

# CTA報告 95:Direct Cherenkov光を用いた宇宙線化学組成計測手法のモンテカルロシミュレーション評価(II)

大石理子, 石尾一馬, 荻野桃子, 片桐秀明<sup>A</sup>, 櫛田淳子<sup>B</sup>,  
郡司修一<sup>C</sup>, 斎藤隆之<sup>D</sup>, 榊直人<sup>E</sup>, 西嶋恭司<sup>B</sup>, 平井亘<sup>B</sup>,  
増田周<sup>D</sup>, 吉越貴紀, 吉田龍生<sup>A</sup>  
他 CTA-Japan Consortium

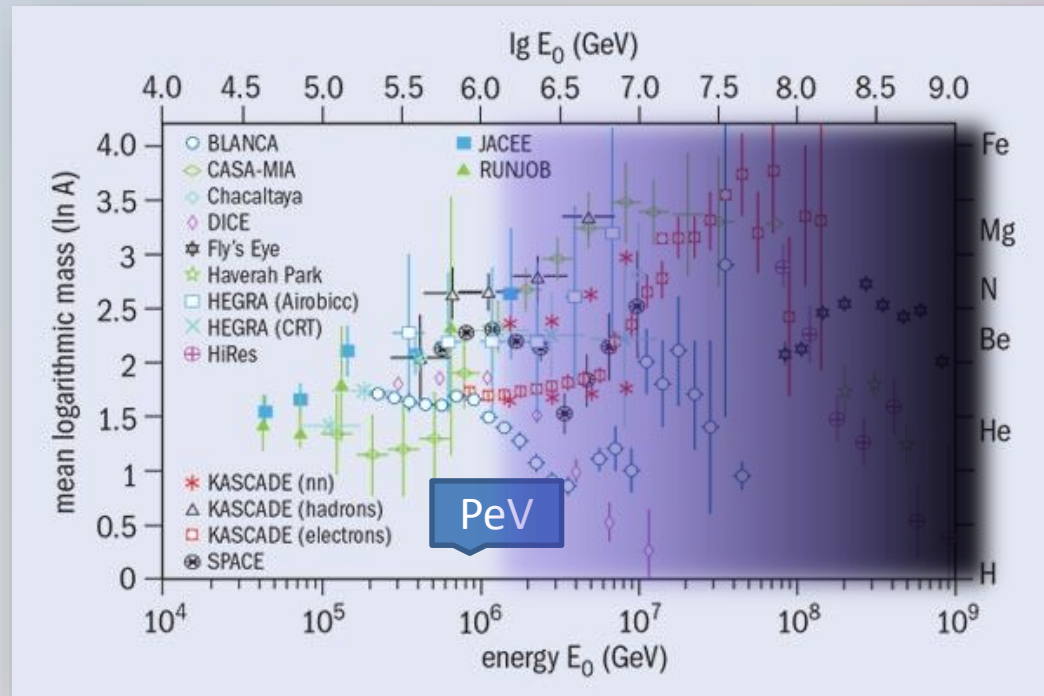
東大宇宙線研、茨城大理<sup>A</sup>、東海大理<sup>B</sup>、山形大理<sup>C</sup>、  
京大理<sup>D</sup>、阪市大理<sup>E</sup>

# Contents

- PeV領域近傍での宇宙線化学組成計測の動機
- Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理
- CTAのアレイ配置とMCシミュレーション
- Direct Cherenkov光イベント抽出の解析手法
- H.E.S.S. like 解析で期待される宇宙線鉄/雑音陽子の検出数
- DC光到来時刻特性とtiming cutの効果(MST)
- Summary

# PeV領域近傍の宇宙線化学組成計測

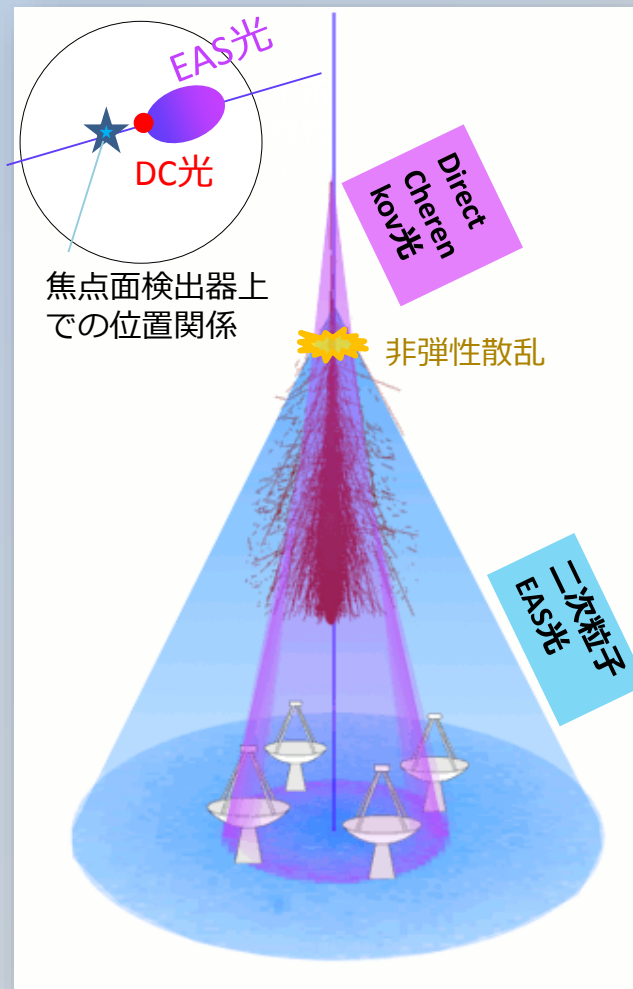
- 宇宙線スペクトルの3PeV近傍”knee”構造が系内天体での加速限界の反映であるならば、エネルギーが高くなるにつれ電荷の大きい重い元素の比率が増加すると予想される
- PeV近傍の重元素スペクトル計測は、低エネルギー (<~PeV)領域は飛行体によって、高エネルギー(>~PeV)領域は空気シャワーアレイ実験によって担われている
- 化学組成の測定結果は実験ごとにばらつきが大きいのが現状



<http://cerncourier.com/cws/article/cern/28675>

	電荷分解	有効面積
飛行体	良好	小
地上EASアレイ	困難	大

# Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理



地上望遠鏡を使用したDirect Cherenkov光検出手法の概要

- 一次粒子が大気上層部で放出する Cherenkov光を地上の望遠鏡で集光・検出

単位長さあたりのチェレンコフ光子放出数:

$$\frac{dN_c}{ds} = 2\pi Z^2 \alpha \int \frac{\sin^2 \theta_c}{\lambda^2} d\lambda$$

$$\alpha : \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

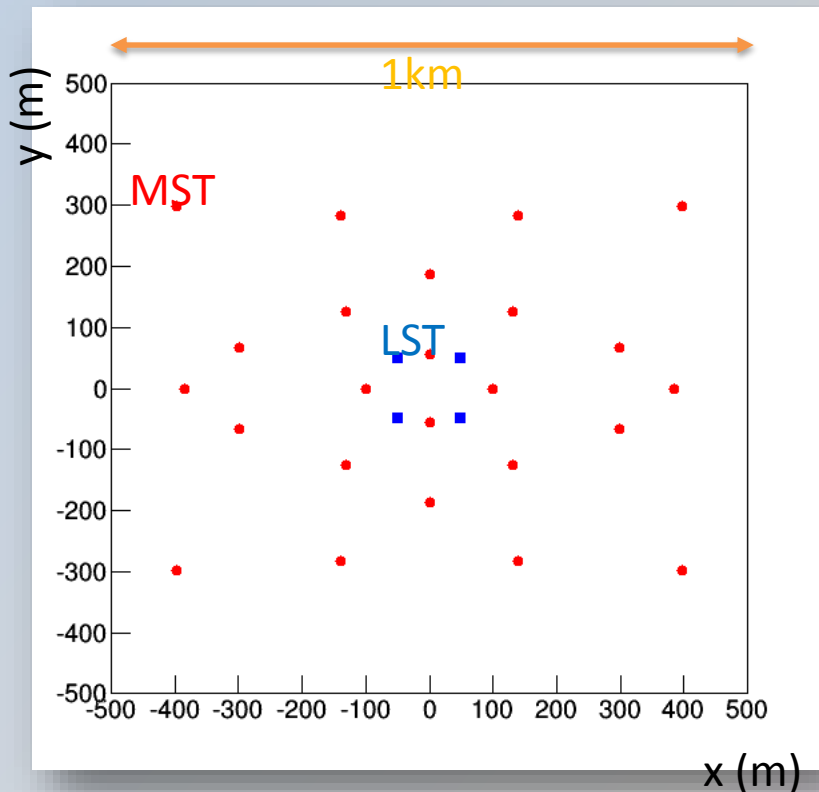
$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- 単位長さあたり発光量は電荷数 $Z$ の二乗に比例することを用いて、地表での検出光量から親粒子の電荷数を測定可能
- この地上の反射鏡を用いた観測手法の初めての定量的評価は Kieda et al. (2001) による

# CTAアレイの配置とMCシミュレーション

- シミュレーションツール：空気シャワー記述部分はCORSIKA(6.990),装置応答記述部分は独自ツール(sim\_telarray)。Hadron interaction modelはQGSJET-IIを使用。
- 使用したアレイ配置 Production 2 : sub-Array 2A の LST(4台)/MST(24台)
- 鉄( $z=26$ )に加え、陽子( $z=1$ )をバックグラウンドデータとして生成

sub2A 望遠鏡配置



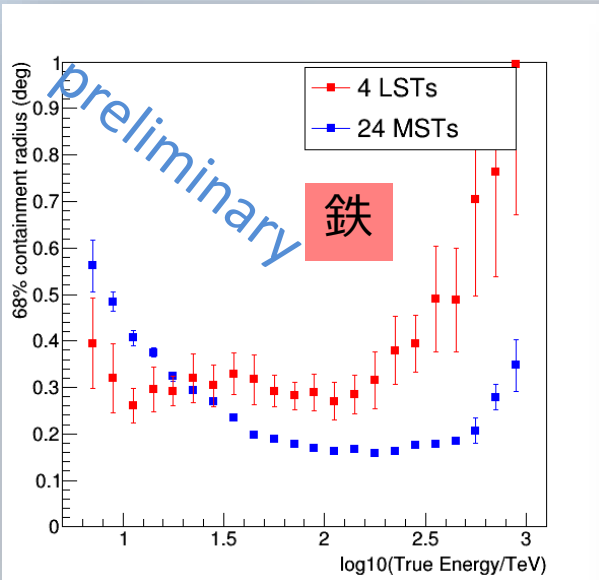
	鉄( $z=26$ )	陽子( $z=1$ )
天頂角	z= 20 deg	
角度範囲	0-10 deg	
コア半径	1000 m	
べき指数	-2.0*	
エネルギー帯	5 TeV - 1 PeV	100 GeV - 1 PeV
イベント数	$8.0 \times 10^6$	$2.6 \times 10^8$

\*解析時に-2.7になるようイベントに荷重

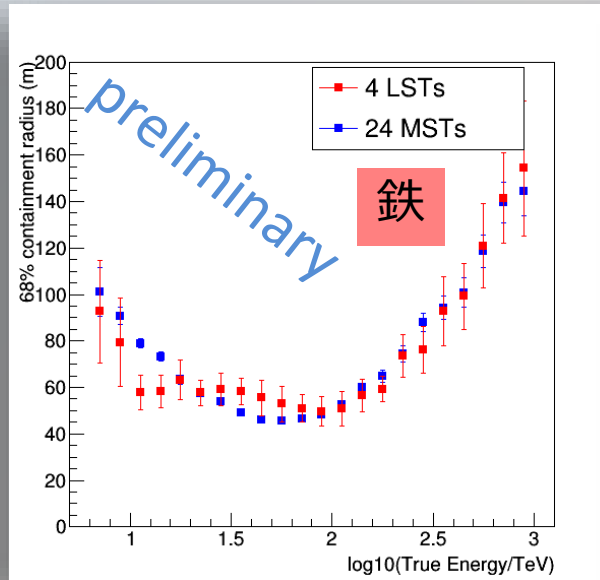
# シャワーイベント抽出時のイメージクリーニングと鉄粒子に対する到来方向・コア位置再構築精度

- イメージ解析に使用するピクセル光量は時間方向(サンプリングピッチ: LST 1GHz, MST 500Mz)に積分したものを使用 (将来的には改善が必要)
- 個々のピクセルの信号ピーク時刻の前後 16ns を積分
- Direct Cherenkov発光のエネルギーしきい値(~20 TeV) を考慮し、解析の初段の image-cleaningのpixel光量しきい値をガンマ線解析と比較して高く設定(LST 100p.e./200p.e., MST 50p.e./100p.e)
- しきい値を高く設定することで、望遠鏡近傍を通るミュオン由来のチェレンコフ光などを排除し角度分解能を向上させることが可能

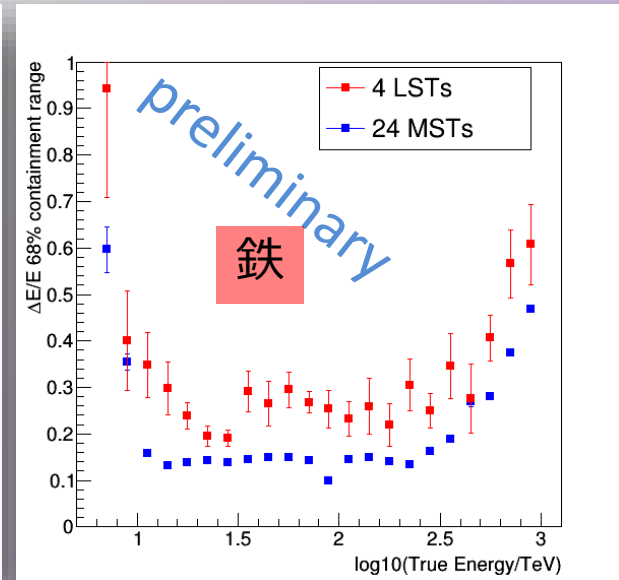
## 到来方向分解能



## コア位置分解能



## エネルギー分解能



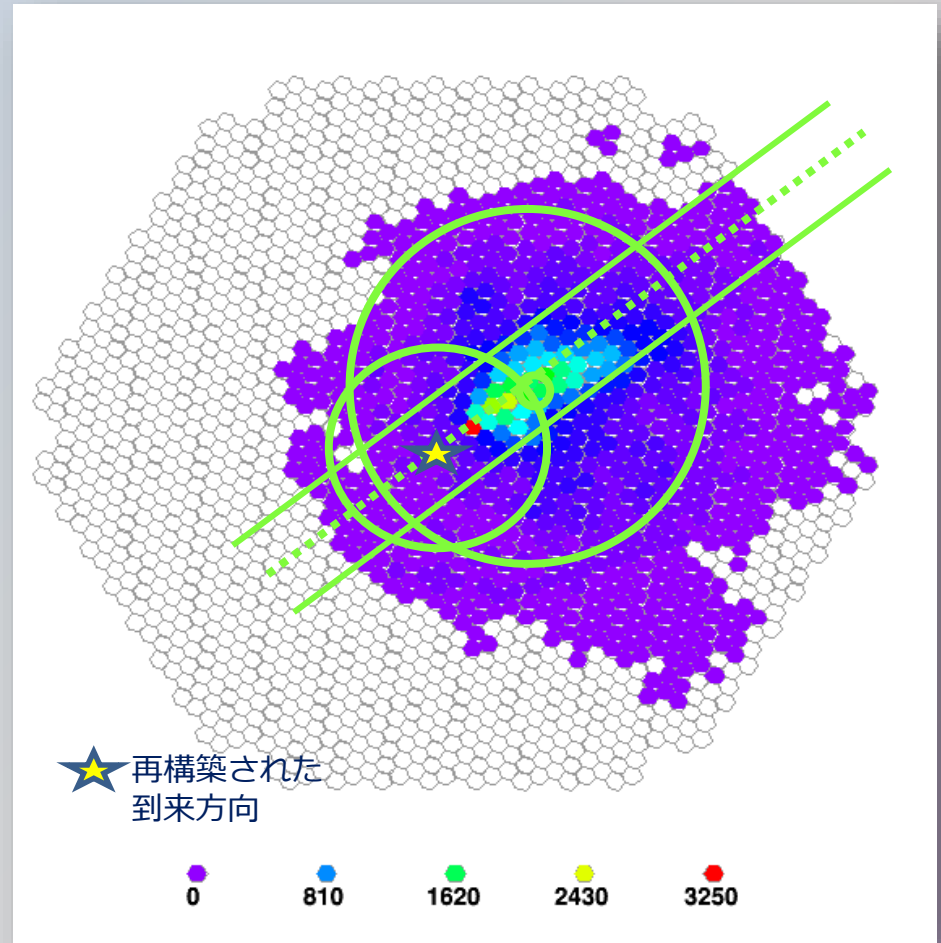


# Direct Cherenkov 光event抽出の解析手法: H.E.S.S.の場合

Parameter	Cut Condition
$Q_{DC}$	$< 0.14 \ln \left( \frac{I_{tot}[p.e.]/161}{\cos(\theta)} \right)$
$\Delta_{DC}^{dir}$	$< 0^\circ.45$
$\Delta_{DC}^{cog}$	$> 0^\circ.17$ $< 0^\circ.91$
$\Delta_{DC}^\perp$	$< 0^\circ.23$
$R_{core}$	$< 40m$ $> 170m$
$I_{DC-pixel}$	$< 2500 \text{ p.e.}$

- Direct Cherenkov pixelの探索対象となる望遠鏡・カメラ面内領域の選択パラメータ
- 赤枠内のみHESSの値をそのまま使用

$$Q_{DC} = \frac{I_{max.neighb.}}{I_{pixel}}$$

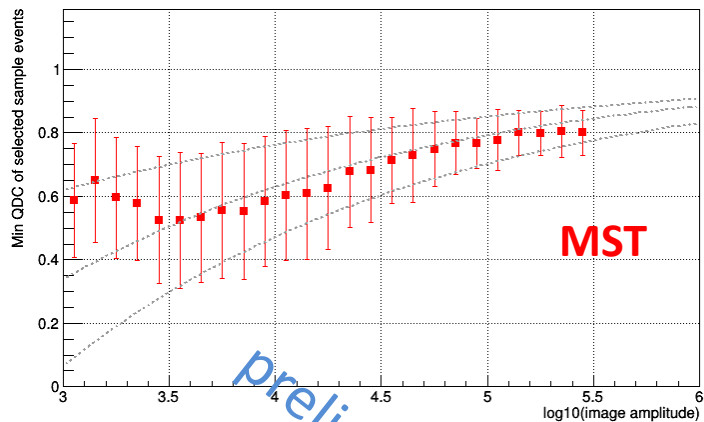


- ◆ 選択領域の中で最も小さい $Q_{DC}$ を持つピクセルを DC-pixelと同定。 $Q_{DC}$ の値でカットをかけて鉄イベントを選別
- ◆ これらの条件を満たす望遠鏡が最低2台あることを要求

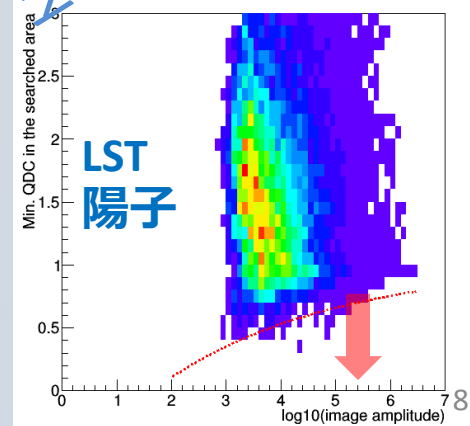
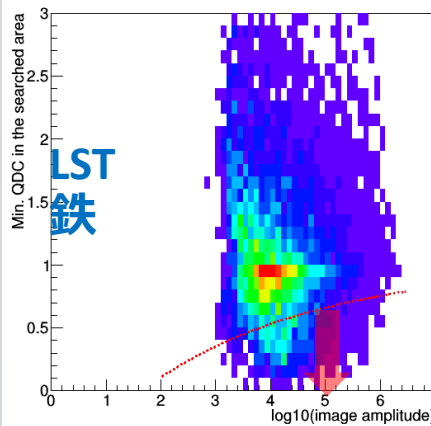
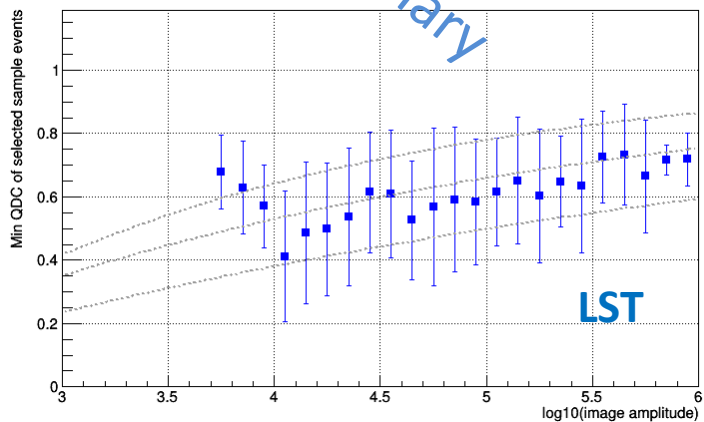
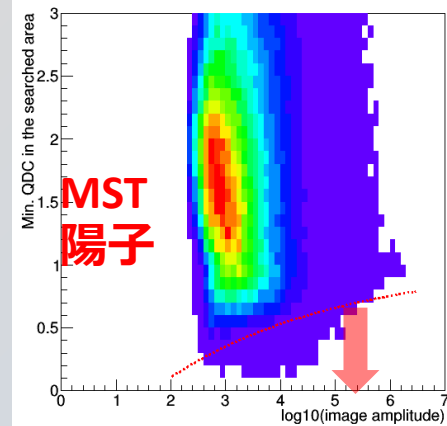
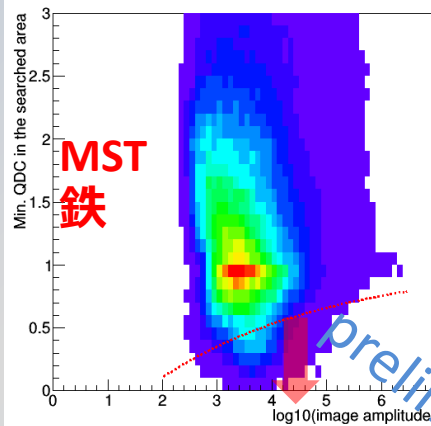
# $Q_{DC}$ cut value

- First interaction heightとエネルギーの値からDC発光条件を満たすイベントサンプルを選択しmin $Q_{DC}$ の分布からカット値を求める

鉄DC発光サンプルに対する  
min.  $Q_{DC}$ 分布



全イベントサンプルに対する  
min.  $Q_{DC}$ 分布





# H.E.S.S. like解析で期待される宇宙線Fe/pの検出数 (MST)

計算に使用した微分フラックス

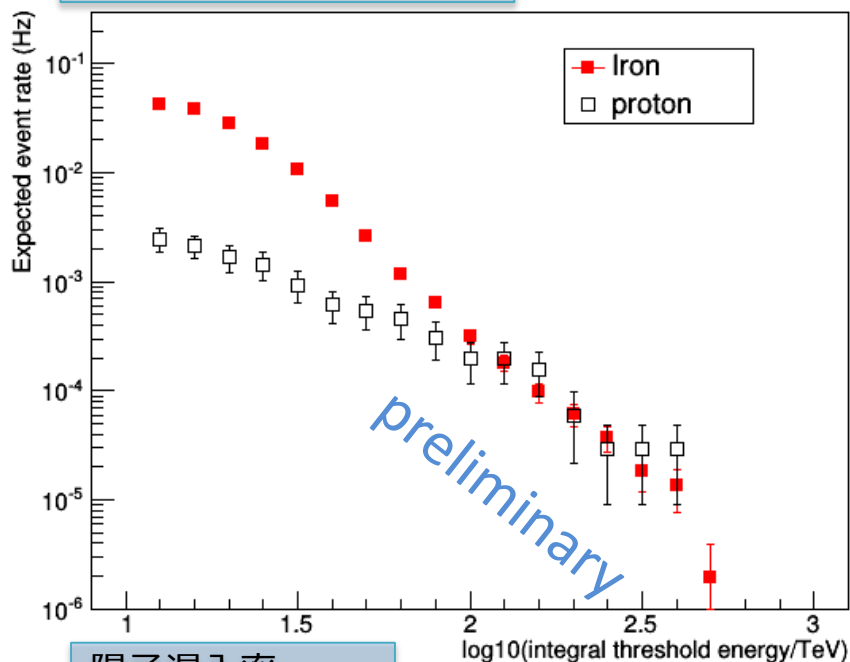
$$I_{Fe} = (2.2 \pm 0.9) \times 10^{-2} (E/TeV)^{-2.62}$$

(Aharonian et al. 2007)

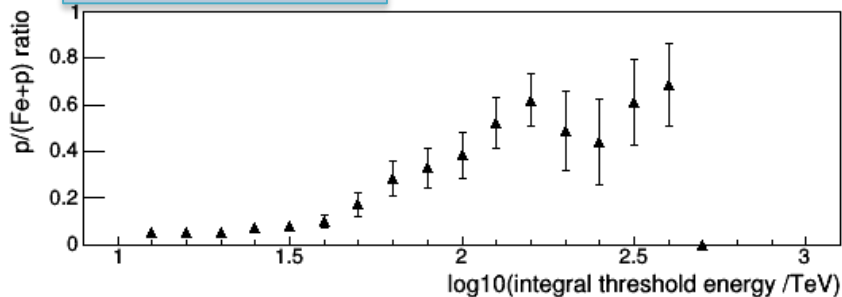
$$I_p = 8.95 \times 10^{-2} (E/TeV)^{-2.7} \quad (/m^2/sec/str/TeV)$$

- 50時間観測,  $E > 20$  TeVで期待されるイベント数は  $5.1 \times 10^3$
- 100TeV超領域で陽子の混入率が高く解析のチューニングが必要

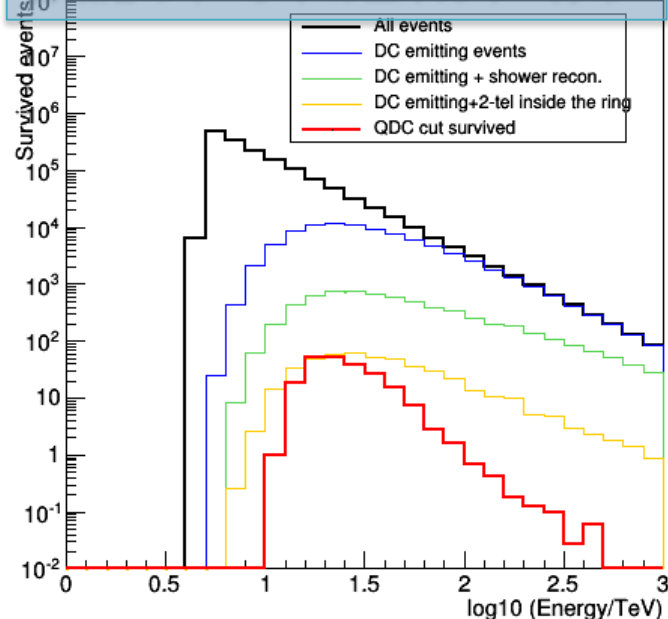
積分イベントレート



陽子混入率

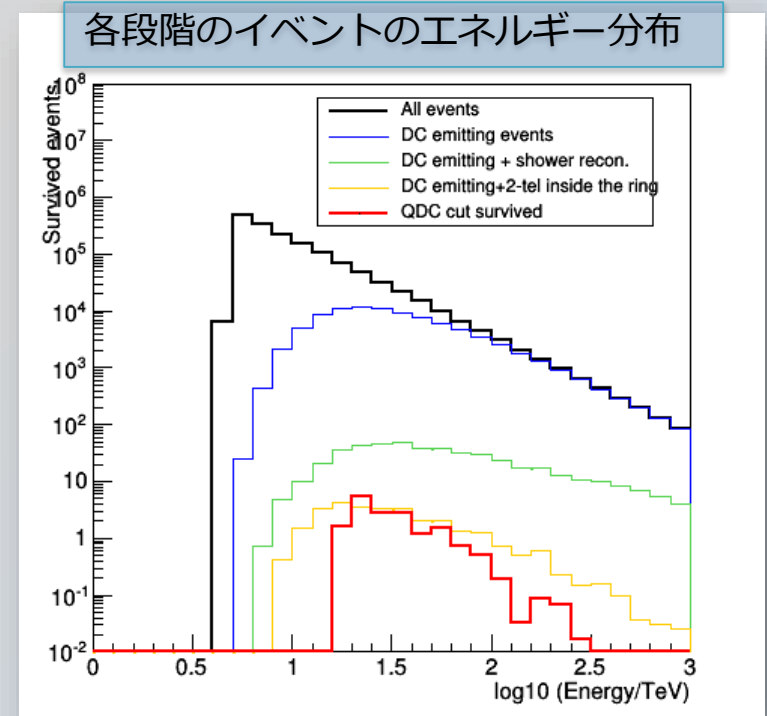
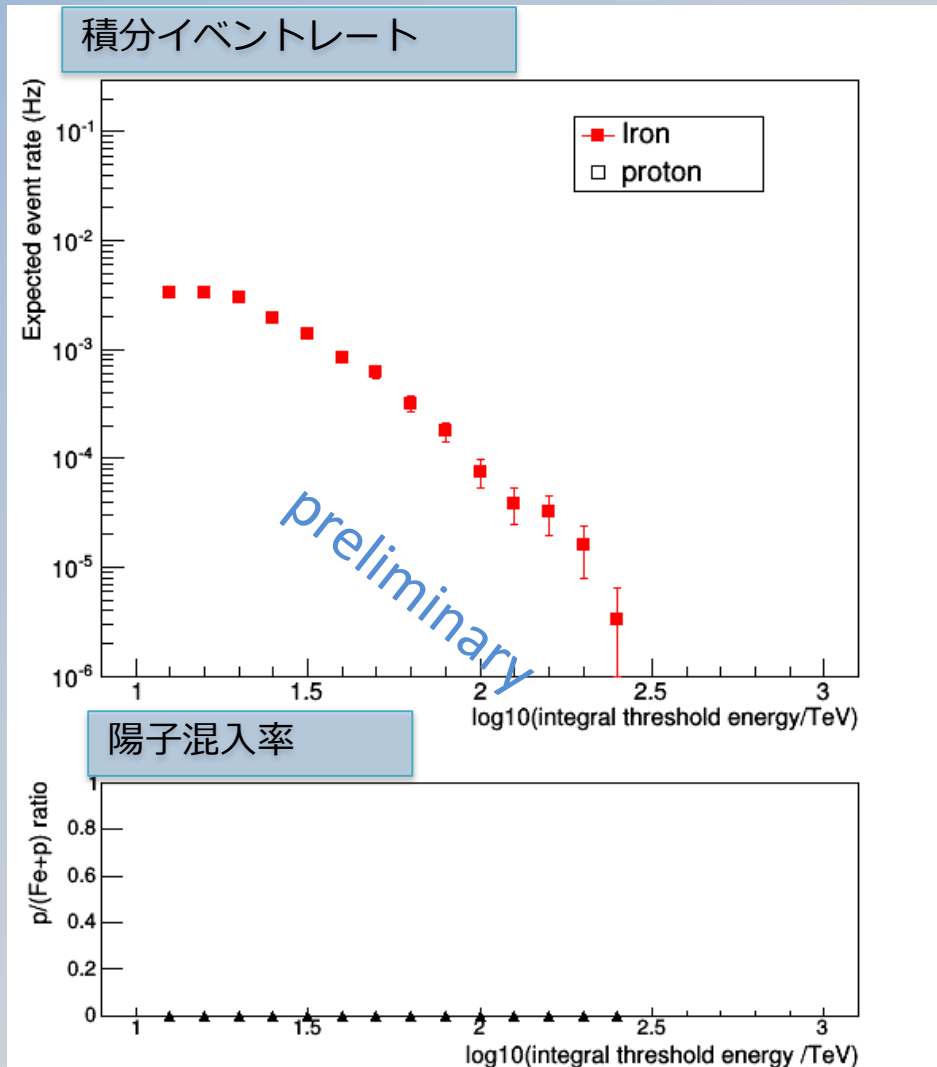


各段階のイベントのエネルギー分布



# H.E.S.S. like解析で期待される宇宙線 Fe/pの検出数 (LST)

- MSTと比較し台数が少なく有効面積が減る
- 陽子の除去率は高い。現状のデータ統計で陽子の混入はゼロ
- 50 時間観測,  $E > 20 \text{ TeV}$  で期待されるイベント数は  $5.4 \times 10^2$  events と推定



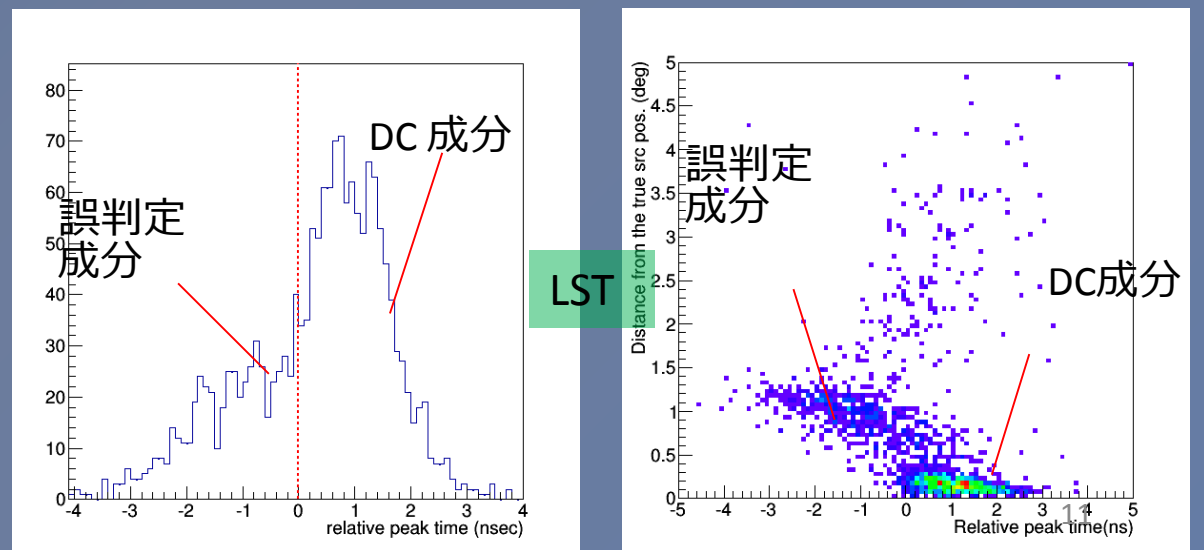
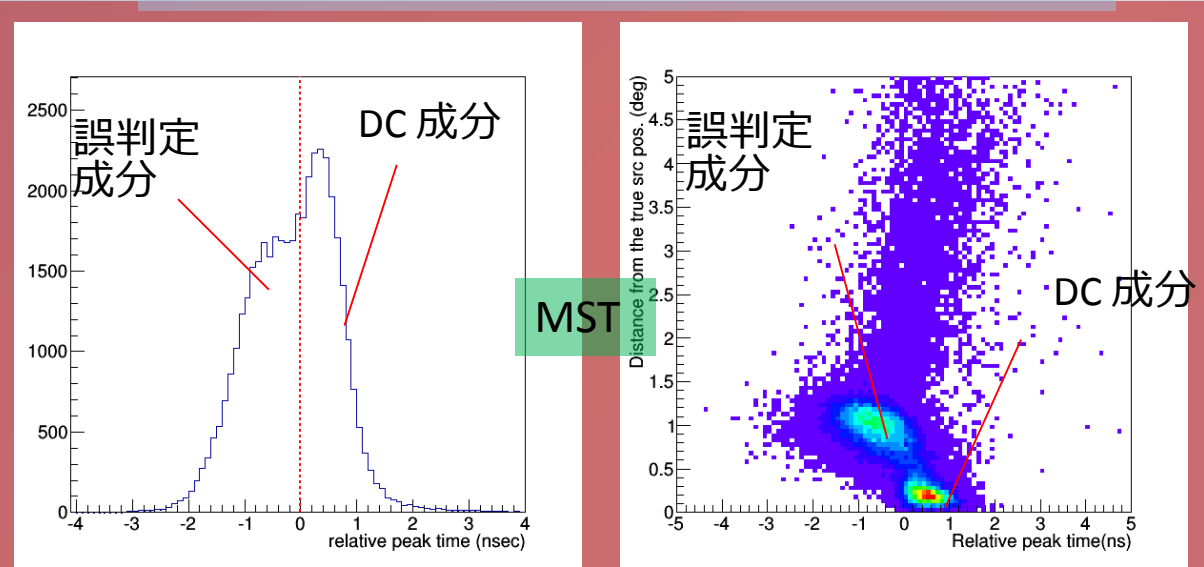
# DC光の到来時刻の特性

DC発光イベントサンプルのDCピクセルタイミング分布・シャワー軸との距離との関係

- Direct Cherenkov光はシャワー粒子より上空で生成されるため、地上への到達時間がシャワー極大からのチェレンコフ光と比較して数nsec遅れる

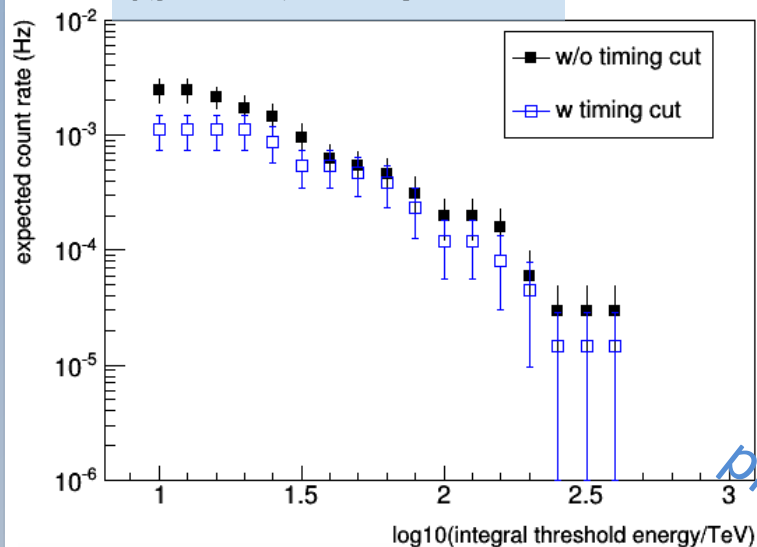
- 実際に検出される信号のピーク時刻の差には、反射鏡の光路差の効果も含まれる

- MST/LST反射鏡での反射後でもDC光ピクセルのピーク時刻の遅延の特性は認識できる

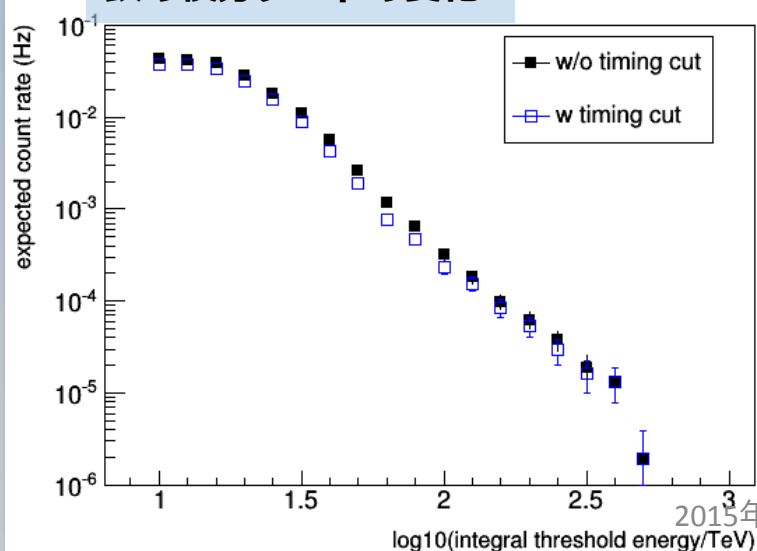


# Timing cutの導入の効果(MST)

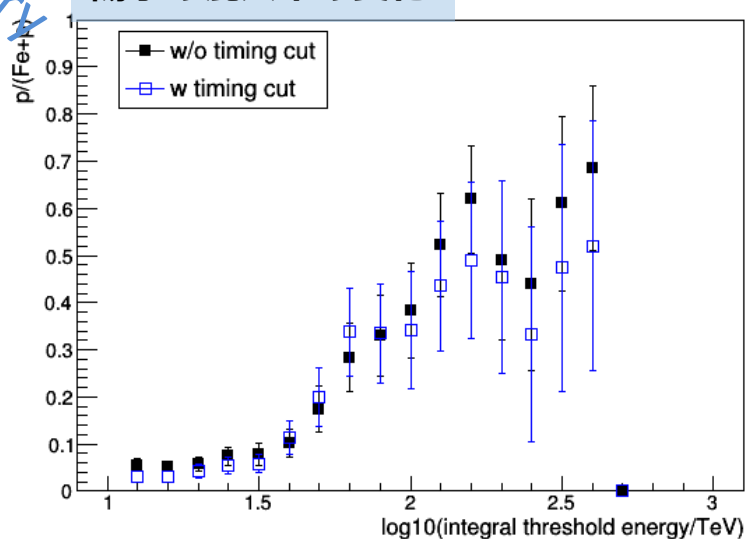
## 陽子の積分レートの変化



## 鉄の積分レートの変化



## 陽子の混入率の変化



- DC (min QDC) pixelの探索条件に信号ピーク時刻を追加：

$$t_i > \frac{1}{N} \sum t_i \text{ (ピーク時刻平均)}$$

- 雑音陽子を低減し、陽子混入率を下げる効果があるが、特に $E > 100$  TeVの高エネルギー領域ではピクセル光量の時間積分方法の調整と合わせた解析手法の改善が必要

# summary + 今後の予定

- CTAでのsub2A MST (24台)/LST(4台) アレイに対し、宇宙線鉄( $z=26$ )と陽子のデータを生成し、H.E.S.S paperを参考にした解析を適用した。
- $Q_{DC}$  cut後に残る鉄のイベント数は、観測時間50 hourとして $E > 20$  TeVで $5.1 \times 10^3$  (MST),  $5.4 \times 10^2$  (LST)と推定。H.E.S.S.観測では357 hourで1899 eventsであり、24台MSTではイベント数は一桁増加したことになる。
- MSTについてはat 20TeVで~6%程度の陽子の混入が見積もられ、 $E > 100$  TeV領域では陽子と鉄がcomparableになる。特に高エネルギー領域での鉄選択解析の改善が必要。
- DC光の到来時刻特性を利用したタイミングカットをテストした。陽子混入率を下げる傾向は見られているが、今後陽子データの統計量を改善し、より定量的な改善度の評価を行う。
- 今後、より現実的な装置記述を取り入れて改善されたシミュレーションツールprod3を用いて鉄( $z=26$ )の電荷分解能の評価を行い、またSi( $z=14$ )などのより軽い元素についても同様の検討を行う予定。