



# Jet in ATLAS

---

隅田 土詞

2012年7月5日

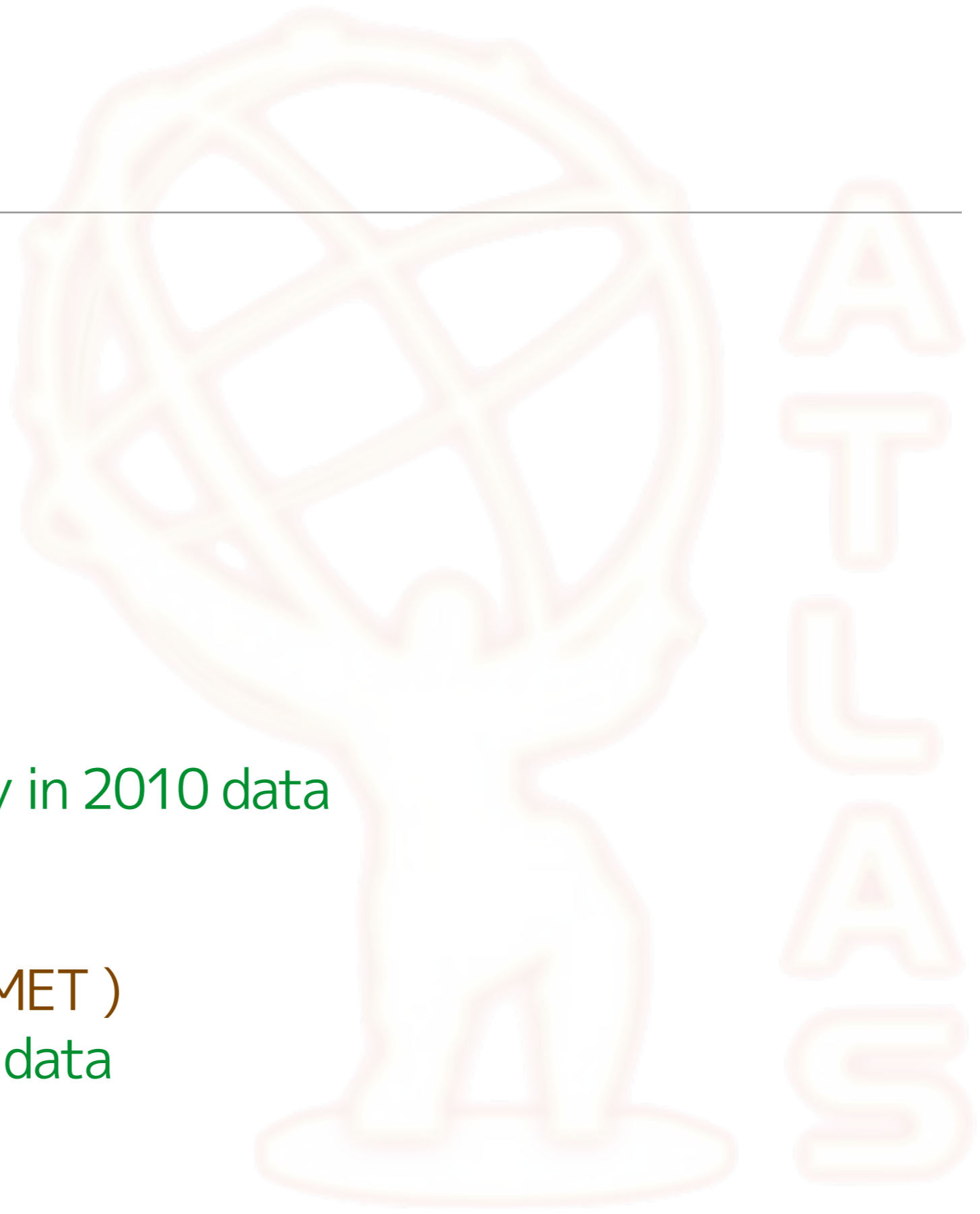
Kyoto ATLAS group meeting



# Outline

---

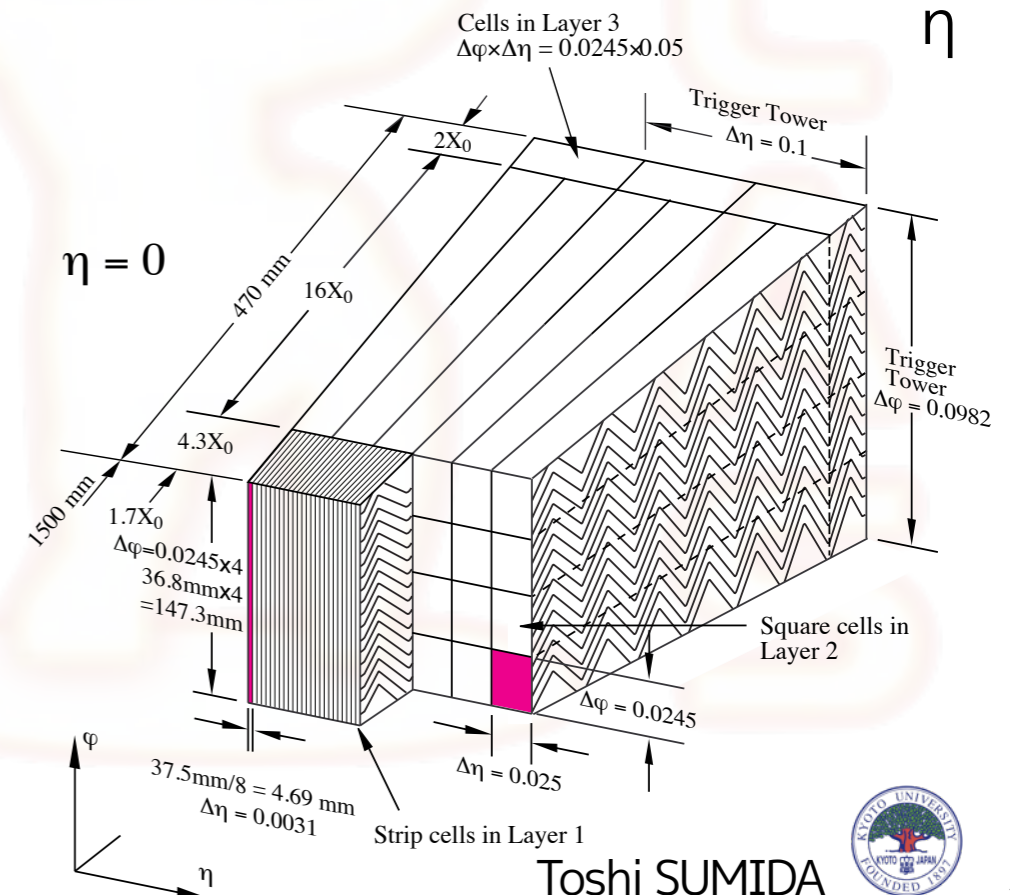
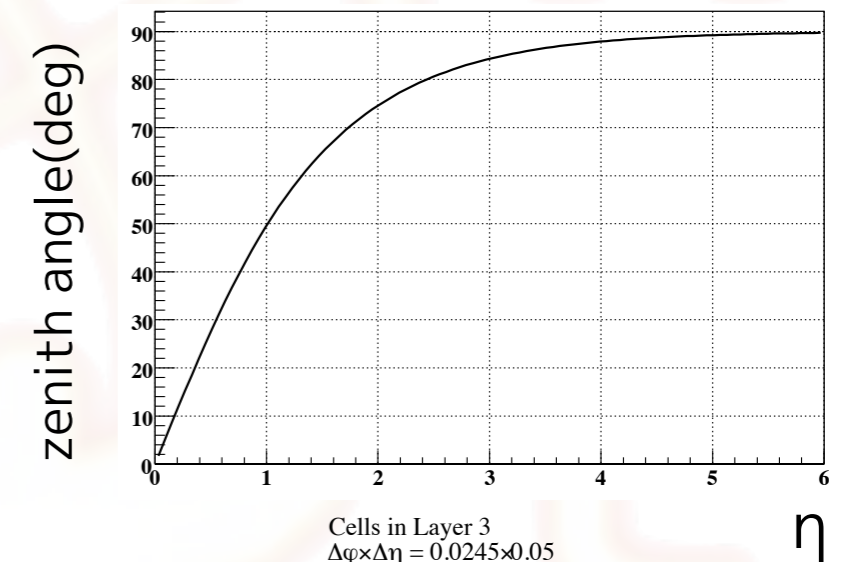
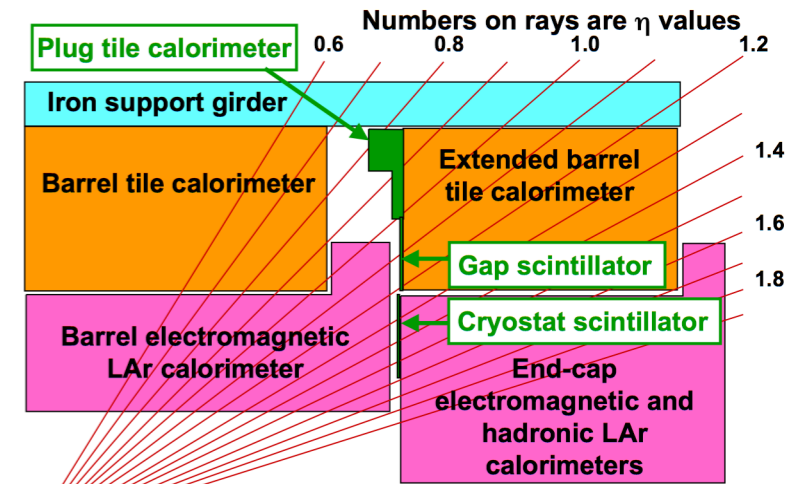
- Introduction
  - ATLAS calorimeter
  - What are Jets ?
    - ▶ physics, measurement
  - Jet reconstruction
- Jet calibration
  - Absolute jet calibration
  - In-situ jet calibrations
- Jet Energy Scale uncertainty in 2010 data
  - ▶ MC-base, single particle
- Pile-up
  - corrections for jets ( and MET )
- JES uncertainty in 2011 full data
  - pile-up correction
  - in-situ calibrations



# Introduction

# コライダーでの座標表示

- pseudo-rapidity
  - $\eta = -\ln(\tan(\Theta/2))$ 
    - ▶  $\Theta$ : 天頂角
      - 0: 検出器中心から垂直の面
    - ▶ coverage in ATLAS :  $|\eta| < \sim 4.9$
- ビーム軸周りの方位角
  - $-\pi < \Phi < \pi$  (rad)
- 検出器中心から延びる方向
  - "longitudinal" (あんまり気にしない)
- 物理オブジェクト同士の"距離"
  - $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta^2 + \Delta\Phi^2)}$ 
    - ▶ もちろん  $dN/dR$  には意味があるし、中心付近では実際の大きさも近い



# The ATLAS Calorimeter

- 電磁カロリメータ

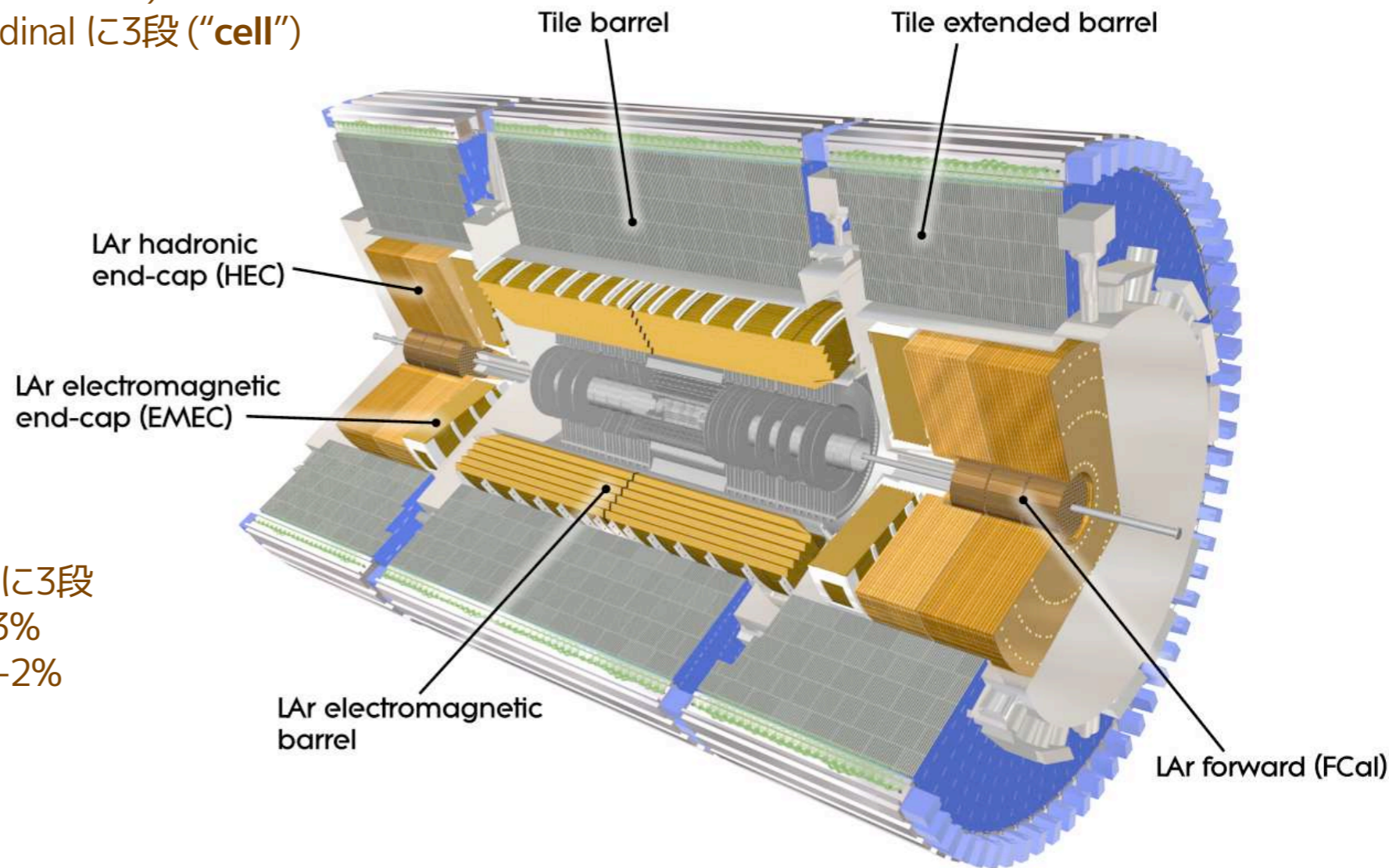
- Liquid Argon : "LAr"
- 鉛アコーディオン型 radiator + LAr (ionization)
- Segment:  $0.025 \times 0.025 \eta\text{-}\Phi$ , longitudinal (3段 ("cell"))
- Resolution:  $\sigma E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$
- Coverage
  - ▶ EC までで  $|\eta| < 3.2$

- ハドロンカロリメータ

- "TileCal"
- 鉄 absorbers  
+ タイル型 plastic シンチレータ
- Coverage
  - ▶ Long Barrel:  $|\eta| < 1.0$
  - ▶ Extended Barrel:  
 $0.8 < |\eta| < 1.7$
- $\eta\text{-}\Phi$  Segment:  $0.1 \times 0.1$ , longitudinal (3段)
- Resolution:  $\sigma E/E$  (jet) =  $\sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$
- goal : Jet energy scale uncertainty: 1-2%

- その他

- Hadron Endcap Calorimeter
  - ▶ "HEC",  $|\eta| < 3.2$
- Forward Calorimeter
  - ▶ "FCAL",  $3.1 < |\eta| < 4.9$ 
    - ✓ いずれも技術は Copper+LAr

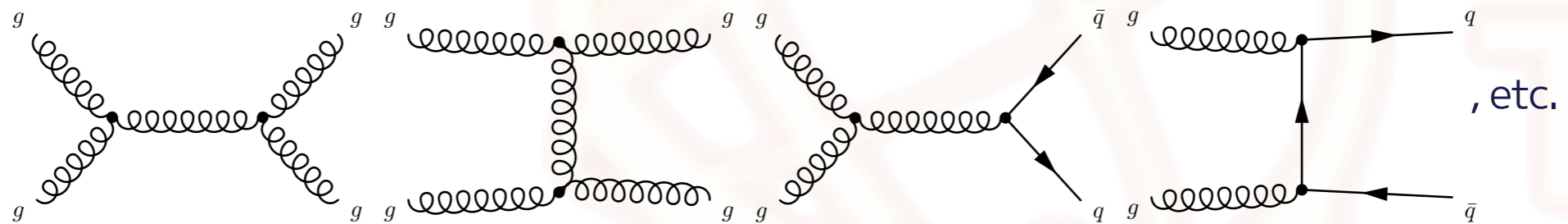


# 陽子-陽子衝突で起こること

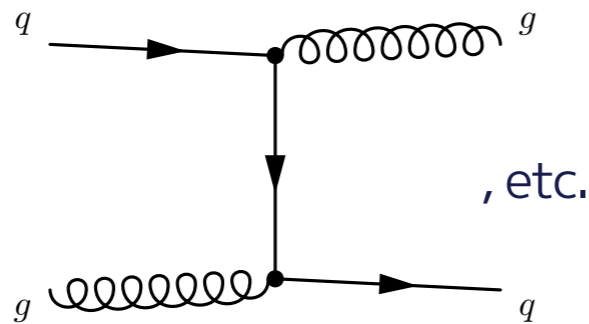
- 高エネルギーでのハドロン衝突 = パarton + パarton 衝突

- 2→2 プロセス

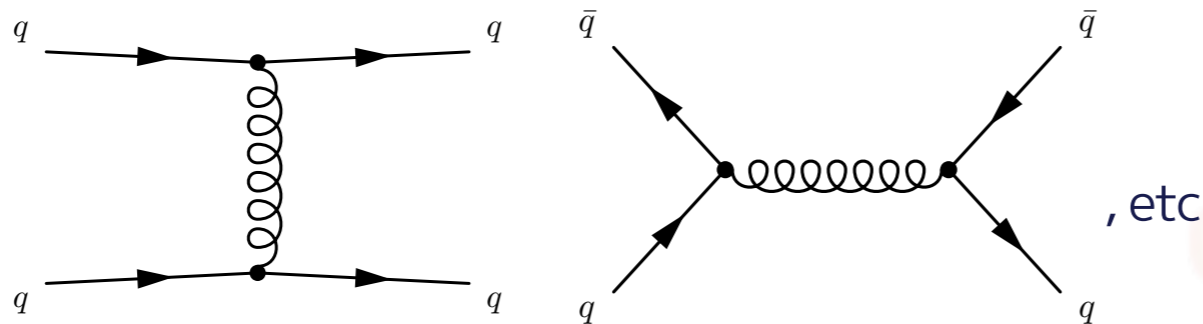
- ▶ gg 反応(一番多い)



- ▶ qq 反応



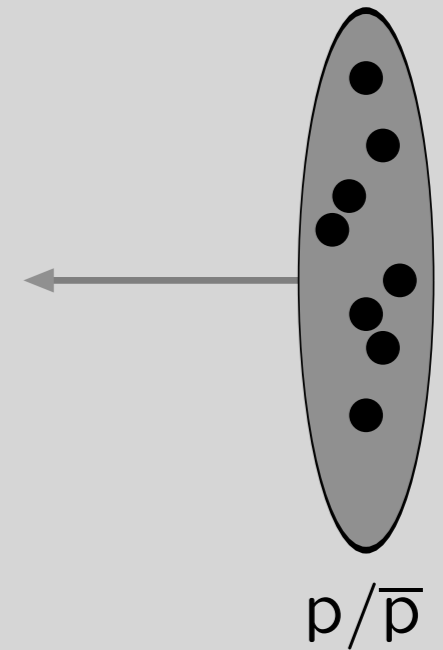
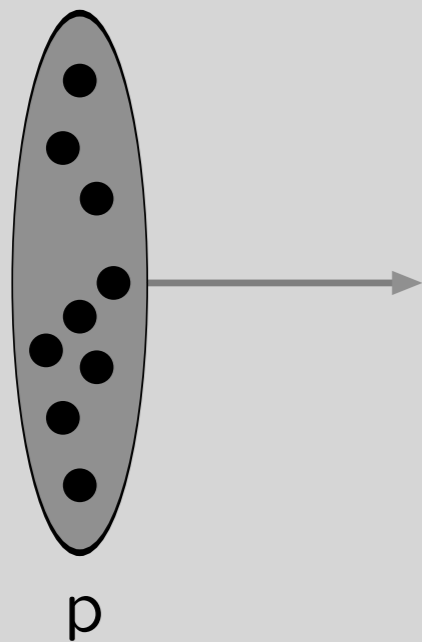
- ▶ qq 反応



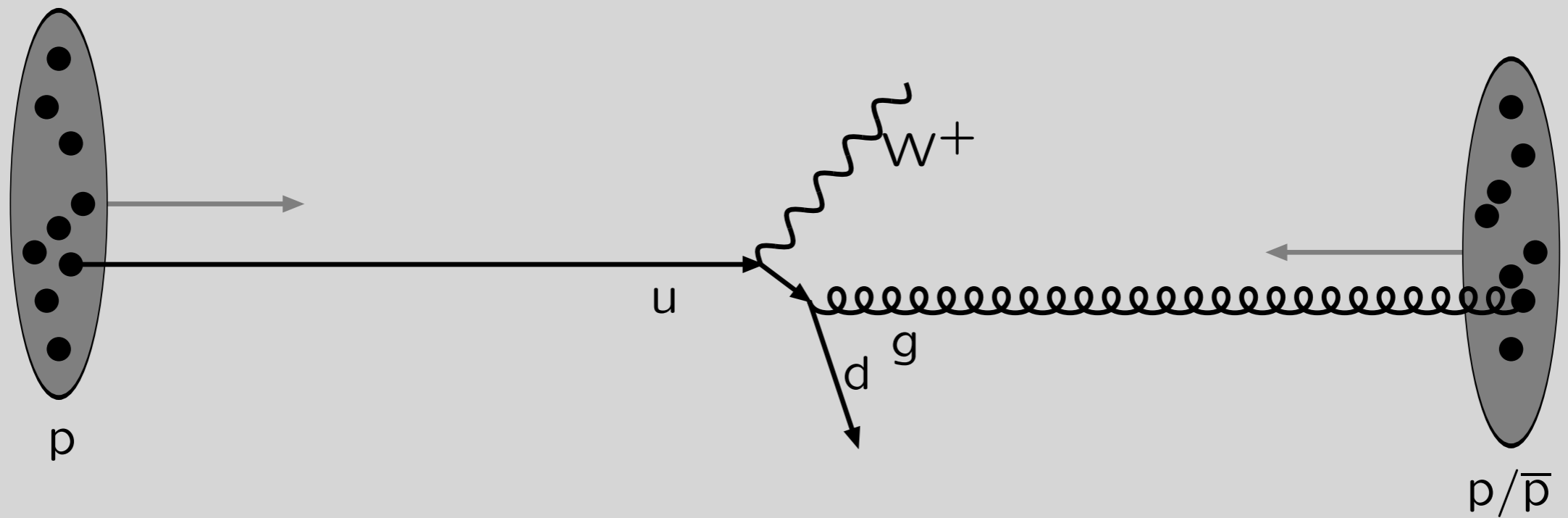
LHC で起こるほとんどの事象は QCD で作られる。  
 放出された高エネルギーパートン  
 (クォーク、グルーオン) が Jet になる。  
 2→2 プロセスで **di-jet** イベントができる。  
 その他、ISR, FSR での low pT jet、  
 高次反応で multi-jet に。

もう少し...

# ハドロン衝突で起こっていること ( $W + \text{jet}$ 生成の場合)

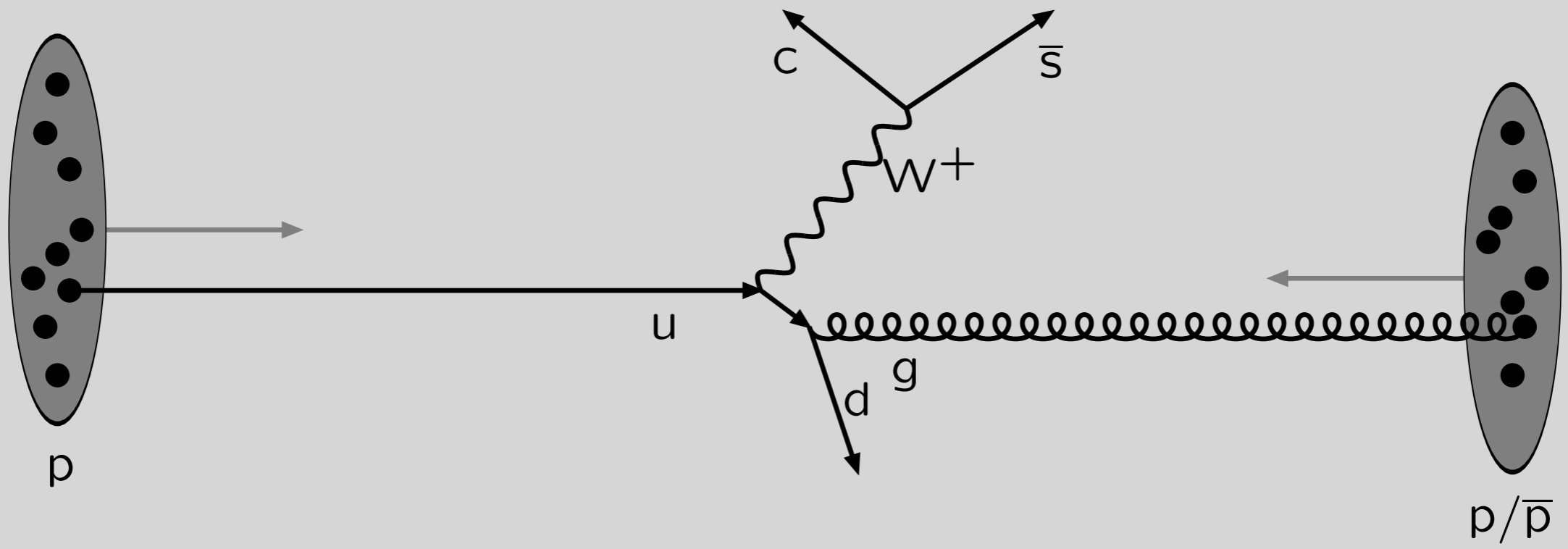


K. Hanagaki

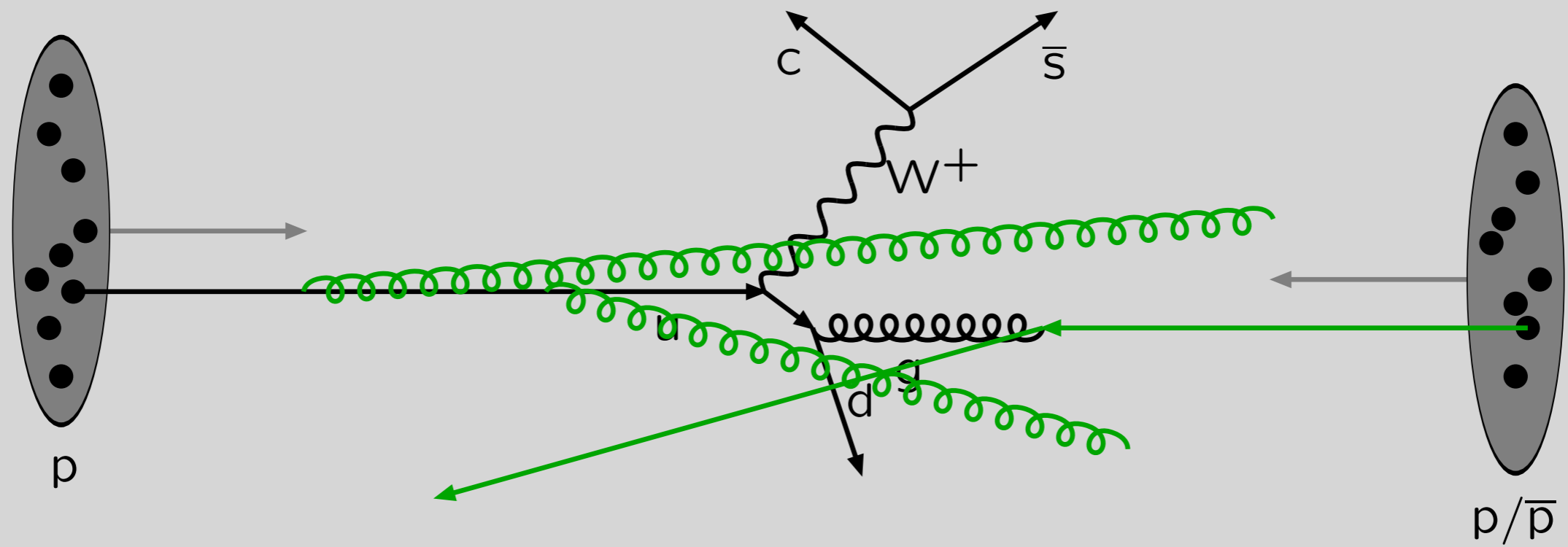


Hard interaction  
described by matrix element



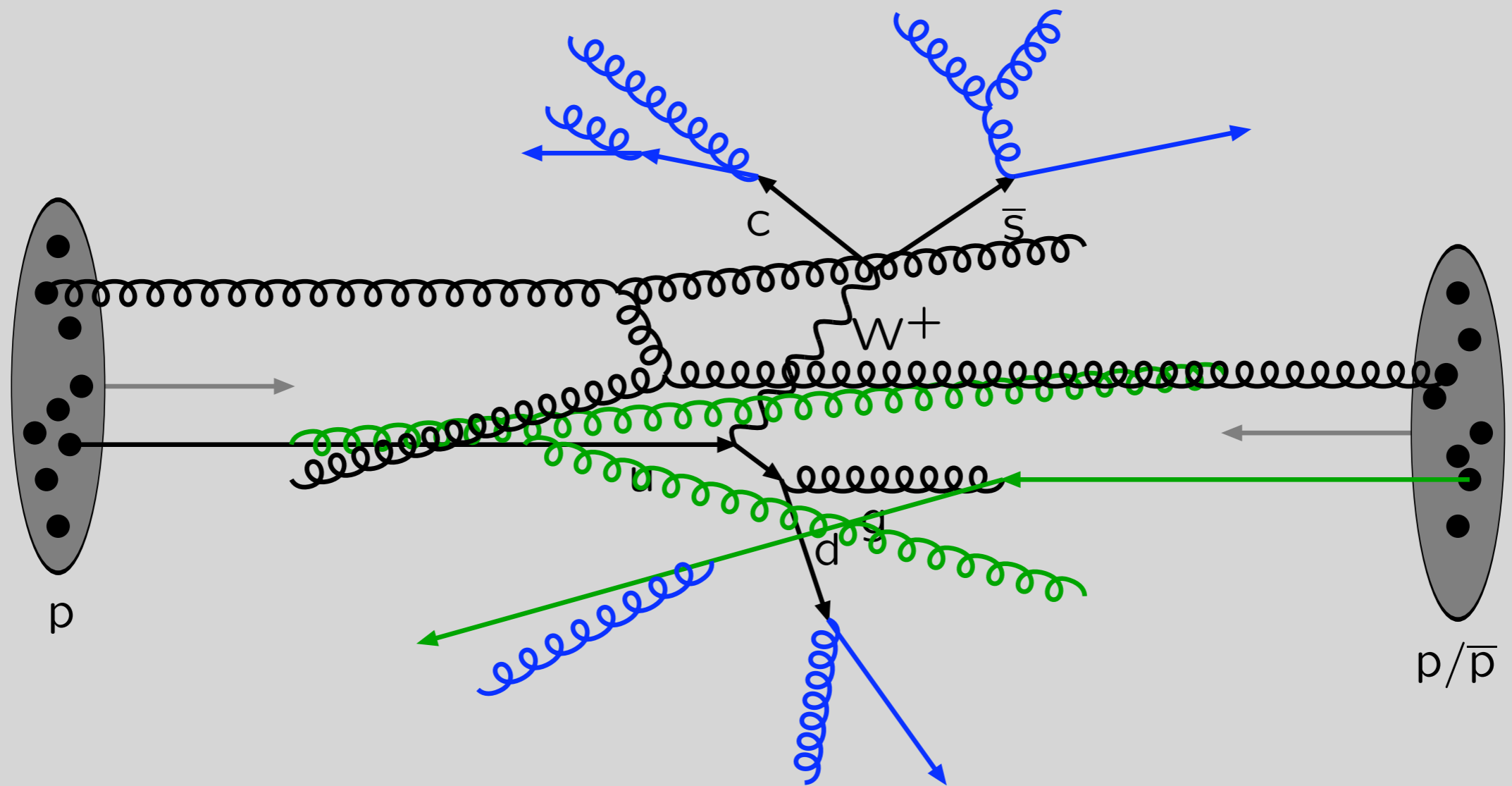


Resonant decay

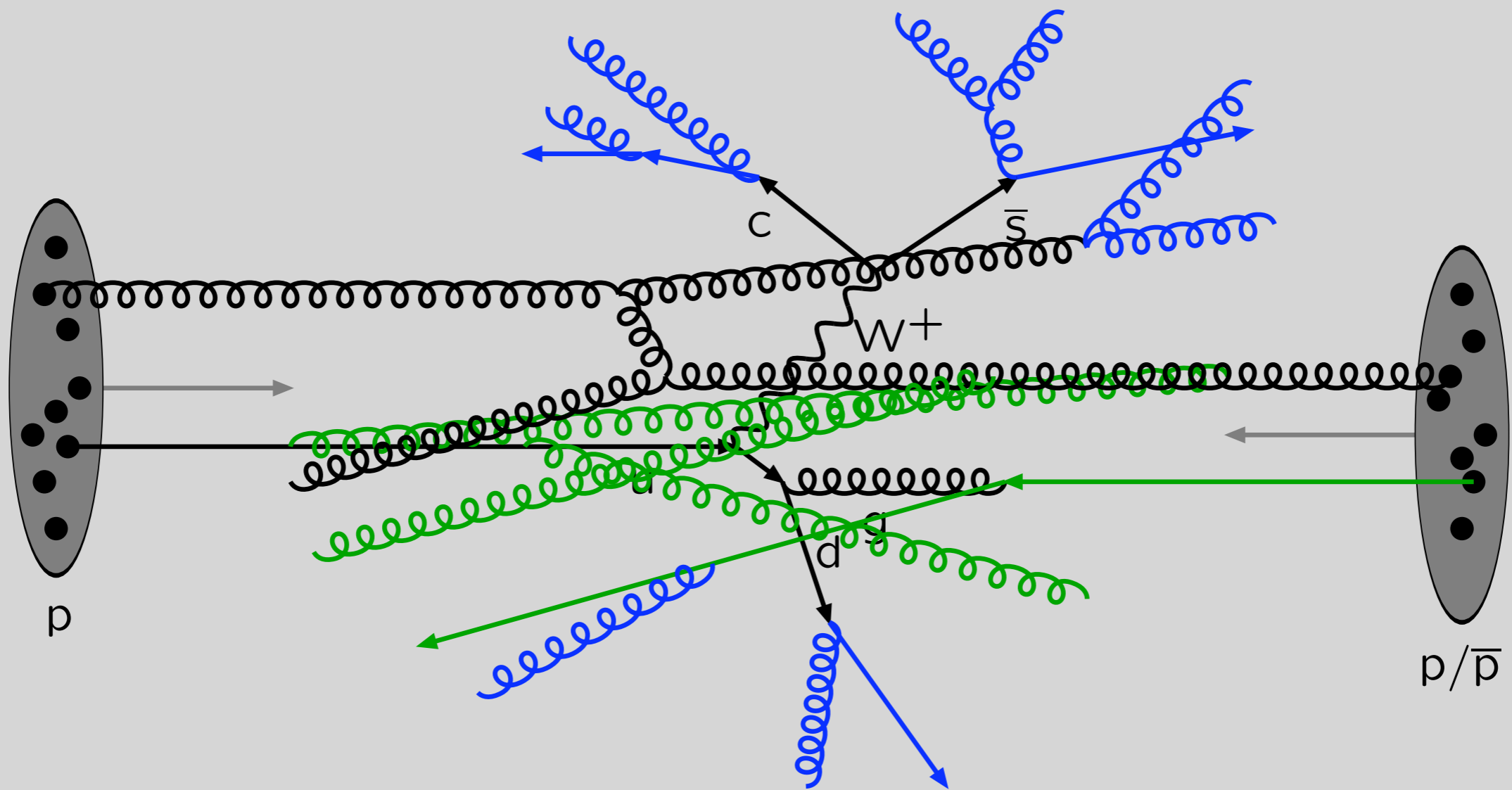


Initial state radiation

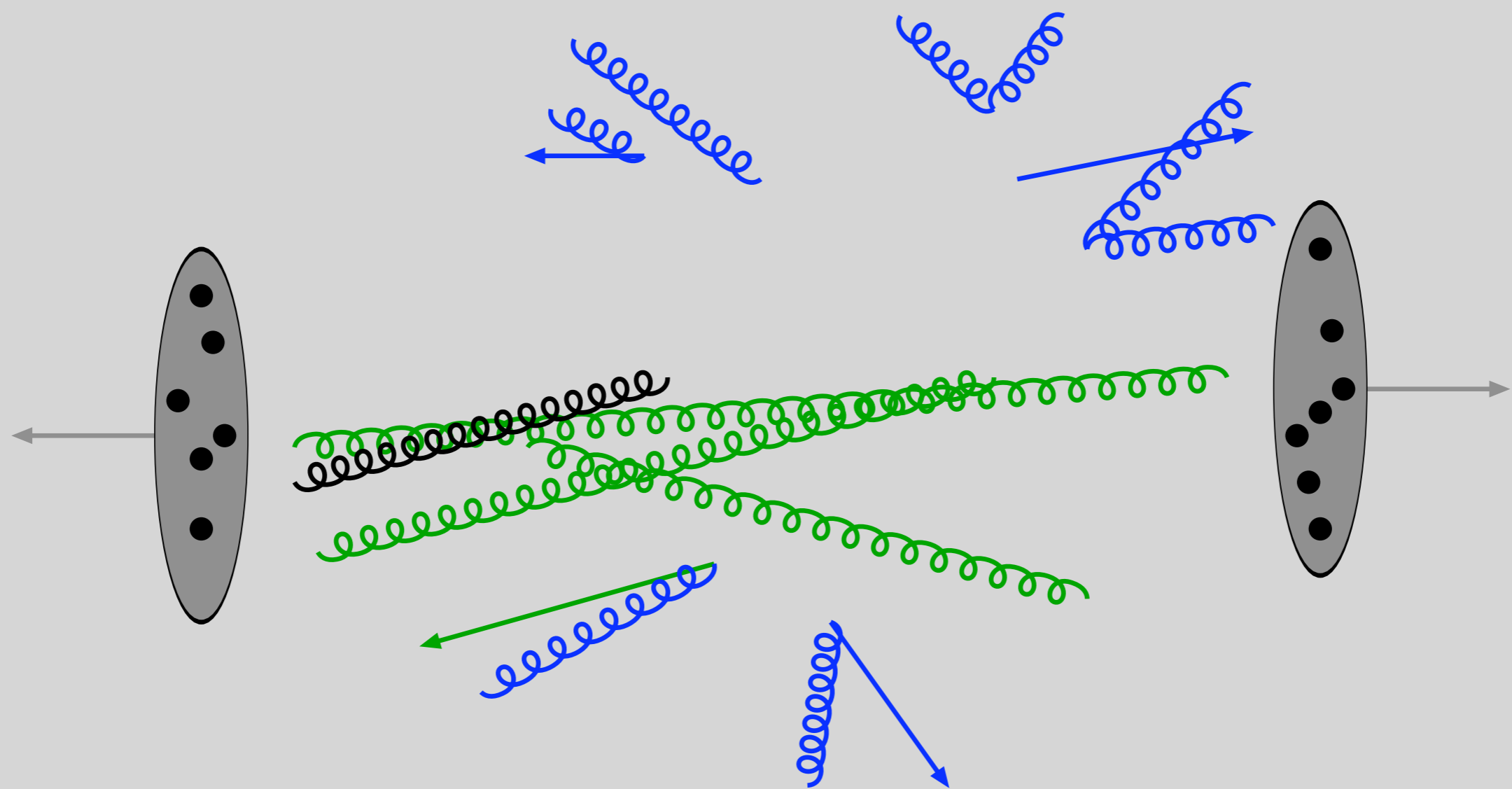




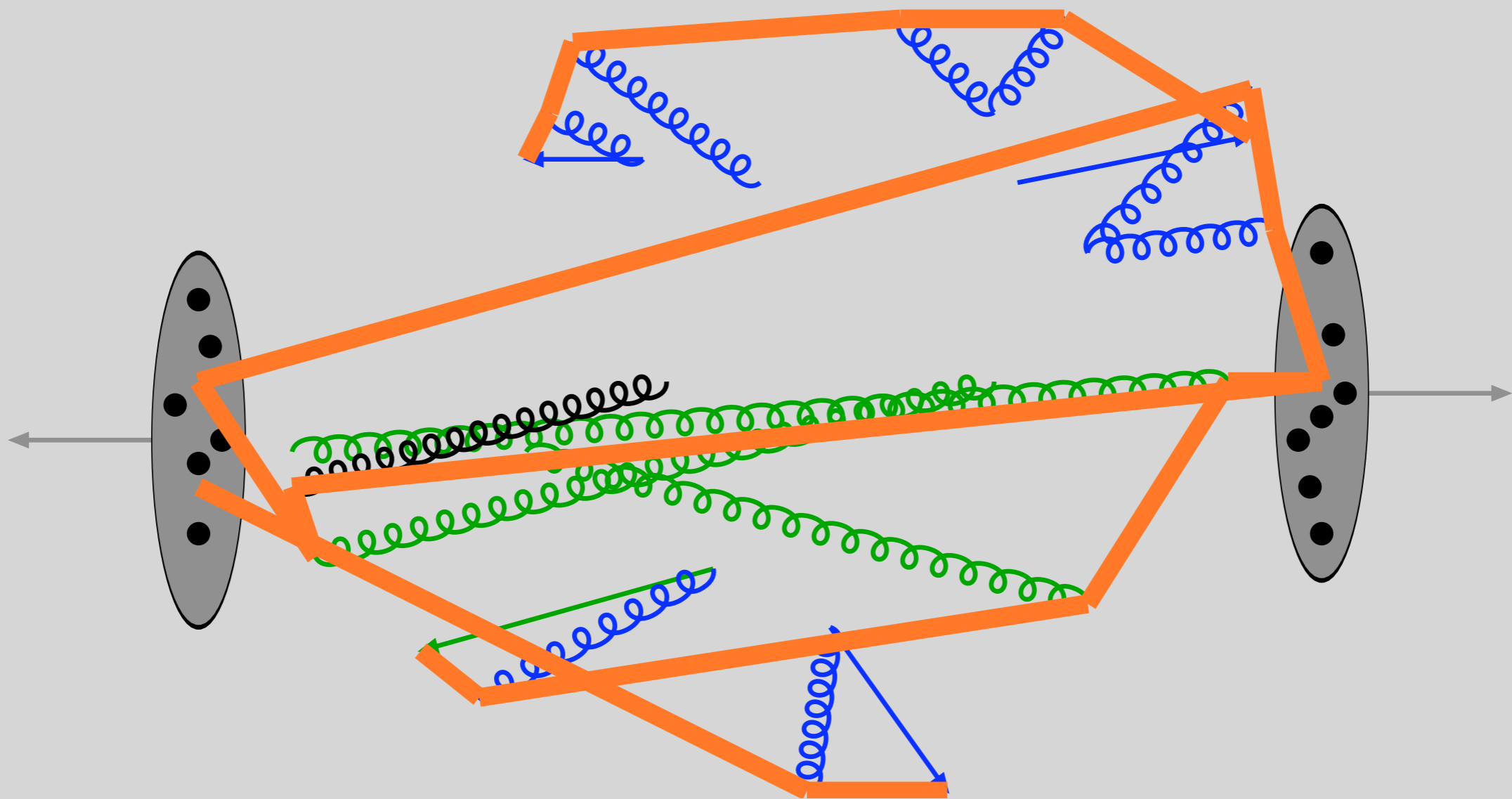
Multiple interaction



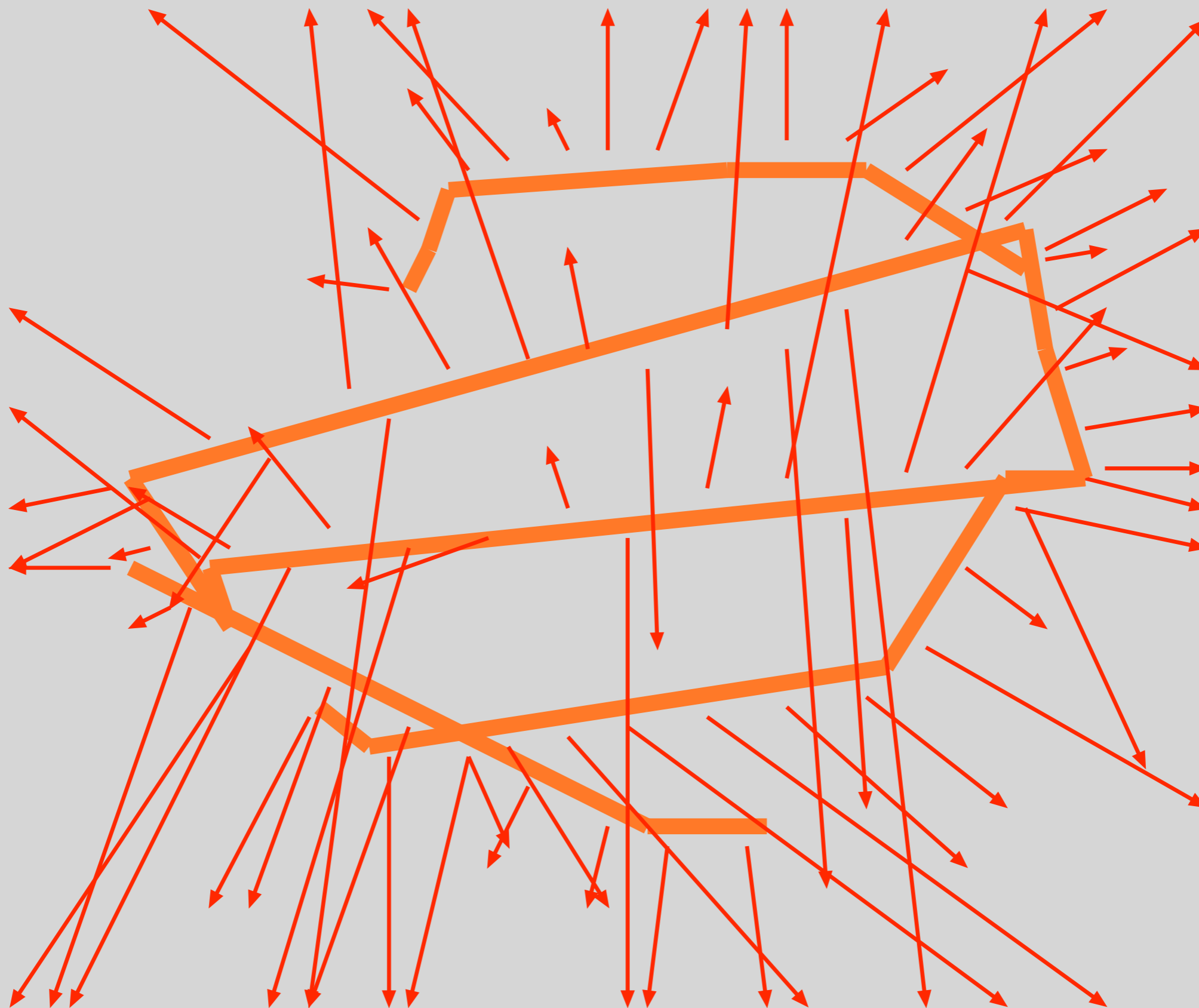
Initial and final state radiation  
for each interaction



Beam remnants

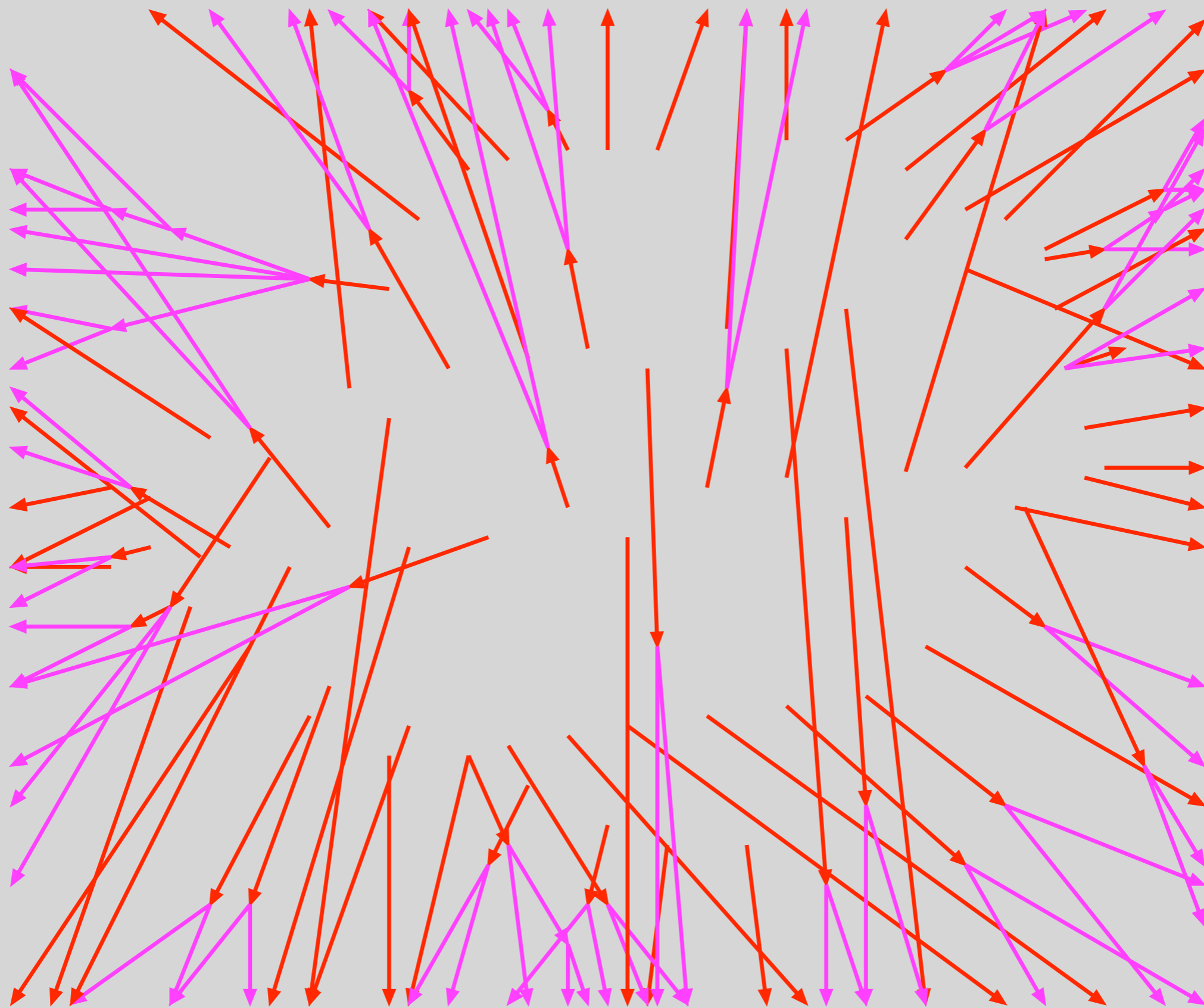


Color connection

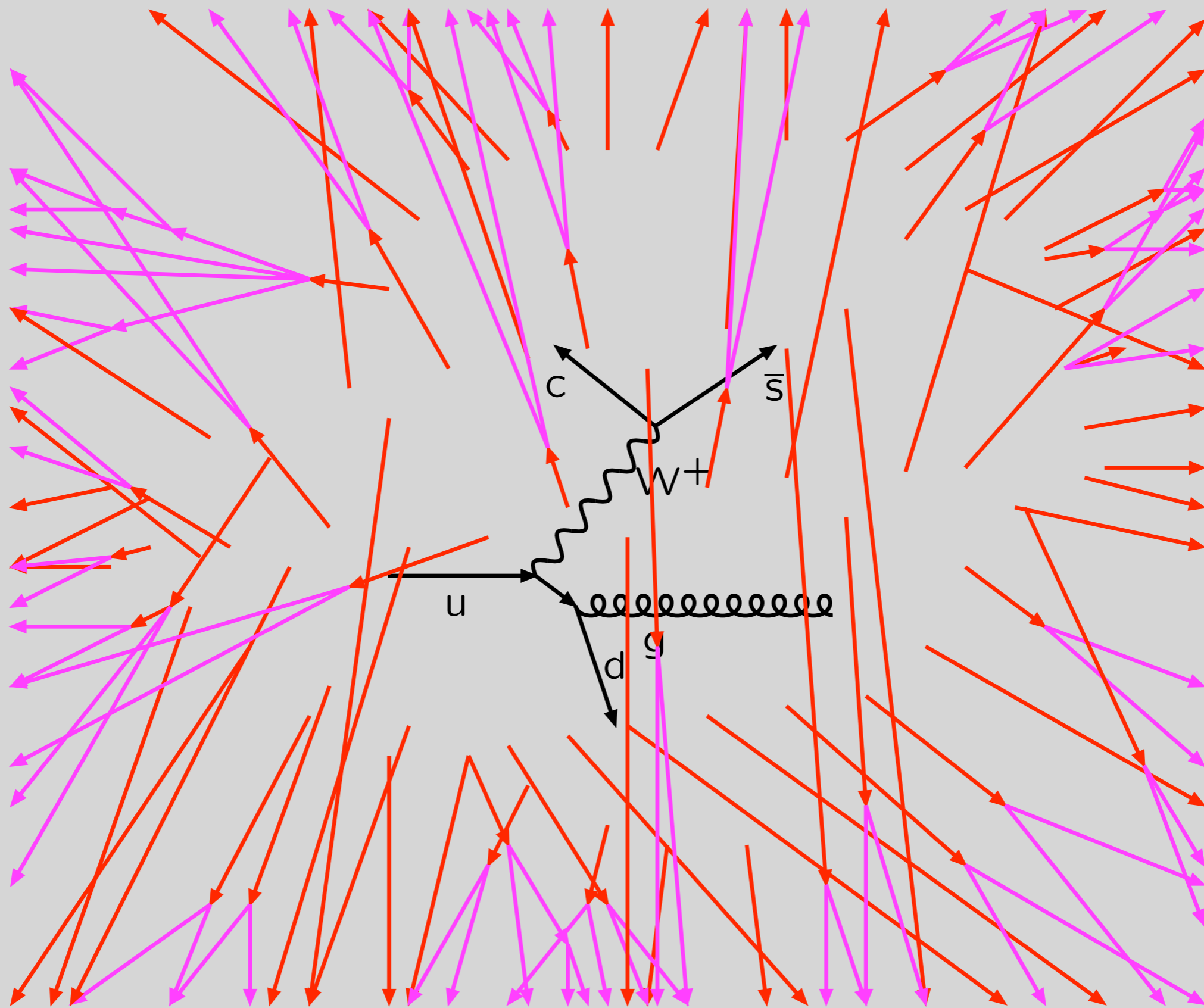


Hadronization





many hadrons unstable and decay



Underlying Event & Multiple Interactions

# 何故 Jet を測るのか

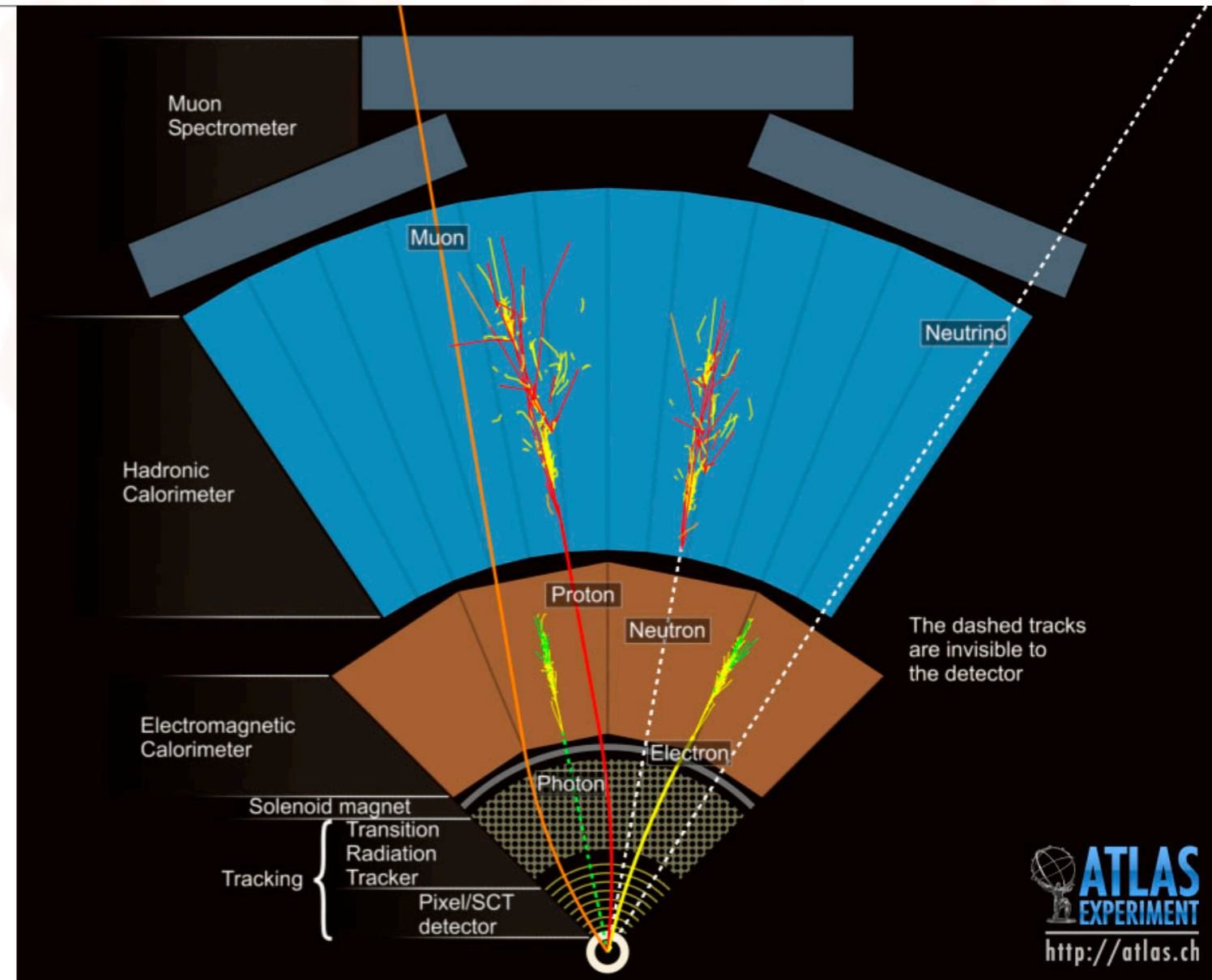
- もちろん、コライダーでは何でも測る

- $e/\gamma$ 
  - ▶ EM calo, track 有/無
- $\mu$ 
  - ▶ tracker, chamber
- $\tau$ 
  - ▶ decay に依存した測定
- $q (u, d, s, c, b), g \rightarrow q\bar{q}$ 
  - ▶ 全部jetになる
  - ✓ Jet も測る

- 物理解析/測定

- Jet 生成 (di-jet, multi-jet)
- $W/Z \rightarrow q\bar{q}^{(*)}$
- $t \rightarrow bW$
- $H \rightarrow bb, WW, ZZ$
- $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q} \rightarrow qq\tilde{\chi}$

- ✓ つまり一番最初の反応 ( $2 \rightarrow 2$ )から、統計が増えて様々な解析を行う全ての段階で、Jet の  $E, p_T$  を正確に測る事は非常に重要。



# 結局Jetとは何か

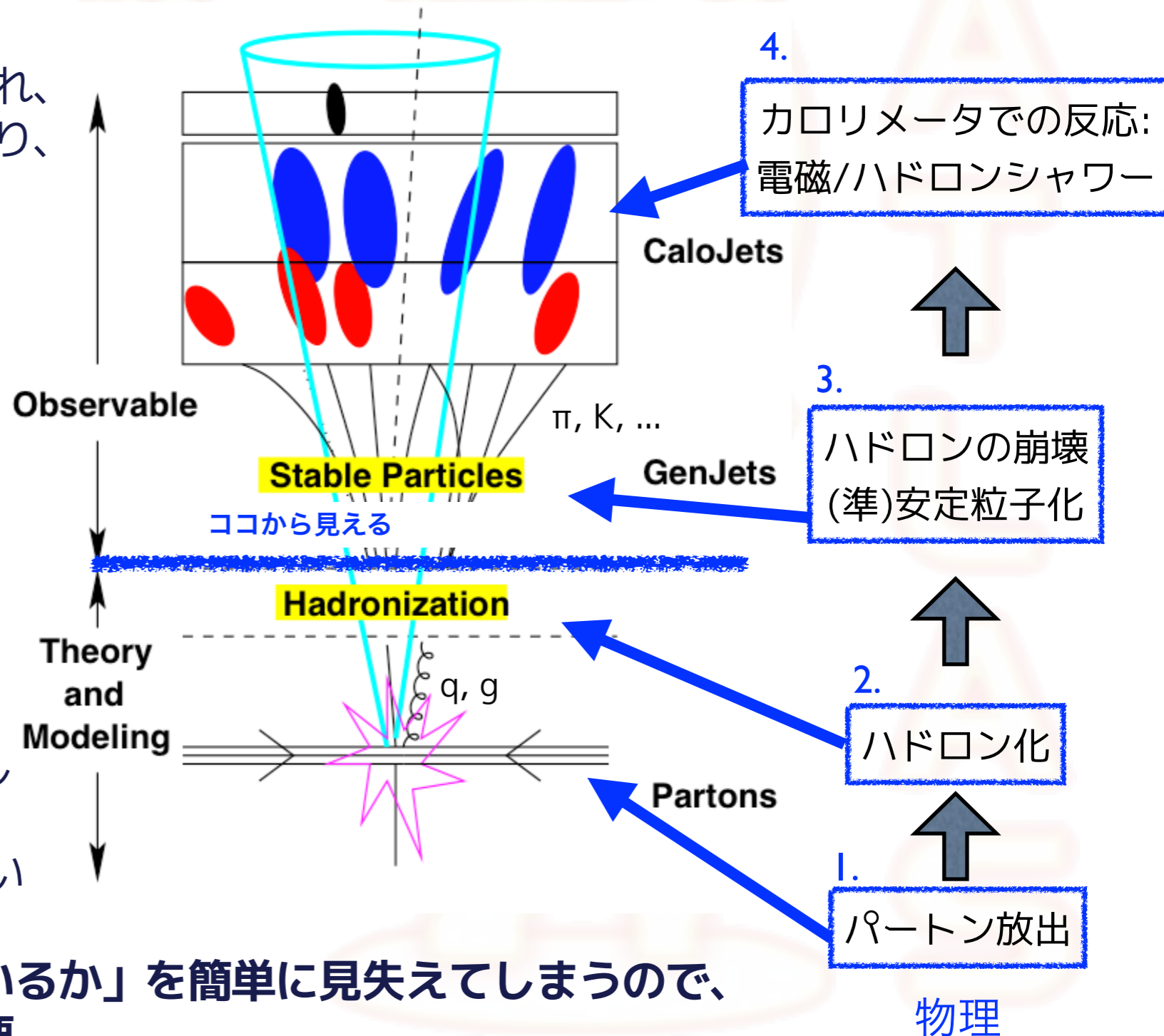
## Calorimeter jet

1. 高エネルギーパートンが放出され、
2. ハドロン化して複数の粒子になり、
3. 崩壊により準安定化 ( $\gamma, \pi^\pm, K, p, n, \text{etc.}$ )し、
4. カロリメータと反応してシャワーを作った、
5. そのひとかたまりのこと

## Particle jet / track jet

- 3. までの段階で Jetを組んだもの
  - (MC truth) particle jet は calibrationに使う
  - track jet は neutral particle なし
    - pile-up に強い
    - まだ精度は calo jet に勝てない

✓ そもそも、「何を測っているか」を簡単に見失えてしまうので、とてもよく考える事が重要。



# Jet reconstruction

- Jetを組む、とは

- エネルギークラスター構築

- ▶ EM/Hadron shower でできた calorimeter cell を一纏めにする
- ▶ threshold は pedestal- $\sigma$  の整数倍が基準
  - noise を抑える事が重要
  - typical な $\sigma$ の値 : 40MeV

- Clustering algorithm

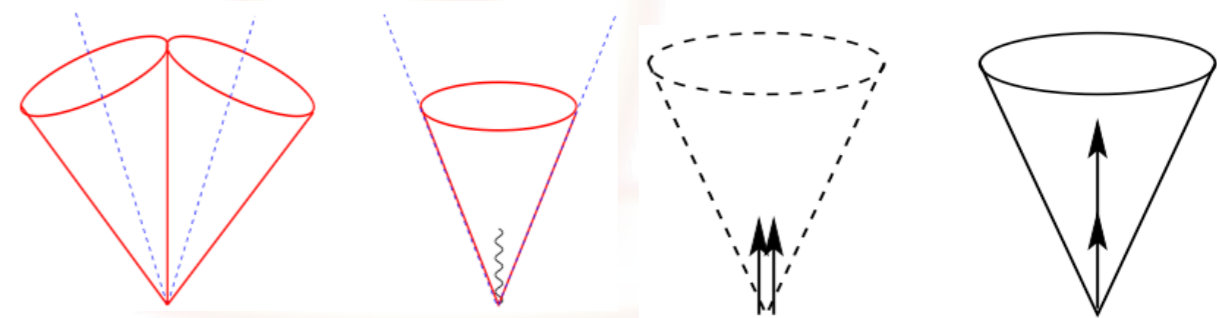
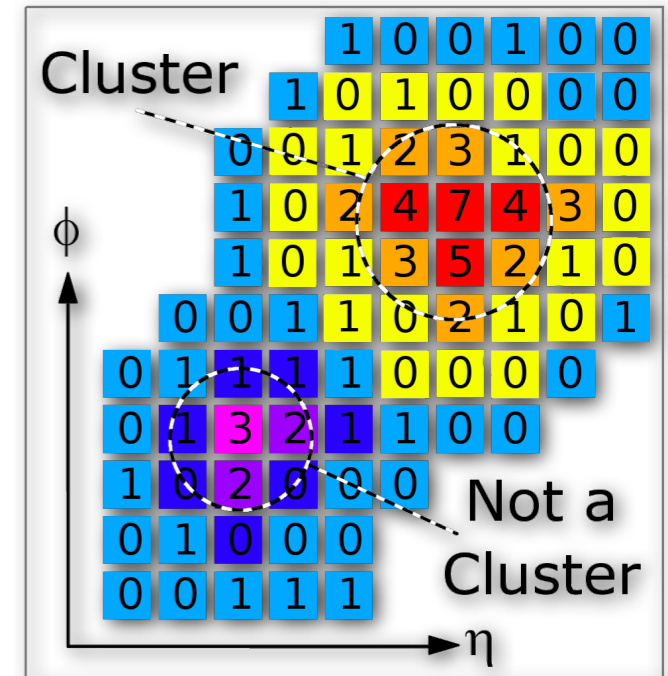
- ▶ "4-2-0 method"

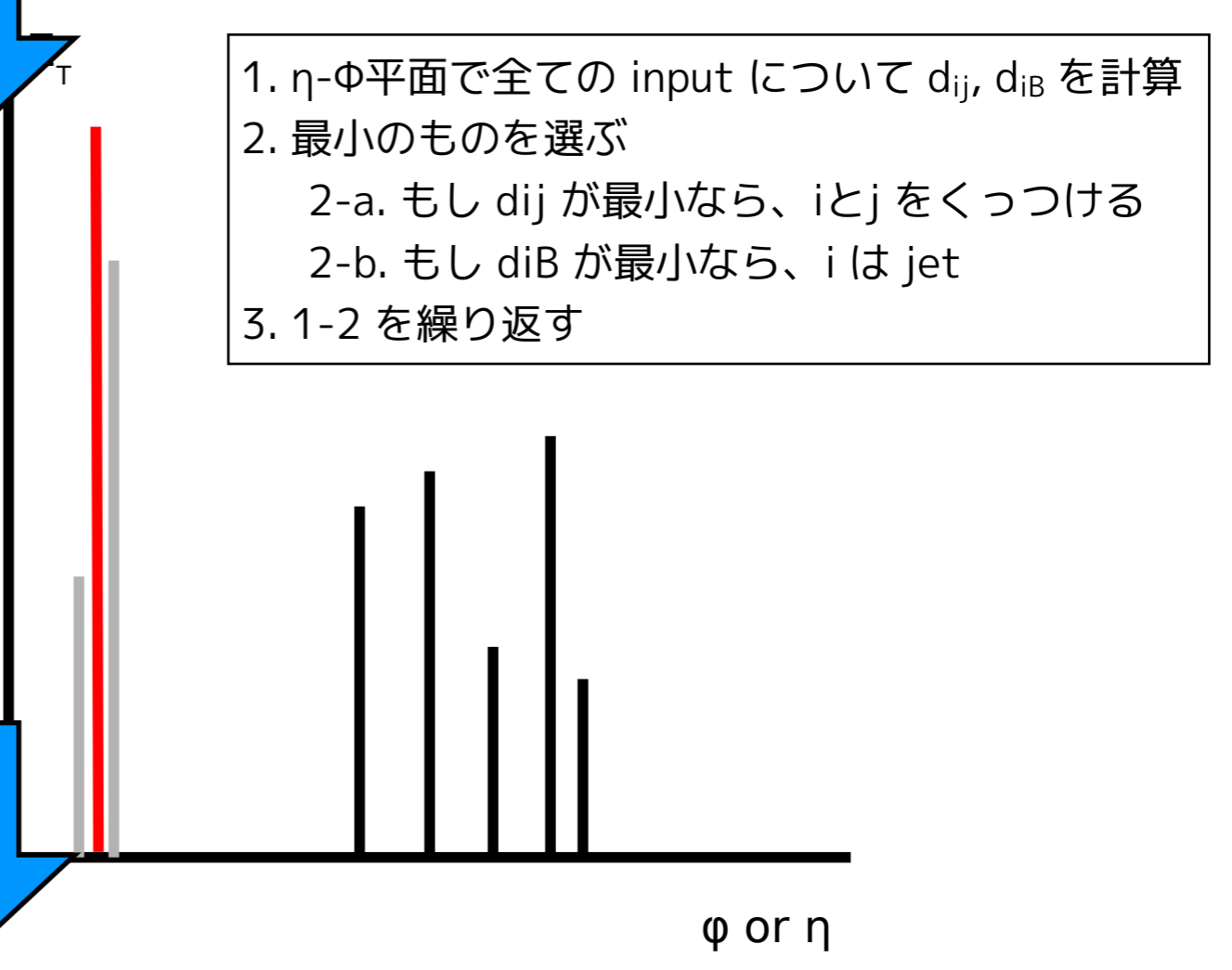
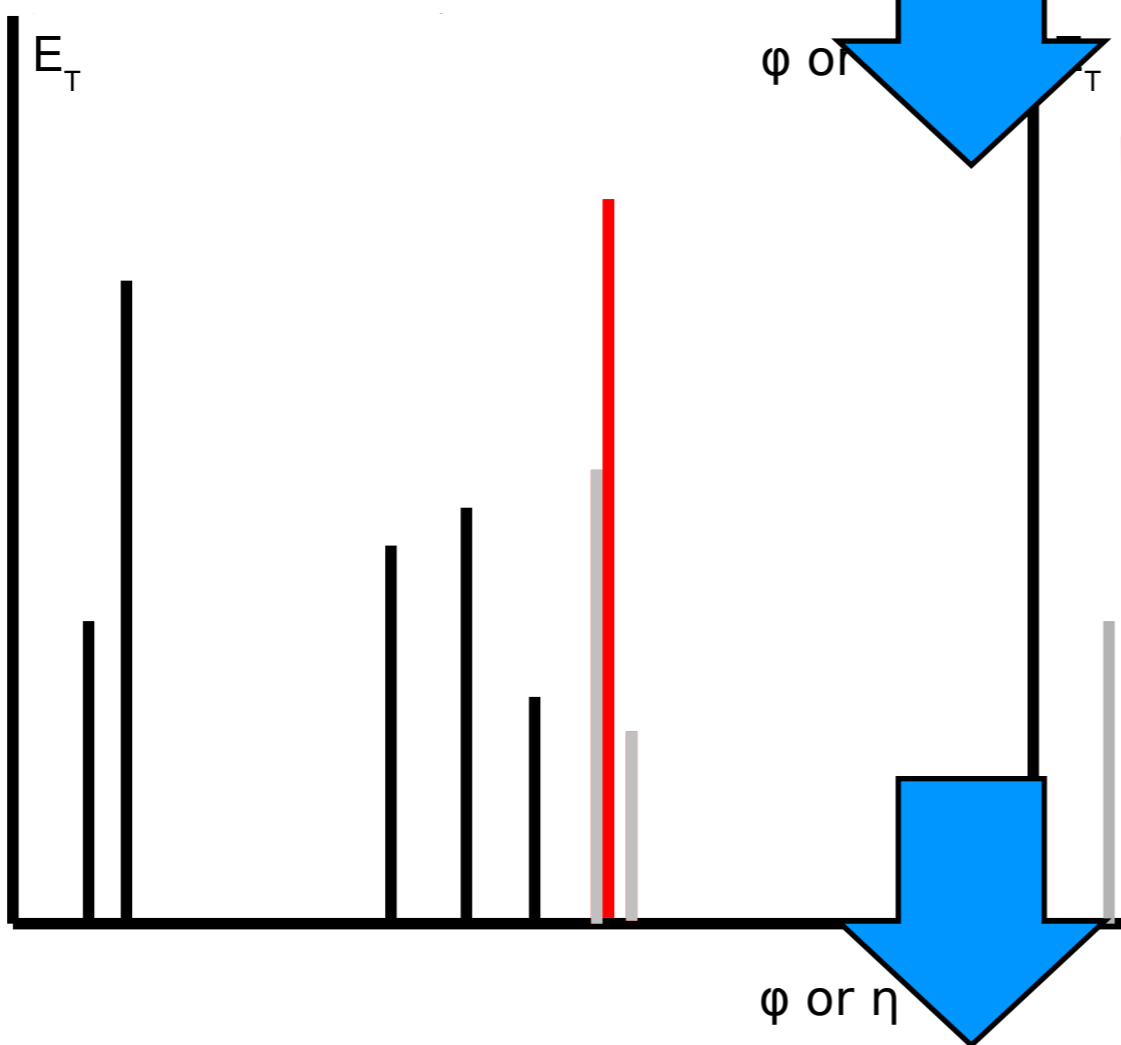
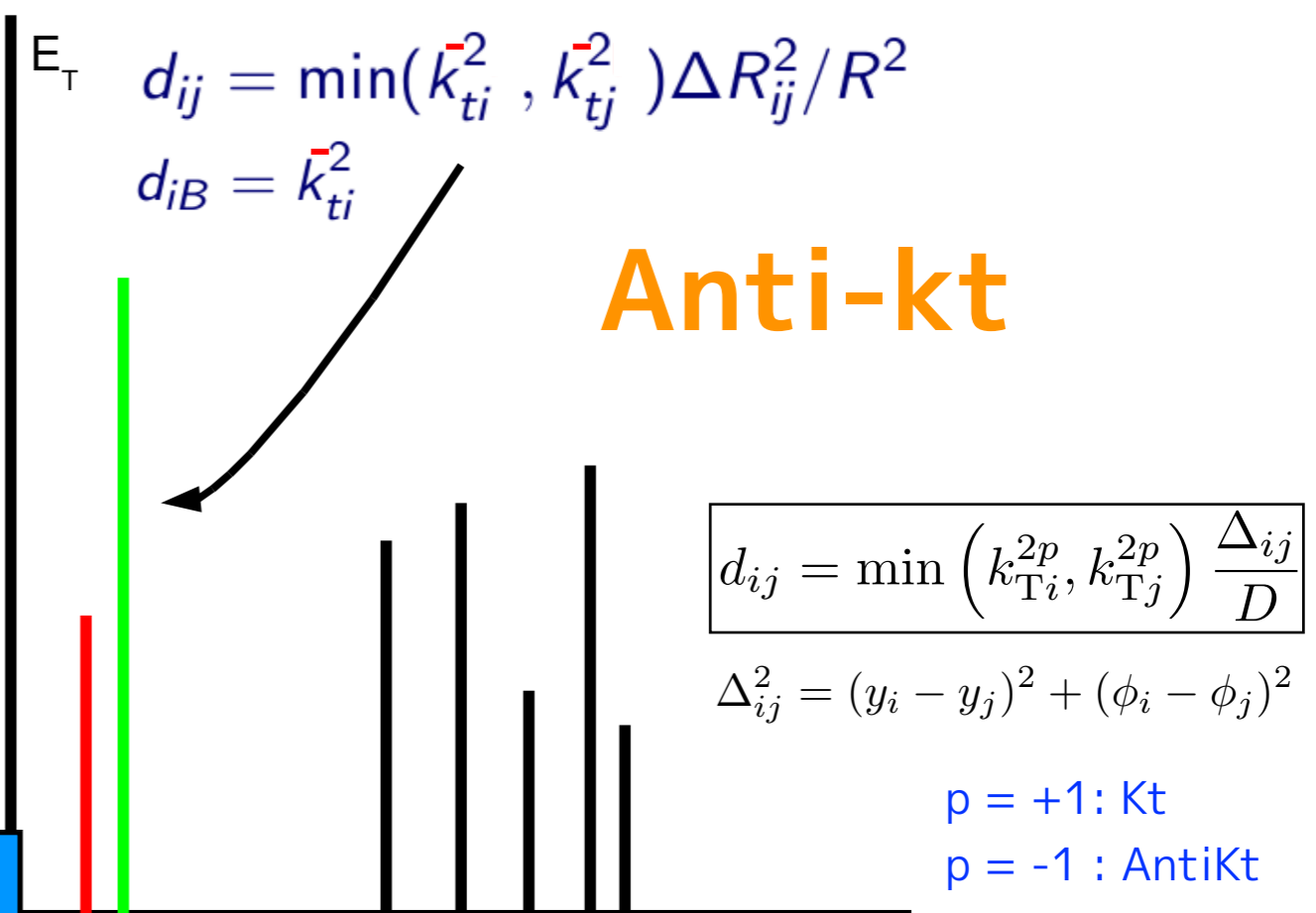
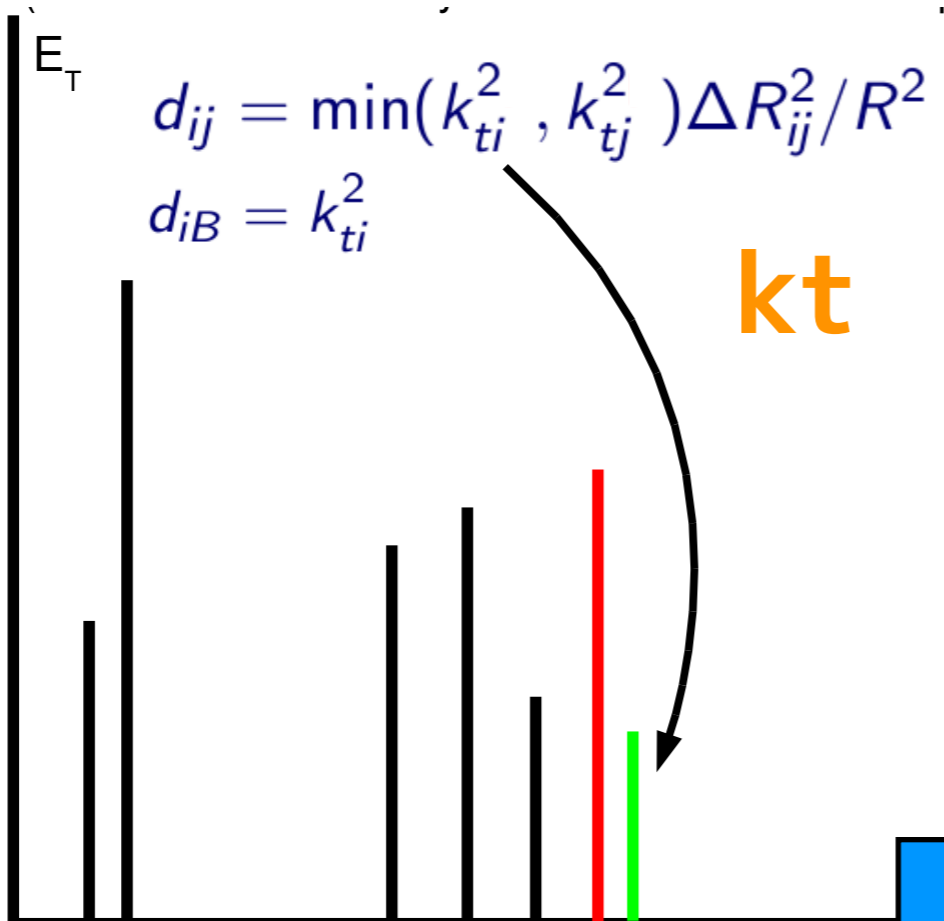
- $E > 4\sigma$  の cell を seed にして  
その周りの  $E > 2\sigma$  の cell、  
さらにその周りの全て cell energy を加える
- **3D ( $R, \eta, \Phi$ ) Topological Cluster (TopoCluster)**
  - ✓ electric noise に強い

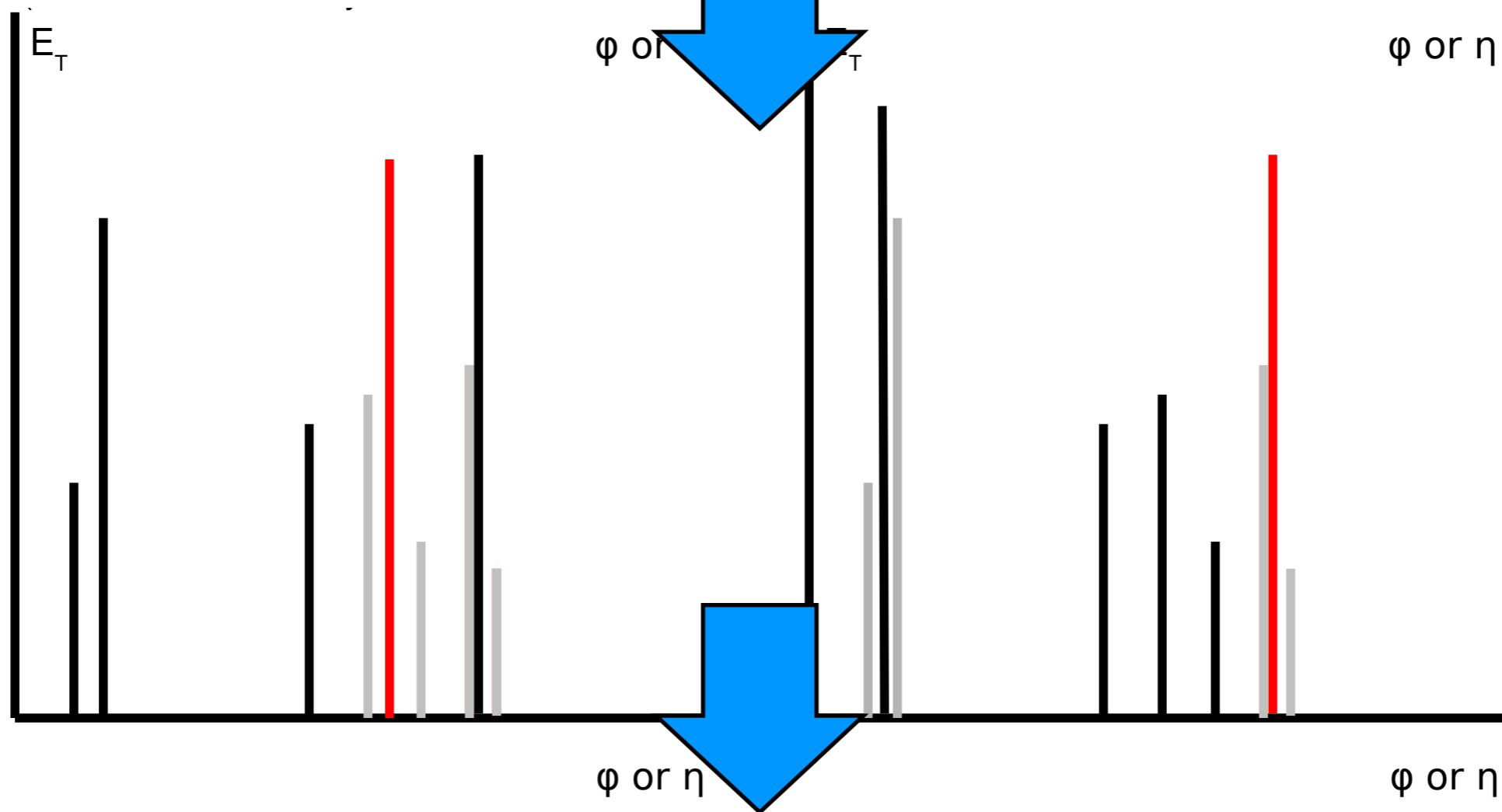
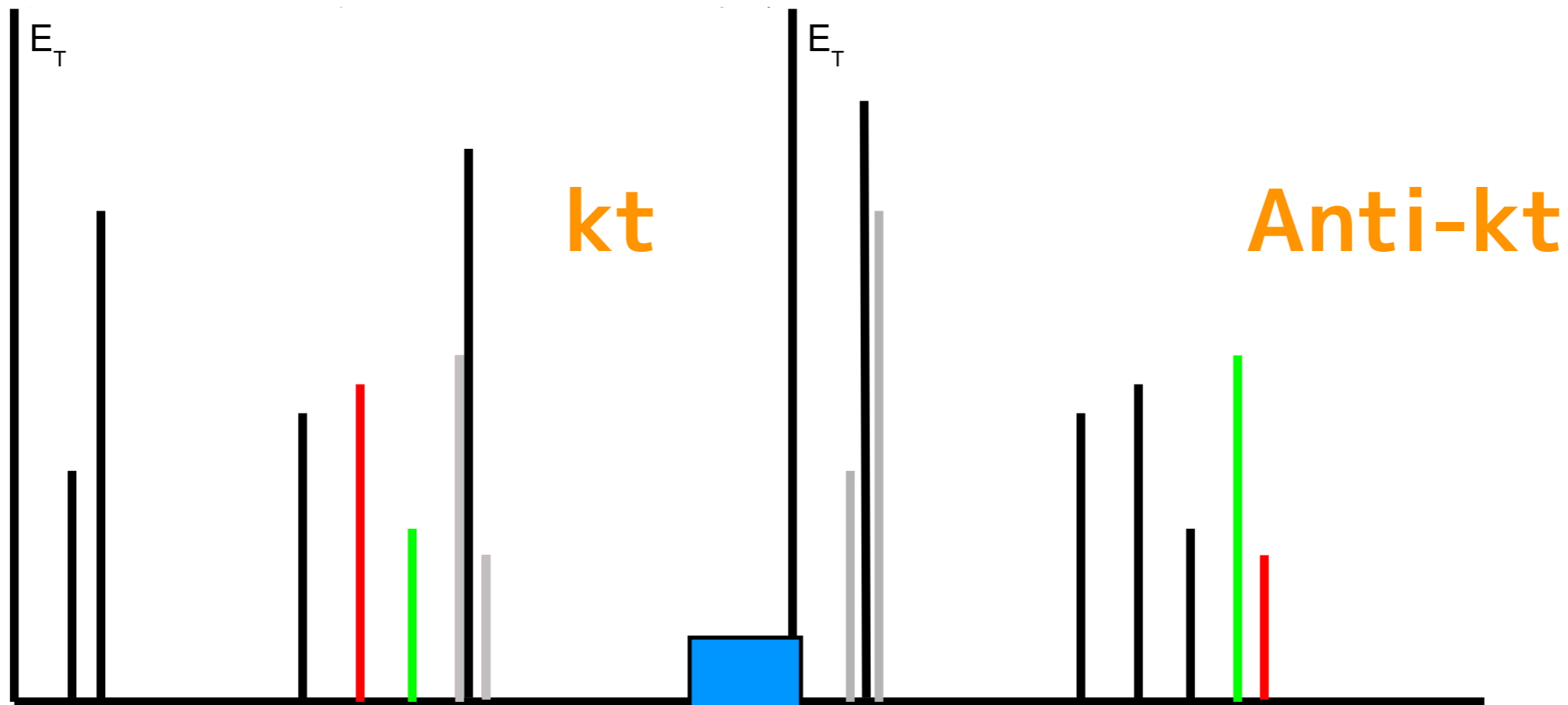
- この Topo-cluster を

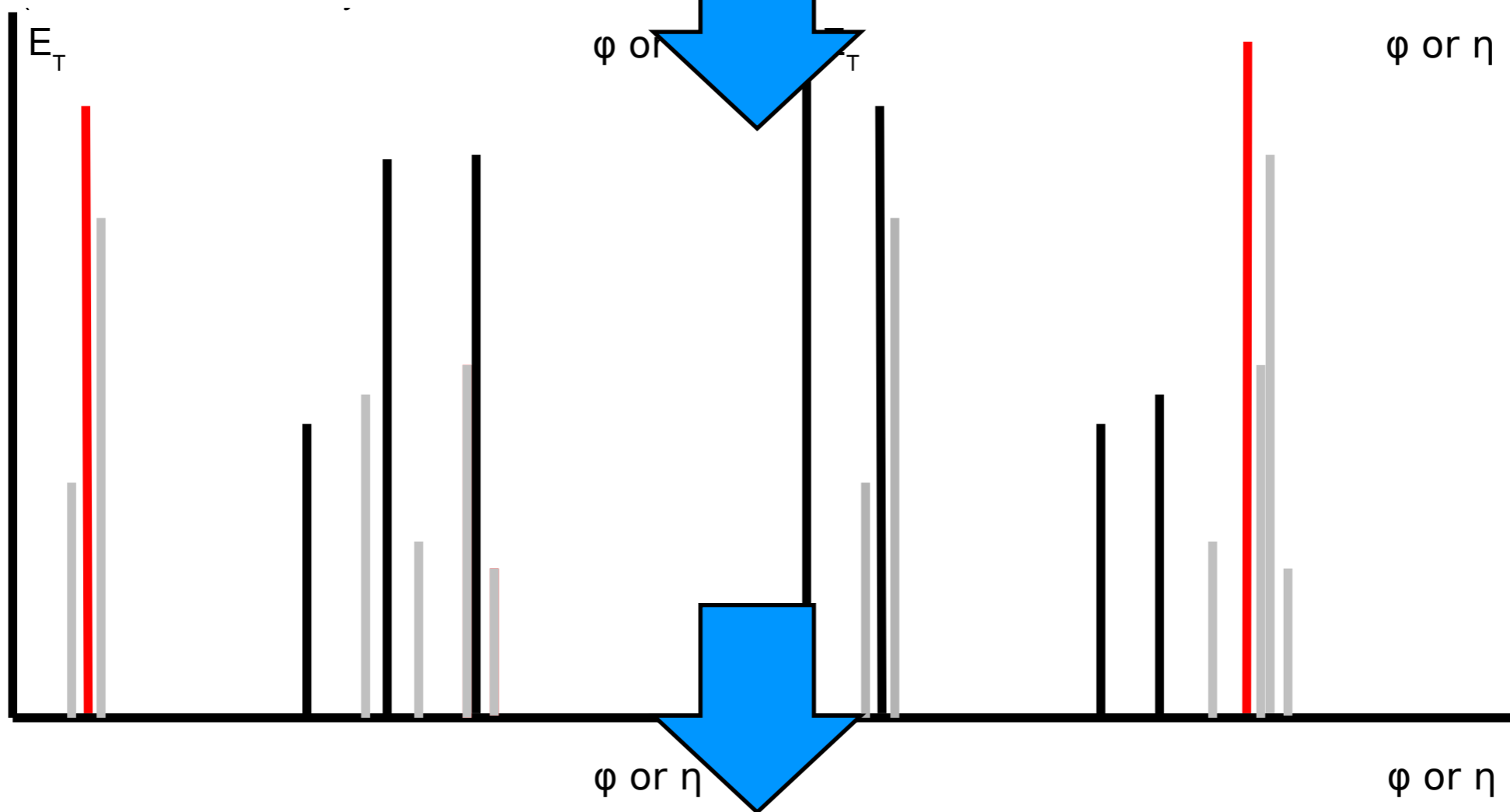
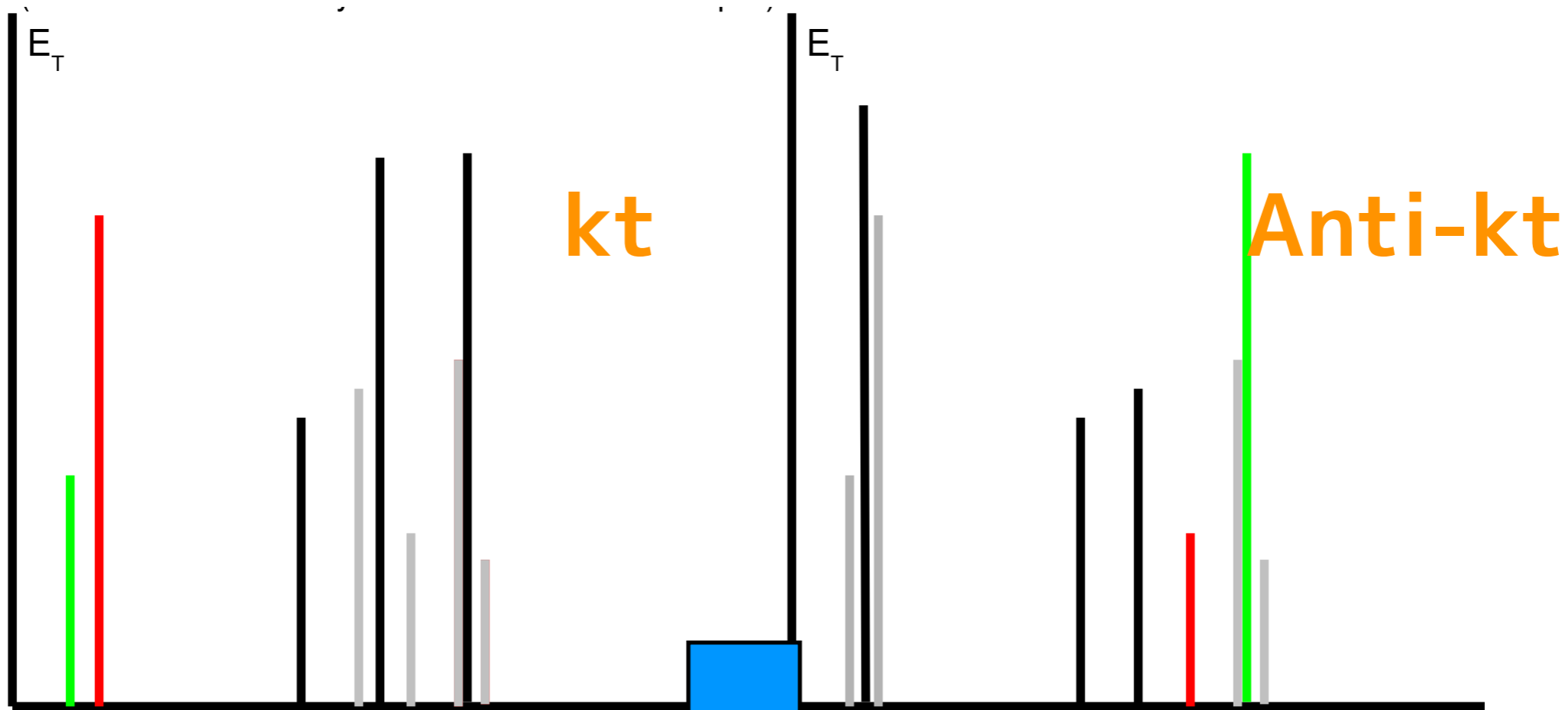
jet reconstruction algorithm への input とする

- 昔: SIS-cone, ATLAS-cone, kt
- default: "Anti-kt" アルゴリズム, w/  $R=0.4/0.6$ 
  - ▶ 2008年くらいに採用
  - ▶ Infrared-safe, collinear safe
    - 素性が良い

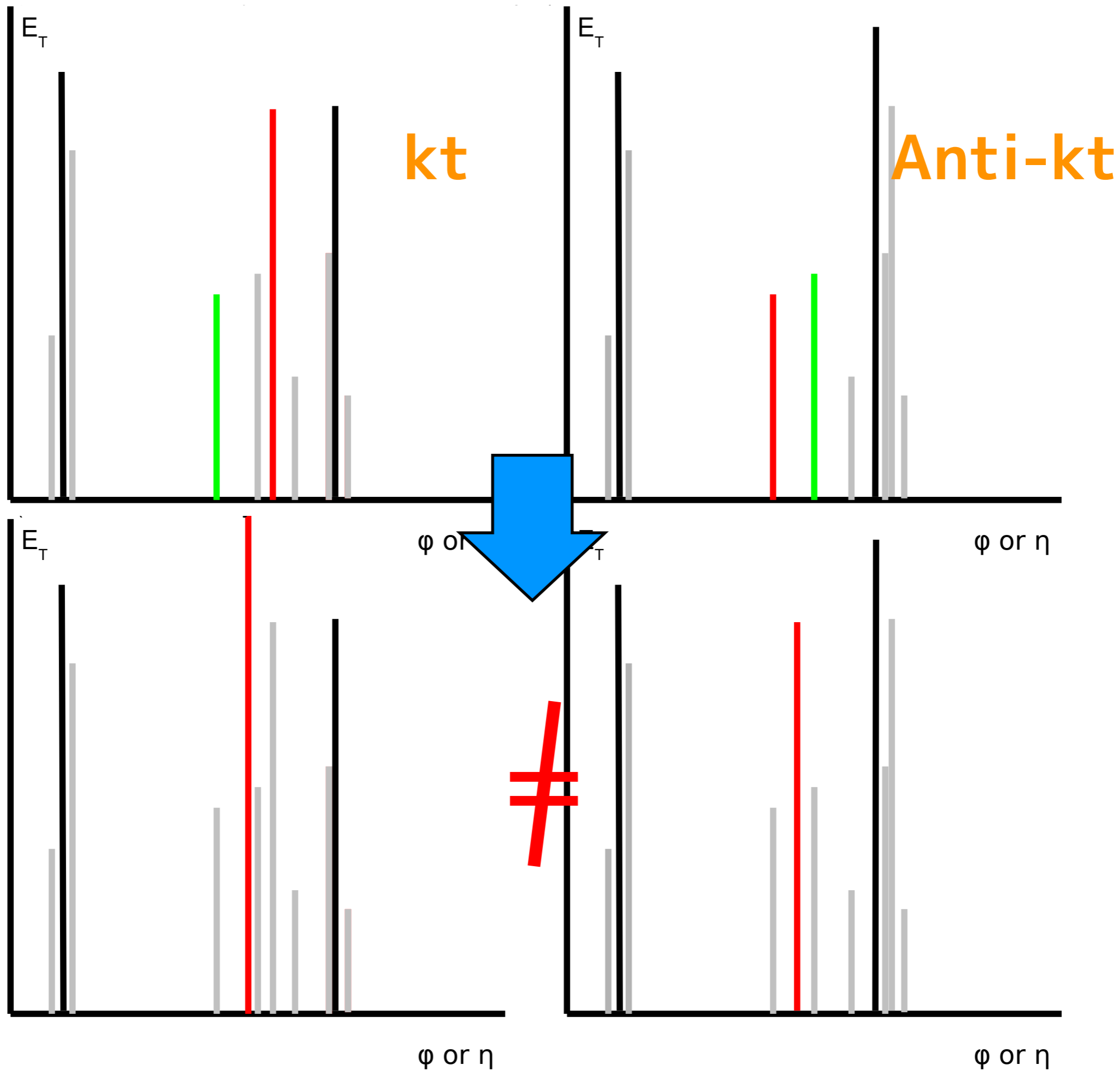






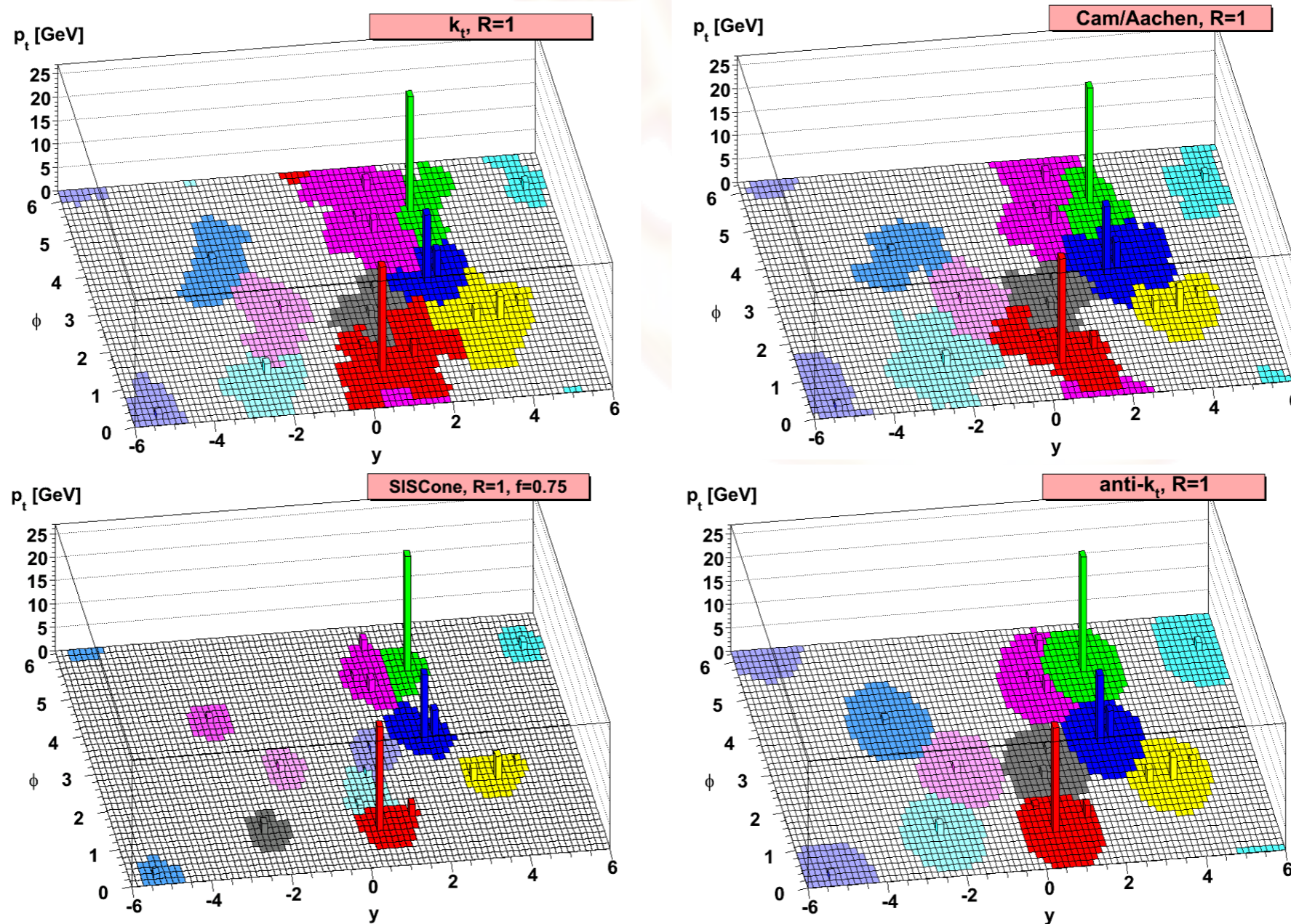






# Jet reconstruction algorithms の比較

- Anti-Kt は綺麗な形の jet を作る



✓ Jet とは、恣意的な定義による object である。

Jetのキャリアブレイクシヨソ

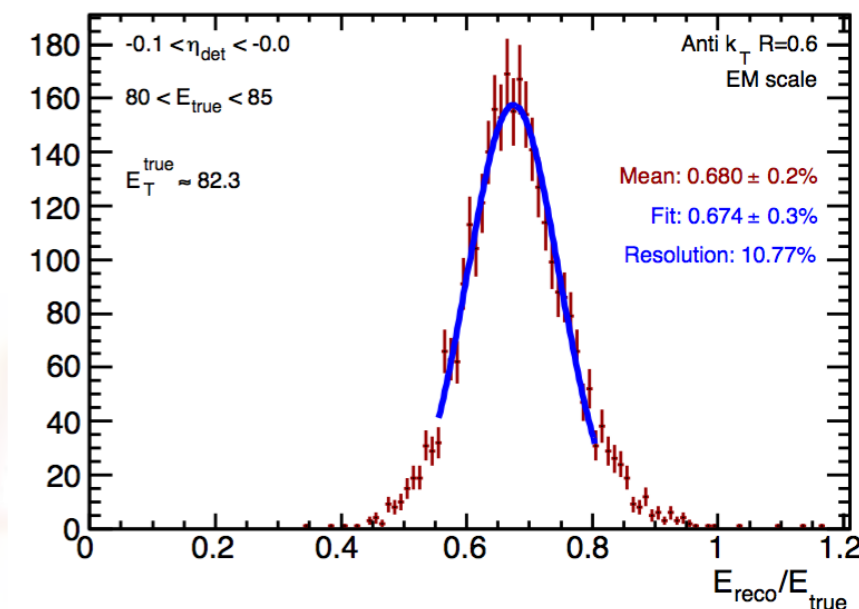
# Jet absolute calibration

- Jetは組んだが、その組んだ jet のエネルギーはどうなっている？
  - 基本的に、カロリメータで測るのは “EM scale” energy:
    - ▶ LAr: ビームテストでの electron を使った calibration が base
    - ▶ Tile:  $^{137}\text{Cs}$  を使った独自システムでの calibration が base
      - Jet の reconstruction も今のところ EM energy で行われている
- “本当の” Jet と比べると？
  - Truth jet : ハドロンレベルの情報を使って  
Anti-kt アルゴリズムで Jet を再構成したもの
  - Reco jet: カロリメータから出発した jet
  - ハドロンは  $e/\gamma$  よりも落とすエネルギーが小さい ( $e/h \sim 1.3$ )
    - ▶ invisible energy (原子核の励起, slow neutron, etc.)
  - Dead material によるエネルギー損失
- ので、再構成された jet のエネルギーに対して、補正 factor をかける必要がある
  - MC を使って、Truth jet を作る
  - $E(\text{reco})/E(\text{true})$ : をある  $E, \eta$  の bin で plot すると、右の図の様になるので基本的にこの中心値の “逆数” を true energy に戻すための補正 factor として使う
    - ▶ “Numerical Inversion” と呼ぶ

$$\frac{e}{\pi} = \frac{1}{1 - (1 - h/e)(E/E_0)^{m-1}}$$

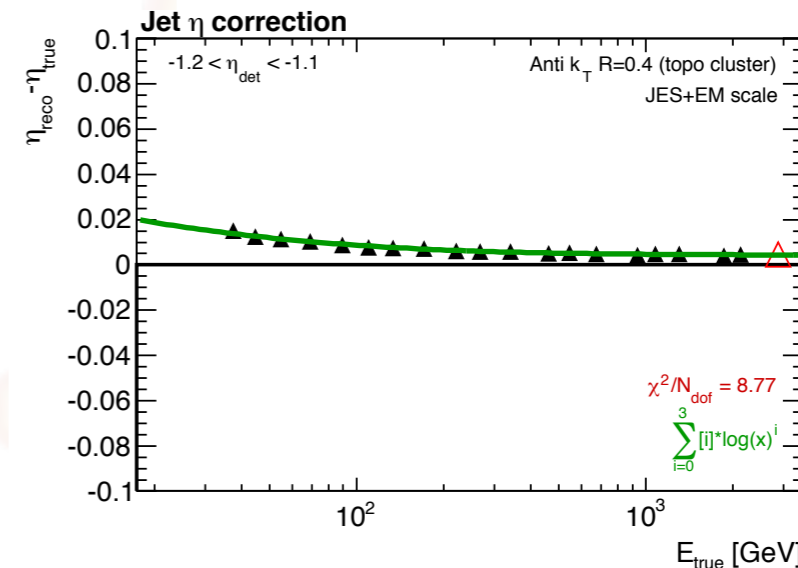
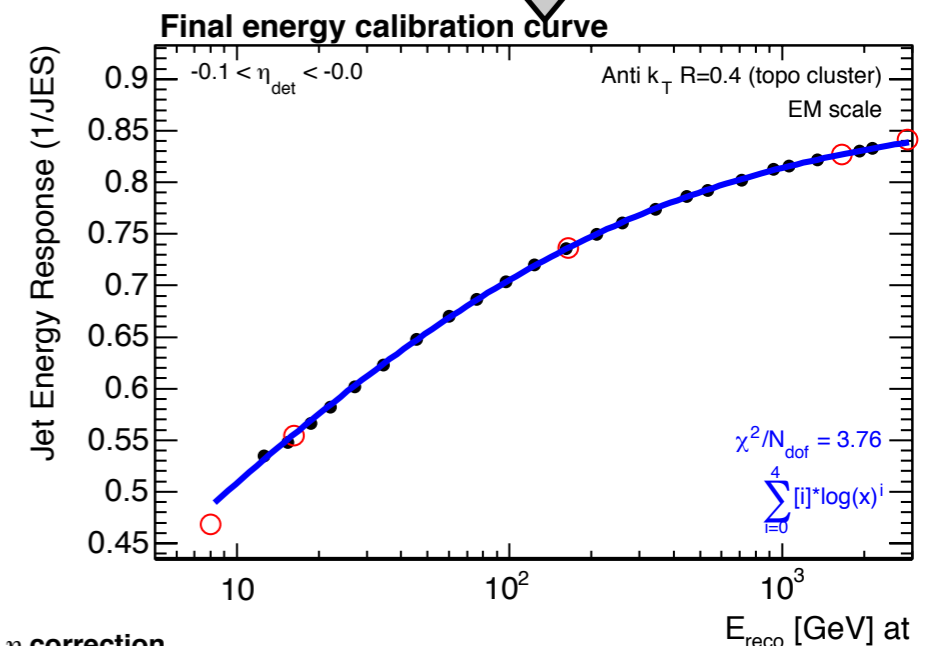
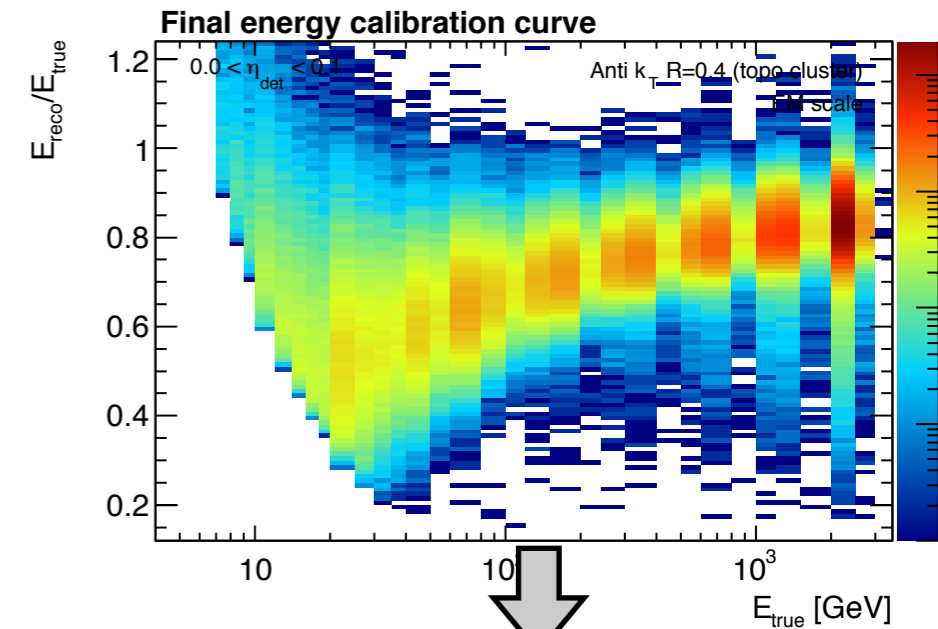
$$0.80 \leq m \leq 0.85$$

$$E_0 = \begin{cases} 1 \text{ GeV} & \pi^\pm \\ 2.6 \text{ GeV} & p \end{cases}$$



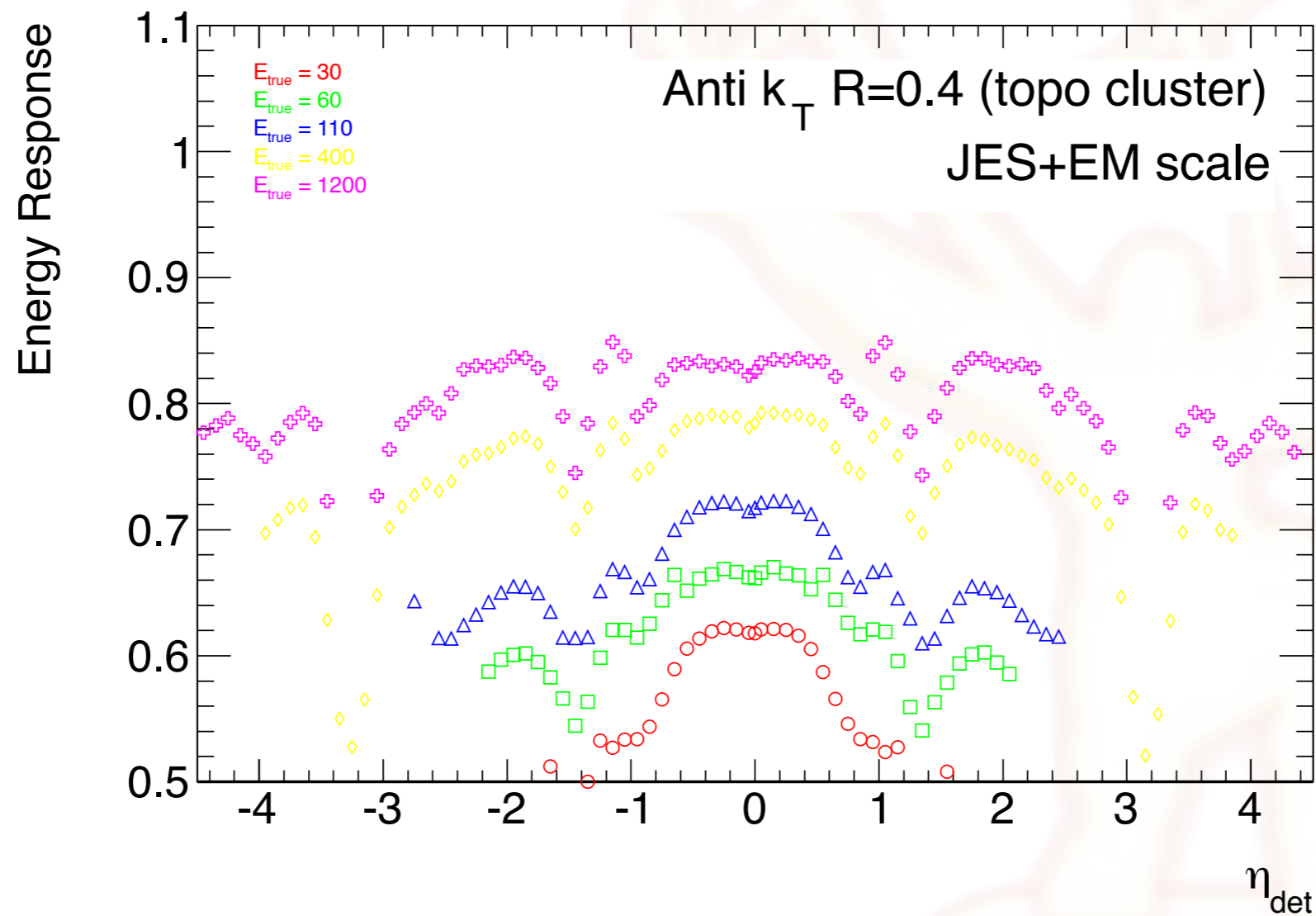
# Jet calibration (2)

- さらに、各  $E, \eta$  bin での inversion factor に対して、 $\log(E)$  の polynomial で fit する
  - この結果を parameter として database に持つ
    - ▶ この constants を “Jet Energy Scale” または “JES” という
    - ▶ EM scale に JES をかけて得られたエネルギーを “EM+JES” と呼ぶ
      - ✓ これが bottom line
- 重要な物理量である Jet の  $p_T$  (横方向運動量) は TopoCluster を massless と見做して、4-vector を組む
- その他
  - “LC”: Local Calibration
    - ▶ Topo-cluster の「ハドロンらしさ」を定義して それに応じた factor をかける
  - origin correction
    - ▶ primary vertex の位置を使った  $p_T$  の補正
  - eta correction
    - ▶ truth と reco での eta の差を補正



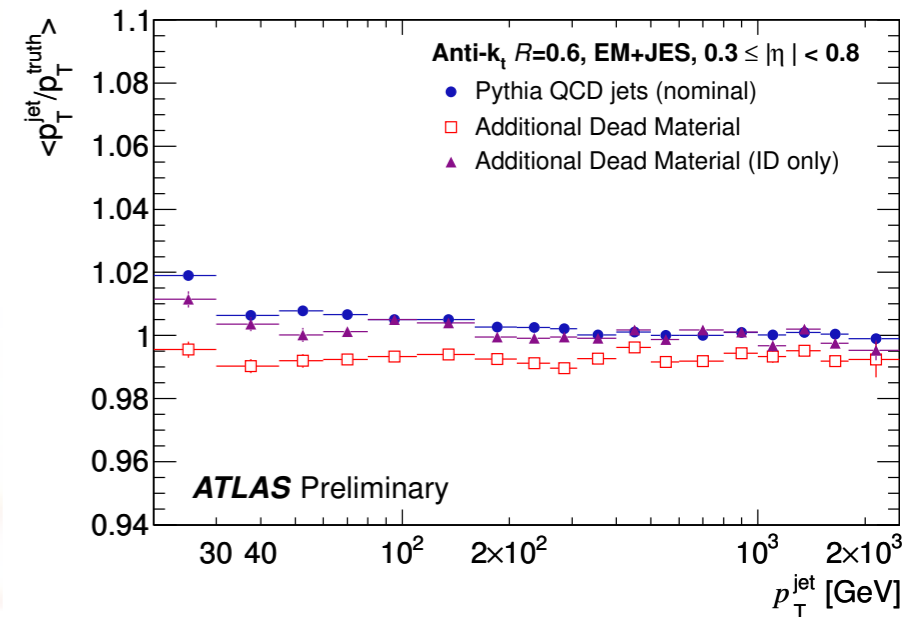
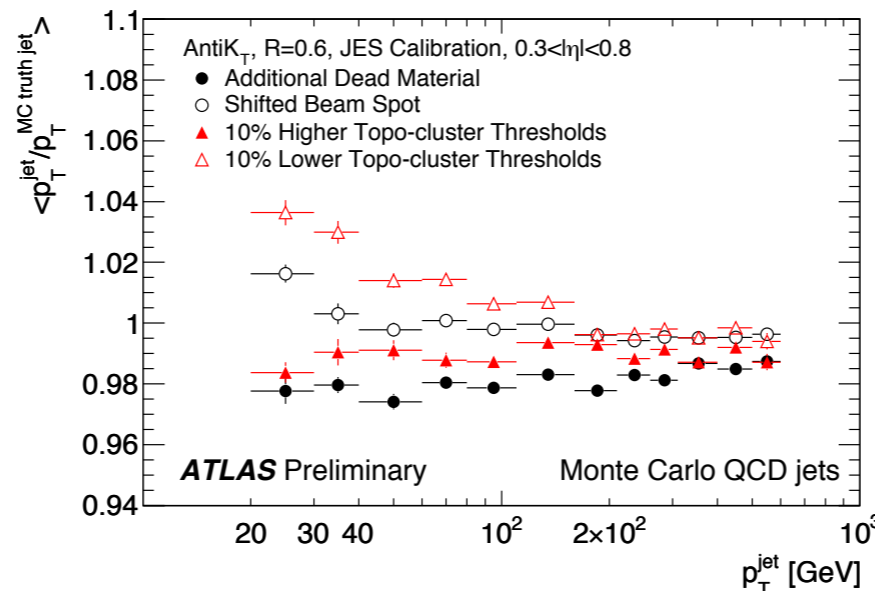
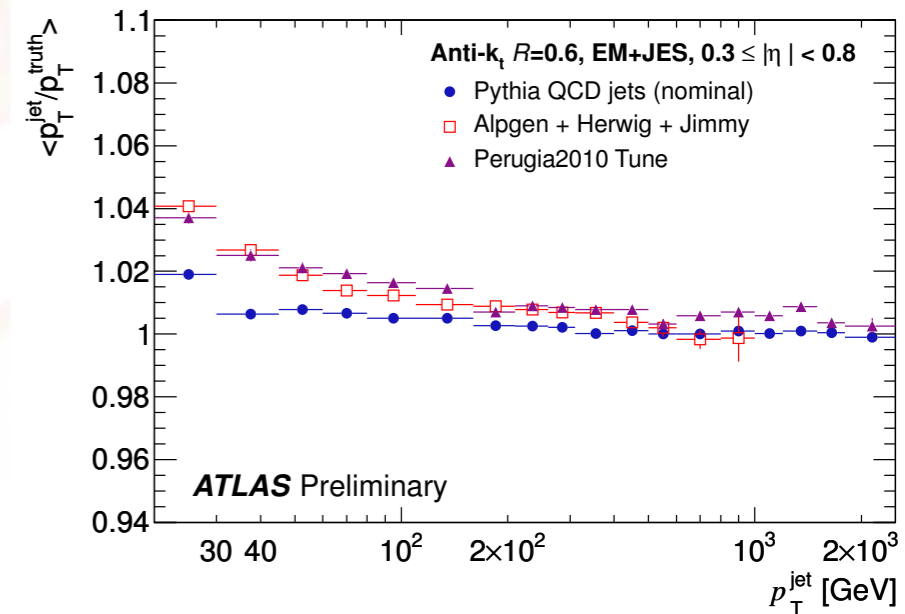
# Jet calibration (3)

- eta-dependence of JES



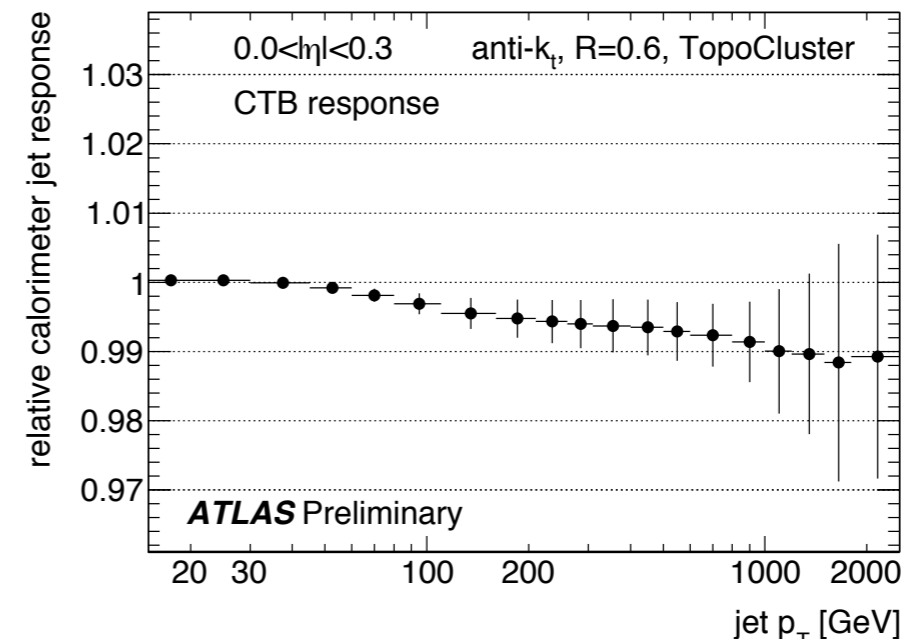
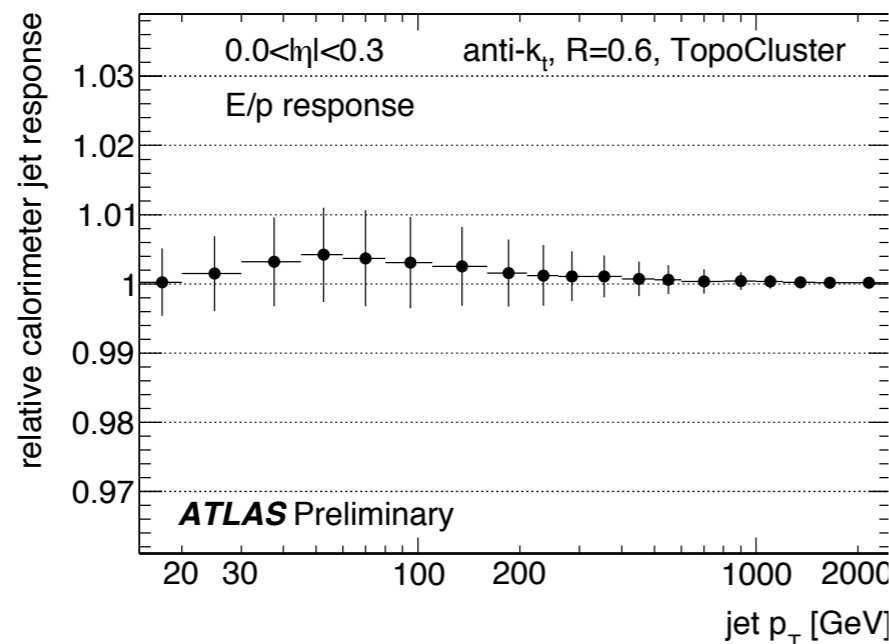
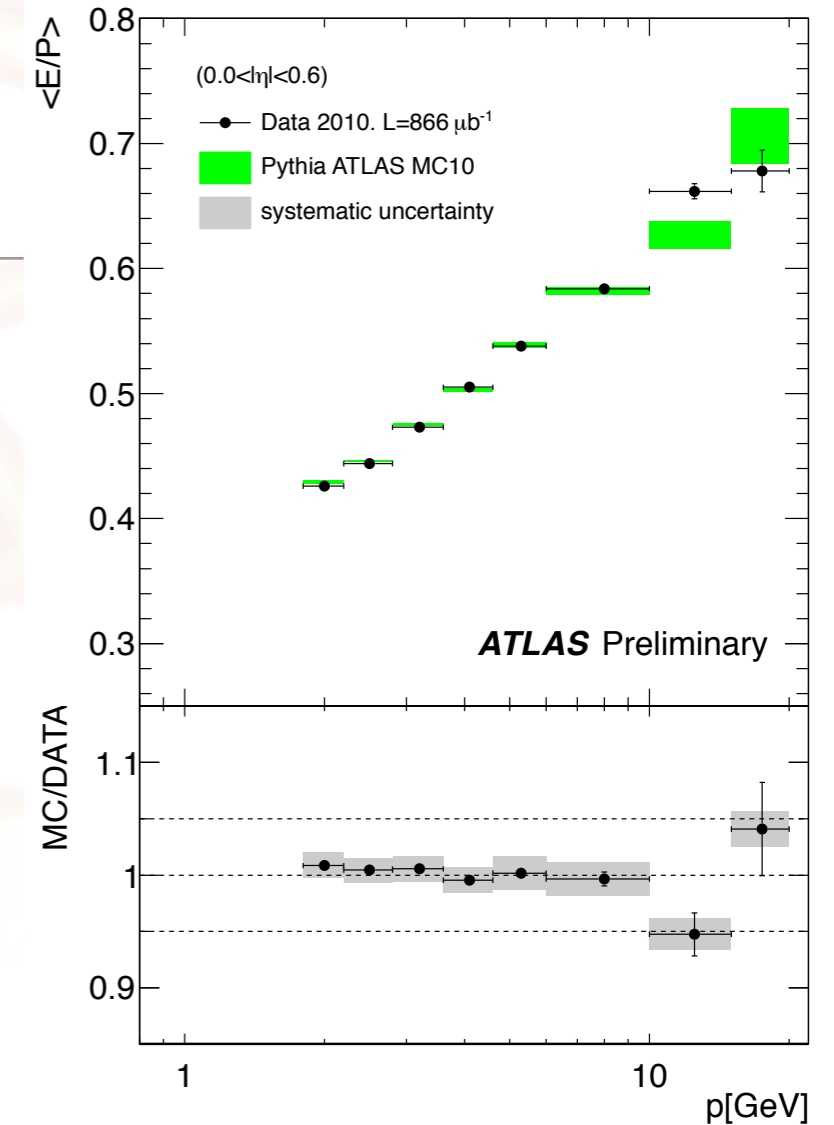
# JES uncertainty (物理、他)

- どれだけ正確にJetをキャリブレーションできているか
  - “正確に”とは“精度良く”(resolution)ということではない。  
ある  $E, p_T$  binで、中心値をどう間違ひ得るか、の指標。
- JES uncertainty の source
  - 全部MCに頼ってのcalibrationなので、  
jet energy response は 物理モデル  
(パートン放出、ハドロン化、シャワー生成)に依る
    - ▶ ~3%



# JES uncertainty (測定)

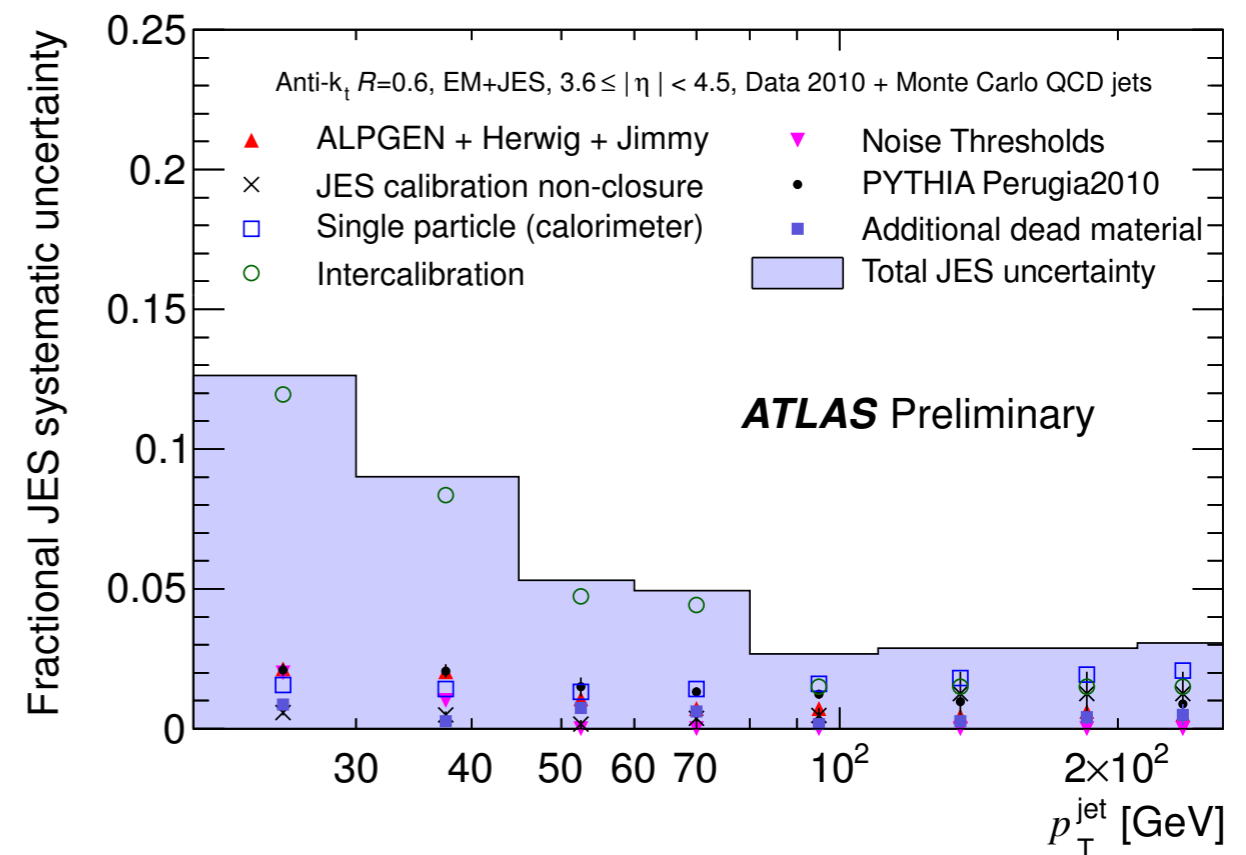
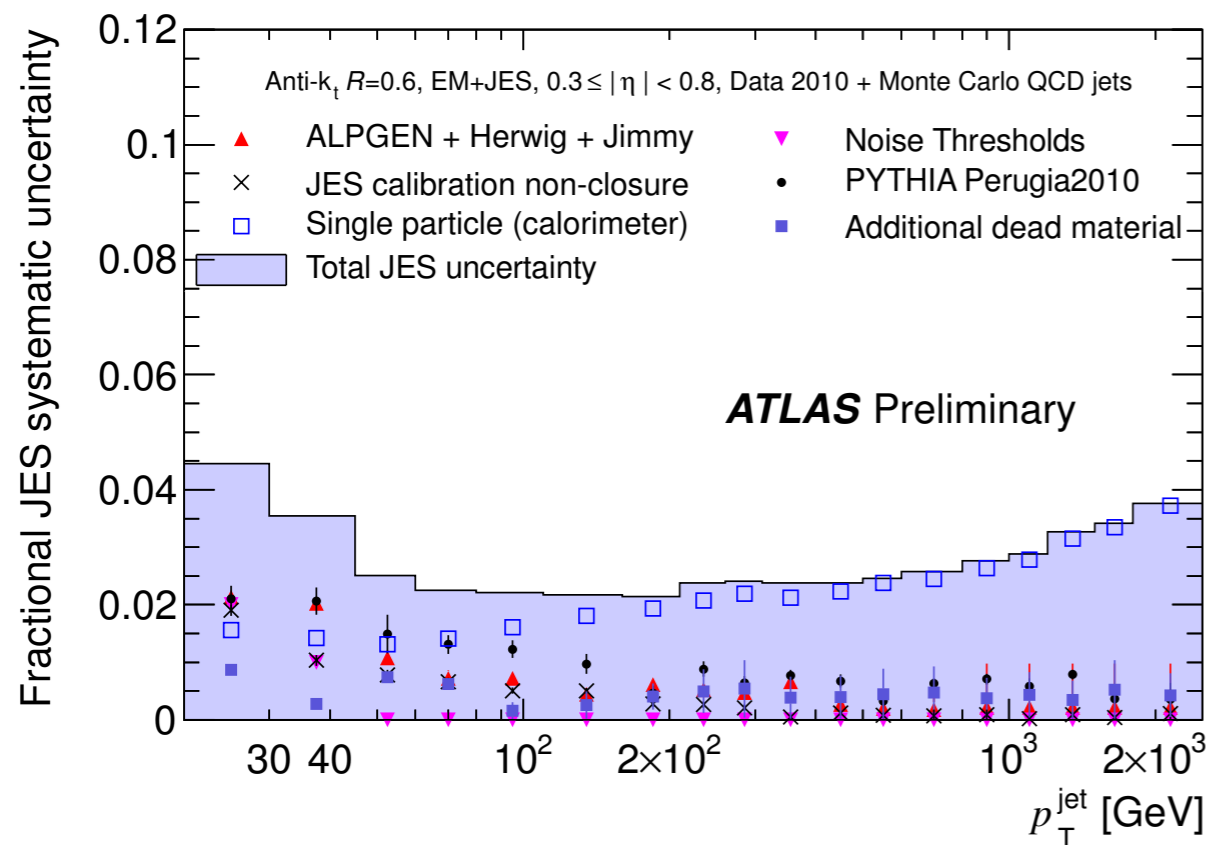
- 電磁スケールエネルギー測定
  - LAr: from [GeV] to [ $\mu$ A]: test beam
  - TileCal:  $^{137}\text{Cs}$ 
    - ▶ muon は EM calibration の performance を見るのに使う
  - これだけだと ~3%
- その他の source
  - Dead material description in MC: 2-3%
  - ノイズの大きさと threshold の関係: 1-2%
- single particle measurement
  - ▶ E/p 測定
  - ▶ Combined Test Beam
  - EM scale, ハドロンシャワー、dead material の効果を一気に測る強力な手段
    - ▶ EM scale の補正に使う
    - ▶ systematics の評価にも使う
      - 3つまとめて2%





# JES uncertainty (初期のまとめ)

- Result in 2010 data
  - 4% @  $p_T=30\text{GeV}$ ,  $0.3 < |\eta| < 0.8$
  - forward では  $\sim 10\%$



# “In-situ” JES calibrations/validations

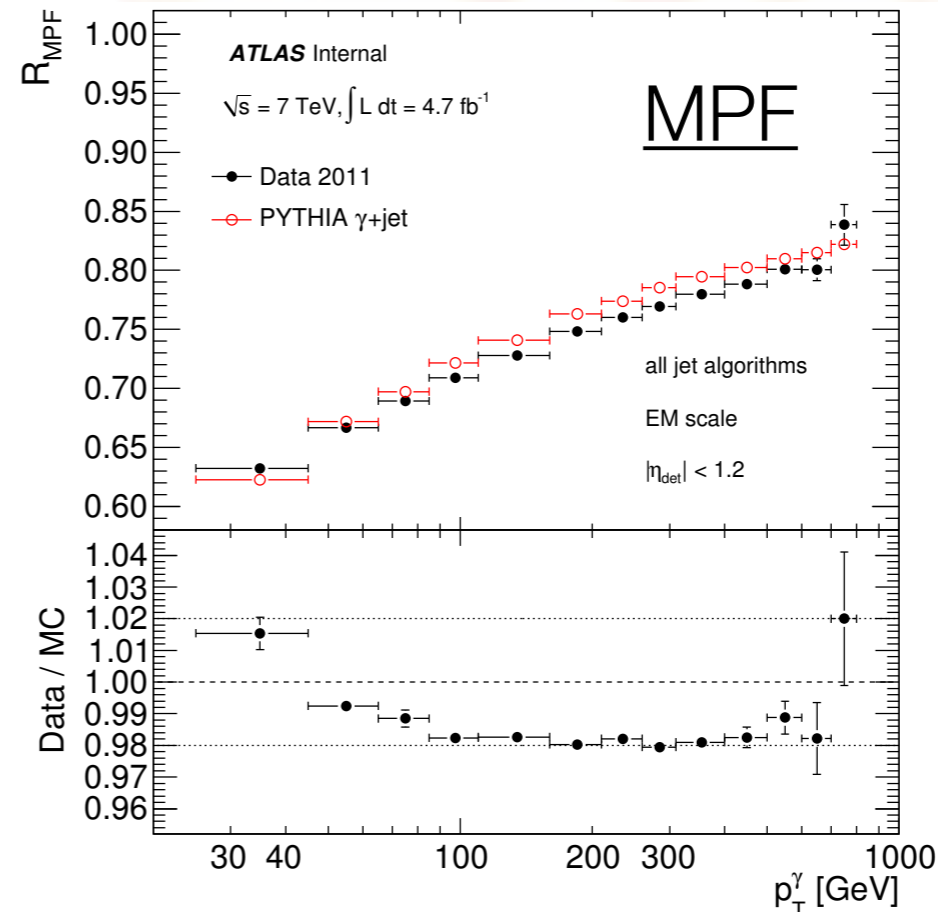
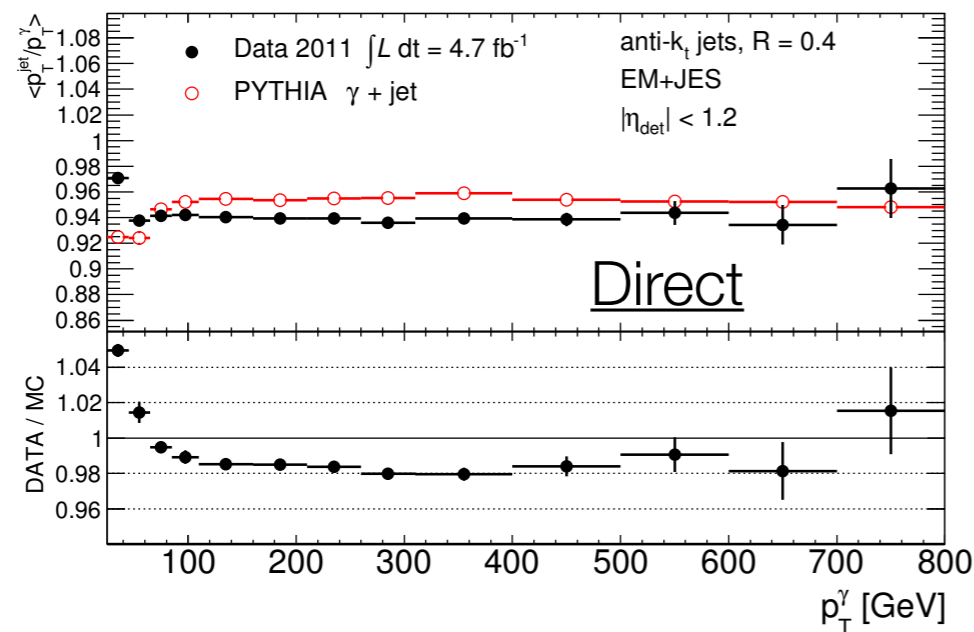
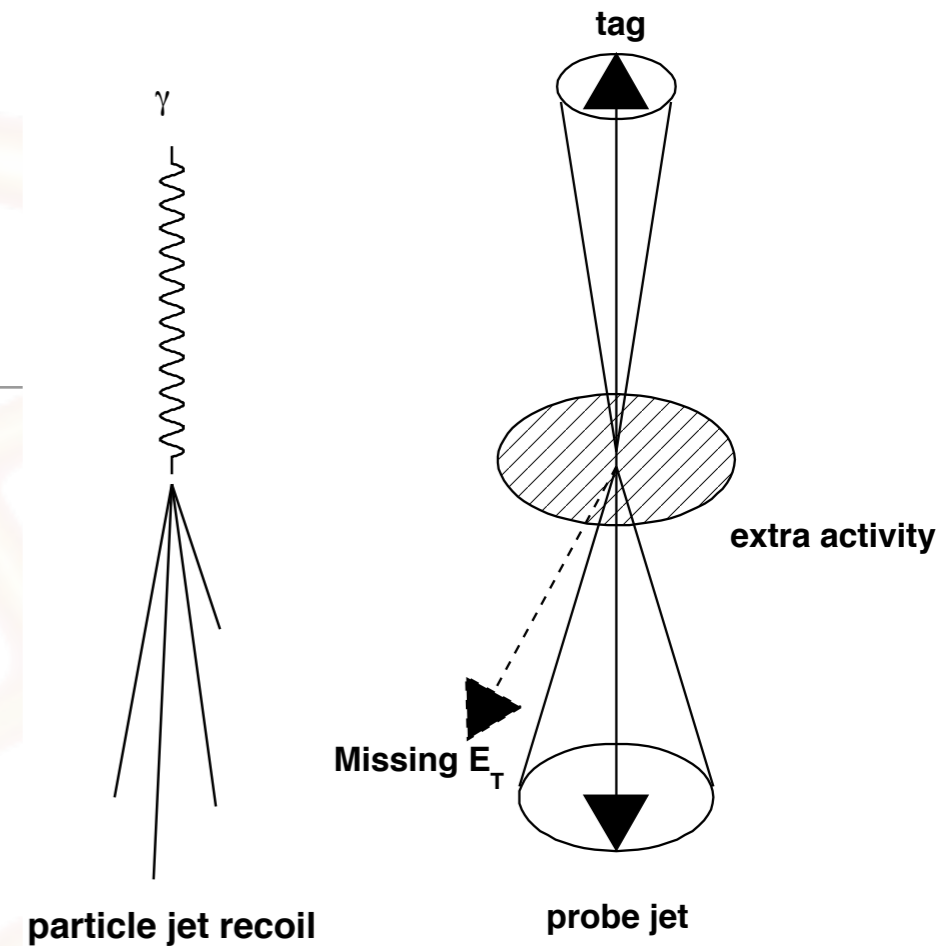
- データを使った “jetとしての” (single particle ではなく) calibration の確認をして、JES の不定性を評価したい
  - Gamma-jet balance method
    - ▶ Robust な EM scale の energy 測定と比較する
  - Z-jet balance
    - ▶ Zのmassが大きいのので、low Pt jet のvalidation ができる
  - Multi-jet method
    - ▶ high- $p_T$  Jetと low- $p_T$  recoil jet system を比べる
      - 一番高い  $p_T$  までいける
  - (track-jet/calor-jet )
    - ▶ track だけで jet を組んで、それと比較
  - Di-jet inter-calibration
    - ▶ barrel と forward での responseを比べて、各  $\eta$  領域で systematics を propagate

# Gamma-Jet balance

- Direct balance
  - $p_T(\text{jet})/p_T(\gamma)$
- Missing ET production fraction (MPF) method

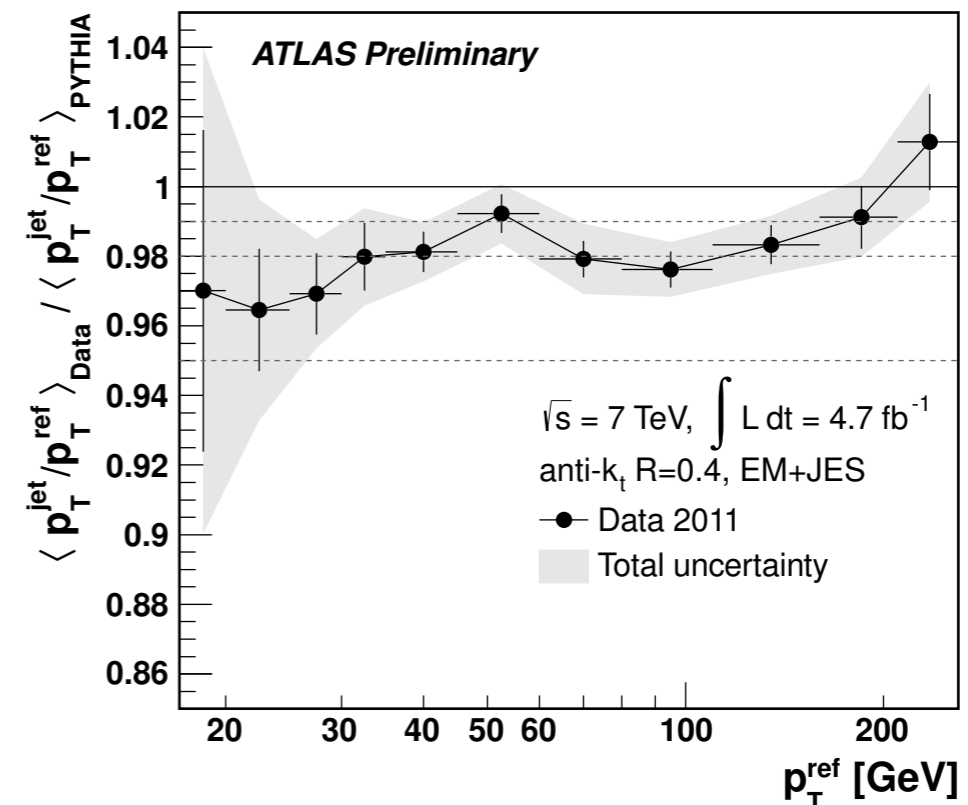
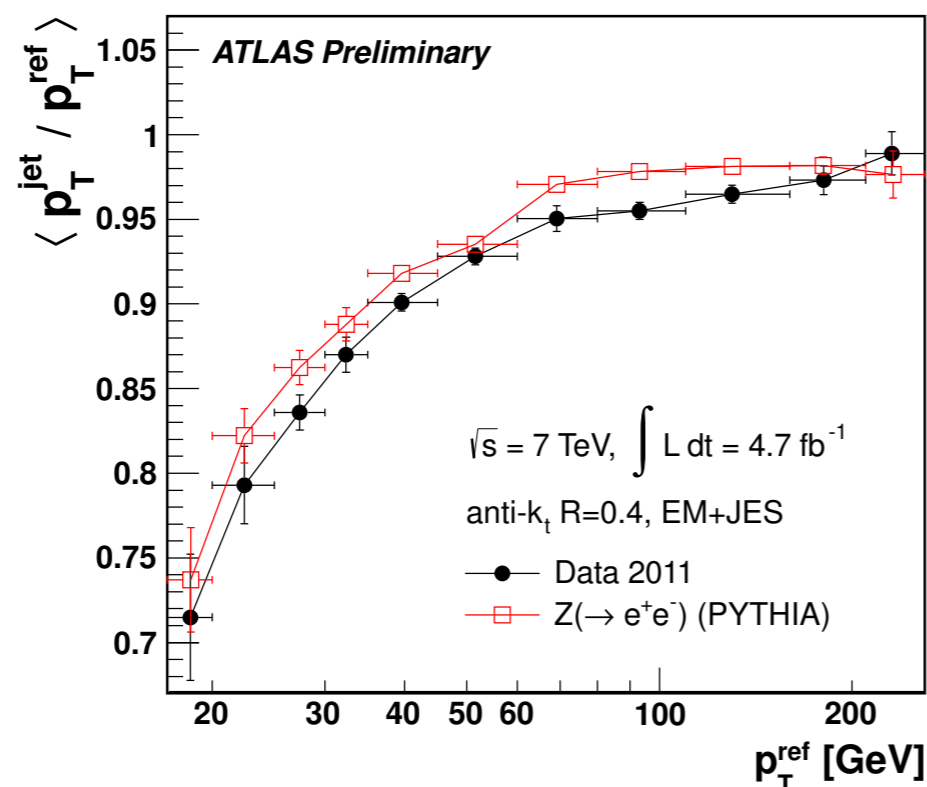
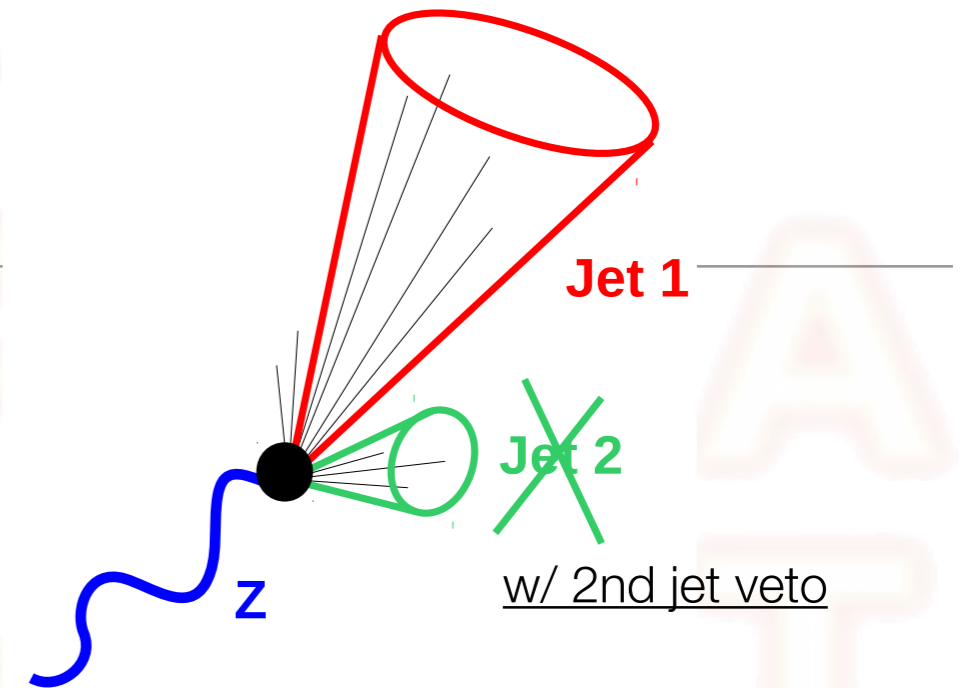
$$\text{MPF} \equiv \frac{\vec{p}_T^\gamma \cdot \vec{E}_T}{[p_T^\gamma]^2}, \quad \mathcal{R}_{\text{MPF}} \equiv 1 + \text{MPF}$$

- Result in 2011 data
  - 1-2% で data と MC は合っている
  - ▶ 合わない分は correction へ



# Z-jet balance

- $p_T(\text{jet})/p_T(\text{reference } Z \rightarrow ee)$ 
  - much less background than  $\gamma$ -jet
  - probes low- $p_T$  jets
- Result in 2011 data
  - data/mc agreement within 3%

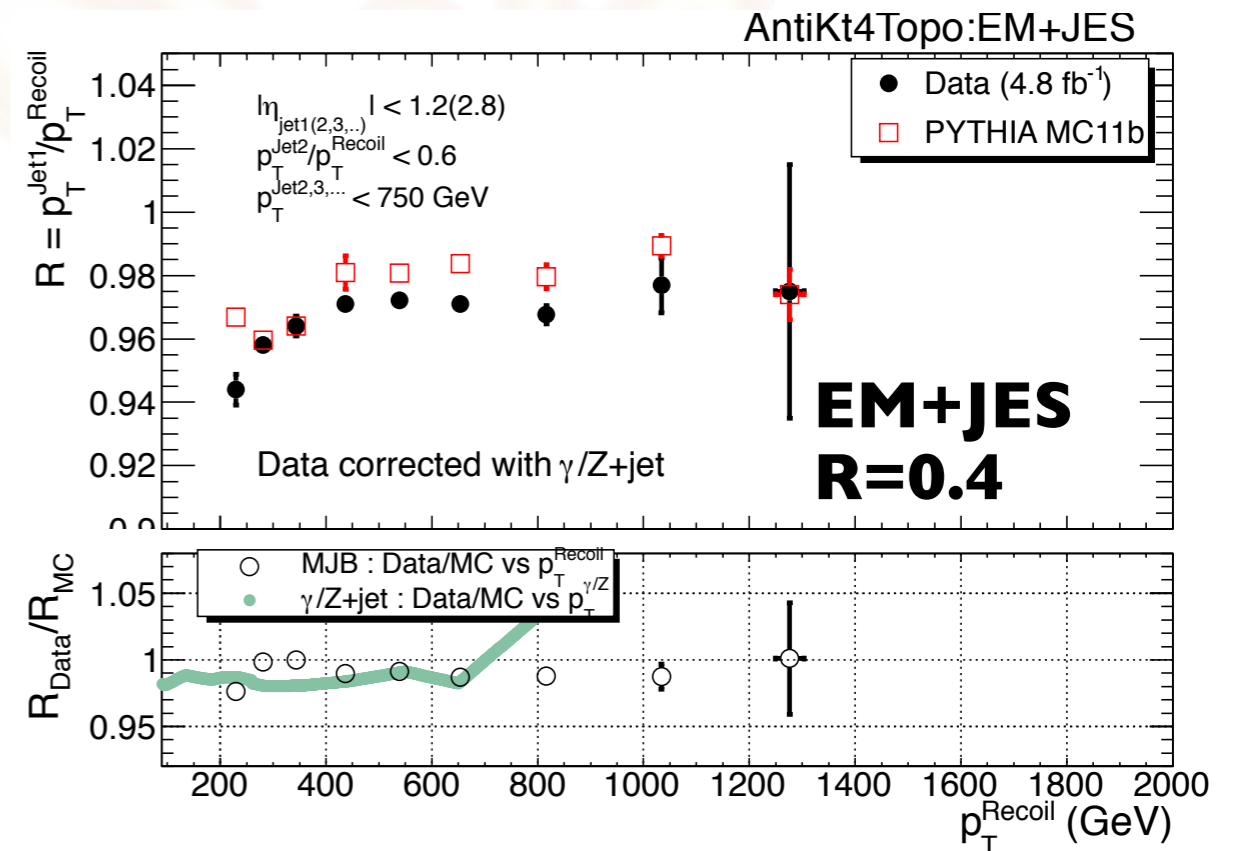
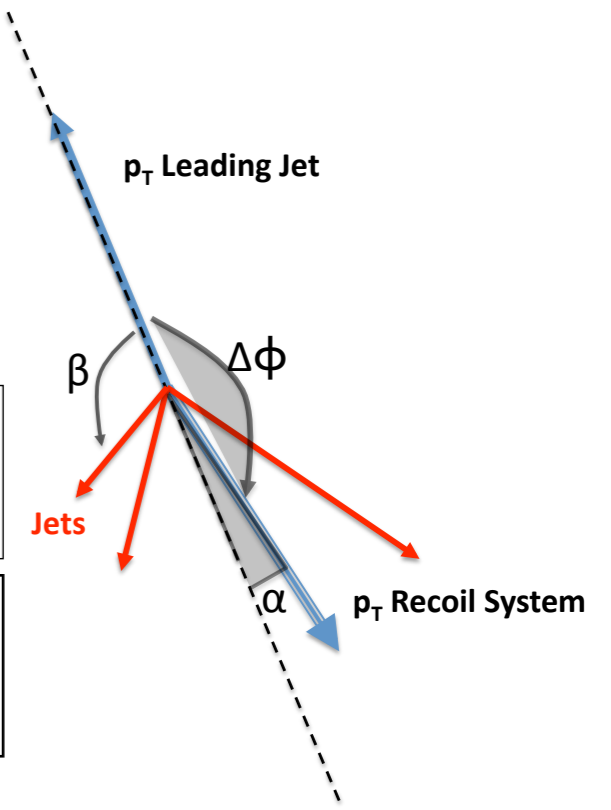


# Multi-Jet balance

- **MJB**
  - powerful tool to reach higher  $p_T$  in JES
- **Result in full data 2011**
  - w/ corrections by gamma-jet/Z-jet
    - ▶ data/MC :  $\sim 1\%$
    - ▶ 2010/2011: similar performance
  - $p_T$  reach extended
    - ▶ 0.8  $\rightarrow$  1.2 TeV
      - Topic in 2011/12 : TeV jets !!

Employ  $p_T$  balance " $p_T^{\text{Jet1}}/p_T^{\text{Recoil}}$ " to validate/calibrate in-situ the leading (high energy) jet response

LCW+JES/EM+JES topo-cluster jets for  $R=0.6$  and  $0.4$   
 ▶  $p_T > 20$  GeV,  $|\eta| < 2.8$ ,  $N_{\text{jet}} \geq 3$



# Dijet balance

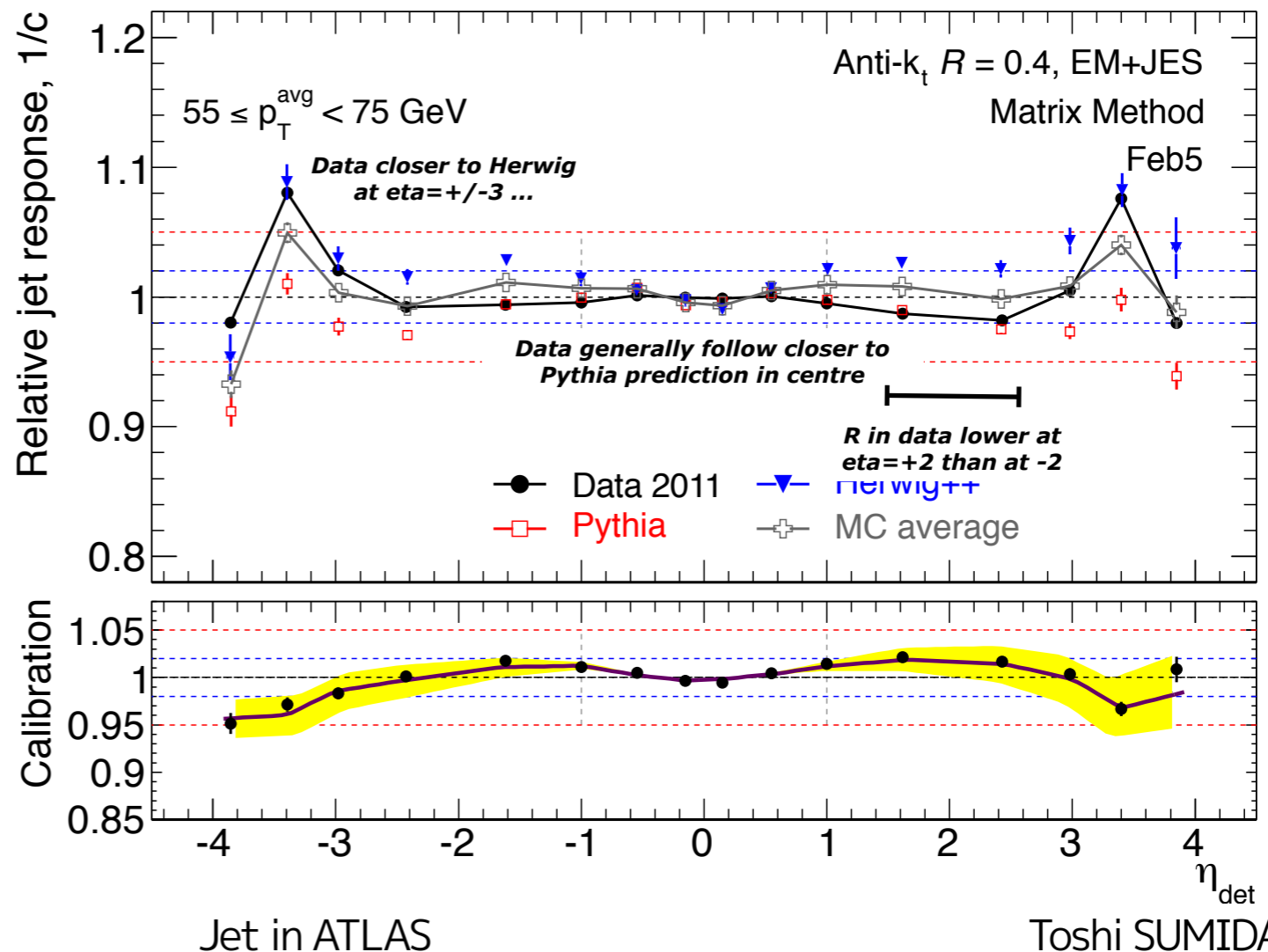
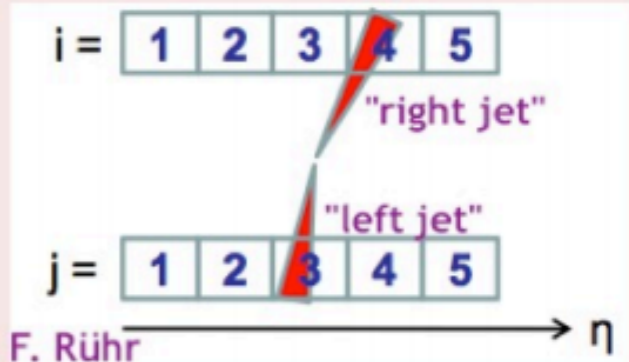
- Analysis methods
  - Standard Method
    - $p_T(\text{probe jet})/p_T(\text{ref. jet})$
  - Matrix Method
    - not defining probe or reference jets
    - $|\eta_1| < |\eta_2|$
- Results in data 2011
  - ~10% difference between Pythia and Herwig
  - taken into systematics in the forward region

## Matrix Method

$$\mathcal{A} = \frac{p_T^{\text{left}} - p_T^{\text{right}}}{p_T^{\text{avg}}}, \quad \eta^{\text{left}} < \eta^{\text{right}}$$

$$\mathcal{R} = \frac{p_T^{\text{left}}}{p_T^{\text{right}}} = \frac{c^{\text{right}}}{c^{\text{left}}} = \frac{2 + \langle \mathcal{A} \rangle}{2 - \langle \mathcal{A} \rangle}$$

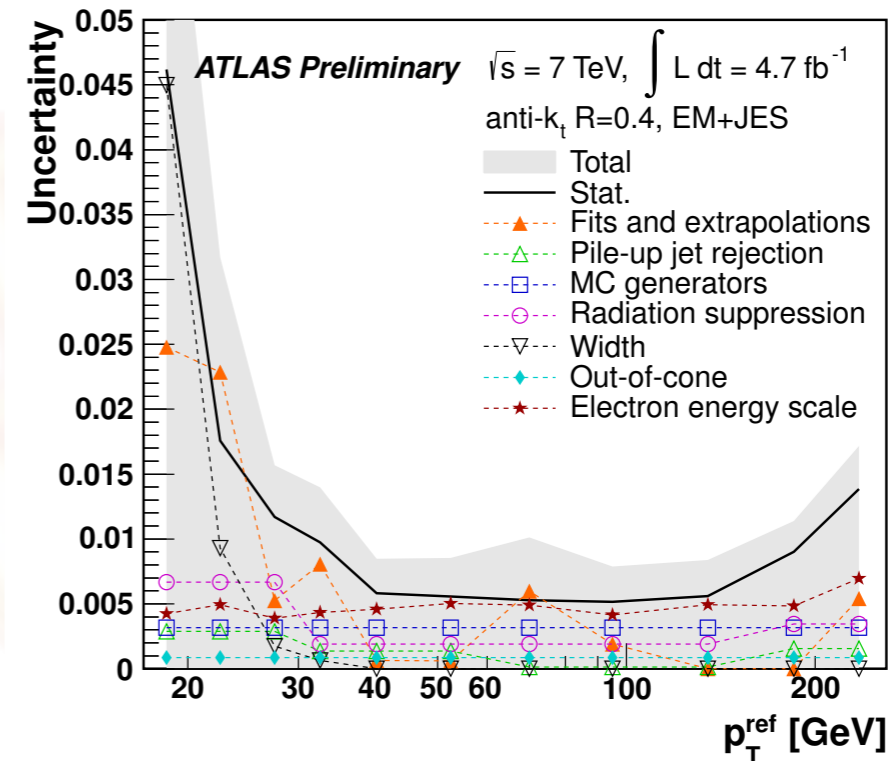
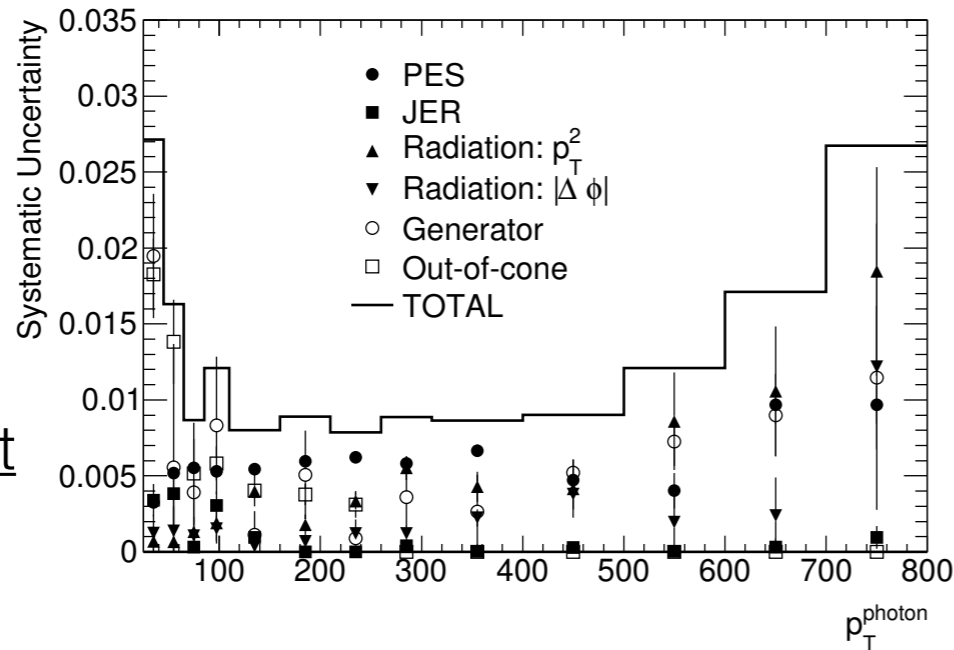
Solve for all  $c_i$  using matrix of lin. eq.



# Systematic uncertainties

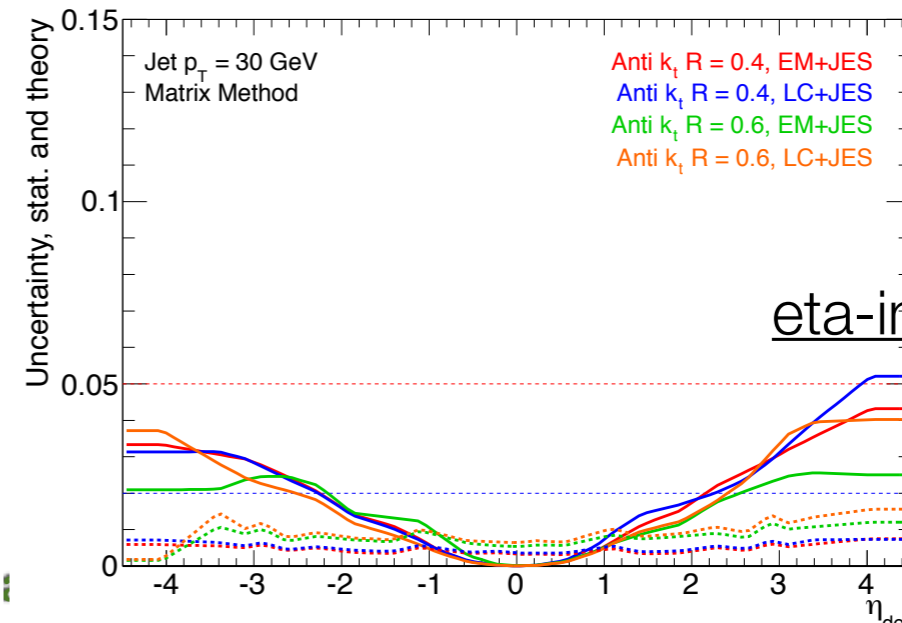
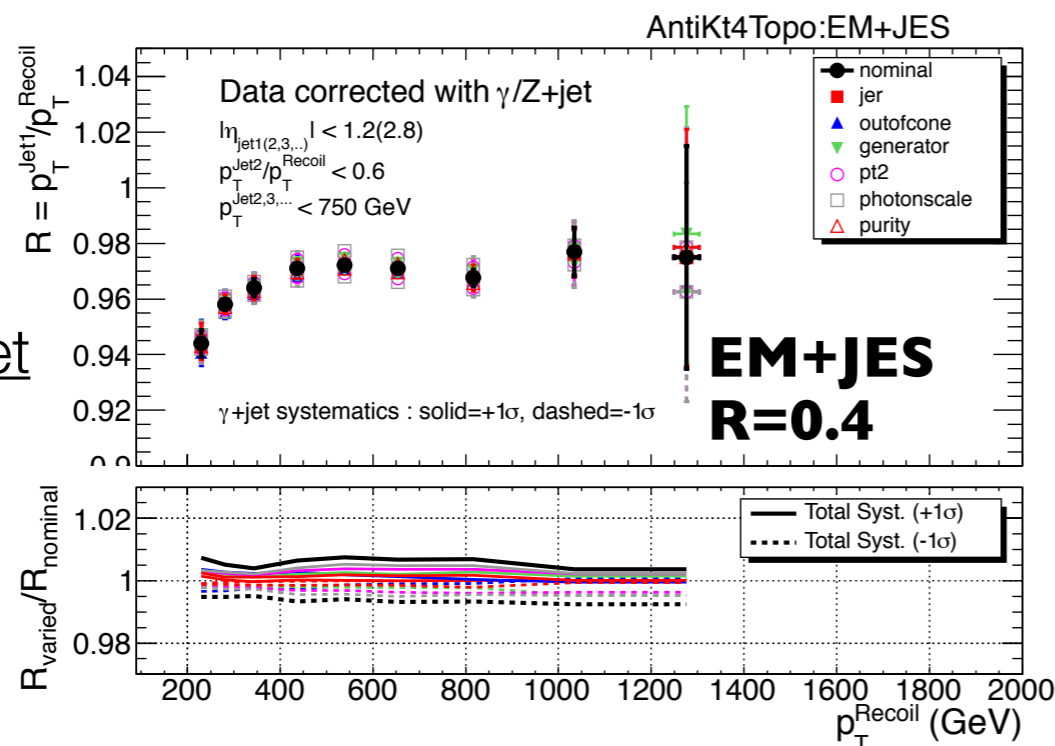
## In in-situ measurements

Gamma-jet



Z-jet

Multi-jet



di-jet  
eta-intercalibration

# ここまでのまとめ

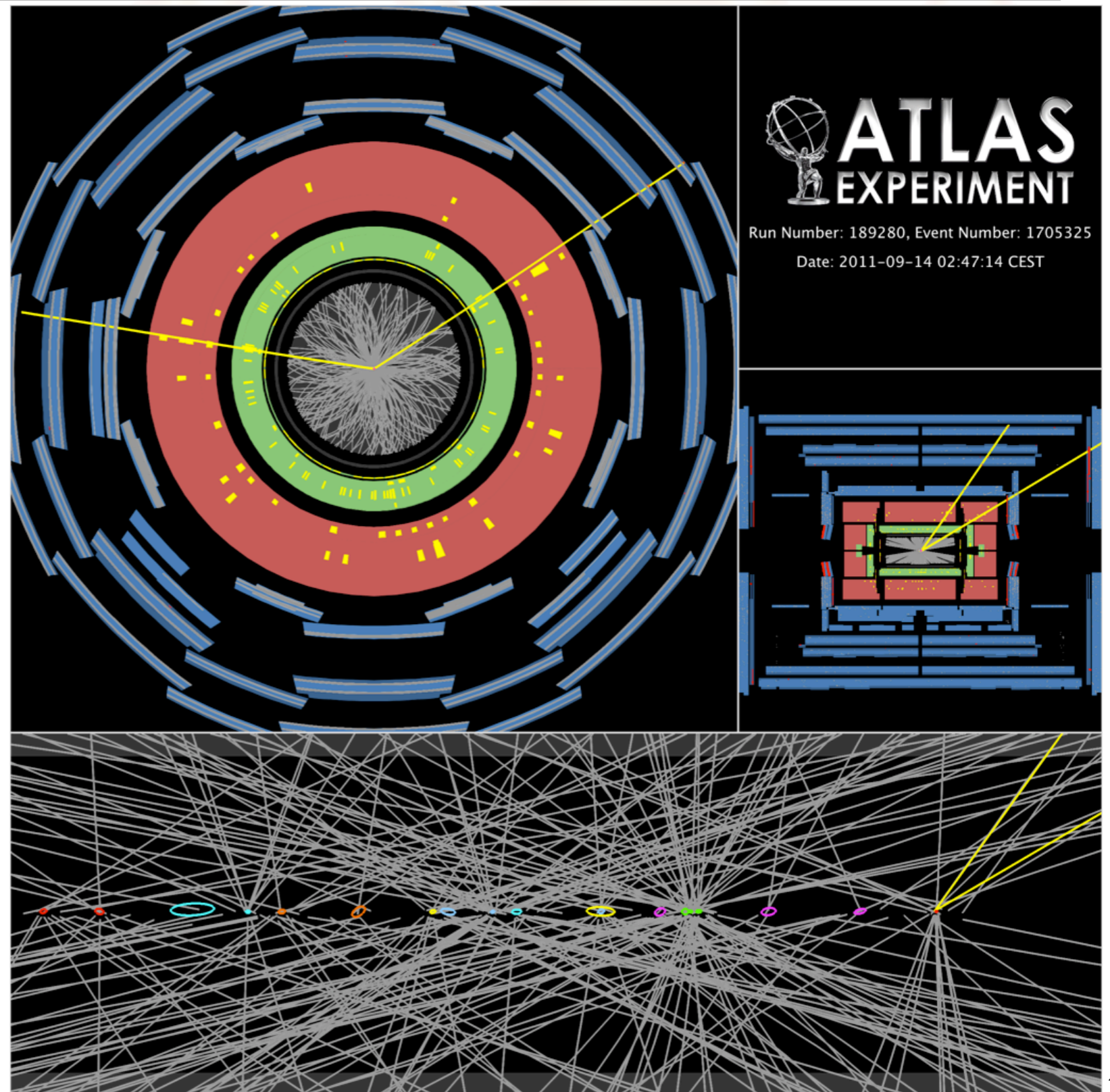
- Jet とは
  - 高エネルギーパートンを元とするハドロンの束
- Jet calibration
  - カロリメータの EM(or LC)-scale でのレスポンス
  - エネルギークラスターの構築
  - Jetの再構築
    - ▶ を行なって、MCで求めた JES をかける
- Calibration がどれくらい合っているか
  - JES uncertainty
    - ▶ 物理モデルや、検出器の反応、ノイズ、物質等からくる jet energy response の不定性
      - 基本的に single particle measurement を使って評価
  - “In-situ” calibrations
    - ▶ データを使って JESを検証
      - (これからはJESの補正、uncertainty の評価に使う)



Pile-up in 2011

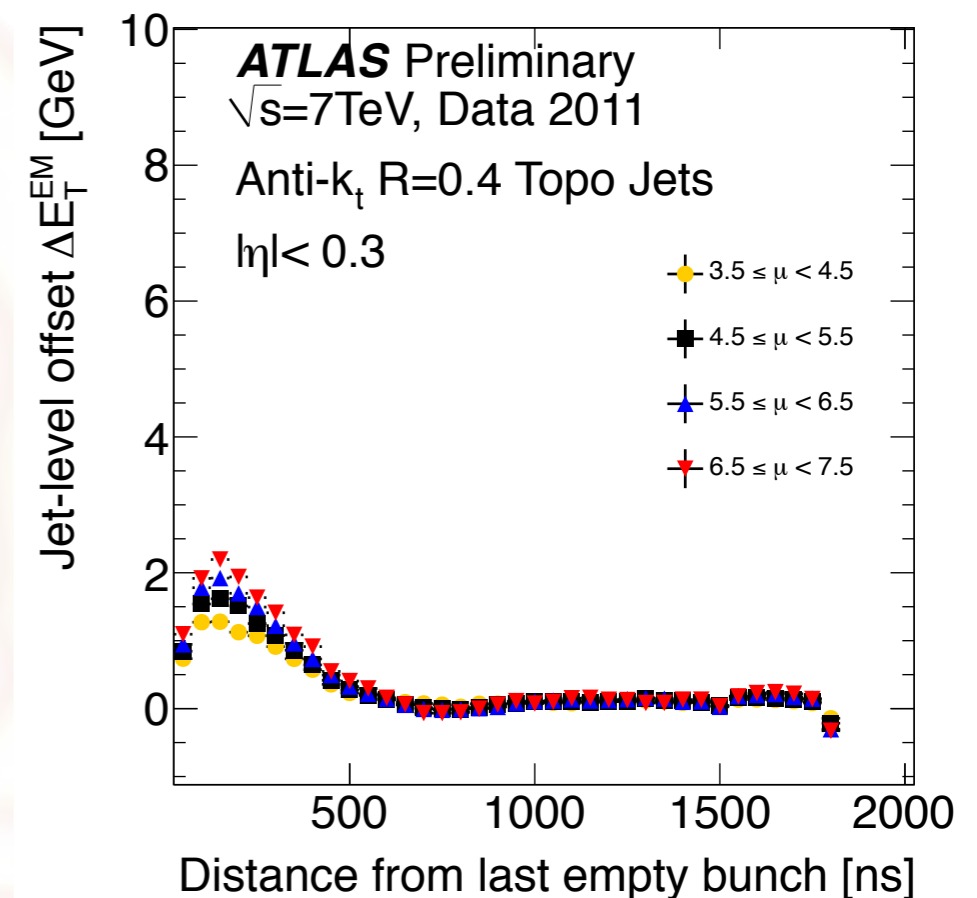
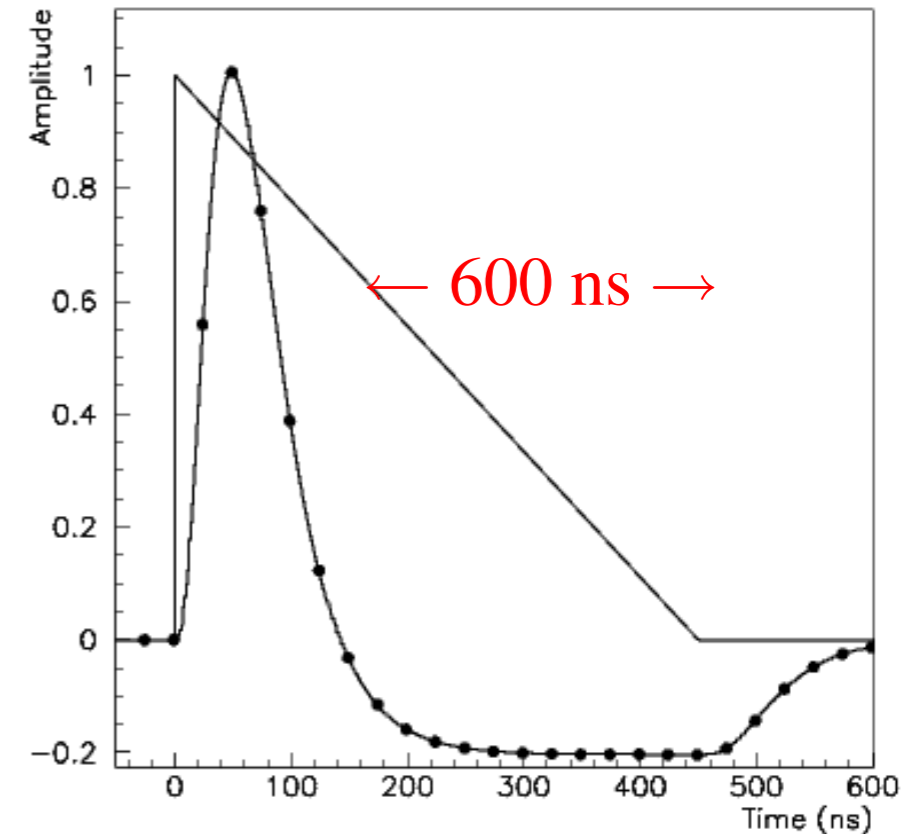
# Pile-up

- $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  の  
イベントディスプレイ
  - with **20** vertices
    - ▶  $p_T > 400 \text{ MeV}$  の  
トラックのみを表示
    - ▶ 楕円の大きさは  
primary vertex再構成  
の不定性を20倍にして  
表している
- カロリメータ(特にハドロン)での  
エネルギー測定や、  
横方向消失運動量(missing  $E_T$ )の  
測定に大きく影響する



# Energies from Pile-up

- Jet (広範囲での energy 測定)に影響するもの
  - In-time pileup
    - ▶ 同時に起こった複数の衝突からの寄与
      - ✓ energy を足し上げてしまう
    - ▶ dependent on
      - その bunch x-ing での同時衝突数:  
Number of Primary Vertex (**NPV**)
      - ✓ tracking で数える
  - Out-of-time pileup
    - ▶ bi-polar pulse shape in the calorimeters
      - total charge は 0 (noise-tolerant)
      - 長い negative charge 部分が energy deposition のあとに続く
        - ✓ これが、energy をさっ引いてしまう
    - ▶ dependent on
      - その bunch x-ing の前の部分の 平均衝突数:  
"  $\mu$  " ( $\langle \mu \rangle$ )
      - ✓ total cross section measurement

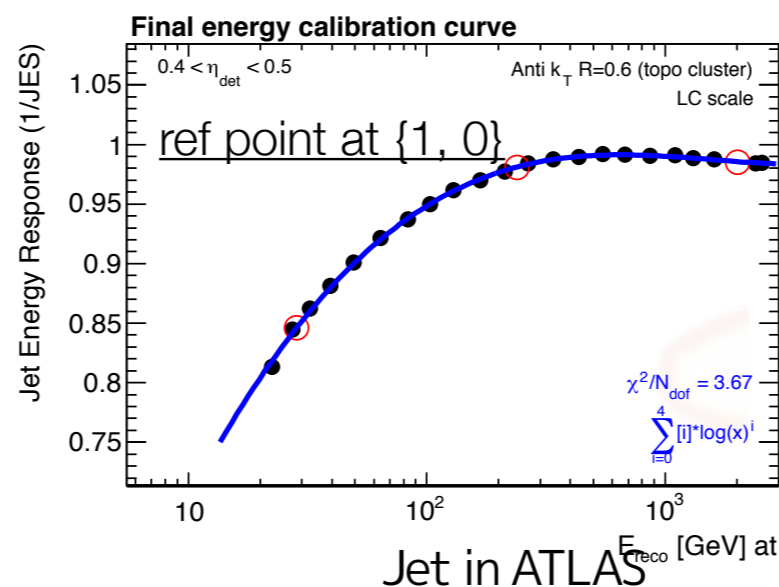
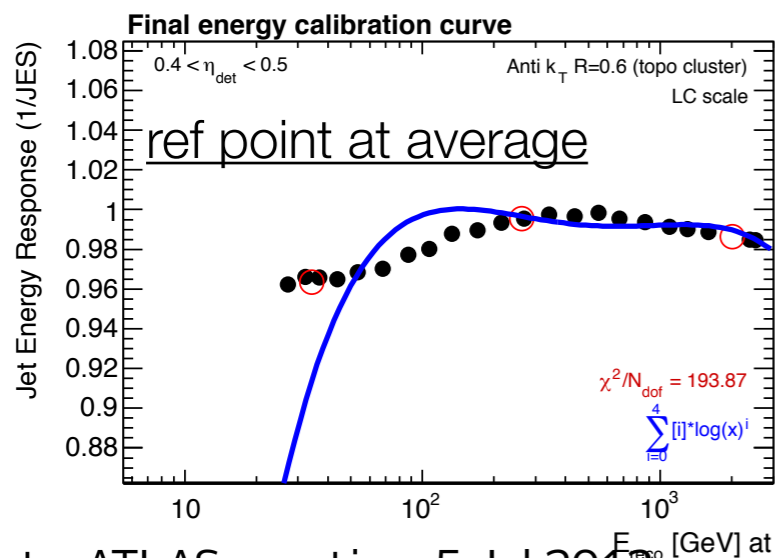


# Pileup corrections

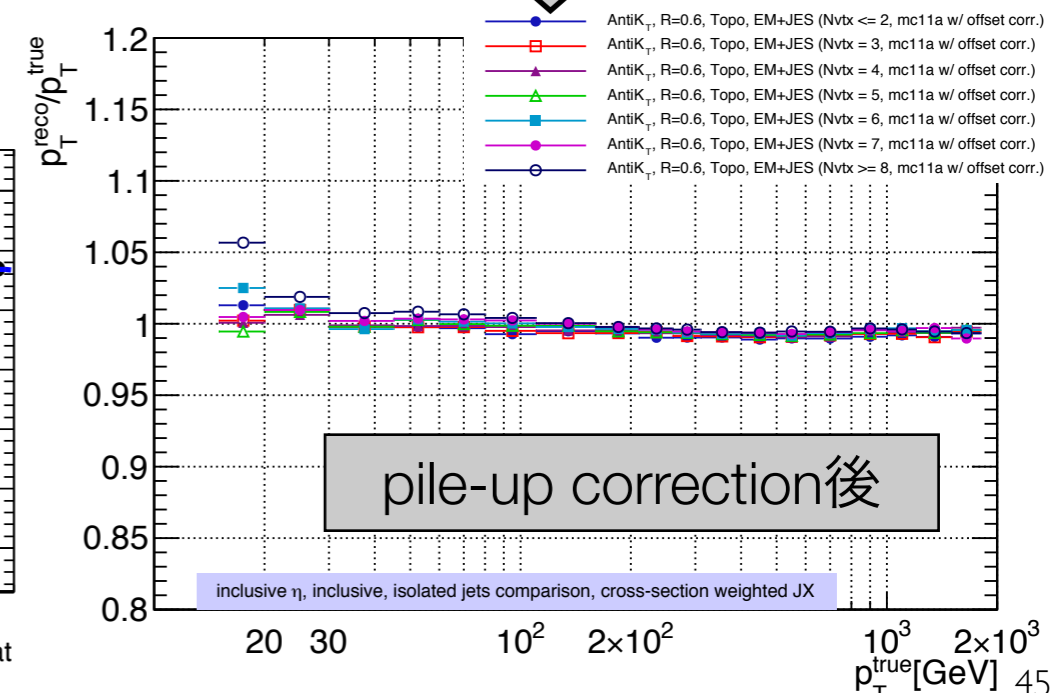
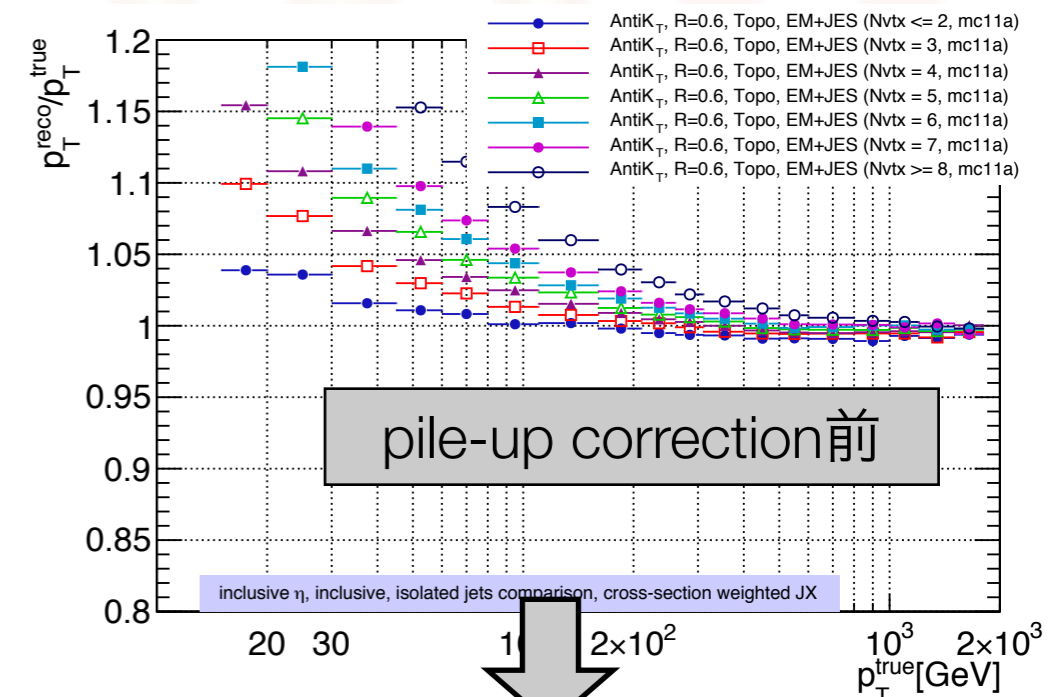
- Calorimeter で測る energy を足したり引いたりされると jet の  $p_T$  を間違えるので、これに対して補正をしたい
  - Offset (pile-up) correction
- Correction methods
  - Tower/cluster-based method
    - ▶ eta-dependent に、NPV or  $\mu$ 毎に energy in calo-towers/clusters の table を作って、それで補正
    - ▶ topo-cluster の noise-suppression が MC で完璧に記述できないため、あまり上手くいかなかった
  - **Truth- $p_T$  based method**
    - ▶ MC truth jet information を使って、ある  $\eta$ , NPV,  $\mu$  での EM/LC scale jet  $p_T$  と比較。これを table に持つ
      - $E(\text{offset}) = A * (\text{NPV} - \langle \text{NPV} \rangle_{\text{ref}}) + B * (\mu - \langle \mu \rangle_{\text{ref}})$ 
        - ✓  $[\langle \text{NPV} \rangle_{\text{ref}}, \langle \mu \rangle_{\text{ref}}]$  : offset が 0 になる点 (reference point)
        - ✓ 現在の default
  - Others
    - ▶ Jet area method, Ntrack, JVF, etc....

# Jet calibration with offset correction

- reference point について
  - JES が、 offset correction なしで求められたのであれば、その MC サンプルの平均
  - しかし、 mc11a ( $\mu \sim 7$ ) 以降、特に LC-scale jet については平均 response が大きすぎるために jet energy response に対する polynomial での fit が絶望的
    - 一旦  $[\langle NPV \rangle_{ref}, \langle \mu \rangle_{ref}] = [1, 0]$  として offset を引いたのちに JES を計算する。
      - jet energy response の形が回復
      - NPV 間での  $p_T$  response の spread がちゃんと修正されている



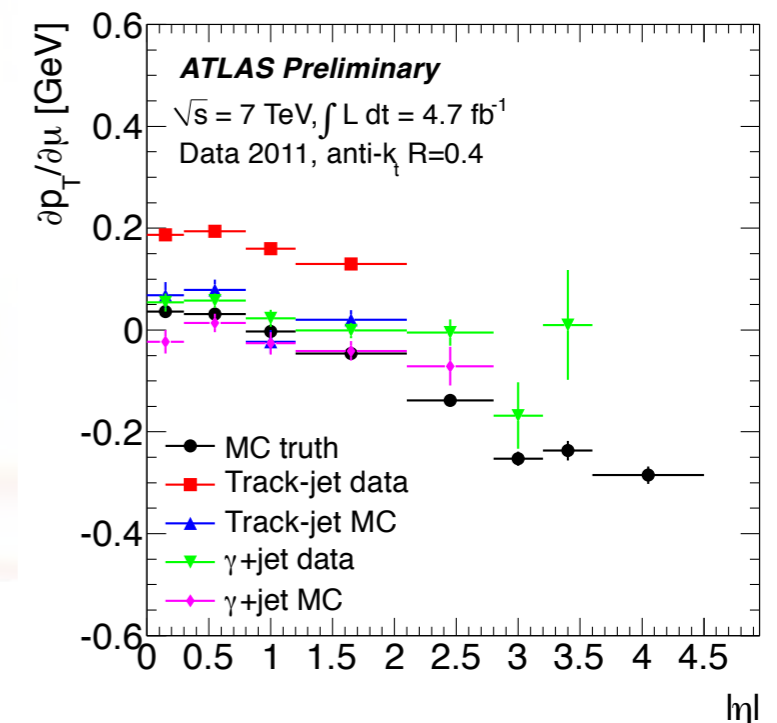
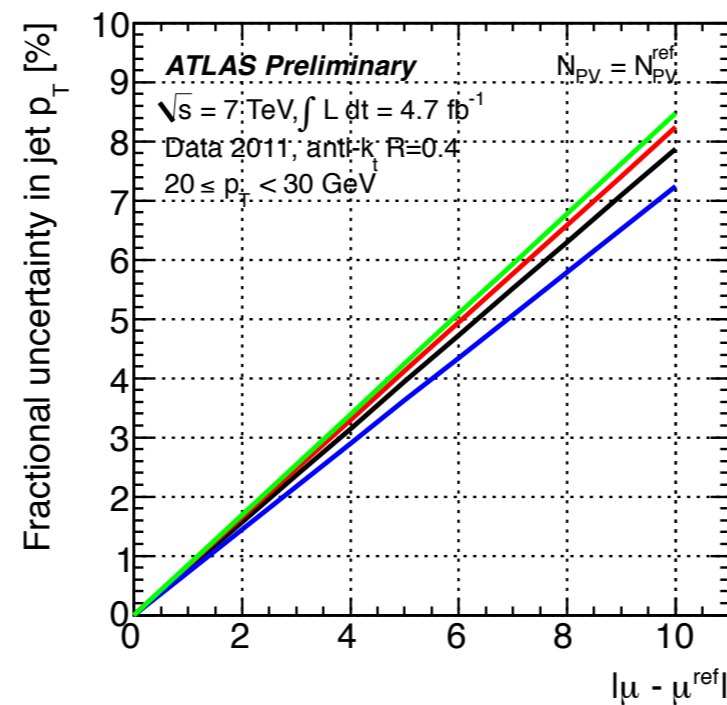
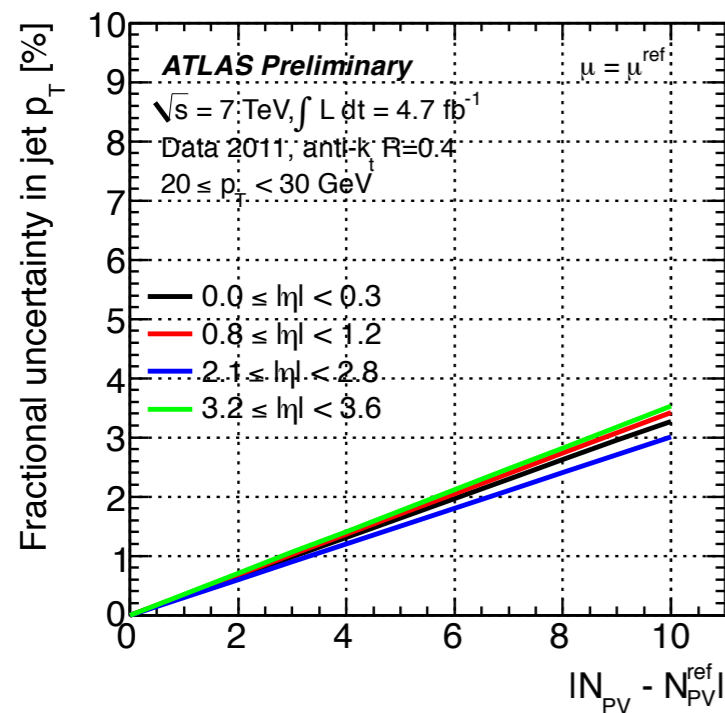
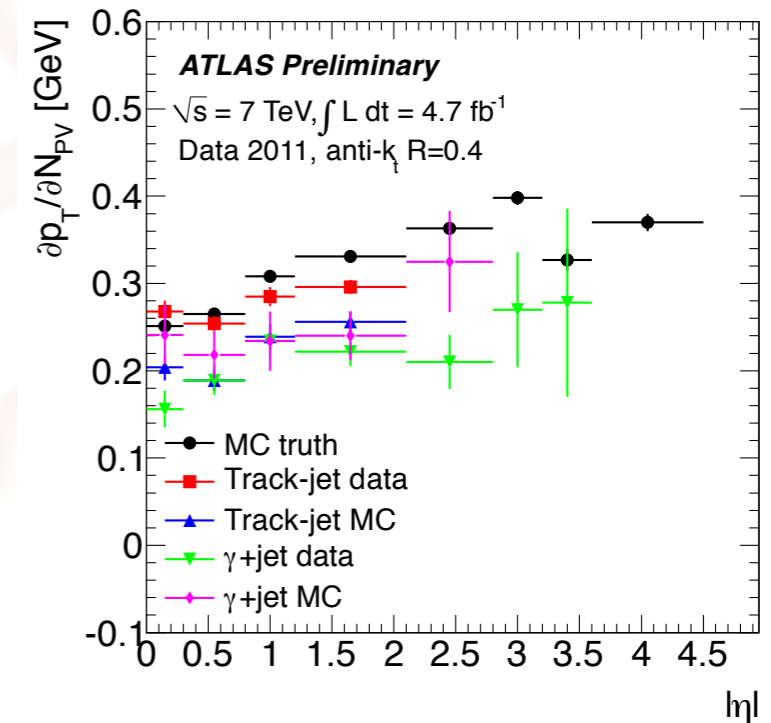
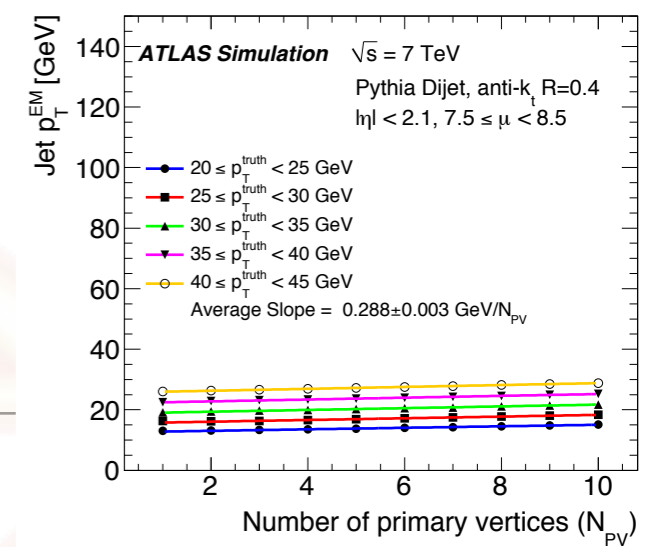
Jet の  $p_T(\text{測定})/p_T(\text{MC truth})$



# Systematics in offset correction

## • Procedure

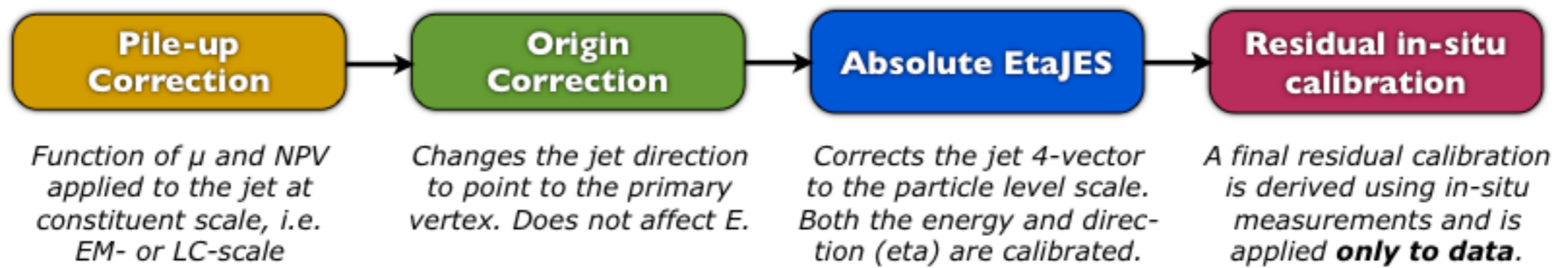
- MC で jet  $p_T$  の NPV/ $\mu$  dependenceからそれぞれの slope を求める
- 各 in-situ measurement での reference を用いて検証
  - ▶ 各 measurement 間の差を systematics として定義



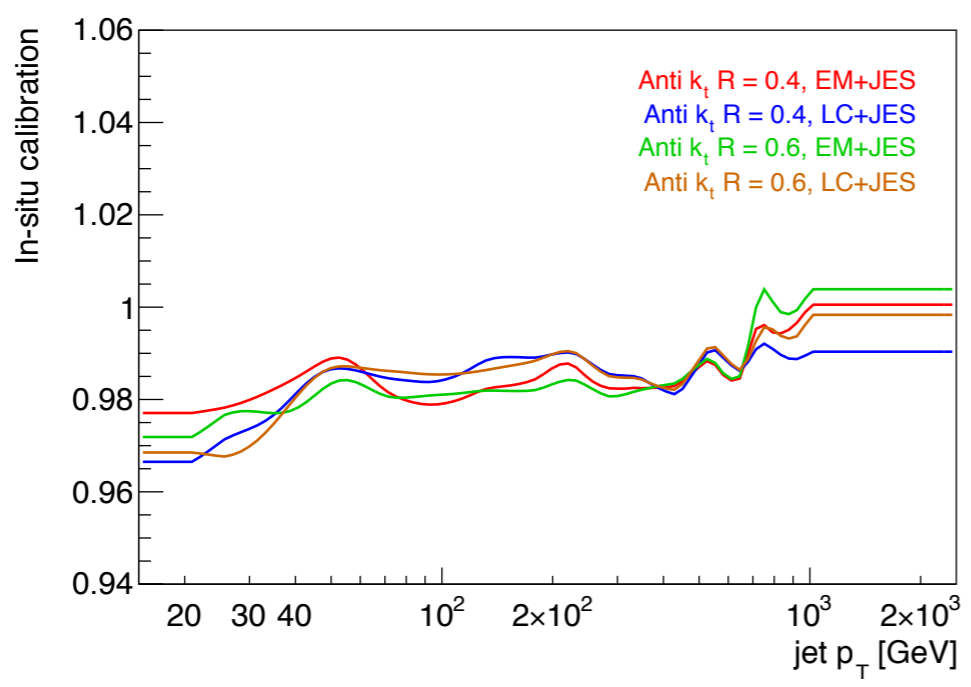
現在の状況

# New JES in 2012

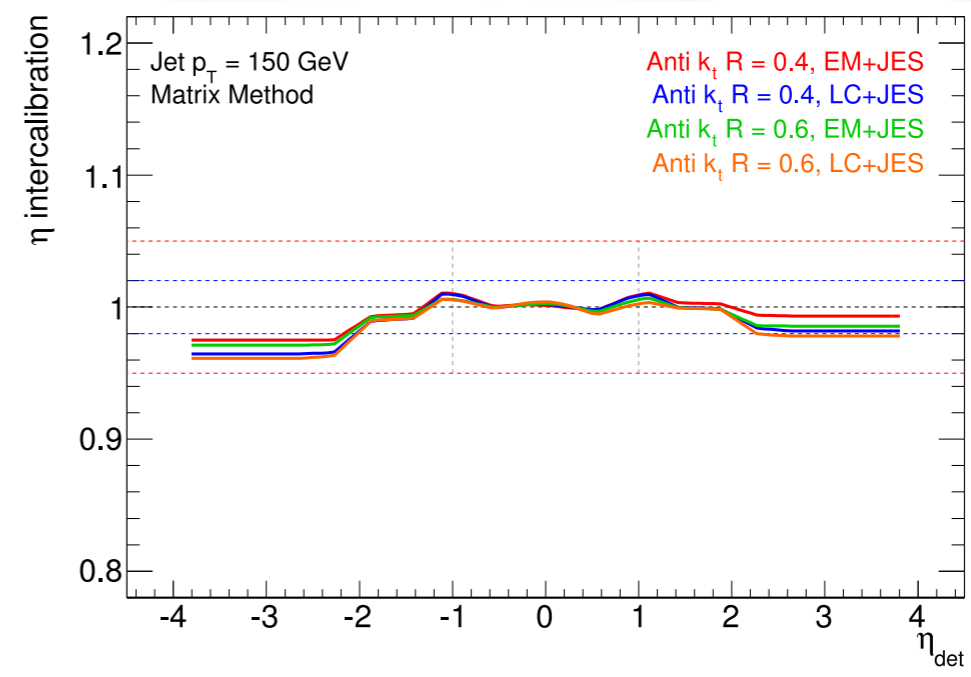
- In-situ calibrations の absolute JES への取り込み
  - 現在の calibration scheme



- Correction from the in-situ measurements



(a) Absolute in-situ calibration ( $|\eta| < 1.2$ )



(b) Relative calibration



# Total JES uncertainty

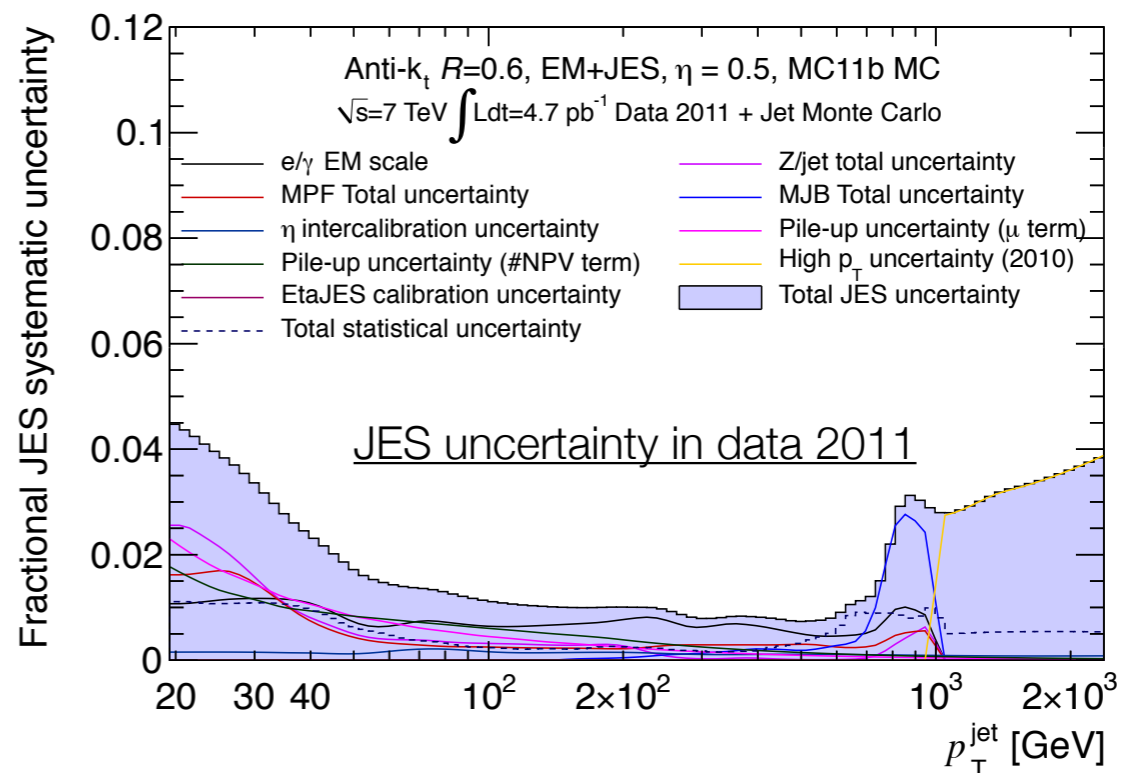
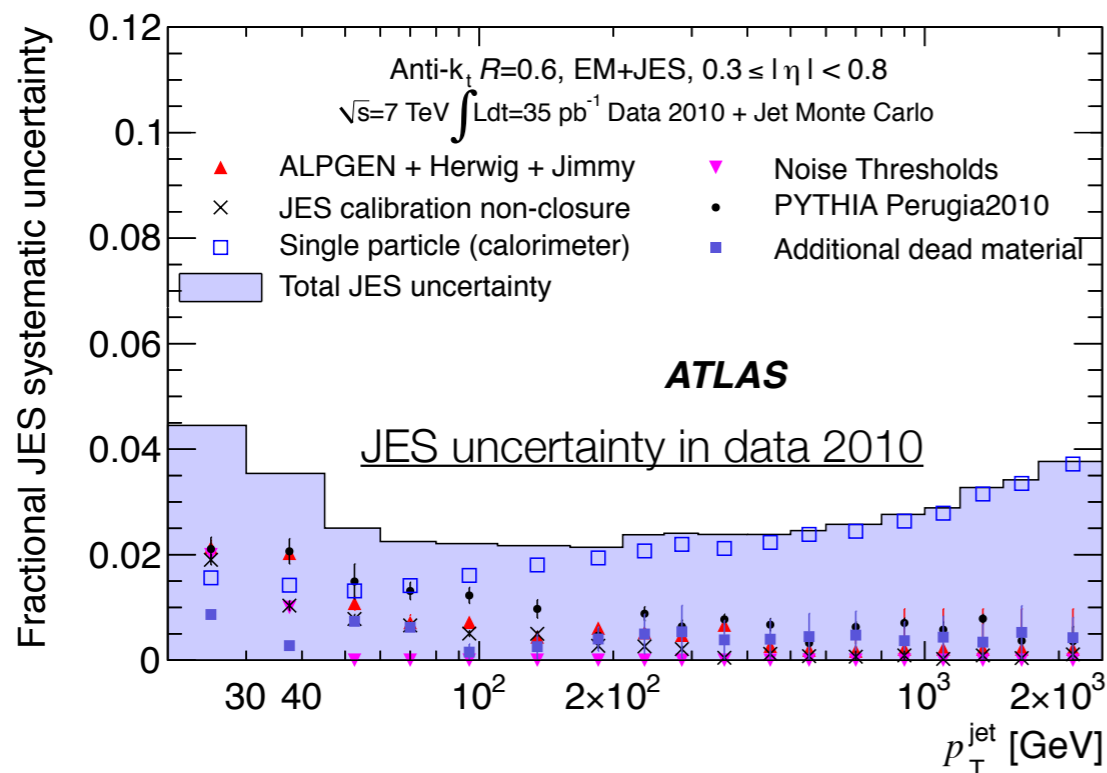
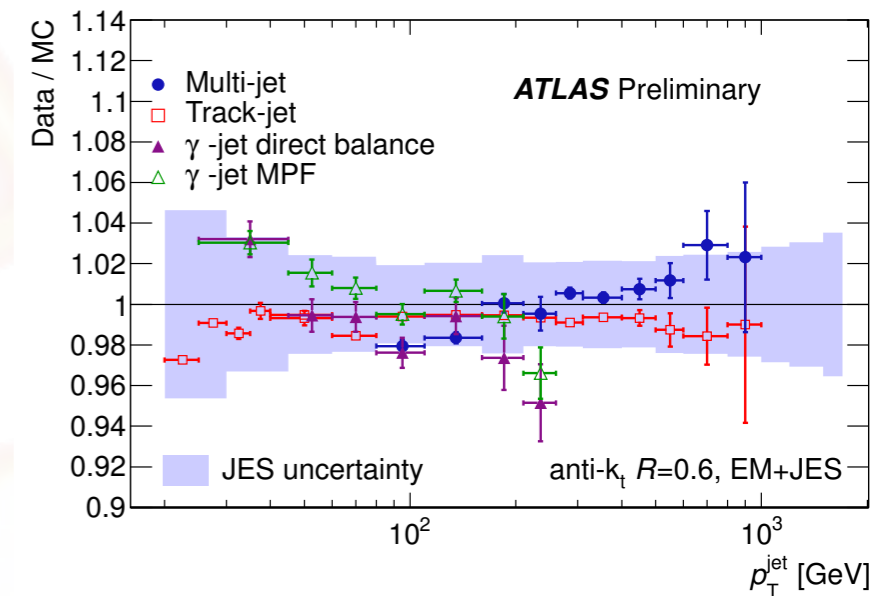
- JES uncertainty への寄与

- Absolute JES calibration method
- Data/Pythia
- Relative calibration for jets with  $\eta > 0.8$
- High  $p_T$  uncertainty for jets with  $p_T > 1\text{TeV}$
- Pile-up
  - ▶ total で 1% @100-500GeV を達成
    - Calibration tool, JES uncertainty provider も一応できた。

- 最新情報

- Twiki: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/JetsWithPileup2011>  
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/AtlasProtected/JetCalibrationToolsWinter2011>
- Jet calib tool in svn: <https://svnweb.cern.ch/trac/atlasgrp/browser/CombPerf/JetETMiss/JetCalibrationTools>

Uncertainty in in-situ measurements in 2011



その他/今後

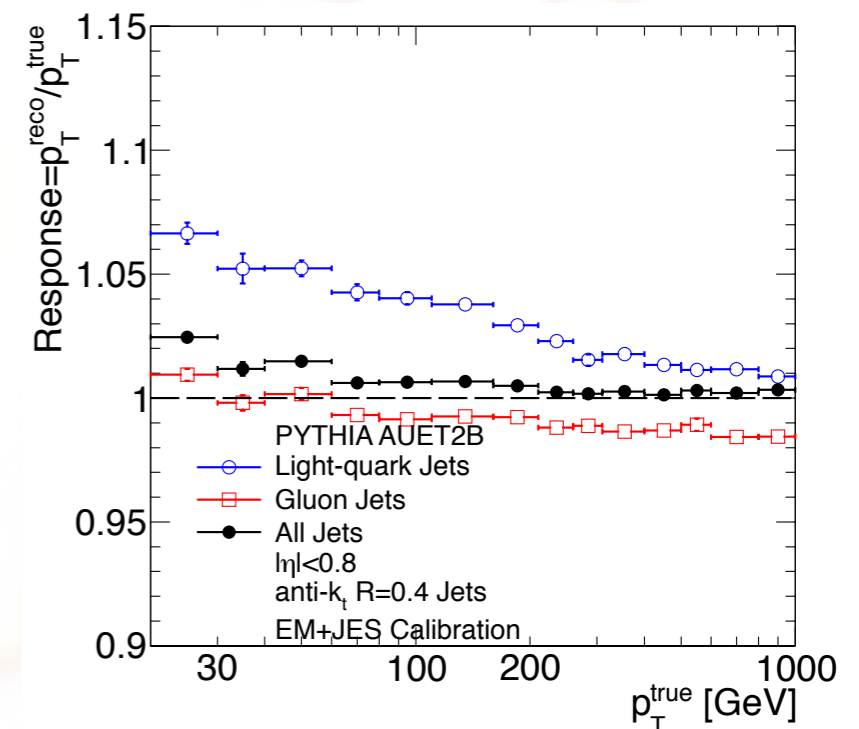
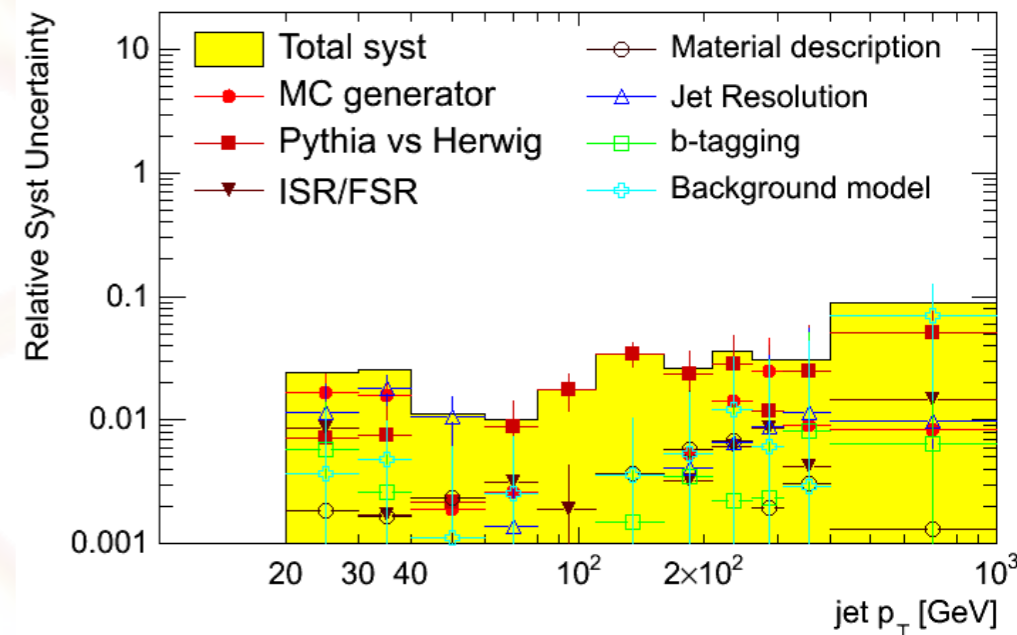
# Physics/Flavor dependent JES

- b-jet

- generation, decay における MC の uncertainty, muon response 等の systematic の source がある
  - ✓ now in finalization

- quark/gluon separation

- 実は、(light)quark と gluon 起源の jet の response は結構違う
  - ▶ more tracks in gluon jets → lower response
- 対処
  - ▶ analysis dependent な JES の補正
    - in top, W+jets, etc...
  - ▶ quark/gluon ID likelihood
    - それぞれの parton の種類らしさ、に応じた JES を提供
    - ✓ work in progress

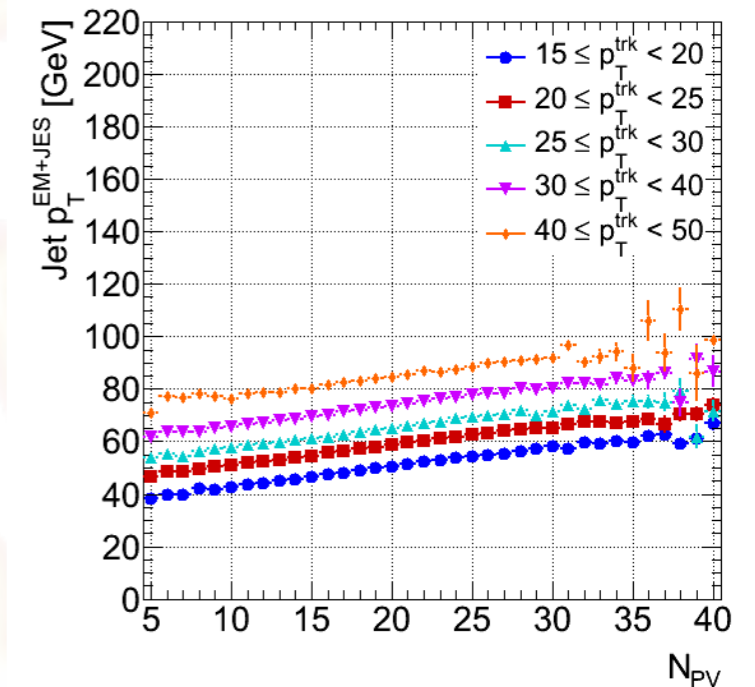


# Pile-up correction in 2012

- より高い pile-up rate への対策

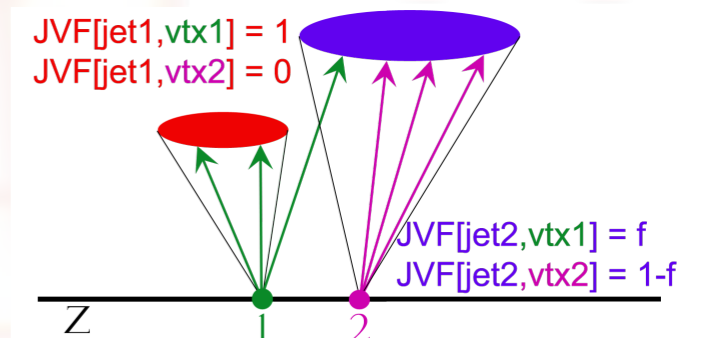
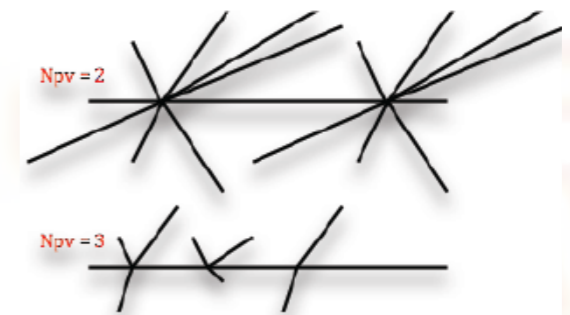
- ✓  $\mu \sim 35 @ 6 \times 10^{33}$

- Linearity on NPV は  $\sim 40$  まで OK
  - ▶ とりあえず、今の correction は動く
- Pile-up uncertainty の評価
  - ▶ ref. point は  $[1,0]$  のままでいいか？
    - slope の syst. err. を最小にする study



- Event-by-event, jet-by-jet corrections

- 今の correction は NPV と  $\mu$  だけで決まっているので、jet resolution を改善しない。
  - ▶ Jet Vertex Fraction (JVF) を correction に使う？
  - ▶  $N_{\text{track}}$  を使う？
    - 色々と study が進行中



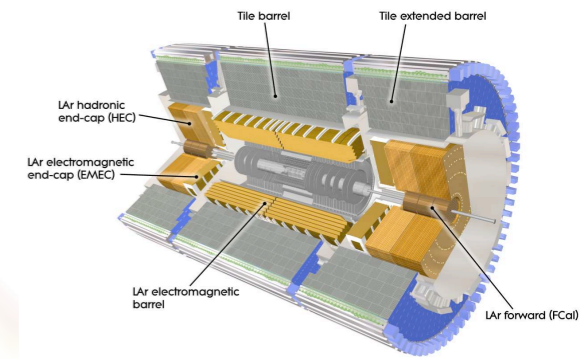
# まとめ

---

- Jet calibration
  - Offset (Pile-up) correction
    - ▶ In- and Out-of time pile-up
    - ▶ Truth-based pT method
  - MC-based absolute calibration
    - ▶ pT (reco) / pT (truth)
  - Residual correction with in-situ measurements
- JES uncertainty
  - In-situ measurements による補正を入れた事で、100-500 GeV で 1% を達成
- Todo
  - Luminosity の増加に合わせた pile-up correction の改良が必要
    - ▶ event-by-event, jet-by-jet に
  - Physics dependent な jet calibration の提供

Backup slides

# TileCal

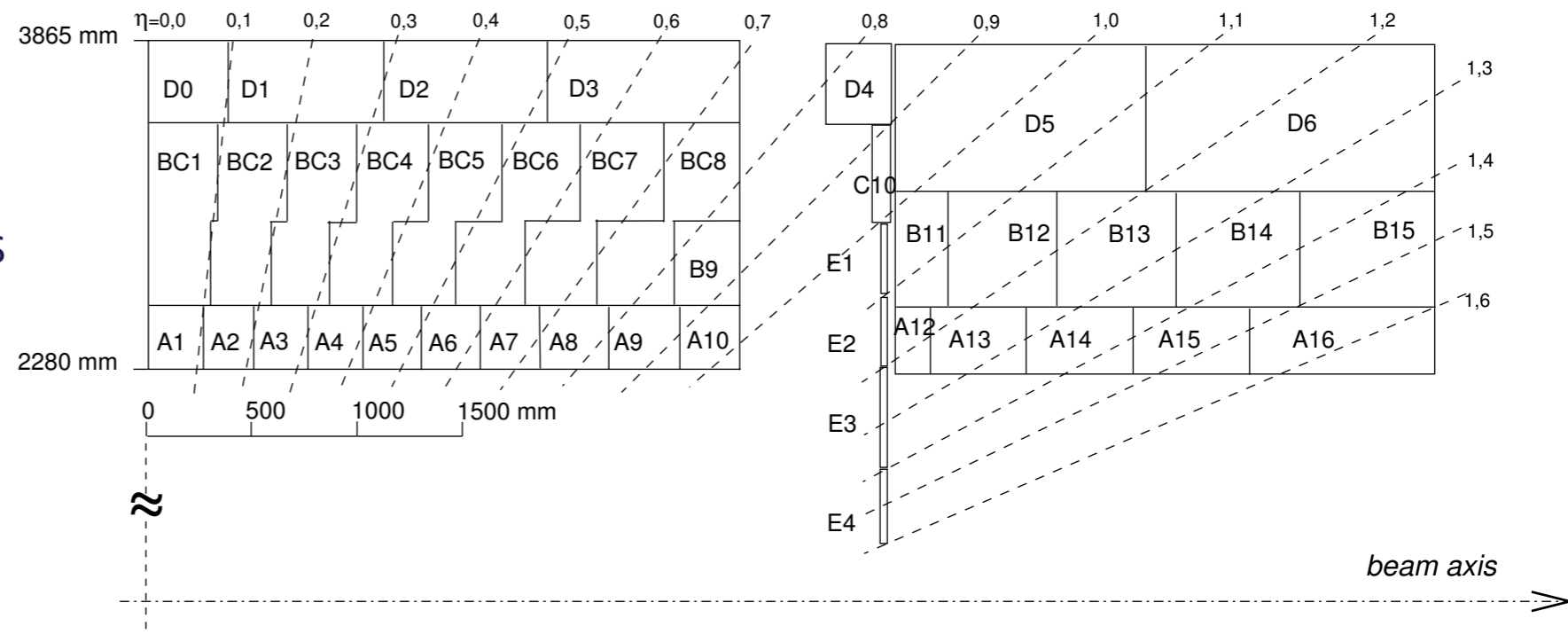
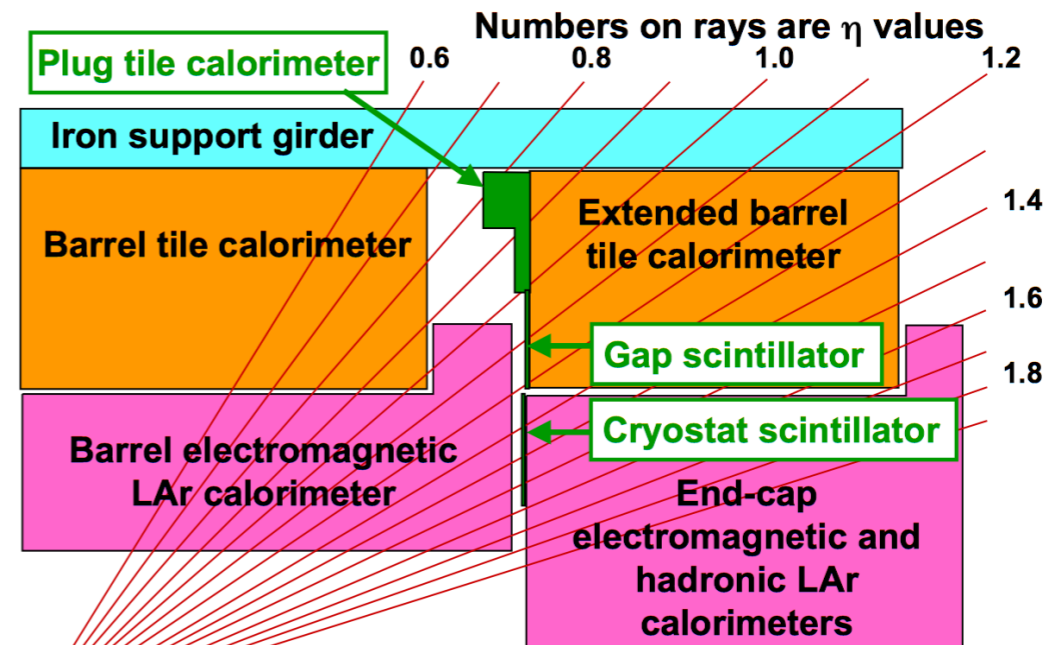


- Geometry

- Length
  - ▶ LB: 5.8m, EB: 2.6m
- Radius
  - ▶ Inner: 2.28m, Outer: 4.25m
  - ✓  $7.4\lambda$

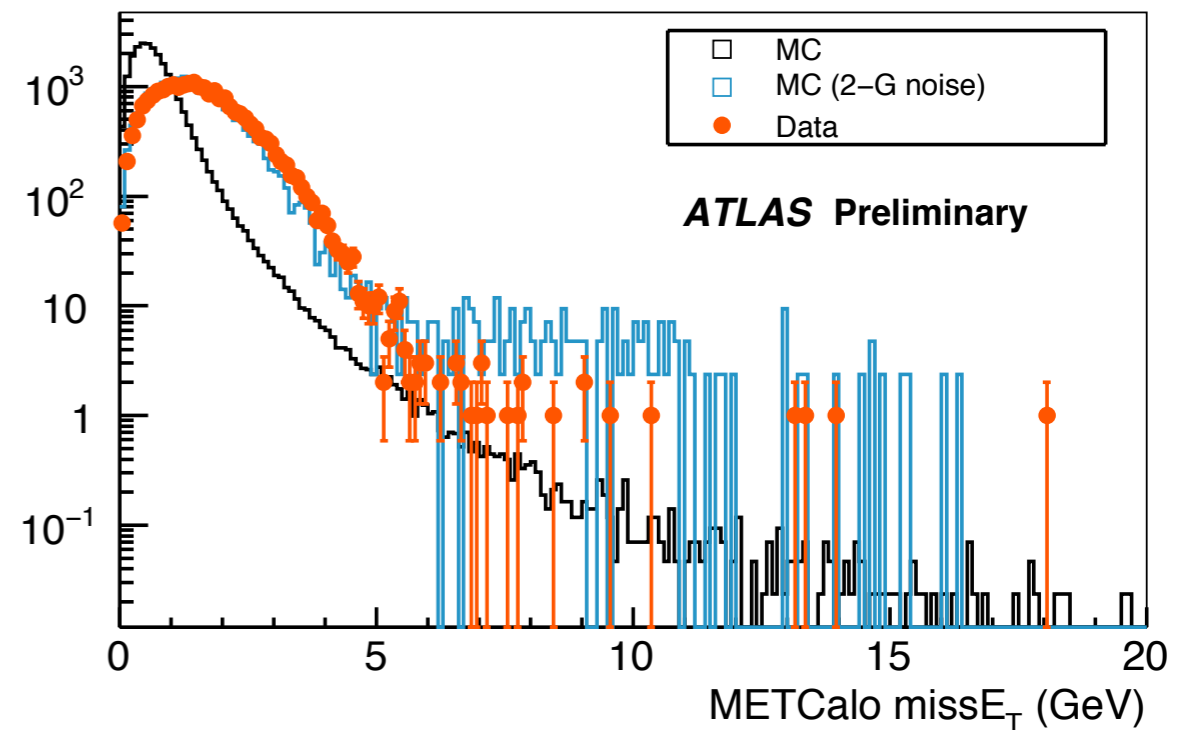
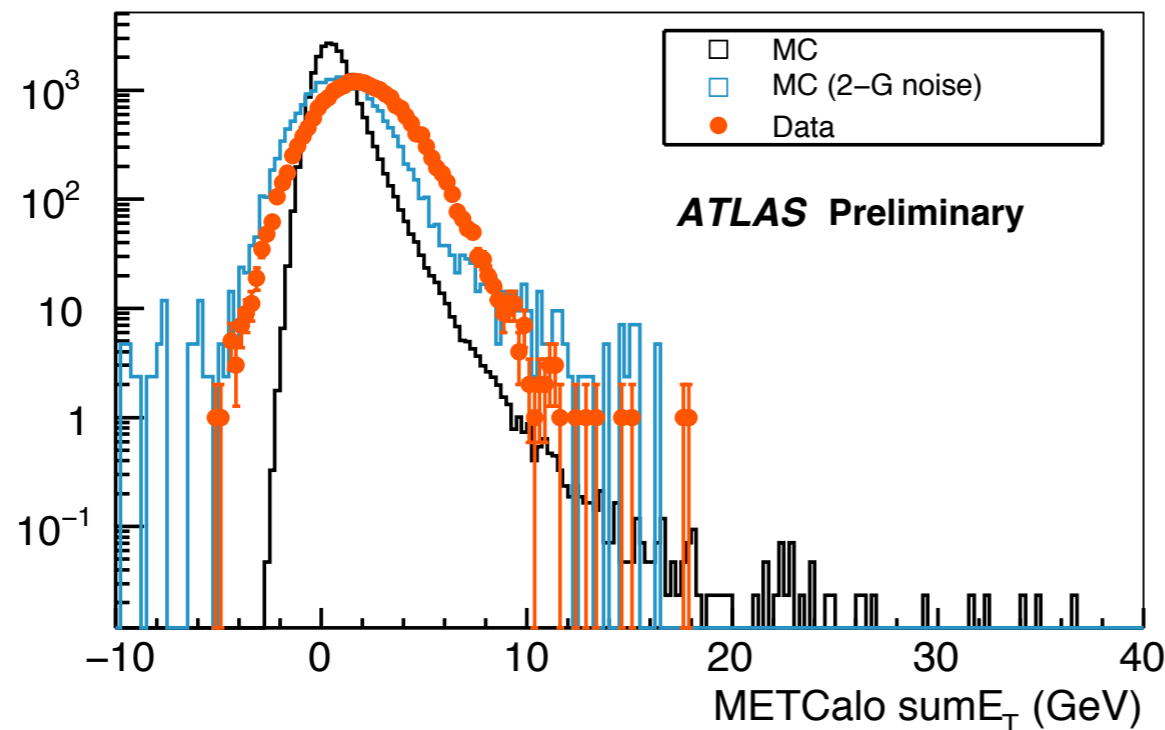
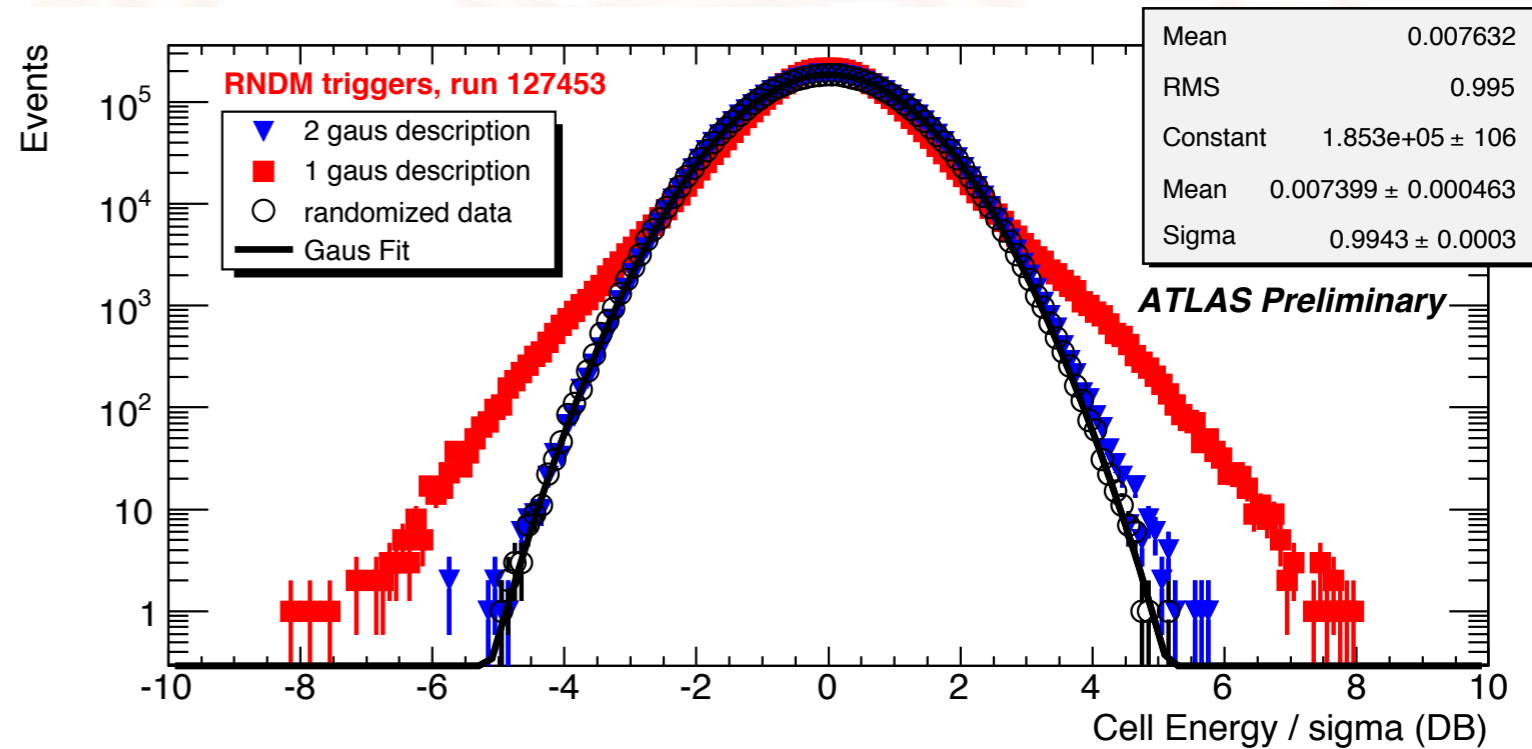
- Granularity

- 64 modules in each barrel
  - ▶  $\Delta\phi \sim 0.1$  rad
- 3 layers
  - ▶ A, BC, D: "Cells"
- "Tower"
  - ▶  $\Delta\eta = 0.1$  for A and BC cells
  - 0.2 for D cells
- ~5000 cells



# Double Gaussian Noise

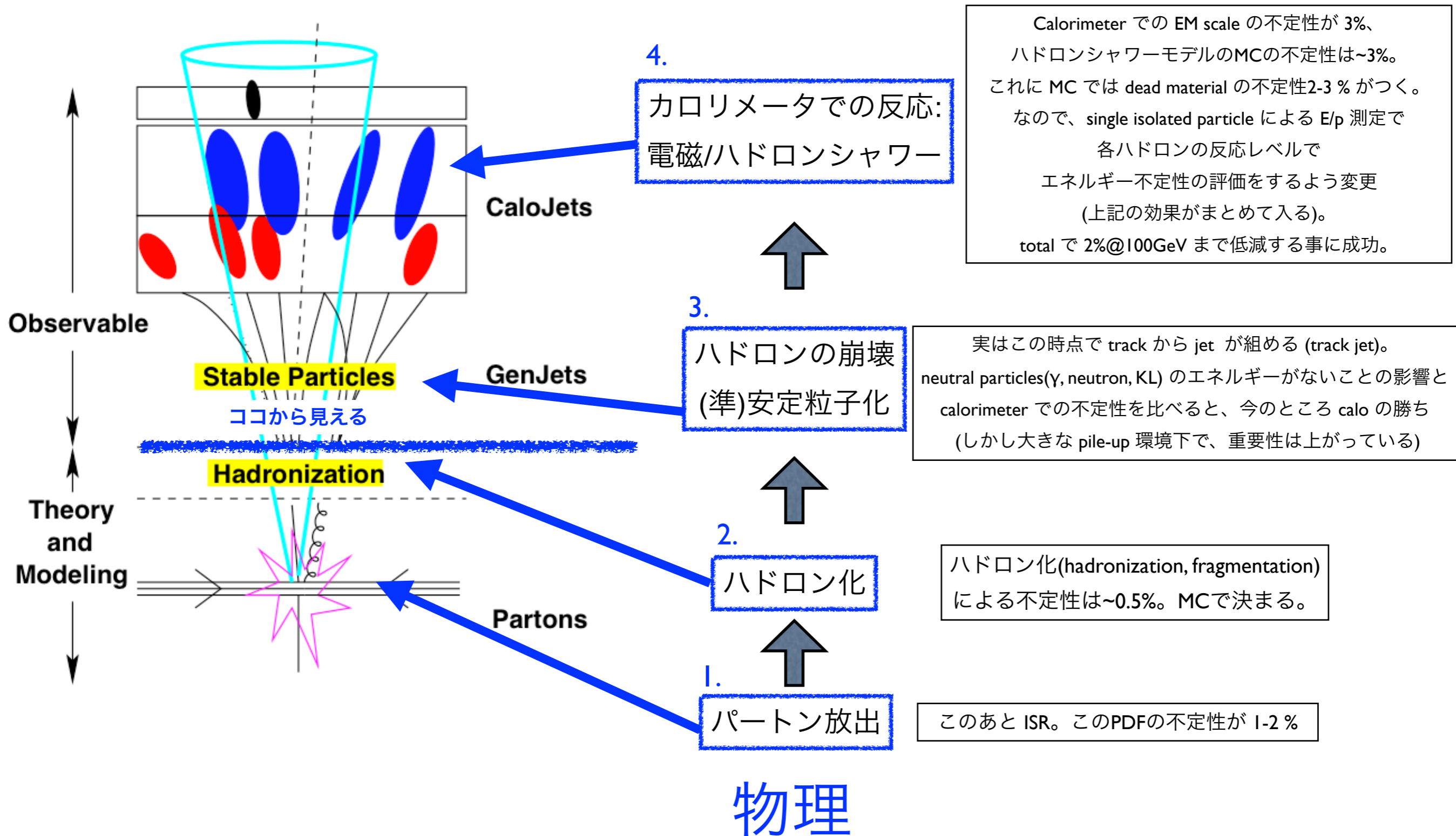
- Fitting with 5 parameters
  - $C, \mu, \sigma_1, \sigma_2, R$ 
    - ▶  $R$ : relative normalization
  - Double gaussian describes data very well
- New MC
  - Implementation of double gauss. noise
  - Missing  $E_T$  in Tile





# Jetができるまで (1)

- 高エネルギーパートン生成後



# Jetができるまで (2)

- カロリメータでのエネルギー測定から

## 測定

1. カロリメータでの  
(電磁スケール)エネルギー測定

2. エネルギークラスター構築

3. Jet再構成

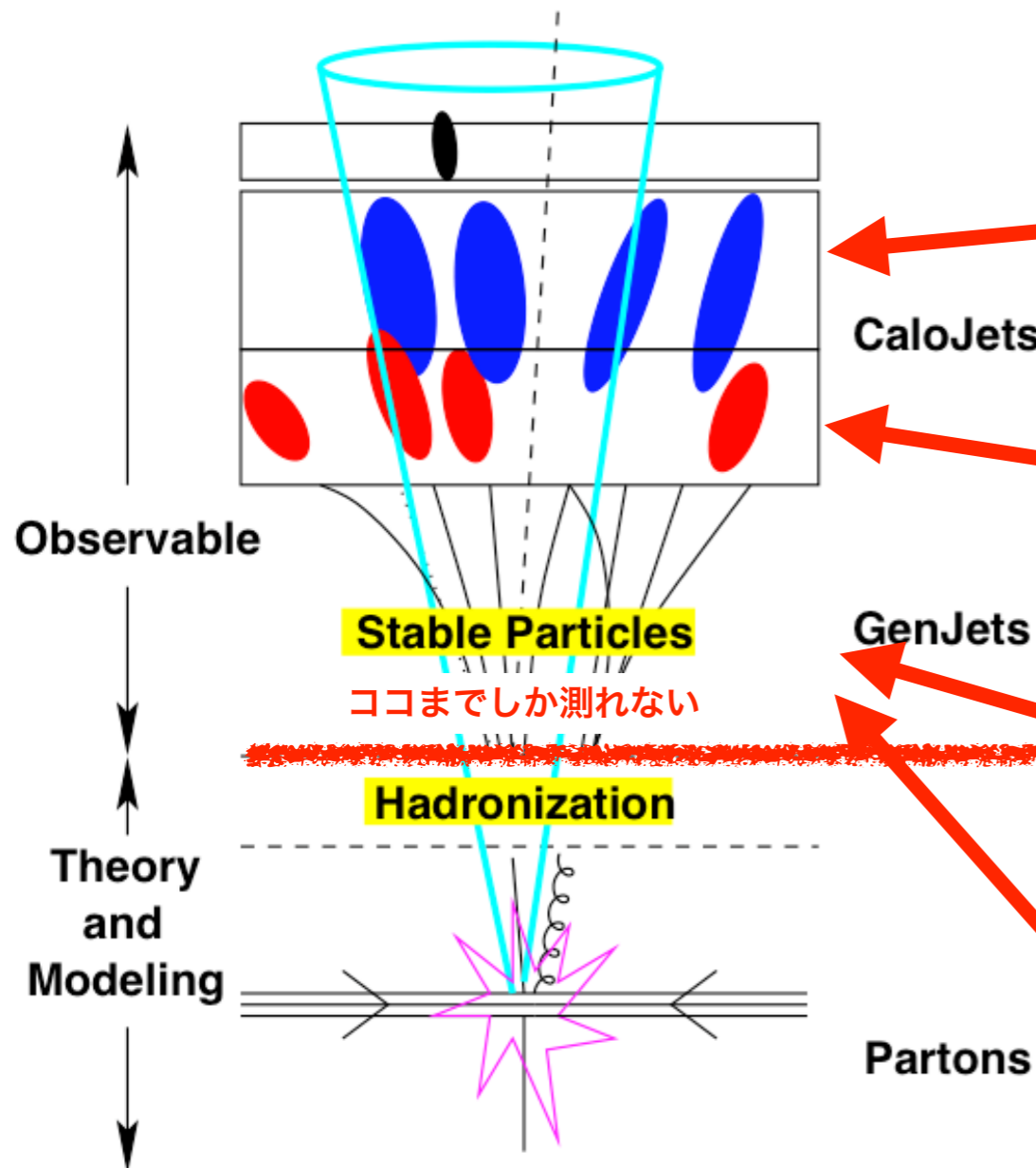
4. エネルギースケールの決定  
エネルギー/方向の補正

EM scale の calibration は基本的に  
LAR: test beam, Tile: Cs (~3%) で始める。  
ハドロン反応の理解も test beam。  
E/p 測定と合わせて calo response は 3%。  
high energy のリアルタイム calibration としては  
( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ),  $Z \rightarrow ee$  がある

各カロリメータ cell で、  
ペDESTALの  $\sigma$  を基準にして  
その4倍の閾値を超えたものを seed とし、  
その周りの cell は  $2\sigma$ 、さらにその周りの cell は  
全てエネルギーを足し上げる、  
4-2-0 topological cluster (Topo-cluster)  
が長年の研究の成果として採用されている。  
この threshold に対する noise の不定性が  
Jetレベルで 1-2%。

Topo-Cluster を Jet再構成の  
input (jet constituents) として使う。  
cone algorithm (単純にある軸からある距離の  
エネルギーを足す) に代わる方法として、  
constituent の運動量を距離の閾値として  
用いる、 $k_T$ , Cambridge/Aachen, Anti- $k_T$  algorithms  
が登場 (Anti- $k_T$  は 2008年)。  
特に Anti- $k_T$  が良い performance を見せたので  
これを採用する事に決定(2009)。

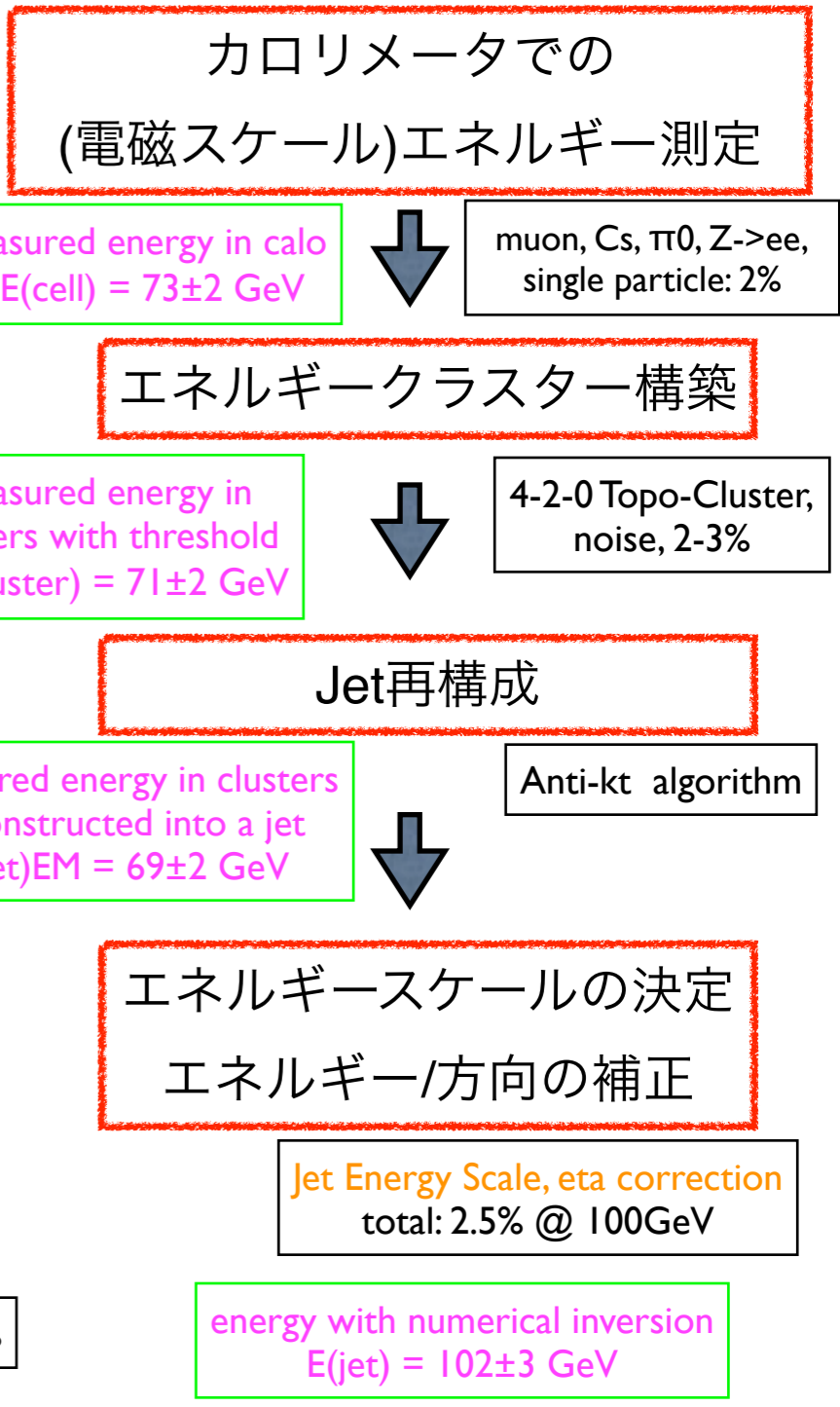
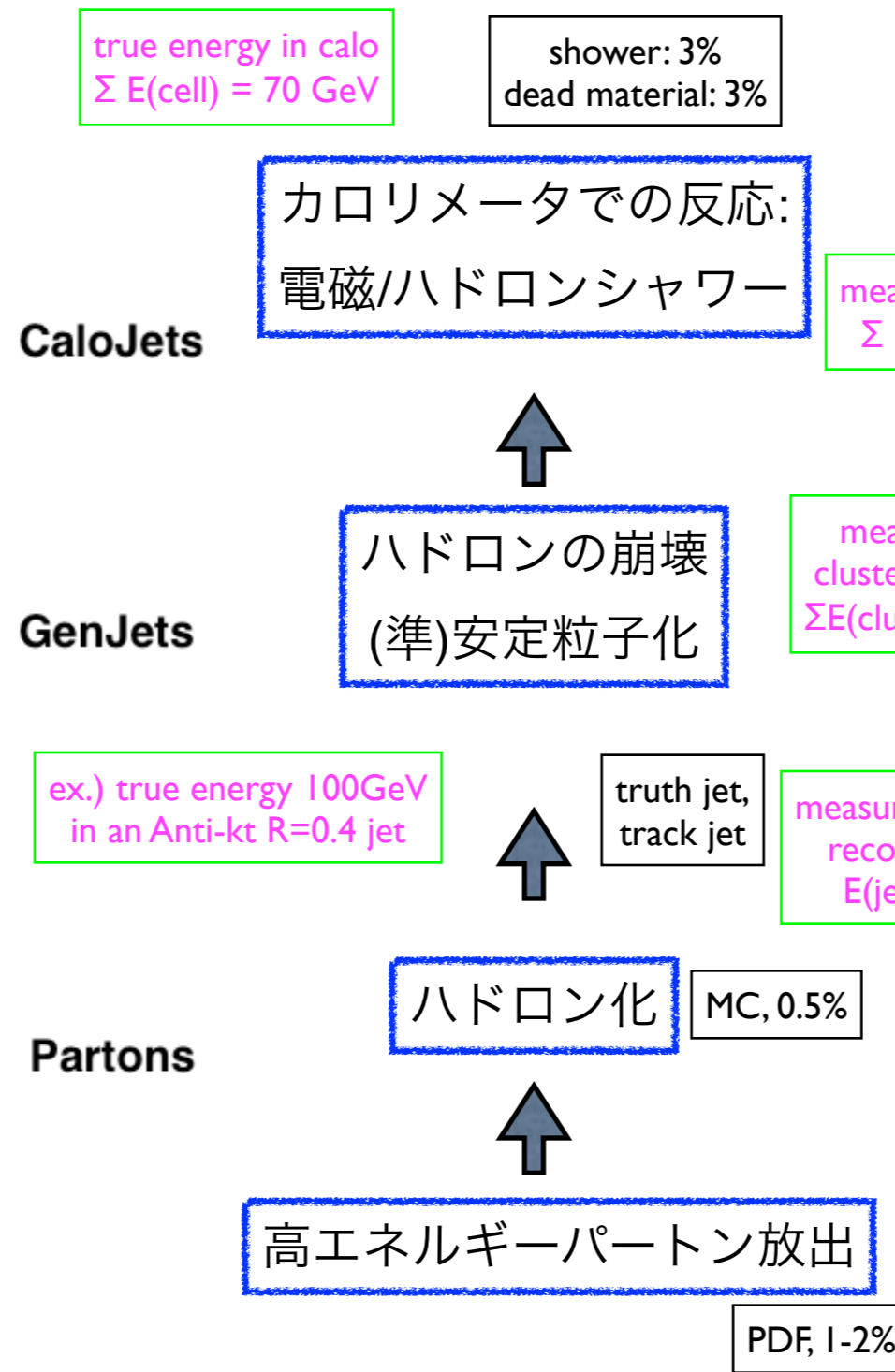
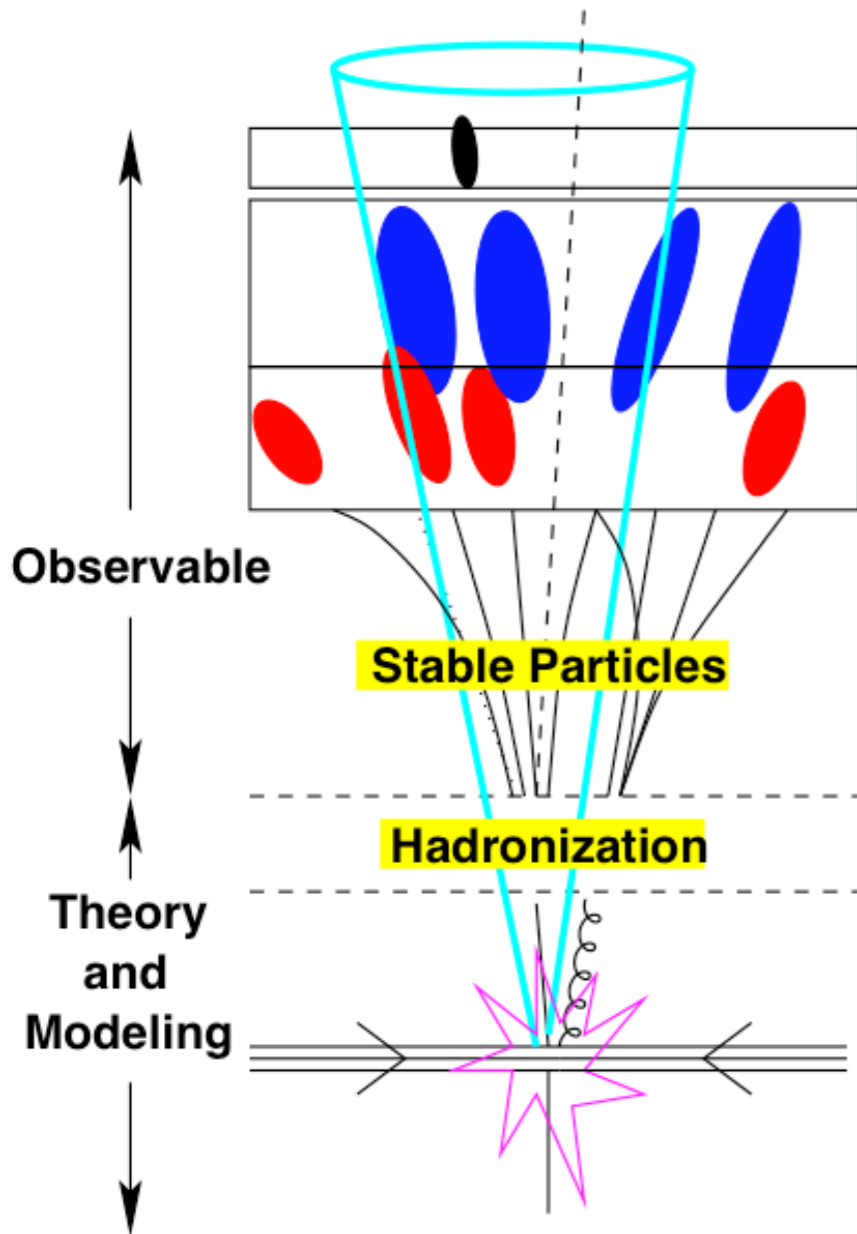
基本的には Jetの再構築は EM scale の Topo-cluster energy で行われる。 エネルギースケールの決定は、  
MC を用いて truth jet (generator による全ての stable particles に対して再構成アルゴリズムを適用したもの)  
の “true” energy と、カロリメータから出発して再構成された “reco. jet” energy の比を取って決定する。



# Jetができるまで(まとめ)

keyword,  $\Delta E/E$  (%)

## 測定



## 物理

# Jet測定の不定性 (1)

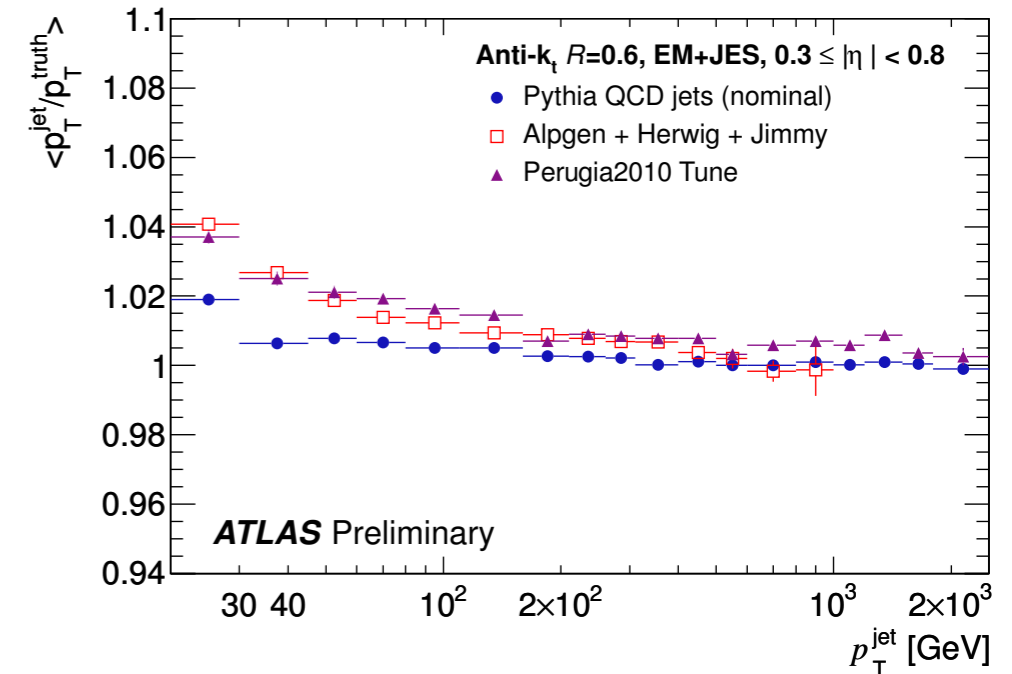
- 基本的に、不定性の評価はJetの response:  
 $p_T(\text{reco})/p_T(\text{truth})$  を基準として行う (後で詳しく説明)

- (1.) MC dependence - PDF

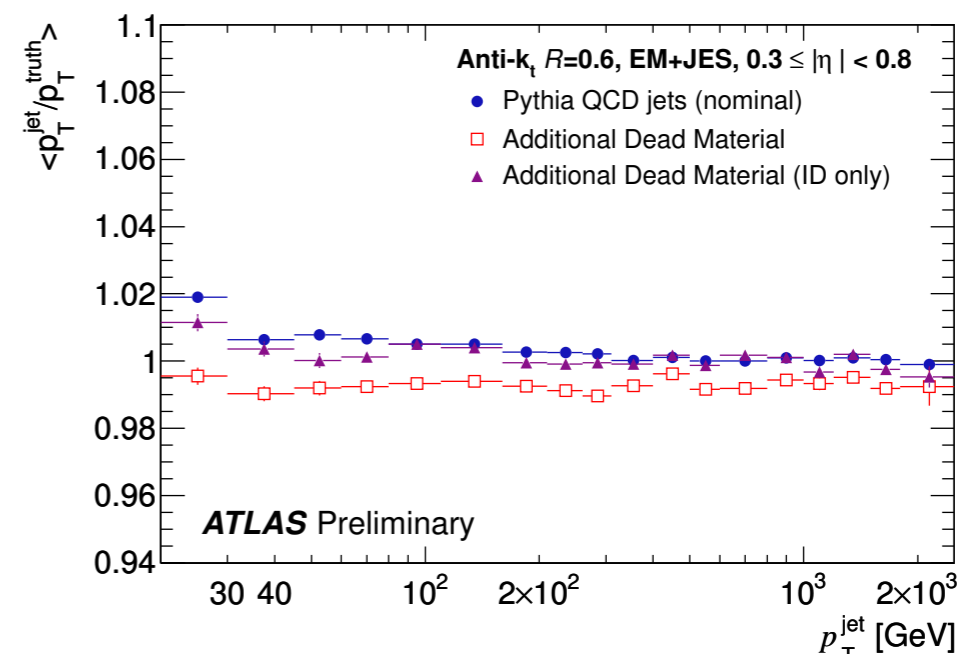
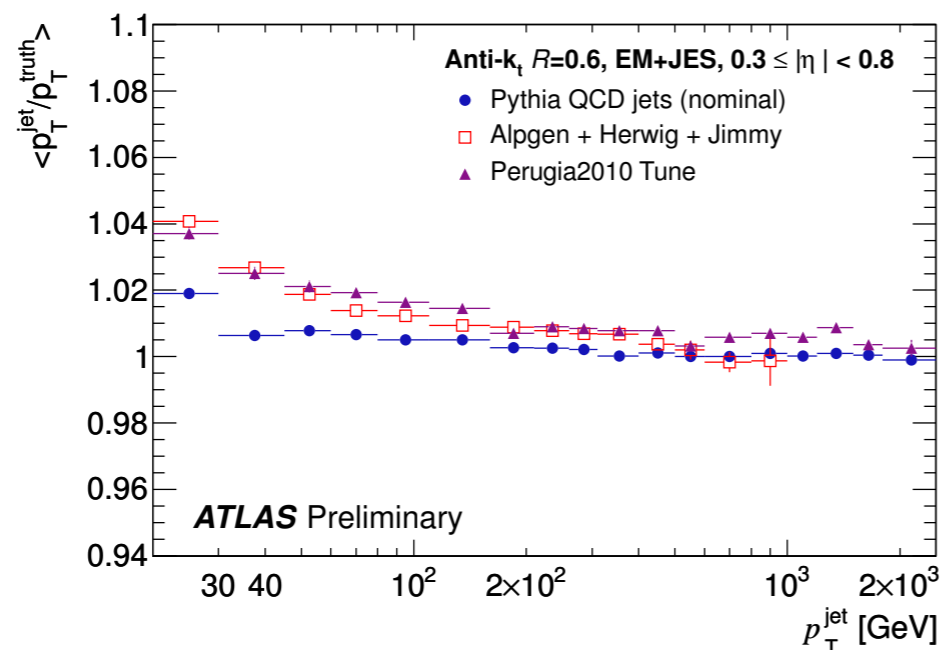
- PDF のモデルを変えてみたとき
  - pythia や Alpgen, Perugia2010 は LO に parton をひっつけただけ (LO\*)
  - NLO を使った generator はまだ不備
  - モデル間で1-2% くらいの不定性 @100GeV

- (2.-4.) MC dependence

- fragmentation の tuning (Herwig++ etc.) : 0.5-1%
- underlying event
- ハドロンシャワーモデル
  - 2つで 3%
- dead material の見積り : 2-3%



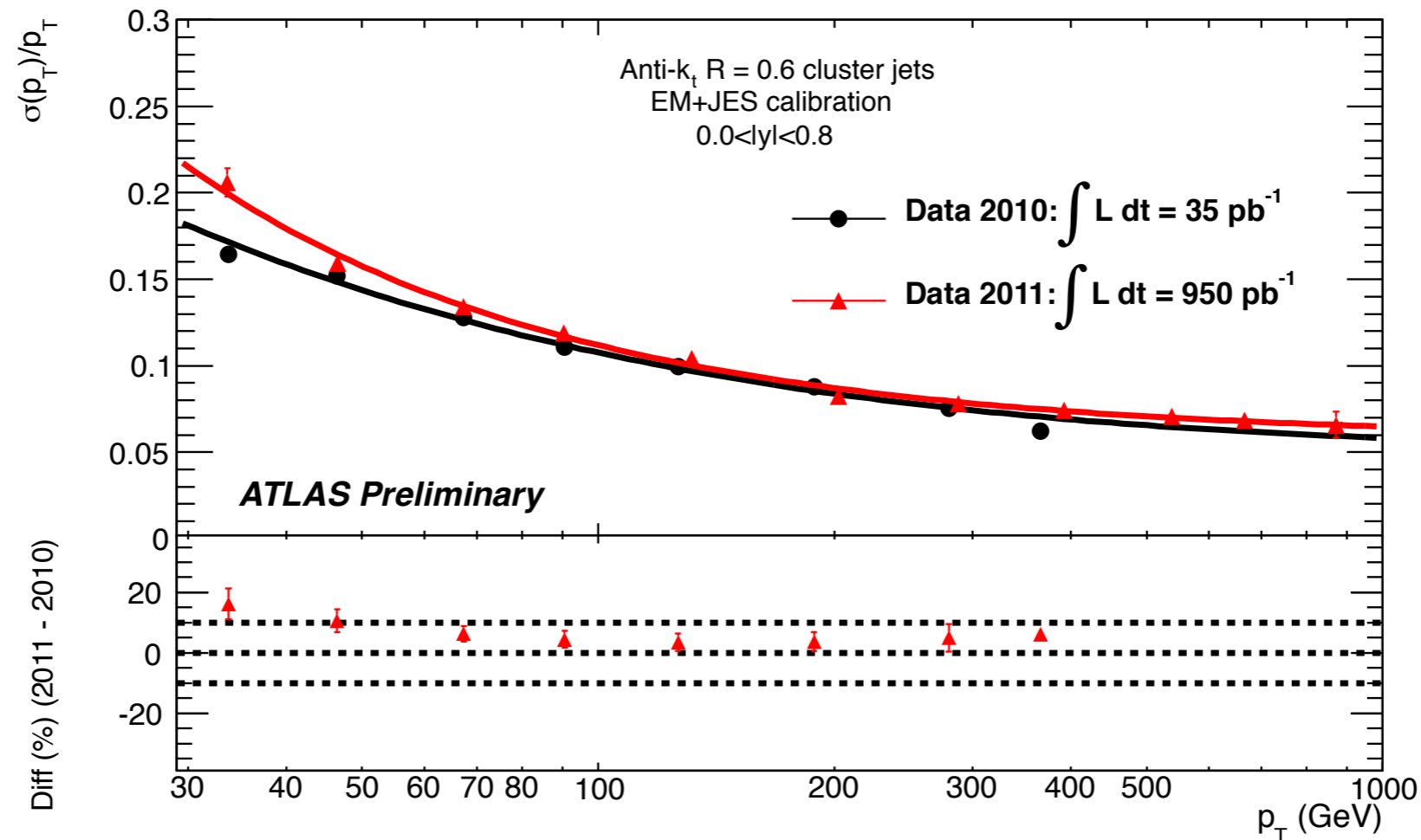
パラメータが膨大なので tuning は大変。  
 いろいろ作ってサンプルをせっせと比べる。





# Jet Energy Resolution

- JER in 2010/2011 data



# References

---

- “Jet energy scale and its systematic uncertainty for jets produced in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV and measured with the ATLAS”
  - ATLAS-CONF-2010-056
- “Jet energy scale and its systematic uncertainty in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV in ATLAS 2010 data”
  - ATLAS-CONF-2011-032
- “ATLAS Calorimeter Response to Single Isolated Hadrons and Estimation of the Calorimeter Jet Scale Uncertainty”
  - ATLAS-CONF-2011-028
- “Jet energy measurement with the ATLAS detector in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV”
  - arXiv: 1112.6426
- Jet and E<sub>miss</sub> reconstruction and calibration (P. Loch)
  - <https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=6&resId=0&materialId=0&confId=48780>
- An introduction to modern jet algorithms (P. Francavilla)
  - <https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=15&resId=0&materialId=slides&confId=48780>
- EM+JES calibration and global sequential layer calibration (D.L. Mateos)
  - <https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=11&sessionId=15&resId=0&materialId=slides&confId=91219>

# References (2)

---

- “Pile-up corrections for jets from proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV in ATLAS in 2011”
  - ATL-COM-PHYS-2012-349
- “Probing the measurement of jet energies with the ATLAS detector using Z+jet events from proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV”
  - ATLAS-COM-CONF-2012-015
- “Probing the measurement of jet energies with the ATLAS detector using photon+jet events in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV”
  - ATL-COM-PHYS-2012-237