

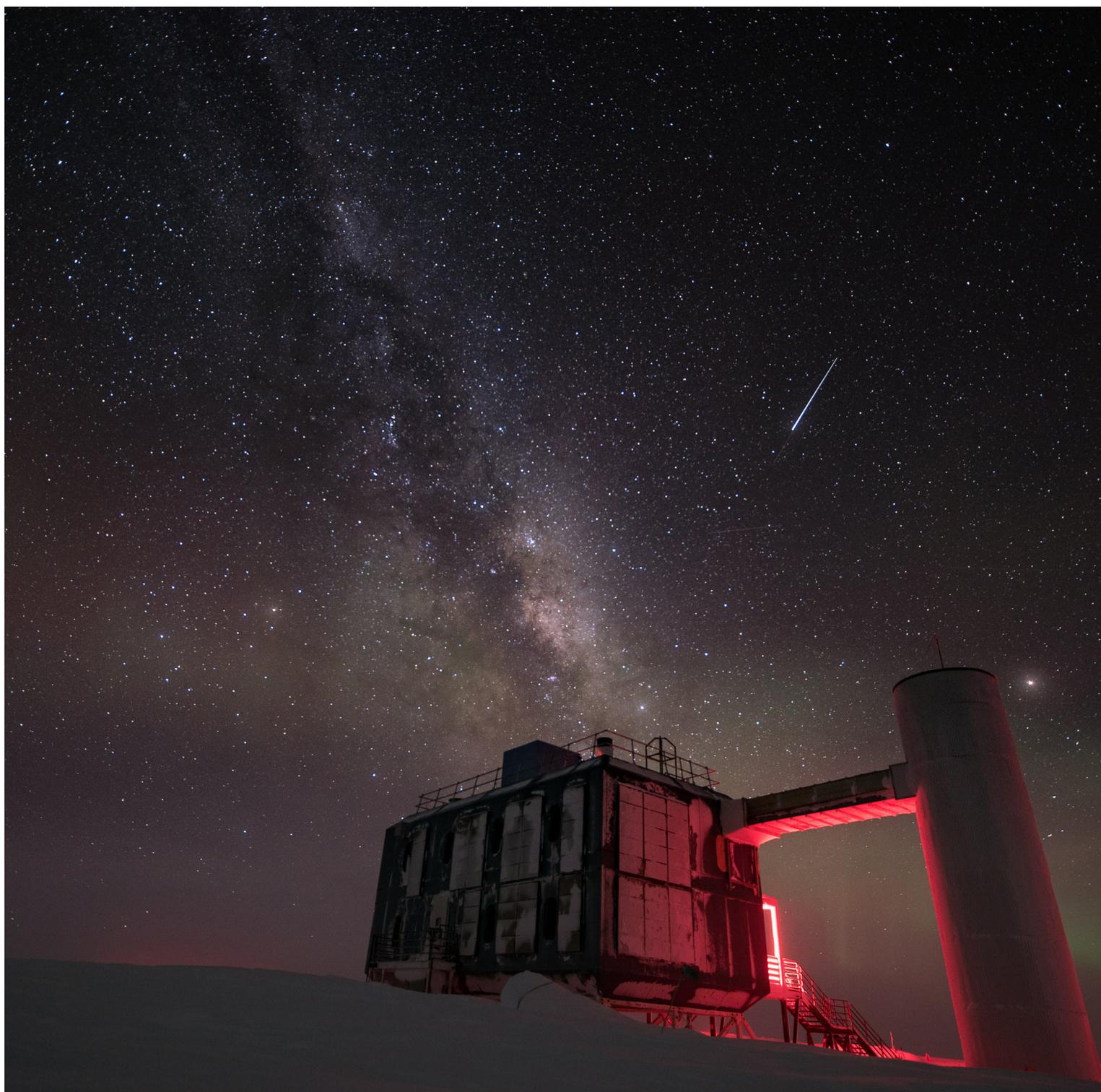


# ICEHAP

NEWS International Center  
for Hadron Astrophysics Apr. 2024 no. 13

## IceCube 制御室と天の川銀河

南極では11月から2月にかけて夏季が訪れ、白夜と呼ばれる24時間太陽が昇っている状態が続きます。逆に、冬季には極夜が訪れ、数か月間太陽が姿を見せません。そのため、夜空に光るオーロラやこの写真のような美しい景色は、冬の間現地に滞在する越冬隊だけが見ることができる特権と言えるでしょう。表紙の写真もIceCubeの越冬隊によって撮影されたもので、IceCube制御室の頭上には天の川銀河が美しく光っています。ぜひ今号に掲載されている「石原教授の研究のはなし」と合わせてご覧ください。





マルチメッセンジャー天文学部門

## マルチメッセンジャー 天文学部門が発足しました

国際研究基幹・ハドロン宇宙国際研究センター

野田 浩司／岩切 渉

### マルチメッセンジャー天文学とは？

天文学は古くから可視光観測によって発展してきました。光は我々が直接赴くことができないような遠くの宇宙の情報を地球に伝えてくれる「メッセンジャー」であり、その情報を解読していくことで人類は宇宙への理解を深めてきたのです。現代では電波、X線、ガンマ線といった多波長の電磁波に感度を持つ実験装置が開発され、天文学はさらに厚みのある学問になっています。一方で、宇宙の天体からは電磁波以外の粒子や波が届けられていることも知られています。近年、IceCubeやLIGOの登場によって人類は高エネルギーニュートリノ、重力波という新たなメッセンジャーを観測する術を手に入れました。このような可視光だけでなく、複数の観測手法を用いて宇宙の謎を解明する学問を「マルチメッセンジャー天文学」といいます。

ICEHAPでは、2023年度から新たにマルチメッセンジャー観測部門を立ち上げました。この部門は、飛翔体を用いたX線天文学を専門とする岩切助教と、地上の巨大な大気チェレンコフ望遠鏡によるガンマ線天文学を専門とする野田准教授を中心に構成されています。2010年代以降「マルチメッセンジャー」という言葉はずいぶんと浸透してきましたが、電磁波とニュートリノ観測の研究者が一つ屋根の下で密接に議論できる環境は、世界的にも珍しいものとなっています。

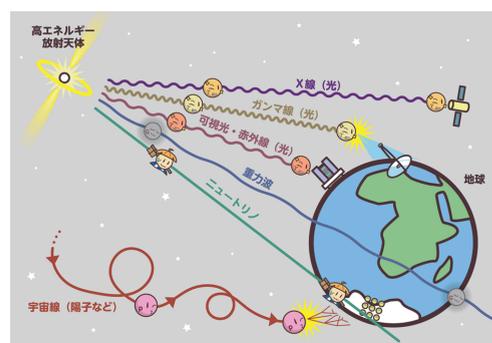


図1:ニュートリノと光のマルチメッセンジャー観測の概念図  
©higgstan.com

### 宇宙ニュートリノはどのように作られるのか

IceCubeは南極大陸の氷河に設置された宇宙ニュートリノ望遠鏡です。ニュートリノが南極の氷河と反応し

て作られた荷電粒子が発するチェレンコフ光を検出器で観測することで、主にTeV以上のエネルギーのニュートリノを観測しています。2012年に最初の高エネルギー宇宙ニュートリノが発見されて以降、IceCubeのデータ収集/解析は進み、今ではその流量の精密測定がなされるほどになりました。しかし、どの天体がニュートリノを生成しているのかという知識に関しては、限定的と言わざるを得ません。このニュートリノの放射源を特定するうえで、光とのマルチメッセンジャー観測が重要になります。実際2017年、IceCubeのニュートリノ信号と、X線やガンマ線観測によるマルチメッセンジャー観測によって、TXS 0506+056というブレーザー銀河\*1がニュートリノ放射源として特定されました (ICEHAP ニュース No.8)。一方で、IceCubeで観測されるニュートリノが全てブレーザー銀河由来だと説明できないこともわかっており、2022年には多くの研究者が予想していなかったセイファート銀河\*2のNGC1068からニュートリノが到来していることが判明しました (ICEHAP ニュース No.12)。

### ニュートリノ放射に同期した X線信号の探査

100 TeVを超える高エネルギーニュートリノを生成する有力な機構は、高エネルギーの陽子がkeV程度のX線と衝突する反応です。そのため、宇宙における天体現象に伴い、ニュートリノとX線の同時観測が期待されます。これを実験的に実現するには、ニュートリノとX線で、全天を常に見張っておく必要があります。実はこのような全天X線監視を2009年から行ってきたのが、国際宇宙ステーションに搭載されている日本のMAXIです。現在我々は、IceCubeとMAXIによる過去10年以上にわ



図2: 国際宇宙ステーションの日本の実験棟きぼうの曝露部に取り付けられた、全天X線監視装置MAXI  
(©JAXA/NASA)

たり蓄積されたデータを解析し、同期した信号の探索を行っています。また、IceCubeとMAXIのデータをリアルタイムで処理することにより、世界にその到来方向を発信するマルチメッセンジャーアラートの準備も進めています。

先ほどの陽子と光の相互作用では $\pi$ 中間子という素粒子が生まれ、これが崩壊して高エネルギーのニュートリノを生み出すと知られています。電荷を持つ $\pi$ 中間子の崩壊ではニュートリノが生まれますが、電荷のないものが崩壊するとガンマ線が生まれます。すなわち、高エネルギーニュートリノを放出する天体現象からは、同時に高エネルギーガンマ線も出ていると考えるのがシンプルな描像です。しかし、発見された高エネルギーニュートリノ天体ではこの描像が必ずしも成り立っていない、とわかりつつあります。高エネルギーニュートリノを放出する天体を高エネルギーガンマ線でも追観測して両者の情報を組み合わせることで、まだわかっていないニュートリノ放射の仕組みに迫り、宇宙における粒子加速現象の理解を深めることができます。

一口にガンマ線といっても何桁にもわたるエネルギーを意味しますが、PeVニュートリノに対応したガンマ線はTeV程度になり、これは地上大気チェレンコフ望遠鏡の守備範囲になります。チェレンコフ望遠鏡によるニュートリノイベントの追観測は10年以上の歴史を持ち、その成果の一つが先に述べた、MAGIC望遠鏡によるTXS0506+056観測です。しかし、その後同様の成果が出ないこと、NGC1068の想定外の結果などを受け、観測戦略の更新が強く求められます。特に、現在次世代計画のチェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) の建設が進んでいるため、今後10年以上にわたって、より高感度の追観測が安定して行われると期待されます。我々は、過去の経験を生かした観測戦略更新の策定をおこなっており、2024年からはその新しい戦略に従った追観測がCTAの大口徑望遠鏡 (LST) の1号基を用いて開始されます。また並行して残り3台のLST建設が佳境に入り、2026年には複数台望遠鏡による観測も始まります。



図3: チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) の大口徑望遠鏡 (LST) 1号基  
(©T. Inada)

\*1 ブレーザー銀河: 活動銀河の一種で、その中心に潜むブラックホールからのジェットが地球の方向を向いていると考えられている。

\*2 セイファート銀河: 活動銀河の一種で、非常に明るい中心核が存在するが強いジェットを伴わない。



ニュートリノ天文学部門

## マルチプレット信号を用いた ニュートリノ放射源の探索

ハドロン宇宙国際研究センター

清水 信宏

### 高エネルギーニュートリノ

高エネルギーニュートリノとガンマ線は一蓮托生、同じ天体から観測されるのは自然な予想と言えます。実際、大量のガンマ線を放出するガンマ線バースト (GRB) は、ニュートリノの放射起源の有力な候補の一つだと信じられてきました。しかしGRBとの相関を調べる解析が何度もなされるも、有意な兆候がみつかったことはありません。極めつけは、2022年の10月に見つかったGRBです。1000年に1度と言われるくらい近傍で明るいものだったのにも関わらず、IceCubeではニュートリノの信号を捉えることはできませんでした。

ニュートリノの放射起源はどこにあるのでしょうか？ GRBのようなレアな現象ではなく、意外と身近なところにあるかもしれません。例えば、超新星爆発 (GRBよりも5桁ほど頻度が大きい) はその候補の一つです。実際、SN1987A\*1から放出された10 MeV程度のニュートリノがカミオカンデで観測されています。このエネルギーは、星の中心から重力エネルギーが開放される際に、直接ニュートリノが持ち去る典型的なもので、その時間のスケールは数秒から数十秒です。一方でTeV以上ともなると、別のメカニズムを必要とします。その一つとして、超新星爆発によって広がった星周物質が宇宙線を加速し、高エネルギーニュートリノを生成するシナリオが考えられます。この加速器となる星周物質は星の核よりもずっと大きな拡がりを持ち、ニュートリノの放出の時間のスケールは1カ月といった長さになります。この「ふつう」とはちょっと違った超新星爆発が我々の宇宙をニュートリノで満たしているのかもしれない。

### 長時間ニュートリノマルチプレットの探索

一か月スケールのニュートリノ放出を検証するために、ニュートリノの「マルチプレット」信号を探索することにしました。マルチプレットとはある時間幅、同じ方向に二つ以上のニュートリノが観測

される事象を指します。この解析では時間幅として30日を採用しました。効率的にマルチプレット信号を選別するために、従来IceCube実験で用いられていた手法を改良しました。詳細は今後出版する論文に譲りますが、ニュートリノのフラックスが小さいときは、従来の手法に比べて最大2桁ほど検出確率を改善することができます。12年間で得たデータを解析し、マルチプレット信号の探索を行いました。

図4はこの解析で発見されたマルチプレット信号 (の一つ) の位置を示しています。残念ながら、最も有意度が高かったものでも、背景事象の分布と無矛盾 (p値は0.32) でした。しかし、背景事象と無矛盾な結果に意味が無いわけではありません。この事実を利用して、ニュートリノ放射源がどのくらい明るいのか、そして宇宙にどのくらい存在しているか、というパラメータを制限することができます。例えば、先に述べた星周物質をまとうような超新星爆発は、普通のものよりざっくり10倍くらい少ないとすると、ニュートリノ放出エネルギーにして $10^{50}$  ergより小さいことが要求されることがわかりました。

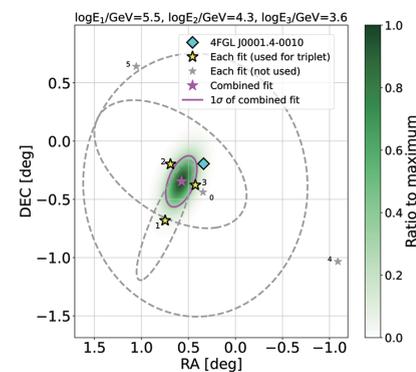


図4：この解析で発見されたマルチプレット信号の赤道座標系における位置。三つのニュートリノが検出され、マルチプレット信号となった。星のマーカーは、ニュートリノが観測された位置、鎖線はその方向不定性(1σ)、マゼンタの星は三つのニュートリノの方向をフィットして決めたマルチプレット信号の方向。

### 新たなニュートリノアラートで放射源を探れ！

IceCubeでは、有意なニュートリノ信号が観測されると、その到来方向などの情報を「アラート」として世界に発信しています。他の望遠鏡に追観測してもらうことで、ニュートリノの放射起源の同定をめざします。しかしながら、追観測によって見つかった天体とニュートリ

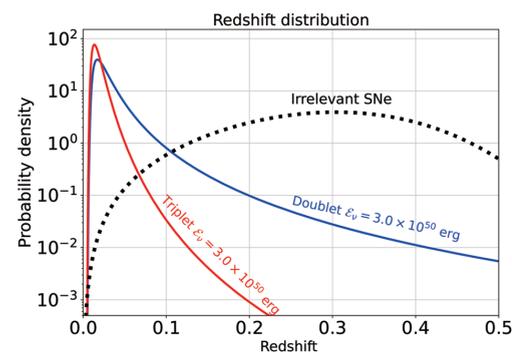


図5：マルチプレット信号として観測された天体の赤方偏移(距離)の分布。青線(赤線)は2つ(3つ)のニュートリノが発見されたときを表す。鎖線はニュートリノとは関係ない超新星爆発の距離の分布を表す(30日の観測で、 $1\text{deg}^2$ の範囲に観測されたときの最小距離の分布)。

ノに、物理的な相関があると主張することは簡単なことではありません。ニュートリノが非常に遠方より到来すること、方向決定精度が $1^\circ$ 程度とあまり良くないこと、この二つの要因により、対応天体の候補が多くなりすぎてしまうからです。例えば、すばるのような宇宙を深く観測できる「良い」望遠鏡で遠く (赤方偏移\*2  $z=1$ 程度) までニュートリノ放射源を探索すると、1ヶ月では $1\text{deg}^2$ に50以上の超新星爆発が見つかることになります。せっかくニュートリノを届けてくれた天体が観測できて、そのほとんどはニュートリノとは関係ない天体ですから、放射源の同定にはなりません。

そこで満を持して登場するのが、この研究が目指したマルチプレットです。ニュートリノに関して明るい (=近い) 天体のみがマルチプレットの信号を作ることができますから、真のニュートリノ天体を優先的に取り出すことができるのです。図5の色が付いたカーブは、マルチプレットとして観測される天体がどの赤方偏移にあるかの分布を示しています。現状のIceCubeのニュートリノに対する感度を考慮すると、赤方偏移として $z < 0.1$ の範囲にある天体がマルチプレット信号を届けることができます。この範囲は、すばるのような世界でも同一の口径をもつ望遠鏡でなくても観測が叶う距離です。一方で、無関係の超新星爆発の分布が黒の鎖線です。両者の分布には明らかな差がありますから、赤方偏移を測定することが出来れば、ニュートリノ放射天体なのか否か決着をつけることができます。マルチプレットにはもう一つ御利益があります。複数のニュートリノからなるマルチプレットは、方向決定精度が通常よりも向上します (およそ $0.3^\circ$ )。私は光学観測の感覚があまりわかりませんが、話を聞くとところによると「 $1^\circ$ の範囲の追観測は大変だよ、けど $0.3^\circ$ なら頑張ってみよう」というサムライスピリッツ (?) が騒ぐ範疇であるようです。それくらい光学望遠鏡で眺める宇宙はいろいろな天体で満ちているのです。この文章を執筆している時点ではまだこの「マルチプレットアラート」は発信していませんが現在実現に向けて調整を行っています。関係各者の皆様、もう少々お待ちください (マタセツスマセツ)。

\*1 SN1987A：大マゼラン雲内に発見された超新星。1987年にカミオカンデ実験によりニュートリノの放出が初めて確認された。この検出にによって、超新星爆発のメカニズムが実証されたことで、東京大学特別荣誉教授小柴昌俊先生がノーベル賞 (2002年) を受賞した。

\*2 赤方偏移：物体が観測者から遠ざかる際に、その光の波長が伸びる現象のこと。その波長の変化を $\Delta\lambda/\lambda = z$ で表す。距離が遠くなると波長の伸びは大きくなるので、 $z$ は距離を示す指標でもある。

## 最近の主な論文

## 本センターのメンバーが発表した主要な論文です

- IceCube Collaboration: A. Ishihara, C. Hill, K. Kin, L. Lu, M. Meier, R. Nagai, N. Shimizu, S. Yoshida, et al.; Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane, *Science* 380, 6652, DOI:10.1126/science.adc9818 (2023)
- IceCube Collaboration: A. Ishihara, C. Hill, K. Kin, L. Lu, M. Meier, R. Nagai, N. Shimizu, S. Yoshida, et al.; D-Egg: a Dual PMT Optical Module for IceCube, *Journal of Instrumentation* 18, P04014, DOI 10.1088/1748-0221/18/04/P04014(2023)
- IceCube Collaboration: A. Ishihara, C. Hill, K. Kin, L. Lu, M. Meier, R. Nagai, N. Shimizu, S. Yoshida, et al.; Limits on Neutrino Emission from GRB 221009A from MeV to PeV using the IceCube Neutrino Observatory, *The Astrophysical Journal Letters* 946, L26, DOI 10.3847/2041-8213/acc077 (2023)
- M. Iwamoto, Y. Matsumoto, T. Amano, S. Matsukiyo, and M. Hoshino; Linearly Polarized Coherent Emission from Relativistic Magnetized Ion-Electron Shocks, *Physical Review Letters*, 132, 035201, DOI:10.1103/PhysRevLett.132.035201(2024)
- T. Hanawa, A. Garufi, L. Podio, C. Codella, and D. Segura-Cox; Cloudlet Capture Model for the Accretion Streamer onto the disk of DG Tau, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, stae338, DOI:10.1093/mnras/stae338(2024)
- M. H. Abdullah, G. Wilson, A. Klypin, and T. Ishiyama; Constraining Cosmological Parameters using the Cluster Mass-Richness Relation, *The Astrophysical Journal*, 955, 26, DOI: 10.3847/1538-4357/ace773(2023)
- T. Jikei, T. Amano, Y. Matsumoto; Enhanced Magnetic Field Amplification by Ion-beam Weibel Instability in Weakly Magnetized Astrophysical Shocks, *The Astrophysical Journal*, 961, 2, id.157, DOI:10.3847/1538-4357/ad1594(2024)
- T. Tokue, T. Ishiyama; Optimizing the gravitational tree algorithm for many-core processors, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528, 1, DOI:10.1093/mnras/stad4001(2024)
- M. H. Abdullah, G. Wilson, A. Klypin, T. Ishiyama; Constraining Cosmological Parameters Using the Cluster Mass-Richness Relation, *The Astrophysical Journal*, 955, 1, DOI:10.3847/1538-4357/ace773(2023)
- S. Ohashi, M. Momose, A. Kataoka, A. E Higuchi, T. Tsukagoshi, T. Ueda, C. Codella, L. Podio, T. Hanawa, N. Sakai; Dust Enrichment and Grain Growth in a Smooth Disk around the DG Tau Protostar Revealed by ALMA Triple Bands Frequency Observations, *The Astrophysical Journal*, 954, 2, DOI:10.3847/1538-4357/ace9b9(2023)



\\ 石原教授の //

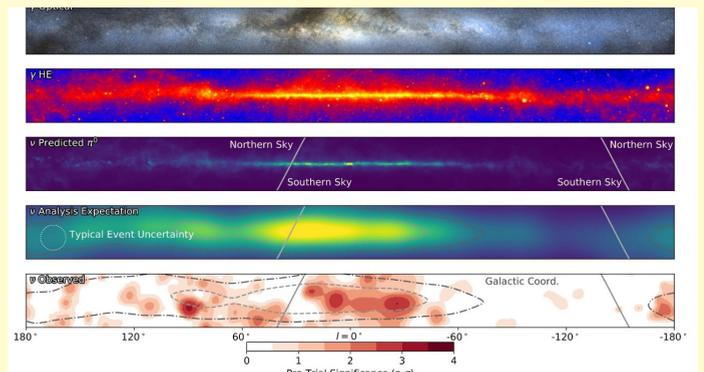
## 研究のはなし

## 天の川銀河からのニュートリノの初観測に成功

ハドロン宇宙国際研究センター / 国際高等研究基幹教授 石原 安野

IceCube 国際共同研究チームは、2023年、世界初となる天の川銀河から放射される高エネルギーニュートリノ観測に成功したことを発表しました。銀河系内宇宙線の多くは高エネルギーまで加速された陽子ですが、電荷を持ちその軌道が星間磁場で曲げられる宇宙線は、到来方向観測による発生源の特定が困難です。しかし、宇宙線は、銀河系内の伝搬時に星間物質などと衝突することでパイオンを生成し、そのパイオンの崩壊からニュートリノやガンマ線を生成するため、これらの二次生成粒子の観測による発生源の同定や系内宇宙線分布の観測が期待されています。荷電パイオンの崩壊によって生成される「高エネルギーニュートリノ」は、物質を通過し銀河の深部まで死角がなく、生成機構不定性も小さい素粒子であり、これまで得られなかった重要な情報をもたらします。今後は、ガンマ線から得られた知見と、高エネルギーニュートリノによってもたらされる新たな情報とを組み合わせるマルチメッセンジャー観測で系内宇宙線の謎に迫ります。

高エネルギー宇宙ニュートリノ発生天体として二つの活動銀河核の同定に成功しているIceCube実験ですが、銀河系からのニュートリノはこれまで観測できていませんでした。それは天の川銀河放射面の多くはIceCube望遠鏡のエネルギー閾値が高くなる南天にあり、その上、銀河面から期待されるニュートリノのエネルギーはこれまで観測されてきた宇宙ニュートリノよりも低いからです。今回IceCube実験では、以前は銀河面観測には不向きと考えられていた観測チャンネルを使った新たな解析手法を開発し、1TeVから10TeV領域の感度を大幅に向上させることで、世界初の観測を達成しました。本研究は2022年にサバティカル休暇で千葉大学に来ていたDrexel大学の倉橋Neilson尚子准教授のグループが主導しました。詳細はIceCube Collaborationによる”Observation of High-Energy Neutrinos from the Galactic Plane”, *Science* 380, 1338(2023) および、日本物理学会第79巻 第4号に掲載される倉橋Neilson尚子氏と石原による記事「最近の研究から」をご参照ください。



光とニュートリノの観測による天の川銀河の平面分布。 *Science* 380, 1338 (2023) より転載。一番上が天の川銀河の光学的カラー画像 [提供: A. Mellinger] で二番目が、Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT) ガンマ線の12年間データによる積分流量。三番目と四番目はモデルによる予測分布で、一番下の図がIceCube実験によるニュートリノ観測の有意度地図。

# 01 学術変革 (A) 「マルチメッセンジャー宇宙物理学：静的な宇宙から躍動する宇宙へ」が発足しました。

この号でフィーチャーされているマルチメッセンジャー宇宙物理学研究を加速的に発展させる文科省科研費・学術変革 (A) の提案が採択され、2023年度より発足しました。ニュートリノ・重力波・可視近赤外・X線・ガンマ線の観測チームから構成される計画研究A班と、検出器技術開発を行うB班、理論研究を進めるC班が、互いに協力しあって学際的研究を推進します。研究者コミュニティや分野の違いを乗り越え、新たな分野のパイオニアとなる研究成果を出すことを目指します。このために、各計画研究班に研究費を支給するだけでなく、サマースクールや初心者向けのワークショップの開催をとおして、幅広い宇宙観測研究手法に精通することを重視しています。詳しくはホームページ<https://multimessenger.jp/>をご覧ください。

領域代表(ハドロン宇宙国際研究センター長) 吉田滋



©Katsuki Asano, ICRR

# 02 NEW MEMBERS! 新しい仲間が加わりました!



**小林志鳳** Yukiko Kobayashi

2023年11月に特任研究員として着任しました。幼い頃から宇宙のダイナミックさに魅了され、現在は宇宙の高エネルギー現象に興味を持って研究をしています。前職までは地上の大気チェレンコフ望遠鏡を用いて、高エネルギー天体のガンマ線観測に取り組んできました。特にCTA大口径望遠鏡初号機の検出器較正に貢献し、博士論文では新星と呼ばれる連星系の爆発現象の観測データを解析して、そのガンマ線放射の仕組みを議論しました。この度ICEHAPに迎えていただき、次はどんな面白い天体を研究できるだろうかとワクワクしています。今はIceCube Upgradeを用いて超新星爆発のような突発天体からのニュートリノを探査することを目指しており、そのための検出器応答シミュレーションやデータ解析手法の改善に取り組んでいます。皆様と一緒に研究できるのがとても楽しみです。どうぞよろしくお願いいたします。



**井上進** Susumu Inoue

2023年11月より、特任研究員としてお世話になっています。専門は理論宇宙物理学ですが、観測にも頻りに携っており、特に宇宙線・ガンマ線・ニュートリノなどが関与する高エネルギー宇宙現象、およびそれらと銀河・銀河団など宇宙大規模構造との相互関係に興味があります。2018年には、ブレーザーTXS0506+056のマルチメッセンジャー (MM) 観測において、ガンマ線観測と理論解釈で貢献し、ICEHAPの皆さんとともに文科省での合同記者発表にも参加させていただきました。最近NGC1068などのセイファート活動銀河核からのMM放射や、天の川銀河における宇宙線起源の大域的なMM放射の理論研究を進めています。今後は、超新星や潮汐破壊現象などの突発天体についても、理論・観測双方で貢献したいと考えているので、皆さんと楽しく議論・共同研究できれば、と思います。どうかよろしくお願ひします。

## 最近のIceCube

いよいよIceCubeのアップグレードに向けた準備が、アムンゼンスコット南極点基地で始まりました。コロナの影響で3年もの間、人の出入りが厳しく制限されていた南極点基地では検出器のメンテナンス等、最低限の研究活動のみが許されてきました。しかし、今シーズンは穴掘りのエキスパートたちが南極点に到着し、2025年に始まるIceCubeアップグレードに向けた準備を開始しました。



アイスキューブ実験のエンジニア達 © Kurt Stoldt, IceCube/NSF

2011年にIceCubeの建設が終了して以来、13年ぶりの建設準備です。長い冬眠からたたき起こされたドリルや発電機など、13年ぶりに取り出された機材が必要となる部品交換やメンテナンスなどが行われています。



氷河の表面付近に穴をあけるために使われるにんじん型のドリルヘッドとこのドリルヘッドであけた40mの穴。 © Kurt Stoldt, IceCube/NSF

さて、いよいよ来シーズン千葉大学で作った約300台のD-Eggが南極点に到着する予定です。IceCubeアップグレードではD-Eggを含む約700台の新しい光検出器を様々な較正装置と一緒に埋設することで、IceCube検出器の高感度化を進めます。

## 最近のセンター長

ベテランのロックバンドの復活を楽しんでいると若いバンドにも行き着くyou tubeの恩恵にあずかっています。CDも買おう。

**ICEHAP NEWS**  
Apr. 2024 no.13  
International Center for Hadron Astrophysics

## 千葉大学 ハドロン宇宙国際研究センター

International Center for Hadron Astrophysics, Chiba University

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

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

icehap@ml.chiba-u.jp



SNSやっています



ICEHAP ニュース・バックナンバー  
これまでに発行されたニュースレターは、当センターHPにてご覧いただけます。▶▶

