

イオの火山噴火と中性酸素トーラス

古賀 亮一

〈名古屋市立大学データサイエンス学部 〒467-8603 愛知県名古屋市長徳区田辺通 3-1〉
e-mail: koga.ryoichi@ds.nagoya-cu.ac.jp



木星衛星イオは火山活動が太陽系で最も活発な天体である。イオの大気生成の主な要因は、地表の霜の昇華なのか、それとも火山からの直接供給なのかは、数十年前から議論されてきた。しかし、イオ起源の中性ガスやプラズマの大規模な変動はこれまでに観測されており、この現象は火山噴火によるガスの供給が一時的に大きくなること以外で説明することは難しいだろう。この記事では木星衛星イオの大気生成・散逸の大まかな仕組みについて説明する。その上で惑星分光観測衛星ひさきによって初めて観測された、イオの大気散逸によってできた中性酸素トーラスの時空間変動の研究結果とその後の研究の発展や課題を紹介する。

1. 木星衛星イオについて

筆者は2015年から大学院に進学し、5年間の大学院生時代の大部分を惑星分光観測衛星ひさき (SPRINT-A) が観測した木星衛星イオの中性トーラスのデータ解析に費やした。ひさきが打ちあがったのがちょうど学部4年生の頃であったので、研究のスタート時期から観測されたばかりのデータを扱うことができたのは幸運であった。その時は地球外生命の存在可能性がありそうな木星衛星エウロパに興味があり、氷の表面から散逸した酸素原子の発光が見えるのではないかと思って解析したところ実際にOI 130.4 nmの発光が受かっていることに驚いたことが記憶に残っている。実際にはよく確認するとエウロパからではなくイオ起源であることが判明したのだが、ではイオはどんな天体だろうと思って調べたところ火山活動が太陽系で一番活発であることを知り、強い興味をもったのがこの研究を始めたきっかけである。その後も解析を進めていくうちにこれまで観測的な知見がほとんど得られていなかったイオの

大気散逸ガスの時空間変動の詳細に迫ることができた。ここでその解析で得られた結果や解釈と関連する研究を紹介する。

イオは木星の4つの大きな衛星のうち、一番内側 (木星から5.91木星半径 (R_J)) を周回している (図1)。これらの衛星はガリレオ・ガリレイが1610年に発見した [1] ことからガリレオ衛星と呼ばれている。イオの直径は3643 kmであり、地球から見たイオの視直径はおおよそ1"である (木星は32"-49")。1979年に探査機Voyager 1による観測が行われて以降、イオの表面には多数の火口や溶岩が存在し、火口からの噴出現象がお



図1 木星とリング、ガリレオ衛星 (イオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト) の位置関係 (<https://www.neomag.jp/mailmagazines/topics/letter201812.html>)

こっていることが広く知られるようになった(図2)。太陽系天体の中で溶岩の噴出する現象を活火山と定義するならば、その存在が明確に確認されているのは今のところ地球とイオのみである[2]。イオの溶岩の温度は900 Kになっている場所もあり、真空下での硫黄の沸点(715 K)よりも大きい。このことが珪酸塩(シリケート)の火山活動が起こっている強い証拠となっている[3]。一方で太陽から木星までの距離はおよそ5 AU(天文単位)離れているため、火山噴火の起こっている場所以外の表面温度は昼面でも120 K程度である。

イオの大気の柱密度は昼面でも 10^{16} - 10^{17} cm⁻²程度で非常に希薄であり、大気の90%程度は二酸化硫黄(SO₂)である。イオの表面温度 T_{surface} と大気の飽和蒸気圧 P_{vap} には以下の関係がある[4]。

$$P_{\text{vap}} = 1.516 \times 10^{13} \exp(-4510/T_{\text{surface}}) \text{ (Pa)}$$

すなわち、火山噴火によるガスの放出が起こらない限り、太陽光の当たらない環境(夜面や極域など)ではガスが少ない。木星からの引力が原因で起こる潮汐固定によってイオの公転周期と自転周期は同じになっている。そのため公転周期約1.77日ご

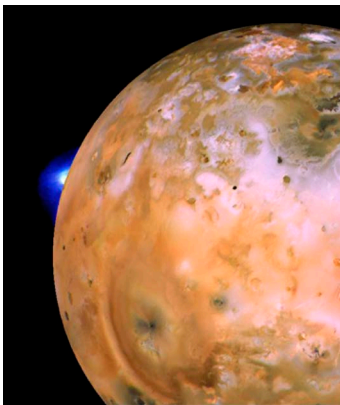


図2 Voyager 1探査機によって撮影されたイオ表面とLokiで起こった火山噴火の様子(NASA/JPL/USGS [7])

どの昼夜のサイクルがあり、表面の二酸化硫黄の霜の昇華と凝縮が繰り返される。他の大気成分は太陽光や電子衝突によって解離した一酸化硫黄(SO)や二硫黄(S₂)、酸素(O)・硫黄(S)原子であり、塩化ナトリウム(NaCl)や塩化カリウム(KCl)も微量に含んでいる。非常に乾燥した環境であり、水素(H)原子や水素を含んだ分子はこれまで観測されていない。このことからイオの水は大昔の枯渇したのだと想像できる(一方でエウロパ、ガニメデ、カリストの表面はすべて主に水の氷で覆われている)。レビュー[5]によるとこれまでにイオの大気で発見されていない分子として一酸化炭素(CO)、硫化水素(H₂S)、OCS、一酸化二硫黄(S₂O)、ClO、CS、水酸化ナトリウム(NaOH)が挙げられている。地殻に含まれているはずのCやNを含む分子が発見されていないのは驚きである。最近ではALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)電波望遠鏡で同位体³⁴SO₂やNa³⁷Clのスペクトルマップが得られたことが話題になっている[6]。研究チームの観測結果と詳細なモデリングによりイオ表層の硫黄と塩素の同位体比が求められ(³⁴S/³²S=0.0595±0.0038, ³⁷Cl/³⁵Cl=0.403±0.028)、火山噴火による質量放出が45.7億年の歴史の大部分で起こっていることが推定された。

図3はイオの大気がどのように散逸するかを簡単に表したものである。上層大気では主にトーラスイオン(イオ軌道周辺に分布するイオン)がイオ周辺の中性粒子と衝突し、それが他の中性粒子と衝突する過程(大気スパッタリング)が起こっている。この大気スパッタリングと熱散逸によってイオの大気からの散逸速度分布が決まっている[8]。外気圏の原子のうち、脱出速度(~2 km/s)を超えたものがイオ重力圏であるイオコロナ(地表から約5.8イオ半径(R₀)の範囲)を脱出し、木星を取り囲むようにイオ軌道周辺を周回する。散逸した酸素・硫黄原子は、イオンや電子との相互作用によって電離し、イオプラズマトーラスの

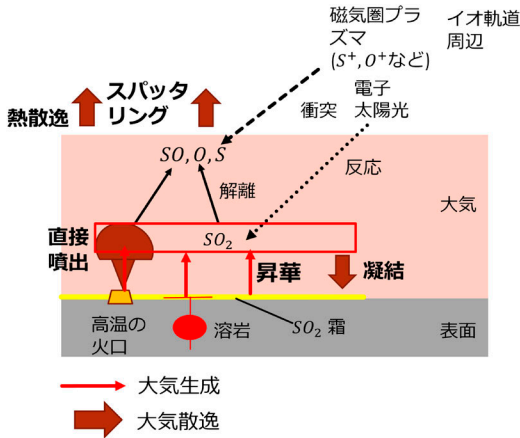


図3 イオの大気散逸過程を示す概略図。実際にはこの他にも散逸パス(例えばイオ近傍で SO_2^+ になる、 SO_2 のままイオ軌道まで飛来してから解離するなど)が存在する。

形成に寄与する。

イオの大気の観測は紫外、可視、赤外、サブミリ波といった多波長で行うことが可能である。しかし、当然ながら基本的にイオから離れるほどガスの密度が小さくなるため、観測の手段に限られるようになる。ひさきの打ち上げ以前では、中性酸素のトラスの観測は紫外線と可視の観測が数例報告されているのみであり(例えば[9])、そのどれもトラスの一部分の光の総量を観測したに過ぎなかった。イオから流出するガスは毎秒1トンに及び、木星磁気圏内のプラズマの質量の9割を担う主要なプラズマ源となっている。また、イオ由来のプラズマが他のガリレオ衛星の表面まで飛来して、スパッタリングや化学反応を起こしている。このため、イオからの大気の流出過程の明らかにすることは他のガリレオ衛星大気を理解する上でも重要である。

イオの大気生成の主な要因は、地表の霜の昇華なのか、それとも火山からの直接供給なのかは、数十年前から議論されてきた。近年は、主にハッブル宇宙望遠鏡による紫外線観測や地上中間赤外観測、電波観測によって少なくとも通常時は昇華大気がメインであるという証拠が積み重なって

る。例えば過去の赤外観測はイオが木星の陰に入る食の時期に、地表の温度低下によって大気が急速に崩壊する現象を明らかにした[10]。火口からの直接噴出の寄与が大きい場合は地表面温度が低下しても供給が持続するため、大気の崩壊は起こりにくい。しかし、次に示すようにイオ起源の中性ガスの大規模な変動がこれまでに観測されており、筆者たちはこの現象は火山噴火によるガスの供給が一時的に大きくならなければ説明がつかないだろうと考えている。

2. イオからの散逸ガス増大イベントと火山噴火の対応関係

これまでの研究では主にイオ起源の塩化ナトリウムや $NaCl^+$ が解離してできたナトリウム(Na)原子の発光を地上観測することで大気散逸ガスの変動を明らかにしようとした。大きな理由としては次の二つが挙げられる。一つ目は地上観測によって火山活動を示すイオからの赤外熱放射量とナトリウム原子の発光量に相関があることがわかったからである[11]。二つ目は酸素や硫黄の原子の発光は暗いのに対し、ナトリウム原子は可視光の589.0 nm, 589.6 nmにおける共鳴散乱断面積が大きく、とても明るく発光することである。これにより、天候さえよければ地上から長期間連続観測することが可能である。東北大学では長年イオから散逸して遠方に広がったナトリウム原子発光の地上観測を継続的に行っており、最近でも米田瑞生氏によってナトリウム雲の突発現象の観測結果が報告されている[12]。しかし、外気圏大気の大部分を占める酸素や硫黄原子の発光の連続的な地上観測が困難であるため、これらの振る舞いについて観測的なアプローチはされてこなかった。

惑星分光観測衛星ひさきは惑星電離圏・磁気圏の変動する姿を連続観測により明らかにすることを目的として開発され、2013年9月に打ちあがった。特に木星磁気圏は重要なターゲットであり、

木星のオーロラとイオプラズマトーラスを同時に紫外線分光観測ができるように設計された。これらの遠紫外線の発光は地球大気で吸収されるため、地上観測でとらえることはできない。ひさきの広い視野と長時間の連続観測のおかげで、当初想定されていたイオトーラスのプラズマの発光の時空間変動だけでなく、酸素原子発光の時空間変動も観測された。

ひさきの1回目の木星系の連続観測の期間では大規模なイオプラズマトーラスの変動は起こらなかった(表1)。ひさきの2回目の連続観測は2014年11月から始まった。解析チームによると、2015年1月10日を過ぎたころからだんだんイオプラズマトーラスの明るさが増していき、1月30日には、この明るさの増加ははっきりとしたものになったようだ。ひさきチーム内でもこれが機器の不具合や人工的なものではなく、本物の自然現象を捉えていると信じられるようになった[13]。筆者はイオの大気変動に関心があったため、ひさきのデータを用いてイオを中心として木星半径程度の範囲に限定して、2013年から2015年の観測データ(表1)から130.4 nm酸素原子の変動を解析した。イオ本体と同程度に範囲を小さくすることができないのは、ひさきの空間分解能に制約があるためである。OI 130.4 nmはイオ軌道では太陽光による共鳴散乱(太陽からの紫外線が原子のエネルギー準位と一致するとき、その光子を吸収すること)の直後原子が光を再放出する過程と電子衝突による励起後に安定した基底状態に戻る際に光を放出する過程の両方が存在する。ひさきに搭載された分光器の検出器には太陽共鳴

散乱で光る地球外気圏の酸素原子による発光や放射線からの高エネルギー粒子によるノイズも存在した。そのためこれらのノイズを排除するため、太陽の光が当たらない衛星が地球の陰に入っているデータだけに制限し、イオトーラスの観測データをキャリブレーション用に木星から数分角外した場所を観測したデータで差分した。

図4は2014年11月下旬から2015年5月上旬にひさきによって観測されたイオ周辺の酸素原子発光の変動[15]と、同時期にハワイ・ハレアカラ山頂の望遠鏡で地上観測されたイオ起源のナトリウム発光の変動[16]を表している。この図で表されている面輝度の単位Rayleigh(以下Rと表記)は惑星科学の分野で広く用いられているものであり、 $1R=10^6/4\pi \text{ photons cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$ である。酸素原子の発光がナトリウム発光から推定される火山活動が静穏な時(2014年11月-12月=Day of year(DOY)-50-0)と比べて、活発な時(2015年2月=DOY 30-60)は2-3倍明るくなったことが分かる。これはイオ周辺の酸素原子量が增大し

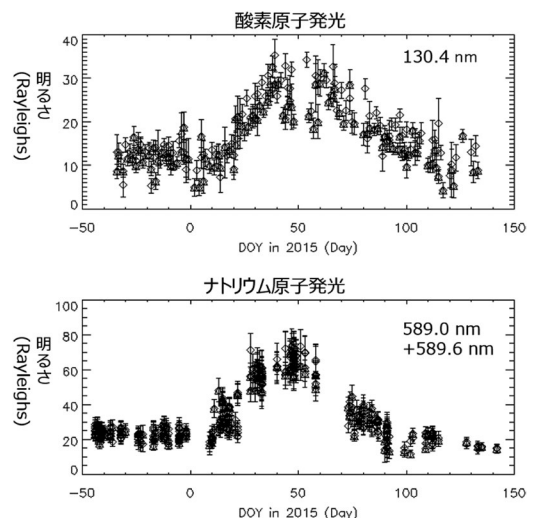


図4 2014年11月-2015年5月の間に観測されたイオ周辺の酸素原子発光の面輝度の変動(上)とイオ起源のナトリウム原子発光の面輝度の変化(下)。横軸は2015年1月1日からの経過日を表している。

表1 ひさきデータ解析期間の概要

期間	酸素原子発の面輝度	主な火山の熱放射 [14]
2013/11-2014/4	静穏	(特になし)
2014/11-2014/12	静穏	Loki (311°W, 10°N)
2015/1-2015/5	活発	Kurdalagon (221°W, 49°S)

ていることを示している。先行研究ではナトリウムの変動に対応するようにイオトラスの硫黄イオンの変動する様子が観測されている [17, 18]。ひさきの酸素原子発光の観測結果は先行研究よりも火山噴火によってイオからの大気散逸の量が増大する現象に迫っている。

酸素原子発光とナトリウム発光の変動を比較したとき、酸素原子発光の面輝度のピークが平穏時の明るさに戻るまでの期間がナトリウム原子発光と比べて長いことがわかる。もし、火山活動が低下することで火口の温度が徐々に低下するならば、それに伴って火山から大気へのガスの供給量も徐々に減少するだろう。解析当初はこの供給量の減少する早さが二酸化硫黄と塩化ナトリウムで異なるかもしれないと考えた (図5)。塩化ナトリウムは昇華温度が高い (10^{-12} bar の環境下で 650 K [19]) ため、高温の火口からの噴出が静まるとすぐに供給量が減る。一方、二酸化硫黄は昇華温度が低いいため、高温の火口の噴出物のみならず、より低温の溶岩によるイオ表面の昇華 (蒸発) によって、供給が持続すると思われる。実際には酸素原子発光は衝突するイオトラスの電子の密度・温度変化の影響を受けた可能性もあるため、この仮説が必ずしも正しいとは限らない。しかし、この考察はその後の筆者のイオ大気の ALMA 観測プロポーザル提出やアーカイブデータ解析の研究 [20] に強いモチベーションを与えた。

また、散逸した酸素原子発光の増大が始まる

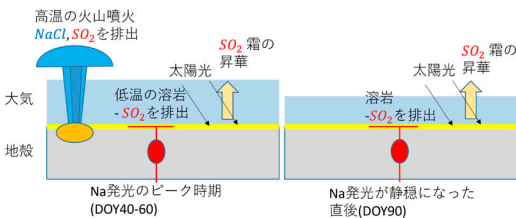


図5 筆者が想像した2015年2月の火山噴火活発イベント時(左)とその30日後(右)のSO₂とNaClガスの生成過程の様子。

2015年1月下旬に、イオのKurdalagon Pateraとよばれる火山地帯において赤外熱放射量 (3.8 μm) の増大が観測された [21]。同じ場所で4月にも赤外放射量の増大が見られたが、ひさきでは対応するイオ周辺の酸素原子発光の大規模な増大は見られなかった。意外なことに最大級の規模の火山地帯であるLoki Pateraでは赤外放射量が12月に最大になったが、この時期は中性酸素原子の発光の強度の変化はほぼ見られなかった。これらの結果は火山活動の熱放射のイベントによってガスの放出を伴う場合と伴わない場合が存在することを示唆している。最近ではKeck望遠鏡の観測によってLokiの火口の熱放射量と高温のSOの禁制遷移 ($a^1\Delta X^3\Delta^-$ 1.9 μm) の発光強度に相関がみられないことが示されている [22]。そのため、前述した火山の赤外放射とイオから散逸したナトリウム雲の相関関係も疑問視する見方がある。

3. イオ中性トラスの空間分布

3.1 ひさきによる中性酸素トラス分布の初観測

筆者は文献調査や関係者との議論を通じて、これまで中性トラスの構造がナトリウム原子を除けば観測的に確かめられていないことを知った。そこでひさきが観測した酸素原子発光の経度・動径分布を詳細に解析したところ、酸素原子の空間分布を推定することができた [23, 24]。まずイオがひさきの分光器のスリット上でどのように動くかを簡単に説明しよう (図6)。イオ位相角 (phase angle) は地球から木星に向かうベクトルと、木星からイオに向かうベクトルの成す角で、木星を北から見て反時計回りに定義される。望遠鏡から見ると位相角が0°のとき、地球-木星-イオの順に一直線に並ぶ。イオはまずdawn側 (夜明け側) に移動し、90°を過ぎたところで引き返して、木星の前を通り過ぎる。その後dusk側 (夕暮れ側) に移動して、270°のところでまた引き返して木星の場所に戻る。これを公転周期 (おおよそ1.77日) ごとに繰り返すのである。

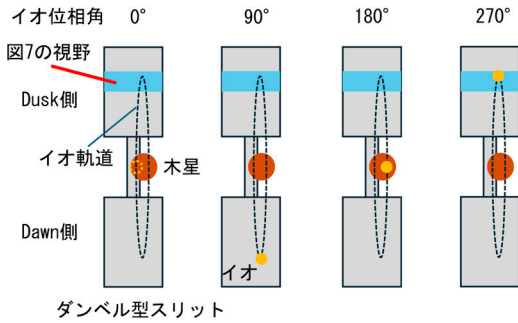


図6 イオの位相角と分光器のスリット内での位置の対応関係。イオは公転周期でdawn側とdusk側を行き来する。dawn側とdusk側は観測時期によって上下が反転する。

筆者はまず面輝度の変動が少ない（静穏な）時期の2024年12月データを使ってdawn側とdusk側の木星から5-6 R_J , 6-7 R_J の発光の面輝度がイオの位相角によってどう変化するかを検証した。この文章内では理解しやすくするためdusk側の5-6 R_J の範囲に絞って説明する（図7）。上図を見るとイオが視野に近い位相角270°付近では15-20 Rと面輝度が大きく、視野から遠くにいる0-180°では4-6 R程度で比較的同じくらいであることがわかる。下図のように酸素原子の密度の濃い領域がイオ周辺に広がり、密度の薄い領域がイオ軌道周辺に沿って分布しているとこの観測結果と整合的である。特に濃い領域の形状はナトリウムの地上観測でも見られており、論文によってはバナナの形をしていることから“banana cloud”と呼ばれている（例えば[25]）。先行研究の数値シミュレーションが出した結果[3]ではイオ付近の領域に対して、イオの反対側（例えばイオが位相角90°にいるときのdusk側5-6 R_J の範囲）の柱密度は十分の一程度になっていたもので、ひさきでこのようにほぼ均一にトラス状に広がっている分布が観測されたのは驚きである。dawn側も似たような酸素原子発光の面輝度のイオ位相角依存性が確認された。しかし、イオが視野に入っている時の面輝度はdawn側よりdusk側の方が大きかった。これは原子に衝突するイオトラスの電

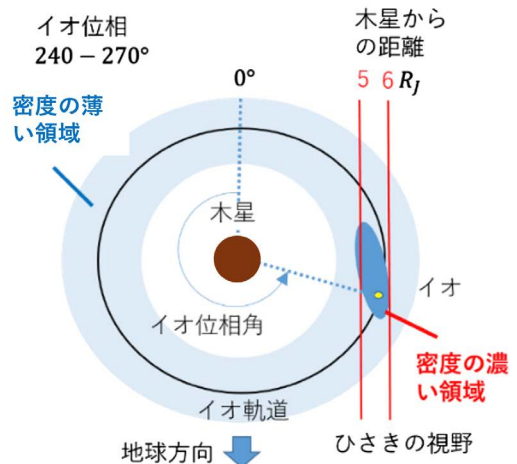
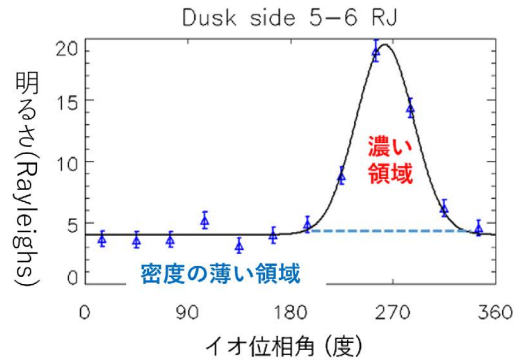


図7 2014年12月の間に観測された、木星からイオ周辺の酸素原子発光の面輝度のイオ位相角ごとの面輝度の変化（上）と上図を説明可能な中性トラスの構造の概略図（下）。

子の温度がdawn側よりdusk側の方が大きいことを反映していると思われる[26]。また、酸素原子発光の動径分布を見てみるとイオ軌道より外側では、イオ軌道から離れていくほど面輝度は小さくなり、木星から7.6 R_J 以遠では発光が検出されなくなった。

次に火山活動が活発であると思われる2015年1月から4月までのデータを使って10日ごとに酸素原子発光の空間分布を解析した。その結果、イオ軌道全体で発光が明るくなる様子を捉えることができた。発光の範囲は木星から最大で8.6 R_J まで広がっていることがわかった。これはエウロパの軌道（木星からおよそ9.4 R_J ）に近い場所であ

る。この時イオから排出された酸素原子がイオン化せずに直接エウロパに衝突している可能性があるため、通常とは異なる化学反応がエウロパ表面でも起こっていてもおかしくなさそうである。

イオトラスの分布のより定量的な評価を行うために太陽共鳴散乱と電子衝突の発光効率を計算し、これらの発光の面輝度の分布を密度（数密度）に変換した。この情報から二つのことがわかる。一つは酸素原子と電子の衝突や電荷交換反応によってイオトラスに酸素イオンを供給する量である。酸素原子とイオンの反応係数とこれまでに観測されたイオトラスのイオン・電子の密度から、供給量を計算したところ火山活動が静穏な時期で460 kg/sであった（イオ軌道より内側のプラズマデータがなかったため活発期の供給量の推定はできなかった）。この情報は先月吉岡和夫氏の記事で示されたようなプラズマ診断の結果を裏付ける上で重要である。もう一つは次の章で示すようにイオからトラスへの原子の放出過程である。

3.2 シミュレーション計算との比較

筆者は博士課程から衛星・土星磁気圏のモンテカルロシミュレーションを専門とする Johns Hopkins 大学の Howard Todd Smith 氏と共同研究を行っている。筆者はまず火山活動が静穏な時期の酸素原子発光から柱密度分布に直したデータ

を用意した。次に Smith 氏が様々な放出量や方向の条件で粒子の軌道計算を行い、得られた結果から同様に柱密度分布を計算し、上記のひさきのデータと比較した [27]。その結果従来のシミュレーション計算では前提とされていたイオから等方的に粒子が放出する条件では観測結果とモデルを合わせることができなかった。一番両者が合う条件は、粒子が木星側かつイオの進行方向に放出したケースであった。この非等方的な放出に対して十分納得できる説明はまだできていないが、原因の一つとしてイオコロナの密度が非対称的であることが挙げられる。

図8はシミュレーション計算によって得られた、北からみた中性酸素・硫黄トラスの分布である。筆者が推測した中性酸素トラスの構造がシミュレーションによっても再確認された。シミュレーションで予想された硫黄原子の分布の範囲が狭いのは、硫黄原子のイオン化までの lifetime が酸素原子よりも短い [8] ためである。この構造が本当に正しいかどうかは将来の観測で確かめる必要がある。現在火山活動が活発な時期のひさきの観測結果とシミュレーション計算の比較を行っている。この比較がうまくいけば、中性トラスの変動とイオからの放出粒子のパラメータの変動の対応関係がわかるかもしれない。

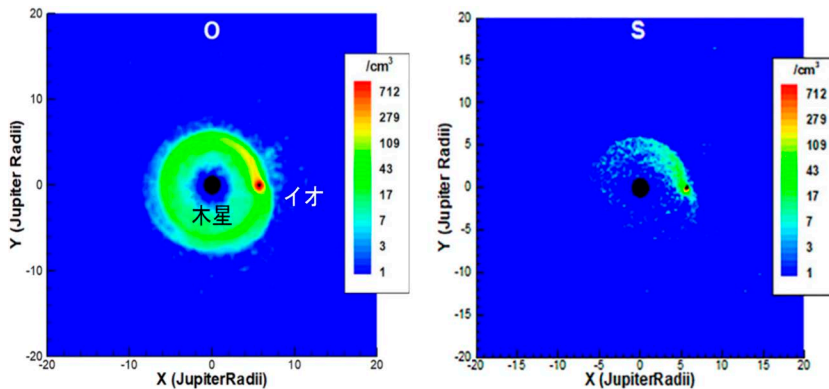


図8 数値シミュレーションによって明らかになった火山活動が静穏な時期の中性酸素 (O) トラスの数密度分布 (左) と予想される中性硫黄 (S) トラスの分布 (右) [22]. xy平面はイオ軌道で、この図はz軸正方向から見ている。

4. ひさきからLAPYUTAへ

ひさきの数か月におよぶ紫外線連続観測によって、今までナトリウム原子以外はシミュレーションに頼らざるを得なかったイオの中性トーラスの時空間変動の研究が観測によっても可能であることが示された。しかし、次世代紫外線望遠鏡計画LAPYUTAで新たに将来観測すべきターゲットがいくつか追加されることになった。まず、今回イオトーラスの酸素原子発光はOI 130.4 nmしか検出できなかった。グレーティングの二次光がなければOI 135.6 nmも検出することができ、より正確な酸素原子の密度分布が得られたであろう。また、ひさきでは観測されなかった硫黄原子の発光の分布も検出できれば、中性トーラスの原子やプラズマ供給量の総量も求められる。エウロパの中性酸素トーラスも数値シミュレーションによって存在が予想されている[28, 29]が、1Rを下回る暗い発光であるため筆者の解析では有意なシグナルを捉えることができなかった。この発光の検出は今でも東北大学で試みられているが、詳細な構造を明らかにするのはLAPYUTAの役目となるだろう。

ひさきが観測した2015年のイオ中性酸素トーラスの増大イベントは火山噴火によるガス放出量の増加と関係していると思われるが、その両者のつながりを示す決定的な証拠は得られていない。実際に、筆者の筆頭論文[24]の査読でも、イオ中性トーラスの変動が火山噴火によるものであるという根拠が乏しいのではないかという指摘もあった。紫外線望遠鏡の空間分解能が0.1"あれば、イオの大気・コロナの分布を十分に捉えることができる。もし大気・コロナと中性トーラスを同時期に連続観測することができれば、火山噴火によるガス放出が起こってからイオ軌道全体に広がるまでの過程を詳細に明らかにすることができるだろう。

謝辞

この記事は筆者の博士論文及び論文[15, 23, 24, 27]、記事[30]の内容を基に執筆しました。データ解析および元論文の執筆には指導教員の坂野井健氏、土屋史紀氏をはじめとしたひさきチームの皆様および東北大学惑星プラズマ・大気研究センター(PPARC)の皆様のお世話になりました。論文の共著者になっていたいただいたFran Bagenal氏、Todd Smith氏には貴重なアドバイスをいただきました。この研究は科研費JP19J10742, JP20KK0074, JP21J00734の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] ガリレオ・ガリレイ, 2017, 星界の報告, (講談社)
- [2] https://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/sci_volcano.html (2025.3.10)
- [3] Johnson, T. V., et al., 1988, *Science*, 242, 1280
- [4] Wagman, D. D., 1979, Sublimation pressure and the enthalpy of SO₂. *Chem. Thermodyn. Data Cent., Natl. Bur. of Stand., Washington, DC*
- [5] Lellouch, E., et al., 2006, in *Io After Galileo*, eds. Lopes, R. M. C., & Spencer, J.R., (Springer, Berlin), 231
- [6] de Kleer, K., et al., 2024, *Science*, 384, 6696, 682
- [7] https://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/multimedia/pia00010.html (2025.3.10)
- [8] Smyth, W. H., & Marconi, M. L., 2003, *Icarus*, 166 (1), 85
- [9] Durrance, S. T., 1983, *ApJ*, 267, 125
- [10] Tsang, C. C. C., et al., 2016, *J. Geophys. Res.: Planets*, 121, 8, 1400
- [11] Mendillo, M., et al., 2004, *Icarus*, 170, 430-442.
- [12] Yonda, M., et al., 2025, *Icarus*, 425, 116301
- [13] 吉川一朗, 特集: 惑星分光観測衛星「ひさき」3. イオの火山爆発とイオプラズマトーラス, オーロラの関係, ISASニュース2018年2月号 (No. 443).
- [14] de Kleer, K., & de Pater, I., 2016, *Icarus*, 317, 104
- [15] Koga, R., et al., 2018, *Icarus*, 299, 300
- [16] Yoneda, M., et al., 2015, *Icarus*, 261, 31
- [17] Brown, M. E., & Bouchez, A. H., 1997, *Science*, 278, 268
- [18] Yoneda, M., et al., 2010, *GRL*, 37, 11202
- [19] Ewing, C. T., & Stern, K. H., 1974, *J. Phys. Chem*, 78, 1998
- [20] Koga, R., et al., 2021, *ApJ*, 907, L6.
- [21] de Kleer, K & de Peter, I., 2016, *Icarus*, 280, 378
- [22] de Kleer, K., et al., 2019, *Icarus*, 317, 104
- [23] Koga, R., et al., 2018, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 123, 3764

- [24] Koga, R., et al., 2019, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 124, 10318
- [25] Mendillo, M., et al., 2007, *Nature*, 448, 330
- [26] Yoshioka, K., et al., 2014, *Science*, 345, 1581
- [27] Smith, H. T., et al., 2022, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 127, 8, e2022JA030581
- [28] Smyth, W. H., & Marconi, M. L., 2006, *Icarus*, 181, 510
- [29] Smith, H. T., et al., 2019, *ApJ*, 871, 69
- [30] 古賀亮一, 特集: 惑星分光観測衛星「ひさき7. 火山活動に伴う衛星イオ大気の変動, *ISASニュース* 2018年2月号 (No. 443)

Io's Volcanism and Neutral Oxygen Torus

Ryoichi KOGA

*Nagoya City University, 3-1 Tanabe-dori,
Mizuho-ku, Nagoya, Aichi 467-8603, Japan*

Abstract: Jupiter's moon Io is the most volcanically active body in the solar system. It has been debated for decades whether the main source of atmospheric generation on Io is sublimation of frost on the surface or direct supply from volcanoes. However, large-scale fluctuations in neutral gas and plasma originating from Io have been observed, and it would be difficult to explain this phenomenon by anything other than a temporarily larger supply of gas from volcanic eruptions. This article describes the atmospheric production and escape of Io. And then, I present the results of the spatio-temporal variability of Io's neutral oxygen torus, which was first observed by the Hisaki UV space telescope, and the subsequent developments and future works.

ひさき衛星の火星・金星上層大気観測の成果

益 永 圭

〈山形大学学士課程基盤教育院 〒990-8560 山形県山形市小白川町 1-4-12〉

e-mail: kei.masunaga@cc.yamagata-u.ac.jp



現在の火星や金星表面に液体の水は存在していません。しかし、探査機の観測により、過去の火星や金星は温暖で表面に海が存在したことが示唆されています。これまで、過去に存在した水を除去する機構の一つとして大気の宇宙空間への流出が重要視され、太陽風が駆動する大気流出機構についての理解が進んできました。一方、近年の観測により、これらの惑星の上層大気のダイナミクスは砂嵐や大気波動という下層大気で発生する現象とも関連していることがわかってきました。そのため、火星・金星からの大気流出機構を理解するためには、太陽風のような宇宙からの影響だけでなく、惑星下層大気からの影響も調べる必要があります。本稿では、火星・金星の下層大気で起こる現象が大気流出へ及ぼす影響に関し、ひさき衛星の観測成果を概説します。

1. はじめに

地球の両隣に位置する火星と金星。火星は乾燥し寒冷な惑星（平均温度は約 -55°C ）であり、金星は高温高压の灼熱の惑星（平均温度は約 460°C ）で、現在どちらも生命が存在するのに適した環境を持っていません。しかし、これまでの観測から、過去の火星や金星は温暖湿潤な気候を有し、表面に液体の水（海）が存在していた可能性が示唆されています（図1）。特に火星については、周回機による遠隔探査やローバーの直接探査により水の痕跡を示す鉱物や地形が見つかっており、表面に海が存在していたことがほぼ確実視されています。では、これらの惑星にかつて存在した海はどこへ消えたのでしょうか。有力な仮説の一つとして、海の一部がガスとして宇宙空間へ流出したという説が挙げられます。

図2のように、火星や金星の上層大気は太陽放射や太陽風といった宇宙からの影響を受けて、大気成分が中性やプラズマの形で宇宙空間へ流出し

ています。これまで、多くの探査機の観測を通じて、太陽風や太陽放射が火星・金星の大気流出に及ぼす影響について比較的多くの研究が行われてきました。特に、米国の火星探査機 MAVEN や欧州の金星探査機 Venus Express の観測により、その実態は明らかになりつつあります。一方、近年の観測から、これらの惑星の上層大気は下層大気中で発生する砂嵐（ダストストームとも呼ばれますが、本記事では砂嵐で統一します）や大気波

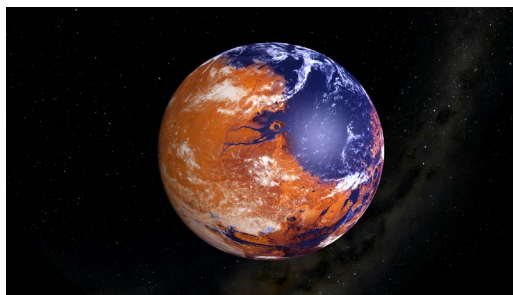


図1 温暖湿潤な過去の火星の想像図 (Credit: The Lunar and Planetary Institute & NASA's MAVEN mission).

火星・金星からの大気流出

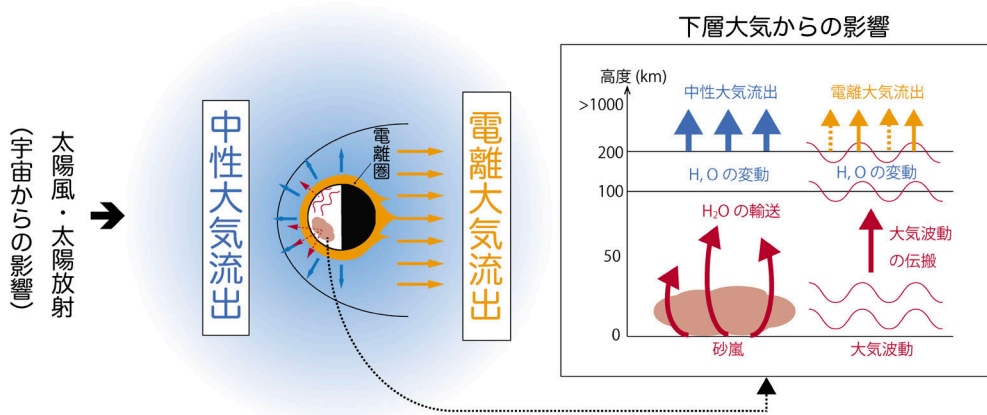


図2 火星及び金星からの大気流出の概要図. 大気流出は宇宙からの影響及び下層大気からの影響を受けて時間的・空間的に変動します.

動に伴う物質や運動量の輸送により大きく影響を受けることがわかってきました. このような物質や運動量の輸送が起これば, 上層大気の状態は大きく変動することになり, その結果, 大気流出にも影響を及ぼすと予想されます. しかし, その実態についてはまだよくわかっていないのが現状です.

私たちは火星や金星の大気流出がそれぞれの惑星の大気進化や気候変動に与える影響を理解するため, これまでにひさき衛星を含む観測データを用いて火星・金星の大気成分が宇宙空間へ逃げ出す仕組みを調べてきました. 特に, 本稿では, 火星や金星の上層大気が下層大気からどのような影響を受け, 大気流出に影響を及ぼすのか, ひさき衛星の観測から得られた成果について紹介します.

2. ひさき衛星により観測された火星・金星上層大気のスเปクトル

図3に火星観測および金星観測で得られたスเปクトルを示します. 図中に示すように, スリット内に火星や金星が導入されて分光されており, 大気由来のさまざまな輝線が検出されていることがわかります. これらの輝線は主に火星・金星の高度約100 kmより上空で発光しており, 太陽光を

吸収して発光する共鳴散乱や電離圏中の高エネルギーの電子との衝突, 二酸化炭素分子の解離・電離等で励起されているため, 発光強度は太陽紫外線フラックスや発光を担う分子の量(柱密度)と関連する量です. 一方, スリット全体に広がった光は地球大気(ジオコロナ)由来の発光で, 主に水素原子や酸素原子の輝線です. そのため, 火星・金星大気光の明るさはジオコロナの寄与を差し引いて導出する必要があります.

私たちは, 観測されたさまざまな輝線の中でも水の構成要素である水素原子や酸素原子の明るい輝線に着目して解析を進めてきました. 特に, ひさき衛星は地球軌道から広い視野で惑星を一望できるため, 惑星全球規模で起こる現象の時間変化を捉えることができます. 指向精度が惑星視直径と同程度(約20秒角)であるため[1], 本研究で登場する大気光の明るさは惑星全球における水素原子や酸素原子の平均柱密度に関連する量として考えています.

3. 砂嵐が火星上層大気へ及ぼす影響

3.1 火星の砂嵐

火星表面は砂や塵で覆われており, 風が吹くと

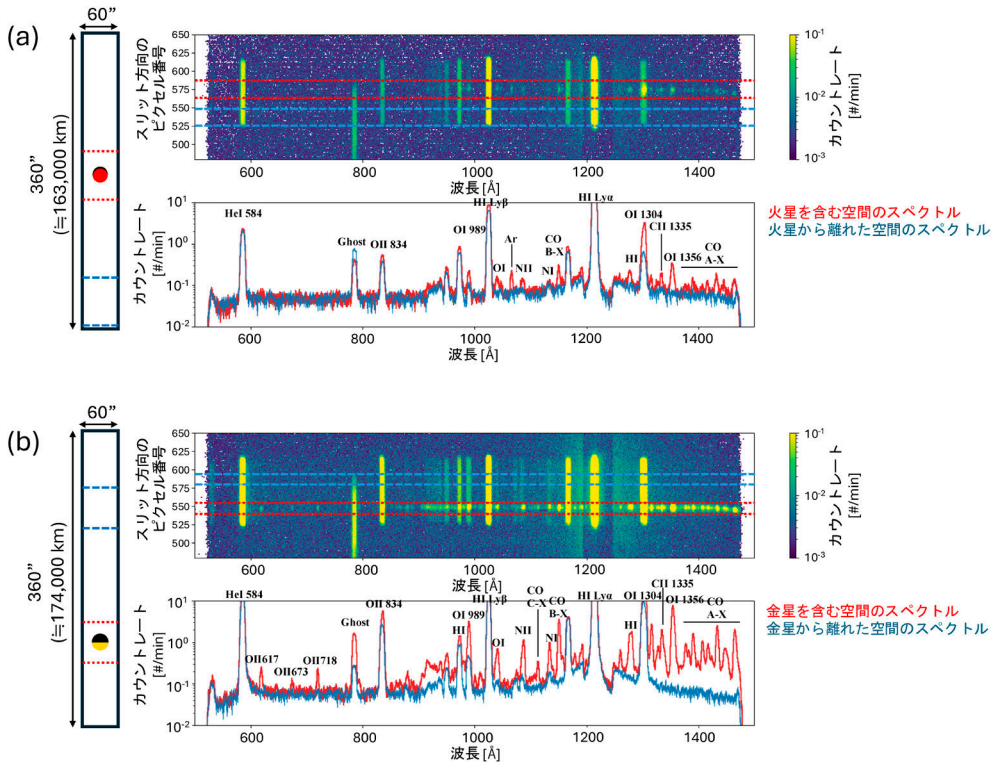


図3 ひさき衛星によって観測された (a) 火星上層大気及び (b) 金星上層大気のスペクトル。このデータの取得期間は火星、金星の視直径がそれぞれ15秒角、25秒角であったため、スリット方向の視野は、それぞれ火星付近で約163,000 km、金星付近で約174,000 kmに対応します。各パネルの上図は、スリットに沿って得られた光子のカウントレートを波長ごとに図示しています。惑星が導入された位置（各パネル左図の点線部）で光っているのが惑星の大気光で、スリットに沿って上下方向に広がった光は地球大気（ジオコロナ）の発光です。各パネル下図はそれぞれ、惑星を含む空間（各パネル左図や上図の点線部）と惑星から十分に離れた空間（各パネル左図や上図の破線部）の光を積分したスペクトルに対応しています。前者から後者を差し引くことにより、惑星の大気光の明さを導出します。なお、1216 Å付近は水素ライマンα線によるサチュレーションを防ぐために感度を落としてあります。780 Å付近に見える特異な信号は、ライマンα線由来の迷光に起因するゴーストです。

これらの砂塵（ダスト）が大気中へ巻き上げられます。大気中のダストは太陽放射を吸収し、大気を加熱する性質があるため、火星大気の熱構造や循環に大きな影響を与えることが知られています。また、火星には地球と同様に季節の変化があり、それに伴って大気循環も変化します。これにより、巻き上げられるダストの量も季節によって変動します。特に、火星が太陽に近づく南半球の夏を中心に、春から秋の季節（Solar Longitude; $L_S = 180^\circ - 360^\circ$ ）には、大気中のダスト量が増加

し、加熱がさらに進むことになります。この加熱が大気循環を強め、さらに多くのダストを巻き上げるという正のフィードバックが働くことで、大規模な砂嵐へと発達していきます。

3.2 ひさき衛星及び複数探査機による砂嵐期間の火星上層・下層大気同時観測

砂嵐は火星表面付近だけでなく、火星の上層大気にも顕著な変化をもたらします。近年の欧州火星探査機TGOの観測により、通常は高度約20 km以下に分布している水蒸気が、大気加熱に

より高高度(約100 km)まで分布できるようになることが明らかになりました[2]。高高度に分布した水分子は太陽紫外線によって解離され、生まれた水素原子が上方へ拡散し、最終的に宇宙空間へ流出します[3, 4]。すなわち、砂嵐は火星から水起源の水素を除去する役割があることを意味しています。

では、水のもう一方の構成要素である酸素についてはどうなるのでしょうか。砂嵐期間中における上層大気中の酸素原子の量の時間変動についてはよく調べられていませんでした。そこで、私たちはひさき衛星を用いて、2016年9月に火星で砂嵐が発生した期間に火星上層大気で発光する大気光を約1ヵ月間モニターしました。その結果、上層大気の水素大気光(ライマンβ線)は約2倍増光するのに対し、酸素大気光(135.6 nm)は一時的に1/3程度減光することを発見しました(図4)。これは、砂嵐によって水起源の水素原子が上層大気中で増加したのに対し、何らかの原因で上層大気中の酸素原子の量は減少したことを示しています。複数の火星探査機(Mars Reconnaissance Orbiter, MAVEN, Mars Express)による同時期の観測データも解析した結果、上層大気ではひさき衛星と同様に酸素原子の一時的な密度

減少が確認され、下層大気では高高度にまで水蒸気や氷粒子が輸送されていることがわかりました。このことから、私たちは砂嵐に伴って輸送された水蒸気起源の元素との化学反応、氷粒子への吸着、乱流による物質混合などにより上層大気中の酸素原子が消失している可能性を提唱しました[5]。大気流出の源である上層大気成分の量に変化すれば、大気流出量にも影響が及ぶ可能性があります。つまり、砂嵐発生時は水素の流出は促進されるのに対し、酸素原子の流出は一時的に抑制される可能性を示唆しています。

4. 大気重力波が金星上層大気へ及ぼす影響

4.1 大気重力波

大気重力波とは、大気の浮力を復元力とする波であり、金星だけでなく、地球や火星など大気を持つ惑星に存在しています。金星では雲層高度(約45-70 km)を中心に大気がスーパーローテーション(自転に243日かかるのに対して、大気は4日で一周する)していることが知られていますが、近年の金星探査機あかつきの観測及び数値実験により、惑星サイズになる大スケールの大気重力波である熱潮汐波やケルビン波がスーパーローテーション

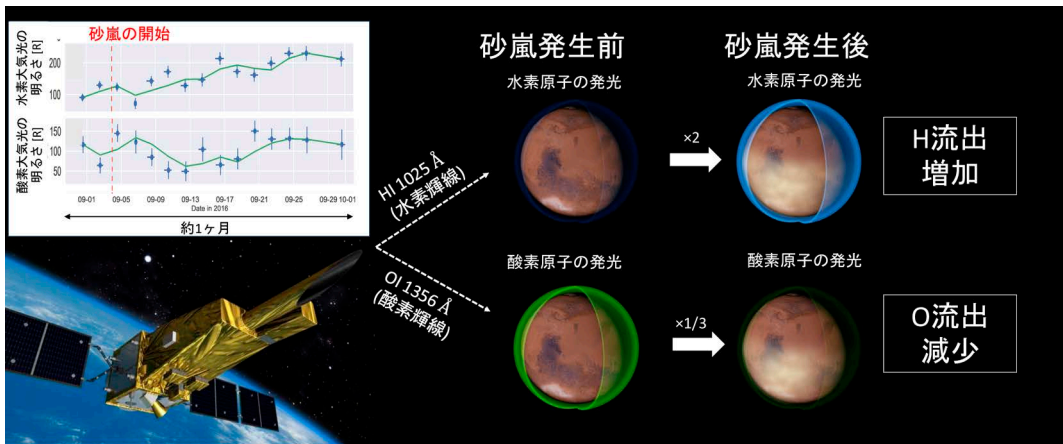


図4 砂嵐期間中に観測された火星水素大気光の明るさと酸素大気光の明るさの時間変動 [5]。なお、1 R (レイラー) の発光強度とは 1 cm^2 を 1 秒間に 100 万個の光子が通過する明るさを示します。

の駆動・維持に関わっていることが明らかになっています。また、一部の大気重力波は生まれた高度から主に上方へと伝播しますが、大気は高度が上がるにつれて密度が減少するため、波の振幅は上方へ伝播するにつれて増大します。上層大気で最終的に波が壊れる（砕波）と、波のエネルギーが背景の大気に渡され上層大気の運動に変化を及ぼすことになります。このように、大気重力波は上層大気のダイナミクスに重要な役割を果たしていると考えられています。しかし、金星の上層大気と下層大気を同時に観測する機会は多くなく、その仕組みは観測的にも明らかになっていませんでした。

4.2 ひさき衛星とあかつき探査機による金星上層・下層大気同時観測

私たちはひさき衛星を用いて断続的に金星の上層大気で発光する大気光の観測を行ってきました

た。特に、明るい輝線である酸素イオン・酸素原子の輝線（83.4 nm, 130.4 nm, 135.6 nm）の発光強度の時間変動に着目しました。その結果、金星の朝側を観測している際に酸素大気光に約4日周期の変動が観測されることが明らかになりました [6, 7]。同時期に欧州金星探査機 Venus Express 等によって観測された太陽風の変動との相関が見られなかったことから、この周期変動は下層大気から伝播する大気波動の影響を受けている可能性が提唱されました。

そこで、ひさき衛星とあかつき探査機の協調観測により、上層大気と下層大気（雲層高度約50–70 km）を同時に観測した結果、熱圏の酸素大気光及び雲層の東西風速の両方に共通する約4日周期の変動が観測されることを明らかにしました [8]（図5a, b）。これらの観測結果を説明する

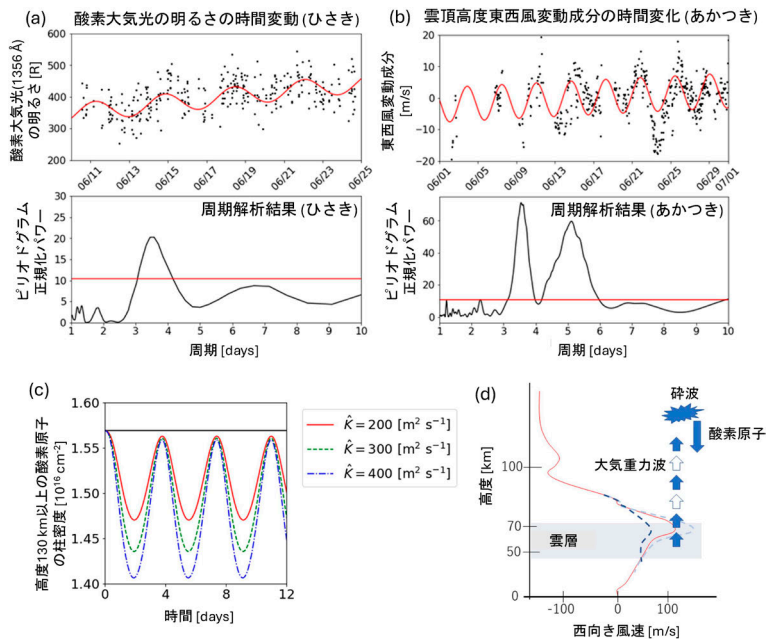


図5 (a) (上パネル) ひさき衛星によって観測された大気光の時間変動 (点) と周期解析により求めた周期 (3.6日) をもつ正弦関数 (曲線)。 (下パネル) ピリオドグラム周期解析結果。水平線はピリオドグラムの99%有意水準。 (b) (上パネル) あかつき探査機によって観測された雲層高度の風速東西成分の時間変動 (点) と周期解析により求めた周期 (3.6日) をもつ正弦関数 (曲線)。 (下パネル) ピリオドグラム周期解析結果。水平線はピリオドグラムの99%有意水準。 (c) モデルによって再現された熱圏 (高度130 kmより上空) の酸素原子柱密度の周期変動。 (d) 観測及びモデルから予想される金星大気の上下結合関係の概略図 [8]。

ために、1次元の波動鉛直伝搬モデルや光化学モデルを用いた数値計算を行った結果、金星の朝側では小スケール (<1,000 km) の大気重力波が雲層高度から熱圏高度まで伝搬可能であることや、雲層を伝播する惑星スケールの波の影響により、大気重力波の伝搬のしやすさが4日周期で変動することを示しました。また、熱圏に伝播した大気重力波の砕波に伴う大気の鉛直混合の影響により酸素原子の密度が変化し、酸素大気光の明るさが4日周期で変化することも明らかになりました (図5c, d)。この結果は、下層大気から伝播する大気波動の影響により大気流出の源となる上層大気の酸素原子の量が変動することを示しています。

5. 今後の展望

ひさき衛星の観測により、火星や金星の下層大気で発生する現象が、上層大気のダイナミクスや大気流出に多大な影響を及ぼす可能性が示唆されました。しかし、ひさき衛星の指向精度の制約上、上層大気で発光する水素原子や酸素原子が水平方向や鉛直方向にどのように広がり、宇宙空間へと流出していくのかについてはまだ謎が多いのが現状です。また、水素原子や酸素原子だけでなく、炭素や窒素などの生命にとって重要な元素の流出機構についても理解する必要がありますが、観測の不足からまだ理解が進んでいません。

現在検討中のLAPYUTA紫外線宇宙望遠鏡計画[9]では、火星や金星を十分に空間分解できる指向精度、様々な輝線を分解できる波長分解能、そして微弱な発光を検出できる高い感度を達成し、上記の課題を解決したいと考えています。これまでは、既存の観測装置の観測データを解析して研究を進めてきましたが、科学検討では「ある現象を理解するために、何(物理量)を測りたくて、それに必要な装置のスペック(要求値)は何か」という、普段使っていた考え方と逆の考えをしなくてはなりません。最初はこのギャップに戸

惑うこともありましたが、新たな視点で研究を見直す貴重な機会にもなっています。今後もチームのメンバーと協力しながら、計画の実現に向けてより詳細な検討を続けていく予定です。

謝辞

原稿の作成にあたり、編集委員の皆様には大変お世話になりました。特に、岩崎一成さんと仏坂健太さんに原稿を丁寧に校閲いただきました。お礼申し上げます。また、本稿の内容に関して東京大学の今村剛さんと宇宙科学研究所の山崎敦さんに助言をいただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Yamazaki, A., et al., 2014, SSR, 184, 259
- [2] Aoki, S., et al., 2019, JGR Planets, 124, 3482
- [3] Stone, S.W., et al., 2020, Science, 370, 824
- [4] Chaffin, M.S., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 1036
- [5] Masunaga, K., et al., 2022, Nat. Commun., 13, 6609
- [6] Masunaga, K., et al., 2015, JGR Planets, 120, 2037
- [7] Masunaga, K., et al., 2017, Icarus, 292, 102
- [8] Nara, Y., et al., 2020, JGR Planets, 125, e2019JE006192
- [9] Tsuchiya, F. et al., 2024, Proc. SPIE 13093 130930I

Overview of Mars and Venus Observations Made by Hisaki

Kei MASUNAGA

Institute of Arts and Sciences, Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa-machi, Yamagata-shi, Yamagata 990-8560, Japan

Abstract: Atmospheric escape from Mars and Venus plays a crucial role in understanding the loss of water on these planets. From 2013 to 2021, JAXA's Hisaki space telescope intermittently observed the upper atmospheres of Mars and Venus, focusing on the escape of hydrogen and oxygen. This article highlights the major findings of these observations, which revealed a strong coupling between lower atmospheric phenomena (such as dust storms and atmospheric waves) and the abundance of hydrogen and oxygen atoms in the upper atmosphere. These interactions potentially influence the atmospheric escape processes on both planets.



ひさき衛星で解き明かす 彗星の核近傍のガス中で生じる物理現象

鈴木 雄 大

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: suzuki.yudai@jaxa.jp

彗星は、初期太陽系環境の理解に重要な研究対象である。彗星のガスの観測から核の化学組成を推定するためには、核近傍で生じる物理現象の理解が不可欠である。そこで、ひさき衛星による高空間分解能の紫外線分光観測が重要な役割を果たす。本稿では、ひさき衛星による彗星の観測例と、それを基に構築された光の放射伝達モデルから得られた新たな知見について紹介する。

ひさき衛星は、木星系を始めとする惑星環境の観測的解明を主目的として様々な惑星の観測を行ってきた。一方で、惑星以外の天体の観測も多く行っている。そのうちの一例が彗星である。本記事では、ひさき衛星による彗星の観測例と、そこから明らかになった彗星大気（コマ）中で生じる物理現象に関する研究成果について紹介する。

惑星科学における彗星研究の意義

彗星と初期太陽系環境

時に夜空で美しい姿を見せてくれる彗星。2024年にC/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS)、いわゆる紫金山・アトラス彗星を見た（見ようと頑張った）方もいらっしゃるだろう。一般的には彗星といえばやはり美しい尾をイメージする方がほとんどだが、本来の彗星の定義は揮発性物質を多く含む希薄な大気（コマ）をまとった小天体である。その「本体」と言える固体の核の大きさはせいぜい数km程度だが、核表面の氷の昇華により放出されるガスは数百万km、すなわち太陽に匹敵するほどの大きさにまで広がる。放出されたガスやチリの一部は太陽光等の影響を受けて彗星核から遠くまで輸送され、時に美しい尾として観測

される。

彗星の多くは海王星以遠の太陽系外縁部に起源を持つと考えられている。中でも、短周期彗星は太陽から約30-50天文単位に存在するエッジワース・カイパーベルトと呼ばれる小天体群、長周期彗星は太陽から約1-10万天文単位ほどに存在するとされているオールの雲と呼ばれる小天体群が起源であると考えられてきた。小惑星同様、彗星も初期太陽系の姿をとどめた微惑星の生き残りである可能性が高く、微惑星の集積・成長過程や初期太陽系外縁部の温度・酸化還元環境等を現在に伝える貴重な研究対象である。また、彗星は初期地球への水の供給源の候補天体としても注目されている。特に短周期彗星の重水素・水素同位体比（D/H比）は地球に近いものが多く、水起源の1つとして有力視されている。ESA（European Space Agency）のRosetta探査機による67P/Churyumov-Gerasimenkoの周回探査（2014-2016年）では当初、地球の3倍以上（ 5.3×10^{-4} ）という非常に高いD/H比が報告された[1]。しかし、最新の再解析結果[2]からダスト表面へのH₂Oの再凝結・再昇華に伴うD/H比の一時的な上昇が明らかになり、同彗星の核のD/H比は地

球の約1.7倍 (2.6×10^{-4}) であると見積もられた。一方で、非常に活動的でダストの放出量が多い彗星ほどD/H比が低くなるという傾向も指摘されており [3], 彗星の起源や活動度と同位体比の関係性についてはさらなる丁寧な議論が必要である。

彗星の化学組成とコマの観測

彗星の形成環境は核の化学組成に現れる。例えば低温環境で形成された彗星はCO₂/H₂O比が高く、還元的な環境で形成された彗星はCO/CO₂比が高い可能性が高い [e.g. 4]。一方で、彗星が遠方から太陽に接近する際、表面温度の変化に応じて核からのガスの放出率は大きく変化する。このとき、分子種により昇華温度が異なるため、日心距離に応じて遠方ではNH₃, CO, CO₂中心、地球近傍付近ではH₂O中心、というようにコマの組成が変化する。また、分子の質量等に応じてコマ中での速度が異なるほか、ガス中では光解離反応が進行しており、解離生成物(娘分子)の観測から解離前の分子(親分子)の放出量を推定する場合には分子種により解離率も異なる。したがって、コマの観測から核の組成を推定するためには、核からの水の昇華過程やコマ中での運動様式理解が必須となる。特に核近傍では分子の光解離・電子衝突解離や原子間衝突等の複雑な現象が生じていると考えられているが、探査機会の乏しさや高空間分解観測の少なさから、核付近でのコマ(内部コマ)における物理現象の理解は進んでいない。

紫外線による彗星の観測

紫外線による彗星観測では、水分子や二酸化炭素分子から解離生成した水素原子、酸素原子、炭素原子など、親分子から解離生成した原子(一般化して娘分子と呼んでしまうことが多い)が発する輝線が主に対象となる。地球大気が紫外線を強く吸収するため、紫外線観測には、地上望遠鏡は使用できず宇宙望遠鏡や探査機の打ち上げが必須であるという最大の欠点が存在する。しかしその一方で、娘分子は親分子に比べて軽く速度が大き

いため非常に広がった分布を持っており、飛翔体搭載という制約の強い望遠鏡であっても観測しやすいという利点がある。Rosetta探査機搭載の紫外線分光器Aliceでは、水素・酸素・炭素原子の輝線の観測結果とモデルの組み合わせにより、親分子にあたる水分子や二酸化炭素分子の核からの放出率を推定し、核全体の化学組成や核表面におけるガス放出領域が議論されてきた [e.g. 5, 6]。水放出率に関しては、SOHO衛星に搭載された太陽風観測カメラSWANが数多くの長周期彗星のLy- α 線の放射輝度を観測してきた [e.g. 7]。これらの研究により、大まかには太陽接近経験の少ない彗星ほど水放出率の日心距離依存性が緩やかになるという傾向が見られた。

しかし、Rosetta/Aliceが近接観測を行った67P/Churyumov-Gerasimenkoは非常に軌道周期が短く活動度が低いため、先述した内部コマ特有の現象の観測的実証に至ったとは言いがたい。また、SOHO/SWANの空間分解能は1°であり、コマ中におけるLy- α 線の放射輝度の詳細な空間分布は捉えられていない。

ここまで述べたように、彗星の核(さらには初期太陽系外縁部)の化学組成を明らかにするためには、彗星のコマ中で生じる物理現象の解明が重要である。紫外線分光観測では核から放出された分子から解離生成される娘分子の分布を捉えることができるが、これまでに活動度の高い彗星の内部コマの高空間分解観測の例はほとんどなかった。そこで登場するのが、我らが「ひさき衛星」である。

彗星コマ中のLy- α 線の放射輝度分布

ひさき衛星による彗星観測

一般的に、長周期彗星の方が短周期彗星よりも太陽接近経験が少ないため、より始原的な姿をどどめていると考えられる。また、活動度(ガス放出率)がより大きく、コマ中の物理現象の研究にも向いている。したがって、本研究ではひさき衛星による4種類の長周期彗星の観測データを解析

表1 解析対象とした長周期彗星

彗星名	近日点 通過日	近日点距離 (天文単位)	観測期間	観測時の 日心距離 (天文単位)	観測時の 地心距離 (天文単位)
C/2013 US10 (Catalina)	2015/11/15	0.823	2015/11/22-2015/12/02	0.829-0.884	1.50-1.69
C/2013 X1 (PanSTARRS)	2016/04/20	1.31	2016/05/30-2016/06/02	1.44-1.46	0.910-1.01
C/2015 ER61 (PanSTARRS)	2017/05/09	1.04	2017/06/02-2017/06/03	1.11-1.12	1.38-1.40
C/2015 V2 (Johnson)	2017/06/12	1.64	2017/06/25	1.65	0.892-0.901

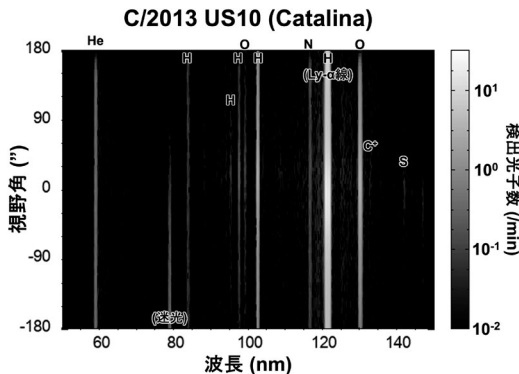


図1 ひさき衛星で得られた彗星のデータの例

した(表1). ちなみにこれら以外にも、観測した
が暗くて輝線がほとんど検出できなかった彗星な
どもあった. 得られたスペクトルの例を図1に示
す. 横軸は波長, 縦軸はスリット長手方向に沿っ
た視野角を表している. 他のひさき衛星関連の記事
でも同様のスペクトル図が登場するが, 彗星は
コマまで含めると非常に広がっているため, 惑星
等の観測データとは異なり縦方向一杯に信号が
入っているのが特徴である. 横軸(波長)方向に
データを見ていくと, 水素(121.6, 102.6, 97.4 nm
など), 酸素(130.4 nmなど), 硫黄(142.5 nm),
窒素(116.8 nm), 炭素イオン(133.5 nm)等の
様々な原子種の発する輝線が検出されていること
がわかる. 縦軸(視野角)方向に見ると, 各輝線
の放射輝度の1次元の空間分布がわかる. 視野中
心に核が来るように観測しているため, 視野角0°
付近で各輝線の放射輝度が最大となっている. 空
間分解能は約10"なので, 例えば波長121.6 nmの
領域の明るさの分布を見れば, Ly- α 線の放射輝

度, さらにはコマ中の水素原子の分布を 10^4 kmより
高い空間分解能で算出することができる.

データの1次処理: 新たな感度較正手法の導入

ひさき衛星の観測データを用いて彗星の核から
の水放出率を評価するためには, Ly- α 線の放射輝
度分布の測定が必要である. しかし, Ly- α 線の輝
線波長付近における感度の評価は困難を極めた.
彗星に限らずLy- α 線は非常に明るいため, 長年の
蓄積により検出器の波長121.6 nmにおける感度
(正確には, マイクロチャンネルプレート: MCP
のゲイン)は他波長に対応した領域に比べて著し
く低下している. 特に, 木星圏の観測の際等に視
野中央付近は幅20", 視野角約45"以上は幅140"
というダンベル型のスリット[e.g. 8]が頻繁に用い
られていたため, 視野の両端付近では中央以上に
感度低下が急速に進行していた. ひさき衛星では
恒星の観測データを用いて感度較正を行ってきた
が, 感度の空間不均一性を評価するためには, 視
野内の1点のみを占める恒星の観測では不十分で
あり, 検出面全体を包括できる新たな感度較正手
法を適用する必要があった. そこで, 観測データ
に混入した地球高層大気(ジオコ罗纳)起源の輝
線の放射輝度を評価するために取得された, 各観
測天体から視野角を少し外した観測データ(スカ
イ観測データ)を用いた感度較正法を新たに考案
した. ジョコ罗纳のLy- α 線/Ly- β 線放射輝度比が
視野内で一定と仮定した場合, 得られたデータの
Ly- α 線/Ly- β 線検出光子数比の時空間変化には検
出器の感度変化が直接反映されているとみなして
各観測時における感度を評価した(図2).

得られたLy-α線の放射輝度分布

感度較正を行ったのち、観測データからスカイ観測データを引くことにより、視野内に混入するジオコ罗纳の信号を除去し、彗星起源の信号を抽出する。こうして得られた長周期彗星のLy-α線

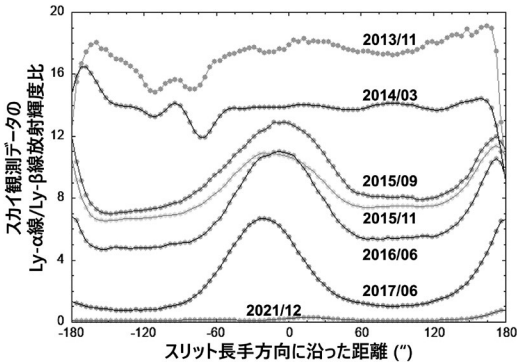


図2 ひさき衛星のスカイ観測データにおけるLy-α線/Ly-β線放射輝度比の時間変化。検出器の感度はこれらの値に比例していると考えられる。

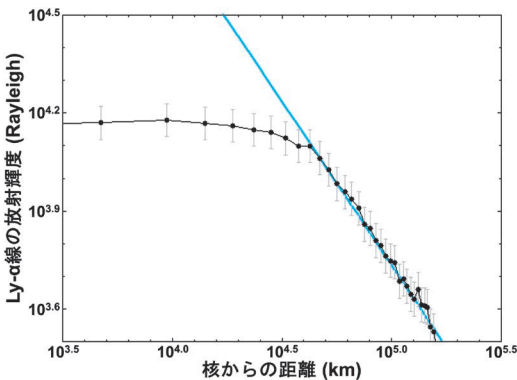


図3 ひさき衛星で得られた彗星コマ中のLy-α線放射輝度分布の、解析解によるフィッティング例。黒点が観測データ、青線が解析解を表す。

の放射輝度分布を図3に黒点で示す。図3の彗星の場合、核から 4×10^4 km以上遠い領域では、放射輝度が核からの距離に反比例して減少する一方で、核に近い領域では減少がほとんど見られないことがわかる。

彗星の活動度の評価

彗星の水放出率と活動領域の面積

まず、得られたLy-α線放射輝度分布から、各彗星の活動度を算出する。計算コストを抑えるために非常に単純化した解析解[9]で計算した水素原子数密度分布を用いて観測データへのフィッティングを行うと、上述の核から 4×10^4 km以上の領域ではモデルと観測データがよく適合することがわかる(図3青線)。ここから水放出率を計算すると、表2の2列目の値が得られる。

続いて、各彗星の観測時の日心距離から期待される単位面積あたりの水分子放出量[10]を観測で得られた水放出率と比較すると、それぞれの核表面における活動領域の面積を計算することができる(表2の3列目)。さらに、活動領域の面積を核の表面積[11]で割ることにより“active fraction”と呼ばれる核表面における活動領域の割合の指標を算出することができる(表2の4列目)。今回解析した4彗星のうち、C/2013 X1 (PanSTARRS)については核の大きさの測定例が存在しなかったためactive fractionを算出することができなかったが、他の3彗星については最大でも25%程度という結果が得られた。C/1996 B2 (Hyakutake)など、一部の彗星ではこのactive fractionは100%を大きく超えることがある[3]。これは水を

表2 ひさき衛星のデータ解析から得られた長周期彗星の活動度の評価

彗星名	水放出率 (/s)	核表面の活動領域の面積 (km ²)	核表面における活動領域の割合 (%)
C/2013 US10 (Catalina)	$(4.8 \pm 0.2) \times 10^{28}$	8.8 ± 0.1	25.8 ± 0.4
C/2013 X1 (PanSTARRS)	$(6.9 \pm 0.7) \times 10^{27}$	7.4 ± 0.6	—
C/2015 ER61 (PanSTARRS)	$(4.3 \pm 0.6) \times 10^{27}$	1.8 ± 0.4	16.7 ± 0.3
C/2015 V2 (Johnson)	$(1.4 \pm 0.3) \times 10^{27}$	1.9 ± 0.4	5.3 ± 1.1

含んだダストがガスと共に核から噴出され、さらにそのダスト表面からも水分子の昇華が進んでいる場合、水放出領域の総面積が核の表面積よりも大きくなるためである。しかし、今回解析対象とした彗星ではこのような現象は支配的ではなかったことがわかる。

彗星コマ中で生じる物理現象

光子の多重散乱効果

前節では、単純化した解析解を用いて外部コマにおけるLy- α 線放射輝度分布から水放出率を得た。しかし、図3が示す通り、内側については本モデルでは観測データを全く再現できず、モデルでは考慮していない物理過程が生じていることがわかる。核近傍でのLy- α 線の放射輝度の折れ曲がりにはSOHO衛星搭載コロナグラフLASCOによるC/1997 H2 (SOHO)の観測でも見られており[12]、こちらはHaser modelと呼ばれる他の単純な解析解[13]で再現されている。しかし、C/1997 H2 (SOHO)は近日点距離が非常に小さいサングレーザと呼ばれる彗星で、我々の研究で解析した彗星とは軌道要素ならびに親分子の光解離寿命等のパラメータが大きく異なるため、同様の解析解ではひさき衛星の観測結果は再現できない。

核近傍では分子の光解離・電子衝突解離に加えて原子間衝突が起こりうる。しかし、原子間衝突を考慮した数値計算結果[e.g. 14]を見ても、 10^4 – 10^5 kmの領域に水素原子数密度分布の顕著な変化は見られていない。また、今回の解析結果を見ると、いずれの彗星においても、水素の視線に沿った柱密度が $(1-3) \times 10^{22}/\text{km}^2$ となる高度付近からLy- α 線の放射輝度の傾きが大きく変化していることがわかった。そこでこの折れ曲がりの原因として我々が目をつけたのが、光子の「多重

散乱」と呼ばれる現象である。

彗星は揮発性物質を激しく噴出している天体だが、それでもガスは非常に希薄であり、コマ中の多くの領域ではある水素原子が放出したLy- α 線は他の水素原子に再吸収されることなくコマを出て観測者まで届く(単散乱)。しかし、核付近や活動度が高い場合など、水素の密度が上昇すると、ある水素原子から放出されたLy- α 線の一部は他の水素によって吸収・再放射されるようになる(多重散乱)。このとき、再放射の効率が100%でないことや再放射する方向がランダムであることにより、水素原子の数密度と観測されるLy- α 線の放射輝度が比例しなくなり、単散乱のみを仮定した場合に比べて放射輝度が暗い傾向になる。ここからは、ひさき衛星で観測されたLy- α 線放射輝度の折れ曲がりへの多重散乱の寄与を検証するために、コマ中でのLy- α 線の放射伝達モデルを構築し、多重散乱が支配的となる条件を考察する。

多重散乱効果を考慮した放射伝達モデルの構築

ここではモンテカルロ法を用いて多重散乱による光の伝搬を再現する。放射伝達計算に必要な彗星コマ中の水素原子の数密度分布は、 $\text{H}_2\text{O}-\text{OH}-\text{H}$ の光解離系を考慮した解析解[15]*1を用いて計算

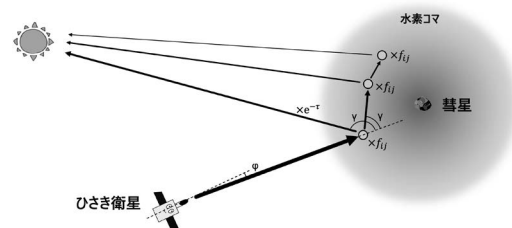


図4 多重散乱を考慮した放射伝達モデルの概念図
計算コストの削減のため、実際の現象とは正反対に、ひさき衛星から放射された光子が彗星のコマ中で数回吸収・再放射されたのち太陽に到達する確率を計算する。

*1 3種類の解析解[9, 13, 15]が登場していてややこしくなりましたが、いずれも仮定している条件は非常に類似している(大まかに言えば、先に登場するものほど単純化度合いが高い[9>13>15])。特に、放射伝達モデルの構築に使用した解析解[15]は、Haser modelと呼ばれる彗星コマ研究で最も広く使われている解析解[13]を $\text{H}_2\text{O}-\text{OH}-\text{H}$ の3世代へ拡張したものである。

した。本来、観測される光は太陽から放射され、彗星のコマ中の水素原子によって吸収・再放射されたものである。しかし、最終的にひさき衛星の視線に沿って水素原子の数密度やLy- α 線の放射輝度を積分することを鑑みて、ここでは計算コストの削減のため、先行研究[16]に倣いひさき衛星から放射された光子が彗星のコマ中で数回吸収・再放射されたのち太陽に到達する確率を計算した(図4)。コマ中の水素の温度が高いほど、

水素原子同士の相対速度が大きくなりドップラー効果の影響で多重散乱が生じにくくなるため、 10^3 - 10^4 Kの範囲の様々な温度を仮定して計算を行った。

放射伝達モデルによる観測データの再現

放射伝達モデルを用いてひさき衛星による観測を再現した計算結果を図5に示す。上述の通り水素温度を 10^3 - 10^4 Kの間の様々な値に設定して計算した結果、同じ水素数密度分布でも高温の場合の方が多重散乱が起こりづらく、Ly- α 線の放射輝度が大きくなる事が確認された。多重散乱効果を考慮していない場合(図5青線)と比べて、多重散乱の考慮(図5灰色領域)によりひさき衛星の観測結果(図5黒点)と統合的なLy- α 放射輝度分布が得られることがわかる。単一水素温度を仮定して観測データを再現することは難しいが、観測データが低高度では低温の、高高度では高温の水素を仮定した場合の計算結果と近くなっていることは、核から離れるほど水素の温度が上昇するという過去の数値計算結果[e.g. 14]と整合的である。

多重散乱効果が支配的となる条件

前節までに構築した放射伝達モデルを用いて、一般的な彗星のコマ内でLy- α 線の多重散乱が無

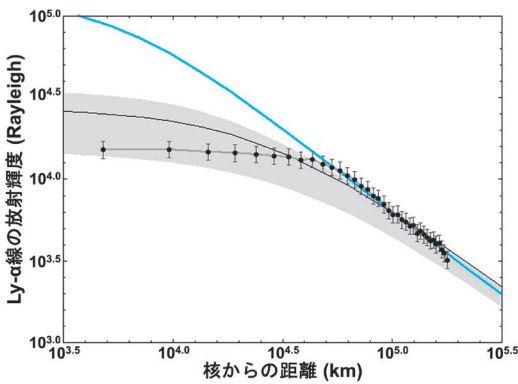


図5 ひさき衛星の観測データと放射伝達モデルによる計算結果の比較。

黒点が観測データ、灰色の影領域が1,000-10,000 Kの計算結果の範囲、黒線が7,000 Kの場合の結果、青線が単散乱のみを考慮した場合の結果を表す。

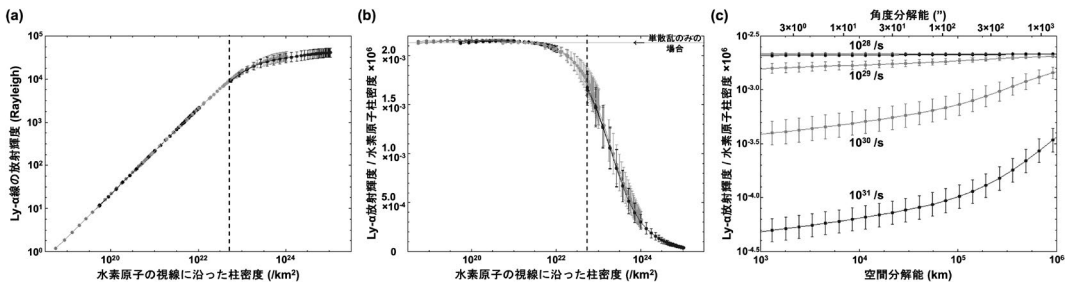


図6 彗星のコマ中において多重散乱が支配的となる条件

- (a) 水素原子の視線に沿った柱密度と観測されるLy- α 線放射輝度の関係。
水素原子柱密度が $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ 付近で比例関係から外れ始めることがわかる。
- (b) 水素原子の柱密度とLy- α 線放射輝度/水素原子柱密度比の関係。
値が小さいほど、多重散乱が支配的であることを意味する。
- (c) 観測装置の空間分解能とLy- α 線放射輝度/水素原子柱密度比の関係。
各線に添えられた数字は彗星の水放出率を表す。

視できなくなる条件を考察する。このために現実的な彗星を一旦離れ、日心距離1天文単位・地心距離1天文単位という仮想条件のもと、様々な水放出率を持つ彗星に対して観測者の視線に沿った水素原子の柱密度と観測されるLy- α 線の放射輝度の関係を調べた(図6a)。図6bはLy- α 線の放射輝度と水素原子の柱密度の比に 10^6 を乗じた値^{*2}を水素原子柱密度の関数として示したものである。水素原子の柱密度が約 $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ 以下の場合、柱密度とLy- α 線の放射輝度がほぼ比例関係になっており、単散乱が支配的であることが窺える。一方で $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$ を超えると、多重散乱の寄与が次第に大きくなりLy- α 線の放射輝度の水素原子柱密度に対する比率が小さくなる様子が定量的に示された。これまでにも、彗星の活動度が大きいときに多重散乱効果の寄与が大きくなることは定性的に予測されてきたが、実際に考慮が必要になるような観測データがなかったこともあり、定量的な議論例はほとんどなかった。ひさき衛星による高空間分解能の紫外線分光観測が行われたことにより、彗星の内部コマの理解が進んだことがよくわかる例である。

では、具体的に観測装置の空間分解能がどれくらい高い場合に多重散乱の考慮が必要になるか。構築したモデルを核から半径 n kmの範囲で積分することにより空間分解能 n kmの観測を再現すると、図6cのような空間分解能とLy- α 線放射輝度/水素原子柱密度比の関係が得られる。例えば先述のSOHO/SWANの場合、空間分解能は 1° 程度であり、これはSOHOと彗星の間の距離が1天文単位の場合 10^6 km以上に相当する。図6cを見ると水放出率が $10^{29}/\text{s}$ までの彗星であれば多重散乱の考慮は不要だが、水放出率 $10^{30}/\text{s}$ ほど活動的な彗星に対しては多重散乱を考慮しないと水素原子密度を半分程度にまで過小評価してしまうこと

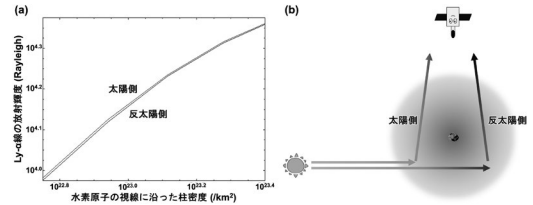


図7 (a) 太陽側と反太陽側におけるLy- α 線放射輝度と水素原子柱密度の関係。太陽側の方がわずかに放射輝度が大きくなるのがわかる。(b) 太陽側と反太陽側からひさき衛星に到達する光の経路の違いの模式図。

がわかる。

多重散乱効果によって生じる現象

対称的な密度分布が作る非対称的な放射輝度分布

前節では「水素原子柱密度」対「Ly- α 線放射輝度」で括って議論したが、計算結果を注意深く分析すると、視線に沿った水素原子柱密度のみならずコマ内の位置によっても多重散乱の効果の強さがわずかに異なることがわかった。図7aに太陽側と反太陽側における水素原子柱密度とLy- α 線放射輝度の計算結果を示す。太陽側の方がわずかに放射輝度が大きくなっていることが見てとれる。図6a, bでは「視線に沿った水素原子の柱密度」の関数として議論をしており、太陽を出た光子が彗星の水素に最後に散乱されるまでに通ってきた道のりのことは議論中は気にしていなかった。しかし実際には反太陽側の水素の方が、太陽からその水素に至るまでに光子が通る道のり(光路長)が長いため、より多くの散乱を受けやすく(図7b)、視線に沿った水素原子柱密度は同じでも反太陽側の方が放射輝度が小さくなるのである。とはいえ視線積分をすればこの効果の寄与はそこまで小さくなく、今回の計算結果では非常に活動的な水放出率 $10^{31}/\text{s}$ の彗星であっても太陽-反太陽非対称性は高々1.5%ほどとなっ

^{*2} 10^6 を乗じたのは「g-factor」と呼ばれる単散乱の効率に対応する係数と合わせるためだが、本稿の範囲では気にしなくてよい。

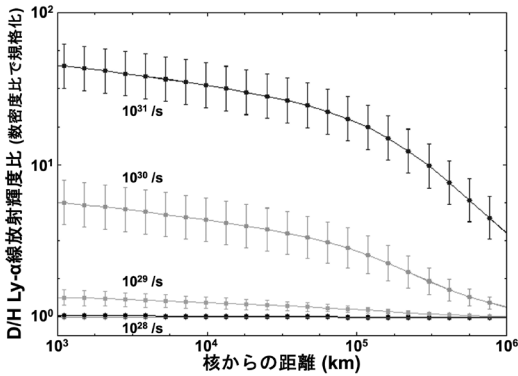


図8 核からの距離とD/H Ly- α 線放射輝度比の関係。放射輝度比はD/H数密度比で規格化しており、単散乱が支配的な場合は1に近づく。各線に添えられた数字は彗星の水放出率を表す。

た。現実の観測では水素原子の数密度や温度の非対称性や測定誤差等の方が大きく検出は困難だと思われるが、対称的な原子数密度分布が非対称な輝線放射輝度分布を作るという帰結は興味深いものである。

核近傍でのD/H放射輝度比の急激な上昇

前節の効果の観測的検出は困難だが、構築したモデルからもう1つ、観測に大きく影響する可能性のある現象が発見された。それは、光学観測の場合、核に近づくほど重水素・水素同位体比(D/H比)が上昇して見えるということである。

質量数1の水素原子の発するLy- α 線の波長が121.567 nmである一方、重水素原子のLy- α 線の波長は121.534 nmと33 pmだけ短い。また、典型的には彗星のD/H比は 10^{-4} オーダーである。このため、水放出率が異常に大きな彗星でない限り、重水素のLy- α 線は光学的に薄く、単散乱が支配的とみなせる。本稿で繰り返し述べてきたように、核に近づくとき水素原子数密度の増加量の割には水素原子の発するLy- α 線放射輝度が伸び悩む。その一方で、光学的に薄い重水素のLy- α 線の放射輝度は重水素原子の数密度増加に合わせて順調に増加していく。よって、D/H数密度比分布が一定だったとしても、D/H Ly- α 線放射輝度

比は核に近づくほど急増するのである(図8)。

今回解析したひさき衛星のデータの場合は波長分解能が1 nm程度のためそもそもD/H比の算出は不可能であったが、2029年に打ち上げが予定されているComet Interceptorミッション[17]では超小型紫外線望遠鏡によるD/H比の光学観測が予定されており、本節で紹介した効果が観測結果に大きな影響を及ぼすだろう。

まとめ：ひさき衛星と彗星

本稿では、ひさき衛星による彗星のガス(コマ)の観測結果とそれを基に構築した放射伝達モデルを用いて、多重散乱効果の光学観測への影響を考察した。彗星の放射伝達モデルは2000年[16]以降ほとんど発展がなかったが、ひさき衛星の高空間分解能のお蔭で大きく理解が進んだのである。

高い空間分解能を持ち、比較的チームが小さく柔軟に観測計画を組みやすいひさき衛星は、長周期彗星の研究に最適である。生憎、筆者がひさき衛星の観測計画に携わり始めた頃には、指向性能の低下により彗星の核を視野中心に捉えることが難しくなっていた。しかし、それでも彗星の物理・化学の理解や今後の様々な彗星関連ミッションに向けて、多数の彗星の紫外線高空間分解観測データをもたらしてくれたことは非常に大きい。本稿で紹介したLy- α 線の多重散乱効果に関する研究以外に、現在も化学組成等に関する研究が進行中である。運用は終了してしまったが、これからもまだまだひさき衛星×彗星の新しい成果が出続けるだろう。続報にご期待いただきたい。

参考文献

- [1] Altwegg, K., et al., 2015, Science, 347, 6220-1261952
- [2] Mandt, K. E., et al., 2024, Sci. Adv, 10, 46
- [3] Lis, D. C., et al., 2019, A&A. 625, L5.
- [4] Ootsubo, T., et al., 2012, ApJ. 752, 15
- [5] Feldman, P. D., et al., 2015, A&A. 583, A8
- [6] Noonan, J., et al., 2016, Acta Astronautica, 125, 3
- [7] Combi, M., et al., 2019, Icarus, 317, 610

- [8] Yoshioka, K., et al., 2013, *Planet. Space Sci.*, 85, 250
- [9] Kaneda, E., et al., 1986, *Nature*, 321, 297
- [10] Cowan, J. J., & A'Hearn, M. F. 1979, *The Moon and the Planets* 21, 155
- [11] Paradowski, M. L. 2020, *MNRAS*, 492, 4175
- [12] Mancuso, S., 2015, *A&A*, 578, L7
- [13] Haser, L., 1957, *Bulletin de la Class des Sciences*, 43, 740
- [14] Tenishev, V., et al., 2008, *ApJ*, 685, 659
- [15] O'Dell, C. R., et al., 1988, *ApJ*, 334, 476
- [16] Richter, K., et al., 2000, *ApJ*, 531(1), 599
- [17] Jones, G. H., et al., 2024, *SSR*, 220, 9

What Did the Hisaki Satellite Tell Us about Comets?

Yudai SUZUKI

Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract: Comets are important targets for understanding the environment of the early solar system. To estimate chemical compositions of the cometary nuclei from observations of surrounding gas, it is essential to clarify physical phenomena occurring in the vicinity of nuclei. We observed several long-period comets using the Hisaki satellite and investigated the Ly- α radiance distributions in detail. Combining observations and a radiative transfer model, we found that multiple scattering becomes dominant at altitudes below tens of thousands of km and when the hydrogen column density is $5 \times 10^{22}/\text{km}^2$. We also found that a slight radiance asymmetry occurs between the sunward and anti-sunward sides even if the hydrogen number density is spherically symmetric, and the D/H Ly- α radiance ratio increases rapidly near nuclei.

超新星残骸での宇宙線加速効率の探求

霜田 治郎

〈宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

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



古くより宇宙から到来する相対論的なエネルギーを持つ粒子，宇宙線の存在が知られている。その起源は，1912年にVictor Franz Hess博士が発見して以来，100年以上経つ今も謎のままである。さらに，どうやって相対論的なエネルギーまで粒子を「加速」するのか，という物理過程の詳細も解明されていない。本稿では，この謎粒子（特に宇宙線陽子）の起源天体として第一候補に挙げられる「超新星残骸の衝撃波」において，宇宙線加速効率を天体観測により突き止めるために行ってきた理論研究について紹介する。

1. 宇宙線と超新星爆発

宇宙線は銀河系内を飛び交う荷電粒子として古くから知られており，エネルギー密度としては陽子を主とする。そのエネルギーは相対論的效果が無視できなくなる10 GeV（陽子の速度が光速の約99%）付近から，冪乗則に従って数を減らしながらも，その100億倍のエネルギーである100 EeV（“E”は 10^{18} を表す）まで到達している。

さらに注目すべきは，宇宙線は数密度にして $\sim 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$ でありながら，星間空間の「普通のガス（数密度 $\sim 1 \text{ cm}^{-3}$ ，温度 $10^4 \text{ K}=1 \text{ eV}$ ）」と同程度のエネルギー密度 $\sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$ を持つ点である。例えるなら，たった一人（宇宙線）が全世界の人々80億人（ $=8 \times 10^9$ ，普通のガス）と綱引きで勝負して，勝ってしまうような存在である。この「やんちゃな粒子」が，宇宙から地球に表面積1平方メートルにつき毎秒1000個程度降り注いでいる。

しかし，その起源天体については，Victor Franz Hess博士が1912年に発見して以来，今もって謎のままである。主な要因は，宇宙線は光と違

い荷電粒子なので，星間空間の磁場により軌道を複雑に変化させながら地球まで到来するためである。地球での到来方向を見ても実際にどこから来たのかがわからないのである。

宇宙線の起源についての考察は，1950年代から60年代までには，Vitaly Lazarevich Ginzburg博士 [1] や早川幸男博士 [2] らの研究により，基礎となる考え方が確立する。これは到来する宇宙線の中に，星間媒質中にほとんど存在しないホウ素 ^{11}B がやたらと多いことから，宇宙線ホウ素が，宇宙線陽子と炭素 ^{12}C の衝突（核破碎反応）により生成されたという考察から出発する。普通の星間ガス中ではホウ素と炭素の数比が $10^{-5.7}$ 程度であるのに対し [3]，宇宙線では ~ 0.1 と，10万倍もホウ素が多い [4]。

宇宙線陽子が炭素に衝突し宇宙線ホウ素を生成する反応断面積は，地上実験により推定される。ここから，宇宙線が源から磁場に軌道を曲げられながら，地球に到達するまでに辿った実効的な経路の長さが，質量柱密度に換算して $\Lambda \sim 10 \text{ g cm}^{-2}$ と求まる（grammageと呼ばれる）。銀河円盤を一樣かつ定常状態にあると近似することで，宇宙

線が銀河系から逃走する時間は $t \sim \Lambda / m_p n_{\text{ISM}} c$
 ~ 10 Myrだと推定される。ここで m_p は陽子質量、
 $n_{\text{ISM}} \sim 1 \text{ cm}^{-3}$ は星間ガスの平均的な数密度、 c は
 光速である。銀河円盤は半径10 kpc、厚み300 pc
 の薄い円盤であり、その体積は $V_G \sim 3 \times 10^{66} \text{ cm}^3$
 である。この体積に宇宙線のエネルギー密度 ε_{cr}
 $\sim 1 \text{ eV cm}^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-3}$ を掛けて、逃
 走時間 t で割ると、宇宙線を説明するのに必要な
 エネルギー注入率が $L_{\text{cr}} \sim \varepsilon_{\text{cr}} V_G / t \sim 5 \times 10^{47} \text{ erg yr}^{-1}$
 と求まる。

この必要とされるエネルギー注入率を賄える天
 体として、真っ先に候補に挙がるのが超新星爆発
 である。銀河系内では、おおよそ100年に一度の
 ペースで超新星爆発が起こる。超新星爆発の爆風
 の運動エネルギーは 10^{51} erg なので、エネルギー
 注入率は $L_{\text{sn}} \sim 10^{49} \text{ erg yr}^{-1}$ となる。そのうちの最
 低でも $\sim 5\%$ が宇宙線の加速に消費されればよい。
 爆風の持つ巨視的な運動エネルギーを微視的
 な粒子の運動エネルギーへと変換する物理過程と
 して、爆風と星間ガスの衝突で発生する衝撃波で
 の散逸が期待されている。衝撃波によって、爆風
 の運動エネルギーが無視できないくらい散逸して
 いる段階は、天体としては「超新星残骸」と分類
 されることが多い*1。

宇宙線加速の証拠を捉える上での難しさにつ
 いて、研究者ごとに異なる考えがあると思われる
 が、私の意見は「超新星残骸までの典型的な距離

$\geq 1 \text{ kpc} = 3000$ 光年にある衝撃波を観測して、ど
 うやって $\sim 5\%$ のエネルギー変換が起こっている
 ことを示すのか?」という点である。本稿では、
 超新星残骸における宇宙線加速に関連した観測を
 紹介し、このエネルギー変換効率の問題（宇宙線
 の注入問題とも呼ばれる）が、超新星残骸をどの
 ように観測すれば求まるのかを追求した理論研究
 について紹介する。

2. 超新星残骸の観測

超新星残骸では電波・赤外・可視光・紫外・
 X線・ガンマ線という、ほぼすべての帯域で観測
 研究がなされている。それぞれの帯域で代表的な
 研究課題は異なり、宇宙線加速の文脈では宇宙線
 自身が放射に直接関わるなどの理由でガンマ線、
 X線、電波による観測研究が主流である。この章
 では、世界的に主流であるガンマ線、X線、電波
 観測を用いた研究について簡単に述べた後、可視
 光であるH α 輝線の活用例を紹介する。

2.1 ガンマ線観測と電波観測

超新星残骸でのガンマ線観測では、光子のエネ
 ルギーにしておおよそ $\sim 0.1 \text{ GeV}$ から $\sim 100 \text{ TeV}$
 の帯域で、世界中で精力的に行われている。特に近
 年では、チベットにある望遠鏡Asyが史上初めて
 $> 100 \text{ TeV}$ のガンマ線を検出し [10]、同様の観測
 器であるLHAASOが続いて多数の検出を報告し
 て世間を賑わしている [11]。ガンマ線が特に注

*1 細かいが、宇宙線研究者にとっては重要な事として、Ginzburg博士は宇宙線は星間ガス中の粒子との「衝突」によ
 って軌道を変えながら、源から地球まで到達すると考察していた。対して早川博士は、宇宙線は磁場の乱れにより複雑
 に曲げられながら、磁場の乱れに付随する電場で「加速」していくという、Enrico Fermi博士の理論 [5] を採用してい
 た。Ginzburg博士は [1] の中で、Fermi博士の理論を定性的に認めつつも、無視できるほど弱い効果であるとしてい
 る。これは、Fermi理論の「加速」を採用すると、観測される宇宙線電子のエネルギー分布の説明に工夫が必要だった
 ためと思われる。Fermi博士 [6] とPhillip Morrison博士ら [7] (および早川博士) は、解決策として宇宙線が銀河系か
 ら「逃走」するという「場当たりのな」仮説を導入し、将来の観測による決着を予言した。現代の標準的な考え方と
 比較すると、「加速」はFermi博士のオリジナルではなく、衝撃波で効率的に起こるという理論 [8, 9] が受け入れられ
 ている(微視的な物理過程は同様であるが、衝撃波を導入した点が異なる)。対して、ベリリウム ^{10}Be などの不安定な
 宇宙線の存在量と、核破砕でできるホウ素などの比較から、逃走仮説が支持され続けている [4]。宇宙線電子の説
 明は一筋縄ではいかず、Ginzburg博士の批判が決着したかは判断し難い。研究はこのように先が見通せず、どれほど
 それっぽく聞こえようと単純に進まない。が、先人たちがその時々をベストを尽くしてきたことは想像に難くない。
 本稿もそのように読んで頂けると幸いである。

目されるのは、宇宙線核子が星間ガス中の陽子と衝突してパイ中間子を生成し、これの崩壊で放たれるためである ($p_{cr} + p_{ism} \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$)。これは、早川博士により少なくとも1952年には指摘されており [12]、この機構が観測されるガンマ線の明るさを決めている場合は「ハドロニック (Hadronic)」と呼ばれている。これに対して、宇宙線電子も逆コンプトン散乱などによりガンマ線を放射することができ、電子起源の場合は「レプトニック (Leptonic)」と呼ばれる。

宇宙線起源問題の解明には最低限、(1) 定性的に観測されたガンマ線が宇宙線核子由来のHadronicであることを示す、(2) 定量的に「~5%のエネルギー変換」が起きていることを示す必要がある。(1)は幸い、Hadronicの時は同時にニュートリノを放射するので、それを検出して決着させることが原理的に可能である。(2)は定量を含んだ議論になるために、ガンマ線・ニュートリノ観測だけでなく、より多角的なアプローチを必要とする。代表的な問題として、Hadronicガンマ線の放射輝度から宇宙線量を求める際に必要となる「ターゲットガス中の陽子の量」に不定性が大きいことが挙げられる。これは電波天文学における「21 cm輝線によるHI雲観測」や「CO輝線により分子雲観測をして、化学反応モデルによりH₂の量に直す」という研究に対応する。

電波観測により定量化されるガスの量にある程度の不定性が生じる事とは別に、実際の研究の現場でよく議論されるのは、観測したガスの「実際の位置 (=距離)」の不定性である。例えば、典型的な距離~1 kpcにある超新星残骸を観測したとする。宇宙線加速の現場である衝撃波が分子雲などの濃いガスと衝突し、かつ「~5%の変換効率」の場合はHadronicガンマ線が検出可能なほど十分に明るくなりうる。超新星残骸の直径は典型的に~10 pcなので、「分子雲のあるところでガンマ線が明るいからHadronicである」という傍証を得るだけでも、衝撃波および分子雲の真の位

置 (距離) を「10 pc/1 kpc=1%」以上の精度で求める必要があり、これは容易ではない。

幾何学的な決定は難しいので、代わりに議論されるのはCO輝線の分光観測などである。衝撃波が分子雲中を伝播しているとすると、ガスを加熱したり、衝撃波進行方向にそって平均運動をするはずなので、輝線幅やドップラー効果による中心周波数のズレ、高準位の輝線放射などが期待される。このような情報を駆使して、超新星残骸の衝撃波に付随すると解釈される分子雲が多数報告されている (図1)。

この場合は、衝撃波が分子雲と衝突した領域と、そうでない領域で電離した炭素Cや酸素Oからの輝線放射強度 (X線帯域) が異なるなどの「対応物」の存在が期待される。が、現在のところ、明確な観測報告はなく、観測結果と比較可能な理論研究も確立していない。また、電離が進行してしまうと、中性水素21 cm線やCO輝線等を放射しなくなってしまうため、求めたい「ガスの

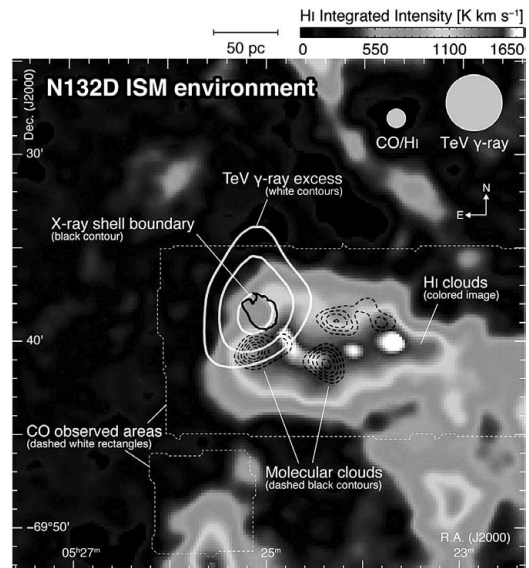


図1 佐野栄俊博士ら [13] による、大マゼラン雲にある超新星残骸N132Dでの観測例。中央の濃い黒線が、超新星残骸を示す。超新星残骸と同じ位置に種々の雲が存在するか、慎重に議論されている。

量」を定量すること自体がさらに困難になる。

このような理由と、「ガンマ線の表面輝度から求まる宇宙線量」がそもそも距離の不定性を反映するという理由から、「~5%のエネルギー変換」を捉えることは容易ではない。地球で観測されている宇宙線量を説明しうだけの、十分に効率的な宇宙線加速が衝撃波で起こっていることを示すためには、もうひとつ工夫必要である。

2.2 宇宙線加速に迫る多角的アプローチの例

観測的に超新星残骸衝撃波で高効率な宇宙線加速が起こっていると主張した研究の1つとして、Eveline Helder博士らが2009年に行ったもの [14] を紹介する。これは、従来までの類似した研究と比べて、可視光のH α 輝線を上手く利用した点が新しかった。

爆発から間のない、若い超新星残骸で観測されるH α 輝線は、狭輝線成分 (narrow 成分) と広輝線成分 (broad 成分) で構成される場合がある (図2)。narrow 成分の輝線幅は典型的に30 km s⁻¹程度以上あり、温度に換算して25,000 K以上とやたら太い (が、narrow 成分である)。broad 成分の幅は1000 km s⁻¹以上と、更に広い幅を示し、温度に換算するとおよそ10⁷ K (1 keV) 程度以上である。当然、このような温度のプラズマ中で

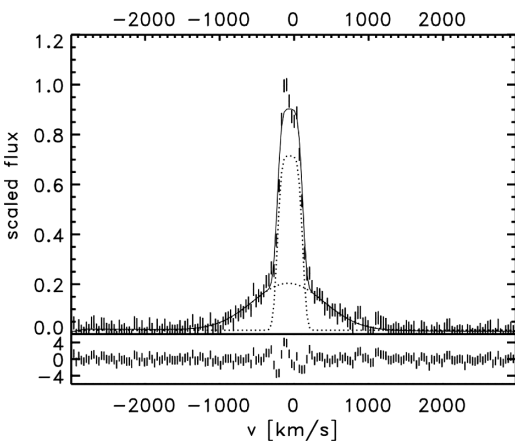


図2 Helder博士ら [14] による、超新星残骸RCW86でのH α 分光観測結果。幅の狭い narrow 成分と、広い broad 成分から成る。

水素原子はあっという間に電離されてしまう。この broad 成分の出自は、1980年代に Roger A. Chevalier 博士と John C. Raymond 博士らを中心として以下のように説明されている [15, 16]。

「中性水素原子を含む部分電離プラズマ中に衝撃波が伝播する際に、電荷を持つ粒子たちが電磁場の乱れにより素早く衝撃波散逸して、温度を大きくする。対して、電荷を持たない中性水素原子は陽子と電荷交換反応 (H+p→p+H) を経ることで、『陽子の温度を反映する H α 』を放射する (図3も参照)」。

水素原子は衝撃波に飲み込まれてから、プラズマ中の電子・陽子との種々の反応によりH α を放射しながら、典型的に~100 AU程度で電離しきってしまう。これが超新星残骸の直径10 pc程度に比べて十分短いので、H α は衝撃波面の優れたトレーサーとなり、かつ、衝撃波での散逸過程をよく反映するものと考えられている。

Helder博士らの取ったアプローチの基本となる考え方は、「もし、衝撃波が宇宙線を加速して“ない”とすると、断熱衝撃波となり、衝撃波散逸を経たガスの温度Tは保存則が予言するT_{ad}となる。逆に、宇宙線へのエネルギー変換が起きているならば、その分だけ温度Tが下がることになる」、というものである。この考え方に従い、エネルギー変換効率を表す指標 η を簡単な数式で与えると、

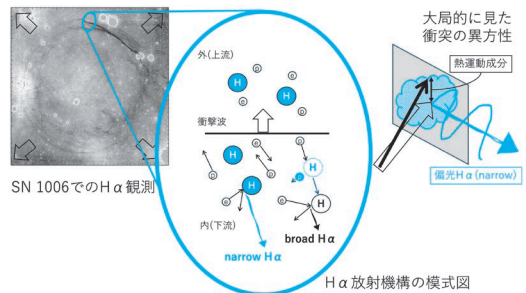


図3 H α 放射機構の概念図。SN 1006の観測は [17] によるもの。

$$\eta = \frac{T_{\text{ad}} - T}{T_{\text{ad}}}, \tag{1}$$

$$kT_{\text{ad}} = \frac{3}{16} m_p V_{\text{sh}}^2, \tag{2}$$

となる [18]. ここで、 k はボルツマン定数である。宇宙線が全く存在しない状況では $T=T_{\text{ad}}$ なので、式 (1) より $\eta=0$ となる ($T \ll T_{\text{ad}}$ なら $\eta \simeq 1=100\%$)。式 (2) は、(宇宙線を加速していない) 十分強い断熱衝撃波によって散逸した場合の温度 T_{ad} を与える式で、流体力学から導かれる。

このときに重要となる点は、(1) 爆風の単位質量あたりの運動エネルギー、すなわち衝撃波速度 V_{sh} を測定し T_{ad} を決める、(2) 衝撃波散逸を経たガスの陽子温度 T を測定する、という2点である。

Helder 博士らは、X線望遠鏡 Chandra を用いて超新星残骸 RCW 86 の天球面上での膨張速度を測り、距離の推定値を使うことで、 $V_{\text{sh}}=5000 \pm 2500 \text{ km s}^{-1}$ という値を得る。これは後の2016年、山口弘悦博士らの追試 [19] により $V_{\text{sh}}=3000 \pm 340 \text{ km s}^{-1}$ と改まる。これに対して、温度 T は $\text{H}\alpha$ の broad 成分から $kT=2.3 \pm 0.3 \text{ keV}$ と求まった。山口博士らの V_{sh} を用いたときの変換効率は、 $\eta \simeq 80\%$ となり、これまでの $\eta \sim 5\%$ という「常識的な期待」を大きく上回ることが示唆される。

一方で、「 $\text{H}\alpha$ の放射領域と、X線の放射領域とで衝撃波速度が異なるのでは」という指摘は当然考えられる。実際、Helder 博士らが2013年に行った $\text{H}\alpha$ による衝撃波速度の追試 [20] では $V_{\text{sh}}=300\text{--}3000 \text{ km s}^{-1}$ とばらつきが大きく、その平均値は 1200 km s^{-1} となった。この平均値を採用した場合は、 $\eta \simeq 18\%$ となり、一転して「常識的な期待」にファクター3の範囲で収まる。

しかしながら、ほぼ球対称 (=天球面上で円

環) に見える超新星残骸の膨張速度が、最大で10倍も違うことが許されるのかには疑問が残る。実は、私が修士課程の学生であった時に提示された研究課題は、この10倍の違いを数値シミュレーションデータに基づいた擬似観測で説明する、というものであった。が、何をどうこねくり回しても、リーズナブルな設定では10倍どころか、2倍の差も出ず、そもそもシミュレーションデータにもそのような分散がなかった*2。

この修士課題は、詳しい内容は割愛するが、紆余曲折の末、最終的に「衝撃波速度の分散によって衝撃波面が“波打つ”効果を見逃して η を推定すると、宇宙線が全く存在しない状況でも $\eta=10\%$ から 40% と誤って推定される」という、当初の目論見とは別だが、より重要な効果を導き出したことで修了を認められた [18]。ただし、この効果を考慮しても $\eta=80\%$ を説明することは困難である。

衝撃波速度の推定は間接的な手法もいくつか提示されているが、現在も確立しておらず、やはり直接的な天球面上の膨張速度から推定したものが良く用いられる。この研究は、そういった場合に科学的主張を弱める「caveat (警告)」としてわざわざ引用されることも多く [21-23]、世界の研究者たちの誠実な取り組みを、当時および現在の私に教えてくれるものとなった。

3. $\text{H}\alpha$ の偏光観測で宇宙線加速に迫る

ここまで述べたように、衝撃波での宇宙線加速へのエネルギー変換効率を捉えることは簡単ではない。特にガンマ線表面輝度にしる膨張速度にしる、距離の不定性を天文学では除去し難い。この問題の糸口は、磁気乱流についての研究に夢中で忘れていたD2の頃(2017年2月)に勝田哲博博士から「 $\text{H}\alpha$ の偏光放射」について質問されたこ

*2 衝撃波が分子雲などの重たく巨大なガス雲と衝突しているとすれば、衝撃波速度は説明できるが、この場合は $\text{H}\alpha$ の表面輝度が明るくなりすぎ観測と矛盾することが簡単な推定でわかっていた。

どでもたらされた。

$H\alpha$ の偏光放射は2015年にWilliam B. Sparks博士らにより超新星残骸SN 1006でnarrow成分として初検出された [24]。偏光 $H\alpha$ が放射されることは、実は1990年にJ. Martin Laming博士が理論研究により予言していた [25]。四半世紀かけて観測器の性能が向上し、Laming博士の理論に観測が追いついたのである。

余談だが、学位を取得し博士研究員となった直後の2018年にLaming博士の下へ共同研究のため訪問した際、1990年当時の研究会で勇足で発表したが、「暗すぎて検出されない」などと言われ、関心を持ってくれなかったことを教えてくれた。理論家が観測家にとって無茶な要求をするのは、今も昔も変わらないという話になり、「今観測できなくても、理論研究を諦めるな」と励ましの言葉を頂いた。今でもこの言葉を思い出しては、日々の研究の励みになっている。

どうした場合に放射が偏光を持つのかを一般的に表現するならば、放射するまでの過程に何らかの方向性(異方性)が存在する場合だと言える。今の場合、この異方性は中性水素ガス雲に衝撃波(=温度の高いプラズマ)が衝突する方向である。 $H\alpha$ を放射する、励起した水素原子を作る衝突過程の中にある異方性で、これが強いほど偏光度は上がっていく。自然現象には大抵、互いに反対に効く要素がいくつか存在し、今の場合熱的な(=乱雑な)運動成分が衝突の異方性を弱めるように働く(図3)。Laming博士の理論計算では、衝撃波速度 V_{sh} と熱的運動成分を表す温度 T の関係は、式(2)のように保存則で決まっている。このため、超新星残骸の衝撃波では典型的に~1%の偏光度で直線偏光が期待できるというもので、後年のSparks博士らによる観測と予言が大まかに一致した。

私は、このメカニズムから「宇宙線へと効率的にエネルギー変換が起きている衝撃波ならば、温度 T がLaming博士の想定した T_{ad} よりも下がる

ため、偏光度が上がるのでは？」と思い、すぐに偏光放射について猛勉強を始め、原子物理学の関連したデータを更新したうえで理論計算を行い、偏光度が倍以上大きくなることを示した [26]。

この方法の画期的な点は、Helder博士の時のように温度 T と距離が必要な衝撃波速度 V_{sh} を比べるのではなく、温度と偏光度を比べるだけでよい点である。つまり、距離の精密な推定を必要としない。実際は V_{sh} を含めてその他の物理量に多少なりとも依存するが、他の距離に依存しない観測量を組み合わせることで解消される。

早速、理論とSparks博士らの観測とを比べてみたところ、観測の測定誤差を考慮し η は「0%」か「90%」の二択になった(図4)。ここにきて、all or nothingである。この結果はしかし、多くの先行研究等ではそれほど注意されていなかった

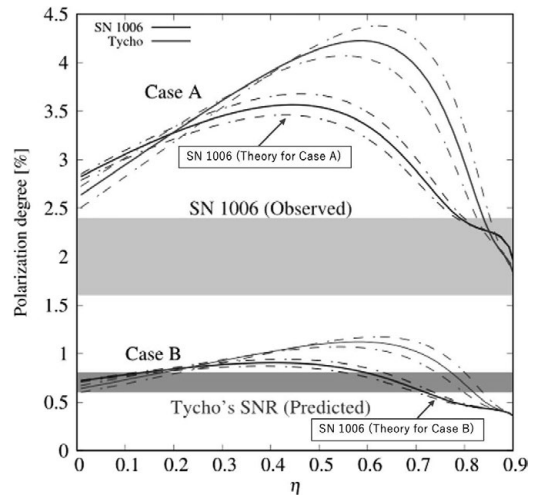


図4 衝撃波の内(下流)からの $H\alpha$ 偏光度の理論計算と観測の比較 [26]。理論線に付随する破線は、他の観測量から制限される電子温度等による不定性の範囲を示す。偏光度が η に対して“山なり”になるのは、原子物理の詳細に起因する。Case Aは $Ly\beta$ - $H\alpha$ 変換が全く起こらない場合で、Case Bは完全に起こる場合である(本文参照)。SN 1006の観測は [24] によるもので、TychoのSNRについては V_{sh} と T から推定される $\eta \sim 80\%$ の場合の偏光度を、ガイドとして引いたものである。

「Ly β のH α への変換」という過程が効いている可能性があった。

Ly β は、原子物理学の言葉で、水素原子の励起状態「3p」から基底状態「1s」への遷移で放射される輝線である。水素原子がたくさんある時は、逆過程により別の水素原子にすぐに吸収され、「3p」の水素原子が新たにできる。「3p」から「1s」への遷移は量子論的な確率として88%で起こり、残り12%の確率で「2s」へ遷移しH α を放射する。このため、Ly β は何回かの吸収・再放射を経験した後にH α に変換される。

さらに、この「Ly β の変換」は通常の「光の散乱」のように偏光したH α を生成する。当時のH α に関する先行研究では、これらは変換が全く起こらない場合 (Case A) と全て変換される場合 (Case B) の2つの極限でしか議論されておらず、私の計算も研究の初期段階ということで、これに倣っていた。

これではダメだと、今度は輝線の輻射輸送について勉強を始め、博士研究員（いわゆるポスドク）としての研究と並行して進めながら理論モデルを構築した。これは世界で初めての超新星残骸における詳しい輝線の輻射輸送計算となり、偏光以外のかかなり専門的な内容まで理解が更新されたので、個別に論文化した [27]。偏光の計算はこれと並行して、アメリカのLaming博士の下に1ヵ月滞在して共同研究を行ったのだが、この時にまた新しい発見があった。

その効果は、またも宇宙線への効率的なエネルギー変換が起きている場合に顕在化する [28]。加速現場である衝撃波面に「捕捉」されている多数の宇宙線粒子は、空間的にある程度の「幅」を持って分布し、集団として無視できない圧力を有する。この圧力は電磁場を介してプラズマ「だけ」に伝わり、衝撃波散逸に先んじて宇宙線に「押されたプラズマ」が $\sim\eta V_{sh}$ ほどの速度を持つようになる。実際、多数の理論や数値シミュレーションにより示唆されている [29]。「常識的な η

は、たかだか $\sim 5\%$ なのだが、原子物理学の文脈では無視できない。

若い超新星残骸で典型的に期待される衝撃波速度は $V_{sh} \geq 2000 \text{ km s}^{-1}$ なので、押されたプラズマは $\eta V_{sh} \geq 100 \text{ km s}^{-1}$ の速度をもつ。このプラズマ中の陽子と、水素原子の間で電荷交換反応 ($H + p \rightarrow p + H$) が起こり、無視できない量の「押された水素原子」が生成される。この「押された水素原子」へ衝撃波散逸を経たプラズマ粒子が衝突し、H α やLy β が放射される。この時に、衝撃波進行方向へと放射されたLy β は「まだ押されていない水素原子」から見ると著しく「青方偏移」しているため吸収されず、素通りしていく。このため、衝撃波の“外”（上流という）でLy β のH α への変換に「異方性」が発生し、H α の偏光度だけでなく「偏光方向」も変わる。

Laming博士とともに、この効果を取り入れた詳細な理論計算や単純化した状況設定の解析解を用いて慎重に議論した結果、「宇宙線を加速している場合は、衝撃波の“外”からの直線偏光H α の電場は衝撃波進行方向に並行となり、加速していない時は垂直になる」ことを示した [30]。理論の不備のために all or nothing となってしまった結果を解消しようと整備したら、「常識的な $\eta \sim 5\%$ 」すらも all or nothing で検証可能な理論になったのである。もちろん、距離には依らない。

早速、理論と観測を比較すると、と行きたいところだが、Sparks博士らの観測は衝撃波の“内と外”（下流と上流）を区別していないため、比較することができない。観測された偏光方向は、衝撃波進行方向に並行だということに。また、観測された偏光度がすべて“内側”（下流）から来ていると解釈した場合、輻射輸送計算から示唆される効率は $\eta \sim 15\%$ となった。またも、「常識的な効率」なのか、それを大きく上回るのか、という「振り出し」に戻された。が、今度はH α 偏光観測を“内と外”に分けて行えばよいという明確な

指針がある。

現在は、この偏光 $H\alpha$ の研究のきっかけを作ってくださった勝田博士や、研究会を通じて知り合った鶴山太智博士らと協力し、すばる望遠鏡での観測を目指している。私は観測器についてはあまり詳しくないが、共同研究者である観測・装置の専門家の方々から頂いた「挑戦的だが性能として不可能というわけではない、面白い」というコメントが大変励みになっており、この場を借りて改めて感謝の意を表したい。理論家の無茶な要求に、応えようという観測家もいらっしやる。

4. XRISM衛星による革新

さんざん $H\alpha$ による新しい観測手法について述べた後だが、Helder博士らが取った基本的なアプローチにも革新の 때가迫っている。これは、最近運用が開始されたX線望遠鏡「XRISM衛星」が、X線帯域で従来の20倍のエネルギー分解能で超精密分光観測を行うことで、衝撃波散逸を経たイオンの温度が輝線幅より直接的に測定できるようになるためである。

Helder博士の時は、この超精密分光ができないために、「放射領域が違う」という問題点があっても $H\alpha$ のbroad成分を用いたのだと思われる。既に述べたように、この方法は距離の推定に難があるものの、 $H\alpha$ が検出できないくらい暗い領域での変換効率 η を求めるうえでは、依然として強力な方法である。また、衝撃波面の優れたトレーサーであるが故に、 $H\alpha$ は“波面の波打ち”の影響を受けやすいが、ある程度離れたところで明るくなるX線輝線に対しては影響が弱まる。

これに関する研究は、宇宙線が駆動する銀河風・および天の川銀河星形成史解明の研究に夢中で忘れていた頃に、馬場彩博士や寺田幸功博士らに議論を持ちかけられたのをきっかけに始まった。一度時間を置いたことが良かったのか、この研究では宇宙線のエネルギー変換効率を予想する世界初の理論モデルの考案にも成功した。そして

様々な効果を考慮した上でX線輝線の放射計算結果を提示し、宇宙線加速により下がったイオン温度をXRISM衛星で捉えられることを示した [31]。この研究は、詳細な放射計算による予言だけでなく、「変換効率に対する理論モデルを提示することで科学的成果を抽出しやすくする」という試みが特に新しいと言えるだろう。

理論のない観測研究だけでは、「天体Aではこうだったけど、Bでは？過去・未来では何が起こった・起こる？」という疑問が絶えず発生し、根本的な「なぜ？」という疑問に答えを出し得ないし、理論研究には観測による検証が必須なのである。 $H\alpha$ と合わせて、次はとにかく観測を更新するというのが、この研究課題の最前線であると思う。

5. まとめ

本稿では宇宙線の起源問題の解明に必要な不可欠な、超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率を捉えるための理論研究に焦点を当てて、様々な研究を紹介した。宇宙線起源問題に関する研究は、歴史が長い分、ここで紹介した以外にもたくさんの研究課題があるし、近年では宇宙線は星形成過程や星間媒質のダイナミクス、ひいては銀河の長時間進化を説明する際に重要な役割を担う、というように、比較的新しい研究課題として様々な分野で活性化している。これらすべてを把握するには長い道のりを必要とするが、だからこそ日々視野が広がっていくことを楽しみながら研究できているのかもしれない。幸いにして、 >100 TeVガンマ線、超精密X線分光、偏光 $H\alpha$ など、多くの新しい観測が提示されており、まだまだ色々な理論研究を楽しめそうである。それらの結果について、またご報告の機会を頂ければ幸いである。

謝辞

本稿の内容は、私が共同研究者の皆様と行ってきた研究についてのものである。特に、日常的に

議論・質問を投げかけて下さったことで始まった研究がほとんどである。改めて、共同研究者の J. Martin Laming, 井上剛志, 大平豊, 勝田哲, 田中周太, 寺田幸功, 馬場彩, 山崎了博士らに感謝の意を表したい。最後に、本稿を執筆する機会を下さった編集委員の勝田哲博士にこの場を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- [1] Ginzburg, V. L., 1956, *Il Nuovo Cimento*, 3, 38
 [2] Hayakawa, S., et al., 1958, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 6, 1
 [3] Asplund, M., et al., 2009, *ARA&A*, 47, 481
 [4] Gabici, S., et al., 2019, *Int. J. Modern Phys. D*, 28, 1930022 339
 [5] Fermi, E., 1949, *Phys. Rev.*, 75, 1169
 [6] Fermi, E., 1954, *ApJ*, 119, 1
 [7] Morrison, P., et al., 1954, *Phys. Rev.*, 94, 440
 [8] Bell, A. R., 1978, *MNRAS*, 182, 147
 [9] Blandford, R. D., & Ostriker, J. P., 1978, *ApJ*, 221, L29
 [10] Amenomori, M., et al., 2021, *Phys. Rev. Lett.*, 126, 141101
 [11] The Lhaaso Collaboration, 2024, *ApJS*, 271, 25
 [12] Hayakawa, S., 1952, *Prog. Theor. Phys.*, 8, 571
 [13] Sano, H., et al., 2020, *ApJ*, 902, 53
 [14] Helder, E. A., et al., 2009, *Science*, 325, 719
 [15] Chevalier, R. A., & Raymond, J. C., 1978, *ApJ*, 225, L27
 [16] Chevalier, R. A., et al., 1980, *ApJ*, 235, 186
 [17] Winkler, P. F., et al., 2014, *ApJ*, 781, 65
 [18] Shimoda, J., et al., 2015, *ApJ*, 803, 98
 [19] Yamaguchi, H., et al., 2016, *ApJ*, 820, L3
 [20] Helder, E. A., et al., 2013, *MNRAS*, 435, 910
 [21] Sankrit, R., et al., 2016, *ApJ*, 817, 36
 [22] Escobar, G. J., et al., 2021, *A&A*, 650, A136
 [23] Raymond, J. C., et al., 2023, *ApJ*, 949, 50
 [24] Sparks, W. B., et al., 2015, *ApJ*, 815, L9
 [25] Laming, J. M., 1990, *ApJ*, 362, 219
 [26] Shimoda, J., et al., 2018, *MNRAS*, 473, 1394
 [27] Shimoda, J., & Laming, J. M., 2019a, *MNRAS*, 485, 5453
 [28] Drury, L. O., & Voelk, J. H., 1981, *ApJ*, 248, 344
 [29] Ohira, Y., 2013, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 245002
 [30] Shimoda, J., & Laming, J. M., 2019b, *MNRAS*, 489, 2723
 [31] Shimoda, J., et al., 2022, *PASJ*, 74, 1022

Observational Methods of Cosmic Ray Acceleration Efficiency in Supernova Remnants

Jiro SHIMODA

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

Abstract: Cosmic rays are energetic, charged particles whose origin has not been revealed since the discovery in 1912 by Victor Franz Hess. The physical process of the acceleration of cosmic rays is also unsettled. This article introduces theoretical studies to determine cosmic ray acceleration efficiency in supernova remnant shocks observationally.

日江井榮二郎氏ロングインタビュー

第2回：高校時代～大学院時代



高橋慶太郎

〈熊本大学大学院先端科学研究部 〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1〉
e-mail: keitaro@kumamoto-u.ac.jp

日江井榮二郎氏のインタビューの第2回です。日江井氏は終戦直後の混乱した社会の中で受験勉強に励み、旧制学習院高等科へ進学しました。その1年間の旧制高校生活では、哲学や語学の優れた教師陣に囲まれ、人格形成にも大きな影響を受けました。その後、新制大学制度の発足に伴い、東京大学の第一期生として理科I類に進学します。戦後の困難な食糧事情を経験しながらも、教養学部で物理学への関心を深め、最終的に天文学を専攻することを決意します。天文学教室では、戦後の日本の天文学を立て直した教授陣の指導のもと、天文学の基礎を学びました。大学院では太陽の研究を志し、ナトリウムの吸収線を用いて太陽の大気構造を解析する研究に取り組みます。今回は、戦後の教育改革や大学の様子を交えながら、日江井氏の学問への情熱を紐解いていきます。

●高校時代

高橋： 前は高校受験のお話まで伺いました。中学2年生で終戦を迎えて、戦後の厳しい状況の中で受験勉強をしたということでしたよね。その後先生は旧制の学習院高等科に進学し、1年間だけ通って修了ということですが、これはどういうことなんですか？

日江井： 戦後の学制改革によって旧制高校の1年生はそこでおしまいになって、昭和24年3月で学校から出されたんです。

高橋： ちょうど旧制と新制が切り替わる複雑な時期でしたよね。じゃあ1年で終わるっていうのはわかって入ったわけですか？

日江井： そうです。でもその後どうなるかわからなかった。一高の校長の天野貞祐先生たちが旧制高校の存続を主張しているって噂されてましたけど、まあどうにかなるだろう、どこかの大学に入れられるだろうと思っていました。

高橋： いかがでしたか、旧制高校の1年間は？

日江井： やっぱり先生のレベルが違ってですね、クラス担任が矢内原伊作さんといって、哲学の先生ですね。後で知ったんですけど、矢内原忠雄先生のご子息なんです。彫刻家のアルベルト・ジャコメッティのモデルにもなったと聞きました。国語は松尾聰先生から源氏物語を教えてもらいましたね。それからドイツ語は、(ローベルト・)シンチンガー先生って言って、西田幾多郎をドイツで紹介した先生です。英語の(レジナルド・)ブライス先生っていうのは、これも後でわかったんですけども、昭和天皇の人間宣言に深く関わった人で、今の上皇の英語の先生だったんです。授業のときはそんなこと何にも話されなかったんですけどね。

高橋： すごい先生方ですね。

日江井： はい。ブライス先生が部屋に入ってくるでしょ。おっとりしてるんですよ。やっぱりジェントルマンっていう感じのね。僕らは英会話



学習院高等科1年（日江井氏提供）。後列最も左が日江井氏。

を教わったんですが、あるとき武士道とジェントルマンの話になってね、自分で自分を律するというようなことの話があったんです。そしたら先生が話をしながら急に黒板に向かってね、論語の「子曰（しのたまわく）、…」って漢字で書くの。英会話の授業ですよ。びっくりしちゃった。そのあと、ひらがなで俳句を書くんですよ。ブライス先生ってのは実はヨーロッパに俳句を紹介した先生でもあるんです。ブライス先生をテーマにした創作能「不來子先生」（ブライス先生）っていう能の作品も作られていますよ。いい先生に教わったなあと思いますよね。その先生がくると、先生から醸し出される雰囲気があってね、イギリス人の気持ちっていうかメンタリティを僕らは教わったような気がするな。

今ね、小中学校で英会話を教えてますよね。ネイティブの人は英語は流暢だろうけれども、教師として品格の良い先生かどうかというのは別問題ですよ。ブライス先生を思い出すとね、ああいう先生が子供たちに教えてくれればいいと思うんだけどもねえ。

高橋: 語学を通して人格教育もされたということですね。旧制高校は今でいう大学の教養みたいな感じなわけですよ。

日江井: そうですね。

高橋: 寮には入ったんですか？

日江井: 寮は入れなかった。入りたかったけどもね、地方の人だけが寮に入っていましたね。私も市川なんかで遠いわけですよ。けども東京の隣だからって入ってもらえなかったね。寮にはシンチンガー先生がいてね、寮にいればもうすこしシンチンガー先生と話ができたとね。クラスは38人くらいだったかな。さっきいった矢内原伊作先生が担任だったので、授業とは別に哲学的な話を聞いたね。みんな好きなことをやって、理科なのに音楽の指揮者になったのもいます。クラスのうち10人くらいは東大に行きましたね。

高橋: 1年間高校にいてまた受験をするってことですね？

日江井: そうです。受験は大変よ。大変というのは、いつ入学試験が行われるか決まっていませんでしたし、試験にどの科目が出るかもわからなかった。

高橋: そうなんですか。それで先生は東大を受けたんですね。

日江井: 新制の東京大学っていうのは、昭和24年5月末に発足したんじゃないのかな。5月末でしょ、そのとき我々はもう旧制高校1年を終えてるわけですよ。受験は普通だったら2月とか3月にあるんだけど、高校が終わってもいつ入学試験があるかわかんない。

高橋: 旧制高校を3月で修了しても、まだその時点で新制の東京大学はできてなかったっていうことなんですね。

日江井: そうです。だからほっぽり出されてぶらぶらしてたわけですよ。その期間の身分は何なんだろう。でも全国にそういうのがたくさんいたわけですよ。

卒業してすぐの4月にね、新制の学習院大学では講義が始まって、私は野上茂吉郎さんの物理学の話聞きに行きました。私は別にその学生ではないから、隠れてですよ。大変いい講義を聴きました。彼は小説家の野上弥生子さんのご次男で、三男は野上耀三さんという方なんです。明

星大学が持っているキュリー夫人の実験ノート、このノートにはまだ放射能が残っているんですが、耀三さんはそれを訳された人ですね。

●大学受験

日江井: それで東大の試験がいつだったというのはなかなかわからなくてさ。そのうち手紙で、6月の何日に試験がありますよっていう連絡がきて、受験しましたよ。でも試験科目に何が出るかはわからない。とにかく入学試験を受けました。

高橋: 結局どういう試験科目だったんですか？

日江井: なんか袋を渡されてね、その中から好きな科目を選ぶというものでした。理科とか文科とかに分かれましたけども、理科は理I、理IIだけだったな。初め理IIIはなかったと思うな。それで理科を受けるものはこの袋だと。その中に数学があって物理があって、語学があった。語学は英語もフランス語もドイツ語もあったね。そんなのが袋に入っていて、私は英語を選んだ。それから国語、漢文、歴史とか、何を選んだかちょっとよく覚えてないです。

高橋: じゃあ先生は新制東大の理科I類の1期生ということなんですか？

日江井: そうです、1期生です。

高橋: 僕も理Iだったんですけど、先生は理Iの一番上の先輩ということですね。

日江井: ああそうですね。あなたは何年に入学？

高橋: 1996年入学です。先生は1949年入学ですから、47年上の先輩ということですね。

日江井: 本当？ 半世紀だなあ(笑)。

まあ考えてみればね、そのときの学校教育の関係者から見ればね、大学をどうするか、教育をどうするか。やっと昭和24年に新制大学ができたってさ、学生が増えた分、先生も教室も増やさないといけない。大変だったに違いないよ。

高橋: 旧制高校と旧制大学を一緒にして新制大学になったということですよ。

日江井: そうです。東大の場合は旧制一高と東京

高校が一緒になって新制東京大学の教養学部ができました。入学式は7月の7日。もう夏休みの寸前だよ。1週間か2週間授業を受けたかな。すぐ夏休みだ(笑)。

高橋: 新制大学ができるときは東大だけじゃなくて他の国立大学も一緒にできたんですよ。

日江井: そうです。それまでいろいろな教育機関がありましたからね。旧制の大学、工業や農業の専門学校、師範学校なんかが統廃合されて、新制の大学ができたんですよ。関係者は大変だったと思うな。

高橋: 先生が東大を選ばれたってというのは？

日江井: やっぱり近くだったからね。家から通えるので。実際には寮に入ったんだけども、まあ家に近いというところでね。実はあの頃、私は京大にあこがれててね、京都に行きたいということもありましたけれども、京都に行ったらどこかに下宿しなくちゃいけないし、食料のことが気になってね。

それで東大で駒場の寮に入ったんだけどもさ、その頃ね、昼食ってというのは軍隊で使うアルマイトの金属皿があるんですよ。そこに蒸かし芋2本がのっている。それが昼めしだよ。

高橋: それだけなんですか。

日江井: それだけ。もうまぜい芋で甘くもないしさ、なんだろう、ただこうジャガイモのようなねえ、蒸かしてくれたからちょっとあったかくて、水分がちょっとあって、なんか胃の中を占有する塊という感じだったね。要するにおなかをいっぱいにするだけ。おいしいというイメージは全然ない。ともかく空腹で空腹でさ、それを癒すだけだったですね。だからその後10年間、サツマイモってのを食べられなかったな。

高橋: もうその嫌なイメージなわけですね。

日江井: 嫌なイメージ。10年くらい経って、サツマイモはおいしいですよと言われてちょっと食べてみたら、本当においしかった(笑)。

高橋: 一応、3食出るわけですか？

日江井: 3食ですね。朝は蒸かしパンくらい出たと思う。そのサツマイモが嫌で嫌で、嫌な印象が残ってるけどね(笑)。そんな食事をしていたので、あるとき熱を出しちゃいましたね。市川の実家へ帰って、お袋に頼んでおいしいごちそうを食べさせてもらったら治って、また寮に入ったって経験があるから、やっぱり食べ物は大事なんだと思いましたね。一高の自治寮だから、食事も寮の誰かが工面してくれたんですね。僕らは芋だなんて文句言ってたけども、食事の面倒を見る人は大変だったに違いないですよ。

あの頃の大学には軍隊から帰ってきた人もいるし、新制高校から入ってきた人もいるし、それから旧制高校を卒業した人もいるわけ。いろんな学歴の人がいたわけだよ。

●教養学部

高橋: 当時、理科III類がなかったってことでしたけど、I類とII類はどういう違いだったんですか？

日江井: 理Iが物理系と工学系、理IIが生物系だね。

高橋: 先生は最初から天文に入るといつもりだったんですか？

日江井: いや、最初はわからなかった。若いころはね、感情というよりも理が盛んでね。ちょうどその頃20歳前後でしょう。体はもうすっかり大人になって、あとは心だとか理だとかそっちの方に一生懸命になってね。それで数学というのは非常にきれいなじゃないですか。数学はある意味じゃ純粋哲学みたいなものでさ、あれくらい純粋できれいな理はないんじゃないかと思って。でも友達と話しててわかったね。「あ、こいつは俺よりも数学ができる」と。やっぱり駒場に行くときでいいのがありますねえ。それで「ああ、俺は数学に向いていない」と。数学っていうけど、高校までの数学は算術だと思うんですよ。算の術を習ってた。大学に行くとき数学ってのはもっと次元が高



東京大学教養学部1年のとき、駒場にて(日江井氏提供)。前列左が日江井氏。

いというのがわかってですね、そういうことで数学はあきらめた。

高橋: じゃあもともと数学に興味を持っていたんですか？

日江井: だと思うね。好きだったからね。そう、好きだったけども、駒場でできのいいのがいてね、これは自分の道ではないということを友人から教わりましたね。

高橋: 駒場ではやっぱり教養を勉強するわけですね。

日江井: 法律とか経済とか社会とか、本郷から偉い先生が来られて一般的な講義をしてくれましたね。ドイツ語は竹山道雄先生に習いました。「Mozart auf der Reise nach Prag (プラハへの旅路のモーツァルト)」っていうのを習った。竹山先生の授業ではドイツ語を習うよりもね、「君たち、モーツァルトの哀しさがわかるか」って言ってね、モーツァルトを覚えてくれたんだよ。竹山道雄先生はねえ、『ビルマの豎琴』を書いた人ですね。そのときは知らなかったんだけども、東京裁判かGHQの施政に批判した文章を書いて、米軍から差し止めを受けてたんです。いや立派な先生だと思ったなあ、竹山道雄先生は。



1950年11月、東京大学教養学部2年のとき、奥穂高山頂にて(日江井氏提供)。左が日江井氏。

それで授業のとき竹山道雄先生に怒られたことがありますね。私が教養の2年のときに大学でレッドパージ（日本共産党員と共産党支持者の追放）があったんですよ。ちょうど秋の試験のときだったかなあ。それで学生がレッドパージに反対して、試験を放棄するストライキをやった。正門の門を閉めちゃって、通学してくる学生が試験を受けられないようにしてね。寮の委員が司令塔のようになって、お前はああしろこうしろって言うわけです。私も寮にいたからね、裏門の方に行けって言われてね。そこで試験を受けようとする学生を入れさせないように守れている。兵隊みたいで嫌だったな。

そしたら当時教養学部長の矢内原忠雄先生が出てこられて、学生を説得しようとしたんだな。あの方はクリスチャンでもう本当にしっかりした方なんですけどね、学生が先生を取り囲んじゃった。それで事務の人が危険だと思ったのかな、警官を大学に入れちゃったんだよね。校門の外にいた警官が入ってきたんです。それで私の友達かね、正門のところでこん棒でぶん殴られてるのを見ました。

高橋：警官にですか？

日江井：警官にぶん殴られていた、私の友達か。それでその日の夕刊新聞を見たら、その騒動について違うことが書いてあってさ。新聞なんてあて

にならないと思ったね。こちらはその現場を見てるんだからね。

それで竹山道雄先生に怒られたっていうのはね、そのストライキのときに正門を閉めちゃったわけだよ。それで誰かが通学してくる学生たちに、「裏門から入って食堂を通れば教室に行って試験を受けられるよ」って嘘の情報を流したらしいんです。それで多くの学生が食堂に入ってきたところを、食堂の出口を閉めて学生を閉じ込めちゃった。

高橋：え、そんなことしたんですか？

日江井：私もそのときはそれを知らなかった。それで竹山先生は授業のときに「君たち若いのはね、嘘をついちゃいけません」って。確かに嘘をついた。そのときから私は左の方の連中のやることに対して、不信感を持つようになったわけだよな。

高橋：寮ではそういう活動がさかんだったと。

日江井：寮ではだいたい学生運動をやってたね。でもレッドパージなんて聞くと、そんなことしなくたっていいじゃないかと。事実、「戦争中に政府に反対してがんばった人たちがなんで追放されるんだ」って寮委員が言うんですね。そう言われるとそれはそうだと思うね。

高橋：戦時中に弾圧された人々ですよな。

日江井：だから私もレッドパージへのストライキには賛成組だったわけ。早とちりだったけどな。

高橋：駒場の他の授業はいかがでしたか？

日江井：授業は面白かったですよ。特に語学の先生っていうのはよかったですね。さっきのドイツ語の竹山道雄先生もそうでしたし、英語の先生からはキリスト教の三位一体ってのを聞いたんですよ。つまり語学の先生からカルチャーを教えていただいたんだと思うね。

それで物理はですね、竹内均さんが教えてくれた。竹内均さんは地球物理の秀才で、卒業されてすぐ助教授で駒場へ来たんだよね。それでアインシュタイン、インフェルトの『物理学はいかに創

られたか』というあの本を教えてくれたの。でも僕らはね、そんなのはつまらないだよ。ちょうど生意気盛りだからね。金沢（秀夫）さんという先生がいてね、電磁気を教えるときに、黒板にマクスウェルの式をふぁーっと書いたんです。ああいう数学を用いた物理学を僕は期待してた。だからね、竹内均さんの授業は面白くなかったなあ。でも竹内均さんはそのアインシュタイン、インフェルトに書かれてる内容の意味を僕らに伝えたかったんでしょねえ。その気持ちはね、後でわかるんだよね。当時はそれよりか、ニュートンの式といい、マクスウェルの式といい、熱力学の式といい、ああいう式の意味を知りたかったんだよね。実際に教養のときにはですね、数人で集まってシッフの『量子力学』を読んだりね、それから場の理論の本を読んだりね、自分で勉強してましたね。

高橋：勉強以外には、サークルとか、何かされてたんですか？

日江井：私は北寮27番の旅行部の部屋に入ってます。旅行部には一高の3年生が3人いて、そのうちの2人が寮生だったんですね。一方、東京大学の方にはもともとスキー山岳部っていうのがあって、数年先にはそれに合流することになるんですけど、私はまず一高の旅行部に入ったことになるんですね。それで7月に入学式をやって、その夏に穂高に連れていってもらいました。寮は約8名の共同生活で、南側が自習室、北側が寝室ですね。それでその一高の先輩とね、ずいぶん人生観を語ったりしたね。まじめな話をしてましたよ。あと寮の便所に落書きが書いてあるんです。一高生が書いたんだね。

高橋：昔の一高生がということですか？

日江井：昔の。なかなか哲学的なことが書いてある。その当時の青春の悩みだね。まあ落書きは便所だけじゃなくて部屋にも書いてありましたけどね、やっぱりあの頃、一高生は自分達をエリートだと思ってて人生観を論じたりしてね。なかなかいい言葉が書いてありましたね。



東京大学理学部3年時の学生証（日江井氏提供）。

●天文学教室へ

高橋：では教養の頃には物理に興味があったってことなんですか？

日江井：そうです。それでどうやって天文学教室に入ったかだね。東大の場合は2年の夏過ぎに進学先を振り分けてたけど、さっき言ったように私はもう数学はできないと思ったわけね。じゃあ学問の中で何が美しいか、数学も使えるような学問は何かっていうと、天文だと思ったんだよ。星空は美しい。星座はわからないけど星を見るのが好きだったのかな。それで天文を志望した。あれは2年の2学期かな。だからそのレッドページの試験の後だったかもしれないけどもね、とにかく進学振り分けで天文学科を志望した。だからはっきり天文に行きたいと思ったのは教養学部の2年の後半ですね。

高橋：じゃあ進路を決める結構ギリギリに。

日江井：そうですね。だけれども小学校から何となく太陽に惹かれてるというようなことがあったからね。それから1年のときに湯川（秀樹）先生がノーベル賞をもらったから、できのいいのはもうみんな物理に行ったわけね。

高橋: ノーベル賞を取ったというのはやっぱりすごいニュースでしたか?

日江井: すごいニュースだったですね。あれは昭和24年か。そのときに古橋(廣之進)が水泳でね、オリンピックではないけどもアメリカの水泳大会でいい成績を出したとか、湯川先生がノーベル賞を取ったとかね、敗戦後、劣等感で沈んでた気持ちが何となくパーっと明るくなったね。

高橋: ノーベル賞っていうのはご存じでした?

日江井: 知らなかったです。

高橋: じゃあ湯川さんが取ったときに、そういう賞があるんだと、国際的に認められたんだっていうことなんですね。

日江井: そうです、そういうことですね。世界の国々に認められたという気持ちになったのがうれしかった。僕らの同期でノーベル賞を受賞したのは、地球物理の真鍋(淑郎)さんですね。

高橋: そうなんですか、同期なんですね。湯川さんのニュースで、素粒子の話の初めて聞いた感じですか?

日江井: うん、でもああいう核力のなんとかっていうのはよくわかんなかったですね。東大では素粒子の授業はありませんでした。原子物理の話はありましたけどね。

高橋: じゃあ2年生の後半になって天文学をやろうと決意したわけですね。当時、天文は物理学科の中にあったんですか?

日江井: そうなんです。僕らは理学部物理学科天文学専攻卒業で。その後天文学科ができましたけどね。だから午前中は本郷で物理の講義を受けてね、本郷のあの二食(第二食堂)の横にバラック建ての建物があって、そこで授業を受けてですね、午後は都電に乗って麻布の天文学教室に行ったんですよ。天文の同期はですね、堀(源一郎)と川上(一郎)と私と3人だったんです。天文学専攻は3人(笑)。麻布に行くときにいかにして安い電車で早く着けるかっていうのを調べたりしましたね。

高橋: へえ、天文の同期は3人なんですね。

日江井: 3人ですね。だから逆に言えば贅沢な授業を受けたなど言われるけれども、我々からすれば先生1人にこっちは3人。夏なんか眠たくなるけれども、うたた寝ができなかった。うたた寝をすると先生にじいっとにらまれてね(笑)。いやあ考えてみれば贅沢な授業を受けたよね。僕らの1学年下に旧制高校を卒業した若生(康二郎)さんと下田(真弘)さんが入ってきた。ちょうど教育制度の変ったときですね。

高橋: 毎日通うわけですね、本郷と麻布と。

日江井: そうです。

高橋: 3年生になると寮は出たわけですか?

日江井: 3年生になると寮を出て本郷と麻布に通いました。住むところは市川だったですね。それで昭和25年に朝鮮戦争があってね。それからずいぶん生活が楽になった。食べ物もずいぶん出るようになったね。

高橋: 朝鮮戦争で景気がよくなったということですか?

日江井: よくなったんじゃないかなあ、日本全体がね。

高橋: じゃあ本郷に行つたくらいのときには割と生活が楽になって。

日江井: うん、食べ物がずいぶん楽になったという感じ、世の中が明るくなったような気がしましたね。戦後まもなくは闇市場があってね、食料管理法違反で起訴された被告人を担当した判事さんが、闇米を決して買わなかったんで栄養失調で亡くなったっていう記事が新聞に出てましたよね。でも昭和25年になると食べ物も出回るようになりましたね。

高橋: 天文学を選ばれるというのは、まあ今もある程度そうですけど、あまり卒業後の就職に直接つながらないというか、その先は学者になるんだっていう感じだったんですか?

日江井: そうですね。就職はあまり考えてなかったですねえ。父が脳溢血で倒れてですね、東大の

冲中（重雄）先生に診てもらいに行ったんです。その先生がとてもよくて、私は医学部へ行こうかなともいう気もしたんです。それでおやじに相談して、「医学部に行こうか、どうしよかなあ」と言ったら、「それはお前の好きなどころに行け」と言われた。それで天文にしたわけですけどもね。

高橋: 本当に自分の興味があることをやりたいということなんですね。

日江井: そうそう、そういうこと。

高橋: それで天文学教室に入られて、先生はどういう方がいらっしゃいましたか？

日江井: 天文学教室は、いい先生がいてね。萩原（雄祐）教授、鍋木（政岐）教授、藤田（良雄）助教授、畑中（武夫）助教授。助手は石田（五郎）さん、青木（信仰）さん、河鱒（公昭）さんですね。萩原先生の授業ってのはものすごくてね。あの頃、萩原先生は東京天文台長もおやりになって、文部省への予算要求で大変忙しかったんでしょう。萩原先生はいつも風呂敷包みでこんな厚い自分のノート、わら半紙のようなものだったですね、それを持ってきて黒板の端からワットと書いていくんですよ。僕らはもう写すのが精いっぱい。

高橋: それは天体力学の授業ですか？

日江井: うん、天体力学ね。そのときはなんにも理解できませんよね。けどもね、いろいろな数学者の名前を聞きましたね。デデキントだとか普段聞かないような名前を萩原先生から聞いたのが耳に残りました。それでレポートが出たんでノートを見返すんですけど、1回見ただけじゃわからない。でも2回3回見るとね、だんだんわかってくるんですよ。だからね、萩原先生の授業ってのはすごいけれども、ノートを熟読するとわかってくるという授業だった。萩原先生の講義は、もうあの講義を聴けばどの講義も怖くないというような感じでしたね。迫力があってね。

それから鍋木先生はね、子午儀の実習で自分の

位置を求めるっていうことを教えていただきました。それで私が麻布の教室で観測して自分の位置を求めたら、東京湾に入っていたんです（笑）。「もう一度観測し直し」とって先生に言われましたね。それから授業では球面天文学を教えていただいた。実地天文であり魅力的ではなかったけれども、後で日食の観測に行ったときにはものすごく役に立ちましたね。

高橋: 実的なわけですね。

日江井: そう、実的。萩原先生は文部省だとか東京天文台だとかいろんなことでお忙しいからね、学生の面倒を見るのは鍋木先生だったんですよ。鍋木先生ってのは人的交流が広がって深いから、卒業後の就職について相談に乗ってくれましたね。今から思うとね、僕ははずいぶん恵まれていました。

それから藤田先生は恒星大気の話。ウンゼルトの恒星大気の本に似たような講義をされた。

高橋: 天体物理ですか。

日江井: 天体物理ですね。藤田先生は非常に几帳面な先生でね。私が天文学教室に入るちょっと前、1950年にアメリカに初めて出掛けられて、リック天文台とかヤーキス天文台の大きな望遠鏡で観測をされたり、カイパー（G. Kuiper）とかチャンドラセカール（S. Chandrasekhar）とか、たくさん優れた天文学者と交流を持たれたりしたんですね。もう少し滞在されればもっと研究ができたのに、授業があるから帰らなきゃいけない。我々の授業のために帰ってこられて、申し訳なかったと思いましたね。先生の最初の授業のとき、先生は赤いネクタイをしめて颯爽としてプレハブの教室に入って来られてね。アメリカ帰りで輝いておられましたね。

それから麻布で彗星の分光観測をしようというので藤田先生から観測の手ほどきを受けました。望遠鏡の前にプリズムを置いて観測しようとしたんですけど、曇って観測はできなかった。あとシーロスタットもあったんですが、それを置く小

屋がないので、藤田先生に小屋を作るように言われたんです。それで建築学科にいた友人に小屋の設計図を書いてもらって小屋を建てました。それを使って太陽のスペクトルを撮る観測も藤田先生から教わりましたね。

高橋：結構観測の実習があったんですね。

日江井：そうですね。それでその頃は住宅事情が悪いから、藤田先生は麻布の構内に住まわられていましたね。本郷だってそうですね。本郷の大学の中にも住まわられてた先生が何人かいらっしゃいました。それくらい住宅事情が悪かったんですね。

高橋：先生方も苦労しながら…。

日江井：そうですね、子供たちよりも大人の方が苦労したと思いますね。

それから畑中先生は“*The Sun*”という太陽の本をうまくまとめられて授業をされて、上手でしたね。わかりやすかったです。

高橋：学部的时候は東京天文台は特に関係なかったんですか？

日江井：学部的时候は関係なかったですね。

高橋：物理の授業もあったんですね？

日江井：ありました。東大の物理にはすばらしい先生方がいましたね。久保（亮五）先生は外国出張中で授業は受けられませんでしたけど、今井（功）先生の流体力学のわかりやすい講義もあれば、小谷（正雄）先生の相対論の講義、山内（恭彦）先生の力学、高橋（秀俊）先生の電磁気、小穴（純）先生の光学の講義、よい先生に恵まれましたね。

高橋：物理の授業は物理の学生と一緒に受けたんですか？

日江井：一緒に聴いた。天文の学生は午後は麻布に行きましたけど、物理の連中は午後に実験をやったり演習をやったりしてたんでしょうね。

それからその当時、天文学教室ではエディントンの“*The Internal Constitution of Stars*”を読むのが習わしでしたね。すごい本だなあと思った。助手の方が面倒を見てくれました。

高橋：駒場のときの旅行部、山岳部っていうのは続けられてたんですか？

日江井：続けられなかったですね。授業とか実験があったから。でも5月のゴールデンウィークに上高地へ行っただけですよ、涸沢が好きだからね。そしたら大雨が降っちゃってさ。梓川が氾濫してね、バスが止まっちゃったんだよ。帰るに帰れなかったんです。それで萩原先生の授業を受けられずさぼっちゃった。「君、授業はさぼるもんじゃないよ」ってちらっと怒られてね。やっぱりそういう怒られたことが耳に残りますよね。

高橋：萩原先生は結構厳しい先生だったっていう話を聞いていますが。

日江井：それは私も聞いている。僕らは萩原先生の最後の学生なんですよ。最後だから優しくなったんじゃない？ 広瀬（秀雄）先生、東京天文台長をやった天体力学の大先生がいるんですけど、萩原先生は「俺は広瀬に良をつけた」って言うんです。広瀬先生は出来がよかったんだと思いますけど、それくらい厳しかったんでしょうね。でも私たちは最後の学生だから優しくなったんでしょうね、私は天体力学のレポートで優をもらいましたよ。だからずいぶん甘くなったんじゃないかと思っています。

高橋：その後、萩原先生は退官になってしまうわけですね。

日江井：そうですね。私が大学院2年のときに東京大学も台長もお辞めになったんです。

●太陽の大気構造の研究

高橋：卒業研究とかあったと思いますが、指導教員はどなただったんですか？

日江井：僕は藤田先生についたんですが、僕は藤田先生の一番最初の弟子なんです。低温度星を研究していた藤田スクールってのがあってですね、山下（泰正）さん、辻（隆）さん、上条（文夫）さんもそうだ。なかなかいい学生が藤田先生のところについた。それで私は藤田先生に太陽のコロ

ナのことを教えてもらったんです。

高橋: それで卒業研究をするわけですか？

日江井: そうですね。私自身はですね、まず恒星を調べ、それから恒星の集合の銀河系を調べ、そして宇宙をと思ったわけ。しかし「隗より始めよ」で、一番身近にある星、太陽から調べようじゃないかと思ったわけですね。それで太陽をやろうと思った。

高橋: なるほど、何か具体的なテーマをもらったんですか？

日江井: center-limb variation とか limb-darkening を用いた上層大気構造の研究について文献を調べましたね。

高橋: 太陽の中心部と周縁部では明るさとかスペクトルが変わってくるという現象ですね？

日江井: そうです。まずですね、昭和13年頃じゃないかなあ、ウィルト (R. Wildt) が言い出したんですが、太陽の光球の opacity の源が negative hydrogen であるということがわかったんですね。それでチャンドラセカールたちが center-limb variation がどうなるかというのを連続光の radiative transfer で調べてたんです。要するに radiative transfer の逆問題で、積分されたものが観測量で、大気が一様であると仮定して、積分の中身がどうなっているかを求めるんです。そういうふうな連続光による光球のストラクチャーの決定っていうのが行われていました。あの頃は radiative transfer がずいぶんさかんだったですね。

高橋: そうなんですか。じゃあ藤田先生に見てもらいながらそういうことを調べたと。

日江井: そうですね。それで大学院に入って、末元 (善三郎) さんが三鷹から麻布まで来られて太陽物理の講義をしてくれたんです。

高橋: 大学院では東京天文台の先生からも授業を受けられるわけですね。

日江井: 受けられたね。東京天文台は東大の附置研究所だったし、何人かの先生は東大の教官を併任されてたんだね。授業は麻布でやりました。

さっき言ったように天文学教室の私の同級生は堀と川上と私だったんだけど、川上は学部を卒業するときに物理に行っちゃった。川上はね、天文より物理的なのが好きで、プラズマの研究をしました。そのときに黒田 (孝) が東大の教養学部から天文に入ってきたんですが、彼は学習院で一緒の組だったんです。

高橋: 高校の同級生だったんですね。それで、大学院ではどういう研究をされたんですか？

日江井: その末元さんの授業で太陽の大気構造の問題について聞きまして、それで末元さんと一緒に太陽の研究をすることになったんです。

高橋: じゃあ修士では末元さんから指導してもらったんですね。具体的にはどういう研究だったんですか？

日江井: さっきの太陽の上層大気構造の研究を連続光じゃなくて吸収線でやろうと思って、NaのD線を選んだんです。太陽のNaのD線はD1, D2って2つの線がありますよね。そのNaの吸収線の limb-darkening を用いて、上層大気構造を調べるとい研究をしたんです。Naの吸収線の中心部は彩層の上層部、ウイングに行くほど大気の下層の情報が含まれているんですね。だからNaの吸収線の limb-darkening のデータを使うと大気の高さに応じた物理状態がわかる。それによって彩層の構造を調べようとしたわけです。

高橋: それも radiative transfer でということですか？

日江井: はい、radiative transfer は、連続光の場合は楽なんです。source function があって、吸収するものがあれば吸収係数をかけて積分する。その吸収源が negative hydrogen だったわけです。ところが彩層となるとスピキュール (太陽彩層に存在する針状の構造) が現れて、一様大気の仮定ができなくなってしまうので、radiative transfer が大変難しくなるわけですね。スペクトルの吸収係数もあるし、ガスの動きによってドップラー効果があったりして難しくなるわけですよ。それ

で私はD1, D2の吸収線を使って観測データを説明しようと思ったんだけど、D1, D2というのはratioが1:2かな、決まってるからね。それがなんか観測データと合わなくてですね、非常に苦労した覚えがありましたよね。修士論文発表のその日まで。

高橋: 計算と観測データが合わないよ。

日江井: はい、それでどうも2ストリームあって、1つは温度が高くて1つは温度が低いっていう、なんかそういう2ストリームモデルを考えたんじゃないかという気がします。

高橋: 観測も自分でしたんですか？

日江井: いえ、自分で観測したわけじゃない。残念ながら外国のデータで、いろんな人の観測があるわけですよ。

高橋: それが修論のテーマということなんですかね。その頃にはもう研究者を目指していたんですか？

日江井: そういふことかな。何かを目指すというよりもそれが好きで、面白くて調べたということですね。

高橋: じゃあ大学院は修士の2年間で太陽の研究をして、その後、東京天文台に助手として就職されるっていうことなんですね。

日江井: そうですね。

(第3回に続く)

謝 辞

本活動は天文学振興財団からの助成を受けています。

A Long Interview with Prof. Eijiro Hiei [2]

Keitaro TAKAHASHI

*Faculty of Advanced Science and Technology,
Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami,
Kumamoto 860-8555, Japan*

Abstract: This is the second article of the series of a long interview with Prof. Eijiro Hiei. He dedicated himself to his studies in the chaotic post-war period and entered the Gakushuin High School. During his one-year high-school period there, he was surrounded by outstanding teachers in philosophy and languages, which had a profound impact on his personal development. With the establishment of the new university system, he became one of the first students of the newly founded University of Tokyo. Despite experiencing severe food shortages in the post-war era, he deepened his interest in physics during his liberal arts education and decided to specialize in astronomy. Under the guidance of professors who played a key role in rebuilding Japanese astronomy after the war, he acquired a solid foundation in the field. In graduate school, he pursued solar research, analyzing the structure of the solar atmosphere using sodium lines. This interview explores his passion for academia, interwoven with insights into Japan's post-war educational reforms and university life.

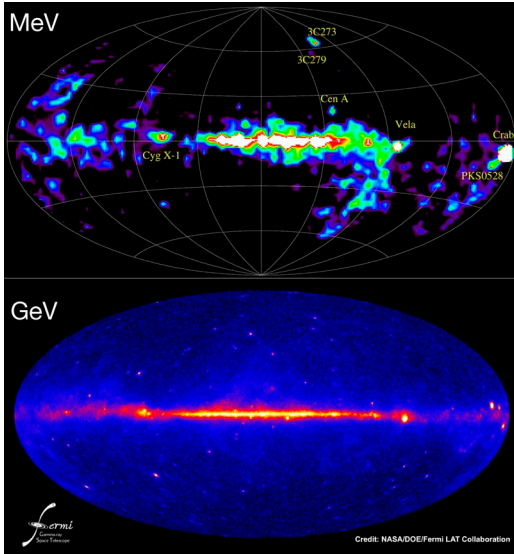


図1 MeV/GeVガンマ線の全天画像の比較. MeVはCGRO/COMPTEL, GeVはFermi/LATによって得られた画像である. GeVガンマ線の画像はMeV帯域よりも高精細で多くの天体が検出されている. Credit: NASA/CGRO, NASA/DOE/Fermi-LAT.

カメラという撮像技法を用いるのだが、X線ミラーのような光学系に比べて集光力、撮像能力ともに、大幅に劣る。さらなる問題が人工衛星軌道上における高いバックグラウンドレベルである。軌道上には宇宙線や地球磁場に束縛された荷電粒子が多量に存在し、これらが検出器そのものや人工衛星構体、ひいては地球大気に衝突し、原子核相互作用を起こす [3]。その結果、MeVのエネルギーを持つガンマ線やベータ線を大量に生み出してしまい、これが観測の妨げとなるのである。MeVガンマ線帯域で「天文学」を実践するには、これらの問題を克服し、高いシグナル・ノイズ比の観測を実現する必要がある。

2. MeVガンマ線のサイエンス

ここでは、MeVガンマ線の高感度観測によって実現すると期待される新しいサイエンスを概観する。MeVガンマ線帯域、特に0.1–10 MeVのエ

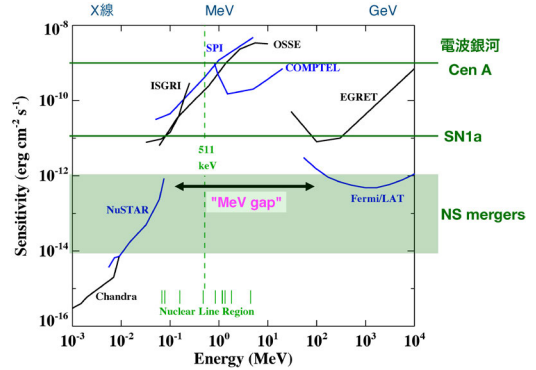


図2 X線からGeVガンマ線に至るエネルギー域の感度（検出可能なフラックス）。MeVガンマ線は隣接する硬X線やGeVガンマ線よりも感度が大きく劣っているのが現状であり、これは“MeV gap”と呼ばれている。MeVガンマ線の主なサイエンスターゲットである電波銀河Cen A, Ia型超新星, 連星中性子星合体について、目標となるフラックスレベルも表示している。

ネルギーは、原子核の準位間エネルギーに相当するため、放射性同位体の崩壊や原子核の脱励起に伴う放射を直接観測できる唯一の帯域となる。そのため、宇宙線加速源の探査や、超新星爆発や連星中性子星合体などの元素合成の現場を探るためのプローブとして、古くから期待されてきた。

MeVガンマ線観測において特筆すべきこととして、天文学の新潮流であるマルチメッセンジャー天文学との相性の良さがある。重力波やニュートリノ、宇宙線は中性子星合体や超新星などの高エネルギー天体现象から放出され、そのような高エネルギー現象は同時に核ガンマ線観測の重要ターゲットとなる。特にライン核ガンマ線はドップラー効果を通して高温・高エネルギー環境のダイナミクスの情報を伝えるため、MeVガンマ線観測がマルチメッセンジャー天文学において果たす役割は非常に重要になると期待されている。

2.1 元素合成—超新星・中性子星合体

$^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ のような半減期が1–100日の短寿命の同位体からの核ガンマ線によって、超新星爆発や

おらず、MeVガンマ線帯域の高精度スペクトルや偏光観測によって、その本質に迫ることができる。

2.4 電子陽電子対消滅線

1970年代の気球実験で銀河中心領域から初検出された0.511 MeVの電子陽電子対消滅線は、以降、多数の気球・衛星でも観測されている [17]。観測からは、銀河中心領域において 2×10^{43} 個/sで陽電子が消滅しており、一つの点源ではなく直径数十度の広がりを持つことが示唆されている [18]。対消滅には、電子-陽電子の束縛状態であるポジトロニウムを生成しての消滅と、正面衝突するin-flight消滅が存在し、0.511 MeVのライン強度とオルソポジトロニウムの連続スペクトルの強度比から、銀河中心領域の電子陽電子対消滅線のほとんどが、ポジトロニウム起因であることが示されている [18]。これは、ポジトロニウム生成断面積の大きい10-100 eVの陽電子が銀河中心領域に広がって存在することを示唆するが [17]、このような低エネルギーの陽電子供給源はまだまだ不明なままとされている。

電子陽電子対消滅線はブラックホールや中性子星の降着流、白色矮星で起きる新星爆発などさまざまな高エネルギー現象から発生することが期待されている。しかし、これまでの観測で個別の天体から0.511 MeVの輝線放射が検出された例はなく、将来の高感度観測での発見が待たれている状況である。高エネルギー天体におけるサブMeV帯域での輝線は貴重であり、降着流や爆発のアウトフローのダイナミクスの測定に利用することができる。

2.5 未知のトピックー暗黒物質など

銀河中心領域におけるMeVガンマ線帯域の観測は数多く実施されており、連続的なエネルギースペクトルが1 MeV以上にも伸びることが報告されている [19, 20]。MeVガンマ線帯域では、電子宇宙線の逆コンプトン散乱による放射が予想されているが、観測されている強度は予想の数倍強

い強度となっている。この拡散ガンマ線を宇宙線で説明する試みは行われているが、Fermi衛星で観測されている π^0 放射強度や一般的に知られる光子密度・宇宙線拡散係数・宇宙線スペクトルとは合わない結果となっている [20, 21]。空間分解されていない天体からの放射の重ね合わせである可能性もあるが、MeVガンマ線帯域に特徴的な放射を持つ天体種族はいまだ発見されていない。

MeVガンマ線帯域においても全天に広がる背景放射が存在する。これは、系外拡散ガンマ線と呼ばれ、空間分解できない遠方の天体からの放射が重ね合わさったものだと考えられている。これまでApolloやCOMPTEL、及び多数の気球実験によって観測され、その起源としてセイファート銀河やflat spectrum radio quasar (FSRQ)といった種族の活動銀河核が候補に挙げられている [22, 23]。

一方で、系外拡散ガンマ線や銀河中心領域のMeVガンマ線放射について、宇宙初期の密度揺らぎで生じた 10^{16} - 10^{17} g程度の質量を持つ原始ブラックホールのホーキング放射 [24] や数十MeVの質量を持つ素粒子的な粒子WIMP (weakly interactive massive particle) の対消滅に伴うガンマ線放射 [25] も提案されており、暗黒物質の間接探索の可能性も出てきた。さらに、MeVガンマ線帯域における宇宙の透明度は非常に高く遠方まで見通すことが可能であるため、宇宙初期の星によるガンマ線バースト [26, 27] の観測も可能と期待されている。

3. これからのミッション

人工衛星ベースの宇宙MeVガンマ線の観測は、COMPTELによる核ガンマ線の全天観測、INTEGRALによる超新星起源の核ガンマ線の検出や銀河中心からの電子陽電子対消滅線のマッピングなどの先駆的成果が創出されてきた。日本でも高いエネルギー分解能を持つ半導体積層コンプトンカメラという新しいコンセプトの軟ガンマ線検

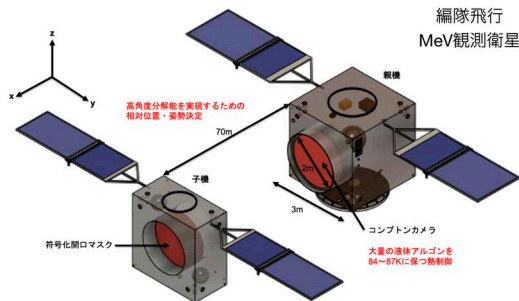


図4 コンプトンカメラと符号化開口マスク光学系を組み合わせた編隊飛行MeVガンマ線観測ミッションの概念図 [32]. コンプトンカメラ衛星(親機)単体で広視野全天サーベイ観測を常時実施する. 超新星や中性子星合体などの突発天体やMeVガンマ線定常放射が期待できる銀河中心領域, 系内ブラックホール天体などを対象として, 光学系衛星(子機)が目標に指向し, 高感度・高空間分解能の観測を行う。



図5 第3回MeVガンマ線天文学研究会(2024年9月9-10日, 石川県文教会館)。

た皆様にも, MeVガンマ線天文学研究会や将来計画の議論へ, ご参画・ご支援いただければ幸いです。

謝辞

編集委員の志達めぐみ氏には原稿の完成を辛抱強く待ってくださったうえに, 有益な助言をいただき厚く御礼申し上げます。本稿を執筆する貴重な機会を作ってくださった榎戸輝揚氏, 原稿の内容に有益な助言をいただいた井上芳幸氏にも深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Schoenfelder, V., et al., 1993, *ApJS*, 86, 657
- [2] Vedrenne, G., et al., 2003, *A&A*, 411, L63
- [3] Odaka, H., et al., 2018, *Nucle. Inst. Method. Phys. Res. A*, 891, 92
- [4] Diehl, R., et al., 2014, *Science*, 345, 1162
- [5] Churazov, E., et al., 2014, *Nature*, 512, 406
- [6] Summa, A., et al., 2013, *A&A*, 554, A67
- [7] Diehl, R., et al., 2015, *A&A*, 574, A72
- [8] Hotokezaka, K., et al., 2016, *MNRAS*, 459, 35
- [9] van de Voort, F., et al., 2020, *MNRAS*, 494, 4867
- [10] Knödlseher, J., et al., 1999, *A&A*, 345, 813
- [11] Bouchet, L., et al., 2015, *ApJ*, 801, 142
- [12] Orlando, E., et al., 2019, *BAAS*, 51, 151
- [13] Benhabiles-Mezhoud, H., et al., 2013, *ApJ*, 763, 98
- [14] Aharonian, F. A., & Sunyaev, R. A., 1984, *MNRAS*, 210, 257
- [15] Kafexhiu, E., et al., 2019, *A&A*, 623, A174
- [16] García, J. A., et al., 2015, *ApJ*, 808, L37
- [17] Prantzos, N., et al., 2011, *Rev. Modern Phys.*, 83, 1001
- [18] Siebert, T., et al., 2016, *A&A*, 586, A84
- [19] Strong, A. W., et al., 1999, *Astrophys. Lett. Commun.*, 39, 209
- [20] Siebert, T., et al., 2022, *A&A*, 660, A130
- [21] Orlando, E., 2018, *MNRAS*, 475, 2724
- [22] Inoue, Y., et al., 2019, *ApJ*, 880, 40

い. 2027年にCOSIが軌道投入されればMeVガンマ線サイエンスには多くの発見が期待されており, 2040年代に向けて重要なパスファインダーの役割を果たすことになる。

5. 日本のコミュニティの活動

日本では, 先に挙げたような将来計画に向けた観測機器開発に並行して, MeVガンマ線天文学の推進・観測対象となるサイエンスの洗練を目的とし, 宇宙科学研究所・宇宙理学委員会の下にMeVガンマ線観測検討リサーチグループを設立し, これまでに3回のMeVガンマ線天文学研究会(2017, 2019, 2024)及び天文学会2024春季年会での企画セッションを実施してきた。これらの研究会・企画セッションでは, 日本におけるガンマ線観測計画だけでなく, 観測が期待される天体についての議論やMeVガンマ線の宇宙観測がもたらす素粒子理論・宇宙論への新しい知見への期待など, 多種多様な講演・議論が活発に行われた(図5)。また機器開発を進める学生・若手研究者にとっても, 係わるミッションに関係なく広く交流を深める機会となっている。本稿を読んで頂い

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Sounding Rocket Experiment FOXSI-4: Comprehensive Testing of the Soft X-Ray Cameras and the Launch Operation

氏 名：清水里香（総合研究大学院大学 物理科学
研究科 宇宙科学専攻 5年一貫制博士課程2-3年（渡航当時））

渡航先：アメリカ アラスカ州

期 間：2024年3月20日～4月26日

2024年4月17日、アラスカ州ポーカーフラット実験施設より、日米共同太陽観測ロケット実験FOXSI-4の打ち上げが実施された（図1）。私は搭載装置の一つである軟X線カメラの主要開発メンバーとして、打ち上げ前の動作試験や通信試験などの最終試験、打ち上げオペレーションに参加した。

太陽フレアの駆動源と考えられる磁気再結合の過程では、反平行の磁力線が繋ぎ変わることで磁気エネルギーが爆発的に解放され、粒子やプラズマの運動・熱エネルギーに変換される。しかし解放されるエネルギーの大きさや、粒子加速・プラ

ズマ放出・プラズマ加熱などへのエネルギーの分配など、未解明な点は多く残る。FOXSI-4はこのような磁気再結合とエネルギー変換に伴うプラズマ現象の追求を目的の一つとし、高精度のX線ミラーとX線センサ（軟X線はCMOSセンサ、硬X線はCdTeセンサ）とを組み合わせることで、太陽フレアに対するX線集光撮像分光観測（光子計測）を行なった。私は軟X線観測用の高速度カメラの開発を担当し、CMOSセンサのX線光子計測能力の評価や、飛行中のコマンド処理やダウンリンクデータ作成のソフトウェア開発など、打ち上げに向けた準備をこれまで進めてきた。

軟X線カメラは他の観測装置との組み上げやロケットへの格納を終え、今年2月にはニューメキシコ州ホワイトサンズ実験場にてロケット全体での振動試験などが完了した。今回の渡航前に、ロケットは発射場であるアラスカ州ポーカーフラット実験施設へ輸送されていた。3月22日の活動初日には、トラック輸送による装置の損傷や変化等がないかを確認するため、観測装置の動作確認を行なった。私は軟X線カメラを担当し、CMOSセンサの前方に ^{55}Fe のX線線源を設置しデータを取得した。得られたデータを解析し、輸送前にホワイトサンズ実験場で行なった同様の実験の結果と比較することで、センサやカメラに異常がないことを確認できた。翌日には、カメラだけでなく光学系の確認を行うため、X線発生装置を望遠鏡の前方十数メートルの位置に設置し、望遠鏡を通してX線をCMOSセンサで検出した。X線光子が検出された位置の分布から、望遠鏡に異常がないことを確認できた。

翌週には、飛行中にダウンリンクデータを確認するGSE（地上支援装置）の表示について、ミ



図1 FOXSI-4打ち上げ（クレジット：NASA）

ネソタ大の担当者と打ち合わせを行った。それまでにオンライン会議等で議論を重ねていたため大まかには実装が完了していたが、細かな確認はできていなかった。そこで模擬データを用いて、撮像の露光パラメタが正しく表示されることを確認した。一方画像データの表示では、正しく表示できているものの、実際に得られるであろう光子の信号値の大きさが考慮されていないことが判明した。観測時には画像が暗く表示され見にくくなるのが懸念されたため、表示スケージングの調整を行い、実際の太陽フレア観測により適ったものへ改良することができた。

4月に入ると、打ち上げウィンドウ中に待機し飛行中にGSEでデータを確認するために使用する部屋へと作業場所を移動し、実際に使用するPCやモニタなどの環境を整えた(図2)。また、コマンドは隣室のオペレーションルームから送るため、飛行中のコマンドの受け渡し方法等の確認を行った。

4月7日に、いよいよ打ち上げウィンドウに入った。ウィンドウ期間中は、一日の初めにカウントダウンオペレーションを予行し、その後打ち上げウィンドウ時間の開始とともにカウントダウンが始まり、打ち上げ3分前で停止する。そのまま打ち上げの判断があるのを待つ間、常に軟X線カメラに異常がないか確認した。打ち上げウィンドウの8日目である17日、Mクラスフレアの発生により、ついにカウントダウン再開が決定された。飛行中、太陽フレアの構造らしき画像データに安堵する間もなく、カメラに異常はないか、露光パラメタはこのままでよいのか、など確認して



図2 使用した作業部屋の様子。一番左が筆者で、モニタにはGSE画面が表示されている。

いるうちに、あっというまに観測時間は終了した。終了後、メンバー皆緊張が解けた様子で、打ち上げを喜び合ったことは忘れられない。

後日、ヘリコプターで観測装置が回収され実験施設に戻ってきた。軟X線カメラをPCに有線接続し、カメラ上のSSDに保存された、飛行中にダウンリンクしていないデータを含む全記録データを無事に取り出すことができた。

現地ではFOXSI-4チームだけでなく、同時打ち上げを実施したHi-C flareチームやフレア予測チームなど、多くの国内外の科学者や技術者と議論を交わすことができた。また同年代の学生とも交流し、大きな刺激となった。この観測ロケット実験に、一つの装置を担当するという大きな役割をもって従事できたことに感謝している。打ち上げオペレーションに参加する機会を与えてくださった早川幸男基金に、深くお礼申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Kochel Cosmic Lyman Alpha Workshop, etc.

氏 名：中根美七海（東京大学 宇宙線研究所
M2（渡航当時））

渡航先：ドイツ コッフエル／デンマーク コペン
ハーゲン／イタリア ピサ

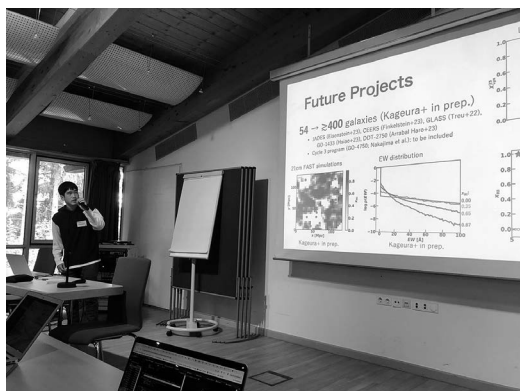
期 間：2024年9月24日～10月10日

本渡航では、ドイツでの国際研究会“Kochel Cosmic Lyman Alpha Workshop”で口頭発表をして議論に参加し、また、デンマークのコペンハーゲンにあるComic Dawn Center (DAWN)とイタリアのピサにあるピサ高等師範学校 (Scuola Normale Superiore; SNS) を訪問してセミナートークをするとともに私の研究について議論させていただいた。研究会には、ライマンアルファに関する銀河周辺物質からの放射機構や輻射輸送、宇宙再電離や宇宙論への示唆など多岐に渡る分野での観測・理論の研究者が集まり、議論や交流が行われた。

まず、9月26, 27日にDAWNを訪問し、セミナートークを行った。トークでは、私が行った、JWSTで観測された高赤方偏移 $z\sim 7-13$ の星形成

銀河のスペクトルに基づいた宇宙再電離と化学進化についての研究発表をした。宇宙再電離研究では、JWST打ち上げ以前はほとんど観測されていなかった $z>9$ の銀河を含めた $z=7-13$ の星形成銀河のライマンアルファ輝線に基づき、銀河間物質の中性水素割合の制限を行った。 $z>9$ における高い中性水素割合から、遅い時代から始まる再電離史という重要な示唆を得た (Nakane+24a)。化学進化研究では、 $z=10.6$ にあるUVで明るい銀河、GN-z11のO/Feの組成比を測定した。得られた低いO/Feの組成比から、 $z\sim 10$ という遠方宇宙において、極超新星／対不安定型超新星または遅延時間の短いIa型超新星が起きている可能性を示した (Nakane+24b)。発表後には、特に宇宙再電離研究に関して中性水素割合の推定方法やモデル依存性など多くの質問をいただいた。2日の間に、DAWNへの訪問を快く受け入れてくださったCharlotte Mason氏とは直接話をさせていただき、JWSTによるライマンアルファ輝線観測の再電離史制限への影響や高赤方偏移の星形成について議論を行った。対面で話をさせていただいたKoki Kakiichi氏には化学進化研究について興味を持っていただき、多くの質問をいただく中で、高赤方偏移銀河のFeの組成比測定についての議論も行った。また、DAWNの中でも主に宇宙再電離に関係して研究を行っているCharlotte Mason氏のグループの定例ミーティングにも参加させていただき、Ting-Yi Lu氏の発表の中で宇宙再電離の進行過程を探る上で重要な電離バブルについての議論を深めた。

9月30日～10月4日には、ドイツ・コッフエルに滞在し、Aspenstein Castleで行われた国際研究会で上記の宇宙再電離研究についての口頭発表を行った。発表後は、中性水素割合の測定方法や結



ドイツでの国際研究会“Kochel Cosmic Lyman Alpha Workshop”における研究発表の様子。

果について多く質問をいただいた。また、私が主に研究行った宇宙再電離以外でのライマンアルファ輝線の輻射輸送など、最新の研究結果から新たな知見を得ることができた。本研究会は参加者全員が集まって食事をする形式になっており、議論や交流の場を多く持った。特に、Mengatao Tang氏やGareth Jones氏とは中性水素割合の推定について深く議論を行うことができた。

10月7, 8日にはSNSを訪問し、宇宙再電離と化学進化の研究についてセミナートークを行った。発表中には測定方法や結果に対して様々な質問をいただいた。発表後は今回のSNSへの訪問を快諾して歓迎して下さったAndrea Ferrara氏と話をさせていただいた。Ferrara氏の高赤方偏移銀河におけるアウトフローとガスの研究から推察されるライマンアルファ輝線のvisibilityや、

O/Feの組成比を説明するモデルについて有意義な議論を交わすことができた。

国際研究会での口頭発表は今回が初めてであった。実際に発表を行い、自身の研究に関連する多くの研究と議論を交わす中で自身の研究の立ち位置を理解し、分野の動向についての知見を深めることができた。また、DAWNやSNSでのセミナートークでは、宇宙再電離研究だけでなく、化学進化研究についても知ってもらえる良い機会となった。本渡航での貴重な経験を通して得られた多くの学びを今後の研究に活かし、精進していきたい。

最後に、非常に有意義であった本渡航をご支援いただいた早川幸男基金ならびに関係者の方々に深く感謝を申し上げます。



月報だよりの原稿は毎月20日に締切り、翌月に発行の「天文月報」に掲載いたします。ご投稿いただいた記事は、翌月初旬に一度校正をお願いいたします。

記事の投稿は、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

近畿大学工学部理学科物理学コース 准教授または講師

1. 職種および公募人員：准教授または講師 1名
2. 所属部門：工学部理学科物理学コース
3. 専門分野および職務内容：宇宙物理学（理論）分野を主体的に研究する意欲的な研究者であり、物理学に関する授業を担当できる人材を募集します。
4. 着任時期：2026年4月1日
5. 任期：なし（定年66歳）
6. 応募資格：
(1) 博士（またはPh.D）の学位を有する方、または、着任までに取得見込みの方、(2) 教育・研究に熱心な方、(3) 大学教員に相応しい研究業績を有し、発展が見込まれる方、(4) 大学の管理・運営に対して十分な能力と熱意のある方
7. 提出書類：JREC-IN Portalの「Web応募」機能から応募
8. 応募締め切り：2025年6月1日
9. 提出先および問い合わせ先：
〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1
近畿大学 工学部理学科物理学コース
井上開輝 電話：06-6721-2332
kinoue_AT_phys.kindai.ac.jp
（_AT_を@に変換して送信）

研究会・集会案内

茨城大学理学部附属宇宙科学教育研究センター／国立天文台水沢 VLBI 観測所茨城観測局 第16回【公開天文台】のお知らせ

日立市と高萩市に跨ってある32mパラボラアンテナ2基は、衛星通信アンテナから電波望遠鏡へのアップグレードがなされ、日本・東アジアVLBIの主要施設として、国際的に優れた天文学研究の成果を挙げています。子どもたちを含め、多くの地域のみなさん

に、宇宙の科学に親しんでいただきたいと考え、今年度も公開天文台を開催することとなりました。

日時：2025年4月26日(土) 12～16時（雨天決行）

場所：茨城県高萩市石滝627-1

（さくら宇宙公園内）

茨城大学理学部附属宇宙科学教育研究センター

国立天文台水沢VLBI観測所茨城観測局

主催：茨城大学

共催：国立天文台

後援：高萩市教育委員会（いきいき萩っ子育成事業）、高萩市観光協会、日立市教育委員会、日立市観光物産協会

内容：パラボラアンテナ施設・地下道見学（12:00-14:30）、4次元シアター（12:00-13:30）、講演「日本各地の電波望遠鏡で探る超新星爆発の謎」（岩田悠平 [国立天文台 水沢VLBI観測所 助教]）（14:30-16:00）

受付：施設見学は開催時間中随時受付。4次元シアター最終受付は13:00。講演会は先着100名14:00より受付。

参加料：無料

アクセス：

[1] 鉄道：JR常磐線高萩駅下車

(1) 会場まで徒歩 約30分

(2) MyRideのるる（オンデマンドバス）利用：さくら宇宙公園下車すぐ（当日の運行時間9時から15時）

[2] 乗用車：常磐自動車道 高萩インターもしくは日立北インターより高萩市街方面約15分9km、明秀学園高萩キャンパス前を山側住宅街に曲がり600m先

駐車場：無料 普通車約300台駐車可

注意：アンテナ見学は動きやすい服装、靴で参加ください。

問い合わせ：

茨城大学理学部附属宇宙科学教育研究センター

〒318-0022 茨城県高萩市石滝627-1

Tel: 0293-24-9516

Fax: 0293-24-9517

メールアドレス: infoast@ml.ibaraki.ac.jp

URL: <http://www.asec.ibaraki.ac.jp/>

賞の推薦

第16回(2025年度)「日本学術振興会育志賞」 受賞候補者の推薦募集

日本天文学会からの推薦にて応募を希望される方は、①～③の手続きをお願いいたします。

(<https://www.jsps.go.jp/j-ikushi-prize/gaiyo.html> を参照)

①以下の提出書類をメール添付データで学会事務長宛て(jimucho@asj.or.jp)にお送りください。

(推薦は電子申請のみの取り扱いとなっています。)

- ・様式2———必要事項を記入
- ・日本学術振興会 育志賞推薦書「①推薦理由」
- ・推薦理由書A・B
- ・研究の概要等「様式4」

②天文学会推薦の場合の応募締切日

- ・2025年5月12日(月)

③応募様式など詳細は下記URLをご参照ください。

<https://www.jsps.go.jp/j-ikushi-prize/yoshiki.html>

会務案内

天文月報表紙デザイン案大募集!

天文月報では、翌年1年間の表紙デザインを常時募集しております。

毎年8月末日、一年間で集まった作品を対象に、次年度の表紙デザインを選考いたします。詳しくは下記募集要項をご確認ください。

応募はプロ・アマチュア、会員・非会員問わずどなたでも受け付けておりますので、多くの方にお声かけくださいますようご協力をお願いいたします。

2026年1月号～12月号の表紙を飾る表紙は、2025年8月31日に締め切ります。応募の際は以下の概要を参照してください。

『天文月報』2026年表紙デザイン募集概要

作品掲載期間: 2025年12月発行の119巻1号～2026年11月発行の119巻12号

- ・表紙は題字(『天文月報』の文字)、号数、日本天文学会のロゴマーク、記事タイトル、カラー画像および背景イラストから構成されます。

- ・入稿形態は、原則として完全版下原稿の電子データで入稿してください。ファイル形式は問いませんが必ずPDFを添えてください。

- ・題字とロゴマークは、原本のデータをダウンロードしてご使用ください。題字は元の文字が崩れない程度に、多少のアレンジをしても構いません。

題字: https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/geppou_title.jpg

ロゴマーク: https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/logo_J_black.eps

- ・すべての構成要素の配置を含めたデザインをお願いいたします。毎号背景ごと変えても、背景を固定して配色や画像・テキストの配置を変えるデザインでも構いません。具体例は過去の天文月報をご覧ください。

天文月報のホームページのバックナンバー

<https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/backnumber/>

■募集要項

- ・天文月報投稿用アップローダーに、表紙デザイン案の画像ファイル、およびそのコンセプトをお送りください。

天文月報アップローダー

https://stg.asj.or.jp/jp/activities/geppou/author_submission/

ログイン

ユーザー名: geppou パスワード: toukou

- ・カラー: CMYK
- ・ファイル形式不問
- ・雑誌のサイズ: B5判タテ(182ミリ×257ミリ)
- ・締切り: 2024年8月末日
- ・送り先: 天文月報編集委員会天文月報投稿用アップローダーまで

■応募規定

- ・募集する作品は、応募者が作成した未発表のオリジナル作品に限ります。
- ・作品の中に第三者が著作権等の権利を有している著作物等を利用していないものとします。
- ・採用された場合、作品の著作権については以下のよう規定します。

*納品された表紙の著作権(著作権法第27条及び第28条に規定する権利を含む。)は日本天文学会天文月報編集委員会に帰属します。

*表紙に使用したオリジナル原画の著作権(著作権法21条から26条の3に規定する権利。)は日本天文学

会天文月報編集委員会に帰属します。

* 著作者が表紙に使用したオリジナル原画を他の目的で使用する場合は、事前にその旨を日本天文学会天文月報編集委員会に知らせ、転載許可を取ってください。

・ 応募にあたりご提供いただいた個人情報は、本要項による採用作品の通知のためのみに使用します。

・ 採用された方には、規定の謝礼をお支払いします。
24万円/1年分

ご不明な点等ございましたら、ホームページお問い合わせフォーム「天文月報について」<https://www.asj.or.jp/jp/contact/>よりご連絡ください。

訃報

会員の平山淳氏は2025年3月5日に逝去されました。満90歳でした。

平山氏は当学会で、1973年5月17日～1977年5月18日に庶務理事、1981年5月13日～1985年5月23日に月報理事、1989年4月1日～1991年3月31日副理事長を務められました。心よりご冥福をお祈り申し上げます。

天文月報 118巻6月号 主な掲載予定記事

ASTRO NEWS: XRISM ニュース (3) 観測速報その2【山口弘悦, 野田博文, XRISM チーム】

ひさき特集 (3): ひさきを用いた木星放射線帯の科学【北元】LAPYUTA計画に向けて【土屋史紀, 村上豪, 山崎敦】

EUREKA: 初代星形成における乱流磁場の影響【定成健児エリック】

〈シリーズ〉天文学者たちの昭和: 日江井榮二郎氏ロングインタビュー [第3回] 乗鞍コロナ観測所 (1)【高橋慶太郎】

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4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)