

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244029

研究課題名(和文) 究極感度 GeV - TeV 広帯域宇宙ガンマ線観測による高エネルギー天体の研究

研究課題名(英文) Study of high-energy celestial objects by wide-band GeV-TeV gamma-ray observations with extreme high sensitivity

研究代表者

窪 秀利 (KUBO, Hidetoshi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40300868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：20 GeVから300 TeVの宇宙ガンマ線を従来より一桁高い感度で観測する次期天文台CTA計画で低エネルギー側に感度を持つ大口径23m望遠鏡の焦点面カメラ(光検出器とGHz波形サンプリング読み出し回路)のモジュールを開発した。また、現在稼働中のTeVガンマ線望遠鏡MAGICとGeV領域ガンマ線フェルミ衛星を用いて、活動銀河核、パルサー、連星系などを観測し、放射機構および粒子加速機構に対して新たな知見を得た。さらに、これらの観測結果から、CTAで狙うべき研究対象を検討した。

研究成果の概要(英文)：CTA is a next-generation gamma-ray observatory with an order of magnitude higher sensitivity in the 20 GeV - 300 TeV energy band than current telescopes. We have developed a camera module (photo-detector and GHz waveform-sampling readout electronics) for a large sized telescope of the CTA. With the gamma-ray telescopes in operation, MAGIC and Fermi, we have observed high-energy celestial objects such as active galactic nuclei, pulsars, and binary systems, and then studied the emission mechanism and the particle acceleration mechanism. From these observational results, we have considered the science themes with CTA.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙線 ガンマ線 ブラックホール 活動銀河核 中性子星 大気チェレンコフ望遠鏡 高速サンプリング回路

1. 研究開始当初の背景

宇宙 TeV ガンマ線の観測は、大気チェレンコフ望遠鏡により、ここ 10 年間で急速に進展し、現在では銀河系内外から 100 を越える天体が検出された。また、GeV ガンマ線は Fermi 衛星により 2000 近くの天体が検出され、TeV ガンマ線の観測とあわせて、宇宙線の起源、宇宙における非熱的過程、銀河間空間を満たす赤外・可視領域背景放射等の問題が解明されつつある。このガンマ線宇宙物理学をさらに大きく発展させるため、我々は次期チェレンコフ望遠鏡アレイ計画 Cherenkov Telescope Array(CTA)を推進している。CTA 計画は、100 台近くの大・中・小口径のチェレンコフ望遠鏡を並べ、20 GeV から 300 TeV の宇宙ガンマ線観測を、従来より一桁高い感度で実現する国際協力実験である。

2. 研究の目的

(1) CTA 計画の中で最も低いエネルギー閾値(20 GeV)を持つ大口径 23m 望遠鏡(図 1)の焦点面カメラ(光検出器と読み出し回路)の開発を行い、最終仕様品を完成させ、量産を開始する。

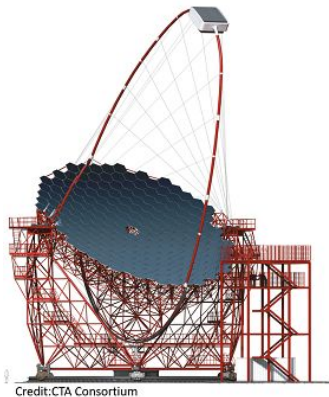


図 1 : 次期ガンマ線天文台 CTA の大口径 23 m 望遠鏡 (完成予想図)。北および南半球サイトに、各 4 台設置される。

(2) 現在稼働中の TeV ガンマ線望遠鏡 MAGIC と、GeV ガンマ線衛星 Fermi を用いた、100 MeV から 10 TeV までの広帯域ガンマ線観測を行い、宇宙線の起源、宇宙における非熱的過程、赤外・可視領域背景放射等の問題の解明に挑む。この結果を踏まえて、CTA で狙うべき研究対象を検討し、CTA 稼働時代における宇宙物理学発展の礎を作る。

3. 研究の方法

(1) CTA の現地建設に向けて、本研究で、大口径 23m 望遠鏡の焦点面カメラ(光検出器と読み出し回路)の開発を行い、量産を開始できる段階にまで仕上げ、望遠鏡に搭載するカメラが持つ総ピクセル数の 1/14 のミニカメラを製作し、性能評価を行う。

(2) 国際協力により現在稼働中の TeV ガンマ

線望遠鏡 MAGIC と Fermi 衛星を用いた、0.1 GeV から 10 TeV の広帯域ガンマ線観測を行い、銀河系内外の宇宙線起源、宇宙の非熱的現象の解明に取り組む。対象は、活動銀河核、パルサー・パルサー星雲、連星系、ガンマ線バーストなどである。さらに活動銀河核の観測から、宇宙赤外線・可視背景放射強度を求める。これらの観測研究から、CTA で狙うべき研究対象を検討する。

4. 研究成果

(1) 20 GeV から 300 TeV のガンマ線を従来よりも一桁高い感度で観測する大気チェレンコフ望遠鏡アレイの次期計画 CTA の口径 23 m 望遠鏡に搭載する焦点面カメラについて、以下の開発を行った。

光検出器である、1.5 インチ径スーパーバイアルカリ光電子増倍管の改良と評価を行い、仕様を最終決定し量産した。

7本の光電子増倍管からの信号を7系統同時に、1 GHz で波形サンプリングする回路を開発した(図 2)。この回路には、スイス PSI 研究所が開発した低消費電力アナログメモリが使われ、デジタル化された波形データはギガビットイーサネットで転送される。

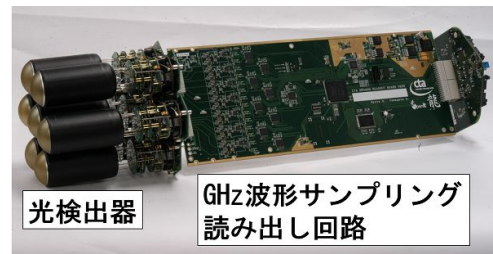


図 2 : 本研究で開発した、CTA 大口径望遠鏡のカメラモジュール。望遠鏡 1 台あたり、このモジュールが 265 台、焦点面に配置される。

光電子増倍管 1 本毎の 1 次トリガー、続いて、クラスタ(光電子増倍管 7 本単位)間の 2 次トリガー生成を、スペインやドイツのグループと協力し開発した。

CTA スペイングループが製作した望遠鏡カメラ筐体に、本研究で開発した読み出し回路基板 35 枚と光電子増倍管のモジュール(全体ピクセル数の約 1/8)を取り付けて、構造的に問題がないことを確認した。

本研究で開発した読み出し回路基板に、光電子増倍管およびライトガイドを取り付けて、望遠鏡に搭載するカメラの 1/14 スケールのミニカメラ(図 3)を製作し、LED 光の照射量や光電子増倍管の電圧を変えながら、性能評価を行い、最終仕様品を完成させ、量産を開始した。

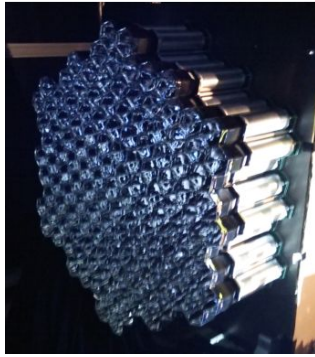


図3：本研究で開発した、ライトガイド付光電子増倍管 133 本と読み出し回路からなるミニカメラ(図2のモジュールが19台並ぶ)。

(2) 現在稼働中の TeV ガンマ線望遠鏡 MAGIC と Fermi 衛星を用いた 100 MeV から 10 TeV までの広帯域ガンマ線観測を行い、以下の成果を得た。

電波銀河 IC 310 から、約 5 分で強度が 2 倍変化する 線フレアを MAGIC で検出した(図4左)。もし、線放射領域のサイズが、ブラックホールのサイズならば、ジェットによる相対論的時間短縮効果を考慮しても、変動スケールは約 20 分であるため、MAGIC による観測結果は、線放射がブラックホールサイズより狭い領域で起こっていることを示す。図4右に示すように、放射機構として、回転ブラックホール(BH)極軸付近の磁気圏に、電位ギャップが発生し、降着円盤やトラスからの光子・光子衝突で対生成された電子・陽電子が加速され、逆コンプトン散乱により線を放射していると考えられる。

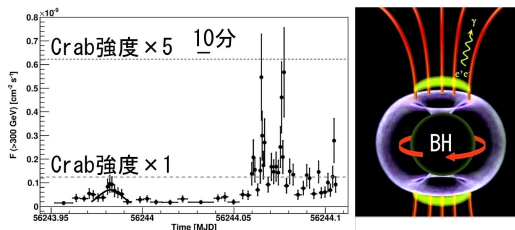


図4：電波銀河 IC310 のガンマ線($E > 300$ GeV)強度変動(左)とガンマ線放射機構(右)。

活動銀河核 PKS 1441+25(赤方偏移 0.94) を MAGIC で観測し、超高エネルギー線放射を発見した。Fermi と MAGIC のスペクトル解析から、線の放射領域は、準静時は、広輝線領域(BLR)の内側、フレア時は BLR 外側であることが示唆された。また、天体からのガンマ線が地球に届くまでに、可視赤外背景放射(EBL)によって吸収されることを利用し、観測されたスペクトルから、EBL の上限値を得た。銀河形成理論による EBL モデルや、銀河数カウントと無矛盾であった。

活動銀河核 QSO B0218+357(赤方偏移

0.95)を MAGIC で観測し、超高エネルギー線放射を発見し、TeV 領域で、現時点で最遠方の線天体となった。MAGIC で検出されたフレアは、Fermi 衛星でフレアが観測された約十日後であり、重力レンズ効果を示す結果となった。また、Fermi と MAGIC で観測されたスペクトルは、ジェット外部からの光子とジェット内電子による逆コンプトン放射で説明できることが分かった。さらに、線の吸収量から求めた EBL 強度は、現在の EBL モデルと無矛盾であった。

Fermi 衛星が発見した未同定天体 2FGL J2001.1+4352(その後、BL Lac 型天体と判明)を MAGIC で観測し、超高エネルギーガンマ線領域で初検出した(MAGIC J2001+435 と命名)。その多波長スペクトル(図5)は、一つの領域内のシンクロトロン自己コンプトン(SSC)放射で説明できることが分かった。

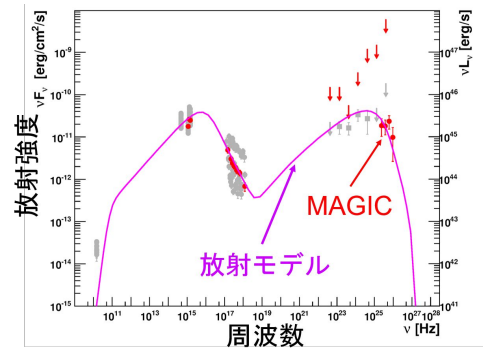


図5：BL Lac 天体 MAGIC J2001+435 の多波長スペクトルと SSC 放射モデル。

活動銀河核 1ES 1011+496、H1722+119、1ES 1215+303 を MAGIC で観測し、超高エネルギー線放射を発見した。線放射は、SSC 放射で説明することができた。

かにパルサーを MAGIC で観測し、TeV 線パルスを発見した(図6)。加速電子のローレンツ因子の下限値を算出し、中性子星の光

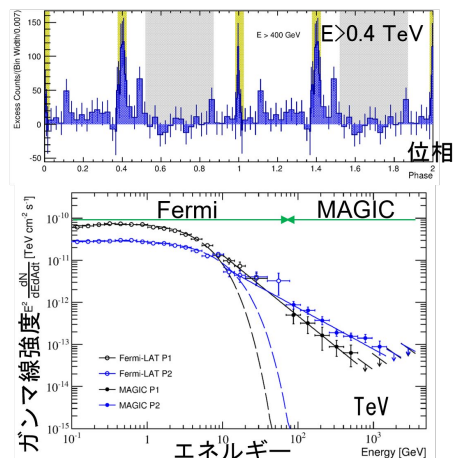


図6：MAGIC で観測された、かにパルサーからのパルス線(上)と、Fermi と MAGIC で観測されたスペクトル(下)。

円柱内における逆コンプトン放射が強く示唆された。

かにパルサーのブリッジ放射を MAGIC より 50 GeV 以上で初めて検出し、そのスペクトルは 2 つのガンマ線パルス時 P1、P2 のものとほぼ同じ幕で表されることを発見した。この発見は放射領域の磁場構造についての情報を与え、磁気カスケードモデルで解釈すると、中性子星の光円柱付近の磁場でトロイダル成分が存在することを示唆した。

ガンマ線連星 LS I +61° 303 を MAGIC で観測し、線強度変動を調べ、連星軌道周期に加え、電波で観測された超軌道周期と同じ周期でも変動していることを発見した。

ガンマ線連星 HESS J0632+057 を MAGIC で観測し、140 GeV 以上で線を検出し、スペクトルに折れ曲がりが見られず、放射強度ピークが GeV 領域以下であることが分かった。

線バースト GRB 090102 を MAGIC で観測したが検出されず、アフターグロー放射に対する線上限値を得た。

矮小楕円体銀河 Segue 1 を MAGIC で観測し、暗黒物質の対消滅ガンマ線に対する上限値を得た。

現行の線望遠鏡の観測結果をもとに、CTA で狙うべき研究対象を検討し、活動銀河核を用いた可視赤外背景放射算出や超新星残骸などの測定精度などを計算した。

(3) 今後は、本研究で開発した CTA 大口径望遠鏡のカメラモジュールの量産および品質管理を行い、望遠鏡に取り付け、観測を開始する予定である。また、本研究で得られた、MAGIC および Fermi の観測成果を踏まえ、CTA による観測を行い、宇宙線起源などの問題に取り組み、宇宙物理学をさらに発展させる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 46 件)

J.Aleksic, H.Kubo(68 番目), 以下番目を省略, J.Kushida(69), R.Orito(102), M.Teshima(140), 他 159 名, Insights into the emission of the blazar 1ES 1011+496 through unprecedented broadband observations during 2011 and 2012, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Vol.591, A10, 2016
DOI:10.1051/0004-6361/201527176

M.L.Ahnen, H.Kubo(67), J.Kushida(68), R.Orito(101), M.Teshima(137), 他 142 名, MAGIC observations of the February 2014 flare of 1ES 1011+496 and ensuing

constraint of the EBL Density, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Vol.590, A24, 2016
DOI:10.1051/0004-6361/201527256

M.L.Ahnen, H.Kubo(67), J.Kushida(68), R.Orito(100), M.Teshima(139), 他 155 名, Multi-Wavelength Observations of the Blazar 1ES 1011+496 in Spring 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Vol.459, pp.2286-2298, 2016
DOI:10.1093/mnras/stw710

M.L.Ahnen, H.Kubo(71), J.Kushida(72), R.Orito(104), M.Teshima(161), 他 156 名, Investigating the peculiar emission from the new VHE gamma-ray source H1722+119, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Vol.459, pp.3271-3281, 2016
DOI:10.1093/mnras/stw689

M.L.Ahnen, H.Kubo(70), J.Kushida(71), R.Orito(103), M.Teshima(140), 他 147 名, Super-orbital variability of LS I +61° 303 at TeV energies, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Vol.591, A76, 2016
DOI:10.1051/0004-6361/201527964

M.L.Ahnen, H.Kubo(72), J.Kushida(73), M.Teshima(142), 他 149 名, Detection of very high energy gamma-ray emission from the gravitationally lensed blazar QSO B0218+357 with the MAGIC telescopes, *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Vol.595, A98, 2016
DOI:10.1051/0004-6361/201629461

M.L.Ahnen, H.Kubo(66), J.Kushida(67), R.Orito(99), M.Teshima(135), 他 241 名, Very High Energy gamma-Rays from the Universe's Middle Age: Detection of the $z = 0.940$ Blazar PKS 1441+25 with MAGIC, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Vol.815, id.L23, 2015
DOI:10.1088/2041-8205/815/2/L23

S.Masuda, S.Gunji(7), M.Ikeno(10), H.Katagiri(14), H.Kubo(15), T.Nakamori(19), T.Saito(24), M.Tanaka(27), M.Teshima(30), T.Uchida(32), 他 23 名, the LST team for the CTA Consortium, Development of the photomultiplier tube readout system for the first Large-Sized Telescope of the Cherenkov Telescope Array, *Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference(ICRC2015)*, 査読

無, id.1003, 2015
<https://pos.sissa.it/236/1003/pdf>

T.Nakamori, H.Katagiri(2),
S.Gunji(13), H.Kubo(16),
J.Kushida(17), CTA Consortium, 他 27
名, Simulating Cherenkov Telescope
Array observation of RX J1713.7-3946,
Proceedings of the 34th International
Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 查
読無, id.774, 2015
<https://pos.sissa.it/236/774/pdf>

Y.Inome, S.Gunji(3), H.Katagiri(7),
H.Kubo(9), J.Kushida(10),
T.Nakamori(13), R.Orito(15),
M.Teshima(18), T.Yamamoto(19), 他 10
名, CTA LST collaboration, Development
of the camera for the large size
telescopes of the Cherenkov Telescope
Array, Proceedings of the SPIE, 查読
無, Vol.9151, 915142, 2014
DOI:10.1117/12.2054619

J.Aleksić, H.Kubo(63), J.Kushida(64),
R.Orito(95), M.Teshima(137), 他 140 名,
Discovery of TeV gamma-ray emission
from the pulsar wind nebula 3C 58 by
MAGIC, Astronomy & Astrophysics, 查読
有, Vol.567, L8, 2014
DOI:10.1051/0004-6361/201424261

J.Aleksić, H.Kubo(67), J.Kushida(68),
R.Orito(102), M.Teshima(150), 他 155
名, MAGIC reveals a complex morphology
within the unidentified gamma-ray
source HESS J1857+026, Astronomy &
Astrophysics, 查読有, Vol.571, A96,
2014
DOI:10.1051/0004-6361/201423517

J.Aleksić, H.Kubo(63), J.Kushida(64),
R.Orito(96), M.Teshima(139), 他 148 名,
Black hole lightning due to particle
acceleration at subhorizon scales,
Science, 查読有, Vol.346,
pp.1080-1084, 2014
DOI:10.1126/science.1256183

J.Aleksić, K.Kodani(63), H.Kubo(66),
J.Kushida(67), R.Orito(100),
M.Teshima(148), 他 152 名, First
broadband characterization and
redshift determination of the VHE
blazar MAGIC J2001+439, Astronomy &
Astrophysics, 查読有, Vol.572, A121,
2014
DOI:10.1051/0004-6361/201424254

J.Aleksić, H.Kubo(67), J.Kushida(68),

R.Orito(100), T.Saito(121),
M.Teshima(147), 他 150 名, Detection of
bridge emission above 50 GeV from the
Crab pulsar with the MAGIC telescopes,
Astronomy & Astrophysics, 查読有,
Vol.565, L12, 2014
DOI:10.1051/0004-6361/201423664

J.Aleksić, H.Kubo(68), J.Kushida(69),
R.Orito(101), M.Teshima(148), 他 154
名, Optimized dark matter searches in
deep observations of Segue 1 with MAGIC,
Journal of Cosmology and Astroparticle
Physics, 查読有, Vol.2014, Issue.2,
id.8, 2014
DOI:10.1088/1475-7516/2014/02/008

J.Aleksić, R.Orito(99),
M.Teshima(145), 他 157 名, MAGIC upper
limits on the GRB 090102 afterglow,
Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society, 查読有, Vol.437,
pp.3103-3111, 2014
DOI:10.1093/mnras/stt2041

B.S.Acharya, S.Gunji(352),
H.Katagiri(424), H.Kubo(470),
J.Kushida(472), T.Nakamori(600),
R.Orito(632), M.Teshima(866), 他 969
名, Introducing the CTA concept,
Astroparticle Physics, 查読有, Vol.43,
pp.3-18, 2013
DOI:10.1016/j.astropartphys.2013.01.
007

D.Mazin, T.Nakamori(6), CTA Consortium,
他 5 名, Potential of EBL and cosmology
studies with the Cherenkov Telescope
Array, Astroparticle Physics, 查読有,
Vol.43, pp.241-251, 2013
DOI:10.1016/j.astropartphys.2012.09.0
02

J.Aleksić, R.Orito(100),
M.Teshima(151), 他 164 名, Discovery
of VHE gamma-rays from the blazar 1ES
1215+303 with the MAGIC telescopes and
simultaneous multi-wavelength
observations, Astronomy & Astrophysics,
查読有, Vol.544, A142, 2012
DOI:10.1051/0004-6361/201219133

② J.Aleksić, R.Orito(99),
M.Teshima(150), 他 157 名, Detection of
VHE gamma-Rays from HESS J0632+057
during the 2011 February X-Ray Outburst
with the MAGIC Telescopes, The
Astrophysical Journal Letters, 查読有,
Vol.754, L10, 2012
DOI:10.1088/2041-8205/754/1/L10

[学会発表](計 54 件)

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告(12)、日本天文学会、2017

野崎誠也、折戸玲子、片桐秀明、櫛田淳子、窪秀利、郡司修一、田中真伸、手嶋政廣、中森健之、山本常夏、他 CTA-Japan Consortium, 池野正弘、内田智久、CTA 大口径望遠鏡初号機用カメラの試験状況と 2号機以降用読み出し回路の開発、日本天文学会、2017

中嶋大輔、折戸玲子、片桐秀明、櫛田淳子、窪秀利、郡司修一、手嶋政廣、中森健之、山本常夏、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 119: CTA 大口径望遠鏡初号機の焦点面カメラのシステム統合試験、日本物理学会、2017

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 108: 全体報告、日本物理学会、2016

野崎誠也、折戸玲子、片桐秀明、櫛田淳子、窪秀利、郡司修一、手嶋政廣、中森健之、山本常夏、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 112: CTA 大口径望遠鏡初号機用カメラ試験、日本物理学会、2016

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告(11)、日本天文学会、2016

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 102: 全体報告、日本物理学会、2016

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告(9)、日本天文学会、2015

櫛田淳子、折戸玲子、窪秀利、手嶋政廣、他 MAGIC collaboration, MAGIC 望遠鏡による活動銀河核 IC310 からのガンマ線短時間変動観測、日本天文学会、2015

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 86: 全体報告、日本物理学会、2015

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告(7)、日本天文学会、2014

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 67: 全体報告、日本物理学会、2014

中森健之、折戸玲子、窪秀利、郡司修一、田中真伸、手嶋政廣、他 CTA-Japan Consortium, 池野正弘、内田智久、CTA 報告 70: CTA 大口径望遠鏡読み出し回路・

初号機搭載モデルの開発、日本物理学会、2014

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告(5)、日本天文学会、2013

中森健之、折戸玲子、窪秀利、郡司修一、田中真伸、手嶋政廣、他 CTA-Japan Consortium, 池野正弘、内田智久、CTA 大口径望遠鏡読み出し回路の開発(4)、日本天文学会、2013

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, CTA 報告 49: 全体報告、日本物理学会、2013

窪秀利、他 CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画: 全体報告、日本天文学会、2012

[その他]

CTA-Japan ホームページ

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

MAGIC-Japan ホームページ

<http://magic.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

窪 秀利 (KUBO, Hidetoshi)
京都大学・理学研究科・准教授
研究者番号: 40300868

(2) 研究分担者

折戸 玲子 (ORITO, Reiko)
徳島大学・大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部・講師
研究者番号: 80579417

片桐 秀明 (KATAGIRI, Hideaki)
茨城大学・理学部・准教授
研究者番号: 50402764

櫛田 淳子 (KUSHIDA, Junko)
東海大学・理学部・准教授
研究者番号: 80366020

中森 健之 (NAKAMORI, Takeshi)
山形大学・理学部・准教授
研究者番号: 30531876

(3) 連携研究者

郡司 修一 (GUNJI, Shuichi)
山形大学・理学部・教授
研究者番号: 70241685

手嶋 政廣 (TESHIMA, Masahiro)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号: 40197778