

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800126

研究課題名(和文)次世代チェレンコフ望遠鏡アレイを用いたknee領域宇宙線化学組成計測の準備研究

研究課題名(英文)Simulation study for the cosmic-ray chemical composition measurement around the knee using a next generation imaging Cherenkov telescope array

研究代表者

大石 理子(Ohishi, Michiko)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：10420233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：地上の解像型大気チェレンコフ望遠鏡アレイを用いて宇宙線原子核が大気上空で放出するDirect Cherenkov光を測定する手法が、sub-PeV領域の宇宙線重元素スペクトル測定に有効であることが近年分かってきた。本研究課題では、次世代の地上ガンマ線望遠鏡計画Cherenkov Telescope Array (CTA)に対して、宇宙線原子核事象のモンテカルロシミュレーションとDirect Cherenkov事象の解析を行い、CTAがPeV領域近傍の宇宙線化学組成計測に対して持ち得る性能(電荷分解能・期待事象数)を定量的に評価した。

研究成果の概要(英文)：Recent imaging atmospheric Cherenkov telescope systems are known to be capable of measuring energy spectrum of cosmic-ray heavy components in sub-PeV region by detecting Direct Cherenkov photons emitted by nuclei at the upper atmosphere. In this study, we performed Monte Carlo (MC) simulation of cosmic-ray nuclei events for the next generation ground-based gamma-ray telescope system CTA (Cherenkov Telescope Array). By analyzing Direct Cherenkov events in the MC simulation data, we estimated the capability of CTA (charge resolution and expected event count rate) for the measurement of cosmic-ray chemical composition around PeV.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 化学組成 チェレンコフ望遠鏡 超高エネルギーガンマ線

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙空間は 10^9 - 10^{20} eV に渡ってベキ乗のエネルギースペクトルを持つ高エネルギー粒子・宇宙線で満たされており、その 98% は陽子等の原子核で占められている。これらの宇宙線の起源については現在でも完全には解明されていないが、エネルギースペクトルに折れ曲がり構造(knee)が見られる 10^{15} eV (=PeV)より低いエネルギー領域については、銀河系内の超新星残骸が主な加速源であり、折れ曲がりはこの源での加速限界エネルギーが反映されたものだとする説が有力である。超新星残骸での加速限界エネルギーは粒子の電荷数 Z に依存するという理論仮説があり、PeV 近傍で宇宙線を核種ごとに分けてスペクトルを測定 (化学組成測定) することで、この仮説を検証し、宇宙線の起源の謎の解明に重要な情報を与えることができる。

(2) PeV 領域近傍の宇宙線の化学組成計測は、気球・衛星等の飛翔体群と地表の空気シャワーアレイとの両方によって担われてきた。前者 (直接観測) は一次宇宙線を直接観測可能であるため、粒子種の判別は比較的良好である反面、検出器の有効面積が小さく (数 m^2) 十分な統計量の事象数を得ることが難しい。一方で、地上の空気シャワーアレイ (間接観測) は有効面積を大きく ($>10^5 m^2$) 取ることができるが、一次粒子が崩壊後に形成する二次粒子しか観測しないため、粒子種の判別がより困難になる。これらの観測装置の特性により、PeV 領域近傍での化学組成測定結果は複数の実験間でばらつきが大きくなっている (図 1)。

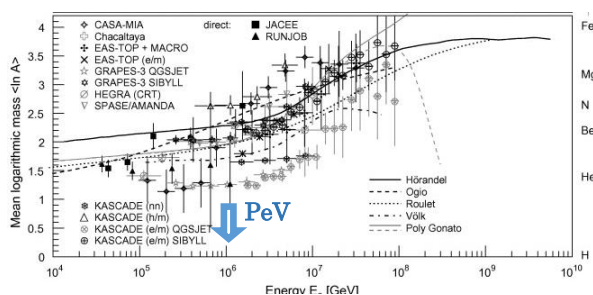


図 1: 複数の実験・検出手法による宇宙線原子核の対数平均質量数の測定結果のまとめ [1]

(3) このような状況下で、宇宙線原子核が放出するチェレンコフ光を利用した核種同定手法が Kieda らにより提案された [2]。一定しきい値エネルギー値以上の宇宙線原子核が大気上空に侵入するとチェレンコフ光 (Direct Cherenkov 光) を放出し、その単位長さあたりの放出光量は粒子の電荷数 Z の 2 乗に比例する。この関係を用い、地上の反射鏡で集光・検出したチェレンコフ光量から電荷を再構築することが可能である。また、宇宙線が非弾性散乱後を起こした後に形成する空気シャワー (EAS) 中の二次粒子由来のチェ

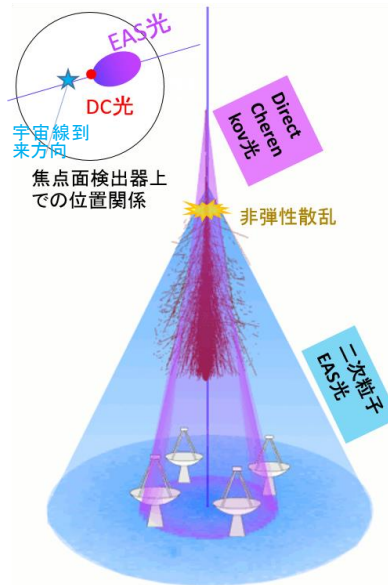


図 2: Direct Cherenkov 光を用いた宇宙線重元素スペクトル測定概念図

レンコフ光の形状・光量を用いて、一次宇宙線の到来方向・エネルギーが推定される。これらの DC 光と EAS 光の 2 種類の情報を合わせることで宇宙線の重元素スペクトルを測定することが可能である。(検出原理の概略図を図 1 に示す。)

また、Kieda らは、この手法に特化した観測装置を建設すること以外に、超高エネルギーガンマ線観測を目的として設計された解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) アレイの観測データにこの測定手法を適用することで、宇宙線重元素スペクトル計測が可能であることを比較的簡便なシミュレーションにより示した。

(4) 上記のシミュレーション研究ののち、既存の IACT アレイを用いて、この手法で宇宙線重元素のスペクトルを初めて計測したのは H.E.S.S. グループであった [3]。H.E.S.S. は約 100 m 間隔で配置された 12m 反射望遠鏡 4 台からなる IACT アレイを用い、357 時間の観測データから Direct Cherenkov 光事象を抽出してその光量から電荷数を再構築する解析を行い、13 TeV - 200 TeV 領域での宇宙線鉄 (Z=26) のエネルギースペクトルの測定結果を報告した [3]。この結果は、2006 年時点でこのエネルギー帯における世界最高精度の測定の一つであった。

(5) IACT による地上からのガンマ線観測の分野では、次期大型計画 CTA (Cherenkov Telescope Array) が進行中である。CTA では、口径の異なる 3 種類の望遠鏡からなる 100 台規模の大アレイにより、20 GeV から 100 TeV 超のエネルギー領域で、4 台規模の現行装置より一桁深い感度のガンマ線観測を達成することを目標としている。

2. 研究の目的

(1) CTA の大規模アレイでは、本来の目的とするガンマ線天体の観測的研究とともに、宇宙線原子核成分・電子成分の測定も重要な研究テーマとなる。CTA の望遠鏡アレイに Direct Cherenkov 手法を適用して宇宙線重元素スペクトル測定を行う場合、現行装置とおおよそ同等の口径を持つ中口径望遠鏡 (MST) の総台数は 24 台(2014 年当時の計画)になり、また望遠鏡の視野も拡大されるため、宇宙線原子核に対する有効面積も 10 倍以上に拡大することが見込まれる。また、23m 反射鏡に高解像度焦点面検出器を搭載した大口径望遠鏡(LST)が 4 台導入されることにより、鉄より軽い元素の検出感度も向上すると期待される。

(2) CTA のフルアレイで得られる宇宙線原子核の電荷分解能と期待事象数を定量的に評価するには、CTA の装置の性能パラメータ (望遠鏡アレイの配置・検出器視野サイズ・空間解像度・時間解像度・鏡の反射率や光検出器の量子効率等を積算した光子収率等) を取り込んだモンテカルロシミュレーションが必要となる。

(3)本研究の目的は、次期大規模地上チェレンコフ望遠鏡計画 CTA が PeV 領域近傍の宇宙線重元素スペクトル計測に対して持ち得る性能 (電荷分解能・期待事象数) を、シミュレーションを用いて定量的に評価することにある。

3. 研究の方法

(1) CTA の候補サイト・アレイ構成の情報が入り込まれたシミュレーションツール(汎用の空気シャワーシミュレータ CORSIKA と CTA の検出器応答記述を組み合わせたもの)を用い、TeV・PeV 領域の宇宙線原子核事象のシミュレーションデータを生成した。図 3 にデータ生成・解析に使用した望遠鏡アレイ配置の一例、図 4 に生成されたシミュレーション事象群の中で Direct Cherenkov 光の特

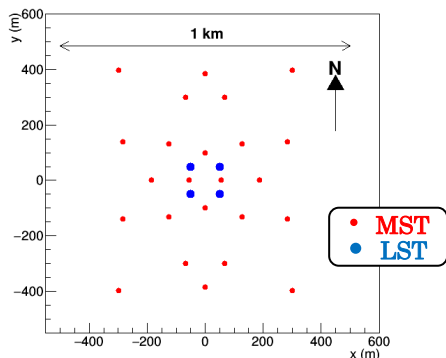


図 3: CTA の Prod2(第二版)シミュレーションの解析に使用したサブアレイ sub2A の配置 (MST・LST のみ抽出)

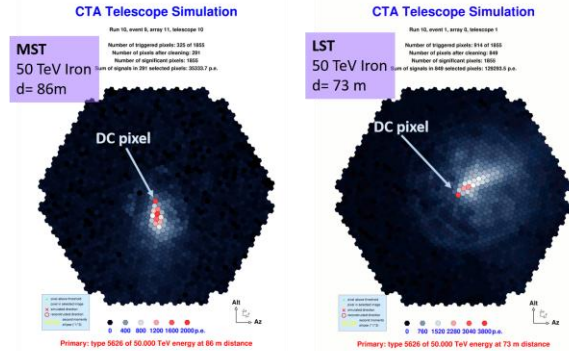


図 4: 50 TeV の鉄(Z=26)粒子入射に対する CTA 望遠鏡での Direct Cherenkov シミュレーション事象サンプル。左: MST, 右: LST

性が良好に確認できる事象サンプルを示す。データ解析・電荷分解能同定に十分なイベント統計を得るには 10^7 以上の事象数が必要であり、この大量データ生成には、宇宙線研究所の保有する並列計算機システム (2.2 GHz CPU \times 2720 コア) を活用した。信号として最も有望な鉄(Z=26)と、背景雑音として主要な割合を占める陽子(Z=1)からデータ生成を開始し、これらのデータに対する解析プログラムの開発・実装を進めてから、宇宙線元素の中で存在比が高い他の軽元素(He, C, O, Ne, Mg, Si, Z=2, 6,8,10,12,14)のデータを生成した。

また、CTA のシミュレーションツールは開発中のハードウェアの最新性能値・アレイ配置候補の絞り込みなどを反映させるために定期的な改訂が行われ、本研究期間中にも望遠鏡建設サイトの優先順位確定を受けた改訂が行われている。このため、シミュレーションデータ生成はこの改訂前(Prod2)と改訂後(Prod3)のバージョンで計二回行った。

(2) Direct Cherenkov 光事象解析では、一次宇宙線の到来方向・位置の決定精度を向上させることが特に重要である。原子核によって形成されるハドロンシャワーは、ガンマ線と比較して横方向の拡がりが大きく発展形状も乱雑であり、シャワー軸の決定はより難しくなる。通常のガンマ線解析と同じシャワー像抽出条件では不十分であるため、光子の時間勾配を使用した到来方向解析の試行、イメージ解析に用いるピクセルの信号しきい値の調整など、到来方向・位置決定精度を向上させる解析パラメータの探索を行った。

(3) H.E.S.S. では考慮されていなかった、Direct Cherenkov 光とシャワー光の到来タイミング差(Direct Cherenkov 光はシャワー極大と比較して ~ 2 ns 程度到来時刻が遅れる)を考慮した解析過程を取り入れた。タイミング差を利用した解析は、信号波形の直接解析と、Direct Cherenkov 光 (信号) とシャワー光 (雑音) に対して信号雑音比が高くなる積分時間窓を設定する解析の二通りがあるが、

実際のシミュレーションデータの分析後に後者を採択することにし、時間窓のパラメータの調整（幅、時刻オフセット）を行った。

(4) 前述の H.E.S.S. の解析に上記(2),(3)の改善を加えた解析手法を CTA シミュレーションデータの解析プログラムに実装した。(1)で生成した大量データにこの解析プログラムを適用して、有力なサブアレイでの観測に対して予測される各粒子の電荷分解能を求めた。また TeV - PeV 領域の宇宙線の各粒子フラックスの文献値[4]（低エネルギー側測定からの外挿による推定を含む）を仮定した場合の単位時間当たりの予測事象数を求めた。

4. 研究成果

(1) CTA の南半球サイト（ナミビア・アール）の望遠鏡アレイに対して生成した宇宙線原子核シミュレーションデータ（Prod2）から、サブアレイ sub2A の MST 24 台を抽出して上記の解析手法を適用した場合に得られた各粒子の再構築電荷分布を図 5 に示す。上段は $E > 12.5$ TeV の全事象に対する分布であり、下段は再構築エネルギー帯ごとに事象を分

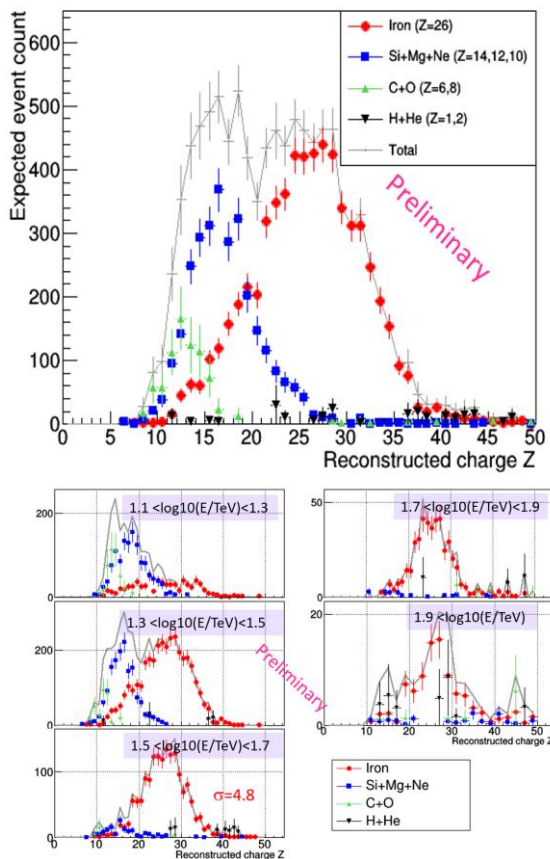


図 5: Aar サイトの MST 24 台アレイに対するシミュレーションデータから求められた各粒子の再構築電荷の分布(上段: $E > 12.5$ TeV 全事象 下段: エネルギー分割)

割した分布である。電荷数の近い粒子群はまとめてグループ化し、全部で 4 グループとして表記してある。(鉄グループ: $Z=26$, ケイ素グループ: $Z=10-14$, 酸素グループ: $Z=6-8$, 水素グループ: $Z=1-2$)。

電荷分解能は、シャワー由来の背景雑音光量、Direct Cherenkov 光の発光効率などの影響を受けるため、図 5 の下段に示すようにエネルギーに依存する。現在の解析手法では、再構築エネルギー帯: 32 - 50 TeV における鉄 ($Z=26$) の再構築電荷の幅は約 4.8 でありこれは H.E.S.S. によって得られた値とおおよそ同等の電荷幅である。

(2) (1) で使用したシミュレーションデータと解析条件に対して、宇宙線の各元素のフラックスの文献値 (Hörandel 2003[4]) を仮定し、期待される単位時間あたりの事象数を見積もった。再構築エネルギー $E > 12.5$ TeV の条件下で、鉄に対する事象数見積りは約 120 事象/時間、ケイ素グループに対しては約 58 事象/時間であった。これらに対する陽子グループの雑音事象混入率は 3%程度と見積もられた。H.E.S.S. による観測結果では、357 時間の観測時間に対し鉄と軽元素を合計した Direct Cherenkov 事象数が 1899 であり、上記の CTA の事象数率は H.E.S.S. の約 30 倍に相当する。(ただし Direct Cherenkov 事象抽出解析後の事象数は解析での収率に依存し、H.E.S.S. の解析では雑音除去率は高いが信号収率も低い陽子混入率 $< 1\%$ の厳しい解析条件を採択しており、条件が同等ではない点は留意する必要がある。)

(3) IACT の主要な観測情報である空気シャワーの発展形状パラメータ群も核種ごとに異なる分布を持つことが知られており、比較的堅実な再構成が可能な形状パラメータの一つにシャワー極大位置 (X_{max}) がある。このパラメータの核種依存性は、空気シャワー形成直前の非弾性散乱の断面積が原子核の幾何断面積 (\propto 質量数 A の $2/3$ 乗) でよく近似さ

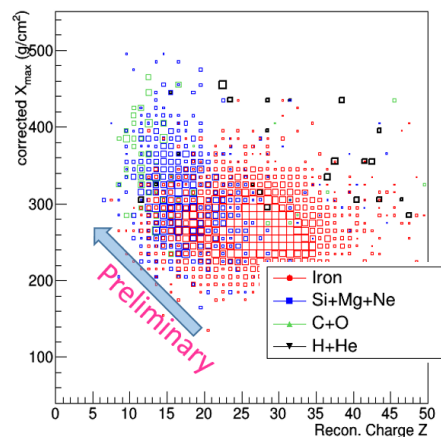


図 6: 再構築電荷数(横軸)とシャワー極大の空気厚み(g/cm^2 、縦軸)の関係

れることに由来する。これらの形状情報を Direct Cherenkov 光の情報に加えて補助的に活用することで、より高精度・低雑音の粒子種同定が可能になる。シミュレーションから得られた再構築電荷 (Z^*) と再構築 X_{\max} の 2 次元散布プロット (図 6) には、再構築電荷数 Z^* が小さい粒子はより大きい X_{\max} を持つという予測された関係性が見られる。 $(X_{\max}$ はエネルギー依存性を持つが図 6 中ではその効果は補正済みである。) 陽子の再構築電荷数がシャワー光揺らぎにより誤判定されて過大な値として求められ、重元素に対して雑音となっているケースも、この X_{\max} との関係性を使った評価により一定量の低減が可能であることが分かった。

(3) CTA のシミュレーションツールの定期改訂に伴い、第 3 版 (Prod3) のシミュレーションツールで、南半球サイト (チリ・パラナル) での宇宙線原子核の新データ生成を行った。

前述の解析プログラムをこの新データに適用し、電荷分解能・期待イベント数を評価した結果、十分な統計が達成される前の preliminary な結果としては、prod2 の結果とほぼ同等の値を得ている。また、prod3 のデータ生成から、原子核の空気シャワーを記述するハドロン相互作用モデルについて QGSJET-II-03 に加えて新たに SYBILL2.1 を導入し、二種類のモデルでのデータ生成・解析結果の比較を行った。QGSJET-II-03 と SIBYLL2.1 の間では、 X_{\max} 分布・電荷分解能に違いが見られ、この選択モデルによる違いは、(十分なイベント統計を得たのちに) 系統誤差として解釈される。

(4) X_{\max} 以外のシャワーパラメータ、特にシャワーの横方向発展の様態を表す WIDTH なども、核種ごとに異なる分布を持ち親粒子の核種の情報を残していることが知られている (Plyasheshnikov et al. [5])。また 100m 間隔規模の現行装置と比較し、CTA では約 1km スケールの広大な面積範囲で単一のシャワーの光量分布が測定可能であり、核種同定の補助的情報となり得ることが分かった。これらのことから、研究計画当初予定していたものから解析手法の改良をさらに拡張し、Direct Cherenkov の情報と複数の空気シャワー情報を統合的に解析して核種を同定する解析手法を現在開発中である。

参考文献

[1] J. Hörandel, *Advances in Space Research* **41**, 442 (2008)

[2] D. Kieda et al., *Astroparticle Physics* **15**, 287 (2001)

[3] F. Aharonian et al., *Physical Review D* **75**, 042004 (2007)

[4] J. Hörandel, *Astroparticle Physics*, **19**, 193 (2003)

[5] A. V. Plyasheshnikov et al., *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **24**, 653 (1998)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 大石 理子、”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(VI)”, 日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 22 日、東北大学泉キャンパス
- ② 大石 理子、”CTA 報告 97: 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(III)”, 日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 27 日、大阪市立大学杉本キャンパス
- ③ 大石 理子、”CTA 報告 88: 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)”, 日本物理学会、第 70 回年次大会、2015 年 3 月 21 日、早稲田大学早稲田キャンパス
- ④ 大石 理子、”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”, 日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 18 日、佐賀大学本庄キャンパス

[その他]

ホームページ等

CTA-Japan Web ページ

<http://www.cta-observatory.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大石 理子 (OHISHI, Michiko)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：10420233