

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03985

研究課題名（和文）解像型大気チェレンコフ望遠鏡アレイで探るハドロン相互作用

研究課題名（英文）Hadronic interactions explored by Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes

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） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：次世代のworld-wide解像型大気チェレンコフ望遠鏡アレイ（IACT）であるCTA（Cherenkov Telescope Array）のOmega Configurationアレイ配置に対するガンマ線感度の見積もりに関して、Monte Carloシミュレーションで使用するハドロン相互作用モデルの差異が残存背景雑音量に影響を与え、その結果として感度曲線に約30%の無視できない大きさで伝搬することを定量的に評価した。さらに、このことにより、IACTがハドロン相互作用モデルの検証において優れた性能を持つことを示し、これらの成果を査読付き論文として発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

解像型大気チェレンコフ望遠鏡（IACT）に限らず、空気シャワー実験の全てにおいて、検出器での観測量を一次物理量（粒子種・エネルギー等）に変換する際には空気シャワーシミュレーションの精度が大きな影響を与える。このため、広いエネルギー帯に対し一貫した描像の下で高精度のハドロン相互作用モデルを得ることは、空気シャワー分野全体において重要なタスクであり続けた。本研究の意義は、IACTを用い、専用の観測時間を要求せず高頻度で到来する宇宙線原子核成分を活用することで、比較的入力宇宙線スペクトルの不定性が小さいTeV近傍エネルギー帯でのハドロン相互作用検証が可能であることを示した点にある。

研究成果の概要（英文）：Regarding the gamma-ray sensitivity estimation for the Omega Configuration array layout of the next-generation worldwide imaging atmospheric Cherenkov telescope array (IACT), the CTA (Cherenkov Telescope Array), we quantitatively evaluated that differences in the hadron interaction models used in Monte Carlo simulations affect the remaining background level, resulting in a significant propagation of about 30% in the sensitivity curve. Furthermore, this study demonstrates that IACTs possess excellent performance in validating hadron interaction models, and these findings were published in a peer-reviewed journal.

研究分野：宇宙線物理学、超高エネルギーガンマ線天文学

キーワード：ハドロン相互作用 宇宙線陽子 解像型大気チェレンコフ望遠鏡 超高エネルギー宇宙線

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー宇宙線が地球大気中の原子核と衝突した際になだれ状に大量の二次粒子群を形成する空気シャワー現象を利用し、地上に設置した装置でこれらの二次粒子を検出することで広大な有効面積を実現する宇宙線の「間接」観測装置：空気シャワー検出器は、多数の装置設計のバリエーションを持ちながら世界各地に多数存在する。これらの空気シャワー実験全般において、既知の粒子・エネルギーによるビームテストは不可能であるため、検出器での観測量を一次宇宙線の物理量(粒子種・エネルギー)に戻す際には、地球大気と宇宙線の相互作用を Monte Carlo シミュレーションで計算機の中で再現し、粒子種やエネルギーが既知であるシミュレーションデータと実データと照合するという過程が必須である。よって、これらの空気シャワー実験全般において、高エネルギー宇宙線と大気中の原子核のハドロン相互作用によって生成される粒子の様態(粒子種、エネルギー、角度分布)を正確に知ることは追い求めるべき重要なタスクであり続けている。

解像型大気チェレンコフ望遠鏡(IACT)は、空気シャワー実験群のうちの一つであり、第三世代と言われる現世代装置に対して次期の world-wide 計画である CTA(Cherenkov Telescope Array)が進行中である。100m スケールであったこれまでの装置群とは異なり、km スケールの広大なアレイの建設が計画されており、20 GeV から 300 TeV までの広範なエネルギー領域をカバーするため、大中小3つの望遠鏡種から構成される複雑なアレイを設計している。

IACTアレイで検出される空気シャワー事象のうち、ガンマ線の占める割合は典型的には0.1%未満であるため、望遠鏡の焦点面イメージの情報を使用して(イメージング法)ガンマ線以外の粒子事象を可能な限り除去することができて初めてガンマ線天文台としての運用が可能になる。この基本原理によりCTAに限らずIACTのガンマ線の検出感度の最も重要な決定要素は有効面積ではなく、これらの背景雑音の除去力である。

従って、IACTのガンマ線観測器としての機能を最大限に引き出すためには、ガンマ線シャワーの特性を理解するだけでなく、背景雑音となる宇宙線(主に陽子、電子)の空気シャワーの特性を理解することも非常に重要である。一方で、原子核-原子核衝突のハドロン相互作用のシミュレーション記述のモデルには未だ複数のモデル間で有意な不定性があることが知られている。このため、すでに装置が完成したIACTアレイでは、感度曲線の見積もりの際にはハドロン相互作用の不定性の影響を受けないように、実機データの残存背景雑音量を使用することが習慣化されている。一方で、CTAのように計画中で実機が存在しないアレイに対する感度推定と配置の最適化においては、背景宇宙線成分についても Monte Carlo シミュレーションデータを使用するほかはない。よって、これらのハドロン相互作用モデルの差異が感度曲線の評価に系統誤差としてどの程度の影響を与えうるのか、定量的に把握することはCTAの性能の最適化の上で重要である。また実データに最も近い最良の相互作用モデルがどれであるかを IACT 分野全体の共通認識として持っていることが望ましい。既存の IACT 群(H.E.S.S., VERITAS, MAGIC)は長年の宇宙線データを蓄積しており、これらのデータを活用して、専用の観測時間を要求することなく TeV 領域のハドロン相互作用の検証を行うことが原理上可能である。

2. 研究の目的

上記の背景状況を踏まえ、研究の目的は大きく分けて二つある。

- I. CTA の最終目標形である 100 台規模の Omega Configuration に対して、既存のハドロン相互作用モデル由来の差異がどの程度の系統誤差を与えるか、アレイ配置と装置応答を含めた full Monte Carlo simulation による定量評価を行い論文として出版する
- II. 既存 IACT のアーカイブデータを用い、上記のハドロン相互作用モデル群の中から best-fit モデルを決定し、また best-fit model MC と実データとの差異を子細に調査し、相互作用モデルを構築する理論家にモデル修正に必要なフィードバックを与えられるだけの情報を提供する

3. 研究の方法

目的 I については、CTA Omega Configuration アレイに対して上記の通り full Monte Carlo simulation を行った。背景粒子として生成するものは陽子と電子とし(原子番号が大きくなるほど空気シャワーの形状がガンマ線とは類似しなくなることが知られているためヘリウム以降の重元素は有意な影響を与えない)、検証に使用するハドロン相互作用モデルは QGSJET-II-03(CTA 公式)、QGSJET-II-04, EPOS-LHC, SIBYLL2.3 を選択した。残存雑音の推定には大量の(約 10^{10} 事象)MC シミュレーション生成が必要となるが、これらには宇宙線研究所の大型計算機システムを活用した。CTA 公式の感度曲線との整合性をとるため、ガンマ線、電子、陽子の QGSJET-II-03 についてはヨーロッパ側で生成されたデータを reference として使用した IACT ではイメージングによる雑音除去はほぼデータのなかのイメージパターン解析のみによって行われるた

め（電荷測定のような簡潔で強力な雑音フラグが存在しない）、データ解析手法の効率は感度曲線を求める上で重要な要素であり、CTA の公式感度曲線を求めているものと同じ解析パイプラインを使用した(EventDisplay)。また、装置応答が含まれたシミュレーションデータだけではなく、空気シャワーを構成する各粒子の情報が取得可能なシミュレーションも並行して、相互作用モデル間の生成粒子の性質の違いが感度曲線に影響を与えている要素と解釈して無矛盾であるか調査した。これらの結果については次項研究成果の欄で記述する。

また、目的 II については、既存の IACT の中で VERITAS(Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) のアーカイブデータを使用することとした。4 台の 12 m 口径望遠鏡からなるステレオ観測システムを持ち(図 1)、2012 年の焦点面検出器のアップデート以来 10 年超の観測データがアーカイブに残されており、そのうち moon-less の好条件のデータは 8,000 hours 以上にもなる。VERITAS のハードウェアと観測時の装置条件に合わせた full Monte Carlo シミュレーションを行い、また入力情報の宇宙線スペクトルには最新の直接観測(CALET, DAMPE, AMS-02)などの結果を取り入れ、実データと MC データ間でのシャワーパラメータの比較によるモデル検証を行っている。また、ハドロン相互作用モデル以外にも系統誤差の要因となるほかの要素(大気モデルの季節変化、反射率の変化、PMT ゲイン等)は多数あるため、これらができるだけ現実に近づけたシミュレーションを実施するパイプラインの開発、またハドロン相互作用の差異をより鋭敏に検出することができるパラメータの導入を機械学習などを用いて検討している。



図 1: VERITAS の望遠鏡アレイ (米国アリゾナ州ツーソン)

4. 研究成果

目的 I の CTA の感度曲線に対するハドロン相互作用モデルの差異の影響評価は、その成果をブラジル・ドイツ・フランス・スペインのメンバーとの国際共著とし研究代表者を責任著者として査読誌にて出版した(M. Ohishi et al., 2021, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **48** 075201)。

IACT において TeV 以上で主要雑音となるのは宇宙線陽子であるが、シャワー形状情報からガンマ線との判別が困難になるケースは、主としてシャワー発展の初期段階で高エネルギー中性パイ粒子を放出した case であることは先行研究(Maier & Knapp 2007)などで知られている。装置応答を含めた full Monte Carlo simulation とは別に、空気シャワー中の二次粒子の情報(エネルギー、位置、方向)を取得するためのシミュレーションを行い、各ハドロン相互作用モデル(QGSJET-II-03, QGSJET-II-04, EPOS-LHC, SIBYLL2.3)について中性パイ粒子の高エネルギー端のスペクトル形状を求めたものを図 2 に示す。これらの 4 つのモデルのうち、QGSJET-II-03 のみ pre-LHC 世代のモデル、それ以外は post-LHC 世代に属する。高エネルギーの中性パイ粒子

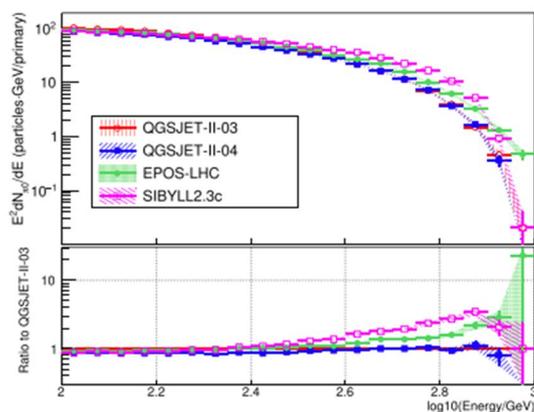


図 2: 各ハドロン相互作用モデル中性パイ粒子生成スペクトルの高エネルギー端。入社陽子エネルギーが 1TeV の場合。

を多く放出するモデルほど、ガンマ線に対する陽子雑音量が多く、ガンマ線感度は悪化する。図 2 から、QGSJET-II-04 と QGSJET-II-04 はほぼ同等の高エネルギー中性パイ粒子を放出し、SIBYLL2.3 と EPOS-LHC はそれらよりも多く、結果としてより劣ったガンマ線感度を与えることが中性パイ粒子のスペクトル特性から予測できる。QGSJET-II-04 は QGSJET-II-03 を LHC のデータを用いて再パラメータ調整したものであるが、この再調整は中性パイ粒子の高エネルギー端の形状に影響を与えず、ガンマ線感度への影響も有意ではないこともこの結果から予測される。

上記論文ではさらに解析の段階ごとに使用するパラメータの比較と考察を行っているがそれらは割愛し、図 3 に最終的に CTA の omega configuration アレイの感度曲線にこれ

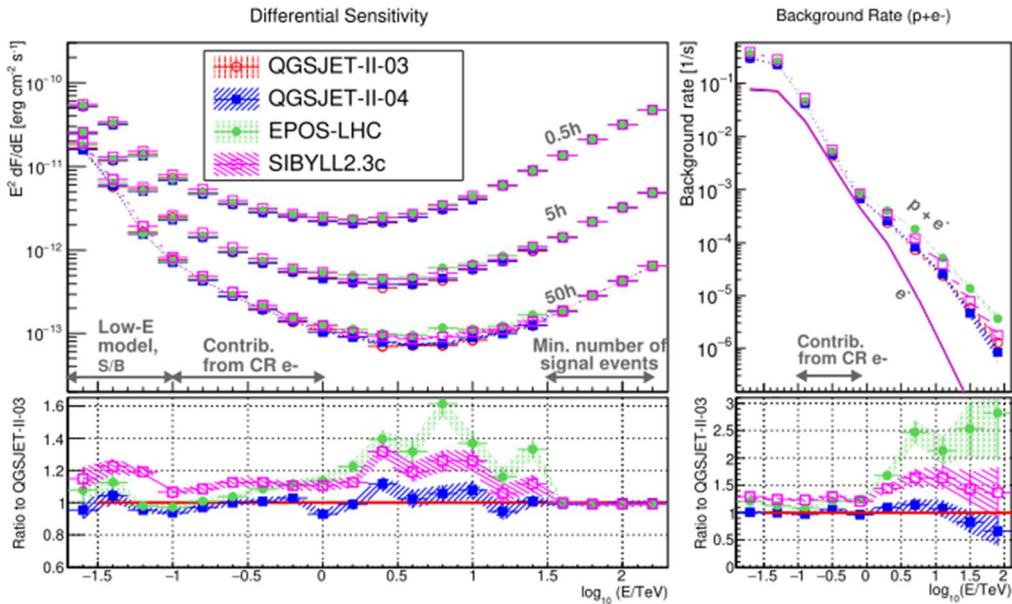


図 3: 各ハドロン相互作用モデルを使用したときの CTA omega configuration アレイに対する感度曲線の差異。

らのハドロン相互作用モデルが与える影響を定量評価したものを示す。QGSJET-II-03/04の間には背景雑音頻度と感度曲線に有意な差異は見られず、EPOS-LHCとSIBYLL12.3については、これらの二つのモデルと比較して背景雑音頻度で2倍(EPOS-LHC)程度の大きな差異が見られ、結果としてこれは1-20 TeV領域の感度曲線に30%程度の無視できない差異として伝搬する。また、EPOS-LHCには残存雑音量にエネルギー依存性がみられる(高エネルギー側はよりガンマ線様の雑音事象を生成する)。翻ってこの結果を解釈すると、CTAはハドロン相互作用検証に対して優れた能力を持つことが示され、また現存のIACT群もCTAほどではないにしても相互作用検証に対する有効な検出器であると考えられる。宇宙線陽子成分はほぼ等方的かつガンマ線の1000倍以上の頻度で到来するため、新たに専用の観測時間を要求せずアーカイブデータを用いた検証が行えることも大きなメリットである。

目的IIの成果については、VERITASの装置応答を含んだfull MC simulationを複数のハドロン相互作用モデルに対し宇宙線研究所の計算機を活用して大量生成し、VERITASのアーカイブデータから厳選した少量のデータとMCと比較した結果をVERITASの内部会議では報告済である。データ選定の方法や系統誤差を抑えながらの使用データ量の増量、VERITASサイトでの大気モデルの不定性の影響、VERITASの装置パラメータの経年変化の影響の考察、ミュオン粒子パターンの利用の有効性など、数多くのフィードバックを受け、またVERITASの解析ソフトウェアも日々アップデートされるため、それらに対応しつつcollaboration reviewを通して結果を対外的に発表できるように研究体制を再構築中である(最終年度は相対的に研究に使用できる時間の割合が低かったこと、研究代表者が健康を害したため生産性が低下し治療のための休養の優先度を上げなければならず、予定していたよりも進捗が遅れたことについては残念である)。今後体調の回復を図りつつ、研究のスピードアップのためにより効率的な研究プランを再度練り直し、このテーマでの研究を引き続き推進する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 TheCherenkov Telescope Array Consortium, Acero F., Acharyya A., Adam R. et al.	4. 巻 150
2. 論文標題 Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to spectral signatures of hadronic PeVatrons with application to Galactic Supernova Remnants	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102850 ~ 102850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2023.102850	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Michiko Ohishi, Luan Arbeletche, Vitor de Souza, Gernot Maier, Konrad Bernloehr, Abelardo Moralejo Olaizola, Johan Bregeon, Luisa Arrabito, Takanori Yoshikoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of the uncertainty in the hadronic interaction models on the estimation of the sensitivity of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/abfce0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Abe H., et al,	4. 巻 680
2. 論文標題 Performance of the joint LST-1 and MAGIC observations evaluated with Crab Nebula data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A66 ~ A66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202346927	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Abe H., et al.	4. 巻 956
2. 論文標題 Observations of the Crab Nebula and Pulsar with the Large-sized Telescope Prototype of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace89d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

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
2. 発表標題 CTA報告 187: ハドロン相互作用モデルとCTA
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	ドイツ電子シンクロトロン	マックスプランク物理学研究所		
ブラジル	サンパウロ大学			
スペイン	バルセロナ自治大学高エネルギー物理学研究所			
フランス	モンペリエ大学			