



LIGO-Virgo-KAGRA & IceCube Science Summary (2026 年 1 月 25 日)

<https://ligo.org/science-summaries/>

重力波と高エネルギーニュートリノの共同発生源を探る 深マルチメッセンジャー探査

背景

地球上では、合体衝突する星や爆発する恒星、噴出する銀河核といった宇宙現象を、それらが発するシグナル、いわゆる「メッセンジャー」を検出することで探索しています。メッセンジャーには3種類あります。電磁波、重力波、そして粒子です。人類は、宇宙の遥か彼方から到来するこれらのメッセンジャーを感知できる高感度検出器を開発してきました。過去 10 年間で、重力波と天体起源の高エネルギーニュートリノ粒子は、それぞれ独立に、あるいは電磁波と組み合わせて検出されています。数十年前は実現不可能と思われていた**先駆的な未来像**が、今や資金提供機関にとっての旗艦ミッションへと変貌を遂げました。今日、この**未来像**は「マルチメッセンジャー天体物理学」と呼ばれています。

過去 10 年間で、マルチメッセンジャー天体物理学の

分野は飛躍的に成熟を遂げました。今日までに、連星ブラックホール、連星中性子星、中性子星・ブラックホール系の合体を含む 200 以上の重力波イベントが検出され、同時にニュートリノ検出器は前例のないデータセットを蓄積してきました。画期的な**マルチメッセンジャー観測**として記憶される連星中性子星の合体では、重力波源と、ガンマ線から電波までの電磁スペクトル全体にわたる放射とが、確実に関連していることが示されました。しかしながら、このマルチメッセンジャー観測で、本来存在するはずの高エネルギーニュートリノは観測されておらず、**明らかに欠けている**状態です。一方で、ニュートリノと重力波を同時に放出する起源天体からのシグナルは、いつでも宇宙の片隅にいる私たちに到達する可能性があります。このような現象の共同検出は、宇宙および天体物理学に関する**深い洞察**をもたらすことになります。

IceCube (アイスキューブ) 検出器

IceCube 高エネルギーニュートリノ検出器は、南極大陸の南極点から数キロメートル地下に設置されています。その計測機器は、1 立方キロメートルにも及ぶ広大な純水を使用しています。IceCube コラボレーションは、氷内でのニュートリノの相互作用によって生じる発光を検出する 5160 個の先進光学モジュールを導入しています。IceCube は 99% 以上の稼働率という模範的な稼働レベルを維持し、全天からのニュートリノ観測を可能にしています。IceCube は、分解できない点源を持つ可能性のある拡散フラックス、ブレーザー **TXS 0506+056**、活動銀河 **NGC 1068**、そして**天の川銀河**など、さまざまな起源からのニュートリノを観測しています。

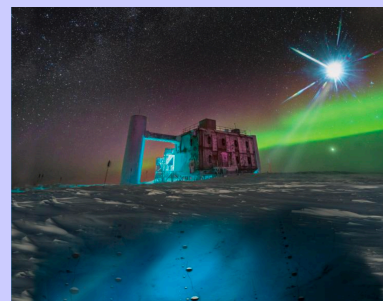


Image credit: IceCube/NSF

マルチメッセンジャー探索

重力波を含むマルチメッセンジャーの探索は、25 年以上前に初めて行われて以降、近年の極めて重要な複数の天体物理学的発見につながりました。この宇宙にある天体は複数の種類のメッセンジャーを同時に放出すると考えられるため、異なる検出器からのデータを組み合わせて同時分析を行うことはごく自然なことです。複数のメッセンジャーからの推定位置が天球面上で重なり合い、かつ発生時間が近い事象は、まさに宇宙の宝です。これがマルチメッセンジャー探索技術の基礎です。重力波は、波形から、例えば合体中のブラックホールや中性子星の質量や自転角運動量などを明らかにするといった、天体物理学的な波源の痕跡を持っています。一方、ニュートリノは放出源に関する相補的な情報を持っており、検出器に記録されたエネルギー量から、それが実際の信号である可能性を推測します。検出されたニュートリノのほとんどは、大気プロセスに由来する背景ニュートリノであり、天体物理学的起源のものではありません。同様に、重力波についても、発見された大きな信号ごとに、検出と呼べるほど強くない、閾値以下の候補事象と呼ばれる弱い痕跡が多数存在します。今回、私たちは、LIGO, Virgo, IceCube の各観測所のデータを活用し、マルチメッセンジャー候補事象のアーカイブ調査を実施しました。本論文では、閾値以下の候補事象も含めたすべての重力波候補を扱いました。これらが、ニュートリノ観測が対応している場合には、検出レベルの重力波と言い直す可能性があるからです。

結果と展望

高エネルギーニュートリノと重力波を含む起源天体（波源天体）の発見とマルチメッセンジャー観測ができれば、起源天体のダイナミクス、最高エネルギーニュートリノと宇宙線の起源、そして重力波源からの高エネルギー放射に関する理解を深めることにつながります。これらの知見は、より効果的な電磁波による追観測の取り組みも可能にするでしょう。LIGO と Virgo のデータに加え、同時に観測された IceCube 候補事象の徹底的な解析により、利用可能なデータセットが大幅に拡大し、従来の取り組みと比較して、より深く包括的な探索が可能になりました。

私たちは、モデル依存型最適統計手法を用いた LLAMA データ解析を、LIGO-Virgo-KAGRA の第 3 回観測運転

におけるすべての確度の高い重力波事象と閾値以下の候補事象、そして時間的に一致する IceCube 候補事象に適用しました。この解析では、重力波検出時刻を中心とした 1000 秒の時間枠内のニュートリノ放射を扱いました。個々の重力波事象において顕著なニュートリノ放出は検出されなかったものの、統合された天球面上の位置情報は、望遠鏡による探索領域を大幅に縮小することにつながり、マルチメッセンジャー探索が電磁波天文台の観測戦略をいかに効果的に導くことができるかを明確に示しました。

決定的な検出には至りませんでしたが、この解析は、重力波とニュートリノの両方を含む宇宙のマルチメッセンジャー源の出現数に重要な制限を与えました。新たな制限は、特に非常に高いエネルギーで等方的に放出する高エネルギーニュートリノを伴うような、重力波源の割合に関する理解を深めるのに役立ちます。さらに、重力波と高エネルギーニュートリノの同時検出は、現在のニュートリノ検出能力によって制限されていることがわかり、次世代ニュートリノ検出器の必要性が浮き彫りになりました。



LLAMA データ分析ソフトウェアセット

この探索は、多くの機能をもつ LLAMA (Low-Latency Algorithm for Multimessenger Astrophysics; マルチメッセンジャー天体物理学向けの低遅延アルゴリズム) システムを用いて実施されました。LLAMA は、コロンビア大学の研究者によって開発された、初の先駆的なリアルタイムデータ分析パイプラインです。現在のソフトウェアセットは、2006 年に開始された、粘り強く効率的かつ先駆的な取り組みの集大成であり、当初は重力波と高エネルギーニュートリノの共通発生源の探索に特化していました。LLAMA は、最先端のベイズ統計フレームワークを搭載しており、すべてのメッセンジャーからの観測データを平等に評価します。LLAMA は、重力波、ニュートリノ、電磁波の観測を最適に統合して単一の仮想検出器を構築し、異なるメッセンジャーが偶然の一致ではなく、同じ天体物理学的発生源から到達したことの統計的有意性を評価します。また、本論文のようにアーカイブデータ上での動作も可能である。さらに、LLAMA がリアルタイムで動作することで、ニュートリノの候補が検出された直後に天文学者に望遠鏡をその方向に向けて追観測するように通知を送信することもできます。

高エネルギーニュートリノと重力波の同時検出を行うリアルタイムのマルチメッセンジャー LLAMA 探索は、確実な事象データと閾値未満の事象データの両方を対象にして、その後の観測運転においても実施されています。この運用は、性能の向上を示しており、コンパクト天体

合体の探索範囲を拡大する成果をみせています。探索率の向上は、マルチメッセンジャー探索の機会を増やし、

将来的にニュートリノと重力波の共通発生源を発見する可能性を高めます。

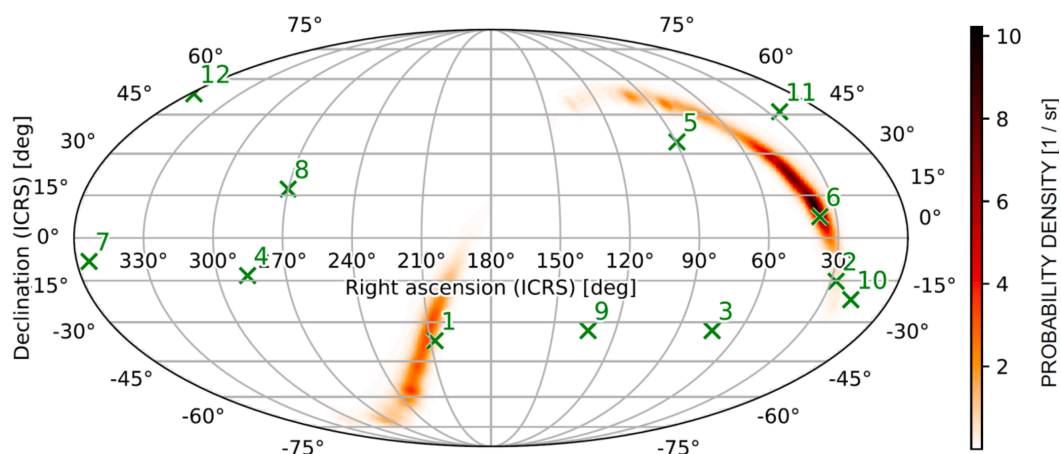


図 1: (論文に掲載した図より) 2020 年 1 月 4 日 3 時 8 分 48 秒 (世界協定時) の連星中性子星合体による重力波候補事象と時間的に一致するニュートリノ候補すべてを示した天球面統合マップ。連星合体由来の O3 閾値以下の候補リストの中で、6 番と記載されたニュートリノは最も有意性のある候補である。

現在設計が進められている**第三世代の重力波検出器**では、地球から観測できる宇宙空間の体積が桁違いに拡大します。同時に、**次世代の IceCube ニュートリノ観測所**は、観測機器の搭載体積を大幅に拡大し、数百 PeV (1PeV は 1000 兆電子ボルト) までのニュートリノエネルギーの検出を目指しています。これらの将来の検出

器により、観測数と観測精度の両面で大幅な向上が期待され、LLAMA を用いたニュートリノ、電磁波、重力波といったメッセンジャーを含む包括的なマルチメッセンジャーの発見という刺激的な機会がもたらされることでしょう。

さらに興味のある方へ

- **ベイズ統計**: モデルに依存しない最適なマルチメッセンジャー探索法は**存在しません**。そのため、想定される天体物理学的発生源と、解析するデータを得た検出器に関する事前情報を含めて、観測された同時発生の重要性を判断することが自然な方法です。このように**事前情報**を利用する方法は、同じく広く用いられている**頻度主義法**とは異なります。頻度主義法では実験・シミュレーションを繰り返し行うことで重要性を判定します。
- 次世代の IceCube-Gen2 とは? <https://icecube-gen2.wisc.edu/> にアクセスして、マルチメッセンジャー天体物理学の将来を担う南極におけるニュートリノ検出の将来についてお読みください。
- 重力波とその検出についてはこちら。
<https://www.ligo.org/news.php>
<https://www.virgo-gw.eu/>
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- ニュートリノと IceCube ニュートリノ観測所については <https://icecube.wisc.edu/>
- 本発表の論文
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2400316/public/>あるいは<https://arxiv.org/abs/2601.07595>
- データへのアクセスは[こちら](#)から。

本解説のオリジナルは、https://ligo.org/science-summaries/O3_subthreshold/ にあります。
(日本語訳: 真貝寿明, 覺依珠美)