

CTA報告 104: 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(IV)

大石理子, 池野祐平^A, 稲田知大, 奥村暁^{B,C}, 片桐秀明^D, 櫛田淳子,
郡司修一^E, 斎藤隆之^F, 榊直人^G, Dang Viet Tan^D, 永吉勤^H, 西嶋恭司^A,
平井亘^A, 増田周^F, 松岡俊介, 吉越貴紀, 吉田龍生^D
他 CTA-Japan Consortium

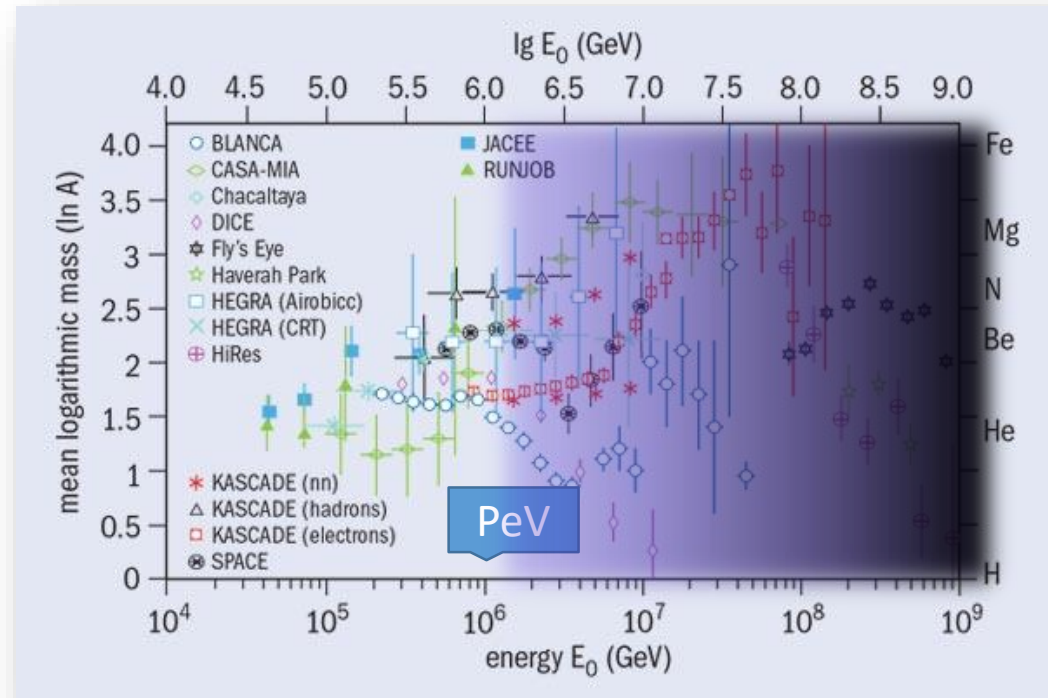
東大宇宙線研, 東海大理^A, 名大STE研^B, MPIK^C, 茨城大理^D, 山形大理^E,
京大理^F, 阪市大理^G, 埼玉大理^H

Outline

- Sub-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
- CTAアレイの配置(Prod3,Paranal)とMCシミュレーション
- データ解析の流れ
 - QGSJET-IIとSIBYLLのFirst interaction height/ X_{\max} の比較
 - 電荷再構築
 - 現状データでの再構築電荷ピーク
 - 電荷分解能に影響を与える要素：コア位置・到来方向再構成精度とシャワー光の漏れ込み
- まとめと今後

sub-PeV領域の宇宙線化学組成計測

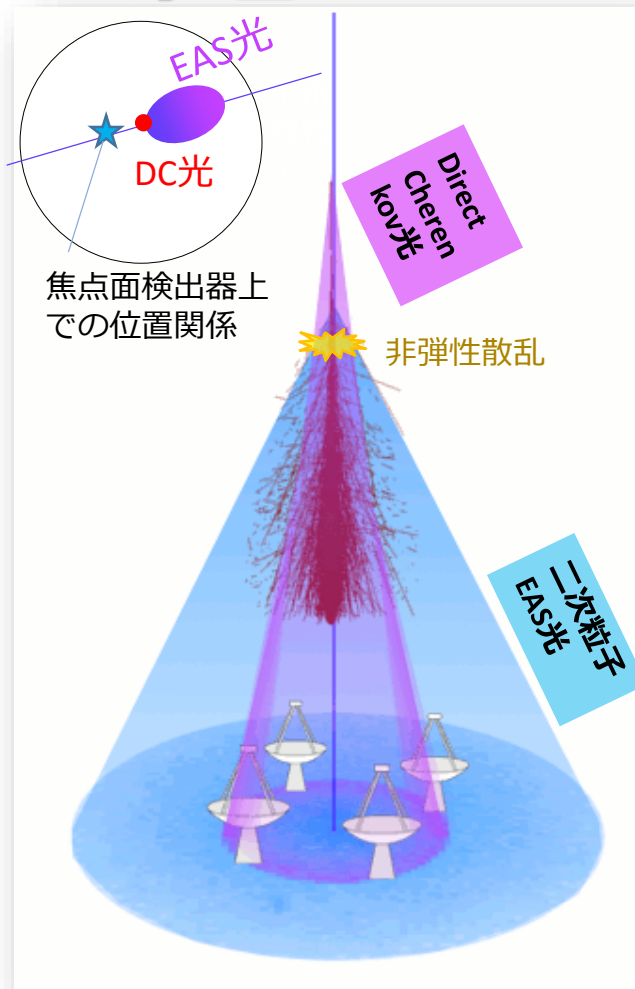
- 宇宙線スペクトルの3PeV近傍“knee”構造が系内天体での加速限界の反映であるならば、エネルギーが高くなるにつれ電荷の大きい重い元素の比率が増加すると予想される
- PeV近傍の重元素スペクトル計測は、低エネルギー (<~PeV)領域は飛翔体によって、高エネルギー(>~PeV)領域は空気シャワーアレイ実験によって担われている
- 化学組成の測定結果は実験ごとにばらつきが大きいのが現状



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

	電荷分解	有効面積
飛翔体	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:

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

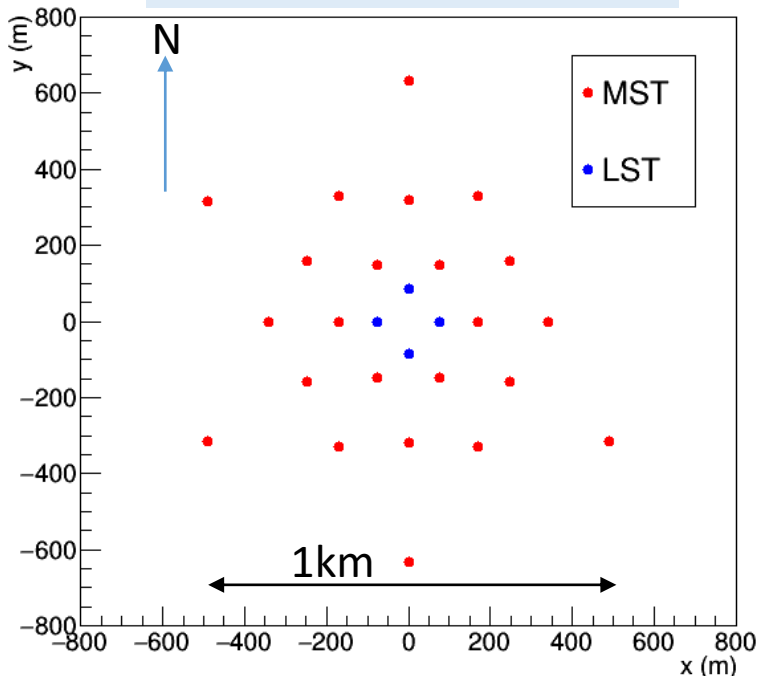
$$\alpha : \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad \cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- 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
- H.E.S.S.がこの手法を用いて計測した宇宙線鉄のスペクトル(13 TeV-200 TeV)を2007年に発表

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)を使用。
- 2015年にシミュレーションツールの新バージョン Production 3がリリースされた
→ 新たにデータ生成を行った。観測サイトはParanal (チリ、南天サイト)、アレイ配置は3HB1-3のMST(24台) +LST(4台)を選択(下図)
- 中口径望遠鏡の二種類の検出器(FlashCam, NectarCam) のうち、信号サンプリングレートが速いNectarCam(1GHz)を解析に使用。
- CORSIKAの中で使用されるハドロン相互作用モデルは2種類(QGSJET-II-03, SIBYLL2.1)をテストした。

アレイ配置(3HB1-3)



	鉄(z=26)	陽子(z=1)
サイト	Paranal, Chile	
天頂角	z= 20 deg	
角度範囲	0-10 deg	
コア半径	2000 m	
べき指数	-2.0	
エネルギー帯	5 TeV - 1 PeV	1 TeV - 1 PeV

他にHe, C, O, Mg, Ne, Si(Z=2,6,8,10,12,14)のデータも生成

データ解析の流れ

望遠鏡抽出・ピクセル信号の時間積分

解析パラメータ：抽出する望遠鏡の選択・時間積分の幅と開始時刻

シャワーイベント選定

解析パラメータ：ピクセル信号量しきい値・ピクセル本数

シャワー選定条件を満たさないイベントは排除

エネルギー・到来方向・コア位置決定

解析パラメータ：到来方向再構築法・エネルギー構築法

エネルギー条件を満たさないイベントは排除

Direct Cherenkov (DC) pixel 探索・DCイベント選択

解析パラメータ：ピクセル探索エリアの設定・カット値の設定

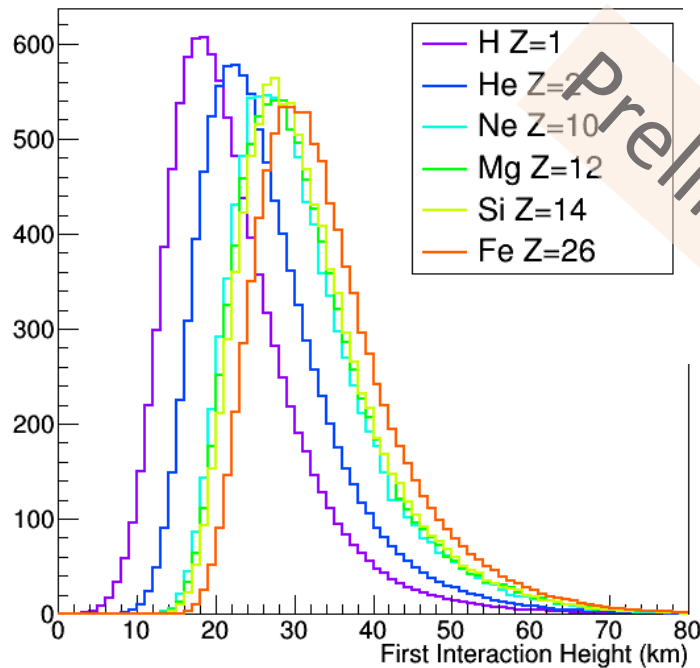
有意なDC pixelが見つからないイベントを排除

電荷再構築

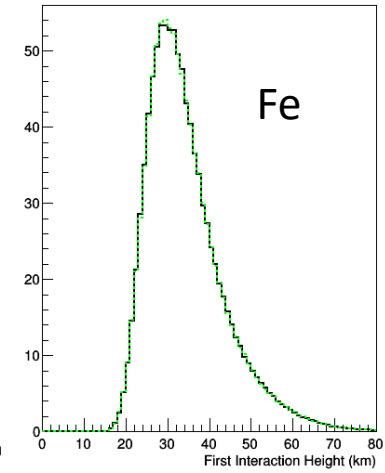
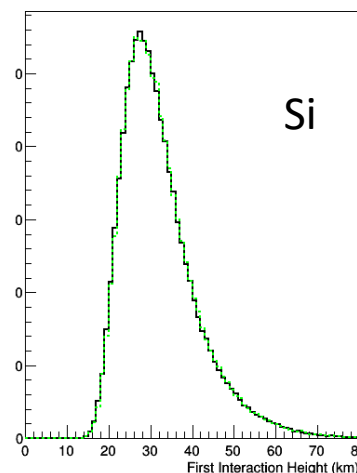
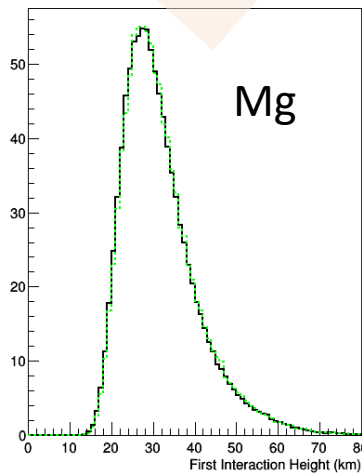
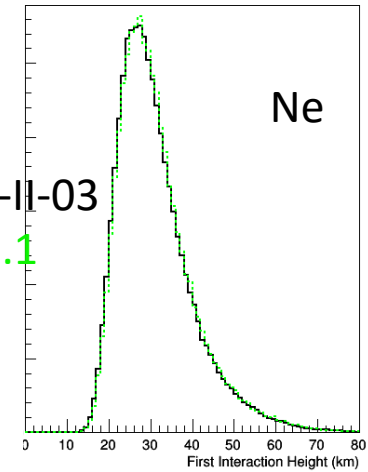
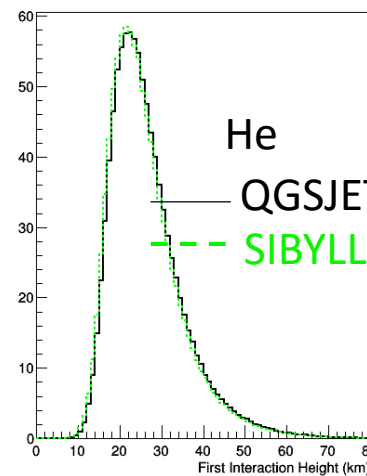
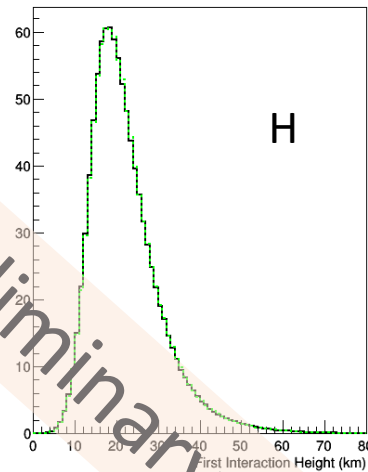
解析パラメータ：ピクセル光量から電荷への変換look up tableの仕様

Prod3 新データ : QGSJETとSIBYLL 間でのFirst interaction heightと X_{\max} の比較(1)

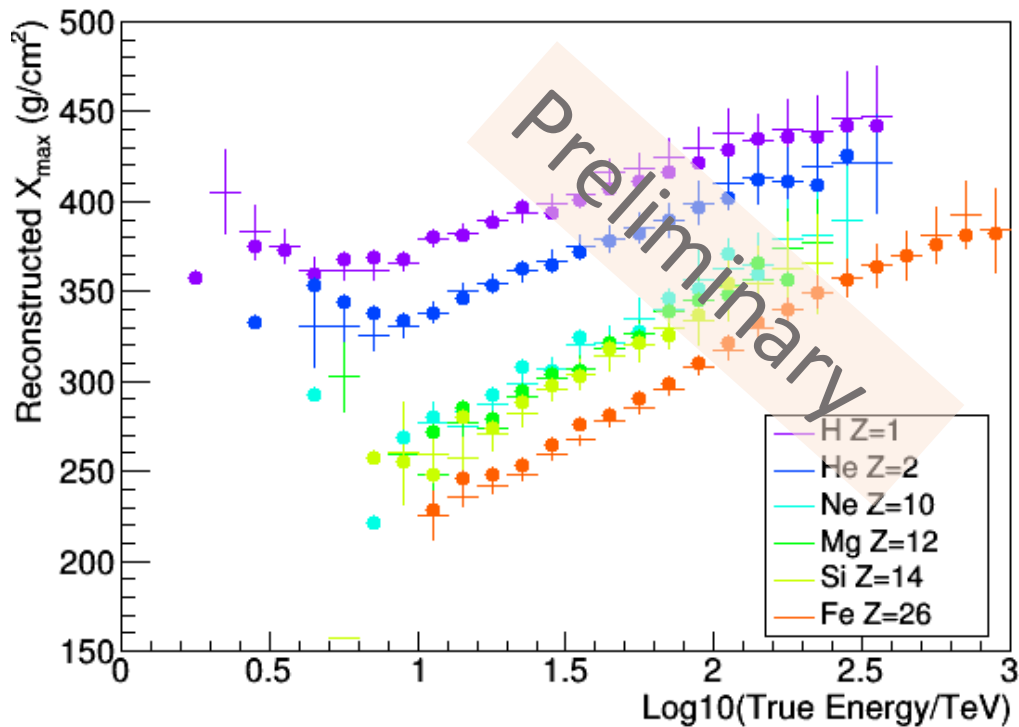
First interaction height 分布(QGSJET-II-03)



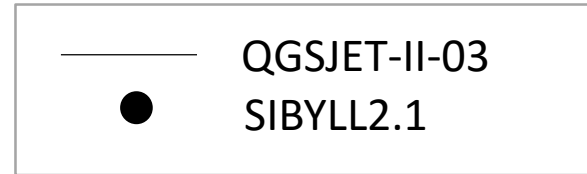
- Direct Cherenkov光の発光総量を決めるパラメータ
- 二つのモデルの分布にはほとんど違いがない



Prod3 新データ :QGSJETとSIBYLL間でのFirst interaction heightと X_{\max} の比較(2)

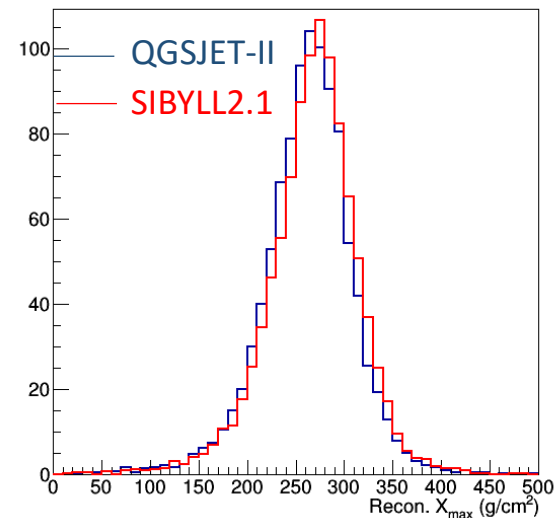


- X_{\max} :シャワー極大の深さ
→Direct Cherenkov光とシャワー光の混合
度に影響を与える



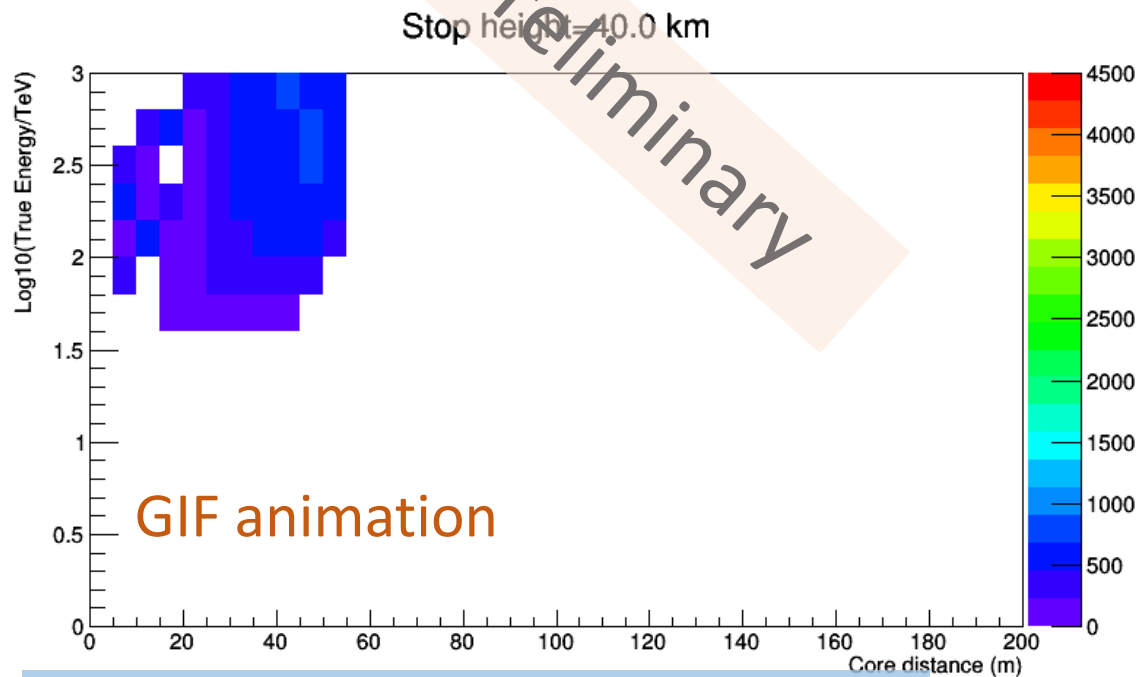
- 比較的重い元素について、30 TeV近傍で SIBYLLの方が大きい X_{\max} が出る傾向がある
- (H.E.S.S.でも同様の傾向は見られていた)

Iron Xmax, 20 - 50 TeV



電荷再構築

- DC-pixelと同定されたピクセルの信号強度から DC光由来の信号量を見積もる
- $I_{DC} = I_{DC_pixel} - \langle I_{neighb.pixels} \rangle$ (シャワーからのバックグラウンド分を差し引く)
- $I_{DC} = CZ^2$ という関係性から z を解く。変換係数 C はエネルギー・core distance・First interaction height に依存し、鉄のDirect Cherenkov光のデータを用いてあらかじめ Look up Table(LUT)を作っておく。



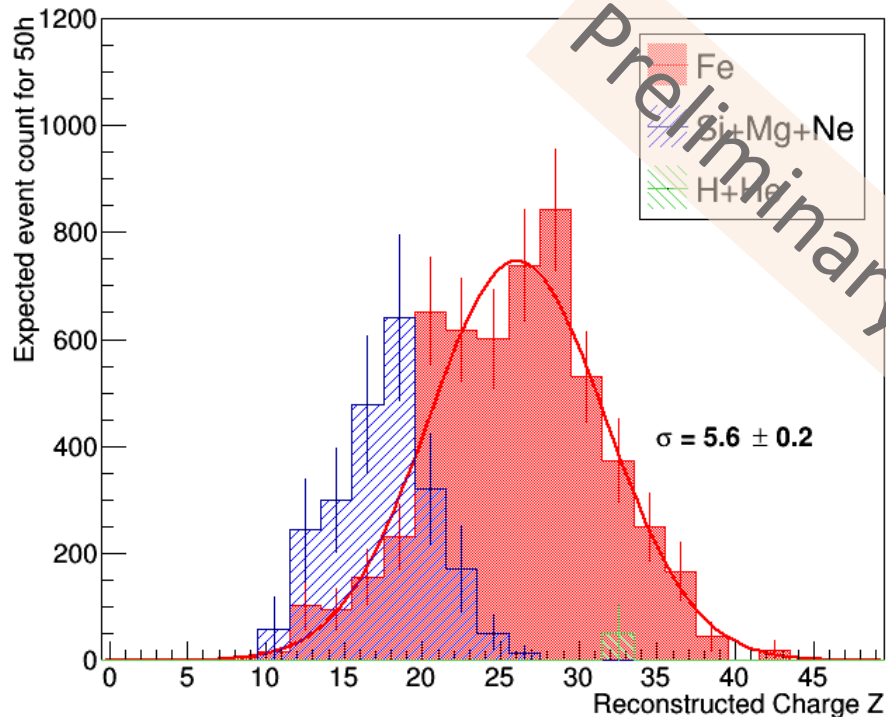
- 一旦LUTができれば、再構築されたパラメータだけ使って、 I_{DC} を求める。同様に再構築された E , d_{core} を使って、LUTから $C(E, d_{core})$ を引き出す。
- $recon.Z = \sqrt{\frac{I_{DC}}{C(E, d_{core})}}$ として再構築電荷を求める
- 複数の望遠鏡のイメージにわたって平均値を求める

非弾性散乱を起こさず Direct Cherenkov光子生成のみのデータで作成したLUTの例

Prod3, Paranal, 24 NectarCam-MSTでの各粒子の再構築電荷ピーク

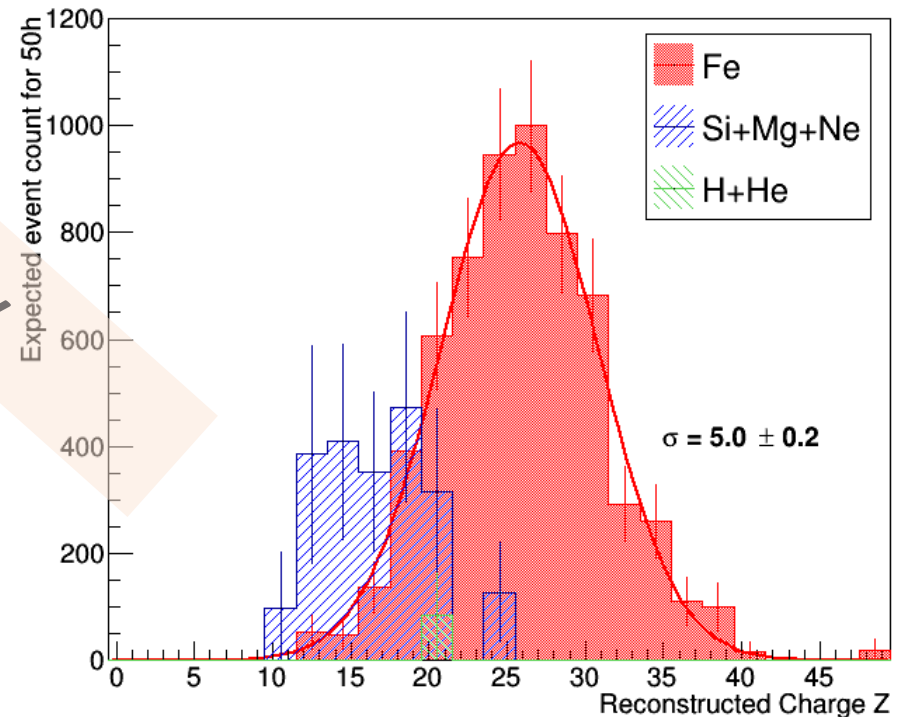
- 鉄、陽子、ヘリウム、ネオン、マグネシウム、ケイ素($Z=26,1,2,10,12,14$)のデータを解析
- TeV – PeVの粒子別フラックスは Hörandel(2003)の文献値を使用

QGSJET-II-03, All Energy



$E > 12.5$ TeV 予測カウント数
 91 ± 5 events/ hour
(H+Heコンタミ 0.8 ± 0.9)

SIBYLL, All Energy

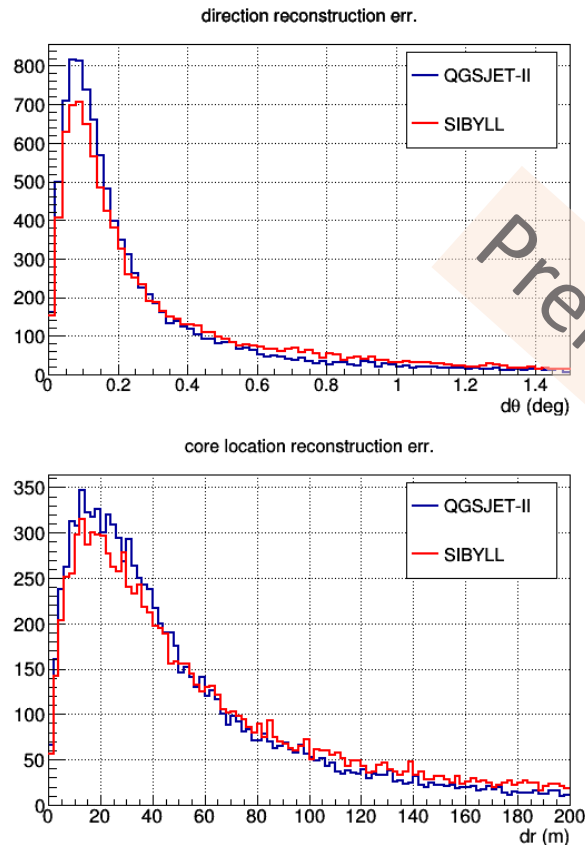


$E > 12.5$ TeV 予測カウント数
 104 ± 5 events/ hour
(H+Heコンタミ 1.4 ± 1.3)

電荷分解能に影響を与える要素(1)：コア・到来方向決定精度

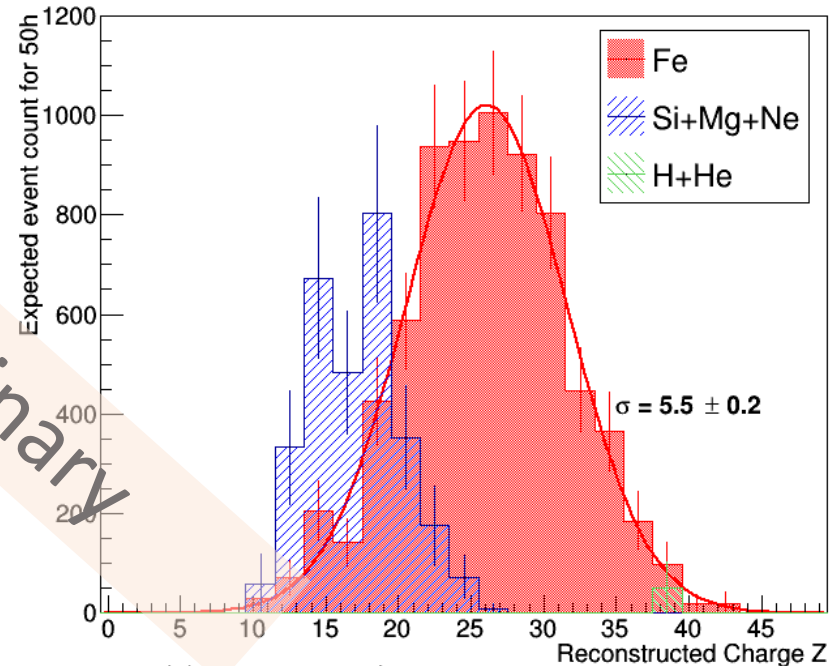
- 再構築したコア位置・到来方向の精度（DC-pixelの判定精度・DC-ring内に入る望遠鏡の判定・光量vs電荷変換テーブルの読み出し精度に影響）

到来方向・コア位置の決定精度（鉄）



到来方向・コア位置をシミュレーションの真の値で解析した結果

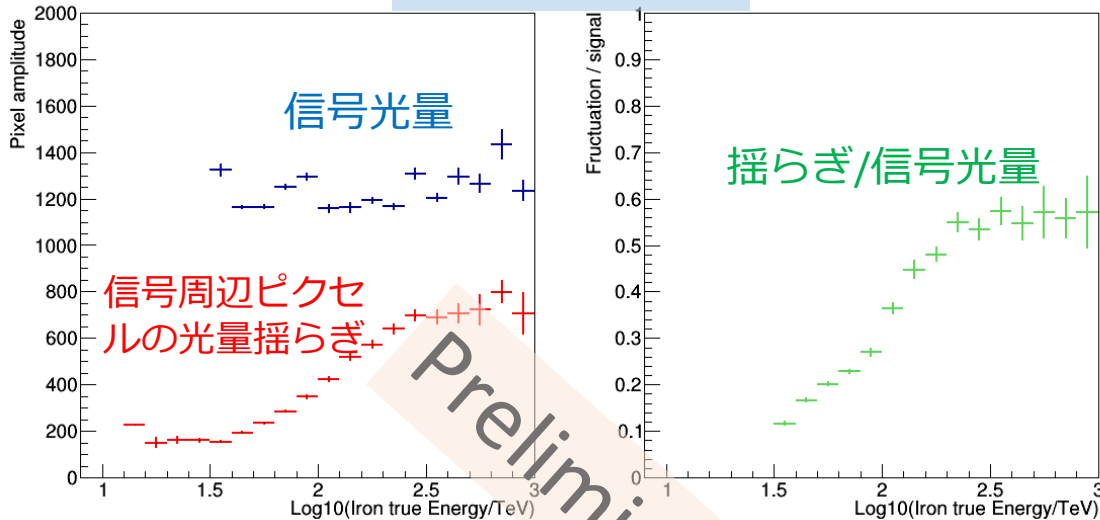
QGSJET-II-03, All Energy, perfect recon.



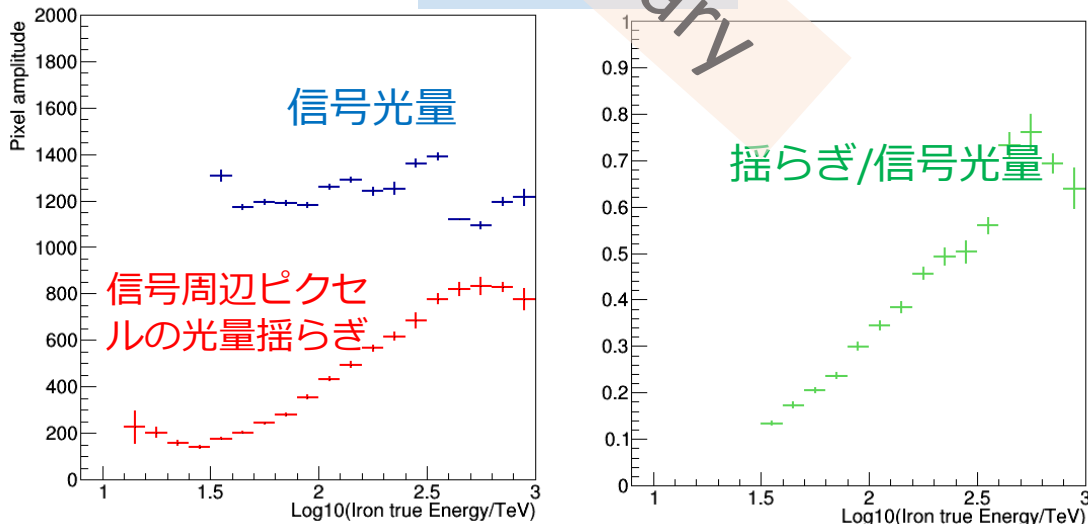
再構築電荷の改善度は統計的には有意とはいえない（イベント収率は~30%向上する）

電荷分解能に影響を与える要素(2)：DC-pixel周 辺のシャワー光量の漏れ込み

鉄, QGSJET-II-03



鉄, SIBYLL2.1



- 実際のDirect Cherenkov pixelの光量は信号とシャワー光雑音の加算。周辺ピクセルの光量平均から雑音レベルを差し引いたあとに残っているバックグラウンド由来のゆらぎを

$$\sigma_{\text{neighb.}} / (N_{\text{neighb.}})^{1/2}$$

として見積もった。

- 信号光量は一定のエネルギーで飽和するが、雑音量はエネルギー上昇とともに増大し続ける
- 例えばQGSJET-IIで@100TeVでは信号光量の30%程度の揺らぎが乗る。
- 電荷数は光量の平方根で効くので、30%の揺らぎは電荷数で約3.6に相当する。

まとめと今後

- 2015年にリリースされたCTAのシミュレーションツールを用い、南天の Paranal (チリ) サイトのアレイ3HB1-3 からMST(24台)+LST(4台)を選択して原子核シャワーデータ生成を継続中。
- 2種類のハドロン相互作用モデル(QGSJET-II-03, SIBYLL2.1)を取り入れた。Direct Cherenkov光の生成終端点となるFirst interaction heightの分布については2者の間にほとんど違いはない。違いはシャワー光の混入率 (DC eventの取得効率・電荷分解能) に反映される。
- 24 NectarCam-MSTについて現状のデータ量でDirect Cherenkov解析を行い、陽子+ヘリウムのコンタミ~1%のカット条件下での鉄の期待イベント数は ~ 100 events/hour($E > 12.5$ TeV)。
- 鉄の再構築電荷の幅は QGSJET-IIで 5.6 ± 0.2 , SIBYLLで 5.0 ± 0.2 。
- 電荷分解能に影響を与える要素のうち、コア・到来方向の決定精度とシャワー光の漏れ込みの寄与を見積もった。
- 今後Prod3 データの統計量を増やしたうえで、カット条件最適化・ X_{\max} 分布なども含め、イベントごとにFirst interaction heightとZを矛盾なく決める解析手法を導入する。