

Jet calibration in ATLAS @ LHC

隅田 土詞 (CERN → 京都)

7th Oct 2011

HEP 研究室セミナー



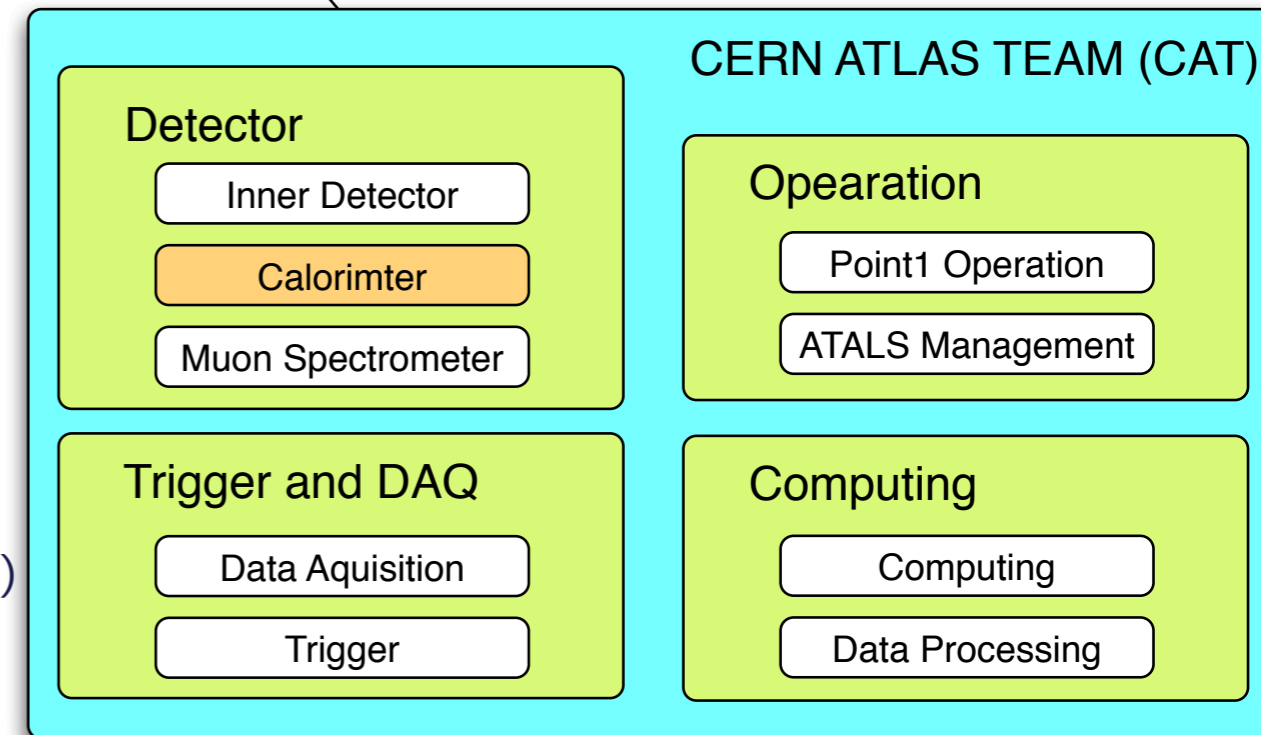
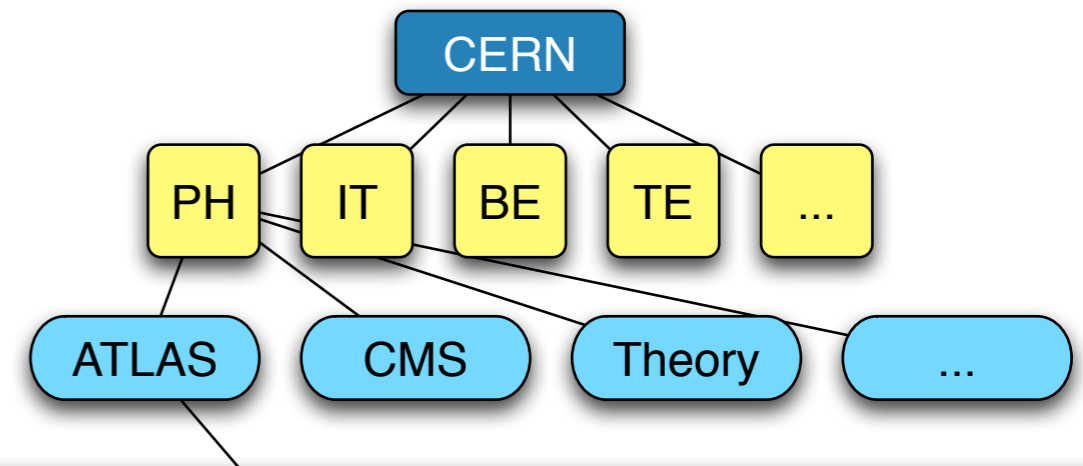
(Self-) Introduction

• CERN での所属

- 職名 : CERN(-Japan) fellow
 - ▶ 内部での区別なし (オススメ)
- 所属: PH-ADE-CA (物理-ATLAS検出器-カロリメータ)
- ボス
 - ▶ Ana Henrique
 - TileCal (ハドロンカロリメータ) グループリーダー
 - ▶ Tancredi Carli
 - Jet/EtMiss グループコンビナー

• やった仕事

- 10.2008-3.2010 : TileCal
 - ▶ TileCal EMスケールキャリブレーション
 - Csキャリブレーションシステム
 - 宇宙線を使った TileCalキャリブレーションのパフォーマンステスト
 - ノイズ study
- 4.2010-現在 : Jet/EtMiss performance, SM QCD physics
 - ▶ Jetクリーニング (non-collision event, bad cal. region, etc.)
 - ▶ JetEtMissグループの performance study 用データの準備
 - ▶ **Jetキャリブレーション**
 - パフォーマンステスト
 - Jetキャリブレーションの systematic uncertainty 見積り
 - ▶ Pile-up の Jet への影響の study
 - ▶ Jetの生成断面積測定



Outline

- Introduction

- ATLAS @ LHC
- ATLAS の最新結果 (ちょっとだけ)

- Calorimetry in ATLAS

- 電磁カロリメータ : Liquid Argon (LAr)
- ハドロンカロリメータ : Tile Calorimeter (TileCal)

- Jet calibration in ATLAS

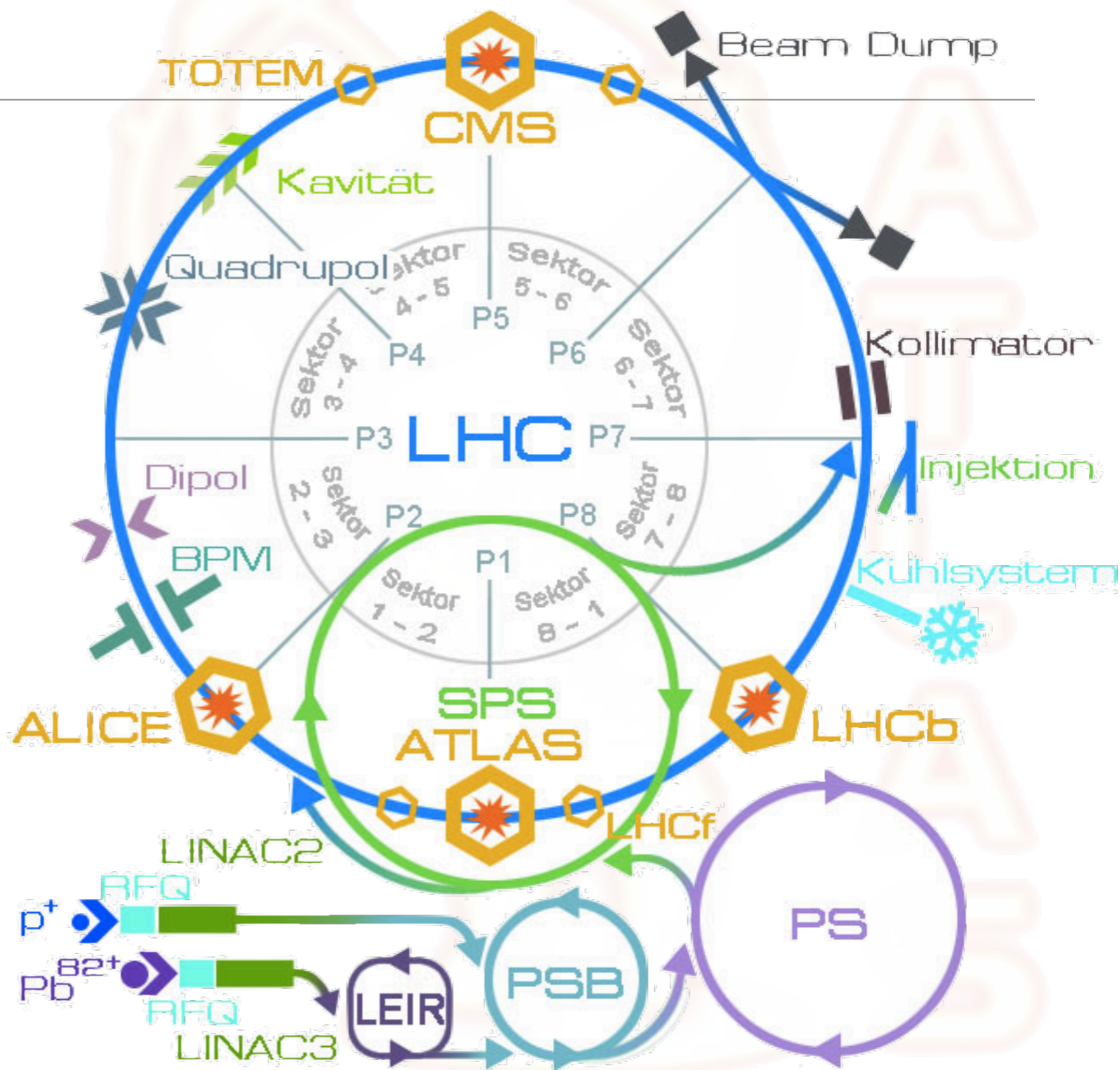
- ジェット(jet)って？
 - ▶ 物理から測定まで
- Jet のキャリブレーション
 - ▶ 基本メソッド
 - ▶ “in-situ” validation/calibration
 - ▶ ジェットキャリブレーションにおける systematic uncertainty
- 最近の話題/問題
 - ▶ 主に pile-up、 Jet topology/physics dependence, そして TeV jet へ...

- まとめと今後の展望

ATLAS @ LHC

LHC

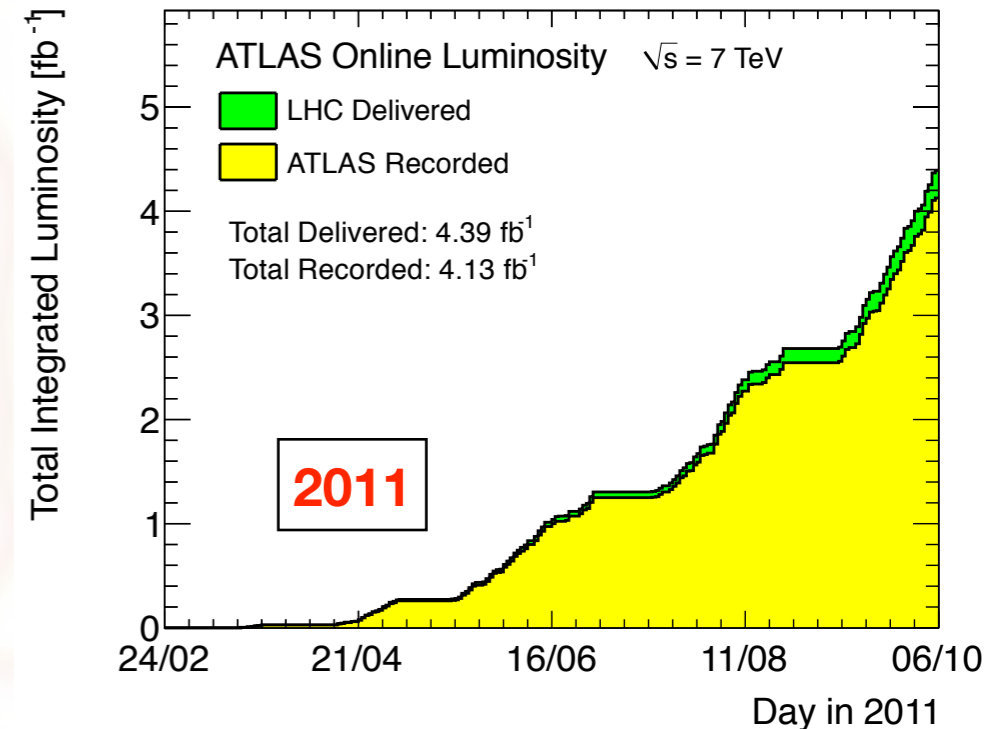
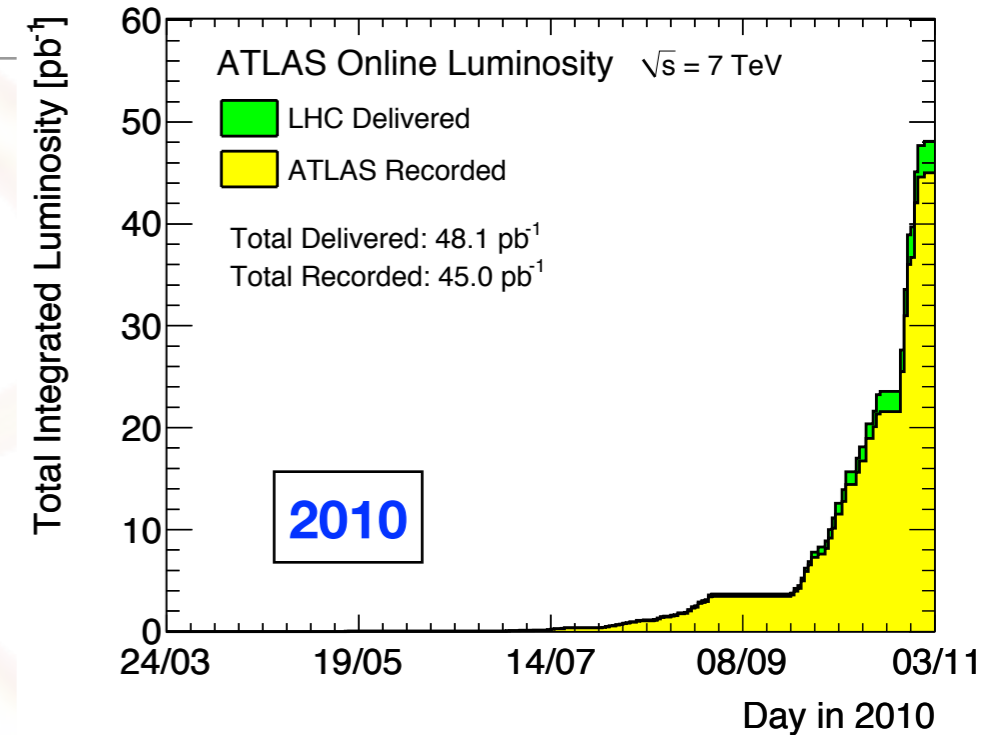
- Large Hadron Collider
 - CERNにある世界最大の陽子陽子衝突型加速器
 - ▶ スイスのジュネーブとフランスの国境
 - ▶ 全周: 27 km
 - ▶ 最大衝突エネルギー
 - 7+7 TeV (陽子-陽子)
- 4+2 個の実験
 - ATLAS, CMS
 - ▶ 汎用検出器
 - LHC-B
 - ▶ Bの物理
 - ALICE
 - ▶ 重イオン衝突実験
 - LHCf, TOTEM
 - ▶ 超前方散乱、全断面積測定



LHC status

- 2010/2011 の年ラン
 - $\sqrt{s} : 3.5+3.5 = 7\text{TeV}$
- peak luminosity
 - $2.1 \times 10^{32} / 3.3 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- integrated luminosity
 - $45 / \sim 4000 \text{ pb}^{-1}$

✓ 多分今年中に 5fb^{-1} !



Parameter	2010	2011	Nominal
Beam energy	3.5 TeV	3.5 TeV	7 TeV
Beam squeeze	3.5 m	1.0 m	0.55 m
Transverse emittance	2-3 $\mu\text{m rad}$	2.5 $\mu\text{m rad}$	3.75 $\mu\text{m rad}$
Protons per bunch	up to 1.2×10^{11}	1.6×10^{11}	1.15×10^{11}
Bunch separation	150 ns	50 ns	25 ns
Number of bunches	368	1380	2808
max peak luminosity ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2.1×10^{32}	3.3×10^{33}	$> 10^{34}$

ATLAS実験

- A Toroidal LHC ApparatuS

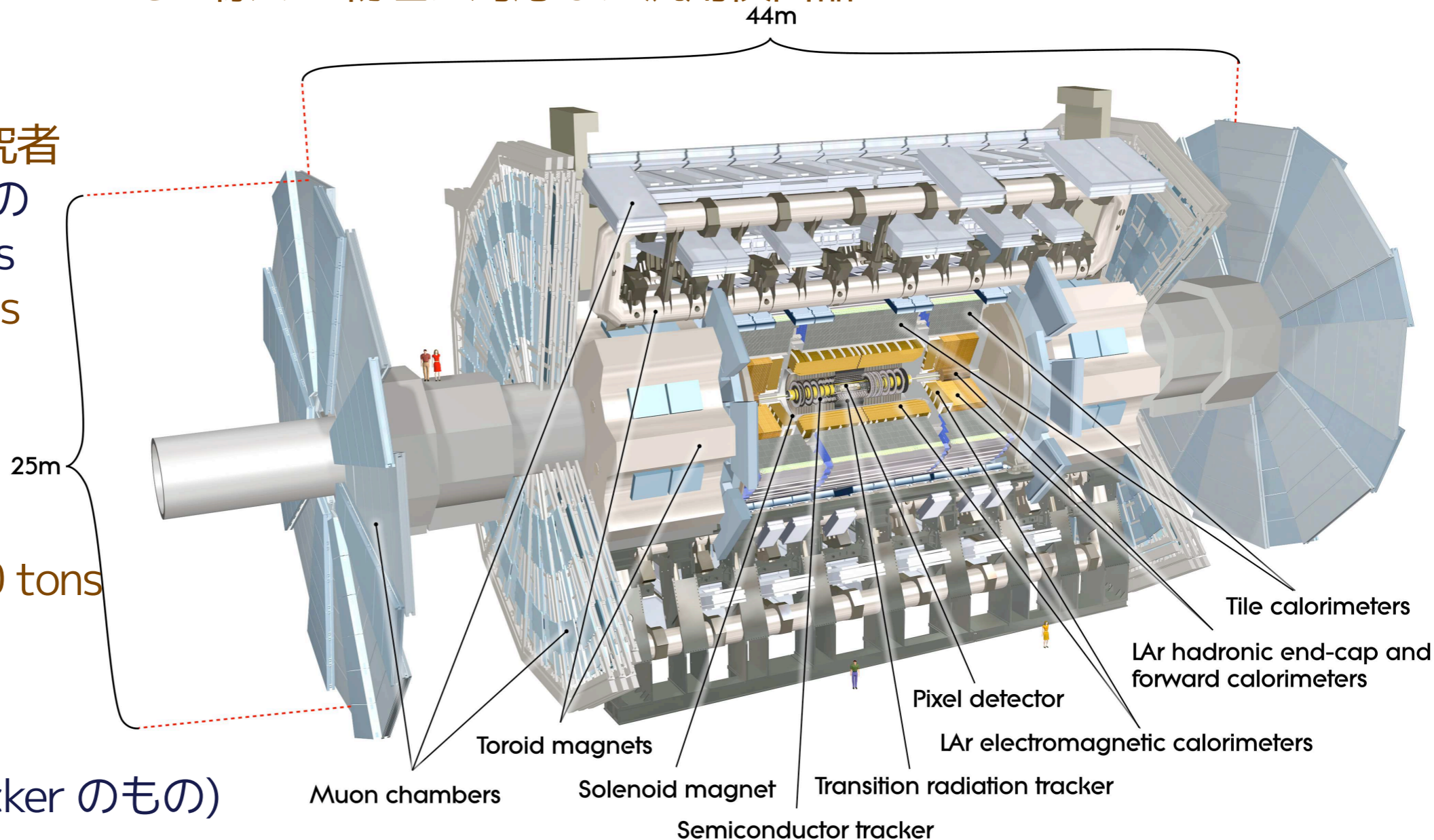
- 100GeV~TeVスケールでの様々な物理に対応した汎用検出器

- コラボレーション

- ~ 3000人の研究者
 - ▶ 1000人以上の PhD students
- 174 institutions
- 38 countries

- ATLAS検出器

- weight: ~ 7000 tons
- height: 25m
- length: 45m
- ~ 10^8 channels
 - ▶ (90% は tracker のもの)



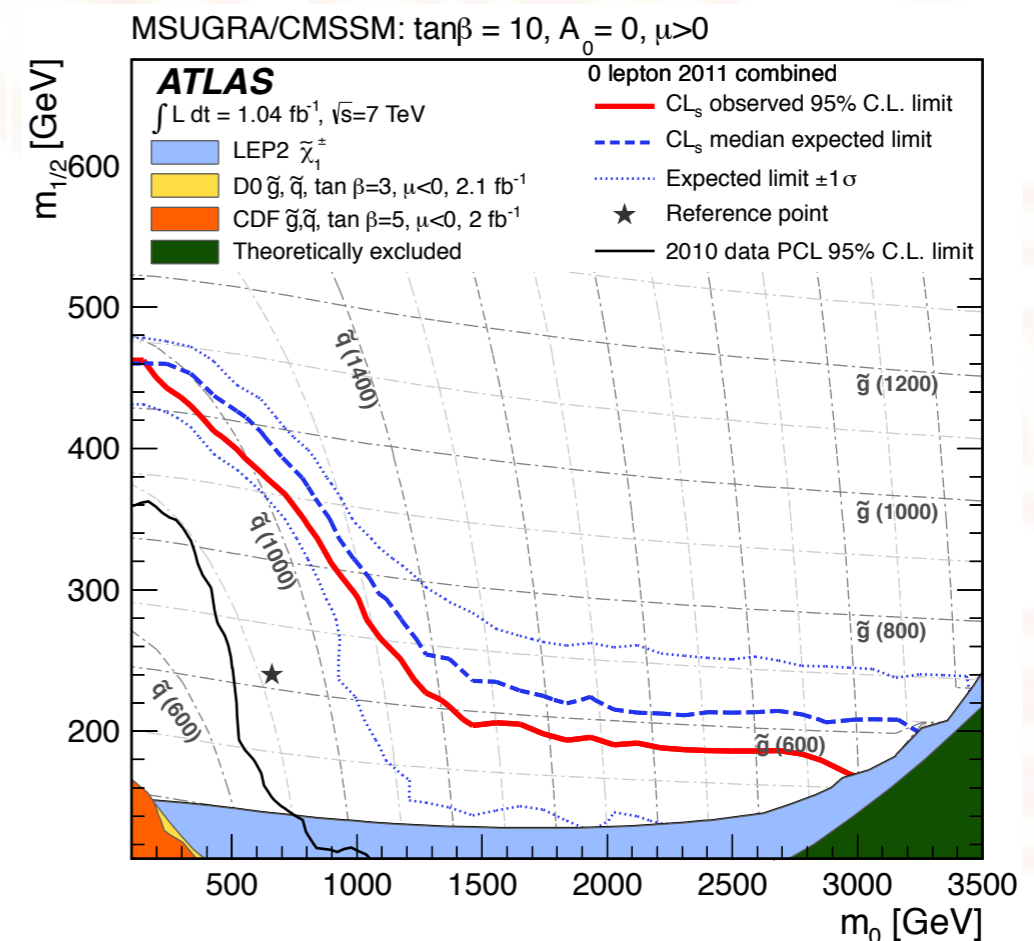
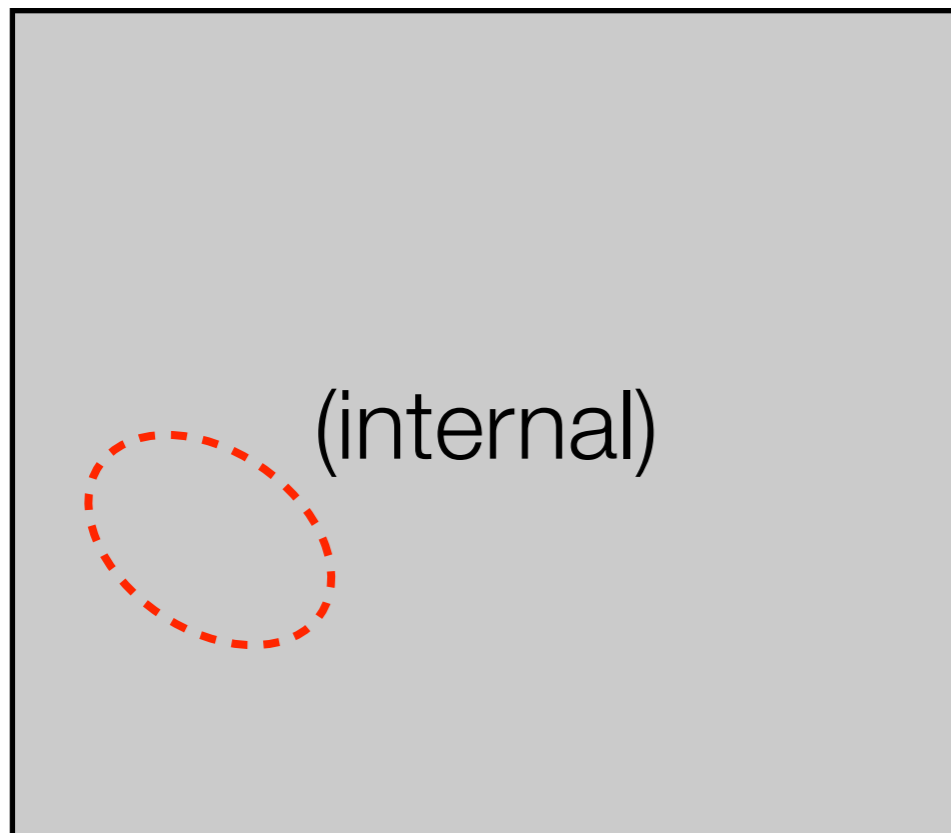
最近の結果 from ATLAS

- Higgs to WW

- 2fb^{-1} の最新 plot
 - ▶ 未 approved

- SUSY 0-lepton analysis

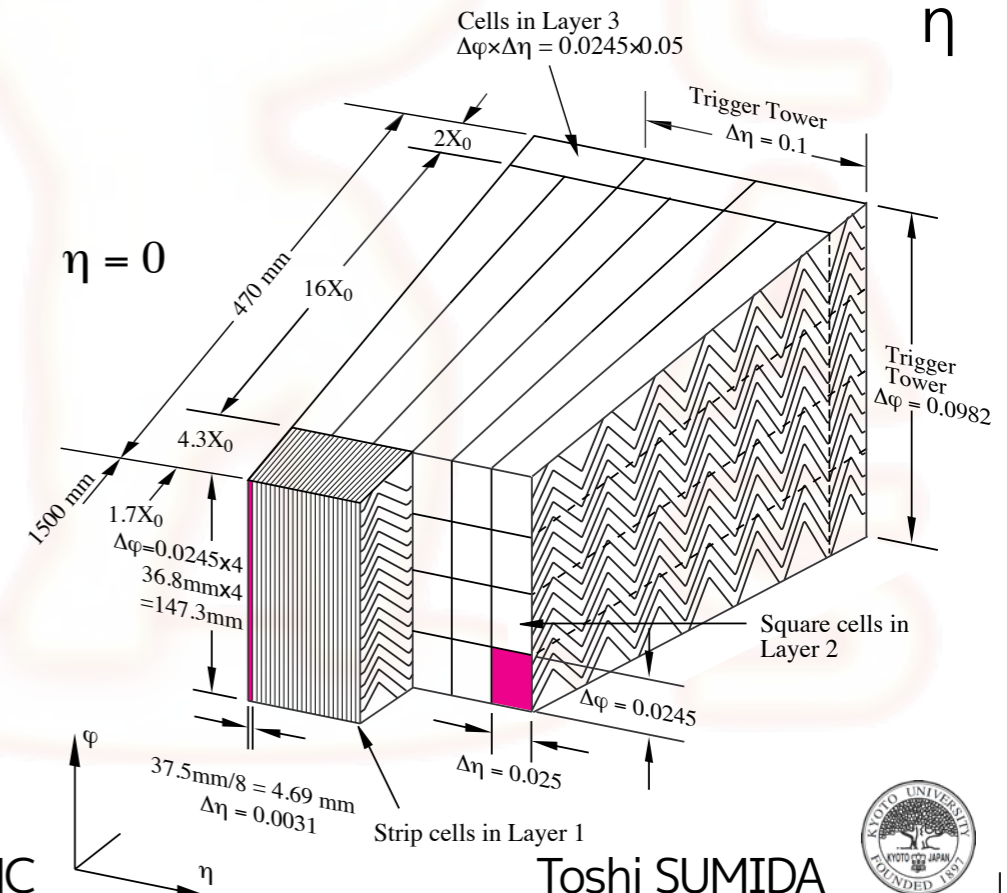
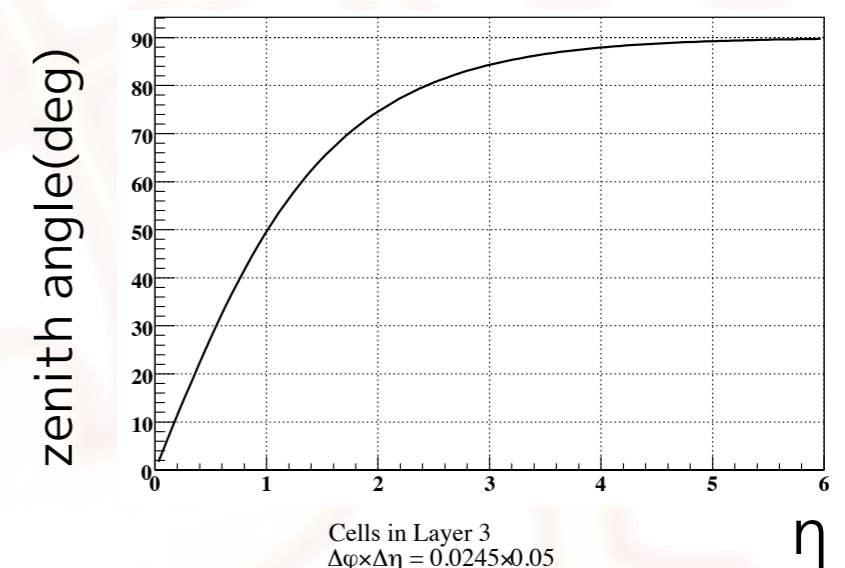
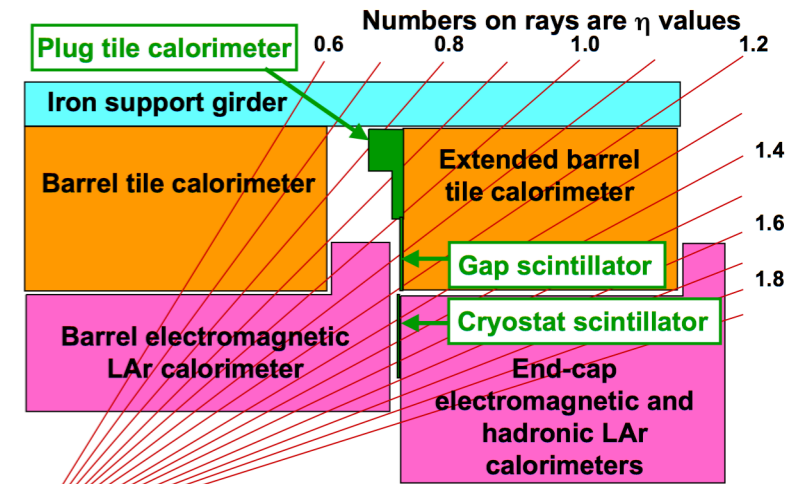
- 1fb^{-1} ([arXiv:1109.6572](https://arxiv.org/abs/1109.6572))
- $\tilde{q} < 1\text{TeV}$ は絶望的 (DM大変)
 - ▶ 細かく topology を分けた解析 (simplified model) ^



Calorimetry in ATLAS

コライダーでの座標表示

- pseudo-rapidity
 - $\eta = -\ln(\tan(\Theta/2))$
 - ▶ Θ : 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"
 - $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta^2 + \Delta\Phi^2)}$
 - ▶ ちょっと乱暴だけど、便利だし
実際の大きさも中心領域では
似たようなものなので、まあいいか?



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: $\sigma E/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

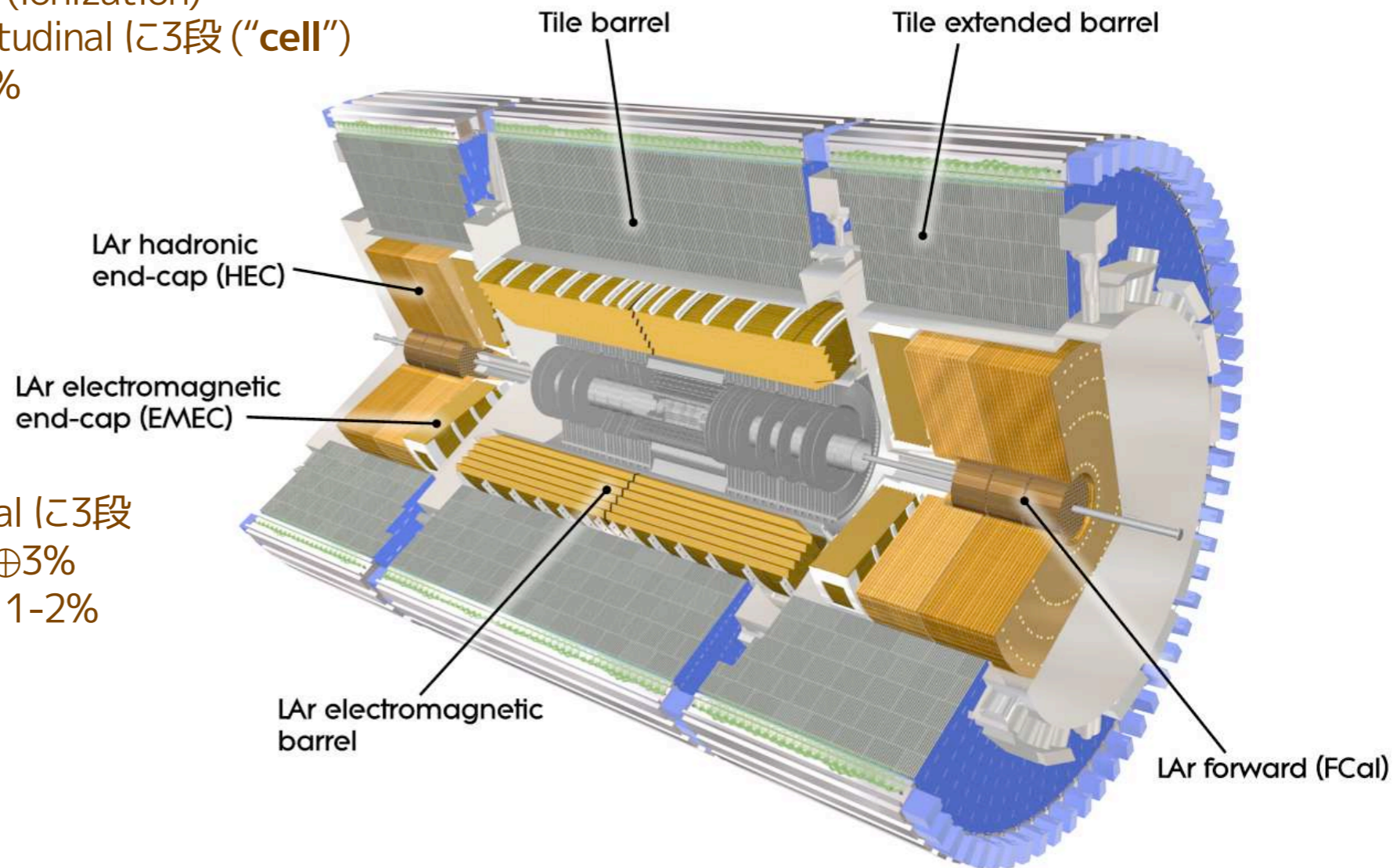
• ハドロンカロリメータ

- "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: 0.1×0.1 , longitudinal (3段)
- Resolution: σ_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 LAr



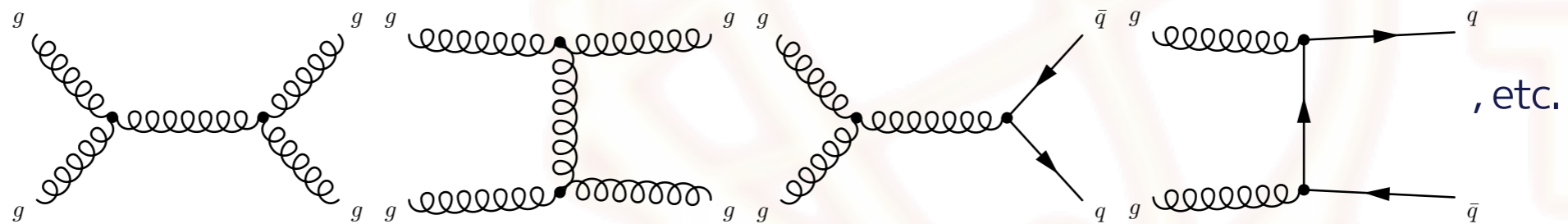
Jet について

陽子-陽子衝突で起こること

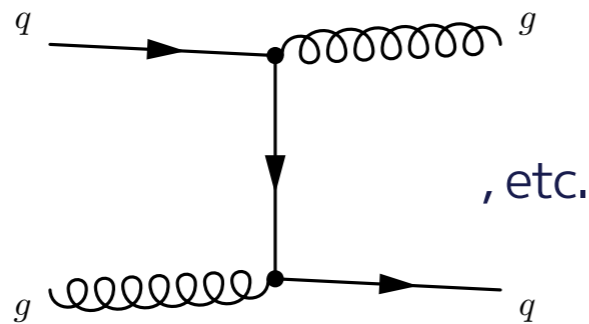
- 高エネルギーでのハドロン衝突 = パarton + パarton 衝突

- 2→2 プロセス

- ▶ gg 反応(一番多い)

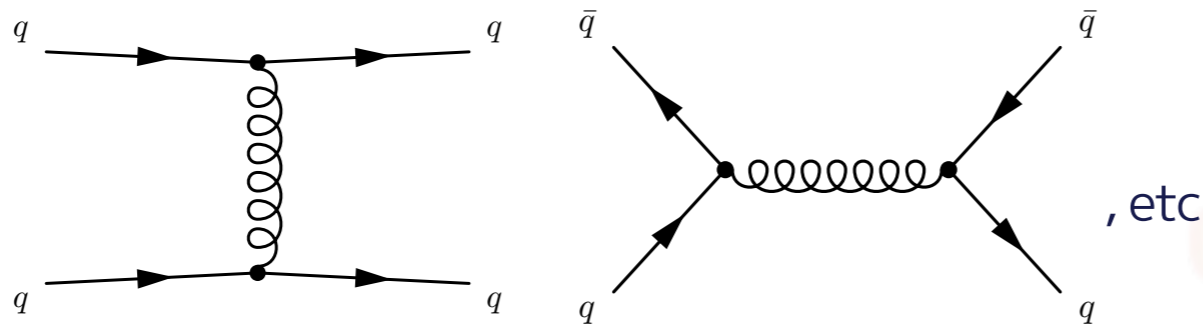


- ▶ qq 反応



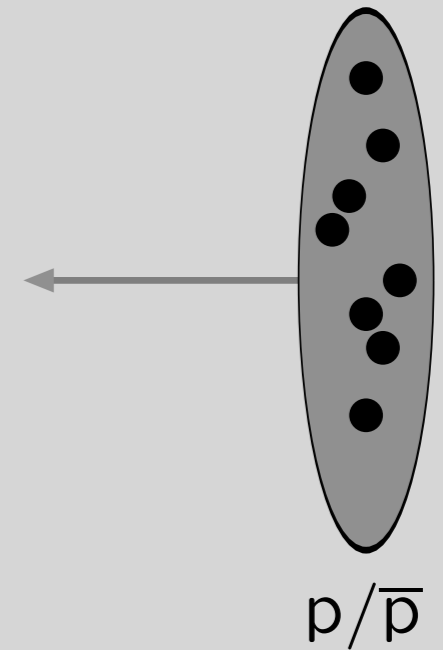
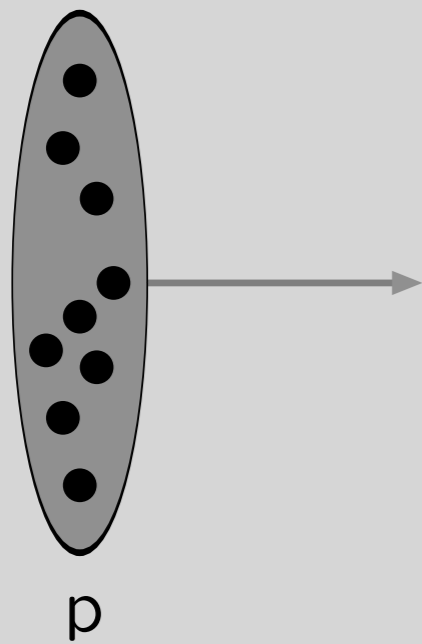
**LHC で起こるほとんどの事象は QCD で作られる。
放出された高エネルギーパarton
(クォーク、グルーオン) がジェットになる。**

- ▶ qq 反応

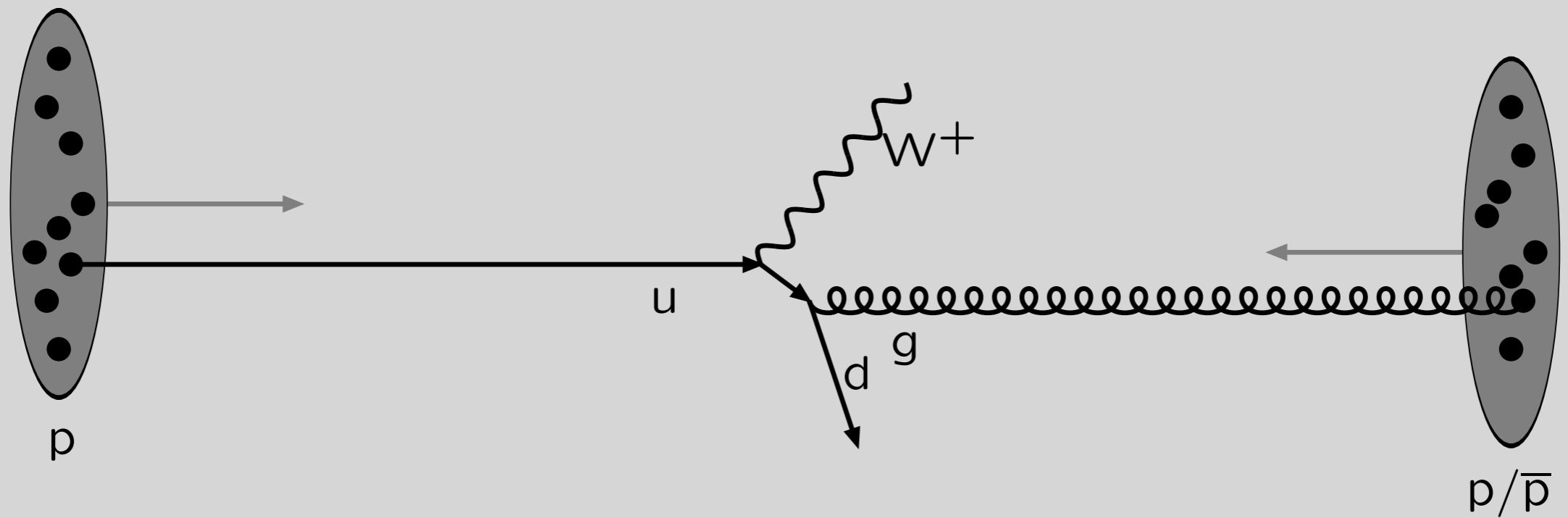


もう少し...

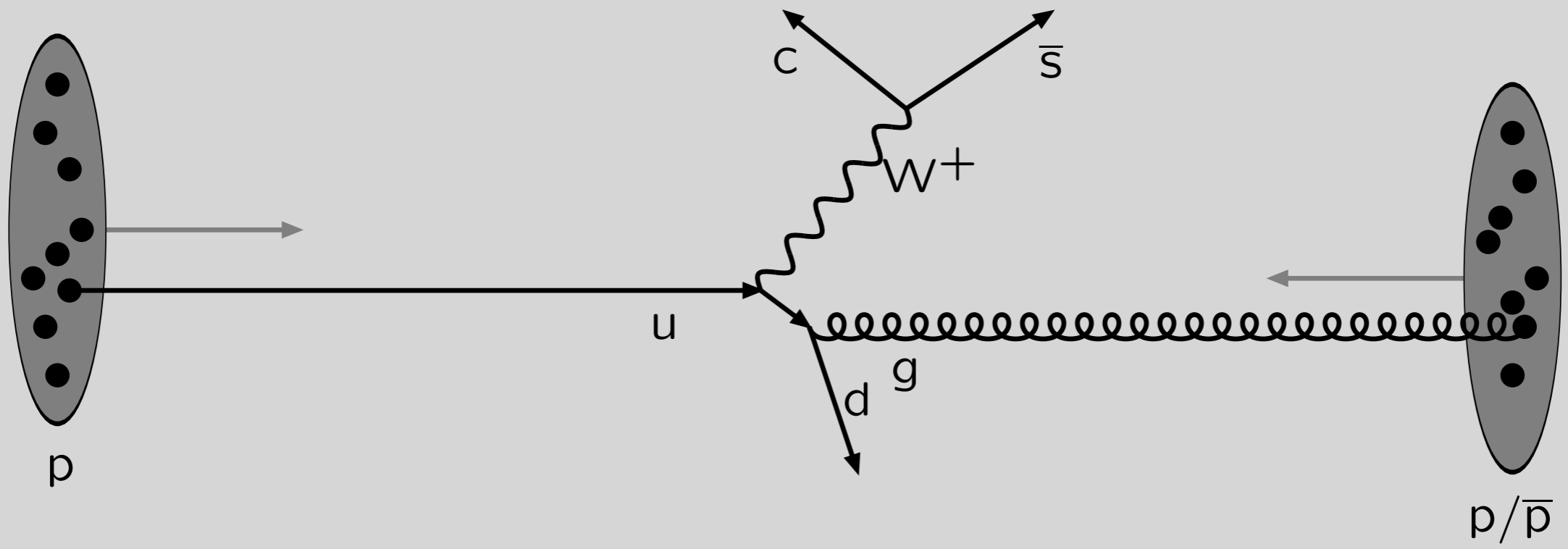
ハドロン衝突で起こっていること ($W + \text{jet}$ 生成の場合)



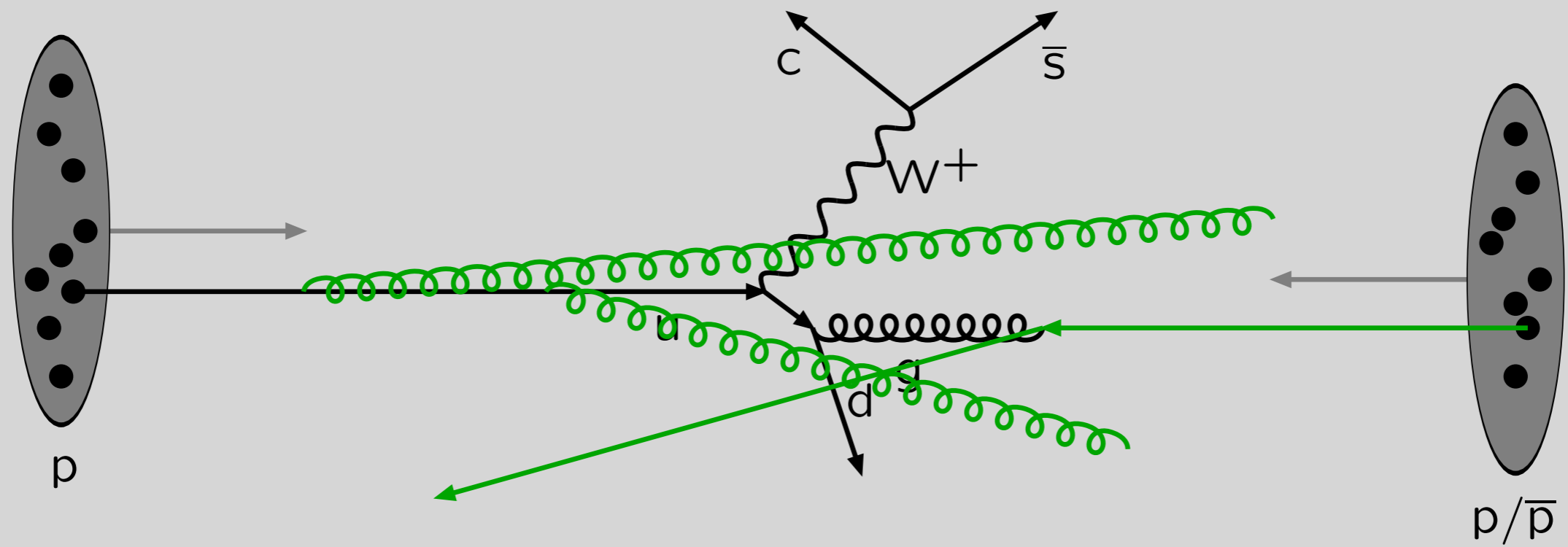
K. Hanagaki



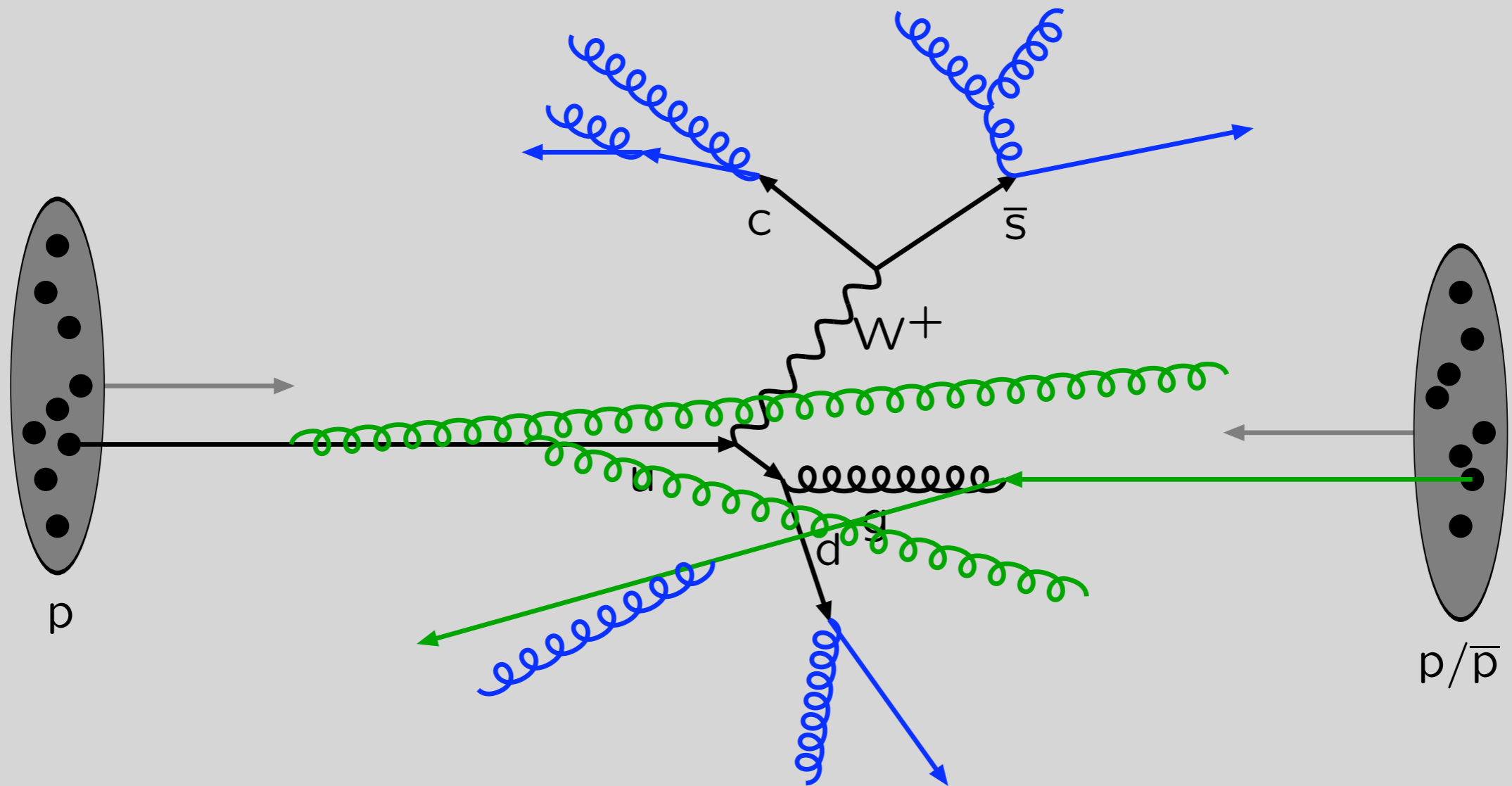
Hard interaction
described by matrix element



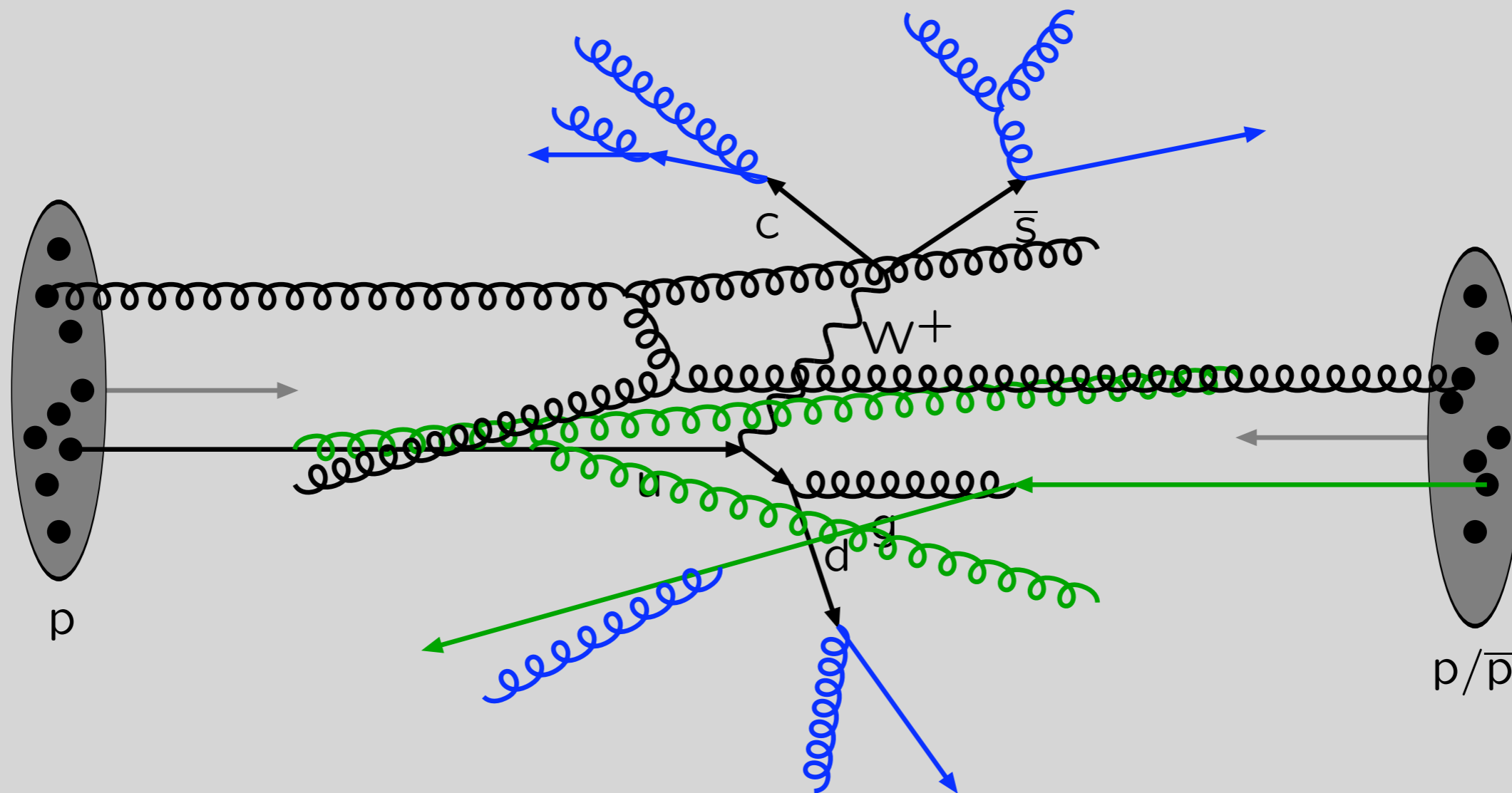
Resonant decay



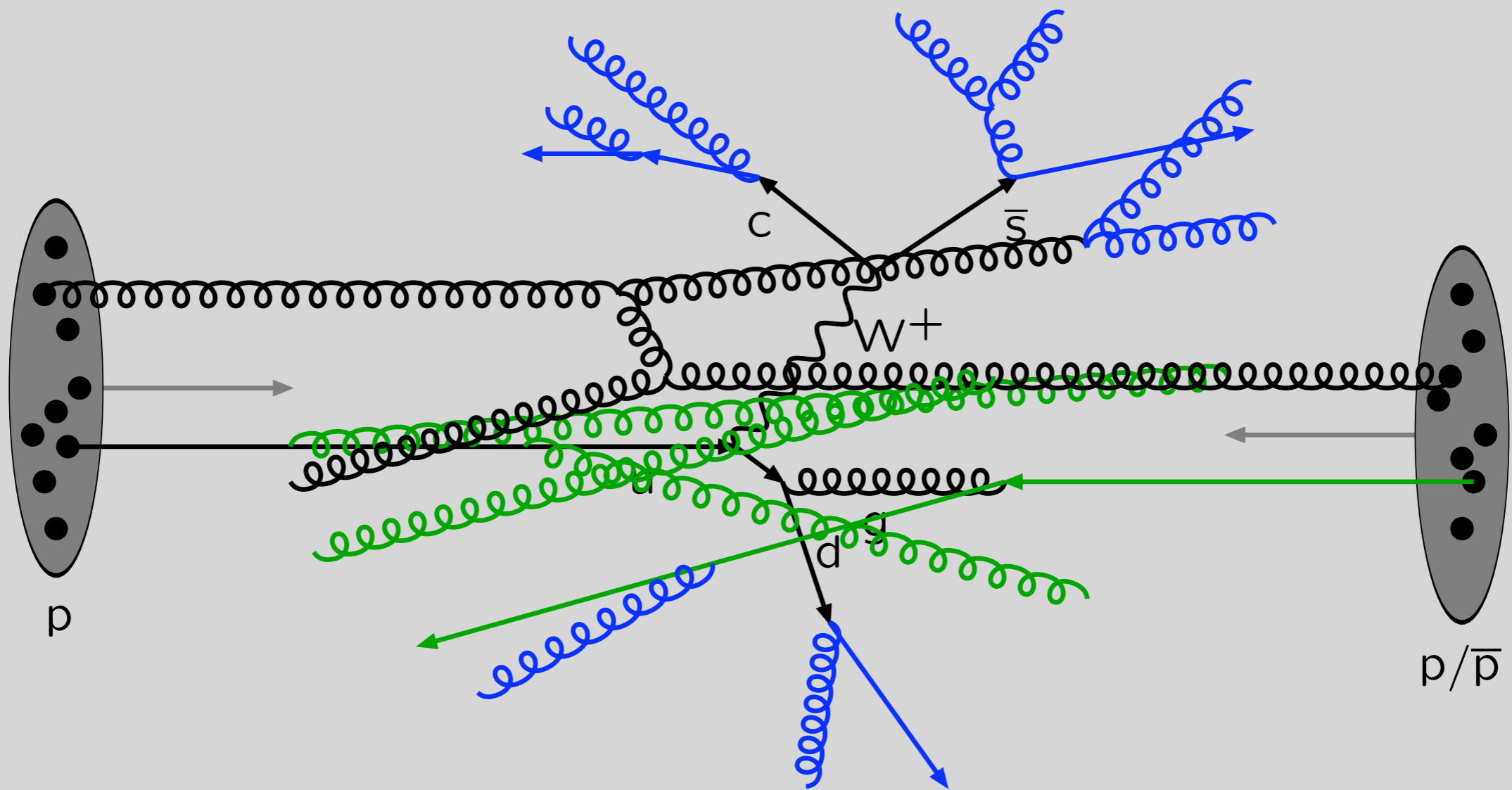
Initial state radiation



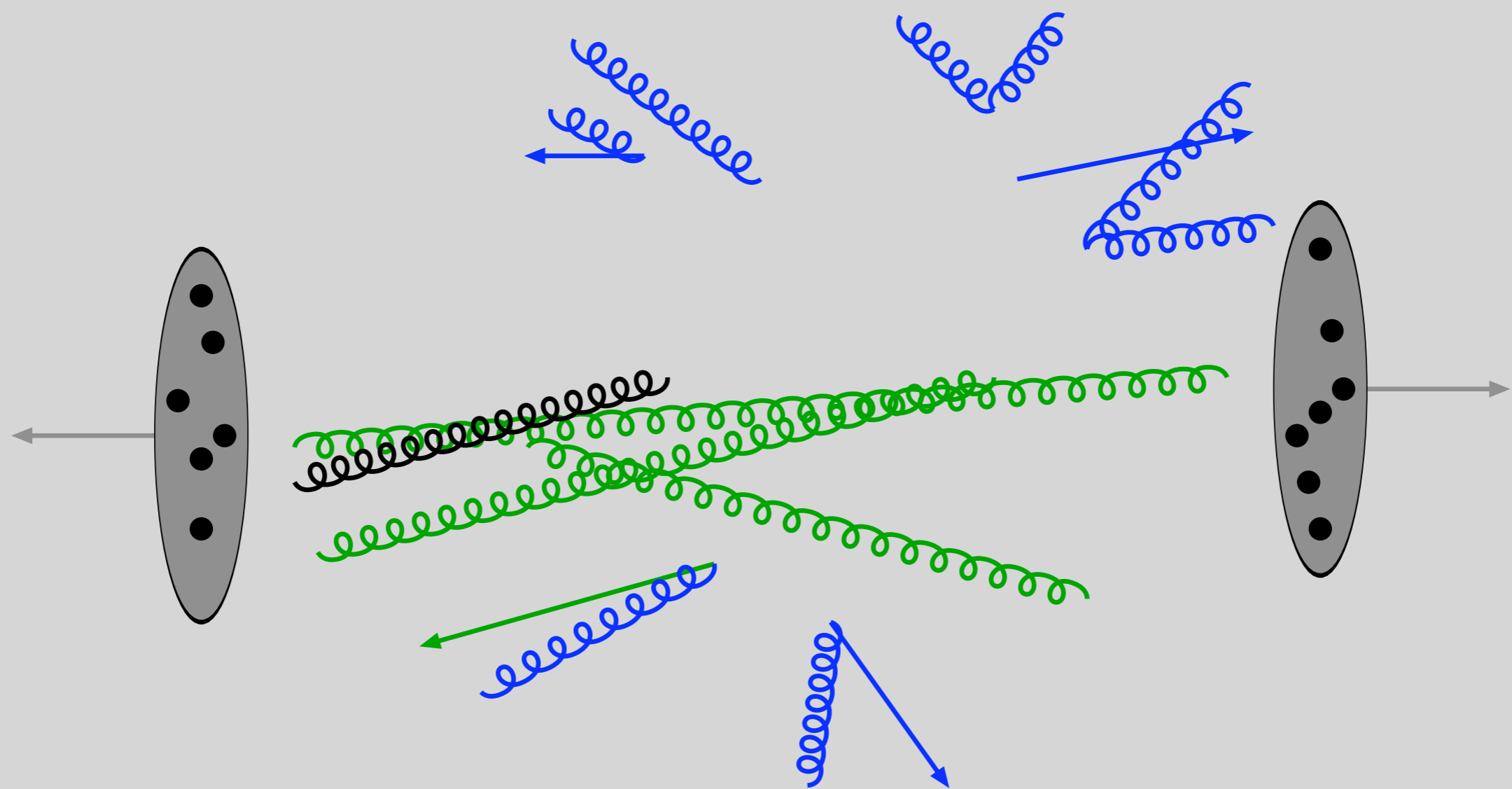
Final state radiation; parton shower



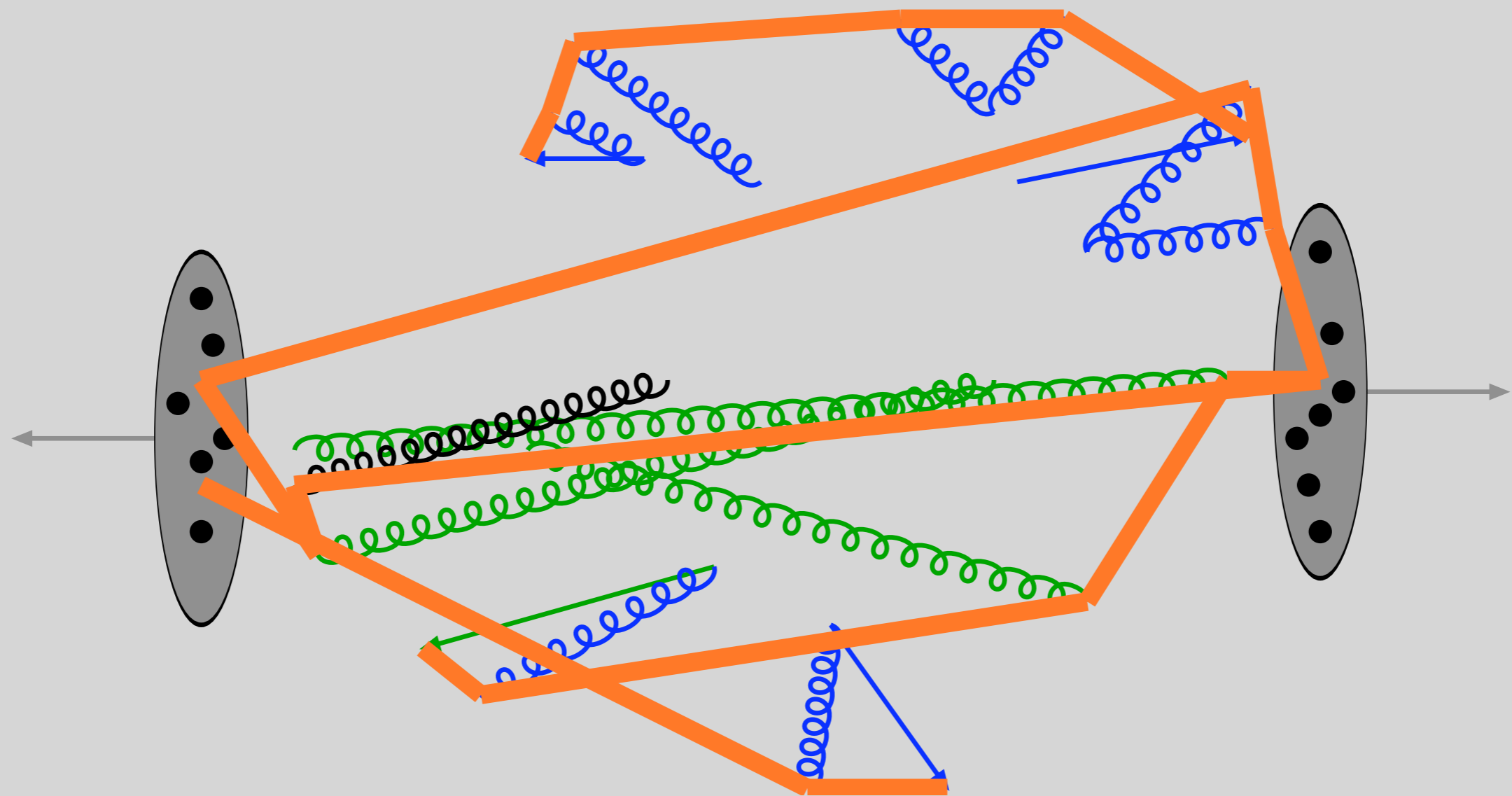
Multiple interaction



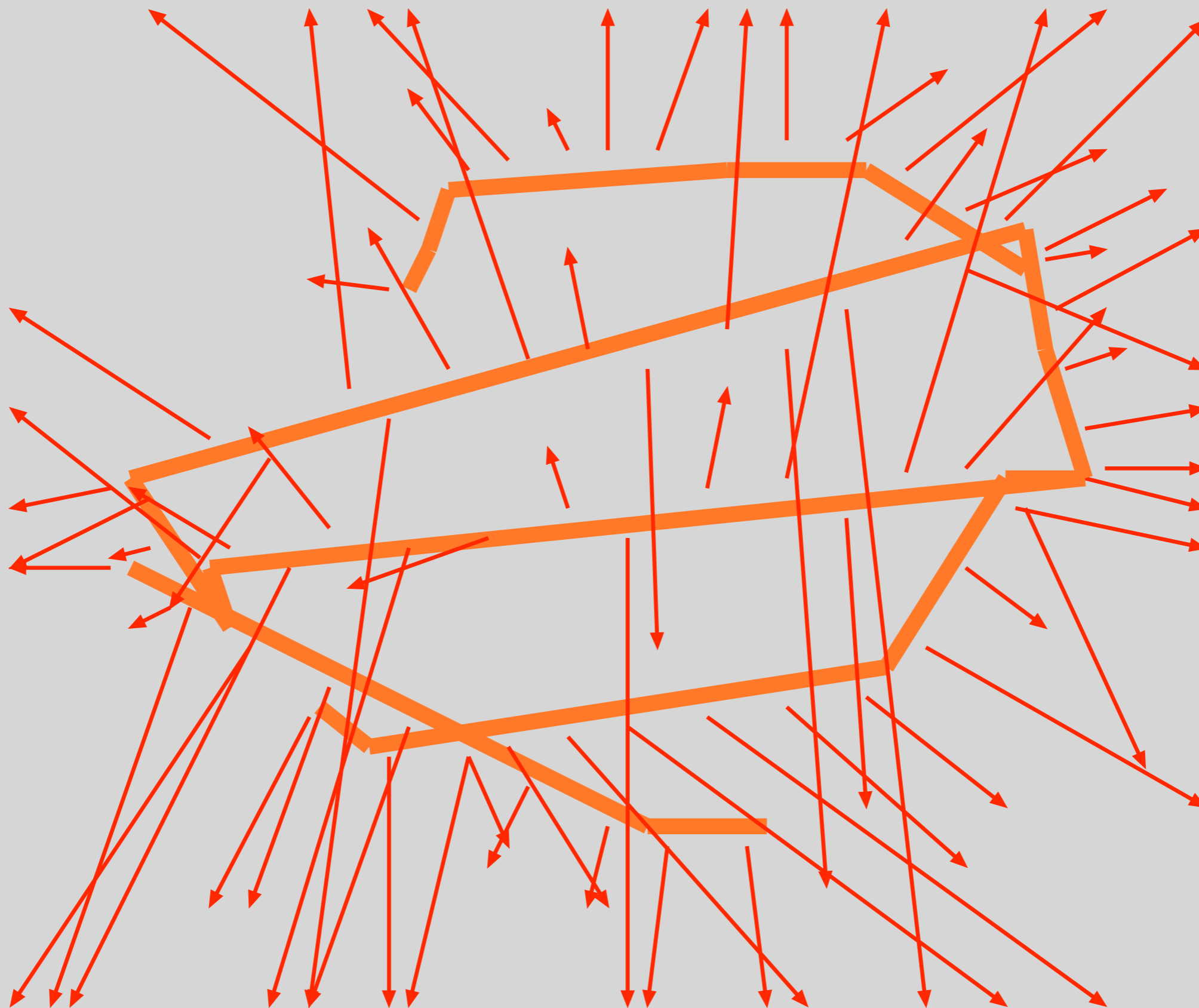
Initial and final state radiation
for each interaction



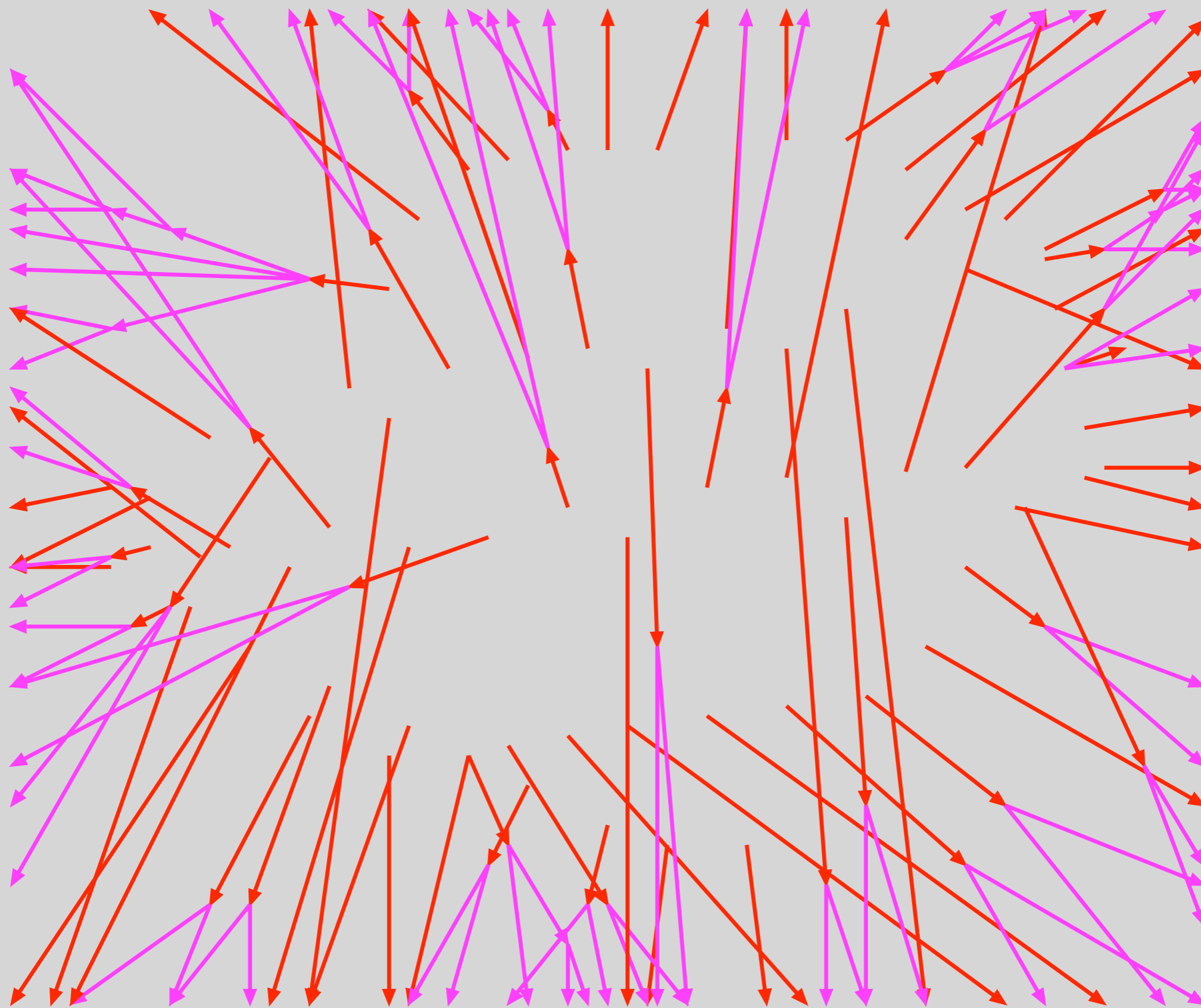
Beam remnants



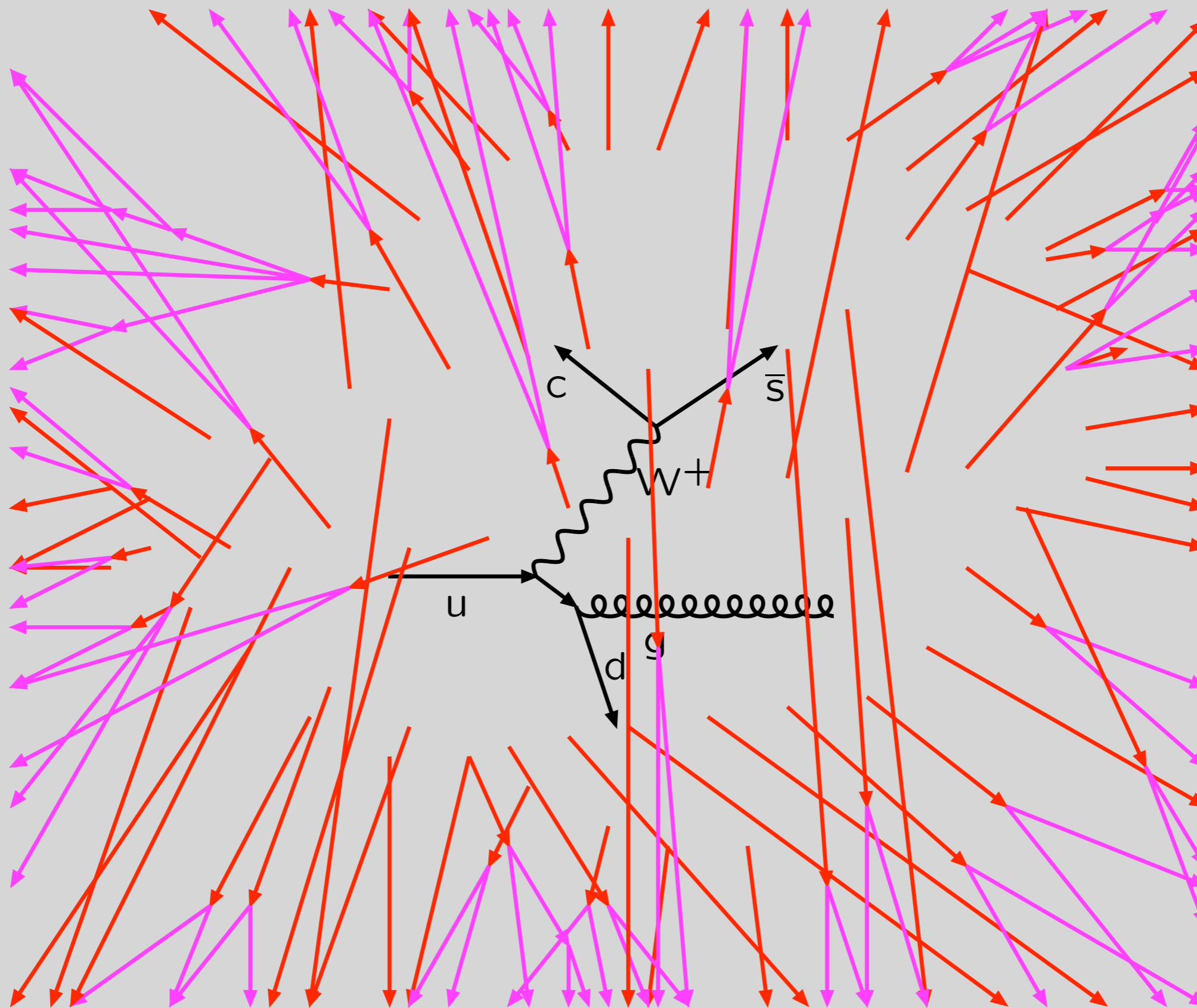
Color connection



Hadronization



many hadrons unstable and decay



Underlying Event & Multiple Interactions

何故ジェットを測るのか

- もちろん、コライダーでは何でも測る

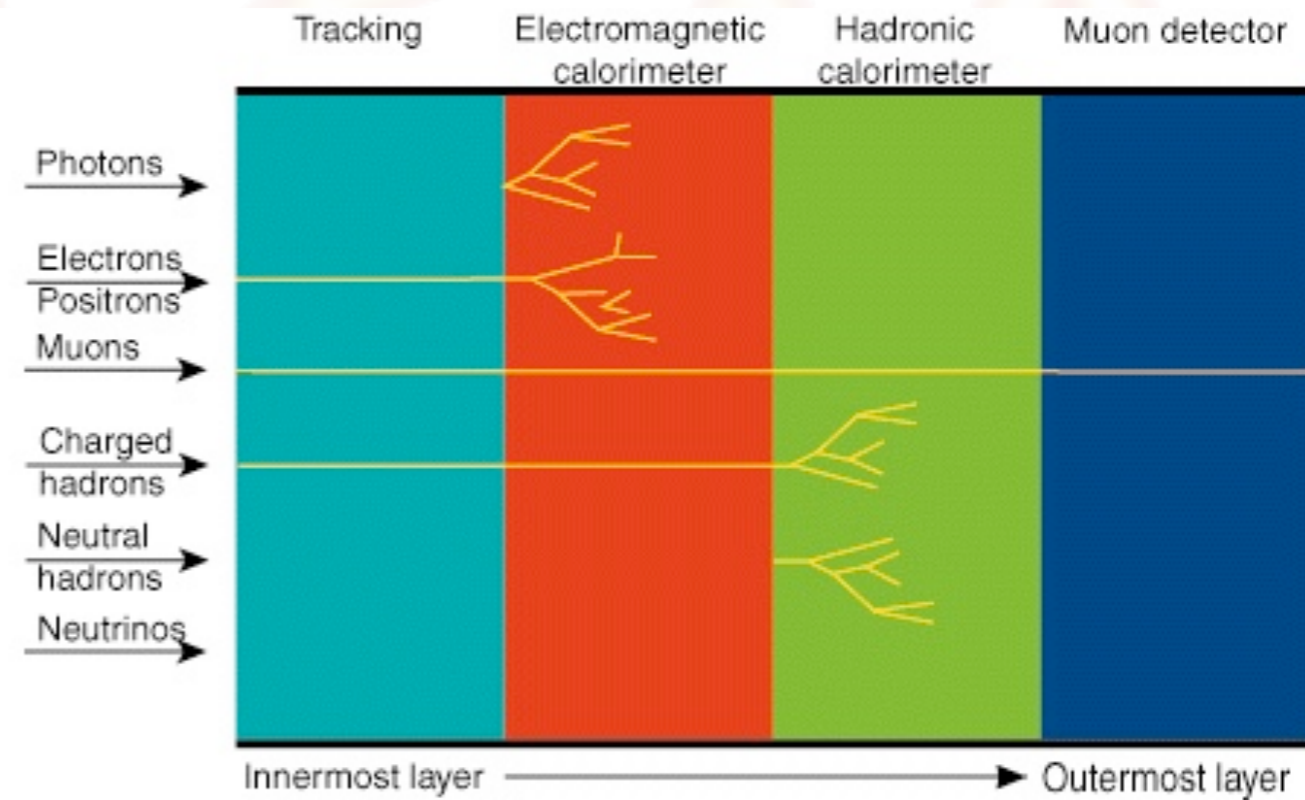
- e/γ
 - ▶ EM calo, track 有/無
- μ
 - ▶ tracker, chamber
- τ (ちょっと難しい)
- $q (u, d, s, c, (b))$, $g \rightarrow q\bar{q}$
 - ▶ 全部jetになる
 - ✓ **ジェットも測る**

- 物理解析/測定

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

- 重要な物理には全部何かしらジェットが出てくる。
- 上の項目は下の項目のバックグラウンドになる。

- ✓ 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、ジェットの E , p_T を正確に測る事は非常に重要。



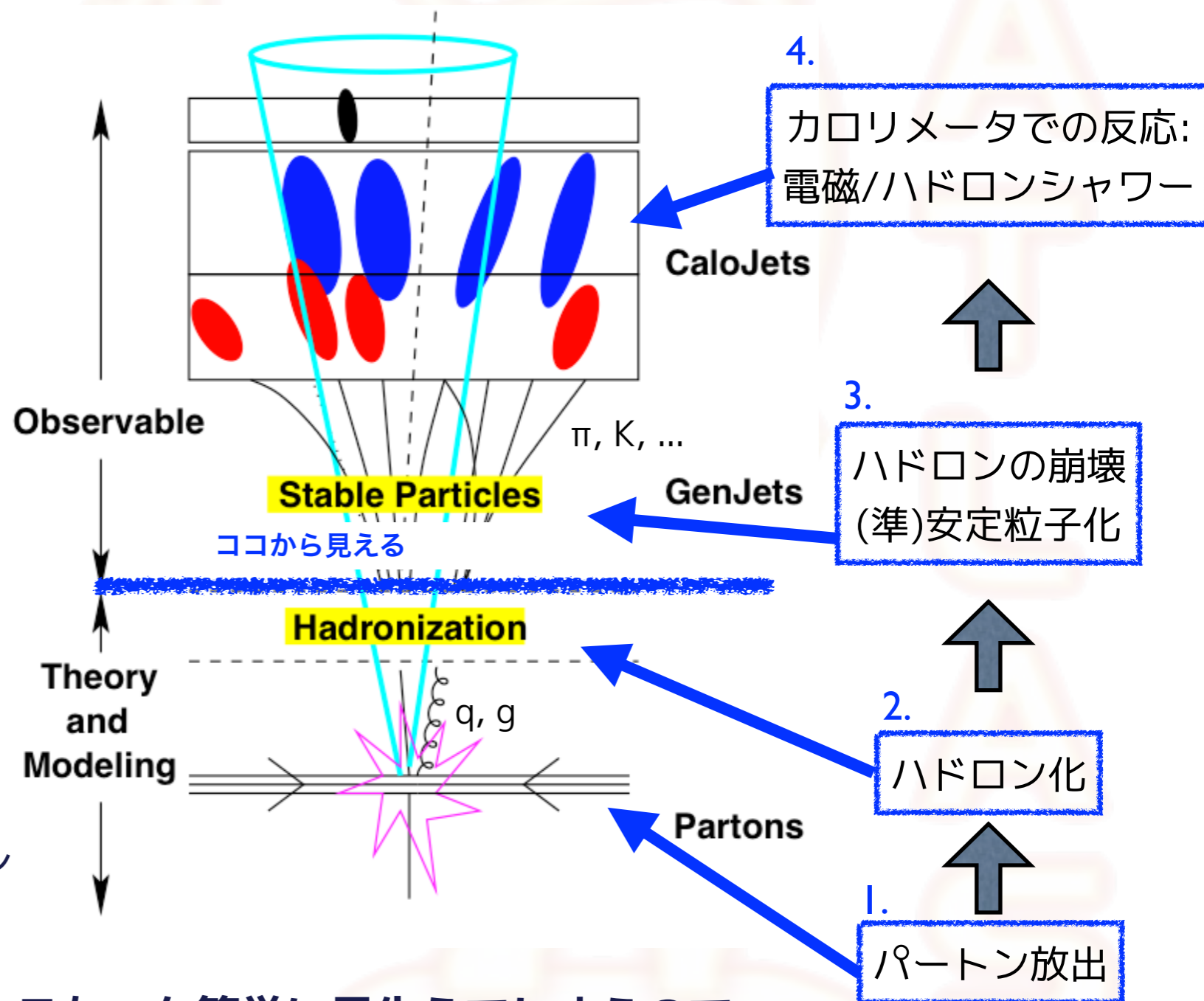
つまりジェットとは何か

• カロリメータジェット (calo/reco jet)

1. 高エネルギーパートンが放出され、
2. ハドロン化し、
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
ジェットを組んだもの
 - (MC truth) particle jet は calibration に使う
 - track jet は neutral particle なし



✓ 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。

物理

Jet reconstruction

- ジェットを組む、とは

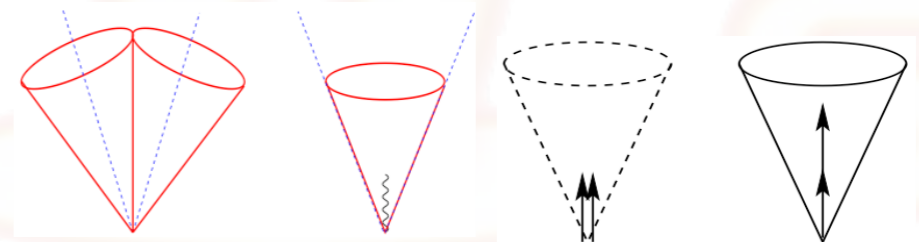
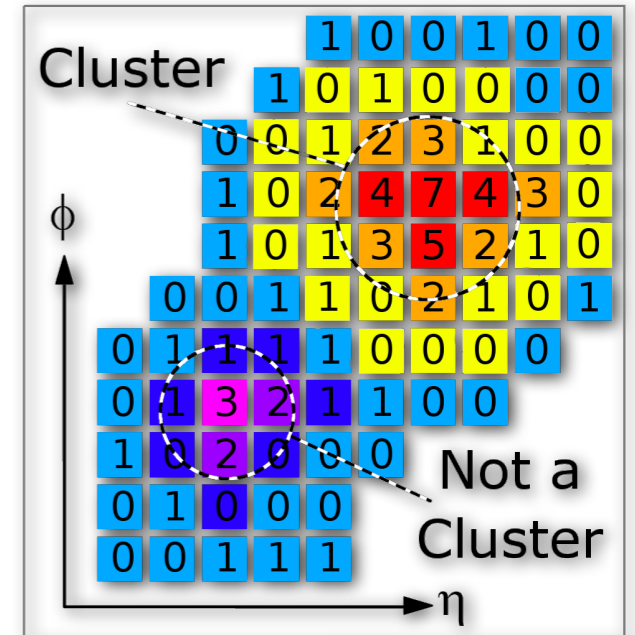
- エネルギークラスター構築

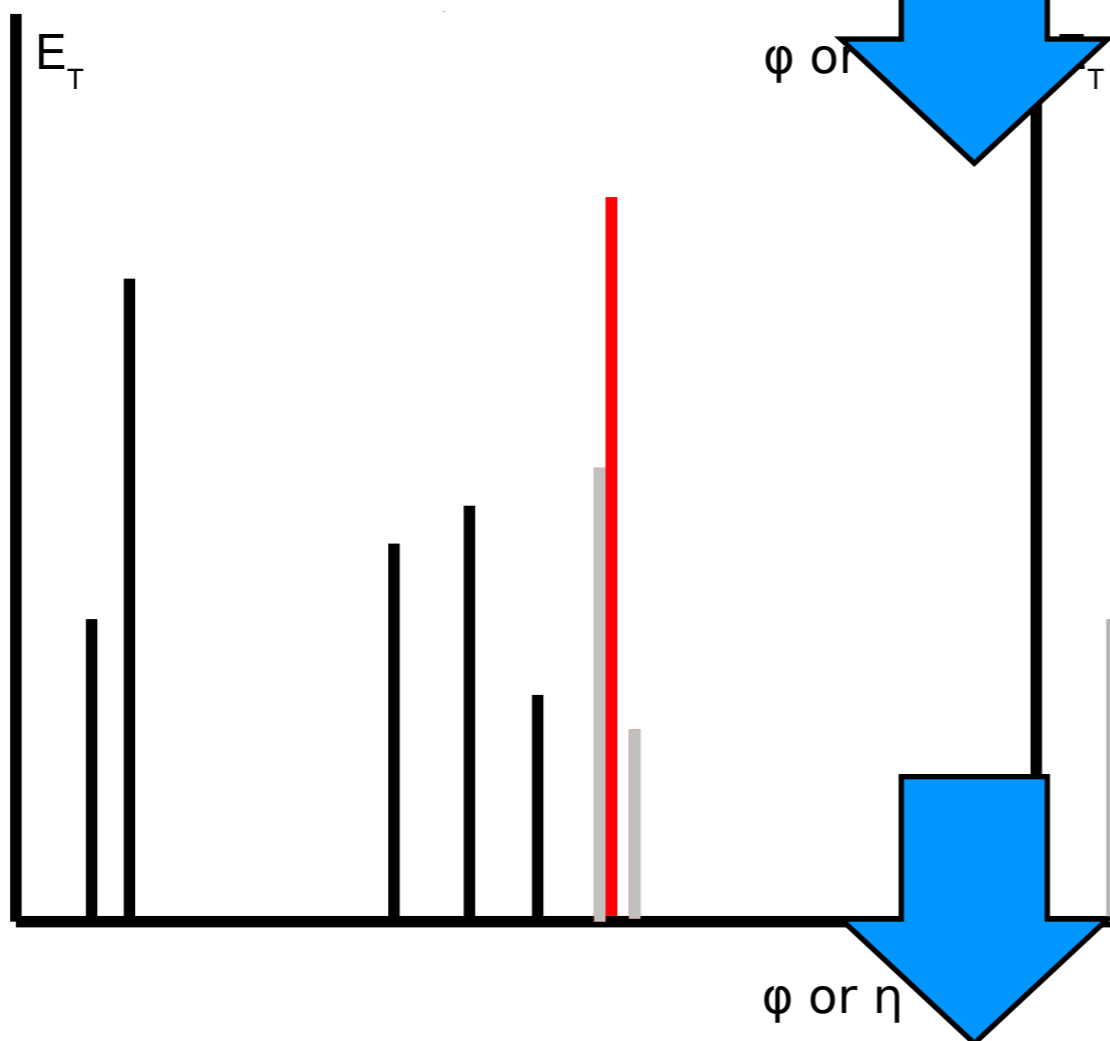
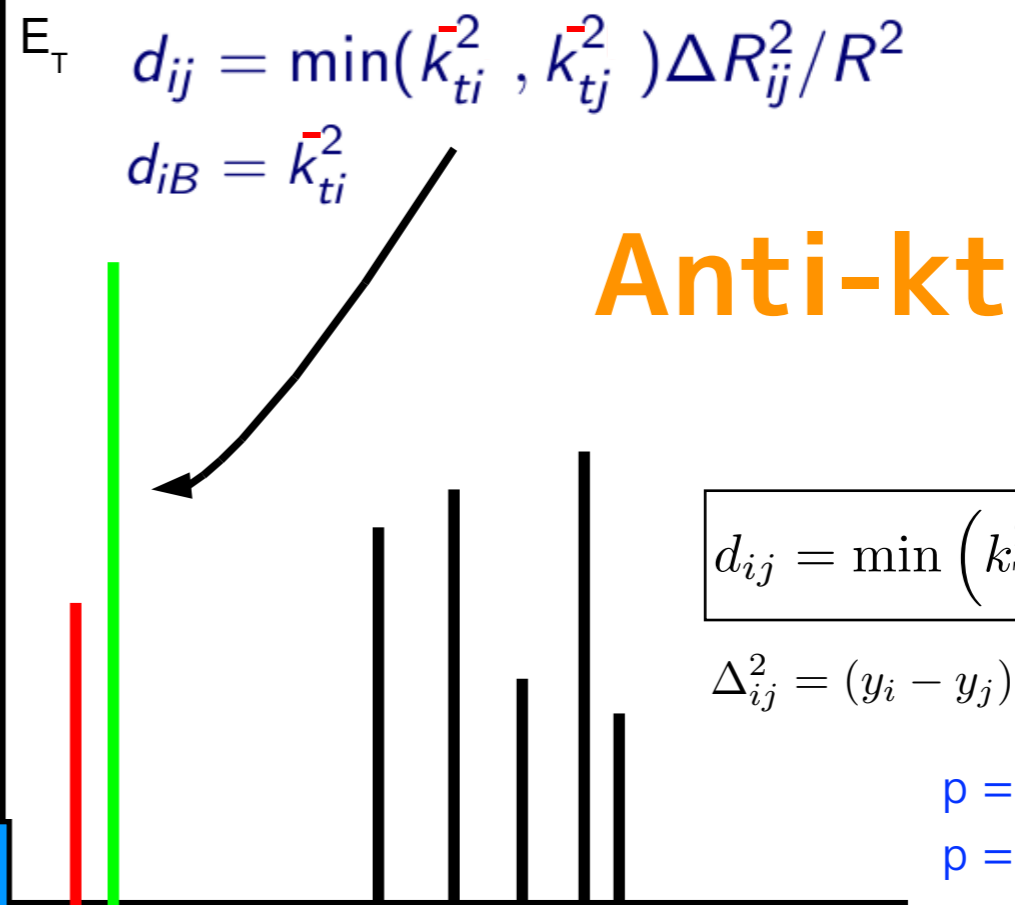
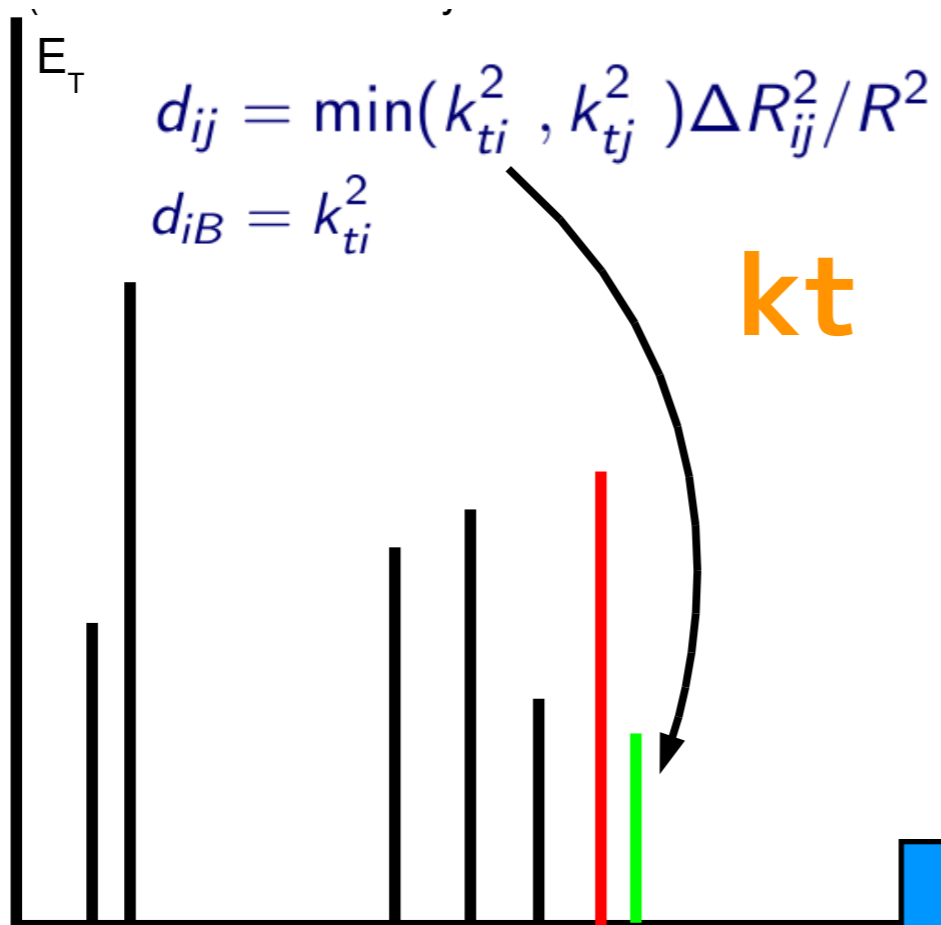
- ▶ EM/Hadron shower でできた calorimeter cell を一纏めにする
- ▶ threshold は pedestal の " σ " の整数倍が基準
 - noise を抑える事が重要
 - typical な σ の値 : 40MeV
- ▶ "4-2-0 method"
 - $E > 4\sigma$ の cell を seed にして
その周りの $E > 2\sigma$ の cell、
さらにその周りの全て cell energy を加える
 - **3D (R, η , Φ) Topological Cluster (TopoCluster)**
 - ✓ electric noise に強い

- この Topoクラスターを

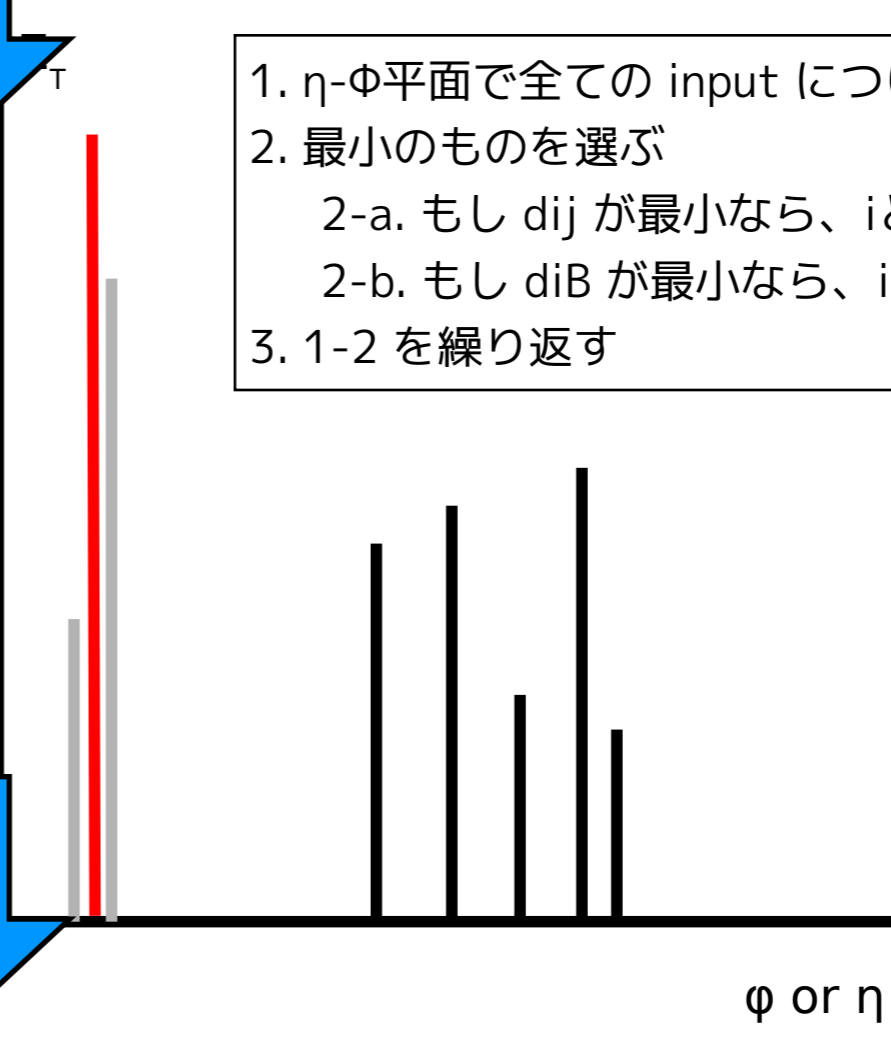
jet reconstruction algorithm への input とする

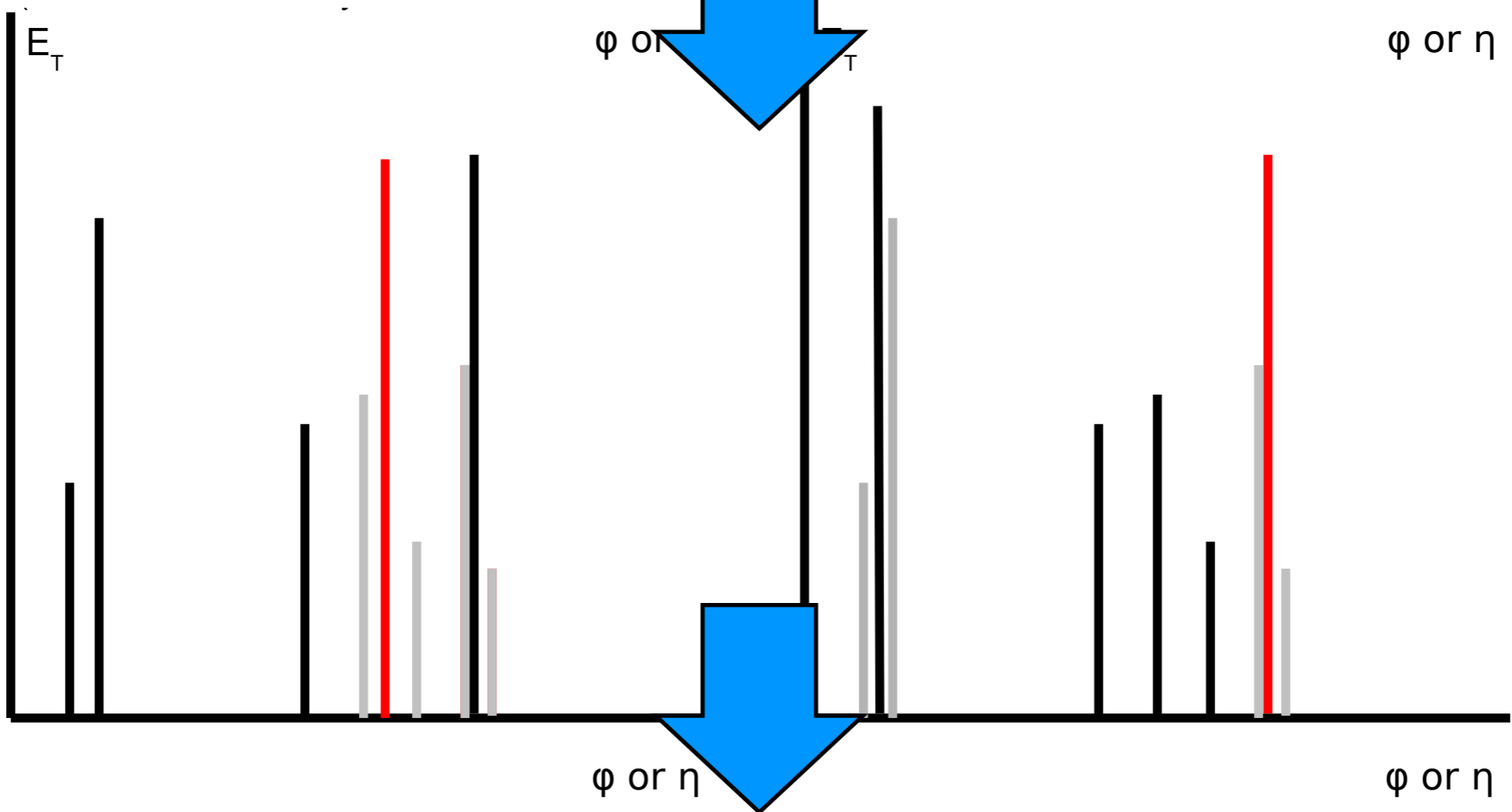
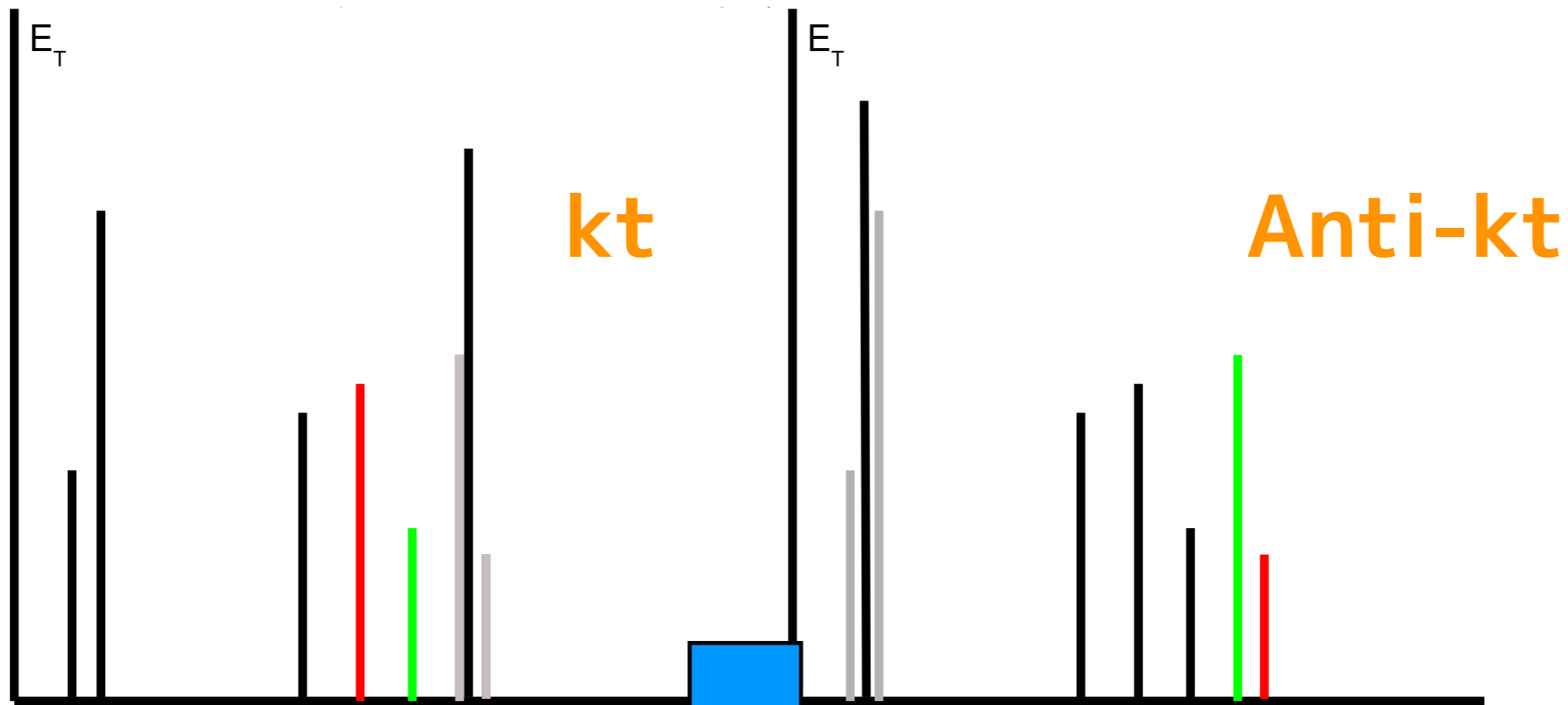
- ▶ 昔: SIS-cone, ATLAS-cone, kt
- ▶ default: "Anti-kt" アルゴリズム, w/ $R=0.4/0.6$
 - 2008年くらいに採用
 - Infrared-safe, collinear safe
 - ✓ 素性が良い

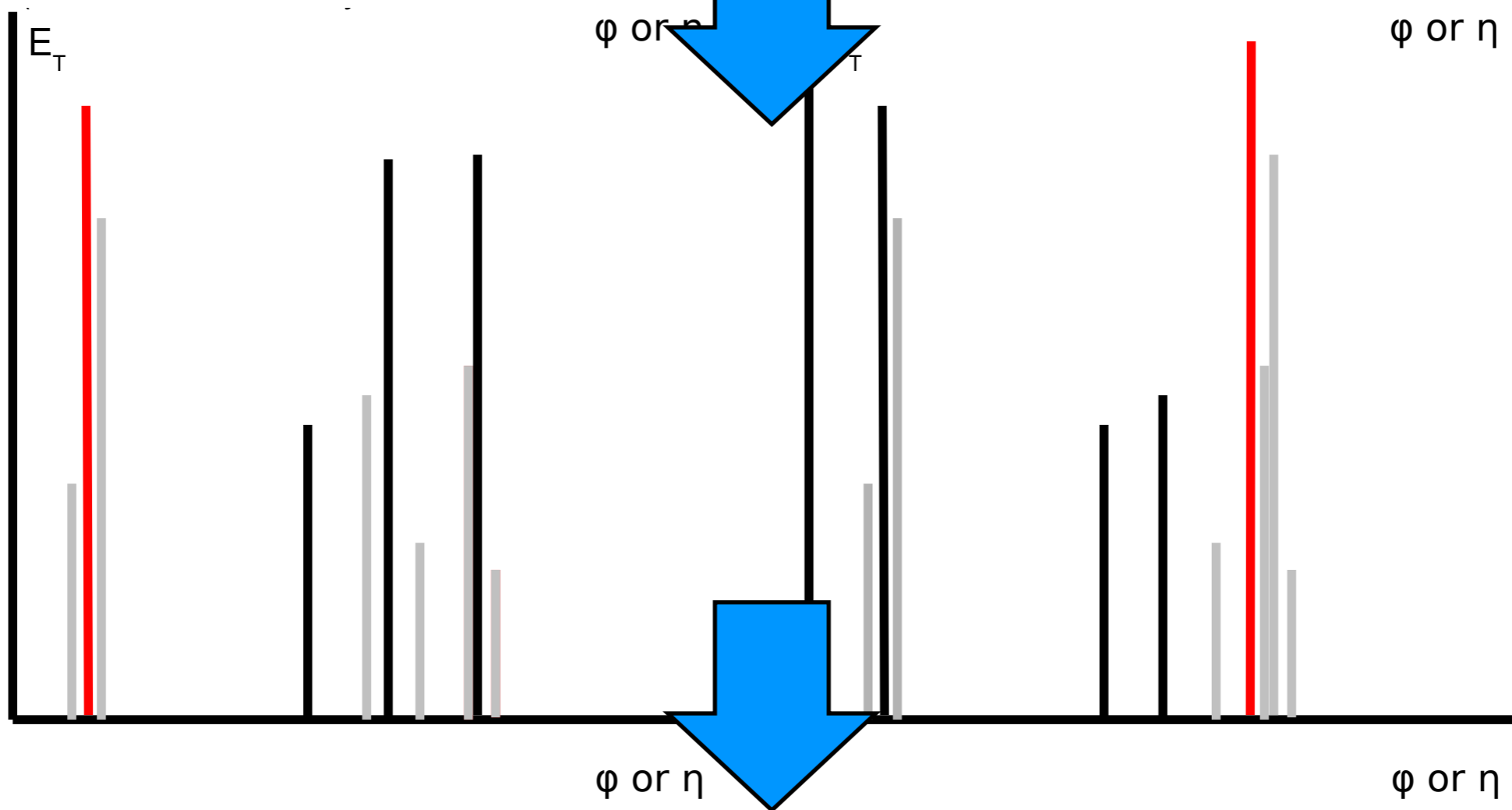
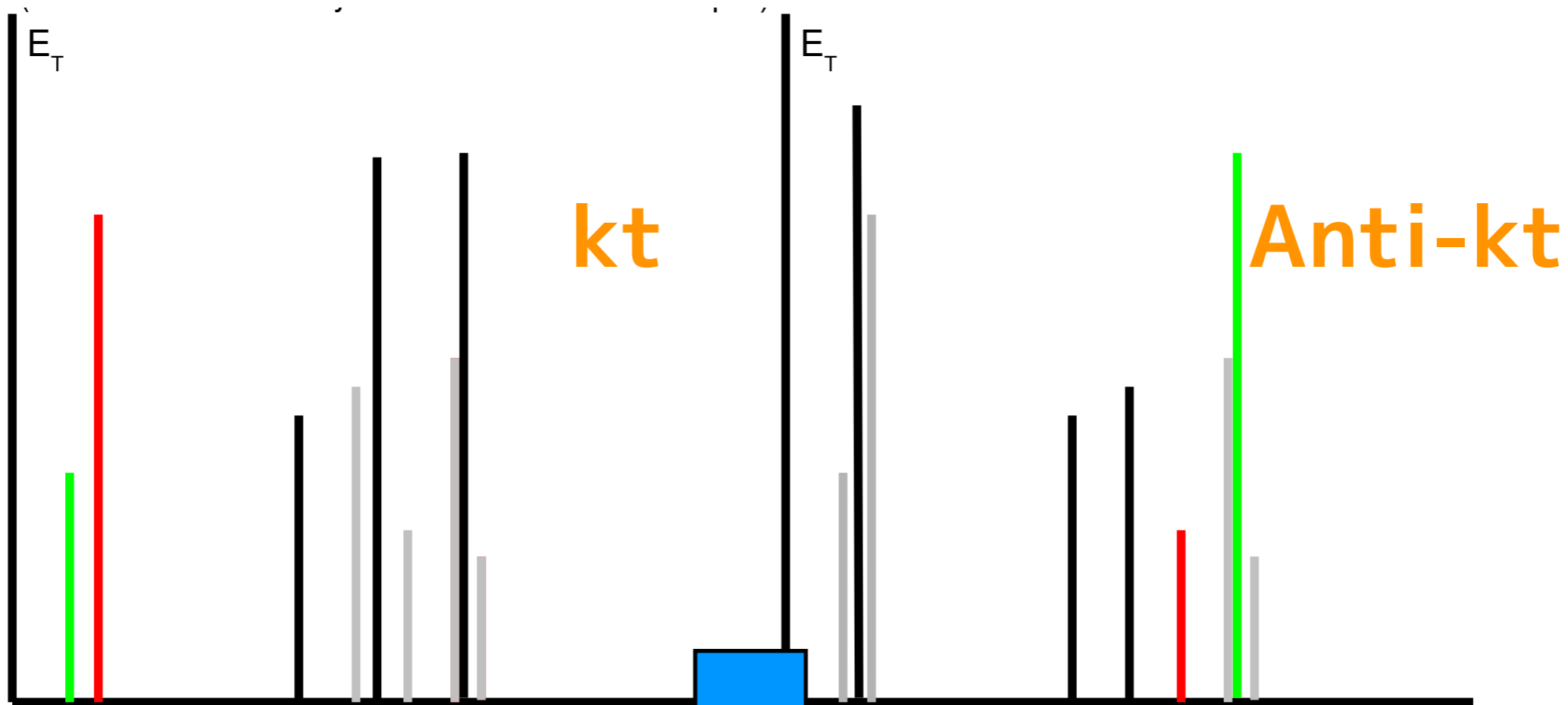


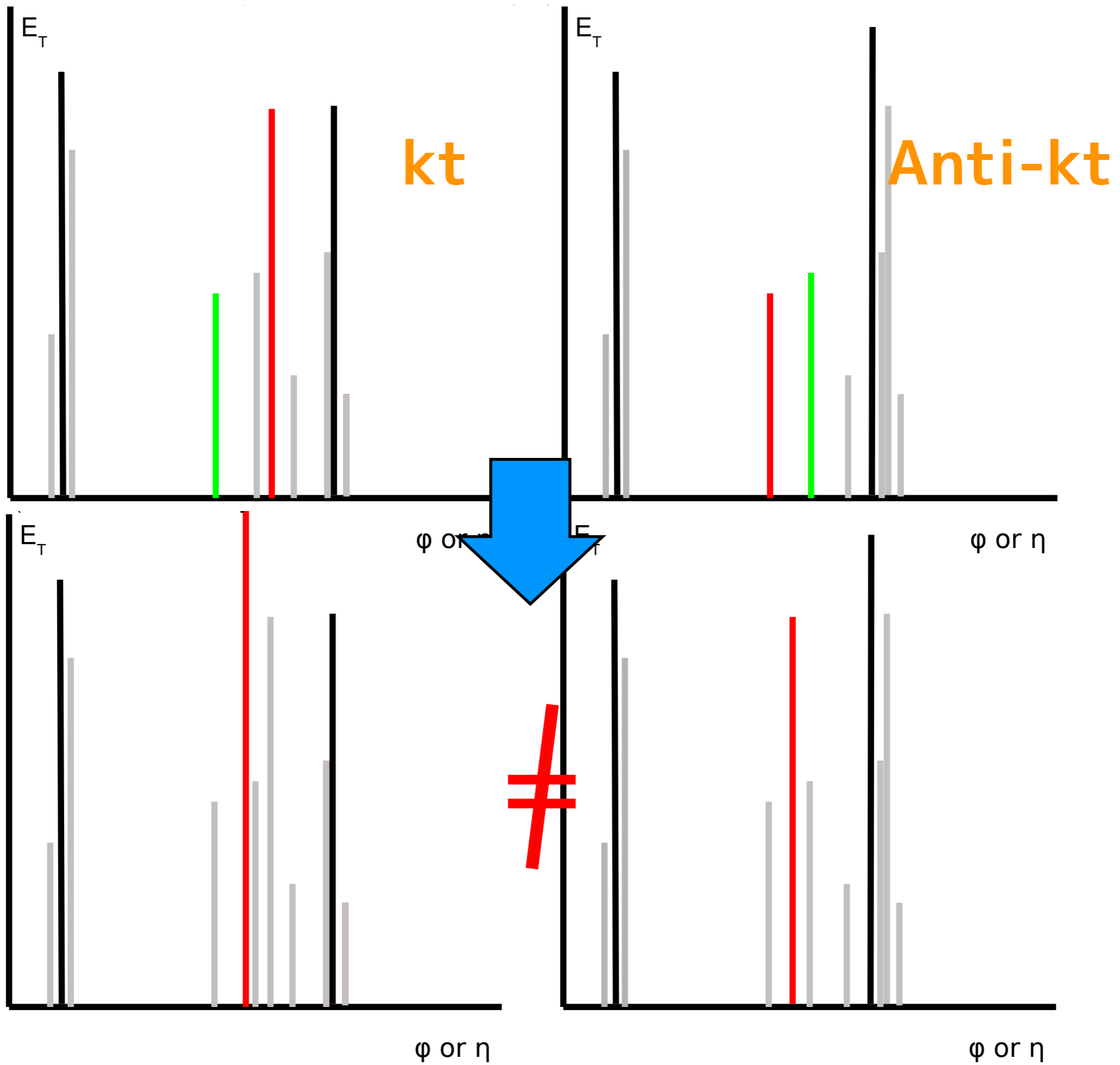


1. η - ϕ 平面で全ての input について d_{ij}, d_{iB} を計算
2. 最小のものを選ぶ
 - 2-a. もし d_{ij} が最小なら、 i と j をくっつける
 - 2-b. もし d_{iB} が最小なら、 i はジェット
3. 1-2 を繰り返す



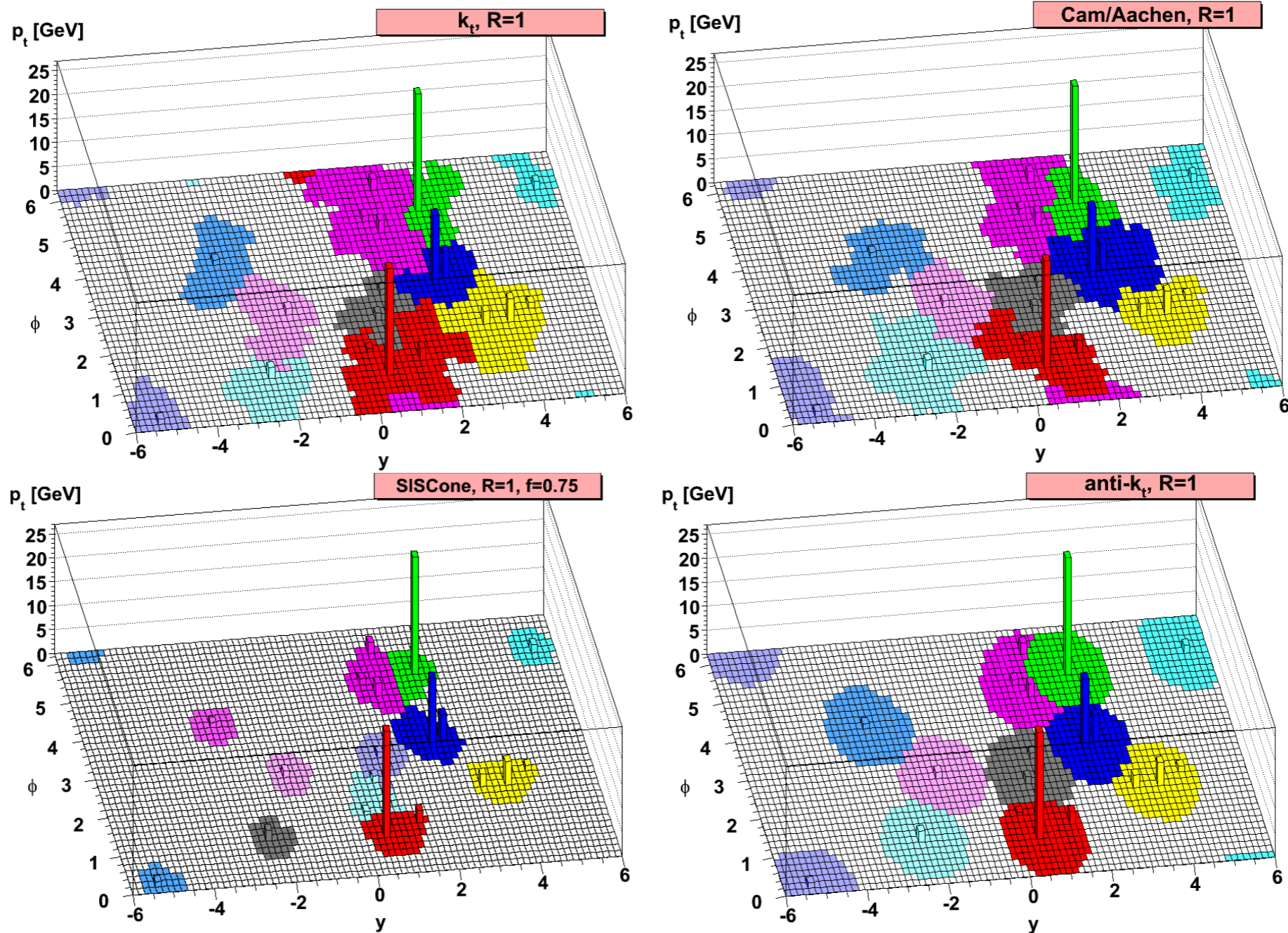






Jet reco. algorithms の比較

- Anti-Kt は優秀！



Jetのキャリアブレイクシヨソ

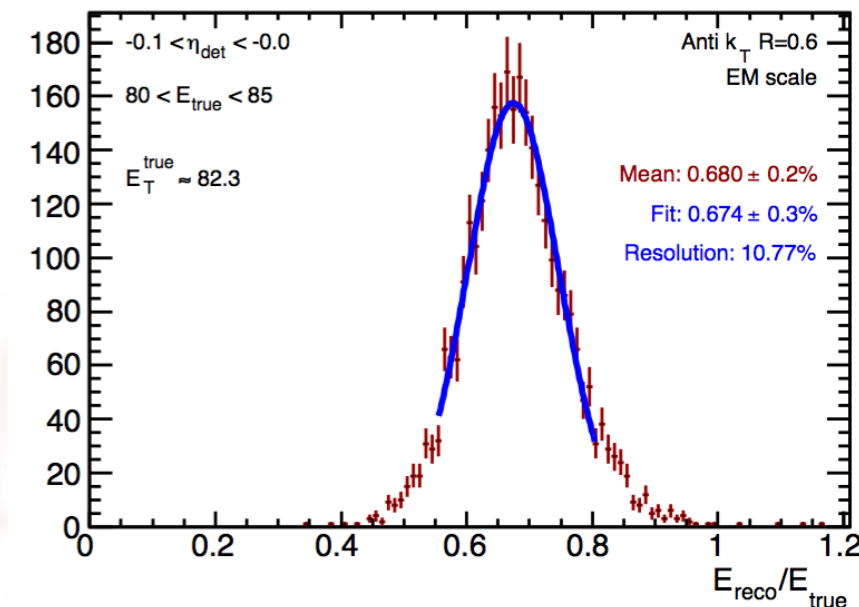
Jet のキャリブレーション

- ジェットは組んだが、その組んだジェット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}Cs を使った独自システムでの calibration が base
 - ジェットの reconstruction も今のところ EM energy で行われている
- “本当の”ジェットと比べると？
 - Truth jet : ハドロンレベルの情報を使って
Anti-kt アルゴリズムでジェットを再構成したもの
 - Reco jet: カロリメータから出発したジェット
 - ハドロンは e/γ 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、再構成されたジェット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, η 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

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

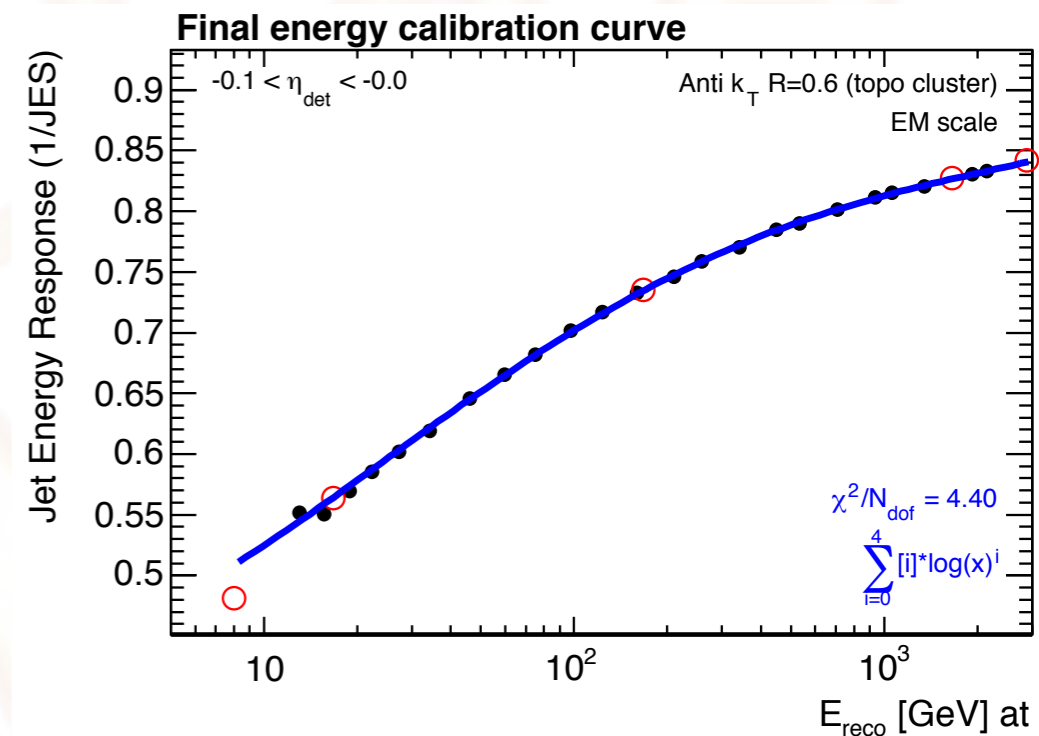
$$0.80 \leq m \leq 0.85$$

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



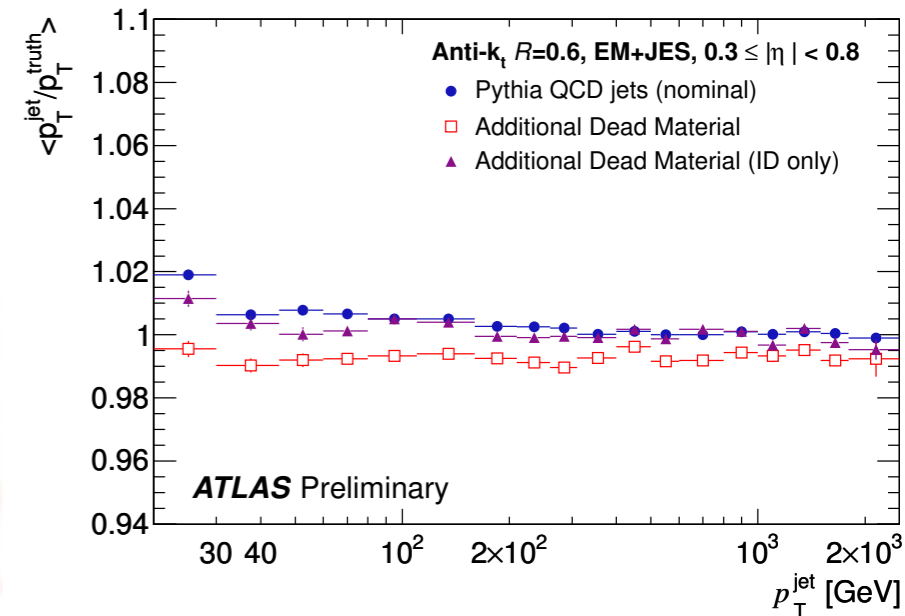
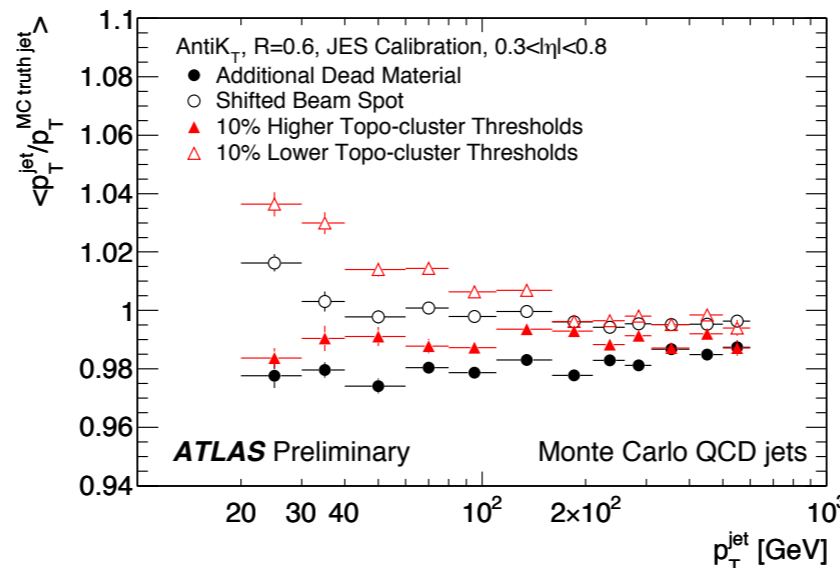
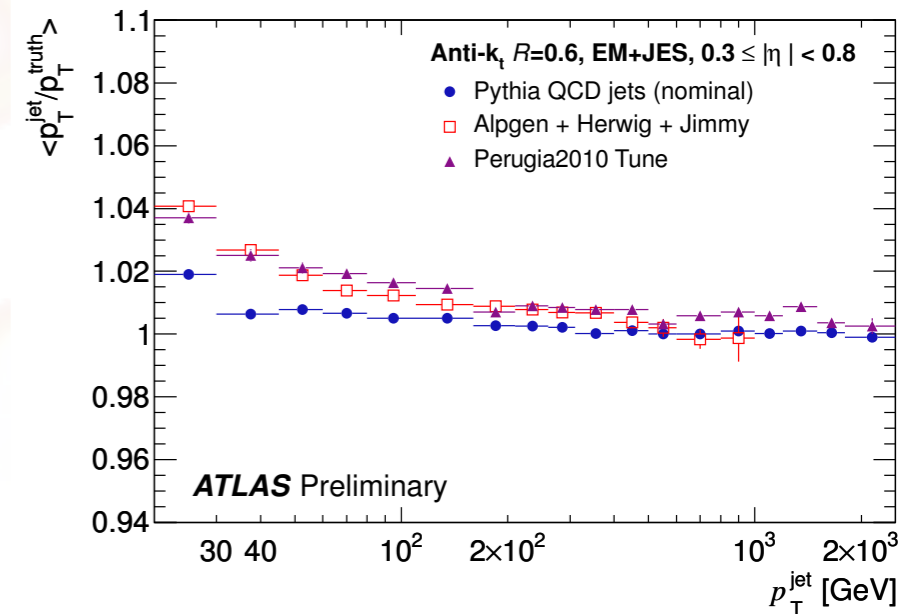
Jet のキャリブレーション (続き)

- さらに、各 E, η 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
- 重要な物理量であるジェットの p_T (横方向運動量) は TopoCluster を massless と見做して、4-vector を組む



JES uncertainty

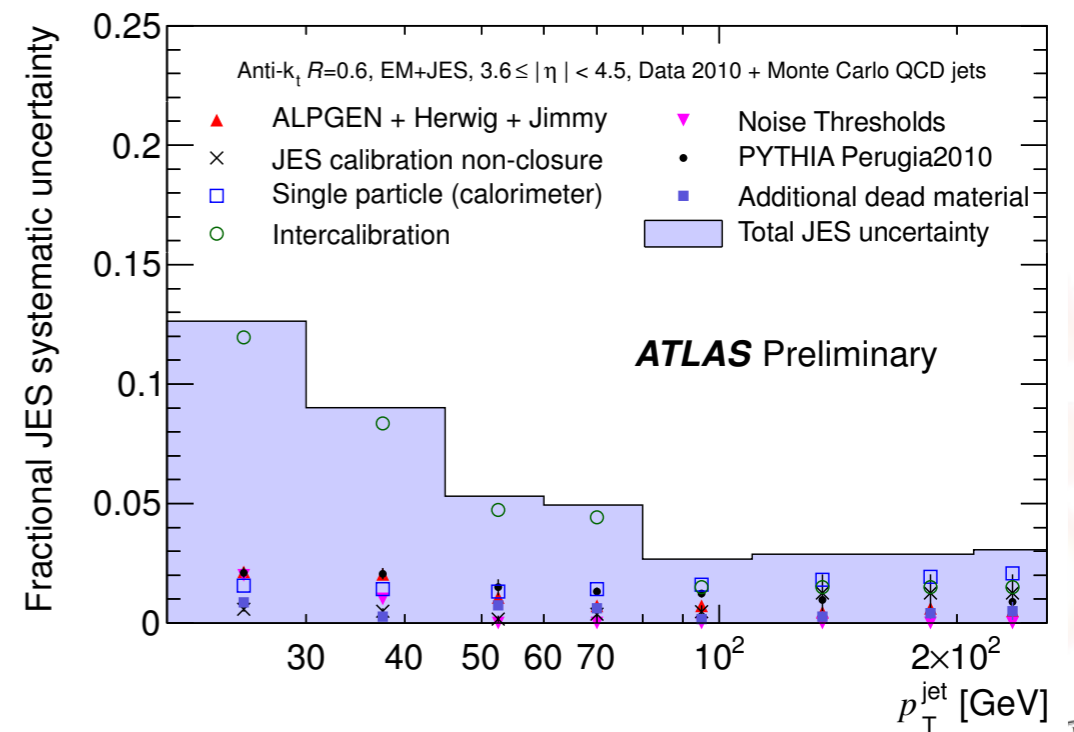
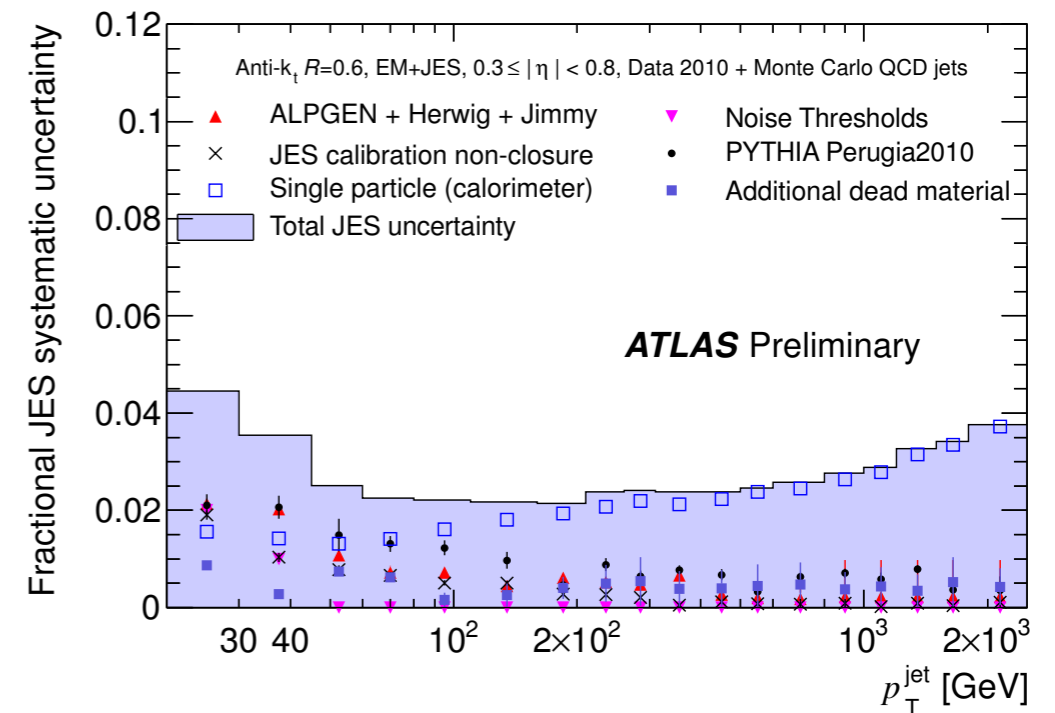
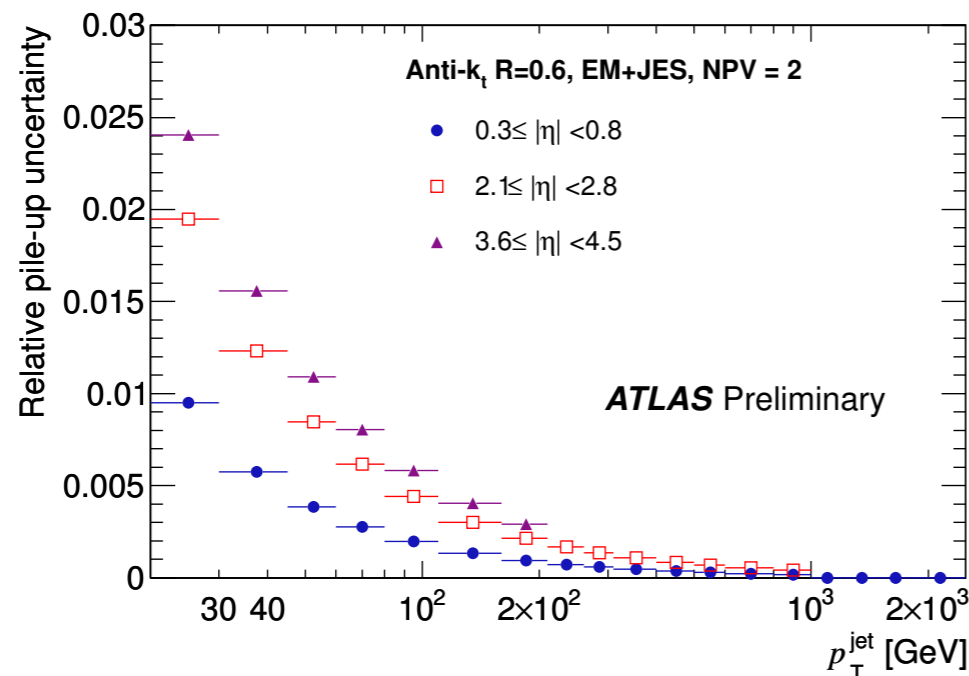
- どれだけ正確にジェットをキャリブレーションできているか
 - “正確に”とは“精度良く”(resolution)ということではない。
ある E, p_T binで、中心値をどう間違い得るか、の指標。
- JES uncertainty の source
 - 全部MCに頼ってのcalibrationなので、
jet energy response は 物理モデル
(パートン放出、ハドロン化、シャワー生成)に依る
 - ▶ ~3%
 - Dear material の MC での記述が間違っていたら…
 - ▶ 2-3%
 - ノイズの大きさと threshold の関係
 - ▶ 1-2%



JES uncertainty (続き)

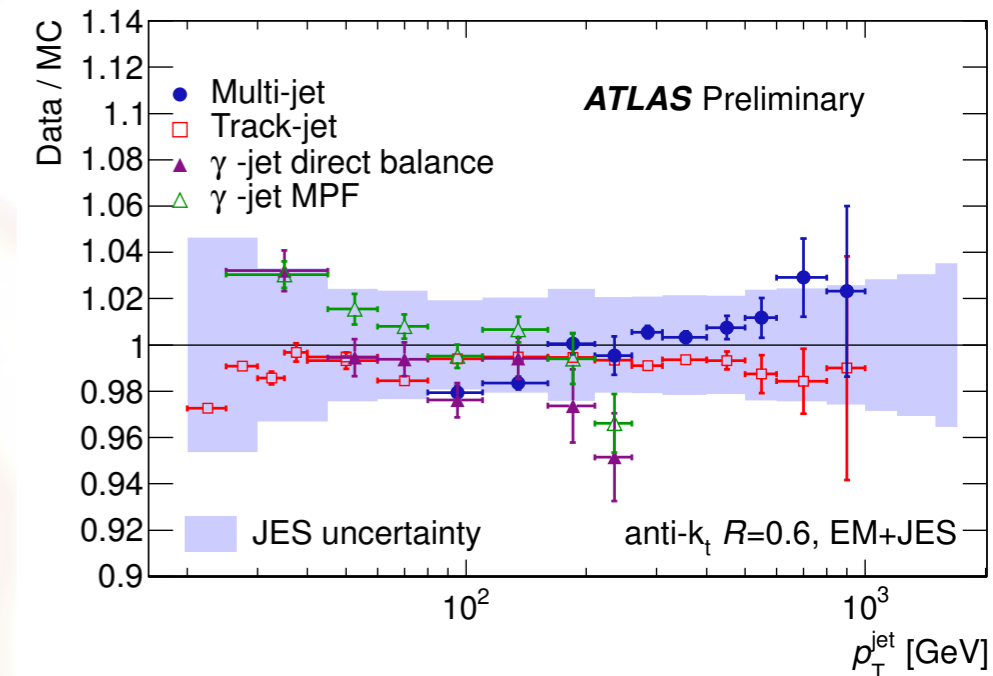
- 2010 data での結果

- 4% @ $p_T=30\text{GeV}$, $0.3 < |\eta| < 0.8$
- forward では $\sim 10\%$
- 右の絵に pile-up (同時に複数のcollisionが起こる場合) の不定性は入っていない
 - ▶ $\sim 1\%$ in 2010
 - ▶ 酷い事になっている in 2011 (次回)



“In-situ” JES validation

- MCに頼り切りでは、どこで間違えるかわからないので、データを使った jet calibration の確認をして、JES の不定性を評価したい
 - di-jet inter-calibration
 - ▶ barrel と forward を比べて、 η での一様性を保障する
 - multi-jet method
 - ▶ high- p_T ジェットと low- p_T recoil jet system を比べる
 - 一番高い p_T までいける
 - gamma-jet balance method
 - ▶ robust な EM scale の energy 測定と比較する
 - track-jet/calor-jet
 - ▶ track だけで jet を組んで、それと比較
 - neutral particle がないので resolution は落ちるが
 - response 自体は良くわかっている
 - ✓ pile-up が大きいと、track-jet の方が得？
 - Z-jet balance
 - ▶ Z の mass が大きいので、low Pt jet の validation ができる



まとめと今後

まとめ

- ジェットとは
 - 高エネルギーパートンを元とするハドロンの束
- ジェットのキャリブレーション
 - カロリメータの EM-scale でのレスポンス
 - エネルギークラスターの構築
 - ジェットの再構築
 - ▶ を行なって、MCで求めた “JES” をかける
- キャリブレーションがどれくらい合っているか
 - “JES uncertainty”
 - ▶ 複数の物理モデルや、検出器の物質を変更したMCで系統誤差を評価
 - “In-situ” validation
 - ▶ データを使って JESを検証

今後

• 次回

- 本当は、最近では single particle measurement (E/p analysis) を使って、JES uncertainty を評価しているが、ややこしいので省略した。
- In-situ measurements の現状 in 2011
- 現在、高い pile-up rate での JES の求め方、pile-up で足された energy の補正、それを考慮した JES uncertainty の評価について study が進行中。
 - ▶ 以上、次があれば報告します。