

# ガリレオ衛星食の掩蔽観測による 宇宙赤外線背景放射の測定



津村 耕 司

〈東京都市大学理工学部自然科学科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1〉

e-mail: ktsumura@tcu.ac.jp

宇宙赤外線背景放射 (Extragalactic Background Light, EBL) とは宇宙誕生から現在までの星形成の歴史を、視線方向の積算値として含むものであり、点源としては検出できないような隠された星形成史を探るためにEBLの観測は重要である。しかしEBLの観測においては、EBLよりも数倍明るい前景光である黄道光のため、精度のよい観測は難しい。そこで私たちは、ガリレオ衛星が木星の影に隠れる「ガリレオ衛星食」を遮蔽体として用いることで、黄道光の不定性なしにEBLを検出することを目指す観測計画を進めている。木星の影の中で太陽に照らされていないガリレオ衛星食は背景からの光を遮断するので、ガリレオ衛星食は周囲よりもその分だけ暗く観測される。黄道光は主に木星より手前で光っているため、検出されたガリレオ衛星食の周囲の空に対する暗さを測光すれば、黄道光は打ち消され、黄道光の不定性なしにEBLを検出できるはずである。私たちのそのような観測計画がJWST GO Cycle-1に採択されたので、それを紹介する。

## 1. 可視光・近赤外線での背景放射

一般の天文観測では、星や銀河など何らかの天体を観測対象とするが、私たちの研究対象である背景放射とは、天文画像で星や銀河などの天体が「写っていない」暗い空を観測対象としている。一見、何も写っていないように見える暗い空も完全な暗闇ではなく、ある一定の明るさを持っている。その「夜空の明るさ」こそが背景放射である。背景放射といえば、ビッグバン証拠である宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) が有名だが、ここで扱う背景放射は可視光や近赤外線での背景放射である。以下ではこれを Extragalactic Background Light (EBL) と呼ぶ\*1。EBLは主に、宇宙誕生時から現在までの、個別天体として分解されない暗い天体からの

光の足し合わせであると考えられている。すなわち、EBLを詳細に観測することで、大型望遠鏡でも検出できないような「隠された星形成」を、宇宙の歴史の積分として探ることができる。

大型望遠鏡の観測などにより宇宙における星形成の歴史を「完全に見切った」とするならば、観測されるEBLは、銀河積算光と一致するはずである。しかし実際は図1に示されるように、様々な手法や観測装置により観測されたEBLは銀河積算光に対して超過しており [1-4]、これはこの宇宙にはまだ私たちの知らない未知の光源が存在することを示唆している。

背景放射のような面輝度の観測の難しさは、前景光との切り分けが困難なことである。地上からの観測は地球大気光のため困難であり、宇宙望遠鏡を用いた観測が必須となる。宇宙望遠鏡での観

\*1 Cosmic Infrared Background (CIB) と呼ばれることも多い。

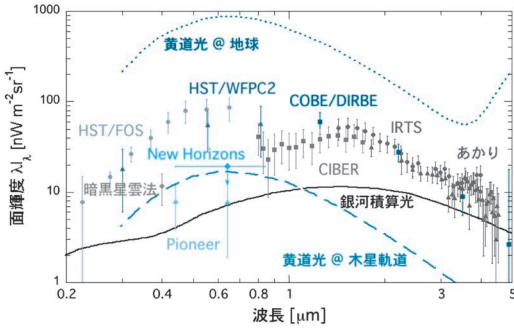


図1 EBLスペクトル。データ点がこれまでのEBLの観測値を表しており、それらは銀河積算光(黒実線)から超過している。地球からの観測では黄道光が最大の前景光となるが(青点線)、木星軌道では黄道光の影響は劇的に小さくなる(緑破線)。

測における最大の前景光は、惑星間塵による太陽光の散乱光である黄道光や、銀河系内のダストによる星間輻射場の散乱光である銀河光である。特に黄道光はEBLよりも10倍近くの輝度を持つため(図1)、黄道光の差し引きがEBLの検出において常に最大の不定性要因となる。そこで、黄道光の不定性によらないEBLの観測が求められている。私たちは黄道光の影響が無視できる木星軌道以遠や黄道面外に望遠鏡を設置する惑星間空間望遠鏡を計画しているが[5]、その実現はしばらく先となってしまふ。そこで、黄道光の不定性によらないEBLの観測手法として、ガリレオ衛星食掩蔽法による観測をJWSTに提案し、それが採択された(GO 2134)。

## 2. ガリレオ衛星食掩蔽法

ガリレオ衛星食掩蔽法については、過去の天文月報の記事[6]にて紹介しているので、詳細はその記事を参照してもらうこととし、ここでは簡潔な紹介にとどめる。

ガリレオ衛星とは木星を回る4大衛星のことで、それが木星の影に入り見えなくなる現象がガリレオ衛星食である。月が地球の影に入る月食と本質的に同じ現象である。食中のガリレオ衛星は

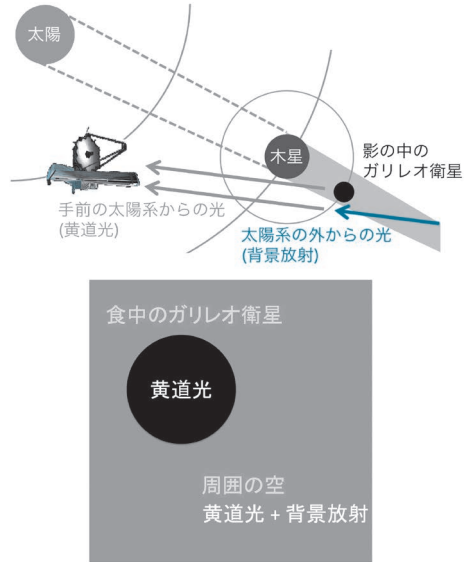


図2 (上) ガリレオ衛星食掩蔽法による背景放射観測の原理。(下) 観測によって得られる画像のイメージ。

太陽に照らされていないので暗く、また表面温度は120 K程度と低く熱放射も無視できるので、ガリレオ衛星食は可視光・近赤外線の波長域では完全に暗いはずである。したがって、ガリレオ衛星食を観測した時に検出される明るさは、そこより手前の明るさ、つまり黄道光のみとなる。一方でその周囲の空は、ガリレオ衛星の背後からの背景放射も合わさった明るさが検出されるはずであるので、ガリレオ衛星食は周囲よりも暗い「黒い穴」のように検出されるはずである(図2)。この検出された「暗さ」は、ガリレオ衛星食とその周囲の空の明るさの差分、すなわち背景放射の明るさとなる。この手法で検出された背景放射の明るさは、木星より背景の明るさをすべて含むので、木星以遠の太陽系内の黄道光成分(ただしそれは無視できるほど小さい[7])や銀河光など、EBLにとっての他の前景光を含むものであるが、最大の前景光である(木星より手前の)黄道光の影響は差し引きされているので、EBL検出の系統誤差を大幅に抑えられ、EBL検出の確度を大幅に

高められると期待されている。

ただ、この手法には一つ問題点がある。例えば皆既月食が完全には暗くならず赤く見えるのと類似の現象で、食中のガリレオ衛星も木星上層大気によって散乱された太陽光でわずかに照らされ、かすかに明るく光っていることが私たちの過去の観測から明らかになった [8]。そこで JWST のガリレオ衛星食観測では、木星からの散乱光が無視できるほどの深い（衝突径数<sup>\*2</sup>が小さい）食を狙って観測せねばならない。そのような観測機会はガリレオ衛星の軌道傾斜角と木星の公転周期によって決まり、およそ6年に1度となり、2021年がまさにその観測好機である（図3上）。またこの時期はガリレオ衛星が高銀緯に位置するため、2番目に強い前景光である銀河光も弱いという好機が重なっている（図3下）。したがって従来の打上げ予定時期に JWST が無事に打ち上がってれば、まさにこの観測好機にガリレオ衛星食を観測できたはずであったが、残念ながら打ち上げ時期が遅延してしまった。とはいえ現在の予定で無事に打ち上がり、予定通りに観測が開始されれば、EBLの検出が期待されるガリレオ衛星食の観測が期待されるため、無事に JWST が打ち上がり、早期に観測が開始されることを期待している。

さらに、JWSTでの観測では、ガリレオ衛星食の全体を観測できるという点も大きい。ガリレオ衛星食は約2時間程度続く現象であるが、ハッブル宇宙望遠鏡での観測の場合、地球を周回しているので、ガリレオ衛星食を最大でも30分程度しか連続して観測できず、十分なデータが得られないという問題があった。また、地上観測の場合も、食が起こるタイミング次第では、望遠鏡がある場所では昼であったり、夜であっても高度が低かったりと、好条件でガリレオ衛星食の全体を観測できることは極めて稀なものになってしまう。

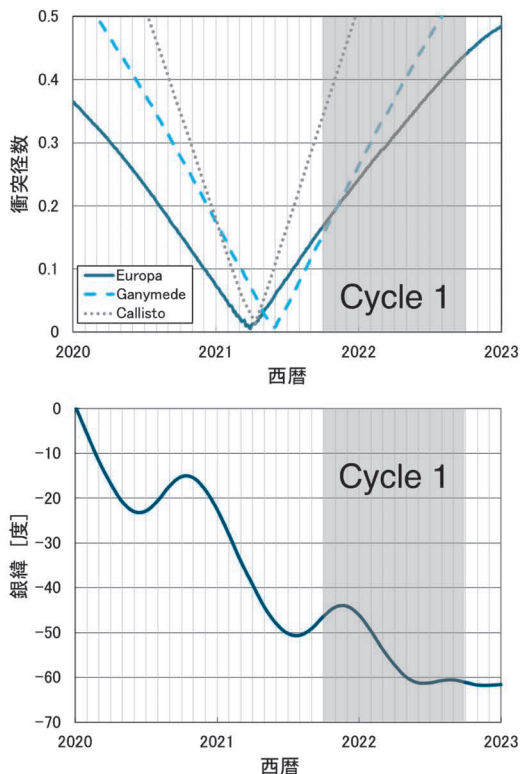


図3 (上) ガリレオ衛星食の衝突径数. (下) 木星の位置の銀緯. プロポーザル提出時における Cycle 1 の観測予定時期もあわせて示している。

一方で JWST の場合は太陽-地球系の第2ラグランジュ点 (L2点) に位置するので、木星が観測可能な時期ならば、ガリレオ衛星食が継続している約2時間の間、ほぼ同条件で観測することが可能である。

### 3. JWSTでの観測計画

ガリレオ衛星食掩蔽法による観測では、普通の天文観測と比べてやや特殊な観測が必要である。その詳細についても過去の天文月報の記事 [6] にて紹介しているので、ここでも簡潔な説明でとどめる。

\*2 木星の影を半径1の円とした場合、食を起こすガリレオ衛星が木星の影の中心に最も近付いた時の距離を衝突径数という。すなわち、木星の影の中心を通る食の場合は衝突径数=0であり、木星の影の端をかすめる食の場合は衝突径数=1である。実際の木星の断面は楕円形なので、衝突径数>0.93では食が起こらない [9]。

観測対象であるガリレオ衛星の予想される「暗さ」は、観測波長帯である近赤外線でおおよそ22等級程度であるが、そこからわずか1分角ほどの位置に非常に明るい木星が常に存在している。したがって、木星からの迷光をいかに低減させるかが観測を成功させるポイントとなる。そこで私たちは、観測を木星大気吸収バンドで実施するという戦略を取っている。図4で示されている通り、木星大気中に存在するメタンなどの影響で、いくつかの波長帯では木星は暗く見える。JWST/NIRCamには木星大気吸収バンドに相当するF140Mというフィルターがあるので(図4)、この波長帯で観測すれば、迷光源である木星は暗くなり、ガリレオ衛星食の観測がしやすくなるのである。しかもこの波長帯はEBLがピークになると予想されているので(図1)、その点でも観測に適した波長帯である。

木星からの迷光対策のもう一つは、「望遠鏡と視野外の木星との位置関係を固定する」観測である。視野外に位置する木星に対して望遠鏡を追尾させることで、望遠鏡と木星との位置関係が固定され、検出器上の木星からの迷光パターンも固定され、迷光の評価がしやすくなる。ただしこの場合、木星に対して動いている観測対象である(木星の影の中の)ガリレオ衛星は、検出器上をおおよそ1秒間に3ミリ秒角の速さで動いていくことになる。一方で、NIRCamのピクセルサイズは31ミリ秒角なので、短時間積分で連写で観測することで、各画像ごとのガリレオ衛星の動きは1ピクセル以下に抑えることができる。また、ガリレオ衛星の位置は精度よくわかっているので、たとえば木星の影の中でガリレオ衛星が見えなくとも、その位置はわかるので、得られた画像をガリレオ衛星の位置に合わせてずらしながら足し合わせていくことで、実質的なディザリングの効果も得ながら実効的な長時間露光のデータを得ることができるという観測手法を採用する。この手法はやや煩雑であるものの、過去にすばる望遠鏡やハッブル

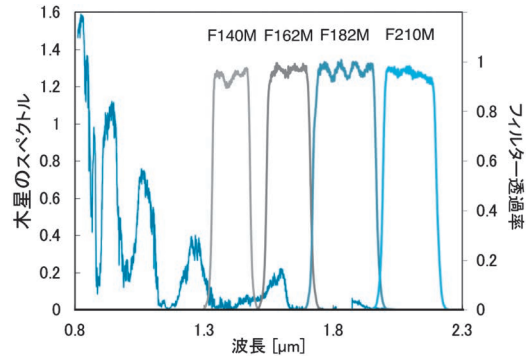


図4 木星のスペクトル[10]とJWST/NIRCamのフィルター透過率(一部のフィルターのみ)

宇宙望遠鏡で実績がある手法であるので[8]、今回のJWSTでの観測でも、サポートアストロノマーと綿密に連絡を取りながら、この観測を成功させたいと考えている。

#### 4. まとめ

私たちは貴重なJWSTの観測時間を、ガリレオ衛星食によるEBL観測のために獲得することができた。このJWSTの観測が成功すれば、EBL超過がある場合はもちろん、EBL超過がなかった場合でも、十分な精度でガリレオ衛星食の暗点が検出されると期待される。そのような観測を成功させることで、COBEやIRTSによって最初にEBL超過の存在が示唆[11, 12]されてから20年も続く論争に対して、黄道光の不定性なしで観測的に決着をつけたいと考えている。

#### 謝辞

この観測計画は、江上英一さん(アリゾナ大学)、松浦周二さん(関西学院大学)、有松亘さん(京都大学)、和田武彦さん(ISAS/JAXA)、佐野圭さん(九州工業大学)、Jason Suraceさん(Eureka Scientific Inc.)と共に、JWST General Observer (GO) programに観測提案して採択された観測計画(JWST GO 2134)を紹介したものである。

## 参考文献

- [1] Tsumura, K., et al., 2013, PASJ, 65, 121
- [2] Matsumoto, T., et al., 2015, ApJ, 807, 57
- [3] Sano, K., et al., 2015, ApJ, 811, 77
- [4] Matsuura, S., et al., 2017, ApJ, 839, 7
- [5] 津村耕司, 松浦周二, 2019, 天文月報, 112, 303
- [6] 津村耕司, 2015, 天文月報, 108, 345
- [7] Tsumura, K., 2018, PASJ, 70, 98
- [8] Tsumura, K., et al., 2014, ApJ, 789, 122
- [9] 津村耕司 他, 2013, 兵庫県立大学天文科学センター紀要, 1, 1
- [10] Rayner, J. T., et al., 2009, ApJS, 185, 289
- [11] Hauser, M. G., et al., 1998, ApJ, 508, 25
- [12] Matsumoto, T., et al., 2005, ApJ, 626, 31

**Absolute Brightness Measurement of the Extragalactic Background Light Using Galilean Satellites Eclipse Occultations****Kohji TSUMURA***Tokyo City University, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo 158-8557, Japan*

Abstract: The Extragalactic Background Light (EBL) as an integrated history of the early universe is important for the study of unresolved star formation. However, previous EBL measurements suffer from residual contamination from strong foregrounds, the zodiacal light (ZL). We propose to observe Galilean satellites eclipsed in the Jovian shadow as occulters to detect the absolute EBL intensity without any ZL uncertainty. ZL originates inside the Jovian orbit; since the Galilean satellites in eclipse shield all light beyond the Jovian orbit, they should be detected as 'dark spots' if the strong EBL implied by previous observations exists. The intensity deficit of this dark spot relative to the surrounding sky directly measures the brightness of EBL, free from any assumptions about ZL. Here, we introduce our observational project by this method accepted for the JWST GO Cycle-1.