

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12501

研究種目：特別推進研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05206

研究課題名（和文）IceCube-Gen2 実験で拓く高エネルギーニュートリノ天文学の新展開

研究課題名（英文）High Energy Neutrino Universe explored by IceCube-Gen2

研究代表者

吉田 滋（Yoshida, Shigeru）

千葉大学・ハドロン宇宙国際研究センター・教授

研究者番号：00272518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 415,600,000円

研究成果の概要（和文）：IceCube-Gen2 実験の第一段階である実験装置アップグレードに提供する新型検出器 D-Eggを開発・製作した。大規模な動作試験と検出器応答のモデル化を終了し、南極の深氷河へ埋設される。さらに、2011年より観測データを取得中のIceCube実験の観測データ解析高度化を実施した。到来方向決定精度の大幅な向上、高エネルギーニュートリノ検出の妨げとなる大気由来雑音事象の除去効率改善を実現した。この高度化に基づき、新天体（NGC1068）の発見、超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索解析、可視光・X線波長帯の追観測による放射天体同定感度を高める宇宙ニュートリノ放射同定手法の新手法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノを用いた新しい宇宙物理学・天文学研究を爆発的に進展させることになった。光では暗いのにニュートリノでは明るく輝く銀河の発見、可視光の1,000兆倍ものエネルギーを持つニュートリノが宇宙から飛来していることや、それが反ニュートリノであったことを実証するなど時代を画する成果があった。将来を見据えた技術開発研究も実施した。新型高感度光検出器の開発と製作を完遂し、次世代の観測研究を開始する準備を整えた。次世代実験の建設は2025年末に南極点で行われる。またニュートリノの爆発的な放射を捉えるための解析手法の高度化も行い、この技術に基づいたニュートリノ検出アラートの運用を始める。

研究成果の概要（英文）：The new detector modules, D-Egg, have been developed and fabricated to provide for the first phase of the IceCube-Gen2 experiment, an experimental instrument upgrade. After completing a large-scale operational test and modeling of the detector response, they will be buried in a deep glacier in Antarctica. In addition, we have upgraded the observation data analysis of the IceCube, which has been acquiring observation data since 2011. The accuracy of determining the arrival direction was greatly improved, and the efficiency of filtering atmospheric background was also improved. Based on this upgrade, we discovered the new neutrino source (NGC1068), analyzed the search for ultra-high energy cosmic neutrinos with the world-best sensitivity, and developed a new method of capturing neutrino emission that improves the sensitivity of the source identification by follow-up observations in the visible light and X-ray wavelength bands.

研究分野：ニュートリノ天文学

キーワード：ニュートリノ 素粒子 宇宙線 南極 宇宙物理学 マルチメッセンジャー

1. 研究開始当初の背景

南極点直下の深氷河に埋設され運転中の世界最大のニュートリノ観測実験 IceCube は、2011年の装置完成以来、高エネルギー宇宙ニュートリノの発見(2012年)、ニュートリノ放射天体の初同定(2017年)など、ニュートリノ天文学の大きな成果を挙げてきた。これまで明らかにできなかった宇宙のエネルギー駆動現象を研究する新しい手段を人類は手にしたことになる。

2. 研究の目的

宇宙を探索する新しいメッセンジャーである高エネルギーニュートリノの観測感度を上げ、高エネルギーニュートリノ天文学を飛躍的に発展させる。IceCube-Gen2 実験のフェーズ 1 観測装置を製作・埋設することにより、IceCube 実験の能力を格段に増強する。このアップグレードにより、マルチメッセンジャーとしてのニュートリノの統計と分解能を格段に改善する。さらに、解析手法の高度化による超高エネルギー宇宙ニュートリノ高感度探索と、マルチメッセンジャー観測に提供するニュートリノ事象の統計を大幅に改善することで、宇宙線起源を解明し、高エネルギー放射天体の駆動機構を明らかにする。

3. 研究の方法

IceCube 実験の中央に新型の検出器を 700 台密に埋設し、氷河の中で紫外光がどのように散乱されるのか、その詳細を測定することでニュートリノ事象の角度分解能を向上させる。次期計画 IceCube-Gen2 のフェーズ・ワンとしても位置付けられている、この IceCube 実験のアップグレード(IceCube Upgrade)では、日本グループが開発してきた新型検出器 D-Egg を 300 台製作し、ドイツグループが開発する mDOM とともに南極現地に埋設する。本科研費では、D-Egg 200 台の製作・校正・輸送・埋設を実行することが主たる活動となる。また現在取得中の観測データ解析手法を高度化し、感度に限界があった超高エネルギー領域の宇宙ニュートリノ探索を高精度で行う。

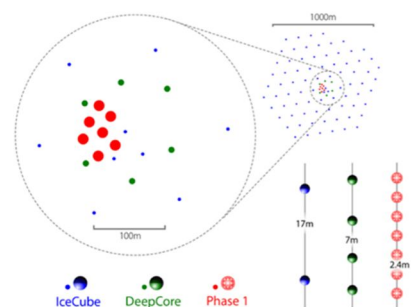


図1 IceCube Upgrade 実験の検出器配置。上から見た図である

4. 研究成果

(1). IceCube-Gen2 フェーズ 1 光検出器アレイ用新型検出器モジュールの製作と校正

本研究提案の最重要課題である。ニュートリノが氷河に衝突する際に放射されるチェレンコフ

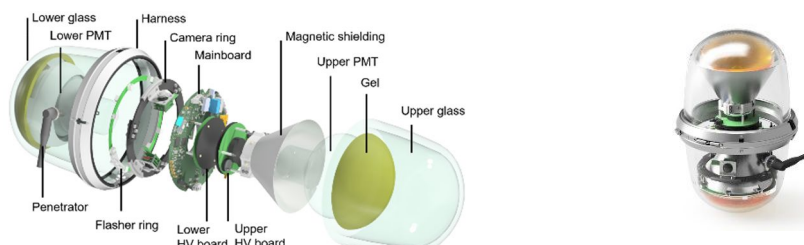


図2 D-Egg 検出器の構成(左図)と検出器全体の概観(右図)

光を検出する検出器モジュールを新技術によって高度化した。日本グループによる新型検出器である通称「D-Egg」は、200 台を製作、低温環境下でのストレス試験・性能試験・校正を遂行した。本成果は論文として出版した(IceCube Collaboration, Journal of Instrumentation 2022)。15% 小型化することで、深氷河への埋設コストを低減した一方で、耐圧ガラス容器、光学カップリング用シリコンゲル、光電子増倍管の短波長領域の光子透過効率を徹底的に改善することで、現在稼働中の IceCube 実験検出器モジュールに比して、2.8 倍の実効検出面積を得ることに成功した。

(2). EeV (1000PeV)領域の超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索

IceCube 実験で観測可能な最も高エネルギー帯である 10PeV (10^{16} eV, 可視光に比して 1 京倍) - 100 EeV (10^{20} eV) 領域の探索は、これまで日本グループの独壇場であり、最初の宇宙ニュートリノ発見(2012年)をもたらしたテーマである。本科研費初年度に 9 年分のデータを利用した解析結果を Physical Review D に出版し、世界で最も厳しい流量上限値を与えるとともに、超高エネルギー宇宙線起源天体が満たすべき条件をニュートリノ観測から与えることに成功した。本科研費期間の 2 年目からは、さらに感度を抜本的に改善すべく、解析手法をアップデートし、信号対雑音比を大幅に向上させることに成功した。12 年半の長期にわたる観測データを解析し、PeV を超えるエネルギーを持つ宇宙ニュートリノを 3 例同定した他、10PeV 以上のエネルギー帯において、世界で最も厳しい流量上限値(宇宙ニュートリノが存在したとしても、この量以下ですという上限)を付けた。この上限値から、最も高エネルギー帯の宇宙放射を形成している宇宙

線は、陽子が主成分ではなく、原子核が主成分であるという知見を、ニュートリノから初めて導き出すことに成功した。この成果をまとめ論文として正式に公表予定である。

(3). セイファート銀河 NGC1068 からのニュートリノ放射同定

TeV (10^{12} eV, 可視光に比して 1 兆倍) 領域では、IceCube 実験は大気ニュートリノがそのほとんどを占めるものの、ニュートリノ事象を高統計で測定している。この性質を使い、到来方向分布を天球座標上で解析することにより、ニュートリノを定常的に放射する天体を探索してきた。この解析により、2020 年に、セイファート銀河 NGC1068 からの放射を強く示唆する結果が得られたが、解析を高度化し 2022 年に 4.2 シグマの統計的優位性で同銀河からの放射を同定した (Science 2022)。マルチメッセンジャー観測で同定されたブレーザー銀河 TXS 0506+056 に続き 2 番目のニュートリノ放射天体同定である。左図は、測定されたエネルギー分布 (天文用語では SED) である。IceCube (this work) と示された帯がデータで、10TeV 以下で卓越するソフトなスペク

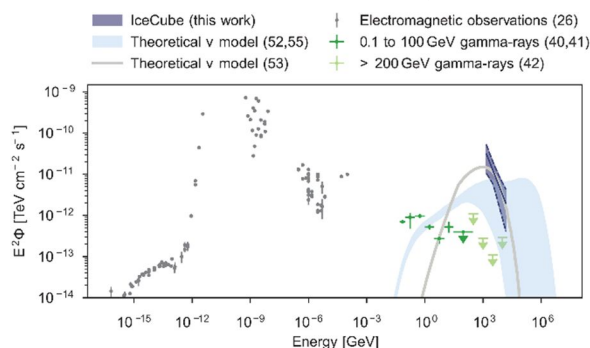


図 3 NGC1068 の SED

トルを持つ放射である。特筆すべきは電磁波スペクトルとの比較である。同じエネルギー帯の電磁波であるガンマ線 (図の十字点、もしくは矢印点) では、この天体は非常に暗い。放射元が光学的に厚く、電磁波が貫通できない高密度環境であることを示しており、銀河中心にある超大質量ブラックホールに近接した中心領域でプラズマの加速が行われていることを意味する。貫通力に優れたニュートリノの特性を生かした天文学の成果である

(4). 超高エネルギー反電子ニュートリノの検出
超高エネルギー宇宙ニュートリノ観測高度化の一環として、検出器が埋設されている氷河部分の外側を通り過ぎる事象も探索可能にする解析技術開発を進めていた。PeV (10^{15} eV) を超えるエネルギー帯では宇宙ニュートリノ量は極めて少ないことが分かっており、実効検出面積を少しでも広げないと検出の見込みがないためである。検出器の存在しない場所で衝突したニュートリノ事象の解析は困難であるが、多変量機械学習手法 (Boosted Decision Tree) を使って観測網を構築した。この網にかかったのが、下図 (左) で示すカスケード事象である。この事象を詳細に理解するための特別解析によって、ニュートリノのエネルギーは $6.05^{+0.72}$ PeV と推定された。大気ニュートリノ・ミュオン事象である確率は事前確率では 0.02 である。6 PeV というエネルギーは、1960 年に Glashow によって提案された、反電子ニュートリノと電子が W ボゾンの s-channel でカップリングする共鳴機構で説明できる。エネルギー推定値を元に検定すると、グラシヨウ共鳴仮説を 2.3 シグマの有意性で支持する。

(4). 超高エネルギー反電子ニュートリノの検出

超高エネルギー宇宙ニュートリノ観測高度化の一環として、検出器が埋設されている氷河部分の外側を通り過ぎる事象も探索可能にする解析技術開発を進めていた。PeV (10^{15} eV) を超えるエネルギー帯では宇宙ニュートリノ量は極めて少ないことが分かっており、実効検出面積を少しでも広げないと検出の見込みがないためである。検出器の存在しない場所で衝突したニュートリノ事象の解析は困難であるが、多変量機械学習手法 (Boosted Decision Tree) を使って観測網を構築した。この網にかかったのが、下図 (左) で示すカスケード事象である。この事象を詳細に理解するための特別解析によって、ニュートリノのエネルギーは $6.05^{+0.72}$ PeV と推定された。大気ニュートリノ・ミュオン事象である確率は事前確率では 0.02 である。6 PeV というエネルギーは、1960 年に Glashow によって提案された、反電子ニュートリノと電子が W ボゾンの s-channel でカップリングする共鳴機構で説明できる。エネルギー推定値を元に検定すると、グラシヨウ共鳴仮説を 2.3 シグマの有意性で支持する。

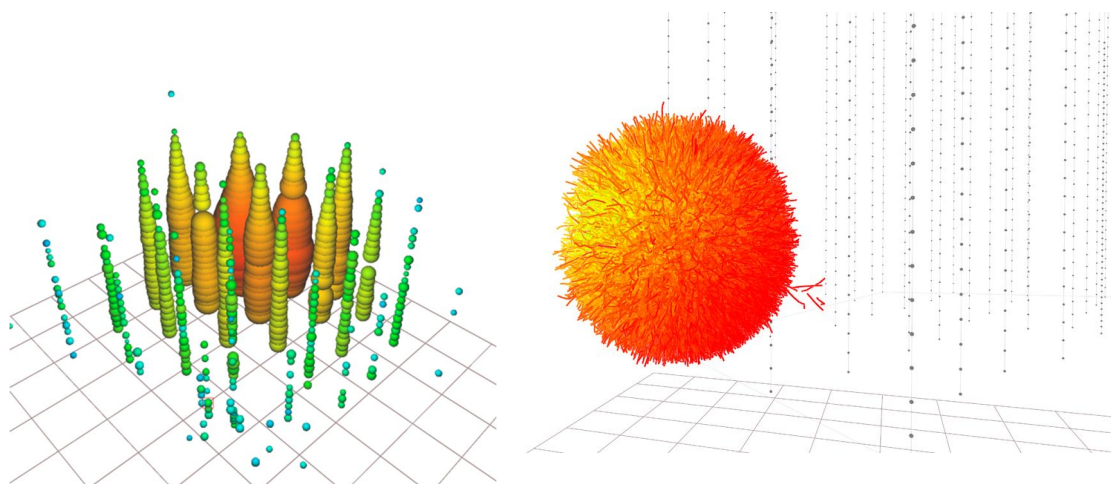


図 4 反電子ニュートリノ事象 (左) とチェレンコフ光軌道のシミュレーション (右)

さらに検出器信号を詳細に解析した結果、ニュートリノ衝突反応点から光の速さで検出器に到達する予想時間より早いパルスが記録されていることが分かった。これはカスケードシャワーで GeV 程度のエネルギーのミュオンが生成され、このミュオンからのチェレンコフ光が先行パルス信号を作ることによって自然に説明される (物質中ではミュオンは光子より速い)。上図右側がこの機構によるチェレンコフ光シミュレーション軌道である。右図右下にチェレンコフ球面より早い光子軌道が見えている。この事実は、反電子ニュートリノがハドロンシャワーを作ったとすると全て説明できる。この事象は史上初めて、宇宙反電子ニュートリノを捉えた成果であり、素粒子物理と宇宙物理の両方にまたがる学際的成果である。2021 年に Nature に論文を発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 IceCube Collaboration	4. 巻 18
2. 論文標題 D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P04014 ~ P04014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/04/P04014	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 -
1. 著者名 IceCube Collaboration	4. 巻 378
2. 論文標題 Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 538 ~ 543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abg3395	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 Aartsen M G et al (IceCube Collaboration)	4. 巻 48
2. 論文標題 IceCube-Gen2: the window to the extreme Universe	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 060501 ~ 060501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/abbd48	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 Yoshida Shigeru, Murase Kohta, Tanaka Masaomi, Shimizu Nobuhiro, Ishihara Aya	4. 巻 937
2. 論文標題 Identifying High-energy Neutrino Transients by Neutrino Multiplet-triggered Follow-ups	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac8dfd	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 Aartsen M.G et al	4. 巻 124
2. 論文標題 Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.124.051103	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 -

1. 著者名 Aartsen M.G. et al	4. 巻 125
2. 論文標題 Characteristics of the Diffuse Astrophysical Electron and Tau Neutrino Flux with Six Years of IceCube High Energy Cascade Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.125.121104	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 -

1. 著者名 The IceCube Collaboration, Aartsen M. G. et al	4. 巻 591
2. 論文標題 Detection of a particle shower at the Glashow resonance with IceCube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 220 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-03256-1	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 -

1. 著者名 Yoshida Shigeru, Murase Kohta	4. 巻 102
2. 論文標題 Constraining photohadronic scenarios for the unified origin of IceCube neutrinos and ultrahigh-energy cosmic rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.102.083023	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 -

1. 著者名 Aya Ishihara	4. 巻 1468
2. 論文標題 D-Egg: new optical sensors for the IceCube Upgrade and Gen2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012166	6. 最初と最後の頁 12166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012166	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 -

1. 著者名 Nagai Ryo	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of the Front-End Electronics for the New Optical Module "D-Egg" for IceCube-Gen2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.27.011012	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 -

1. 著者名 Lu Lu, Yuan Tianlu	4. 巻 970
2. 論文標題 The use of Cherenkov light in the detection of high-energy cosmic rays and neutrinos: The Pierre Auger and IceCube Observatories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 163678 ~ 163678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.163678	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 -

1. 著者名 IceCube Collaboration	4. 巻 98
2. 論文標題 Differential limit on the extremely-high-energy cosmic neutrino flux in the presence of astrophysical background from nine years of IceCube data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.062003	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 The IceCube Collaboration, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams	4. 巻 eeat
2. 論文標題 Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1378 ~ 1378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aat1378	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

[学会発表] 計16件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Mximillian Meier
2. 発表標題 Recent cosmogenic neutrino search results with IceCube and prospects with IceCube-Gen2
3. 学会等名 Recontres de Moriond - VHEPU 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 High energy diffuse background neutrinos in the Universe: from TeV to EeV
3. 学会等名 2023 Fall Meeting of APS DNP and JPS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Neutrino Astronomy
3. 学会等名 The 30th Anniversary of the Rencontres du Vietnam (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shigeru Yoshida
2. 発表標題 Multimessenger astronomy driven by high-energy neutrinos
3. 学会等名 ICRC 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Photo-sensors for the South Pole Neutrino Observatory: IceCube and IceCube-Gen2
3. 学会等名 IEEE Nuclear Science Symposium on "Advanced technologies for future large-scale neutrino experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Colton Hill
2. 発表標題 IceCube Upgrade & the Performance of the D-Egg Optical Modules
3. 学会等名 TeVPA 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原 安野
2. 発表標題 マルチメッセンジャー観測時代における高エネルギー宇宙ニュートリノ観測
3. 学会等名 第12回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeru Yoshida
2. 発表標題 High energy neutrino astronomy - the neutrino connections to cosmic ray origin: Present and Future
3. 学会等名 CRIS 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Neutrino Astrophysics: Experimental
3. 学会等名 AAPPS-DACG Workshop on Astrophysics, Cosmology and Gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 D-Egg: new optical sensors for the IceCube Upgrade and Gen2
3. 学会等名 TAUP 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeru Yoshida
2. 発表標題 Multi-messenger astronomy with high energy neutrinos
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichi Mase
2. 発表標題 Observation of radio signals from an electron beam using an ice target
3. 学会等名 ARENA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeru Yoshida
2. 発表標題 Multi-messenger astronomy driven by the High-energy cosmic neutrinos
3. 学会等名 CRIS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aya Ishinara
2. 発表標題 Constratins on UHECR sources with 9 years of the IceCube EHE data
3. 学会等名 VLvNT - 2018 Very Large Volume Neutrino Telescopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Aya Ishihara
2. 発表標題 Recent results on astrophysics and particle physics from IceCube
3. 学会等名 XLVIII International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Nagai
2. 発表標題 Development of the front-end electronics for the new optical module “D-Egg” for IceCube-Gen2
3. 学会等名 5th International Workshop on New Photon-Detectors (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉田滋	4. 発行年 2020年
2. 出版社 光文社	5. 総ページ数 400
3. 書名 深宇宙ニュートリノの発見	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ハドロン宇宙国際研究センター http://www.icehap.chiba-u.jp/index.html

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
研究分担者	石原 安野 (Ishihara Aya) (40568929)	千葉大学・大学院理学研究院・教授 (12501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	清水 信宏 (Shimizu Nobuhiro) (60869395)	千葉大学・大学院理学研究院・助教 (12501)	2021年度より参加
研究分担者	永井 遼 (Nagai Ryo) (00801672)	千葉大学・大学院理学研究院・特任助教 (12501)	
研究分担者	間瀬 圭一 (Mase Keiichi) (80400810)	千葉大学・大学院理学研究院・助教 (12501)	2020年度まで

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2件

国際研究集会 AMON workshop	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 IceCube Collaboration Meeting	開催年 2019年～2019年

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