

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔令和2（2020）年度 中間評価用〕

平成30年度採択分  
令和2年3月31日現在

**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**

High-Energy Neutrino Universe  
explored by IceCube-Gen2

課題番号：18H05206

**吉田 滋** (YOSHIDA, SHIGERU)

千葉大学・大学院理学研究院・教授



研究の概要（4行以内）

南極点直下の深氷河に設置され稼働中の IceCube ニュートリノ観測所を拡張する IceCube-Gen2 計画の第一段階として、新型検出器 D-Egg の集中埋設を行い、高エネルギー宇宙ニュートリノ観測の感度を強化する。ニュートリノを軸とするマルチメッセンジャー天文学観測機能を大幅に改善するのが主目標である。

研究分野：ニュートリノ天文学、素粒子物理学、宇宙線物理学

キーワード：ニュートリノ、宇宙線、南極

1. 研究開始当初の背景

IceCube 実験によって、TeV (1兆電子ボルト) から PeV (1000兆電子ボルト) という高いエネルギーをもつ宇宙ニュートリノの放射が発見された。さらにニュートリノと電磁波観測を組み合わせたマルチメッセンジャー天文学観測手法によって、ニュートリノ放射天体の一つが同定され、ニュートリノをメッセンジャーとして宇宙を探索する手法は、宇宙の高エネルギー現象の極限を理解する新しい手段として確立した。高エネルギーニュートリノ天文学が開花した時代を迎えたのである。

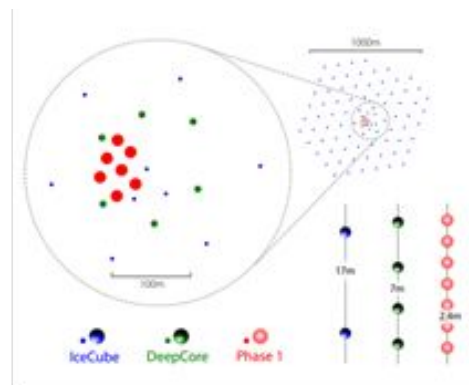
2. 研究の目的

高エネルギーニュートリノ天文学の急速な発展をさらに加速させるため、マルチメッセンジャーとしてのニュートリノの統計を倍に増強し、未だ発見されていない超高エネルギー領域 ( $E_{\nu} = 10^3$  PeV) の宇宙ニュートリノを初検出するための実験装置のアップグレードが本研究の目的である。

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では、日本グループが開発してきた新型検出器 D-Egg を製作し、ドイツグループが開発する mDOM

とともに 2022-2023 年に南極現地に埋設する。D-Egg 検出器を用いた較正データ取得によって、ニュートリノ信号となるチェレンコフ放射光の氷河内における散乱を正確に理解することで、宇宙ニュートリノ到来方向の決定精度を大幅に改善し、マルチメッセンジャー天文学観測に提供する宇宙ニュートリノ検出アラートの数を倍増させる。



IceCube 実験アップグレード。赤丸が新たに切削されるホールで、ここに新型検出器が埋設される。

4. これまでの成果

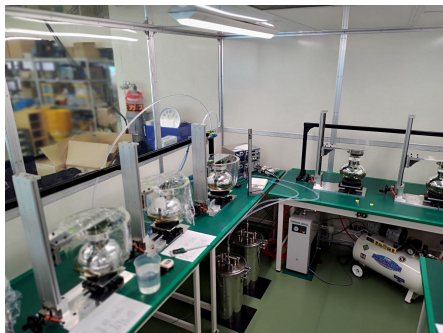
● 新型検出器 D-Egg の製作  
D-Egg 検出器は、開発フェーズから大規模製作フェーズへの移行を完了した。主なマイルストーンは以下の通りである

(1) 各パーツの量産用バージョンの完成  
チェレンコフ光を捉えるセンサーである、高電子増倍管、駆動電源回路、耐圧ガラス容器など、D-Egg を構成する各要素の量産型を決定し、性能評価を終えた。

(2) 量産施設の整備  
検出器量産を実施する専用クリーンルーム設備を整備し、1日8台の検出器組立ができる能力を持たせた。これにより、300台製造という計画が実現した。

(3) 製作検出器試験  
製作拠点で製作した10台のD-Eggの信頼性を確保する最終試験(DVT - Detector Verification Test)を遂行した。DVTは、量産を開始する必要条件である。試験は5種類に分類される。光検出器としての性能評価(FVT - Functional Verification Test)、耐圧試験(深氷河埋設時にかかる最大75MPaの圧力に耐える能力を試験する)、振動試験(南極への輸送に耐えられるか? 輸送パッケージも含めた試験)、強度試験(輸送・建設時に誤ってパッケージを落としても耐えられるか?)及び長期安定性試験(LTS - Long Term Stability)である。試験の性格上LTSはまだ終了していないが、残りすべての試験は終了した。

(4) 量産バッチ1の開始



D-Egg 検出器の最初の量産を開始した。1日8台のペースで組立が進んでいる。

#### ● 氷河中の光散乱のシミュレーション研究

D-Egg 検出器の中に内蔵したLED光源からの光により、氷河内の散乱長などの情報を抜き出す解析手法を構築するため、D-Egg 検出器のシミュレーター、LEDのシミュレーター、LEDからの光子の伝搬・散乱・屈折をトレースするシミュレーターを開発した。泡氷河柱(Bubble Ice Column)は、検出器埋設時に解けた氷が再氷結することによって生成され、ニュートリノ信号の到来方向決定に最も大きな不定性をもたらしている要因である。上下に隣接したD-EggでLEDからの光信号を受け

ることで泡氷河柱の場所と散乱長を推定する解析手法を構築中であり、予備的結果を発表している。

#### ● IceCube と電波検出器アレイ(ARA)のハイブリッドシミュレーション

IceCube 実験に隣接する電波検出器アレイARAとの統合シミュレーションを開発し、ニュートリノからのチェレンコフ放射を紫外光(IceCube)電波帯(ARA)で同時に測定する可能性について研究を始めている。電波は氷河内での散乱がなく、吸収長も長いのでニュートリノ検出容量を大きくとれる長所があり、流量が少ない超高エネルギー宇宙ニュートリノの検出に優れている。一方で雑音事象がよく理解できないことから信頼性の欠如が欠点であり、この部分を紫外光検出で補おうとしている。

#### 5. 今後の計画

製作されたD-Egg検出器を2022/2023南極シーズンに埋設し、IceCube観測装置アップグレードを完成させる。新観測装置による観測を開始し、ニュートリノ到来方向解析を実施する。改善された角度分解能を基に、マルチメッセンジャー天文学観測に提供するニュートリノアラートの種類をふやし、観測感度を引き上げる。また、現在観測データを貯めつつある現行IceCube実験の高統計解析を、IceCube-Gen2を見据えた新たな手法で実施し、結果を公表する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む) 査読付き論文

(IceCube Collaborationの著者数は約300名で氏名はアルファベット順にリストされる)

1. [A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida, et al.](#) (IceCube Collaboration) Time-integrated Neutrino Source Searches with 10 years of IceCube Data, Phys. Rev. Lett. 124 051103 (2020)

2. [A. Ishihara, K. Mase, \\*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, Phys. Rev. D98, 062003 (2018).

受賞

第65回仁科記念賞(2019)

「超高エネルギー宇宙ニュートリノの発見」  
吉田滋・石原安野

#### 7. ホームページ等

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