# 宇宙総合学研究ユニット

## NEWS 2019年7月号





### 第6回宇宙学セミナー開催報告

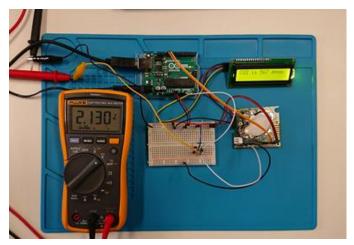
2019 年 6 月 13 日、第 6 回宇宙学セミナーが理学研究科 4 号館 504 会議室で開催されました。「宇宙建築とヒラキガミ」と題して、東海大学工学部建築学科十亀昭人準教授がご講演を行いました。十亀先生は宇宙での建築をより簡単に行うことなどを目的として、小さく折り畳まれた構造物を展開し、大きな構造物をつくる展開構造物について研究されています。これまでの宇宙建築に関する活動や三次元展開構造物のお話をしていただきました。その後、十亀先生の考案されたソガメ折りに実際に挑戦しました。苦労しながらも完成させる参加者もいました。参加学生、研究者から活発に質問が出され、講演後も議論が盛り上がりました。(伊藤梓記)

### 第2回 Arduino 講習会開催報告

第2回 Arduino 講習会が2019年6月5日に宇宙ユニット実験室(北部総合教育研究棟506号室)にて開催されました。Arduino は電子工作に入門しやすいアナログ・デジタル入出力ができるワンボードマイコンです。プログラミングを用いて電圧・電流を制御し、簡単にロボットや計測システムを作ることができます。総勢12名が参加し、それぞれの宇宙活動の目標に向けてマイコンの制御・開発の基礎を学びました。有人宇宙計画研究会では、①宇宙ロボットチーム、②木造キューブサットチーム、③宇宙樹木育成チームへの参加者を募っています。宇宙樹木育成チームは、減圧環境下における樹木の成長や物性変化を調べるために減圧チャンバ内の温度、湿度、気圧、二酸化炭素分圧の制御システムの開発を行っています。(三木健司記)



第2回 Arduino 講習会の様子



宇宙樹木育成チームが開発した二酸化炭素分圧測定装置

#### 今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	場所
7月11日 (木) 13:30~15:00	第7回 宇宙学セミナー タイトル:学際研究に挑む:宇宙観測の技術を雷科学にスピンオフした体験 講演者:榎戸輝揚 氏(白眉センター/宇宙物理学教室 特定准教授)	理学研究科 4 号館 5 階 504 会議室 一般対象

<sup>※</sup>宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/seminar.html) で公開いたします。

## 宇宙X線での天体観測から雷のオープンサイエンスへ 榎戸輝揚 特定准教授 (白眉センター/宇宙物理学教室)

#### 1. 京都大学の白眉プロジェクトとは?

京都大学に着任して5年、白眉プロジェクトの任期の最終年度を迎えています。白眉プロジェクトは若手教員に学内の業務や教育を5年間免除し、自由に研究に打ち込んでもらう制度で、毎年 10-20人ほどが国際公募により選ばれ、白眉研究者同士の横の繋がりや交流、受け入れ部局の教員や学生とも連携しながら、独立した研究を進められるという制度です。私はその6期生として採用されました。学術研究をめぐる様相が激変し、大学に余裕がなくなっている中で、自由な研究を保証され、知的好奇心の赴くまま研究に打ち込められる環境を与えられたことに深く感謝しています。白眉プロジェクトは、社会の荒波に侵食されつつある大学における最後の砦のように、「大学の中の大学」といった理念をもっており、それを支えてくださっている白眉プロジェクトのスタッフや同僚、私が実際に研究活動を行なった宇宙物理学教室のメンバー、そしてお世話になった京都大学の皆様に深くお礼を申し上げます。宇宙ユニットのセンター便りへの執筆を依頼された機会に、この5年間でどのような研究活動を行なってきたのかを報告し、記録に書き留めておきたいと思います。本項では、挑戦したテーマとこれからの夢を記します。





図 1. (左) X 線望遠鏡 NICER 打ち上げ時のケネディ宇宙センターでの見学の様子。遠方に発射台が見える。手前の芝生にはスペースシャトルの形が描かれている。(右) 国際宇宙ステーションに設置された NICER の様子 (NASA/GSFC)。

#### 2. 宇宙最強の磁石星「中性子星」に国際宇宙ステーションから挑む

私の専門は X 線天文学と呼ばれる分野で、ブラックホールや中性子星など極限的な天体からの宇宙 X 線を、大気圏外に打ち上げた人工衛星や国際宇宙ステーションに搭載した装置を使って、地球大気 に吸収されてしまう前に観測するというものだ。この X 線天文学での私の観測ターゲットは、超新星爆発 の後に残される高速で自転しているコンパクト天体「中性子星」だ。中性子星は半径 10 km くらいの 球中に太陽ほどの質量が押し込められ、星の内部が超高密度、周辺は強い重力場で空間も歪んでおり、強い輻射場や超強磁場など、地球上では実現できない極限的な物理環境が成立している基礎物理の実験室ともいえる。これまでに私たちの銀河系を中心に 2500 個以上が見つかっており、その多様性をどのように理解するかという研究が現在、活発に行われている(興味のある方は、宇宙科学研究所 ISAS ニュースに執筆した記事をご覧ください[1])。

京都大学に着任する前、私は米国ワシントン D.C.の近くにある NASA ゴダード宇宙飛行センターで 仕事をしており、Neutron star Interior Composition ExploreR (NICER; ナイサー)と呼ばれる、 最新鋭の X 線望遠鏡の開発に携わっていた。この NICER は、中性子星の表面から放射される X線を高精度に観測することで、星の周辺の重力的な歪み具合を測定し、内部の未解明の物理状態(専門的には、状態方程式を確定する)を観測的に調べることを目指している[2]。NICER は 図 1 のように 2017 年 6 月に米国フロリダ州のケネディ宇宙センターから打ち上げられ、国際宇宙ステーションに 搭載されて観測を開始した。私は検出器チームとして X線望遠鏡の開発に携わったのち、これまでの経験を活かして、中性子星の中でももっとも磁場の強い種族「マグネター」の科学成果を創出するサイエンスグループのリーダーとして研究を牽引してきた。米国、ヨーロッパ、日本を結んだネット会議を毎週1回開催し(日本時間の早朝や深夜になるので、なかなかつらい)、次にどの天体を観測するかとか、どういった解析を進めているのかの議論を活発に行っている。すでに、2018 年末に明るくなったマグネターの初期観測を世界に先駆けて報告したり[3]、将来の重力波観測での参考になるパルサーの暦を決定したり[4]、X-ray Dim Isolated Neutron Star (XDINS)と呼ばれる天体のひとつを観測した成果[5]が、このチームから出版されている。チームとしての成果をどう最大化するかは、大変ではあったものの勉強になっている。

さて、マグネターは自分の専門であり、チーム戦で進めているものの、何か新しい事にもチャレンジしてみたい。ちょうど京都大学で研究を進めている間に、天文学では革新的な発見が相次いだ。たとえば、「電波で観測される宇宙論的な距離からの謎の電波バースト Fast Radio Burst (FRB)」「太陽系のお隣さんであるプロキシマケンタウリに見つかった系外惑星」、そして「ブラックホールや中性子星の合体による重力波イベント」という三つが自分にはインパクトが大きかった。日本のお家芸と呼ばれていた X 線天文学は、この三つのテーマとは、波長の違いや、これらの現象の X 線での観測可能性を真剣に考えると、必ずしも繋がりが近い分野とは言えないし、普通なら手を出さない。しかし、せっかくの白眉の自由な時間を利用し NICER を使って、これらの一見すると関係しにくいテーマに挑戦できないかと考えた。たとえば、FRB については、それによく類似した銀河系内パルサーでおきる Giant Radio Pulse という現象を、X 線でかつてない精度で調べること、プロキシマは中心の恒星が惑星に与える影響を理解するために、可視光望遠鏡と連携して長期の X 線モニタリングを行うこと、などだ。重力波の話題は、最後に述べよう。いずれも NICER の大集光能力と柔軟な観測運用が理想的で、私たちの観測提案は無事採択され、

観測も蓄積されて結果が出始めている。詳しい説明は別の機会での報告にゆずるが、X線でハビタブルな可能性のある惑星系を観測するなどは、遥か未来の人類が太陽系外への進出していく時代を思って夢が膨らむ。これらの研究テーマは、京都大学に着任してから本格的に始めたテーマであり、これからも大切に育てていきたい。

#### 3. 新発見の高エネルギー大気物理現象に日本の冬季雷から挑む

さて、宇宙観測のスピンオフの話がある。現代の宇宙観測は大規模プロジェクトとなっており、研究の設計段階から若手が主導できる機会は限られている。せっかくの自由な環境で研究の全体像から設計してみたいということで、宇宙放射線の観測技術を身近な、しかし未だに多くの謎の残る分野に応用することにした。「雷雲と雷の高エネルギー大気物理学」という分野である。実は、この学問名そのものが、近年になって私たちで呼び始めたものだ。この学際的なテーマをうまく呼ぶ言葉がなかったのだ。雷雲や雷は身近な自然現象であるにも関わらず、最近になって、これらの自然現象から放射線、とくに MeV に達するガンマ線が出ていることが明らかになってきた。どうやら、雷雲や雷での強い電場で電子が加速され、大気にぶつかってガンマ線が出ているらしい。電場での粒子加速は、宇宙物理学の視点でみても面白いが、この研究は雷がどう起きるかといった身近な問題にも深く関係してくる。面白い学際的なテーマだ(詳しい最近の解説では、日本物理学会誌に執筆した記事を参照されたい[6])。

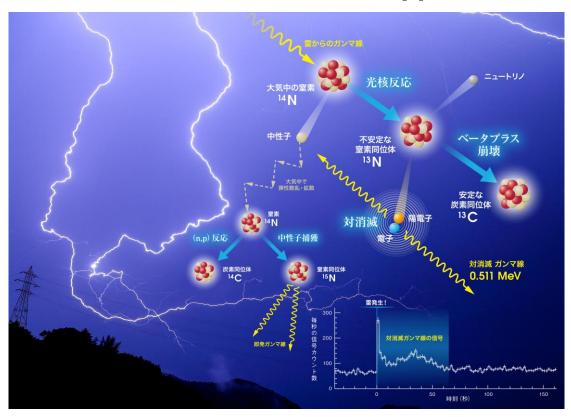


図 2. 雷からのガンマ線により発生する光核反応の模式図(京都大学でのプレスリリースの図より掲載)。

私たちは宇宙観測のノウハウを活用して、雷雲や雷からの放射線を高精度に測定している。特に、日本海沿岸の冬季雷雲は、高度も低いためにガンマ線が大気吸収を受けにくく、強力な雷放電もおきるなど、うってつけの観測対象になっている。これまで、新潟県の一箇所で観測を行ってきたのだが、ガンマ線は大気中であまり遠くまでは飛ばないため、小型で扱いやすい装置をたくさん設置して、雲の動きを地

上でマッピング観測するのがよいだろうと見込みをつけた。そこで、京都大学だけではなく、東京大学や理化学研究所、名古屋大学のメンバーとも連携して、これまでに比べて安価で扱いやすく、それでいて十分な観測性能をもったミカン箱サイズの測定器を作り上げ、日本海沿岸の複数の場所に設置、展開を進めてきた。その結果、検出器の上空を雷雲が通過していく際に、地上に数分間にわたってガンマ線が降り注ぐ現象(我々はロングバーストと呼んでいる)を次々に見つけることができるようになった(たとえば、最近の事例では[7])。これは雷雲の中に隠された強い電場の領域が、電子を加速する天然の粒子加速器として働き、加速された電子が大気にぶつかってガンマ線を放射し、地上をサーチライトのように照らしながら移動しているという、身近な雷雲の隠れた姿を明らかにしつつある。

この新しい多地点観測ネットワークは、思わぬ発見をもたらした[8]。 雷が原子核反応を起こすことを解 明したことだ。2017年2月、柏崎に設置していた検出器のごく近くで雷放電が起き、同時に強力な放 射線が地上に降り注いだ。これは、Terrestrial Gamma-ray Flash と呼ばれる、雷放電に伴ってミリ 秒のタイムスケールをもって雷雲から上空に放たれるガンマ線放射を、地上で検出したものと考えられる。 これだけでもなかなかに幸運なイベントなのだが、この直後に面白い現象をとらえることができた。まず、雷 放電の直後に 0.1 秒ほどで減衰していくガンマ線の残光を見つけたことだ。さらに、数十秒遅れて、 0.511 MeV のエネルギーをもつ電子と陽電子の対消滅線を検出した。これは、雷の後に、電子の反 粒子である陽電子が生まれていたことを示している。いったい、どうやってこのような現象が起きるのか?チ 一ム内で熱心な議論を続けた結果、これは図2のイラストに示すように、雷放電に伴って放射されるガン マ線が、大気中の窒素の原子核と光核反応を起こしたと考えると理解できると解明できた。この反応で は、窒素の原子核から中性子が叩き出され、この中性子は大気中でエネルギーを失ったあと、ふたたび 大気中の窒素に捕獲され、一部はガンマ線を放出する。これが、0.1 秒ほど続いたガンマ線残光と解釈 できた。また、光核反応で中性子を失った窒素の不安定同位体は、ベータプラス崩壊して陽電子を大 気中に撒き散らす。この過程は、半減期の 10 分間ほど続くため、雷放電から数十秒遅れた対消滅線 が検出されたわけだ。この発見は、雷の研究に原子核の知見も使えることを表しており、今後の展開がと ても楽しみだ。我々の論文は 2017 年に Nature 誌[8]に掲載され、2017 年の Physics World Top 10 Breakthoroughs のひとつにも選ばれた。

#### 4. これからの科学の可能性にオープンサイエンスから挑む

この「雷雲や雷の高エネルギー大気物理学」という新しい分野に挑む過程は、科学研究のあり方を考え直す契機にもなった。京都大学に赴任した当初、宇宙観測の予算はあったものの、雷の放射線測定に使える予算がなかった。科研費と学内の助成金にも申請してみたが、なかなか理解を得ることができず採択されなかった。そこで、白眉の同期にアドバイスをもらい、当時始まったばかりの学術系クラウドファンディングを通して市民サポーターから直接の寄付を募ることになった[9]。2ヶ月で100万円を目標にチャレンジして、最終的に160万円の支援をいただいて、研究をスタートすることができた。市民による学術プロジェクトへのサポートの新たな可能性に気づくことができた。

この体験は、市民と連携して科学を進める可能性、広い意味でのオープンサイエンスの潮流へのきっかけになった。すでに米国では Zooniverse というウェブサイト[10]が立ち上がり、市民科学者がさまざま

な科学プロジェクトにクラウドソーシングの形で参加している。たとえば、銀河の写真を分類したり、火星の表面の模様を分類したり、歴史記録を調べたりしている。インターネット技術の発達を活用したオープンサイエンスは、日本でも可能なはずだ。そこで、京都大学の同僚とともに、KYOTO オープンサイエンス・ミートアップというイベント(旧: KYOTO オープンサイエンス勉強会)を立ち上げた[11]。これ



図 3. KYOTO オープンサイエンス・ミートアップやワークショップの様子

(会場:FabCafe Kyoto / MTRL KYOTO, https://mtrl.com/kyoto/)。

は、市民と連携した広い意味でのオープンサイエンスを実践している方を、月に一人ずつお呼びして、そういった知恵やノウハウを共有している。年に1回のワークショップも行い、すでに三年になろうとしている。いずれは、Zooniverse のようなプラットフォームが日本にもあるとよいのかもしれない。私たちの雷の観測も、金沢市街地に高校や民間サポーターの支援をもらって設置しており、放射線百葉箱を使ったオープンサイエンスの可能性を模索している。

こういった経験をしながら、これからの自分の研究では Collaborative Power of Science というスローガンを考えている。これは、資金や人的リソースで巨大化が進む科学プロジェクトの限界がくることを考え、小型でシンプルな装置だが、それらを多数、連携して運用することで質の違う科学成果をあげていく分散型システムの科学研究という意味をもっている。しかしそれだけではなく、これまでは研究者だけに閉じている側面もあった科学研究を、市民サポーターなどと連携し、オープンサイエンスの視点も取り入れて行っていく、というものだ。私たちは、雷雲ガンマ線の観測をそのテストケースとしてすすめているが、これからは超小型衛星を利用した宇宙観測にも活用して行きたい。国や世界にある大型のX線望遠鏡と相補的に、小さなグループで自由に運用できる超小型のX線望遠鏡を実現したいと思っている。その科学目標は多様だが、たとえば、重力波天文学に関わる研究もできるかもしれない。突発的な重力波イベントの発見の後には、高速自転する中性子星からの定常重力波の探査が重要になってくる。その場合、中性子星の自転周期を長期にわたってモニタする必要があり、特に質量降着を受けている場合には、なるべく切れ目なく観測を行いたい。そのためには、運用に自由度のある超小型衛星が有効だ。我々は、全天でもっとも明るい「さそり座 X-1」などをターゲットに、NICER で培った経験を活かして、観測計画を進めている。

#### 5. おわりに

今年度で私の京都大学白眉プロジェクトでの任期が終了する。残念ながら、任期なしの研究職に接続できたわけではない。ここで述べてきたような研究アプローチは、「既存の研究室を継承、発展させる」というよりも「新しい研究テーマを新規に開拓する」という色合いが濃く、大学への基盤的支援が先細りす

る中では、既存分野を保持で守勢にならざるを得ない大学環境では、任期なしの研究職につながりにくいかもしれない。これは残念なことではあったが、ありがたいことに理化学研究所の理研白眉研究チームリーダー(昨年度から発足した新しい制度)に、任期付きとはいえ採用いただいた。「高エネルギー大気物理学の開拓と次世代の宇宙観測への応用」を研究課題として、榎戸極限自然現象理研白眉研究チームを発足する予定になっている。ここでは、Collaborative Power of Science をスローガンに、高エネルギー大気物理学の新規開拓や、超小型衛星を用いた宇宙 X 線の新しい観測体制の模索、多波長連携による中性子星の極限物理の開拓という三つのテーマにチャレンジしたい。いずれのテーマも、狭い専門分野に限らない魅力的な題材になると自負している。この理化学研究所では、2020年度以降に大学院生ではリサーチ・アソシエイト(JRA)&nbspの制度、ポスドクとしては基礎科学特別研究員という枠で研究員を募集予定である。魅力的な研究環境であると思うし、一緒に新しい科学研究に切り込んでいく喜びを提供できる。興味のある若手は是非ご一報いただきたい。いまの大学の惨状の中で、自分と一緒に科学プロジェクトに挑んでいる仲間や後輩には、研究環境やポストの観点でも、自分が体験したような苦労が少なくなるように、尽力できるシニアな世代になりたいと思っている。

#### 参考文献

- [1] 榎戸輝揚「中性子星の織りなす物理の魅力」ISAS ニュース 2018 年 6 月号 No.447 宇宙科学最前線 http://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/180618.html
- [2] Gendreau et al. Nature Astronomy 1 895 (2017) https://www.nature.com/articles/s41550-017-0301-3.epdf
- [3] Guver et al. ApJL 877, 2, L30 (2019) https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019Ap J...877L..30G/abstract
- [4] Bogdanov et al., ApJ, 877, 2, 69 (2019) https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...877...69B/abstract
- [5] Malacaria et al., ApJ accepted (2019) <a href="https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv">https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv</a> 190602806M/abstract
- [6] 榎戸輝揚、和田有希、土屋晴文、日本物理学会誌 Vol. 74 (2019) https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2019/04/74-04interdisciplinary1.pdf
- [7] Wada et al., Communication Physics 2, 67 (2019) <a href="https://www.nature.com/commsphys/articles">https://www.nature.com/commsphys/articles</a>
- [8] Enoto et al., Nature 551, 481 (2019) <a href="https://www.nature.com/articles/nature246">https://www.nature.com/articles/nature246</a>
  30
- [9] カミナリ雲からの謎のガンマ線ビームを追え, academist <a href="https://academist-cf.com/projects/16?lang=ja">https://academist-cf.com/projects/16?lang=ja</a>
- [10] Zooniverse, https://www.zooniverse.org
- [11] KYOTO オープンサイエンス勉強会 https://kyoto-open.science

## 京都大学 宇宙総合学研究ユニット

http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人:伊藤梓

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp