最先端物理学が描く宇宙
Frontiers of Physics & Cosmology

第3回　2026/10/5

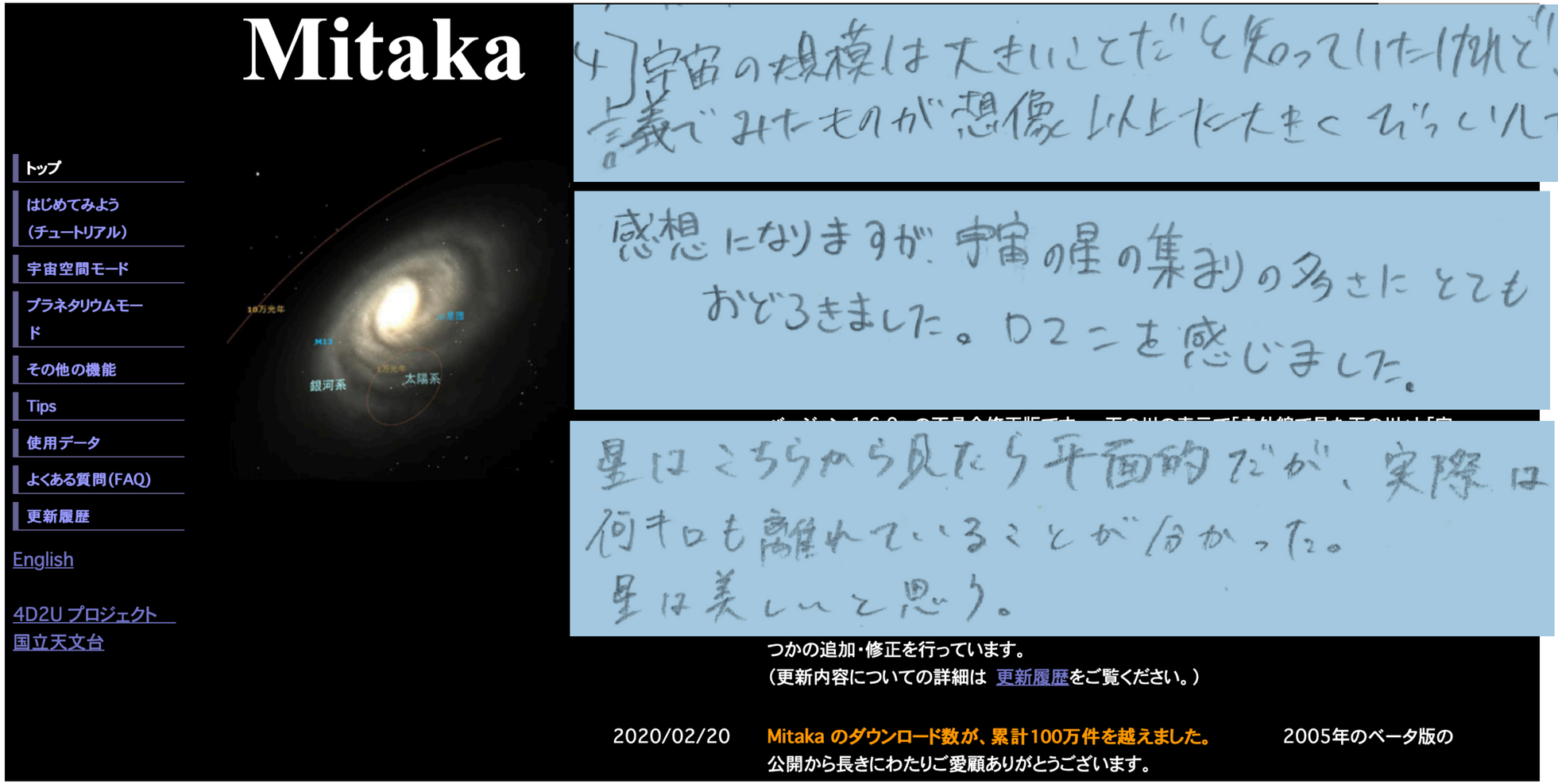
第1章　宇宙の階層構造（3）



真貝　寿明
Hisaaki Shinkai

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

真貝の武庫川講義ページtop



国立天文台が東京都三鷹市にあることにちなむ

http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/

前回のミニッツペーパーから

ほかの銀河にも地球のように生命が生まれている惑星はあるのかが気になりました。
姫路に住んでいるので科学館にまた行きたいと思いました

気になりますね. 調べてみましょう.

宇宙ができる前の無ってどんなかんじですか？

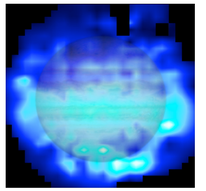
12月頃に, 宇宙論を学ぶと, 少しお分かりになることでしょう.

木星に氷のかたまりが落ちて現在氷があることを初めて知りました。

【太陽系惑星】 **木星の水はシューメーカー・レヴィ彗星がもたらした** 2013/4/25

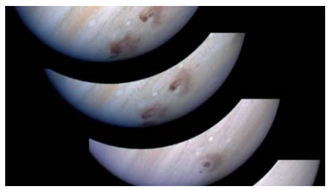
Herschel links Jupiter's water to comet impact

シューメーカー・レヴィ彗星（D/1993 F2）は1993年3月に発見され，20個以上に分裂した彗星核が1994年7月17日から数日間にわたって木星の南半球に次々と衝突した．その規模は予想以上に大きく，衝突の瞬間の発光が地上からもとらえられた．
この翌1995年，ESAが打ち上げた赤外線宇宙望遠鏡（ISO）の観測により，初めて木星の大気に水が発見された．シューメーカー・レヴィ彗星で運ばれたものと考えられるという見方が広まったものの，直接の証拠はない．水が見つかった成層圏の底に，低温で水蒸気を通さない天然の「コールドトラップ」があることから，天体内部ではなく外部からやってきたことだけはわかっていた．
今回，ESAの赤外線天文衛星「ハーシェル」が木星の水の分布を調べたところ，彗星が衝突した南半球には北半球の2，3倍もの水があり，しかもほとんどが彗星の衝突位置に集中していることがわかった．木星の成層圏に存在する水の95%がシューメーカー・レヴィ彗星の衝突で運ばれたものと見積もられるという．



木星大気中の水分布
（提供：Water map: ESA/Herschel/T. Cavalie' et al.; Jupiter image: NASA/ESA/Reta Beebe (New Mexico State University)）

彗星衝突の影響は予想以上に大きく，衝突痕は数週間も残った．（提供：R. Evans, J. Trauger, H. Hammel and the HST Comet Science Team）



http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_links_Jupiter_s_water_to_comet_impact
http://www.astroarts.co.jp/news/2013/04/25jupiter/index-j.shtml
Cavalié+, A&A 553, A21 (2013)

64

前回のミニッツペーパーから

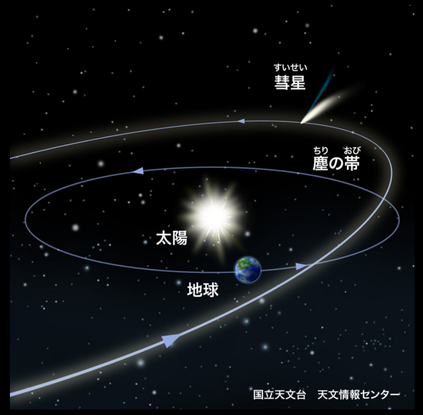
流星群見に行きたいなと思いました。

流星群は関西の山からもみえますか!?

流れ星の見える日付まで分かっているというのが驚きでした!
どこら辺で見れるとかは分かるのですか、??

たくさんの流れ星が見える時期が決まっている！

流星群という



地球が通ると，流れ星になる

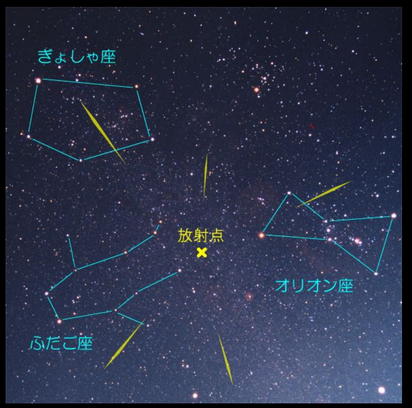
68

10月21日-22日　極大

オリオン座流星群

★2025年は条件　最良
★1時間に20個
（昨年予報は，10個/時間）

もとは，ハレー彗星



https://www.astron.pref.gunma.jp/events/091020orion.html

70

④ 宇宙や月の満ち欠けは1年先まで動きが分かっているなら，私たち人間の手もとうの昔に決まっていて偶然だし思うことは必然なんじゃないかという概念を学んで感じました。

12月頃に，量子論を学ぶと，
考えが変わることでしょう．

10月第2週は，ノーベル賞ウィーク



5日（月）Physiology or Medicine
6日（火）Physics
7日（水）Chemistry
8日（木）Literature
9日（金）Peace
12日（月）Economic science

https://www.nobelprize.org

ノーベル賞

Nobel Prize



- 安全に運搬・保管できる爆薬のダイナマイトの発明などで巨万の富を築いたスウェーデンの実業家、アルフレッド・ノーベルの遺産を基に、1901年に創設された賞
- 創設当初は物理学、化学、生理学・医学、文学、平和の5賞、69年に経済学が加わり6賞となった.

- ノーベル賞を運営するのはスウェーデンのストックホルムに本部がある「ノーベル財団」
- ノーベル財団は基金を株式や国債、不動産などで運用し、賞金や運営費用を確保することが主な役割で、賞の選考には関わらない. 経済学賞の賞金だけはスウェーデン国立銀行が用意する.

賞	選考組織
物理学賞	スウェーデン王立科学アカデミー
化学賞	スウェーデン王立科学アカデミー
生理学・医学賞	カロリンスカ研究所
文学賞	スウェーデンアカデミー
平和賞	ノルウェー・ノーベル委員会
経済学賞	スウェーデン王立科学アカデミー

- 授賞式はノーベルの命日である12月10日に、平和賞以外の5賞はスウェーデンのストックホルムで、平和賞はノルウェーのオスロで開かれる. 賞金額は2001～11年まで1000万スウェーデン・クローナ（現行レートで約1億4000万円）だったが、運用益の減少などを理由に12年からは800万クローナ（同約1億1000万円）に減額された。

ノーベル賞の選考過程

Nobel Laureates: Japanese Laureates



https://www.nikkei4946.com/

賞	選考組織
物理学賞	スウェーデン王立科学アカデミー
化学賞	スウェーデン王立科学アカデミー
生理学・医学賞	カロリンスカ研究所
文学賞	スウェーデンアカデミー
平和賞	ノルウェー・ノーベル委員会
経済学賞	スウェーデン王立科学アカデミー

- 受賞者の選考過程は受賞の50年後まで明かされない.
- 専門家が「推薦された研究者が本当に最初に手掛けたものか」「同様の成果を挙げた研究者が他にいないか」などを調査し、候補者を絞り込む. 特に自然科学3賞は「最初」にこだわる.

最近のノーベル物理学賞　受賞者

Nobel Laureates in Physics

年度	受賞者	分野	顕彰タイトル
2025	John Clarke, Michel H. Devoret John M. Martinis	量子実験	電気回路における巨視的量子力学的トンネル効果およびエネルギーの量子化の発見に対して
2024	John J. Hopfield Geoffrey E. Hinton	情報工学	人工ニューラルネットワークによって機械学習を可能にする基礎の発見と改良
2023	Pierre Agostini, Ferenc Krausz Anne L’ Huillier	量子光学	物質中の電子の動きを研究するためのアト秒光パルスを発生させる実験方法の確立
2022	Alain Aspect, John F. Clauser Anton Zeilinger	量子実験	量子もつれの光子の実験, ベルの不等式の破れの実証と量子情報科学の創設
2021	眞鍋淑郎, Klaus Hasselmann Giorgio Parisi	複雑系	「地球気候の物理モデル化, 地球温暖化の確たる予言と量的変動への貢献(真鍋, Hasselmann)」 「原子から惑星スケールに及ぶ無秩序と擾乱の相互作用の発見 (Parisi)」
2020	Roger Penrose, Reinhard Genzel Andrea Ghez	宇宙物理	「ブラックホール形成が一般相対性理論の枠組みでごく自然な帰結となることの発見(Penrose)」 「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(Genzel, Ghez)」
2019	James Peebles, Michel Mayor Didier Queloz	宇宙物理	「物理的宇宙モデルにおける理論的な発見(Peebles)」 「太陽系外惑星の発見 (Mayor, Queloz)」
2018	Arthur Ashkin, Gerard Mourou Donna Strickland	物性物理	レーザー物理学の分野における革命的な発明
2017	Rainer Weiss, Barry C. Barish Kip S. Thorne	宇宙物理	LIGO検出器と重力波観測への決定的な貢献
2016	David Thouless, Duncan Haldane Michael Kosterlitz	物性物理	物質のトポロジカル相転移とトポロジカル相の理論的な発見
2015	梶田隆章 Arthur B. McDonald	素粒子物理	ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見
2014	赤崎勇, 天野浩, 中村修二	物性物理	高輝度でエネルギー効率のよい白色光を実現する青色発光ダイオードの開発

日本人のノーベル賞　受賞者

Nobel Laureates: Japanese Laureates

	物理学賞	化学賞	生理学・医学賞
2025		北川進	坂口志文
2021	眞鍋淑郎*(米国籍)		
2019		吉野彰	
2018			本庶佑
2016			大隅良典
2015	梶田隆章		大村智
2014	赤崎勇, 天野浩, 中村修二*(米国籍)		
2012			山中伸弥
2010		鈴木章, 根岸英一	
2008	南部陽一郎*(米国籍), 小林誠, 益川敏英	下村脩	
2002	小柴昌俊	田中耕一	
2001		野依良治	
2000		白川英樹	
1987			利根川進
1981		福井謙一	
1973	江崎玲於奈		
1965	朝永振一郎		
1949	湯川秀樹		
	12人（このうち米国籍3人）	9人	6人

1994	大江健三郎	文学賞
1974	佐藤栄作	平和賞
1968	川端康成	文学賞

日本人のノーベル物理学賞　受賞者　(1)

Nobel Laureates in Physics: Japanese Laureates



湯川秀樹（1949）

陽子と中性子との間に作用する核力を媒介するものとして，中間子の存在を予言

for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces



朝永振一郎（1965）

「超多時間理論」と「くりこみ理論」，量子電磁力学分野の基礎的研究

jointly to Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger and Richard P. Feynman *"for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles"*.



江崎玲於奈（1973）

半導体・超電導体トンネル効果の研究，エサキダイオードの開発

jointly to Leo Esaki and Ivar Giaever "for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively" and the other half to Brian David Josephson "for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects".



小柴昌俊（2002）

ニュートリノ天文学の先駆的な貢献に対して

jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiba "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos" and the other half to Riccardo Giacconi "for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources".

Nobelprize.org
The Official Web Site of the Nobel Prize

日本人のノーベル物理学賞　受賞者　(2)

Nobel Laureates in Physics: Japanese Laureates



南部陽一郎（米国籍）　（2008）

素粒子物理学と核物理学における自発的対称性の破れの発見





小林誠　　**益川敏英**　（2008）

クォークの世代数を予言する対称性の破れの起源の発見

one half awarded to Yoichiro Nambu "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics", the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature".







赤崎勇　　**天野浩**　　**中村修二**　（2014）

高輝度でエネルギー効率のよい白色光を実現する青色発光ダイオードの開発

for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources.



梶田隆章（2015）

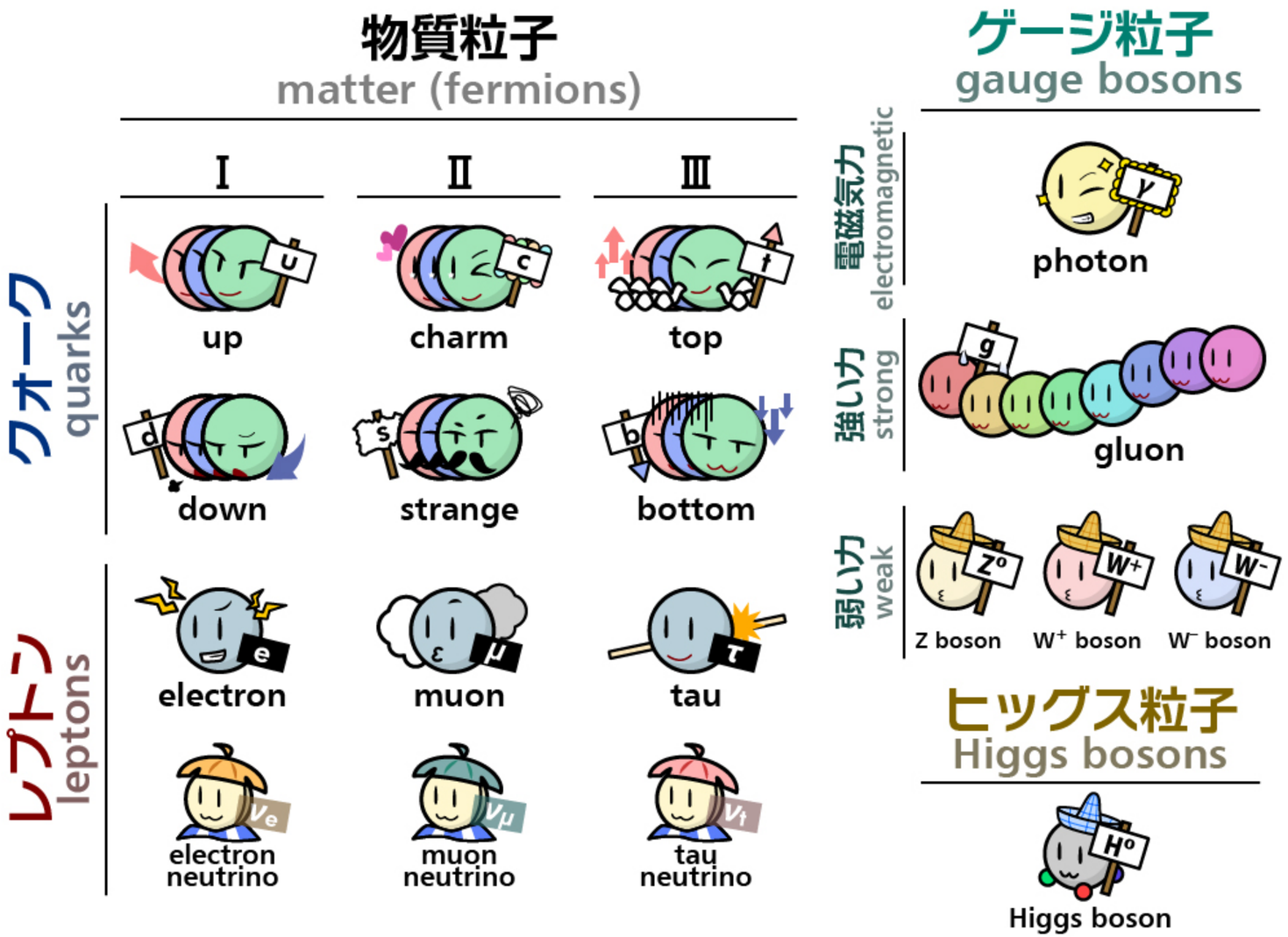
ニュートリノに質量があることを示したニュートリノ振動の発見

for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass

Nobelprize.org

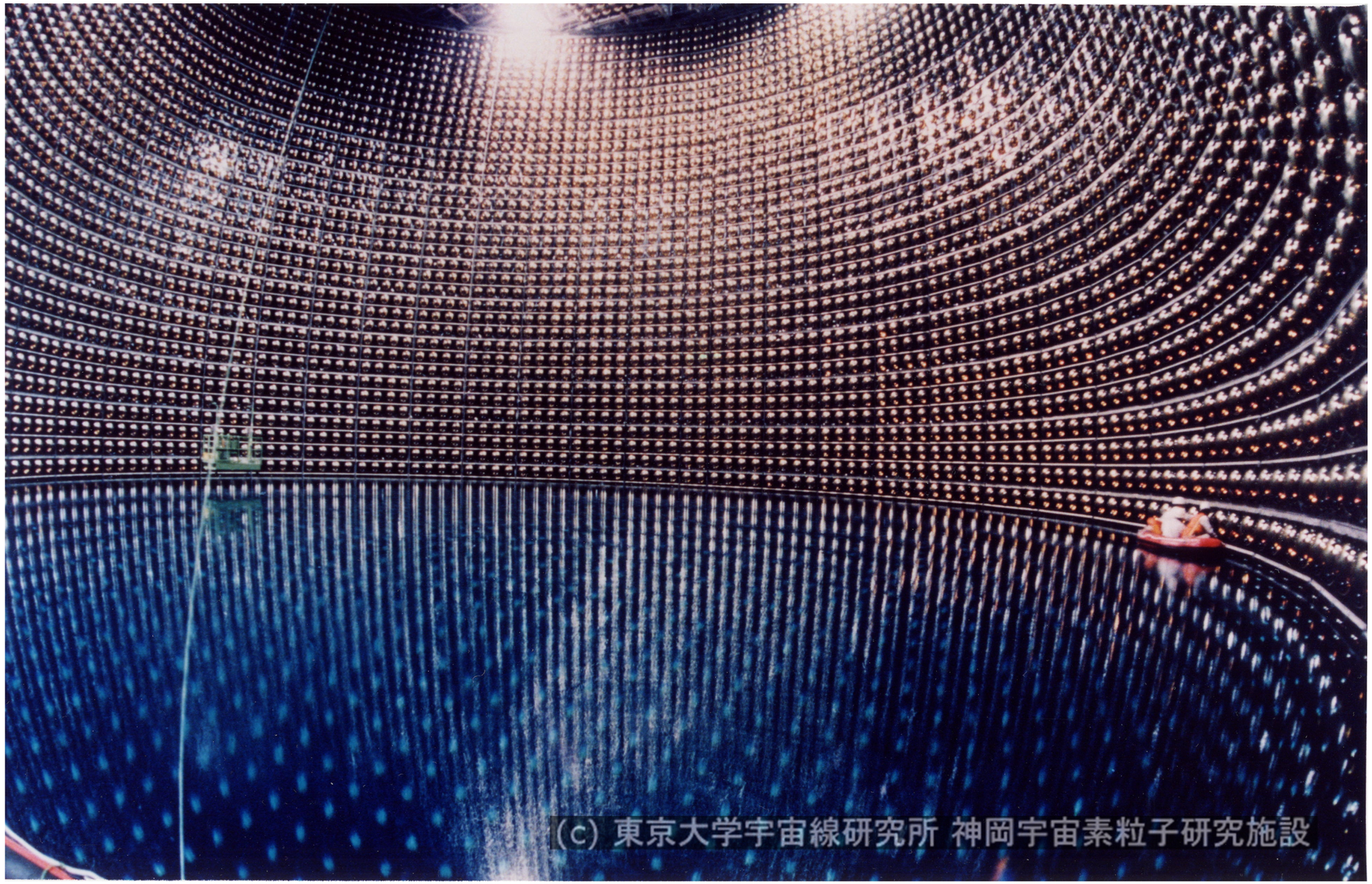
The Official Web Site of the Nobel Prize

素粒子（基本粒子）



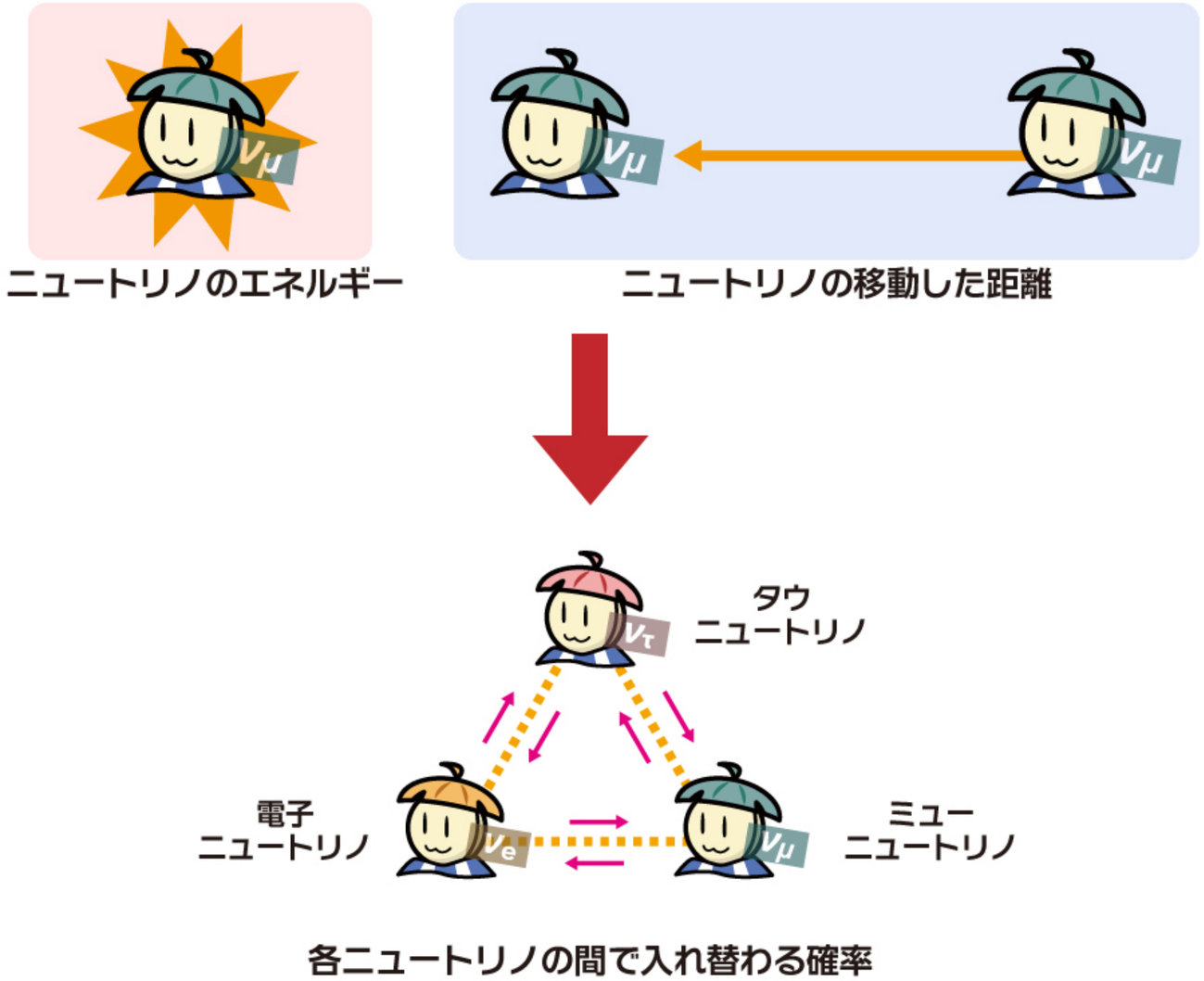
http://higgstan.com/2012/08/16/86

スーパーカミオカンデ（Super-Kamiokande、Super-K）



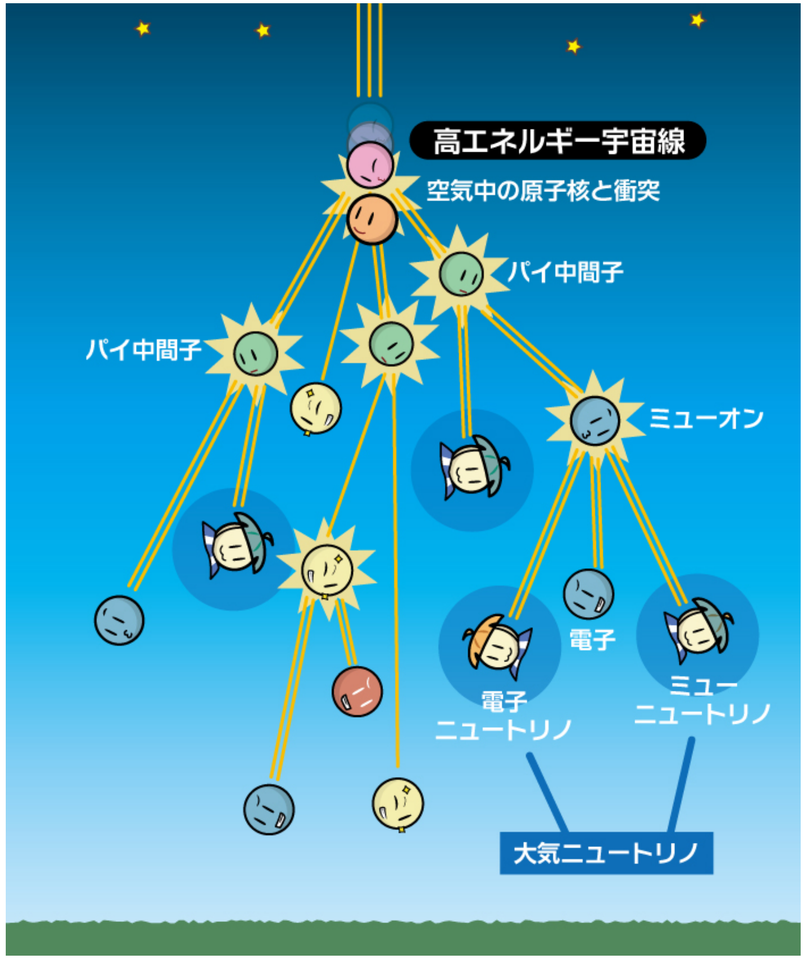
岐阜県神岡鉱山跡

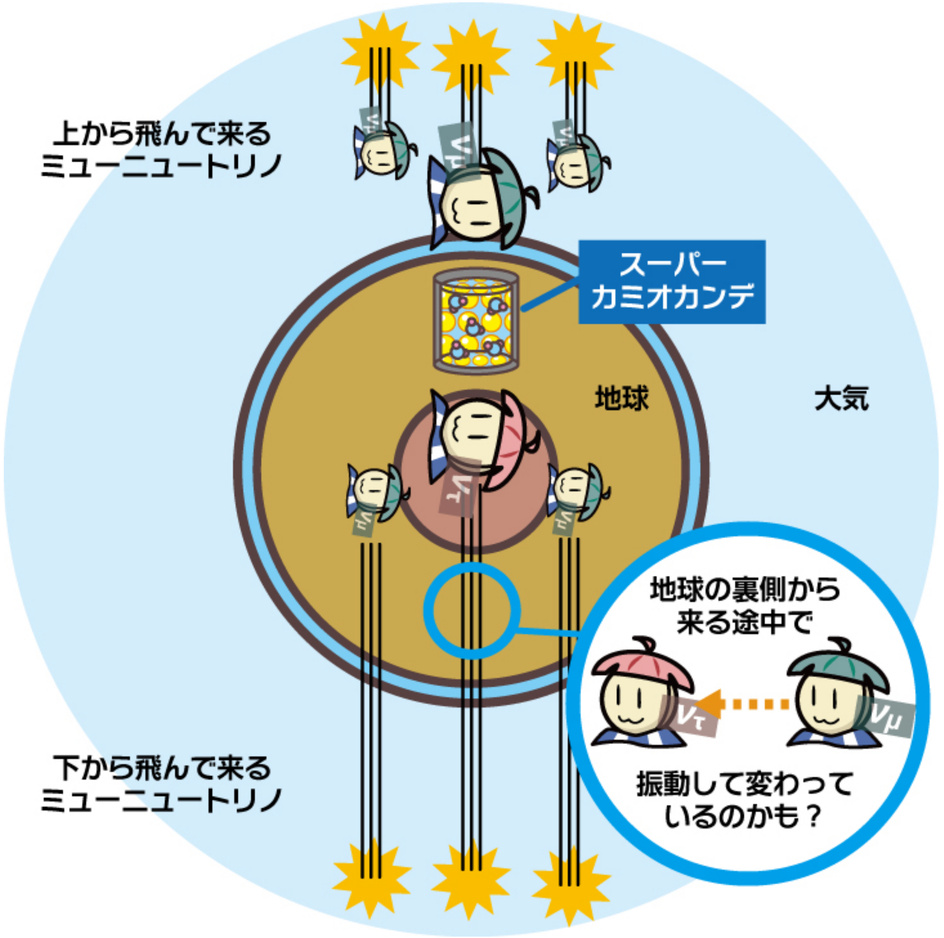
ニュートリノ振動



http://higgstan.com/2015/10/06/617

ニュートリノ振動





http://higgstan.com/2015/10/06/617

ノーベル物理学賞受賞者 2020年

Nobel Laureates in Physics 2020

http://www.nobelprize.org/

“ブラックホール”



ロジャー・ペンローズ（89）英オックスフォード大
「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

ラインハルト・ゲンツェル（68）独マックスプランク研究所
アンドレア・ゲズ（55）　米カリフォルニア大ロサンゼルス校
「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」

Roger Penrose “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"
Reinhard Genzel and **Andrea Ghez** "for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy".



ノーベル物理学賞受賞者 2020年

Nobel Laureates in Physics　2020

科学・環境

無料

「ブラックホール」でまとめたノーベル物理学賞

理論家ペンローズの並外れた業績と、「謎」を「実在」に転換させた長年の天文観測

真貝寿明　大阪工業大学教授（相対性理論、宇宙物理学、天文学史）

ノーベル賞 | ブラックホール | 基礎科学 | 宇宙　2020年10月13日

ツイート | list | おすすめ 28 | シェア | B! 0 | noteで書く | コメント 0件 | 印刷



イラストはNASA提供

2020年のノーベル物理学賞は、ブラックホールの研究業績をテーマとして、英オックスフォード大のロジャー・ペンローズ（89）、独マックスプランク研究所のラインハルト・ゲンツェル（68）、米カリフォルニア大ロサンゼルス校のアンドレア・ゲズ（55）の3氏に贈られると発表された。贈賞理由は、ペンローズは「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」、ゲンツェルとゲズは「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」となっている。

物理学賞は、ここのところ、宇宙・素粒子分野と物性物理分野が毎年交互に選ばれてきた。昨年は宇宙分野だったため、私は（他の多くの方と同じように）今年は宇宙以外の分野を想定していた。個人的には光格子時計に期待していて、学生にもその説明を発表の前週にしていたところだ。発表中継をインターネットで見ていて、まず、分野が宇宙だと知って驚き、さらに純粋な理論研究者であるペンローズが受賞したとわかり、想定外の嬉しさを隠せない。ここでは、ペンローズの業績を中心に紹介しながら、ブラックホール研究の歴史を振り返ってみたい。

ブラックホールにアインシュタインは拒絶反応を示していた

質量の大きな星が燃え尽きると、最終的には中性子の塊（中性子星）か、ブラックホールになると考えられている。ブラックホールとは、重力が強すぎて、光でさえも抜け出せない領域のことである。昨年4月には、イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）のチームが、M87銀河の中心にある「黒い穴」の撮影に成功したことを発表し、話題となった。



日米欧の研究チームが2019年4月に発表した、M87銀河のブラックホールの画像。黒い穴の部分がブラックホール＝©EHT collaboration

強い重力場のふるまいを描くのは、アインシュタインの一般相対性理論である。この理論は、重力の正体を「空間のゆがみ」で説明し、時間も空間も絶対的なものではなく、伸びたり縮んだりすることを結論する。理論的な整合性を突き詰めて得られた「アインシュタイン方程式」から導かれることになるのは、ブラックホール・膨張宇宙・重力波の存在といった現象である。しかし、アインシュタイン自身がこの3つのいずれにも当初拒絶反応を示したことは面白い。

一般相対性理論が発表された直後にシュヴァルツシルトがアインシュタイン方程式を解き、解を見つけたが、その中には無限大となってしまう奇妙な空間の点（時空特異点と座標特異点）が含まれていた。アインシュタインはその理解に苦しみ、この解は簡略化された仮定のもとに得られたものであったため、「実際にはあり得ない話」と解釈したようである。ブラックホールという言葉が生まれたのは、アインシュタインの没後である。

相対論研究でもっとも貢献したペンローズ



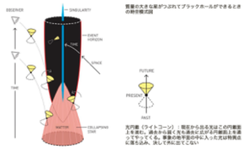
オックスフォード大学のR・ペンローズ教授＝1995年10月6日、オックスフォード大の研究室、尾関章撮影

アインシュタイン以降、相対性理論の研究でもっとも貢献した3名を挙げよ、という問いかけがあったとしよう。相対性理論の研究者なら、答えは「ペンローズ、ペンローズ、ペンローズ」となる。これは研究者間でウケる冗談だが、ある意味本当だ。

一般相対性理論は、時空を対象とする物理であって、身の回りの現象とはかけ離れた理論であり、1950年代の終わりまでは研究者からも避けられていた。60年代になって、正体不明のクエーサーという天体の存在が報告され、一方で回転している時空でのブラックホール解が発見され、研究が一気に花開くことになる。この「ルネッサンス期」を牽引したのがペンローズである。

ブラックホールの解には、時空特異点が存在している。特異点（無限大の発散点）が物理的な現象を扱う微分方程式の解に生じるのは不思議である。現実世界には無限大は存在しないからだ。当時多くの研究者は、原因は解を導く時に課した時空の対称性にあると考えていた。ところが、ペンローズは「重力崩壊の状況では時空特異点の発生が避けられない」ことを時空の対称性を課さずに数学的に証明する。1965年に発表した「特異点定理」である。

ペンローズは、重力崩壊する星から外側に広がっていこうとする光の経路を考えた。重力がある程度強くなると、光は無限遠まで到達できずに、ある距離までしか進めなくなるだろう。そしてその内側にある光は再び星に落下せざるをえず、特異点を形成する。ペンローズの用いた「光の捕捉面」というアイデアは、その最大到達する境界が「事象の地平面（イベント・ホライズン）」と呼ばれるようになり、ブラックホール領域を表す境界面として理解されるようになった。このようにして、ペンローズは、ブラックホールはごく自然な帰結として導かれることを示したのである。そして、数年後にはホーキングと共に、膨張宇宙を考えるならば、宇宙初期にも特異点が存在することを定理にした。

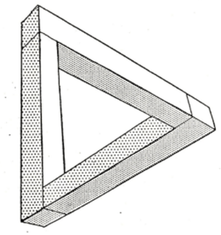


ノーベル財団の発表資料から

ペンローズの受賞理由となったのは特異点定理の業績であるが、この他にもペンローズの名前がつく業績は多々ある。すぐ思いつくだけで、無限遠の領域を含めて時空を扱うために座標変換して得られる「ペンローズ・ダイアグラム」、4次元時空を空間＋時間と分解せずに光の進行方向を基準にして扱う「ニューマン・ペンローズ形式」、回転するブラックホールからエネルギーを取り出す「ペンローズ過程」、彼の名前はついていないものの重要な業績として、ループ量子重力理論に引き継がれた「スピンネットワーク」、そして相対性理論と量子論を統合する可能性をもつ「ツイスター理論」などがある。

エッシャーの作品に取り入れられた不可能立体

時空特異点がブラックホールの内側に隠れていないと因果関係が保証されず大問題だ。そこで、ペンローズはこれを「『裸の特異点』は禁止される」と表現し、「宇宙検閲仮説」と名付けた。裸の出現を検閲する管理官がどこかにいる、というユーモアも含んだ命名である。この仮説が成立するかどうかは、現在の研究テーマの1つとなっている。



不可能立体の一つ「ペンローズの三角形」

実現不可能な立体や、繰り返し図形で知られる画家エッシャーとの関係をご存知の方も多いだろう。ペンローズの考案した不可能立体の三角形や無限に続く階段はエッシャーの作品に取り入れられ、逆にエッシャーの図柄からペンローズは、非周期的に平面を充填するペンローズ・タイルを考案した。

私は20年ほど前に、米国ペンシルベニア州立大学でポスドクとして武者修行をしたが、ペンローズは毎年何カ月か、客員教授として招致され、隣の研究室に滞在していた。小さな子供を肩車して学内を笑顔で歩き回っていた。彼のプレゼンテーションは、決してパソコンを使わず、OHP（オーバーヘッドプロジェクター、手書きの透明シートを投影する装置で20年前までは学会発表の主流だった）を用意するスタイルだった。カラーのペンで、たくさんの絵が描かれているOHPを使った彼の講演は、数年前の国際会議でも同じだったので、おそらく今年のノーベル賞講演でもそうだろう。インターネット中継となるようなので、楽しみだ。

次は→見えないブラックホールがどうして観測でわかるのか

先頭 | 前へ | 1 | 2 | 次へ | 末尾

コメント 利用規約

コメントを入力する(最大500文字)

コメント投稿時には、利用規約を確認・同意したものとみなさせていただきます。

0/500　名前(任意30文字以内)　規約に同意して投稿する

Powered by ユーザーローカルAIコメント

全ジャンルパックなら15897本の記事が読み放題。

全ジャンルパックを購読する

論座ではこんな記事も人気です。もう読みましたか？

- 「オフレコ懇談会」を問い直す～菅首相と官邸記者の「パンケーキ朝食会」を機に
- 「下部構造」がないからアイデアも出ない～2大政党が育たない理由
- 「元・学者」が日本学術会議騒動に抱いた大いなる違和感

関連記事

科学・環境 見えないはずのブラックホールがなぜ見えた？
平林久　2019年04月16日

科学・環境 続々見つかる重力波、高まるKAGRAへの期待
高橋真理子　2019年05月31日

科学・環境 スティーブン・ホーキング――上書きモードの達人
尾関章　2018年03月26日

科学・環境 重力波天文学が始まった
須藤靖　2017年10月18日

科学・環境 重力波の直接観測で宇宙の新しい窓が開いた
大栗博司　2016年02月12日

筆者



真貝寿明（しんかい・ひさあき）　大阪工業大学教授（相対性理論、宇宙物理学、天文学史）

大阪工業大学情報科学部教授、理化学研究所客員研究員。1966年東京生まれ。早稲田大学大学院博士課程修了。主な研究分野は一般相対性理論と天文学史。著書に『ブラックホール・膨張宇宙・重力波』（光文社新書）、『現代物理学が描く宇宙論』『徹底攻略確率統計』（共立出版）、『日常の「なぜ」に答える物理学』（森北出版）など。

購読のご案内 | ログイン | 朝日新聞 DIGITAL

論座 RONZA

15897 本の記事が読み放題　文字サイズ 小 中 大　マイコンテンツ

論座とは？ | よくある質問 | お問い合わせ　検索

政治・国際 | 経済・雇用 | 社会・スポーツ | 科学・環境 | 文化・エンタメ | Journalism | 特集

科学政策 | 科学者論 | テクノロジー | 基礎科学 | 宇宙 | 生命・医療 | 原発 | 地球環境 | 生態系 | 自然史・進化 | 地震・災害 | 脳・認知科学 | 情報

いいね！ 7,653　フォローする

科学・環境

無料

「ブラックホール」でまとめたノーベル物理学賞

理論家ペンローズの並外れた業績と、「謎」を「実在」に転換させた長年の天文観測

真貝寿明　大阪工業大学教授（相対性理論、宇宙物理学、天文学史）

ノーベル賞 | ブラックホール | 基礎科学 | 宇宙　2020年10月13日

ツイート list　おすすめ 31　シェア　B! 0　noteで書く　コメント 0件　印刷

天の川銀河中心の継続観測でわかったこと

同じく受賞となったゲンツェルとゲズは、私たちのいる銀河（天の川銀河）の中心に、超大質量なブラックホールがあることを突き止めた天文観測の人である。



ラインハルト・ゲンツェル氏＝ノーベル財団の公式ツイッターから

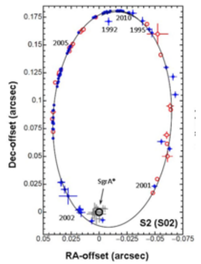


アンドレア・ゲズ氏＝ノーベル財団の公式ツイッターから

銀河の中心は我々から見て、いて座の方向にある。ゲンツェル率いるドイツのグループはチリにある南天天文台(ESO)を用いて、そしてゲズ率いるアメリカのグループはハワイにあるケック望遠鏡を用いて、すでに30年近く、天の川銀河の中心を継続的に観測している。どちらも、補償光学という技術を導入した。これは、地上からレーザー光を望遠鏡の視野に放ち、人工的な星をつくって大気の揺らぎを計測し、それを差し引くことで遠い天体のデータを修正する技術である。

このようにして得られた星の軌道は実に説得力があるものだった。例えばゲンツェルらがS2と名付けた（ゲズらはS02と名付けた）星は、16年の周期で楕円運動をしている（図参照）。この事実は、楕円の焦点に巨大な重力源が存在していることを示していて、この場所こそが、電波天文学者らによって命名されていた天の川銀河の中心（いて座Aスター、Sgr A*）だということがわかる。

天の川銀河の中心の位置は、その他の星の運動からも推測され、矛盾なく定まるようになった。何も見えないその場所に太陽質量の400万倍の質量があると考えられることから、超大質量ブラックホールが存在している、と結論された。



S2(S02)と名付けられた星は16年の周期で楕円運動をしている。焦点に相当する部分が天の川銀河の中心で、その質量が太陽質量の400万倍であることが見積もられた＝ノーベル財団による贈賞理由説明資料から。ゲンツェルらの2000年の論文を加工したもの

重力波で格段に進むであろうブラックホール研究

宇宙には星の数ほどの星があり、銀河の数ほどの銀河がある。そして、ほとんどすべての銀河の中心には超大質量ブラックホールがあると考えられている。昨年、ブラックホールの直接撮像に成功したEHTプロジェクトは、次に天の川銀河中心の撮像を計画しているそうである。ブラックホールがダイナミックに姿を表す動画が見られることを期待したい。

超大質量ブラックホールの成り立ちはまだ解明されていない。宇宙の初期にガスがつぶれて、はじめから巨大ブラックホールができたとする説がある。一方で、小さいブラックホールが合体を繰り返して成長していくとする説がある。最近は、どの銀河も中心ブラックホールとともに成長していく「共進化」と呼ばれる考えも出ており、今後さまざまな観測データと共に銀河形成のシナリオも更新されていくことになる。

ブラックホール研究に大きな力を発揮するのが重力波である。2015年9月には、欧米の重力波観測チームが、ブラックホールの合体による重力波を初めて直接観測した。先月には、太陽質量の150倍と見られるブラックホールの痕跡の発見を報告して注目を集めている。

重力波の観測は、これからも新しい情報を次々ともたらしていくだろう。筆者が関わっている日本の重力波観測装置KAGRA（かぐら）も、米欧との共同観測体制を整えて本年はじめに稼働したが、残念ながら新型コロナの影響で米欧の観測装置が先に止まり、共同観測が中断した。2022年に再開する次期共同観測での成果にご期待いただきたい。

よく指摘されることだが、ノーベル賞で顕彰されるのは、成果が定まった過去の仕事である。とくに理論的な仕事が評価されるまでには10年、20年と時間がかかる。今回のペンローズの業績は55年前の研究である。ノーベル賞を獲ることは科学研究の目的ではないし、国別のノーベル賞受賞者数で一喜一憂するのもおかしな話だと思う。しかし、試行錯誤を繰り返しながら、独創的なアイデアで進める科学研究を、どれだけ各国が応援していく体制になっているのかを示す指標にはなっているはずだ。

先頭 前へ 1 2 次へ 末尾

次の記事

コメント 利用規約

コメントを入力する(最大500文字)

コメント投稿時には、利用規約を確認・同意したものとみなさせていただきます。

0/500　名前(任意30文字以内)　規約に同意して投稿する

Powered by ユーザーローカルAIコメント

全ジャンルパックなら15897本の記事が読み放題。

全ジャンルパックを購読する

論座ではこんな記事も人気です。もう読みましたか？

- 「オフレコ懇談会」を問い直す～菅首相と官邸記者の「パンケーキ朝食会」を機に
- 「下部構造」がないからアイデアも出ない～2大政党が育たない理由
- 「元・学者」が日本学術会議騒動に抱いた大いなる違和感

関連記事


科学・環境 見えないはずのブラックホールがなぜ見えた？
平林久　2019年04月16日


科学・環境 続々見つかる重力波、高まるKAGRAへの期待
高橋真理子　2019年05月31日


科学・環境 スティーブン・ホーキング――上書きモードの達人
尾関章　2018年03月26日


科学・環境 重力波天文学が始まった
須藤靖　2017年10月18日


科学・環境 重力波の直接観測で宇宙の新しい窓が開いた
大栗博司　2016年02月12日

筆者



真貝寿明（しんかい・ひさあき）　大阪工業大学教授（相対性理論、宇宙物理学、天文学史）

大阪工業大学情報科学部教授、理化学研究所客員研究員。1966年東京生まれ。早稲田大学大学院博士課程修了。主な研究分野は一般相対性理論と天文学史。著書に『ブラックホール・膨張宇宙・重力波』（光文社新書）、『現代物理学が描く宇宙論』『徹底攻略確率統計』（共立出版）、『日常の「なぜ」に答える物理学』（森北出版）など。

真貝寿明の記事

Astronomy Picture of the Day

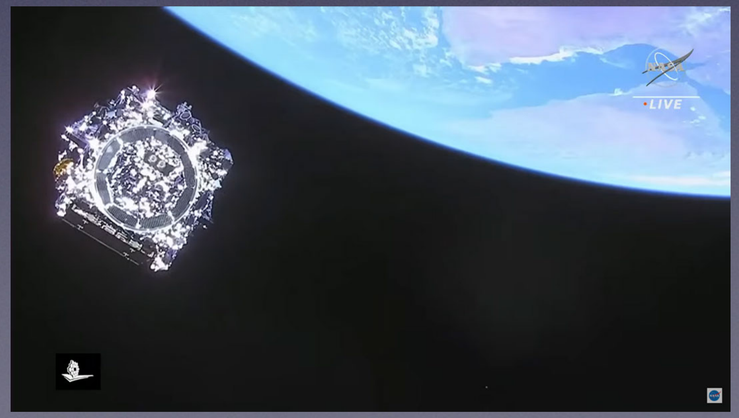
https://apod.nasa.gov/apod/astropix.html



Star Forming Region NGC 3582 without Stars
2022/Sep 20



September Sunrise Shadows
2022/Sep 24



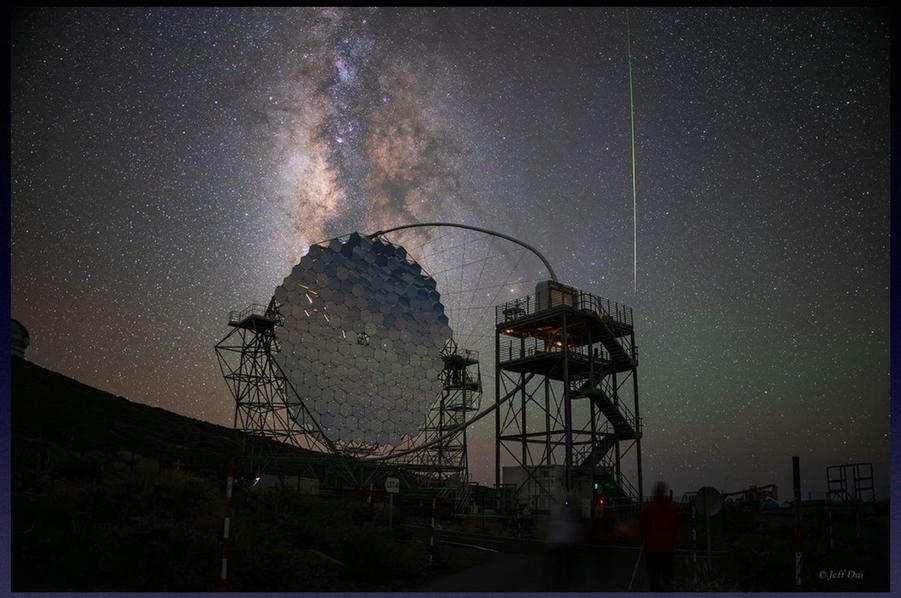
James Webb Space Telescope over Earth
2021/Dec 26

Astronomy Picture of the Day

https://science.nasa.gov/apod/archive/



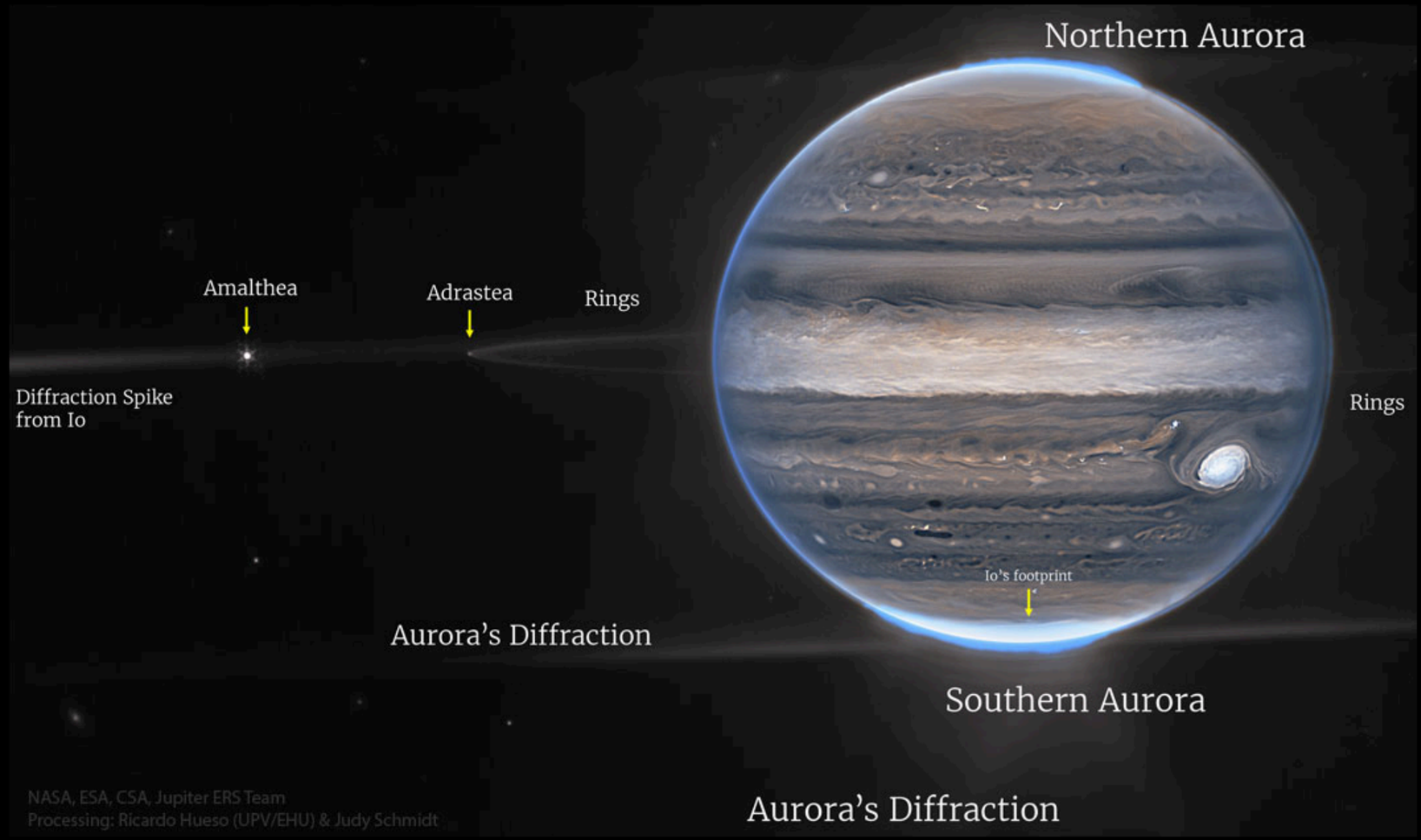
Andromeda Before Photoshop
2026/Sep 27



Mirrored Meteor and Milky Way
2026/Sep 26



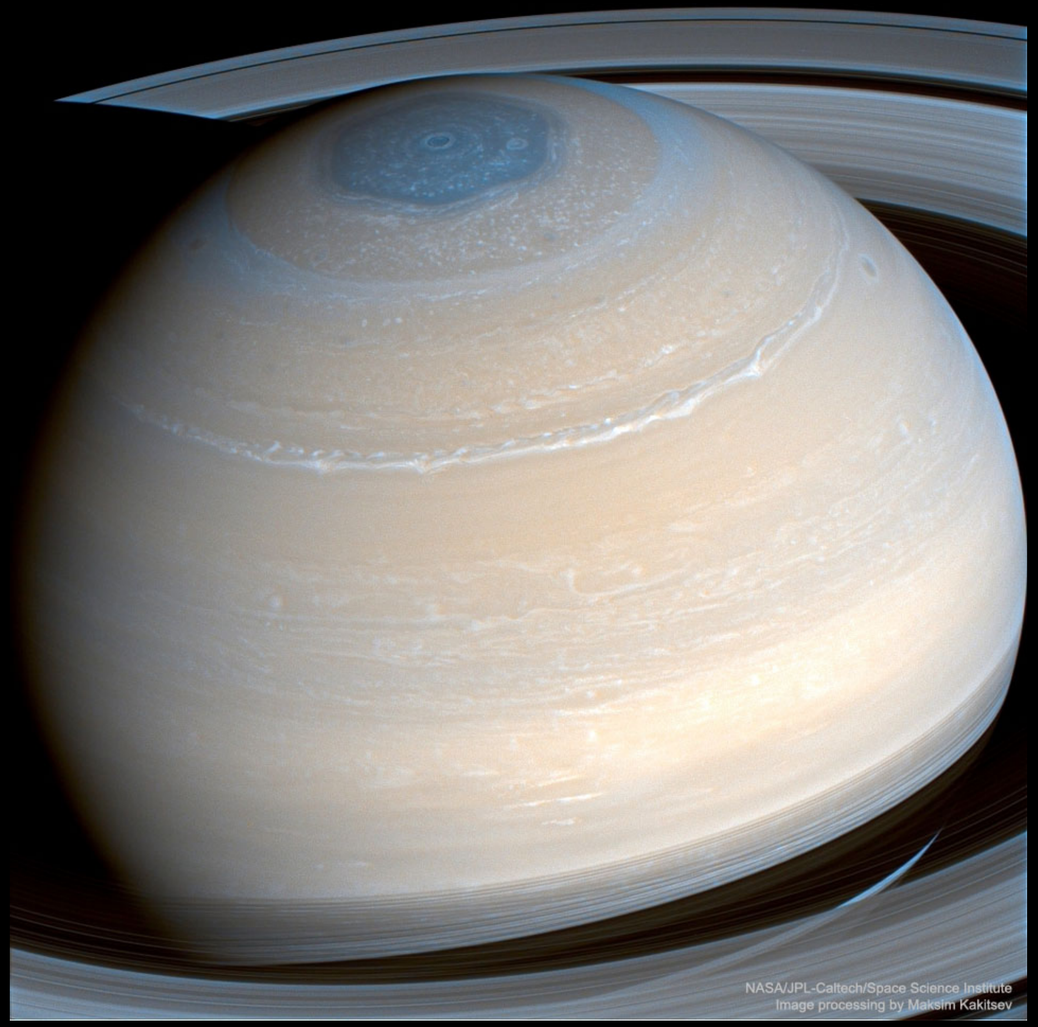
Arp 78: Peculiar Galaxy in Aries
2026/Sep 30



Jupiter from the Webb Space Telescope

This new view of Jupiter is illuminating. High-resolution infrared images of Jupiter from the new James Webb Space Telescope (Webb) reveal, for example, previously unknown differences between high-floating bright clouds -- including the Great Red Spot -- and low-lying dark clouds. Also clearly visible in the featured Webb image are Jupiter's dust ring, bright auroras at the poles, and Jupiter's moons Amalthea and Adrastea. Large volcanic moon Io's magnetic funneling of charged particles onto Jupiter is also visible in the southern aurora. Some objects are so bright that light noticeably diffracts around Webb's optics creating streaks. Webb, which orbits the Sun near the Earth, has a mirror over six meters across making it the largest astronomical telescope ever launched -- with over six times more light-collecting area than Hubble.

https://apod.nasa.gov/apod/ap220830.html



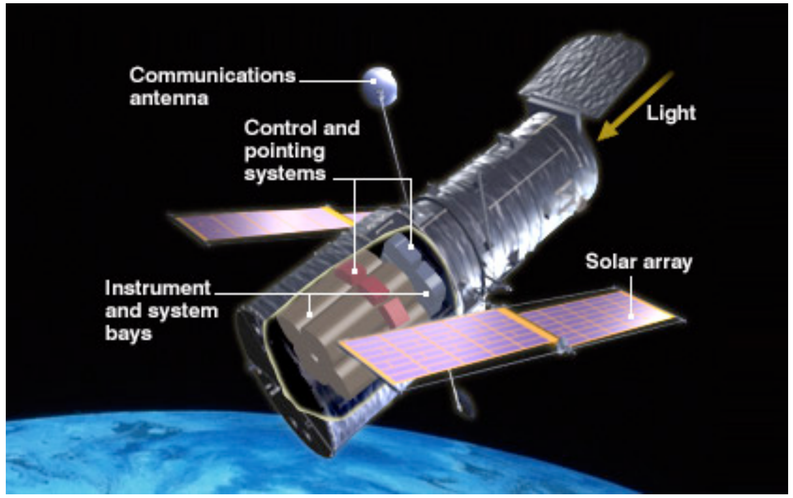
Saturn in Infrared from Cassini
Many details of Saturn appear clearly in infrared light. Bands of clouds show great structure, including long stretching storms. Also quite striking in infrared is the unusual hexagonal cloud pattern surrounding Saturn's North Pole. Each side of the dark hexagon spans roughly the width of our Earth. The hexagon's existence was not predicted, and its origin and likely stability remains a topic of research. Saturn's famous rings circle the planet and cast shadows below the equator. The featured image was taken by the robotic Cassini spacecraft in 2014 in several infrared colors. In 2017 September, the Cassini mission was brought to a dramatic conclusion when the spacecraft was directed to dive into ringed giant.

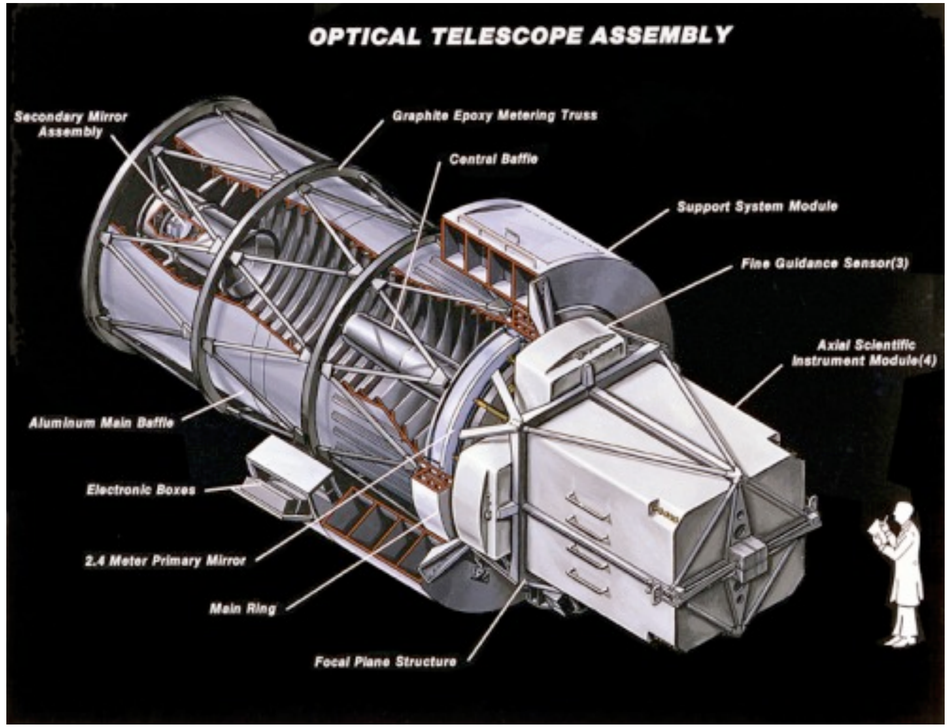
https://apod.nasa.gov/apod/ap220724.html

【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.

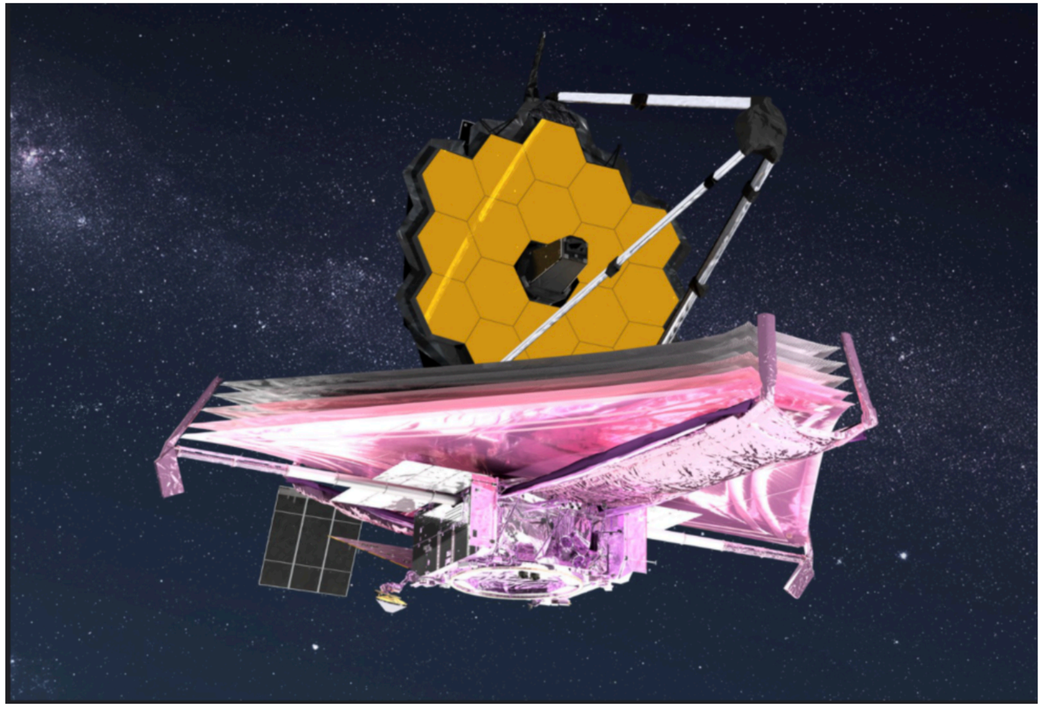
ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　　2021年12月25日打ち上げ成功

James Webbは1960年代のNASA長官．アポロ計画を推進した

Webb Telescope

Jan 9, 2022
RELEASE 22-004

NASA's Webb Telescope Reaches Major Milestone as Mirror Unfolds



https://www.jwst.nasa.gov

Quick Facts

PRIMARY MIRROR SIZE: 21.3 feet (6.5 meters) across

MIRROR SHAPE: The mirror is comprised of 18 gold-plated hexagonal deployable segments

SUNSHIELD: Webb's five-layer deployable sunshield is the size of a tennis court

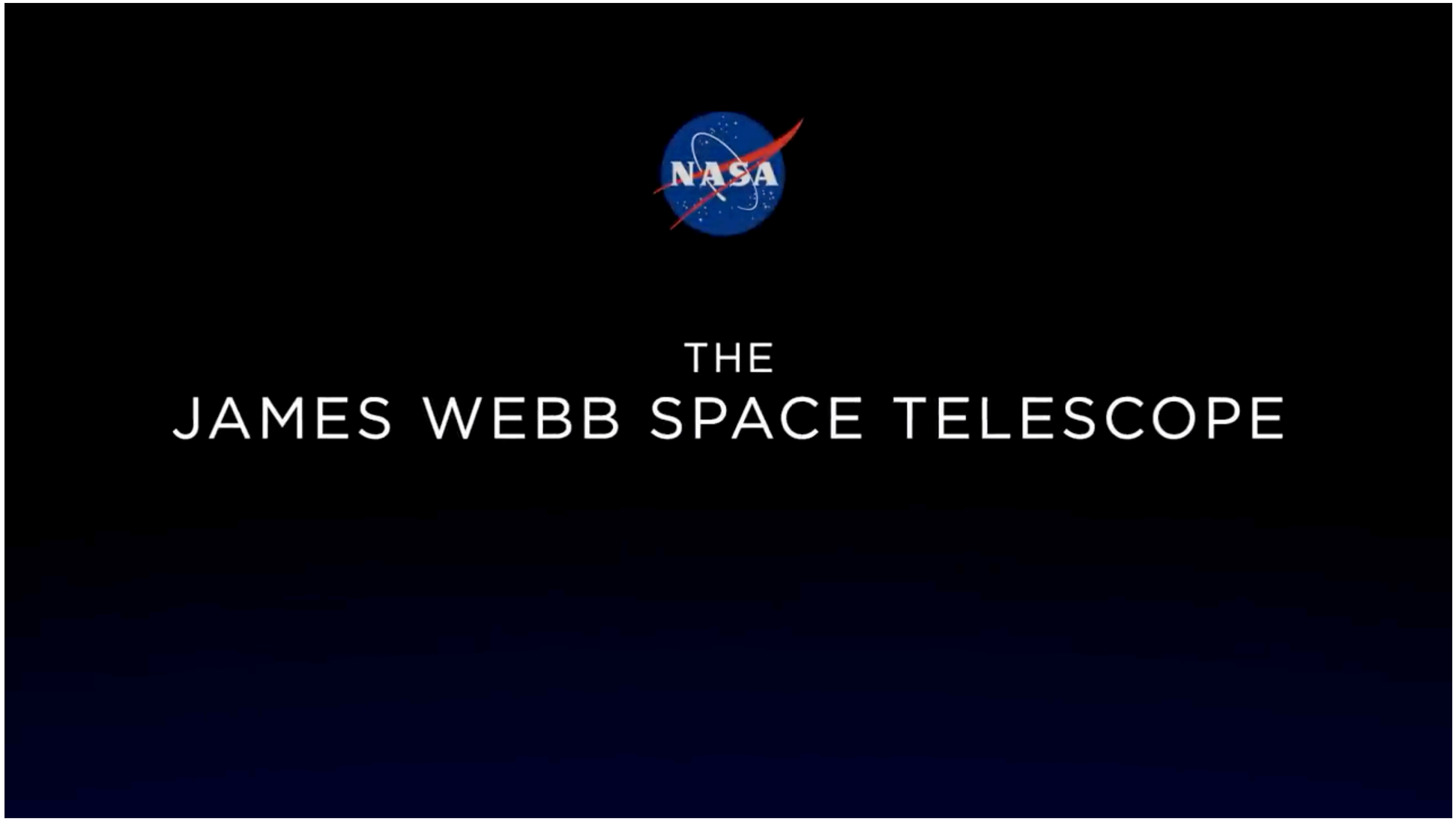
INSTRUMENTS: Webb has four science instruments: Near-Infrared Camera (NIRCam), Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec), Mid-Infrared Instrument (MIRI), and Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS) with the Fine Guidance Sensor (FGS)

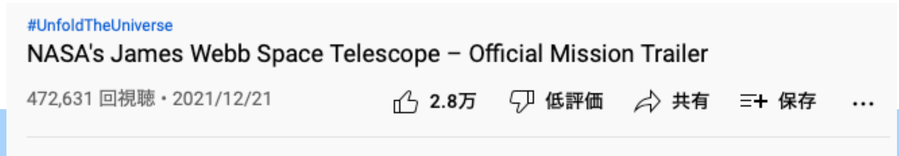
WAVELENGTHS: Visible, Near Infrared, Mid Infrared (0.6-28.5 micrometers)

TRAVEL DISTANCE: 1 million miles (1.5 million kilometers) from Earth

LOCATION IN SPACE: Orbiting the Sun around the second Lagrange point (L2)

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　　2021年12月25日打ち上げ成功





on click, 1’27”

https://www.youtube.com/watch?v=69uT90tEJdE

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

2022/7/12

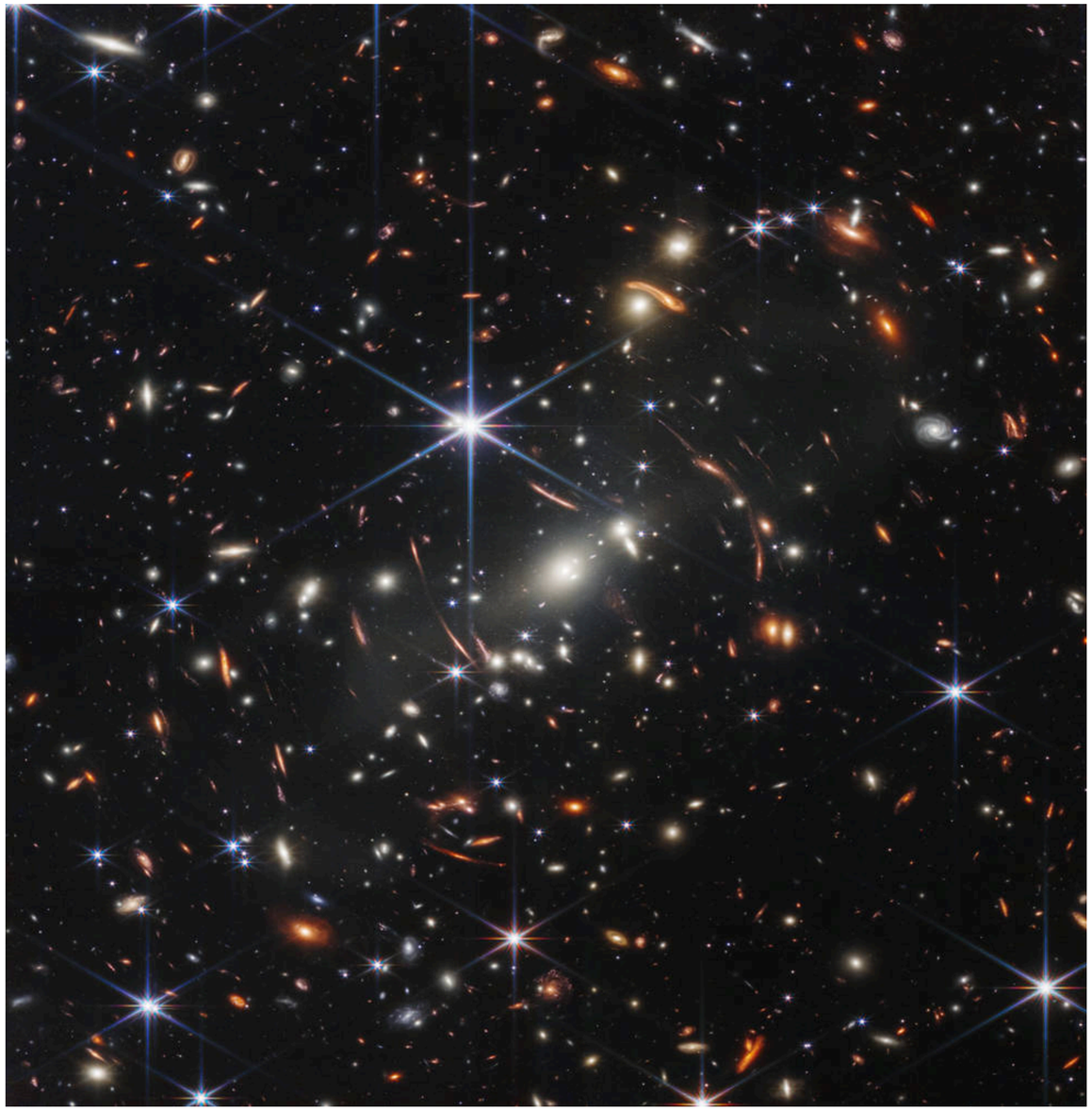


Stephan’s Quintet, a visual grouping of five galaxies, is best known for being prominently featured in the holiday classic film, “It’s a Wonderful Life.” Today, NASA’s James Webb Space Telescope reveals Stephan’s Quintet in a new light. This enormous mosaic is Webb’s largest image to date, covering about one-fifth of the Moon’s diameter. It contains over 150 million pixels and is constructed from almost 1,000 separate image files. The information from Webb provides new insights into how galactic interactions may have driven galaxy evolution in the early universe.

https://www.nasa.gov/webbfirstimages

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

2022/7/12



NASA’s James Webb Space Telescope has produced the deepest and sharpest infrared image of the distant universe to date. Known as Webb’s First Deep Field, this image of galaxy cluster SMACS 0723 is overflowing with detail.
Thousands of galaxies – including the faintest objects ever observed in the infrared – have appeared in Webb’s view for the first time. This slice of the vast universe covers a patch of sky approximately the size of a grain of sand held at arm’s length by someone on the ground.

https://www.nasa.gov/webbfirstimages

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡　First Image

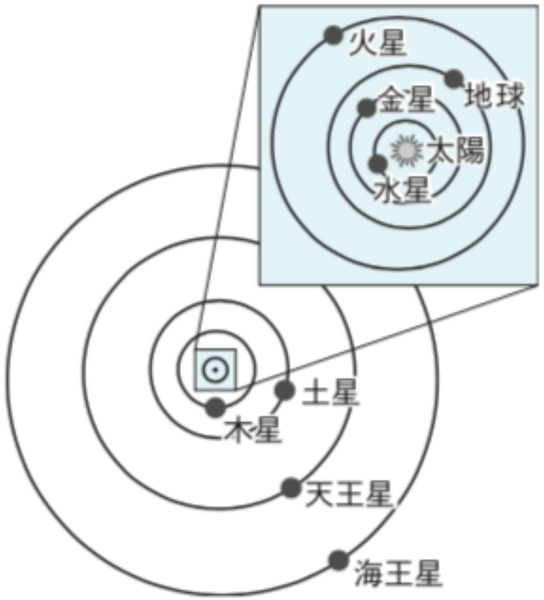
2022/7/12



This landscape of “mountains” and “valleys” speckled with glittering stars is actually the edge of a nearby, young, star-forming region called NGC 3324 in the Carina Nebula（カリーナ星雲，りゅうこつ座）．　Captured in infrared light by NASA’s new James Webb Space Telescope, this image reveals for the first time previously invisible areas of star birth.

https://www.nasa.gov/webbfirstimages

地球・月 ▶ 太陽系　　太陽系小天体



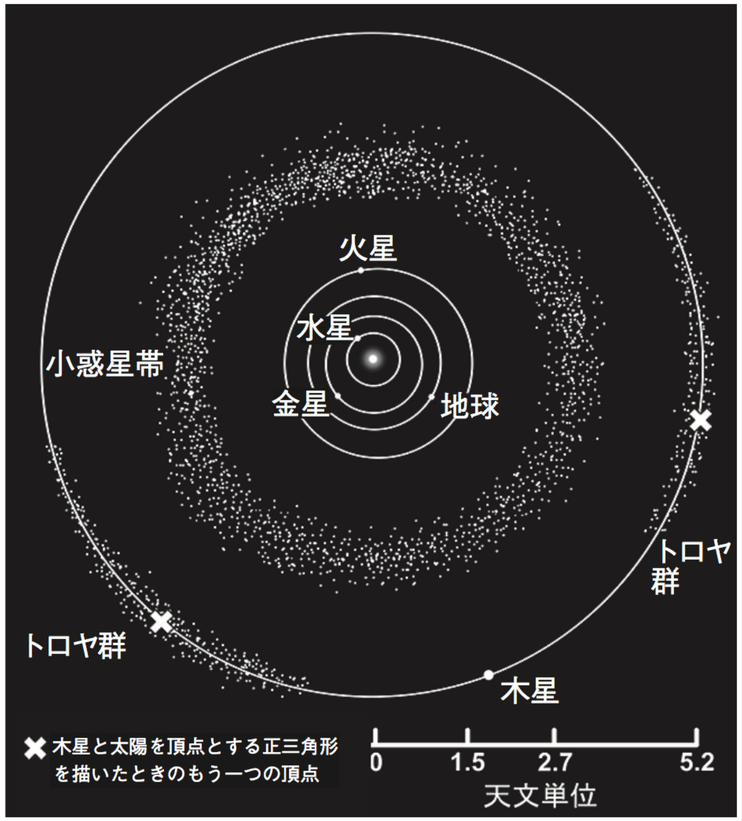
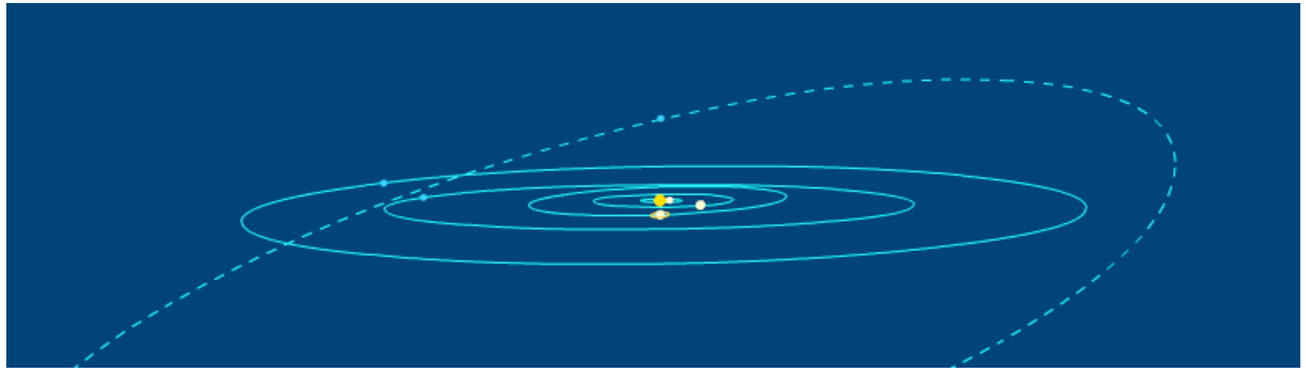
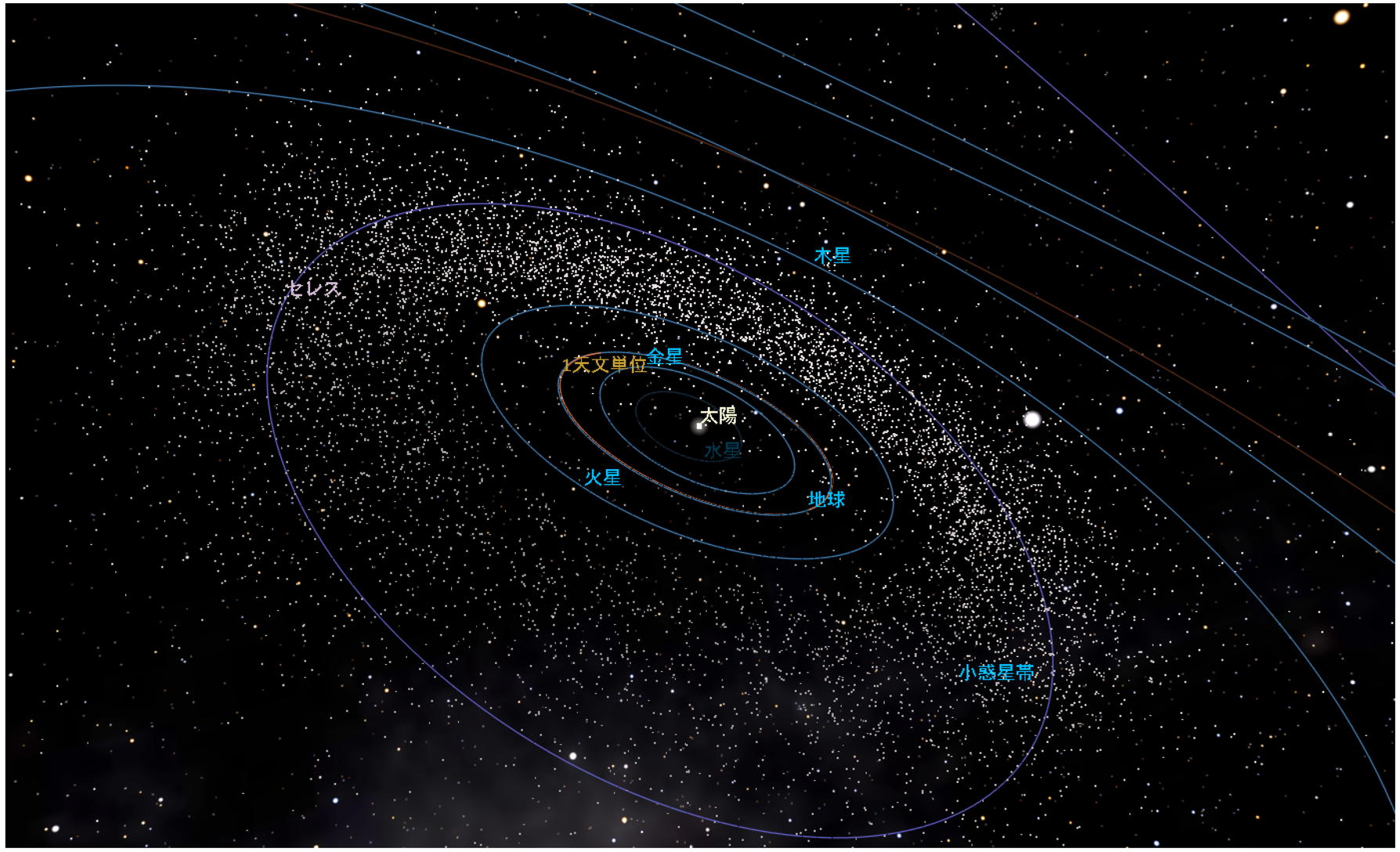


図 1.20　小惑星帯は火星と木星軌道の間にある．また，木星軌道にはトロヤ群と呼ばれる小惑星帯もある．トロヤ群は太陽と木星を 2 つの頂点として正三角形を描いたときの 3 つ目の頂点付近にある．

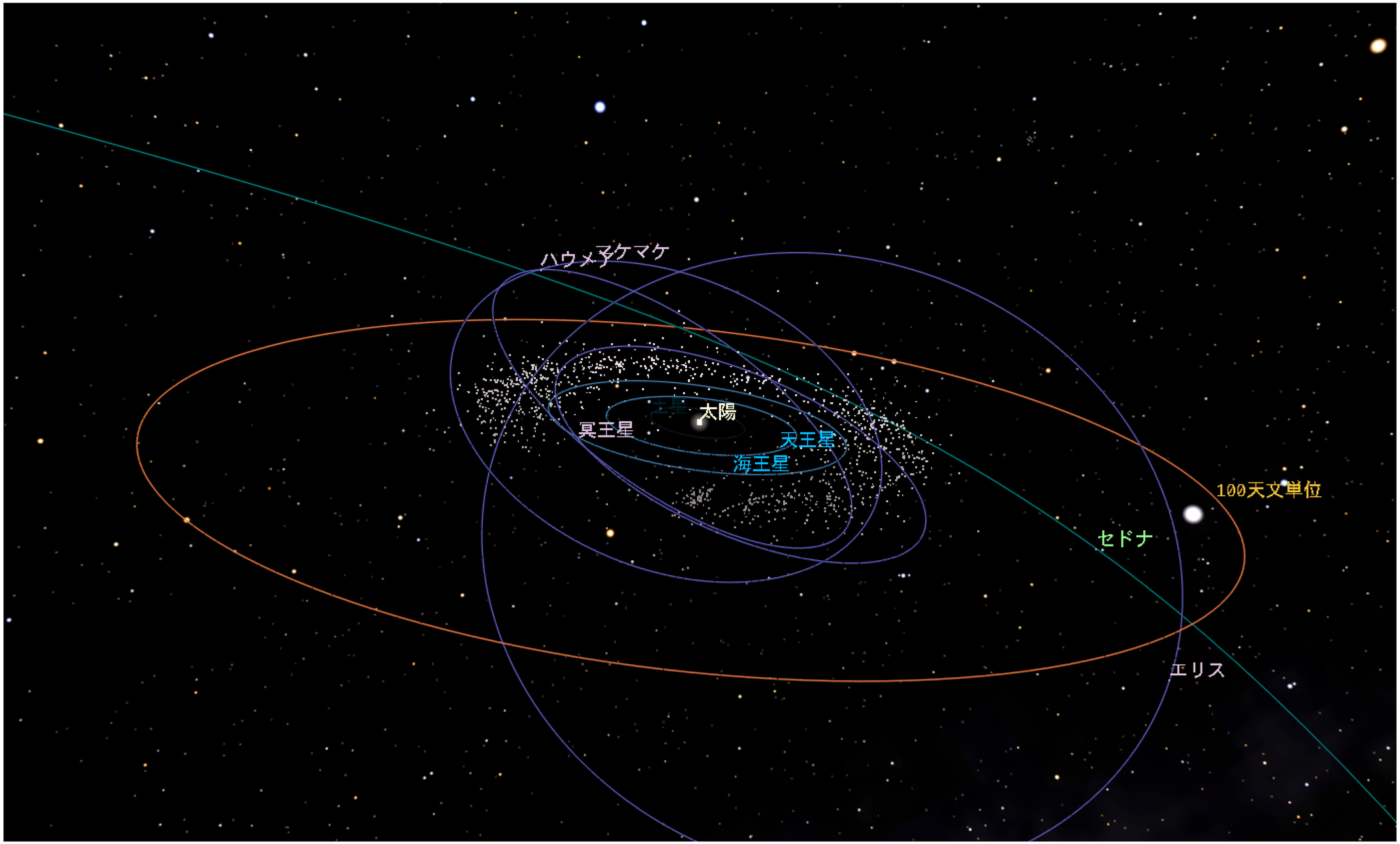


小惑星帯 (火星と木星の間)



イトカワ　　竜宮

太陽系 (100天文単位)



天文学で使う距離の単位：AU, 光年，パーセク

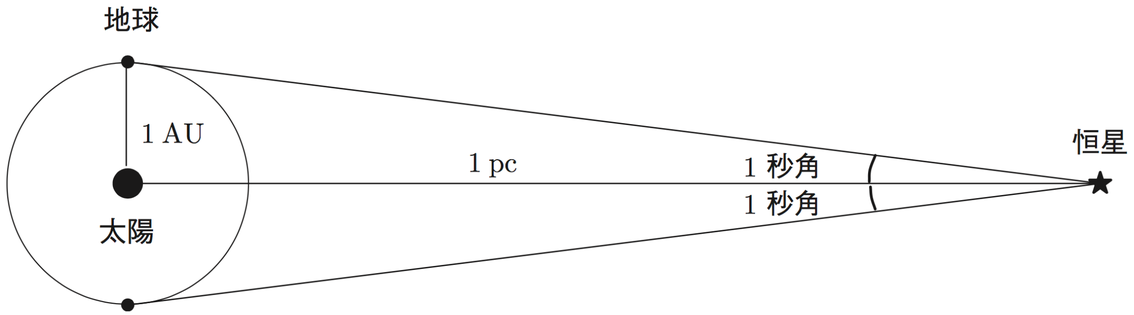
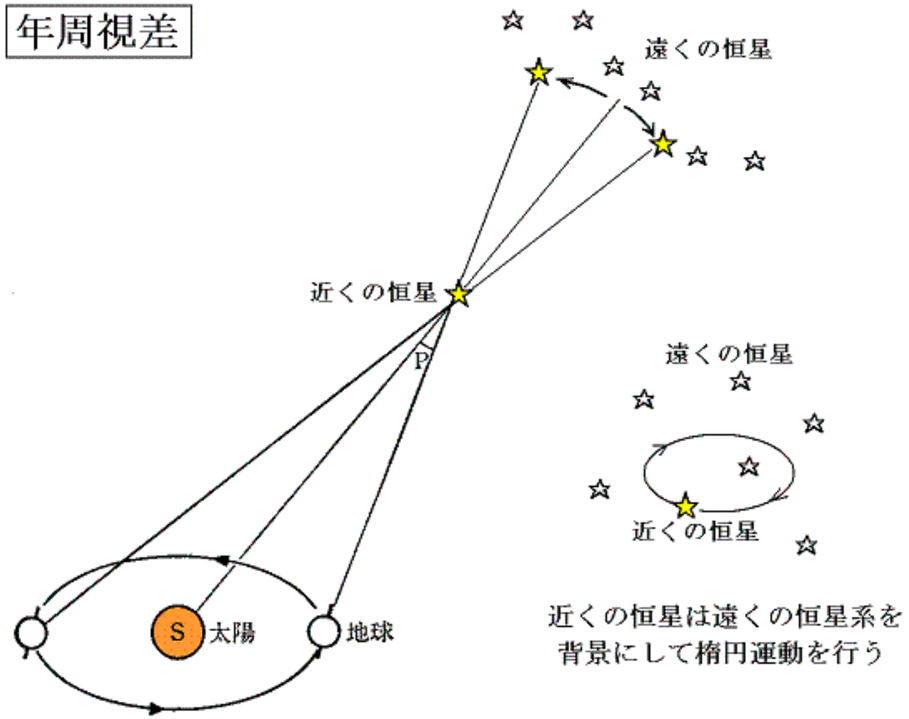


図 A.2　距離パーセク (pc) の定義．地球から見る星の位置が半年で 2 秒角ずれる場所までの距離を 1 pc とする．



天文学で用いられる距離の単位（§ A.1.5）　教科書 見返し

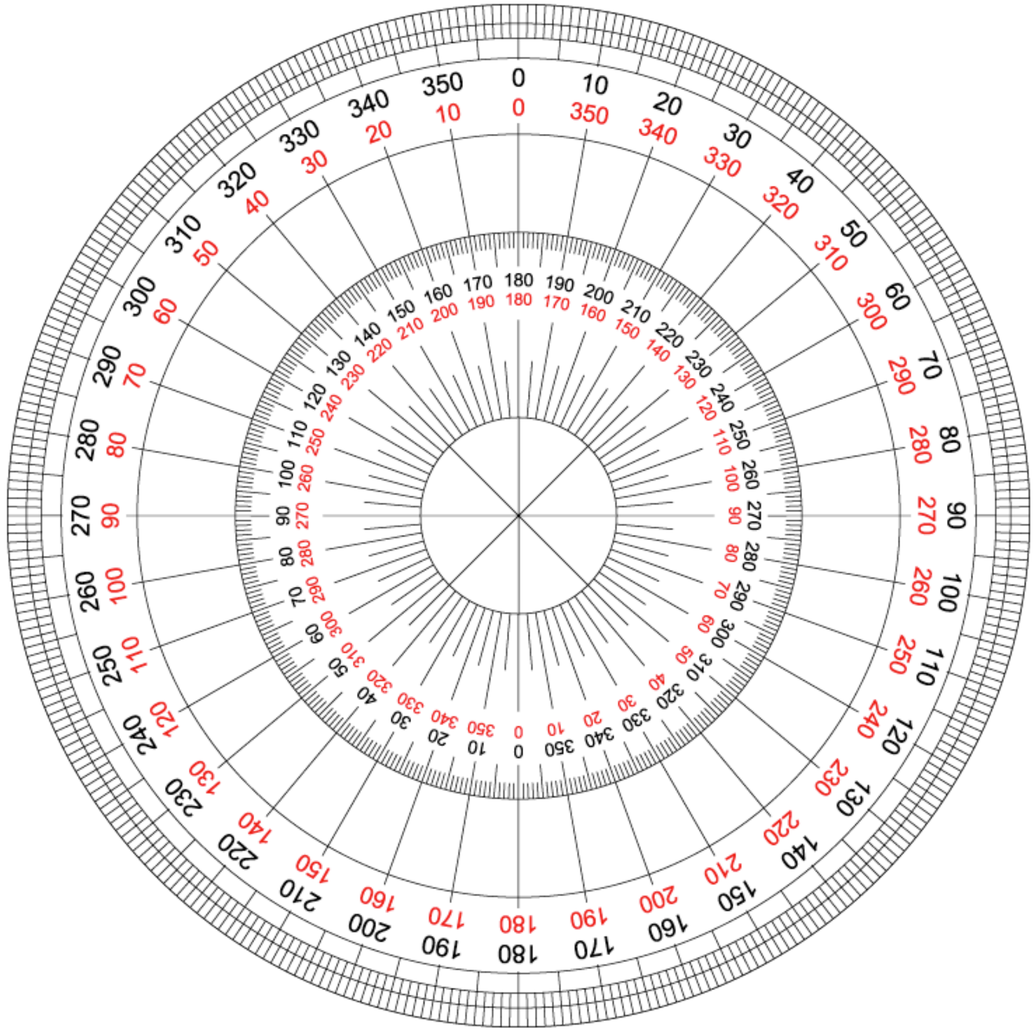
名　記号	長さ	定義
天文単位　AU	1 億 5000 万 km	地球と太陽の距離
光年　ly	9.46×10^{12} km	光が 1 年間に進む距離
パーセク　pc	3.09×10^{13} km $=$ 3.26 ly	地球からの年周視差が ±1 秒角
赤方偏移　z	(A.2.16) 式	本来の光の波長のずれの比

【背景となる話】

角度の単位　　１度より小さい角度は　分と秒

１度＝60分　minute

１分＝60秒　second minute

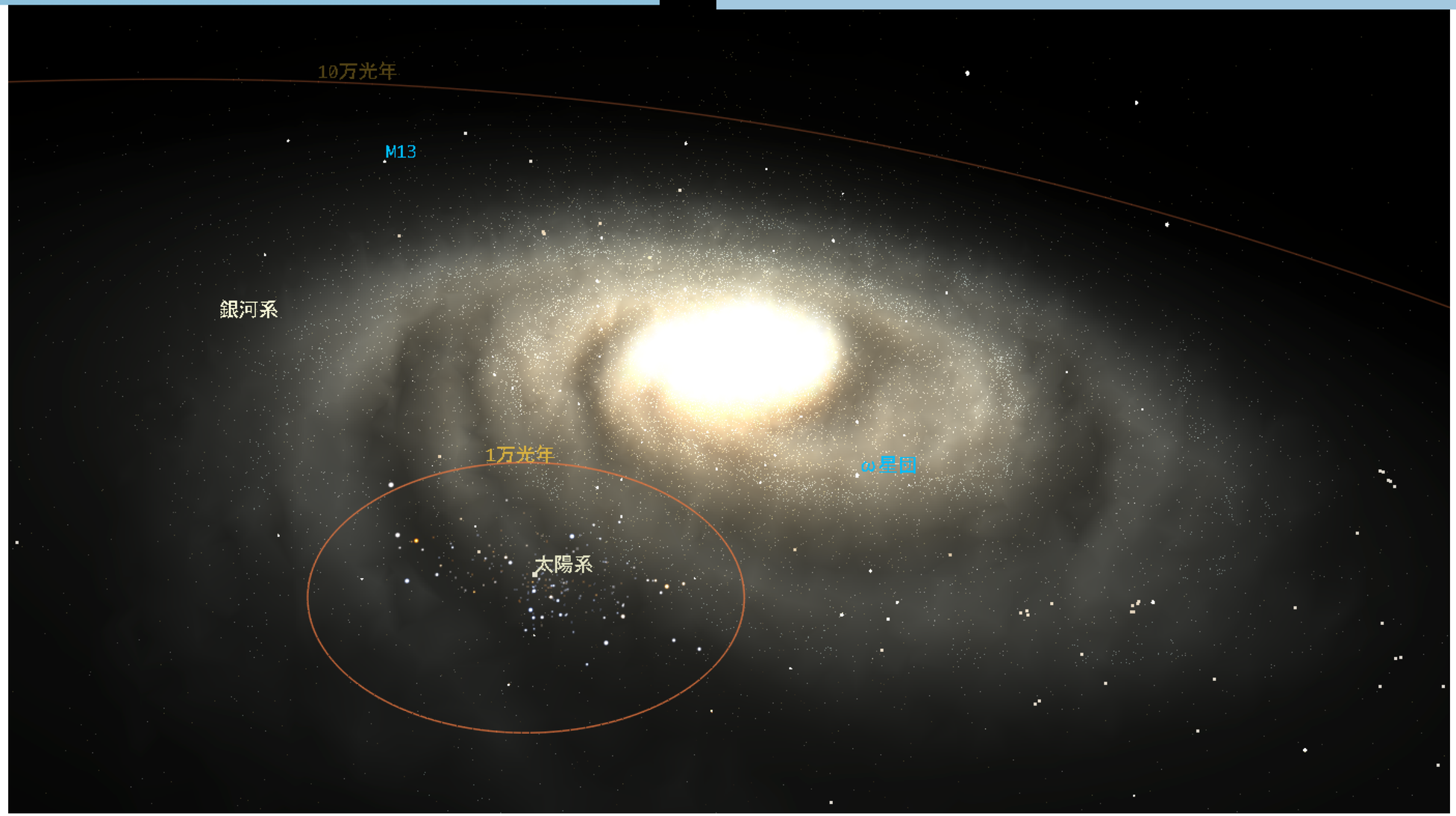




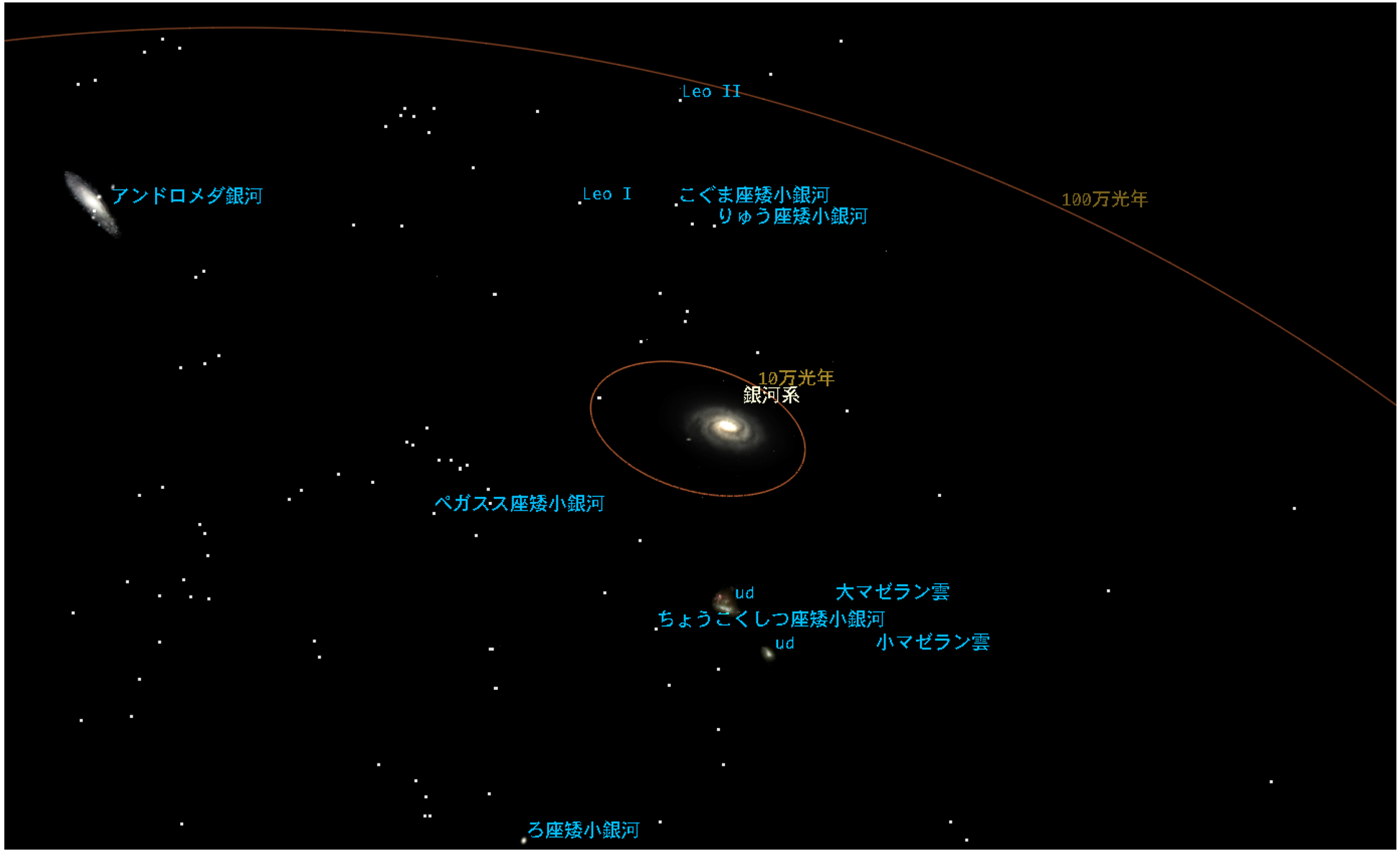
天の川銀河 (our Galaxy)

天の川がなぜ川みたいに見えるのか初めて知りました。

どうして銀河が渦巻いているか気になりました。

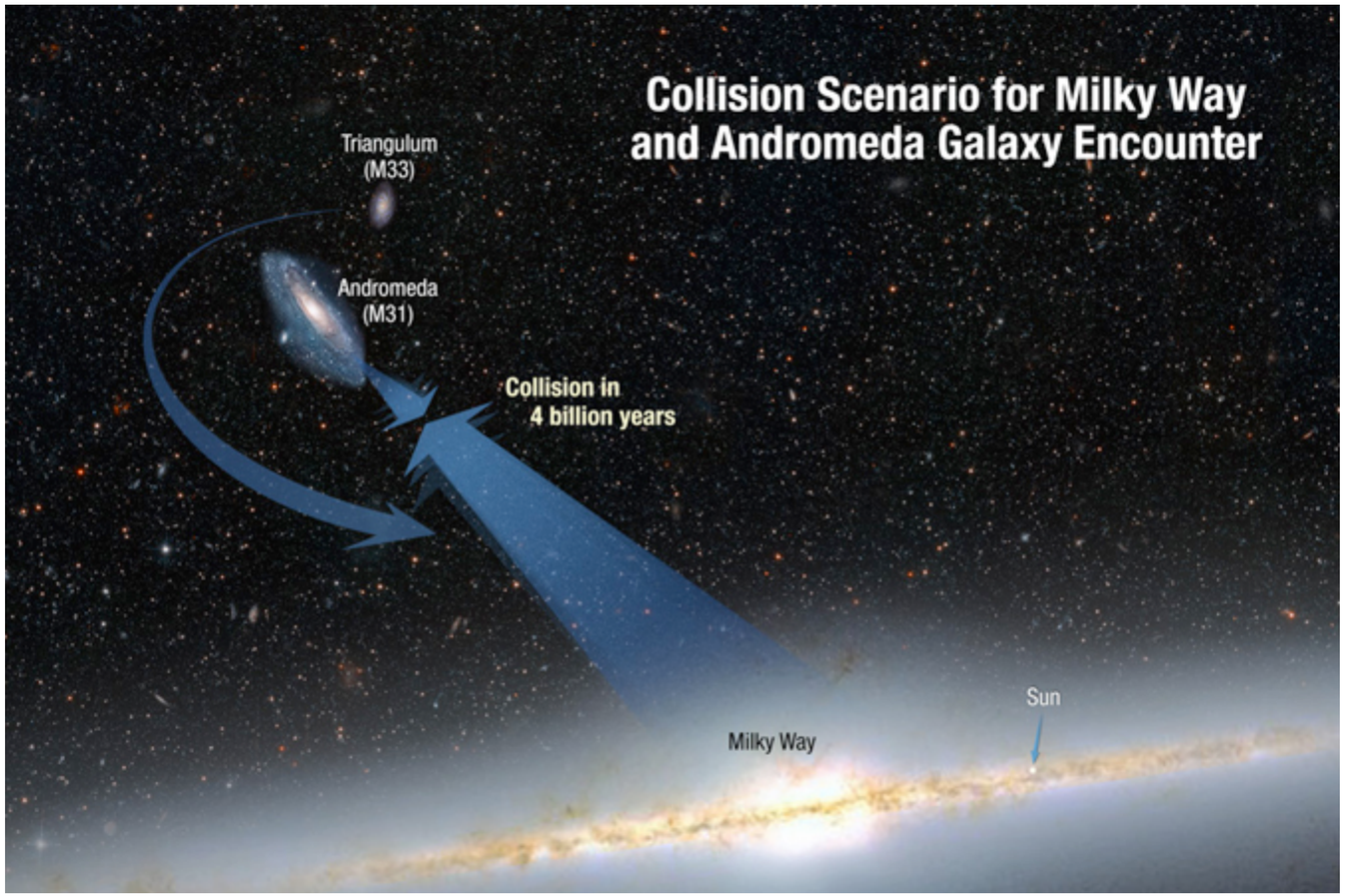


銀河群


Leo II
アンドロメダ銀河
Leo I
こぐま座矮小銀河
りゅう座矮小銀河
100万光年
10万光年
銀河系
ペガスス座矮小銀河
ud
大マゼラン雲
ちょうこくしつ座矮小銀河
ud
小マゼラン雲
ろ座矮小銀河

アンドロメダと40億年後に衝突

When galaxies collide



NASA's Hubble Shows Milky Way is Destined for Head-On Collision
05.31.12

NASA astronomers announced Thursday they can now predict with certainty the next major cosmic event to affect our galaxy, sun, and solar system: the titanic collision of our Milky Way galaxy with the neighboring Andromeda galaxy.

The Milky Way is destined to get a major makeover during the encounter, which is predicted to happen four billion years from now. It is likely the sun will be flung into a new region of our galaxy, but our Earth and solar system are in no danger of being destroyed.

我々の銀河と，230万光年先にあるアンドロメダ銀河は，互いの重力で近づきつつあります．ハッブル宇宙望遠鏡の詳細な観測から，40億年後の衝突の様子をシミュレーションした結果が，公開されました．

http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/milky-way-collide.html

アンドロメダと40億年後に衝突

When galaxies collide



Milky Way Versus Andromeda As Seen from Earth (3:53)

https://www.youtube.com/watch?v=qnYCpQyRp-4

アンドロメダと40億年後に衝突

When galaxies collide



現在



20億年後



37.5億年後



38.5億年後

アンドロメダと40億年後に衝突

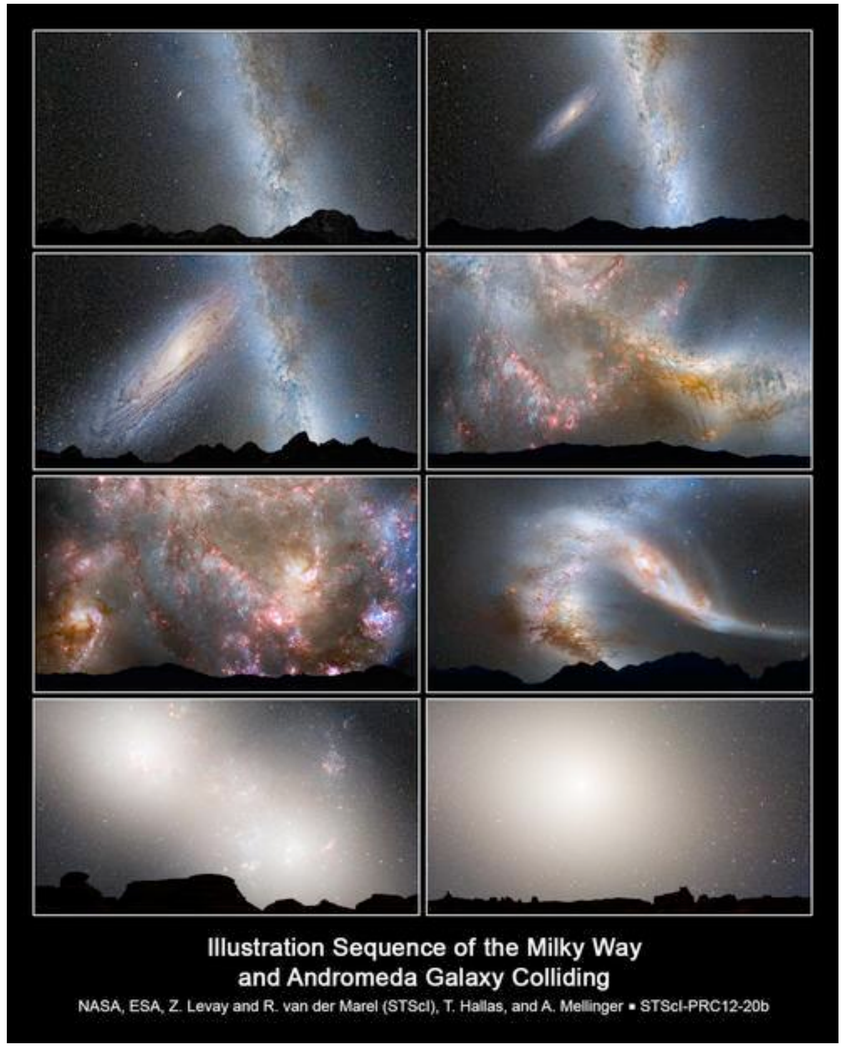
When galaxies collide



40億年後



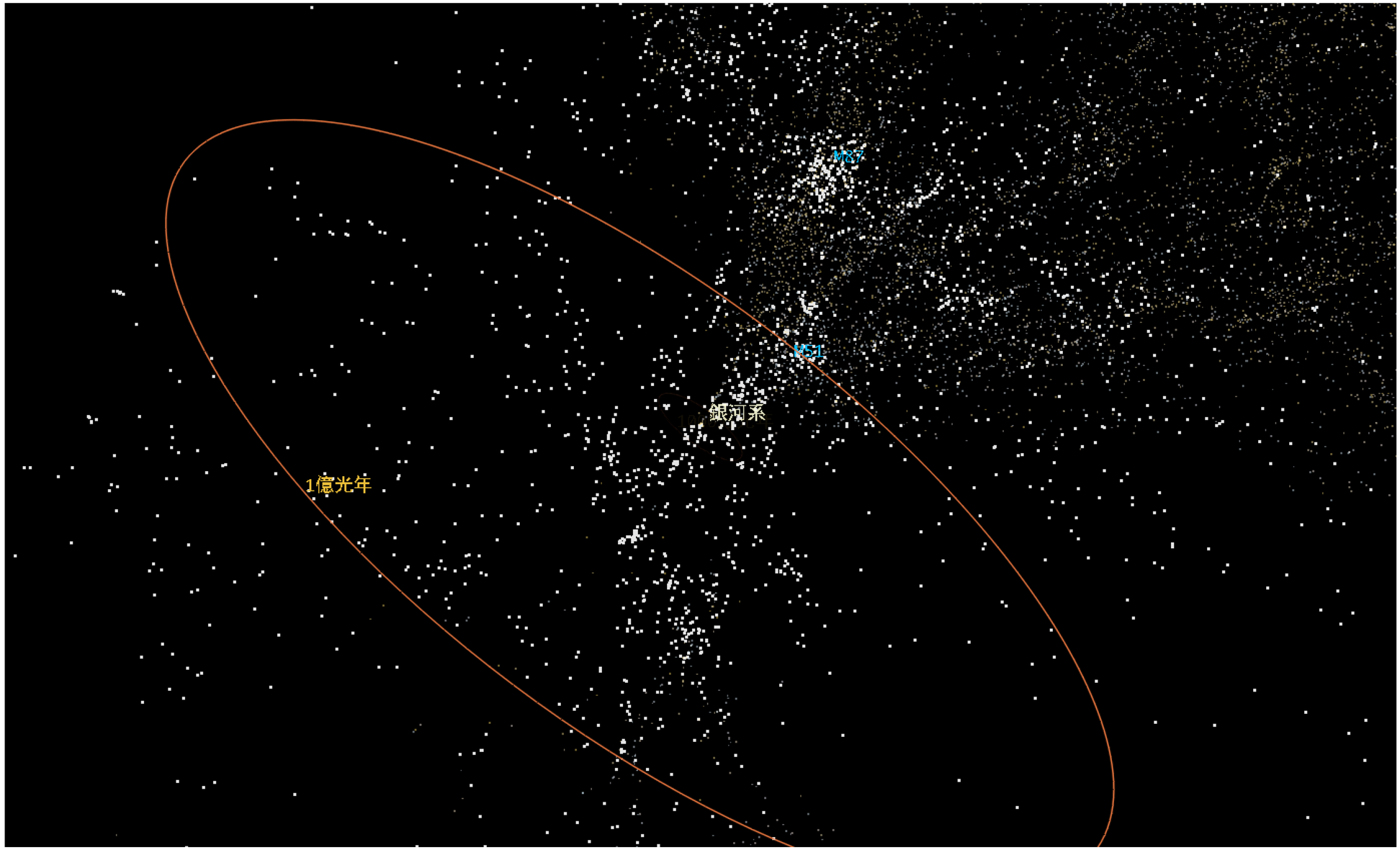
51億年後



70億年後

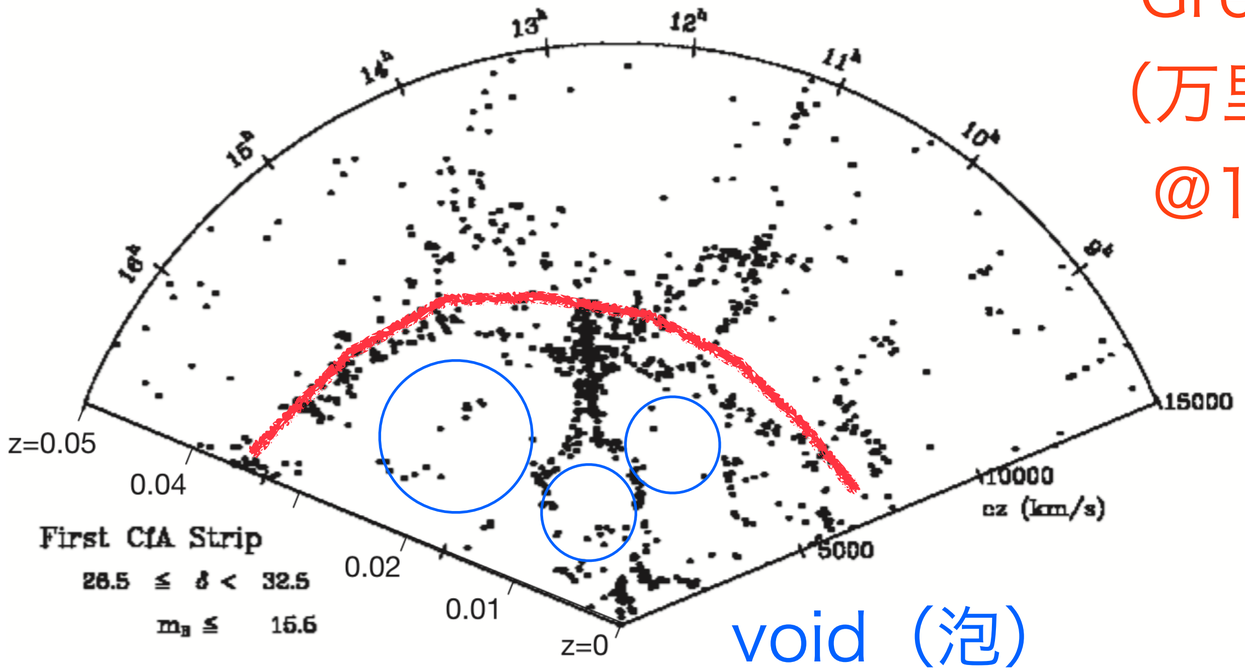
銀河が衝突しても，星どうしが衝突することはほとんどありません．星と星の間の距離が長く，銀河系内は「疎」なのです．70億年後には合体して1つの銀河になるようです．

銀河団



1個の点が銀河を表す.
（星ではない）

銀河団 (cluster)，宇宙の大規模構造



Great Wall
（万里の長城）
@128Mpc

void（泡）

図 1.34　1989 年に報告された CfA サーベイの図．扇子を広げたように，見かけの範囲を狭く，奥を深く銀河をサーベイした結果の図である．中心はかみのけ座銀河団 (Coma cluster)．1 つ 1 つの点が銀河であり，全部で 1027 個のデータがある．右側の距離の目盛りは赤方偏移から測った後退速度を示している．左側の目盛りは赤方偏移 z を記入した．$z = 0.03$ と記された距離が 128 Mpc に相当する．[CfA が提供している図を加工]



Margaret Geller

1027個の銀河分布を観測 (1989)

銀河団 (cluster)，宇宙の大規模構造

(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

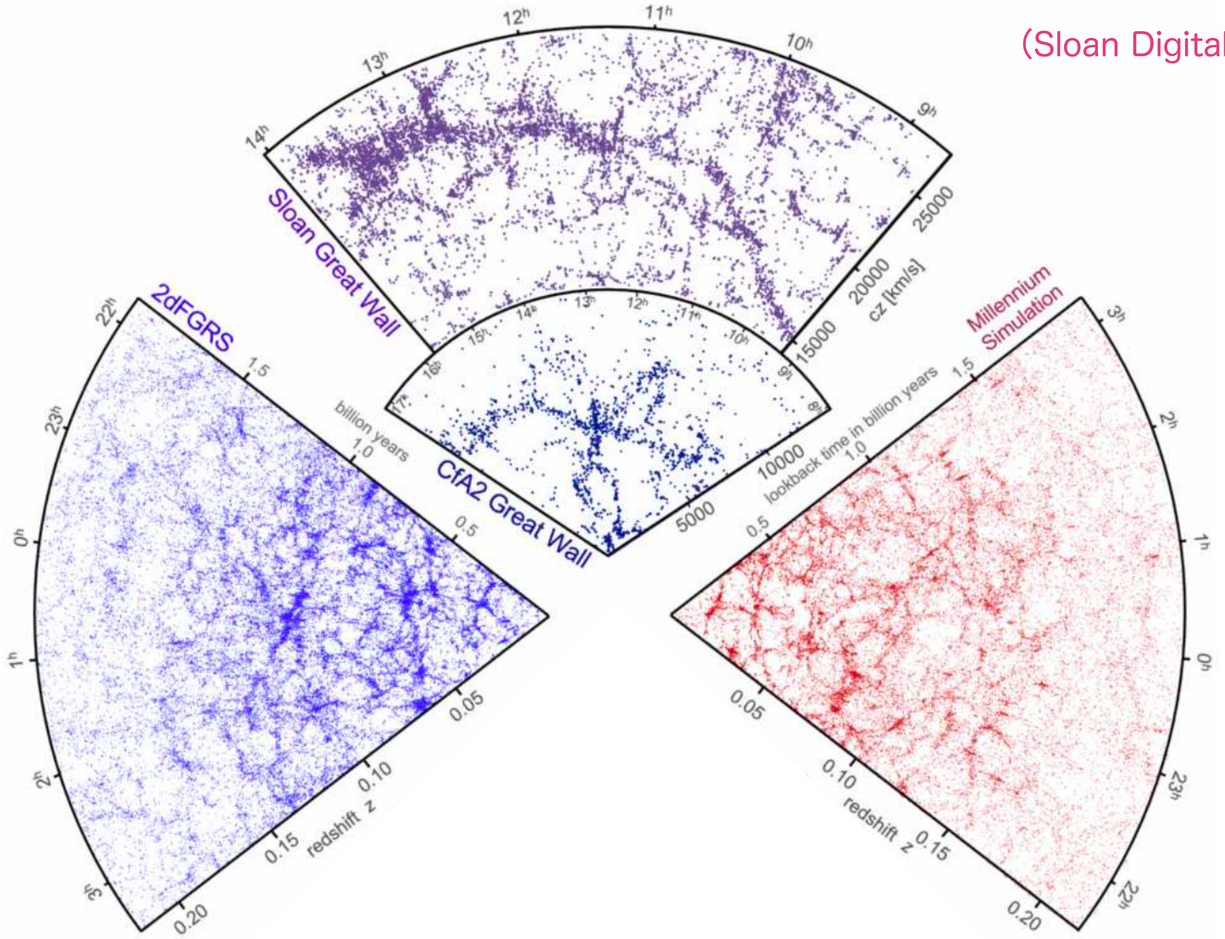
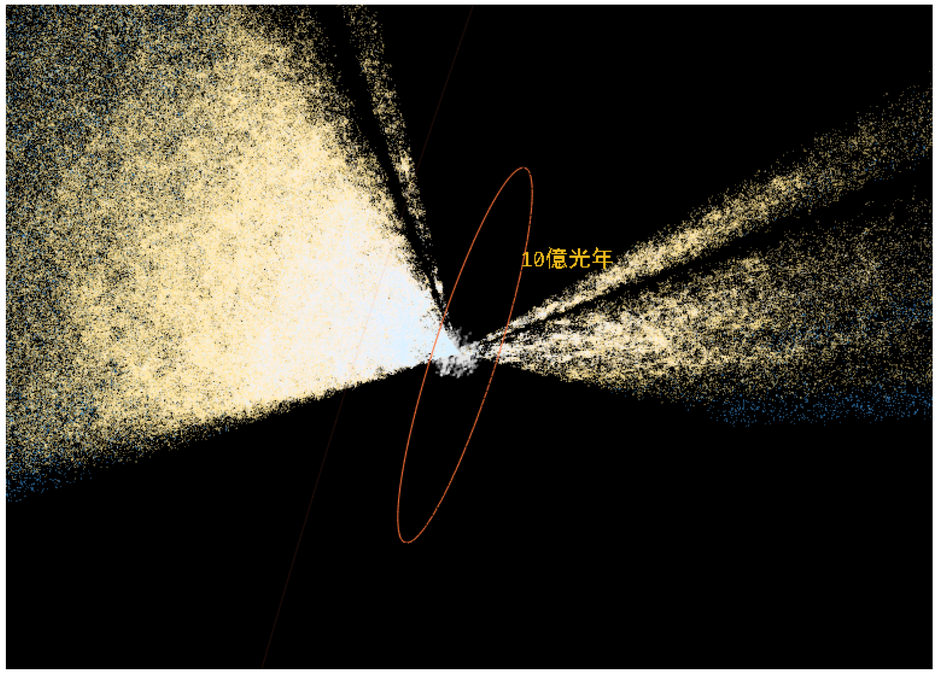


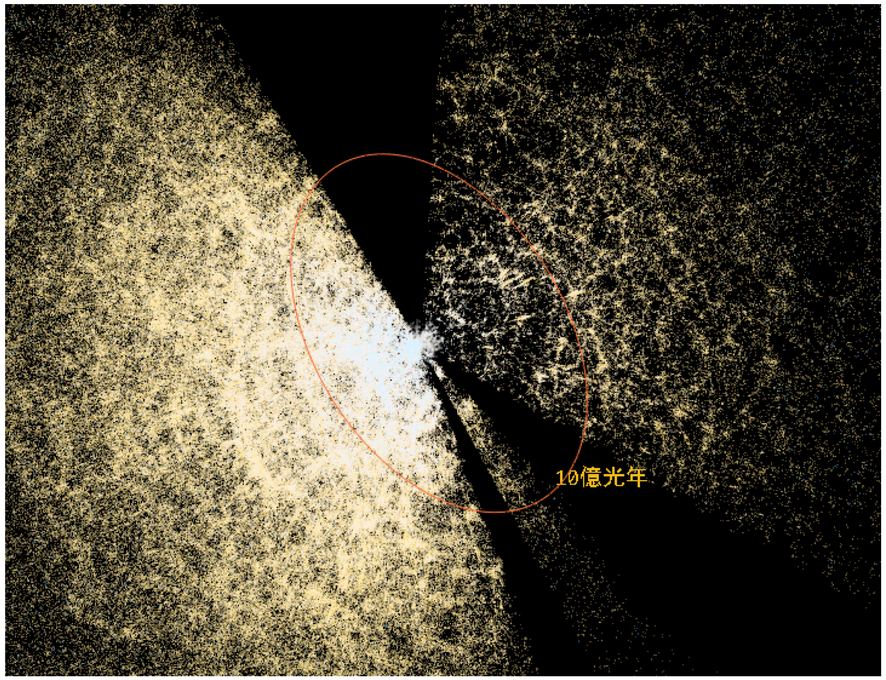
図 1.35　銀河の分布観測とシミュレーションによる疑似分布を並べたもの．〔上〕SDSS サーベイによる銀河の分布図と図 1.34 を重ねたもの．SDSS は，北天から見える 65 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している．1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグレートウォール（万里の長城）も新たに発見された．〔左〕2dFGR サーベイによる銀河の分布図．南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している．〔右〕ミレニアム・シミュレーションという数値計算結果を似せて示したもの．[Springel, Frenk, White の論文 (2006) を加工]

65万個の銀河分布を観測 (2006)

前回のミニッツペーパーから

ミタカで銀河を縮小して見ているタイミングで、左っの扇が反対向きに開いているように配置していたのはなぜか。
黒のとこにも本当はいるのか？





銀河系が泡のような感じだを初めて知りました。
今分かっている宇宙の全体像を見れて良かったです。

銀河系が泡のよう，ではなくて
銀河の分布が泡のようなのです．

レポート課題

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（土）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 XXXXXXX ○○○○」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，XXXXXXX 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．）



ドレークによる地球外文明の推定

1960 年にアメリカの天文学者ドレークが発表した「地球外文明の数を推定する式」は，太陽系が属する銀河系内に現存する文明の数 N を推定する式である．

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L \qquad (5.11)$$

式の右辺の記号の意味と推定値を表 5.5 に示すが，楽観的に考えるか悲観的に考えるかで，ずいぶんと最後の値が違ってくる．



図 5.46 Frank Drake (1930–)

2022/9/2 没

表 5.5 ドレークの式［(5.11) 式］にいれるべき値はどれだろうか．天の川銀河にある恒星は約 2000 億個といわれているが，はたして知的生命体の存在する星の数はいくつだろうか．

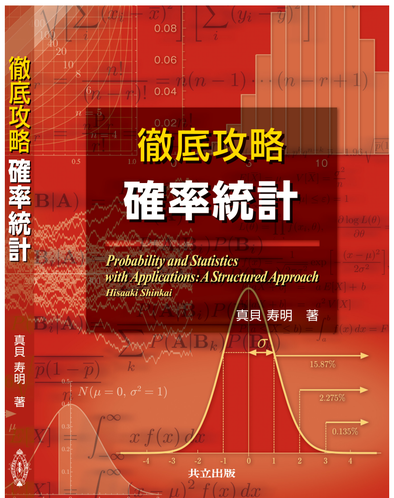
		楽観論	中間論	悲観論
R_*	銀河系で毎年生成される星の数（個/年）	50	20	1
f_p	生成される星のうち惑星系をもつ星の割合	1.0	0.5	極めて小
n_e	星のまわりで生命にとって適当な環境をもつ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
f_ℓ	そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
f_i	生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
f_c	知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
L	そのような技術文明の平均寿命	10^8	10^4	100

風がふくと桶屋が儲かる

「風が吹くと桶屋が儲かる」という諺がある．全く関係のないところに影響がでること，の意味で使われたり，ほとんどあり得ない無理矢理なこじつけ，の意味で使われたりする．理屈はつぎのものだ．

(1) 風が吹けば，砂ぼこりが立つ．
(2) 砂ぼこりが眼に入ると，失明する人が出る．
(3) 失明した人の中には，三味線を習う人がいる．
(4) 三味線が売れると，猫の皮が必要になり，猫が多く殺される．
(5) 猫が減ると，ネズミが増える．
(6) ネズミが増えると桶がかじられる．
(7) 桶の注文が増えて，桶屋が儲かる．

それぞれの事象は独立であるから，すべてが成り立つ確率は，各確率の積になる．例えば，仮にそれぞれの確率を 1/10 とすると，風が吹いて桶屋が儲かる確率は $(1/10)^7 = 10^{-7} = 0.0000001$ （1000 万分の 1） となる．（丸山健夫『「風が吹けば桶屋が儲かる」のは 0.8%!?』PHP 新書，2006）



課題（次のうちから2つ以上調べる）

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．

- **太陽系内惑星探査**.
  最近 10 年間の火星探査，小惑星探査，彗星探査，木星の衛星探査による成果は何か．

- **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」「TESS」をキーワードに．

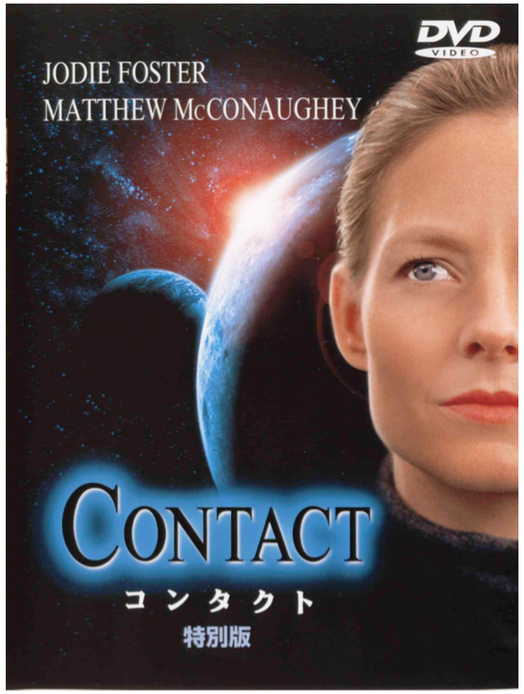
- **地球外知的生命体探査** (Search for Extra-Terrestrial Intelligence).
  40 年の探査の成果はどうか．SETI@Home プロジェクトとは何か．

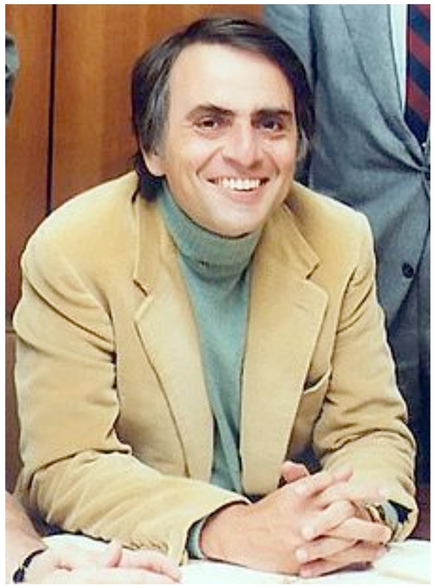
- **宇宙生物学** (Astrobiology).
  「バイオマーカー (Biomarker)」「ハビタブルゾーン (habitable zone)」をキーワードに．

そして，各自の考察を行い，「地球外生命体の存在について」「地球外知的生命体の存在について」それぞれ結論してください．

参考　映画「コンタクト」

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 30 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．）





”Contact” Theatrical Trailer（1997）





(2:27)

http://www.youtube.com/watch?v=SRoj3jK37Vc

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．

ハッブルの宇宙膨張の法則（1929 年）

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

銀河の後退速度 ＝ ハッブル定数 H_0 × 銀河までの距離

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)



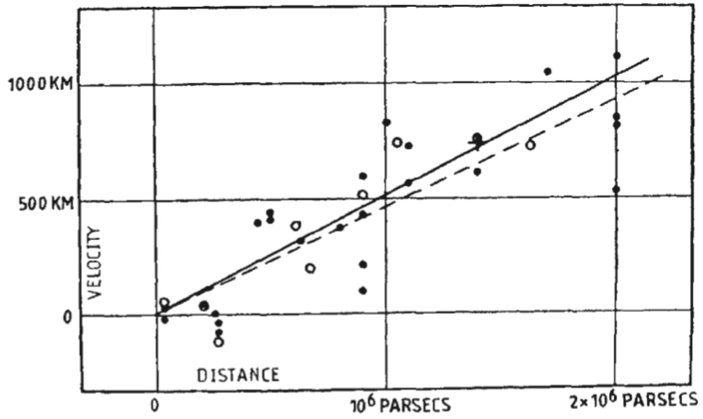


図 5.7　ハッブルが 1929 年に発表した図．横軸は距離，縦軸は銀河の後退速度．このグラフの傾きがほぼ一定になることが，ハッブルの法則である．ハッブルが報告した値は，$H_0 = 530\,\mathrm{km/s/Mpc}$ だった．現在値は $H_0 = 68\,\mathrm{km/s/Mpc}$.

光の「ドップラー効果（赤方偏移）」から

水・音・光　波に共通する特徴

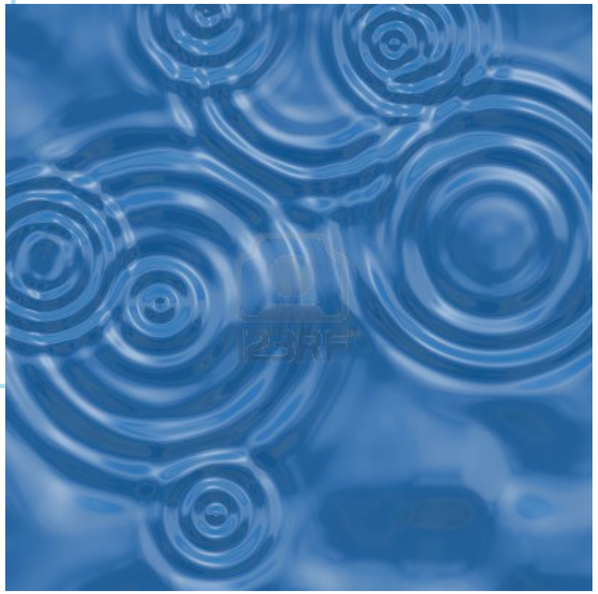
波の特徴

- ある時刻で全体像をとらえたとき，同じ形状の間隔を**波長** λ（単位は [m]）という．波の振れる幅を振動中心から測った長さを**振幅** A（単位は [m]）という．
- ある場所で止まって観測したとき，一定時間ごとに同じ形の振動を繰り返す．この時間を**周期** T（単位は [s]）という．1 秒間に何回振動するかという量を**振動数** f（単位は [Hz]）という．

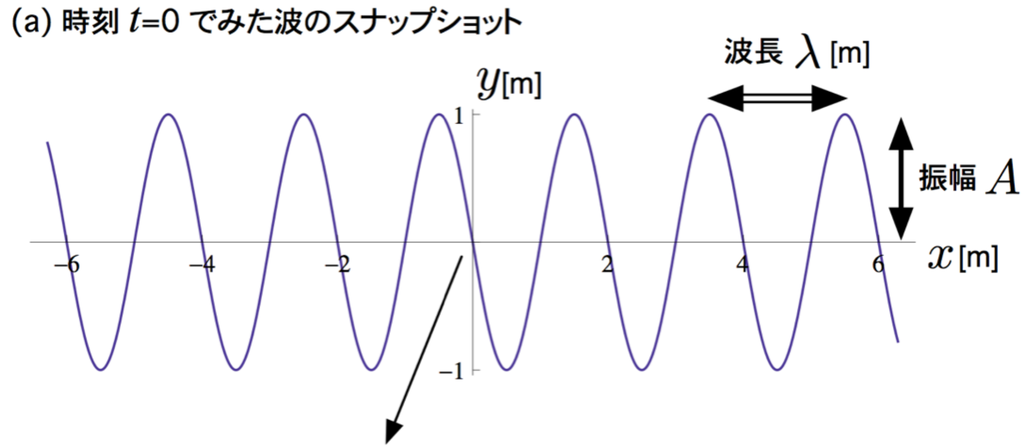
$$f = \frac{1}{T} \qquad \text{振動数 [Hz]} = \frac{1}{\text{周期 [s]}} \tag{A.18}$$

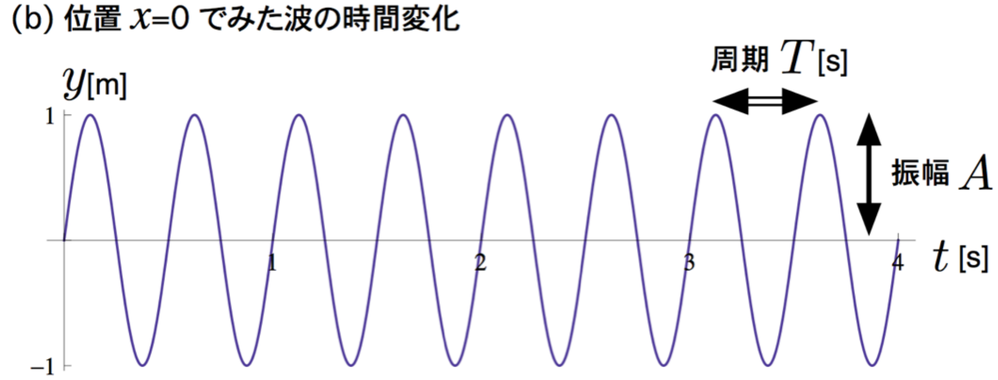
- 波の伝わる速さ v [m/s] を次のように決める．

$$v = f\lambda \qquad \text{速さ [m/s]} = \text{振動数 [Hz]} \times \text{波長 [m]} \tag{A.19}$$



波を表す物理量

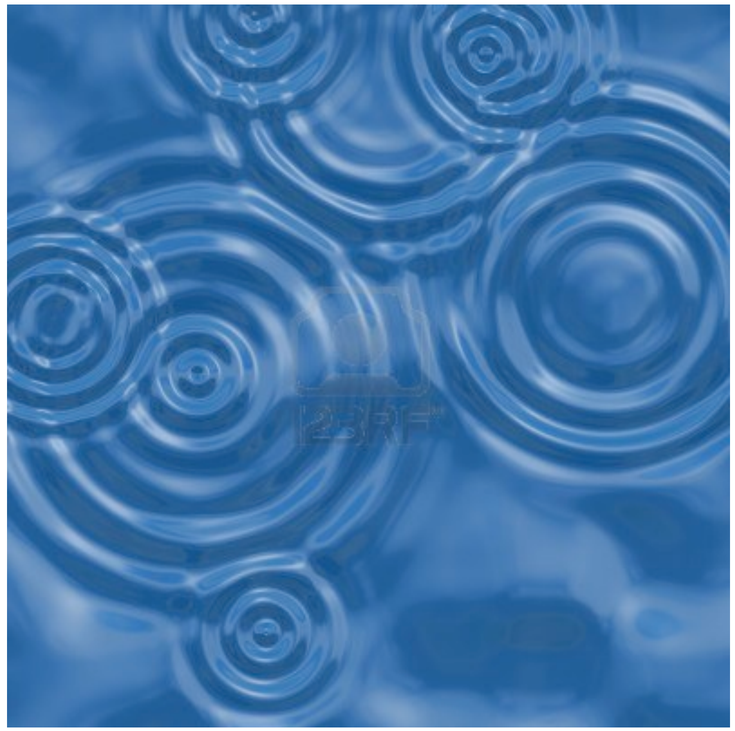




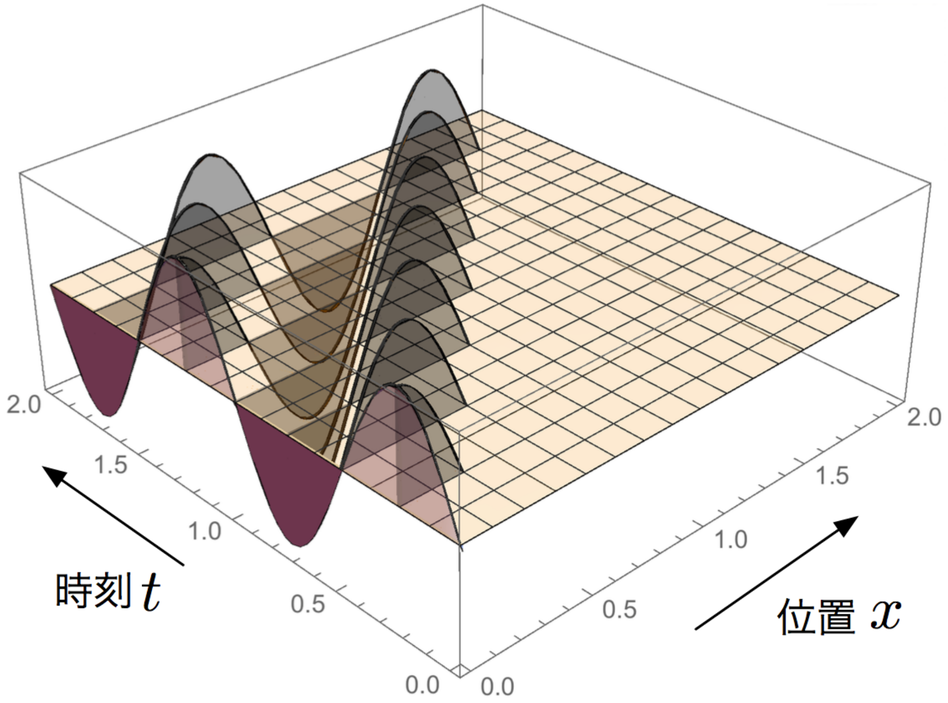
「写真を撮る」

「全体図を知る」

「1カ所での動きを見る」



波を表す物理量



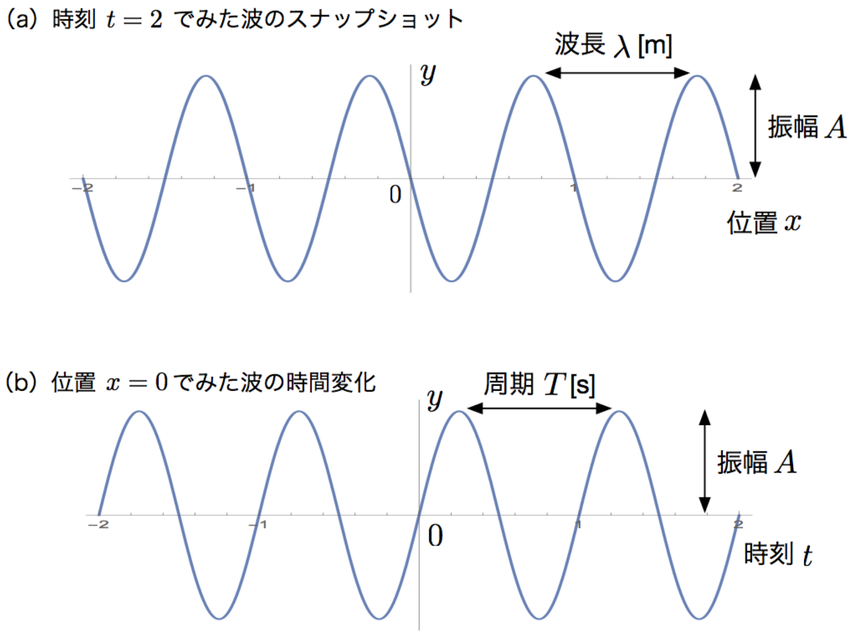
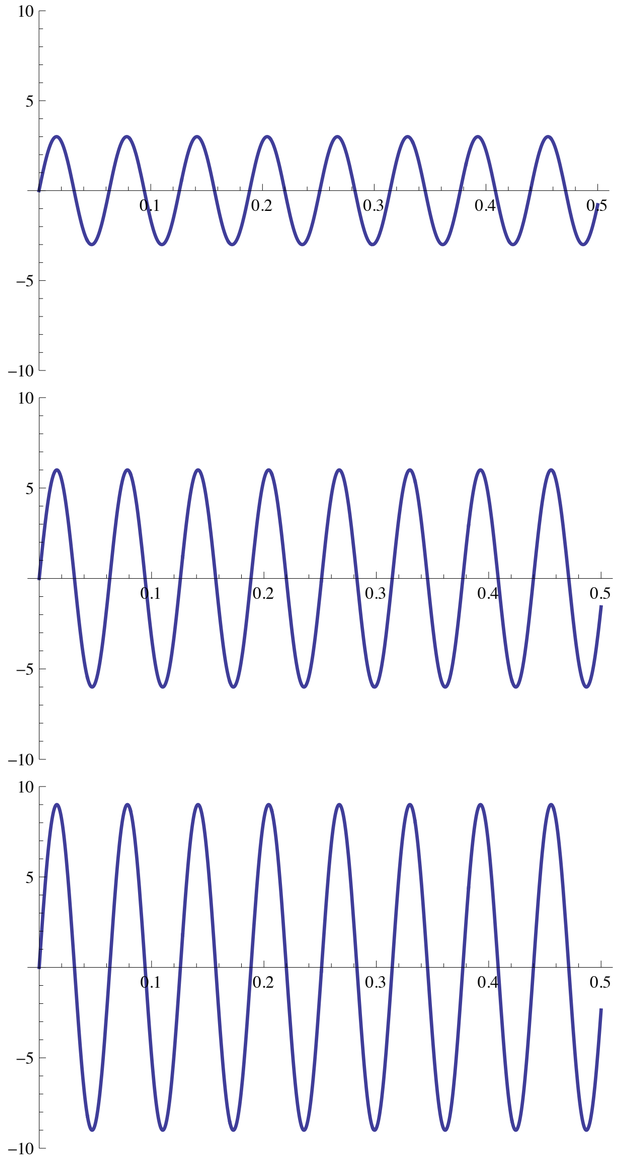


図 A.6　正弦波の伝わる様子．ある時刻で写真を撮っても，1 か所で止まって時間変化を観測しても，周期的な変動になる．〔左〕位置 $x = 0$ で単振動している波源から，x 軸の正の向きに正弦波の伝わる様子を 1/4 周期ごとの波形を並べて示した．〔右〕(a) x 方向に進む振幅 A，波長 $\lambda = 1$ [m] の波を時刻 $t = 2$ でみた図．(b) は，この波を位置 $x = 0$ で観測したもの．周期 $T = 1$ [s] であることがわかるので，この波の速さ v は，$v = \lambda/T = 1$ [m/s] である．

音の3要素 （1)大きさ （2）高低 （3）音色



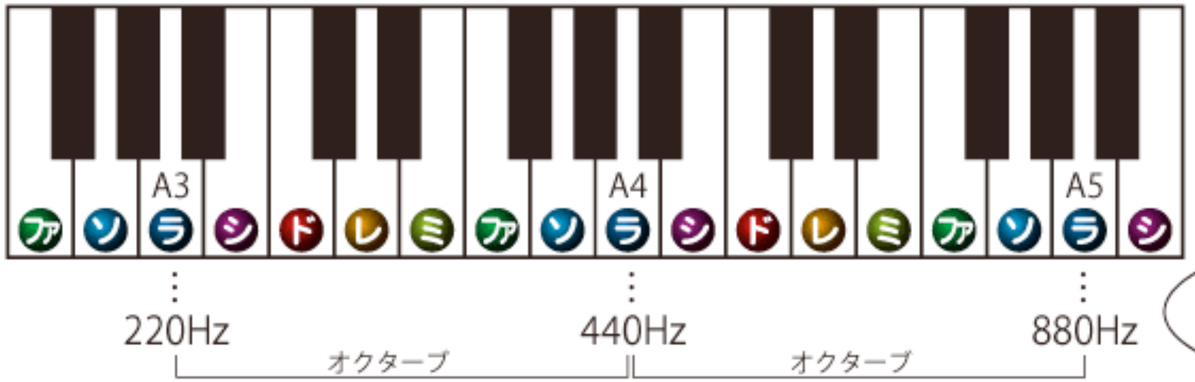
大きさ＝振幅



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

音の3要素 （1）大きさ （2）高低 （3）音色

高低＝振動数

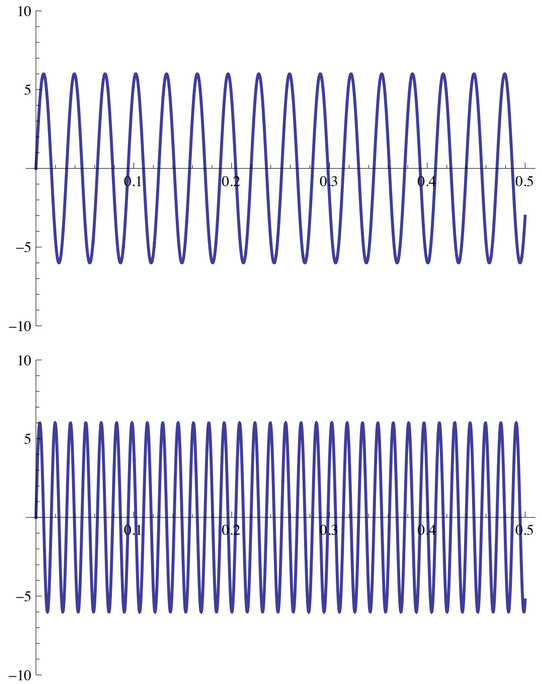


高い音ほど速く
振動しています

周波数を倍にすると
1オクターブ高い音になります

人間が聞く事ができる音は 20Hz から 20,000Hz

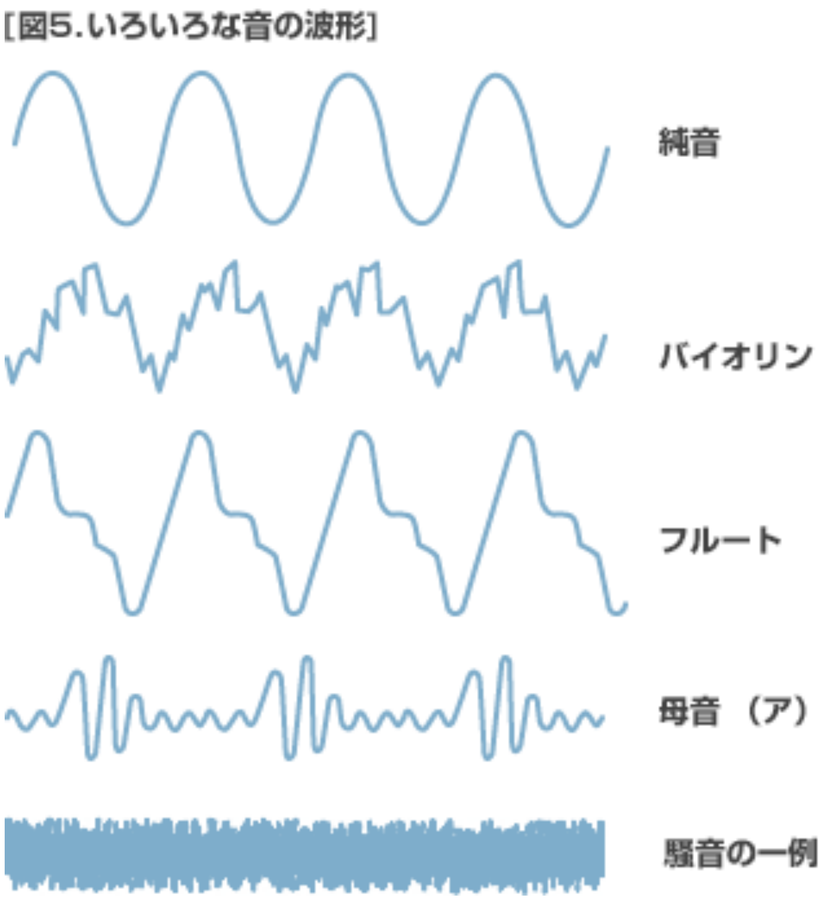
人間が聞くことが出来る音より
　遅い振動は**低周波音**
　速い振動は**超音波**



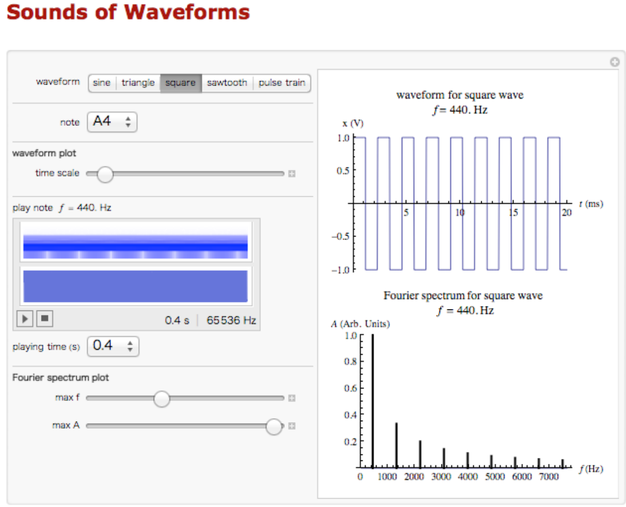
http://www.tajima-d.jp/music/basic/01.html

音の3要素 （1)大きさ　（2）高低　（3）音色

音色＝波形



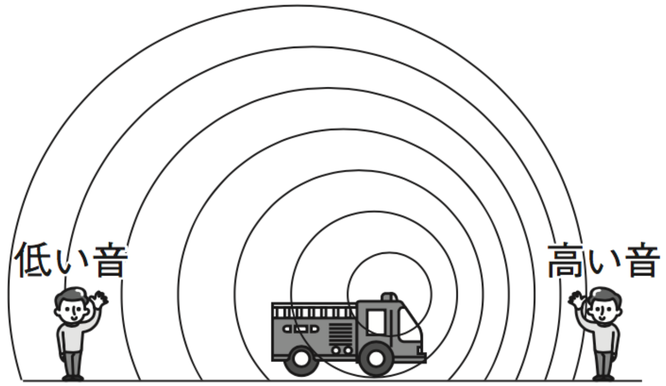




http://www.widexjp.co.jp/hearing/various_sounds/

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．



遠ざかるとき　**低い音**

近づくとき　**高い音**

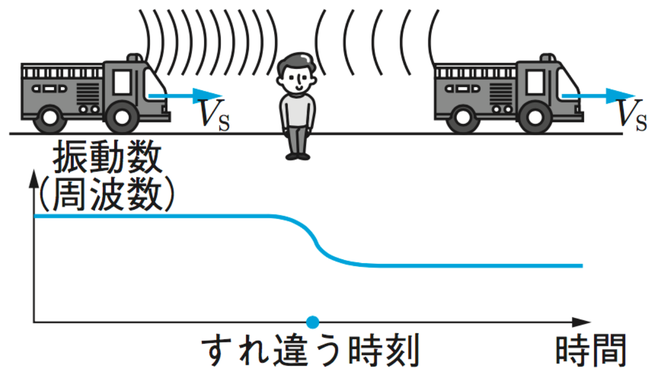
ドップラー効果

- 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，

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

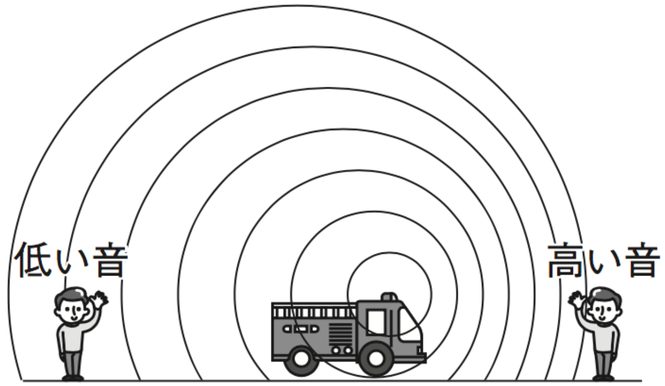
が成り立つ．V_O と V_S の前の符号 $(+, -)$ は，互いに近づくときの符号である．互いに離れるときは符号を逆にすればよい．

- 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．



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．



遠ざかるとき　**近づくとき**

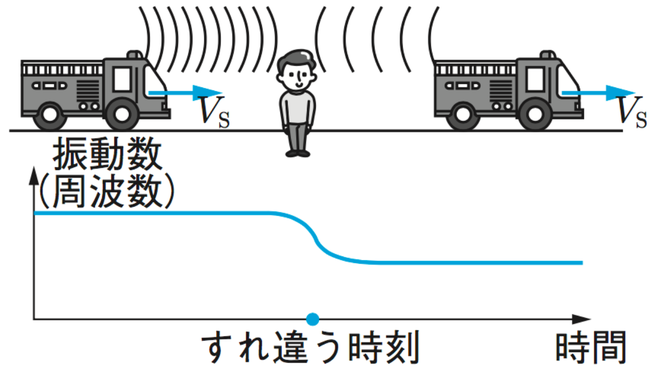
低い音　**高い音**

ドップラー効果，初めて聞きました。

救急車のサイレンがだんだん小さく聞こえること？

救急車の音へやつ…？

[2-3]
音や光などの波が、観測者と波源の相対的な運動によって周波数が変わって聞こえる現象．
救急車みたいな．

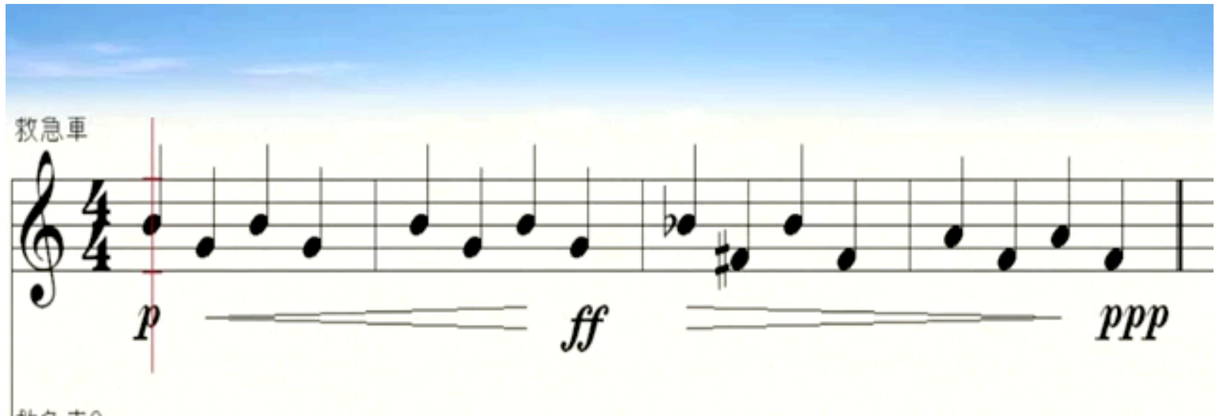


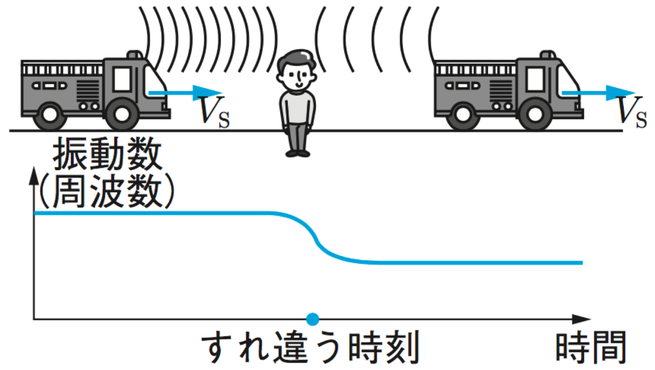
ドップラー効果



近づくとき
高い音
大きい音に

遠ざかるとき
低い音
小さい音に





ドップラー効果

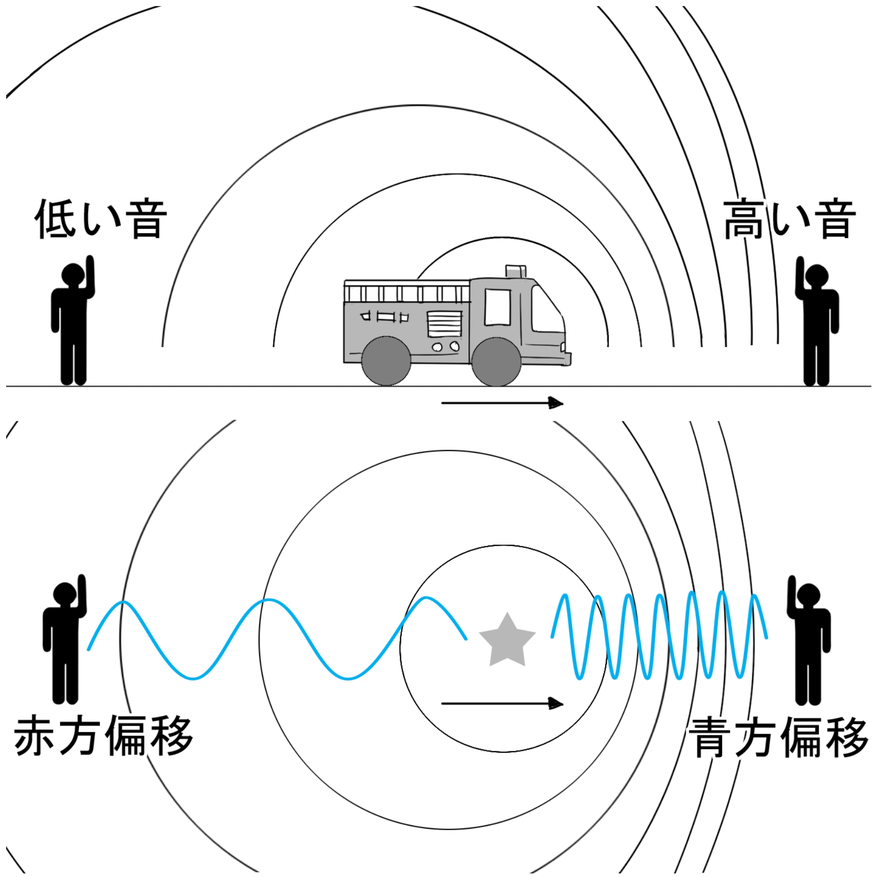
ドップラー効果

- 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，

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

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．

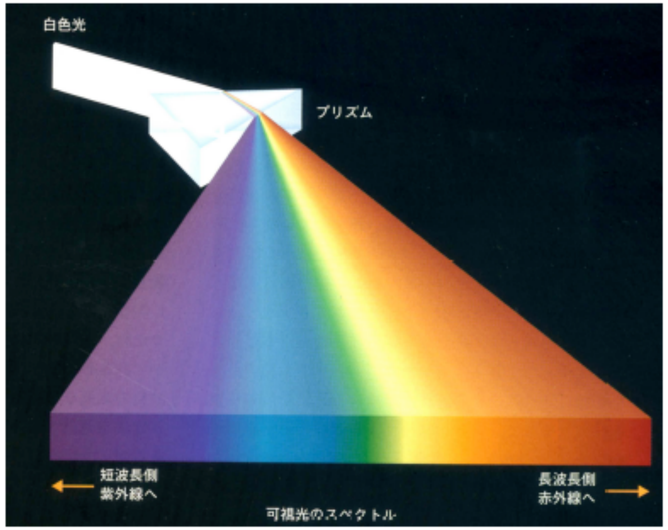
- 互いに近づくとき，音の周波数は大きくなり（すなわち音は高くなり），遠ざかるときは音は低い音に変化する．



音源と観測者が相対的に近づく
＝音が高くなる

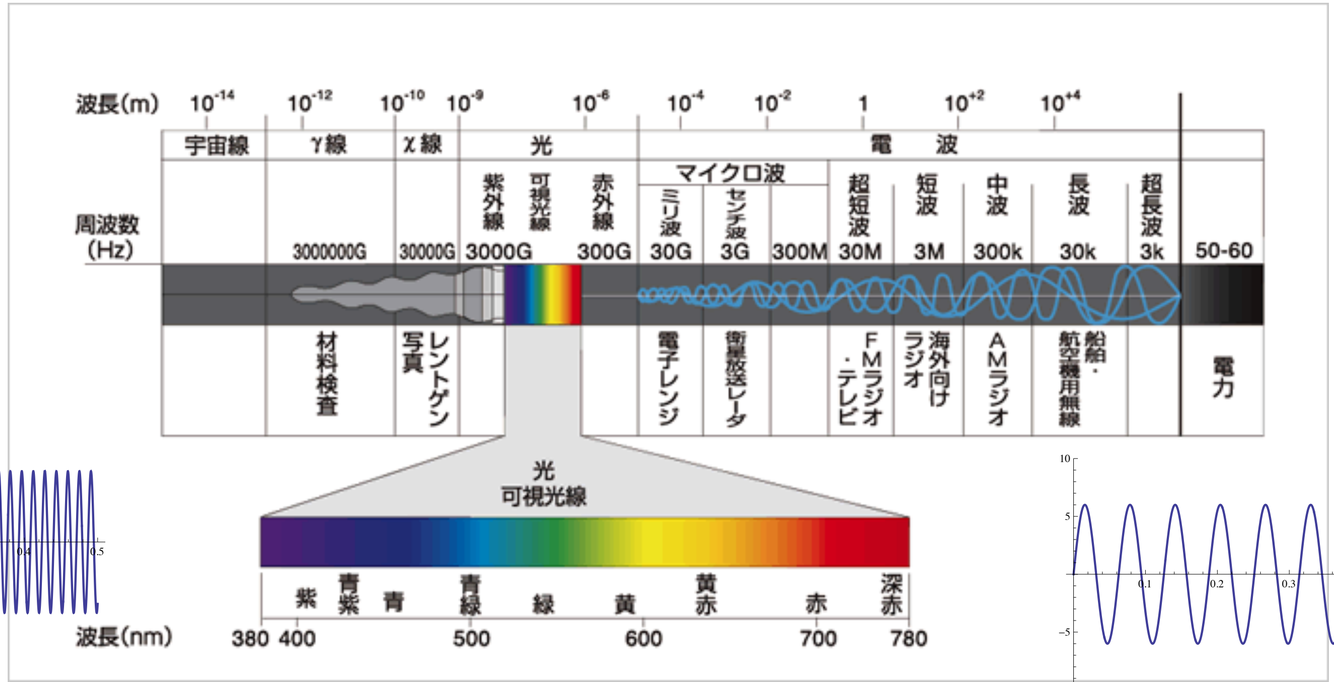
音源と観測者が相対的に遠ざかる
＝音が低くなる

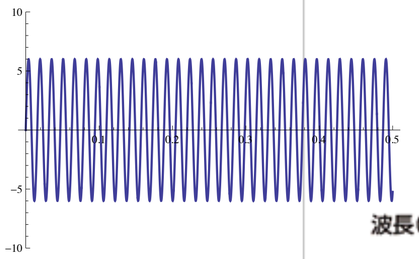
光の色＝振動数



●電磁波の分類

名称		波長（振動数）	おもな利用例
γ線		1×10^{-10}m 以下	食品照射，医療
X線		1×10^{-11} ～ 1×10^{-8}m	X線写真，医療
紫外線		1×10^{-9} ～ 3.8×10^{-7}m	殺菌，化学作用の利用
可視光線		3.8×10^{-7} ～ 7.7×10^{-7}m	光学器械
赤外線		7.7×10^{-7} ～ 1×10^{-3}m	赤外線写真，暖房
電波	マイクロ波	10^{-4}～1m　(3×10^{8}～3×10^{12}Hz)	携帯電話，電子レンジ
	超短波	1 ～10m　(3×10^{7}～3×10^{8}Hz)	FM ラジオ放送，テレビ放送
	短波	10 ～10^{2}m　(3×10^{6}～3×10^{7}Hz)	短波ラジオ放送
	中波	10^{2}～10^{3}m　(3×10^{5}～3×10^{6}Hz)	AM ラジオ放送
	長波	10^{3}～10^{4}m　(3×10^{4}～3×10^{5}Hz)	飛行機の通信，電波時計
	超長波	10^{4}～10^{5}m　(3×10^{3}～3×10^{4}Hz)	





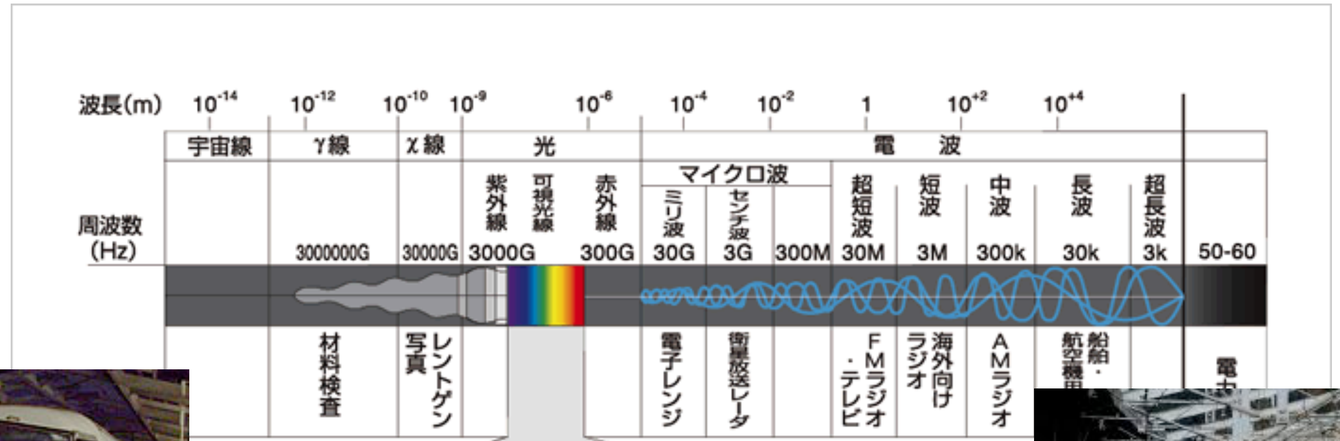
光のドップラー効果

音源と観測者が相対的に近づく

　＝音が高くなる　　＝色が青くなる

音源と観測者が相対的に遠ざかる

　＝音が低くなる　　＝色が赤くなる









The Doppler Effect (2:00)

http://www.youtube.com/watch?v=Kg9F5pN5tll

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．

ハッブルの宇宙膨張の法則（1929 年）

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

銀河の後退速度 ＝ ハッブル定数 H_0 × 銀河までの距離

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)



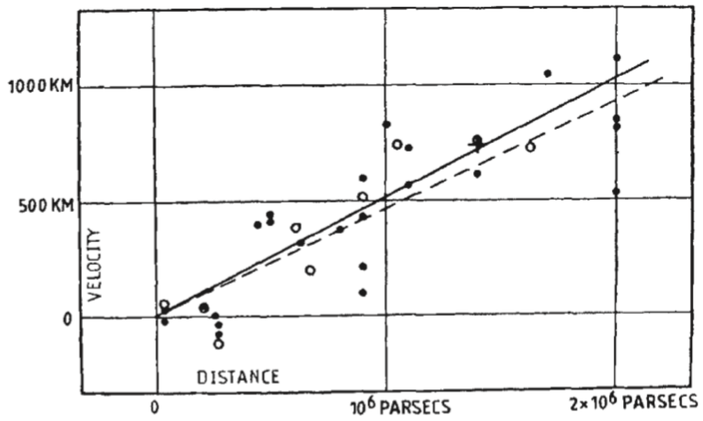


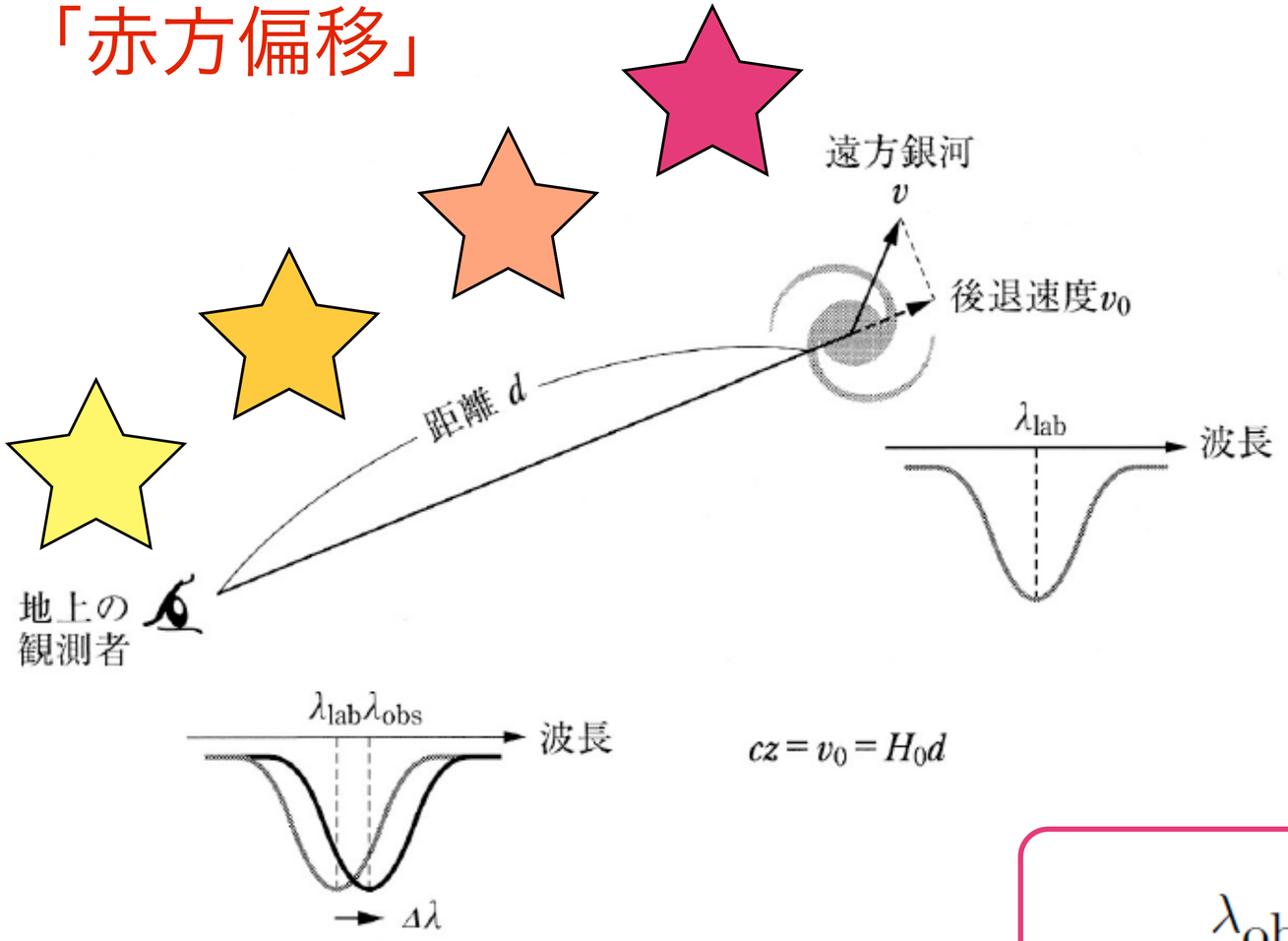
図 5.7　ハッブルが 1929 年に発表した図．横軸は距離，縦軸は銀河の後退速度．このグラフの傾きがほぼ一定になることが，ハッブルの法則である．ハッブルが報告した値は，$H_0 = 530\,\mathrm{km/s/Mpc}$ だった．現在値は $H_0 = 68\,\mathrm{km/s/Mpc}$.

光の「ドップラー効果（赤方偏移）」から

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
教科書 p210

光の「赤方偏移」



$cz = v_0 = H_0 d$

赤方偏移パラメータ

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

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

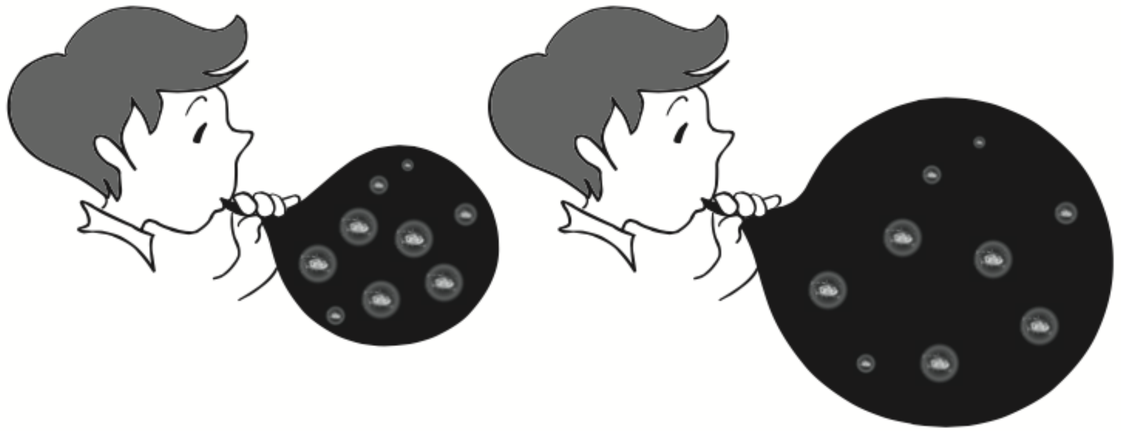


図42　遠方の銀河ほど速く遠ざかっている、というハッブルの法則は、我々が宇宙の中心にいることを意味するわけではない。

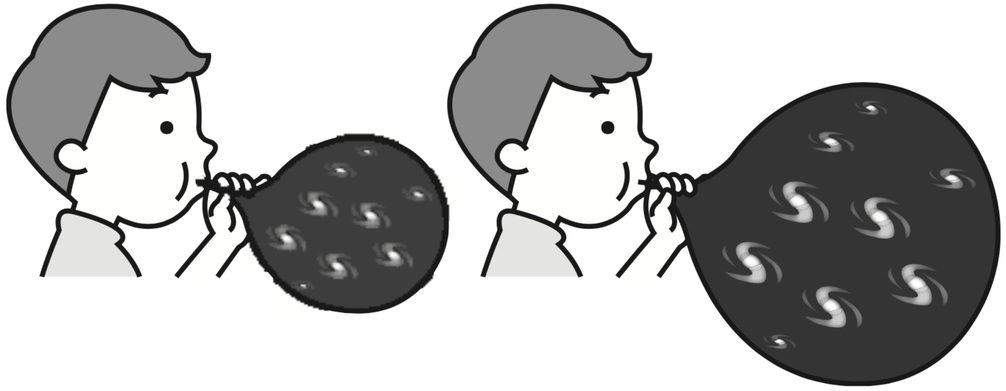
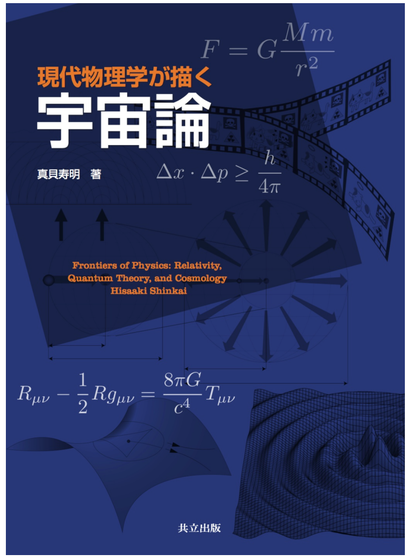


図 5.8　宇宙の中心はどこ？

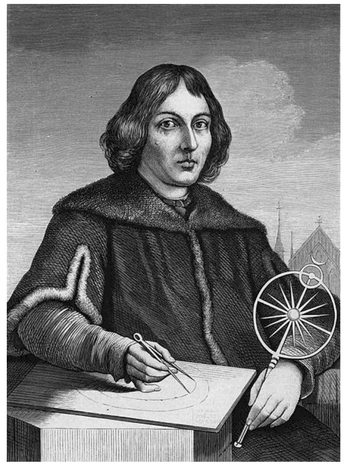




近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス

Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



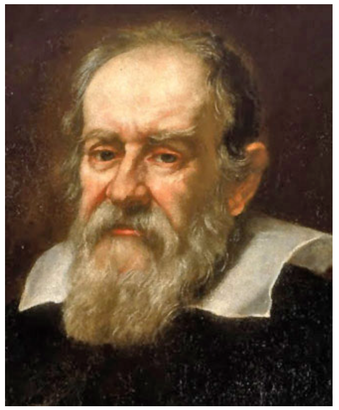
ケプラー

Johannes Kepler
(1571-1630)



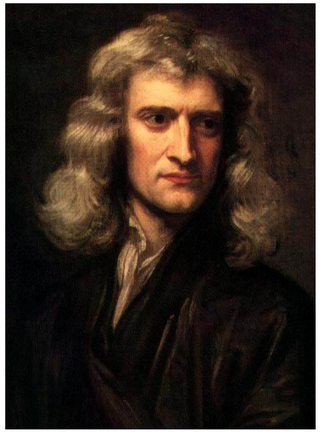
ガリレイ

Galileo Galilei
(1564-1642)



ニュートン

Isaac Newton
(1642-1727)

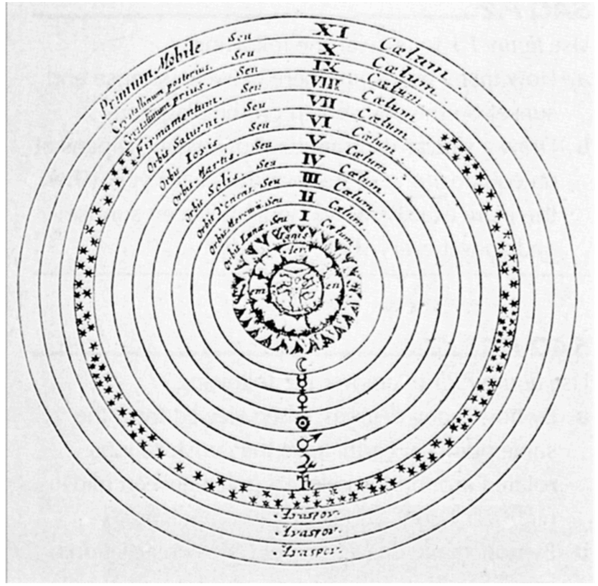


2.1 コペルニクス以前の宇宙観

地球中心説（天動説）

Claudius Ptolemaeus
83年頃 - 168年頃

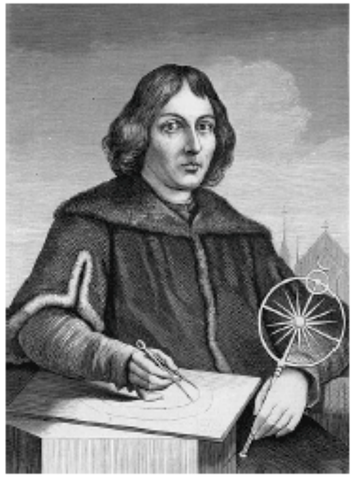


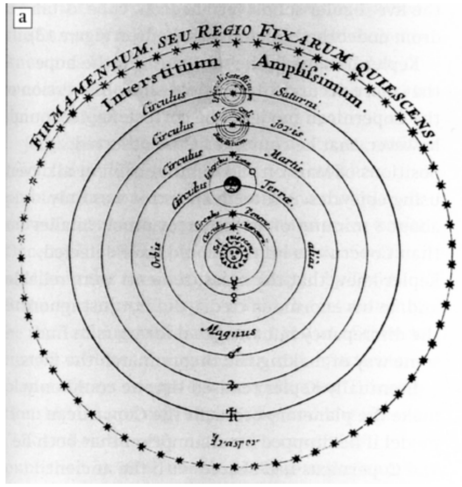


2.1 コペルニクス以降の宇宙観

太陽中心説（地動説）

Nicolaus Copernicus
(1473–1543)





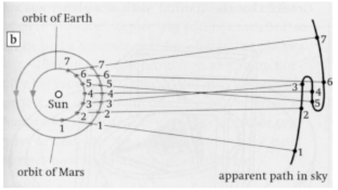
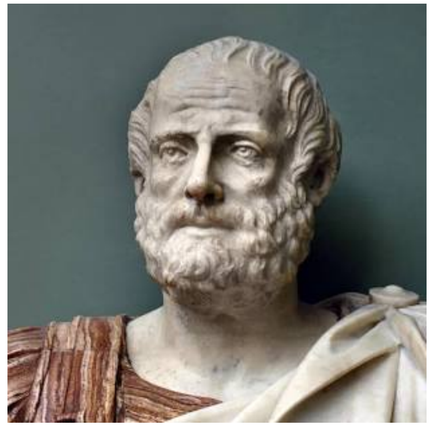


図 13: コペルニクスによる天球図（地動説）．火星の位置が逆行することが自然に説明できることが述べられている．([1] より)

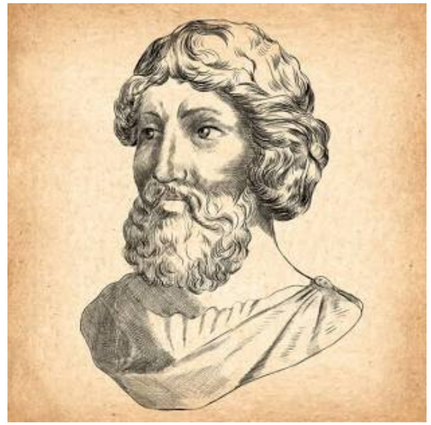
2.1 コペルニクス以前の宇宙観



■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。



■アリスタルコス（紀元前3世紀）：

古代の地動説（太陽中心説）

異端の説

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。

2.1 コペルニクス以前の宇宙観

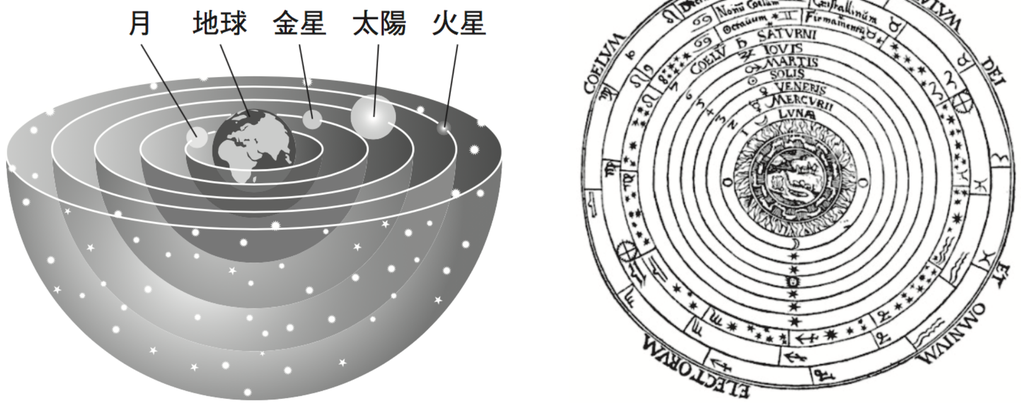
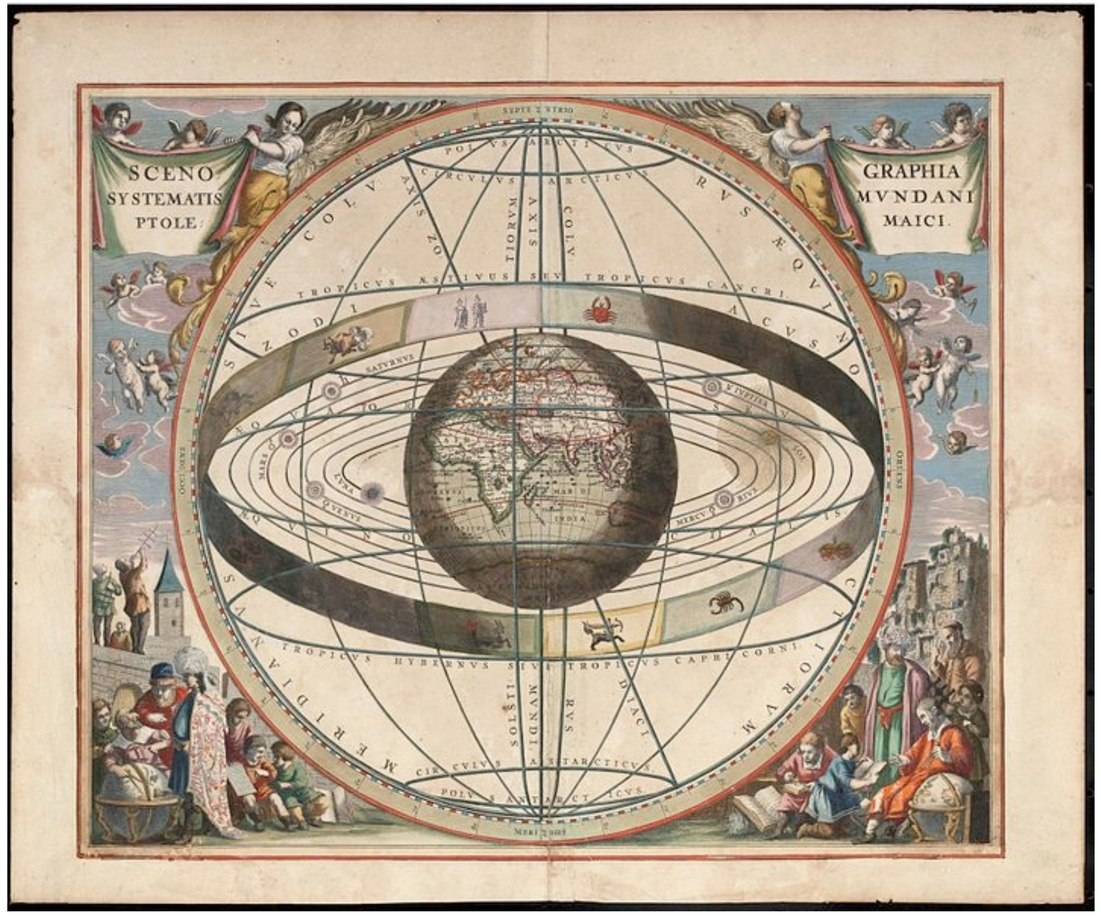


図 2.2 〔左〕アリストテレスの天球モデル．〔右〕Peter Apian 著の Cosmographia (1539) に描かれたアリストテレスの天球モデルの説明図．



地球中心説

プトレマイオス(2c)

2026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

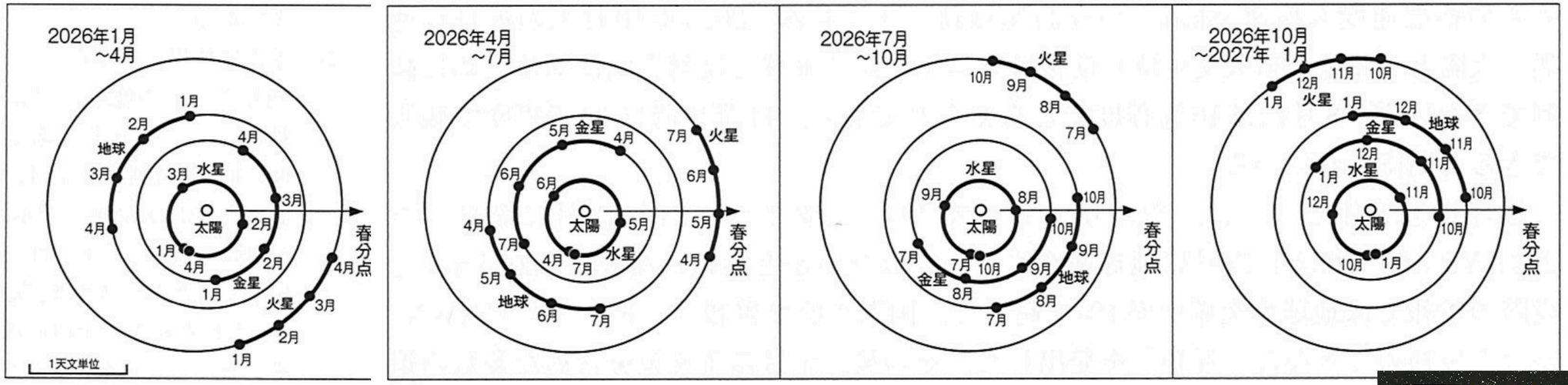


図２　3ヵ月ごとの内側惑星の動き　・印は毎月1日の位置

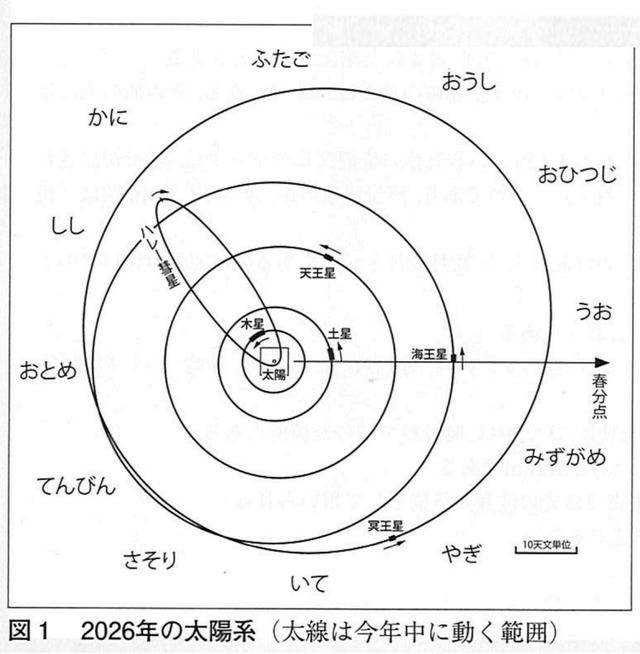
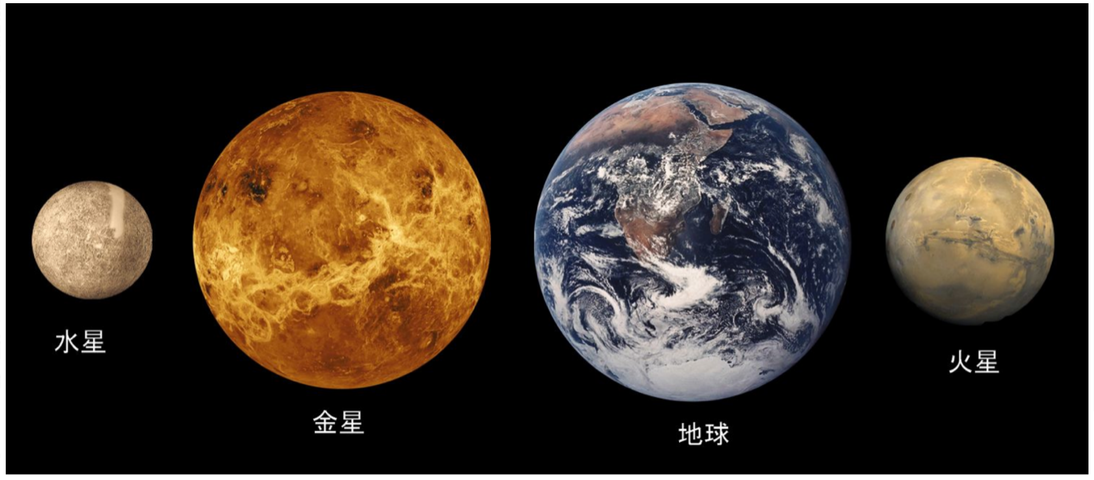
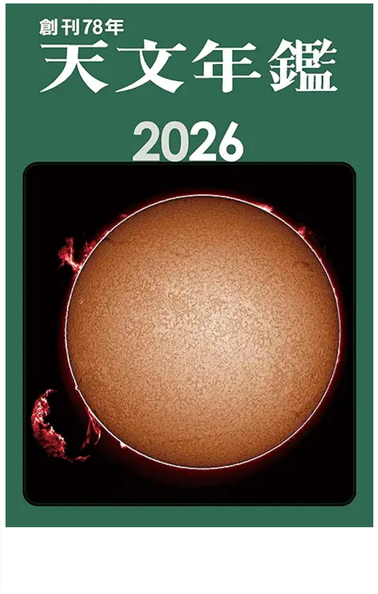


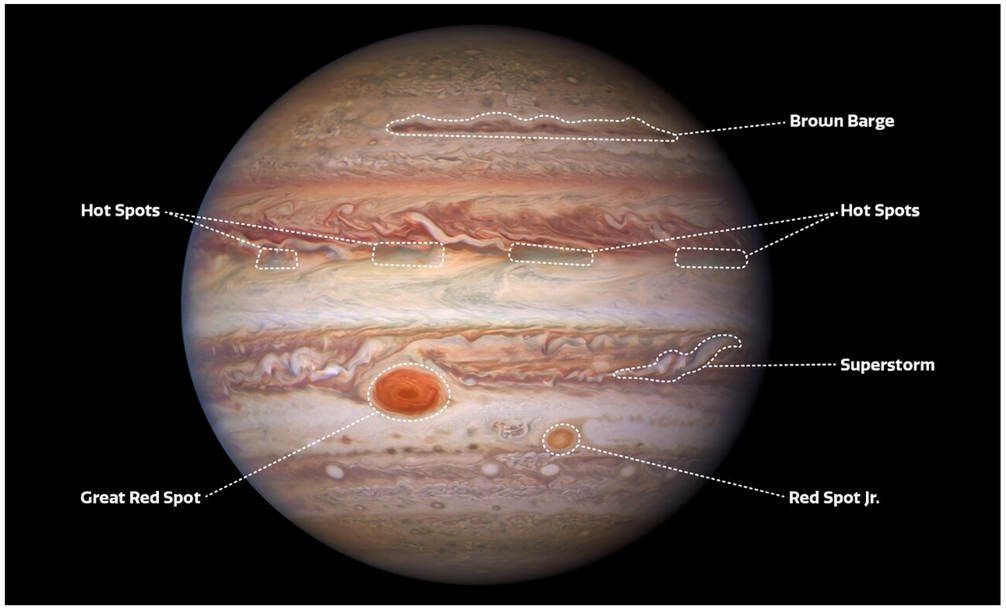
図１　2026年の太陽系（太線は今年中に動く範囲）

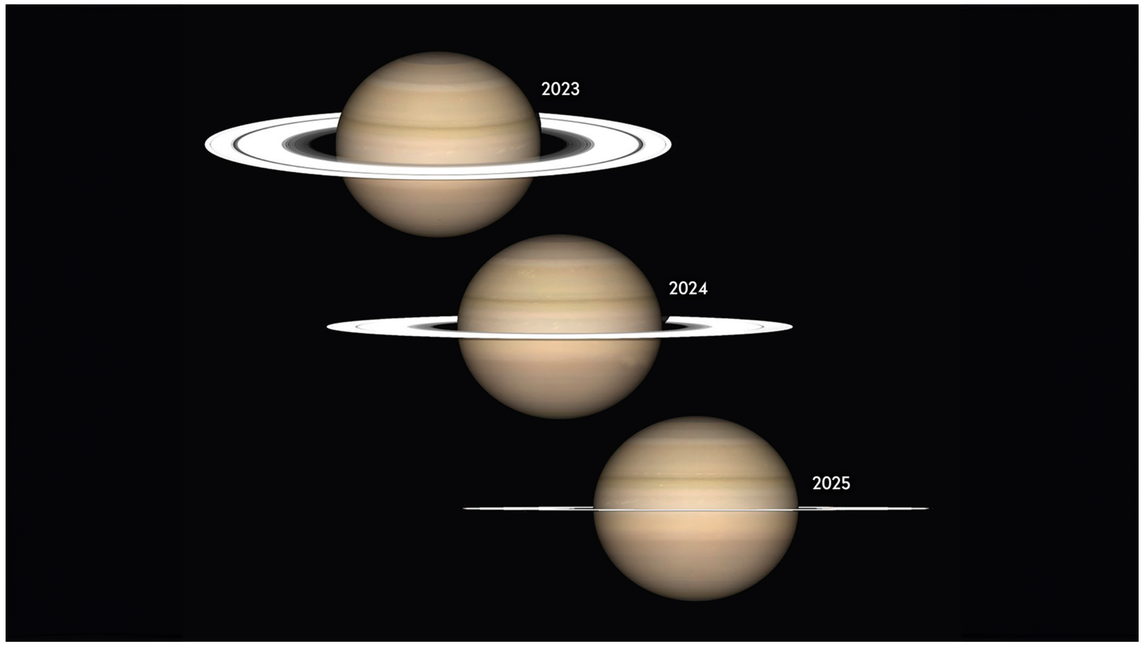






2026年の木星・土星





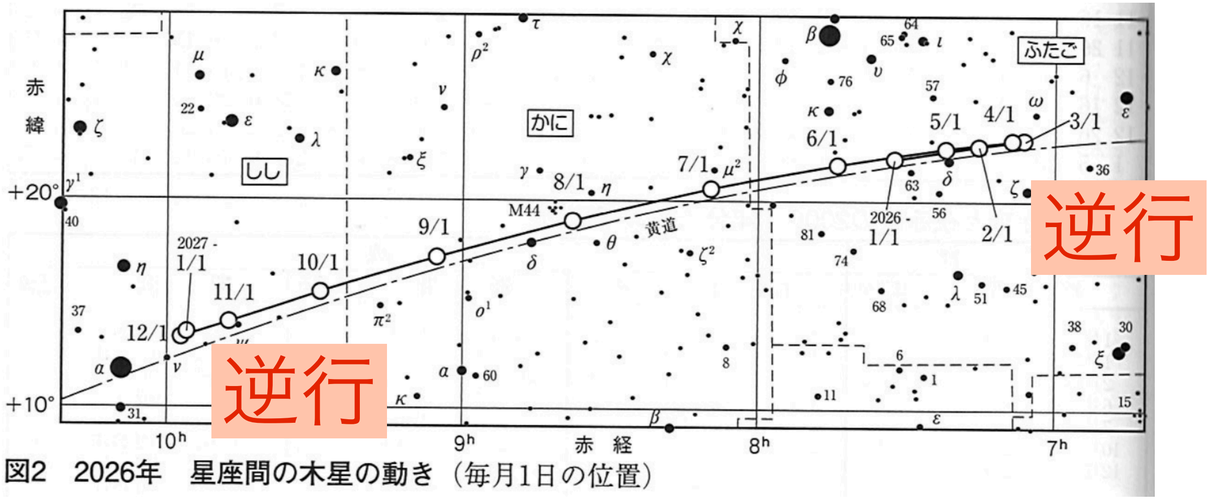


図2　2026年　星座間の木星の動き（毎月1日の位置）

現在よく見えている. 2026年は初夏まで.

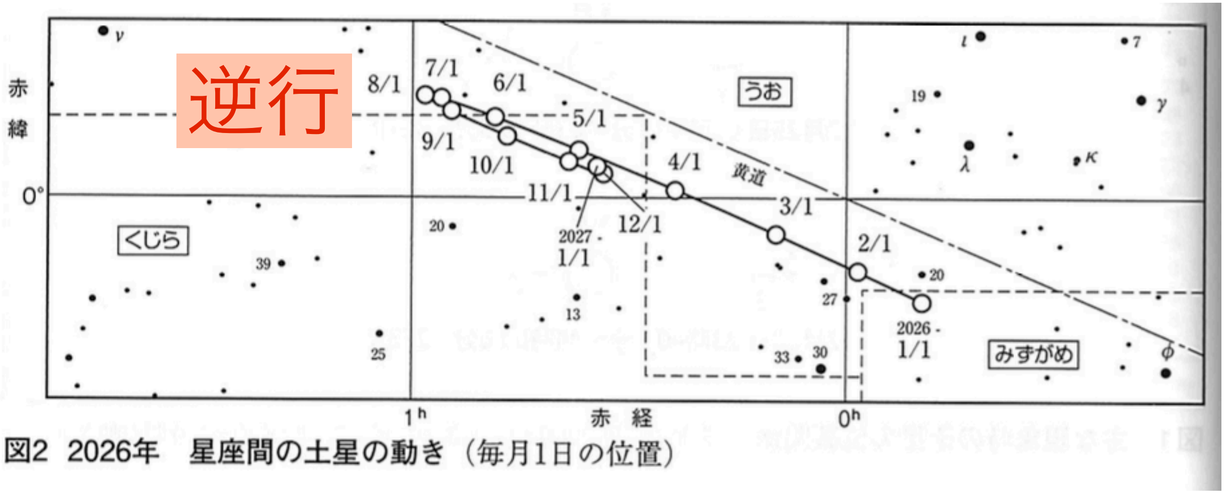


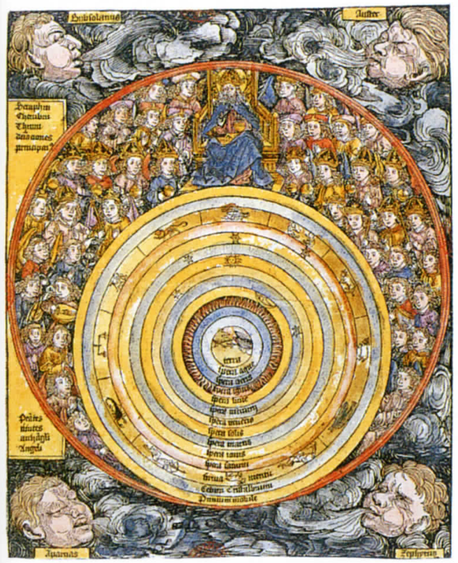
図2　2026年　星座間の土星の動き（毎月1日の位置）

2026年は夏以降に見える. 土星の輪は見えはじめる

プトレマイオス(2c) 惑星の逆行は，周天円で説明できる

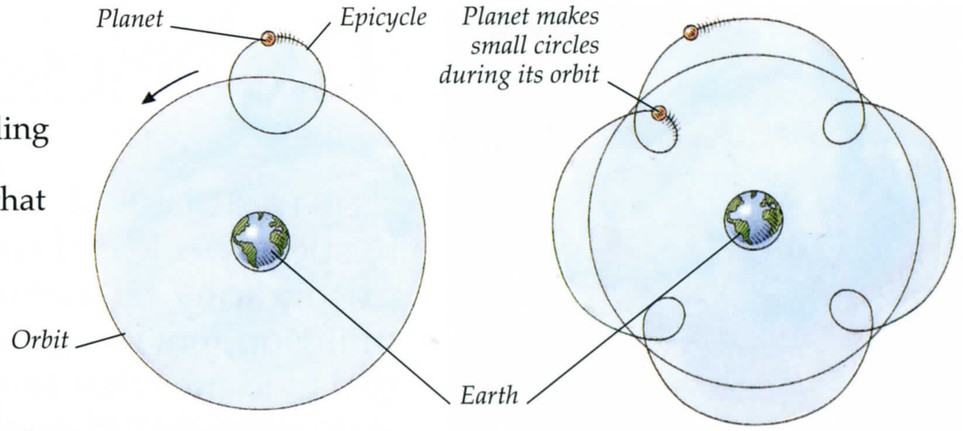
Geocentric Universe

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.

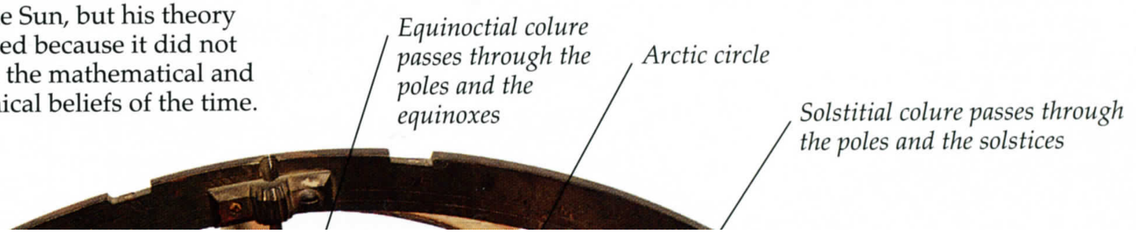


Engraving (1490) of the Ptolemaic Universe

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.

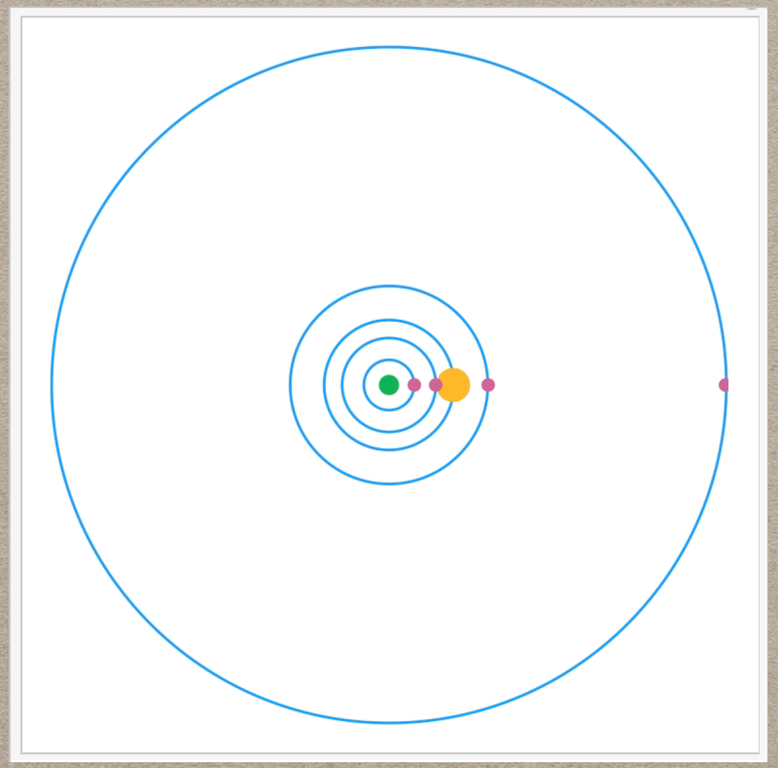


PROBLEMS WITH THE GEOCENTRIC UNIVERSE
The main problem with the model of an Earth-centred Universe was that it did not help to explain the apparently irrational behaviour of some of the planets, which sometimes appear to stand still or move backwards against the background of the stars (p. 19). Early 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.

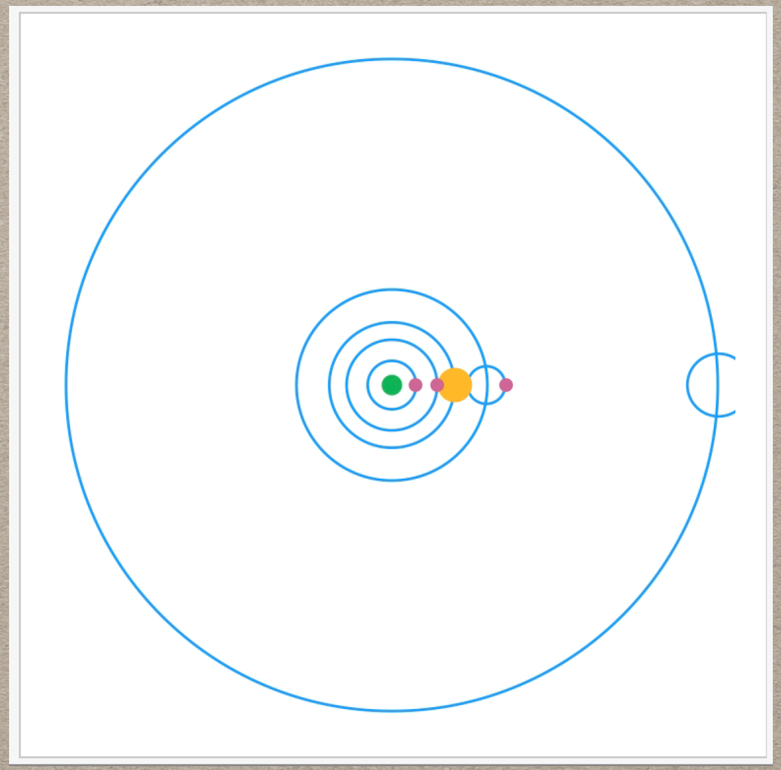


地球中心説（天動説）

周天円（epicycles）



天動説



天動説＋周天円

Claudius Ptolemaeus

克劳狄斯 托勒密

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)

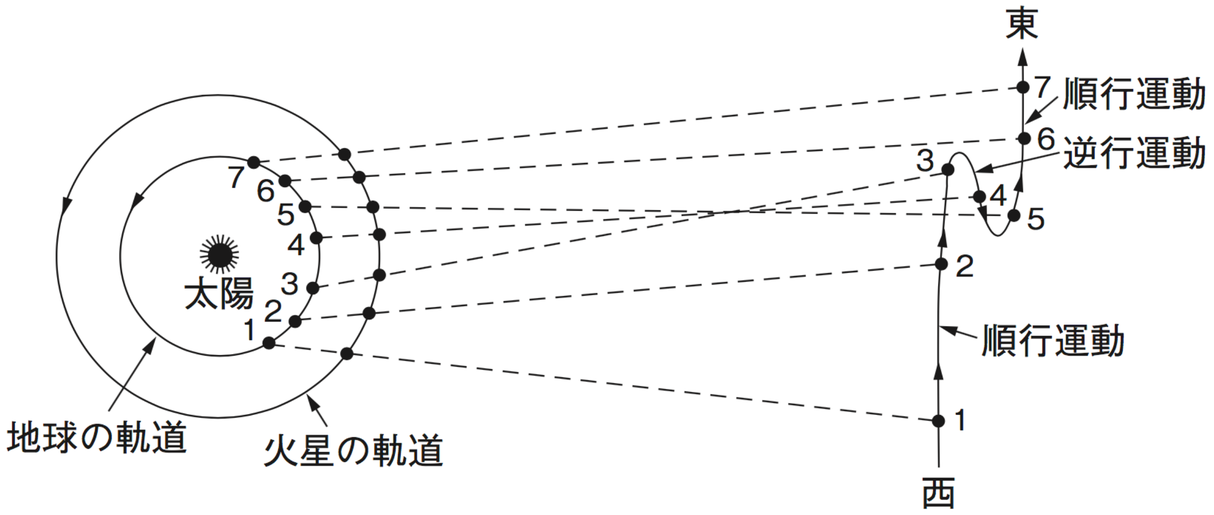


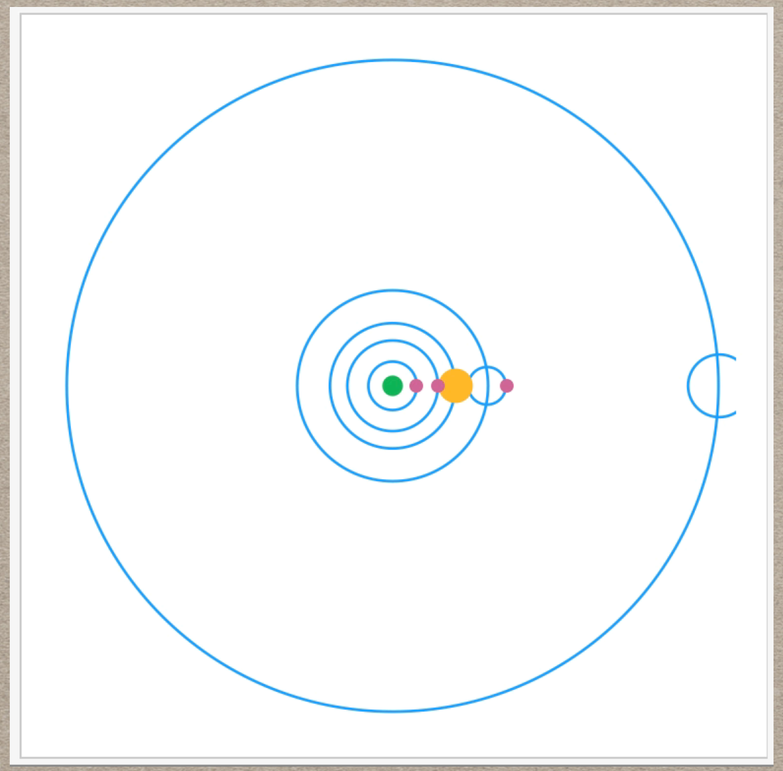
図 2.5 地動説では，火星が逆行することが自然に説明できる．


NICOLAI
COPERNICI TO-
RINENSIS DE REVOLVTIONI-
bus orbium cœlestium,
Libri VI.
IN QVIBVS STELLARVM ET FI-
XARVM ET ERRATICARVM MOTVS, EX VETE-
ribus atq recentibus observationibus, restituit hic autor.
Præterea tabulas expeditas luculentasq addidit, ex quibus eosdem motus ad quodeis tempus Mathe-
matum studiosus facillime calcu-
lare poterit.
ITEM, DE LIBRIS REVOLVTIONVM NICOLAI
Copernici Narratio prima per M. Georgium Ioachi-
mum Rheticum ad D. Ioan. Schonerum scripta.
Cum Gratia & Priuilegio Cæs. Maiest.
BASILEAE, EX OFFICINA
HENRICPETRINA

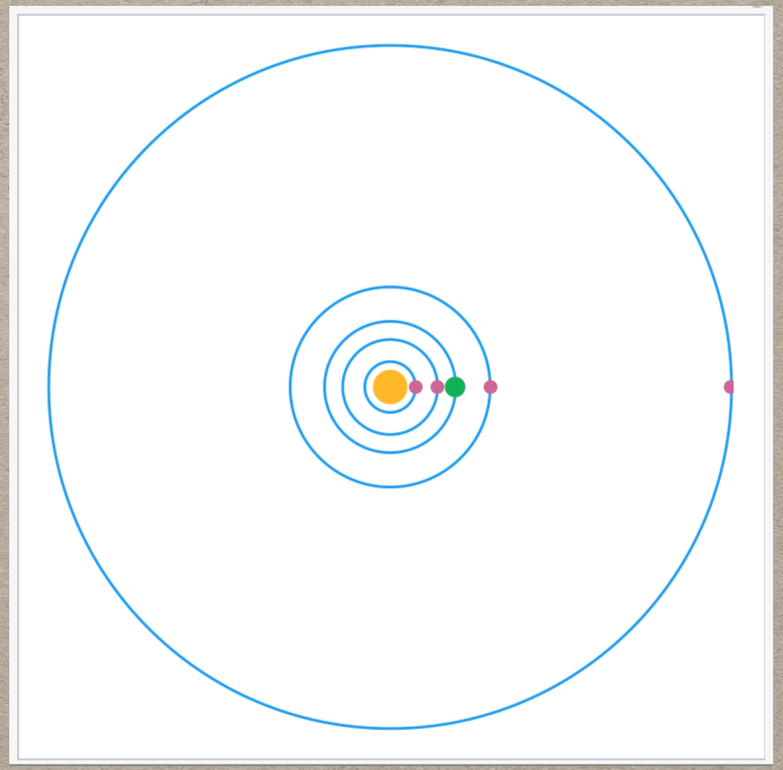
NICOLAI COPERNICI
ner, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum denique locum Mercurius tenet, octuagesima dierum spacio circũ currens. In medio vero omnium residet Sol. Quis enim in hoc
Sol.
pulcherimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco po neret, quàm unde totum simul possit illuminare? Siquidem non inepte quidam lucernam mundi, alij mentem, alij rectorem uocant. Trimegistus uisibilem Deum, Sophoclis Electra intuentẽ omnia. Ita profecto tanquam in solio re gali Sol residens circum agentem gubernat Astrorum familiam. Tellus quoq; minime fraudatur lunari ministerio, sed ut Aristoteles de animalibus ait, maximã Luna cũ terra cognationẽ habet. Concipit interea à Sole terra, & impregnatur annuo partu. Inuenimus igitur sub hac

『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」

異端の説

本日のミニッツペーパー記入項目

出席票を兼ねます.

【3-1】レポート課題のトピック, 何と何を調べようと考えましたか？（第一印象で）

太陽系内惑星探査, 太陽系外惑星探査, 地球外知的生命体探査, 宇宙生物学

【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, [A] の関係が成り立つ.

【3-3】ドップラー効果とは, 観測者と音源が相対的に動くと音の [B] が変化する現象である.

互いに近づくと音の [B] は [C] 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] と なるので, 本来の色より [E] 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**

【3-4】質問, 感想, その他のコメントなど