◆◇◆◇◆◇

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

必要があり，どこで，どのように宇宙線が加速されてニュートリノを放射しているのか，活発に議論が行われている（詳細は過去の月報記事[7]や[8], [9]など）．加えて，セイファート銀河が宇宙ニュートリノ背景放射の起源となりうるかどうかも議論が続いており，今後のさらなる研究が必要である．

3つ目は，天の川銀河の銀河面である．南極点にあるIceCubeにとって，南天方向は上空から到来する大気由来のニュートリノイベントが多いため，銀河面の観測は不向きであったが，機械学習などを駆使し上述の理由で大気バックグラウンドの影響が少ないカスケード事象のイベント解析を発展させることによって銀河面からのニュートリノ信号を同定することに成功している（詳細は物理学会誌の[10]など）．しかし，天の川銀河のような星形成銀河で生成されるニュートリノを足し合わせても宇宙ニュートリノ背景放射の起源にはなれないことも示されている．

以上，これまでに確認された3つの高エネルギーニュートリノの起源を紹介してきたが，三者三様であり，IceCubeの10年を超える観測によってニュートリノ起源天体のダイバーシティが見えてくると同時に，依然として背景放射の主要な起源は特定できていない．上記の3天体の他には，超新星爆発や低光度のガンマ線バースト，潮汐破壊現象と言った突発天体もニュートリノ放射源となり得ることが理論的に提案されている．まだ統計的に十分な確証があるレベルにはないかもしれないが，可視光帯域での突発天体探査のZTFチームによってニュートリノ信号とジェットを持たない潮汐破壊現象が同期している可能性が示唆されている．宇宙背景放射の起源天体は何なのか．この正体を探ることがこれから2040年代までスコープに入るメインのサイエンスであると我々は考えている．

2. 今後のニュートリノ観測の展望

本節では現在計画されている今後のニュートリノ観測施設の計画を簡単に紹介していく．これまでのIceCubeで得られた知見から，高エネルギーニュートリノ観測施設が目指すべき方向性をまとめると，

A）北半球にGeV以上に感度をもつ大型のニュートリノ観測施設があると，IceCubeと相補的になる．

B）バックグラウンド事象を除去でき，宇宙由来のニュートリノが十分に卓越する領域，100 TeVから10 PeVの高エネルギー領域が正鵠である（突発天体に関しては時間方向のイベントセレクションでバックグラウンドを減らせるのでこの限りではない）．

C）電磁波での追観測の障壁を下げるためにもイベントの到来方向の決定精度の向上は重要である．

となる．Aに関しては，現在地中海に建設中であるKM3NeT [11]，太平洋のCascadia海盆に建設予定のP-ONE [12]，南シナ海に建設予定のTRIDENT [13]など多くの計画が存在しており，2030年代には宇宙ニュートリノのイベント数，天体の同定が現行のIceCubeのみの結果と比べて飛躍的に増加していることが期待される．Bは特にIceCubeと比べて約8倍の容量の氷を検出器とするIceCube-Gen2計画が目指すところである（詳細は[1, 2]を参照）．Cはすべてのプロジェクトが目指すところであり，海中でのチェレンコフ光を検出するタイプの実験では，氷と比べて光の散乱に対する不定性が少なくなるためにより高いイベントの角度分解能が得られることが期待される．しかし検出の原理上，期待される角度分解能は～100 TeVのトラック事象に対して半径で約0.1度角のオーダーであることは心に留めていただきたい．

突発天体の追観測を実行する側として気になる情報はその位置の不定性だけでなく，期待される

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

多次元の数値シミュレーションをベースにした放射モデルの構築も始まりつつある．現実的な物理量での第一原理計算は2040年代になっても難しいと思われるが，多次元シミュレーションで物理を理解し，より自由度の少ないモデルで多波長・多粒子の観測予言がでてくると期待される．それぞれのシナリオごとにサブミリ波やX線，MeVガンマ線などの波長間の時間変動の相関などが異なると予想される．2040年代には実現しているであろうMeVガンマ線衛星やサブミリ波，X線の観測データ（スペクトル情報と時間変動情報）と理論予言を照らし合わせることで，ブラックホール周囲での粒子加速過程と高エネルギー放射過程の理解が進むであろう．MeV帯域はその観測の困難さ（検出器製作，衛星軌道上でのバックグラウンド信号対策など）が大きな障壁となっているが，気球観測や超小型衛星で得られる知見をパスファインダーとして2040年代にはぜひ開け放ちたい天文の窓である．

観測的には2030年代は個別の天体からの高エネルギーニュートリノのイベントレートが現状より約一桁程度向上することが期待される．そうなると，ニュートリノにおいてもmonth～year程度のタイムスケールでのフラックスの変動を追うことがスコープに入り，マルチメッセンジャー時系列データが取得できることになる．そこから，AGN反響マッピングと同様の考え方で時間方向の相関情報からニュートリノの発生源，つまり粒子加速の現場，加速機構の情報にアクセスすることも可能となることが期待される．このようなデータを得るうえで重要となるのは特に高温コロナ成分のよいプローブである硬X線（＞10 keV）も含む広帯域の長期モニターデータである．ニュートリノはその観測方法から稼働中は間断なくデータを取得することができるが，上記の帯域における長期のモニターデータを取得できるような観測衛星の計画はなく，マルチメッセンジャー観測の穴となることが予想される．近年の衛星ミッションの大型化を鑑みると，本企画シリーズの玉川徹氏の記事で紹介されているような超小型衛星を利用して明るい近傍のAGNに限ったモニター型の衛星計画を進めることが重要ではないかと個人的には考える．現行の日本のMAXIや機動力の高いNASAのSwift衛星が期待されるが，2030年代以降は国際宇宙ステーションの運用や装置の老朽化を考えると，次世代のモニター型のミッションが鍵となる．

3.2　ブレーザー

ブレーザー天体TXS 0506＋056からニュートリノを検出した一方で，ブレーザーは主要なニュートリノ放射源ではないという観測事実に対してどのようなアプローチを取るべきなのかを考えてみよう．TXS 0506＋056はIceCubeによるリアルタイムアラートが機能し，多波長＋ニュートリノのマルチメッセンジャーデータが得られているが，ニュートリノの放射機構はまだわかっておらず，二匹目のドジョウを探すことが重要である．しかし，これまでにTXS 0506＋056ほど有意なニュートリノイベントとブレーザーフレアの同期は見つかっていない．ニュートリノ観測側としては，IceCube-Gen2が稼働するとIceCubeでは5σの有意度で検出するのに200日程度の観測時間が必要であったのに対し，これがGen2では約30日程度で達成できる．そのため，2030年代以降はブレーザーフレアに伴ったニュートリノ検出例が増えることが予想される．スペース天文学に期待したいことは，ブレーザーからニュートリノ放射モデルを制限する際に重要となるkeV–MeVにかけてのX線–軟ガンマ線帯域での機動力のある衛星観測である．ブレーザーの広帯域エネルギースペクトルは電波から可視光にピークを持つ成分と，ガンマ線にピークを持つ2つの成分が存在することが知られており，ガンマ線放射がレプトン起源かハドロン起源かを議論する上で重要となる．この二つの成分をつなぐのがX線–軟ガンマ線帯域となり，TXS 0506＋056の議論でもSwift衛星とNuSTAR

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

◆◇◆◇◆◇

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

[9] Inoue, S., et al., 2022, arXiv:2207.02097
[10] 倉橋Neilson尚子，石原安野，2024，日本物理学会誌，79, 181
[11] https://www.km3net.org/（2024.6.5）
[12] https://www.pacific-neutrino.org/（2024.6.5）
[13] https://trident.sjtu.edu.cn/en（2024.6.5）
[14] Yoshida S., et al., 2022, ApJ, 937, 108
[15] van Velzen, S., et al., 2024, MNRAS, 529, 2559
[16] Gorham P. W., et al., 2019, Phys. Rev. D, 99, 122001
[17] Allison, P., et al., 2016, Phys. Rev. D, 93, 082003
[18] Chen, L., et al., 2023, EPJC, 83, 102
[19] Yoshida, S., & Teshima, M., 1993, PThPh, 89, 833

Expectations for Space Astronomy in 2040 from the Viewpoint of High-Energy Neutrino Observations

Wataru Iwakiri[1] and Shigeo Kimura[2]
[1]*International Center for Hadron Astrophysics, Chiba University, 1–33 Yayoicho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263–8522, Japan*
[2]*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences; Astronomical Institute, Graduate School of Science, Tohoku University, 6–3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku Sendai 980–8578, Japan*

The term “multi-messenger astronomy” has become widely known in the last decade since the dawn of neutrino astronomy and gravitational wave astronomy. However, as has been raised in this series of articles, it is also true that astronomy is becoming increasingly subdivided into wavelength-specific specializations, which is a high barrier to promoting multi-messenger astronomy. In this article, from the standpoint of multi-messenger observations using neutrinos and electromagnetic waves, we review the results of the IceCube experiment, the issues that have emerged from them, and the next-generation high-energy neutrino observation program, and then discuss expectations for space astronomy in the 2040s.