

ジェット物理の最前線

中條 達也

筑波大学

理研シンポジウム：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」

August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan

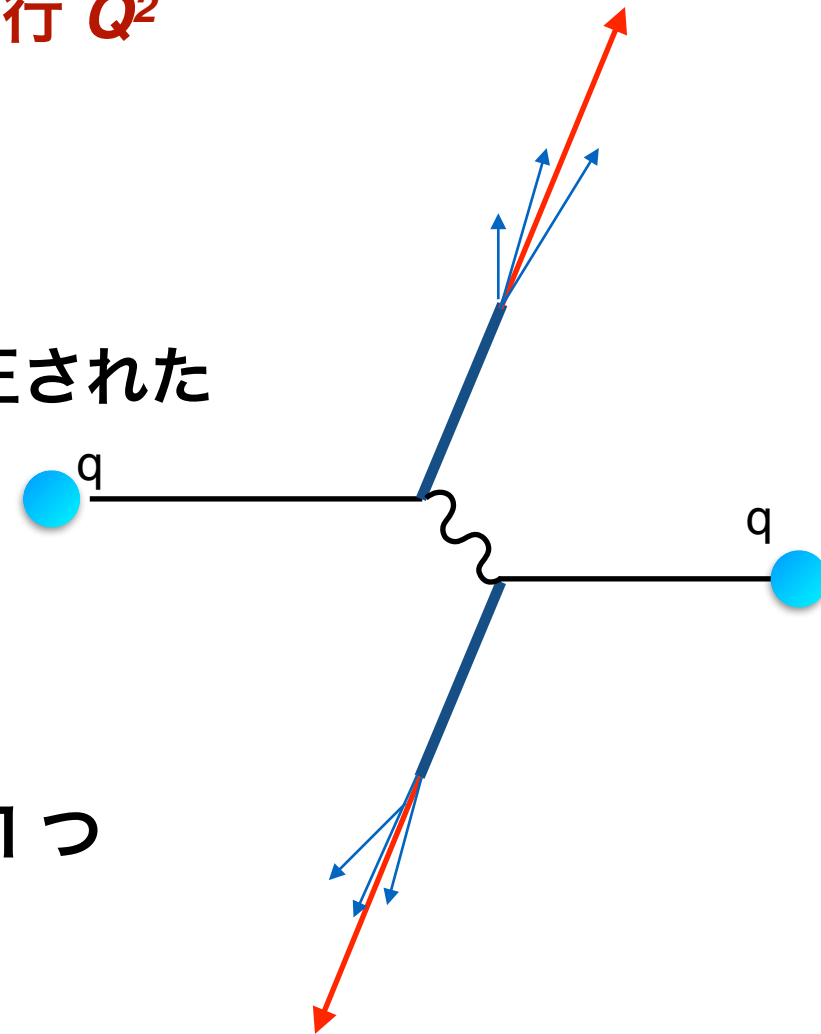


1. 導入：ジェットの物理
2. ジェット再構成
3. パートンのエネルギー損失とジェット
4. 最新結果から
5. まとめ・将来展望

1. 導入：ジェットとは何か？

• ハードプローブ（硬散乱）

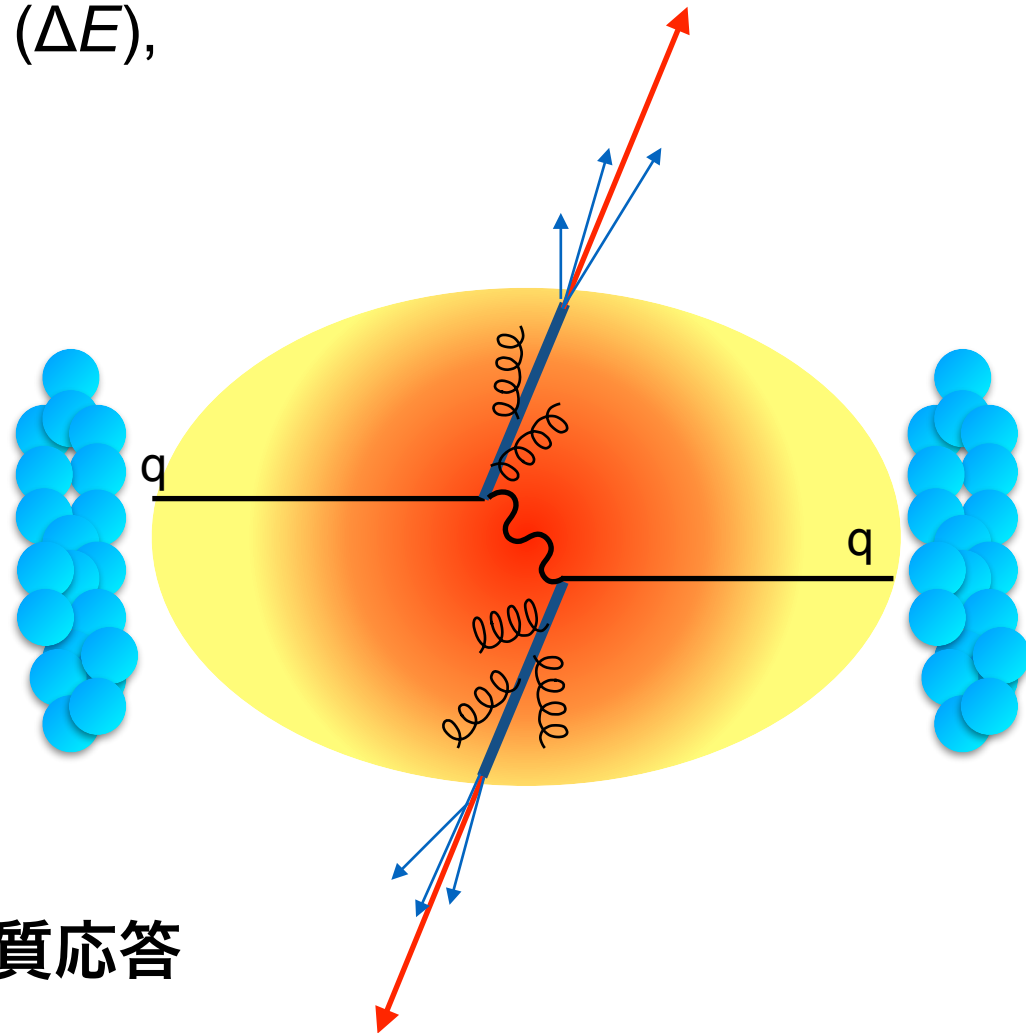
- パarton 2体硬散乱（運動量移行 Q^2 大）を起源に持つ
- 衝突初期に生成 ($1/Q \ll 1 \text{ fm}/c$)
- 摂動QCDで計算可能 → 良く較正された
プローブ



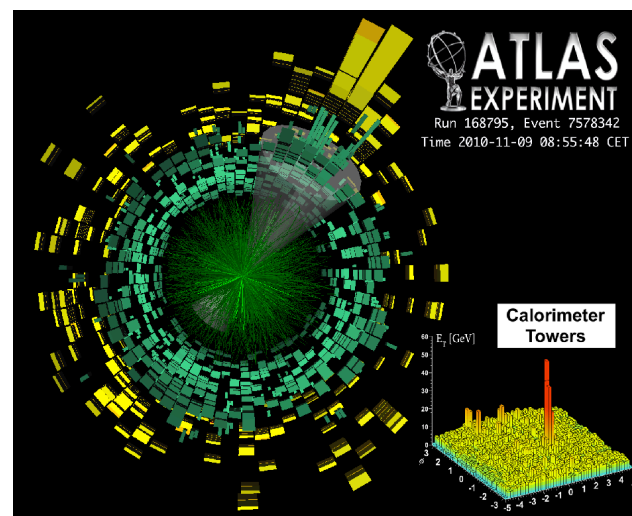
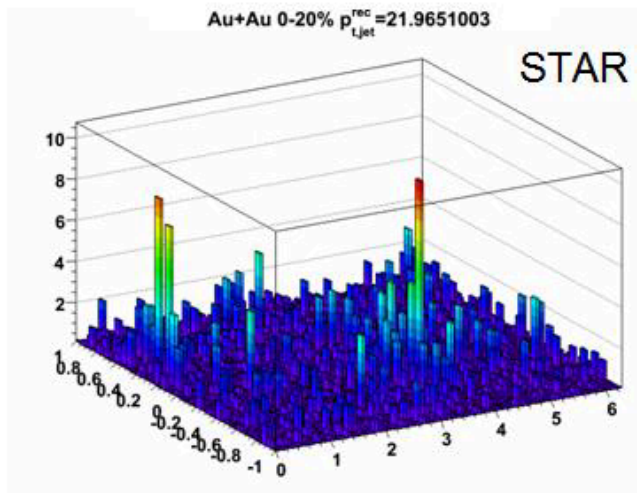
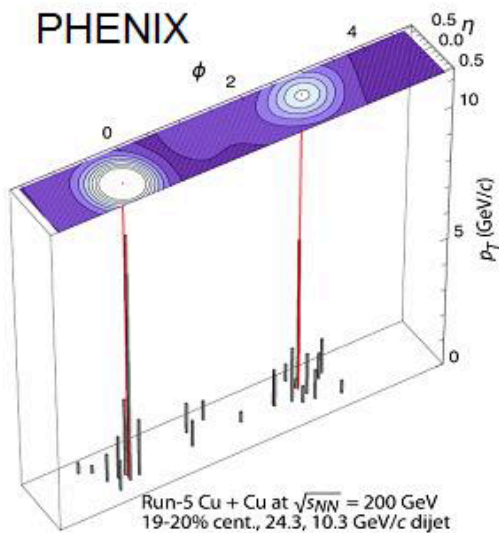
- 高エネルギーの粒子束から構成
- （一般に） 180° 反対方向に対生成
- 最もエネルギーが高いプローブの1つ
- 強く相互作用する

なぜジェットか？

- QGP媒質の性質を直接反映
 - パartonエネルギー損失 (ΔE),
阻止能力 (dE/dx)
 - 輸送係数 \hat{q}
- ジェットの変貌
 - 破砕関数
 - 半径方向プロファイル
 - 内部構造
 - 幅の変化, 偏り
- ジェット通過によるQGP媒質応答

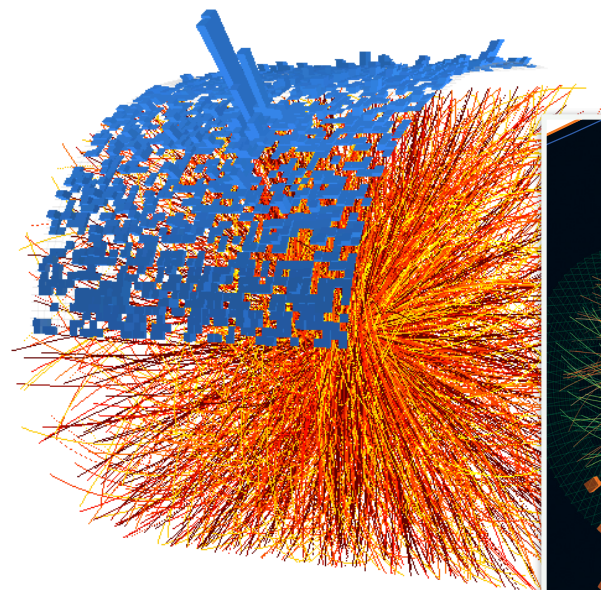
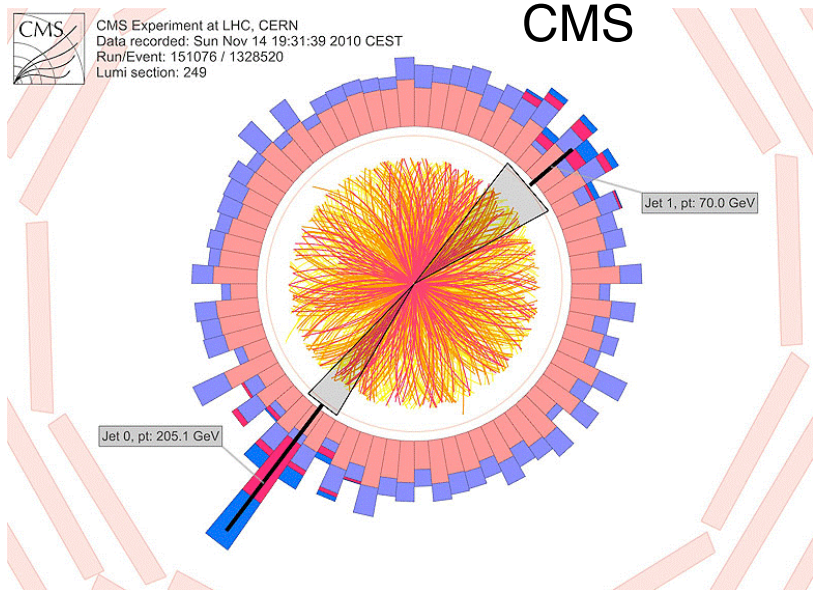


LHC と RHIC で観測された様々なジェット

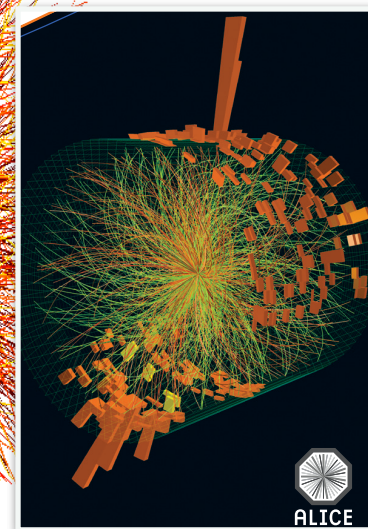


CMS
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 14 19:31:39 2010 CEST
Run/Event: 151076 / 1328520
Lumi section: 249

CMS

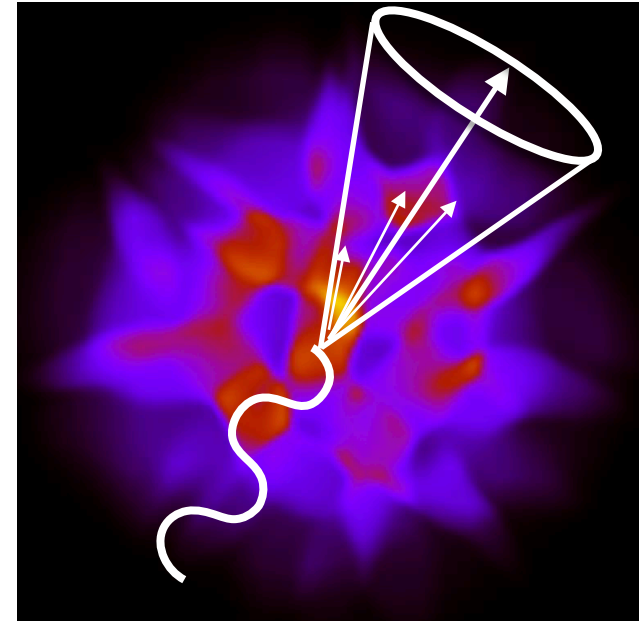


ALICE



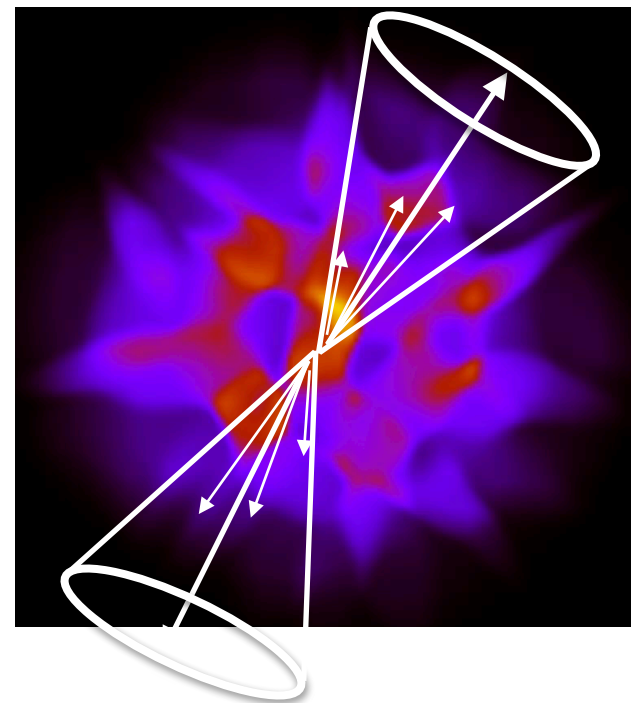
<https://cds.cern.ch/record/2155668>

- QGP媒質の性質にアクセスする
 - パートンの阻止能 (dE/dx)
 - g, q (u, d, s, c, b)
 - QGP通過距離依存性
 - ジェットとの相関測定
 - **光子 - ジェット相関**
 - ジェット - ジェット相関
 - ハドロン - ジェット相関
 - 重いクォーク (c, b) を含むジェット
 - ジェットと媒質応答
 - 大きな角度のソフト ($low p_T$) ハドロン生成
 - ジェット - ハドロン相関

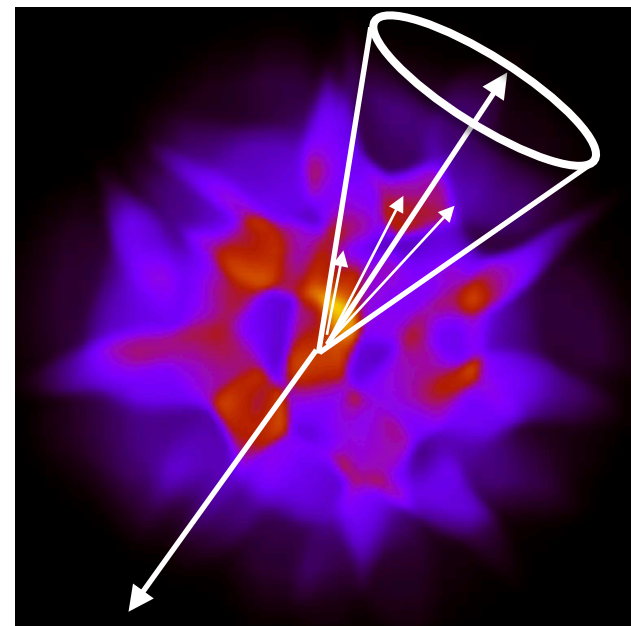


- QGP媒質の性質にアクセスする

- パートンの阻止能 (dE/dx)
 - g, q (u, d, s, c, b)
 - QGP通過距離依存性
- ジェットとの相関測定
 - 光子 - ジェット相関
 - **ジェット - ジェット相関**
 - ハドロン - ジェット相関
 - 重いクォーク (c, b) を含むジェット
- ジェットと媒質応答
 - 大きな角度のソフト ($\text{low } p_T$) ハドロン生成
 - ジェット - ハドロン相関

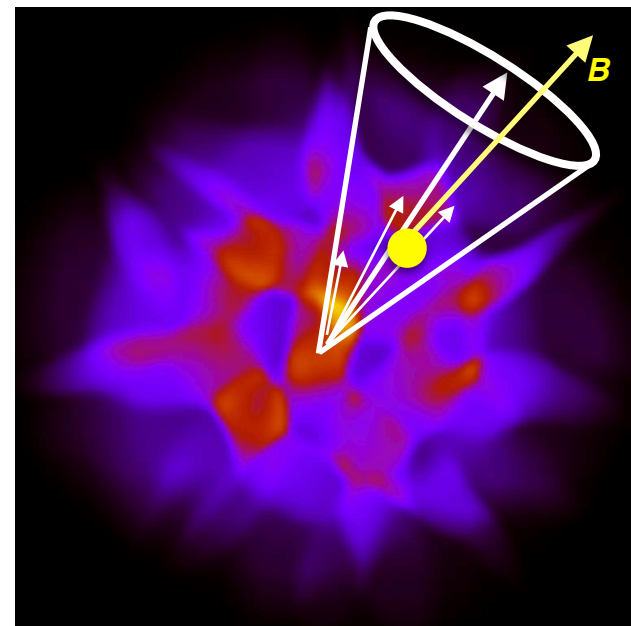


- QGP媒質の性質にアクセスする
 - パートンの阻止能 (dE/dx)
 - g, q (u, d, s, c, b)
 - QGP通過距離依存性
 - ジェットとの相関測定
 - 光子 - ジェット相関
 - ジェット - ジェット相関
 - **ハドロン - ジェット相関**
 - 重いクォーク (c, b) を含むジェット
 - ジェットと媒質応答
 - 大きな角度のソフト ($\text{low } p_T$) ハドロン生成
 - ジェット - ハドロン相関



- QGP媒質の性質にアクセスする

- パートンの阻止能 (dE/dx)
 - g, q (u, d, s, c, b)
 - QGP通過距離依存性
 - ジェットとの相関測定
 - 光子 - ジェット相関
 - ジェット - ジェット相関
 - ハドロン - ジェット相関
 - **重いクォーク (c, b) を含むジェット**
- ジェットと媒質応答
 - 大きな角度のソフト ($\text{low } p_T$) ハドロン生成
 - ジェット - ハドロン相関

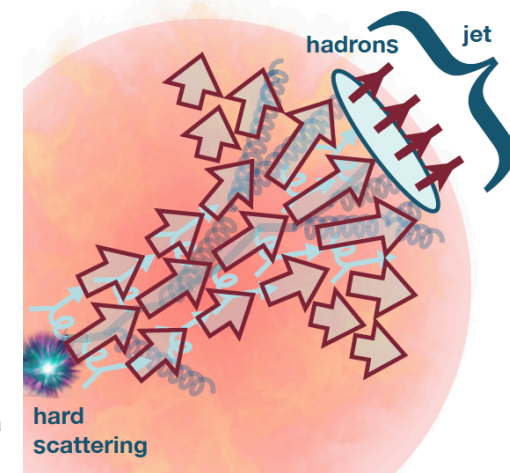
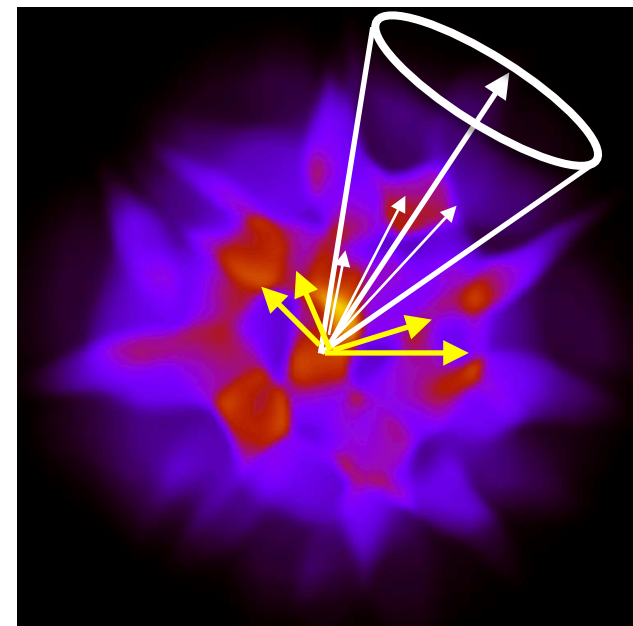


• QGP媒質の性質にアクセスする

- パートンの阻止能 (dE/dx)
 - g, q (uds, c, b)
 - QGP通過距離依存性
- ジェットとの相関測定
 - 光子 - ジェット相関
 - ジェット - ジェット相関
 - ハドロン - ジェット相関
 - 重いクォーク (c, b) を含むジェット

• **ジェットと媒質応答**

- 大きな角度のソフト ($low p_T$) ハドロン生成
- ジェット - ハドロン相関



Picture from Y. Tachibana
(Heavy Ion Cafe 2017)

2. ジェット再構成

1) ジェットは検出された粒子リストを使い、あるアルゴリズムによって再構成されるもの。

- **Jet reconstruction algorithm**

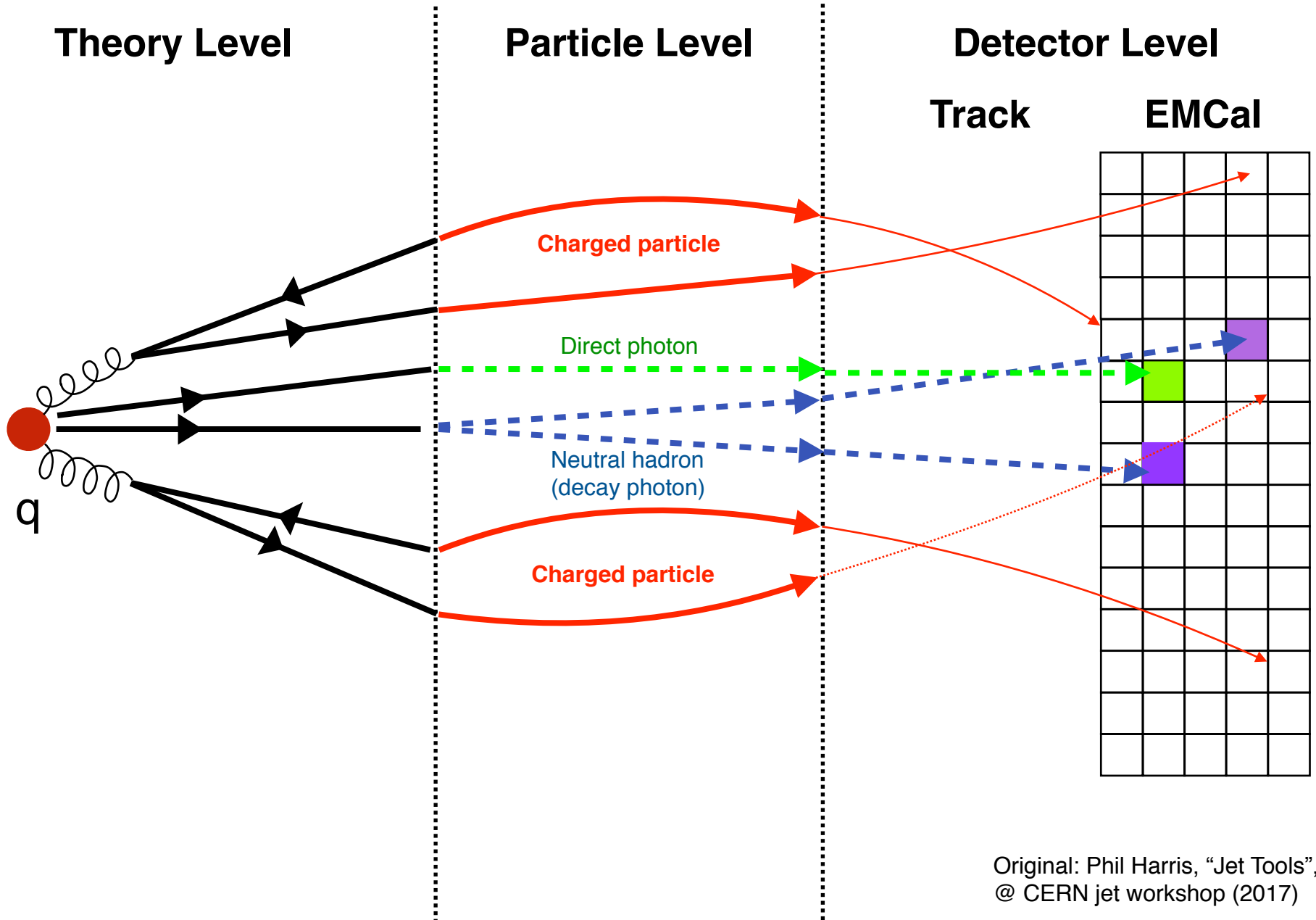
2) 実験データについては、検出器の効果（飛跡再構成効率、不感領域など）の補正をし、真の分布に戻し、理論と比較する。

- **Unfolding**

3) 重イオン衝突においては、ソフトな粒子の寄与 (underling events) が大であり、これを取り除く必要がある

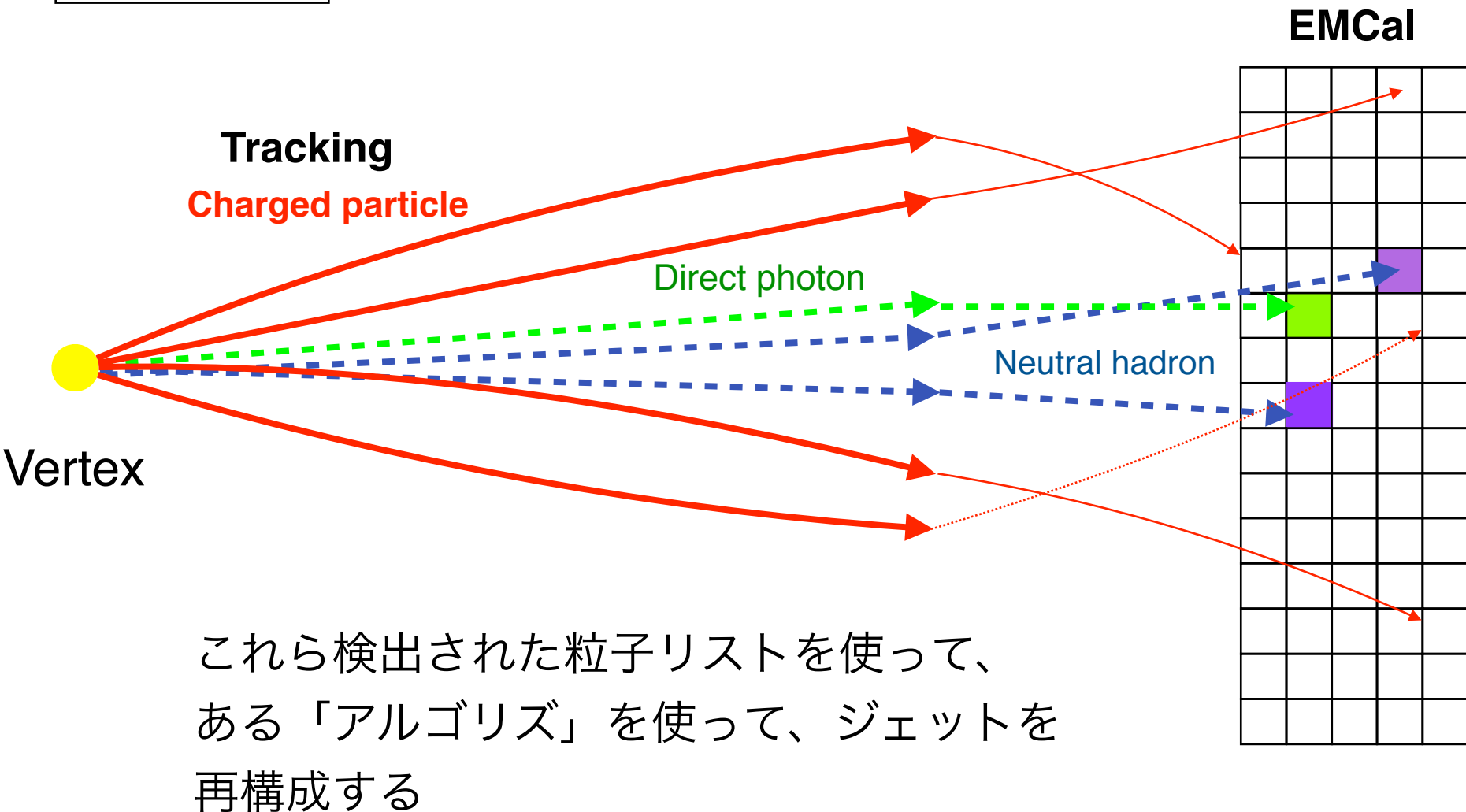
- **Background treatment**

これら3点について簡単に説明する。

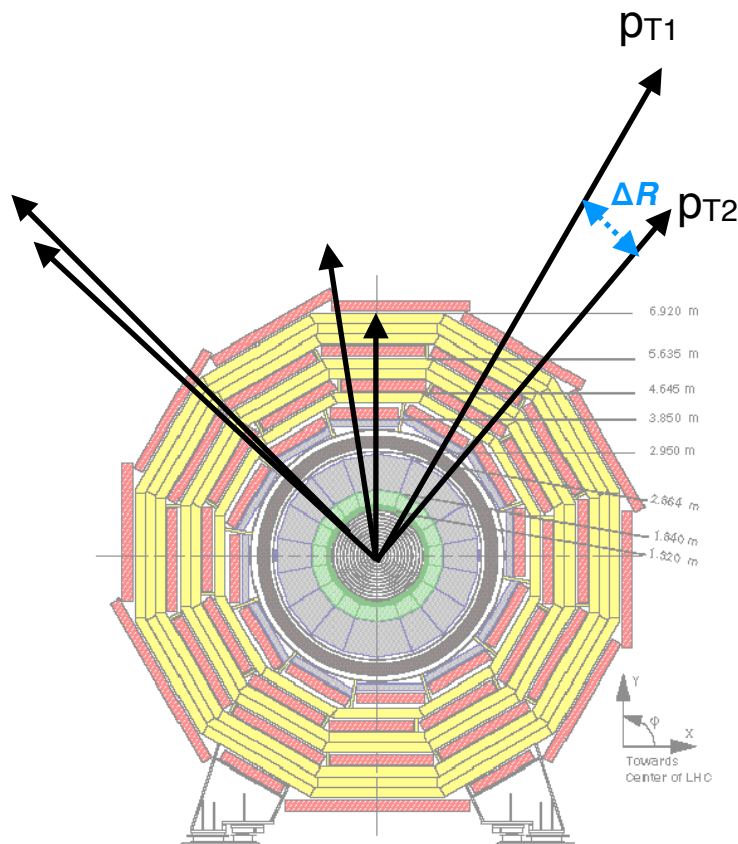


Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)

実際の検出器



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

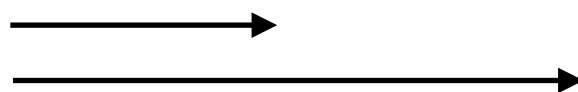
- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm
 $\alpha = 0$: Cambridge Aachen
 $\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

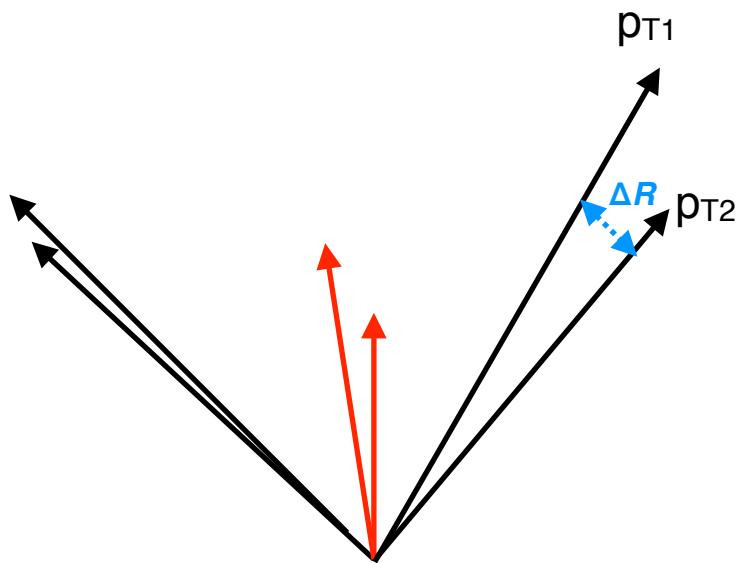
$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

粒子

低 p_T
高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



**p_T が最小のものから
スタート**

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: Cambridge Aachen

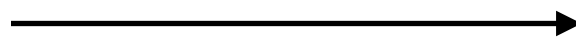
$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

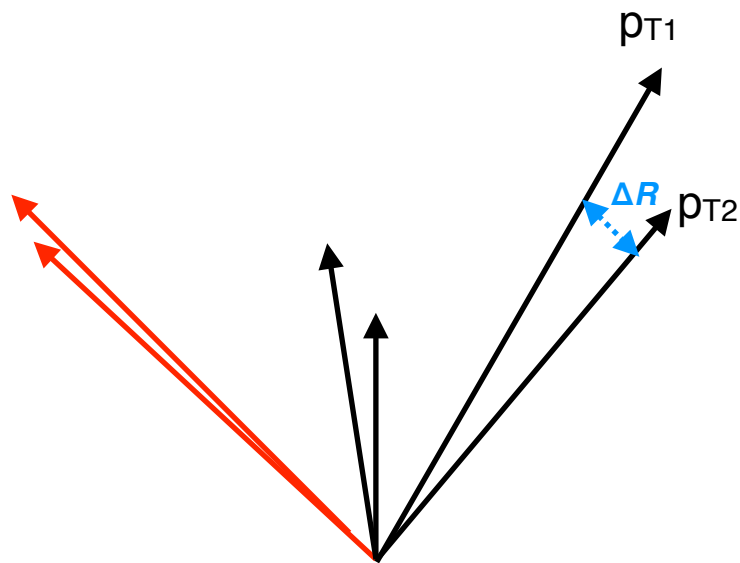
粒子

低 p_T

高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



2粒子間距離が近いもの
からスタート

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: **Cambridge Aachen**

$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

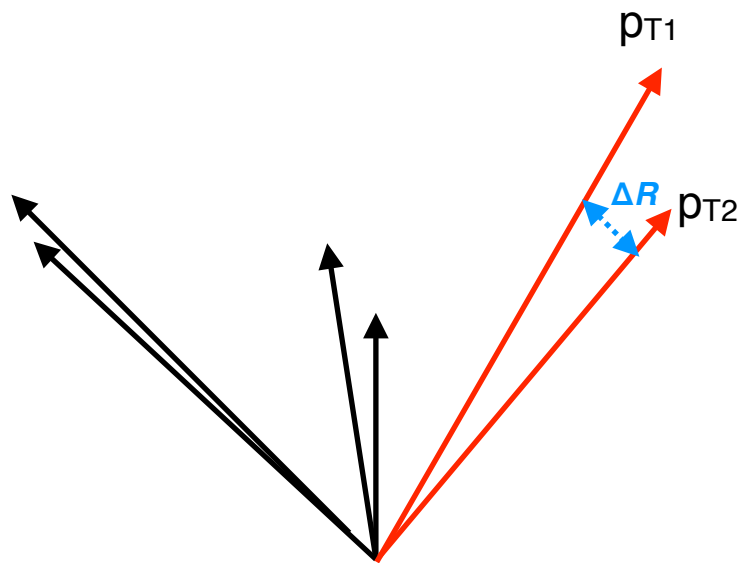
粒子

低 p_T

高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



**p_T が最大のものから
スタート**

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: Cambridge Aachen

$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

粒子

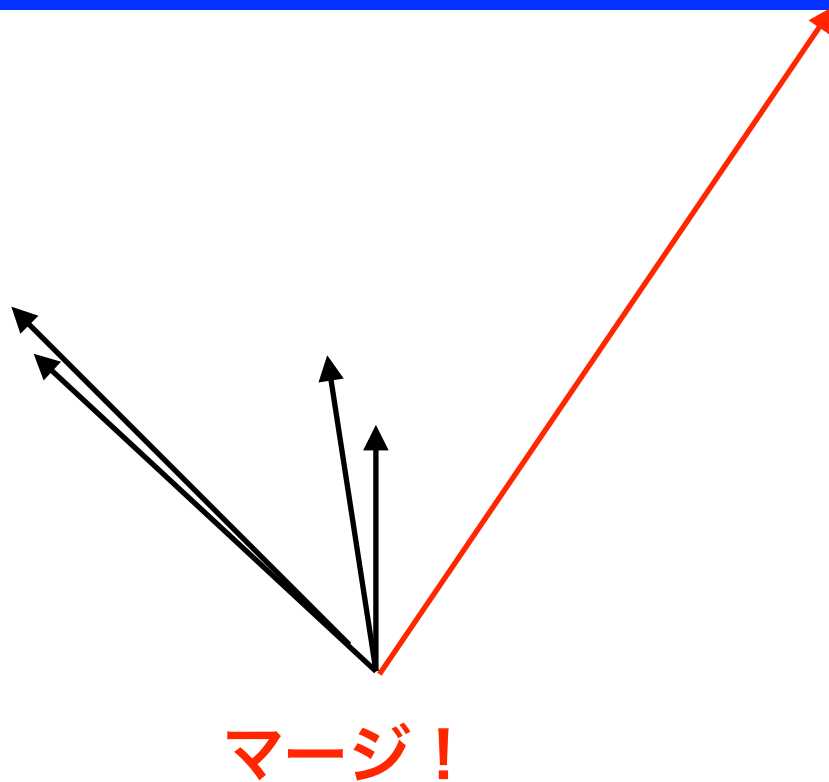
低 p_T

高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)

ジェット再構成アルゴリズム



- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: Cambridge Aachen

$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

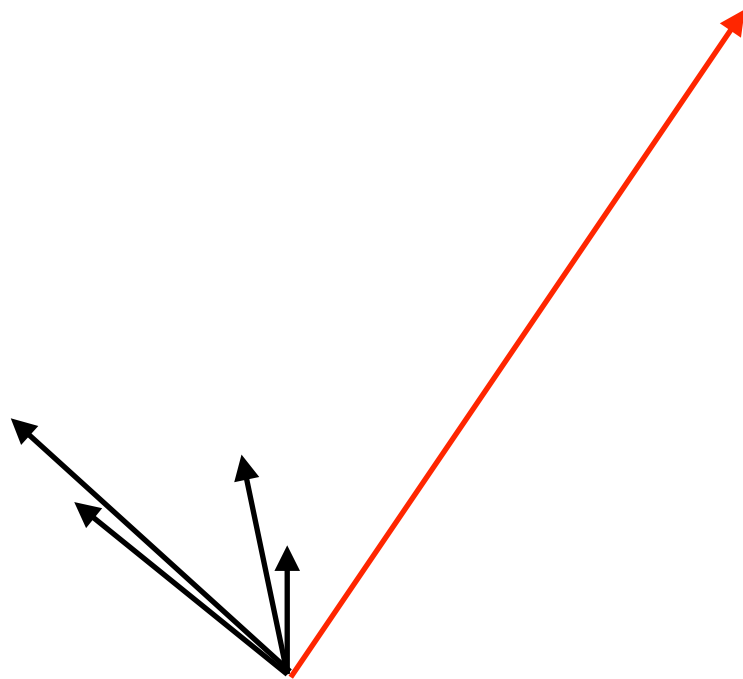
粒子

低 p_T

高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



Zoom out

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm
 $\alpha = 0$: Cambridge Aachen
 $\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

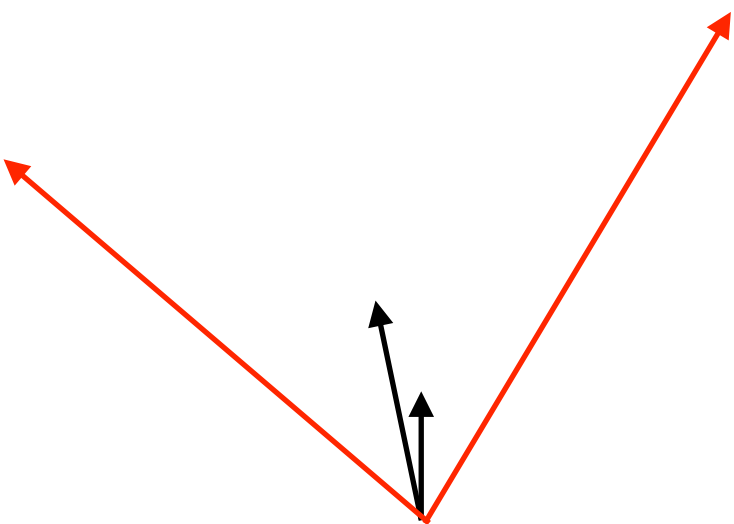
$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

粒子

低 p_T
高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



次をマージ

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

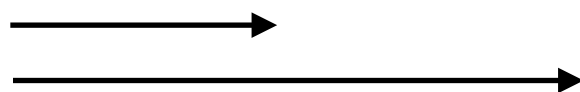
- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm
 $\alpha = 0$: Cambridge Aachen
 $\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

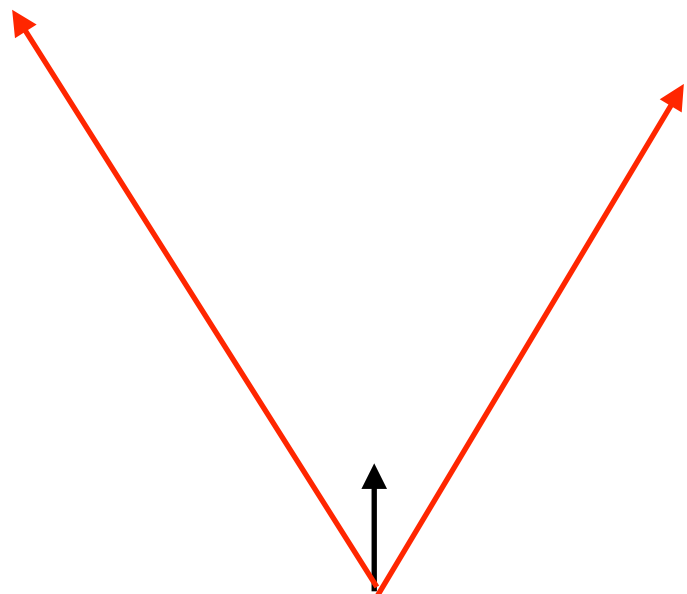
$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

粒子

低 p_T
高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



次をマージ

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

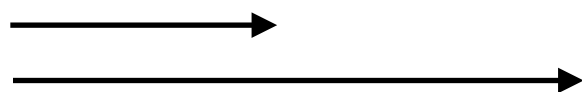
- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm
 $\alpha = 0$: Cambridge Aachen
 $\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

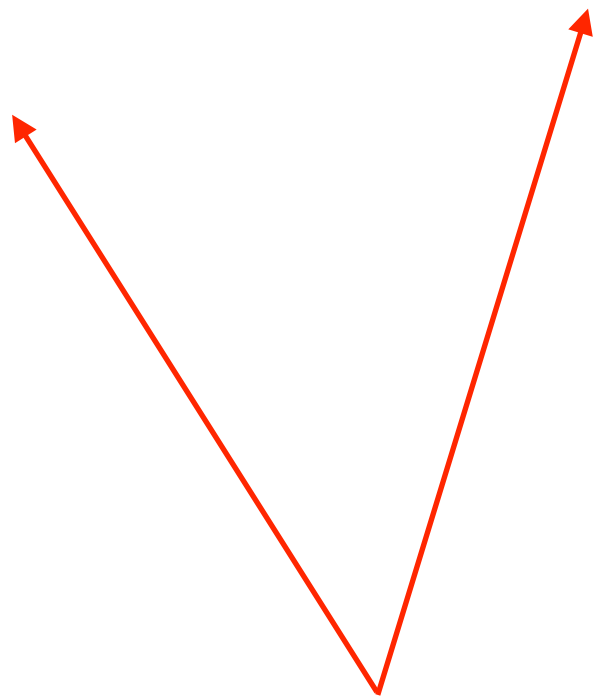
$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

粒子

低 p_T
高 p_T



Original: Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)



次をマージ

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

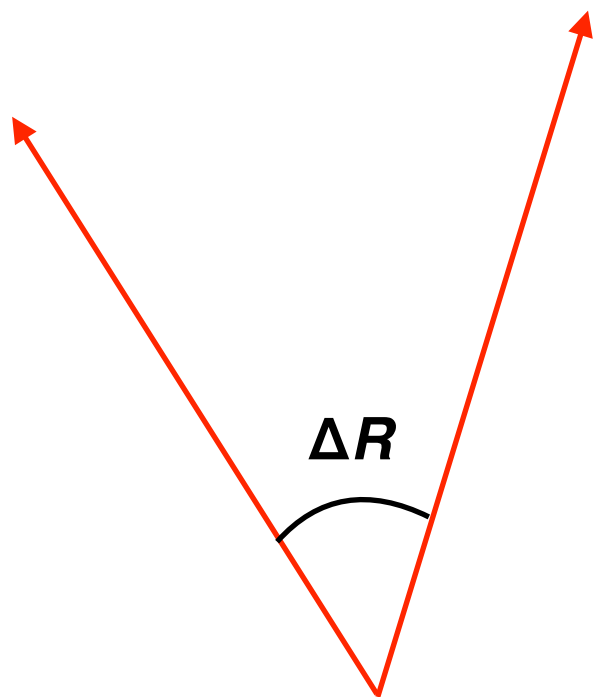
- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: Cambridge Aachen

$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$



次をマージ

もし $\Delta R > R (= 0.2, 0.3, 0.4\dots)$ ならば, $\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$

そこでマージ (clustering) をストップ

* R: Resolution parameter (コーン半径)

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

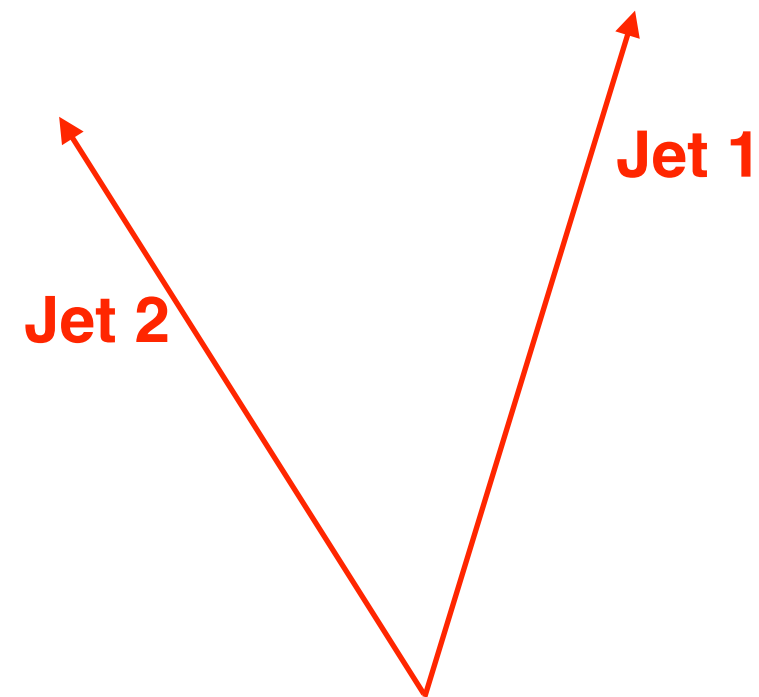
$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: Cambridge Aachen

$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm



ジェット再構成完了！

- 1) 2粒子を選ぶ。以下が最小になるものを採択

$$\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha$$

- 2) 全ての2粒子について繰り返す

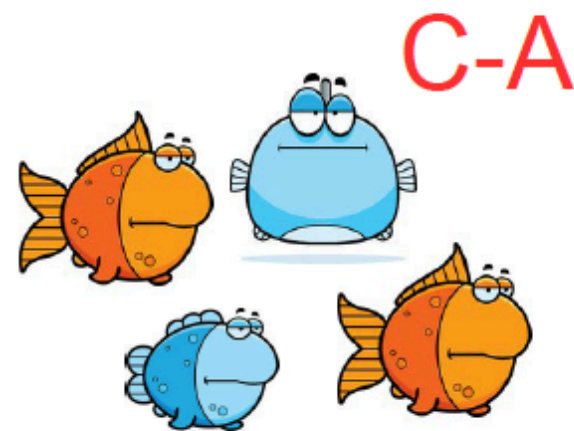
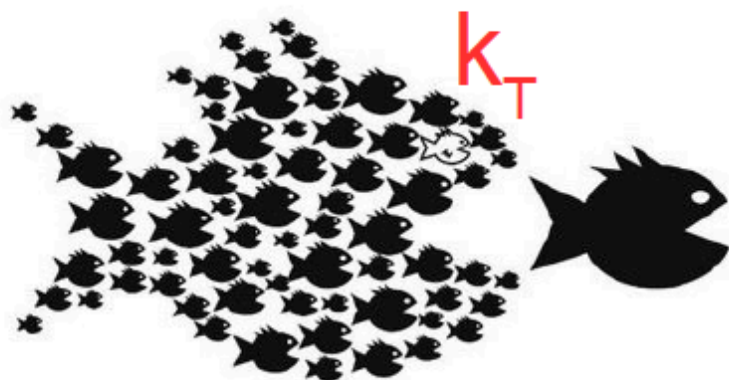
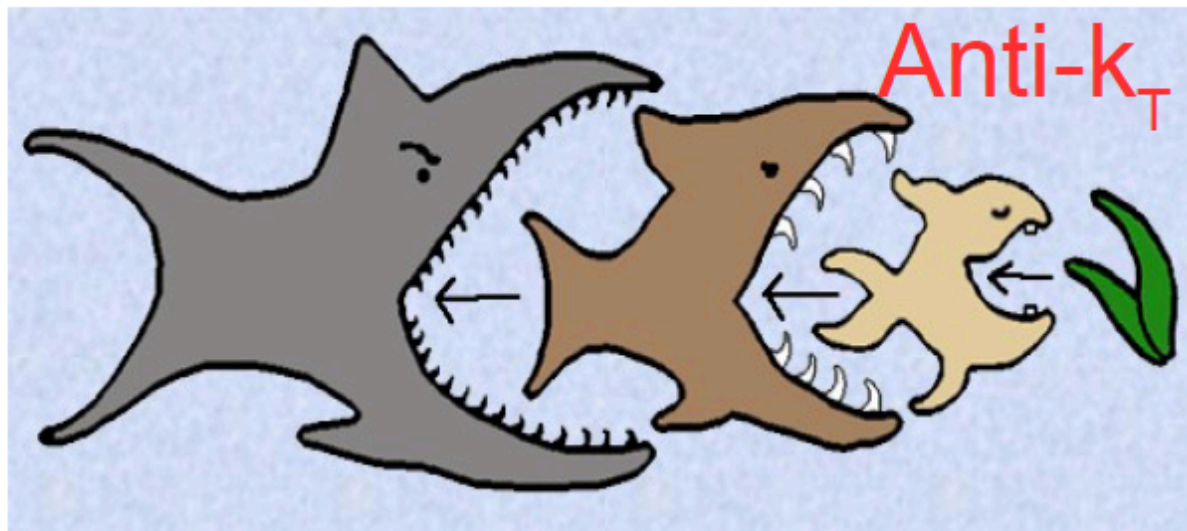
$\alpha = 1$: k_T algorithm

$\alpha = 0$: Cambridge Aachen

$\alpha = -1$: anti- k_T algorithm

$$\Delta R = \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\phi_1 - \phi_2)^2}$$

例えるならば、



Taken from Phil Harris, "Jet Tools",
@ CERN jet workshop (2017)

ジェット再構成の安全性

- 再構成されたジェットは QCD で計算可能でなければならない

ランダムに発生

when $\Delta R \rightarrow 0, p_T \rightarrow 0$

- $\Delta R \min(p_{T1}, p_{T2})^\alpha \rightarrow 0$

– collinear safety:

- $\Delta R \rightarrow 0$ で、ランダムに発生する分岐 (splitting) に対し不変

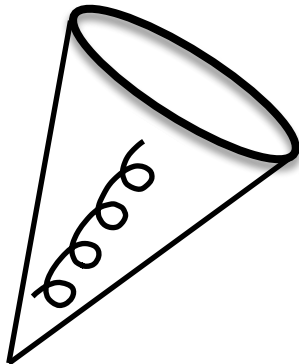
– ALICE では: ハードコア、極端に高い p_T を持つ leading ハドロン (最も p_T の高いハドロン) の要求を課さない

– infrared (赤外) safety:

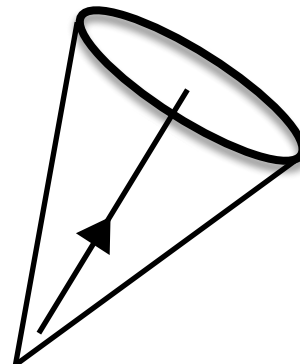
- $p_T \rightarrow 0$ で、ランダムに発生する粒子に対してジェットが不変

– ALICE では: ジェットを構成する粒子に対して、できるだけ小さい E (<300 MeV), p_T (<150 MeV/c) の粒子まで足し合わせる

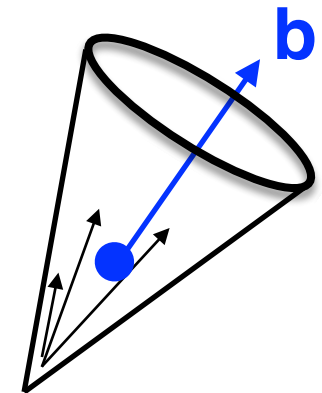
Gluon jet



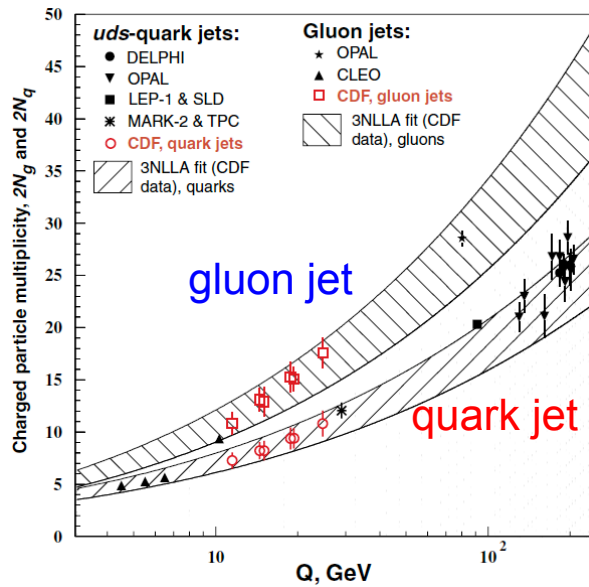
Quark jet

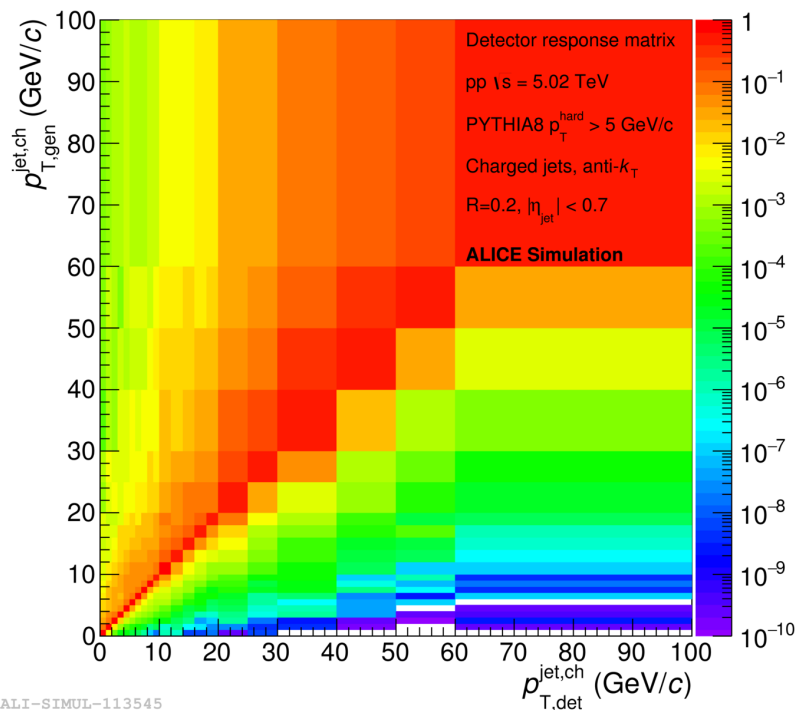


Heavy Flavor jet



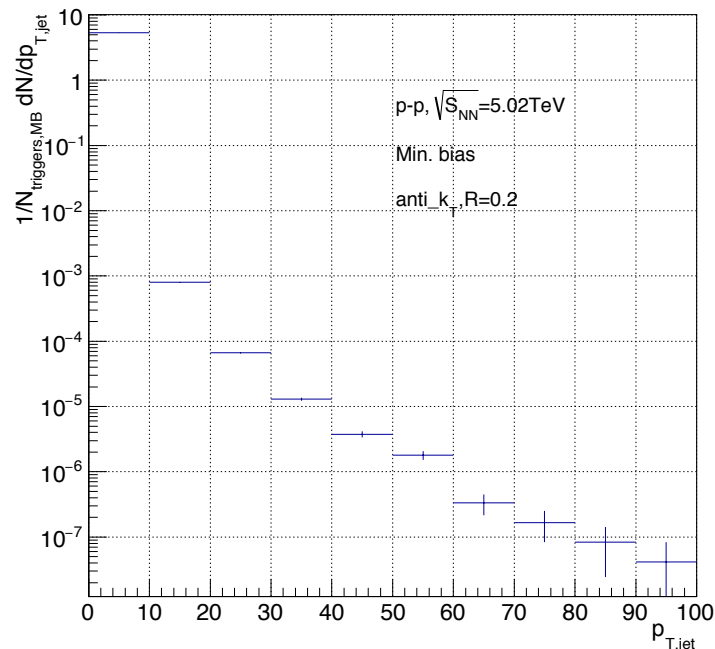
CDF, PRL94(2005)171802





ALI-SIMUL-113545

Charged jets raw p_T spectrum (R=0.2)



×

||

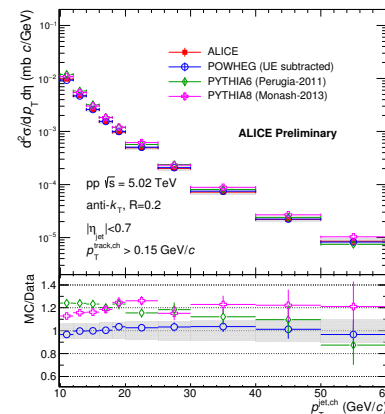
$$\mathbf{M}_m = \mathbf{R}_{m,t}^{\text{det}} \cdot \mathbf{T}_t$$

Measured
Raw spectrum

Detector
Response
Matrix

True
Spectrum

SVD (ALICE default), Bayesian unfolding



R. Hosokawa,
Ph.D thesis (2019)

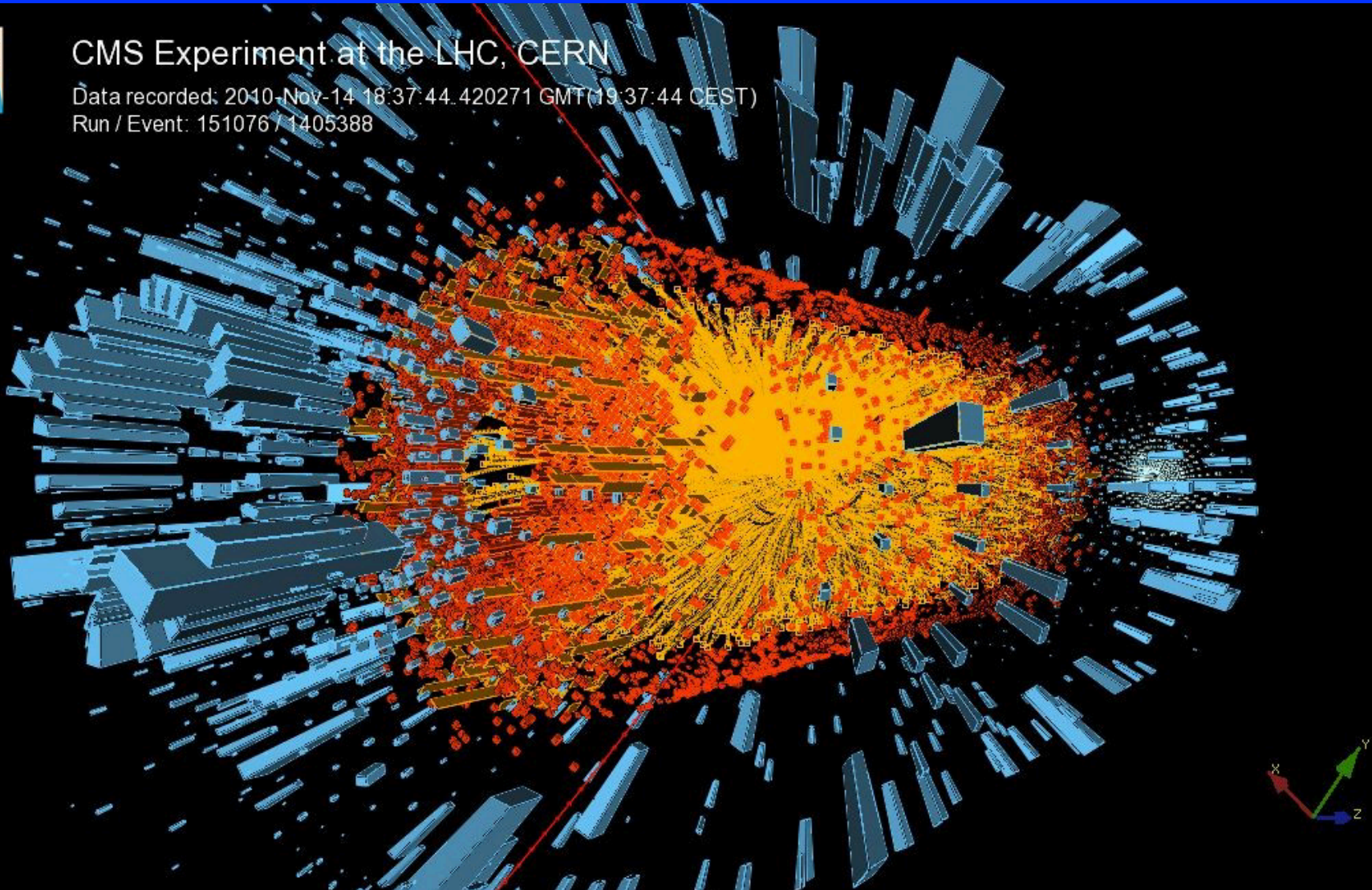
ALI-PREL-113801



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Nov-14 18:37:44.420271 GMT(19:37:44 CEST)

Run / Event: 151076 / 1405388



ソフト・バックグラウンド (BG) の取扱い

1. 平均 BG を引く

- BGの密度: ρ
- **k_T algorithm** を使用、ただし 2つの leading cluster は除外 (=jet)

$$p_{T,jet}^{rec} = p_{T,jet}^{raw} - \rho A_{jet}$$

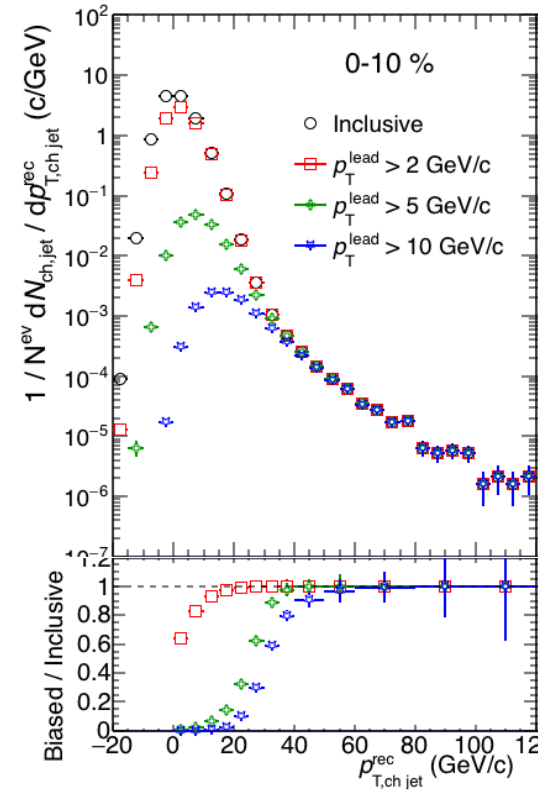
$$\rho = \text{median} \left(\frac{p_{T,i}}{A_i} \right)$$

2. Combinatorial jet BG の除去

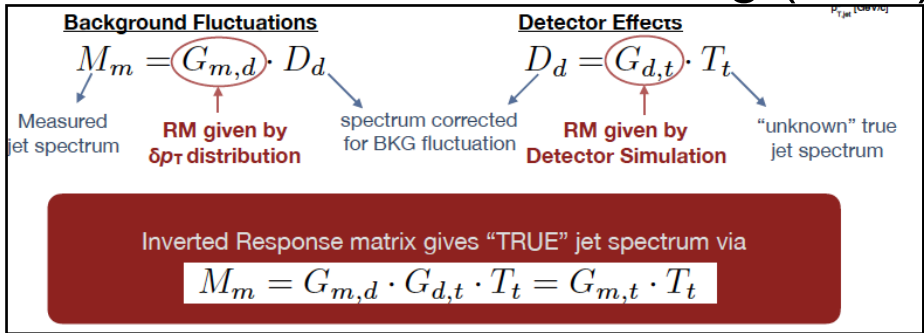
- leading track p_T カットを課す (ALICE)
- $p_{T}^{lead} > 5 \text{ GeV}/c$

3. BG の揺らぎ (δp_T)の補正 (non-Gaussian)

- ランダムコーン法, Unfolding (別の)



H. Yokoyama, Ph.D thesis (2018)



3. パーティン・エネルギー 損失とジェット

高い p_T を持つ

ハドロンの横運動量分布

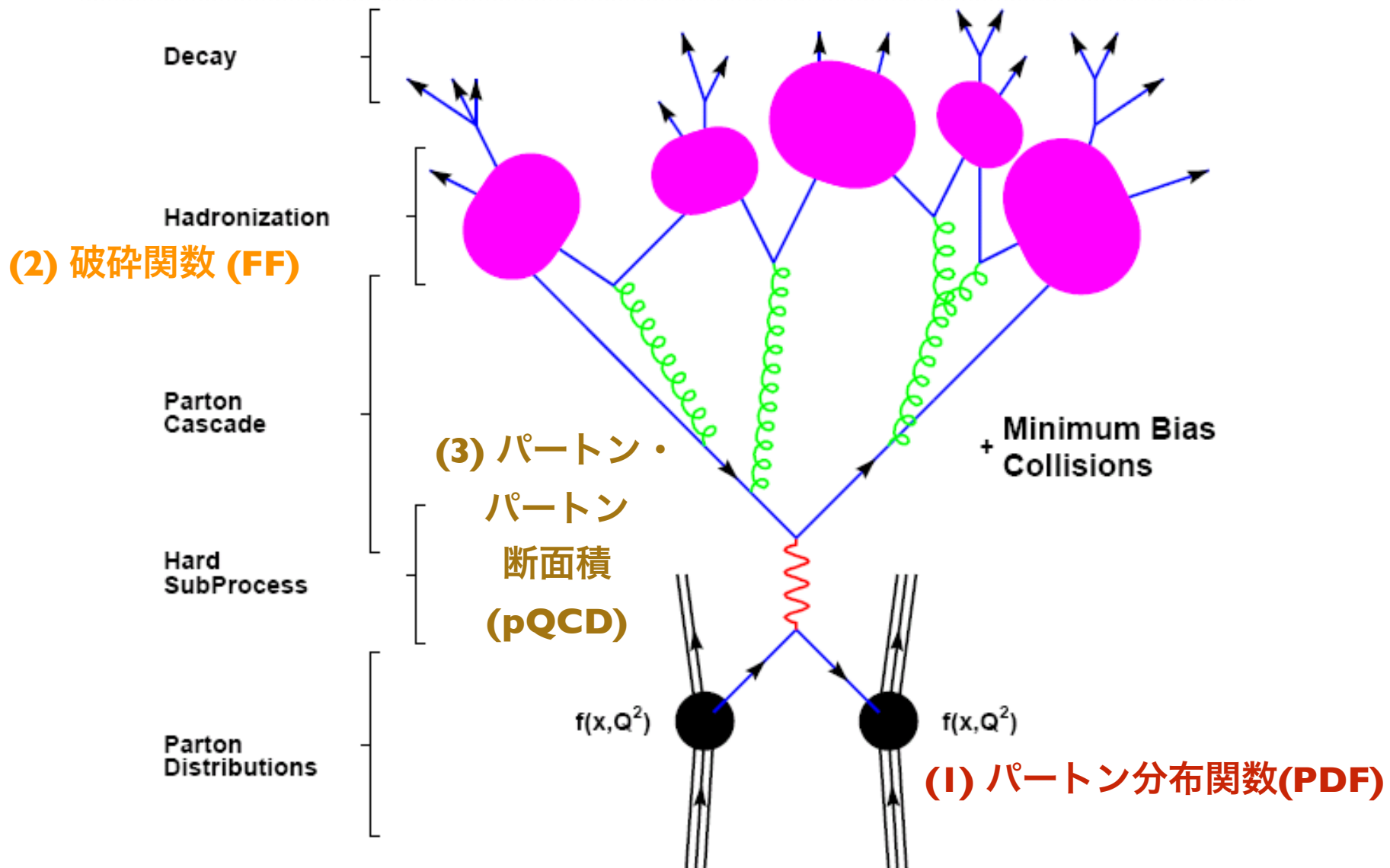
$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \sum_{abc} \int dx_a dx_b \phi_{a/A}(x_a, Q^2, \mu) \phi_{b/B}(x_b, Q^2, \mu)$$

(1) パarton分布関数(PDF) $f_{a/A}(x, Q^2)$
 と書く場合もある

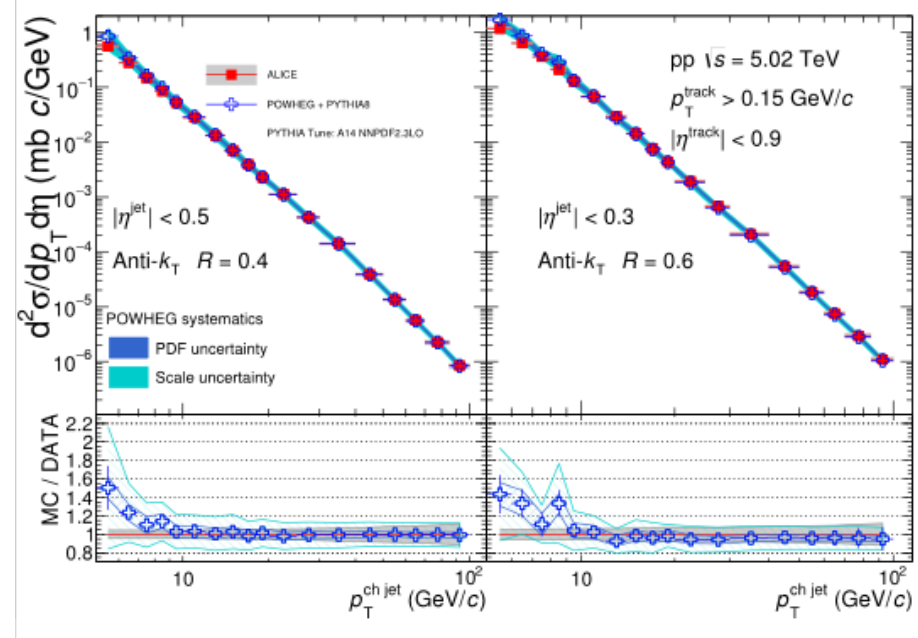
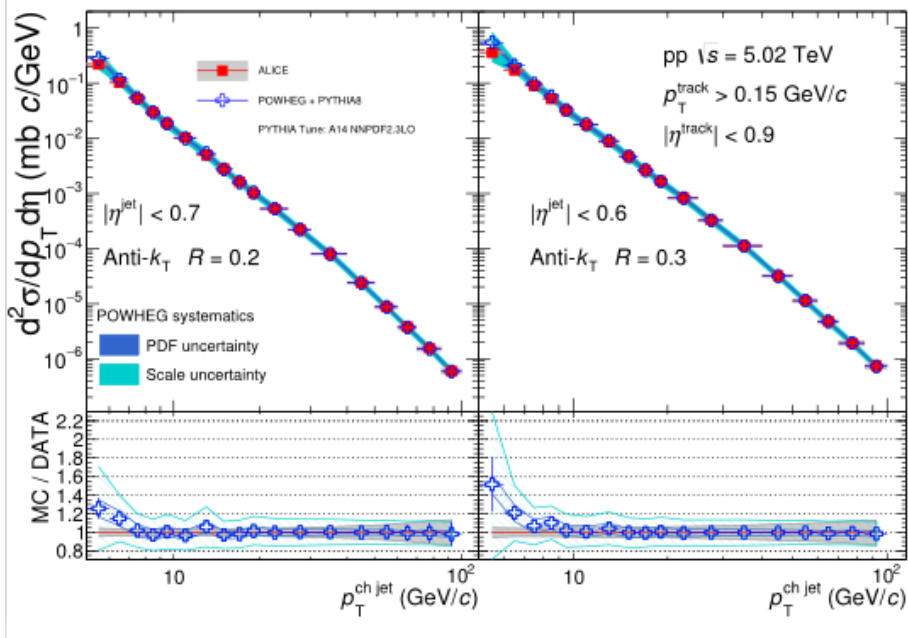
$$\times \frac{D_{\pi^0/c}(z, Q^2, \mu)}{z\pi} \frac{d\hat{\sigma}}{dt}$$

(2) 破砕関数 (FF)

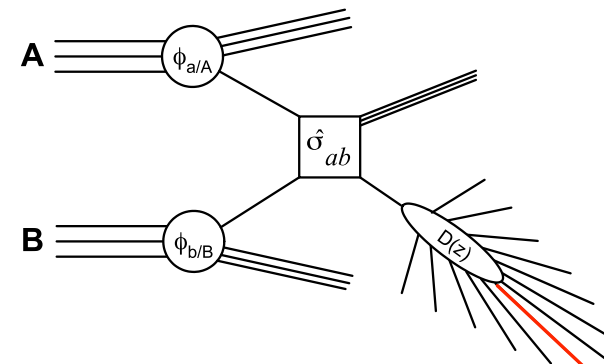
**(3) パarton・パarton
 断面積(cal. by pQCD)**



arXiv:1905.02536 (ALICE)



$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} = \sum_{abc} \int dx_a dx_b \phi_{a/A}(x_a, Q^2, \mu) \phi_{b/B}(x_a, Q^2, \mu) \times \frac{D_{\pi^0/c}(z, Q^2, \mu)}{z\pi} \frac{d\hat{\sigma}}{dt}$$



- NLO pQCD を基にした計算 (POWHEG+Pythia8)、データと比較
- データと計算が良く一致！

高い p_T を持つ

ハドロンの横運動量分布

$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \sum_{abc} \int dx_a dx_b \phi_{a/A}(x_a, Q^2, \mu) \phi_{b/B}(x_b, Q^2, \mu)$$

(I) パarton分布関数(PDF) $f_{a/A}(x, Q^2)$
 と書く場合もある

$$\times \frac{D_{\pi^0/c}(z, Q^2, \mu)}{z\pi} \frac{d\hat{\sigma}}{dt}$$

(2) 破砕関数 (FF)

$$\otimes P(\Delta E)$$

**(4) エネルギー
損失分布**

**(3) パarton・パarton
断面積(cal. by pQCD)**

エネルギー損失: ΔE

- エネルギー損失 ΔE が依存するのは:
 1. 粒子の持つ性質
 - エネルギー E , 質量 m , ...
 2. 媒質の性質
 - 温度 T , 粒子-媒質の結合の強さ α , 通過距離 L

$$\Delta E(E, m, T, \alpha, L)$$

**媒質中の ΔE を特徴付ける物理量
例)**

- 1) 平均自由行程: λ
- 2) 輸送係数: \hat{q}
- 3) デバイ質量、拡散係数...

エネルギー損失を特徴づける物理量

1. 平均自由行程 $\lambda = 1/(\rho\sigma)$

- ρ : 媒質の密度 (理想気体の場合)

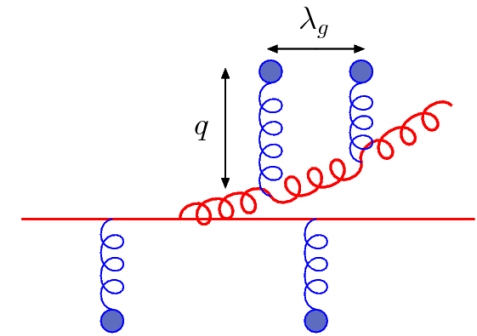
$$\rightarrow \rho \propto T^3$$

- σ : 粒子と媒質の相互作用断面積 $\sigma_{el} \propto \alpha/T^2$

- QED (QCD) クーロン (Yukawa)

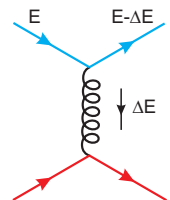
散乱:

$$\rightarrow \lambda \approx 1/(\alpha T)$$



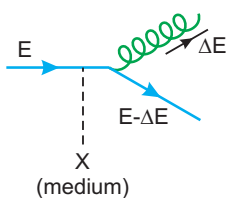
2. 輸送係数 $\hat{q} \equiv \frac{\langle q_{\perp}^2 \rangle}{\lambda}$

- 単一散乱あたりの q_{\perp}^2 で見た媒質散乱強度



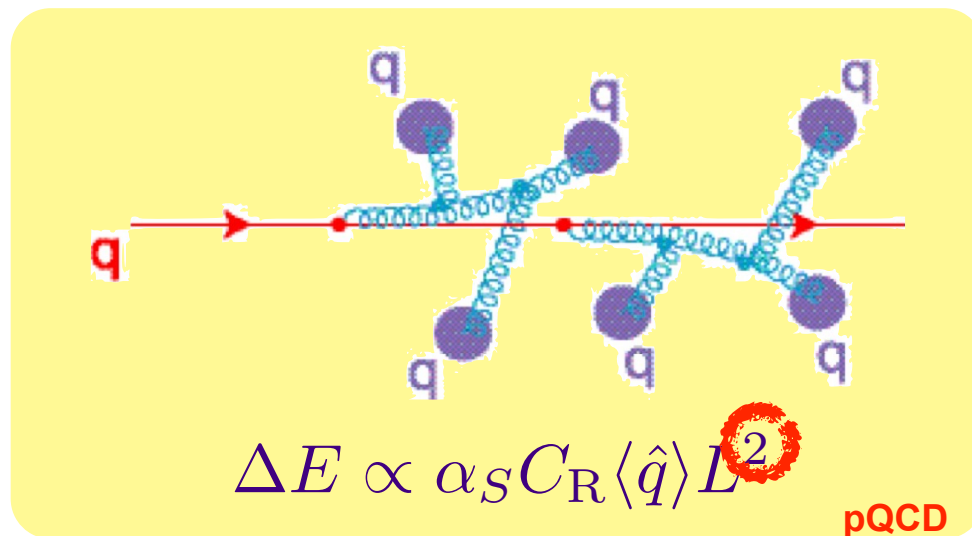
Collisional

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



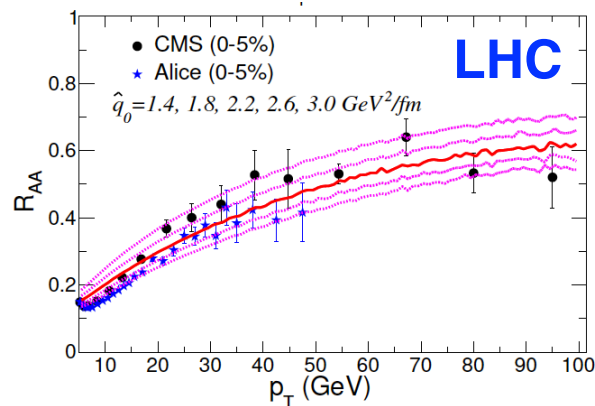
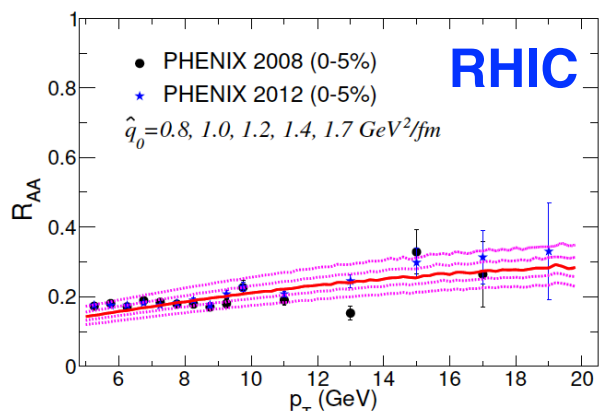
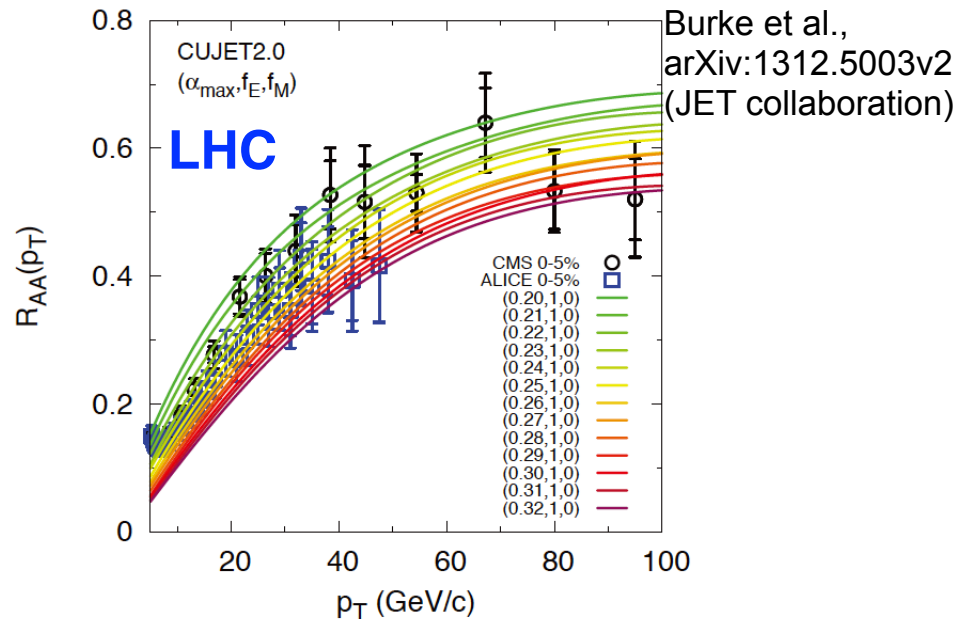
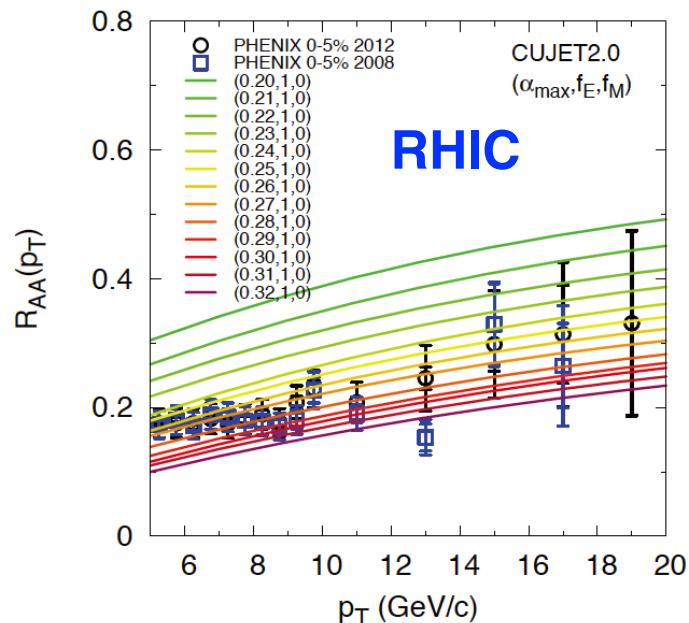
Radiative

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



✓ LHC: 放射によるエネルギー損失が支配的

$$\Delta E \sim \alpha_s \hat{q} L^2$$



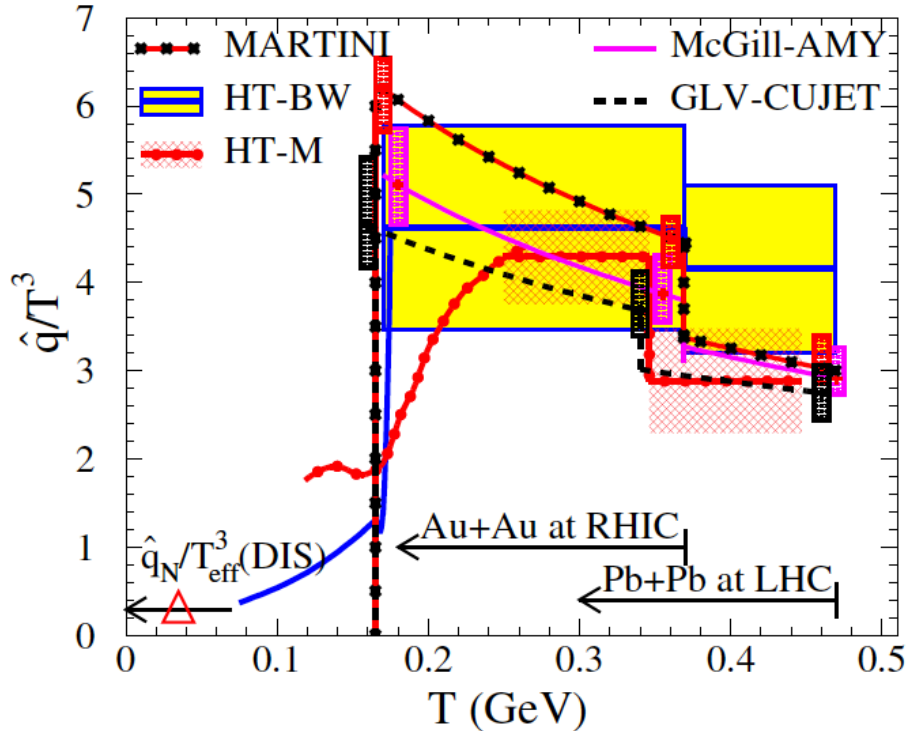
RHIC と LHC のデータとエネルギー損失モデルと比較

流体計算を含むエネルギー損失

p_T 依存性をよく再現

\hat{q}/T^3 vs. T

Burke et al.,
arXiv:1312.5003v2
(JET collaboration)



$$\hat{q} \approx \begin{cases} 1.2 \pm 0.3 & \text{at } T=370 \text{ MeV,} \\ 1.9 \pm 0.7 & \text{at } T=470 \text{ MeV,} \end{cases} \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

- RHIC 200 GeV Au+Au central
- LHC 2.76 TeV Pb+Pb central

$$\frac{\hat{q}}{T^3} \approx \begin{cases} 4.6 \pm 1.2 & \text{at RHIC,} \\ 3.7 \pm 1.4 & \text{at LHC,} \end{cases}$$

異なるエネルギー損失モデルだが、consistent な \hat{q} の値

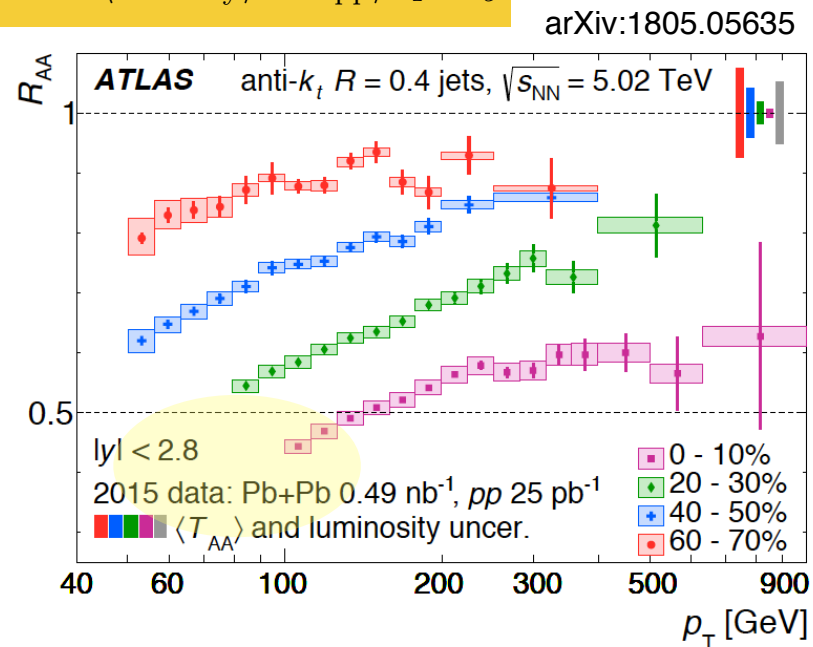
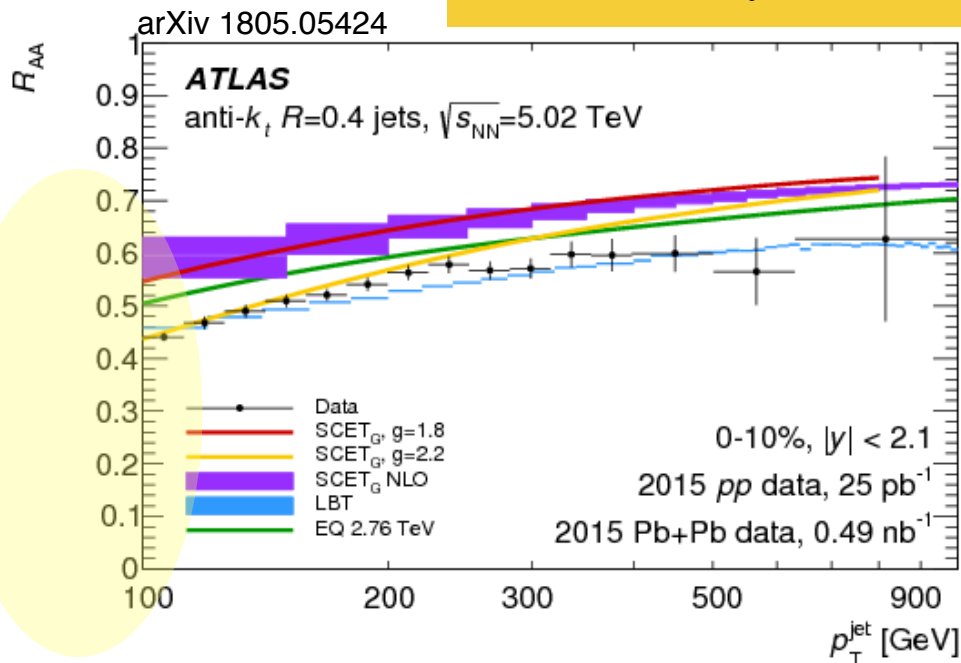
HTL (Hard thermal loop) の予測： $\hat{q} \sim 24\alpha_s^2 T^3 \sim 2T^3$

\hat{q}/T^3 ：温度依存性？ running α_s ？

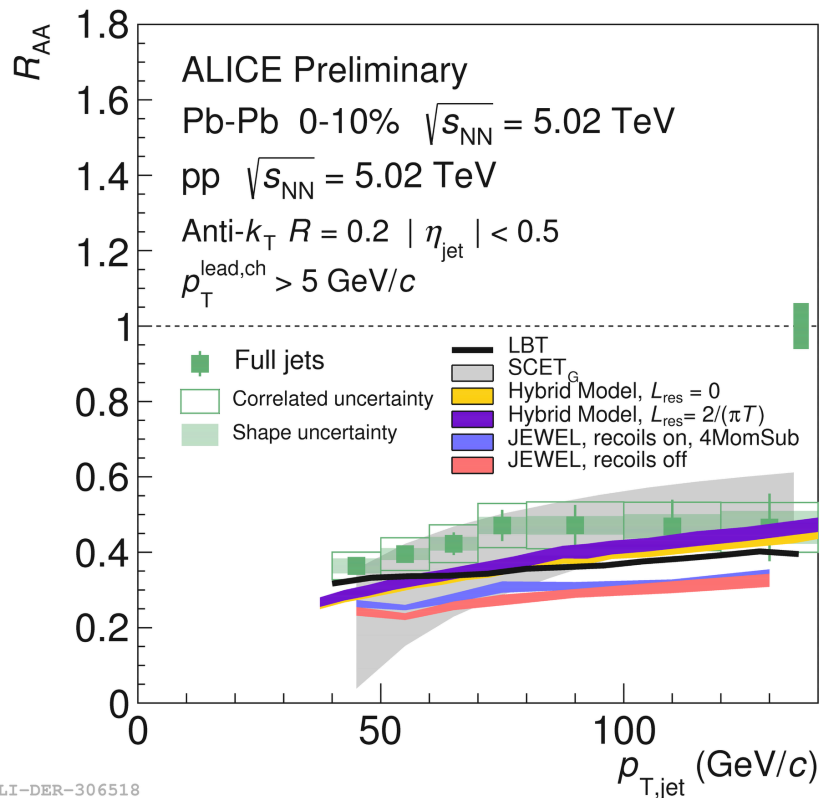
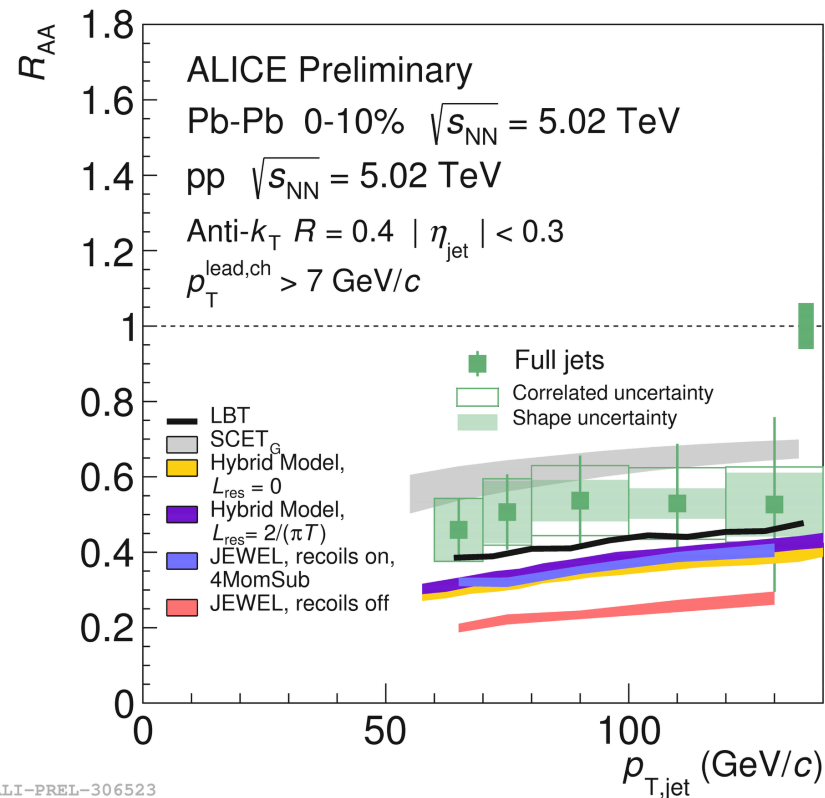
Arnoldo and Xiao, arXiv:0810.1026

4. 最新結果から

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

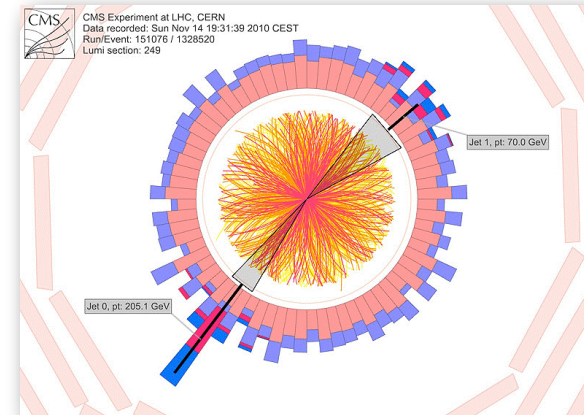
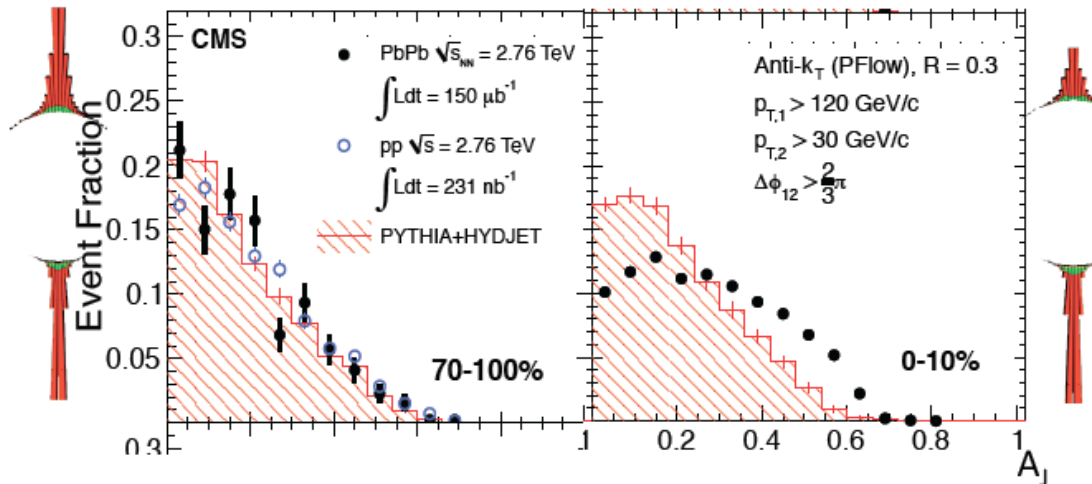


900 GeV までのジェットを測定、 $R_{AA} \sim 0.5 - 0.6$ 、 p_T 依存性あり
100 GeV 以下の low p_T ジェットは？

$R = 0.2$

 $R = 0.4$


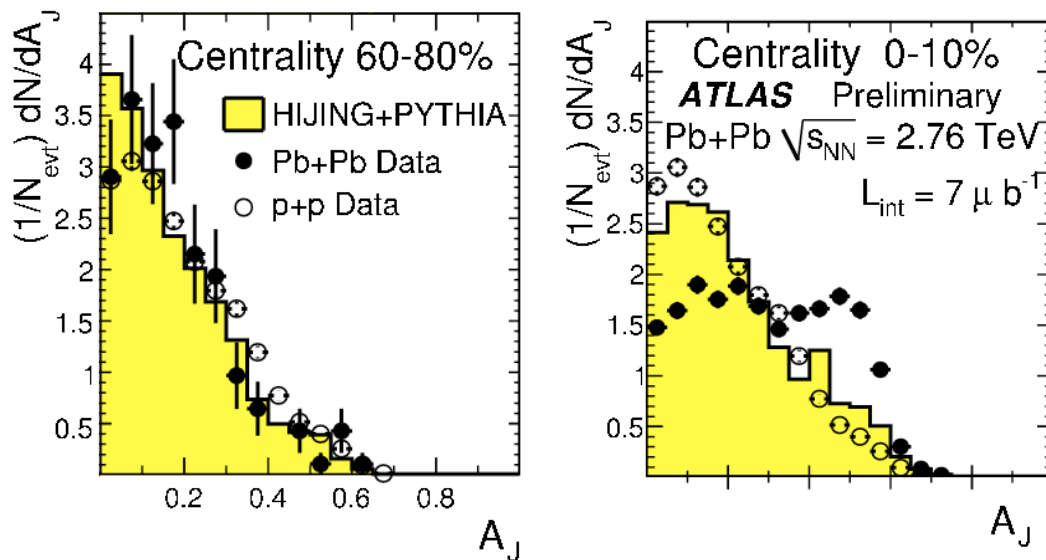
- $R = 0.2, 0.4$ のジェット、 $p_T = 40 - 50$ GeV/c まで測定
- p_T 依存性は弱い、low p_T でより強く抑制か？

CMS, PRC 84, 024906 (2011)



Pb-Pb 中心衝突で大きなエネルギー・インバランスを観測

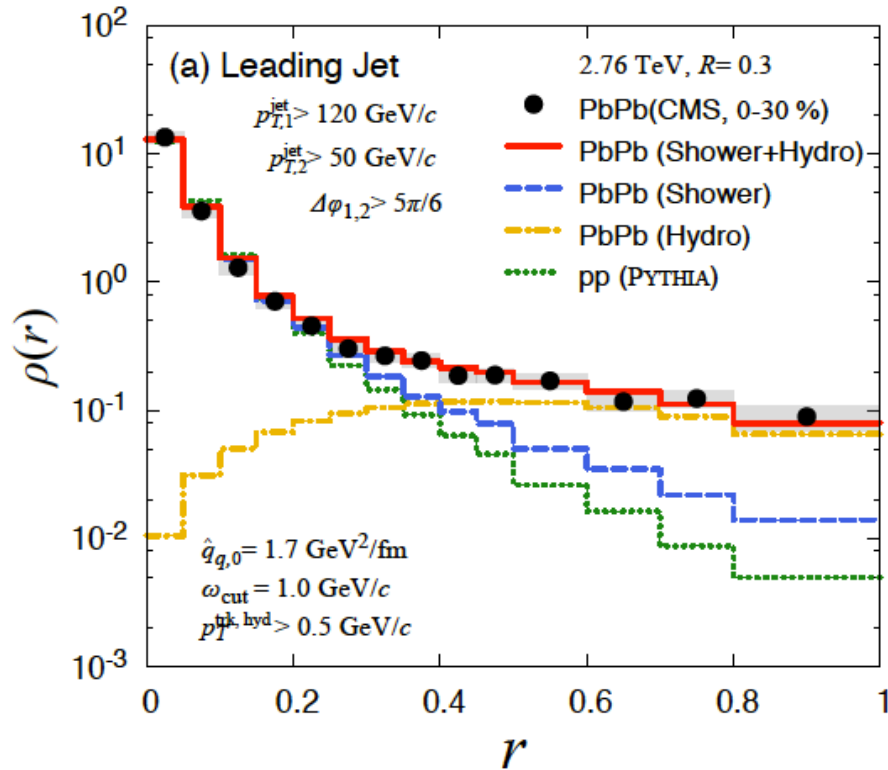
ATLAS, PRL, 105 (2010) 252303



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

$p_{T,1}$: leading jet
 $p_{T,2}$: sub-leading jet

Tachibana, Phys.Rev.C 95, 044909 (2017)



Quenched parton shower
+
medium excitation

Quenched parton shower

Vacuum parton shower

- 大きな角度 (large r) でソフトな粒子生成
- 媒質応答の重要性

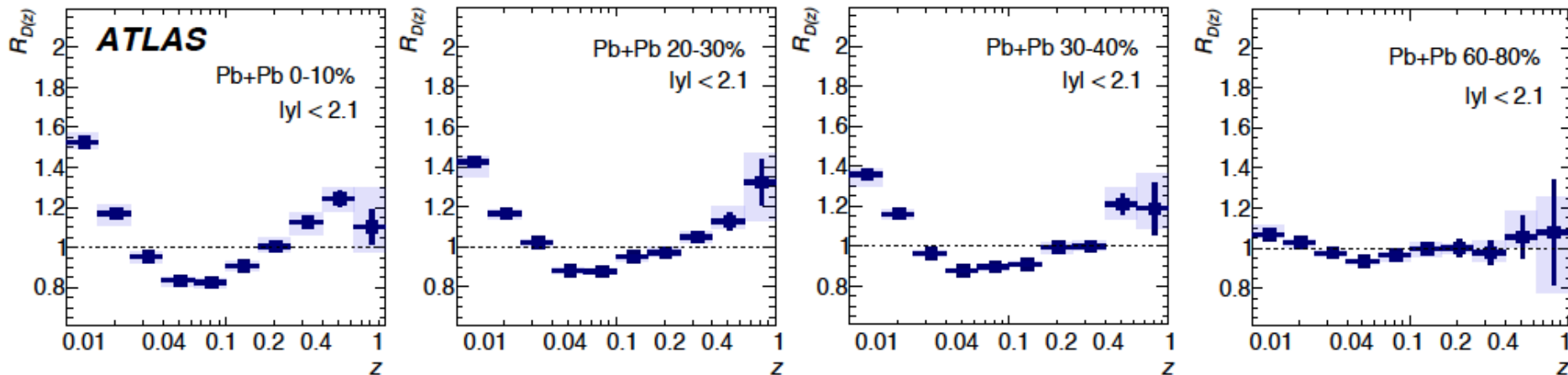
破碎関数の変化

ATLAS

2.76 TeV: EPJC 77 (2017) 379

中心衝突 ←

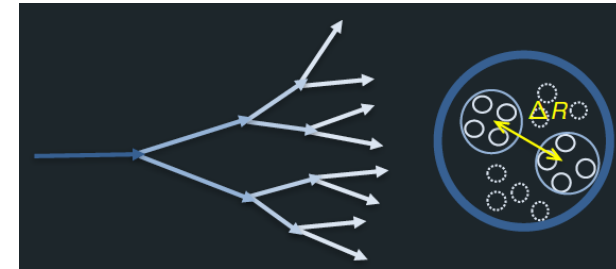
→ 周辺衝突



$$R_{D(z)} = \frac{D(z; p_{T}^{\text{jet}}) \text{ in } \mathbf{A+A}}{D(z; p_{T}^{\text{jet}}) \text{ in } \mathbf{p+p}}$$

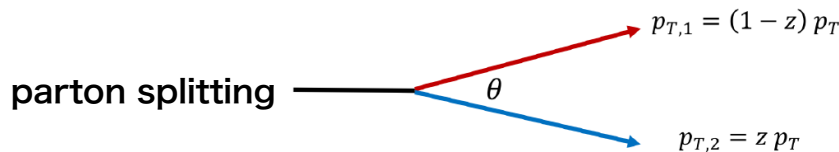
- 中心衝突で破碎関数が変化
- Large z: 増加, mid-z: dip, small z: 増加

- ジェットのハードコアを抜き出すため、繰り返しde-clustering
 - 大角度ソフトなハドロンを繰り返し「グルーミング」
 - C/A アルゴリズムで再クラスタリング：ジェット再構成
 - Soft Drop 条件（以下の式）を満たすまで、ソフト分岐を除去



$$z_g = \frac{\min(p_{T1}, p_{T2})}{p_{T1} + p_{T2}} > z_{cut}$$

– それぞれのジェットは2つサブジェットから構成

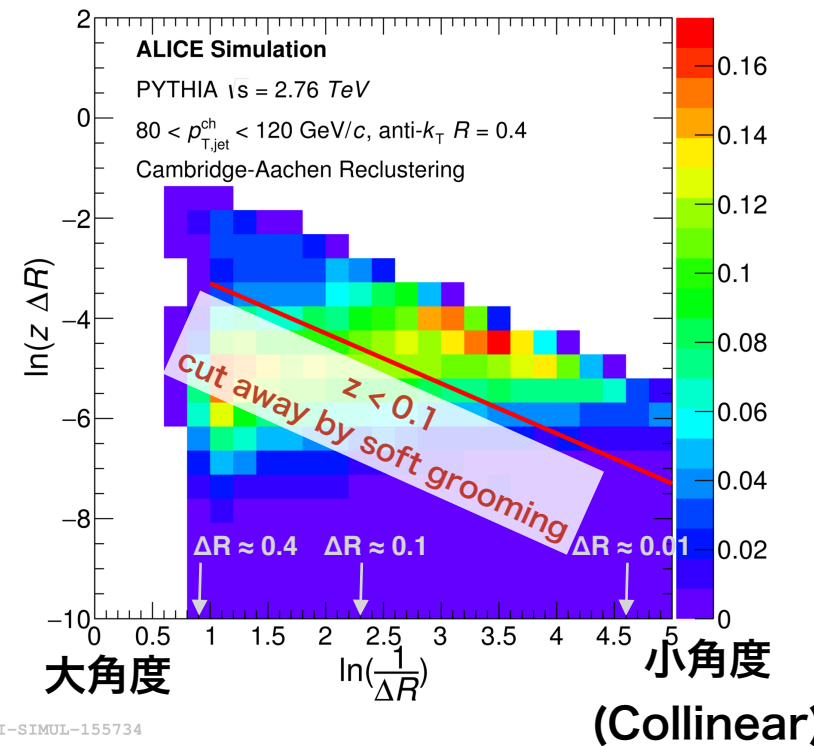


• Lund ダイアグラム (マップ)

- 全てのジェット分岐のマップ
- 運動量の割合 (z) vs. 角度 (θ)

• グルーミング

- 興味のある部分（この場合 hard core）のシグナル強度を高めるため、位相空間でカット
- ソフトドロップ: 最大 p_T が次式を満たすまで繰り返す $z > z_{cut} \cdot (\Delta R)^\beta$

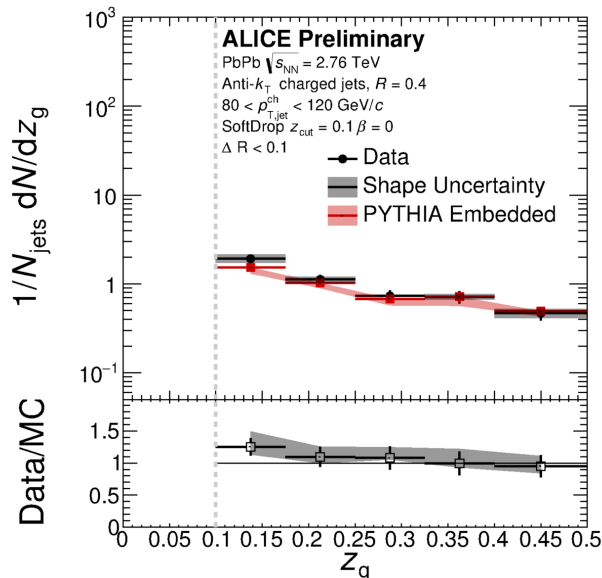


ALI-SIMUL-155734



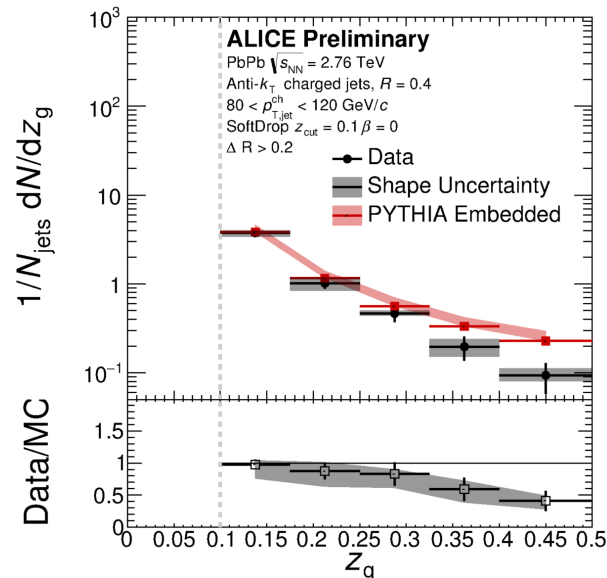
2つの角度で見てみる：小角度ど大角度のカット

$\Delta R < 0.1$ (小角度= collimated)



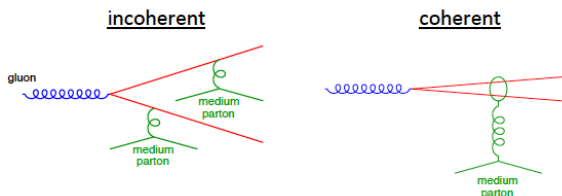
z_g : shared momentum fraction of the first groomed splitting

$\Delta R > 0.2$ (大角度)



$$z_g = \frac{\min(p_{T,1}, p_{T,2})}{p_{T,1} + p_{T,2}}$$

エネルギー損失の「コヒーレンスさ」に敏感
 sensitive to coherence of energy loss



小角度：小さな z_g でわずかな増加あり

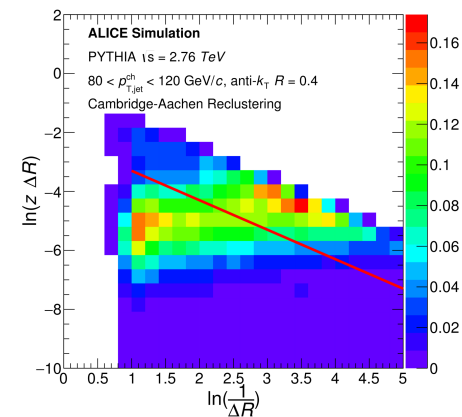
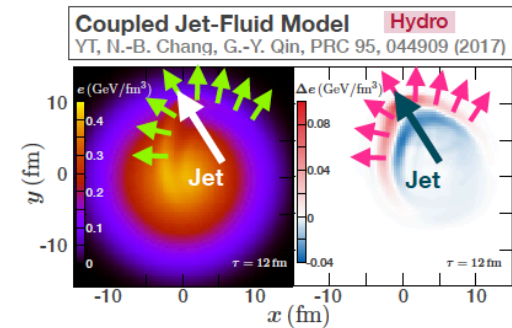
大角度：対称な分岐 ($z \sim 0.5$) で大きな抑制

5. Summary & outlook

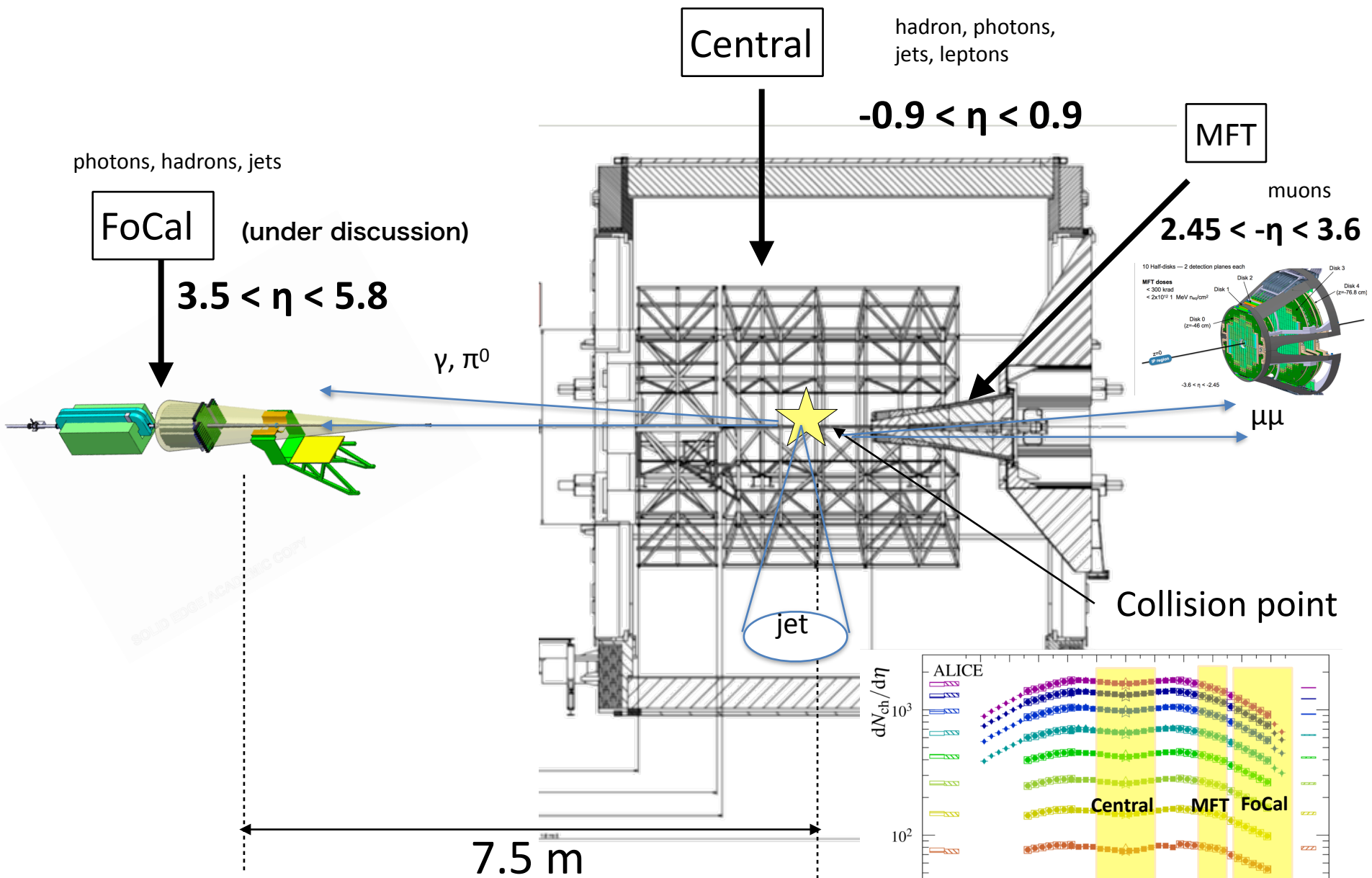
- ジェットはQGP物性と媒質応答を知るための強力なプローブ
- ジェットの再構成の基本概念、定義
- パarton・エネルギー損失からわかるQGP物性量 (\hat{q} を例に)
- いくつかの最新結果の紹介とその意味

5. 今後の方向性

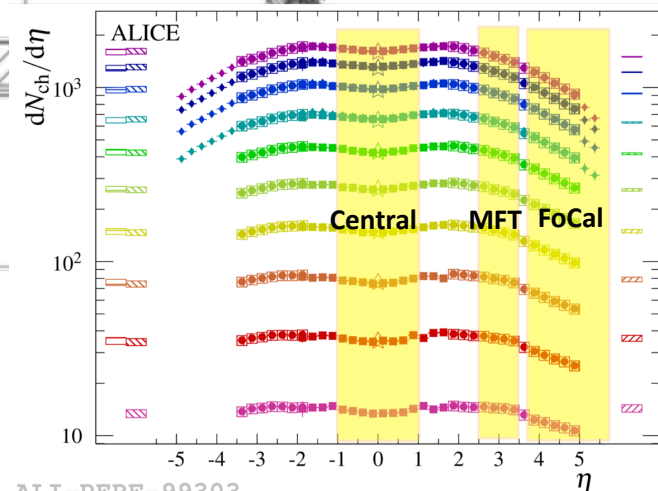
- ジェット媒質応答と shock wave 探索
 - low p_T , large R , PID, ...
- Jet トモグラフィー
- 小さな系でなぜ jet quenching が見えないのか？
- 大角度散乱現象の探査と QGP 物性
- Lund マップの応用
- Machine Learning, ジェットへの応用
- 超前方方向へ、CGCの実験的証拠、QGPの起源（光子・ジェット）



ALI-SIMUL-155734



ALICE Forward Upgrade (Run-3/4)



FoCal = Forward Calorimeter:

FoCal-E: EM Calorimeter

FoCal-H: Hadronic Calorimeter

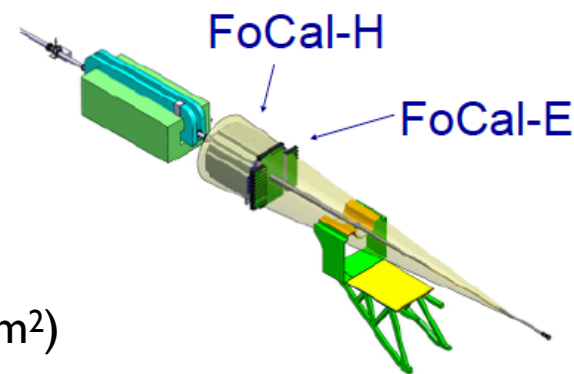
- 衝突点から~7 m
- 技術的困難さ: 高エネルギー γ/π^0 の分離
- Si-W 電磁カロリメータ (hybrid Si: pad 1cm^2 & MAPS $30\mu\text{m}^2$)
- Run-4 ALICE 以降のアップグレードとして提案中

• カラーグラス凝縮効果の実験的検証 @ small-x ($\sim 10^{-5}$)

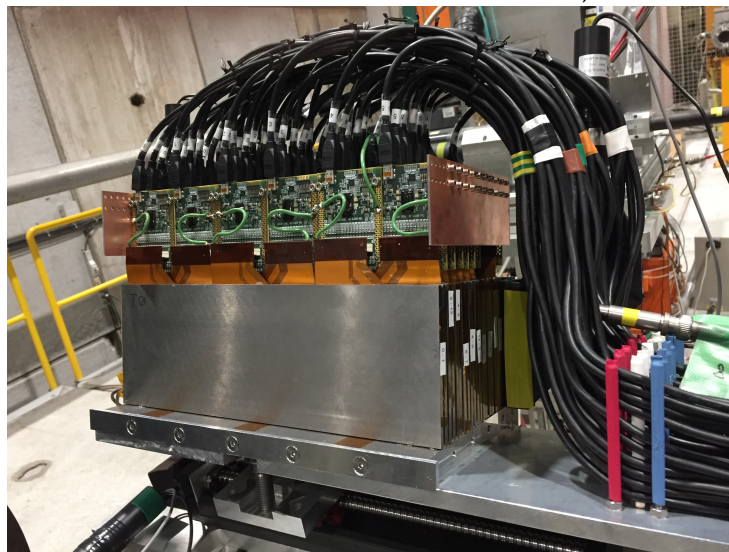
$3.2 < \eta < 5.8$

• QGP の起源

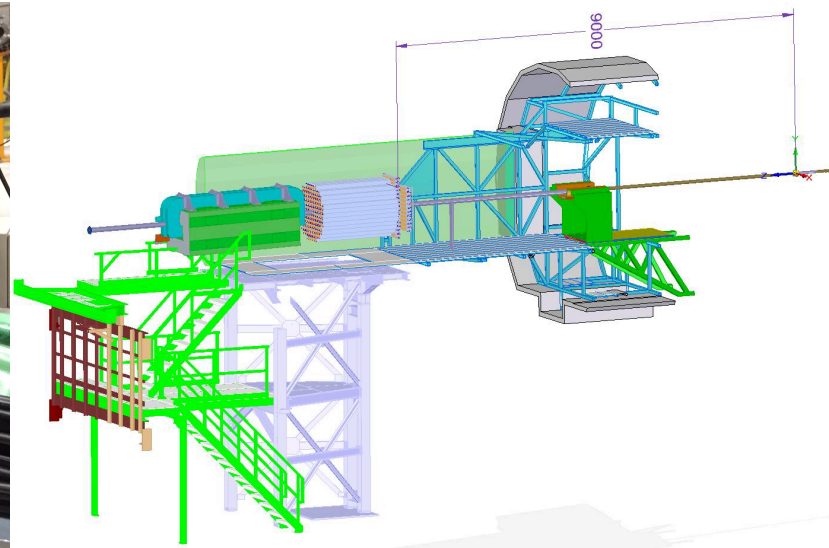
- 主要な観測量: 直接光子、ハドロン崩壊光子, π^0 - π^0



MAPS detector



mini-FoCal (PAD)



参考文献

1. D. d'Enterria and B. Betz, “High- p_T Hadron Suppression and Jet Quenching”, in lecture notes in physics 785, Springer (2010) “The Physics of the Quark-Gluon Plasma: Introductory Lectures”.
2. FastJet user manual (for version 3.0.1), arXiv:1111.6097.
3. Slides from “Novel tools and observables for jet physics in heavy-ion collisions / 5th Heavy Ion Jet Workshop“ (Aug-Sep, 2017 @ CERN)
 - <https://indico.cern.ch/event/625585/overview>
 - especially, Phil Harris, “Jet Tools”

ご静聴

ありがとうございます。