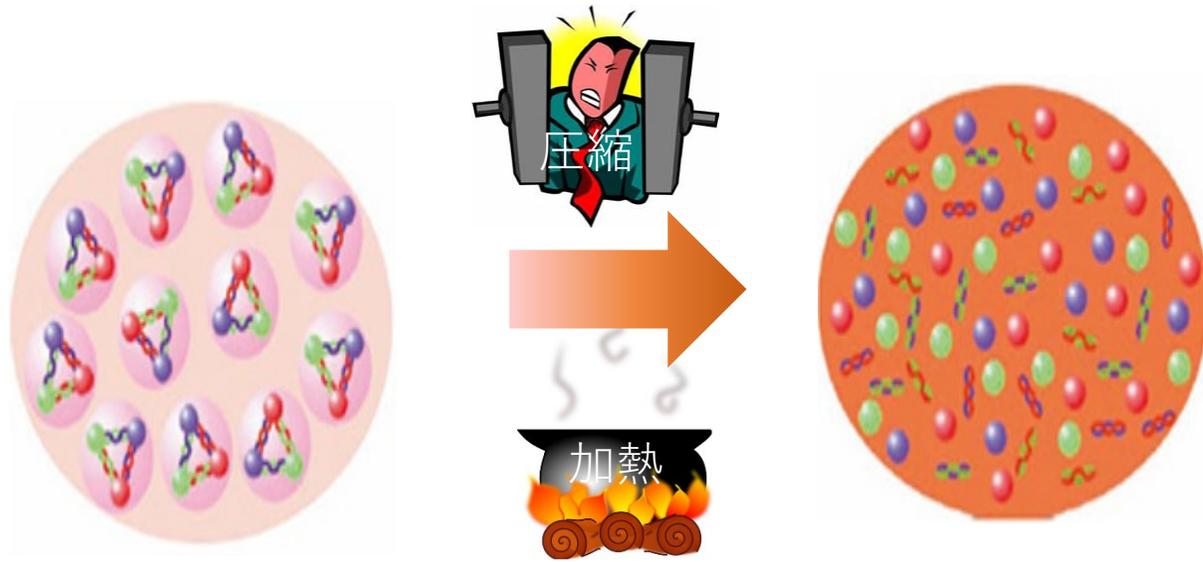


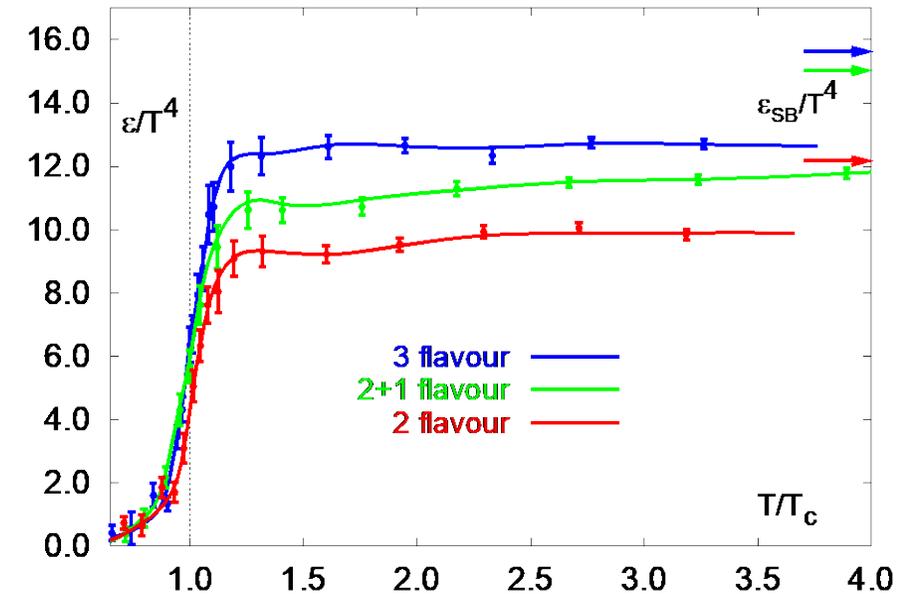
INTTを用いた 重いフレーバー解析

奈良女子大学
蜂谷 崇

クォーク・グルーオン・プラズマ



格子QCDによる理論計算



宇宙開闢直後の世界

$$\frac{\epsilon}{T^4} \sim \text{自由度}$$

温度 $T_c \sim 170\text{MeV}$ で QGP へと相転移する

クォーク : $3 \times 3 \times 2 \times 2$ (uds)

グルーオン : 8×2

π 中間子 : 3 (一番軽いハドロン)

RHICやLHCの重イオン衝突でQGPをつくり、検証する。

高エネルギー重イオン衝突の物理

- QGP物性：

- 全体に関する物性： QGPの密度、温度、大きさ、硬さ、

- より詳細な物性： 透過率、エネルギー損失(QGPの結合)、エネルギー拡散(波・情報の伝わり方)、

- 相転移に関する物性： 相転移したかどうか、相転移前後の相。QCD相図の解明

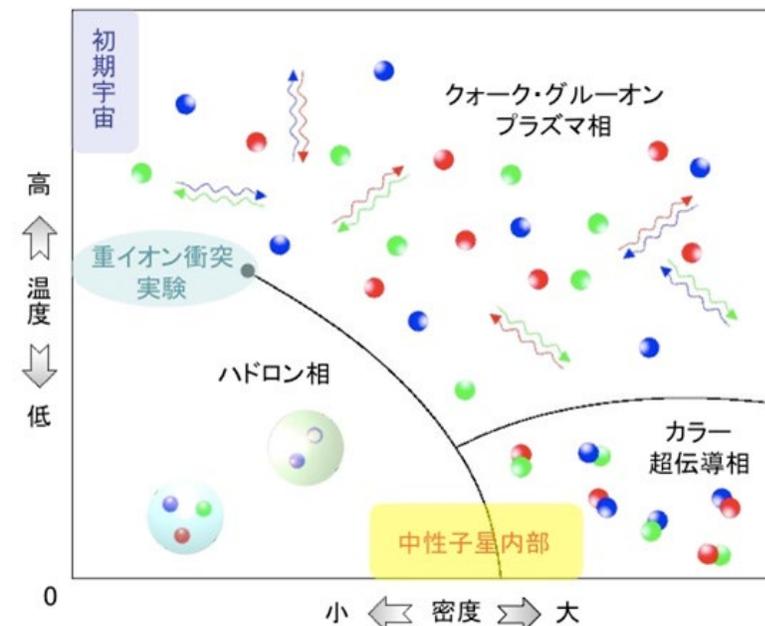
- QGP生成過程・条件の検証

- 質量の起源

- クォーク質量は陽子の1%
- カイラル対称性により $\langle qq \rangle$ が質量を持つ

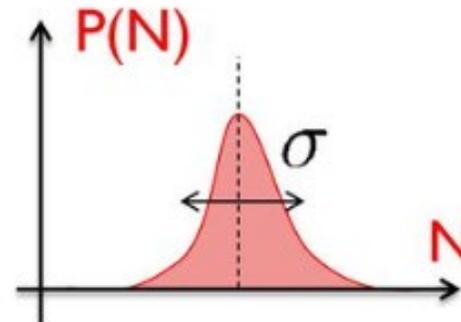
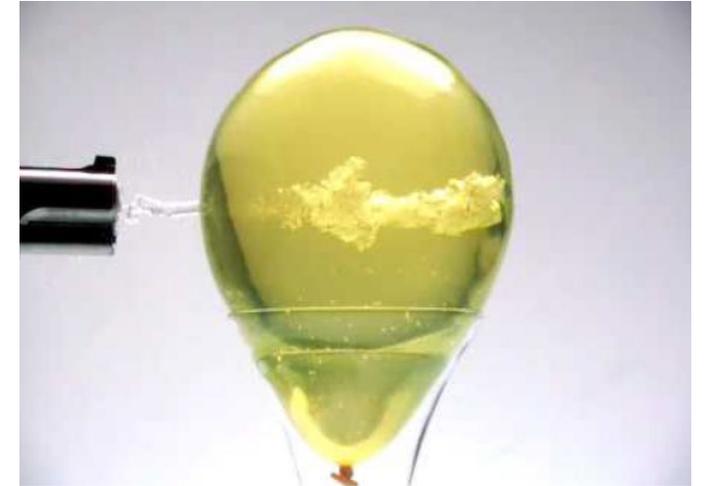
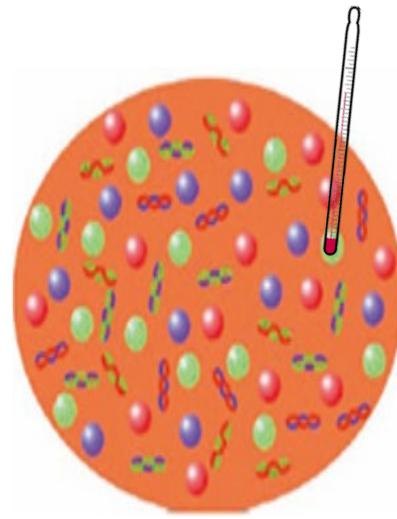
- ハドロン物理

- 多数のクォークやハドロンが相互作用し、様々なハドロンが大量に生じる
 - $\Omega - \Omega$ 、 $\Lambda - \Lambda$



QGP物性の測定

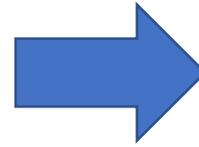
- QGP物性：
 - 全体に関する物性：
 - QGPの密度、温度、大きさ、硬さ、
 - より詳細な物性：
 - 阻止能(透過率)、エネルギー損失(QGPの結合)、エネルギー拡散(波・情報の伝わり方)、
 - 相転移に関する物性：
 - 相転移したかどうか。QCD相図の解明



QGP物性の測定

- QGP物性：

- 全体に関する物性：
 - QGPの密度、温度、大きさ、硬さ、

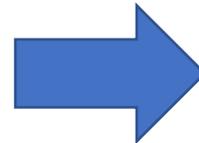


ソフトプローブ

- 全ハドロン生成量
- 熱的光子の生成量
- 楕円フロー（流体力学的膨張）

- より詳細な物性：

- 阻止能(透過率)、エネルギー損失(QGPの結合)、エネルギー拡散(波・情報の伝わり方)、
- プラズマとしての性質： デバイ遮蔽

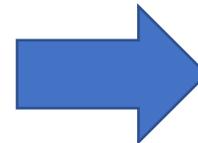


ハードプローブ

- Hi-pTハドロン
- ジェット
- 重いクォーク
- クォーコニウム

- 相転移に関する物性：

- 相転移したかどうか。QCD相図の解明

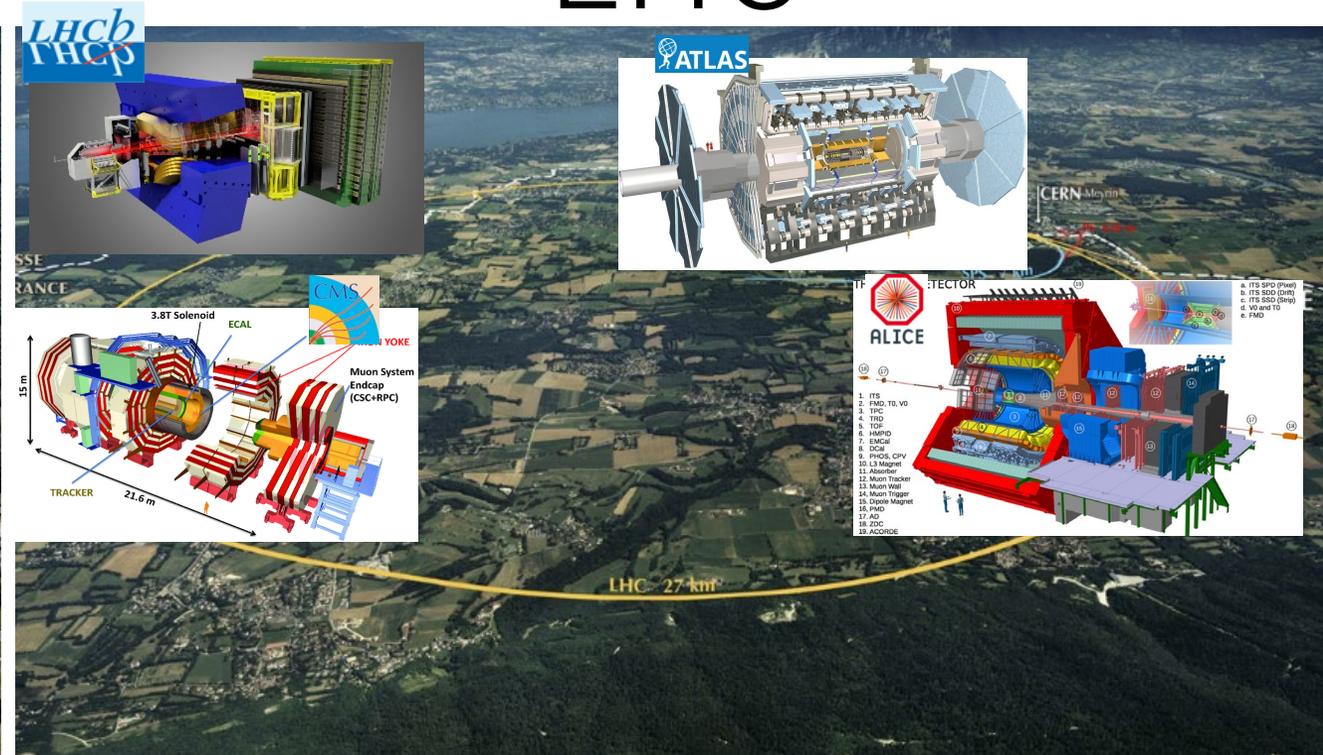
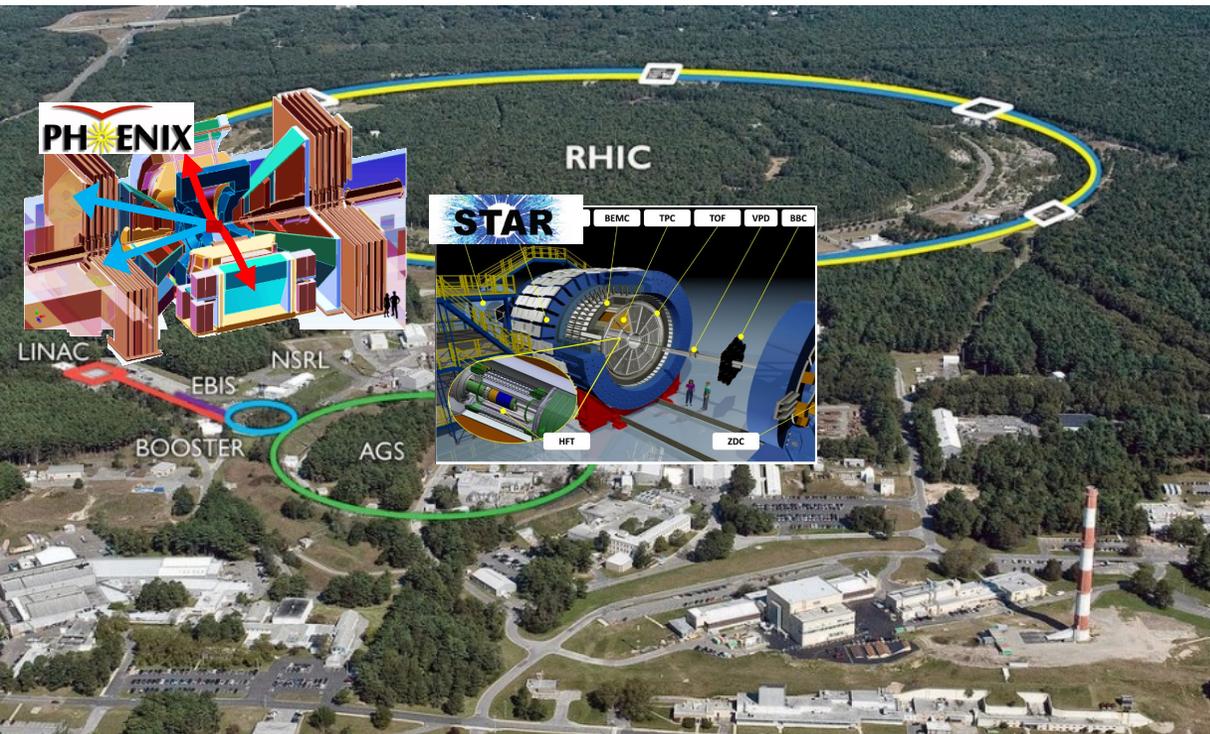


ゆらぎ

- バリオン数の揺らぎ

RHIC QGP Experiments

LHC

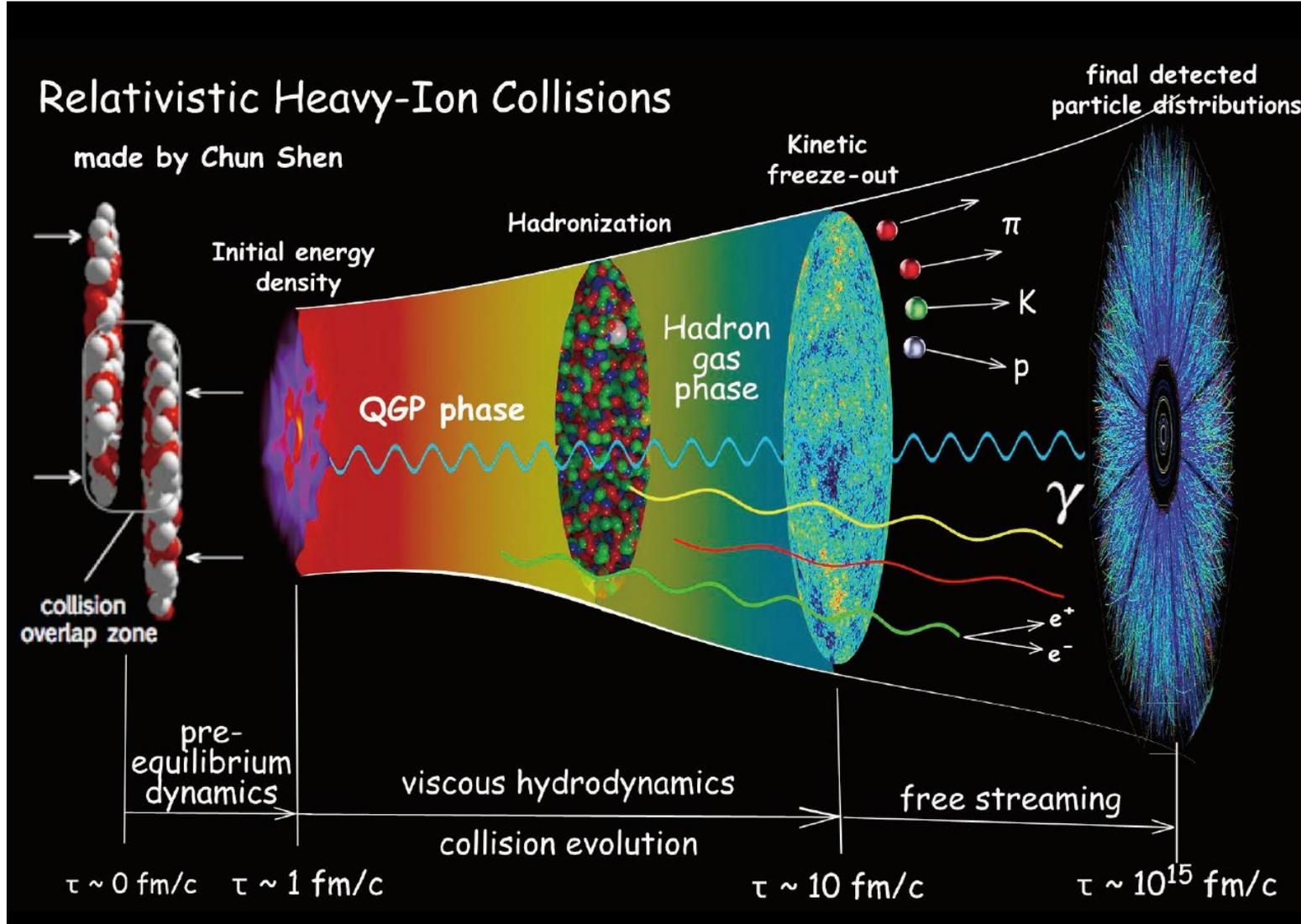


- Versatile machine to collide various nuclei (pp, pA, dA, CuCu, AuAu) and energies ($\sqrt{s_{NN}} = 3 \sim 7.7 \sim 62 \sim 200 \text{ GeV}$)
 - Systematic study

- Highest energy frontier
 - pp, pPb, PbPb at 2.76, 5.02 TeV
 - Good for Jet

相互のデータで系統的にQGP物性を調べる

高エネルギー重イオン衝突



ダイナミカルは時空発展

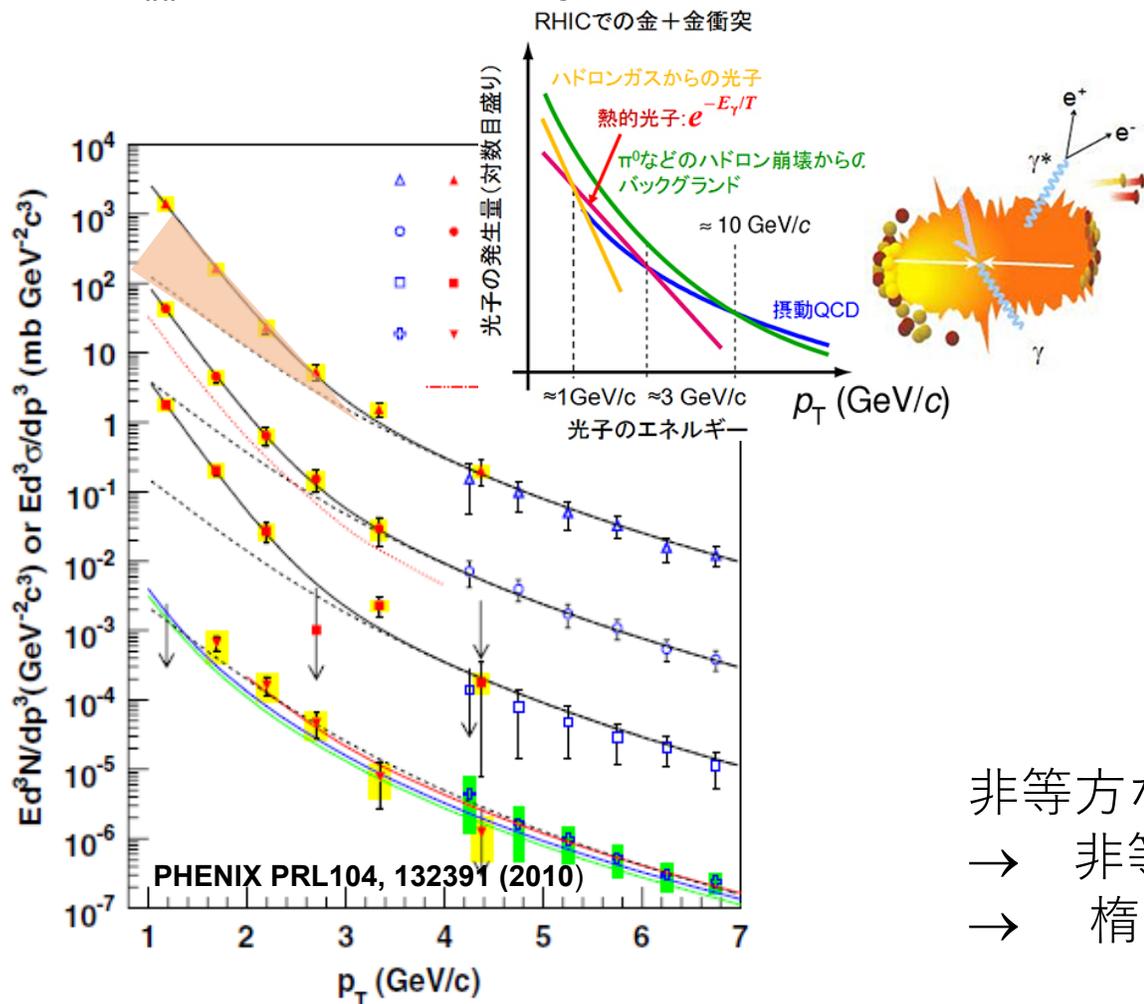
1. パートン散乱
2. 熱平衡化、QGP
3. ハドロン化
 - 化学凍結
 - 熱凍結

• QGPが短く、QGP後もハドロン間相互作用するため、QGPの直接測定は難しい。

これらの測定によるQGP発見

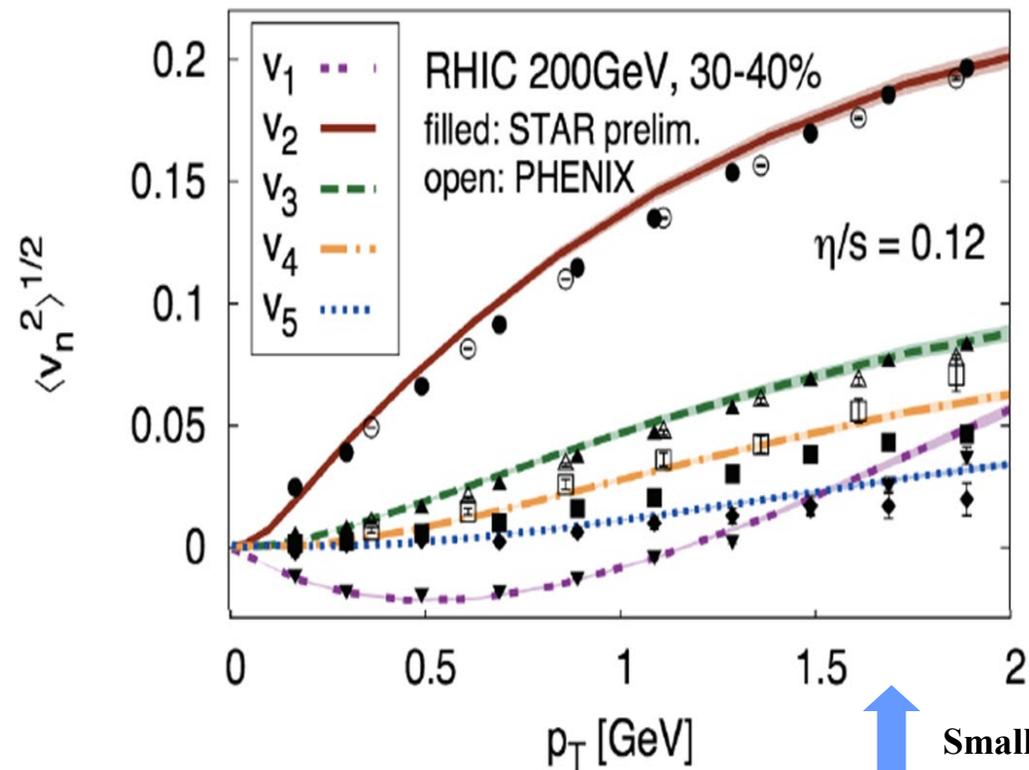
• 低い p_T 光子の増大の発見

- $T_{\text{slope}} = 221 \pm 19_{\text{stat}} \pm 19_{\text{syst}}$
- $T_{\text{ini}} = 300\text{-}600\text{MeV} > T_c (170\text{MeV})$

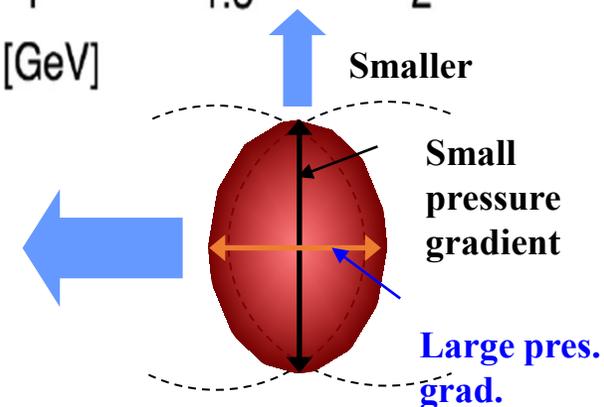


流体力学的膨張の発見

クォーク自由度に従う



非等方な圧力勾配が粒子を押し流す
 → 非等方な集団運動
 → 楕円型や高次のモーメント



ハードプローブを使ってQGP物性を見る

- プラズマの性質を調べる方法

- 電場・磁場をかける
- レーザーを打ち込む

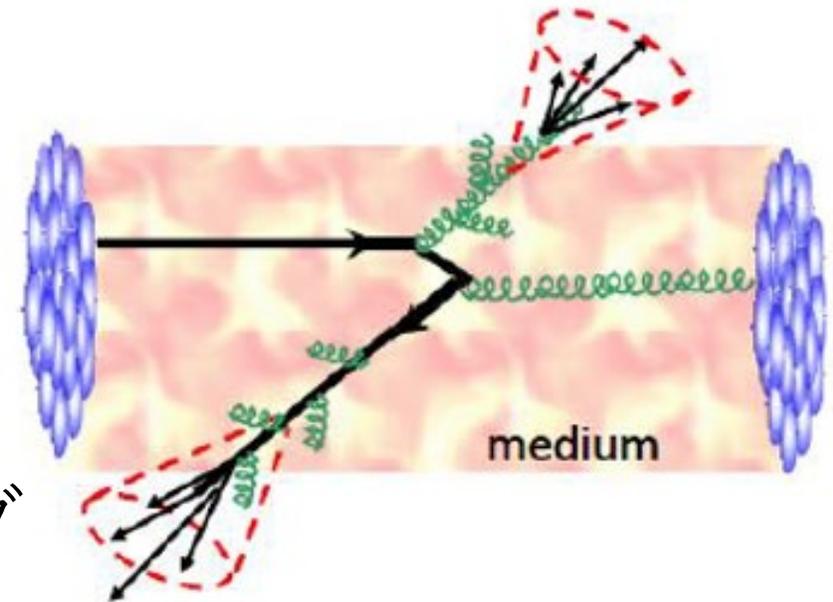
よくわかっているプローブを「外から」打ち込み調べる。

- QGP物理の場合

QGPを「外から」プローブすることはできない

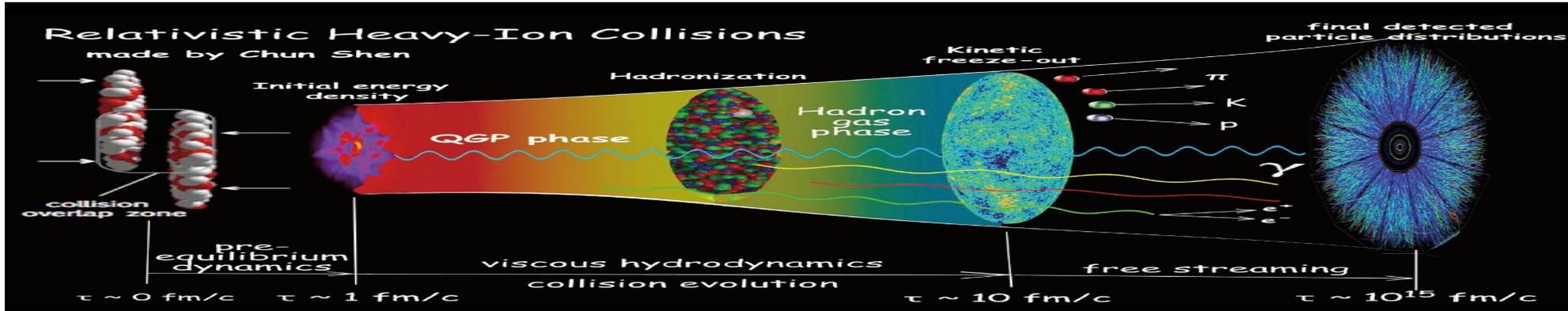
→ しかし、生成したクォーク・グルーオンの全てがQGPになるわけではない。
QGPが生成されたとき、QGPになっていない成分が存在することを利用

QGPになっていない成分 = ハードプローブ

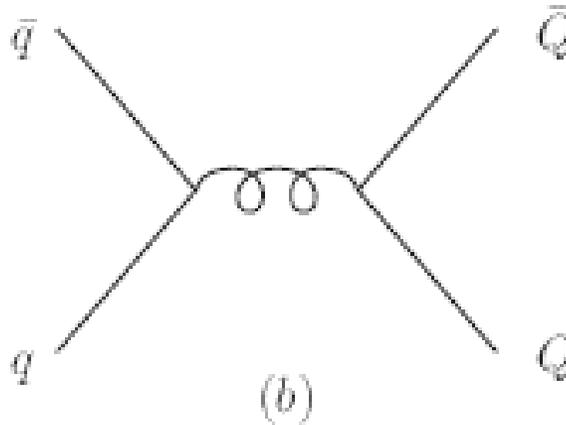
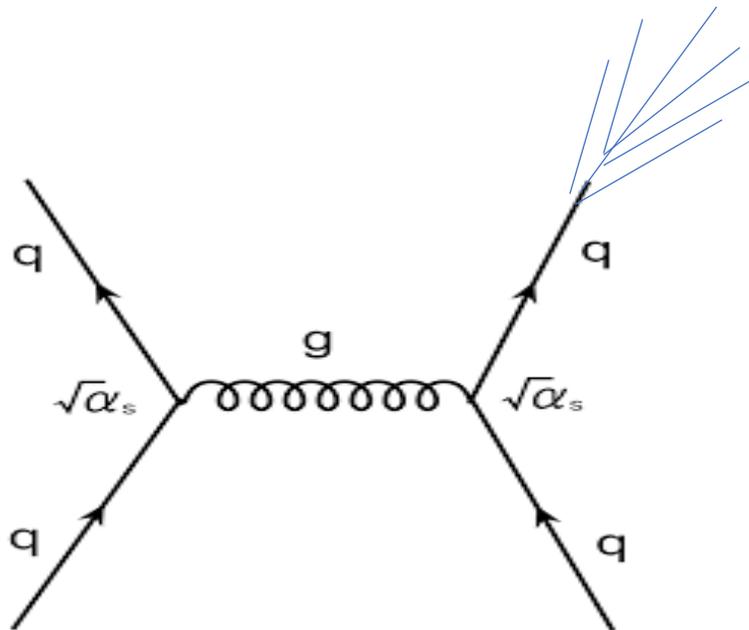


ハードプローブ： ジェットや重いクォーク消失

- 衝突初期の高エネルギー反応で生成(その後、できない)



ジェットや重いクォークができるほどの高エネルギー反応
 ジェットエネルギー ($E \sim Q \sim > 5 \sim 10 \text{ GeV}$)

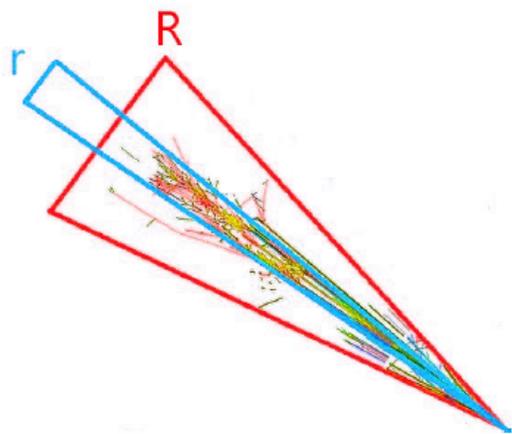


$$\begin{aligned}
 M_c \sim 1.3 \text{ GeV} &>> T_{\text{QGP}} \sim 400 \text{ MeV} \\
 M_b \sim 4.5 \text{ GeV} &>> \Lambda_{\text{QCD}} \sim 200 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

sPHENIXでの物理ミッション

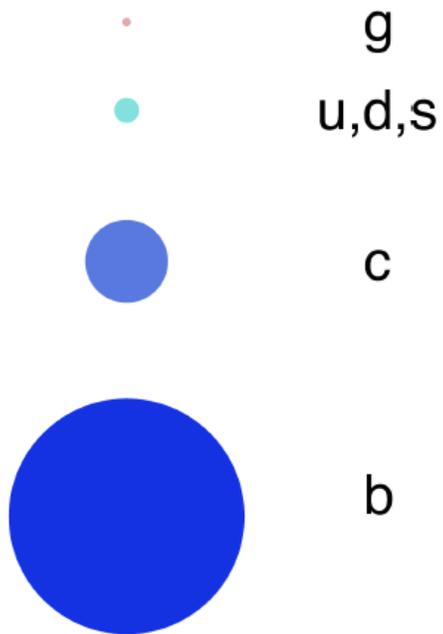
Jet correlation & substructure

Vary momentum/
angular
size of probe



Parton energy loss

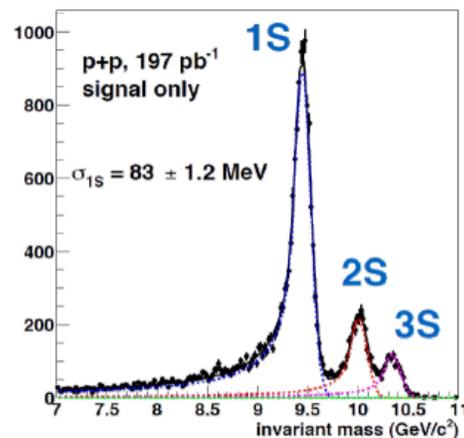
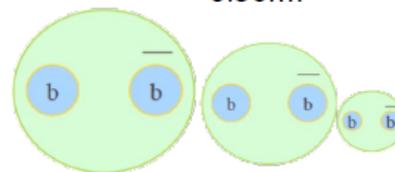
Vary mass/
momentum
of probe



Upsilon spectroscopy

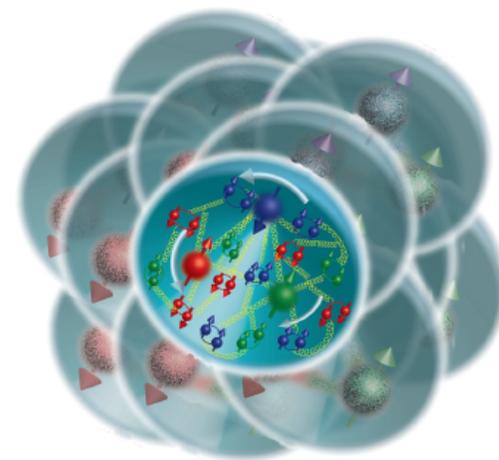
Vary size
of the probe

$\Upsilon(3s)$ - 0.78fm $\Upsilon(2s)$ - 0.56fm $\Upsilon(1s)$ - 0.28fm

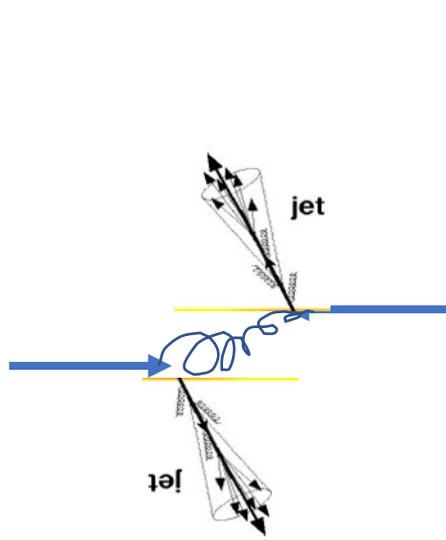


Cold QCD

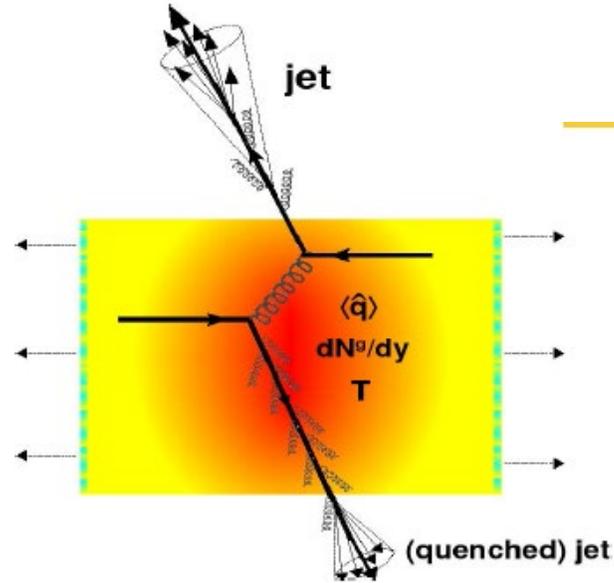
Vary temperature
of QCD matter



QGPによるジェット消失

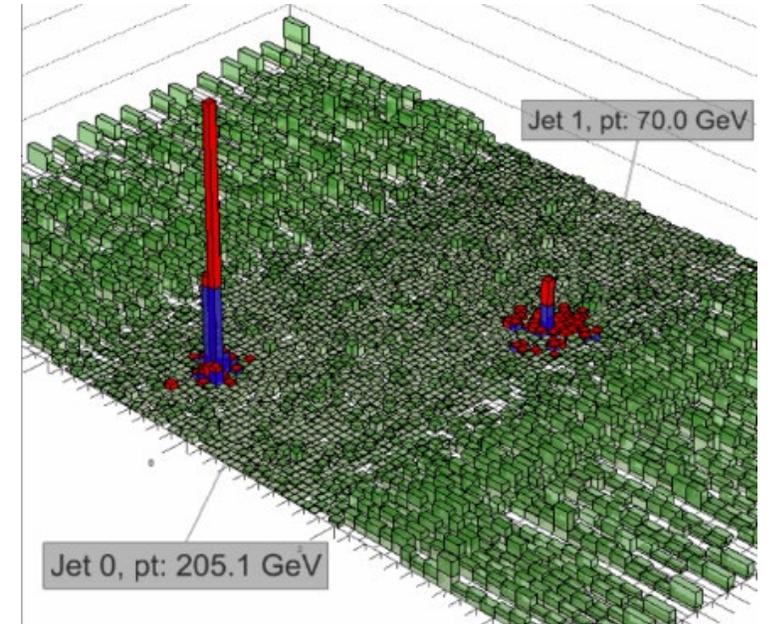


陽子陽子ではback-to-backに
高エネルギー粒子(ジェット)が生成



重イオンでは片方
QGPに吸収され、消失する

CMS実験でのジェット生成

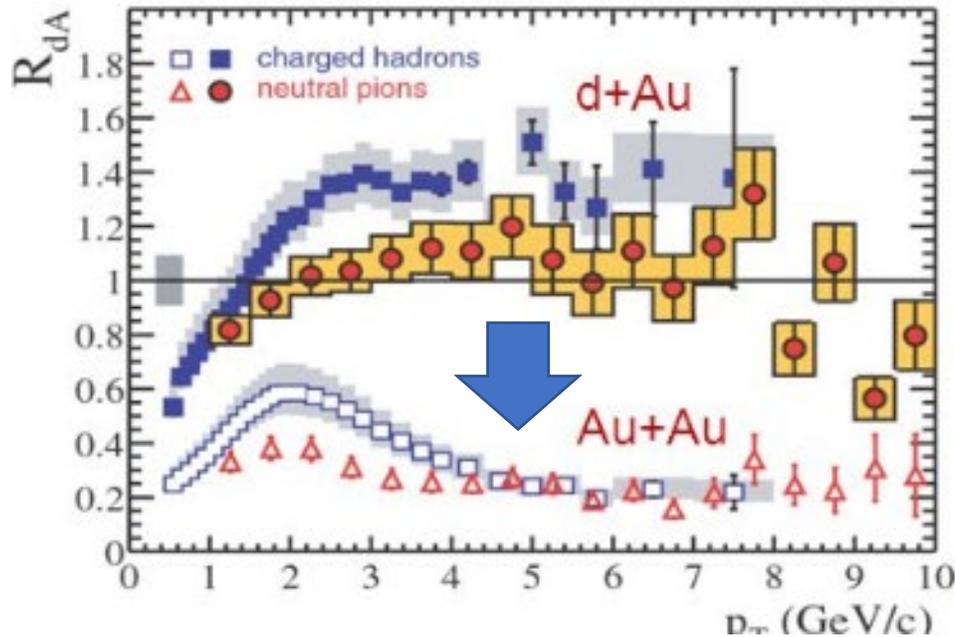
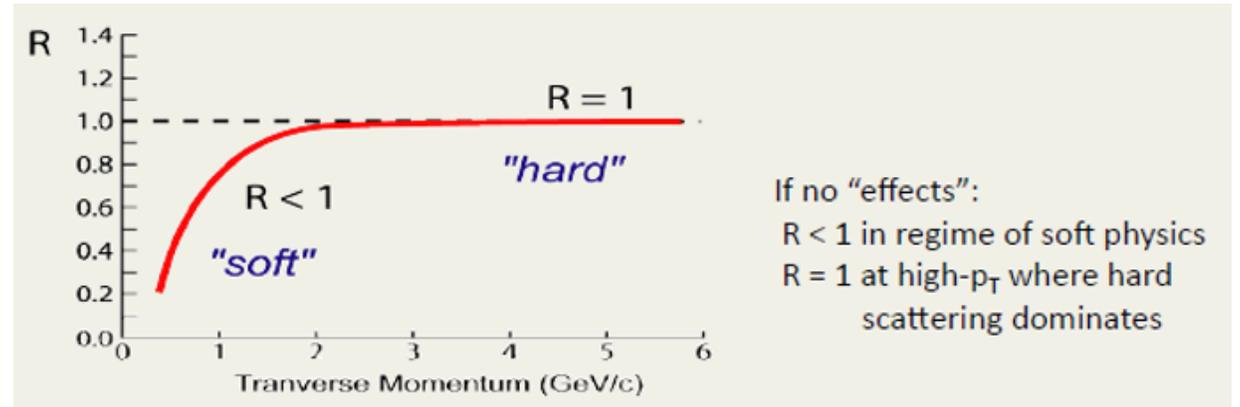


ジェット消失の定量化

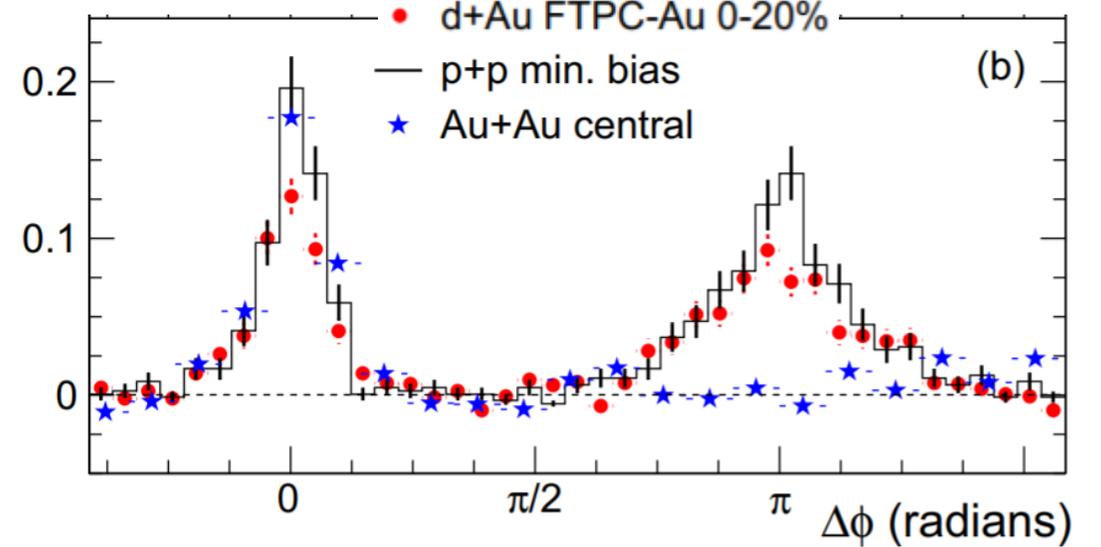
- Nuclear modification factor

$$R_{AA} = \frac{Yield(Au + Au)}{N_{coll} * Yield(p + p)}$$

1 with no suppression



$1/N_{trigger} dN/d(\Delta\phi)$



Phys.Rev.Lett.91:072304,20

03

- 高エネルギーパートンのQGP中でのエネルギー損失

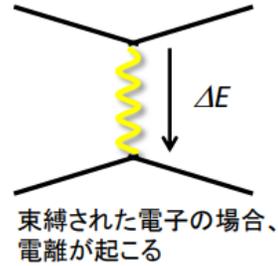
- 数GeV/fmの巨大な阻止能

- 低いpTは、ソフト生成

物質中でのエネルギー損失

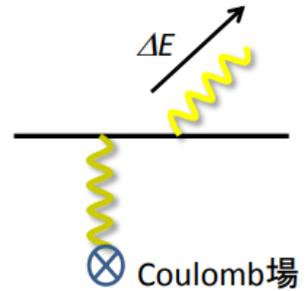
1. Collisional energy loss (電離損失、衝突損失)

- 素過程としては弾性散乱(粒子数が変わらない)によるエネルギー移行
- 低エネルギー領域で有効な機構
- Bethe-Bloch公式



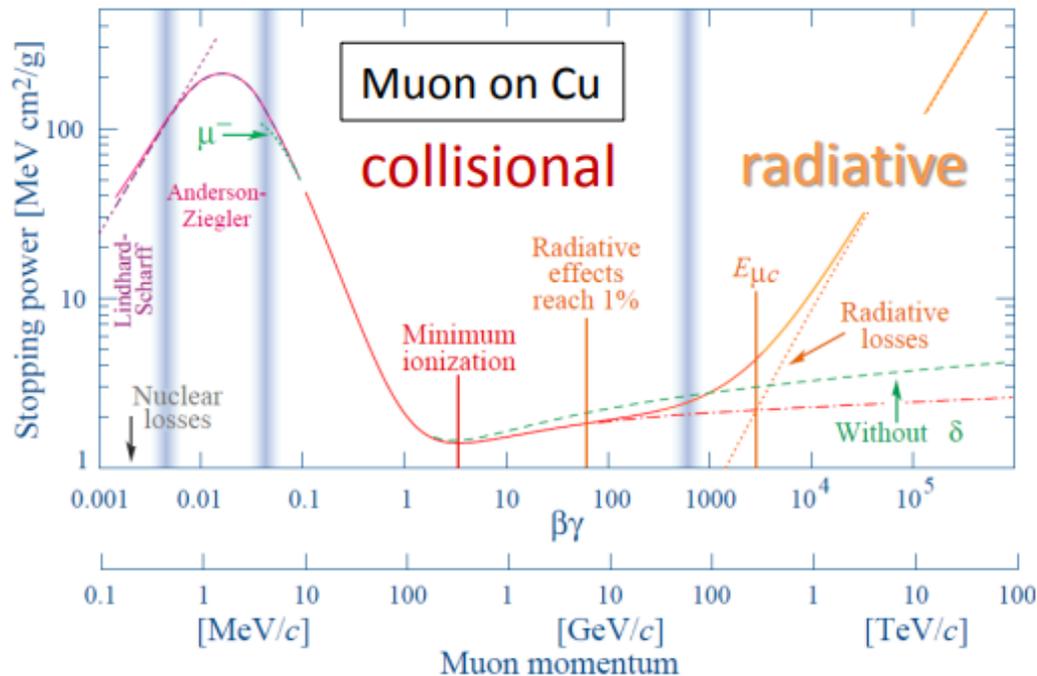
2. Radiative energy loss (制動放射)

- 弾性散乱よりも高次効果だが、高エネルギー領域で有効
- 一回の散乱はBethe-Heitler公式で与えられる。
- 散乱中心が増加(あるいは高エネルギーに行く)すると、各放射同士の間渉が効き始め、放射が抑制される。これをLandau-Pomeranchuk-Migdal効果という。



K.A. Olive *et al.* (PDG), Chin. Phys. C38, 090001 (2014) (<http://pdg.lbl.gov>)

32. PASSAGE OF PARTICLES THROUGH MATTER



• QGP中でも同じことが起きる

- 電子・原子核の電荷 → クォーク・グルーオンの色荷

• LPM効果も考慮

- 密度が高すぎる時、電荷が見えなくなる現象
- 散乱数が減少し、Elossも減る

QGP中でのエネルギー損失

- QGPの性質

- Collisional vs Radiative

- 距離L依存性

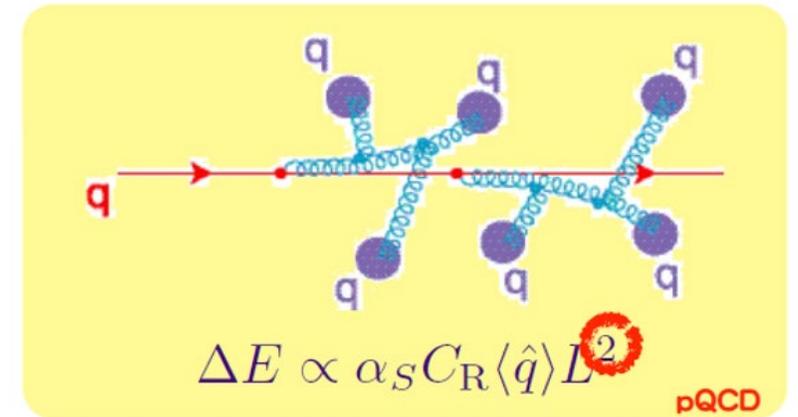
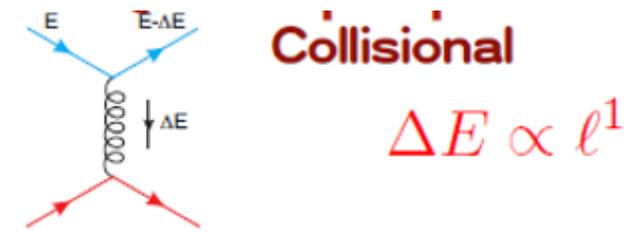
- 輸送係数

$$\hat{q} = \frac{\langle q_{\perp}^2 \rangle}{\lambda}$$

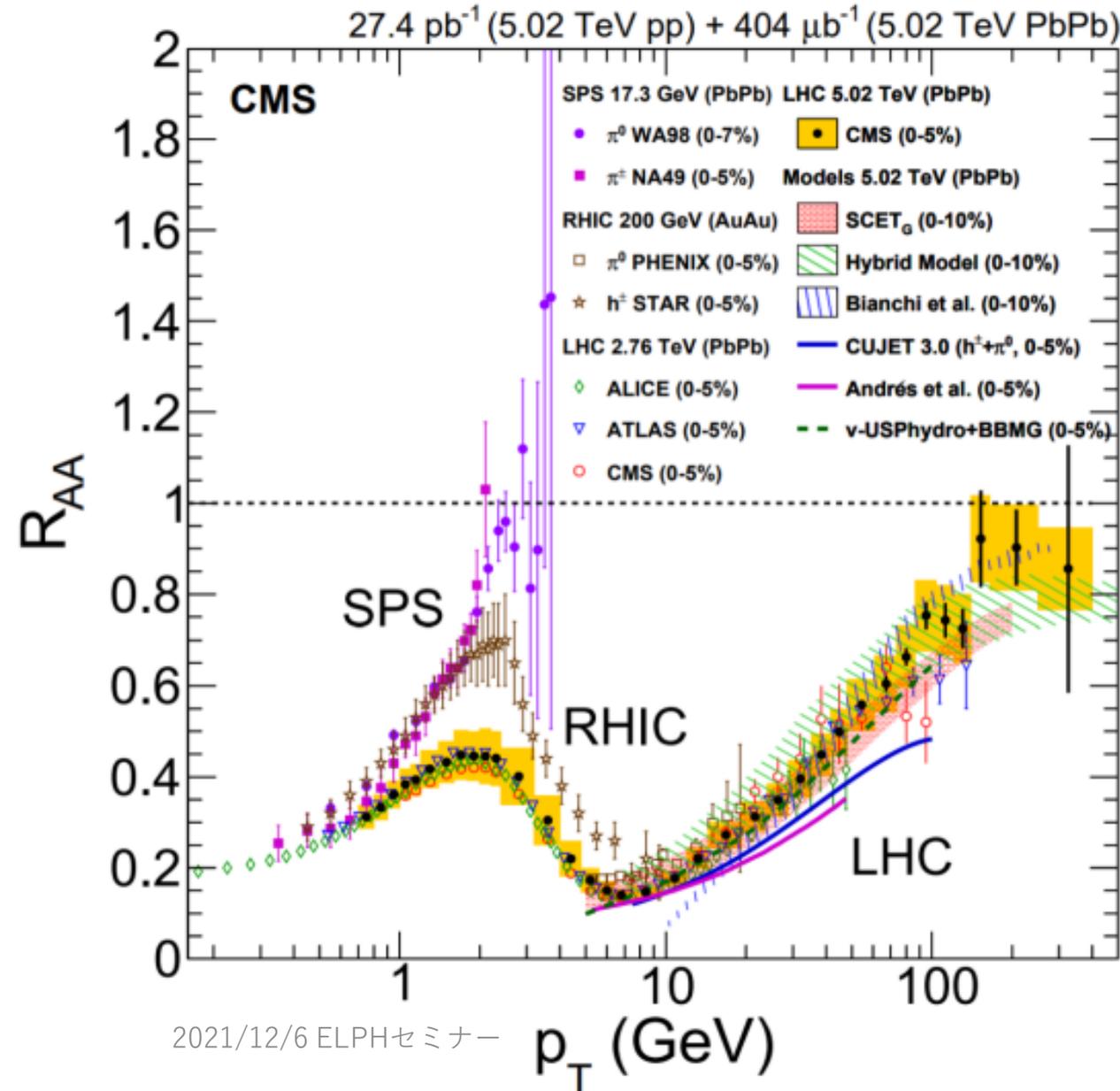
単一散乱当たりの散乱強度

- 通過粒子の質量依存性

- $\Delta E_g > \Delta E_{u,d,s} > \Delta E_c > \Delta E_b$



Nuclear modification factor : 衝突エネルギー



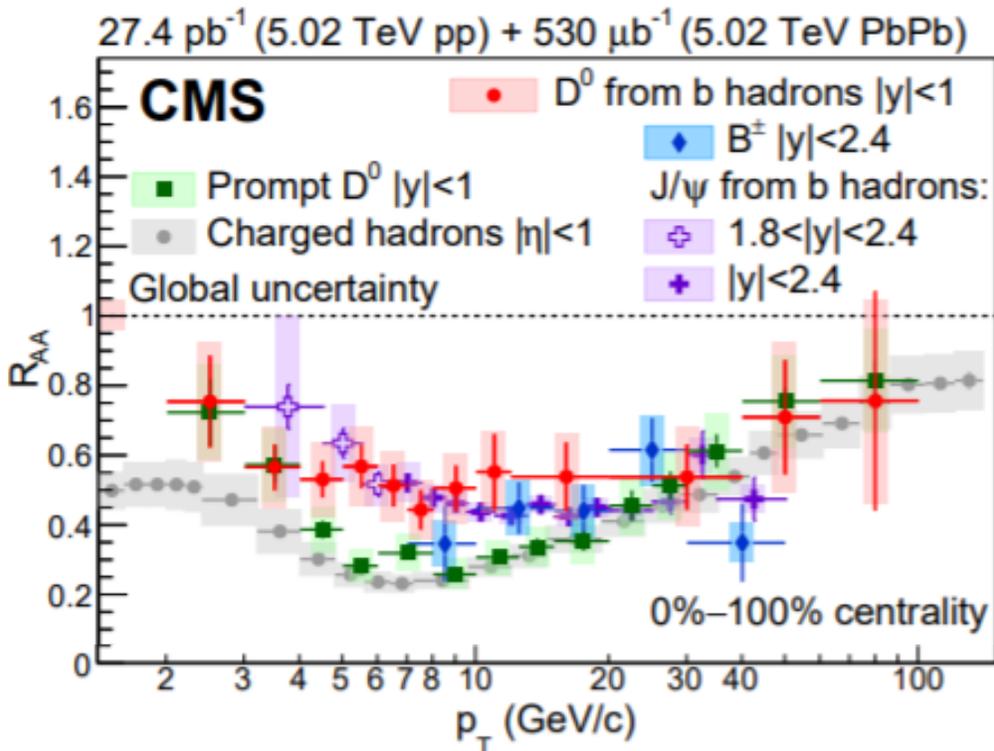
- LHCとRHICで強い抑制
 - SPSでは逆に増加する
- R_{AA} は、RHICとLHCで滑らかにつながる
 - Increasing with p_T at high p_T

- R_{AA} ~ 1 at p_T > 100 GeV/c
 - LPM効果
 - Surface bias?

高すぎるp_TではQGP情報が少ない

ボトム+チャーム R_{AA} at LHC

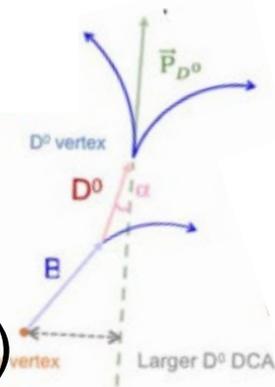
Non-prompt D0



• 重いクォーク測定

- B → J/ψ+K (direct reco.)
- B → J/ψ+X or D +X(non-prompt)
- D → K+π
- B, D → e + X, μ + X (semi-leptonic)

シリコン検出器による2次崩壊点測定



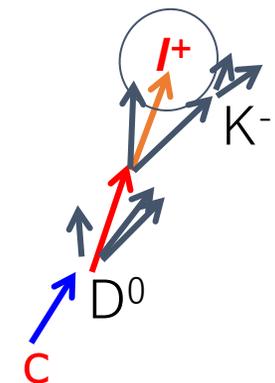
semi-leptonic

• 高い p_T

- 軽いクォークと一致

• 低い p_T ,

- 質量依存性が見える
 - $R_{AA}(b) > R_{AA}(c) > R_{AA}(\text{light})$
 - 予想と定性的に一致

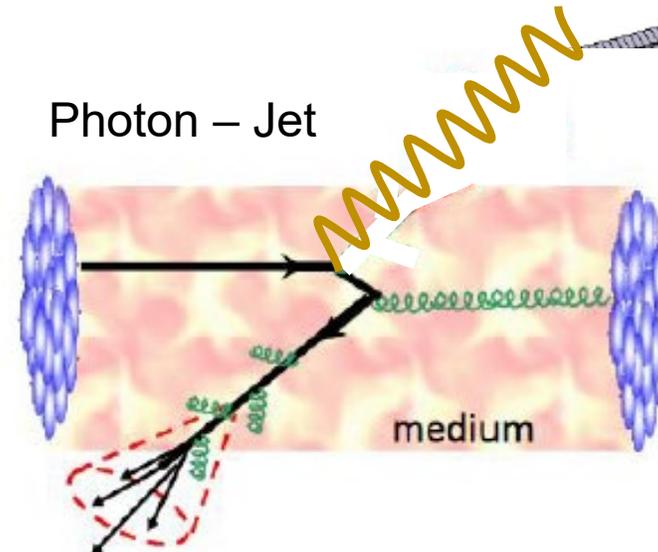
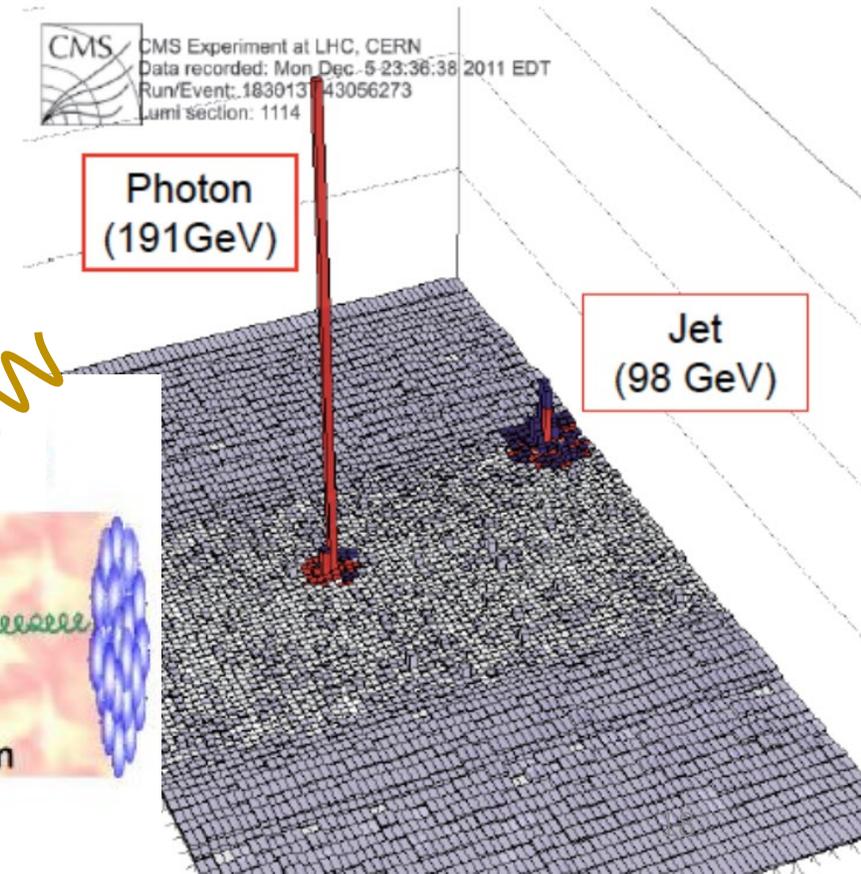
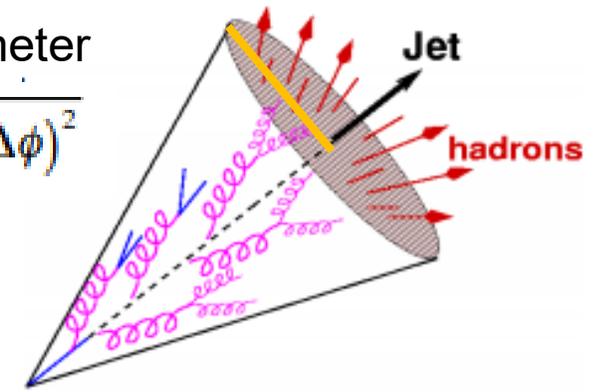


ジェットによるQGP断層撮影

- Jet : 高運動量パートンの2体散乱から生じるの“スプレー”状のハドロン発生現象
 - 測定ではジェット再構成アルゴリズムを用いる
- ジェットによる測定
 - パートンのエネルギーロスを直接測定
 - 損失したエネルギーの行方
- 光子 – ジェット (Golden channel)
 - ジェットの初期エネルギーを制御
 - Jet (im)balance – Eloss
 - Jet shape modification - Redistribution

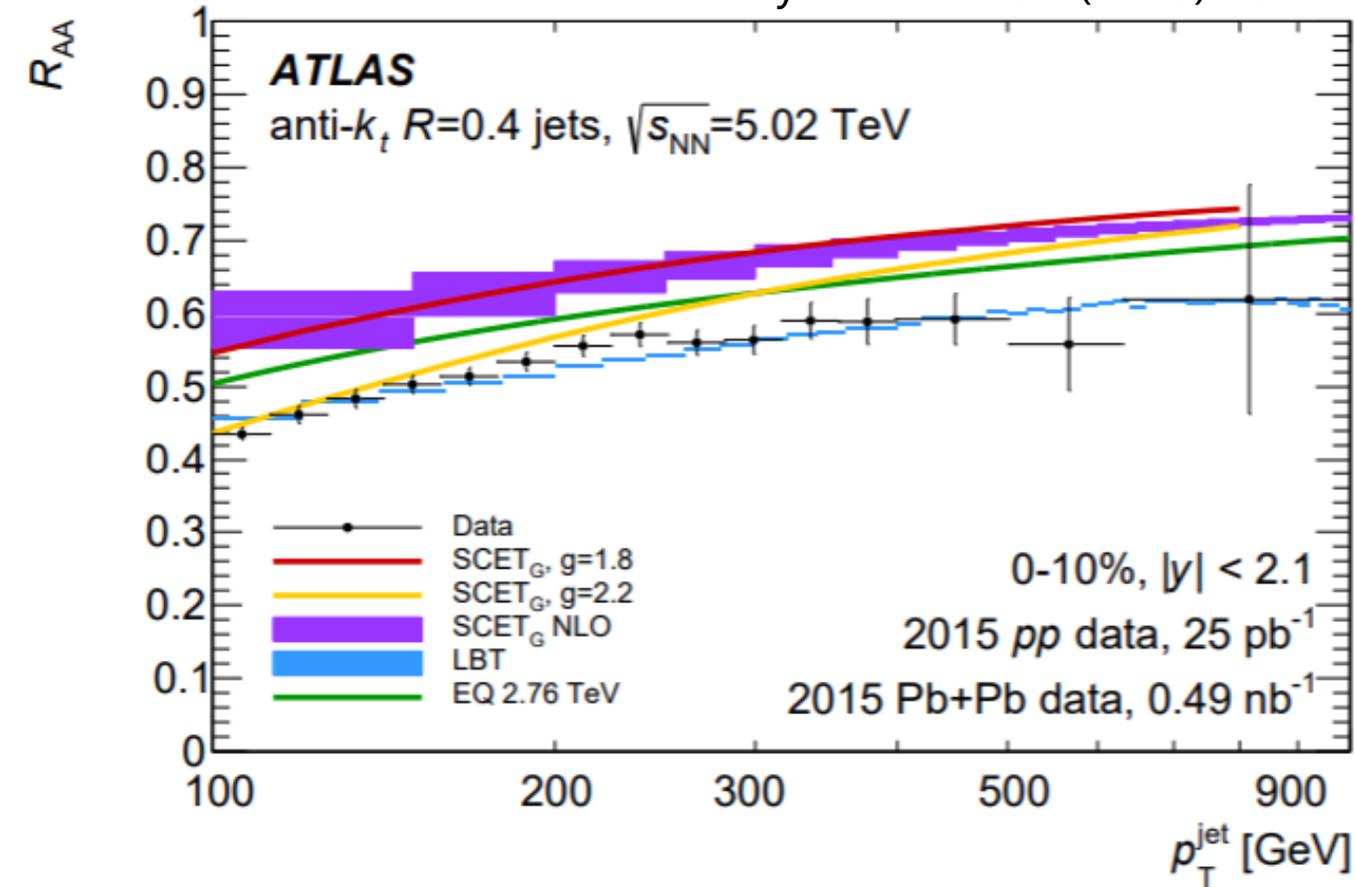
Radium parameter

$$R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$$

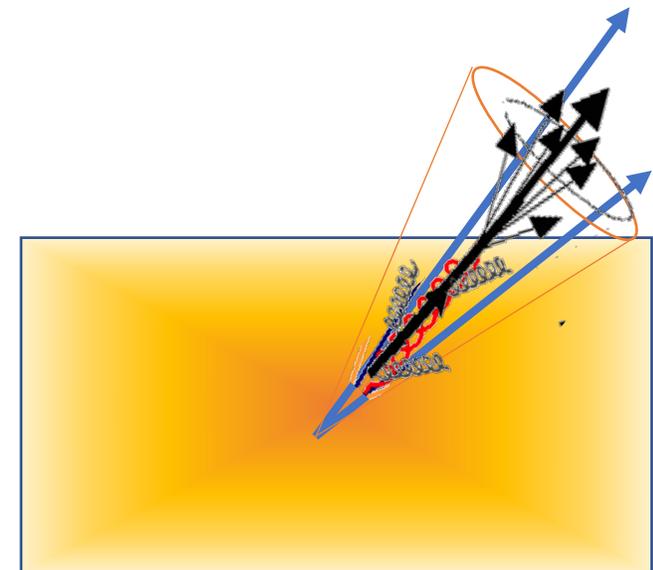


Jet R_{AA}

Phys. Lett. B 790 (2019) 108



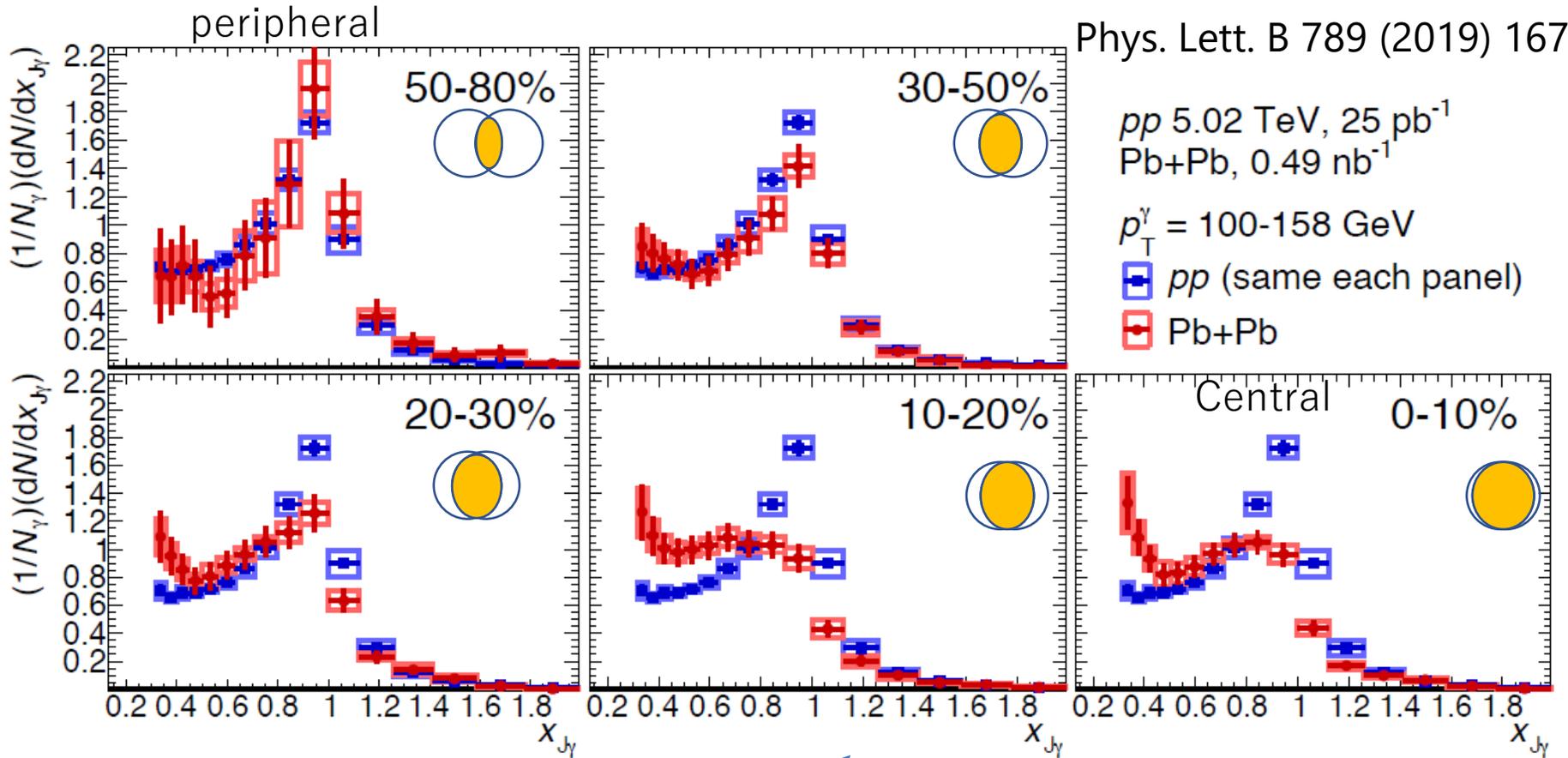
- Jet R_{AA} is ~ 0.6 up to $p_T \sim 1 \text{ TeV}/c$
 - Jet $R_{AA} < h+ R_{AA} p_T$
 - p_T 依存性はほぼなくフラット
- Hadron RAA より小さい
 - Jet contains multi-partons which can lose energy in QGP, result to more energy loss in Jet than single particle
- 低い運動量の振る舞いは？
 - QGPに感度がある



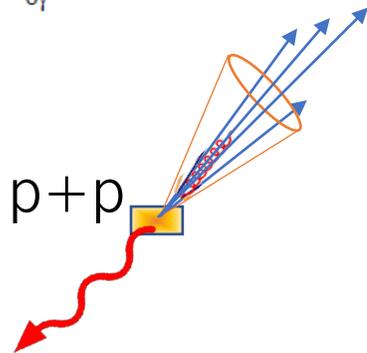
Photon-Jet imbalance in Pb+Pb

(im)balance parameter

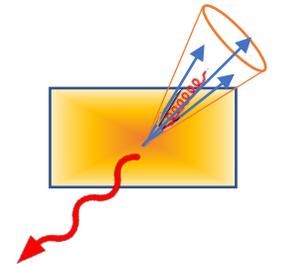
$$X_{j\gamma} = \frac{p_T^{Jet}}{p_T^\gamma}$$



- A peak at 1 in p+p
 - Photon-Jet balance
- 50-80% is similar to p+p



- Clear asymmetry in 0-10%
 - Small bump at 1
 - Peak shifted to small $X_{j\gamma}$ with centrality
 - Direct evidence of “Jet quenching”



Jet shape modification in γ - Jet

Jet shape

$$\rho(r) = \frac{1}{\delta r} \frac{\sum_{\text{jets}} \sum_{\text{trk} \in [r_a, r_b]} (p_T^{\text{trk}} / p_T^{\text{jet}})}{\sum_{\text{jets}} \sum_{\text{trk} \in [0, r_f]} (p_T^{\text{trk}} / p_T^{\text{jet}})}$$

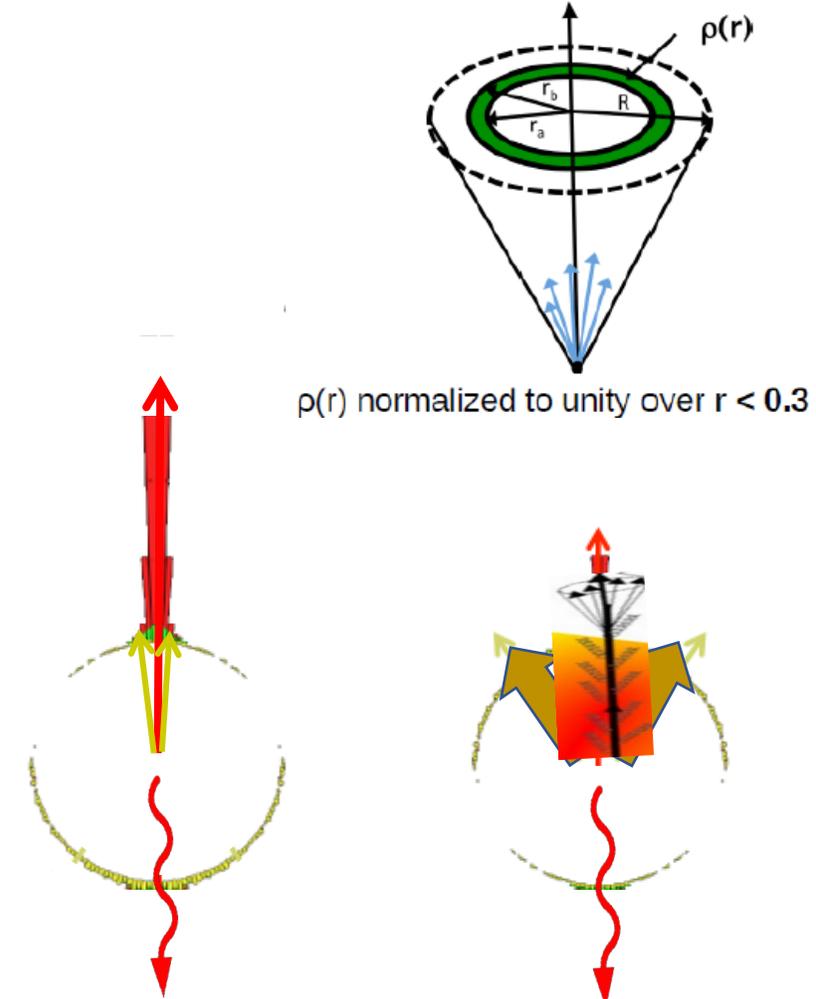
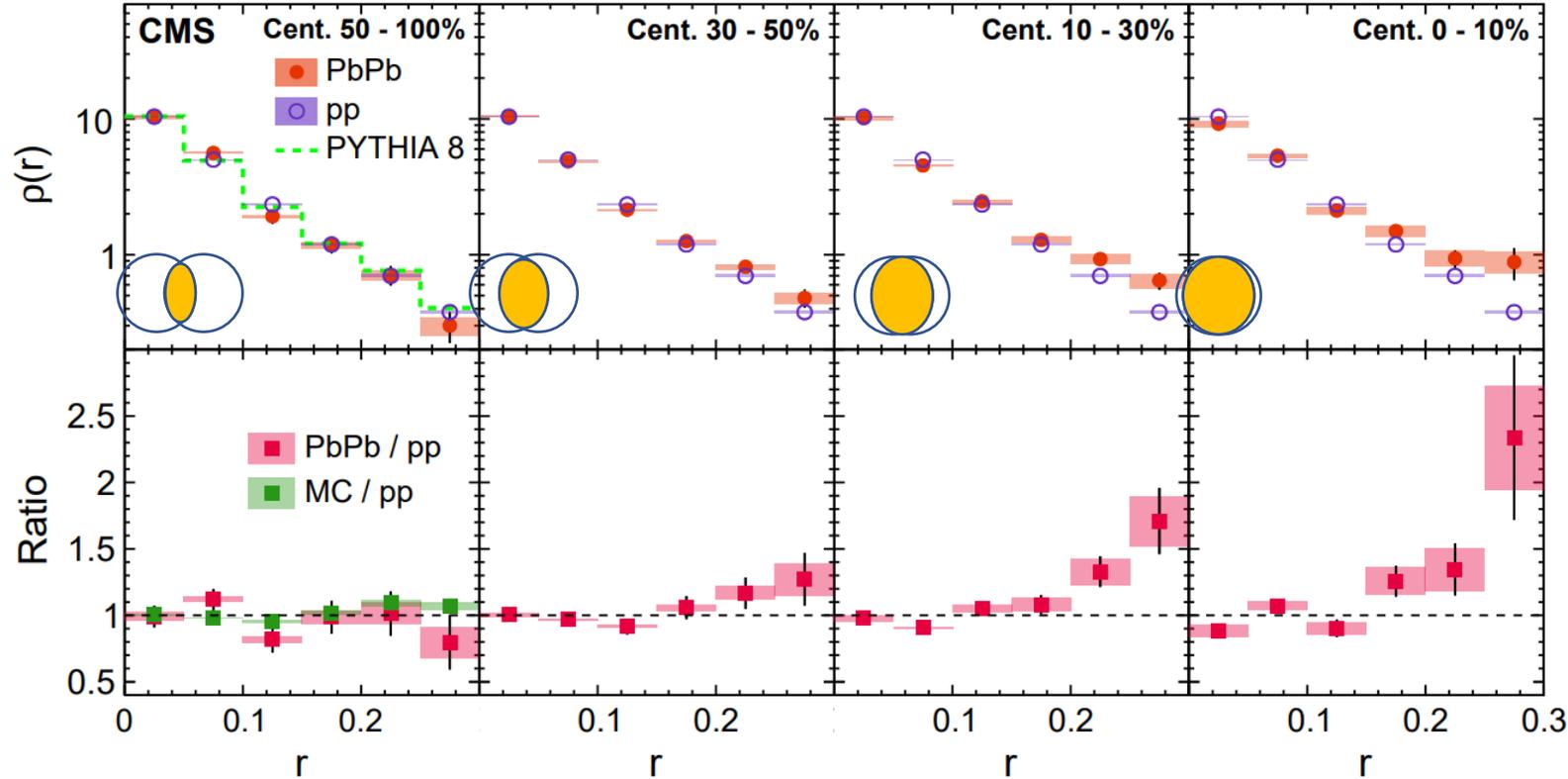
CMS-HIN-18-006

$\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$

PbPb $404 \mu\text{b}^{-1}$, pp 27.4 pb^{-1}

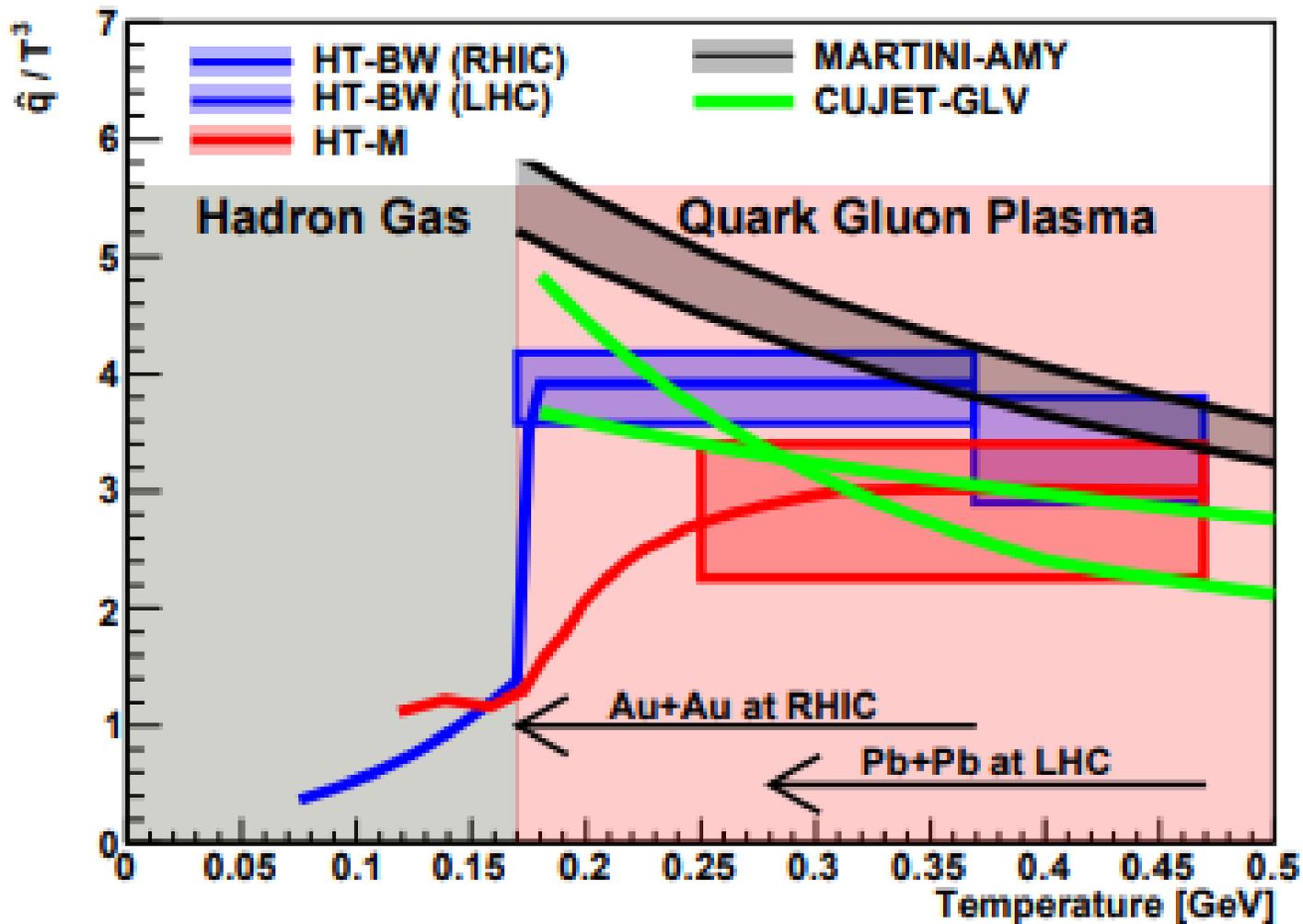
$p_T^\gamma > 60 \text{ GeV}/c$, $|\eta^\gamma| < 1.44$, $p_T^{\text{trk}} > 1 \text{ GeV}/c$

anti- k_T jet $R = 0.3$, $p_T^{\text{jet}} > 30 \text{ GeV}/c$, $|\eta^{\text{jet}}| < 1.6$, $\Delta\phi_{\gamma\text{jet}} > \frac{7\pi}{8}$



- 50-100% similar w/ p+p
- 0-10%: Large fraction of energy shifted to large R

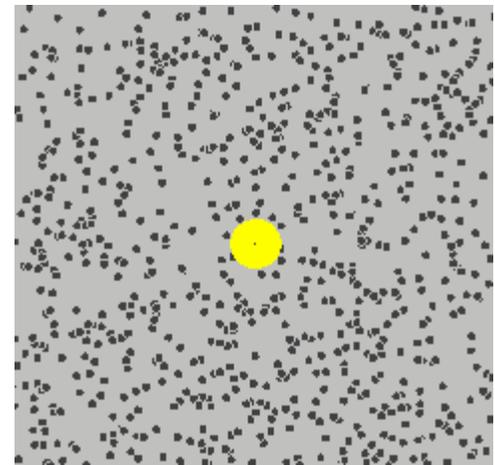
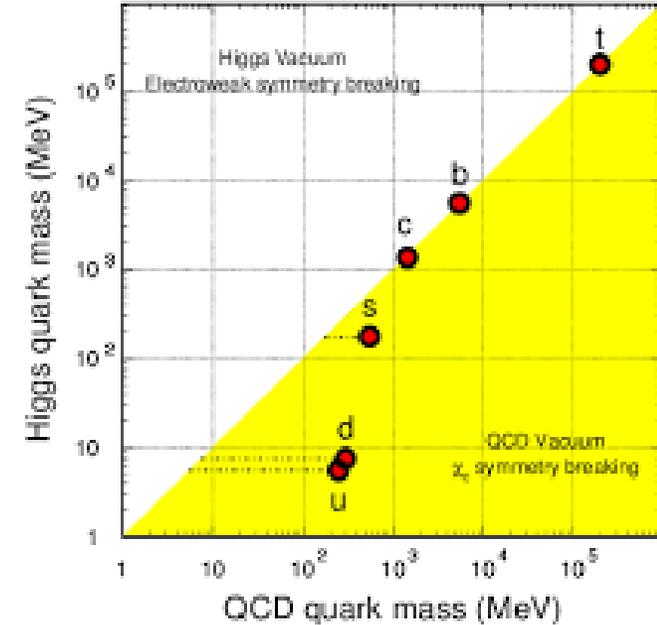
輸送係数 \hat{q} の温度依存性



- RHICとLHCの両方で精密測定が必要
 - モデルとの比較
- New heavy flavor/Jet data will provides further constraint on \hat{q}

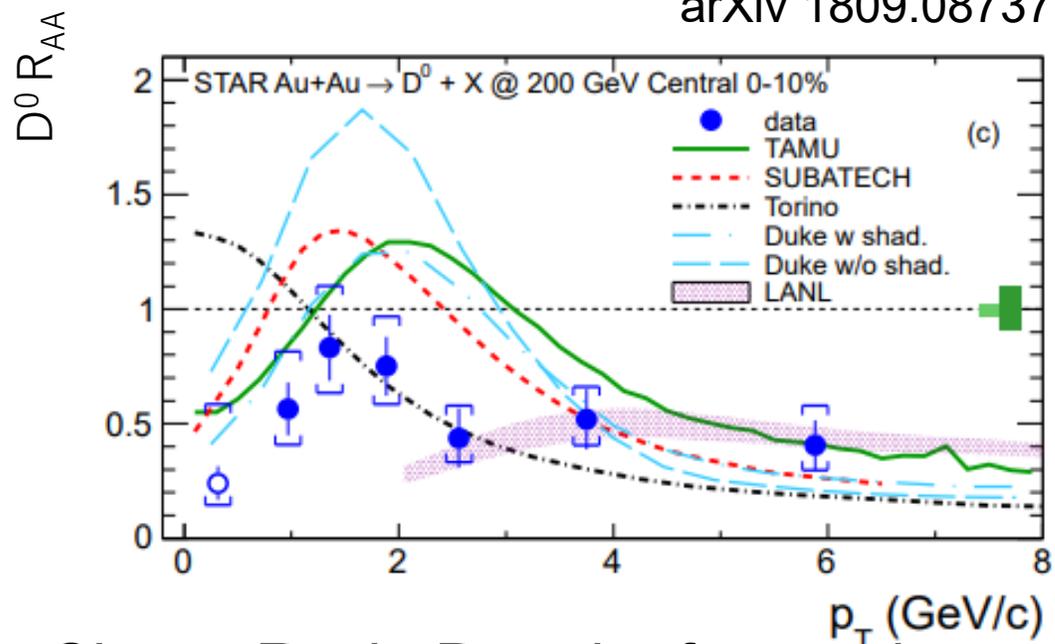
重いクォークによる測定

- 重いクォークのジェット
 - 破砕関数が固いため、HQハドロンがジェットエネルギーの大きな割合を持つ
- 重いクォーク粒子(D, B, Λ_c , Λ_b など)
- 重いクォークの良いところ
 - ハードプローブでありながら、運動量が低いものを選べる
 - QGPの構成要素ではない。(uds,g)
 - ブラウン運動の描像



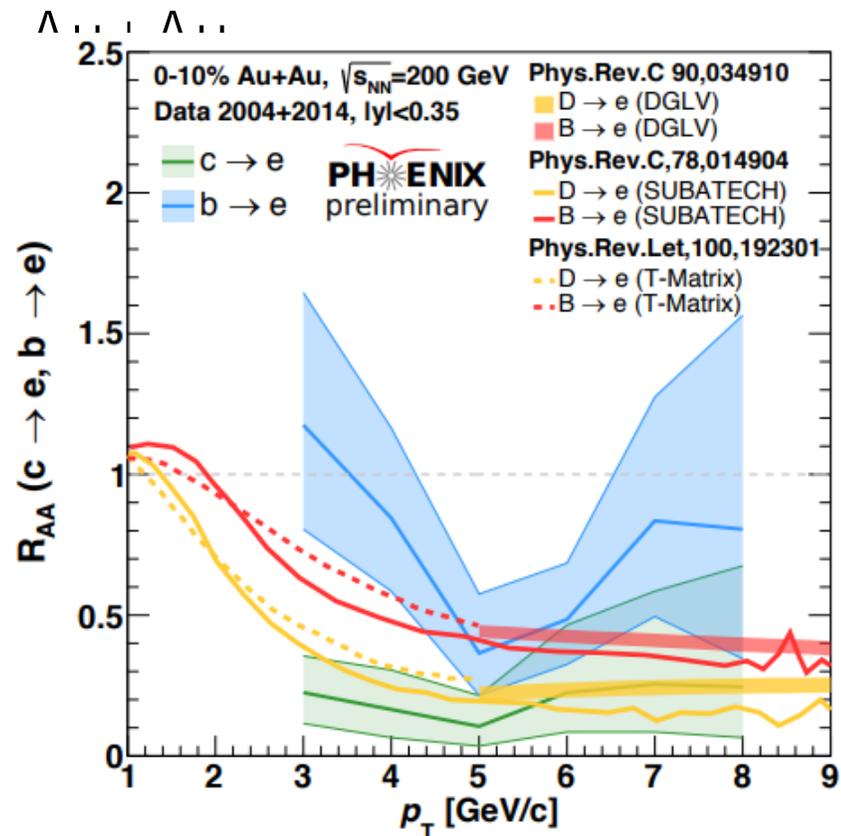
ボトム+チャーム R_{AA} at RHIC

arXiv 1809.08737



- Charm R_{AA} in D and e from c decays
 - They are consistent each other
- Bottom R_{AA} in e from b decays
 - $R_{AA}(b \rightarrow e) \sim R_{AA}(c \rightarrow e)$ in high p_T
 - $R_{AA}(b \rightarrow e) < R_{AA}(c \rightarrow e)$ in low p_T

$b \rightarrow e$ & $c \rightarrow e$ in 0-10%

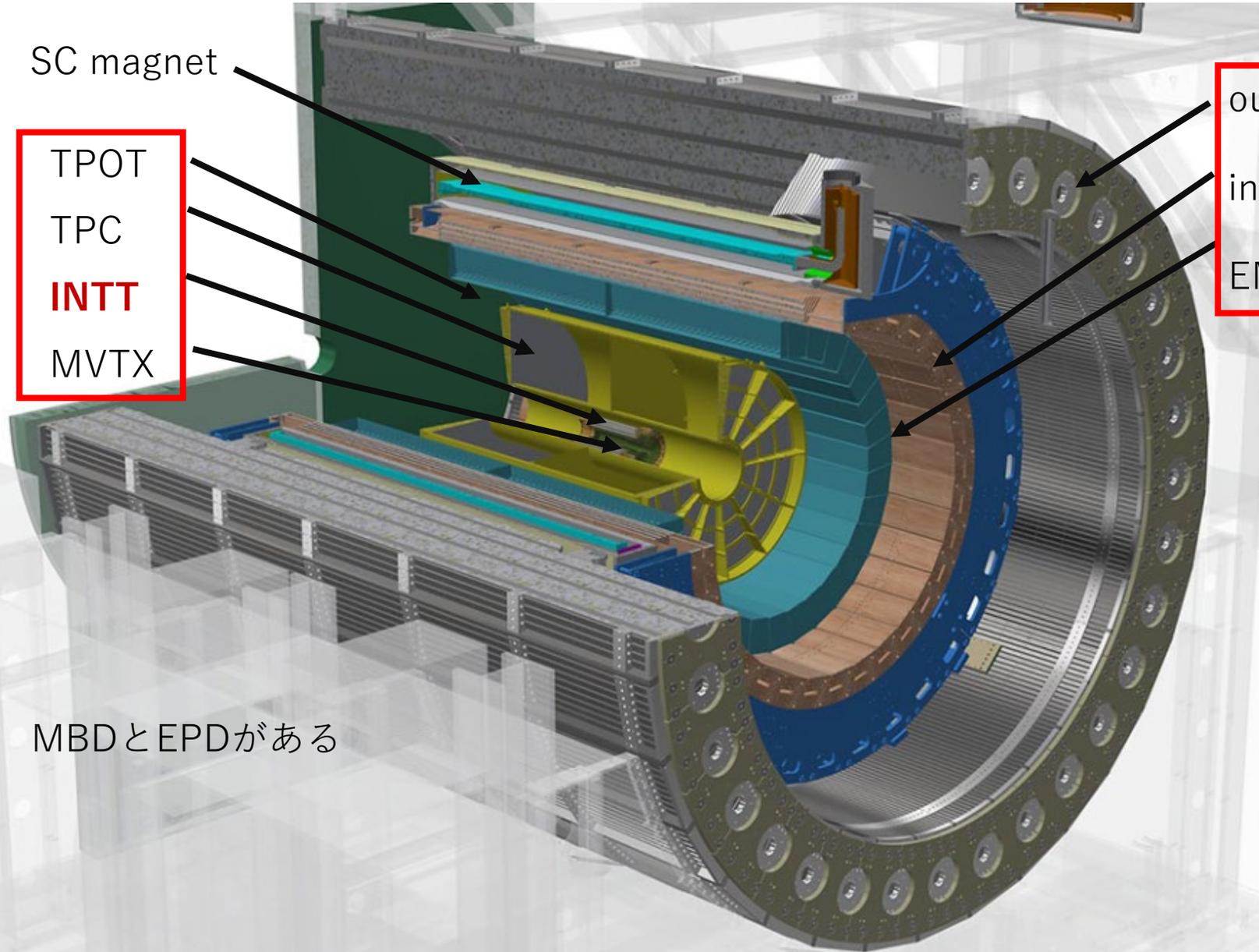


Flavor dependence at central Au+Au

- Models including Eloss are consistent

Suggest mass dependence of energy loss

SPHENIXにおけるハードプロローブ測定



SC magnet

TPOT

TPC

INTT

MVTX

outer HCAL

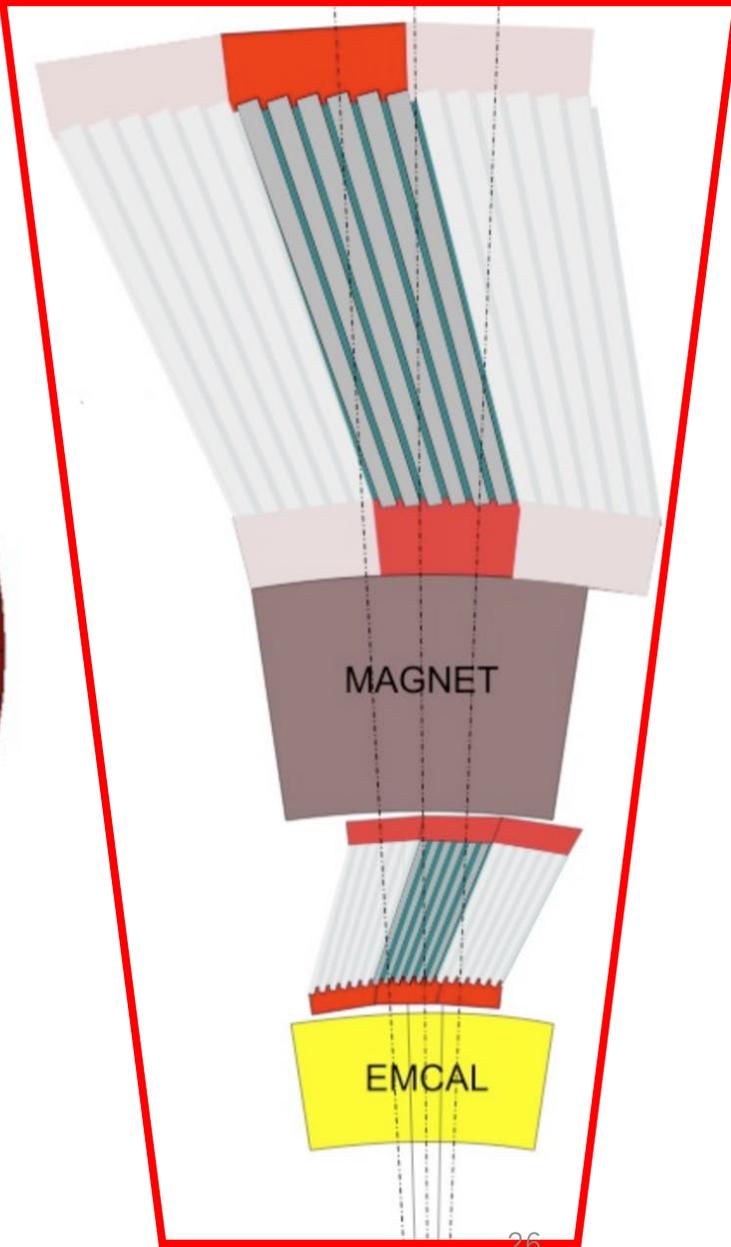
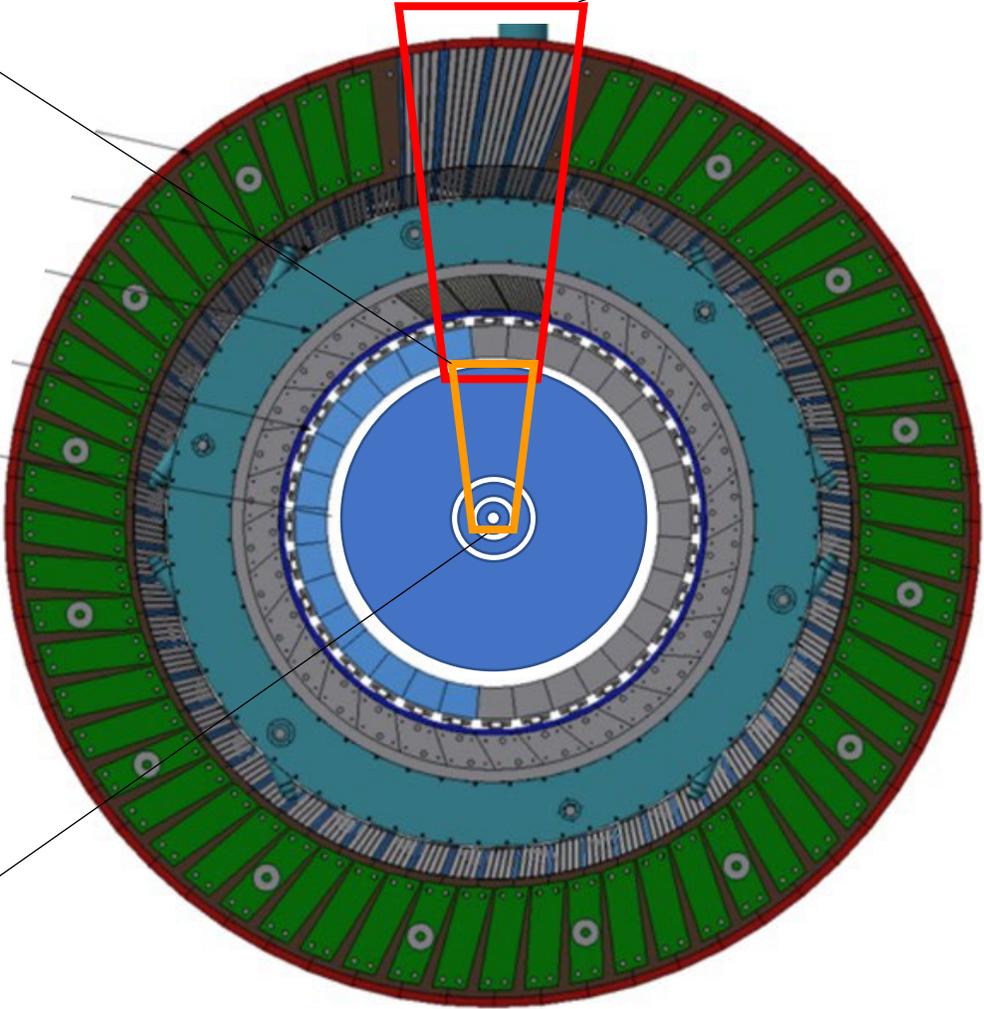
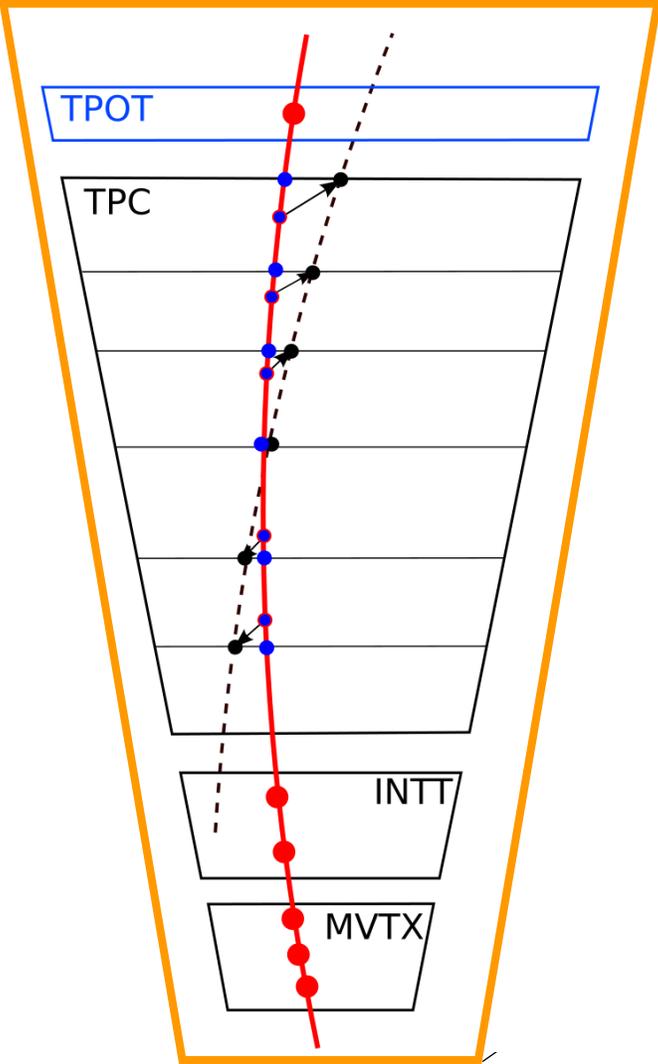
inner HCAL

EMCAL

MBDとEPDがある

- HCAL + EMCALによるRHIC初のフルジェット測定
- 連続読出しを用いた高速DAQ
- ジェットおよび γ の高精度測定を行う

荷電飛跡の測定



sPHENIXにおける重いクォークの測定

- 崩壊粒子による直接再構成

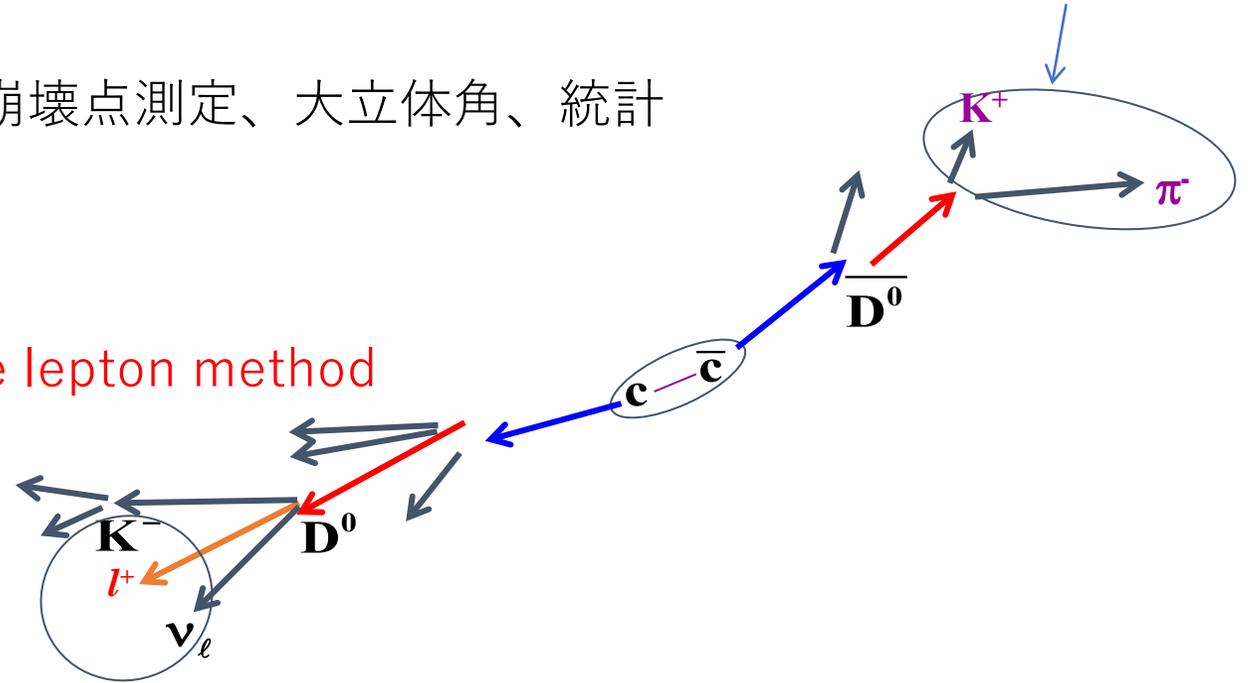
- $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ (few %)
- $B^0 \rightarrow J/\psi + K(X) \rightarrow e^+e^-$

崩壊点測定、大立体角、統計

D reco. method

$D^0 \rightarrow K\pi$ (BR : 3.9%)

Single lepton method



- 崩壊電子の測定

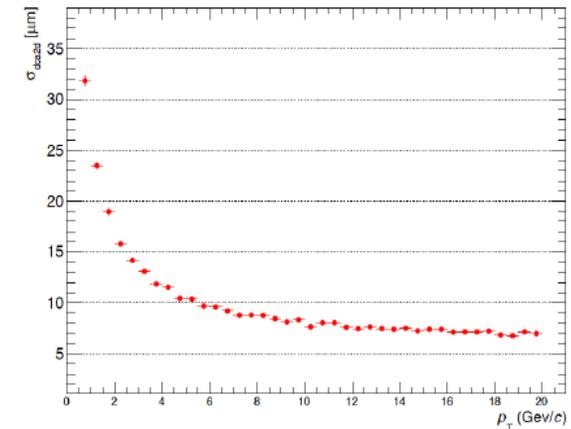
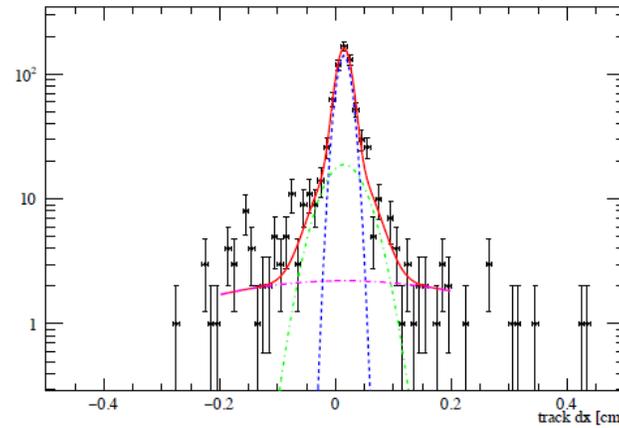
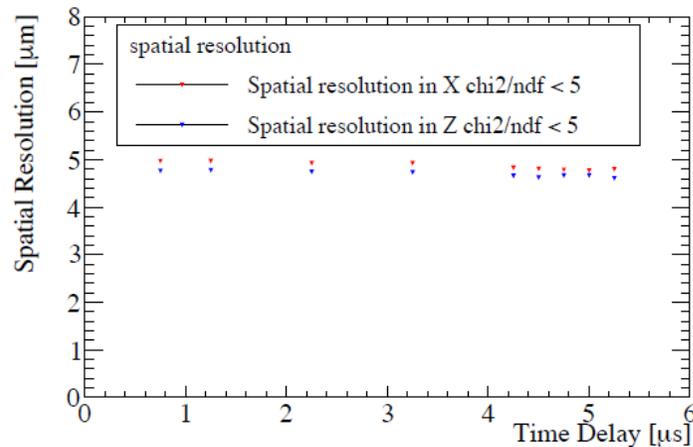
- Leptons, electrons, from heavy-flavor decays
 - Mixture of charms and bottoms
 - Electrons in PHENIX central arm
- Large Branching ratio

- $c \rightarrow e + X$ (BR : 9.6%)、 $b \rightarrow e + X$ (BR : 11%)

Unlocking flavor physics at sPHENIX



- What is needed to reconstruct decays?
 - Minimum: tracks and vertices
 - Extras: calorimeters, jet algorithms, PID
- sPHENIX uses KFParticle for HF reconstruction, wrapped in sPHENIX code for IO



Left – MVTX spatial resolution as a function of trigger delay from test beam

Middle – MVTX track resolution from test beam

Right – sPHENIX DCA_{XY} resolution from simulation

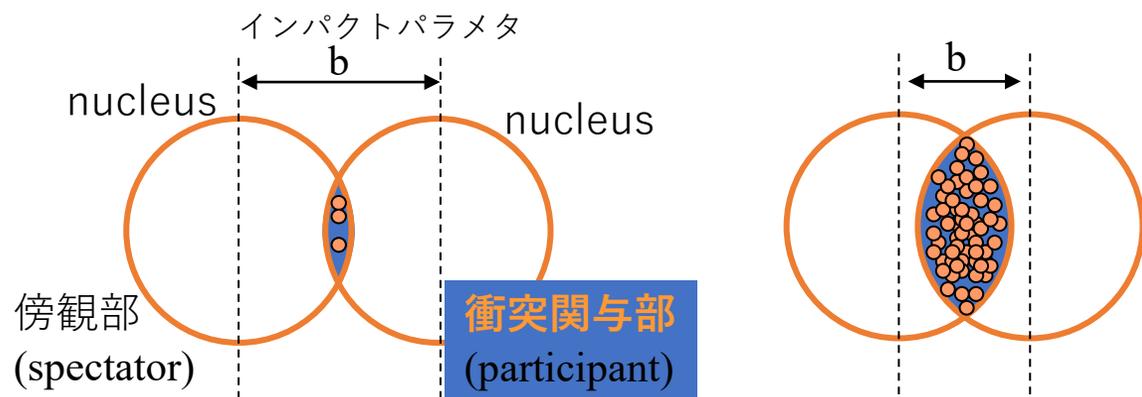
- 崩壊点 : MVTX
- 運動量 : TPC (MVTX + INTT)

阻止能測定でやらないといけないこと

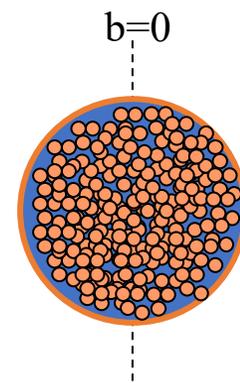
- 阻止能： dE/dx を測定し、その運動量や距離依存性を調べる。
- dE の測定： ジェット(軽いクォーク)、重いクォークなど
クォーク種を変えて測定
- L の測定： 重イオン衝突をより細分化して測定する。
 - Centralityをより詳細に測定する。
- どちらもINTTが活躍する。

L測定のためのイベント選別

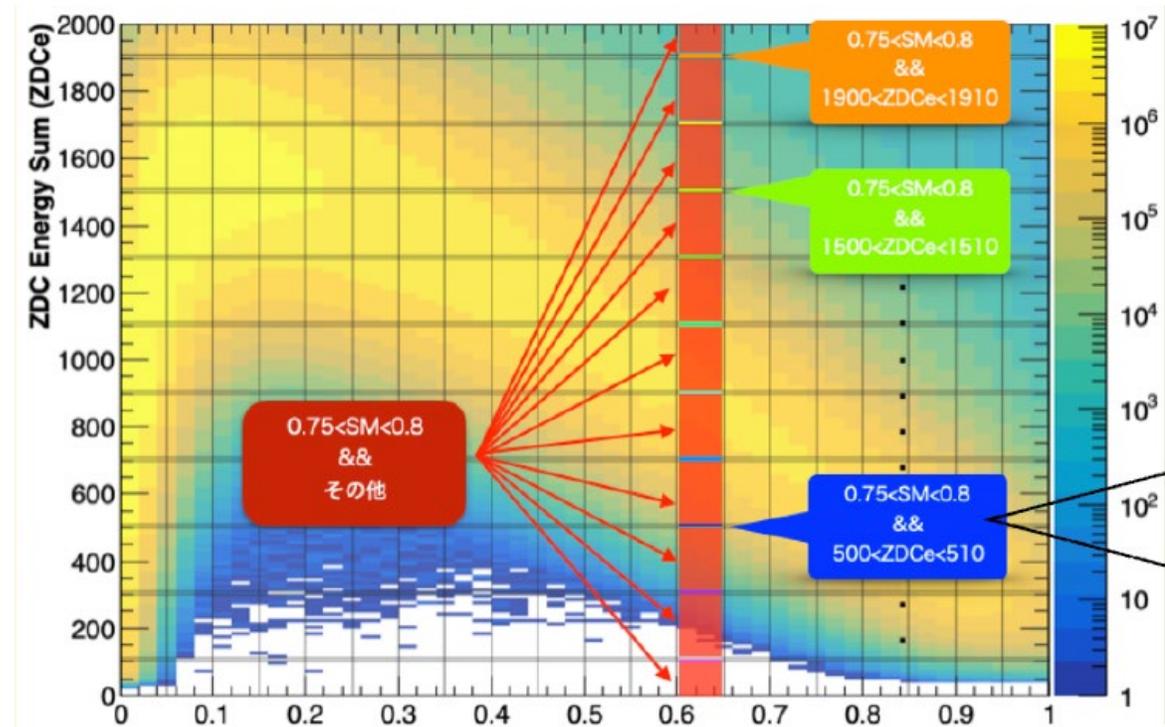
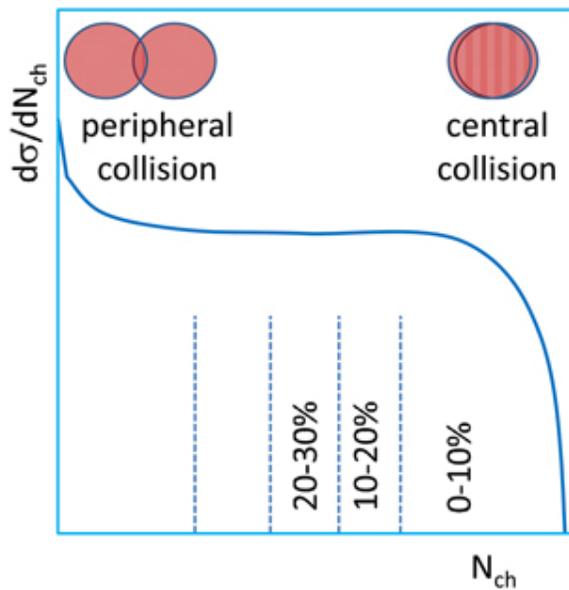
かすり衝突



中心衝突

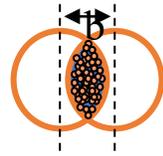
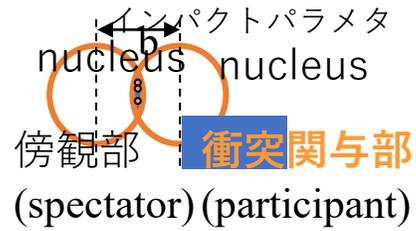


衝突中心度による発生粒子数が変わる

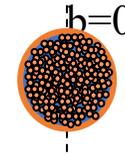


L測定のためのイベント選別

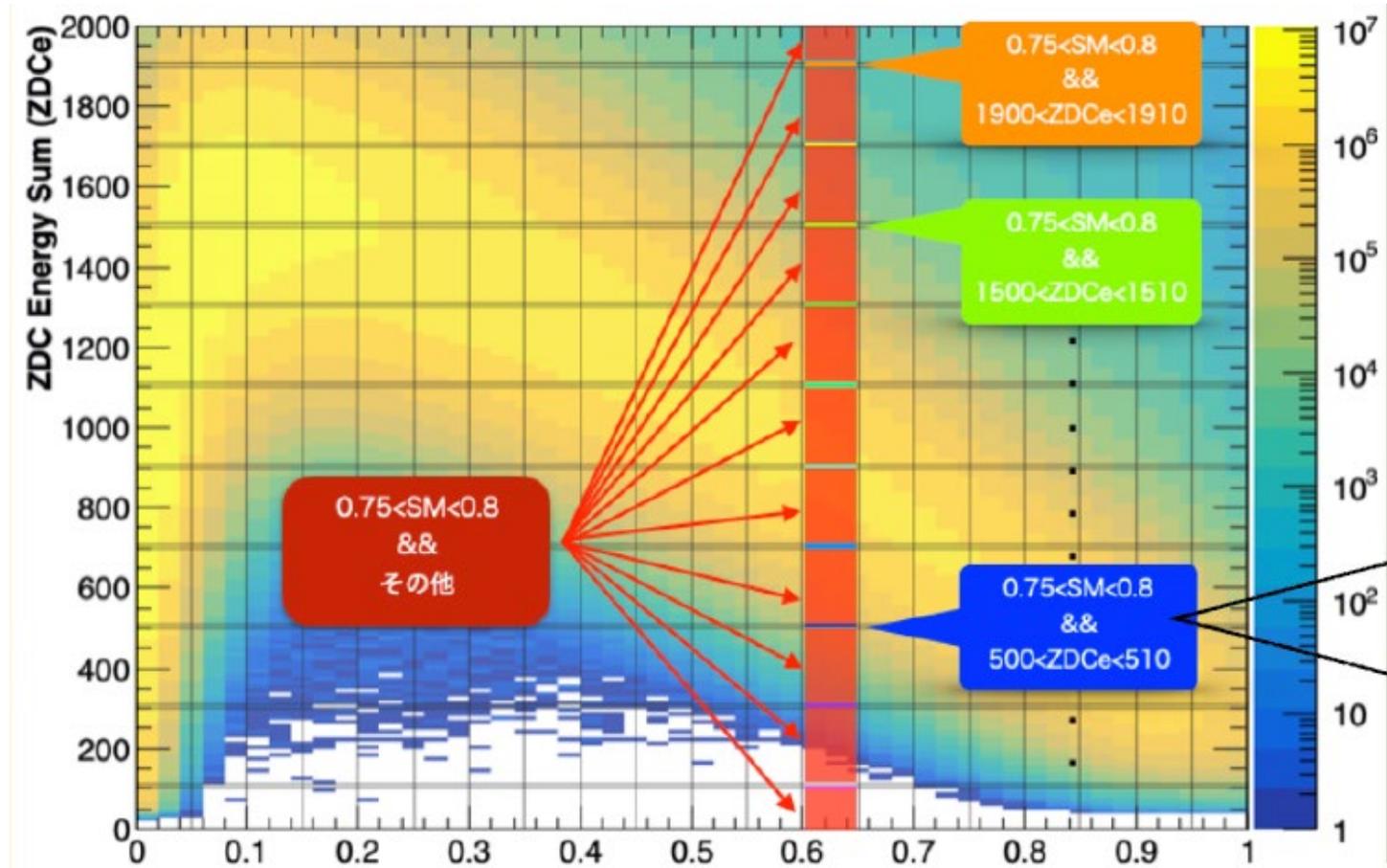
かすり衝突



中心衝突



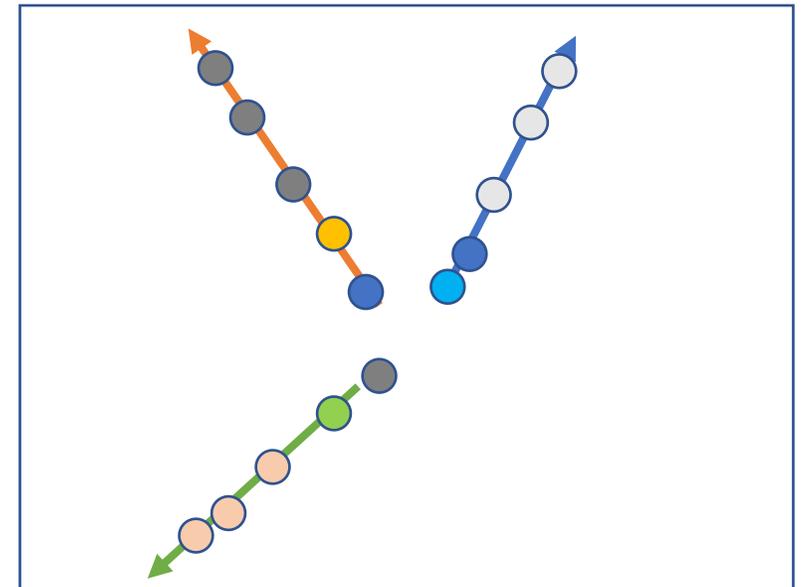
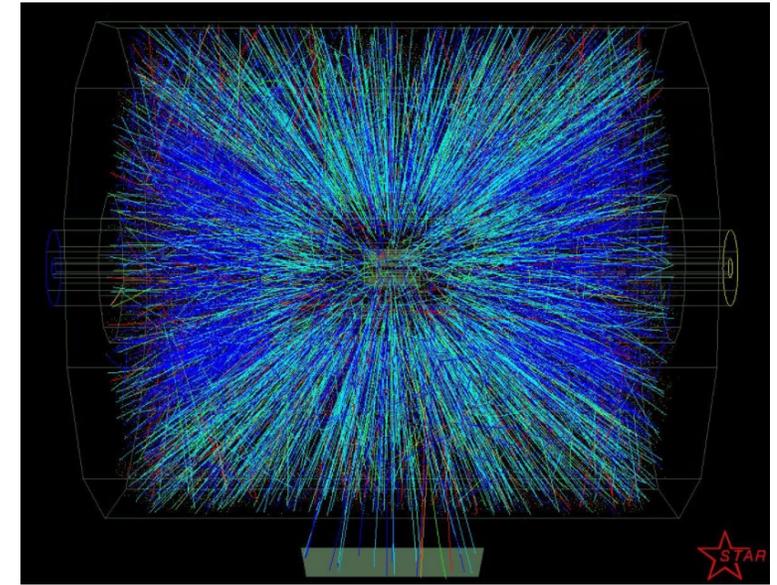
- 異なる検出器の相関を用いて、衝突した重イオンの形を詳細に検出
 - 高濱さんの解析の応用



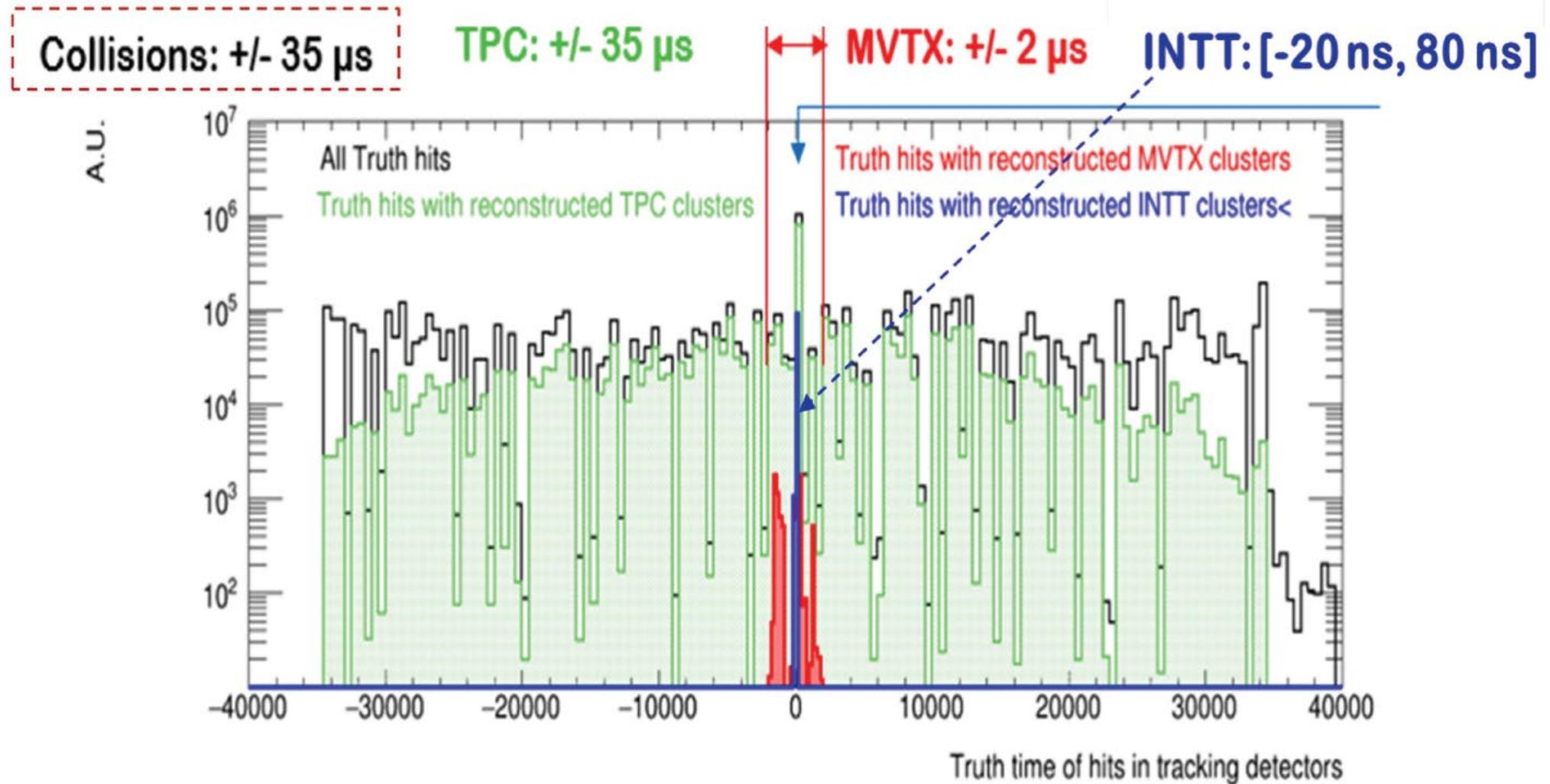
INTTが必要な理由

- ジェット測定・重いクォーク測定の両方で荷電粒子を検出する
- sPHENIXのストリーミング読出しとデータ処理時間により、検出器のヒットがいつ起こったかわからない。
- 最大でビーム交差の毎(106ns)に連続して衝突が起きる。
 - 平均20kHzぐらい。
- どのビーム交差で生じた粒子かを区別する必要がある。
できなければ、衝突事象が混じってしまう。
なにがおきたか理解できなくなる

衝突で生じる粒子



検出器毎の時間分解能



データ処理時間：INTT = 1clk, MVTX ~ 40, TPC ~ 700
INTTだけが、衝突を区別できる

さいごに

- sPHENIXではハードプローブによるQGP物性測定を行う。
 - 阻止能の起源や q^{\wedge} のL依存性を決定する。
- そのために、ジェットや重いクォークの測定が必須
 - イベント選定によるLの測定も重要
- INTTはそのための重要な検出器
- みなさんの力が必要です。
 - QGP物理は分からないことが多い。 自分の能力・想像力・創造力で
未知の現象を解明してほしい