

CTA 報告78: 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

大石 理子, 井川大地^A, 石尾一馬, 荻野桃子, 櫛田淳子^A, 郡司修一^B,
小島拓実, 斎藤隆之^C, 榊直人^D, 西嶋恭司^A, 平井亘^A, 増田周^C,
吉越貴紀 他 CTA-JAPAN コンソーシアム

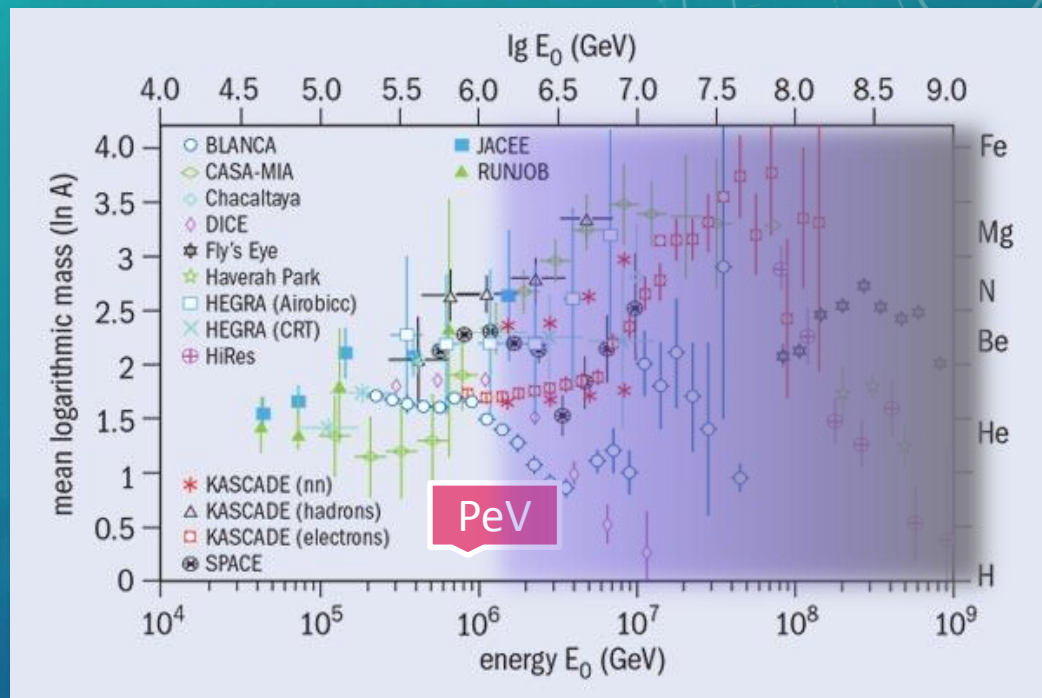
東大宇宙線研、東海大理^A、山形大理^B、京大理^C、KIT^D

Outline

- ◆ PeV領域近傍の宇宙線化学組成計測
- ◆ Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理
- ◆ DC検出手法とハドロン相互作用モデルの影響
- ◆ 過去のIACTでの測定結果
- ◆ CTAでのDirect Cherenkov光観測
 - シミュレーション中での大気モデル
 - シミュレーション中でのアレイ配置
 - Direct Cherenkov光イベントの選別方法:H.E.S.S. 解析
 - Direct Cherenkov光ピクセルのタイミング特性
 - 鉄テストデータへのH.E.S.S. like解析条件の適用
- ◆ まとめと今後の課題

PeV領域近傍の宇宙線化学組成計測

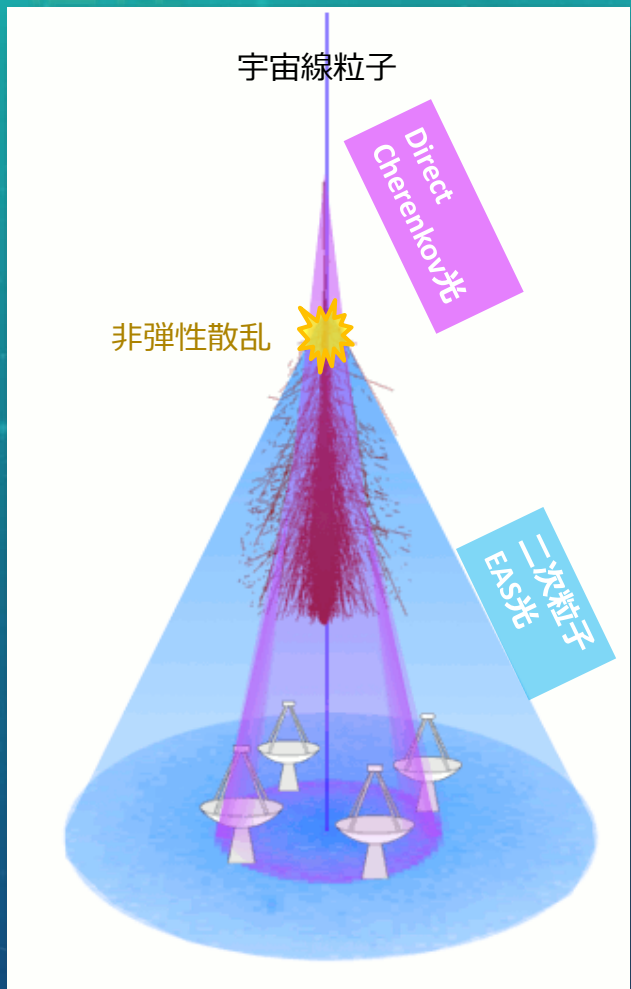
- ◆ 宇宙線スペクトルの3PeV近傍”knee”構造が系内天体での加速限界の反映であるならば、エネルギーが高くなるにつれ電荷の大きい重い元素の比率が増加すると予想される
- ◆ PeV近傍の重元素スペクトル計測は、低エネルギー(<~PeV)領域は飛行体によって、高エネルギー(>~PeV)領域は空気シャワーアレイ実験によって担われている
- ◆ 化学組成の測定結果は実験ごとにばらつきが大きいのが現状



<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



- ◆ 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:

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

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad \cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- ◆ 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

地上望遠鏡を使用したDirect Cherenkov光検出手法の概要

Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理 (2)

◆ DC光の焦点面検出器上での形状

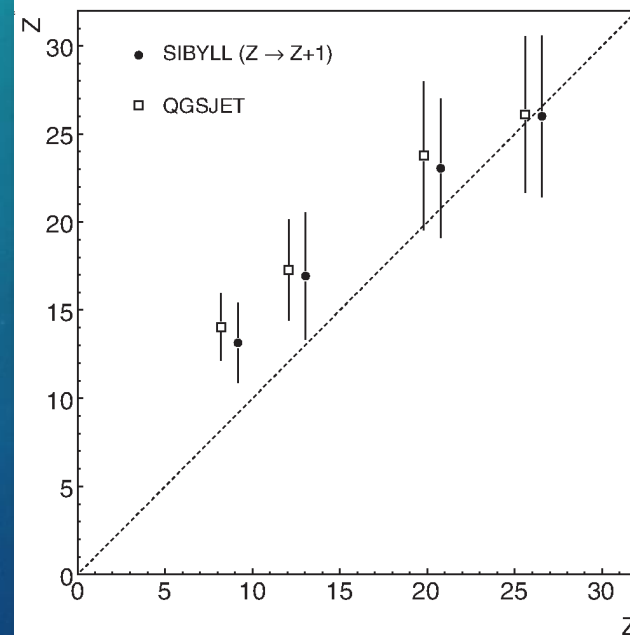


◆ 親粒子のエネルギー決定は二次粒子シャワー由来のEASチェレンコフ光量を用いて行われる。
(光量 \propto エネルギーの関係性)

◆ DC光とEAS光は上記のように焦点面上で分離した位置関係にないため、高エネルギー側ではEASチェレンコフ光がDCチェレンコフ光の測光に対して雑音となる。→測定可能エネルギーの上限の決定要素(~ 1 PeV)

◆ チェレンコフ光の空間的・時間的分解能向上は雑音と信号の分離に有用に働く

H.E.S.S.望遠鏡仕様でのシミュレーションによる 実電荷・再構築電荷との関係



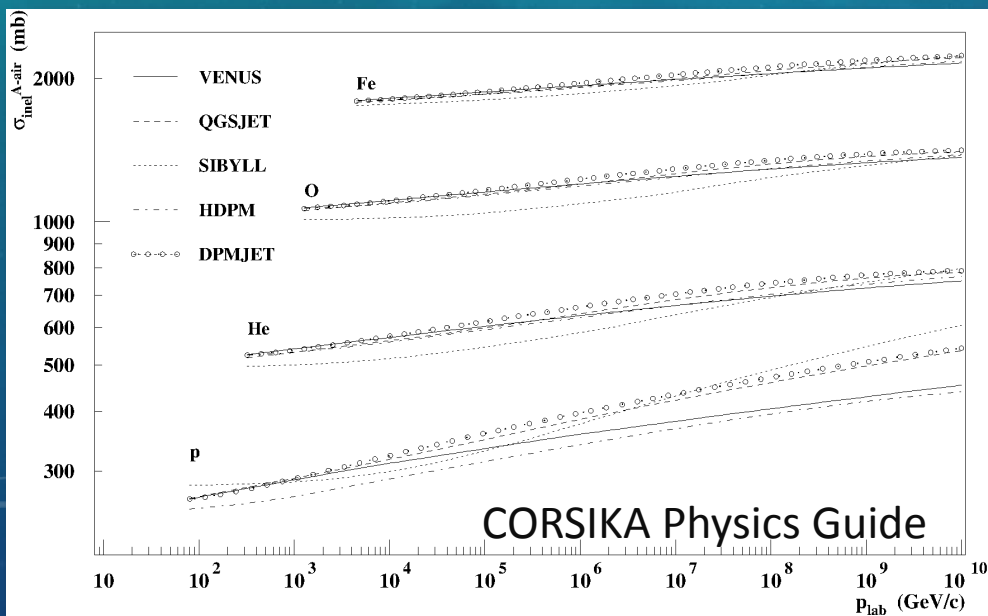
Aharonian et al., (2007)

IACTはガンマ線シャワー観測に最適化された装置であり、電荷分解能はこの装置特性に大きく影響を受ける

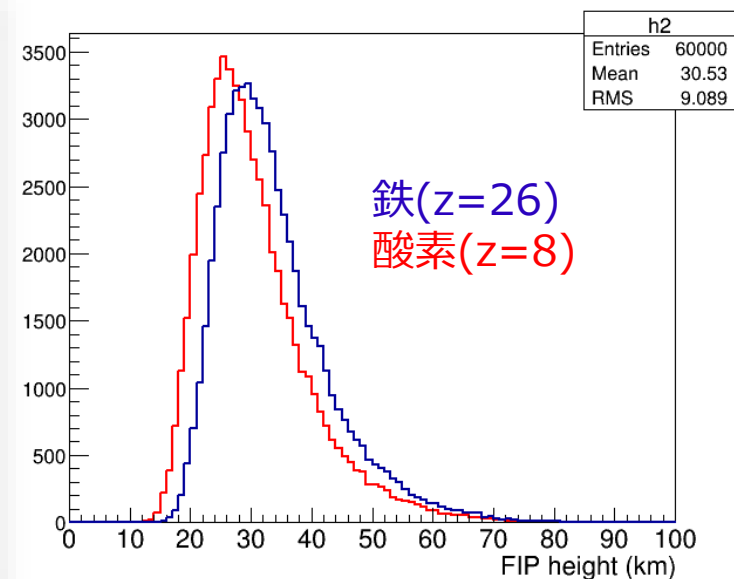
DC検出手法とハドロン相互作用モデルの影響

- ◆ **エネルギー推定**はEAS光を使用するため、シミュレーション中のハドロン相互作用モデルの不定性の影響を受ける
- ◆ Direct Cherenkov光放出は非弾性散乱を起こした時点で終了する
→ **有効面積の推定**はシミュレーション中の非弾性散乱断面積の不定性の影響を受ける
- ◆ CTAでのhadron interaction modelのデフォルト設定は (>80GeV /nucleonの領域で) **QGSJET-II-03**

QGSJET のAir-宇宙線原子核の非弾性散乱断面積



左記断面積と大気モデル（後述）を用いて計算された First interaction height 分布

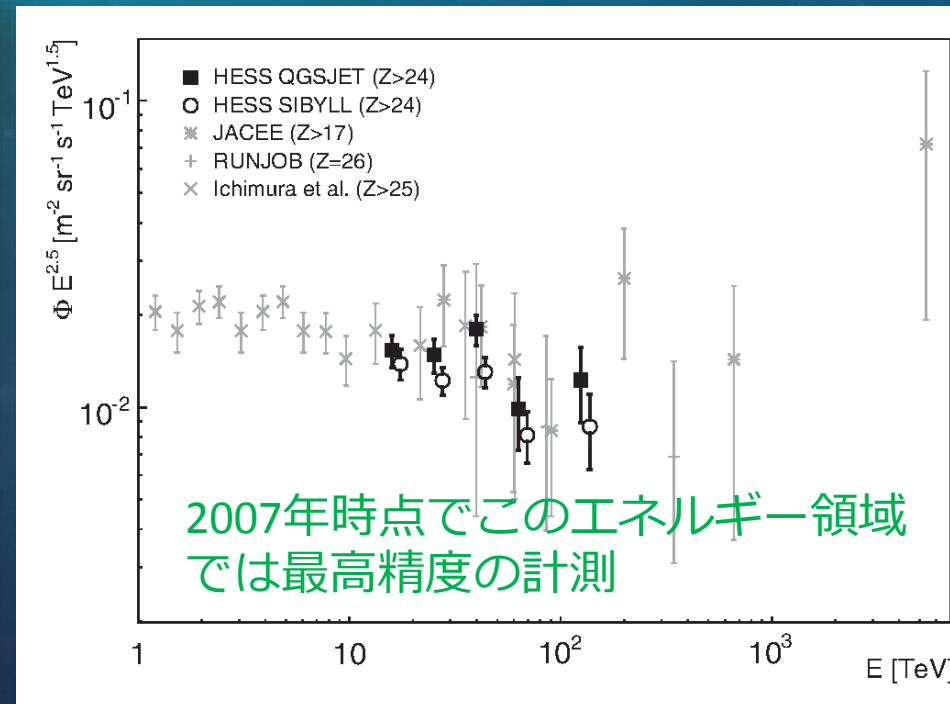
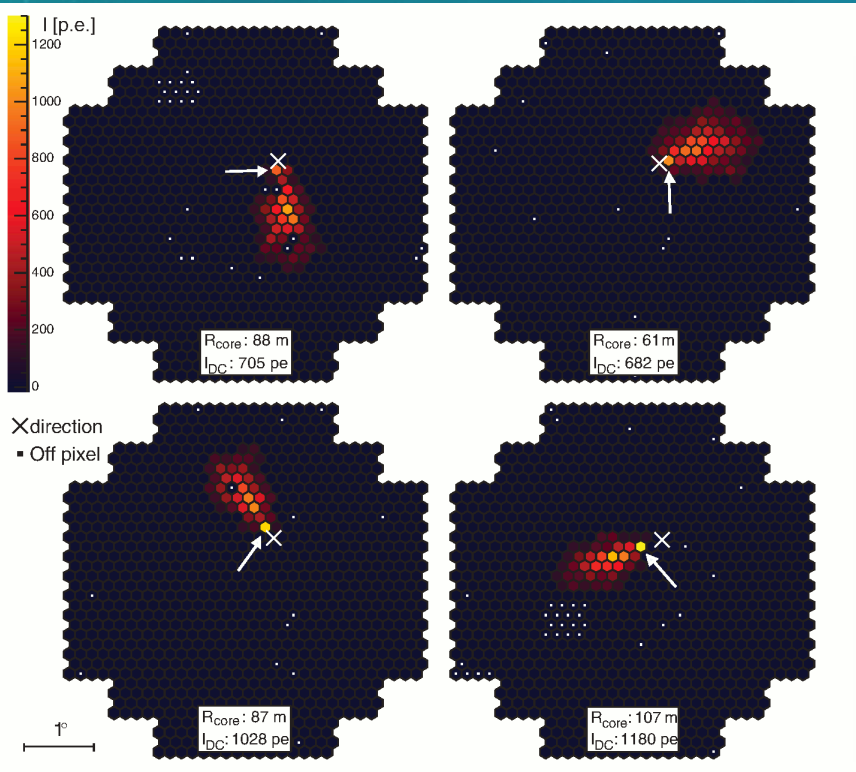


過去のIACTでの測定結果

- ◆ H.E.S.S.による観測 Aharonian et al., Phys. Rev. D 75 042004 (2007)
- ◆ 12m口径望遠鏡4台の系
- ◆ 2004年-2006年に取得されたデータのうち $z < 22$ degのものを選択
→ 正味観測時間 357 hours, DC event 解析 (後述) 後 1899 events

4台のH.E.S.S.望遠鏡に同時にDirect Cherenkovが入ったイベント例

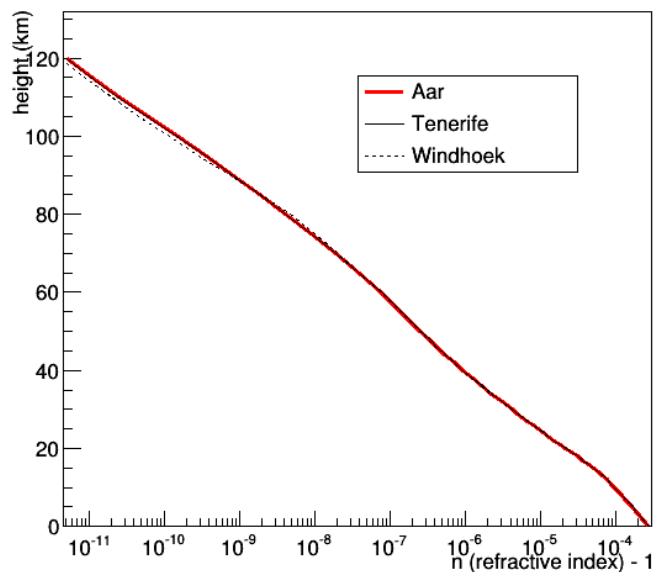
H.E.S.S.によるsub-PeV領域の鉄スペクトルの測定結果と飛翔体実験結果の比較



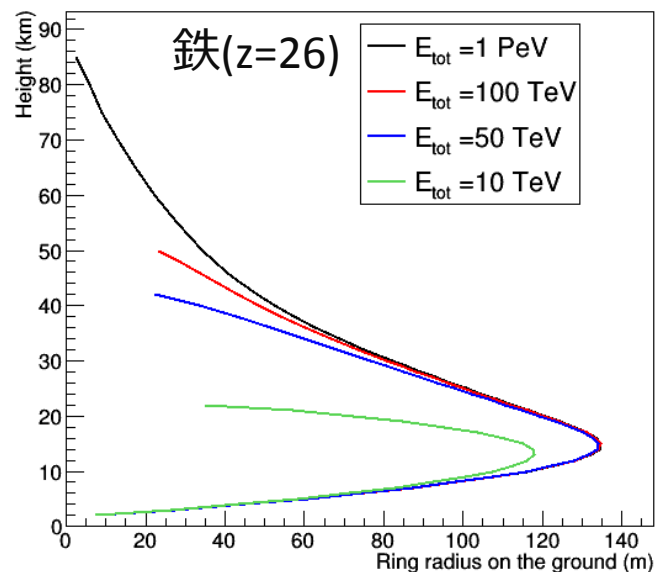
CTAでのDirect Cherenkov観測:大気モデル

- ◆ CTAのシミュレーションコードはCORSIKAに**装置記述部**(sim_telarray)を組み合わせたもの
- ◆ CORSIKAに候補サイトごとに**外部**大気モデルを取り込んでいる
- ◆ 海拔 0-30kmまでは1km刻み、30-50kmは2km刻み、50-120kmは5km刻みのデータをinterpolation
- ◆ CORSIKA中のCherenkov光発光高度の刻みは $h > 10\text{km}$ の領域で約12cmと細かい

外部大気モデル中の屈折率と海拔高度の設定値



Aarの大気モデル下でのDirect Cherenkov光の発生高度と地表面(1640m a.s.l.)でのリング半径の関係

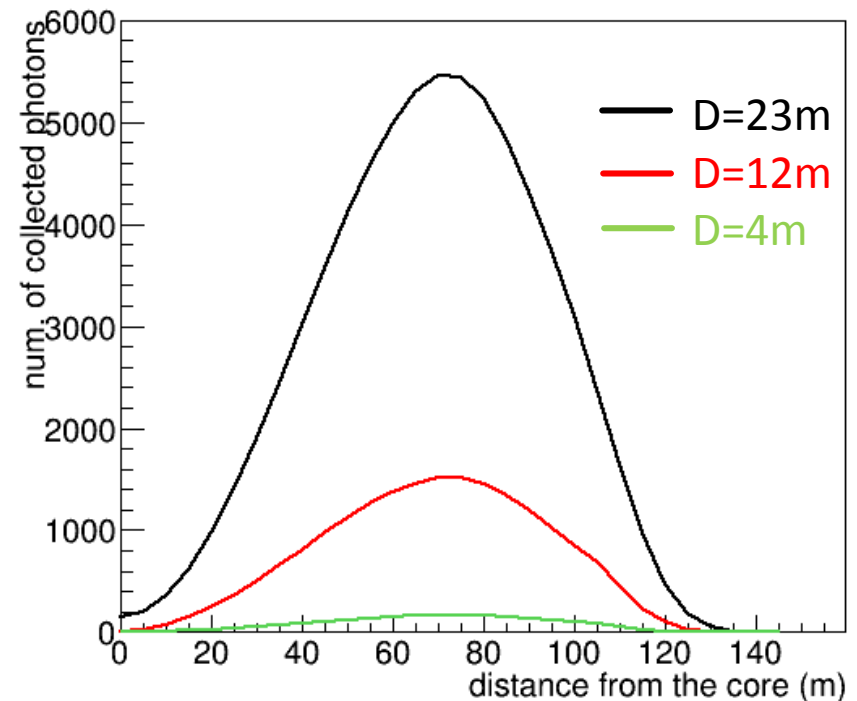
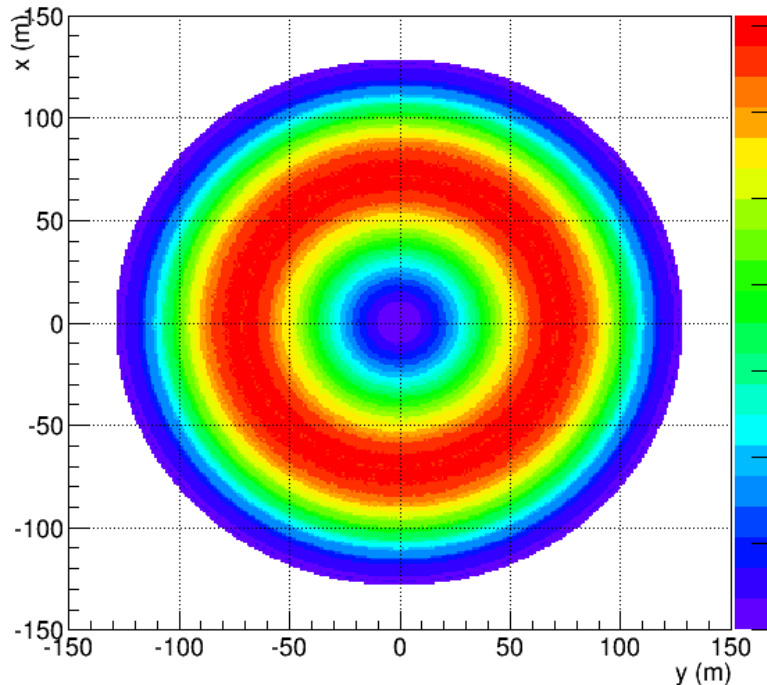


CTAでのDirect Cherenkov観測：大気モデル(2)

- ◆ Direct Cherenkov放射部分のみを取り扱うsimpleなsimulatorを作つて光量を試算

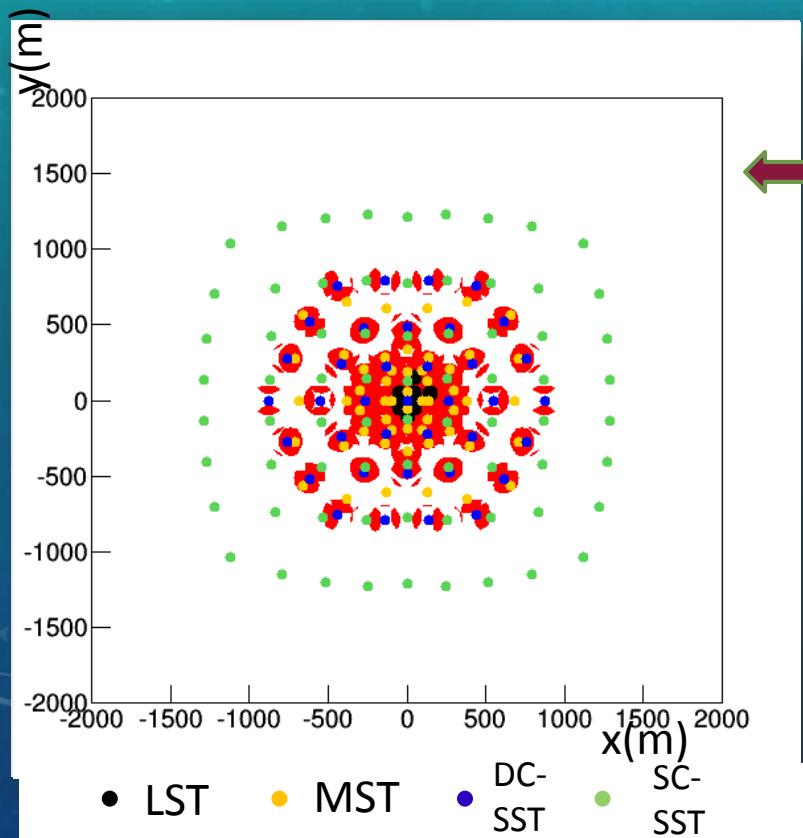
First interaction pointの分布を取り込んだ地表面でのDirect Cherenkov光の積算分布(Iron $z=26$, E冪乗スペクトル)

コア位置からの距離と一定半径円内で積分した光量 (Iron, 17TeV)



CTAでのDirect Cherekov光観測：アレイ配置

- ◆ CTAアレイの構成の詳細 → 前の講演
- ◆ MST(中口径望遠鏡)がH.E.S.S.望遠鏡のサイズに相当 台数4 → 25
→ 有効面積の拡大
- ◆ LST(大口径望遠鏡)の23m反射鏡 → 集光力はH.E.S.S.の3.6倍、より軽い
元素(Siなど) の検出確率が向上する



CTAのシミュレーションコード("Production 2" Phase) 中での望遠鏡配置 (複数のアレイ候補の重ね合わせ)

*一部の望遠鏡は省略されている

この配置でのテスト生成データ(z=20 deg)

Parameter	Set value
Site	Aar (1640m a.s.l.)
Particle	Iron (z=26, A=56)
Energy	5TeV – 1 PeV, power-law(-2.0)
Core scatter area	<850m
Arrival direction	0°-10° uniform

CTA-LST/MSTでのDCイベント例(50TeV)

LST

MST

CTA Telescope Simulation

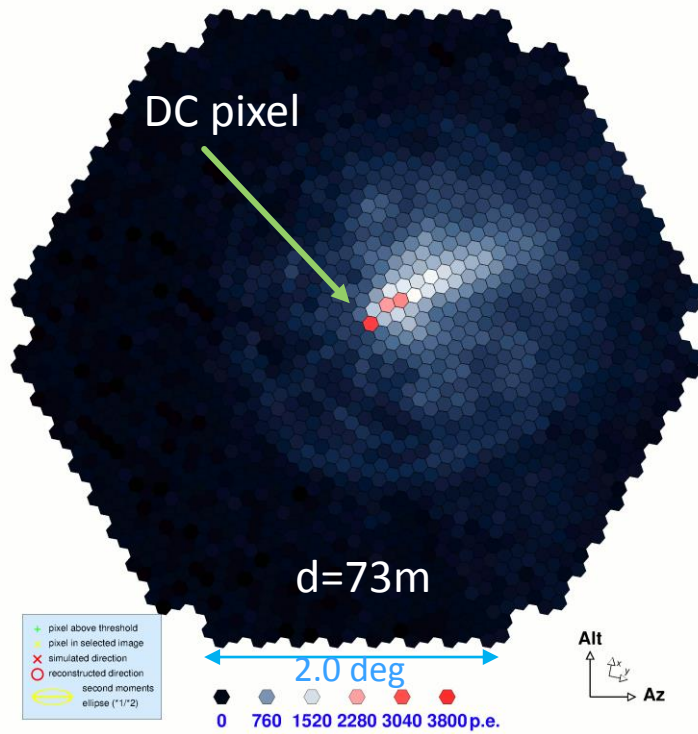
Run 10, event 1, array 0, telescope 1

Number of triggered pixels: 914 of 1855

Number of pixels after cleaning: 849

Number of significant pixels: 1855

Sum of signals in 849 selected pixels: 129293.5 p.e.



Primary: type 5626 of 50.000 TeV energy at 73 m distance

CTA Telescope Simulation

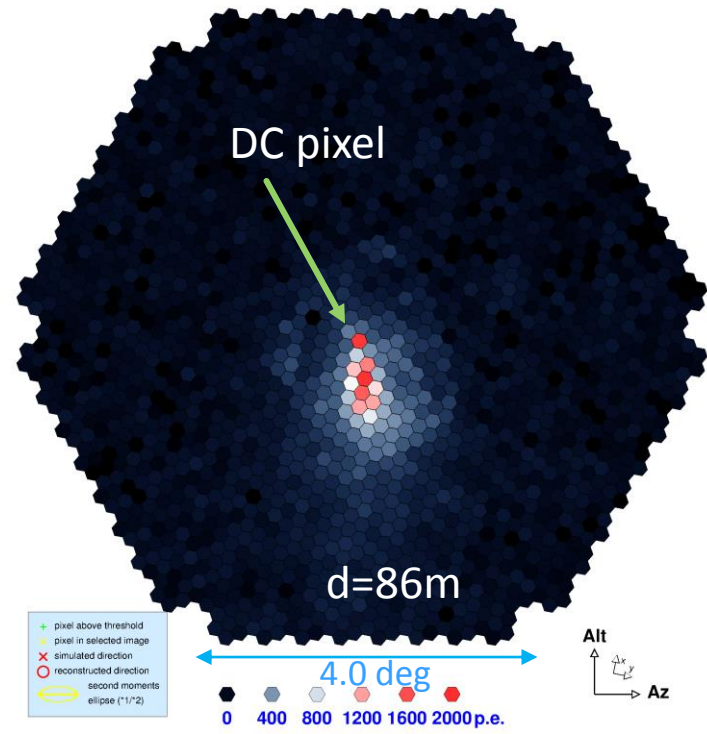
Run 10, event 9, array 11, telescope 10

Number of triggered pixels: 325 of 1855

Number of pixels after cleaning: 291

Number of significant pixels: 1855

Sum of signals in 291 selected pixels: 35333.7 p.e.

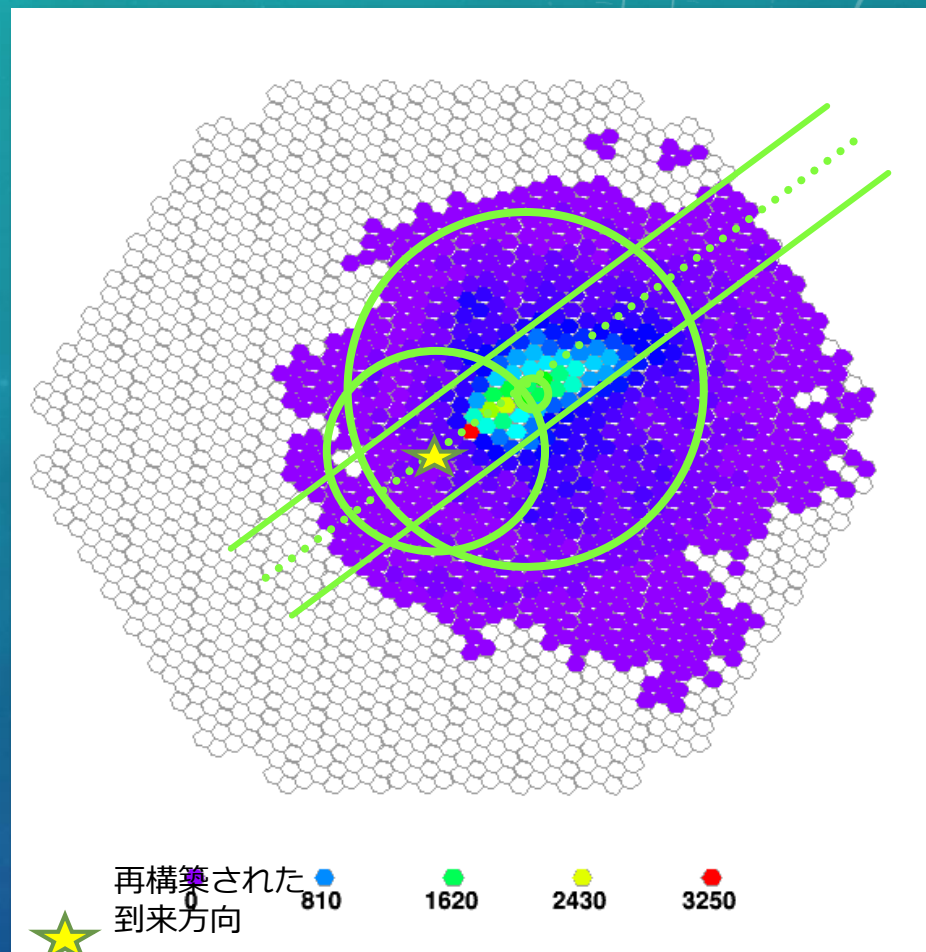


Primary: type 5626 of 50.000 TeV energy at 86 m distance

Direct Cherenkov eventの選別方法: H.E.S.S.の場合

Image cleaning後 aspect ratio
(=image_width/image_length)<0.75の
イベントを選択

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



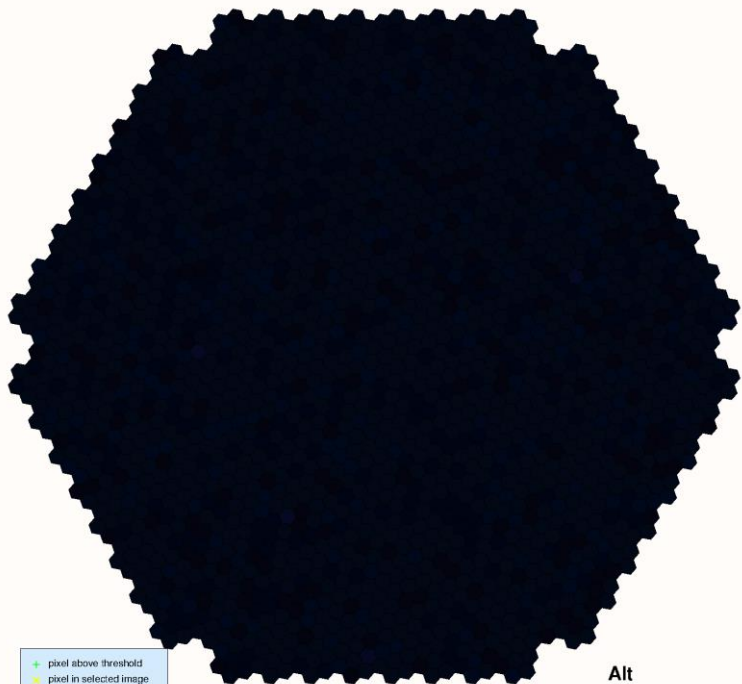
$$Q_{DC} = \frac{I_{max.neighb.}}{I_{pixel}}$$

- ◆ 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
- ◆ 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

Direct Cherenkov光pixelのタイミング特性

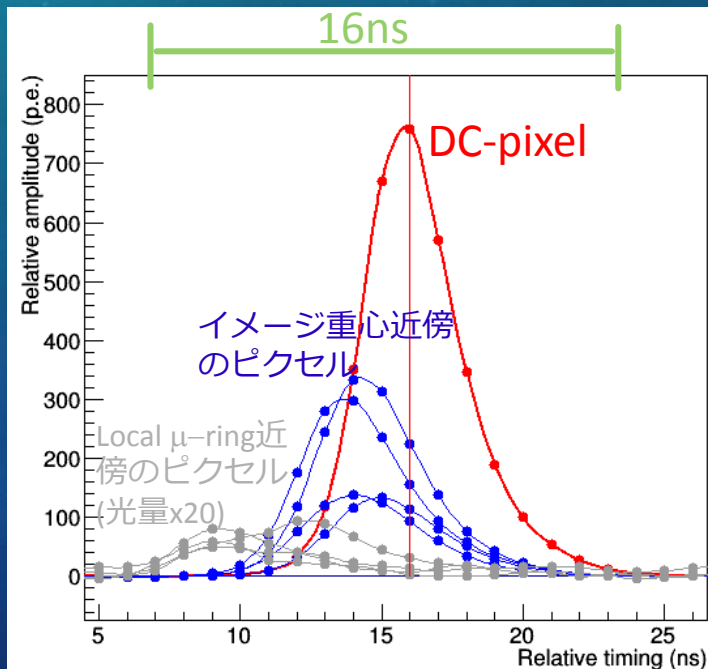
LSTに入ったDCイベントの各ピクセルの光量の時間推移

Number of triggered pixels: 914 of 1855
Number of pixels after cleaning: 849
Number of significant pixels: 1855
Sum of signals in 849 selected pixels: 129293.5 p.e.



- ◆ 大気上層部で放出されるDirect Cherenkov光はシャワー極大近傍で放出されるCherenkov光よりも~3ns遅れて地表に到達する特性がある
- ◆ H.E.S.S.のデータは16 ns間の積分で取得されていたため、この時間特性は利用されていない

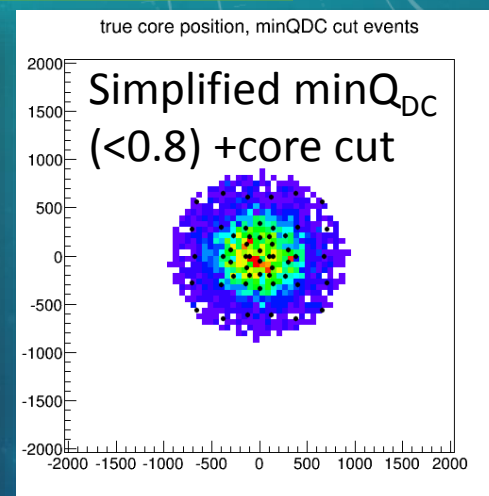
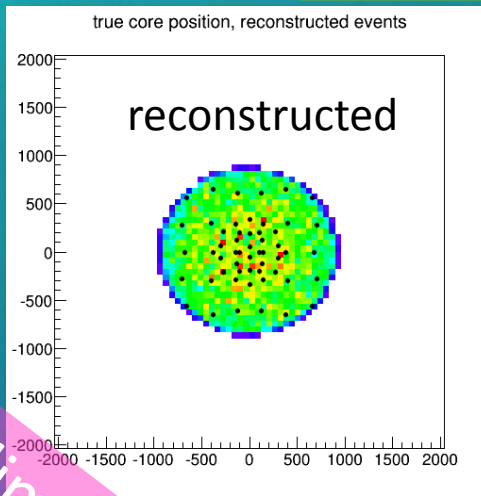
各ピクセルの光量の時間推移(2)



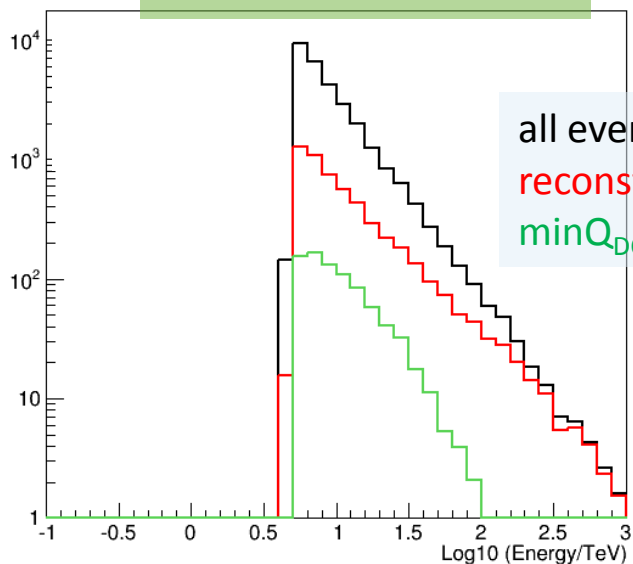
テスト鉄データへのhess like 解析条件の適用

- ◆ 前掲のテスト鉄データに H.E.S.S.like 解析のカットを適用
- ◆ $\min Q_{DC} < 0.8$ と簡略化
- ◆ Image cleaning 条件からはじまって、これからCTA仕様での解析パラメータのチューニングが必要

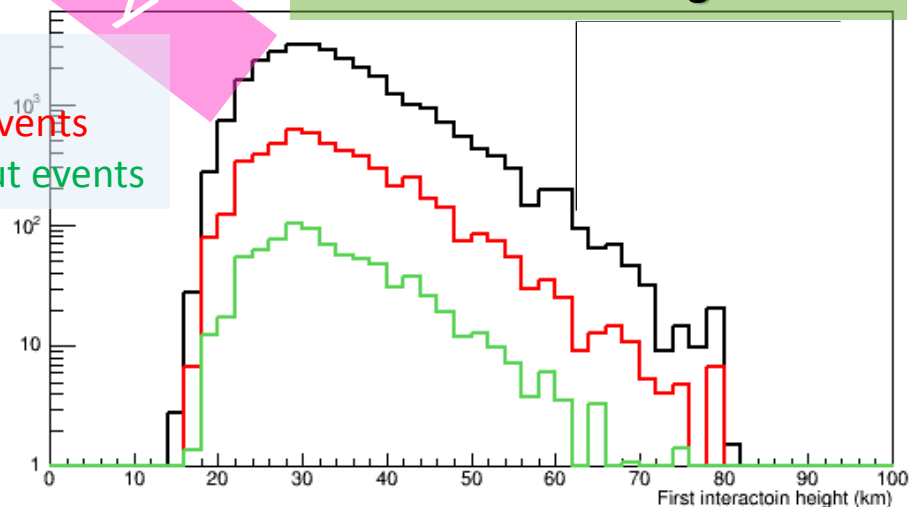
True Core position 分布



エネルギー分布



First interaction height 分布



Preliminary

まとめと今後の課題

- ◆ Direct Cherenkov光を利用したIACTでの宇宙線重元素スペクトル計測は、100TeV領域において現行装置(H.E.S.S.)での結果が飛翔体による直接計測結果と比較しても最も精度の良いものであり、有望な手法と言える。
- ◆ 次期計画CTAでは12mの中口径望遠鏡の数が増大することによりDC手法での鉄粒子検出の有効面積の増大が見込まれる。また、23mの大口径望遠鏡の集光力により、より軽いSiなどの原子核成分の検出感度も向上すると期待される。
- ◆ 今後H.E.S.S.の解析手法から発展させたCTA仕様の解析手法の開発が不可欠である。DC光イベントの高効率選択と背景陽子イベントの高効率排除を両立するevent selection, またDC光をEAS光分布から精度よく抽出する解析手法を確立する必要がある。
- ◆ チェレンコフ光子の到来タイミング情報の活用はこれらの解析手法の確立に有用である可能性があり、今後フルシミュレーションデータを用いたstudyを展開する予定である。