

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年3月10日現在

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  
The Deep Survey of Ultrahigh Energy Universe  
by the South Pole Neutrino Telescope Complex

課題番号：25220706

吉田 滋 (Yoshida Shigeru)

千葉大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

PeV( $10^{15}$ eV)から EeV( $10^{18}$ eV)以上の超高エネルギー領域に存在する宇宙ニュートリノを探索・測定し、超高エネルギー宇宙線の起源を探る。南極点に建設され観測を開始した IceCube 実験の観測データ解析を推進するとともに、隣接エリアに IceCube よりさらに大きな観測面積を持つ ARA 実験検出器を建設し、高エネルギーニュートリノ天文学を始動する。

研究分野：物理学(素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理)

キーワード：ニュートリノ、南極、超高エネルギー宇宙線

1. 研究開始当初の背景

IceCube 実験により PeV のエネルギーを持つ宇宙ニュートリノが発見された。ニュートリノを使った高エネルギー天文学研究が現実のものとなった今、透過力に優れたニュートリノの特質を生かして、銀河系外から飛来していると思われる超高エネルギー宇宙線の起源を理解する機会が訪れようとしている。高エネルギー宇宙線をニュートリノにより描画する時代の幕開けであった。

2. 研究の目的

PeV—EeV(1000 PeV) 領域の宇宙ニュートリノ信号を探索することで、超高エネルギー宇宙線起源をニュートリノ観測という新しい手段によって探り、確かな知見を得る。特に超高エネルギー宇宙線起源天体の性質をニュートリノ流量を元に解き明かすことが目標である。

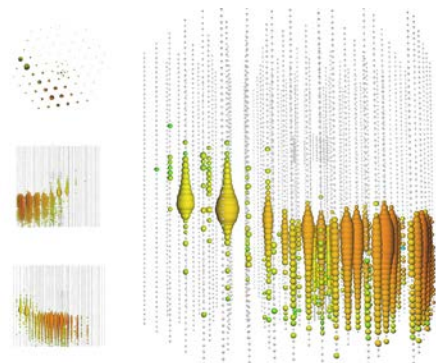
3. 研究の方法

南極点に展開され運用が始まった IceCube 観測所の観測データを精力的に解析する。特に高いエネルギー帯である PeV-EeV 領域にフォーカスし、この領域における宇宙ニュートリノを探索する。解析結果を用いて宇宙線起源天体はどのような性質を持つべきかを明らかにする。さらに超高エネルギー帯における観測を高統計で行うために IceCube 実験サイトに隣接した場所に、ニュートリノ衝突からの電波放射を捉える検出器アレイから較正される ARA 観測装置を建設する。IceCube

の数倍の観測有効面積を実現し、EeV のエネルギー帯においてもニュートリノ検出感度を大きく改善させる。

4. これまでの成果

(a) 2008-2015 年までの7年間の観測データの解析を完了した。少なくとも 3PeV のエネルギーを持つミュオンニュートリノ由来の事象を同定し、高エネルギー宇宙ニュートリノは少なくとも、3PeV 以上まで伸びていることが明らかになった。下図に示したのは同定された事象である。



EeV(1000PeV)のエネルギーに達するニュートリノは存在せず、流量上限値をつけた。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放射と衝突して生成するニュートリノの流量にこの上限値は抵触する。この事実から、遠方宇宙でより活発な天体(宇宙

進化度の高い天体)は超高エネルギー宇宙線の主たる起源ではないことが分かる。宇宙線起源天体の宇宙進化度に厳しい制限を与えた。この制限によって超高エネルギー宇宙線起源として最有力であったガンマ線バースト天体や高輝度電波銀河が排除されることになった。これは長年の定説を覆す結果である。

(b) PeV以上の超高エネルギー帯における信号探索をリアルタイム化し、事象検出と同時にアラートを出すシステムを開発した。これにより $\gamma$ 線、X線、可視光等による望遠鏡の即時追尾観測が可能となる。事象到来方向にバースト現象やフレアを起こした天体がこれらの追尾観測によって検出されれば、超高エネルギー宇宙線放射天体を同定することになる。多種の粒子・光によるマルチメッセンジャー天文学の創生である。システムは現在試験運用を続けており平成28年度中に本格運用に入る予定である。

(c) ARA実験の装置の開発・製作を進め、電波検出器及び信号伝送系システムの建造を行った。検出器の較正も行い、南極埋設後の観測データ解析の基礎となる検出器応答モデルを確立した。

(d) ARA実験は電波放射を捉える手法を用いる。電波測定はノイズ・検出器応答の理解、放射機構の正確なシミュレーションが信頼性の担保には欠かせない。このため電子ビームを氷塊にあてることで生じる電波放射を製作したARA実験検出器で測定するビーム較正実験を実施した。米国ユタ州の砂漠の中に設置された電子ライナック施設を使い、データを取得、解析した結果、製作した検出器の応答は正しく理解していることが示された。下写真はビーム実験全体の概観である。



## 5. 今後の計画

IceCube実験の解析では、PeV-100PeV帯のエネルギー領域に焦点をあて、宇宙ニュートリノスペクトルがどのエネルギーまで伸びているのか、折れ曲がりがあるのか否かについて明らかにする。

製作したARA実験検出器は2017年12月に南極現地に埋設し稼動を開始する予定である。それに先立ち2016年12月-2017年1月には試験埋設を行い、最終的なチェックを行うスケジュールが確定している。既に埋設・稼動済みの第一期検出器からの観測データもあわせて解析し、ARA実験による超高エネルギー宇宙ニュートリノ測定を行う。電波手法を用いた観測で初めて、サイエンスとして意味をもつ感度を達成することを目指している。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. IceCube Collaboration ([A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#) et al), "Evidence for Astrophysical Muon Neutrinos From the Northern Sky with IceCube", *Physical Review Letters* **115**, 081102 (2015)
2. ARA Collaboration ([A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#) et al), "First constraints on the ultra-high energy neutrino flux from a prototype station of the Askaryan Radio Array", *Astroparticle Physics* **70** 62-80 (2015).
3. [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)
4. 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)
5. IceCube Collaboration ([A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#) et al) "Probing the origin of cosmic-rays with extremely high energy neutrinos using the IceCube Observatory", *Physical Review D* **88** 112008 (2013)
6. IceCube Collaboration ([A.Ishihara](#), [K.Mase](#), [S.Yoshida](#) et al) "First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube", *Physical Review Letters* **111** 021103 (2013)

ホームページ等

ウェブページ

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

facebook

<https://www.facebook.com/ICEHAP.Chiba.Univ>