

ハードプローブの最先端

鳥井 久行 (東大CNS)

Heavy Ion Café/Pub 合同研究会
「QCD物質の最先端」 at 名古屋大学

Contents

1. 実験サマリー

- 驚くべきことに、今QMで全ての実験結果が統一の見解を出してきた。実験結果サマリーを兼ねて。
- ジェット測定の実験的困難。本当は大変。

2. クエンチングの仕組み

- pQCDの破綻危機？

3. パarton同定が鍵となるか？

- クォークかグルーオンか？
- リッジはfluctuationなんかじゃない(by STAR)？
- QGPの再加熱は見えている？

4. low-pTハドロンRAAの謎

- Photon v_2 について、

Contents

1. 実験サマリー

- 驚くべきことに、今QMで全ての実験結果が統一の見解を出してきた。実験結果サマリーを兼ねて。
- ジェット測定の実験的困難。本当は大変。

2. クエンチングの仕組み

- pQCDの破綻危機？

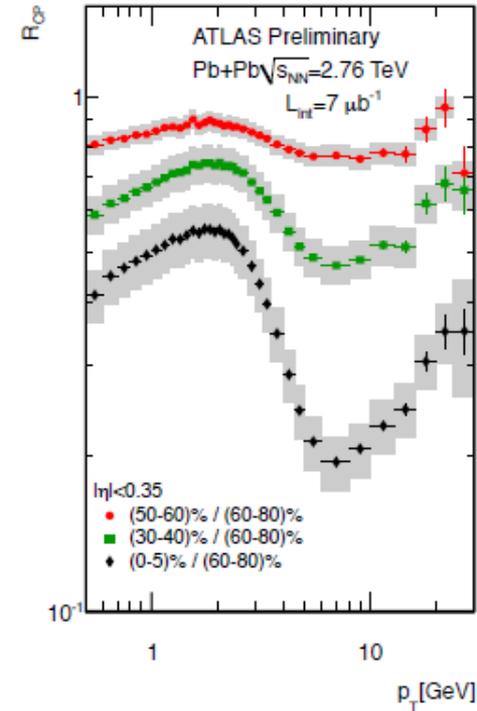
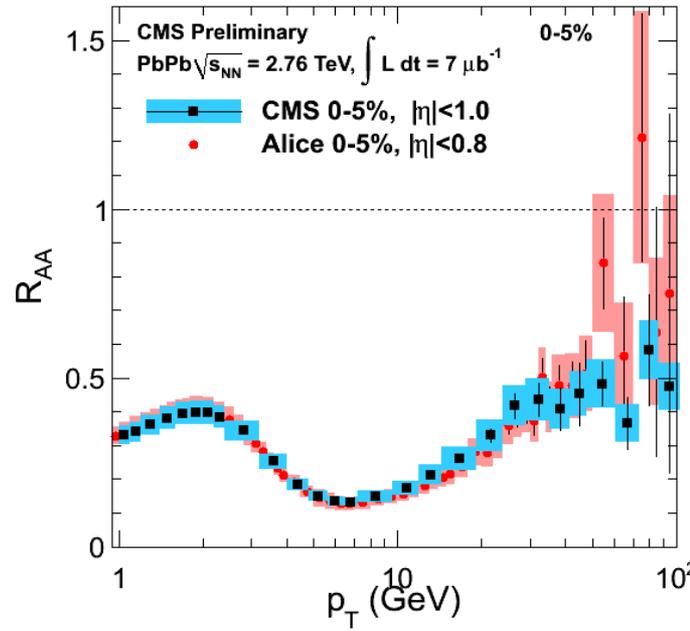
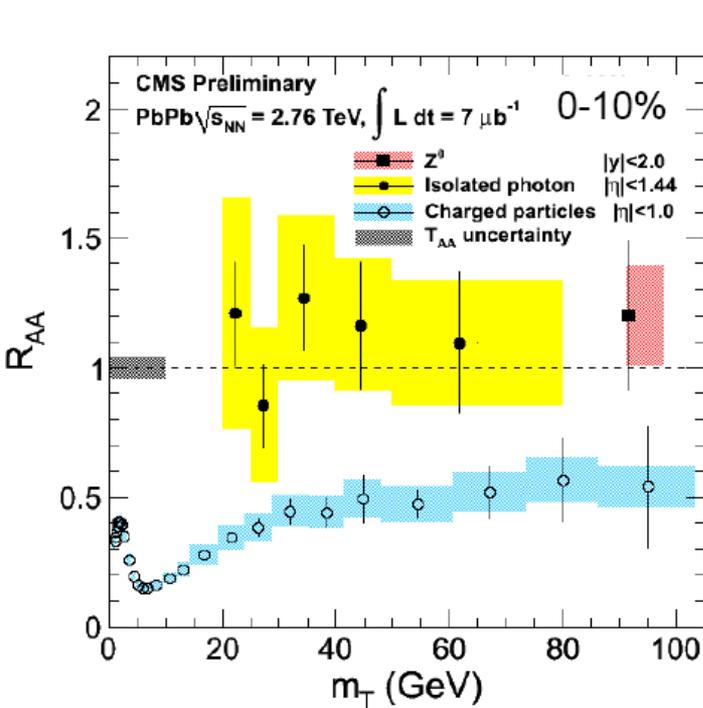
3. パarton同定が鍵となるか？

- クォークかグルーオンか？
- リッジはfluctuationなんかじゃない(by STAR)？
- QGPの再加熱は見えている？

4. low-pTハドロンRAAの謎

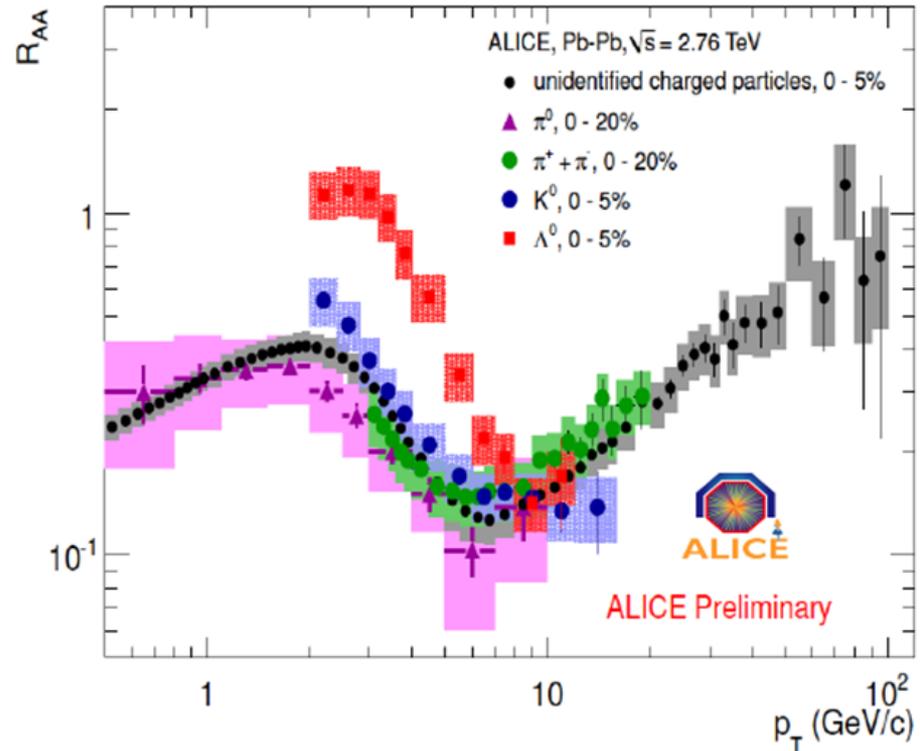
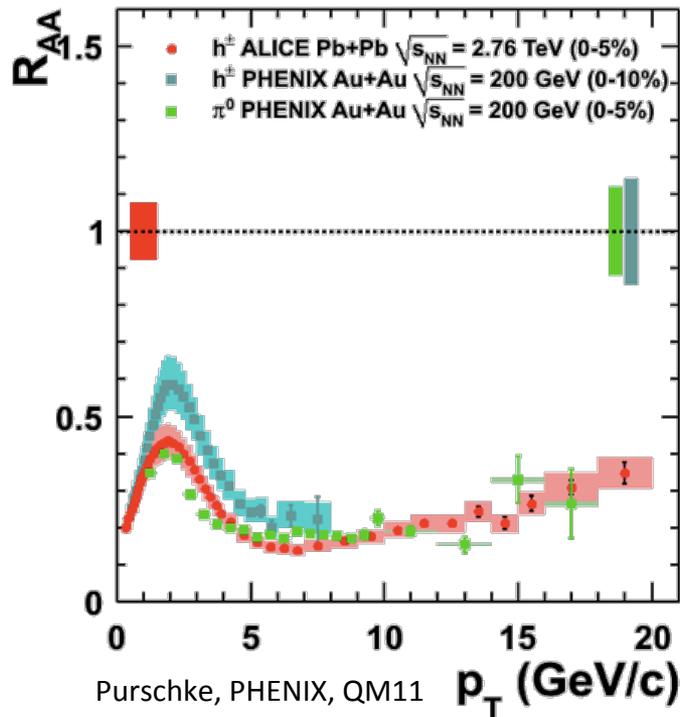
- Photon v_2 について、

実験サマリー: Single Particle



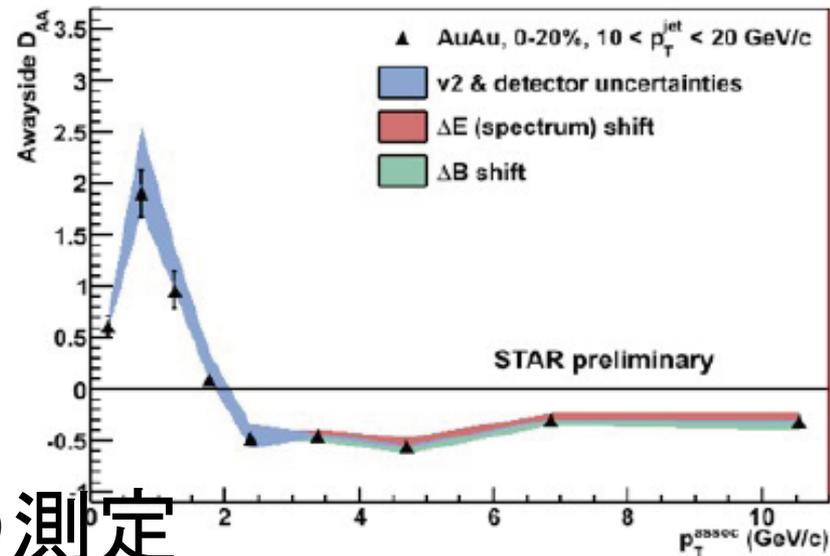
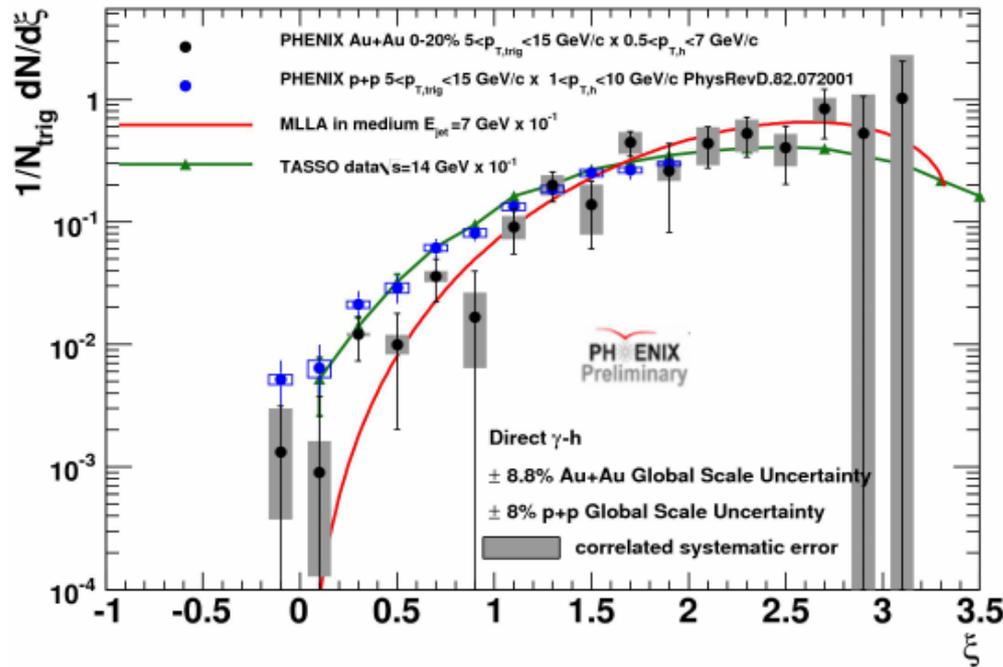
- Direct photon, Z^0 はクエンチしていない (CMS)
 - Ncoll scalingが正しい。
- 8GeV/c(LHC)以上から上昇 (CMS/ALICE/ATLAS)
 - $R_{AA}(100\text{GeV}/c) = \sim 0.5$ 、後述するJet RAAと同じ

実験サマリー: Identified Hadron



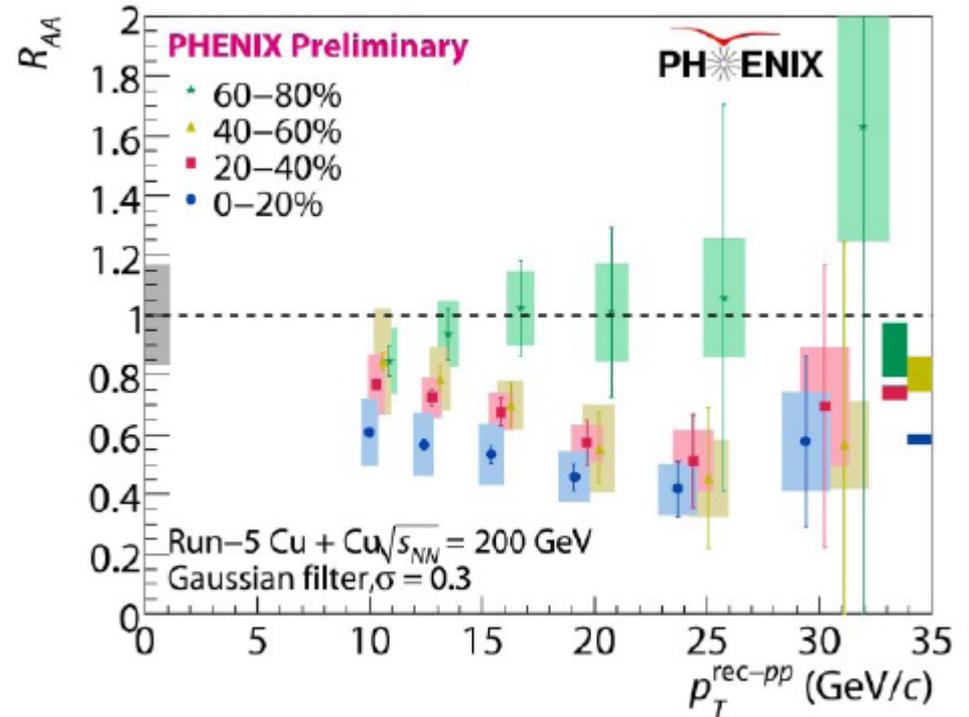
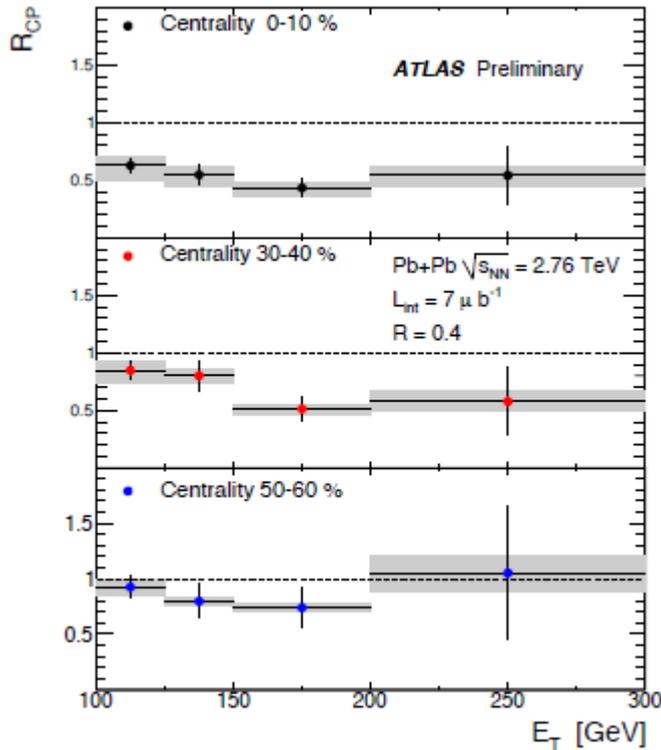
- RHICとLHCで8GeV/c以上では同じ
 - 温度、密度への依存性は少ない
- 8GeV/c(LHC)以上で R_{AA} は粒子種非依存(LHCで初)
- 2GeV/cのピークは大きく違う。(最後の方でコメントします)

実験サマリー: γ -hadron or jet-hadron



- Fragmentation Functionの測定
- Away-sideハドロンの収量DAA=0.5
 - Jet RAAと同じ

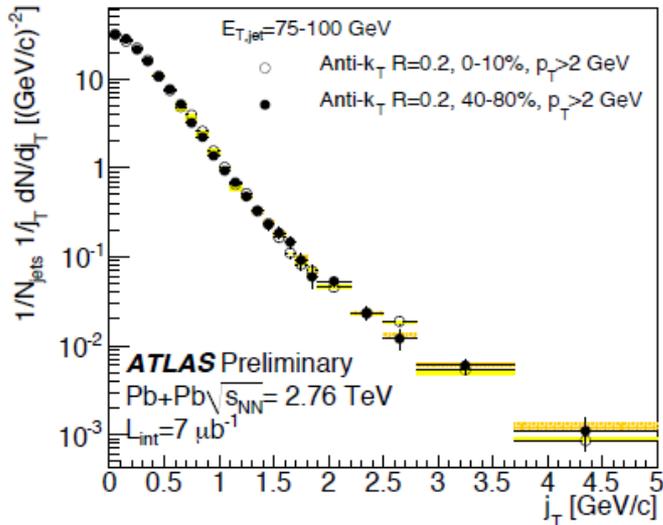
実験サマリー: Single Jet RAA/RCP



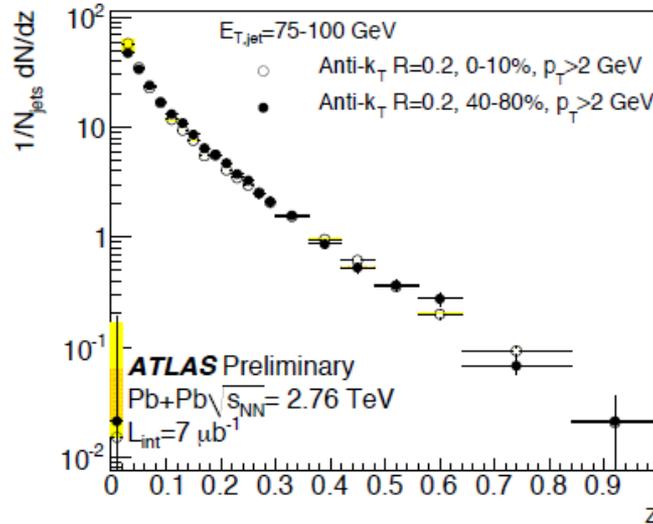
- $R_{AA} = 0.5$
 - Cu+Cu@RHIC と Pb+Pb@LHC で同じ = 温度、密度への依存性は少ない

実験サマリー: Single Jet Shape

Fragmentation Functions



p_T cut to suppress underlying event,
and background subtracted
using region outside jet cone
Yellow bands represent uncertainties
from background subtraction

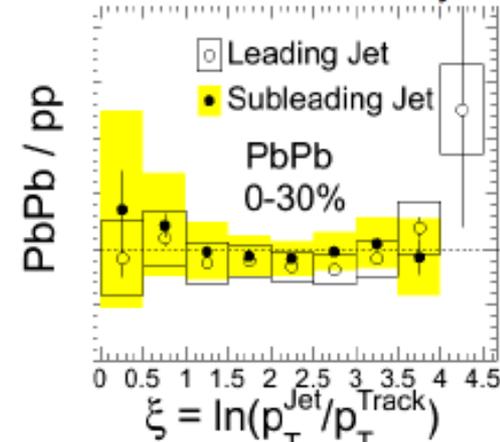


No strong modification of
fragmentation functions
between peripheral and central:
surprising in a radiative
energy loss scenario?

$$\sqrt{s} = 2.76 \text{ TeV}$$

$$\int L dt = 260 \text{ nb}^{-1}$$

CMS Preliminary

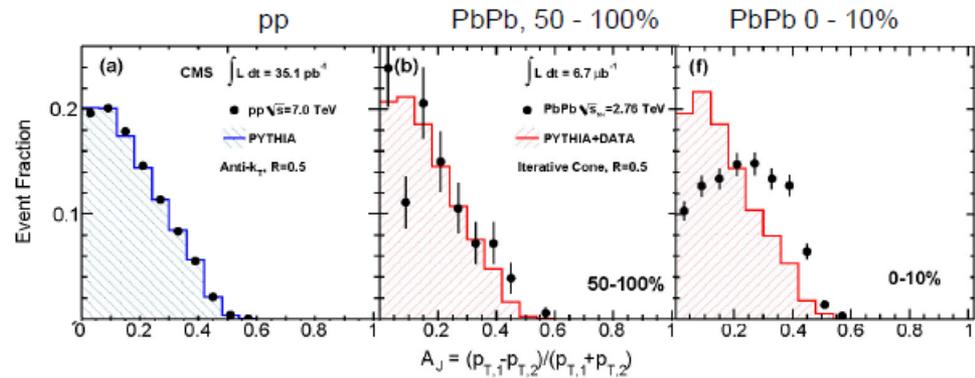
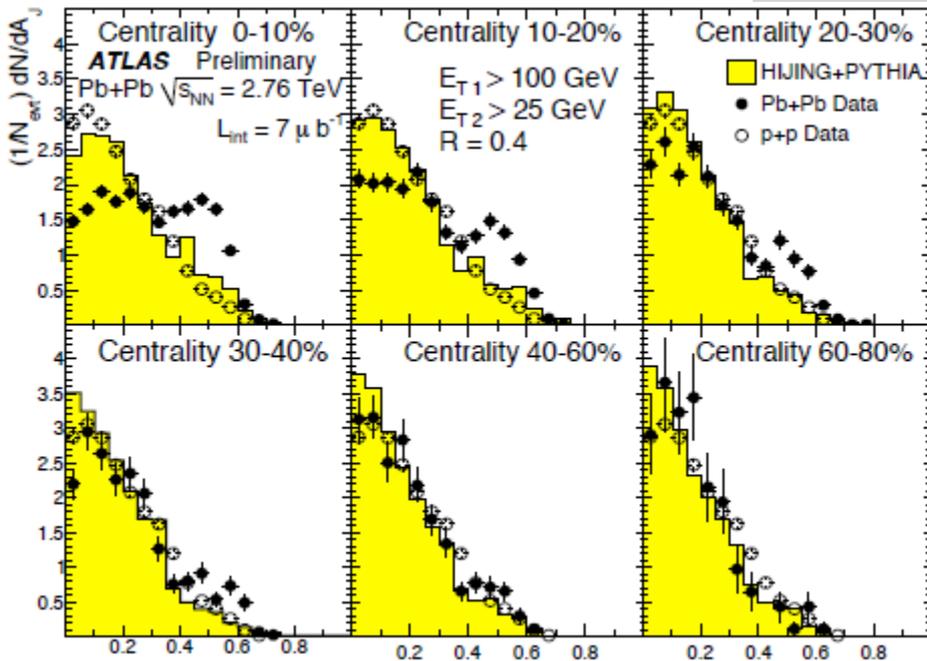


- ジェット(ハードコア)内の構造は変化なし: $p+p = A+Au$
 - 縦、横方向共に。
 - まるで真空中($p+p$)で破砕化しているかのよう。

実験サマリー: Dijet Energy

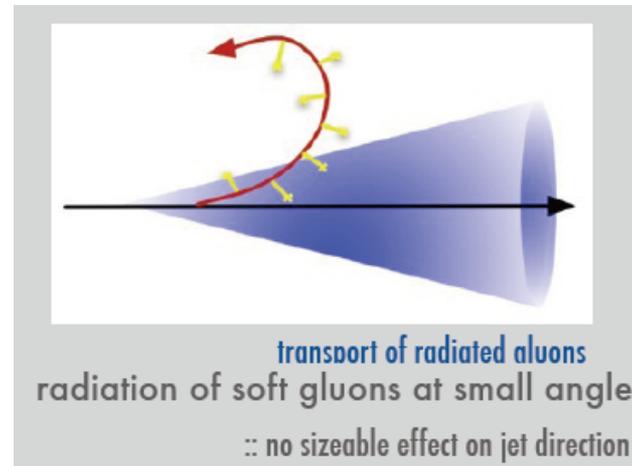
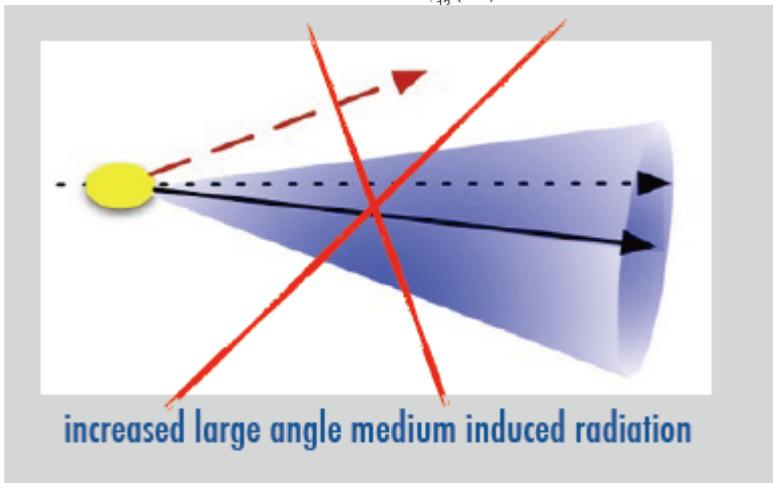
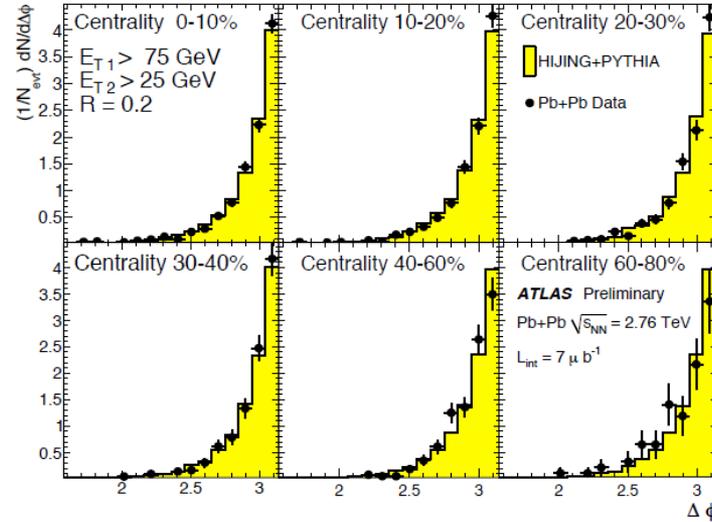
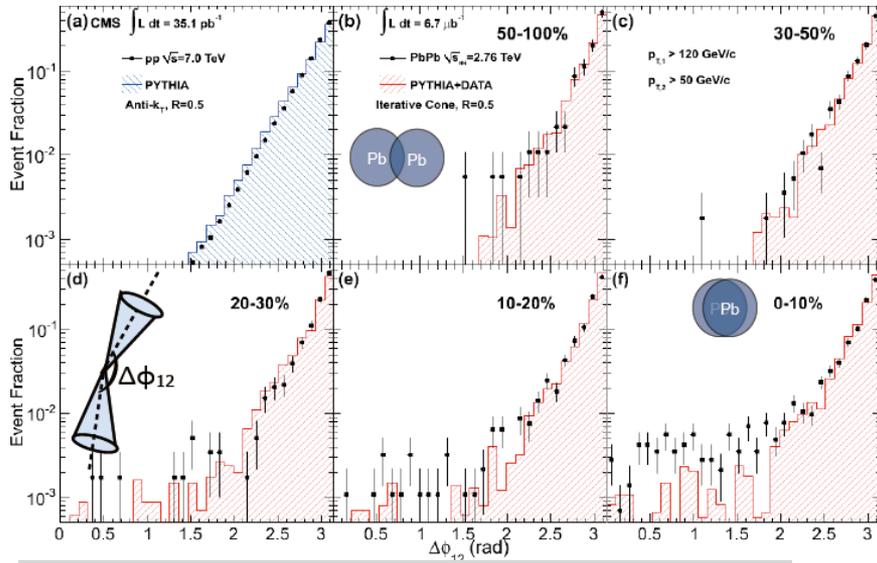
$$A_J = \frac{p_{T,1} - p_{T,2}}{p_{T,1} + p_{T,2}}$$

	int. luminosity [μb^{-1}]	R	E_{T1}^{min} [GeV] [leading jet]	E_{T2}^{min} [GeV] [recoiling jet]	$\Delta\phi^{\text{min}}$	
ATLAS	1.7	0.4	100	25	$\pi/2$	1011.6182, PRL (2010)
CMS	6.7	0.5	120	50	$2\pi/3$	1102.1957



- ジェットのバランスは大きく崩れる。
- パートンのエネルギーロス

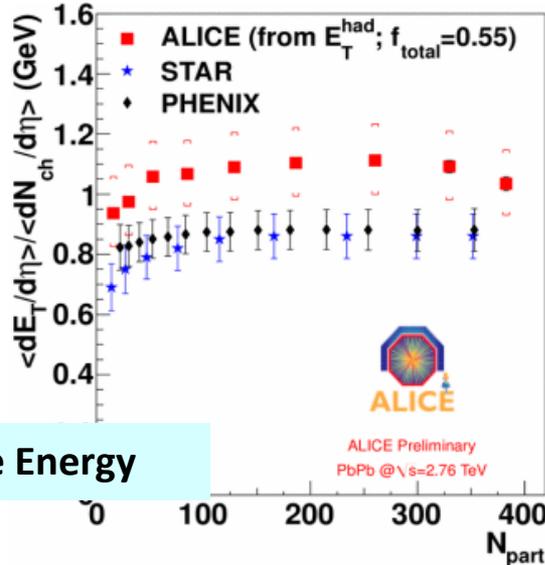
実験サマリー: Dijet Angle



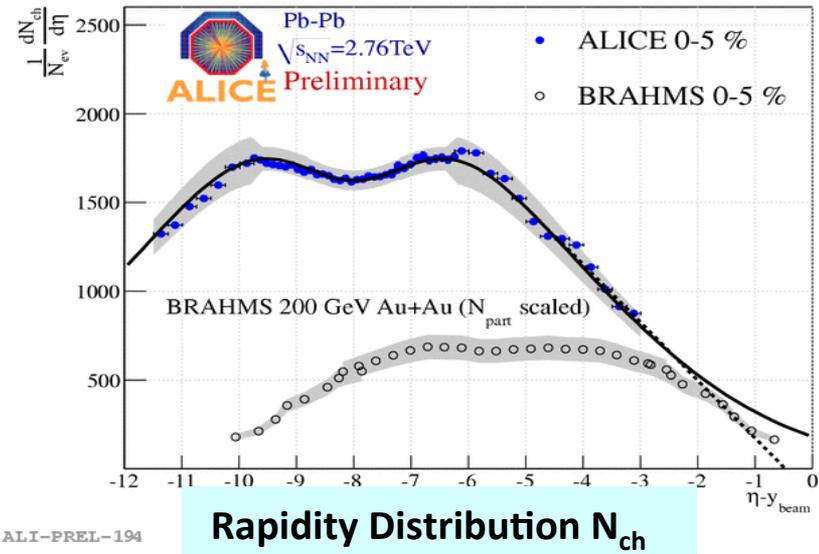
No Stronger angular deflection!!! → ソフトグルーオン

ジェット測定の実験的困難

- バックグラウンド粒子 = 1GeV/個 x 600(RHIC)/1600(LHC)個(central)
- $R < 0.4$ の範囲内に40GeV(RHIC) or 100GeV(LHC)のバックグラウンド



Transverse Energy

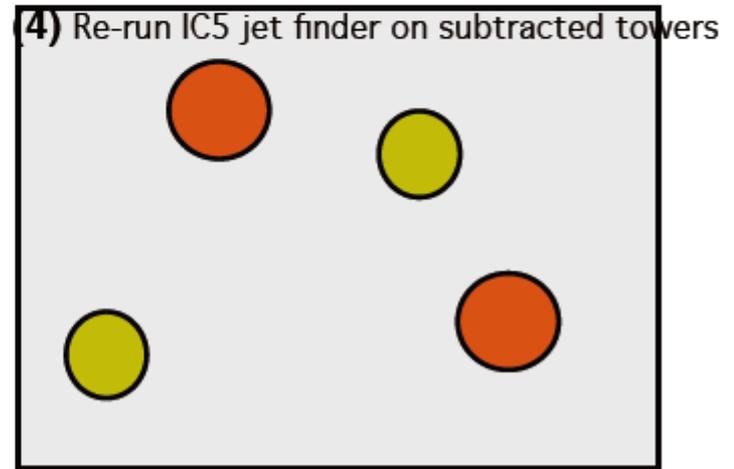
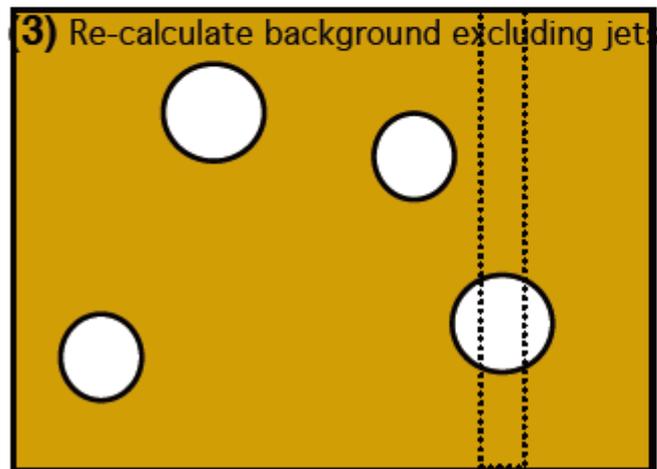
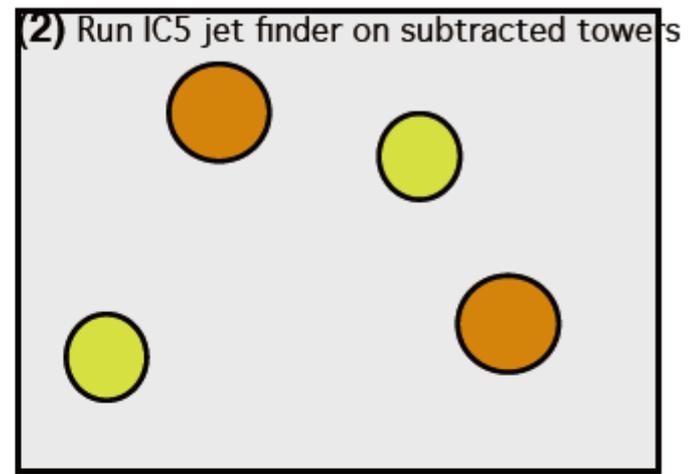
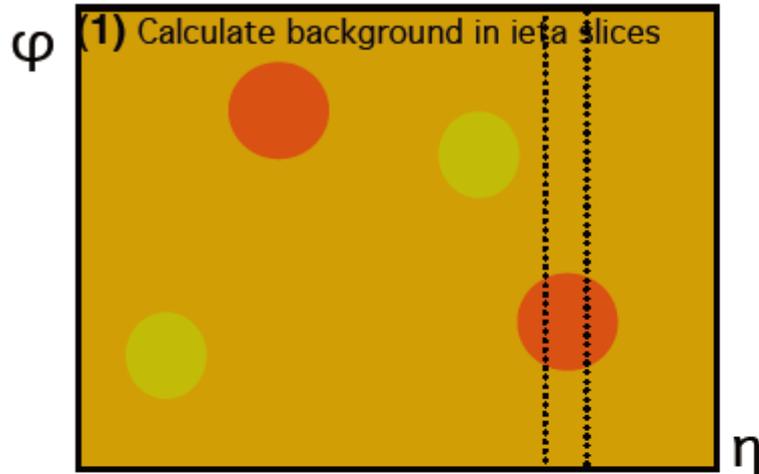


Rapidity Distribution N_{ch}

- 当然バックグラウンドよりも小さいジェットは測定が困難。バックグラウンドの fluctuationの補正が重要。↔ Leading Hadronは見つけやすい。
- 失われたエネルギー(数十GeVが $R > 0.8$ の範囲)はバックグラウンドに埋れている
 → バックグラウンドと失われたエネルギー、全て(荷電のみ)を用いて、エネルギーバランスがどう変化するかを調べる。

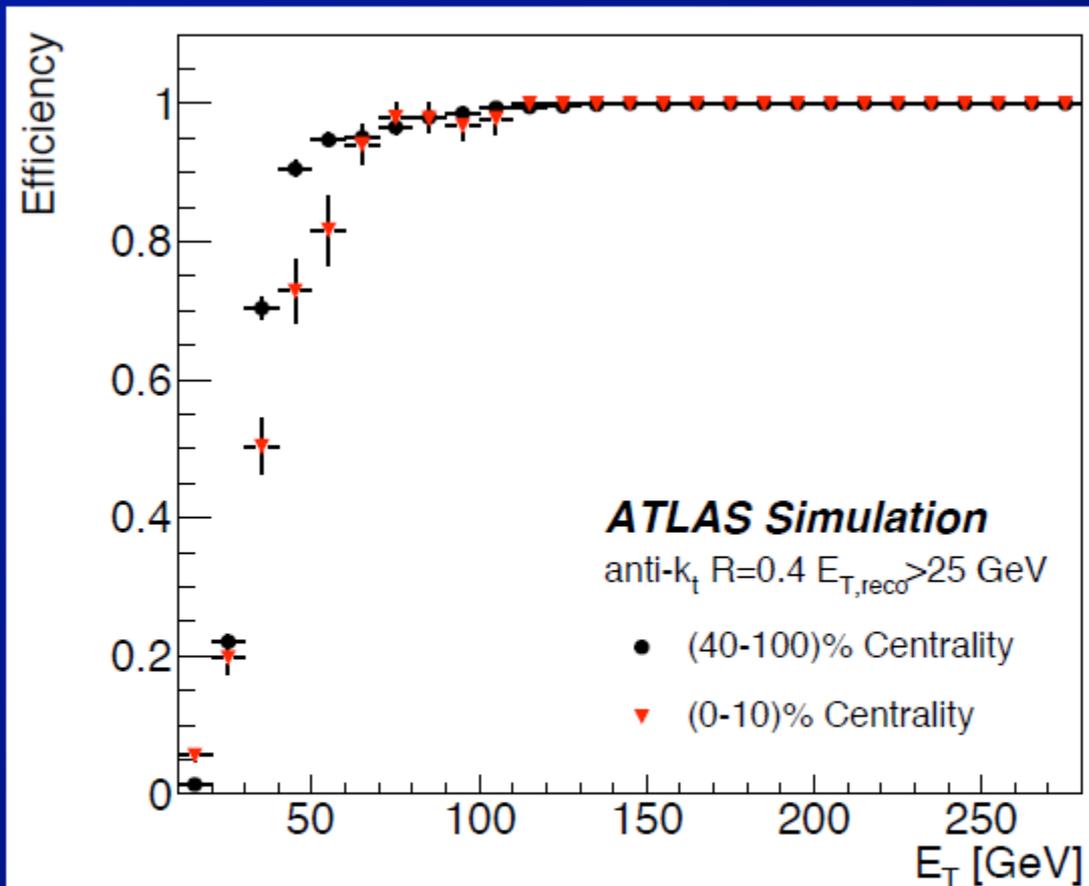
$$p_T^{\parallel} \equiv \sum_{\text{tracks}} -p_{T,\text{track}} \cos(\phi_{\text{track}} - \phi_{\text{leading jet}})$$

Jet Algorithm



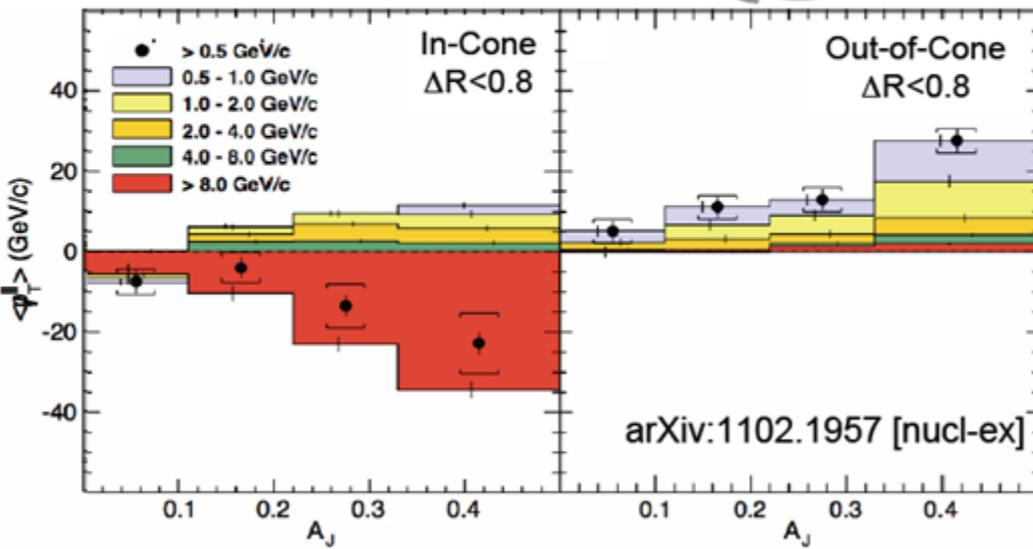
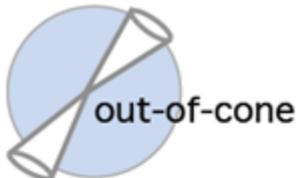
O. Kodolova, I. Vardanian, A. Nikitenko et al., Eur. Phys. J. C50 (2007)

Jet Reconstruction Efficiency



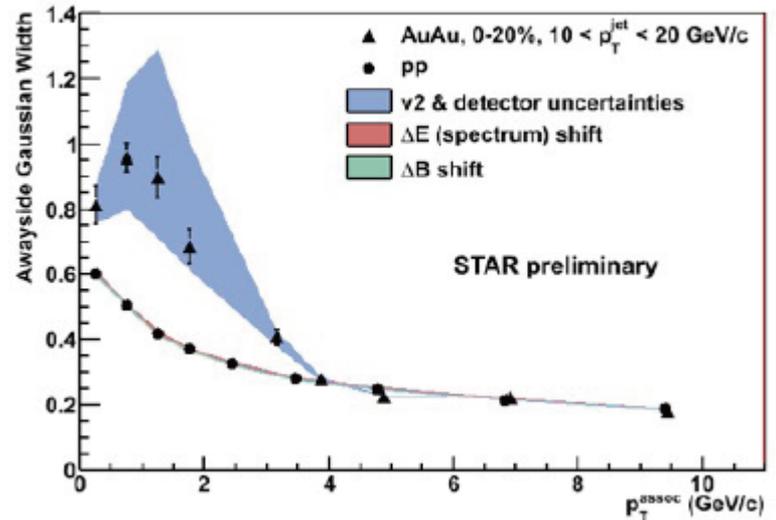
- **Anti- k_t $R = 0.4$, jet reconstruction efficiency**
– truth match $\Delta R < 0.2$

失われたエネルギーへ何処へ？



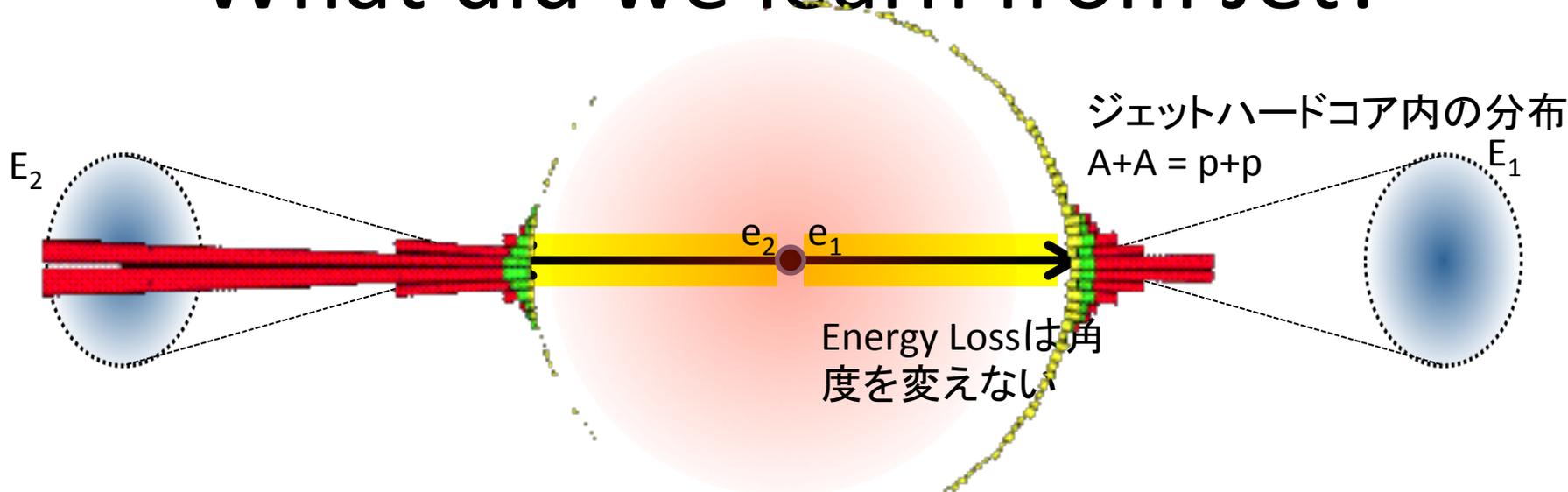
- CMS
- ジェットバランス平均=0.2
 - Leading Jet : 120GeV
 - Second Jet : 平均 80GeV
- 残り40GeVが失われたことになる。
 - 20GeVは $R>0.8$ の外側に0.5-1.0GeV/cのハドロン
 - 10GeVは $R>0.8$ の外側に1-8GeV/cのハドロン
 - 10GeVは $R<0.8$ の内側に<8GeV/cのハドロン

Away side Gaussian width



- STAR
- ジェットハドロン相関
 - Leading Jet : 10GeV-20GeV
 - Hadron : <10GeV
- 幅
 - >4GeVで $R<0.3$: $p+p = A+A$
 - <4GeVで $R=0.8(A+A)$

What did we learn from Jet?



Lesson1: エネルギー減衰: 収量減衰 : $e_1 < E_1$ and $e_2 < E_2$, thus $E_1 \neq E_2$

ジェットもハドロンも0.5のRAA

Single Hadron ($\sim 100\text{GeV}/c$) (ALICE, CMS)

Single Jet (ATLAS, PHENIX)

光子やジェットタグハドロン (PHENIX/STAR/ALICE)

ダイジェットエネルギーはバランスしていない。(CMS/ATLAS)

→ 目新しくはない
RHIC/LHCでの変化は無い
ハードとソフトの境目 $\sim 8\text{GeV}$

Lesson2: ジェットの方向に影響を与えない : $e_1 // E_1$ and $e_2 // E_2$

No angle deflection (CMS, ATLAS)

→ ハードなグルーオン放射を含むpQCD描像は間違い。

Lesson3: 真空中と同じようにフラグメントする。(pT > 8 GeV/c @ LHC)

No change in lateral and longitudinal shape (ATLAS/CMS)

→ 破碎化は外で

Lesson4: 失われたエネルギーは外側へ (R > 0.8)

< 8 GeV でソフト粒子生成 (CMS/STAR)

→ 再加熱? マッハコーン? 15

Contents

1. 実験サマリー

- 驚くべきことに、今QMで全ての実験結果が統一の見解を出してきた。実験結果サマリーを兼ねて。
- ジェット測定の実験的困難。本当は大変。

2. クエンチングの仕組み

- pQCDの破綻危機？

3. パarton同定が鍵となるか？

- クォークかグルーオンか？
- リッジはfluctuationなんかじゃない(by STAR)？
- QGPの再加熱は見えている？

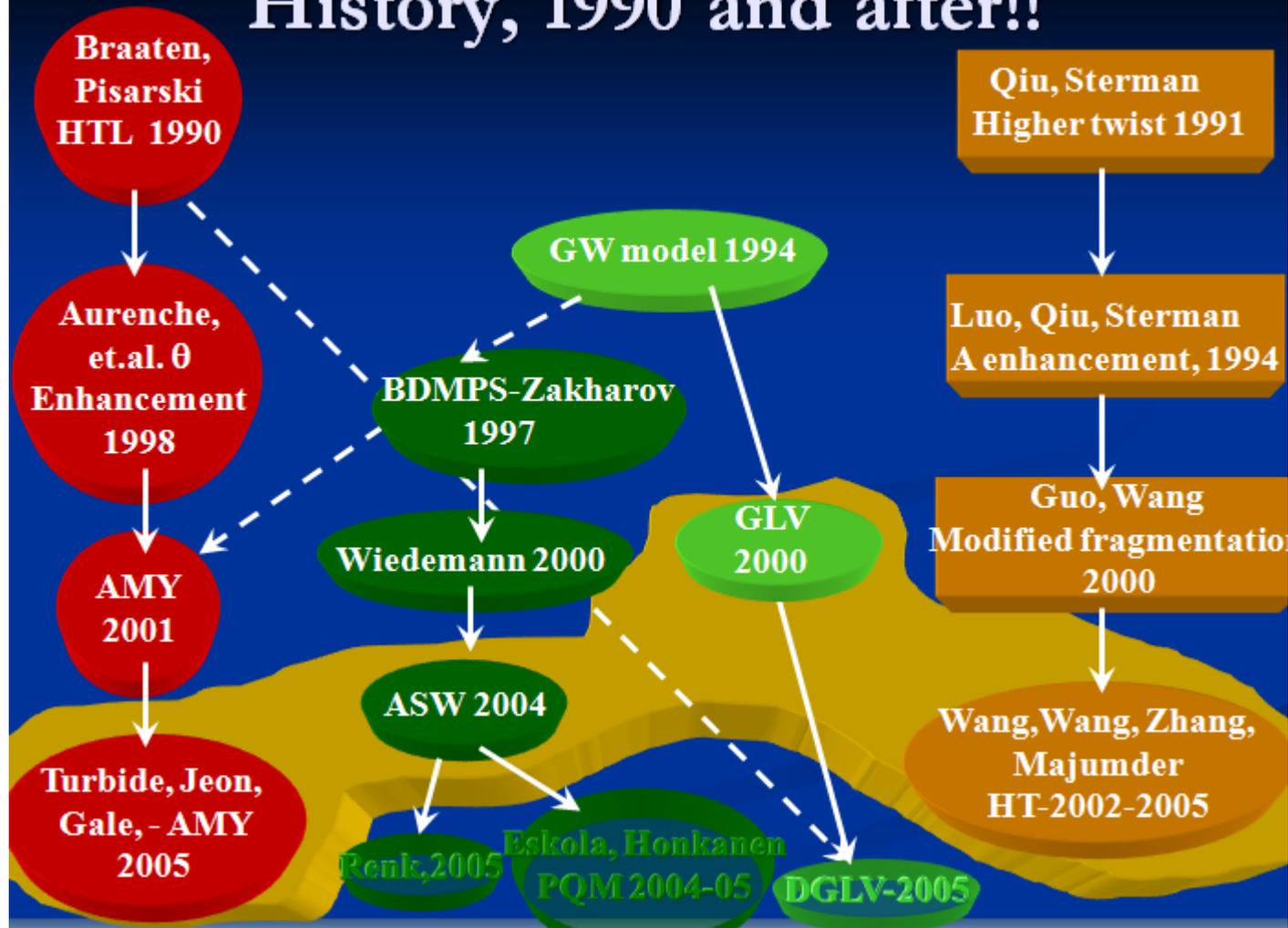
4. low-pTハドロンRAAの謎

- Photon v_2 について、

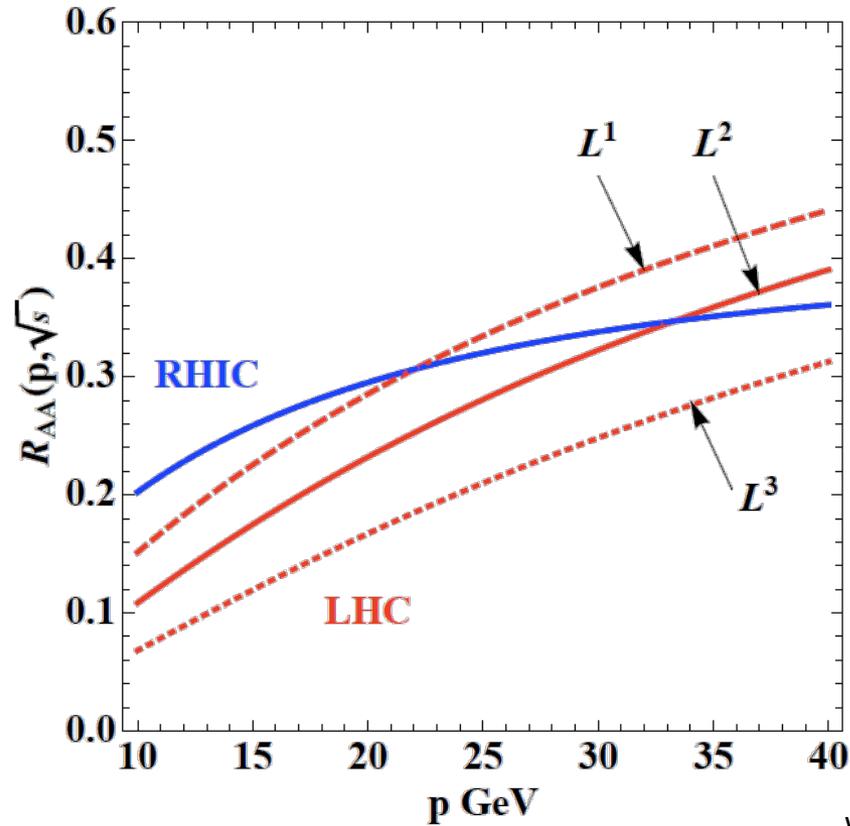
エネルギー減衰モデル

- 様々なモデル
 - 平均自由行程 \leftrightarrow Lとの関係の違い: thin or thick?
 - collisional energy loss を含めるか? MCへの組み込み。
- Radiative energy loss
 - Multiple soft scattering
 - BDMPS (LPM) or AMY
 - ~~– Few hard scattering~~
 - ~~• DGLV, Higher-twist framework~~
- Collisional energy loss
 - Full calculation including the running of α_S
- Radiative or collisional energy loss
 - 今QMでも片方だけで実験を説明するトークあり。
 - 多分両方取り入れて比較していくのが正しいのでは?

History, 1990 and after!!



距離依存性(path length dependence)



WAH and M Gyulassy, arXiv:1104.4958

— 距離依存が大きい効果？

pQCDの危機

PATHLENGTH DEPENDENCE OF ENERGY LOSS

model	elastic L	radiative L^2	AdS L^3	rad. finite E	min. Q_0
3+1d ideal	fails	works	fails	fails	works
2+1d ideal	fails	fails	marginal	fails	not tested
2+1d vCGC	fails	marginal	works	fails	not tested
2+1d vGlb	fails	marginal	works	fails	not tested

- quantum coherence is an important part of the answer
- finite energy corrections need to be taken seriously!
 - quite possibly they destroy the success of L^2 and maybe also L^3
 - quite possibly other existing shower codes do not reproduce pathlength dependence
- strong constraints on **combinations** of hydro + parton-medium interaction model
- I_{AA} provides additional constraints for shower evolution

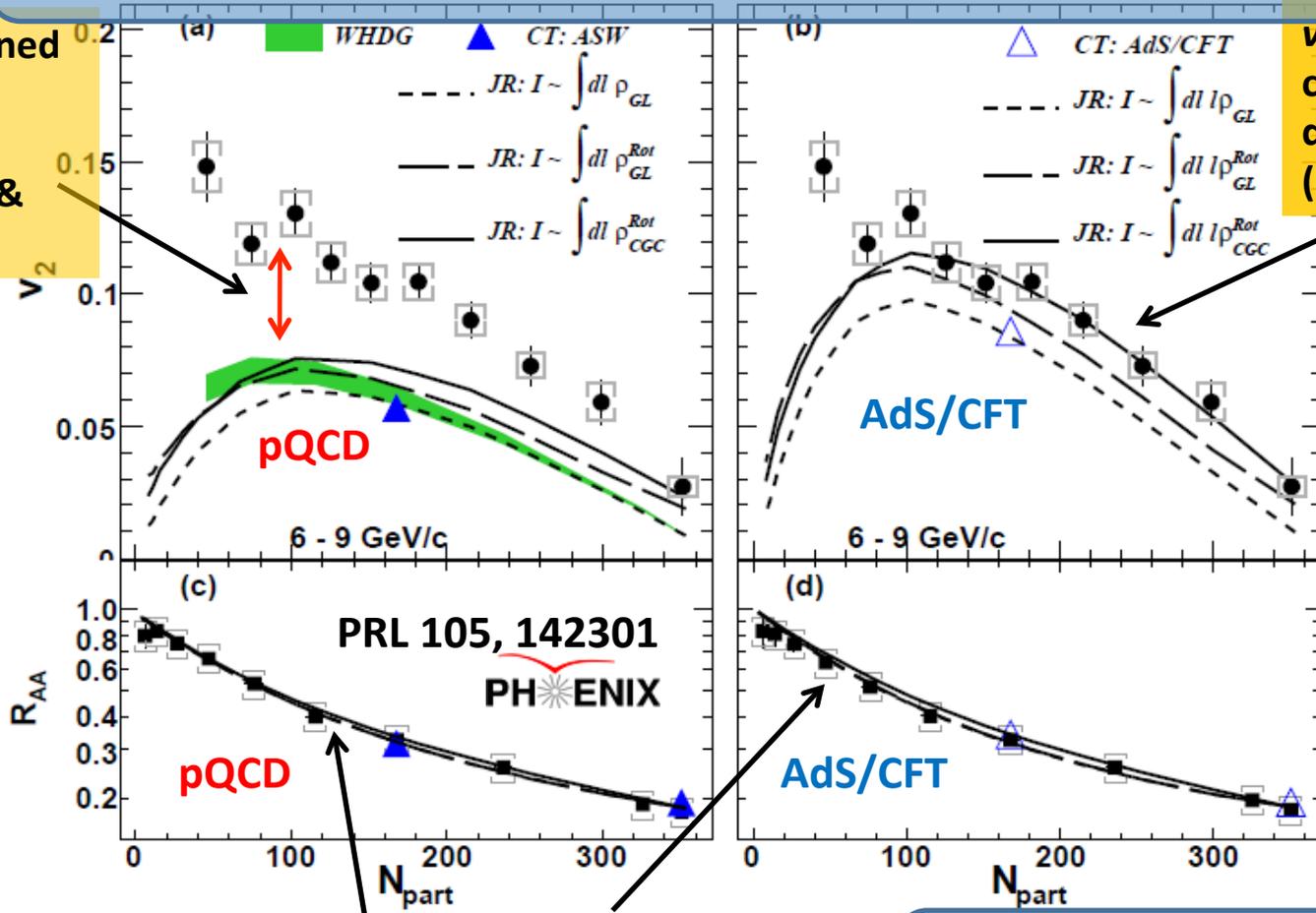
T. R., Phys. Rev. C83 (2011) 024908; J. Auvinen, K. J. Eskola, H. Holopainen, T. R., Phys. Rev. C82 (2010) 051901; T. R., H. Holopainen, U. Heinz, C. Shen, Phys. Rev. C83 (2011) 014910.

pQCDの危機

v_2 data favors $dE/dx \sim l^3$ (like AdS/CFT)

v_2 not explained by pQCD (even with fluctuations & saturation)

v_2 explained by cubic path length dependence (like AdS/CFT)



R_{AA} explained by both models

Plenary: M. Porschke (R_AA) Wen
 Parallel: N. Grau (gamma-hadron, jets) Tue
 Parallel: D. Sharma (light vector mesons) Mon
 Poster: M. Tannenbaum (E loss RHIC vs. LHC)

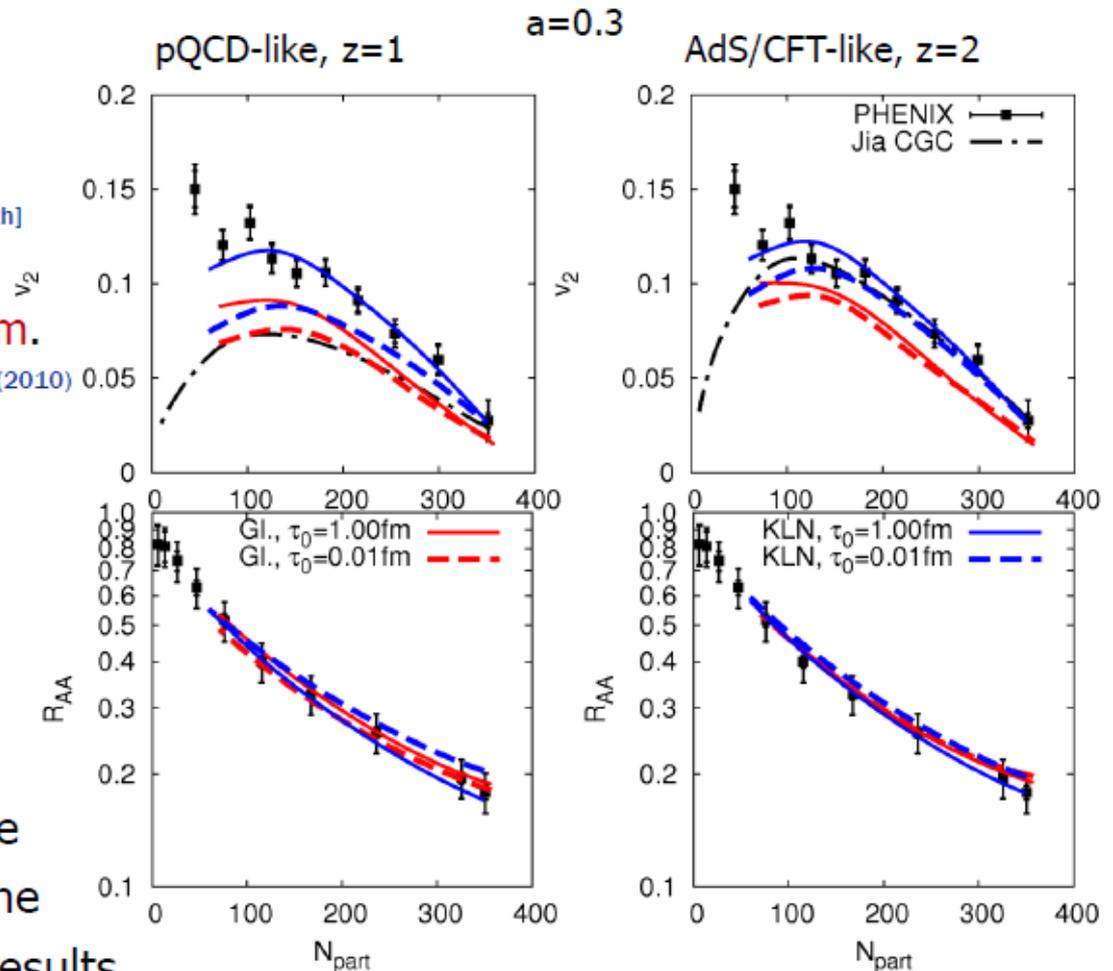
Theory calculations:
 Wicks et al., NPA784, 426
 Marquet, Renk, PLB685, 270
 Drees, Feng, Jia, PRC71, 034909
 Jia, Wei, arXiv:1005.0645

pQCD危機回避？

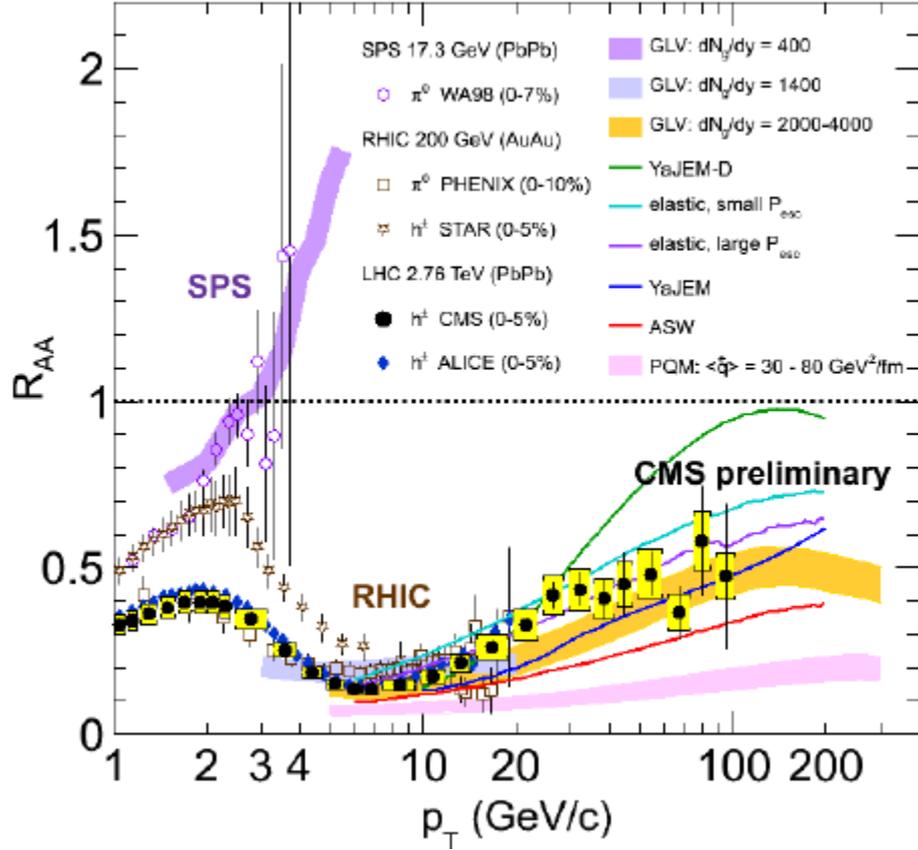
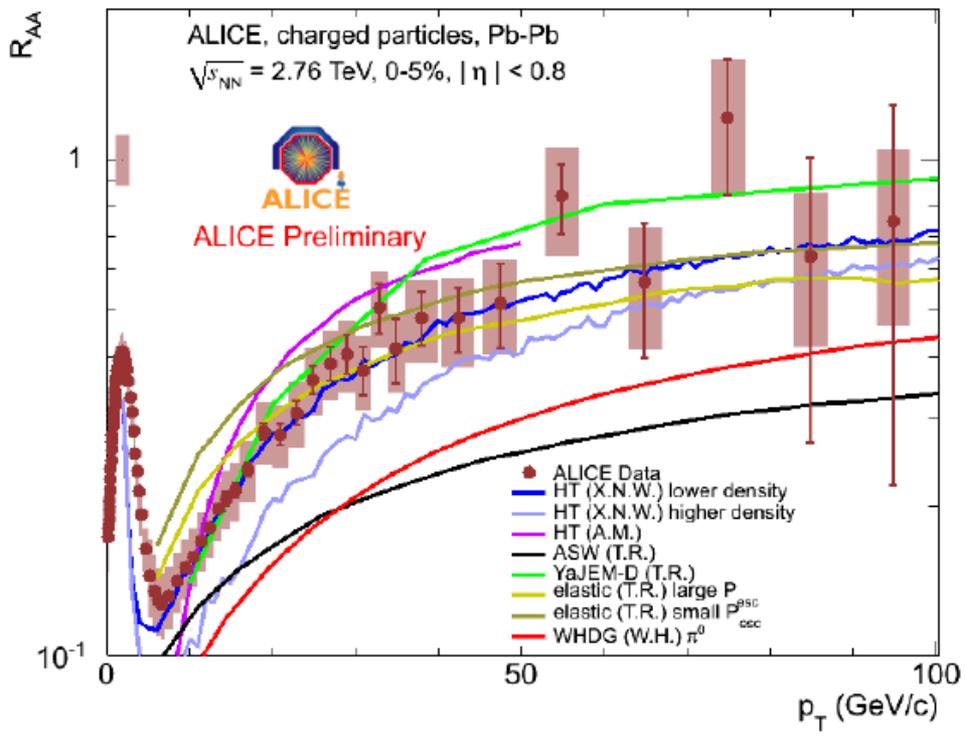
Initial time

- We chose $\tau_0 = 1\text{fm}$.
H. Song et al., arXiv:1011.2783[nucl-th]
- Jia's model has $\tau_0 = 0\text{fm}$.
A. Adare et al, Phys. Rev. Lett. **105**, 142301 (2010)

→ A smaller τ_0 reduces the $v_2(N_{\text{part}})$ for both pQCD-like and AdS/CFT-like energy loss and increases the difference between the pQCD and AdS/CFT results



結論にはまだ早い



- Radiative energy loss (slightly) undershoot data
- Don't draw premature conclusions because of a (dis)agreement !

Contents

1. 実験サマリー

- 驚くべきことに、今QMで全ての実験結果が統一の見解を出してきた。実験結果サマリーを兼ねて。
- ジェット測定の実験的困難。本当は大変。

2. クエンチングの仕組み

- pQCDの破綻危機？

3. パarton同定が鍵となるか？

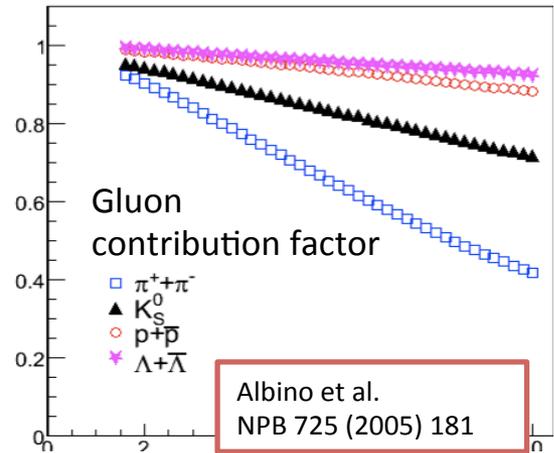
- クォークかグルーオンか？
- リッジはfluctuationなんかじゃない(by STAR)？
- QGPの再加熱は見えている？

4. low-pTハドロンRAAの謎

- Photon v2について、

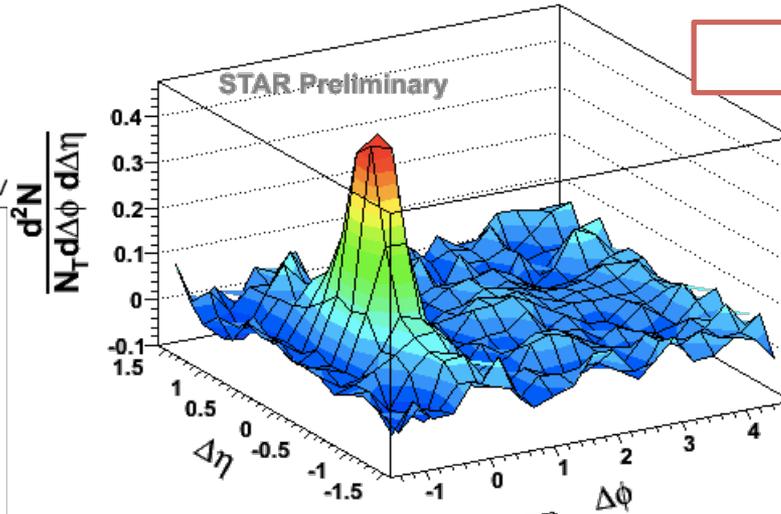
パートンIDが解決への糸口？

NLO pQCD AKK FF : p+p collisions at 200 GeV



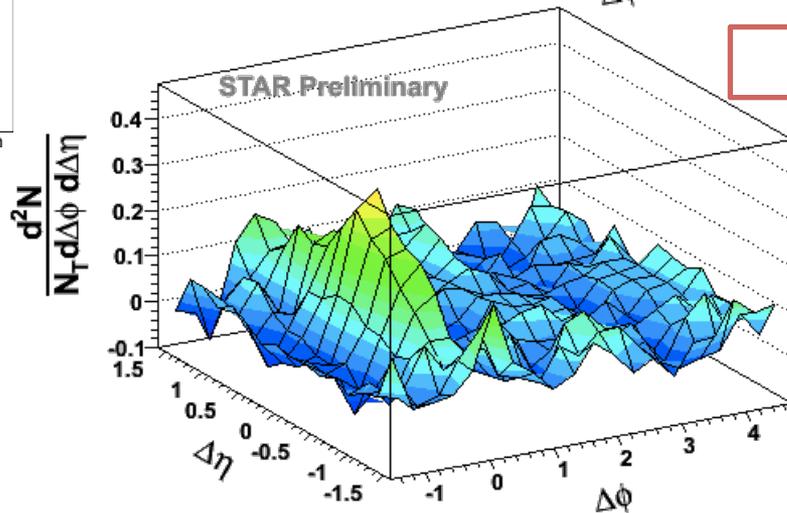
Albino et al.
NPB 725 (2005) 181

p_T



π^\pm trigger

- Quark:30%
- Gluon:70%
- Large jet-like cone
- Small ridge



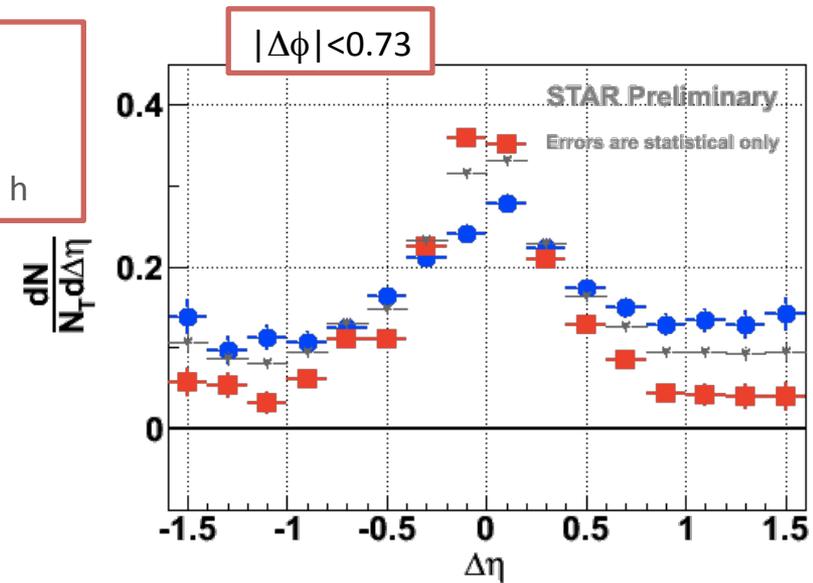
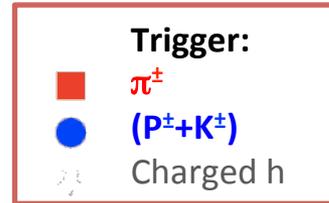
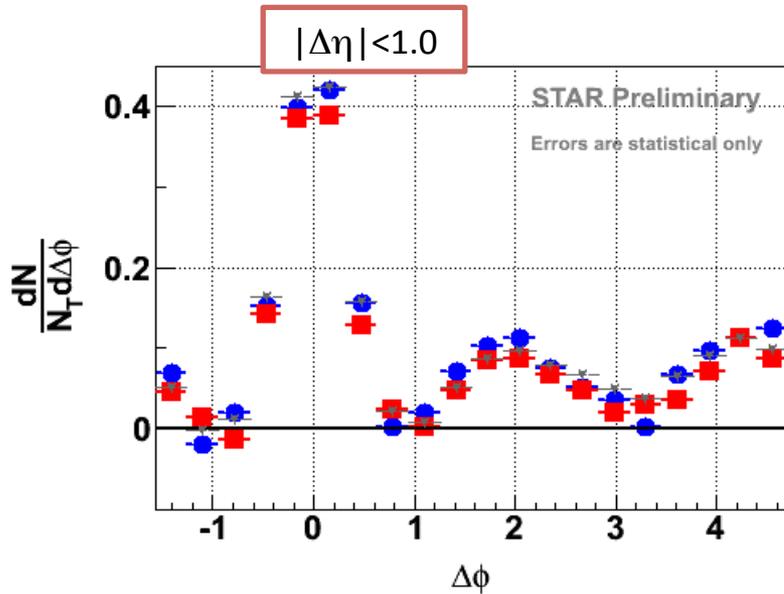
$(P^\pm+K^\pm)$ trigger

- Quark:<10%
- Gluon:>90%
- Smaller cone
- Large ridge

Au+Au

$4 < p_{T,trigger} < 6 \text{ GeV}/c$
 $p_{t,assoc.} > 1.5 \text{ GeV}/c$

グルーオンがリッジの元？ (by STAR)



- ▶ Consistent with previous results – but that is a function of projection range!
- ▶ Does not reveal entire structure

- ▶ $\Delta\eta$ reveals rich trigger PID dependent structure:
 - ▶ Higher jet-like amplitude for pions
 - ▶ Ridge predominantly contributed by non-pion-triggered events

Au+Au

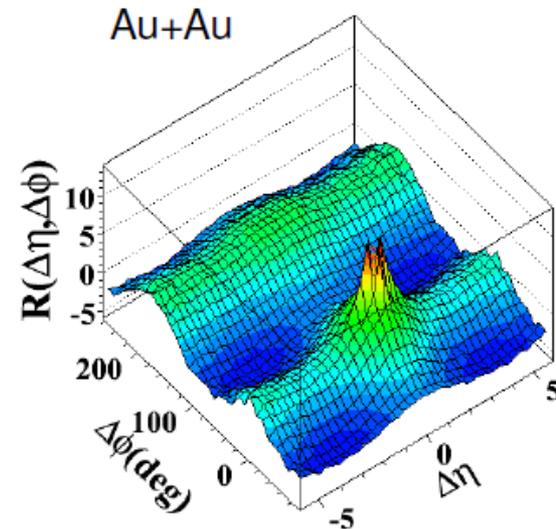
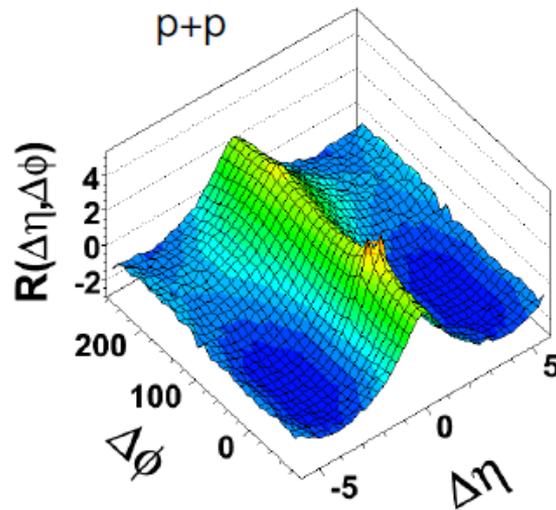
$4 < p_{T,trigger} < 6 \text{ GeV}/c$
 $p_{t,assoc.} > 1.5 \text{ GeV}/c$

リッジというより失われたエネルギーが $R > 0.8$ に表れている、と見るべき。(by Hisa Torii)

リッジは $|\Delta\eta| < 5$ まで広い

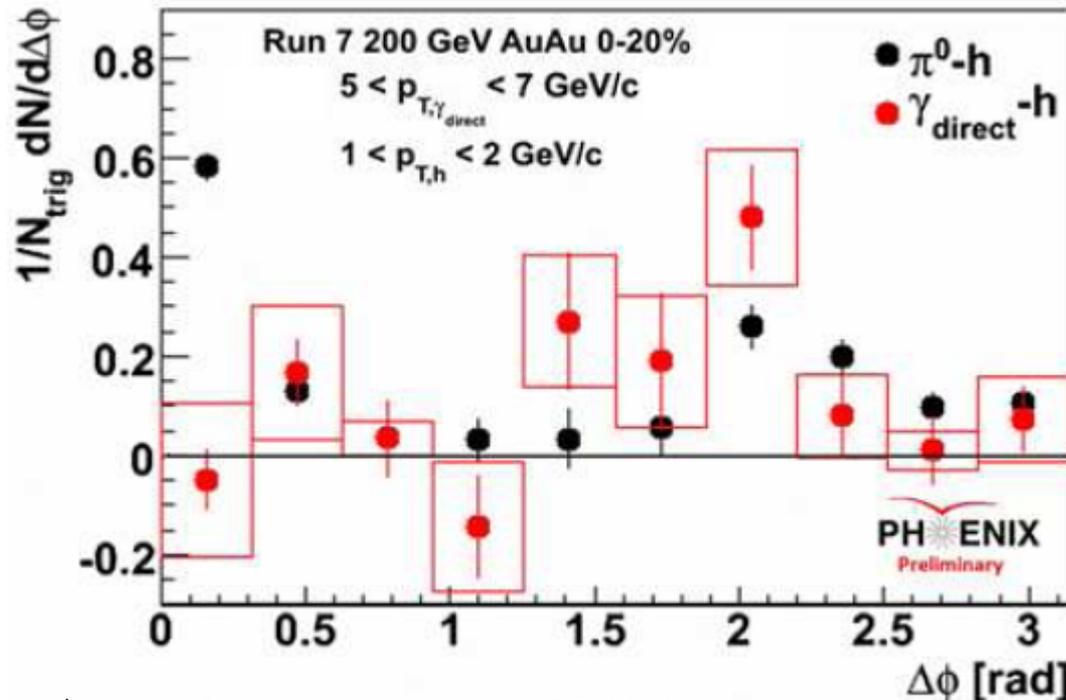
TWO-PARTICLE CORRELATIONS

Unique long-range correlations in heavy-ion collisions...



(PHOBOS, *Phys. Rev. C* 75(2007)054913)

直接光子tagged-クォークジェット



- クォーク or グルーオンの違いは統計的な有利で明らかではない。
 - 直接光子のAway-side クォーク:90%
 - Pi0のAway-side グルーオン:70%(?)
- 従来の測定を失われたエネルギーが現れる領域で測定。
 - HBT radius, chemical temperature by particle ratio, thermal photon
 - Leading Jet axis、direct photon axisからの角度依存性

Contents

1. 実験サマリー

- 驚くべきことに、今QMで全ての実験結果が統一の見解を出してきた。実験結果サマリーを兼ねて。
- ジェット測定の実験的困難。本当は大変。

2. クエンチングの仕組み

- pQCDの破綻危機？

3. パarton同定が鍵となるか？

- クォークかグルーオンか？
- リッジはfluctuationなんかじゃない(by STAR)？
- QGPの再加熱は見えている？

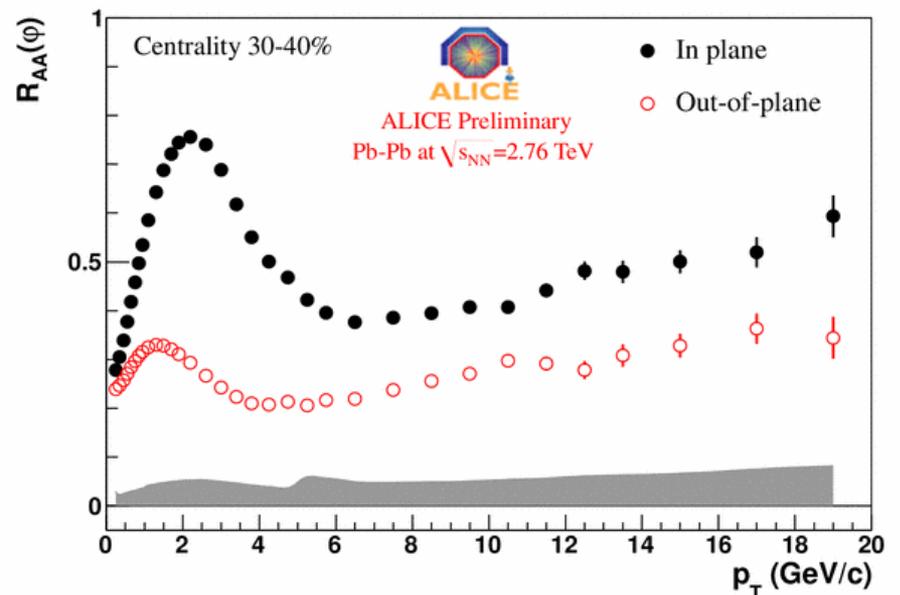
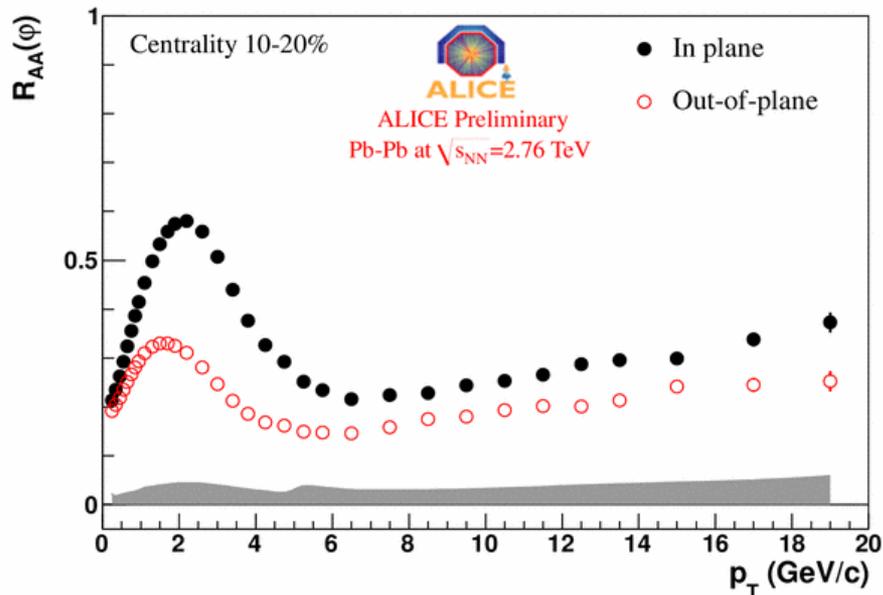
4. low-pTハドロンRAAの謎

- Photon v_2 について、

Low-pT RAAの謎

reaction plane dependent R_{AA}

Talk: A Dobrin



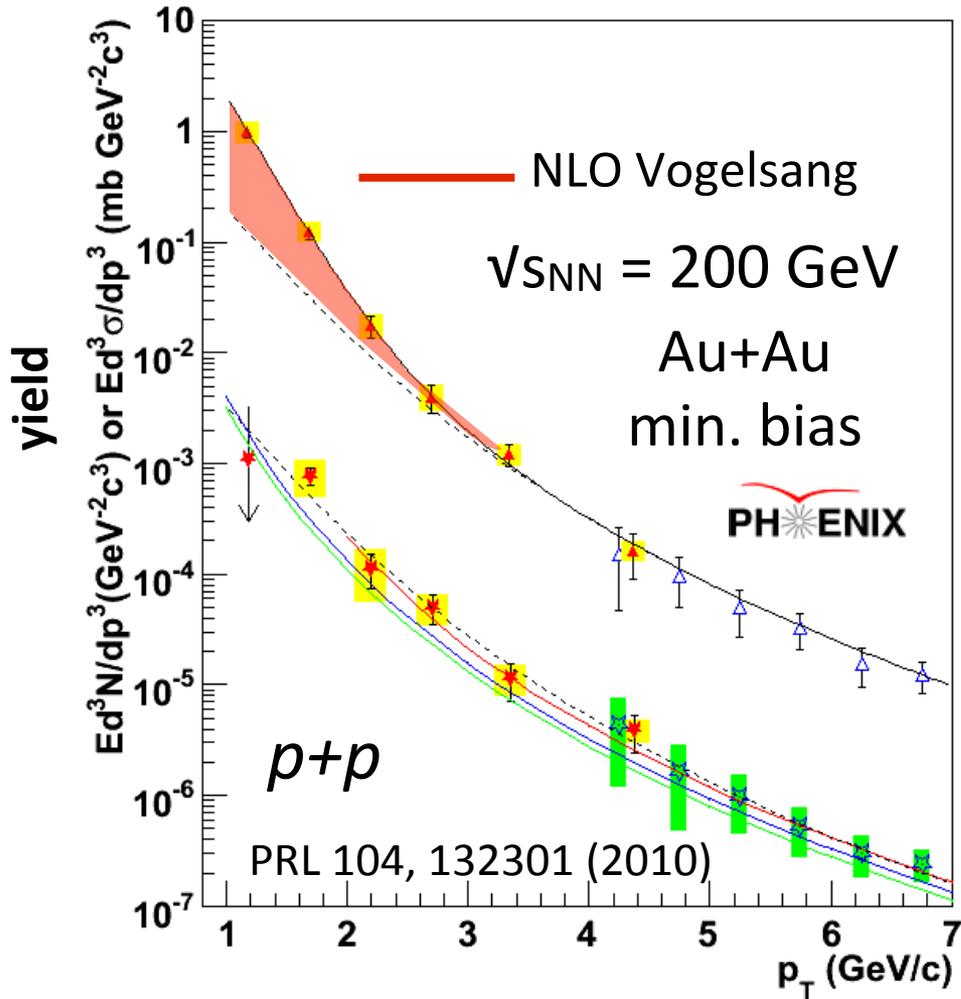
$$R_{AA}(\varphi) = R_{AA}(1 + 2v_2 \cos(2\varphi))$$

All you want is on your head!!!

完

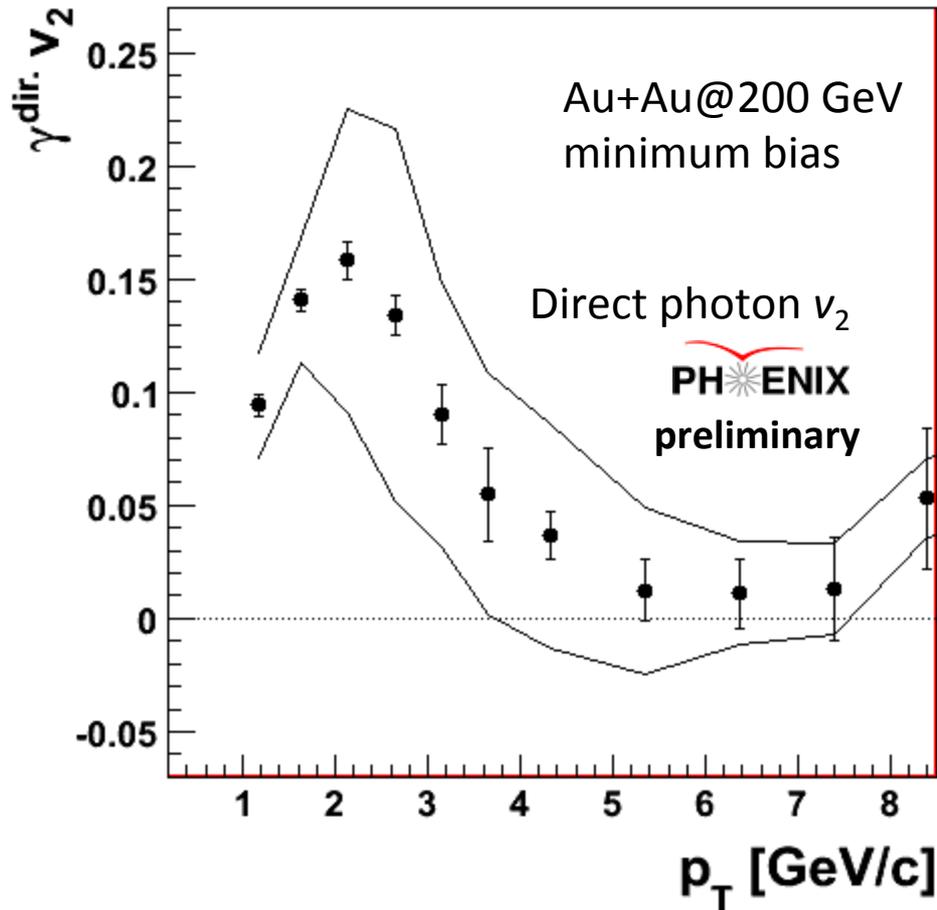


Direct Photon Excess in Au+Au



- Direct photon excess above $p+p$ spectrum
- Exponential (consistent with thermal)
- Inverse slope = $220 \pm 20 \text{ MeV}$
- T_i from hydro
 - 300 . . . 600 MeV
 - Depending on thermalization time

Direct Photon v_2



- direct photon v_2 large ($\sim 15\%$) at $p_T = 2.5$ GeV
- $v_2 \rightarrow 0$ where prompt photons dominate

熱光子放射 v_2 はハドロン v_2 と同じ程度
⇒系発展の後半で放射
同様の解析をJet軸angle依存で？再加熱への道筋？