

宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



10月25日 **なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則**

11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則

12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論

1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論

2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論

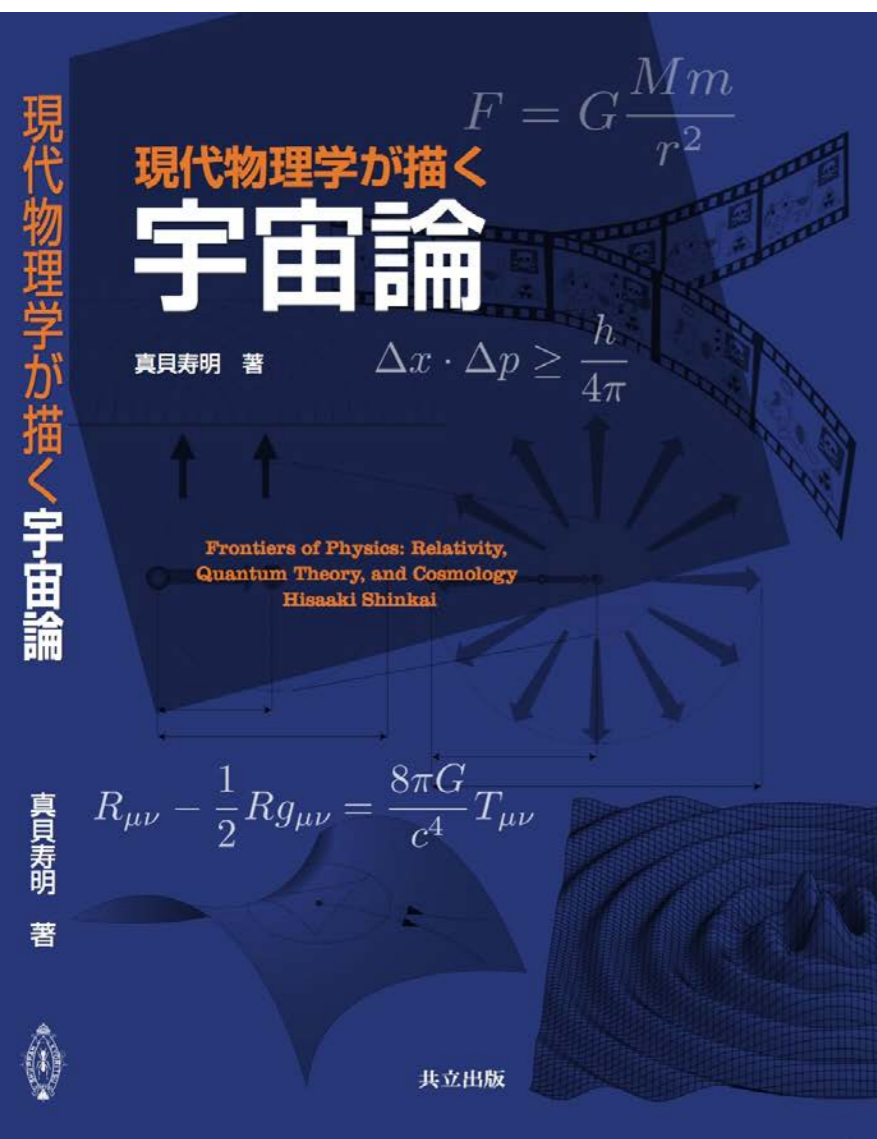
3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/mainichi/>

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>

宇宙をひもとく物理学

真貝寿明 (しんかいひさあき)

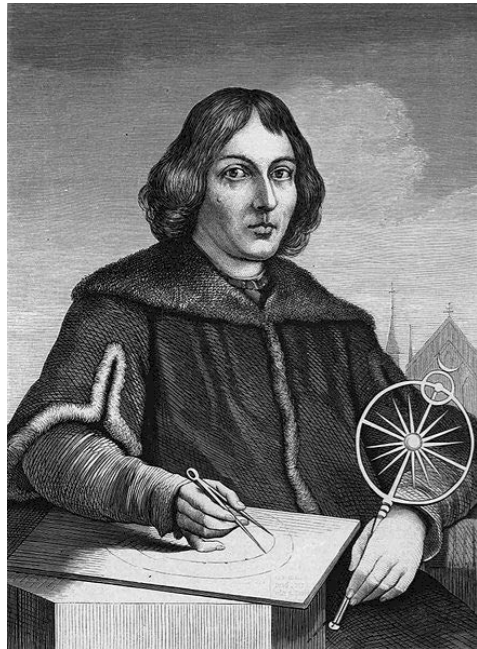


1. なぜ円ではなく楕円か：ケプラーの惑星運動の法則

登場人物たち

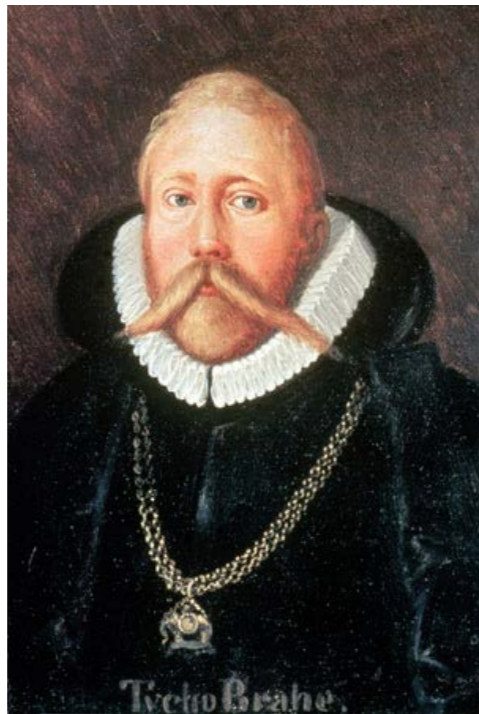
コペルニクス

Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



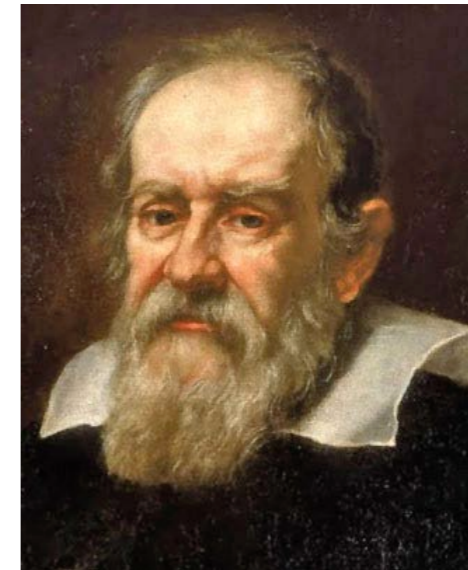
ケプラー

Johannes Kepler
(1571-1630)



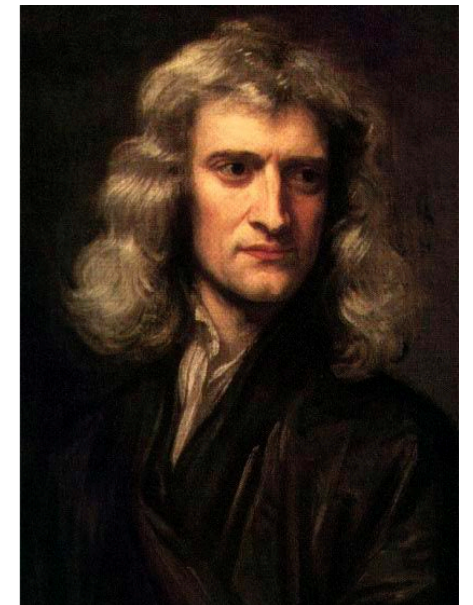
ガリレイ

Galileo Galilei
(1564-1642)



ニュートン

Isaac Newton
(1642-1727)



1. なぜ円ではなく楕円か：ケプラーの惑星運動の法則

コペルニクス以降の宇宙観

Claudius Ptolemaeus
83年頃 - 168年頃



Nicolaus Copernicus
(1473–1543)

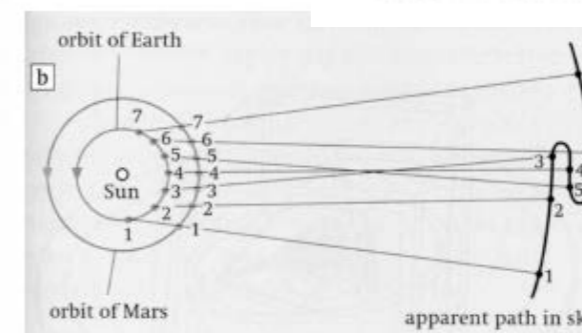
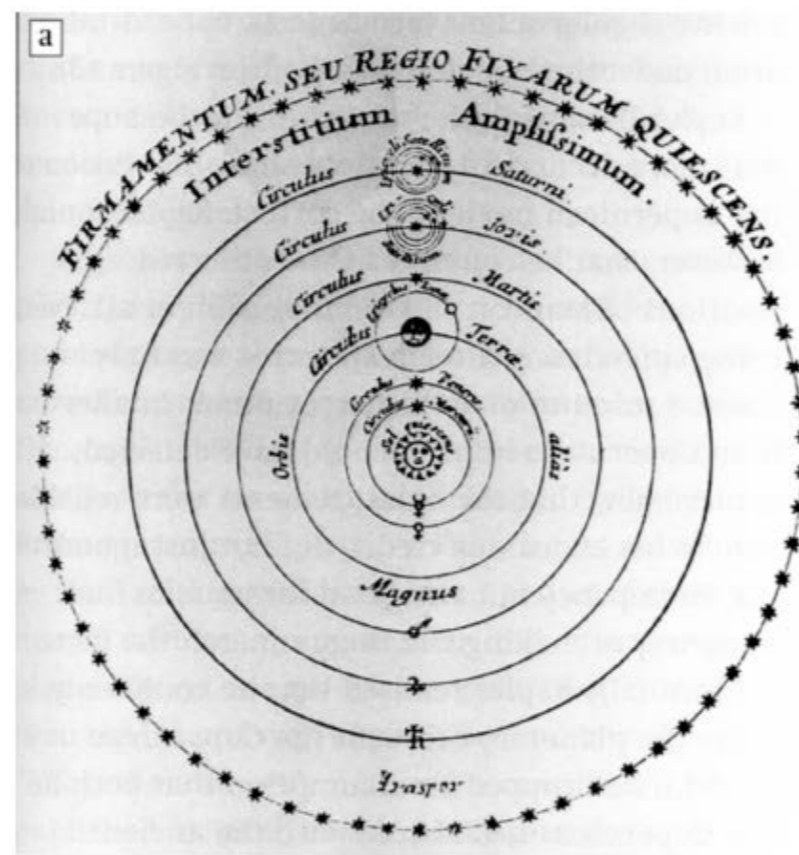


図 13: コペルニクスによる天球図（地動説）。火星の位置が逆行することが自然に説明できることが述べられている。（[1] より）

天動説

地動説

1.1 コペルニクス以前の宇宙観

■アリストテレス的宇宙（紀元前4世紀）：

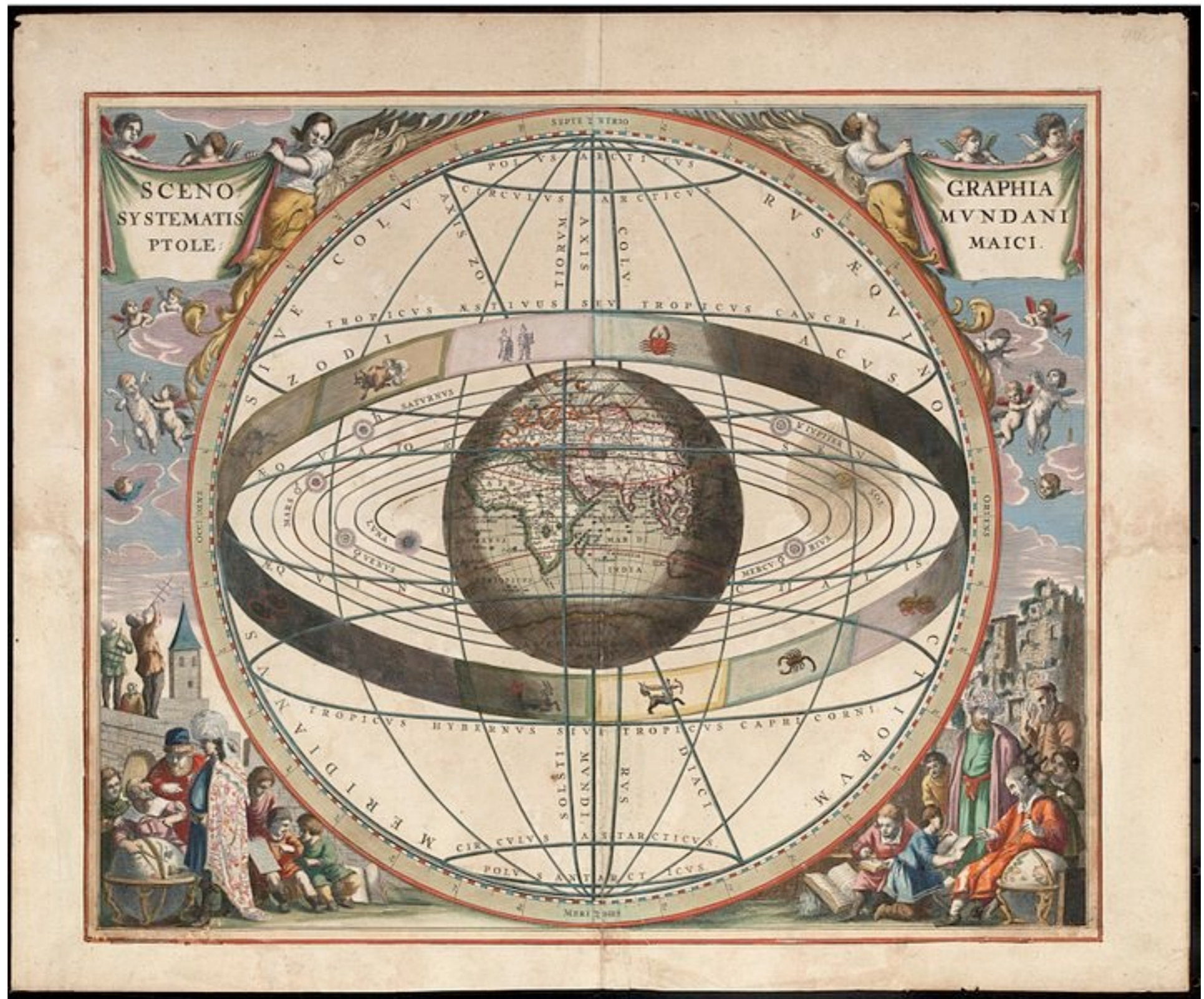
天動説（地球中心説） + 四元素説（地、水、火、空気）

→プトレマイオス（2世紀）以後1000年以上、
世界の「常識」となった。

■アリストタルコス（紀元前3世紀）：

古代の地動説（太陽中心説）

太陽は月よりもはるかに大きく、地球よりも大きい。
そんな太陽が地球の周りを動くはずがない。



天動説

プトレマイオス(2c)



Engraving (1490) of the Ptolemaic Universe

around the Sun, but his theory was rejected because it did not fit in with the mathematical and philosophical beliefs of the time.

TEACHING TOOL
Astronomers have always found it difficult to explain the three-dimensional motions of the heavens. Ptolemy used something like this armillary sphere to do his complex astronomical calculations and to pass these ideas on to his students.

Meridian ring
Horizon ring

Tropic of Cancer

Equinoctial colure passes through the poles and the equinoxes
Arctic circle
Solstitial colure passes through the poles and the solstices

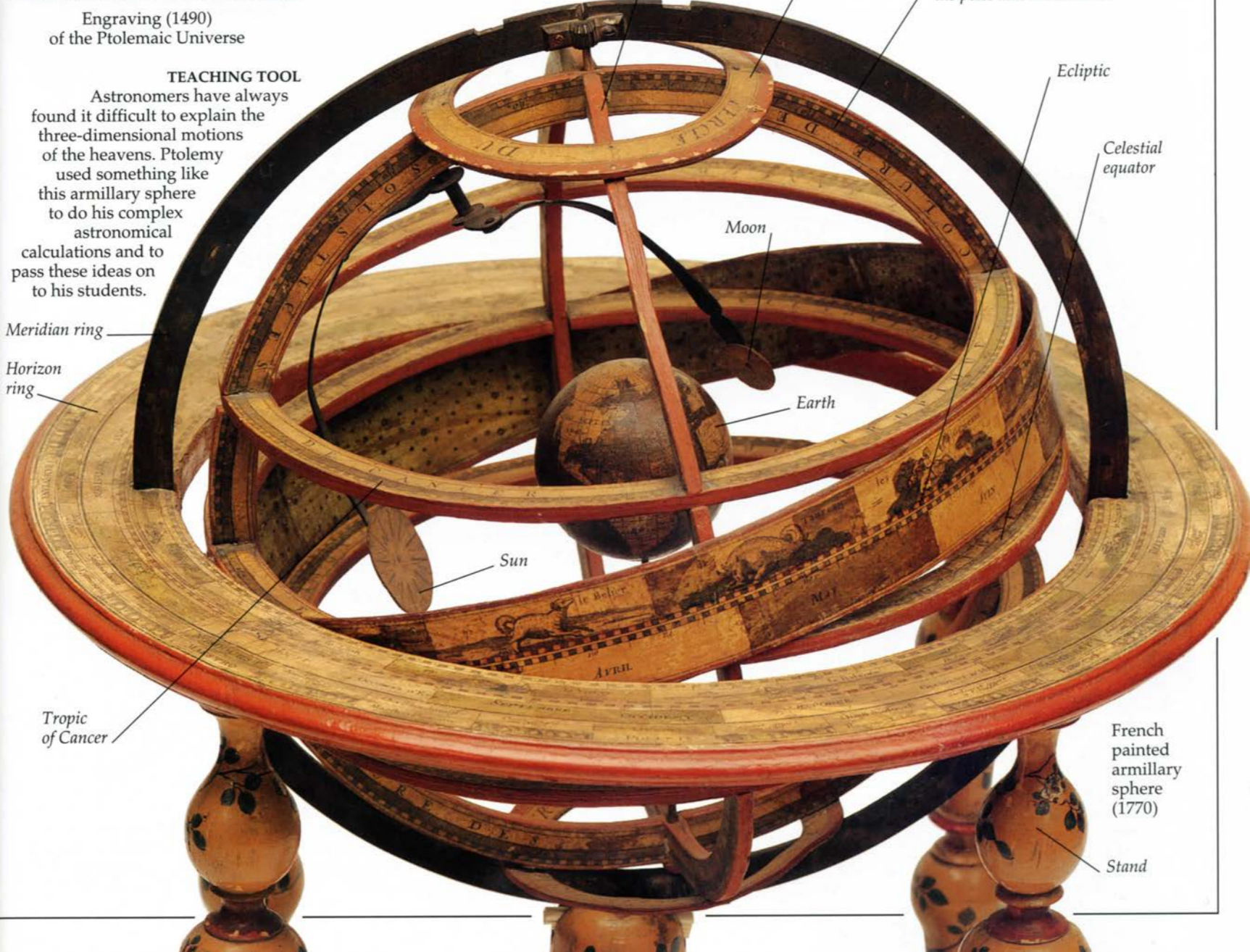
Ecliptic
Celestial equator

Moon
Earth

Sun

French painted armillary sphere (1770)

Stand



天動説

プトレマイオス(2c)

1.1 コペルニクス以前の宇宙観

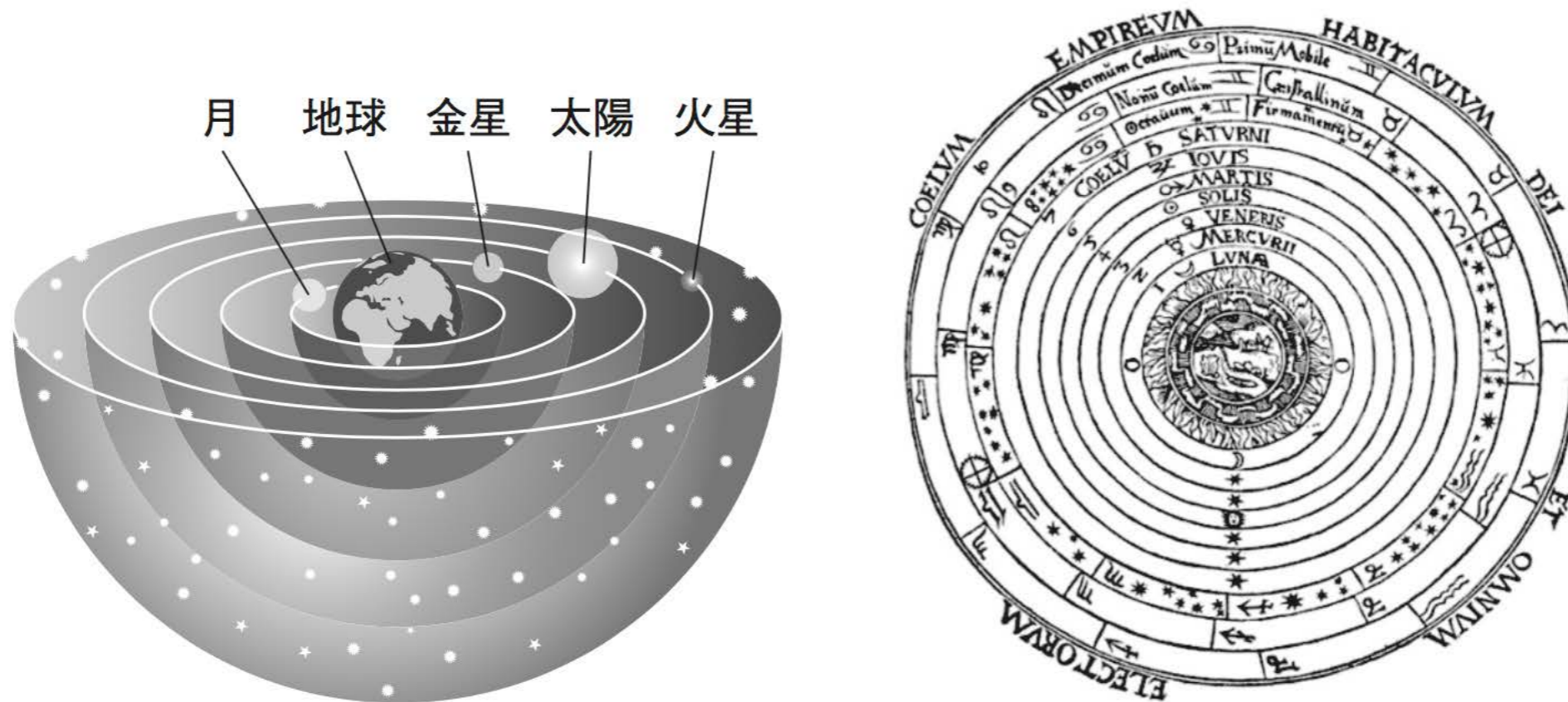


図 2.2 [左] アリストテレスの天球モデル. [右] Peter Apian 著の *Cosmographia* (1539) に描かれたアリストテレスの天球モデルの説明図.

惑星の動き 2018年

太陽系内の惑星の位置

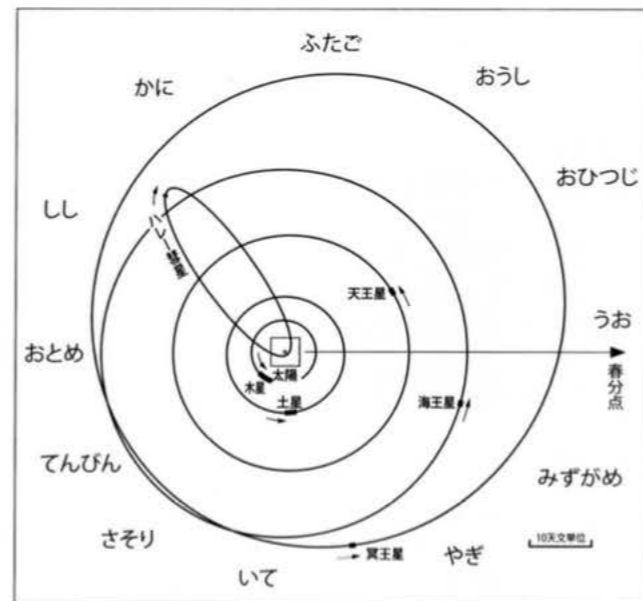
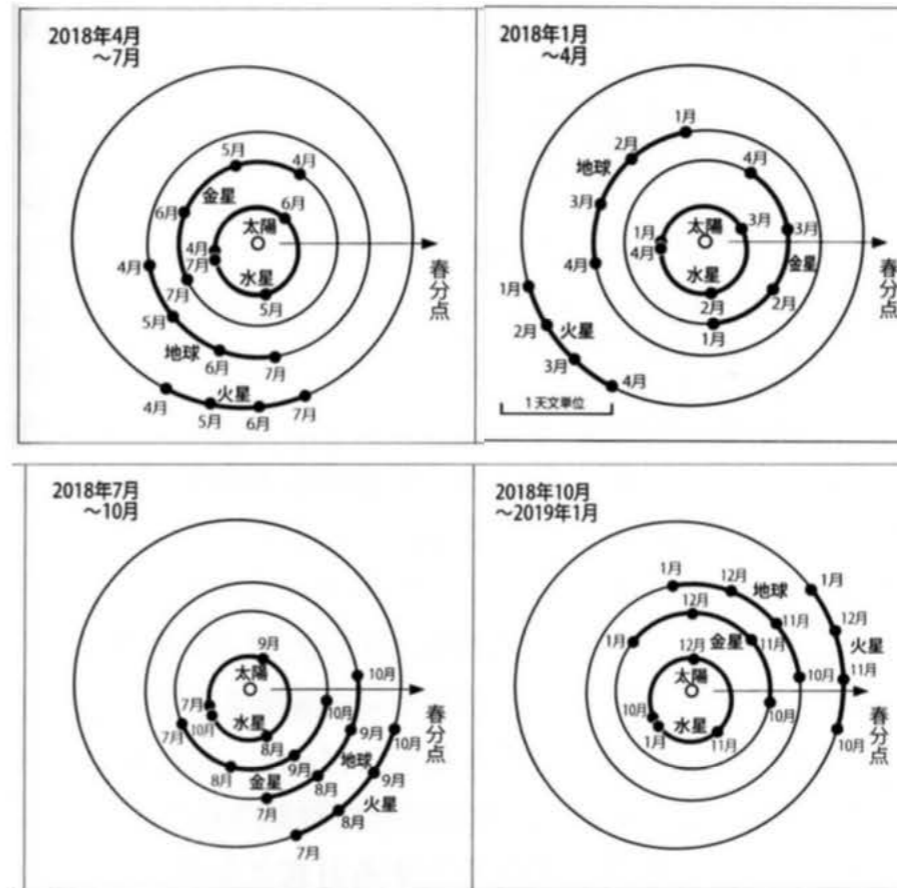


図1 2018年の太陽系 (太線は今年中に動く範囲)



水金地火ケレス木

土天海冥・ハウメア・マケマケ・エリス

図は「天文年鑑2018」 (誠文堂新光社) より

木星の動き 2018年

おとめ座付近. 夏が見頃.

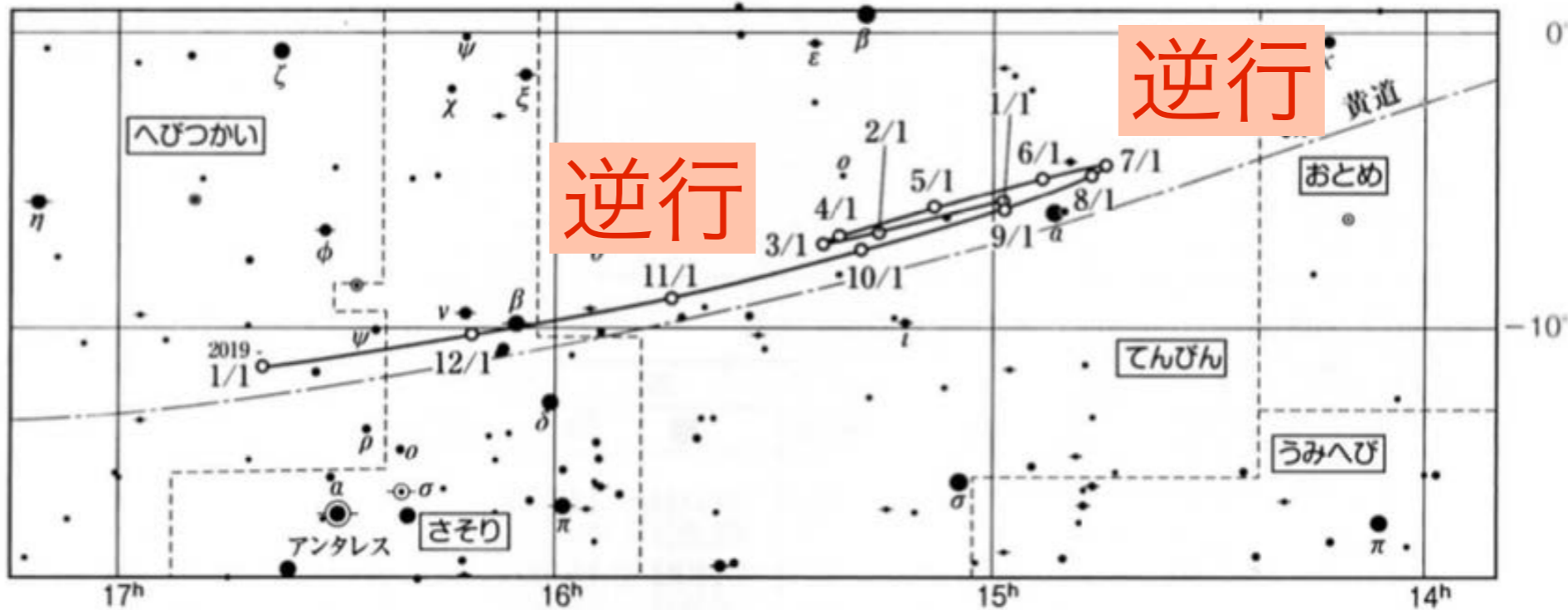


図2 2018年 星座間の木星の動き (毎月1日の位置)

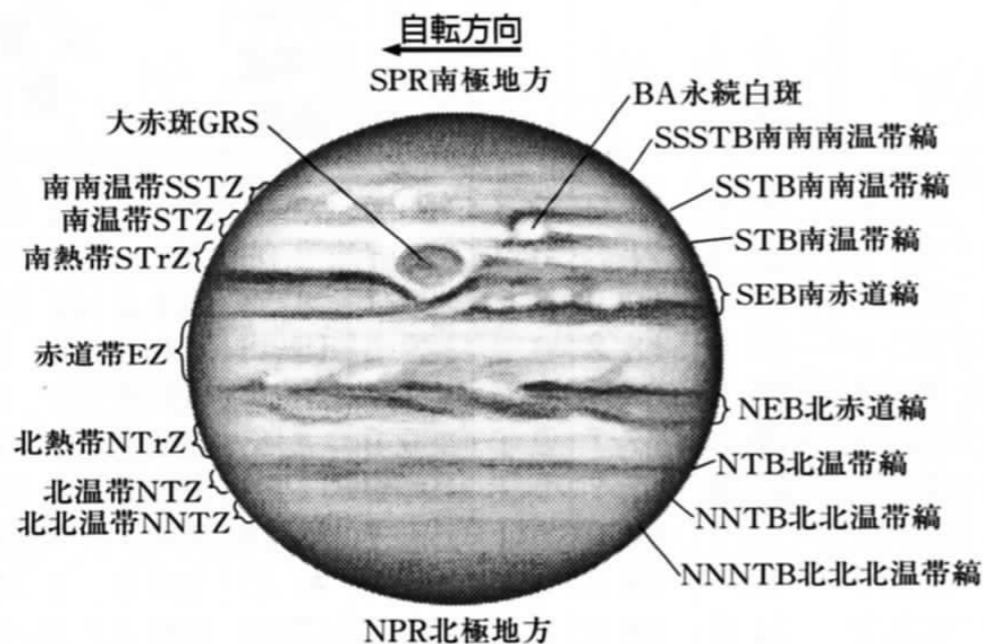


図1 木星面の模様名称



土星の動き 2018年

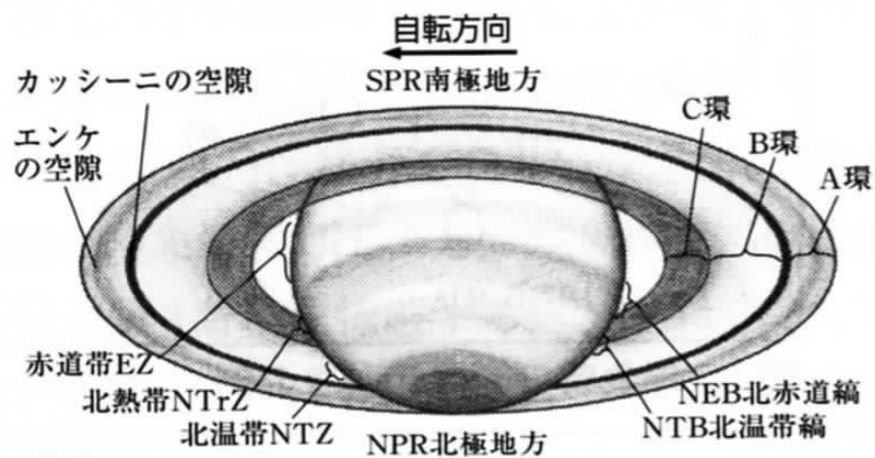
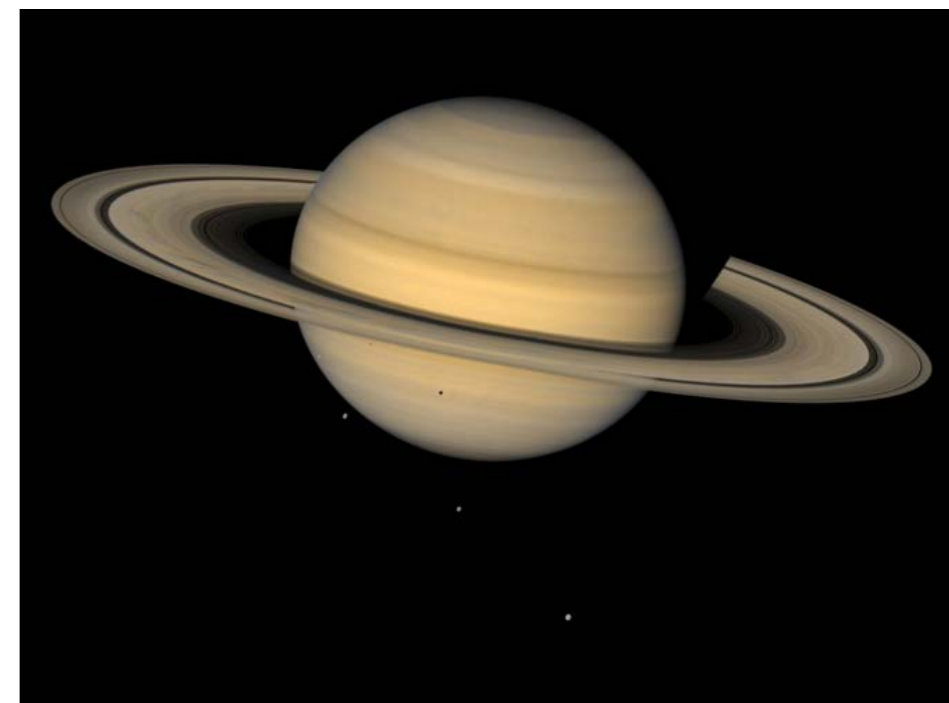


図1 土星面の模様名称



いて座付近. 夏が見頃.

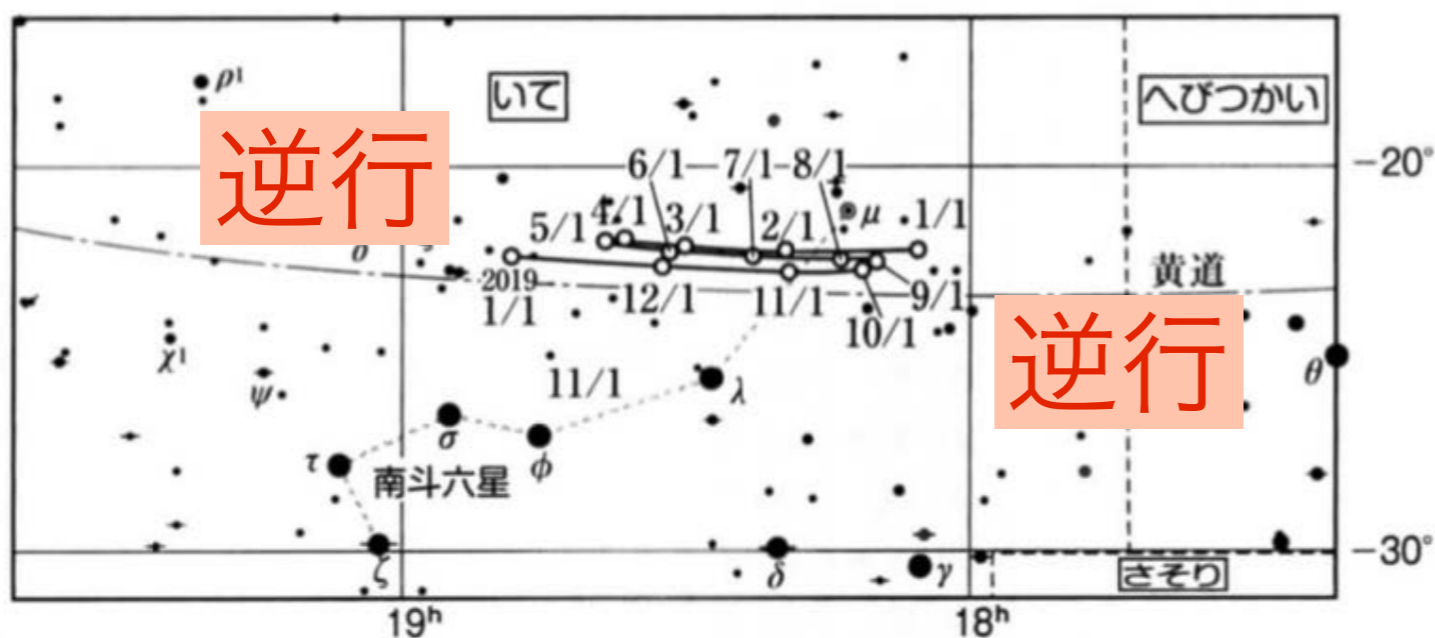
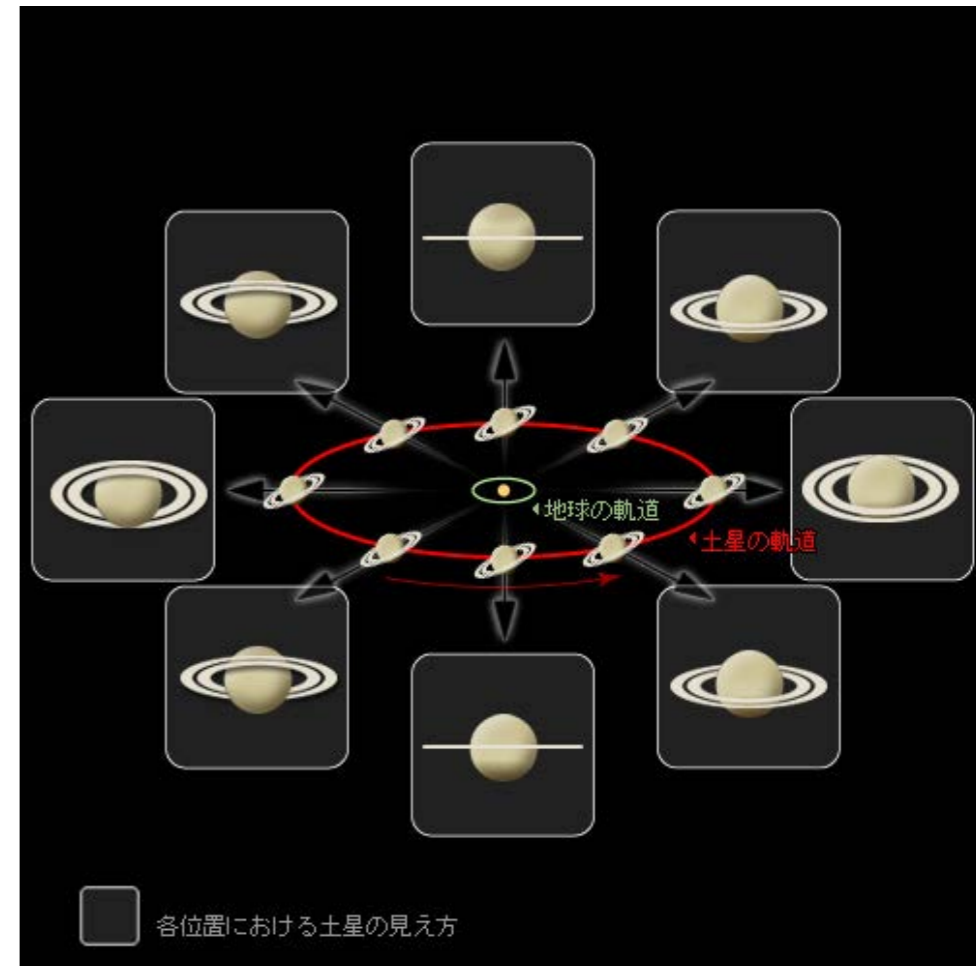
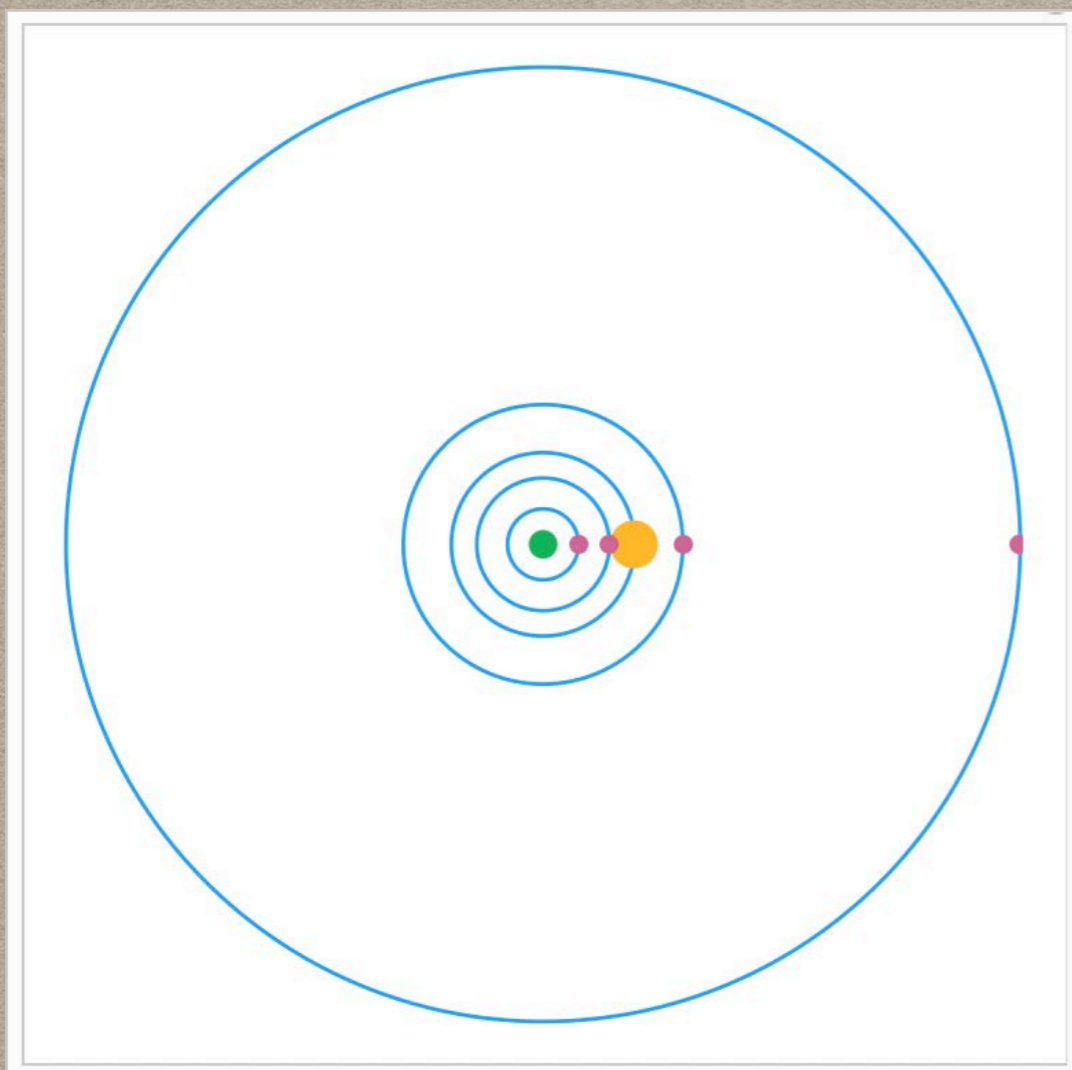
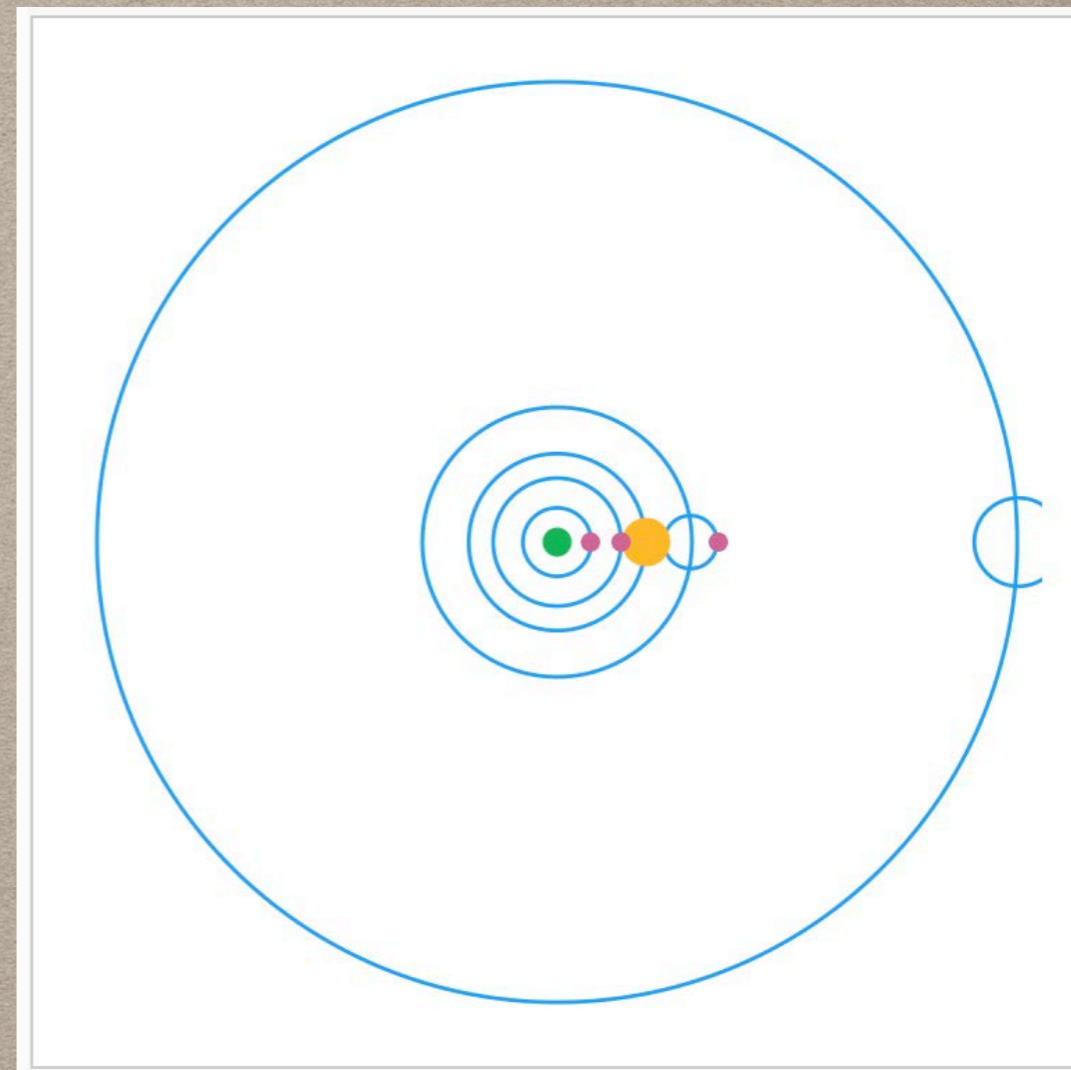


図2 2018年 星座間の土星の動き (毎月1日の位置)





天動說



天動說+周天円

Claudius Ptolemaeus
克勞狄斯 托勒密

1.2 コペルニクス 『天体の回転について』 (1543)

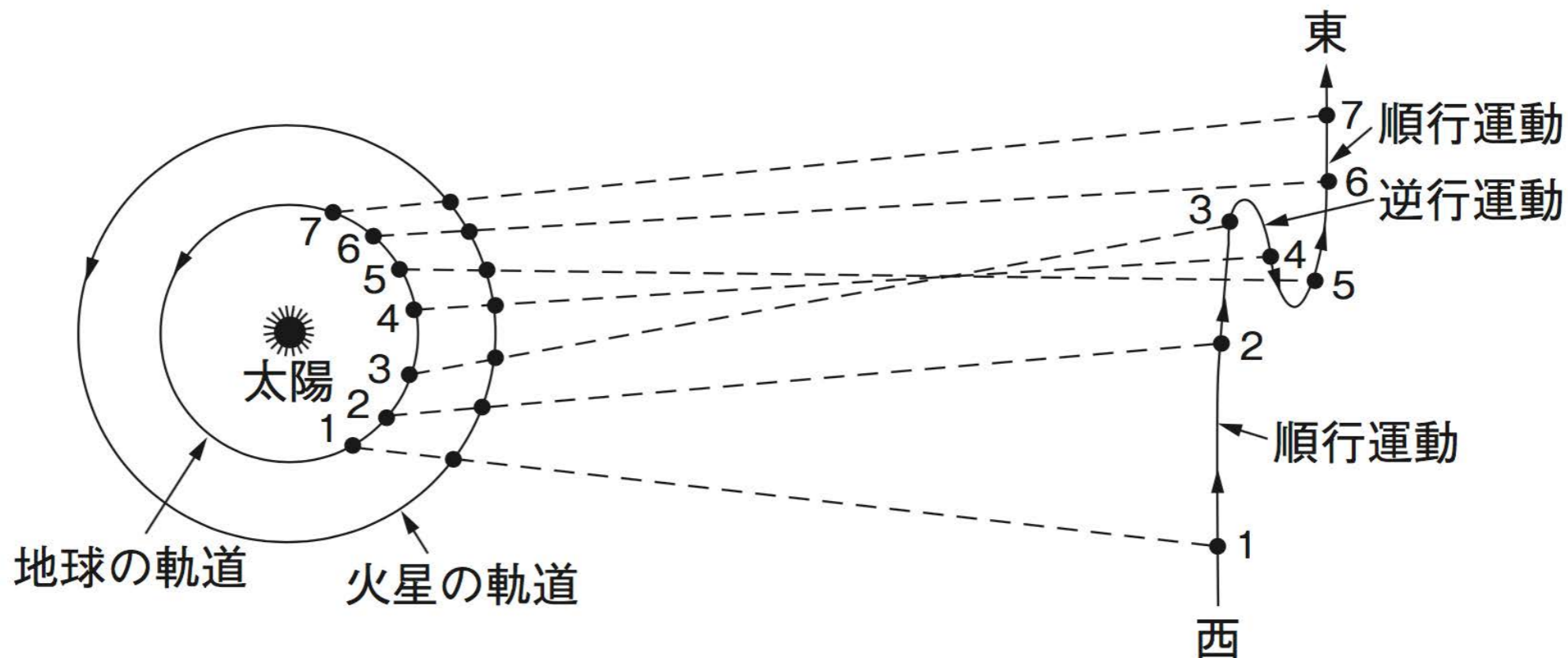


図 2.5 地動説では，火星が逆行することが自然に説明できる。



地動説 (heliocentric theory)
コペルニクス(16c)

1.2 コペルニクス 『天体の回転について』 (1543)



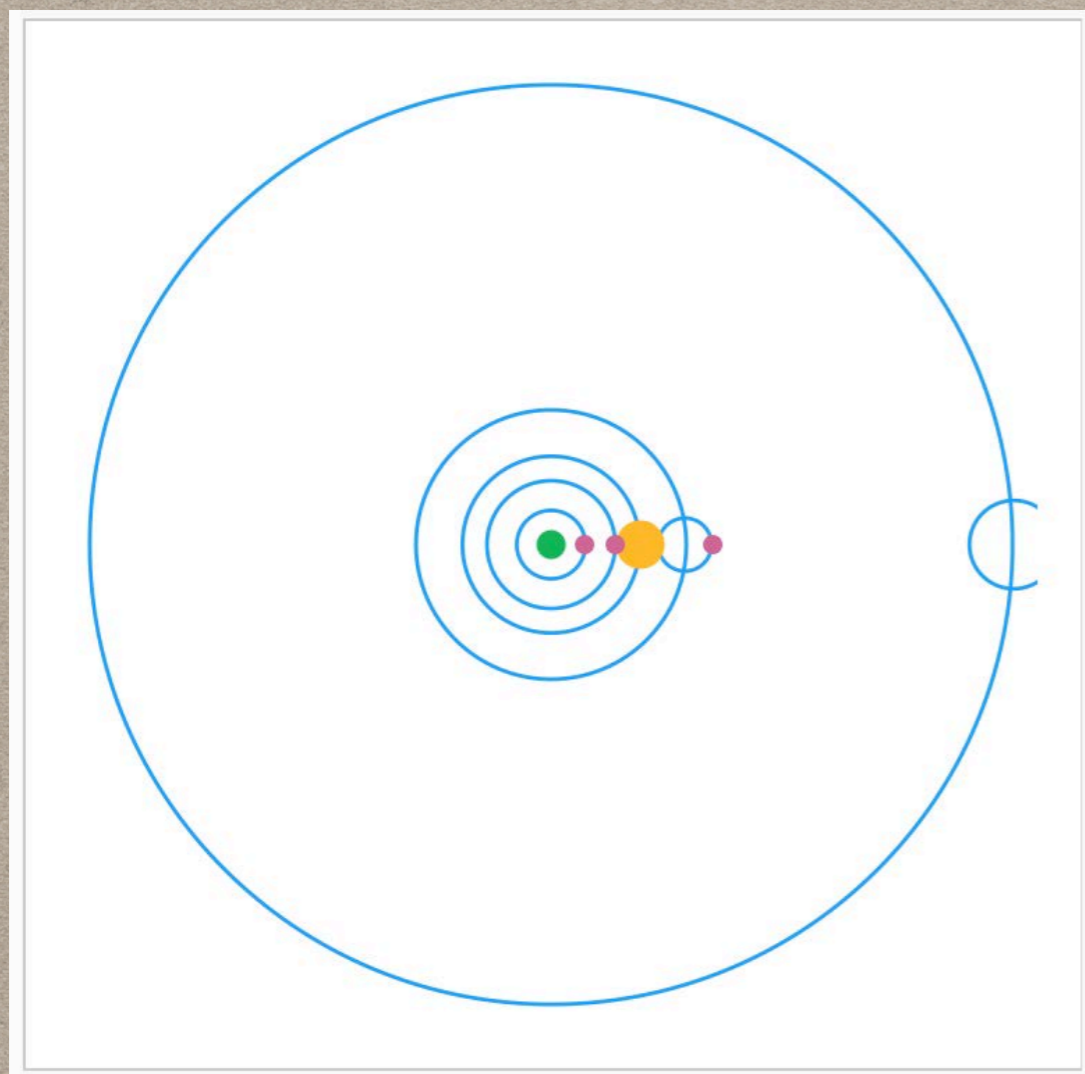
『この仮説は真実でなくても構わない。観測に一致する計算結果が得られるというその一点で十分なのだ。』

この序文は友人が勝手に書いたそうだ。

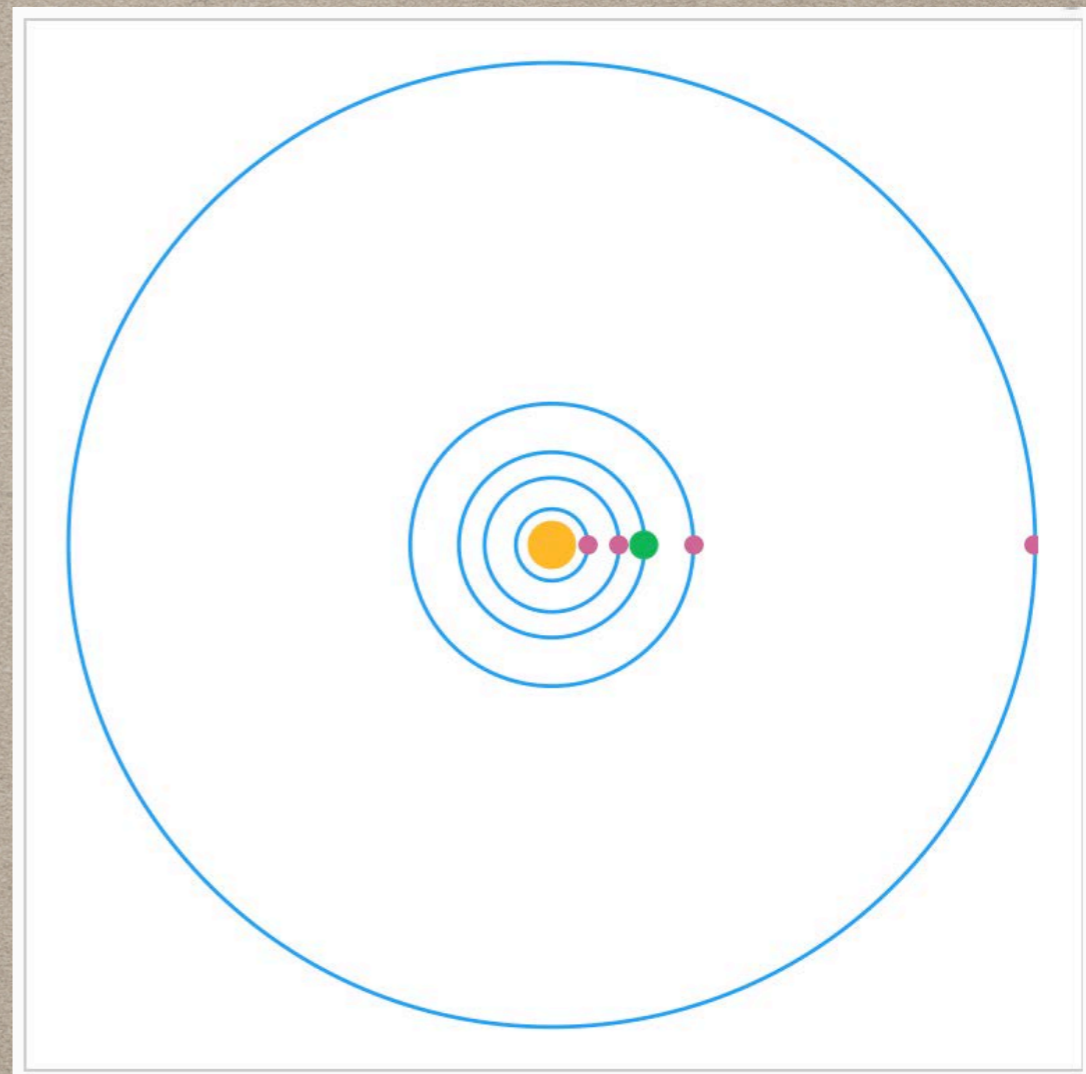


地動説 (heliocentric theory)

コペルニクス(16c)



天動説＋周天円



地動説

Nicolaus Copernicus
尼古拉 哥白尼

1. なぜ円ではなく楕円か：ケプラーの惑星運動の法則

コペルニクス以降の宇宙観

■コペルニクス（1473-1543）

「天体の回転について」（1543）

哲学的理想論 「天は完全であり美しい」

→太陽中心説を提唱

■ジョルダノ・ブルーノ（1548-1600）：

キリスト教との対立→焚刑

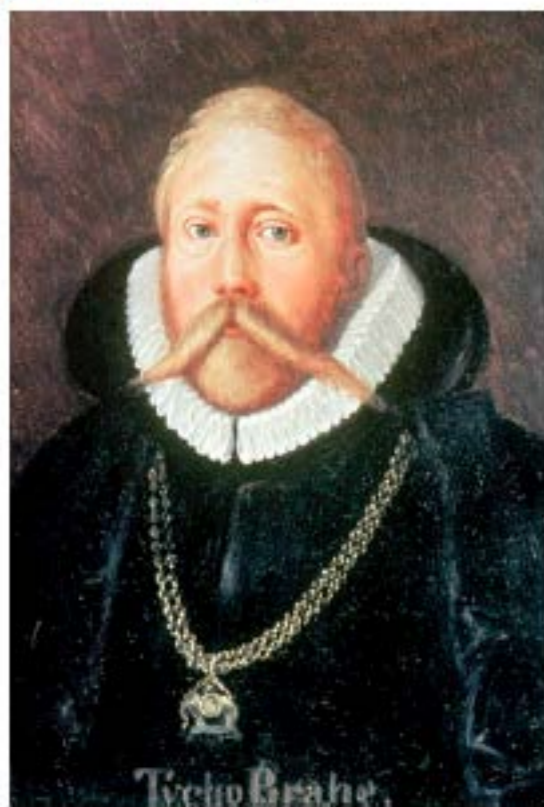
コペルニクス説を伝道

「恒星＝宇宙に浮かぶ無数の太陽」

1.3 ティコ・ブラーエと超新星の発見

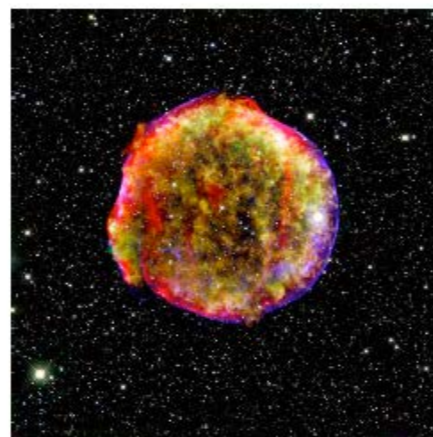
ティコ・ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)

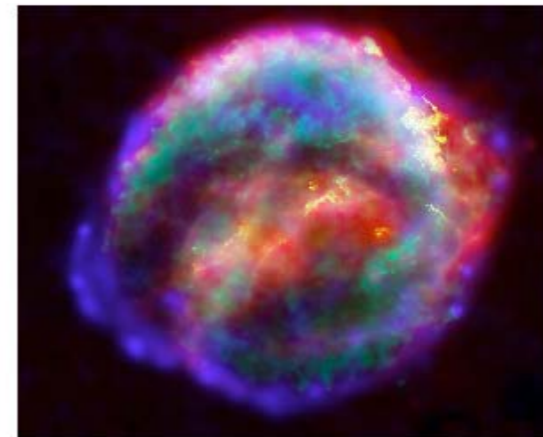


精密で膨大な天体観測記録を残す
観測的権威だが天動説支持
「太陽は地球の周りを回り、
惑星は太陽の周りを巡る」

1572 超新星を発見
(SN1572, 通称「ティコの新星」)



SN1572 (ティコの新星)



SN1604 (ケプラーの新星)

超新星 SN 1572 と SN1604 の現在の姿。数百年が経ち、爆発の先端の衝撃波が球状に広がっていて、超新星残骸 (supernova remnant) と呼ばれる。

超新星は、数百年に一度、肉眼で観測されている。

表 2.1 歴史的に有名な超新星。超新星名には発見された西暦がつく。SN 185 は 185 年に、SN 1987A は 1987 年に発見された一番はじめの超新星である。最近では、大型望遠鏡で次々と発見されていて、統一した番号付けはされなくなった。

超新星	星座	銀河	最大光度	型	備考
SN 185	ケンタウルス座	銀河系	-8		最古の観測記録（中国『後漢書』）
SN 393	さそり座	銀河系	-1		
SN 1006	おおかみ座	銀河系	-9	I	
SN 1054	おうし座	銀河系	-6	II?	かに星雲
SN 1181	カシオペア座	銀河系	0	II	
SN 1572	カシオペア座	銀河系	-4	I	ティコの新星
SN 1604	へびつかい座	銀河系	-2.5	I	ケプラーの新星，天の川銀河で最新のもの
SN 1885A	アンドロメダ座	アンドロメダ銀河	5.8	Ia	アンドロメダ座 S 星，他銀河で初の発見
SN 1987A	かじき座	大マゼラン星雲	2.9	II	肉眼で見た最新のもの
SN 2002bj	うさぎ座	NGC 1821		Ia	2009 年の解析により新型超新星と確認
SN 2006gy	ペルセウス座	NGC 1260	15.0	II	最大級の超新星
SN 2009dc	かんむり座	UGC 10064		Ia	チャンドラセカール限界を超えた初の爆発

表 2.2 超新星の分類。Ia 型は「いち・えー型」と読む。

I 型	水素の吸収線がない	Ia 型	ケイ素 S の吸収線がある
		Ib 型	ヘリウム He の吸収線がある
		Ic 型	S の吸収線も He の吸収線もない
II 型	水素の吸収線がある		

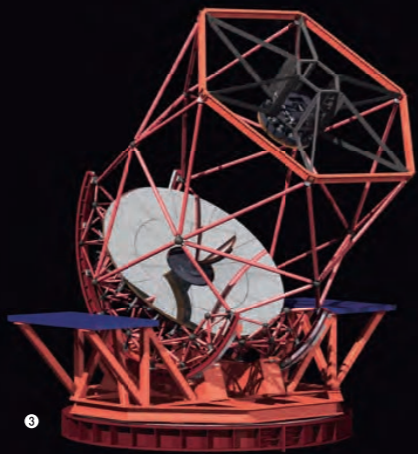
京都大学総合博物館 平成26年度特別展

明月記と最新宇宙像

Meigetsuki and the latest images of our universe

千年を超えて羽ばたく
京の宇宙地球科学者たち

後冷泉院天壽二年丁酉中旬後廿時客星
此頃天度見事才字天同星大也歳星



2014年

9月3日[水]

10月19日[日]

9時30分—16時30分(入館は16時まで)
休館日●月曜日・火曜日(平日・祝日にかかわらず)
観覧料●一般 400円 高校生 大学生 300円
小学生 中学生 200円

※20名以上の場合は団体観覧料が適用されます
※70歳以上の方は身体障害者手帳をお持ちの方は無料

主催●京都大学総合博物館、京都大学大学院理学研究科附属天文台、京都大学大学院理学研究科地球物理学教室、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室
共催●NPO法人花山星空ネットワーク、京都大学宇宙総合学研究所、京都大学研究資源アーカイブ協賛●株式会社西村製作所

協力●冷泉家時雨亭文庫、自然科学研究機構国立天文台、NHK

後援●京都府教育委員会、京都市教育委員会

ワークショップ・講演会

期間中の土曜日または日曜日に開催します。

4次元デジタル宇宙シアター

3D映像の宇宙の中をナビゲーターとともに旅します。原則として期間中の土曜日・日曜日、1日5回、各回30分程度。

※詳細は総合博物館ホームページをご覧ください。

明月記原本展示期間 9月17日(水)～9月28日(日)

●明月記における客星出現古例の記載(部分) ●かに星雲 ●3.9m新技術望遠鏡

京都大学総合博物館



〒606-8501 京都市左京区吉田本町
TEL (075) 753-3272
http://www.museum.kyoto-u.ac.jp/

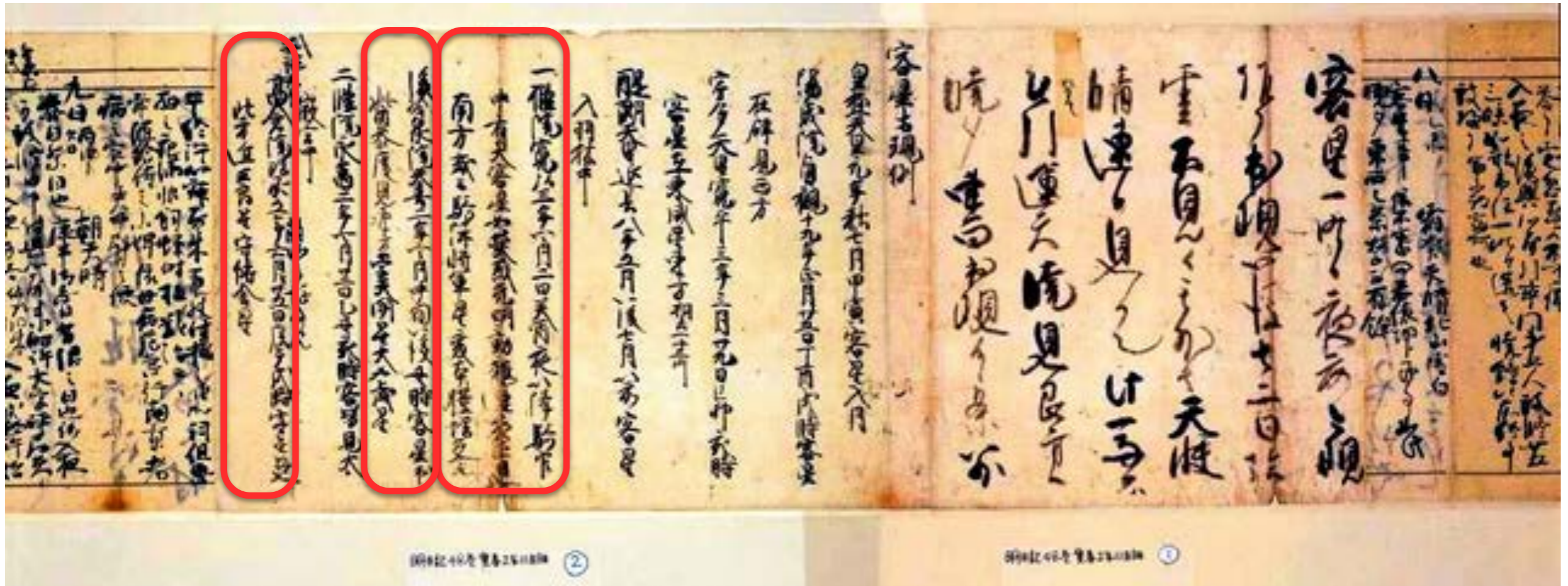
「明月記」の天文現象について書かれた部分



藤原定家(1162-1241)は、陰陽師（天文博士）に調べさせた報告文をそのまま切り貼りした。



「明月記」の天文現象について書かれた部分



1 安倍清明の息子， 安倍吉昌がSN1006を観測

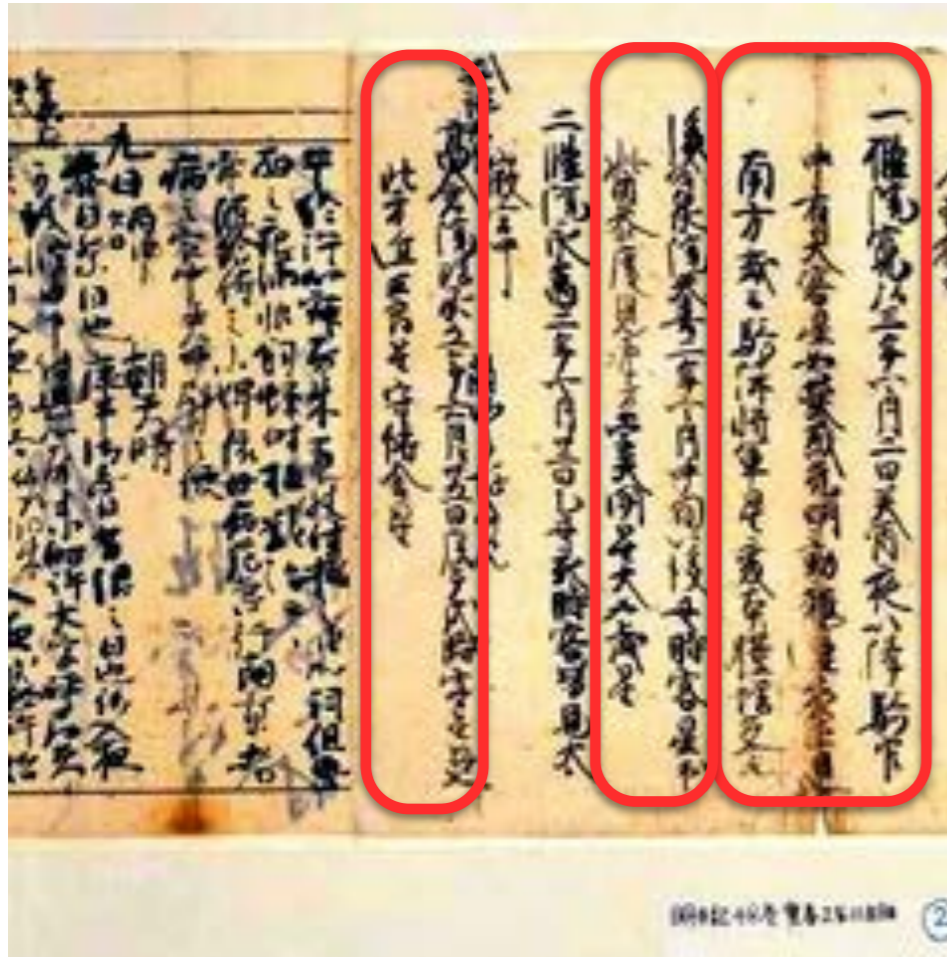
2 清明の子孫（詳細不明）がSN1054を観測

3 清明の子孫（詳細不明）がSN1181を観測

藤原定家本人も見ている可能性あり



1 安倍清明の息子， 安倍吉昌がSN1006を観測



一條院 寛弘三年四月二日 葵酉
夜以降 騎官中 有大客星 如螢惑
光明動耀 連夜正見南方
或云騎陣將軍星變本體：



図2 1006年の大客星

SN 1006

7200光年. 記録に残されている限り、歴史上で最も視等級が明るくなった天体（太陽と月を除く、-7.5等[1]）.

1006年4月30日から5月1日の夜におおかみ座領域に初めて出現したこの「客星」は、スイス、エジプト、イラク、中国、日本、そして恐らくは北アメリカの観察者たちにより記録されている.

SN 1006 Supernova Remnant

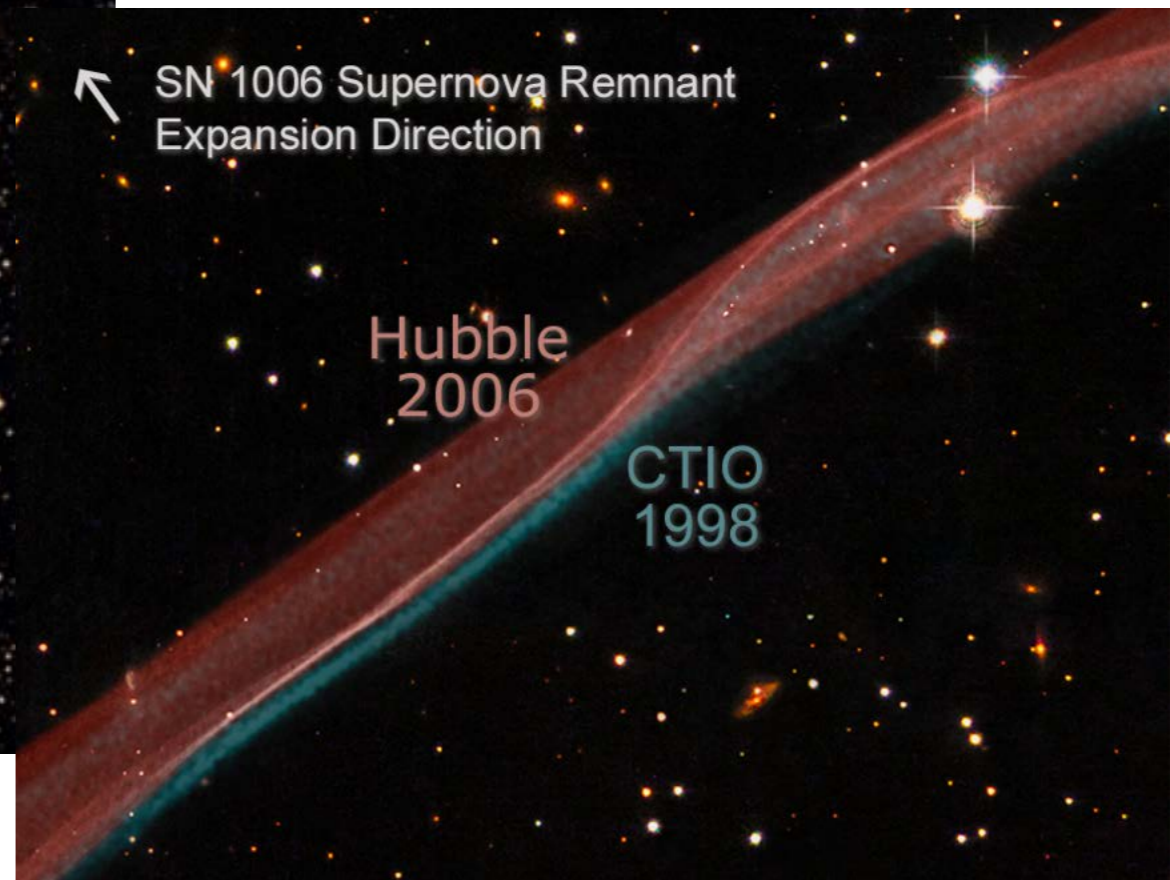
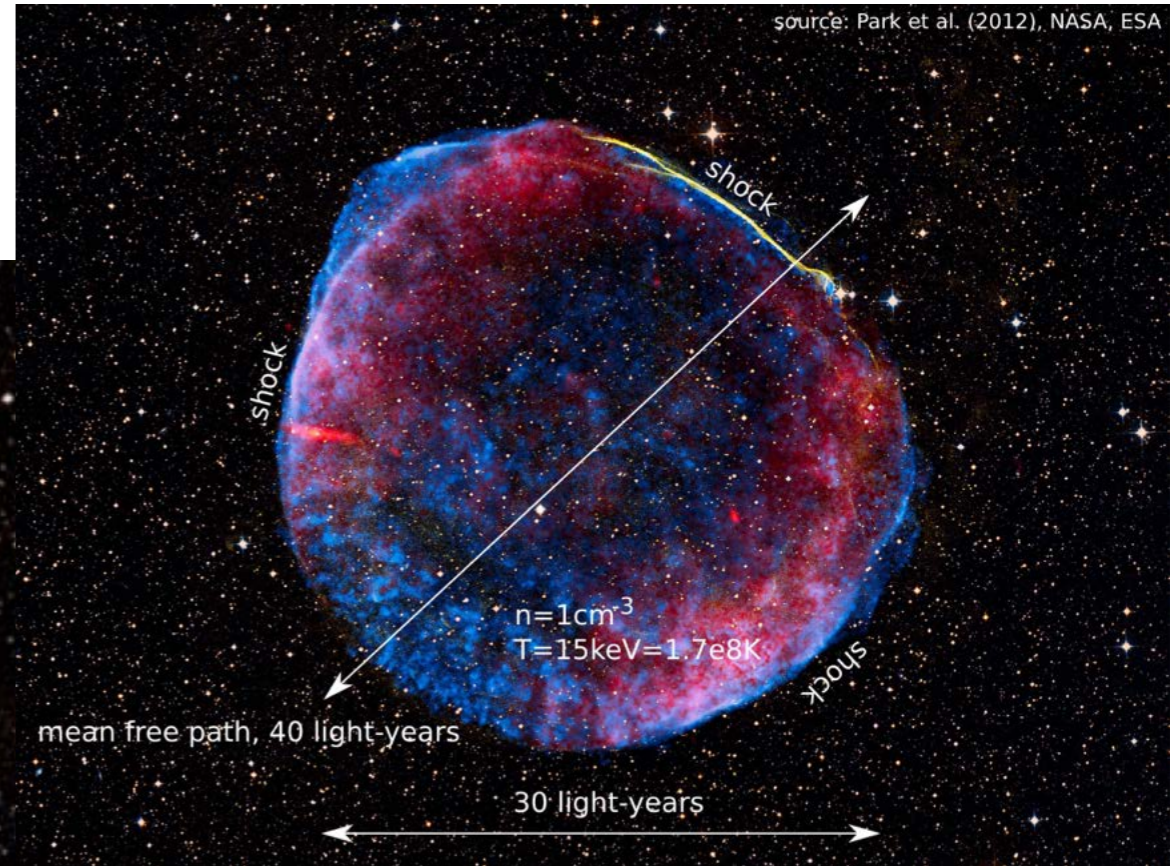
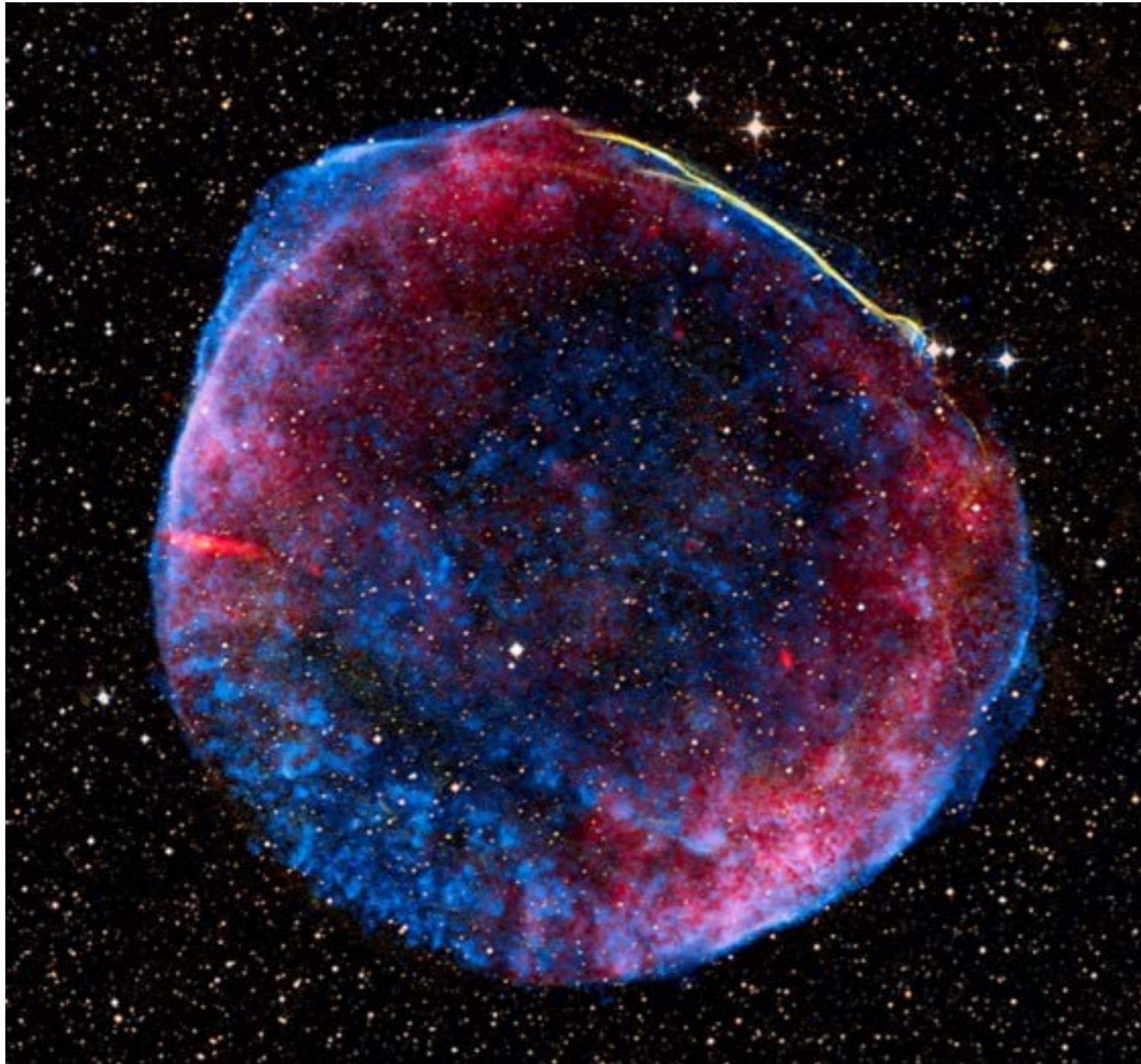
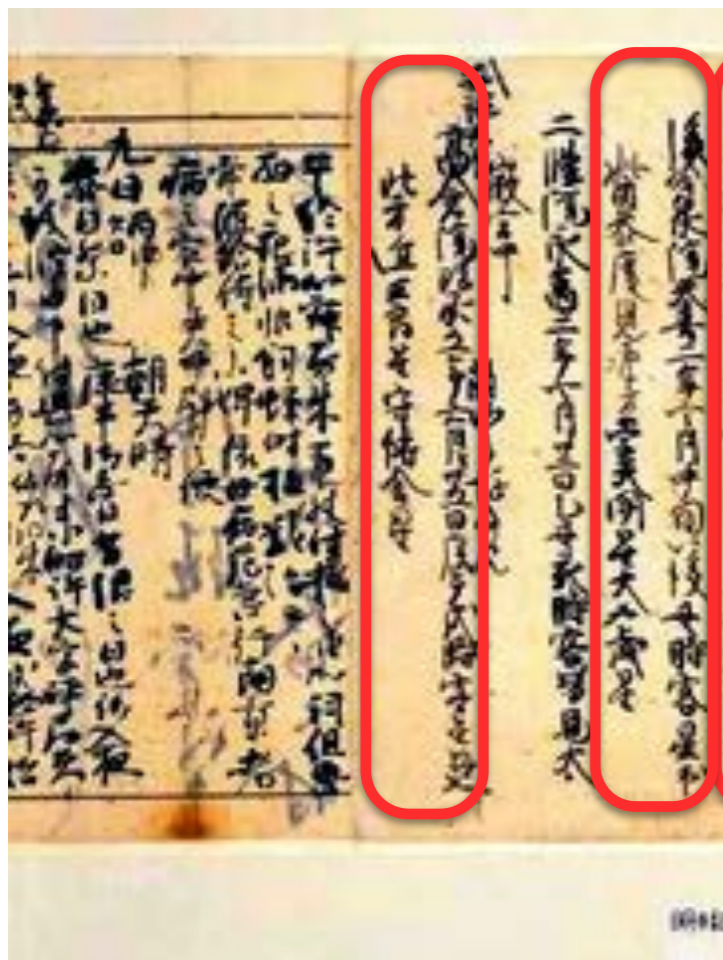


Image credit: Chandra, Hubble, and NRAO teams,
retrieved from heasarc.gsfc.nasa.gov.

2 清明の子孫（詳細不明）がSN1054を観測



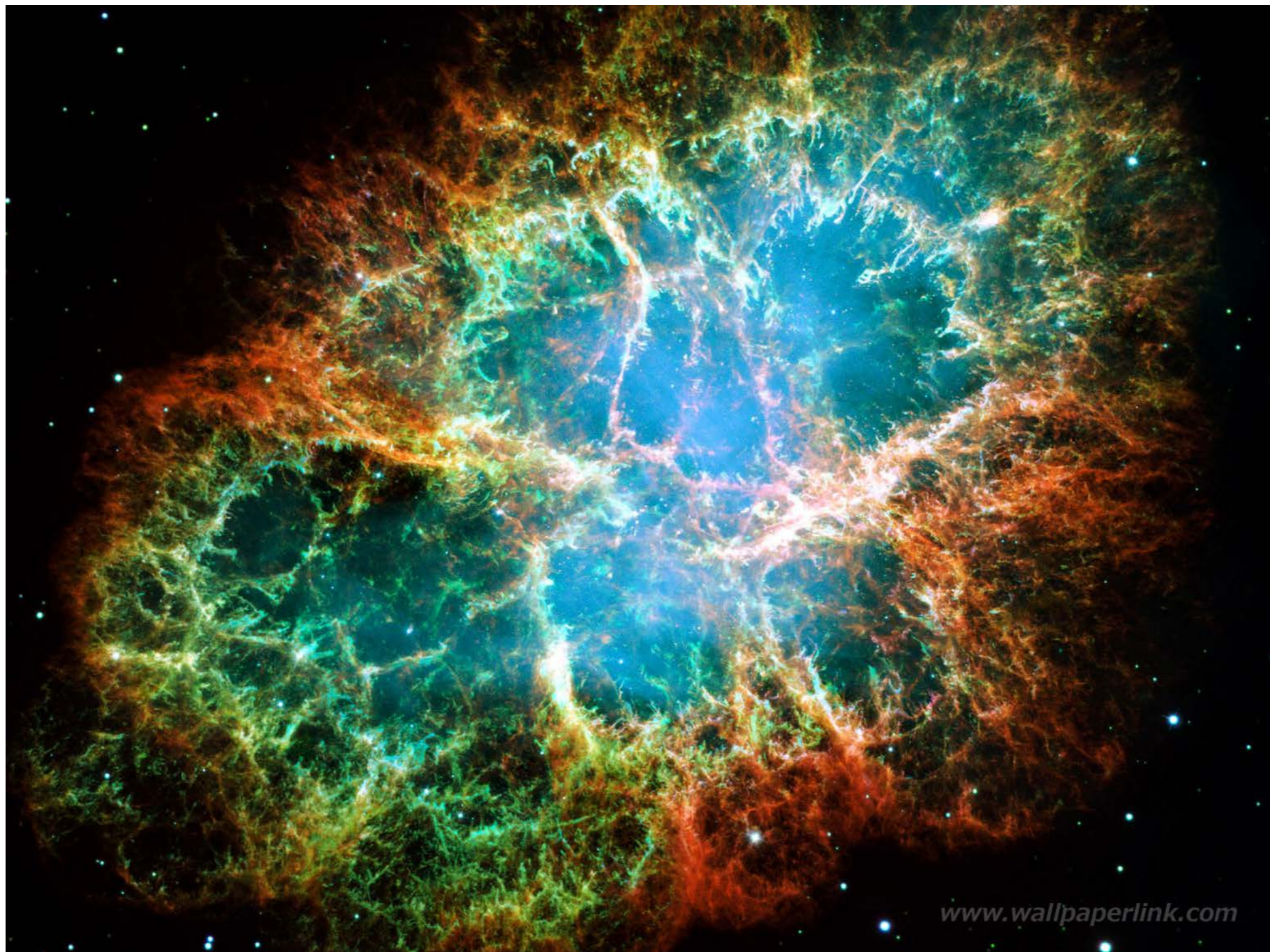
後冷泉院、天喜二年四月中旬以後丑時
客星觜参ノ度ニ出ズ、東方ニ見エ、
天関星ニ孛ス 大キサ歳星ノ如シ



図3 1054年の客星

かに星雲（Crab Nebula, M1, NGC1952）

おうし座にある超新星残骸，距離は7000光年。
超新星の出現当時は金星ぐらいの明るさになり，23日間にわたり昼間
でも肉眼で見えた。夜間は後2年間も見えていた。



かに星雲 (Crab Nebula, M1, NGC1952)

中心にある星は、パルサー（中性子星）で、1969年発見。

直径は約10km. 光度は16等級. 1秒間に30回という高速回転をしており、33msの周期で電波やX線を出し、また可視光線で星雲全体を照らしている。

3 清明の子孫（詳細不明）がSN1181を観測

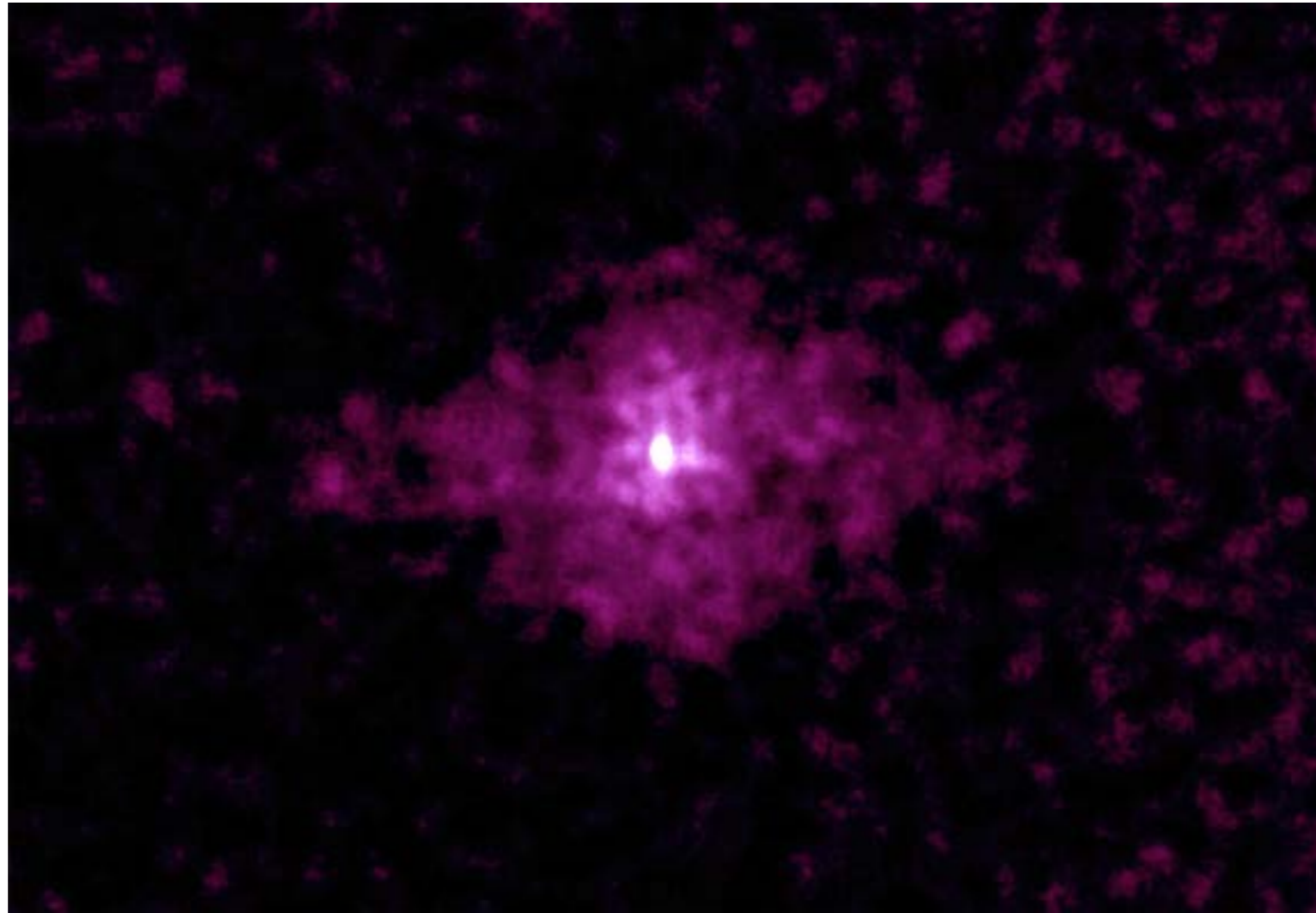
藤原定家本人も見ている可能性あり



SN 1181

1181年8月4日から8月6日の間にカシオペヤ座で観測され始め、約185日間に渡って夜空に見えた。中国と日本の天文学者により8つの独立した文献に記録された。

12世紀のイギリスの科学者アレクサンダー・ネッカムがこの超新星に気づき、『Liber Ymaginum Deorum』に記したといわれている。日本においては、吾妻鏡に「治承五年六月廿五日（1181年8月7日）庚午。戌尅。客星見良方。鎮星色青赤有芒角。是寛弘三年出見之後無例云々。」とあり、他にも明月記や宋史などの史料に記録されている。



SN 1181

電波源 3C 58 は超新星SN1181の残骸だと考えられている。この星は1秒間に約15回転し、クォーク星と推測された最初の天体の1つで、また、形成時と同じ速さで回転し続けていると考えられている。

ティコ・ブラーエは地動説を信じなかった



2分角（1度の 1/30）までの観測能力

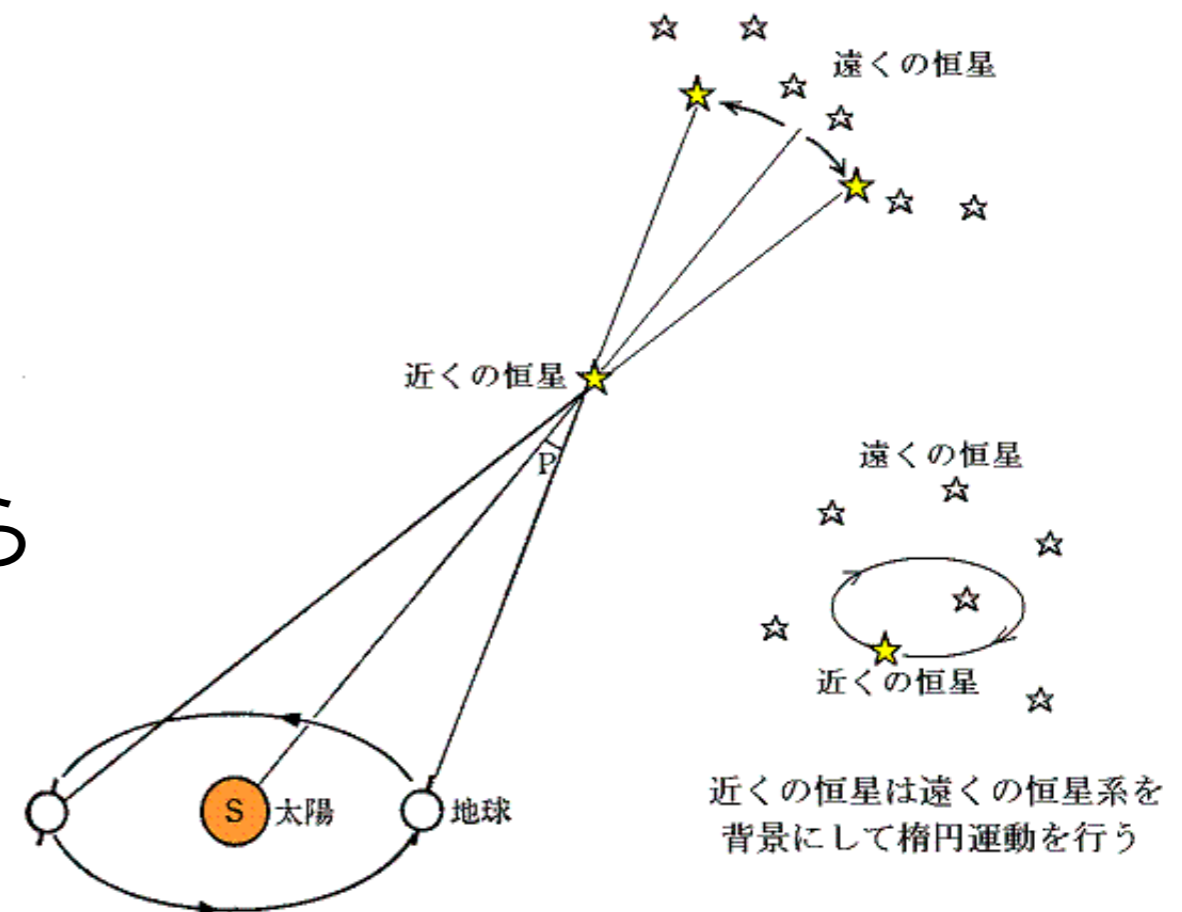
0.1	
0.2	
0.3	
0.4	
0.5	
0.6	
0.7	
0.8	
0.9	

5m離れて，視角1分を視認できる
= 7.272mmの輪の1.454mmの欠損
= 視力 1.0

5m離れて，視角2分を視認できる
= 視力 0.5

年周視差が確認できなかったから

もっとも近いケンタウルス座alpha
でも年周視差0.76秒角



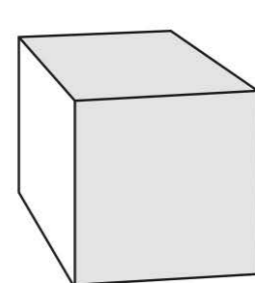
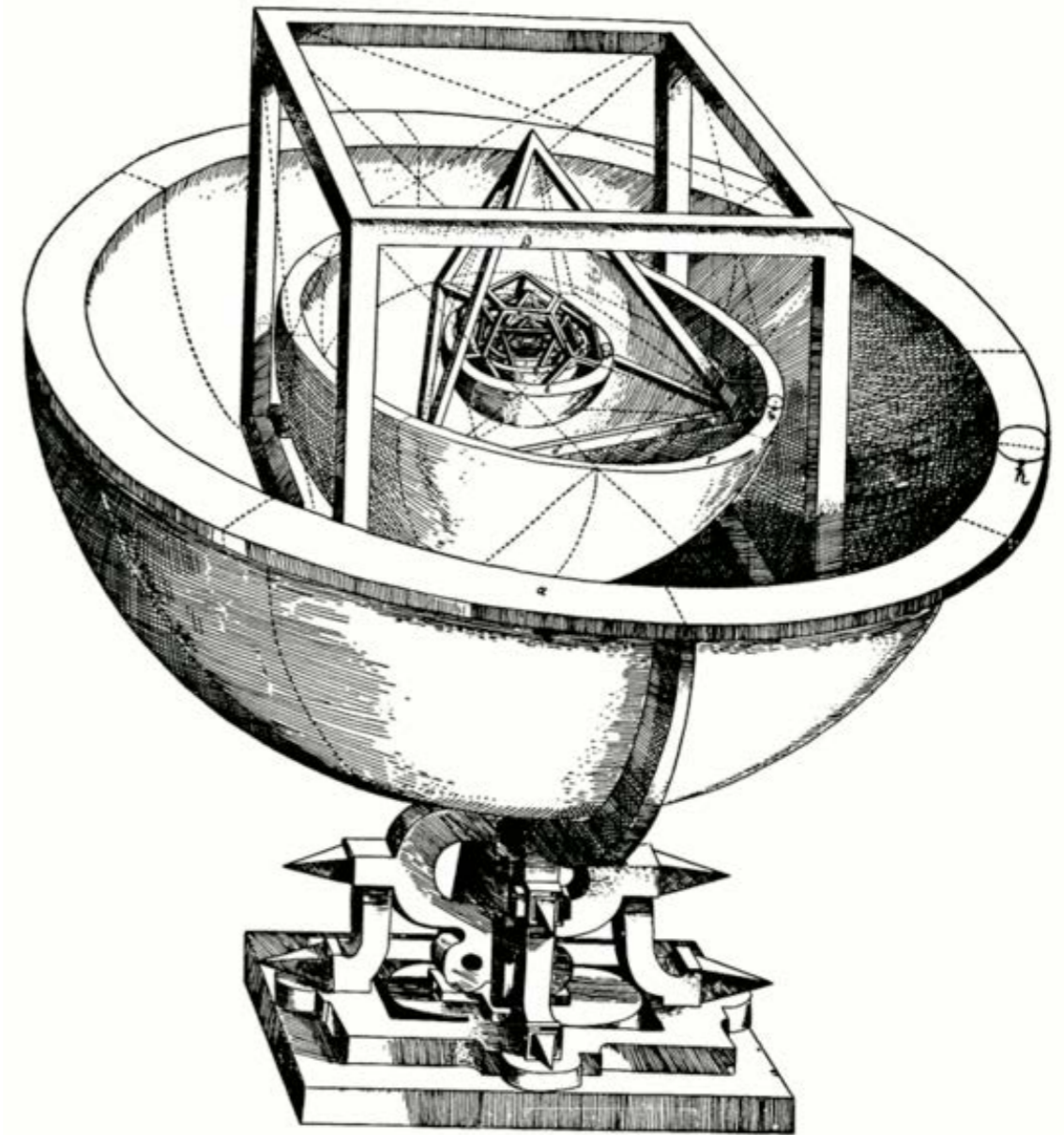
1.4 ケプラーによる惑星の運動法則の発見

ヨハネス・ケプラー

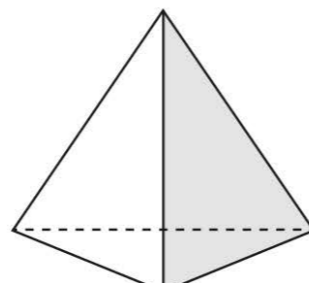
Johannes Kepler
(1571-1630)



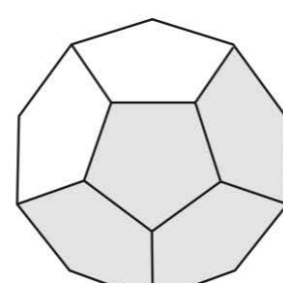
『宇宙の神秘』(1596年)に描かれたケプラーによる初期の多面体太陽系モデル



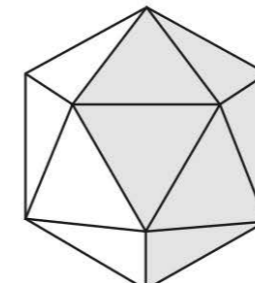
立方体



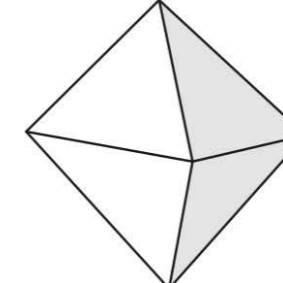
正4面体



正12面体

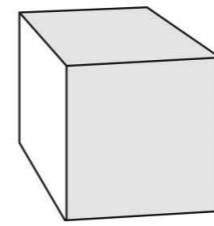
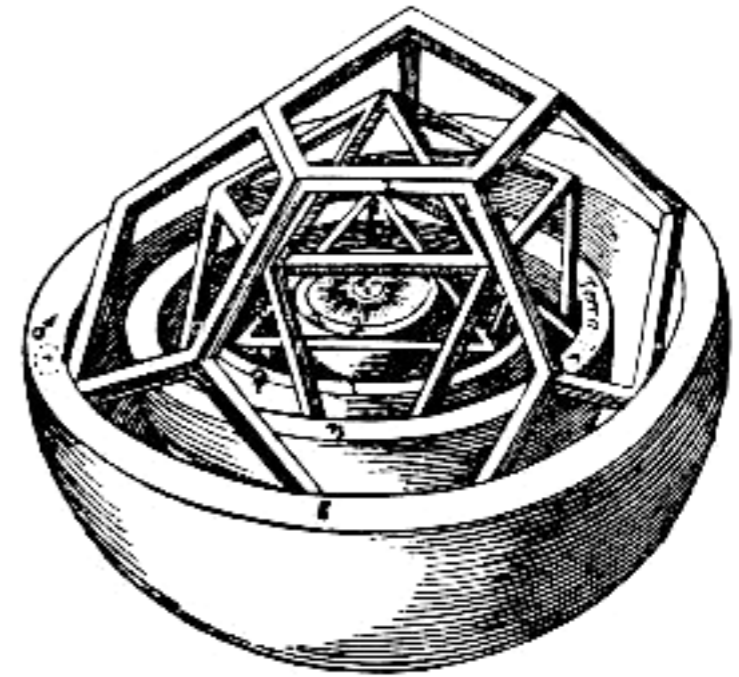
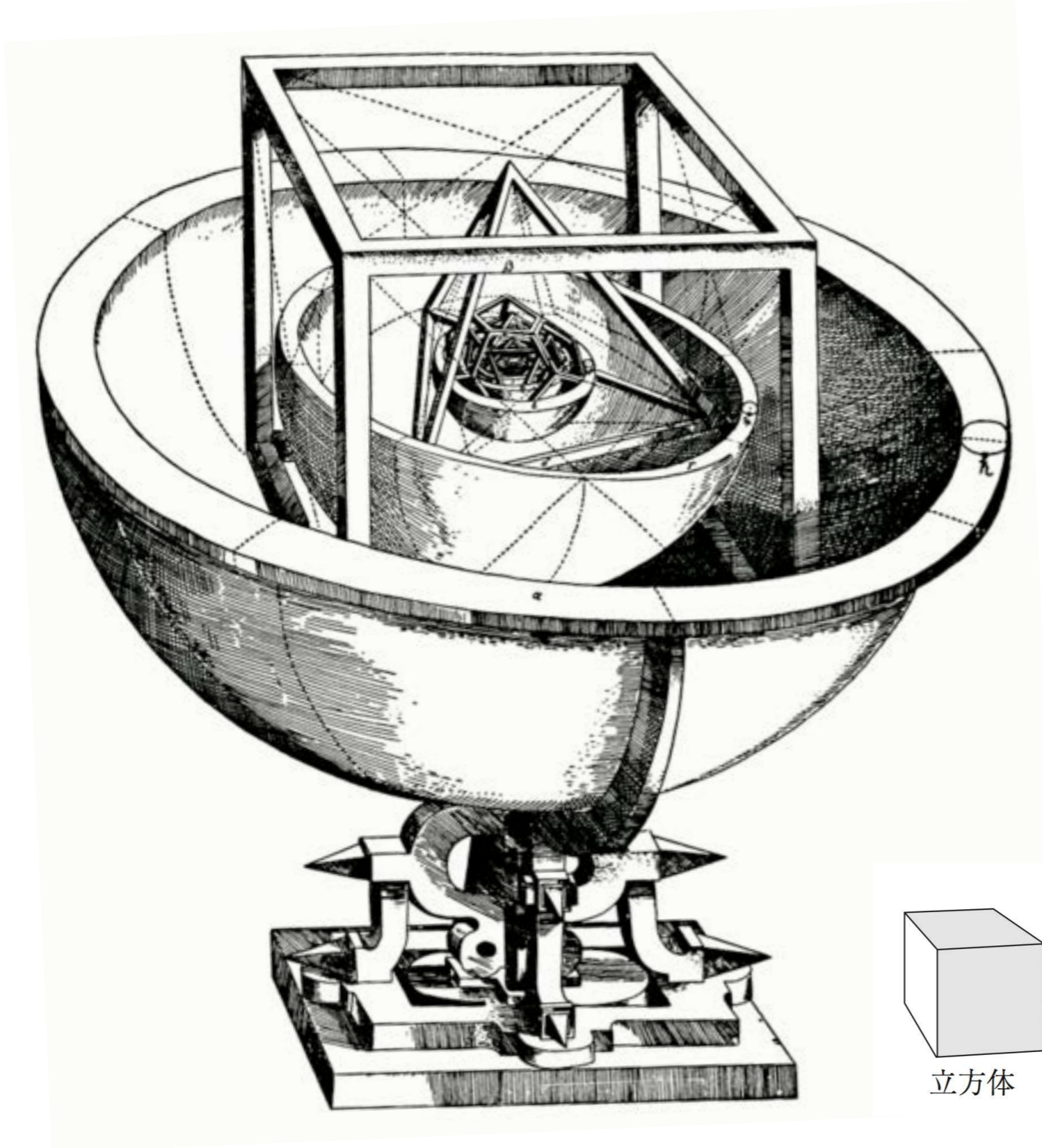


正20面体

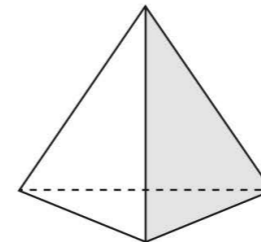


正8面体

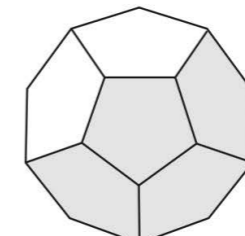
Kepler's Platonic solid model of the Solar system from *Mysterium Cosmographicum* (1600)



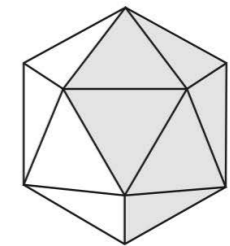
立方体



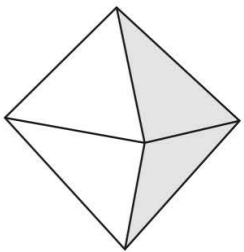
正 4 面体



正 12 面体

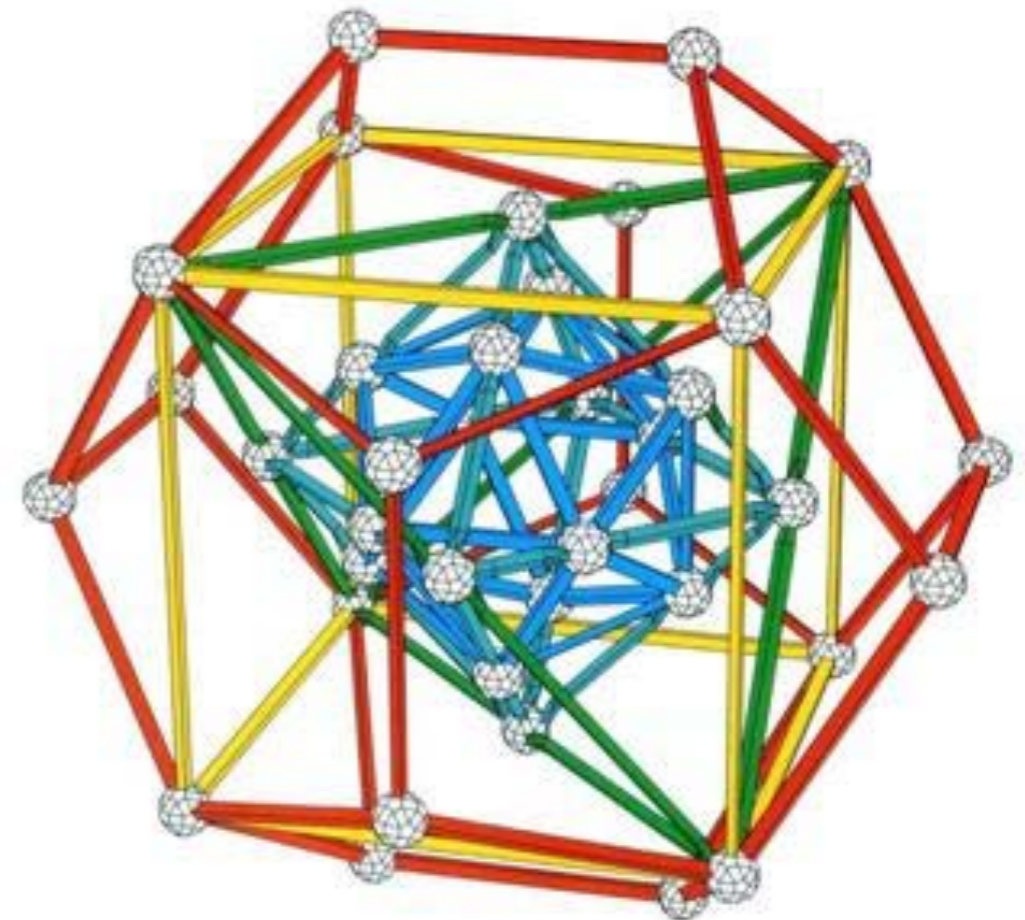
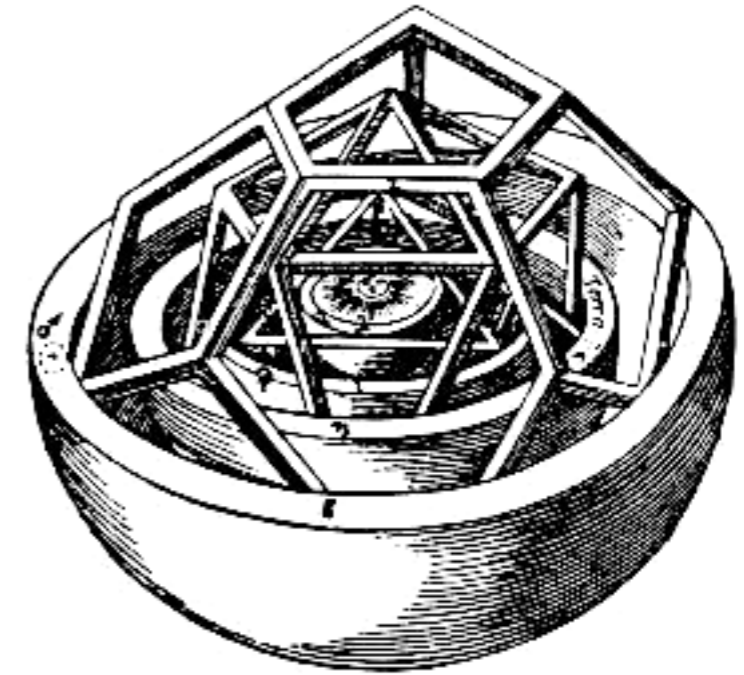
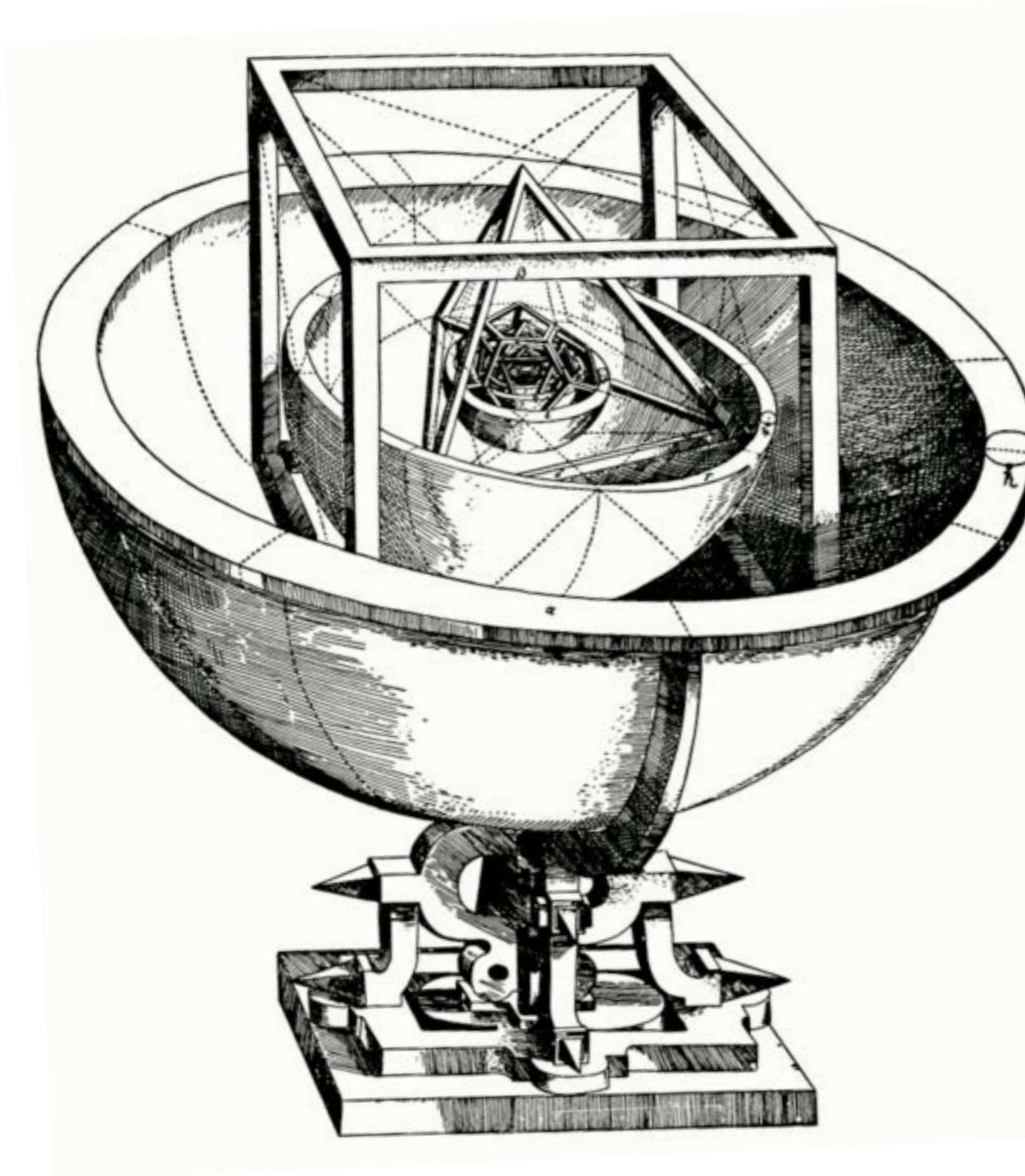


正 20 面体



正 8 面体

Kepler's Platonic solid model of the Solar system from *Mysterium Cosmographicum* (1600)



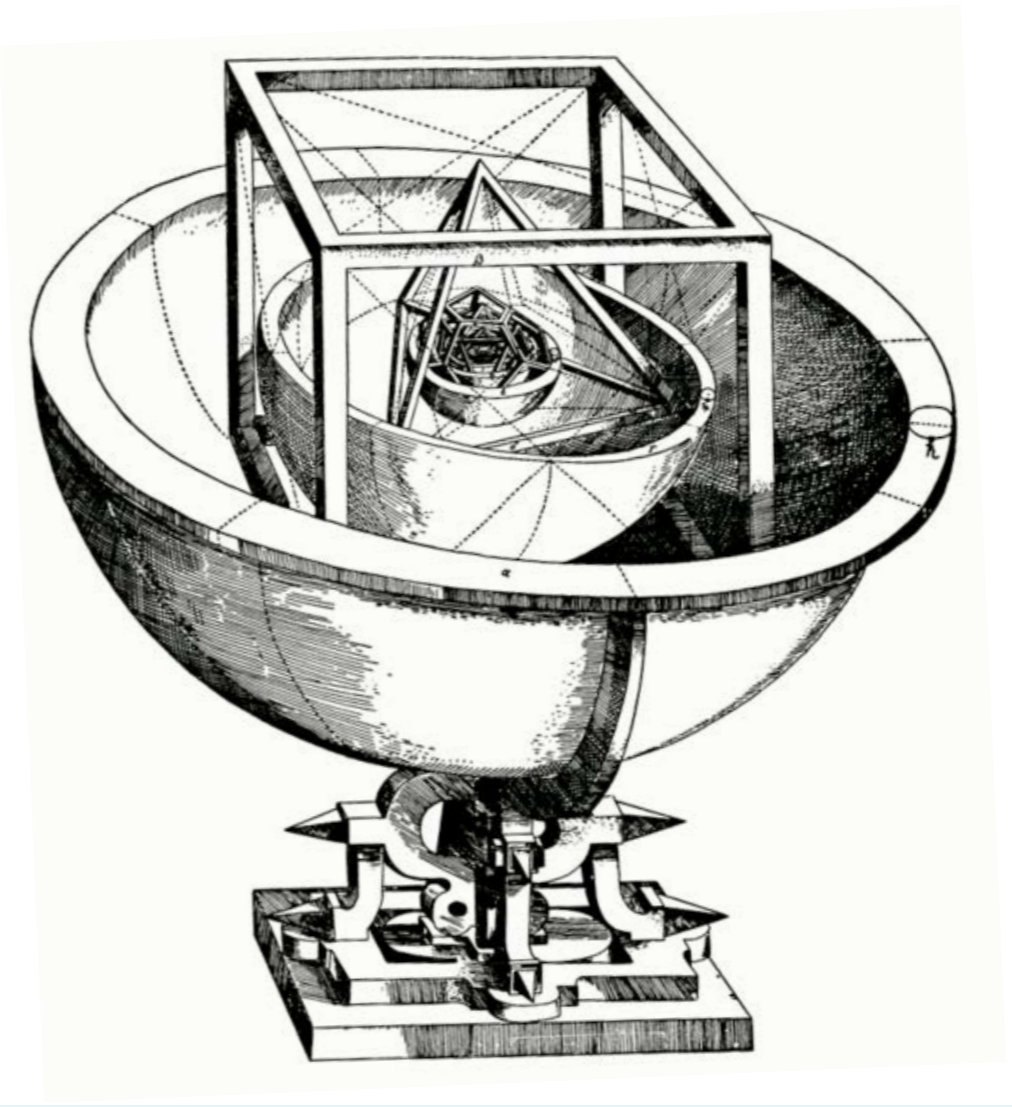
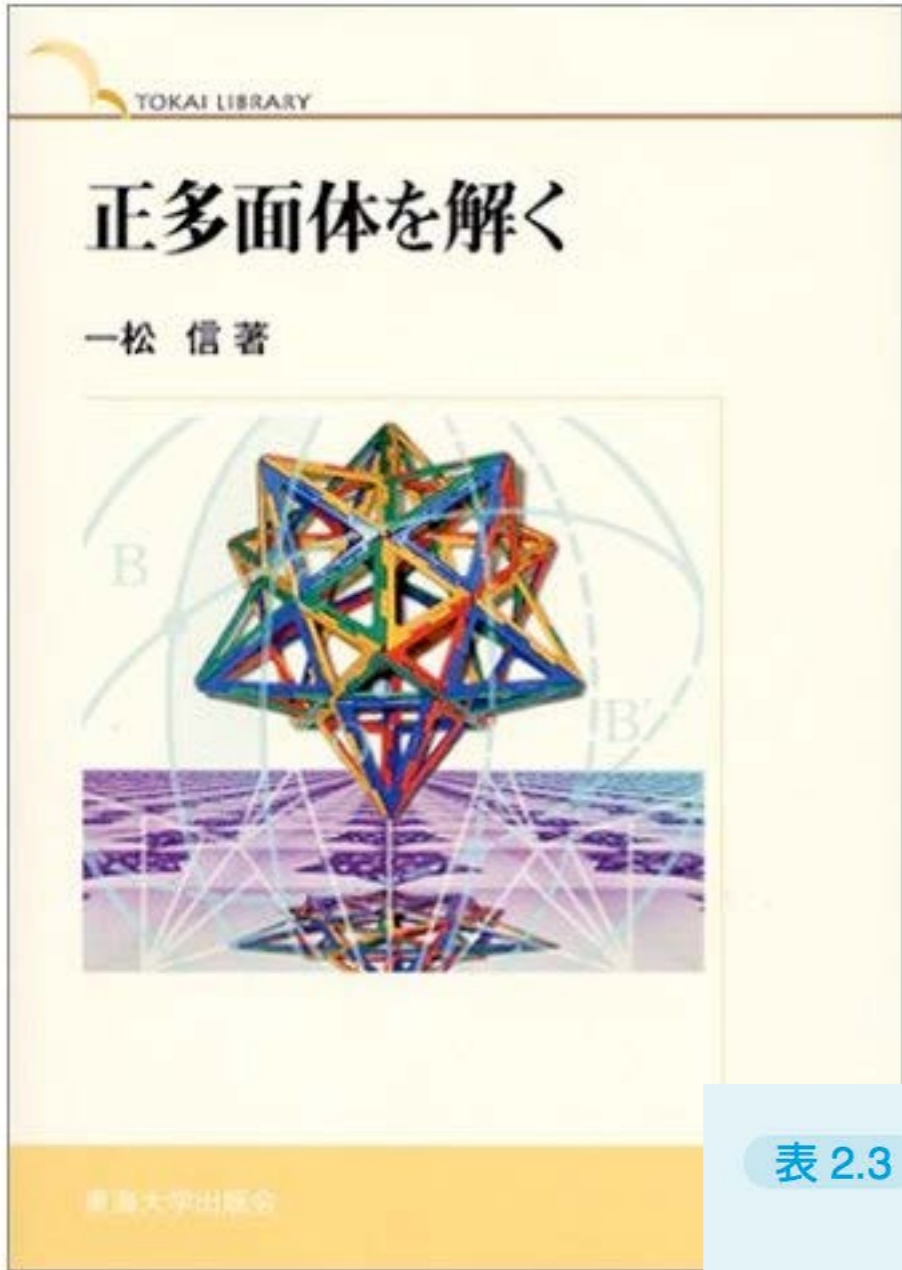


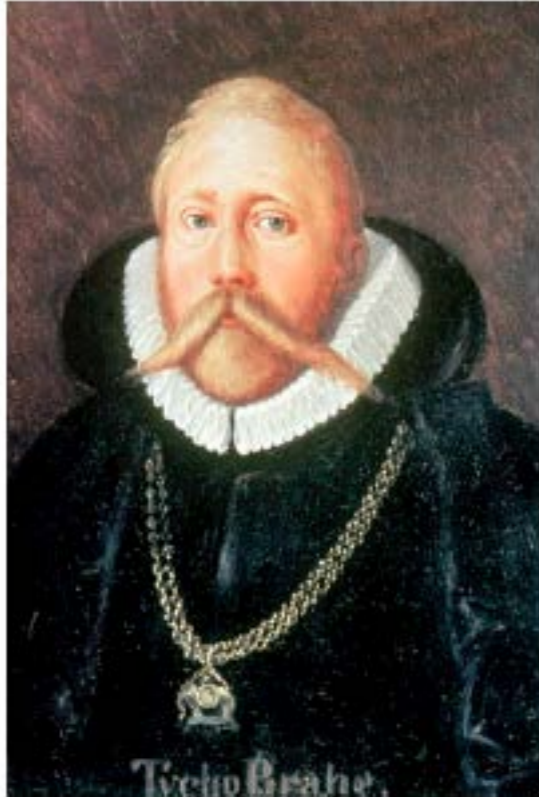
表 2.3 惑星軌道半径の比と，正多面体の間に球を挟んで積み上げた太陽系モデルの半径比

惑星	軌道半径	軌道半径の比	正多面体モデルの比
水星	0.3871	> 1.8685	1.73205 正 8 面体
金星	0.7233	> 1.3825	1.25841 正 20 面体
地球	1.0000	> 1.5237	1.25841 正 12 面体
火星	1.5237	> 3.4146	3 正 4 面体
木星	5.2028	> 1.8334	1.73205 立方体
土星	9.5388		

(参考：一松信著『正多面体を解く』（東海大学出版会)）

ティコ・ブラーエ

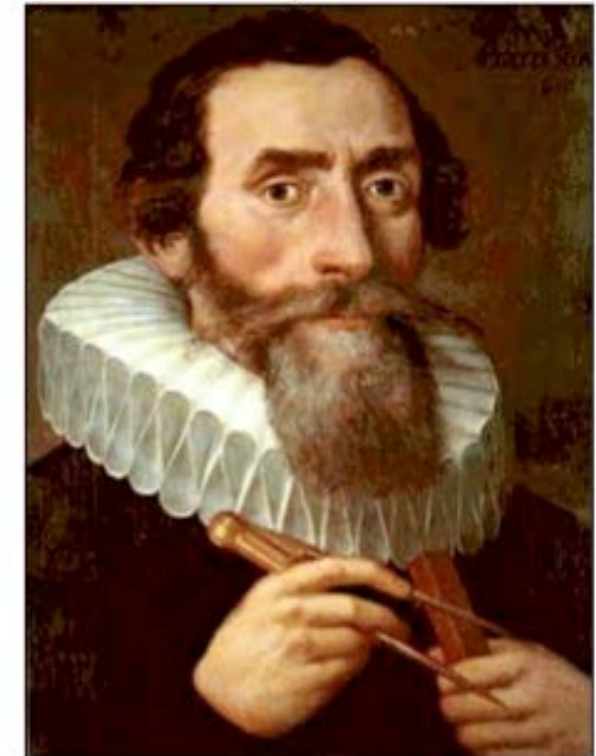
Tycho Brahe
(1546-1601)



君は火星の担当

ヨハネス・ケプラー

Johannes Kepler
(1571-1630)



ケプラーによる惑星の運動法則（1609年, 1619年）

第1法則 楕円軌道の法則

惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く。

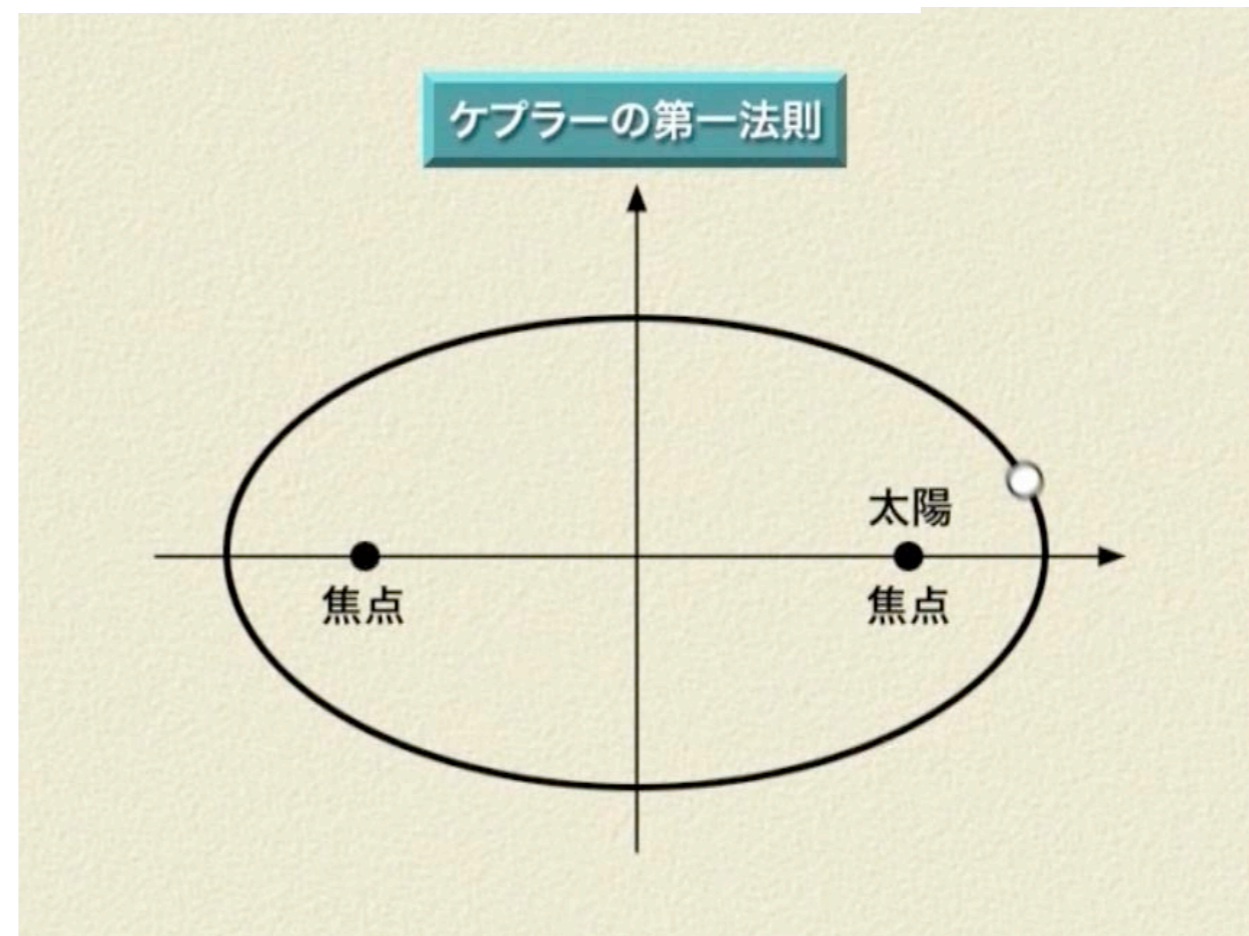
第2法則 面積速度一定の法則

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積（面積速度）は、惑星それぞれについて一定である。

第3法則 調和の法則

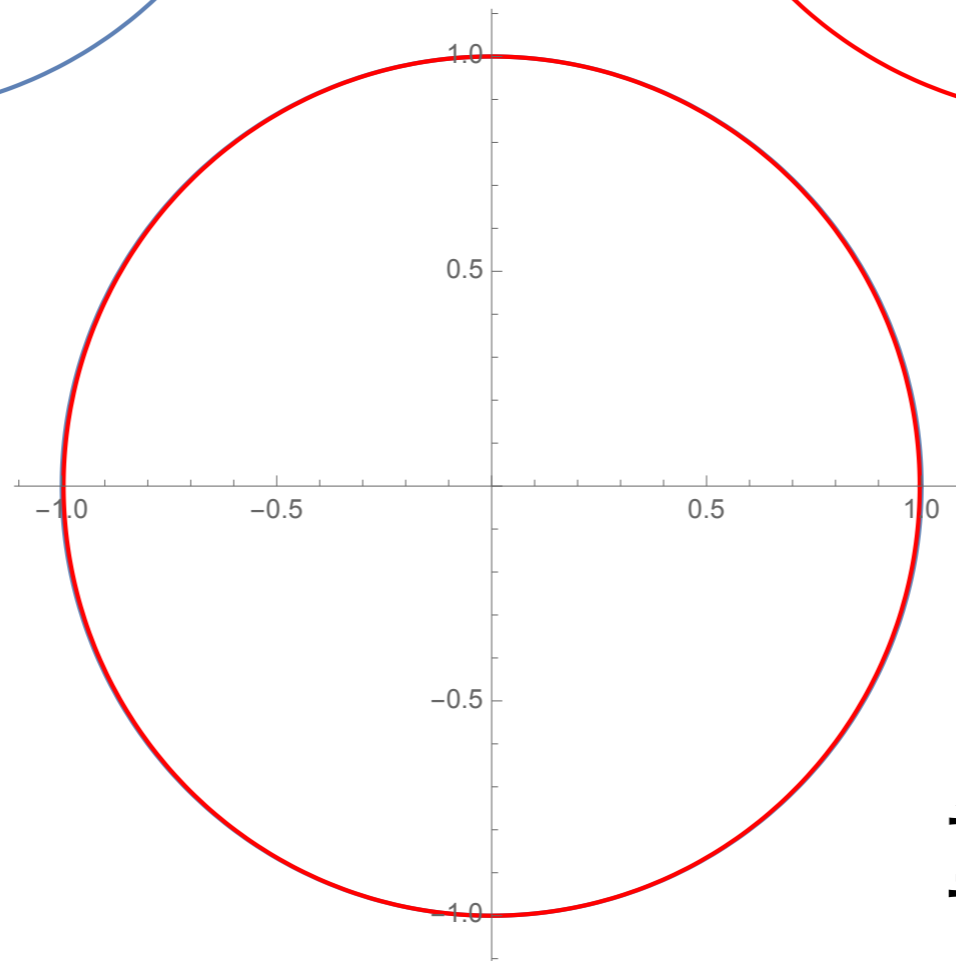
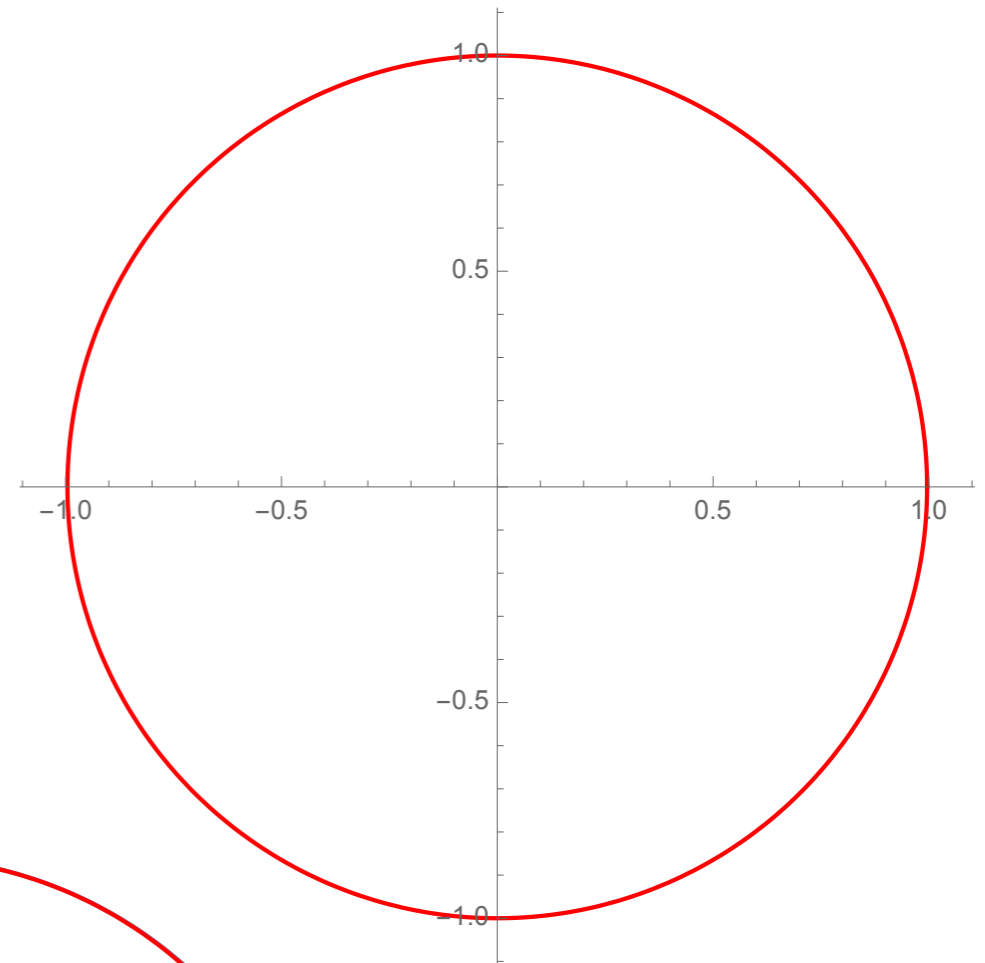
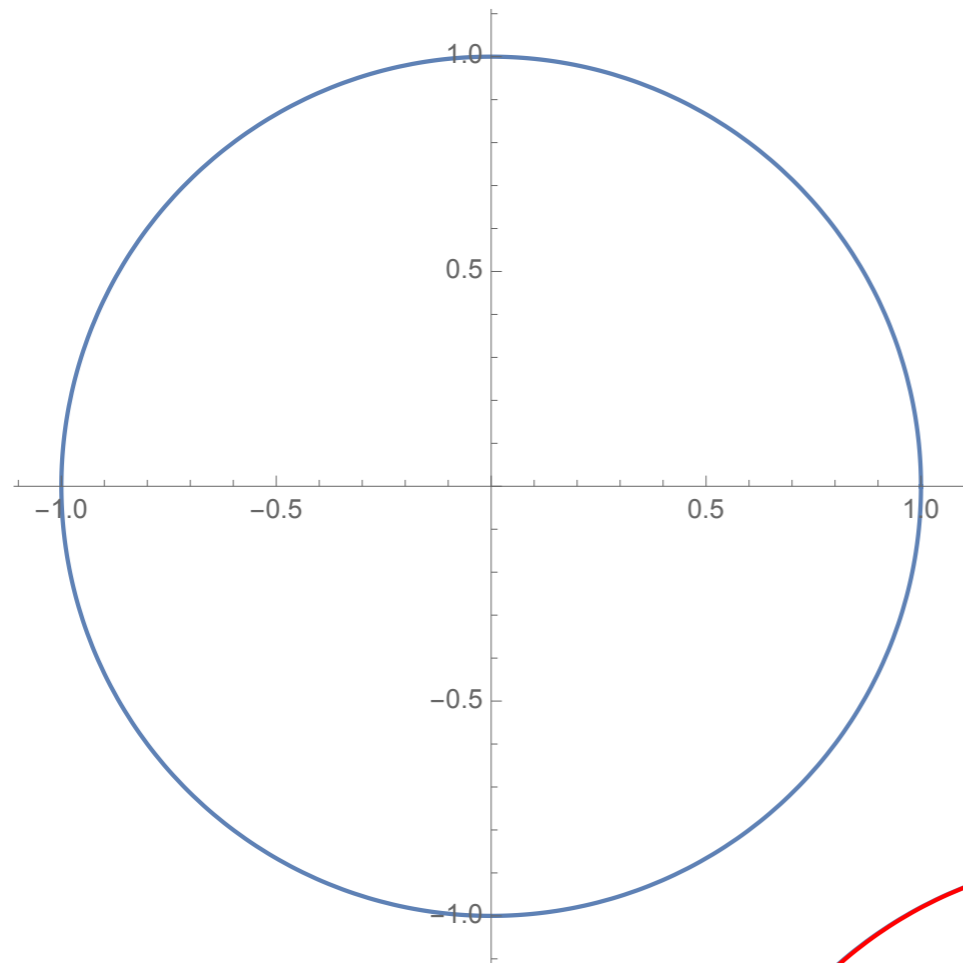
惑星の公転周期 T の2乗と、惑星の描く楕円の長軸半径（長軸の長さの半分） R の3乗の比 T^2/R^3 は、惑星によらず一定である。

Johannes Kepler
(1571-1630)



円

離心率0.09の円 (火星)



重ね合わせ

ケプラーによる惑星の運動法則 (1609年, 1619年)

第1法則 楕円軌道の法則

惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く。

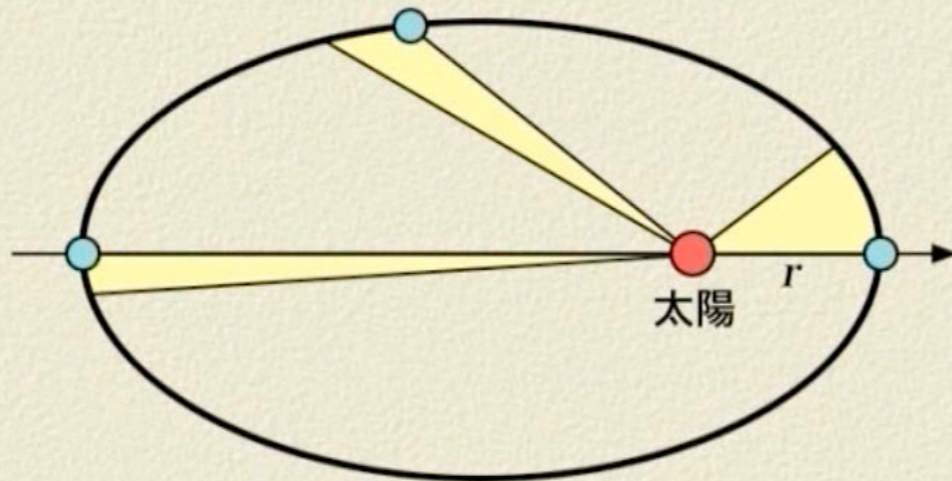
第2法則 面積速度一定の法則

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積(面積速度)は、惑星それぞれについて一定である。

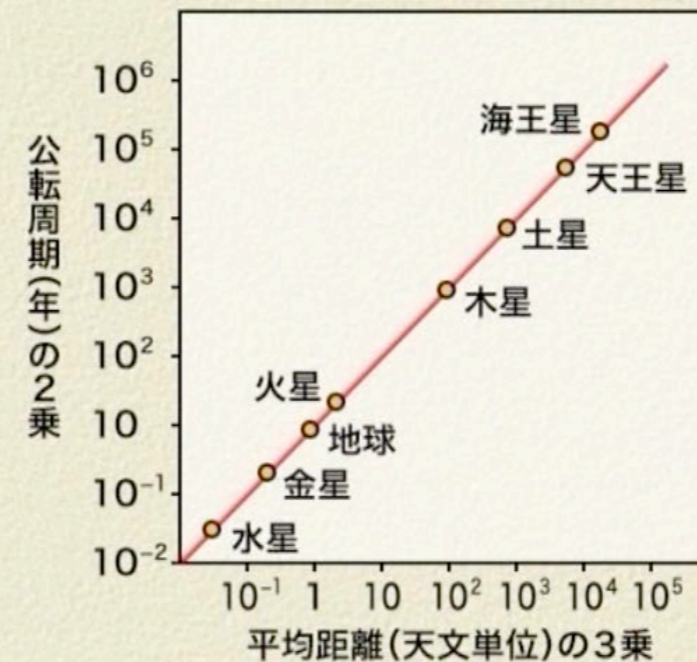
第3法則 調和の法則

惑星の公転周期 T の2乗と、惑星の描く楕円の長軸半径(長軸の長さの半分) R の3乗の比 T^2/R^3 は、惑星によらず一定である。

ケプラーの第二法則



ケプラーの第三法則

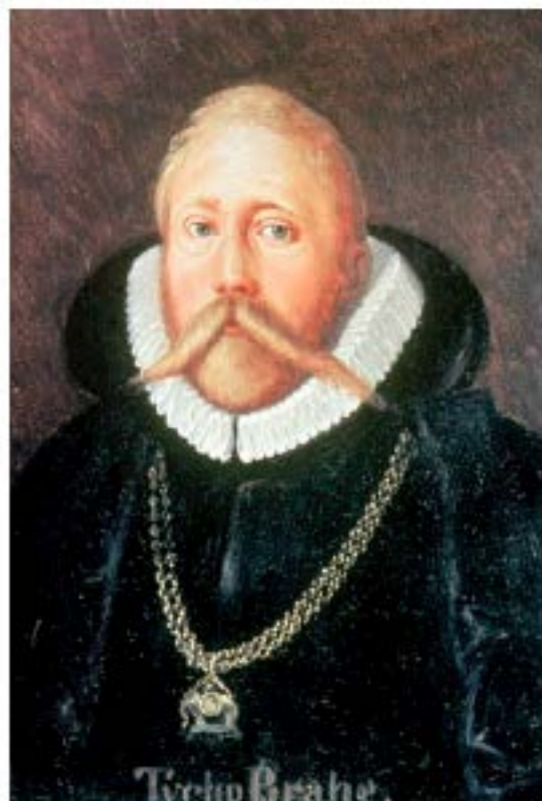


ケプラーの3法則から 万有引力の法則へ

数物教材ビデオ (10分)

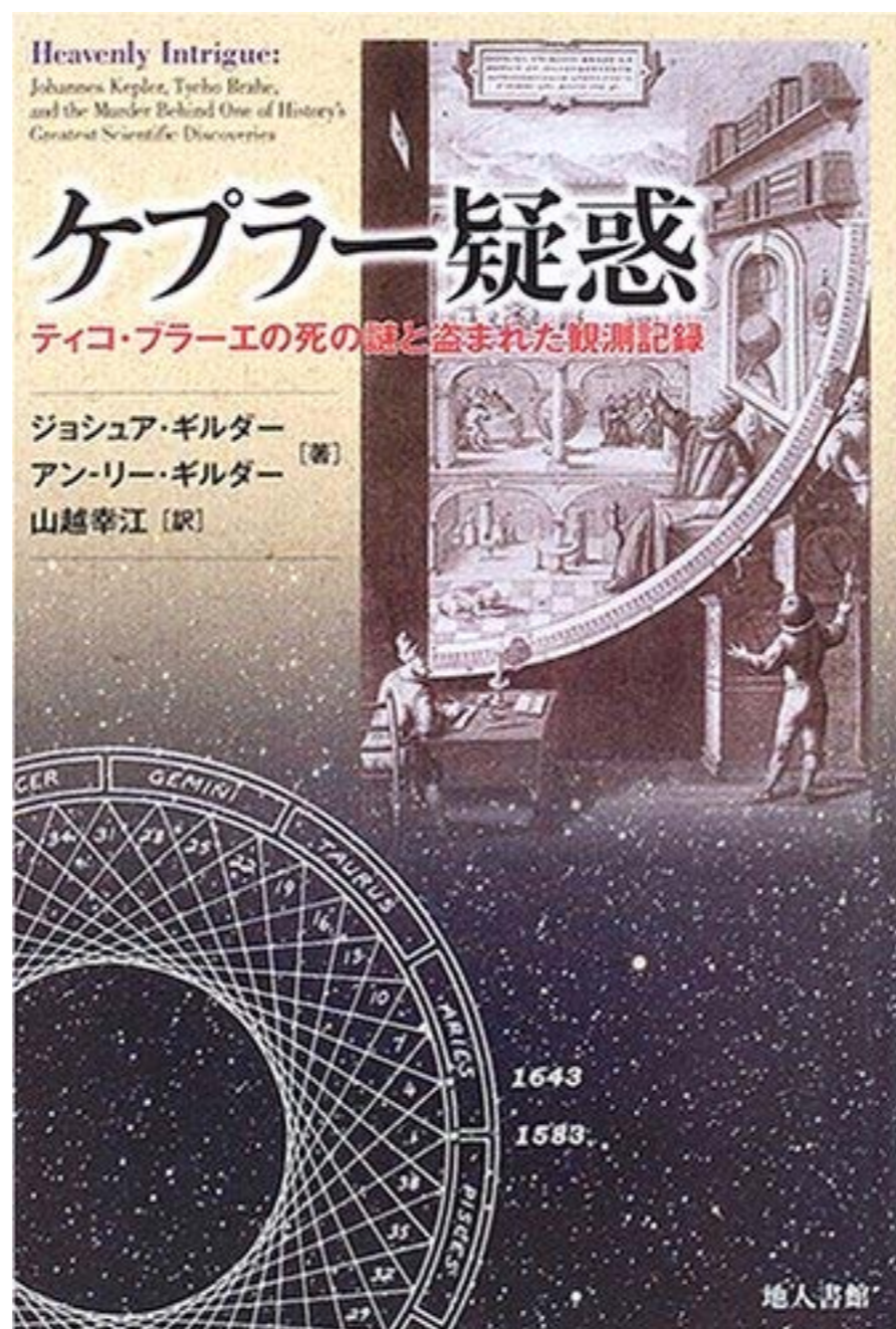
ティコ・ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



ヨハネス・ケプラー

Johannes Kepler
(1571-1630)





『アレクサンドリア』 (2009)
(原題: Ágora)

Hypatia
ヒュパティア (350-70?--415)





『アレクサンドリア』 (2009)

(原題: *Ágora*)

ケプラーによる惑星の運動法則 (1609年, 1619年)

第1法則 楕円軌道の法則

惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く。

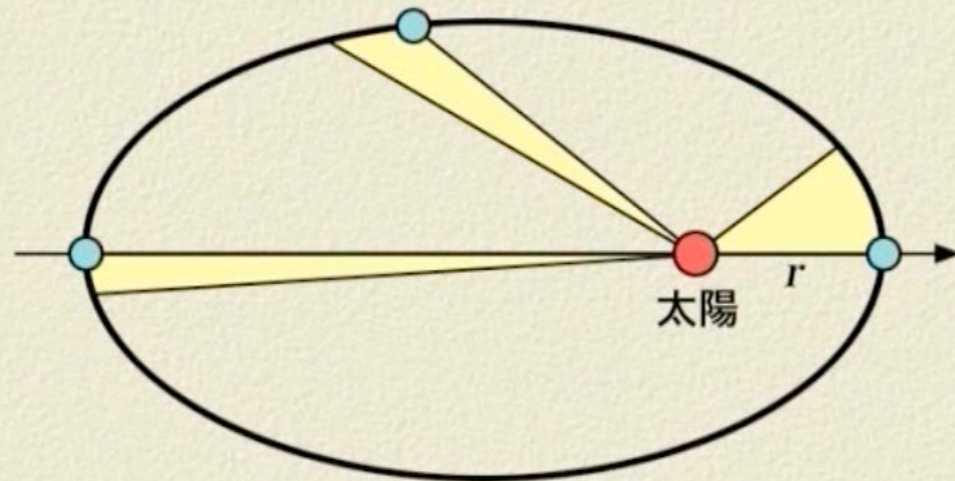
第2法則 面積速度一定の法則

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積(面積速度)は、惑星それぞれについて一定である。

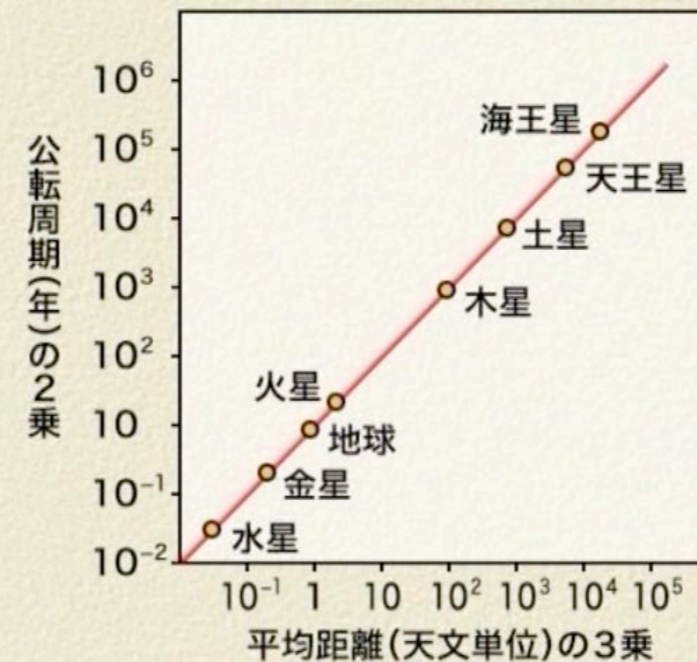
第3法則 調和の法則

惑星の公転周期 T の2乗と、惑星の描く楕円の長軸半径(長軸の長さの半分) R の3乗の比 T^2/R^3 は、惑星によらず一定である。

ケプラーの第二法則



ケプラーの第三法則

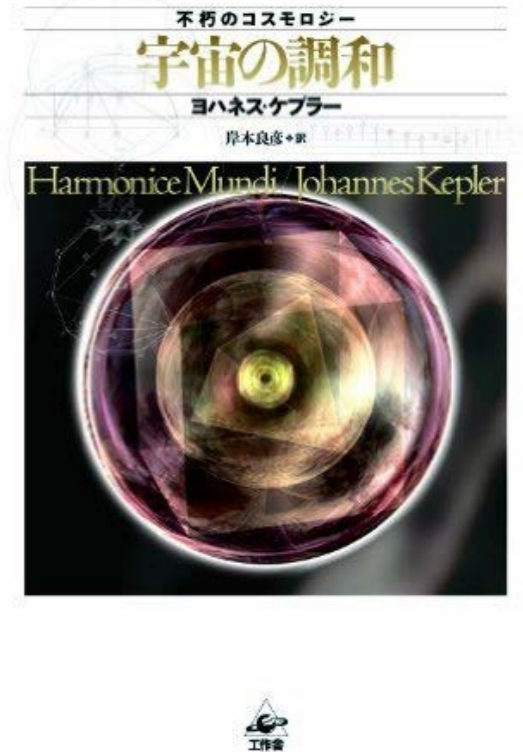


宇宙の調和 (Kepler, 1619)

正確な日付を求めるなら、この本当の比は、今年1618年3月8日に思い付いた。ところが、いざ計算してみると不運にもうまく行かなかったもので、いったんは誤りとして斥けた。結局、5月15日にそれが戻ってきて、新たなはずみをつけて私の知性の闇を一掃した。ブラーエの観測結果に取り組んだ私の17年間にわたる労力と現在のこの思索との一致をみごとに確認したので、初めは、夢を見ていて、求めた結果をあらかじめ前提の中に入れていた[論点先取の虚偽を犯している]ように思ったほどである。しかし、事柄は非常に確実に正確である。⑤ 2惑星の公転周期の比は、正確に平均距離つまり軌道そのものの比の2分の3乗になる[つまり、 $t^2 : T^2 = r^3 : R^3$]^{*034}。ただし、^{*}楕円軌道の長径と短径の算術平均は長径よりいくらか小さいことに注意する必要がある。

そこで、例えば地球の周期1年と土星の周期30年から得た比の3分の1乗つまり立方根を取り、この根を平方してその比の2乗を作れば、算出した数値に、太陽から地球と土星までの平均距離の非常に正しい比が得られる。すなわち、1の立方根は1で、その平方は1である。30の立方根は3より大きく、したがってその平方は9より大きい。実際、土星は太陽からの平均距離が太陽から地球までの平均距離の9倍よりいくらか高い。第9章で、離心値を明らかにするためにこの定理を用いる必要がある。

p424



perihelion of the lower. Therefore again, a certain part of my *Mysterium Cosmographicum*, which was suspended twenty-two years ago, because it was not yet clear, is to be completed and herein inserted. For after finding the true intervals of the spheres by the observations of Tycho Brahe and continuous labour and much time, at last, at last the right ratio of the periodic times to the spheres

*though it was late, looked to the unskilled man,
yet looked to him, and, after much time, came,*

and, if you want the exact time, was conceived mentally on the 8th of March in this year One Thousand Six Hundred and Eighteen but unfortunately submitted to calculation and rejected as false, finally, summoned back on the 15th of May, with a fresh assault undertaken, outfought the darkness of my mind by the great proof afforded by my labor of seventeen years on Brahe's observations and meditation upon it uniting in one concord, in such fashion that I first believed I was dreaming and was presupposing the object of my search among the principles. But it is absolutely certain and exact that *the ratio which exists between the periodic times of any two planets is precisely the ratio of the $\frac{3}{2}$ th power of the mean distances, i.e., of the spheres themselves*, provided, however, that the arithmetic mean between both diameters of the elliptic orbit be slightly less than the longer diameter. And so if any one take the period, say, of the Earth, which is one year, and the period of Saturn, which is thirty years, and extract the cube roots of this ratio and then square the ensuing ratio by squaring the cube roots, he will have as his numerical products the most just ratio of the distances of the Earth and Saturn from the sun.¹ For the cube root of 1 is 1, and the square of it is 1; and the cube root of 30 is greater than 3, and therefore the square of it is greater than 9. And Saturn, at

1.5 ガリレイによる地動説の支持

ガリレオ・ガリレイ

Galileo Galilei
(1564-1642)



望遠鏡をつかって天体観測
自由落下の法則を発見
振り子の周期の法則を発見
地動説に関する本を出版



1.5 ガリレイによる地動説の支持

斜面に球を置いて手をはなすと、球は加速しながら転がり落ちる。斜面の角度を急にすれば加速は一層速くなる。一方で斜面上向きにボールを放つとボールは減速してゆく。この場合も減速は斜面の角度に依存する。それでは、水平面ならば、ボールはどのように動くだろうか。—加速も減速もせず、そのままの運動を保ち続けると考えるのが自然である。（『天文対話』1632年）

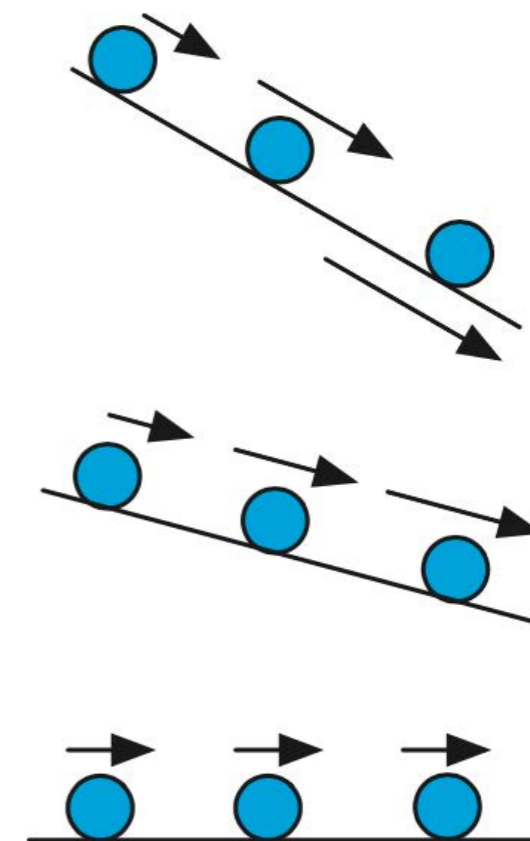


図 2.16 斜面の角度を小さくすれば、加速が少なくなる。傾きゼロでは等速運動となるはずだ。

慣性の法則

= ニュートンの運動第1法則

力を加えなければ、

物体はそのままの運動状態を保つ

ミニッツペーパーから

授業とは関係ないのでは、

電車の中で飛んでいる蚊は、

電車と同じ速度で並走して飛んでいるのでしょうか？

1.5 ガリレイによる地動説の支持

地動説への批判

『地球が動いていたら、人間は気がつくはずだ』に対して

動いている船のマストの上から真下に石を落とすと、石はマストの足元に落下する。これは、慣性の法則により、石も船と同じ速さで水平方向にも動き続けるからである。したがって、足元に落下したからといって、船が動いていないとは言い切れない。同じように、地球が運動していたとしても、目にする身近な運動現象に特別な異変が生じるわけではない。（『天文対話』）

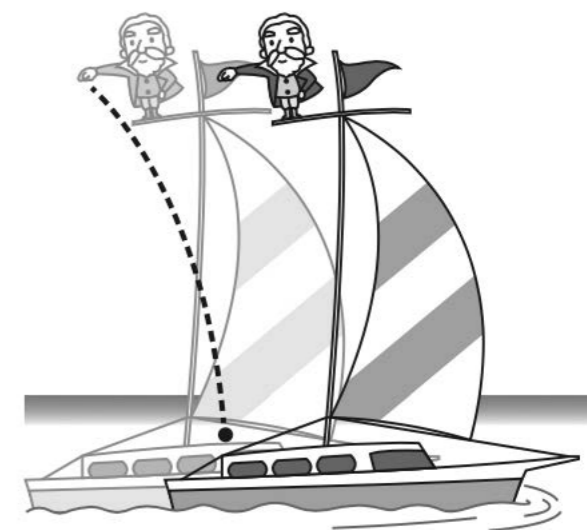
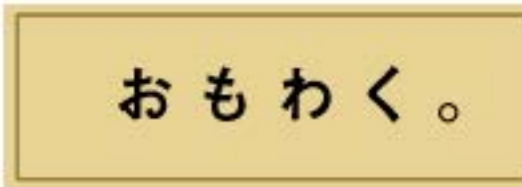
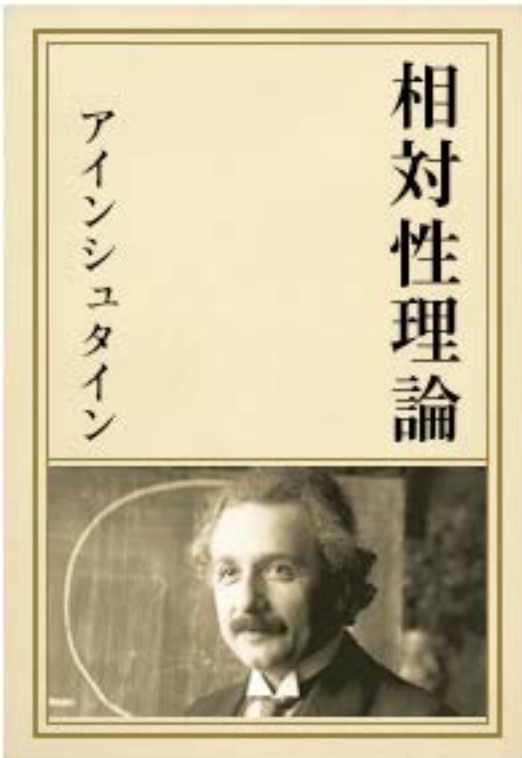
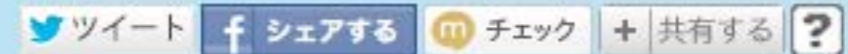


図 2.17 等速で動いている船であっても、マストから落下した物体は、マストの下に落下する。

地球が運動していたとしても、
慣性の法則により、我々は気づかない。
=> 地動説は否定できない。

名著17



第1回 11月7日放送

光の謎を解き明かせ!

第2回 11月14日放送

時間と空間は縮む



アインシュタイン『相対性理論』

20世紀初頭に発表されたアインシュタインの相対性理論。物理学の革命と言われ、時間と空間の概念を一新するとともに、原子力開発にも結びついた、この偉大な論文を知らない人はいないでしょう。

しかし相対性理論とはどのようなものなのか、正確に答えられる人はほとんどいません。難解な十元連立方程式など、理解するには高度の数学知識が必要となるからです。

しかし実は、比較的簡単にその理論を説明することもできます。アインシュタインが得意とした「思考実験」という方法を用いることです。思考実験とは、「光に近い速度で宇宙船が飛行しているとしたら、その内部で何が起きるか」といった、実現不可能な想像上の実験のことです。

そこで11月の「100分 de 名著」では、スペシャル企画として、アニメーションやコンピューターグラフィックスを駆使して様々な思考実験を行いながら、相対性理論を読みときます。番組を見れば、数学や科学の知識がなくても、そのエッセンスが手に取るようになります。

ロマンあふれる「相対性理論」の不思議な世界を、どうぞお楽しみ下さい。

▲ ページ先頭へ



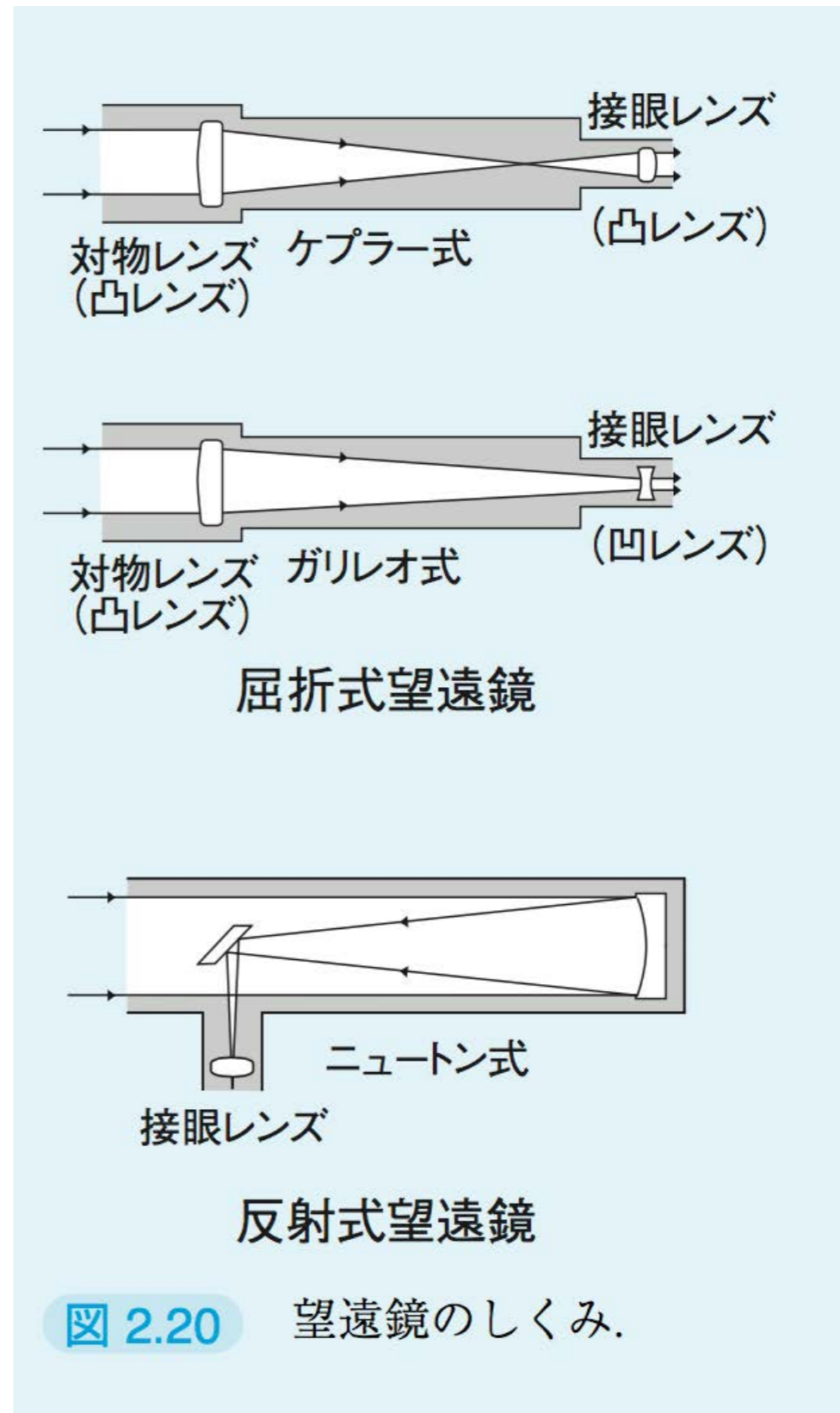
相対性原理とは

NHK 100分de名著 (2012年)

ガリレイ：天体望遠鏡による天体観測



倍率20--30倍

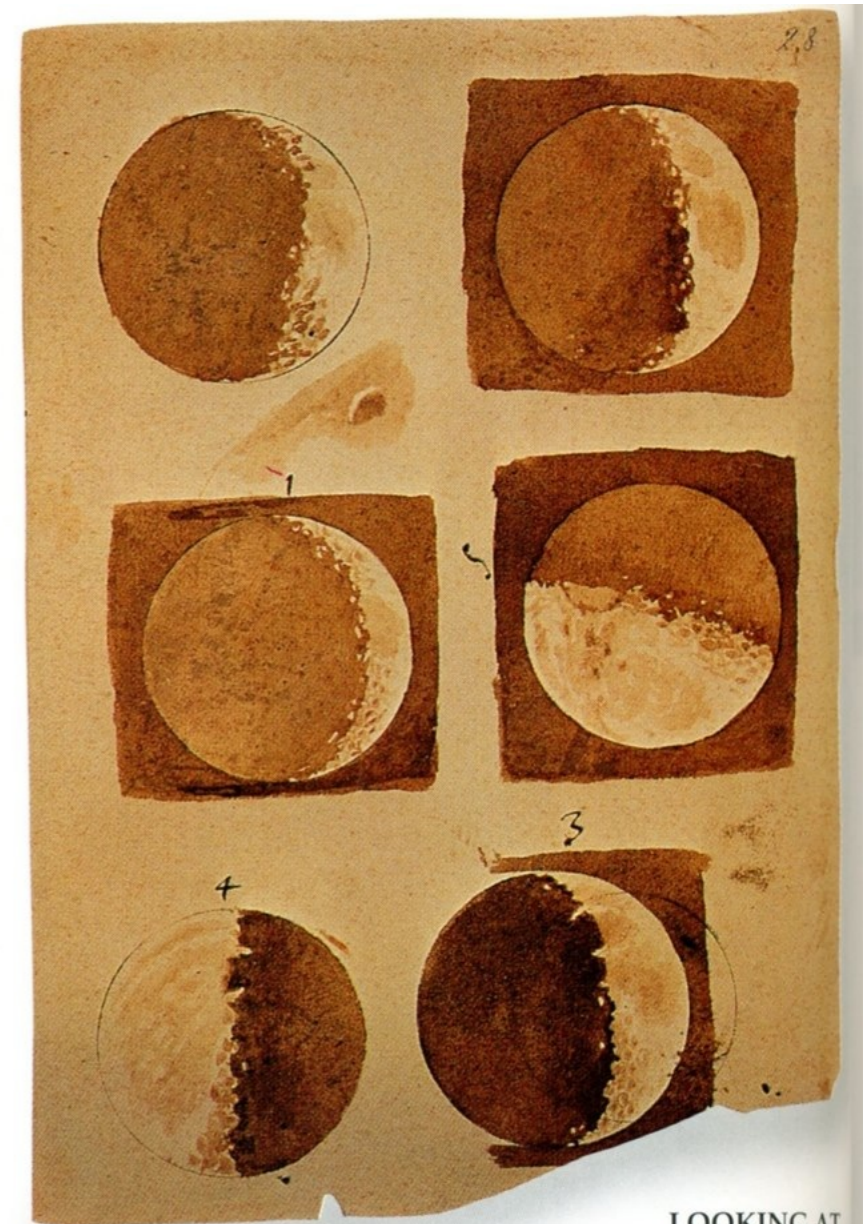


ガリレイ：「月の表面はでこぼこ」の発見

月の表面は、これまで多くの哲学者が主張しているような、滑らかで一様な、完全な球体なのではない。起伏にとんだ凹みや隆起がいたるところにあり、山や谷によって刻まれた地球と何の変わりもない。（『星界の報告』1610年）

=> 月は地球と同じくでこぼこ

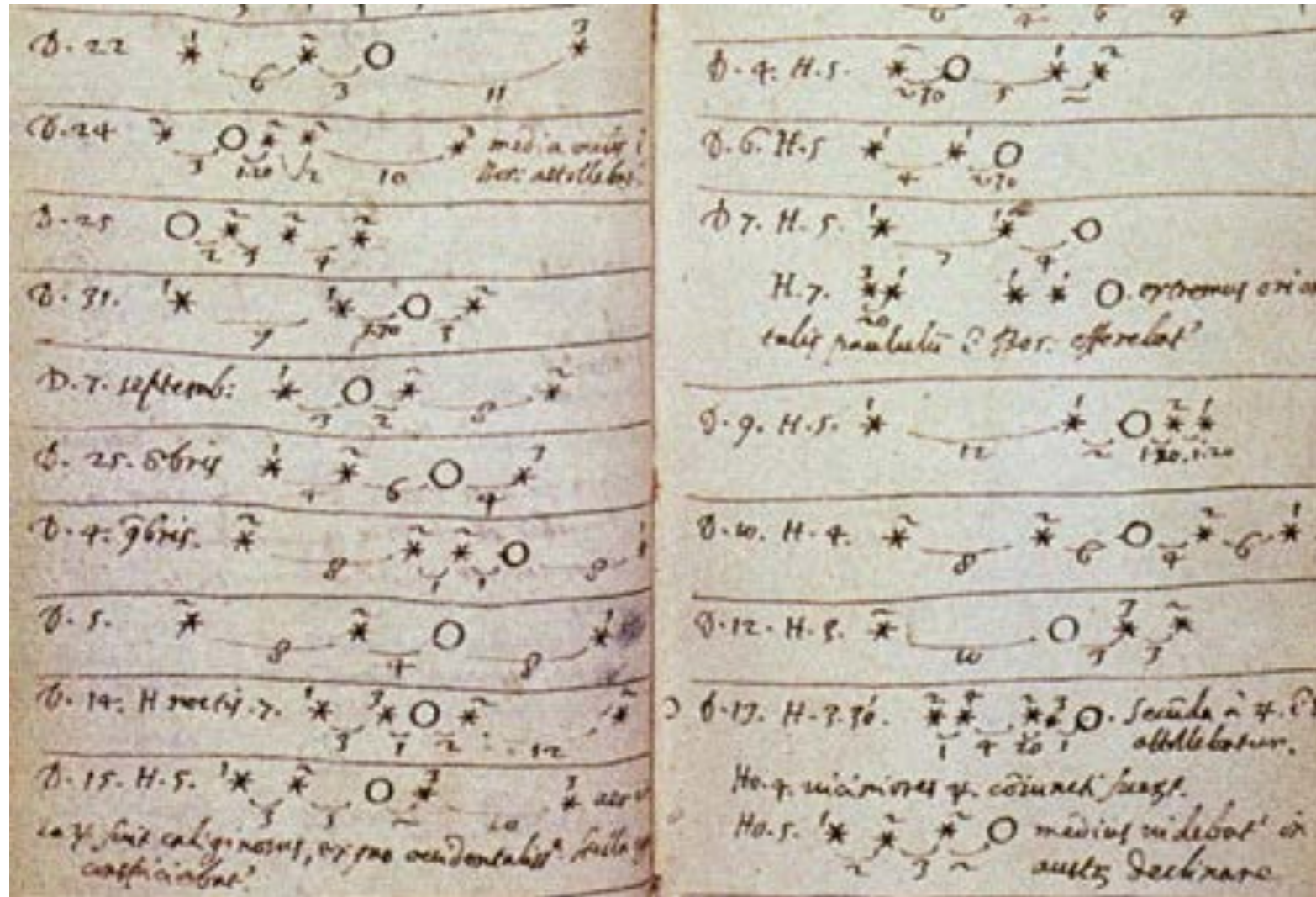
=> 「神が造った」は×



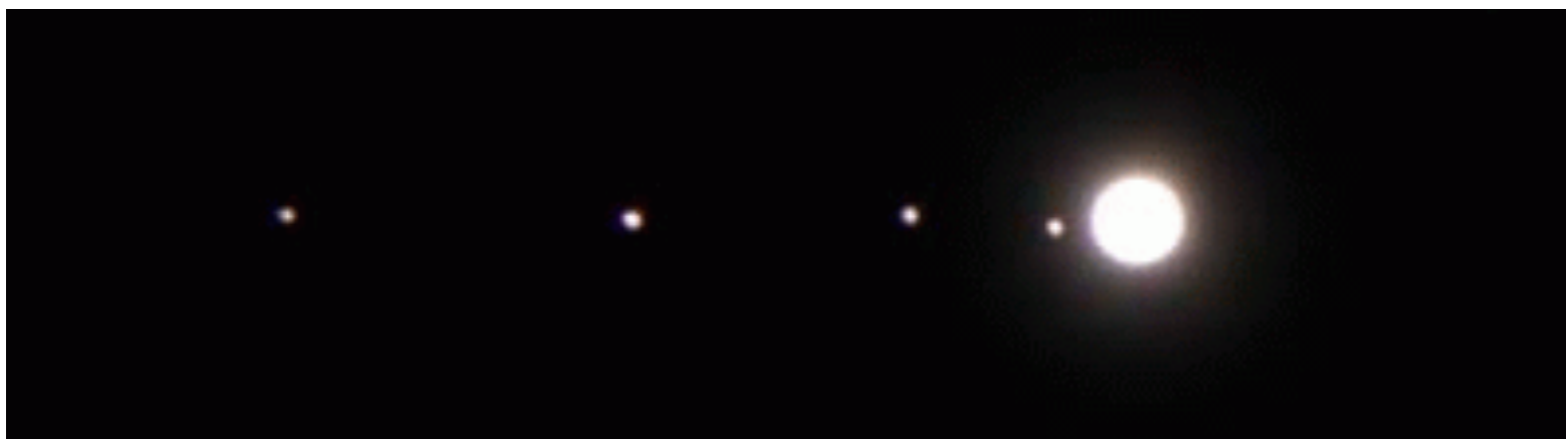
LOOKING AT
THE MOON'S SURFACE

Through his telescope, Galileo measured the shadows on the Moon to show how the mountains there were much taller than those on Earth. These ink sketches were published in his book *Sidereus nuncius*, "Messenger of the Stars", in 1610.

ガリレイ：「木星には衛星が4つ」発見



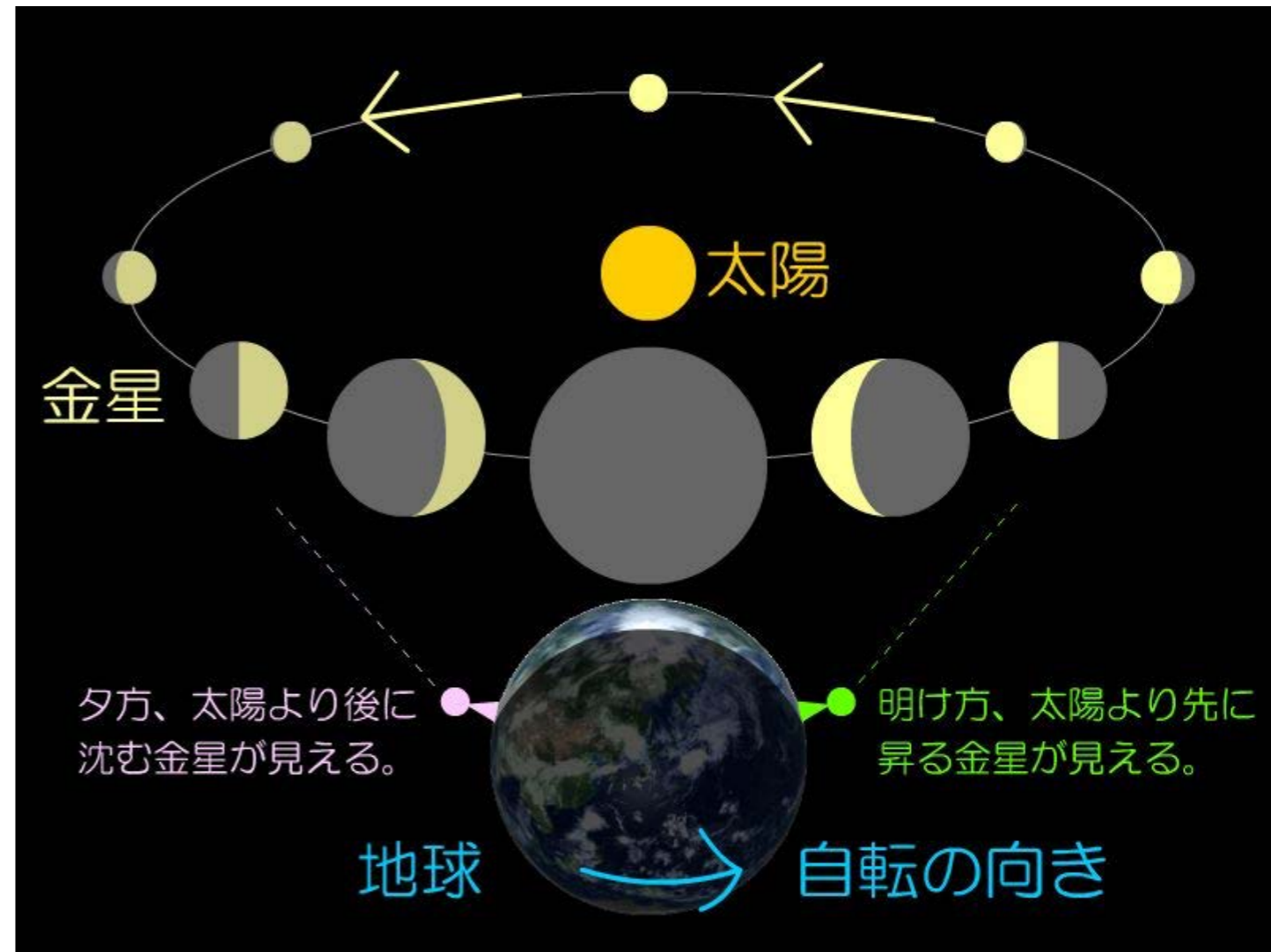
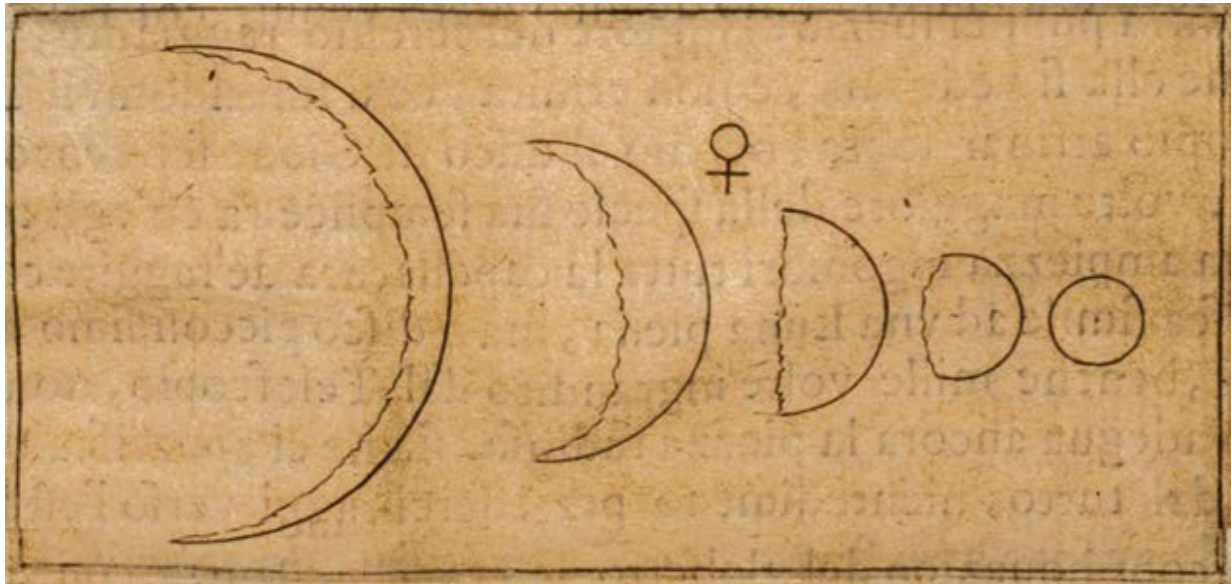
=> 太陽系もこんな形



イオ
 エウロパ
 ガニメデ
 カリスト

現在79個

ガリレイ：「金星の満ち欠け」発見



=> 太陽を中心に惑星がまわる証拠

1.6 ニュートンによる運動法則の確立

アイザック・ニュートン

Isaac Newton
(1642–1727)



運動の基本法則を確立

万有引力の法則で惑星運動を説明

微分・積分の計算を発明

ニュートン：リンゴはなぜ落ちる？



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>

ニュートン : 万有引力の法則



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>

万有引力の法則

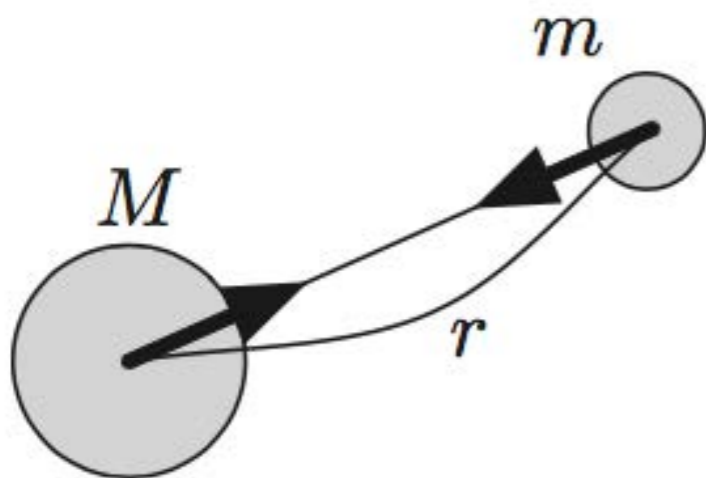
すべてのものは、引力で引き合う

◆ Advanced 万有引力の法則

質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

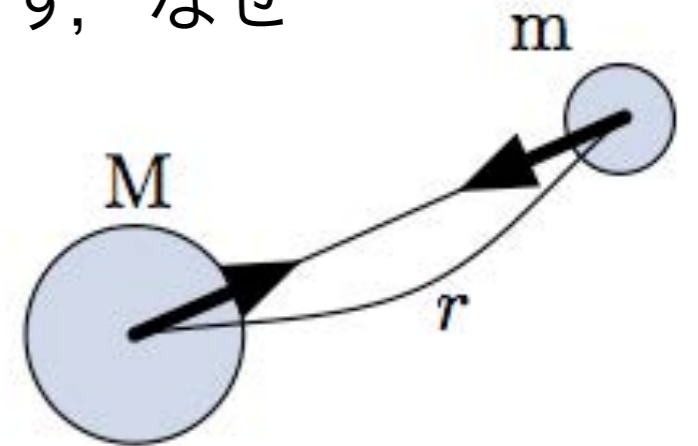
$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.2)$$

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。

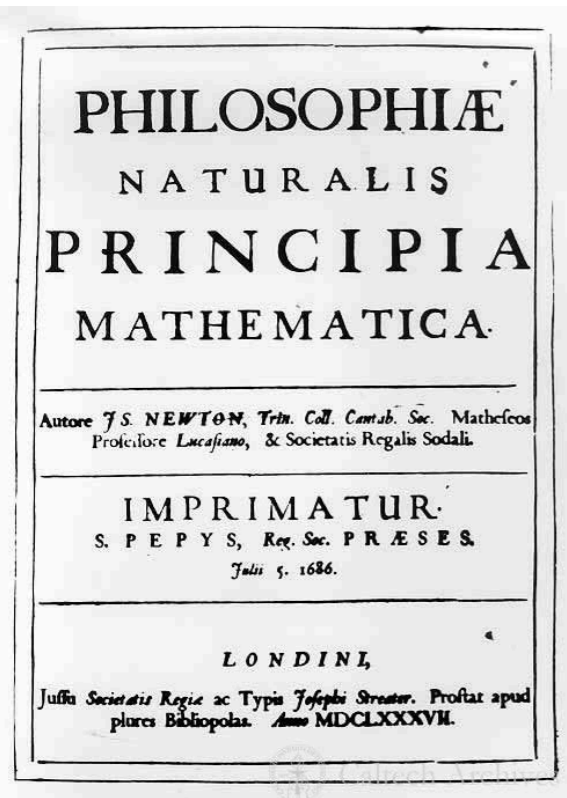


なぜ月は地球に落下してこないのか

万有引力を考えると、すべての物体は近づいてゆくように思える。地球と月も万有引力で引っ張り合っているのにも関わらず、なぜ月が地球に落下してこないのだろうか。



ニュートン : 運動の基本法則



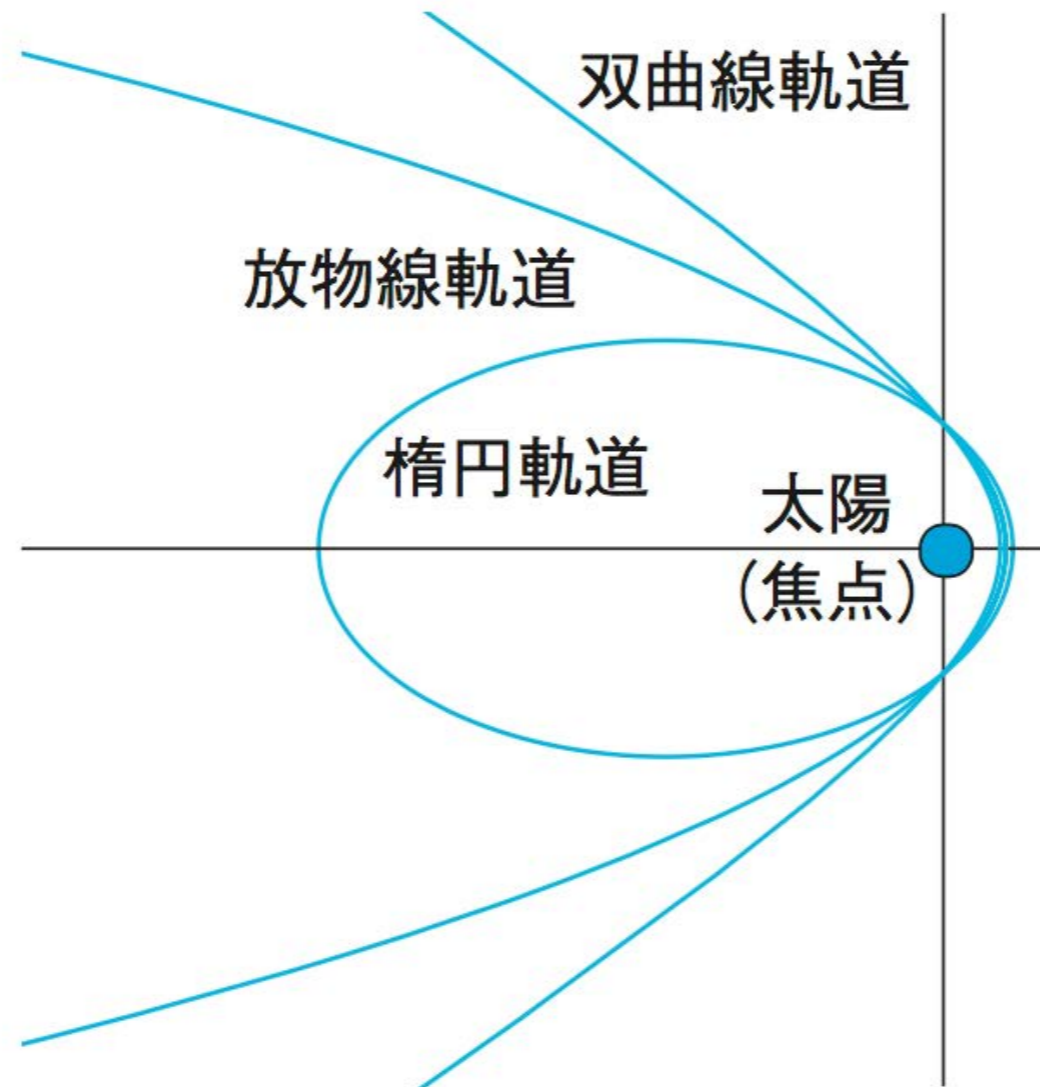
ニュートンの運動法則 (1687年)

- 第1法則 慣性の法則
力を加えなければ，物体は等速直線運動を行う。
- 第2法則 運動方程式
物体に力 F を及ぼすと，物体の質量 m に反比例した加速度 a が生じる。
- 第3法則 作用反作用の法則
物体に力 F を及ぼすと，その物体は同じ大きさで逆向きの反作用 $-F$ を作用物体に及ぼす。

第2法則とされた運動方程式は式で書くと，

$$F = ma \quad (2.3)$$

万有引力の法則 + 運動方程式



太陽の重力圏にとどまるならば、
楕円運動するのが自然である。

ニュートンの運動法則から出てくる保存則 (1)

(A) 運動量保存則

衝突の前後では、全体の運動量は保存する。



$$\text{運動量} = \text{質量} \times \text{速度}, \quad p = m \times v$$

図 9: 氷の上で、太った人とやせた人がお互いに相手を押し出すと... ?

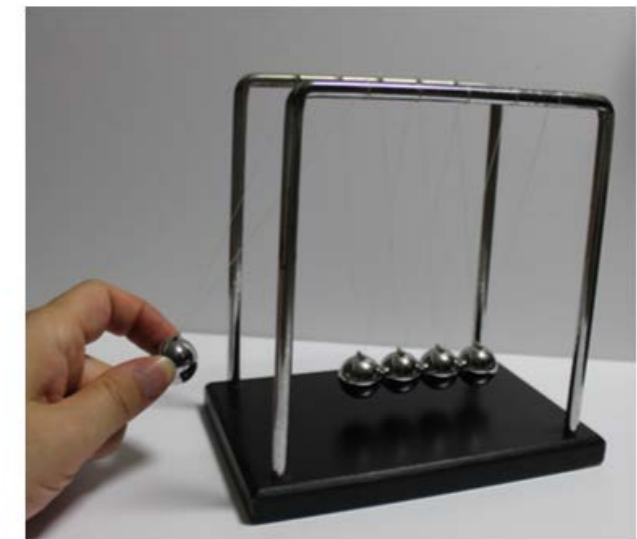


図 8: ニュートンのゆりかご

ニュートンの運動法則から出てくる保存則 (2)

(B) エネルギー保存則

位置エネルギーと運動エネルギーの合計は一定である。

$$mgh_0 + 0 = mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 = 0 + \frac{1}{2}mv_3^2$$

位置エネルギー + 運動エネルギー = 一定

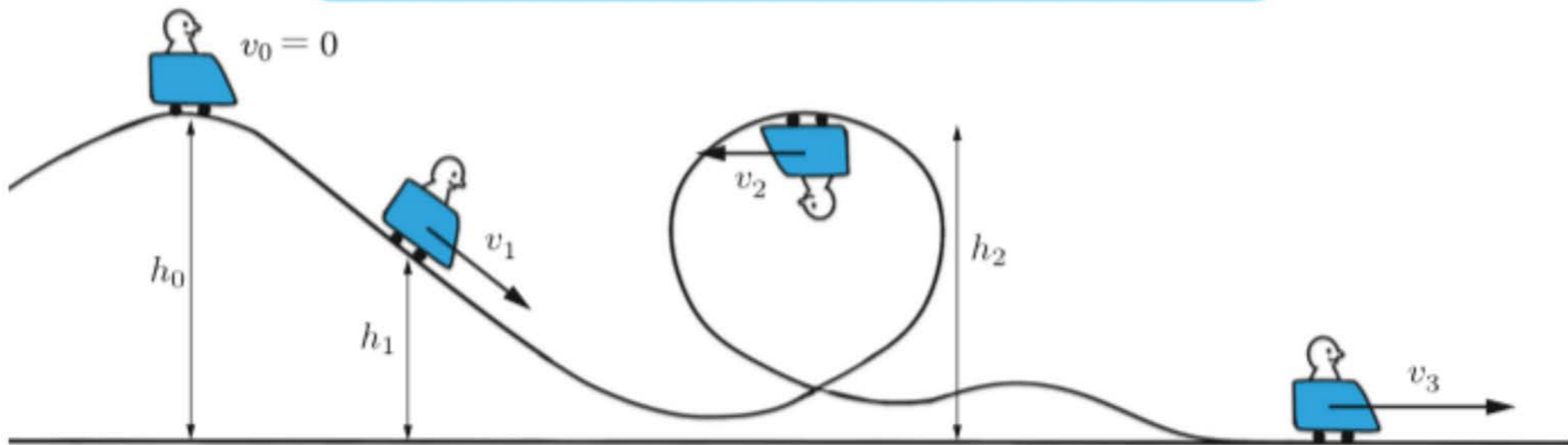


図 10: ジェットコースターは、はじめに一番高いところまで引き上げられて、あとはすべりおりのだけ。

ニュートンの運動法則から出てくる保存則 (3)

(C) 角運動量保存則

回転しようとする運動量 (角運動量) は, 保存する.

- 角運動量 = 半径 × 質量 × 速度, $L = r \times m \times v$
- ケプラーの面積速度一定の法則は, 角運動量の保存則だった.

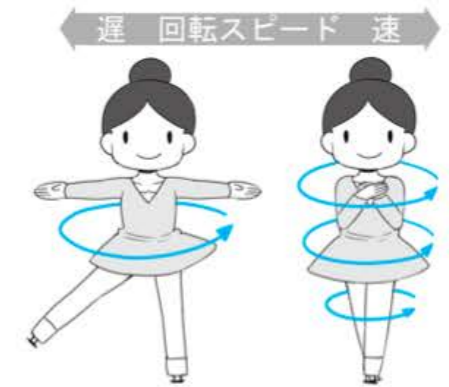


図 11: フィギュアスケートの回転. はじめに大きく手を広げ, あとは手を体につけるとはやく回る.

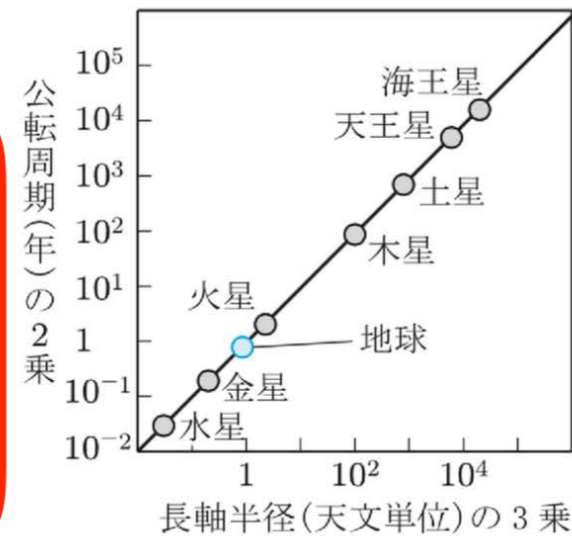
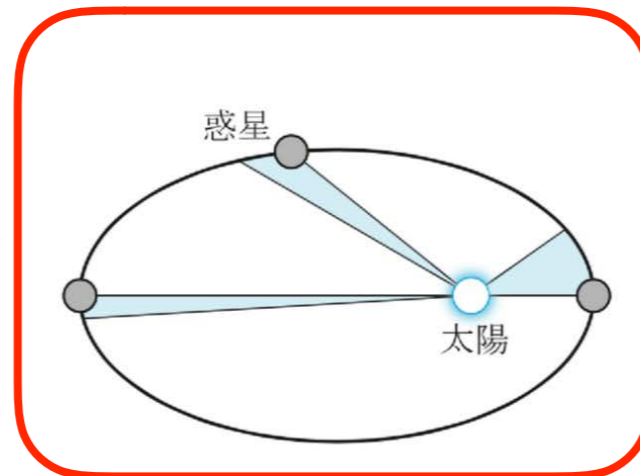
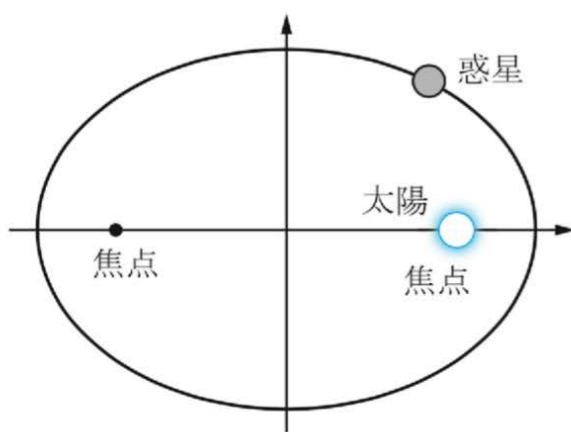


図 3: ケプラーの惑星運動の法則

ハレー彗星の軌道



Edmund Halley
(1656-1742)

76年周期

前回 1986年

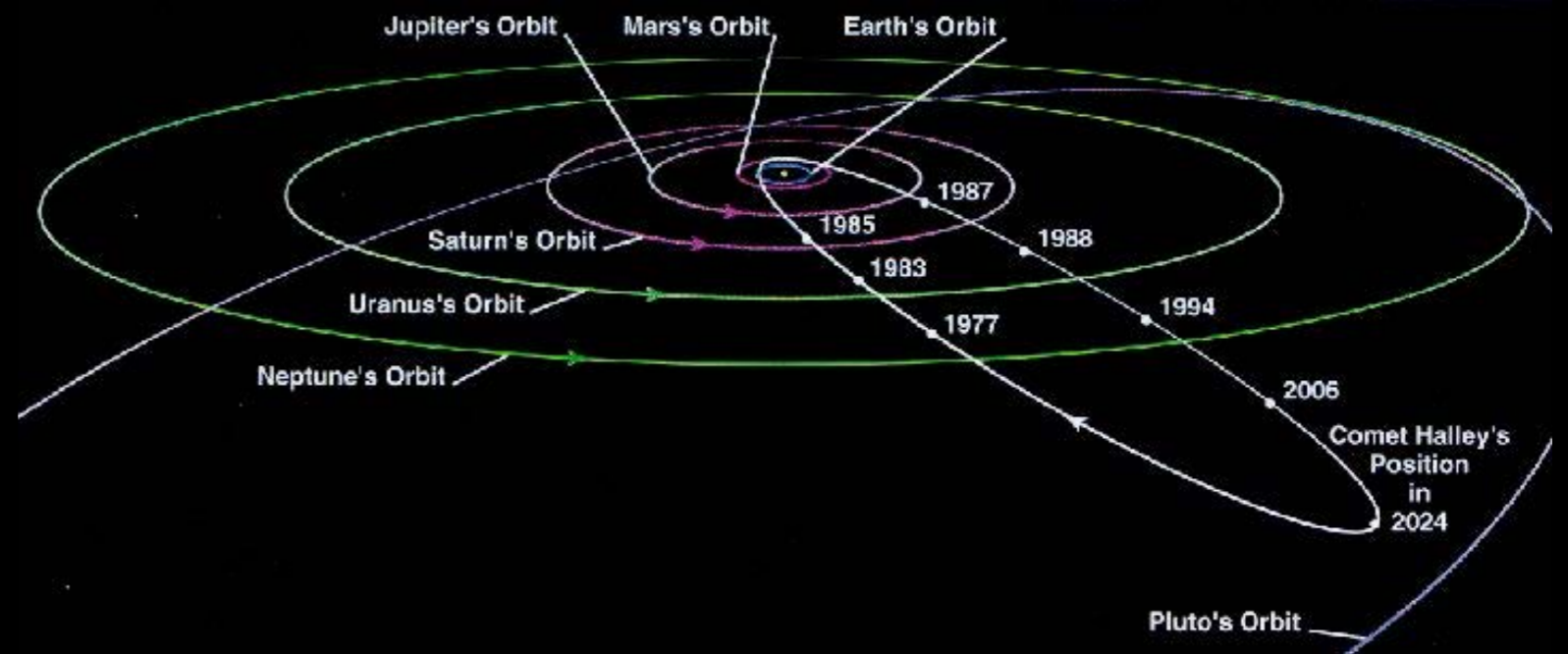
次回 2061年



ニュートンの「プリンキピア」の出版を手助け。
1682年の大彗星の軌道を計算し、次回は1758年に回
帰することを予言した。

ハレー彗星

76年に一度，地球に近づく。
前回は1985年，次は2061年



10月21日

オリオン座流星群

★1時間に10個！

★2018年は×

もとは、ハレー彗星



はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座

銀河中心



いて座

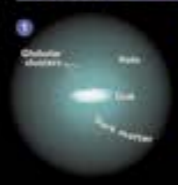


さそり座

THE MILKY WAY

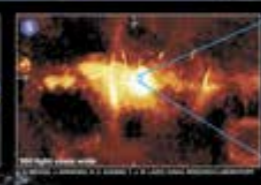
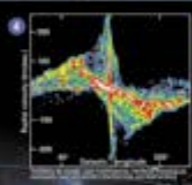
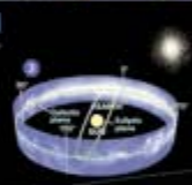


Home galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or expel their outer layers as beautiful planetary nebulae, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encompassing the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic core, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



GUIDE TO THE GALAXY

1. Far beyond the galactic disk, yet drawn by its gravity, long arms of dark matter stretch across the galaxy's face. Regions of dark matter—regions that lack stars—stretch through the disk to reveal the galaxy's structure.
2. Earth's orbit around the sun lies in a groove along the galactic plane.



A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the turbulent nature of molecular gas in the inner part of our galaxy: gas swirling away from Earth (top left) and toward Earth (bottom right). The densest gas appears white, later colors, blue, are revealed near the center of the Milky Way, producing electrons that race along magnetic field lines, illuminating remnants of stellar explosions. Probing even deeper into the core, a radio image detects a spiral of hot gas that is falling toward what may be a black hole some 2.6 million times as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—our perspective of a 3-D model newly compiled for National Geographic—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulae.

- 1. Globular star cluster
- 2. Interstellar gas and dust
- 3. Nebulae
- 4. Younger star region (OB stars)
- 5. Molecular cloud
- 6. Galactic bulge or center (older star region)

Reference numbers for galaxies:
 1. Andromeda Galaxy
 2. Triangulum Galaxy
 3. NGC 2445 (Small Magellanic Cloud)
 4. NGC 2446 (Large Magellanic Cloud)
 5. Centaurus Galaxy



PLANETARY NEBULA NGC 9

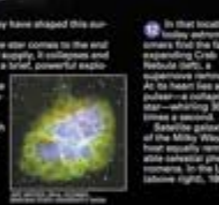
Earth's kaleidoscope of the Milky Way's colorful nebulae and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Even a fan-of-the-wind star may eventually undergo a cycle of increasing beauty. Just as our sun will do in its death throes some five billion years from now, a dying star expanded into a red giant and was transformed into the nebula NGC 9 (above). At its center shines a small, hot core, which will cool and fade over time to come, its stellar wind, swarms of charged particles, rushing outward from back to back jet engines. This expansion, revealed by the Hubble Space Telescope, is common among planetary nebulae. Ultraviolet light from the star heats the gas and makes them glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark matter-rich interstellar dust that blocks our view of stars beyond. When a star explodes as a supernova, the star particles (left) are flung out the black

galaxy, including dark matter-rich interstellar dust that blocks our view of stars beyond. When a star explodes as a supernova, the star particles (left) are flung out the black

start the sun. They sparkle like an aspen forest of green on a winter's velvet pool. The sun's dark clouds look orange-yellow like NGC 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300.



visible light from the Hubble Space Telescope. Clouds of interstellar dust (right) obscure star-forming regions along the galactic plane of the Milky Way, are not thick and smooth but seem as frothy as the head on a glass of beer. Bumpiness, shock waves and stellar wind from



swirling stars may have shaped this surprising pattern. When a massive star comes to the end of its nuclear fuel supply, it collapses and then rebounds in a brief, powerful explosion, or supernova. The Chinese called these celestial fireworks quiet stars and recorded one such event in the constellation Taurus in July 1054 that was visible in broad daylight.

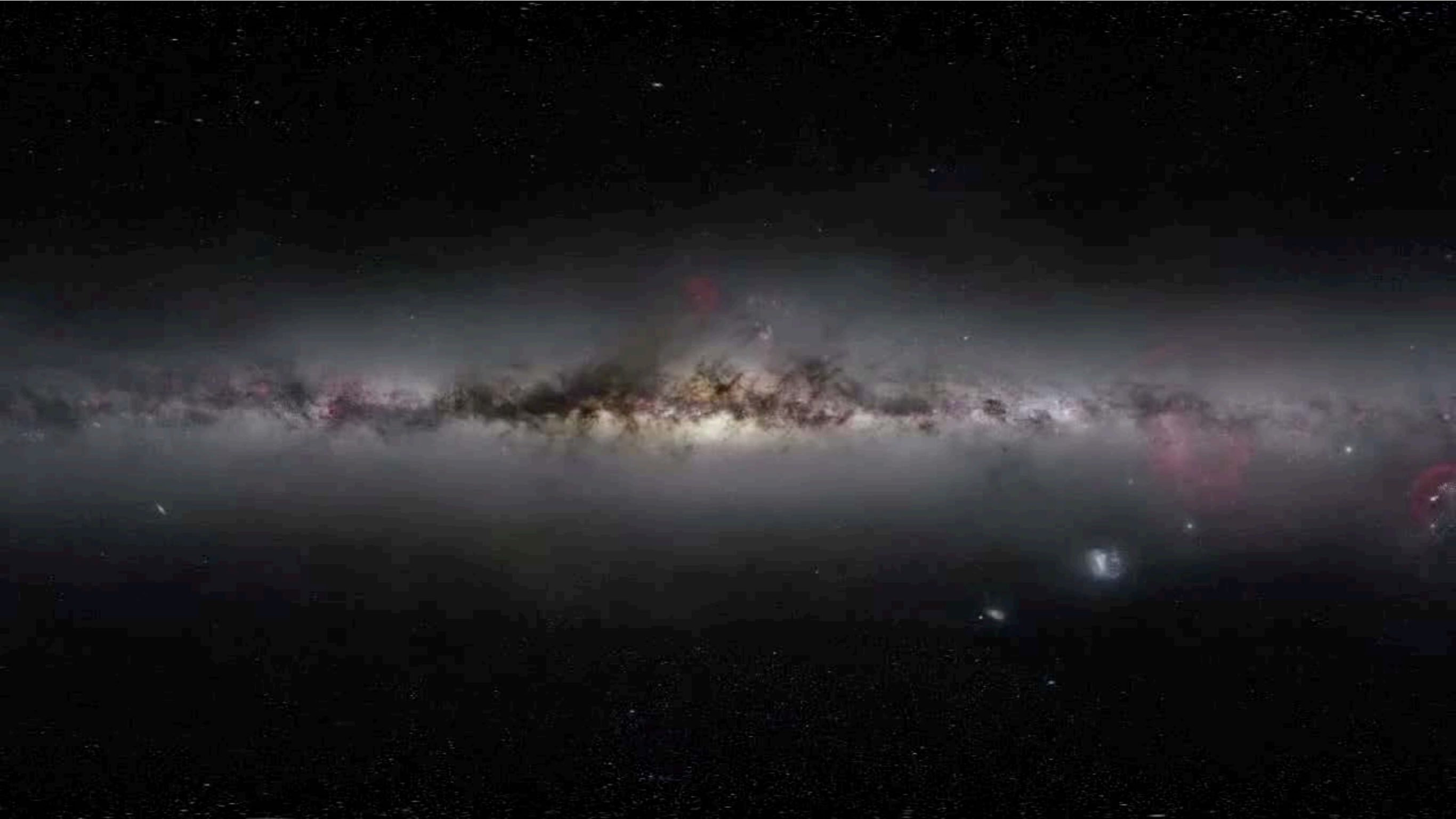
In that location, the Crab Nebula (left) is expanding at 10 miles a second. Satellite galaxies of the Milky Way host equally remarkable interstellar phenomena. In the Large Magellanic Cloud (above right), 100,000 light-years from

LADON NEBULA

Each clumpy, filamentary cloud of hydrogen gas (above) from the Australian Southern Cross constellation. The lower half of the cloud (left) is lying toward the Earth while the top half (right) faces away. Growing along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are forming. The Lagoon Nebula (below, left) is 1,500 light-years distant, is easily detected with the naked eye as a soft glow in the southern constellation Sagittarius. Wide-field images show that it covers more of the sky than does the full moon. Where stars were once only a red-hot cloud, turbulence from the Big Bang and most massive young star in the nebula, Men 22, heats and ionizes the gas around it. The Lagoon Nebula (below, right) has many more planets circling nearby stars, including the 102 already discovered. And the bigger question of all: Do any of them harbor life?

<http://shop.nationalgeographic.com/ngs/product/maps/wall-maps/space-maps/the-milky-way-map%2C-laminated>
<http://ernstgraphics.wordpress.com/page/2/>

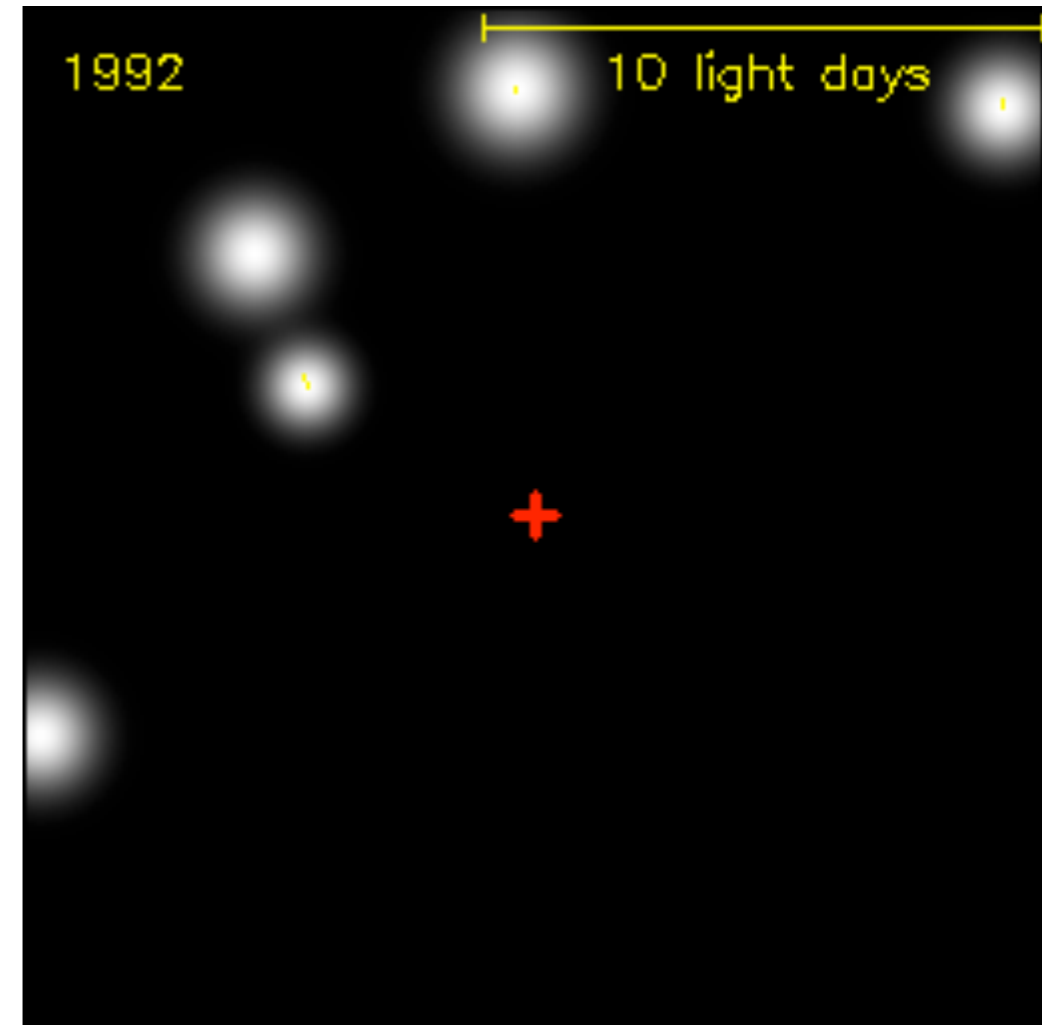
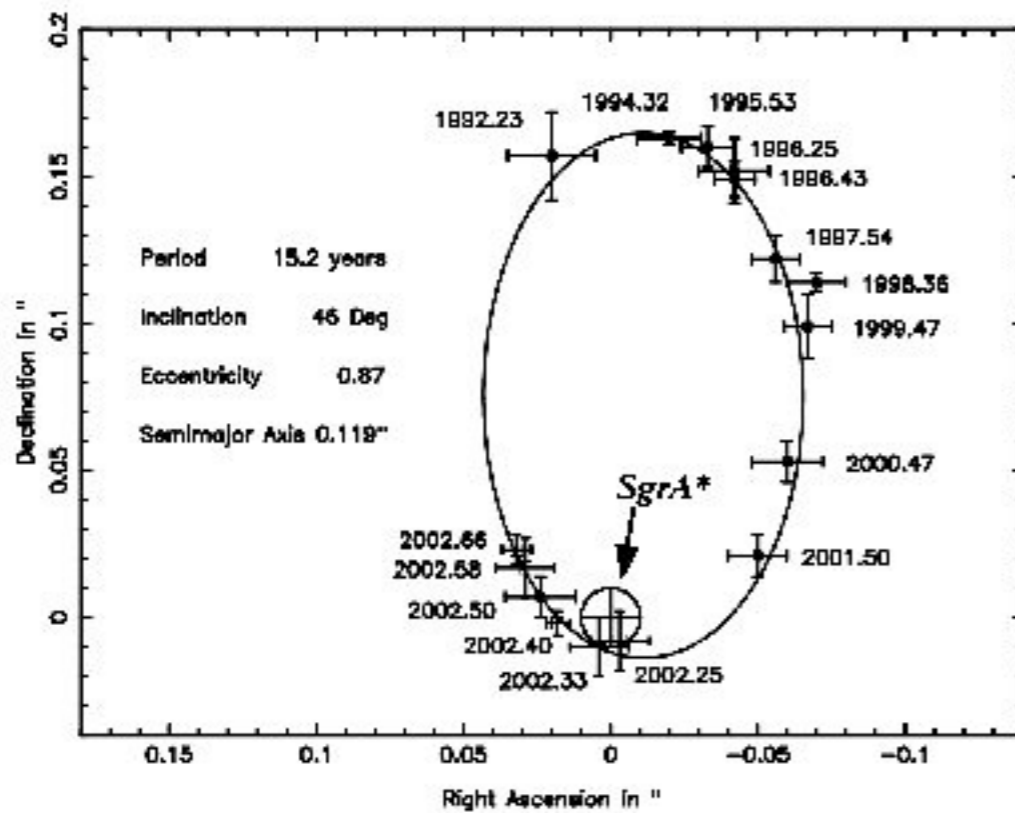
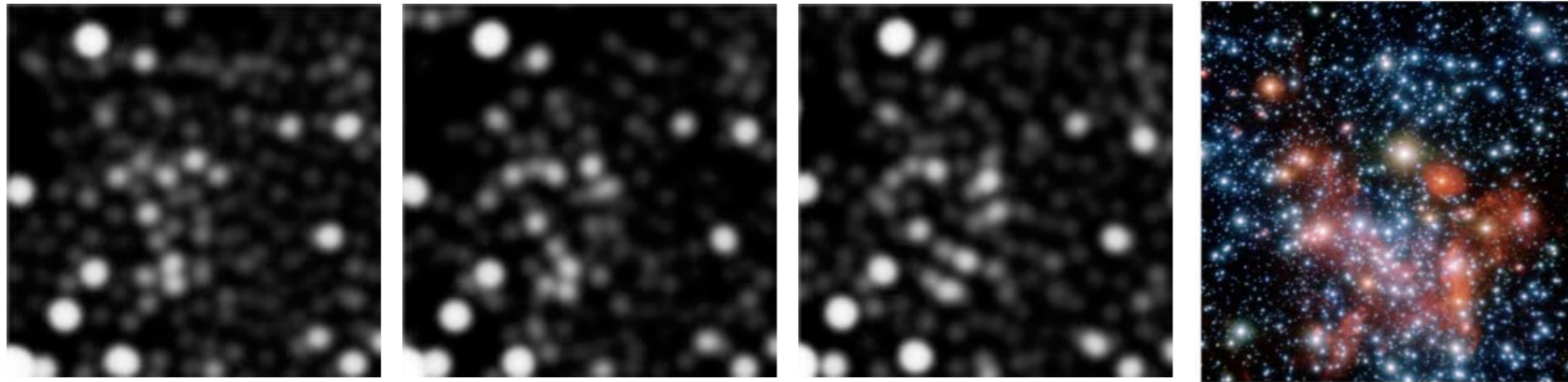
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

<http://www.youtube.com/watch?v=XhHUNvEKUY8> (1:15)

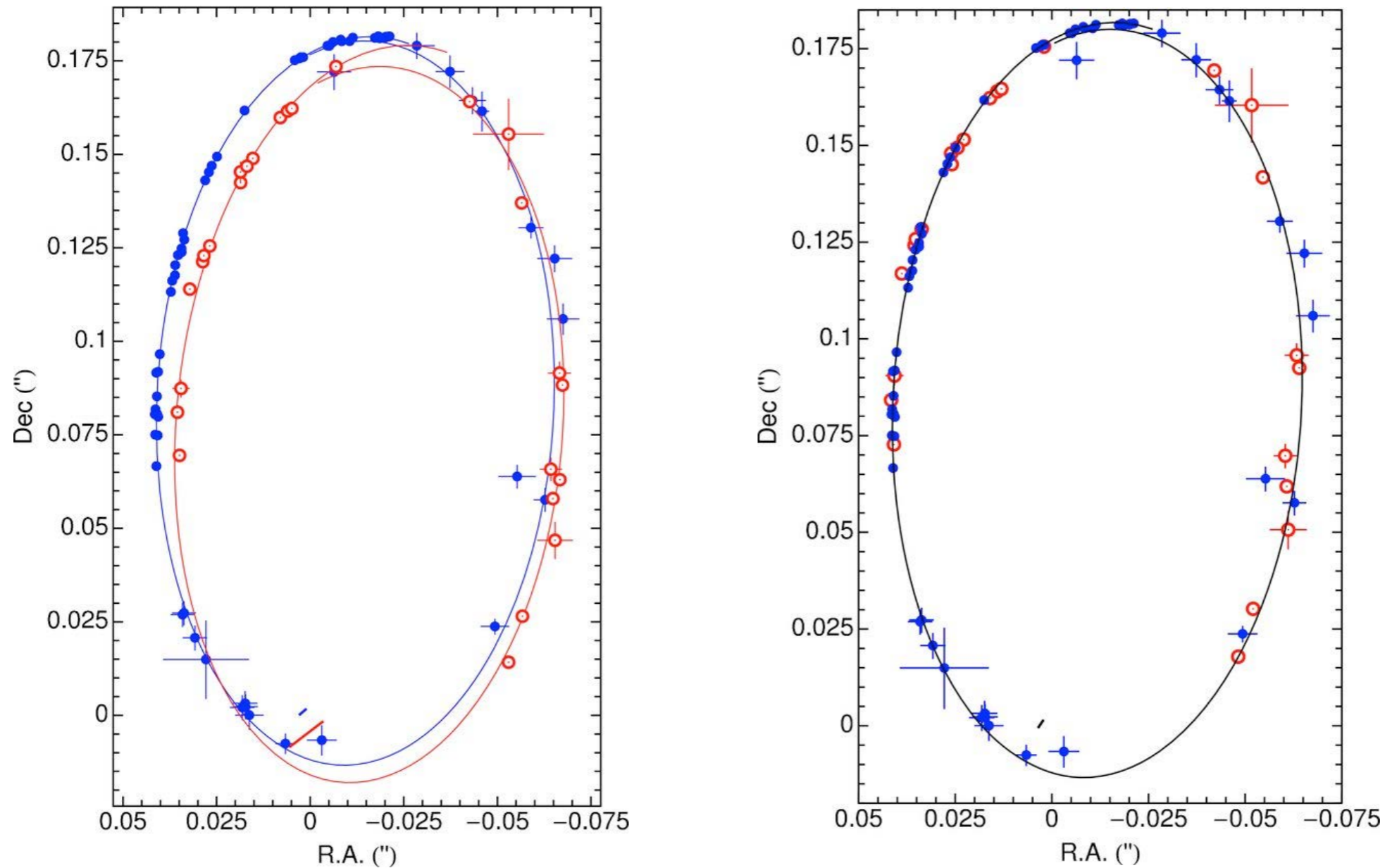
S2 orbit around Sgr A*



<http://www.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm>

<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

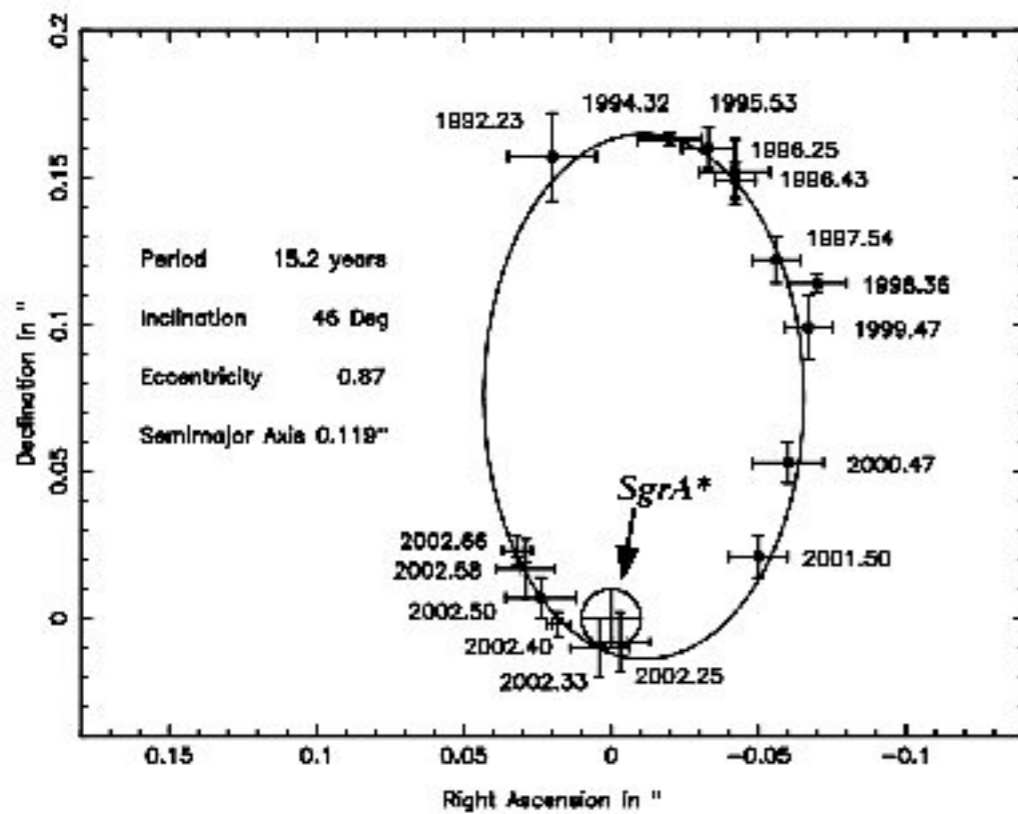
S2 orbit around Sgr A*



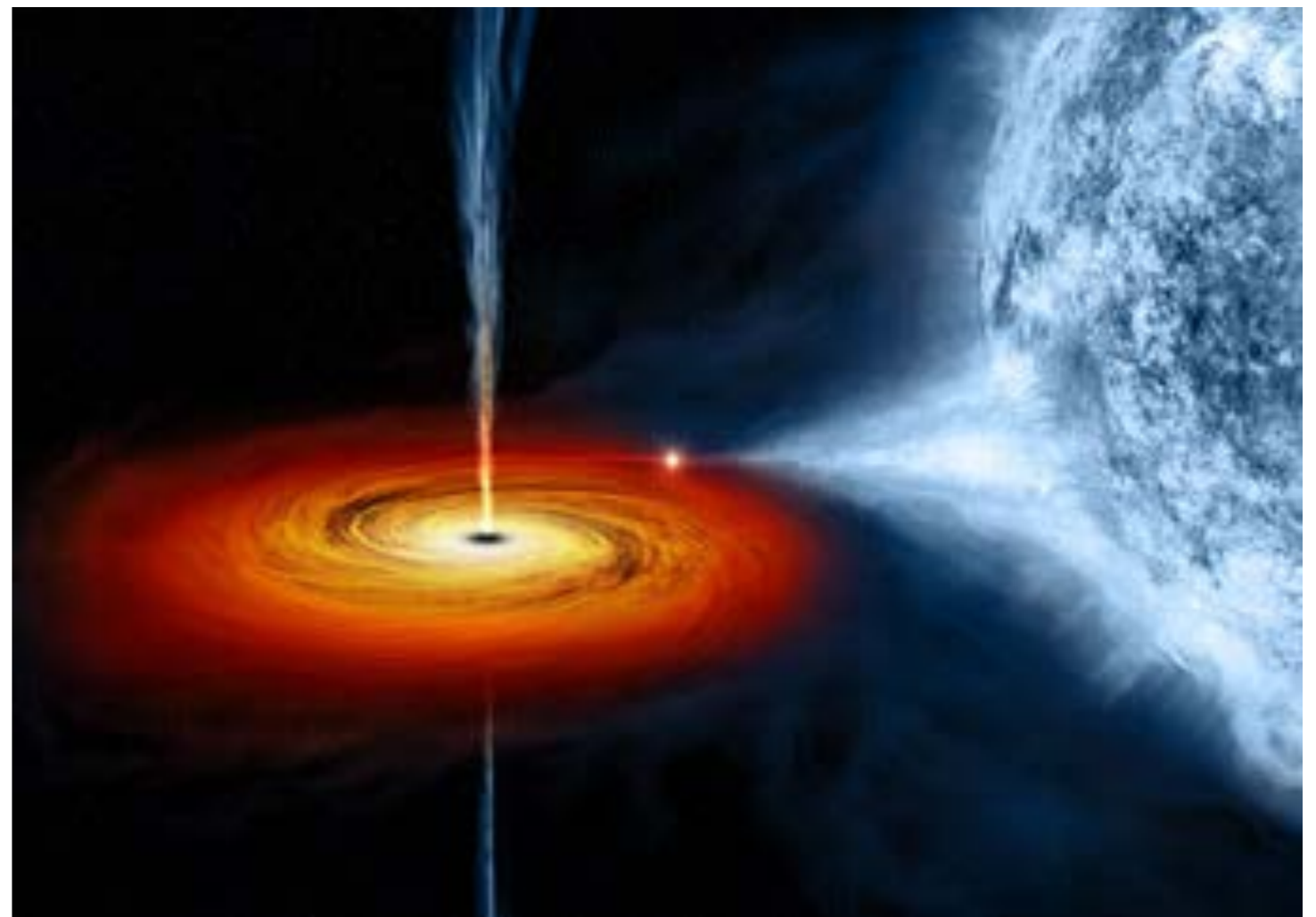
Astrometric data for the star S2. Blue: NTT/VLT measurements. Red: Keck measurements. The lines show the Keplerian orbit fits for the respective data set, which do not yield closed ellipses in this figure due to the motion of the point mass with respect to the chosen coordinate systems. The small lines close to the origin indicate the position of the center of mass as a function of time.

Result of the combined orbit fit for the star S2. Blue: NTT/VLT measurements. Red: Keck measurements. The black line shows the Keplerian fit (row 1 in Table 2).
http://iopscience.iop.org/1538-4357/707/2/L114/fulltext/apjl_707_2_114.figures.html

ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？



周りの星の激しい運動から
強い重力源であることがわかる

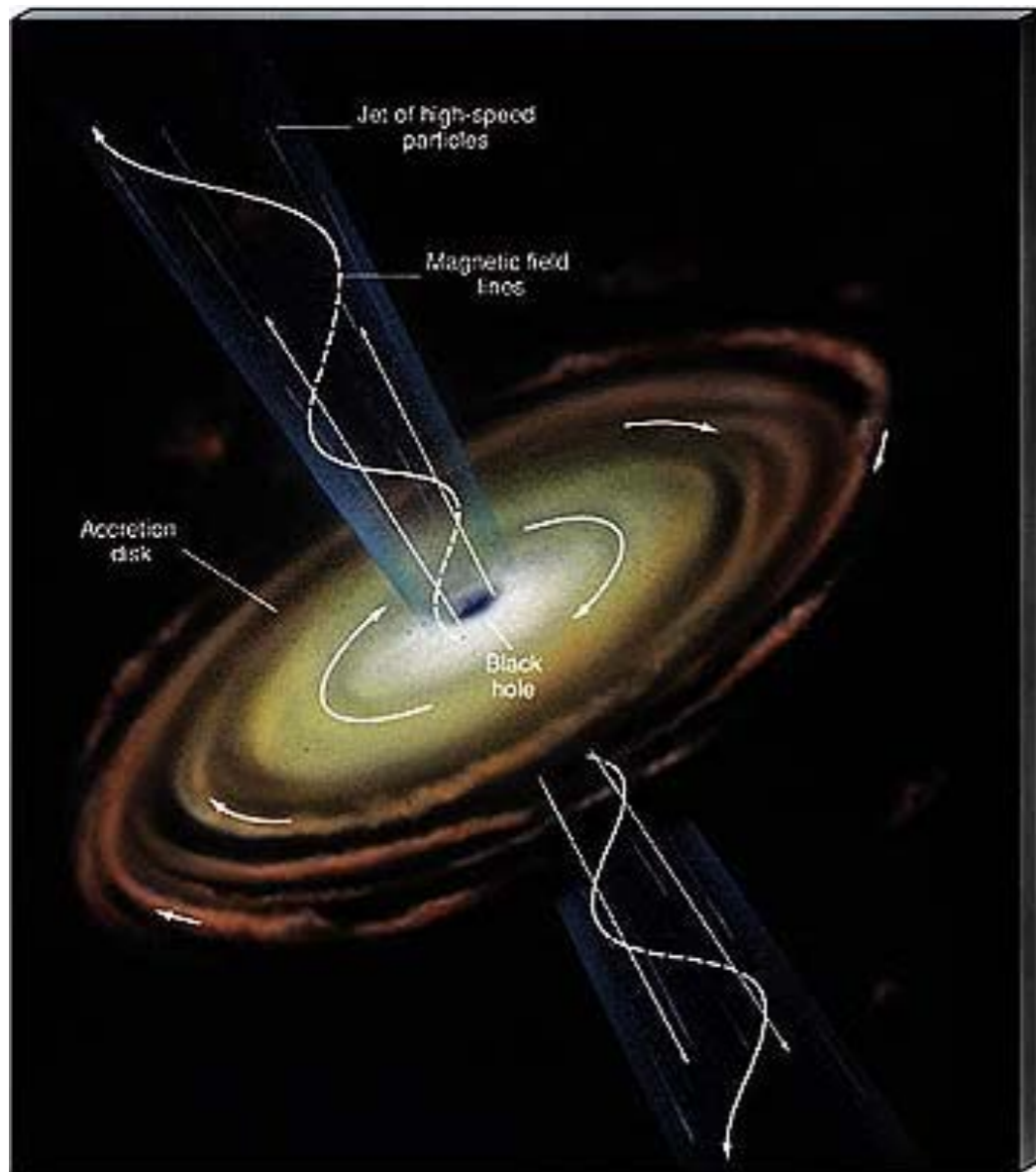


落下していくガスが
高い温度で輝く

(降着円盤 accretion disk)

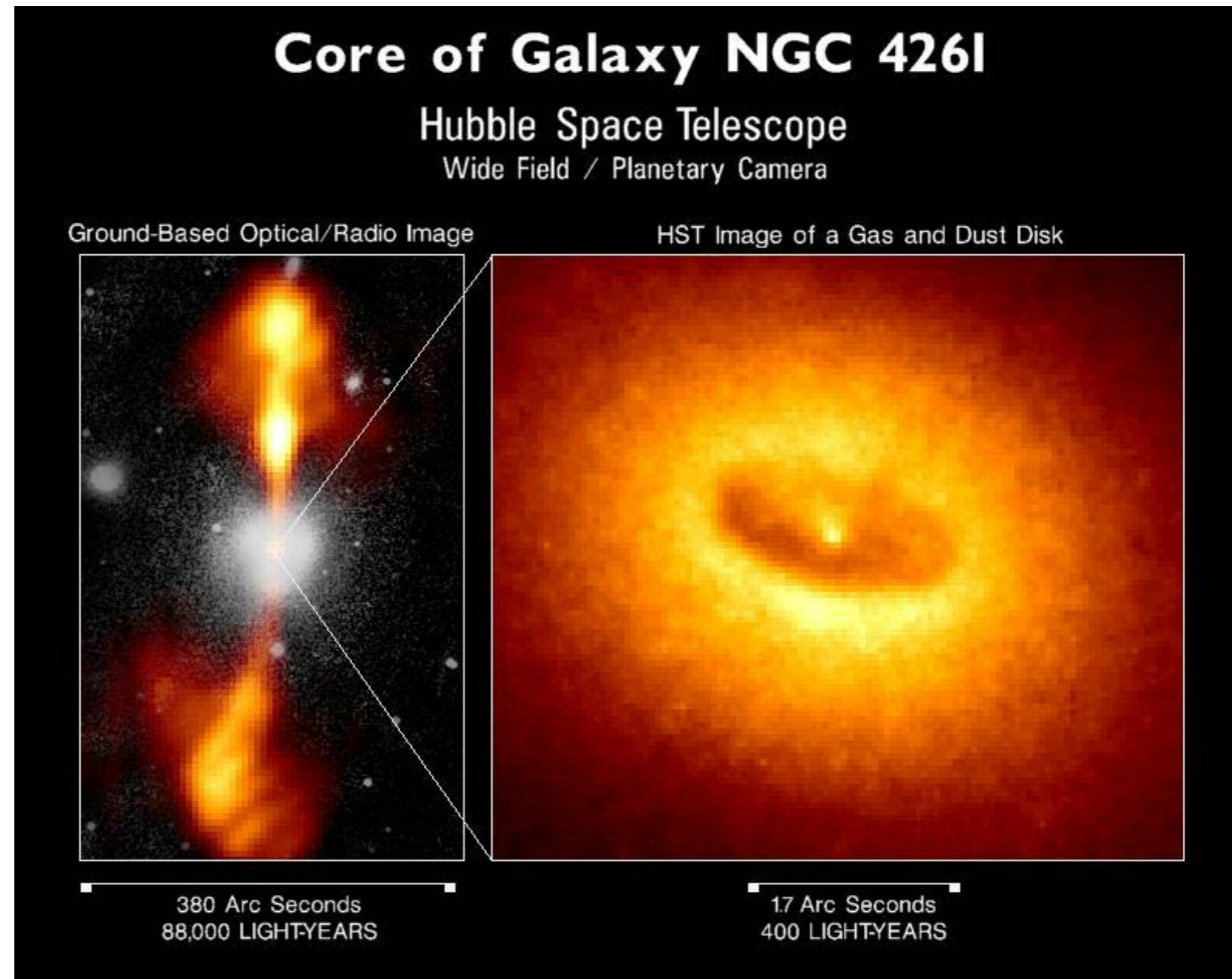
想像図

ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？



<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html>

想像図



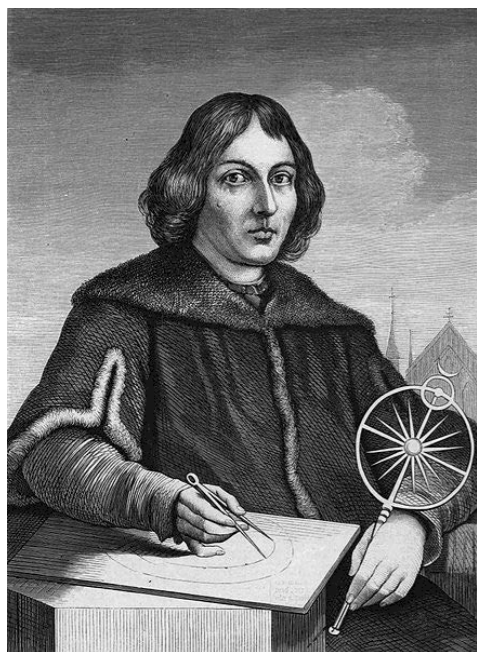
銀河中心からジェットが吹き出す
(活動銀河核 active galactic nuclei)

1. なぜ円ではなく楕円か：ケプラーの惑星運動の法則

近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス

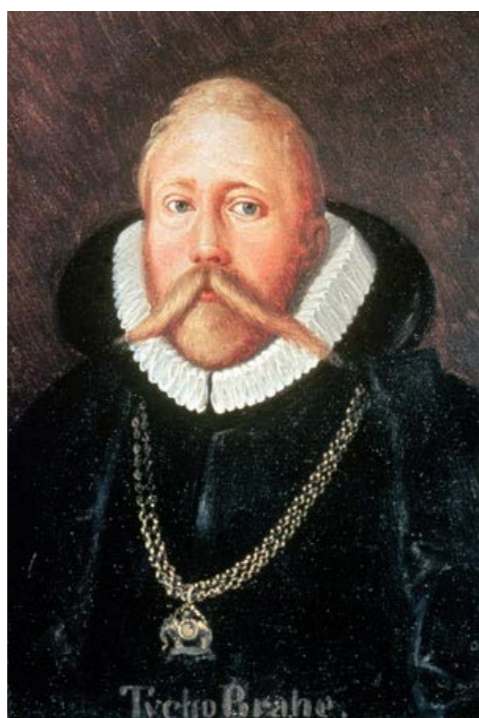
Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



地動説

ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



天体観測

ケプラー

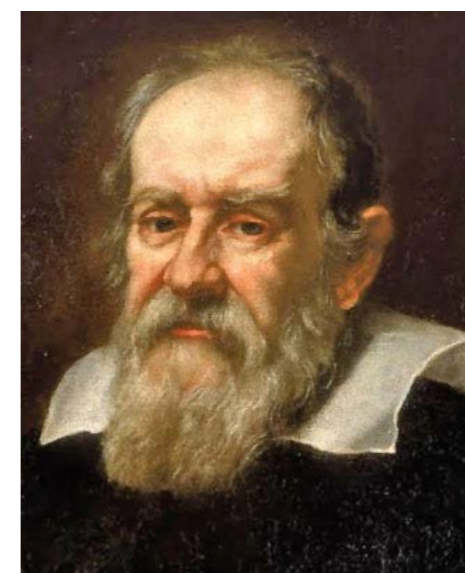
Johannes Kepler
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

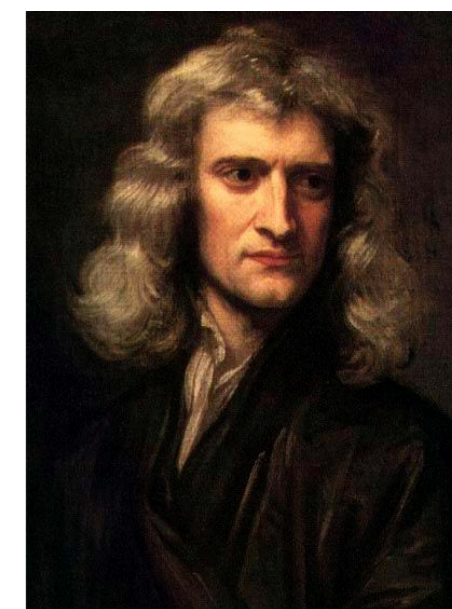
Galileo Galilei
(1564-1642)



慣性・自由落下運動
地動説の物理的根拠

ニュートン

Isaac Newton
(1642-1727)



運動の法則
万有引力

宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則

11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則

12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論

1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論

2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論

3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/mainichi/>

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>