

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第4回 2025/10/13

第2章 近代物理学の夜明け (1)



真貝 寿明
Hisaaki Shinkai

真貝の武庫川講義ページtop



<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/mukogawa/>

レポート課題締め切り10月31日23:59 詳細は前回プリント配布

宇宙人はいるのか？ 各自の考えを述べよ

「地球外生命体・地球外知的生命体の存在について」

提出日・様式など

- A4 用紙 3-4 枚程度. 手書き・PC 印刷どちらも可. 表紙は不要. (手書きの場合は写真撮影したものを提出)

- 必要であれば, 図や表を添付してよい. (上記のページ枚数に含める).

- 〆切は, **10月31日 (金) 23:59**

Google Classroom の課題として提出.

- 提出ファイルの名前は, 「U 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること. (U は Universe の頭文字でレポート区別するためのもの, 学科は大日/短生など 2 文字で, XXXXXXXX は学籍番号, ○○○○は氏名) とすること.

- ファイル内の初めにも, タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること.

- 参考とした文献 (web ページ含む) などがあれば, **必ず**記すこと. 剽窃行為が認められる場合は評価を下げます. (参考文献から引用するのは構いませんが, 引用範囲は必ずそう明記すること.)



レポート頑張ります！

課題をがんばろうと
(田) いまこ = 〇



地球外知覚生命の存在を調べるのが難しいけど面白そうじゃありません。SFバカとしては、いい感じという希望がもてられます。

(質問)
宇宙人がグレーの2足歩行なのはなぜなのか？
(感想)

レポート課題がタイトなので楽しみながら余裕をもってとりかきたい。

宇宙人はいるのか、よく疑問に思うことがあるので、レポートとして調べられたらいいなと思います。今晚、お月見でゴゴゴうに！

映画「コンタクト」の予告を見て、とても興味を持った。未知の存在との出会いの中で、科学と人間の関係を深く考えさせられたと感じた。映像のスケールが印象的で本編も見たいと思った。

人間の宇宙人の存在 宇宙人と対峙して
反対から見たらどう見えるのか



なお、映画『コンタクト (Contact)』（1997年、アメリカ映画、主演 Jodie Foster）は、Carl SaganのSF小説を映画化したものですが、現時点で考えられる物理学の範囲内でストーリーが組み立てられていて面白いです。この映画を見てからレポートに着手するのもよいかもしれません。（ただし、映画のあと約25年を経て、上記のトピックのように大きく観測が進展しました。それを調べて、考察してほしい、という主旨のレポート課題です。）

ハードSF作品？でおすすめのものはありますか。
先生は地球外生命体を探していますか。

レポート課題（トピック） 何を選ぶ？

課題「地球外生命体・地球外知的生命体の存在について」

次のトピックのうち、2つ以上を調べ、若干の解説をしてください。

18人

- 惑星探査.

最近 10 年間の火星探査（探査機スピリット、フェニックス、キュリオシティ）、木星の衛星エウロパ探査による成果は何か。

16人

- 太陽系外惑星探査.

太陽系以外の恒星の周りに惑星がたくさん発見されるようになった。現時点でどのような発見がされているのか、宇宙望遠鏡「ケプラー」をキーワードに。

29人

- 地球外知的生命体探査 (Search for Extra-Terrestrial Intelligence).

40 年の探査の成果はどうか。SETI@Home プロジェクトとは何か。

- 宇宙生物学 (Astrobiology).

「バイオマーカー (Biomarker)」「ハビタブルゾーン (habitable zone)」をキーワードに。

32人

そして、各自の考察を行い、結論してください。

1つのみ記入した人 4名. 注意

“電気回路における巨視的な量子力学的トンネル効果とエネルギー量子化の発見”

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2024 to

John Clarke (U. California, USA)

Michel H. Devoret (Yale U. & U. California, USA)

John M. Martinis (U. California, USA)

“for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit”



NOBELPRISET I FYSIK 2025
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025

KUNGL. VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Photo: University of California
John Clarke
University of California,
USA

Photo: Yale University
Michel H. Devoret
Yale University &
University of California, USA

Photo: Rocco Ceselin, Nature
John M. Martinis
University of California,
USA

“för upptäckten av makroskopisk kvantmekanisk tunnling och energikvantisering i en elektrisk krets”
“for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantisation in an electric circuit”

#NobelPrize

THE NOBEL PRIZE

ジョン・クラーク 米カリフォルニア大

ミシェル・デボレ 米イェール大, カリフォルニア大

ジョン・マルティニス 米カリフォルニア大

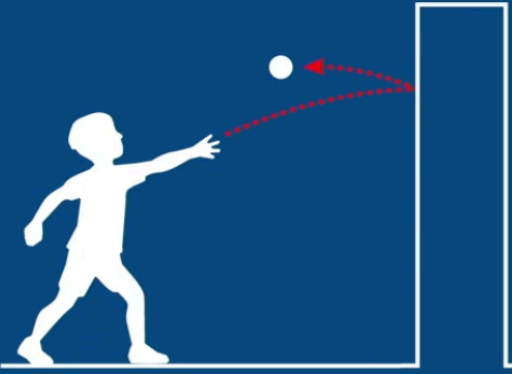
“電気回路における巨視的な量子力学的トンネル効果とエネルギー量子化の発見”



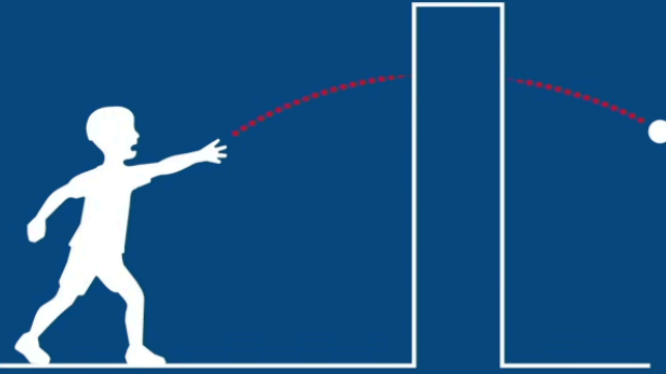
NOBELPRISET I FYSIK 2025
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025



KUNGL.
VETENSKAPS
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Classical physics



Quantum tunnelling

#NobelPrize

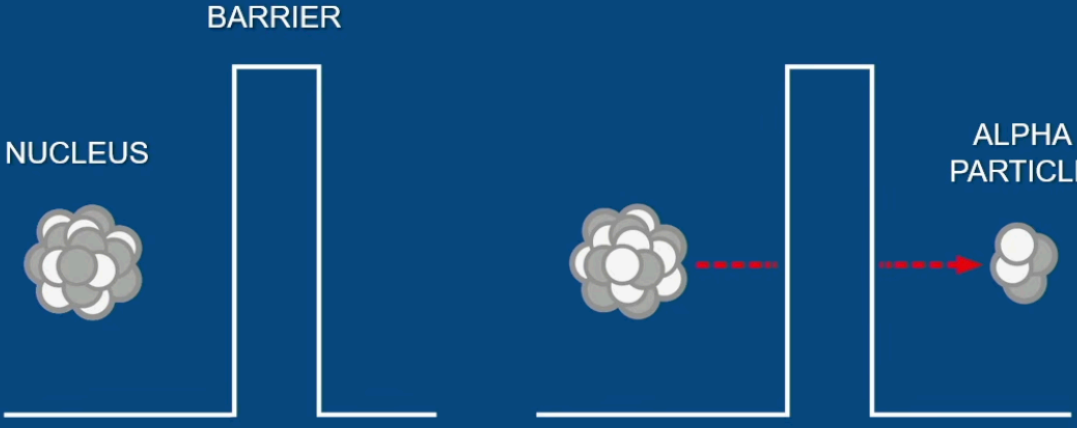
THE NOBEL PRIZE



NOBELPRISET I FYSIK 2025
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025



KUNGL.
VETENSKAPS
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Radioactive decay

#NobelPrize

THE NOBEL PRIZE



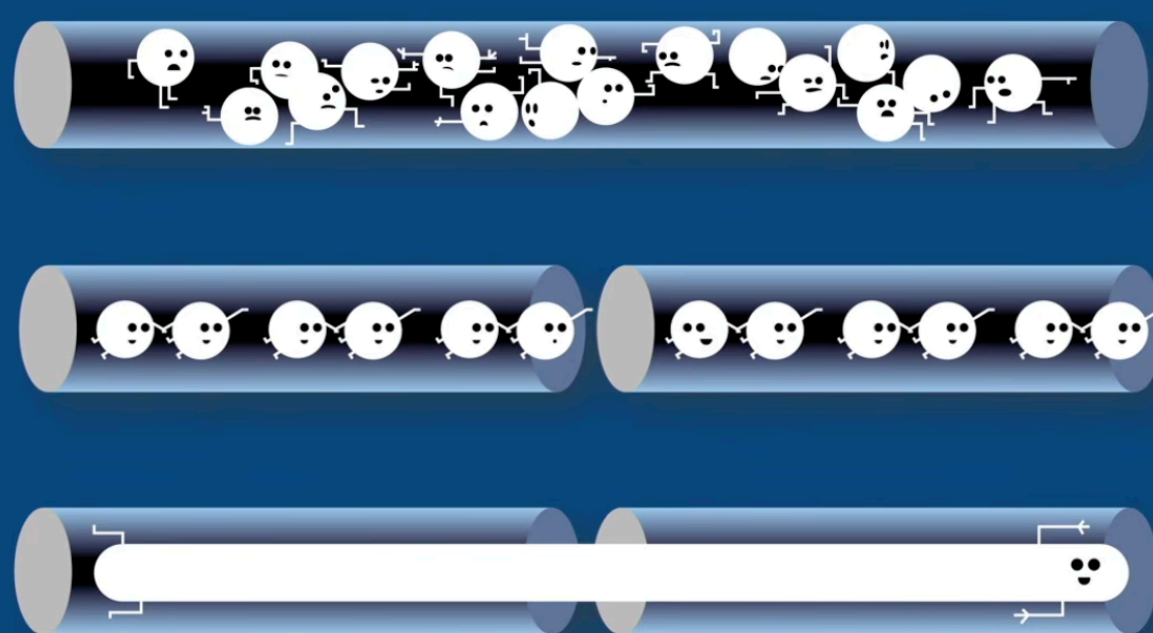
“電気回路における巨視的な量子力学的トンネル効果とエネルギー量子化の発見”



NOBELPRISET I FYSIK 2025
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Josephson junction

#NobelPrize

THE NOBEL PRIZE

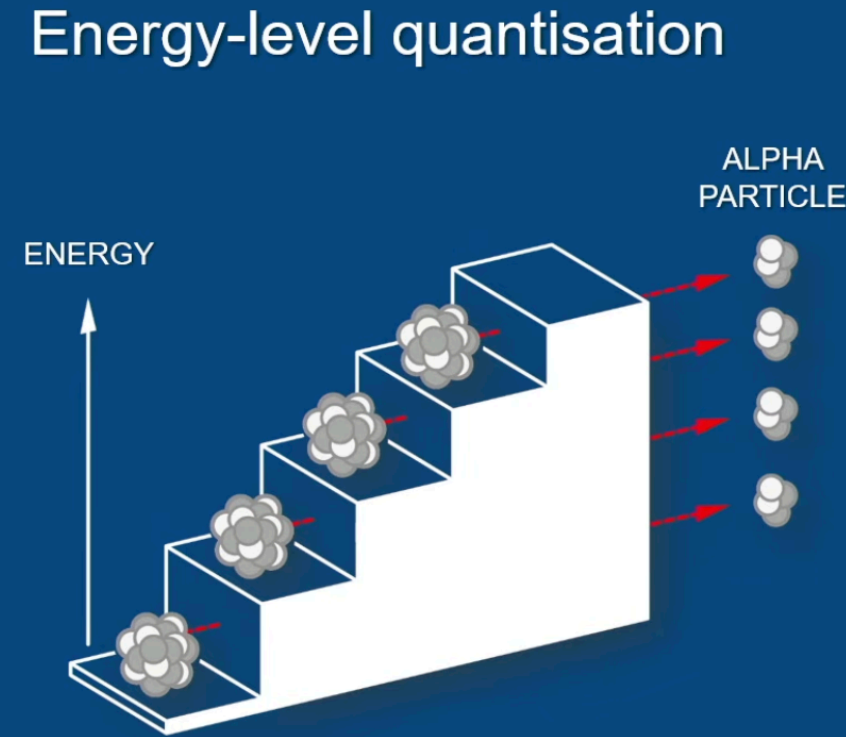


NOBELPRISET I FYSIK 2025
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025

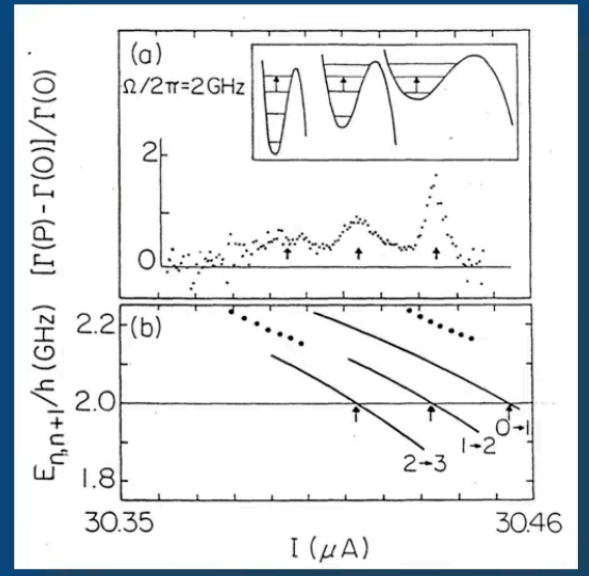


KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Energy-level quantisation



ALPHA PARTICLE



Martinis, Devoret, Clarke
Physical Review Letter 1985

#NobelPrize

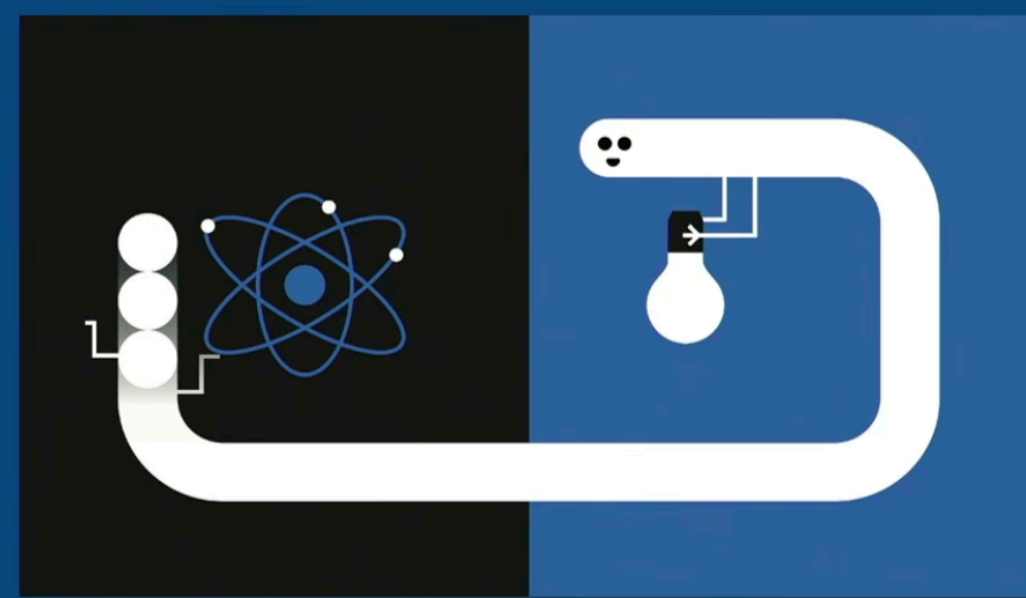
THE NOBEL PRIZE



NOBELPRISET I FYSIK 2025
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2025



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



- Quantum physics on a chip
- Engineerable artificial atoms
- Probe quantum properties of mechanical oscillators
- One of the platforms for quantum computers

前回のミニッツペーパーから

文系の自分でも内容を理解できた。

本日も面白い講義でした。

難しかった。

素朴な講義をありがとうございました。

宇宙について理解が深まりこれに疑問が出てくるのもすごく感じている

授業をきいて、日常の少し不思議に思っていることを説明してくださっておもしろかったです。

38.5億年後の星空を見ることが出来る。また救急車の音の話は
大まかすぎる。小さくはその話でいい思っていた。高く、低くがあると思ってる。

40億年後にアンドロメダと衝突するという可能性があること知って人類はいつか
違う銀河に移り住むのかなという考えさせる良い授業でした。

銀河衝突によって、新しい星が大量に誕生するのってすごい？
太陽系の位置も変わる...？

天の川銀河とアンドロメダ銀河が約40億年後に衝突するというのは想像を
超える時間の長さで、宇宙の中で自分たちの存在がどれだけ小さいかを
実感させられました。

アンドロメダと40億年後に衝突

When galaxies collide

2012/6/1



現在

20億年後



37.5億年後

38.5億年後

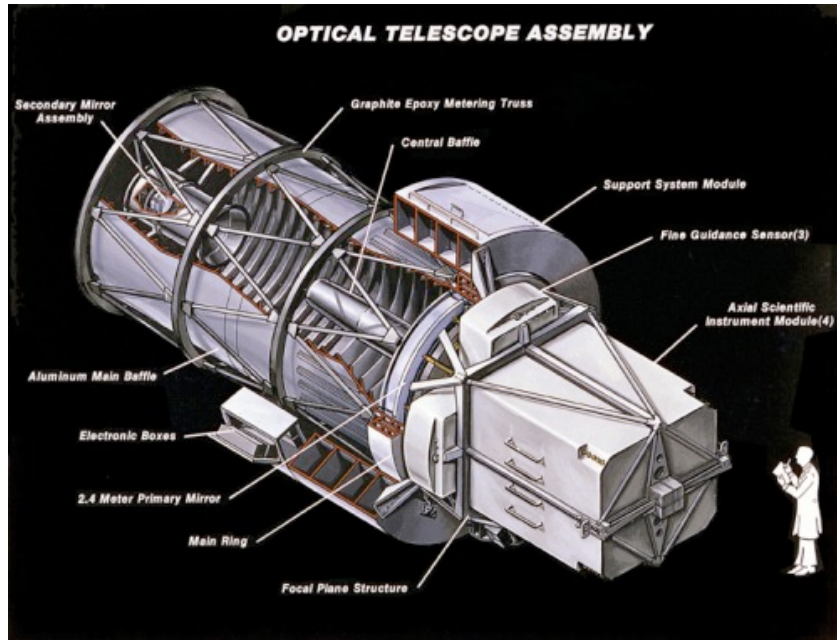
前回のミニッツペーパーから

宇宙空間で望遠鏡を修理したと聞き、驚きました。

スカイツリーの上で時間の進み方が異なるという話を聞いて、
上手くいけばタイムマシンも夢ではないのかなと思いました。

【天文】

ハッブル宇宙望遠鏡 Hubble Space Telescope (HST)



アメリカが1990年、宇宙空間に打ち上げた望遠鏡。
衛星は長さ 13.1m の筒型、重さは 11トン
反射望遠鏡の主鏡直径は 2.4 m。
宇宙空間にあるため、大気の影響を受けず、鮮明な画像が得られる。

40

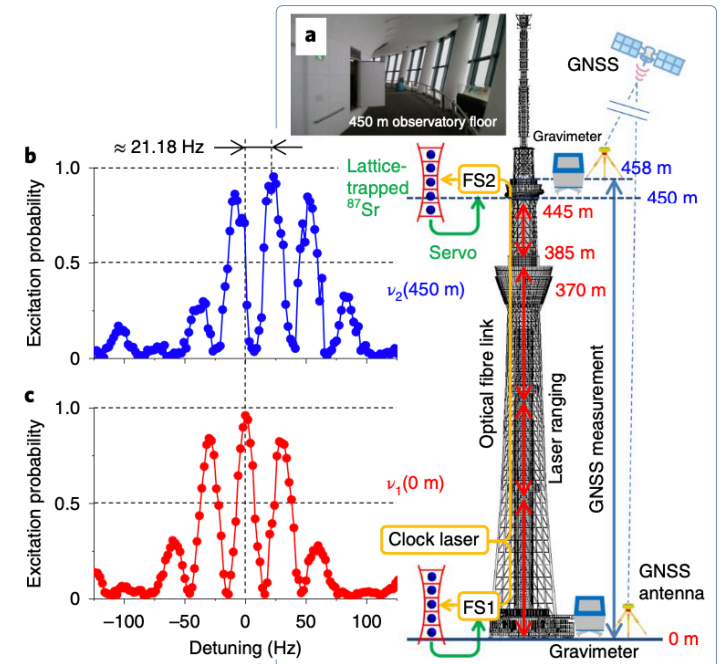
時間を測る

スカイツリーの上で時間の進み方が違う

アインシュタインの相対性理論によれば、
重力の強いところでは時間の進み方が遅くなる

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

図 6: 東京スカイツリーでの一般相対論検証実験の概要。地上階と展望台に設置した2台の可搬型光格子時計を光ファイバーでつなぎ、周波数比較を行った。一方、2台の時計の標高差を従来の測量手法（GNSS 測量およびレーザー測距）によって計測した。時計遷移を分光して得られたスペクトルでは、標高差 450メートルに相当する約 21 ヘルツの周波数シフトが観測された。



Nature Photonics, 14 (2020) 411

Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks

Masao Takamoto^{1,2}, Ichiro Ushijima³, Noriaki Ohmae^{1,2}, Toshihiro Yahagi⁴, Kensuke Kokado⁴, Hisaaki Shinkai⁵ and Hidetoshi Katori^{1,2,3}

34

宇宙のことは地球と関係ないと思っただけで
今日の授業で 巧みに感じたら
見えなかった。確かにある。という感覚。

前回のミニッツペーパーから

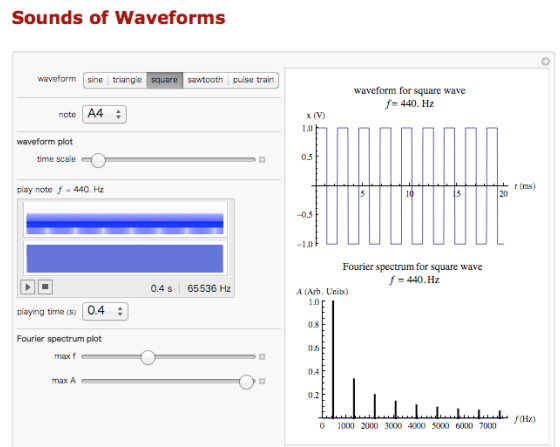
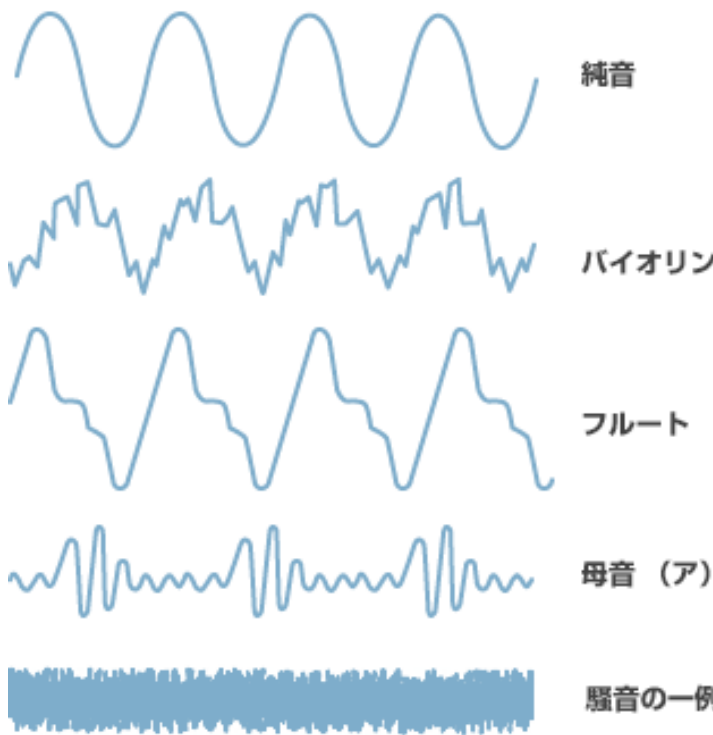
センサーのしくみをはじめてみました。

【身近な技術】

音の3要素 (1)大きさ (2) 高低 (3) 音色

音色＝波形

【図5.いろいろな音の波形】



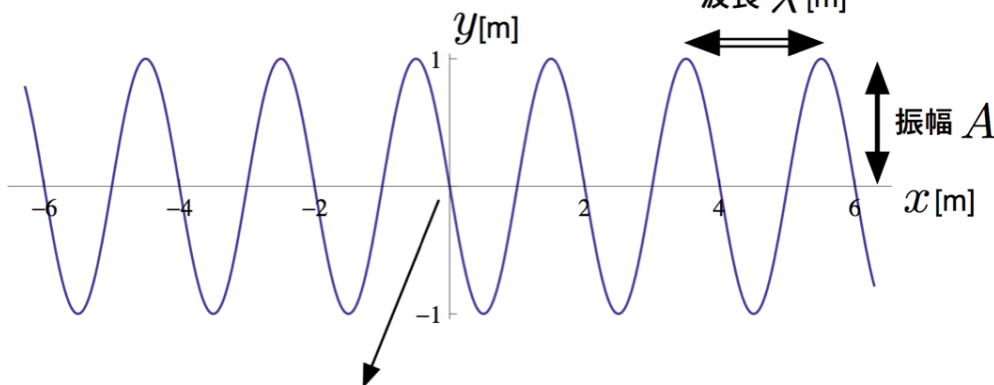
http://www.widexjp.co.jp/hearing/various_sounds/

付録 A. 》 A.3 波のもつ性質

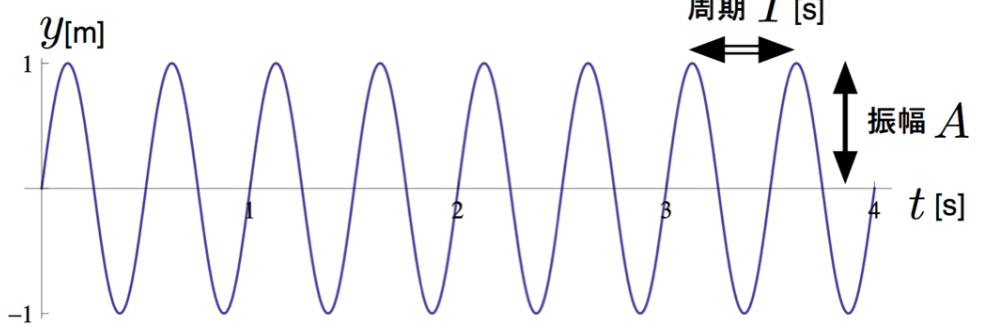
教科書 p207

波を表す物理量

(a) 時刻 $t=0$ でみた波のスナップショット



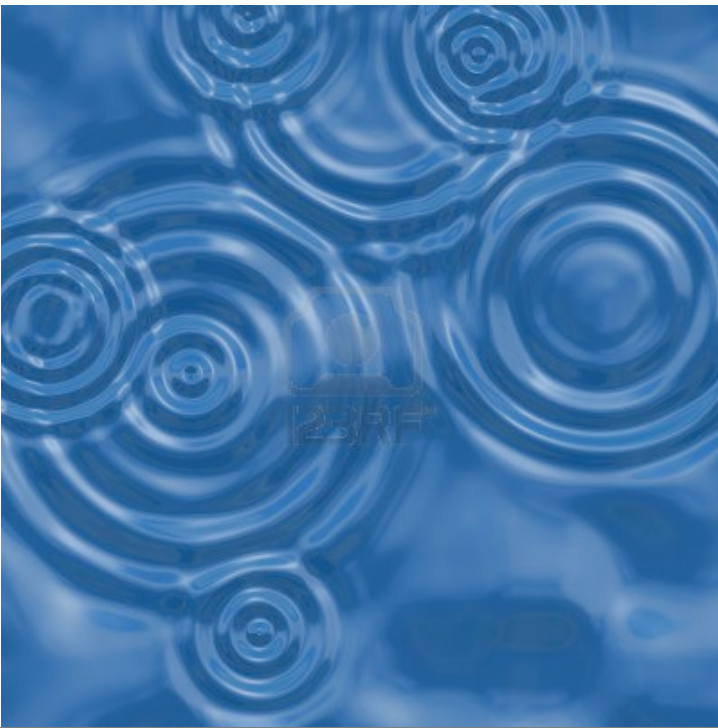
(b) 位置 $x=0$ でみた波の時間変化



「写真を撮る」
「全体図を知る」



「1カ所での動きを見る」



ドップラー効果

- 音速を V [m/s], 音源の移動速度を V_S [m/s], 観測者の移動速度を V_O [m/s] とする. 音源の音の振動数を f_0 [Hz], 観測者の受け取る音の振動数を f' [Hz] の間には,

$$f' = \frac{V + V_O}{V - V_S} f_0 \quad (\text{A.23})$$

が成り立つ. V_O と V_S の前の符号 (+, -) は, 互いに近づくときの符号である. 互いに離れるときは符号を逆にすればよい.

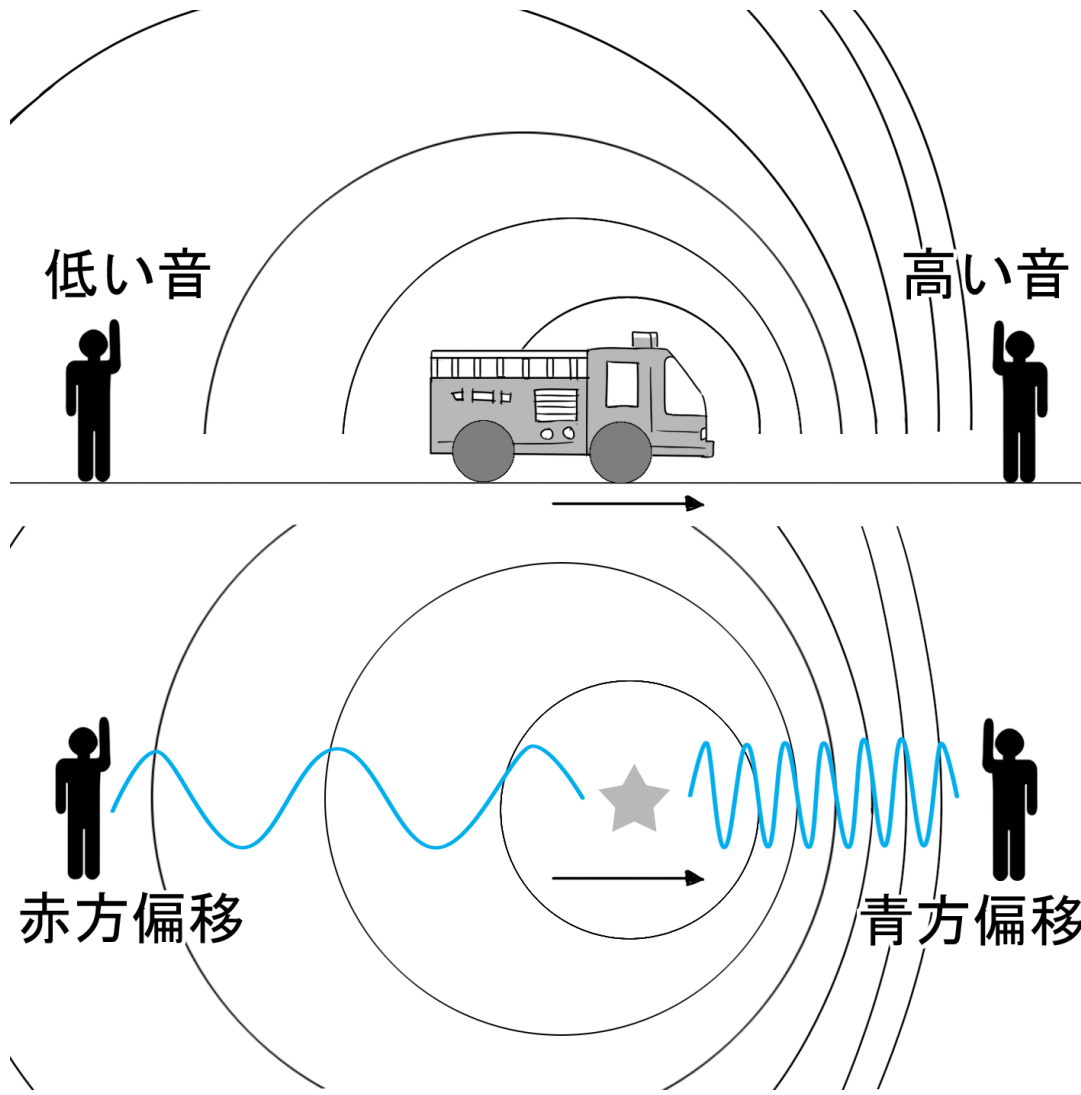
- 互いに近づくととき, 音の周波数は大きくなり (すなわち音は高くなり), 遠ざかるときは音は低い音に変化する.

音源と観測者が相対的に近づく

= 音が高くなる

音源と観測者が相対的に遠ざかる

= 音が低くなる



前回のミニッツペーパーから

ドップラー効果の仕組みを知って面白い現象だなと思いました。

ドップラー効果は聞いたことはあったけれど、詳しくは知らなかったのを知れて良かったです。

救急車が通る時に、音が変化して聞こえ、不思議に思っていたので、今日の授業でぐわしく知ることによって、よくなりました！

ドップラー効果で、救急車が通る前と後で音が変化するの、不思議だったのを、調べとけて良かったです。

高校の物理で習ったドップラー効果や、また授業で出たのを懐かしく感じました。普段何気なく聞ける音が、ドップラー効果という名が付いていることを知ることで、びっくりです。

救急車とかパトカーなどのサイレンが、近づく時と遠ざかる時と音を変えているのかなと最初は思っていたが、「ドップラー効果」というのが関係していることに深く興味を持った。

人とぶつかることによって振動数が変化するのかなと思いました。同じ一定の振動数でなくなるのが不思議に思いました。

救急車
ドップラー効果は救急車で知っていたから、ドップラー効果の宇宙について考えるとは思っていませんでした。人間の命では調子悪くてよかった。

【物理法則】

教科書 p209

ドップラー効果

救急車が近づくときや遠ざかるときに、聞こえる振動数が変化する。また、電車に乗っていると踏み切りの音が近づくときと遠ざかるときで変化する。このように、音源や観測者が移動することによって、本来伝わる音が高くなったり、低くなったりする現象（振動数・周波数が変化する現象）をドップラー効果という。

低い音

高い音

遠ざかるとき
低い音

近づくとき
高い音

振動数(周波数)

すれ違う時刻

時間

ドップラー効果

- 音速を V [m/s]、音源の移動速度を V_S [m/s]、観測者の移動速度を V_O [m/s] とする。音源の音の振動数を f_0 [Hz]、観測者の受け取る音の振動数を f' [Hz] の間には、
$$f' = \frac{V + V_O}{V - V_S} f_0 \quad (\text{A.23})$$
が成り立つ。 V_O と V_S の前の符号 (+, -) は、互いに近づくときの符号である。互いに離れるときは符号を逆にすればよい。
- 互いに近づくとき、音の周波数は大きくなり（すなわち音は高くなり）、遠ざかるときは音は低い音に変化する。

前回のミニッツペーパーから

耳の錯角ではなく波が影響しているのが面白くて、
もっと日常生活の中に溶けこんでいるドップラー効果について
調べてみたいと思いました。また、遠くほど赤に見える、近いほど
高く聞こえるなど、日常で生まれる疑問は錯角なのか、それとも
その裏に複雑な構造があるのか、を調査するのも面白そうだなと
感じました。

ドップラー効果には、音源だけでなく光も関係していることを初めて知りました。
遠くなるにつれ赤く見えるということは、青い地球もどきの惑星から見ると
赤く見えていると思うとおもしろいなと思いました。

最近夜に空に帰るとき、星を見ると白く光っている星も赤っぽく光って
見えていたことに、二つも遠めれば赤く見える現象の1つですか？

改めて考えると球急車が通った時と通り終わった時の音が違うからって
気づかずにいました。星を観望していた時に星1つ1つ色が違うことで、疑問
が湧いたが、距離が理由であることを知って、良かったです。

【物理法則】

教科書 p209

ドップラー効果

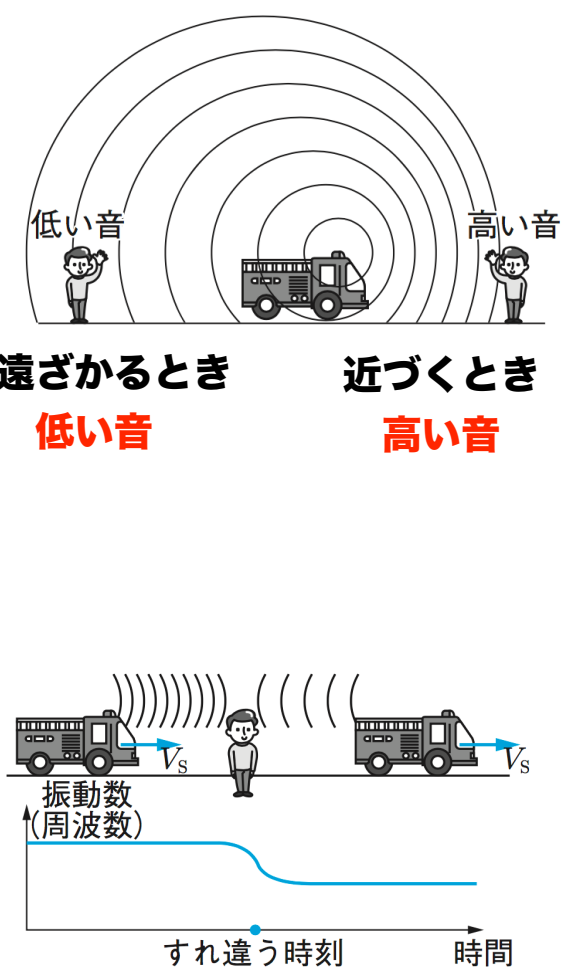
救急車が近づくときや遠ざかるときに、聞こえる振動数が変化する。
また、電車に乗っていると踏み切りの音が近づくときと遠ざかるときで
変化する。このように、音源や観測者が移動することによって、本来伝
わる音が高くなったり、低くなったりする現象（振動数・周波数が変化
する現象）をドップラー効果という。

ドップラー効果

- 音速を V [m/s]、音源の移動速度を V_S [m/s]、観測者の移動速度を V_O [m/s] とする。音源の音の振動数を f_0 [Hz]、観測者の受け取る音の振動数を f' [Hz] の間には、
$$f' = \frac{V + V_O}{V - V_S} f_0 \quad (\text{A.23})$$
が成り立つ。 V_O と V_S の前の符号 (+, -) は、互いに近づくときの符号である。互いに離れるときは符号を逆にすればよい。
- 互いに近づくとき、音の周波数は大きくなり（すなわち音は高くなり）、遠ざかるときは音は低い音に変化する。

遠ざかるとき
低い音

近づくとき
高い音



70

違います。
肉眼で見える赤い星は、赤い星です。

赤方偏移が生じるのは、遠くの銀河です。

13

前回のミニッツペーパーから

【3-2】 波の速度を v [m/s], 波長を λ [m], 振動数を f [Hz]とすると,
[$v=f\lambda$] の関係が成り立つ.

【3-3】 ドップラー効果によると観測者と音源が相対的に動くと音の [B 振動数] が変化する. 互いに近づくと音の [B] は [C 高く] となる. 光も波であり, 音と同様にドップラー効果を受ける. 光源が遠ざかると, 光の [B] は [D 低く] となるので, 本来の色より [E 赤っぽく] となる.

Bの選択肢: 振幅, 振動数, 波長, 速度

C,Dの選択肢: 大きく, 小さく, 高く, 低く, 長く, 短く

Eの選択肢: 赤っぽく, 青っぽく

前回のミニッツペーパーから

身近で体験ある事のできるドップラー効果が宇宙とも関係しているのは興味深かった。
銀河の光に赤方偏移がみられることで宇宙が膨張を
発見したのはすごいと思った。

ドップラー効果や赤方偏移の仕組みを学んで、
宇宙がどのように膨張しているかを具体的に理解することになった。
音のドップラー効果のように身近な現象に置きかえて、
説明出来ることに関心をもった。

前回の問題の中にあつたドップラー効果について理解することができた。なぜ近くなると
耳がキンキンするんだろ？という疑問が解消された。また、宇宙の中心が地球で
ない理由も風船の原理を用いて説明されて、なるほどと思った。
これから発表されるノーベル賞が楽しみです。

本日のテーマ

宇宙が膨張していることはどうしてわかったのか？

教科書 p157

1929年 宇宙膨張の発見

「ハッブル・ルメートルの法則」と呼ぶことに、2019年、国際天文学連合（IAU）が議決しました。

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)



ハッブルの宇宙膨張の法則（1929年）

$$v = H_0 d \quad (5.9)$$

銀河の後退速度 = ハッブル定数 H_0 × 銀河までの距離

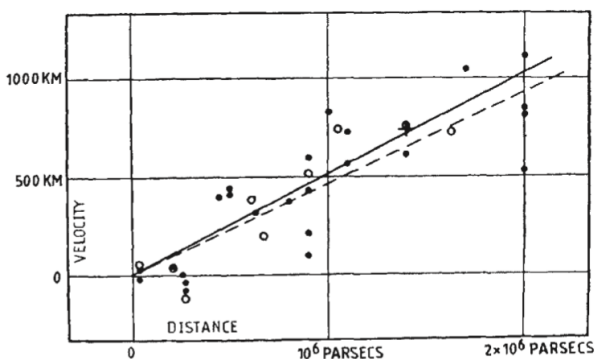


図 5.7 ハッブルが 1929 年に発表した図。横軸は距離、縦軸は銀河の後退速度。このグラフの傾きがほぼ一定になることが、ハッブルの法則である。ハッブルが報告した値は、 $H_0 = 530 \text{ km/s/Mpc}$ だった。現在値は $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$ 。

光の「ドップラー効果（赤方偏移）」から

63

遠方の銀河ほど速く遠ざかる、だが我々は宇宙の中心ではない

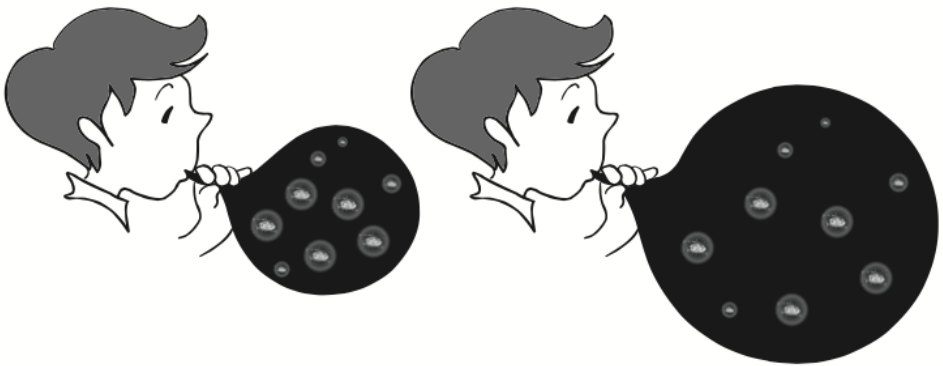


図42 遠方の銀河ほど速く遠ざかっている、というハッブルの法則は、我々が宇宙の中心にいることを意味するわけではない。

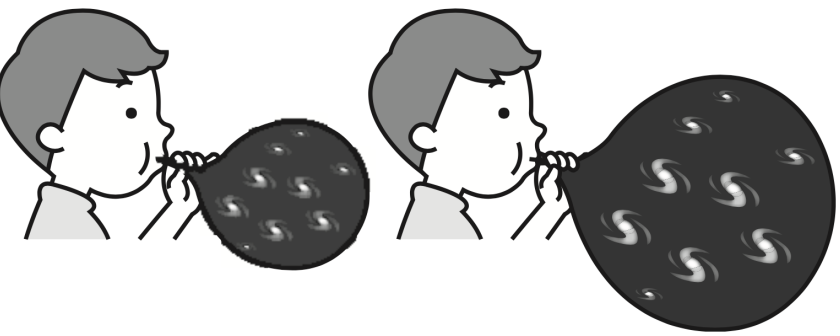
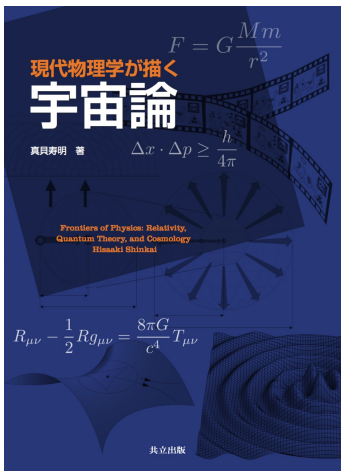
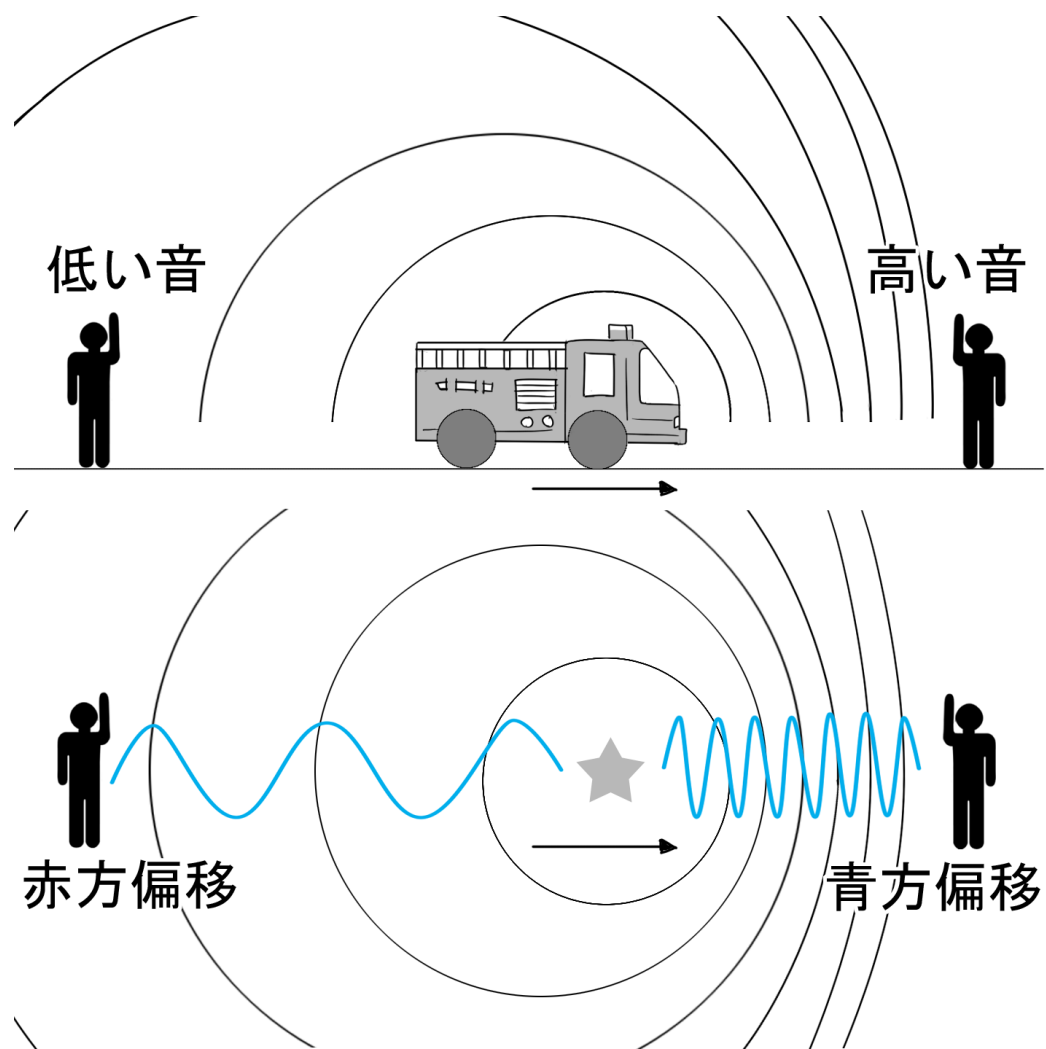


図 5.8 宇宙の中心はどこ？





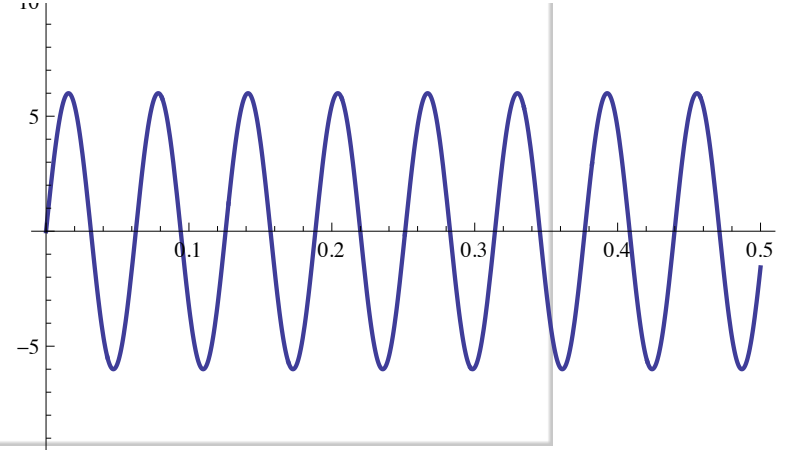
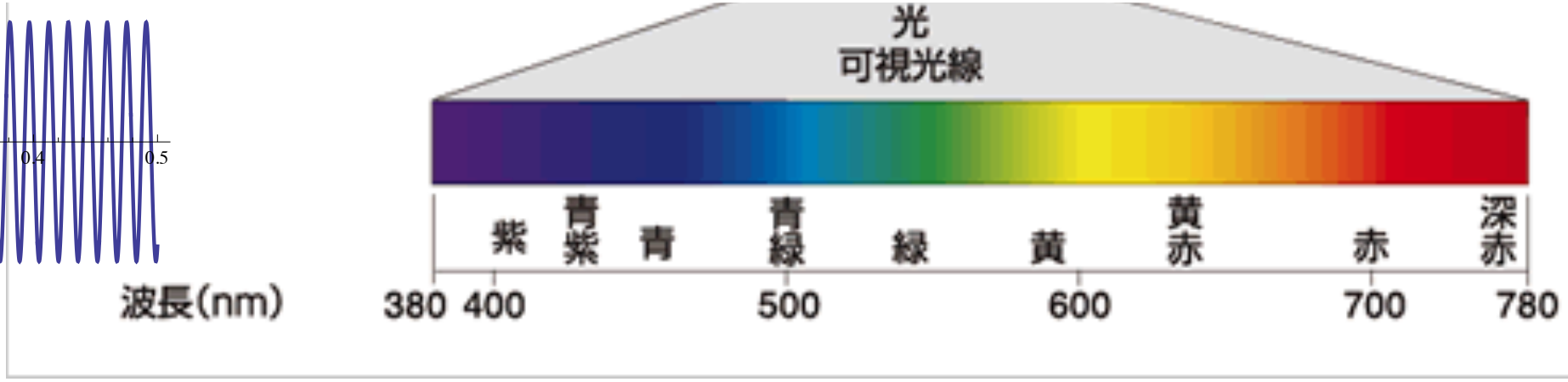
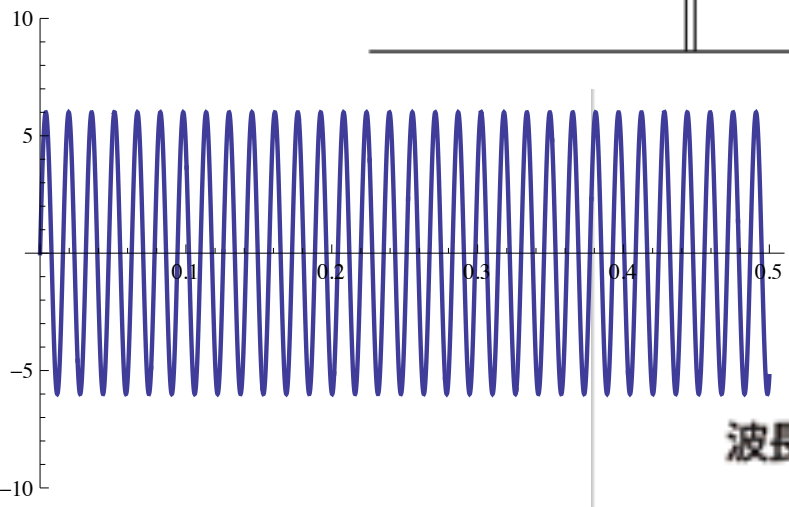
音源と観測者が相対的に近づく

=音が高くなる

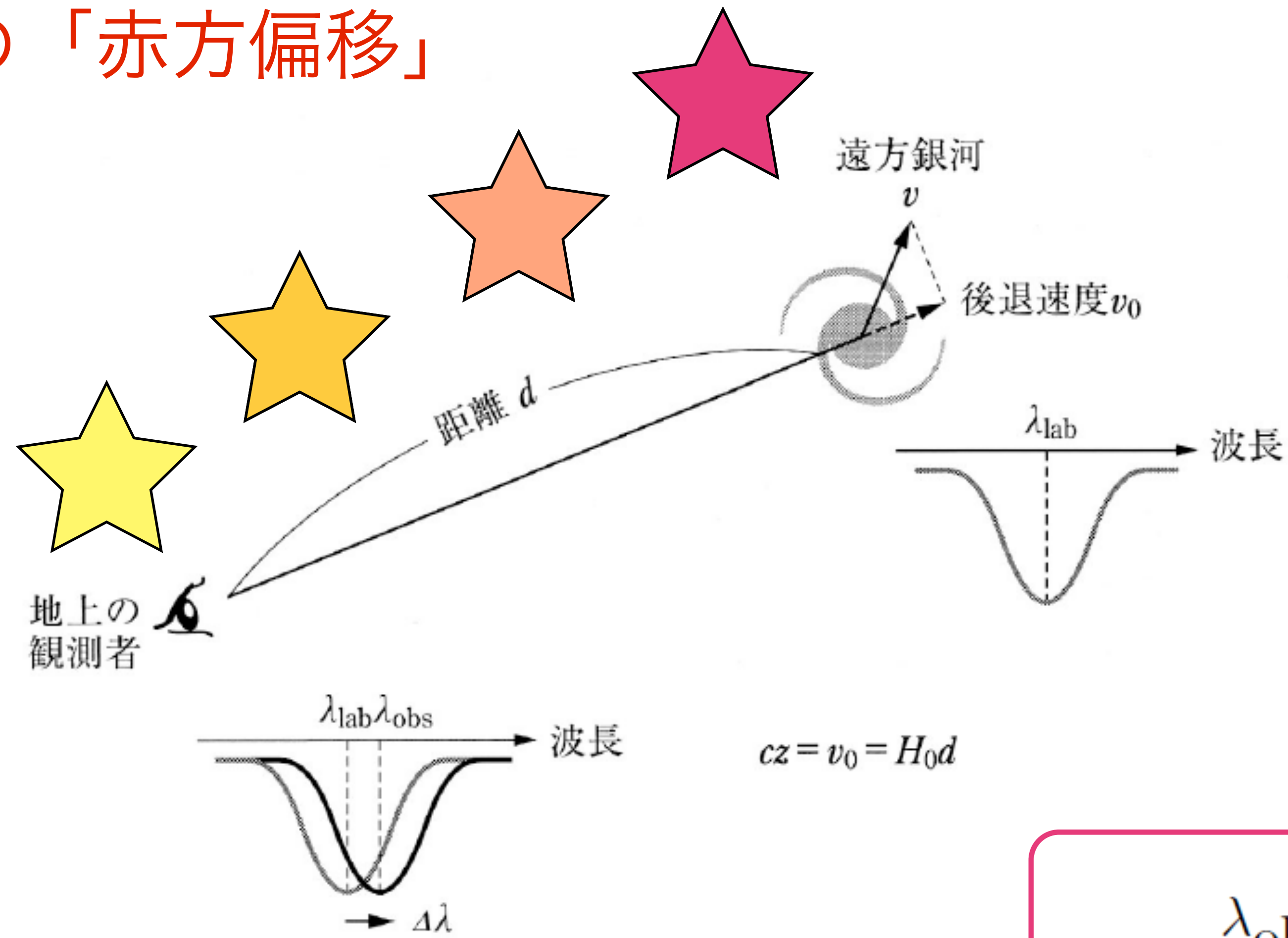
音源と観測者が相対的に遠ざかる

=音が低くなる

	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波					
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波
波長[m]	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	3.8×10 ⁻⁷	7.7×10 ⁻⁷	10 ⁻⁴	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	
波長[nm]				380	770							
振動数[Hz]		3×10 ¹⁸	3×10 ¹⁷				3×10 ¹²	3×10 ⁸	3×10 ⁷	3×10 ⁶	3×10 ⁵	3×10 ⁴
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	F Mラジオ テレビ	短波ラジオ	A Mラジオ	飛行機の通信 電波時計	



光の「赤方偏移」



赤方偏移パラメータ

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_S}{\lambda_S}$$

コラム 30 宇宙膨張はハッブルの発見か

宇宙膨張を報告したのは 1929 年のハッブルの論文だというのが通説だ. 速度と距離の比例定数をハッブル定数 H_0 というのも広く知れ渡っている. しかし, ルメートルの 1927 年のフランス語の論文では, すでに銀河の後退速度が宇宙膨張によるものだと述べられていて, 「ハッブル定数」がほぼ同じ値で計算されていた, という事実が, 2011 年になって研究者間で話題になった.

ルメートルの論文はほとんど知られていなかったが, 1931 年に英訳されて英国王立天文学会誌に掲載されている. だが, その際に, ハッブルの業績と重なる部分は故意に訳されずに, 抜け落ちていることも指摘された. ハッブル定数の計算に関する式の一部と, 本文および脚注がすっぽりと抜け落ちているのである.

ハッブルの観測結果は, 図 5.7 に紹介したが, 以前から「これだけまばらなデータから, 宇宙膨張をすぐに結論したのはなぜか」という疑問は物理学者の間でよく話題になっていた. ハッブルの慧眼だ, と説明されることも多かったが, 直前にルメートルの業績を知っていたなら理解できる. ルメートルは神父でもあったので, 「謙虚で超越した聖人 vs 科学発見の先取権に強欲な悪人」という構図も考えられ, かくして, ハッブル本人の悪人説や, ハッブルを怒らせることを恐れた英国王立天文学会悪人説などいろいろな憶測が飛び交うことになった.

2011 年の最後になって, この騒動に終止符を打つ報告があった. 英訳したのは, ルメートル本人であり, 該当箇所を削除したのもルメートルだというのだ. その理由については不明であるが, ハッブル悪人説は誤解だったことになる (悪人ではなかったことが証明されたわけではないが). いずれにせよ, ルメートルの業績について再評価が進んでおり, 1927 年の彼の論文の引用件数も増加している.

参考: 須藤靖, 日本物理学会誌, 2012 年 5 月号, p311

【話題】「ハッブル・ルメートルの法則」と呼ぶことに, 2018年, 国際天文学連合(IAU)が議決



INTERNATIONAL
ASTRONOMICAL
UNION

[Home](#) | [About IAU](#) | [Member Directory](#) | [Site Map](#) | [Contact Us](#) | [Login](#)

[News](#)

[Science](#)

[Publications](#)

[Administration](#)

[Education](#)

[IAU for the](#)

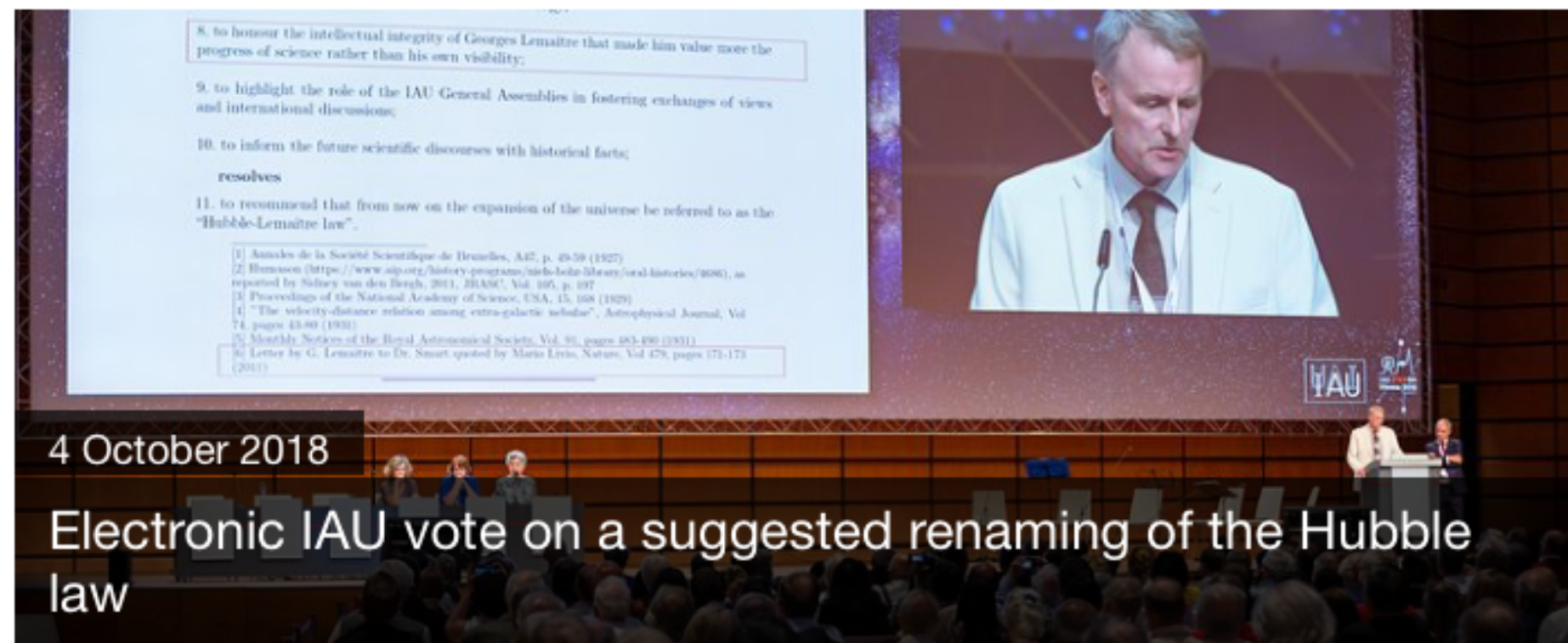
[Astronomy](#)

[Home](#) / [News](#) / [Announcements](#)

/ [Electronic IAU vote on a suggested renaming of the Hubble law](#)

ann18048 — Announcement

[Subscribe to the IAU e-Newsletter.](#)



4 October 2018

Electronic IAU vote on a suggested renaming of the Hubble law

[Click to Enlarge](#)

During its XXX General Assembly in Vienna (in August 2018), the International Astronomical Union (IAU) put forward a draft resolution to rename the Hubble law as the “Hubble–Lemaître law”. The resolution was proposed to recognise Lemaître’s research on the expansion of the Universe, and to pay tribute to both Lemaître and Hubble for their fundamental contributions to the development of modern cosmology. This resolution has now been put to all IAU Junior and Individual Members via an electronic vote.

To acknowledge the fundamental scientific contributions of both Georges Lemaître and Edwin Hubble to the scientific theory of the expansion of the Universe [1] [2] [3] [4], the International Astronomical Union (IAU) has proposed a resolution ([Resolution B4](#)) that would have the effect of renaming the Hubble law as the “Hubble–Lemaître law”. This resolution was put forward after a period of extensive consultation with the astronomical community and it was one of the most intensely discussed proposals presented at the [XXX General Assembly](#) of the IAU.

Search iau.org

Search

[Twee](#)

Follow the IAU on social
media



About the Announcement

Id:

ann18048

Images



[PR Image ann18048a](#)

IAU Resolutions being
presented at the GA 2018

投票用紙, 真貝も 1 票



Vote on Resolution B4 "on a suggested renaming of the Hubble Law"

Dear IAU Member,

you are invited to express your vote on the Resolution B4 "on a suggested renaming of the Hubble Law" by ticking one of the following three options:

- ☐ I approve the Resolution B4
- ☐ I reject the Resolution B4
- ☐ I abstain

Please find more details about the vote and an announcement on this resolution here:

<https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann18048/>

The Resolution will be approved by simple majority, abstentions do not count. The voting will close on October 26th at 23:59 pm UTC.

How do you vote regarding Resolution B4 "on a suggested renaming of the Hubble Law" ?

Please note you have 1 choice(s) in this vote. Also, you have to select a minimum of 1 choice(s).

This is compulsory to complete.

☐ I approve the Resolution B4

☐ I reject the Resolution B4

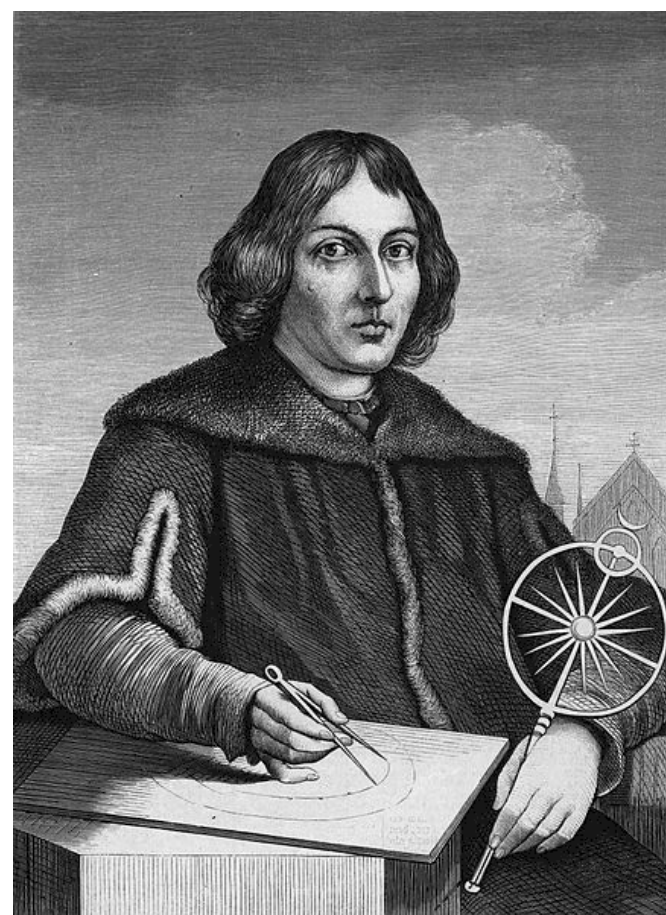
☐ Abstain

[Next step](#)

近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス

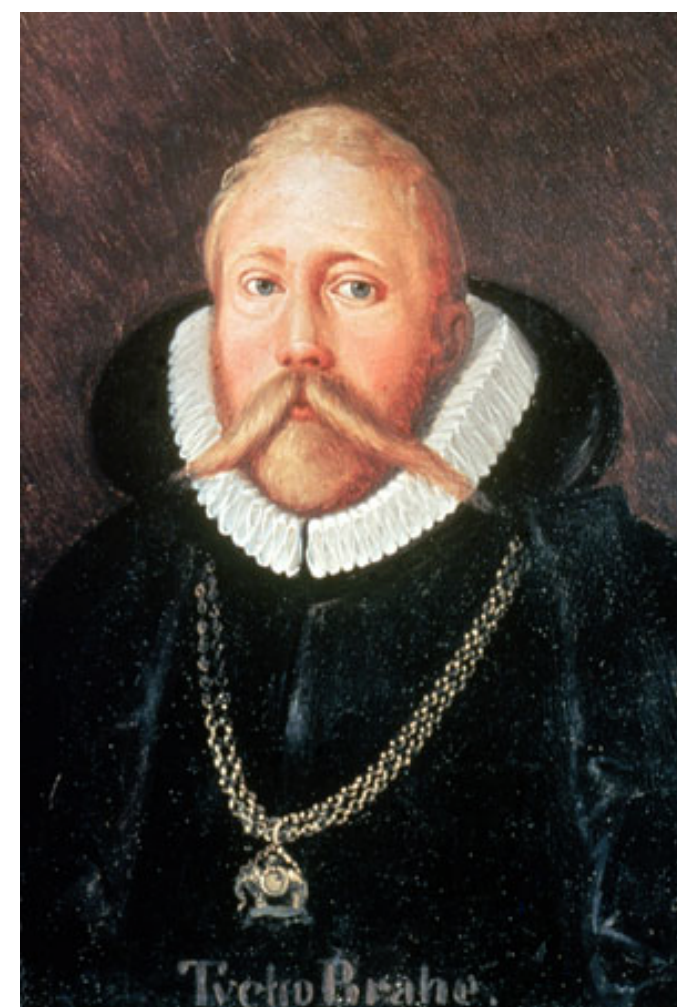
Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



地動説

ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



天体観測

ケプラー

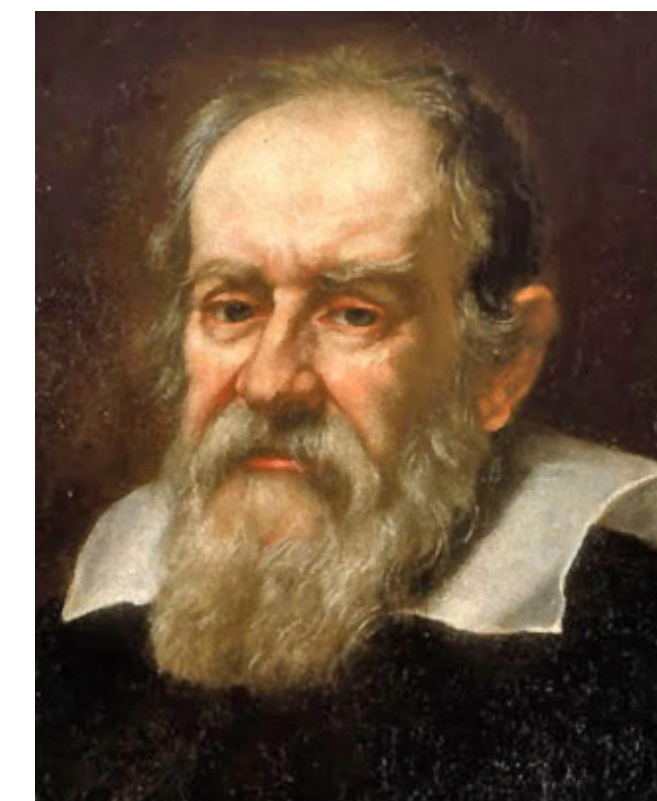
Johannes Kepler
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

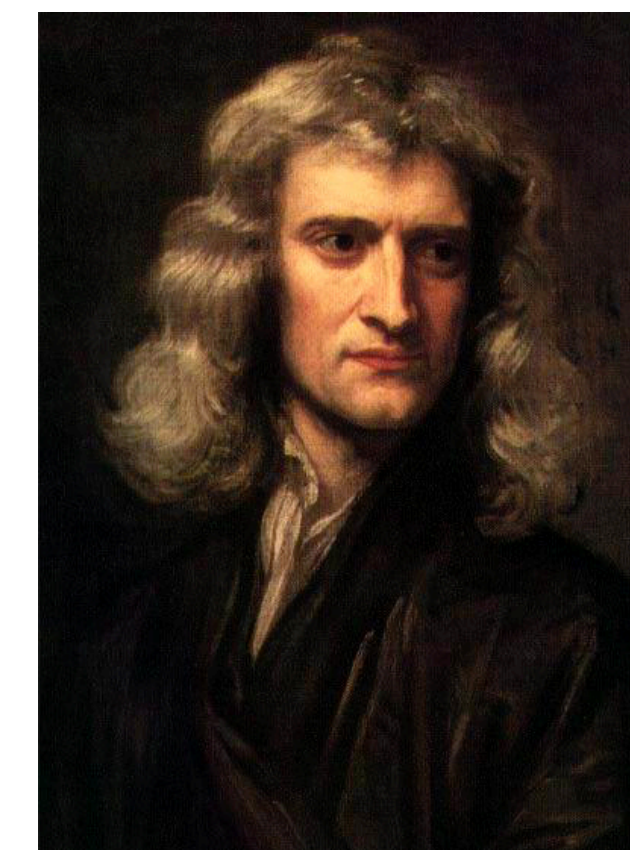
Galileo Galilei
(1564-1642)



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)



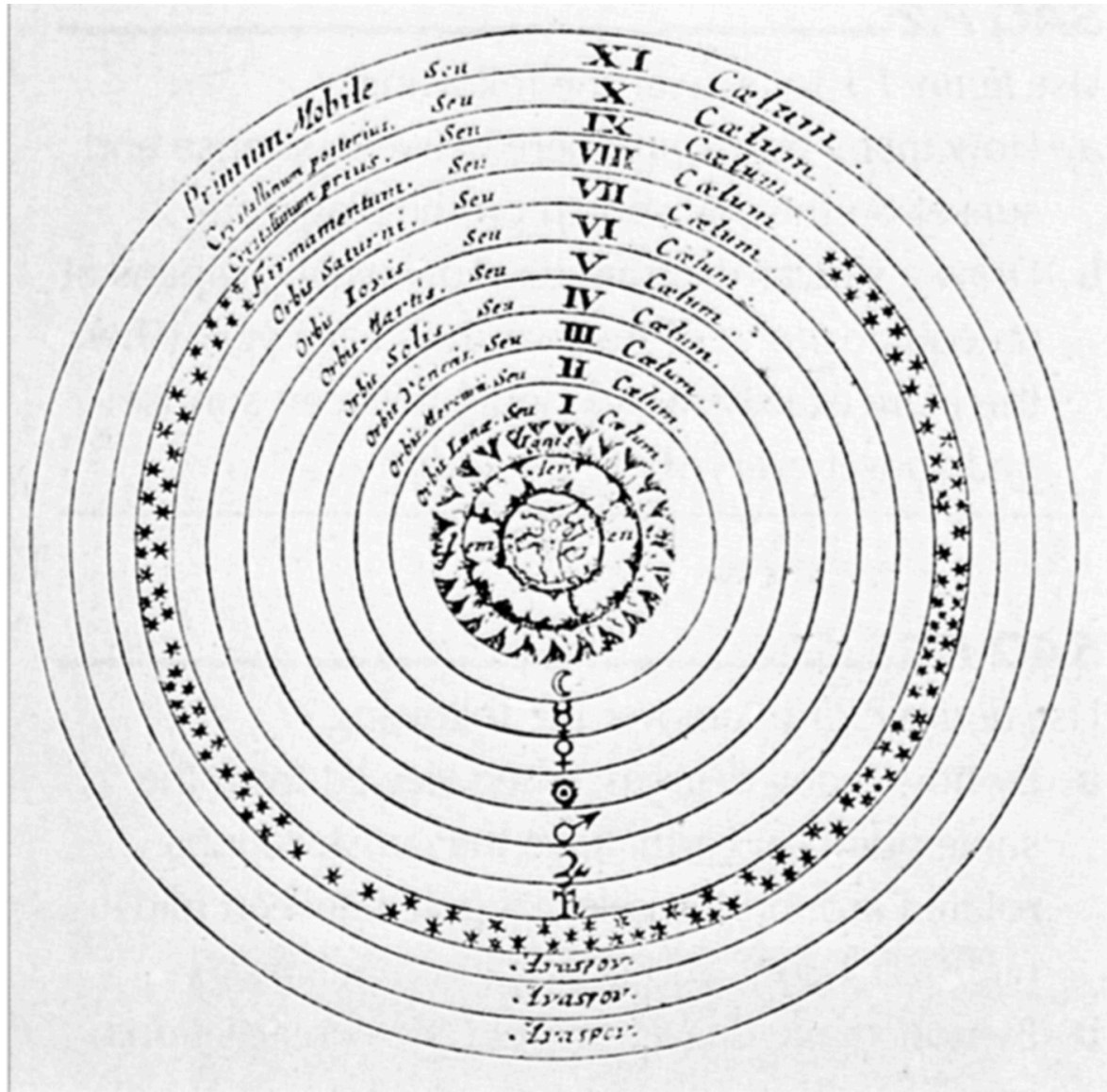
運動の法則
万有引力

2.1 コペルニクス以前の宇宙観

2.1 コペルニクス以降の宇宙観

地球中心説（天動説）

Claudius Ptolemaeus
83年頃 - 168年頃



太陽中心説（地動説）

Nicolaus Copernicus
(1473–1543)

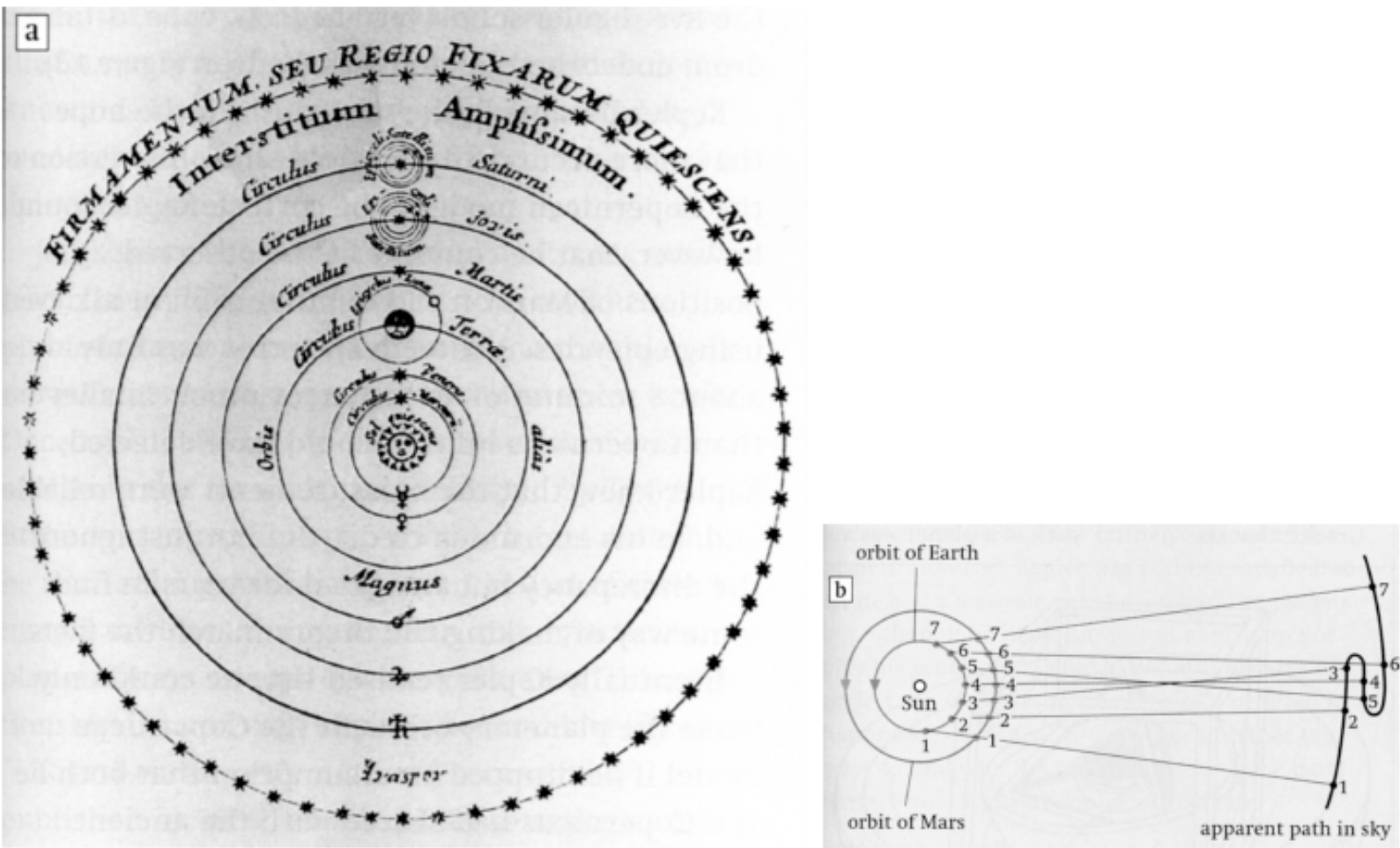
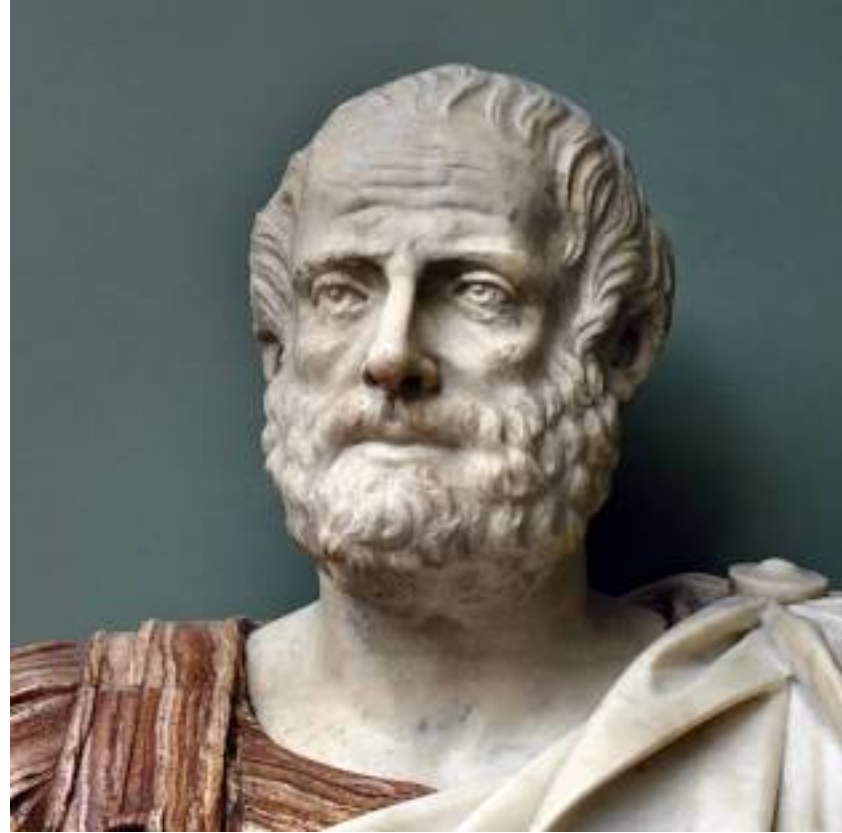
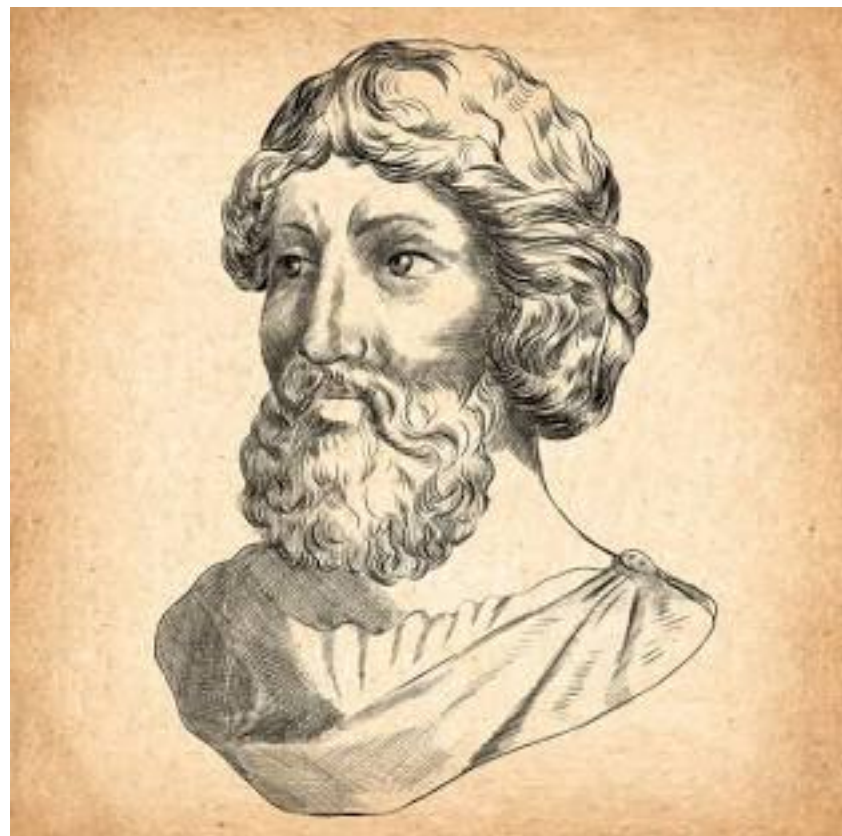


図 13: コペルニクスによる天球図（地動説）。火星の位置が逆行することが自然に説明できることが述べられている。([1] より)

2.1 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。

異端の説

2.1 コペルニクス以前の宇宙観

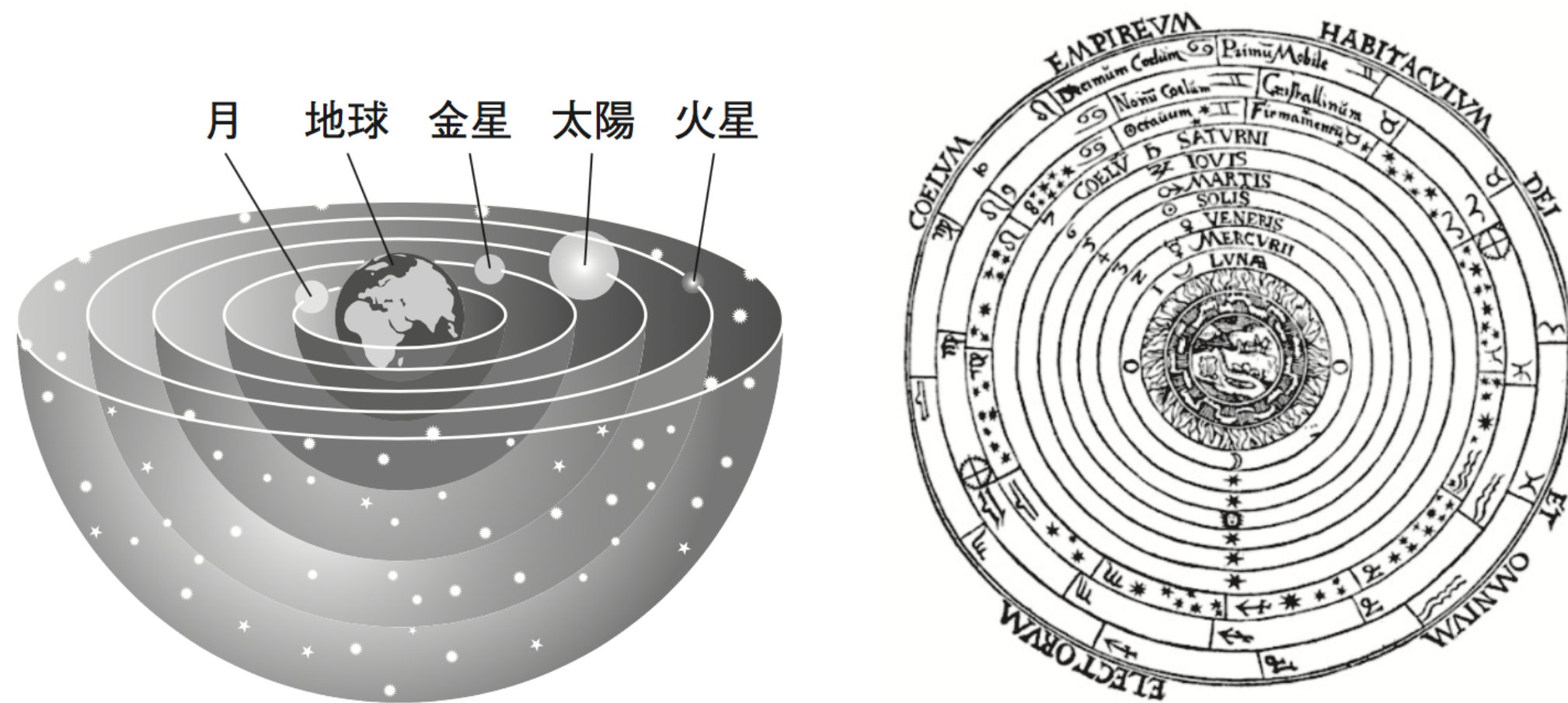
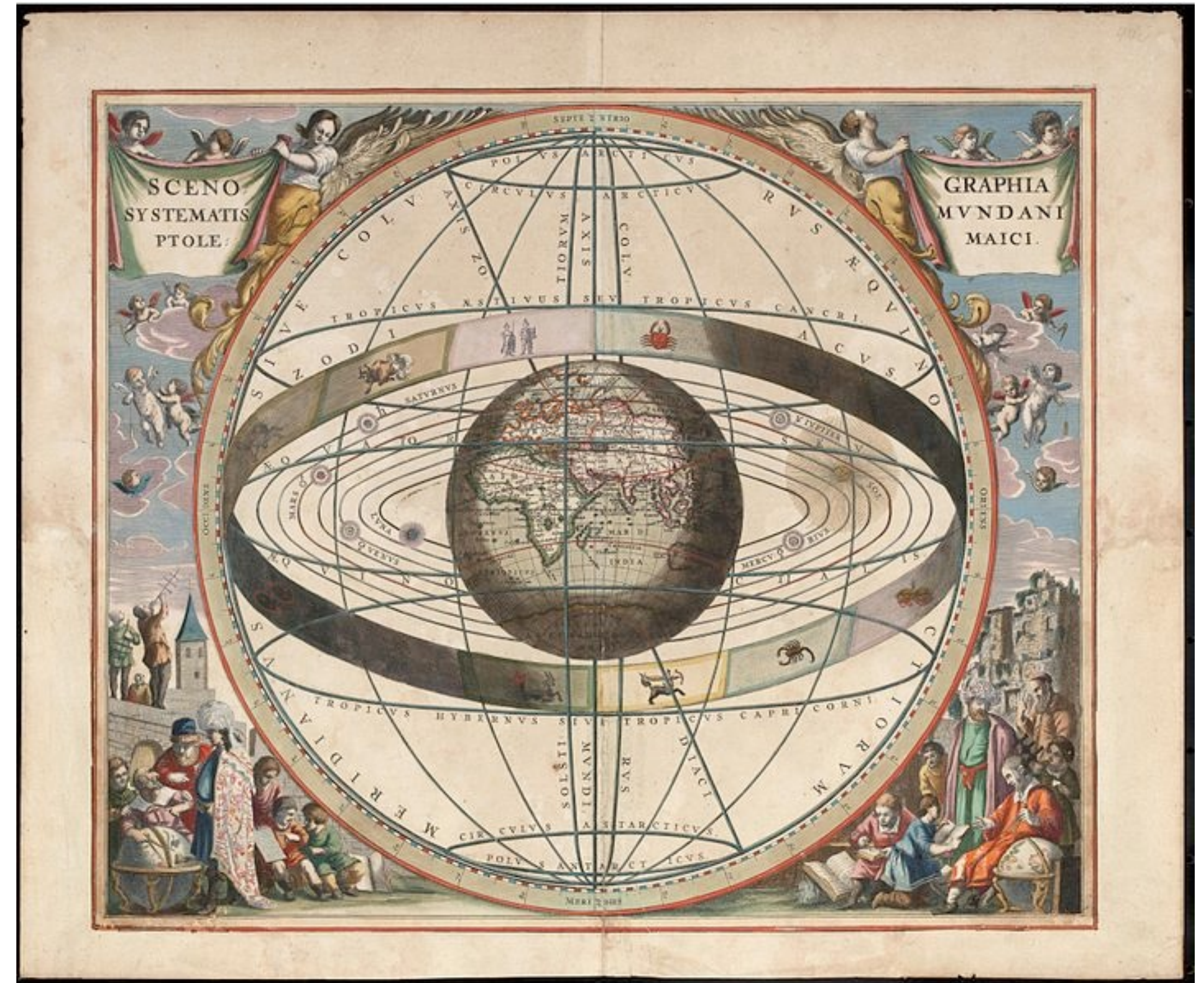


図 2.2 [左] アリストテレスの天球モデル. [右] Peter Apian 著の Cosmographia (1539) に描かれたアリストテレスの天球モデルの説明図.



地球中心説
プトレマイオス(2c)

2025年の惑星観望

水金地火ケレス木土天海冥・ハウメア・マケマケ・エリス

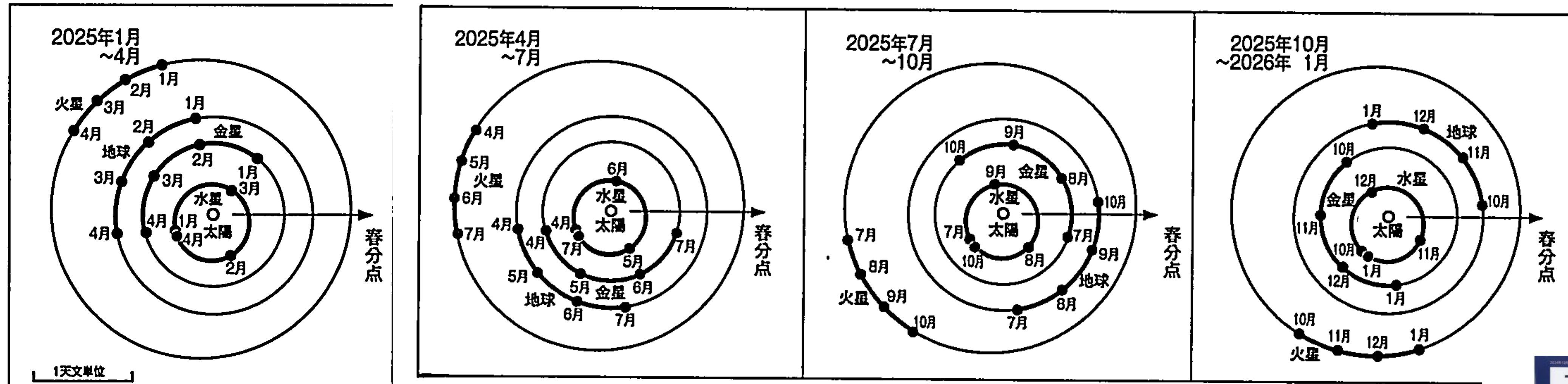


図2 3ヵ月ごとの内側惑星の動き ・印は毎月1日の位置

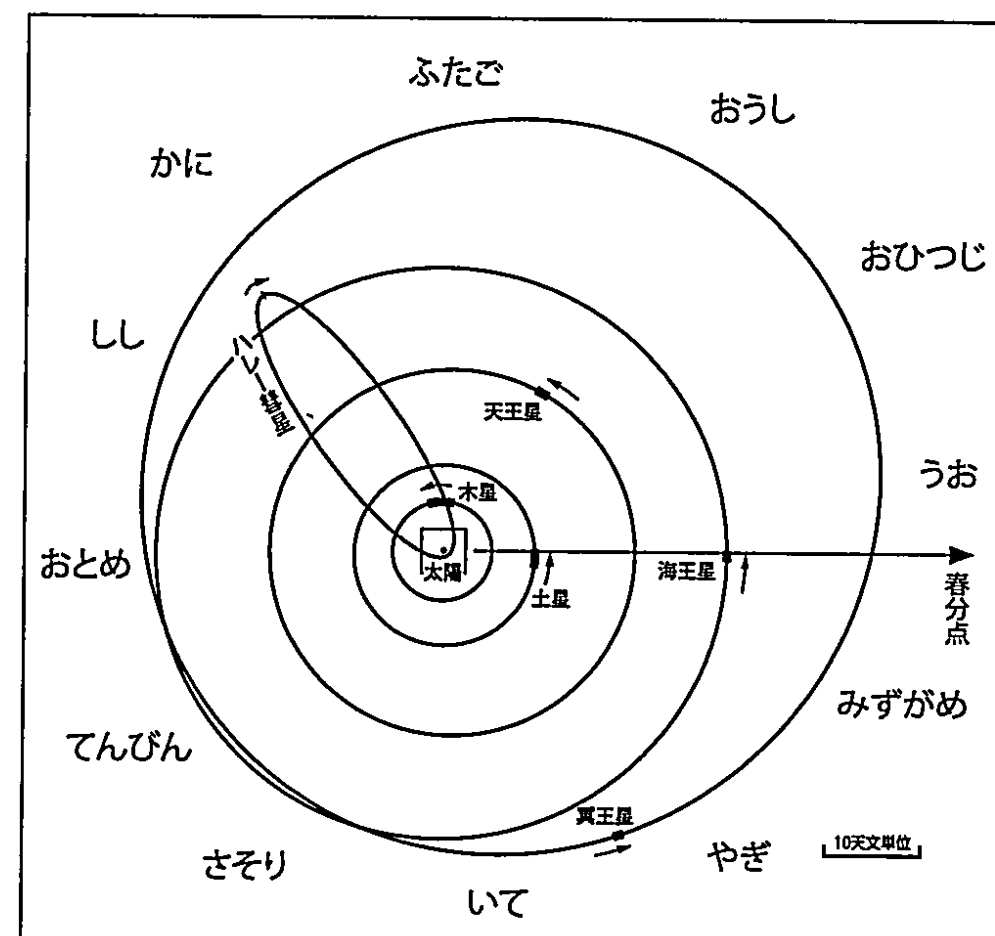
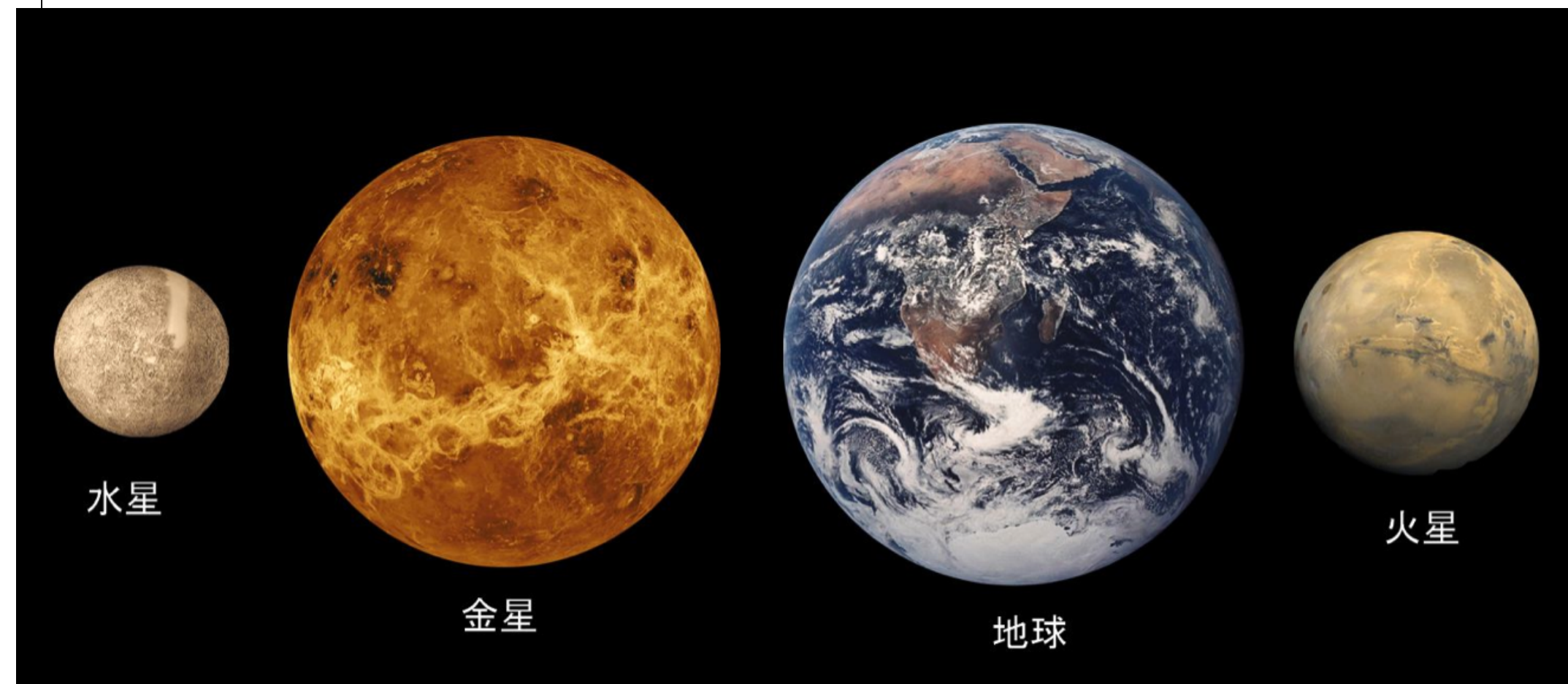


図1 2025年の太陽系（太線は今年中に動く範囲）



火星

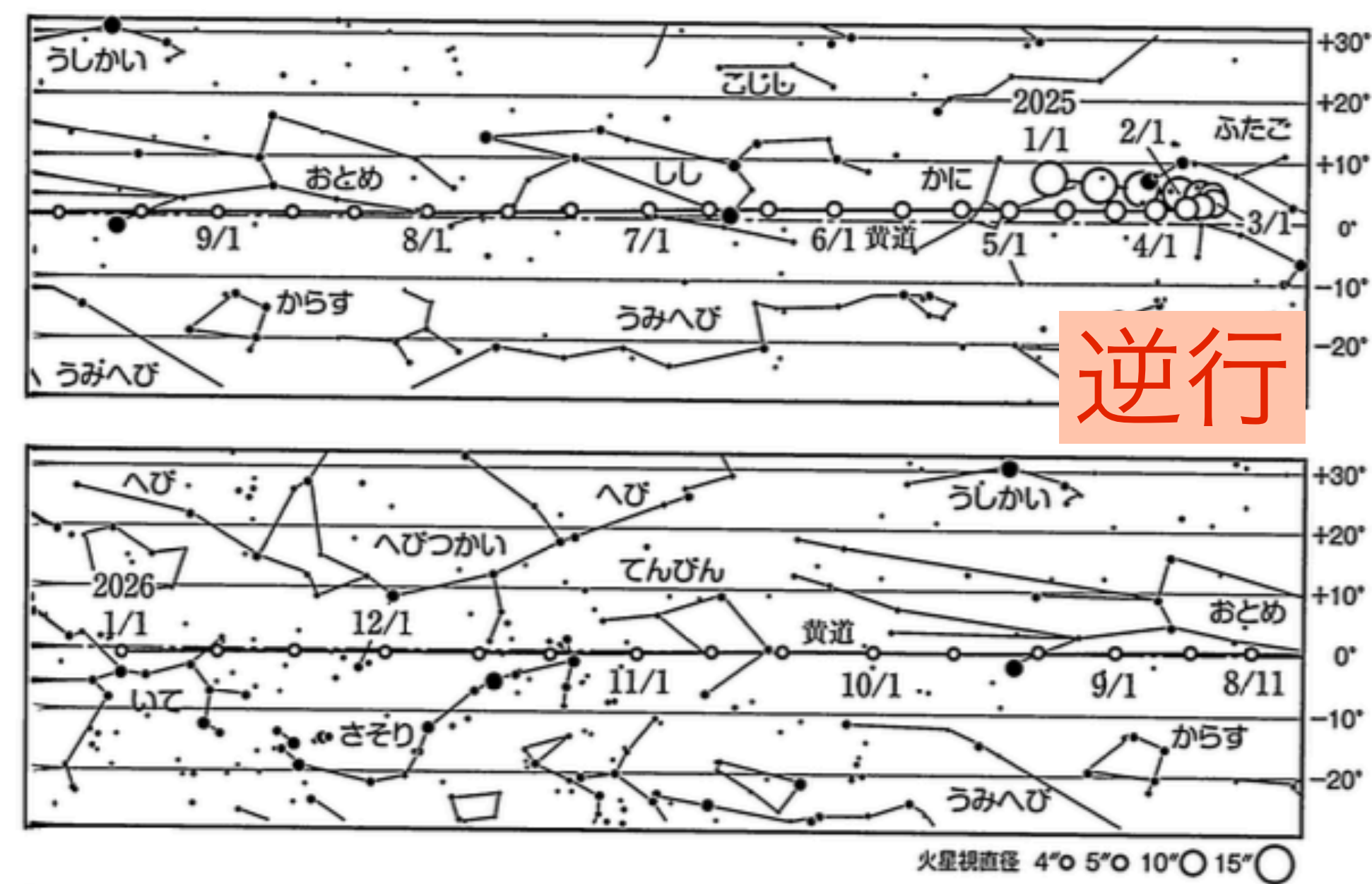


図2 2025年 星座間の火星の動き (黄道中心図, 毎月1・11・21日の位置)

木星

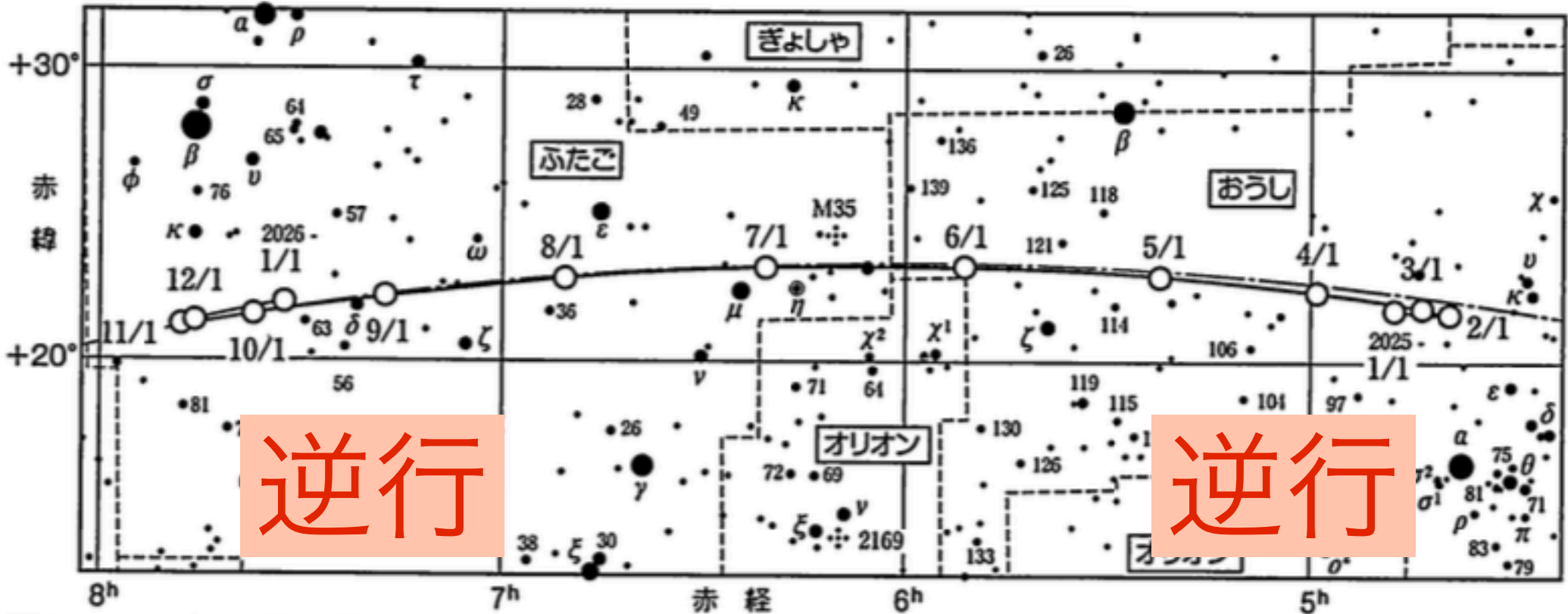


図2 2025年 星座間の木星の動き (毎月1日の位置)

土星

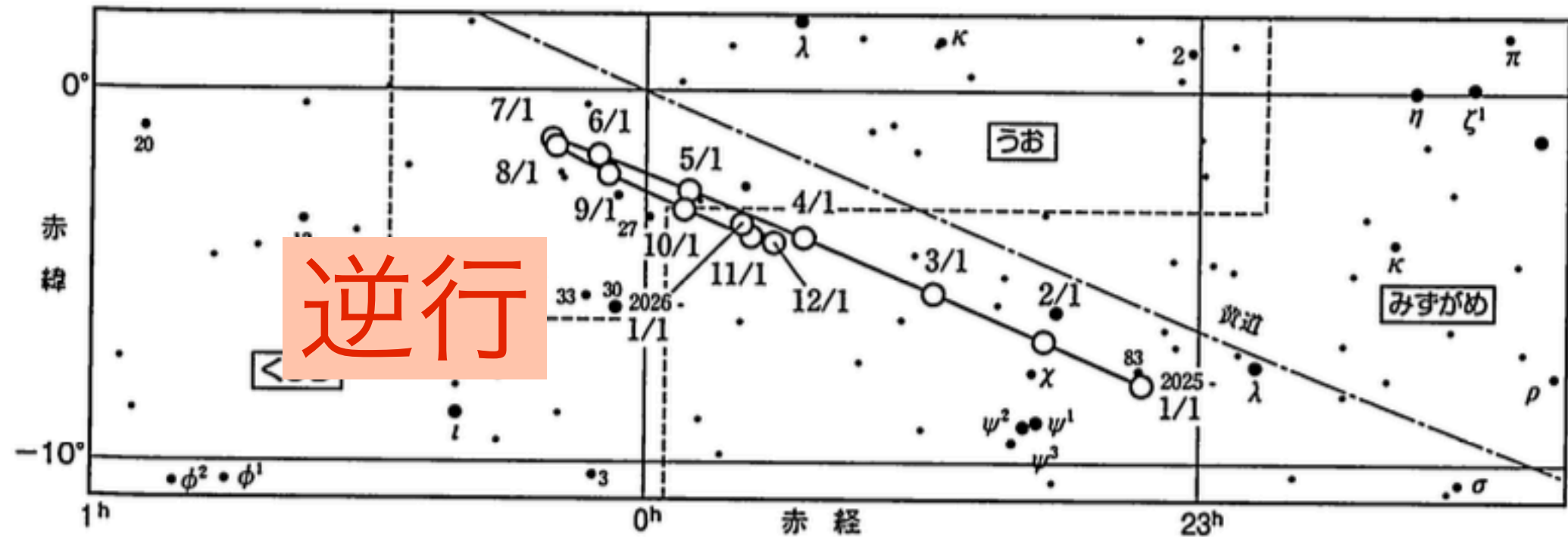


図2 2025年 星座間の土星の動き (毎月1日の位置)

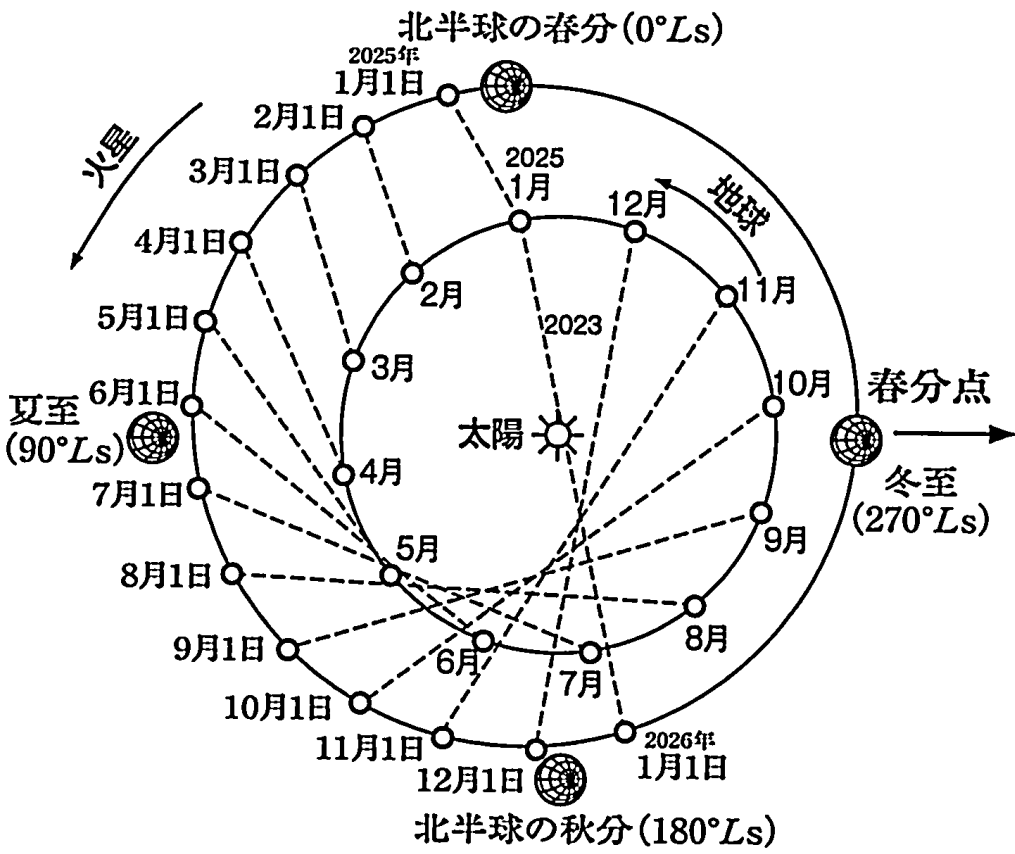
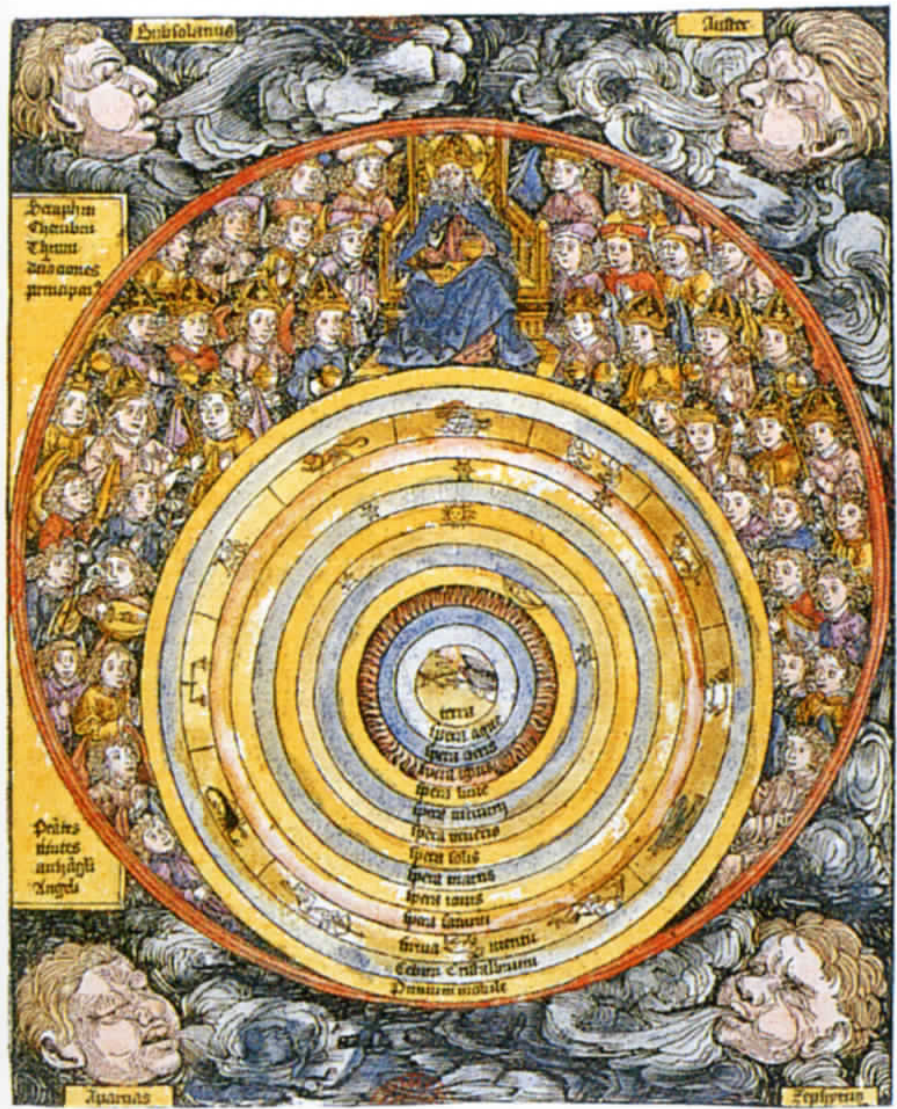


図1 2025年 地球と火星の位置

プトレマイオス(2c) 惑星の逆行は, 周天円で説明できる

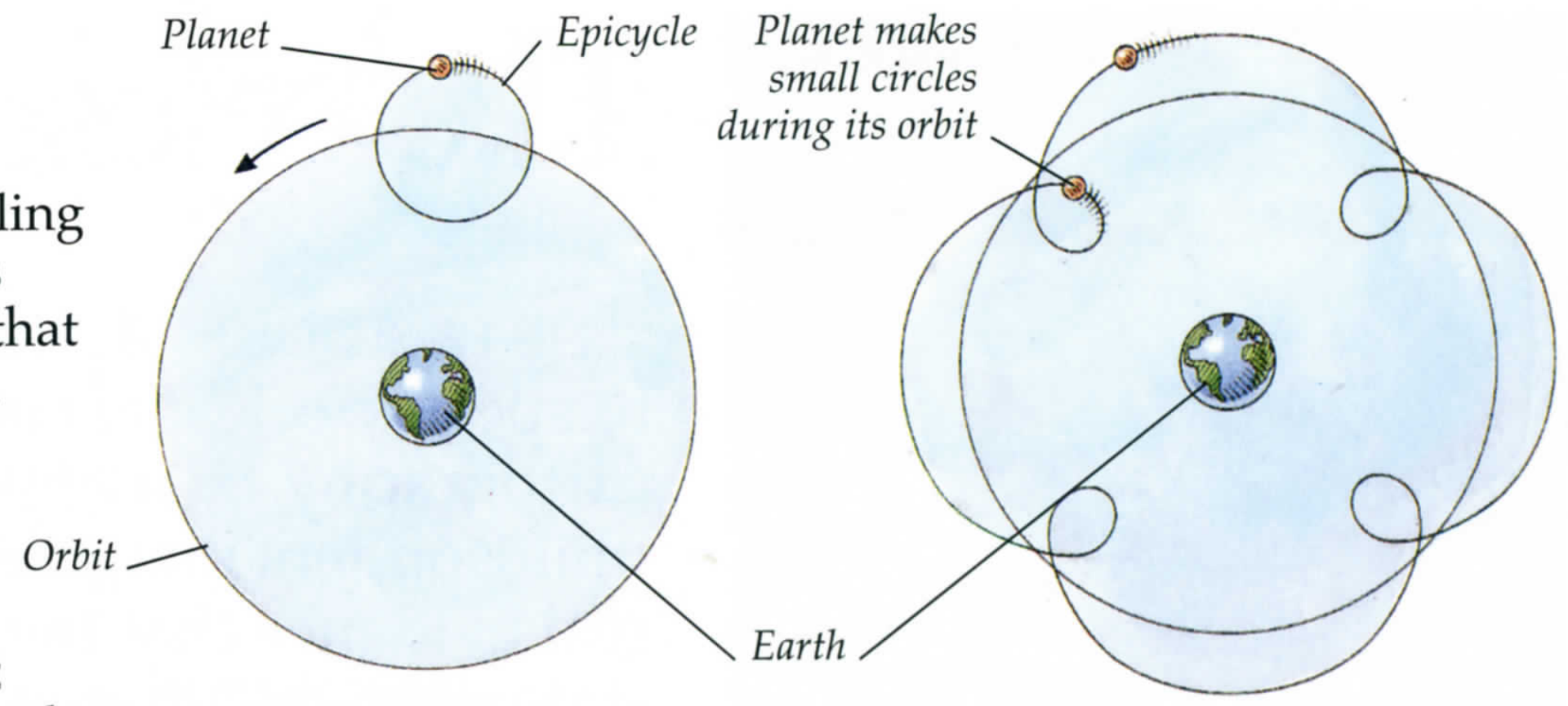
Geocentric Universe

It is logical to make assumptions from what your senses tell you. From the Earth it looks as if the heavens are circling over our heads. There is no reason to assume the Earth is moving at all. Ancient philosophers, naturally, believed that their Earth was stable and the centre of the great cosmos. The planets were arranged in a series of layers, with the starry heavens – or the fixed stars as they were called – forming a large crystalline casing.

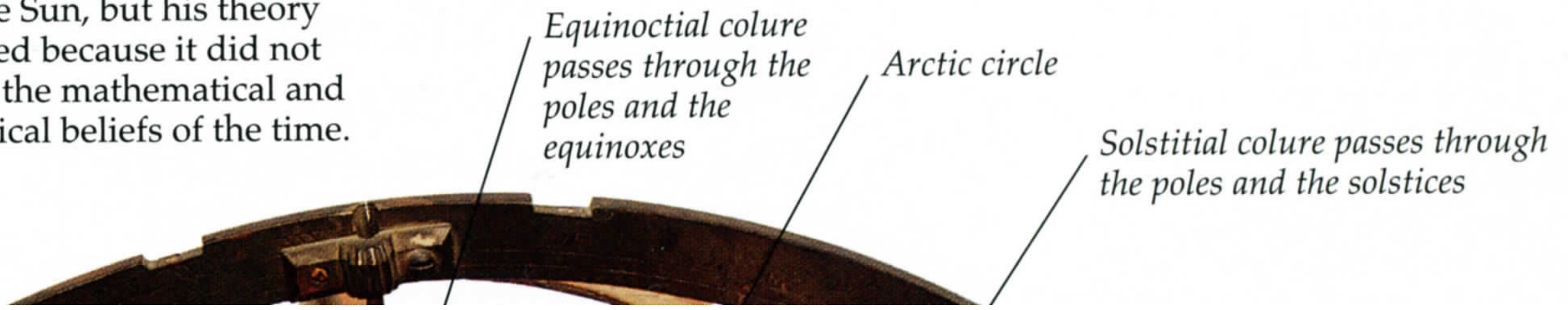


Engraving (1490) of the Ptolemaic Universe

THE EARTH AT THE CENTRE
The geocentric or Earth-centred Universe is often referred to as the Ptolemaic Universe by later scholars to indicate that this was how classical scientists, like the great Ptolemy, believed the Universe was structured. He saw the Earth as the centre of the Universe with the Moon, the known planets, and the Sun moving around it. Aristarchus (c. 310-230 BC) had already suggested that the Earth travels around the Sun, but his theory was rejected because it did not fit in with the mathematical and philosophical beliefs of the time.

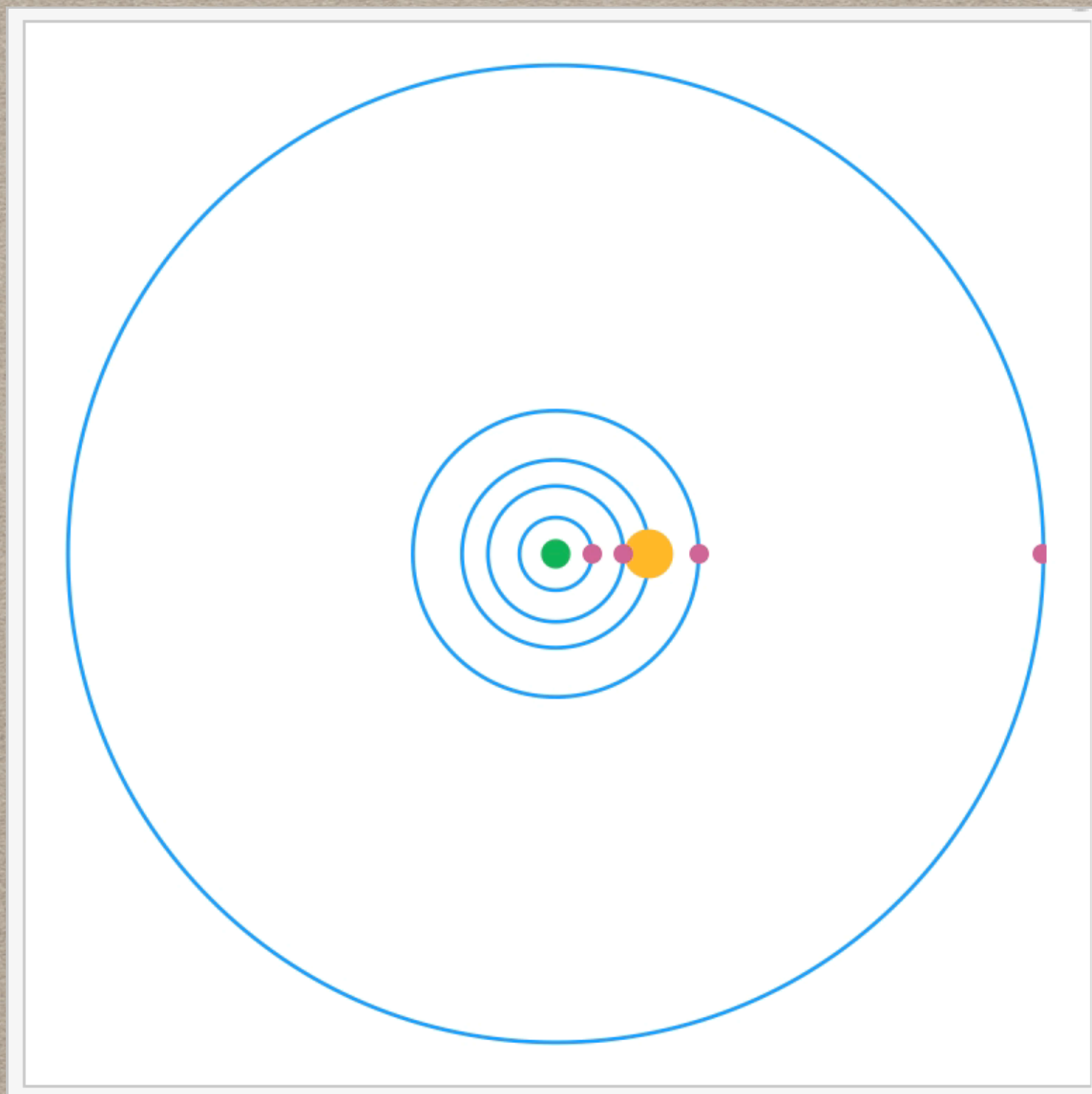


PROBLEMS WITH THE GEOCENTRIC UNIVERSE
The main problem with the model of an Earth-centred Universe was that it did not help to explain the apparently irrational behaviour of some of the planets, which sometimes appear to stand still or move backwards against the background of the stars (p. 19). Early civilizations assumed that these odd movements were signals from the gods, but the Greek philosophers spent centuries trying to develop rational explanations for what they saw. The most popular was the notion of epicycles. The planets moved in small circles (epicycles) on their orbits as they circled the Earth.



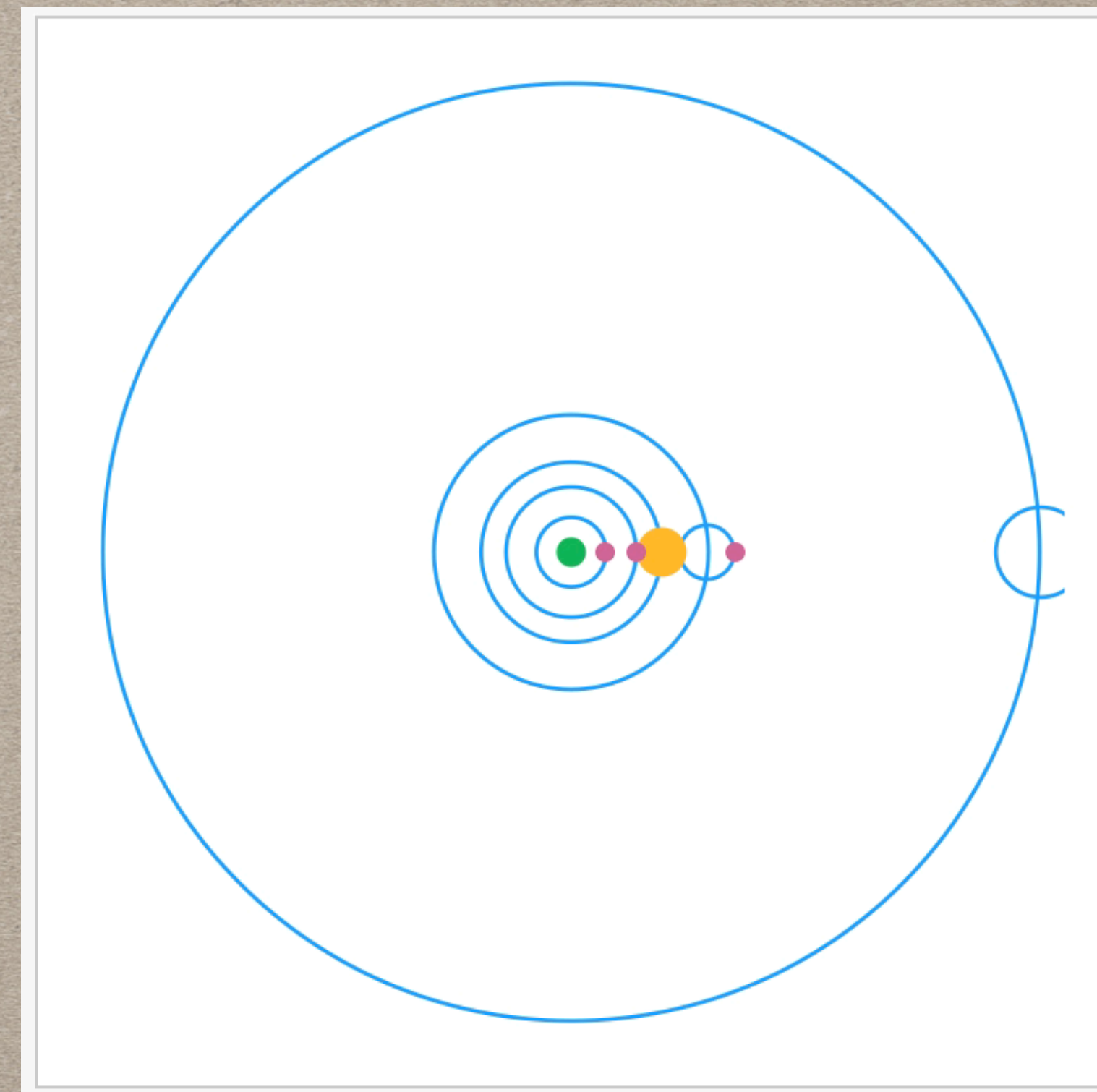
地球中心説 (天動説)

周天円 (epicycles)



天動説

Claudius Ptolemaeus
克劳狄斯 托勒密



天動説＋周天円

2.1.2 コペルニクス『天体の回転について』(1543)



地動説 (heliocentric theory)
コペルニクス(16c)

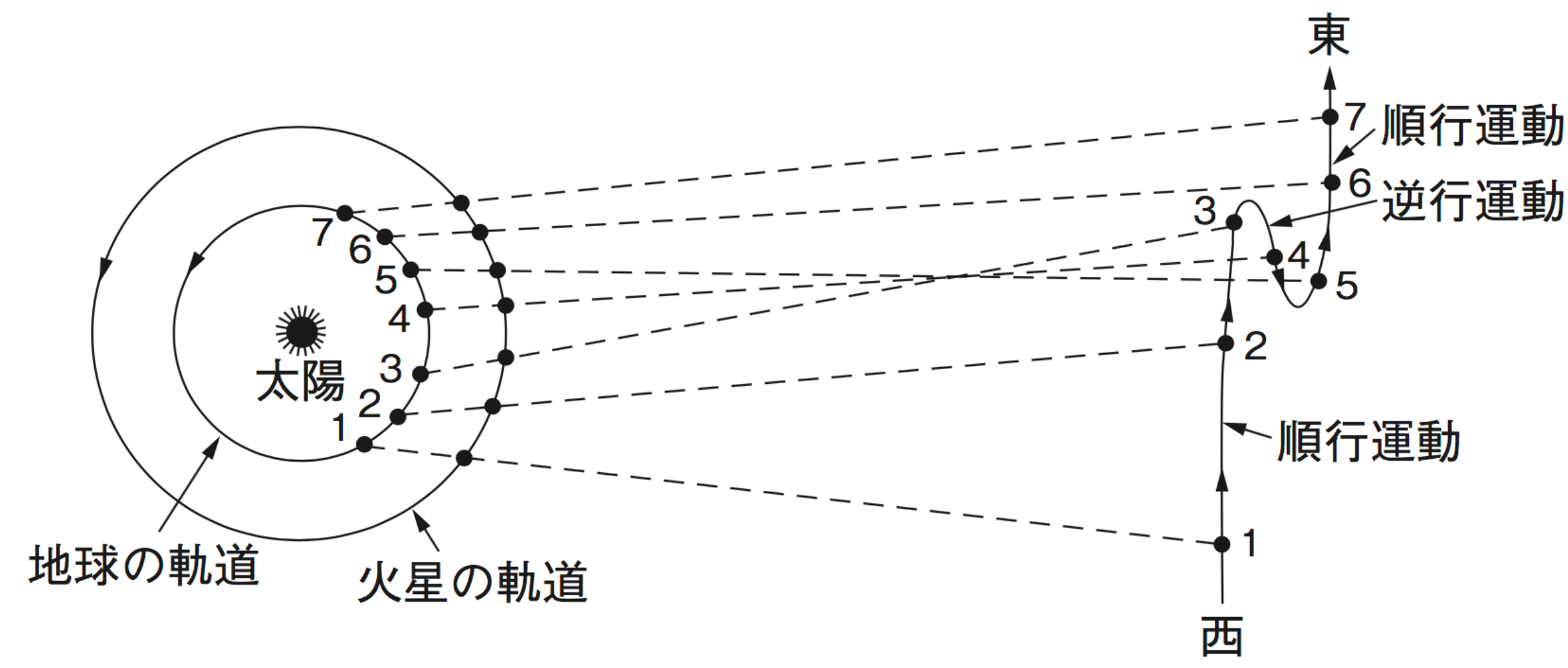
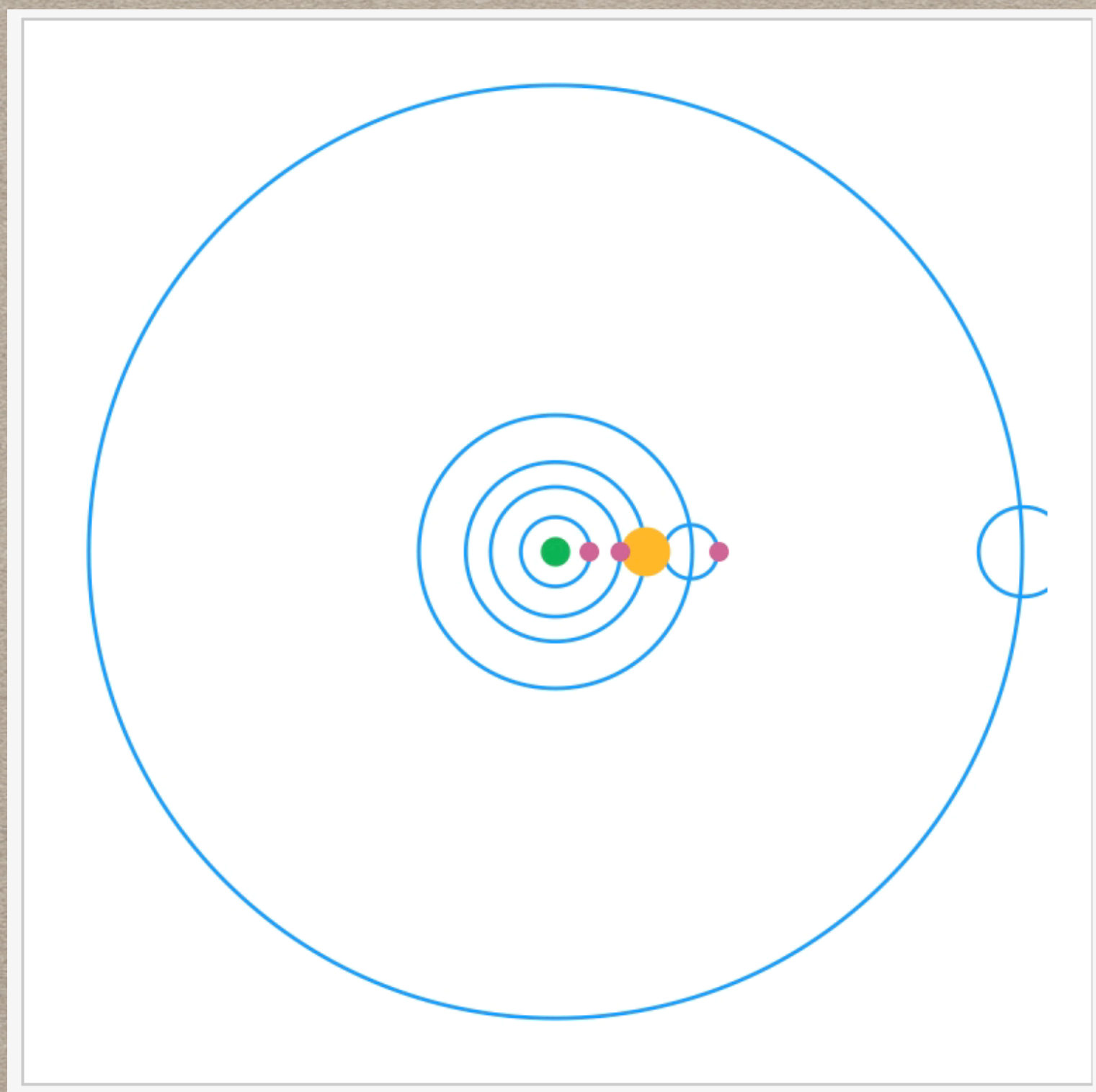


図 2.5 地動説では、火星が逆行することが自然に説明できる。

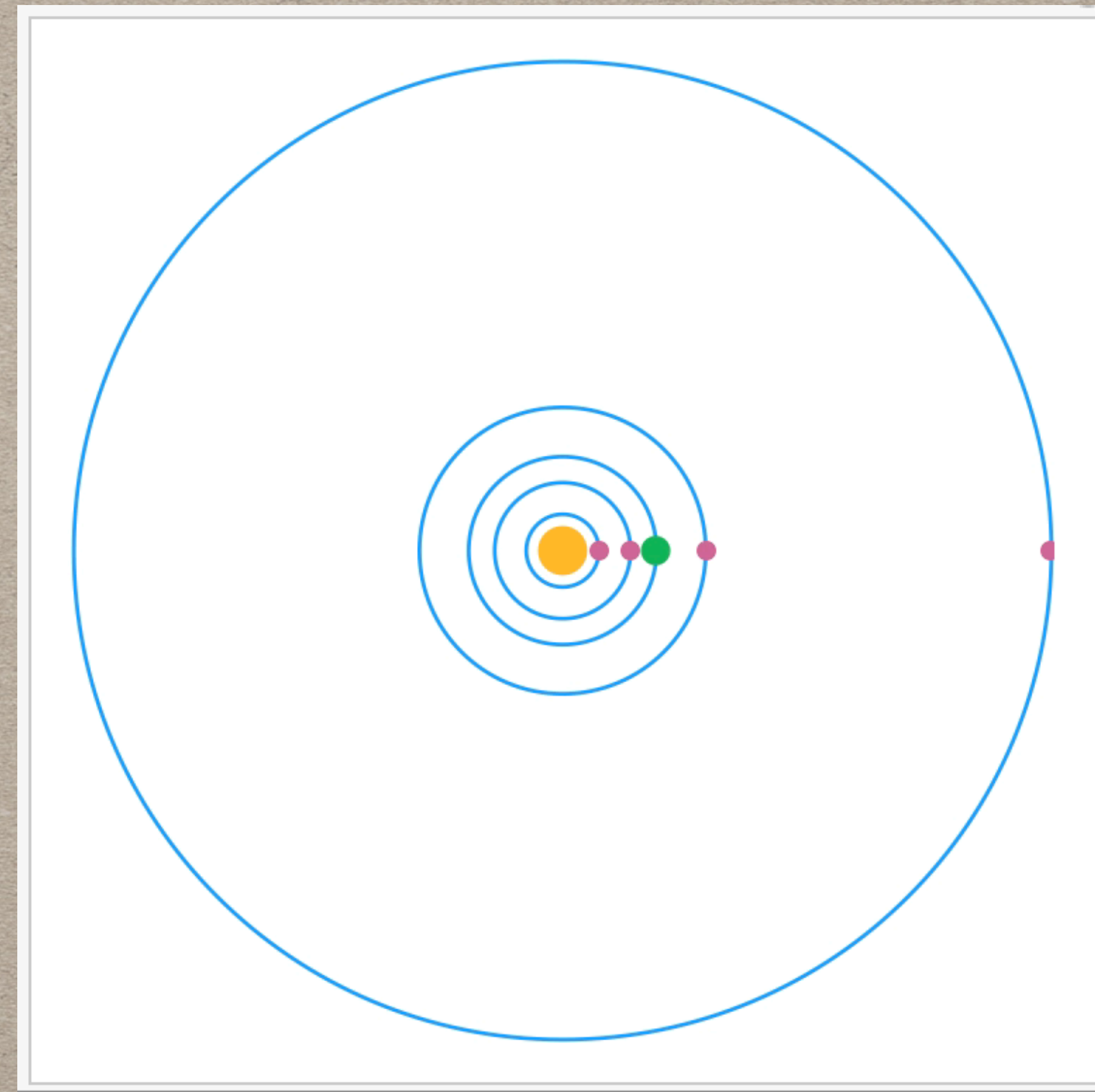


『この仮説は真実でなくても構わない。観測に一致する計算結果が得られるというその一点で十分なのだ。』

この序文は友人が勝手に書いたそうだ。



天動説＋周天円



地動説

Nicolaus Copernicus

尼古拉 哥白尼

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



■ジヨルダノ・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」

異端の説

2.2.1 ティコ・ブラーエと超新星の発見

ティコ・ブラーエ

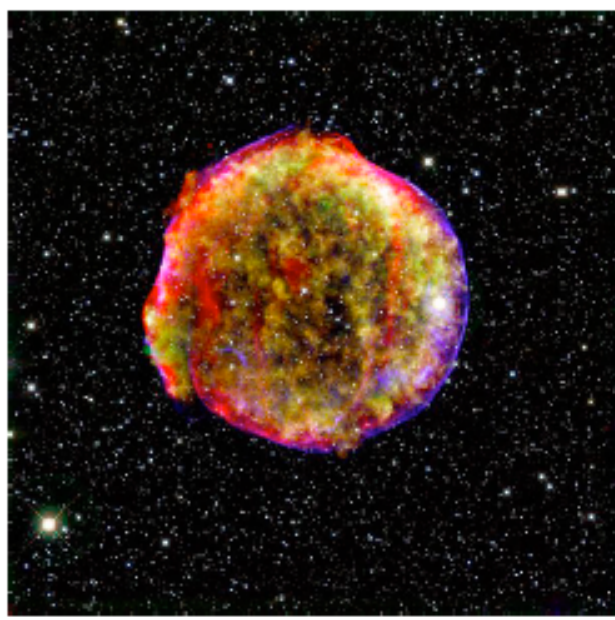
Tycho Brahe
(1546-1601)



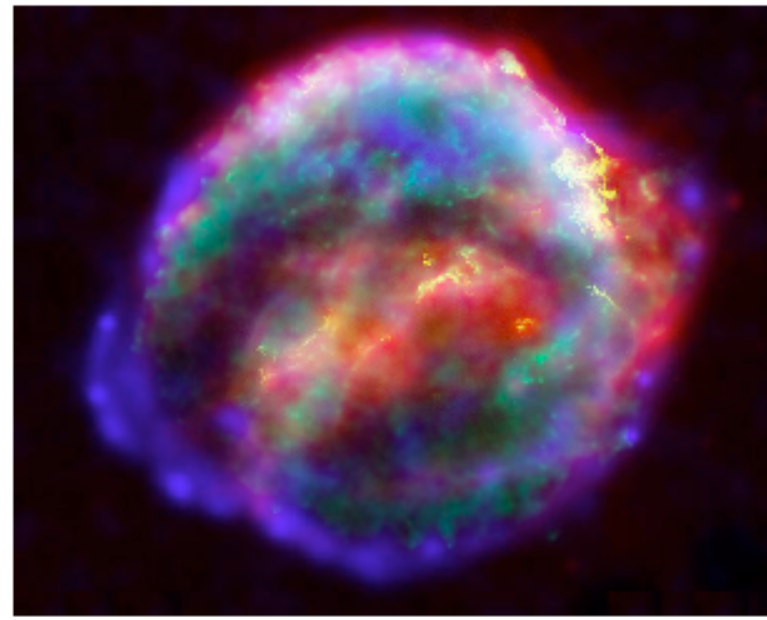
精密で膨大な天体観測記録を残す

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)

図2.8 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.

観測的権威だが地球中心説支持
「太陽は地球の周りを回り、
惑星は太陽の周りを巡る」



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

「明月記」

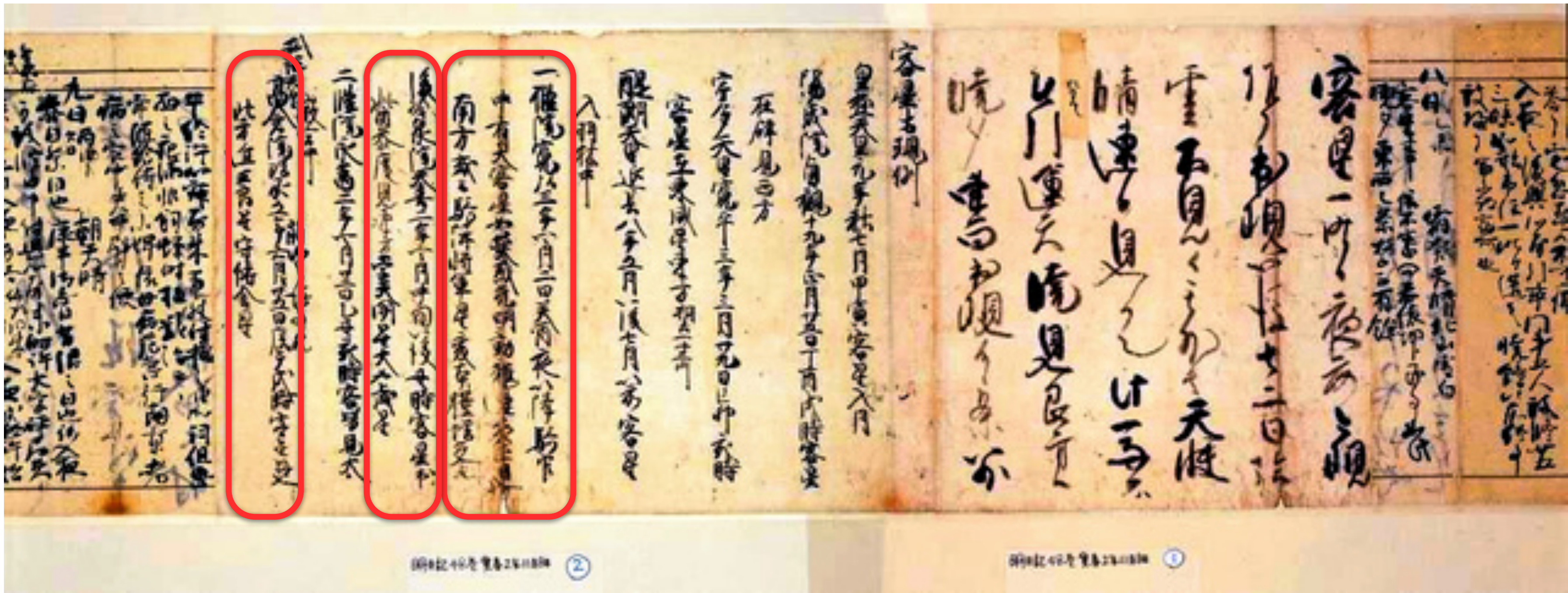
ヨーロッパの人々にとっての
初めての超新星記録

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		

「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。

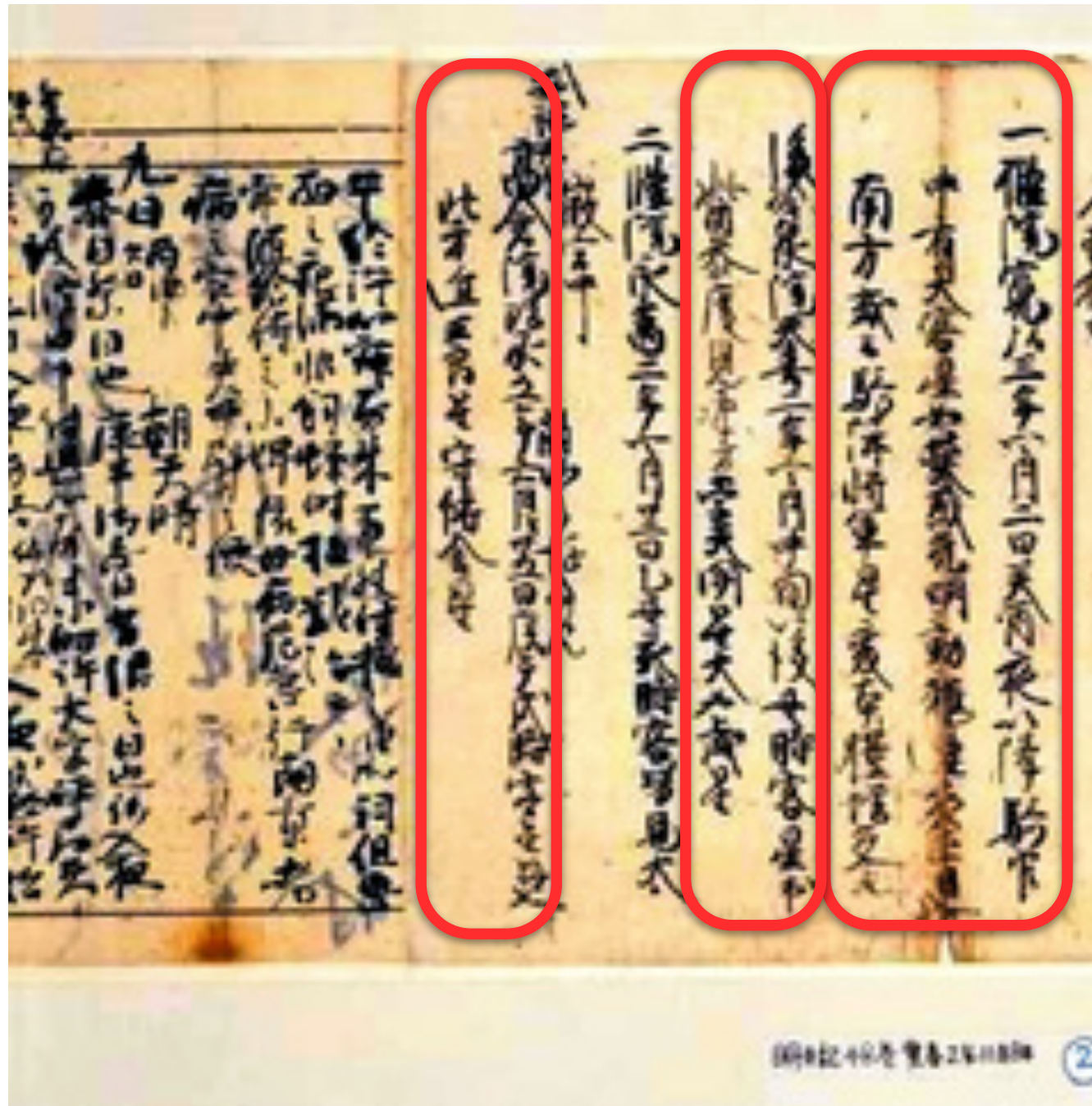


1 安倍清明の息子， 安倍吉昌がSN1006を観測

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



一條院 寛弘三年四月二日 癸酉
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

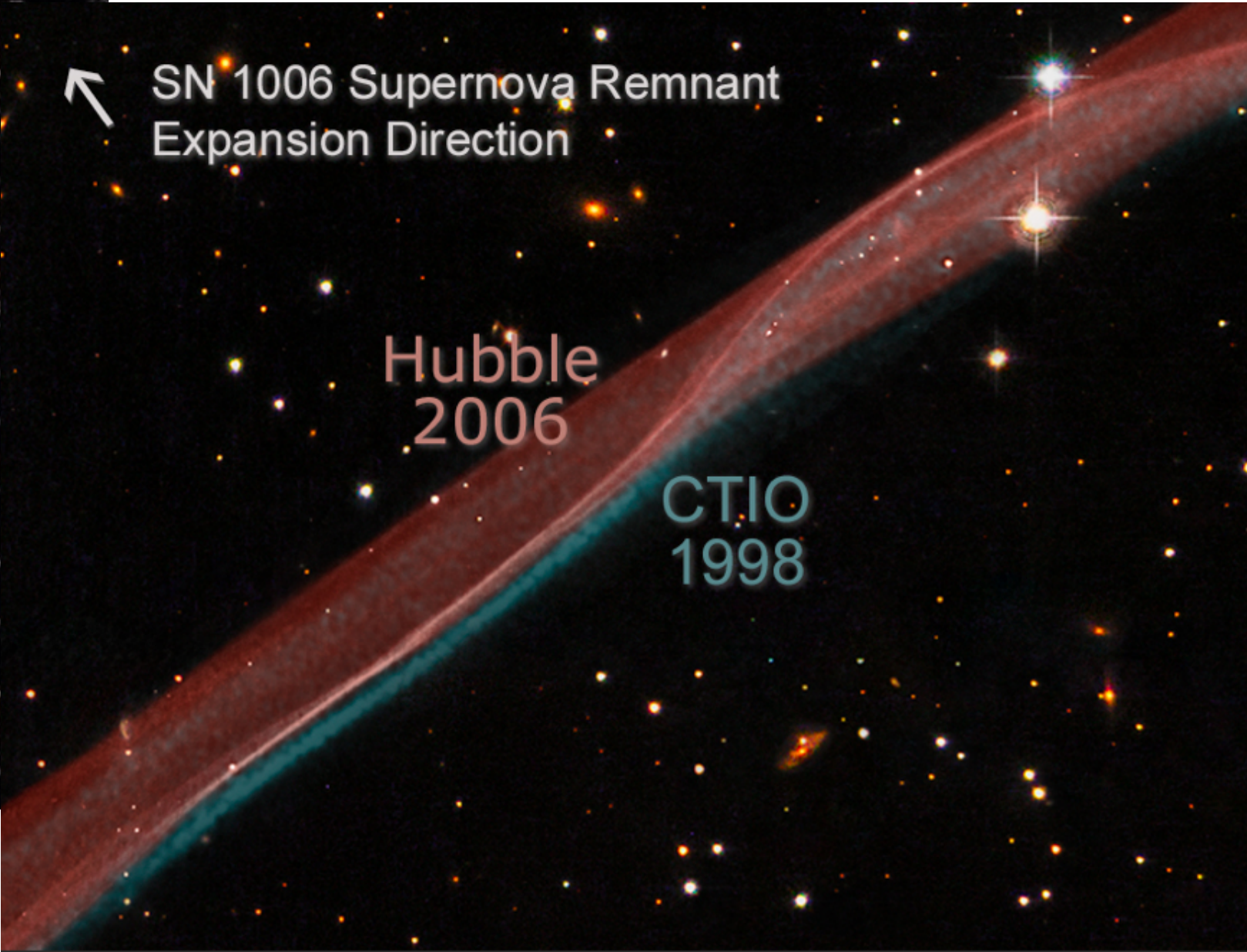
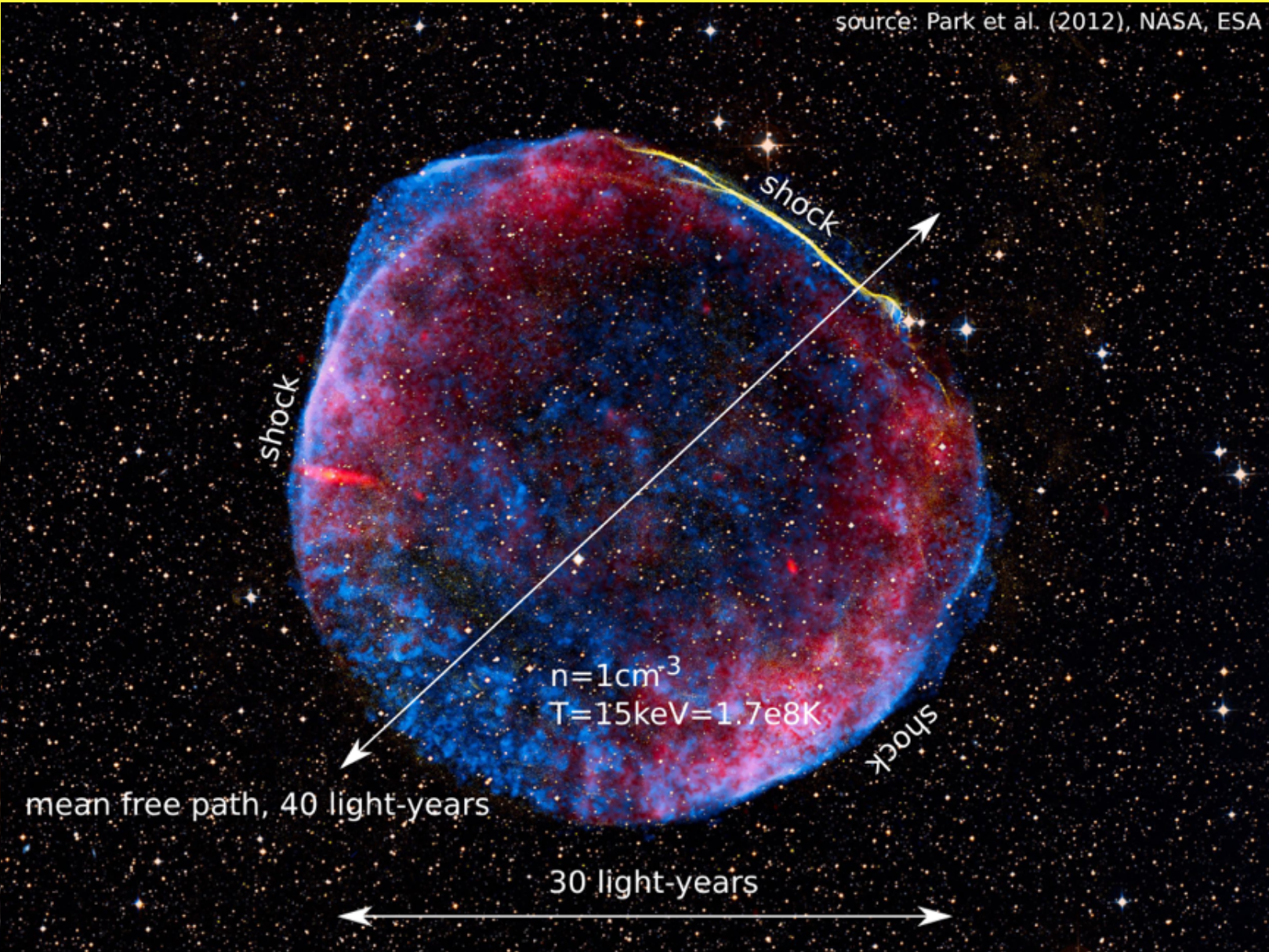
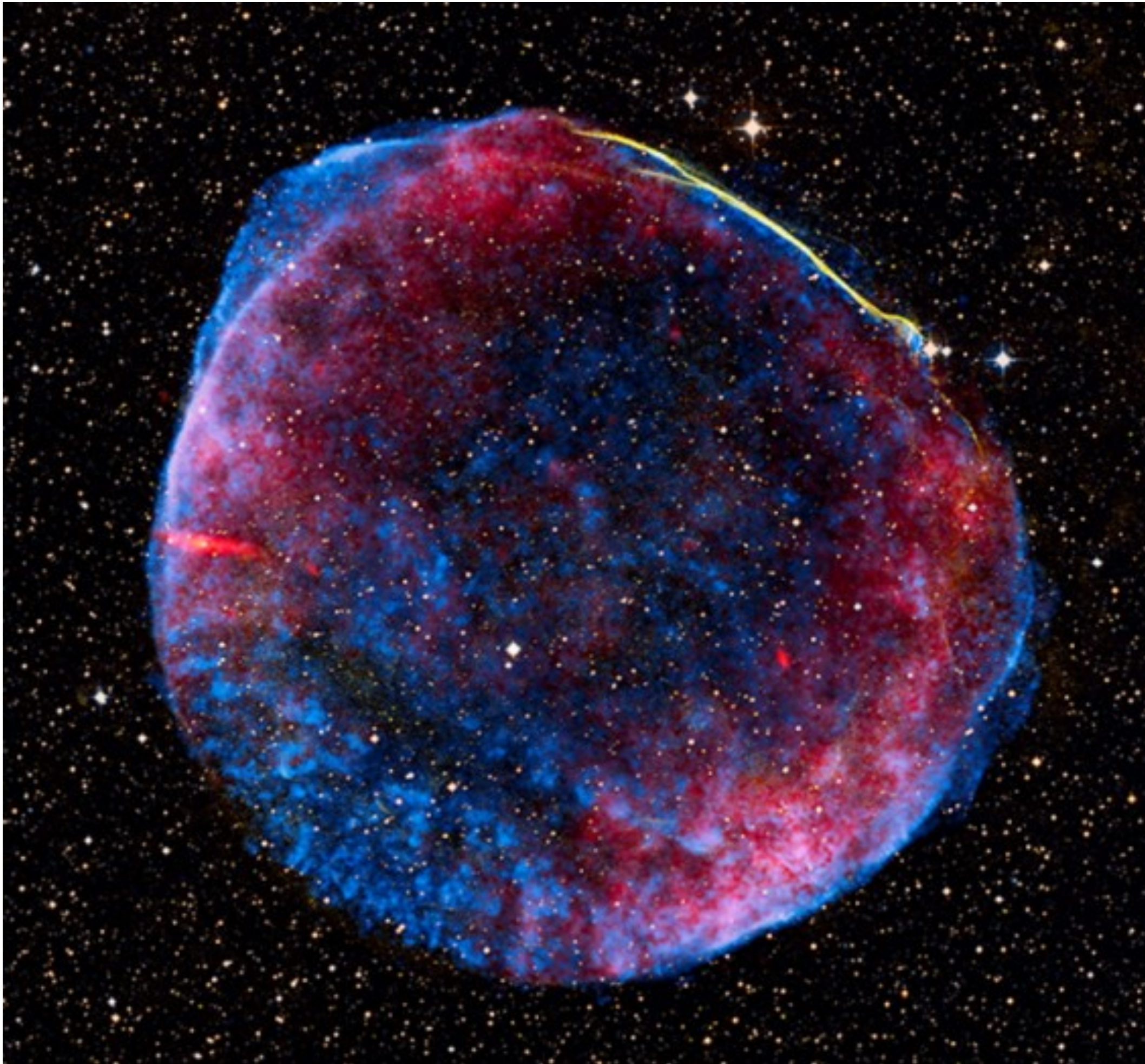
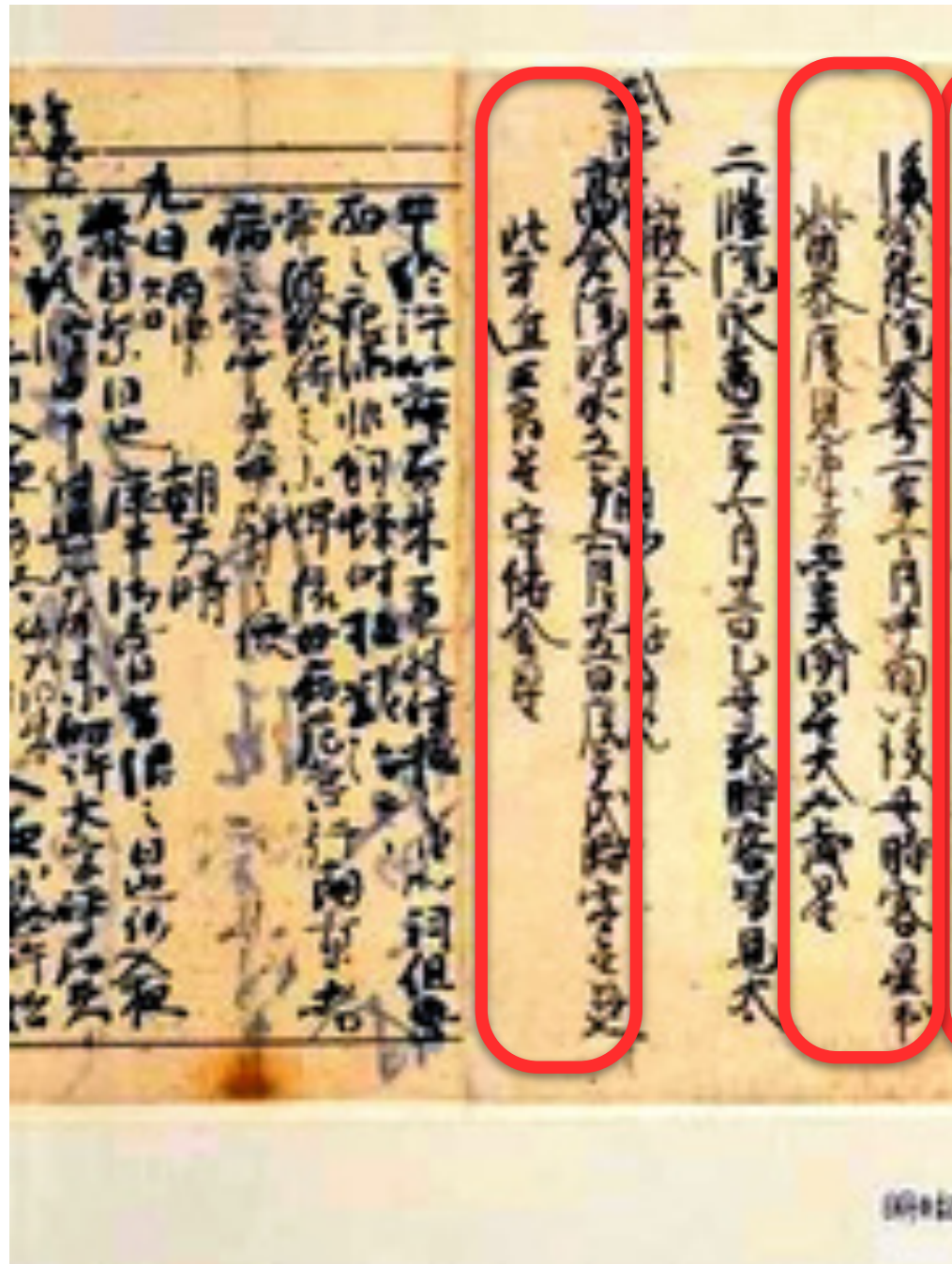


Image credit: Chandra, Hubble, and NRAO teams, retrieved from heasarc.gsfc.nasa.gov.



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、
天関星ニ字ス 大キサ歳星ノ如シ



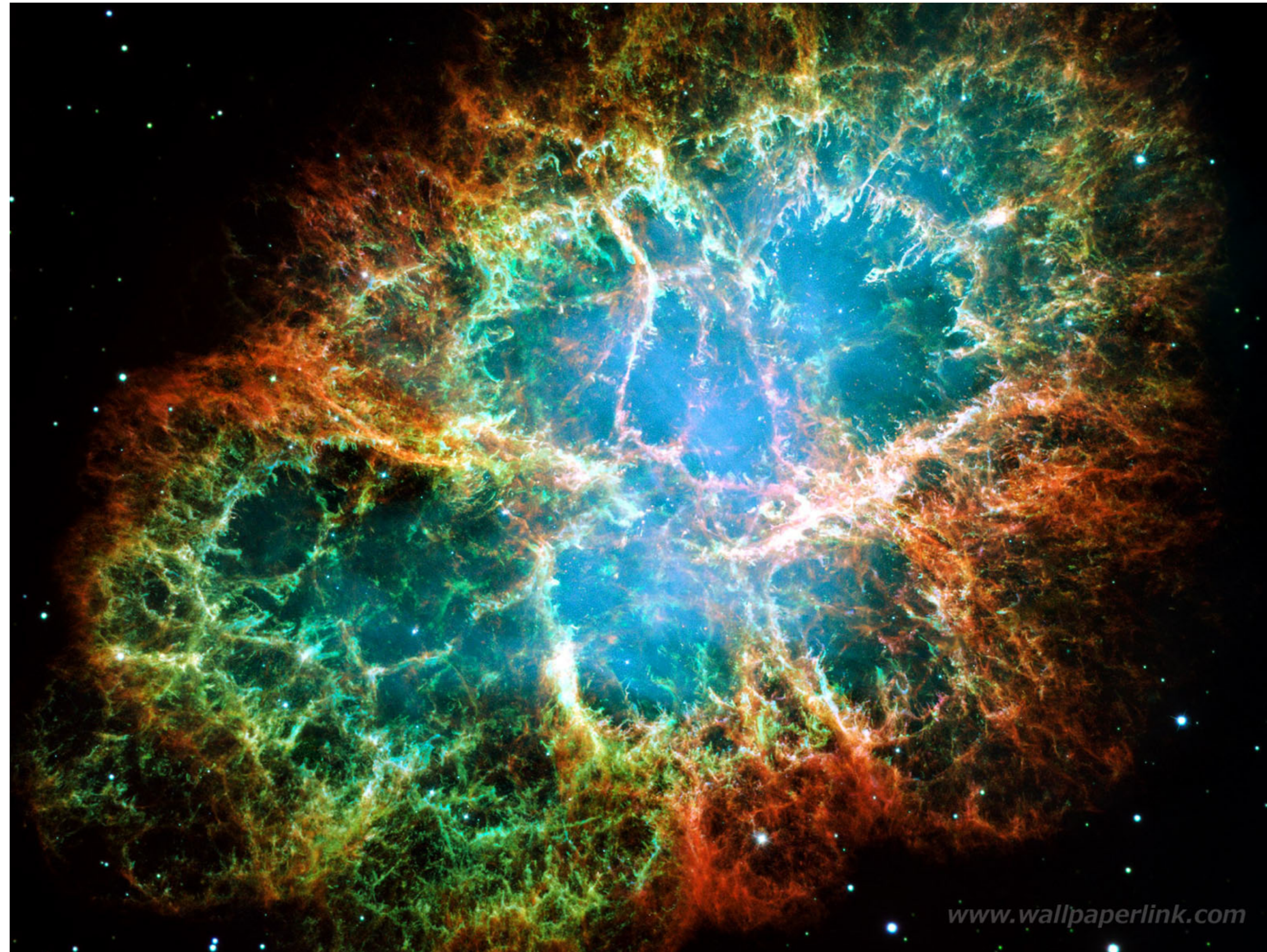
図3 1054年の客星

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．

【天文】 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.



www.wallpaperlink.com

藤原定家本人も見ている可能性あり

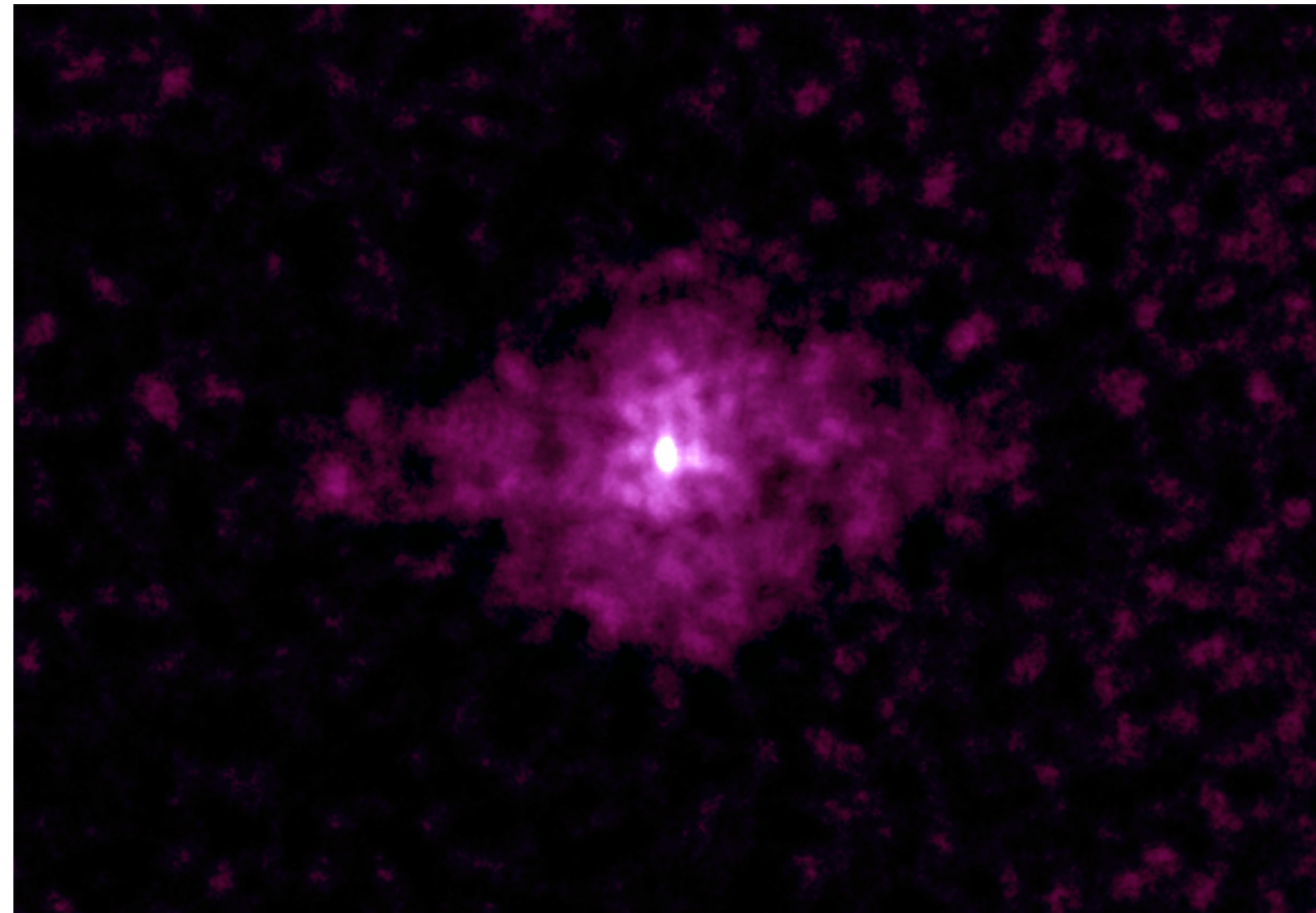


SN 1181

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

Tycho Brahe
(1546-1601)



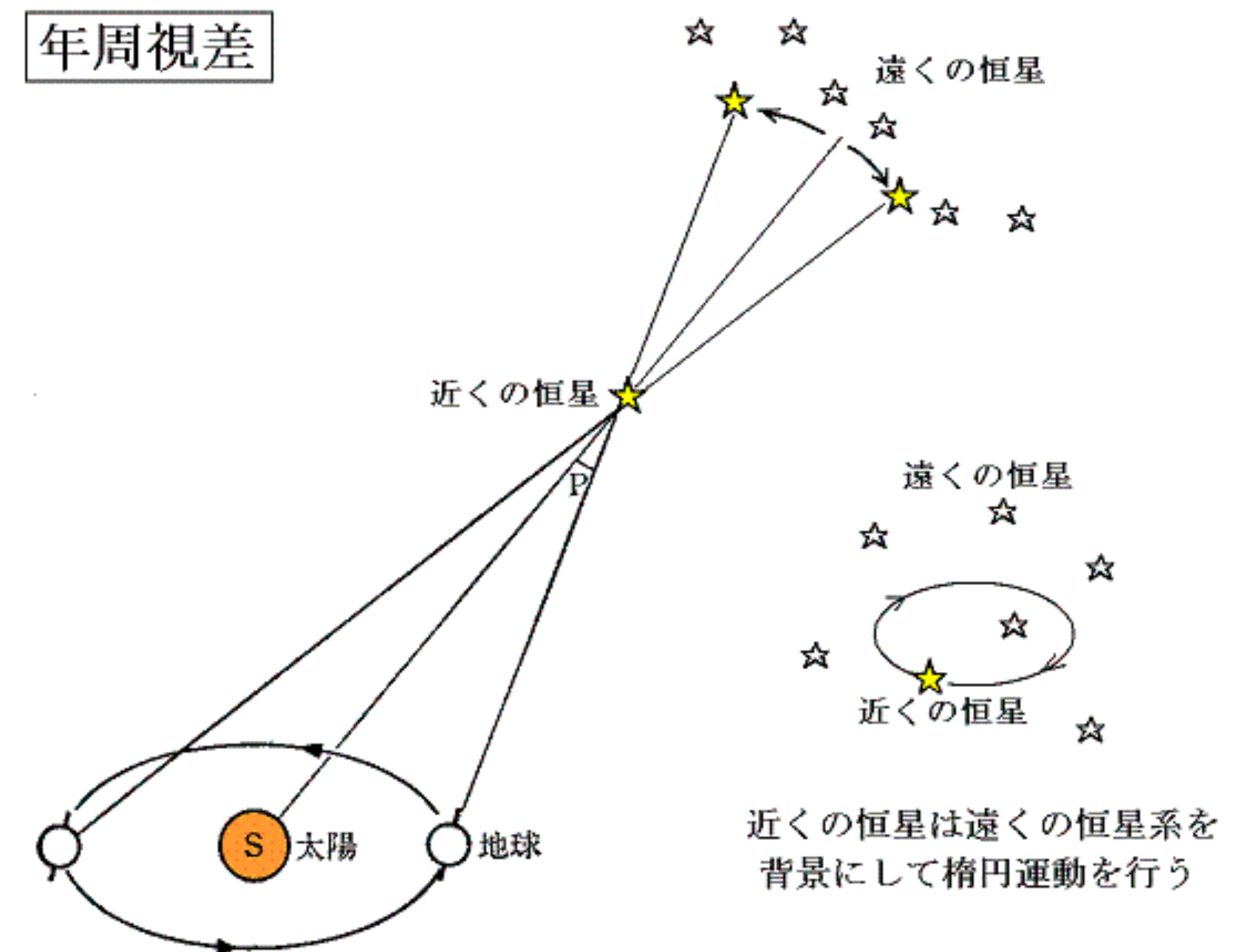
当時は肉眼観測，2分角（1度の $1/30$ ）までの観測能力

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

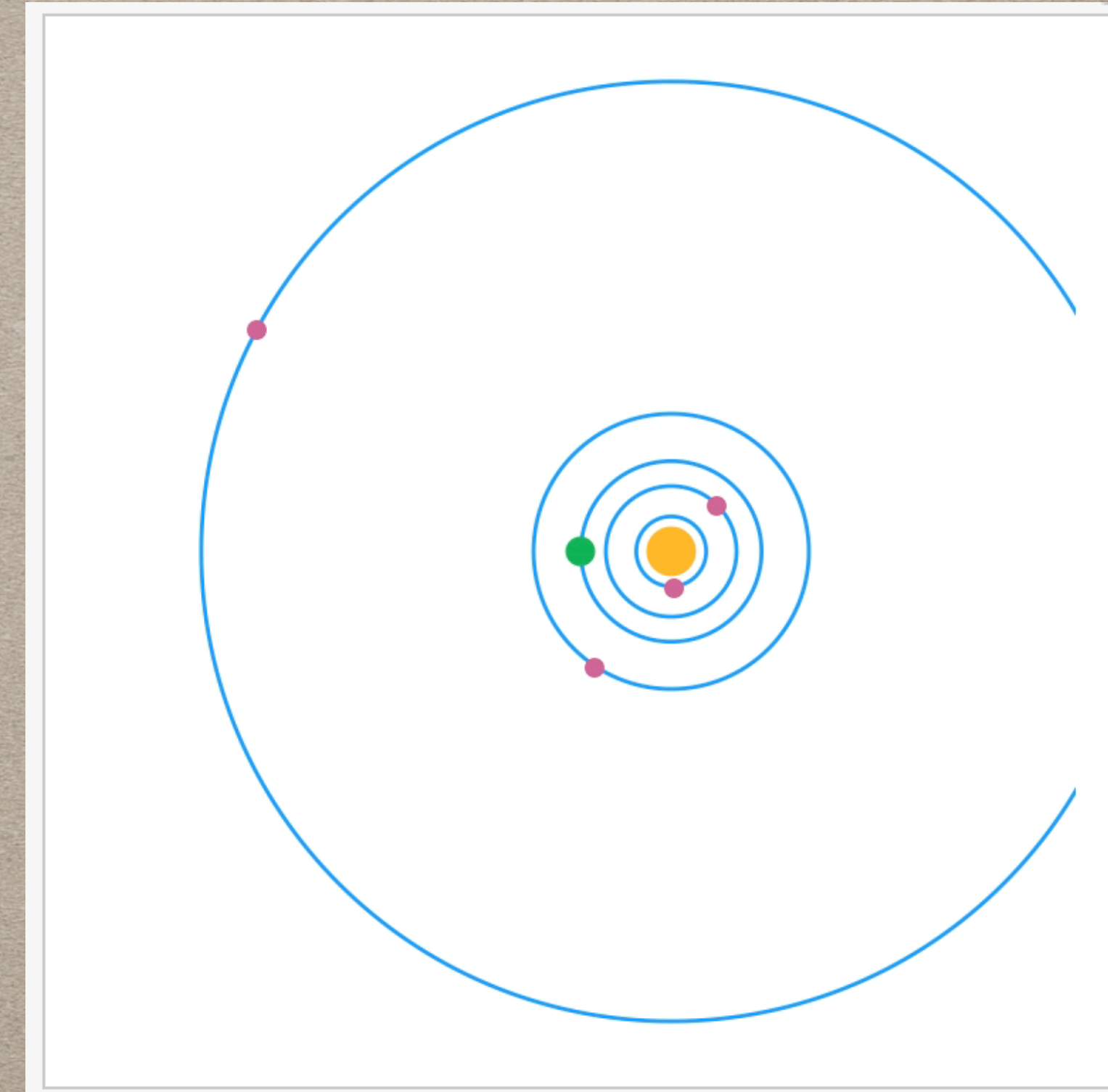
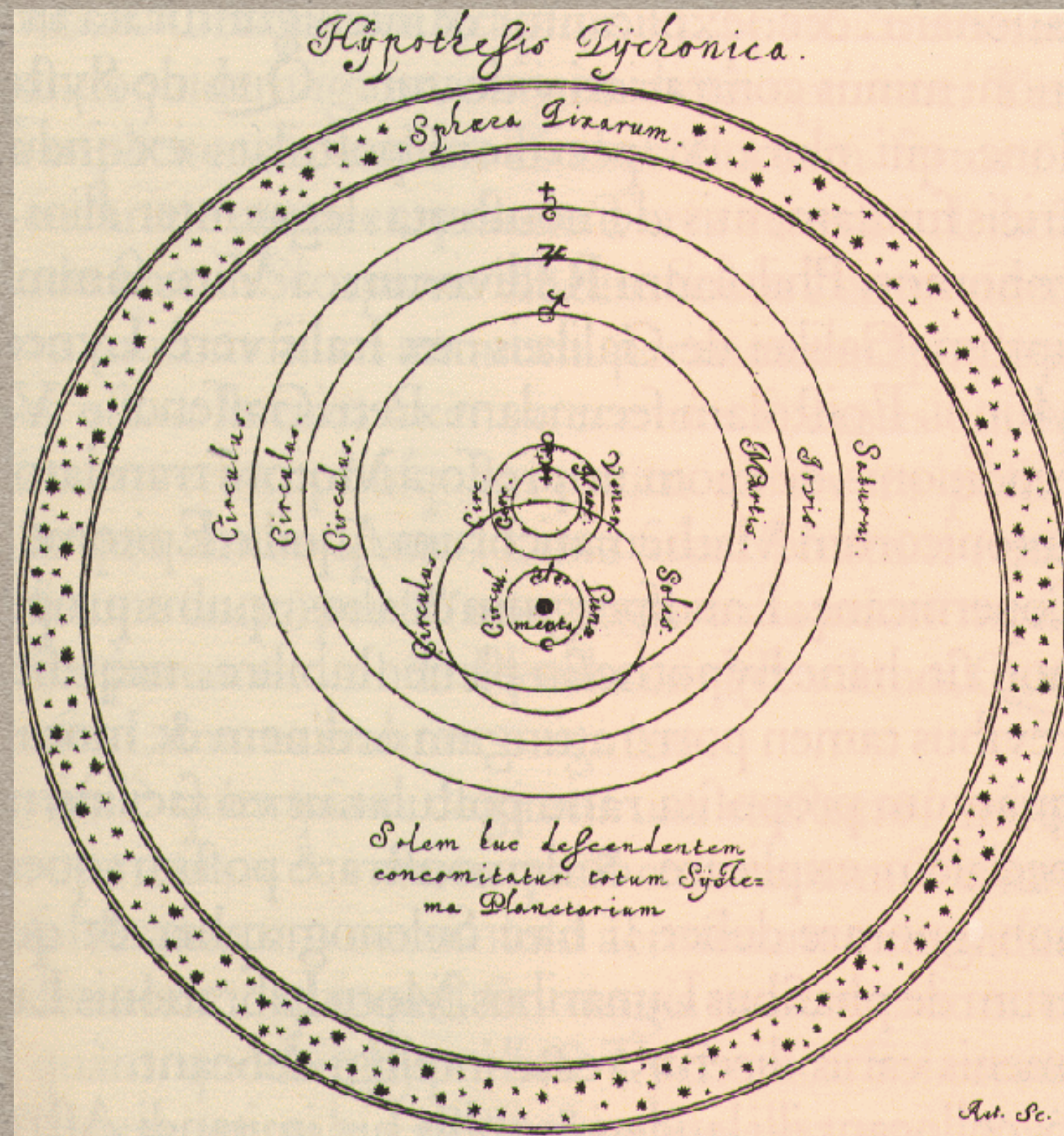
年周視差



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

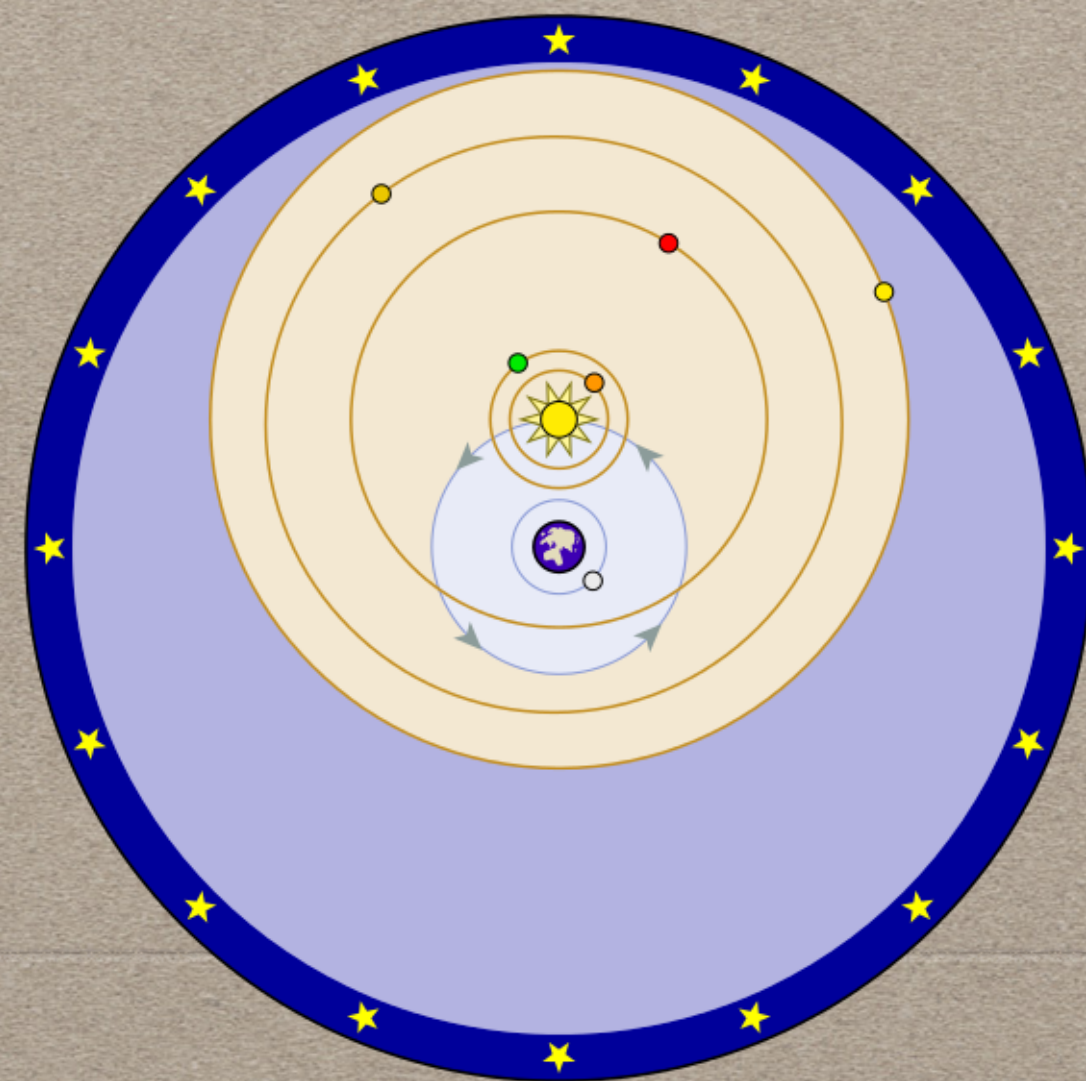
1583 Tychonian planetary model

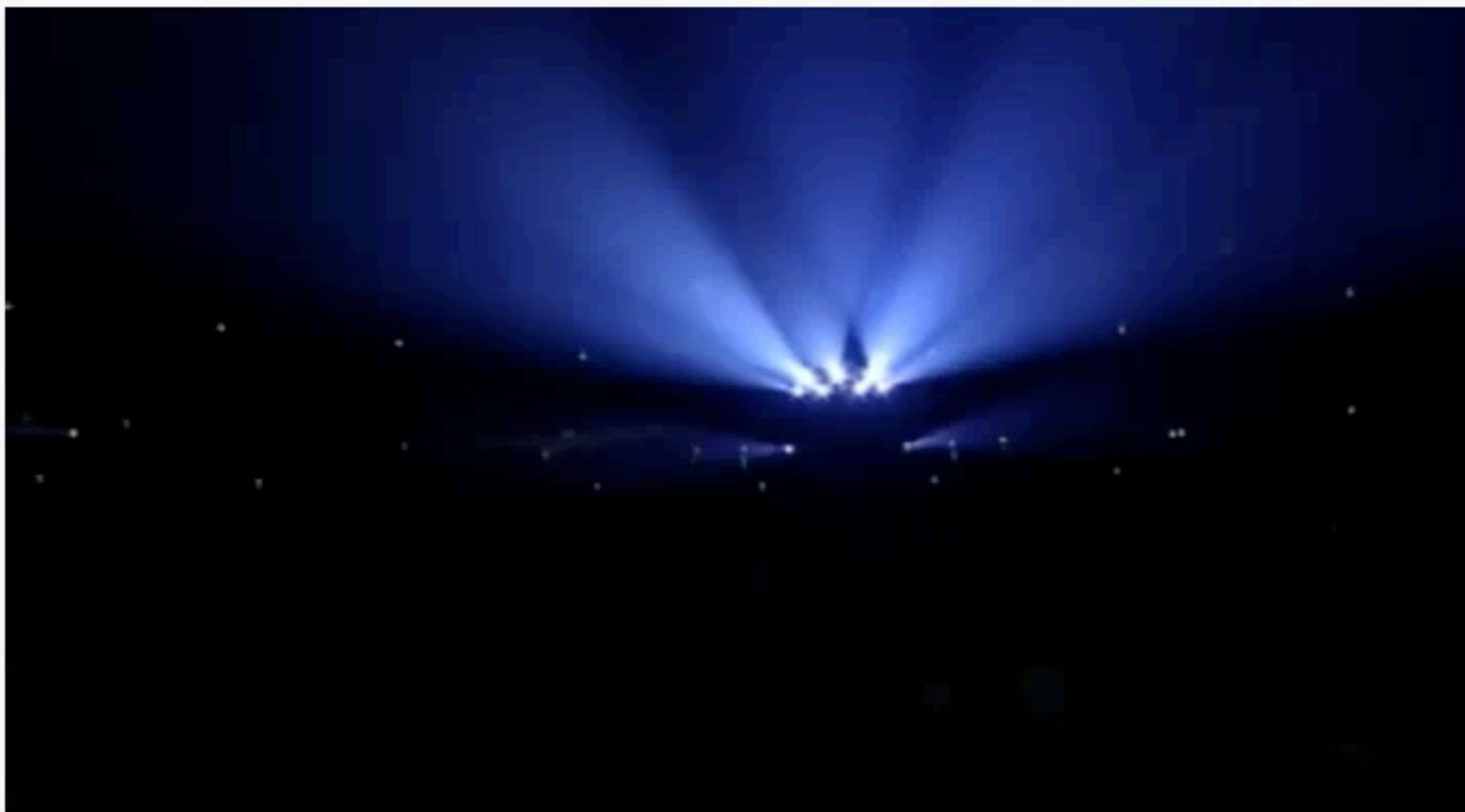


チコ・ブラーエの説

Tycho Brahe

第谷 布拉赫





EXILE / Choo Choo TRAIN (EXILE PERFECT LIVE 2008)

9,204,905 回視聴 • 2009/04/18

👍 高評価

🗨️ 低評価

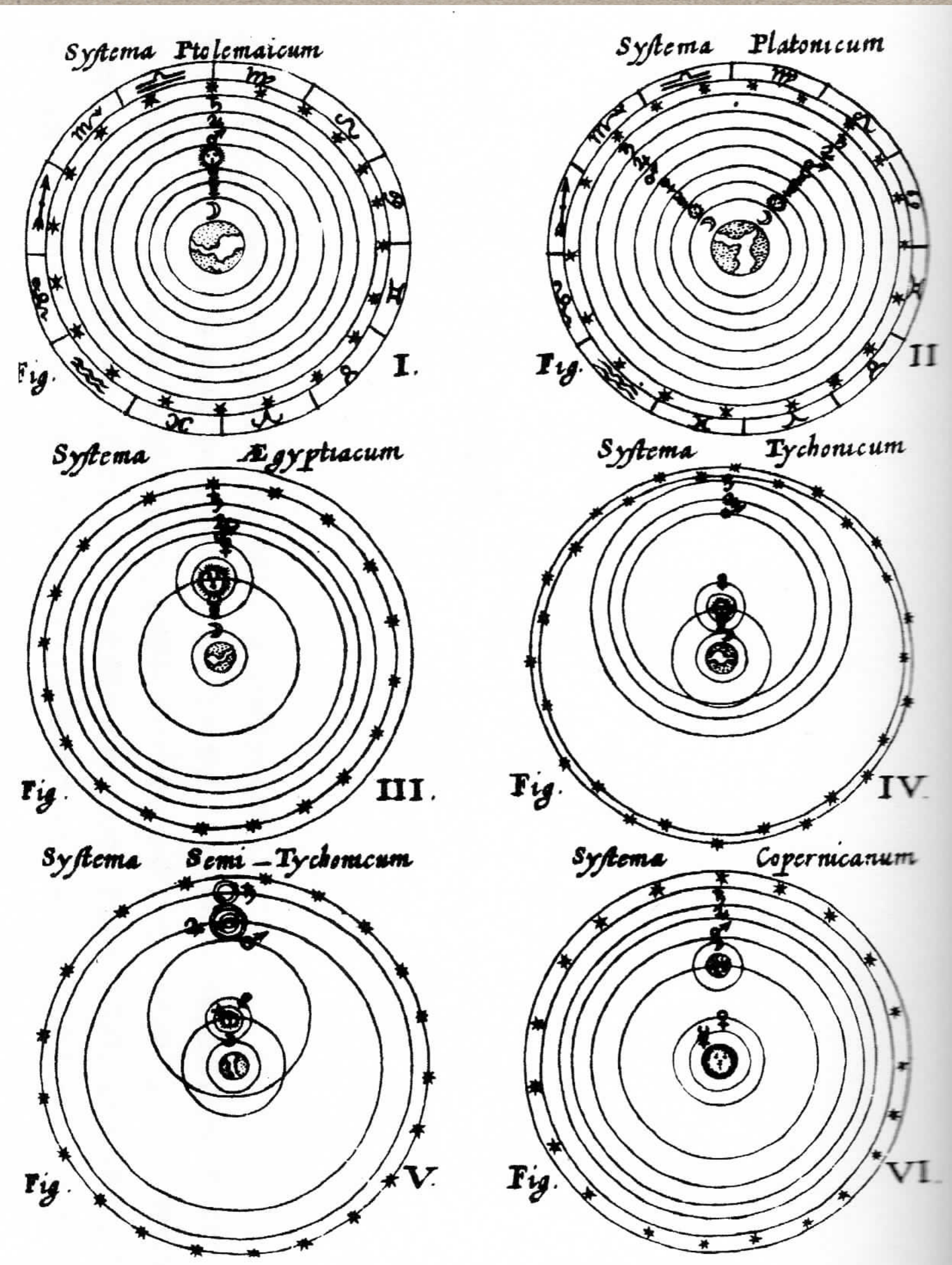
➡️ 共有

≡+ 保存

...

リッチョーリ (Giovanni B. Riccioli, 1598-1671)

『新アルマゲスト』にある太陽系モデルの比較.



モデル I, II はプトレマイオス体系で, I では太陽軌道は水星と金星の軌道の外側にあり, II では太陽軌道は水星と金星の軌道の内側にある.

III はエジプト体系で, 太陽は水星と金星が太陽を周り, 太陽は外惑星とともに地球を回る.

IV はチコ・ブラーエのモデルで, 太陽は地球以外のすべての惑星を連れながら地球を回る. 水星と金星の軌道は常に太陽と地球の間にあるが, 外惑星の軌道は地球と太陽の両方を取り囲む.

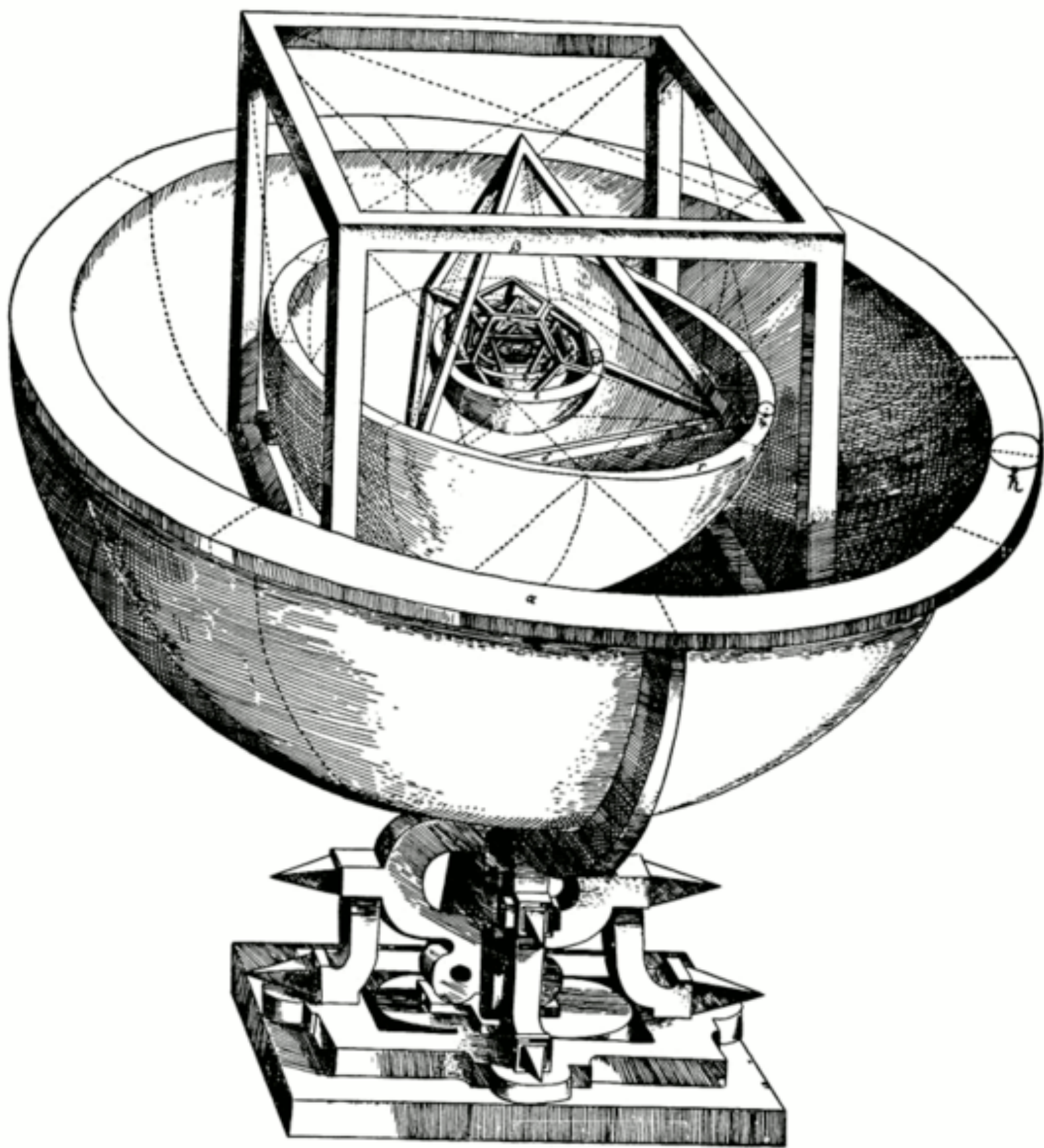
V はリッチョーリのモデルで, 太陽が水星金星火星を連れ, 木星・土星とともに地球を回る (木星は月を持ち, 土星はリングを持っていたから, 太陽と同じ格付けにした).

IV はコペルニクス体系でこれだけ中心が太陽になる.

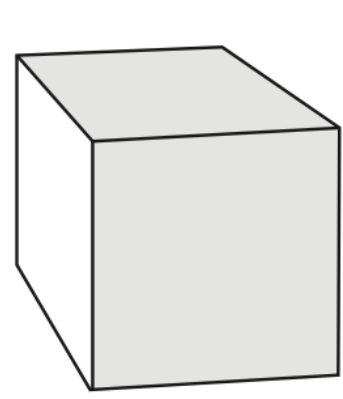
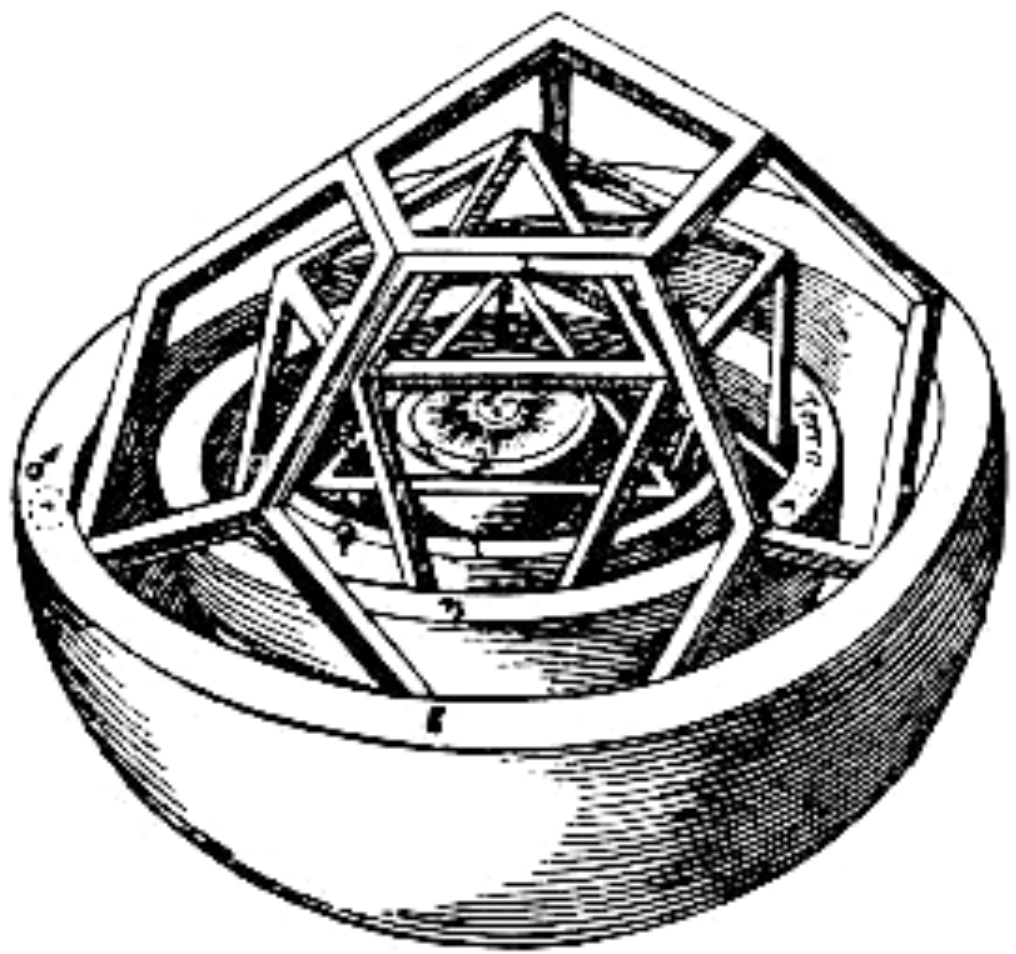
2.2.2 ケプラーによる惑星の運動法則の発見

ヨハネス・ケプラー

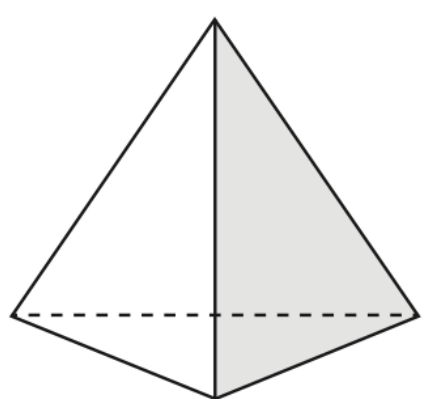
Johannes Kepler
(1571-1630)



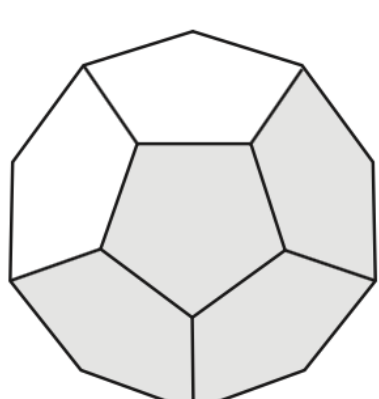
『宇宙の神秘』(1596 年) に描かれた
ケプラーによる初期の多面体太陽系モデル



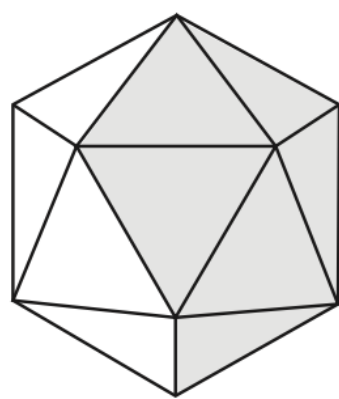
立方体



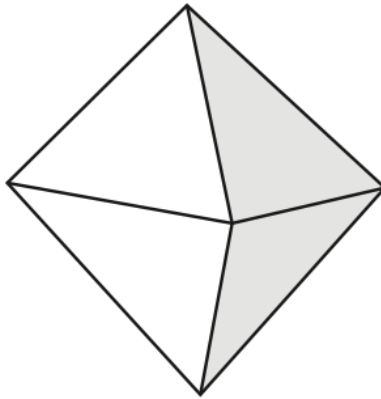
正 4 面体



正 12 面体



正 20 面体



正 8 面体

ケプラーによる多面体太陽系モデル

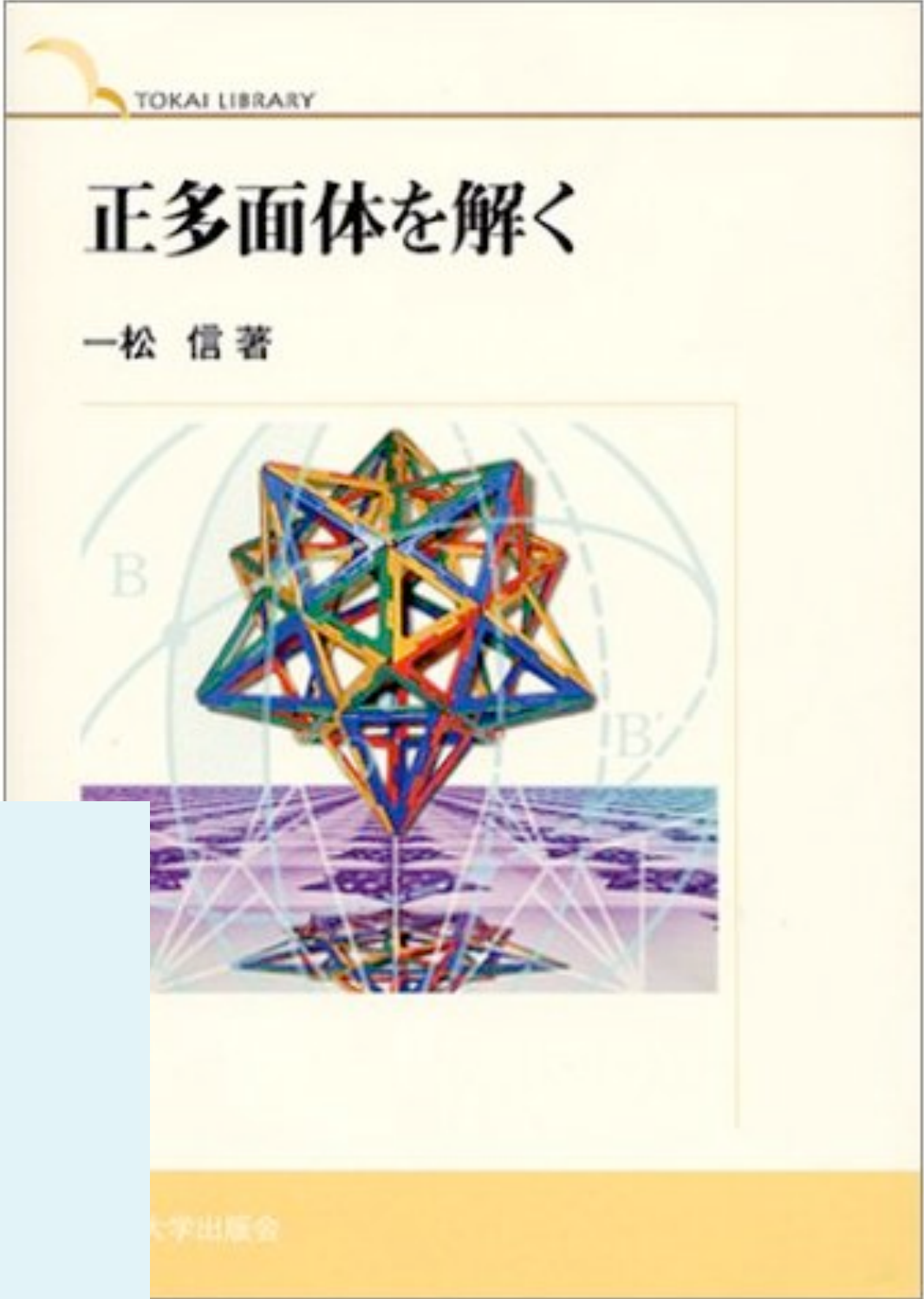
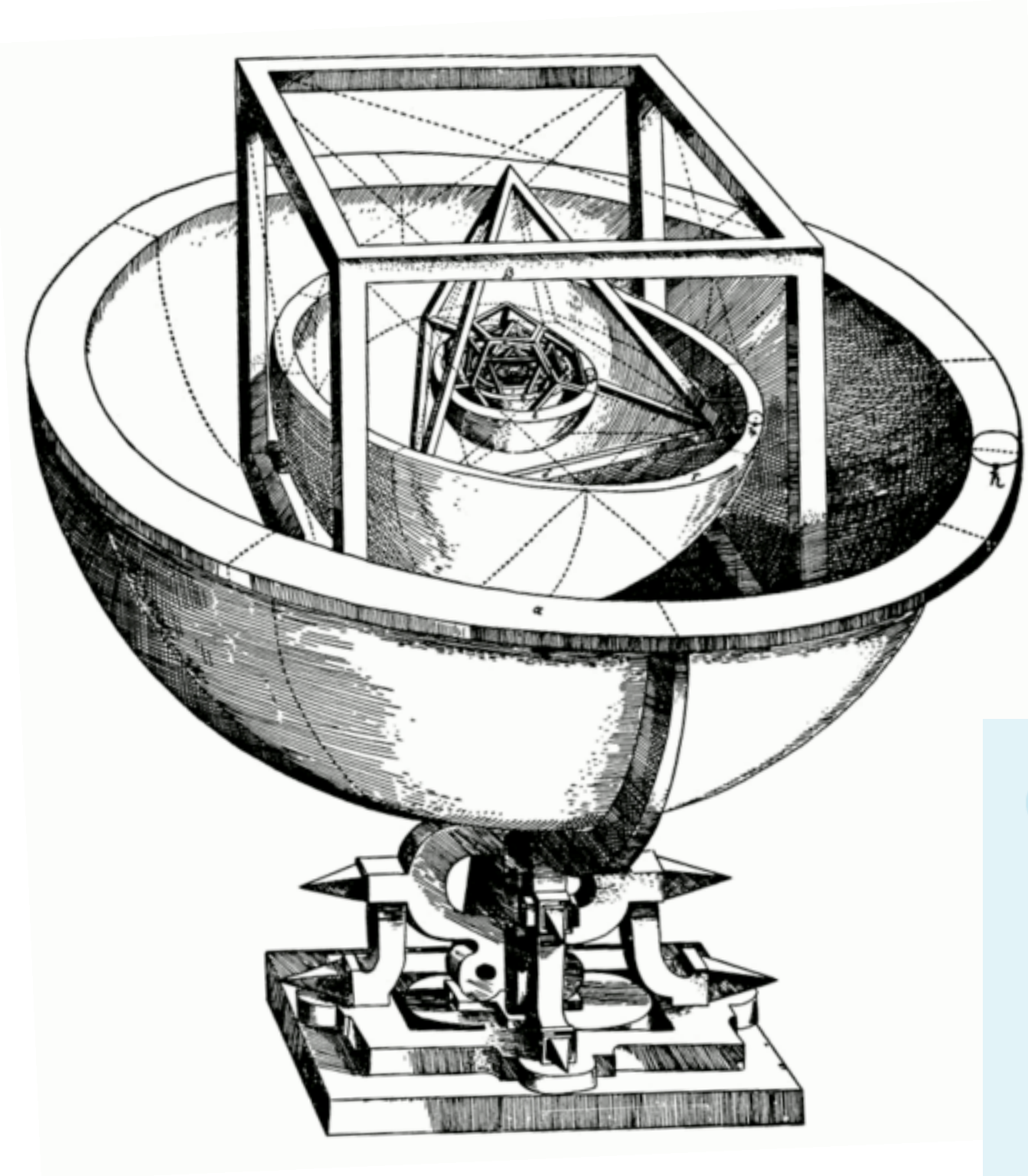


表 2.3 惑星軌道半径の比と，正多面体の間に球を挟んで積み上げた太陽系モデルの半径比

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))

ケプラーは、ブラーエのもとを訪ねる

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.

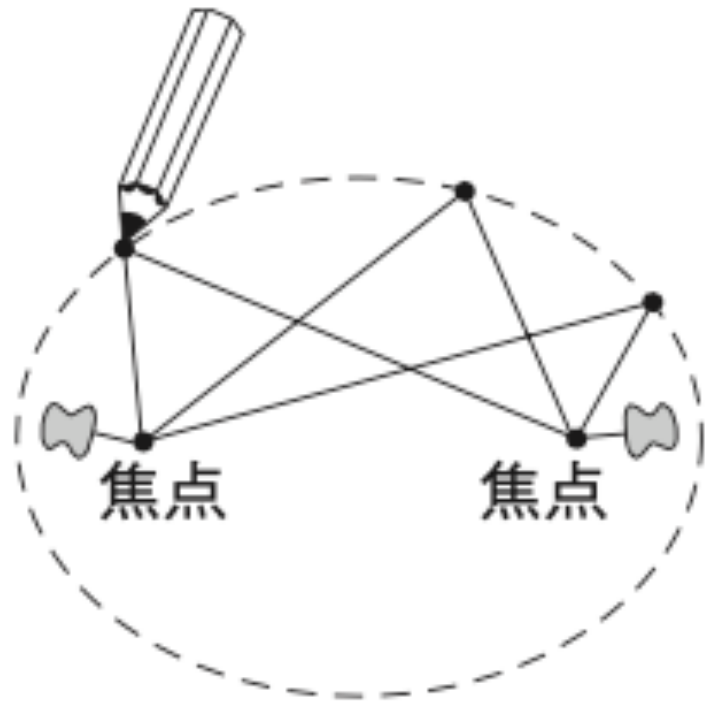
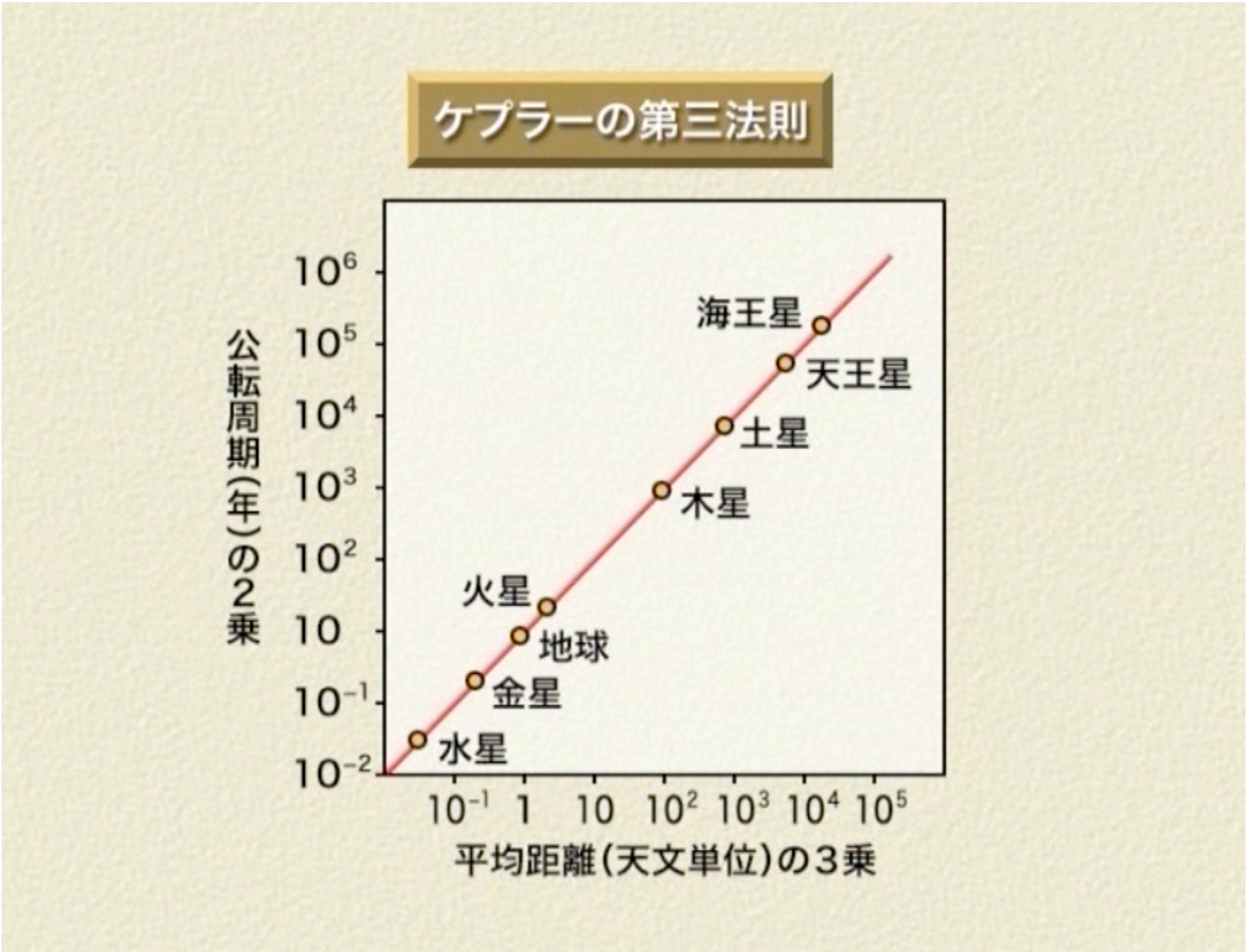
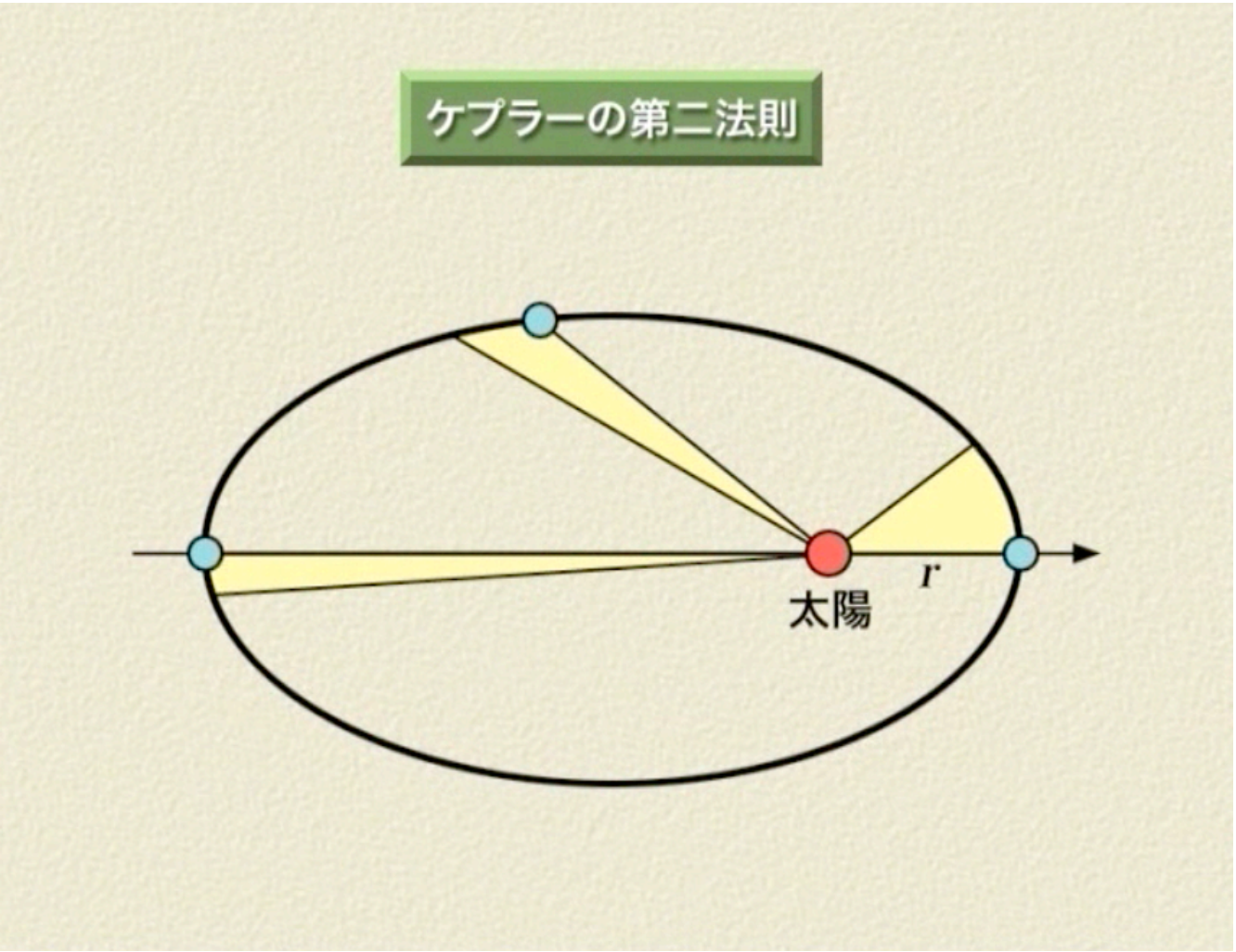
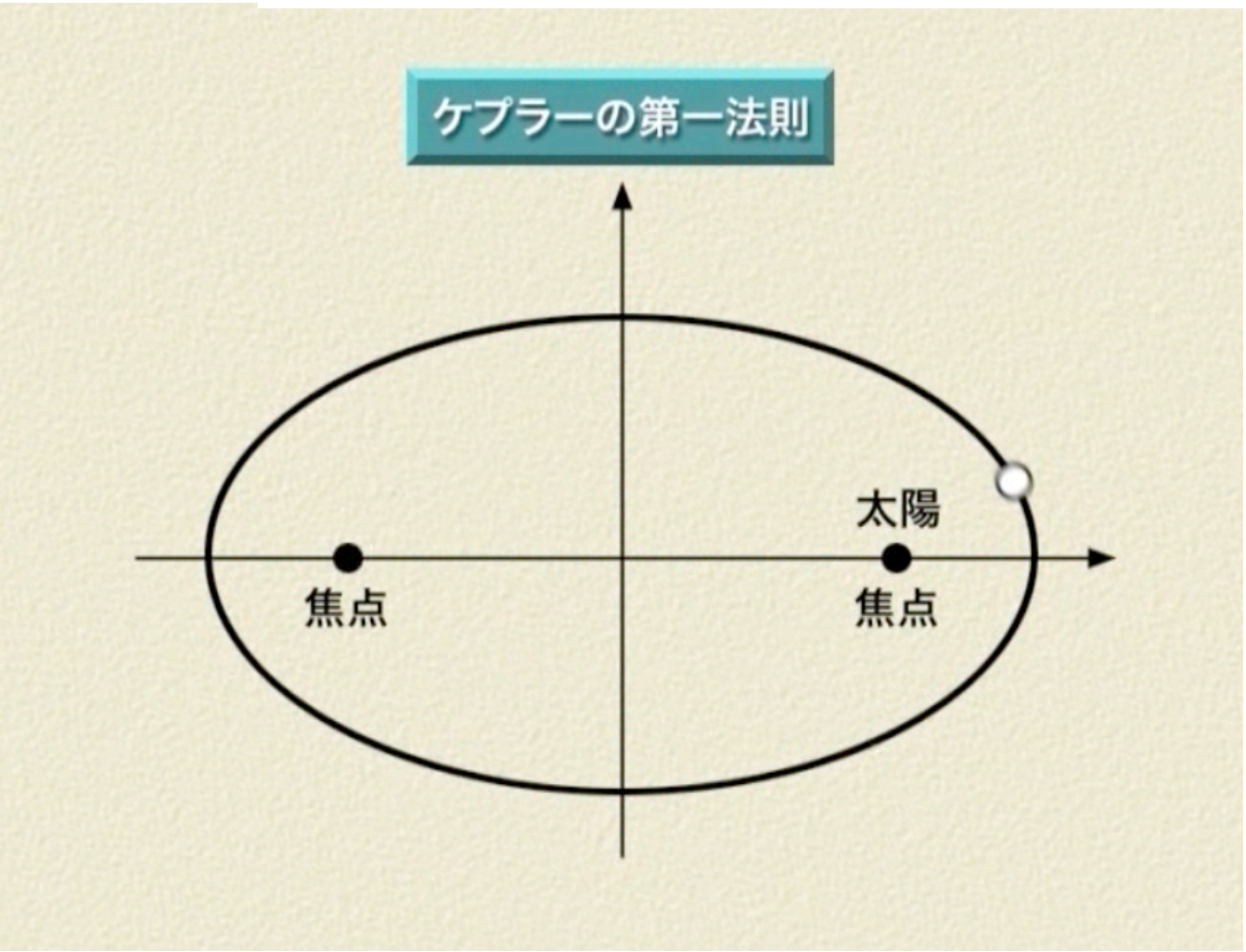
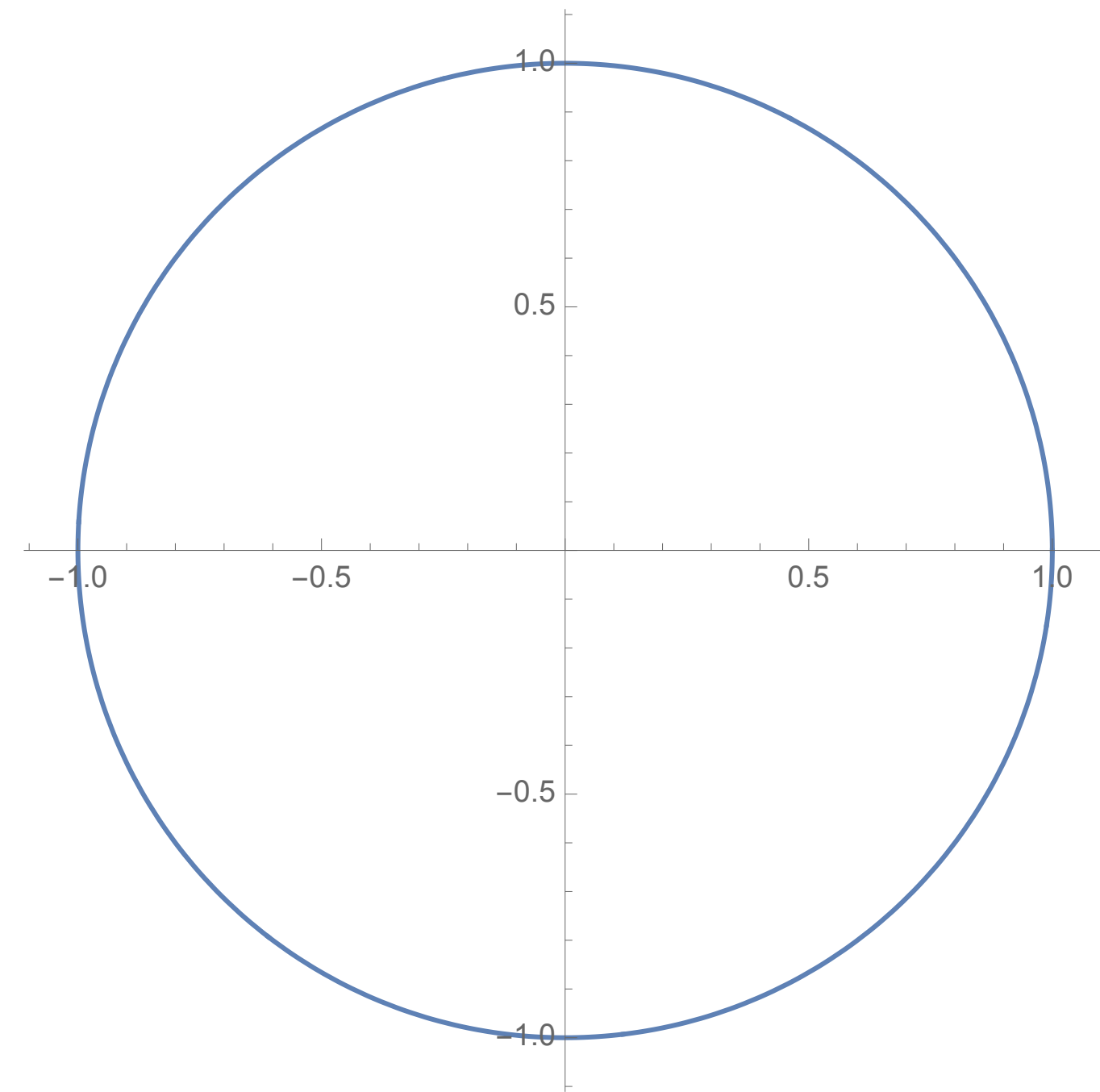


図 2.13 楕円は 2 つの焦点から糸を張り、ペンで一周すると描ける形である。焦点が 1 つに重なっていれば円になる。円は特殊な楕円である。

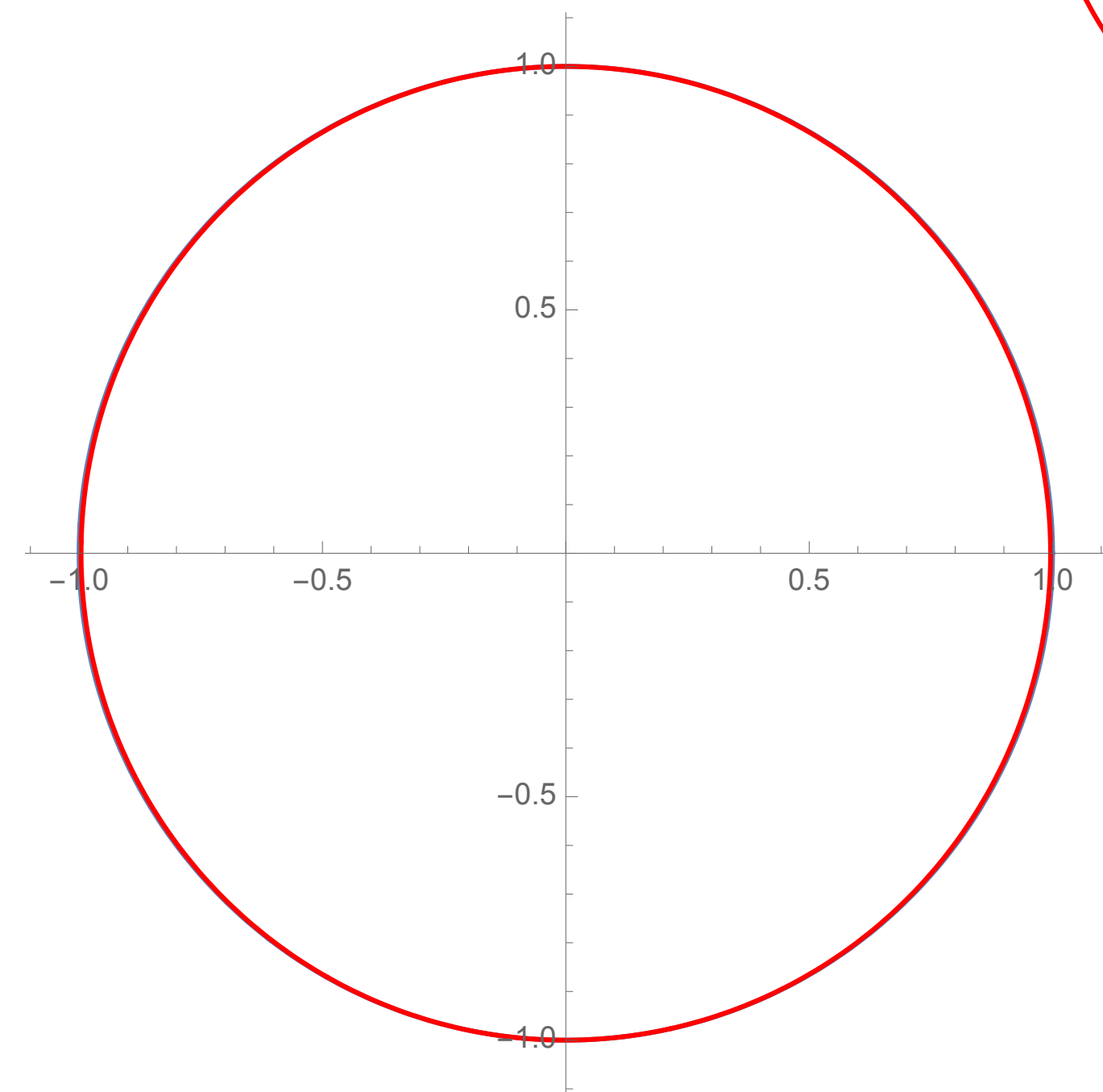
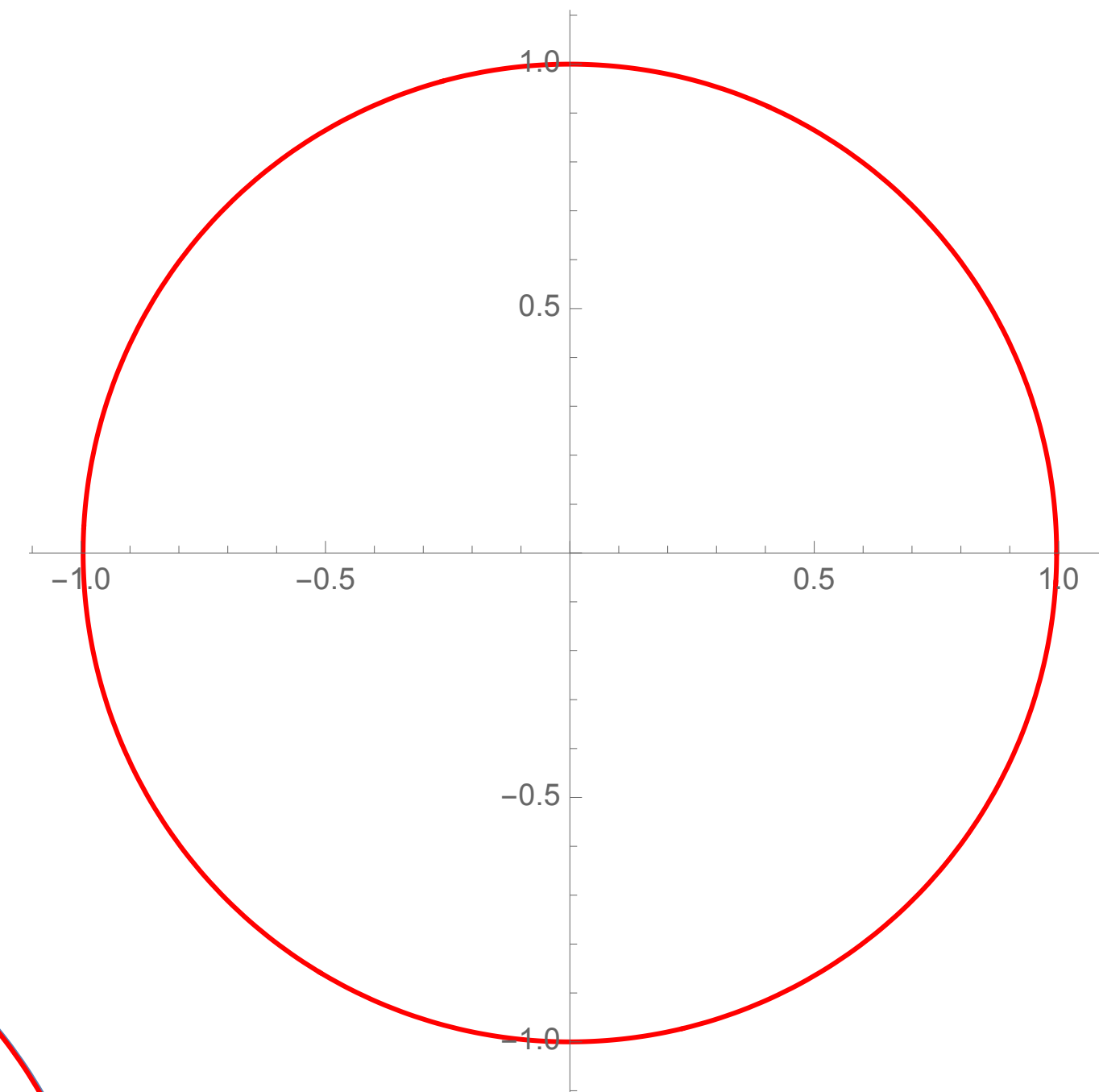


太陽系惑星でいちばん離心率が大きいのは火星

円



離心率0.09の円（火星）



重ね合わせ
（円に近い）

ブラーエはケプラー訪問後、一年目に急逝

ティコ・ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



ヨハネス・ケプラー

Johannes Kepler
(1571-1630)



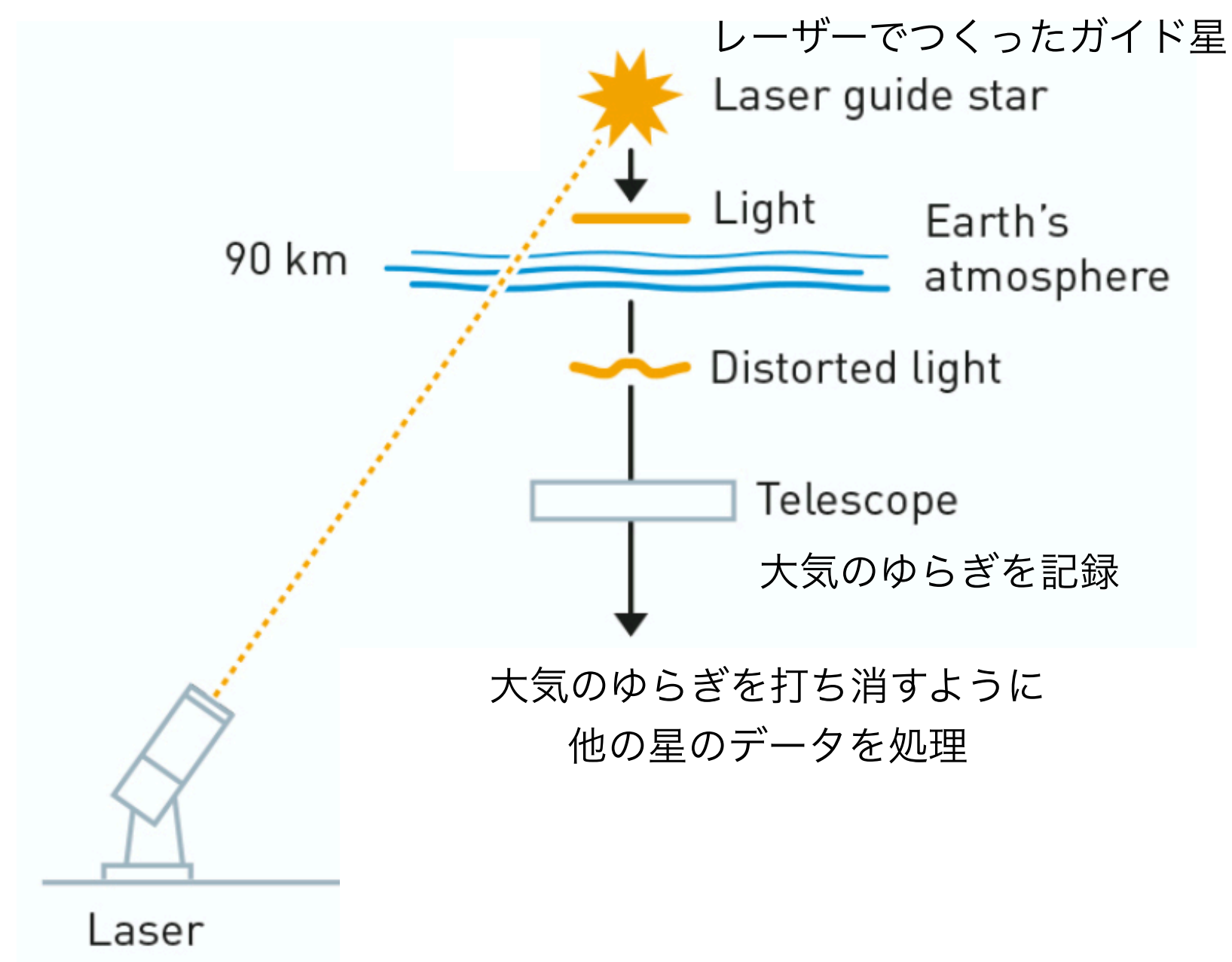


『アレクサンドリア』（2009）
（原題: Ágora）

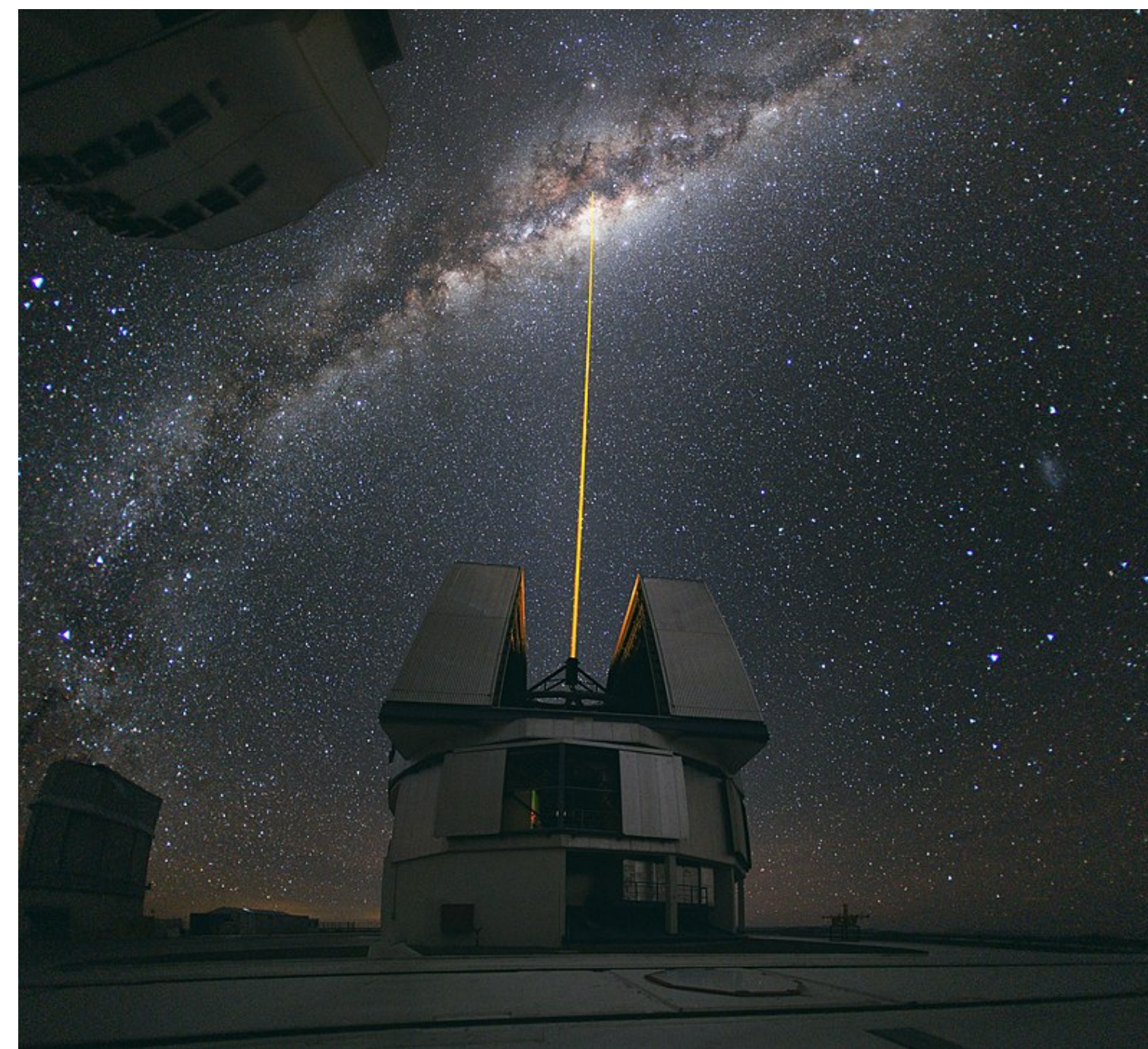
Hypatia ヒュパティア（350-70?--415）



「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



補償光学

<https://www.quantamagazine.org/><https://ja.wikipedia.org/wiki/ヨーロッパ南天天文台>

天の川銀河 (our Galaxy)



はくちょう座



こと座



へびつかい座



銀河中心



わし座



いて座



さそり座



はくちょう座

こと座

へびつかい座



X-1

鷺の停車場



わし座

Sgr A*

宮澤賢治

「銀河鉄道の夜」路線図

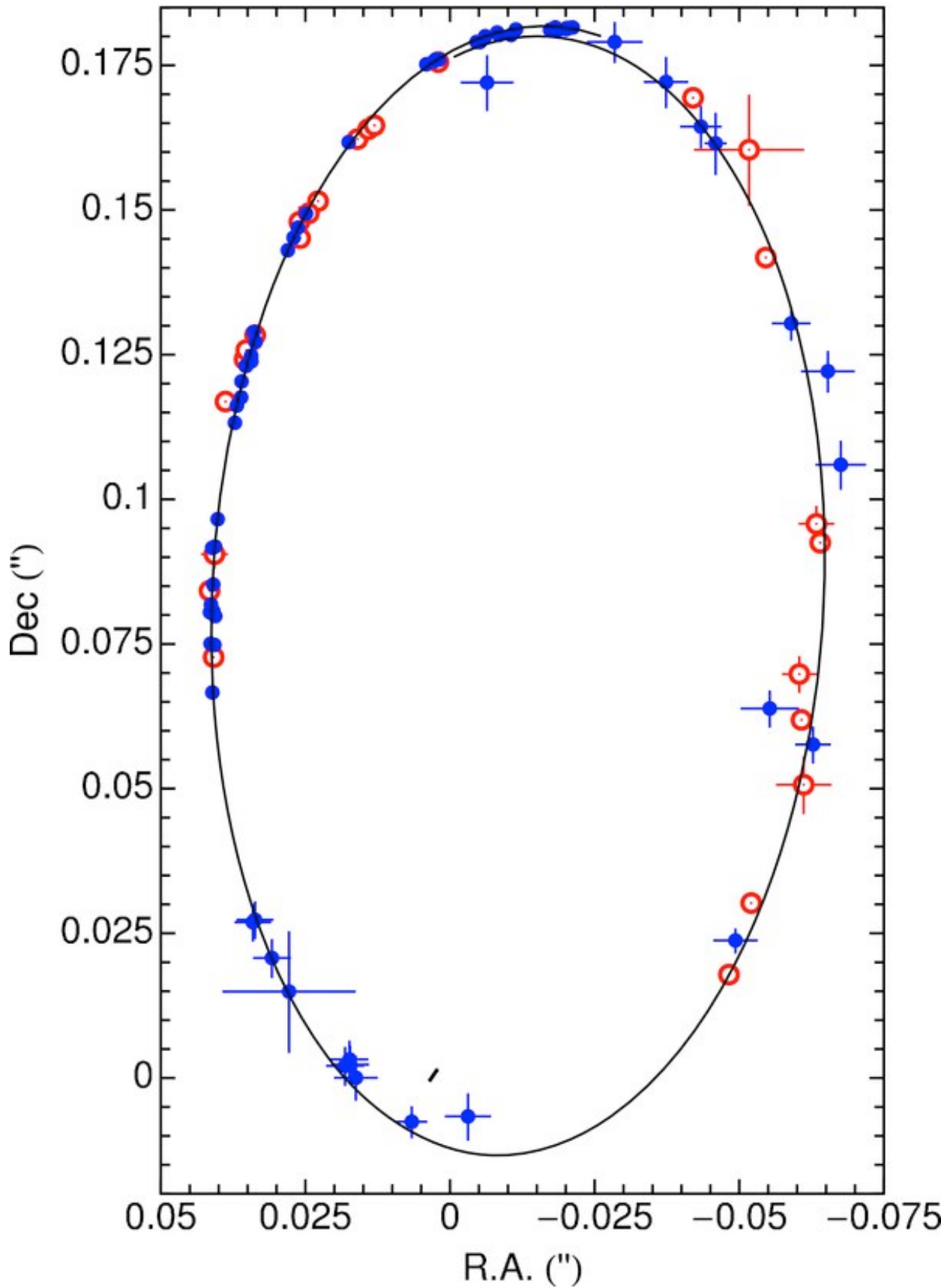
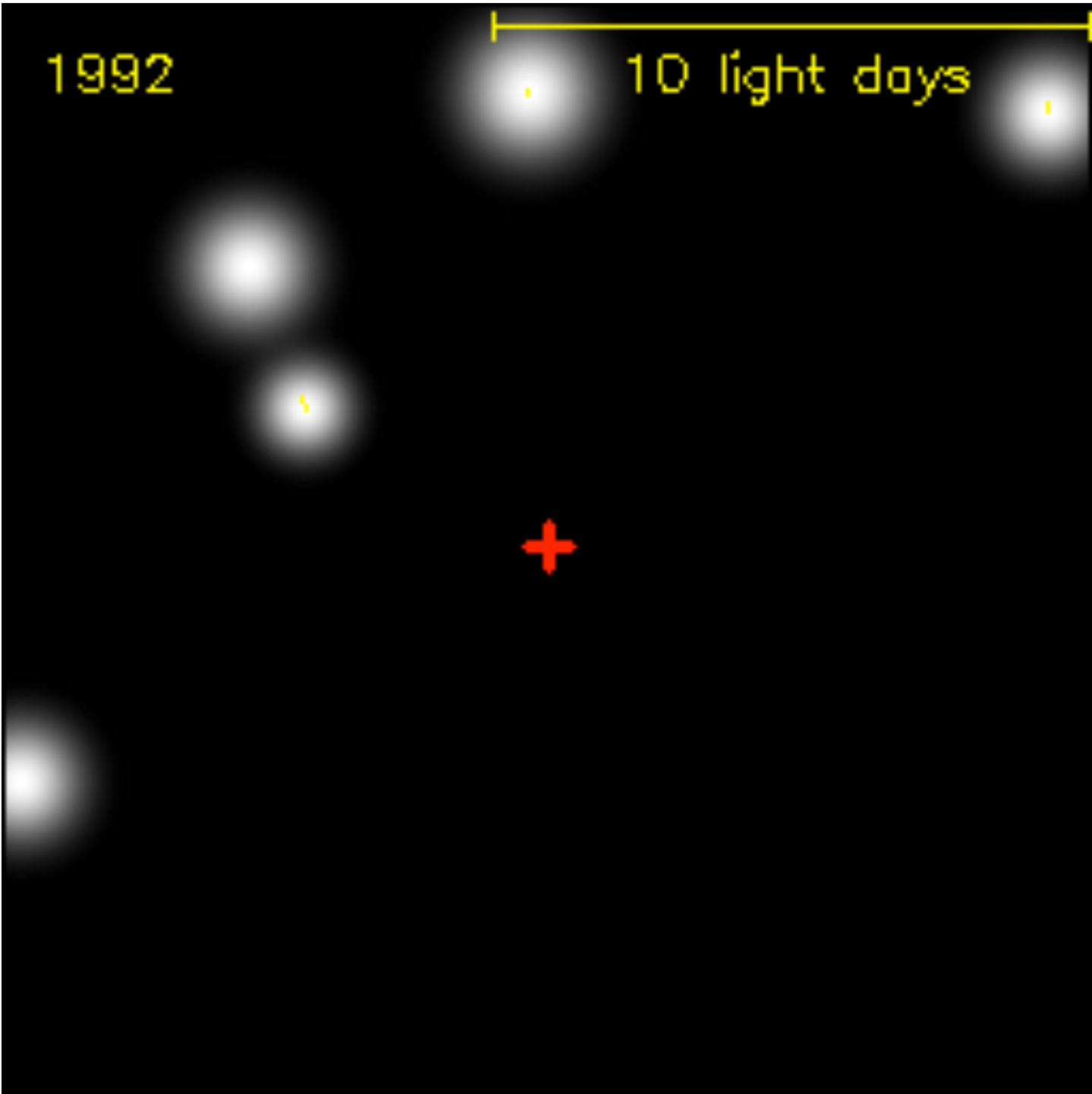
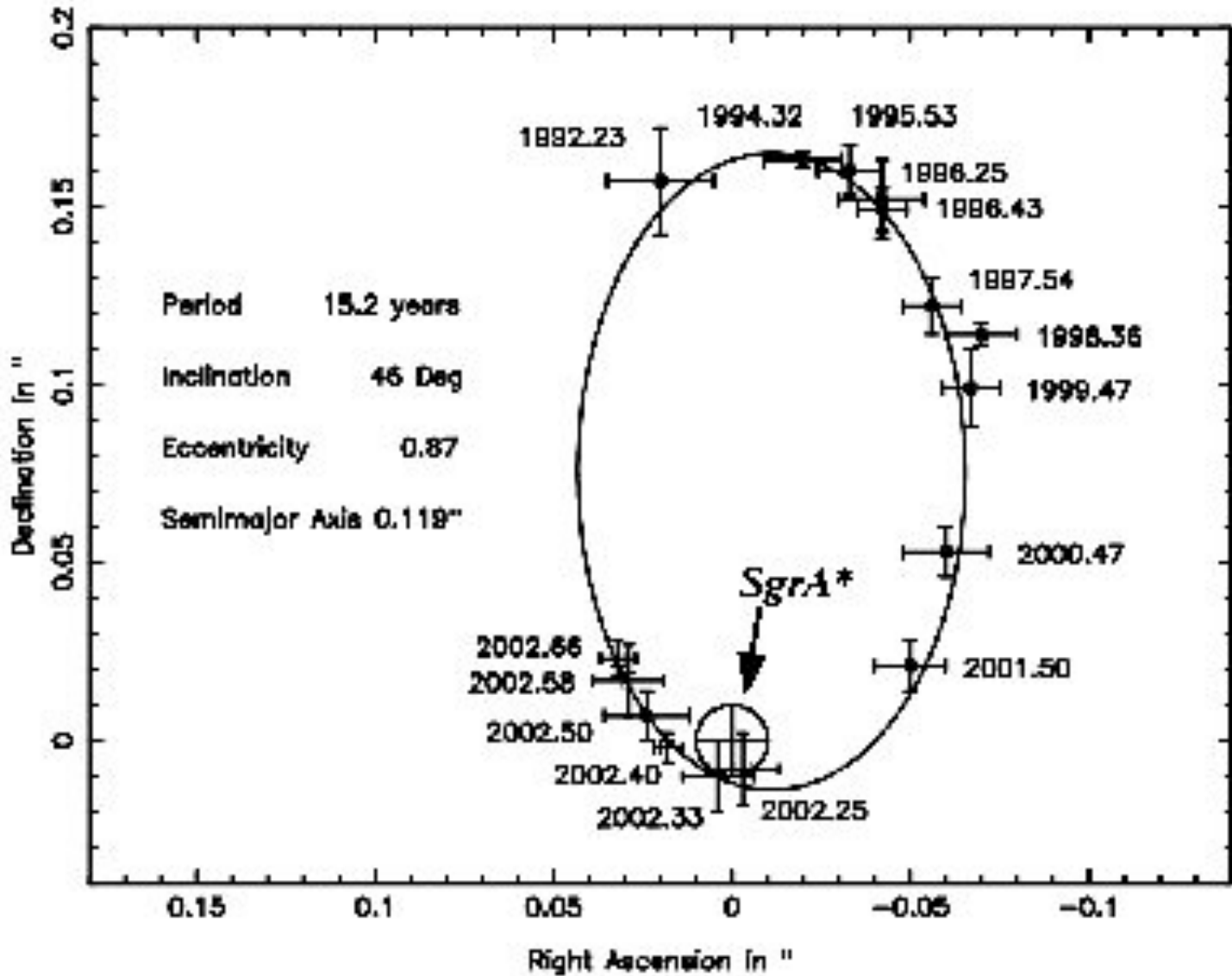
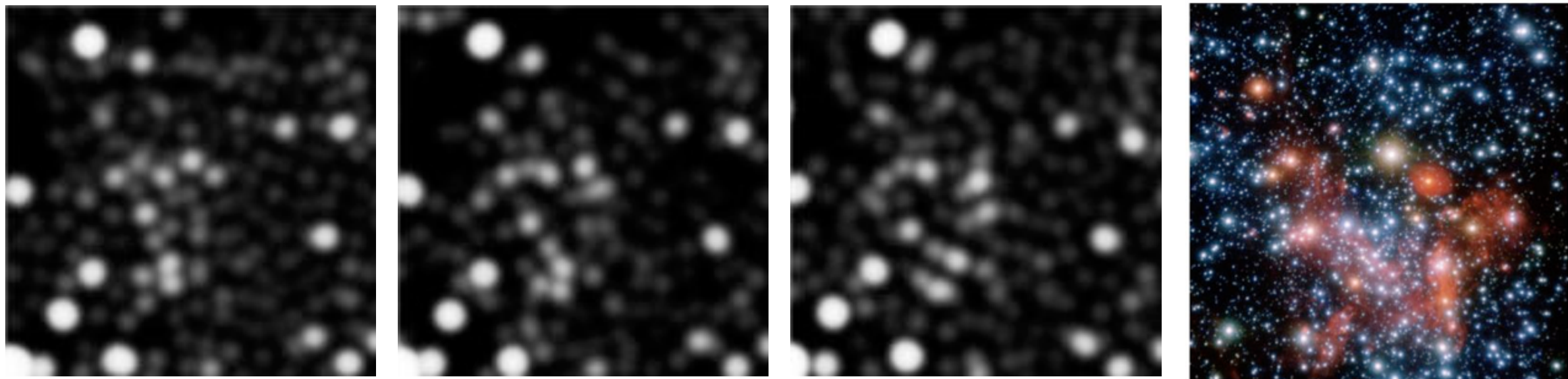


いて座

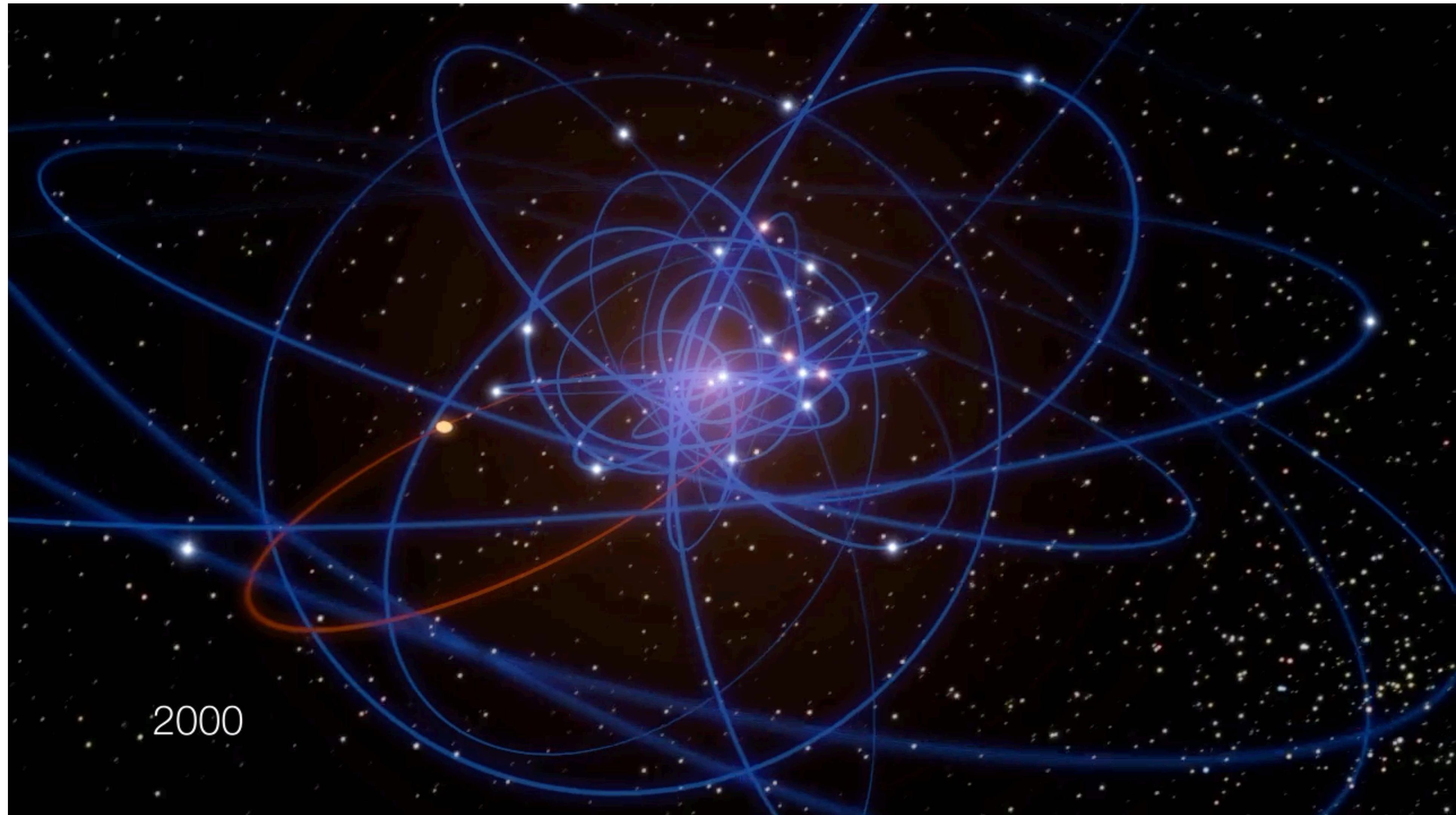


さそり座

サウザンクロス



<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>
<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>



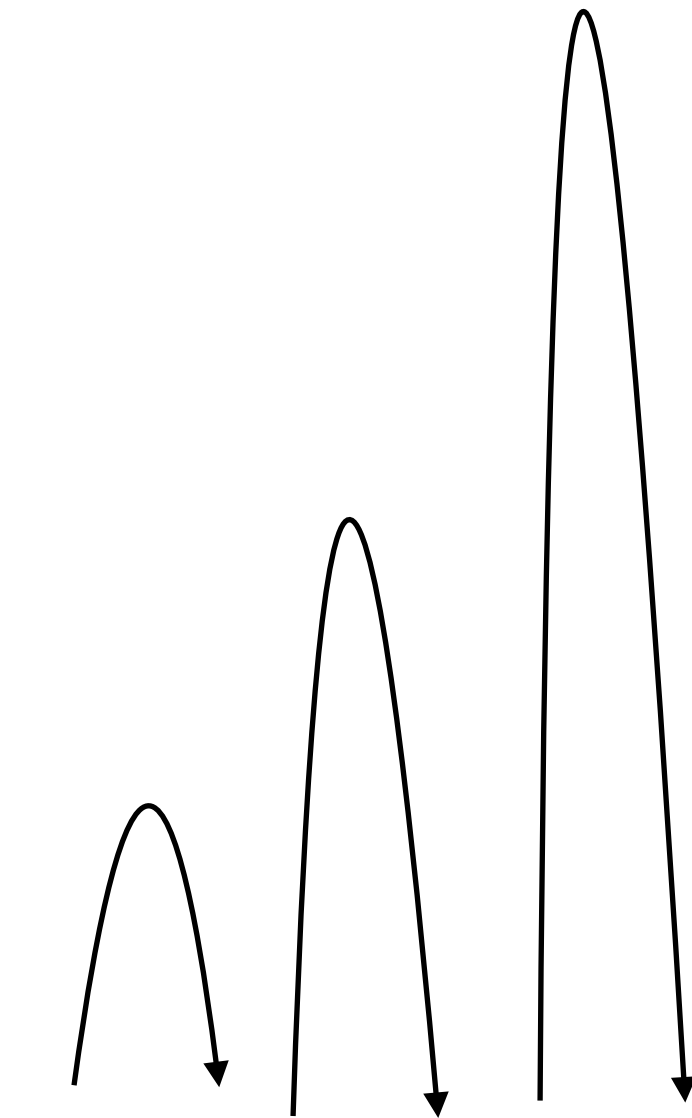
Reinhard Genzel and Andrea Ghez independently tracked the activity around the supermassive black hole at the Milky Way's center over a period of decades.

<https://www.quantamagazine.org/physics-nobel-awarded-for-black-hole-breakthroughs-20201006>

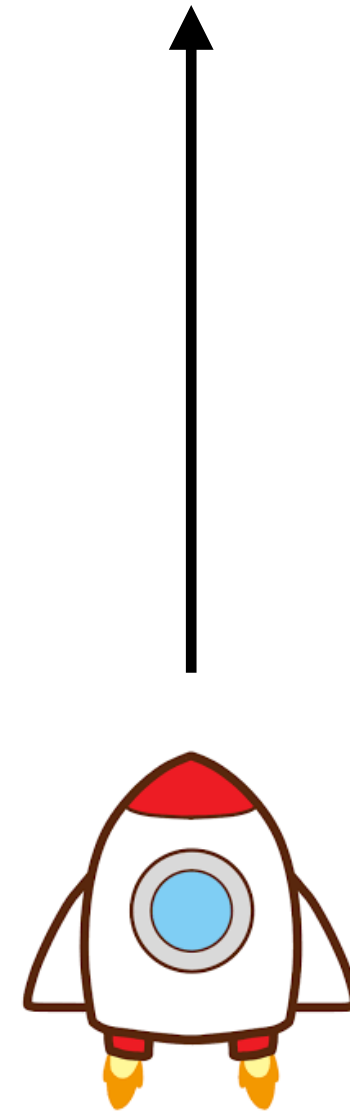
ブラックホール = 光が脱出できない時空の領域

とてつもなく 重くて小さな天体では

ボールを速く投げ上げると、
高くまで飛ぶ



地球からの脱出速度
秒速 12 km



秒速
30万 km



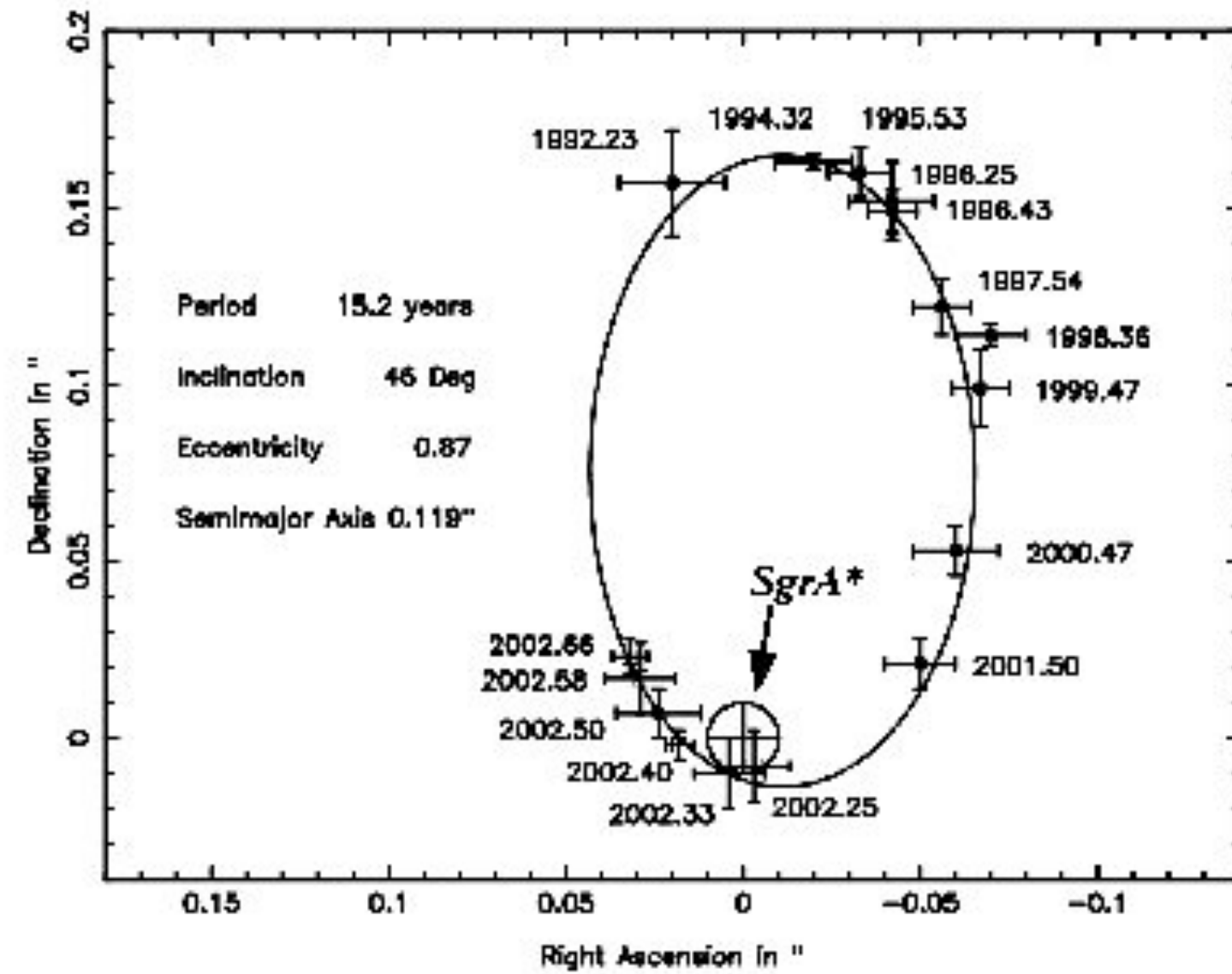
光は当然
脱出できる

光も
脱出できない



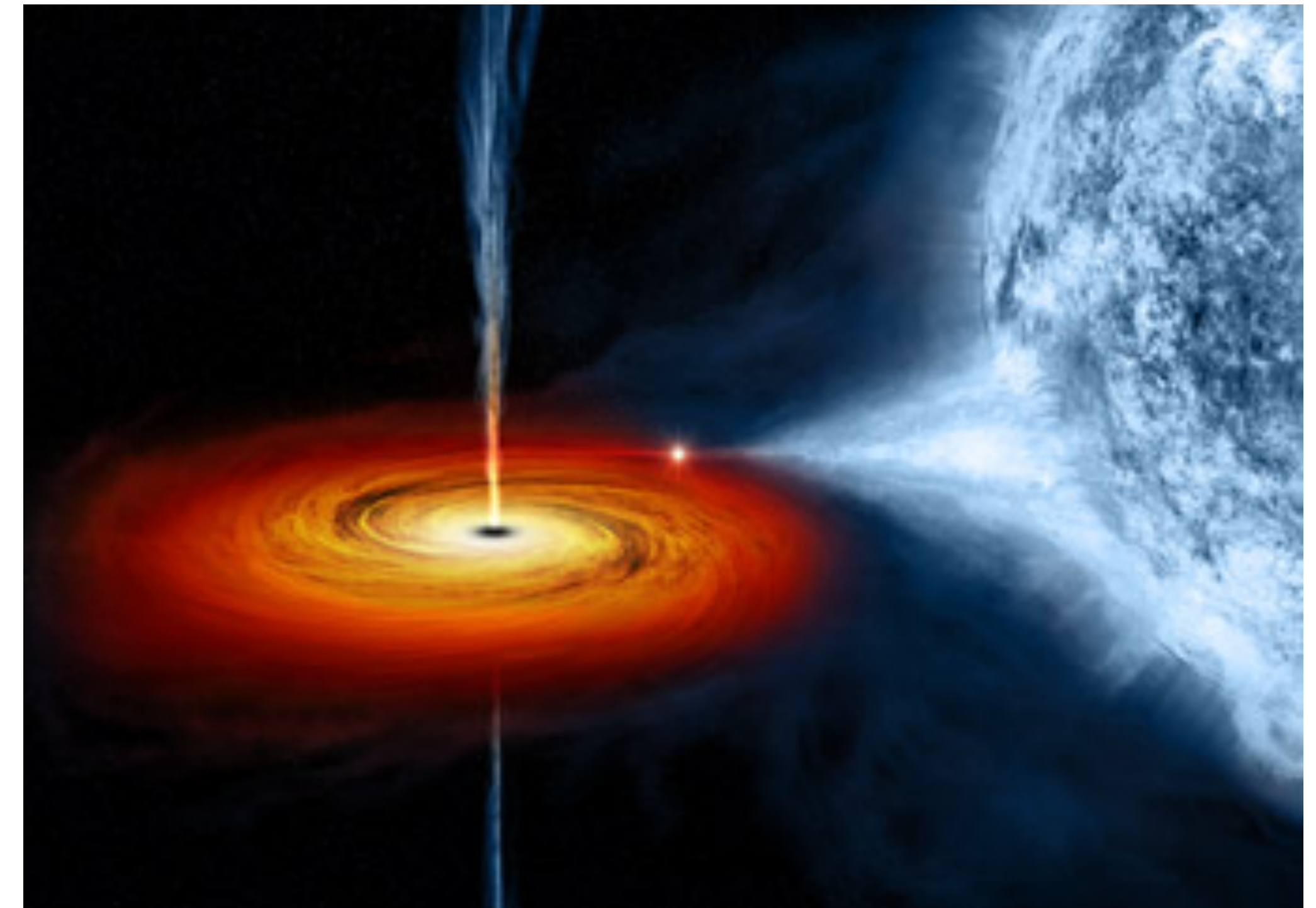
地球質量が半径9mmに押し込められたら
ブラックホール

ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？



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

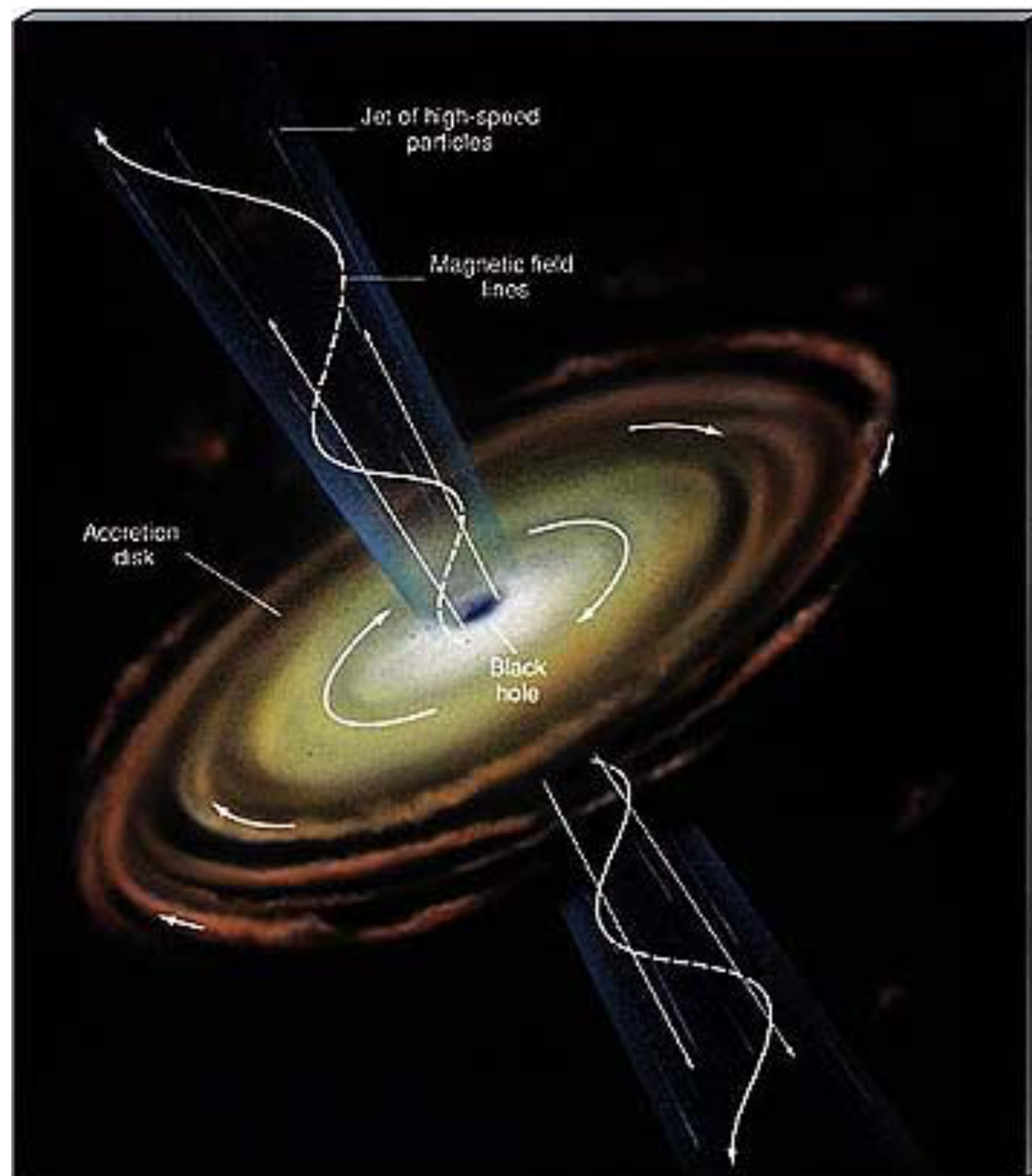
想像図



落下していくガスが
高い温度で輝く
(降着円盤 accretion disk)

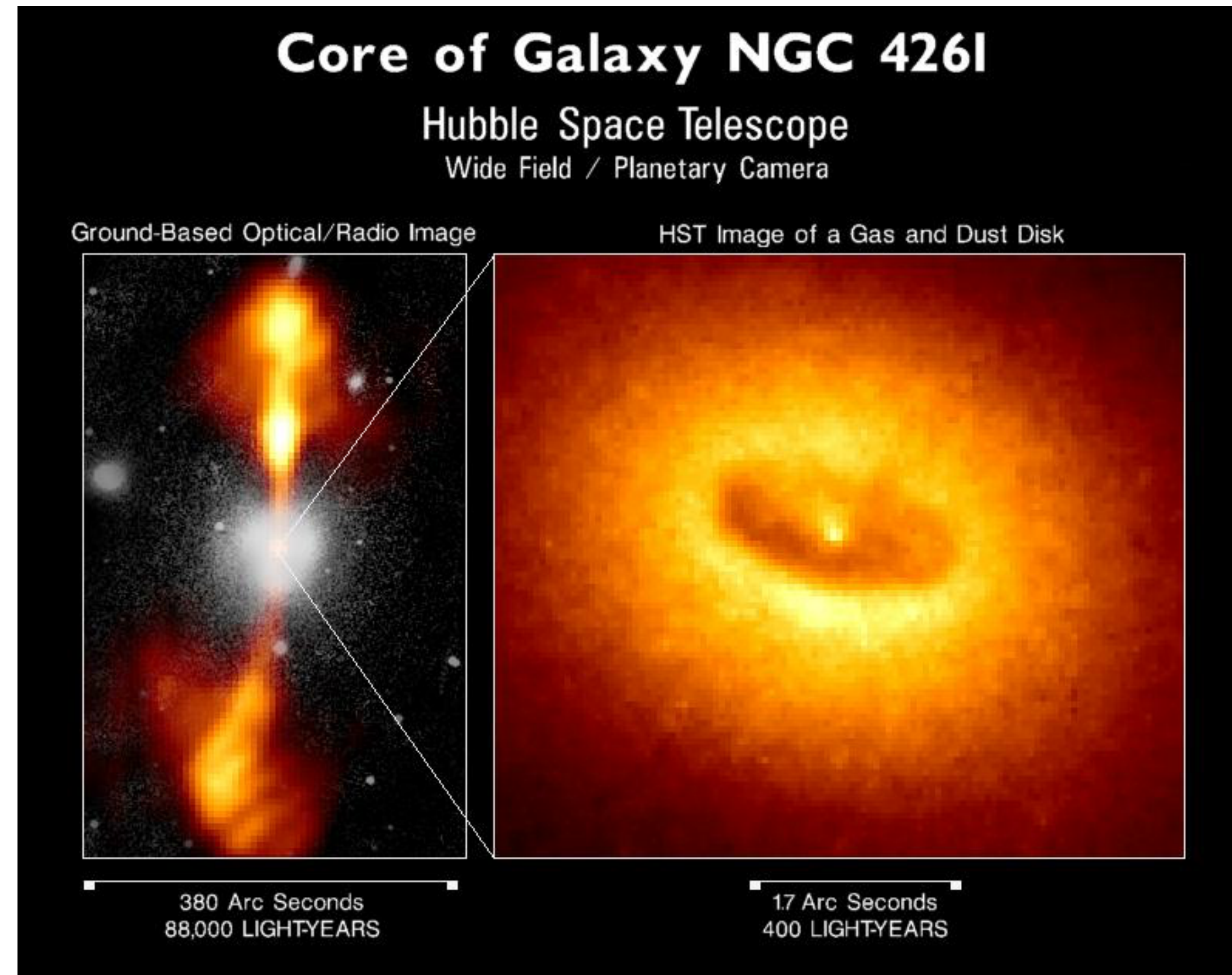
「ブラックホールは明るい天体」

ブラックホールが存在することは, どうしてわかったのか？



<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)

2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



地球から5500万光年

<https://alma-telescope.jp/news/press/eht-201904>

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 875:L1 (17pp), 2019 April 10

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>

© 2019. The American Astronomical Society.

OPEN ACCESS



First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of $42 \pm 3 \mu\text{as}$, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim 10:1$. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$. Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

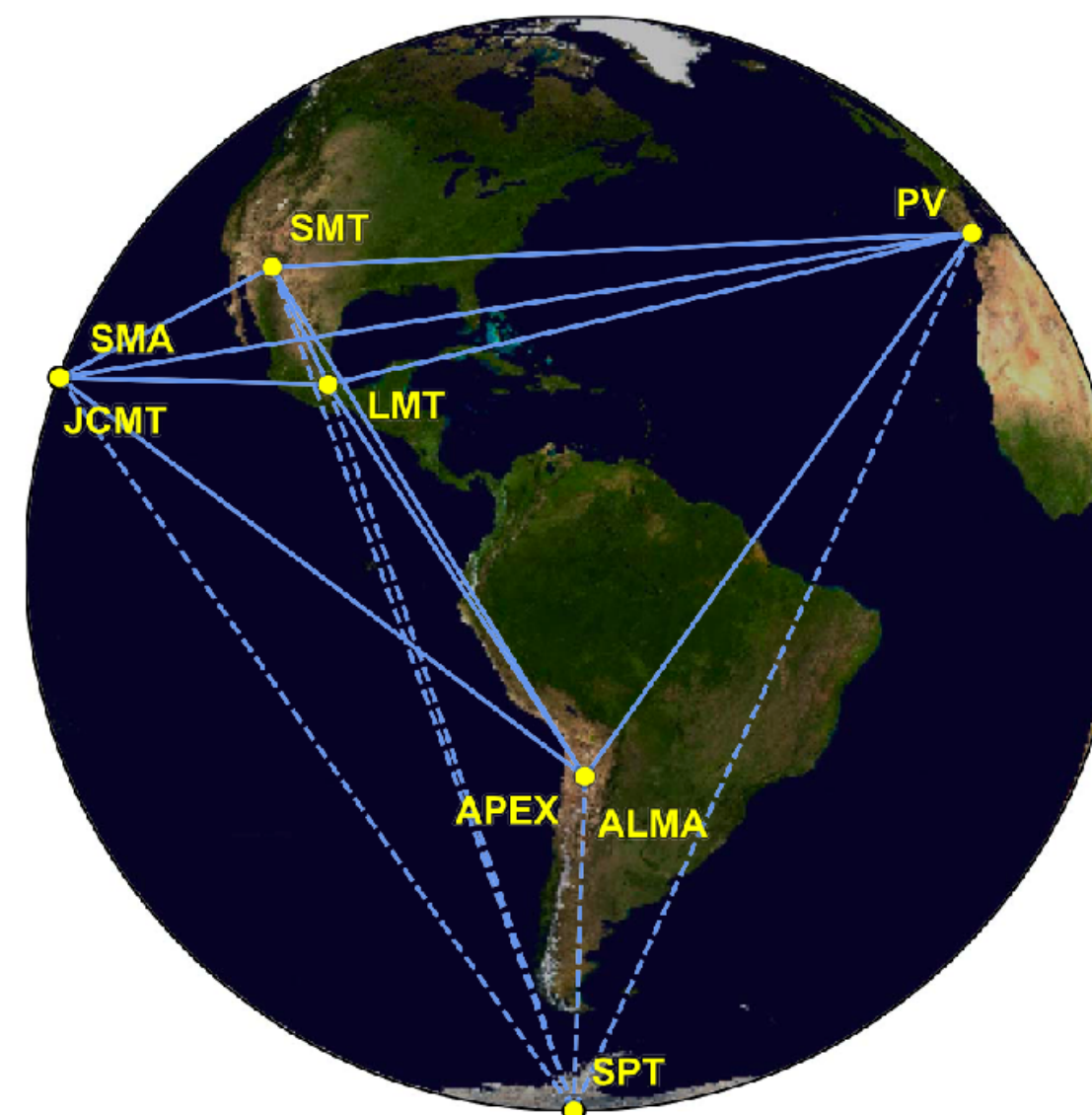


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual visibility on M87* (+12° declination). The dashed baselines were used for the calibration source 3C279 (see Papers III and IV).

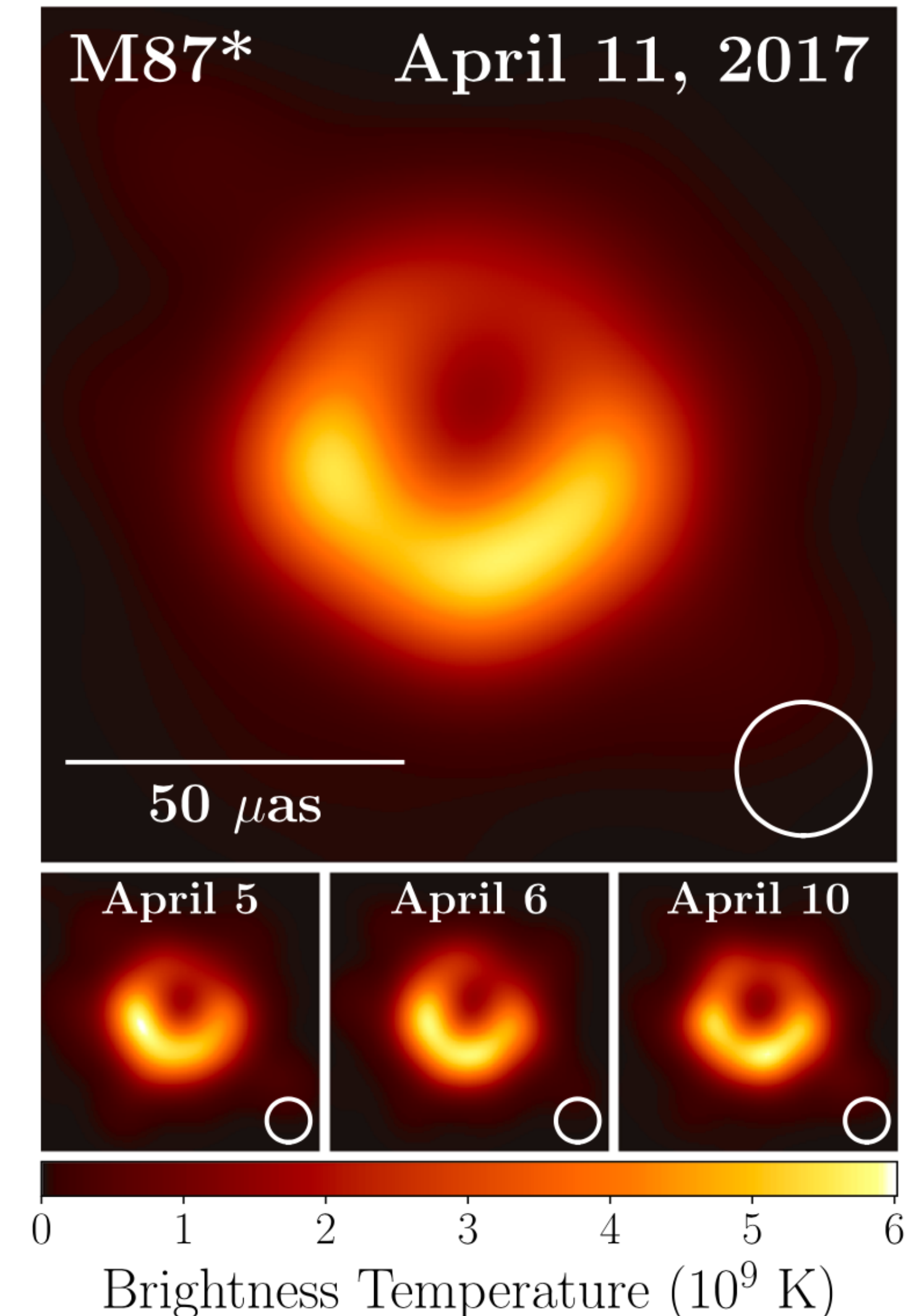


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each

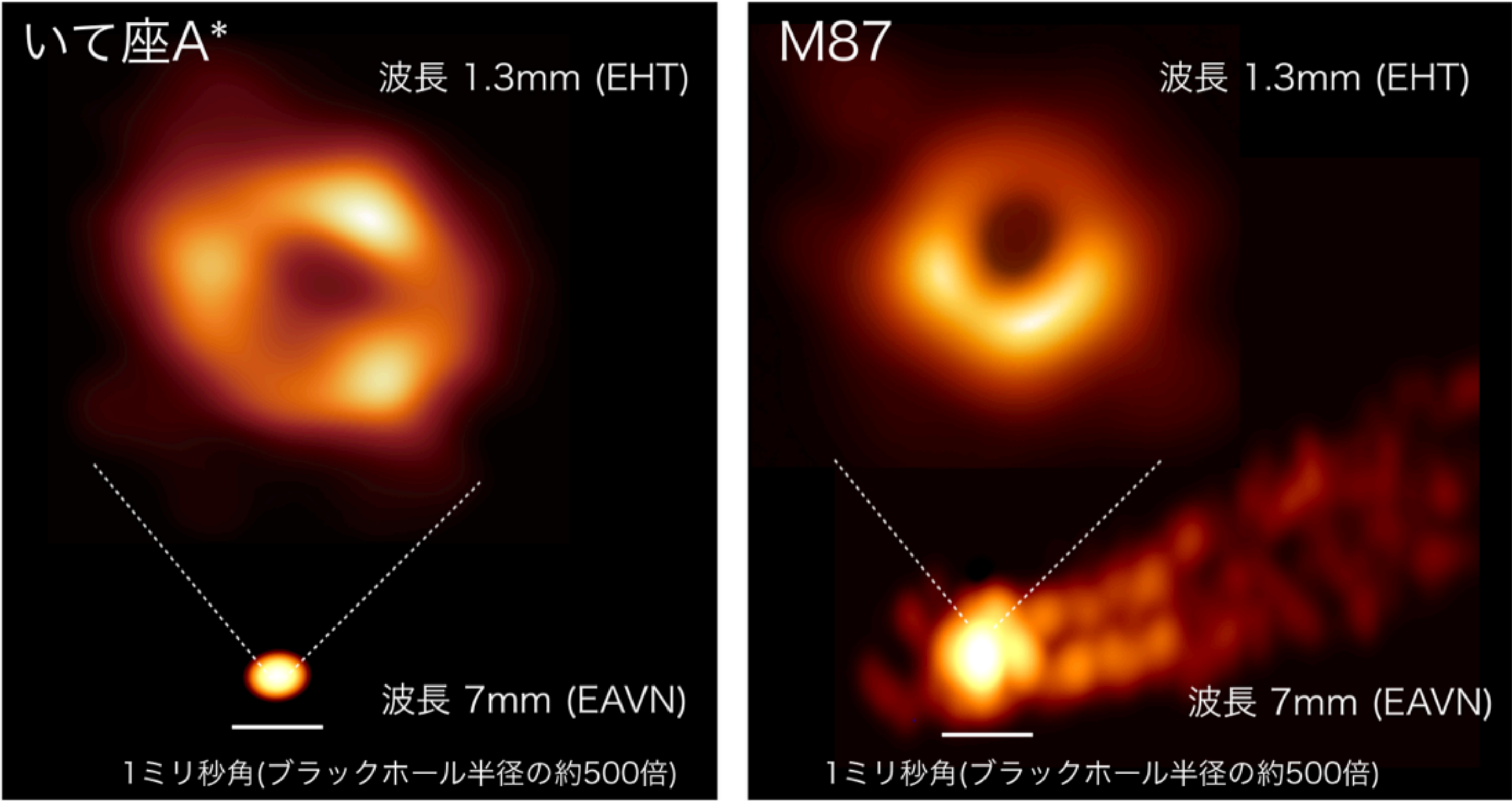
Event Horizon Telescope



2022年5月12日,「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

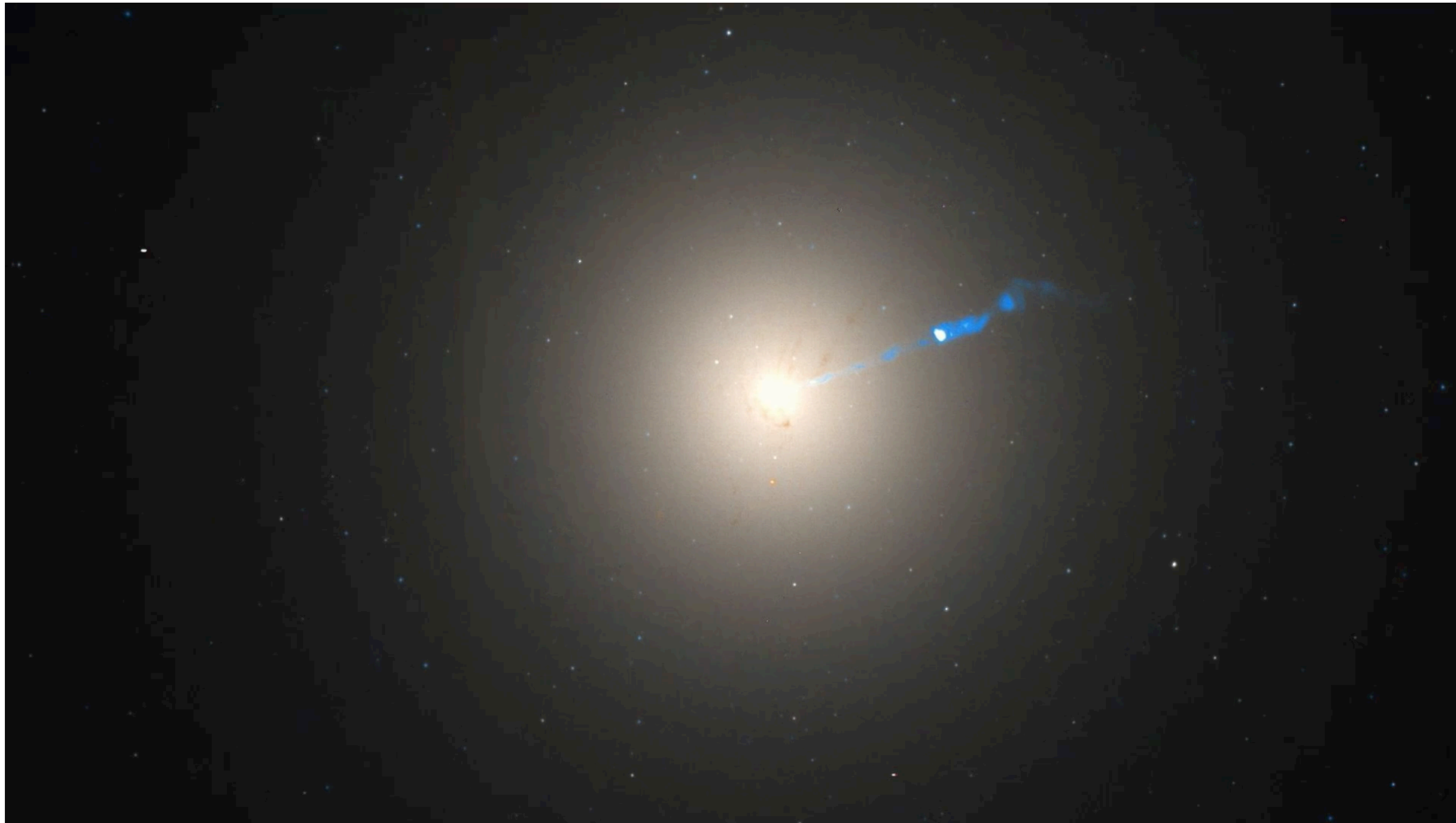
Sgr A*	M87
400万太陽質量	65億太陽質量
8 kpc	16.8 Mpc

3桁大きなBHが
3桁遠くにいるので,
同じ位の大きさに見える



[図6] いて座A* (左) とM87 (右) の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網 (EAVN) で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。(クレジット: EHT Collaboration, EAVN Collaboration)

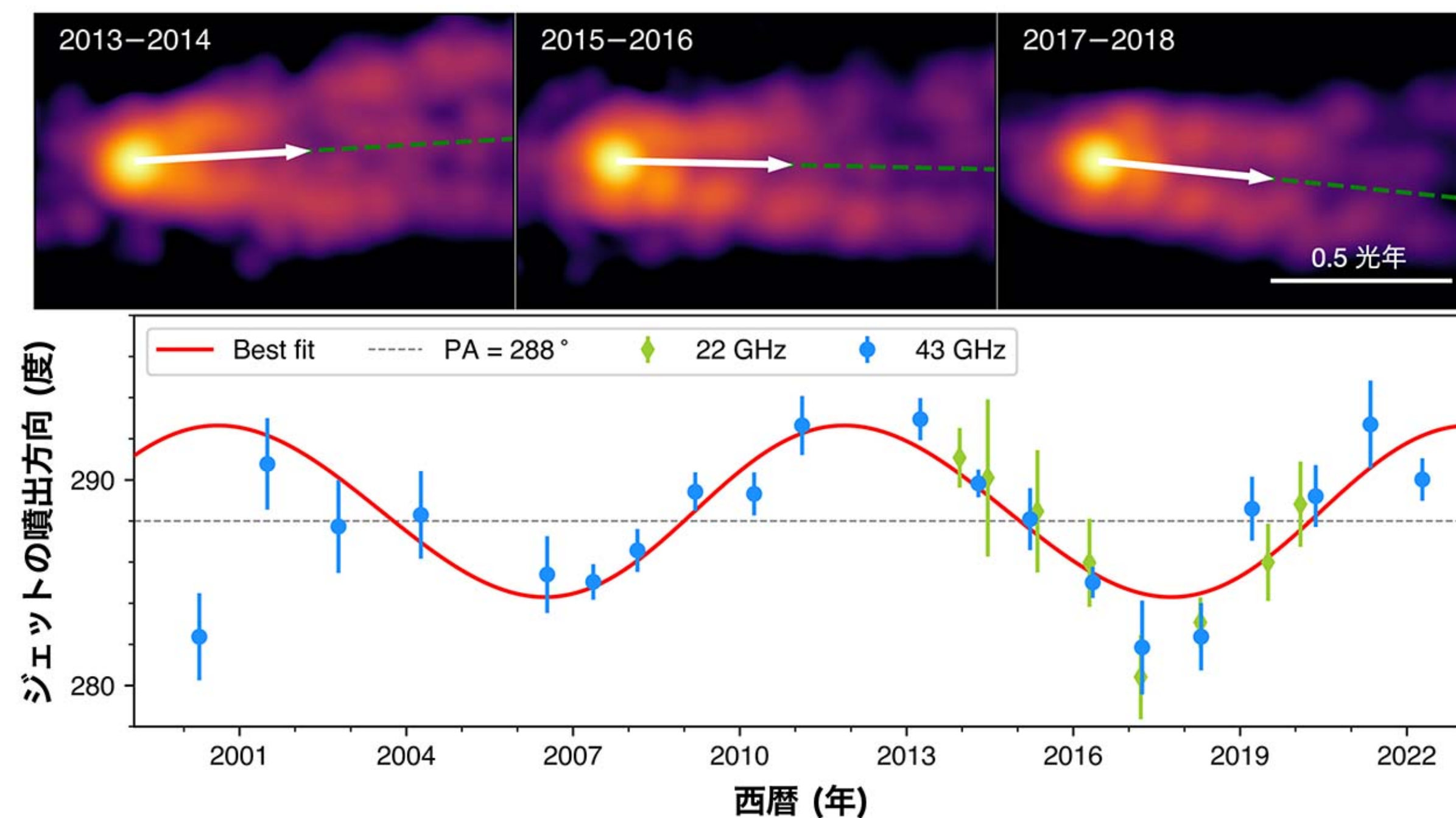
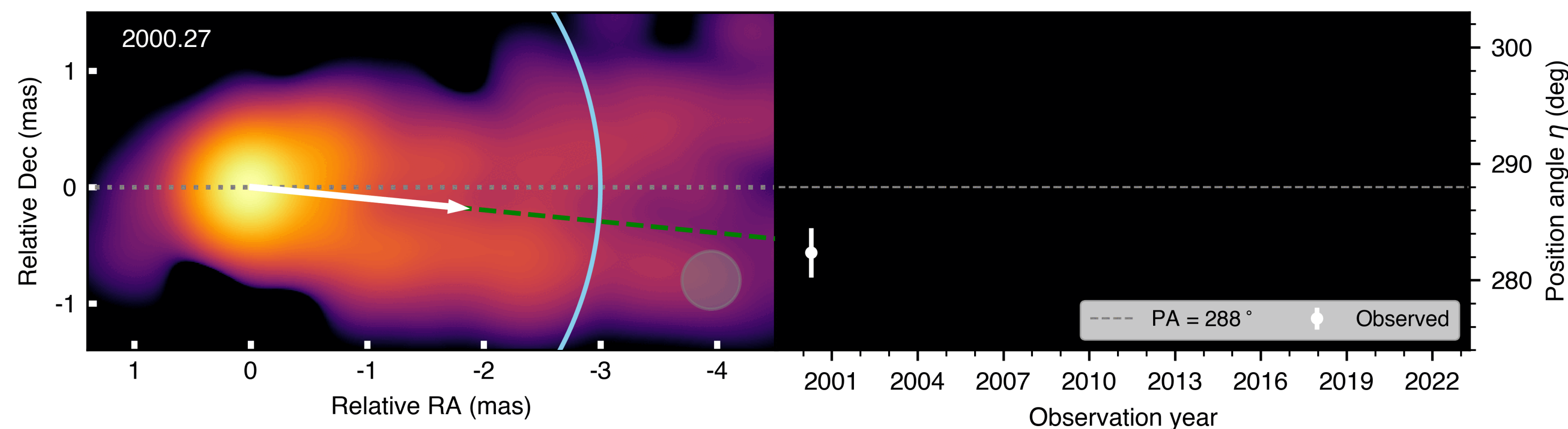
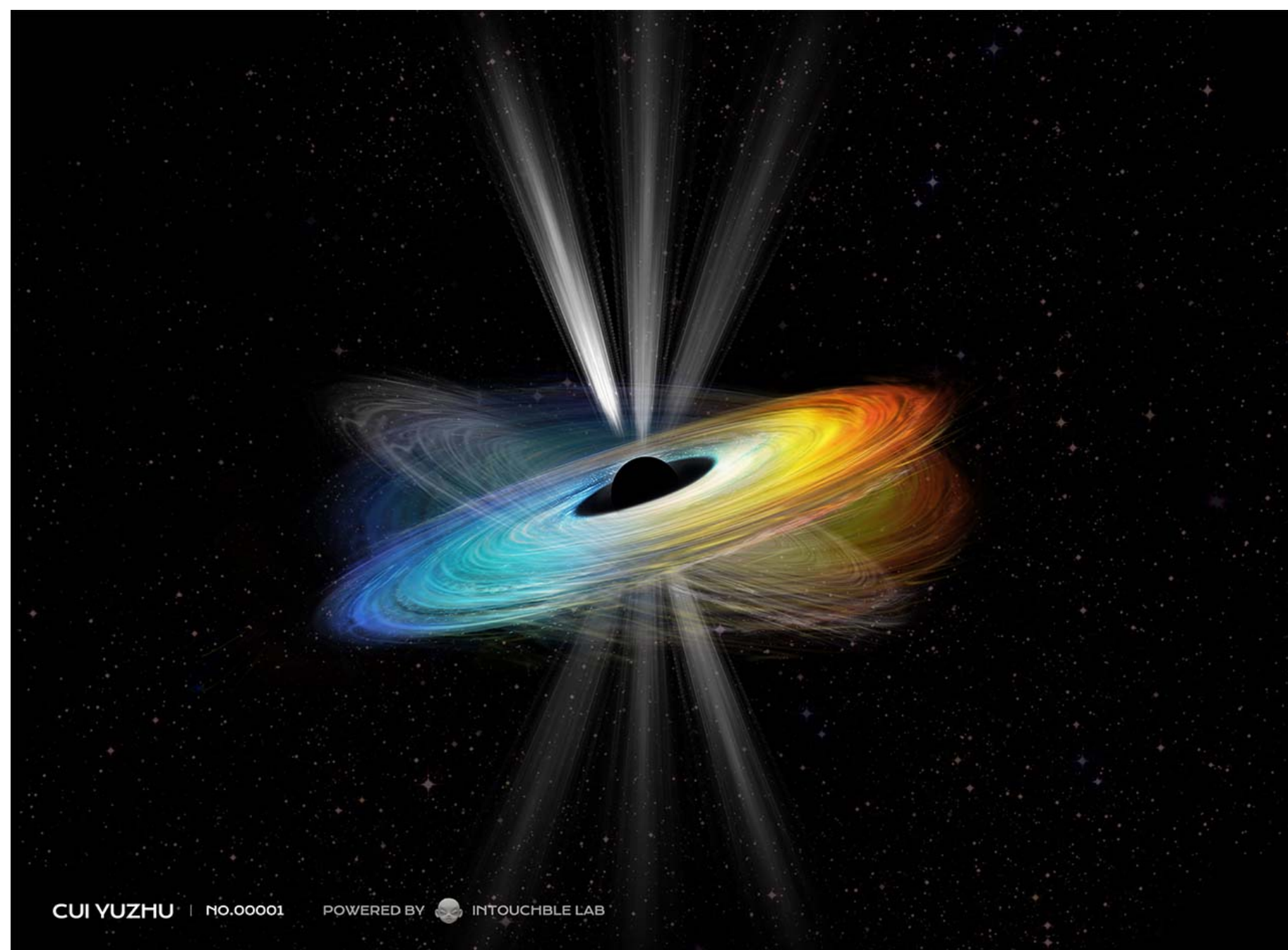
Event Horizon Telescopeのグループは、M87銀河（5000万光年先 [16.8Mpc]）の中心にあるブラックホール（質量は太陽の65億倍）が、11年周期で歳差しながらジェットを吹き出していることを確認した。M87中心のブラックホールは、初めて撮像に成功したブラックホール天体である。ブラックホールが自転していることを示す初めての観測的な報告となった。



<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20230928>

<https://www.nao.ac.jp/news/science/2023/20230928-eavn.html>

Event Horizon Telescopeのグループは、M87銀河（5000万光年先 [16.8Mpc]）の中心にあるブラックホール（質量は太陽の65億倍）が、11年周期で歳差しながらジェットを吹き出していることを確認した。M87中心のブラックホールは、初めて撮像に成功したブラックホール天体である。ブラックホールが自転していることを示す初めての観測的な報告となった。



<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20230928>

<https://www.nao.ac.jp/news/science/2023/20230928-eavn.html>

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）

ケプラーによる惑星の運動法則



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.

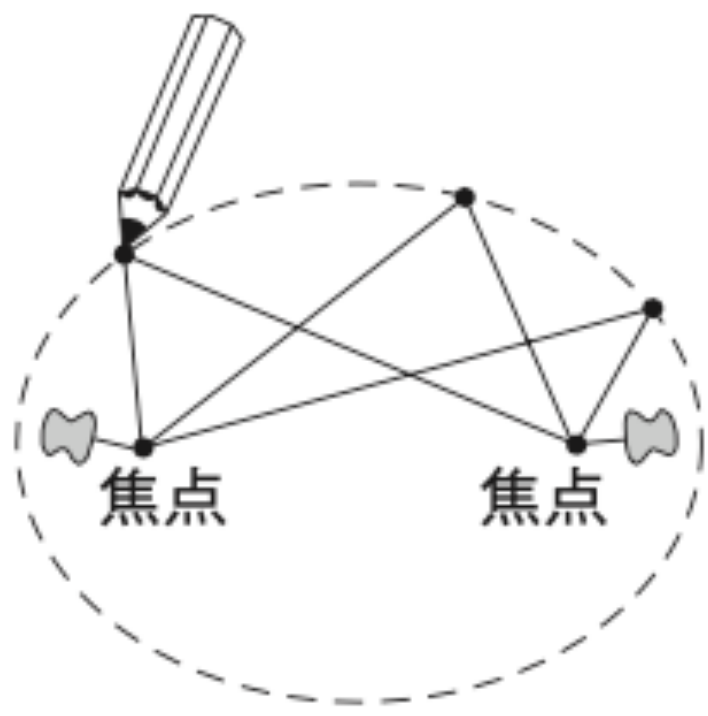
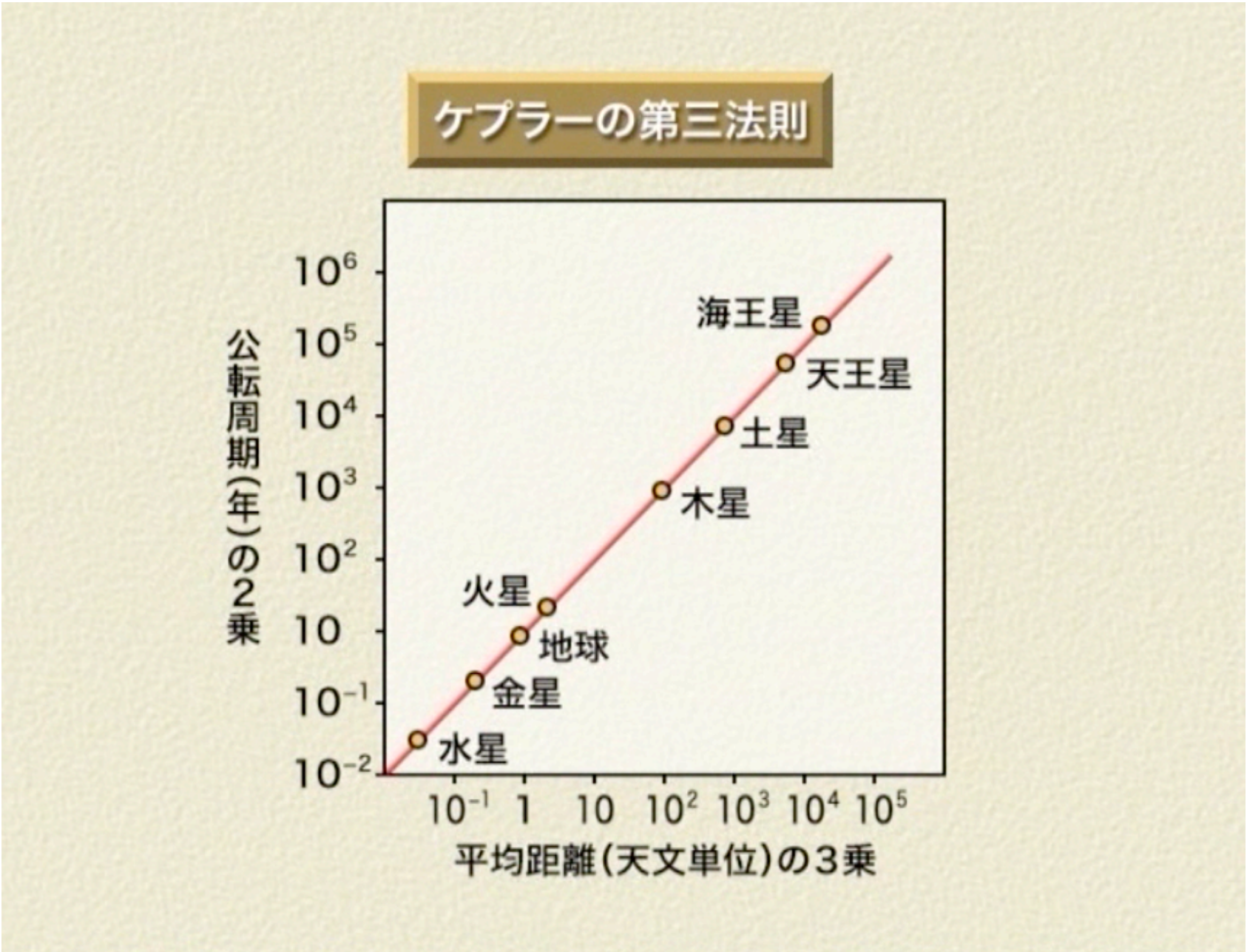
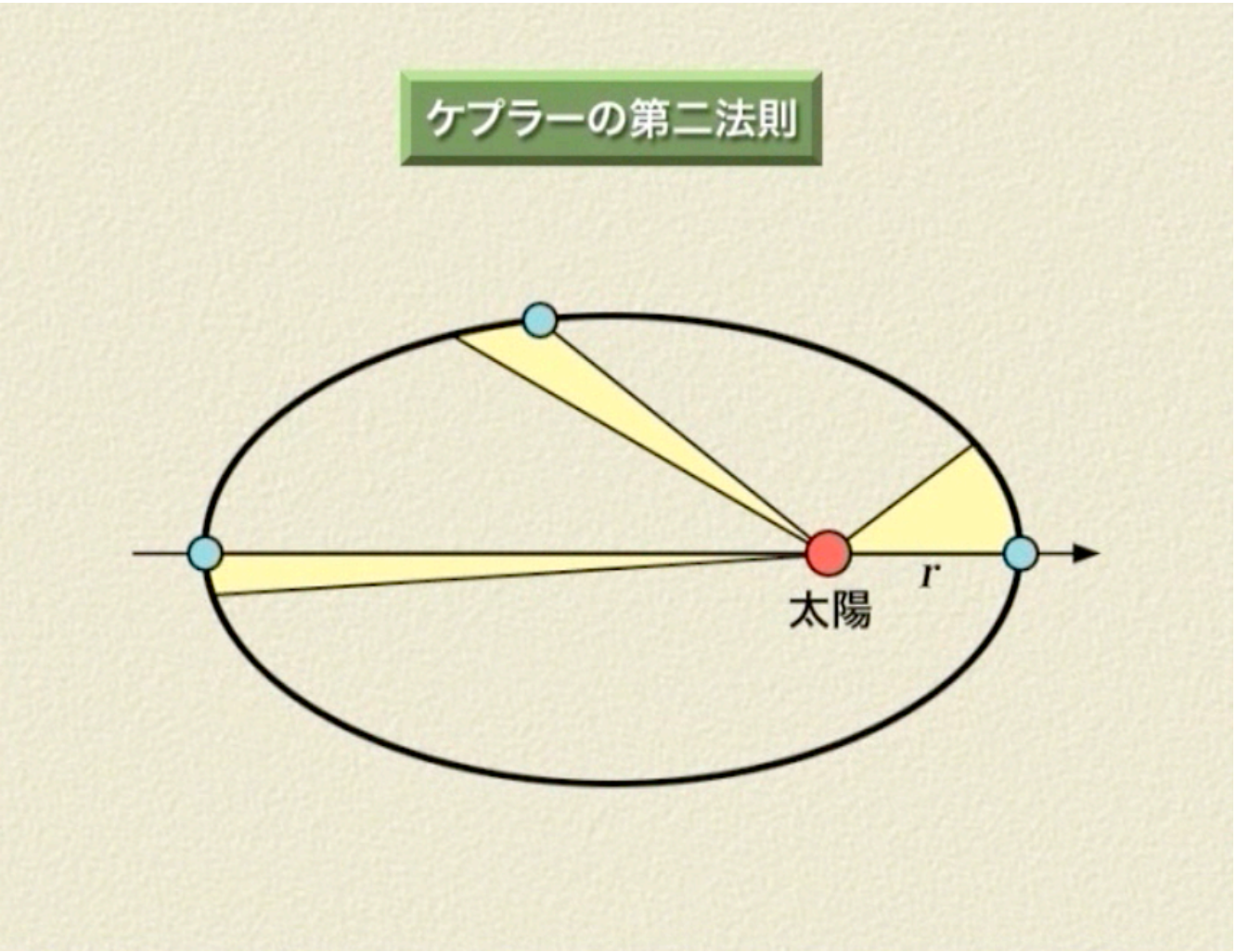
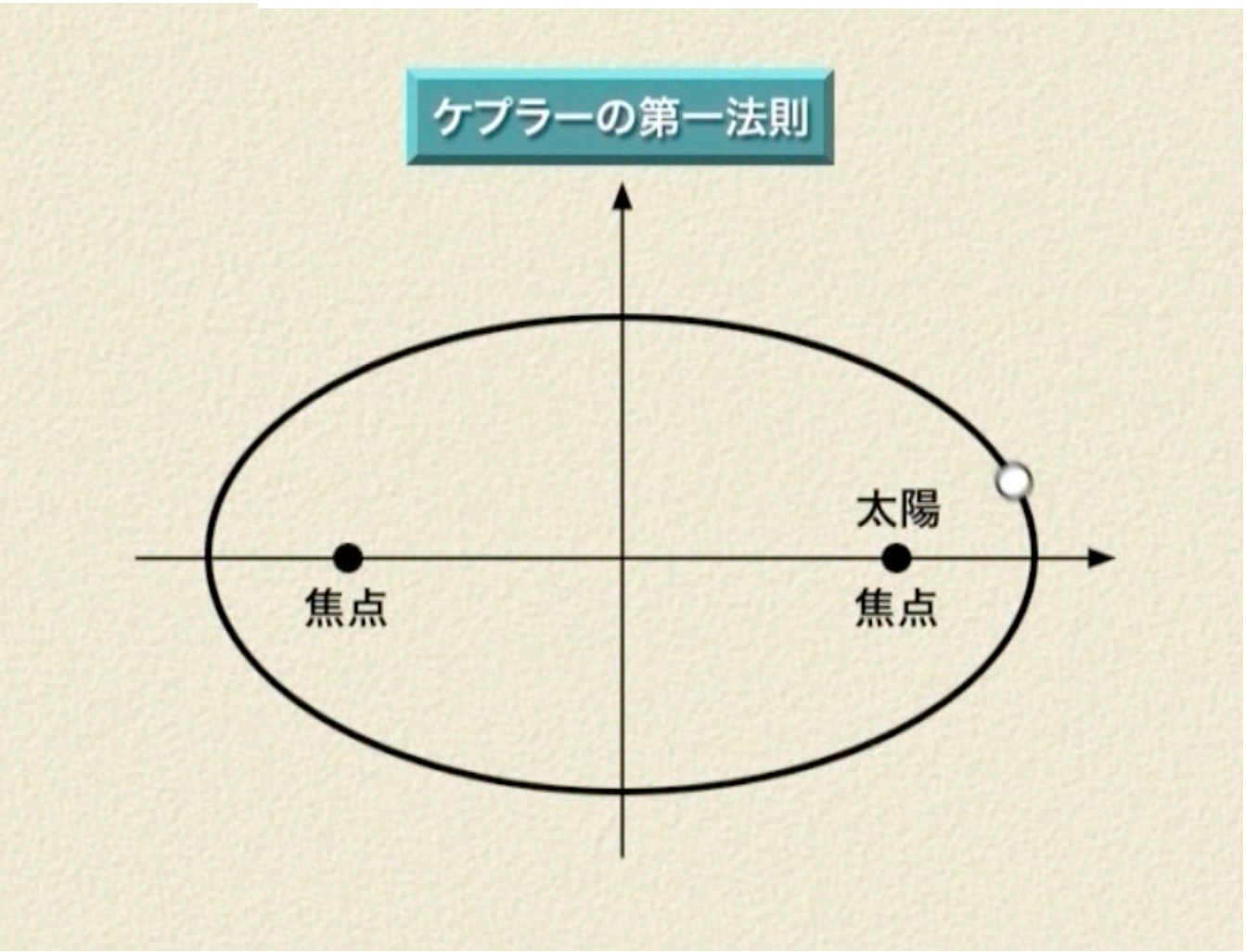


図 2.13 楕円は 2 つの焦点から糸を張り, ペンで一周すると描ける形である. 焦点が 1 つに重なっていれば円になる. 円は特殊な楕円である.



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る〔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、事柄は非常に確実で正確である。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 unfelicitously 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 $3/2$ 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

2.2.3 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



2.2.3 ガリレイ 慣性の法則の発見

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。一方で斜面の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）

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

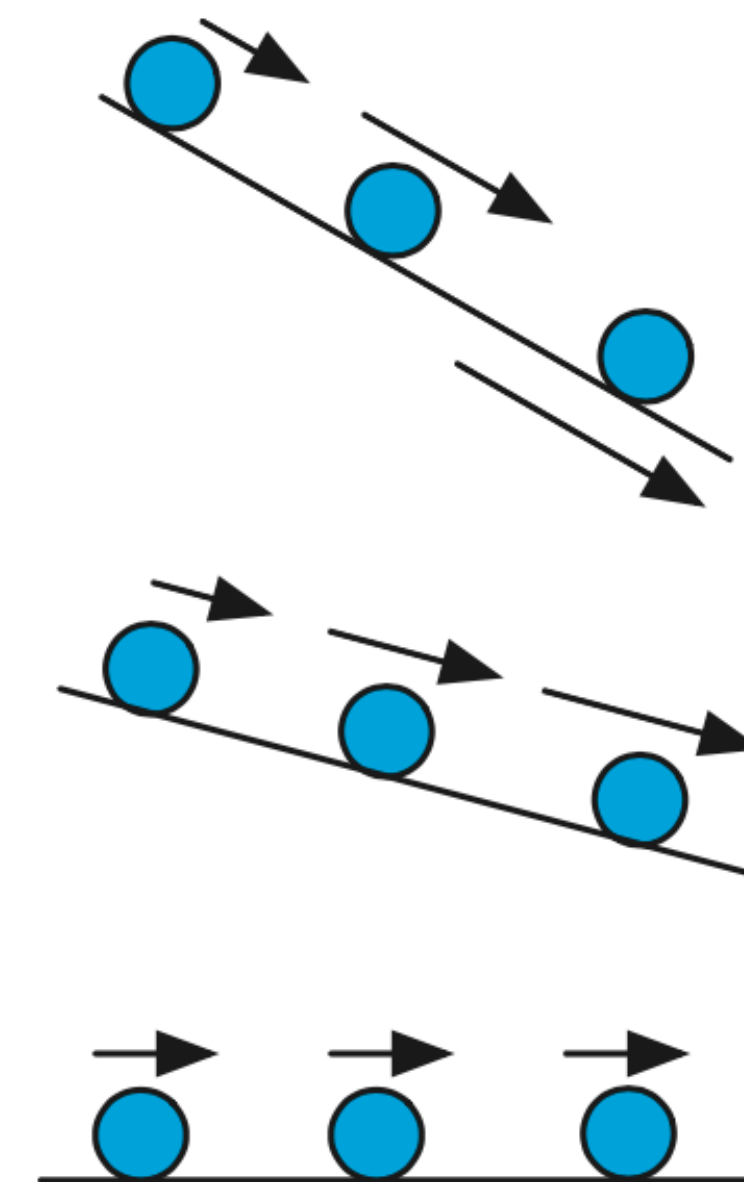
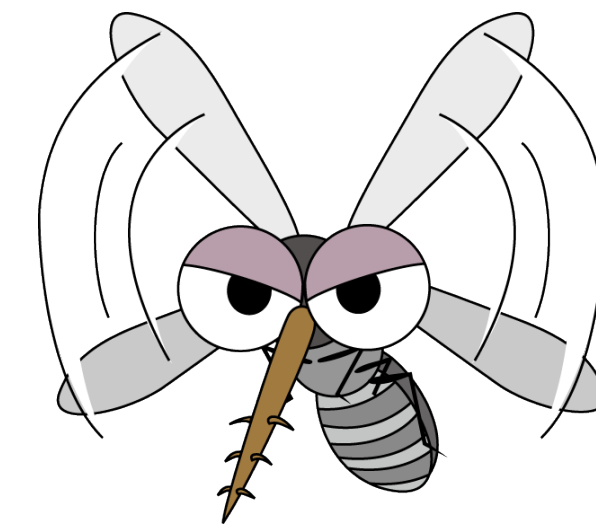


図 2.16 斜面の角度を小さくすれば、加速が少なくなる。傾きゼロでは等速運動となるはずだ。

以前のミニッツペーパーから

授業とは関係ないのですが、
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？



2.2.3 ガリレイ 地動説の擁護

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』）

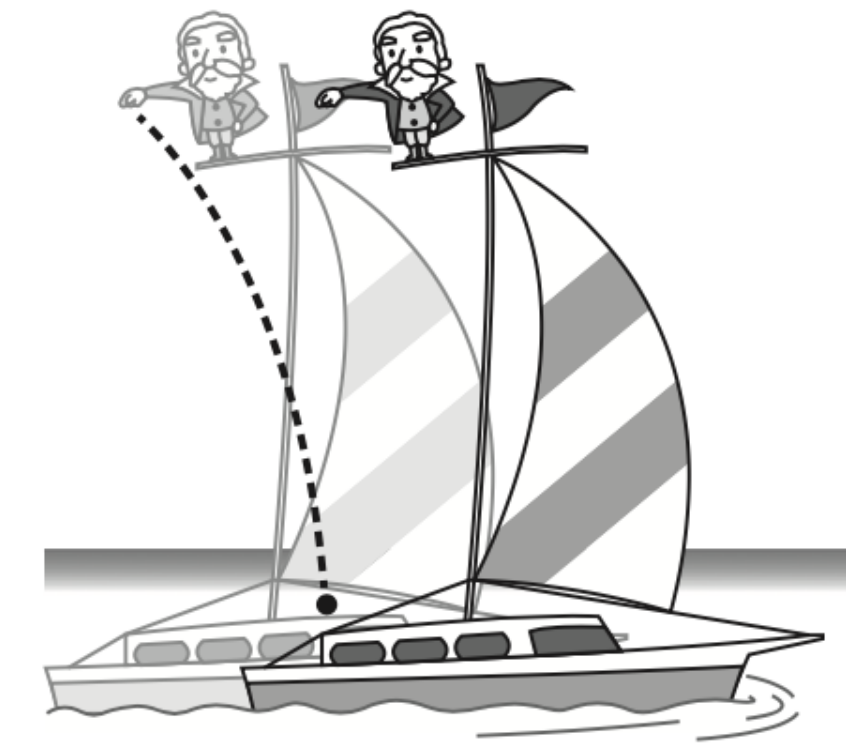
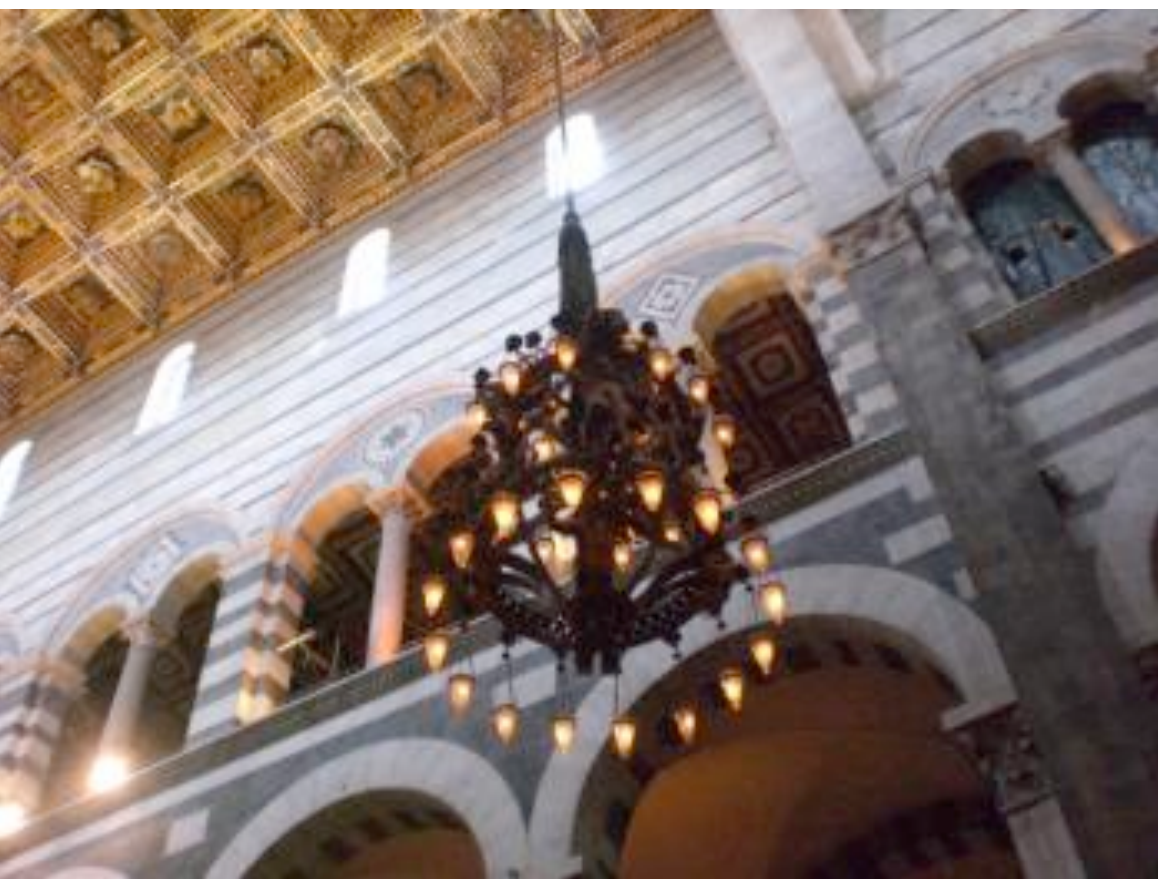


図 2.17 等速で動いている船であっても、マストから落下した物体は、マストの下に落下する。

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。

相対性原理とは

NHK 100分de名著 (2012年)



周期 [s]

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

長さ [m]

重力加速度
9.8 [m/s²]

$T = 1[s] \quad \ell = 0.248[m]$

$T = 2[s] \quad \ell = 0.994[m]$

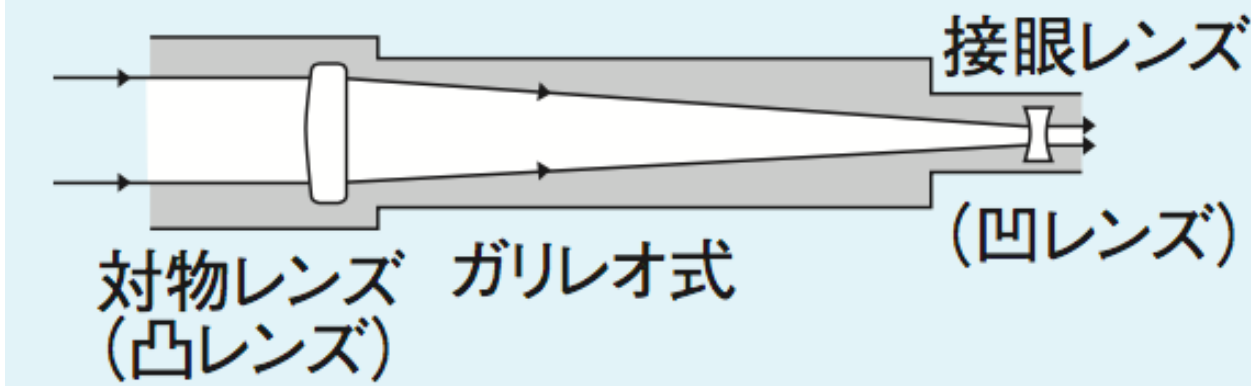
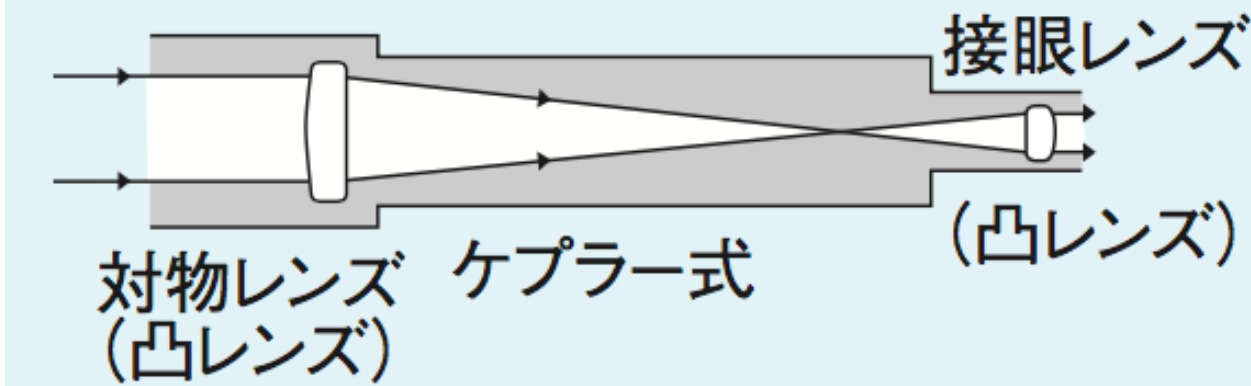
$T = 10[s] \quad \ell = 24.8[m]$



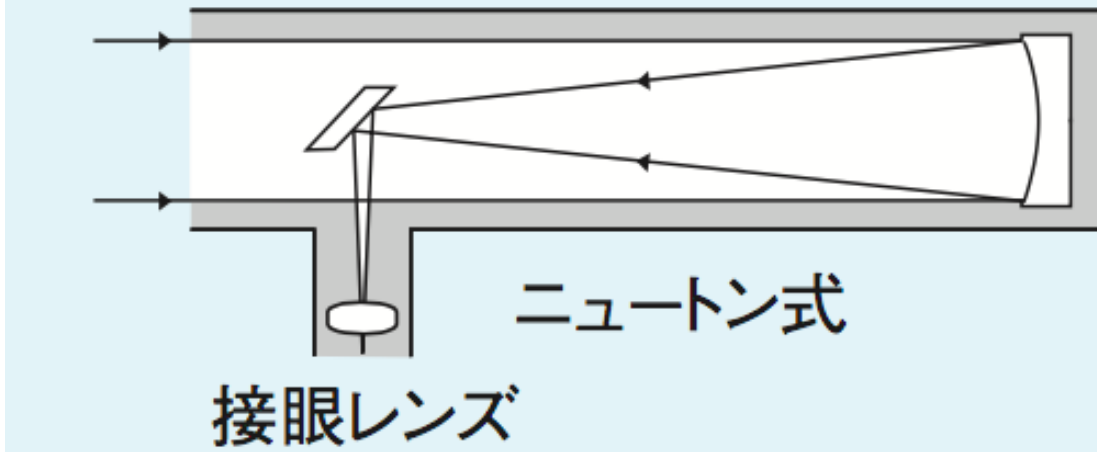
ガリレイ：天体望遠鏡による天体観測



倍率20--30倍



屈折式望遠鏡



反射式望遠鏡

図 2.20 望遠鏡のしくみ.



ガリレイ：「月の表面はでこぼこ」の発見

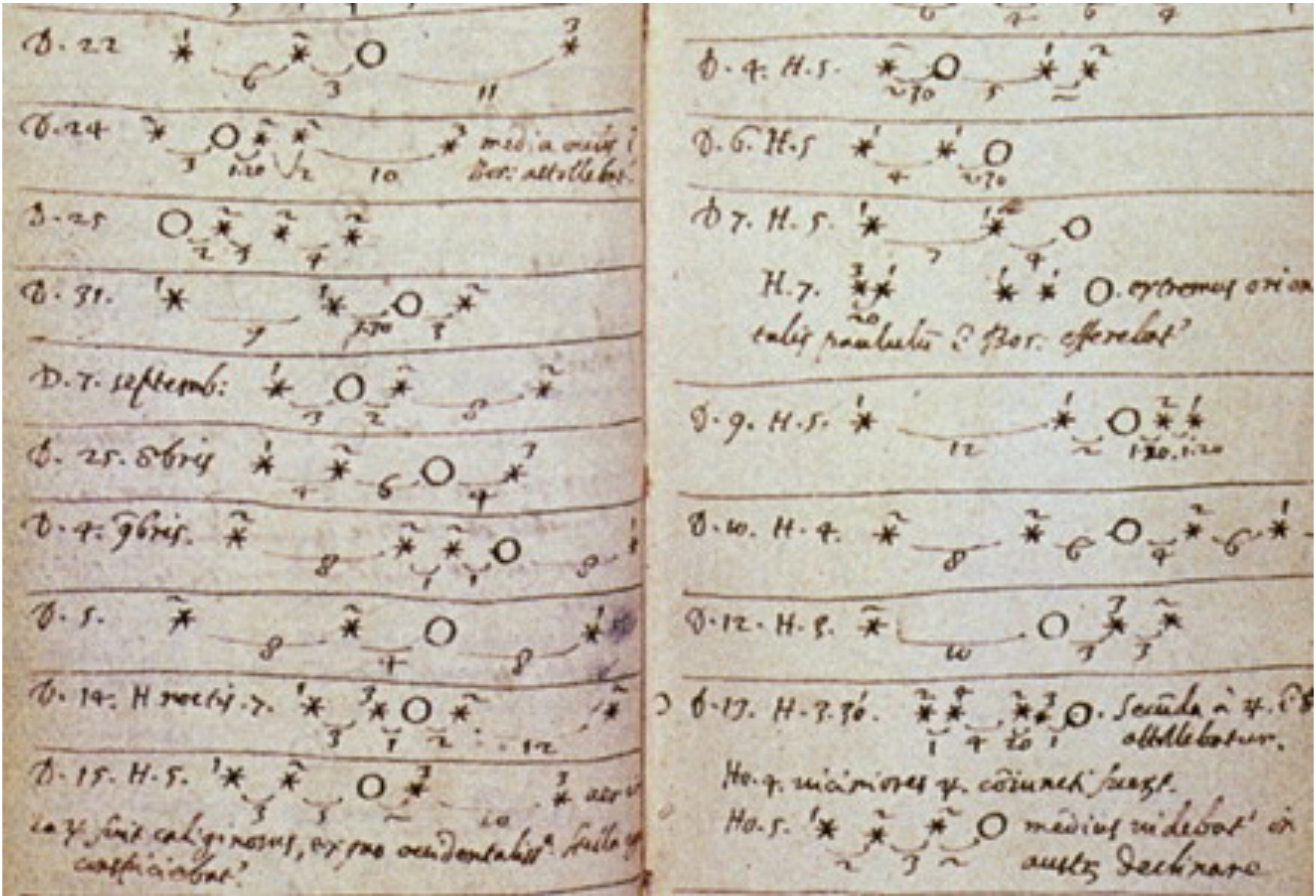
月の表面は、これまで多くの哲学者が主張しているような、滑らかで一様な、完全な球体なのではない。起伏にとんだ凹みや隆起がいたるところにあり、山や谷によって刻まれた地球と何の変わりもない。（『星界の報告』1610年）

=> 月は地球と同じくでこぼこ

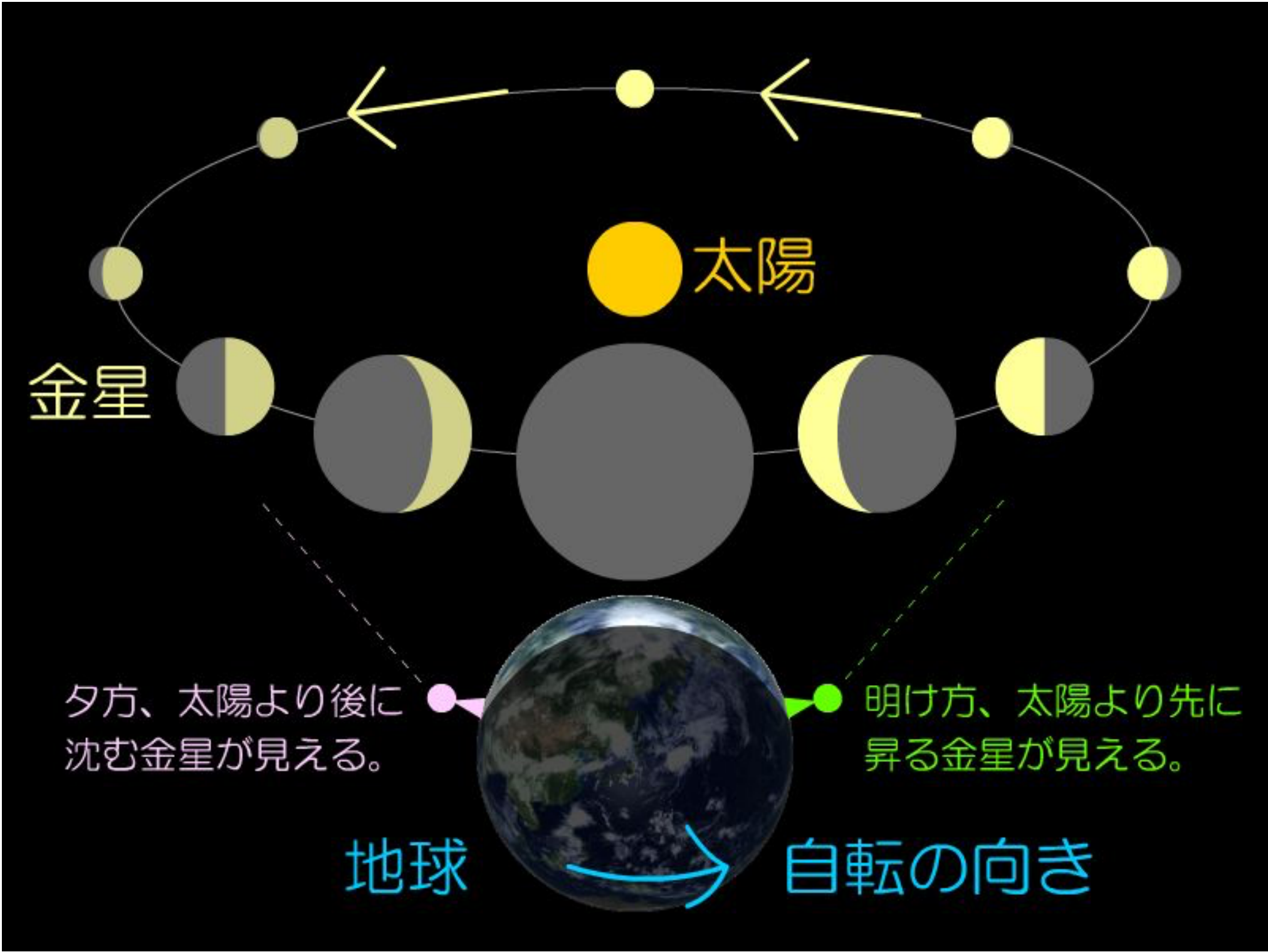
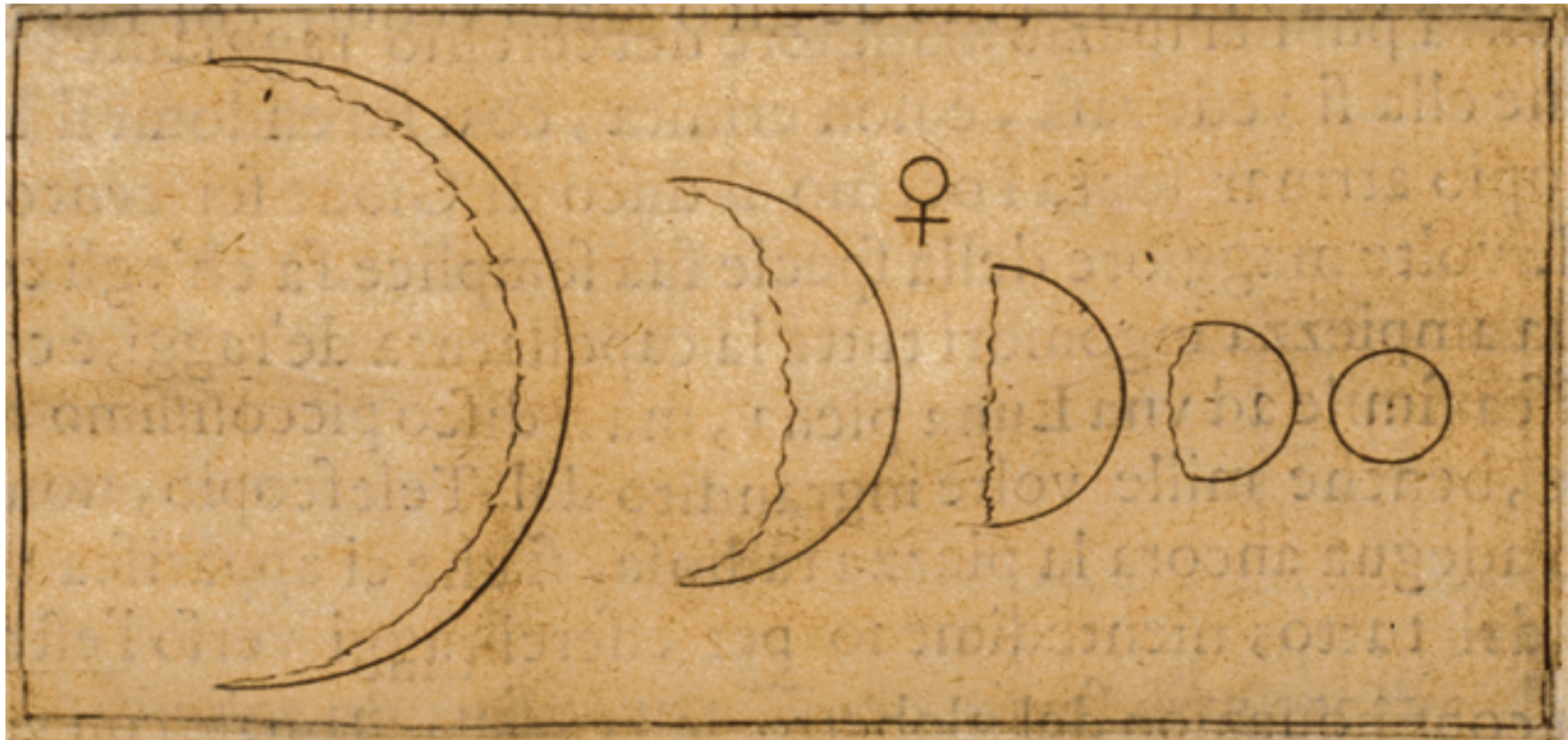
=> 「神が造った」は×



ガリレイ：「木星には衛星が4つ」発見



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

【話題】 ガリレオ裁判の顛末

Galileo Galilei
(1564-1642)



地動説を唱えたことで、有罪判決.

「それでも地球は動いている」

↓ 「当時は地動説はすべて異端」？

最近の学説では、

「ガリレオが神父たちよりもキリスト教の本質をよく理解し、科学的な言葉でそれを説いていたために快く思われず、でっちあげの偽裁判で有罪判決を受けたのではないか」

1992年、ローマ教皇ヨハネ・パウロ2世は、ガリレオ裁判が誤りであったことを認め、ガリレオに謝罪。（ガリレオの死去から350年後）.

コラム 12 ガリレイ裁判の顛末

地動説を熱心に唱えるガリレイは、ローマ教皇庁（異端審問所）との間で、裁判に二度かけられている。第1回の裁判（1616年）では、地動説が異端かどうかが論点とされた。裁判では、神や天地創造と地動説を結びつける発言をしなければ問題はないとされ、ガリレイは無罪とされたが、裁判の直後から、コペルニクスの『天球の回転について』は一時閲覧禁止とされ、後に「この書は数学的な仮説にすぎず、教会教理の批判ではない。」という但し書きを付して閲覧許可になった。この直後、ガリレイは地動説支持の活動をしばらく控えている。

1632年、ガリレイは『天文対話』を出版する。天動説と地動説の両方をあくまで仮説として扱い、それぞれを信じる2人と中立な者との3人の対話形式を使った解説書である。注意深く書かれた書であり、決して地動説を全面的に賛同するような書き方はされていなかったが、地動説を紹介したとして裁判にかけられることになった。裁判の経緯や真意についてはさまざまな説があり定かではないが、ガリレイは有罪とされ、地球が動くという説を放棄する旨が書かれた異端誓絶文を読み上げさせられることになった（ガリレイの伝記では、この後「それでも地球は動く」とつぶやいたとされる。しかし、これはガリレイの説を信奉する弟子か伝記作家が創作した話のようだ）。そして、『天文対話』は禁書目録に載せられ、1822年まで撤回されなかった。

裁判の判決に対してガリレイの名誉が回復したのは、ごく最近である。1965年からガリレイ裁判の見直しが行われ、1992年、ローマ教皇ヨハネ・パウロ2世が、ガリレイ裁判が誤りだったことを認めた。

【4-1】（教養問題. スマホで調べないこと）

コペルニクスの「てんかい」 漢字で書くと？ 意味は？

【4-2】（今日の講義から）

ケプラーの惑星運動の法則の発見に至った「歴史的偶然」とは？

【4-3】 2009年は国際天文年でした. その理由は400年前の出来事です. なんでしょう？

【4-4】通信欄.（講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば）