

令和 2 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：2017～2019

課題番号：17K14275

研究課題名（和文）次世代チェレンコフ望遠鏡アレイCTAによるTeV領域電子・陽電子計測の準備研究

研究課題名（英文）Preparatory study for the measurement of electrons and positrons in the TeV region using the 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） 1,100,000円

研究成果の概要（和文）： 解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) を用いた宇宙線の電磁成分（電子とガンマ線）の検出感度を定める主因は、背景雑音となる宇宙線陽子の漏れ込み量である。次世代IACT計画CTAの南半球サイトの望遠鏡アレイに対してシミュレーションデータ生成を行い、4つのハドロン相互モデルを比較検証した結果、TeV領域では雑音頻度に2倍(100%)以上の差異があり、この差異はガンマ線の感度に30%程度の無視できない影響を与えることが分かった。これらの差異は主に中性パイ粒子の生成スペクトルの違いに起因するものであり、同時にIACTがハドロン相互作用モデルの検証に対して有力な検出器であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線粒子の電荷数を直接測定できない間接測定実験にとって、二次粒子の情報のみから一次線の粒子種とエネルギーを再構築するためには、空気シャワーシミュレーションと実測が高精度で一致していることが要求される。現時点でシミュレーション中のハドロン相互作用の不定性は宇宙線化学組成の間接測定の精度に影響を与える重要な要素であり、加速器での検証実験も含めて相互作用モデルの改善がコミュニティ全体の取り組みとして続けられてきている。本研究の成果により、ガンマ線天文台として認知されているIACTがTeV領域でのハドロン相互作用の検証においても有力な検出器であり、重要な貢献が可能であることを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The main factor that determines the sensitivity of an Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT) array to the electromagnetic components of cosmic rays (electrons and gamma rays) is the amount of residual backgrounds from cosmic-ray protons. We performed Monte Carlo simulations of the South site array of the next-generation IACT project CTA (Cherenkov Telescope Array), to test the effect of the difference of present hadron interaction models. As for the rate of residual background protons, we found that there is a factor 2 (~100%) level difference in TeV region among the chosen four interaction models, and it leads to 30%-level difference in the gamma-ray sensitivity. These differences are mainly due to differences in the production spectra of neutral pions in the models, and we quantitatively showed IACT arrays are to be powerful detectors for the validation of hadronic interaction models.

研究分野：宇宙線物理学（実験）

キーワード：解像型大気チェレンコフ望遠鏡 ハドロン相互作用 宇宙線電子スペクトル

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間を満たしている様々な種類の高エネルギー粒子 = 宇宙線のうち、電子・陽電子成分に注目すると、2017年当時には TeV 近傍のエネルギースペクトル計測について興味深い進展が見られていた。2008年に ATIC (気球検出器) が電子と陽電子の合算スペクトル (以下“電子スペクトル”はこの合算スペクトルを指す) の 600 GeV 付近にピーク構造があることを報告したが (Chang et al., 2008)、その後の H.E.S.S. [1] (地上観測器、後述)、Fermi [2] (衛星検出器) の観測ではこのピーク構造は追確認されなかった。2011年には AMS-02 (国際宇宙ステーション ISS 搭載検出器) が稼働開始し、2013年に初期成果として $E < 1$ TeV 領域の高い統計精度のスペクトル測定結果を報告した [3] (図 1)。2015年には TeV 領域の電子測定を主標的とした CALET (ISS 搭載検出器) も稼働を開始し、2017年時点では近い将来の $E > 1$ TeV の測定結果の報告が期待される状況であった。

$E > 1$ TeV のエネルギー領域の宇宙線電子スペクトル測定については、飛翔体による直接検出は粒子識別の精度が良好である反面、装置のサイズで決まる有効面積の制限が厳しく、約 3.2 の急峻なベキ乗のスペクトルに対して十分なイベント統計量を得るのが困難である。一方で、宇宙線が大気と相互作用して生成する空気シャワーを利用して地上から宇宙線を測定する間接検出は、粒子識別の精度は劣る反面、飛翔体と比べて莫大な ($> 10^6$ 倍) 有効面積を得られる。先述の H.E.S.S. は 0.1-10 TeV 領域のガンマ線観測を主標的とする地上観測装置の一つで、空気シャワーからのチェレンコフ光を検出する解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) 4 台のアレイである。ガンマ線と電子・陽電子はほぼ同様の形態の電磁シャワーを形成するため、検出有効面積はガンマ線と同等 ($\square 10^5 \text{ m}^2 @ 1 \text{ TeV}$) であるが、背景雑音の評価・差し引きが困難であるため、H.E.S.S. のデータ解析には電子スペクトル測定に特化した手法が適用された。図 1 に示すように H.E.S.S. の電子スペクトルの測定結果は 1 TeV 近傍に折れ曲がり構造が見られており、他の IACT での追測定や CALET による追確認が必要な状況であった。

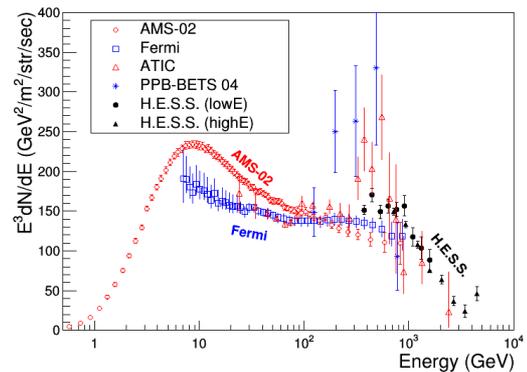


図 1: $e^- + e^+$ スペクトルの測定結果 (AMS-02 [3], Fermi [2], H.E.S.S. [1] [4], その他 [5]). 縦軸は E^2 が掛けてある。

IACT 分野ではガンマ線天体観測での大きな成功により、さらに大規模な世界統一の次期計画 CTA (Cherenkov Telescope Array) [6] が進行中である。望遠鏡の台数の増加、また検出器視野の増大により、電子観測に対する有効面積は少なく見積もっても H.E.S.S. の 15 倍以上に拡大することが見込まれ、一つの空気シャワー事象を同時に観察する望遠鏡の台数が増えることにより、粒子弁別性能も向上する。これらの条件から CTA が 1 TeV 以上の電子スペクトル観測に非常に有望な条件を持つことは確実であるが、定量的な検出性能の評価は現時点では不十分である。一方で、宇宙線電子はほぼ等方的な到来方向分布を持つためガンマ線観測データのほぼ全部が解析対象として再利用可能であり、CTA 観測開始から早いペースでデータが蓄積されていく。このため、CTA の観測開始後速やかに電子スペクトルの解析に着手できるように早期に解析手法を確立する必要がある状況であった。

参考文献

- [1] F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **508**, 561 (2009)
- [2] M. Ackermann et al., *Phys. Rev. D* **82**, 092004 (2010)
- [3] M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 221102 (2014)
- [4] F. Aharonian et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 261104 (2008)
- [5] B. Bertucci, “AMS Days at CERN”
<https://indico.cern.ch/event/381134/timetable/#20150416>
- [6] <https://www.cta-observatory.org>

2. 研究の目的

本研究課題は、上記の2017年現在の状況に基づき、解像型大気チェレンコフ望遠鏡(IACT)アレイの大型次期計画として進行中のCTAがTeV領域の電子スペクトル測定に対して持ち得る性能をシミュレーションデータを用いて定量的に評価することを目的とする。具体的には、空間分布の特徴上宇宙線陽子との判別がガンマ線以上に困難である電子陽電子成分について、CTAの装置構成に対してより高精度の信号雑音弁別を達成する解析手法を確立し、またその条件下で予想される宇宙線陽子からの漏れ込み雑音量をハドロン相互作用の不定性の効果も含めて定量的評価し、最適化した選別条件下での電子事象数を推定する。さらに、発展的課題として、IACTでの陽電子成分を分離して測定する手法のシミュレーションによる評価も考慮している。(なお、後述する通り、研究を進めるうちに、副目的であったハドロン相互作用の不定性について予想外の結果が得られ、CTAの主要目的であるガンマ線の感度推定にも重要な影響を与えることが分かったため、研究期間後半はハドロン相互作用の不定性がガンマ線観測に与える影響の評価、及びIACTでの相互作用モデル評価の可能性の検討に重点を置き直して研究を継続した。)

3. 研究の方法

CTAの大規模アレイに対応した宇宙線電子・陽子のモンテカルロ(MC)シミュレーションデータを生成し、それを用いて宇宙線電子スペクトル測定に特化した高雑音除去率を達成するデータ解析手法を開発するとともに予測される信号事象数を評価する。

(1) CTAアレイに対応したMCシミュレーションデータの生成

シミュレーションの装置構成については1 TeV - 50 TeV程度のエネルギー領域をカバーすることを念頭に、小口径望遠鏡(SST)を含んだCTAの南半球サイトアレイ(図2)を選択した。通常CTAのシミュレーションでは電磁成分は3 GeVを下限としたシミュレーションを行うが、上述の理由からエネルギー範囲をTeV領域の観測に特化したものに変更した。宇宙線陽子については最低でも 10^8 事象程度の大量生成を必要とするため、MCシミュレーションデータ生成には宇宙線研究所の大型計算機システムを利用した。

(2) 宇宙線電子スペクトル解析に特化した解析手法の開発

ほぼ等方的な到来方向分布を持つ電子は、天球上で背景雑音量推定のための比較対象領域を設定できず、ガンマ線解析時以上に高い雑音除去率を達成する解析手法が(信号に対する有効面積を減少させてでも)要求される。簡便かつ効果が明瞭な手段の一つは、一つの空気シャワーを同時観測している望遠鏡の台数(Telescope multiplicity)の要求値を上昇させることで、より詳細なシャワーの描像が得られ電磁/ハドロン成分の分離度が向上する。さらに個々の望遠鏡の焦点面検出器の詳細な情報(光量とタイミング)を使った手法の改善を予定していたが、次項に述べる効果の不定性が大きいことが分かってきたため、この改善については優先順位を下げた。

(3) 宇宙線陽子成分の漏れ込み推定におけるハドロン相互作用の不定性の影響評価

宇宙線電子のスペクトル測定の精度に最も大きい影響を与える問題は、背景雑音となる宇宙線陽子成分の漏れ込みである。実データを用いた漏れ込み量推定が不可能であるため、電子測定にあたっては高い精度で宇宙線陽子のシミュレーションが実測と一致していること要求される。一方で、宇宙線陽子と大気中の原子核の相互作用はTeV領域でもまだ完全

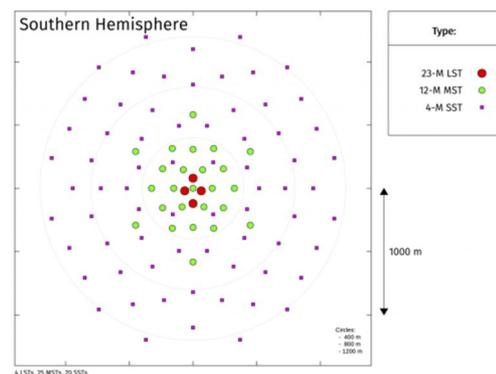


図 2: CTA の南半球サイトアレイ望遠鏡 99 台の配置。(参考文献[6]より)

には理解されておらず、複数の相互作用モデル(QGSJET, EPOS, SIBYLL など)が宇宙線の観測的研究分野では並列して使用されている。これらのモデルのうち4つを選択して陽子のシミュレーションデータを生成し、雑音漏れ込み推定量の違いを調査した。

4. 研究成果

下記の結果については、日本物理学会での口頭発表及び国際会議発表(TAUP2019)を行い、主に(2), (3)の内容については日本・ブラジル・ドイツ・スペイン・フランスの国際共同で投稿論文を準備中である。

(1) CTA 南半球サイトのアレイによる宇宙線電子観測事象数の推定

生成した CTA 南サイトアレイの MC データに対し、電子測定に特化した解析手法改善の端緒として telescope multiplicity の下限を 12 まで増やし、1000 時間の観測時間を仮定(ガンマ線天体観測データを再使用できるため)して、得られる電子事象数を推定した。Preliminary な結果として、HESS group が 2017 年の国際会議で報告したスペクトルを仮定し、陽子の混入率が 4% (1-3 TeV), <1% (3-30 TeV)の厳しいイベント選択条件を課した上で、10 TeV 近傍でエネルギーの一桁を 10 分割した 1 ビンに対し >200 events 程度の電子事象数を得ると見積もられた。

(2) CTA でのハドロン相互作用の不定性による電磁成分様雑音事象頻度の推定と、ガンマ線観測に与える影響の評価

宇宙線陽子が形成する空気シャワーは部分構造として電磁シャワー(主に中性粒子由来)を含み、これをガンマ線/電子由来と誤認したものが最大の雑音源となっている。一方で、現在シミュレーションで使用されている相互作用モデルの間では、超高エネルギー帯の陽子と原子核の衝突で生成される粒子を含む二次粒子のエネルギー・スペクトルと角度分布に有意な差異が存在する。上述の理由により、特に π^0 粒子の高エネルギー端のスペクトル形状は、電磁成分に対する雑音量に影響を与えると考えられるため、CORSIKA 6.99/7.69 で使用できる4つのハドロン相互作用モデル(QGSJETII-03, QGSJETII-04, SIBYLL2.3c, EPOS-LHC)に対して CTA アレイでの MC シミュレーションデータを生成して解析を行った結果、QGSJETII-04/03 と EPOS-LHC の間では、TeV 領域においてガンマ線様雑音事象の頻度に2倍以上の差異があることが分かった(ただしこの差異の値については、解析中でのパラメータ設定、電磁/ハドロン成分の分離位置に依存することには注意が必要である)。さらに原因を確定させるため、CTA の装置応答を含まない空気シャワー中の粒子飛跡情報を取り出すシミュレーションを行い、 π^0 粒子の生成スペクトル、及び一次線粒子のエネルギーが電磁成分で消費された割合等を調査した。 π^0 粒子のスペクトルの調査からは、硬いスペクトルを持つモデル(図3)が多く雑音を生成することが確認され、また一部のモデルについては電磁成分の割合にエネルギー依存性が見られた。これらの差異は CTA の主要科学標的であるガンマ線天体の観測に

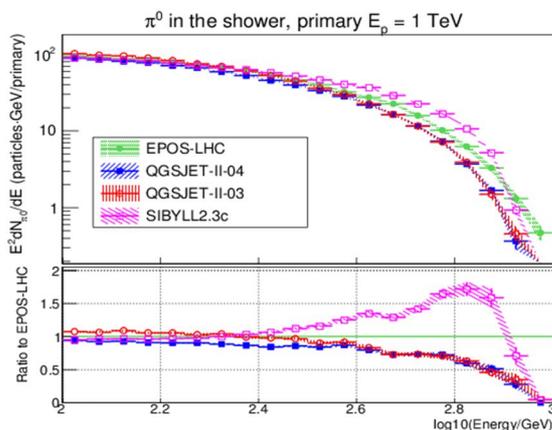


図3: 各相互作用モデルの空気シャワー中の π^0 スペクトル。陽子単色 1 TeV の場合。

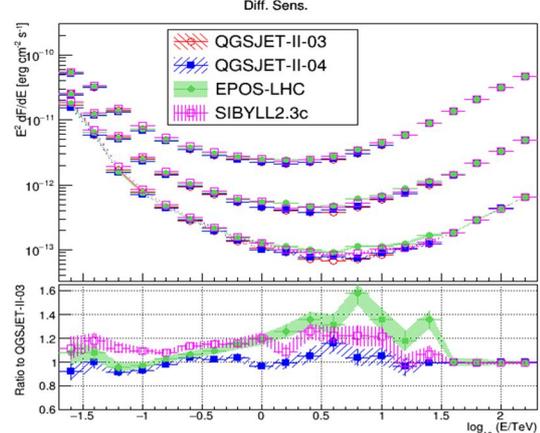


図4: 各相互作用モデルを使用した陽子に対する CTA のガンマ線検出感度の差異。差異は主に陽子からの残存雑音量の違いに由来する。

も影響を与えうるため、ガンマ線感度曲線を得るのに適したエネルギー範囲とイベント統計量を設定して各相互作用モデルの陽子シミュレーション事象を大量生成し、感度曲線の解析を行った。今までは QGSJET-II-03 が感度曲線の導出に使用されてきたが、使用する相互作用モデルの違いにより、1 - 30 TeV のエネルギー帯で 30% 程度の感度の差異が現れることを確認した(図 4)。前述の一部モデルのエネルギー依存性も感度曲線に予想通りに表出していることが確認できた。

(3) CTA を含む IACT の観測データを用いたハドロン相互作用検証の可能性の検討

上記の結果から、CTA を含む IACT アレイは、加速器による衝突実験や空気シャワー実験群によって今まで取り組まれてきたハドロン相互作用モデルの検証に参加・貢献できる可能性が高い。IACT の様々な観測量(シャワー形状、円環像によって同定される μ 粒子の流量など)が相互作用モデルの検証に利用可能であるが、今回の電磁成分様の事象頻度を利用するメリットは、宇宙線元素組成の不定性を受けにくいことにある。空気シャワー実験の観測量を相互作用の検証に使用する場合は、入力粒子である宇宙線粒子がヘリウム等の重元素も含んでおり、また一次線の種類によって生成される二次粒子の内容が異なるため、元素組成の測定精度が結果の検証に影響を与えるという欠点がある。一方で、IACT でのガンマ線様陽子事象はほぼ宇宙線陽子から構成され、重元素の影響をほとんど受けないことは過去の論文からの知見、またこの CTA でのシミュレーションでも実証されている(図 5)。従って、1)相互作用モデル間の差異が大きい領域で、2)宇宙線の元素組成の不定性の影響を受けず、3)専有の観測時間を要求しない(ガンマ線天体の観測データを再利用できる)という特長を持った相互作用モデル検証が IACT で可能であることを示すことができた。

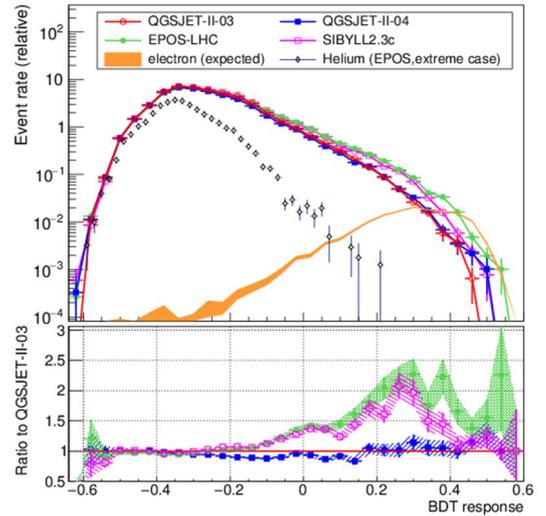


図 5: 各相互作用モデルを使った陽子事象の「ガンマ線らしさ」をあらわす多変量解析パラメータの分布。下段の比率は宇宙線電子からの寄与が考慮されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名	大石理子, 奥村暁, 折戸玲子, 片桐秀明, 神本匠, 櫛田淳子, 郡司修一, 齋藤隆之, 榊直人, 佐々井義矩, 高橋知也, 種田裕貴, 千川道幸, 中森健之, 西嶋恭司, 藤原千賀己, 三浦智佳, 吉越貴紀, 吉田龍生, 李健, Anatolii Zenin, 他 CTA-Japan Consortium
2. 発表標題	CTA報告140: モンテカルロシミュレーションを用いたCTAでのgamma-ray like陽子事象の空気シャワー特性とハドロン相互作用モデル依存性の調査
3. 学会等名	日本物理学会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	大石理子, 稲田知大, 奥村暁, 片桐秀明, 櫛田淳子, 郡司修一, 齋藤隆之, 榊直人, 千川道幸, 西嶋恭司, 三浦智佳, 吉越貴紀, 吉田龍生, 李健, 他 CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題	CTA報告124: CTAのTeV領域電子・陽電子スペクトル測定性能のシミュレーション評価
3. 学会等名	日本物理学会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	大石理子, 奥村暁, 折戸玲子, 片桐秀明, 神本匠, 櫛田淳子, 郡司修一, 齋藤隆之, 榊直人, 佐々井義矩, 高橋知也, 種田裕貴, 千川道幸, 中森健之, 西嶋恭司, 三浦智佳, 吉越貴紀, 吉田龍生, 李健, 他 CTA-Japanコンソーシアム
2. 発表標題	CTA報告132: CTAのTeV領域電子・陽電子スペクトル測定性能のシミュレーション評価
3. 学会等名	日本物理学会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Michiko Ohishi, Takanori Yoshikoshi, Tatsuo Yoshida for the CTA-Consortium
2. 発表標題	A Monte Carlo simulation study for cosmic-ray chemical composition measurement with Cherenkov Telescope Array
3. 学会等名	35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017) (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 Michiko Ohishi, Luan Arbeletche, Vitor de Souza, Gernot Maier, Konrad Bernloehr, Abelardo Moralejo, Johan Bregeon, Luisa Arrabito, Takanori Yoshikoshi, for the CTA-Consortium
2. 発表標題 Influence of uncertainty in hadronic interaction models on the sensitivity estimation of Cherenkov Telescope Array
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大石理子, Luan Arbeletche, Vitor de Souza, Gernot Maier, Konrad Bernloehr, Abelardo Moralejo, Johan Bregeon, Luisa Arrabito, 吉越貴紀, 奥村暁, 片桐秀明, 櫛田淳子, 郡司修一, 斎藤隆之, 榎直人, Zenin Anatolii, 千川道幸, 中森健之, 西嶋恭司, 吉田龍生 他 CTA-Japan Consortium
2. 発表標題 CTA報告156: CTAのガンマ線感度推定におけるハドロン相互作用モデルの不定性の影響の評価
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考