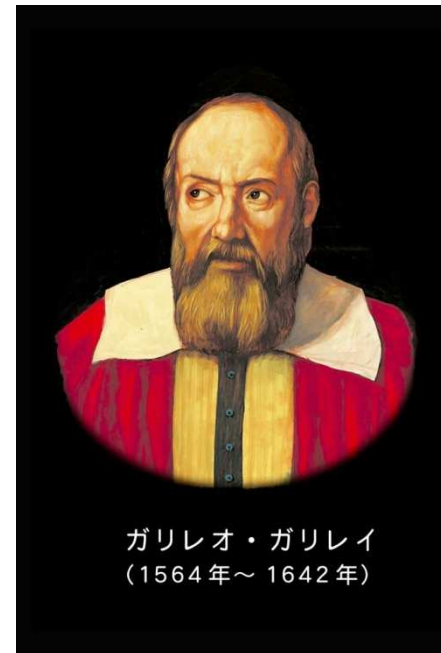


# インターネット望遠鏡天文学

## ーガリレオ衛星の魅カー



望遠鏡で天体観測しているガリレオ  
(五藤光学研究所所蔵)



ガリレオ・ガリレイ  
(1564年～1642年)

ガリレオ・ガリレイ  
(五藤光学研究所所蔵)

## 木星とガリレオ衛星



インターネット望遠鏡(府中)で撮った木星の画像  
(2011年8月11日)

五藤光学研究所 近藤弘之氏提供  
撮影日時:2007年6月12日21時29分

# ガリレオ衛星 I

—Io, Europa, Ganymede, Callisto—

- 人類史上初めての天体望遠鏡を使って、ガリレオが発見
- 1610年1月7日1時、木星を観測し、その近くに小さいけれど明るい3個の天体を発見
- 3月2日まで継続観測し、木星の近くには小さくて明るい天体が4個存在し、時間が経つに連れて木星に対するそれらの位置関係が周期的に変化することを発見
- これらの天体が木星の周囲を回る天体たち(木星の衛星)であることを確認
- ガリレオは、これらの星を‘メジチ星’と名付けたが、現在はこれらをまとめて‘ガリレオ衛星’と呼ぶ
- 4個の衛星は、内側から順に、Io, Europa, Ganymede, Callisto と名付けられている

ゼウス(ギリシャ神話)の恋人たち

# ガリレオ衛星Ⅱ

## ガリレオ衛星のデータ

名前	軌道半径a(万km)	周期P(日)	半径(km)
イオ(Io)	42.18	1.769	1815
エウロパ(Europa)	67.11	3.551	1569
ガニメデ(Ganymede)	107.04	7.155	2631
カリスト(Callisto)	188.27	16.689	2400

月の半径(km) 1738  
水星の半径(km) 2440

イオとガニメデとカリストは月よりも大きい  
ガニメデは水星よりも大きい



2007年7月9日、日本から慶應義塾ニューヨーク学院設置のインターネット望遠鏡にアクセスし、木星とガリレオ衛星を撮ったもの

Keio Academy of New York



Europa Ganymede  
Callisto Io

2007/7/9 22:23:08

**ガリレオ衛星の見分け方**  
**(インターネット望遠鏡の利用法参照)**



2008年9月5日

時間の経過によってガリレオ  
衛星の配置が変化



2008年9月11日



ガリレオ望遠鏡

# ガリレオ衛星の魅力

- 天文学史上の位置づけ⇔星界の報告(ガリレオ:1610)
- 明るくて観測しやすく美しい天体系…天体観測の入門編
- 短時間(数日)の継続で、衛星が木星を回っていることを実感できる
- ミニ太陽系と位置づけ可能
- イオの2週間程の継続観測で、その軌道半径を測定可能(公転周期は既知として)→木星の質量を求められる
- ガリレオ衛星の2ヶ月程の観測で、4個全てのガリレオ衛星の軌道半径を測定可能→ケプラーの第三法則を検証可能(木星の質量測定)→他に類のない天体系
- 木星の表面でガリレオ衛星を見たら→想像力を駆使して



# ガリレオ衛星を観測してみよう

- 何を観測するか？

各衛星(イオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト)を識別

木星と各衛星の位置関係とその変化の様子・・・継続観測

ガリレオは1610年1月7日～3月2日・・・約2ヶ月間

見える衛星の数の変化を確認→ガリレオ衛星の食の観測

木星と各衛星の分離角を測定

観測日時を記入し、各衛星ごとに分離角を記入(正・負を区別)

- 観測方法

インターネット望遠鏡ネットワークを使用

インターネット望遠鏡ネットワークの詳細参照

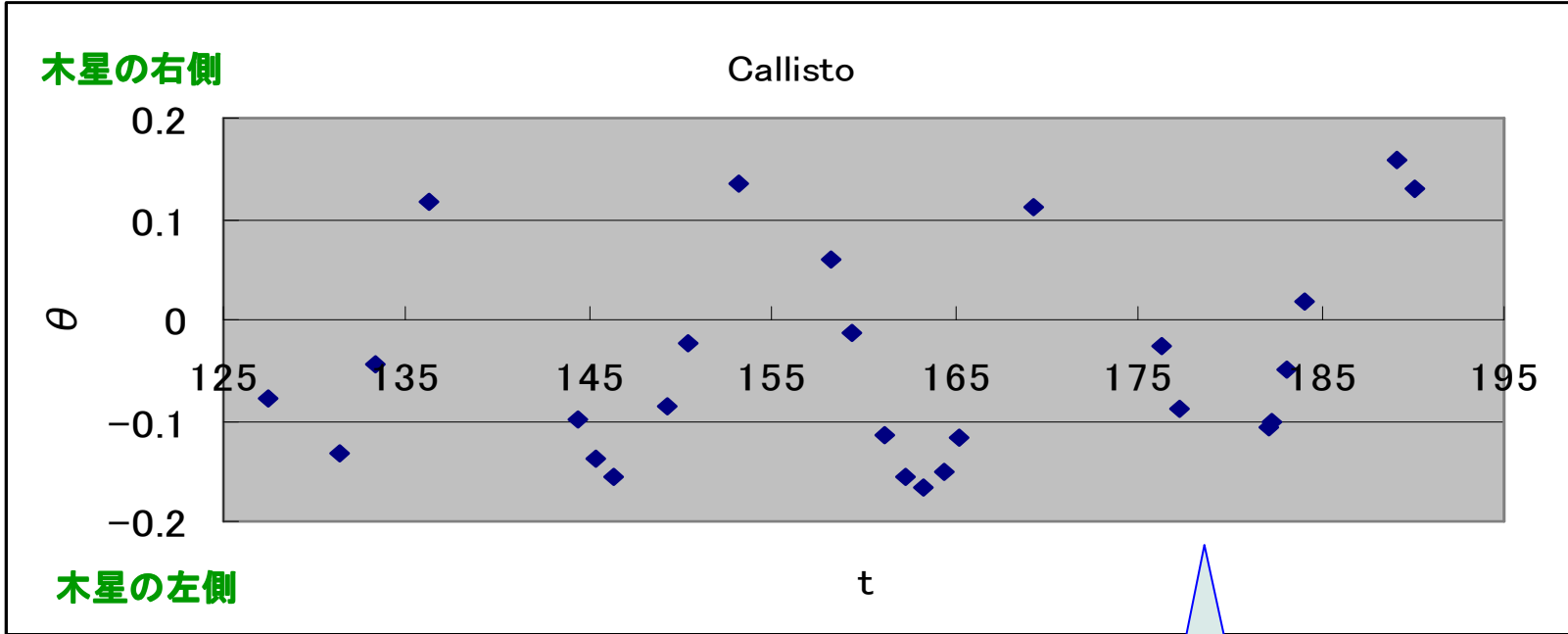
Place	観測日	Io	Europa	Ganymede	Callisto
NY	2008/5/5		0.05449	0.07369	
NY	2008/5/7	0.02057	-0.04333	0.0356	-0.0779
NY	2008/5/11	0.0291	-0.01952		-0.13129
NY	2008/5/13	0.02106		0.0875	-0.04333
NY	2008/5/16	0.02346	0.05246	-0.07991	0.11628
NY	2008/5/24	-0.03064		-0.08512	-0.09866
NY	2008/5/25	0.03529	-0.04151	-0.03145	-0.13704
NY	2008/5/26	-0.03347		0.04933	-0.15698
NY	2008/5/29				-0.08613
NY	2008/5/30	0.019	0.05788	-0.07499	-0.02404
NY	2008/6/2	-0.0366	0.04333	0.0366	0.13547
NY	2008/6/7		-0.01273	-0.09263	0.05942
NY	2008/6/8	0.02858	-0.05478		-0.01262
NY	2008/6/10	0.0384	0.05138	0.08459	-0.11451
NY	2008/6/11	-0.02756	-0.05059	0.08615	-0.15467
NY	2008/6/12	0.02797	-0.02105	0.02298	-0.16561
NY	2008/6/13		0.05873	-0.0603	-0.15179
NY	2008/6/14			-0.09289	-0.11702
NY	2008/6/18	-0.03504	-0.04272	0.09289	0.11294
NY	2008/6/25		-0.03475	0.09887	-0.02701
NY	2008/6/26	0.03817	-0.03995	0.04983	-0.08715
NY	2008/7/1	0.01893	0.06187	0.06187	-0.10587
NY	2008/7/1	0.03172	0.05915	0.07321	-0.10093
NY	2008/7/2	-0.02724	-0.01586	0.09709	-0.04862
NY	2008/7/3	0.03817	-0.05246	0.06438	0.01799
NY	2008/7/8	0.02231	0.04115	0.06205	0.15803
NY	2008/7/9	-0.01609	0.01586	0.09866	0.13079

角度の単位(°)

ガリレオ衛星が、木星の左側にある場合を負、右側にある場合を正、と符号を決める

木星とガリレオ衛星間の分離角の測定例  
(2008年5月5日～7月9日)

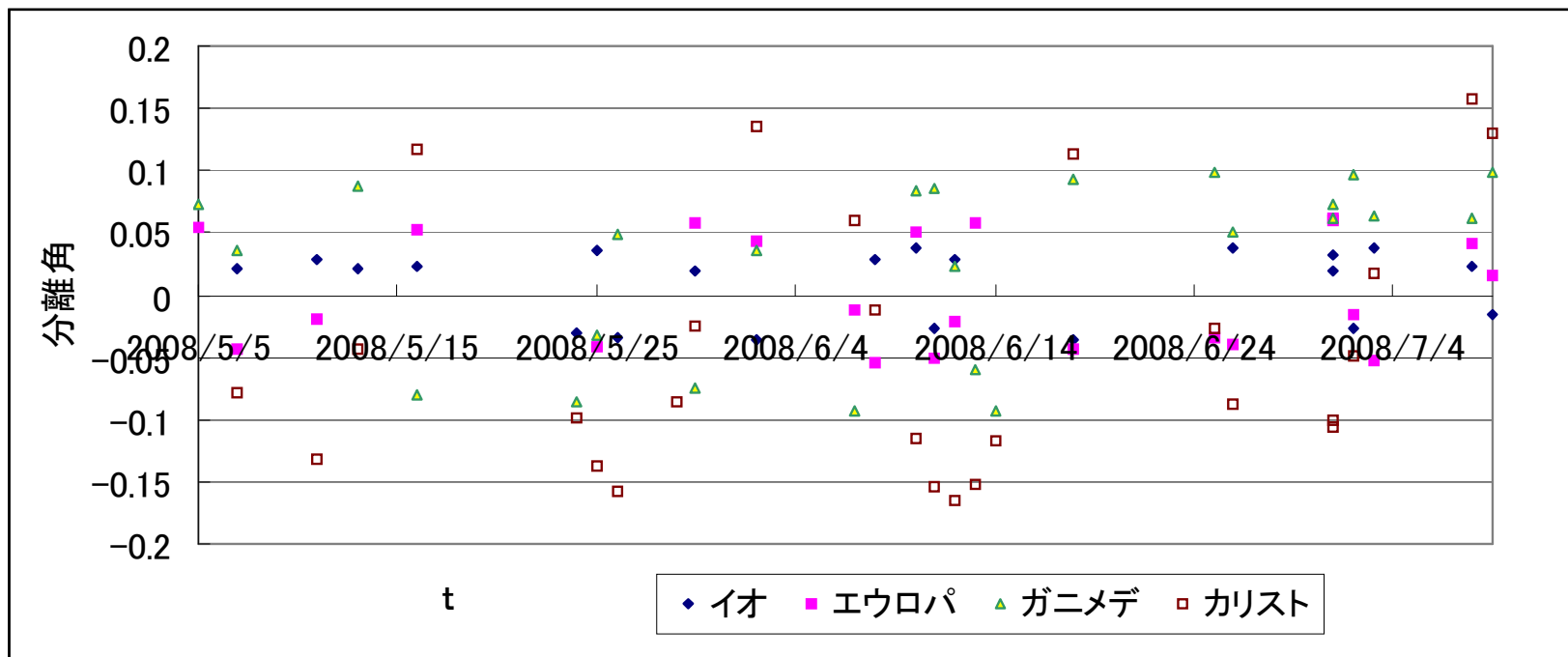
分離角の計り方は、インターネット望遠鏡の利用法を参照



2008年5月5日から7月9日までの、  
カリストの分離角(測定値)の記録

★どのような規則性があるか？  
★何を求められるか？

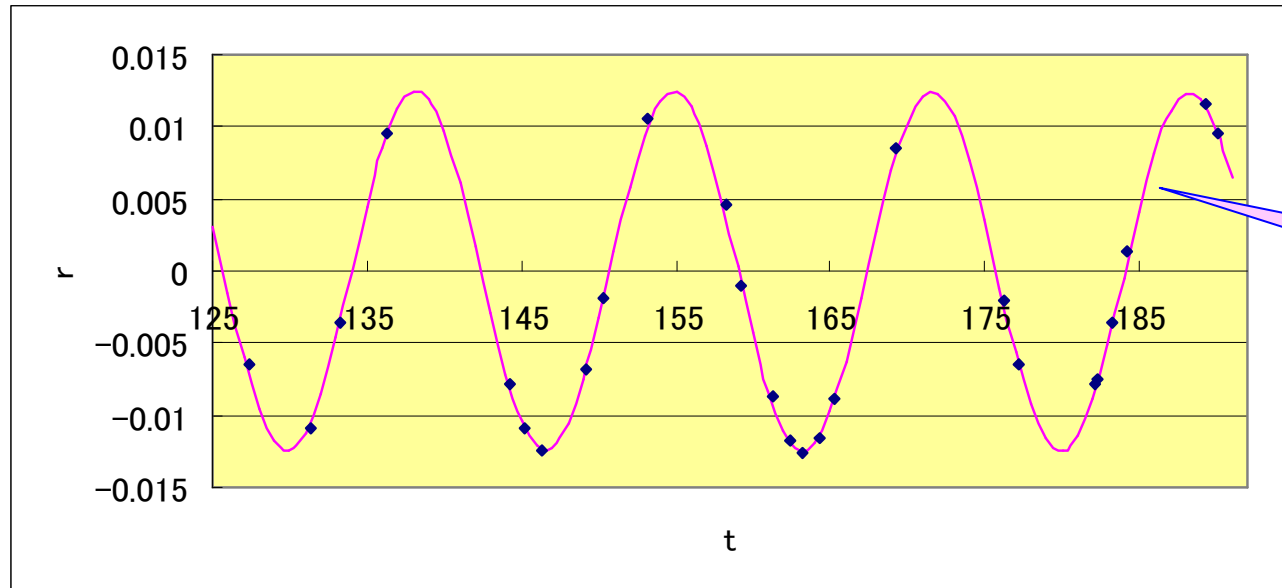
カリストは規則的に木星  
の左右に往復  
他のガリレオ衛星も同様



全てのガリレオ衛星(イオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト)に関する分離角の測定データ(5月5日~7月9日)

各衛星が規則的に木星の左右(グラフの上下)に往復していることを見取れる

## カリストの測定データと最適曲線



他の衛星も同様

最適曲線の求め方  
(資料参照)

### 分離角の測定から何がわかるか？

- (1) 衛星の運動の様子→円運動(近似的)  
→規則的な振動と観測される
- (2) 振れ幅から衛星の軌道半径 $a$ が求められる  
→ 木星と衛星の距離 = (木星と地球の距離) × (分離角)
- (3) 衛星の軌道半径と公転周期から、木星の質量を測定可能

木星と地球の距離の求め方  
(資料参照)

測定結果	測定値	天文年鑑
軌道半径 $a$ :	186(万km)	188 (万km)
公転周期 $P$ :		16.7 (日)
木星の質量 $M_j$ :	$1.83 \times 10^{27}$ (kg)	$1.90 \times 10^{27}$ (万km)

木星も地球も日々移動する

# ミニ太陽系としてのガリレオ衛星

- ミニ太陽系としての木星・ガリレオ衛星系

太陽 → 木星    惑星 → ガリレオ衛星

- 太陽系は万有引力(重力)で結合した天体系

木星とガリレオ衛星は、重力で結合した天体系

- ケプラーの3法則

惑星の運動に関する3つのルール

- ニュートン力学とニュートンの重力理論

ケプラーの法則を理論的に証明 ← ニュートン

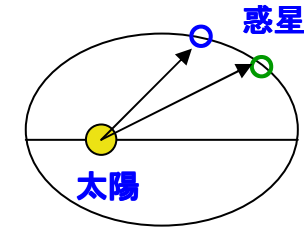
→ ガリレオ衛星の運動に関してもケプラーの3法則が成立

# 惑星の運動に関するケプラーの3法則

- 第一法則

惑星は太陽を一つの焦点とする楕円軌道を描く

ケプラーの  
大発見



- 第二法則

各惑星の公転運動では、単位時間の間に描く扇形の面積は一定

円に近い

- 第三法則

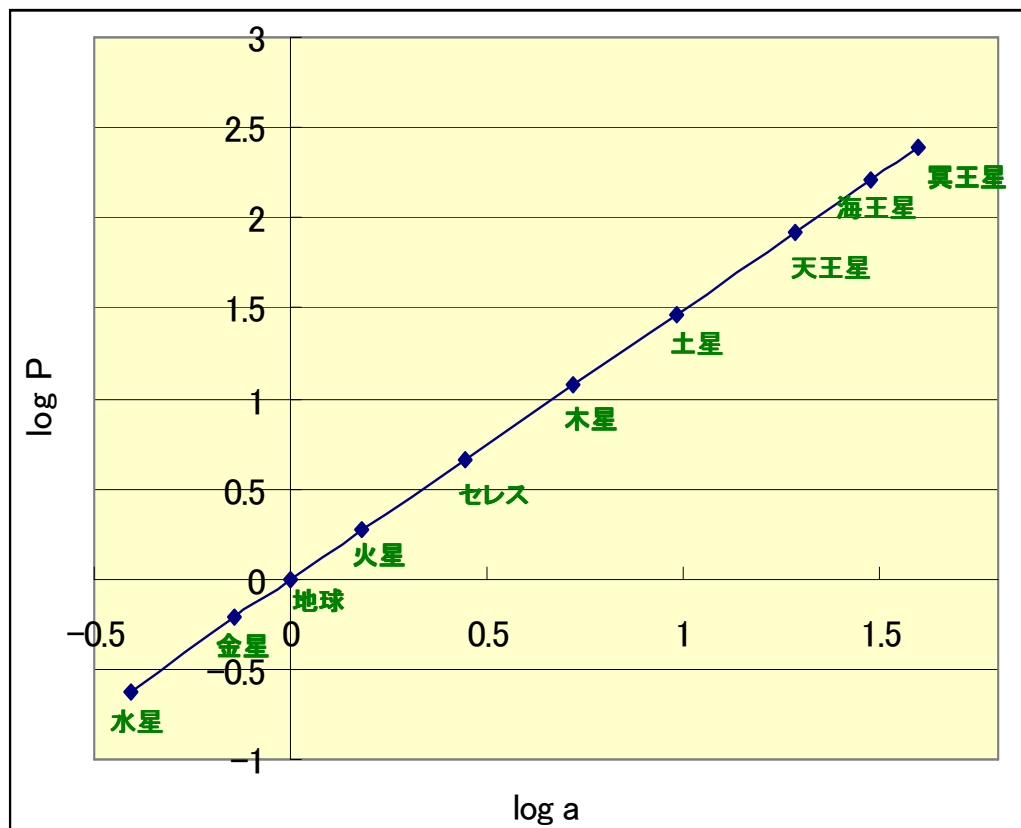
惑星の公転周期  $P$ 、公転軌道半径  $a$  としたとき、 $P$  の2乗は  $a$  の3乗に比例する

$$\rightarrow (P \text{ の2乗}) \propto (a \text{ の3乗})$$

比例係数は太陽の質量で決まる (資料参照)

太陽に近いところでは速く、  
遠いところではゆっくり

## ケプラーの第3法則(惑星の場合)



水星・金星・地球・火星・木星・土星・天王星・海王星が直線上にある。冥王星・彗星なども直線上にある。

ガリレオ衛星の運動でもケプラーの法則は成立？ → 観測で検証

$$(P \text{ の } 2 \text{ 乗}) \propto (a \text{ の } 3 \text{ 乗})$$

傾き(比例係数から太陽の質量が決まる)

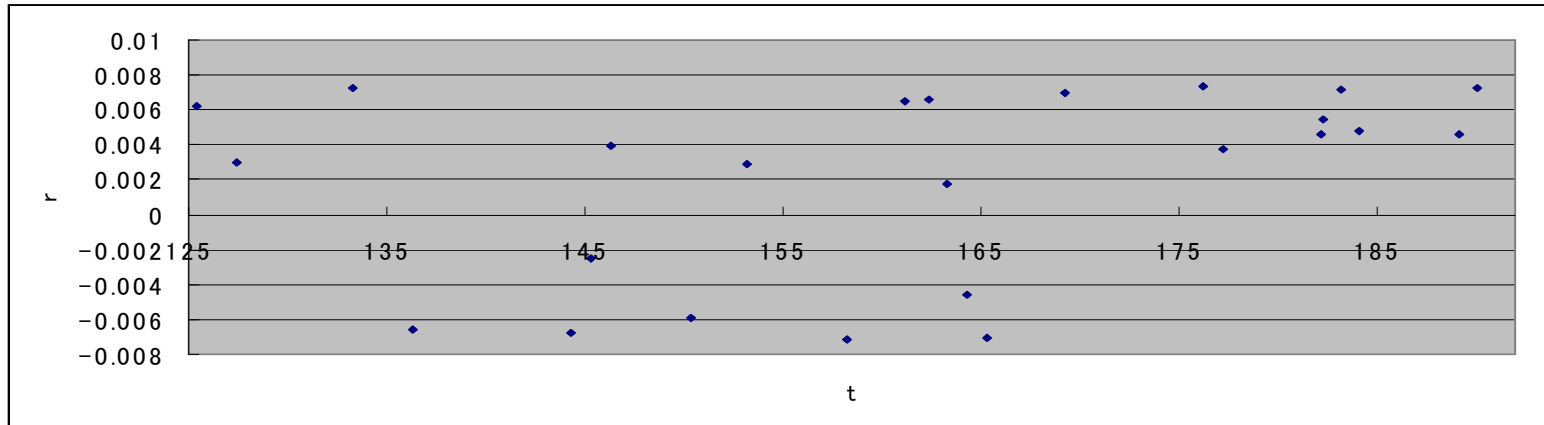


# ガリレオ衛星とケプラーの法則

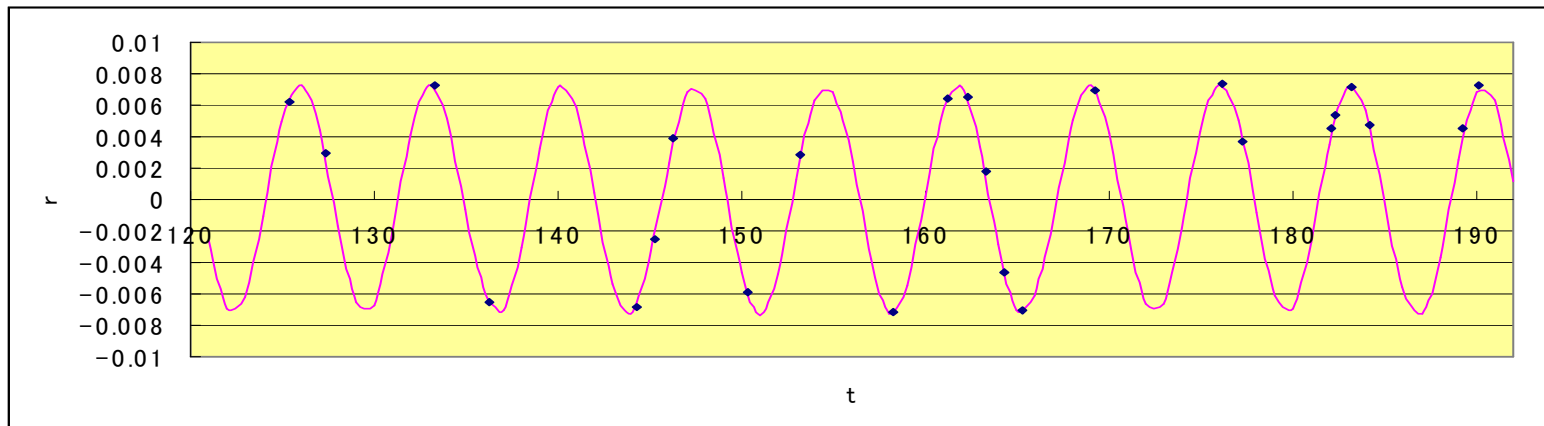
## —教材としてのガリレオ衛星—

- ケプラーの第三法則は、惑星の公転周期の2乗と公転半径の3乗の比が、全ての惑星で同じ値であることを意味します
- 惑星の運動を観測して、ケプラーの第三法則が成り立つことを検証するのは、時間がかかりすぎて不可能である ← **公転周期が大きすぎる**
- 木星を太陽に、ガリレオ衛星を惑星に置き直して考えれば、木星とガリレオ衛星からなる体系は、ミニ太陽系と考えられる
- ガリレオ衛星の運動を2ヶ月あまり継続観測すれば、全ての衛星は数回以上木星を周回するので、そのデータからガリレオ衛星の運動でケプラーの第三法則が成り立つことを検証可能
- インターネット望遠鏡を利用することで、衛星の継続観測と、木星と衛星間の分離角(0.01度程度の大きさ)を、誰でも測定可能となる
- インターネット望遠鏡を利用することで、ガリレオ衛星系は宇宙に設定された天文学の教材として使用可能 → **インターネット望遠鏡天文学**

## ガニメデの観測データ



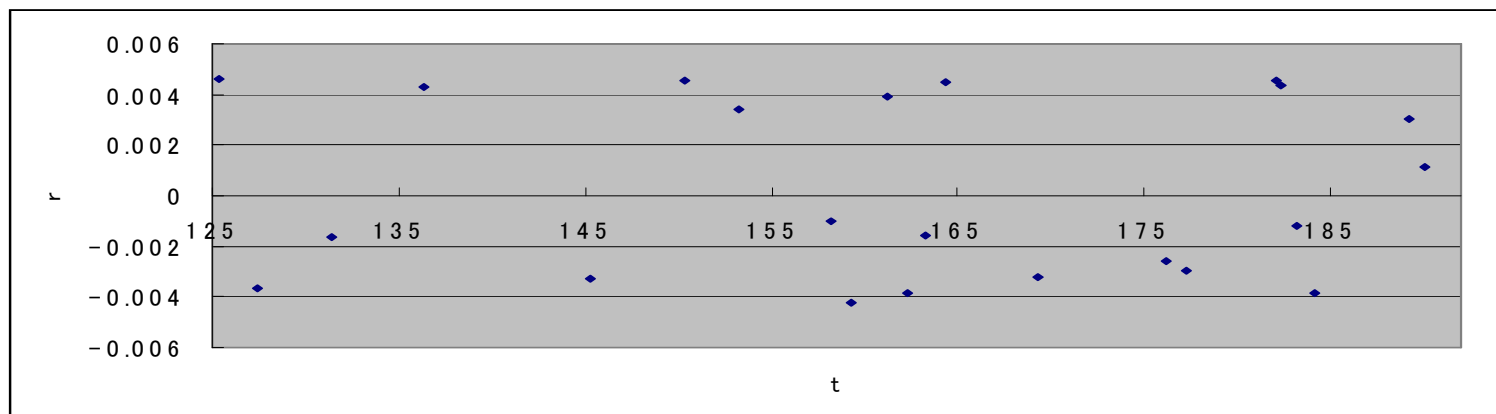
## ガニメデの観測データと最適曲線



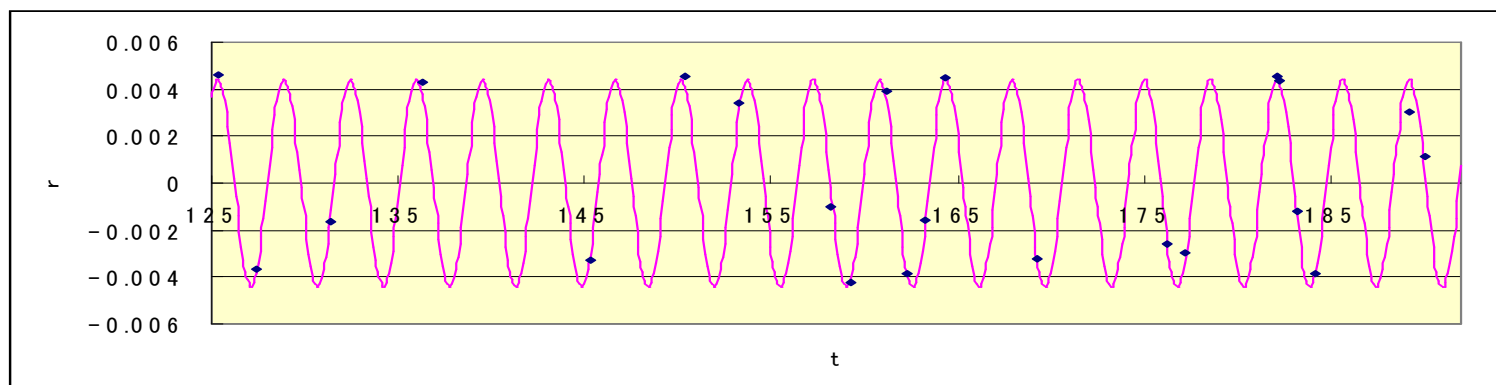
## ガニメデについて

測定結果	測定値	天文年鑑
軌道半径 a :	110(万km)	107 (万km)
公転周期 P :		7.16(日)
木星の質量 Mj :	$2.03 \times 10^{27}$ (kg)	$1.90 \times 10^{27}$ (kg)

## エウロパの観測データ



## エウロパの観測データと最適曲線



## エウロパについて

### 測定結果

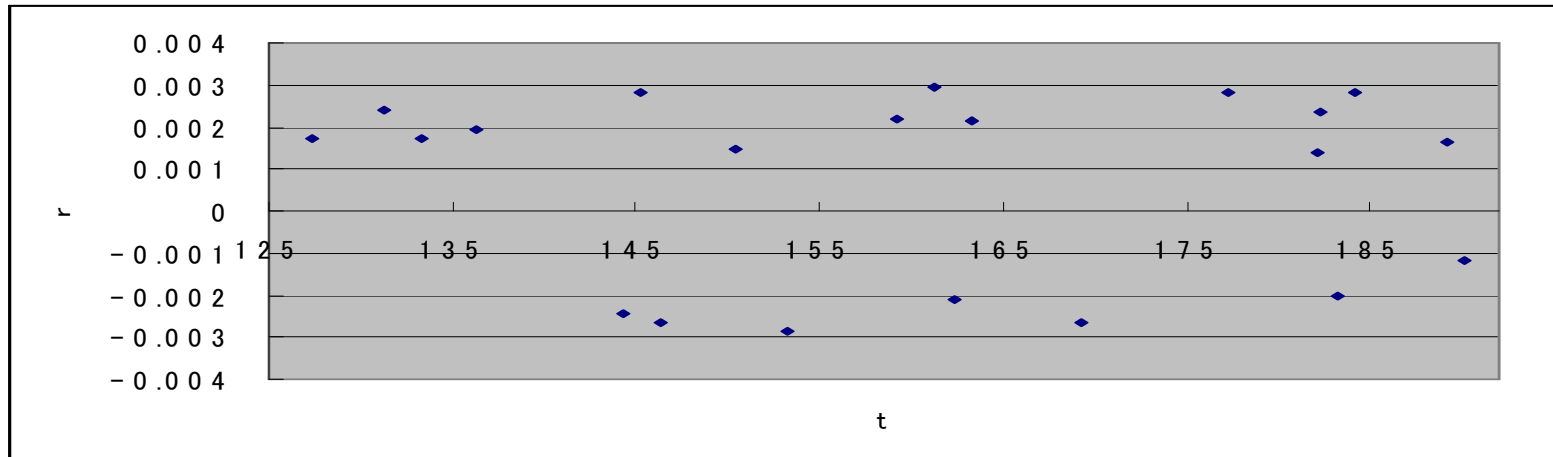
軌道半径  $a$  : 66.5(万km)  
公転周期  $P$  :  
木星の質量  $M_j$  :  $1.85 \times 10^{27}$  (kg)

### 測定値

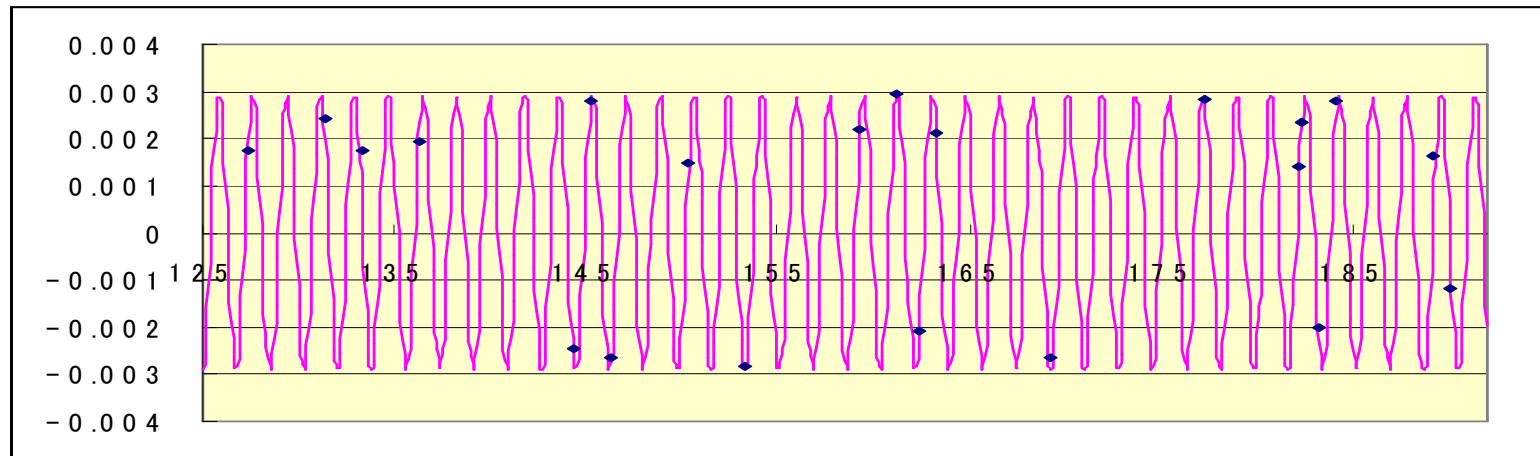
### 天文年鑑

67.1 (万km)  
3.55 (日)  
 $1.90 \times 10^{27}$  (kg)

## イオの観測データ



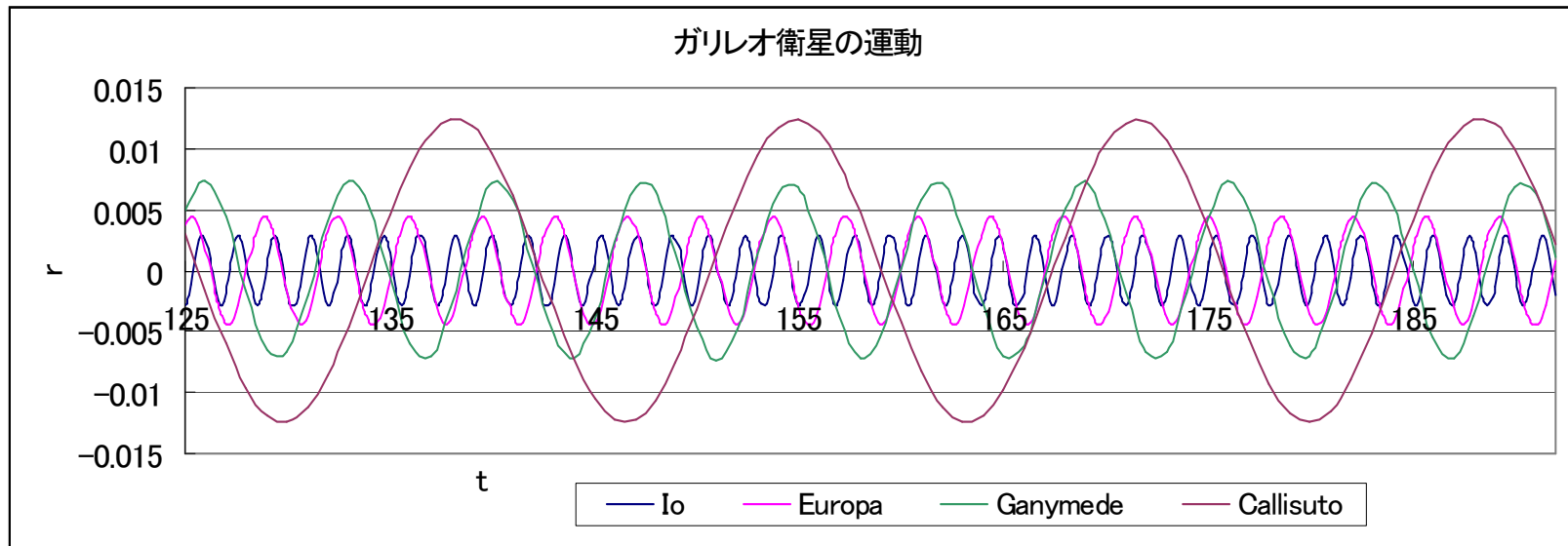
## イオの観測データと最適曲線



## イオについて

測定結果	測定値	天文年鑑
軌道半径 a :	43.6(万km)	42.2 (万km)
公転周期 P :		1.77 (日)
木星の質量 Mj :	$2.10 \times 10^{27}$ (kg)	$1.90 \times 10^{27}$ (kg)

## 観測期間中のガリレオ衛星の運動の様子



### 図から読み取れること

- (1) 同じ期間中に、最内側のイオ(軌道半径が最も小さい)は、頻繁に木星の周りを周回すること、
- (2) 外側に位置する衛星(軌道半径が大きい)は、軌道半径の大きさの順(エウロパ・ガニメデ・カリスト)に、ゆっくりと木星の周りを回ること

4個のガリレオ衛星の、公転周期と公転半径の間には、ケプラーの第三法則が成り立つか？  
測定データを利用して確かめる！

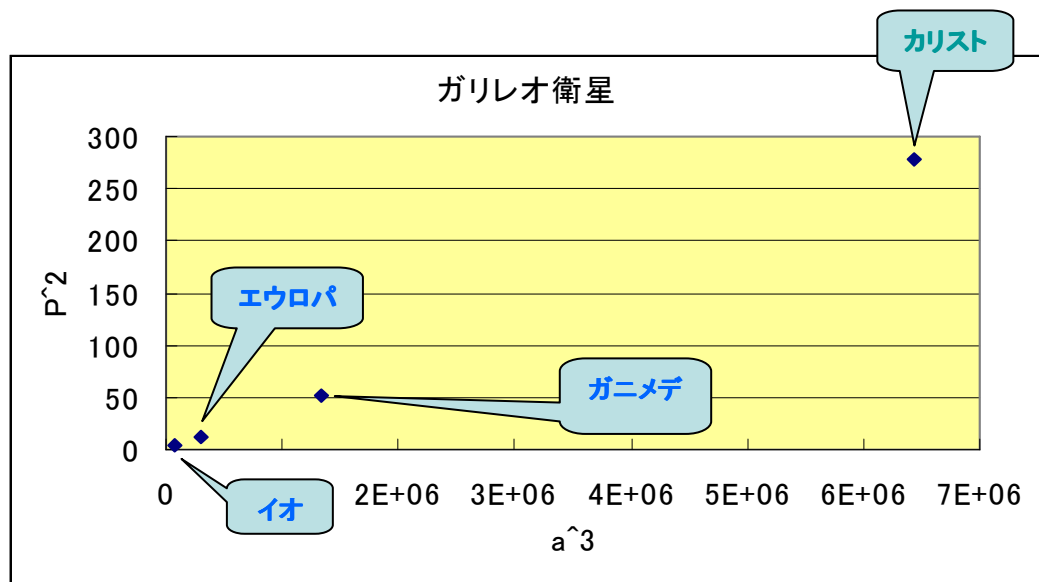
## ガリレオ衛星の公転半径と木星の質量の測定値

	公転半径(万km)	公転周期(日)	木星の質量( $10^{27}$ kg)
イオ	43.6(42.2)	1.77	2.1
エウロパ	66.5(67.1)	3.55	1.85
ガニメデ	110(107)	7.16	2.03
カリスト	186(188)	16.7	1.83

**測定値**  
( )内は天文年鑑のデータ

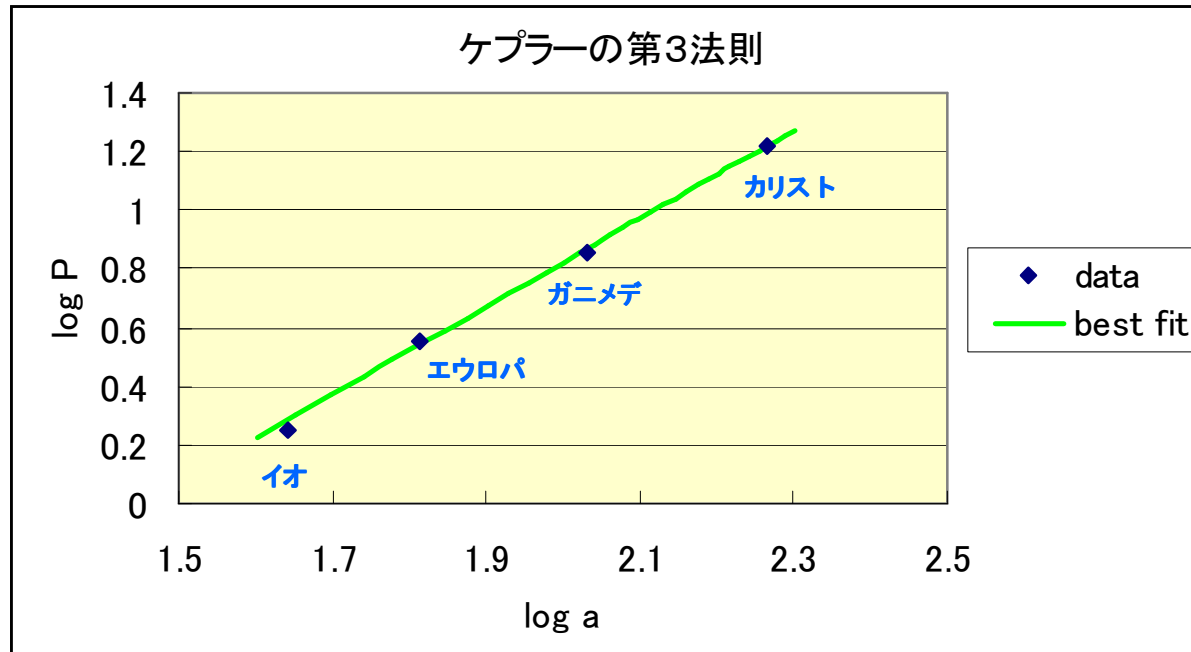
天文年鑑のデータ

各惑星の公転半径  
と公転周期から求  
めた木星の質量



ガリレオ衛星の  
公転周期と公転  
半径の関係

## ケプラーの第3法則の検証



公転半径の測定データは、公転周期の2乗と公転半径の3乗は比例関係であることを示す

ガリレオ衛星系についてもケプラーの第三法則が成り立つことが、観測データから確かめられた

比例係数から求めた木星の質量

$1.84 \times 10^{27} \text{ kg}$

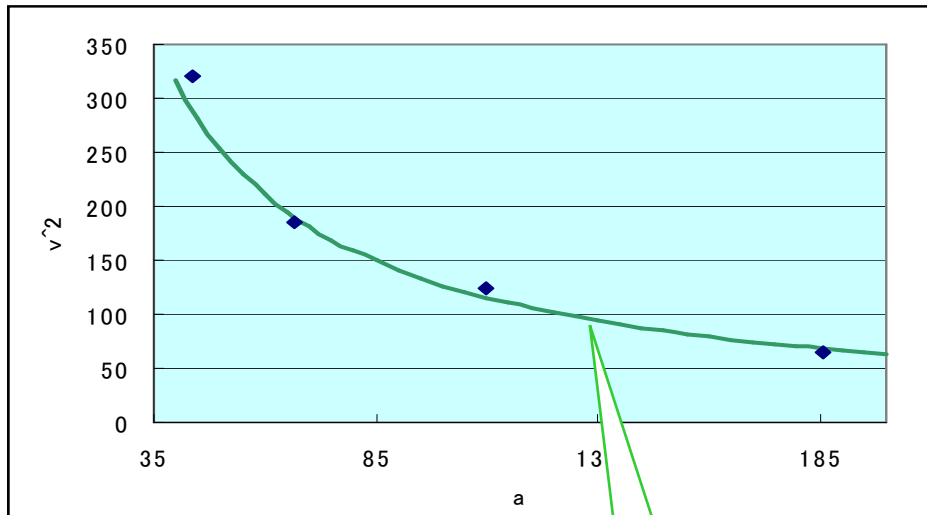
(天文年鑑:  $1.90 \times 10^{27} \text{ kg}$  )

ガリレオ衛星が木星を中心とする円軌道上を移動する速さ

地球の公転速度  
30 km/s

	公転半径(万km)	公転周期(日)	公転速度(km/s)
イオ	43.6(42.2)	1.77	17.9
エウロパ	66.5(67.1)	3.55	13.6
ガニメデ	110(107)	7.16	11.2
カリスト	186(188)	16.7	8.1

ガリレオ衛星の公転速度曲線



速さの2乗は軌道半径に逆比例

理論曲線

光速  
30 万km / s

新幹線の速さ  
0.08 km/s

衛星の公転速度の2乗は、公転半径に半比例  
太陽系と同様

$$\text{速さ} = (\text{円周}) / (\text{周期})$$



# ガリレオ衛星の魅力(まとめ)

- ガリレオ衛星は、ガリレオが人類の歴史上初めての天体望遠鏡で発見したものであり、科学的に意義深い天体である
- 太陽系の惑星の衛星としては、月を除けば際立って明るく(イオ:5.0等級、エウロパ:5.3等級、ガニメデ:4.6等級、カリスト:5.6等級)、観測しやすい
- 木星とガリレオ衛星は、ミニ太陽系とみなせる
- インターネット望遠鏡を利用することで、衛星と木星間の分離角の測定が容易になる(～0.01度の大きさ)
- 太陽系の惑星の観測から検証することは難しいケプラーの第三法則を、ガリレオ衛星の2ヶ月程の継続観測で検証可能
- ガリレオ衛星を観測することで、木星の質量を測定できる
- ガリレオ衛星の公転速度を測定可能