

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 5月17日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340048

研究課題名（和文） IceCube ニュートリノ望遠鏡による極限宇宙物理の新たな展開

研究課題名（英文） The New Frontier of Extreme-Astrophysics
with the IceCube Neutrino Observatory

研究代表者 吉田 滋 (SHIGERU YOSHIDA)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00272518

研究成果の概要（和文）：

IceCube 実験によって、超高エネルギーニュートリノ 2 事象を観測することに成功した。衝突反応によって放射したエネルギーはそれぞれ 1.0 ± 0.15 and 1.1 ± 0.17 PeV であり、観測史上最高のエネルギーを持つニュートリノである。この 2 事象は検出器アレイ内でニュートリノが弱荷電相互作用(この場合は電子ニュートリノ)または弱中性相互作用(この名前は全てのニュートリノフレーバーに可能性がある)によって生成された粒子シャワー現象として矛盾が無い。これらのニュートリノは、IceCube 実験の 2010-2012 年の 615.9 日間の観測データによる超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索によって発見された。この探索における大気雑音事象の期待数は $0.082 \pm 0.004(\text{stat}) + 0.041 - 0.057(\text{sys})$ であり、2 事象がこの雑音で説明できる確率は系統的不定性を考慮して 2.8×10^{-3} (2.8σ) である。この結果は PeV という高エネルギー領域で宇宙ニュートリノが存在することを示唆する初めての観測的証拠である。100 PeV 以上のエネルギー領域で得られたニュートリノ流量の上限値から、超高エネルギー宇宙線の赤方偏移空間における分布に制限が加えられた。この制限は、幾つかの超高エネルギー宇宙線放射天体候補が分布するパラメータスペースに達しており、ニュートリノ観測から初めて宇宙線放射天体に意味のある制限を加えた結果である。以前の結果と比べて大幅に向上した本結果は、検出器埋設容量が増えたことと、データの振る舞いを予測するシミュレーションの精度が向上したことによるものである。

研究成果の概要（英文）：

We successfully made the observation of two neutrino-induced events which have an estimated deposited energy in the IceCube detector of 1.0 ± 0.15 and 1.1 ± 0.17 PeV, respectively, the highest energies observed so far. They are consistent with fully contained particle showers induced by neutral-current ν -e, ν - μ or ν - τ , or charged-current ν -e interactions within the IceCube detector. The events were discovered in a search for ultra-high energy neutrinos using data corresponding to 615.9 days effective livetime. The two neutrino events are observed over an expected atmospheric background of $0.082 \pm 0.004(\text{stat}) + 0.041 - 0.057(\text{sys})$. The resulting p-value for the background-only hypothesis is 2.8×10^{-3} (2.8σ) taking into account the uncertainty on the expected number of background events. This is a first indication of an astrophysical neutrino flux beyond PeV. An upper limit on the neutrino rate in the energy region above 100 PeV puts constraints on distribution of ultra-high energy cosmic-ray (UHECR) emitters in redshift space. For the first time the observational constraints reach the beginning of the parameter region where some UHECR source leading candidates are expected to be distributed. The bound is significantly upgraded from our previous publication because of the enlarged instrumentation volume and refined Monte Carlo simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、南極、ニュートリノ、宇宙物理

1. 研究開始当初の背景

宇宙からの放射の内、最も高エネルギー帯を担うのは宇宙線である。超高エネルギー宇宙線放射機構として、天体現象に基づく加速モデルから標準理論を超える素粒子物理にその起源を求めるモデルまで数多く提案されているが、それぞれに理論的困難を抱え観測事実を矛盾なく説明するには至っていない。しかし放射機構理論モデルの多くは、異なったスペクトルの高エネルギーニュートリノ放射を予言する。ニュートリノは電荷を持たないため到来方向と放射源方向が一致する。また弱相互作用粒子であるニュートリノは宇宙論的距離をエネルギー損失せず伝播することができる。ニュートリノは遠方深宇宙における超高エネルギー宇宙線放射天体を直接研究する唯一のメッセンジャーである。この長所を背景に IceCube 国際共同実験は、高エネルギー宇宙ニュートリノを探索・検出することにより、宇宙線の起源を探ることを目指している。2009年4月時点で全検出器の半分が稼動を始めていた。本研究グループは PeV(=10⁶ GeV)から EeV(=10⁹ GeV)に達する超高エネルギー領域におけるニュートリノ事象探索を主導してきた。2008年データを用いた解析で、当時最も厳しいフラックス上限値を決め論文として出版し、本来 TeV 領域を観測のメインエネルギーとしてきた IceCube 実験が、EeV 領域においても宇宙ニュートリノ探索を行える能力を持つことを実証できた。しかしながら、理論的に予測されるフラックス値である、10⁻⁸ GeV/cm² sec sr に感度を届かせるためには、解析手法を改善することが必要であった。特にニュートリノ検出において主雑音となる大気ミュー束事象が誤解析されて信号と誤認識される可能性を極力下げるために、必要以上に保守的な信号弁別カットを適用せざるを得ない点、及び実験的なエネルギースケールに関する系統誤差が大きくな点が感度改善の妨げとな

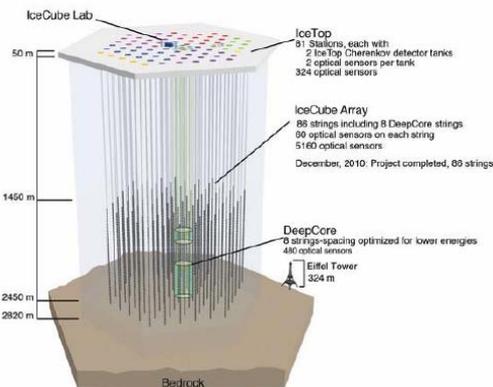
っていた。

2. 研究の目的

IceCube ニュートリノ望遠鏡を用いて、超高エネルギー宇宙(素)粒子生成機構解明を目指す。極高エネルギー粒子の放射は未知の激的な現象が宇宙に存在することを意味しており、その多くが遠方の深宇宙で起きていることがγ線バーストなどの観測から示唆されている。しかし 10²⁰ 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り、IceCube 実験は現在唯一の貴重な観測手段を提供する。

3. 研究の方法

IceCube ニュートリノ望遠鏡は南極氷河の地下 1400 m から 2400 m の深さに六角柱状に埋められた光検出器を主要構成要素とし、約



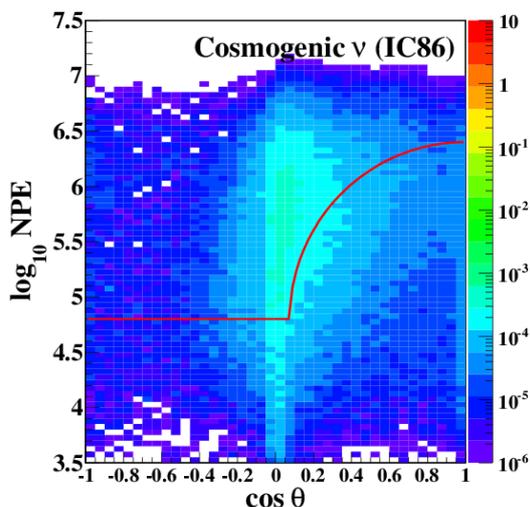
1km³ の容積を持つ世界最大のチェレンコフ光観測装置である(上図)。この氷中を伝播するμ、τ、あるいはν相互作用による電磁・ハドロンカスケードからのチェレンコフ光を検出する。事象のエネルギーは、チェレンコフ光の輝度にほぼ比例するため、DOM 検出器で受けた光電子数の総量(Number of

Photo Electrons (NPE)をエネルギーインデックスに採用する。大気ミュオン雑音を信号として誤認識する頻度を大幅に減らす超高エネルギー宇宙ニュートリノ同定アルゴリズムを確立し、2011年春に完全稼働が開始される予定のIceCube観測装置の高統計データを解析して、宇宙由来のニュートリノの初検出を目指す。観測結果から、超高エネルギー宇宙線放射天体の性質に新たな知見を与える。

4. 研究成果

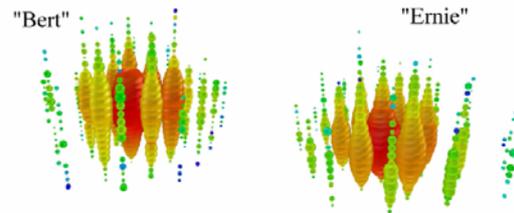
宇宙ニュートリノ事象と誤認識してしまう可能性のある大気ミュオン束は、主として検出容量体の最深部に軌跡を残す事象であることが分かった。全計画の半分の検出器が埋設され稼働した2008-2009年データでは、このカテゴリーに属する事象を選び分け、シミュレーション予測との合いがよいタイミングプロファイルに関する変数を抽出した解析を行うことで、この問題点を克服し、感度を大幅に向上した超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索を遂行した。この結果、信号は見つからなかったが、世界で最も厳しいフラックス上限値をつけることに成功し、IceCubeの全検出器が稼働を始める2011年5月以降のデータを使えば、理論的な予測値に感度が到達する見込みがあった。

2010-11年(9割の検出器が稼働)取得データでは、氷河の光学的な特性のモデリングを改善したシミュレーションが完成し、実データの振る舞いをより広範囲に予測・再構成することに成功した。観測容量の増加とあわせ、この改善により、検出器最深部を通過する事象も特別扱いすることなく、高信頼度で解析することに成功した。この手法を用いて、2010-11年、及び全ての検出器が稼働した2011-12年取得のデータをいちどきに解析し、

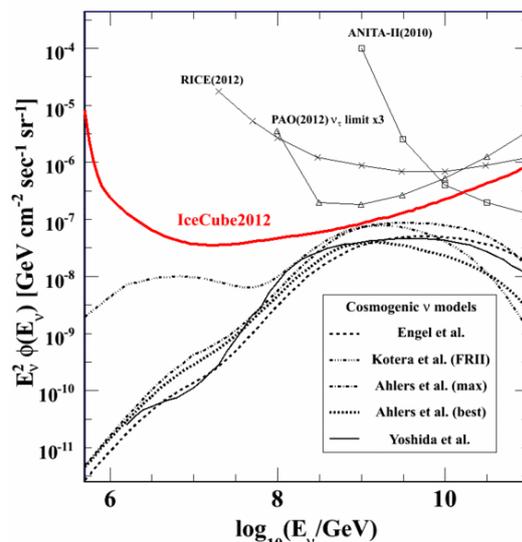


PeVを超える超高エネルギー宇宙ニュートリノ事象を探索した。上図に示したのは超高

エネルギー宇宙ニュートリノ事象の天頂角(横軸)–NPE(縦軸、エネルギーに対応)平面での分布予測である。図中赤線から上の事象が、大気雑音に卓越した宇宙ニュートリノ事象候補として同定される。この結果、史上初めてPeVを超えるニュートリノを2事象捉えることに成功した。いずれも2011-12年の観測データにあり、推定エネルギーはそれ



ぞれ1.04 PeV, 1.14 PeVである。上図が検出された2事象のdisplayである。球状の形状は、これらの事象がニュートリノが検出器内で弱荷電相互作用または弱中性相互作用によって粒子カスケードを引き起こしたものであることを示している。この検出に対する雑音事象の期待数は0.082事象であり、この2事象が宇宙ニュートリノではないという統計的確率は 2.9×10^{-3} (2.8σ)である。この結果は、高エネルギー領域において宇宙ニュートリノが実在することを示唆する初めての観測結果である。PeV領域において宇宙ニュートリノは、 γ 線バーストあるいは活動的銀河核といった高輝度放射天体で放出されることが予測されており、2013年以降の観測データで更に統計を上げて、事象数を増やし、放射天体の同定につなげることが次期研究計画の最優先課題である。



次の図は、2008-2012年の観測結果による超高エネルギーニュートリノ流量の上限値である。理論予測モデルが黒線で示されており、そのうちの幾つかは今回の観測結果によ

て排除されていることが分かる。PeV(10^6 GeV)領域では流量上限値は $<10^7$ GeV/cm² sec sr であり、観測された2事象の示唆する宇宙ニュートリノ束は $O(10^{-8})$ GeV/cm² sec sr であることを意味する。

100PeV を超える極高エネルギー領域では信号は観測されなかった。この領域では 10^{20} eV を超える最高エネルギー宇宙線陽子が宇宙背景輻射と衝突することによってニュートリノを放出する機構が支配する。信号が検出されなかったことから、この機構の起こる頻度に制限がつく。背景輻射の量と宇宙線の流量は既知でありしたがって両者の衝突確率は一定の不定性はあるものの明快に計算できる。よって、この制限は超高エネルギー宇宙線放射の宇宙開闢以降の時間発展の歴史と放射総量の上限を与えることになる。この結果、高エネルギー粒子放射天体は、それがなんであれ、遠方宇宙で格段に高輝度ではなかったことが分かった。強い相対論的ジェットを伴う電波銀河など、遠方宇宙で明るい天体を高エネルギー宇宙線放射源を除外する結果であり、ニュートリノ観測によって初めて得られた知見である。

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 10 件) 全て査読有

- ① “Constraints on the origin of the ultrahigh energy cosmic rays using cosmic diffuse neutrino flux limits: An analytical approach”, Shigeru Yoshida and Aya Ishihara, Phys. Rev. D **85** 063002 (2012).
- ② “Design and initial performance of the Askaryan Radio Array prototype EeV neutrino detector at the South Pole” P. Allison S. Yoshida, *et. al.*, (ARA Collaboration) Astropart. Phys. **35** 457-477 (2012).
- ③ “An Absence of Neutrinos Associated with Cosmic-Ray Acceleration in Gamma-Ray Bursts”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) Nature **484** 351-354 (2012)
- ④ “Constraints on the extremely-high energy cosmic neutrino flux with the IceCube 2008-2009 data”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) Phys. Rev. D **83** 092003 (2011).
- ⑤ “A Search for a diffuse flux of astrophysical muon neutrinos with the

IceCube 40-string detector”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) Phys. Rev. D **84** 082001 (2011).

⑥ “Limits on neutrino emission from gamma-ray bursts with the 40 string IceCube detector”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) Phys. Rev. Lett. **106** 141101 (2011).

⑦ “Measurement of the atmospheric neutrino energy spectrum from 100 GeV to 400 TeV with IceCube”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) Phys. Rev. D **83** 012001 (2011).

⑧ “Constraints on neutrino-nucleon interactions at energies of 1 EeV with the IceCube Neutrino Observatory”, Shigeru Yoshida, Phys. Rev. D **82** 103012 (2010).

⑨ “Calibration and Characterization of the IceCube Photomultiplier Tube”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) NIM A **618** 139-152 (2010).

⑩ “First search for extremely high energy cosmogenic neutrinos with the IceCube Neutrino Observatory”, R. Abassi, S. Yoshida, K. Mase, A. Ishihara, *et. al.* (IceCube Collaboration) Phys. Rev. D **82** 072003 (2010).

[学会発表] (計 5 件) 招待講演のみ

- ① “IceCube実験による超高エネルギーニュートリノの検出と宇宙線起源への示唆”, S. Yoshida, 日本物理学会、広島大学、2013年3月26日
- ② “Search for extremely high energy cosmogenic neutrinos with the IceCube detector”, K. Mase, Very High energy Phenomena in the Universe, Recontres de Moriond, Italy, March 12th (2013)
- ③ “Search for Ultra-high energy cosmic neutrinos with the IceCube neutrino observatory”, S. Yoshida, ARENA 2012, Erlangen, Germany, June 21st (2012).
- ④ “Neutrino Astrophysics with IceCube”, HEAP 2011, KEK, JAPAN, November 14th (2011).
- ⑤ “Neutrino Astrophysics”, S. Yoshida, UHECR 2010, Nagoya, JAPAN, December 12nd (2010).

[その他]

ホームページ等

- ハドロン宇宙国際研究センターホームページ <http://www.icehap.chiba-u.jp/>

- 一般向けに IceCube 実験と本研究成果を解説する講演会、「コズミックカフェ」を 2013 年 3 月 17 日に開催した。
<http://www.icehap.chiba-u.jp/130317cosmiccafe.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 滋 (Shigeru Yoshida)
千葉大学大学院理学研究科・准教授
研究者番号：00272518

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

間瀬 圭一 (Keiichi Mase)
千葉大学大学院理学研究科・助教
研究者番号：80400810