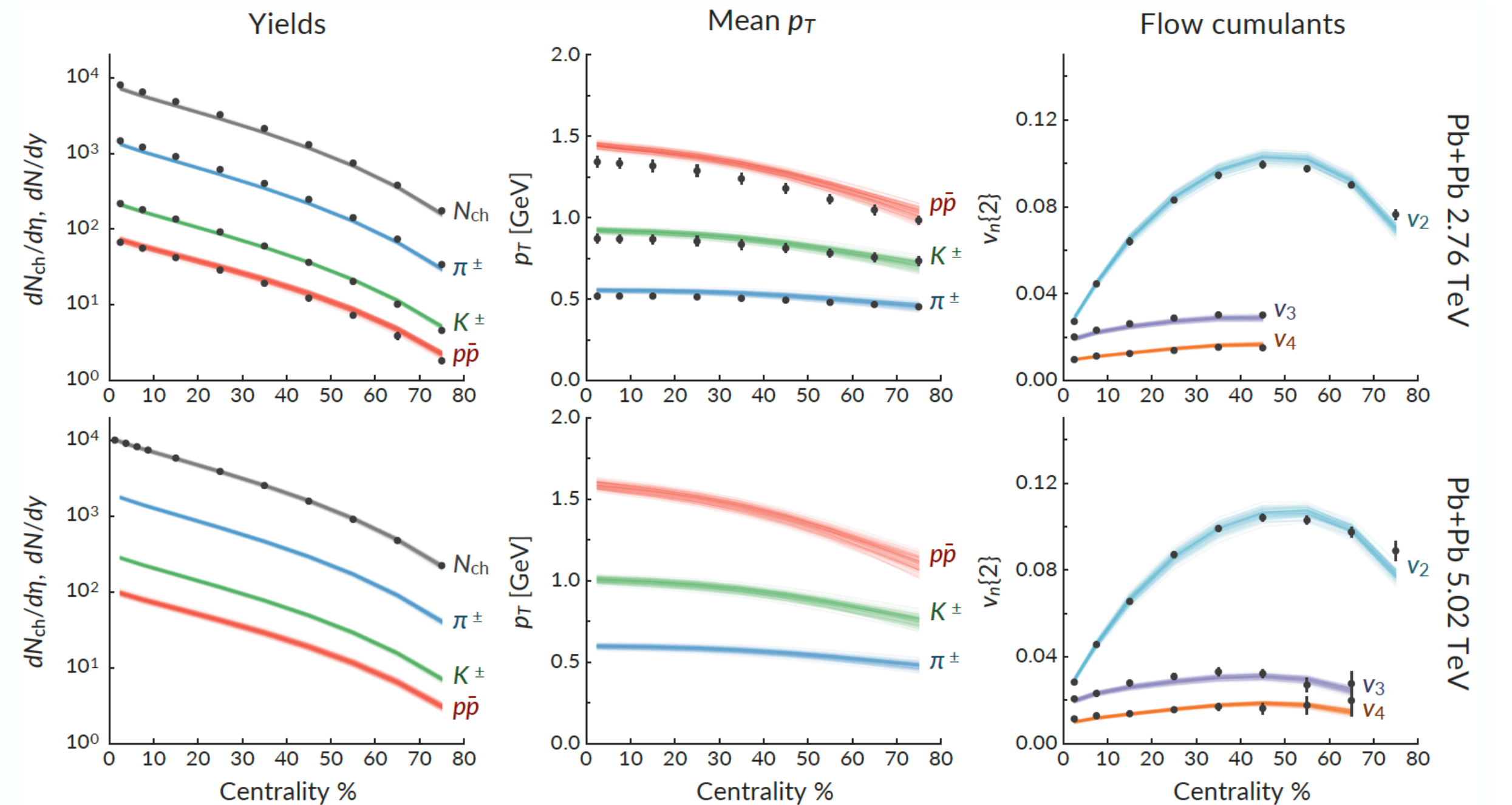
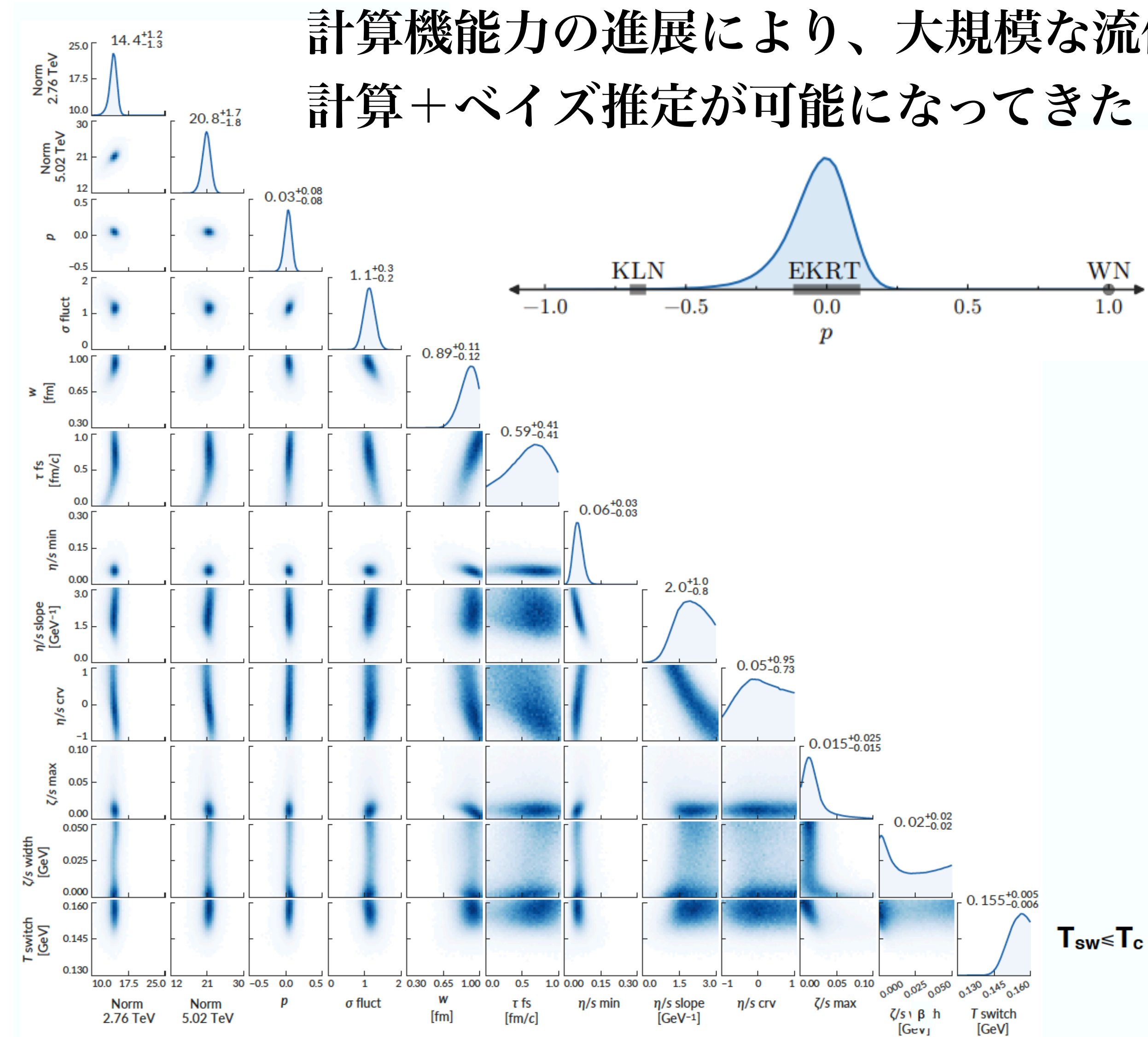
H. Song, S. Bass, U. Heinz, T. Hirano, and C. Shen, PRL2011





# これまでに分かったこと

計算機能力の進展により、大規模な流体計算+ベイズ推定が可能になってきた

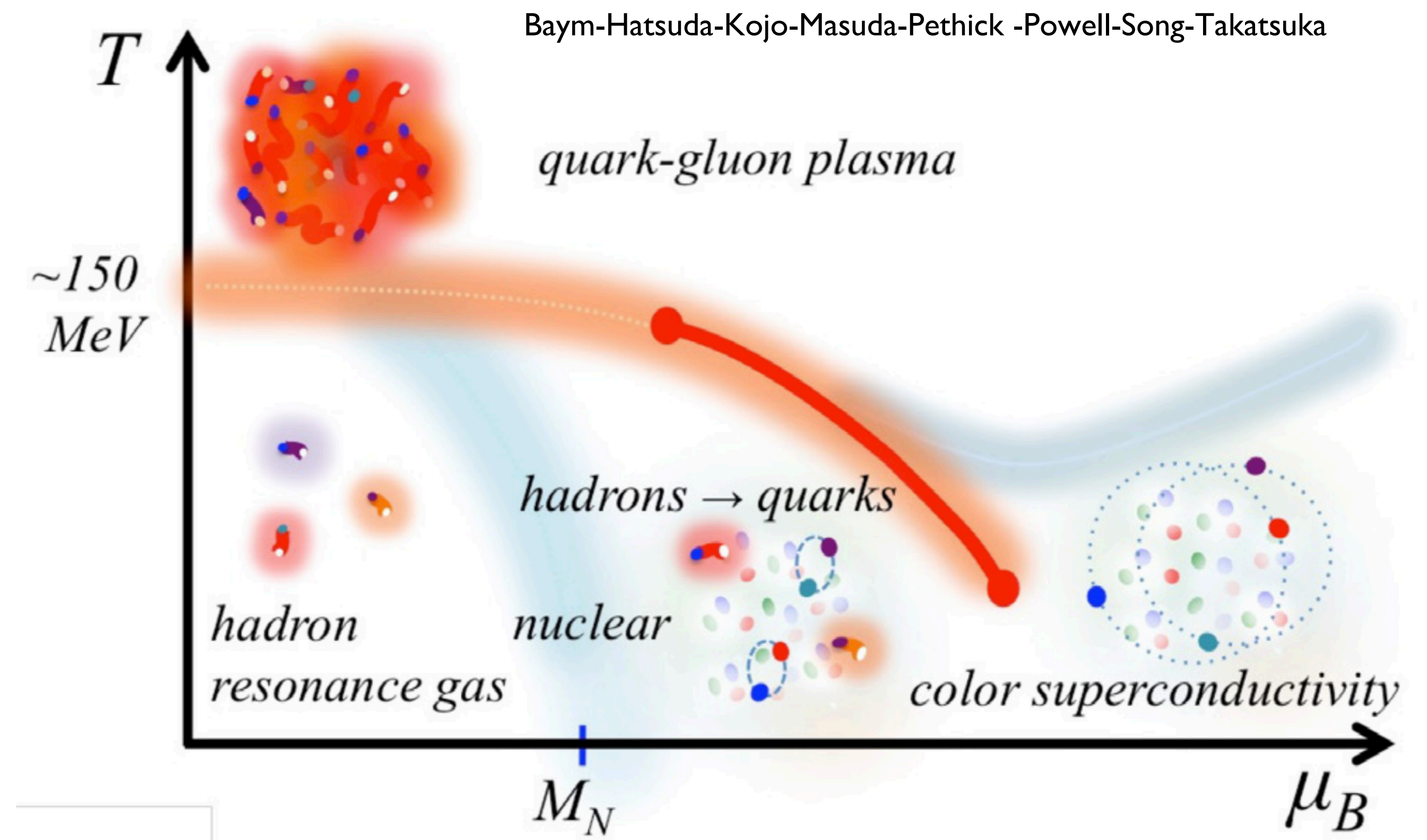




# これまでに分かったこと

流体計算の進展や強結合QGP  
の発見はとても凄いことである

しかし、依然として、QGPに  
関する多くのことはまだわかって  
いない





# まだ分かっていないこと

クォークの自由度は見たのか？

QCD相転移は見たのか？

QGPの微視的な状態はどうなっているのか？

どうして強結合なのか？

相構造はどうなっているのか？

QCD相転移が起こるメカニズムは？

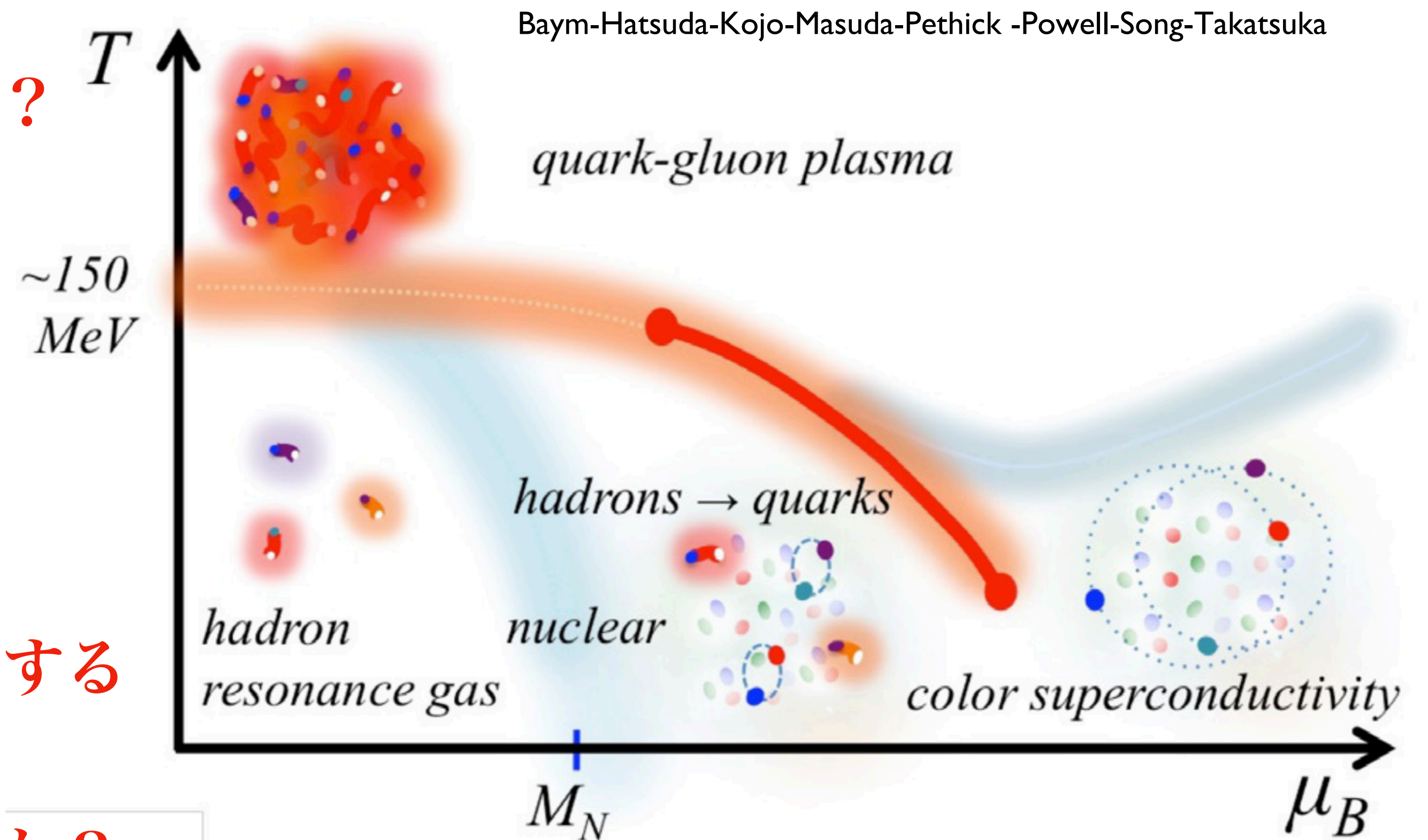
相境界付近はどうなっているのか？

粘性以外の物性量は？

QGPの物性量は温度や密度と共にどう変化する  
のか？

重イオン衝突でQGPがどうやって出来るのか？

小さい系の解釈は？

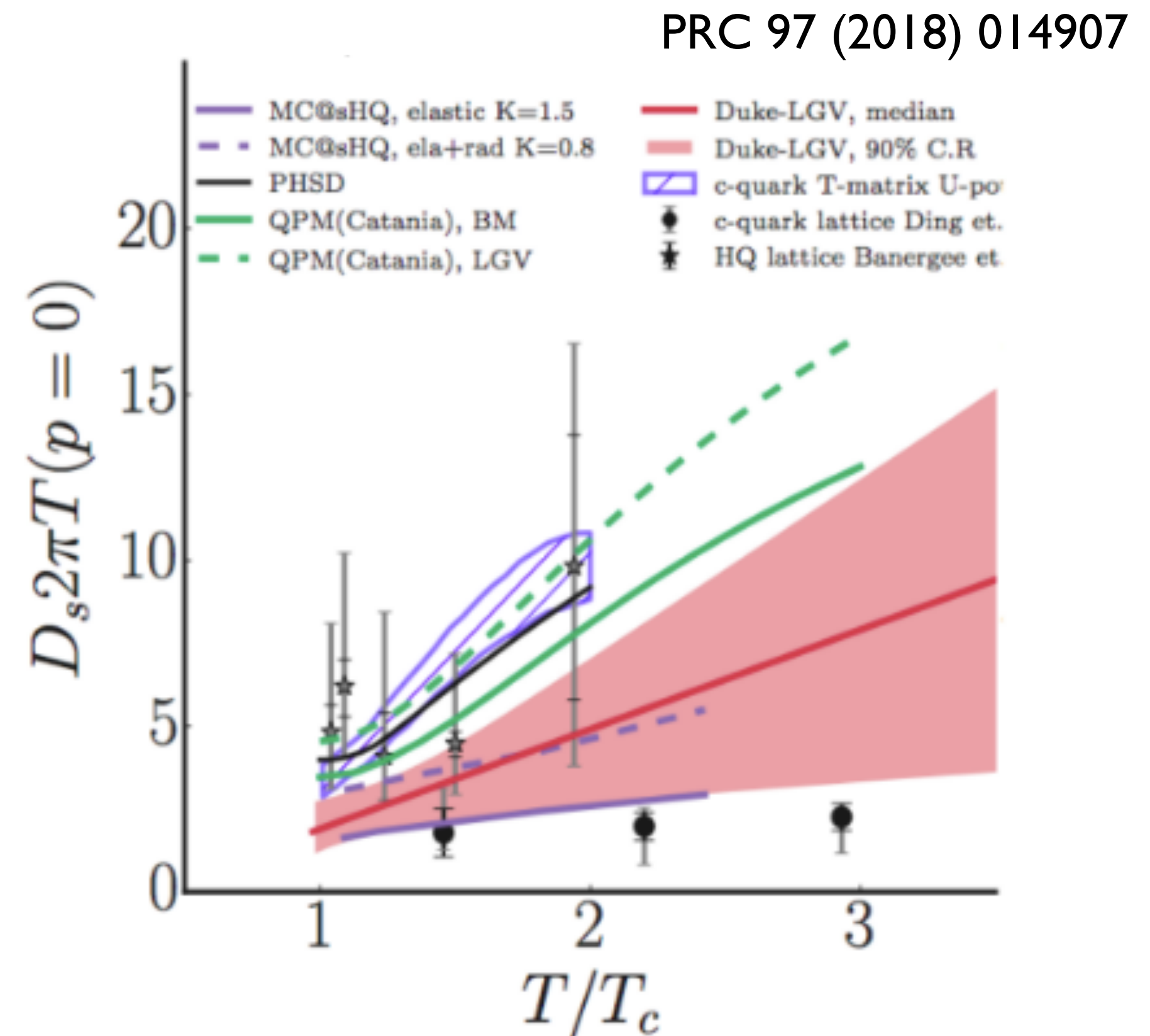
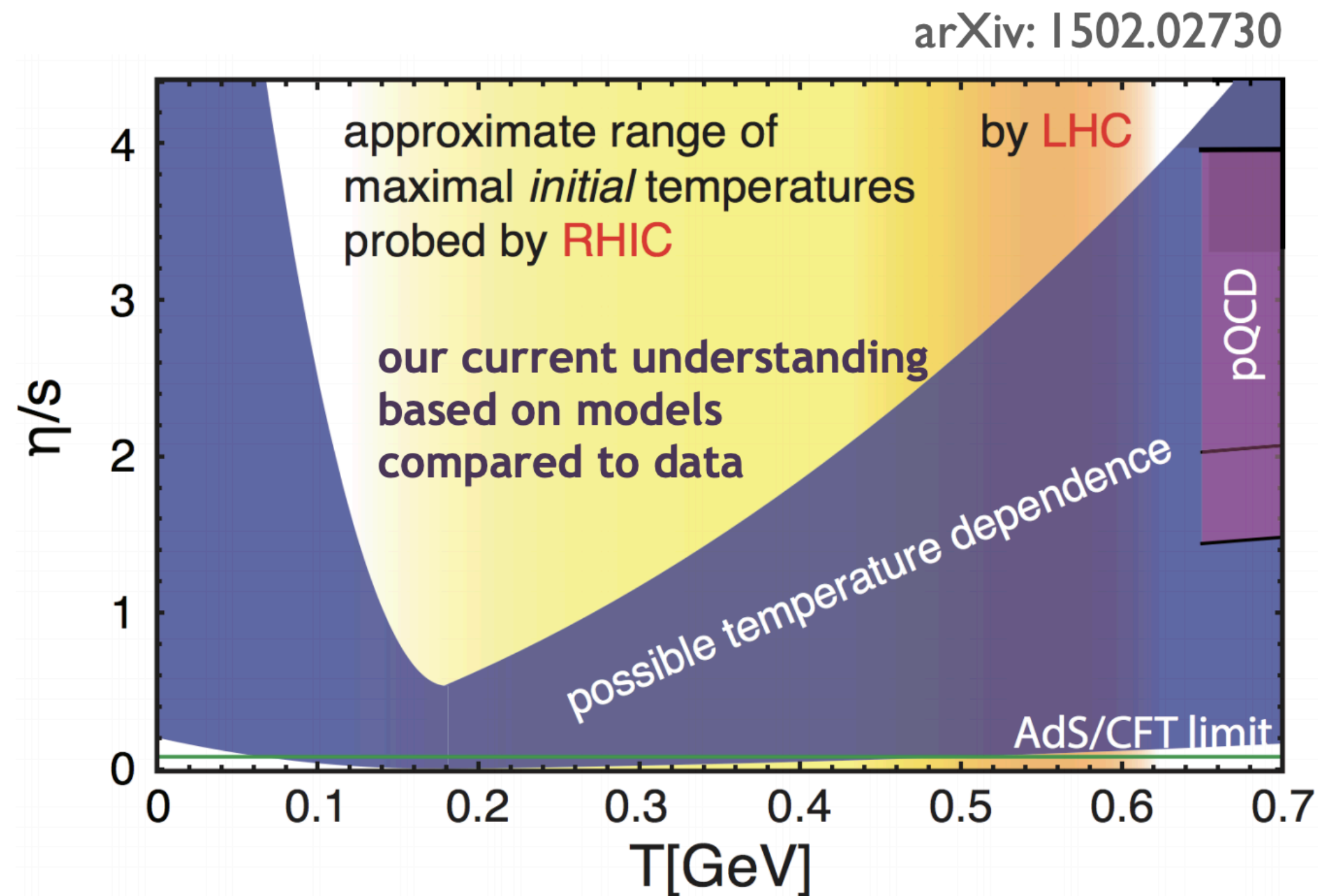


# (私が思う)次のステップ

## ① 高温側におけるQGP物性の詳細な研究

LHC, RHIC

- 様々な物性量の温度依存性とその背景にある物理の解明
- 熱化や流体化に至るダイナミクス



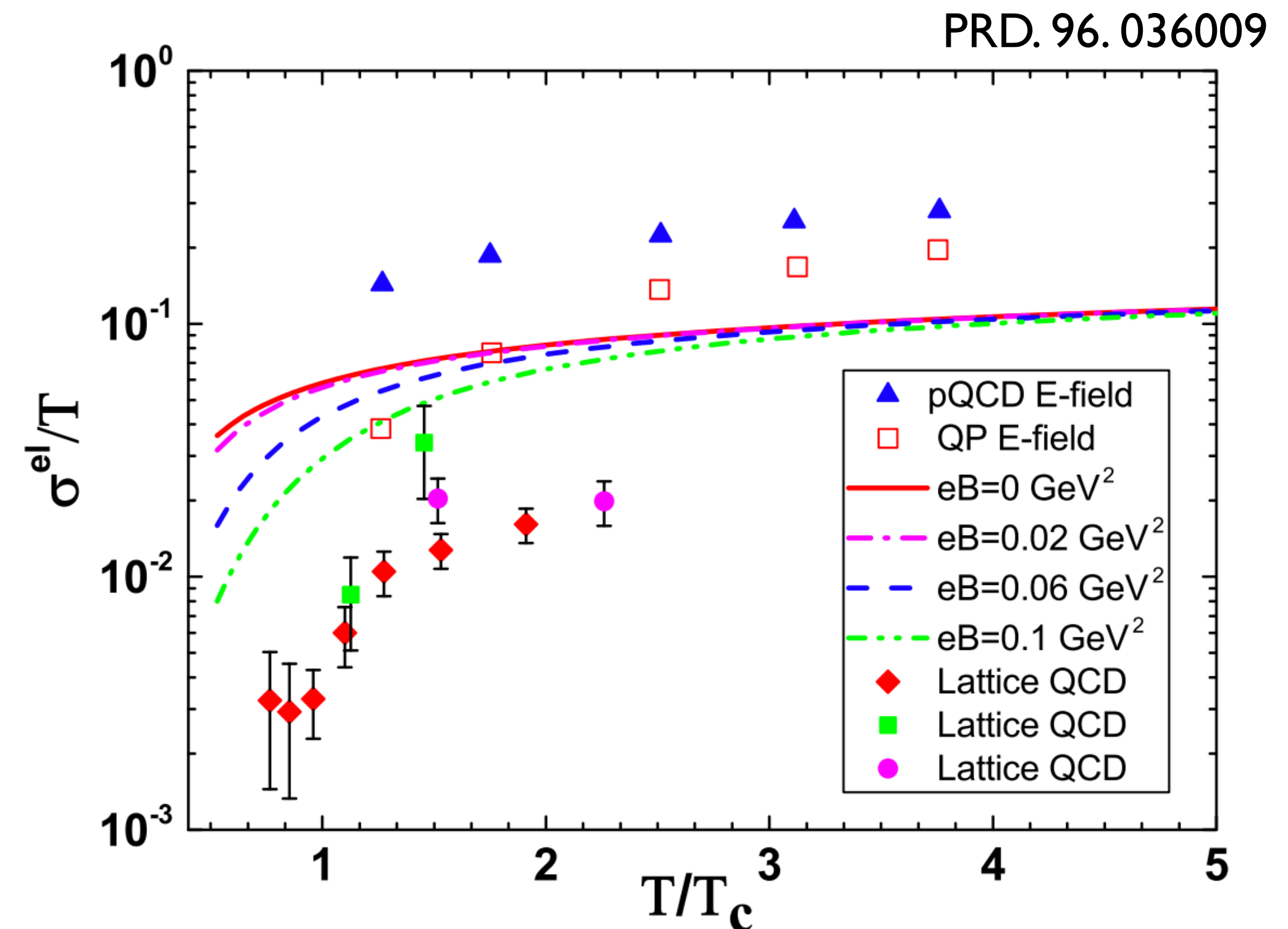
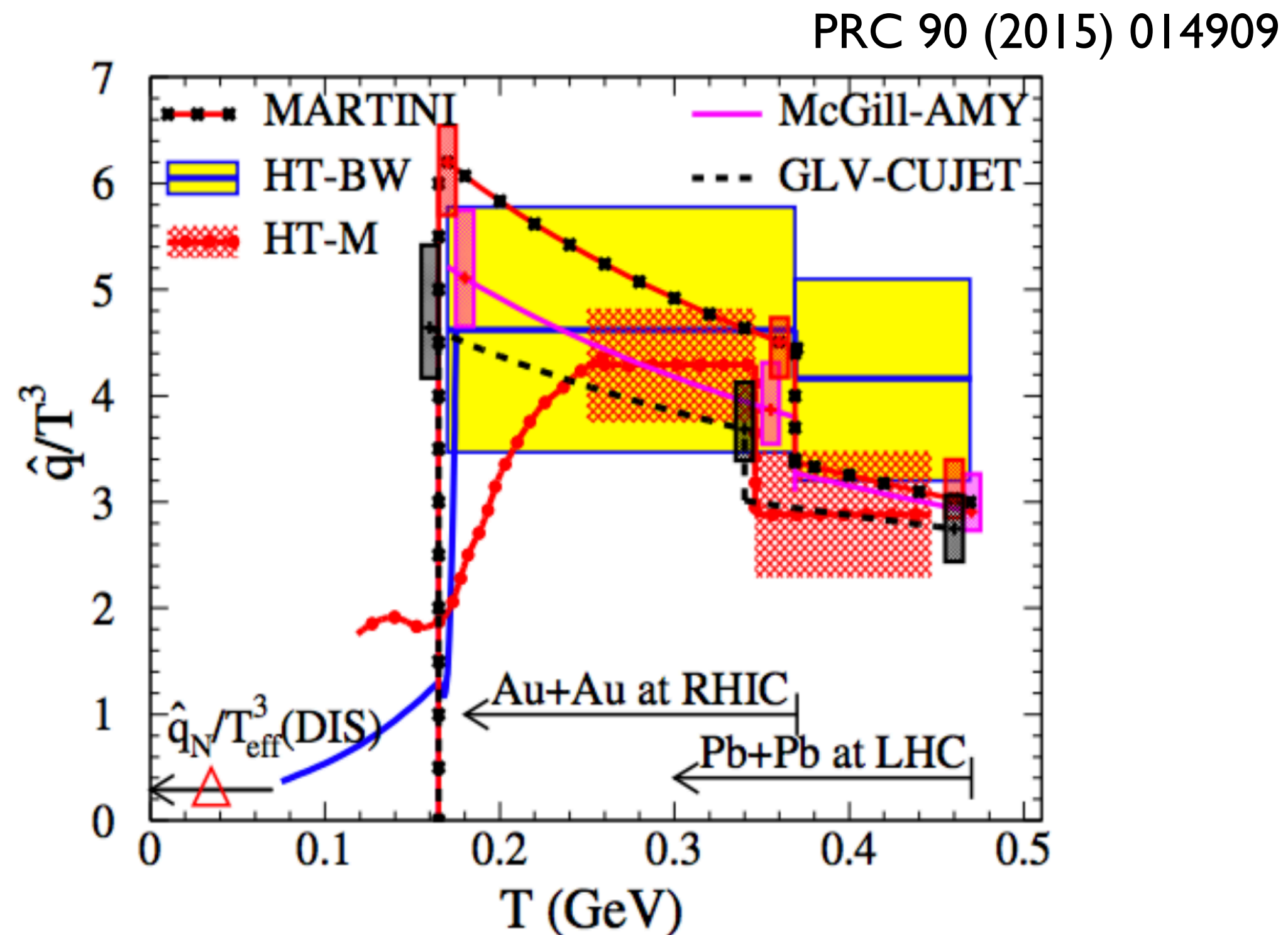


# (私が思う)次のステップ

## ① 高温側におけるQGP物性の詳細な研究

LHC, RHIC

- 様々な物性量の温度依存性とその背景にある物理の解明
- 熱化や流体化に至るダイナミクス





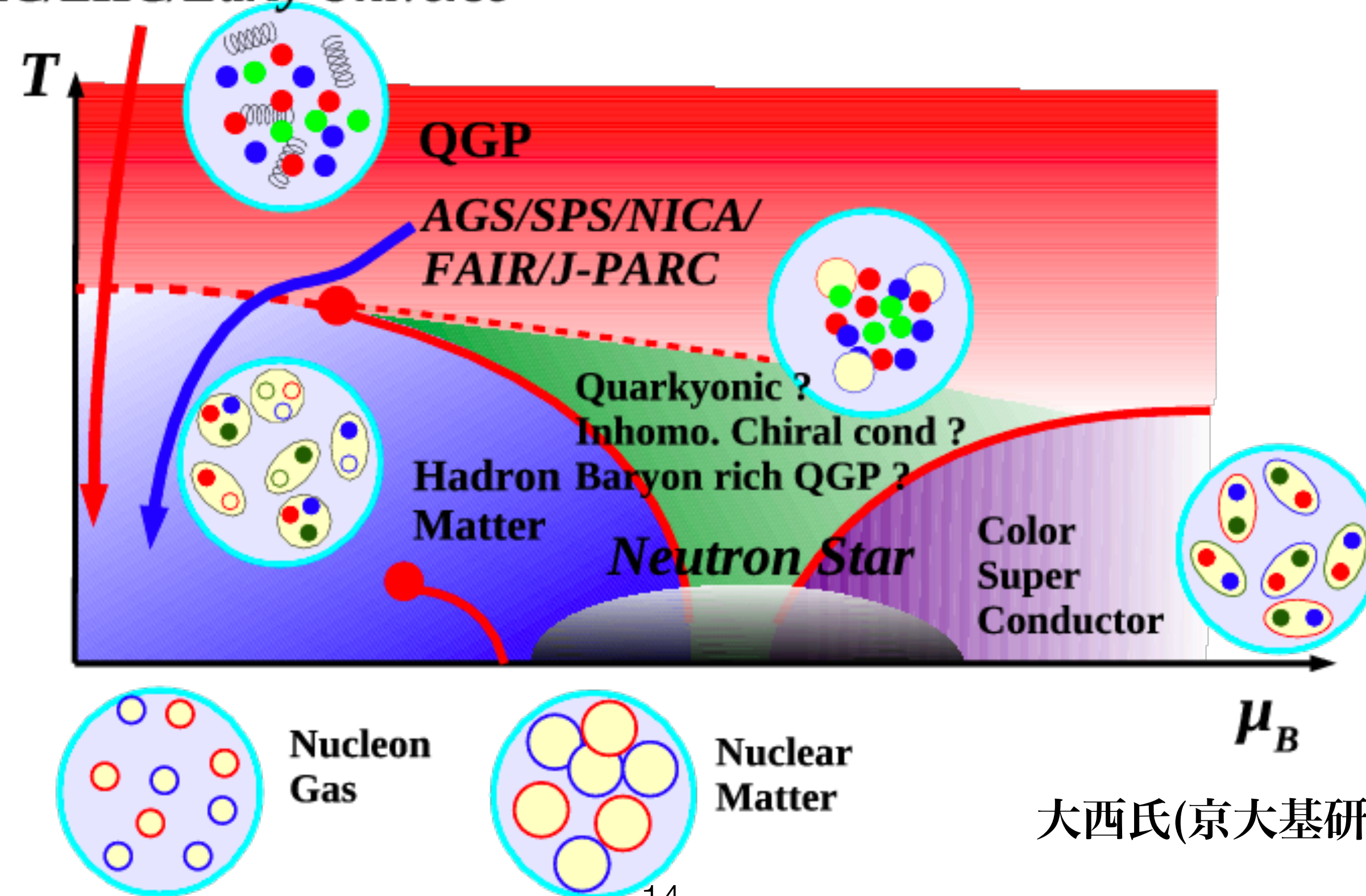
# (私が思う)次のステップ

## ② 高密度QCD物質の物性研究

RHIC, FAIR, J-PARC-HI

- 臨界点、一次相転移、非一様相の探索、カラー超電導相への挑戦

RHIC/LHC/Early Universe



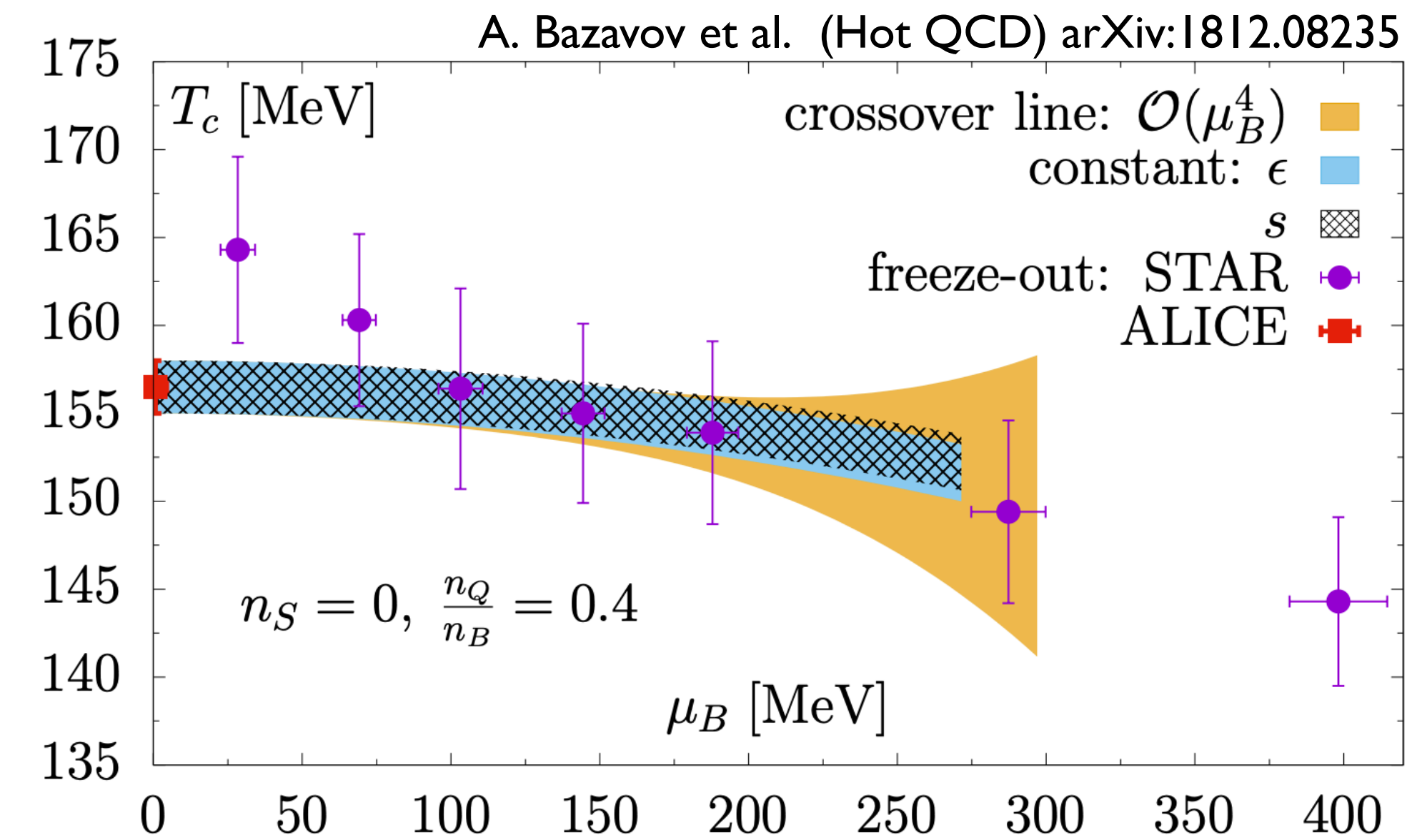
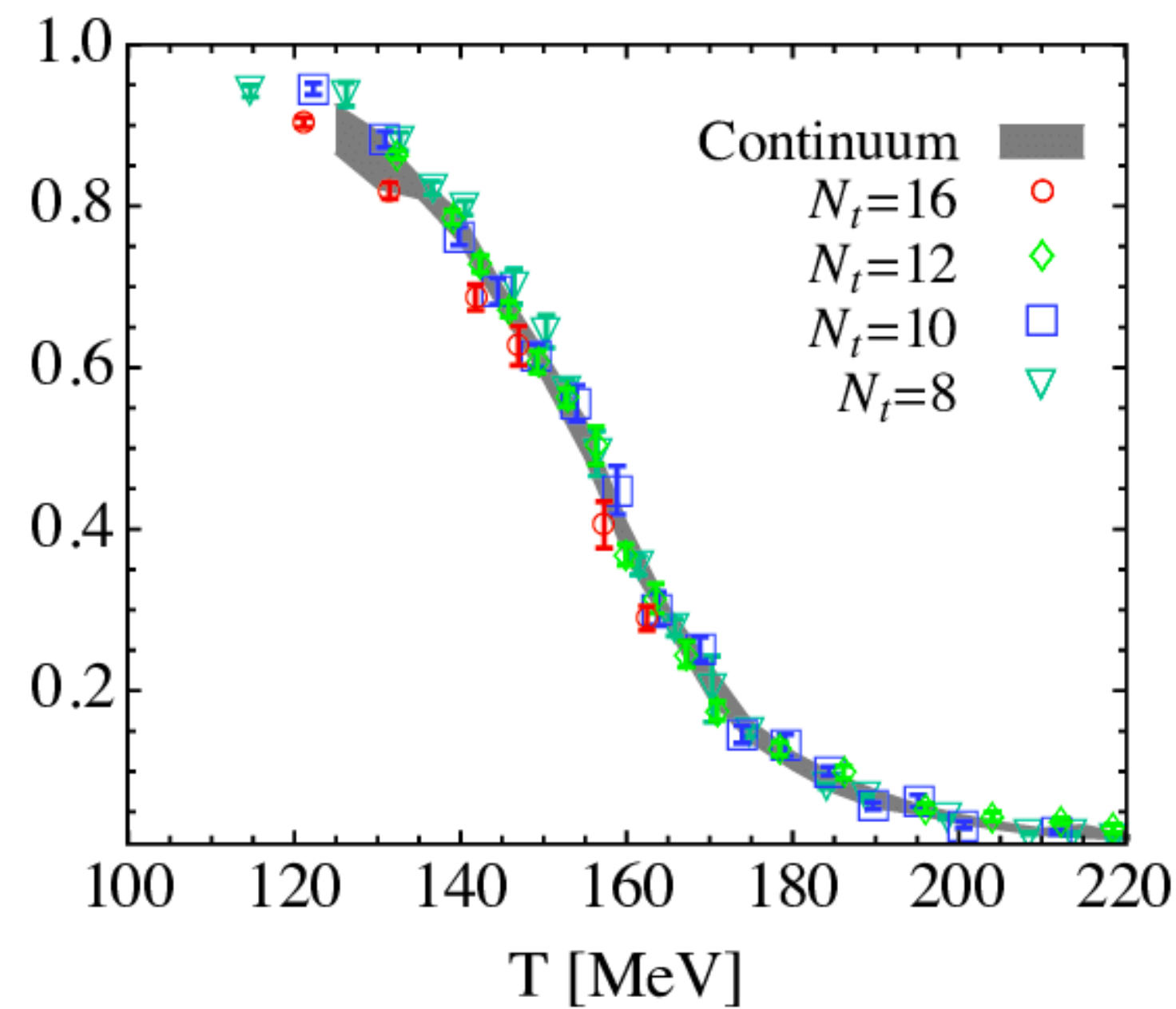
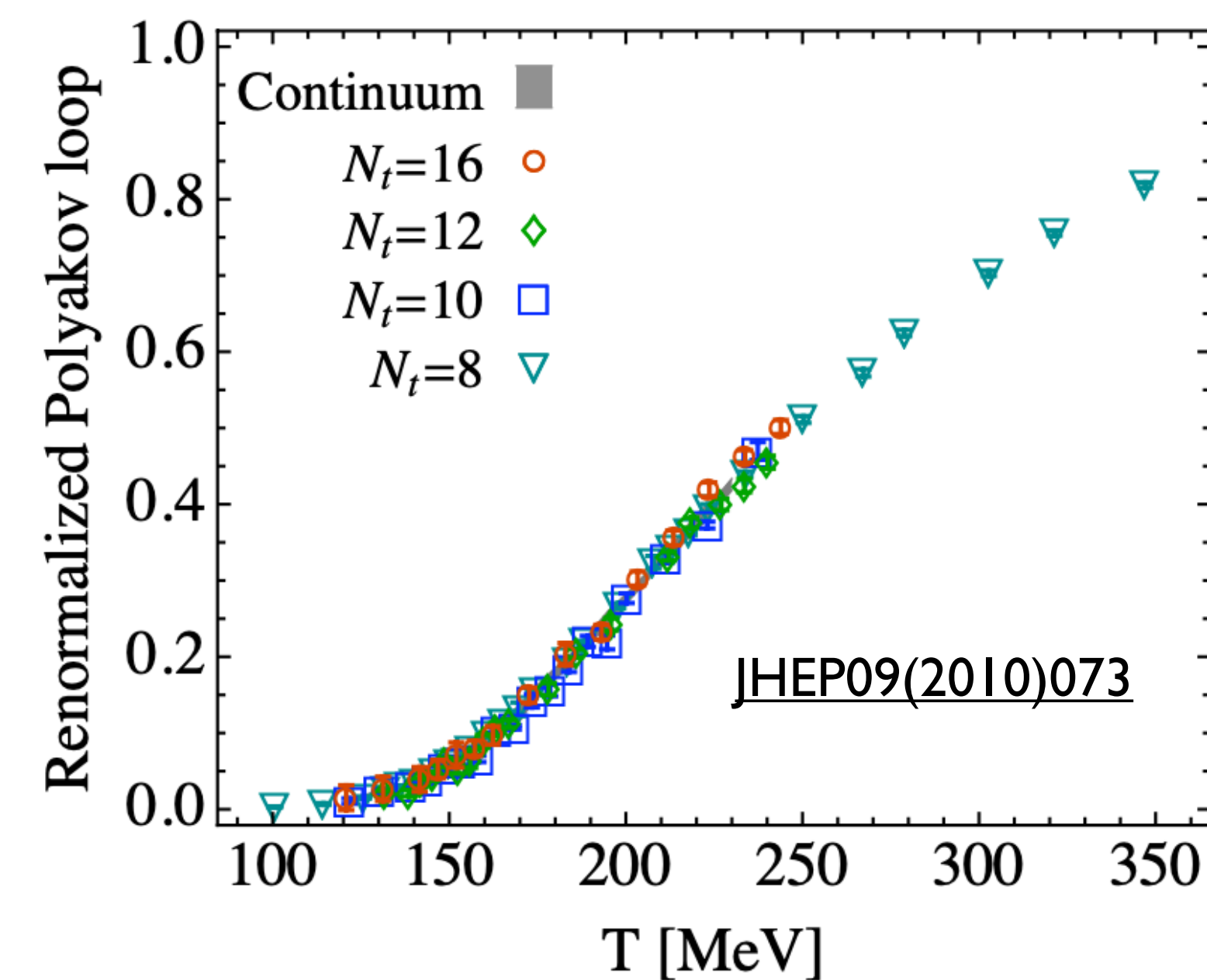
大西氏(京大基研)

# (私が思う)次のステップ

## ③ 相転移近傍のダイナミクスの研究

LHC, RHIC, FAIR, J-PARC-HI

- 閉じ込め・カイラル相転移、相転移の臨界指数
- 相転移付近での内部状態や秩序変数の振る舞い



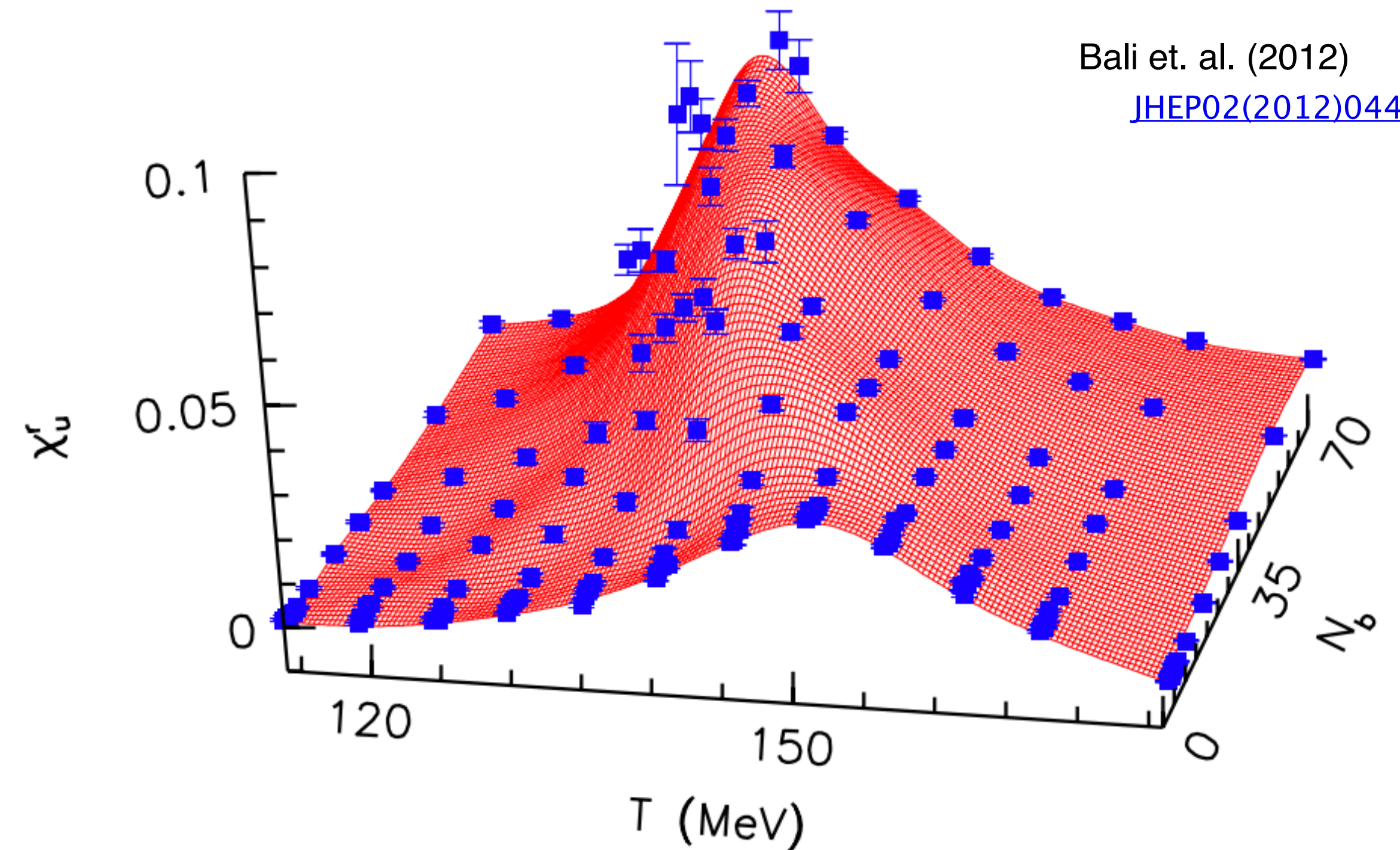
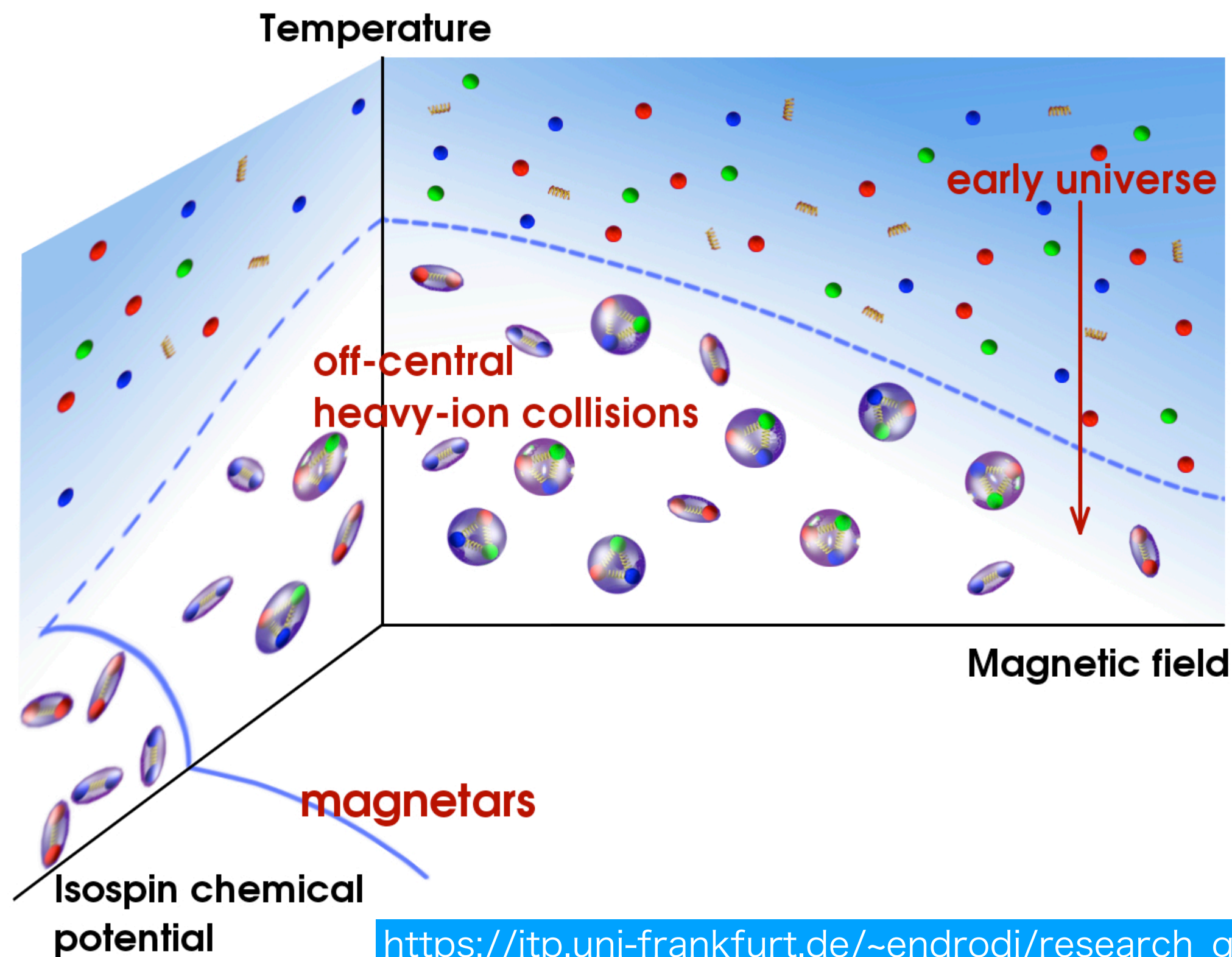


# (私が思う)次のステップ

## ④ 強磁場の物理

LHC, RHIC

- 相構造や真空構造の磁場依存性(3次元化)、アノマリー現象



Bali et. al. (2012)  
[JHEP02\(2012\)044](https://arxiv.org/abs/1203.4094)

[https://itp.uni-frankfurt.de/~endrodi/research\\_group.html](https://itp.uni-frankfurt.de/~endrodi/research_group.html)



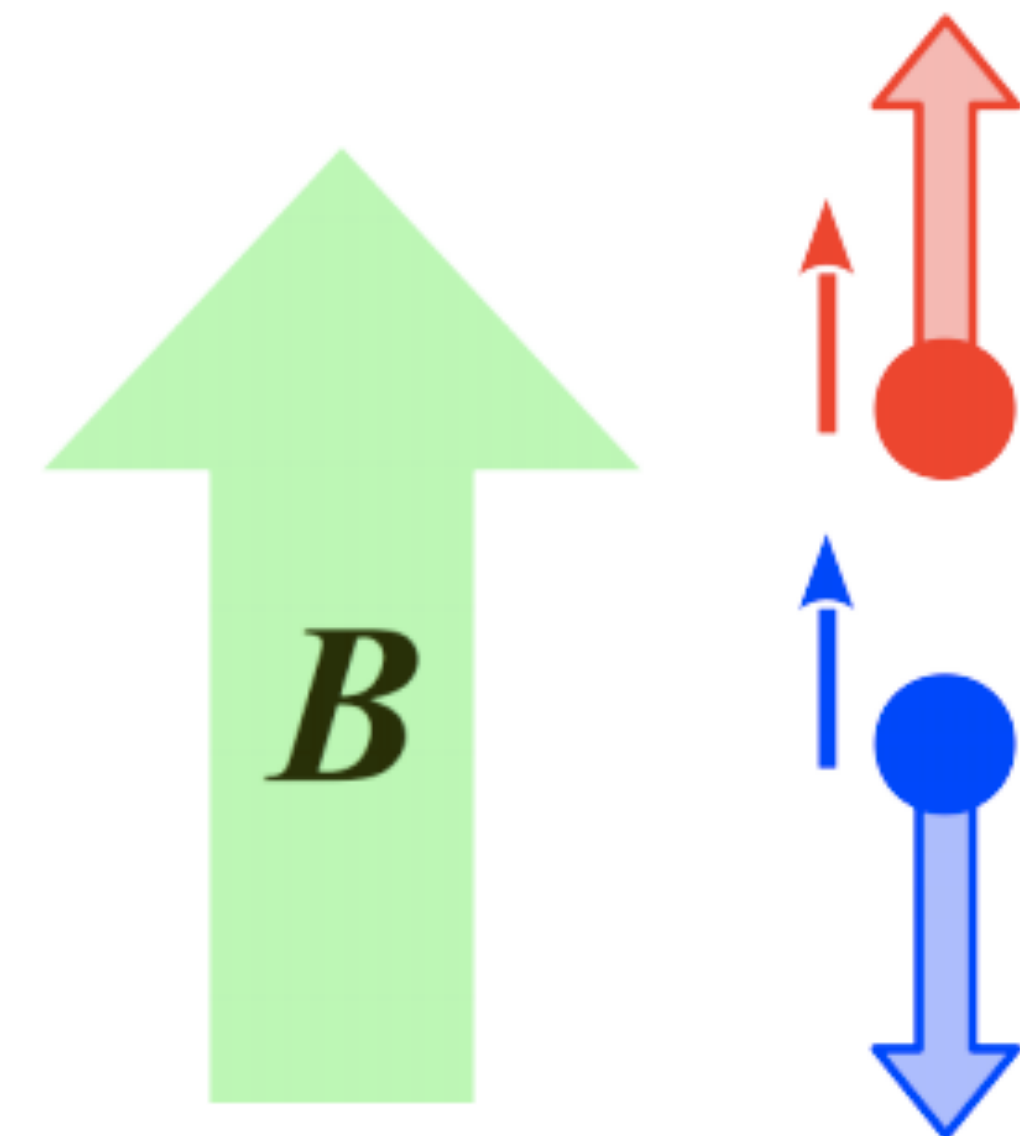
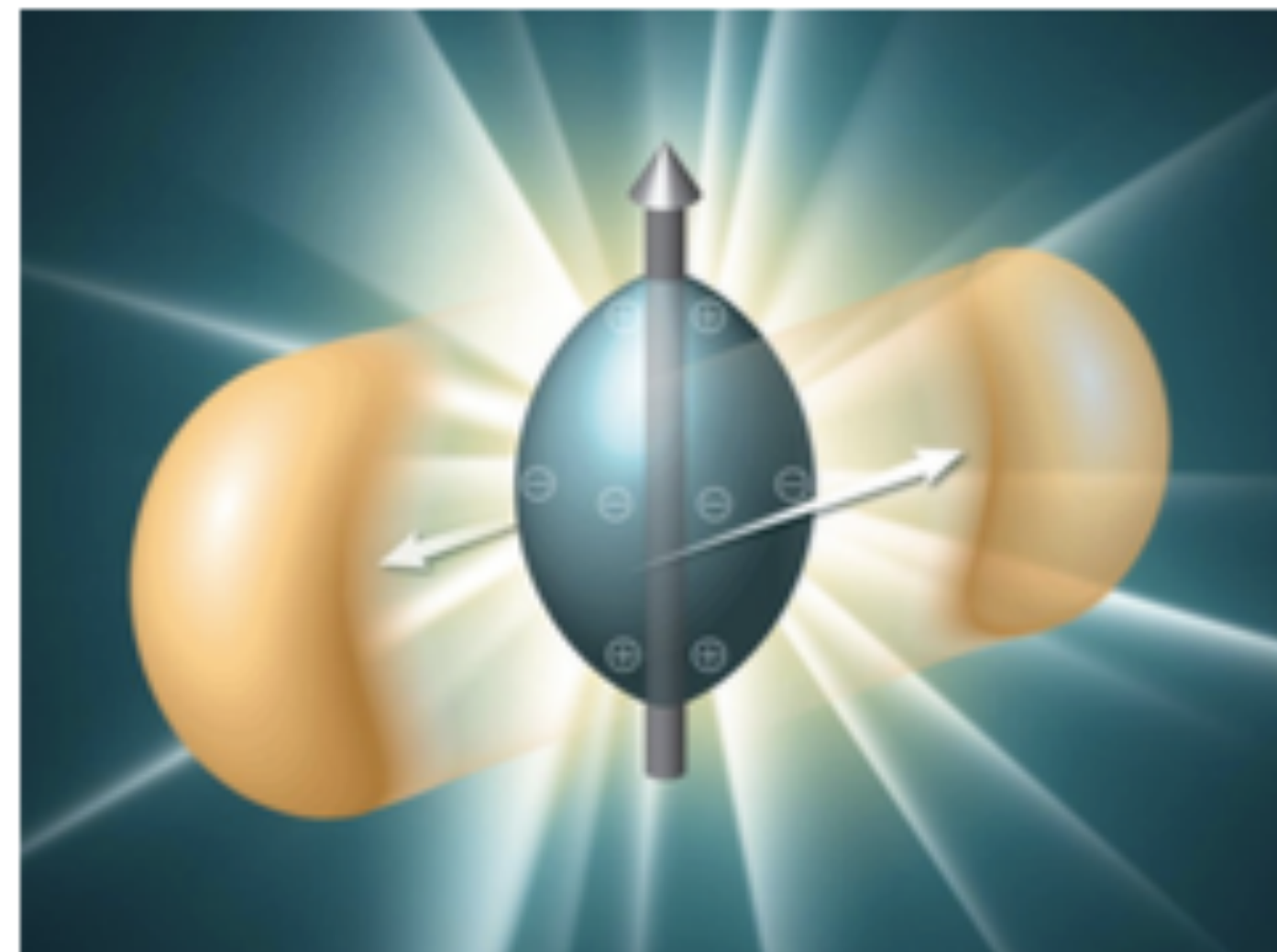
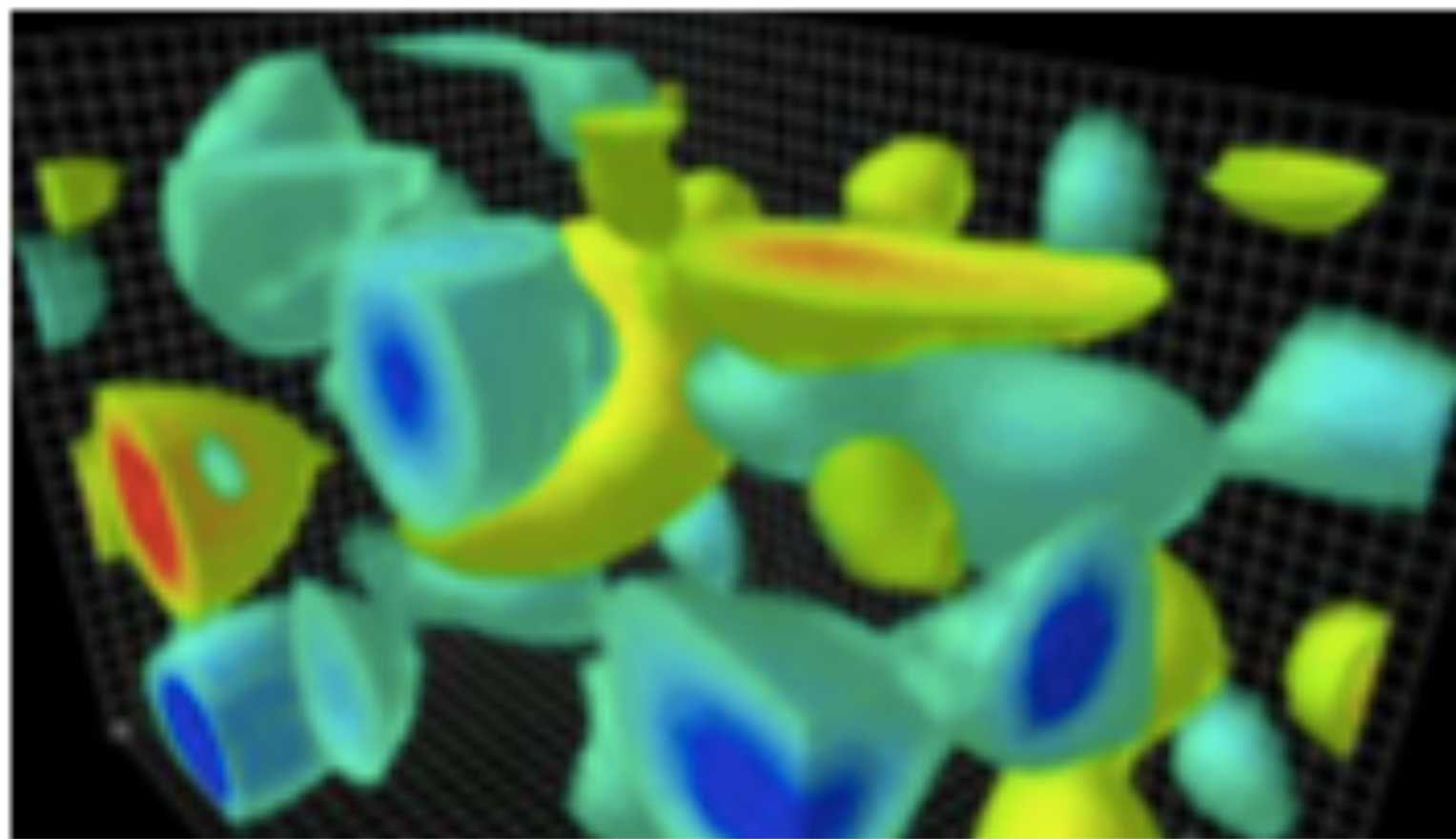
# (私が思う)次のステップ

## ④ 強磁場の物理

LHC, RHIC

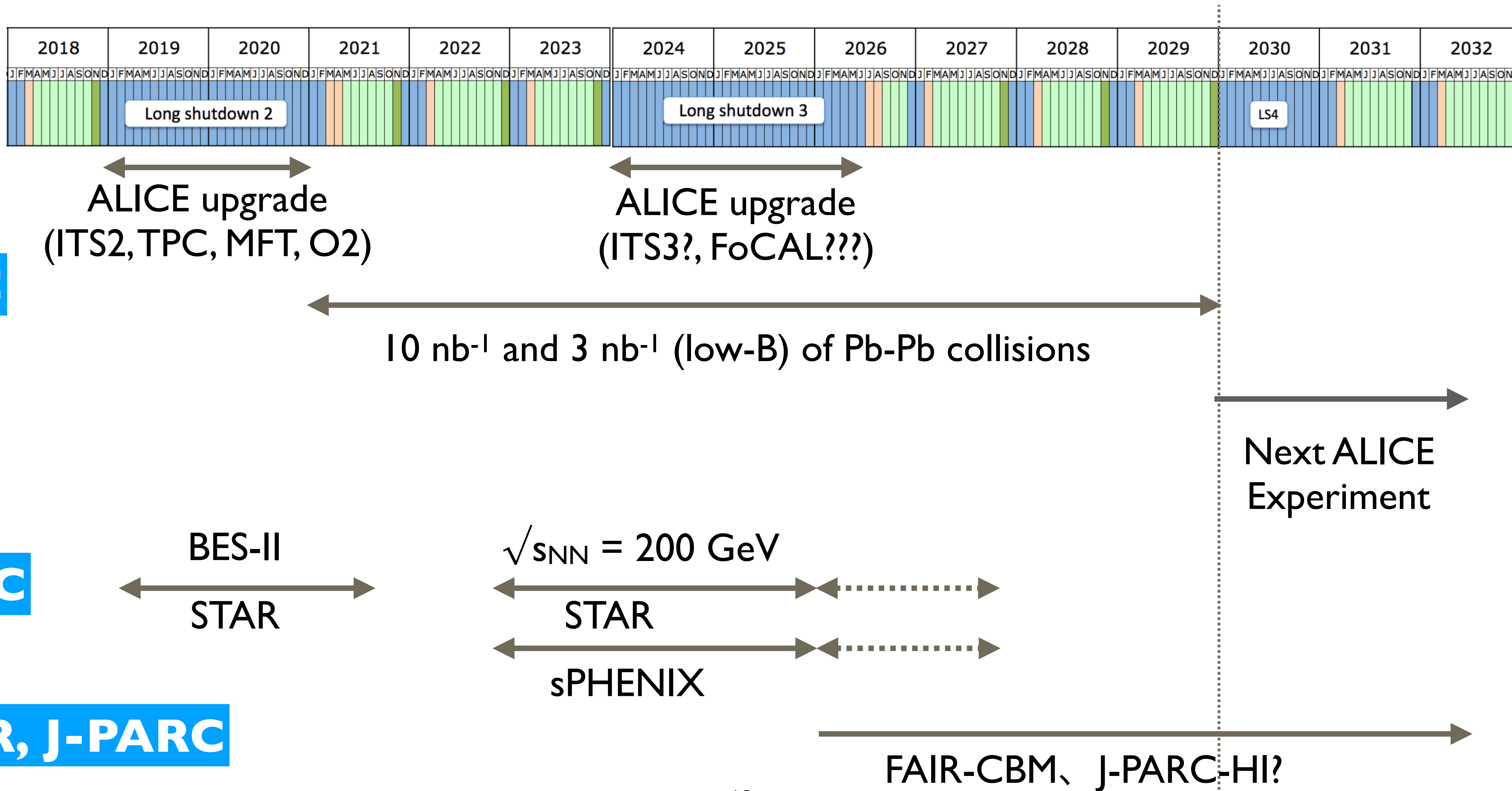
- 相構造や真空構造の磁場依存性(3次元化)、アノマリー現象

重イオン衝突に特異な現象: トポロジカル電荷ゆらぎ+磁場によるカイラル磁気効果

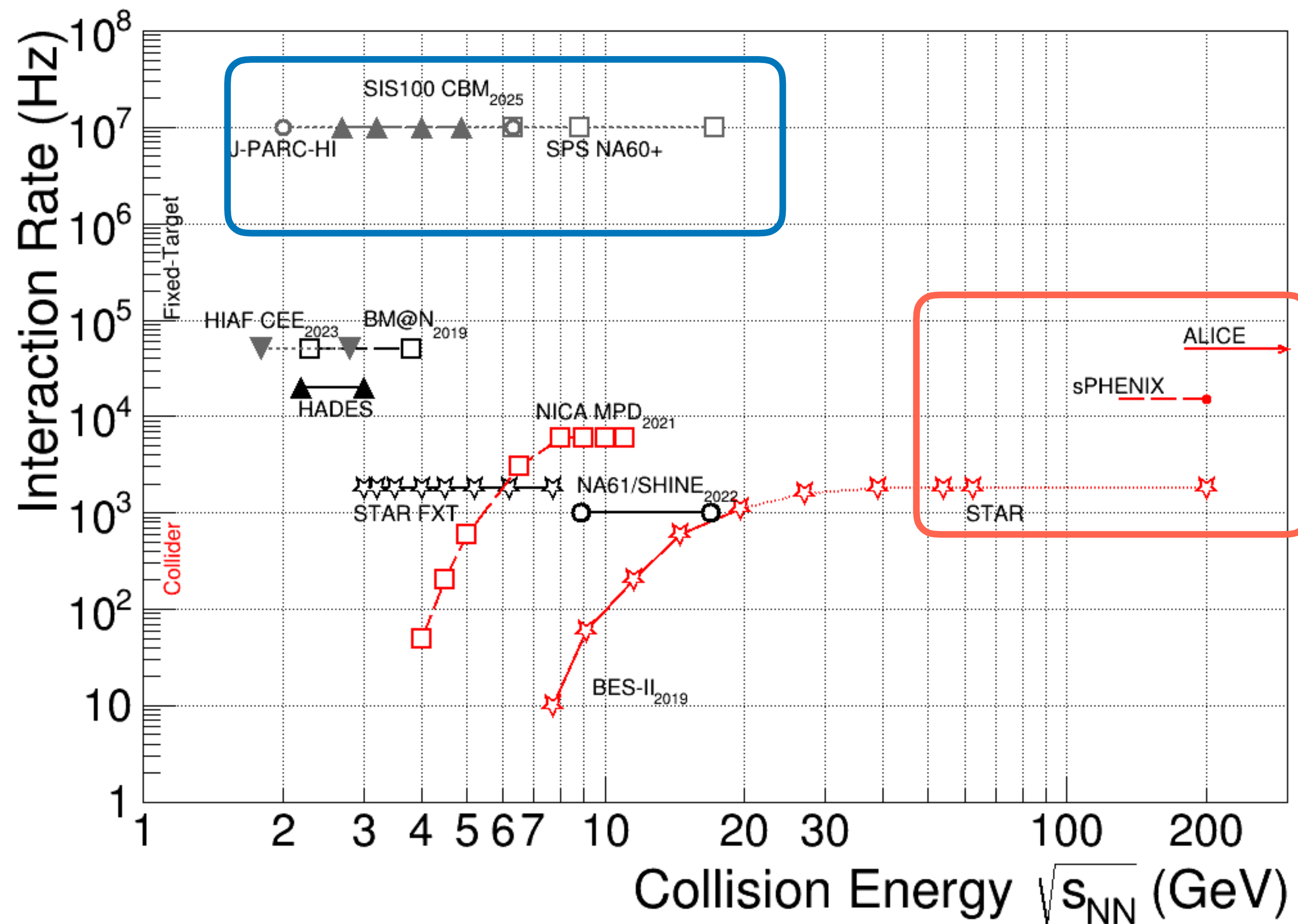
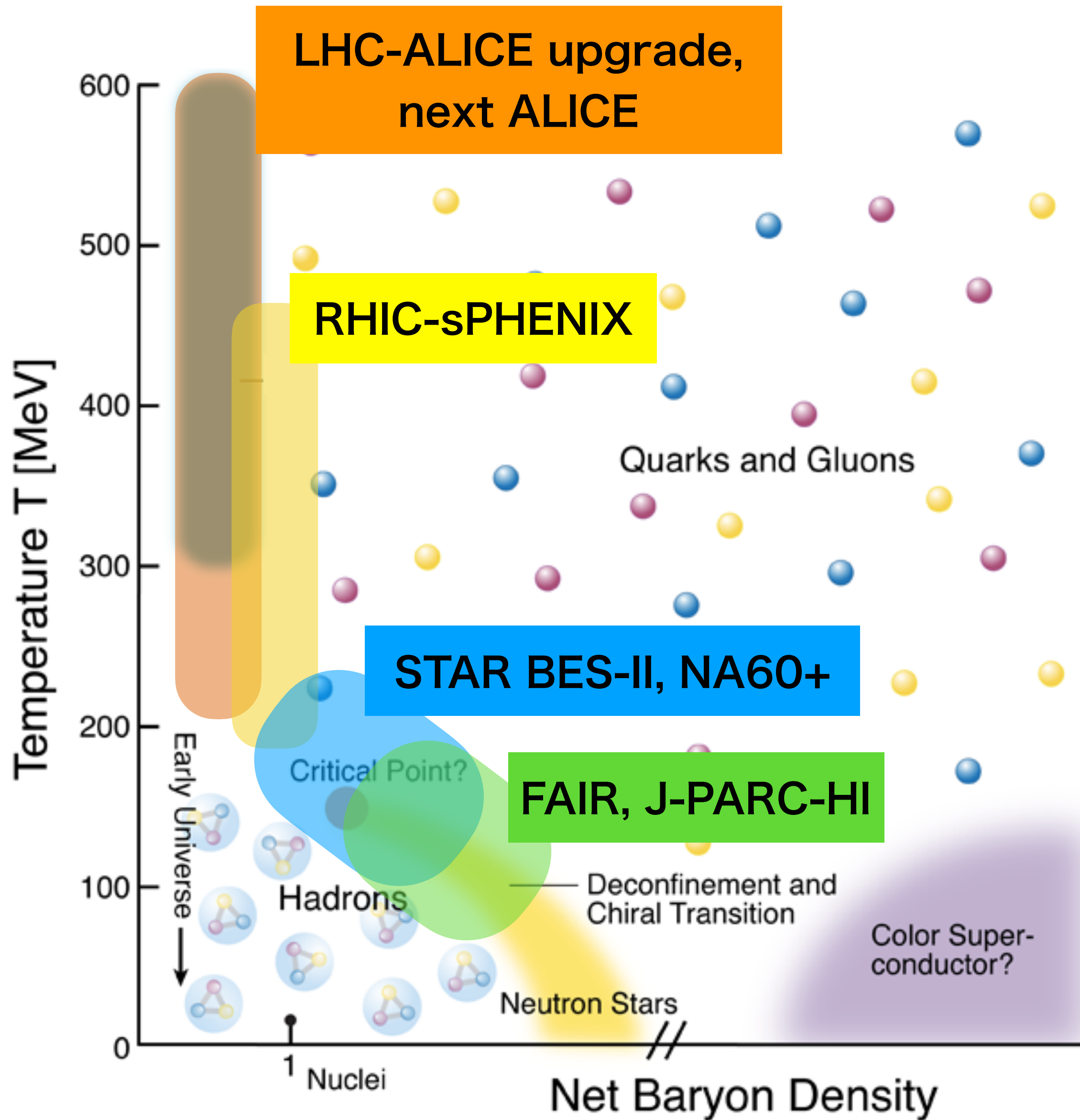




# 今後の実験計画



# 今後の実験計画





# ALICE upgrade@LHC

**x100 data taking capabilities after LS2 upgrade**



arXiv:1812.06772

CERN-LPCC-2018-07  
December 18, 2018

## New Inner Tracking System (ITS) *Novel MAPS technology*

- CMOS Active Pixel Sensors
- improved resolution, less material, faster readout

## New Muon Forward Tracker (MFT)

- CMOS Active Pixel Sensors
- vertex tracker at forward rapidity

## New TPC Readout Planes *Largest GEM application*

- 4-GEM detectors, new electronics
- continuous readout

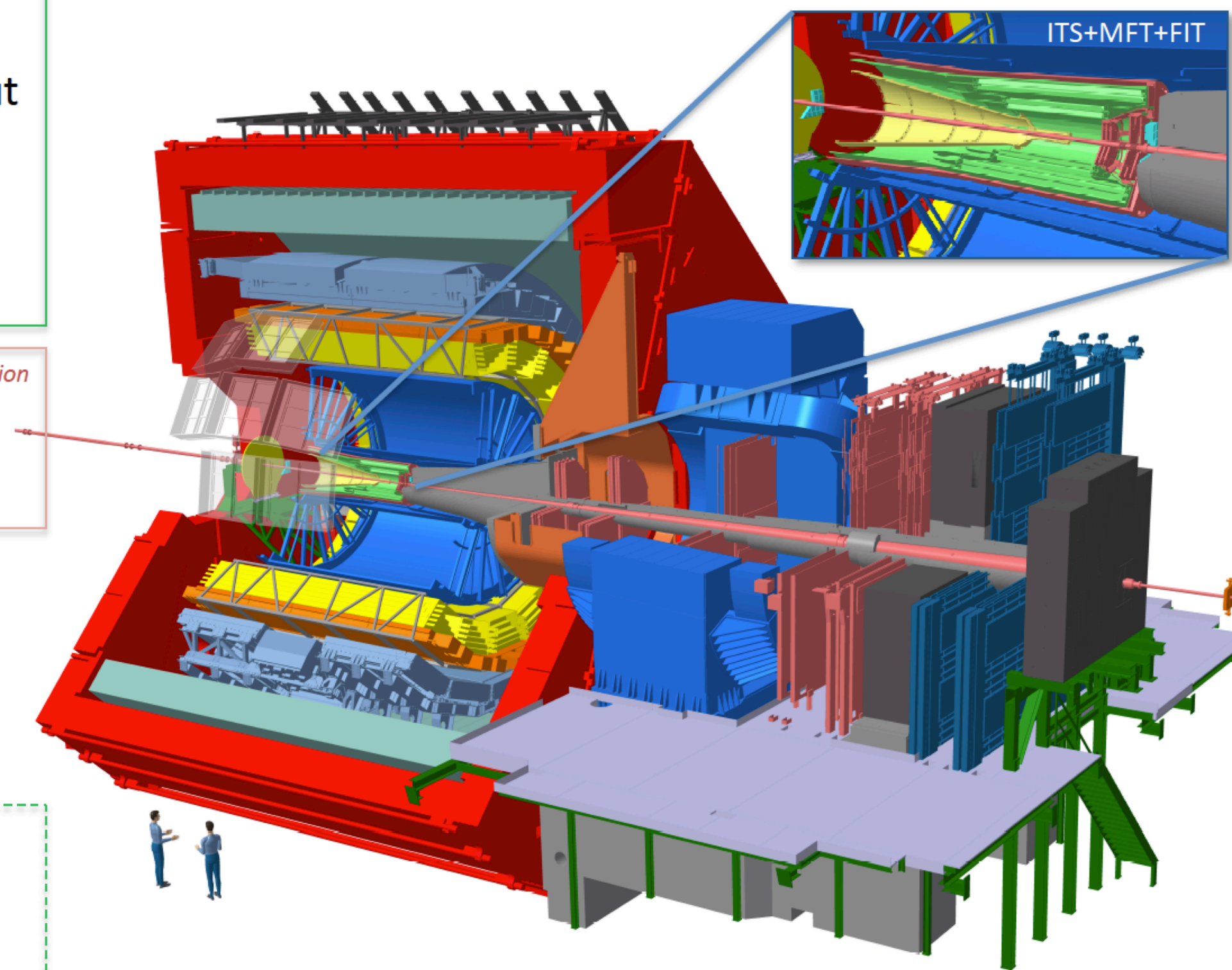
## New trigger detectors (FIT, AD)

- Centrality, event plane

Upgrades readout for TOF, TRD, MUON, ZDC, Calor.

## Integrated Online-Offline system (O<sup>2</sup>)

- Record minimum-bias Pb-Pb data at > 50kHz (currently ~ 1 kHz)



arXiv:1812.06772v1 [hep-ph] 17 Dec 2018

## Future physics opportunities for high-density QCD at the LHC with heavy-ion and proton beams

Report from Working Group 5 on the Physics of the HL-LHC, and Perspectives at the HE-LHC

Editors:

Z. Citron<sup>3</sup>, A. Dainese<sup>24</sup>, J.F. Grosse-Oetringhaus<sup>6</sup>, J.M. Jowett<sup>6</sup>, Y.-J. Lee<sup>53</sup>, U.A. Wiedemann<sup>6</sup>, M. Winn<sup>33,43</sup>

Chapter coordinators:

A. Andronic<sup>52</sup>, F. Bellini<sup>6</sup>, E. Bruna<sup>26</sup>, E. Chapon<sup>6</sup>, H. Dembinski<sup>51</sup>, D. d'Enterria<sup>6</sup>, I. Grabowska-Bold<sup>1</sup>, G.M. Innocenti<sup>6,53</sup>, C. Loizides<sup>61</sup>, S. Mohapatra<sup>13</sup>, C.A. Salgado<sup>38</sup>, M. Verweij<sup>68,101</sup>, M. Weber<sup>74</sup>

Contributors:

J. Aichelin<sup>71</sup>, A. Angerami<sup>48</sup>, L. Apolinario<sup>35,44</sup>, F. Arleo<sup>45</sup>, N. Armesto<sup>38</sup>, R. Arnaldi<sup>26</sup>, M. Arslanok<sup>19</sup>, P. Azzi<sup>24</sup>, R. Bailhache<sup>39</sup>, S.A. Bass<sup>16</sup>, C. Bedda<sup>99</sup>, N.K. Behera<sup>36</sup>, R. Bellwied<sup>88</sup>, A. Beraudo<sup>26</sup>, R. Bi<sup>53</sup>, C. Bierlich<sup>50,59</sup>, K. Blum<sup>6,103</sup>, A. Borrisov<sup>52</sup>, P. Braun-Munzinger<sup>17</sup>, R. Bruce<sup>6</sup>, G.E. Bruno<sup>65</sup>, S. Bufalino<sup>66</sup>, J. Castillo Castellanos<sup>33</sup>, R. Chatterjee<sup>100</sup>, Y. Chen<sup>6</sup>, Z. Chen<sup>69</sup>, C. Cheshkov<sup>31</sup>, T. Chujo<sup>97</sup>, Z. Conesa del Valle<sup>8</sup>, J.G. Contreras Nuno<sup>14</sup>, L. Cunqueiro Mendez<sup>61</sup>, T. Dahms<sup>18</sup>, N.P. Dang<sup>92</sup>, H. De la Torre<sup>54</sup>, A.F. Dobrin<sup>6</sup>, B. Doenicus<sup>39</sup>, L. Van Doremalen<sup>99</sup>, X. Du<sup>77</sup>, A. Dubla<sup>17</sup>, M. Dumancic<sup>103</sup>, M. Dyndal<sup>15</sup>, L. Fabbietti<sup>76</sup>, E.G. Ferreira<sup>38</sup>, F. Fionda<sup>83</sup>, F. Fleuret<sup>45</sup>, S. Floerchinger<sup>19</sup>, G. Giacalone<sup>32</sup>, A. Giammanco<sup>81</sup>, P.B. Gossiaux<sup>71</sup>, G. Graziani<sup>23</sup>, V. Greco<sup>82</sup>, A. Grelli<sup>99</sup>, F. Grosa<sup>66</sup>, M. Guilbaud<sup>6</sup>, T. Gunji<sup>10</sup>, V. Guzey<sup>20,64,90</sup>, C. Hadjidakis<sup>30</sup>, S. Hassani<sup>34</sup>, M. He<sup>56</sup>, I. Helenius<sup>80,90</sup>, P. Huo<sup>75</sup>, P.M. Jacobs<sup>47</sup>, P. Janus<sup>1</sup>, M.A. Jebrancic<sup>6,39</sup>, J. Jia<sup>4,75</sup>, A.P. Kalweit<sup>6</sup>, H. Kim<sup>12</sup>, M. Klasen<sup>52</sup>, S.R. Klein<sup>47</sup>, M. Klusek-Gawenda<sup>21</sup>, J. Kremer<sup>1</sup>, G.K. Kriniras<sup>61</sup>, F. Krizek<sup>2</sup>, E. Kryshen<sup>64</sup>, A. Kurkela<sup>6,73</sup>, A. Kusina<sup>1</sup>, J.-P. Lansberg<sup>30</sup>, R. Lea<sup>96</sup>, M. van Leeuwen<sup>60,99</sup>, W. Li<sup>69</sup>, J. Margutti<sup>99</sup>, A. Marin<sup>17</sup>, C. Marquet<sup>9</sup>, J. Martin Blanco<sup>45</sup>, L. Massacrier<sup>30</sup>, A. Mastroserio<sup>86</sup>, E. Maurice<sup>45</sup>, C. Mayer<sup>21</sup>, C. McGinnis<sup>53</sup>, G. Milhano<sup>6,35,44</sup>, A. Milov<sup>103</sup>, V. Minissale<sup>29</sup>, C. Mironov<sup>53</sup>, A. Mischke<sup>99</sup>, N. Mohammadi<sup>6</sup>, M. Mulders<sup>6</sup>, M. Murray<sup>91</sup>, M. Narain<sup>5</sup>, P. Di Nezza<sup>28</sup>, A. Nisati<sup>25</sup>, J. Noronha-Hostler<sup>70</sup>, A. Ohlson<sup>19</sup>, V. Okorokov<sup>58</sup>, F. Olness<sup>72</sup>, P. Paakinen<sup>90</sup>, L. Pappalardo<sup>85</sup>, J. Park<sup>42</sup>, H. Paukkunen<sup>20,90</sup>, C.C. Peng<sup>67</sup>, H. Pereira Da Costa<sup>33</sup>, D.V. Perepelitsa<sup>84</sup>, D. Peresunko<sup>57</sup>, M. Peters<sup>53</sup>, N.E. Pettersson<sup>93</sup>, S. Piano<sup>27</sup>, T. Pierog<sup>40</sup>, J. Pires<sup>7,35</sup>, M. Ploskon<sup>47</sup>, S. Plumari<sup>52</sup>, F. Prino<sup>26</sup>, M. Puccio<sup>95</sup>, R. Rapp<sup>77</sup>, K. Redlich<sup>17,98</sup>, K. Reygers<sup>19</sup>, C.L. Risteau<sup>37</sup>, P. Robbe<sup>43</sup>, A. Rossi<sup>94</sup>, A. Rustamov<sup>17,19,55</sup>, M. Rybar<sup>13</sup>, M. Schaumann<sup>6</sup>, B. Schenke<sup>4</sup>, I. Schienbein<sup>46</sup>, L. Schoeffel<sup>34</sup>, I. Selyuzhenkov<sup>17,58</sup>, A.M. Sickles<sup>89</sup>, M. Siever<sup>70</sup>, P. Silva<sup>6</sup>, T. Song<sup>87</sup>, M. Spousta<sup>11</sup>, J. Stachel<sup>19</sup>, P. Steinberg<sup>4</sup>, D. Stocco<sup>71</sup>, M. Strickland<sup>41</sup>, M. Strikman<sup>63</sup>, J. Sun<sup>78</sup>, D. Tapia Takaki<sup>91</sup>, K. Tatar<sup>53</sup>, C. Terrevoli<sup>88</sup>, A. Timmins<sup>88</sup>, S. Trzeciak<sup>95</sup>, A. Trzeciak<sup>99</sup>, A. Trzupek<sup>21</sup>, R. Ulrich<sup>40</sup>, A. Uras<sup>31</sup>, R. Venugopalan<sup>4</sup>, I. Vitev<sup>49</sup>, G. Vujanovic<sup>62,102</sup>, J. Wang<sup>53</sup>, T.W. Wang<sup>53</sup>, R. Xiao<sup>67</sup>, Y. Xu<sup>16</sup>, C. Zampolli<sup>6,22</sup>, H. Zanolini<sup>79</sup>, M. Zhou<sup>75</sup>, Y. Zhou<sup>59</sup>

\* deceased

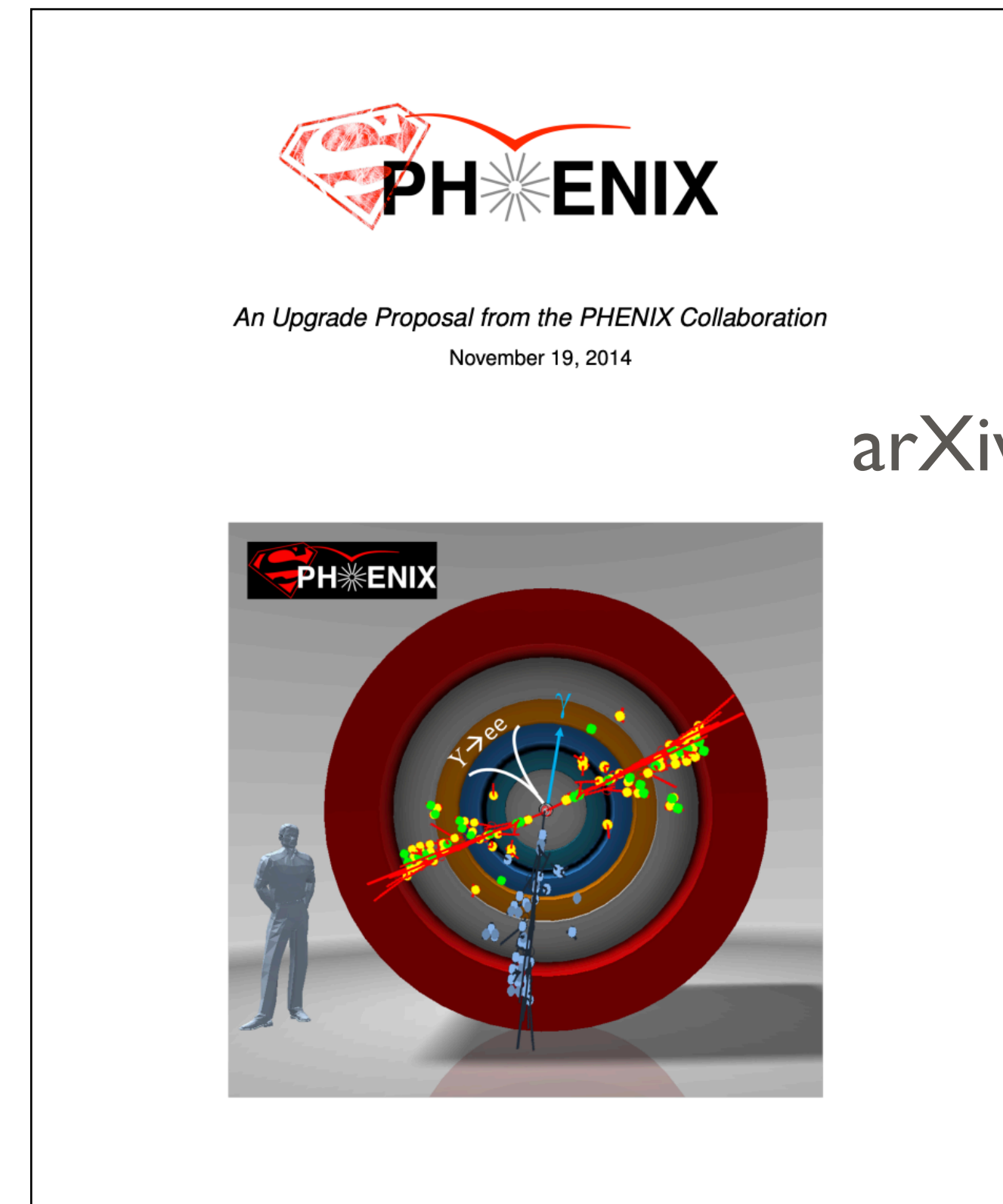
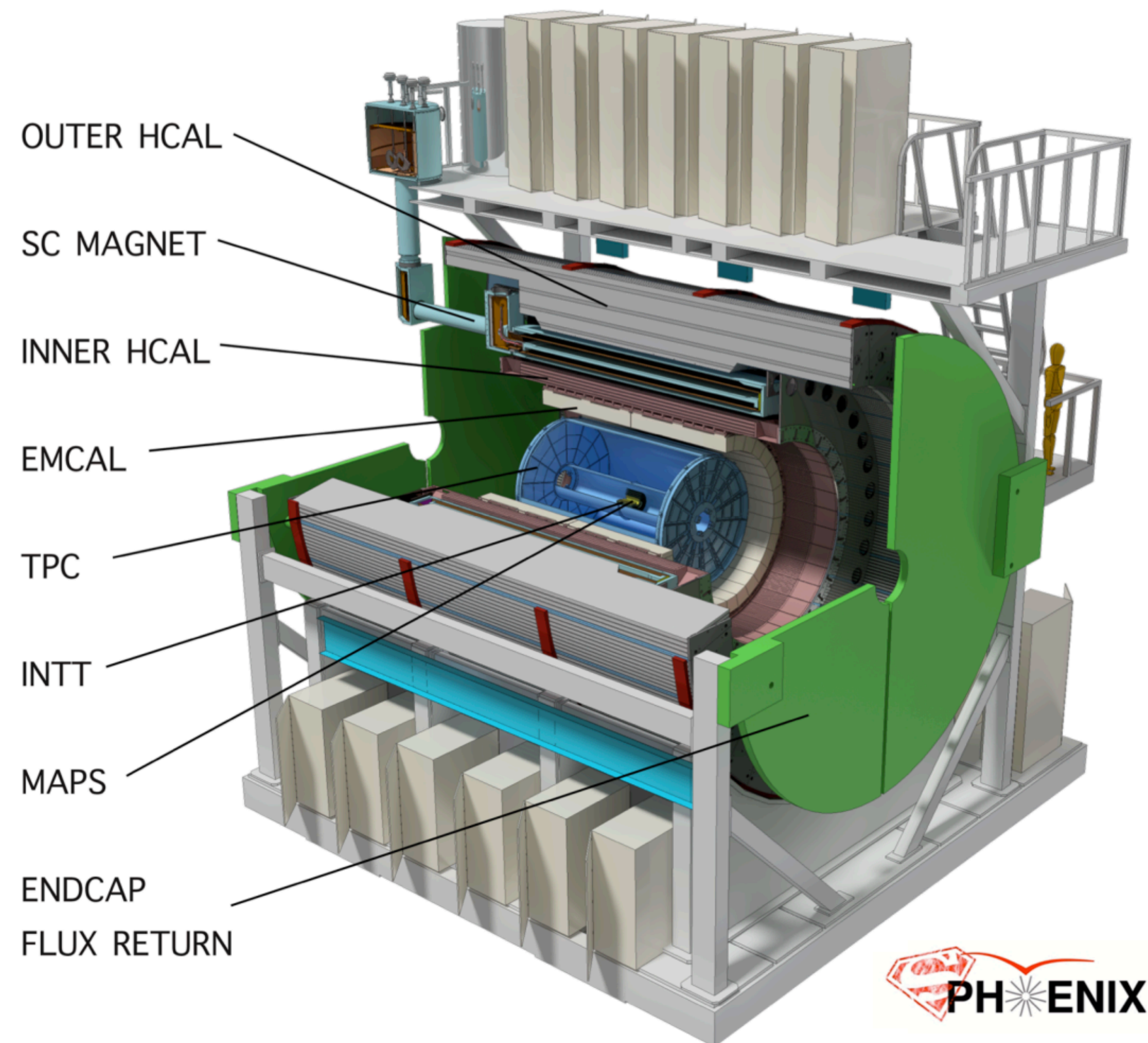
これまでの100倍のデータ収集

低運動量ハドロン、重クォーク、クォークonia、レプトン対などの測定を強化



# sPHENIX@RHIC

2022年頃に完成. 2023-2025(2026-2027)の金+金衝突データを取得 ( $35\text{nb}^{-1}$ ,  $83\text{nb}^{-1}$ )



重クォーク、クォークニア、  
ジェットなどの測定を強化



# High $\mu_B$ facilities

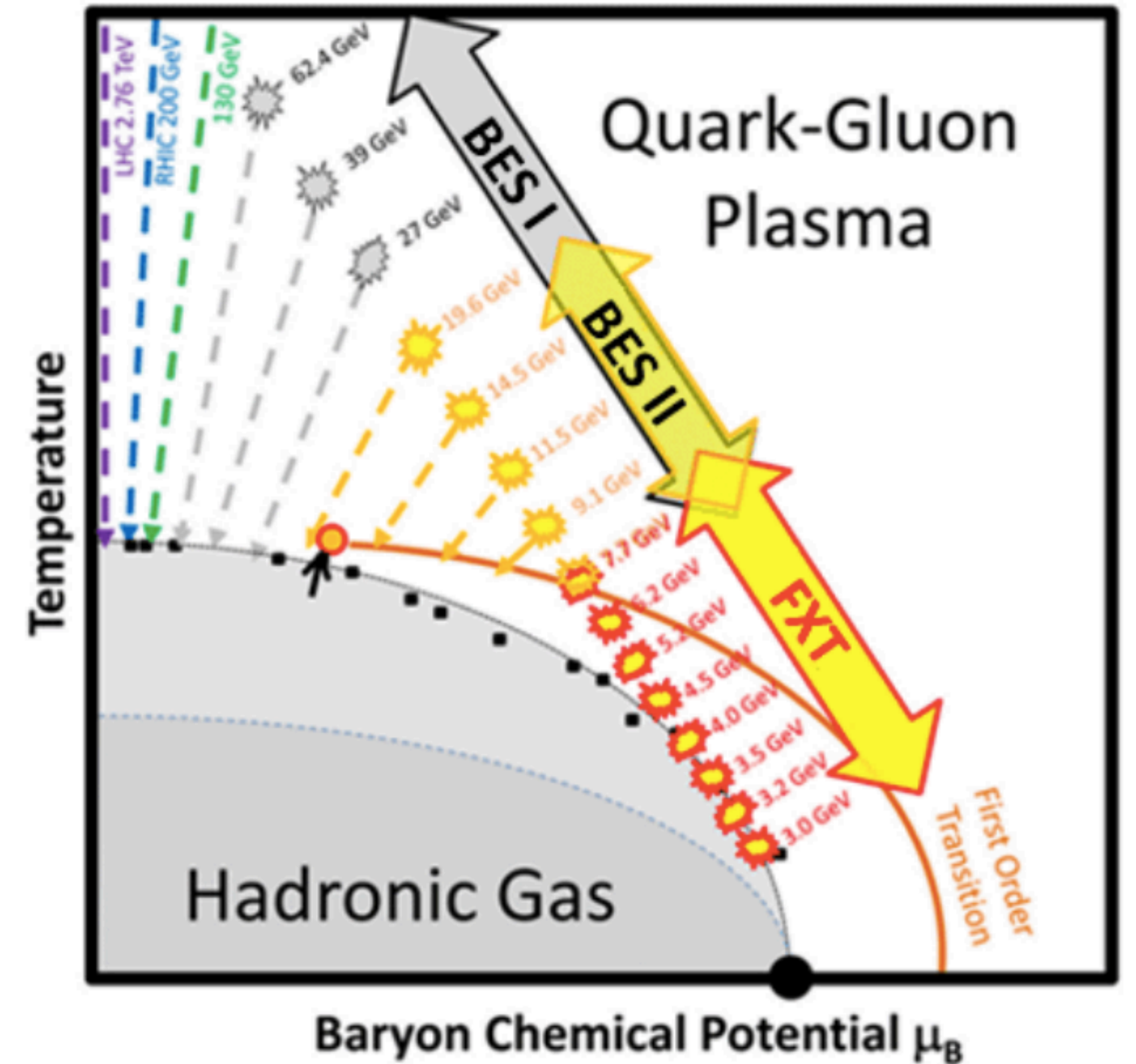
Facility	SIS18	HIAF	Nuclotron	J-PARC-HI	SIS100	NICA	RHIC	SPS	SPS
Experiment	HADES / miniCBM	CEE	BM@N	DHS, D2S	CBM / HADES	MPD	STAR	NA61	NA60+
Start	2012, 2018	2023	2019 (Au)	>2025(?)	2025	2021	2010, 2019	2009, 2022	>2025(?)
$\sqrt{s_{NN}}$ , GeV	2.4 – 2.6	1.8 – 2.7	2 – 3.5	2 – 6.2	2.7 – 5	2.7 – 11	3 – 19.6	4.9 – 17.3	4.9 – 17.3
$\mu_B$ , MeV	880 – 670	880 – 750	850 – 670	850 – 490	780 – 400	750 – 330	720 – 210	560 – 230	560 – 230
Hadrons	+	+	+	+	+	+	+	+	(+)
Dileptons	+		(+)	+	+	+	+		+
Charm				(+)	(+)	+	+	+	+

# STAR BES-II

## STAR-BESII (2019-2022)

Beam Energy (GeV/nucleon)	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	$\mu_B$ (MeV)	Run Time	Number Events
9.8	19.6	205	4.5 weeks	400M
7.3	14.5	260	5.5 weeks	300M
5.75	11.5	315	5 weeks	230M
4.55	9.1	370	9.5 weeks	160M
3.85	7.7	420	12 weeks	100M
31.2	7.7 (FXT)	420	2 days	100M
19.5	6.2 (FXT)	487	2 days	100M
13.5	5.2 (FXT)	541	2 days	100M
9.8	4.5 (FXT)	589	2 days	100M
7.3	3.9 (FXT)	633	2 days	100M
5.75	3.5 (FXT)	666	2 days	100M
4.55	3.2 (FXT)	699	2 days	100M
3.85	3.0 (FXT)	721	2 days	100M

BES1  
(M eve)  
36  
20  
12  
0.3  
4



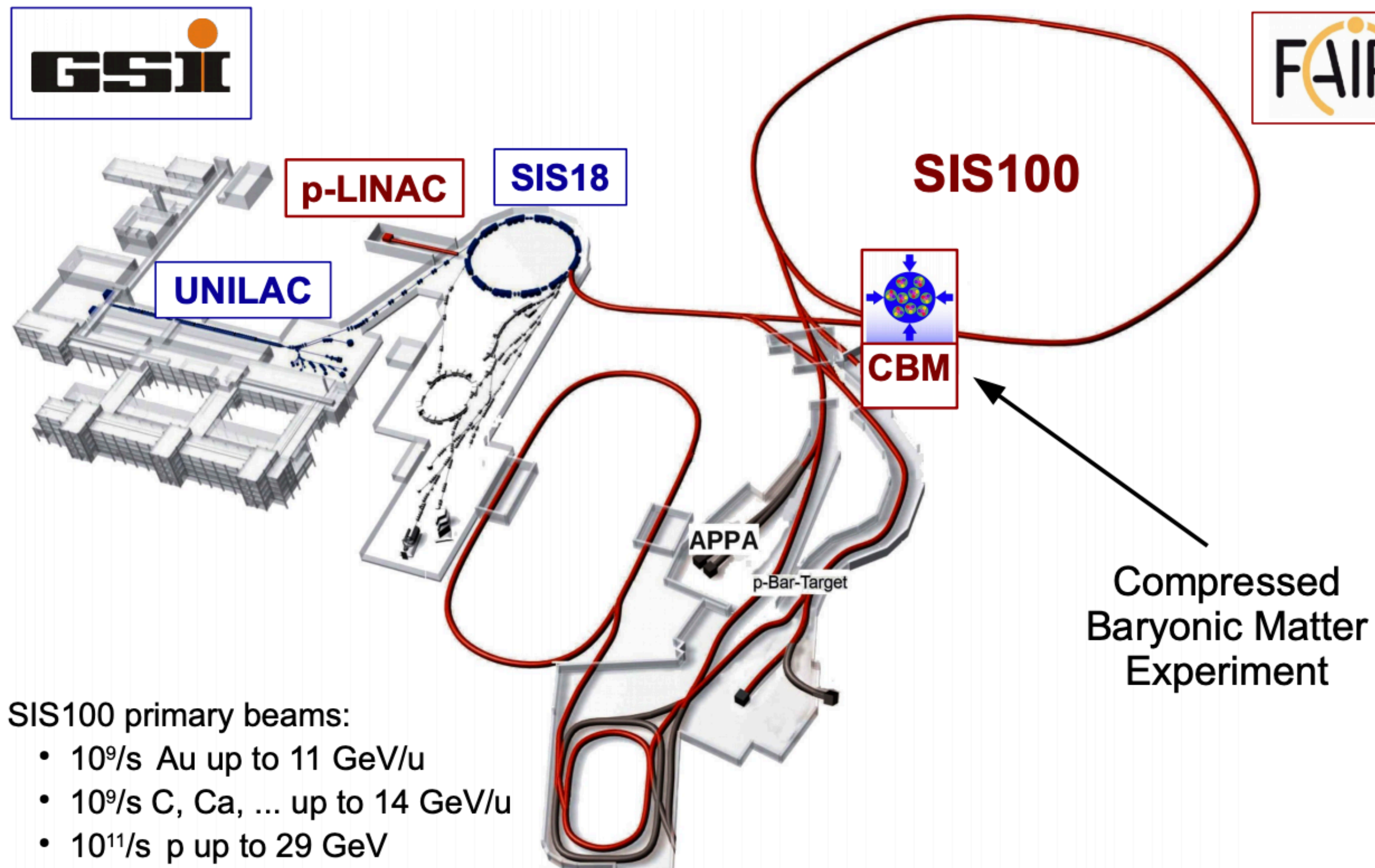
BES-Iの10倍以上の高統計が期待



# FAIR-CBM

Current schedule landmarks:

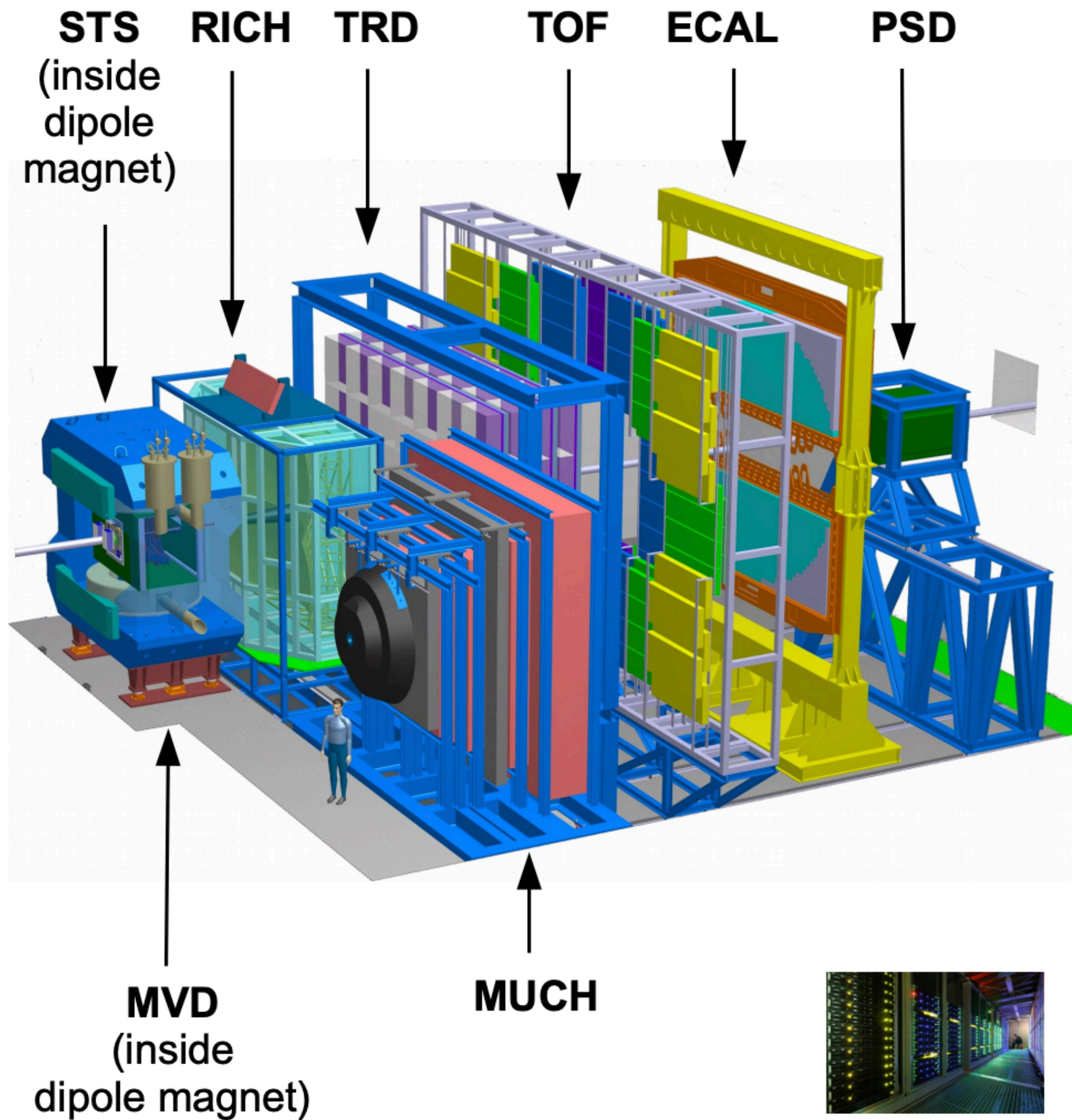
- 2017 Start of excavation
- 2018 Finished SIS18 tunnel upgrade
- 2022 CBM cave ready
- 2025 SIS100 commissioning with beams**





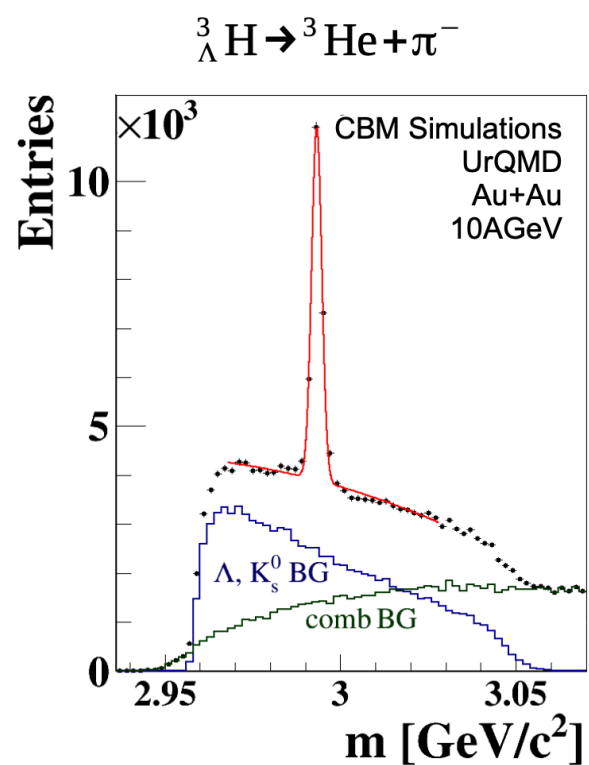
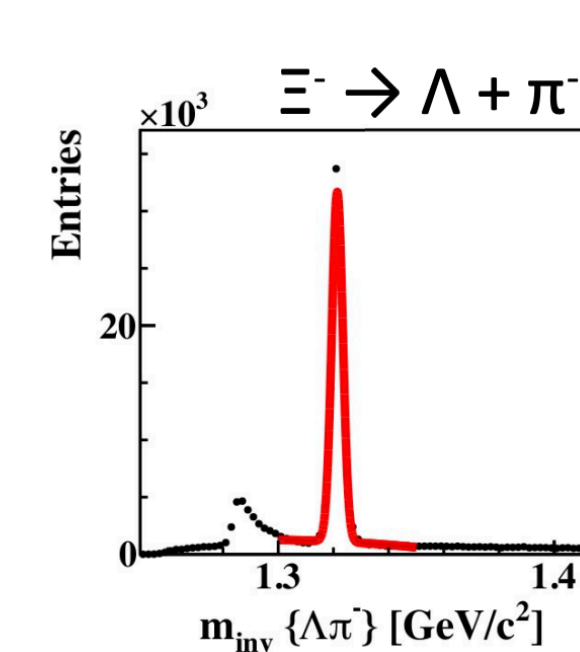
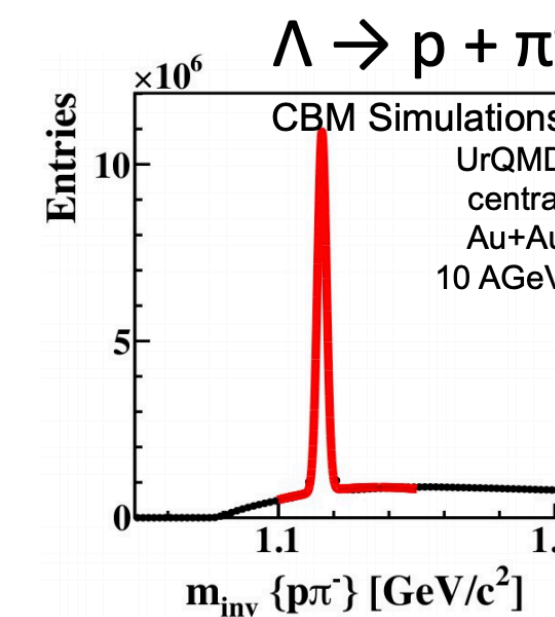
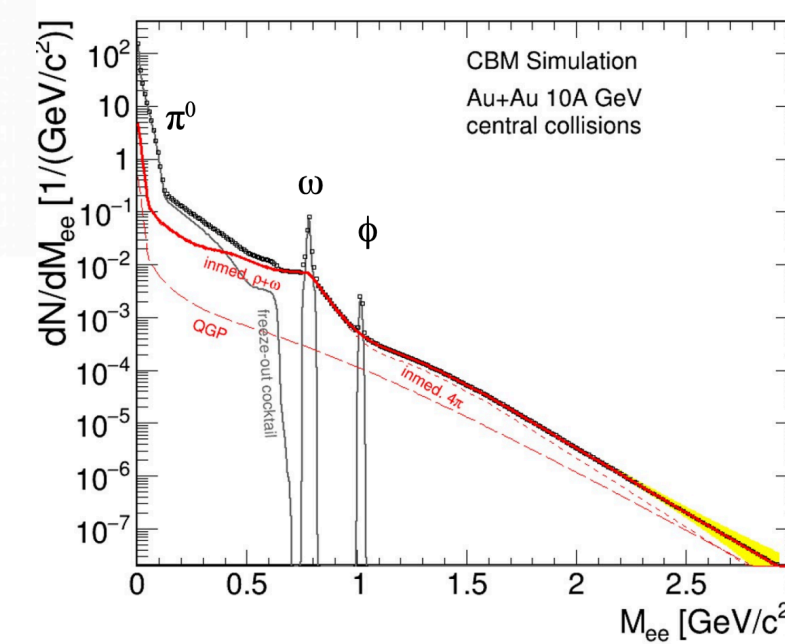
# FAIR-CBM

## 高レート実験(BES-IIの1000倍)



- Fixed-target (ions, p) beams
- Acceptance  $2^\circ < \theta < 25^\circ$
- Compact tracking with silicon, 1 Tm dipole field
- RICH/TRD behind tracking

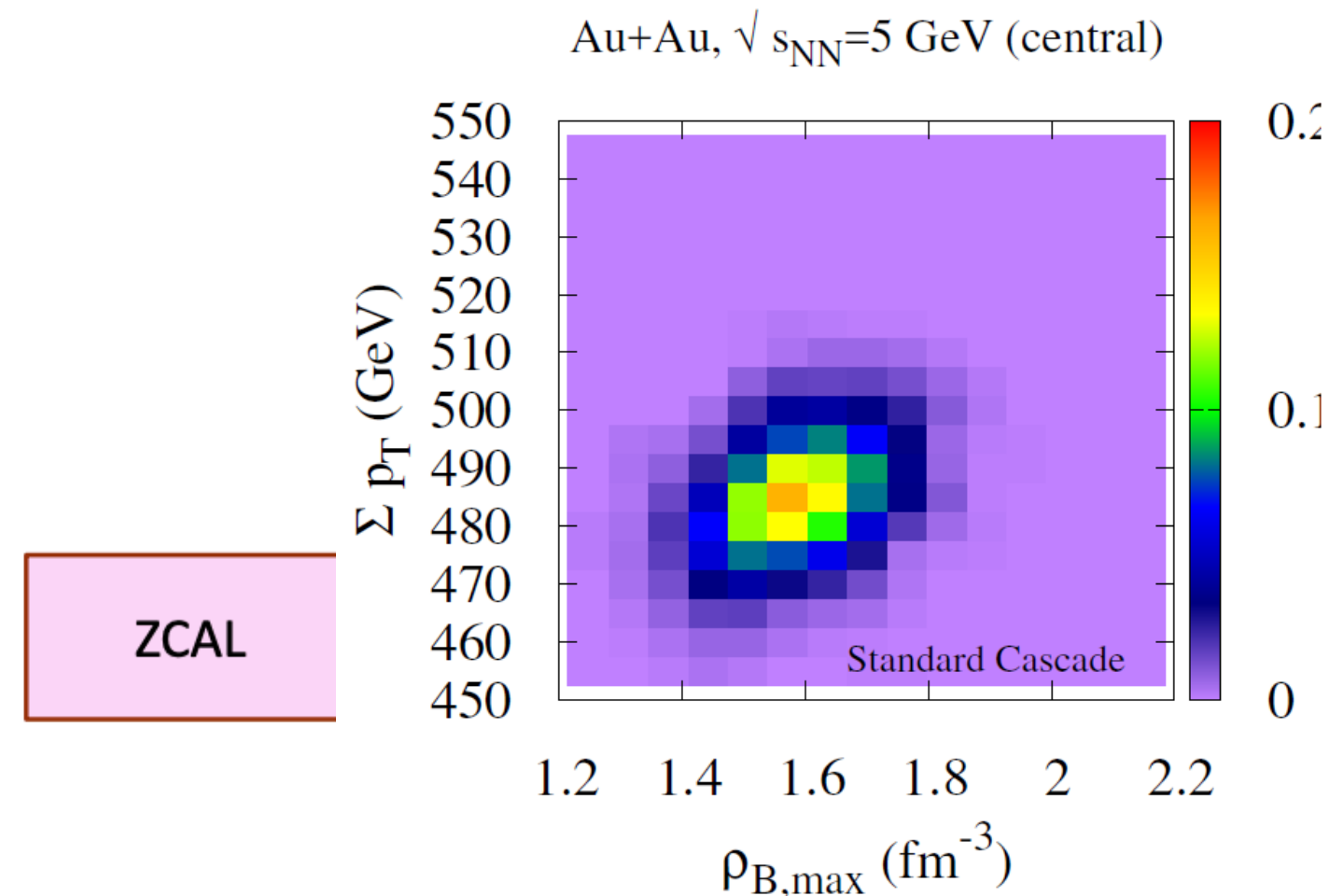
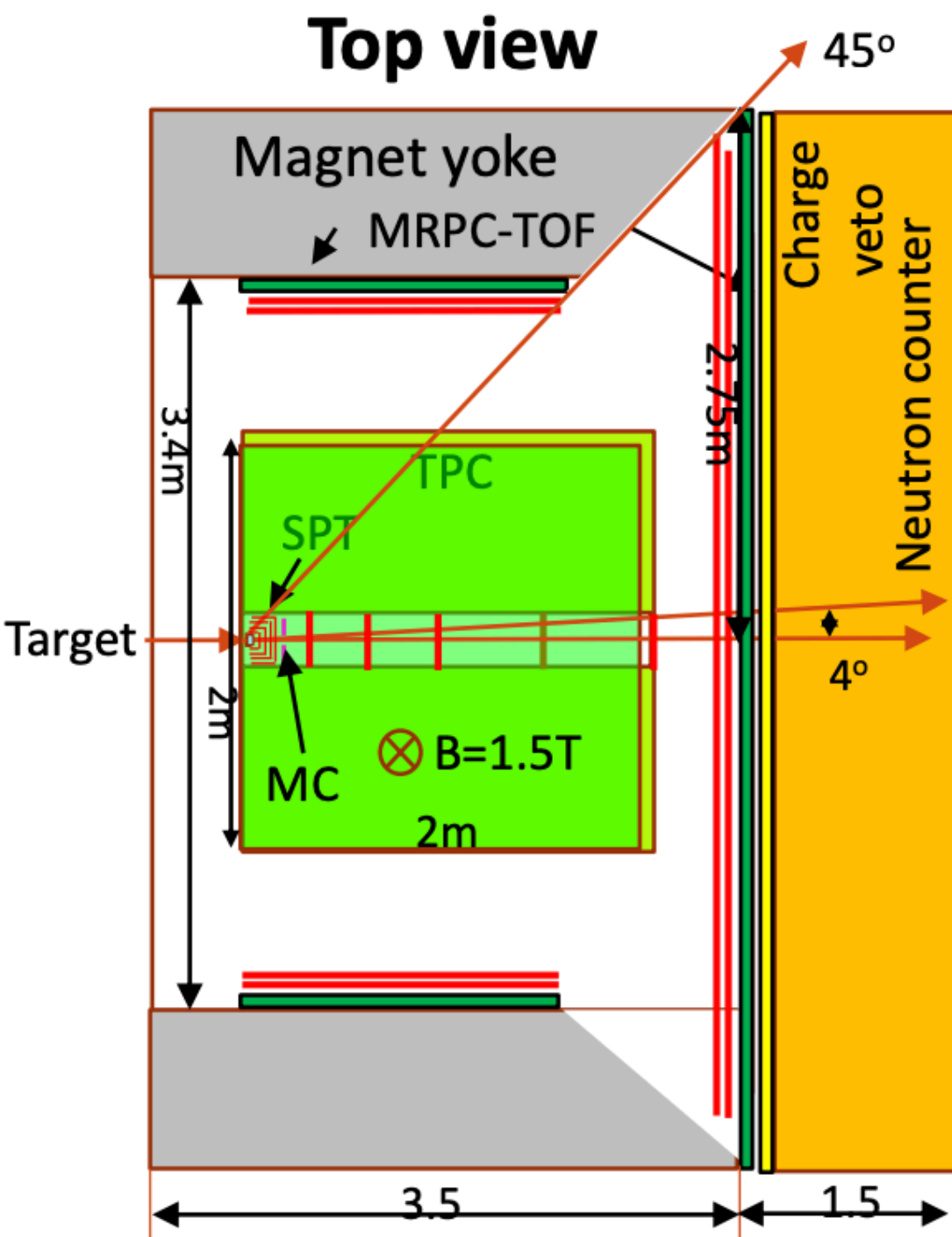
- Designed for  $\sqrt{s_{NN}} \sim 7.7$  GeV
- Dead-time free FEE
- Rate: 0.1 – 10 MHz (Au+Au)
- Software based event selection, 4D tracking



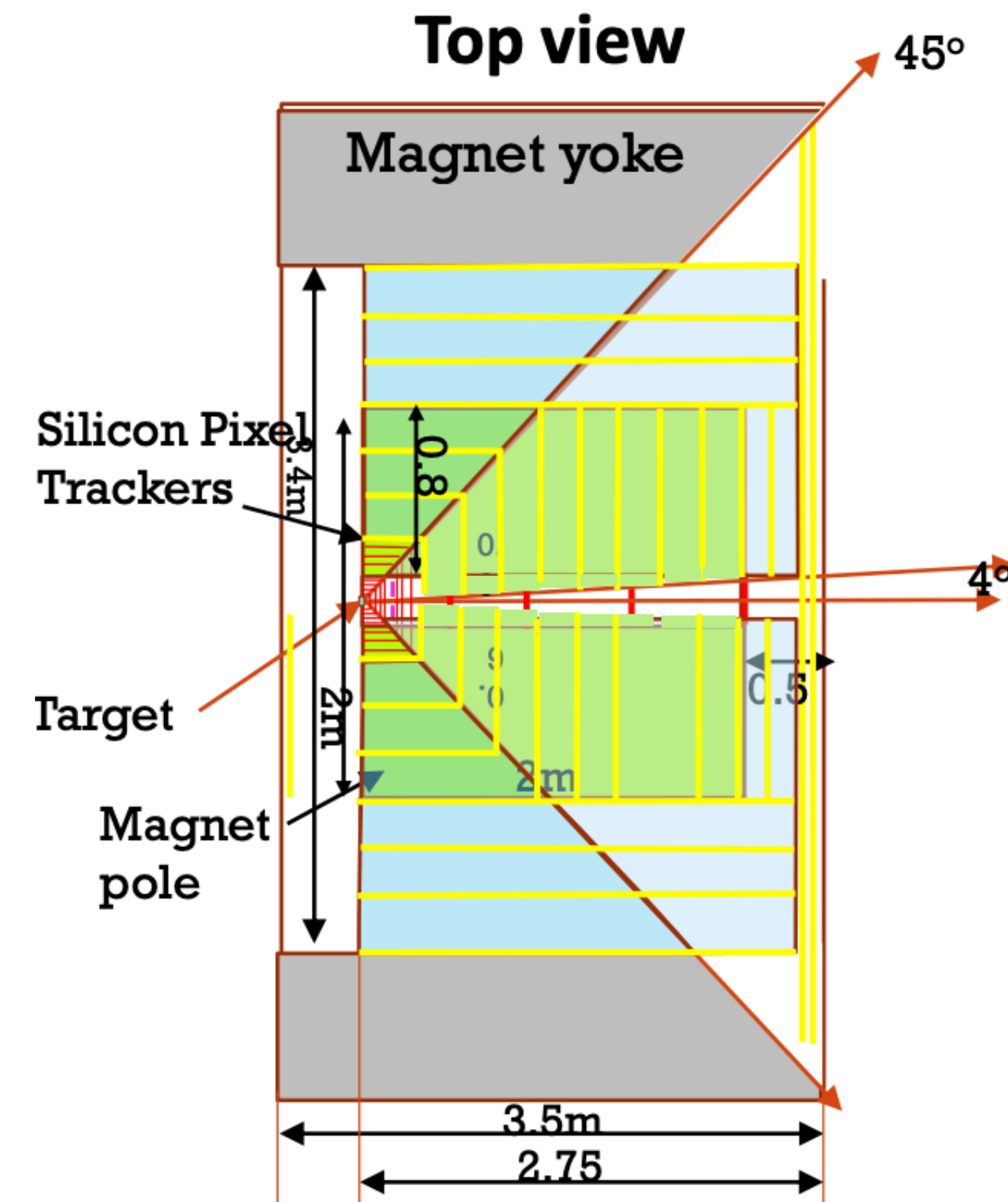
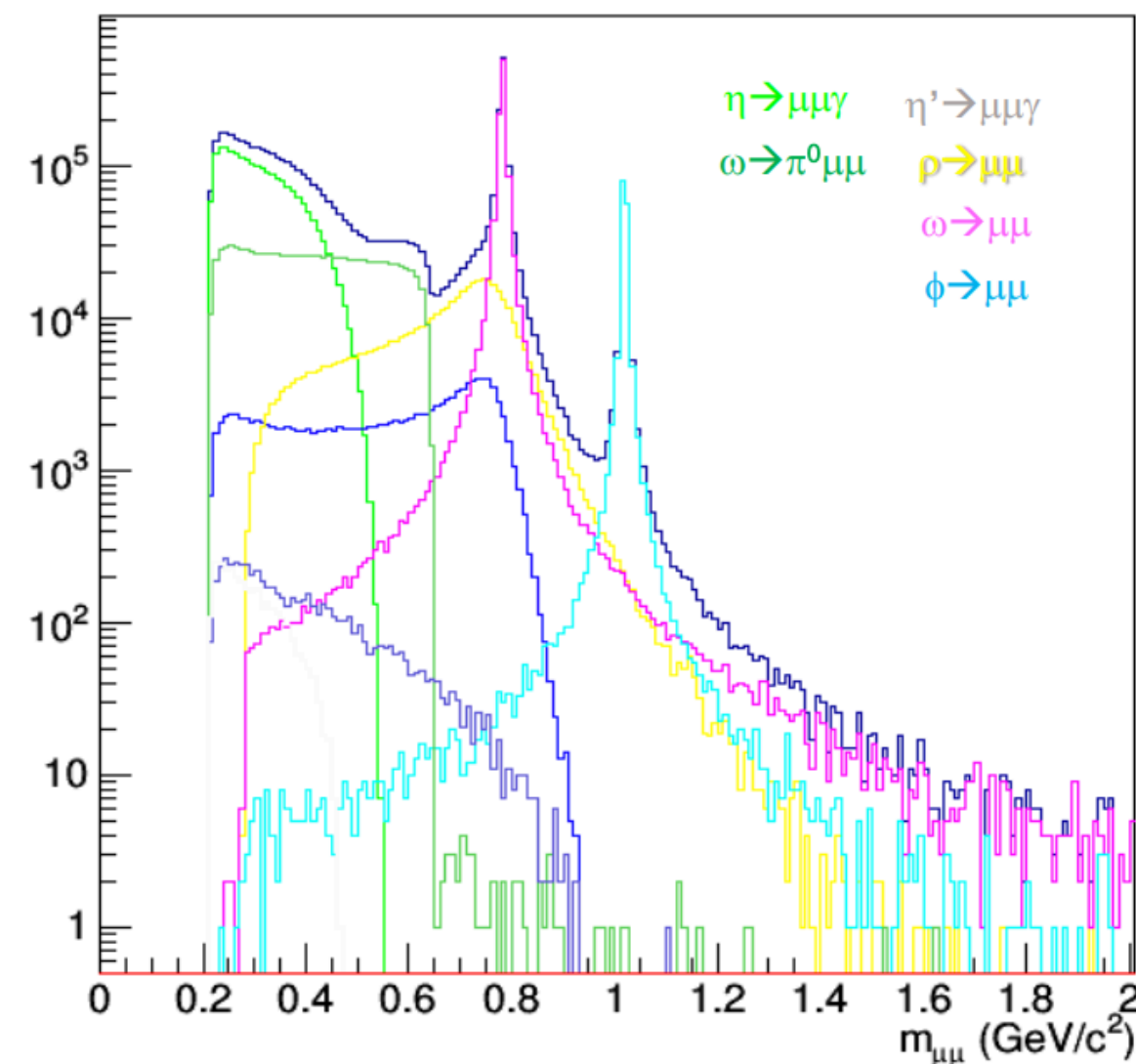


# J-PARC-HI

高レート実験  
(BES-IIの1000倍)

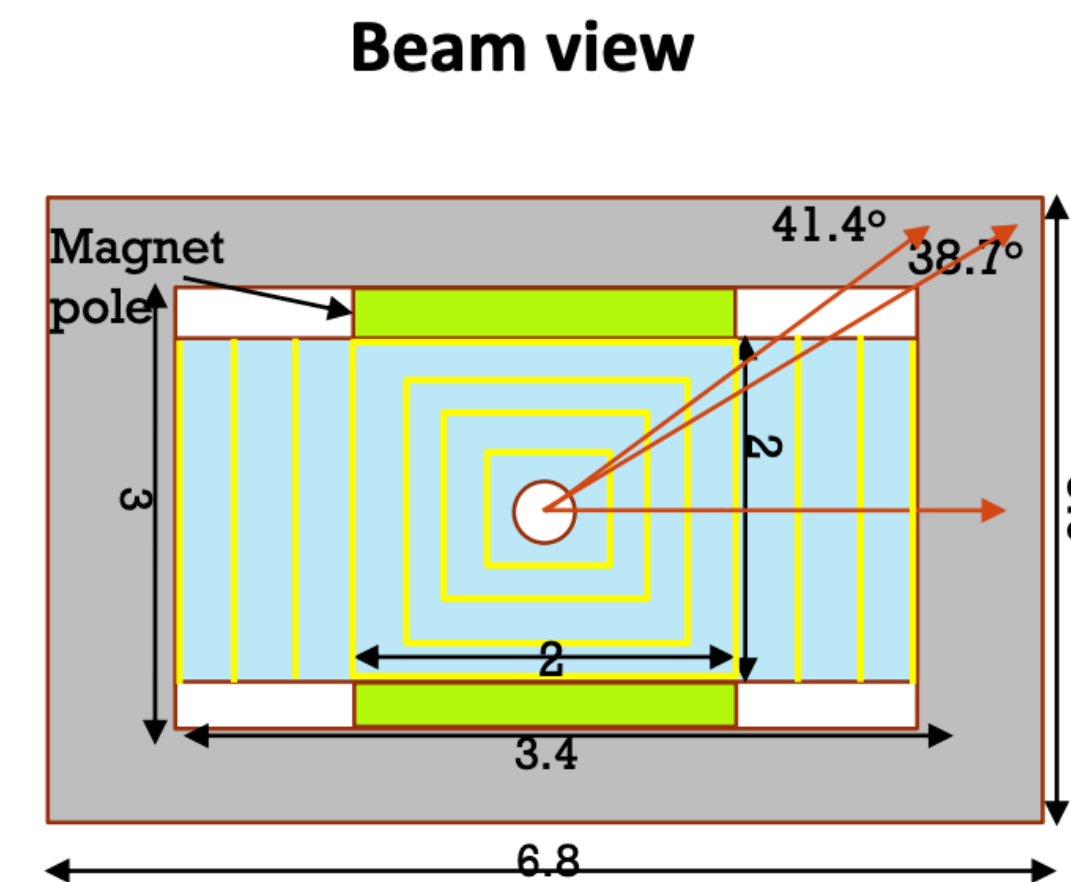
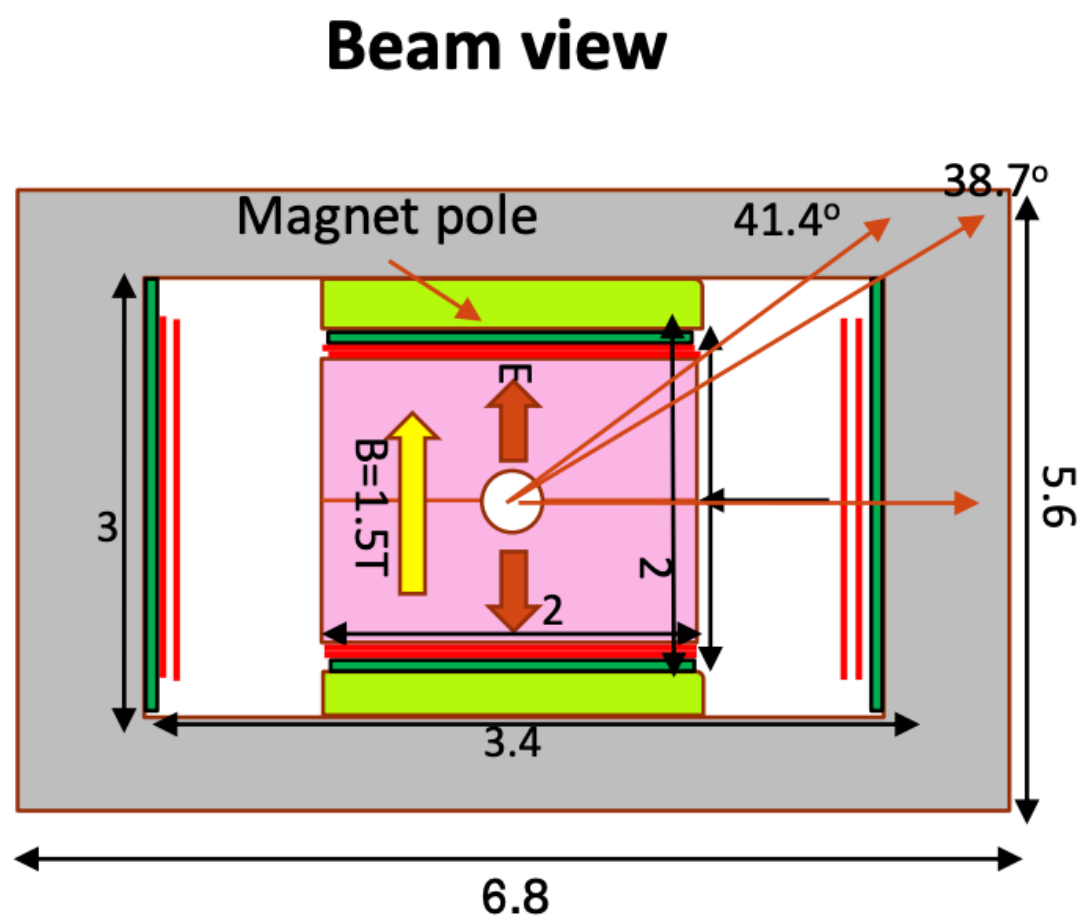
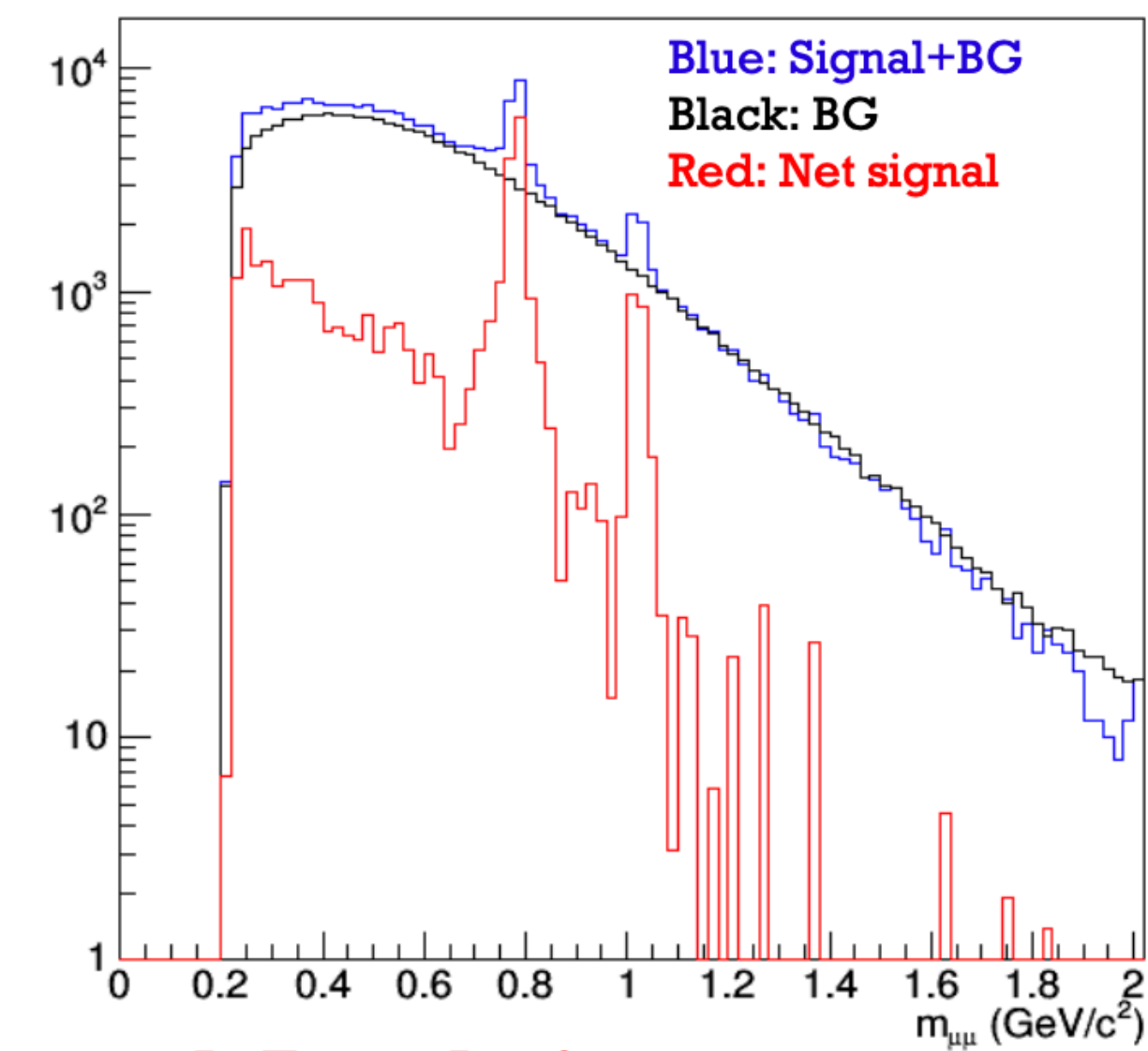


$\theta_{ee} > 2^\circ, 2^\circ < \theta < 80^\circ, p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$   
Generated cocktail



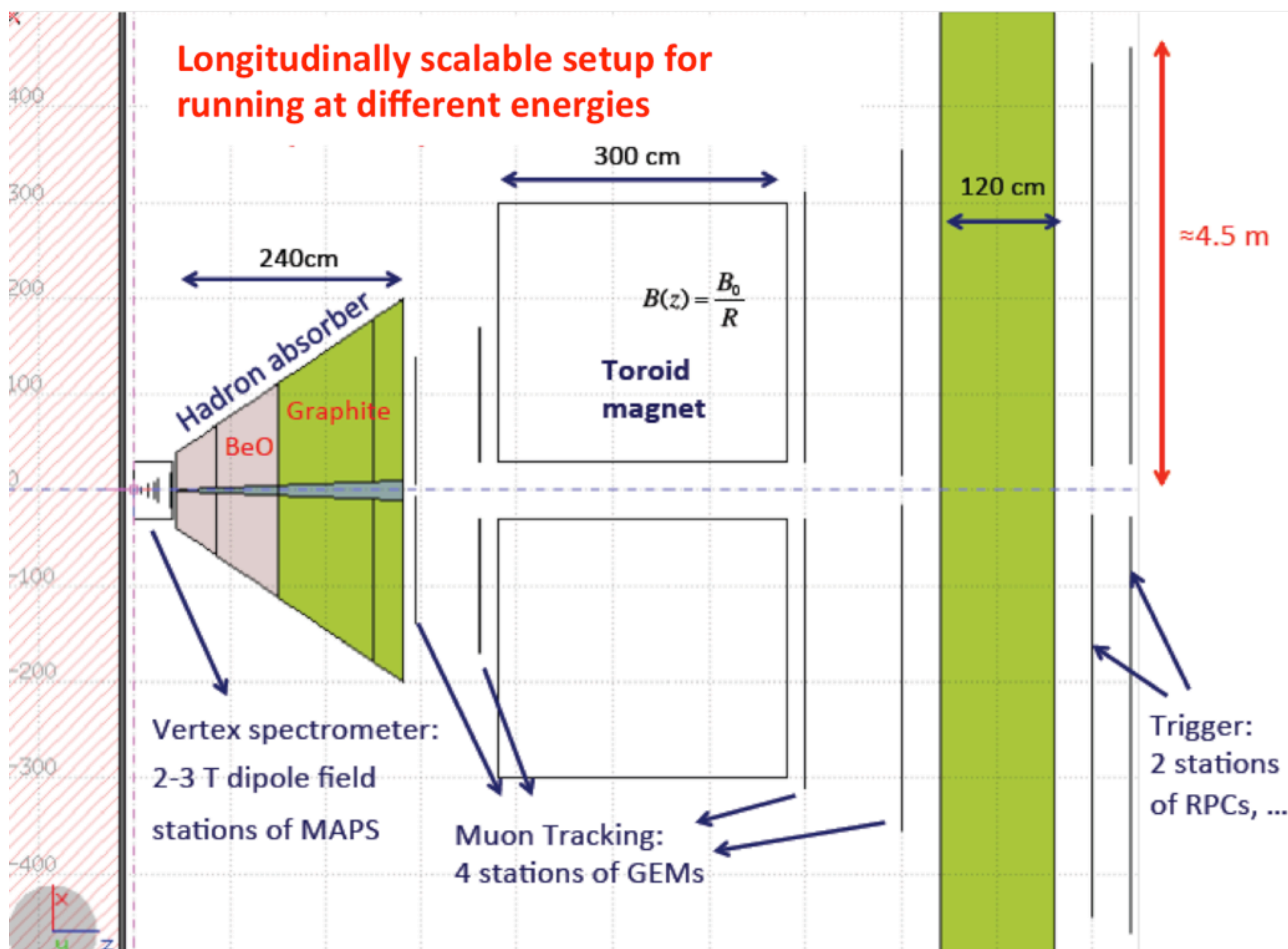
ZCAL

U+U  $\sqrt{s_{NN}}=4.5 \text{ GeV}$ , Min-bias (54k)  
Reconstructed spectrum



# NA60+

## Conceptual design level



### Objective:

- Precision measurements of dimuon production via a beam energy scan ( $\sqrt{s_{NN}} \sim 4.5 - 17.3$  GeV)

### Strategy:

- Muon measurement with tracking in front of and behind hadron absorber
  - Vertex spectrometer: MAPS
  - Hadron absorber (BeO-Graphite sections)
  - $\mu$  spectrometer: GEM ( $\sim 200$   $\mu$ m space resolution)
  - Toroid magnet (BL=0.75 Tm at  $r = 1$  m)
- Online dimuon trigger

### Statistics goal:

- $5 \times 10^7$  reconstructed pairs from thermal radiation
- $2 \times 10^4$  reconstructed  $J/\psi$  (larger for open charm)
- Energy scan 17.3-8.8-6.3 GeV (down to 4.5 GeV – SIS100 upper limit),  $\sim$  few weeks run / energy
- Beam intensity  $> 10^7$  ions/s



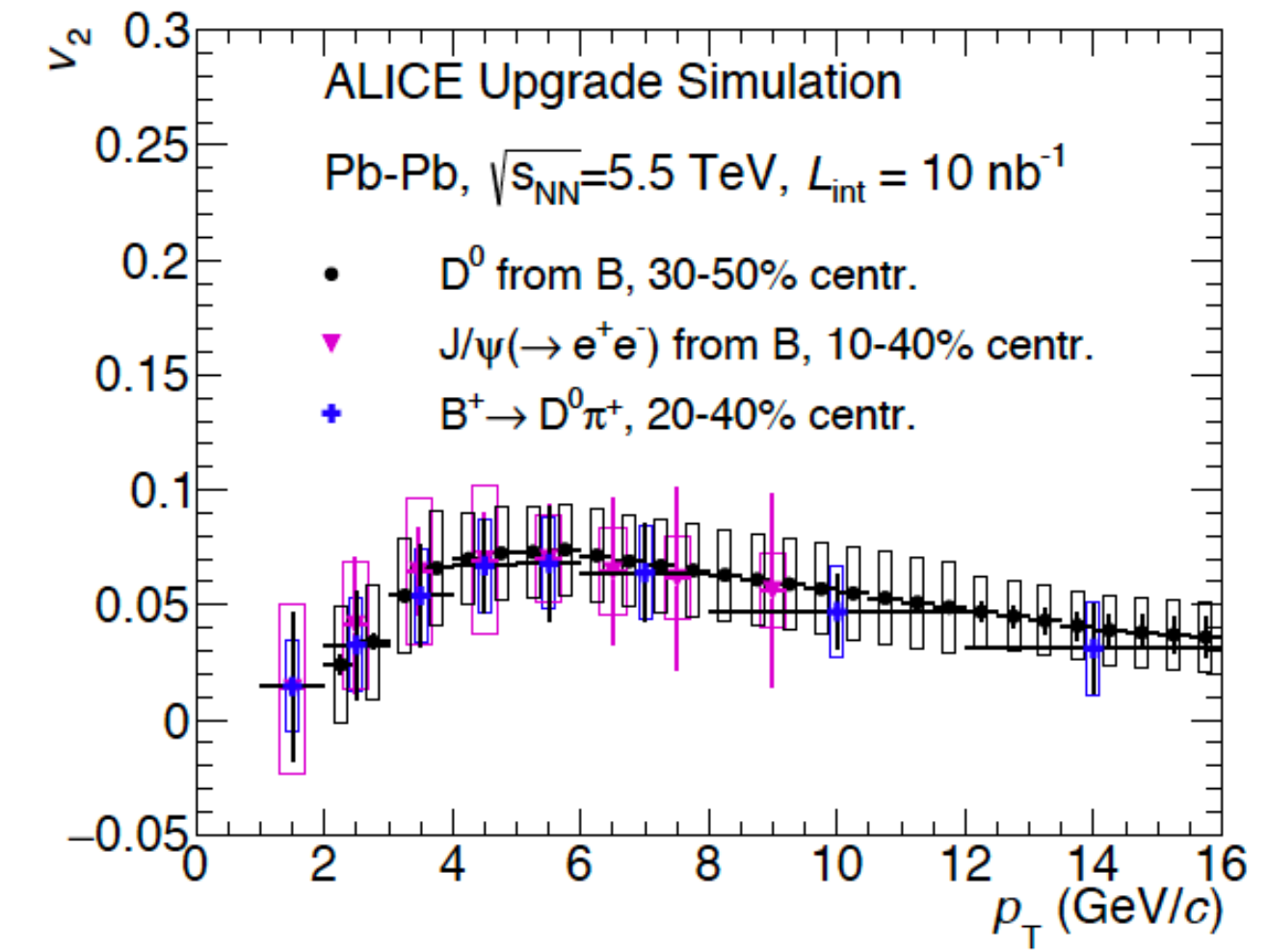
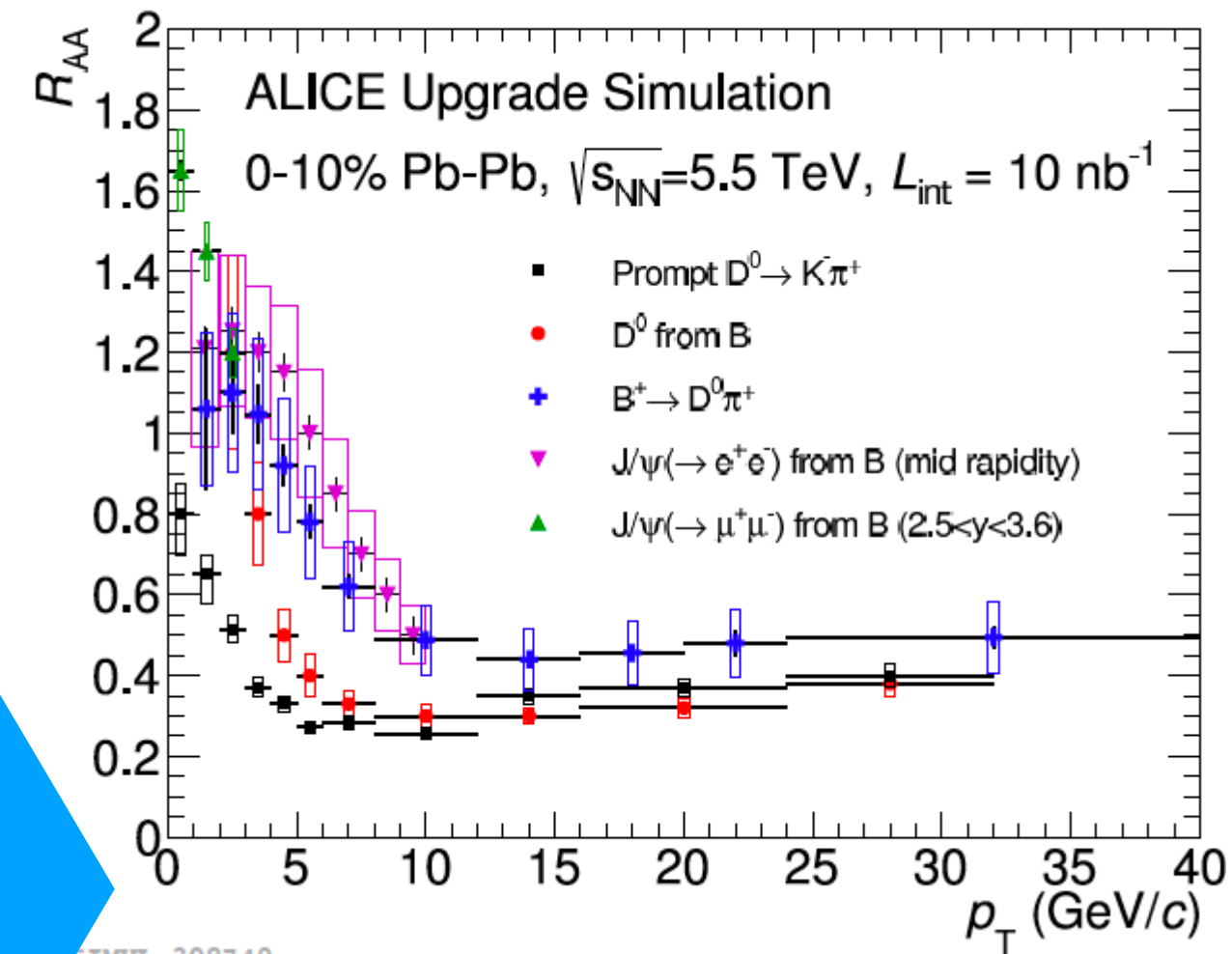
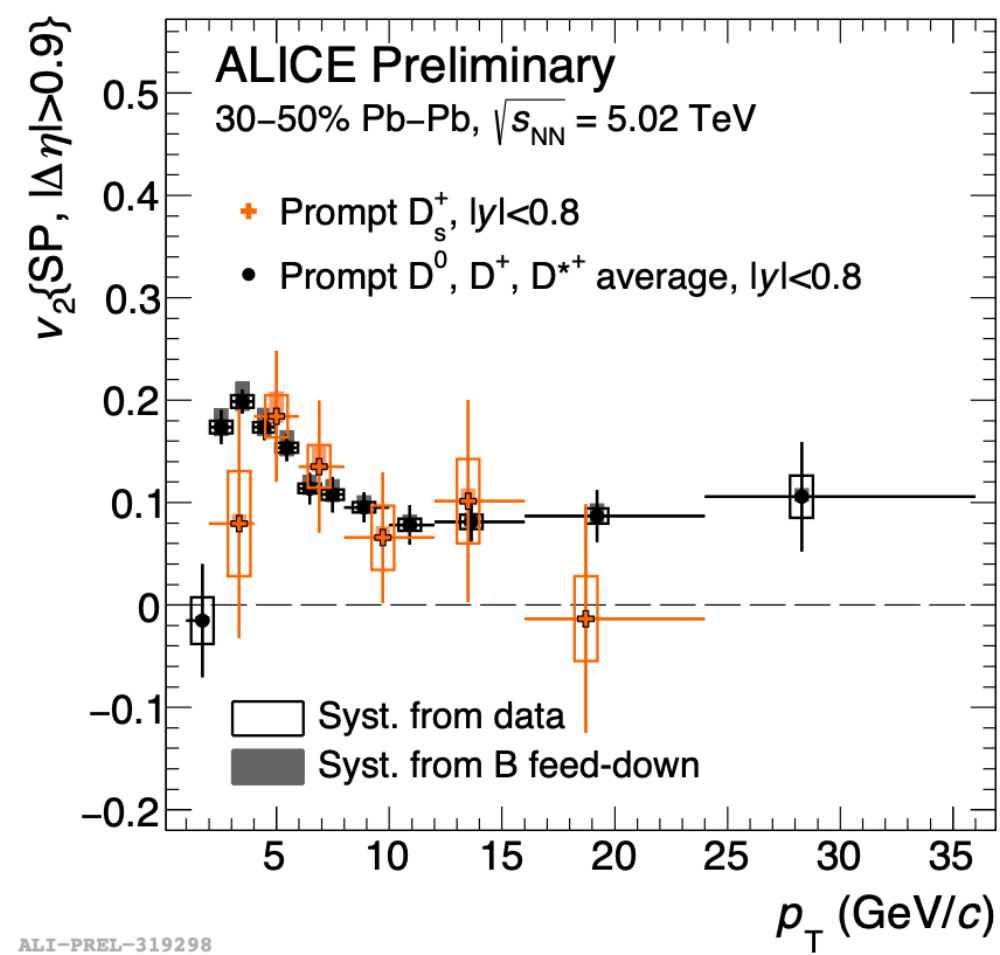
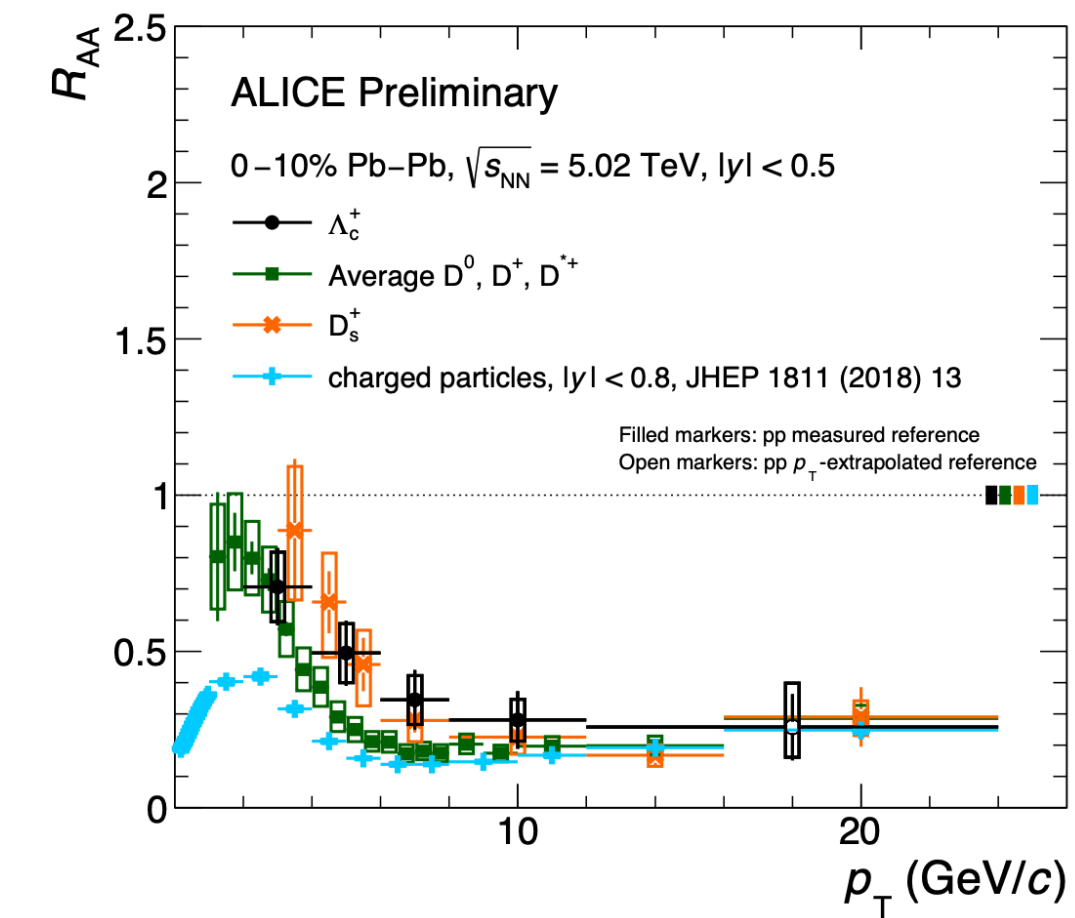
これらの実験では

どんな新しい測定が可能になるのか？

何が明らかになるのか？

# 低運動量重クォーク

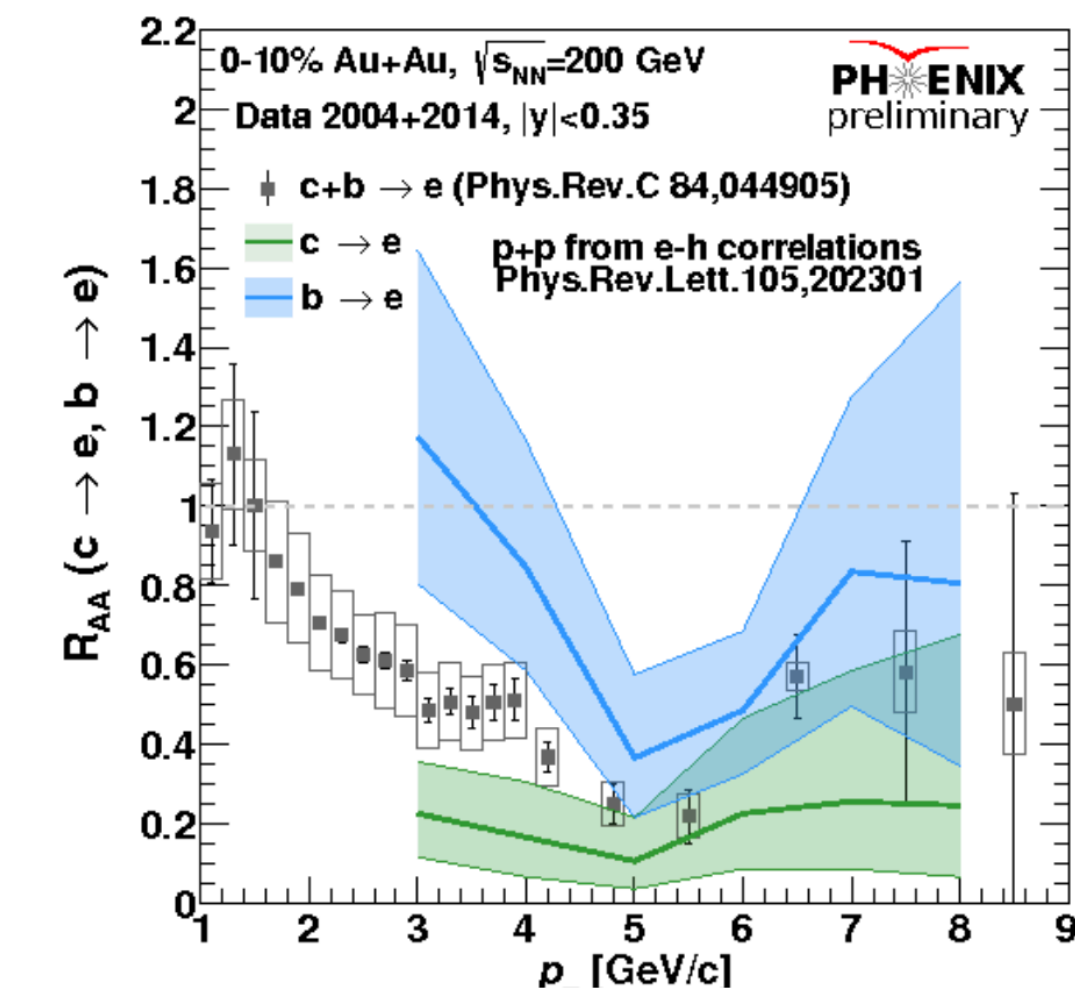
ALICE upgrade, sPHENIX



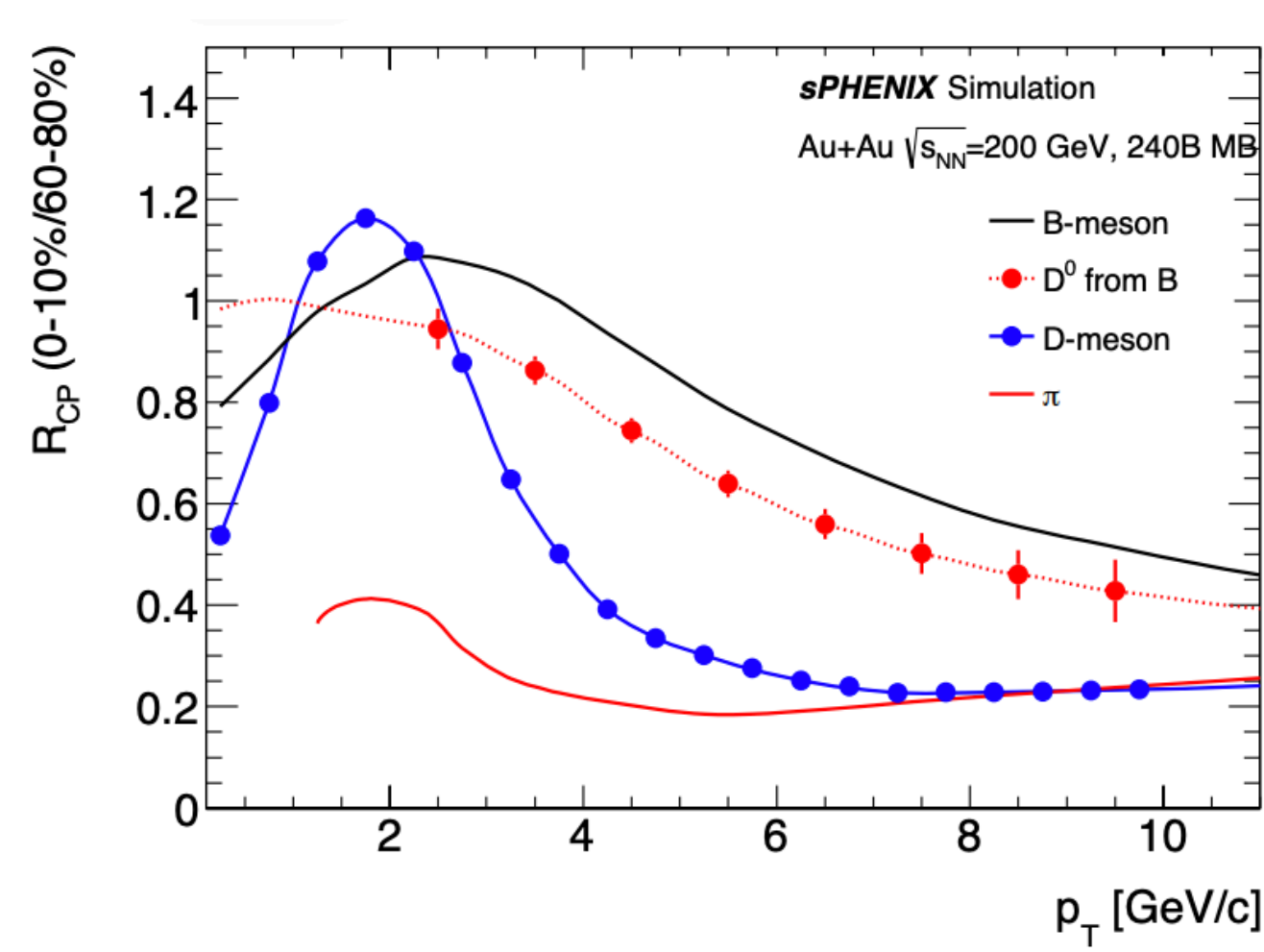
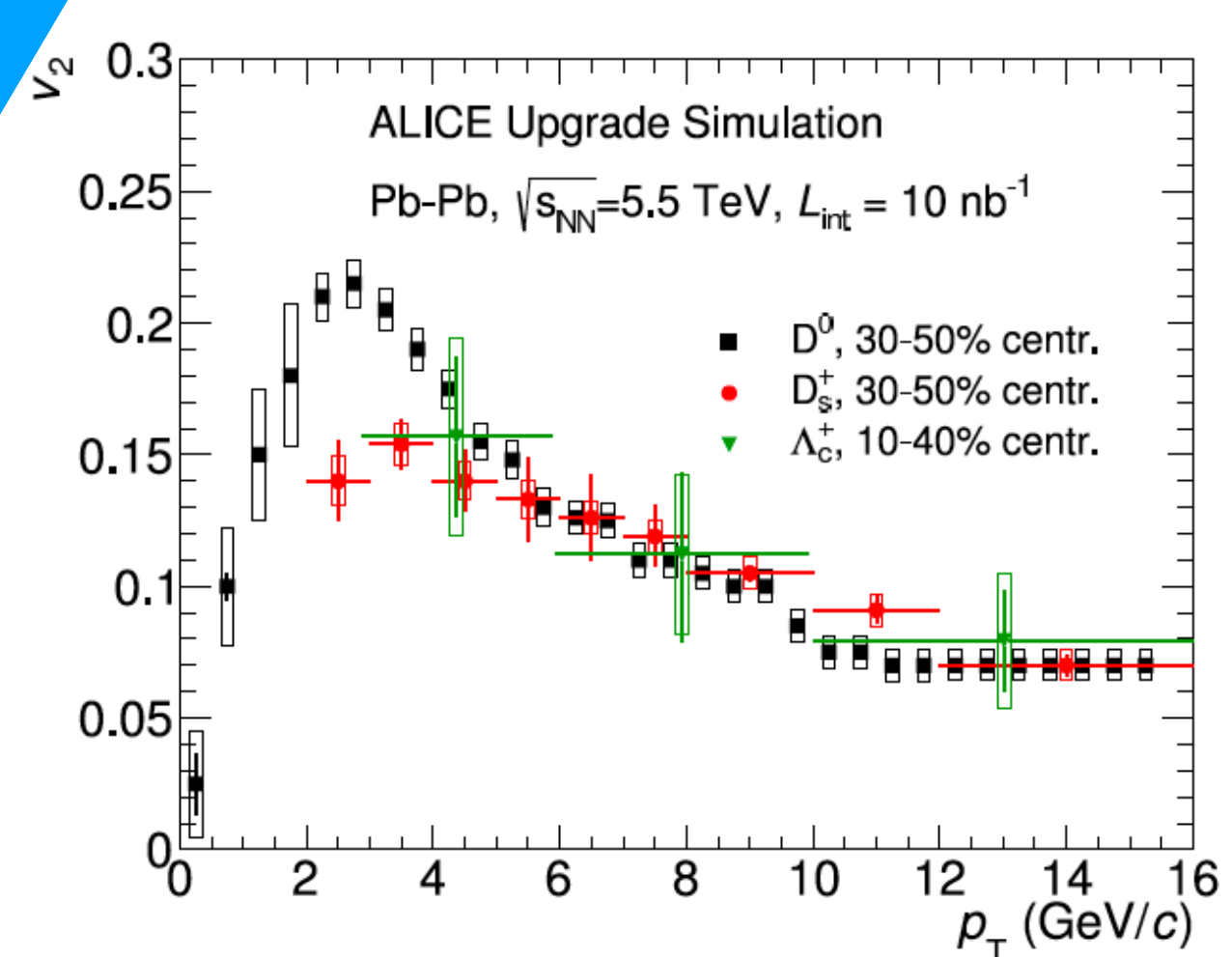
ALI-PREL-321872

ALI-PREL-319298

ALICE Upgrade Simulation  
SIMUL-308749



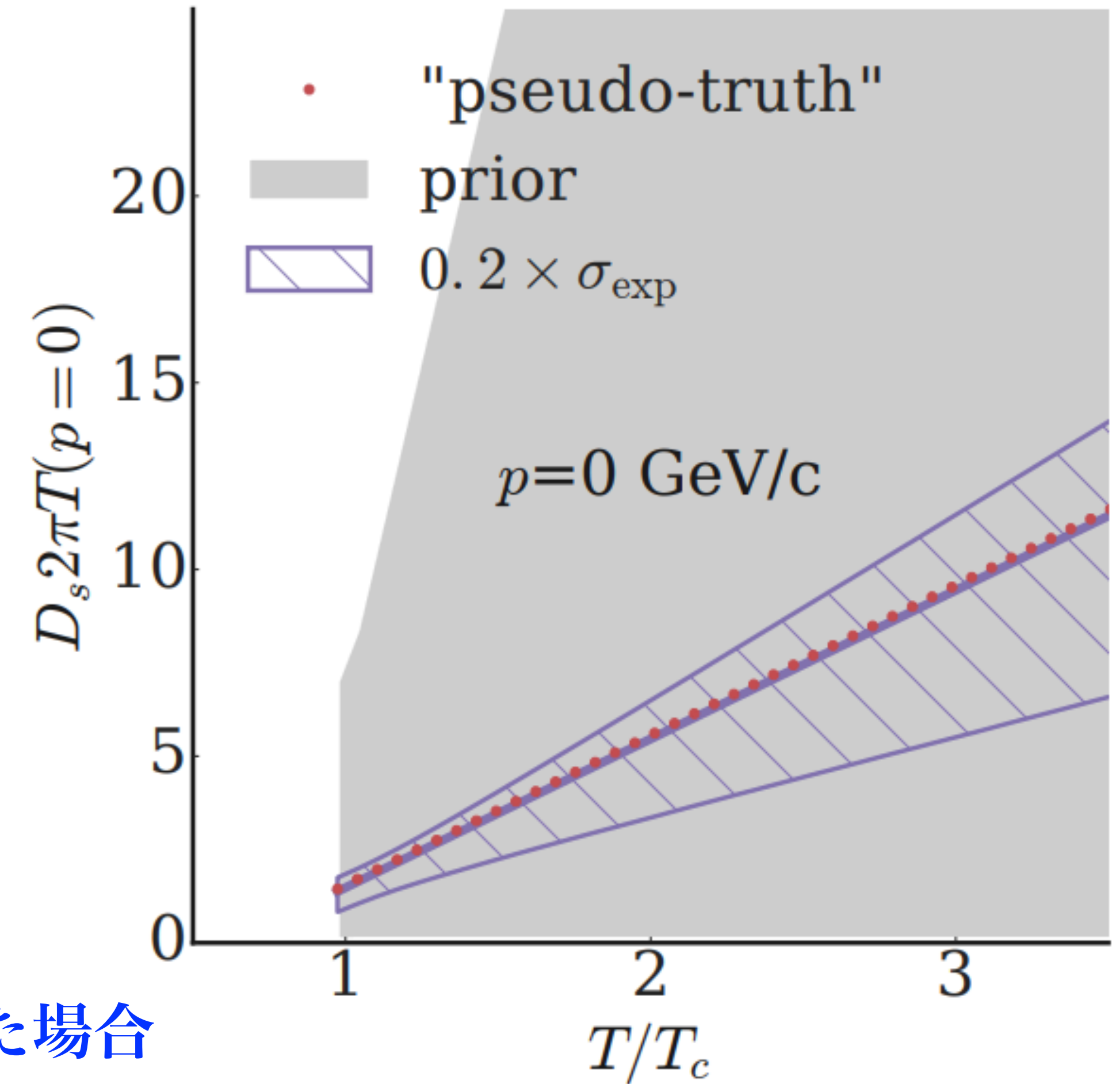
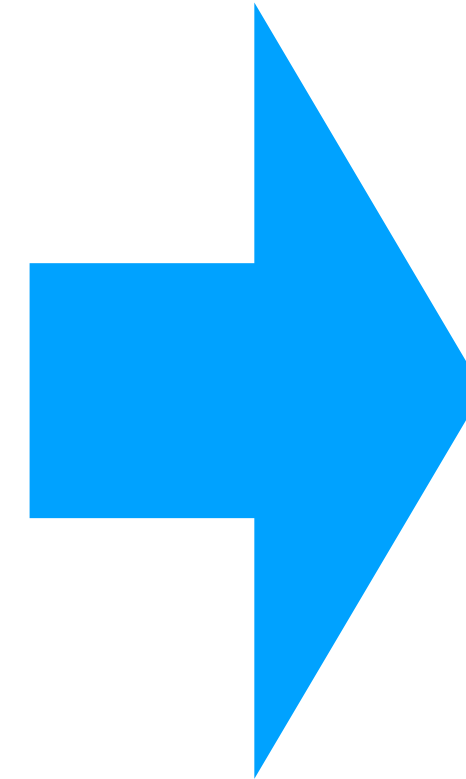
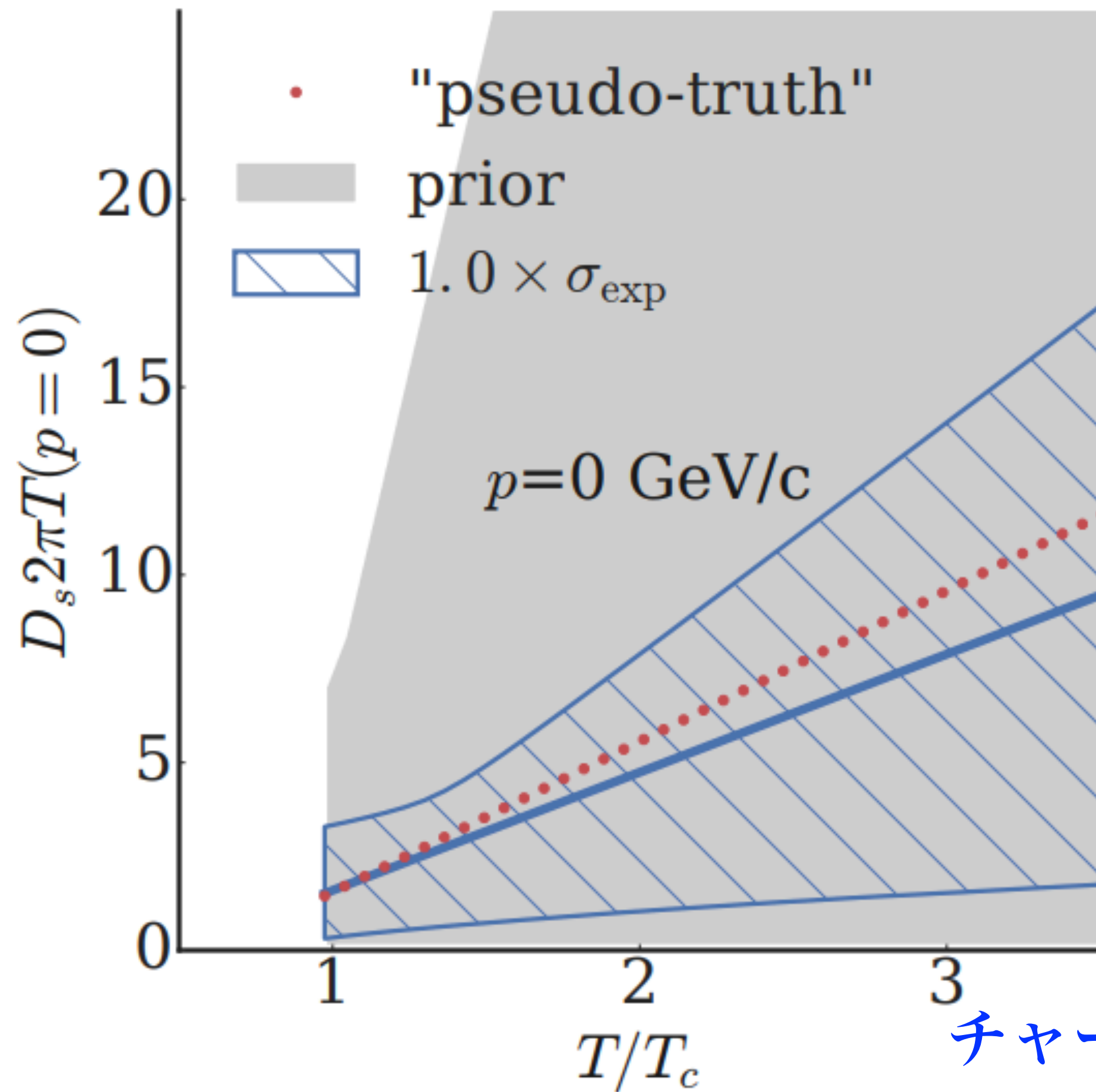
低運動量領域で  
チャームの高精度測定  
ボトムハドロン初測定  
→ 拡散係数の精密化





# 拡散係数

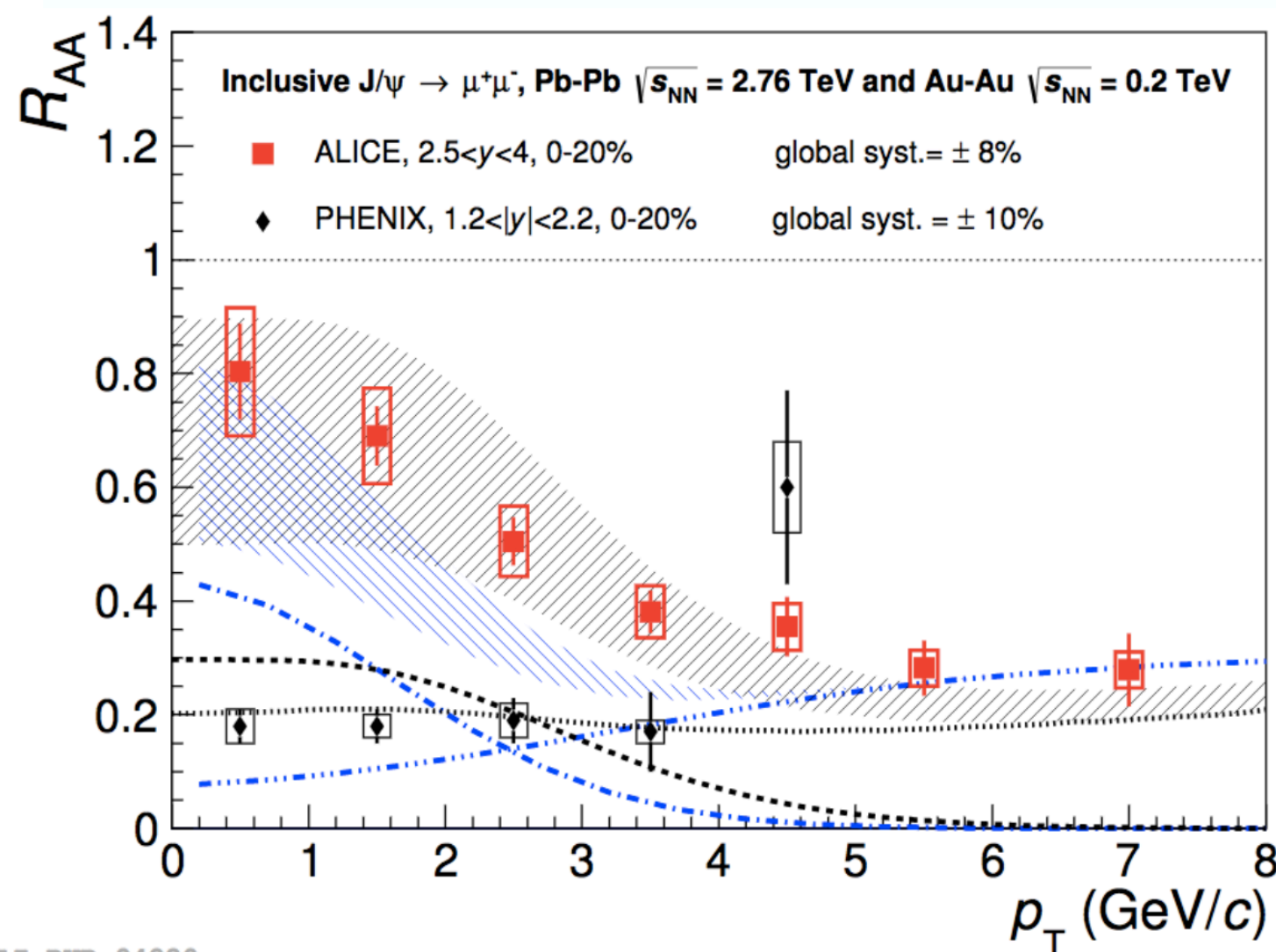
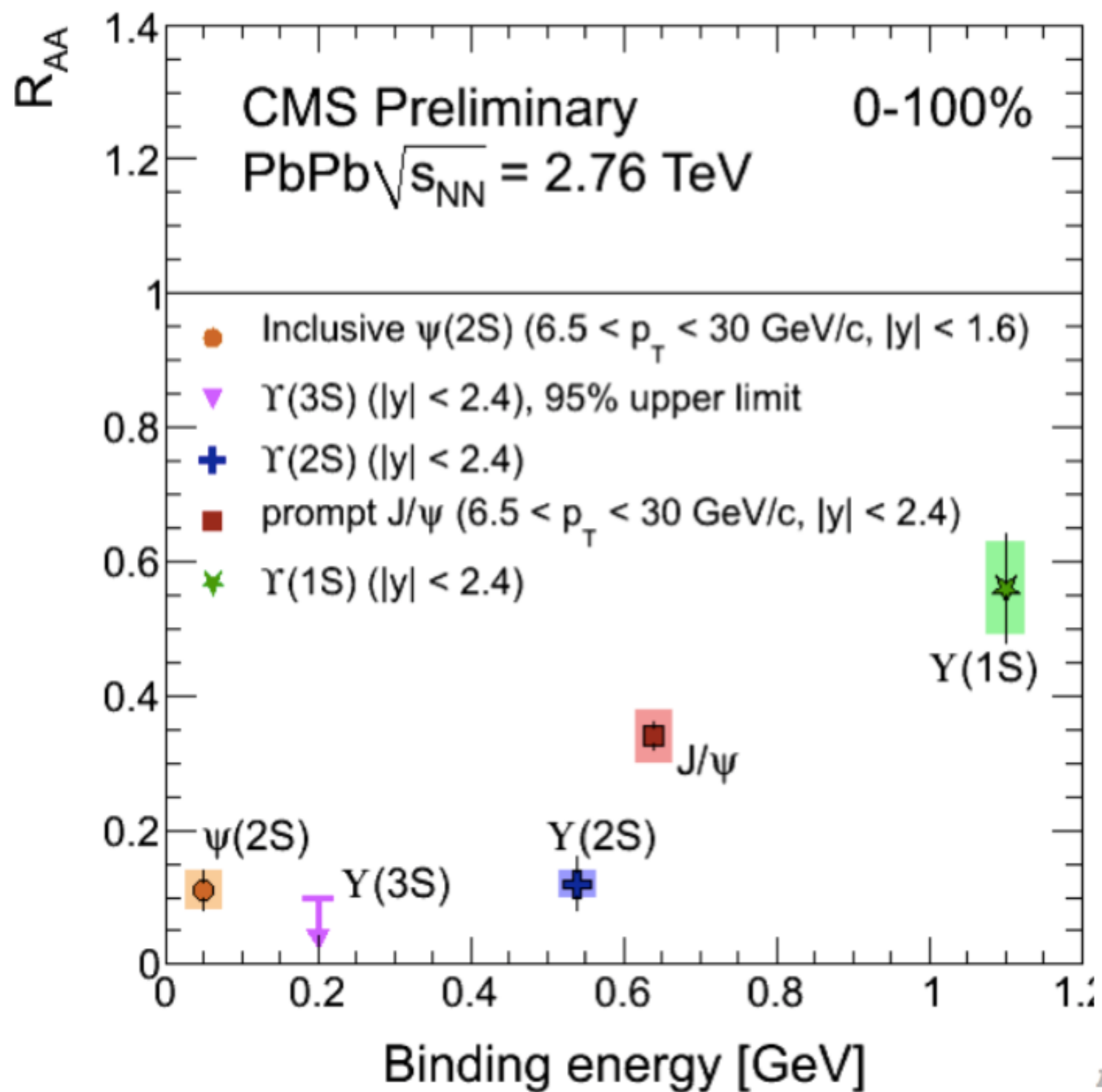
S. Bass, WG5 meeting, 6.3.2018



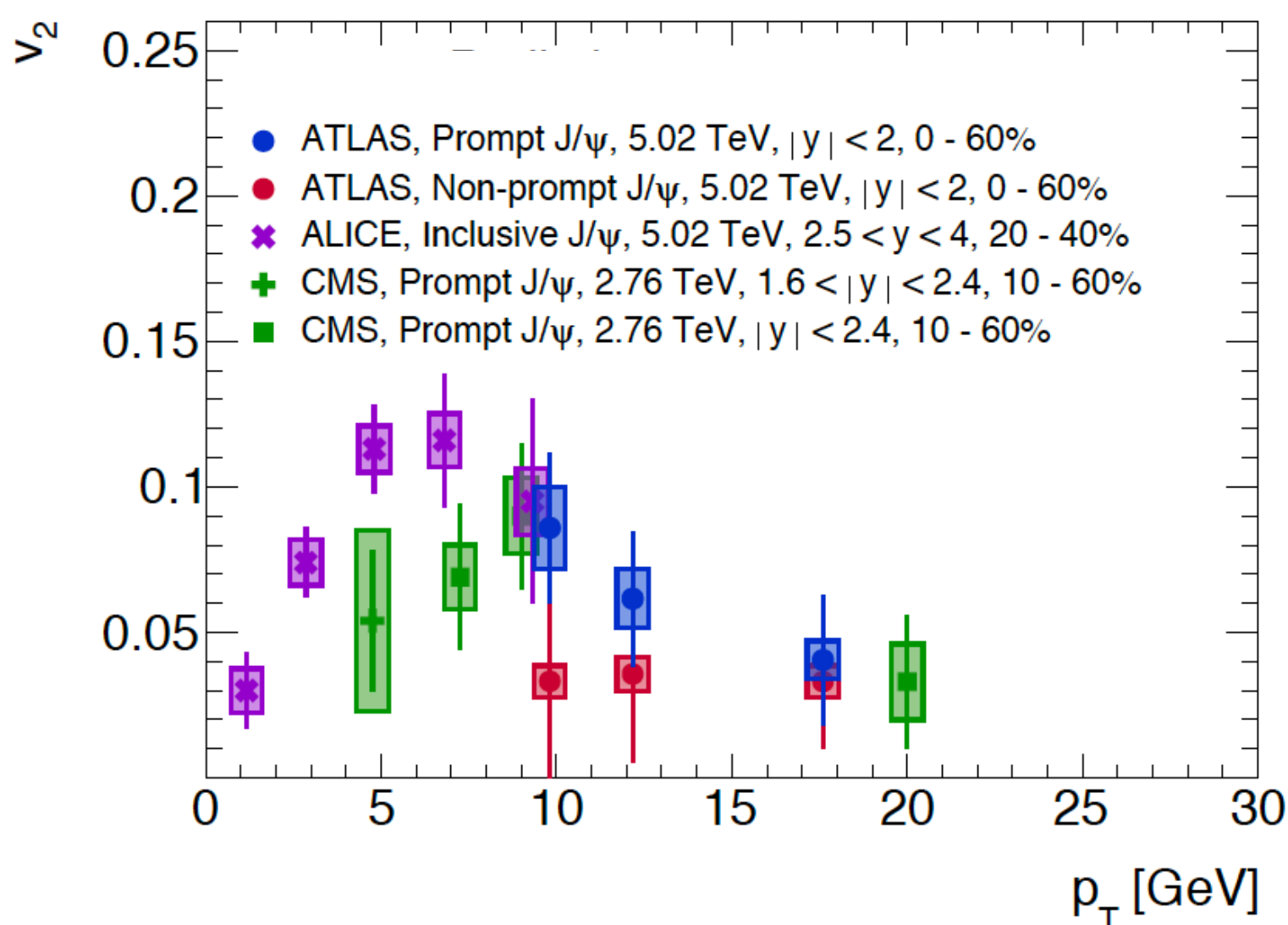
チャームのみを使った場合  
ボトムを使うともっと制限できるか？

# クォーコニア

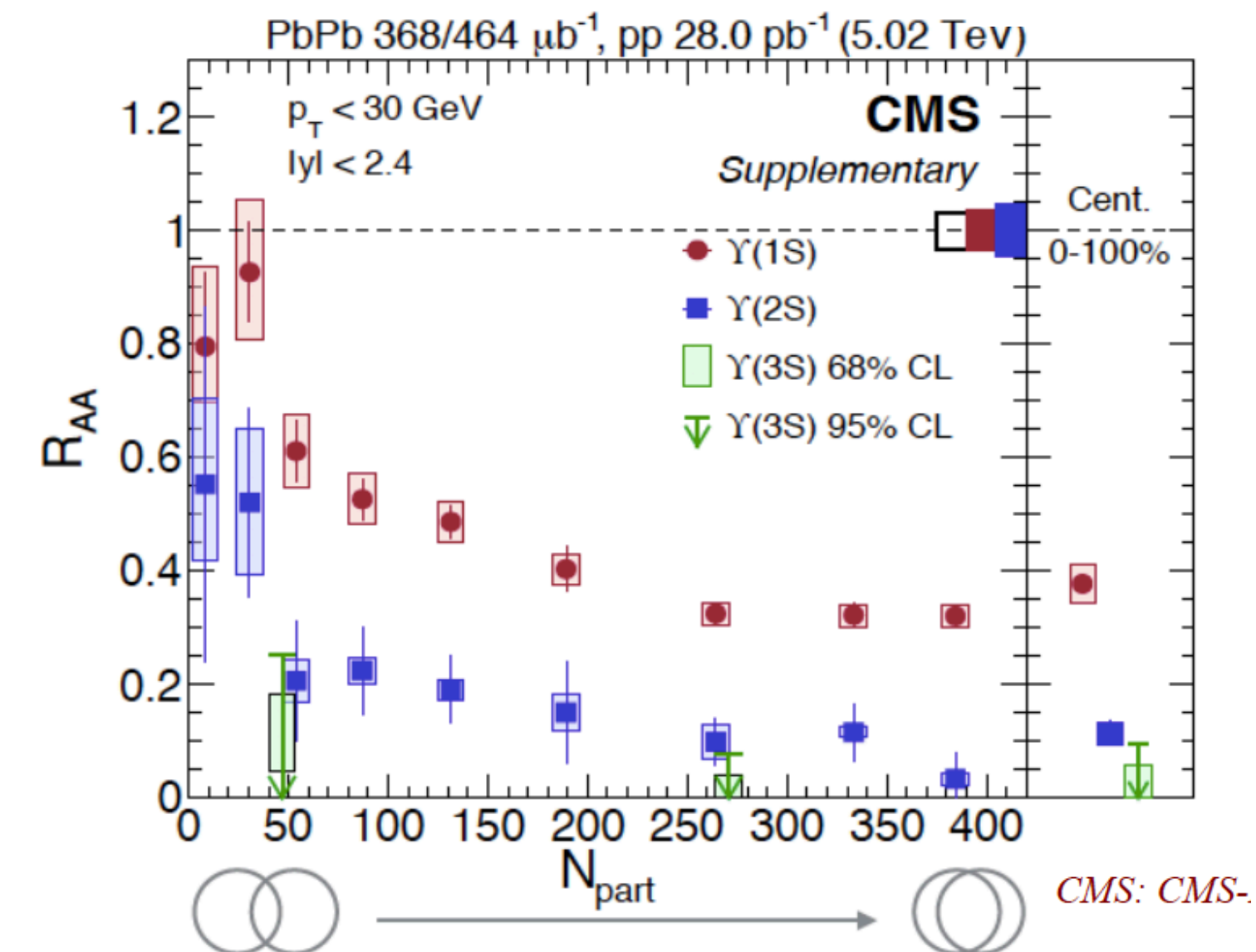
## 現在の測定



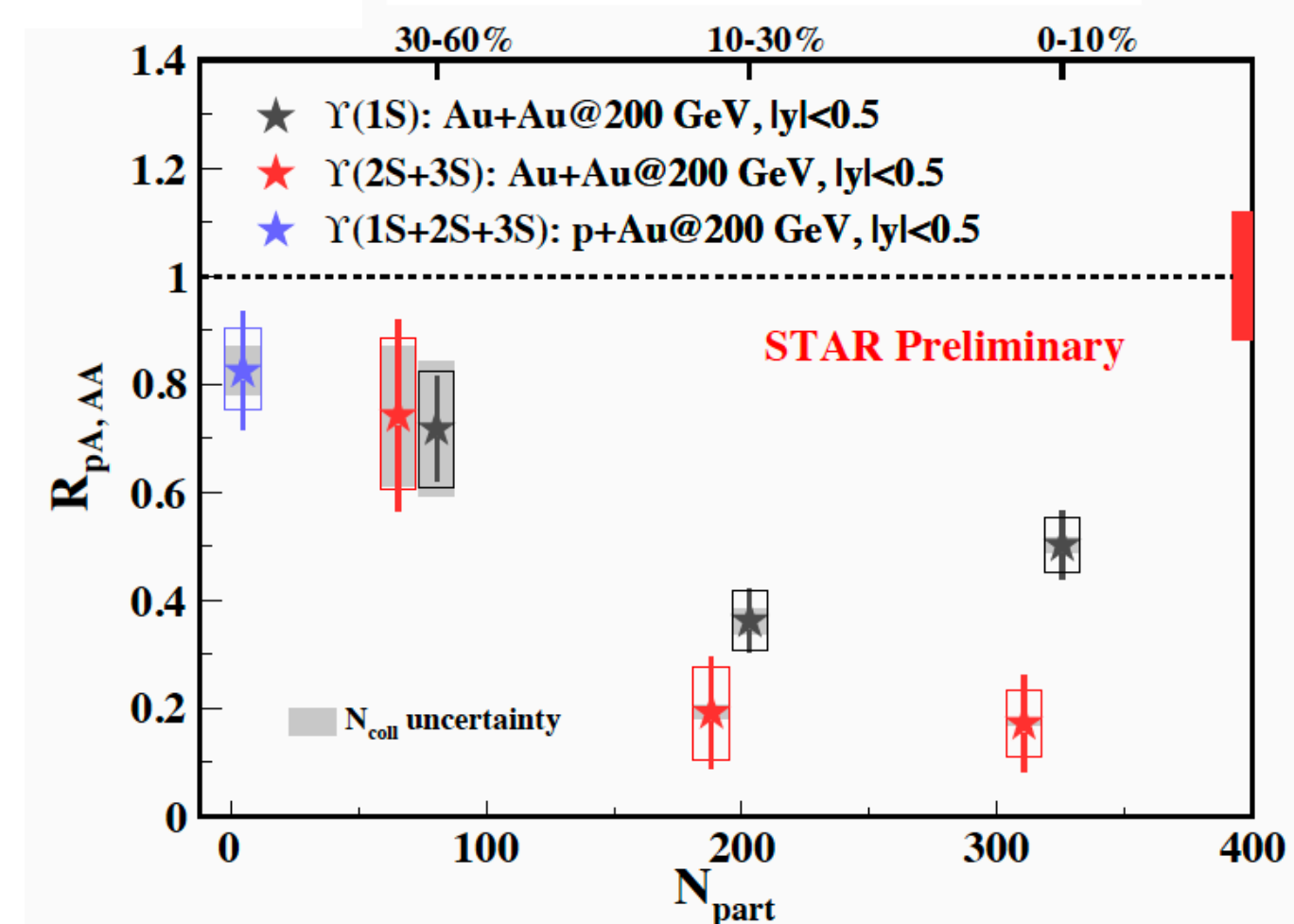
ALI-PUB-94820



## Pb+Pb @ 5.02 TeV



## Au+Au @ 200 GeV

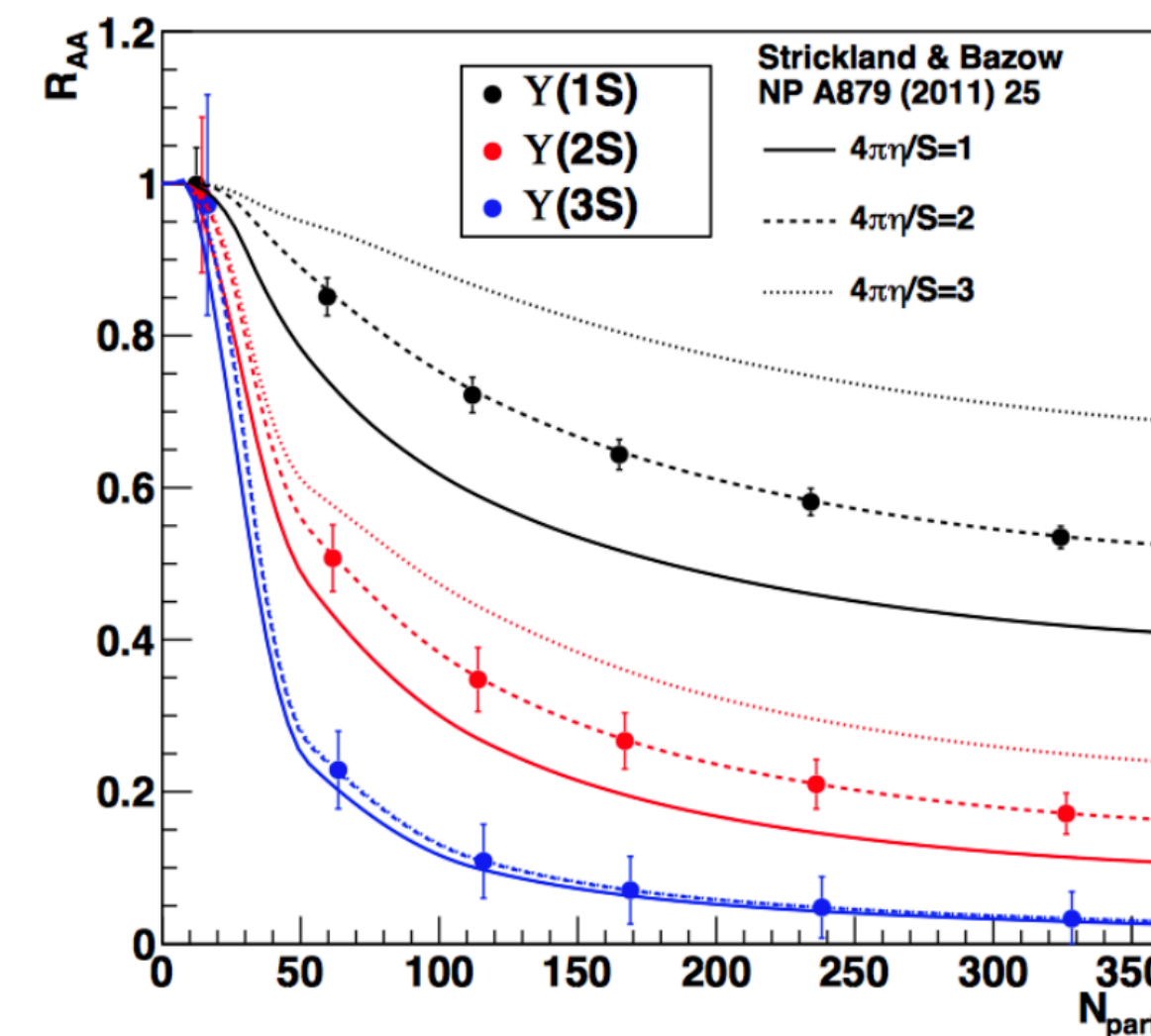
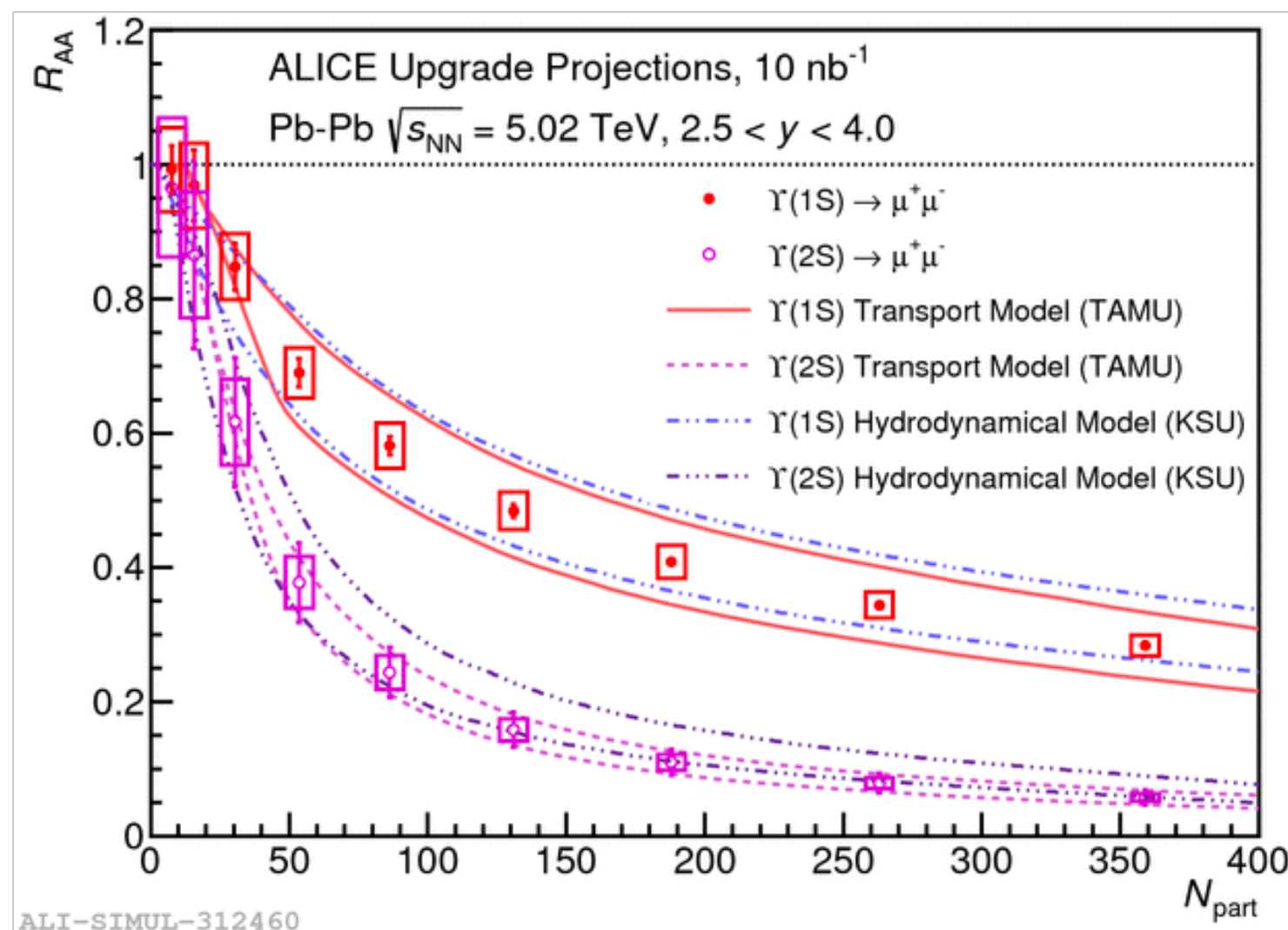
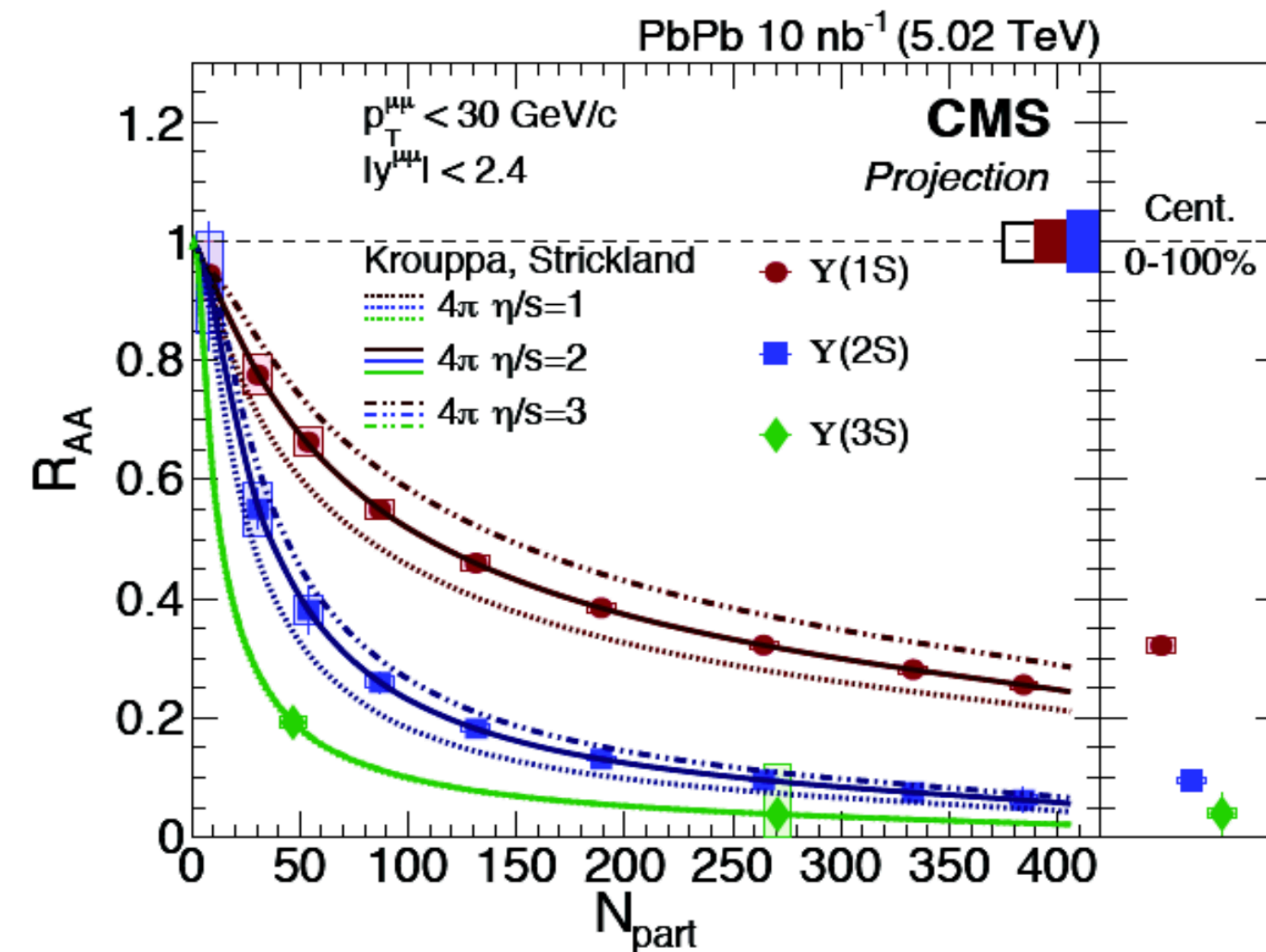
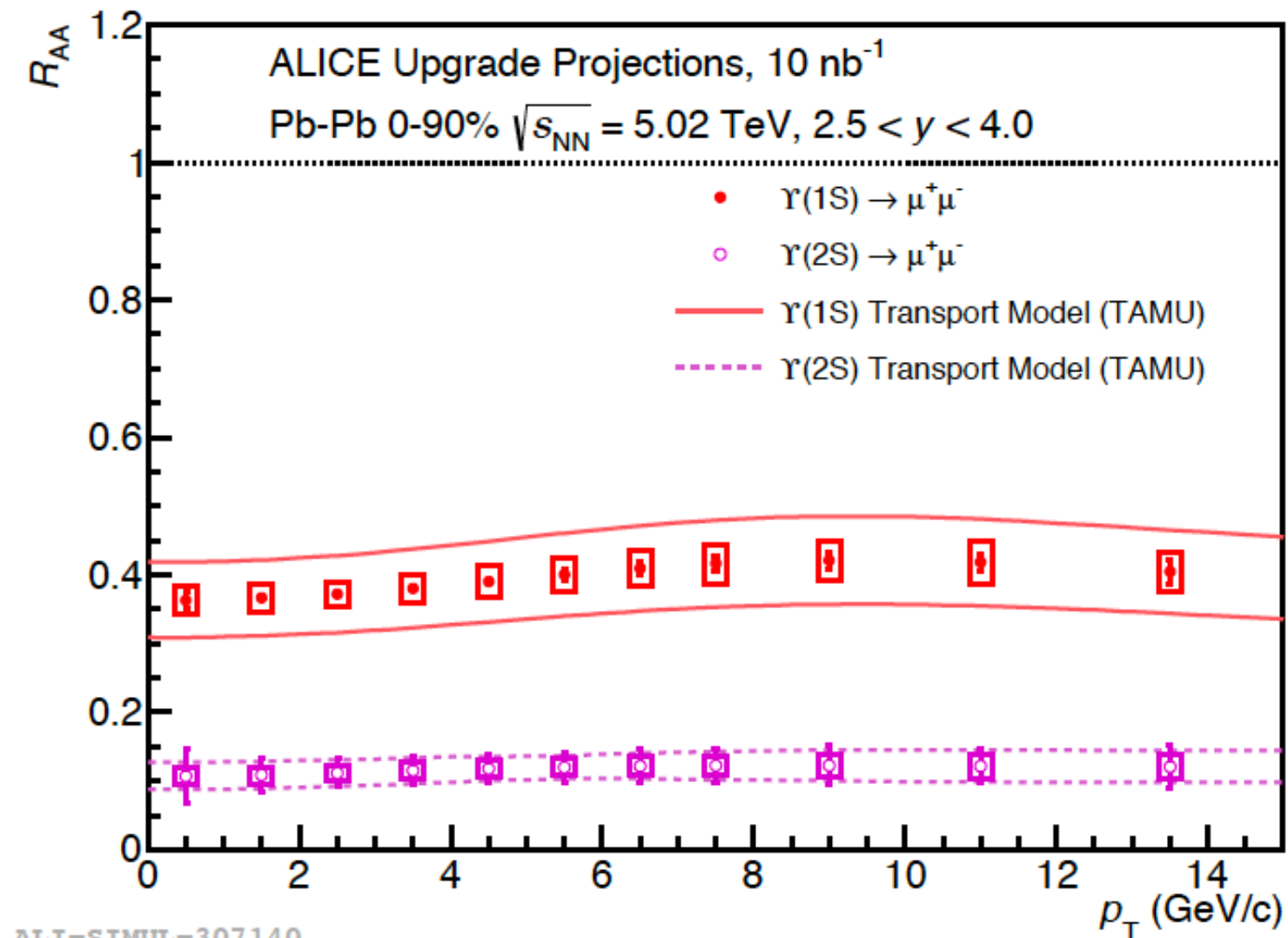
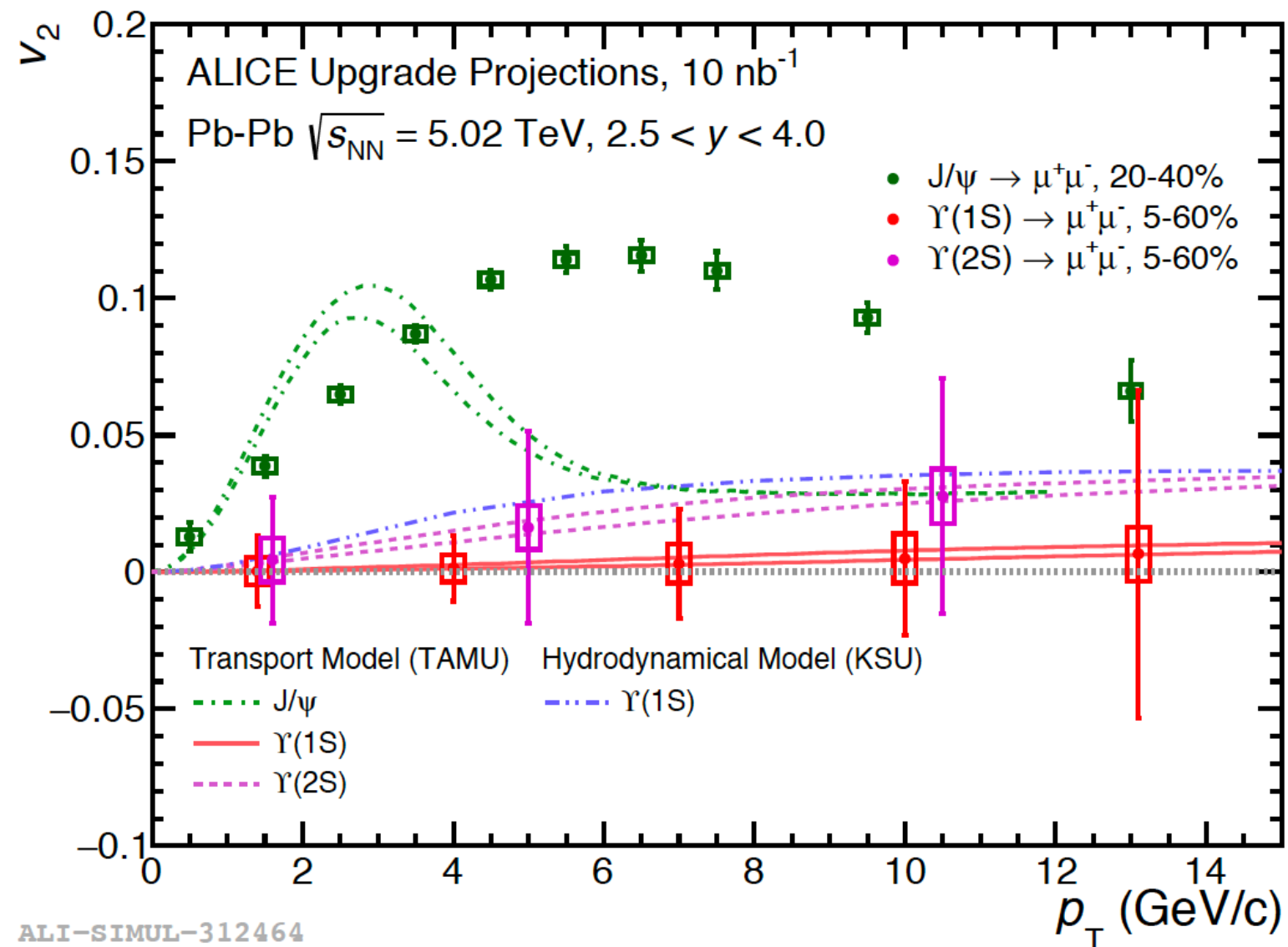




# クォーコニア

ALICE upgrade, sPHENIX

arXiv:1812.06772



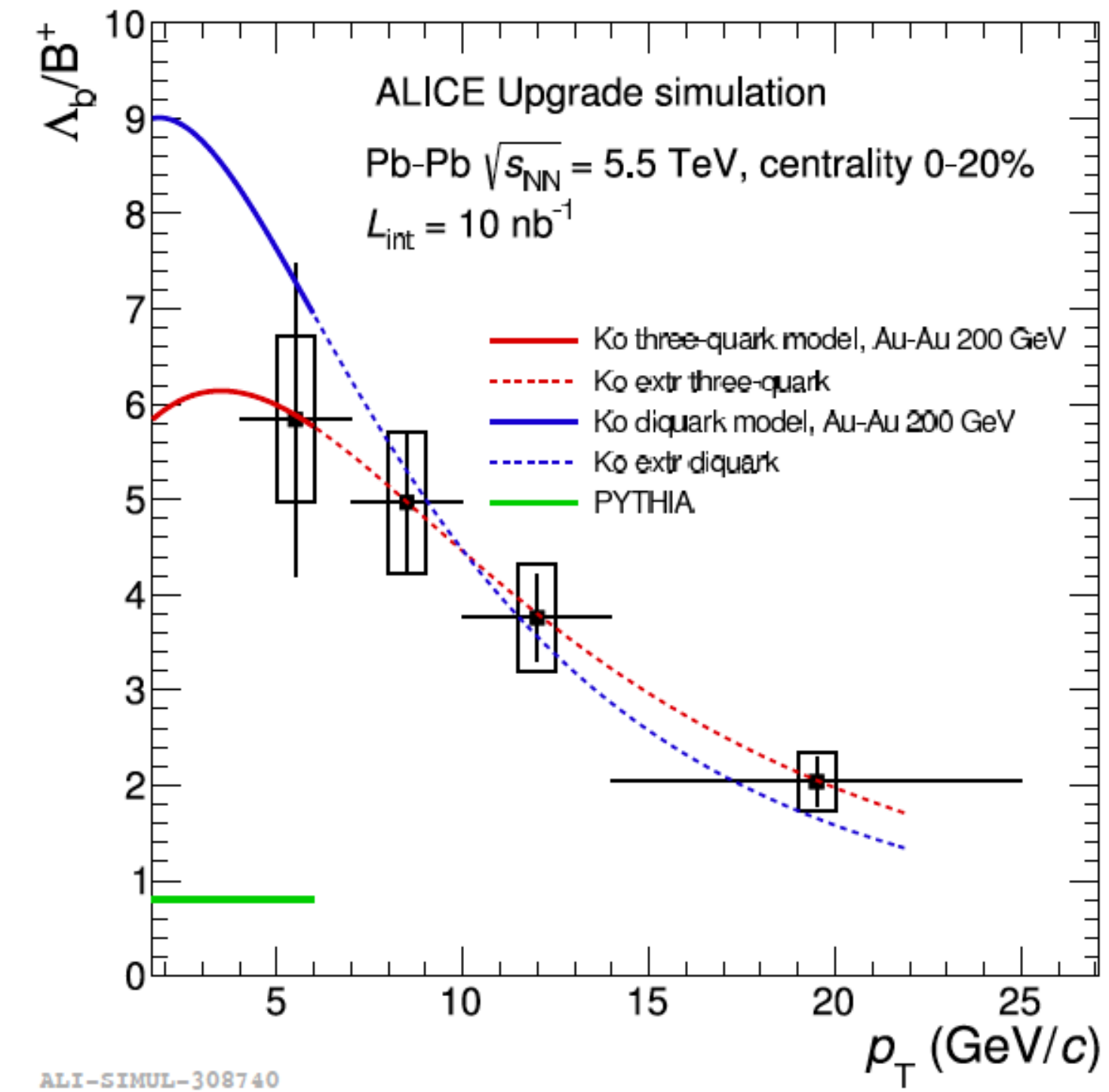
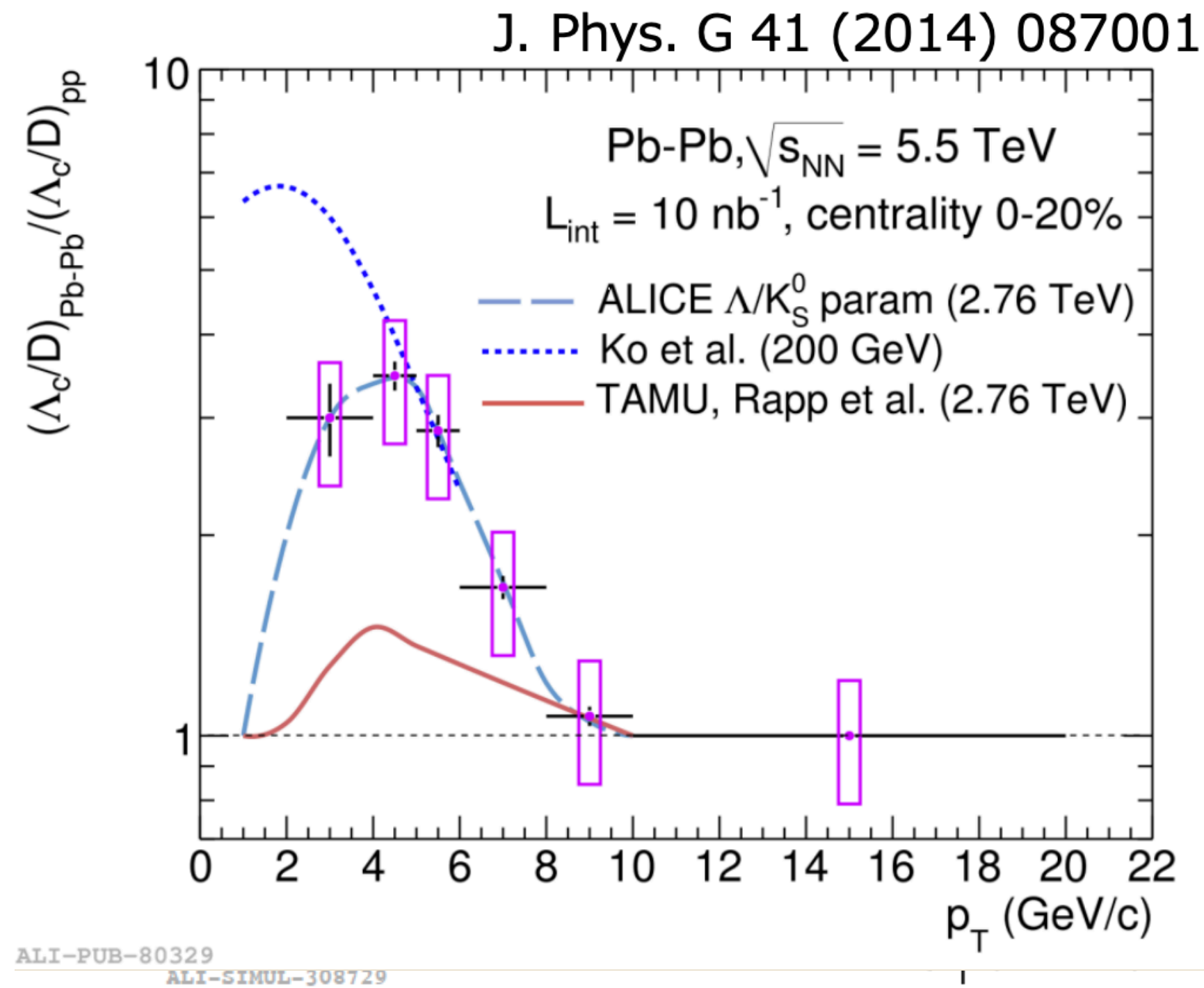
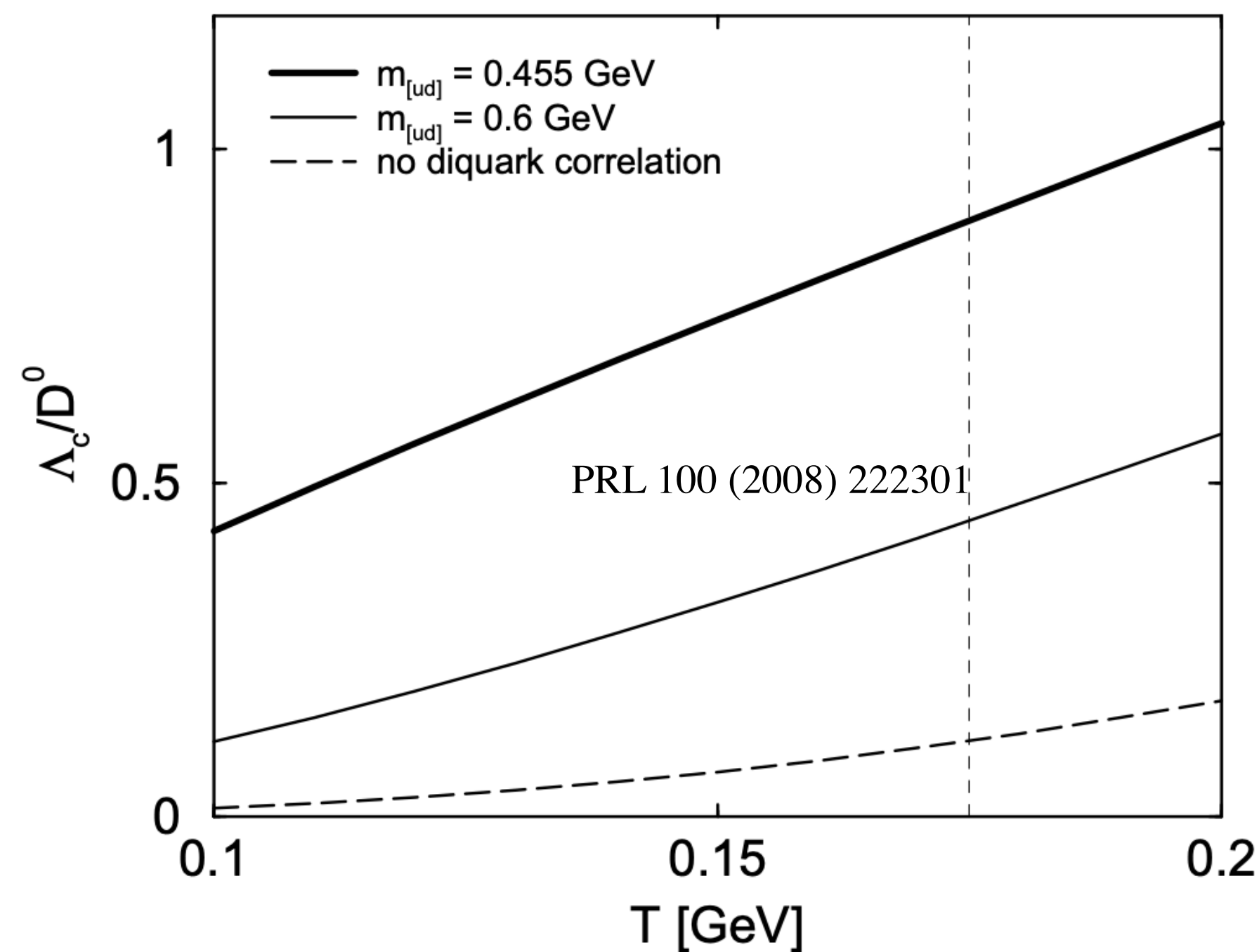
J/Ψの集団運動の高精度測定  
→色遮蔽、再結合の詳細理解  
Υ(1S, 2S, 3S)の高精度測定  
→色遮蔽  
理論の進展に期待



# 重クォークバリオン

## QGP中のダイクォーク相関

ALICE upgrade, STAR, sPHENIX



$$m_{[ud]} \approx m_u + m_d - C \vec{s}_u \cdot \vec{s}_d \frac{1}{m_u m_d} \approx 450 \text{ MeV}$$

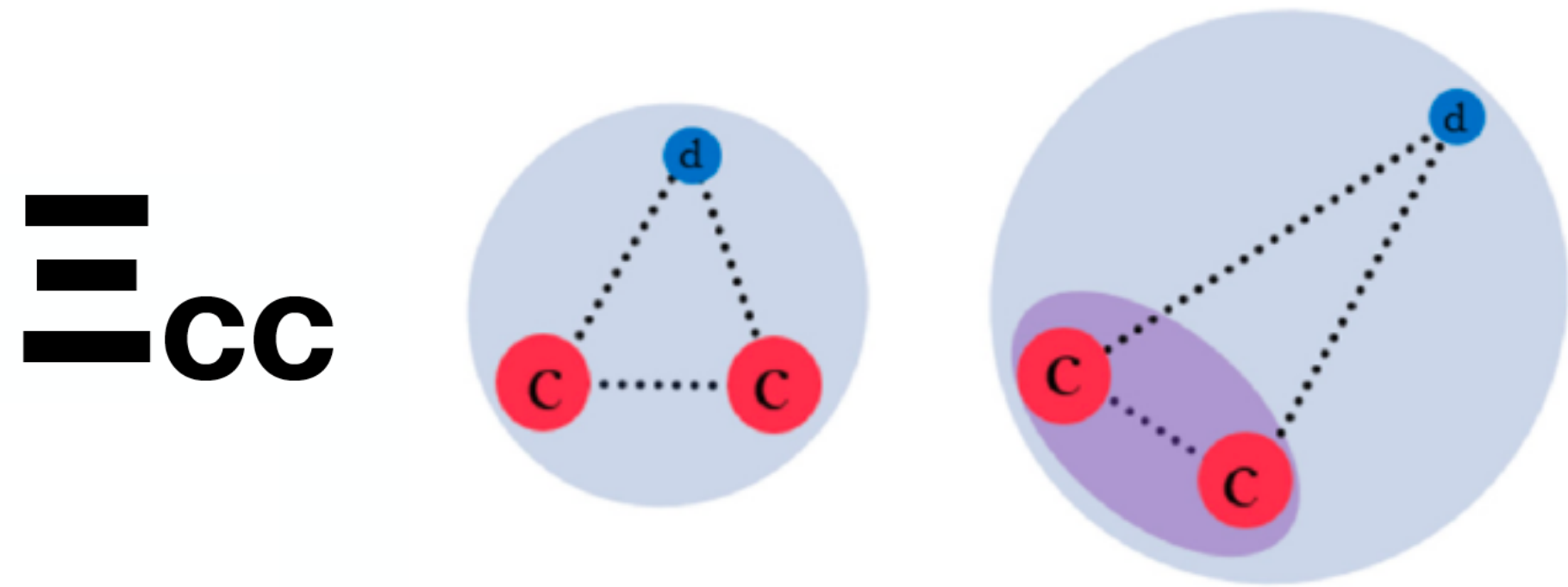
低運動量のチャームとボトムバリオン

→ダイクォーク構造の探索、高密度でより重要

→ダイクォーク質量とカイラル対称性の回復？



# 多重クォークバリオン



Chiral symmetry restoration on the coalescence hyper surface:

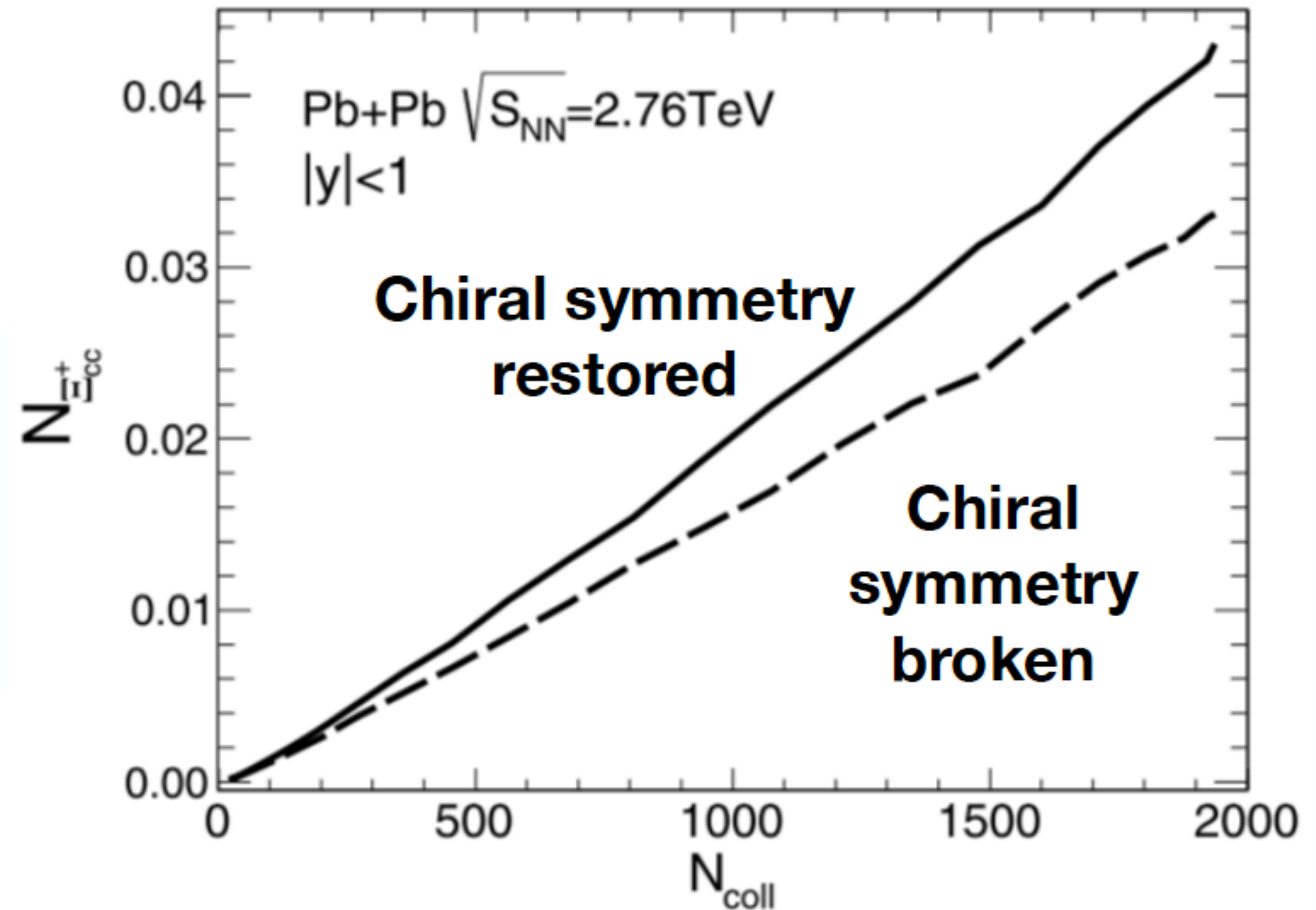
- $\Xi_{cc}$  mass: 3.58 GeV  $\rightarrow$  2.79 GeV
- $\Xi_{cc}$  <radius>: 0.41 fm  $\rightarrow$  0.49 fm
- Distance between 2 c quarks and between cc pair and q:  
 $\langle r_{cc} \rangle = 0.44$  fm,  $\langle r_{cc-q} \rangle = 0.53$  fm  $\rightarrow$   $\langle r_{cc} \rangle = 0.46$  fm,  $\langle r_{cc-q} \rangle = 0.97$  fm

Chiral symmetry broken:  $\Xi_{cc}$  is a 3-quark state ccq

Chiral symmetry restored:  $\Xi_{cc}$  is a quark-diquark state

$\rightarrow$  production yield sensitive to coalescence happening between a 3-quark state and a diquark-quark state

$\rightarrow$  variation from 0.03 to 0.04 (cross section per binary collision from 513 nb to 667 nb)



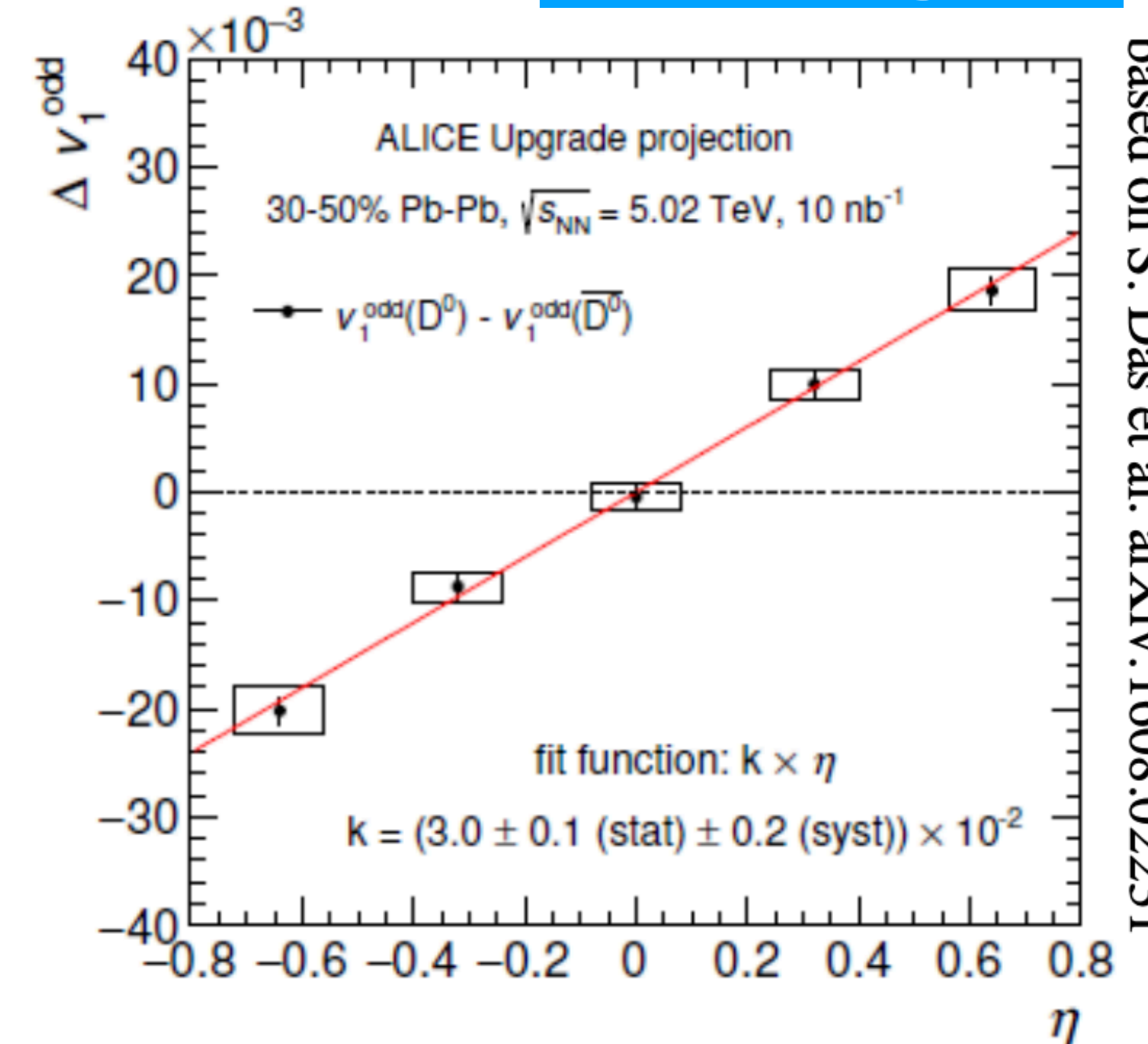
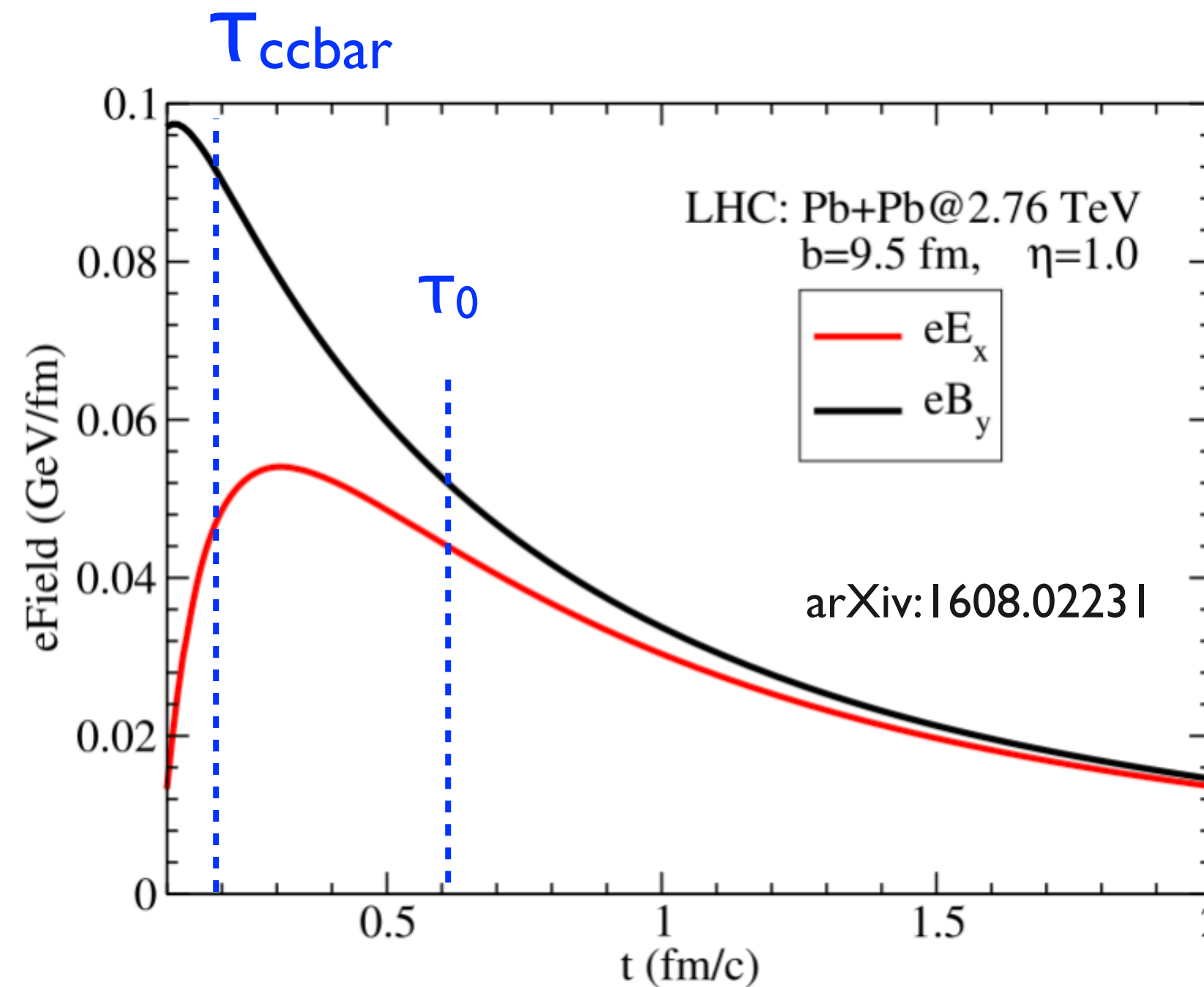
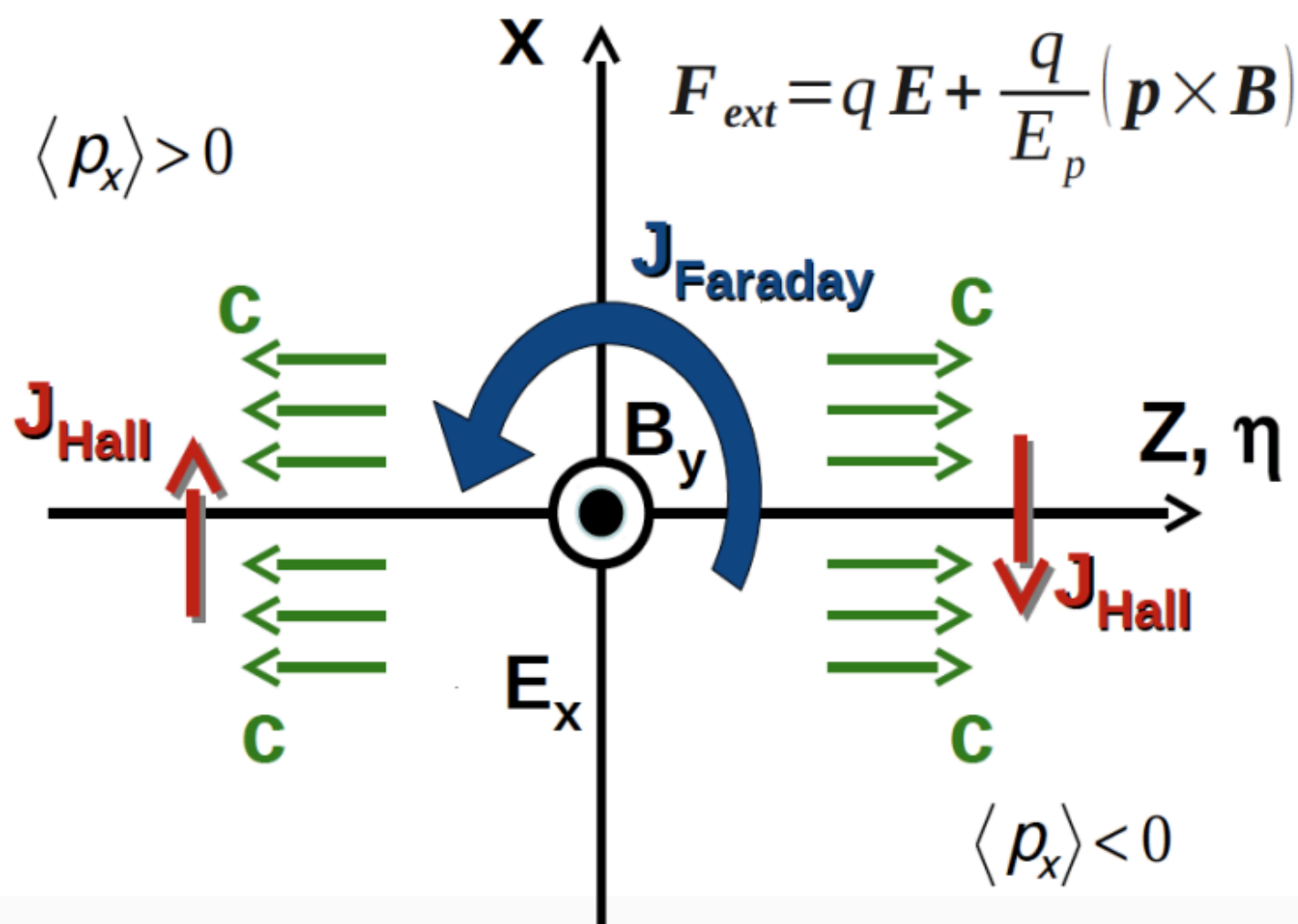
[Zhao, He, Zhuang, PLB 771 (2017) 349-353]

# 重クォークのdirect Flow

- 磁場に大きな感度を持つ可能性

ALICE upgrade

Tuchin PRC88, Adv. High En. Phys. 1 (2013)  
Gürsoy, Kharzeev, Rajagopal PRC89 (2014)



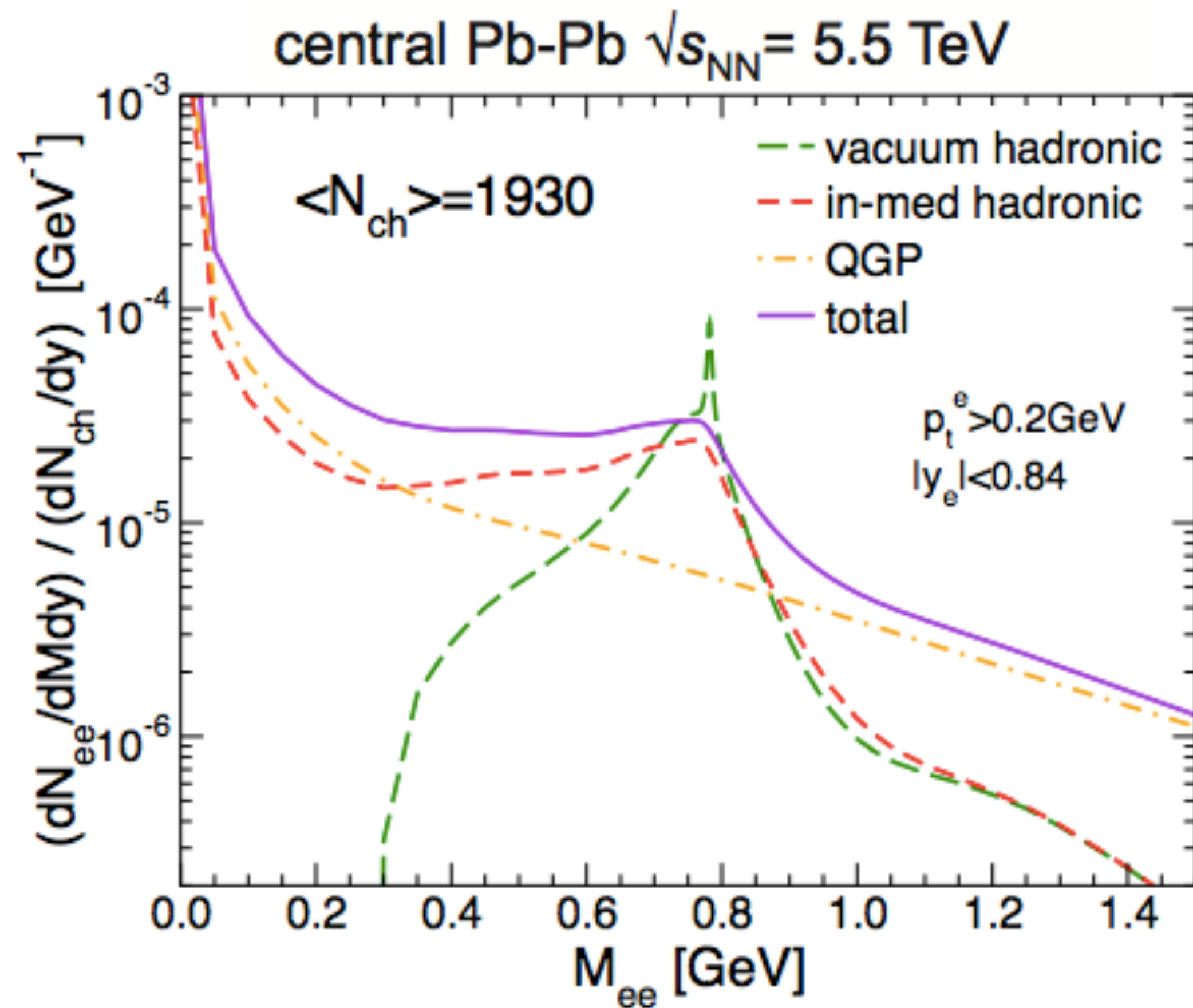
- HQ  $v_1$  is sensitive to the EM field in very early stage of collisions (and  $\sigma_{el}$ )
- Large  $v_1$  (compared to hadrons,  $k(10^{-4})$ ) gives some hints for relativistic magnet+fluctuating hydro and dynamics of early stage?



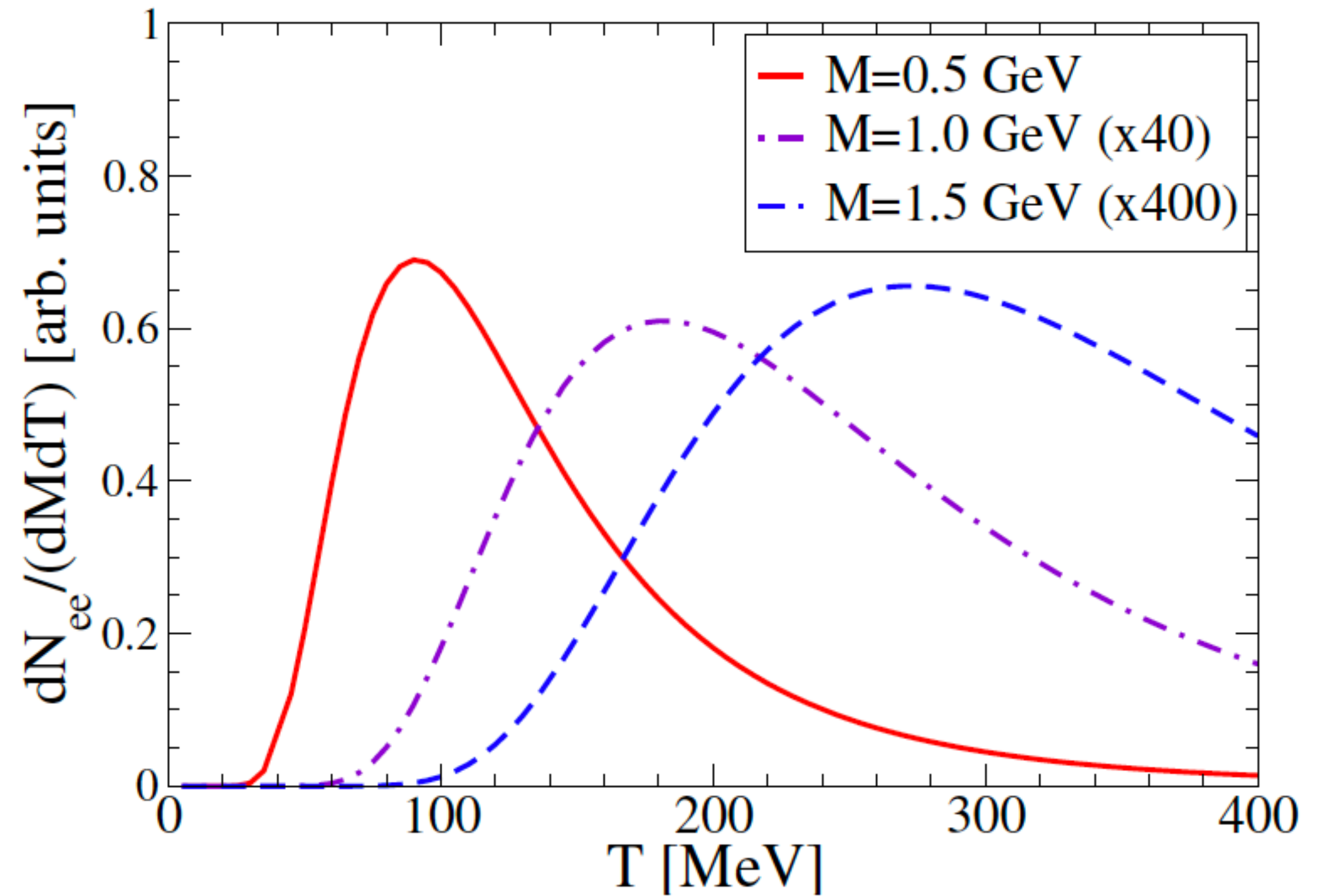
# レプトン対測定

$$\frac{dN_{ee}}{d^4x d^4q} = -\frac{\alpha^2}{\pi^3 M_{ee}^2} f^{BE}(q_0, T) \text{Im}_{EM}(M_{ee}, q, \mu_B, T)$$

有効自由度、スペクトル関数、EoS...

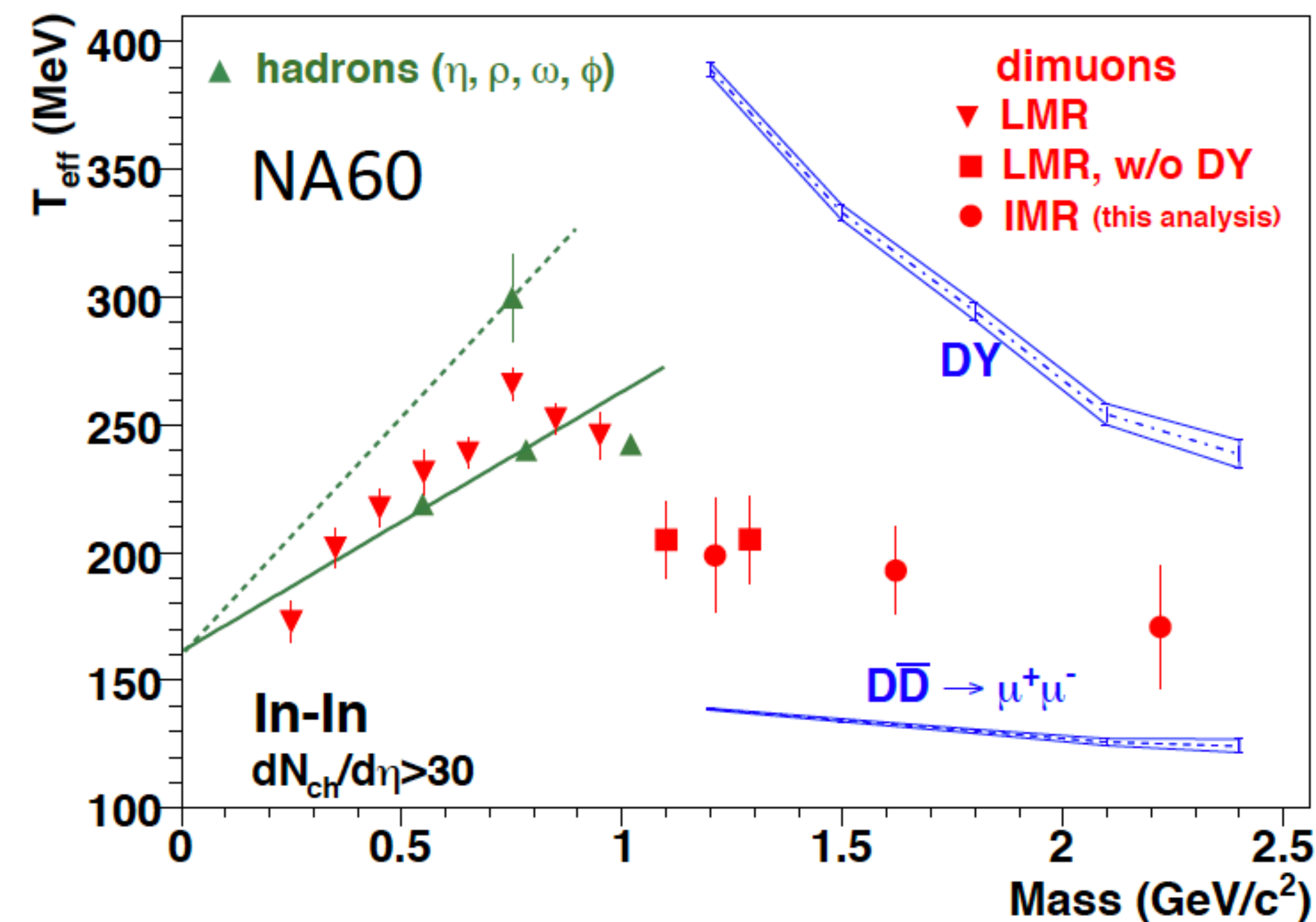
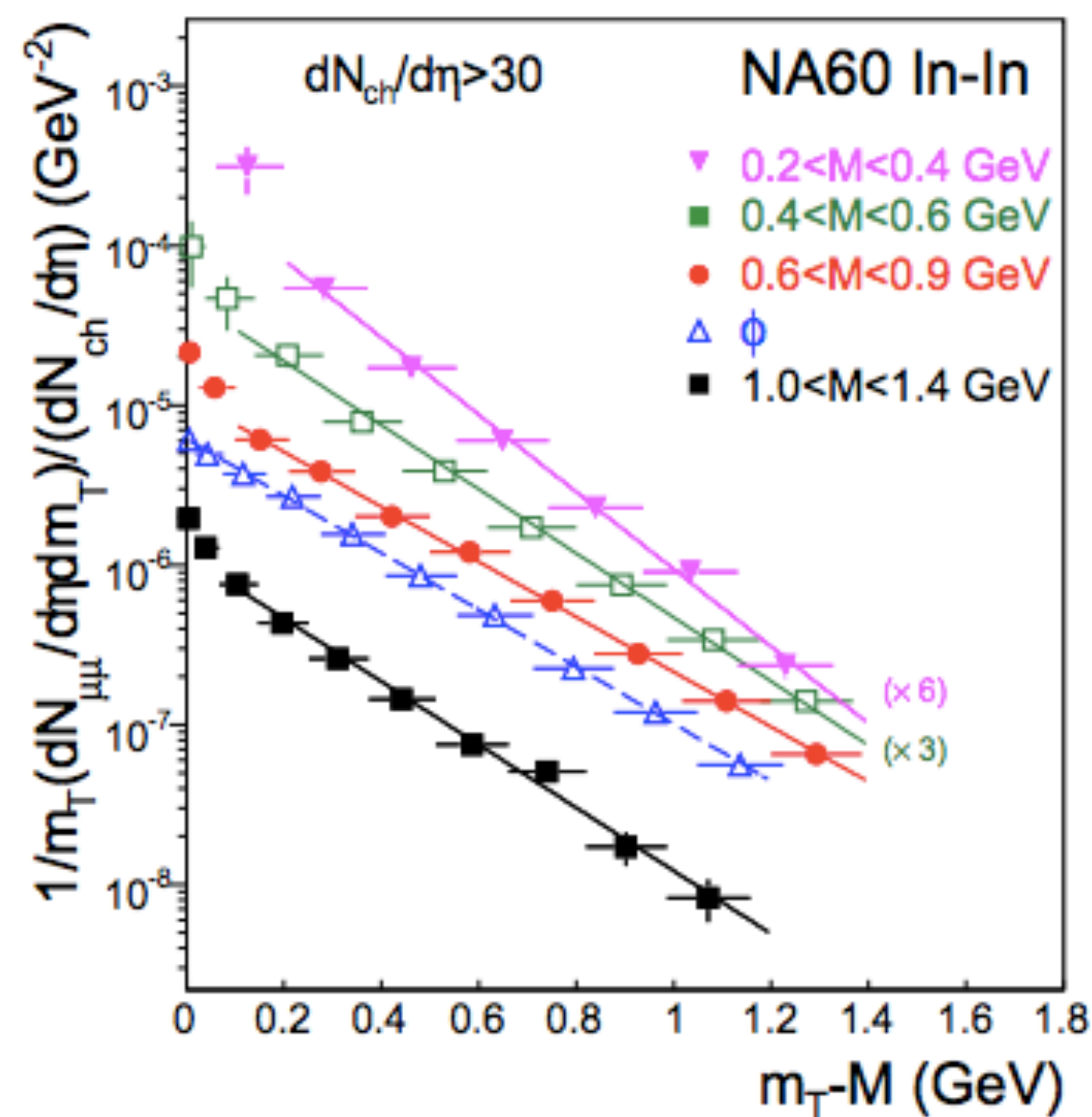
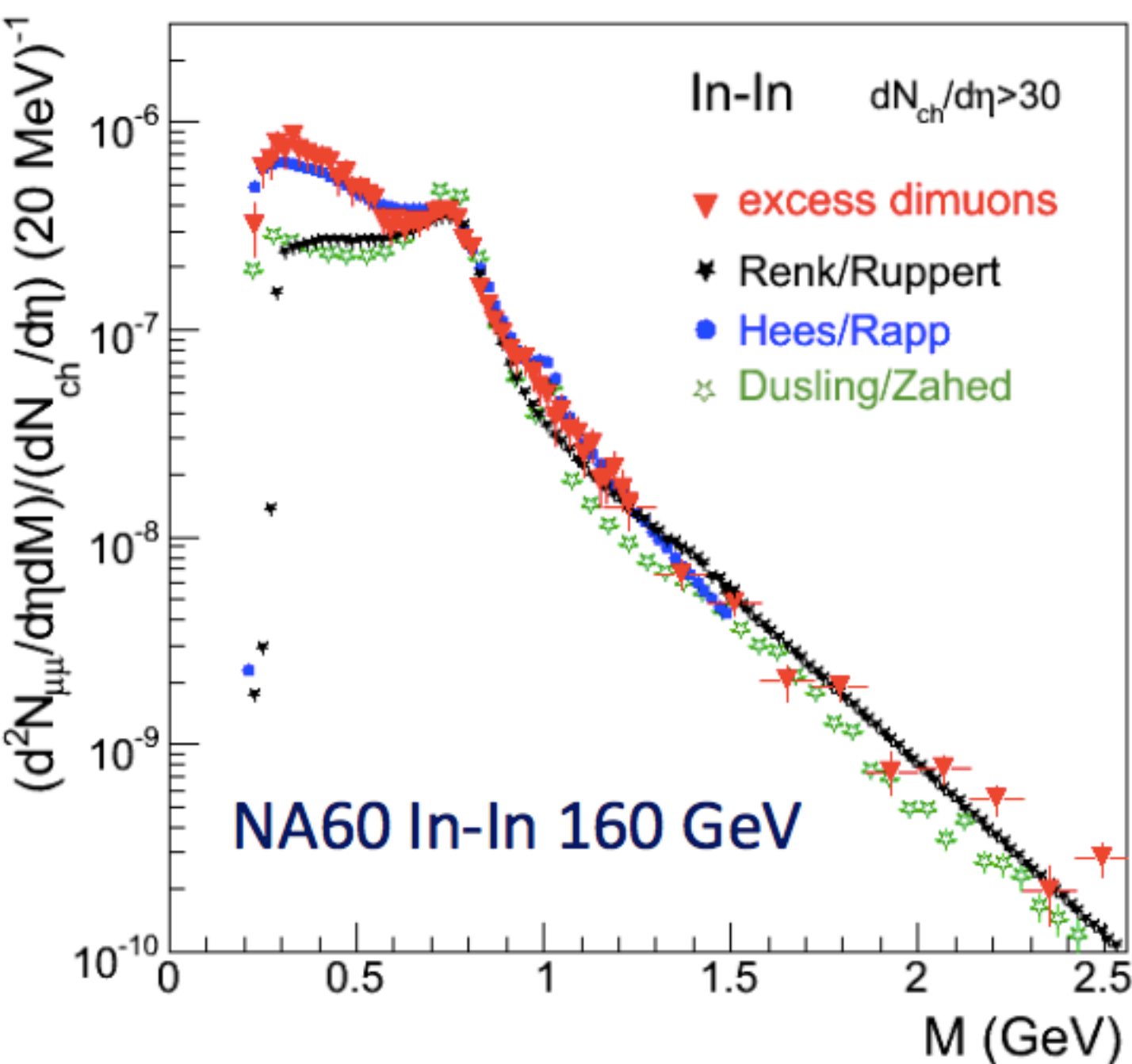


R. Rapp Acta Phys. Polon. B42 (2011)



# NA60 dimuon excess

Eur.Phys.J.C61:711-720,2009

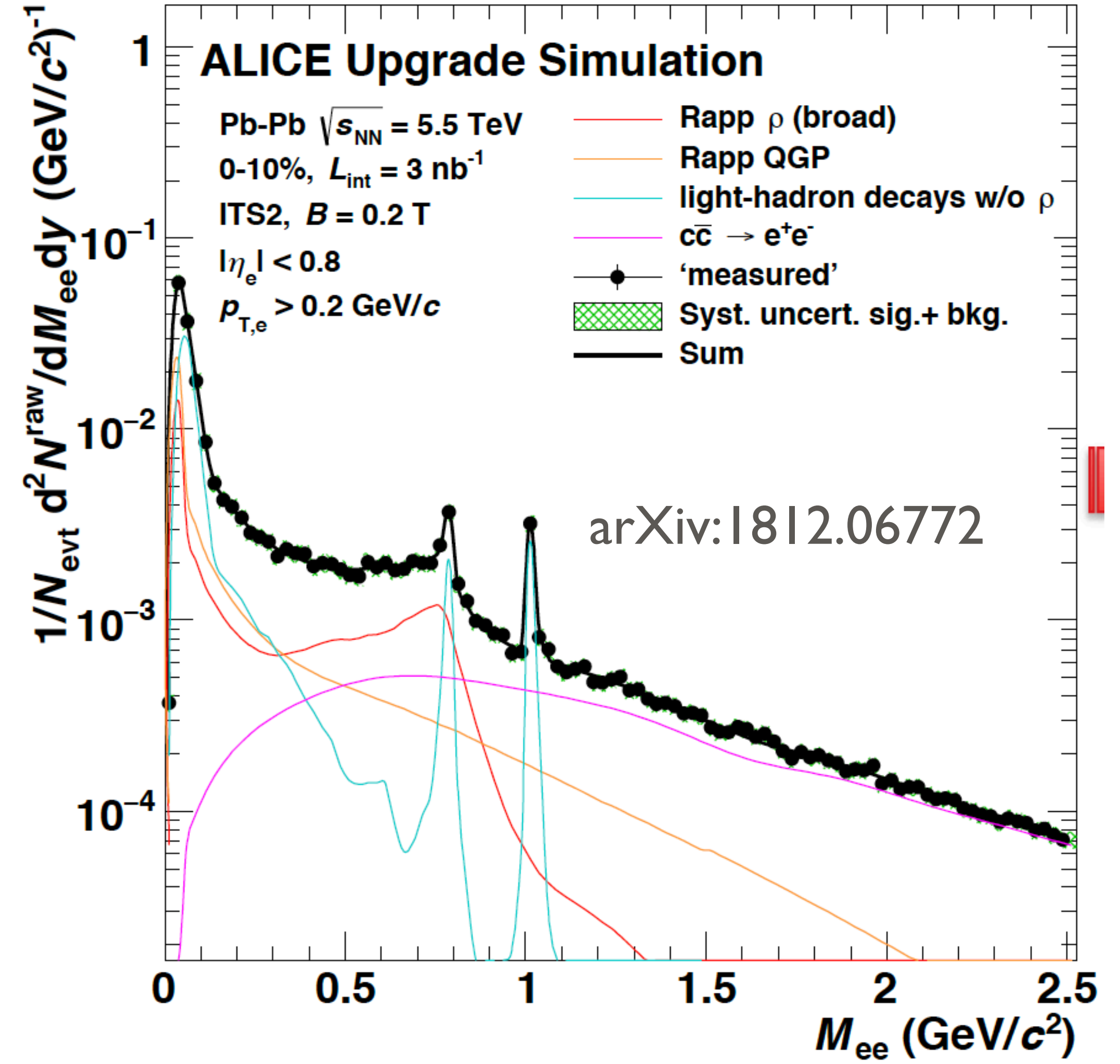
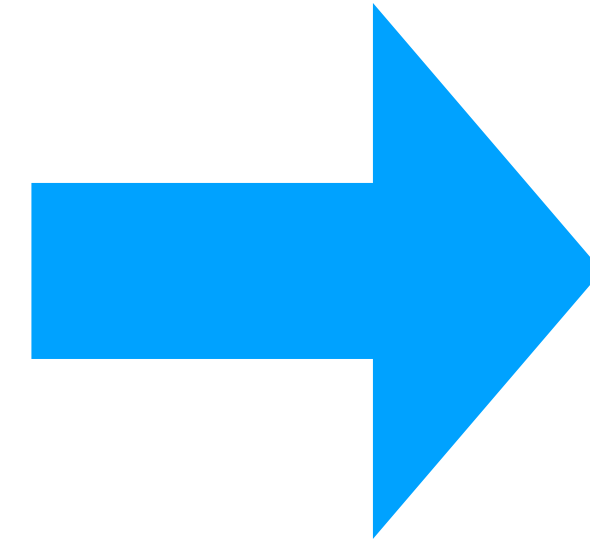
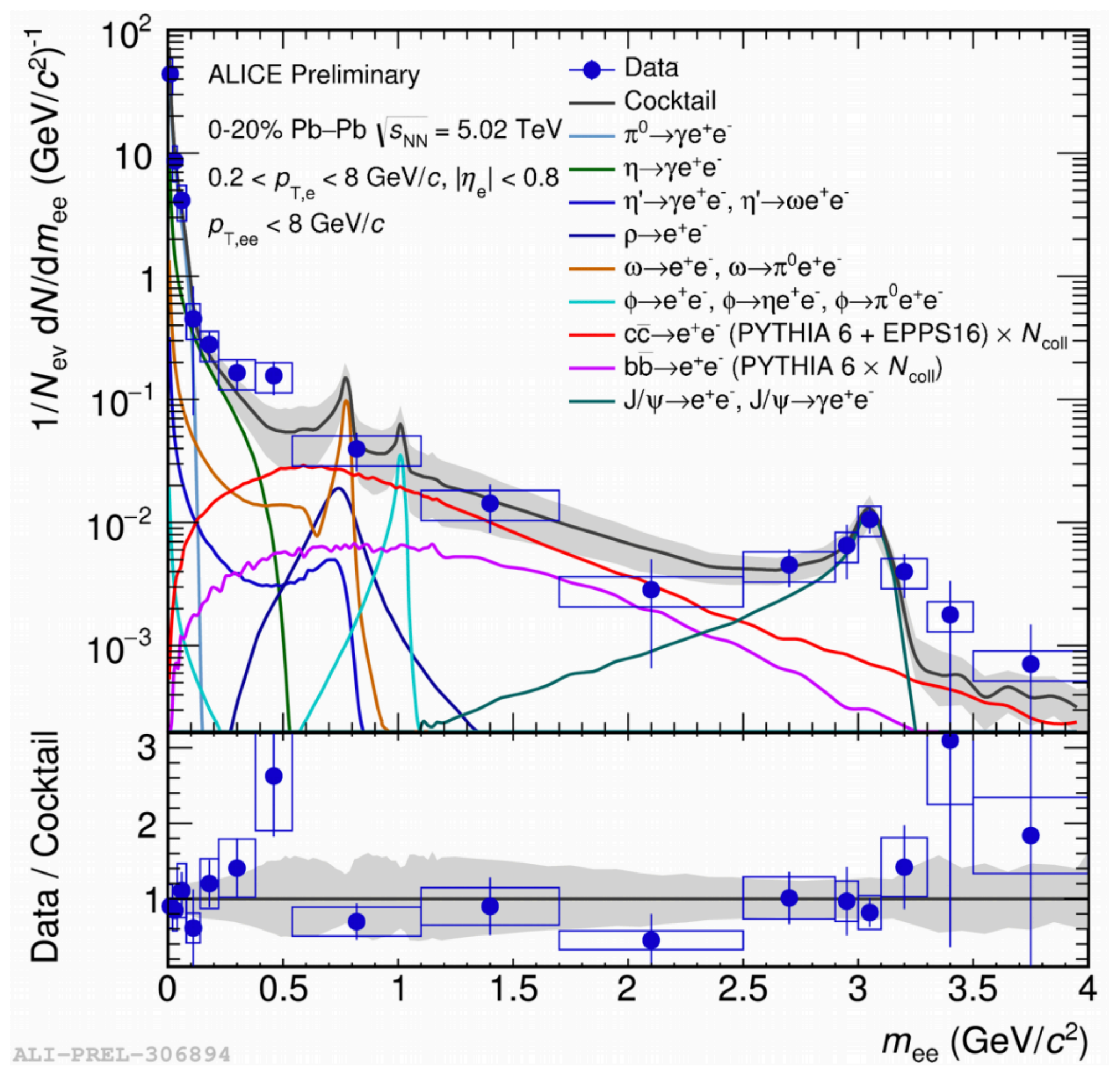


Mass > 1 GeV → パートン相からの熱輻射



# ALICE upgradeでの電子対測定

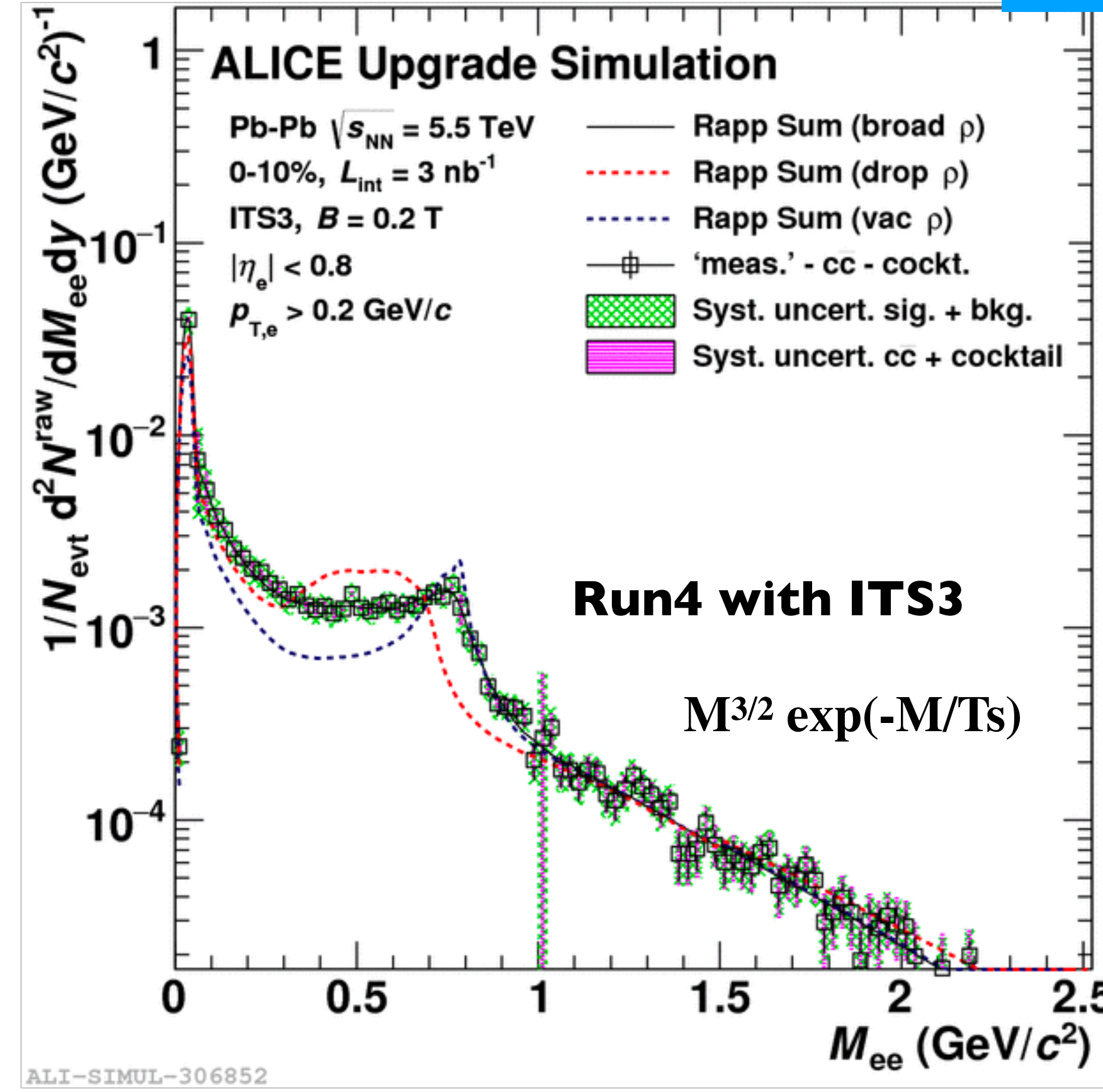
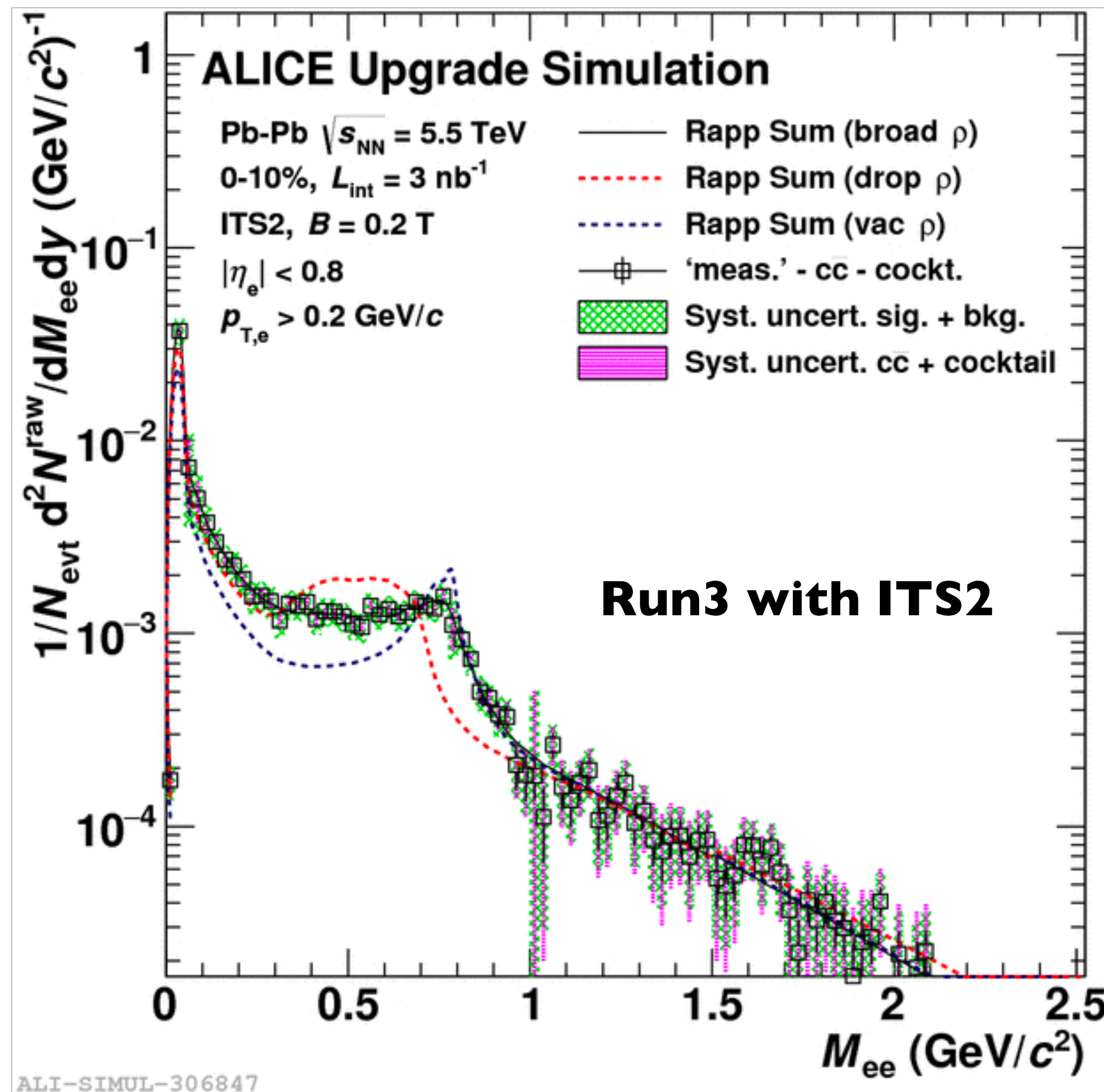
ALICE upgrade





# $\rho$ + 熱的レプトン対

ALICE upgrade



arXiv:1812.06772

$\rho$  の質量変化、熱的電子対の初測定、集団運動などの質量依存性の測定

→ハドロン相起源、パートン相起源の直接的観測、物性の温度依存性、フォトンパズルの解決

低いエネルギーの熱的電子対 ( $p_T \ll T$ ) → 電気伝導度

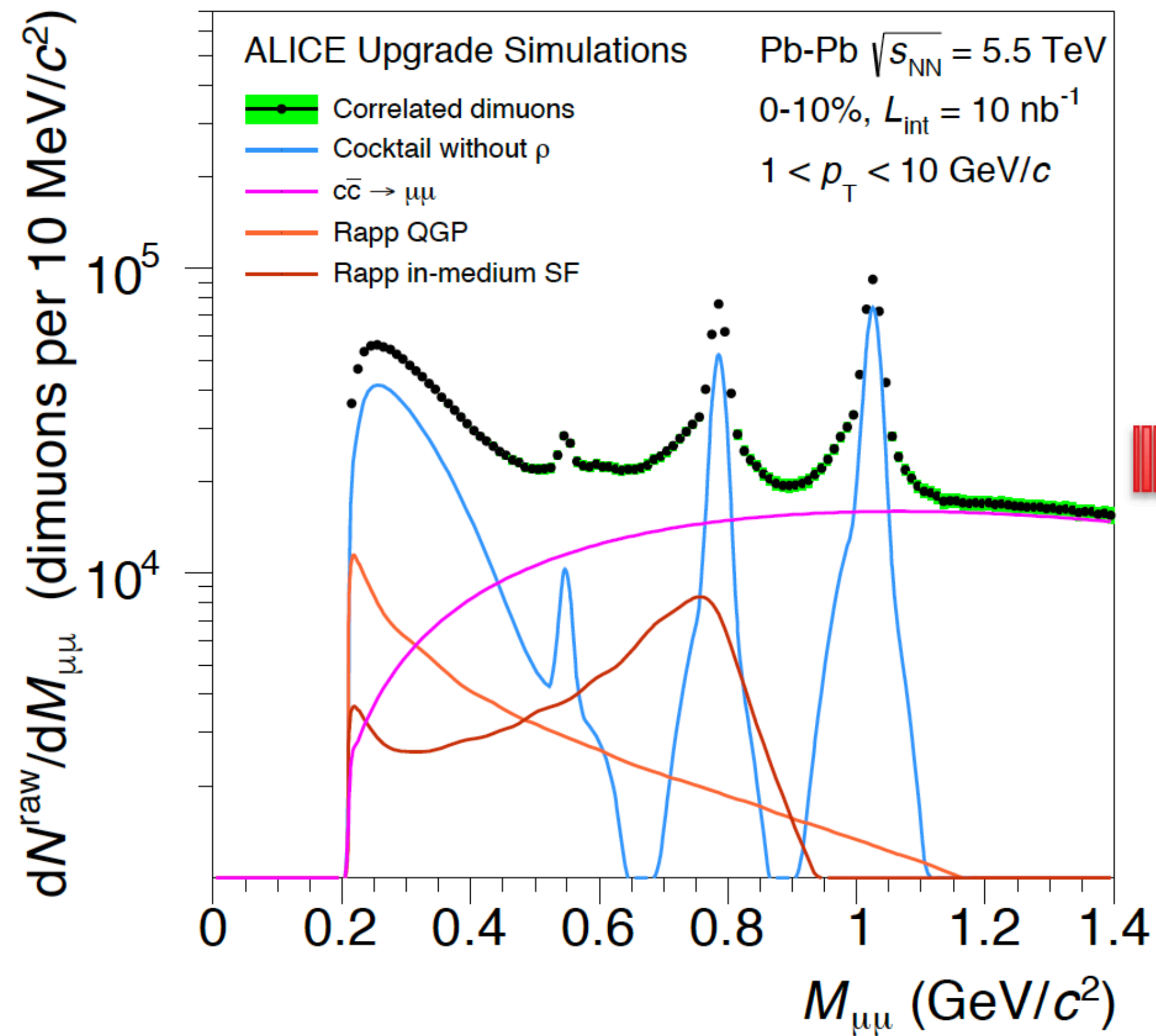
$$\sigma_{EM}(T) = - e^2 \lim_{q_0 \rightarrow 0} [ \partial / \partial q_0 \text{Im} \Pi_{EM}(q_0, q=0; T) ]$$



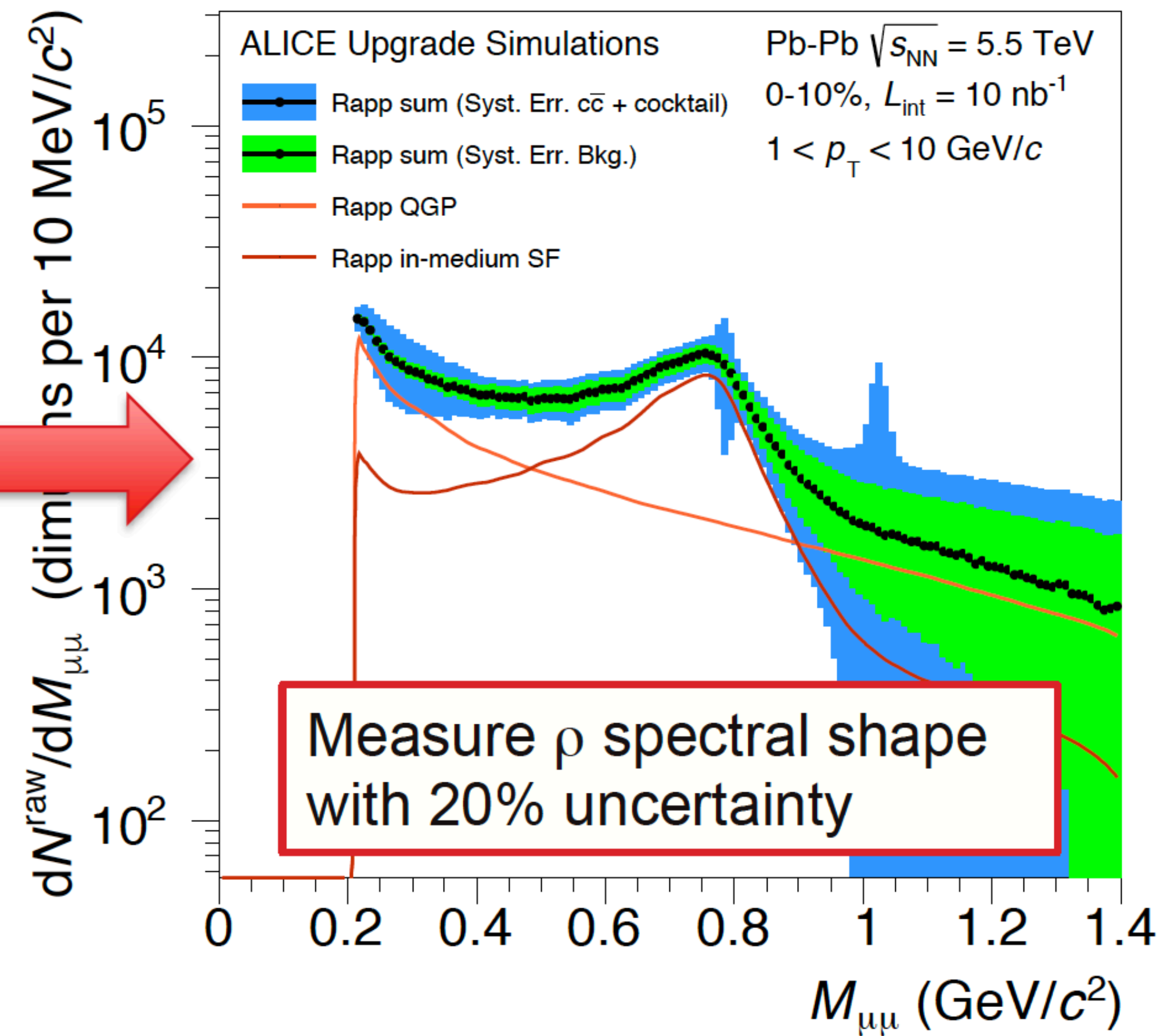
# ALICE upgrade と ミューオン対

ALICE upgrade

arXiv:1812.06772



Excess (after subtraction)

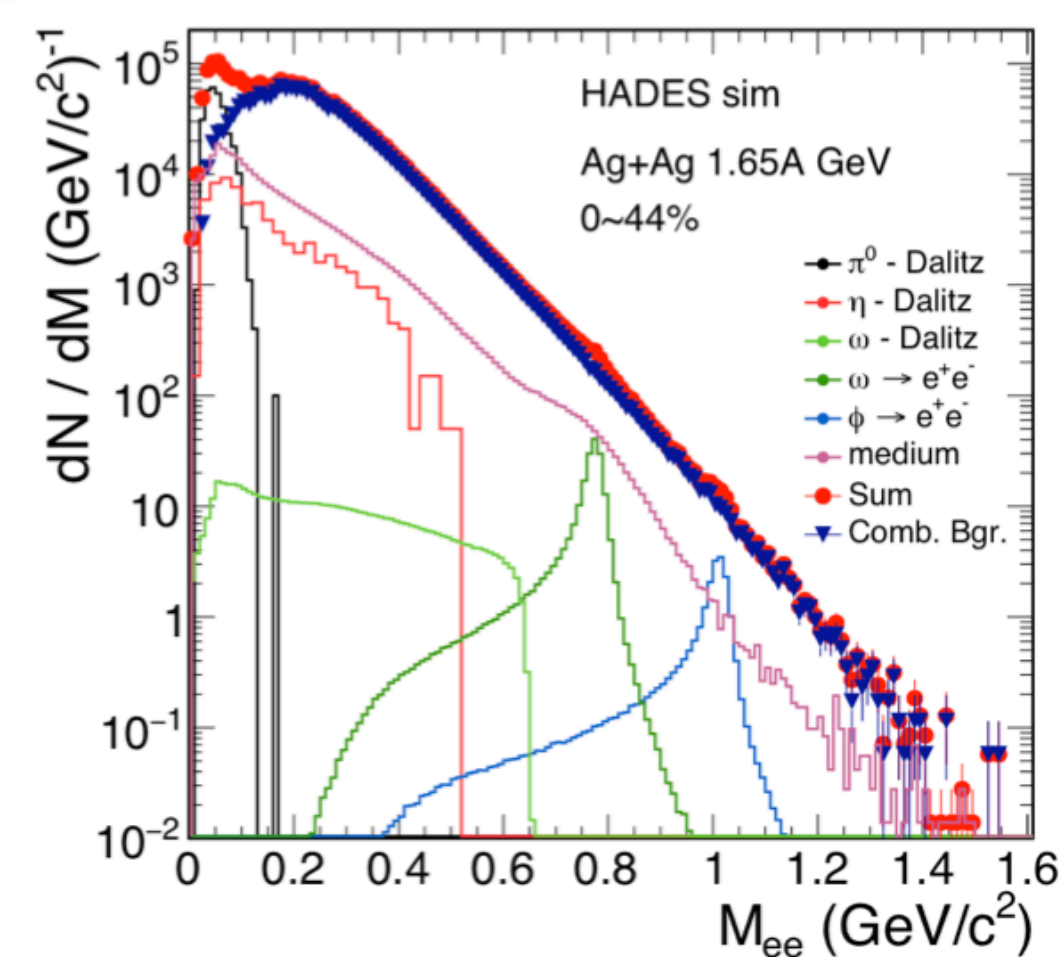
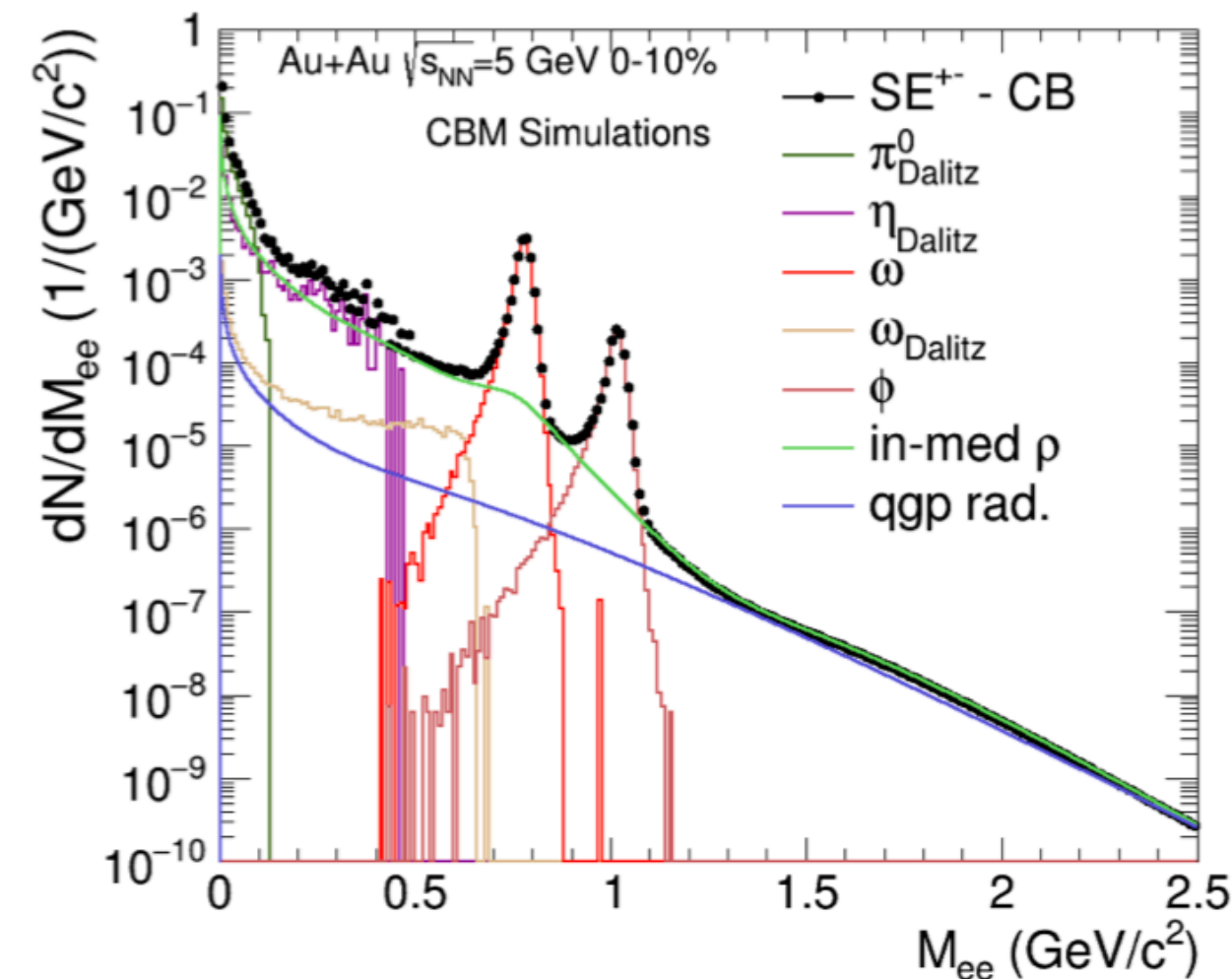
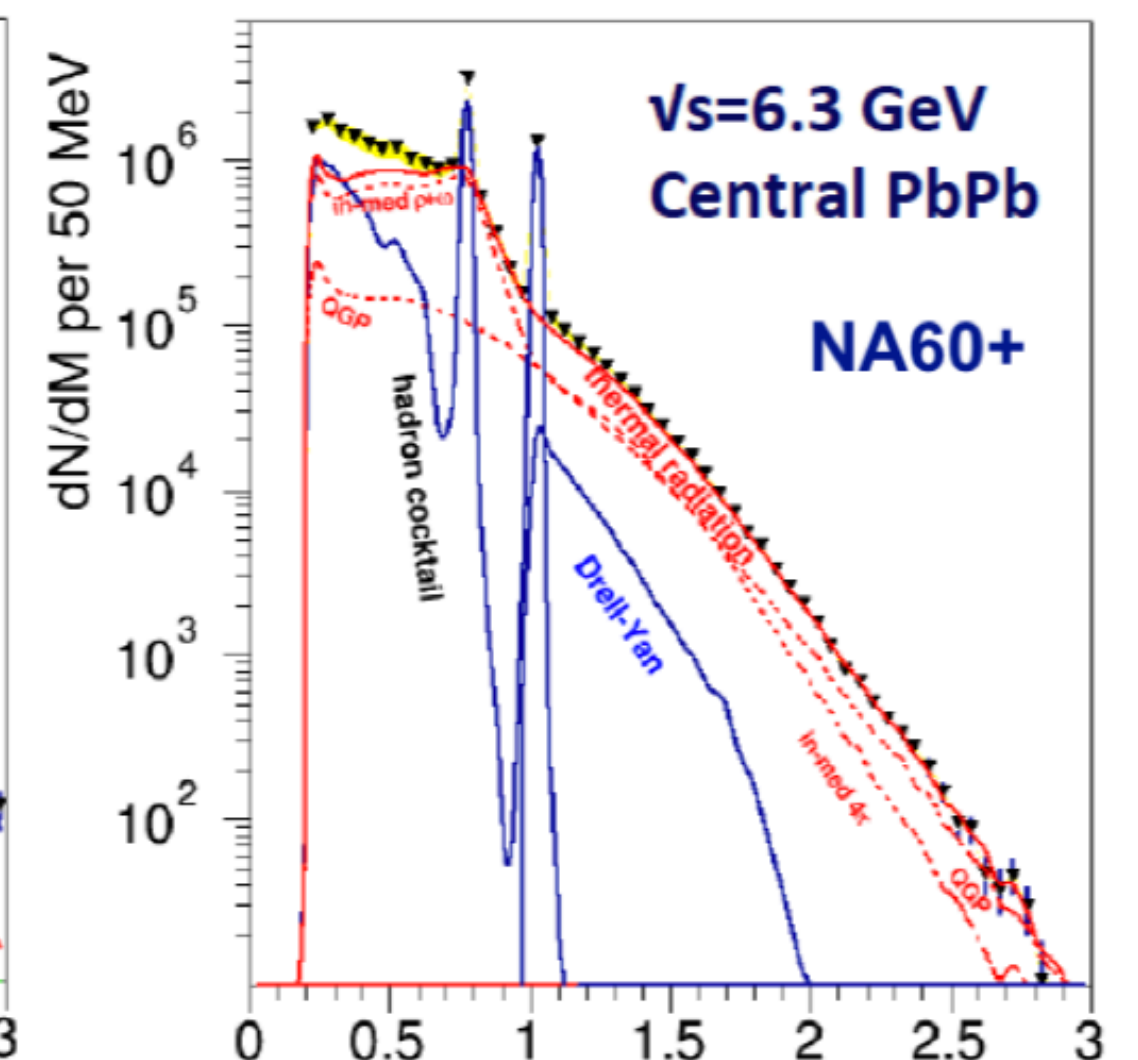
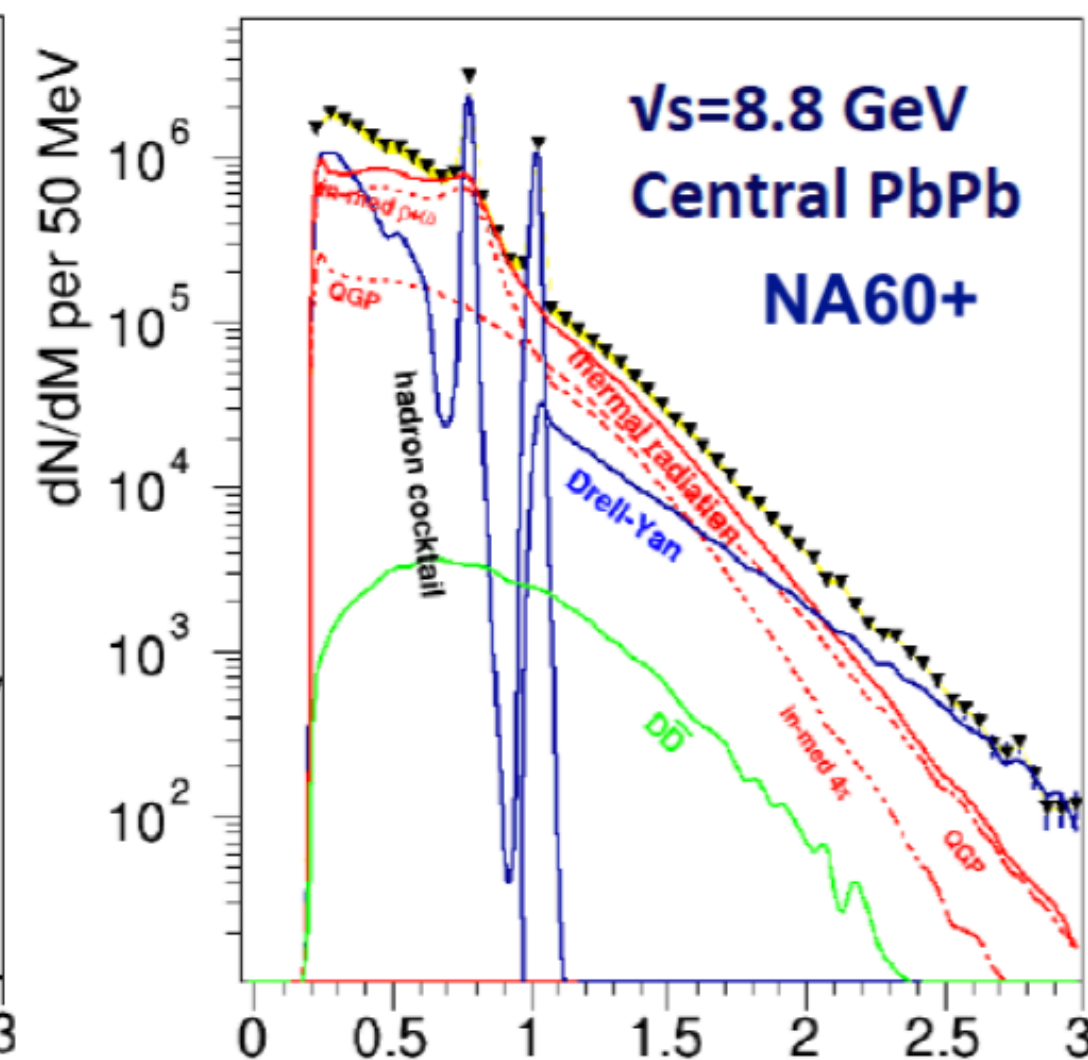
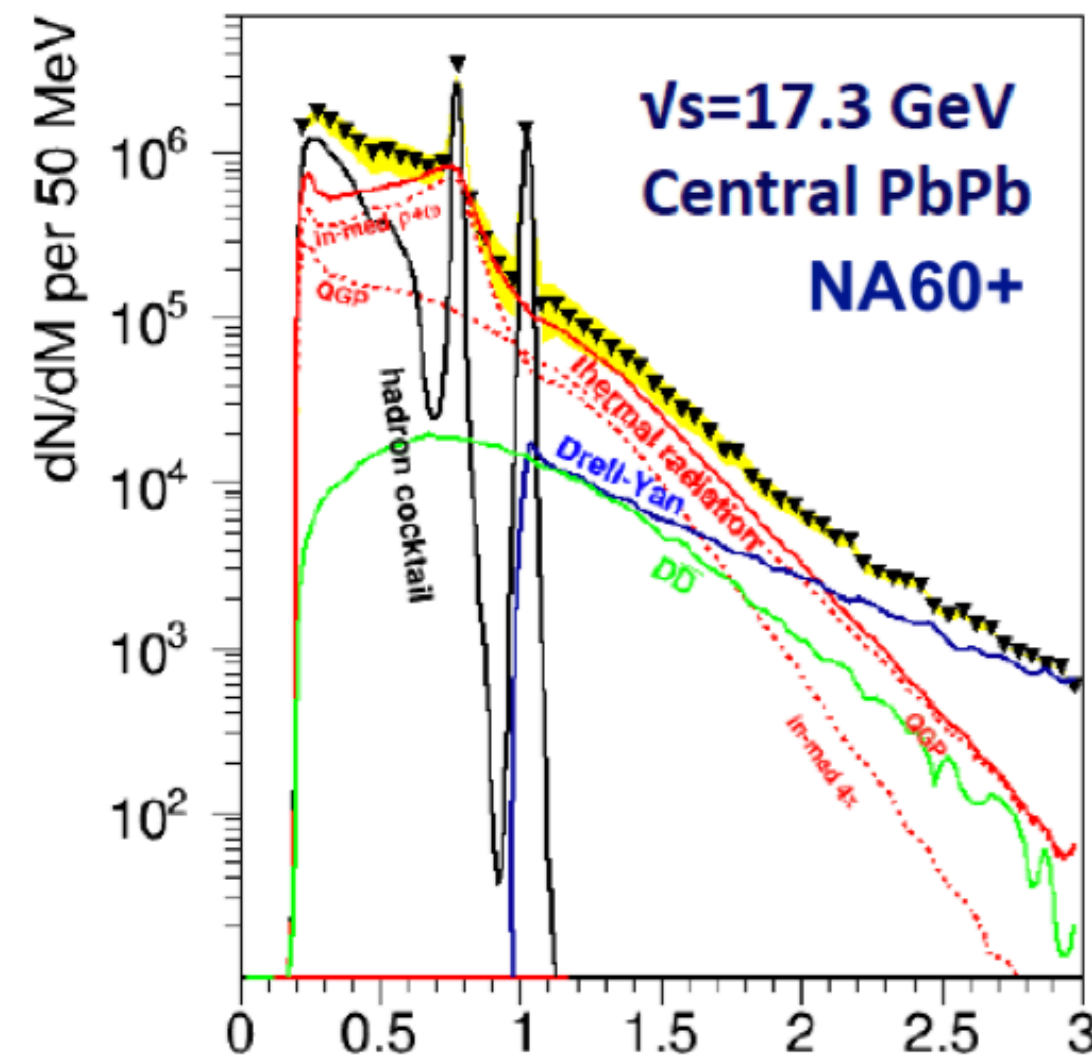
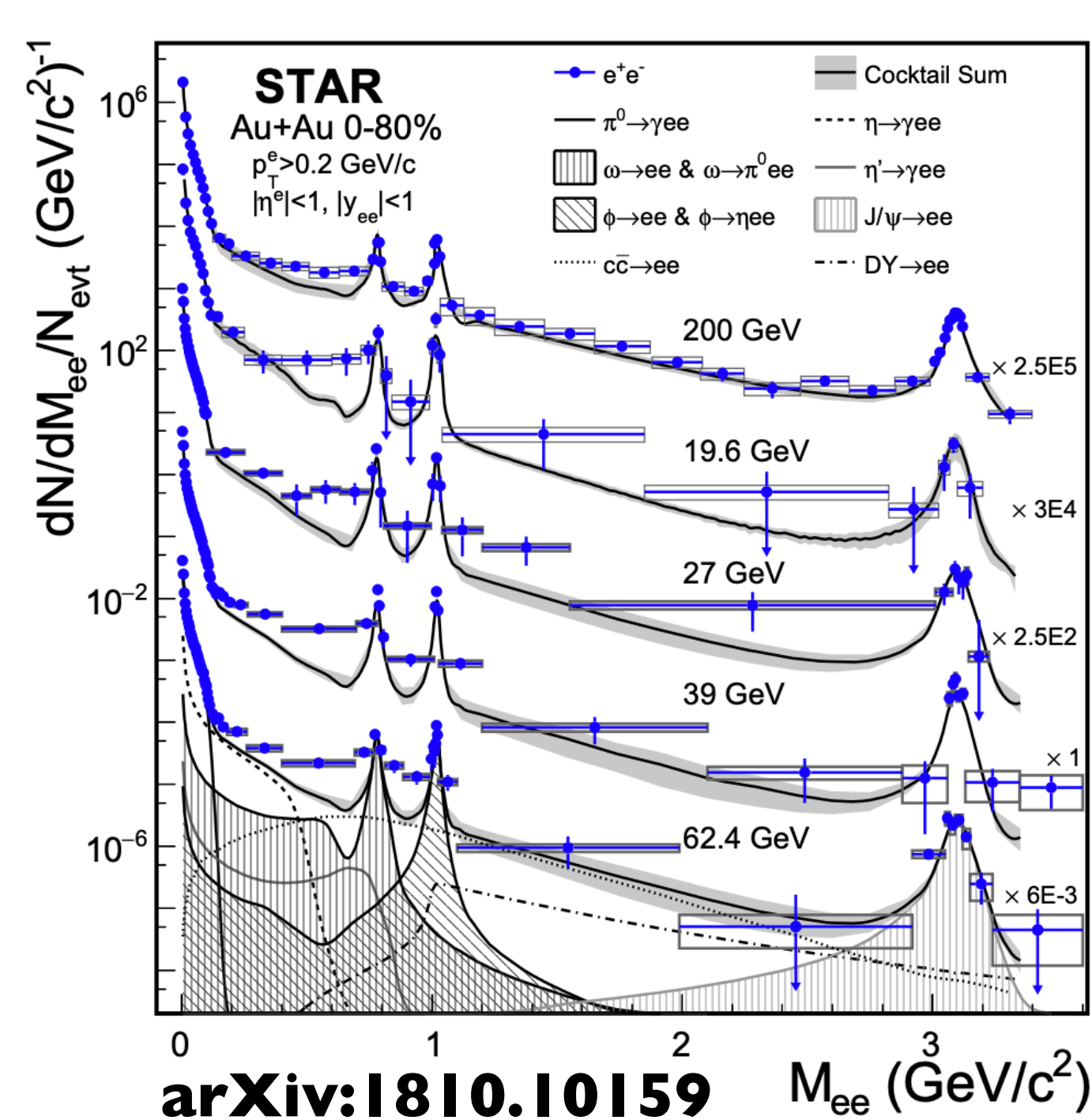




# レプトン対測定@high $\mu$ B

STAR-BES -II, NA60+, CBM, HADES

Tetyana Galatyuk, QM2018

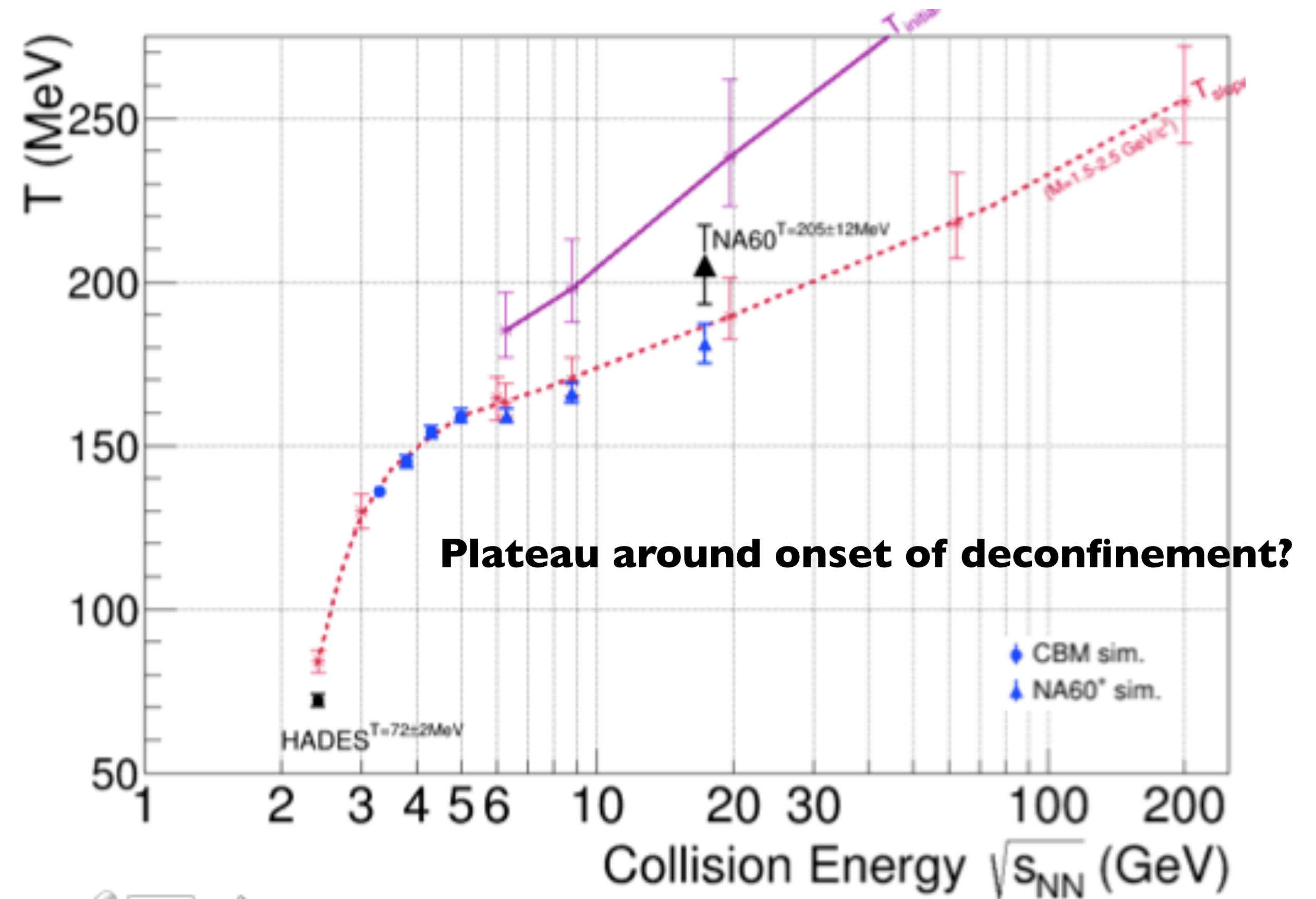
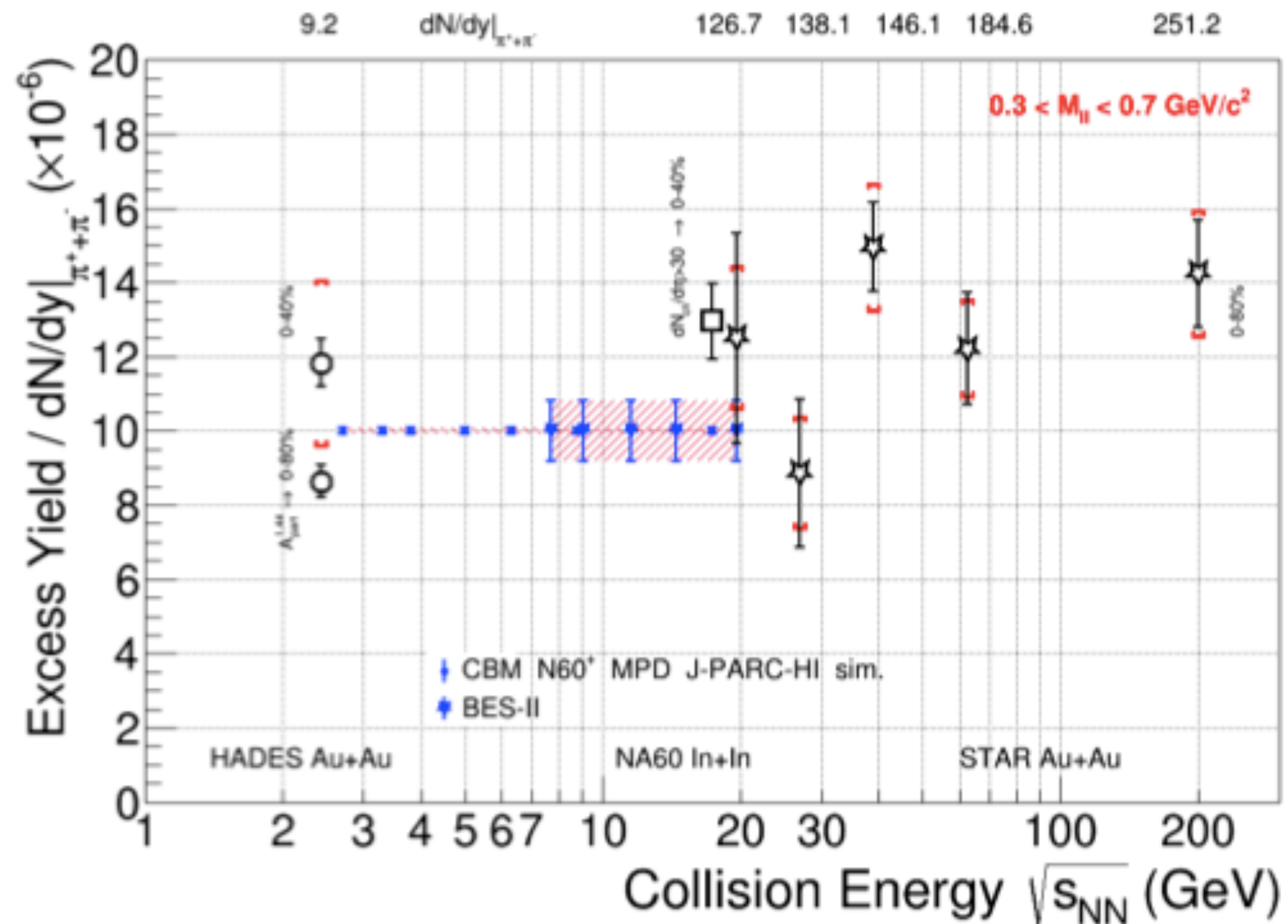


高統計データにより、  
質量スペクトルの変化  
熱的レプトン対の測定



# レプトン対測定@high $\mu_B$

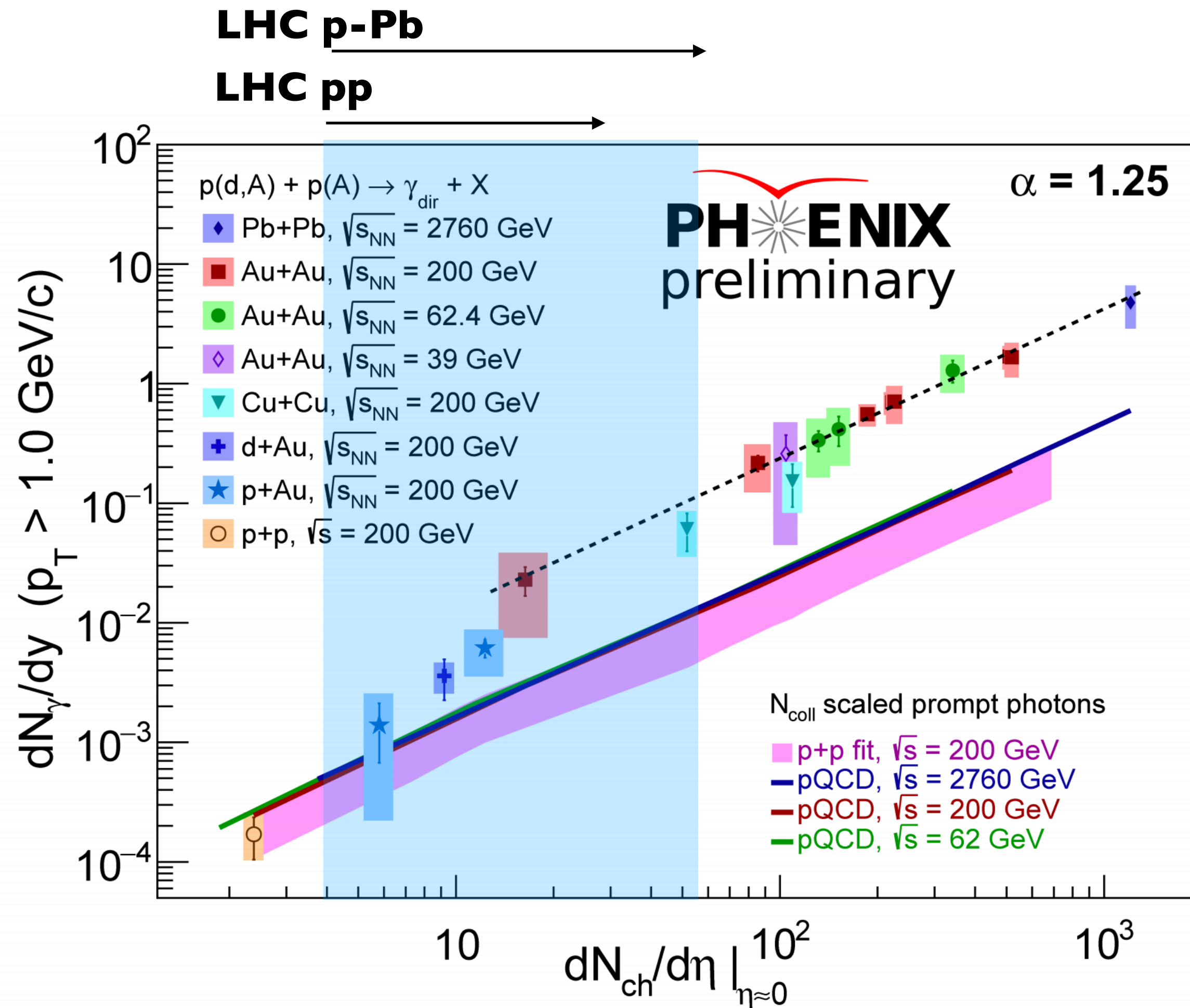
STAR-BES -II, NA60+, CBM, HADES



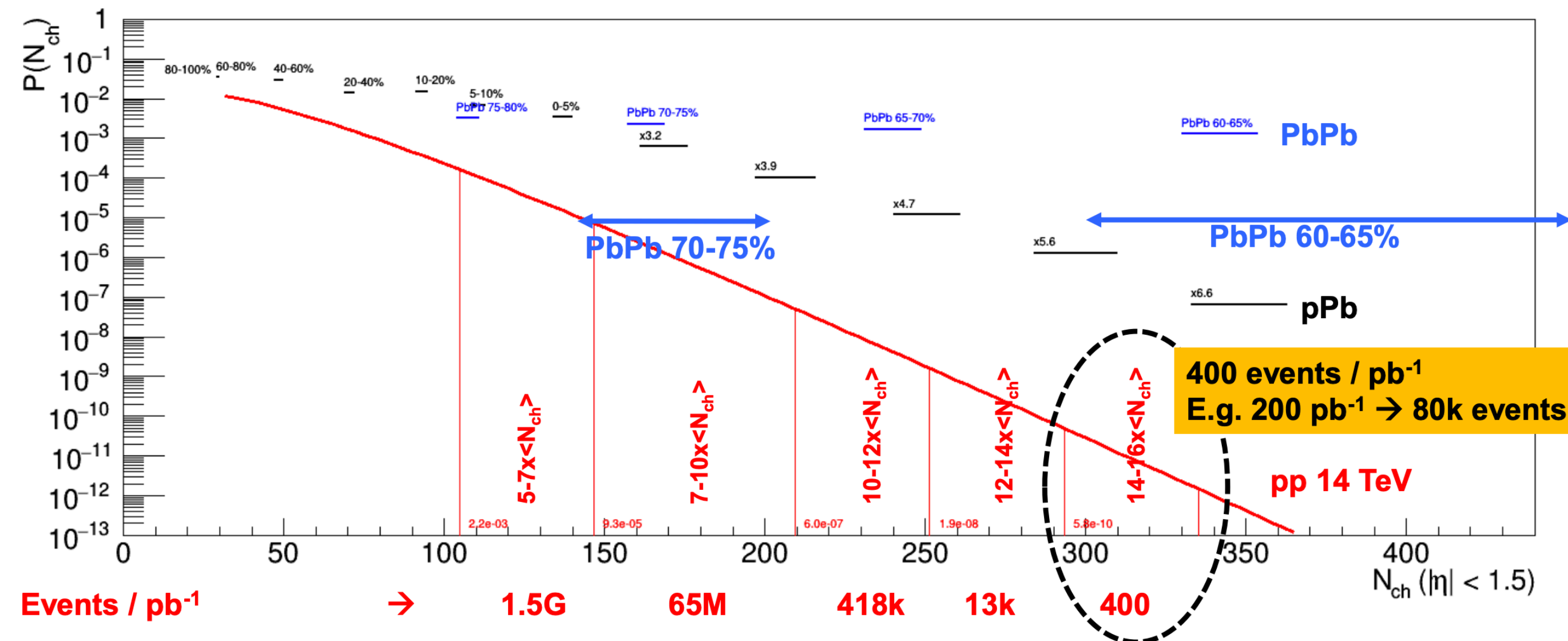
収量  $\rightarrow$  fireballの寿命(EoS)、相転移に伴う超過収量？

熱的レプトン対の質量分布  $\rightarrow$  平均温度(青方偏移なし)、QGP相転移？

# 小さい系での熱光子・レプトン対探索



**ALICE upgrade**

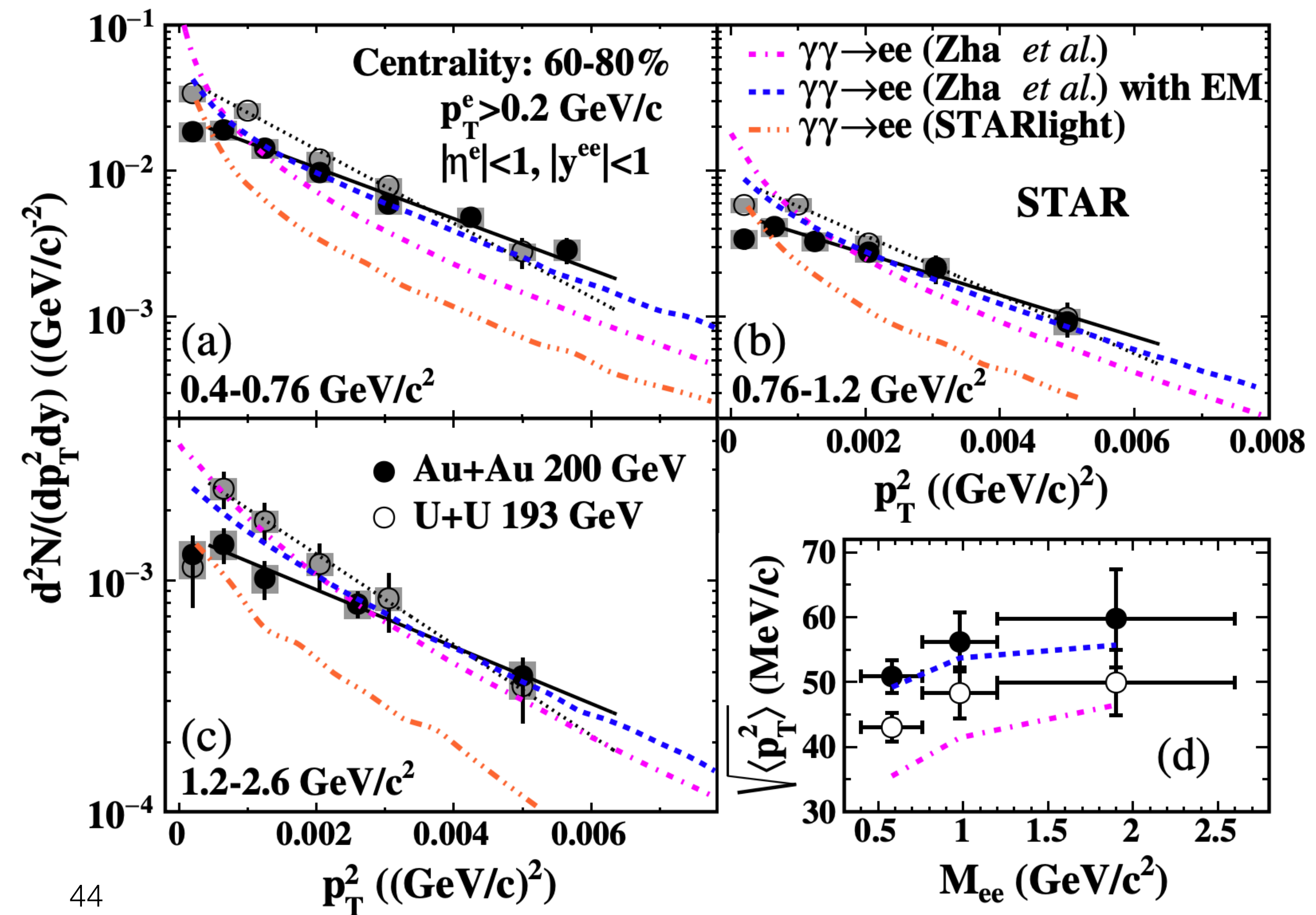
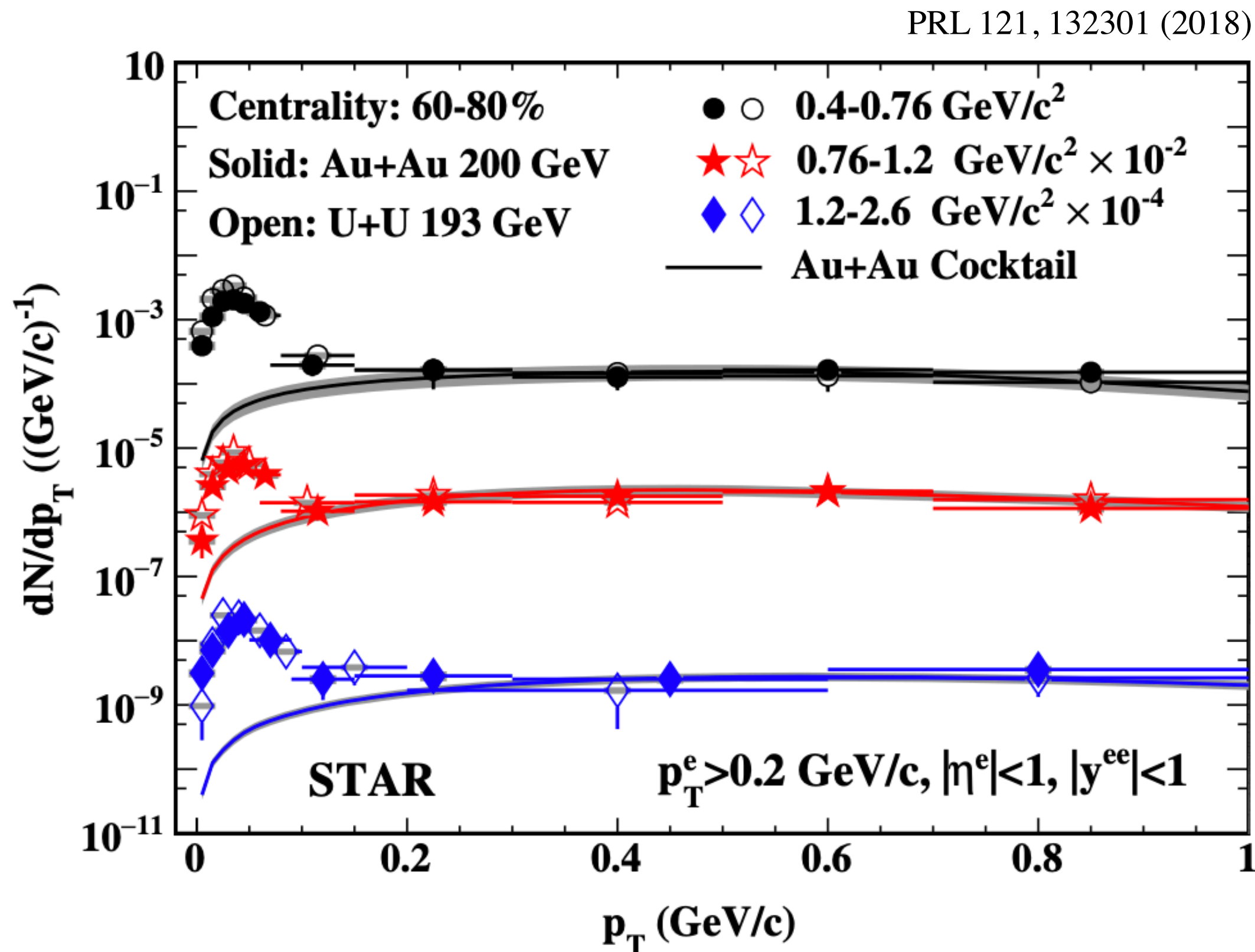




# 光子-光子→電子対

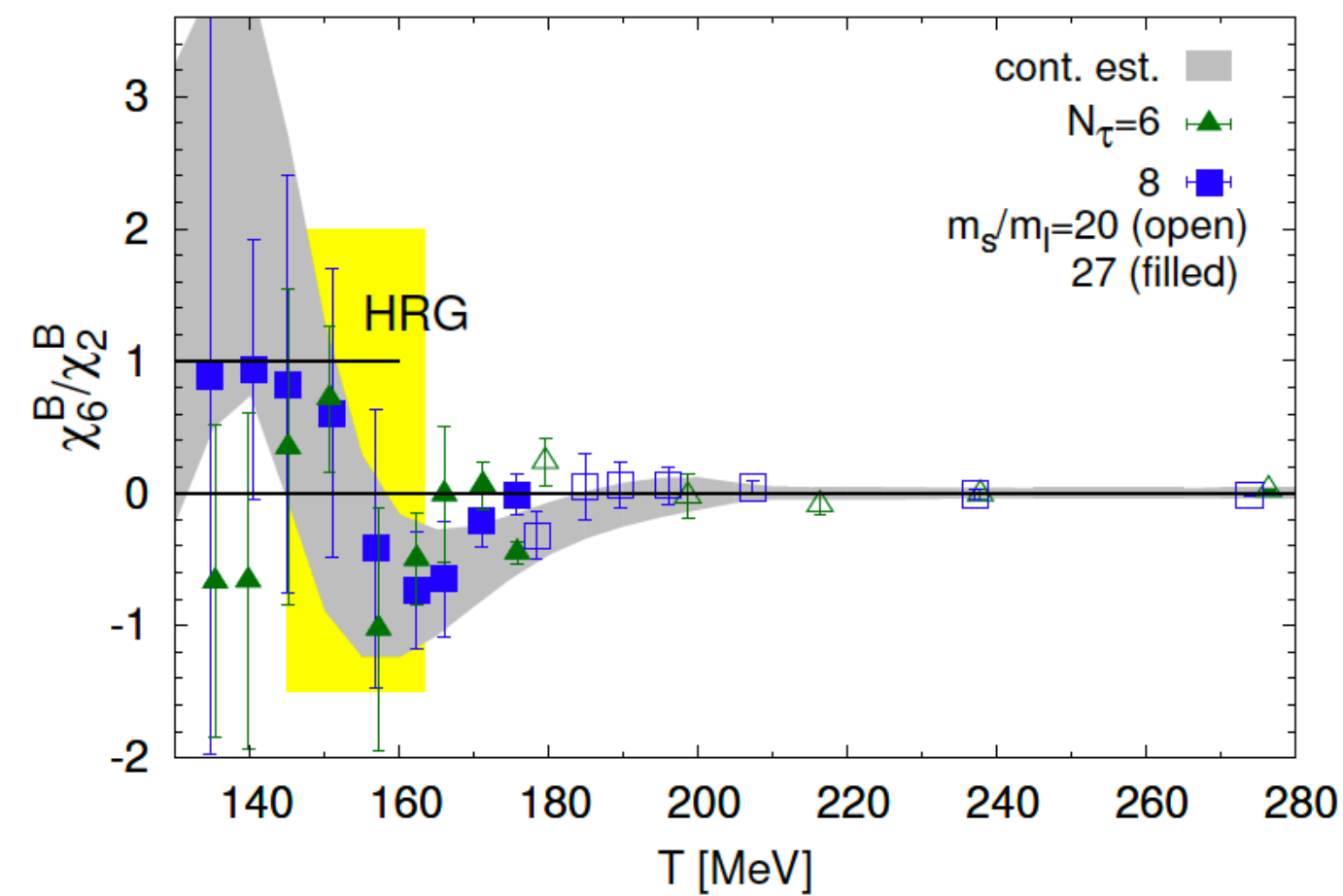
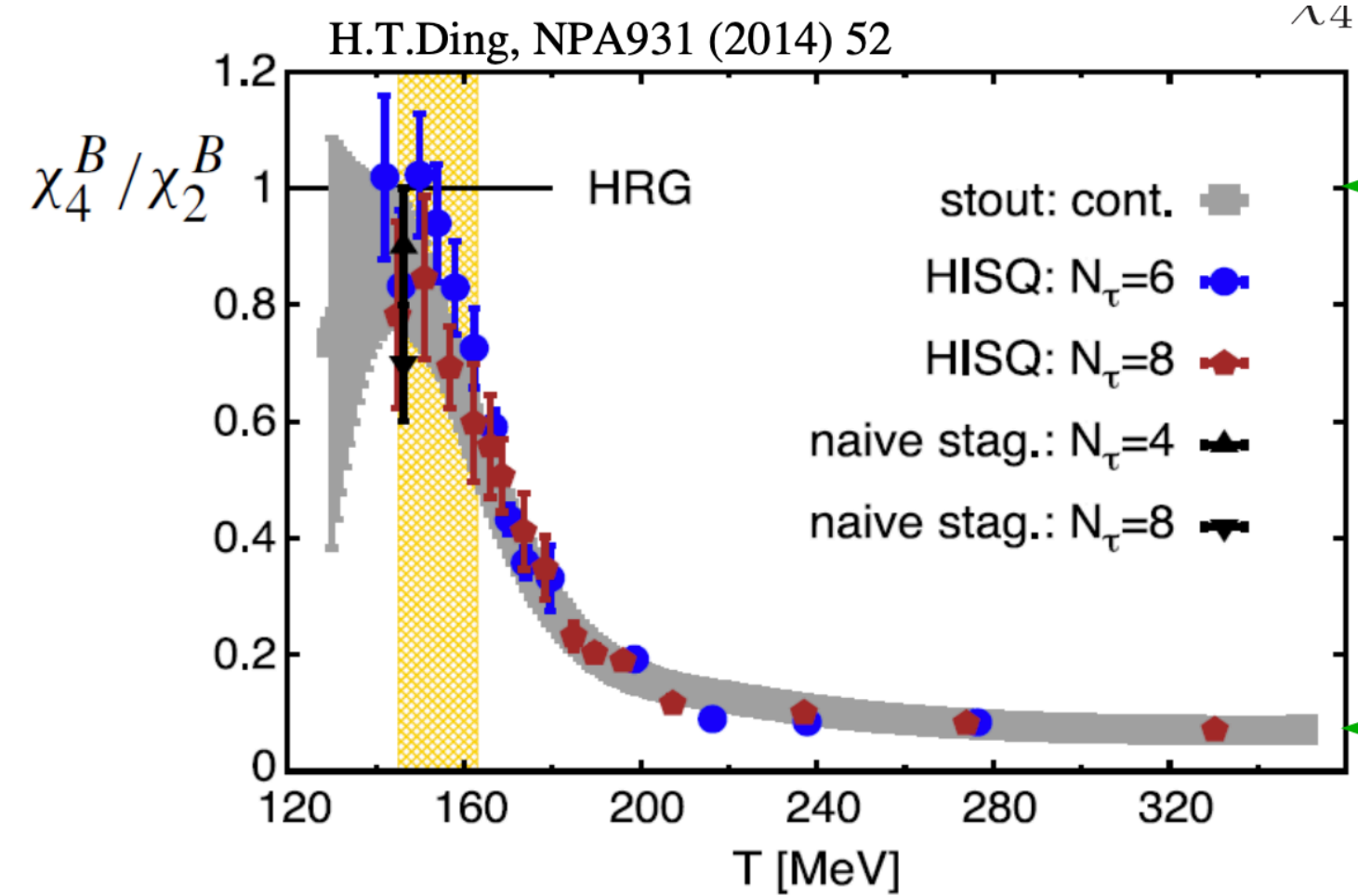
- 周辺衝突における光子-光子散乱の寄与を確認
- pair  $p_T$ のbroadening → 磁場の時間発展

ALICE upgrade, STAR

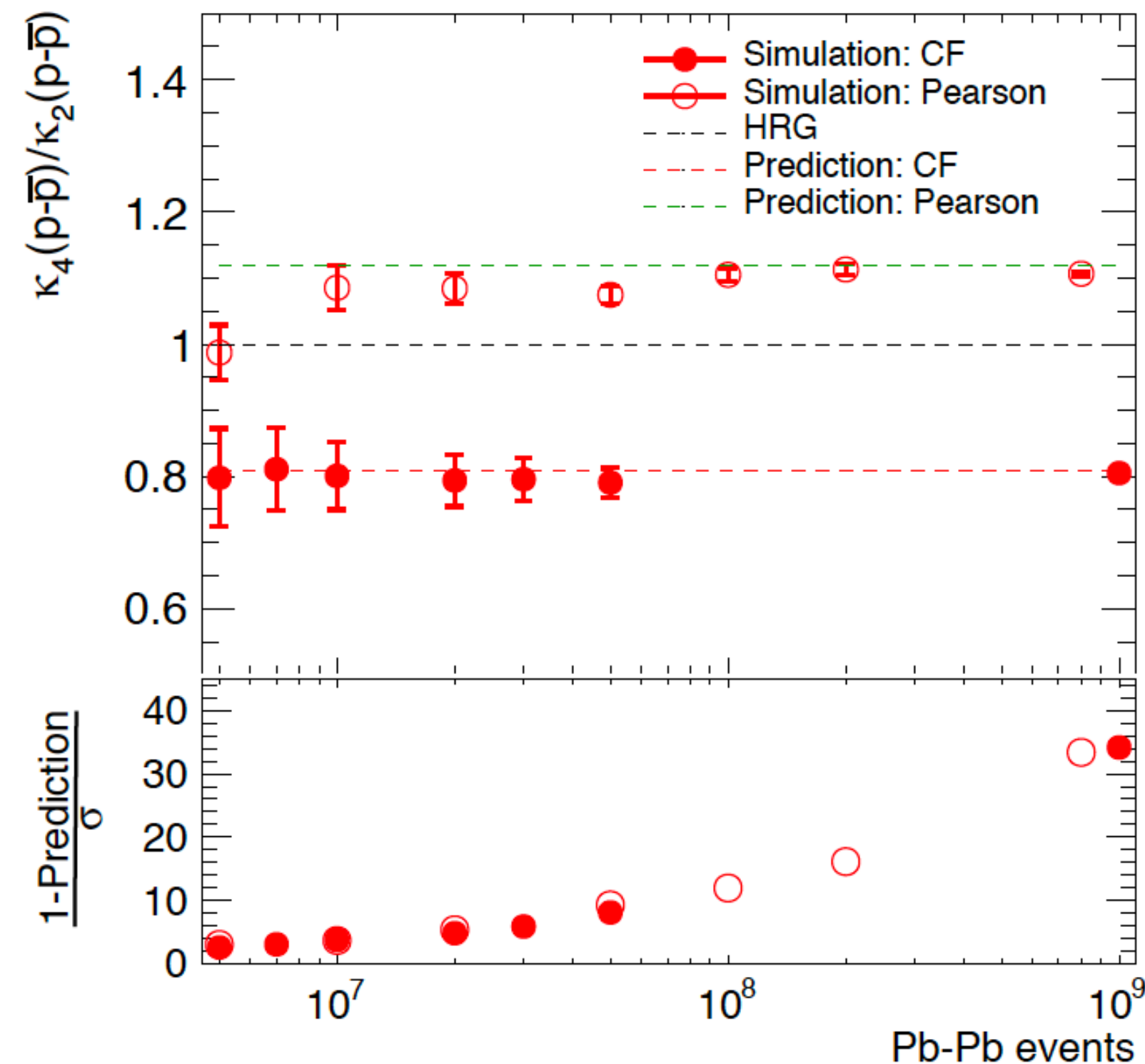


# 揺らぎと相転移

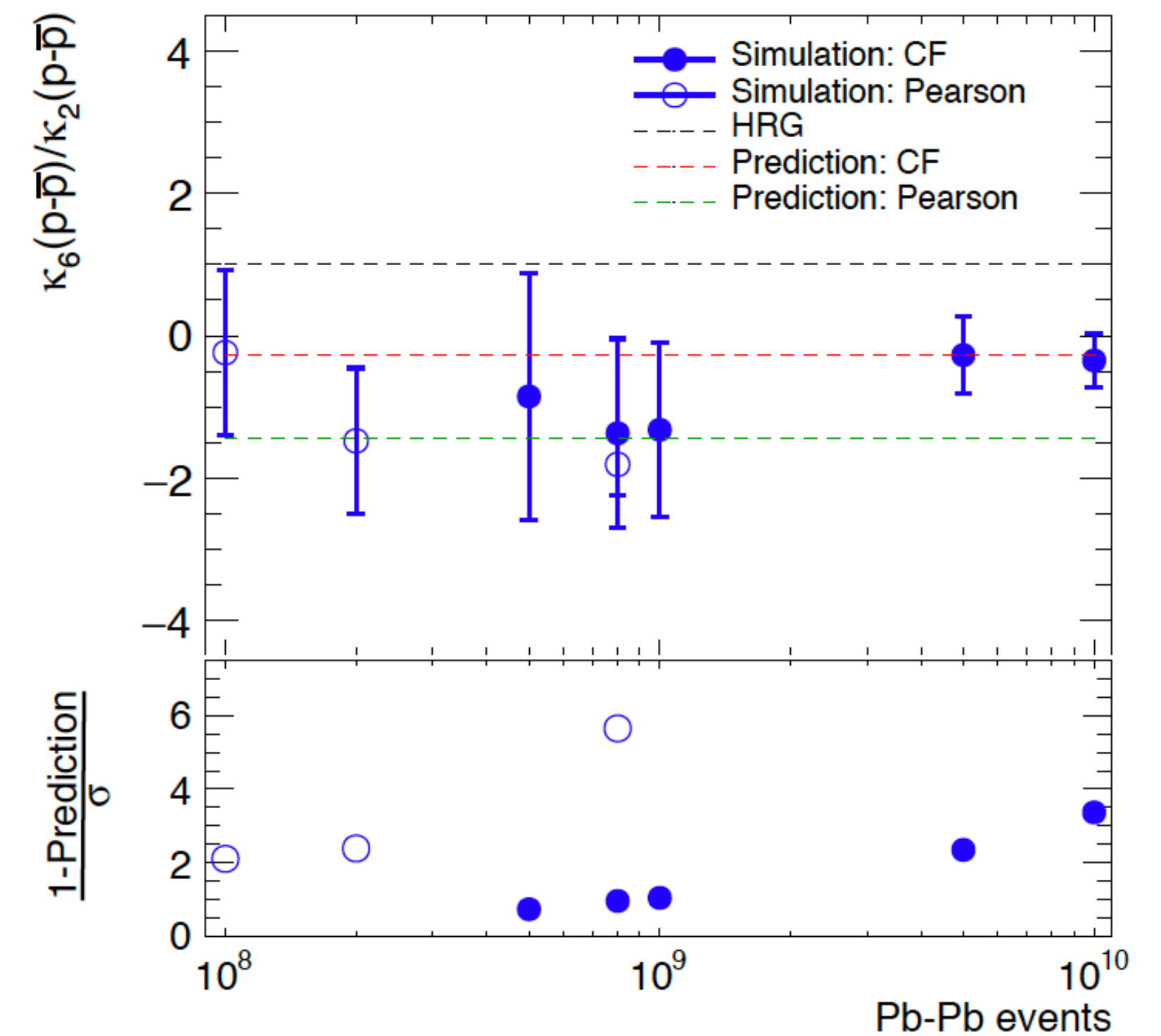
pseudo-critical temperatures of QCD chiral crossovers = 156.5 MeV  $\pm$  1.5 MeV  
 Chemical freeze out temperature measured by ALICE = 156.5 MeV  $\pm$  1.5 MeV  $\pm$  3 MeV



## ALICE upgrade



## ゆらぎ(4次、6次)の高精度測定 格子QCD計算との比較

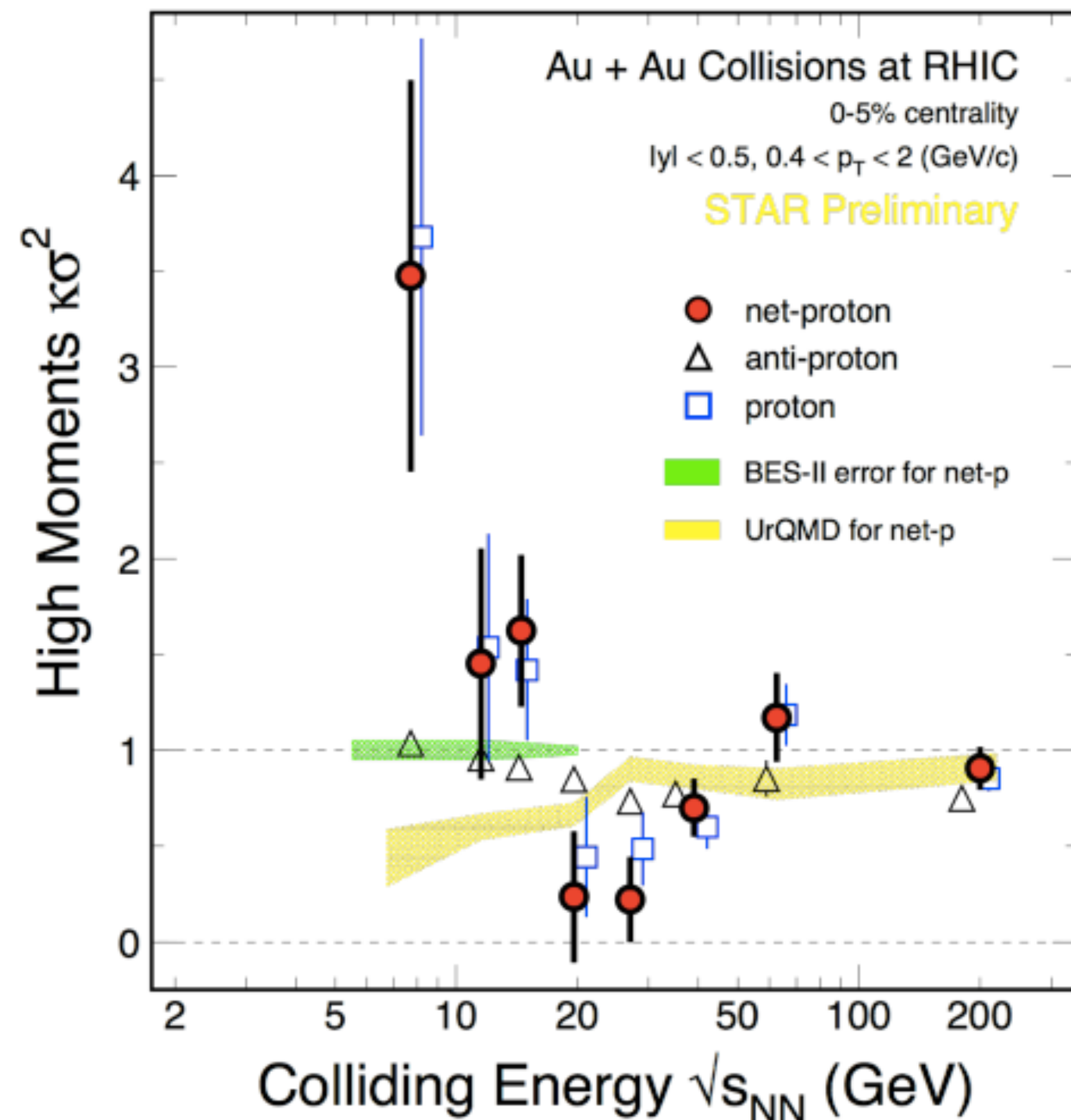




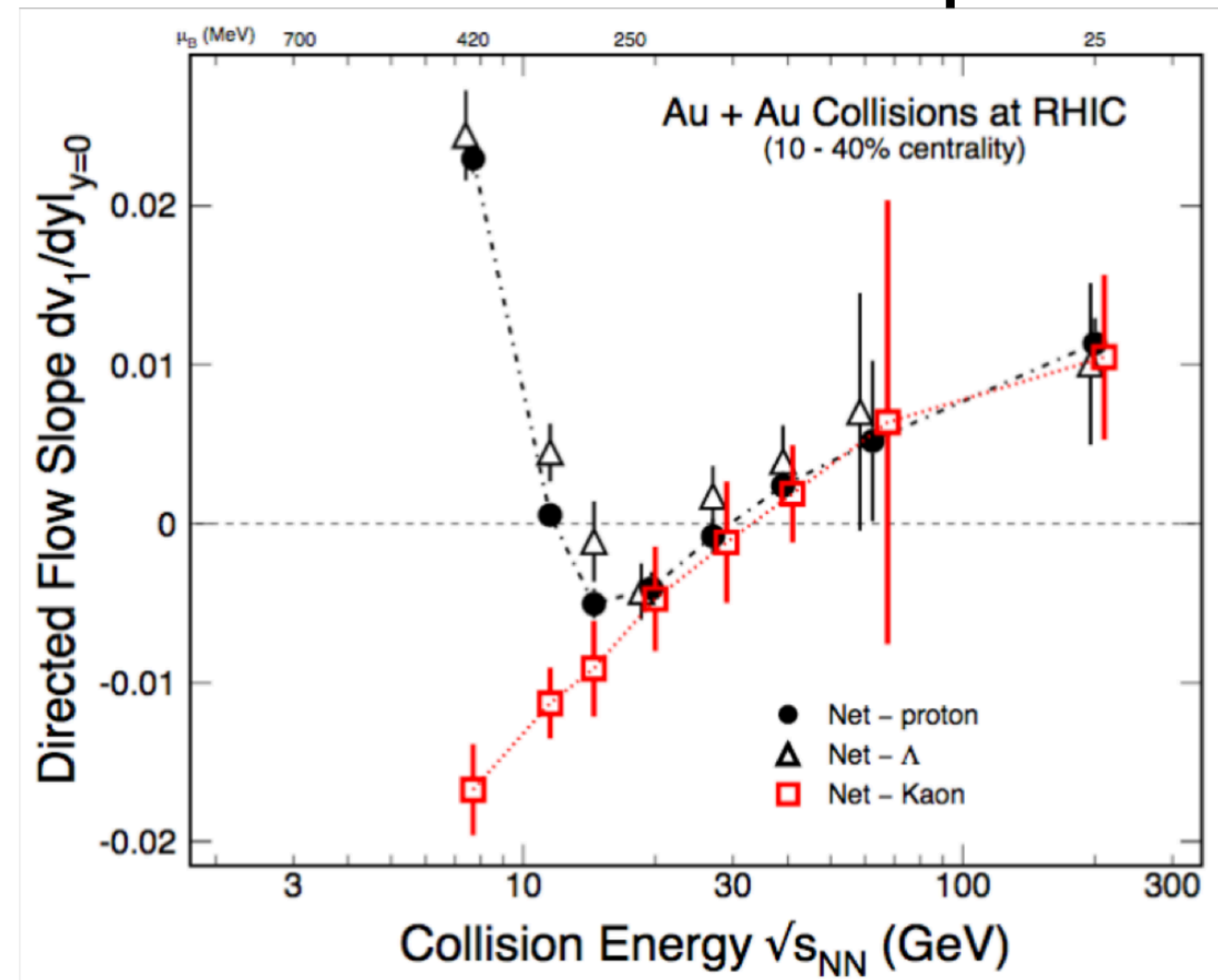
# 臨界点探索@STAR BES-II

STAR BES-II (2019-2021)

BES-IIにおいて、臨界点のヒントが得られるか？

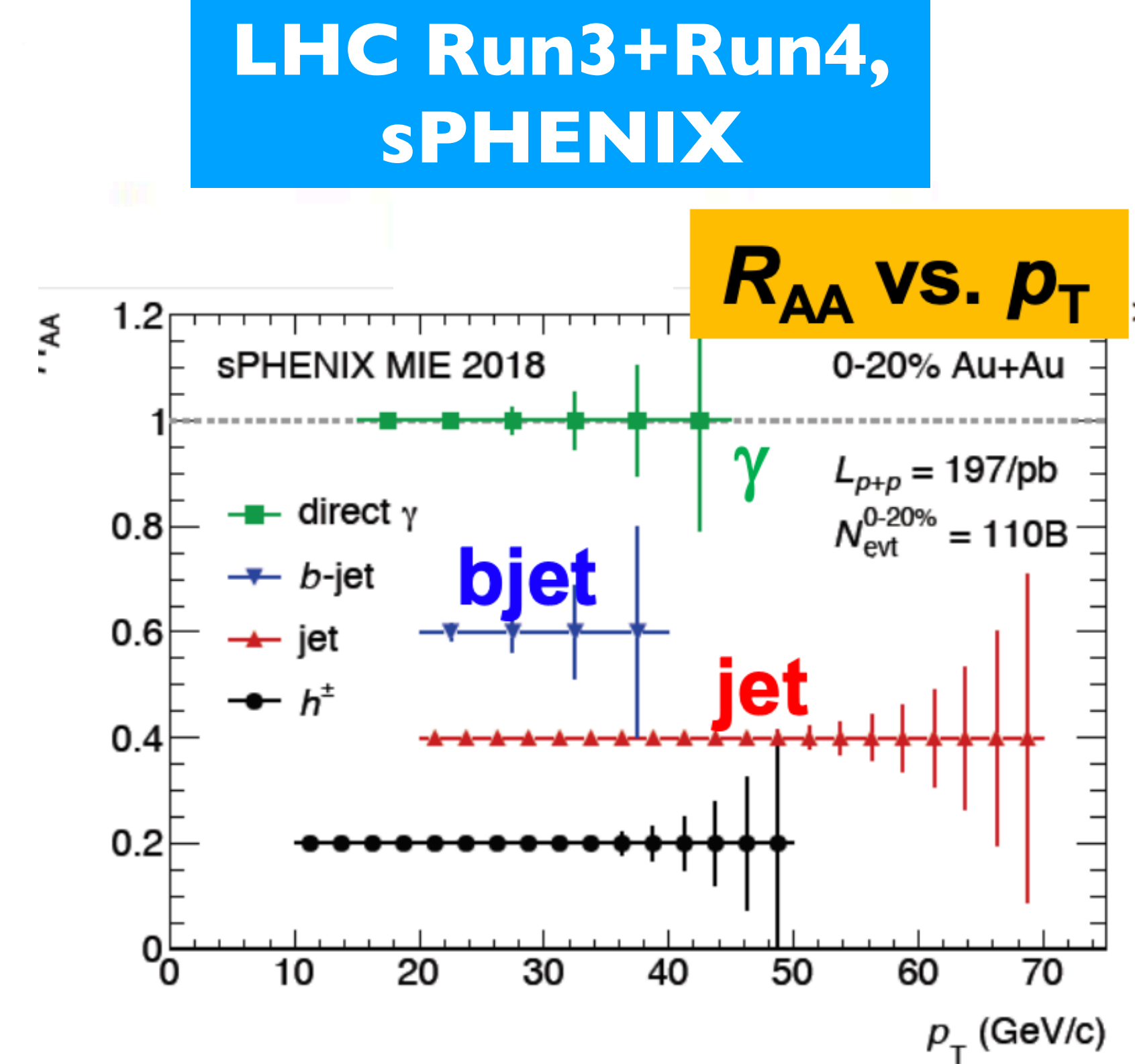
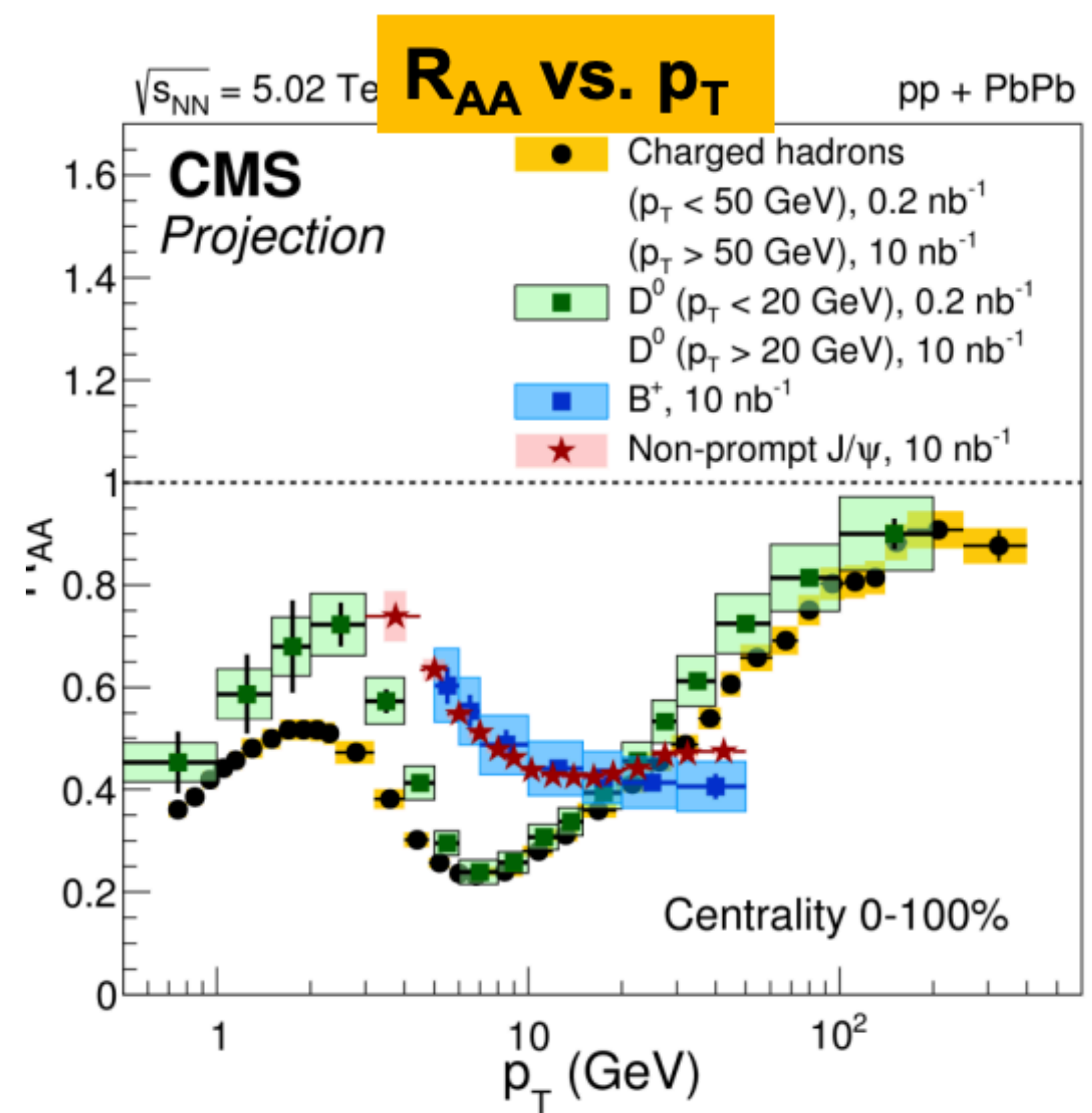
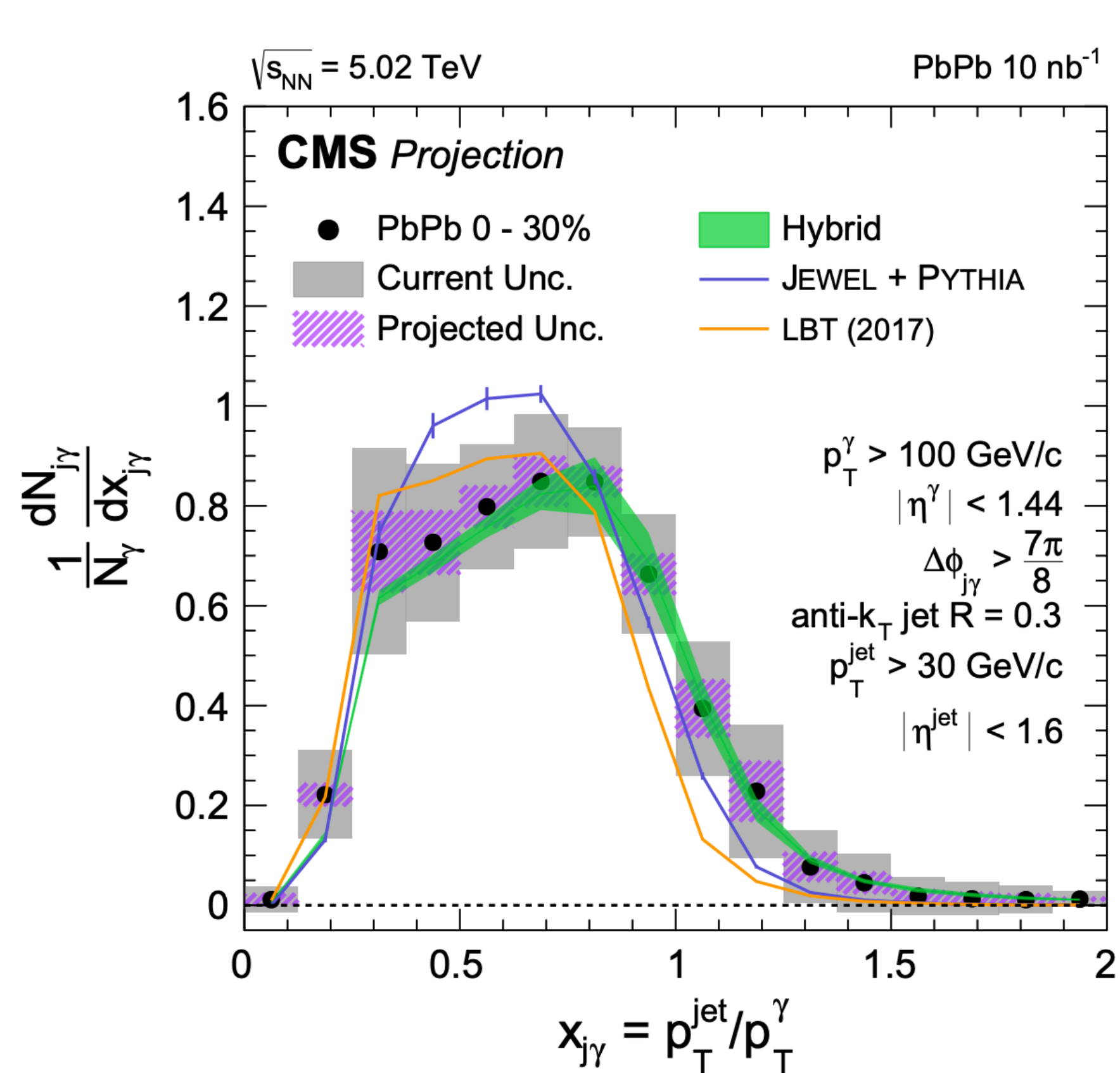


## Directed flow slope



# ジェットクエンチング

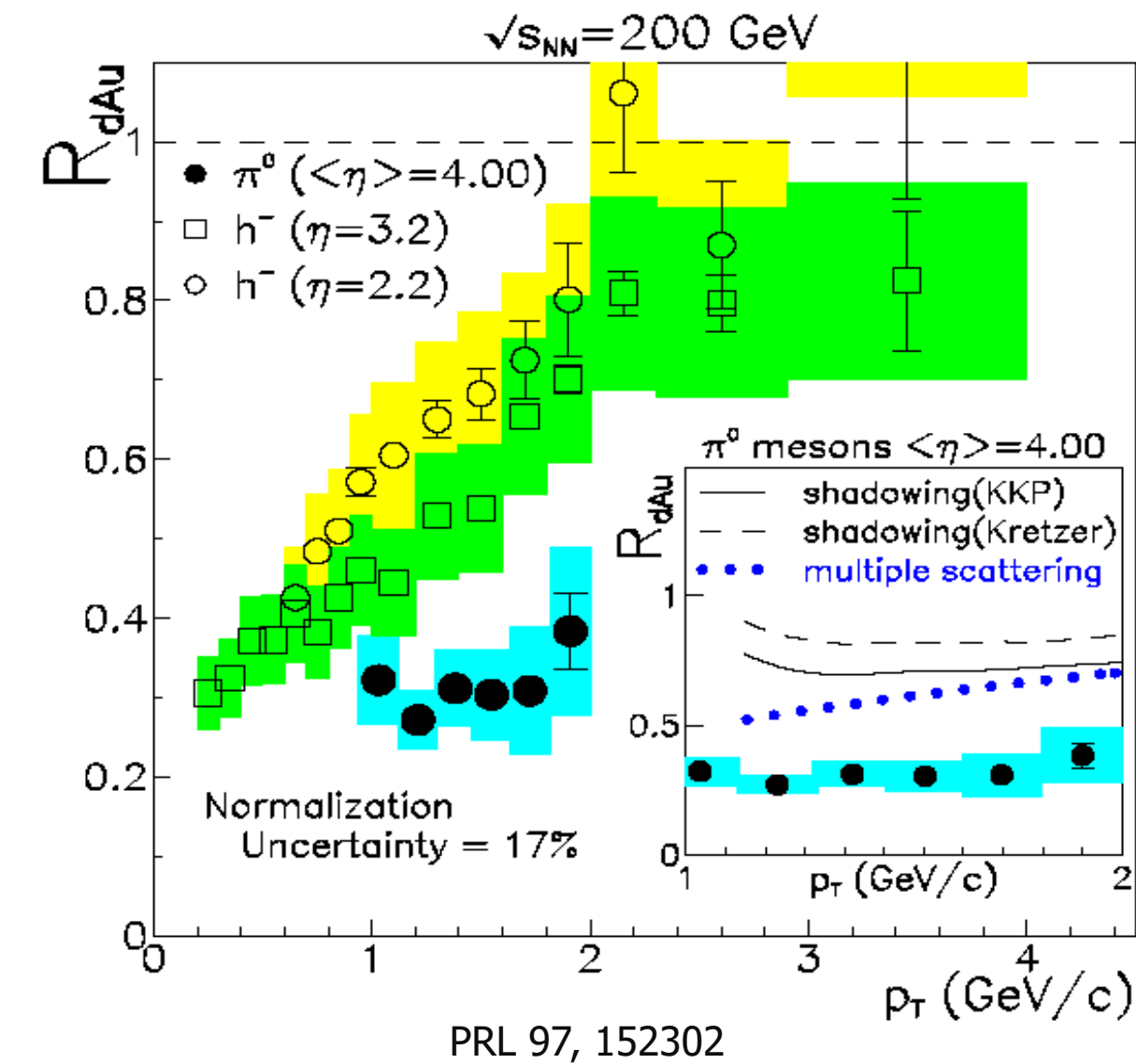
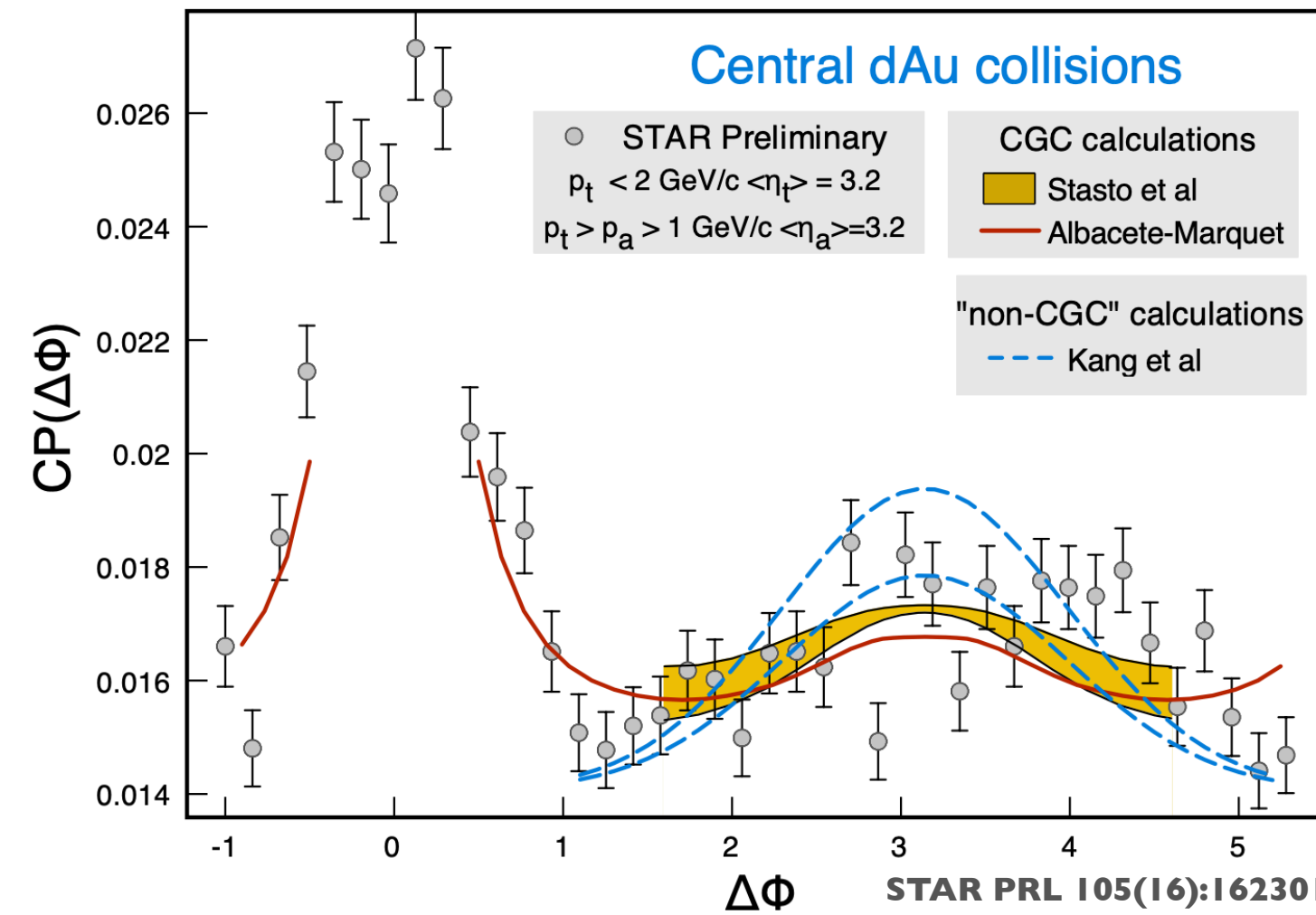
Z-jet,  $\gamma$ -jetなどの稀事象、jet substructure, フレーバー依存性、失ったエネルギーの振る舞い



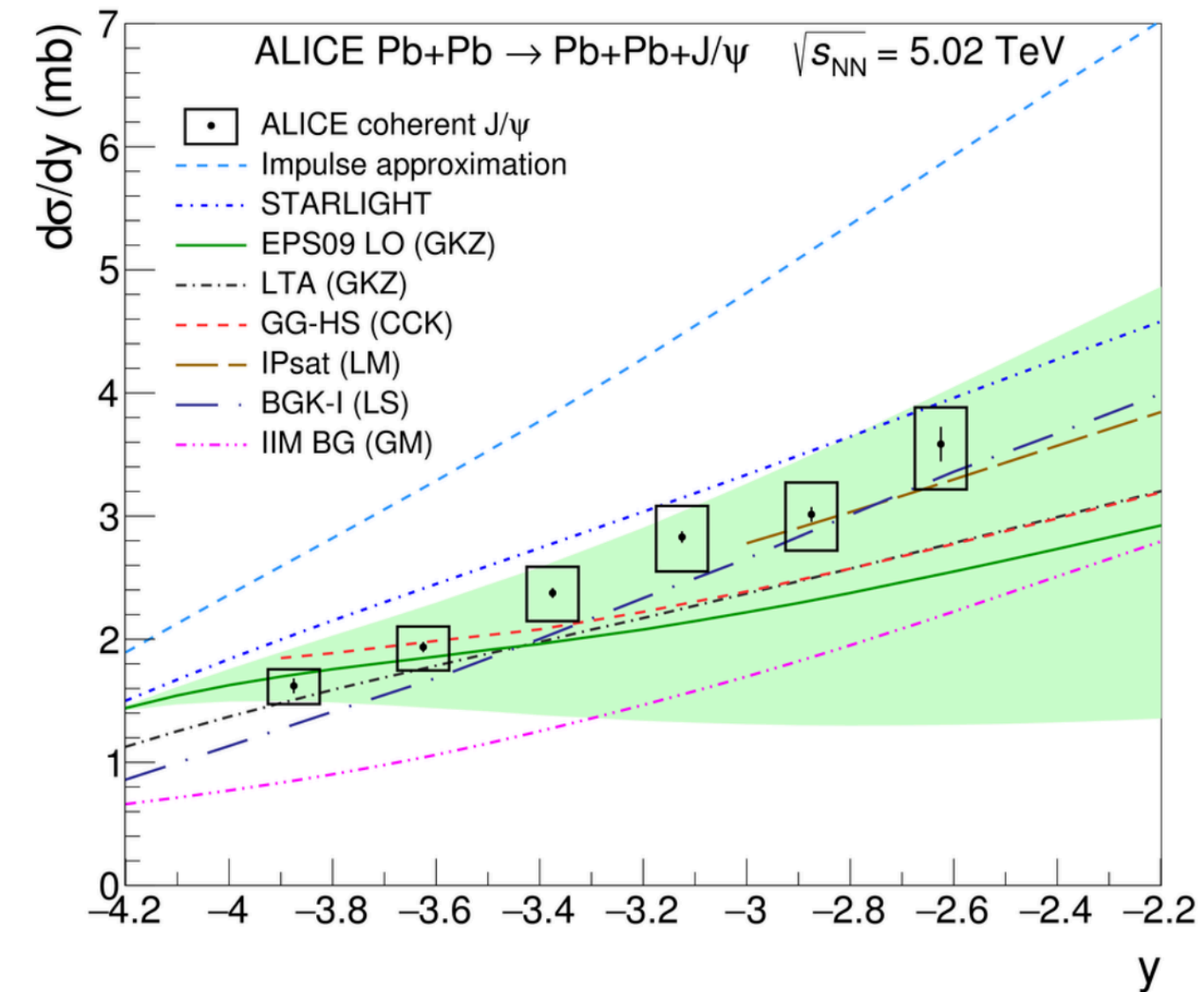
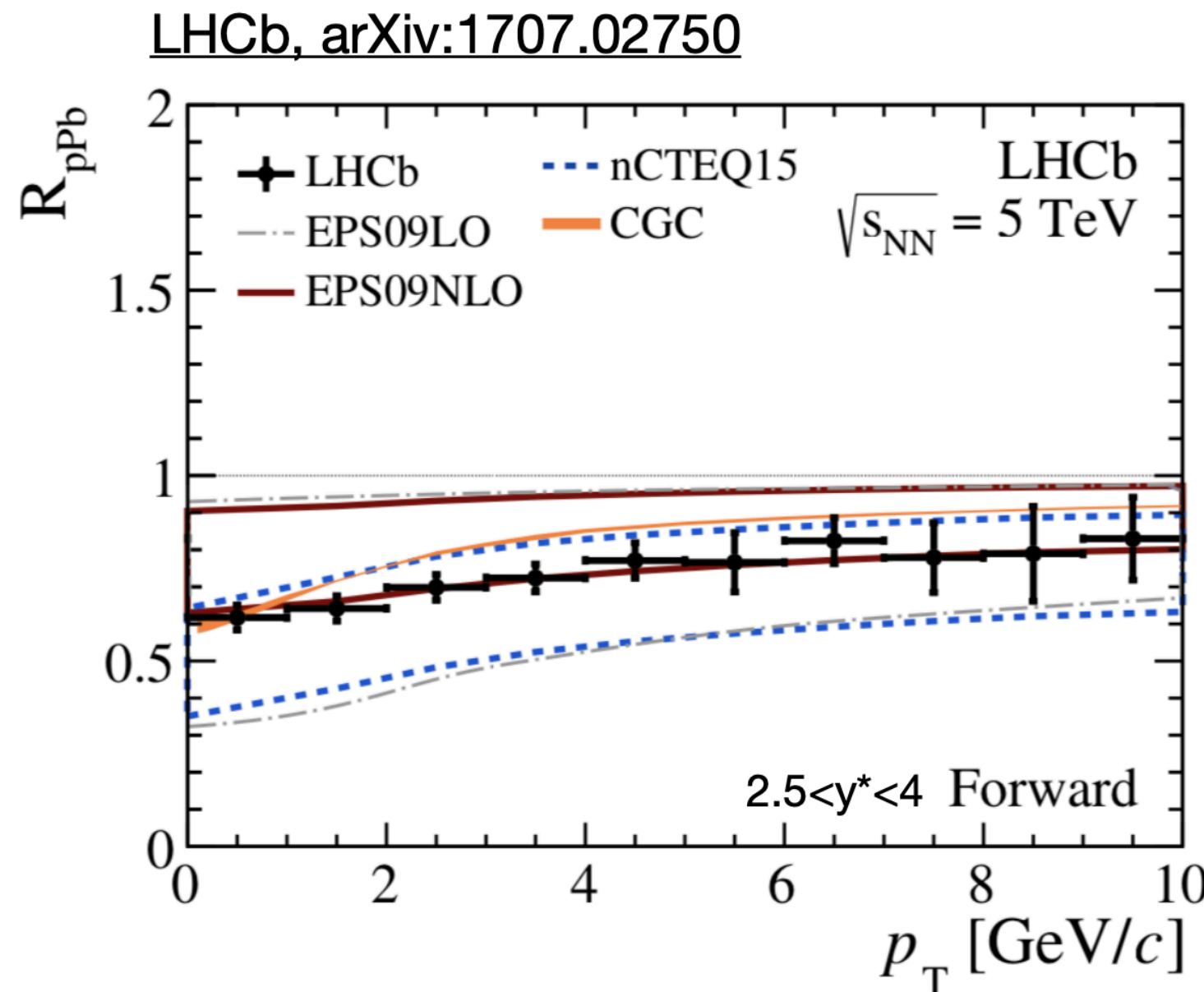


# 初期条件

$V_n$ を通じた粘性の決定において、最も大きな不定性を与えるもの  
初期条件を切り離すためにp-Aが行われているが、確定には至っていない？

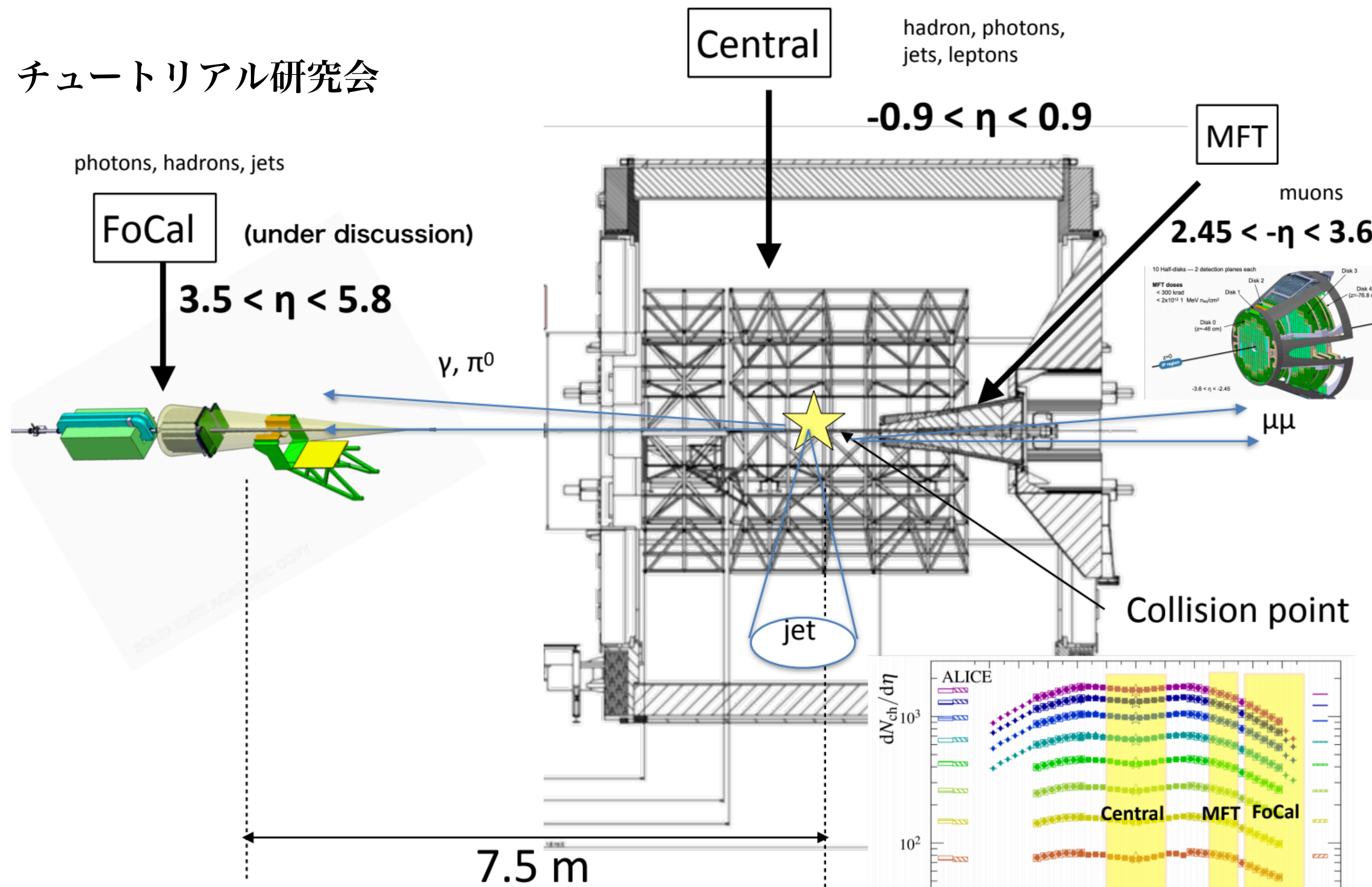


- 初期モデル
- MC Glauber
  - T<sub>RENTO</sub>
  - AMPT
  - IP Jazma
  - Nexus
  - MC KLN
  - EKRT
  - IP Glasma
  - CGC

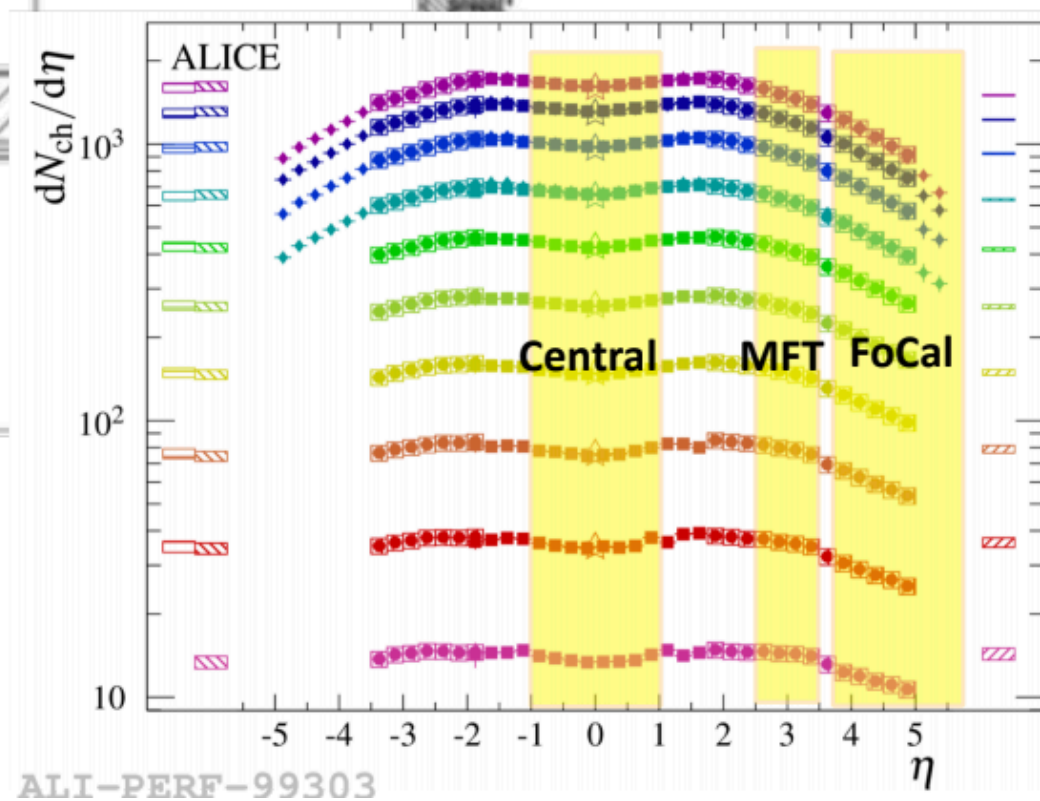


# 初期条件

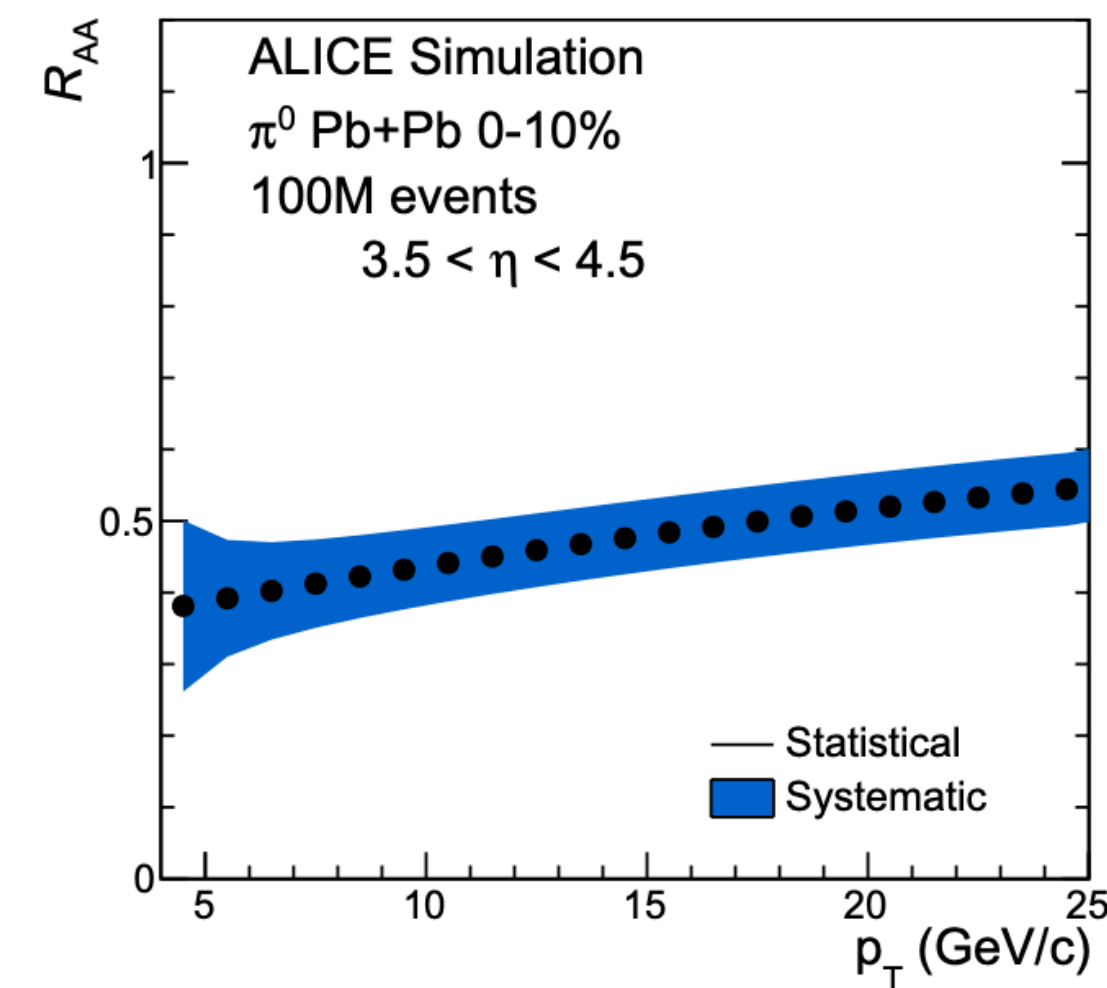
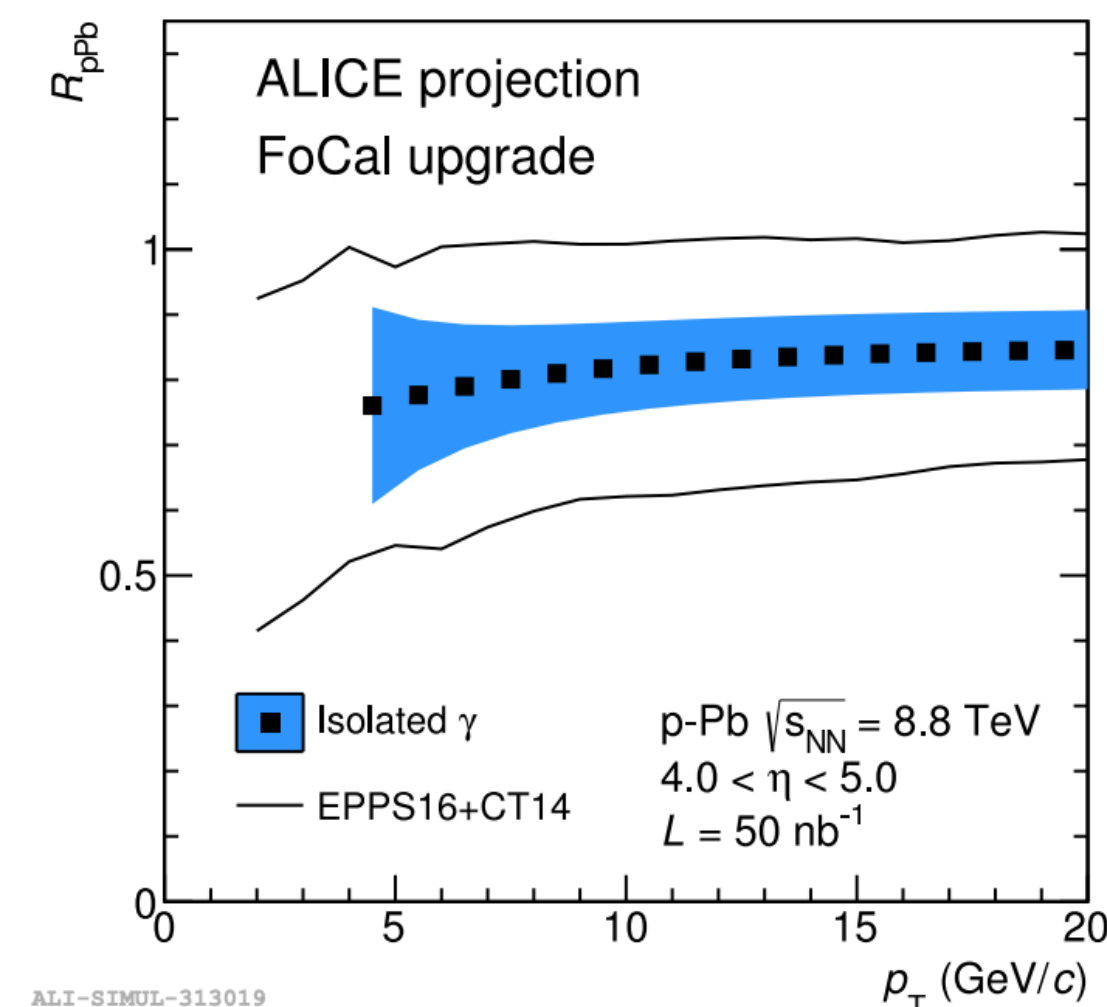
中條さん、チュートリアル研究会



**ALICE Forward Upgrade (Run-3/4)**



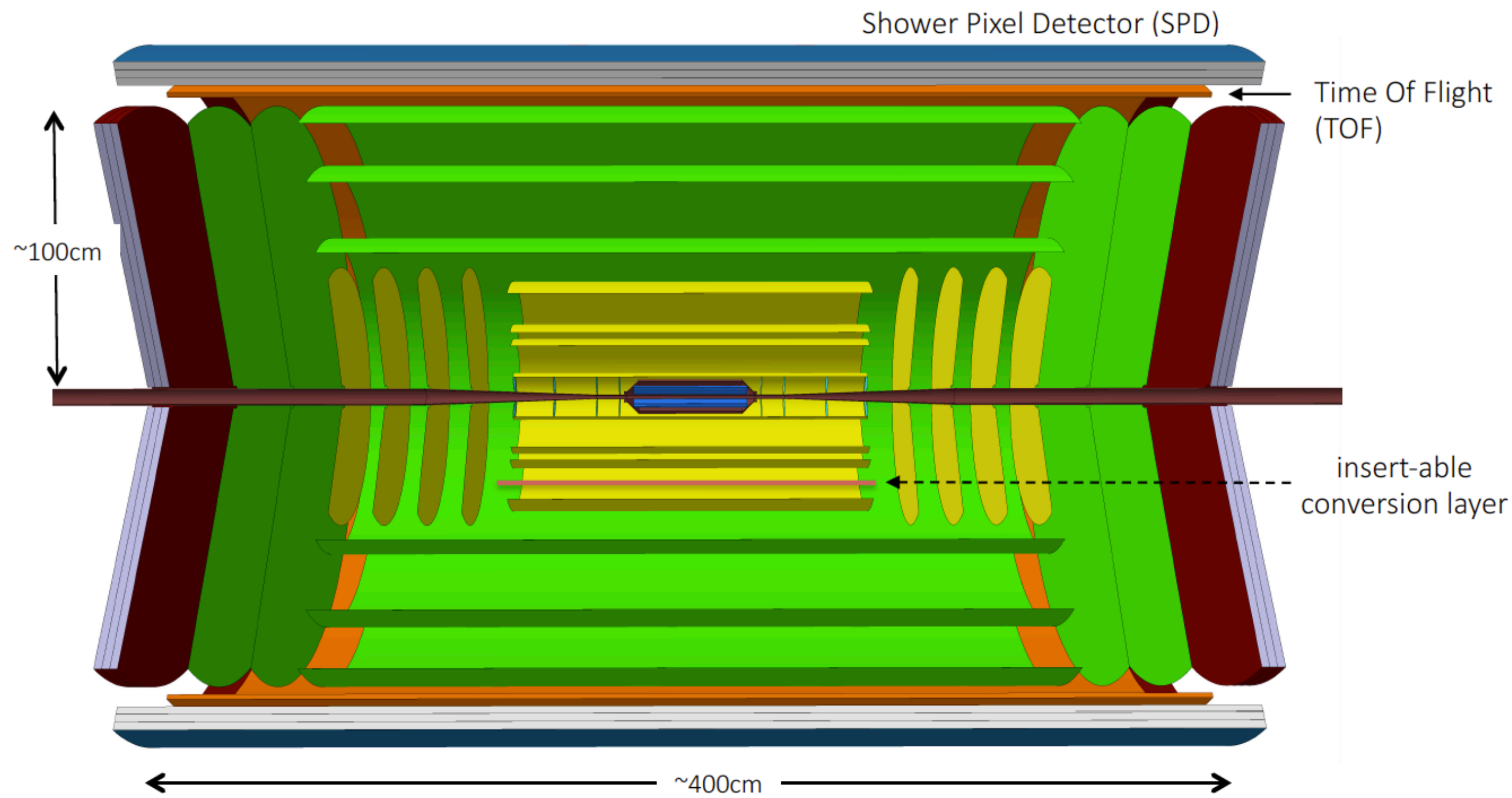
## ALICE upgrade in Run4?





# Next ALICE beyond 2030

arXiv:1902.01211



## A next-generation LHC heavy-ion experiment

*Authors*

### Abstract

The present document discusses plans for a compact, next-generation multi-purpose detector at the LHC as a follow-up to the present ALICE experiment. The aim is to build a nearly massless barrel detector consisting of truly cylindrical layers based on curved wafer-scale ultra-thin silicon sensors with MAPS technology, featuring an unprecedented low material budget of  $0.05\% X_0$  per layer, with the innermost layers possibly positioned inside the beam pipe. In addition to superior tracking and vertexing capabilities over a wide momentum range down to a few tens of MeV/c, the detector will provide particle identification via time-of-flight determination with about 20 ps resolution. In addition, electron and photon identification will be performed in a separate shower detector. The proposed detector is conceived for studies of pp, pA and AA collisions at luminosities a factor of 20 to 50 times higher than possible with the upgraded ALICE detector, enabling a rich physics program ranging from measurements with electromagnetic probes at ultra-low transverse momenta to precision physics in the charm and beauty sector.

Geneva, Switzerland  
December 10, 2018

# 狙う物理

F.Antinori, FoCAL workshop @ Tsukuba (2019)

- Heavy-flavor and quarkonia

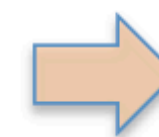
- Multiply Heavy Flavoured hadrons. e.g.:  $\Xi_{cc}$ ,  $\Omega_{cc}$ ,  $\Omega_{ccc}$
- $\chi_{c1,2}$  states
- Ultimate precision on B mesons at low  $p_T$
- X, Y, Z charmonium-like states (e.g. X(3872))



Hadron formation from deconfined QGP

- Low-mass dielectrons

- Precision measurement of the thermal dilepton continuum,  $0 < m < 3\text{GeV}$



Chiral symmetry restoration  $\rho$ -a1 sector



- Real soft photons

- down to 50MeV/c



QGP Radiation uncharted phase space region

- Real ultra-soft photons

- Very low  $p_T$  photons:  $1\text{MeV}/c < p_T^\gamma < 100\text{MeV}/c$
- dedicated small forward spectrometer at  $3.5 < |\eta| < 5$

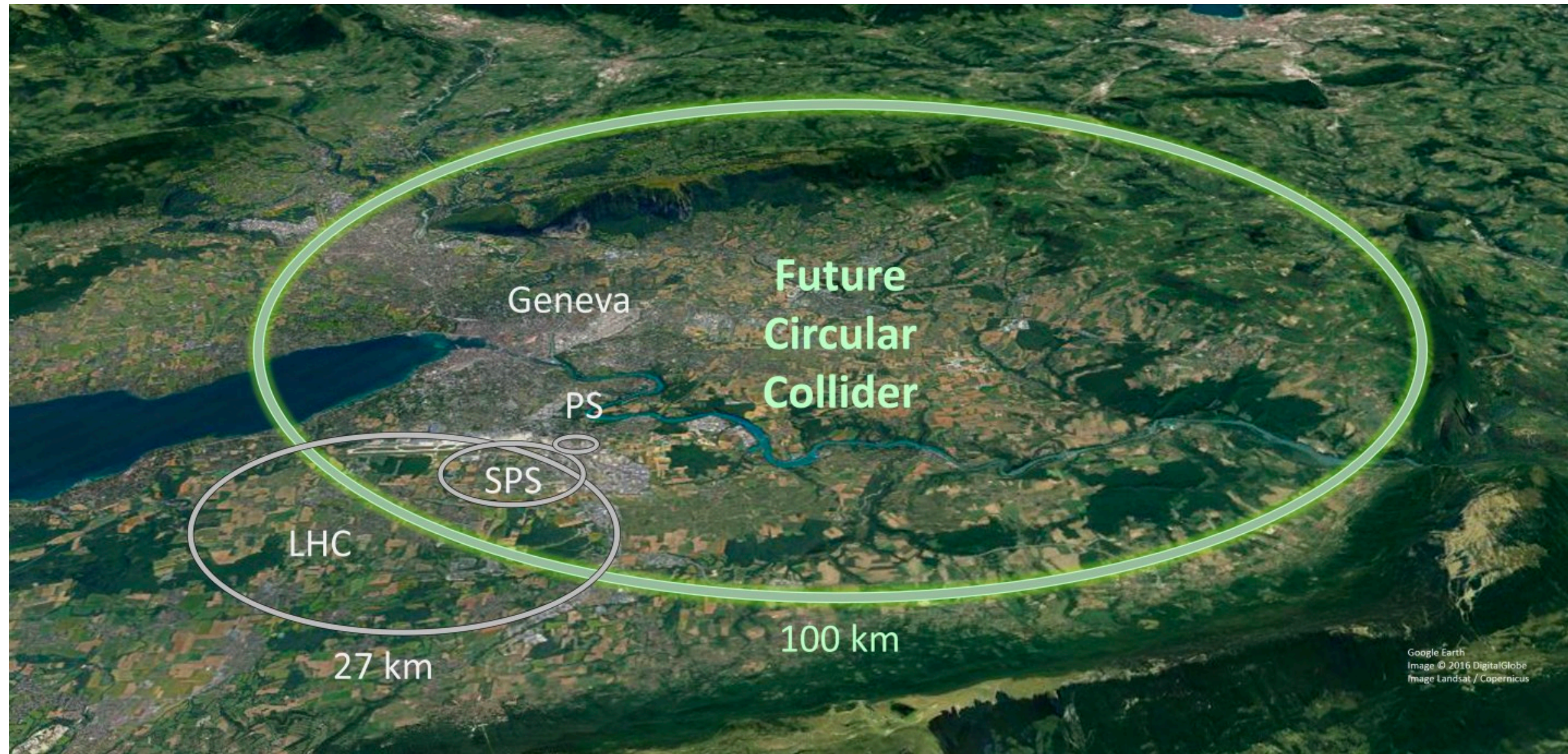


Test of soft theorems

何かアイデアがあれば、教えてください！！



# Future Circular Collider



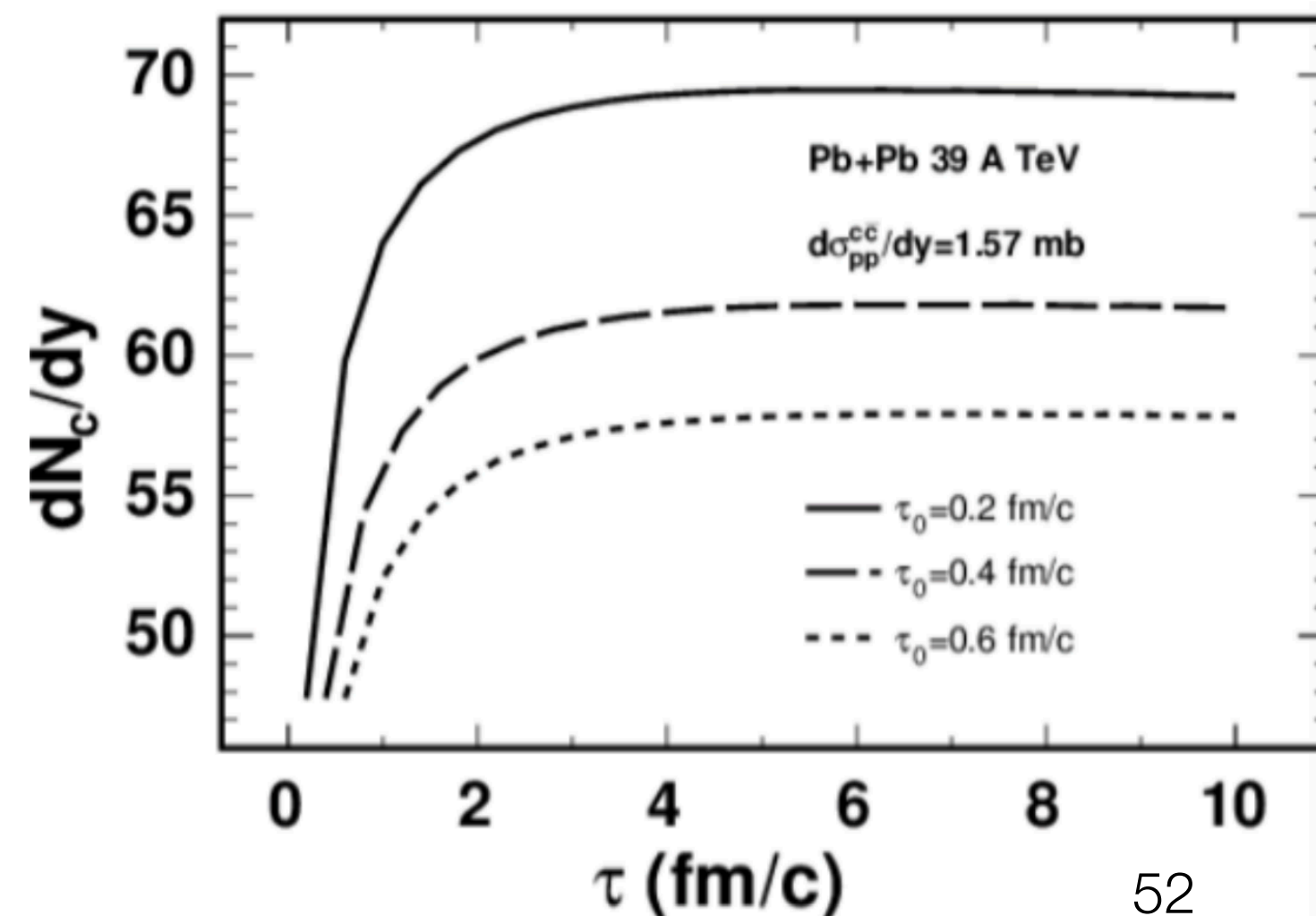
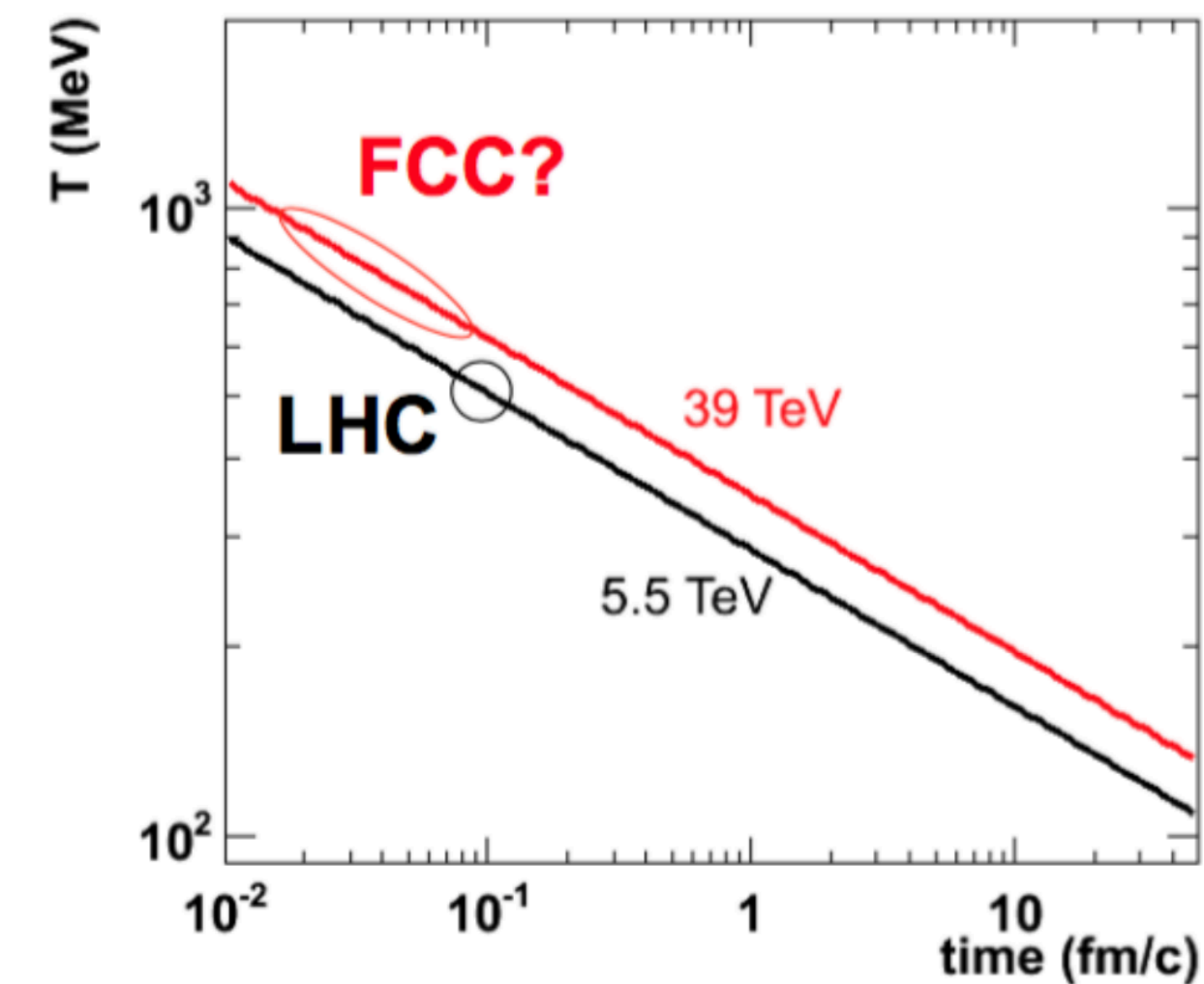
Quantity	Pb–Pb 2.76 TeV	Pb–Pb 5.5 TeV	Pb–Pb 39 TeV
$dN_{ch}/d\eta$ at $\eta = 0$	1600	2000	3600
$dE_T/d\eta$ at $\eta = 0$	1.8–2.0 TeV	2.3–2.6 TeV	5.2–5.8 TeV
Homogeneity volume	5000 fm <sup>3</sup>	6200 fm <sup>3</sup>	11000 fm <sup>3</sup>
Decoupling time	10 fm/c	11 fm/c	13 fm/c
$\varepsilon$ at $\tau = 1$ fm/c	12–13 GeV/fm <sup>3</sup>	16–17 GeV/fm <sup>3</sup>	35–40 GeV/fm <sup>3</sup>

- FCC: 100km accelerator after LHC
- FCC-hh : 2045 as earliest. Lumi ~ x10 LHC

## Some interesting observables:

- Flow, Thermal photons and dileptons
  - Transition to wQGP?
- Thermal charm production
- $\Upsilon$ (IS) regeneration
- Boosted top quark energy loss
- Gluon saturation

arXiv:1605.01389

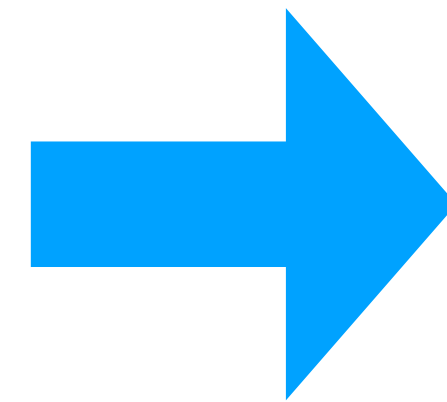




# まとめ

- 今後のテーマ

- QGP物性の温度依存性の研究
  - 相転移近傍のダイナミクス
  - 高密度QCDの研究
  - 強磁場の物理(相構造、アノマリー)
- ALICE upgrade, sPHENIX,  
STAR BES-II, FAIR, J-PARC-HI
  - next ALICE実験、FCC



## 非摂動領域QCDの理解

(如何にして、フェムトスケールで流体的な振舞が実現するのか?)

強い相互作用が齎すQCD物質の多様性とその発現機構の解明



今後ともよろしくお願ひします



**Backup slides**

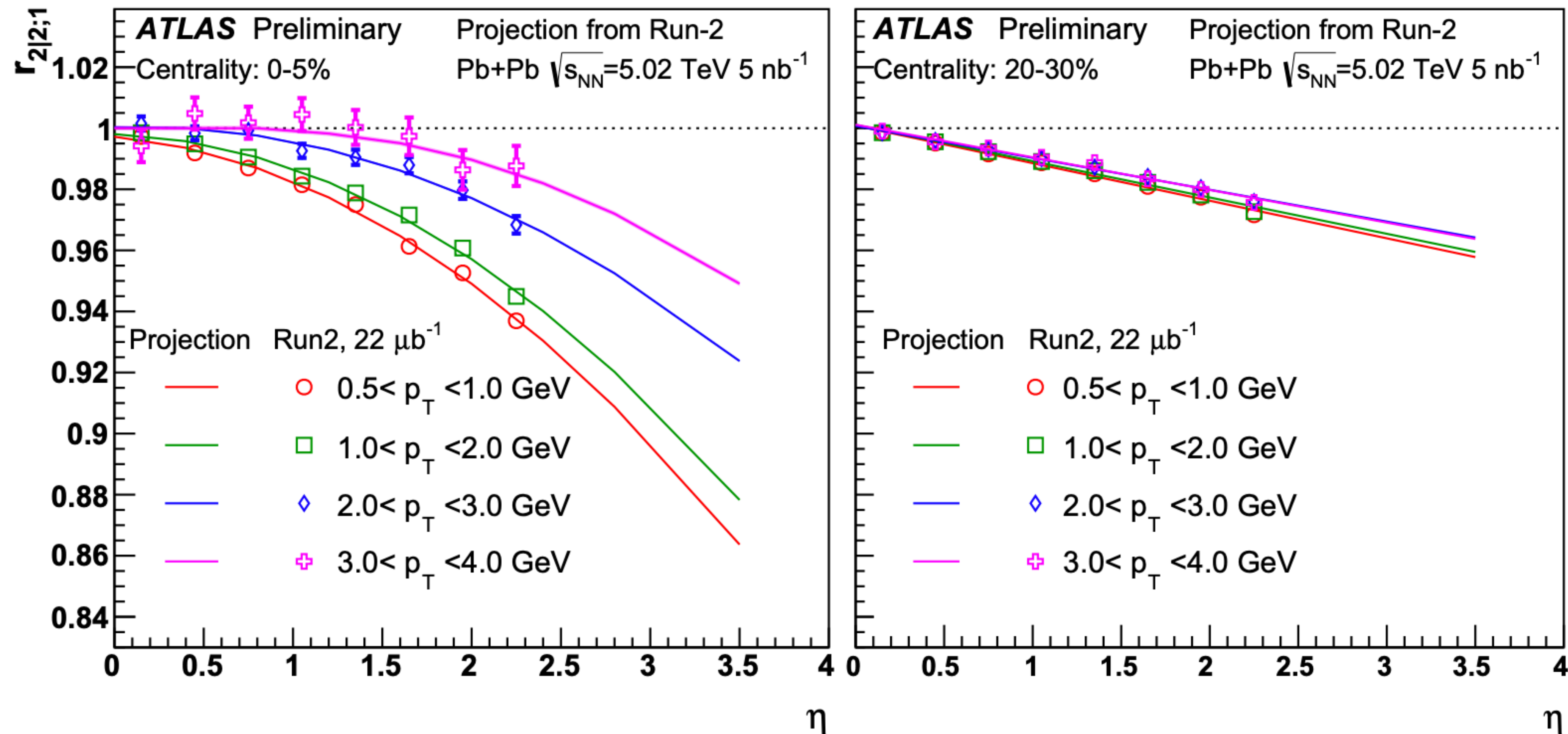


# フロー因子化

LHC Run3+Run4

$$r_{n|n;1}(\eta) = \frac{\langle \mathbf{v}_n(-\eta) \mathbf{v}_n^*(\eta_{\text{ref}}) \rangle}{\langle \mathbf{v}_n(\eta) \mathbf{v}_n^*(\eta_{\text{ref}}) \rangle},$$

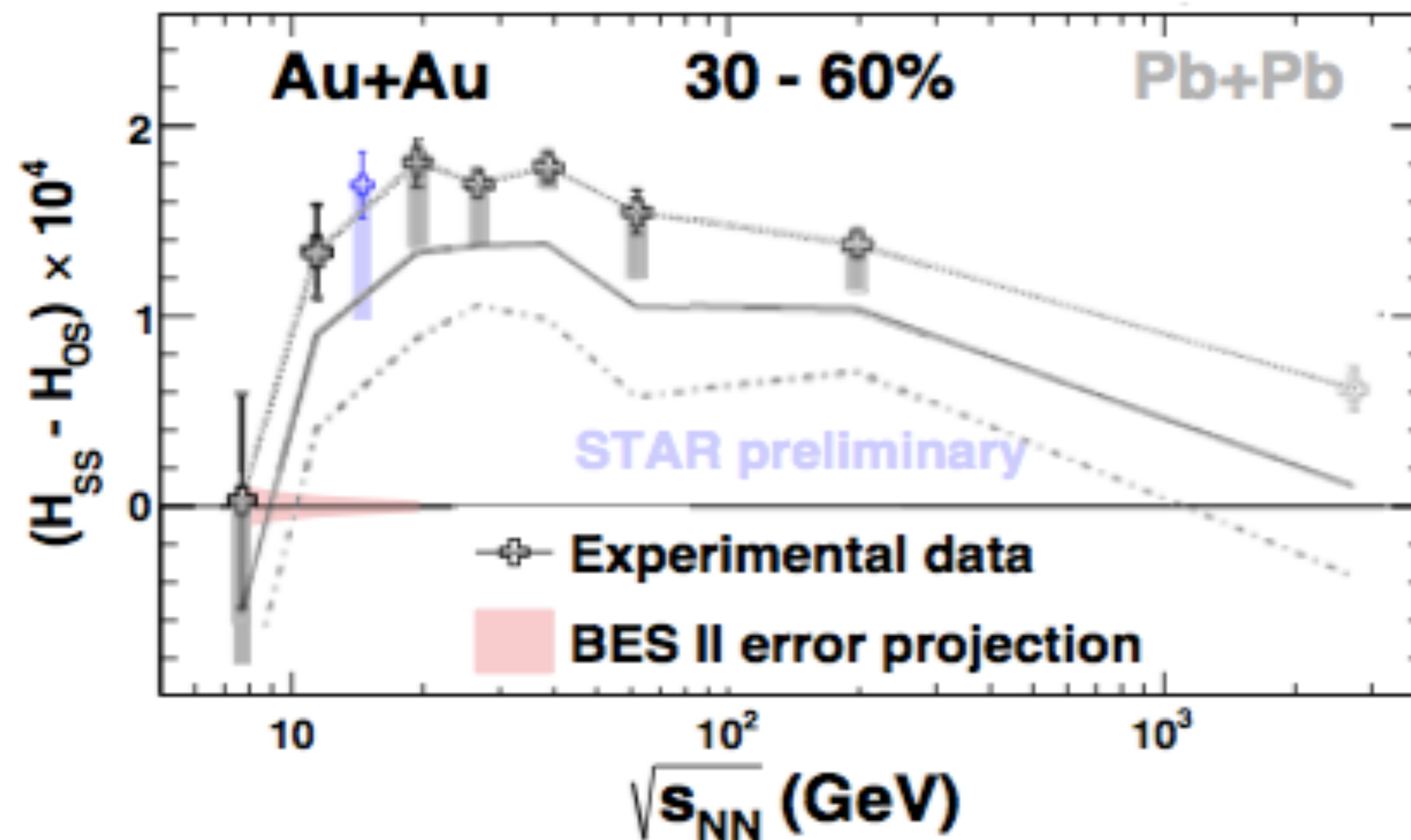
初期条件、熱化(縦方向の不安定性)、揺らぎ流体の理解



# 強磁場による物理：アノマリー現象

local parity violation in QCD possible due to nontrivial gluon field configurations

$$\gamma = \langle \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\Psi_{EP}) \rangle$$



STAR Ru+Ru/Zr+Zr, BES-II



# 現在の課題

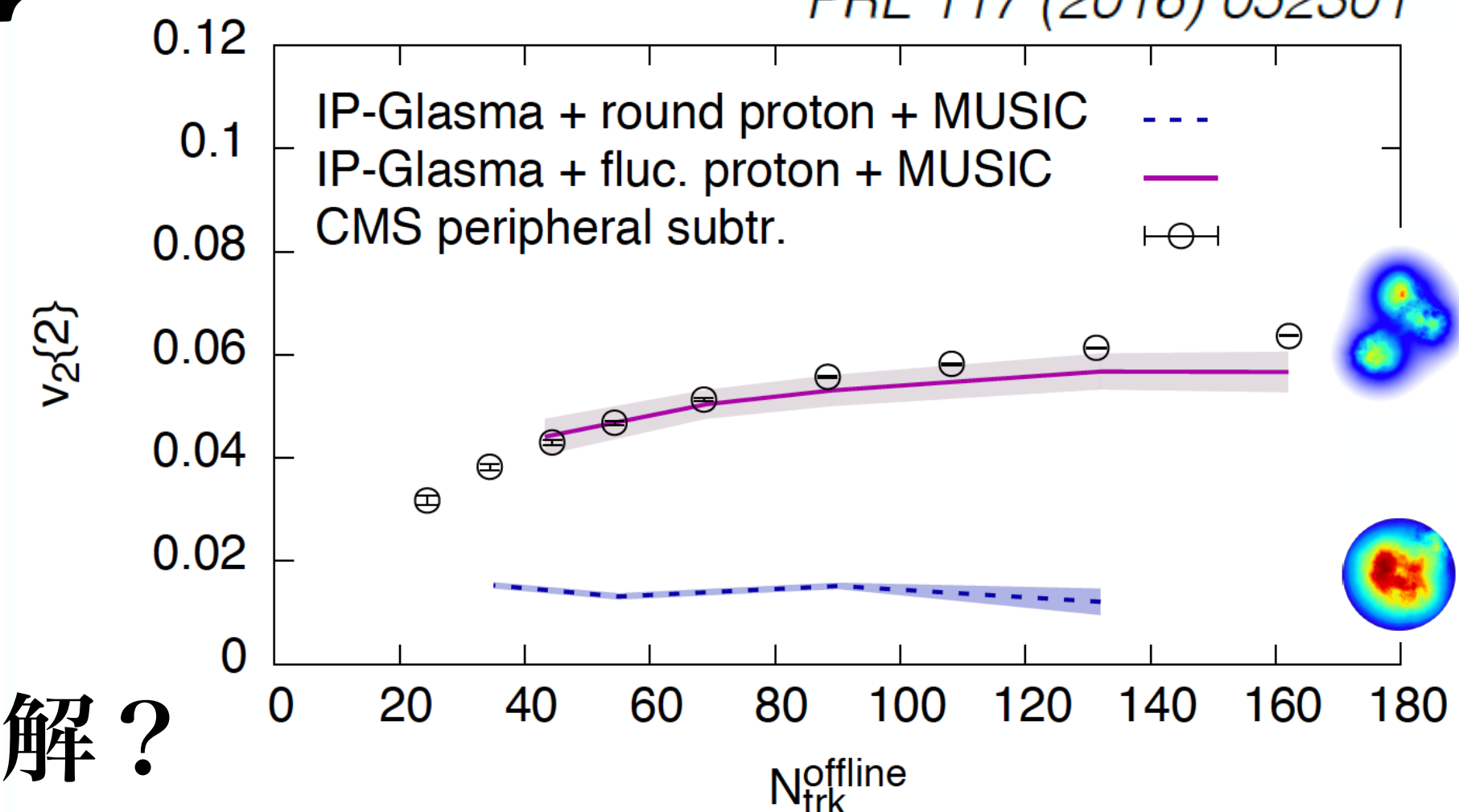
- 初期条件の不定性
  - MC-KLN, MC-Glauber, EKRT, Trento, IP-Glasma, AMPT-IC,
  - CGC/nPDFから熱化を経て初期の $T_{\mu\nu}$ を事象ごとに計算できる日は？
- 流体
  - 揺動流体→揺らぎ流体→次は？
- 熱化や流体化
  - グラズマ時空発展と(何かの)不安定性？
  - 早期の非等方性を流体計算に取り込む動き(aHydro)
  - QGP物性に与える影響は？揺らぎ？異常粘性？

# 現在の課題

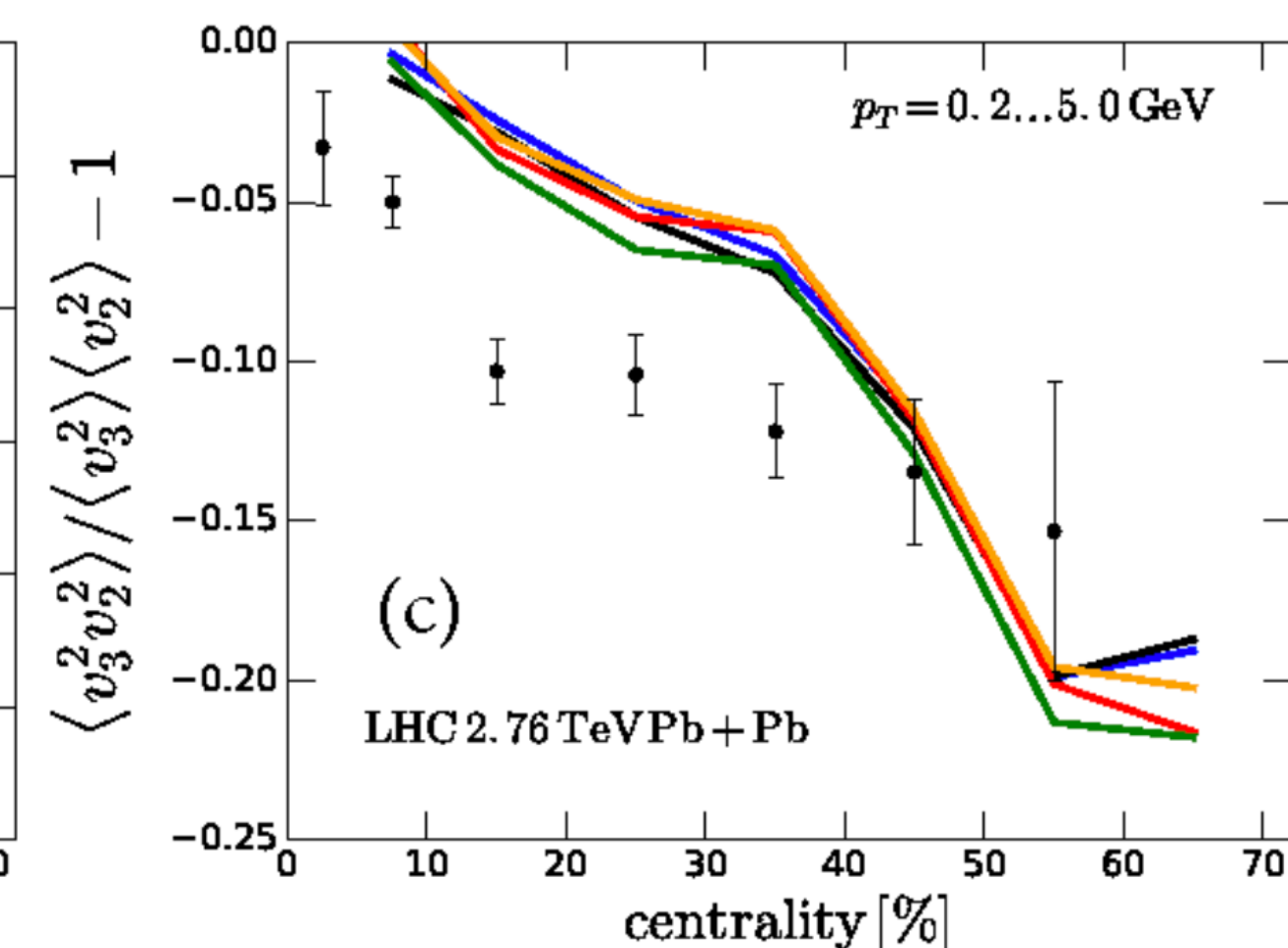
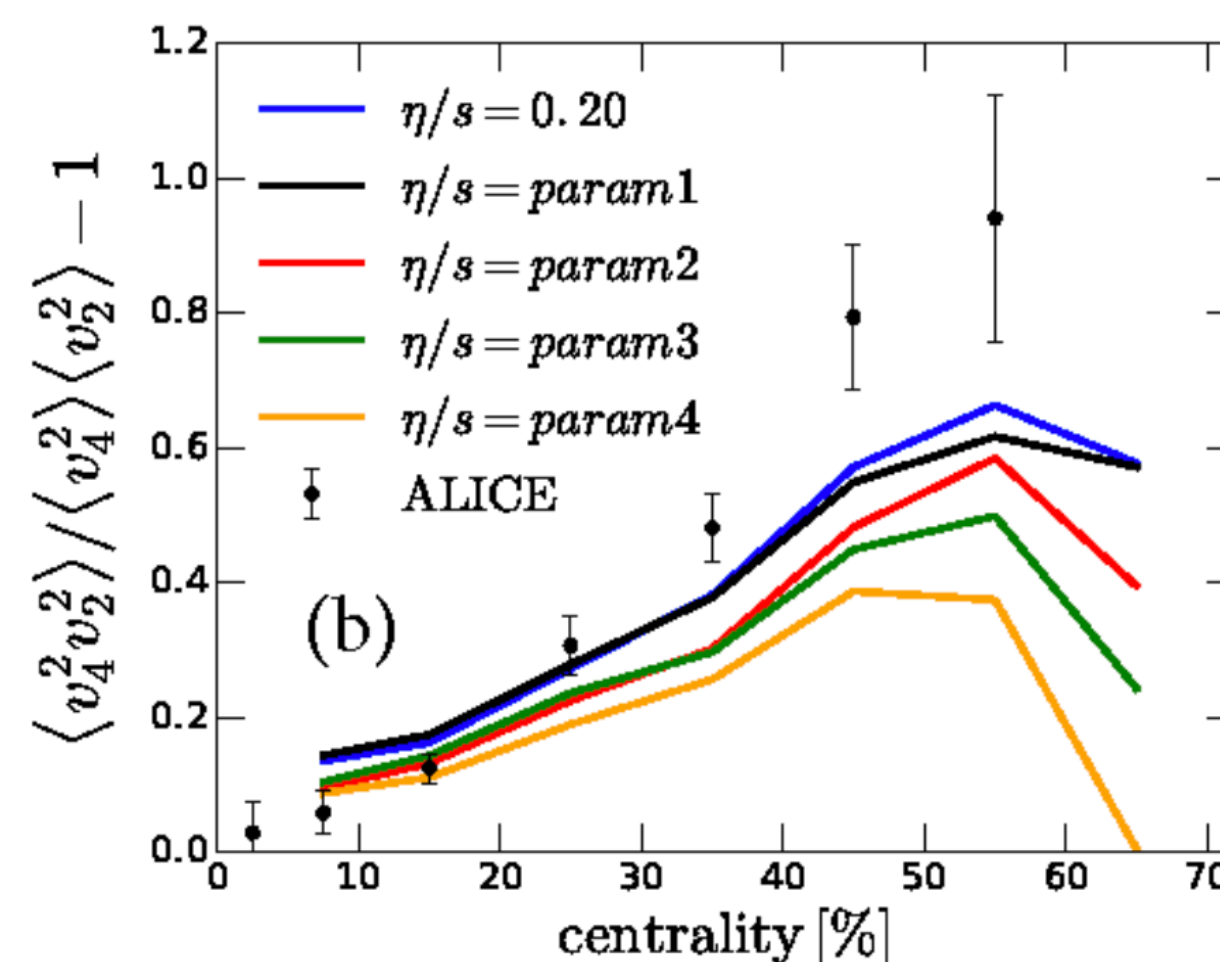
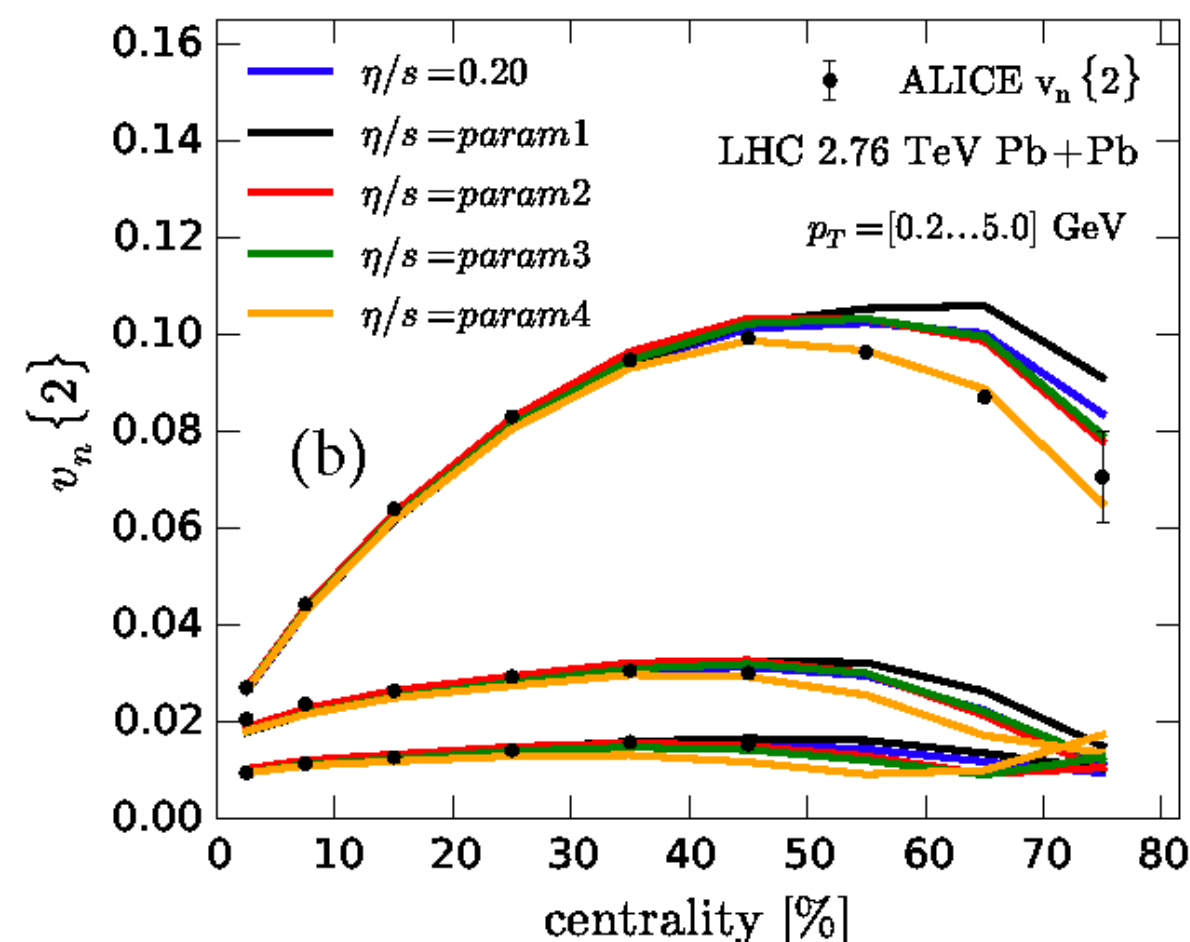
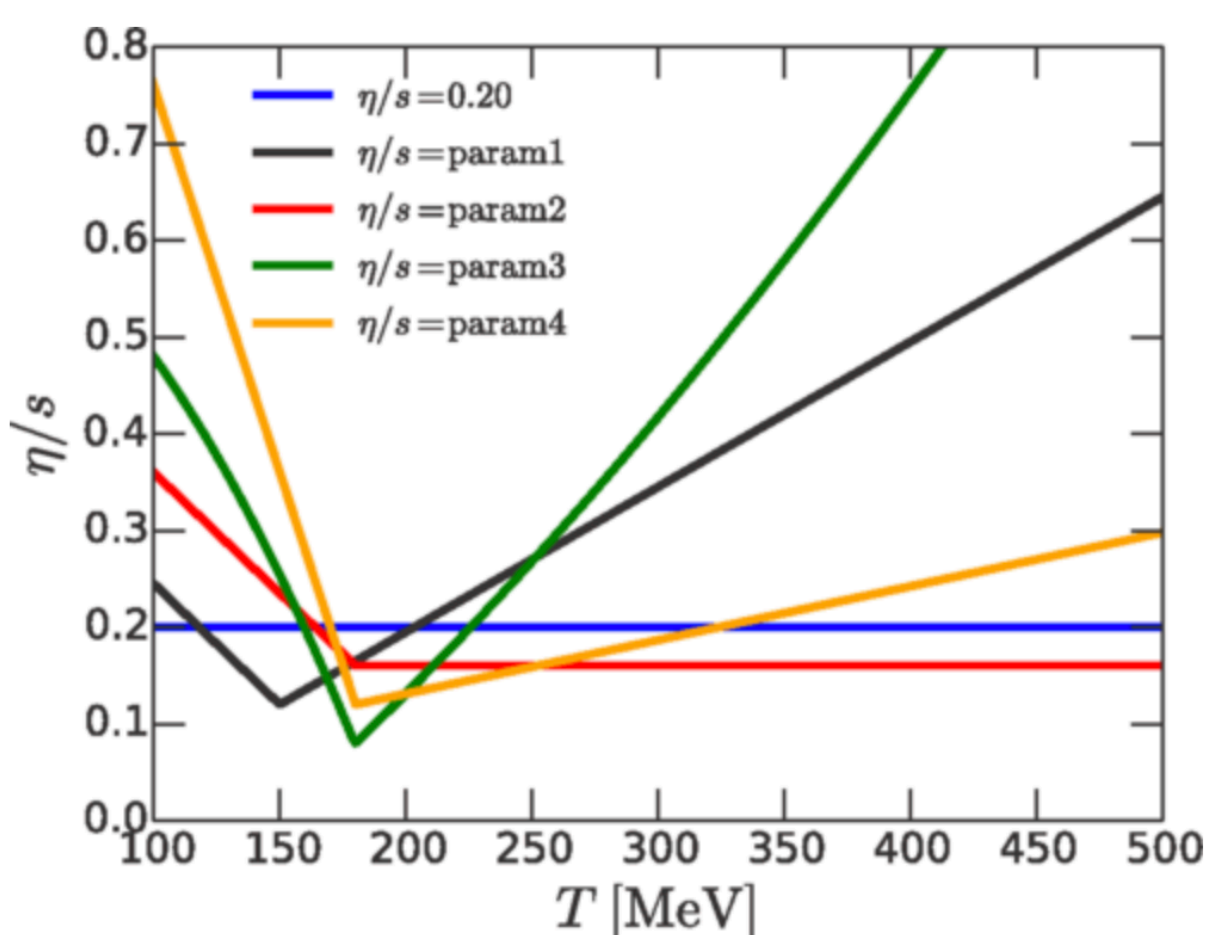
- 小さい系の理解
  - 陽子の内部構造の理解
  - 初期の揺らぎや流体揺らぎが現れやすい？
  - (ボトムアップ的な)熱化や流体化のメカニズムの理解？
- 温度依存に感度を持つ測定がなされていない

PRL 113 (2014) 102301

PRL 117 (2016) 052301

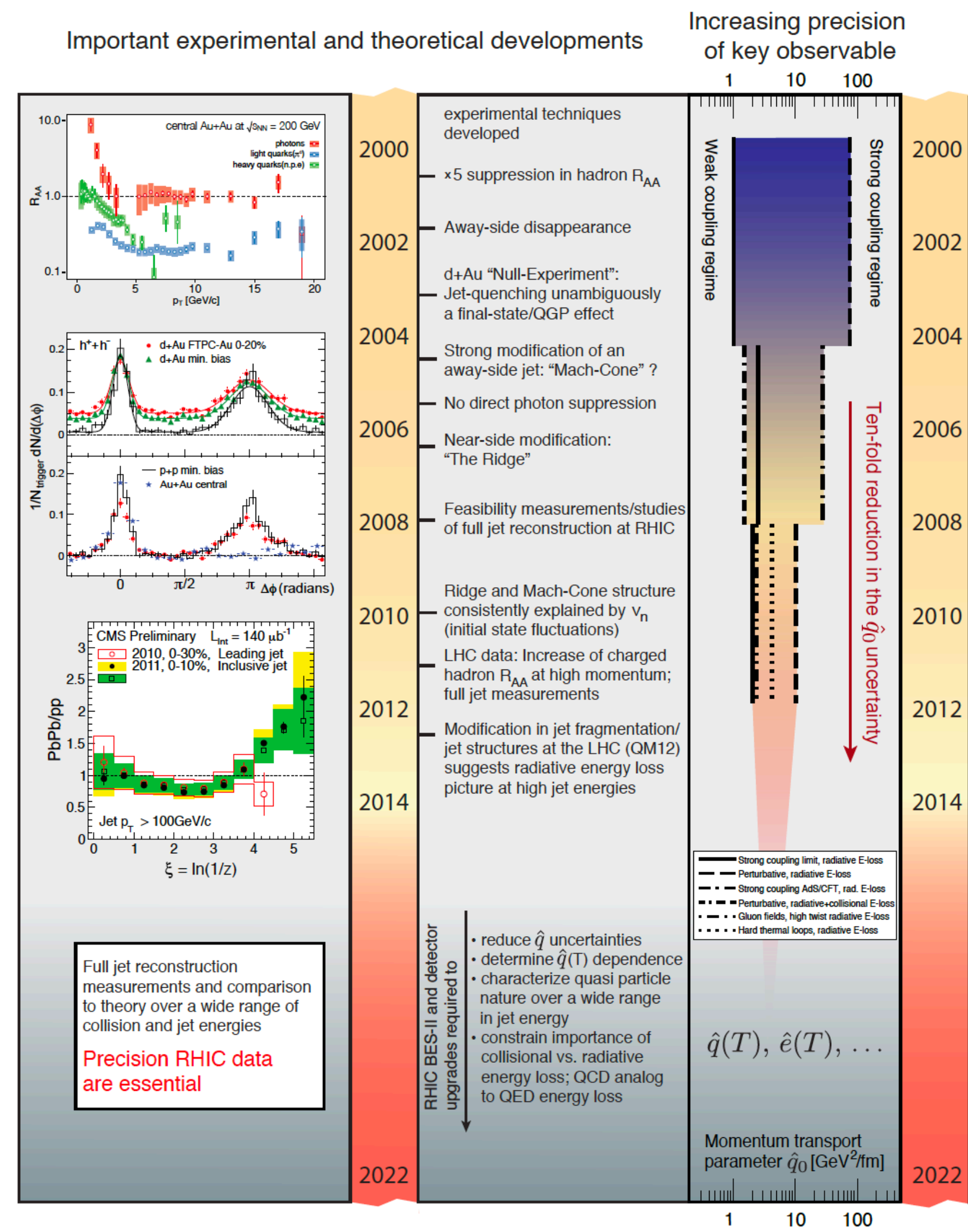
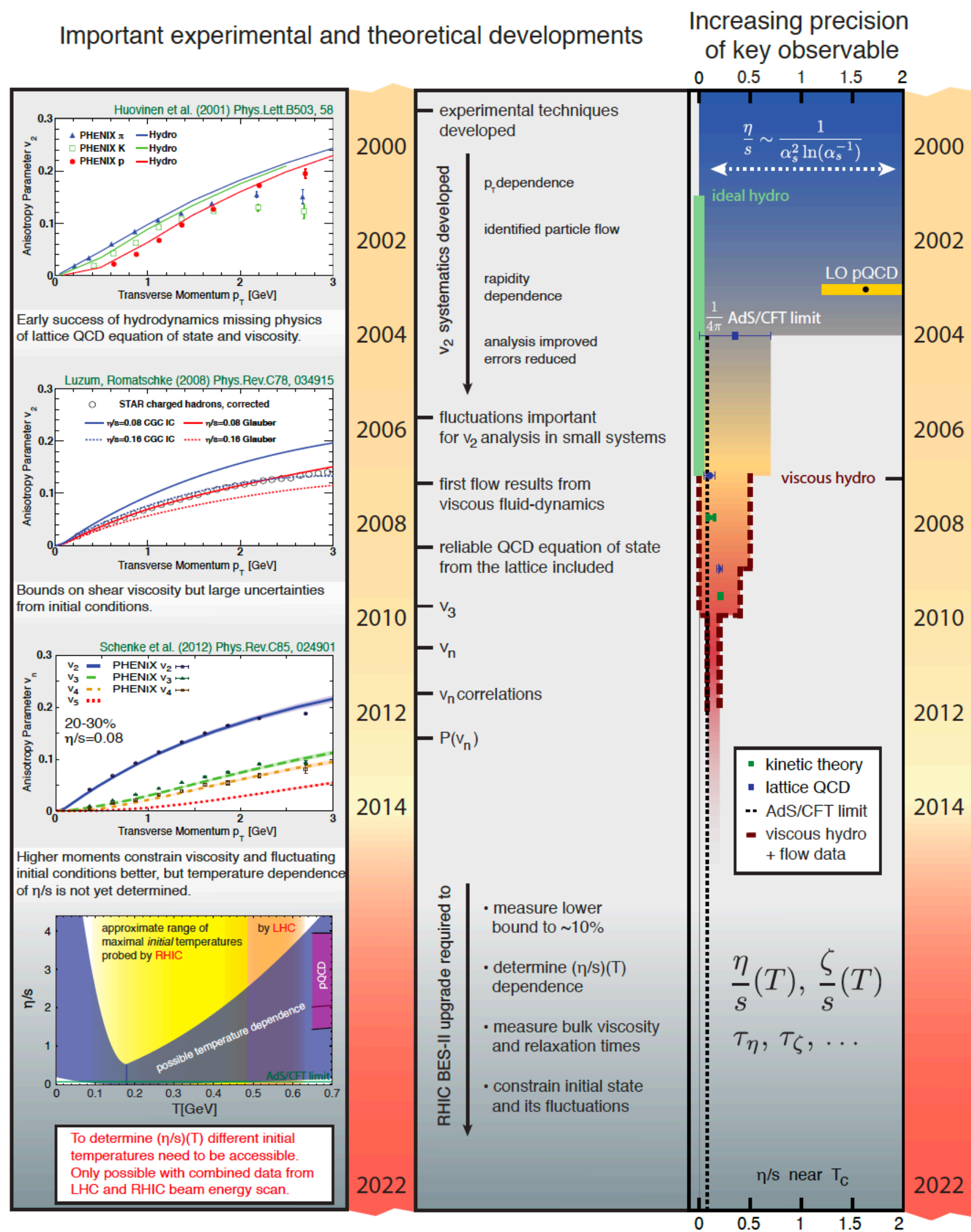


Nucl.Phys.A967 (2017) 313-316





# その後の進展





# 流体

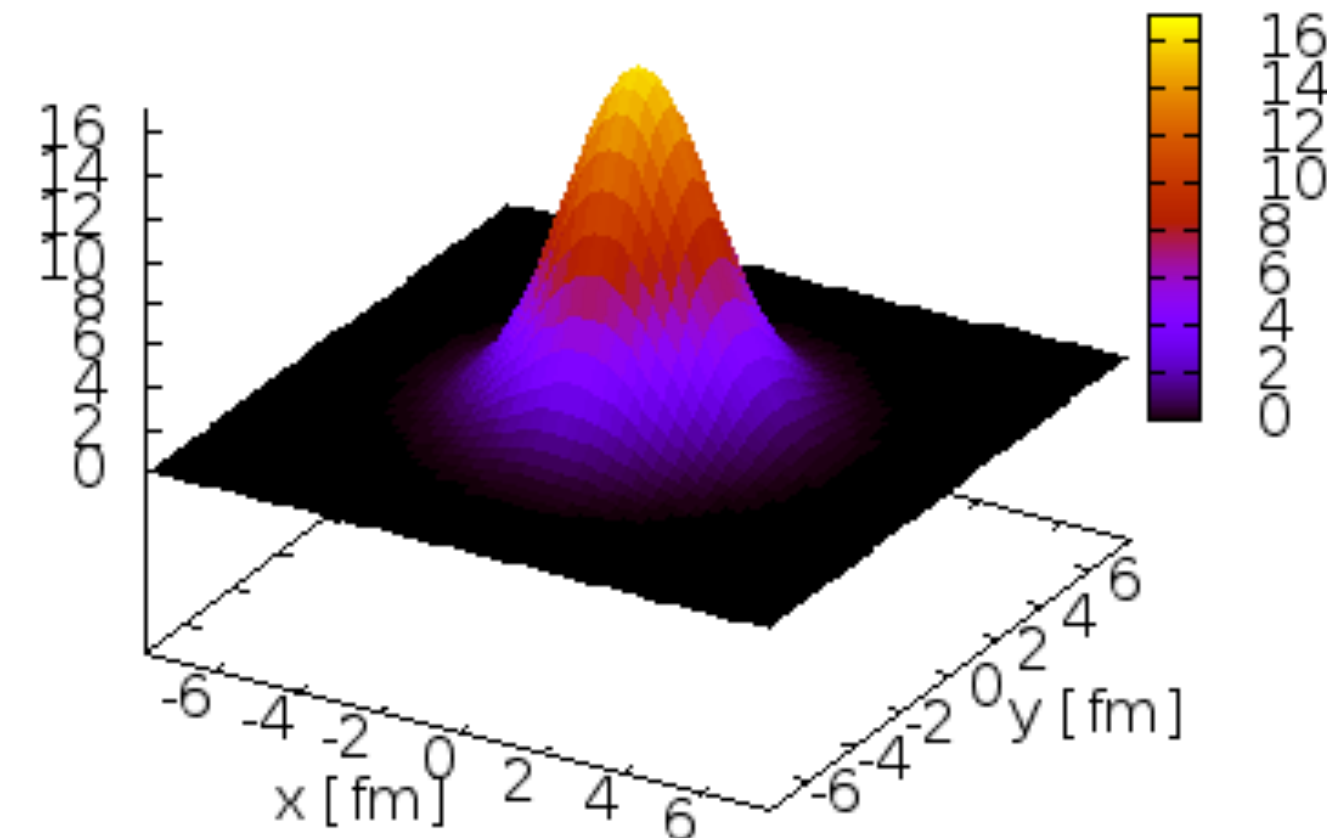
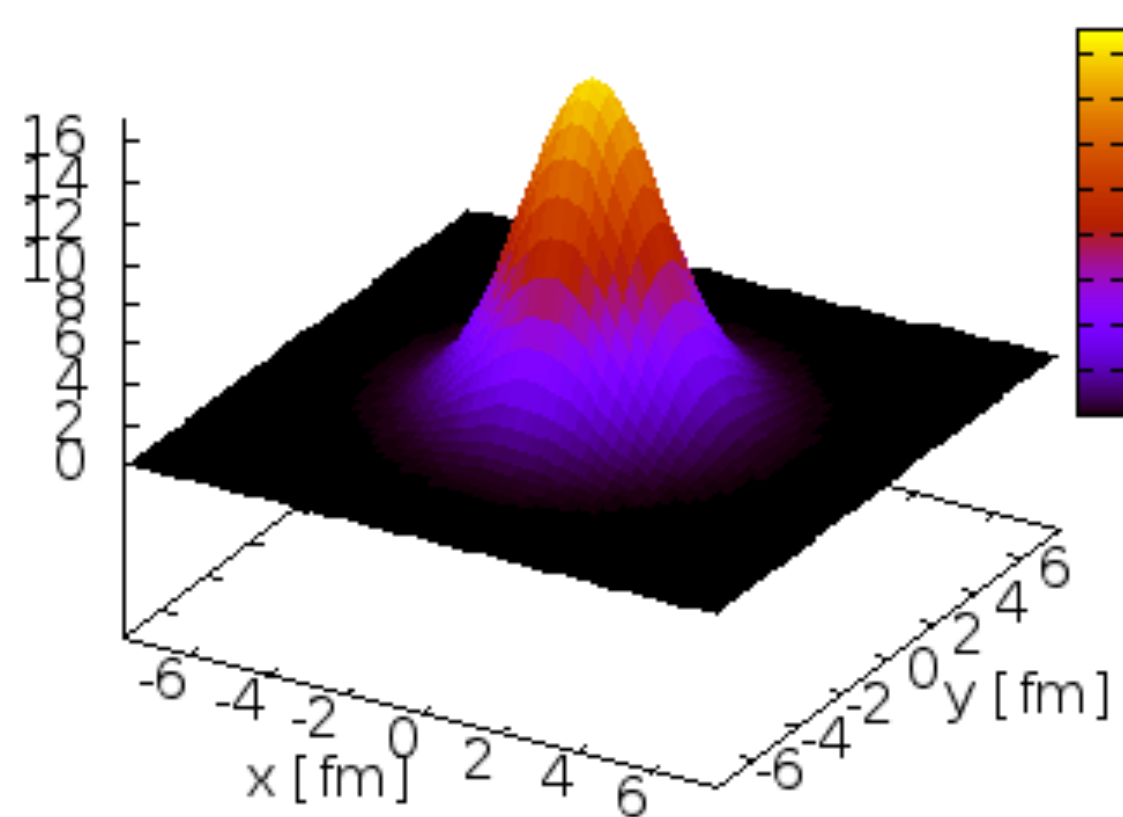
## 最近の進展：揺らぎ流体

relativistic dissipative hydrodynamics

relativistic fluctuating hydrodynamics

$T^{\mu 0}$  [GeV/fm<sup>3</sup>] (t = 0.0 fm)

$T^{\mu 0}$  [GeV/fm<sup>3</sup>] (t = 0.0 fm)



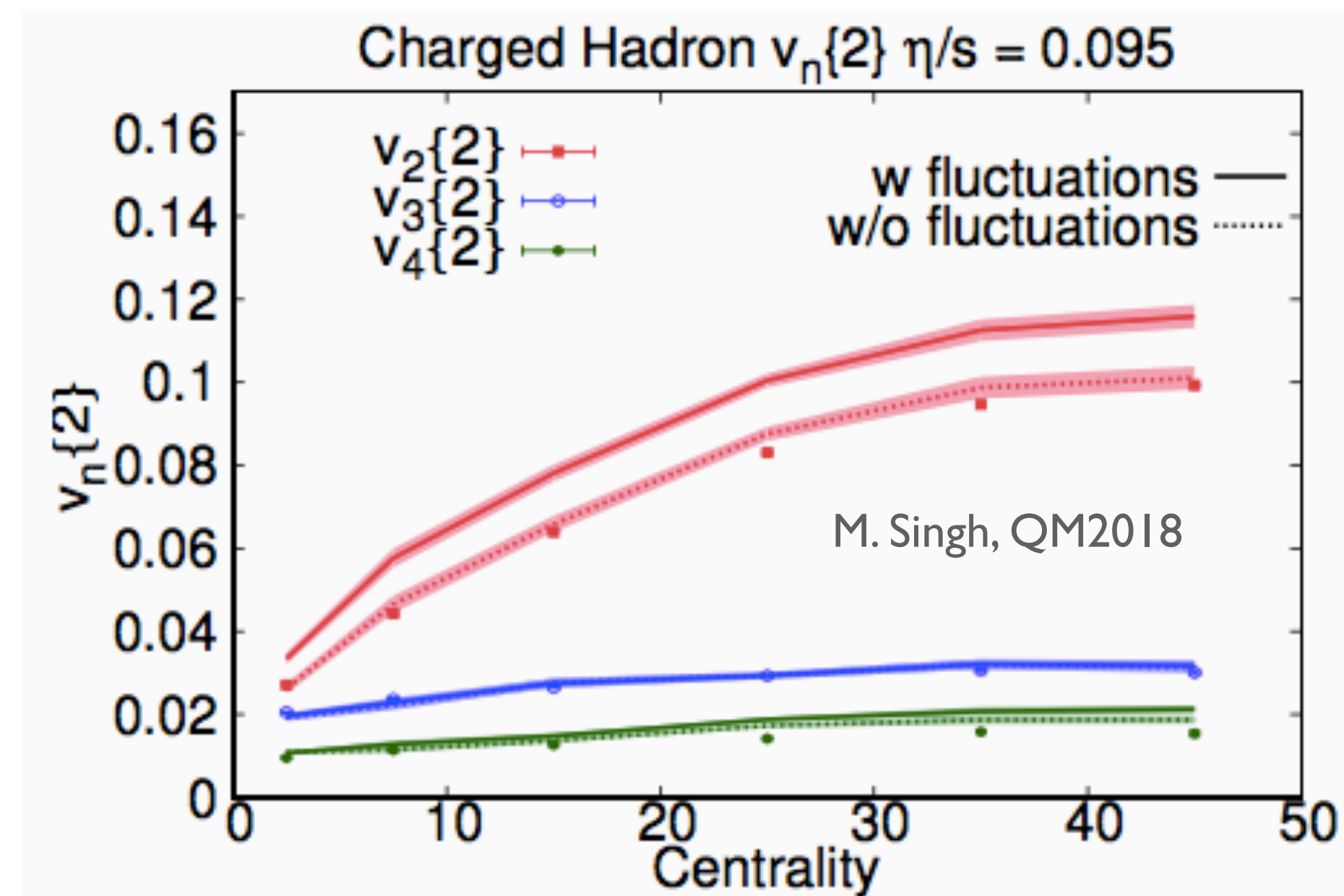
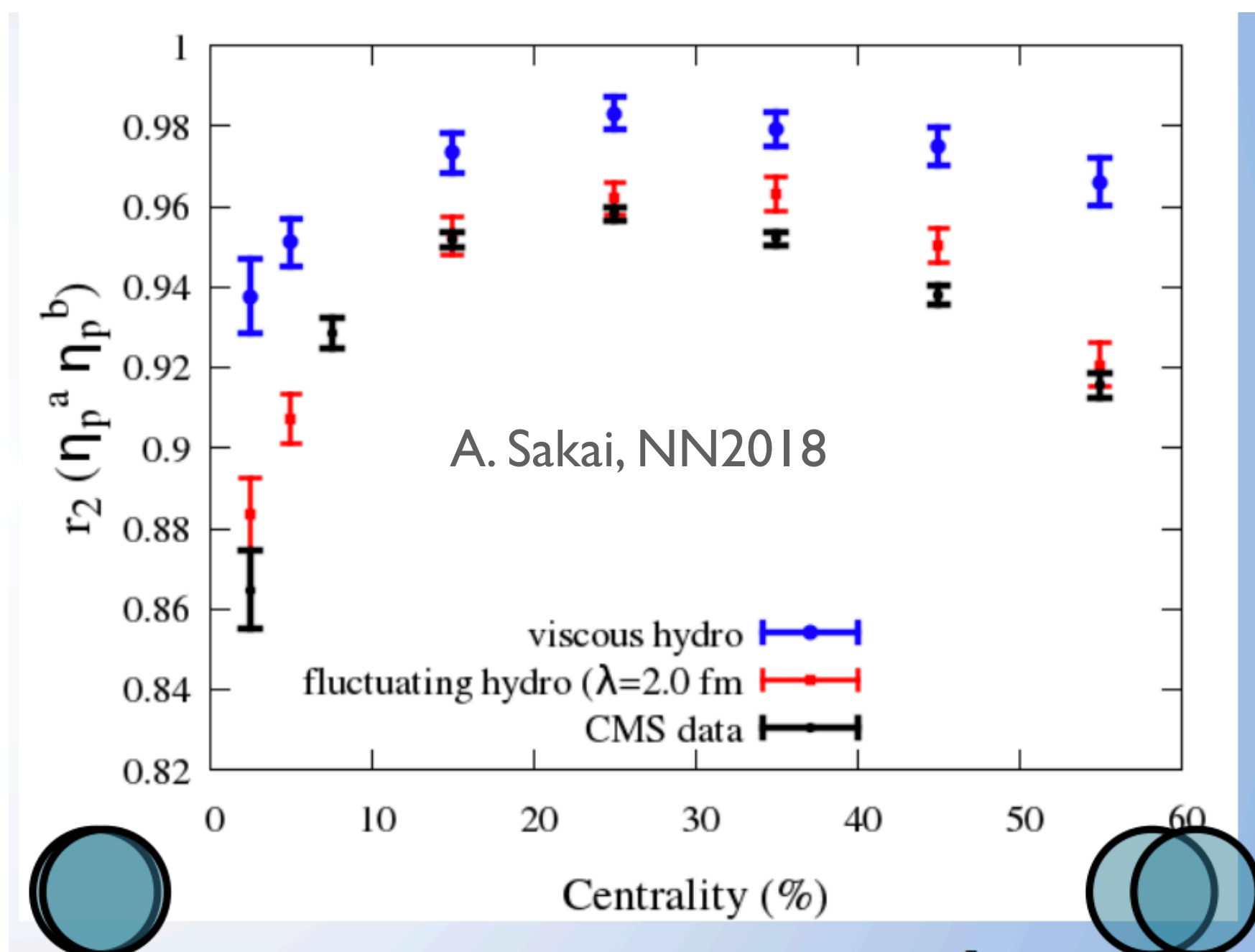
(物性に影響が出ない範囲で)流体が完全なもの

にならないといけない

揺らぎの大きさ( $\lambda$ )と基礎理論の関係性？(第一

原理的に導けるか？)

揺らぎ流体の次は？

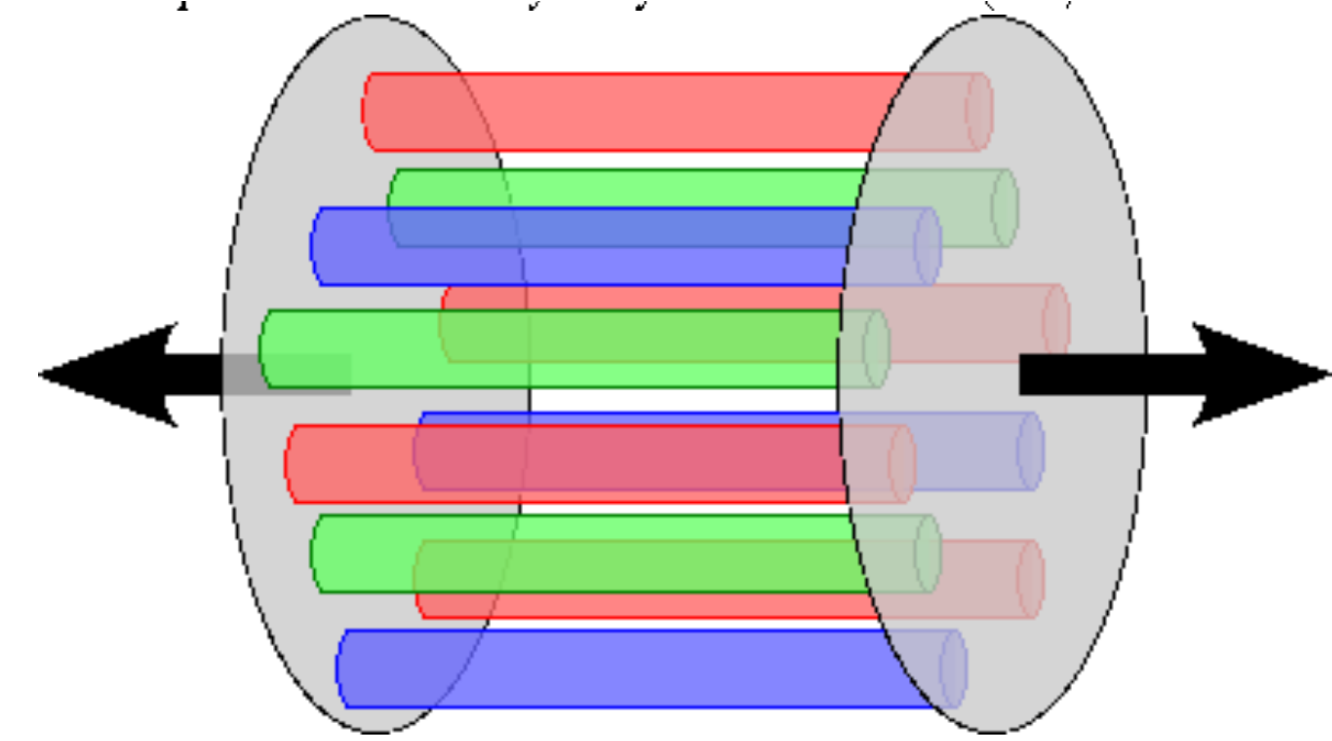




# 熱化と流体化

- 最も難しい課題

- グラズマ時空発展？ (様々な)不安定性と早期平衡化？
- 早期の非等方性を流体計算に取り込む動き (aHydro)
- QGP物性に与える影響は？ 異常粘性？

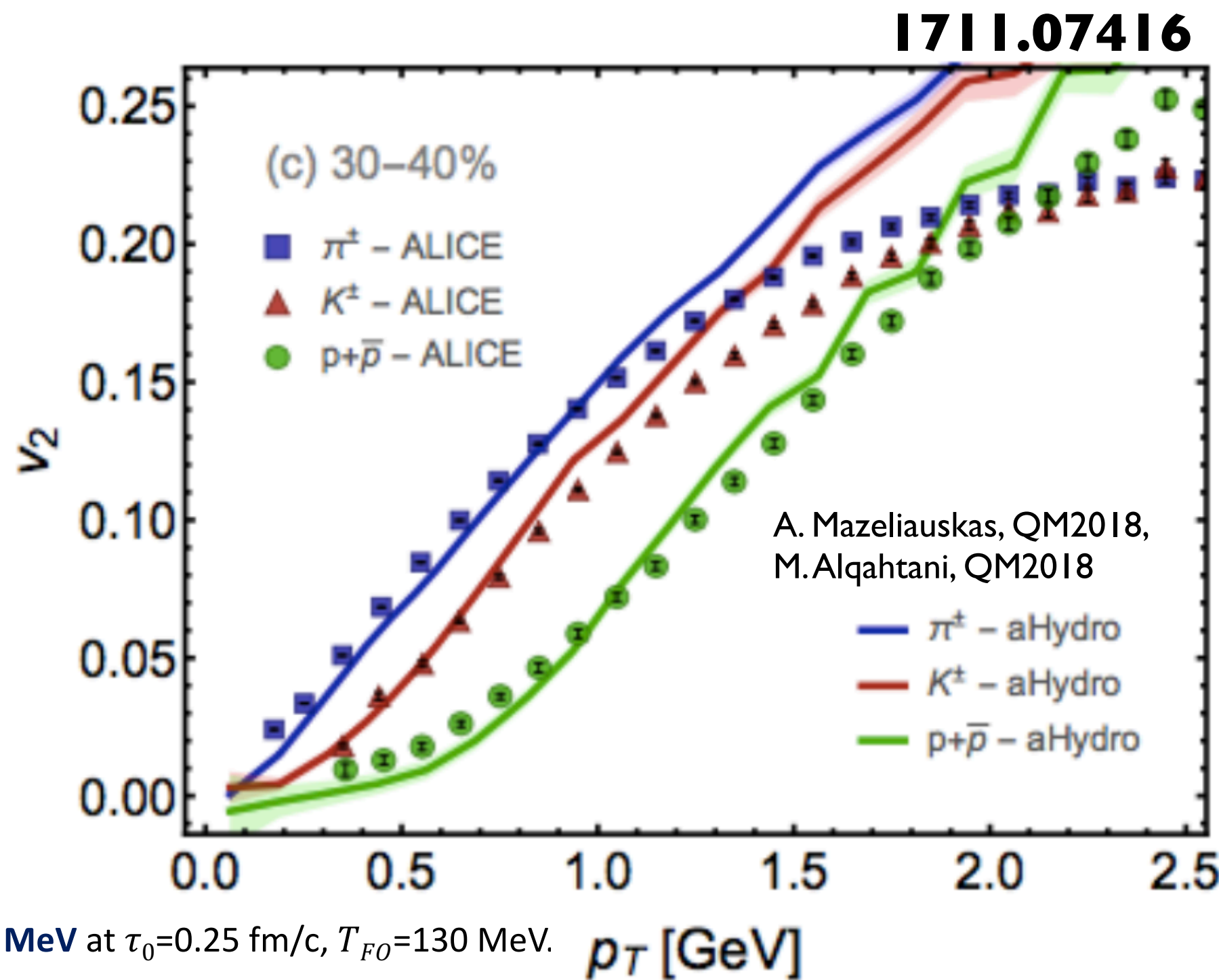


$$f(x, p) = f_{\text{eq}} \left( \frac{\sqrt{p^\mu \Xi_{\mu\nu}(x) p^\nu}}{\lambda(x)} \right) + \delta f(x, p)$$

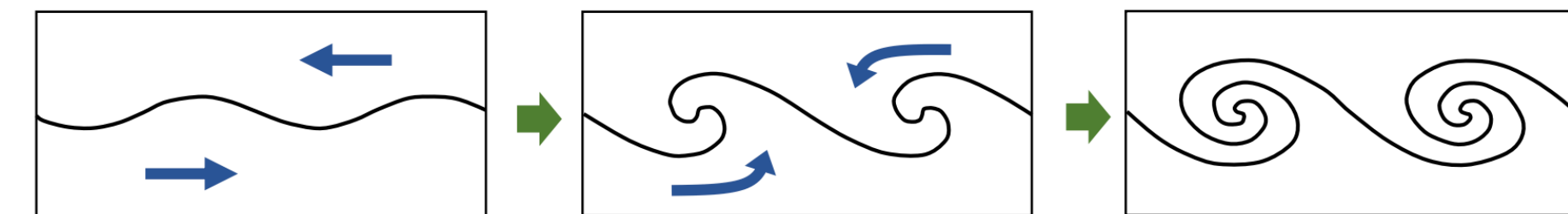
$$\Xi^{\mu\nu} = u^\mu u^\nu + \xi^{\mu\nu} - \Delta^{\mu\nu} \Phi$$

$u^\mu$  LRF four velocity  
 $\xi^{\mu\nu}$  the traceless anisotropy tensor  
 $\Delta^{\mu\nu}$  the transverse projector  
 $\Phi$  the degree of freedom associated with bulk

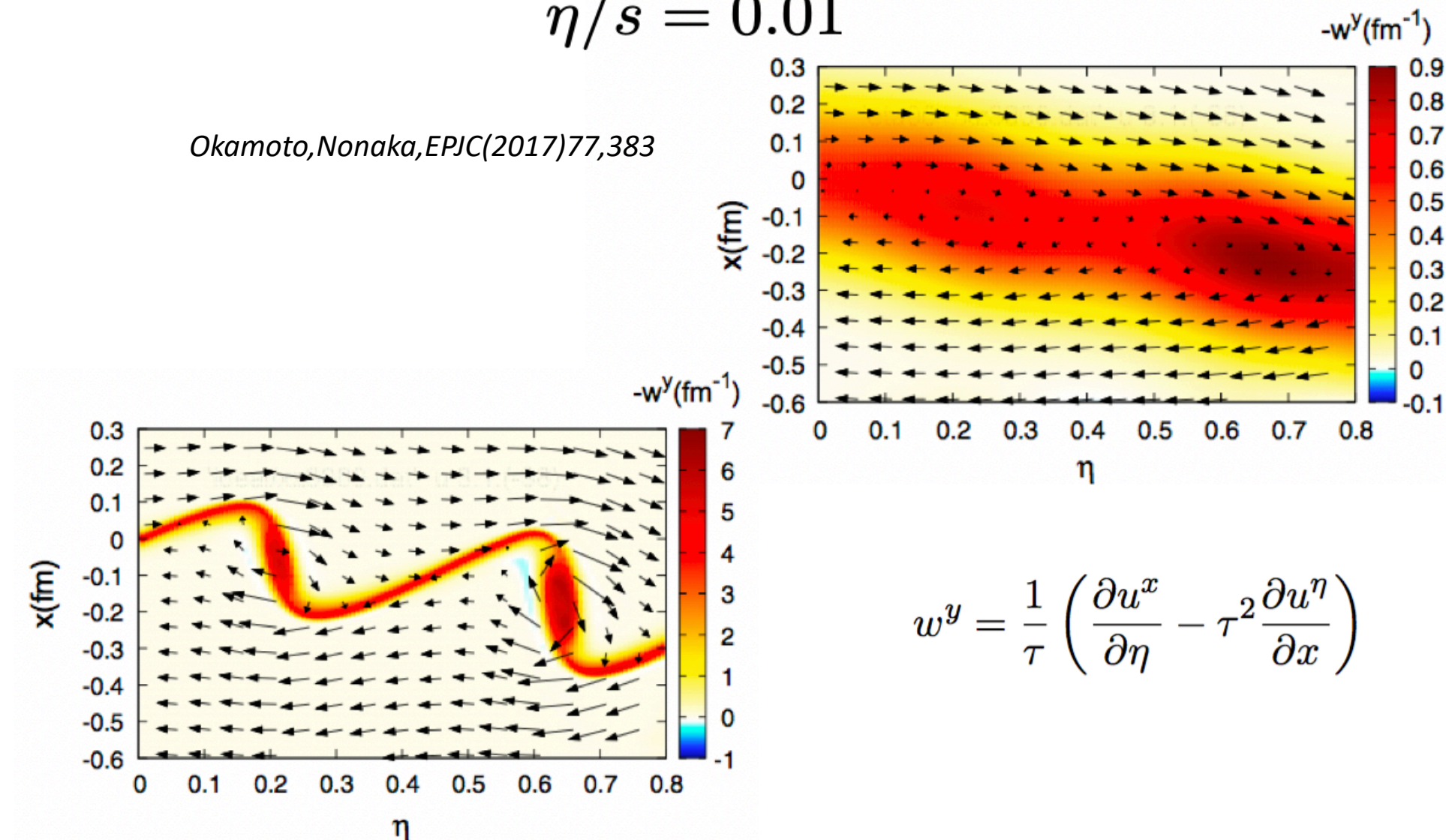
$$p^\mu \partial_\mu f + \frac{1}{2} \partial_i m^2 \partial_{(p)}^i f = -\mathcal{C}[f]$$



ケルビン・ヘルムホルツ不安定性



Okamoto, Nonaka, EPJC(2017)77,383

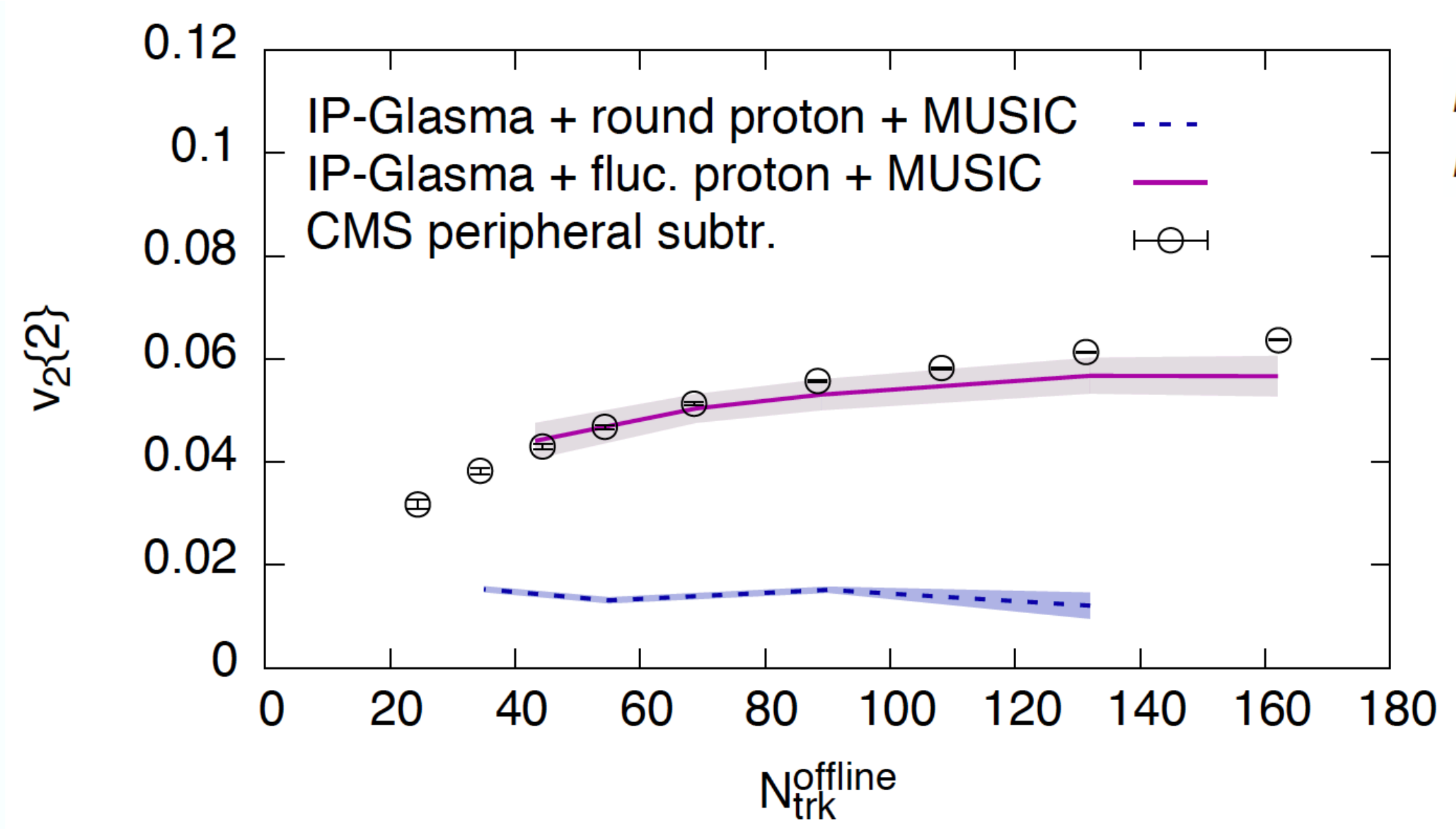
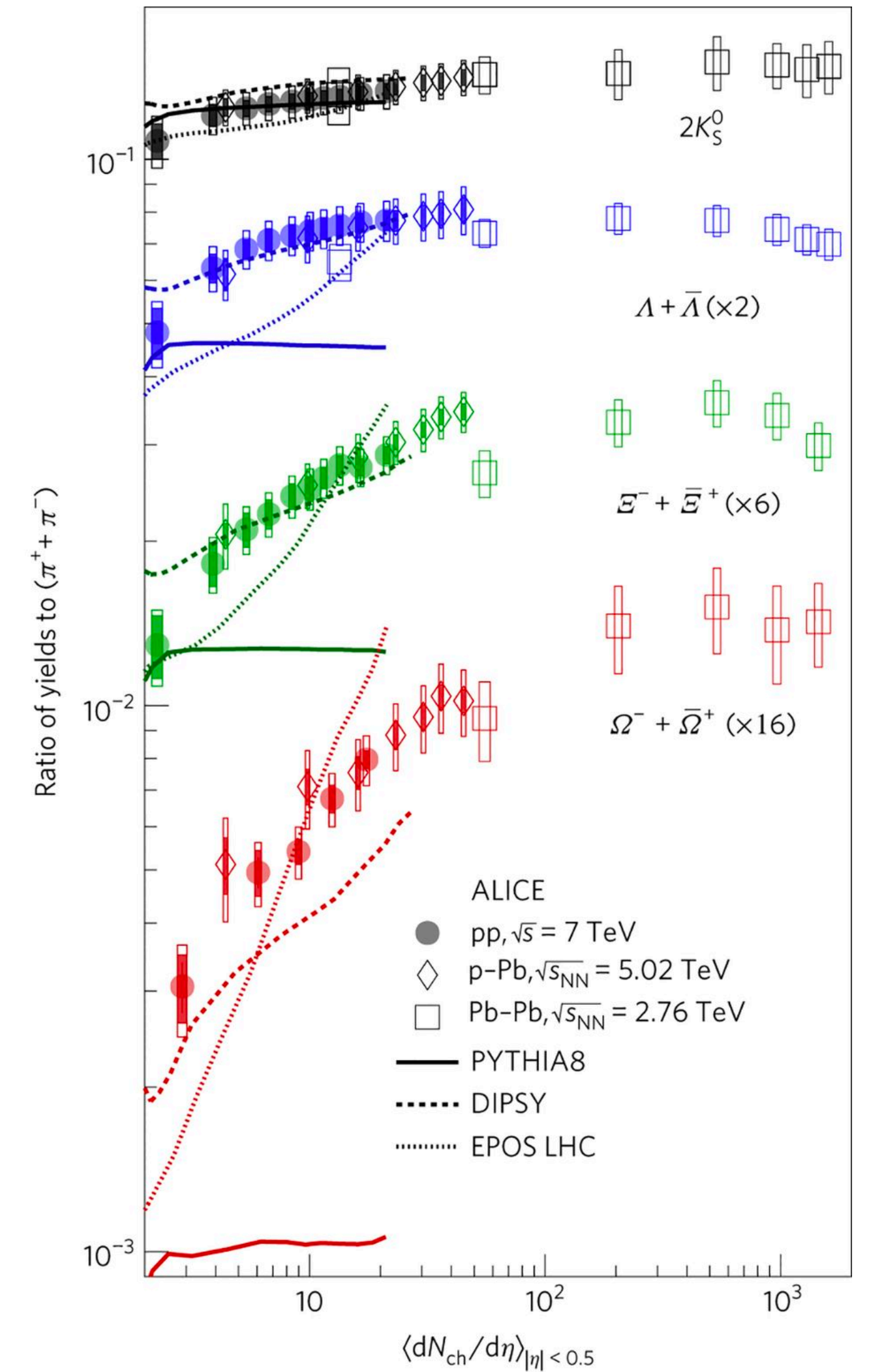


$$w^y = \frac{1}{\tau} \left( \frac{\partial u^x}{\partial \eta} - \tau^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial x} \right)$$

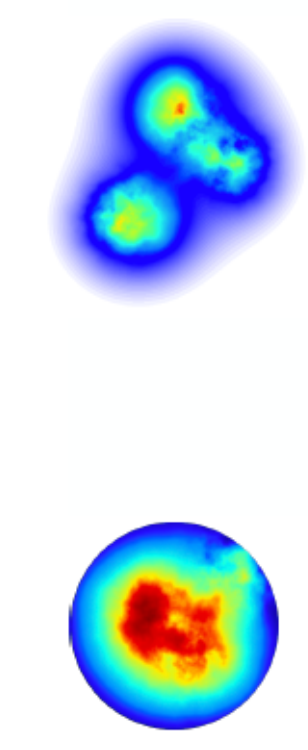


# 小さい系

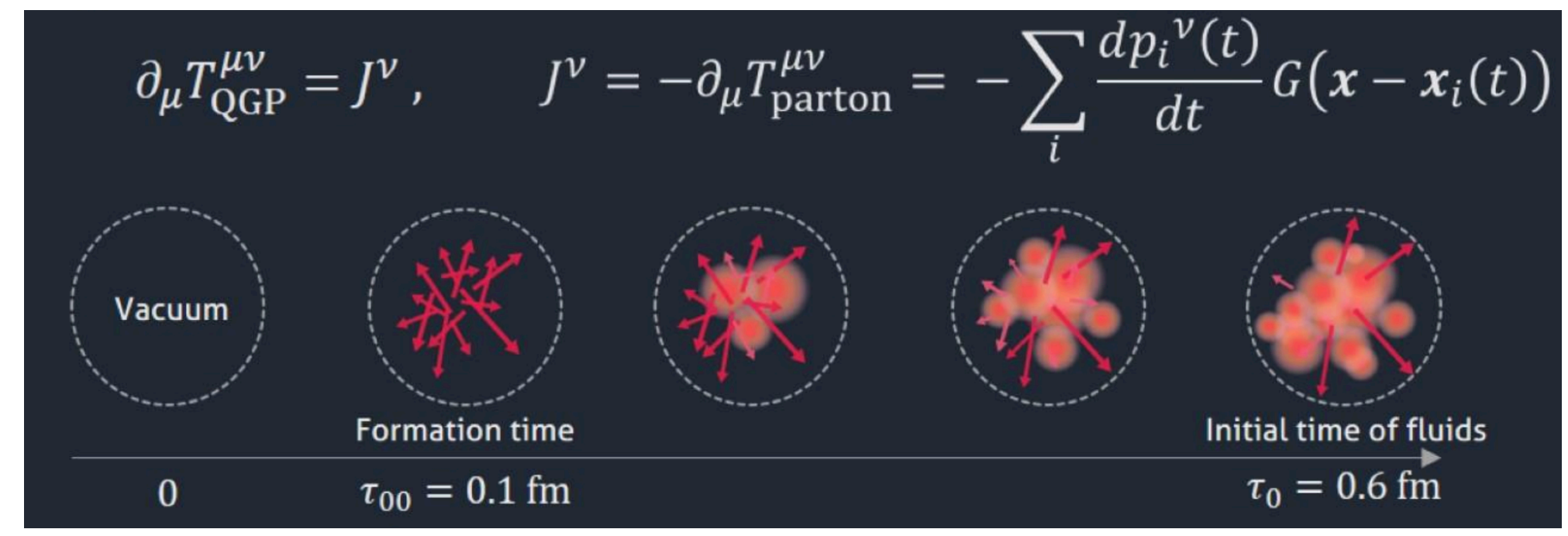
- 大きな集団運動の起源は？
- 小さい系の重要性：
  - 陽子の内部構造や量子揺らぎのヒント
  - 流体揺らぎ、熱揺らぎが現れやすい？
  - (ボトムアップ的な)熱化や流体化のメカニズムの理解？



PRL 113 (2014) 102301  
 PRL 117 (2016) 052301



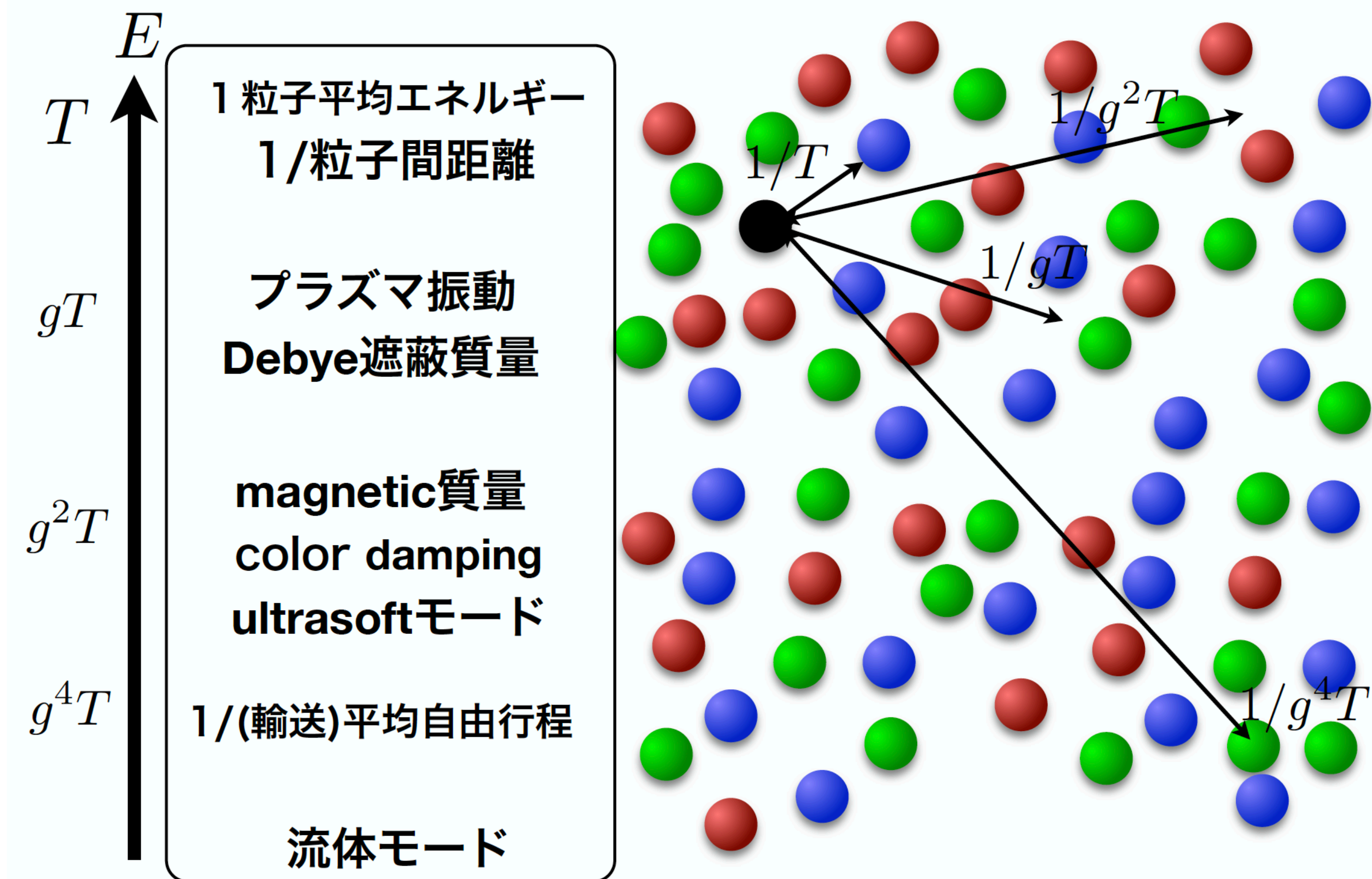
Kanakubo, SQM2019





# 他の物性量

- これまで議論されている物性量 = 比粘性や拡散係数というバルクな性質のみ
- 他の物性量は？
  - プラズマの電気伝導度
  - プラズマ中の粒子透過阻止能
  - プラズマ遮蔽
  - プラズマ中の粒子相関
  - ...



# レプトン対測定

## HADES, Nature (2019)

