

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654061

研究課題名(和文) 直接チェレンコフ光の高精度撮像による宇宙線核種の精密測定

研究課題名(英文) Precision Measurement of Cosmic Ray Chemical Composition by High Resolution Imaging Direct Cherenkov Light

研究代表者

佐々木 真人 (SASAKI, MAKOTO)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：40242094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：10-100TeVの宇宙線が空気シャワー(EAS)生成前に放射する“直接チェレンコフ光(DC)”の発光量は電荷Zの2乗に比例し、その測光は不定性の少ない核種同定となる。その際、高解像によるDCとEASの明確な分離が鍵である。1分(=0.015度)以下の優れた解像度を実現する撮像装置を開発した。その装置をマウナロア山のAshra観測地に設置された集光器の光学焦点面に装着し、調査観測を遂行した。データ解析は継続中である。

研究成果の概要(英文)：The measurement of "Direct Cherenkov" (DC) light, of which intensity is proportional to the charge Z of the primary cosmic ray particle, should be a clear identification of particle species with less ambiguities. In that case, clear discrimination between DC and air shower components is a key. We have developed a very precise imaging device with the angular resolution less than 1 arcmin (i.e. 0.015 deg) for this purpose. We installed it onto a light collector in the Ashra Observatory on Mauna Loa in Hawaii and performed several investigation observations. The data analysis is on going.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：宇宙線核種 宇宙線起源 銀河内宇宙線 宇宙線スペクトル 超新星 宇宙線伝播 直接チェレンコフ光 宇宙線加速

1. 研究開始当初の背景

10_{eV} から 10_{eV} の 1 次宇宙線が大気中で 2 次粒子生成する前に放射する大気チェレンコフ光("直接チェレンコフ光")を高精度で複眼撮像し、1 次宇宙線ごと核種を精密に測定する。地上検出のみ可能である 10_{eV} 以上の 1 次宇宙線核種成分の測定は宇宙線物理における積年の重大な課題であった。そのエネルギー遷移は宇宙線起源の問題にも強く関連する。現状、空気シャワー実験の核種同定の結果は互いに矛盾し、従来の測定法の困難さを示唆している。直接チェレンコフ光の発光量は粒子の電荷数 Z の 2 乗に比例するため、その測光は、原理的な不定性がない核種同定となる。

宇宙線スペクトルには、-2.7 の冪乗則に従う 10 桁に及ぶ大域的構造とともに、3-4 × 10¹⁵eV で冪が-3.1 に変化する"``knee"と呼ぶ局所的構造(Kulikov & Khristiansen 1958)がある。その物理起源として、加速機構(Jokipii 1987 など多数)、銀河内伝播(Ptuskin et al. 1993 など)、近傍天体(Bednarek & Protheroe 2002 など)、ハドロン反応(Nikolsky & Romachin 2000 など)等の説が提唱され、多数の気球搭載型の直接検出や空気シャワー実験(図の誤差棒)が行われてきたが、未だ解明には至っていない。気球実験では感度が knee に届かず、空気シャワー実験では 2 次粒子の間接検出に起因する多種の不定性を誤差として引き込んでしまう。

超新星残骸での衝撃波加速による陽子の加速限界は 10¹³-10¹⁴eV と予想されていた(Lagage & Cesarsky 1983)が、近年、H.E.S.S. が SNR RXJ1713.7-3946 の殻で 10¹⁴eV を超える加速領域を確認した(Aharonian et al. 2007)。衝撃波前段での宇宙線流の不安定性による強い非一様磁場が増幅され、加速限界が 2 桁上がることが理論からも示され(Bell 2004)、若い超新星残骸の X 線観測から 150-500μG の強磁場の存在が確認された(Volk et al. 2005)。この磁場増幅機構と複数の超新星型の混合を考慮した、最新の計算(Ptuskin et al. 2010)では、knee を含む宇宙線スペクトル全体が良く再現され、鉄の加速限界は、銀河内外起源の境界とされてきた"``ankle"(5 × 10¹⁸eV)にまで達する。

この理論では、図(実線)で示すように、宇宙線成分が重核種へとエネルギー遷移する特徴がある。検証には、2 次生成の不定性がない、高感度での核種の直接測定が強く望まれる。42 度の視野と~2 分角の解像度をもつ Ashra 望遠鏡で、空気シャワーをトリガー撮像し、1 次粒子による直接チェレンコフ光像を抽出し測光する。その光量は 1 次粒子の荷電数 Z の 2 乗に依存するため、事例ごと核種の直接決定に他ならない。

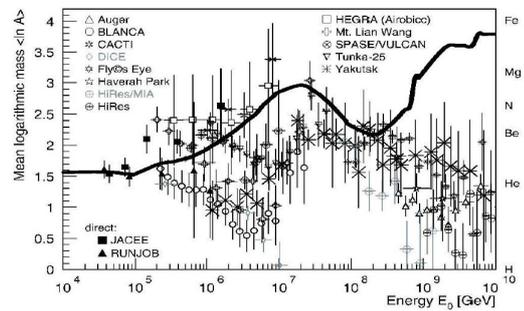


図 1 : 平均対数質量スペクトル。計算(実線)、実験(誤差棒)。

knee を含む 10¹⁴-10¹⁵eV の領域で年間 10 万事例以上の複眼測光像が取得でき、エネルギーごとの核種の精密決定が可能である(後述)。ankle 以上のエネルギーで、従来のデータは上述の銀河内加速理論から乖離し、軽核種優勢を示している。これは、異方性がない観測とともに、銀河外起源説から自然な結果であった。しかし最近、最大の空気シャワー実験 Auger は、2 次生成ミュー粒子分布や空気シャワー縦発達の解析から、ankle 以上で重核種優勢へと遷移する衝撃的な結果を報告した(Abraham et al. 2010)。光分解により銀河外から重核種成分の到来は難しく、ankle 以上でも銀河内起源を強く示唆している。過去の銀河内 GRB を起源とするモデル(Calvez et al. 2010)も提案されている。本研究が、knee 領域宇宙線起源の確定だけでなく、ankle 領域の物理解明に大きく貢献する可能性も高い。

knee 領域 1 次宇宙線の核種同定が銀河宇宙線起源の解明の鍵である。最近の Auger の結果により、銀河外起源と信じられていた ankle を超えた領域の物理機構解明にも、さらに強く関連してきたといえる。しかし、気球での直接測定では knee 領域での流束が小さく十分な検出感度が望めない。また、従来の地上実験では、空気シャワー(EAS)を媒介して測定するため、不定性が大きく、また、MC シミュレーションに依存せざるを得ない。実際、KASCADE では 100%、Tibet では 30%の系統誤差を MC 依存性に計上している。また、EAS 毎の 1 次核種同定は不可能であり、平均対数質量や最尤度など統計的な指標により"``識別"を行っている。これらの困難のため、knee 付近に鉄流束の測定データは乏しい。

直接チェレンコフ光(DC)撮像による測定は、原理的に鉄などの重核種同定が可能であり、10¹⁵eV まで、MC 依存や不定性の少ない直接検出が可能となる。この DC 法は Kieda et al. (Astropart.Phys.15,287 (2001))が提案し、撮像型大気チェレンコフ光望遠鏡(IACT)H.E.S.S.が初めて地上観測で応用した(Phys.Rev.D 75 (2007))。

大気に垂直入射した宇宙線核子は、20-40km 上空で第 1 衝突するまで DC を放出し、第 1 衝突以降は 2 次生成による EAS を発達させる。典型的な放出角は、EAS では 0.4 度以上だが、DC では発生位置と屈折率(大気密度)に依存し、0.15 度から 0.3 度へと変化する。つまり、実験の上で重要なのは、~0.1 度より十分精細な解像度で撮像できれば、測光画像から DC と EAS を分離でき、さらに、DC の形状さえも分解できる。核子の荷電数 Z の分解能と信頼性が劇的に向上すると考えられる。

2. 研究の目的

図 2 に Ashra による MC で鉄からの DC + EAS をシミュレートした撮像例を示した。解析の要は EAS の背景から DC を精度よく分離抽出することにある。EAS 背景は高エネルギーになるほど DC を被って厳しくなる。H.E.S.S.が 0.16 度 (9.6 分)の解像度であり DC と EAS を分離するにはぎりぎり厳しく、実際、DC を受光した画素に EAS が多く混合するため、 10^{14}eV (knee の 1/40)までしか鉄流量を導出できていない(論文先述)。これに対して、Ashra は 0.05 度(3 分)以下(画素解像度は 0.021 度(1.2 分))であり、適切な到来方向とインパクトパラメタの事例を用いれば、EAS 背景からの DC の除去分離は事例毎に容易となり、有利である。このように、広視野高解像 IATC とも言える Ashra 望遠鏡による複眼観測は DC 測光に対して非常に有利であり、knee 領域の物理解明を画期的に推し進めることが可能である。

Ashra-1 はハワイ島マウナロア山中腹 3300m の地で光学閃光と宇宙線(主にニュートリノ)大気発光を広視野高精度監視する計画である。既に 2 年半(798 日間)で 3763 時間(好天率 94.4%、稼働率は 99.5%)の光学観測を行い、GRB 衛星アラートの 12 事例を視野内でクロス探査した。また、初の PeV-EeV 領域のタウニュートリノ探査観測を行った (ApJ. Lett. 736:L12, 2011)。核子 EAS 撮像データからエネルギー再構成も行い、knee 以上の宇宙線スペクトルも求め、鉄成分を仮定した MC との一致を確認している。本研究で、knee 領域における DC 法が例証されれば、宇宙線分野の積年の課題である knee 領域宇宙線、および、ankle の物理過程の確実な解明に向けた卓越した精密実験を本格的に展開して開始する基盤を得る。

本計画では、高分解能と正確な方向決定により、この優れた核種同定法の可能性を調査し、knee の物理起源決定を目指す基礎とする。

3. 研究の方法

DC 法の利点を最大化するため系統誤差を極

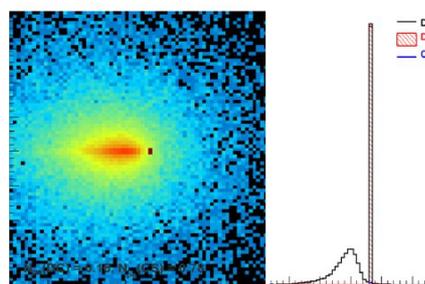


図 2: Ashra MC 鉄 DC+EAS 撮像と射影

力廃した実験としたい。高解像度化による DC と EAS との分離が本研究の鍵である。まず、その性能調査のため、さらなる高解像の撮像を行う。平成 24 年度(H24)には、広視野と高解像を両立した Ashra 望遠鏡を基に、従来の IATC と同様の主光線軸付近の狭い視野に限定して光学調整し、1 分(=0.015 度)以下の優れた解像度を確保する。高精度撮像を実現し例証する。その上で、100-200TeV にて、H.E.S.S.の鉄流量測定を同等の統計数で比較し、本研究の優位性を明示する。平成 25 年度(H25)には、理解された系統誤差に見合う統計精度を得るよう、再び広視野化し検出効率を上げる。初めて、 10^{15}eV (V)以上の領域まで高精度の核種同定を行い、鉄流量スペクトルなどを導出し、その振る舞いからモデルを検定する。

平成 24 年度(H24)には、広視野と高解像を両立した Ashra 望遠鏡を基に、従来の IATC と同様の主光線軸付近の狭い視野に限定して光学調整し、1 分(=0.015 度)以下の優れた解像度を確保する。高解像度撮像を実現し例証する。平成 25 年度(H25)には、理解された系統誤差に見合う統計精度を得るよう、広視野化し検出効率向上を目指して試験観測する。

新焦点面装置の設計・製作・試験 [佐々木]
 既存 PIP との接続、隣接望遠鏡からトリガー配線実装 [連携: 浅岡]
 DC+EAS の分離状況の調査のための試験観測、解析 [佐々木]
 高視野化実装、稼働確認、データ処理の実装・調整 [連携: 浅岡]
 高視野観測・解析 [佐々木]
 成果発表

4. 研究成果

10-100TeV の 1 次宇宙線が大気中で 2 次粒子生成する前に放射する大気チェレンコフ光(“直接チェレンコフ光(DC)”)を高解像度で撮像し、1 次宇宙線ごと核種を精密に測定する観測・解析方法について調査した。地上検出のみ可能である、10TeV 以上の 1 次宇宙線核種成分の測定は宇宙線物理における重要な

課題であった。そのエネルギー遷移は宇宙線起源にも強く関連する。現状、空気シャワー(EAS)観測による核種同定の結果は決定力を欠き、従来の測定法の困難さを示唆する。DC光の発光量は1次粒子の電荷Zの2乗に比例し、その測光は不定性の少ない核種同定となる。

本計画では、高分解能と正確な方向決定により、この優れた核種同定法を調査実証し、1次宇宙線の物理起源の決定を目指している。DC法の利点を最大化するため系統誤差を極力廃した実験とした。高解像度化によるDCとEASとの分離が本研究の鍵である。その性能調査のため、さらなる高解像の撮像を行う。

平成24年度(H24)には、広視野と高解像を両立したAshra望遠鏡を基に、従来のIATCと同様の主光線軸付近の狭い視野に限定して光学調整し、1分(=0.015度)以下の優れた解像度を実現する撮像装置を開発した。ラボにて組み上げ試験により順当な性能を確認した。

平成25年度短期に海外遠征をくりかえし、前記のラボにて開発調整済みの撮像装置を、ハワイ島マウナロア山中腹高度3300mにあるAshra観測地に設置済みの格納庫付集光器の光学焦点面に装着して、光学調整、データ取得系への組み入れの後、観測試験を行った。順調にデータ取得し長期連続運転が可能であることを確認した。

協力研究員の転出に伴い、若干の計画の遅れが生じたが、研究代表者その他のAshra共同研究者が補い、計画に必要な調査観測を順当に遂行した。

成果一部を学会講演で発表し、論文として出版すべく準備中である。

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)

[雑誌論文](計 5件)

: M.Sasaki, Search for PeV-EeV Tau Neutrinos and Optical Transients from Violent Objects with Ashra-1, Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications - Proceedings of the 14th ICATPP Conference, 査読有、1巻、2014、112-119 DOI:10.1142/9789814603164_0018

: Y. Aita, T. Aoki, Y. Asaoka, H.M Motz, M. Sasaki, C. Abiko, C. Kanokohata, S. Ogawa, H. Shibuya, T. Takada, T. Kimura, J. G. Learned, S. Matsuno, S. Kuze, P. Chang, *G.W-S. Hou, Y.B. Hsiung, J-G. Shu, K. Ueno, M. Wang, P. M. Binder, J. Goldman, N. Sugiyama, Y. Watanabe, C-C. Hsu (Ashra NTA Collaboration), Ashra NTA: Towards Survey of Astronomical Tau Neutrino Sources, JPS Conference Proceedings, 査読有、1巻、2014、3095-3098、<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.1.013095>

: Y. Aita, T. Aoki, Y. Asaoka, Y. Morimoto, H.M Motz, M. Sasaki, C. Abiko, C. Kanokohata, S. Ogawa, H. Shibuya, T. Takada, T. Kimura, J. G. Learned, S. Matsuno, S. Kuze, P. M. Binder, J. Goldman, N. Sugiyama, Y. Watanabe (Ashra-1 Collaboration), Trigger and readout system for the Ashra-1 detector, JPS Conference Proceedings, 査読有、1巻、2014、3111-3114 <http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.1.013111>

: Asaoka, Yoichi; Sasaki, Makoto, Cherenkov τ shower earth-skimming method for PeV-EeV $\nu\tau$ observation with Ashra, Astroparticle Physics, 査読有、41巻、2013、7-16、DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.10.001

: 浅岡陽一 佐々木真人 GRB 起源 PeV-EeV タウニュートリノ初探査、日本物理学会、査読無、67巻、2012、710-714

[学会発表](計 11件)

: 佐々木真人 Ashra-1 全体報告 日本物理学会 第70回年次大会、2015年03月21日~2015年03月24日、早稲田大学(東京都新宿区)

: 佐々木真人 Ashra-1 全体報告 日本物理学会 2014年秋季大会、2014年09月18

日～2014年09月21日、佐賀大学(佐賀県佐賀市)

: 佐々木真人 Ashra-1 全体報告 日本物理学会 第69回年次大会、2014年03月29日、東海大学(神奈川県平塚市)

: M.Sasaki、Search for PeV-EeV Tau Neutrinos and Optical Transients from Violent Objects with Ashra-1, 14th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications、2013年09月23日～2013年09月27日、Villa Olmo, Como, Italy、コモ(イタリア)

: 佐々木真人 Ashra-1 全体報告 日本物理学会 2013年秋季大会、2013年09月20日、高知大学(高知県高知市)

: Y. Aita, T. Aoki, Y. Asaoka, H. M. Motz, M. Sasaki, C. Abiko, C. Kanokohata, S. Ogawa, H. Shibuya, T. Takada, T. Kimura, J. G. Learned, S. Matsuno, S. Kuze, P. Chang, *G. W.-S. Hou, Y. B. Hsiung, J.-G. Shu, K. Ueno, M. Wang, P. M. Binder, J. Goldman, N. Sugiyama, Y. Watanabe, C.-C. Hsu (Ashra NTA Collaboration), Ashra NTA: Towards Survey of Astronomical Tau Neutrino Sources, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs ASEPS3 The third Asia-Europe Physics Summit、2013年07月15日、幕張メッセ(千葉県美浜区)

: Y. Aita, T. Aoki, Y. Asaoka, Y. Morimoto, H. M. Motz, M. Sasaki, C. Abiko, C. Kanokohata, S. Ogawa, H. Shibuya, T. Takada, T. Kimura, J. G. Learned, S. Matsuno, S. Kuze, P. M. Binder, J. Goldman, N. Sugiyama, Y. Watanabe (Ashra-1 Collaboration)、Trigger and readout system for the Ashra-1 detector, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs ASEPS3 The third Asia-Europe Physics Summit、2013年07月14日、幕張メッセ(千葉県美浜区)

: Y. Aita, T. Aoki, Y. Asaoka, H. M. Motz, M. Sasaki, C. Abiko, C. Kanokohata, S. Ogawa, H. Shibuya, T. Takada, T. Kimura, J. G. Learned, S. Matsuno, S. Kuze, P. M. Binder, J. Goldman, N. Sugiyama, Y. Watanabe (Ashra-1 Collaboration), Search for PeV-EeV Tau Neutrinos and Optical Transients from Violent Objects with Ashra-1, 33th Intl. Cosmic Ray Conf.、2013年07月02日～2013年07月09日、Centro Brasileiro de Pesquisas Fisicas (CBPF) Rua Xavier Sigaud 150, Rio

de Janeiro CEP 22290-180, RJ, Brazil、リオデジャネイロ(ブラジル)

: Y. Aita, T. Aoki, Y. Asaoka, H. M. Motz, M. Sasaki, C. Abiko, C. Kanokohata, S. Ogawa, H. Shibuya, T. Takada, T. Kimura, J. G. Learned, S. Matsuno, S. Kuze, P. Chang, *G. W.-S. Hou, Y. B. Hsiung, J.-G. Shu, K. Ueno, M. Wang, P. M. Binder, J. Goldman, N. Sugiyama, Y. Watanabe, C.-C. Hsu (Ashra NTA Collaboration), Ashra NTA: Towards Survey of Astronomical Tau Neutrino Sources, 33th Intl. Cosmic Ray Conf. 2013年07月02日～2013年07月09日、Centro Brasileiro de Pesquisas Fisicas (CBPF) Rua Xavier Sigaud 150, Rio de Janeiro CEP 22290-180, RJ, Brazil、リオデジャネイロ(ブラジル)

: 佐々木真人 Ashra-1 全体報告 日本物理学会 第68回年次大会、2013年03月27日、広島大学(広島県東広島市)

: 佐々木真人 Ashra-1 全体報告 日本物理学会 2012年秋季大会、2012年09月13日、京都産業大学(京都府京都市)

〔産業財産権〕
出願状況(計1件)

名称: 撮像光学系及び撮像装置
発明者: 佐々木真人
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許願 2013-070634 号
出願年月日: 平成 26 年 3 月 2 8 日
PCT/JP2014/59376
国内外の別: 国外

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/index.html>
Ashra
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/̃ashra/>
佐々木研究室
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/̃sasaki/>
佐々木真人ホームページ
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/̃sasaki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 真人 (SASAKI Mokoto)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 40242094