

令和元年6月6日現在

機関番号：12501

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105005

研究課題名(和文)ニュートリノで探る深宇宙

研究課題名(英文)Deep Universe explored by neutrinos

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) 146,200,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギーニュートリノ天文学が豊富な観測データに基づく新しい研究分野として花開いた。南極に設置したIceCubeニュートリノ観測実験による観測データ解析を遂行しTeVからPeV領域にかけてニュートリノ束が宇宙から飛来していることを明らかにした。その主要な放射源天体ははまだ同定されていないものの、今後のデータの蓄積によってニュートリノ点源同定につながる道筋をつけたといえる。新型の高機能検出器D-Eggを開発することで、現在の観測能力をさらに増強する技術も獲得した。IceCube実験の次期アップグレードには、このD-Egg検出器が主要検出器として採用されることが決定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類は宇宙を観測する手段として、ガリレオの時代から一貫して光、すなわち電磁波信号の検出に依存してきた。しかし2010年代に、重力波、そしてニュートリノという全く新たな信号を宇宙観測の手段として利用できるまでに至った。本研究は、それ自体未知の部分が多い素粒子ニュートリノを、活動的宇宙を観測する手段として定着させ、ニュートリノ天文学の急速な発展を実現した。

研究成果の概要(英文)：High energy neutrino astronomy is now blooming as a new astronomical research frontier based on the rich amount of observational data. We conducted analyses of the data taken by the IceCube Neutrino Observatory at South Pole and revealed that there is a bulk of cosmic neutrinos at energies ranging from TeV to PeV. Their major origins have been still unknown, but the present analyses has brought a convincing path toward identifying neutrino emitters by accumulating more data in near future. We have also acquired key technologies to enhance our neutrino detection capability by developing the new high-function detector called D-Egg. D-Egg has been selected as one of the major optical sensors in the up-coming upgrade of IceCube.

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

日本におけるニュートリノ研究は、小柴氏のノーベル賞受賞につながった1987年の超新星ニュートリノ観測から25年、ニュートリノ質量の発見、太陽ニュートリノ問題の解決、地球反ニュートリノの発見、3世代間ニュートリノ混合の確立、宇宙起源ニュートリノの発見、と世界第1級の成果を続々とあげてきた。これらの結果、「ニュートリノ研究は日本のお家芸」と言われるまでに世界の研究者の注目を集め、こんにち多くの外国人研究者がニュートリノ研究のため日本を訪れる。ただし、最近では中国、韓国等のアジアの国々からも優れた研究結果が発表されている。よって、既に世界最先端に位置する日本のニュートリノ研究ではあるが、今後より一層発展させるために、日本のニュートリノ研究者の横のネットワークを強固なものとし、新しい研究結果、新しいアイデア、新しい実験技術を創出し、オールニッポン体制で「ニュートリノフロンティア」のさらなる進化を目指す必要があった。

2. 研究の目的

本計画研究では、IceCube実験による高エネルギー宇宙ニュートリノ天文学研究を発展させる。とくに TeV (10^{12} eV) から PeV (10^{15} eV) にいたるエネルギー領域の宇宙ニュートリノ流量測定を中心に据える。加えて、観測感度を強化する新型検出器の開発研究を実施する。

3. 研究の方法

主に二項目から構成される。

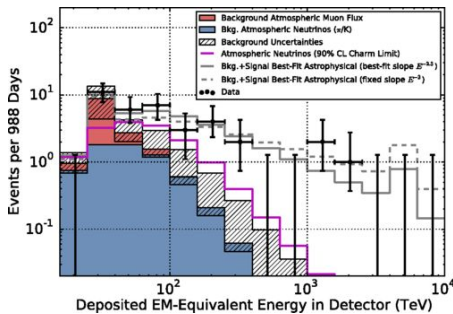
研究項目[TeV-PeV 宇宙ニュートリノ同定]は、宇宙ニュートリノスペクトルがどのように高エネルギー領域にまで伸びているかを検証する。また角度分解能に優れた上向きミュオン事象の解析を進め、宇宙ニュートリノのミュオンニュートリノ成分に感度のある測定を実施する。

研究項目[高エネルギーニュートリノ検出器開発]に関しては、新型検出器のプロトタイプを数台製作し、試験する。コンデンサーではなくトランスを用いた高電圧回路の開発も並行して行い、光検出器からアナログ信号読み出しまでのシステムを開発・製作する。この部分が順調に進めば、デジタル回路系を次期IceCube実験の低エネルギー領域特化型サブ実験として開発が先行しているPINGU実験用のプロトタイプをベースにして装着し、統合的な試験を実施する。

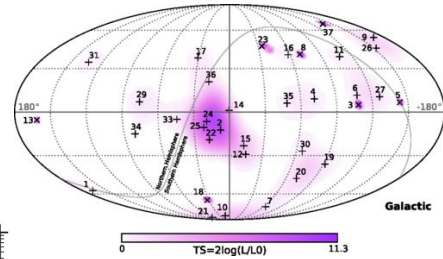
4. 研究成果

● [TeV-PeV 宇宙ニュートリノ同定]

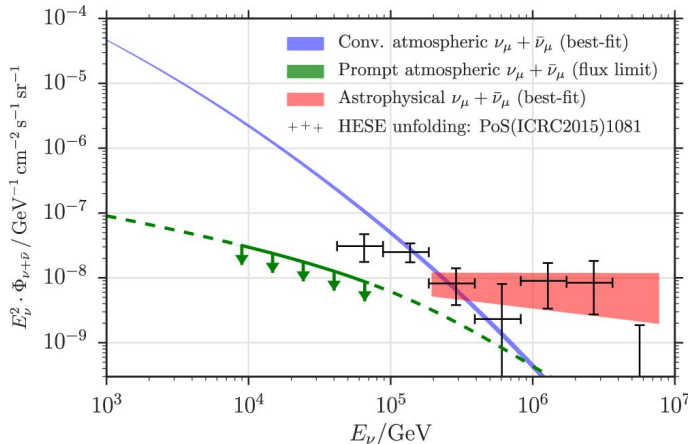
PeV 事象を発見した解析の threshold energy を下げるため、外側の検出器をアクティブ veto 検出器として利用することで、大気ミュオン・ニュートリノ雑音事象をカットする解析を確立した。この結果、宇宙ニュートリノは少なくとも 60 TeV 以上からはほぼエネルギーにべき乗のスペクトルで PeV まで伸びていることが分かった(左図)。その最初の成果はサイエンス誌に掲載され、2013年取得の最新データを使って更に高統計で測定した結果を PRL に出版した。信号は 5.7σ の優位性で雑音事象に卓越し、宇宙ニュートリノの発見を正式にクレームした。また流量も フレーバーあたり



り 10^{-8} GeV/cm² sec sr であるという値が得られた。これは理論的な予想の上限値に近い。この数値を使って詳細な検討を行った結果、銀河系外起源の宇宙線陽子の量が、これまでの一般的な理解よりもより低いエネルギー領域から銀河系内宇宙線に卓越することや放射源天体は極めて大きい光学的厚さ(optical depth にして 0.01 以上)を持つ必要性などが導かれた。到来

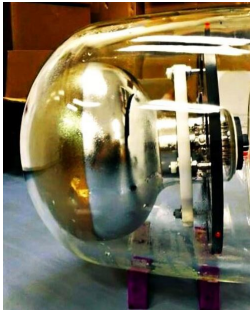


方向は右図に示したように、一様な分布とコンシステントであり、点源は同定されていない。統計を格段にあげることが必要であり、また角度分解能の良い上向きミュオン事象を集めた解析を追加した。ミュオンニュートリノにおいても、宇宙ニュートリノの存在を同定しスペクトルを測定した(左図)。



[高エネルギーニュートリノ検出器開発]

Veto の重要性を上記解析から認識し、本計画研究グループは IceCube 日本グループの提案として、2 個の光電子増倍管を上下に二つ格納し、ミュオントラックの入射角度によらず一様な検出効率を有する検出器 (D-Egg というコードネームが付けられている) の開発に着手した。写真は、開発・製作した最初のプロトタイプである。短波長領域で卓越するチェレンコフ放射光の検出感度をあげるために、ポロシリケート型のガラスでありながら 350nm 以下の波長でも透過率が変わらない耐圧ガラスを開発することにも成功した。右図は実効検出効率を波長の関数で描画したもので、実測値及び Geant4 ベースのシミュレーションともに**短波長領域で大幅に感度を改善(現在の IceCube 検出器に比して 4 倍)**した結果を示している。基幹部品要素である、紫外光透過と高耐圧性を両立させたガラス



容器、紫外光透過ゲル、簡易な実装可能な磁気シールド、高効率光電子増倍管それぞれの開発・較正を終え、10 台の D-Egg を製作し、評価した(右写真)。ダークカウントをもう少し低減する余地があるものの、IceCube 実験の拡張に供することが十分可能な検出器性能を有することを確認した。この検出器 D-Egg を中核検出器として IceCube 実験をアップグレードするための予算提案が実現した。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件) 全て査読有

1. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al), "Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert", Science **361** 147-151(2018) DOI: 10.1126/science.aat2890
2. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida, et al), "Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere Using Six Years of IceCube Data", The Astrophysical Journal, **833**:3(18pp) (2016) DOI:10.3847/0004-637X/833/1/3
3. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al), "Flavor Ratio of Astrophysical Neutrinos above 35 TeV in IceCube", Physical Review Letters **114**, 171102 (2015) DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.171102
4. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al), "Atmospheric and Astrophysical Neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube", Physical Review D **91** 022001 (2015) DOI: 10.1103/PhysRevD.91.02200
5. *S. Yoshida and H. Takami, "Bounds on the origin of extragalactic ultrahigh energy cosmic rays from the IceCube neutrino observations", Physical Review D **90** 123012 (2014) DOI: 10.1103/PhysRevD.90.123012
6. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al), "Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data", Physical Review Letters **113**, 101101 (2014) DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.101101
7. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al), "Search for a diffuse flux of astrophysical muon neutrinos with the IceCube 59-string configuration", Physical Review D **89** 062007 (2014) DOI: 10.1103/PhysRevD.89.062007
8. IceCube Collaboration (A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al), "Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector", Science **342**, 1242856 (2013) DOI: 10.1126/science.1242856
9. IceCube Collaboration (*A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al) "First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube", Physical Review Letters **111** 021103 (2013) DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.021103
10. Super-Kamokande Collaboration (K. Okumura et al), "Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande", Physical Review Letters **110** 181802 (2013) DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.181802

〔学会発表〕(計 11 件)

国際会議発表および国内学会招待講演のみリストした。他に多数の国内学会発表がある。

1. R.Nagai, "Development of the front-end electronics for the new optical module "D-Egg" for IceCube-Gen2", 5th International Workshop on New Photon-Detectors, Tokyo Japan Nov 27-29 (2018)
2. A.Ishihara, "High Energy Neutrino Astronomy", TeVPA 2015, Kashiwa Japan Oct 26-30 (2015)
3. S.Yoshida, "What Neutrinos Tell about the Ultra-high Energy Universe", International Conference on Massive Neutrinos", Nanyang Technological University, Singapore, Feb 9-13 (2015)
4. 石原安野 "ニュートリノ天文学 2 - 高エネルギー宇宙ニュートリノ - "ニュートリノシンポジウム、日本物理学会、早稲田大学 3月23日 (2014)
5. 吉田滋 "高エネルギーニュートリノ天文学:南極から見上げる高エネルギー宇宙" 理論懇、国立天文台 12月24-26日 (2014)
6. S.Yoshida, "Dual DOM housing up and down PMT pair", HAP workshop, Germany, Dec 8-10 (2014)
7. S.Yoshida, "The recent results from the IceCube neutrino observatory and their implications to the origin of ultrahigh energy cosmic rays", JGRG 2014, Japan, Nov 10-14, (2014)
8. A.Ishihara, "Recent results from IceCube and the future high energy extension", Recontres du Vietnam, Vietnam Aug 3-9 (2014)
9. K.Mase, "The latest IceCube results", RICH 2013, Japan, Dec 2-6 (2013)
10. S.Yoshida, "What can we learn about the ultra-high energy cosmic-ray origin from the present results by the IceCube Neutrino Observatory?", TeVPA 2013, USA, Aug 26-29 (2013)
11. A.Ishihara, "Probing cosmic-ray origin with the cosmogenic neutrino searches with IceCube", TeVPA 2013, USA, Aug 26-29 (2013)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 <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：

ローマ字氏名：

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。