

令和元年6月6日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220706

研究課題名(和文)南極点複合ニュートリノ望遠鏡で探る深宇宙 - 高エネルギーニュートリノ天文学の始動

研究課題名(英文)The Deep Survey of Ultrahigh Energy Universe by the South Pole Neutrino Telescope Complex

研究代表者

吉田 滋 (Yoshida, Shigeru)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：00272518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 160,900,000円

研究成果の概要(和文)：IceCube 実験観測データの高精度解析及び、新型電波検出器の埋設による観測エネルギー領域の拡張により、長年の謎である超高エネルギー宇宙線起源に関する全く新たな知見をニュートリノ観測によって得ることに成功した。さらに高エネルギー宇宙ニュートリノ信号をリアルタイムに同定し、検出情報を世界の天文観測施設にアラートとして送るシステムを開発したことで、可視光・電波・線による即時追尾観測が可能となった。この手法により、高エネルギーニュートリノ放射天体候補が初めて同定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノ天文学は、宇宙を観測する新たな手法として完全に定着した。ニュートリノは貫通力が極めて高く、宇宙空間を満たす放射やガスにも妨げられることなく、宇宙遠方から直進して地球にまで届くことができる。この特質により、全く新しい宇宙の描像が得られようとしている。ついにニュートリノ放射天体の同定に至った成果は、ニュートリノ観測を軸に様々な観測手段を組み合わせ得られたもので、新たな宇宙の探査方法を拓いたのみならず、報道でも大きく取り上げられるなど、宇宙をさぐる人類の挑戦という視点から多くの社会的関心を引き起こした。

研究成果の概要(英文)：The high precision analyses of the new data from the IceCube Neutrino Observatory have been conducted. We have successfully obtained the completely new insights on the long-standing mystery of ultra-high energy cosmic ray (UHECR) origins. Our measurements of extremely-high energy neutrinos with energies thousands of trillions higher than visible light have revealed that UHECRs are unlikely to originate in powerful super-luminous objects mainly found in the far-universe, ruling out the classical belief on the UHECR origins. The results also favor that the main populations of UHECR compositions are nuclei heavier than protons. We have also established the cosmic neutrino signal realtime identification methods, which enables rapid follow-up observations by various astronomy instruments prompted by a cosmic neutrino detection. This new approach has led to the first identification of a high energy neutrino source candidate.

研究分野：宇宙線物理学、天文学

キーワード：宇宙線 ニュートリノ 南極 素粒子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2012年、IceCube 実験日本グループによる高エネルギー宇宙ニュートリノの発見によって、高エネルギーニュートリノ天文学が観測データに基づく新しい研究分野となった。「発見」から「測定」のフェーズに進み、ニュートリノ観測がもたらす情報を最大限に引き出す必要がある。統計をあげた観測データを高精度に解析する手法は急務であった。またニュートリノ観測の感度を極高エネルギー帯 ~ EeV (10^{18} eV) 領域~ で飛躍的に高めることは、超高エネルギー宇宙線起源を明らかにするためには必須のステップであった。弱相互作用にしか感応しない素粒子であるニュートリノの特質は、極高エネルギー領域の宇宙観測にこそ有効に生きることが期待されたからである。

2. 研究の目的

南極点直下深氷河に展開する IceCube 宇宙ニュートリノ望遠鏡とその拡張実験である超高エネルギーニュートリノ観測網 ARA によって、超高エネルギー宇宙(素)粒子生成機構を解明する。地球上で観測されている極高エネルギー粒子の放射の多くが遠方の深宇宙で起きていることが線バーストなどの観測から示唆されている。しかし 10^{20} eV にも達する超高エネルギー領域において遠方宇宙の直接探査が可能なのはニュートリノ観測だけである。本研究では高エネルギーニュートリノを探索・検出することによって極高エネルギー放射天体の同定及びその宇宙進化度を測定する。この宇宙ニュートリノ測定により高エネルギーニュートリノ天文学を始動させる。

3. 研究の方法

(A)IceCube による超高エネルギーニュートリノ天文学研究と(B)ARA 実験建設による高統計観測の始動、の2本柱から構成される。

IceCube 実験による PeV (10^{15} eV) から EeV (10^{18} eV) 以上の超高エネルギー領域 (EHE-Extremely-high Energy)における検出感度を 50% 以上増強する。この実現のために、信号波形を元にしたより最適な弁別手法の開発と、検出器埋設エリアの外側を通る事象をも同定する解析手法を実用化する。また後述するように超高エネルギーニュートリノ同定をリアルタイムに行うことで、マルチメッセンジャー天文学観測を開始する。

ARA 実験はチェレンコフ放射の電波帯における極限に相当するアスカリアン放射を電波検出器によって検出することで EeV 領域の超高エネルギーニュートリノ探索を行う実験であり、IceCube 実験の極高エネルギー領域への拡張と捉えることができる。ARA 実験は12基の電波検出器を1ステーションとして氷河内に埋設する。本研究では、ARA 実験に供する検出器および信号伝送システムの開発・製作を行い、ARA 実験フェーズ1として5 station による観測を行う。当初の予定では5ステーションすべての検出器とGPSシステムを担当することになっていたが、米国側の予算面の制約から3ステーション分の検出器と信号伝送システムを担当することに変更し、不足分は台湾グループが賄うことで総計5ステーションの建設を行うこととなった。

4. 研究成果

(1) IceCube 実験による超高エネルギーニュートリノ天文学

本研究における基幹プロジェクトである。最初の宇宙ニュートリノ信号はこの超高エネルギー (EHE - Extremely-high Energy) 解析により2012年に同定され高エネルギーニュートリノ天文学を拓いた。今回の解析では、データの統計量増加に加え、この信号同定手法の大幅な改善により宇宙ニュートリノ検出感度は100PeV以上で3倍に向上した。7年分の観測データによる結果を Physical Review Letters に論文として出版した。

2.6 PeV のトラック事象(右図)を同定。大気雑音である可能性は 2.2σ で否定され、これらは新たな宇宙ニュートリノ事象である。PeV 以上で初めての「事象の発見であり、宇宙ニュートリノが少なくとも3PeV以上までスペクトルが伸びていることが判明した。一方でこの超高エネルギー宇宙ニュートリノ事象の到来方向には超高エネルギー宇宙線起源天体と目される候補天体は存在しなかった。EeV のエネルギーに達する超高エネルギー宇宙ニュートリノは検出されず、フラック

スの上限値を導出。超高エネルギー宇宙線陽子が宇宙空間伝播中に宇宙背景輻射と衝突して生成する cosmogenic ニュートリノの流量にこの上限値は抵触する。起源天体の宇宙進化度に厳しい制限が付き、起源天体は若い宇宙に多く存在する高輝度天体ではなく、星形成に代表される標準的な宇宙活動史に準じる天体であるべきことが明らかになった。

(2) 超高エネルギー宇宙ニュートリノアラートによるマルチメッセンジャー天文学

上述した2.6 PeV のトラック事象の到来方向は0.8度である。その方向内の天体には放射起源になり得そうな天体は見つからなかった。放射天体を同定する有力な手段は、事象検出を迅速

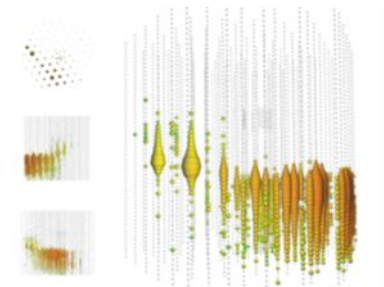


図 1 2.6PeV のエネルギーをもった宇宙ニュートリノ事象

に行いリアルタイムに検出アラートを出すことで、他の天体観測装置による即時追尾観測でフレアなどを伴った天体を探索することである。PeV-EeV 領域をカバーする超高エネルギーニュートリノを即時に同定するアルゴリズムを開発した(Astropart.Phys. 2017)。2016年7月に EHE ニュートリノアラートとして運用を開始した。2017年9月22日 EHE ニュートリノが同定され IceCube-170922A 事象(図 2)としてアラートが配信された。多くの追尾観測が実施され、その結果ブレーザー銀河 TXS 0506+056 の線フレアに IceCube-170922A が同期していることが示され、史上初めて高エネルギーニュートリノ放射天体候補が同定された(Science 2018)。ジェットが我々の銀河系方向を向いている活動銀河核が少なくとも 10PeV 以上の高エネルギー宇宙線起源の一翼を担っていることを示唆した結果であり、ニュートリノによるマルチメッセンジャー天文学のブレークスルーを達成した。

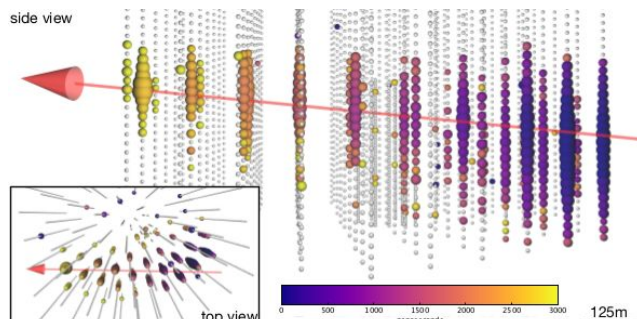


図 2 IceCube-170922A 事象のディスプレイ

IceCube-170922A が同期していることが示され、史上初めて高エネルギーニュートリノ放射天体候補が同定された(Science 2018)。ジェットが我々の銀河系方向を向いている活動銀河核が少なくとも 10PeV 以上の高エネルギー宇宙線起源の一翼を担っていることを示唆した結果であり、ニュートリノによるマルチメッセンジャー天文学のブレークスルーを達成した。

(3) PeV-10PeV 領域の宇宙ニュートリノ探索による反電子ニュートリノ事象の発見

上述した(1)の結果、少なくとも IceCube 実験で検出した宇宙ニュートリノは数 PeV 程度の高エネルギー域まではスペクトルが伸びているが、10PeV から EeV 領域といった更なる高エネルギー帯には、達していないことが明らかである。この結果 PeV から 100 PeV 領域の探索感度を強化し、PeV 帯における宇宙ニュートリノの分布を測定することは自然な帰結である。このためには、既存の解析手法に加え、検出器埋設エリアの外側にニュートリノ反応点をもつ事象も同定する必要がある。外側事象は、大気ミュオンによる雑音事象の弁別がより困難であるため、雑音事象と信号事象の弁別に効果的な 11 種類の測定変数を探し出し、BDT (機械学習の一手法)によって宇宙ニュートリノ弁別を行う解析手法を開発した。PEPE と呼ばれるこの解析チャンネルが付加されたことで、IceCube 実験による PeV-10PeV 領域の感度は 3 倍に向上した。2013 年から 5 年弱の観測データセットを用いて PEPE による宇宙ニュートリノ探索を遂行した。その結果 6 PeV のエネルギーをもつシャワー事象を検出した(右図)。

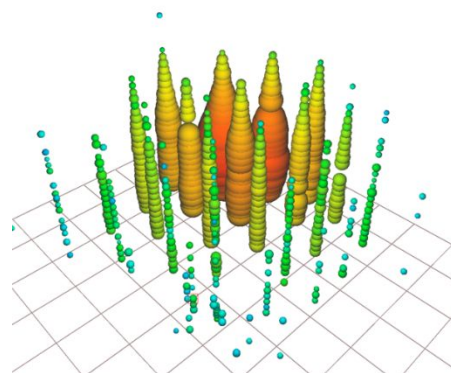


図 3 グラシウ共鳴事象

(4) ARA 実験の建設と観測データ取得

電波検出器からの信号は 100MHz - 1 GHz の UHF 帯に属する高周波信号である。ケーブル伝送による歪みおよび減衰を避けるため、氷河深度 200m に設置されたアンテナからの出力は光信号に増幅変換されたうえで光ファイバーによって氷河表層へと伝送する必要がある。本研究ではこの光信号変換増幅装置(RFoF)を開発・製作した。増幅率を周波数の関数として較正し、3 ステーション(36 チャンネル)分の増幅率がチャンネルによらずほぼ一樣になるようにファイバーとアンプの組み合わせを最適化したうえで、すべてをパッケージ化し、アメリカ経由で南極点基地に輸送した。またアンテナ検出器も縦偏光(VPol)と横偏光(HPol) の 2 種類を設計・製作し、3 ステーション分を提供した。米側の予算の都合から途中で仕様変更を余儀なくされ、1 年の遅延を招いたが、この遅延期間内にアンテナシミュレーション計算を実行し、ケーブル接続部分の構造を見直すなど、検出性能の向上にも力を注いだ。2018 年 1 月に悪天候の中で建設をやり遂げ、総計 5 ステーションによる観測を開始した。観測データの解析は続行中であるが、シミュレーション研究による見積もりでは(Phys.Rev.D 2016)、 10^9 GeV におけるニュートリノ検出有効面積は 3 ステーションで $\sim 3,000$ m^2 に達し、これは IceCube 実験と同程度である。したがって ARA 5 ステーションでは、IceCube を凌駕する検出面積を確保できる見込みである。将来計画である 37 ステーションでは IceCube の 30 倍の面積に達することが分かっている。ARA 5 ステーションによる 2 年間の観測データによる超高エネルギーニュートリノ流量の上限値を 2019 年度に公表する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)すべて査読有

1. 吉田滋 宇宙ニュートリノ IceCube-170922A が拓いた高エネルギー宇宙線起源天体の同定への道, 日本物理学会誌 Vol.4, 215 (2019)
2. M. G. Aartsen, A. Ishihara, L. Lu, Y. Makino, K. Mase, A. Stöbl, S. Yoshida, et al.(IceCube Collaboration) ; Differential Limit on the Extremely-High-Energy Cosmic

- Neutrino Flux in the Presence of Astrophysical Background from Nine Years of IceCube Data , Physical Review, **D98**,062003, DOI: 10.1103/PhysRevD.98.062003 (2018)
3. M. G. Aartsen, A. Ishihara, L. Lu, K. Mase, A. Stöbl, S. Yoshida, et al. (Fermi-LAT, MAGIC, IceCube et al); Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A , Science **361**, eaat1378, DOI: 10.1126/science.aat1378 (2018)
 4. M. G. Aartsen, A. Ishihara, L. Lu, K. Mase, A. Stöbl, S. Yoshida, et al. (IceCube Collaboration); Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert , Science **361**, 147-151 , DOI: 10.1126/science.aat2890 (2018)
 5. M. G. Aartsen, A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, A. Stöbl, S. Yoshida, et al. (IceCube Collaboration); The IceCube realtime alert system , Astroparticle Physics, **92**, 30-41, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2017.05.002 (2017)
 6. M. G. Aartsen, A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. (IceCube Collaboration) ; The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems , Journal of Instrumentation, **12**, P03012, DOI: 10.1088/1748-0221/12/03/P03012 (2017)
 7. M. G. Aartsen, A. Ishihara, T. Kuwabara, L. Lu, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. (IceCube Collaboration) ; Constraints on Ultra-High-Energy Cosmic-Ray Sources from a Search for Neutrinos Above 10 PeV with IceCube, Physical Review Letters **117**, 241101, DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.241101(2016)
 8. P. Allison, R. Gaior, A. Ishihara, T. Kuwabara, K. Mase, M. Relich, S. Yoshida, et al. (ARA Collaboration) ; Performance of two Askaryan Radio Array stations and first results in the search for ultrahigh energy neutrinos , Phys. Rev. D **93**, 082003, DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.082003 (2016)
 9. S. Yoshida, and H. Takami; Bounds on the origin of extragalactic ultrahigh energy cosmic rays from the IceCube neutrino observations, Phys. Rev. D **90**, 123012, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.123012, (2014)
 10. M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration); Probing the origin of cosmic-rays with extremely high energy neutrinos using the IceCube Observatory, Physical Review **D88**, 112008, (2013). DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.112008(2013)
- (IceCube Collaboration の論文著者はすべてアルファベット順に掲載しており、総著者数は約320名である。ARA Collaboration の論文著者も同様にアルファベット順であり、総著者数は66名である。)

[学会発表](計13件)

1. A. Ishihara, "Neutrino and multimessenger astrophysics with IceCube", Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (2019)
2. L. Lu, "Recent IceCube results - evidences of neutrino emission from the blazar TXS 0506+056 and searches for Glashow resonance", UHECR 2018 (2018)
3. A. Ishihara, "Constraints on UHECR sources with 9 years of the IceCube EHE data", VLVnT 2018, (2018)
4. S. Yoshida, "Multi-messenger astronomy driven by the High-energy cosmic neutrino", CRIS 2018, (2018)
5. K. Mase, "Observation of radio signals from an electron in an ice target", ARENA 2018, (2018)
6. 石原安野 "高エネルギー宇宙ニュートリノから展開するマルチメッセンジャー天文学", 2018年天文学会 シンポジウム 「高エネルギー宇宙ニュートリノから展開するマルチメッセンジャー天文学」(2018)
7. S. Yoshida, "Differential limit on an EHE neutrino flux in the presence of astrophysical background from nine years of IceCube data", ICRC 2017 (2017)
8. A. Ishihara, "Recent progresses on the multi-messenger astronomy with neutrinos and cosmogenic neutrino searches", PACIFIC 2017 (2017)
9. A. Ishihara, "Constraints on UHECR sources from IceCube", UHECR 2016 (2016)
10. S. Yoshida, "What have we learnt about the sources of ultra-high energy cosmic rays via Neutrino Astronomy?", CRIS 2016 (2016)
11. S. Yoshida, "Exploring the origin of UHECRs with very-high energy neutrinos", AugerPrime Symposium, (2015)
12. A. Ishihara, "Neutrino Astronomy", Rapporteur Talk, ICRC 2015 (2015)
13. A. Ishihara, "Recent results from IceCube and the future high energy extension", Recontres du Vietnam (2014)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ <http://www.icehap.chiba-u.jp/>

ハドロン宇宙国際研究センターニュース(2013年より計9号発行・配布)

<http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/>

本研究成果の社会発信として、コズミックカフェ 本研究課題期間中に4回開催

<http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/171022cosmiccafe.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：石原 安野

ローマ字氏名：Ishihara, Aya

所属研究機関名：千葉大学

部局名：大学院理学研究院

職名：教授

研究者番号(8桁)：40568929

研究分担者氏名：間瀬 圭一

ローマ字氏名：Keiichi, Mase

所属研究機関名：千葉大学

部局名：大学院理学研究院

職名：助教

研究者番号(8桁)：80400810

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：Lu Lu

ローマ字氏名：Lu Lu

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。