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

第5回　2024/10/21

第2章　近代物理学の夜明け（2）

真貝　寿明
Hisaaki Shinkai

「神戸ハーバーランドの
mosaicの壁で
発見しました」

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

レポート課題締め切り10月31日　詳細は前々回プリント配布

紫金山・アトラス彗星が10月中旬夕方見頃

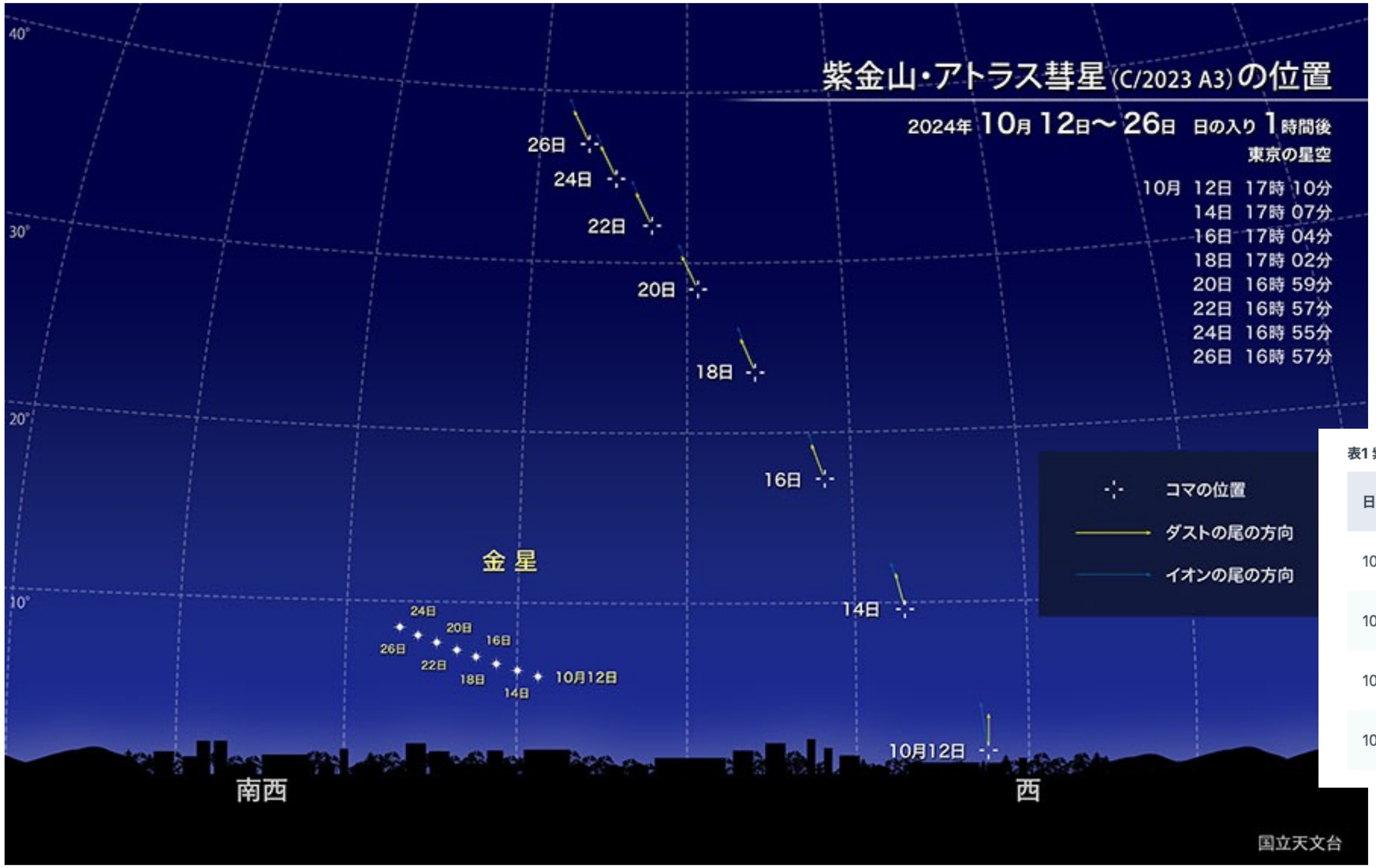
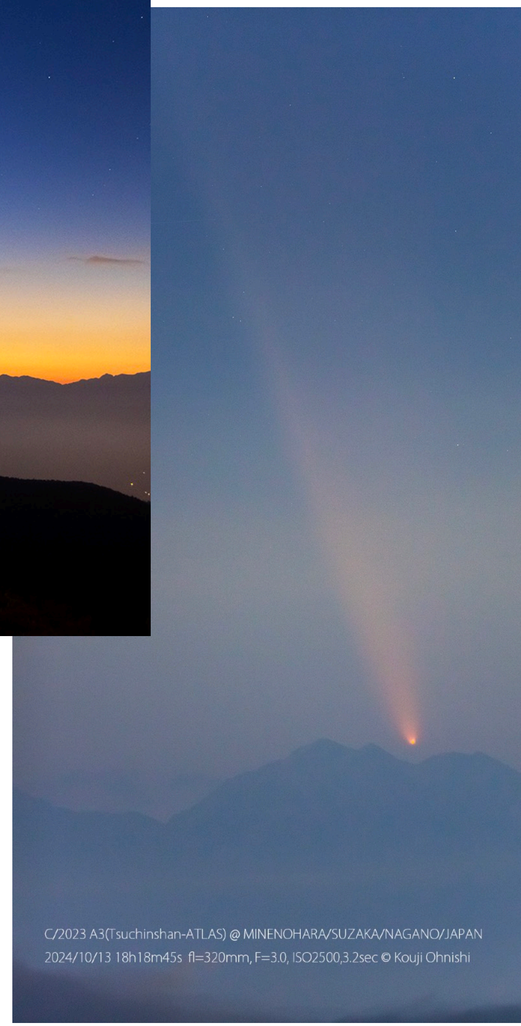


表1 紫金山・アトラス彗星の位置と明るさ（日の入り1時間後、東京の場合）

日付	時刻	方位と地平高度	明るさ
10月12日	18時09分	西1度	1.5～2.5等
10月13日	18時08分	西5度	1.5～3等
10月14日	18時06分	西10度	1.5～3等
10月15日	18時05分	西14度	1.5～3等

https://www.nao.ac.jp/astro/sky/2024/10-topics05.html

紫金山・アトラス彗星が10月中旬夕方見頃



大西 浩次
お気に入り · 3日前 ·

#今日の星景写真 2024年10月14日
「夕暮れの空の紫金山・アトラス彗星 I」
撮影:2024/10/13
#須坂市

夕暮れの空に金星が輝いていた。
その右横に #紫金山・アトラス彗星 が輝いているはずだ。
薄明の中、目を凝らすとなにか見える。
見えるはずがないと思いつつ、
望遠鏡のファインダーで彗星を探すと
その天体が彗星だとわかる。
気づくと肉眼で長い尾がみえる
ああ、いつの間にか、大彗星となっていたんだ！

大西 浩次
お気に入り · 3日前 ·

#今日の星景写真 2024年10月14日
「夕暮れの空の紫金山・アトラス彗星 II」
撮影:2024/10/13
#須坂市

夕暮れの空 #紫金山・アトラス彗星 が輝いていた。
気づくと肉眼で長い尾がみえる！
ああ、いつの間にか、大彗星となっていたんだ！

PS:尾の長さ、肉眼では20°超えと見えたが、
写真では10°弱。強い残照の中での見え方の違いか？

紫金山・アトラス彗星が10月中旬夕方見頃

大西 浩次
お気に入り · 20時間前 ·

#今日の星景写真 2024年10月16日
「紫金山・アトラス彗星の長い尾」
撮影:2024/10/15
#小川村

#紫金山・アトラス彗星 が長い尾を見せている。
昨日速報で紹介したが、
これは、別のカメラで撮影したもの。
20度を超える尾があるのだろう。
週末以降が楽しみだ。

大西 浩次
お気に入り · 20時間前 ·

#今日の星景写真 2024年10月16日
「紫金山・アトラス彗星のビームが照らす鹿島槍ヶ岳」
撮影:2024/10/15
#小川村

#紫金山・アトラス彗星 が長い尾を見せている。
よく見ると、コマからビームのような細い尾が見えている。
#アンチテール と言われているが、「#ネックライン構造」だろう。
このビームが #鹿島槍ヶ岳 に当たる（いや、月あかりだ）。

【宇宙工学】
【惑星探査】

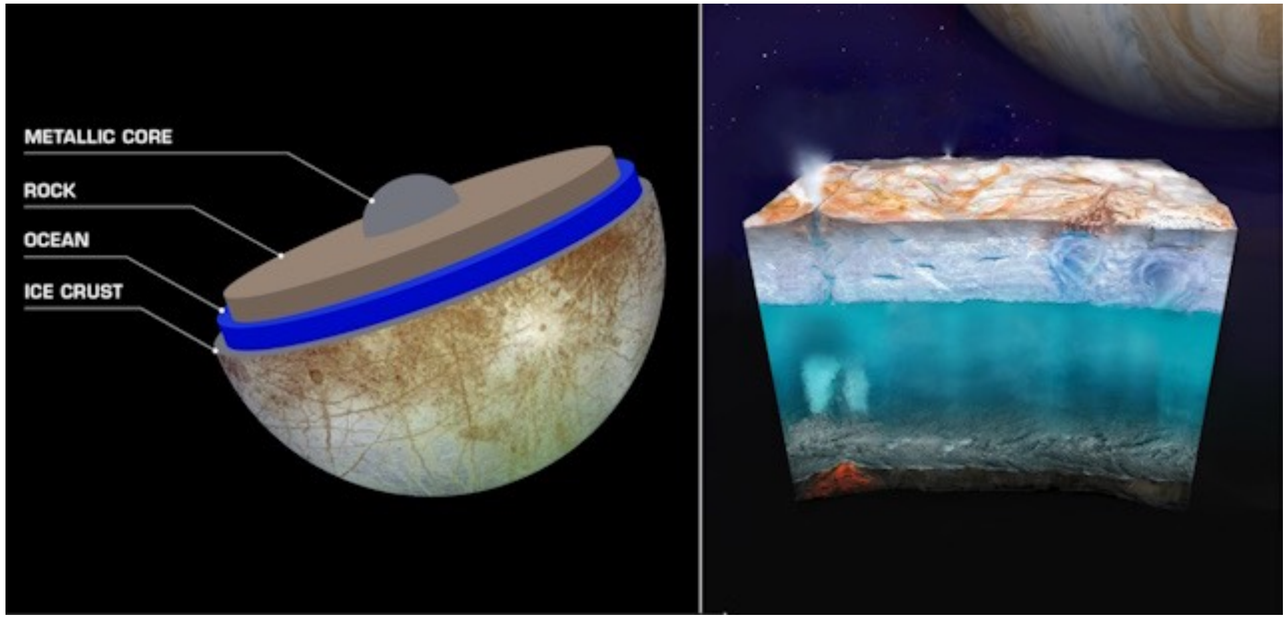
木星の衛星を探査、「エウロパ・クリッパー」打ち上げ成功

Liftoff! NASA’s Europa Clipper Sails Toward Ocean Moon of Jupiter

NASAの探査機「エウロパ・クリッパー」が10月15日にスペースX社のファルコンヘビーロケットによって打ち上げられた. 木星の衛星エウロパの表面下にある海などを調べ, 生命に適した環境の有無を探る.

エウロパ・クリッパーは来年2月に火星スイングバイ, 2026年1月に地球スイングバイをそれぞれ実施し, 約5年半に及ぶ29億kmもの旅の末に2030年4月に木星系に到着する. その後, 2031年から4年間かけてエウロパへの接近飛行を49回実施し, 最接近時は地表からわずか25km上空を通過して, 分光計やレーダー, 磁力計など9つの観測機器を使って衛星全体を調べる.

エウロパ・クリッパーが目指す木星の第2衛星エウロパは, 地球の月と同じくらいの大きさの天体で, 表面は厚い氷に覆われている. その氷の殻の下には地球上の海水のおよそ2倍の塩水をたたえた内部海が存在すると考えられていて, 生命の材料となる有機物や, 生命に必須の化学エネルギー源の存在も示唆されている. さらに, 水や有機物, 化学エネルギーを持つ環境が過去40億年間安定して続いてきたとみられている. こうしたことからエウロパは, 太陽系内では地球以外で生命に適した環境の存在が最も期待できる天体の一つとなっている.



https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13736_europa_clipper
https://www.nasa.gov/news-release/liftoff-nasas-europa-clipper-sails-toward-ocean-moon-of-jupiter/

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」

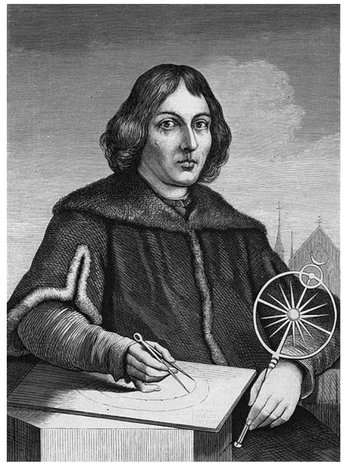
提出日・様式など

- 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（木）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．）

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

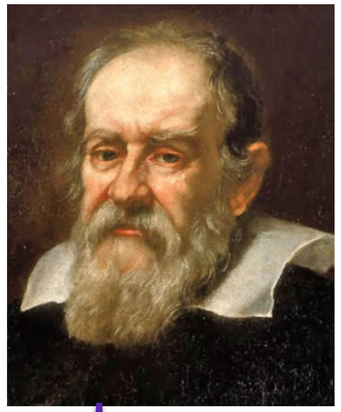
ケプラー

Johannes Kepler
(1571-1630)

惑星運動の法則

ガリレイ

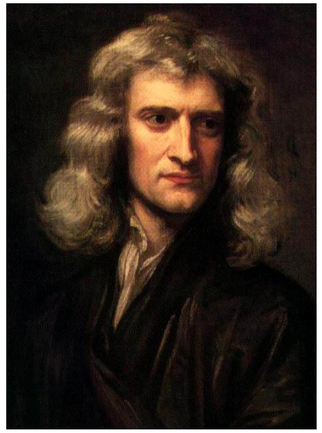
Galileo Galilei
(1564-1642)



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

前回のミニッツペーパーから

ケプラーやガリレイの時代背景について少し知ることができた。

ケプラーが、天体の軌道は楕円に回っているという仕組みを動画で見て、詳しく知ることができて良かったです。あんな難しい内容を発見できるなんてすごいなと思いました。

ガリレオ・ガリレイは 聖田永年私財法と並ぶぐらい語呂がいいと個人的に思って頭に残る言葉だったので、今回の授業でくわしく知ることが出来てうれしかったです。

ガリレオ・ガリレイの発見した説がどれもわかりやすく、現実的で快く思われなかったのが少し理解できる気がした。

どうしてキリスト教は立場が不利になったからと有罪にするほど天動説にこだわったのですか。

宗教にとって，教えにブレがないこと，権威を保つことが最重要だったのではないでしょうか．

前回のミニッツペーパーから

ブラックホールは吸いこむ ホワイトホールってあるのか
(小さい時の遊びに出てきた気がする)

よい発想ですね. ホワイトホールは, 数学的な解として存在します. なんでも吐き出す穴です.
ですが, 宇宙に存在している証拠は見つかっていません.

どのくらいブラックホールに近づけばのみこまれていくのであろ。

ブラックホールの半径の3倍以内のものはすべて飲み込まれてしまうことがわかっています.
詳しくは, 11月の講義にて.

光の「赤方偏移」などでも学習したように、星の色も
グラデーションのようになっているんだなあと思いました。
ガリレオも教会の時計をぼーっと見ていて大発見をしたので、自分も
日常のささいな出来事に発見をできたらなと思います。

星にはいろいろな色がある, ということで,
決して1つの星がグラデーションになっている
わけではないですよ.

前回のミニッツペーパーから

Netflixの「チ。ー地球の運動についてー」を見始めました。
地動説から天文学に目覚めるお話でおもしろいです。
最近配信が始まったので良かったらみてみて下さい。

「チ。ー地球の運動についてー」を見ていたのでおもしろくもけました。

「チ。」という地動説のまんがをぜひよんでみてほしいです。

専門家からは，いろいろ史実と違うことが指摘されています．
あくまでもフィクションとしてお楽しみください．

先生は「宇宙兄弟」を見たことがありますか？
私は「宇宙兄弟」を見てこの授業をとろうと思いました．
見たことがなければぜひ見てみて下さい。

前回のミニッツペーパーから

解明までに何百日・何千日かかっていると思うのですが、途中で研究者が死んでしまった場合どうするのでしょうか。

誰かが引き継ぐか, 忘れ去られるかですね.

電車にいる蚊が電車と同じ速度で飛んでいるのか、という天動説の説明がとても興味深かった。

慣性の法則ですね.

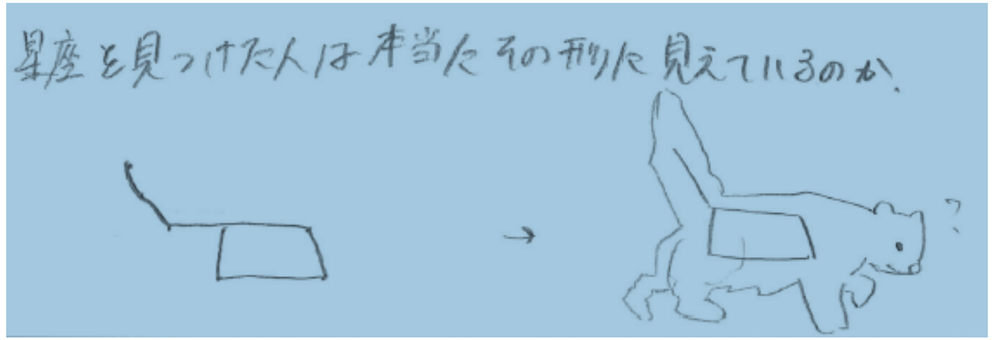
宇宙に残された謎は多くあると思います。先生は現段階で宇宙の謎は何%解明されていると考えますか？ 私は5%だと思います。

私は4%だと思います. その理由は12月の講義になりますが, 宇宙全体でわかっているもののエネルギーが4%, 正体不明なエネルギー(ダークマターや, ダークエネルギー)が96%だからです.

ロケットが上の方向に向かって動くことができる原理はなんですか。飛行機なども なぜ飛べるのか分からないです。

ロケット上昇は, ガス噴射による反作用です. 飛行機は翼の上下の風速の差で飛びます.

前回のミニッツペーパーから



RESEARCH ARTICLE

The network signature of constellation line figures

Doina Bucur*

Department of Computer Science, University of Twente, Enschede, The Netherlands

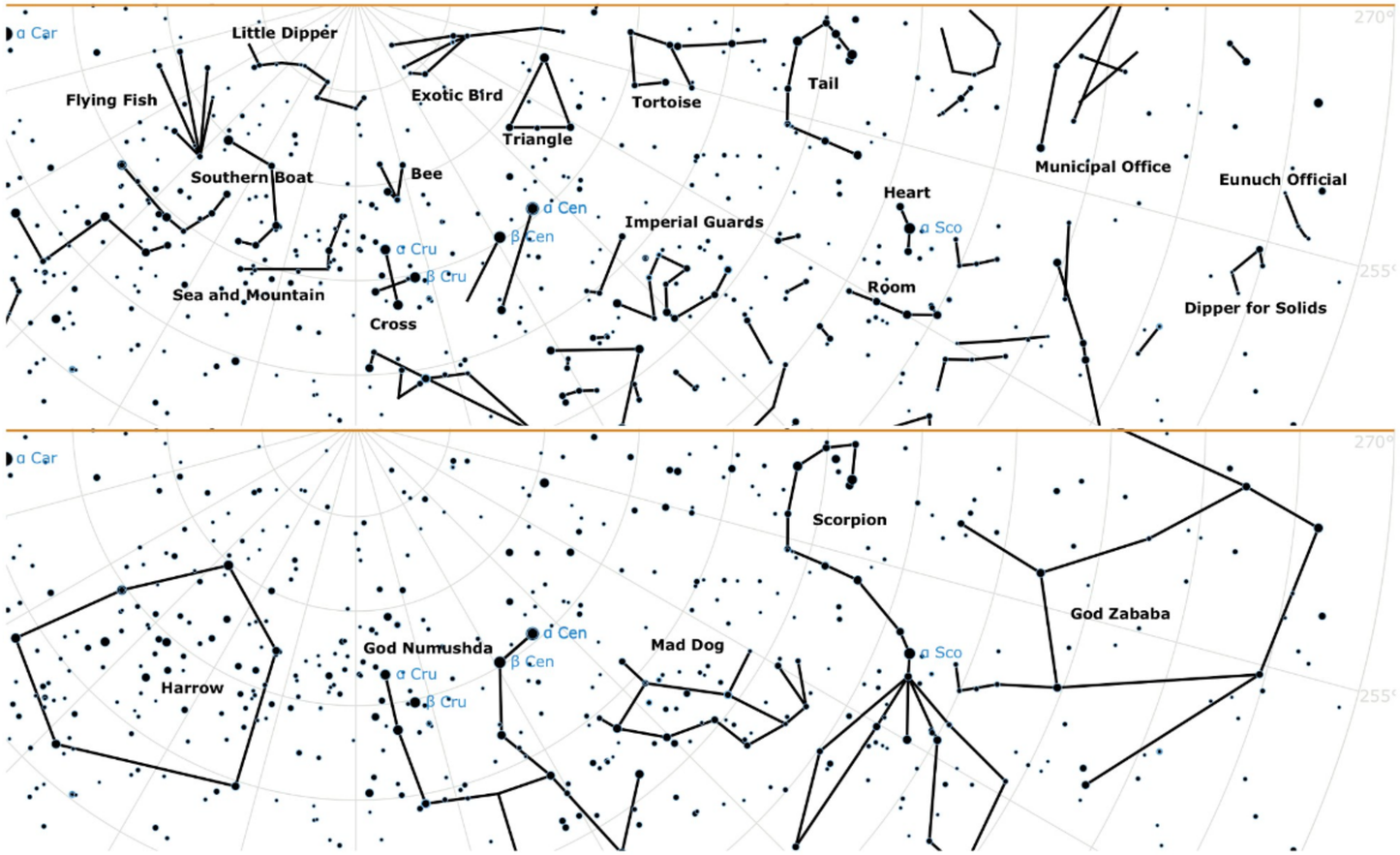


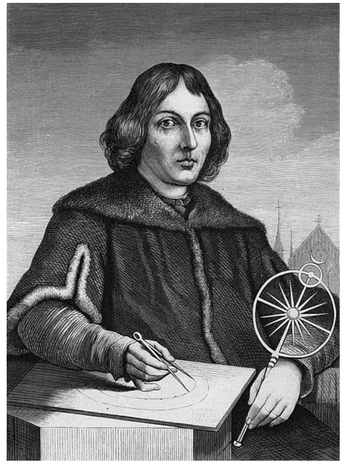
Fig 1. The diversity of constellations line figures. Traditional Chinese (top) and ancient Babylonian (bottom) constellations for the same southern sky: declinations [−90°, 20°], right ascensions [90°, 270°]. The choice of stars and lines differs. Some constellation names removed for clarity.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272270.g001

（復習）コペルニクス

コペルニクス

Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



コペルニクス的転回　地動説

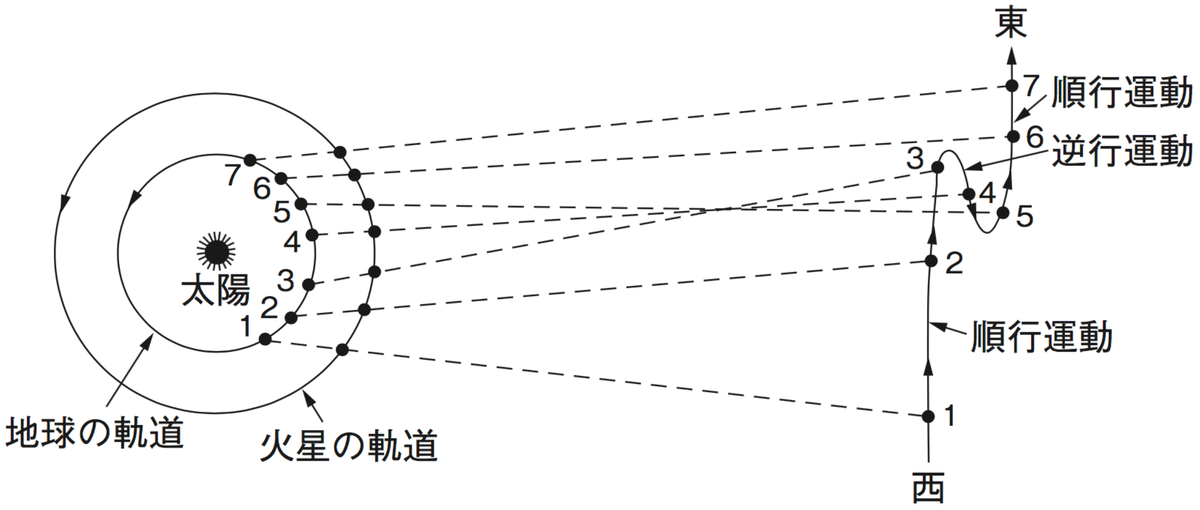


図 2.5　地動説では，火星が逆行することが自然に説明できる．

惑星の逆行運動を説明するには，地球を含めた惑星が太陽を中心に周回運動している，と考えるのがシンプルである．

2.1.2 コペルニクス『天体の回転について』(1543)

地動説 (heliocentric theory)

先日、「奇書の世界史」という本を読んだのですが、その中で、今回の講義内容(物理学の歴史)が説明されていました。それは文学的に説明されていたので、今回の講義で物理学的にそれを理解できたのではかった。

地動説がどのように唱えられたかがよくわかりました。


NICOLAI COPERNICI TORINENSIS DE REVOLVTIONIbus orbium cœlestium, Libri VI.
IN QVIBVS STELLARVM ET FIXARVM ET ERRATICARVM MOTVS, EX VETERibus atq recentibus observationibus, restituit hic autor. Praterea tabulas expeditas luculentasq addidit, ex quibus eosdem motus ad quodeis tempus Mathematum studiosus facillime calculare poterit.
ITEM, DE LIBRIS REVOLVTIONVM NICOLAI Copernici Narratio prima per M. Georgium Ioachimum Rheticum ad D. Ioan. Schonerum scripta.
Cum Gratia & Priuilegio Cæs. Maiest.
BASILEAE, EX OFFICINA HENRICPETRINA.

NICOLAI COPERNICI
net, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum denicq locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circũ currens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc pulcherimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco poneret, quàm unde totum simul posit 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．

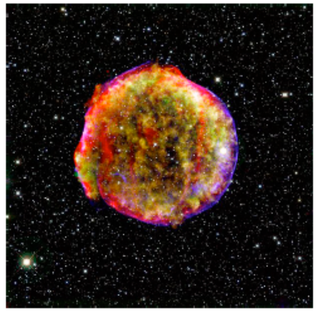
（復習）ティコ・ブラーエ

ティコ・ブラーエ

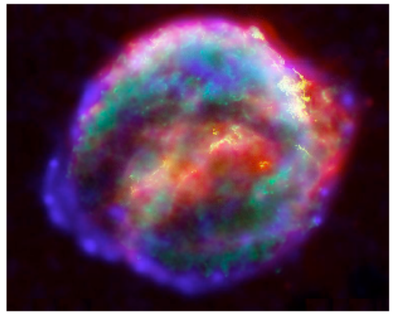
Tycho Brahe
(1546-1601)

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)



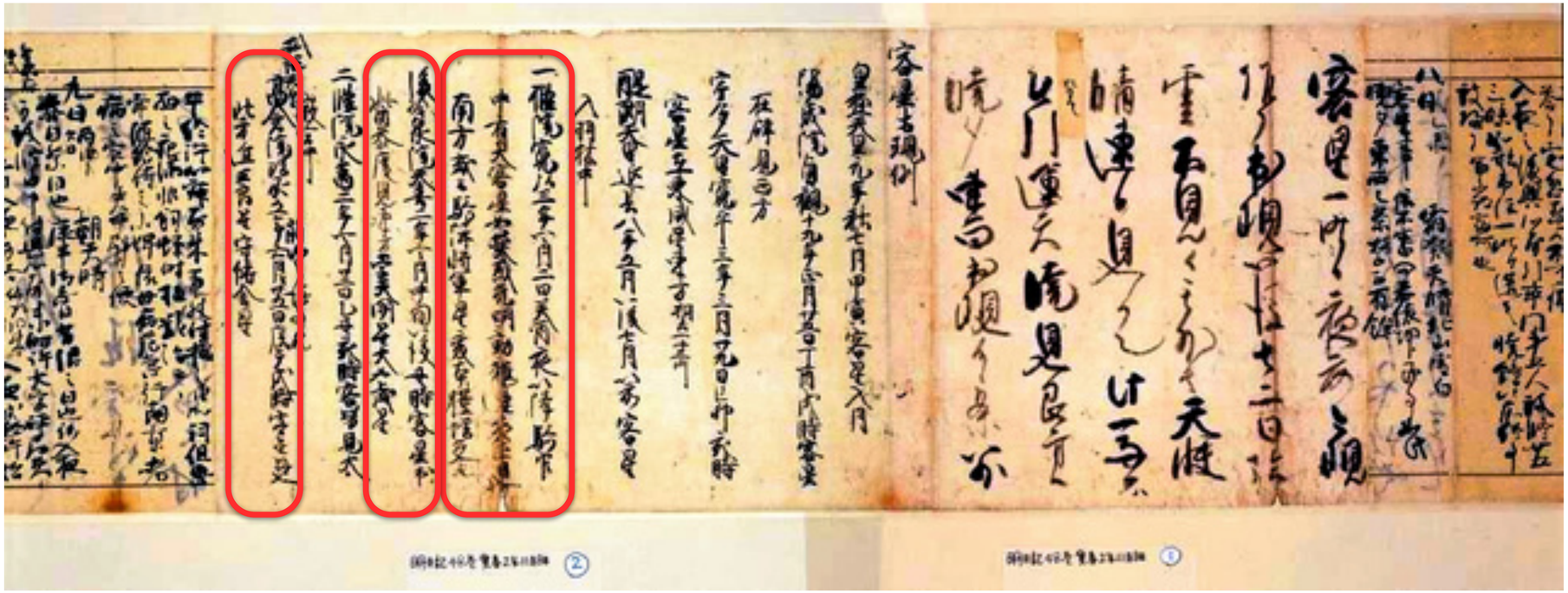
SN1604 (ケプラーの新星)

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」

昔の人は何故どの星がどれと明確に判断できたのか

「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.



1️⃣安倍清明の息子，安倍吉昌がSN1006を観測

2️⃣清明の子孫（詳細不明）がSN1054を観測

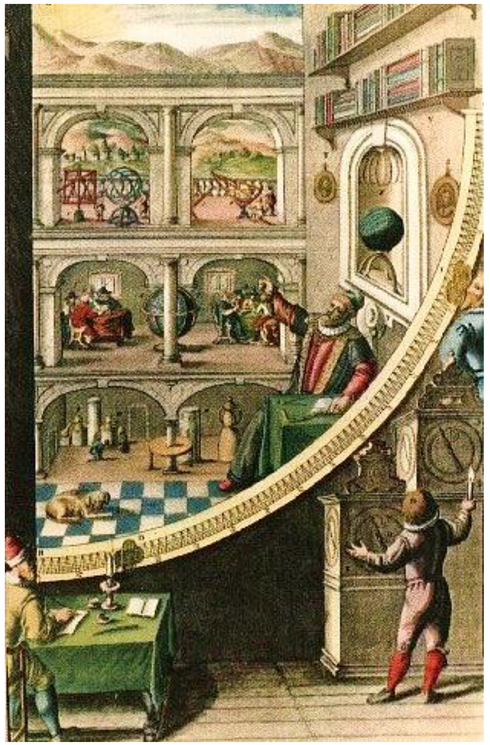
3️⃣清明の子孫（詳細不明）がSN1181を観測

藤原定家本人も見ている可能性あり

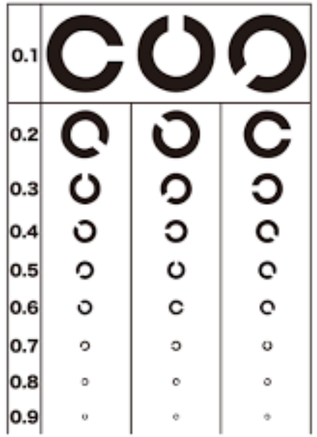
明日記のように古代の日すはどのように星のかんそくをしていたのか気になったので調べようと思った。

ティコ・ブラーエは地動説を信じなかった

Tycho Brahe
(1546-1601)

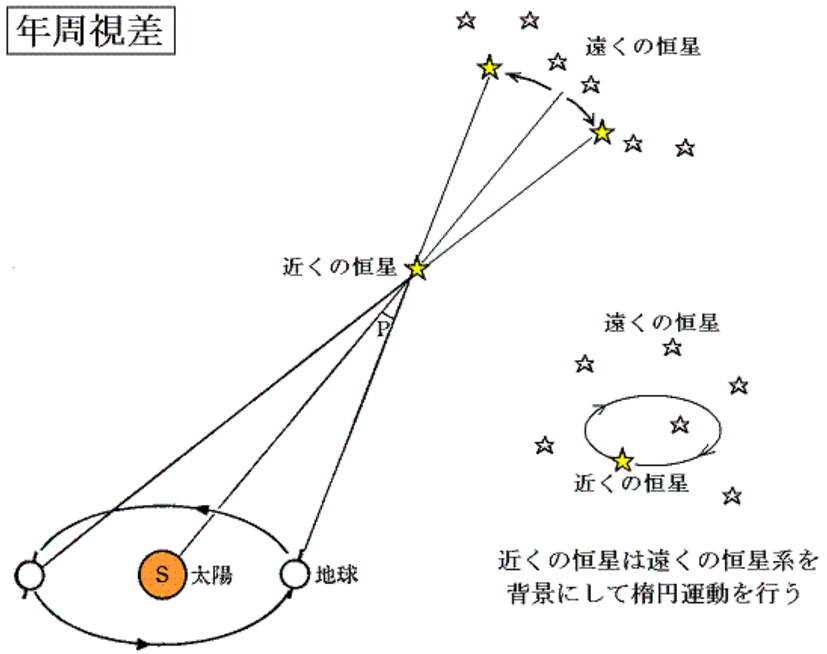


当時は肉眼観測，2分角（1度の 1/30）までの観測能力



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

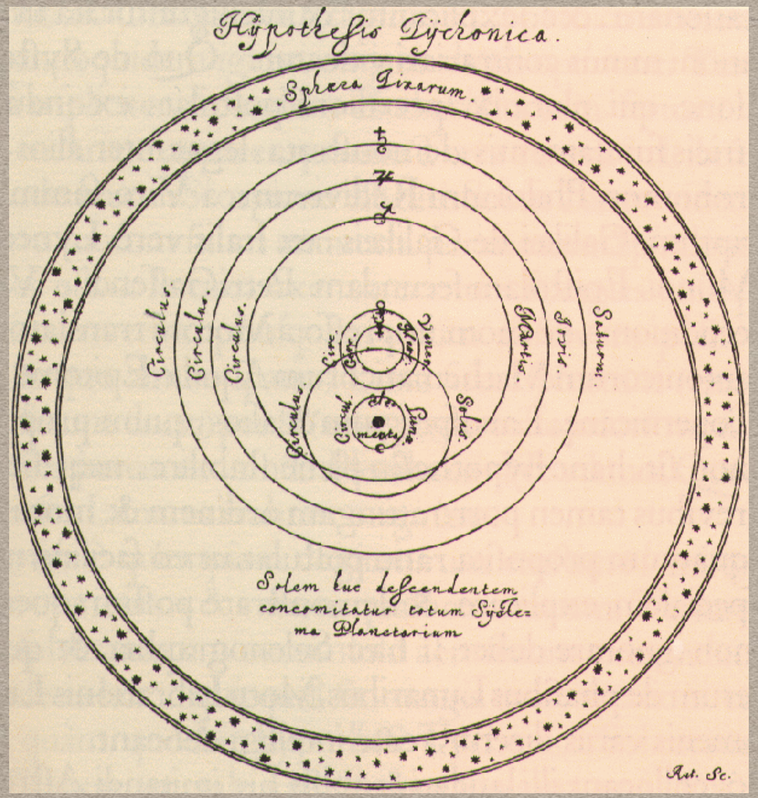
5m離れて，視角2分を視認できる
= 視力 0.5

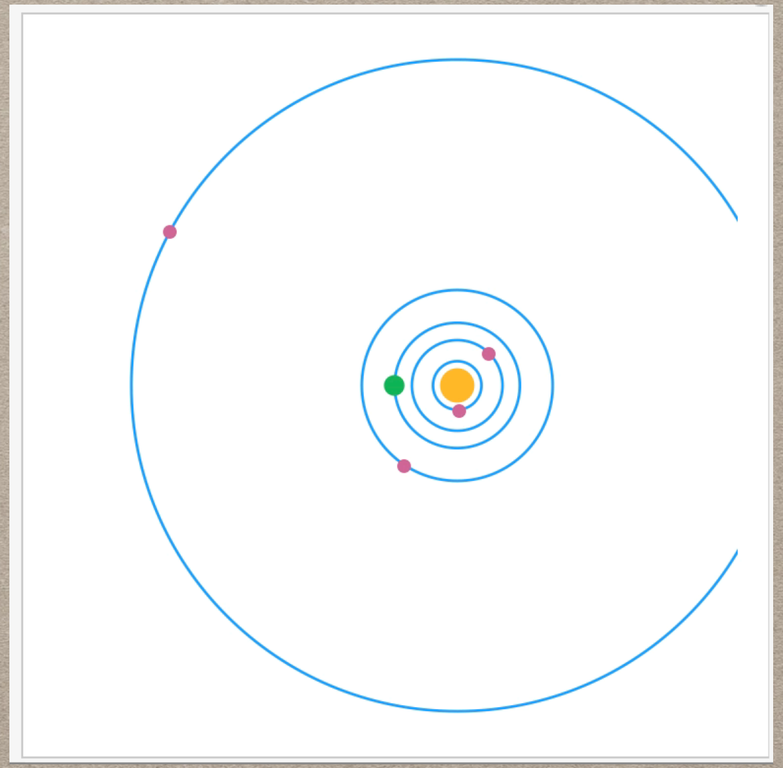


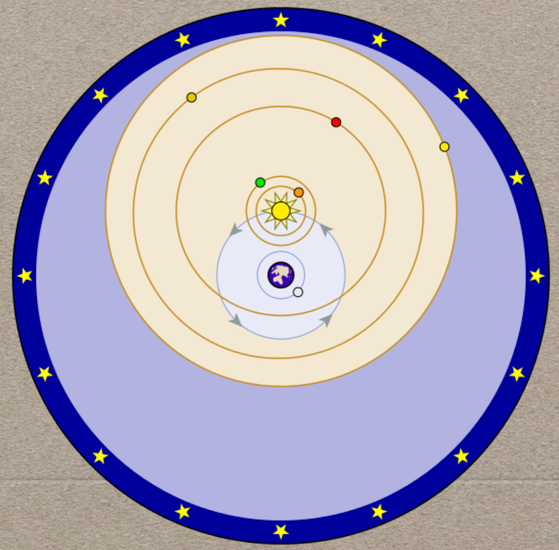
年周視差が確認できなかったから

もっとも近いケンタウルス座alpha
でも年周視差0.76秒角

1583 Tychonian planetary model







ティコ・ブラーエの説

Tycho Brahe

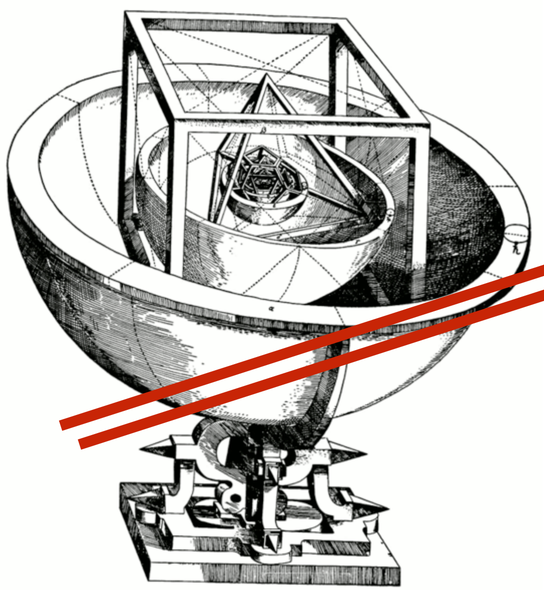
第谷 布拉赫

教科書 p37

（復習）ヨハネス・ケプラー

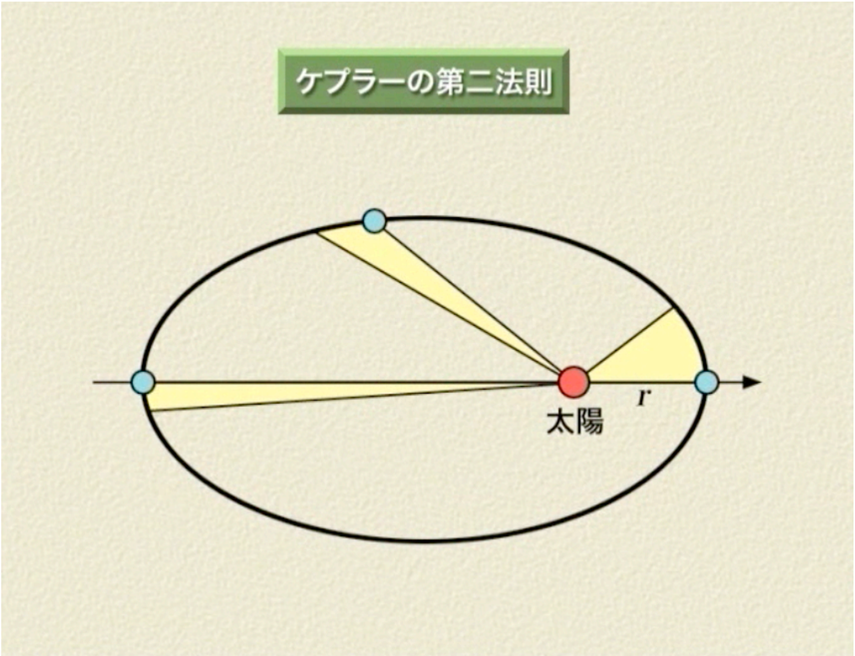
ケプラー

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

惑星運動の3法則



ケプラーによる惑星の運動法則

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．

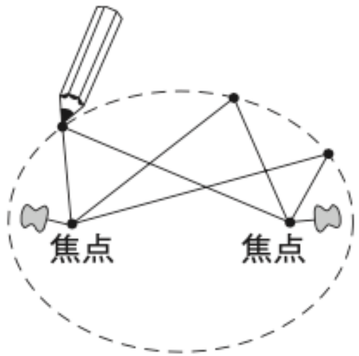
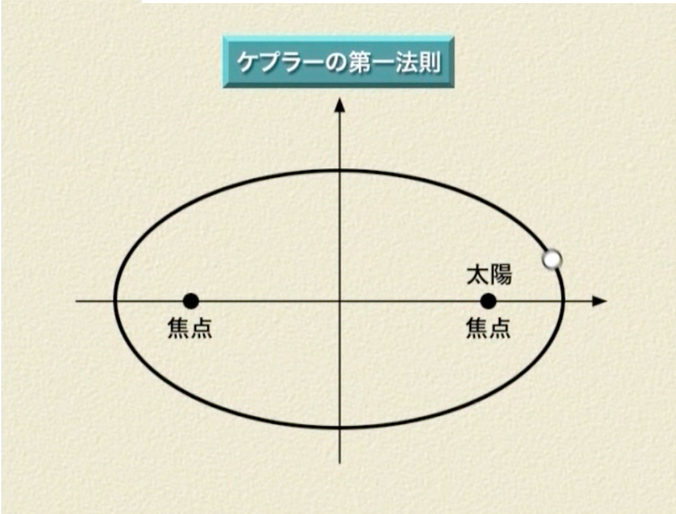
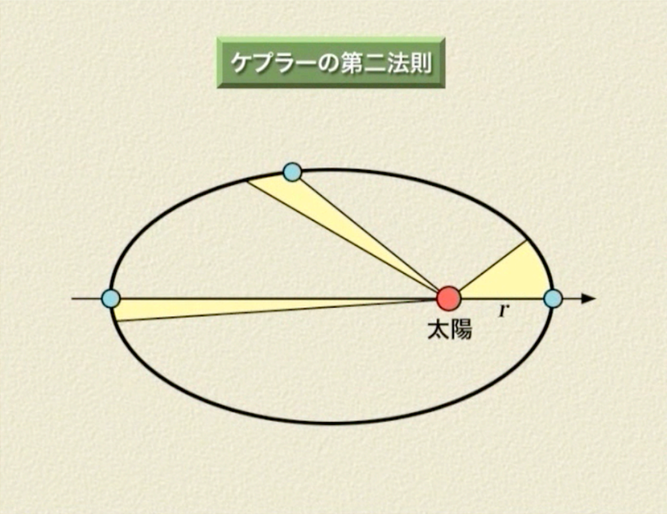
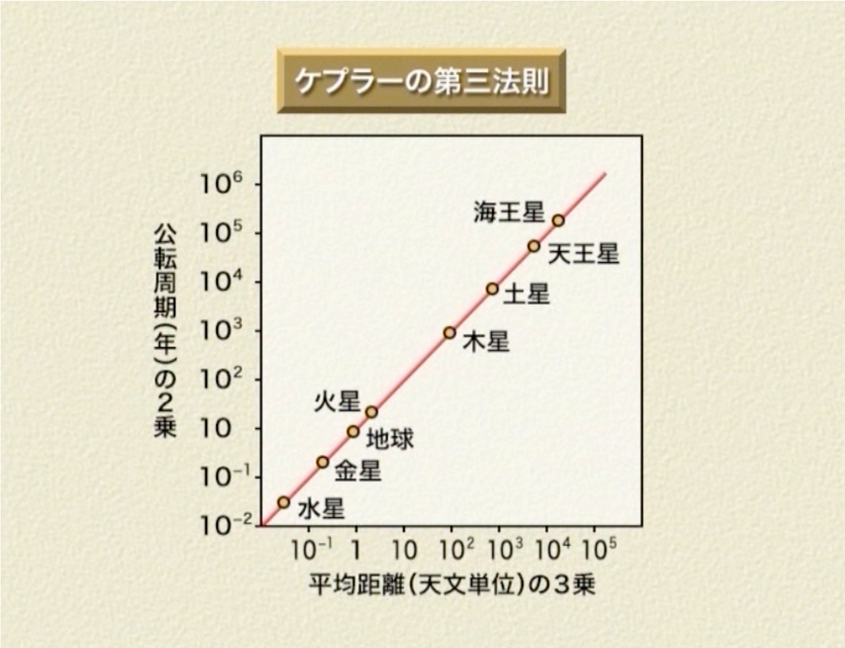


図 2.13　楕円は 2 つの焦点から糸を張り，ペンで一周すると描ける形である．焦点が 1 つに重なっていれば円になる．円は特殊な楕円である．







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

ケプラーの楕円運動の法則は当初受け入れなかった

教科書 p42

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）

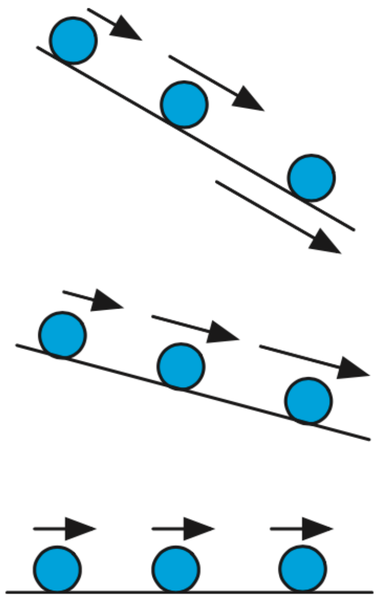


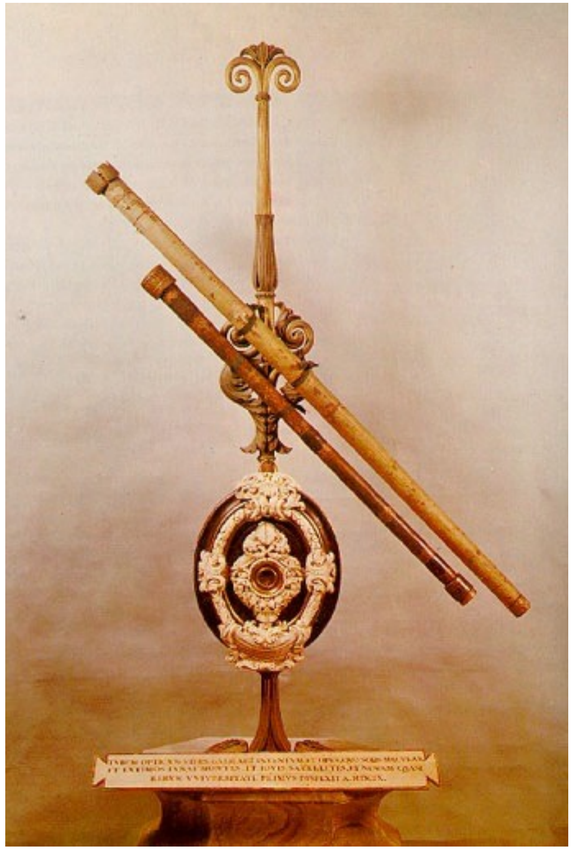
図 2.16　斜面の角度を小さくすれば，加速が少なくなる．傾きゼロでは等速運動となるはずだ．

慣性の法則

＝　ニュートンの運動第１法則

力を加えなければ,
物体はそのままの運動状態を保つ

ガリレイ： 天体望遠鏡による天体観測



倍率20--30倍

望遠鏡を作りあげた人の話について知りたいです。

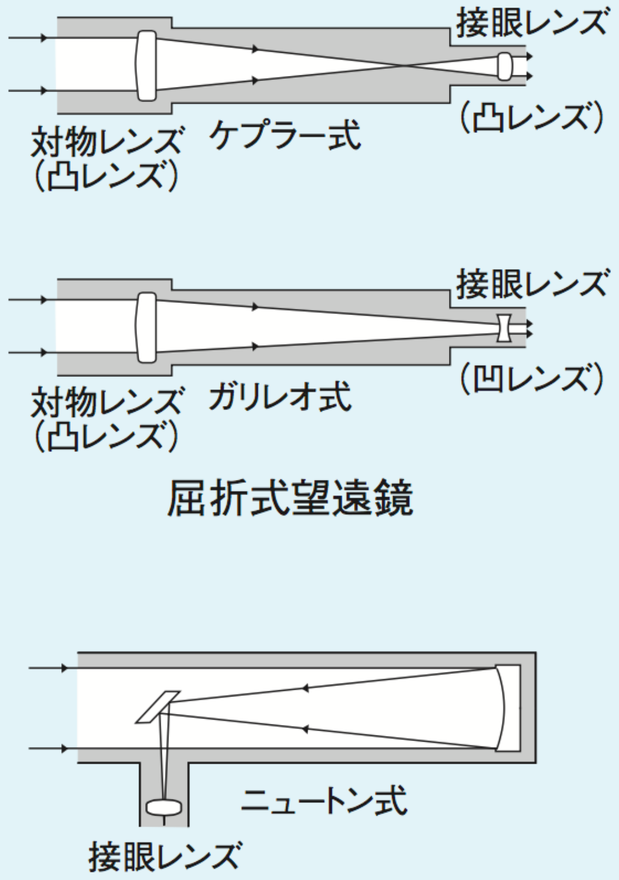


図 2.20 望遠鏡のしくみ.

前回のミニッツペーパーから

【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？

400年前（1609年）にガリレオ・ガリレイによる初めての天体望遠鏡を使った宇宙の観測が行われた。

2009年：月と木星と金星が近くにあって、ニコちゃんのような形を描いていた記憶があります。 ← こんなかんじ

明石市立天文科学館

シゴセンジャーvsブラック星博士

井上毅（いのうえたけし）
@INOUE_Takeshi_
フォロー

夕暮れ西空に金星と木星が並んでいます。6月20日には月も加わり素敵な風景になるでしょう。7月1日には最も接近します。参考として2008年12月1日（金星・木星・月）と2012年3月13日（金星木星接近）の様子を紹介します。

36 リツイート　39 お気に入り

23:58 - 2015年6月17日

教科書 p43

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）

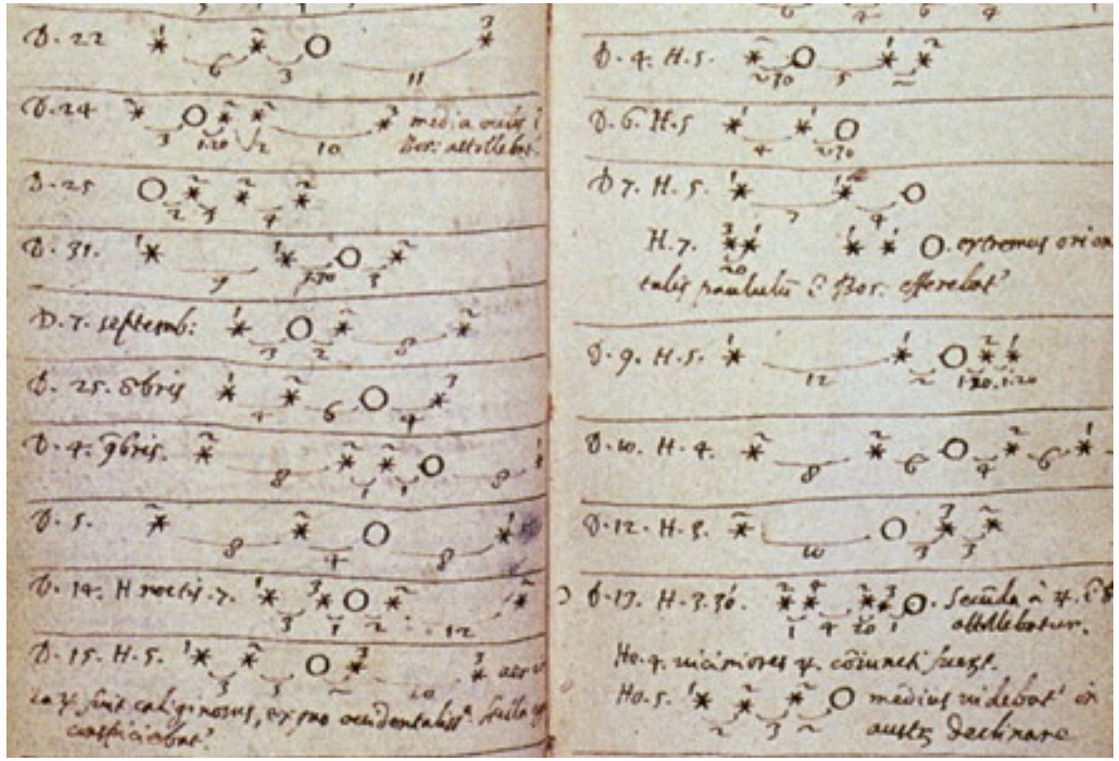
=> 月は地球と同じくでこぼこ

=> 「神が造った」は x

LOOKING AT THE MOON'S SURFACE

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

ガリレイ：「木星には衛星が4つ」発見



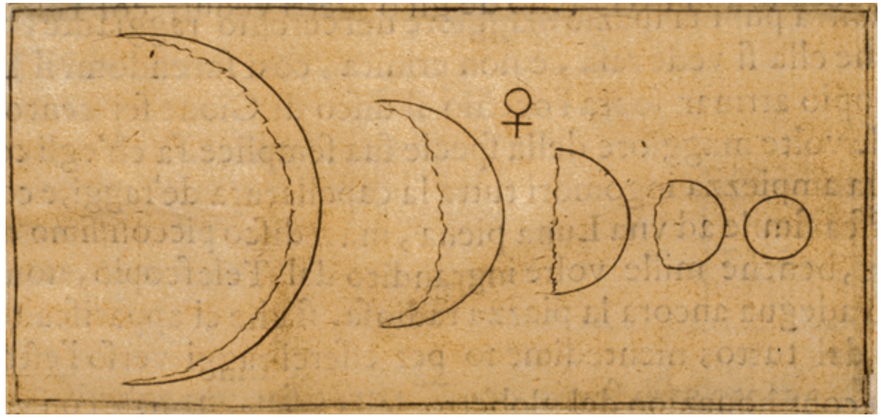
=> 太陽系もこんな形

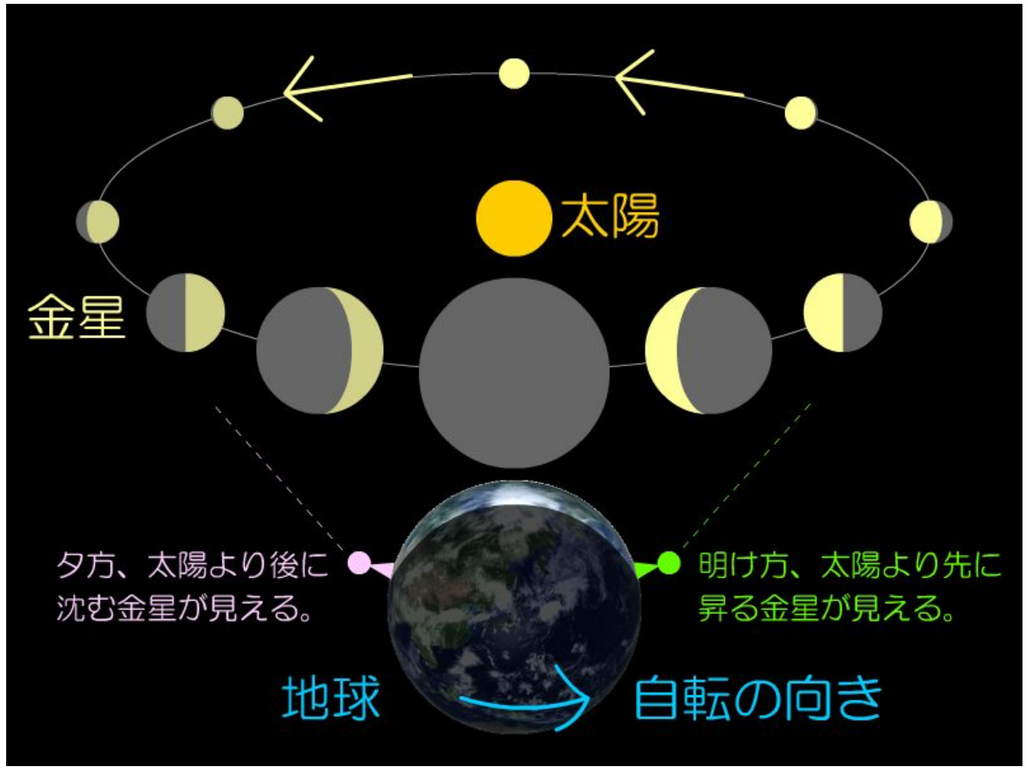
イオ
エウロパ
ガニメデ
カリスト

現在79個

http://www.astron.pref.gunma.jp/kyozai01/tendou/chidou1.html

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

http://www.astron.pref.gunma.jp/flash/venus2.html

【話題】 ガリレオ裁判の顛末

教科書 p44

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．

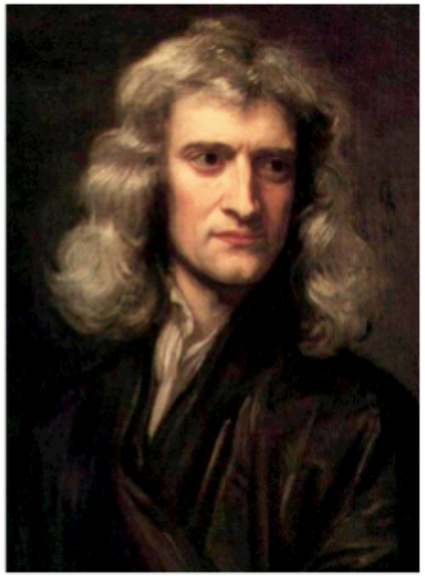
1632 年，ガリレイは『天文対話』を出版する．天動説と地動説の両方をあくまで仮説として扱い，それぞれを信じる 2 人と中立な者との 3 人の対話形式を使った解説書である．注意深く書かれた書であり，決して地動説を全面的に賛同するような書き方はされていなかったが，地動説を紹介したとして裁判にかけられることになった．裁判の経緯や真意についてはさまざまな説があり定かではないが，ガリレイは有罪とされ，地球が動くという説を放棄する旨が書かれた異端誓絶文を読み上げさせられることになった（ガリレイの伝記では，この後「それでも地球は動く」とつぶやいたとされる．しかし，これはガリレイの説を信奉する弟子か伝記作家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

2.2.4　ニュートンによる運動法則の確立

アイザック・ニュートン

Isaac Newton
(1642–1727)



運動の基本法則を確立

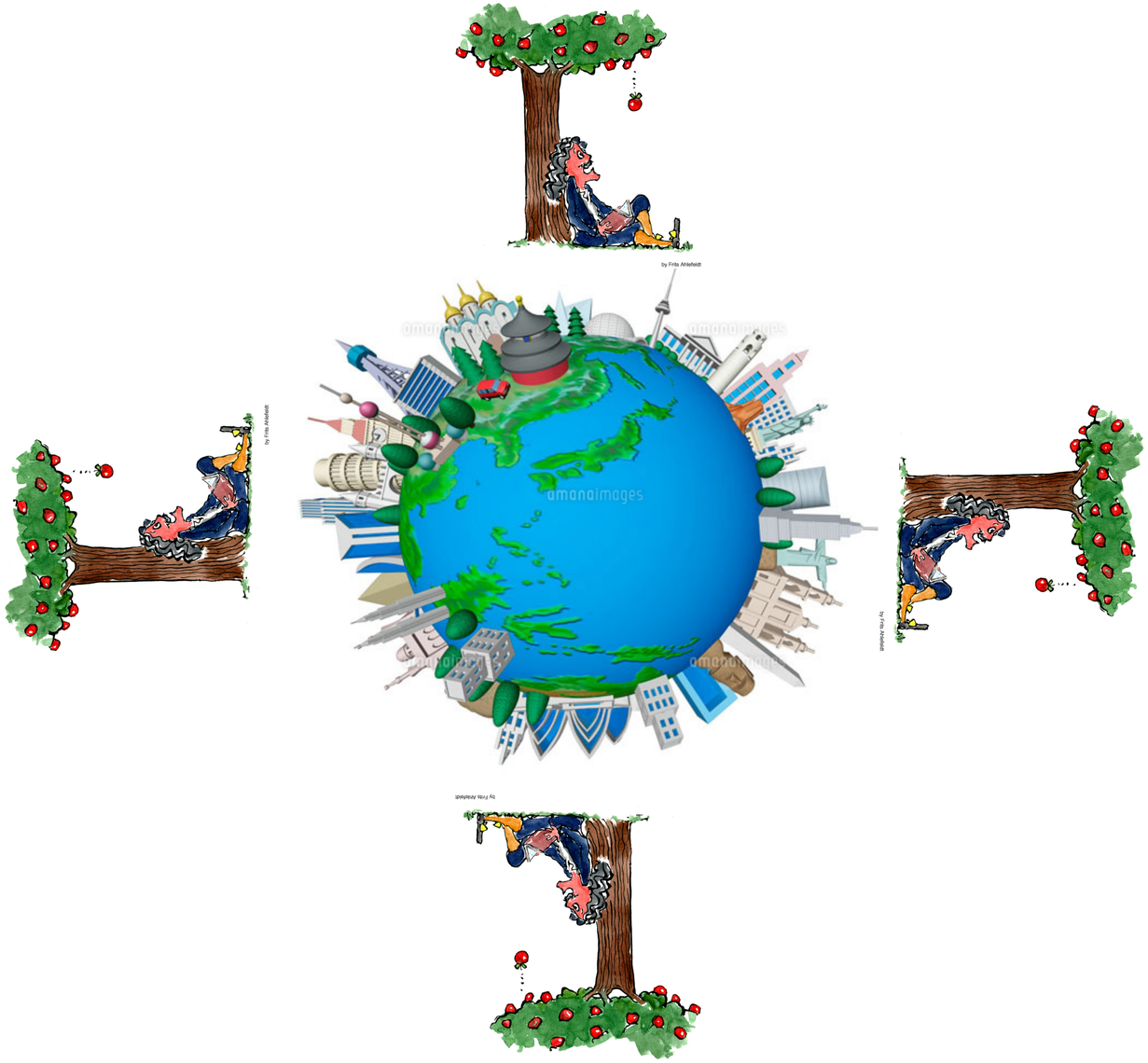
万有引力の法則で惑星運動を説明

微分・積分の計算を発明

教科書 p45

ニュートン ： リンゴはなぜ落ちる？

http://hikingartist.com/



ニュートン ： 万有引力の法則

http://hikingartist.com/

万有引力の法則

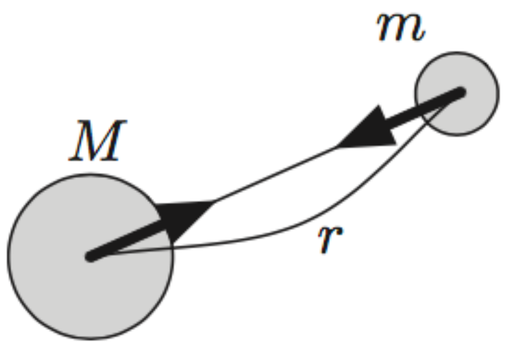
すべてのものは，引力で引き合う

◆Advanced　万有引力の法則

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

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \tag{2.2}$$

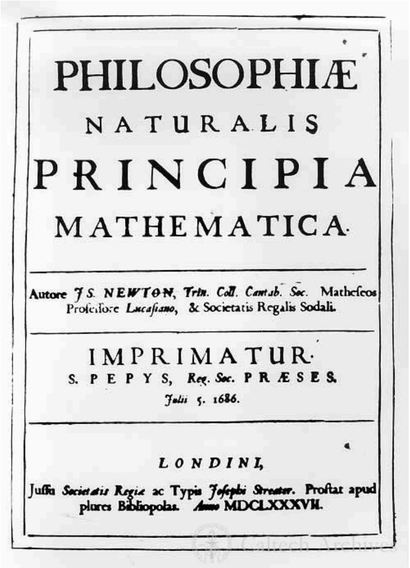
でつねに引力である．G は定数であり，万有引力定数と呼ぶ．



＊ こう仮定すると，惑星の楕円軌道が説明できることを示した．

＊ 「なぜ」分母が距離の２乗なのか，という問いかけはしなかった．

ニュートン ： 運動の基本法則


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

ニュートンの運動法則（1687 年）

第 1 法則　**慣性の法則**

力を加えなければ，物体は等速直線運動を行う．

第 2 法則　**運動方程式**

物体に力 $\boldsymbol{F}$ を及ぼすと，物体の質量 m に反比例した加速度 $\boldsymbol{a}$ が生じる．

第 3 法則　**作用反作用の法則**

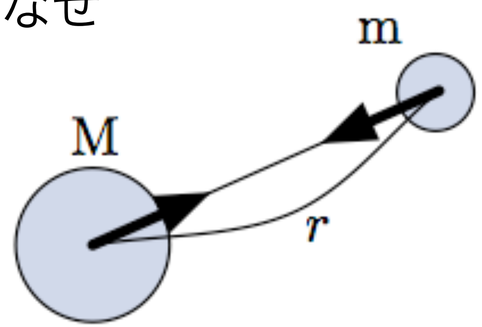
物体に力 $\boldsymbol{F}$ を及ぼすと，その物体は同じ大きさで逆向きの反作用 $-\boldsymbol{F}$ を作用物体に及ぼす．

第 2 法則とされた運動方程式は式で書くと，

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} \tag{2.3}$$

なぜ月は地球に落下してこないのか

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



運動方程式はベクトルの式（向きも含めて成立する）

力を加えると

重力（万有引力）
摩擦力（抵抗力）
抗力
弾性力
張力
浮力
大気圧の力
電気の力
磁石の力
‥‥‥‥

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

大きさだけではなく，
向きを含めて成り立つ

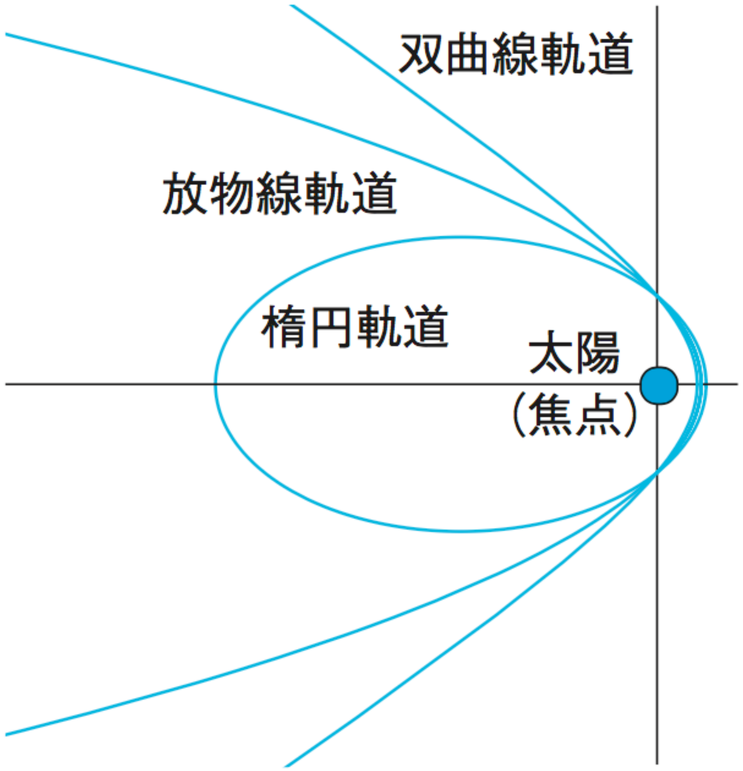
加速度が生じる

速度がわかる
位置がわかる

運動がわかる！

等速直線運動
等加速度直線運動
放物運動
円運動・楕円運動
単振動
減衰振動
……

万有引力の法則＋運動方程式　→　楕円運動



太陽の重力圏にとどまるならば,

楕円運動するのが自然である.

ケプラーによる惑星の運動法則

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．

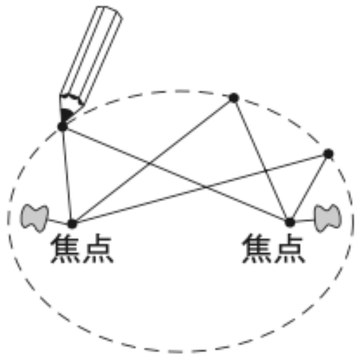
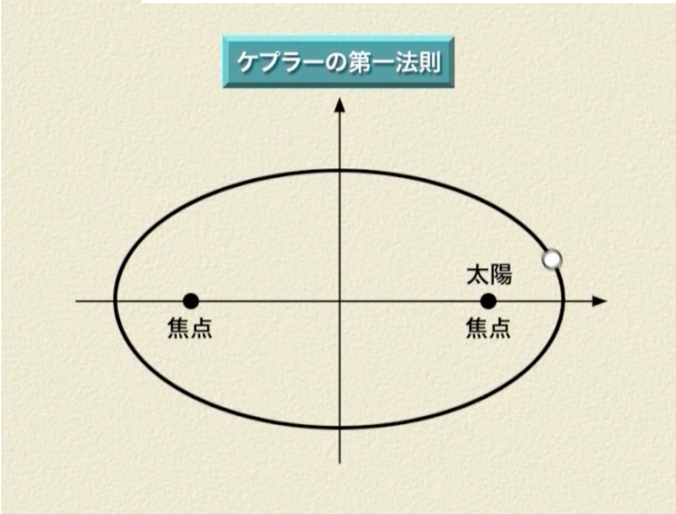
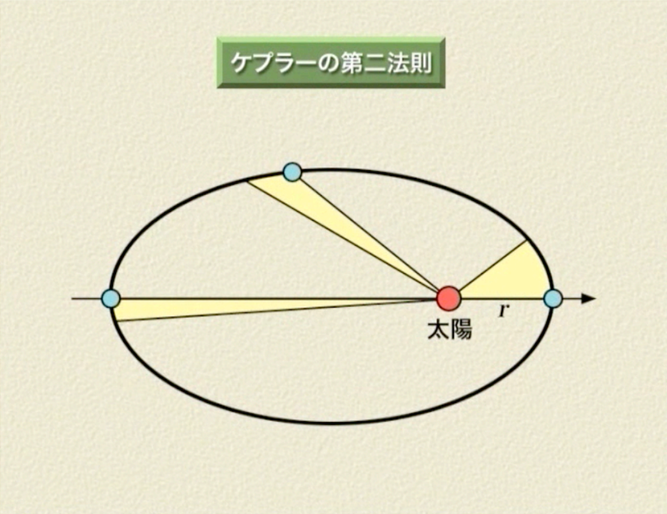
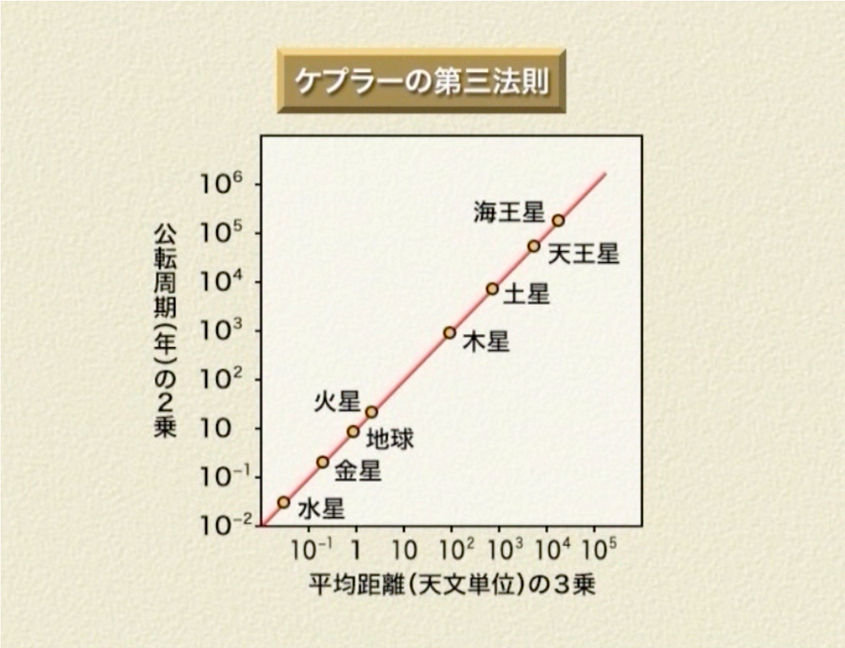


図 2.13　楕円は 2 つの焦点から糸を張り，ペンで一周すると描ける形である．焦点が 1 つに重なっていれば円になる．円は特殊な楕円である．



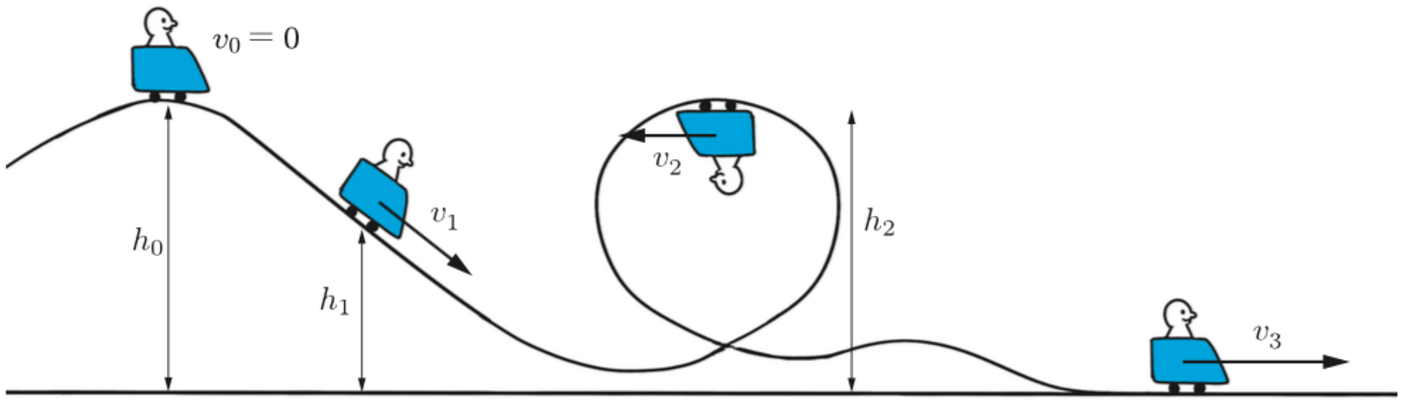




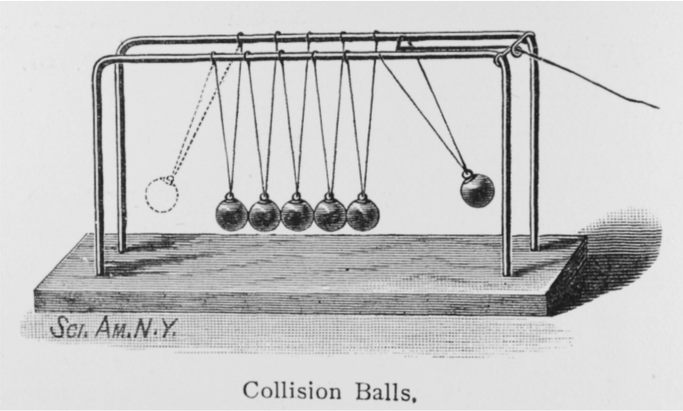
＊エネルギー保存則

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

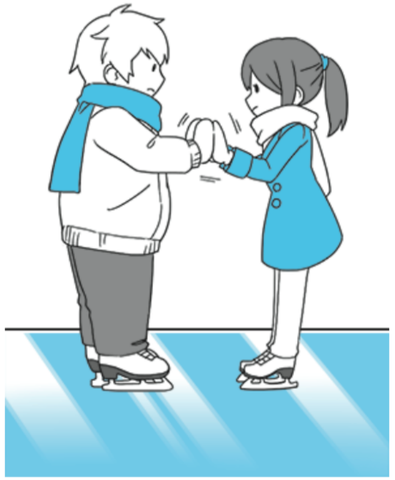
位置エネルギー ＋ 運動エネルギー ＝ 一定



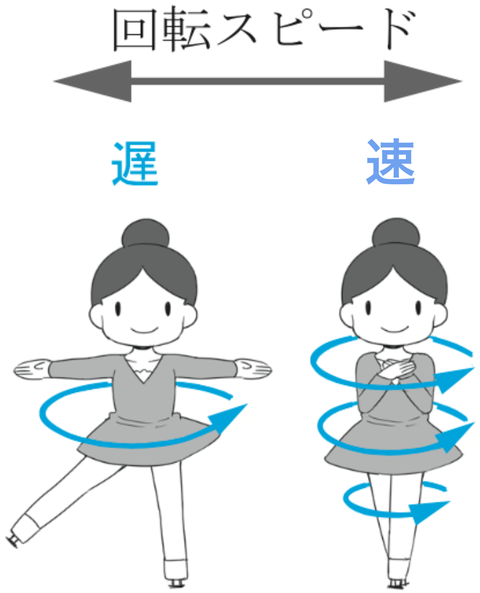
＊運動量保存則



Collision Balls.

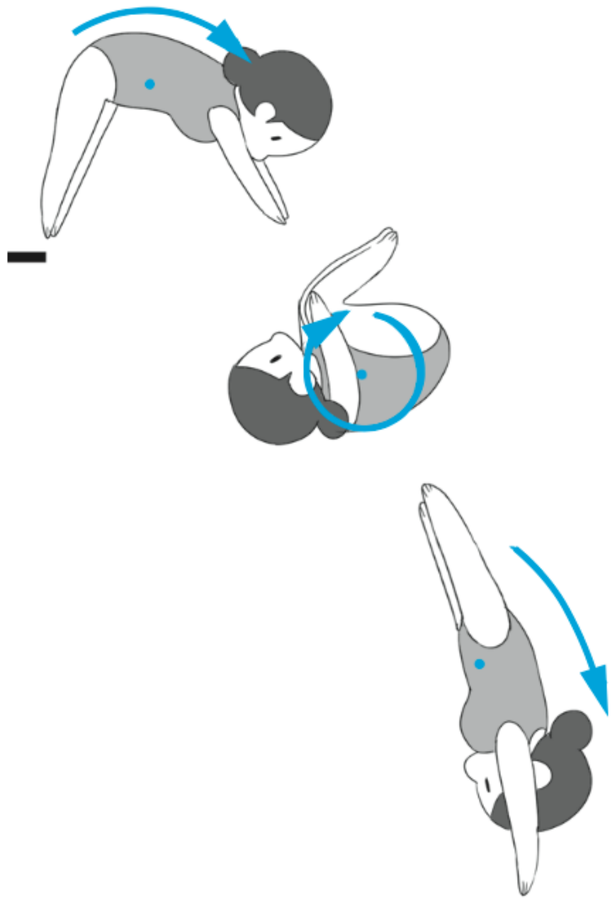


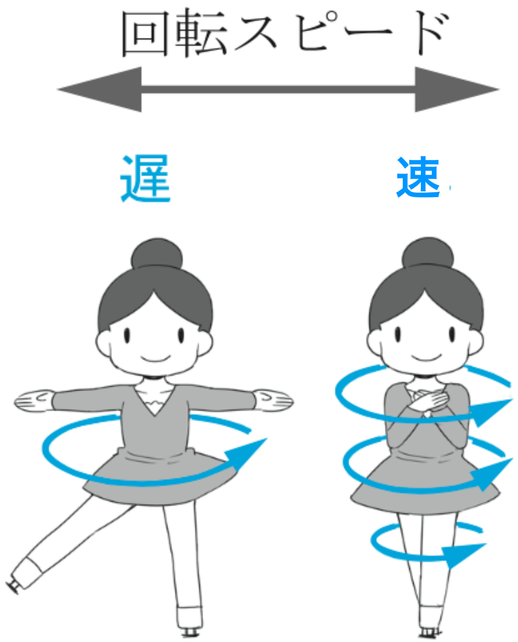
＊角運動量保存則

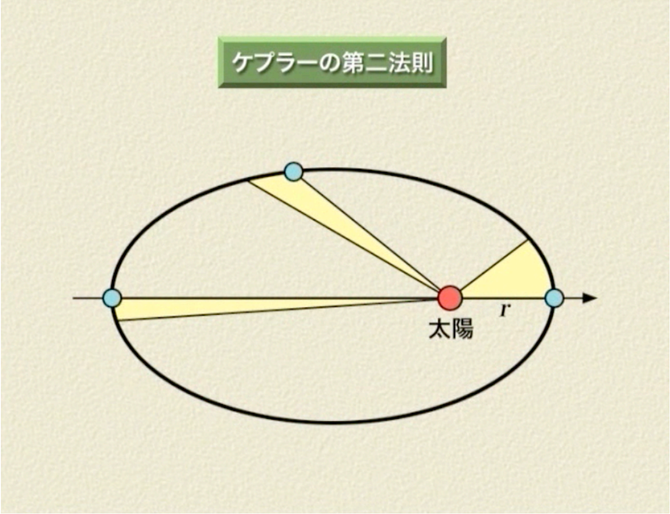


角運動量は保存する

角運動量 = 回転半径 x 運動量 = r x mv



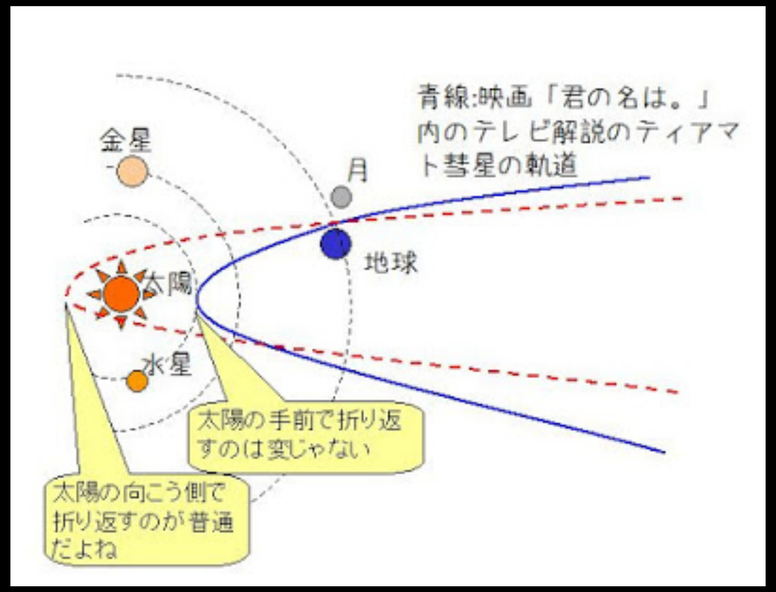




ケプラーの面積速度一定の法則は,
角運動量保存則と同じだった.

2016年の
コメント

映画『君の名は。』に出てくる彗星の軌道が
おかしいと言われているそうですが、本当におかしいのですか

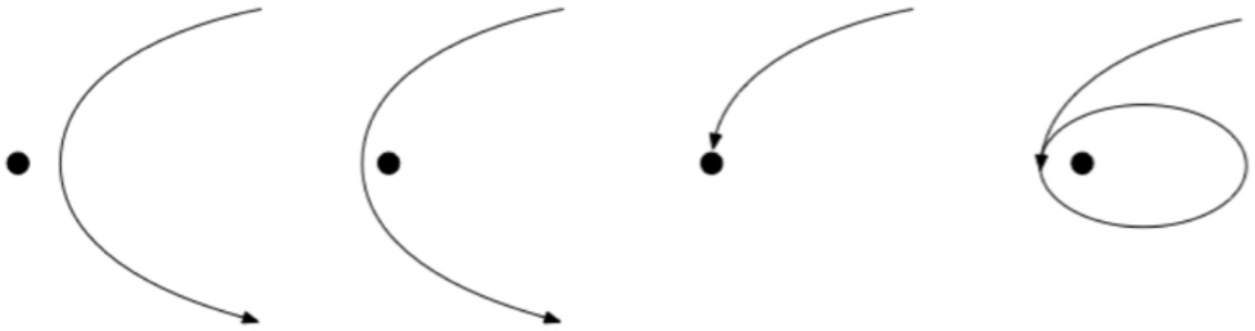


https://ara50yourname.blogspot.jp/2016/10/blog-post_88.html

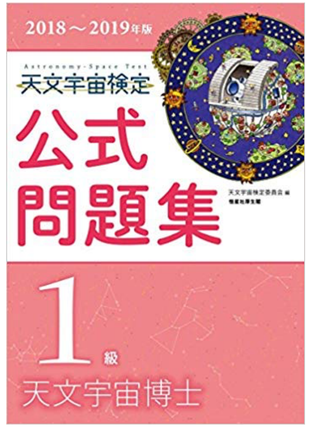
前回のミニッツペーパーから

問題文

万有引力がはたらく2つの天体が描く軌道は，楕円（円を含む），放物線，双曲線の3種類のいずれかになる．いま，太陽に彗星が接近してきたとする．図に示す４つのうち，力学的にありえない軌道はどれか．



(a) 太陽の手前を横切る放物線軌道　(b) 太陽の後ろ側を横切る双曲線軌道　(c) 太陽に突っ込む軌道　(d) 太陽を焦点とする楕円軌道



2016年11月26日　東京朝刊　　土記
http://mainichi.jp/articles/20161126/ddm/003/070/037000c

「君の名は。」と科学力＝青野由利

遅ればせながらアニメ映画「君の名は。」を見た。大ヒット中と知ったからではなく、登場する彗星（すいせい）の軌道図の誤りが話題になっていると聞いたからだ。大胆なストーリー展開に引き込まれ、問題の場面は見落としそうになったが、天文ファンには気になるところかもしれない。

この話を知ったのは、今月参加した「高校の理科教育」を考えるシンポジウム。といっても映画の誤りを糾弾しようなどというやぼな集まりではない。企画者は物理学者の須藤靖さん。「日本学術会議」の小委員会委員長として、今年初めに「これからの高校理科教育のあり方」をまとめている。

日本で理系の大学に進学する人は国民の約１５％。とすれば高校理科は残りの８５％のためにあってしかるべきだ。そのためには物理・化学・生物・地学の基礎を満遍なく学べる科目を必修とし、相応の時間をかけよう、というのが提言の大まかな内容だが、これが一部関係者の不興を買った。「そんな時間がどこにある？」ということらしい。

みんなはどう思っているのか。シンポジウムでは、高校現場からの報告も、大学生の科学力調査も興味深かった。その中で「やっぱり」と思ったのは科学哲学者の戸田山和久さんが紹介した「Ｓｃｉｅｎｃｅ　ｆｏｒ　ａｌｌ　Ａｍｅｒｉｃａｎｓ（すべてのアメリカ人のための科学）」の失敗だ。市民が習得しておくべき知識や態度を米科学振興協会がまとめた１９８９年の報告書で、日本もこれをお手本に「科学技術の智」を２００８年にまとめている。しかし、各分野があれもこれもと詰め込み、いずれも「絵に描いた餅」に終わってしまったという。

大事なのは、科学的知識を偏重せず、必要な時に学べる能力や日常生活で示されるデータを批判的にみる力をつけること。大方の人が賛成する論点だと思うが、難しいのは具体的な教育の方法だろう。

「君の名は。」に話を戻すと、「彗星の軌道はこういうもの」と覚えるのではなく、物理の法則とは何か、重力とはどういう力なのかを知って、日常のあれこれに応用できるといい。

実はこの映画には科学心をくすぐるネタが他にもたくさん含まれている。隕石（いんせき）湖は実在するか。彗星が分裂した破片が地球にぶつかる確率はどれぐらいか。時間旅行は可能か。夢の記憶がすぐに薄れていくのはなぜか。「口噛（か）み酒」はどういう反応でできるのか。とても楽しい学習ができそうだと思うのは、独り善がりだろうか。（専門編集委員）

万有引力の法則はどこまで正しいか

空間3次元（4次元時空）なら

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

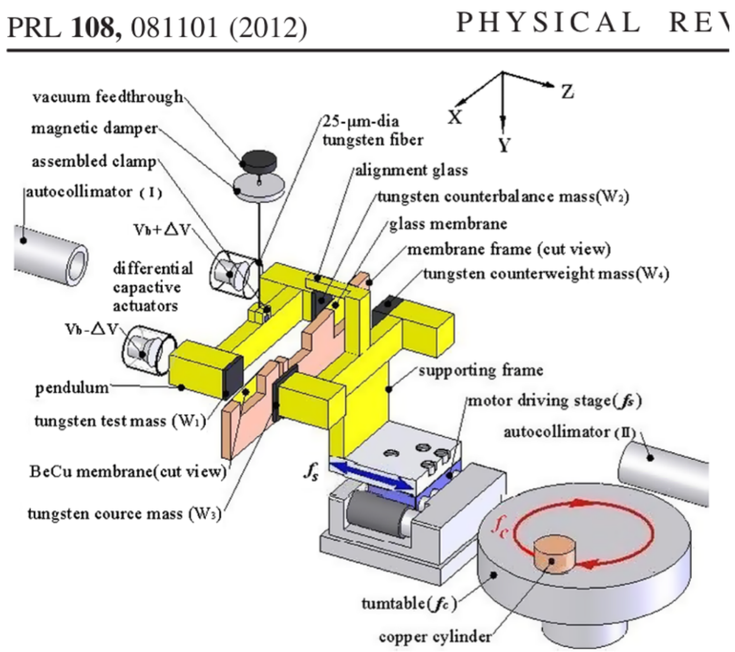
$$U = -G\frac{Mm}{r}$$

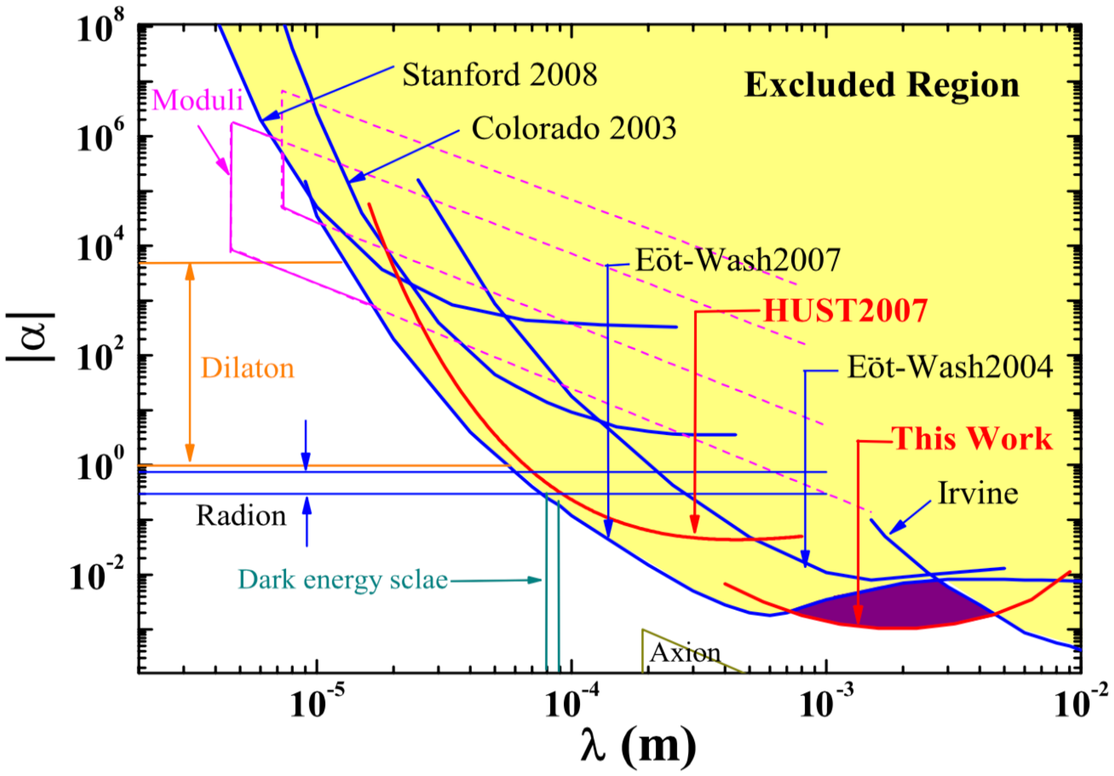
空間4次元（5次元時空）なら

$$F = G\frac{Mm}{r^3}$$

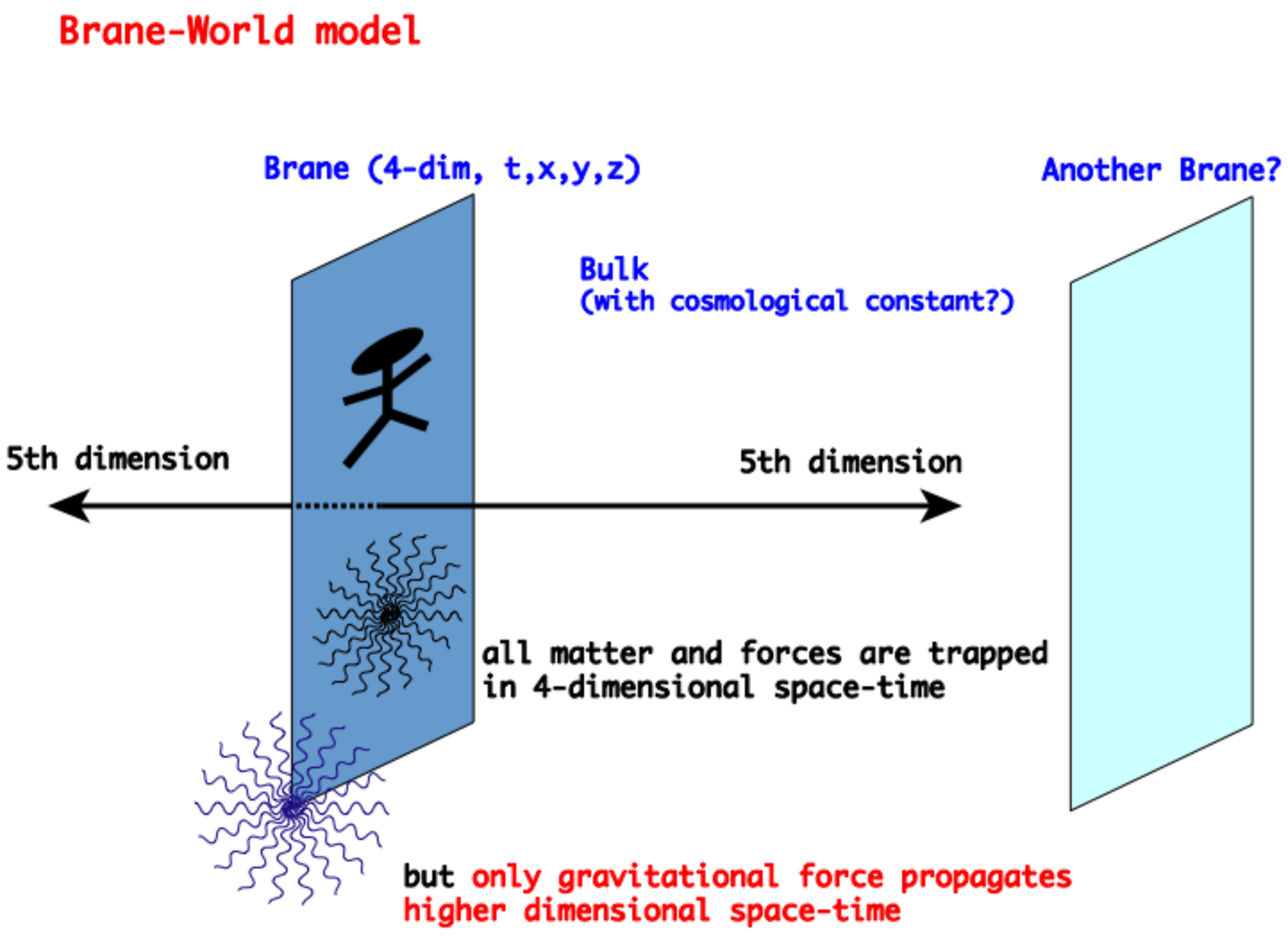
$$U = -G_5\frac{Mm}{r^2}$$

$$U = -G\frac{Mm}{r}(1+\alpha e^{-r/\lambda})$$

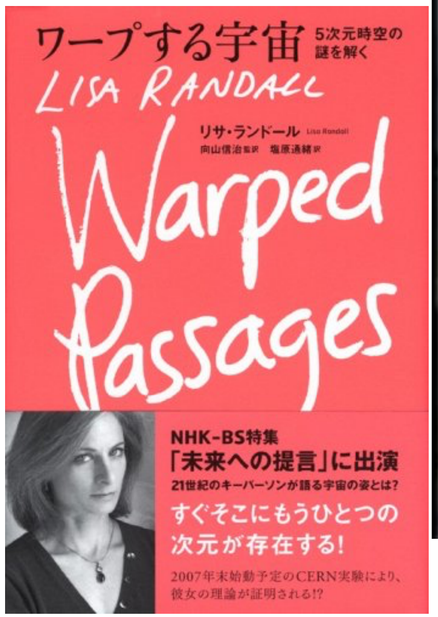


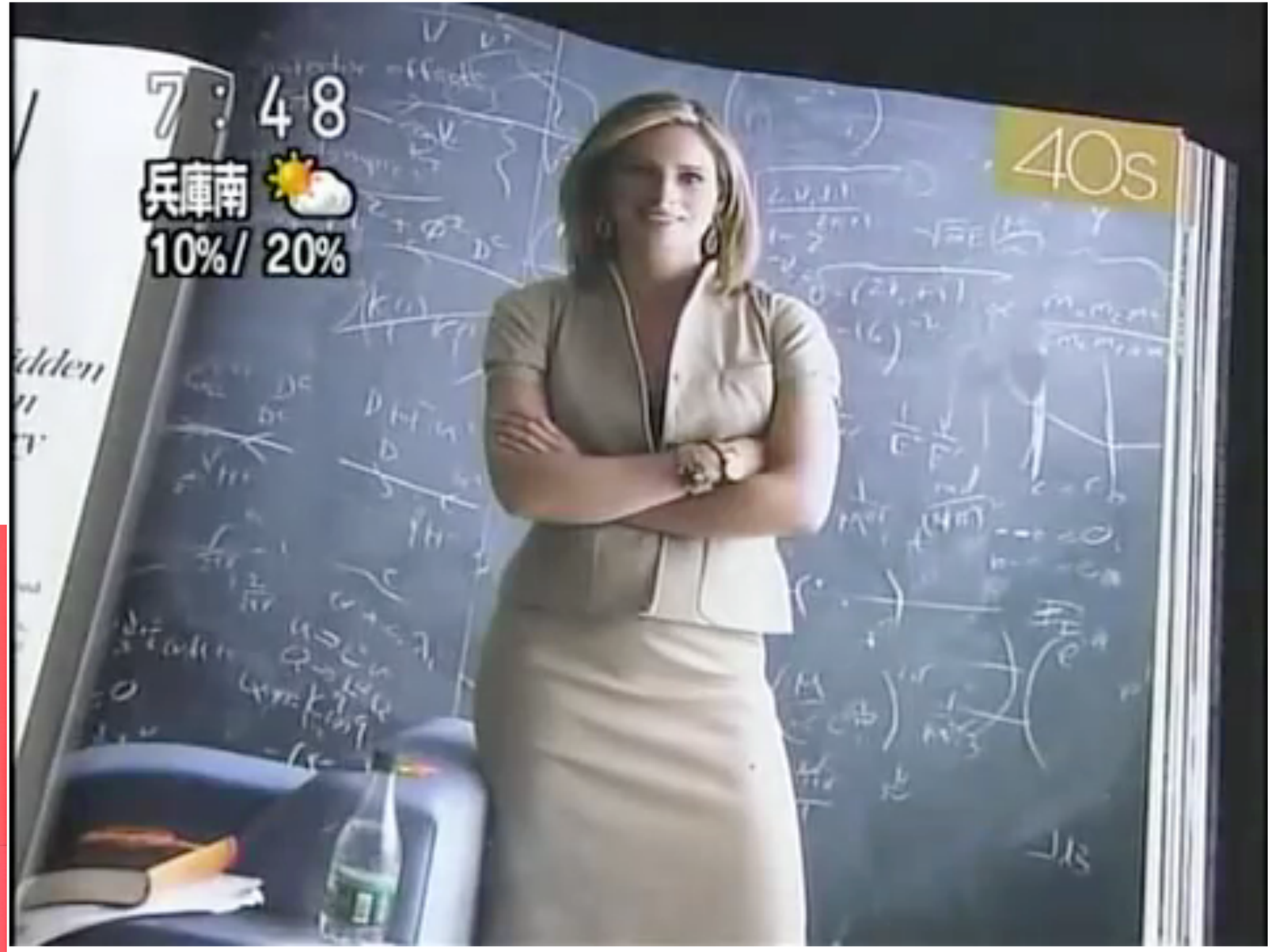


膜宇宙論（我々の4次元時空は, 高次元の中の膜のようなもの）



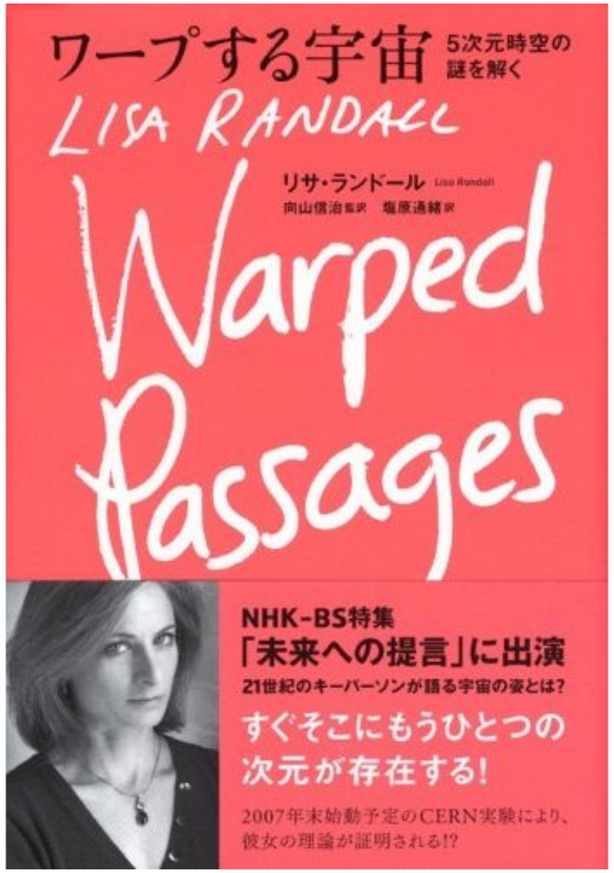
膜宇宙論の提唱者の一人, リサ・ランドール



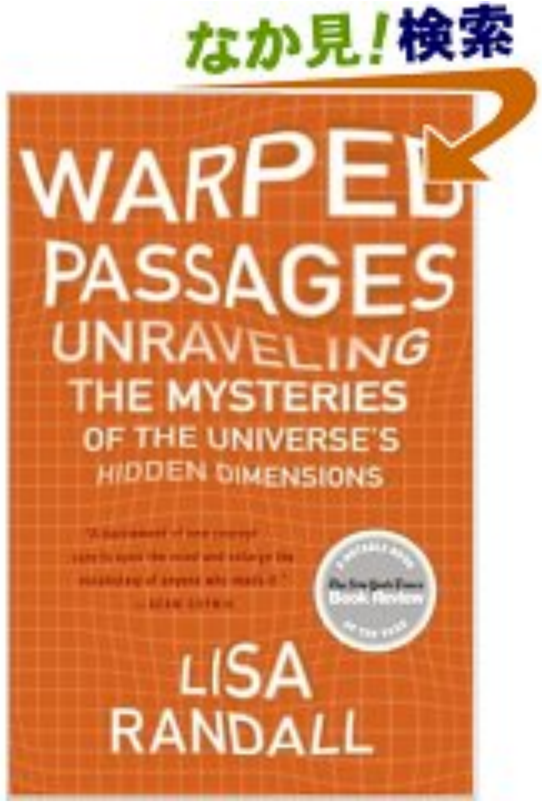


"Be inspired.
Keep an open mind.
Be brave and have fun!"

2007年　NHKニュース (7分)



*フアン・ガルシア－ベリド、アンドリュー・シャンブリン、ロベルト・エンパラン、ルース・グレゴリー、スティーヴン・ホーキング、ゲーリー・T・ホロヴィッツ、ネマーニャ・カロパー、ロバート・C・マイヤーズ、ハーヴェイ・S・リオール、真貝寿明、白水徹也、トビー・ワイズマンなど。



*They include Juan Garcia-Bellido, Andrew Chamblin, Roberto Emparan, Ruth Gregory, Stephen Hawking, Gary T. Horowitz, Nemanja Kaloper, Robert C. Myers, Harvey S. Reall, Hisa-aki Shinkai, Tetsuya Shiromizu, and Toby Wiseman.

最先端物理学が描く宇宙

真貝寿明先生

わからないのがおもしろい！

科目の魅力

「宇宙」はとても研究対象の範囲が広いです。星はどのように生まれ最後を迎えるのか、ブラックホールとは？タイムマシーンは作れる？など…物理学の歴史的発展を交えながら、現時点で、物理学者、天文学者が理解している宇宙の姿を紹介します。さらに、最新の宇宙や物理学に関して報道されるニュースも取り上げていく予定です。

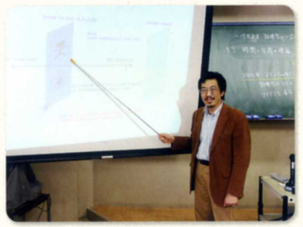
真貝先生の紹介

大阪工業大学　情報科学部教授

主な研究分野は、一般相対性理論・宇宙論とその周辺。

2012年秋から武庫川女子大学非常勤講師。

開講科目：「最先端物理学が描く宇宙」のほか「生活の中の物理学」



著　書

タイムマシーンと時空の科学

微底攻略シリーズ

（微分積分・常微分方程式・確率統計）

雑誌Newton　協力編集ほか…

どのような学生に受けてほしいですか？

数式を怖がらないで！テストで難しい数式を出すつもりはありません。

自分で説明できるかどうかが大切です。

ただ、この授業を通して物理は面白い！と思ってもらえると嬉しいです。物理学はよく知らないけれど面白そうだなと思った人はぜひ受講してくださいね。

オススメの本

『ワープする宇宙（５次元時空の謎を解く）』

リサ・ランドール

宇宙は私たちが実感できる３次元＋時間という構成ではないらしい。すぐそこに、もう一つの見えない次元が存在する?!

学生へのメッセージ

まず何よりも大事なのは、

疑問を持つことです。

知らないことにも貪欲になってください。そして、どんどん頭を突っ込んで勉強をしましょう。

大学生には自由な時間がいっぱいありますし、勉強だけでなく、たくさん遊びましょう。

大いに遊び、大いに学ぶ！

大学生活を思いきり楽しんでくださいね。

物理学とは昔からあまりなじみがなかった私ですが、この授業を受けたことで身の周りの出来事や宇宙の果てまで、全てに物理が関わっていることを実感できました。武庫女には数少ない物理の授業ですし、とてもオススメです。

Mcollection (2013)

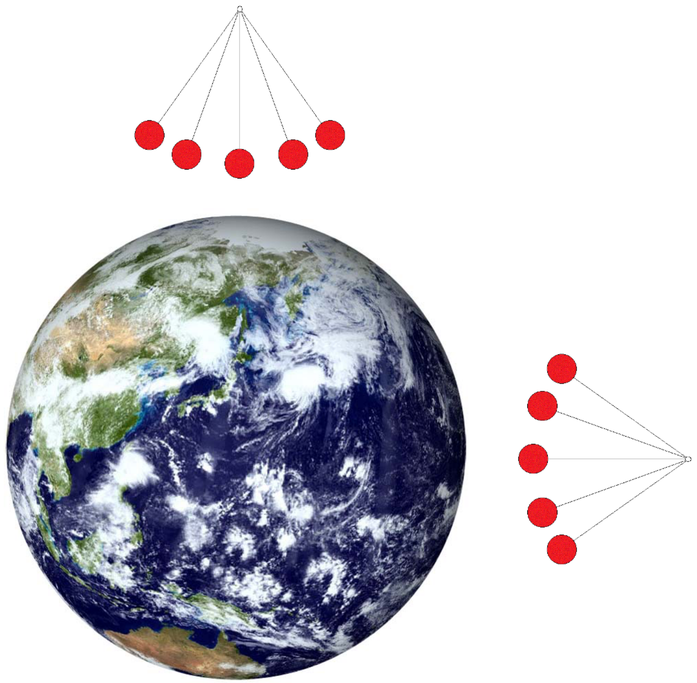
教科書 p49

ニュートン力学の勝利

地球の扁平度の測定

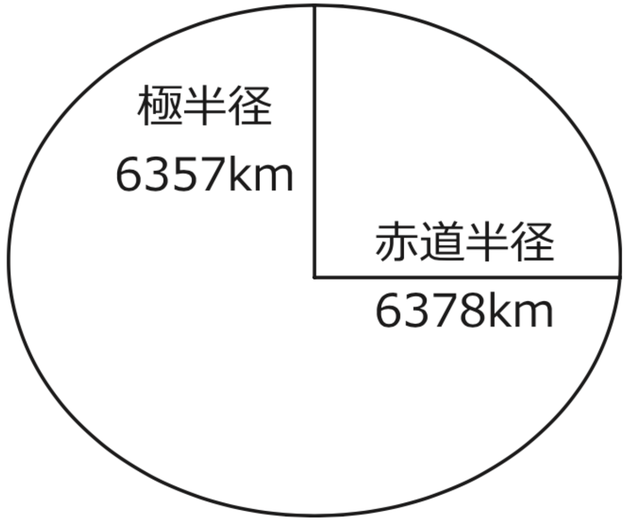
赤道付近ではふりこの周期が長い

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



地球の自転で，遠心力あり．
重力加速度ｇは少し小さくなる．

しかし，計算が合わない．．．



1735/36年，子午線の長さの測量実施．
地球が扁平であることが確かめられる．

ハレー彗星の軌道

Edmund Halley
(1656-1742)

http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/halley.html

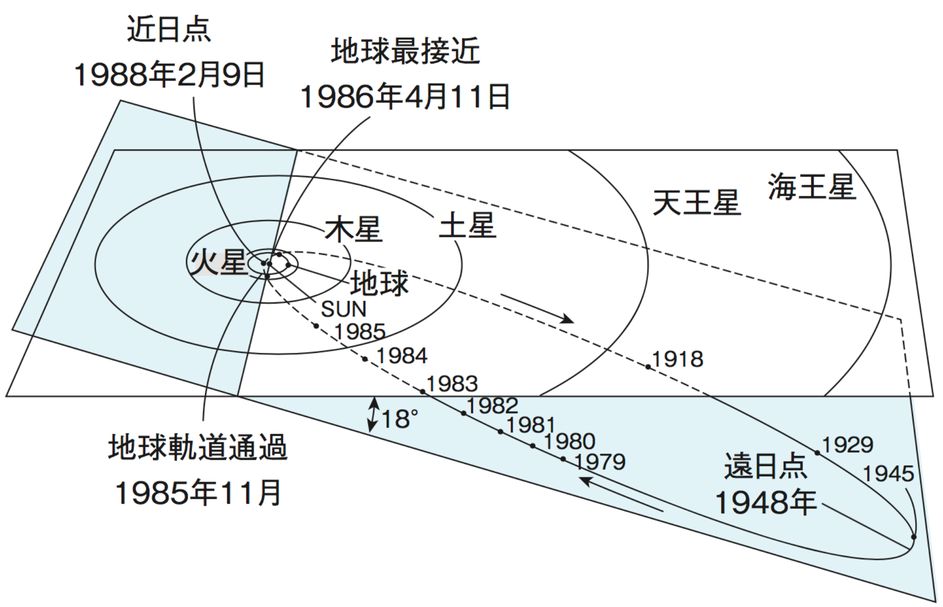
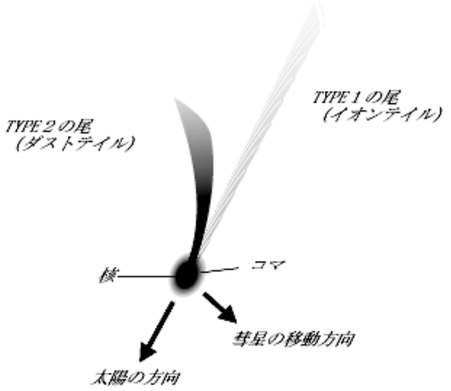
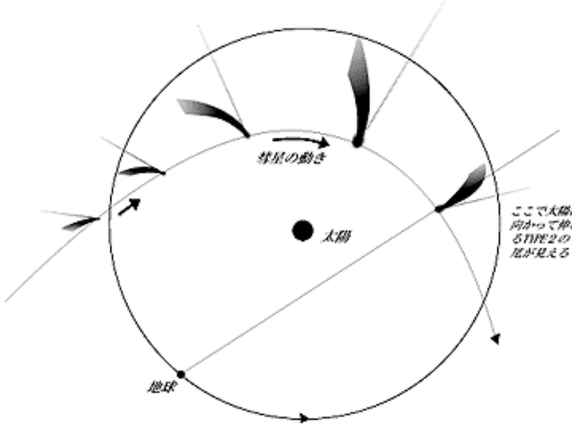


図 2.32　ハレー彗星の軌道は惑星運動面から大きく傾いている.

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

76年周期　前回　1986年
　　次回　2061年

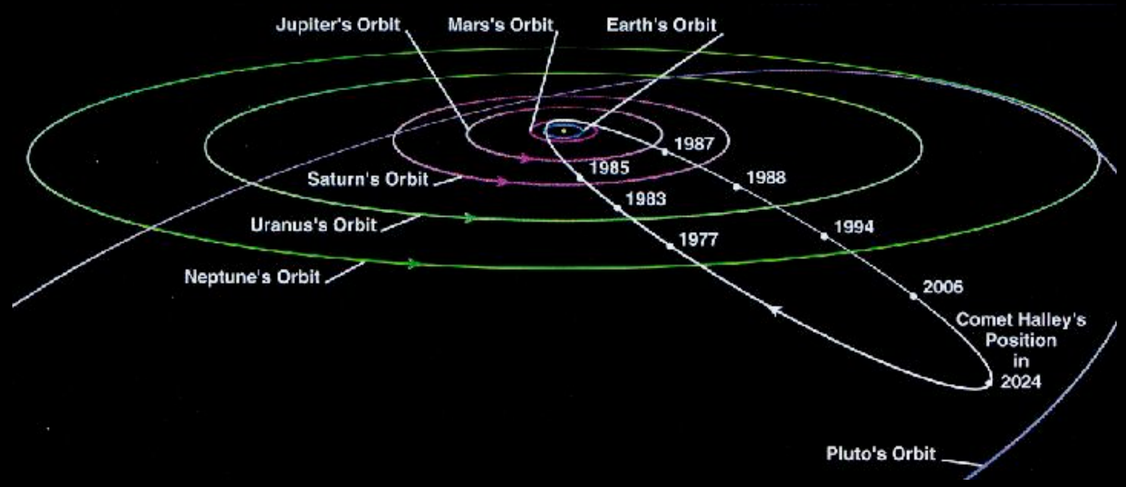




http://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter05/01/02.shtml
http://www.astroarts.co.jp/alacarte/kiso/kiso10-j.shtml
http://www.geocities.jp/planetnekonta2/hanasi/halley/halley.html

ハレー彗星

76年に一度，地球に近づく．
前回は1985年，次は2061年



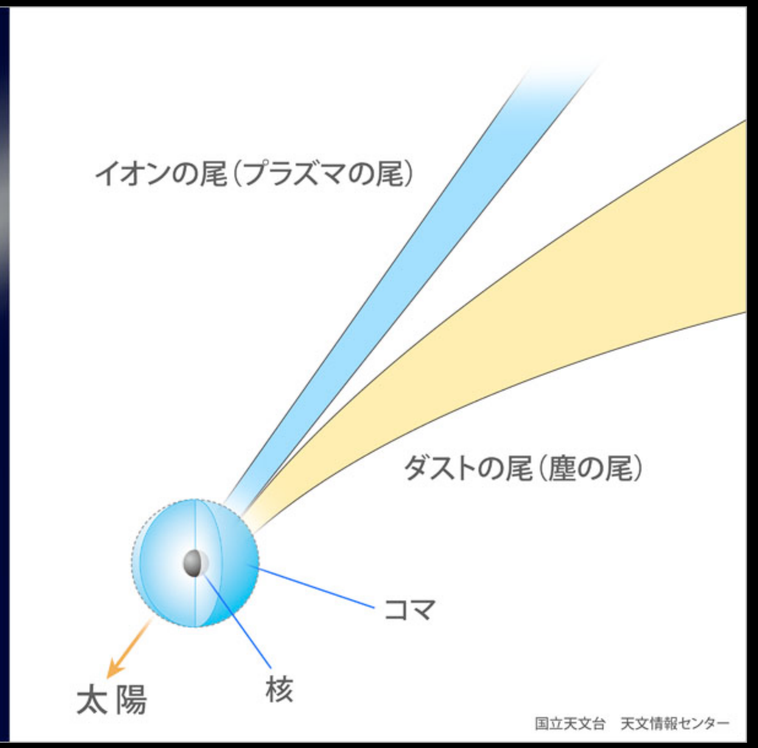
すいせい

彗星（ほうき星）とは

★太陽のまわりを動く大きさが数キロメートルから数十キロメートルのとても小さな天体.

★およそ8割が水（氷の状態）で，残りはガス・ちり.

★太陽に近づくと大きな尾ができる



10月21日-22日　極大

オリオン座流星群

★2024年は条件　悪

★1時間に10個

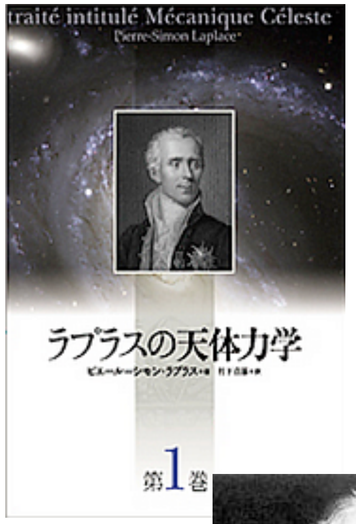
（昨年予報は，20個/時間）

もとは，ハレー彗星

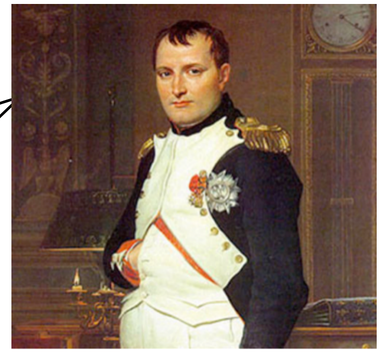
https://planetarium.konicaminolta.jp/stariumnavi/starguide/hoshizora/20171021.html

ニュートン力学の勝利　ラプラス「天体力学概論」

『あらゆる物理現象は原理的には力学 の運動方程式で解決可能である』



「この大著には宇宙について書いているが,宇宙の創造者については言及していないそうだな」



Napoléon Bonaparte
(1769–1821)

“I had no need of that hypothesis.”
(実際にはフランス語).
「私にはもはやその仮説は不要なのです.」

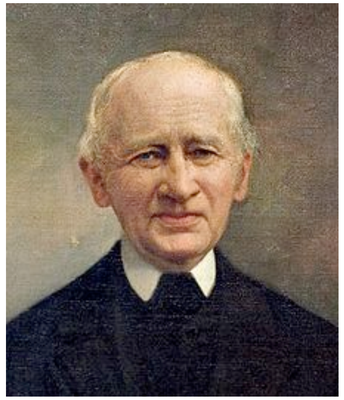
Pierre-Simon Laplace
(1749–1827)

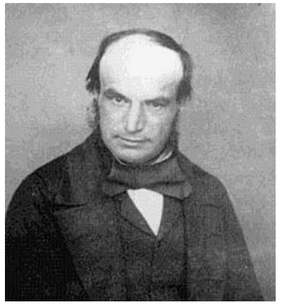
ニュートン力学の勝利　　海王星の発見

1781年　天王星の発見

ところが，天王星の軌道を長期間観測すると，予想された位置からずれが生じた．当時の計算には，他の惑星からの重力もきちんと取り入れられていたが，計算通りにはならなかった．そこで，天王星のさらに外側を回る第8惑星の存在が考えられた．

フランスのルヴェリエが予想軌道を算出．ドイツのガレに観測依頼の手紙を出した．
手紙を受けとったその晩 (1846年9月23日) に，ガレは計算値に非常に近い位置に惑星を発見した．





一方イギリスではアダムスが予想軌道を算出し，チャリスに観測を依頼していた．チャリスは，1846年7月から観測をはじめたが，星の同定作業を怠っているうちに，ガレによる海王星発見の報を知る．チャリスが観測ノートを見直してみると，ガレより 1ヶ月前に 2度，海王星を記録していたが新惑星であることを見落としていたことがわかった．

教科書 p58

1905年　物理学 奇跡の年

近代物理学の進展

現代物理学の進展

1600　1700　1800　1900　**1905**　1915　1925　60s　80s　00s

天文学

ケプラー

ガリレイ

力学

光学

ニュートン

電磁気学

解析力学

熱学／流体力学

ファラデー

マクスウェル

宇宙物理学

一般相対性理論

量子重力理論?

特殊相対性理論

場の理論

素粒子論

光電効果

原子核

経済物理

量子力学

複雑系

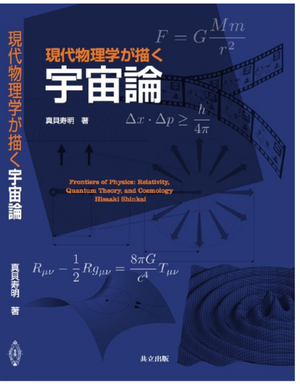
ブラウン運動

統計力学

物性物理

物理化学

生物物理

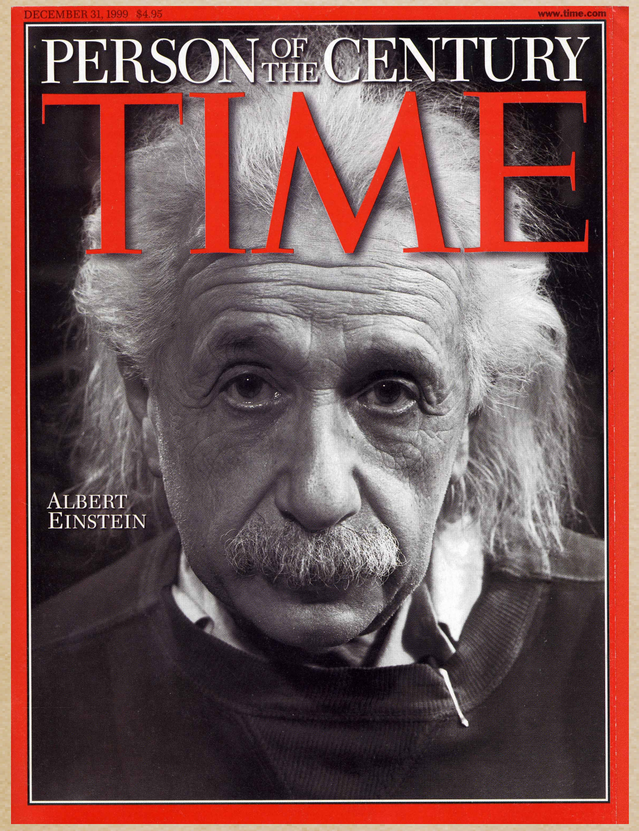


19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

1905年から新たな物理学が拓けていった。

アルベルト・アインシュタイン

1879 (明治12)/3/14　～　1955 (昭和30)/4/18



Time　1999/12/31号

26歳のアインシュタイン
（1905年）

国際物理年2005

World Year of PHYSICS 2005
www.physics2005.org

科学の重要性と，自然や
宇宙に対する真理探究の
重要性を訴える1年間

1905年は奇跡の年　(1)

光電効果の理論

A. Einstein, Annalen der Physik (Germany), 17, 132-148 (1905).

『光の発生と変換に関する一つの発見的な見地について』

（1905年3月18日投稿）

ブラウン運動の理論

A. Einstein, Annalen der Physik (Germany), 17, 549-560 (1905).

『熱の分子論から要求される静止液体中の懸濁粒子の運動について』

（1905年5月11日投稿）

（特殊）相対性理論

A. Einstein, Annalen der Physik (Germany), 17, 891-921 (1905).

『動いている物体の電気力学』

（1905年6月30日投稿）

1905年は奇跡の年　(2)

光電効果の理論

　光や電子が「波でもあり，粒子でもある」と考えれば，金属に光を当てたときに電子が飛び出す現象が説明できる.

⇒　「量子力学」の基礎を与えた.

ブラウン運動の理論

「ブラウン運動をする粒子の運動を測定すれば，原子（分子）の存在が結論づけられる」と予言した.

⇒　「確率過程論」の基礎を与えた.

（特殊）相対性理論

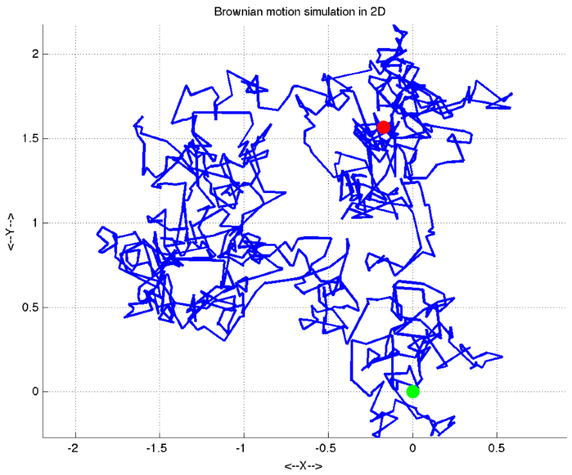
時間の流れが，観測者によって異なることを主張.

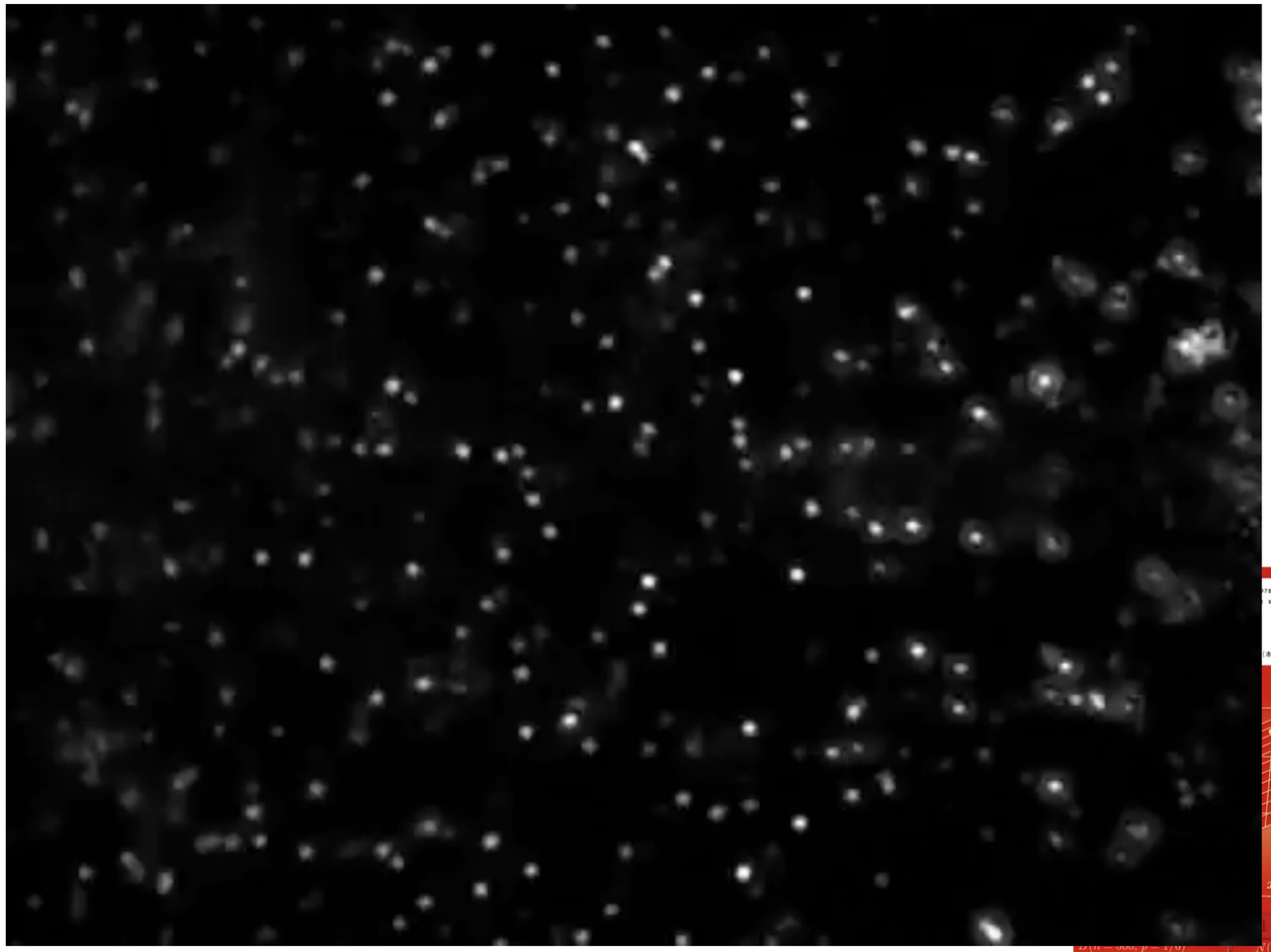
$E=mc^2$　の公式を得た．原爆・水爆・原子力発電へ応用.

⇒　「時間と空間の概念」を変えた.

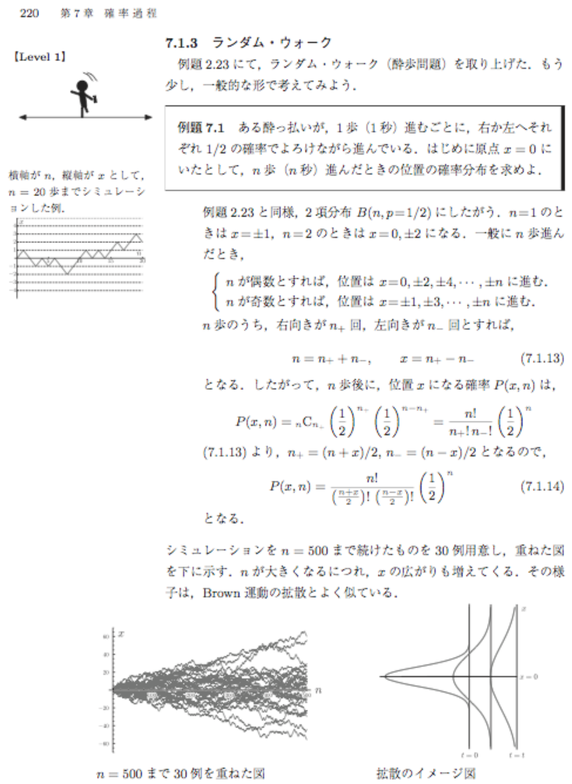
【物理】

ブラウン運動（＝水分子が微粒子を常に動かす）





Robert Brown (1773-1858)



220　第7章　確率過程

7.1.3　ランダム・ウォーク

【Level 1】

例題 2.23 にて，ランダム・ウォーク（酔歩問題）を取り上げた．もう少し，一般的な形で考えてみよう．

例題 7.1　ある酔っ払いが，1 歩（1 秒）進むごとに，右か左へそれぞれ 1/2 の確率でよろけながら進んでいる．はじめに原点 $x=0$ にいたとして，n 歩（n 秒）進んだときの位置の確率分布を求めよ．

横軸が n，縦軸が x として，$n=20$ 歩までシミュレーションした例．

例題 2.23 と同様，2 項分布 $B(n,p=1/2)$ にしたがう．$n=1$ のときは $x=\pm1$，$n=2$ のときは $x=0,\pm2$ になる．一般に n 歩進んだとき，

$$\begin{cases} n \text{ が偶数とすれば，位置は } x=0,\pm2,\pm4,\cdots,\pm n \text{ に進む．} \\ n \text{ が奇数とすれば，位置は } x=\pm1,\pm3,\cdots,\pm n \text{ に進む．} \end{cases}$$

n 歩のうち，右向きが n_+ 回，左向きが n_- 回とすれば，

$$n = n_+ + n_-, \qquad x = n_+ - n_- \tag{7.1.13}$$

となる．したがって，n 歩後に，位置 x になる確率 $P(x,n)$ は，

$$P(x,n) = {}_n\mathrm{C}_{n_-}\left(\frac{1}{2}\right)^{n_-}\left(\frac{1}{2}\right)^{n-n_+} = \frac{n!}{n_+!\,n_-!}\left(\frac{1}{2}\right)^n$$

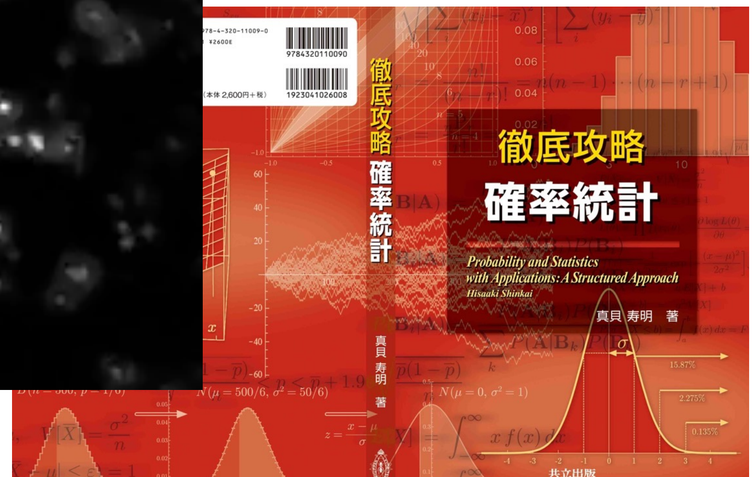
(7.1.13) より，$n_+=(n+x)/2$, $n_-=(n-x)/2$ となるので，

$$P(x,n) = \frac{n!}{\left(\frac{n+x}{2}\right)!\left(\frac{n-x}{2}\right)!}\left(\frac{1}{2}\right)^n \tag{7.1.14}$$

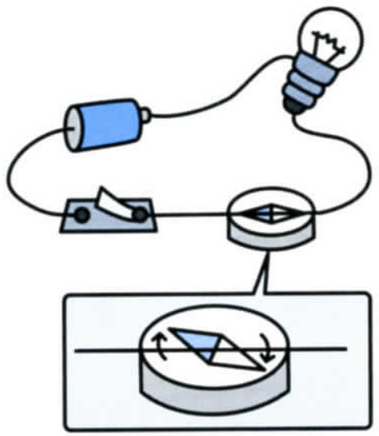
となる．

シミュレーションを $n=500$ まで続けたものを 30 例用意し，重ねた図を下に示す．n が大きくなるにつれ，x の広がりも増えてくる．その様子は，Brown 運動の拡散とよく似ている．

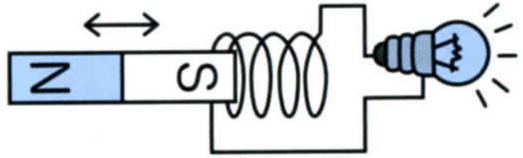
$n=500$ まで 30 例を重ねた図　　拡散のイメージ図



電磁気学の進展



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

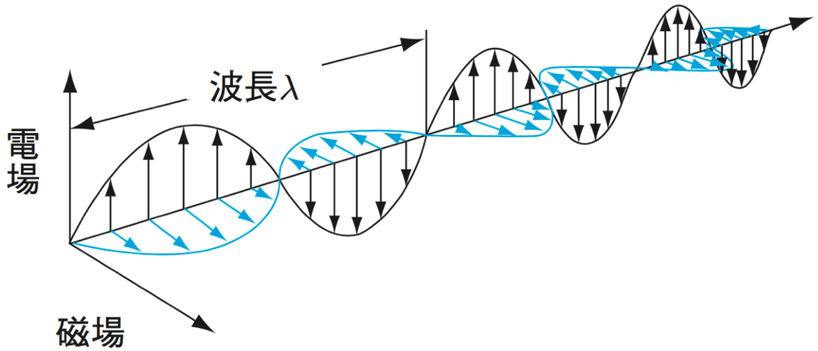
コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

電磁誘導現象の発見（1831年）

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

マクスウェル

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ（1864年）、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



ヘルツ

電磁波は確かに光の速さで伝わっていた。

電磁波（電波）の受発信に成功し、光の電磁波説を実証する（1888年）

教科書 p53

電磁気学の完成（Maxwell, 1864）

◆Advanced　マクスウェル方程式

マクスウェルがまとめた電磁気学の方程式は次の 4 本の式から成り立つ．$\boldsymbol{E}$ は電場ベクトル，$\boldsymbol{B}$ は磁場ベクトル，ρ は電荷密度，$\boldsymbol{j}$ は電流ベクトル，c は光速とする．また，∇ は微分演算子とする．

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 4\pi\rho, \tag{2.6}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \tag{2.7}$$

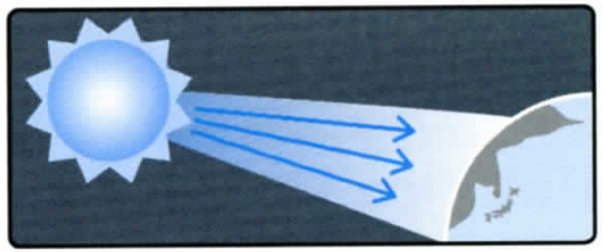
$$\nabla \times \boldsymbol{B} - \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j}, \tag{2.8}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = 0. \tag{2.9}$$

3.2.1 電磁気学で生じた疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの（媒質）は何か？

音波は空気中の分子の振動が伝える。



電磁波（光）は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える？

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか？

電磁波を伝える媒質として

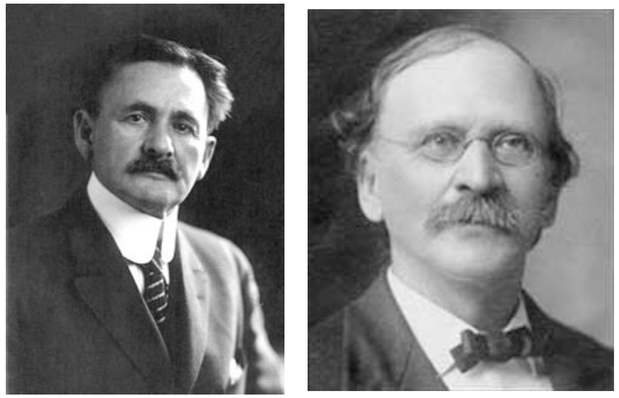
「エーテル」（ether; 天空をみたす物質）

が存在するはずだ.

教科書 p61

マイケルソン・モーリーの実験

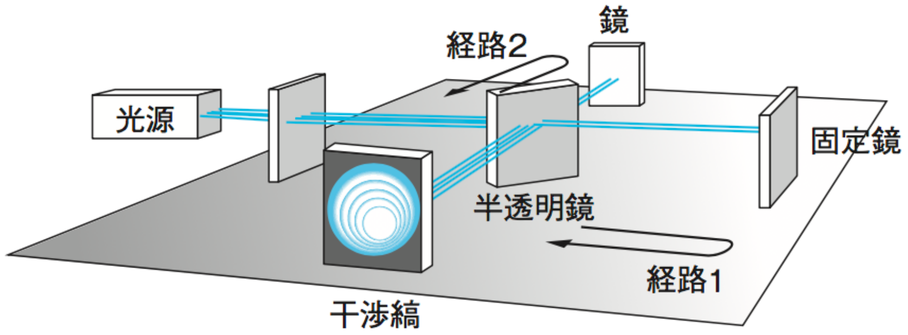
Michelson-Morley experiment　1887

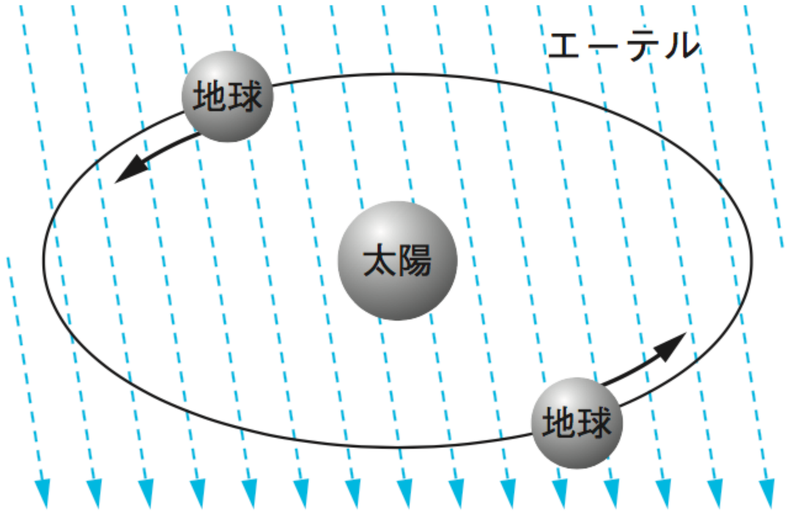


電磁波を伝える媒質としての

「エーテル」を探す実験

微小距離を測定する干渉計

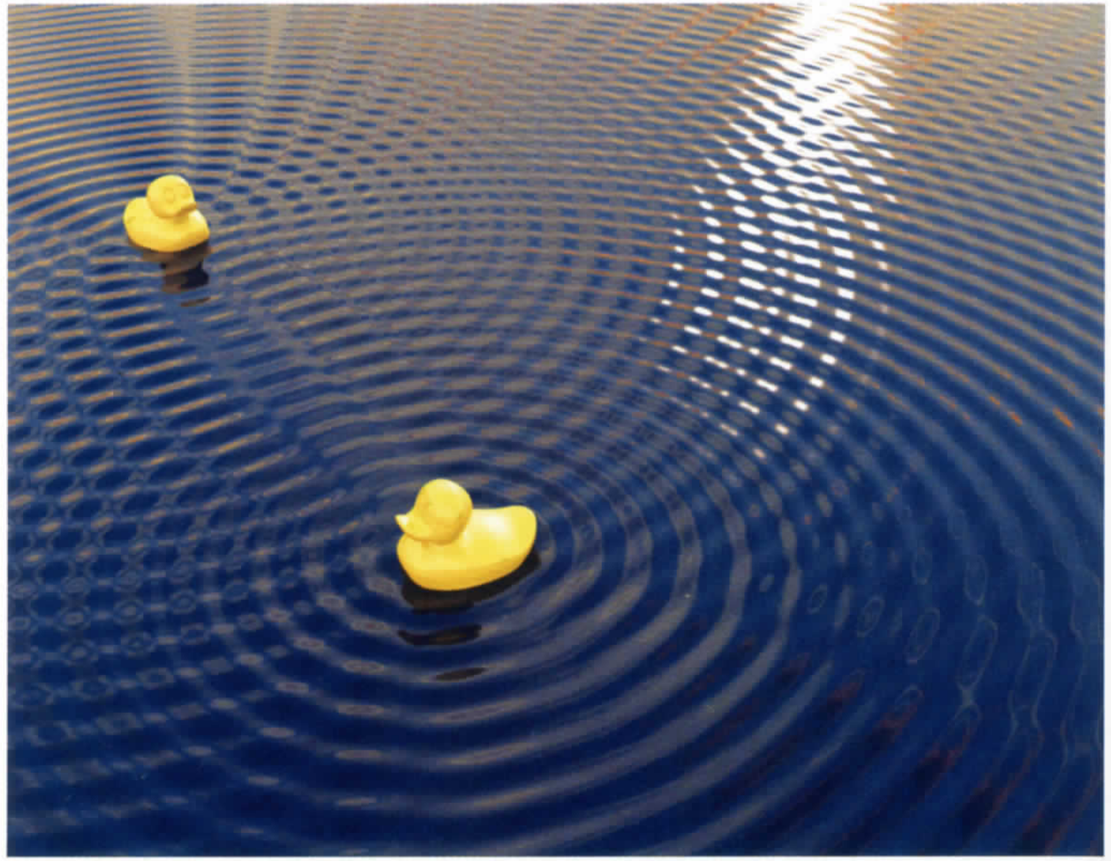




エーテルがあれば，季節で距離が変わるはず.

微妙な差でも，干渉計なら測れるはず.

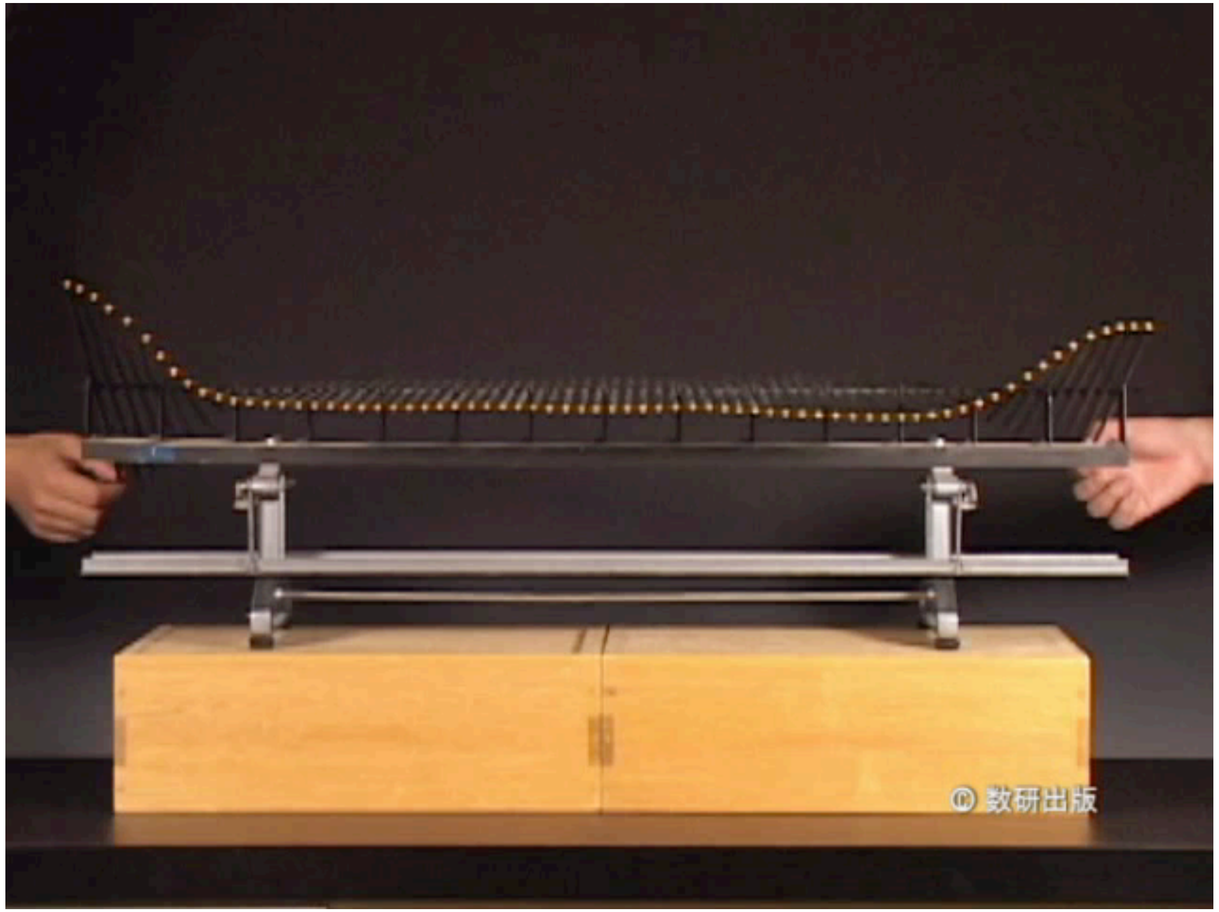
波の干渉



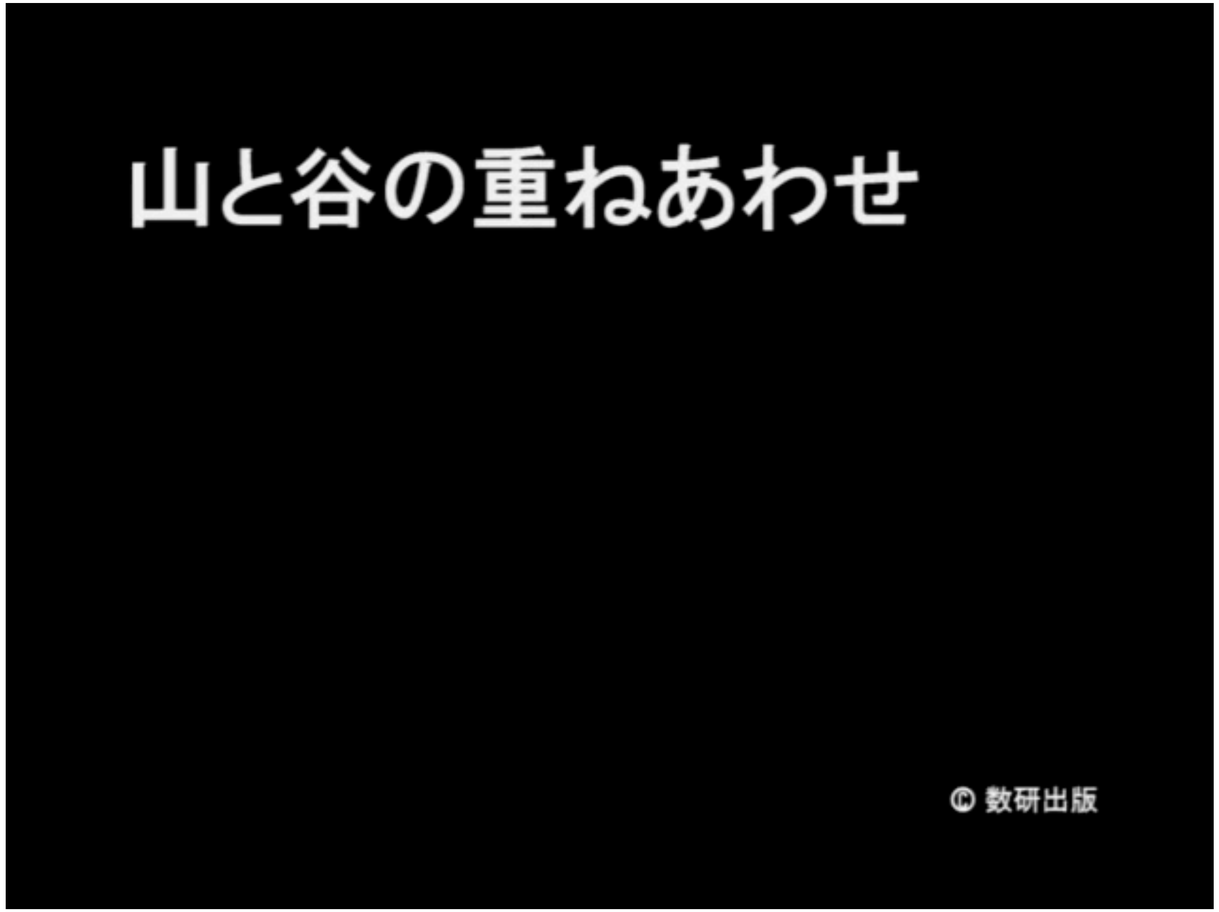
Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

マイケルソン・モーリーの実験を理解しよう

波の干渉：　山＋山＝強い山　強めあう

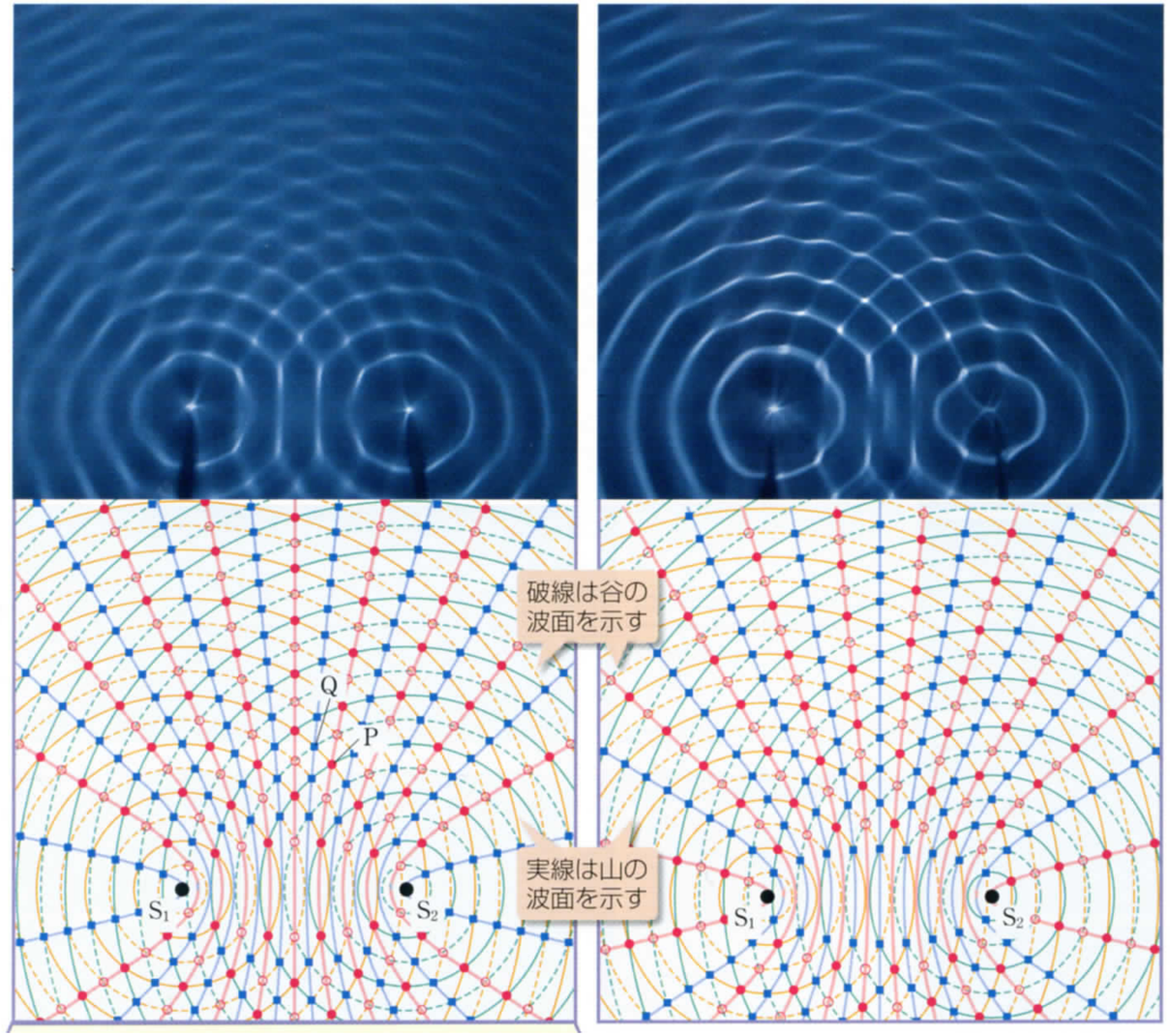


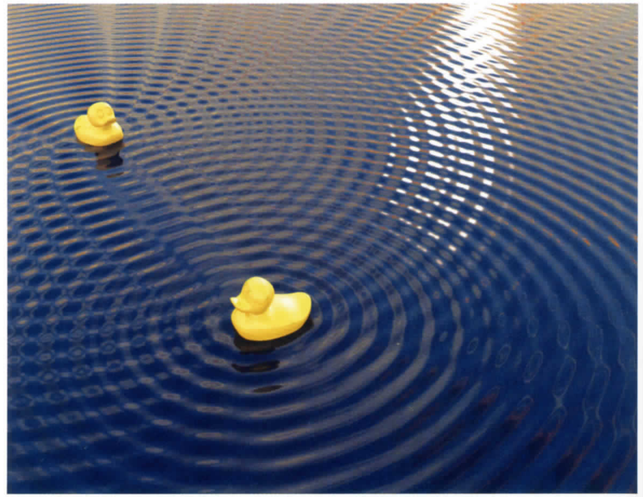
波の干渉：　山＋谷＝０　弱めあう



波の干渉　＝　強めあったり弱めあったりする現象

●同位相で振動する 2 つの波源の場合　●逆位相で振動する 2 つの波源の場合





Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

赤色で示した曲線（双曲線）―― は強めあう点を連ねて得られる曲線で，●（山と山）や○（谷と谷）の状態が移動していく経路を表している。
青色で示した曲線（双曲線）―― は，打ち消しあう点（■（山と谷））を連ねて得られる曲線であり，**節線**という。

ノイズキャンセリング ヘッドホン

ノイズキャンセリングヘッドホンとは？

周囲の騒音を低減し、クリアなサウンドを再生する
ノイズキャンセリングヘッドホン

NC NOISE CANCELING

電車内や航空機※などでのリスニング時に、走行音やエンジンノイズなどさまざまな騒音を低減。
勉強や仕事のときなどは、気が散る原因となる周囲の雑音を低減し、静かな環境で聴けるので目的に集中できます。また、音量を上げ過ぎずに音楽を聴きとれるので、周囲への音漏れの心配がありません

■ノイズキャンセリングヘッドホンの活躍シーン

電車の中でもクリアなサウンドで聴けます

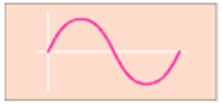
航空機※での移動時に快適にリスニング

勉強・仕事などに集中して取り組めます

※航空機内の音楽サービスシステムにより、ご使用になれない場合があります
※航空機内で電子機器の使用が禁止されている場合や、機内の音楽サービスを個人のヘッドホンで利用することが禁止されている場合は、本機を使用しないでください

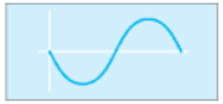
■ノイズキャンセリング機能の原理

MDR-NC6
内蔵マイク



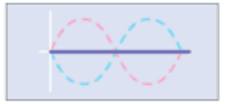
1.騒音（元の波）
ヘッドホンに内蔵されたマイクで周囲からの騒音を拾い、ノイズキャンセリング回路がその音を分析。

＋



2.逆位相の波
その騒音を打ち消す効果のある、逆位相の音を発生。

→

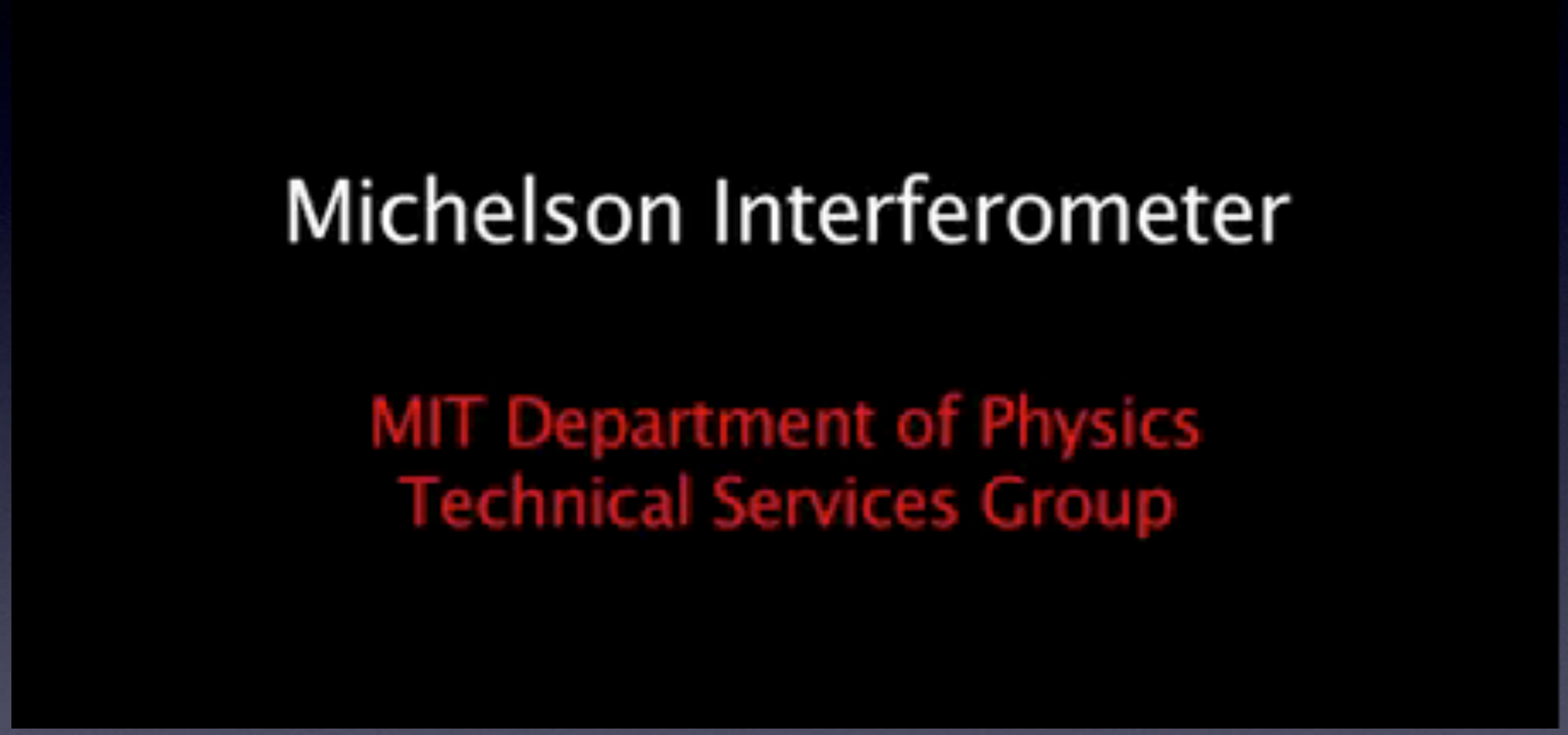


3.合成されて消えた波
元の波を反転させた逆位相の波を重ね、元の波を消去。これにより周囲の騒音を低減します。

＊ノイズキャンセリング機能は、人が耳障りに感じやすい40～1,500Hzの音を低減させます。周囲からの騒音がまったく聞こえなくなるわけではありません

http://www.sony.jp/headphone/select/popup_noise_cancel.html

マイケルソン型干渉計のしくみ

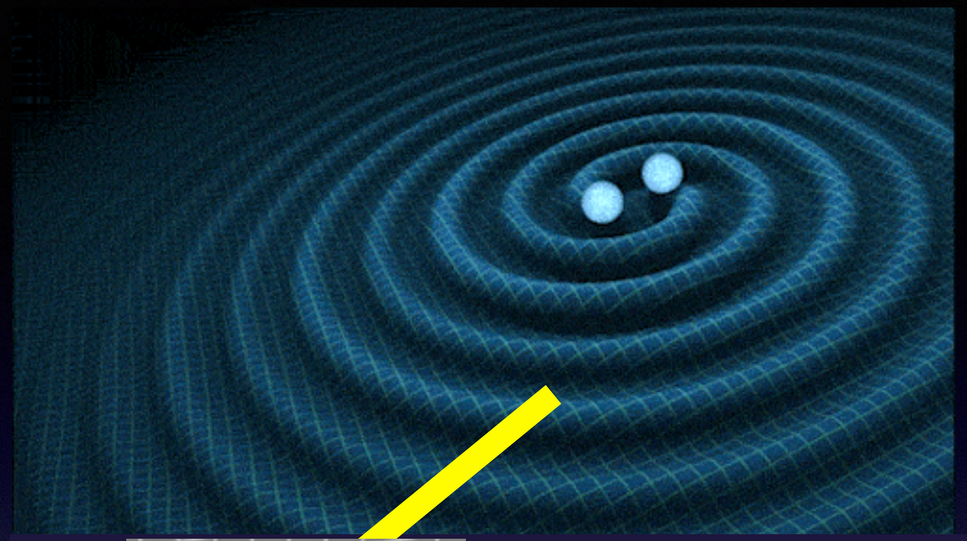


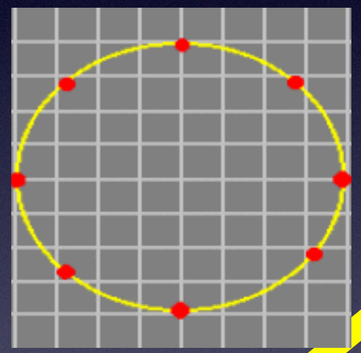
start on click, last half, 1'45"

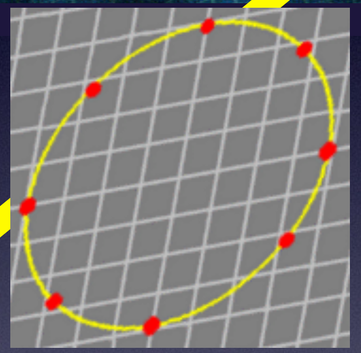
http://techtv.mit.edu/videos/9823-michelson-interferometer

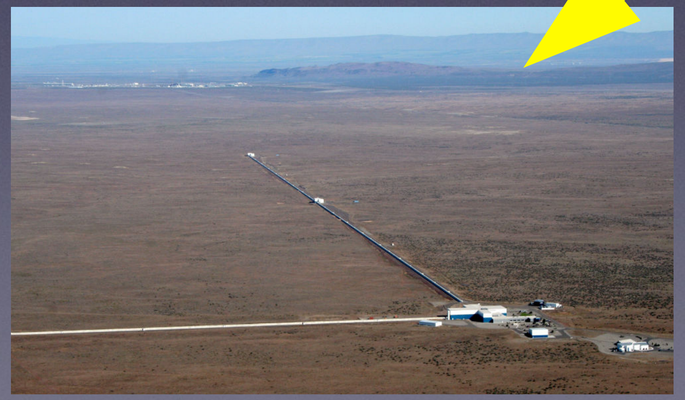
重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星







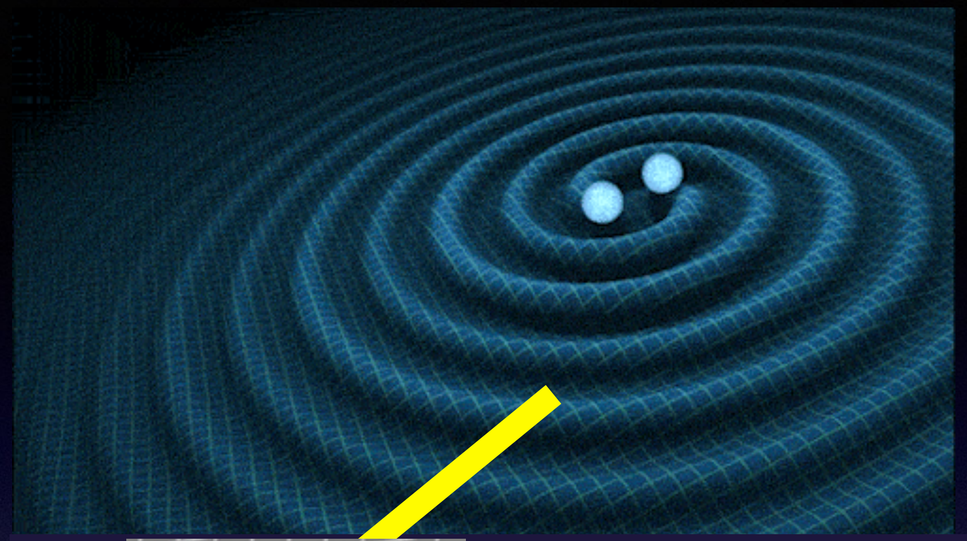


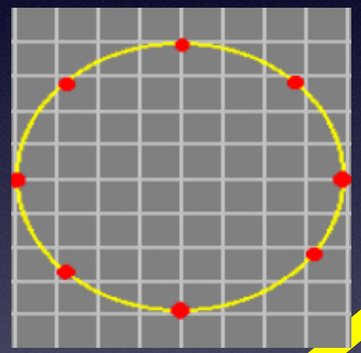
レーザー干渉計

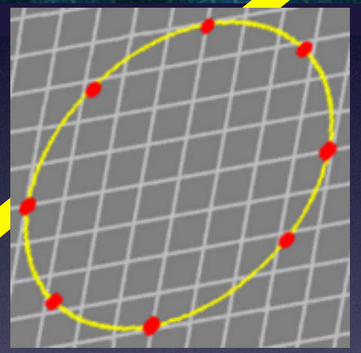
LIGO＝Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

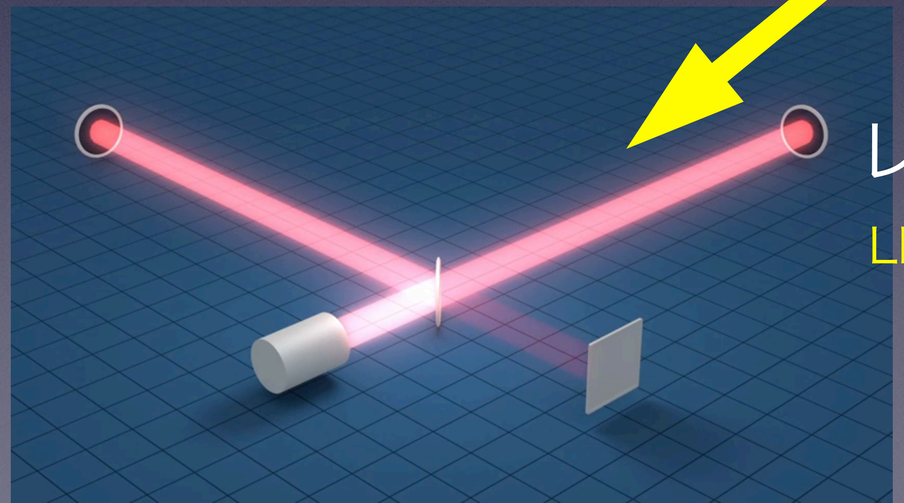
重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星









レーザー干渉計

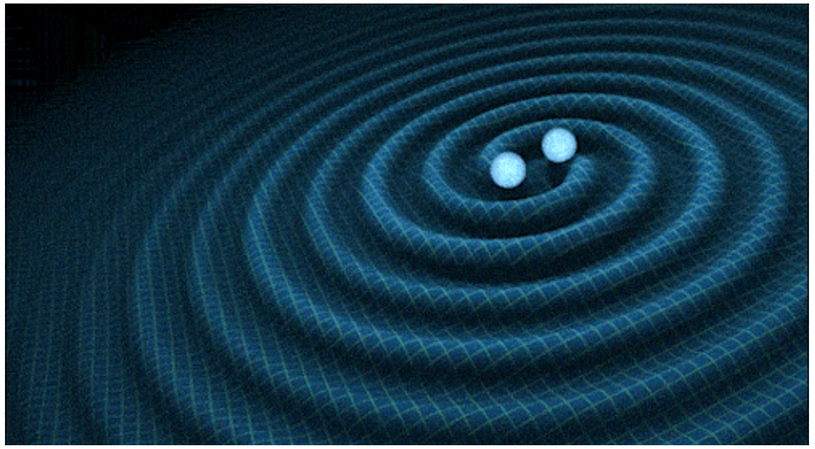
LIGO＝Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

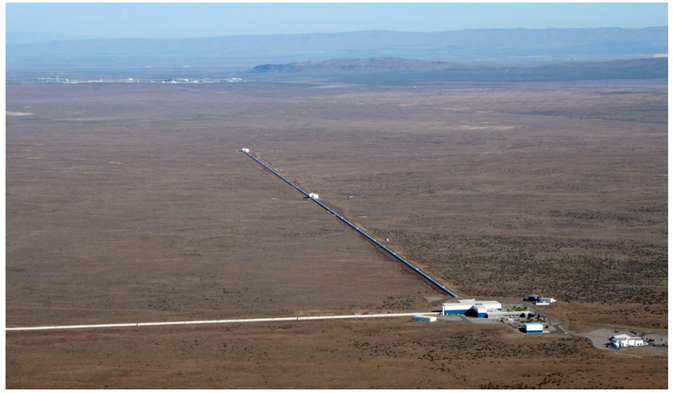
ノーベル物理学賞受賞者 2017年

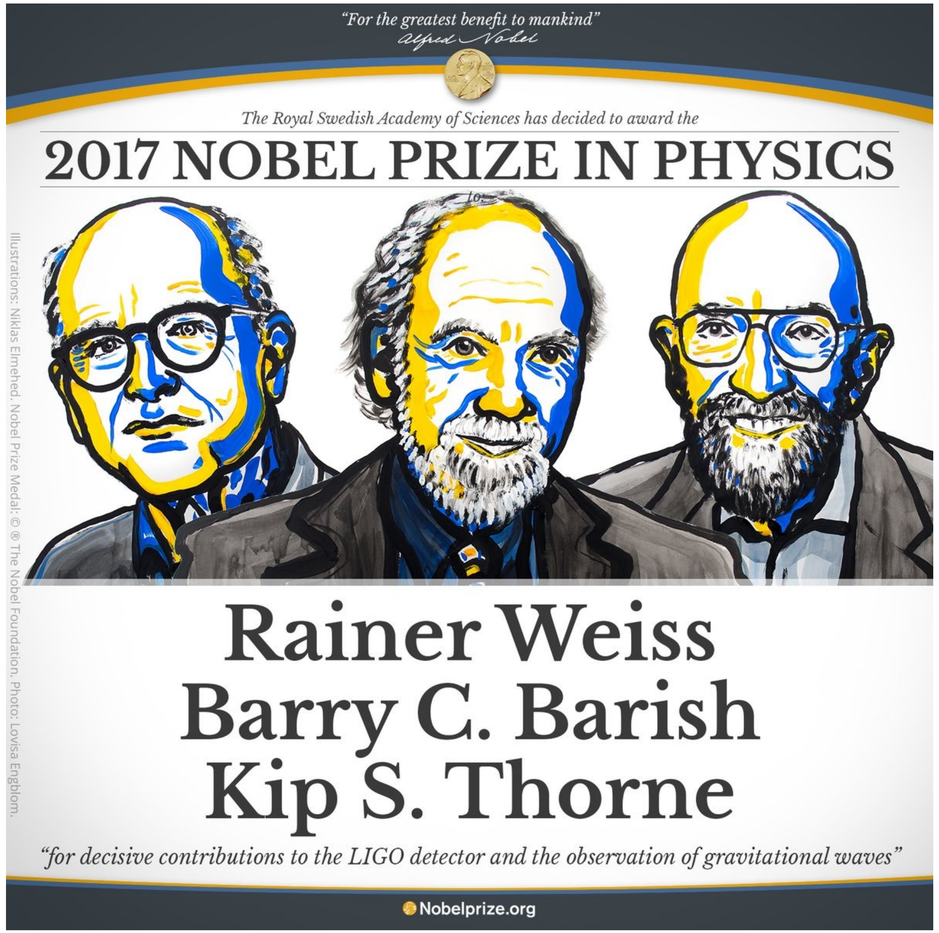
Nobel Laureates in Physics 2017

重力波の初観測に成功したアメリカの重力波検出グループLIGO（ライゴ, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)の３名へ.

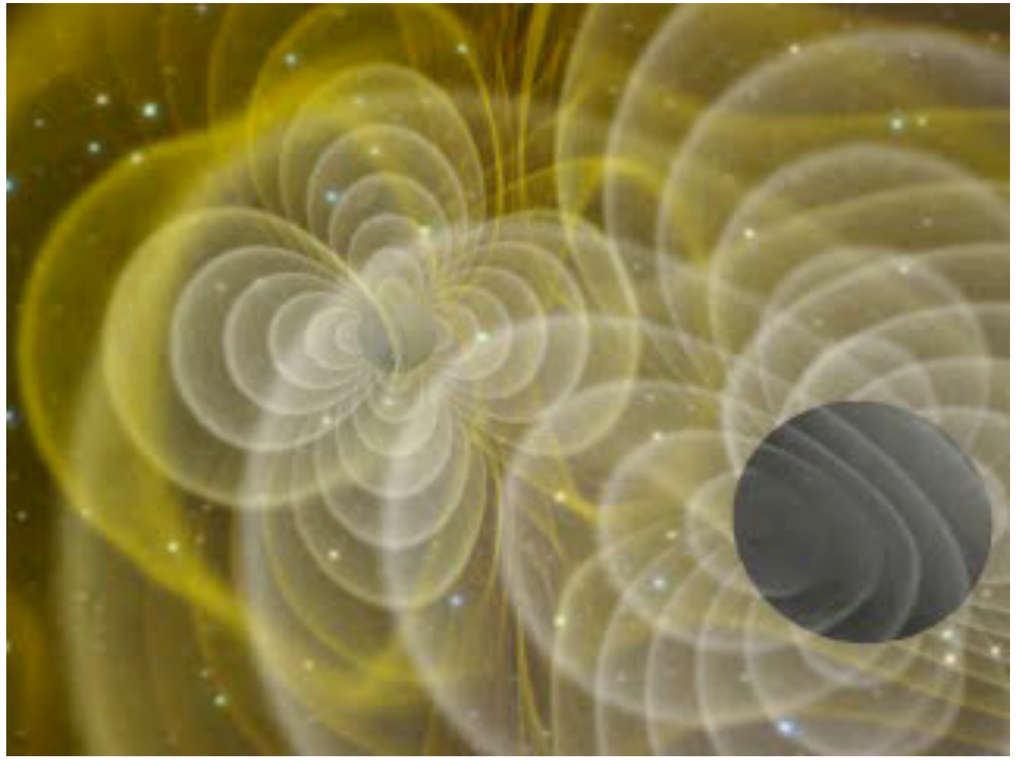
贈賞理由は，"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"（LIGO検出器開発への貢献と重力波の観測）.



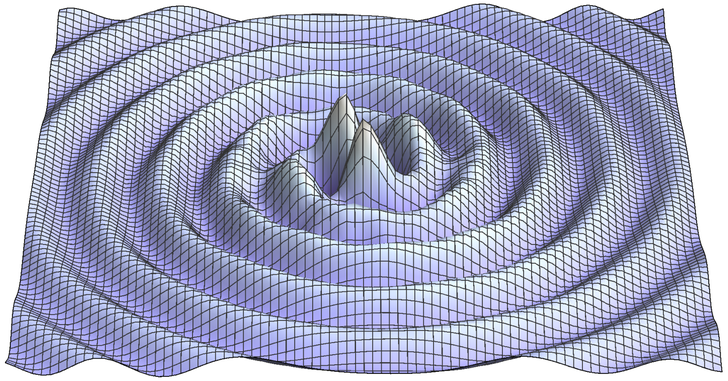


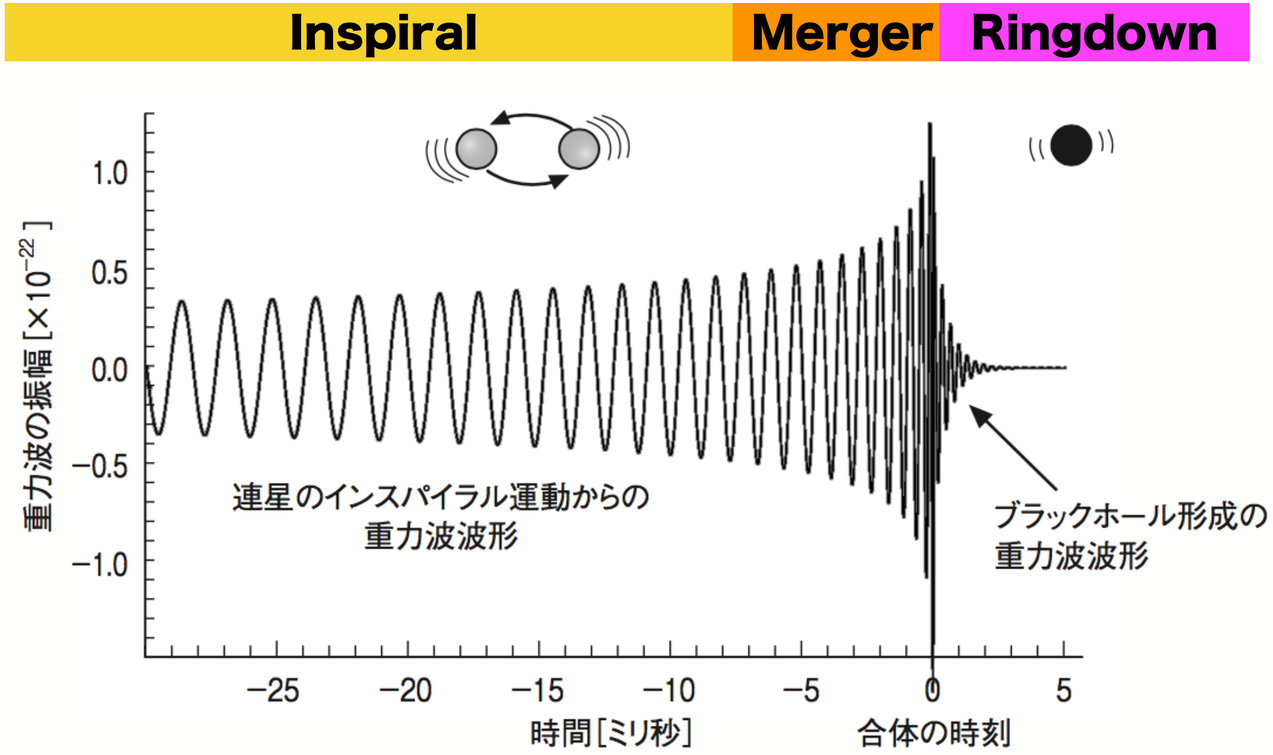


連星合体からの重力波の波形(理論予測)

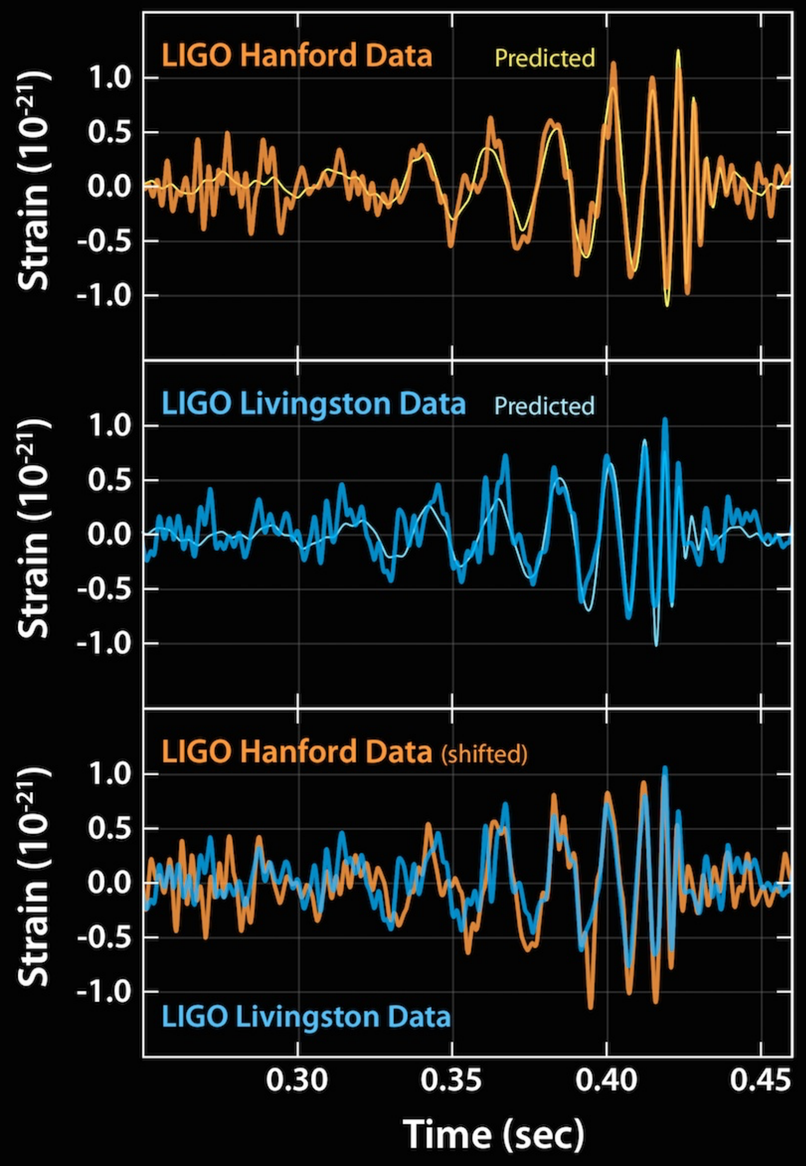


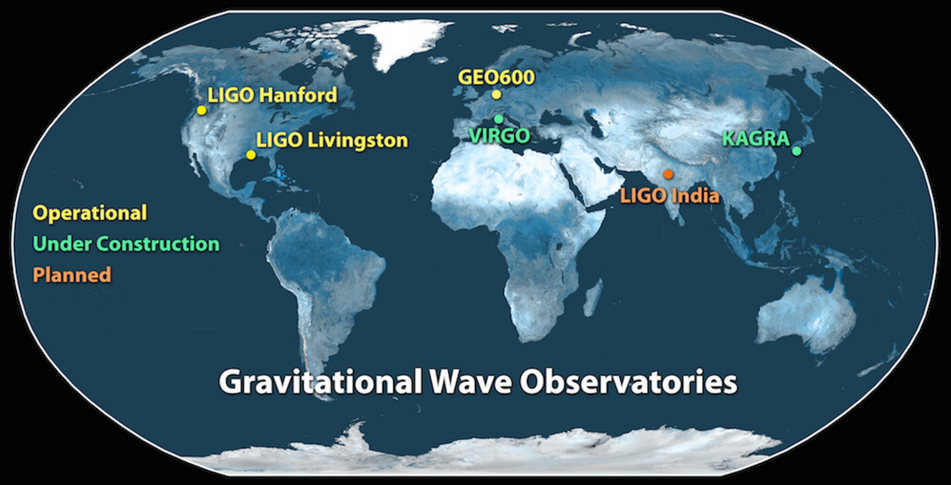
(NCSA-AEIグループ, 1998年)





2015年9月14日





太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して,
太陽の62倍のブラックホールになった.

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先

KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設
地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度（20K）まで冷却
熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/history

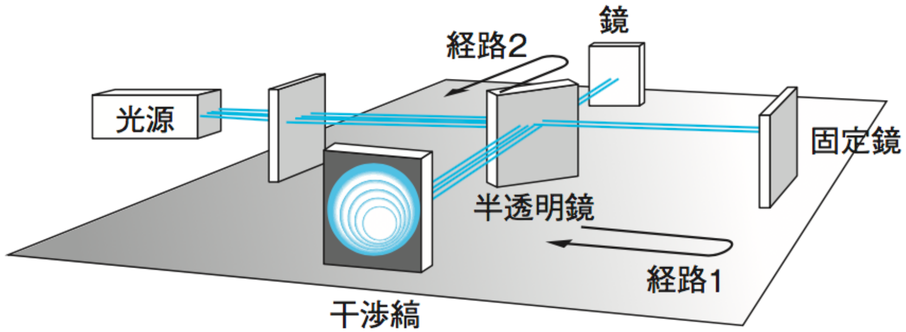
教科書 p61

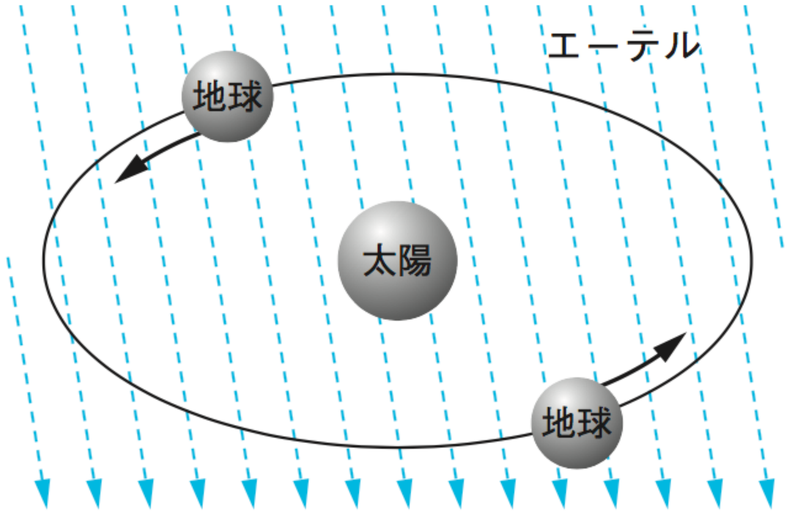
マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment　1887

→エーテルの検出に「失敗」

微小距離を測定する干渉計





エーテルがあれば，季節で距離が変わるはず.

微妙な差でも，干渉計なら測れるはず.

（特殊）相対性理論(1905年)

- **発端：**
  電磁気学の式に出てくる「光速c」は誰から測った速さなのか．光は真空でも伝わるのか．

- **当時の考え：**
  光はエーテル中を伝わる．「光速c」は座標系によって変化するはずだ．ただし，エーテルは未発見．．．．

- **アインシュタインの考え：**
  光速度は誰から見ても一定，光は真空でも伝わり，物理法則は座標系によらず不変のものでなければならない．

本日のミニッツペーパー記入項目　出席票を兼ねます.

【5-1】(本日の講義から)

ニュートン力学が認められることになった実験や観測を1つ説明せよ.

【5-2】(本日の講義から)

リサ・ランドールが唱えたパラダイムとは何か.

【5-3】(次回, 未来へ行くタイムマシンの話をするのですが)

行けるとしたら何年後の未来へ行ってみたいですか？

【5-4】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)

レポート課題締め切り10月31日　詳細は前々回プリント配布