



研究代表者	千葉大学・大学院理学研究院・教授 石原 安野（いしはら あや）	研究者番号:40568929
研究課題 情報	課題番号：22H04935 キーワード：宇宙ニュートリノ、マルチメッセンジャー天文学、チレンコフ光検出器	研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

ニュートリノはなんでも通り抜ける！

そのため遠方の宇宙からも伝搬の途中で情報を失うことなく地球までたどり着く事ができる。この性質を使ってこれまで光の死角になってきた宇宙に目を向けようというのがニュートリノ天文学のアイデアである。

ニュートリノで宇宙の何を見るのか？

真っ暗闇に見える宇宙であるが実は目に映らない背景光という過去の放射光で満ちている。高いエネルギーの光はこの背景光と衝突を起こしてしまい、天体からの光は、そのエネルギーが高くなると遠くまで届かなくなるといった性質を持つ。つまり、宇宙は高いエネルギーにおいてより死角が大きい。その正体が長年の謎である非常に高いエネルギーを放射する天体は、そのような宇宙の死角にあると考えられている。宇宙ニュートリノでその正体を探る。

どうやって宇宙ニュートリノを観測するのか？

何でも通り抜けてしまい非常に稀な宇宙ニュートリノの観測には巨大な透明な媒質を含む観測装置が必要である。一立方キロメートル容量の南極深氷河を使う世界初の超高エネルギー宇宙ニュートリノ望遠鏡IceCube実験が2012年、宇宙ニュートリノの初観測に成功、ついに高エネルギーニュートリノによる天体探査が始まった。

～現在の課題～

宇宙ニュートリノの観測開始から10年が経った今、10年分の観測データにより恒常的に高エネルギーニュートリノで光る天体が見つかり始めている。一方、高エネルギー放射を宇宙で最も多く作っていると考えられる天体はIceCubeをもってしても、未だ確定できていない。その発見に向けては、IceCubeの高精度化と、次世代ニュートリノ望遠鏡IceCube-Gen2の開発・製造が必須である。

アムンゼンスコット南極点基地

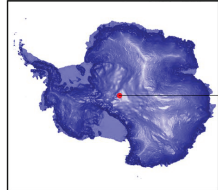
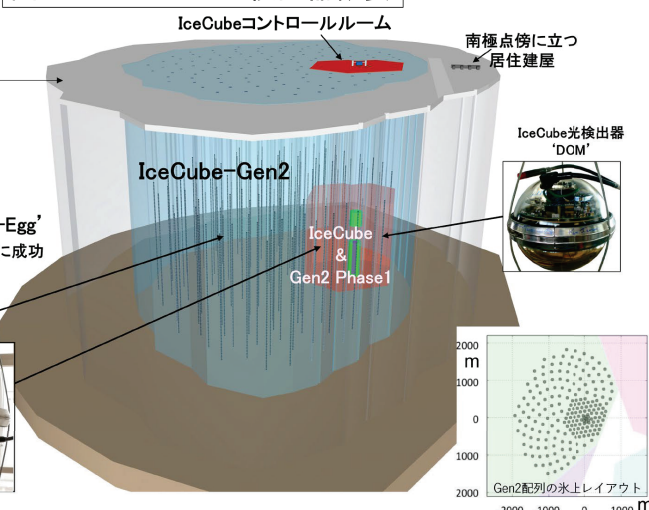


図1: IceCube-Gen2検出器概要



Gen2 Phase1長球形光検出器 'D-Egg'

- 縦長で掘削費用および時間を大幅に削減に成功
- Gen2に向けさらなる改良を行う
 - 感度の向上
 - 消費電力の低減



● IceCube-Gen2実験

図1で表しているのは、本研究提案で製造を開始する次世代南極点ニュートリノ望遠鏡IceCube-Gen2の概要である。ニュートリノ観測はチレンコフ光の検出によって行われる。そのため光検出器を埋設する掘削孔の間隔をIceCube実験の125mから240mまで広げ、埋設面積を約6倍に拡大すると同時に縦方向の

埋設距離も約40%増大させることで、IceCubeと同規模の予算で、IceCube検出器では1立方キロメートルであった検出器容量を、8立方キロメートルにまで拡大する。図1の右下のレイアウトが掘削孔の位置を表す。密になって見える部分が現行のIceCube配列である。この拡大により一年間で観測できる高エネルギー宇宙ニュートリノ事象数は5倍以上に増える。IceCube-Gen2 Phase-1で採用された光検出器D-Egg(基盤研究(A)16H02174により開発、新学術領域研究(研究領域提案型)18H05538により製造)の形状を基に改良を加えることで、信頼性を保ちつつ、さらなる感度の向上消費電力の低減を目指すと共に本基盤研究(S)によりその製造を日本から開始する。

● IceCube実験の高精度化 (IceCube-Gen2 Phase-1)

IceCube-Gen2検出器の建設に先立ち、現在IceCube実験で最大の系統誤差であり事象再構築精度を制限している深氷河での光伝搬特性系統誤差削減をPhase-1検出器配列によって行う。IceCube-Gen2 Phase-1では、現行のIceCube光検出器配列の中心に密になるように約700個の新型光検出器を埋設する。一つ一つの新型光検出器は、現行実験で使用されている光検出器と比較して2.8倍以上の感度を持つ。この密な光検出器の配列から詳細な氷河中の光伝搬データの取得が可能になり、ニュートリノ観測精度を大きく向上させることができる。この精度向上は、宇宙ニュートリノの観測以外に、より低いエネルギーの大気ニュートリノ観測精度にも当てはまり、スーパーカミオカンデ実験などと相補的な、ニュートリノ振動の情報を得ることもできる。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

● Phase1深氷河光検出器配列によるデータの較正

IceCubeでの最も大きい系統誤差は、南極点氷河中の光の伝搬特性に起因する。Gen2 Phase-1では、高性能光検出器だけではなく、様々な人工光源も一緒に埋設する。図2で表すような、光源と検出器のシステムにより南極の深氷河という自然に作られ、透過性の高いが不純物も混じる氷の中をチレンコフ光がどのように伝搬するのか、氷河中で検出器は異なる輝度の光に対しどのような応答をするのかを詳細に調べることが可能となる。新たな氷の中伝搬モデルと検出器の応答特性をシミュレーションに組み入れ、特に不定性の大きいニュートリノ事象の再構築精度を向上させる。再構築精度が上がるとことでニュートリノの種類(フレーバーと呼ばれる)の識別を行い、宇宙で飛び交うニュートリノのフレーバー分布を導く。その分布からは、宇宙ニュートリノがどのように生成されたかのヒントを得ることができると期待している。

● 較正されたIceCubeデータを用いたフレーバー解析

事象再構築の精度の向上が達成した暁には、過去に取得された全てのIceCubeデータにまで遡って新しいシミュレーションを用いたニュートリノ事象解析を行う。2025年までに取得予定である14年分データで解析を行うことで世界最高感度でのニュートリノ流量のニュートリノ・フレーバー依存性測定を行うことが可能となる。

● Gen2光検出器の製造

本研究計画により、10TeVから100PeV超まで感度を持つ8ギガトン容量チレンコフニュートリノ望遠鏡の製造を開始する。製造及び試験方法を確立し、世界に先駆け日本に製造拠点を構え、各国製造拠点で想定通り製造を進めるための先導を走る。日本グループが2013年から取り組んできた“掘削孔の直径を最小化しながら光検出器の感度を最大化する”という難題を満たし、これまでに300台規模の製造にも成功しているD-Eggをベース仕様とし、さらなる改良を進める。D-Eggによって達成された、長球ガラス容器の耐圧性能、低ノイズ、紫外光高透過性を保ちつつ、内部PMTの配置を最適化し、高感度化と省電力の両立を目指す。

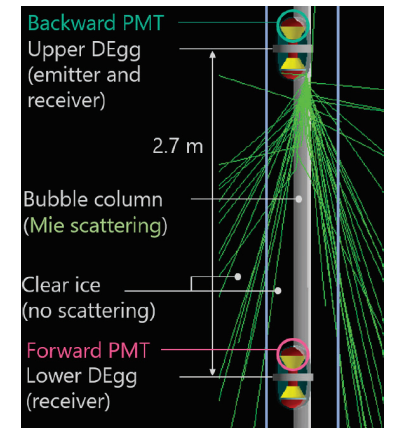


図2 Phase-1配列中の新型光検出器モジュール内のLED光源による光の氷河中の伝搬のシミュレーション。上側のD-Eggから放たれた光が下側のD-Egg及び光を放ったD-Eggによって観測することで、光の散乱が配列中の異なる場所で変化する様子を観測することができる。

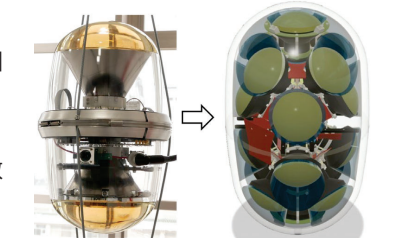


図3 D-Eggの写真(左)と新型光検出器のデザイン(右)