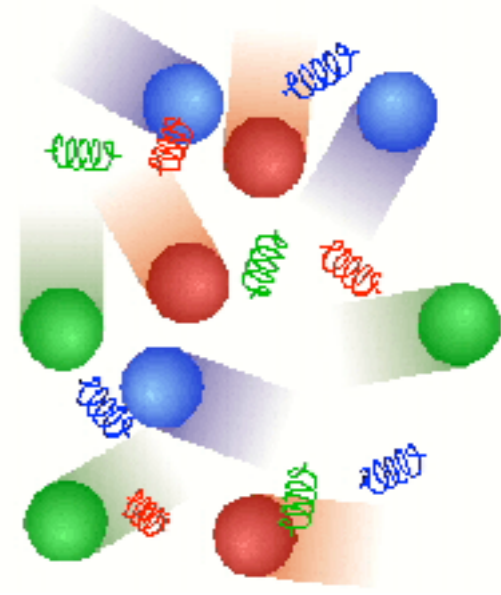


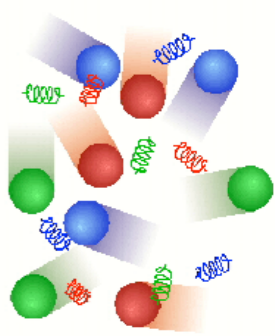
QGPプロジェクト

～研究の潮流～

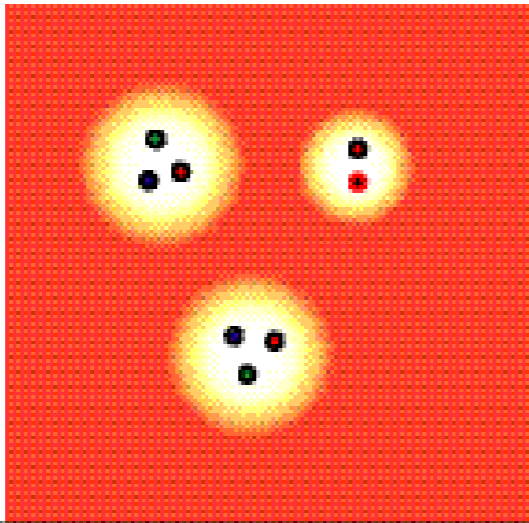


宇宙史研究センターQGP班
三明康郎

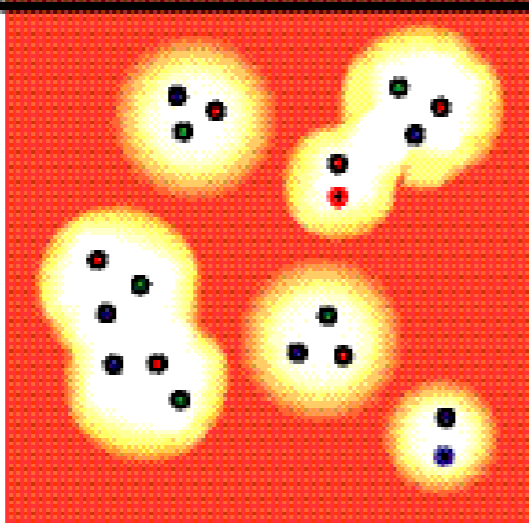
クォーク・グルオンプラズマ (QGP) とは



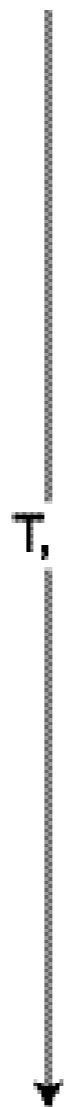
hadron gas
 T, ρ low



phase transition
 T, ρ critical



T, ρ



✓ ハドロンの構造；

- ハドロン (陽子、中性子や中間子) は、1 fm程度の大きさを持ちクォークと媒介粒子グルオンから構成されている。

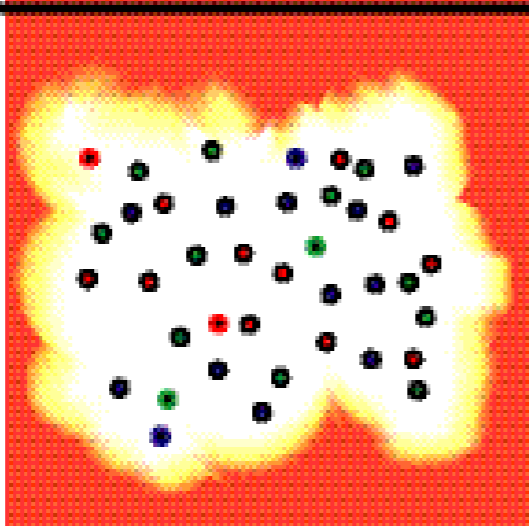
✓ 大きさを持つハドロンを狭い空間に多重発生させると (高温・高密度状態)、ハドロンが連結した状態が起こる？

- クォーク・グルオンが比較的大きな体積中を自由に飛び回る状態が実現する

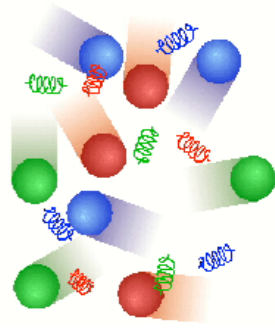
⇒クォーク・グルオンプラズマ状

⇒宇宙初期、中性子星内部、、、

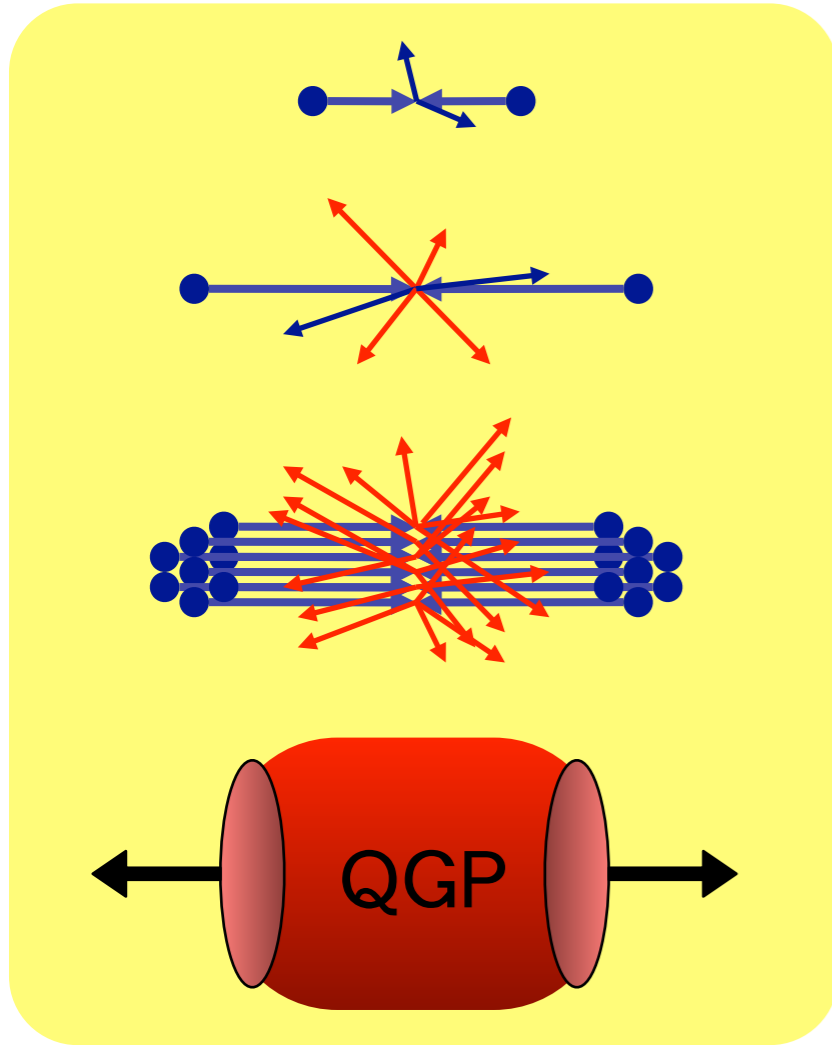
quark-gluon-plasma
 T, ρ high



実験室におけるQGPの生成と期待される性質



高エネルギー原子核・原子核衝突



$$\epsilon_{\text{QGP}} \sim 2 \text{ [GeV/fm}^3\text{]}$$

$$\langle n_{q,\bar{q}} \rangle \sim \frac{\epsilon_{\text{QGP}}}{\langle m_T \rangle} \sim \frac{2\text{GeV}}{0.4\text{GeV}} \sim 5$$

$$\lambda_q = \frac{1}{n\sigma_{qq}} \sim \frac{1}{5 \times 0.4} = 0.5 \text{ [fm]}$$

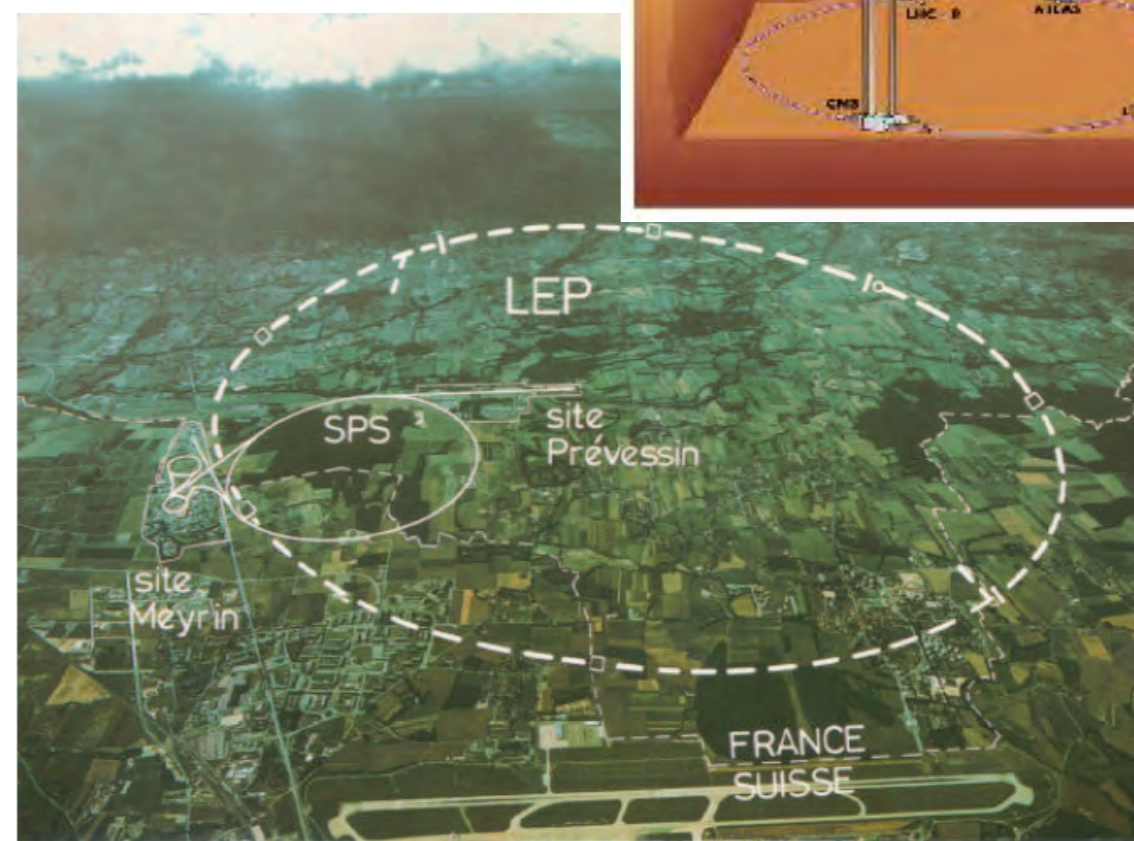
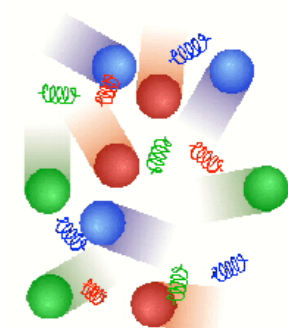
$\lambda_q \ll R_{\text{system}}$

$$\therefore \sigma_{qq} \sim \frac{\sigma_{NN}}{3 \times 3} \sim \frac{4\text{[fm}^2\text{]}}{9} \sim 0.4$$

- ✓クォークレベルの統計力学的性質
- ✓クォークレベルの流体力学的性質
- ➡QGPの物性を調べるのが目的
- ➡初期宇宙進化や中性子星構造への影響

➡新物質QGPの物性、特に相構造を調べる

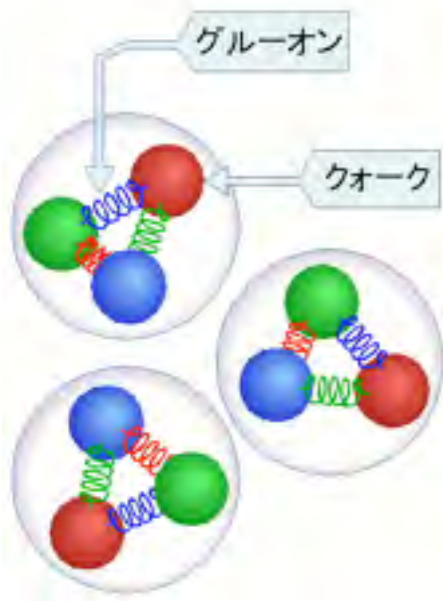
2大実験施設： 米国BNL-RHIC vs 欧州CERN-LHC



米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)
RHIC加速器(2000-)
全周3.8km
 $\sqrt{SNN}=10-200$ GeV Au+Au

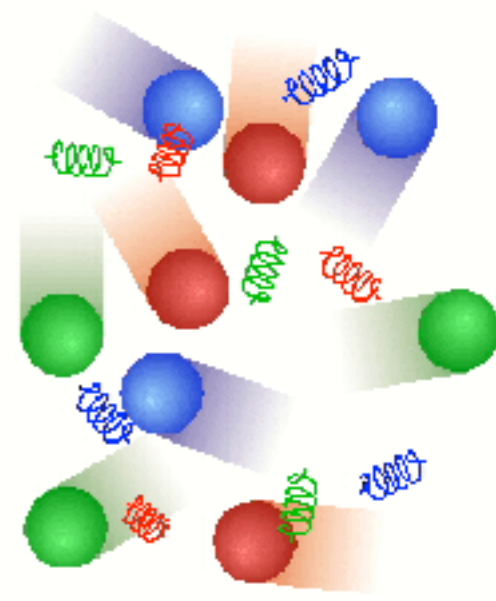
欧州共同原子核研究機構(CERN)
LHC加速器(2009~)
全周27km世界最大・最高エネルギー
 $\sqrt{SNN}=2.76, 5.5$ TeV Pb+Pb

✓ QGP生成を疑う研究者は恐らくいない。



よくわかっていないけど、

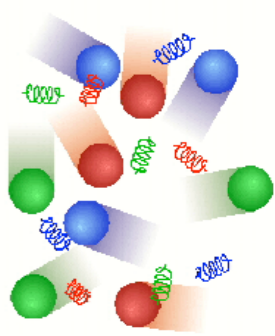
QGP物性に関わる 2大トピックス



①流体力学的振舞
～QGPの粘性～

②ジェットクエンチ
～密度と dE/dx ～

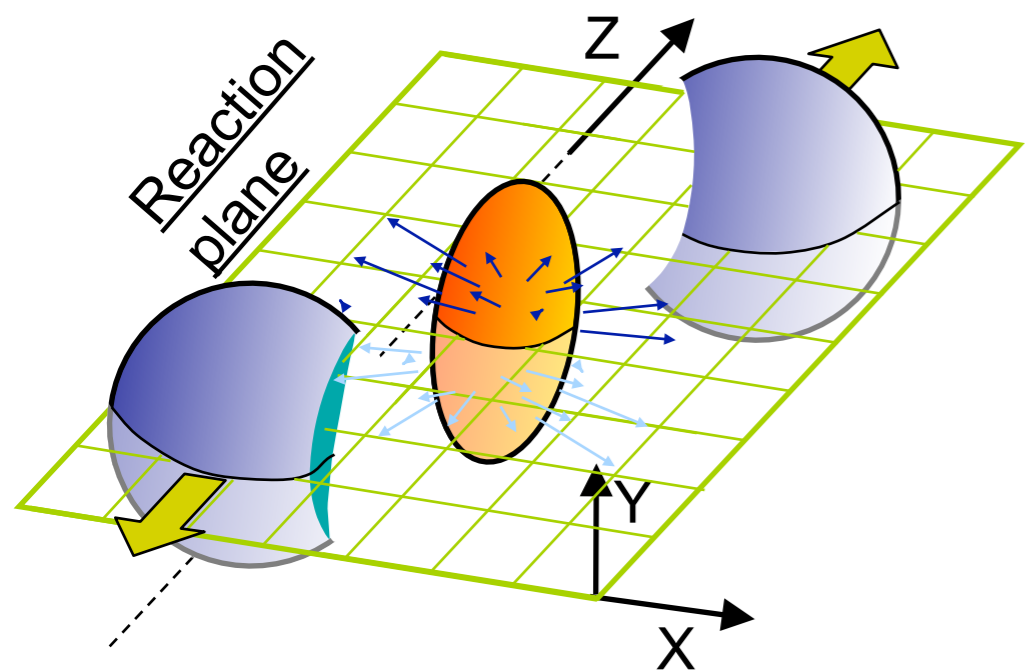
①流体力学による理解



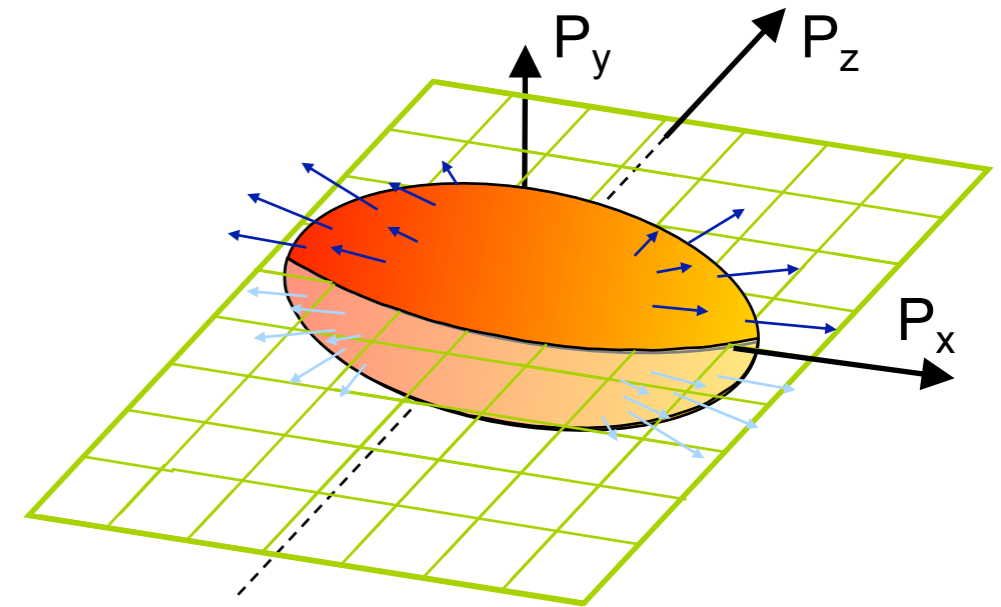
初期状態

流体力学計算による時間発展
～粘性などQGP物性～

終状態



比較



座標空間

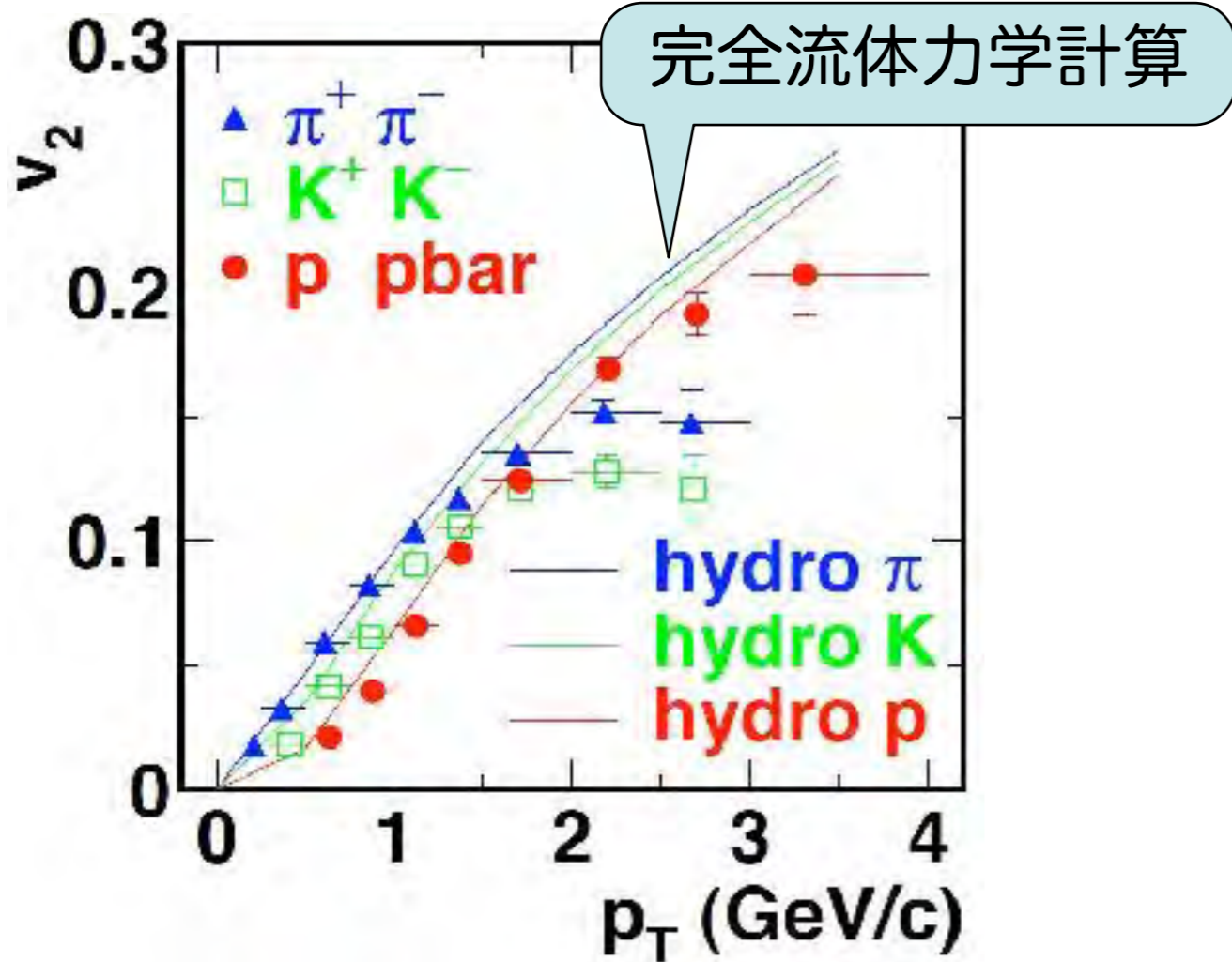
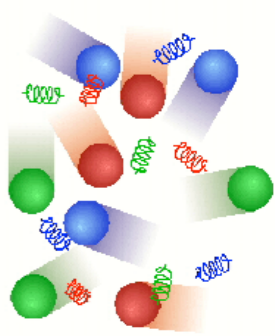
$$\epsilon_{ecc} = \left\langle \frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} \right\rangle$$

運動量空間

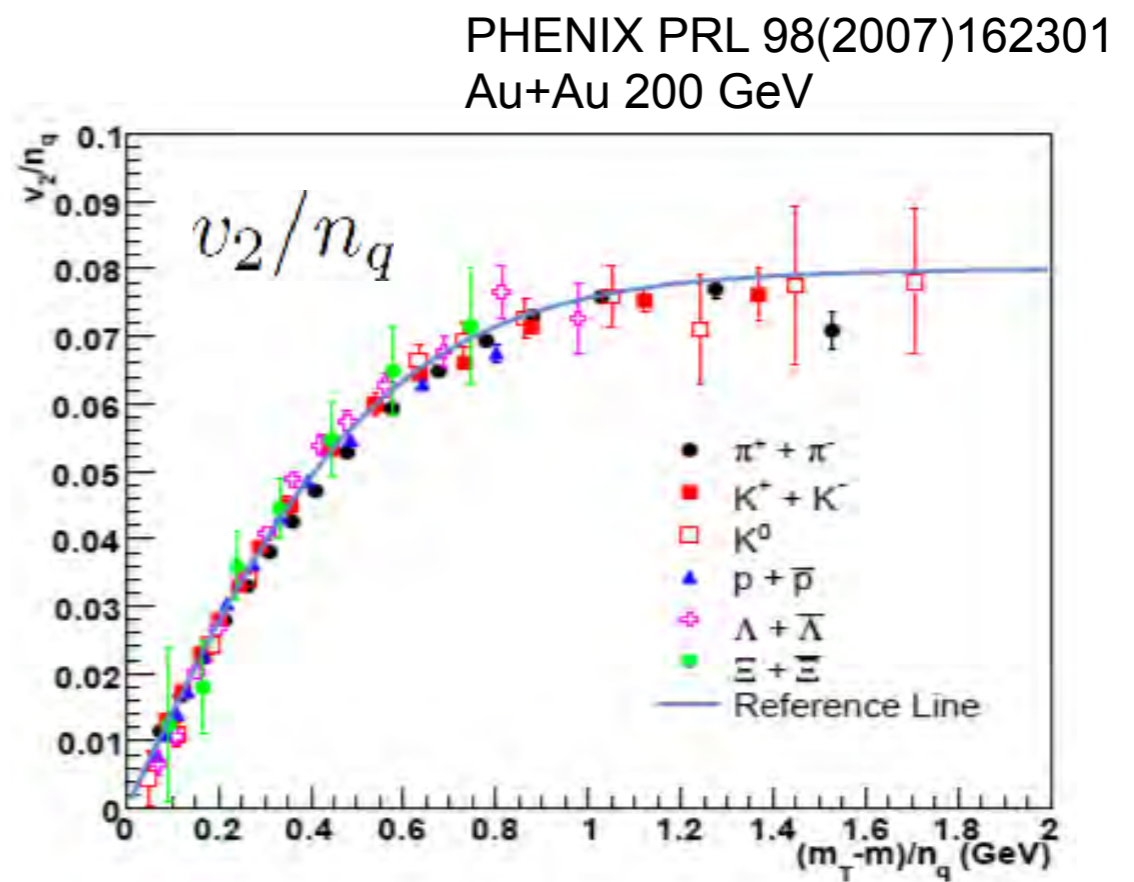
$$v_2 = \left\langle \frac{p_y^2 - p_x^2}{p_y^2 + p_x^2} \right\rangle$$

✓ 初期状態と終状態両方を実験的に決定可能

大きな方位角異方性 v_2



方位角異方性/クォーク数



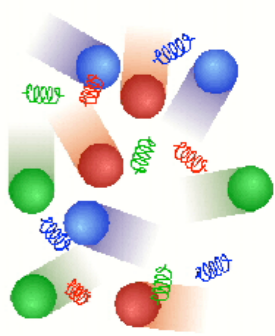
横運動エネルギー/クォーク数

- クォーク数 (n_q) スケーリング E_T/n_q
→ パartonレベルで異方性が生成

√大きな楕円方位角異方性 (v_2) + 完全流体力学計算

- 極めて早い thermalization ~ 0.6 fm/c
課題1 ; なぜこんなに早く熱化できるのか? (初期状態は?)
- 完全流体 (粘性なし) で良く説明!
課題2 ; 定量的に粘性は? (QGP物性は?)

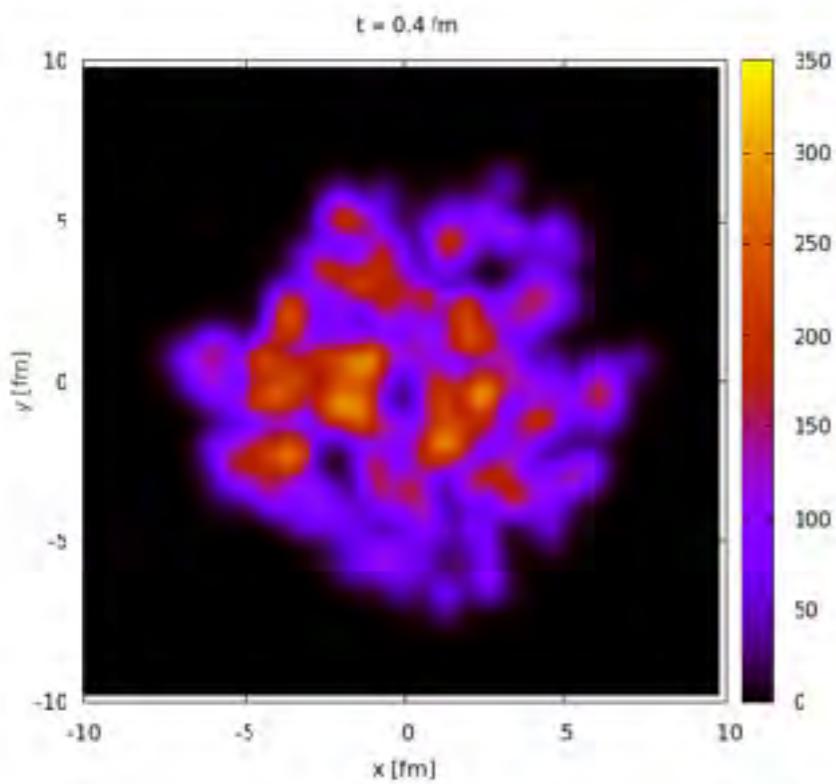
現実の原子核・原子核衝突で起こっている揺らぎからQGPの粘性の情報



現実の原子核・原子核衝突では核子数と衝突確率が有限であることから、揺らぎが発生→高次のフーリエ成分

Slide from Marco vanLeeuwen

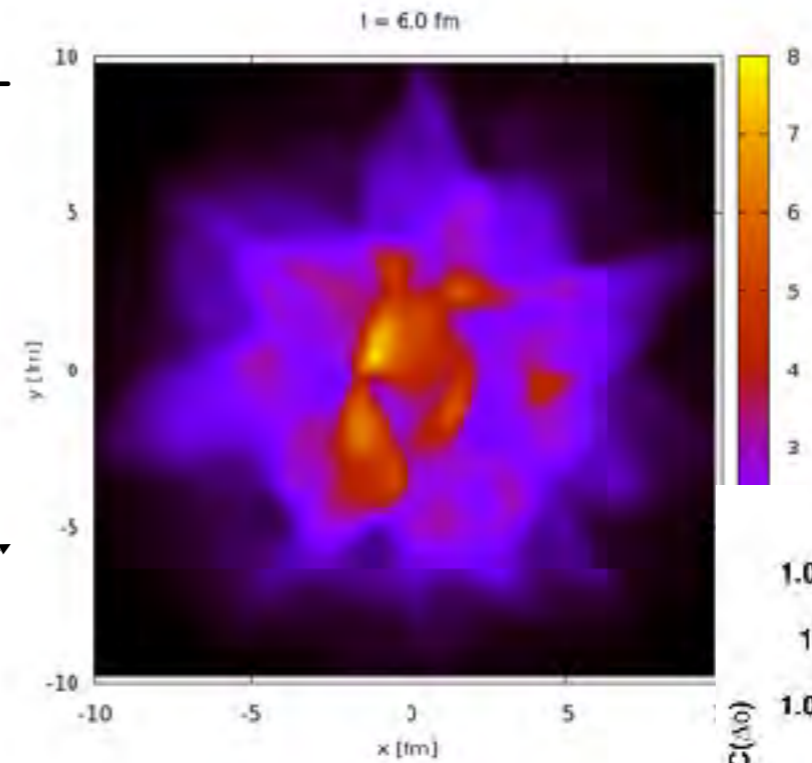
Schenke and Jeon, Phys.Rev.Lett.106:042301



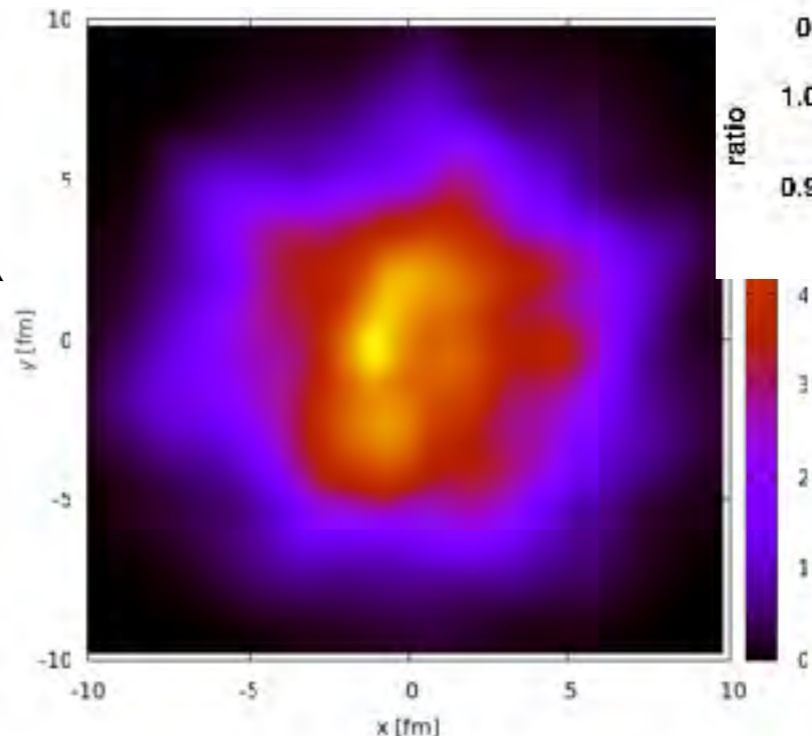
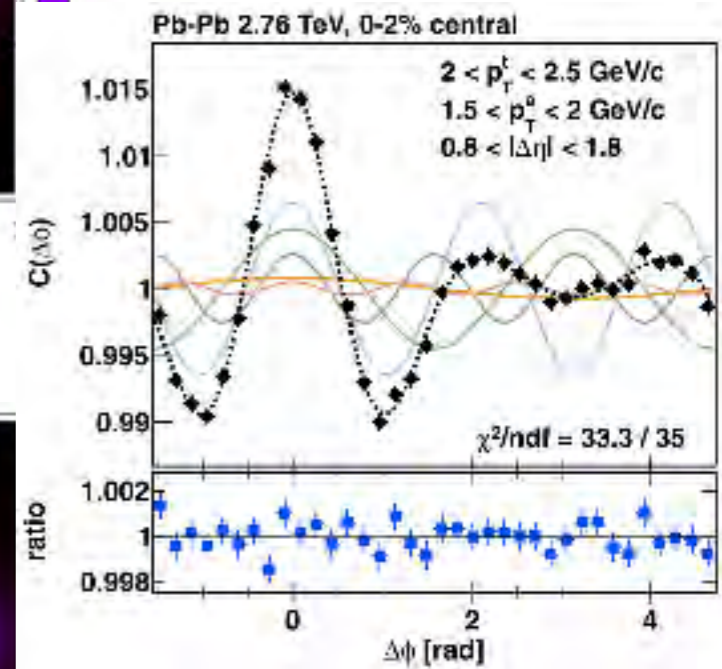
$$\eta/s = 0$$

時間発展

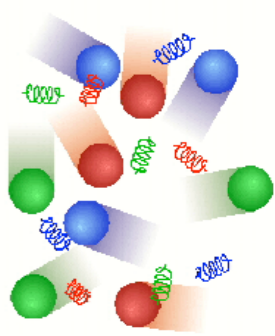
$$\eta/s = 0.16$$



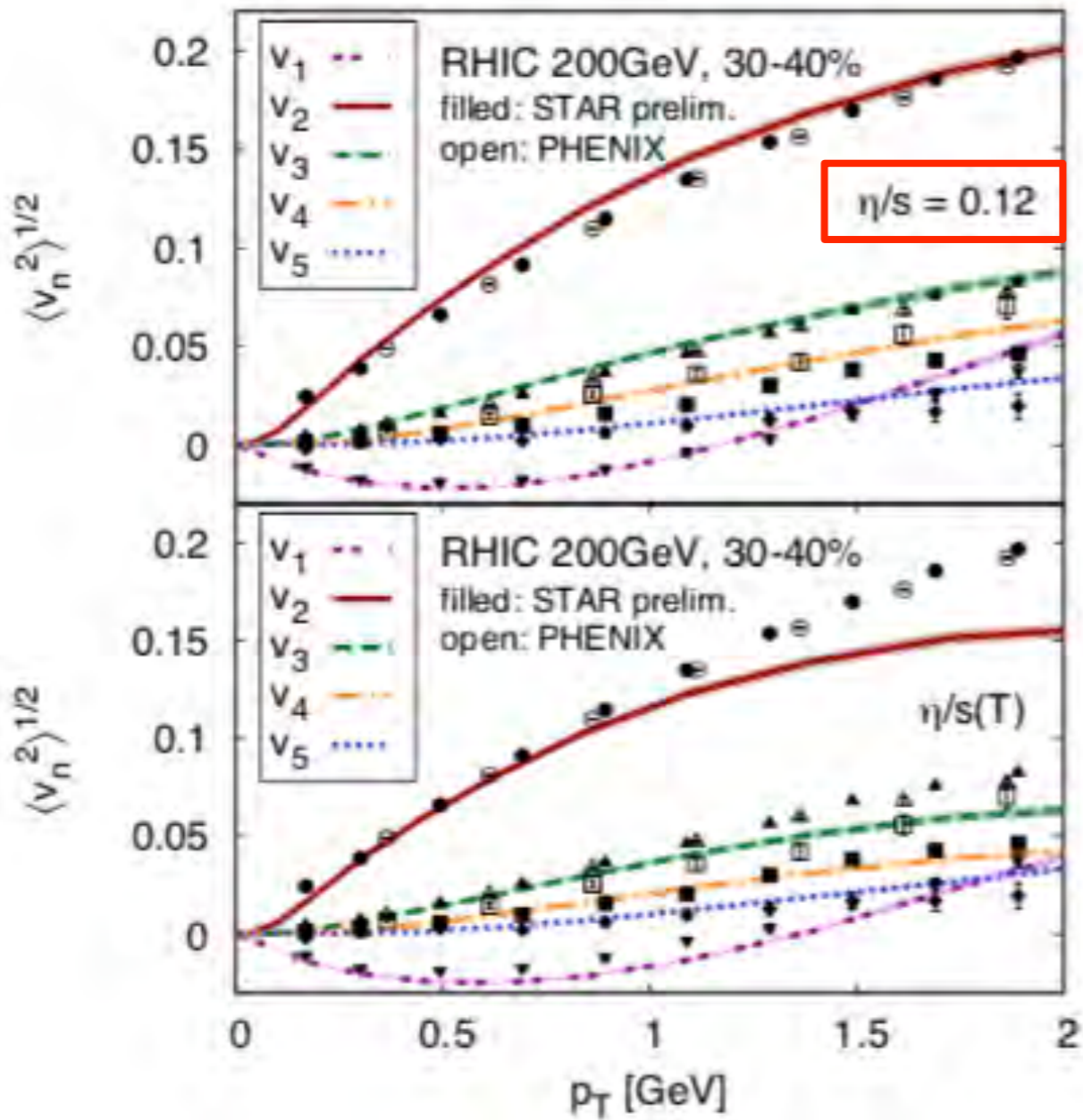
ALICE, PLB, 708, (2012)



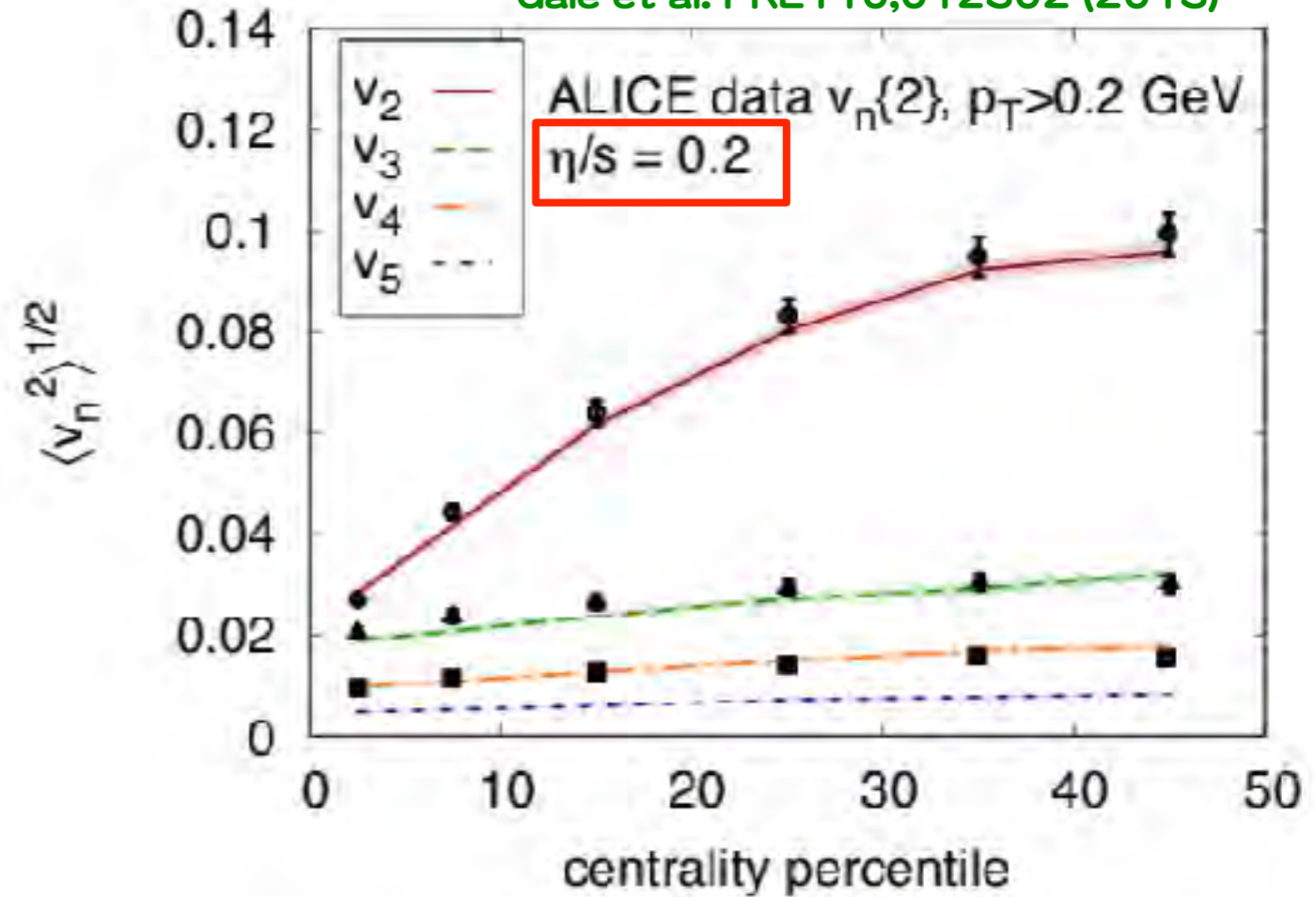
非常に小さい比粘性 (η/s)



PHENIX; PRL 107,252301 (2011), STAR; QM2012



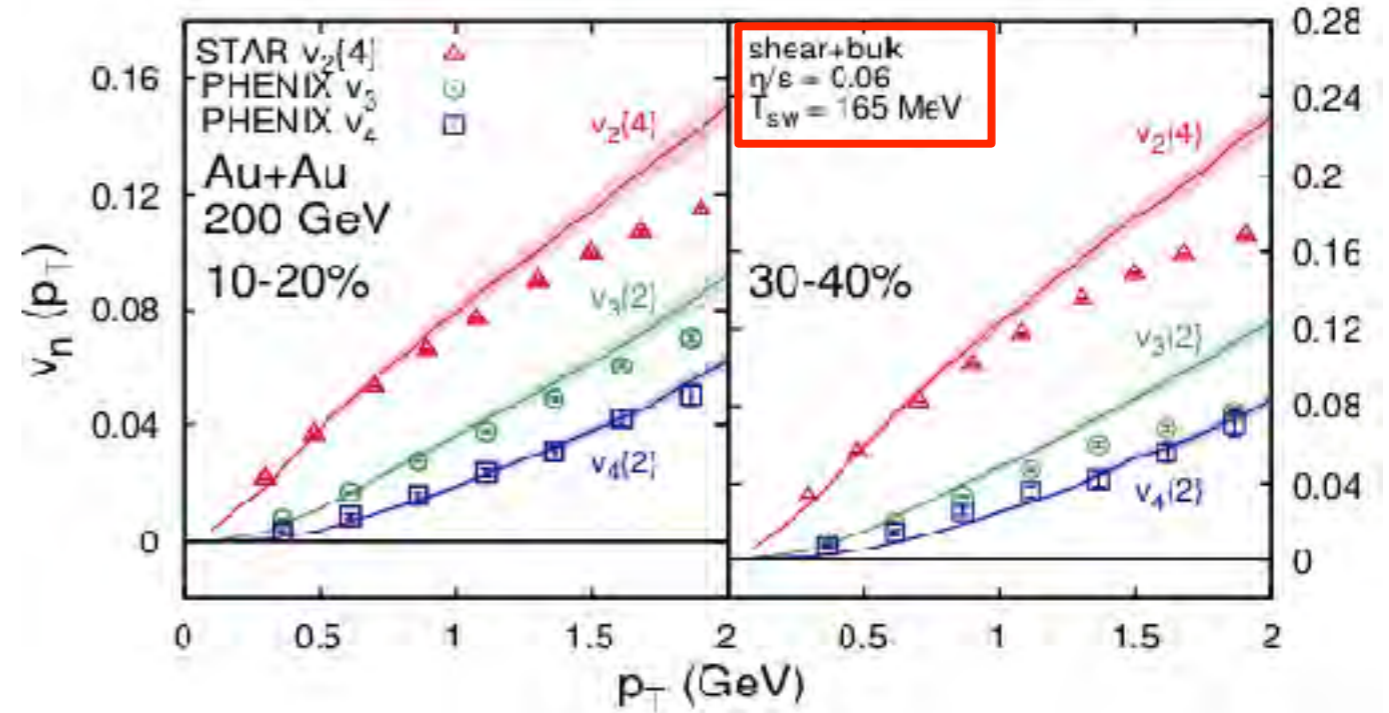
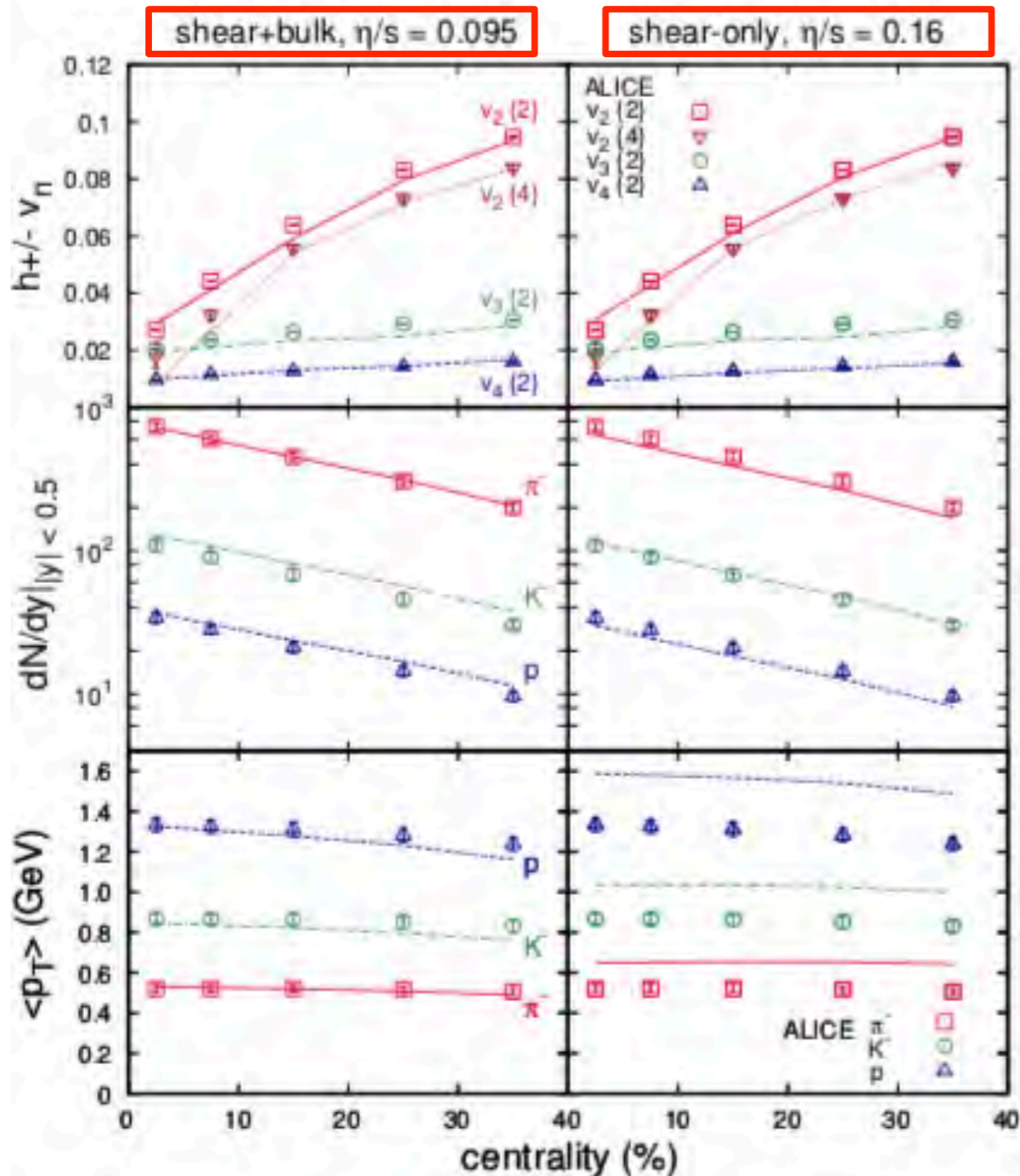
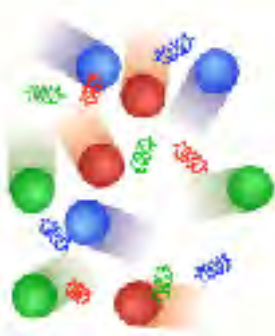
Gale et al. PRL 110,012302 (2013)



✓ With shear viscosity,

$$\frac{\left(\frac{\eta}{s}\right)_{\text{LHC}}}{\left(\frac{\eta}{s}\right)_{\text{RHIC}}} \sim \frac{0.2}{0.12} \sim 1.7$$

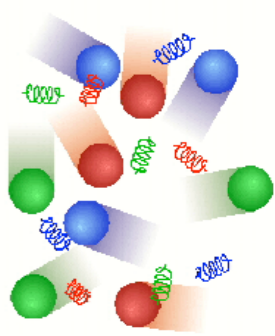
Shear+bulk viscosity



✓ Better fitting

$$\frac{\left(\frac{\eta}{s}\right)_{\text{LHC}}}{\left(\frac{\eta}{s}\right)_{\text{RHIC}}} \sim \frac{0.095}{0.06} \sim 1.6$$

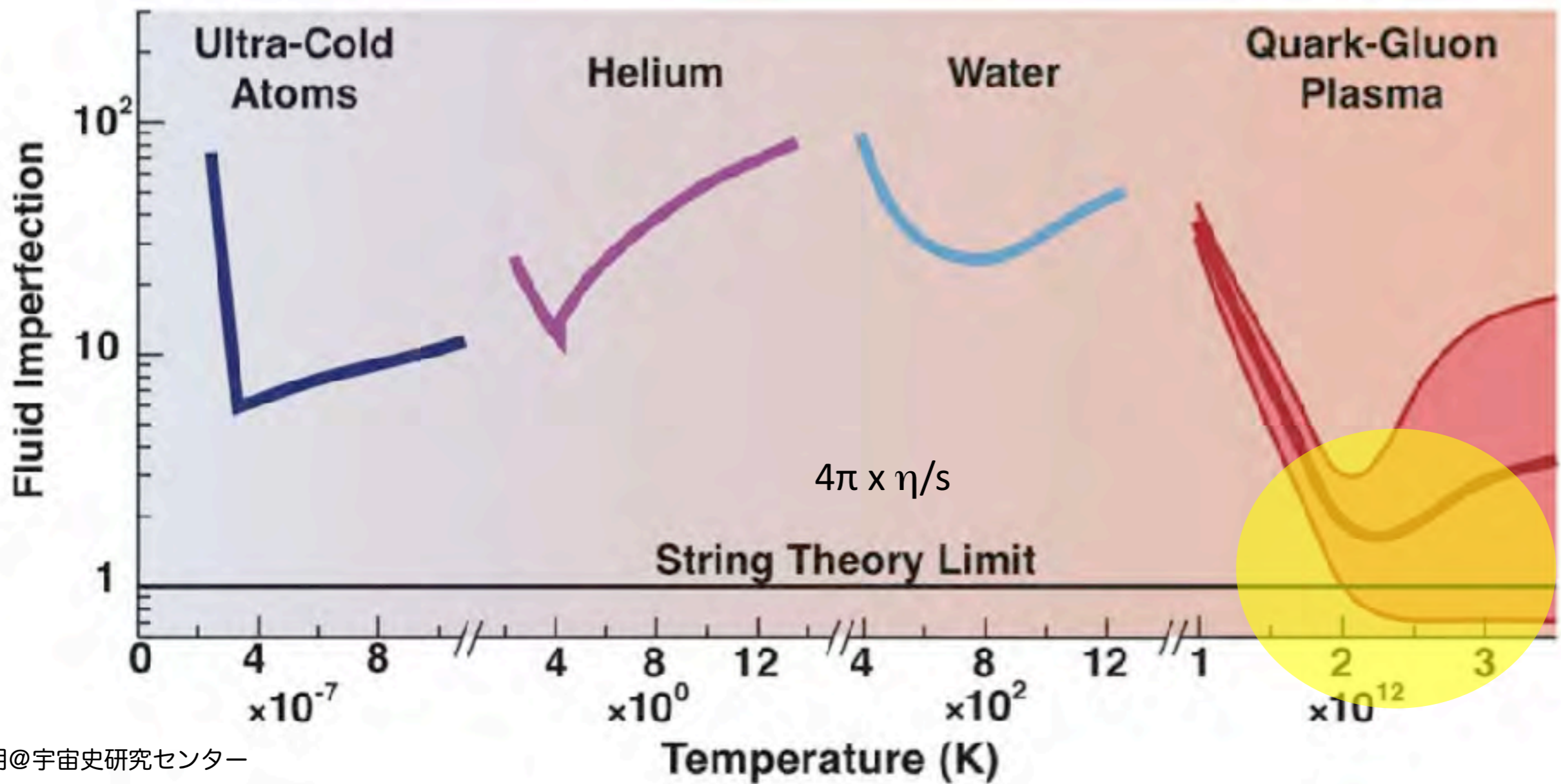
QGPはサラサラな物質



✓ 比粘性(ずれ粘性/エントロピー)

- $\eta/s \sim 0.20$ at LHC, $\eta/s \sim 0.12$ at RHIC

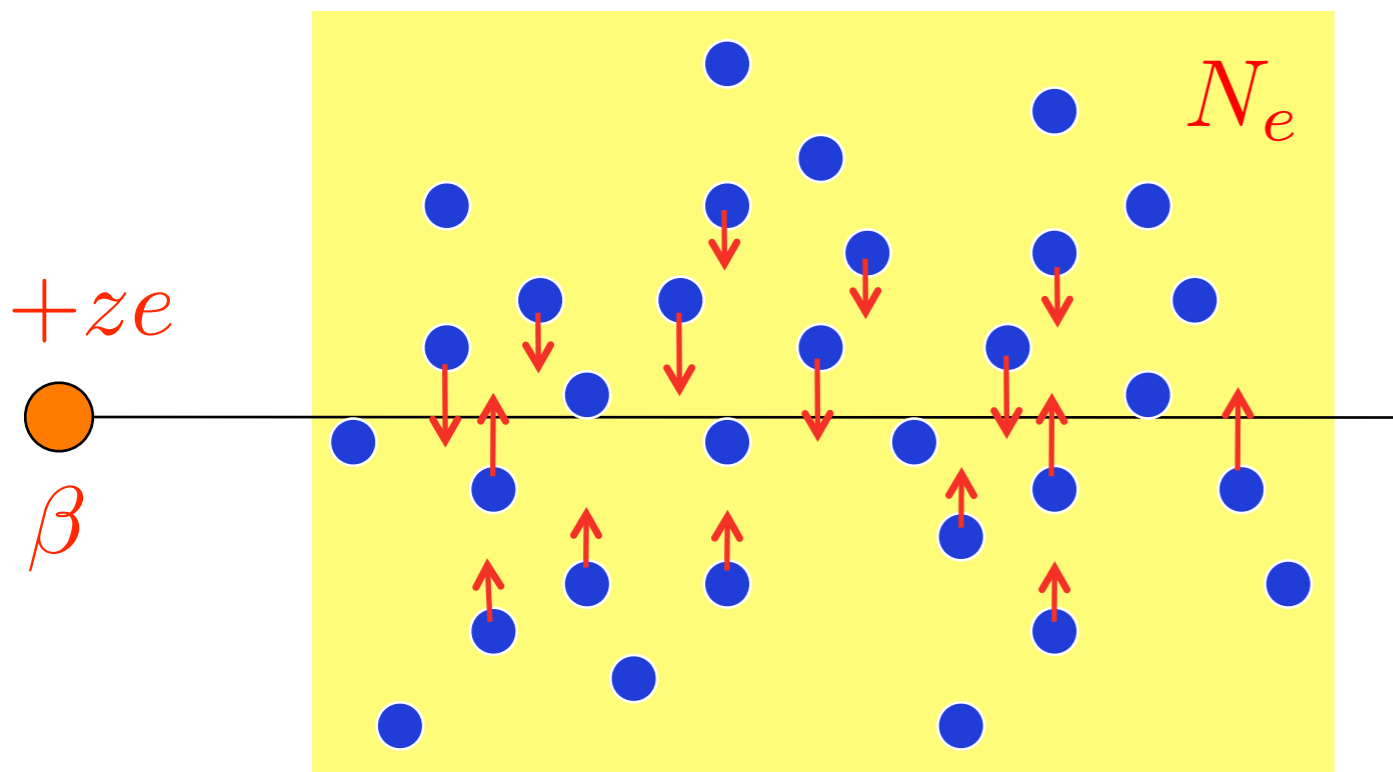
✓ QGPは、どの物質よりも粘性が小さい“サラサラ”な物質！？



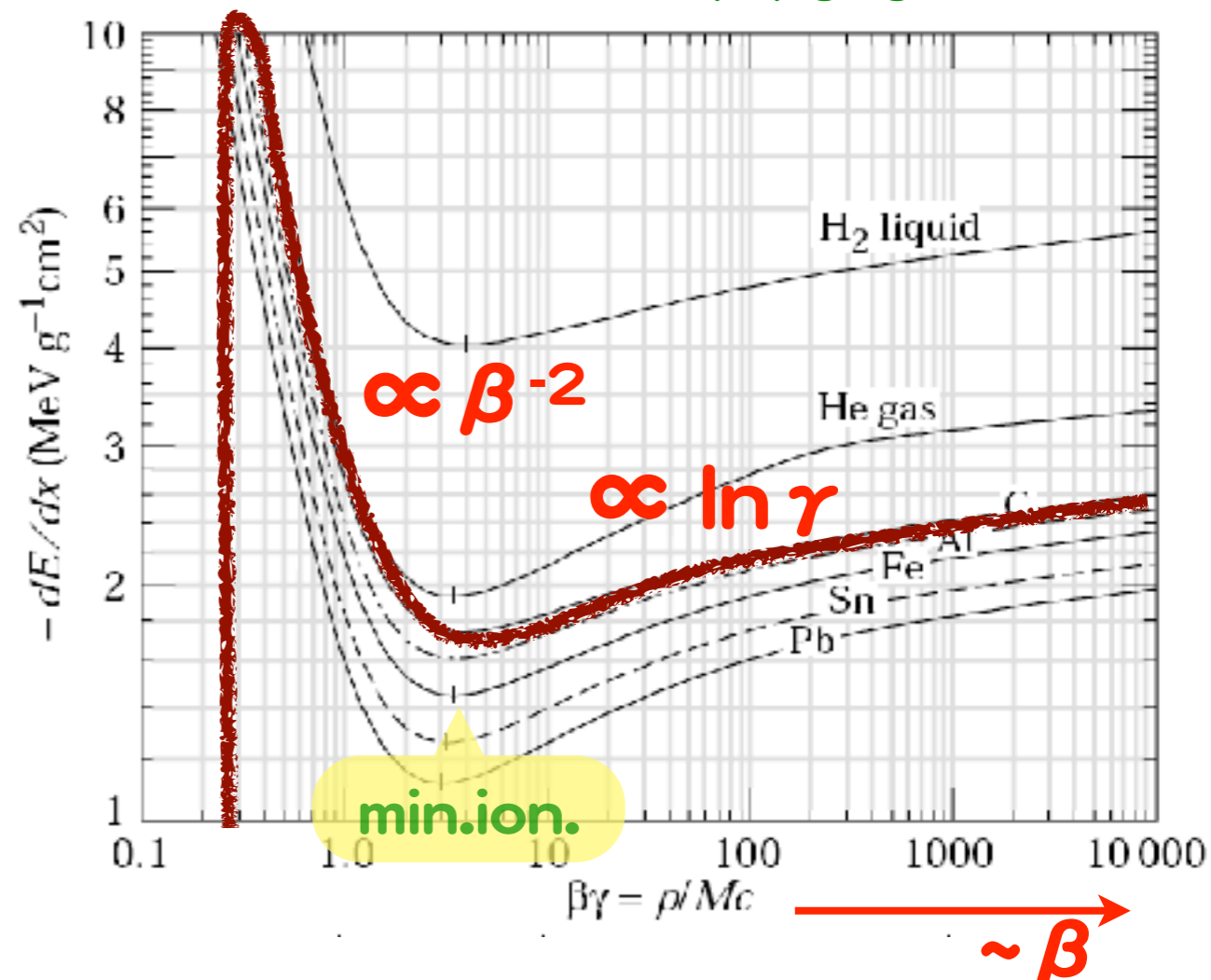
②ジェットクエンチ

QEDにおけるエネルギー損失 ～ Bethe-Bloch Eq.～

<http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/>

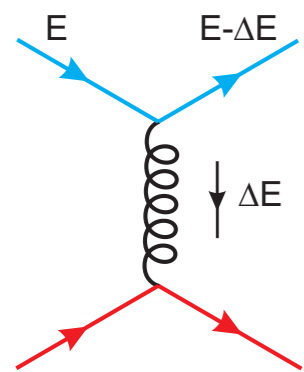
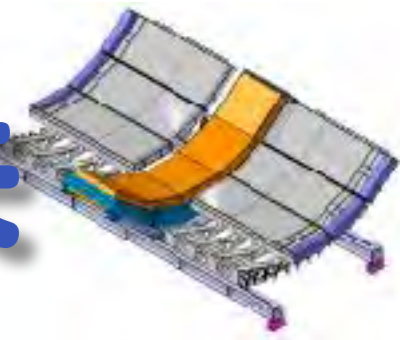


$$-\frac{dE_{\text{Bethe}}}{dx} \propto \frac{z^2 N_e}{\beta^2} \ln(\beta^2)$$



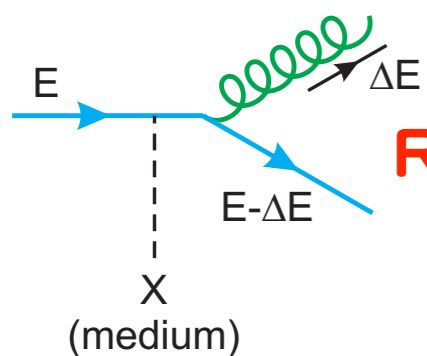
- 入射荷電粒子と物質中の原子電子がクーロン相互作用
 - ✓ 原子電子を電離することによって、入射粒子はエネルギー損失
 - ✓ エネルギー損失量は物質の電子密度(N_e)に比例
 - ✓ エネルギー損失量は入射粒子の z^2 に比例
- エネルギー損失量から物質の電子密度を測定できる → 「プローブ」

QCDにおけるエネルギー損失



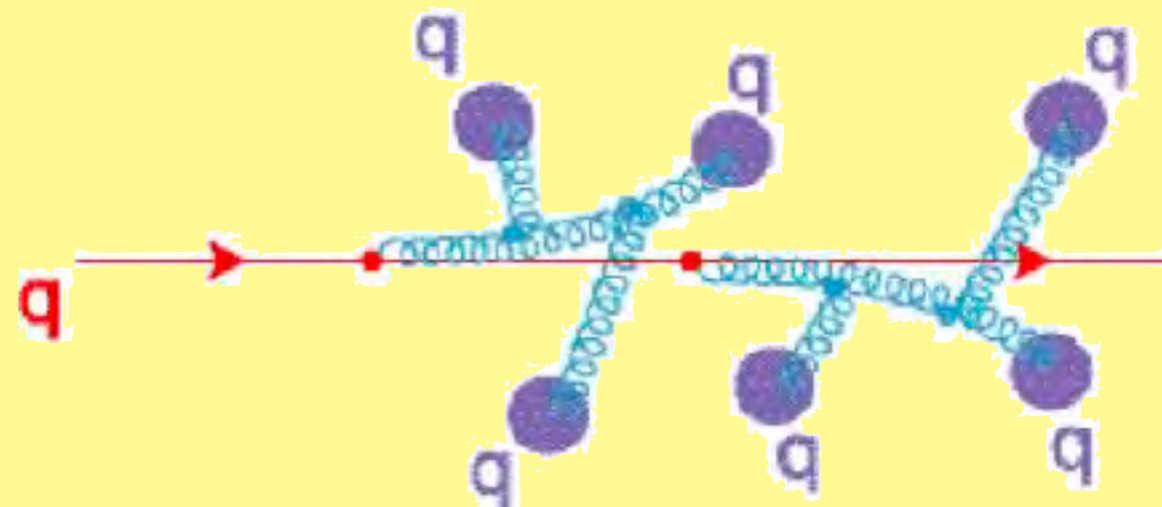
Collisional

$$\Delta E \propto \ell^1$$



Radiative

$$\Delta E \propto \ell^2$$



$$\Delta E \propto \alpha_S C_R \langle \hat{q} \rangle L^2$$

pQCD

理論の示唆するところ

放射型損失が重要

期待される効果;

- 高横運動量ハドロンの減少
- back-to back相関の崩れ
- jet fragmentationの変貌
softer, larger multiplicity,
angular broadeningなどなど

$$\Delta E_{\text{gluon}} > \Delta E_{\text{quark}} > \Delta E_{\text{charm}} > \Delta E_{\text{bottom}}$$

✓ 様々な理論

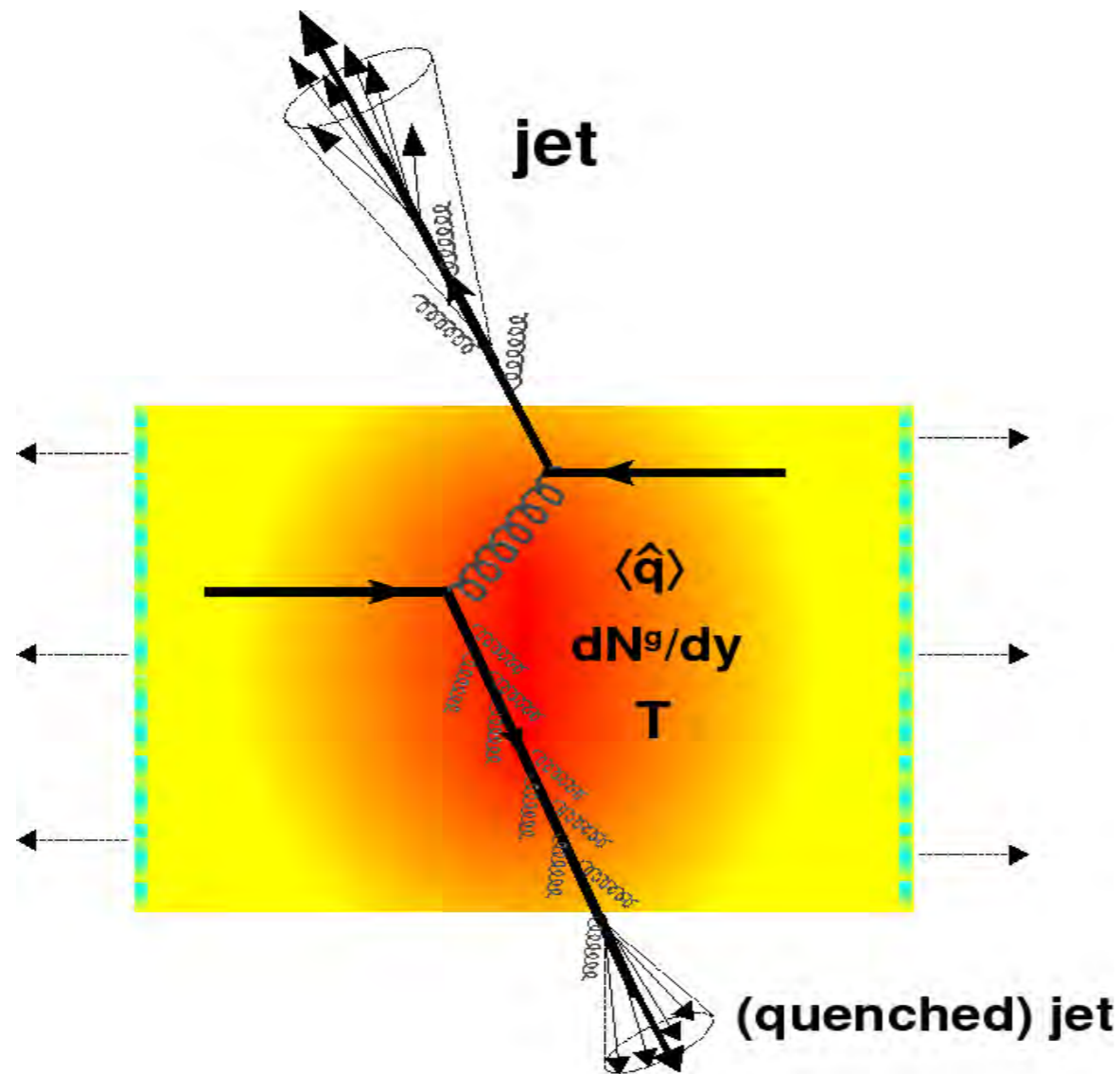
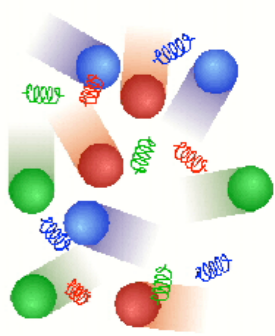
- 衝突型損失
- 放射型損失

➡ **Bethe-Heitler regime**

➡ **LPM regime**

➡ **“dead-cone” effect**

QGPの「密度」の測り方



✓ AA衝突で2つのパートンが Hard Scatt. を起こす

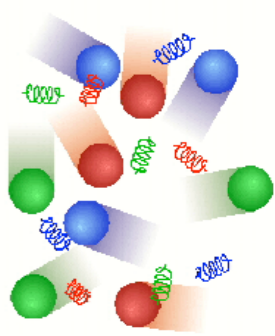
- 一つは真空に飛び出しジェットを生成し、
- 他方は、QGP中を突き抜ける際に特徴的なエネルギー損失を受ける

✓ 現れる現象；

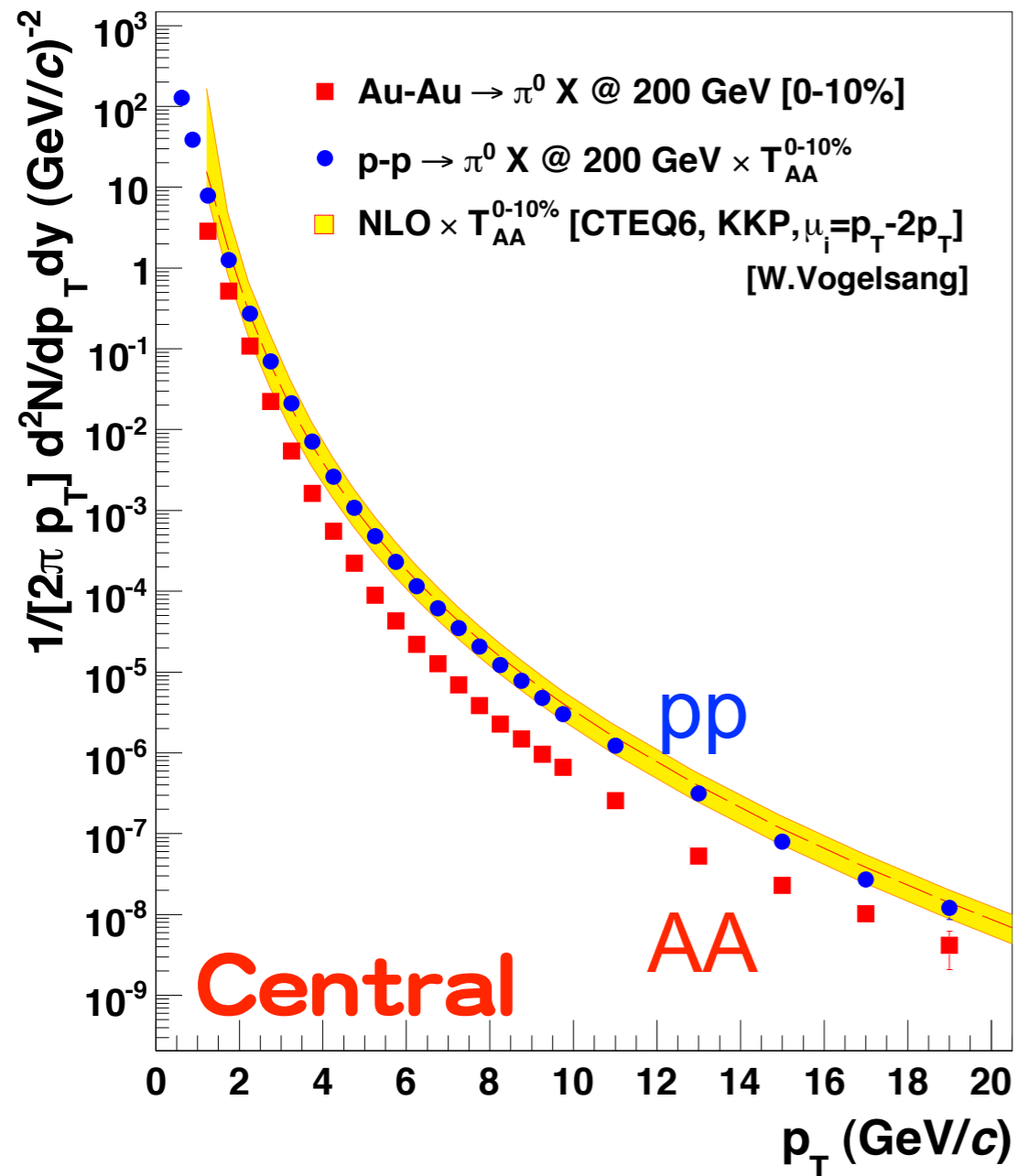
- ジェットの消失／減衰
- 高横運動量粒子の減少
- ジェット成分の変化？

“Jet quenching” in nucleus-nucleus collision.

高横運動量粒子が減少する現象



Phenix; P.R.L. 91, 232301 (2008), PRD76,051106(2007)



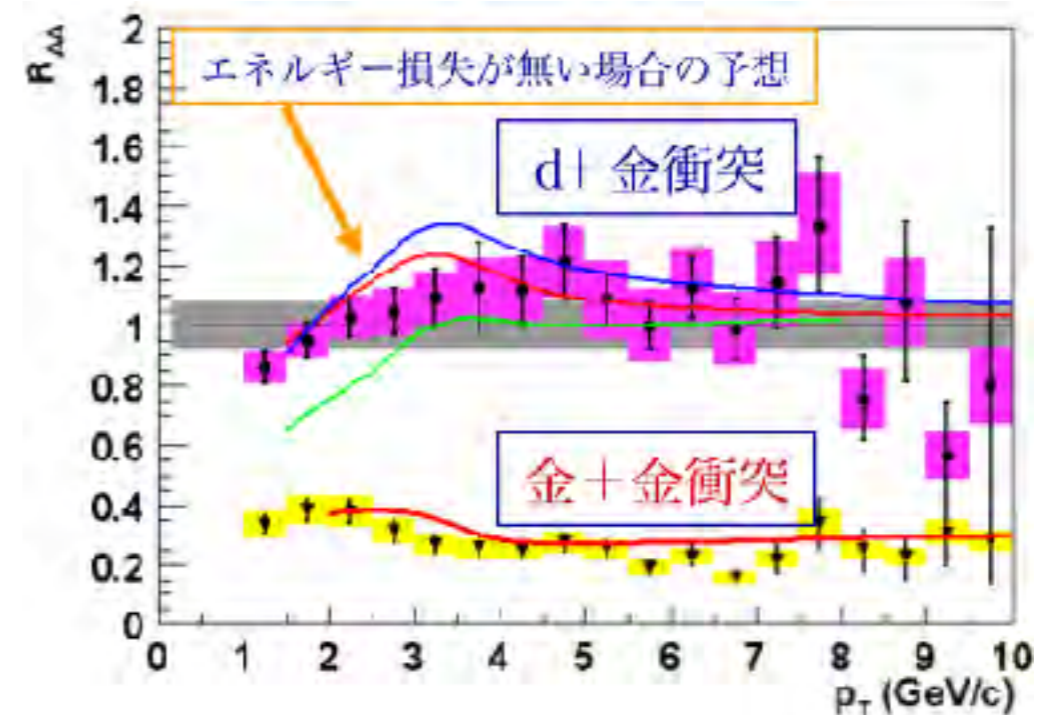
✓ pp衝突の重ね合わせと比較

Nuclear Modification Factor;

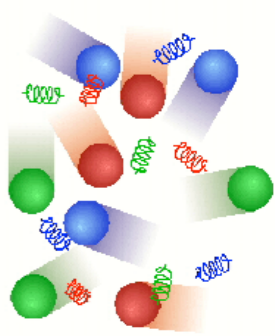
$$R_{AA} = \frac{\text{"hot/dense QCD medium"}}{\text{"QCD vacuum"}} = \frac{dn_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot dn_{pp}/dp_T dy}$$

✓ AA中心衝突では高横運動量領域で「減少」

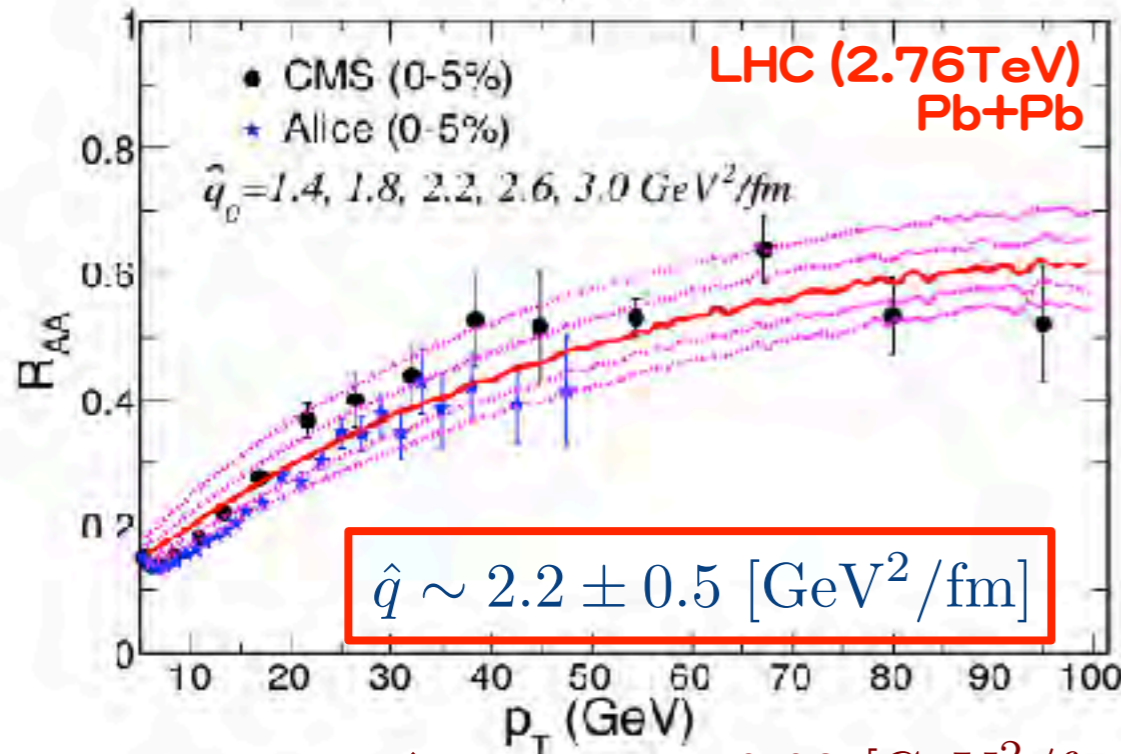
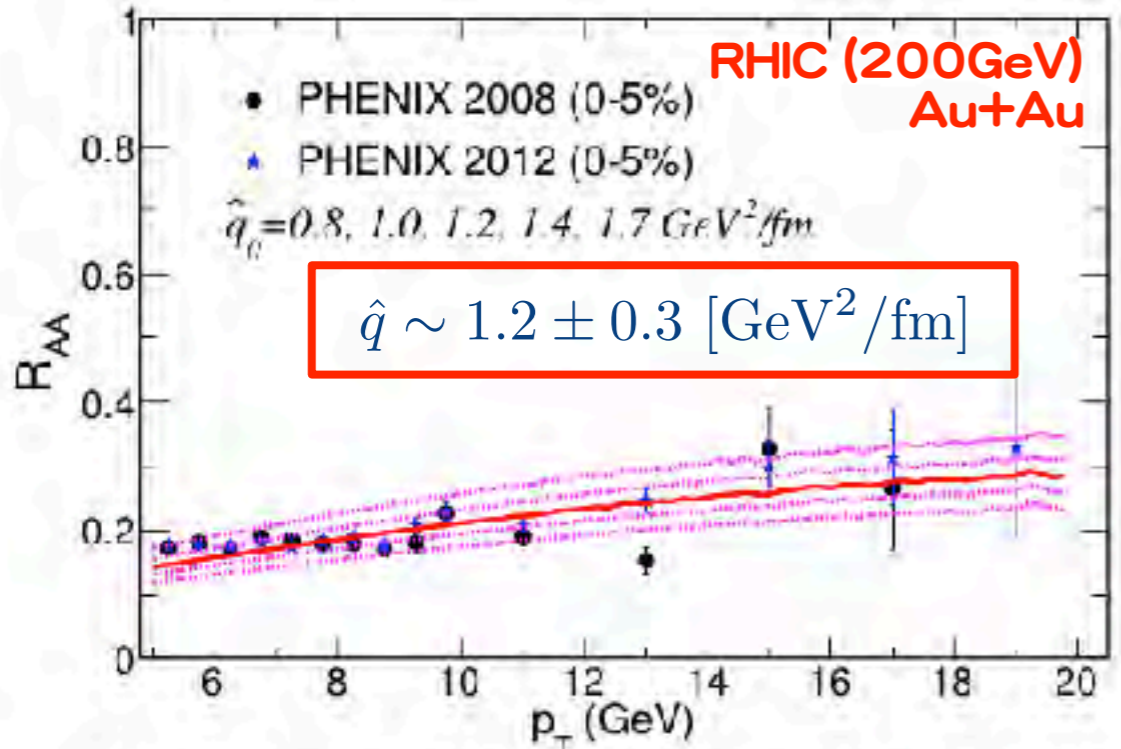
✓ dAuではなく、AuAuで見られることから Jet Quenchか？



エネルギー損失量



PRC90(2014)14909



✓ 3次元理想流体力学モデルによる時間発展計算

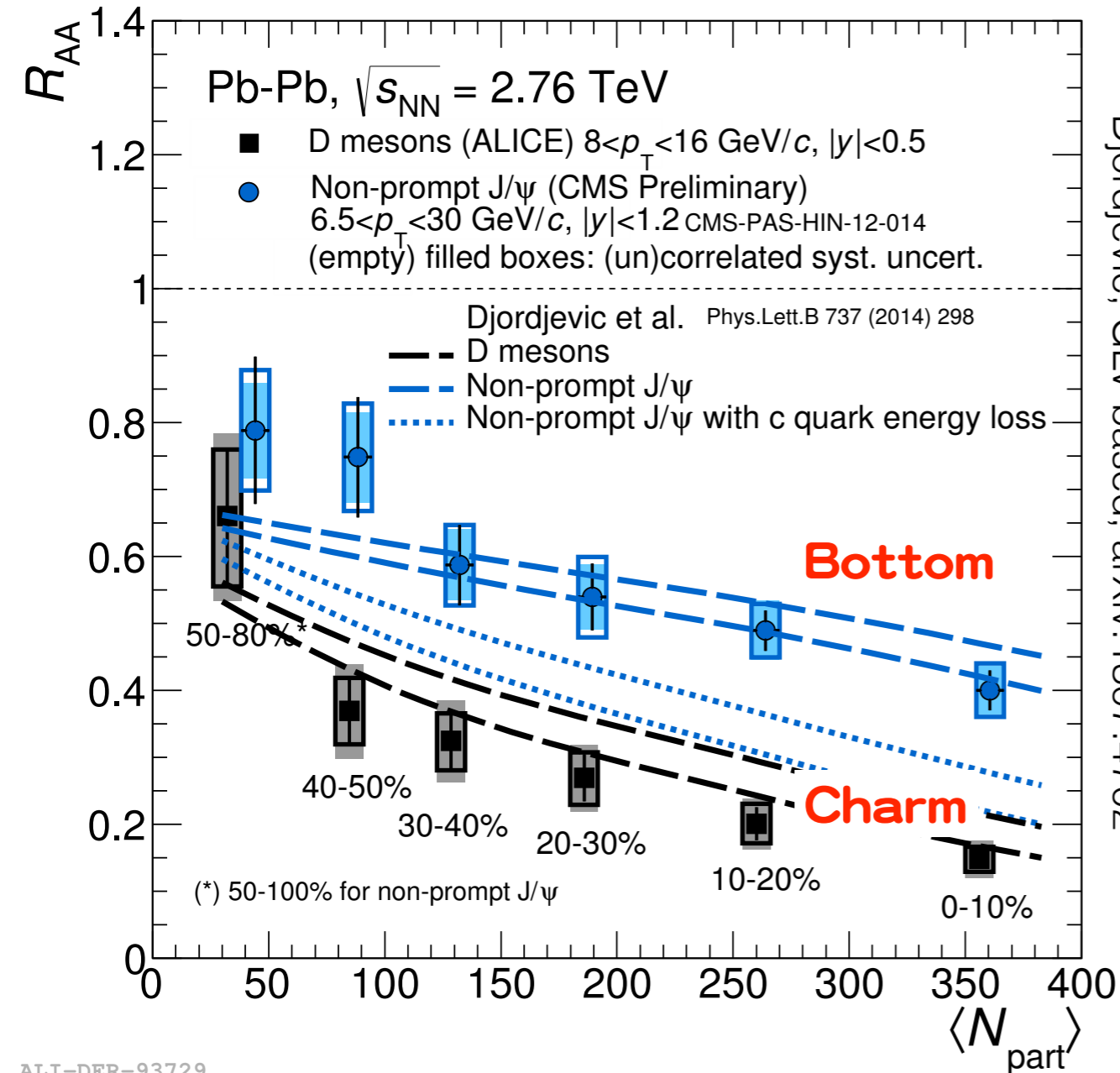
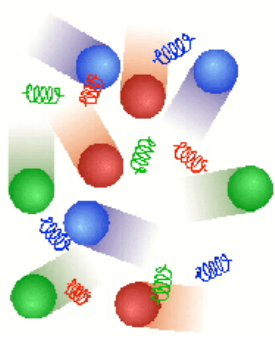
- Glauber w. Wood-Saxonを仮定
- RHIC Au+Au central collision
- LHC Pb+Pb central collision

✓ RHICからLHCで約2倍に

- グルオン密度比~2に対応! ?

$$\frac{(\hat{q})_{\text{LHC}}}{(\hat{q})_{\text{RHIC}}} \sim \frac{2.2}{1.2} \sim 1.8 \iff \frac{(\frac{dN_{\text{ch}}}{dy})_{\text{LHC}}}{(\frac{dN_{\text{ch}}}{dy})_{\text{RHIC}}} = \frac{1584}{687} \sim 2$$

パートン質量による違い



Djordjevic, GLV-based, arXiv:1307.4702

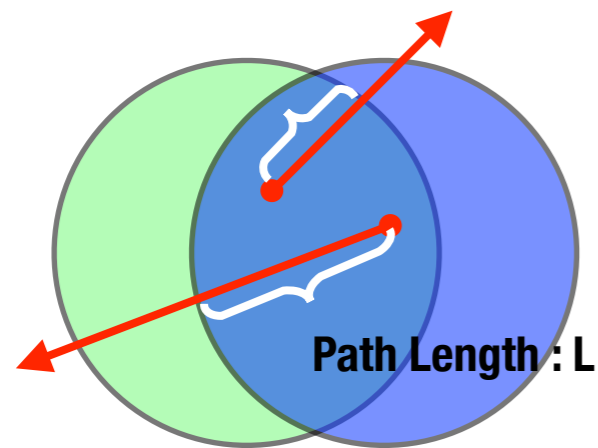
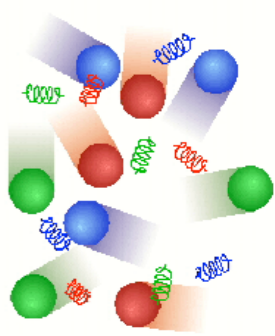
✓ B中間子からのJ/ψと
D中間子の R_{AA} を比較

- D中間子; charmを含む
- B中間子; bottomを含む

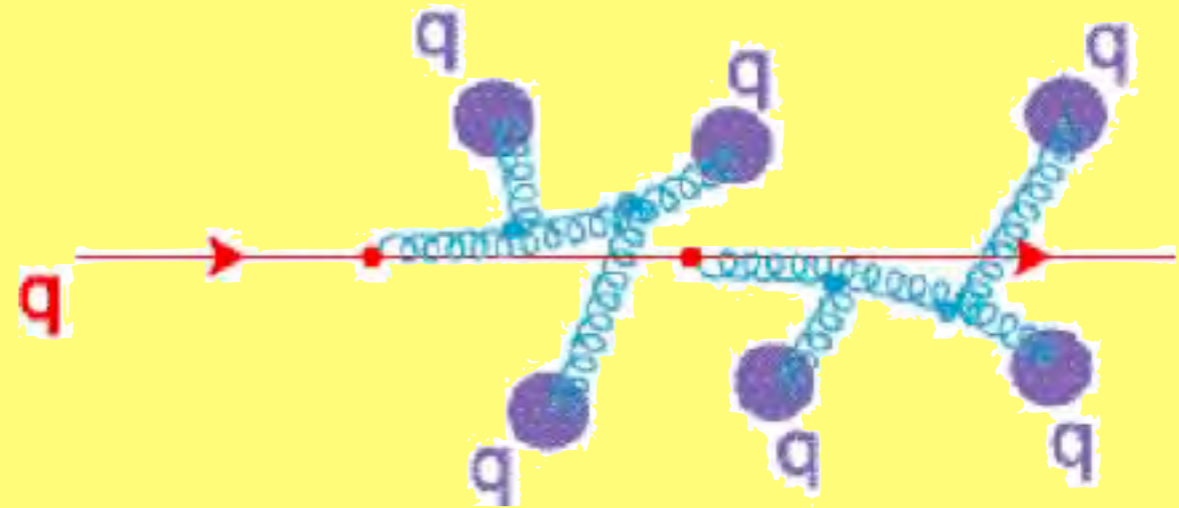
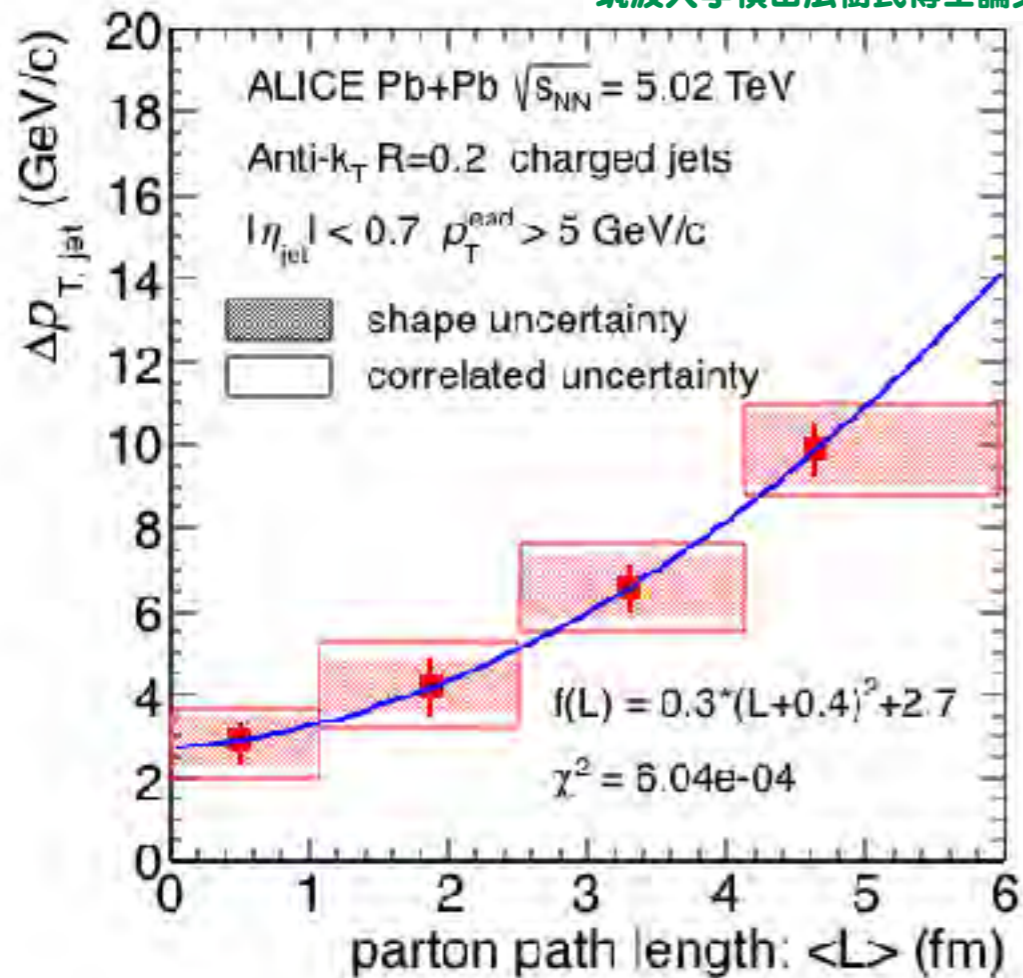
✓ 理論予測通り

$$\Delta E_{gluon} > \Delta E_{quark} > \Delta E_{charm} > \Delta E_{bottom}$$

ジェットで観測したエネルギー損失



筑波大学横山広樹氏博士論文より

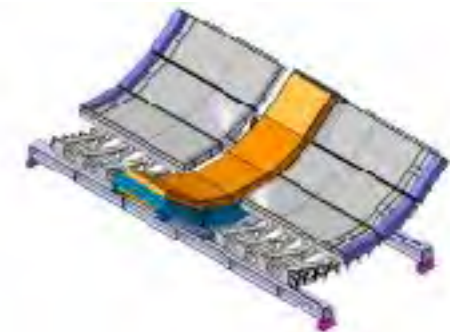


$$\Delta E \propto \alpha_S C_R \langle \hat{q} \rangle L^2$$

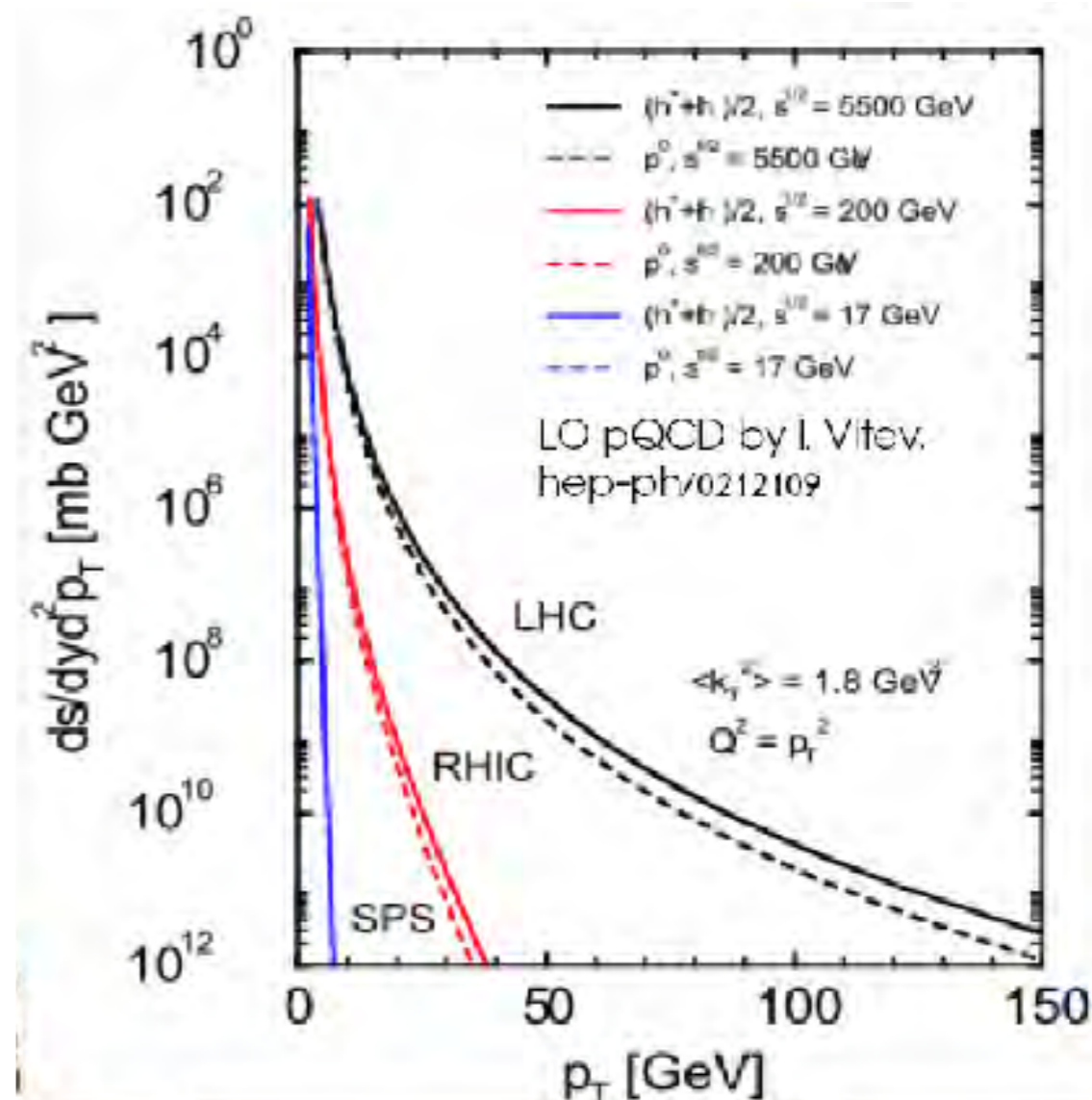
?!

✓ 乞うご期待!

研究の流れ： なぜRHICからLHCへ



	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
T/T_c	1.9	3.0-4.2
ε (GeV/fm ³)	5	15-60
τ_{QGP} (fm/c)	2-4	>10

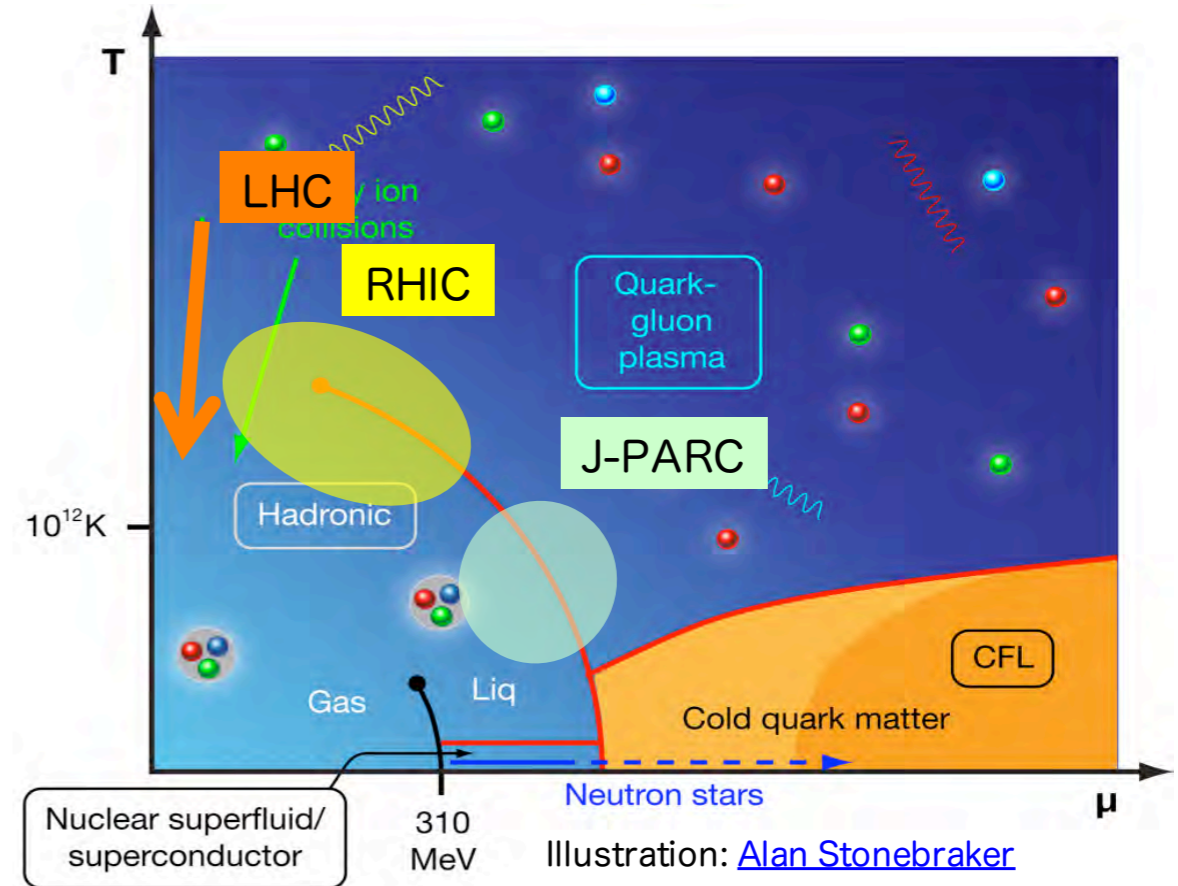
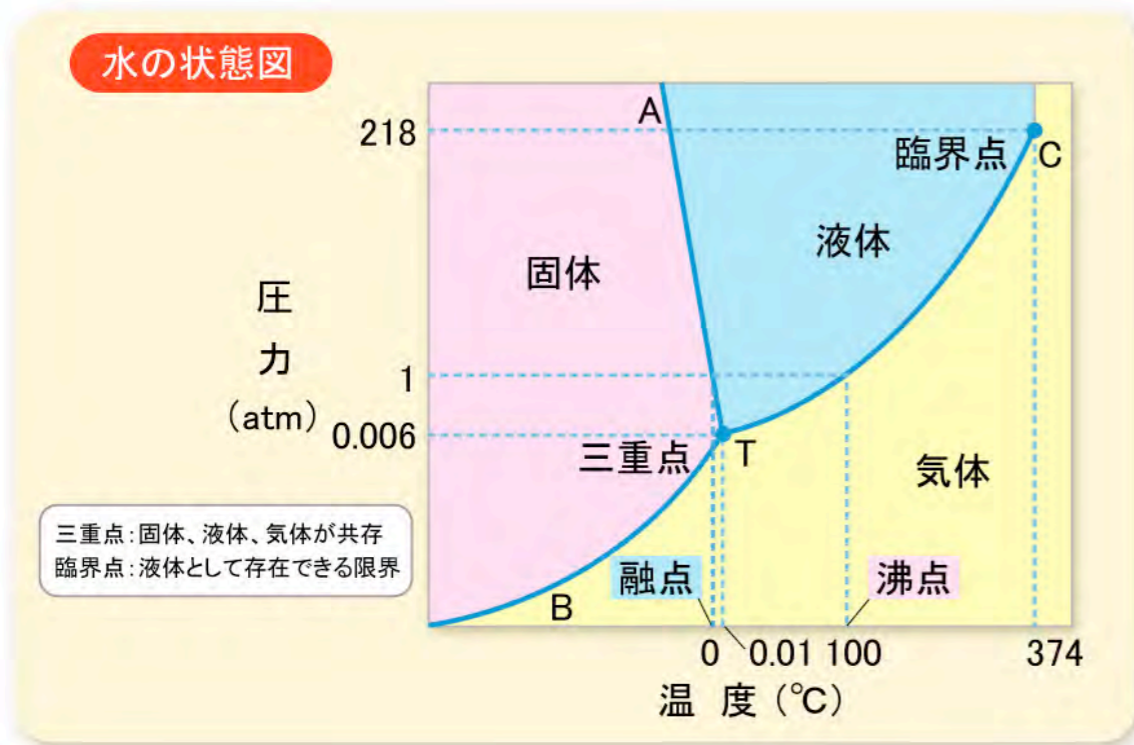
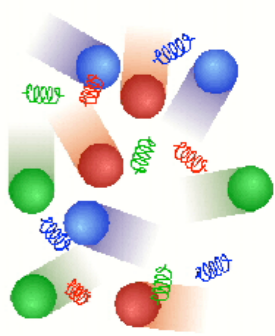


✓ LHCをRHICと比べると、

- 到達温度やエネルギー密度が数倍大きい
- ジェットの生成量 (数桁)

→ 粘性や dE/dx の
エネルギー密度依
存性

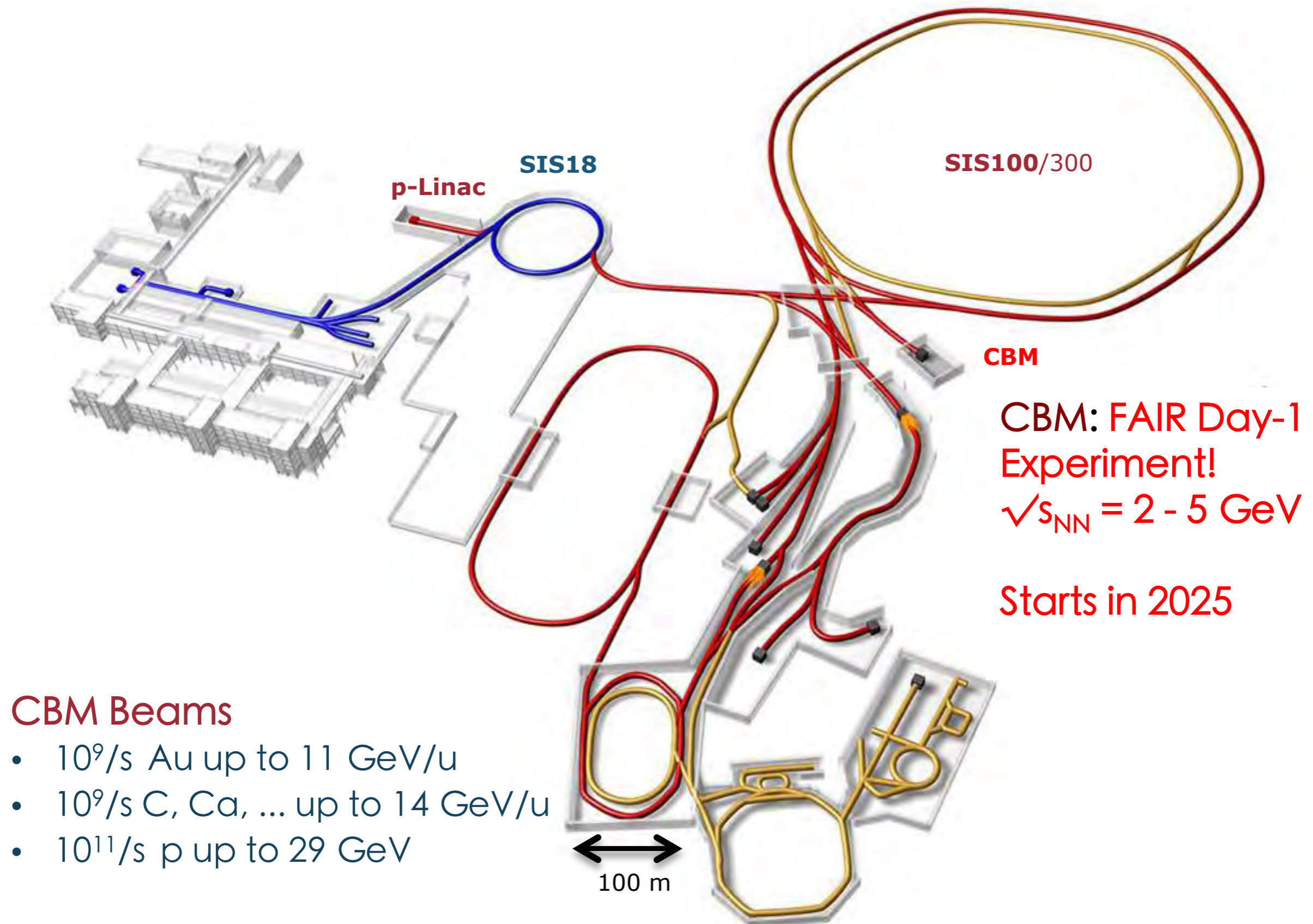
今後) 相構造の理解を目指して



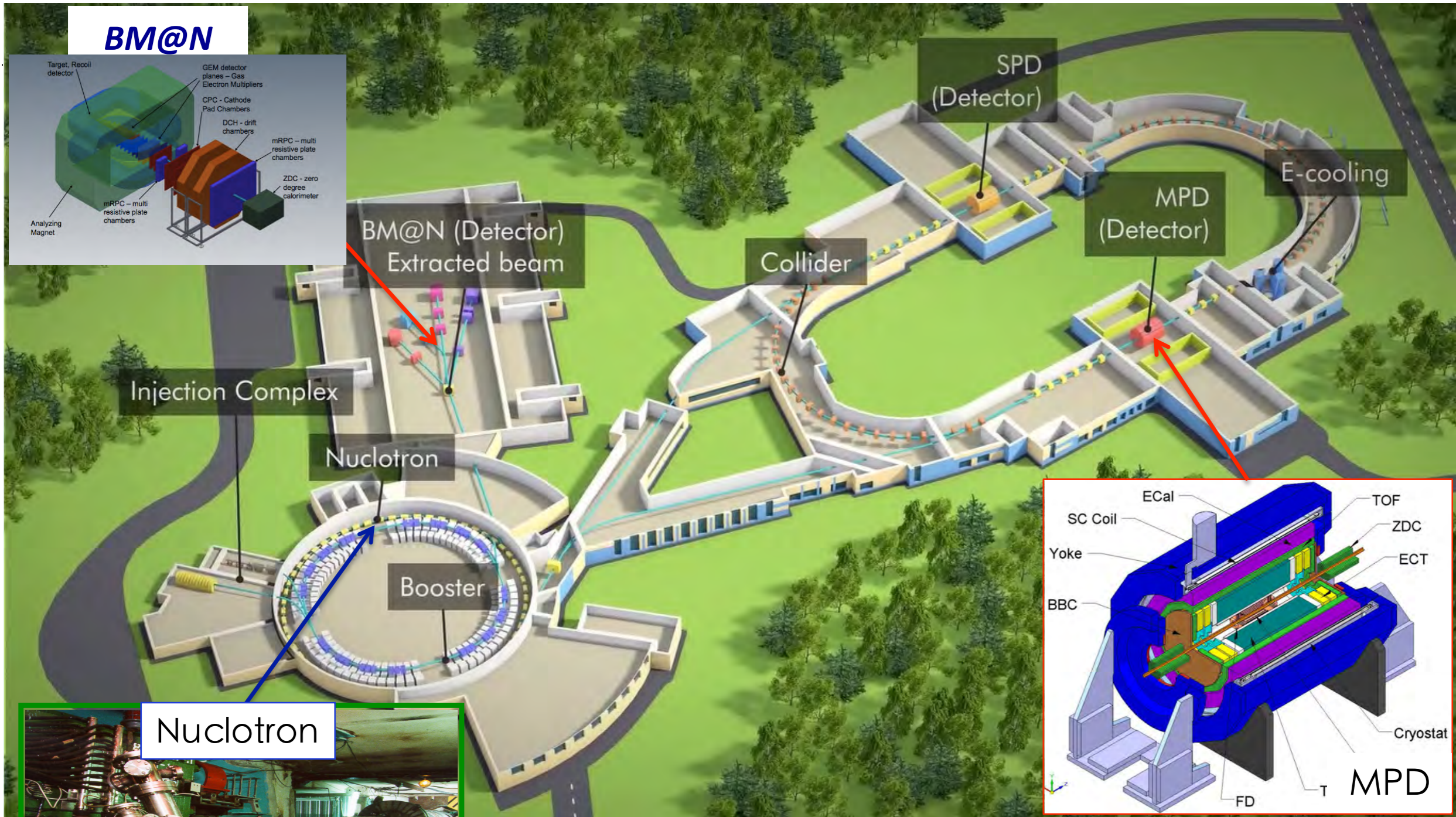
✓ 加速器の進化／建設が不可欠

	Machine	Beam+Target	Ecm [GeV]
1987 -	米国・BNL・AGS	Si+Au	5A
1992 -	米国 BNL・AGS	Au + Au	4A
2000 -	米国・BNL・RHIC	Au + Au	130A - 200A
2011 -	欧州・CERN・LHC	Pb+Pb	2900-6300A
2025	独・FAIR	p, C, Ca ,, Au	2 - 5 A
2023??	露・NICA、中・HIAF、日・J-PARC	p,,,U?	4 - 11A、(), 2-6.2A

Facility for Antiproton & Ion Research: FAIR



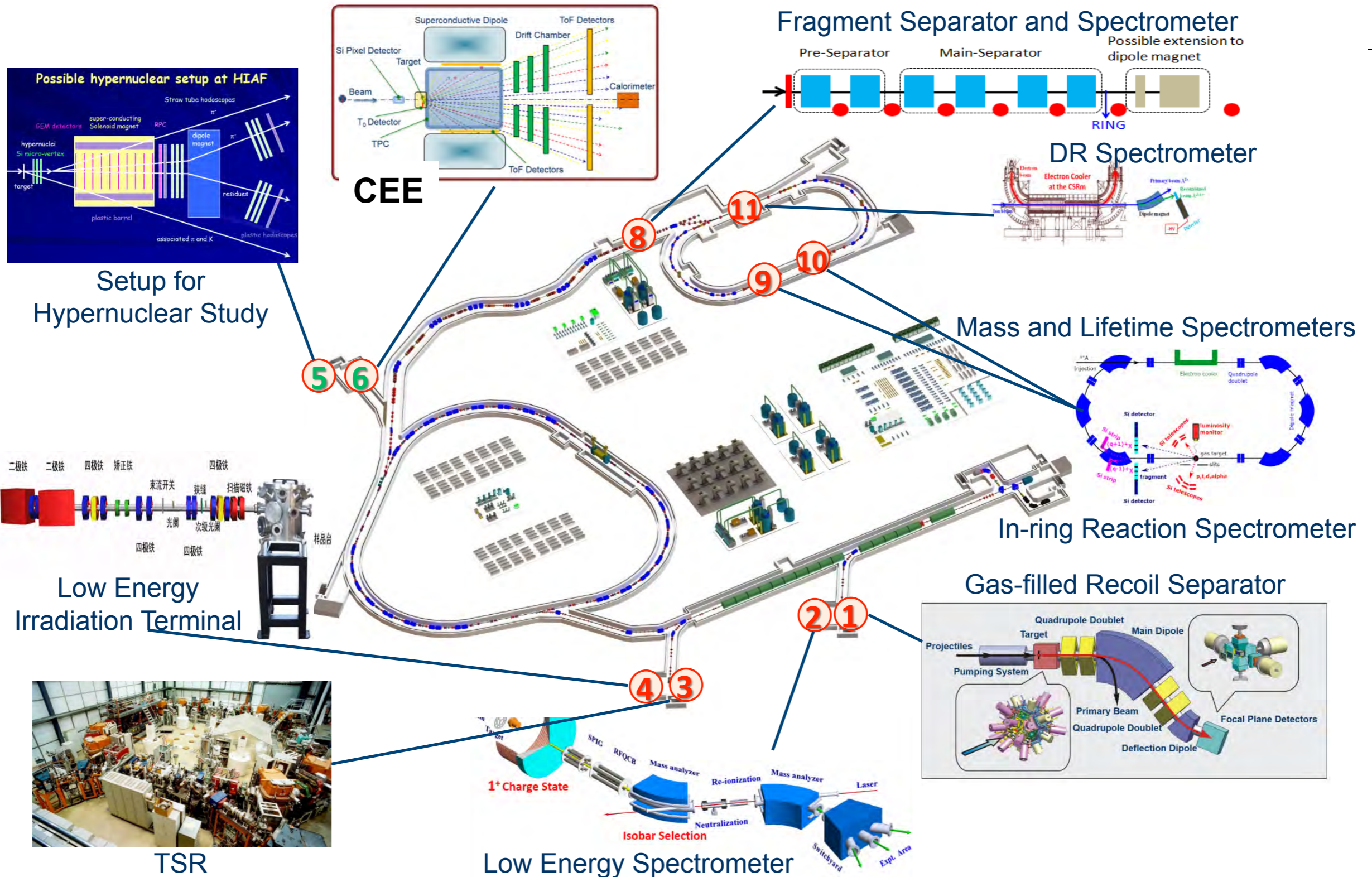
Experiments at NICA $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11 \text{ GeV}$



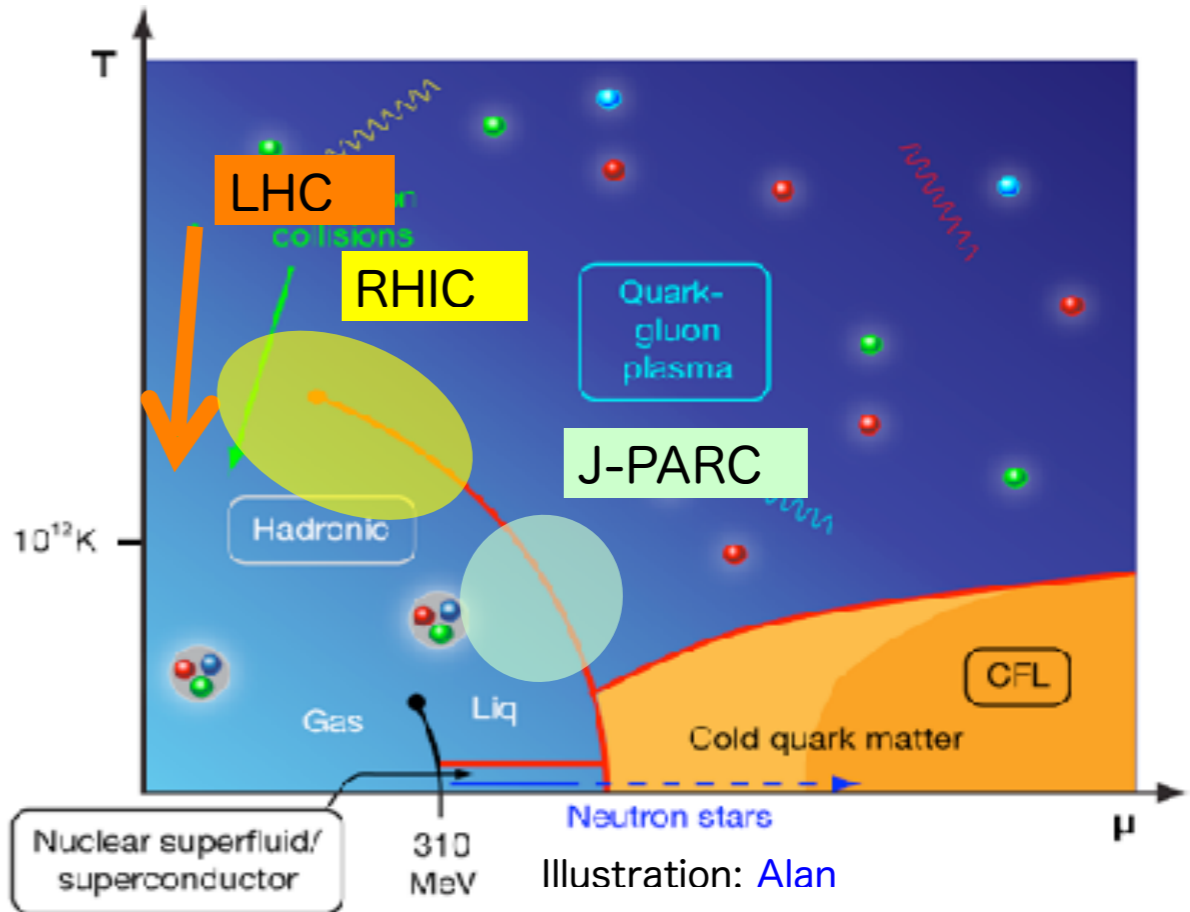
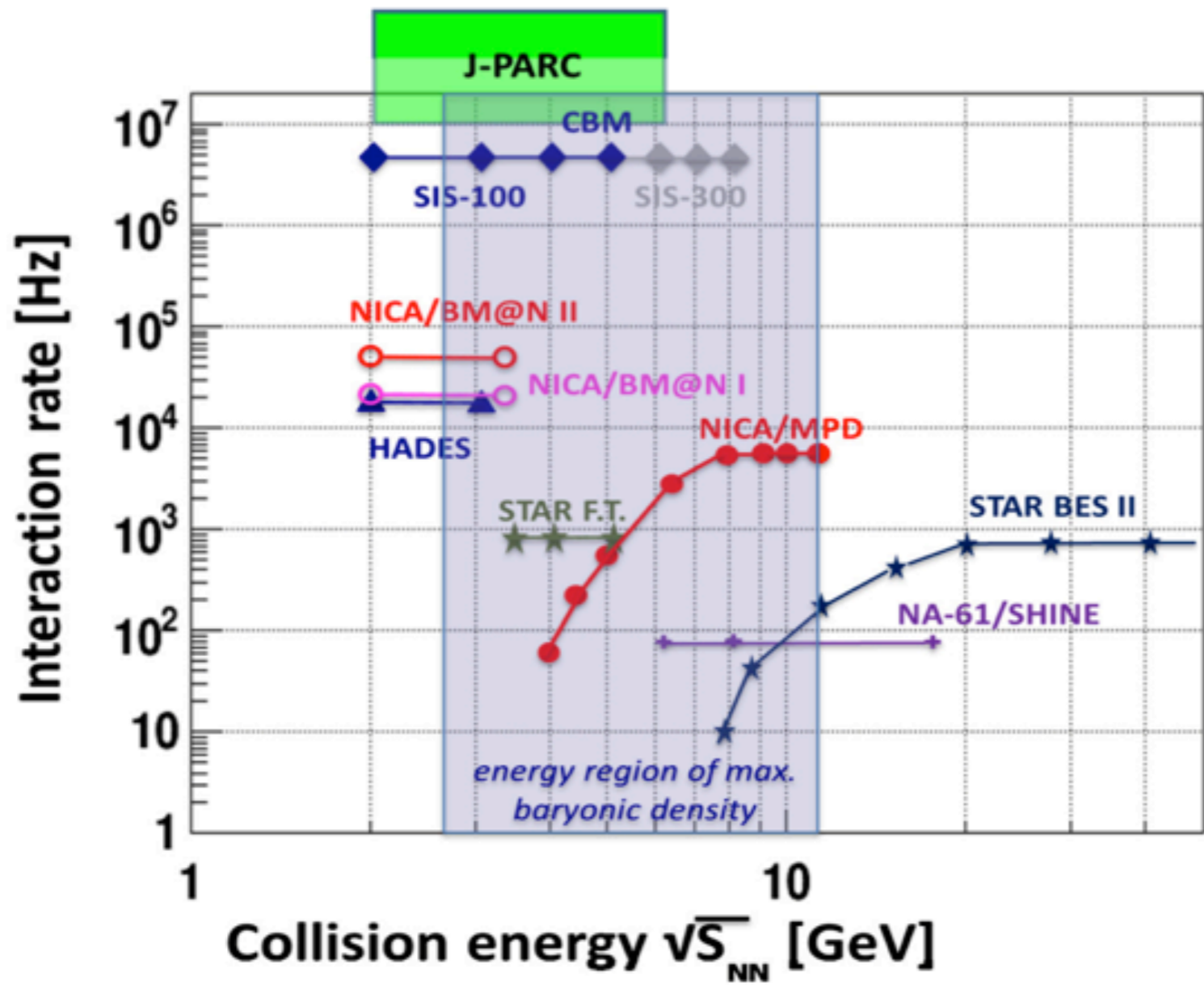
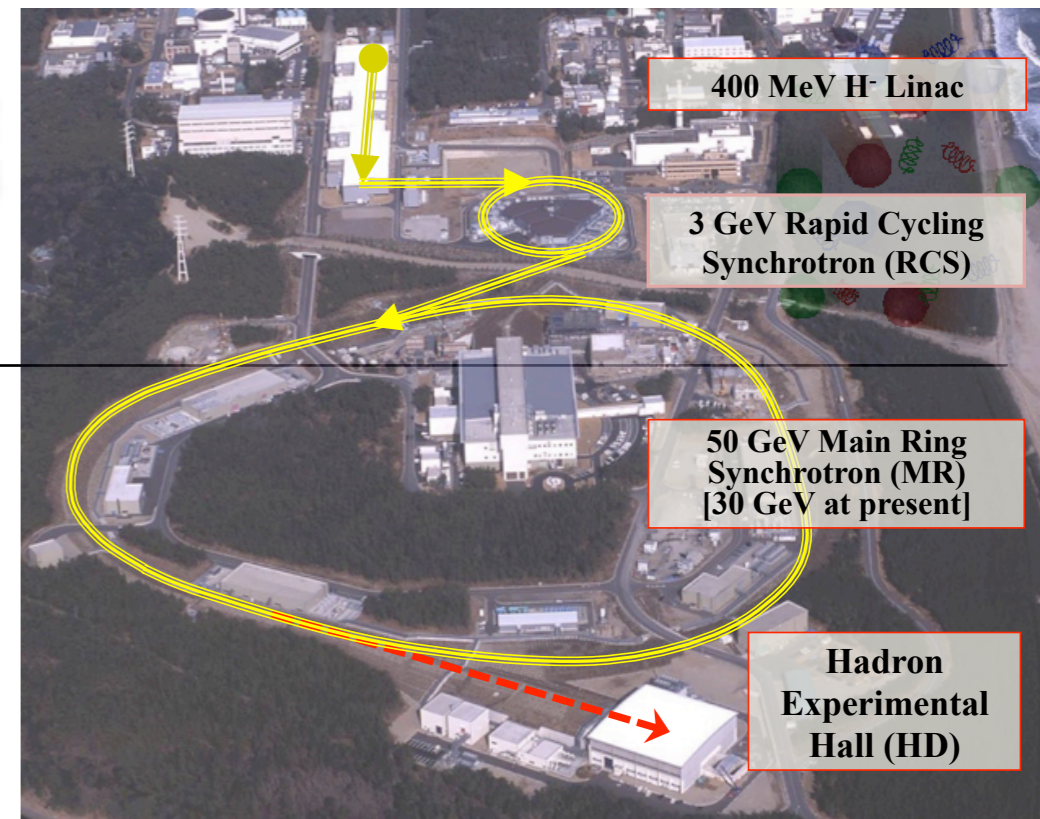
Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA)

[http://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2016/04/MPD_CDR_en.pdf]

High Intensity Accelerator Facility (2023)



J-PARCにおける重イオン加速 (計画中)

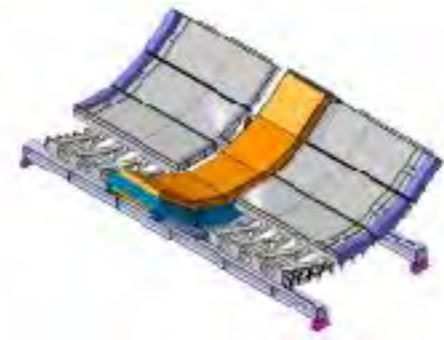


✓ $\sqrt{s_{NN}} = 2-6$ GeV

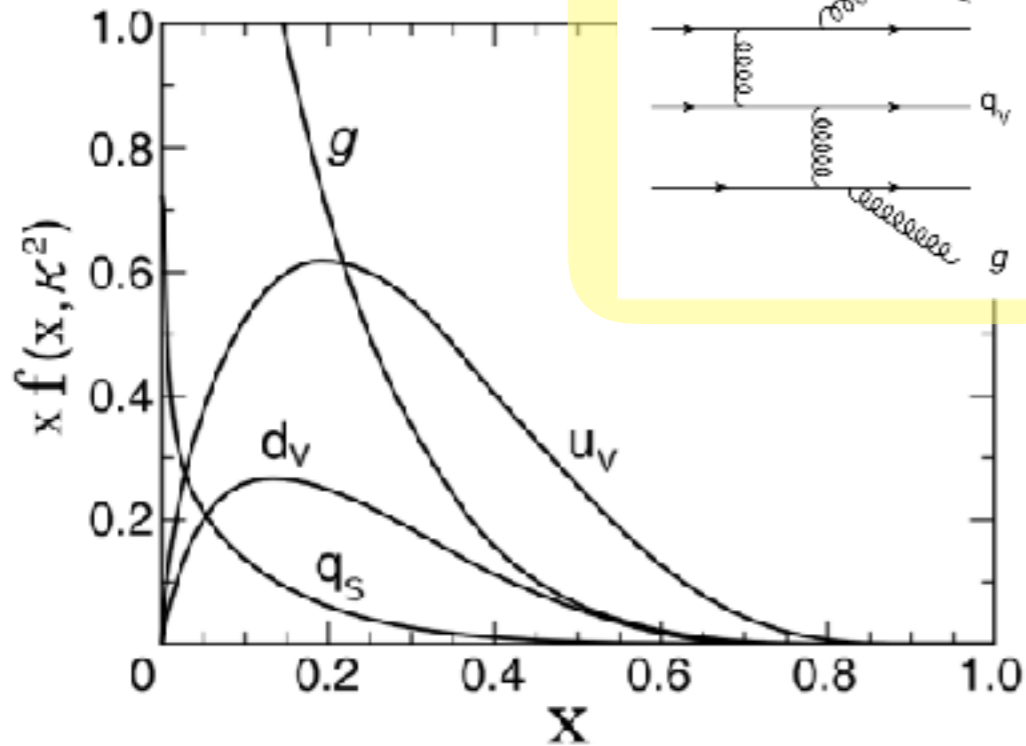
✓ 10^8 Hzの高衝突レート

✓ LHC, RHICで探索できない $\rho/\rho_0 \sim 5-10$ の高密度状態の研究

課題 1 ; 初期状態の解明



QGP, Yagi, Hatsuda, YM

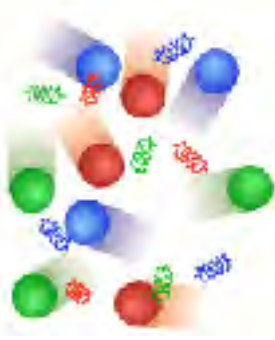


- ✓ なぜこんなに早く熱化した QGP状態ができるのか？
- ✓ そもそも初期状態は？
 - ➡ Gluon saturation?
 - ➡ Color Glass Condensate状態？
- ✓ 高エネルギーではグルオンが大量に生成→どこかで飽和するはず
 - Gluon saturationの明確な証拠？
 - 原子核の方が見つけやすい

$$Q_s^P \sim \alpha_s \frac{xg(x, Q_s^2)}{\pi R^2}$$

$$\rightarrow Q_s^A \sim \alpha_s \frac{Axg(x, Q_s^2)}{\pi(r_0 A^{1/3})^2} \propto A^{1/3}$$

初期状態解明に向けたR&D (中條)

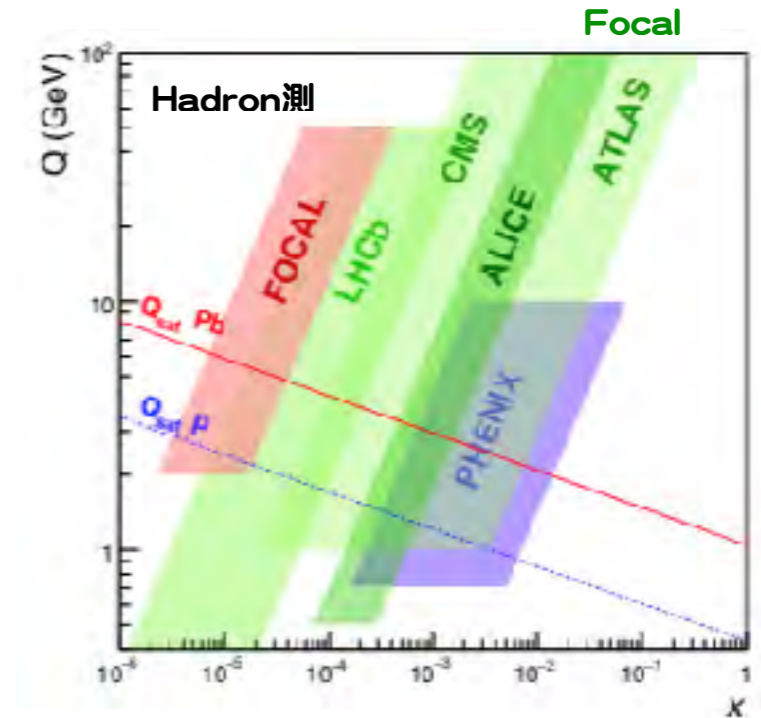


✓ Small xのフロンティア

- LHC; \sqrt{s} が最高
- yが大きく、 p_t が小さい

$$x \sim \frac{2p_t}{\sqrt{s}} \exp(-y)$$

➡超前方におけるフォトン測定



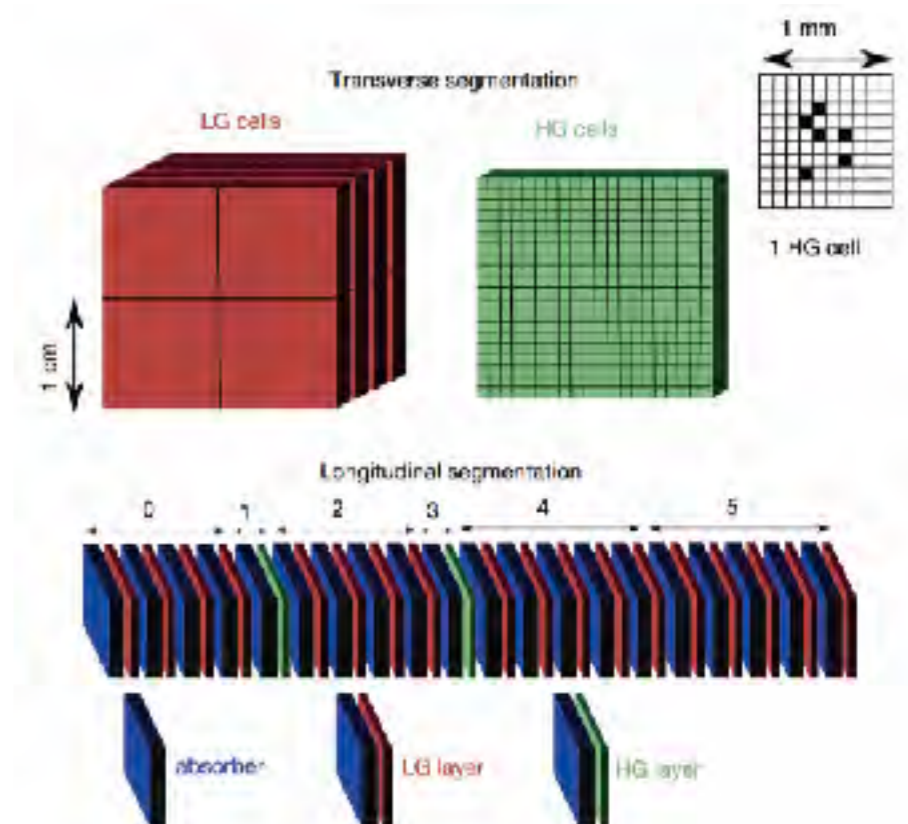
✓ 超高粒子密度環境下の測定

➡超高細電磁カロリメータ開発(Focal)

✓ Si - W sampling cal.

- LG ; 1x1cm pad (analog)
- HG ; 30x30 μ m (digital)

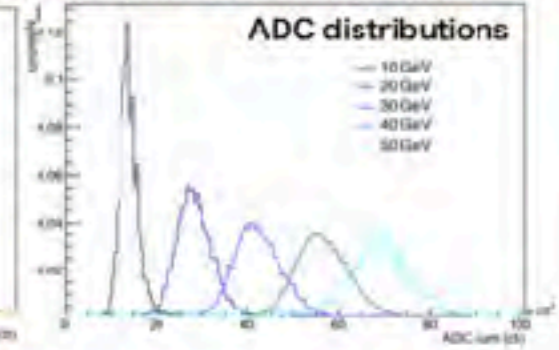
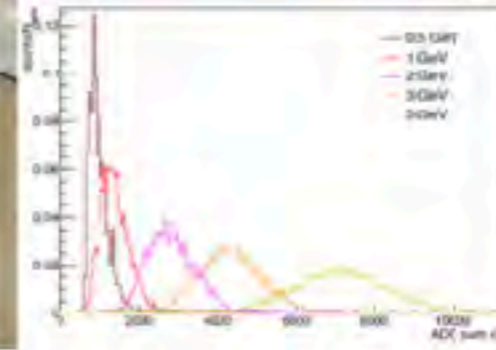
✓ Mini-Focal test 7月~9月



FoCal R&D

~2016 PS, SPS
4セグメント実験

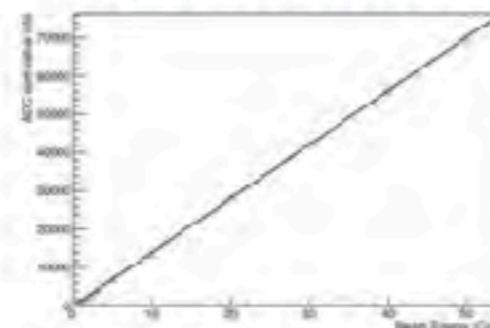
D. Kawana, Y. Kawamura, T. Suzuki



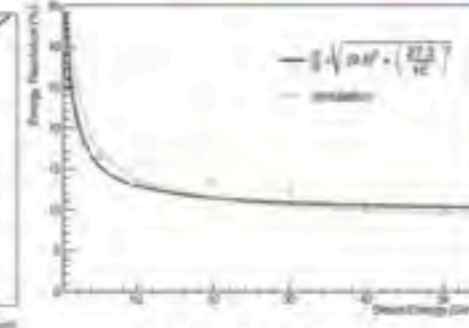
↑ ORNL PAD prototypes

Tested by Tsukuba, Nara W. team, Utrecht, Indian team (2014-2016)
PAD I/P: APV+SRS is used for readout

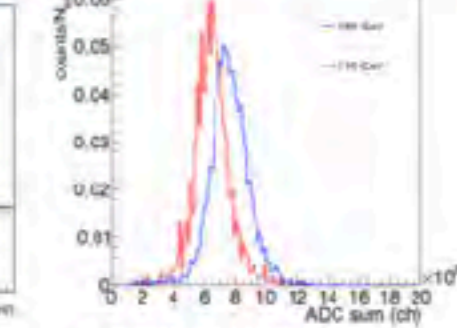
- Prototype working as expected.
- NIM paper under preparation.



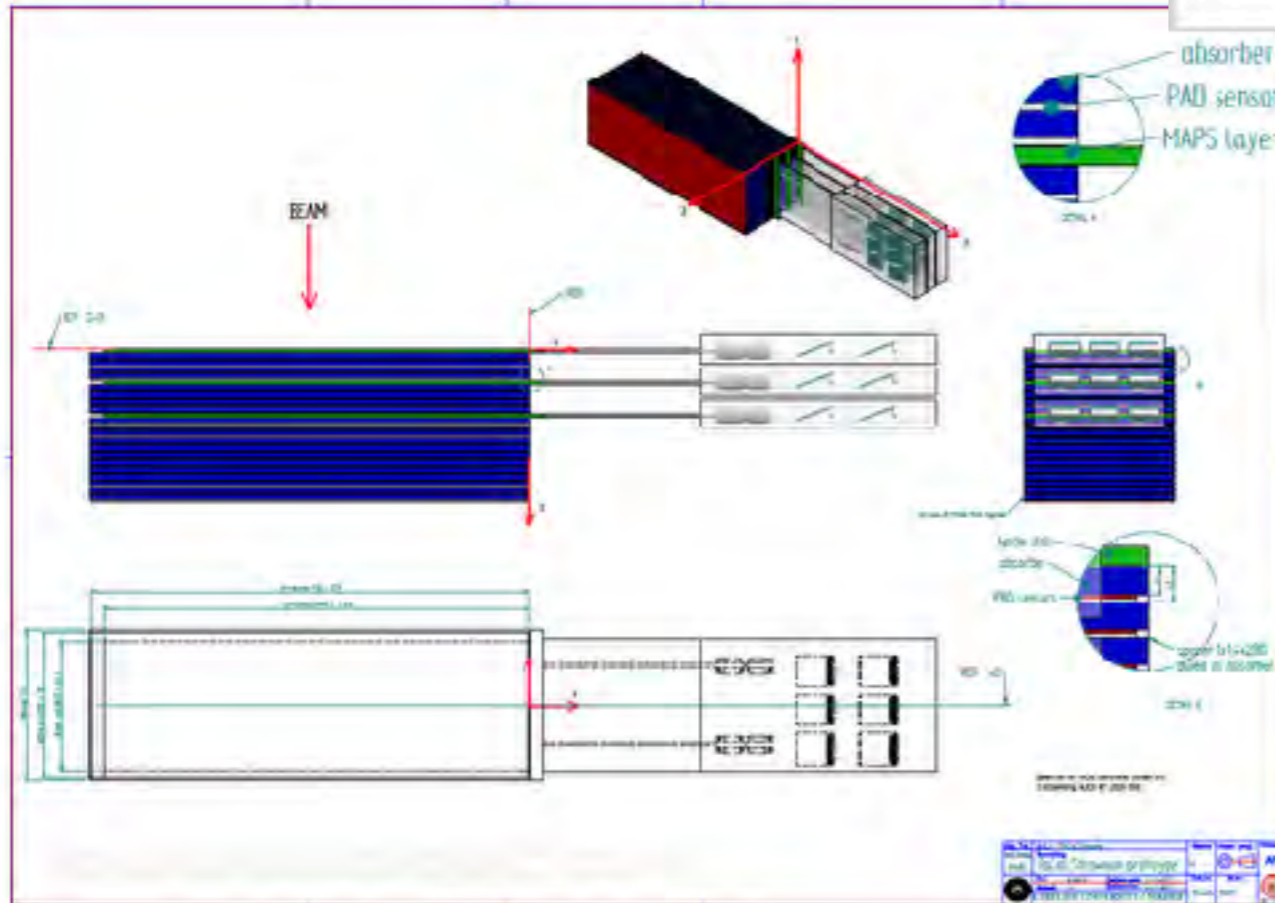
Linearity



Energy resolution



ADC distributions

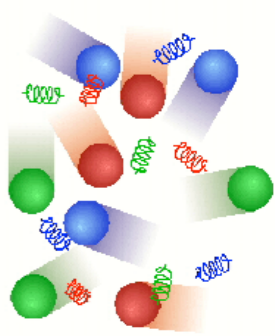


✓ 2018版 Mini-Focal

- APV読み出し回路系改善
- 20枚、3モジュール

➡出来ればALICE超前方環境下でも測定
(50-100GeVのパイゼロ検出)

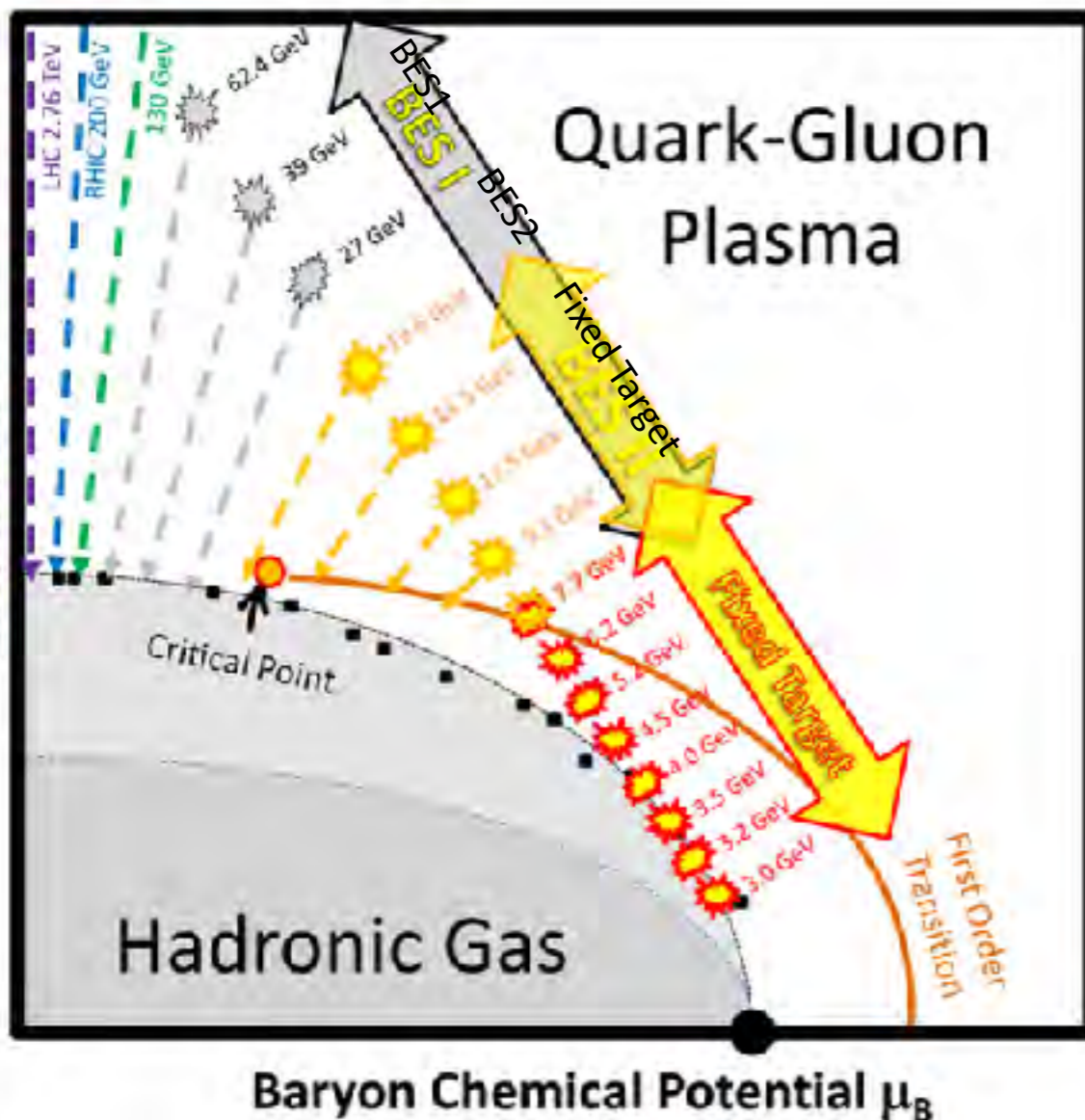
課題2：相構造の理解



✓ RHIC STAR実験における
ビームエネルギースキャン

- 臨界点探索
- 高次の揺らぎ、 $v_1, v_2, K/\pi$

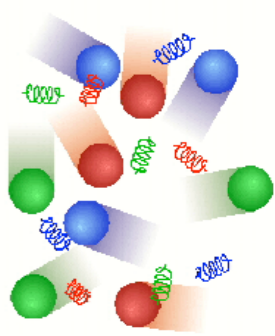
✓ 次期加速器・実験計画を左右
する重要な探査実験



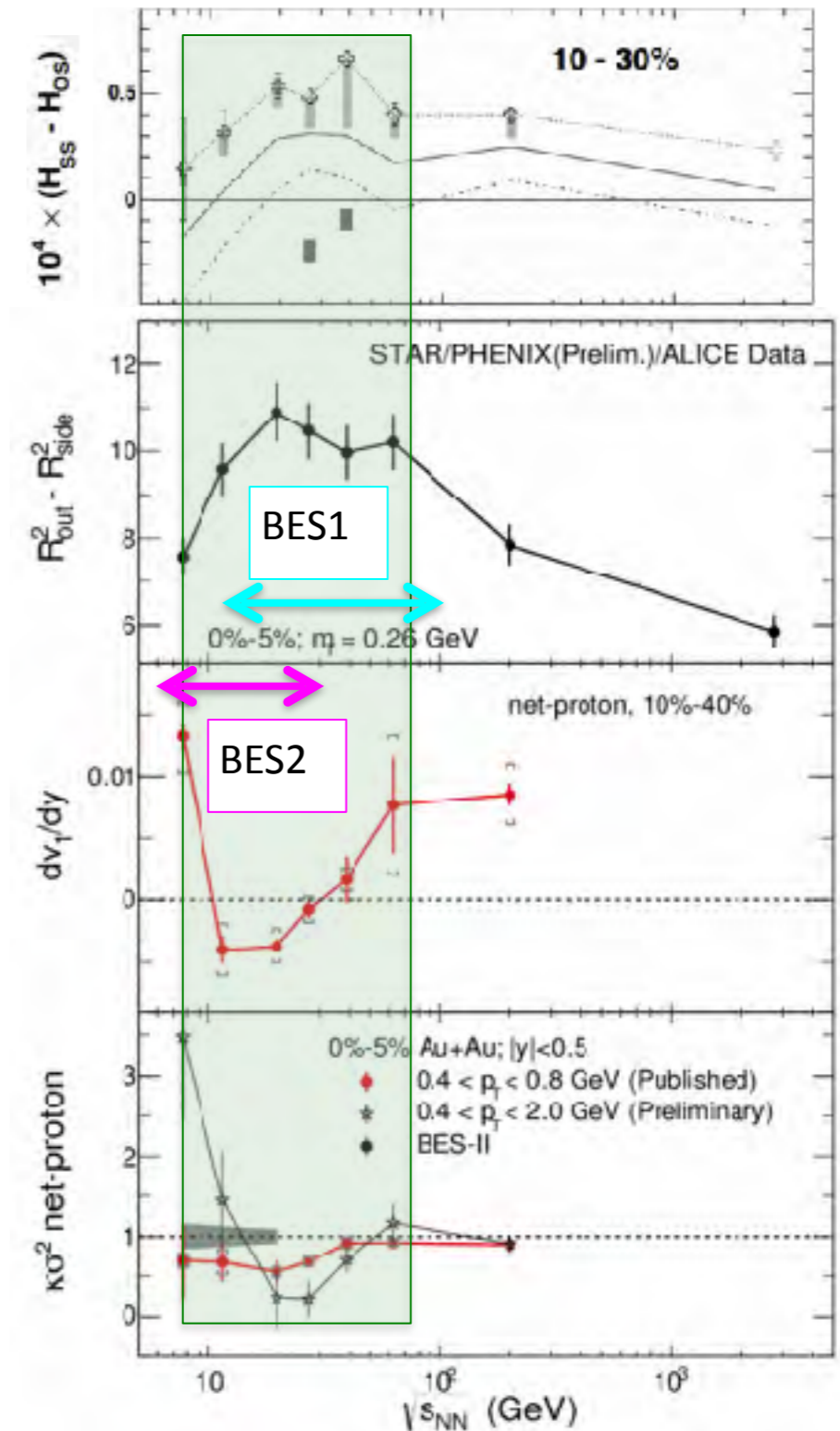
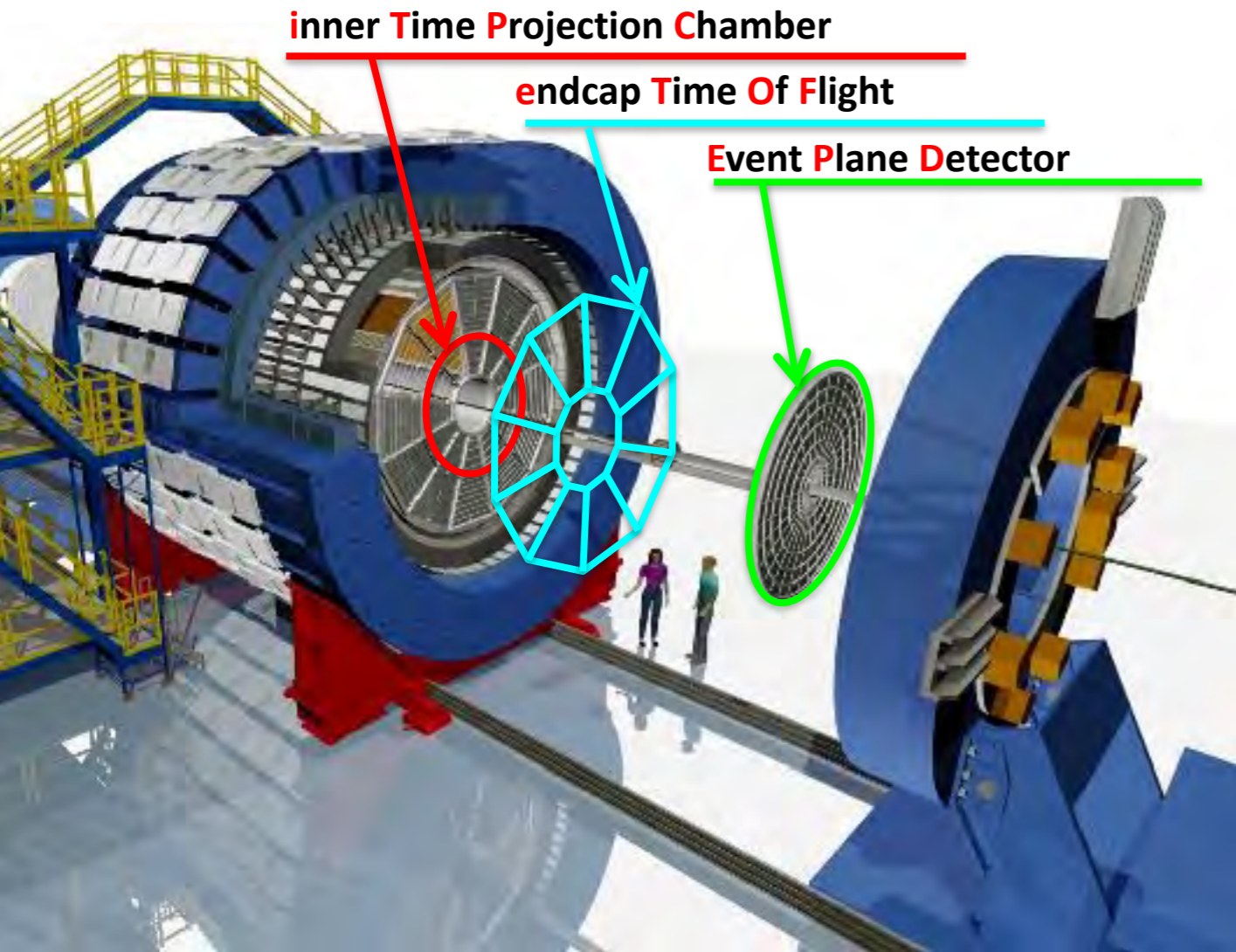
Colliderで強度不足でもFixed target実験も！

$\sqrt{s_{NN}}$ [GeV]	Events (10^6)	BES II / BES I
200	350	2010
62.4	67	2010
54.4	1200	2017
39	39	2010
27	70	2011
19.6	400 / 36	2019-20 / 2011
14.5	300 / 20	2019-20 / 2014
11.5	230 / 12	2019-20 / 2010
9.2	160 / 0.3	2019-20 / 2008
7.7	100 / 4	2019-20 / 2010

臨界点探索



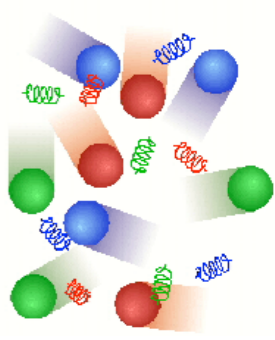
Z. Xu, ICPAQGP2015



✓ $\sqrt{s} \sim 10 - 20$ GeV前後に種々の信号において特徴的变化! ?

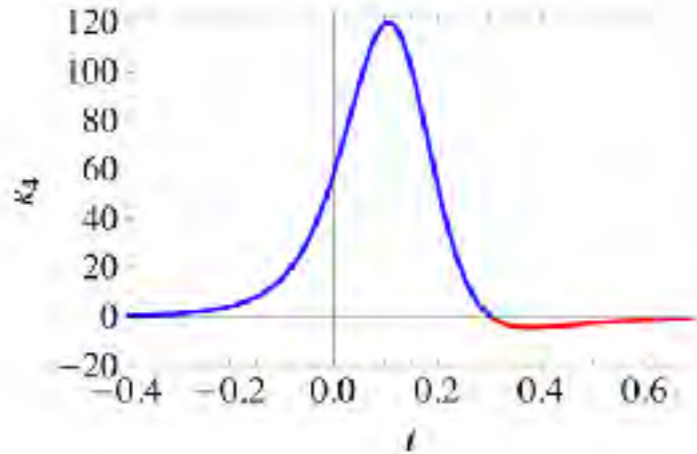
➡そこに何かありそう!

揺らぎによる臨界点探索 (江角)

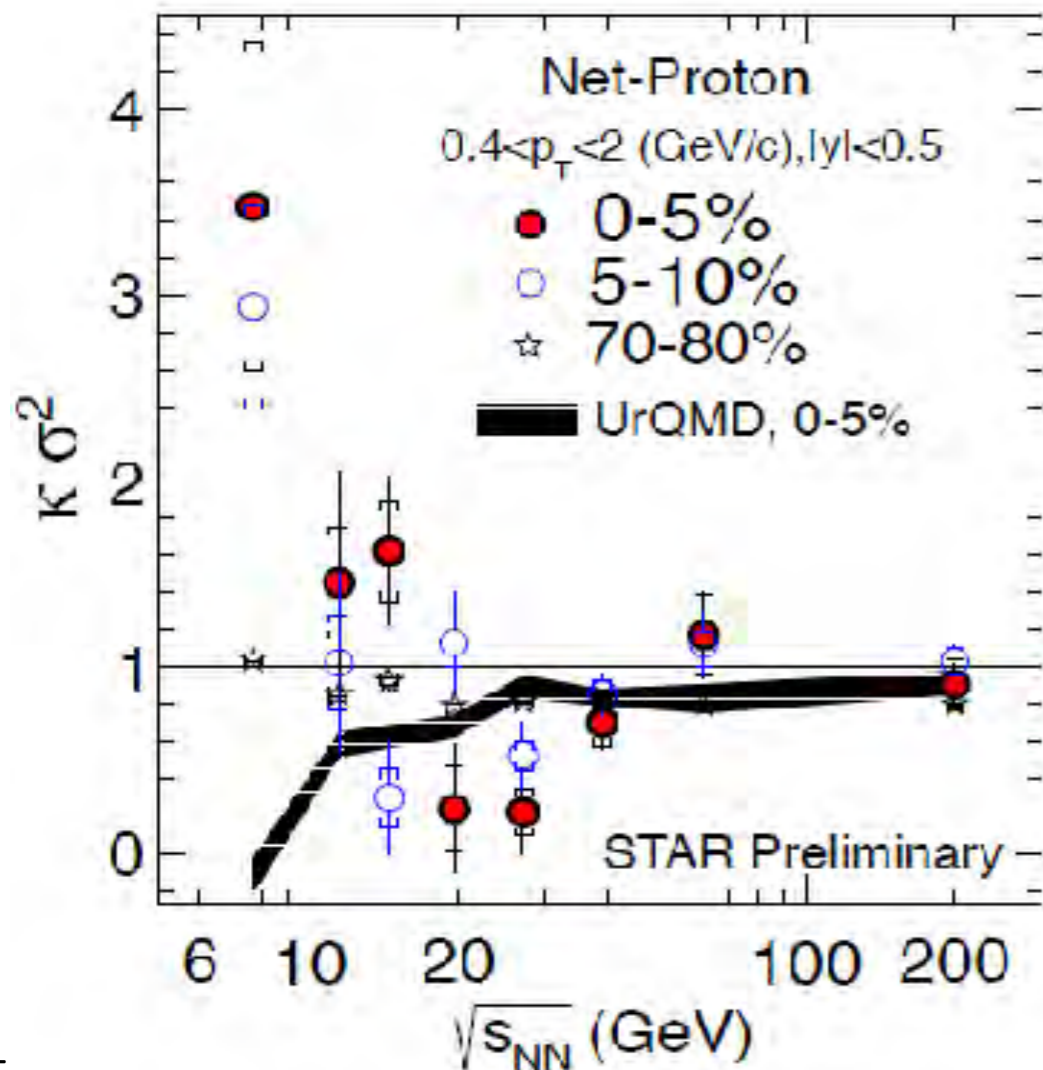


M.A.Stephanov, PRL 107,052301(2011)

臨界点
を示唆？



Net proton数の
4次の揺らぎ



✓ 相転移によると、臨界点付近では
相関長が伸びる

● 揺らぎが変化する！

➡ Cumulant 1-4 ; mean, sigma,
skewness, kurtosis

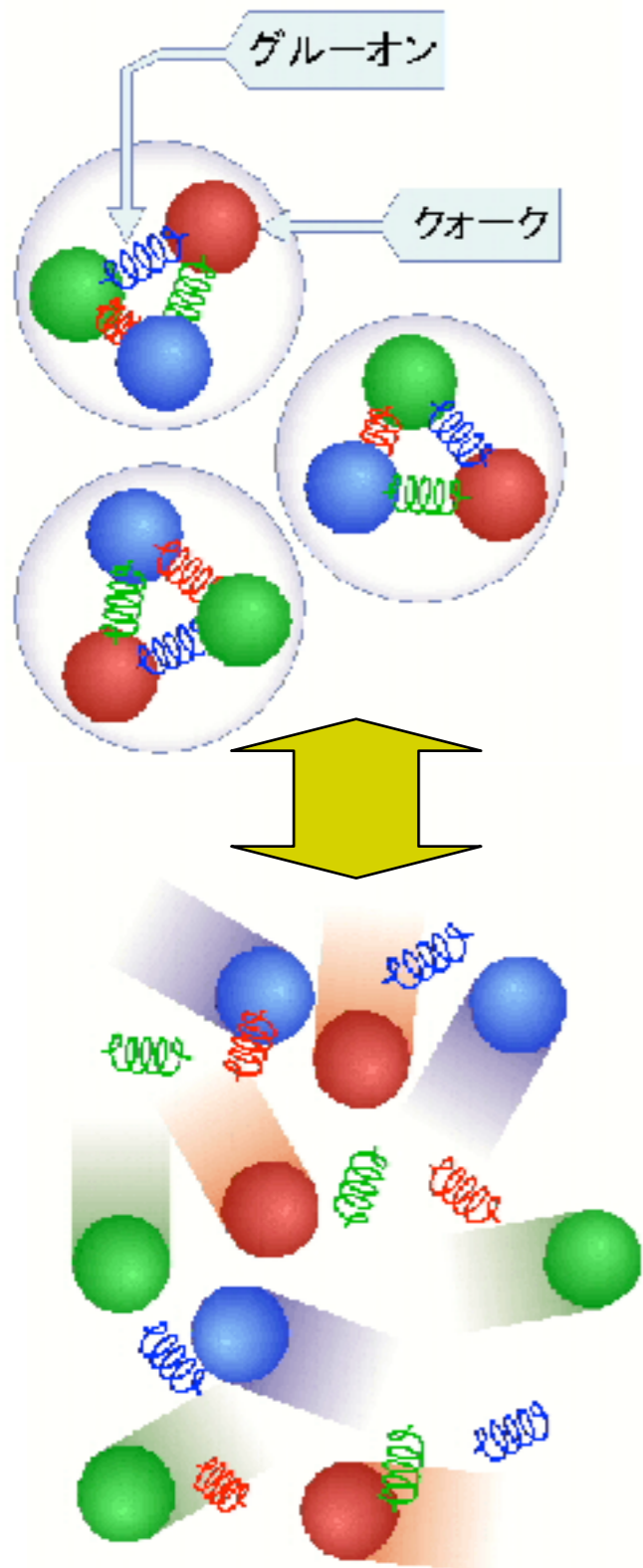
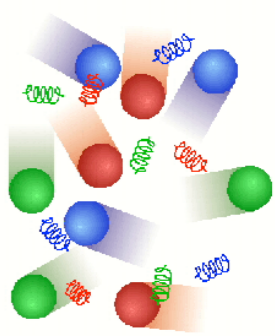
✓ より高感度の揺らぎ観測のために、
高次のモーメントを求める計算方
法を新提案

➡ T.Nonaka, S.Esumi et.al.,
PRC95,064912(2017)

● 200GeVにおいて6次のモーメント
を初めて測定

➡ 野中俊宏氏博士論文

QGP物理でわかったこと、わかってないこと



✓ わかったこと；

- QGP生成とQGP物性の手がかり
 - ⇒ 流体力学的理解
 - ⇒ 特徴的エネルギー損失の様子

✓ わかってないこと；

- なぜこんなに早く熱化できるのか？（初期状態は？）
 - ⇒ LHC実験FoCalプロジェクト
- QCD相転移の構造（臨界点、次数）
 - ⇒ RHIC STAR実験Beam Energy Scan

✓ 将来； J-Parc, Fair, HIAF, NICA

RHIC-STAR実験(2019-2020)と J-PARC重イオン実験(2023-)

- 物理目標

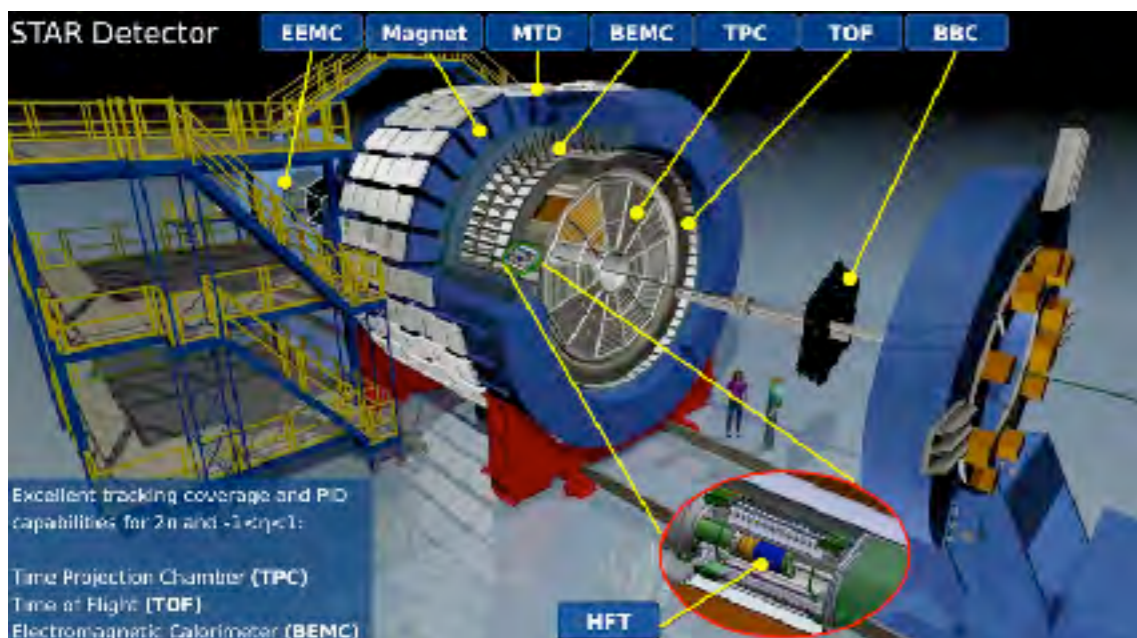
- 衝突エネルギー走査実験(@RHIC-STAR実験)や高ビーム輝度を用いた重イオン実験(@J-PARC)による臨界点の探索、相構造の研究

RHIC-STAR実験 (2019-2020)

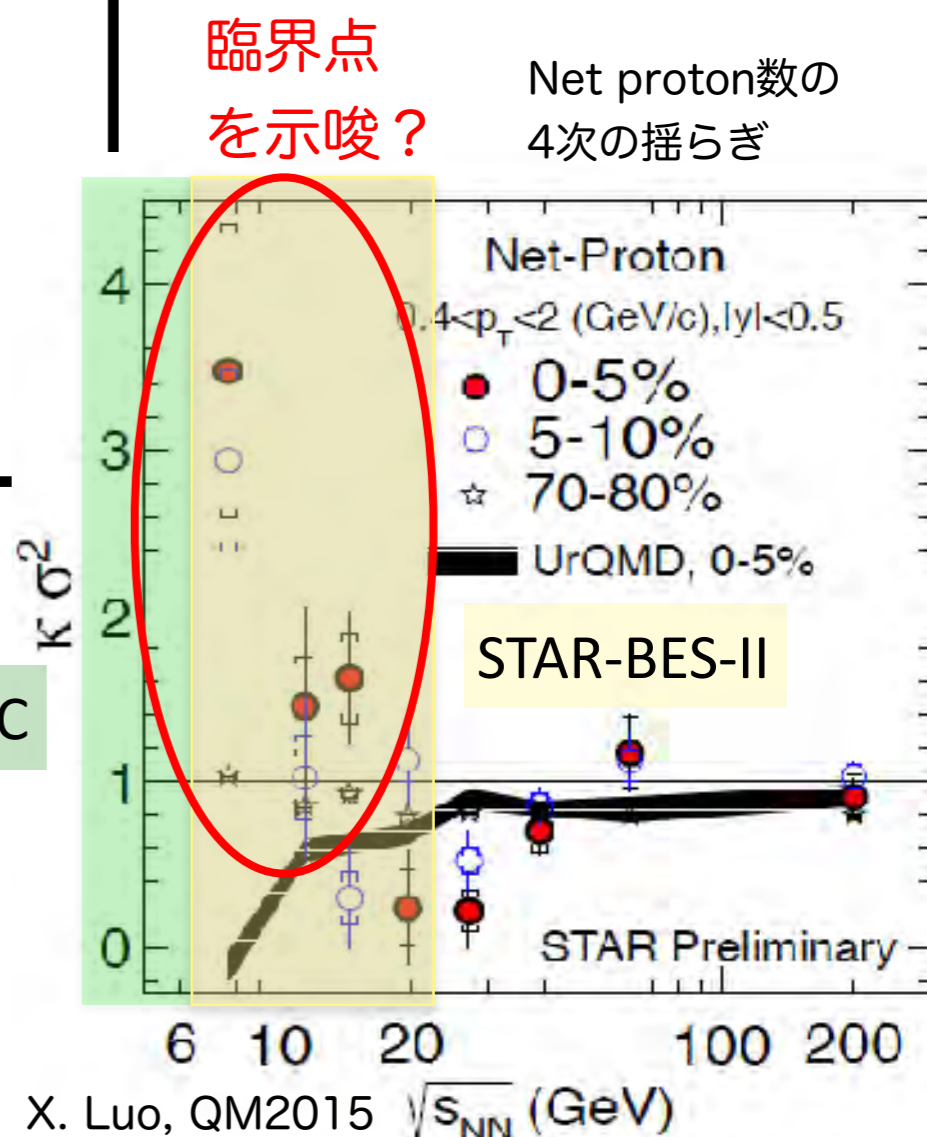
- 日本グループの新規参加. 衝突反応面検出器の建設
- 揺らぎ、集団運動の測定. これまでの10倍の統計

J-PARCでの重イオン実験

- 2023年の開始を目指す.
- $\rho/\rho_0 \sim 5-10$ の高密度物質の研究.



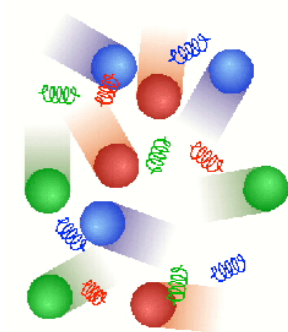
RHIC-STAR実験
12カ国、56機関、
590人からなる
国際共同実験



J-PARC

CM)

大学院生向けのQGPの教科書！



CAMBRIDGE

Catalogue

[Home](#) > [Catalogue](#) > [Quark-Gluon Plasma](#)



Quark-Gluon Plasma

Series: [Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology](#)

Kohsuke Yagi

Urawa University, Japan

Tetsuo Hatsuda

University of Tokyo

Yasuo Miake

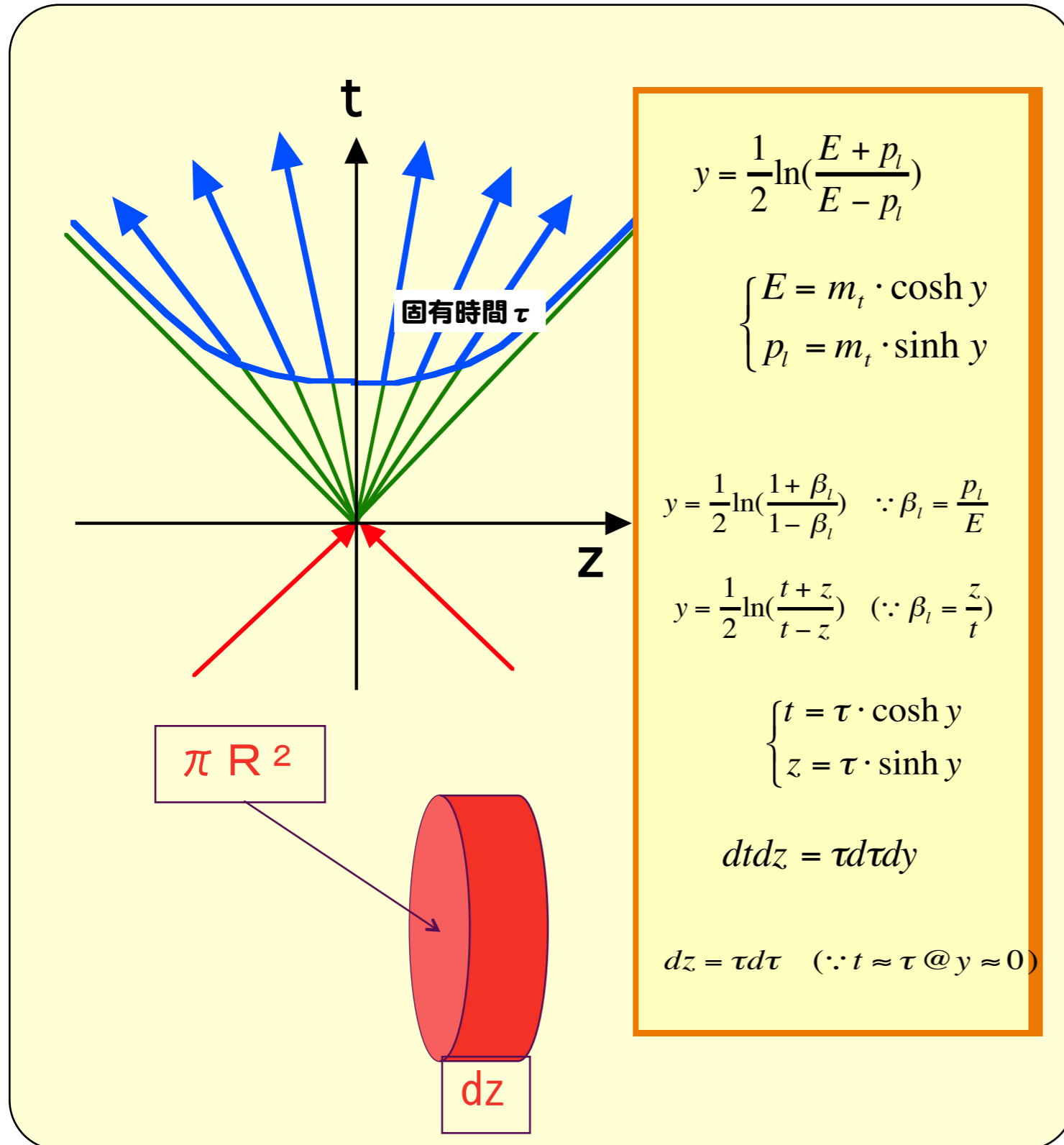
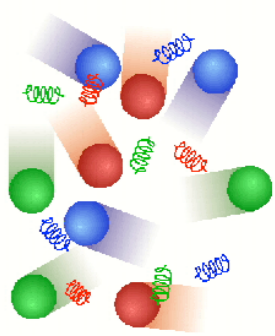
University of Tsukuba, Japan

Amazonでも買えます。
中国語版も出ています。

Hardback (ISBN-10: 0521561086 | ISBN-13: 9780521561086)

For price and ordering options, inspection copy requests, and regional distribution, please contact your nearest Cambridge University Press office:
[UK, Europe, Middle East and Africa](#) | [Americas](#) | [Australia and New Zealand](#)

QGP生成の傍証 1 ; エネルギー密度



✓ Bjorkenの描像

- ローレンツ収縮のために原子核衝突は短時間の間に起こり、その短時間にハドロンの多重発生が起こるが、固有時間 τ 以後、それらは自由粒子として飛び出す。

- 到達エネルギー密度の推定

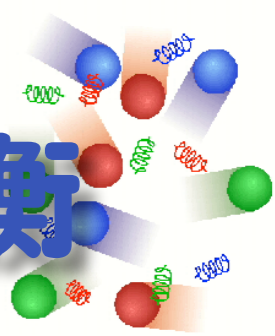
✓ 到達エネルギー密度

- QGP生成に十分な値

$$\varepsilon_{Bj} = \frac{1}{\pi R^2} \frac{1}{c \tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

$$\approx 4.6 \text{ GeV/fm}^3$$

$$> \varepsilon_c \approx 0.6 - 1.2 \text{ GeV/fm}^3$$



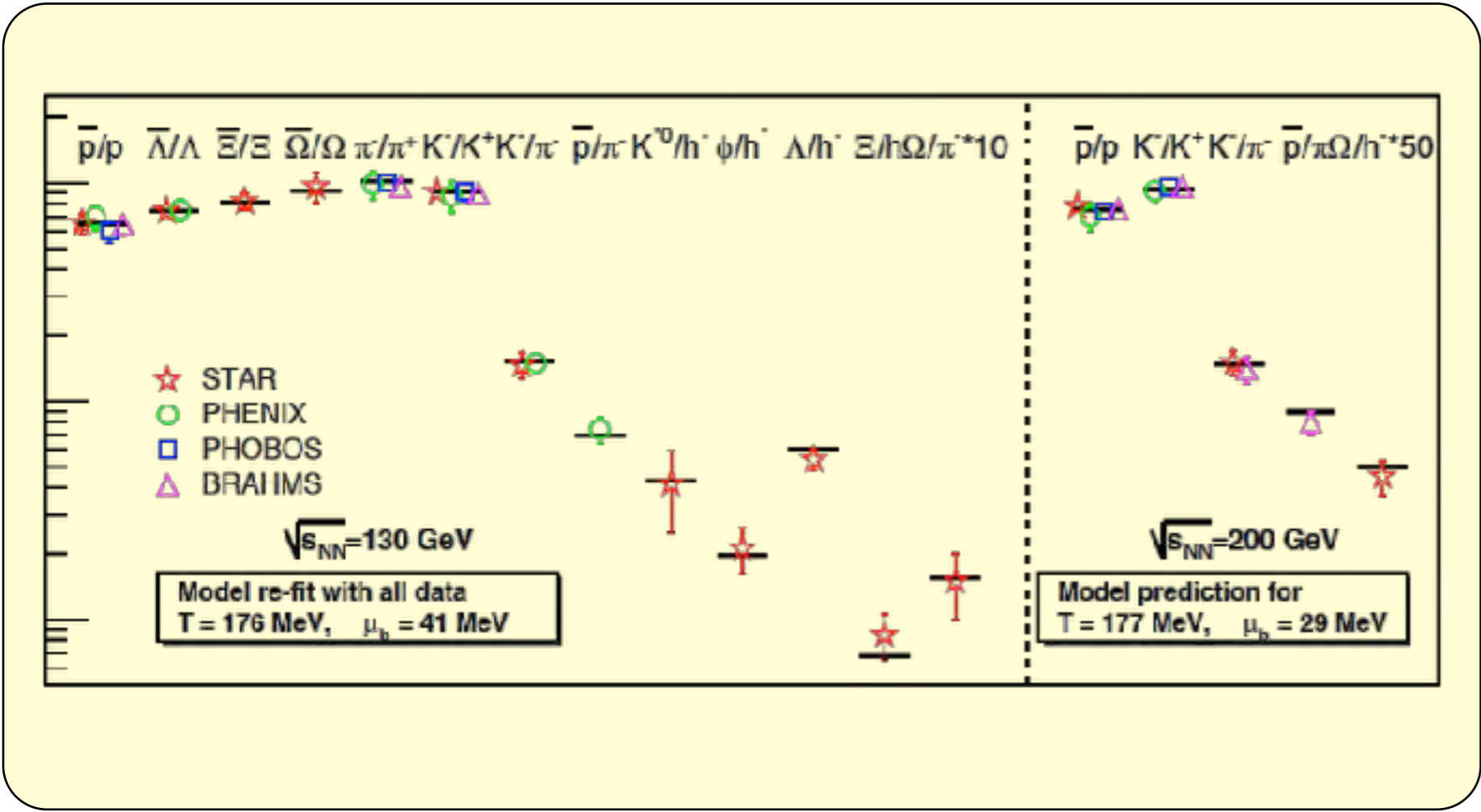
QGP生成の傍証2：クォークの化学平衡

$$n_i = \frac{g_i}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{p^2 dp}{e^{(E_i - \mu_i)/T} \pm 1}$$

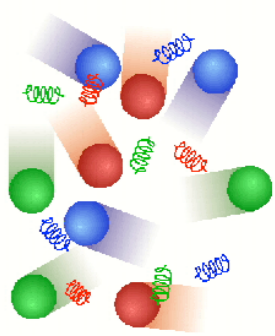
✓ 様々な種類のハドロン
の生成量比が「温度」と「化学ポテンシャル」というたった2つのパラメーターで説明できた！

✓ クォークの化学平衡を仮定した統計モデルと測定データが良い一致

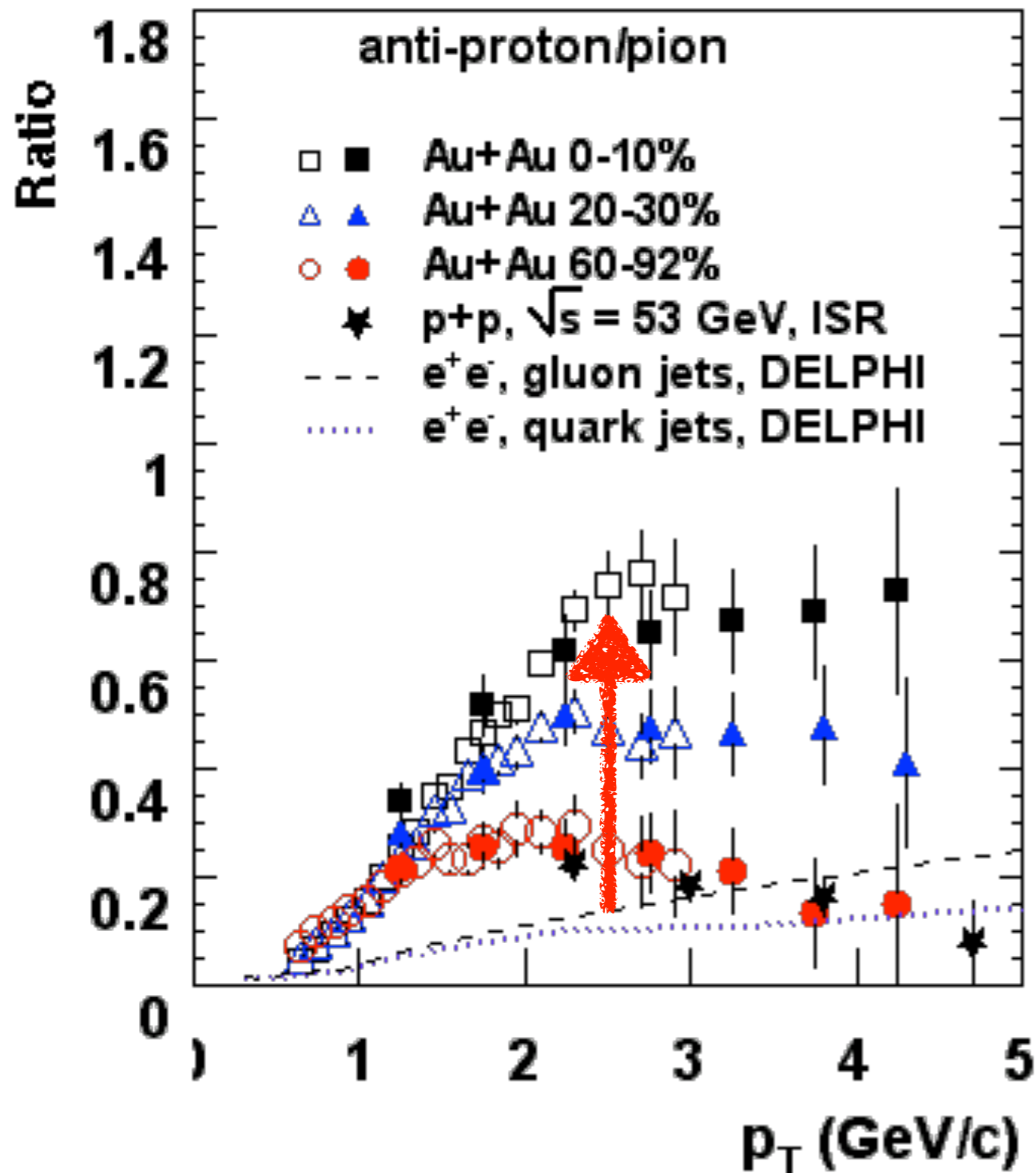
- 化学平衡時の温度 (~180MeV) は予想される相転移点付近



バリオン異常生成



Phenix; P.R.L. 91(2003)172301

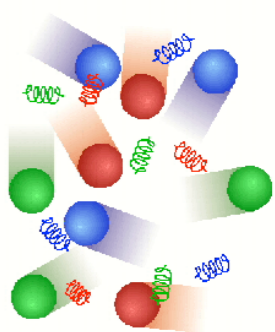


- ✓ 高横運動量領域での p/π 比に異常を発見
- ✓ Au+Au周辺衝突では p/π 比は、eeやpp衝突と同等であるが、
- ✓ Au+Au中心衝突では p/π 比は非常に大きい
 - Fragmentation process では ee/ppに見られるように $n_p < n_\pi$
- ✓ Au+Au衝突では別の生成機構が! ?

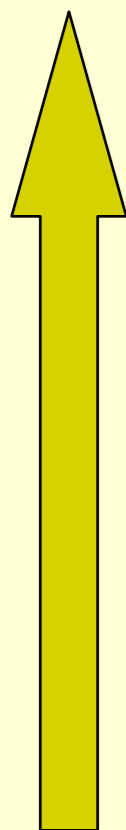
↓

**Quark Recombination Model
(Quark Coalescence Model)**

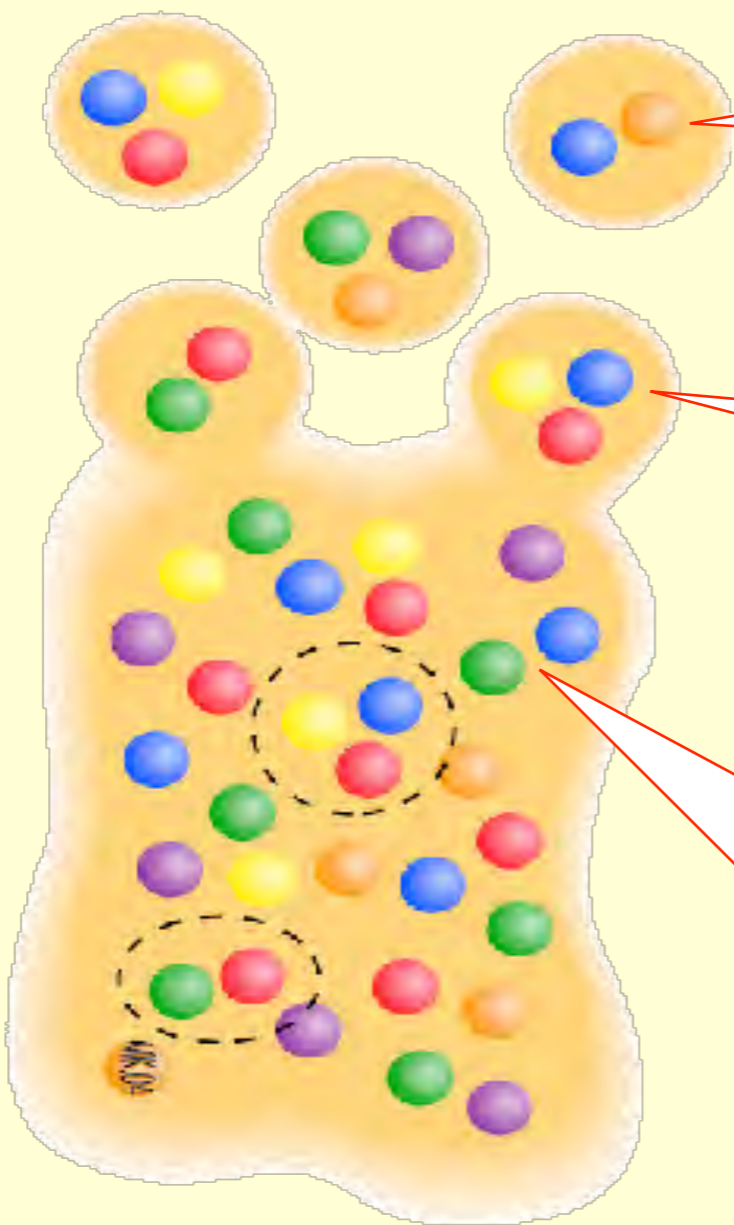
クォーク融合反応 (Quark Coalescence)



ハドロン



QGP



✓ QGP特有のハドロン生成
メカニズム?

中間子の運動量分布(2q);

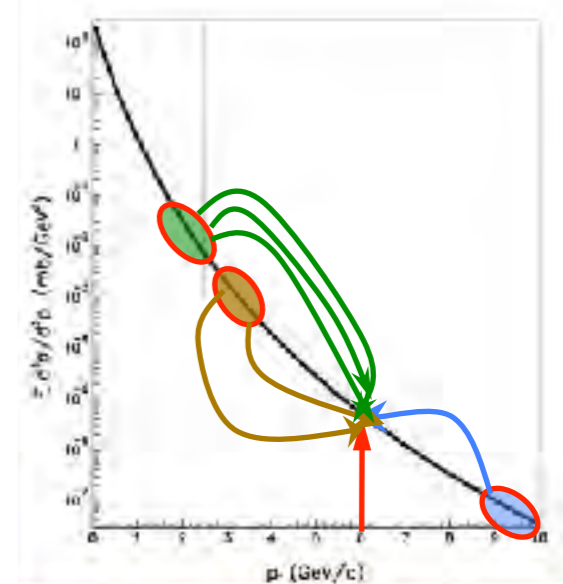
$$W_M(p_t) \approx C_M \cdot w^2(p_t/2)$$

陽子の運動量分布(3q);

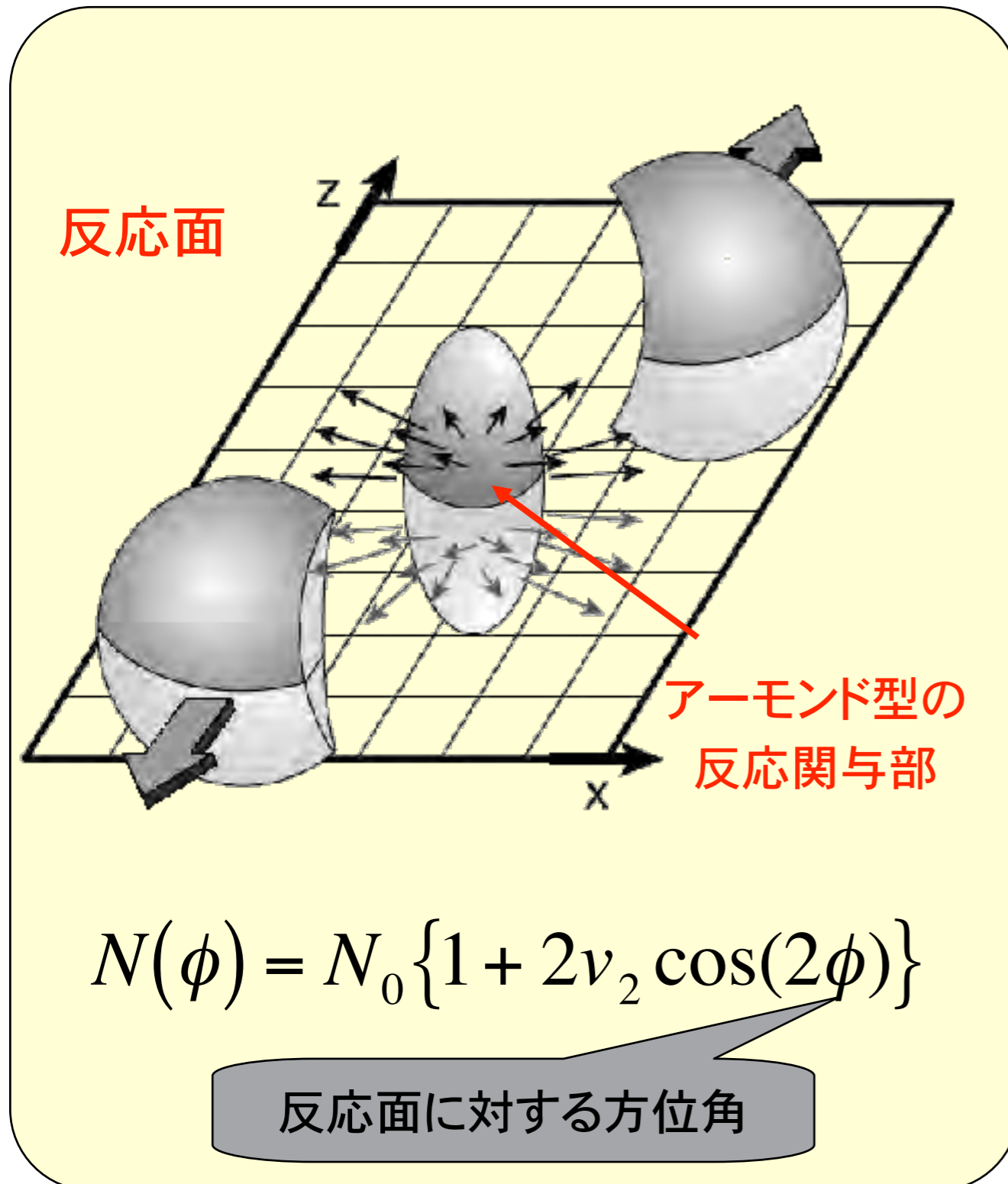
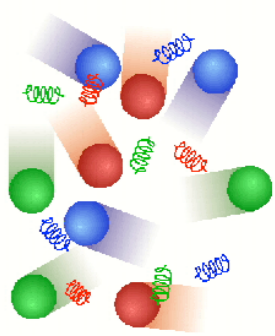
$$W_B(p_t) \approx C_B \cdot w^3(p_t/3)$$

$w(p_t)$;
ユニバーサルな
クォークの
運動量分布

ptと共に急速に減少する分布の場合、陽子のpt/3の方が有利になる場合がある



注目される方位角異方性測定



✓ 反応関与部と非関与部

- 核子の運動量に比べビーム運動量が圧倒的に大きい
- 相対論的効果により極めて短い衝突時間

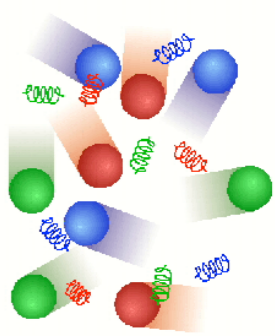
✓ 方位角異方性とは

- 非中心衝突における反応関与部は衝突軸に対し異方性
- アーモンド型!

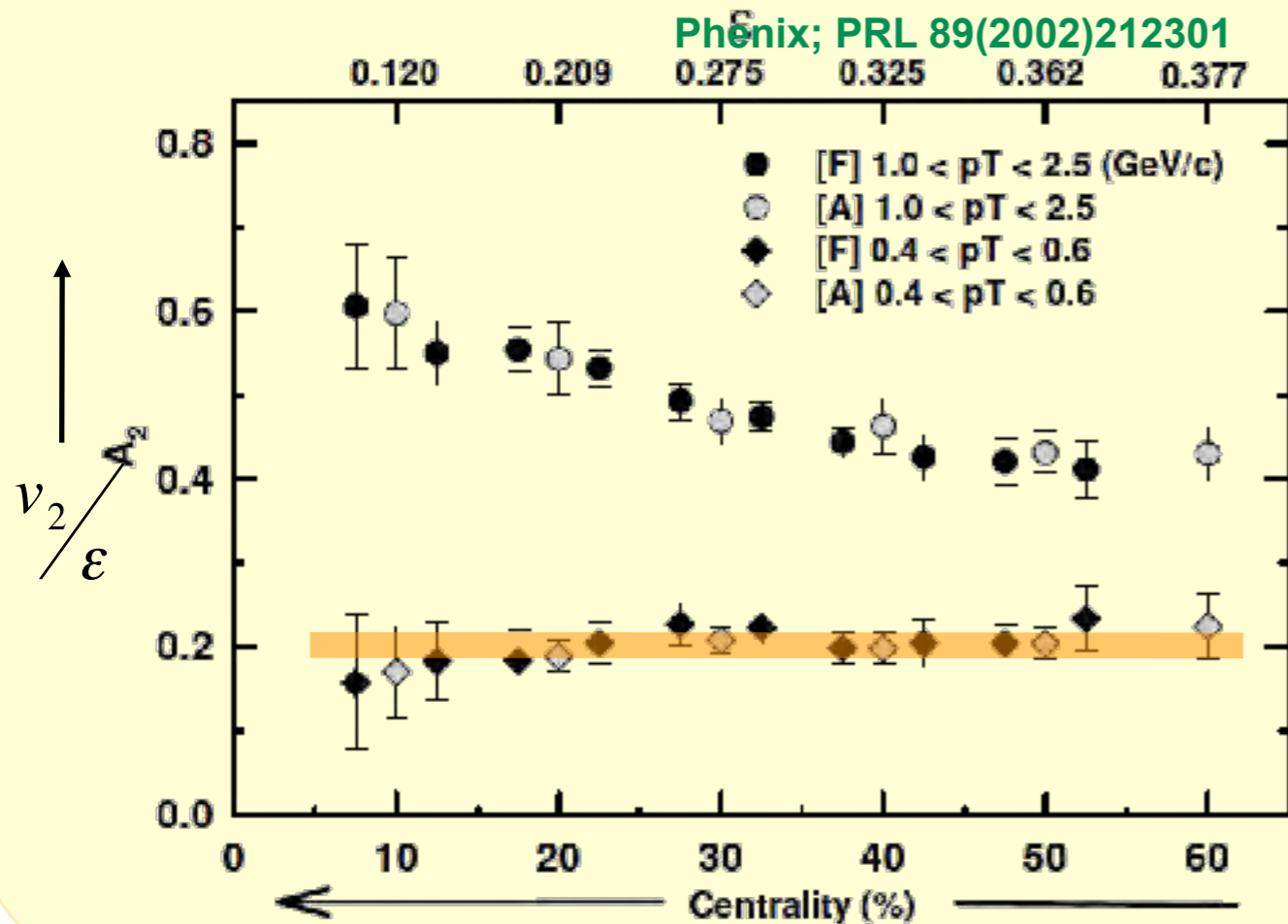
✓ 放出粒子の運動量の方位角異方性を測定

- 座標空間の方位角異方性が生成粒子の運動量空間異方性に転換

楕円率に比例した方位角異方性

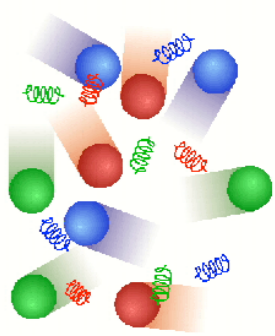


$$\epsilon_{ecc} = \left\langle \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right\rangle \quad v_2 = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right\rangle$$

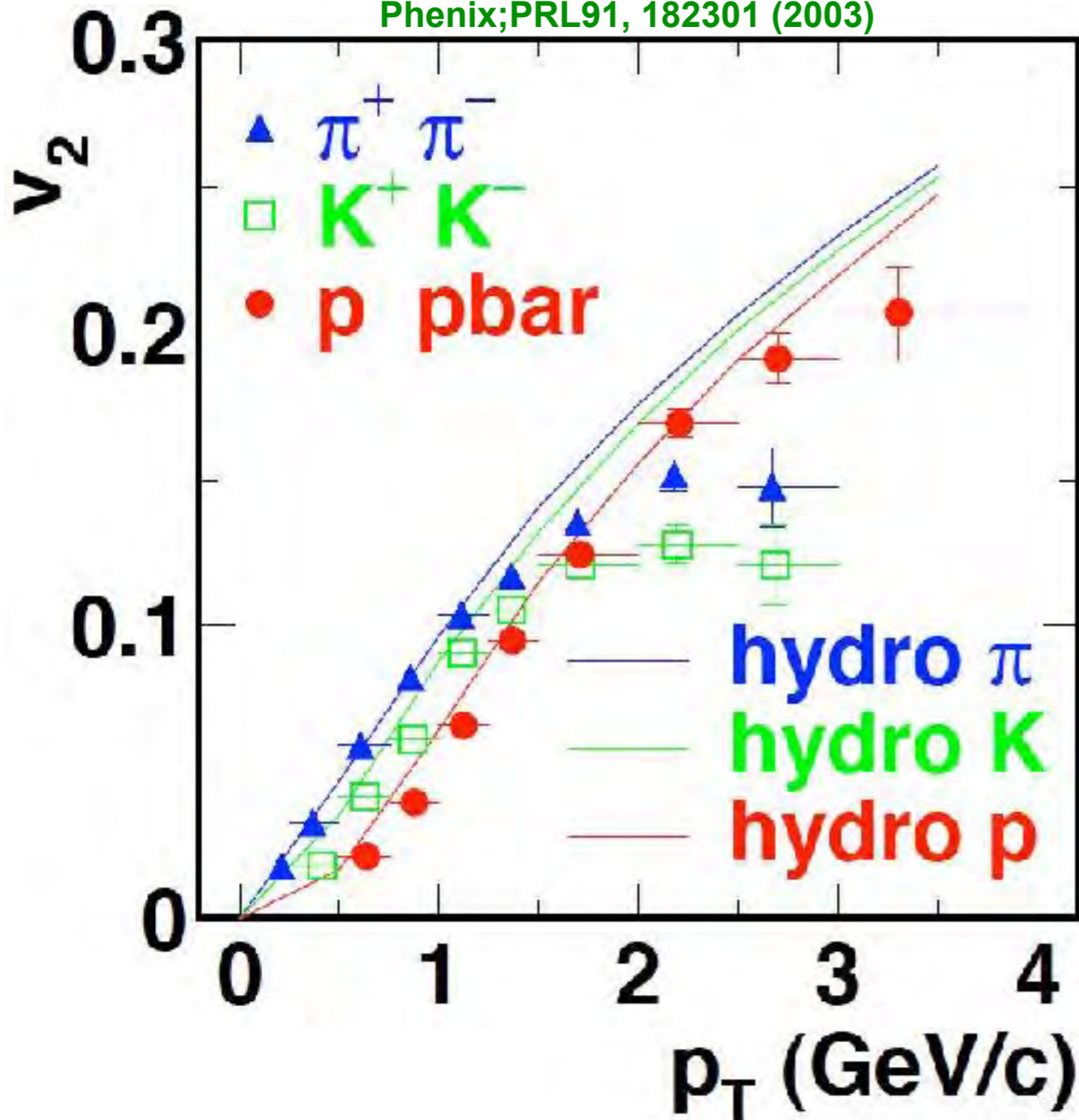


- ✓ 中心衝突から周辺衝突まで様々な楕円率に対して方位角異方性を測定
- ✓ 楕円率に比例した方位角異方性
 - 確かに座標空間から運動量空間の異方性に転換された

QGP生成の証拠3：方位角異方性



Phenix;PRL91, 182301 (2003)



✓ 粘性がない完全流体理論

論模型と良い一致

● 衝突後0.6fm/cで熱化

● 20 GeV/fm³

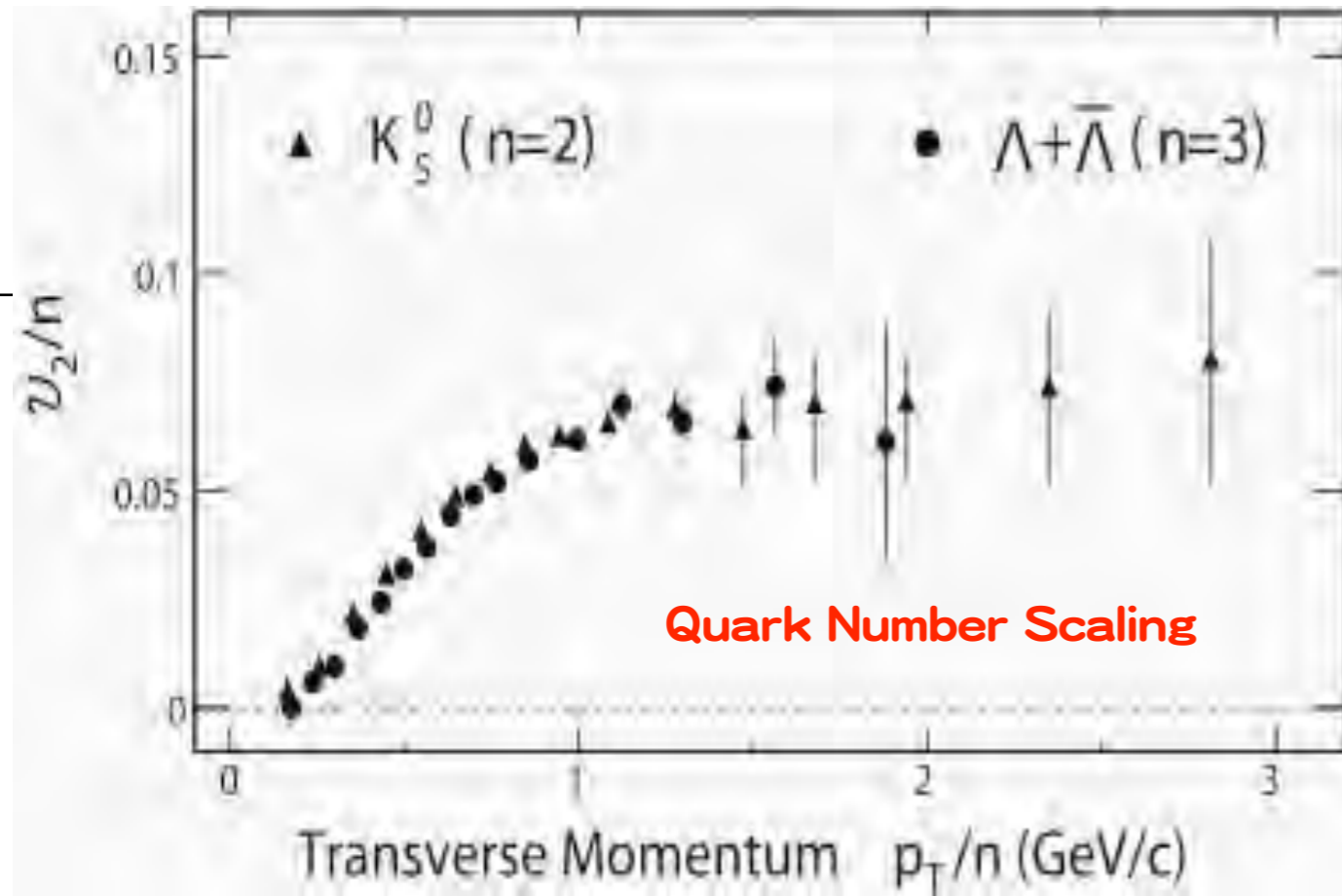
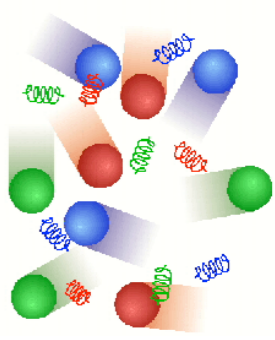
✓ 衝突後0.6 fm/cで熱

化出来るメカニズムは？

— QGP!

— 粘性がない!?

QGP生成の証拠4 ; クォークの統計力学的分布



✓ クォーク融合反応の証拠

→ Quark Number Scaling

中間子の運動量分布(2q);

$$\frac{dN_M}{d\phi} \propto w^2 = (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)^2$$

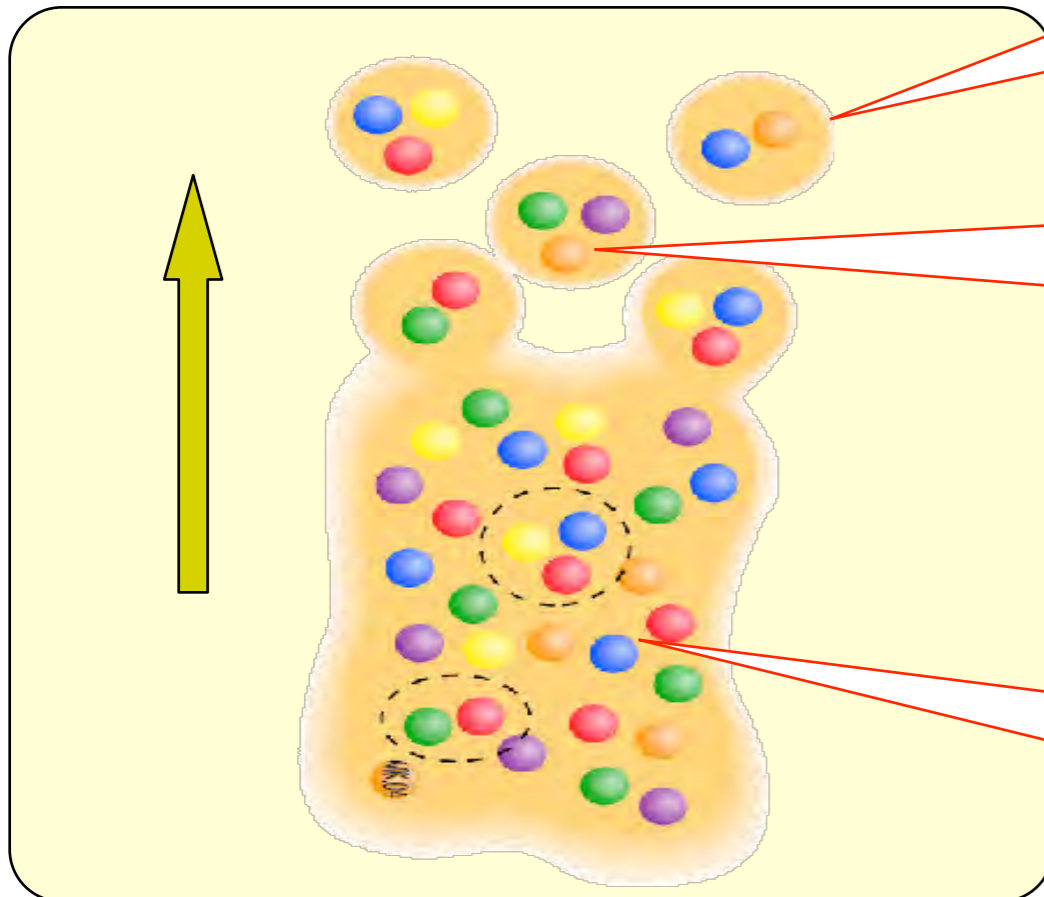
$$\approx (1 + 4v_{2,q} \cos 2\phi)$$

クォーク数比 ; 2:3

陽子の運動量分布(3q);

$$\frac{dN_B}{d\phi} \propto w^3 = (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)^3$$

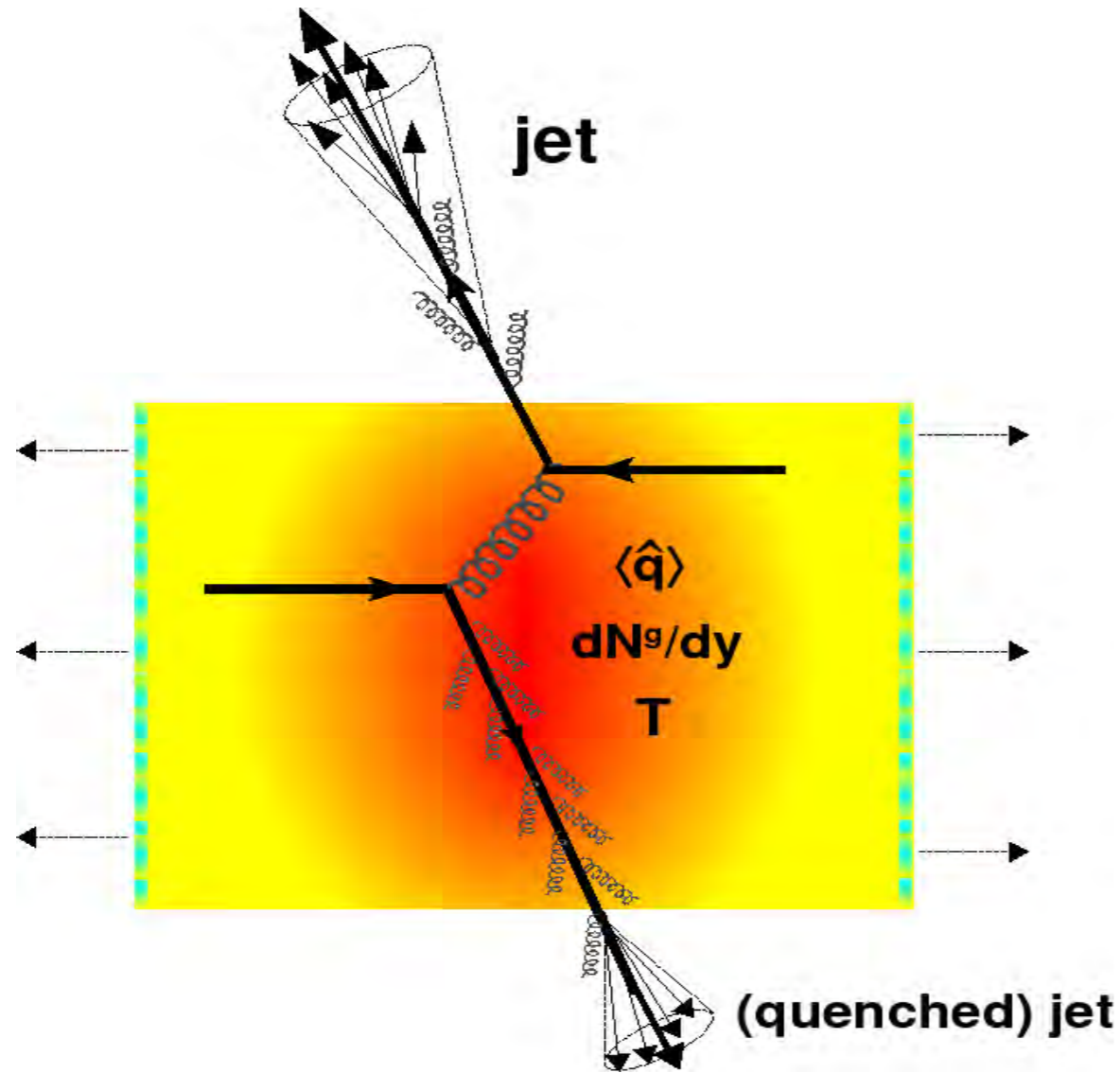
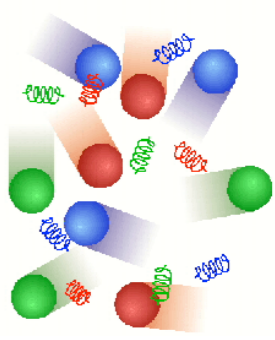
$$\approx (1 + 6v_{2,q} \cos 2\phi)$$



w; クォークの方位角分布

$$w \propto (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)$$

ジェット変貌：Jet Quench



✓ AA衝突で2つのパートンが Hard Scatt. を起こす

- 一つは真空中に飛び出しジェットを生成し、
- 他方は、QGP中を突き抜ける際に特徴的なエネルギー損失を受ける

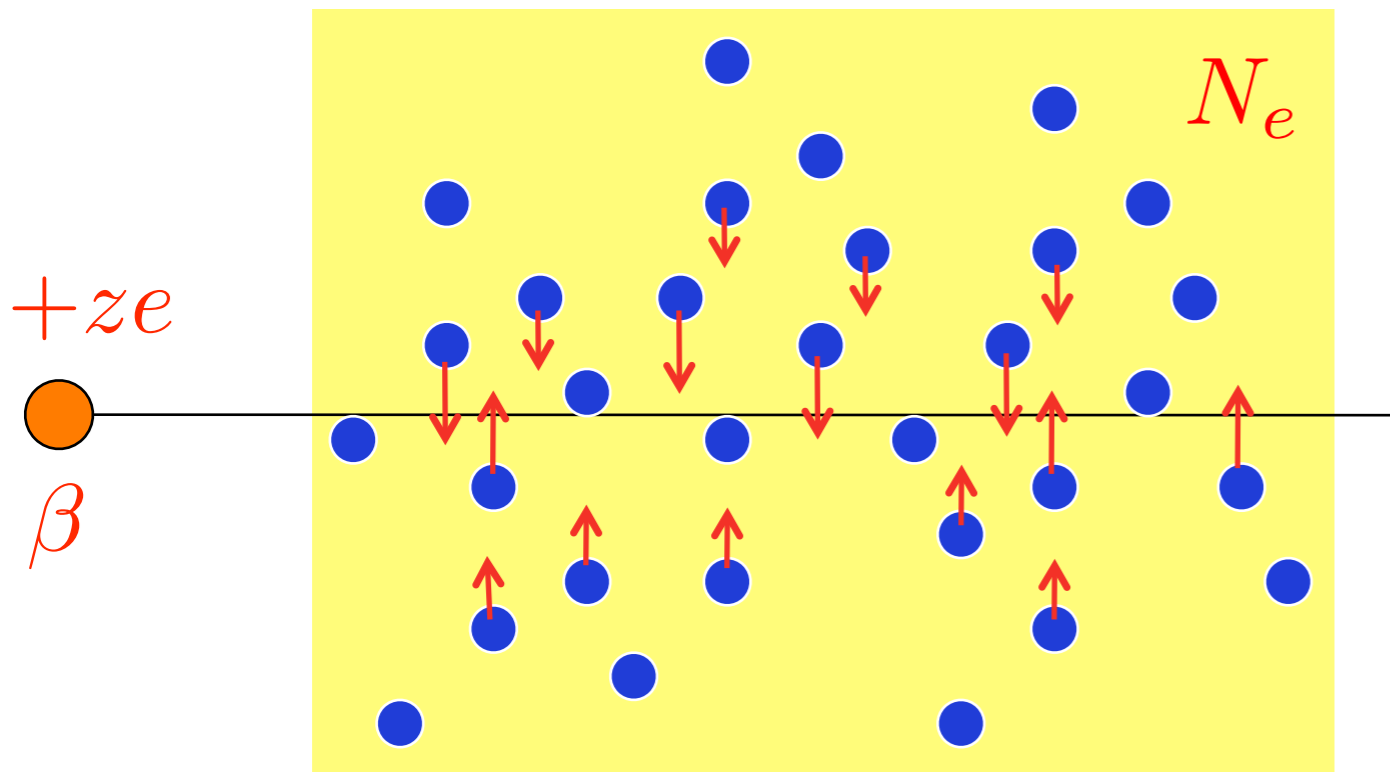
✓ 現れる現象；

- ジェットの消失／減衰
- 高横運動量粒子の減少
- ジェット成分の変化？

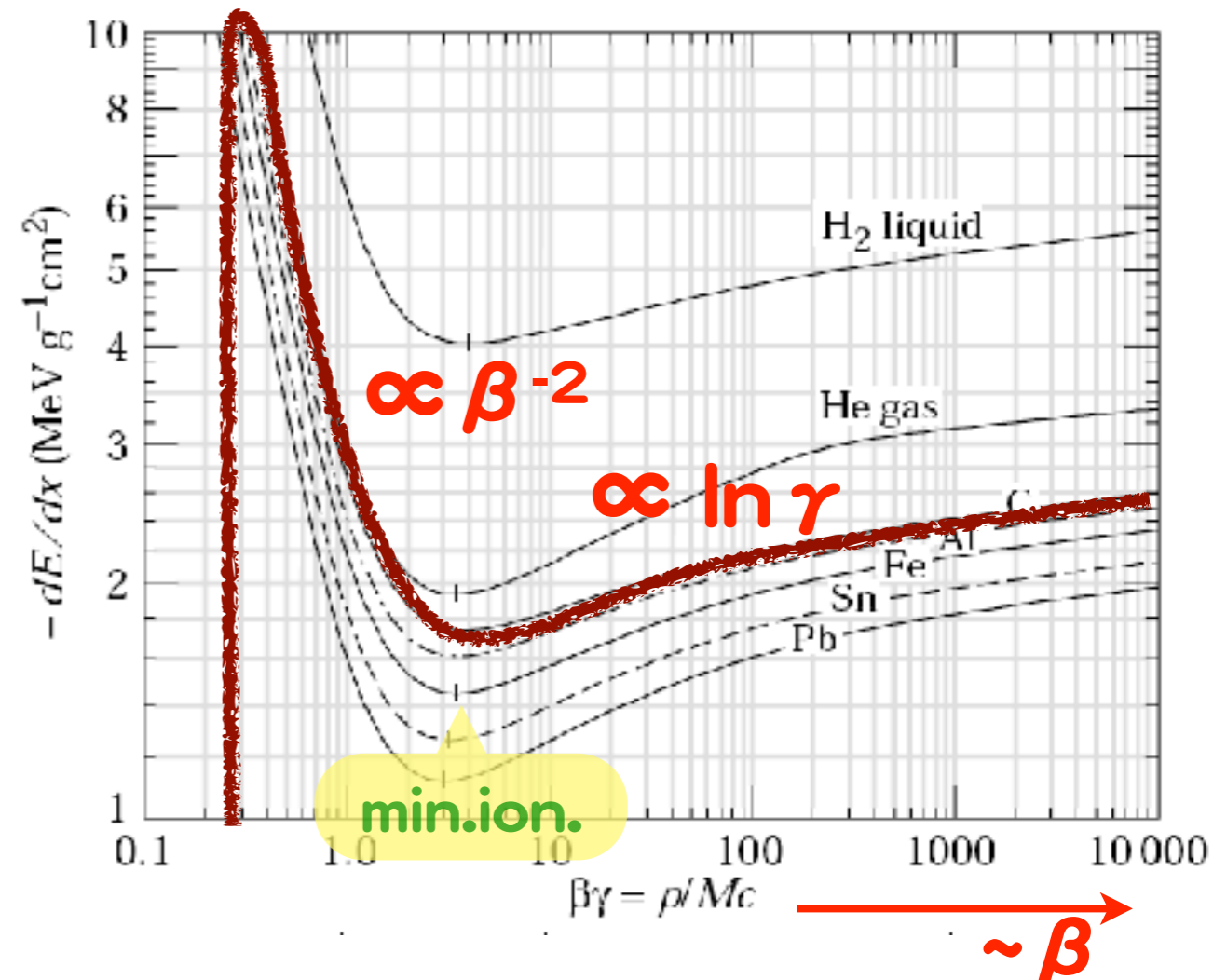
“Jet quenching” in nucleus-nucleus collision.

QEDにおけるエネルギー損失 ～ Bethe-Bloch Eq.～

<http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/>

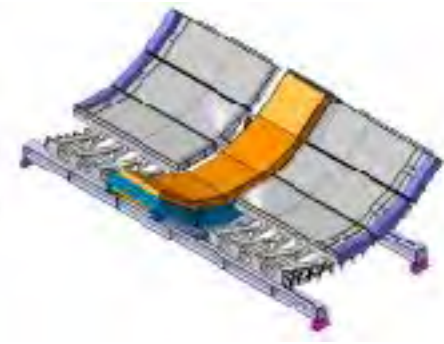


$$-\frac{dE_{\text{Bethe}}}{dx} \propto \frac{z^2 N_e}{\beta^2} \ln(\beta^2)$$

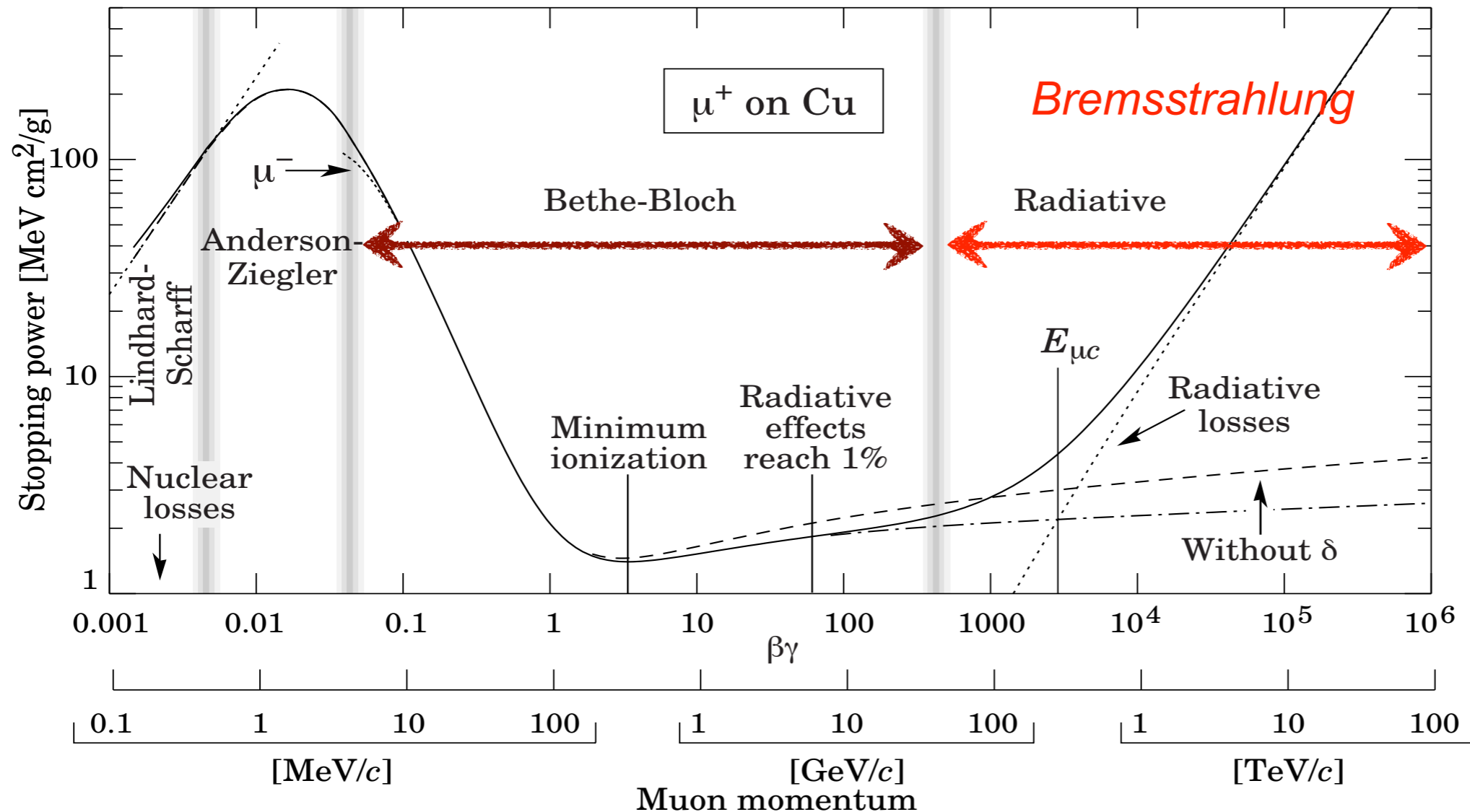


- 入射荷電粒子と物質中の原子電子がクーロン相互作用
 - ✓ 原子電子を電離することによって、入射粒子はエネルギー損失
 - ✓ エネルギー損失量は物質の電子密度(N_e)に比例
 - ✓ エネルギー損失量は入射粒子の z^2 に比例
- エネルギー損失量から物質の電子密度を測定できる→「プローブ」

QEDにおけるエネルギー損失 ～Bremsstrahlung～



荷電粒子のエネルギー損失；制動放射も！



衝突型

✓ Bethe-Bloch

放射型

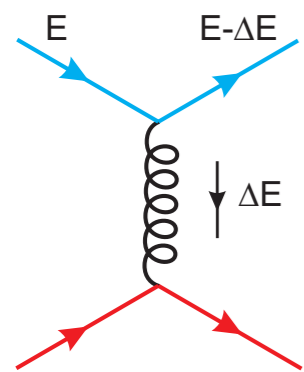
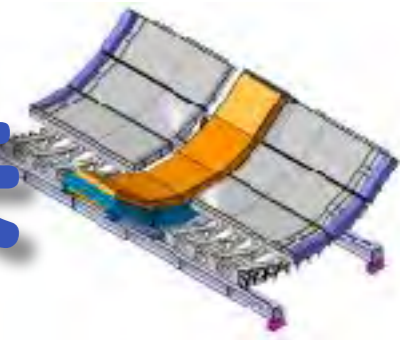
✓ Bethe-Heitler
(thin; $L \ll \lambda$)

✓ Landau-Pomeranchuk-Migdal
(thick; $L \gg \lambda$)

✓ dE/dx の測定から物性情報 → 「プローブ」

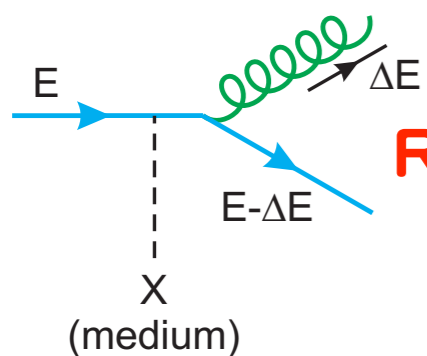
● 例) QEDプラズマ中の dE/dx 測定

QCDにおけるエネルギー損失



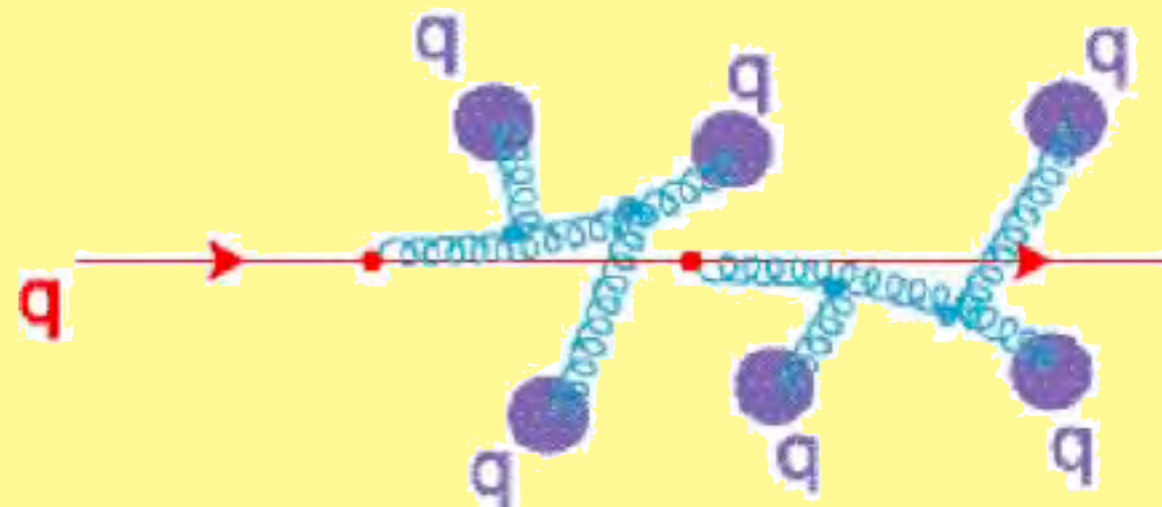
Collisional

$$\Delta E \propto l^1$$



Radiative

$$\Delta E \propto l^2$$



$$\Delta E \propto \alpha_S C_R \langle \hat{q} \rangle L^2$$

pQCD

理論の示唆するところ

放射型損失が重要

期待される効果;

- 高横運動量ハドロンの減少
- back-to back相関の崩れ
- jet fragmentationの変貌
softer, larger multiplicity,
angular broadeningなどなど

$$\Delta E_{\text{gluon}} > \Delta E_{\text{quark}} > \Delta E_{\text{charm}} > \Delta E_{\text{bottom}}$$

✓ 様々な理論

- 衝突型損失
- 放射型損失

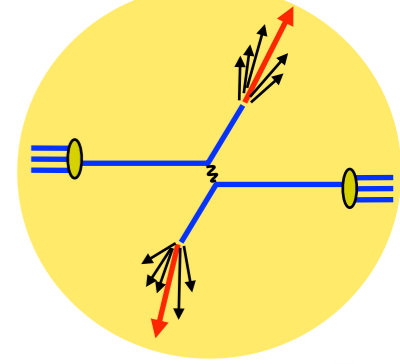
➡ **Bethe-Heitler regime**

➡ **LPM regime**

➡ **“dead-cone” effect**

near side

ジェットの消失/減衰



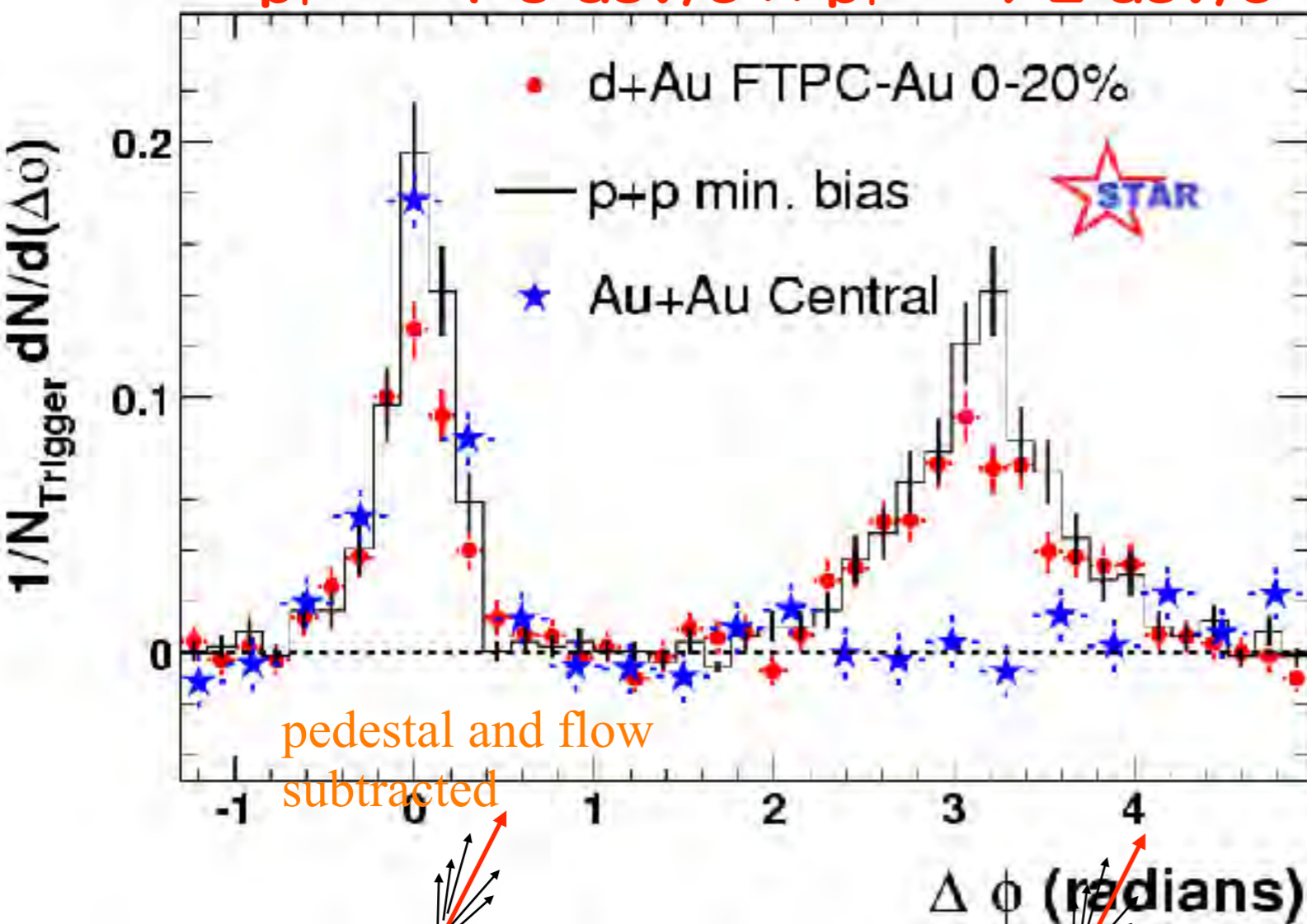
away side

Star; P.R.L. 91, 72304 (2003)

$$p_{T}^{trig} = 4\sim 6 \text{ GeV}/c \times p_{T}^{assoc} > 2 \text{ GeV}/c$$

✓ ジェット消失の証拠

✓ 高横運動量粒子に対する方位角相関；



pp ; 明確なback-to-back

dAu; ppと同様

Au+Au; 高横運動量側(same side)では同様だが、相反側では消失！

効果がdAuでは見られなかったことから、initial stageではなく final stageの効果

Au+Au衝突で作られたQGP中での大きなエネルギー損失のためか

