

JWST を使った最遠方銀河探査

播 金 優 一

〈東京大学宇宙線研究所〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: hari@icrr.u-tokyo.ac.jp



138億年の長い宇宙の歴史の中で、銀河がどのように形成され、進化してきたかを知ることは、現代天文学における大きな目標の一つである。銀河の形成・進化を理解するために、これまでにモズバる望遠鏡やアルマ望遠鏡などの大型望遠鏡を用いた遠方銀河の観測が行われてきたが、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）の登場によりこの分野は急速に進展しており、今や多くの研究者がJWSTのデータに熱中している。私も、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡に研究者として育てていただき、現在JWSTを使った研究を楽しんでいる一人である。本稿では、私がJWSTを用いた最遠方銀河の研究にたどり着いた過程と、そこで待ち受けていた予想外の発見について紹介したい。

2022年7月20日深夜4時

「えっ！なにこれ…」

思わず鳥肌が立ち、一瞬で目が覚めた。連日深夜遅くまで、JWSTで撮られた画像から遠方銀河を探していた私は、選ばれた天体のうちの一つに目が釘付けになった。ディスプレイには、 $1.5\ \mu\text{m}$ を境に、長い波長でははっきりと見え、短い波長では見えないという、お手本のような赤方偏移 $z\sim 12$ （134億年前）の銀河の姿が映っていた。

「この時代にこんな明るい天体がいるのか…」
予想もしていなかった宇宙の姿に驚き、感慨に浸っていると、外は明るくなり始めていた。JWSTの登場により最遠方銀河研究が新たな時代に突入したことを実感した、まさにそんな夜明けだった。

1. 鳥肌の立つ瞬間

「研究者をやっていると、鳥肌が立つような発見をする瞬間が人生で何度かあるんだよ」2016年、博士課程のある日、確か一緒に食事をしてい

た時だと思うが、指導教員である大内正己さん（現・国立天文台・東京大学教授）がこのような話をされた。研究者という職業の魅力について語る大内さんの姿に眩しさを感じ、せっかく研究者になるなら、自分もそのような経験をしてみたいと思った。しかし同時に、果たして自分にそんな発見ができるのだろうか、一生できずに人生を終えるのではないか、という一抹の不安も感じた。

当時私は、すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam（HSC）の探査データを使って選択した大量の遠方銀河サンプルをもとにクラスタリング解析を行っていた [1]。この研究テーマは博士課程の途中で卒業された先輩から引き継いだ研究であったが、もともと大量のデータを使った観測的宇宙論をやりたいと思っていた私にとっては非常に楽しい研究であった。しかし、遠方銀河のクラスタリング研究を行っている研究者は世界中でもごくわずか、研究会で発表してもあまり興味をもってもらえず、質問が出ないために座長が気を利かせて質問してくれることが少なからずあった*1。そ

*1 このような経緯もあり、HSCを使った遠方銀河のクラスタリングの研究 [1] に欧文研究報告論文賞をいただいたときは本当に嬉しかった [2]。

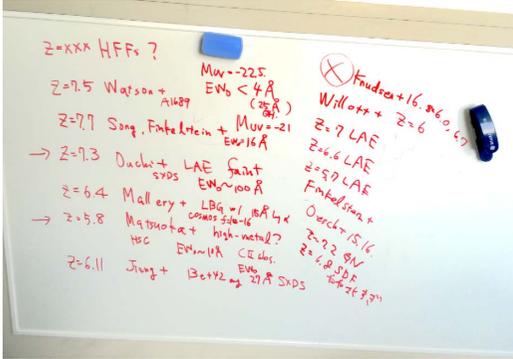


図1 アルマ望遠鏡の観測ターゲットに関する議論の様子。アルマ望遠鏡は南米チリにあるため、天体の赤緯が高すぎると観測できない。さらに [OIII]88 μm 輝線は理論的には明るいと予想されていた一方で [9], $z \leq 9$ では大気吸収が強い周波数に赤方偏移してしまうため、うまく観測ターゲットを選ぶ必要があった。長時間の議論の結果、左下から2番目の(矢印がついている)松岡さんが分光同定された $z \sim 6$ の銀河をターゲットにすることに決まった。

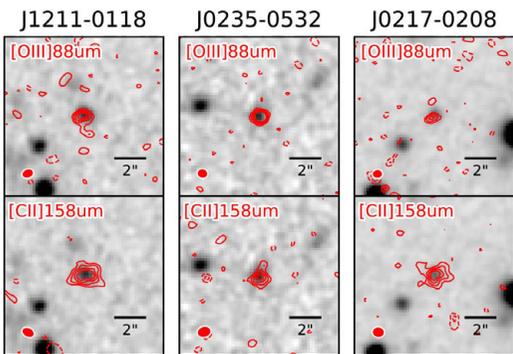


図2 観測した3つの $z \sim 6$ 銀河の [OIII]88 μm 輝線と [CII]158 μm 輝線 [11]。コントラストがアルマによって得られた輝線マップで、背景はHSCの z バンド画像。観測した3天体すべてから [OIII]88 μm 輝線と [CII]158 μm 輝線を検出することに成功した。

め、観測データが全て届いた2019年春には井上さんの初検出から3年以上が経っていた。その間に橋本拓也さん(現・筑波大学助教)や田村陽一さん(名古屋大学教授)により $z=7-9$ の銀河で次々と [OIII]88 μm 輝線の検出が報告され [12-15], [OIII]88 μm 研究のフロンティアは $z \sim 9$ に移りつつあった。このまま $z \sim 6$ の銀河3つからの [OIII]88 μm 輝線の検出を報告しても大きなインパクトにはならないだろう、しかも同時に検出された [CII]158 μm 輝線は光電離領域 (photodissociation region; PDR) から出るため、電離水素領域 (Hii region) のみから出る [OIII]88 μm 輝線とは異なり理論的解釈が難しい。どうすればよいのか悩んでいた*5。

この頃は東大での大学院生活を終え、国立天文台のアルマプロジェクトにポスドクとして在籍しており、アルマを使った研究をしている人々と議論する機会が豊富にあった。その中で、遠方銀河の輝線を理論的に研究していた森脇可奈さん(現・東京大学助教)が当時大学院生として定期的に天文台に来ており、彼女と議論していく中で、近傍銀河の [CII]158 μm 輝線の強度を光電離モデル Cloudy を使って PDR も含めて理論的に計算している研究 [17] があることを知った。「輝線の検出を報告するだけでなく、Cloudy を使って [OIII]88 μm と [CII]158 μm 輝線の強度を理論的に解釈し、星間物質 (ISM) の物理状態を議論する論文は新しいのではないか」そう確信した私は、光電離モデル計算のエキスパートである長尾透さん(愛媛大学教授)、但木謙一さん(現・北海学園大学教授)に教えを請いながら Cloudy を使った理論計算を進めた。結果として、 $z > 6$ の遠方銀河は近傍銀河と比べて系統的に [OIII]88 μm / [CII]158 μm 輝線強度比が高く、その原因は ISM

*5 「つまらん研究をする人はつまらん人間」これはとある東大工学部の教授が1991年に記した言葉で [16], 私も工学部の友人に教えてもらったものである。非常に厳しい言葉で、実際には研究の良し悪しで人の価値は測れないだろうが、当時の私はこの言葉が頭をよぎり、何か面白い研究をしなければ、と思っていた。

マルチバンドカタログを作成したら、そのあとはドロップアウト法^{*6}で遠方銀河を探すのが一般的である。JWSTの撮像カメラNIRCamのフィルターはF070W (0.7 μm) から揃っているが、波長が短すぎると感度が落ちてしまうため、通常観測で用いられるのはF090WやF115Wからである。F115W-ドロップアウト銀河は $z\sim 9$ に対応するが、 $z\sim 9$ 銀河は既にハッブル宇宙望遠鏡の観測で見つかっているので、探すべきは新規性のあるF150W-ドロップアウト ($z\sim 12$) やF200W-ドロップアウト ($z\sim 16$) だろう。ドロップアウト法の詳細な選択基準を検討している間に、せっかくなのでどれくらいの銀河がJWSTの初期観測データで検出できるのか見積もってみることにした。しかし、当時理論で予想されている $z\sim 12$ 銀河の光度関数(銀河の個数密度を光度ごとに表したもの)を使って検出個数を予測してみたものの、最も楽観的な理論モデルで限界等級ギリギリの暗い銀河がやっと数個が見つかる、というかなり絶望的な予測だった^{*7}。F150W-ドロップアウトが新規性があるのに、1個も見つからなかったらどうか、自分の研究の方針に不安を覚えを始めた。しかしデータ公開まで1ヵ月と迫りつつあり、もうこのまま走るしかなかった。

3.2 データ公開：天文学者たちの熱い夏

研究者用のデータの公開は日本時間2022年7月14日午前0時に予定されていたが、EROの一般向け画像はその前の12日夜9時半からライブブロードキャストで先に公開されると発表されていた。しかし11日になって突然、EROの画像の一部がバイデン米大統領(当時)の前で公開さ

れる、という情報がオープンになった。バイデン大統領の前で公開された画像は、重力レンズ銀河団SMACS 0723の非常に深いNIRCam画像であった。この画像を見たとき私は、多くの銀河の姿が鮮明に映し出されている様子に感激するとともに、期待通りの質の高いデータが取得できていることを確認でき胸を撫で下ろした。JWSTの打ち上げはこれまで幾度となく延期を繰り返しており、この画像はまさに天文学者が10年以上も待ち望んでいたものであった。もし万が一画像がイマイチだったら、これまでの天文学者の期待が一気に消えてしまう、そんな心配をふっ飛ばすくらい凄まじい画像だった。

その後は7月12日夜に他のEROの画像が公開された。私の研究に一番関係があるのは既に出てきたSMACS 0723の画像だろうとたかを括り、私は家事をしながら横目にブロードキャストを見ていた。しかしその中で公開された $z=8.5$ 銀河のNIRSpec分光スペクトルに衝撃を受け、思わず家事をする手が止まった。そこには検出が予想されていた明るい[OIII] $\lambda 4959$, 5007やH β の輝線だけでなく、暗い[OIII] $\lambda 4363$ 輝線が映っていた。[OIII] $\lambda 4363$ は[OIII] $\lambda 5007$ と組み合わせると正確な金属量推定に必要な電子温度を求められる。そのため遠方銀河の研究者にとっては是非検出した輝線の1つであるが、強度が[OIII] $\lambda 5007$ の10分の1以下と弱く、 $z=8.5$ のような遠方宇宙で検出できるとは思ってもいなかった。公開されたNIRSpecのスペクトルにはほかにも多くの輝線が写っており、さまざまな研究が展開できそうな予感がした。ブロードキャスト直後の13日深夜0

^{*6} 銀河と我々の間にある銀河間物質中の中性水素による吸収のため、遠方銀河は121.6 nmより短い波長では暗くなる。これをライマンブレイク(正確にはライマンアルファブレイク)といい、このブレイクを目印に複数バンドで取られた画像から遠方銀河を探す手法をドロップアウト法またはライマンブレイク法と呼ぶ。ドロップアウト法で選ばれた銀河は、使ったフィルターの名前と合わせて呼ばれることが多く、例えばF150Wバンドで暗い銀河($z\sim 12$ に対応)はF150W-ドロップアウト銀河と呼ばれる。

^{*7} JWSTの装置チーム(GTO/JADESチーム)も似たような予測を出しており [25]、彼らの大きな探査でも見つかる $z>12$ 銀河の数は多くはなく、大半は暗いものであると考えられていた。

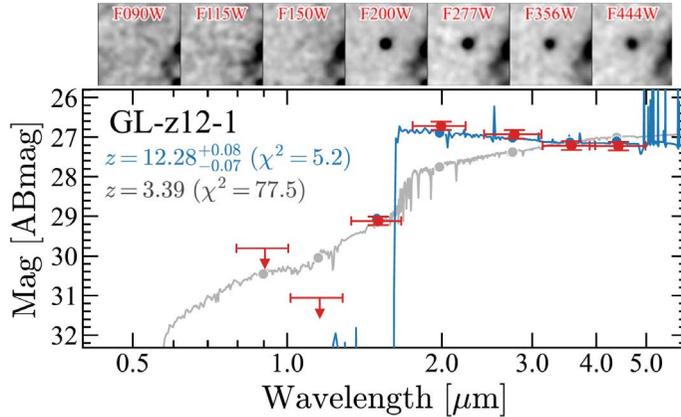


図3 JWSTの初期データから見つけた明るい $z\sim 12$ 銀河候補GL-z12-1[26]。上パネルはJWST/NIRCamの画像を示している。F150Wバンドを境に長波長側では明るく、短波長側では暗くなっており、画像だけでもF150W-ドロップアウト銀河であることがはっきりとわかる。下パネルは丸印が観測された各バンドごとの等級（スペクトルエネルギー分布；SED）を示しており、 $z\sim 12$ 銀河のモデル（青線）とよく合うことがわかる。この銀河はのちのNIRSpec分光観測で、赤方偏移が $z=12.34$ であることが確認されている [27]。

観測時間が長く、データ量が多いため時間がかかっていたERS GLASSのデータの整約が終わったので、 $z\sim 12$ 銀河を選択してみることにした。選ばれた天体の画像と等級を1つ1つ目で確認していくと、そのうちの1つの天体を見た時に鳥肌がたった。冒頭で紹介した、お手本のようなF150W-ドロップアウト（ $z\sim 12$ ）銀河、GL-z12-1の発見である（図3）。明るい上に、観測時間が長く、データが深いおかげで、ひと目でこれは $z\sim 12$ の銀河だとわかった。限界等級ギリギリの暗い銀河が1個見つかったらよい方、という予想をしていたところで、限界等級より10倍も明るい銀河が見つかったのは衝撃だった。「こんなに明るい天体が $z\sim 12$ の宇宙にいるのか。従来の理論予測がまちがっていたのだろうか。なぜこんなに明るいのだろうか。この明るさならアルマで追観測できるのでは。いやJWST DDTプロポーザルを出すべきだろうか。」20日深夜4時の出来事だったが、驚きで一気に目が覚め、さまざまな可能性が頭の中をよぎった。さらに明るくまたお手本のようなF115W-ドロップアウト（ $z\sim 9$ ）銀河GL-z9-1も見つかった。この頃にはもう研究の方針への不安はどこか

に消え去っており、興奮で胸がドキドキして眠れない状態であった。

しかし、競争は予想以上に熾烈だった。後からわかったことだが、JWSTの初期データを使って最遠方銀河を探しているグループは、我々を含めて世界に10あった。深夜4時の発見の後、すぐに共同研究者に報告のメールをしたが、その日の朝9時に更新されたarXivにはアメリカ・ヨーロッパの2つの研究グループからそれぞれ独立にGL-z12-1、GL-z9-1を報告する論文2本 [28, 29] が投稿されていた。自分が世界のトップ研究者たちの熾烈な競争の中に飛び込んでしまったことを実感した。焦る気持ちもあったが、我々の方針はなるべく多くのデータを使い包括的な研究をすることである。粛々とEROやERSの他の領域でも天体を探しながら、論文にまとめて行った。

3.4 論文執筆：天文学者になってよかったと思った瞬間

翌週25日からはドイツ・リングバーク城で開かれる研究会に招待されていた。リングバーク城は、学生時代にさまざまな人にその様子を聞き、研究者として一度は行ってみたいと思っていた場

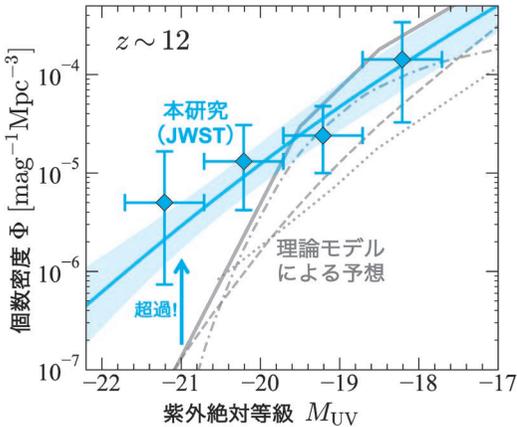


図4 $z \sim 12$ の紫外光度関数 ([26] を改変). 横軸は紫外絶対等級, 縦軸は銀河の個数密度. ダイヤ印がJWSTを使った本研究の結果. 初期データでは統計が限られているためエラーが大きいが, $z \sim 12$ の宇宙初期で初めて描かれた光度関数であった. $z \sim 12$ でも暗い銀河が多く, 明るい銀河が少ない, ということはこの図から確認でき, 私はこの結果をプロットした時に134億年前の宇宙の様子を人類で初めて見た気持ちになり感動した. 灰色線は様々な理論モデルによる予想で, 明るい側では個数密度を過小評価しており, GL-z12-1のような明るい銀河がこの宇宙初期の時代に存在することは予想されていないことがわかる.

みたところ, 確かに大質量星からの大量の電離光子が周りのガスを電離するために, 電離ガスからの連続光である nebular continuum が強くなり静止系紫外で非常に明るくなることがわかった^{*15}. 急いで議論と関連する図を加え, 8月3日深夜2時44分に論文 [26] を投稿した^{*16}. JWSTのデータが公開されてからちょうど3週間であった.

論文は共同研究者の方々のおかげで, 36ペー

ジの大作になった. 反響は凄まじく, 引用数369と, 2000本を超えるJWST関連論文の中で欧米チームの論文を抑えいまだに引用数1位となっている^{*17}. イギリスでポスドクをしていた時代の上司であるRichard Ellisさん(ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン)からは“Impressive paper!”とお褒めの言葉をいただき, 国際会議の招待講演依頼を大量にいただくなど(2023–2024年で20件), 自分の研究者人生を変えた論文になった. また自分としても, 構築した銀河サンプルを使って初めて $z \sim 12$ の光度関数(図4)をプロットした時は, 人類が今まで目にしたことのない134億年前の宇宙の姿を初めて概観した気持ちになり, 「こんな経験ができるなんて, 天文学者になってよかったなあ」と心から感じた.

4. 鳥肌の立つ発見・再び

4.1 次の研究

JWSTを使った最初の論文をまとめた後は, 国際研究会やセミナー発表で忙しい日々が続いていたが, 11月から12月にかけてERSのGLASSとCEERSでNIRSpecによる観測が進み, NIRSpecの分光データを使った研究の機運が高まってきた. NIRSpecデータは遠方銀河の金属量を調査していた中島王彦さん(国立天文台特任助教)がまとめてくださっており [44], アイディアさえあればすぐにNIRSpecデータを使った研究が始められる環境が整いつつあった. しかしすぐに思いつくような研究テーマは既に周りの共同研究者が取り組み始めており, NIRSpecデータを使って何をやろうとかが悩んでいた.

^{*15} このほかにも, 爆発的に星を作っている銀河を選択的に観測している可能性などが議論されているが, 理論予測と観測のずれの原因はまだはっきりとはしておらず, さらなる観測が必要である.

^{*16} 8月はアメリカでは夏時間なので, arXivの論文投稿締め切り時刻は日本時間深夜3時である. 普段は深夜3時ぴったりに投稿し, 自分の論文をarXivのリストの一番上に載せようとする人も多いだろう. しかしJWSTを使った論文が次々と投稿されていたこの時期は, 皆1日でも早く論文をarXivに載せるために, むしろ締め切り時刻直前に投稿された論文が多かった.

^{*17} 2024年10月31日現在.

そのような状況の中で、2023年2月初め、CEERSチームのDale Kocevski（コルビー大学）たちが $z=5-6$ の広輝線AGNの分光同定を報告した [45]。見つかった天体の $H\alpha$ 輝線は確かに広輝線AGNに特徴的な広がったプロファイルを示しており、一方で紫外絶対等級で $M_{UV} \sim -19$ magと、これまで遠方宇宙で見つかったクェーサーと比べて100倍ほど暗い。これまでの地上望遠鏡によるクェーサー探査によると、遠方宇宙のクェーサーの光度関数は暗い側では傾きが緩やかになるため、暗いAGNの数は銀河に比べると少なく、個数密度では1000分の1以下と見積もられていた。そのような予想があったため、暗いAGNはJWSTの探査自体では1個も見つからないだろうと思っていた私にとって、Dale Kocevskiたちの論文は驚きであった。しかし報告されたのは2天体のみであり^{*18}、見積もられた個数密度はエラーが大きく、本当にAGNの数が従来に見積もりと比べて多いのかどうかはわからない状況であった。

似たような暗いAGNはほかにはいないのだろうか、そう思った私は中島さんに連絡をとってNIRSpecデータで広輝線AGNを探してみることにした。当時私たちがもち合わせていた遠方銀河のNIRSpecデータは、EROの5天体、ERS GLASSの15天体、ERS CEERSの165天体、合計185天体であった。このうちCEERSのデータが一番銀河の数が多く、まだ広い領域をカバーしているため、個数密度が少ないと予想されるAGNを探するには最適であった。しかしDale KocevskiはCEERSチームの主要メンバーである。既にCEERSのデータは全て確認していて、それでこの2天体を論文で報告したいのではないかと、普通ならそう考えるだろう。もしそうならCEERSのデータの中には他には

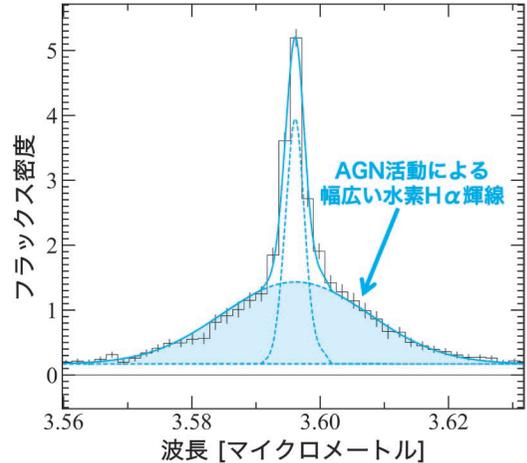


図5 本研究で発見した暗いAGNの $H\alpha$ 輝線スペクトルの一例 [48]。幅広い（半値幅 ~ 2200 km s^{-1} ） $H\alpha$ 輝線が高いSN比（ 37σ ）で検出できており、この天体が $z=4.4$ の広輝線AGNであることを示している。

AGNは見つからないはずであり、ましてや個数や面積の小さいEROや、GLASSのデータには何もないだろう。つまり何も発見できない可能性の方が高かった。

4.2 予想外の遠方AGNの大量発見

このように期待していたわけではなかったが、とりあえず185天体のスペクトルを一個一個確認してみることにした。広輝線が見られると予想される $H\alpha$ 輝線をまずはガウシアンでフィットし、禁制線である $[OIII]\lambda 5007$ 輝線とも比較しながら、結果を1天体ごと目で確認していく。するとKocevskiらの論文で報告していた天体以外にも、幅広い $H\alpha$ 輝線をもつ銀河がいることに気がついた（図5）。それも1天体だけではなく、どんどん見つかる。

「おお！本当にいるのか！それもこんなに…」

^{*18} このうちの1天体は、尾上匡房さん（現・東京大学研究員）や稲吉恒平さん（北京大学准教授）が分光前にNIRCam画像とSEDをもとにAGN候補として報告した天体であった [46, 47]。当時尾上さんたちの論文を読んだ私は、SEDを見ながらAGNではなくて強い輝線をもつコンパクトな銀河かもしれないな、などと思っていたのだが、その後の分光観測で見事AGNであることがわかり、AGNのエキスパートの慧眼に感服した。

最初の天体を見つけた時は驚きで鳥肌が立ったが、どんどん発見していくうちに何かの間違いなのではないか、と思い始めた。しかし広輝線AGNの特徴を示す幅広いH α 輝線は1次元スペクトルだけではなく2次元スペクトルでも見えており、NIRSpecの各ショットごとのデータを見ても偽シグナルなどの兆候は見当たらない。疑いのような

いくらい高いSN比で広輝線が見えている天体もある。さまざまな検証をしたが、やはり検出されたH α 広輝線は本物のようだった。最終的にKocevskiらが報告した天体を含めて、 $z=4-7$ で10個の暗い広輝線AGNを見つけた。従来のクエーサー研究から見積もった予想の50倍以上の数である(図6)。「暗いAGNは遠方宇宙には実はたくさんいる」まだ誰も発表していない新事実を確認した興奮と嬉しさが胸がいっぱいになった。

なぜこんなにたくさんの暗いAGNがJWSTで見つかったのだろうか?これまでの地上望遠鏡によるクエーサー探査では見つからないと思われていた天体が見つかったと聞くと、これまでのクエーサー研究が間違っていたのか、と思われる方もいるかもしれないが、実はそうではない。図7に、今回見つかった10個の暗いAGNの画像を示す。見てわかるように、多くの天体は点源ではなく広がった構造を示しており、AGN自体よりも母銀河の光が支配的である。そのため画像からは普通の銀河にしか見えない。つまり今回見つかったのは、近傍宇宙で見られるセイファート1型銀河のような天体である。このような天体は点源をターゲットとしたクエーサー探査ではもちろん見つからない。そのために個数を過小評価していたのである。JWST/NIRSpecの卓越した感度のおかげで実現した、予想外の発見だった。

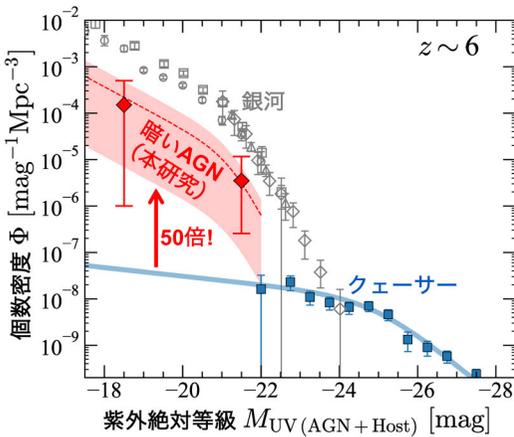


図6 $z\sim 6$ の紫外光度関数 [48]。青色四角がクエーサーの光度関数 [49] で、暗い側で傾きが緩やかになることから、暗いAGNの個数密度は小さく、銀河の個数密度(灰色印)の1000分の1以下だと予想されていた。ダイヤ印が本研究で見つかった暗い広輝線AGNの個数密度で、クエーサーの光度関数の外挿よりも50倍以上も高い値になっており、JWSTによって予想以上に多くの暗いAGNが遠方宇宙において見つかったことを示している。

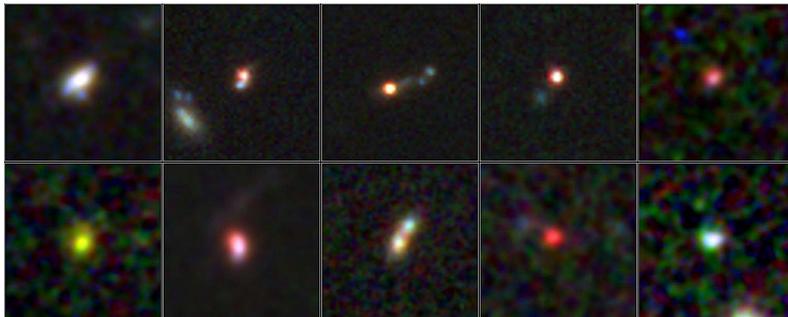


図7 本研究で見つかった $z=4-7$ の10個の暗い広輝線AGNの画像 [48]。多くの天体は広がった構造を示しており、AGNによるコンパクトな放射だけでなくその母銀河からの光も検出することに成功している。上パネル右から1番目と、下パネル右から2番目は、little red dotsと呼ばれる赤くコンパクトな天体である。

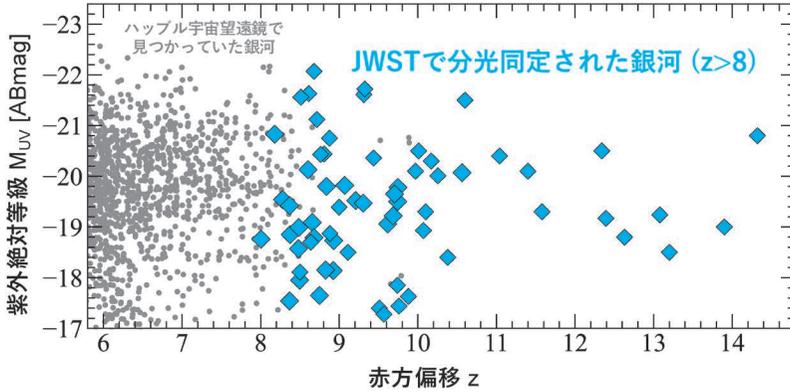


図8 これまでJWSTで分光同定されてきた $z > 8$ 銀河（ダイヤ印）。JWSTの観測開始からまだ2年ほどしか経っていないが、 $z = 14$ （135億年前）の宇宙にいる銀河まで分光同定されている [52–54]。灰色丸印はハッブル宇宙望遠鏡でこれまで見つかった銀河。 [39] を改変。

銀河)が見つかる日もいつか来るかもしれない。一方でJWSTは宇宙望遠鏡であり、その寿命は有限である。いつかJWSTが寿命を迎えた時に後悔しないように、知恵を最大限絞りながら、研究を前に進めていきたいと思う。

すばる望遠鏡から始まった遠方銀河研究は、アルマ望遠鏡、JWSTへと繋がり、その中でたくさんの人々に支えられながら、いくつもの感動と驚きを私にもたらしてくれた。今後もすばる/PFSやローマン宇宙望遠鏡、ELT、TMTといった30 m級望遠鏡、さらにHabitable World Observatoryなど、次世代の望遠鏡/装置が計画されている。その中で日本の研究が存在感を保てるように、また後輩たちにも私が体験したような驚きの発見を経験させられるように、引き続き頑張っていきたい。

謝 辞

この度、ありがたいことに2023年度研究奨励賞をいただきました。大変光栄に思います。本記事に記しましたように、私の研究は多くの方々

支えられてきました。特に指導教員である大内正己教授には、無理を言って学部4年の頃から研究を始めさせていただき、研究方針の立て方から発表の仕方まで、数多くの有用なアドバイスをいただきながら研究者として育てていただきました。この場を借りて深く感謝を申し上げます。またほかにも多くの方々にも助けていただいたおかげで今日まで研究を続けることができしております。紙面の都合上全員の名前を挙げられませんが、イギリス時代から研究やプロポーザル執筆を強力にサポートしていただいたRichard Ellis教授や国立天文台で私を快くポストドクとして受け入れてくださった松田有一助教、共同研究者として有用なアドバイスをいただいた井上昭雄教授、大栗真宗教授、小野宜昭助教、斎藤俊助教、Ryan Sanders助教、Yechi Zhangさん、澁谷隆俊准教授、嶋作一大准教授、Tucker Jones准教授、但木謙一教授、田村陽一教授、利川潤特任助教、長尾透教授、中島王彦特任助教、長峯健太郎教授、橋本拓也助教、Peter Behroozi准教授、松岡良樹准教

*21 この little red dots は、実は3.4節で Ivo Labbe や Rachel Bezanson たちによって初期データから報告された大質量銀河候補のうちの1天体である。初期データが公開された頃はJWSTの狭い探査データからAGNが見つかるとはほとんど誰も予想しておらず、さらに従来のAGNとは異なる特徴的なSEDをしていたため、分光データがない状態でこの大質量銀河候補をAGNだと判別するのは不可能に近かった。

授, 馬渡健さん, 宮武広直准教授, Surhud More 准教授, 森脇可奈助教, Michael Rauch さん, Suraphong Yuma 助教授, 吉田直紀教授 (五十音順), 研究室の先輩・同期・後輩の皆さん, 研究室秘書の井戸村貴子さんには大変お世話になりました。昨今のインフレ・円安のために招待された国際会議への参加が難しくなった際に助けていただいた, SUPER-IRNET の世話人の皆様, 山口育英奨学会, 住友財団, 伊藤科学振興会の皆様にもお礼申し上げます。また, 本稿の内容に関して助言をくださった天文月報編集委員の川中宣太さん, 志達めぐみさんに感謝いたします。最後になりましたが, 私の仕事を理解し支えてくれる妻と, 日々の生活を楽しく彩ってくれる子どもたちに心からの感謝を贈らせてください。

参考文献

- [1] Harikane, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S11
 [2] 播金優一, 2024, 天文月報, 117
 [3] Finkelstein, S. L., et al., 2013, Nature, 502, 524
 [4] Zitrin, A., et al., 2015, ApJ, 810, L12
 [5] Oesch, P. A., et al., 2015, ApJ, 804, L30
 [6] Roberts-Borsani, G. W., et al., 2016, ApJ, 823, 143
 [7] Inoue, A. K., et al., 2016, Science, 352, 1559
 [8] 井上昭雄, 2017, 天文月報, 110
 [9] Inoue, A. K., et al., 2014, ApJ, 780, L18
 [10] Matsuoka, Y., et al., 2018a, PASJ, 70, S35
 [11] Harikane, Y., et al., 2020, ApJ, 896, 93
 [12] Hashimoto, T., et al., 2018, Nature, 557, 392
 [13] Hashimoto, T., et al., 2019, PASJ, 71, 71
 [14] Tamura, Y., et al., 2019, ApJ, 874, 27
 [15] 橋本拓也, 2024, 天文月報, 117
 [16] 堀洋一, 1991, 「研究者を目指す普通の学生諸君に」, 電子情報通信学会学生報, 21
 [17] Cormier, D., et al., 2019, A&A, 626, A23
 [18] 播金優一, 2022, 天文月報, 115
 [19] Pontoppidan, K. M., et al., 2022, ApJ, 936, L14
 [20] Treu, T., et al., 2022, ApJ, 935, 110
 [21] Finkelstein, S. L., et al., 2023, ApJ, 946, L13
 [22] 森下貴弘, 2024, 天文月報, 117
 [23] Bertin, E., & Arnouts, S., 1996, A&AS, 117, 393
 [24] Oguri, M., 2010, PASJ, 62, 1017
 [25] Rieke, M., et al., 2019, BAAS, 51, 45
 [26] Harikane, Y., et al., 2023a, ApJS, 265, 5
 [27] Castellano, M., et al., 2024, ApJ, 972, 143
 [28] Naidu, R. P., et al., 2022, ApJ, 940, L14
 [29] Castellano, M., et al., 2022, ApJ, 938, L15
 [30] Leethochawalit, N., et al., 2023, ApJ, 942, L26
 [31] Adams, N. J., et al., 2023, MNRAS, 518, 4755
 [32] Atek, H., et al., 2023, MNRAS, 519, 1201
 [33] Morishita, T., & Stiavelli, M., 2023, ApJ, 946, L35
 [34] Finkelstein, S. L., et al., 2022, ApJ, 940, L55
 [35] Donnan, C. T., et al., 2023, MNRAS, 518, 6011
 [36] Yan, H., et al., 2023, ApJ, 942, L9
 [37] Arrabal Haro, P., et al., 2023, Nature, 622, 707
 [38] Harikane, Y., et al., 2024a, ApJ, 960, 56
 [39] Harikane, Y., et al., 2025, ApJ, 980, 1
 [40] Harikane, Y., et al., 2022, ApJS, 259, 20
 [41] Labbé, I., et al., 2023, Nature, 616, 266
 [42] Omukai, K., et al., 2005, ApJ, 626, 627
 [43] Chon, S., et al., 2022, MNRAS, 514, 4639
 [44] Nakajima, K., et al., 2023, ApJS, 269, 33
 [45] Kocevski, D. D., et al., 2023, ApJ, 954, L4
 [46] Onoue, M., et al., 2023, ApJ, 942, L17
 [47] 尾上匡房, 2024, 天文月報, 117
 [48] Harikane, Y., et al., 2023b, ApJ, 959, 39
 [49] Matsuoka, Y., et al., 2018b, ApJ, 869, 150
 [50] Matthee, J., et al., 2024, ApJ, 963, 129
 [51] Kokubo, M., & Harikane, Y., 2024, arXiv:2407.04777
 [52] Carniani, S., et al., 2024a, Nature, 633, 318
 [53] Schouws, S., et al., 2024, arXiv:2409.20549
 [54] Carniani, S., et al., 2024b, arXiv:2409.20533

A Search for the Most Distant Galaxies Using the JWST

Yuichi HARIKANE

The University of Tokyo, Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8582, Japan

Abstract: Understanding how galaxies have formed and evolved over 13.8 billion years of cosmic history is one of the major goals of modern astronomy. To explore galaxy formation and evolution, high redshift galaxies have been observed using large telescopes such as the Subaru Telescope and ALMA. However, with the arrival of the James Webb Space Telescope (JWST), this field is evolving rapidly, and now many researchers are excited about JWST data. I am one of those who were trained as a researcher using the Subaru Telescope and ALMA and am now enjoying research with the JWST. In this article, I would like to share the journey that led me to study the most distant galaxies using the JWST and the unexpected discoveries that awaited me there.

重力崩壊型超新星コア内部における ニュートリノ集団振動



赤穂龍一郎

〈早稲田大学理工学術院 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1〉

e-mail: akaho@asagi.waseda.jp

大質量星の生涯を締めくくる大爆発である重力崩壊型超新星は宇宙の進化において中心的な役割を果たす高エネルギー現象である。爆発のメカニズムにはいまだに謎が残っており、最先端のシミュレーションでも観測結果を定量的に再現することができていない。爆発のダイナミクスはニュートリノによって支配されており、ニュートリノがどのように振る舞うのかを理解することが極めて重要である。超新星のように非常に高いニュートリノ数密度を持つ環境では自己相互作用によるニュートリノ集団振動が発生しうると考えられており、超新星ダイナミクスやマルチメッセンジャーシグナルに影響を与えている可能性がある。本研究では運動量空間全体を解く超新星シミュレーションの結果を詳細に解析することで、どのような種類のフレーバー不安定性が発生するかを調査した。

1. 重力崩壊型超新星

大質量星が進化の最後に引き起こす重力崩壊型超新星は、その明るさが銀河一個分に匹敵するほどの高エネルギー現象である。爆発の際には、合成されたさまざまな元素が宇宙空間に拡散される。水素などの軽元素しかなかった宇宙に、人類をはじめとする生命を構成する多彩な元素をもたらした生みの親と言っても過言ではない。また中心部には中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体が残され、それはコンパクト連星合体など他の高エネルギー現象の源となる。よって超新星は宇宙の新陳代謝の主要な担い手である。

マルチメッセンジャー天文学の観点からも超新星は興味深い現象である。電磁波に加えて、超新星からはニュートリノも大量に放出される。1987年に発生したSN1987Aからのニュートリノが当時のカミオカンデ-II検出器などで観測されたこ

とを契機として超新星ニュートリノ観測の機運は高まり、現在ではスーパーカミオカンデをはじめとして多彩な手法の検出器が稼働中、かつ、さらに大規模な施設の建設計画もされている。次のイベントが銀河系近傍であれば現在の検出器で多数のニュートリノ検出が期待できる。また、超新星における乱流や非対称ニュートリノ放射は重力波の源でもある。これまで検出の前例はないが、銀河系内のある一定距離以内であれば超新星からの重力波検出も可能であると考えられている。ニュートリノや重力波は電磁波よりも内部の高温かつ高密度物質の振る舞いを反映するため、核物質状態方程式などの検証を通した高エネルギー物理全体への示唆を与えることが期待できる。

2. 超新星の物理

まずは星の進化から始まり、どうやって超新星に至るのか、簡単におさらいしておきたい。ここ

でカバーできない詳細については、過去の天文月報の記事 [1-4] などを参考にしていきたい。

水素を燃焼して形を保っている主系列星はやがて水素を使い果たし、次々に重い元素の核融合反応を起こしながら進化していく。太陽くらいの質量であれば、水素を使い果たした後は赤色巨星になりヘリウム燃焼段階に移行し、最終的には白色矮星になると考えられている。一方で超新星の親星となる大質量星（約10太陽質量以上）はより高温なのでヘリウム燃焼を超えて炭素、ケイ素などの燃焼を起こし、最終的には最も安定な元素である鉄を生成する。鉄より先の元素合成は起こらないので中心部に鉄コアが形成されて大きくなっていく。この鉄コアは電子縮退によって支えられている。その形状を保てる限界はチャンドラセカール限界質量（温度や組成によって異なるが約1.4太陽質量）として知られており、それを超えると鉄の光分解と電子捕獲反応によって重力崩壊が始まる。どちらの反応も重力崩壊によって温度と密度が上がるとさらに促進されるので、重力崩壊は一旦起きると暴走する。中心密度が原子核密度に達して核力による斥力が働くようになると重力崩壊は止まり、内部コアはバウンスを起こす。その瞬間外部コアはまだ超音速で落ちてきており、その結果、内部コアと外部コアとの間で衝撃波が発生する。この衝撃波が外向きに伝播し、星の外層まで達することができれば爆発したと考えることができる。

衝撃波が星の外層まで達するにはさまざまな障害が存在する。まず、大質量星の内部コアを除くすべての星の質量が降り積もって来るのに打ち勝たなければならない。しかし衝撃波は原子核の光分解やニュートリノ冷却などによってエネルギーを失ってしまう。そのため例外的な親星を除き衝撃波は一旦停滞してしまうということが知られている。爆発の成功のためには、コアの重力崩壊に

よって解放された重力エネルギーをうまく衝撃波伝播のために活用することが必要である。ニュートリノ加熱メカニズムというシナリオでは、中心部の熱エネルギーがニュートリノとして放出され、その一部が衝撃波後方物質を加熱することで爆発を成功させる。

2.1 超新星におけるニュートリノ

地上ではほとんど相互作用しない、捉えにくい粒子であるニュートリノであるが、物質密度が非常に高い超新星においては“ちょうどいい”エネルギーの運び手となる。ここでは超新星でニュートリノがどう生成され、どのように伝播すると考えられているか述べる。

大質量星の段階では核反応などによってニュートリノが生成されるが、平均自由行程は星の大きさ程度であるためすぐに逃げ去ってしまう。そして重力崩壊によって物質温度・密度が徐々に高くなるとニュートリノは自由に抜け出せなくなり、ニュートリノトラッピングという状態になる。先ほど述べた衝撃波はニュートリノ球^{*1}の内側に最初形成されるが、それが外側に進んで追い越すと一気にニュートリノが放出される。これは中性子化バースト（neutronization burst）と呼ばれ、最もニュートリノ光度が高いフェーズである。

その後は中心部にできた高温の原始中性子星（proton neutron star）が熱的にニュートリノを放出してだんだん冷えていく。放出されるニュートリノの総エネルギーは 10^{53} ergのオーダーであり、ほとんどのニュートリノは抜け出してしまうが、一部が停滞してしまった衝撃波後方の物質を加熱して爆発を補助する。典型的な超新星の爆発エネルギーは 10^{51} ergのオーダーであるため、ニュートリノのエネルギーのうち1%程度が加熱に貢献できれば爆発に成功する。超新星ダイナミクスにとって、ニュートリノ分布が決定的に重要であることがわかりいただけるかと思う。本稿のテー

*1 ここでニュートリノ球とは、光学的深さが2/3で定義される場所で、ニュートリノがトラップされている領域と自由な領域の境目としてよく用いられる。光球のニュートリノ版である。

マであるニュートリノ集団振動は、超新星の理論計算ではこれまで組み込まれておらず、どのように発生するかにもまだまだ不明な点が残る。その点を明らかにするのが本研究の動機である。

2.2 数値シミュレーションによる理論研究の現状

超新星は複雑な非線形現象であるため数値シミュレーションによる研究が主となる。ここでは大まかな歴史と、現状残っている課題について述べる。超新星の爆発メカニズムの研究は1960年代から行われており [5, 6], ニュートリノによるエネルギー輸送を活用した爆発メカニズムが提唱されたのも1980年代である [7]。しかし当時用いられていた仮定は現在の理解からするとかなり非物理的であり、本当にニュートリノ加熱による爆発が可能かどうかという問いへの答えはその後の詳細なシミュレーションを待たねばならなかった。

計算コストが高い超新星シミュレーションの歴史は計算機の発展とともにあり、20世紀や2000年代初頭は球対称次元計算による計算が行われていた。しかし例外的な親星を除いて次元ではそれらの計算が爆発に成功することはほとんどなかった。2010年代から多次元計算が盛んに行われるようになってから、対流やStanding Accretion Shock Instability (SASI) などの多次元効果が爆発に不可欠であることが認知されるようになった。最近では空間三次元で長時間(秒単位)の超新星シミュレーションも珍しくなく [8-12], 爆発も多くのシミュレーションで得られている。

長らく爆発が再現できていなかった中で、シミュレーションによる爆発が得られたのは画期的な進歩であるが、まだ観測を定量的に再現できないという問題が残っている。超新星の光度曲線の解析により、爆発エネルギーや放射性同位体元素ニッケル56の生成量などは見積もられているが、基本的にはこれらより一桁小さい値しかシミュレーションで再現できていない。一部これらの観測制限を突破したと主張する論文も存在するが [9, 12, 13], 爆発しやすい核物質状態方程式を用

いていたり、数値的手法の問題により爆発が非物理的に強められているのではないかと疑われる。現在の最先端のシミュレーションでも多数の近似が用いられており、それらを取り除いていって観測結果を再現することが重要な課題である。

2.3 ニュートリノ輸送計算

超新星コアでは、ニュートリノがトラップされている中心部から、だんだん外側に行くにつれて平均自由行程が伸びていき自由粒子となる。特にその中間的な領域を正しく再現するためには、ニュートリノ輻射輸送計算が鍵となる。

2.3.1 ボルツマン輸送計算

後述のニュートリノ振動を考慮しなければ、位相空間分布関数に関する(古典的)ボルツマン方程式を解くことが最も厳密なニュートリノ輸送計算法である。位相空間分布関数 $f(x^\mu, p^i)$ はどの時間・位置 x^μ で、どのくらいの運動量 p^i を持ったニュートリノがどれくらいの量存在するか、という情報を持っている。ボルツマン方程式は以下のような構造になっている。

$$p^\alpha \frac{\partial f}{\partial x^\alpha} - \Gamma_{\alpha\beta}^i p^\alpha p^\beta \frac{\partial f}{\partial p^i} = S_{\text{col}} \tag{1}$$

ここで $f(x^\mu, p^i)$ が分布関数で Γ はクリストッフエル記号である。相対論の慣習に則り、ギリシャ文字 (α, β) は0~3, ラテン文字 (i) は1~3を表す。左辺第一項はニュートリノの空間移動, 左辺第二項はエネルギー・運動量変化, そして右辺は他の物質との反応を記述する。

超新星シミュレーションにボルツマン輸送計算を用いることは計算コストが高く、実際には2.3.2項で紹介する近似輸送法がよく用いられる。空間多次元でボルツマン輸送計算を用いた超新星シミュレーションを行なっているのは日本の研究グループ一つだけであり、筆者もそのメンバーのうちの一人である [14-23]。のちにも述べるが、本稿の主題であるニュートリノ集団振動の発生条件は運動量空間分布に依存するため、ボルツマン計算の結果を用いることが肝である。

2.3.2 近似的ニュートリノ輸送

ボルツマン輸送計算による超新星シミュレーションには計算コストがかかるので大抵は近似的ニュートリノ輸送が用いられる。中でも広く用いられているのがモーメント法 [24, 25] である。分布関数に関して運動量空間内で角度モーメント^{*2}を取ることで運動量空間の情報を削減し、計算コストを減らすことが目的である。よく用いられるM1法またはtwo-moment法では0次と1次のモーメントについての方程式を解き、2次モーメント以降は現象論的仮定からクロージャー関係式を課し、方程式を閉じる。モーメント法以外の近似的計算法として、Flux-limited-diffusion (FLD) 法や Isotropic-Diffusion-Source-Approximation (IDSA) などが挙げられる。ニュートリノ輸送計算手法の違いは超新星ダイナミクスに影響し、中には爆発するか否かすら変わってしまう場合も報告されている [26-29]。計算コストの削減のため近似法は適宜用いる必要があるが、不定性が残ってしまうことを心に留めなければならない。

3. ニュートリノ振動

3.1 導入：真空振動，物質抑制，MSW 共鳴

本稿の焦点はニュートリノ数密度が高い場合に起こるニュートリノ集団振動であるが、まずはニュートリノ振動自体に馴染みがない方のために基礎をおさらいしておこう。ニュートリノの質量固有状態とフレーバー固有状態は異なり、そのことがニュートリノ振動の原因である。素粒子標準模型ではニュートリノの世代は3つであり、電子型 (ν_e)、ミュー型 (ν_μ)、タウ型 (ν_τ) が変換する。超新星においてはミュー粒子はあまり存在しないと考えられるので^{*3}、通常の超新星シミュレーションではミュー型とタウ型の区別をせずに

重レプトン型あるいは ν_x と呼ばれ同一粒子として扱われる。

ニュートリノフレーバー固有状態を $|\nu_e\rangle$, $|\nu_\mu\rangle$, $|\nu_\tau\rangle$, 質量固有状態を $|\nu_1\rangle$, $|\nu_2\rangle$, $|\nu_3\rangle$ と書くことにする。また、フレーバー固有状態をギリシャ文字 (α)、質量固有状態をラテン文字 (i) で書くと、お互いは以下のユニタリ変換で関係づけられる

$$|\nu_\alpha\rangle = U_\alpha^i |\nu_i\rangle \tag{2}$$

ここで U は Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列と呼ばれる。

まずはニュートリノが他の物質から孤立して伝播しているときに、真空振動が発生することを示す。ニュートリノ質量固有状態についてのシュレディンガー方程式は

$$i \frac{d}{dt} |\nu_i\rangle = \hat{H} |\nu_i\rangle \sim \left(p + \frac{m_i^2}{2p} \right) |\nu_i\rangle \tag{3}$$

ここで、 \hat{H} はハミルトニアンで、質量 m_i と運動量 p で陽に書き直している。当然であるが質量固有状態の存在確率 $\langle \nu_i | \nu_i \rangle$ は時間発展で不変である。

この方程式をフレーバー固有状態のものに直すと、ハミルトニアンに左から U 、右から U^\dagger が加わった形になる。よってフレーバー基底でのハミルトニアンは非対角成分を持ち、あるフレーバーに関する発展方程式の右辺に異なるフレーバーの状態も関わってしまうため、ニュートリノフレーバーは時間とともにひとりで変化していく。これがニュートリノ振動のコアとなる重要な点である。

簡単のため2フレーバーのみを考えて、初期が ν_e のフレーバー固有状態だとすると、 ν_x の存在確率は

$$\langle \nu_x | \nu_x \rangle \propto \sin^2 \left(i \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p} t \right) \tag{4}$$

^{*2} 運動量空間角度モーメントとは、分布関数に方向余弦を掛けて運動量空間の角度積分をすると得られる量である。例えば0次のモーメントは数密度、外向きを基準とした角度のコサインをかけて積分した1次のモーメントは流束である。

^{*3} ミュー粒子の静止質量エネルギーは100 MeV程度であり、超新星コアの温度スケールが数10 MeVであることからその出現を無視することはできず、本来考慮すべきである。ミュー粒子を考慮すると爆発しやすくなるという報告もある [30]。

のように、ニュートリノの質量差に応じて時間とともに振動する部分が現れることがわかる。これがいわゆる真空振動と呼ばれる現象である。

周囲の物質との相互作用、特に電子散乱による影響がある場合、前述の真空振動は影響を受ける。その影響があるとハミルトニアンに物質項というものが追加される（前に登場したものは真空項。）前に見た通り真空項はフレーバー基底で非対角成分を持ち、それが真空振動の発生のために重要であったが、物質項はフレーバー基底で対角成分のみを持つ。そのため物質密度（電子密度）が高い場合には非対角成分が対角成分と比べて無視できる大きさになり、真空振動は抑制される。これを物質抑制（matter suppression）と呼ぶ。また、物質項による対角成分がちょうど真空項の対角成分を打ち消すような場合、非対角成分の影響が真空の時よりも大きくなり迅速なフレーバー変換が発生する。これを Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) 共鳴という。太陽ニュートリノ問題において、真空振動と MSW 共鳴が重要であったということはよく知られている通りである。地球に到達する超新星ニュートリノシグナルの予測をする際も当然両者が考慮される。

3.2 ニュートリノ集団振動

いよいよ本稿の主題であるニュートリノ集団振動の説明をしていく。超新星や連星中性子星合体、初期宇宙などニュートリノ密度が極端に高い環境では、ニュートリノ同士の散乱による自己相互作用項が真空項と物質項を凌駕し、集団振動が発生する。自己相互作用によるフレーバー変換については20世紀後半から指摘されてきており、多数の研究が行われてきた [31-38]。

ニュートリノ集団振動の研究の基礎となるのは以下の量子運動論的方程式（Quantum Kinetic Equation）と呼ばれるものである。

$$iv^\mu \partial_\mu \rho = [H, \rho(x, P)] + iC \quad (5)$$

ここで ρ は密度行列で位置 x と運動量 P の関数、

v^μ は四元速度、 C は衝突項である。密度行列の対角成分は数密度に対応し（例えば11-成分が電子型、22-成分がミュー型、など）、上の方程式の対角成分のみを考える場合は古典的輸送方程式に帰着する。非対角成分はコヒーレンスと呼ばれ、これが有限の値を持つことは対角成分が影響し合うこと、つまりフレーバー変換を表現する。

交換子に登場するハミルトニアンとして、ニュートリノ同士の散乱による自己相互作用項を考えると

$$H = \sqrt{2} G_F \int dP' v^\mu v'_\mu \rho(x, P') \quad (6)$$

運動量空間全体での積分を $\int dP'$ と表した。速度 v を持つニュートリノに対して散乱を起こす、速度 v' を持つ相方に関して運動量空間積分がなされている。真空項と物質項と異なる重要な点として、ハミルトニアンの中に密度行列が登場するということが挙げられる。これがニュートリノ集団振動が非線形進化を起こす所以である。また、ニュートリノ同士の散乱過程によるものであるため、運動量空間角度分布の依存性も持ってしまう。

3.3 ニュートリノ集団振動の不安定モード

集団振動が真空振動などと大きく異なる点是非線形性であり、ある条件が満たされると時間に対して指数関数的にフレーバー変換が発生する。対流をイメージしてもらえればわかりやすいと思う。ある流体分布が対流に対して安定な場合は微小な摂動に対して何も起きないが、不安定な場合にはこれをきっかけとして混合が発生し、その不安定な状況を是正する方向に系が変化する。

集団振動が発生する条件はフレーバー不安定性（flavor instability, FI）と呼ばれ、現在以下の3種類が提唱されている。

- ・高速フレーバー不安定性（fast FI）
- ・低速フレーバー不安定性（slow FI）
- ・衝突フレーバー不安定性（collisional FI）

名前から察せられる通り低速フレーバー不安定性のタイムスケールは長く（つまり効果が出るの

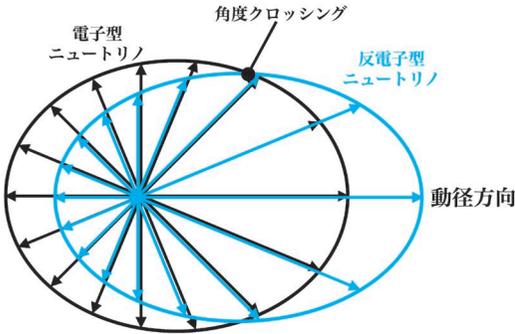


図1 角度クロッシングがある場合の運動量空間分布のイメージ図. 黒の曲面が電子型ニュートリノ分布, 青が反電子型ニュートリノに対応する. 曲面までの距離 (矢印の長さ) はそちらの方向へ飛ぶニュートリノの量を表す. この場合は前者が動径方向内向きで卓越している, 後者が動径方向外向きで卓越している.

が遅く), 超新星にさほど影響を与えないと考えられるため本研究では高速フレーバー不安定性と衝突フレーバー不安定性にのみ着目する.

3.3.1 高速フレーバー不安定性

ニュートリノ集団振動の研究の中で最も注目されているのが高速フレーバー不安定性 (以下, FFI) である. FFIが出現すること, ニュートリノ運動量空間角度分布が角度クロッシングを持つことは必要十分であることが数学的に証明されている [39]. ここで角度クロッシングとは, 運動量空間分布においてある方向にニュートリノが, また他の方向へ反ニュートリノが卓越しているような状況をいう (図1).

3.3.2 衝突フレーバー不安定性

衝突フレーバー不安定性 (CFI) は比較的最近その存在が指摘された不安定性である [40]. これは衝突項 (量子運動論的方程式の右辺) と自己相互作用項によって発生する. CFIの出現条件はFFIと比べて複雑であるが, 角度分布を無視するなどいくつかの仮定を課せば解析的に発生条件を判定することができる. 詳細は [41-43] を参照のこと. CFIは以下の2つに分類される.

・共鳴型 (Resonance-like) CFI:

これはニュートリノ (n_{ν_e}) と反ニュートリノ数密度 ($n_{\bar{\nu}_e}$) が以下の関係を満たすときに出現する.

$$n_{\nu_e} - n_{\bar{\nu}_e} = n_{\nu_x} - n_{\bar{\nu}_x} \quad (7)$$

本研究では ν_x と $\bar{\nu}_x$ を区別しないので, ν_e と $\bar{\nu}_e$ の数密度に近い値を持つ場合に対応する.

・非共鳴型 (non-resonance) CFI:

数式上の定義はここでは省略するが, 大まかにいうと非共鳴型CFIは以下の2つの条件が満たされると出現する不安定性である; (1) ニュートリノの衝突率 (collision rate) が反ニュートリノの衝突率を大きく上回ること, (2) $n_{\nu_e} \sim n_{\bar{\nu}_e} \geq n_{\nu_x}$ であること, である.

3.4 集団振動発生後は何が起きるか

結局のところ, 集団振動が超新星にどのように効くのか気になっている読者の方がおられると思うが, いまだわかっていない. ニュートリノ種別が変化するとニュートリノ加熱にも影響が及び, 爆発の可否をも変えうる. その影響を明らかにする理想的な方法は, 従来の古典的ニュートリノ輸送の部分量子運動論的方程式に置き換えて超新星シミュレーションを行うことであるが, 計算コストの観点から現実的ではない. 集団振動の振動スケールはcmのオーダーであり, 空間メッシュ, 時間ステップを古典的計算よりも数桁細かくしなければならない. さらに運動量空間メッシュ数が不十分であると非物理的な振動モードが発展してしまうことが知られているため [44], 古典的ボルツマン計算よりも細かい運動量空間角度解像度が必要である. 古典的ボルツマン計算ですらコストが高いので, 量子運動論的方程式を直接解くのは非常に難しいのである. 短時間かつ流体分布が固定された計算ではあるが, 超新星計算の流体バックグラウンドを用いて量子運動論的方程式を直接解く研究が最近行われ [45], 集団振動によりニュートリノ光度や加熱率が変化することが示された.

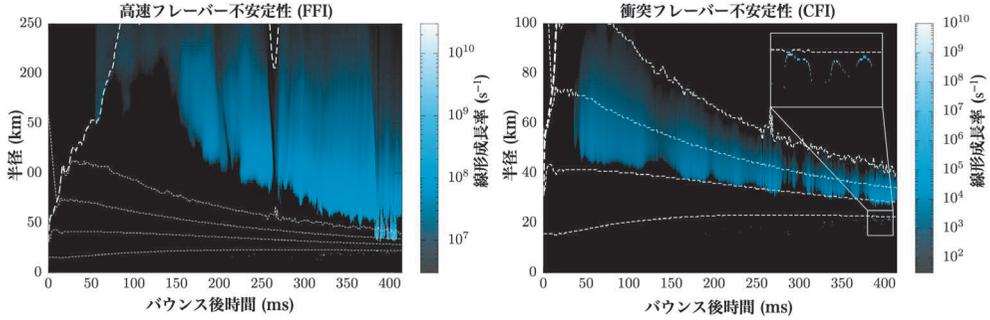


図2 赤道面方向における高速フレバー不安定性 (FFI) と衝突フレバー不安定性 (CFI) の線形成長率を半径とバウンス後時間の関数として表した図. 太い破線は衝撃波の半径, 細い破線は一定密度の半径に対応し, 上から $10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} \text{ g cm}^{-3}$ に対応する. [43] の図を改変.

4. 超新星シミュレーションにおけるフレバー不安定性解析

先ほど集団振動の不安定性の種類を紹介したが, それらは超新星コア内部のさまざまな場所で, 異なる原因により出現する. 筆者らが実施した研究 [43] では, ボルツマン輻射流体コードを用いた超新星計算のポストプロセス (事後的) 解析を用いてその包括的理解を試みた. 元となるデータは 11.2 太陽質量の親星の重力崩壊をボルツマン輸送計算コードによって空間二次元軸対称を仮定して計算したものである. 計算の詳細については論文を参照されたい. 既に述べたが, ニュートリノ集団振動はニュートリノの運動量空間角度分布に依存するため, 本研究の解析はボルツマン輸送計算によってしか得られない.

図2は赤道面方向における FFI と CFI の線形成長率を半径と時間の関数として表したものである. ここで線形成長率は先行研究の算出方法を採用した (FFI: [46], CFI: [41]). FFI と CFI とでプロット範囲が違うことに注意してほしい. CFI は $10^{10} \text{ g cm}^{-3}$ と $10^{12} \text{ g cm}^{-3}$ の間の密度領域で出現していることがわかり, 原始中性子星の収縮に伴い出現する半径も縮んでいる. FFI の出現する領域は CFI よりもかなり外側であるが, 後半の 400 ms 付近では物質密度が $\rho \sim 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$ の領域

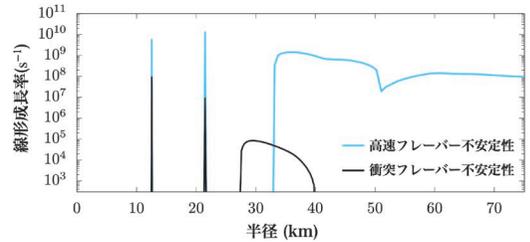


図3 バウンス後 404 ms, 赤道面方向における FFI (青線) と CFI (黒線) の線形成長率の半径分布. [43] の図を改変.

でも出現している. また, CFI の図には拡大図が添付されているが, 半径内側の非常に狭い領域でも不安定性が生じていることがわかる.

各不安定性の線形成長率の大きさをわかりやすく比較するため, バウンス後 404 ms の時点での半径分布を図3に示している. 成長率はフレバー変換が発展するタイムスケールの逆数である. 場所によっては流体タイムスケール $\sim 10^{-3} \text{ s}$, そして弱い相互作用のタイムスケール $\sim 10^{-7} \text{ s}$ よりも短い (すなわち, 変換速度が速い) ため, 超新星ダイナミクスに影響を与えても何ら不思議ではないといえる.

また, FFI 及び CFI が出現する場所がそれぞれ特徴的な形をしていることがわかる. 異なる場所では異なる機構によってフレバー不安定性が出現しているため, 以下では分類して解説を行う.

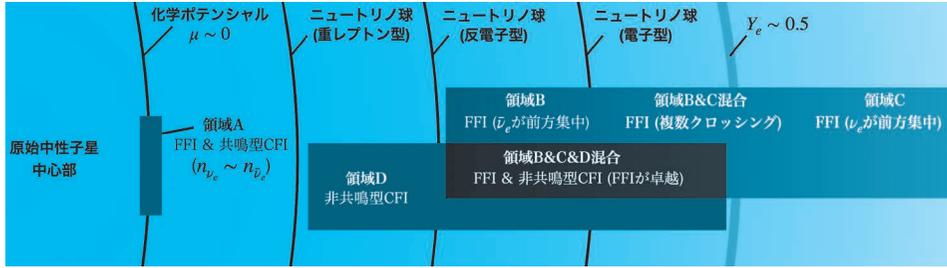


図4 FFIとCFIが発生する領域の模式図. 左側が動径方向内側の高密度領域.

特徴的な領域を示した模式図を図4に示しているので適宜参照して欲しい.

・領域A FFI&共鳴型CFI

図3で、ピンポイントに大きな線形成長率が出現している2点ではFFIとCFIの両方が線形成長率をもつ. この2点はニュートリノ化学ポテンシャルが0となる点に対応する. ここではニュートリノと反ニュートリノの数密度がほぼ一致し、先ほどの記述通り共鳴型CFIが出現する. そしてこの状況は実はFFIの発生にも有利である. この場所は光学的に厚い領域であることと数密度が同じであることから電子型も反電子型ニュートリノも運動量空間内では同じ半径の球状分布となっている. その分布に少しでも揺らぎが存在すれば角度クロッシングが発生するのである.

・領域B FFI ($\bar{\nu}_e$ が前方集中)

図3で30~40 kmに対応し、電子型と反電子型のニュートリノ球の間の領域である. 前者は後者よりも外側に位置し^{*4}, 結果として反電子型の方が電子型よりも前方集中している状況が発生する(図1に対応). これによって角度クロッシングが発生し、FFIが出現している.

・領域C FFI (ν_e が前方集中)

図3で $r \geq 60$ kmに対応する. ここではニュートリノ球からだいぶ外側に位置しているため、電子型と反電子型ともに前方集中しているが、一部が核子散乱による影響により動径方向内側に向けて散乱される. この反応は電子型および反電子型に対して同じように働くが^{*5}, 反電子型の方が平均エネルギーが高いため^{*6}, 結果的に電子型よりも多く散乱される. その結果反電子型ニュートリノが動径方向内側で卓越する. この領域では後ろ向きに飛んでいるニュートリノの量は元々少ないので、動径外向きのものがどれくらい後ろに散乱されるかに強く依存するのである.

・領域B&C混合 FFI (複数クロッシング)

この領域は図3で $r \sim 50$ kmの凹みができている場所に対応する. 領域Bと領域Cの両方のメカニズムが働くため複数の角度クロッシングが発生する.

・領域D 非共鳴型CFI

この領域は図3で30~40 kmあたりに山なりに生じている不安定領域である. この領域では重レプトン型ニュートリノ球の外側であるため電子型と反電子型ニュートリノの数密度が卓越してい

*4 電子の方が陽電子より多く存在するため、前者との荷電カレントを主な反応とする電子型ニュートリノの方が、反電子型ニュートリノよりもコアから抜け出しにくい. よって前者のニュートリノ球の方が外側に形成される. 重レプトン型のニュートリノ球は反電子型よりもさらに内側である.

*5 本研究では考慮されていないが、weak magnetism (核子の内部構造による影響) を考慮すると同じエネルギーだとしても電子型と反電子型ニュートリノで核子散乱反応の反応率は異なるため、今回の結果が変わる可能性はある.

*6 出てきたニュートリノの平均エネルギーはニュートリノ球の位置の物質温度を強く反映する. 電子型よりも反電子型の方がニュートリノ球が内側にあり、その位置では温度がより高いため後者の平均エネルギーの方が高いのである.

る。さらに中性子過剰であるため電子型ニュートリノの吸収の反応率が反電子型のものを上回っている。これら2つの状況から非共鳴型CFIが出現した。

・領域B&C&D FFI&非共鳴型CFI

この領域ではFFIおよび非共鳴型CFIの存在が両方認められた。図3からわかるように、FFIの成長率の方がCFIよりも数桁大きい。フレーバー変換初期は、より速いFFIの成長率でフレーバー変換が開始すると考えられる。一方でCFIは非線形進化に影響を与える可能性もあるため、CFIが重要でない結論づけるのは早計である。

5. まとめと将来展望

本稿では、ニュートリノ自己相互作用に起因する集団振動に関する研究 [43] の結果を紹介した。ボルツマン輸送を用いた重力崩壊型超新星シミュレーションのポストプロセス解析を行うことで、さまざまな種類のフレーバー不安定性が出現すること、超新星ダイナミクスに影響を及ぼしうる成長率を持つことが示された。再度強調しておくが、集団振動は運動量空間分布に依存する現象であるためボルツマン輸送の結果が必須であり、これを明らかにできるのは我々のグループだけである。

最後に、残されている課題について述べる。まず、本研究はポストプロセス解析であるため、それが実際に発生していた場合にダイナミクスにどのような影響を与えたはずであるかは未だに不明である。一方で、すでに述べたとおり量子運動論的方程式を直接解くことは計算コストの観点から現実的ではない。現実的な解決方法は古典的なボルツマン輻射輸送を行いながら、不安定性が出現した場合にフレーバー変換の効果を実効的に入れるという方法である。流体力学の対流問題で喩えるならば、多次元計算が直接量子運動論的方程式を解くことに対応し、一次元計算が古典的計算に対応する。対流の実効的モデルである混合距離理

論のように二つの橋渡しとなるモデルを用いるということである。我々はすでに、ボルツマン計算による角度分布を用いてフレーバー不安定性を検知する手法を確立しているため、最も正確に実行的モデルを組み込んだ計算を行うことができる。その計算により集団振動が超新星に及ぼす影響を明らかにすることが直近の目標である。

謝辞

本稿の内容は筆者らが発表した投稿論文 [43] および博士論文に基づいている。共同研究者の長倉洋樹氏、財前真理氏、Jiabao Liu氏、山田章一氏にこの場を借りて感謝したい。また、原稿を読んで有益なアドバイスを頂いた住吉光介氏と諏訪雄大氏、小山翔子氏（編集委員）にも深く感謝したい。本研究で用いたボルツマン輸送計算の結果は山田氏、住吉氏、長倉氏に加えて岩上わかかな氏、原田了氏、大川博督氏、古澤峻氏、松古栄夫氏の協力がなくしては実現できなかったものである。

参考文献

- [1] 中村航, 2013, 天文月報, 106, 596
- [2] 滝脇知也, 2017, 天文月報, 110, 710
- [3] 加藤ちなみ, 2020, 天文月報, 113, 14
- [4] 守屋堯, 2022, 天文月報, 115, 105
- [5] Colgate, S. A., et al., 1961, AJ, 66, 280
- [6] Colgate, S. A., & White, R. H., 1966, ApJ, 143, 626
- [7] Bethe, H. A., & Wilson, J. R., 1985, ApJ, 295, 14
- [8] Nakamura, K., et al., 2019, PASJ, 71, 98
- [9] Burrows, A., & Vartanyan, D., 2021, Nature, 589, 29
- [10] Burrows, A., et al., 2024, ApJ, 964, L16
- [11] Choi, L., et al., 2024, ApJ, 975, 12
- [12] Janka, H. T., & Kresse, D., 2024, Ap&SS, 369, 8, 80
- [13] Bollig, R., et al., 2021, ApJ, 915, 28
- [14] Nagakura, H., et al., 2014, ApJS, 214, 16
- [15] Nagakura, H., et al., 2017, ApJS, 229, 42
- [16] Nagakura, H., et al., 2018, ApJ, 854, 136
- [17] Nagakura, H., et al., 2019, ApJ, 878, 160
- [18] Harada, A., et al., 2019, ApJ, 872, 181
- [19] Harada, A., et al., 2020, ApJ, 902, 150
- [20] Iwakami, W., et al., 2020, ApJ, 903, 82
- [21] Akaho, R., et al., 2021, ApJ, 909, 210
- [22] Iwakami, W., et al., 2022, ApJ, 933, 91
- [23] Akaho, R., et al., 2023, ApJ, 944, 60

- [24] Thorne, K. S., 1981, MNRAS, 194, 439
- [25] Shibata, M., et al., 2011, Prog. Theor. Phys., 125, 1255
- [26] Skinner, M. A., et al., 2016, ApJ, 831, 81
- [27] Cabezón, R. M., et al., 2018, A&A, 619, A118
- [28] Just, O., et al., 2018, MNRAS, 481, 4786
- [29] Glas, R., et al., 2019, ApJ, 873, 45
- [30] Bollig, R., et al., 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 242702
- [31] Fuller, G. M., et al., 1987, ApJ, 322, 795
- [32] Nötzold, D., & Raffelt, G., 1988, Nucl. Phys. B, 307, 924
- [33] Pantaleone, J., 1992a, Phys. Rev. D, 46, 510
- [34] Pantaleone, J., 1992b, Phys. Lett. B, 287, 128
- [35] Samuel, S., 1993, Phys. Rev. D, 48, 1462
- [36] Pastor, S., & Raffelt, G., 2002, Phys. Rev. Lett., 89, 191101
- [37] Sawyer, R. F., 2005, Phys. Rev. D, 72, 045003
- [38] Duan, H., et al., 2006, Phys. Rev. D, 74, 123004
- [39] Morinaga, T., 2022, Phys. Rev. D, 105, L101301
- [40] Johns, L., 2023, Phys. Rev. Lett., 130, 191001
- [41] Liu, J., et al., 2023a, Phys. Rev. D, 107, 123011
- [42] Liu, J., et al., 2023b, Phys. Rev. D, 108, 123024
- [43] Akaho, R., et al., 2024, Phys. Rev. D, 109, 023012
- [44] Sarikas, S., et al., 2012, Phys. Rev. D, 86, 125020
- [45] Nagakura, H., 2023, Phys. Rev. Lett., 130, 211401
- [46] Morinaga, T., et al., 2020, Phys. Rev. Res., 2, 012046

Neutrino Oscillation Inside Core-collapse Supernovae

Ryuichiro AKAHO

*Faculty of Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555,
Japan*

Abstract: Massive stars end their lives with Core-collapse supernovae (CCSNe), which is a high-energy phenomena that play a central role in the evolution of the universe. However, the mystery remains in the explosion mechanism, and even the most state-of-the-art simulations have yet to quantitatively reproduce observational signals. Neutrinos are known to be a driving force for the explosion, and understanding their behavior is a key for unveiling the physics of CCSNe. Due to extremely high neutrino number densities in CCSNe, it is recently thought that neutrino self-interaction can drive collective neutrino oscillations, potentially impacting supernova dynamics and multi-messenger signals. This study investigates what kind of flavor instabilities that arise by conducting a detailed analysis of the results of CCSN simulations.

ウィキペディアから天文を普及する ～ウィキペディア天文関連記事の編集活動

小林 道生

〈ウィキプロジェクト天体〉

e-mail: tenmon.open@gmail.com

ウィキペディア日本語版に天文関連の記事が載るようになって20年が経ちました。ウィキペディアについては「内容が薄い」「間違いばかりだ」と批判されることもあります。現在では10,000を超える天文関連の記事が立項され、その内容も日々加筆・修正されています。ウィキペディアを使った天文普及活動に長年取り組んできた著者より、ウィキペディアとは何か、そして日本語版の天文記事がどのように書かれてきたか紹介します。天文普及に携わる方々の参考になれば幸いです。

1. はじめに

無料のオンライン百科事典「ウィキペディア」が誕生したのは、21世紀が始まってから間もない2001年1月15日のことでした [1]。その4ヵ月後の2001年5月20日には、我々に馴染みの深いウィキペディア日本語版が、ラテン文字以外の文字を使う言語としては初の言語版として設立されました。それから四半世紀近い年月を経て、2024年現在では332の言語版のウィキペディアが運営されています [2]。

今ではGoogleなどのウェブ検索を用いて検索を行うとウィキペディアの記事が必ずと言ってよいほど上位に表示されるようになり、もはやウィキペディアはいつでも使える身近な情報源としての地位を確立していると言えるでしょう。分野によっては単なるトリビアルな情報の羅列に留まらない質の高い記事も多く、そういった記事を興味深く読まれたこともあるかと思います。一方で、学術領域、特に皆さんの専門である天文分野の記

事には、情報の量や質に対して疑問や不満を覚えた経験のある方も多いのではないのでしょうか。私がウィキペディアの天文関連記事の編集を始めた動機もまた「ウィキペディアの誤った情報を掲載した記事のせいで迷惑を掛けられることが多い」ことへの不満でした*1。

実は私、ウィキペディアの編集を始める以前は趣味として早押しクイズを嗜んでいたのですが、サークルや大会、あるいはオンラインのクイズゲーム等で出題される天文学・惑星科学関連問題に内容の怪しいものが多かったため、知っているがゆえの不利を度々被っていました。やがて、その原因の一端はどうやらウィキペディアにあるらしい、と気づき、素人の手さすびながら天文学関連の記事編集を始めた次第です。その後、縁あって日本天文教育普及研究会に入会することとなり、少しの期間ですがインターネット版『天文学辞典』にも協力者としてお手伝いさせていただきました。

本稿ではこれまでの私の編集経験を踏まえて、

*1 記事編集を始めた詳しい経緯については大阪市立科学館の冊子『月刊うちゅう』2021年4月号に掲載の拙稿を参照ください。

ウィキペディアとは何か、またウィキペディア日本語版の天文記事がどのように編集されているかについて紹介します。

2. 「ウィキペディア」とは

2.1 ウィキペディアの定義

そもそも「ウィキペディア」とは何なのか？ウィキペディア日本語版の「ウィキペディアについて」という紹介記事では「信頼されるフリーなオンライン百科事典、それも質・量ともに史上最大の百科事典を、共同作業で作り上げることを目的とするプロジェクト、およびその成果である百科事典本体です。」と定義されています [3]。ここでいう「フリー」には「無償で使える」という意味だけでなく、「自由に二次利用できる」「誰でも自由に編集できる」などの含意があります。

自由に二次利用できると言っても、ウィキペディアの記事は著作権を放棄したわけではありませんので、著作権法の認める範囲でのみ外部での引用ができます。引用の範囲を超える二次利用をする場合は、クリエイティブ・コモンズの策定したCC BY-SA 4.0という規定に添って利用することが求められています。これは「作品の複製・頒布・展示・実演にあたっては著作権者を表示し、作品を改変・変形・加工してできた作品にも基となった作品と同じライセンスを継承させた上で頒布を認める」という規定で、二次的利用に対して非常に自由度の高い、開かれたものとなっています [3]。

記事の編集に対して金銭的な報酬もなく、それぞれの記事は無償のボランティアによって立項・編集されています。また、記事編集に対して報酬を授受することも禁止されています。

記事の執筆や編集には特別な資格は必要ありません。方針とガイドラインを守って編集できる人

であれば、誰でも参加することが可能です。記事の編集にあたってはアカウントを作成することが推奨されています*2。

「誰でも編集に参加できる」ということは、その分野の専門家が記事の編集に参加することももちろん問題ないということです。むしろ、専門家の知見を記事に反映してもらうことは大歓迎されます。ただし、専門家であっても他の利用者と同じ立場であり、ウィキペディア内のローカルルールに沿って参加することが求められます*3。

2.2 ウィキペディアの強み

他のメディアと比較すると、ウィキペディアには以下のような強みがあると言えます。

- ユビキタスな閲覧性

いつでもどこでも誰でも閲覧できるのはウェブ媒体ならではの強みです。加えてウィキペディアには「永続的に」という強みがあります。新聞や通信社、TVなどの既存メディアのウェブ記事は、一定期間が過ぎると消されていきますが、ウィキペディアにはこれがありません。また、誰もが見ることができる形で編集履歴が残されており、仮に削除される場合でも利用者間で交わされた議論が目に見えるところに残されますので、こっそり見えないところで削除や文章の改変をされる心配がありません。この点で、多くのマスメディアより公明正大な情報源であると言えるでしょう。

- 検索上位の優位性

ウェブサイト運用担当の経験がある方は、各種SEO（Search Engine Optimization, 検索エンジン最適化）対策には腐心されたことと思います。その点、ウィキペディアはどの検索エンジンでも必ずと言ってよいほど上位に表示されるという優位性があります。PCで検索すると、Googleでは右側に表示されるナレッジパネルにウィキペディアの該当記事の要約が表示されます。またBingで

*2 ウィキメディア財団への寄付を求める表示が出にくくなるという副次的効果もあるのでおすすめ。

*3 時折、信頼できる情報源を提示せず改稿して、ほかの利用者と編集バトルを繰り返す人が現れます。

は強調スニペットとして最上位に表示されることが多いようです。このような強みにより、情報を求める人に対して必要かつ適切な情報を確実に届けることが期待できます。

・ 検証可能性

後ほど詳述しますが、ウィキペディアの記事にはその記述の根拠となる文献を出典として明示することが求められます。これがあることで、記事に書かれた内容の真实性を閲覧者自身の手で検証することが容易になります。

・ オープンコンテンツであること

ウィキペディアの記事は、その分野の専門家に限らず、方針とガイドラインを遵守する限り誰でも記事を編集することができます。誰でも新たな情報を書き加えられる、あるいは記事の誤りを正せるというオープンコンテンツで得られる集合知は、他のメディアでは享受できない貴重な利点であると言えます。

一方でこのオープンな特徴は、専門性の低い記事が乱立することにも繋がるため、ウィキペディアの信用性を下げる要因にもなっています。また、悪意ある利用者による記事荒らしが頻発するため、記事内容の保全に善意の利用者の手間が掛かっているのも事実です。

このオープンコンテンツな特徴が悪用されたり記事の質の低下を招いたりすることを防ぐため、ウィキペディアでは記事の内容について、

- ・ 中立的な観点
- ・ 検証可能性
- ・ 独自研究は載せない

という三大方針が定められています(図1)。ウィキペディアでは、これら3つの方針によって記事に書き記すことができる情報の種類と品質を決めており、すべての記事がこの方針に沿って書き記されなければならないとされています[4]。

2.3 ウィキペディアの内容に関する三大方針

2.3.1 中立的な観点

「中立的な観点」とは、記事を記述する際に、

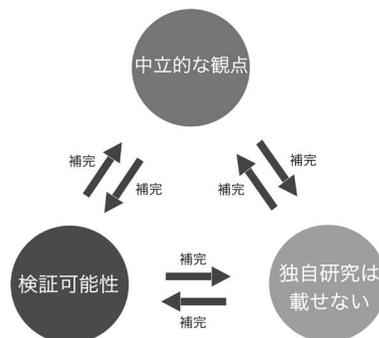


図1 ウィキペディアの内容に関する三大方針。3つの方針は相互補完的に機能する。

事実は事実、意見は意見として分けて記し、意見が分かれるトピックに対しては単に両論併記するのではなく、相対的な支持度が反映されるように適切な重み付けをしよう、とする編集姿勢です[4]。

天文学の分野では、見解が分かれやすい政治的なトピックなどは異なり、中立性の問題は生じにくいと言えます。しかし、時折「金星の大気が高高温なのは温室効果によるものではない」等の非主流の意見を出典なく事実のように書き込んでく人がいますので、注意を要します。

2.3.2 検証可能性

ウィキペディアでは記事の内容について「真実か否か」以上に「検証可能か否か」を重要視しています[5]。これはよく勘違いされることなのですが、書かれた内容が間違っていること自体が問題なのではなく、信頼できる情報源に基づいて記事が書かれていないことが問題なのです。私が編集に天文関連記事に携わって10年以上経った今でも多くの記事に誤った記述が残されていますが、それらの大部分はまだウィキペディア日本語版で出典の明示について厳しく相互チェックされなかった時期に立項された記事です。2010年前後を境に検証可能性に対して利用者間の相互チェックがより厳しく入るようになり、粗雑な記事が立項されて放置されることは少なくなったよ

うに見受けられます*4。

各記事で出典とされる文献は、本文の引用箇所
に引用順に連番を振り、連番順に文献を記述する
「バンクーバー方式」で記事の末尾に提示されて
います。また個々の文献の表記には、いわゆる
「シカゴスタイル」のテンプレートが主に用いら
れています。かつては、引用箇所を示さず参考文
献の記事の最後に列記するだけの「一括参照」と
いう形式もとされていましたが、現在では個々の
文献の引用箇所を文章中で明確に示す「個別参
照」で記述するように求められています [5]。

2.3.3 独自研究は載せない

ウィキペディアは、信頼できる情報源を参考文
献としてその資料の内容に忠実に記述する百科事
典であり、未発表の事実やデータ、理論、主張な
どを発表する場ではありません [6]。

2024年5月頃、安土桃山時代に日本に渡来して
織田信長に仕えたアフリカ系奴隷「弥助」に関す
るウィキペディア日本語版と英語版の記事対し
て、アマチュア日本史研究家のイギリス人教員が
自らの公開前論文や自著を引用して編集したこ
とが発覚する、という事件がありました。彼の提唱
する説の妥当性や研究者倫理の問題はさておく
としても、ウィキペディアの記事編集としては「独
自研究は載せない」だけでなく「中立的な観点」
「検証可能性」の面からも大きく逸脱する行為で
あり、到底認められるものではありませんでした*5。

2.4 ウィキペディアの賢い使い方

2.4.1 ウィキペディアを学業に利用する場合

「ウィキペディアの記事は学業に使えるのか？」
あるいは「学業に使ってよいか？」という問いを
投げかけられることがありますが、私は「使い方
次第」と考えています。

先述のように、ウィキペディアは百科事典です
ので、何かを調査したり研究したりする際のポ
ータルには成り得ても、それ自体を学術研究の論拠
としてはならないでしょう。

一方で「ウィキペディアは間違いが多いから
使ってはいけない」と指導することについては、
やや行き過ぎのように思われます。より正確を期
するなら「ウィキペディアは百科事典なので論文
やレポートの出典に使ってはいけない。使いたい
内容が書かれた記事を見つけたのなら、その記事
で出典とされた文献に目を通して確認し、その文
献を使うように」というところでしょう。記事編
集に携わる立場としては、ただ闇雲に禁じるので
はなく、リテラシーやクリティカルシンキングを
鍛える教材として活用してもらえるとありがたく
思います。

私はよく「本文はおまけ、出典にされた文献が
本体」や「本文？あんなの飾りです」などと冗談
めかして言っていますが、これは半ば本心でし
て、出典として挙げた文献こそ是非目を通して



図2 ウィキペディアのロゴマークと帰属/ライセンス表示の例。

Version 1 by Nohat (concept by Paullusmag-
nus); Wikimedia. (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wikipedia-logo-v2.svg>), CC BY-SA 3.0

*4 2013年頃まで、英語版の天文関連記事を機械翻訳しただけの記事を粗製濫造させる利用者が活発に活動していま
した。この利用者は「長期にわたる荒らし行為」として無期限ブロックされていますが、その悪影響は今も残されてい
ます。

*5 当該アカウントは、ほかにも複数アカウントの利用等のルール違反もあったため、無期限の編集ブロックという処置
を受けています。

りたいものです。

2.4.2 ウィキペディアから画像を転載する場合

講演資料や教材等にウィキペディアから画像を転載する際に「Wikipedia」とだけ記載される方が多いようですが、実はその記載では不十分です。ウィキペディア日本語版の記事に貼られている画像は「ウィキメディア・コモンズ (Wikimedia Commons)」というウィキメディア財団が運営するメディアファイルリポジトリに保管されたパブリックドメイン (PD) あるいはフリーなライセンスが付与されたファイルが使われています。これらのフリーライセンスの画像ファイルを再利用する際には、著作権が誰に帰属するか、どのようなライセンスが付与されているかを表示することが求められています (図2)*6。

3. ウィキペディア日本語版の天文関連記事

3.1 最も読まれている記事は？

ウィキペディア日本語版に初めて天文学関連の記事が立項されたのは2003年2月3日のことでした。「天文学」と題された記事は「・スペースシャトル」とだけ記された、わずか29バイトの内容でした。それから20年余りの年月を経た2024年6月末現在、ウィキペディア日本語版には約10,000件の天文学や天文学史に関連する記事が立項されています。この中には宇宙開発と分野が重なる記事も含まれますが、ロケット工学など天文学と直接結び付かない記事は除外してカウントしています。

表1は、ウィキペディア日本語版の天文関連記事のうち2023年7月1日から2024年6月30日までの1年間で人間と思われる利用者からのページ

表1 ウィキペディア日本語版の天文関連記事のページビュー上位20記事。
(2023年7月1日-2024年6月30日)。

順位	項目名	PV数
1位	アルベルト・アインシュタイン	612,527
2位	月	337,008
3位	干支	307,168
4位	地球	300,361
5位	ブラックホール	291,384
6位	伊能忠敬	279,873
7位	ガリレオ・ガリレイ	268,154
8位	太陽	267,526
9位	十二支	247,909
10位	アリストテレス	238,880
11位	太陽系	237,733
12位	ベテルギウス	224,605
13位	冥王星	219,431
14位	木星	211,121
15位	金星	206,721
16位	アイザック・ニュートン	205,640
17位	スティーヴン・ホーキング	205,502
18位	火星	199,005
19位	宇宙	198,307
20位	蛍石	191,991

ビューが多かった記事を表にしたものです。

やはり「アルベルト・アインシュタイン」や「ブラックホール」、「ガリレオ・ガリレイ」などは、いつ統計を取っても最上位にくる人気の記事となっています。「ベテルギウス」は、2019年末から2020年にかけての大減光が話題となったことからページビューが増え、今回の集計でも12位に入っています。

意外なところで「蛍石」が20位に入っていました。人気漫画の『Dr.STONE』辺りが影響した

*6 帰属とライセンス表示の具体例は、Commons:クレジットライン (https://commons.wikimedia.org/wiki/Commons:-Credit_line/ja) に挙げられていますので、そちらを参照願います。また、ウィキメディア・コモンズのURLと回答選択式のフォームへの入力だけ帰属・ライセンス表示を生成する「Attribution Generator」(https://lizenzhinweisgenerator.de/?lang=en) というツールもありますので、そちらも是非ご活用ください。

のかと思って調べてみたところ、どうやら2023年9月10日に放送されたTBSのTVドラマ『VI-VANT』で蛍石の枯渇が取り上げられたことが影響したらしく、ここから2週間で平常の1年分に当たるPV数を計上していました。TV離れが進んだと言われる2020年代でもその影響力は健在のようです。

3.2 天文関連記事編集の実態

ウィキペディアには「ウィキプロジェクト」と呼ばれる、特定の分野についてウィキペディア内でどのような書式でどのように説明するか等を検討するための利用者間の集まりがあります。日本語版の天文分野には「ウィキプロジェクト天体」（以下「PJ天体」）というプロジェクトがあり、ここに参加している利用者によって多くの記事が立項や加筆修正されています。PJ名こそ「天体」ですが、天文学全般についてこのプロジェクトで取り扱っています。

2024年8月現在、PJ天体に参加して天文関連記事の編集を継続している利用者は、私含め6名です。どうです、少ないでしょう？ そうです、本当に少ないんです。英語版ウィキペディアには同様のPJとしてWikiProject Astronomyがありますが、アクティブメンバー数は246名。「戦いは数だよ兄貴」とはまさにこのことで、日本語と英語の話者数の差を考えても40倍以上の戦力差は大きく、英語版に比して記事の量と質で不利な状況にあることは否めません。

それでも、少人数でも質のよい情報を提供すべく各自日夜奮励努力しております。普段は各々が関心あるテーマの記事を編集していますが、タイムリーで何か工数が掛かりそうなテーマが出てくれば、協力して知恵を出し合って編集作業に取り組むこともあります。たとえば、2019年に開催された「IAU100 NameExoWorlds」で113の恒星系と系外惑星に固有名が認証された際には、PJ天体

表2 ウィキペディア日本語版の天文関連記事でよく使われる文献の一覧。

項目	対象	文献名
学術用語		学術用語集（文科省）
		インターネット版「天文学辞典」（日本天文学会）
		シリーズ「現代の天文学」（日本天文学会編，日本評論社）
各種パラメータ	恒星・銀河・星団等	SIMBAD（CDS）
		VizieR（CDS）の各カタログ
	太陽系小天体	Minor Planet Center（IAU）
		Small-Body Database Browser（JPL）
	太陽系外惑星	Extrasolar Planets Encyclopaedia
名称	恒星の固有名	IAU Catalog of Star Names（IAU WGSN）
		A Dictionary of Modern Star Names（Paul Kunitzsch, Tim Smart）
		Stars and Stars of the Week（Jim Kaler）
	太陽系の天体の地名	Gazetteer of Planetary Nomenclature（WGPSN）
	星座の歴史・由来	Star Tales（Ian Ridpath）
		Star Names — Their Lore and Meaning（Richard Hinckley Allen）
		ルネサンス期以降の各種星表・星図の原書（ETHなど）
	日本の星名	日本の星名事典（北尾浩一）
		日本星名辞典（野尻抱影）

所属の利用者たちで手分けして記事の立項作業に取り組みました。そのため、翌3月末にはすべての星系の記事を立項し終えることができました。

質のよい情報を提供するためには信頼できる情報源が必要です。表2に、我々が記事編集の際に主に利用している情報源を列挙してみました。おそらく皆さんが想像されるよりもマシな情報源ではないでしょうか。これらに加え、関係しそうな論文はNASA/ADSで検索して内容を確認し、必要に応じて記事編集の参考文献としています。

オープンアクセスの学術誌は我々でも読めるのですが、有償で定期購読する必要がある学術誌にはなかなか手を出せず、記事を一から書くにせよ英語版から翻訳するにせよ編集が難渋する原因の一つとなっていました。しかし近年ウィキメディア財団から新たに提供された『ウィキペディア図書館』という記事編集支援の仕組みが、大きなブレイクスルーを生んでいます。

3.3 『ウィキペディア図書館』—典拠情報へのアクセスを可能とする記事編集支援の仕組み

天文学にせよ天文学史にせよ重要な典拠情報の多くは海外の書籍や学術誌に記載されており、研究機関や教育機関に属していない限り簡単にアクセスできません。本誌のようなオープンアクセスの学術誌の存在には大いに助けられています、それにも限界があります。

『ウィキペディア図書館 (Wikipedia Library)』は、そのような重要な典拠情報へのアクセスと利用を無料かつ簡単に提供することを目的とした、ウィキメディア財団のプロジェクトです。ウィキペディア図書館の運営チームは、海外の数十の出版社とパートナーシップ契約を締結しており、ウィキペディアやWikimedia Commons等を編集する利用者が無償で資料にアクセスすることを可能にしています [7]。

ウィキペディア図書館から閲覧可能な天文学・天体物理学の分野の資料としては、NatureやScience, Astronomy & Astrophysicsなどの学術誌の

ほか、SpringerLinkやWileyが刊行する学術誌や書籍があります。またOxford Academicが刊行する王立天文学会月報やPASJなどの学術誌も自由に閲覧することができます。また人文系ではJSTORにアーカイブされた論文等の資料が利用できるため、天文学史関連の典拠情報を調べる際に大いに役立っています。

これらの文献を無償で閲覧するには、

- 500回以上の編集履歴があること
 - 6ヵ月以上編集活動に携わっていること
 - 直近30日間に10回以上の編集実績があること
 - 現時点で投稿ブロックを受けていないこと
- といった要件を満たす必要がありますが、週20件程度の編集作業をすれば半年ほどで達成できます [7]。

有償の学術誌や文献にアクセスするのが難しい環境にある研究者の方々にとっては、結構魅力的な条件ではないでしょうか？ 研究活動のちょっとした合間に記事編集をお手伝いしてもらえると、私も大変ありがたいです。

3.4 ウィキペディア日本語版天文記事の今後

以下、私見ではありますが、現状を踏まえて取り組みたいことを並べてみます。

現在、記事編集に参画してくれる仲間がもっと増えるような何らかアクションを起こせないものかと思案中です。英語版ウィキペディアがNASAのサイトに引用されるほど高く信用されているように、ウィキペディアに関わる人が増えれば増えるほど記事の量も質も向上していく、と考えています。とは言え、余暇のほとんどを百科事典の編纂に費やすような酔狂な人はそうそういないので、もっと気軽に参画してくれるライトな層を増やしたいと考えています。たとえば、知見や関心のある分野だけ出典を付けて加筆してみたり、誤っている箇所を教えてくれたり、そんな感じで十分です。先述したウィキメディア・コモンズに天体写真をアップロードしてもらうのも大変ありがたいです。画像のアップロードは、問答形式で

必要事項を入力していけば誰でも簡単にできますので、天体や日本天文遺産の写真など提供いただけると大変助かります。

記事の質について言えば、天文学・天体物理学の理論や法則など、専門性の高いテーマについては、記事の内容が十分でない、あるいは記事自体が立項されていないのが実状です。たとえば、私が特に関心のある恒星物理学の分野では「周期-光度関係」や「κ機構」などの記事を立項こそしていますが、その内容も不十分なままとなっています。何とか専門家の知見の記事に反映させたいと思っていますので、研究者の皆様からも助言や情報提供いただけると幸甚です*7。

4. 「星座関連記事の抜本的改稿」私的に取り組み中のテーマについて

最後に、私が2022年頃から最優先で取り組んでいるテーマである「星座関連記事の抜本的改稿」について紹介します。これは、ウィキペディア日本語版に立項されている現行の88星座に、既に廃止されたアルゴ座と壁面四分儀座の2星座を加えた90星座の記事を、日本語文献としては最高レベルのものに仕上げたいこうという取り組みです。

現代の天文学で「星座」という天球上の区分は、突発天体やアソシエーション、宇宙の大規模構造の名前で見聞きする程度になっており、既に天文学史や天文文化の分野の事象になっているように見受けられます。天文学関連の講演で研究者の方から「星座のことは何も知りません」と自己紹介されるのはもはや定番となっていますが、それも仕方ないことなのでしょう。

その一方で、プラネタリウムや観望会など広く一般向けに天文・宇宙を紹介する現場では、その由来や伝承について様々に解説されるなど今もな

表3 ウィキペディア日本語版の星座記事の節構成。

節	内容
導入部	記事全体の概略
特徴	星座の位置、観望に適した時期等
由来と歴史	星座の成立史、中国の星官
神話	星座と直接関連するギリシア・ローマ神話
呼称と方言	日本語名の変遷、日本独自の名称
主な天体	領域内の恒星、星団・星雲・銀河
流星群	星座名を冠した確定流星群

お人々の興味を引く題材であり、天文学へ興味・関心を繋ぐ入口として軽視できないものとも考えます。

さて、私がなぜ星座の記事の改稿を最優先に取り組み始めたのか、主な理由は以下の通りです。

1. ウィキペディア日本語版の星座関連記事の内容が薄い
2. 日本の先人が遺した文献には誤りが多い
3. 先人の著書の内容を元に社会教育・一般普及活動がされている
4. 生成AIによる検索が普及する前に学習データとして整える必要がある

理由1は当然として、問題は2と3です。野尻抱影、原恵、山田卓、藤井旭といった先人たちが遺した星座に関する著作は、多くの読者に天文に関する興味関心を大いに掻き立ててきました。ただ、星座とは本来何の関係もなかった神話を星座と結び付けてみたり、16世紀以降に考案された新星座について考案者が星図や星表に書いていないことを独自解釈で書き加えてみたりと、事実と想像をコンタミしてしまう悪い癖を共通してお持ちだったようです。そのため、欧米とは異なる星座の由来や伝承が彼ら先人たちから語られることによって国内では情報のガラパゴス化が進み、解説員や星空案内人、YouTuber、VTuberらによ

*7 『天文学辞典』のように研究者の手で質の高い記事を編集してもらえるに越したことはないのですが……いずれにせよ、私のような門外漢の興味関心や知見、編集意欲に左右されるような現状は決して健全ではなからうと思っています。

て今もなおおかしな情報が拡散されているのが現状です*8。

偉大な先人たちの肩の上に立っていることは十分に踏まえつつ、彼らが遺した過ちは21世紀の今を生きる我々が正していきましょう。幸い、Copilot, Gemini, perplexityなどの生成AIによる検索は、ウィキペディア日本語版の記事の内容をよく学習してくれるようですので、ウィキペディアの記事を正しく改稿していくことによって、人間だけでなく大規模言語モデルに対してもよい学習データを提供できそうです。

星座記事の節構成もPJ天体のメンバーと協議して改めました(表3)。これで以前よりも幾分読みやすい記事になっているかと思います。

由来と歴史、神話の内容には、日本語文献を一切採用せず、英国の研究者Ian Ridpathの『Star Tales』を主な参考文献としました。Ridpathの説の妥当性は、星図・星表の原書や天球儀、海外の専門家のコメントリー等で裏を取りながら確認しています。このほか、西洋の星座が日本で受容される過程で星座名がどのように変遷したかなど、これまでほとんど語られなかった事柄も記述しています。

気になる進捗ですが、2024年8月末時点で16世紀以降の新星座41個は編集が終わり、プロトマイオス星座48個も30星座ほど作業を終えました。遅筆も災いして、1つの星座記事に1ヵ月近く時間を要していますが、2025年度末までには全星座の編集を完了する予定です。

謝辞

星座の由来や伝承について貴重な助言をいただいたBayFlam氏、並びに天文関連記事の更新に尽力されているPJ天体の各位に、深く感謝致します。

参考文献

- [1] <https://ja.wikipedia.org/w/index.php?title=%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%82%AD%E3%83%9A%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%A2&oldid=101742632> (2024.12.27)
- [2] <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wikipedia&oldid=1244882264> (2024.12.27)
- [3] <https://ja.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:%E3%82%A6%E3%82%A3%E3%82%AD%E3%83%9A%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%A2%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6> (2024.12.27)
- [4] <https://ja.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:%E4%B8%AD%E7%AB%8B%E7%9A%84%E3%81%AA%E8%A6%B3%E7%82%B9> (2024.12.27)
- [5] <https://ja.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:%E6%A4%9C%E8%A8%BC%E5%8F%AF%E8%83%BD%E6%80%A7> (2024.12.27)
- [6] <https://ja.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:%E7%8B%AC%E8%87%AA%E7%A0%94%E7%A9%B6%E3%81%AF%E8%BC%89%E3%81%9B%E3%81%AA%E3%81%84> (2024.12.27)
- [7] <https://wikimedialibrary.wmflabs.org/about/> (2024.12.27)

Outreach for astronomy from Wikipedia

Michio KOVAYASHI

Abstract: This paper introduces what Wikipedia is and how the astronomy articles on the Japanese version of Wikipedia have been edited. The author, who has been actively engaged in astronomy outreach through Wikipedia for many years shares insights and experiences in this area.

*8 誰でも手の届くウィキペディアという場により正しい情報を置くことによって、天文普及の場により意味で圧を掛けたいという思いもあります。

電波天文の観測環境を守る ～世界無線通信会議 2023 参加報告～



平松正顕

〈自然科学研究機構国立天文台天文情報センター周波数資源保護室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hiramatsu.masaaki@nao.ac.jp

人工電波にあふれる現代社会で電波天文観測を続けていくためには、電波天文のための周波数帯を守り、他の業務からの有害干渉を防ぐための調整が欠かせません。電波の使い方を議論する最高レベルの国際会議「世界無線通信会議2023」が一昨年ドバイで開催されました。携帯電話や衛星通信などさまざまな業務で使用する周波数についての議論が行われたほか、次回2027年の世界無線通信会議の議題も決まりました。その中には衛星コンステレーションと天文学の関係を議論するものや76 GHz以上の電波を出す業務と電波天文の関係を議論するものなど、今後の電波天文観測にとって重要な議題も設定されました。本稿では、この会議の報告とともに電波天文の置かれた現状をご紹介します。

1. 「平等に不幸になる」国際会議

“Let's all be equally unhappy.”

そんな合言葉はごめんだ、と思う方もいらっしゃるかもしれませんが、しかし、世界無線通信会議 (World Radiocommunication Conference 2023, WRC-23) ではこの言葉が何度も議長から発せられました。週末だろうが日付をまたごうが議論をして、一人勝ちは認めず、無理やりにでも妥協点を見つけ出す。天文学の会議とは一線を画するスタイルで行われたのは、世界の電波の使い方や周波数の取り決めを行う会議です。2023年11月20日から12月15日までドバイで開催されたこの会議には、数多の携帯電話会社や衛星事業者、通信事業者、行政官に交じって、電波天文学の守り人たちが参加していました。さまざまな周波数でますます電波が飛び交うこの世界で、今後も電波天文観測を続けるために。

2. 電波の交通整理, 周波数割り当て

皆さんも、電波を使わない日はないことでしょう。朝にはスマートフォンのアプリで天気を確認し、車に乗ればカーナビやETCを使い、駅ではタッチ式のICカードで運賃を払い、職場ではノートパソコンをWi-Fiにつなぎ、Bluetoothのイヤホンでオンライン会議に出る。科学衛星から電波に乗って送られてきたデータを解析することもあるでしょう。数えきれないほどの装置が電波で通信する現代で混信が起こらずきちんと装置が機能するのは、それぞれが使う電波の周波数が決まっているからです。携帯電話、無線LAN、衛星通信、レーダーなど通信や測位のために電波を出す業務は、原則としてそれぞれに分配された周波数帯の電波だけを出すことができます。分配があれば、別の業務に起因する有害な電波干渉からの保護も受けられます。電波は国境を越えて飛び

ますから、その調整は国際的に行う必要があります。この任を負うのが、国連の専門機関である国際電気通信連合（International Telecommunication Union (ITU)）無線通信部門（ITU-R）です。電波の使い方は無線通信規則（Radio Regulations）にまとめられており、そのもとで各国の主管庁（日本なら総務省）が各国内の状況に応じて周波数の割り当てを行います。

電波天文にも、分配された周波数帯があります [1, 2]。例えば水素原子が電波を放つ 1.4-1.427 GHz、アンモニア分子のスペクトルがある 23.6-24 GHz、一酸化ケイ素分子のスペクトルがある 42.5-43.5 GHz などは電波天文に分配されています。また、特に重要な周波数帯（例えば先に挙げた前者ふたつ）は国際的に「発射禁止帯」に設定されていて、通信等のための電波を出すこと自体が禁じられています。宇宙にあるさまざまな原子や分子のスペクトルは電波のあらゆる周波数に存在していますが、当然ながらそれらすべての周波数が電波天文に分配されているわけではなく、分配があるのは一部の重要な周波数帯のみに限られます。多くの電波望遠鏡では電波天文に分配のない周波数の観測も行われていますが、その場合は無線通信規則のもとでは干渉電波に対して保護を訴える権利はありません*1。

電波を使ってビジネスを行う会社にとって、周波数の獲得は重要です。例えば携帯電話会社なら、新たな周波数帯が獲得できれば帯域の逼迫が解消されて通信品質が上がり、契約者数を増やして大きな利益を上げることが可能になります。周波数管理は、企業の活動の可能性を広げる重要な要素なのです*2。とはいえ電波の周波数は有限ですし、既にさまざまなサービスが電波を使っています。世界を見渡せば、重要視する使い道も国に

よってさまざまでしょう。このため、新しい周波数の分配は一筋縄ではいきません。

その一筋縄ではいかない国際的な周波数分配を何とかして実施するのが、冒頭でご紹介した世界無線通信会議、WRCです。3-4年に一度開催されるWRCの目的は、周波数の使い方を記した無線通信規則の改訂です。無線通信規則はITU条約の附属文書として国際的な拘束力を持ちます。このため、あらゆる国の代表者がWRCに参加し、各国の国益に沿う形での改訂を目指すのです。

2023年に開催されたWRC-23では、携帯電話や人工衛星、サブオービタル機、船舶無線などさまざまな用途、さまざまな周波数が議題になりました。議題はひとつ前のWRCで決められますので、2019年から2023年までの4年間で議題への対応方針を議論します。WRCの目的は無線通信規則の改訂ですから、検討の結果無線通信規則を改訂して新たな周波数を新たな用途に割り当てることもあれば、別の用途への影響が避けられないので無線通信規則は改訂しない（新たな周波数分配はしない）という結論になることもあります。

3. ITU-Rでの議論

WRCに向けた議論の舞台となるのが、ITU-Rです。ITU-Rには6つの研究部会（Study Group）があり、それぞれの下に作業部会（Working Party）が設置されています（図1）。携帯電話や衛星通信、リモートセンシング、電波天文など業務ごとの作業部会のほかに、干渉検討のために必要な電波伝搬モデルを検討する作業部会もあります。これらの部会では、WRC議題の議論に必要な観点、過去の似た事例の検討結果や国内での検討事例などをITUメンバーが文書にまとめて持ち寄り、議題への対応を決めるときの参考になる勧告

*1 特定の電波望遠鏡のまわりでは電波天文に分配のない周波数帯でも法律によって電波の発射が制限されている場所（Radio Quiet Zone）がありますが、これはあくまで国内法での取り扱いで、無線通信規則によるものではありません。

*2 米国では、携帯電話に割り当てられた周波数を通信企業がオークションで競り落として獲得するという事例があります。落札価格は数十億ドルにもなり、逆に言えばそれだけ大きな利益が見込めるということです。

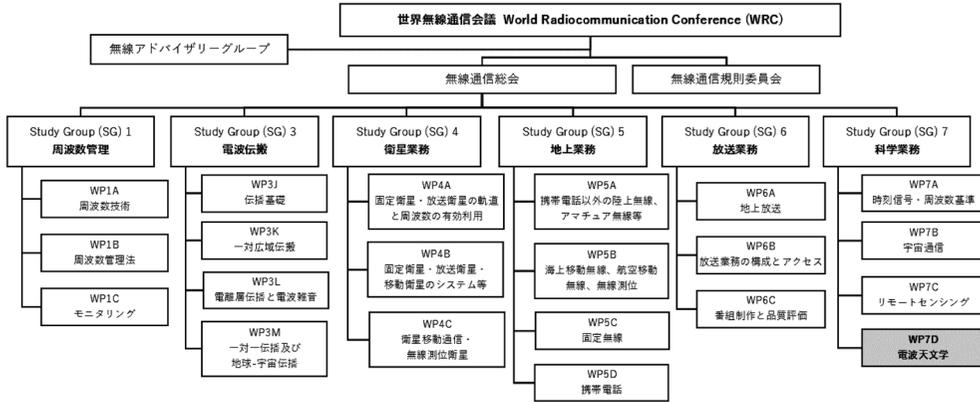


図1 ITU-Rの組織図. さまざまな業務を取り扱う Working Party の中に、電波天文学を扱う Working Party 7D もあります.

(Recommendation) 案や報告 (Report) 案を議論します。また、WRC 議題とは別に必要に応じて研究課題を設定し^{*3}、その研究に必要な情報をまとめて報告を作成したり、有害干渉を避けるための方法を勧告としてまとめたりします。部会の会議は年に1回か2回。ITUは徹底した文書主義なので、例えば衛星通信から電波天文への干渉を評価するための情報提供を衛星通信の部会に依頼するにも、電波天文の部会で依頼文書を議論して合意が得られないと先に進めません。しかし、電波天文の部会の参加者は電波天文関係者だけではありません。各国の通信を司る省庁の行政官や弁護士、電波天文台のない国からの参加もあります。次のWRCまで4年あったとしても、余裕はまったくありません。

ITU-Rの部会での議論は電波伝搬や干渉防止策など技術的な観点は必須ですが、先に触れた通り議論の結果が各国企業のビジネスの展開に直結するため、議論は政治的な様相を帯びてきます。参加者は国や業界団体を代表して会議に臨みます。

ある産業を振興したいなら、規制はできるだけない方がいい。別の業務を守りたいなら、規制は厳しい方がいい。無線通信規則に従い既存の勧告などを参照しながら議論を進めるわけですが、時には理解しがたい論理で規制を作ること自体に反対したり、手練手管で規制を骨抜きにしようとしたり、知ってか知らずか過去の勧告を無視したり^{*4}。百戦錬磨の行政官や弁護士と対峙するのは、ある意味刺激的です。しかもITUでは強行採決をせず全会一致が原則となれば、そんなツワモノたちとなんとかして妥協点を見つけなくてははいけません。“Let’s all be equally unhappy.”と議長が言いたくなるのもわかります。

4. 世界無線通信会議 2023

そうした準備を経て開かれたのが、WRC-23。ドバイ世界貿易センターで4週間にわたって開催されました(図2)。参加国数は163、参加者数は約4000人。東京ビッグサイトのような大きな国際展示場に大小30もの仮設の会議室が作られ、

^{*3} 例えば2022年には、今後活発になるであろう月面開発を見越して、月の裏側に建設される電波天文台はどんな特性を持ち、科学成果を最大化させるためにどの周波数を観測するか、という研究課題が設定されました。現在、各国で検討されている月面電波天文台の諸元をまとめ、報告を作成する作業が行われています。

^{*4} こう書くとはひどい人たちに見えるかもしれませんが、彼ら彼女らにも「その国の国益に沿う」という大義があるので、無理やりな論理での発言を見ていると、むしろ不憫に思えてきます。



図2 WRC-23のプレナリ（全体会）。広大な会場に全参加者が集まります。議論では前方の巨大なスクリーンにWordファイルを投影し、これを編集しながら進めます。

多くの会議室には全席にマイクシステムが設置され、大きな会議室では国連公用語6ヶ国語の同時通訳も入ります。日本代表団は約130人で、総務省、通信関連企業や業界団体、研究機関などから「電波を使う」という共通項で集まった人たちです。日本の電波天文側参加者は、私と大石雅寿前周波数資源保護室長。世界を見渡せば、米国立電波天文台やマックスプランク電波天文学研究所、SKAO（Square Kilometre Array observatory）などからも電波天文関係者が参加しました。

WRC-23の議題は多岐に渡りますので、会議は4週間続くとはいえいくつもの議題を並行して議論しないと間に合いません。ひとりですべてを把握することはとてもできませんし、電波天文に関係ない議題も多くあります。WRC-23専用アプリに掲載されるスケジュールと毎朝にらめっこしながら、9:30からはRoom Aで衛星の議題、10:45からはRoom Cで携帯電話の議題、と会場内を行ったり来たりする4週間でした。

WRCの会議は複数の階層からなります。まず

6つのコミッションがあり、その下にいくつかの議題をまとめて議論するワーキンググループがあり、個々の議題はその下のサブワーキンググループで議論されます。ひとつの議題に複数の周波数帯の議論が含まれる場合は、さらに細かく分割されます。小さいグループで議論し、結果を上級の会議に持ち込んで議論して、さらに上の会議に上程します。議論がまとまらず上の会議に持ち越され、差し戻されることもあればさらに上の会議に行くこともあります。上位の会議にはまとまらなかった面倒な議論が積み重なっていくので、常識的な時間に終わらないのも想像が付きまします。

WRCは、議論の仕方の議論から始まりました。やっと実質的な議論に入ったと思ったら1週目が終わります。週末をはさんで2週目に入るころには「このままでは間に合わないのでは？」という危機感がにじみ始め、議長がはっぱをかけ始めます^{*5}。夜のセッションが設定され始め、土日にもセッションが作られ、第3週には日付をまたいだセッションも現れました。会議場からホテルまでのシャトルバスにも乗れない日が続き、広い会議場内の売店でサンドイッチと水を買って会議室に戻って、なかば朦朧とした頭でセッションに出る日も何度か。正式なセッション内で意見の隔たりが埋まらない時は、セッション間の休憩時間でそこかしこで非公式協議が発生します。セッションが再開するといつのまにか合意ができていたこともありました。こういう交渉はオンラインではやりにくいものです。

今回のWRCでは電波天文を直接の議題としたものはありませんでしたが、関連する議題はいくつかありましたので、簡単にご紹介します。

^{*5} “We used almost two weeks for one topic. We have 81 topics.” “We finish this topic in this week. Weekend is included in this week.” “Enjoy your weekend in the meeting rooms.” など、ユーモアを交えて参加者に議論と妥協を促す議長の言葉を何度も耳にしました。

4.1 携帯電話周波数帯における成層圏プラットフォームの利用

高度20 km付近の成層圏に飛行機を飛ばして通信基地局とする High Altitude Platform Station (HAPS) という構想があり、日本でも開発が進められています*6。今回のWRCでは、携帯基地局としてのHAPSが使う周波数帯の拡大が議題となりました。従来の基地局は地上に置かれていますが、空から電波が降ってくるとなると有害干渉の議論は変わります。電波天文に分配のある周波数帯は議題には含まれていませんが、想定周波数(694-960 MHz)の二次高調波が電波天文の帯域(1610-1613.8 MHz)に入ってくる可能性があります。議論の結果、2.7 GHz以下の複数の周波数帯をHAPS携帯基地局で使うことが認められました。二次高調波まで考慮するかどうかは各国で意見の違いがありましたが、最終的には問題になる周波数は地上からHAPS方向のみに限定されることになりました。つまり、上空からその周波数の電波が降ってくることはありません。これは、電波天文関係者の働きかけが実を結んだものと言えます。

4.2 非人命保護用途の航空業務への新規分配

主にリモートセンシングのために航空機にセンサーを載せるニーズが高まっているそうですが、使用する周波数帯が決まっていませんでした。WRC-23では15.4-15.7 GHzと22-22.21 GHzの2つの周波数帯をこの用途に分配するか否かが議題となりました。これに隣接する15.35-15.4 GHzは発射禁止帯域となっていて、電波天文や地球観測衛星業務に分配されています。また、22.01-22.21 GHzは「電波天文業務を有害な混信から保護するための実行可能なすべての措置を取らなければならない」と無線通信規則に明記されていま

す。隣接周波数帯が使われる場合、漏れこんでくる電波が心配です。WRC-23での議論の結果、いずれの周波数帯も一部の地域で新規に分配されることが決まりましたが、「電波天文に有害干渉を与えてはならない」という注釈がつけられました。これも、電波天文関係者の働きかけによるものです。

4.3 14.8-15.35 GHz帯の宇宙研究業務への分配

科学的研究や技術的研究のために人工衛星など宇宙にある装置と通信するのが「宇宙研究業務」です。月をはじめさまざまな宇宙開発研究が進む将来を見越して優先的に使える周波数帯を拡大する動きがあり、WRC-23の議題となりました。ひとつ前の項目と同じく電波天文に割り当てのある発射禁止帯と隣接しているため、漏れ電波が宇宙から飛んできては大変です。WRCでの議論の結果、優先権のある一次分配が認められましたが、アメリカや日本を含む一部の国では優先権のない二次分配のままとなりました。従来と同じように、電波天文は保護されます。

5. 電波天文が次回WRCの議題に

WRCでは、その次のWRCでの議題の設定も行われます(図3)。今回のWRCで決議された、WRC-27の主要議題を列挙したのが表1です*7。次回2027年のWRCの主要議題19件のうち、電波天文を直接の検討対象とするものが2件も含まれることになりました。Radio Astronomyの語が入った議題が設定されるのは、2007年のWRC-07以来20年ぶりです。SKAOとマックスプランク電波天文学研究所では、それぞれこのことをプレスリリースしました[3, 4]。この2機関に所属する人たちが特に議題の設定に尽力したという背景がありますが、電波天文が議題に選ばれるのが稀

*6 天文月報1998年5月号「電波天文生存の危機」[1]の冒頭にもHAPSへの言及がありますが、まだ実用化されていません。国内では2025年の実用化を目指した制度的な議論も行われている一方、技術的な課題はまだ残っているようです。

*7 天文学の世界ではなじみのない専門用語が並びますが、そんな世界で電波天文を議論しなくてはいけない困難さを感じていただきたく、総務省による翻訳をそのまま載せています。

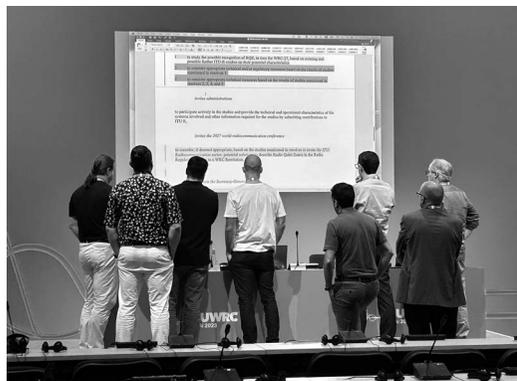


図3 次回WRC議題のもとになる決議文の議論。休憩中ですが投影されたワードファイルを囲んで議論が進んでいます。この写真撮影後に私も加わりました。

であると同時に、これからの社会で電波天文観測を続けていくためには避けて通れない議論であることを天文コミュニティにも社会全体にも訴えかける意図があったのだろうと推察します。

5.1 衛星コンステレーションと電波天文学

昨今の大規模衛星コンステレーションの急速な隆盛により、電波天文観測への悪影響が懸念されています。こうした状況を受けて、電波天文への影響を研究し必要な技術的・規制的な条件を検討することが議題1.16として設定されました。

この議題は、主にふたつの要素からなります。ひとつは、電波天文に割り当てのある帯域に近い周波数で通信する衛星からの保護です。衛星通信に割り当てられた周波数だけで電波を出すのであればこちらが文句を言う筋合いはないのですが、一般的にある周波数で厳密に電波をカットすることは難しく、漏れ出しがあります。この漏れ出しが電波天文に与える影響を評価する必要があります。2030年代には衛星数が今の十倍以上になる可能性があるため、現時点で影響がなかったとしても今

後も安心とはいえません。この議題では、電波天文と衛星業務への分配が隣り合う10.6-134 GHzの7つの周波数帯が議論の対象となります。

もうひとつは、チリのアルマ望遠鏡と南アフリカに建設中のSKAのみを対象とした検討です*8。これらの望遠鏡は、それぞれの国が設定したRadio Quiet Zone (RQZ)の中にあります。RQZでは国際的な電波天文への割り当て範囲を超えて広い周波数帯で電波天文観測が保護され、人工電波の発射が制限されています。しかしこれらの効力は国内にしか及ばず、人工衛星は対象外です。人工衛星からのRQZの保護を実現するためにはなんらかの国際的な取り決めが必要で、これをITUで実現しようというのが今回の議題の狙いです。電波天文に分配されていない周波数帯で観測することの重要性と、衛星の影響を評価し共存方法を探ることが議題の決議に謳われていますが、分配されていない周波数帯で保護を検討すること自体がITUでは一般的ではありません。検討そのものに強い難色を示す国があることも事実で、決議では検討対象とする周波数帯すら明示することができませんでした*9。全会一致が原則のITUでは、これは極めて厳しい状況。仲間を増やして議論を尽くして、なんとか妥協点を見出す以外に方策はありません。

5.2 76 GHz以上の電波を出す業務と電波天文・地球観測衛星

日本でもミリ波は盛んに観測されていますが、高い周波数ではこれまでそれほど電波干渉は大きな問題にはなっていませんでした。ところが技術の進展で高周波電波を出すハードルが下がり、高い周波数の電波も通信やレーダーに使われるようになってきています。WRC-27議題1.18では、特に76-235 GHzの周波数で電波を出すさまざま

*8 「世界で最もつながる国」を目指すオーストラリアに建設中のSKA-Lowは、この議題の検討対象には含まれないことになりました。

*9 すでに始まっているITU-Rの作業部会の議論でも、決議が出て1年以上経過するにも関わらずどの周波数帯を検討対象とするかで合意に至っていません。

表1 WRC-27議題

議題	題目
1.1	47.2-50.2 GHz及び50.4-51.4 GHz帯（地球から宇宙）における固定衛星業務の静止衛星及び非静止衛星宇宙局と通信する移動する地球局の使用のための技術上、運用上、規則上の手段の検討
1.2	13.75-14 GHz帯（地球から宇宙）における固定衛星業務の小口径アンテナを有する地球局の使用のための共用条件の改正の検討
1.3	51.4-52.4 GHz帯（地球から宇宙）における非静止衛星システムのゲートウェイ地球局の使用に関する検討
1.4	第3地域における17.3-17.7 GHz帯の固定衛星業務（宇宙から地球）への新規一次分配と17.3-17.8 GHz帯の放送衛星業務（宇宙から地球）への新規一次分配、第1地域及び第3地域における17.3-17.7 GHz帯の非静止衛星の固定衛星業務（宇宙から地球）の等価電力束密度制限の検討
1.5	固定衛星業務及び移動衛星業務における非静止衛星地球局の無許可運用の制限すること並びにこれに関連する非静止衛星システムのサービスエリアに関する規制措置及びその実現可能性の検討
1.6	37.5-42.5 GHz（宇宙から地球）、42.5-43.5 GHz（地球から宇宙）、47.2-50.2 GHz（地球から宇宙）、50.4-51.4 GHz（地球から宇宙）における固定衛星業務の衛星ネットワークシステムの公平なアクセスのための技術的・規制措置の検討
1.7	4400-4800 MHz、7125-8400 MHz（またはその一部）、及び14.8-15.35 GHzにおけるIMT使用のための、これらの帯域及び隣接帯域における既存一次業務を考慮した共用・両立性検討、及び技術的条件の策定
1.8	ミリ波・サブミリ波イメージングシステムのための231.5-275 GHz帯における無線標定業務への新規一次分配に関する検討及び275-700 GHz帯における無線標定業務のアプリケーションへの新規周波数特定に関する検討
1.9	航空移動（OR）業務におけるHF帯利用の近代化のための無線通信規則付録第26号の更新に係る適切な規制措置の検討
1.10	71-76 GHz及び81-86 GHz帯における固定、移動業務保護のための固定衛星、移動衛星、放送衛星業務に関する無線通信規則第21条におけるpfd及びEIRP制限の検討
1.11	1518-1544 MHz、1545-1559 MHz、1610-1645.5 MHz、1646.5-1660 MHz、1670-1675 MHz及び2483.5-2500 MHz帯の宇宙から宇宙の回線のための技術上、運用上、規則上の手段の検討
1.12	低データレート非静止移動衛星システムに必要な1427-1432 MHz（宇宙から地球）、1645.5-1646.5 MHz、1880-1920 MHz及び2010-2025 MHzにおける移動衛星業務への分配及び規則上の措置の検討
1.13	地上IMTネットワークのカバレッジを補完するための、宇宙局とIMTユーザ機器の直接接続のための移動衛星業務への新規分配に関する検討
1.14	第1地域及び第3地域の2010-2025 MHz（地球から宇宙）及び2160-2170 MHz（宇宙から地球）並びに2120-2160 MHz（宇宙から地球）における移動衛星業務への追加分配の検討
1.15	月表面間及び月軌道と月表面間のための、宇宙研究業務（宇宙から宇宙）への新規分配または分配の変更の検討
1.16	非静止衛星システムの干渉からの特定のラジオ・クワイエット・ゾーンで運用される電波天文を保護するための技術上、規則上の規定に関する検討
1.17	受信専用宇宙天気センサの規則上の規定及びその保護の検討
1.18	76 GHz以上の特定の周波数帯における、能動業務の不要発射からの地球探査衛星業務（受動）及び電波天文業務の保護に関する規則上の手段の検討
1.19	4200-4400 MHz及び8400-8500 MHzの周波数帯における、地球探査衛星業務（受動）への全地域の一次分配の検討

な業務との周波数共用を議論します。この議題で電波天文への影響を検討する相手は衛星通信や衛星放送などで、地上の業務は検討対象になってい

ません。本来の衛星業務に割り当てられている周波数の外に漏れてくる電波が対象で、そうした電波の制限値を決めることを目指します。

5.3 高周波へ、衛星へ、そして月へ

電波天文を直接の対象とする上記ふたつ以外にも、電波天文に関係する議題はいくつもあります。これまでのWRC議題と比べると全般的に高い周波数の検討が増え、また人工衛星に関連する議題も増えています。231.5 GHz以上という高周波でレーダーやイメージング装置を使うことに関する議題1.8、2.7 GHz以下の帯域で衛星と携帯電話（International Mobile Telecommunications (IMT)）を直接繋ぐことに関する議題1.13、月表面や月周回軌道での新しい周波数分配に関する議題1.15など、技術の進展と社会のニーズに対応するための議題が並びます。電波天文に分配がある周波数帯や隣接する周波数帯を扱う議題も多く、電波天文を所管するWP 7Dでは11の議題への貢献が求められます。衛星コンステレーションに関する議題1.16だけでもかなりの困難が予想される中で、これ全部を4年で議論するのはなかなか大変です。とはいえ、今後人間社会*¹⁰の中で電波天文観測を続けるためには避けて通れません。

WRCでの議論で、特に最後に意見をまとめる段階で重要な役割を果たすのが世界に6つある地域機関です。アジア・太平洋、米州、アラブ、アフリカ、欧州、旧ソ連の各地域に地域機関があり、日本は「アジア・太平洋電気通信共同体 (Asia-Pacific Telecommunity, APT)」のメンバーです。今回のWRCでは、正式なワーキンググループ等での会合で意見がまとまらないとき、最終的に地域機関の代表たちの会議で結論が出てしまう場面が何度もありました。密室で決まってしまうことへの不満もありますが、ともあれ地域の総意として意見を発信することが重要と言えます。APTには、衛星通信が極めて重要なインフラとなっている多くの太平洋諸国が参加しています。一方で電波天文を進めているのは日本、韓国、中

国、タイ、オーストラリアなど一部の国。この地域で、例えば衛星コンステレーションから電波天文学の保護を強く求めるような意見が出せるかどうか。もちろんそれを目指してさまざまな活動を進めていかなくはなりません、これも簡単なことではありません。

6. 光り輝く街ドライブで邂逅する世界

ドライブと聞けば、砂漠にそそり立つ超高層ビル群や広大な埋め立てリゾート地が思い浮かぶことでしょう。前述の通り、4週間の会議も半ばを過ぎると週末は消滅していたので現地の文化に触れる機会はそれほどありませんでしたが、街の作りも会議に関連する諸々も随所にドライブパワーを感じるものでした。まず、超高層ビルのほとんどがまばゆく光ります。砂漠の砂っぽい空気もあって空に見える天体は月と木星くらいで、オリオン座すら目を凝らさないと見つけられないほどの激しい光害が街を包みます。ドライブパワーと言えば、毎日の昼食は現地スポンサーの提供で無料。数千人分、週末を除いた4週間ずっとです。初日夜にはこれまた全員ご招待のレセプション。何十台ものバスを連ねて、ヤシの木の形の人工島パーム・ジュメイラの根本付近に向かいます。だだっ広い人工緑地にオープンエアーのレセプション会場が



図4 初日のレセプション会場の遠景。Dark and Quiet Skyという概念を口にするのが空しくなります。

*¹⁰ 月の裏側に電波天文台が建つ頃には、月面にも無線通信をする人間社会が広がっていることでしょう。

セットされ、まばゆいサーチライトが何本も踊ります（図4）。会期中の12月2日はアラブ首長国連邦の建国記念日ということで、この日も無料の砂漠ツアーとレセプションが開催されました。会議場からバスで30分ほど揺られればもう砂漠の中。民族衣装を見たり伝統的なチーズやドライフルーツを味見したりした後は、例によって野外にセットされたレセプション会場でディナー。原油高もなんのその、お金とエネルギーをたっぷり使ったおもてなしを見せつけられました。

最初に説明した通り、WRCは条約に準じる無線通信規則の改訂を目的としています。このため最終日には各国が文書に署名し、これを取りまとめるセレモニーが開かれます。天文学の世界で一般的な国際研究会とは違って、まさに国際政治と外交の場です。周波数調整や干渉防止の議論の中身自体は技術的な観点が多くとも、その結果は各国の経済活動に直結するものであり、政治抜きには語れません。そもそも、ガザ攻撃開始から1カ月ほどしか経っていなかったWRC初日の最初のセッションは、パレスチナとイスラエル、ウクライナとロシア、米国、欧州の代表団による発言の応酬から始まりました。日本代表団の席のすぐ目の前にはイスラエル代表団の席があり、異様としか形容できない雰囲気でした。議論でも、いわゆる先進国だけでなくアフリカや太平洋諸国の代表団もたいへん活発に発言します。もちろん電波天文台が存在しない国もたくさんあります。国だけでなく、電波を使うさまざまな業界団体や企業も声を上げます。そんな中で、世界中の合意を取り

付けながら電波天文観測が続けられる環境をどうすれば守れるのか。どうやって妥協を引き出しこちらはどこまで妥協するか、言い換えれば互いにどこまでのunhappyを受け入れるのか。“Let’s all be equally unhappy”を乗り越えた先の世界で、電波天文学はどうあるべきかを考える日々が続きます。

参考文献

- [1] 大石雅寿, 1998, 天文月報, 5, 229
- [2] 齋藤正雄他, 2015, 天文月報, 9, 599
- [3] <https://www.skao.int/en/news/498/potential-new-protections-for-radio-astronomy> (2024.11.11)
- [4] <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/announcements/2023/2?c=247870> (2024.11.11)

Safeguarding Radio Astronomy—A Report of World Radiocommunication Conference 2023

Masaaki HIRAMATSU

Spectrum Management Office, Public Relations Center, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: In order to perform radio astronomy observations in today’s world full of artificial radio signals, it is essential to protect the frequency bands for radio astronomy and coordinate with other radio users to prevent harmful interference. World Radiocommunication Conference 2023, the highest-level international conference to discuss the use of radio waves, was held in 2023 in Dubai. This article reports on this international conference, which also included important discussions on protecting future radio astronomy observations, and introduces the current status of radio astronomy.

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

IXPO: International X-ray Polarimetry Symposium

氏 名: 二之湯開登 (東京理科大学大学院 創域
理工学研究科 先端物理学専攻M2 (渡
航当時))

渡航先: アメリカ アラバマ州ハンツビル

期 間: 2024年9月15~19日

本渡航では、9月15日から19日にかけてアメリカ アラバマ州ハンツビルにて開催されたIXPO: International X-ray Polarimetry Symposiumに参加し、口頭発表を行った。本研究会は、IXPE (Imaging X-Ray Polarimetry Explorer) 衛星打ち上げ以降初めて行われたX線偏光観測を主軸とした国際研究会である。本研究会では、IXPEによる様々な観測実績に関する講演と、現在または将来の偏光観測プロジェクトに関する講演も行われた。さらに、IXPEのこれまでの観測実績を基に、Martin Weisskopf氏、Paolo Soffitta氏と並びIXPE teamにRossi Prizeが贈られ、その記念授賞式も合わせて行われた。日本からは玉川徹氏 (理研)、高橋弘充氏 (広島大) も参加されており、現地では大変お世話になった。

偏光観測の歴史は長く、天文衛星による初めての有意な偏光観測は、まさにWeisskopf氏らによる1976年OSO-8衛星での「かに星雲」の観測である。OSO-8衛星に搭載された偏光計はブラッグ反射を利用して偏光を検出する偏光計であるため、感度がブラック条件を満たす2.6 keVと5.2 keVに限定されていた。その後、高感度で連続帯域での偏光観測は技術的な困難を極め、数十年の時を経て、2010年代にPoGO+気球実験において硬X線帯域でかに星雲やCygnus X-1 (Cyg X-1) のような明るい天体の偏光を有意に観測した。そして、華々しく登場したのが、IXPE衛星 (2021-) である。IXPE衛星には偏光

X線が光電吸収されたときの光電子の放出方向の異方性を利用して偏光を検出する偏光計 (GPD; Gass Pixel Detector) が搭載されており、軟X線帯域で、位置 (撮像)、時間、エネルギー、偏光の4つの物理パラメータを測定することができる。このGPDに取り付けられているガス電子増幅フォイルは理研/玉川研究室で開発されたものである。詳細は天文月報2024年4月号IXPE特集 (1) を参照されたい。打ち上げから現在までの約2年間で、IXPEは様々な天体において有意な偏光観測を実現し、その成果に対してRossi Prizeが贈られる運びとなった。

今回開催された研究会では、超新星残骸、活動銀河核、中性子星、恒星質量ブラックホール (BH) のIXPEの偏光観測結果に関する講演が行われ、偏光特性からわかること・X線偏光のメカニズムについて様々な議論がなされた。加えて、気球偏光実験XL-Calibur (高橋氏の口頭発表) やXPoSatなど現在またはこれからの偏光観測ミッションに関する講演も行われた。天文学会などの国内の学会でもX線偏光観測に関する講演は行われているが、その数は少ない。そのため、本研究会で世界の研究者らによる偏光に関する研究は新鮮に感じられ、とても興味深かった。また、世界の中での自身の研究の立ち位置を理解することもよい機会になった。IXPE teamの方々も多く参加し、IXPEによるここ2年の新しい観測結果が多く講演されたこともあり大変大きな盛り上がりを見せた4日間であった。本研究会において私が行った発表は、IXPEによる恒星質量BH Cyg X-1における観測結果に関するものであり、PASJに投稿されているNinoyu et al. (2024) に基づいている。

BH連星では、伴星からの質量降着により、

BH周辺に降着流が形成される．これまでの観測により，BH周囲には数百万度の降着円盤と数億度の高温電子雲コロナが形成されていることがわかってきたが，降着円盤やコロナの幾何構造は議論的となっていた．降着円盤に対するコロナの幾何学的位置によって偏光度・偏光角が異なることが知られており，IXPEで観測したCyg X-1の偏光は，コロナが円盤面に平行な方向に分布していることを示唆していた[1]．また，Cyg X-1のスペクトル状態遷移に伴った偏光度の遷移も観測され，偏光からは状態遷移がBH周辺のガスの大きさや散乱回数の変化によるものだと考えられている[2]．このように，X線偏光はBH周囲の環境を知るための強いツールとして重要な役割を果たす．本研究では，状態遷移のタイムスケールよりもさらに短い，Cyg X-1で観測される数秒スケールの強度変動に注目して解析を行った．光度曲線から複数の強度変動を抽出し足し合わせることで，統計を上げて強度変動における偏光特性の解析を実現した．その結果，1sスケールのX線強度変動に相関して偏光が変動しており，これはBH近傍の降着円盤内縁がBHに落ち込んでいく現象を見ていると考えている．

聴講いただいた研究者の方に研究手法や解釈について興味を持っていただくことができた．Cyg X-1をはじめとするBH連星の時間変動解析に詳しいMichael Nowak氏には自身の研究手法の根幹に直結する質問をいただいた．Coffee Breakなどの時間では，IXPEのCyg X-1の観測データを解析しておられるNicole Rodriguez Cavero氏(Washington Univ.) とCyg X-1や



Rossi Prize授賞式の様子

SwiftJ1727.8-1613の解析に関して情報を共有し，議論できたことがとても大きな収穫であったと感じている．

本研究会は，私にとって初めての国際会議での口頭発表であった．発表では自身の研究を正しくかつ印象に残るように発表することを心掛けた．英語での口頭発表や海外の研究者との交流の難しさと自身の実力不足を痛感したと同時に，英語スキルを伸ばして海外の研究者とより活発に議論していきたいという想いが強まった．本研究会に参加させていただき，よい刺激を受け新たな視点を得ることができた．最後に，このような貴重な経験をさせていただき，ご支援をいただいた早川幸男基金ならびにその関係者の皆様に心からの感謝の意を表する．

参考文献

- [1] Krawczynski, H., et al., 2022, *Science*, 378, 650
- [2] Jana, A., & Chang, H., 2024, *MNRAS*, 527, 10837

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Astrophysics and Space Science in Marche I

氏 名: Zhaoxuan Liu (東京大学 カブリ数物連
携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) M2 (渡
航当時))

渡航先: イタリア シローロ

期 間: 2024年9月1~7日

From Sep 2nd to Sep 6th, I attended the conference “Astrophysics and Space Science in Marche I: AGN feedback and star formation across cosmic scales and time”, held in Sirolo, a charming seaside small town on the west coast of the Adriatic Sea in Italy. The conference centered on recent advances in simulation and observation of AGN feedback and star formation across cosmic scales and time. These studies have been enhanced by new data from ALMA, JWST as well as XRISM, recently launched by JAXA.

On the first day, I presented a contributed talk entitled “JWST and ALMA discern the assembly of structural and obscured components in high-redshift starburst galaxies” during the “Star Formation Across Cosmic Time” section. My talk focused on the spatially resolved observation with JWST and ALMA on two starburst galaxies at cosmic noon. For both galaxies, we utilized high-resolution ALMA observations (CO 5–4 and its underlying dust continuum, ~ 0.1 and 0.3 arcsec) along with data from JWST (from COSMOS-Web and PRIMER), allowing us to construct spatially resolved star formation rate (SFR), gas mass and stellar mass maps. The first part of my talk focused on PACS-819, a starburst that lies 11 times above the Main Sequence (MS). Spatially resolved modeling using ALMA and

JWST/NIRCam+HST data revealed disk-dominated kinematics and a spiral-like morphology, indicating that starburst triggering at cosmic noon is not necessarily due to major mergers. This research is detailed in Liu et al. 2024, ApJ 968, 15. In the second part, I discussed PACS-830, a spiral-like starburst galaxy where a PAH deficit was identified in its starbursting core. In this study, CO 5–4 is used as a tracer for the total infrared luminosity (LIR), and MIRI/F1800W serves as a tracer for luminosity at rest-frame $8\ \mu\text{m}$ (L8, containing PAH $7.7\ \mu\text{m}$ emission). IR8 is inferred from the division of two maps after homogenizing the grid and spatial resolution using a convolutional kernel. The observed bump in IR8 at the starburst center can be interpreted as a PAH deficit, likely resulting from the destruction of PAHs by intense star-forming activity in the starburst core. Such a PAH deficit might be a new tracer for central starbursts occurring in the dusty centers of SFGs in the distant Universe. My work showcased excellent examples of joint studies using JWST and ALMA on starbursts at cosmic noon. Combining these observations provides a more comprehensive view of SFGs concerning their ISM and obscured stellar populations in the distant Universe.

Following my talk, I received an inspiring question about whether similar high-resolution studies could be applied to AGN host galaxies at cosmic noon, focusing on internal physics, mass distribution, and PAH content. I explained that such studies are indeed challenging due to redshift constraints—especially the need for the PAH

7.7 μm emission to remain within the MIRI wide-band filter in the absence of MIRI spectroscopy. Additionally, for AGN host galaxies, detailed PSF handling and subtraction of AGN contributions are necessary before estimating the mass distribution using pixel-based SED fitting.

The conference provided valuable insights into AGN outflows and galaxy quenching, notably from the Blue Jay collaboration, which utilized JWST/NIRSpec spectroscopy to observe cosmic noon AGNs. Their findings highlighted the importance of AGN-driven outflows in quenching massive galaxies at this epoch. Additionally, on the last day, Dr. Satoshi Yamada from RIKEN presented the remarkable sensitivity of XRISM spectra in detecting X-ray winds, showcasing the instrument's capabilities. As a student from a Japanese institute, I was delighted to see the astonishing outcome of XRISM.

I am sincerely grateful to the Hayakawa Foundation and the ASJ for their generous support of my trip.

〈日本語要訳〉

本レポートでは、2023年9月2日から6日にかけてイタリア・シローロで開催された国際会議「Astrophysics and Space Science in Marche I」に出席し、AGN フィードバックと星形成が宇宙的

スケールおよび時間にわたってどのように進むかを議論した成果を報告する。筆者は“JWST and ALMA discern the assembly of structural and obscured components in high-redshift starburst galaxies” という題目で、星形成最盛期に存在する2つのスターバースト銀河の空間分解観測を報告した。具体的には、ALMA (CO 5-4 およびダスト連続放射) と JWST/NIRCam, ハッブル宇宙望遠鏡を組み合わせることでターゲット銀河の星形成率、ガス質量、星質量の空間分布を調査し、スターバーストを駆動する要因や中心部における Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) 欠乏の可能性を指摘した。また、このような高解像度観測を AGN 母銀河へ応用する際の技術的課題 (PSF 処理, AGN 成分の分離など) にも言及した。会議中には AGN 駆動アウトフローが銀河の星形成抑制過程に果たす役割, JWST/NIRSpec による星形成最盛期の AGN の研究, そして打ち上げられたばかりの XRISM 衛星が示す高感度の X 線アウトフロー検出能力といった関連トピックが議論され、AGN—銀河共進化を探るための新たな観測の重要性が改めて認識された。今後の共同観測・解析の展開によって、遠方銀河における星形成と AGN フィードバックのメカニズム解明がさらに進むことが期待される。なお、今回の研究発表は日本天文学会早川幸男基金の支援により実現したものである。(訳: 尾上匡房)



暗い夜空のパラドックスから宇宙を見る

谷口義明（著）

岩波書店 B6判 118頁 定価1,400円+税

読み物
お薦め度
4
☆☆☆☆★

「なぜ夜空が暗いのか」について考えたことがあるだろうか。昔の人は夜空に目を向け、このように考えた。「宇宙は無限に広い」、「宇宙には無限個の星が存在する」、「宇宙の星は一様に分布している」と仮定した場合、空は無数の星で埋め尽くされることになるので夜空は明るくなるのではないか。これがオルバースのパラドックスである。この問題は実は「なぜ我々が宇宙に存在できているか」という疑問にも密接に関わってくる。そんな興味深い話が僅か100ページの本に収められているのだ。

私は本を読むのが好きで書店や図書館によく足を運ぶのだが、本書はいつものように図書館で読みたい本を探していたときに出会った。宇宙物理のなかでも私の専門は星形成で、位置天文観測衛星であるGaiaのデータを用いて近傍の星々を解析する研究を行っている。宇宙物理学の研究室に属しているとはいえ、専門外の知識を得ようと思うと、専門書より新書などに手が伸びがちというのが私自身の傾向であり、本書も興味本位で手に取った次第である。

私はオルバースのパラドックスについてなんとなく知っていたにもかかわらず、恥ずかしながらその答えは一切知らなかった。もし私と同じような境遇の方がいればぜひご一読願いたい。数学と物理学の素養が最低限備わっていれば理解できる難易度で解説されているので、特に大学生や大学院生に勧めたい1冊である。

オルバースのパラドックスと宇宙論との関係

は、歴史的に見て切っても切り離せない関係である。古代から宇宙論に関する議論はなされていたが、それはあくまで哲学の範疇であった。“オルバースのパラドックス”が唱えられたのは1826年だが、類似した議論は16世紀から行われていたようである。冒頭の1つ目と2つ目の仮定は当時、宇宙膨張や宇宙年齢などの概念がないことを考慮すれば当然思い至る発想である。この長年の疑問は人類の宇宙に対する考え方がそのまま反映されたものであるということもできるだろう。

このパラドックスを解き明かすにあたって、本書では宇宙物理学の様々な分野の話が登場する。星間物理、星、銀河、宇宙論など多岐にわたっているが、それは一般的に知られている説や陥りがちな誤りなどを1つ1つ改めて丁寧に解説しているからに他ならない。本書の特徴を挙げるとすれば、図や表、数式の多さであろう。図や表が多いので宇宙に対する知識があまりなくてもイメージしやすく伝わりやすい。数式が多いと言われると構えてしまう学生が多そうだが、本書ではパラドックスに関わる要素を定量的に評価しているため、なぜ誤りに陥りがちなかがわかりやすい。

オルバースのパラドックスはどの昔に解決しているではないか。そう思われるかもしれないが、よく考えるとこの問題は想像以上に複雑なのである。しかし、その答えは意外にもシンプルだ。その答えと理由が知りたくなったら本書をぜひ手に取ってほしい。

富井耀（新潟大学）



月報だよりの原稿は毎月20日締切、翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。校正をお願いしておりますので、締切日よりなるべく早めにお申込みください。

e-mailで toukou@geppou.asj.or.jp宛にお送りください。折り返し、受領の連絡をいたします。

人事公募

国立天文台天文情報センター 石垣島天文台 講師

国立天文台では、石垣市、石垣市教育委員会、沖縄県立石垣青少年の家、特定非営利活動法人八重山星の会、琉球大学と国立天文台が協力して運営する石垣島天文台を率いる施設の責任者として勤務する講師を公募します。石垣島天文台は九州・沖縄で最大となる口径105 cm むりかぶし望遠鏡を備え、太陽系天体や突発天体の観測研究及び市民に対する天文学の広報普及を行っています。光赤外線天文学大学間連携(OIS-TER)の一員として共同観測を実施するとともに、口径20 mの電波望遠鏡を備えるVERA石垣島観測局と連携した教育活動にも取り組んでいます。石垣島天文台の公開・教育・研究を強力に推進する強い意志を持った方の積極的な応募を期待します。

1. 募集人員：講師1名
2. (1) 所属：国立天文台天文情報センター石垣島天文台
(2) 勤務地：沖縄県石垣市
(勤務地の変更の範囲) 法人の指定する場所
3. 専門分野：観測天文学
4. 職務内容：

国立天文台は、2006年に石垣島天文台を設置し、以来、石垣市、石垣市教育委員会、特定非営利活動法人八重山星の会、沖縄県立石垣青少年の家、琉球大学の6者で構成する協議会によって運営してきました。望遠鏡施設見学・併設施設の宇宙シアター(石垣市星空学びの部屋)・むりかぶし望遠鏡による観測研究および観望会などの公開業務、地元の大学や高等学校等と連携した教育業務、そして国内外の研究者・研究機関とも協力して進める研究業務を実施しています。

本公募では、このような石垣島天文台の特色を理解し、活動の継続性を確保するとともに、石垣島天文台の管理・運営の責任者となって、あらゆる活動

を主導していく能力と意欲のある講師を求めます。(職務内容の変更の範囲) 研究教育業務全般

5. (1) 着任時期：採用決定後なるべく早い時期
(2) 任期：なし(定年は65歳年度末)
(3) 試用期間6ヶ月
6. 応募資格：理学または工学の分野で博士の学位を有するか、またはそれと同等以上の方
応募者に求める必須能力：
 - (1) 観測天文学、特に光赤外線天文学の十分な経験や知識
 - (2) 光赤外線天文学に関する施設の管理・運営に関する能力
 - (3) 石垣島天文台の運営を円滑に実施するためのコミュニケーション能力
 - (4) 地域との連携・協働が必須のため、日本語が堪能であること

必須ではないがあれば望ましい資質：天文台や天文学の広報・教育における経験

7. 提出書類：以下の書類を日本語もしくは英語で作成の上、PDFファイルとし、9. に示す方法によりアップロードしてください。
 - (1) カバーレター
 - (2) 履歴書
 - (3) これまでの活動歴および6. で記述した必須能力や望ましい資質を持っていることを具体的に示す資料。活動歴は、研究歴および本公募に関連するものに限定してください。個人としての研究業績、活動歴の他、多人数で行った場合は果たした役割を具体的に記述してください。
 - (4) 論文リスト：査読論文とそれを区別し、共著の場合は役割分担を記すこと。論文に加え、これまでに携わった業務一覧(それぞれの業務に簡単な説明を付けてください)を追加しても構いません。
 - (5) 職務に対する抱負と計画(A4で2枚以内)
 - (6) 意見を求められる人の氏名と連絡先(2名)
 - (7) できるだけ迅速に連絡がとれる連絡先(E-mailアドレス、電話番号)
 - (8) 推薦書1通以上。ただし推薦書は応募者からの書類に含めず、推薦者から直接、下記9に

て指定されたURLに応募締切までにアップロードするよう依頼してください。

8. 応募締切: 2025年4月15日(火) 正午(日本時間) 必着

9. 応募方法:

(1) 下記のURL先の応募フォームにて回答の上、応募書類をファイルアップロードサービス(NAOJ Nextcloud)を通じて提出してください。
<https://forms.office.com/r/QnqrSiWXL1>

(2) 応募フォーム回答後、(a) 応募書類アップロード用URL、(b) 推薦書アップロード用URLが記載されたメールが送られます。

(3) (a) 応募書類アップロード用URLに上記7. (1)~(7) のファイルをアップロードしてください。また、(b) 推薦書用URLを使って推薦書をアップロードしていただくよう、推薦者に依頼してください。

(4) 提出書類については、全てをPDFに変換してください。PDF作成にあたっては解像度に注意し、あまり容量が大きくなり過ぎないようにご注意ください(1ファイル最大50MB、トータル100MB、最大10ファイルまで)。

10. 問い合わせ先:

(1) 応募に関する問い合わせ: 国立天文台総務課 人事係

E-mail: job03-seniorlecturer_AT_ nao.ac.jp
(_AT_を@で置き換えてください、以降同様)
タイトル: 「天文情報センター講師公募に関する問い合わせ」

(2) 職務に関する問い合わせ:

国立天文台天文情報センター
センター長渡部潤一
E-mail: jun.watanabe_AT_ nao.ac.jp
メールのSubject欄に "Inquiry on New Position for Ishigakijima Astronomical Observatory" と明記してください。

11. 待遇:

(1) 就業時間

専門業務型裁量労働制(8時30分~17時15分(休憩60分)を基本とし、1日7時間45分勤務したもののみなす)

(2) 休日・休暇

土、日、祝日、年末年始(12月29日~1月3日) 年次有給休暇、リフレッシュ休暇、忌引休暇等

(3) 加入保険

文部科学省共済組合(健康保険)、厚生年金保険、雇用保険、労災保険

(4) 賃金等

給与: 当機構の規定に基づき学歴・職務経験等を考慮して決定(年俸制、年額の12分の1を月額支給)。

賞与: なし(相当額を年俸に含む)

諸手当: 扶養手当、住居手当、通勤手当は当機構の支給要件を満たす場合に支給。その他、当機構の定めるところによる。

昇給: 年1回(業績評価に基づく)

退職手当: 支給対象

12. その他:

(1) 面接を行う場合があります。面接は対面またはオンラインで行います。なお、面接に要する費用(交通費、通信費等)は応募者の自己負担となります。

(2) 採用者には、自然科学研究機構職員就業規則が適用されます。給与については、研究教育職本給年俸表(二)が適用されます。

(3) 館内及び敷地内禁煙

(4) 自然科学研究機構は男女共同参画推進に取り組んでいます。

・業績の評価において同等と認められた場合には、女性を積極的に採用します。

・産前産後休暇、育児休業および介護休業を取得していた期間がある場合には、その旨を履歴書に記載していただければ、業績を評価する際に考慮します。

・その他、国立天文台での男女共同参画社会の実現を目指した取り組みについては、下記リンクをご覧ください。

<https://www2.nao.ac.jp/~open-info/gender-equality/index.html>

(5) 応募に際していただいた情報は、本選考および事務連絡以外のいかなる目的にも使用いたしません。選考後、採用に至った方以外の応募書類は責任を持って破棄します。

13. 募集者名称: 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台

研究助成

公益財団法人天文学振興財団 2025年度研究助成等応募

当財団は、天文学の振興に寄与することを目的として、天文学に関連する分野の研究、教育および普及活

動への必要な経費を助成いたします。

2025年3月1日

公益財団法人天文学振興財団 理事長 観山正見

1. 応募種目

[1] 国際研究支援事業

(1) 研究に対する助成

- ・対象：天文学に関する研究に従事する若手研究者（申請者は原則35歳以下とする）
- ・助成：研究経費（設備備品費、消耗品費、その他）1件あたり100万円以下

(2) 国際交流に対する助成

- ・対象：天文学に関する海外での国際交流活動（1ヵ月以内）に2025年6月以降参加する研究者
- ・助成：参加に要する往復航空運賃および滞在費

(3) 国際研究集会開催および参加に対する助成

①国際研究集会開催に対する助成

- ・対象：2025年7月以降に国内外において天文学に関する国際研究集会を開催する研究者グループ
- ・助成：1件あたり100万円以内。

②国際研究集会参加に対する助成

- ・対象：2025年6月以降に海外で開催される天文学に関する国際研究集会に参加、発表する研究者
- ・助成：派遣に要する往復航空運賃および滞在費

[2] 普及・啓発支援事業

(1) 普及・啓発活動に対する助成

- ・対象：天文学および関連分野の普及・啓発事業を行う個人、団体
- ・助成：事業経費（設備備品費、消耗品費、その他）1件あたり100万円以内。

(2) 「スター・ウィーク協力イベント」に対する助成

- ・対象：「スター・ウィーク2025」に協力する団体
- ・助成：開催経費等

2. 申込期限：

- ・[1]-(1)・(2)・(3)-②, [2]-(1) は、2025年5月末日、9月末日、2026年1月末日の計3回
- ・[1]-(3)-①は、第1回が2025年5月末日

（対象期間が2025）年7月以降の開催）

第2回が2025年9月末日（対象期間が2025年11月以降の開催）

第3回が2026年1月末日（対象期間が2026年3月以降～2026年6月末日迄の開催）

・[2]-(2) は、2025年5月末日

3. 選考結果：選考委員会で審査の上、採択の可否について各申込期限の約1ヵ月後に文書で通知します。
4. 報告：[1]-(1) は年度末、それ以外の助成は帰国後または開催後1ヵ月以内に報告書を提出すること。
5. 申請方法：天文学振興財団ホームページ上にWordファイルとPDFファイルを掲載します。申請書類は、一つのPDFファイルにまとめて電子メールに添付し、締切期限までに以下のメールアドレス宛にお送りください。

shinsei@fpastron.jp

天文学振興財団より受理確認メールを返信いたします。

6. 問合せ先：公益財団法人天文学振興財団 事務局
〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

国立天文台内

Te1: 0422-34-8801

Fax: 0422-34-4053

<http://www.fpastron.jp/>

賞の推薦

公益財団法人天文学振興財団 2025年度天文学業績表彰応募

当財団は、社会における天文学の振興に寄与するため、天文学に関連する分野での顕著な業績に対して表彰をいたします。

2025年3月1日

公益財団法人天文学振興財団 理事長 観山正見

1. 応募種目

[1] 古在由秀賞

(1) 選考基準（以下のいずれかに該当する者）

- ・広い意味で理論天文研究において顕著な業績をあげた研究者
- ・天文学の広報普及に貢献した者（アマチュアも含む）
- ・広い意味で重力波天文学の貢献に顕著な業績をあげた研究者
- ・国際的に天文学の推進（特にアジアの天文学）に貢献した者

- ・天文学の推進に関して管理運営等において優れた業績をあげた者

(2) 対 象

- ・当該年度当初において45歳以下であること（個人または研究グループの代表者）。

また、応募は推薦に依るものといたしますが、他薦・自薦の別は問いません。

[2] 吉田庄一郎記念・ニコン天文学業績賞

(1) 選考基準（以下のいずれかに該当する者）

- ・新たな天体観測手法の研究・開発で顕著な業績をあげた者
- ・天体観測技術の研究または開発分野で顕著な業績をあげた者
- ・新たな天体観測手法・装置の研究・開発を通じて産業界の発展に顕著な寄与をなした者

(2) 対 象

- ・当該年度当初において50歳以下であること（個人またはグループの代表者）。

また、応募は推薦に依るものといたしますが、他薦・自薦の別は問いません。

2. 表彰件数：両賞とも原則として1件/年

3. 応募期限：両賞とも2025年10月末日

4. 選考結果：両賞とも選考委員会で審査の上、結果ついて2026年1月下旬に文書で通知します。

5. 申請方法：天文学振興財団ホームページ上にWordファイルとPDFファイルを掲載します。

応募書類は、できるだけ一つのPDFファイルにまとめて電子メールに添付し、応募期限までに以下のメールアドレス宛にお送りください。

shinsei@fpastron.jp

天文学振興財団より受理確認メールを返信いたします。

6. 問合せ先：公益財団法人天文学振興財団 事務局
〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1

国立天文台内

Tel: 0422-34-8801

Fax: 0422-34-4053

http://www.fpastron.jp/

会 務 案 内

公益社団法人日本天文学会

2025年度(2025年4月1日～2026年3月31日)

事業計画書と予算書

2025年1月14日に開催された代議員総会において2025年度の事業計画書と予算書が承認されました。事業計画書と予算書は電子版を天文学会ホームページ(<http://www.asj.or.jp>)で公開しています。ホームページ上部の「日本天文学会について」の情報公開をご覧ください。

日本天文学会2025年度事業計画書の概要

事業計画はおおむね例年どおりです。欧文研究報告・天文月報・年会予稿集・ジュニアセッション予稿集の刊行、年会の開催、各種委員会活動、全国同時七夕講演会、各賞の授与、助成金、後援事業に関する事業を行う予定です。さらに2020年度から引き続き「シリーズ現代の天文学」英語版および日本語改訂版の刊行を予定しています。また、2025年度中に2026～2029年度の代議員を選出する代議員選挙を行います。

日本天文学会2025年度予算書の概要

公益社団法人として、公益目的事業の適切な実施とともに、保有上限額がある遊休財産額の適正化を考慮して予算書を作成しました。全体としては事業収益111,225千円・事業費用122,606千円と、費用が収益を上回る予定です。予算上最も大きな事業である欧文報告事業では、投稿料半額キャンペーン実施による減収が見込まれるものの、論文アクセス制限解除（オープンアクセス）の需要増及び円安の影響で引き続き収益が費用を上回る見込みです。年会事業では、開催地費用高騰の影響で例年よりも多くの費用を計上しています。その他については、現会員数に基づく会費収益など、ほぼ例年どおりの経常収益です。経常費用については、事業/法人活動を維持するための定常的費用に加えて、引き続き年会のハイブリッド開催に必要な費用を計上しています。

（文責 庶務理事：勝川行雄，会計理事：鈴木竜二）

事務所からのお知らせ

【移籍・退会について】

2024年度末をもって移籍・退会希望の方で、まだ学会事務所に連絡していない方は、大至急当学会ホームページ「各種手続き」から申請してください。

※退会の届け出がない限り、会員資格は年度始めに自動更新されます。会費の納入を停止しても退会とはなりません。

【会費納入について】

◆正・準会員の皆様◆

2025年度（2025年4月～2026年3月）会費の納入

期限は、2025年4月30日です。

正会員：16,000円

正会員（学生）：8,000円

※学生である旨連絡の上、期限内に納入の場合にのみ学生割引適用

準会員：8,000円

年会予稿集紙版代：4,000円（予約している方）

- ・会費の口座自動引き落とし登録の方は、2025年4月10日に引き落としますので口座残高不足にご注意ください。

通帳には引き落とし代行会社の「JCB」という文字が印字されます。

- ・口座自動引き落とし登録のない方には、3月下旬にメールで支払方法のご案内をお送りします。

メールの利用がない方は、今月号の発送台紙に記載のご案内をご覧ください。

- ・海外在住の方は、会費金額をご確認のうえ、クレジットカードまたは銀行振込等でご納入ください。詳しくは学会ホームページ「各種手続き」の「会費の納入」をご覧ください。

※金融機関の利用明細をもって本学会の領収書とさせていただきます。控えや明細書は大切に保管してください。

◆団体・賛助会員の皆様◆

4月に請求書をお送りしますので、それ以降にご納入ください。

賛助：30,000円（1口） 団体：10,000円

入会・移籍・退会のお知らせ

2024年12月24日に開催された公益社団法人日本天文学会理事会において、正式に入会・移籍が承認された方、退会が報告された方の人数をお知らせします。

入会 正会員：87名 準会員：13名

賛助会員：1団体

移籍 準会員→正会員：2名

退会 正会員：5名 準会員：4名

年会開催地立候補の募集

日本天文学会では年会開催地の決定にあたり立候補を募集いたします。詳しい内容は学会ホームページに掲載しますので、そちらをご覧ください。なお、開催地は立候補状況を見ながら理事会にて決定する予定です。皆様、奮ってご応募お願いします。

2024年度日本天文学会各賞について

2024年度日本天文学会各賞は、2025年1月14日の代議員総会において次のように決定しましたのでご報告いたします。

◇林忠四郎賞（1氏）

井岡邦仁（いおかくにひと）氏・京都大学教授
研究の表題「高エネルギー突発天体の理論的研究」

◇欧文研究報告論文賞（2編）

- ・論文題目：Precision radial velocity measurements by the forward-modeling technique in the near-infrared
著者：Teruyuki Hirano, Masayuki Kuzuhara, Takayuki Kotani, Masashi Omiya, Tomoyuki Kudo, Hiroki Harakawa, Sébastien Vievard, Takashi Kurokawa, Jun Nishikawa, Motohide Tamura, Klaus Hodapp, Masato Ishizuka, Shane Jacobson, Mihoko Konishi, Takuma Serizawa, Akitoshi Ueda, Eric Gaidos, and Bun'ei Sato

出版年等：Vol. 72 (2020), No. 6, article id. 93

- ・論文題目：The origins and impact of outflow from super-Eddington flow
著者：Takaaki Kitaki, Shin Mineshige, Ken Ohsuga, and Tomohisa Kawashima
出版年等：Vol. 73 (2021), No. 2, pp. 450–466

◇研究奨励賞（3氏）

- ・Nugroho, Stevanus（ぬぐろほ、すてふあぬす）氏・アストロバイオロジーセンター特任研究員

研究の表題「すばる望遠鏡の高分散分光によるウルトラ・ホットジュピター大気中の新分子検出と温度逆転層の発見」

- ・ 札本佳伸（ふだもとよしのぶ）氏・千葉大学先進科学センター特任助教
研究の表題「遠方銀河の多様な物理的性質の観測的解明」
- ・ 藤林 翔（ふじばやししょう）氏・東北大学学際科学フロンティア研究所助教
研究の表題「連星中性子星合体における質量放出・重元素合成の理論的研究」

◇天体発見賞（5氏，12件）

- ・ 板垣公一（いたがきこういち）氏 8件
超新星2024gyの発見，超新星2024wsの発見，超新星2024exwの発見，新星V1725 Scoの発見，
超新星2024vfoの発見，超新星2024vsuの発見，超新星2024abflの発見，超新星2024adufの発見
- ・ 大越英比古（おおこしひでひこ）氏 1件
超新星2024ahvの発見
- ・ 中村祐二（なかむらゆうじ）氏 1件
新星V6620 Sgrの発見
- ・ 小嶋 正（こじまただし）氏 1件
新星V4370 Ophの発見
- ・ 大野眞一（おおのしんいち）氏 1件
超新星2024aeceの発見

◇天体発見功労賞（5氏，5件）

- ・ 櫻井幸夫（さくらいゆきお）氏 1件
新星V1723 Scoの独立発見
- ・ 板垣公一（いたがきこういち）氏 1件
新星V4370 Ophの独立発見
- ・ 山本 稔（やまもとみのる）氏 1件
新星V4370 Ophの独立発見
- ・ 藤川繁久（ふじかわしげひさ）氏 1件
新星V4370 Ophの独立発見
- ・ 中村祐二（なかむらゆうじ）氏 1件
新星V4370 Ophの独立発見

◇天文功労賞

長期的な業績（1氏，1件）

- ・ 望月悦育（もちづきえついく）氏
「60年以上の長期間にわたる均質性の高い太陽黒点の継続観測」

短期的な業績

受賞者なし

◇天文教育普及賞（2氏・1団体，3件）

- ・ 加藤恒彦（かとうつねひこ）氏
「4次元デジタル宇宙ビューワー Mitakaの開発」
- ・ 一般社団法人星つむぎの村
「インクルーシブな社会を目指す天文教育普及活動」
- ・ 村松 修（むらまつおさむ）氏
「プラネタリウムによる天文教育普及への長年の貢献」

編集委員会より

天文月報オンラインでは、これまで一部の記事を発行後一年間はアクセス制限することにより、会員限定で公開していました。2025年4月号よりアクセス制限をやめ、それ以降は、すべての記事をパスワードなしで読めるようになります。今後一層、天文月報オンラインを日本の天文学の普及にお役立ていただければ幸いです。

訃報

会員の内海和彦氏は2024年11月14日に逝去されました。満87歳でした。御冥福をお祈り申し上げます。

天文月報オンラインのユーザ名とパスワード

ユーザ名: asj2025

パスワード: 雑誌コード (5桁の数字) と **vol118** (6文字) の計11文字を入力してください。「雑誌コード」とは印刷版の月報の裏表紙の右下に書かれている「雑誌○○○○○-▲」の○○○○○の部分です。○○○○○は各号共通の数字です。

編集委員: 津村耕司 (委員長), 岩崎一成, 小野寺仁人, 勝田哲, 川中宣太, 西澤淳, 仏坂健太, 岡本文典, 日下部展彦, 小山翔子, 志達めぐみ, 鈴木大介, 鳥海森, 信川久美子, 橋本拓也, 宮本祐介

令和7年2月20日 発行人 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

印刷発行 印刷所 〒162-0801 新宿区山吹町332-6 株式会社 国際文献社

定価733円 (本体667円) 発行所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 公益社団法人 日本天文学会

Tel: 0422-31-1359 (事務所) / 0422-31-5488 (月報) Fax: 0422-31-5487

振込口座: 郵便振替口座00160-1-13595 日本天文学会

三菱UFJ銀行 三鷹支店 (普) 4434400 公益社団法人 日本天文学会

日本天文学会のウェブサイト <https://www.asj.or.jp/> 月報編集 e-mail: toukou@geppou.asj.or.jp

会費には天文月報購読料が含まれます。

©公益社団法人日本天文学会 2025年 (本誌掲載記事は無断転載を禁じます)