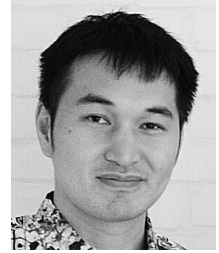


遠方宇宙を調べる為のガリレオ衛星食観測 —ガリレオ衛星食発光の予想外の発見—



津村 耕 司

〈東北大学 学際科学フロンティア研究所 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉

e-mail: tsumura@astr.tohoku.ac.jp

宇宙の歴史を通して生成された星からの光の積算を宇宙赤外線背景放射として精度よく観測することで、点源としては観測できないような暗い天体まで含んだ星形成史を観測的に探ることが可能です。ところがその観測は前景の明るい黄道光のため不定性が大きくなってしまいます。そこで私たちは、木星の影に入り食の状態のガリレオ衛星を遮蔽体として用いることで、前景の黄道光の差し引き不定性によらずに宇宙赤外線背景放射を測定する手法を開発しました。しかしいざそのような目的でガリレオ衛星食を観測すると、木星の影の中で太陽光に照らされていないためガリレオ衛星は周囲の空より暗いと予想していたにもかかわらず、食中のガリレオ衛星が明るく観測されました。この原因を追究した結果、木星上層大気のヘイズによる太陽光の散乱が原因であることがわかりました。この新発見は、木星の縞模様を形作る木星の雲の形成を理解するのに重要なだけでなく、大気透過光の観測という立場から系外惑星の大気を探る研究においても重要です。

1. ガリレオ衛星食観測の本来の目的

私たちは、すばる望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡の観測から、木星の4大衛星であるガリレオ衛星(内側からイオ・エウロパ・ガニメデ・カリスト)が、木星の影の中に入り太陽光に直接照らされていない食の状態にもかかわらず「明るい」という新現象を発見しました¹⁾。ここで「明るい」と言っても、太陽光に照らされている通常の状態(約5等程度)の 10^{-6} 程度なので、今回の私たちの深い観測によって初めて見つかった現象です*1。

1.1 宇宙赤外線背景放射の観測

そもそもなぜ私たちは、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などという超高性能な望遠鏡を使ってガリレオ衛星食を観測しようとしたのでしょうか？ 私たちの本来の研究目的は、宇宙赤外線背景放射の測定でした。そこでまず最初に、私たちの本来の研究目的を理解してもらうため、今回の観測天体である近くの木星とガリレオ衛星のことはしばらく忘れて、遠くの宇宙について考えていきましょう。

宇宙背景放射といえば、この宇宙誕生後約38万年の頃に、宇宙がプラズマ状態から中性の状態に変化した際に放射された宇宙マイクロ波背景放射が有名です。この放射の発見がビッグバン理論の直接証拠となりました。このように、銀河系外に起源をもつため全天からほぼ一様に届く光のことを「宇宙背景放射」といいます。「宇宙の明るさ」と思ってもらっても良いでしょう。宇宙マイクロ波背景放射の起源はビッグバンにありました

か？ 私たちの本来の研究目的は、宇宙赤外線背景放射の測定でした。そこでまず最初に、私たちの本来の研究目的を理解してもらうため、今回の観測天体である近くの木星とガリレオ衛星のことはしばらく忘れて、遠くの宇宙について考えていきましょう。

*1 この研究成果については、国立天文台からプレスリリースを出していただき、記者会見の場も設定していただきました。 http://subarutelescope.org/Pressrelease/2014/06/18/j_index.html

が、宇宙赤外線背景放射の起源は主に「銀河や星からの光」です。すなわち、もし宇宙赤外線背景放射の測定値のほうが、すでに知られている手前の銀河や星からの光の積算よりも大きければ、この宇宙にはまだ私たちの知らない未知の光源があることを意味します^{2),3)}。そしてCIBER*²など私たちの研究グループを含む複数の観測結果⁴⁾⁻⁷⁾は、その未知の光源の存在を示唆しています。

宇宙背景放射の観測は、星や銀河など「点光源」を観測する普通の天体観測とは違った難しさがあります。普通の天体観測の場合、観測対象である星や銀河は周りの空よりも明るいいため、その周りの空の明るさとの差し引きから、対象天体の明るさを求めることができます。しかし、宇宙背景放射のような「面光源」の観測の場合には、手前の明るさと奥の明るさを分離することが非常に困難です。赤外線での宇宙背景放射の観測においては、手前の太陽系の明るさ（惑星間塵による太陽光の散乱光である黄道光）が空の明るさの8割以上を占めるため、常に「黄道光をいかに評価して差し引くか」に悩まされ続けてきました⁸⁾。

黄道光に悩まされない宇宙赤外線背景放射の観測には大きく二つの手法があります。一つは黄道光の外から観測することです。これは、天文学者が地球大気の影響から逃れるために望遠鏡を宇宙に打ち上げるのと同じ発想で、次は太陽系の影響から逃れるために望遠鏡を太陽系の外側にもっていけば良いのです。NASAのパイオニア探査機による観測から、木星軌道までいけば黄道光の影響が無視できるレベルにまで低減することが知られています⁹⁾。この手法による宇宙背景放射の観測としては、可視光波長域ではありますが、パイオニア探査機のデータを再解析して得られた結果があります¹⁰⁾。私たちもJAXAが計画中のソーラー電力セイルによる木星トロヤ群探査機に、小型の赤外線望遠鏡EXZITを搭載する計画を進めてい

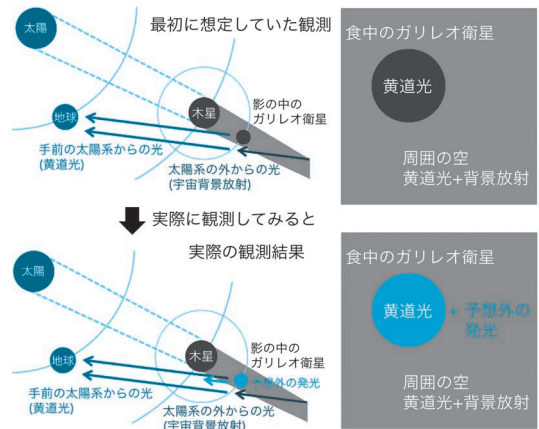


図1 ガリレオ衛星食を用いた観測の原理。本来の研究目的は、真っ暗なはずの食中のガリレオ衛星を遮蔽体にして背景放射を抽出することでしたが（上）、実際に観測してみると、ガリレオ衛星は食中にもかかわらず予想外に明るかったのです（下）。

ます¹¹⁾。もう一つは何らかの遮蔽体による掩蔽を用いる手法です。この宇宙に何らかの真っ暗な遮蔽体があったとすると、その遮蔽体は背後からの光（＝宇宙背景放射）をブロックするので、その光の分だけ暗く見えるはずですが（図1上）。この手法により、月の太陽光が当たっていない影の部分遮蔽体として用いてX線背景放射を測定した研究が有名です¹²⁾。可視光波長域では、暗黒星雲を遮蔽体として宇宙背景放射を測定した例があります¹³⁾、赤外線波長域では暗黒星雲は明るいいため、遮蔽体としては使えないという欠点があります。

1.2 研究アイデア誕生の瞬間

某日、私は当時の所属であったJAXA宇宙科学研究所（宇宙研）の居室で、和田武彦さん（宇宙研）、有松亘さん（宇宙研／東大*³）と、いつものようにコーヒーを飲みながら雑談していました。研究と直接関係のない話題のときが多いのですが、研究に関する話題もときどきあります。そ

*² 私たちのCIBERなどによる成果はこちらをご覧ください。 http://www.ir.isas.jaxa.jp/~matsuura/darkage/index_da.html

*³ 現在の所属は国立天文台。

して、こういうリラックスした状態での雑談から、ときどきスマッシュヒットなアイデアが出てくるものです。このときの話は、宇宙赤外線背景放射の観測に適した遮蔽体はないだろうか、というものでした。この頃私は、この数日前に東京大学天文学教室談話会にて宇宙赤外線背景放射について発表した際に受けた質問がきっかけで、月の影を用いたX線背景放射の検出と似たようなアイデアで、木星の太陽光が当たっていない影の部分の遮蔽体として使えないだろうかと考えていました。しかし実際にハッブル宇宙望遠鏡のアーカイブデータを見てみると、太陽光に照らされている木星の明るい部分が明るすぎて、そこからの光の漏れ込みのせいで暗い部分も見えなさそうだということがわかったばかりでした。そんな話をコーヒーを飲みながらしていると、和田さんが木星に投影されたガリレオ衛星の影を使うアイデアを出しましたが、これもハッブルのデータを見た感触から、木星からの光の漏れ込みで無理そうだと回答しました。すると今度は隣にいた有松さんが「ガリレオ衛星食が使えるのでは」と提案しました。このとき、恥ずかしながら私はこのガリレオ衛星食という天文現象のことをほとんど知らなかったのですが、幼少時から天文少年だった有松さんは、この現象を知っていたのです。

1.3 ガリレオ衛星食とは？

ガリレオ衛星食とは、木星系における月食です。地球-月系の月食では、月が地球の影に入ることです。暗くなりますが、ガリレオ衛星食では、木星を周回するガリレオ衛星が木星の影に入ることです。百聞は一見にしかず、私たちがすばる望遠鏡を用いて撮影した動画^{*4}を見ていただくのが最もわかりやすいでしょう。この動画

では、エウロパが木星の影に入り食の状態になることで、急激に暗くなっていく様子が見られます。この現象は家庭用の望遠鏡でも見ることができるので、興味がある人は是非とも観測にチャレンジしてみてください。

ガリレオ衛星食は、ガリレオ衛星が木星を公転するほぼ毎週回ごとに起こります^{*5}。例えばイオ食ならイオの公転周期である1.77日ごとにかかるわけです。ただし、それを地球から観測できるのは、太陽-木星-地球の位置関係(図1)の都合から、年に2回のシーズン(それぞれ約2カ月間)に限られます。

ガリレオ衛星食の利用例として最も有名なのは、1676年のオーレ・レーマーによる世界初の光速の測定でしょう¹⁴⁾。レーマーはイオ食が起こる間隔の僅かな変化を検出しました。イオ食の間隔はイオの公転周期すなわちニュートン力学で決まっておらず不変のはずなので、観測された変化は地球-木星間の距離変化に伴う光の到達時間の差によるものと結論し、そこから光速を導き出したのです^{14), 15)}。このほか、比較的最近の例としては、1970年代後半にガリレオ衛星食の潜入・出現の観測から、木星の大気を探る研究が行われています¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。現在では探査機によるその場観測のデータが木星大気研究の基礎データとなっていますが、この頃はまだやっとなパイオニア探査機やボイジャー探査機が木星に初めて近接した頃なので、この手法による木星大気の研究は重要だったようです。また、イオ食の機会を利用してイオの火山活動を地上から観測することも可能です^{20), 21)}。^{*6}。このように、ガリレオ衛星食は様々な天文研究に用いられている天文現象なのです。

^{*4} http://subarutelescope.org/Pressrelease/2014/06/18/europa_eclipse.mpeg

^{*5} 軌道傾斜角の関係からカリストは毎週回ごとに食を起こさない時期があります。

^{*6} この火山活動のためイオは食中でも明るいので、ガリレオ衛星食を遮蔽体として用いる私たちの研究ではイオ食は観測対象から外れます。

2. 観測手法

さて、コーヒーを飲みながら思いついたこのアイデアは、ものの数分ほどでコアとなるアイデアと基本的な観測計画ができあがり、「これはいけそうだ」ということになりました。ただし、淡い宇宙赤外線背景放射を食の継続時間（典型的に2-3時間程度）という限られた積分時間で検出するためには、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などの高性能な望遠鏡が必要であることもわかりました。そこで早速、プロポーザルの準備に取り掛かりました。かくして、遠方宇宙を観測するために近傍の木星（の衛星の食）を観測するという不思議な観測計画が始まったのです。まずは、すばる望遠鏡の近赤外線分光撮像装置IRCSでの観測を念頭に置いていたため、共同研究者で当時ハワイ観測所に勤務していた白簾麻衣さん（国立天文台）を介して、IRCSのスペシャリストである美濃和陽典さん（国立天文台）、早野裕さん（国立天文台）らにもチームに加わっていただき、本観測前に試験観測を実施していただくなどいろいろな検討を通して最適な観測手法を探っていました。特に白簾さんはこれ以降、本研究でのすばる望遠鏡での観測において中心的な役割を担っています。ハッブル宇宙望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡でも観測を行っていますが、観測手法の基本的な考え方は同じなので、以下では主にすばる望遠鏡を例に挙げて観測手法について紹介していきます。

2.1 視野外の木星追尾

この観測において最も難しいことは、近くに木星という明るい迷光源が常に存在することです^{*7}。そこで、木星からの迷光の影響をいかに抑えるかが観測の成否を握るカギとなります。

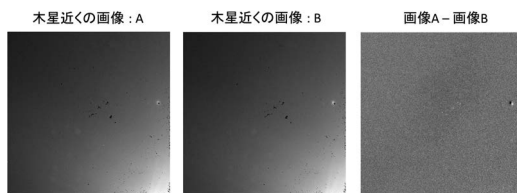


図2 すばるIRCSによる観測を例とした迷光除去の原理。視野の右下外に配置された木星からの迷光を差し引くため、木星追尾で観測することで、迷光パターンが固定され、木星からの迷光をきれいに差し引くことができます。木星追尾で時間をずらして撮像した2枚の画像を差し引いているため、星などの天体（画像の右中央）はずれて写ります。

まず、明るい木星を望遠鏡の視野の外に配置して、視野内の木星からの迷光の影響ができるだけ小さくなるようにします。このとき、観測する装置ごとに、ある特定の方向に迷光が出ることがわかっている場合があるので、視野内の迷光が最小になるような木星の配置を、各観測装置の専門家と相談しながら決定します^{*8}。さらに、その視野外に配置した木星に対して望遠鏡を追尾させます。こうすることで検出器上の迷光パターンが固定されるため、観測後の解析で迷光パターンをきれいに差し引けるようになります（図2）。このような追尾をすると、観測対象であるガリレオ衛星は観測中に検出器上を移動していくことになります。そこで、ガリレオ衛星の移動量が1ピクセル以下になるように積分時間を短く設定して（IRCSの場合は約20秒）連続撮像をします。このようにして得られた連続画像を、観測対象のガリレオ衛星が存在するはずの位置^{*9}に合わせてずらしながら足し合わせることで、迷光の影響を最小限にしつつ、ガリレオ衛星の実効的な積分時間を稼ぎます。この観測手法にはもう一つ利点があって、観測対象のガリレオ衛星が検出器上を移

^{*7} 食の条件にもよりますが、木星リムからの距離は最大でも1.5分角程度、典型的には30秒角程度です。

^{*8} 例えばすばる望遠鏡IRCSの場合、木星を検出器の（画面上で）右下に配置して観測を行います。

^{*9} 観測時には観測対象のガリレオ衛星は食中なので、短い積分時間の画像では見えません。そこで、ガリレオ衛星が存在するはずのピクセルをガリレオ衛星の位置情報から割り出して足し合わせていきます。

動していくので、ディザリング*10が不要だということ。ガリレオ衛星が食を起こしている限られた時間を有効活用するために、ディザリングのために望遠鏡を微動する時間ロスを気にしなくて良いというのは、地味ですが重要な利点です。

2.2 木星大気吸収バンド

上述の手法で木星の迷光は精度よく差し引くことができますが、とはいえ木星の迷光はないに越したことはありません。そこで、木星の大気主成分であるメタンやアンモニアによる吸収バンド*11を主な観測波長帯として選択してガリレオ衛星食の観測を行います。この波長帯では木星そのものの明るさが暗いので（図3青）、その迷光も暗くなるため差し引きが容易になるのです。例えば、すばる IRCSでの通常のJバンド（1.25 μm）やHバンド（1.63 μm）での観測では、主にガリレオ衛星食が起こる木星リムから30秒角程度の距離の位置において、木星からの迷光が大気光とほぼ同程度なのに対し、CH₄-longバンド（1.69 μm）での観測では、木星自体が暗いため、その迷光も大気光の1割以下になります（図4）。宇宙赤外線背景放射の予想されるスペクトルはCH₄-longバンドよりもJバンドのほうが明るいのですが、この木星迷光の影響も考慮に入れると、CH₄-longバンドでの観測のほうがより高い精度で宇宙赤外線背景放射を測定できると見込まれます。

2.3 補償光学のガイド星

すばる望遠鏡での観測の場合は補償光学も用いました。そのためにはガイド星も必要です。ガイド星として、通常は観測天域の近く（30秒角以内）にある点源（Rバンドで16.5等よりも明るい）を用いるのですが、私たちの観測の場合、近くに明るい木星が存在するため、その木星からの

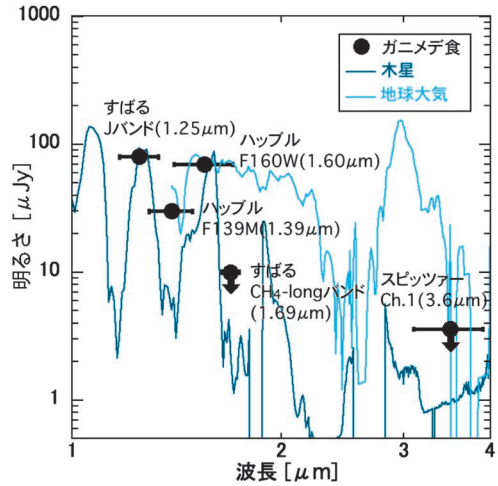


図3 私たちが観測した食中のガニメデの明るさ(黒)。比較として、木星のスペクトル(青)²²⁾と地球大気スペクトル(水色)²³⁾も示しています。

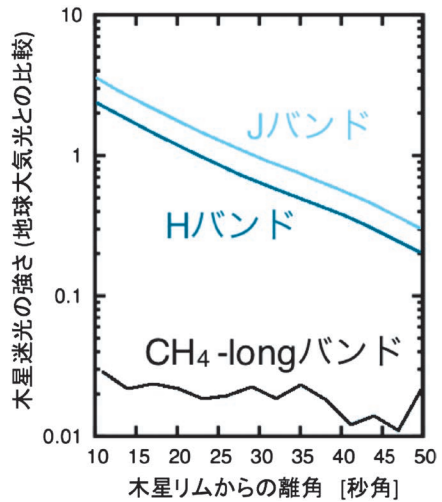


図4 すばる IRCSでの観測時における各バンドでの木星迷光の強さ。

迷光のせいで、ガイド星はもっと明るくしなければなりません。普通はなかなか観測天域の近くにそんな明るい星は存在してくれないのですが、私た

*10 観測対象の天体がたまたまバッドピクセルにまたがってしまうことを避けるために、観測中に望遠鏡を僅かにずらしながら観測することで、観測対象の天体を複数のピクセルで検出して、バッドピクセルなどによる悪影響を排除する観測手法のことをディザリングといいます。

*11 すばる望遠鏡 IRCS の場合は CH₄-long フィルター（1.69 μm）、ハubble宇宙望遠鏡 WFC3 の場合は F139M フィルター（1.39 μm）、スピッツァー宇宙望遠鏡 IRAC の場合はチャンネル1（3.6 μm）が該当します。

ちの観測の場合、明るい天体が近くに存在する可能性が高いのです。その明るい天体とは、食を起こさない他のガリレオ衛星です。観測時の衛星の配置条件にもよりますが、例えばガニメデ食を観測する場合、側にイオなど他の食を起こさない衛星が存在する可能性が高いため、その場合はそのイオを補償光学のガイド星として用います。

このような観測の難しさは主に2点ありました。まず上記の例の場合、観測対象であるガニメデ食、望遠鏡が追尾する(視野外の)木星、補償光学のガイド星であるイオがすべて天球に対して異なる動きをしているということです。したがって望遠鏡の運用が非常に複雑なものとなります。さらに、すばる望遠鏡ほどの解像度をもってすると、ガリレオ衛星はもはや点源ではなく空間分解されています。このように空間的に広がった天体をガイド星として用いた場合、補償光学がどれほど効果的に効くのかも知っておく必要がありました。このような複雑な観測の実現のために、数度の試験観測などを行っていただき、最適な観測手法を作り上げていったのです。

2.4 プロポーザルと観測の準備

以上のような特殊で複雑な観測手法をプロポーザルに英文で説明するのはなかなか困難で最初はいへん苦労しました。また、観測対象がガリレオ衛星食という時刻限定の天文現象のため、その観測場所(すばる望遠鏡の場合ならハワイ)で観測可能な食をリストアップして、それらの食の観測条件などを評価して観測希望の優先順位をプロポーザルに記載します。この優先順位を決める作業はとてたいへんな作業で、共同研究者たちといろいろな条件を比較しながら議論を進めて決めていきます。例えば、ある食は木星から離れた場所で起こるので木星迷光の影響は小さく、しかも

食の継続時間が長いと積分時間も稼げるとしましょう。一見、非常に良い食のように見えて、ぜひともこの食を観測したいと思っても、実はこの食が起こる時刻はハワイでは日が沈んだ直後でまだ薄明が残っていて、しかも高度も低いため観測条件は非常に悪い、ということもしばしばです。

さらに、時刻限定のイベントが観測対象であるため、当然ですが観測日を人間の都合で決めることができません。普通の観測なら、すばるの観測時間を2夜獲得したのなら、その2夜が連続していますが、ハワイへの渡航は1回で済むことが多いのですが、私たちがこの観測計画で2つの異なる食を観測する時間を獲得した場合^{*12}、例えば最初の食の観測のためハワイに渡航して観測し、帰国して2週間後にまたハワイに渡航して2回目の観測を行う、ということもありました。

ほか、地味に頭を悩ませたのが、プロポーザルに記載する科学カテゴリーです。提出されたプロポーザルは、各分野の専門家に審査され点数がつけられ、その点数に応じて採択かどうかが決まるので、そのプロポーザルに適切な審査員を選択するため、プロポーザルでは科学カテゴリーの欄で観測計画に最も適した分野を選びます。私たちの科学的な目的は「宇宙赤外線背景放射の観測による遠方宇宙での星形成史の解明」のため、すばるのプロポーザルでは「High-z Galaxies (遠方銀河)」を、ハッブル宇宙望遠鏡では「COSMOLOGY (宇宙論)」を科学カテゴリーとして選択するわけですが、観測対象は遠方宇宙とは距離的に対極な木星のガリレオ衛星という不思議なことになり、観測手法も上述のとおり木星観測に特化した特殊なものです。ハッブル宇宙望遠鏡での観測の場合、プロポーザルの採択後、より詳細な観測計画を練るためにサポート天文学者が割り当てられま

^{*12} ガリレオ衛星食の継続時間は長くても4時間程度であるため、すばる望遠鏡での観測の場合、標準星の観測などを含めても半夜で観測が終了することがほとんどです。そこで、すばる望遠鏡へのプロポーザルでは、1回の食の観測につき0.5夜で申請する場合があります。ただし、すばるの観測時間割り当ては前半夜と後半夜で分けられるため、ガリレオ衛星食がちょうどその切り替え時刻の深夜をまたいでしまう場合などは1夜全部を申請することもあります。

す。私たちのプロポーザルは宇宙論カテゴリーで採択されたので、宇宙論が専門のサポート天文学者が割り当てられたのですが、木星追尾など特殊な観測手法について具体的に相談を始めると、すぐにサポート天文学者が太陽系の専門家に交代となりました。

さらに、ハッブル宇宙望遠鏡の軌道は地球の残留大気による抵抗のため常に変化しているので、1カ月前であってもハッブル宇宙望遠鏡の位置を正確に予測するのは困難です。プロポーザルの採択は観測の半年以上前なので、すなわちその時点ではどのガリレオ衛星食が観測できるのかわからないのです。そこで観測計画を立てる段階では、あらかじめ観測したい条件をサポート天文学者に伝えておき、ハッブル宇宙望遠鏡で観測可能でその条件も満たすガリレオ衛星食が見つければ、サポート天文学者から連絡が届き、その食を観測するかどうかを決断する、という感じでした。その観測可能な食の連絡は、おおよそ2週間くらい前に届きました。ハッブル宇宙望遠鏡で獲得した観測時間は4周回^{*13}だったため、最初にそこそこの条件の観測可能な食が見つかった場合、その食を観測するか見送るか迷ったこともありました。

3. 二つの予想外の結果

以上のような経緯を経て、無事に観測計画が採択され、観測を実施しました。最初にコーヒーを飲みながら雑談していた頃は、ガリレオ衛星食を1回観測すれば宇宙赤外線背景放射を簡単に測定できる、と軽く考えていましたが、実際に観測してみるといろいろと予想外のことが起こるわけです。この予想外の展開が研究の楽しさでもあるわけですが、ここでは、私たちが直面した二つの予想外の現象についてご紹介します。

3.1 食の時刻ずれ

最初に異変を感じたのは、2012年3月のスピッツァー宇宙望遠鏡での観測結果を見たときでした。このときに観測したガニメデ食は、NASA/JPLのHORIZONS²⁴⁾が予報する時刻より約10分遅く始まり、予報より約10分早く終わったのです。地球を追いかけるように太陽の周りを回る軌道を飛んでいるスピッツァー宇宙望遠鏡はこの頃、地球から約1 AU離れた所から観測しましたが、その位置関係の違いによる時間差を考慮してもこのずれは全く説明できませんでした。一方で、この約1カ月前にすばる望遠鏡でエウロパ食を観測したときは、予報どおりの時刻に食が開始・終了しました。

この時刻ずれの原因を究明するため、JAXA宇宙研赤外線モニター観測装置 (1.3 m)、西はりま天文台なゆた望遠鏡 (2.0 m)、名古屋大学南アフリカ赤外線天体観測所 IRSF (1.4 m) を用いてガリレオ衛星食の追観測を行ったところ、この予報時刻とのずれはガニメデ食では起こり、エウロパ食やイオ食では起こりませんでした (カリスト食は季節の関係上観測できませんでした)。最初はなぜガニメデ食だけ予報時刻とずれが生じるのかわからなかったのですが、後にHORIZONSは木星を完全な球として食の時刻を予報していることが原因だとわかりました。この頃はガニメデのみ木星の影の端をかすめる食だったので、影の形を円で計算した予報とのずれの影響を大きく受けたのです。理由がわかってしまうと単純なことなのですが、木星に探査機をいくつも飛ばしているNASA/JPLによる予報が、木星の形を完全な球として計算していたことに驚きを感じました。この件に関する顛末は文献25により詳細にまとめられています。

^{*13} ハッブル宇宙望遠鏡の観測時間は、ハッブル宇宙望遠鏡が地球を1周回する時間 (約100分) を1単位として割り当てられます。ハッブル宇宙望遠鏡が地球を半周回ると地球の裏側に隠れてしまうので、ガリレオ衛星食を連続して観測し続けられる時間は約50分程度です。

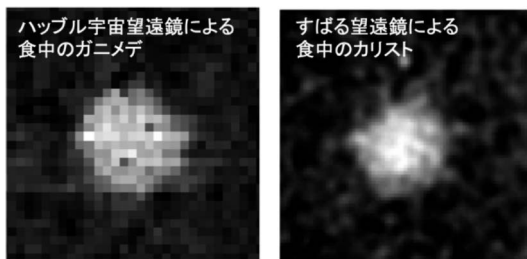


図5 ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した食中のガニメデ(左)と、すばる望遠鏡が撮影した食中のカリスト(右)。

3.2 影の中での発光

もう一つの予想外の現象も、最初の発見はまたもガニメデ食でした。2012年7月にガニメデ食をすばる望遠鏡で観測してみると、ガニメデが木星の影の中に完全に入っているにもかかわらず、僅かに明るかったのです。これもガニメデ食でばかり不思議な現象が起こるため、ジェイムズ・P・ホーガンの有名なSF小説²⁶⁾にちなみ「ガニメアン(ガニメデ人)がいるのではないか」と冗談を言ったりもしました^{*14}。

その後、いろいろと観測を進めていった結果、ガニメデやカリストでは食中の明るさが検出されました(図5)、エウロパの食中の明るさは、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡の検出限界以下でした。さらに、ガニメデ食の多波長観測から、スピッツァー宇宙望遠鏡による $3.6\ \mu\text{m}$ 帯での観測ではガニメデの食中の明るさは検出限界以下で、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡による $1.5\ \mu\text{m}$ 付近の観測では明るいという波長依存性が確認されました(図3黒)。これが、私たちの観測によって発見された新現象だったのです。

4. 木星上層大気を探る新たな手法

なぜ木星の影の中でガリレオ衛星は太陽光に直

接照されていないのに明るかったのでしょうか? この謎を解くためには、惑星科学の専門家の助けが必要と判断しました。そこで、もともと同じ宇宙研に所属しており、はやぶさ2搭載機器の開発で共同研究を行っている本田親寿さん(会津大)を介して、木村淳さん(東工大ELSI)、中島健介さん(九州大)、中本泰史さん(東工大)、倉本圭さん(北海道大)ら惑星科学の研究者を紹介していただき、ガリレオ衛星食の発光現象に関する共同研究を開始しました。特に倉本研の学生である高橋康人さん(北海道大)には、その後のすばる望遠鏡での観測などで主戦力として活躍してもらっています^{*15}。

4.1 いろいろな可能性の検討

惑星科学の専門家達と学際的な共同研究体制を構築して、なぜガリレオ衛星が食中にもかかわらず明るかったのか、いろいろな可能性を検討していきました。まずは木星によって照らされている可能性を検討しました。例えば木星にはオーロラ²⁷⁾や雷²⁸⁾が発生することが知られていますし、大気発光のため木星裏面も明るいはず²⁷⁾です。しかしこれが原因だとすると、木星により近いエウロパのほうがガニメデやカリストより強く照らされるはずで、エウロパは未検出という観測結果と矛盾するため棄却されました。

次はガニメデやカリストの大気発光の可能性です。実はガニメデにもオーロラ現象があることが知られているのですが²⁹⁾、その場合は両極が光るはずで、私たちが観測した衛星全体が一様に明るい発光(図5)はオーロラでは説明できません。だとするとありえるのは衛星自身の大気発光で衛星全体が光っているという可能性です。ガニメデの大気モデル³⁰⁾によると、ガニメデ大気が発光しているとすると、それは地球大気と同じく

*14 ここから、私たちの研究チームのメーリングリストの名称を *ganymean* としました。

*15 天文部で天文写真の撮影も得意な高橋さんは、悪天候のためすばるでの観測ができずに下山中に偶然見つけた月虹(ムーンボウ)の撮影にも成功しました。私たちのこの研究がこういう形で一つの成果となったのも、見ると幸福になれると言われる月虹を撮影できたおかげかもしれません。 http://subarutelescope.org/Topics/2013/11/11/j_index.html

励起されたOH分子が主成分だと考えられます。しかしOH分子は3 μm 帯に強い発光スペクトルをもつため(図3水色)、この波長帯でガニメデ食が未検出だったという観測結果からこの可能性も棄却されました。

話をますますややこしくしたのが他の衛星からの照り返しです。先ほど、エウロパは食中で未検出だったと述べましたが、実は1回だけハッブル宇宙望遠鏡の観測で明るく検出されたことがありました。しかもその1年前に同じくハッブル宇宙望遠鏡で同じフィルターで観測したときは未検出だったため、私たちはますます混乱しました。ガニメデ人の次はエウロパ人の仕業か、などと冗談を言ったりもしていたのですが、実はこの原因が他の衛星からの照り返しだったのです。エウロパ食がなぜか明るく観測されたこのときは、たまたま近くに食になっていないイオが存在していて、木星の影の中でエウロパはこのイオに照らされていたのです。ちょっと計算してみると、エウロパとイオが絶妙な位置関係のときのみ、イオによってエウロパがギリギリ検出可能な程度の明るさに照らされることがわかり、このときはたまたまその絶妙な位置関係にはまっていたのです。しかし、ガニメデやカリストは他の衛星の照り返しによって観測された明るさにまで照らされることはないことも確認できたため、ガニメデとカリストが明るい原因としてこの可能性も棄却されました。

4.2 木星上層大気のヘイズ

以上のような検討から私たちは、ガリレオ衛星が木星の影の中でも明るかった原因は、木星大気中のヘイズ(haze)^{*16}による散乱が原因であると現時点では考えています^{*17}(図6)。この説だと、より大きく散乱しないと照らされないエウロパの

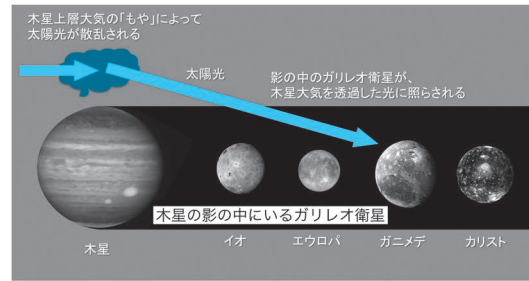


図6 木星上層大気中のヘイズによる散乱光によってガリレオ衛星が照らされる概念図。

ほうが、ガニメデやカリストより暗くなるはずで、私たちの観測結果と一致します。また、観測されたガニメデ食の明るさの波長依存性が木星のスペクトルと一致している(図3)ことも、この説を支持しています。

1970年代のガリレオ衛星食の潜入・出現のライトカーブの観測から、木星大気の成層圏下部にダストが存在することが明らかになりました¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。しかしこの大気モデルをそのまま適用すると、このダストによる散乱・吸収のため、私たちが観測したような完全に影の中に入ったガリレオ衛星食はもっと暗くなるはずなのです。私たちが観測した影の中でのガリレオ衛星の明るさは当時の観測限界よりも暗かったので、当時はこの大気モデルで問題なかったのですが、この発見により、この大気モデルに改良が必要になったのです。そこで私たちはこれよりさらに上層の成層圏上部にヘイズが存在していると考え、その散乱によって影の中のガリレオ衛星が照らされていると考えました(図6)。このモデルが正しければ、観測されたガリレオ衛星の明るさを木星上層大気のヘイズによる散乱で説明するためには、どのような大きさのヘイズの粒子が、木星上層大気のどの部分にどれだけの量が存在する必要があるのかを、私たちの

^{*16} 惑星科学において高層大気中の微粒子のことをヘイズと呼びます。プレスリリース等では「もや」と表現しました。

^{*17} 月食中の月が赤く見える理由とよく似ていますが、月食が赤く見えるのは地球大気による太陽光の屈折が主に効いているのに対し、今回の現象は木星大気中のヘイズによる散乱が主に効いていると考えているため、原因は微妙に異なります。

木星大気モデルから計算して推測することができるようになるのです。

実は木星大気上層のヘイズを考えるのには科学的に重要な意味があります。例えば地球大気の雲は、地表の水が上層に運ばれることで形作られます。一方で、木星の縞模様を作っている雲は、地球の雲とは反対で、より上層で作られたヘイズが沈降していくことで形作られると考えられているのです³¹⁾。すなわち、木星の縞模様の原因である雲の形成を理解するうえで、木星上層大気のヘイズについて知ることは本質的に重要なのですが、今までの木星大気の地上観測では、そのような薄い上層大気の領域を観測することはできませんでした。私たちの観測によって初めて、木星の雲形成のカギを握る木星上層大気のヘイズを、機会が限られる惑星探査機に頼らずに、地上から観測することが可能となったのです。

4.3 系外惑星大気の研究への応用可能性

この手法による木星大気の研究は、木星大気の透過光を観測できるという点が大きな特徴で、その系外惑星の大気の研究への応用も期待されます。系外惑星の大気は、トランジット観測において、系外惑星大気の透過光を観測することで調べられています³²⁾。この手法で系外惑星の大気を調べるためには、まずは足元の太陽系惑星の大気透過光がどのように観測されるかを詳しく知っておく必要がありますが³³⁾、太陽系内の惑星の大気透過光は、金星の日面通過³⁴⁾、皆既月食を利用した地球大気透過光の観測³⁵⁾、木星の恒星掩蔽時の観測³⁶⁾など、特殊な条件がそろったときにしか観測ができません。一方で、頻繁に観測できるガリレオ衛星食を用いれば、木星大気の透過光をさまざまな条件で継続的に観測することができます。すなわち、ガリレオ衛星食の継続的な観測によって、木星大気を詳しく調べられるだけでなく、その木星の大気が透過光でどう見えるのかという知見が、トランジット観測を用いて系外惑星の大気を調べるときにも役立つのです。

5. ま と め

宇宙赤外線背景放射の観測を通して遠方宇宙における星形成史を明らかにしようと始めたこのガリレオ衛星食の観測から、思いがけず木星や系外惑星の大気を調べるための重要な発見に至りました。これは偶然の発見ではありましたが、遮蔽体として使おうとした食中のガリレオ衛星が明るかったという、本来の研究目的が遂行できない結果に諦めるのではなく、惑星科学という異分野に足を踏み入れてその原因を追求しようとしたおかげで、このような結果が得られ、学際的に研究の幅を広げられたのだと思っています。また、本来の目的であった宇宙赤外線背景放射の観測についても、木星の影の中心付近を通る深い食の観測を用いれば検出できる可能性も残されており、そのような観測の準備も進めています。このようにこれからも、ガリレオ衛星食などの観測を通して、近くの宇宙（太陽系や系外惑星）から遠くの宇宙（宇宙背景放射）までを併せて研究していきたいと考えています。

謝 辞

本文は私たちが2014年に発表した論文¹⁾の内容に基づいています。まずは本研究でこのような成果を上げることができたことに対して、共同研究者であるこの論文の共著者たちに感謝します。この研究は国立天文台が運営するすばる望遠鏡（観測計画S12A-022, S13B-115, S14A-080）、NASA・ESA・STScIが共同で運用するハubble宇宙望遠鏡（観測計画12980）、およびNASA/JPL・カリフォルニア工科大学が共同で運用するスピッツァー宇宙望遠鏡（観測計画80235, 90143）により得られたデータに基づいています。また、本研究は科学研究費補助金（24111717, 26800112）の助成を受けています。

参考文献

- 1) Tsumura K., et al., 2014, ApJ 789, 122
- 2) 松本敏雄, 2005, 天文月報98, 710
- 3) 松浦周二, 2012, 天文月報105, 686
- 4) Cambřesy L., et al., 2001, ApJ 555, 563
- 5) Matsumoto T., et al., 2005, ApJ 626, 31
- 6) Tsumura K., et al., 2013, PASJ 65, 121
- 7) Zemcov M., et al., 2014, Science 346, 732
- 8) 津村耕司, 他, 2015, 宇宙科学情報解析論文誌4, 135
- 9) Hanner M. S., et al., 1974, JGR 79, 3671
- 10) Matsuoka Y., et al., 2011, ApJ 736, 119
- 11) Matsuura S., et al., 2014, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 12, ists29, Tr. 1-5
- 12) Schmitt J. H. M. M., et al., 1991, Nature 349, 583
- 13) Mattila K., et al., 2011, in IAU Symp. 284, The Spectral Energy Distribution of Galaxies, eds. Tuffs R. J., Popescu C. C. (Cambridge Univ. Press, Cambridge), p. 429
- 14) Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Rōmer de l'Académie Royale des Sciences, 1676, Journal des Sçavans 4, 233^{*18}
- 15) 前原英夫, 2014, 天文月報107, 493
- 16) Smith D. W., Greene T. F., Shorthill R. W., 1977, Icaurs 30, 697
- 17) Greene T. F., Smith D. W., Shorthill R. W., 1980, Icarus 44, 102
- 18) Smith D. W., 1980, Icarus 44, 116
- 19) Smith D. W., Greene T. F., 1980, Icarus 44, 134
- 20) de Pater I., et al., 2004, Icarus 169, 250
- 21) 米田瑞生, 2013, 天文月報106, 108
- 22) Rayner J. T., Cushing, M. C., Vacca, W. D., 2009, ApJS 185, 289
- 23) Stair A. T. Jr., et al., 1985, JGR 90, 9763
- 24) Giorgini J. D., et al., 1996, BAAS 28, 1158
- 25) 津村耕司, 他, 2013, 兵庫県立大学天文科学センター紀要1, 1
- 26) ホーガン J. P. (池央耿訳), 1980, 星を継ぐもの (創元SF文庫)
- 27) Gladstone G. R., et al., 2007, Science 318, 229
- 28) Dyudina U. A., et al., 2004, Icarus 172, 24
- 29) McGrath M. A., et al., 2013, JGRA 118, 2043
- 30) Marconi M. L., 2007, Icarus 190, 155
- 31) Friedson A. J., Wong, A.-S., Yung Y. L., 2007, Icarus 190, 155
- 32) 山下卓也, 成田憲保, 2012, 天文月報105, 248
- 33) Montañés-Rodríguez P., et al., 2015, ApJ 801, L8
- 34) Tanga P., et al., 2012, Icarus 218, 207
- 35) Pallé E., et al., 2009, Nature 459, 814
- 36) Christou A. A., et al., 2013, A&A 556, 118

Observation of Galilean Satellites to Investigate the Farthest Universe: A Serendipitous Discovery of Brightness of Galilean Satellites in Eclipse

Kohji TSUMURA

Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Star formation history can be investigated by an observation of the Cosmic Infrared Background (CIB) as integrated light from outside of our Galaxy, but it is difficult to observe CIB owing to the strong foreground zodiacal light. We developed a new technique to observe CIB without any uncertainty of the zodiacal light subtraction by using a Galilean satellite eclipse as an occulter. In such observations, however, we discovered Galilean satellites are bright even when not directly lit by sunlight in Jovian shadow. We concluded that this phenomena are caused by forward scattering of sunlight by hazes in Jovian upper atmosphere. This discovery gives us a new tool to understand the Jovian cloud formation related to the Jovian stripes, as well as to investigate the atmosphere of exoplanets by transit observations.

*18 この歴史的なレーマーの研究発表の記事(著者不明)は Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 12, 893 (1677) にて英語翻訳されています。