

木星の衛星イオと光速度

～イオの公転周期変動について～

岩川 真理子, 坂本 夏帆, 藪井 かやの

指導教員 戸田 洋平

要約

私たちの先輩は、金光学園天文台の望遠鏡を使用し、デンマークの天文学者オーレ・レーマーが行った方法で光速度を求めることに挑戦した。その結果、木星の衛星イオの公転周期が変動しているという結論を導き出した。私たちは、さらに観測を行うことで、この周期変動にどのような性質があるのかを明らかにすることを目的として研究を行った。学校の35cm反射望遠鏡にデジタル一眼レフカメラを取り付け、イオの撮影を行った。撮った画像を用いてイオの測光(光度測定)を行った。測光結果を用いて、グラフを作成し食時刻を決定し、レーマーの考え方に基づいた式に代入することでイオの公転周期を求めた。観測については、イオの食現象である消滅・出現をそれぞれ2回ずつ撮影することに成功した。これらのデータを用いて、食時刻を決定し公転周期を求めると、シミュレーションソフト「ステラナビゲータ」で予測される公転周期とはほぼ同じ結果が得られた。イオの公転周期は確かに変動しており、それは周期的に変動していることが確認できた。その周期は1.3年程度であった。さらにガニメデ等の他の衛星からの影響を考えると、より短い周期変動の存在も考えられ、食の予報値からそれらを確認することもできた。予報値から求められた短周期を観測で実証する。また、継続観測を行い、シミュレーションが実際の観測からずれないかをさらに調査する。

Abstract

Last year, the students of our astronomical seminar calculated the speed of light with Romer's method, using our school equipment. They made sure of changes of Io's orbital period. This year, our purpose is to make more observations and analyses. We measured the brightness of the light from Io with the "Makalii" software. Then, we made graphs from the images and calculated the eclipse time. Our calculation when Io appeared from behind the Jupiter almost fit with the prediction by the simulation software, but the calculation when it disappeared didn't fit with the prediction. There is a possibility that Io's orbital period changes more briefly.

キーワード 木星とイオ, 光速度, 公転周期

Keywords Jupiter and Io, speed of light (light velocity), orbital period

1. 研究目的

私たちの先輩は、金光学園天文台の望遠鏡を使用し、デンマークの天文学者オーレ・レーマーが行った方法で光速度を求めることに挑戦した。レーマーの方法から、光速度を求める式を作り、木星の衛星イオの観測結果から、光速度を計算した。その結果、現在知られている値と大きく異なる値が得られ、この原因について考察し、イオの公転周期が周期的に変動しているという結論を導き出した。

私たちは、さらに観測を行うことで、この周期変動にどのような性質があるのかを明らかにすることを目的として研究を行った。

2. 研究方法

2-1. レーマーの方法について

レーマーの方法の原理を、図1を用いて説明する。木星の衛星イオが木星の後ろに伸びる影(食)から出る時刻を地球で観測し、この時刻を食時刻 t_e とする。その次に、イオが木星の周りを1公転(公転周期 P 秒)して次

の食が観測できる時刻を食時刻 t_2 とする。このとき、木星も公転し、影の位置が変化するため、イオが A 秒だけ余分に公転した時刻で観測される。つまり、

$$t_2 - t_1 = P + A \quad (\text{秒})$$

の関係があると考えられる。

しかし、実際に観測される食時刻には「ズレ」が生じた。「ズレ」を α 秒とする) この「ズレ」の原因は、最初の食から次の食までに地球も木星も公転するため、地球-木星間の距離が変わる。その距離の差 ($R_2 - R_1$) の分だけ「光」が (α 秒) 遅れて届くためであった。つまり、

$$t_2 - t_1 = P + A + \alpha \quad (\text{秒})$$

なお $\alpha = (R_2 - R_1) / c$ c : 光速度 の関係になる。

太陽の周りを公転する木星は、離心率 0.0485 の楕円軌道である。私たちの観測では、食と食の間隔は、最大でも 3 か月程度で、木星公転全周の 48 分の 1 程度なので、円に近似して考えた。上式の A は以下のような式を用いて求めることができる。

※) $A = \text{イオの公転周期} \times (\text{イオの公転周期} / \text{木星の公転周期}) = 62.4 \quad (\text{秒})$

先行研究でも、同様の式を用いて公転周期の計算を行った。

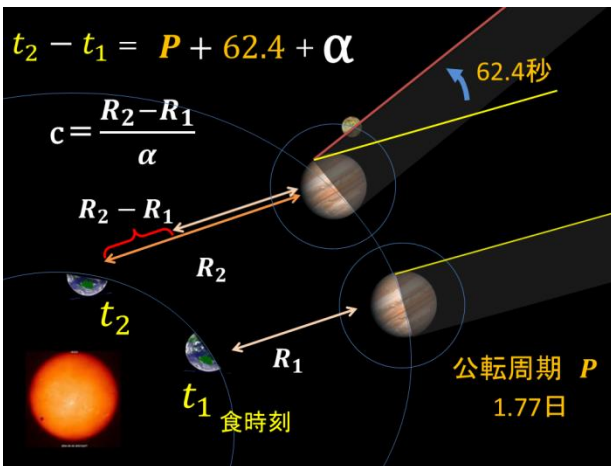


図 1. レーマーの方法の原理

望遠鏡を用いて食時刻 t_1, t_2 を観測することでイオの公転周期 P を求めた。

2-2. 観測

金光学園天文台で木星とイオの観測を行い、4 回の解析可能な食の画像 (合計 972 枚) を得た。

①金光学園天文台の機材と観測条件

★使用望遠鏡

CELESTRON C-14 主鏡有効径 : 355.6mm

焦点距離 : 3910mm



画像 1. 木星とイオ

★使用カメラ Canon EOS 7D EOS 60Da

(デジタル一眼レフカメラ)

※) 私たちは専門的な機材に詳しくなかったため、私たちでも扱える一眼レフカメラを用いた。

★使用時計

- ・カメラに内蔵の時計で、自動で画像ファイルに書き込まれる。
- ・時刻合わせは、携帯電話の時報を耳で聞きながら使用直前に合わせた。
- ・数字では表せないが、時刻の誤差は 1 秒より十分に小さくしてある。

②「ゆらぎ対策」とカメラの設定

カメラの設定に関しては試行錯誤を繰り返し、露出時間は 1 秒、撮影間隔は 4 秒で行った。

a.木星の縞模様が見える露出時間 (1/30 秒) で撮影すると、「イオ」は写らなかった。(画像 2)



画像 2. 木星 (露出 1/30 秒)

b. 「ゆらぎ」対策で、露出時間は1秒とした。(画像1) 今回はイオの明るさの測定(測光)が目的なので、時間を長くして、十分にゆるがせて撮影することにし、露出は1秒とした。カメラの露出時間は1/8000秒まで設定できるので、露出時間の精度は充分ある。

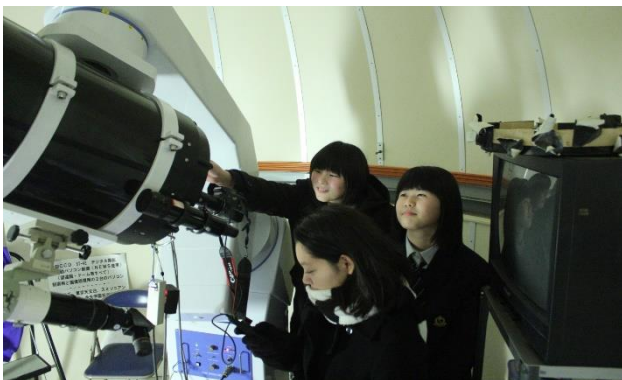
c. カメラの処理能力への対策

撮影間隔は短い方がより観測の精度を上げられるが、2秒間隔で撮影すると、「busy」表示が出て撮影が止まってしまう。カメラの処理能力との関係で、先輩の先行研究と同様に1秒露出で3秒閉の4秒間隔で、sRAW設定で撮影した。

③観測計画と実績

a. 27回の観測を計画し、7回の観測が実現(画像3)

2013年11月から翌年5月までの約半年間に27回のチャンスがあった。しかし、天候や学校行事の関係で可能な回数が減少し、結局7回観測を行うことができた。



画像3. 天文台での観測の様子

b. 4回分の解析可能な食データ、合計972枚の画像が得られた。なお、観測ができて、「薄曇りで良い結果が得られない」、「ピントが甘くて使えない」などの理由で、解析不可能なデータもあったが、4回分の解析可能な食データを得ることができた。撮影日時等は表1の通りである。それぞれの食で撮影された画像は100枚を超え、合計枚数は972枚になった。

撮影日時	2013.11.8	2013.11.16
枚数	195枚	288枚
撮影日時	2014.2.10	2014.5.6
枚数	213枚	336枚

表1. 観測結果

c. 4回分の食の観測は図2のような地球と木星の位置関係で観測されている。前半2回は「消滅」の観測、後半2回は「出現」の観測である。

※ 消滅(影に入っていくとき)

出現(影から出てくるとき)

d. 「消滅」または「出現」の時刻は「天文年鑑」の予報(分単位)から得、その時刻を挟んで前後10分以上にわたり、1秒露出・3秒閉の4秒間隔で、sRAW設定で連続撮影した。

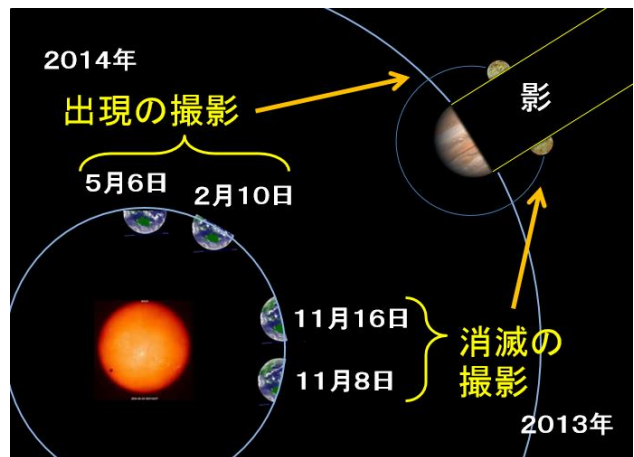


図2. 地球と木星の位置関係

2-3. 解析

①解析の手順

観測で得ることができた972枚の画像データを用いて、解析を行った。

a. 「ステライメージ」というソフトウェアで、すべてのRAW画像をFITS画像に変換。

(次の「マカリ」では、FITS画像でないと使えない。)

b. 国立天文台作成ソフトウェア「マカリ」を使用し、すべてのFITS画像を元に、イオの測光(光度測定)を行う。

c. 測光結果をもとにEXCELでグラフ化(図3)し食時刻の決定をする。

d. 食時刻を元に公転周期 P を計算する。

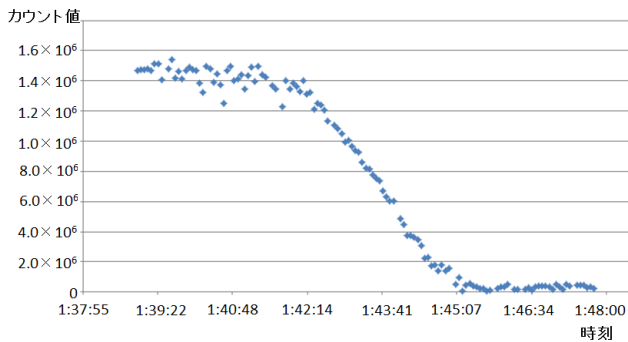


図 3. 食のグラフ 11/16 の説明(消滅のグラフ)

②食のグラフについて

- 図 3 のように、グラフの縦軸はイオの明るさ(測光カウント値)、横軸は日本標準時を表している。
- 図 3 のグラフのカウント値が大きい部分ではイオがまだ木星の影に隠れておらず、曲線の上の部分の角から次第に影に入っていく、カウント値が小さい部分の角になると完全に影に入っているということを表している。影に入り始めてから完全に隠れるまでに約 3 分かかる。これはイオが大きな衛星であるからだ。

③食時刻の決定

- グラフをもとに食時刻を求める (図 4)

グラフ左下部のイオが木星の影に入っているときのカウント値の平均をとる。そして、グラフ右上部の完全に影から出たときのカウント値の平均をとる。この 2 つの値のちょうど真ん中のカウント値の時刻を食時刻と定義した。

※) グラフの影から出始めたときや完全に出てしまうときなどの角の時刻を食時刻とする事も可能だが、グラフを見ると角はシャープではない。理由は、太陽に大きさがあり半影の状態があること、また木星は気体の惑星なので縁がシャープでないことがあげられる。そこで、上のような食時刻の決定とした。たとえば、月の出などの時刻は、ちょうど半分出たときで決められている。

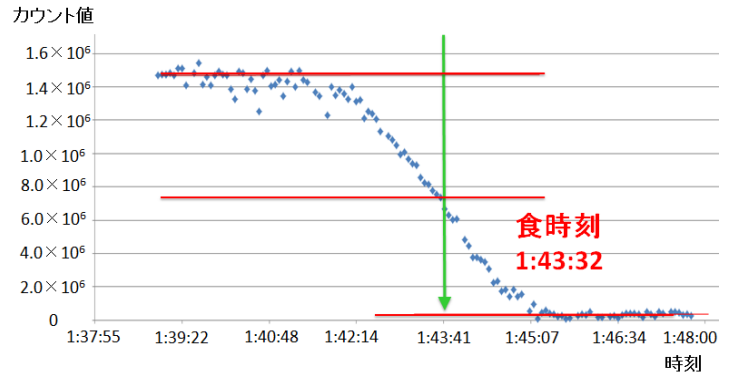


図 4. 食時刻の決定方法の説明

- 4 回分すべてのデータにおいて行った結果はこの表のようになった。(表 2)

日付	食時刻	時間(秒) $t_2 - t_1$	木星との距離 (10^8 km)	距離の差 (10^8 km) $R_2 - R_1$
2013/11/8	23:49:42	611630	4.6629346	0.09469
2013/11/16	1:43:32		4.5682430	
2014/2/10	21:22:05	7340421	4.4153958	1.25470
2014/5/6	20:22:26		5.6700969	

表 2. 4 回分のデータのまとめ

- ※) 表中の「木星との距離」は国立天文台暦象年表から求めた値である。
- 精度約 2.5 秒で食時刻を求めることができた。食の前後でデータ点が上下にばらついているので、そのばらつきに合わせて線の引き方を変えて食時刻を求めることで誤差の見積もりを行った。消滅は 2 回の分の食の観測から誤差 2.5 秒で、出現も、2 回分の食の観測から誤差 0.5 秒で食時刻を決定することができた。

2-4. 公転周期の計算

1. 観測に記載したレーマーの方法は、食から公転 1 回の次の食までの関係で説明をしたが、実際には今回の観測では 4~48 回 (n 回とする) したところで次の観測ができている。

①公転周期を求める式

1.観測に記載したレーマーの方法で示した式をもとにイオの公転回数 n 回を入れて、

$$t_2 - t_1 = n(P + 62.4) + (R_2 - R_1)/c \quad \dots\dots \text{式1}$$

(t : 食時刻 n : 公転回数 P : イオ公転周期

R : 地球-木星間距離 c : 光速度)

この式1を基本の関係式として、公転周期 P を求める。

(図5)

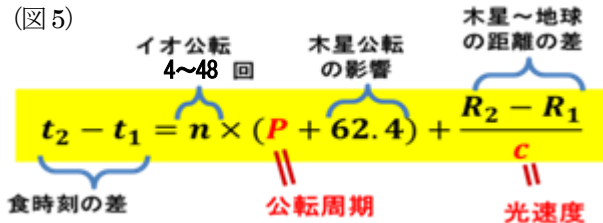


図5 私たちが用いた式の説明

②計算に使用したデータについて

a. 食時刻 t

観測・解析で得た消滅2回分と出現2回分の計4回分の食時刻から、食時刻の差の計算なので、消滅2回分から2つの計算、出現2回分から2つの計算で、計4つの光速度データを求めることができた。

b. 公転回数 n

私たちの観測では、イオが影から出てくるところの観測から再びイオが影から出てくるところを観測する間にイオが4~48回転しているため、 $P+62.4$ 秒に4~48を掛けなければならない。

c. 光速度 c

理科年表に記載されている値 299792458 m/s を用いた。

d. 地球-木星間距離 R

国立天文台作成のホームページ「暦象年表」より、地球-木星間距離の値を得た。

3. 得られた結果

公転周期計算の結果は表3のようであった。11/8~11/16は152857秒、2/10~5/6は152850秒とわずかながら差が生じた。

日付	間の日付	公転周期(秒)
11/8-11/16	11/12	152857
2/10-5/6	3/22	152850

表3. 求めた公転周期

以下は、天文シミュレーションとの比較結果である。

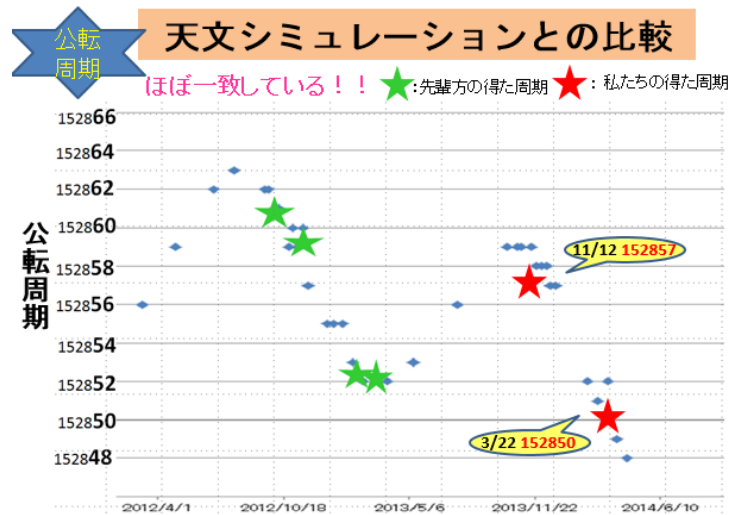


図6. 天文シミュレーションとの比較

式1を用いて食時刻の誤差から公転周期の誤差を計算した結果、11/12(消滅)は約2.5秒、3/22(出現)は約0.5秒の誤差で公転周期を求めることができた。

4. 考察

①観測によって求められた公転周期は予報値とほぼ一致した。

②周期変動の周期は1.3年程度に見える(図6)が、イオの外側を回るエウロパなどの衛星の影響(表4)を考慮すると、もっと短い周期で公転周期に影響を及ぼしているかではないかと考えられる。今後、観測によって食時刻をさらに細かく見積り、新たな周期を見つけていきたい。

番号	名前	直径	質量	平均軌道半径	公転周期
I	イオ	3,632 km	8.92×10^{22} kg	421,600 km	1.76 日
II	エウロパ	3,138 km	4.8×10^{22} kg	670,900 km	3.55 日
III	ガニメデ	5,262 km	1.49×10^{23} kg	1,070,000 km	7.16 日
IV	カリスト	4,820 km	1.08×10^{23} kg	1,883,000 km	16.69 日

表4. ガリレオ衛星の情報

③木星の赤道傾斜角による食時刻への影響

木星の赤道傾斜角は3.13度傾いている。そのためイオが潜入する影の位置が時期によって変化する。これが食時刻に影響を及ぼしているのではないかと考え、考察を行った。

今回は4回の観測を行った。そのうち出現の2/10と5/6は観測の時期が特に大きく開いているので、上記のような影響が食時刻の見積りに現れるのではないかと考えた。木星の半径を1としたとき、イオは、5/6は赤道から0.116の位置を、2/10は0.151の位置を通過する。

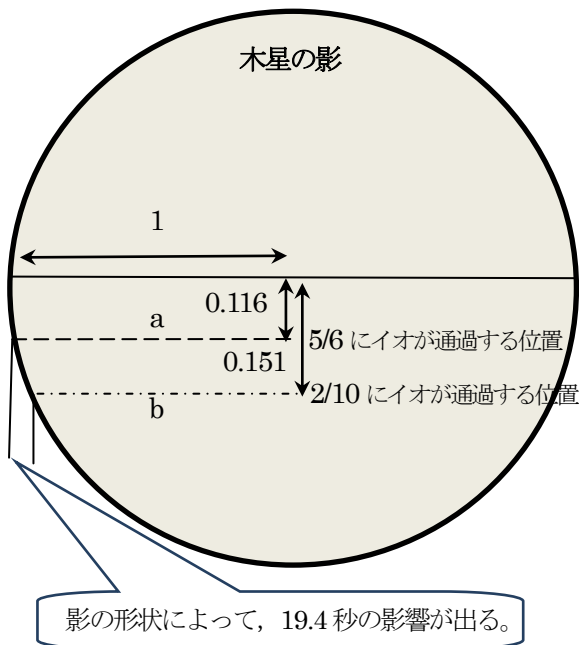


図8 木星の影の形状による食時刻への影響

三平方の定理より、木星半径は71492 (km)なので

$$a = \sqrt{1^2 - 0.116^2} \times 71492 \text{ (km)} = 71009.372 \text{ (km)}$$

$$b = \sqrt{1^2 - 0.151^2} \times 71492 \text{ (km)} = 70672.255 \text{ (km)}$$

$$a - b = 337.147 \text{ (km)}$$

この距離の差をイオが通過するのにかかる時間は

(距離の差) ÷ (イオの見かけの速度) なので、

$$337.147 \text{ (km)} \div 17.4 \text{ (km/s)} = 19.4 \text{ (秒)} \text{ となる。}$$

先行研究の式1では、影の形状による影響は考慮されていない。2/10の出現の位置に合わせて考えると、5/6の出現時刻には、19.4秒だけ引いたものを式1に代入し

なければならぬ。公転周期について求める際には、回転数 $n = 48$ 回で割るので、この影響は0.4秒程度となる。実際は、152850秒より0.4秒程度小さい値が公転周期となり、これに誤差を加えたものが結論となる。

5. 結論

- ① 先輩の行った先行研究と今回の研究結果を合わせることで、シミュレーションソフト「ステラナビゲータ」が予報する公転周期の変動を、金光学園天文台の望遠鏡を用いた食観測によって確認することができた。
- ② また、この公転周期は、周期的に変動していることが確認できた。
- ③ イオは、他のガリレオ衛星からの影響を受けることで、さらに複雑な周期変動の存在を予測できた。今後は観測でこのような局所的な周期変動を確認したい。
- ④ 私達がイオの公転周期変動を詳しく観測することは現在、多くの惑星探査機などが計画され、信用できる位置情報と運動の予報が必要な中、理論を観測で検証する学術的な貢献となる可能性がある。

6. 参考文献

- ・「探究II論文集 2013」
- ・「理科年表」(国立天文台)
- ・「天文年鑑」(誠文堂新光社)
- ・Lieske, J, H, 1998, Astron, strophys, Suppl, 129, 205-217
- ・「Astronomical Algorithms」 – Jean Meeus / Willmann-Bell, Inc. 1991
- ・「宇宙赤外線背景放射検出を目的としたガリレオ衛星食観測のフォローアップ」 http://www.nhao.jp/research/bulletin/bl_01.html#2013J-1
- ・ステラナビゲータ

7. 謝辞

ご協力に感謝いたします。

元国立天文台岡山天体物理観測所所長 前原英夫 先生
大阪教育大学名誉教授 定金晃三 先生
国立天文台名誉教授 木下 宙 先生