

光速の測定～木星とその衛星イオの中心線が重なる時刻を利用～

堀 祐基

要約

1676年、デンマークの数学者オーレ・クリステンセン・レーマーが初めて光速を算出し、214,300(km/s)という結果を出した。私は、レーマーの実験を基に、学校の望遠鏡など身近な機材を使った独自の方法で、より正確な光速の値を出すことを目的とし、研究を進めた。

今回は木星とその衛星であるイオの中心点が重なる時刻を2回測定、その時刻から算出した重なる時刻の理論値と実測値の誤差を求める。この誤差は木星～地球間の距離が変化したことに因るので、(速さ)=(距離)/(時間)の公式で光速を求めた。最終的に約361,000km/sが出た。現在定義されている光速の値との約61,000km/sの差は、イオが木星の緯度0°を通らないことによる。これを考慮すればさらに良い結果が得られるのではないかと思う。

In 1676, it was calculated that light traveled at a speed of 214,300 kilometers a second by the Danish mathematician, Ole Christensen Romer. By an original method based on his, we calculated the velocity of the light with familiar equipment. We observed and recorded the times Jupiter lines up with Io twice. Using these records, we computed the remainder when we subtracted the know time from the measured one. This remainder was brought about by the change in the distance between the Earth and Jupiter, so the velocity of light was able to be calculated with the formula $v=dt$. Finally, the velocity of light calculated by us was about 361,000 kilometers a second, a difference of about 61,000 kilometers a second from the correct value. We suppose that this was because Io doesn't pass through the 0° latitude of Jupiter. We think that considering this will produce a better result next time.

キーワード 木星とイオ, 木星～地球間の距離, 光速

Jupiter and Io, the distance between the earth and Jupiter, velocity of light

1. 序論

1676年、デンマークの数学者であり天文学者であったオーレ・クリステンセン・レーマーが世界で初めて光速を算出した。彼の測定方法は木星とその衛星イオを利用したものだった。

そこで、木星とイオを利用するが、学校の望遠鏡と一眼レフカメラという身近な機材を使用し独自の方法でレーマーよりさらに正確な光速の値を出すことを目的とし、自分なりの工夫を加えつつ研究を進めた。

次に、撮影した写真データ (RAW) を画像変換ソフト「ステライメージ」に取り込み、FITS画像に変換する。

-----今回の研究に使用した機材-----

望遠鏡

名称 : CELESTRON C-14

主鏡有効径 : 355.6mm

焦点距離 : 3910mm

口径比 : F11

カメラ CANON EOS 7D

2. 本論

まず、2011年11月17日の21時29分から翌日11月18日の2時01分までと、2012年2月17日の19時33分から20時33分までの計2回、カメラで撮影をする。

それを「マカリ」というソフトに取り込み、木星とイオのX座標とY座標をピクセル単位でそれぞれ求める。そのX座標、Y座標から、木星とイオの距離をピクセル単位で算出する。(表①)

ピクセル単位で求めた値を、「Excel」でグラフ化 (図①) し、木星～イオ間の距離が0になる時間を求めた。

<1回目>

2011年11月18日0時11分14秒

<2回目>

2012年2月17日21時43分24秒

グラフからの比例計算をして、グラフのYの値 (木星～イオ間の距離) を求めると、

2011年11月17日に観測した木星とイオの中心線が重なる時刻は、24時11分14秒となる。

つまり、これは2011年11月18日の0時11分14秒ということになる。

同様に計算をして2012年2月11日の木星とイオの中心線が重なる時刻は、21時43分24秒となる。(表②)

2011年11月18日0時11分14秒～2012年2月17日21時43分24秒までは92日と21時間32分10秒。

この値をすべて秒で表すと、

$$92 \times 86,400 + 21 \times 3,600 + 32 \times 60 + 10 = 8,026,330$$

よって8,026,330秒。…①

<イオの公転周期>

ここでイオの公転周期は1日と18時間27.6分なので、秒で表すと

$$1 \times 86,400 + 18 \times 3,600 + 27.6 \times 60 = 152,856$$

よって152,856秒。

2つの観測日の差をイオの公転周期で割ると、52.5091回。これより、イオは2回の観測日の間に木星の周りを52回転し、0.5091の分だけさらに余計に回転する。

イオが52回転する時間は

$$52 \times 152,856 = 7,948,512 \text{ 秒} \dots \text{②}$$

余分に回った時間は

$$0.5091 \times 152,856 = 77,818 \text{ 秒} \dots \text{③} \text{ (これは①-②になる)}$$

しかし、この2回の観測では地球・木星・イオの位置関係が異なっている。(図③)

イオは離心率0.00000の円軌道なので、0.5回転分は152,856(秒) × 0.5(回) = 76,428秒…④

ゆえに、イオが52.5回転したあと余分にかかった時間は③-④より、1390秒…⑤

さらにここで、2つの観測日の際の木星の黄経をステラ

ナビゲーターを使って求める。

2011年11月18日0時11分14秒の際の黄経を求めたいが、得られたデータが

2011年11月17日19時31分08秒、黄経32°53'40"と

2012年11月18日19時31分08秒、黄経32°46'39"しかなかったため、

そのふたつの値を利用して比例計算をした。

$$86,400 : (-701'') = 16,806 : P$$

$$86,400P = (-117,642)$$

$$P = (-1.36) = (-1'22'')$$

$$\text{よって、} 32^\circ 53'40'' - 1'22'' = 32^\circ 52'18''$$

同様の計算をして2月17日のデータで計算すると、34°54'54"

これら2つの黄経の差は、2°02'36"

秒で表すと、7356秒。

この値は黄経(角度)であるので時間に換算すると、

$$(\text{イオの公転周期}) \times (\text{約} 2^\circ / 360^\circ)$$

$$= 152856 \times (7356 / 1296000)$$

$$= 867.5175995$$

$$\approx 868 \text{ 秒} \dots \text{⑥}$$

ここで地球が移動していることで、地球からみたときの木星とイオの中心線が重なる時刻がずれてくる。

そのずれはイオが余計に回転した方向なので理論値との差は⑥-⑦で

$$1390 - 868 = 522 \text{ 秒} \dots \text{⑧} \text{ (図④)}$$

地球～木星間の距離の差は

$$= 5.28904 \text{ (AU)} - 4.03026 \text{ (AU)}$$

$$= 1.25878 \text{ (AU)}$$

$$= 1.25878 \times 1.496 \times 10^8 \text{ (km)}$$

$$= 1.883 \times 10^8 \text{ (km)}$$

ゆえに光速は

$$1.883 \times 10^8 \text{ (km)} \div 522 \text{ (秒)} = 36.07 \dots \text{ (万 km/s)}$$

$$\approx 36.1 \text{ (万 km/s)}$$

<結果>

光速は36.1(万km/s)

<考察>

カメラの露出時間を短くする方がゆらぎの影響が少な

と思っていたが、あまりに短いとイオがはっきり写らず、1/30秒くらいだとゆらぎによって像が羽根のように写っていた。それにより位置測定も難しくなった。むしろ露出時間を1秒程度にした方がよかったと考えられる。さらに、一番大きい要因は距離が0になる時刻を求めたことが間違っていて、最小値を求めるべきだった。

しかし、2月17日はイオが木星に突入するまでしか撮影できなかったため出てくる方がないので最小値の時の時刻を求められなかった。

3. 結論

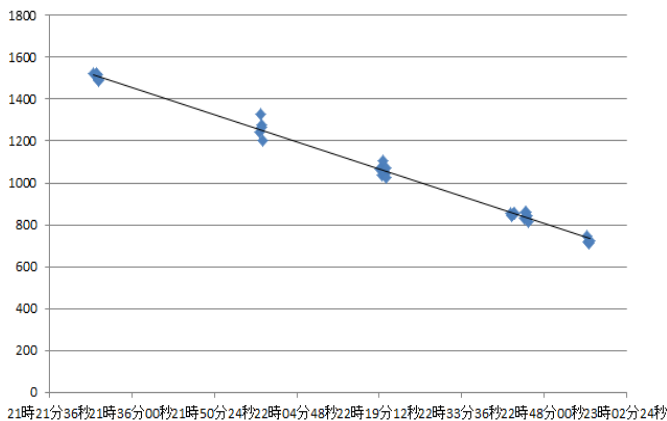
今回の研究は、木星とイオの中心を合わせる時刻測定の方法、学校にある天文台で、身近な一眼レフカメラで

測定し、光速 36.1 万 km/s という結果を得た。これはレーザーの算出した値よりも正確であり、今回の研究で得た課題を考慮してもう一度実験すればより近い値を算出できると思う。今後は、＜考察＞で述べた大気のゆらぎへの対策、木星とイオの中心を合わせる方法を改善し、再実験したい。今回の測定では誤差はあったもののかなり正確な値が得られた。この簡易的で身近な光速の測定方法は新しいものであり、今後の研究に大いに役立つと思われる。

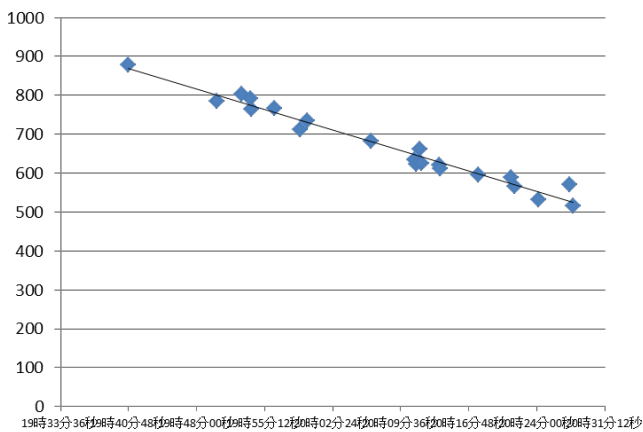
<謝辞>

この研究に携わってくださった大阪教育大学教授定金晃三先生、金光学園中学高等学校の岡崎裕先生、中島覚先生、戸田洋平先生、たくさんのアドバイスとご協力本当にありがとうございました。

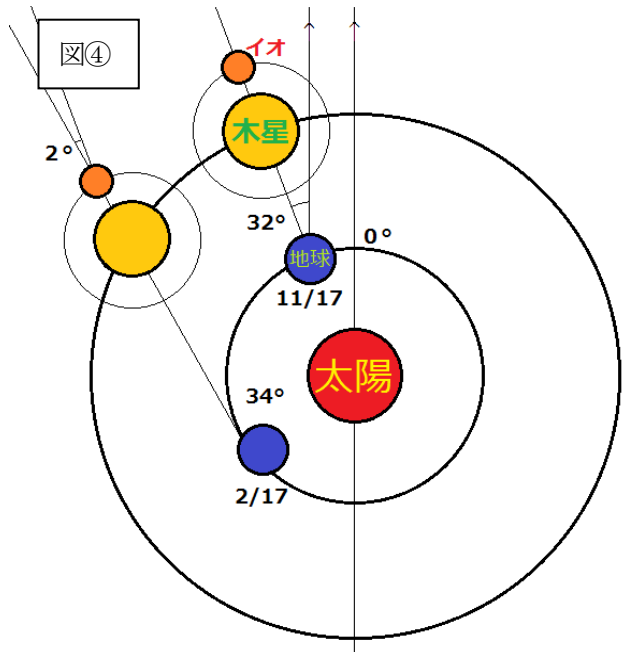
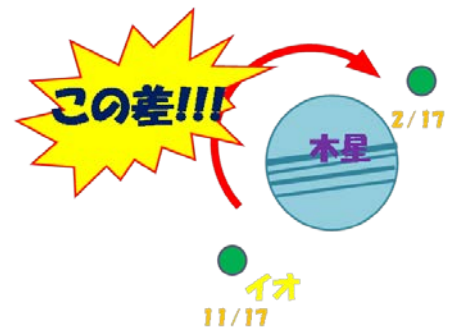
図①



図②



図③



表①

露出開始時刻 (JST)	時刻	距離 ピクセル
21時29分17秒	0時00分00秒	1525
21時29分29秒	0時00分12秒	1519
21時29分45秒	0時00分28秒	1522
21時29分53秒	0時00分36秒	1519
21時30分03秒	0時00分46秒	1488
21時30分11秒	0時00分54秒	1494
21時58分18秒	0時29分01秒	1243
21時58分24秒	0時29分07秒	1327
21時58分35秒	0時29分18秒	1275
21時58分40秒	0時29分23秒	1267
21時58分48秒	0時29分31秒	1200
22時19分22秒	0時50分05秒	1067
22時19分33秒	0時50分16秒	1070
22時19分43秒	0時50分26秒	1037
22時19分49秒	0時50分32秒	1068
22時19分55秒	0時50分38秒	1106
22時20分03秒	0時50分46秒	1056
22時20分12秒	0時50分55秒	1043
22時20分20秒	0時51分03秒	1027
22時20分27秒	0時51分10秒	1072
22時42分15秒	1時12分58秒	856
22時42分25秒	1時13分08秒	846
22時42分33秒	1時13分16秒	847
22時42分43秒	1時13分26秒	855
22時42分52秒	1時13分35秒	854
22時44分37秒	1時15分20秒	834
22時44分45秒	1時15分28秒	858
22時44分51秒	1時15分34秒	844
22時44分57秒	1時15分40秒	863
22時45分02秒	1時15分45秒	846
22時45分09秒	1時15分52秒	829
22時45分15秒	1時15分58秒	816
22時55分37秒	1時26分20秒	747
22時55分46秒	1時26分29秒	719
22時55分52秒	1時26分35秒	723
22時55分59秒	1時26分42秒	715
22時56分05秒	1時26分48秒	726
1時22分14秒	3時52分57秒	687
1時28分11秒	3時58分54秒	712
1時29分17秒	4時00分00秒	765
1時41分08秒	4時11分51秒	866
1時50分07秒	4時20分50秒	939
1時50分22秒	4時21分05秒	949
1時50分42秒	4時21分25秒	988
2時00分09秒	4時30分52秒	1031
2時00分24秒	4時31分07秒	1018
2時01分42秒	4時32分25秒	1025

表②

露出開始時刻 (JST)	時刻	距離 ピクセル
20時54分24秒	0時00分00秒	1676
20時56分36秒	0時02分12秒	1560
20時56分54秒	0時02分30秒	1566
20時56分57秒	0時02分33秒	1606
20時58分57秒	0時04分33秒	1453
21時00分34秒	0時06分10秒	1543
21時01分31秒	0時07分07秒	1611
21時01分37秒	0時07分13秒	1560
21時05分50秒	0時11分26秒	1410
21時05分59秒	0時11分35秒	1406
21時07分11秒	0時12分47秒	1422
21時10分02秒	0時15分38秒	1372
21時10分22秒	0時15分58秒	1437
21時11分02秒	0時16分38秒	1430
21時11分22秒	0時16分58秒	1395
21時12分02秒	0時17分38秒	1391
21時12分22秒	0時17分58秒	1429
21時14分38秒	0時20分14秒	1367
21時14分58秒	0時20分34秒	1365
21時15分18秒	0時20分54秒	1373
21時15分38秒	0時21分14秒	1403
21時15分58秒	0時21分34秒	1337
21時16分38秒	0時22分14秒	1179
21時17分41秒	0時23分17秒	1400
21時18分01秒	0時23分37秒	1241
21時18分41秒	0時24分17秒	1343
21時19分01秒	0時24分37秒	1309
21時19分41秒	0時25分17秒	1230
21時20分01秒	0時25分37秒	1260
21時20分41秒	0時26分17秒	1306
21時21分01秒	0時26分37秒	1265
21時22分01秒	0時27分37秒	1310
21時23分01秒	0時28分37秒	1252
21時23分21秒	0時28分57秒	1264
21時23分41秒	0時29分17秒	1225
21時24分01秒	0時29分37秒	1180
21時24分41秒	0時30分17秒	1249
21時26分01秒	0時31分37秒	1241
21時26分21秒	0時31分57秒	1191
21時27分01秒	0時32分37秒	1184
21時27分21秒	0時32分57秒	1122
21時28分01秒	0時33分37秒	1201
21時28分21秒	0時33分57秒	1241
21時29分01秒	0時34分37秒	1108
21時29分21秒	0時34分57秒	1062
21時30分01秒	0時35分37秒	1237
21時30分21秒	0時35分57秒	1107
21時31分01秒	0時36分37秒	1070
21時31分21秒	0時36分57秒	1134
21時32分01秒	0時37分37秒	1064
21時32分21秒	0時37分57秒	1081
21時33分21秒	0時38分57秒	1070