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

第5回　2026/10/19

第2章　近代物理学の夜明け（2）



「神戸ハーバーランドの
mosaicの壁で
発見しました」

真貝　寿明
Hisaaki Shinkai

真貝の武庫川講義ページtop

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

レポート課題締め切り10月31日　詳細は前々回プリント配布

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」





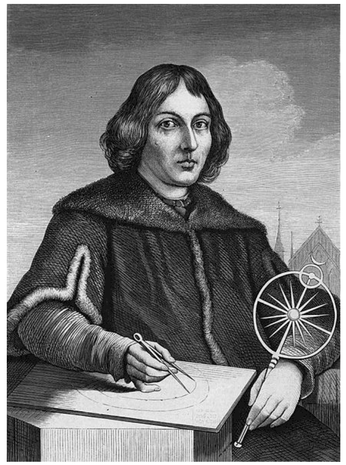
提出日・様式など

- 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

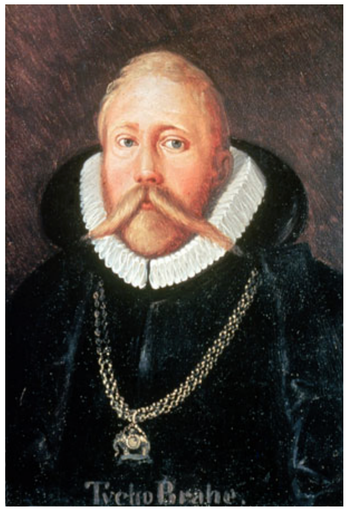
Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



地動説

ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



天体観測

ケプラー

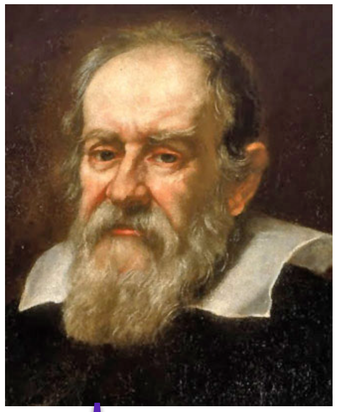
Johannes Kepler
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

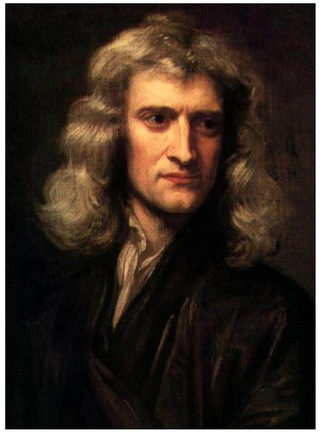
Galileo Galilei
(1564-1642)



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

昔の人はよくもここまで・・・感心した人たち

日測の記録が正確な計算に使えたことにおどろきました。

昔の人たちは、天体のことや、ニュートンが発見した重力などをまず、疑問に思ったことがすごいと思いました。

天動説から地動説への変遷において、観測データの精度や歴史的な偶然が深く関わっていたことがわかり、興味深かった。

惑星の軌道はなぜ楕円なのかという疑問にとても共感した。そういうものだと思っていたけど、おもしろい着眼点だと感じた。

ヨーロッパ以外の地域で、このような天体の運動について
どう捉えられていたのか。科学的な推論が行われていたのか気になりました。

昔は望遠鏡などの技術が発達していなかったのに、どのようにして惑星の位置や動きを正確に記録していたのでしょうか

数学で今の世界の常識になるものが発見されていることが凄いと思った。見つけた時の科学者たちは大興奮だっただろうなと思った。

ティコ・ブラーエもヨハネス・ケプラーも
コペルニクスの本に影響されていたので
当時彼が同年代の学者にあたえた
影響のおおきさを実感した。

天文学の発展には、観測記録も重要な役割を果たしていると分かった。

宇宙や正しいとされていることが、信仰によってまがっていくことが怖いとも感じました。

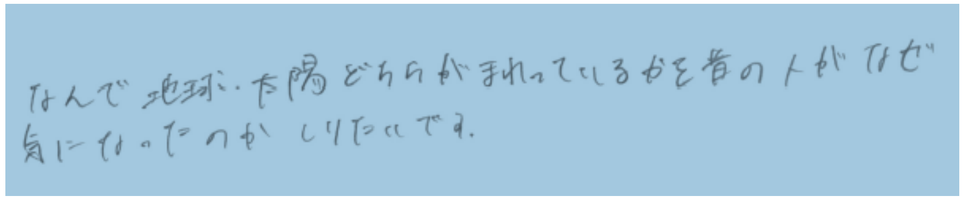
ガリレイが振り子や望遠鏡を
開発したと聞いてなぜこんなに
かしこく計算などができたんだろう
と思いました。

前回のミニッツペーパーから

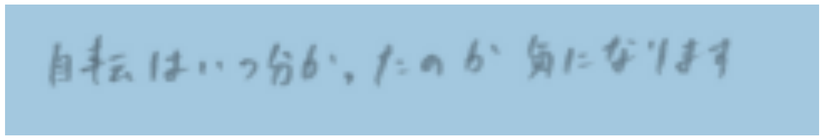
疑問が生じた人たち



神が宇宙をつくった, という教義に矛盾が生じてしまうから



宇宙の姿を知りたいのが人間の好奇心



フーコーです. あとで登場します

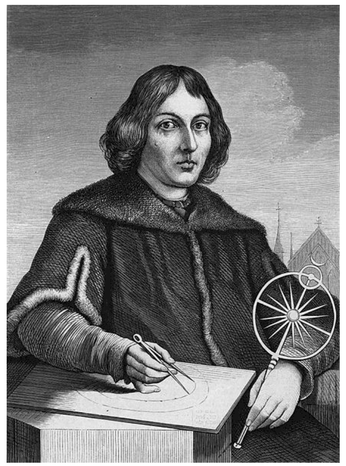


火星の大気圧は地球の1%以下です. 難しいかも. . .

（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

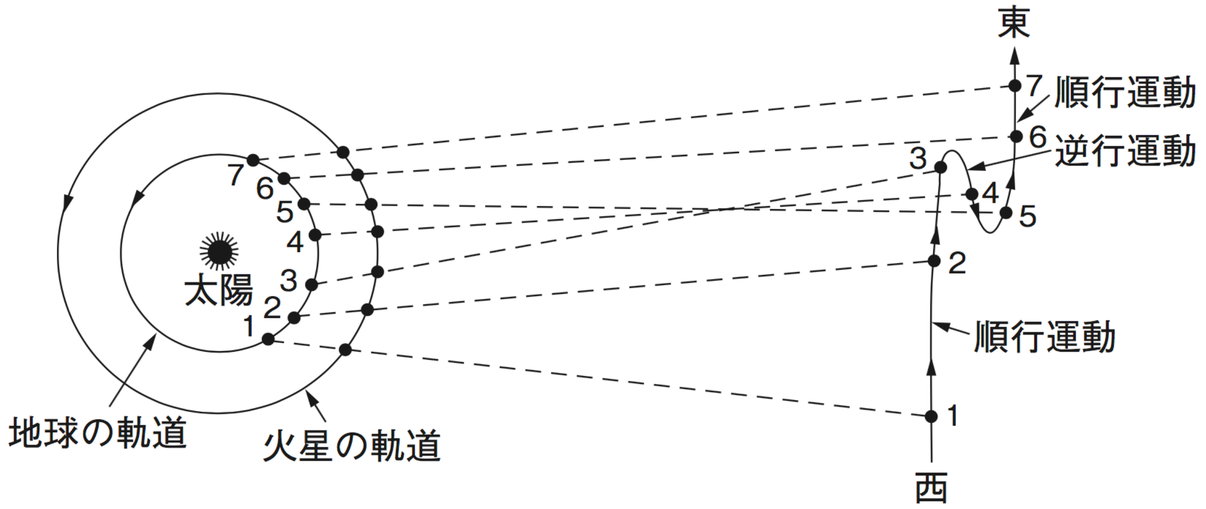


図 2.5　地動説では，火星が逆行することが自然に説明できる．

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よかった。

地動説がどのように唱えられたかがよくわかりました。

『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．

前回のミニッツペーパー記入項目

「コペルニクス的てんかい」

（a）漢字で表記すると？　コペルニクス的転回（正解 22/41, 54%）

（b）意味は？　物事の見方が180度変わってしまうこと

（正解 12/41, 29%）

それまでの根本的な物の見方や考え方が、逆の視点から劇的に覆され、全く新しいものに変わること

今まで当たり前だと思われていた考え方を根本的なところからひっくり返すこと

物事の発想や見方が正反対に変わること。

物事の見方や発想を根本的に常識や前提をひっくり返す

転回
物事の見方などが180度変わること。

物事の常識等が180度ひっくり返ること

物事の見方が根本的に変化すること。

物の見方が180°変わること

物事の見方が180度かわって、考え、見方がかわること、

考え方が根本から変わる

ボクシングで人生が380度変わった



ガッツ石松

（復習）ティコ・ブラーエ

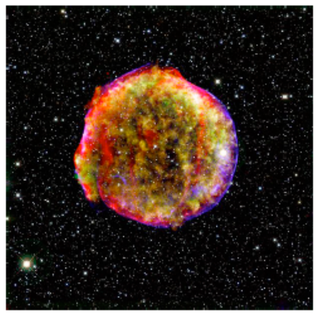
ティコ・ブラーエ

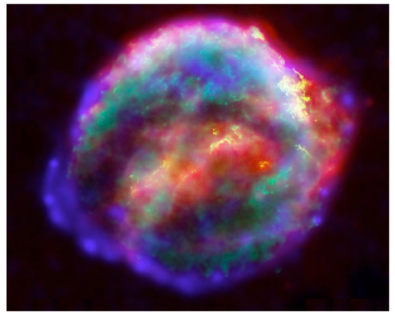
Tycho Brahe
(1546-1601)



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)

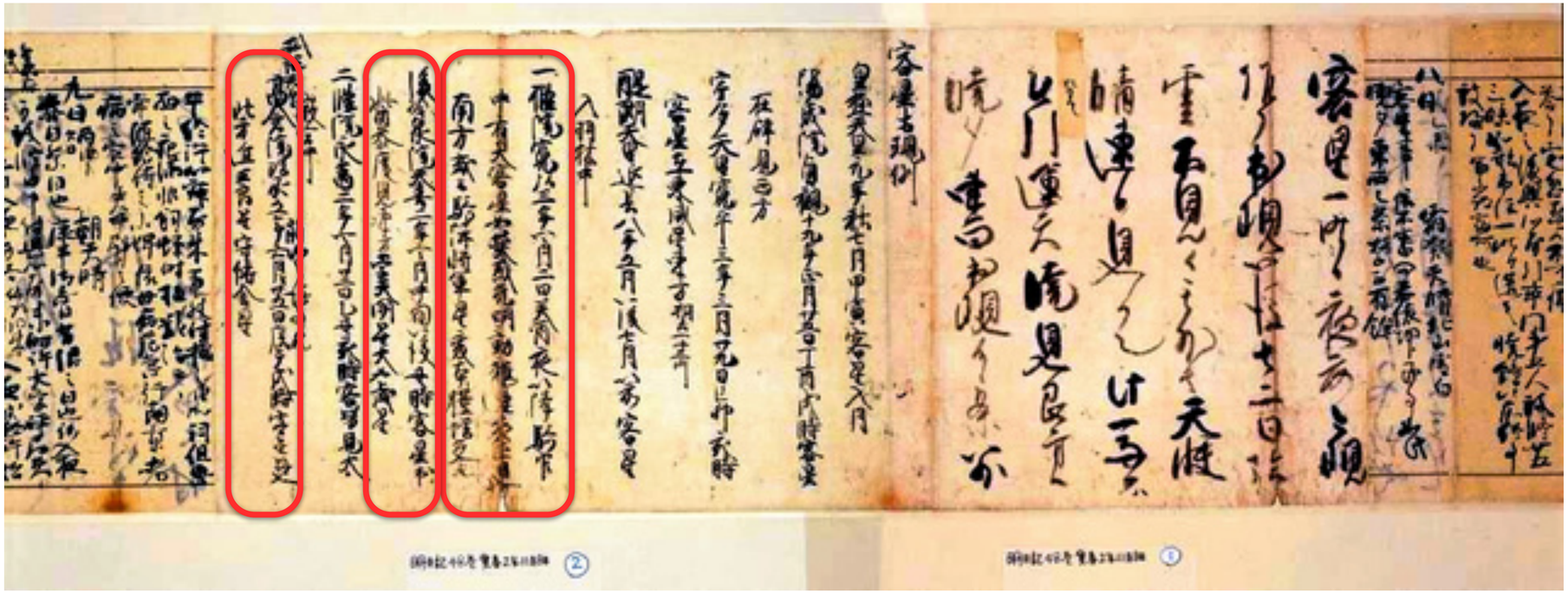

SN1604 (ケプラーの新星)

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．





1 安倍清明の息子，安倍吉昌がSN1006を観測

2 清明の子孫（詳細不明）がSN1054を観測

3 清明の子孫（詳細不明）がSN1181を観測

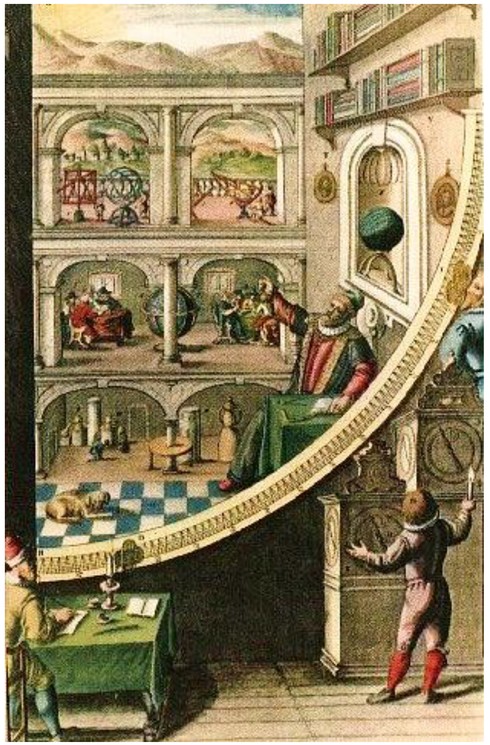
藤原定家本人も見ている可能性あり

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。

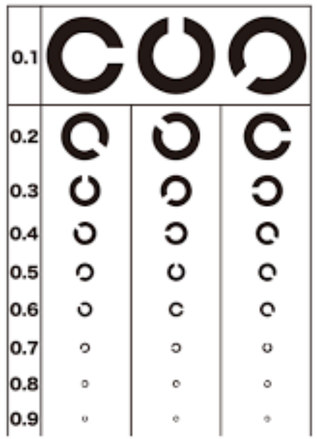
ティコ・ブラーエは地動説を信じなかった

Tycho Brahe
(1546-1601)





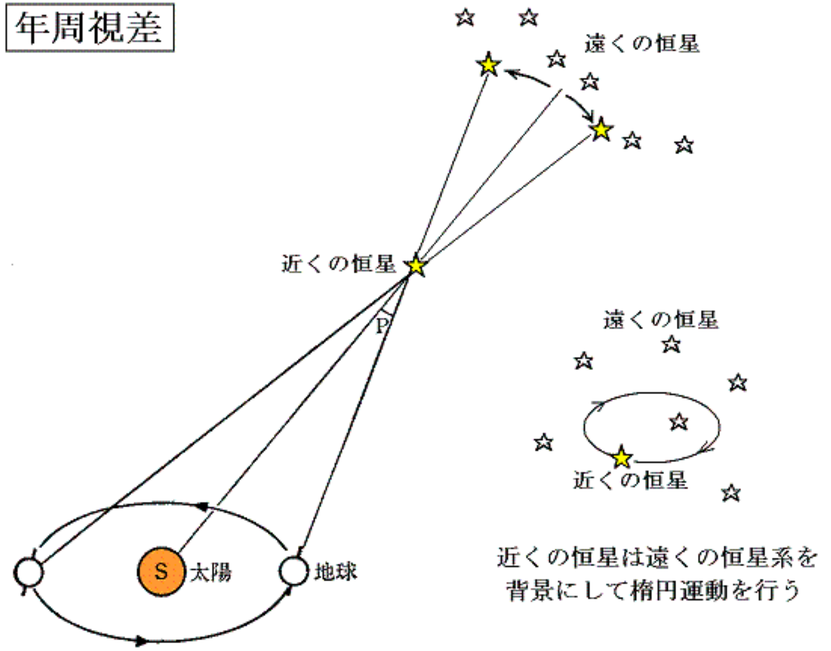
当時は肉眼観測，2分角（1度の 1/30）までの観測能力



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



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

前回のミニッツペーパーから

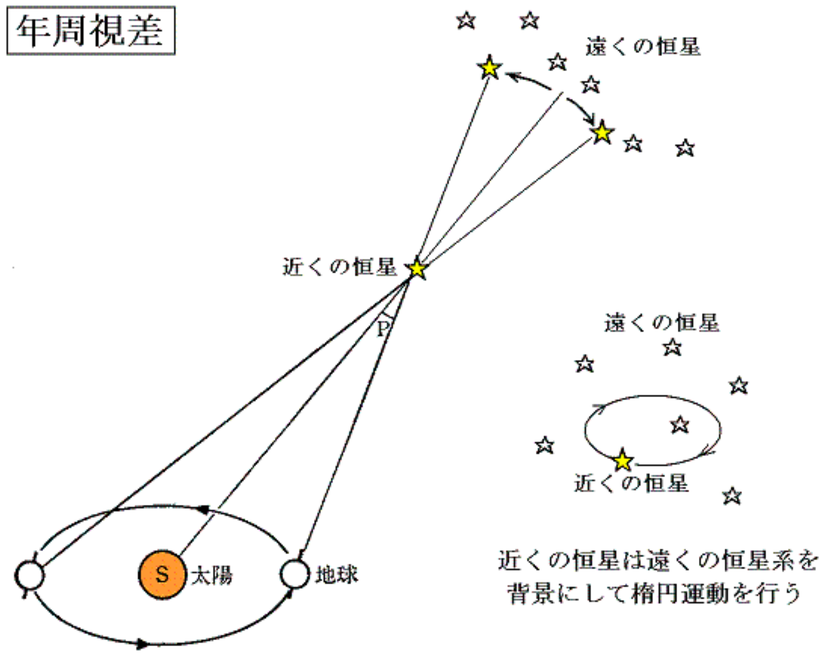
昔は望遠鏡などの技術が発達していなかったのに，どのようにして惑星の位置や動きを正確に記録していたのでしょうか

大きな分度器で，星々の相対位置を測定していた

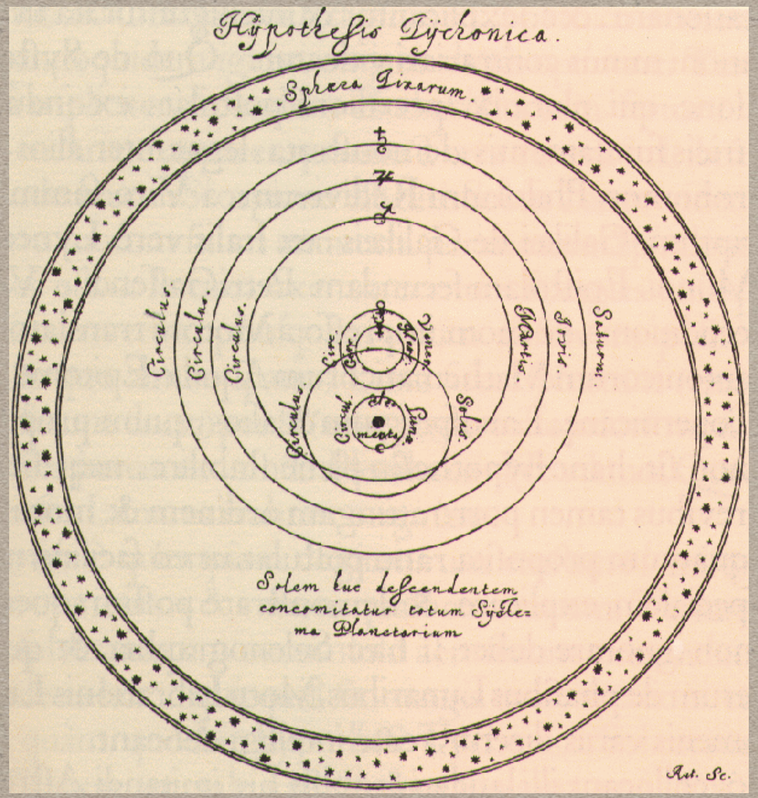
ティコ・ブラーエはケンタウロス座でも0.16？秒角差？だったことから年周視差をみつけることが出来なかったとおっしゃっていましたが、結局誰がみつけたのですか？

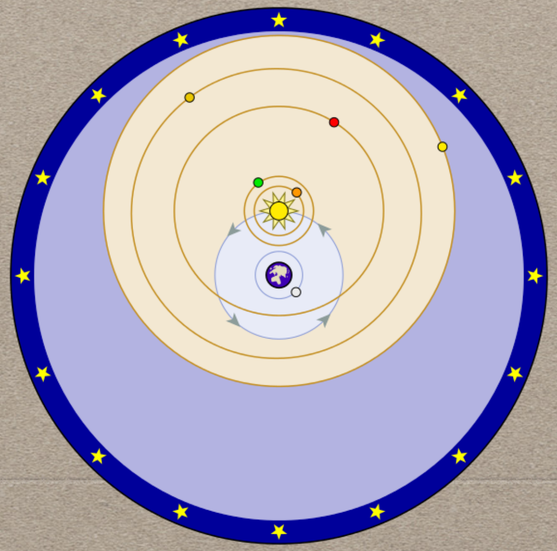
年周視差を初めて発見（検出）したのは、ドイツの天文学者ベッセル（Friedrich Wilhelm Bessel）

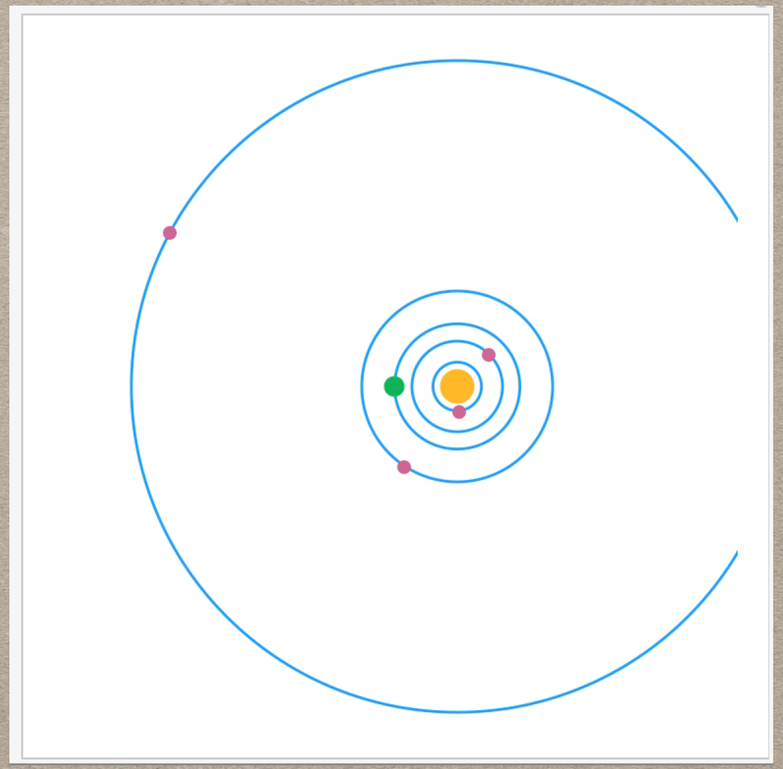
- 発見年: 1838年
- 対象の星: はくちょう座61番星
- 視差の値: 約0.314秒角



1583 Tychonian planetary model







ティコ・ブラーエの説

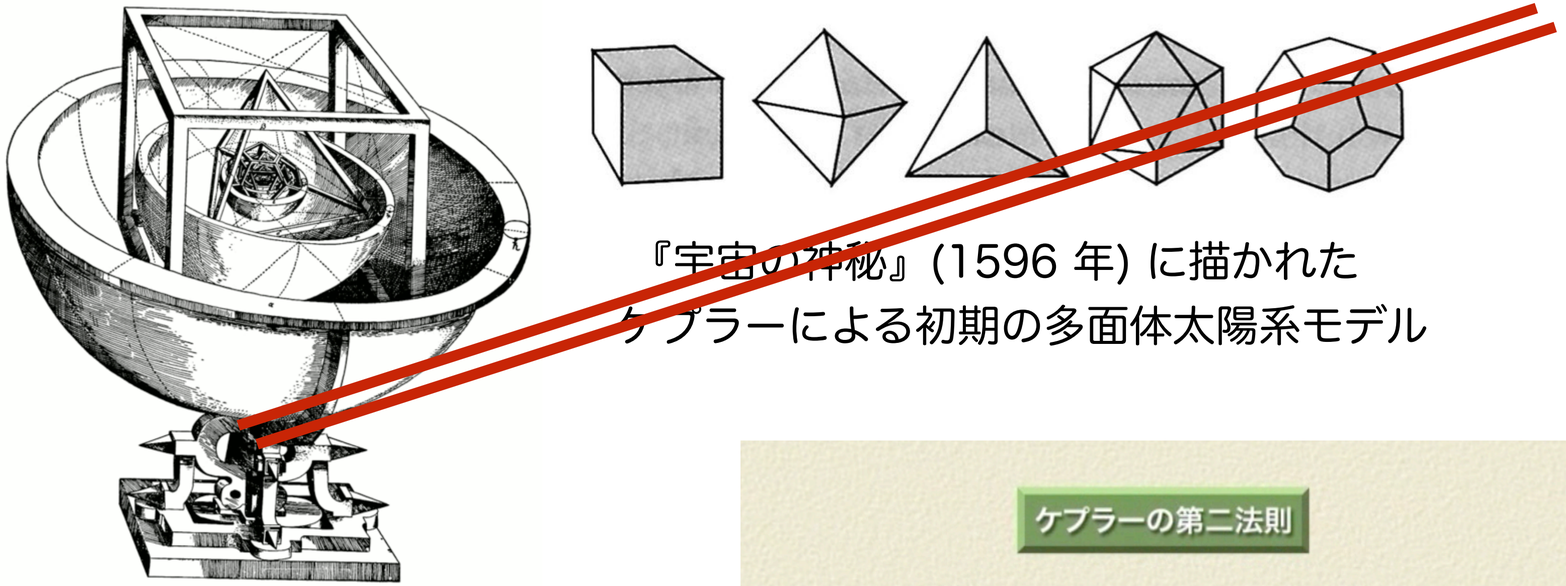
Tycho Brahe

第谷 布拉赫

（復習）ヨハネス・ケプラー

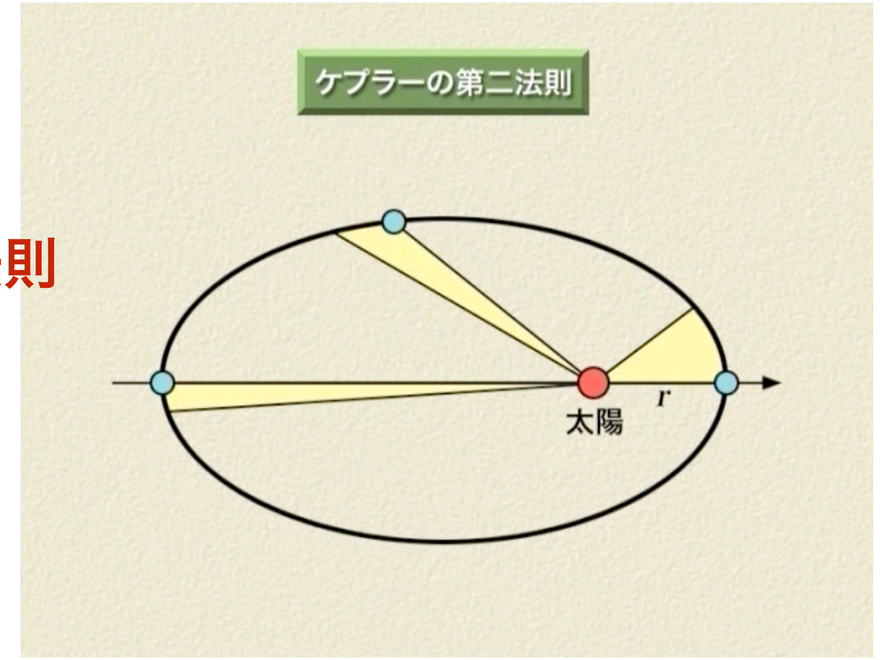
ケプラー
Johannes Kepler
(1571-1630)





『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.

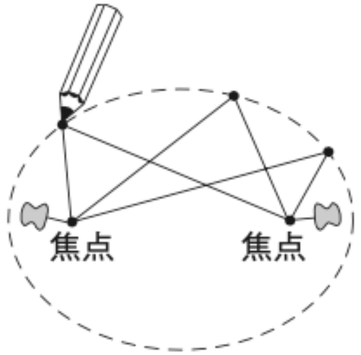
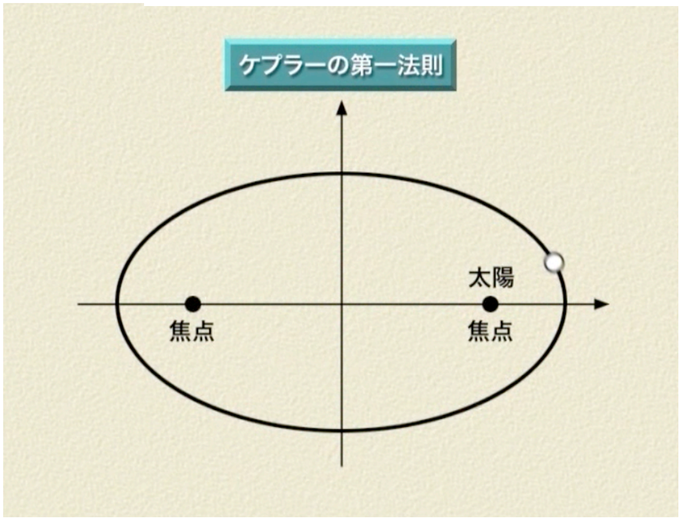
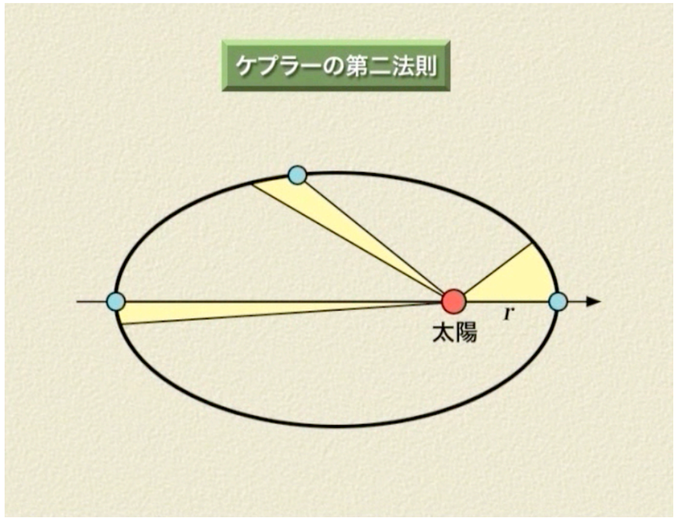
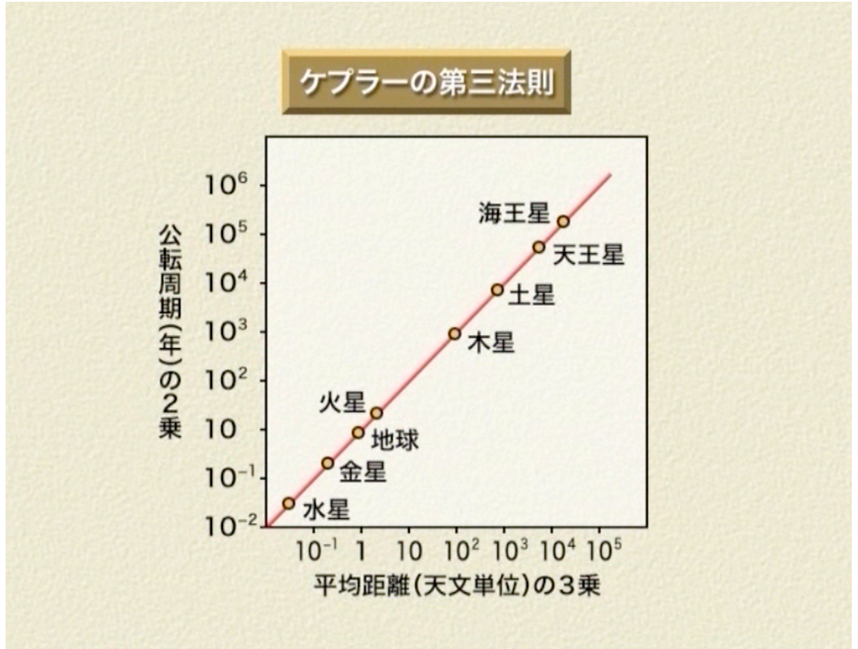


図 2.13　楕円は 2 つの焦点から糸を張り，ペンで一周すると描ける形である．焦点が 1 つに重なっていれば円になる．円は特殊な楕円である.



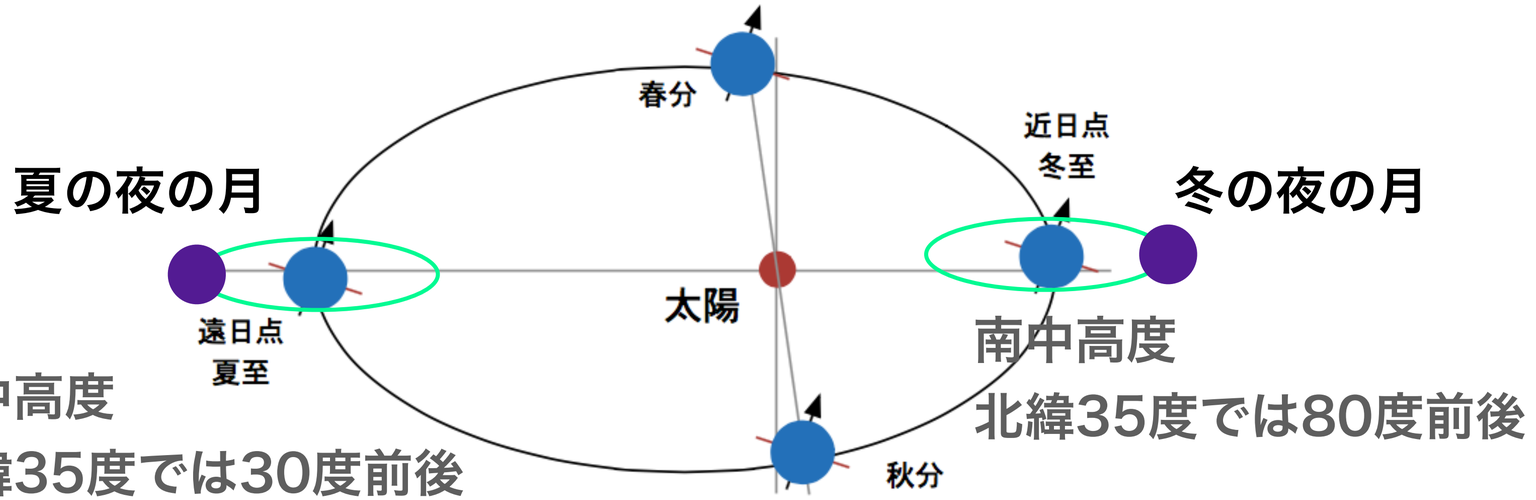




前回のミニッツペーパーから

なぜ楕円でまわると夏と冬ができるのかがあまり理解できなかったです。なぜ季節ができるのですか？

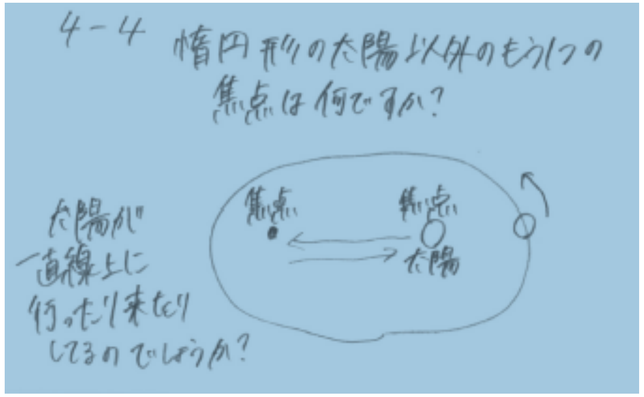
季節があるのは，楕円運動ではなく，地球の自転軸の傾きです



南中高度
北緯35度では30度前後

南中高度
北緯35度では80度前後





単なる数学上の点です．太陽は行ったり来たりしません．

前回のミニッツペーパーから

【4-2】　ケプラーの惑星運動の法則の発見に至った「歴史的偶然」とは？

精密な観測データを残したティコ・ブラーエと出会い，その中でも特に軌道のずれが大きい火星を解析対象に選んだこと。

ケプラーがティコ・ブラーエから観測データを手に入れることができたこと。

ケプラーがティコブラーエのデータを見せてもらっていなかったら今の宇宙のデータがどうなっていたのか気になった

ケプラーがティコ・ブラーエのもとで助手として働き，火星観測データを引き継げたこと。

ティコの精密な観測データと、ケプラーの素晴らしい計算力が組み合わさったこと。

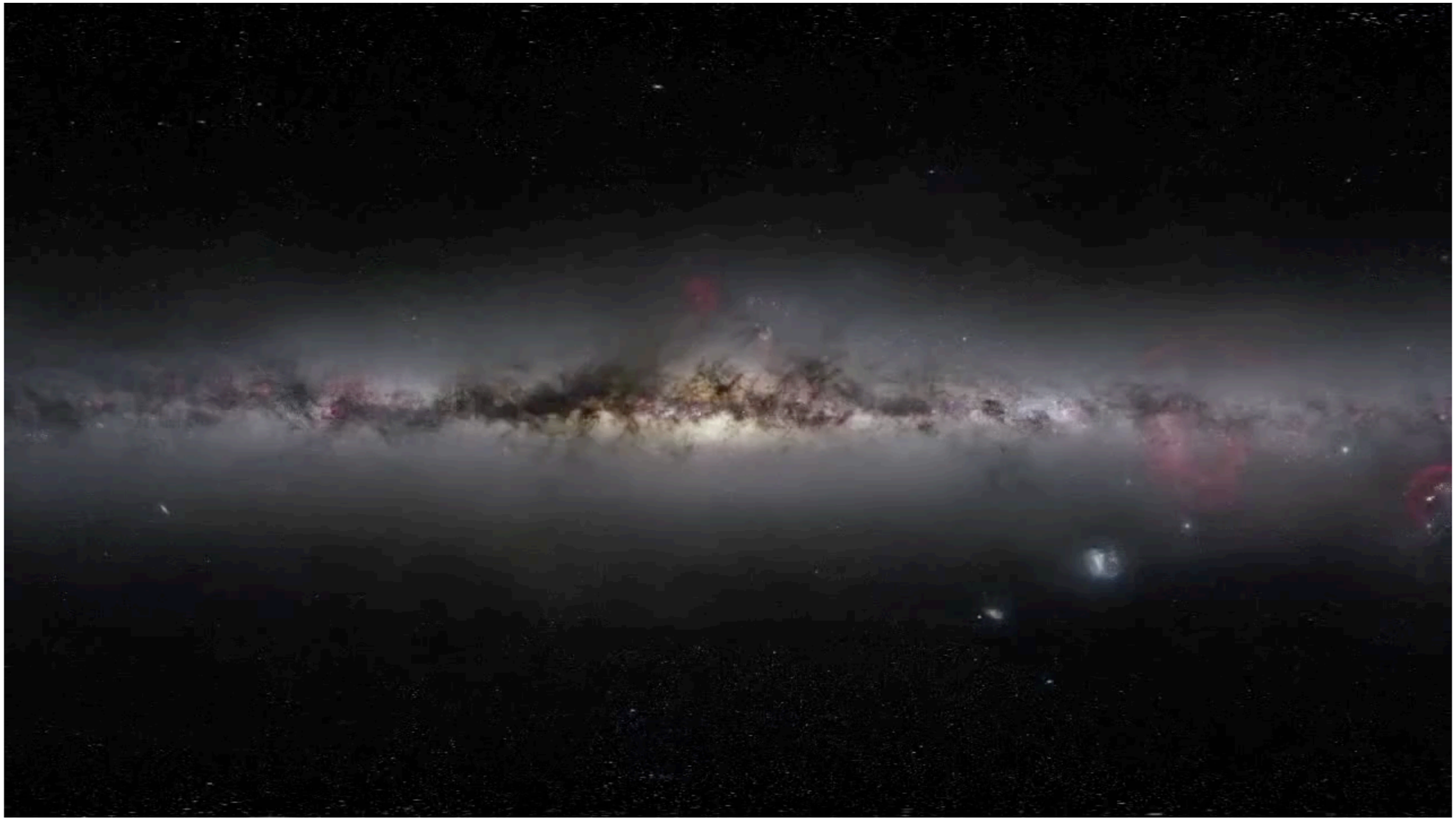
2、ティコ・ブラーエ以外国のわけの分からない人が自分の宇宙観測データが欲しいと言ってきて，1番，観測してよくわからない惑星（火星）のデータを渡した。その火星が楕円運動をしてた。

ブラーエが火星ではなく他の星のデータを渡していた場合でもケプラーは法則を発見できたと思いますか．

- 当時，史上最高精度をもった天体観測者ブラーエと，最高の計算力をもった数学者ケプラーの出会い
- ブラーエが解析に苦労した火星データをケプラーに渡し，その火星の離心率がもっとも大きかったことで楕円運動の発見に至った

銀河中心へ向かって ズームイン

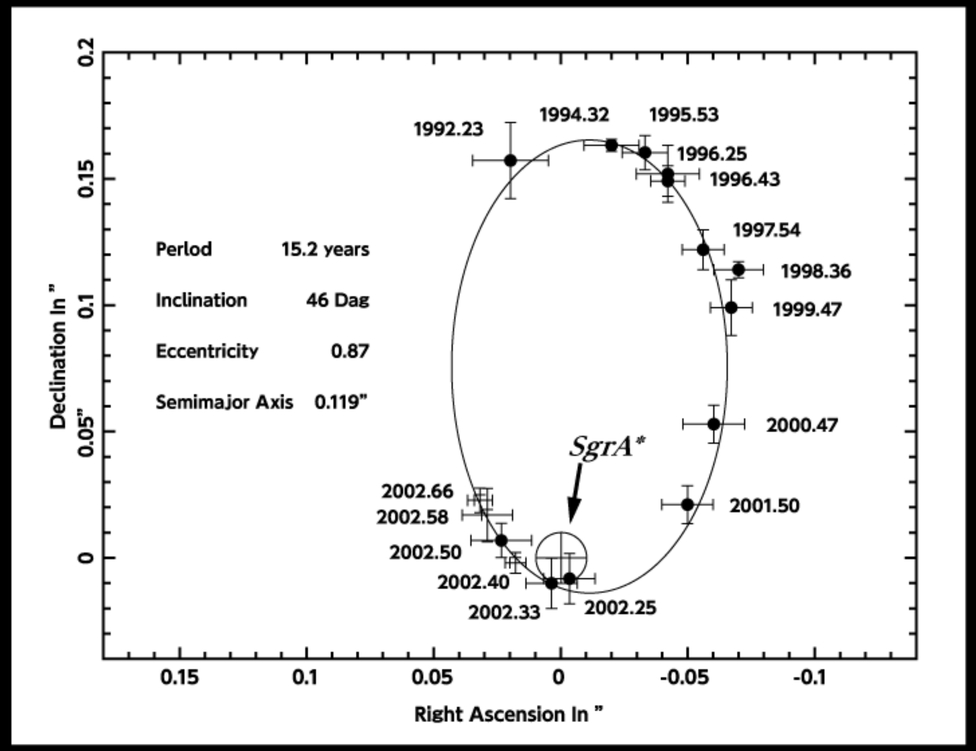
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある

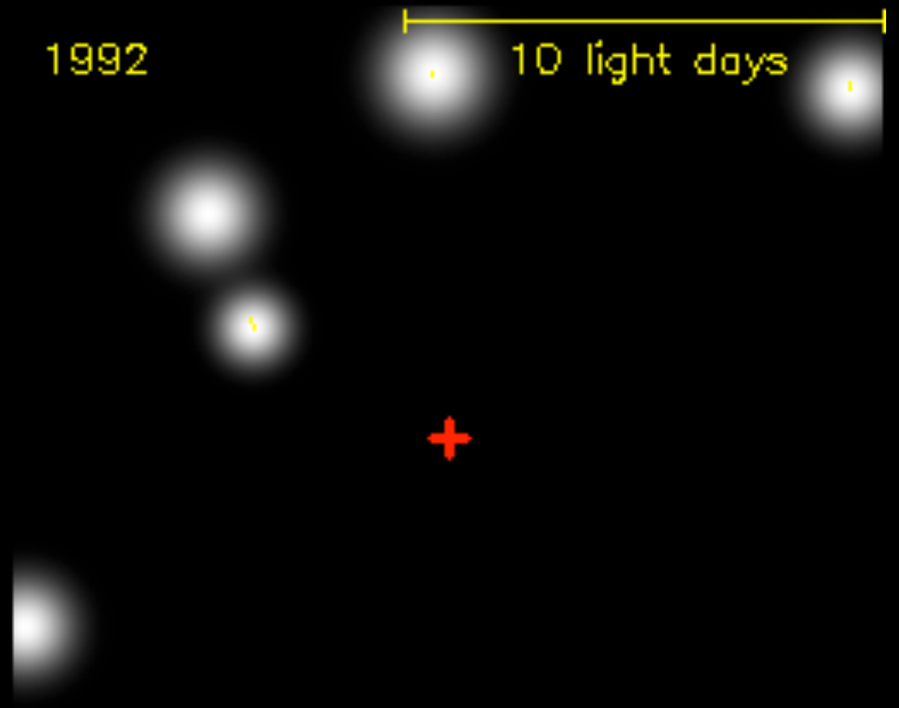


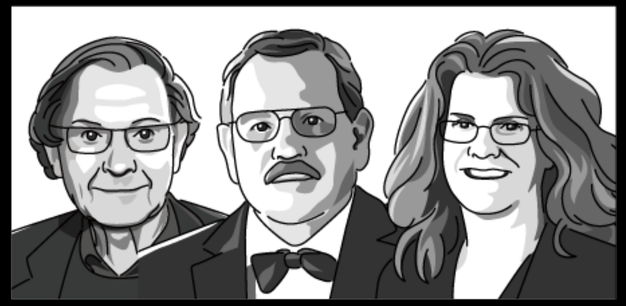
Zooming in on the centre of the Milky Way

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

天の川銀河の中心には巨大ブラックホールがある（太陽質量の400万倍）



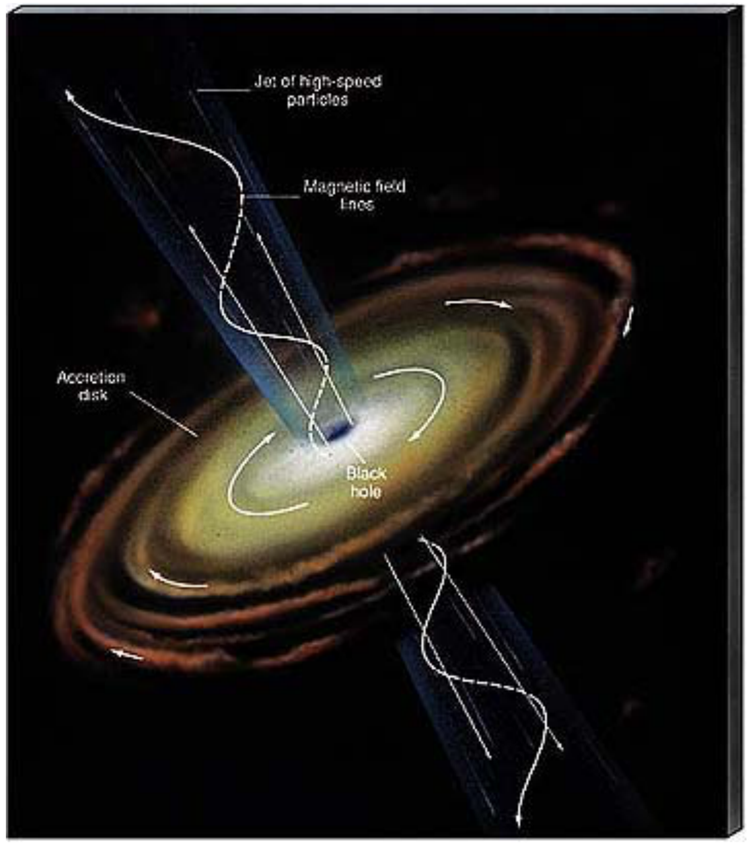




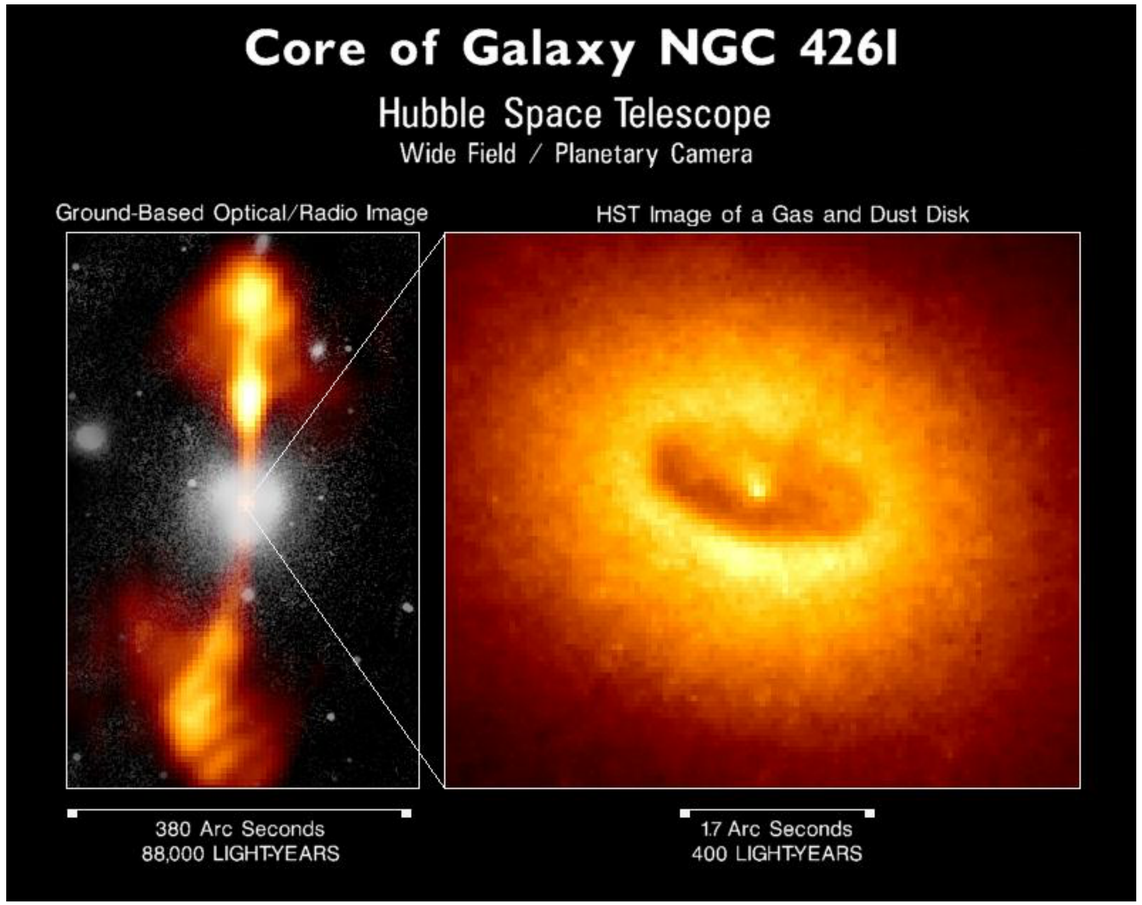
2020年　ノーベル物理学賞受賞

ロジャー・ペンローズ
「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
アンドレア・ゲズ
「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」

ブラックホールが存在することは，どうしてわかったのか？



http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html　想像図



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

すべてのガスが吸い込まれるわけではない
軸方向にジェットが吹き出す

「明るい天体」＝ブラックホール

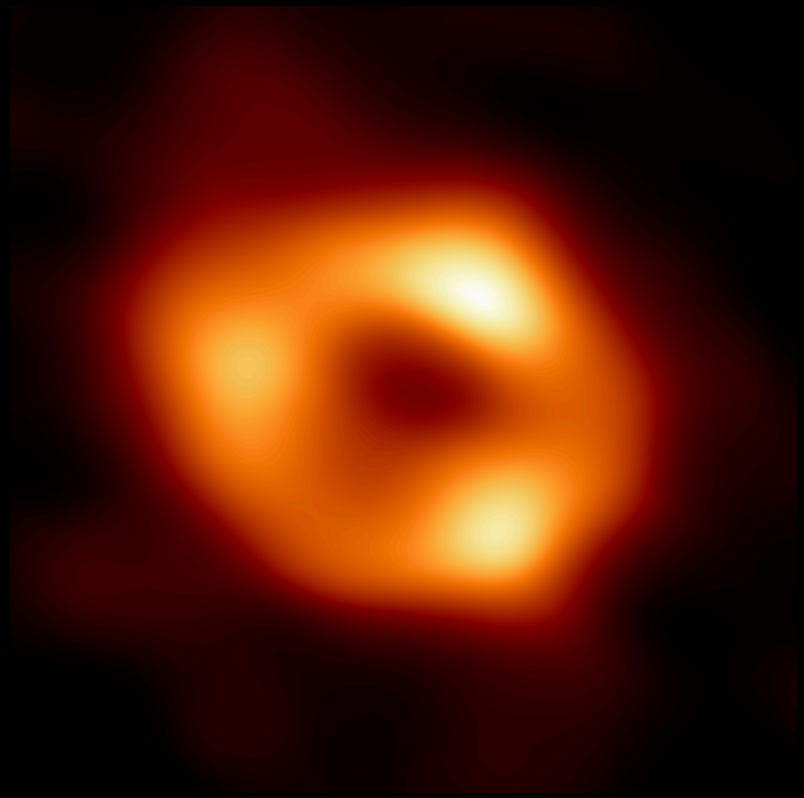
2019年4月10日　国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



M87銀河（地球から5500万光年, 太陽質量の65億倍）

出典　Event Horizon Telescope HP

2022年5月22日　国立天文台グループ「天の川ブラックホールの撮像に成功」



天の川銀河中心（地球から3万光年, 太陽質量の400万倍）

出典　Event Horizon Telescope HP

前回のミニッツペーパーから

ブラックホールはすべてを吸いこむわけではないことを初めて知りました。

ブラックホールは，1度のみこまれたら2度と脱出できないもの。という知識しか持っていなかったので，中心から脱出したガスが出てくるのにとても驚きました。強い重力源であることも初めて知りました。

ブラックホールに吸い込まれなかったガスや光が噴き出しています．吸い込まれたら，終わりです．

ブラックホールに今見えている星が吸い込まれることはないのですか？

ガスだけですか？

ブラックホールに吸い込まれなかったガスや光が噴き出しています．吸い込まれたら，終わりです．

ブラックホールが明るく輝いていることに驚いた。
写真でとれたのがすごいと思った。

ブラックホールから光が出る原理は分かりましたが戻る原理が分からないです．



なぜ吸い込まれるのでしょうか？

質量が小さいから飛び出せる

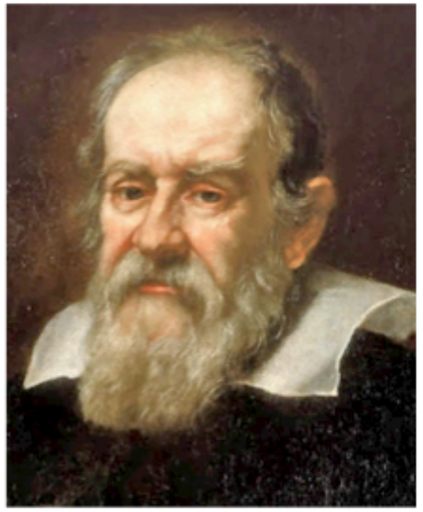
昔の物理学者のことをもっと知りたいなと思いました。文系にも分かりやすいオススメの本などはありますか？

真貝著『宇宙論』どうぞ

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





ガリレオの振り子の発見がすごいと思いました。

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）

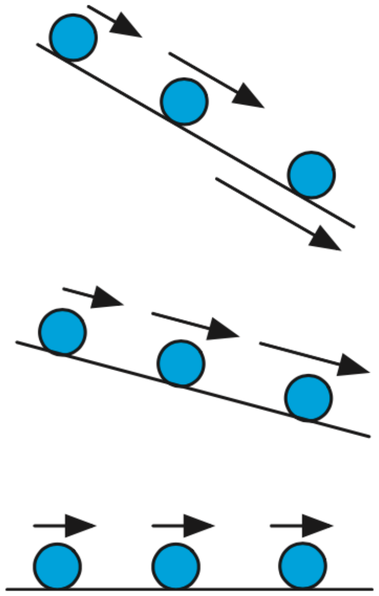


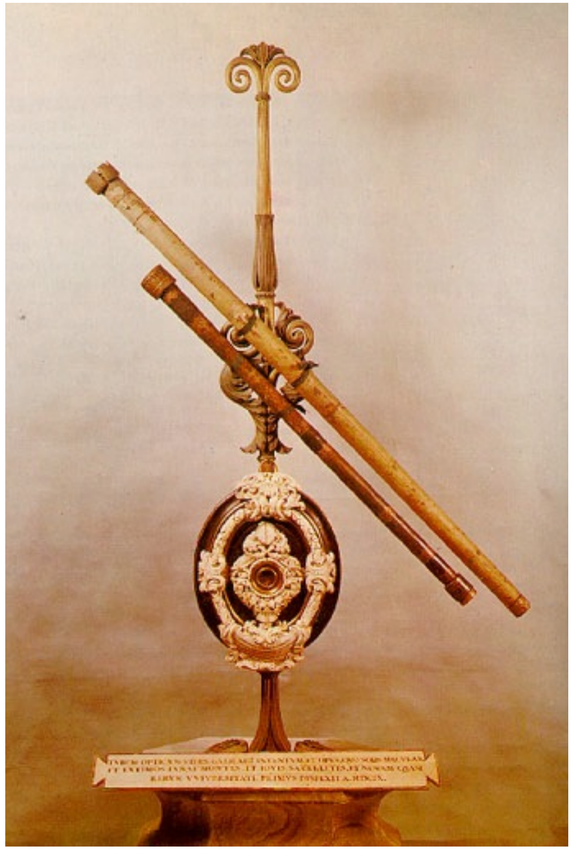
図 2.16 斜面の角度を小さくすれば，加速が少なくなる．傾きゼロでは等速運動となるはずだ．

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。

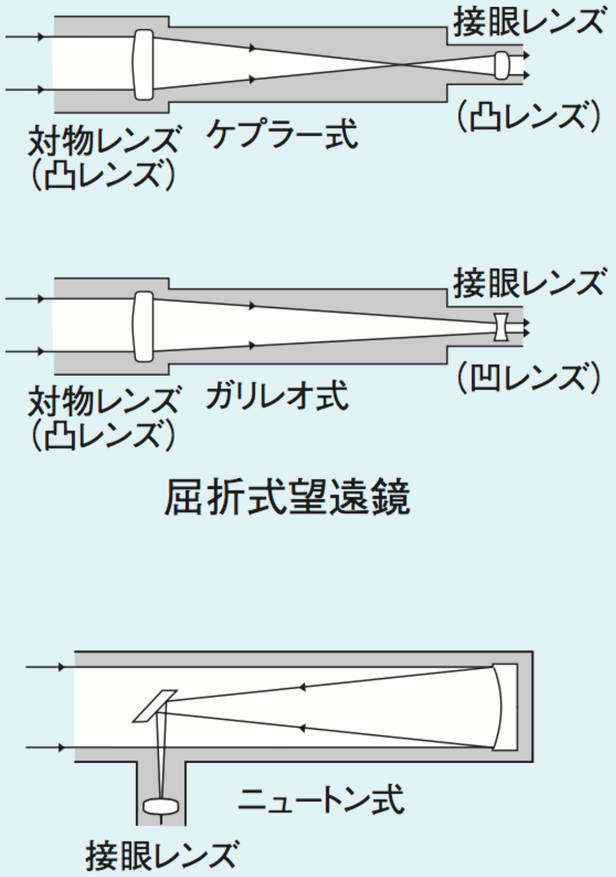


図 2.20 望遠鏡のしくみ.

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

桶狭間の戦い？



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

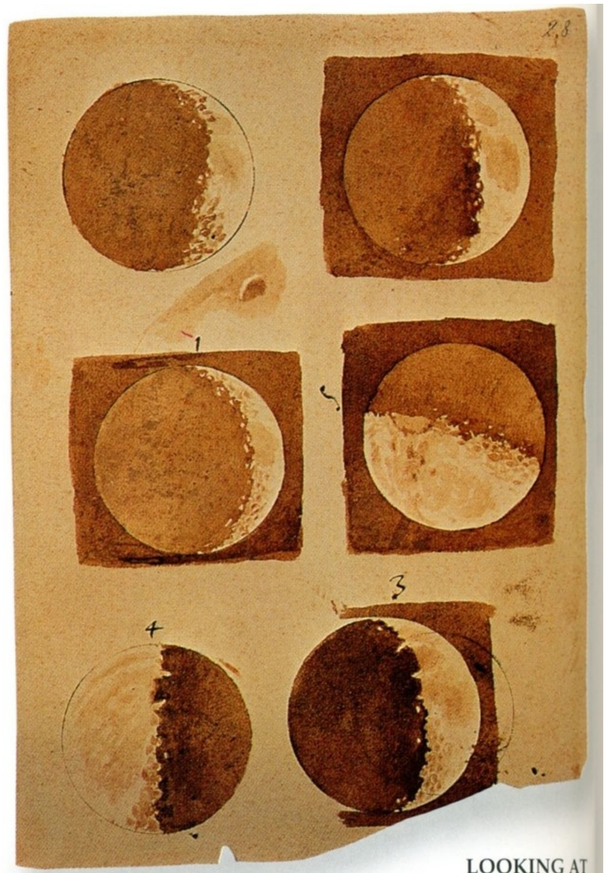
23:58 - 2015年6月17日

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）

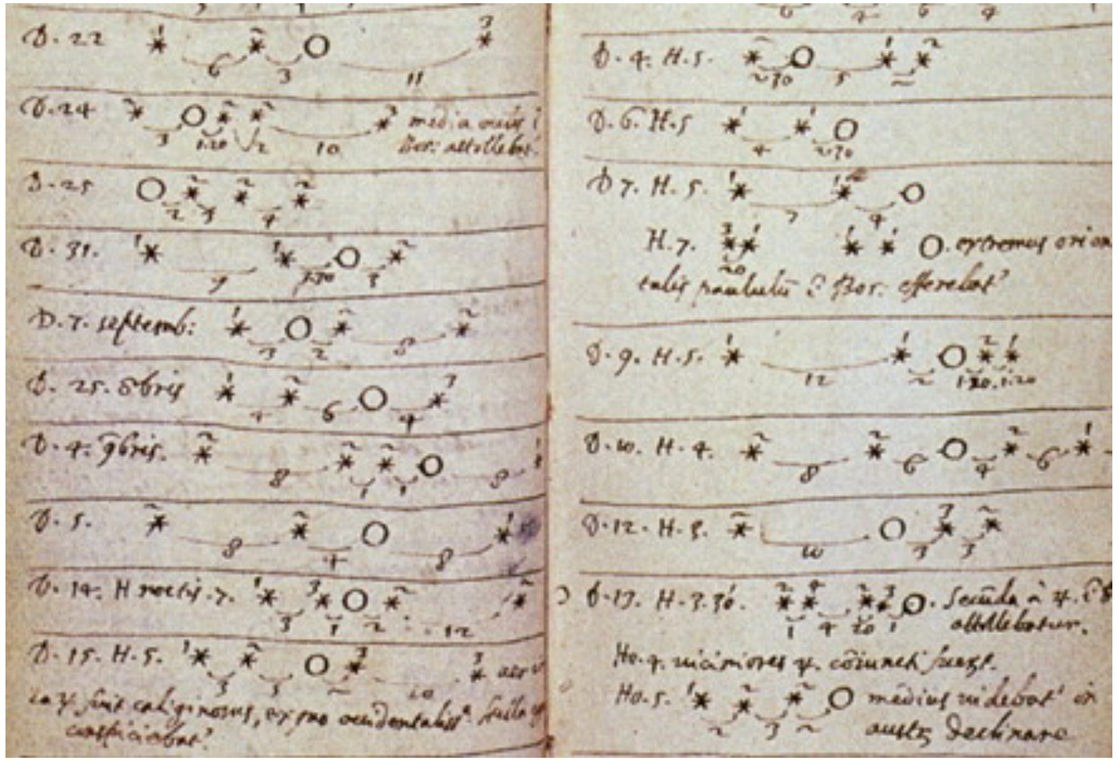
=> 月は地球と同じくでこぼこ

=> 「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

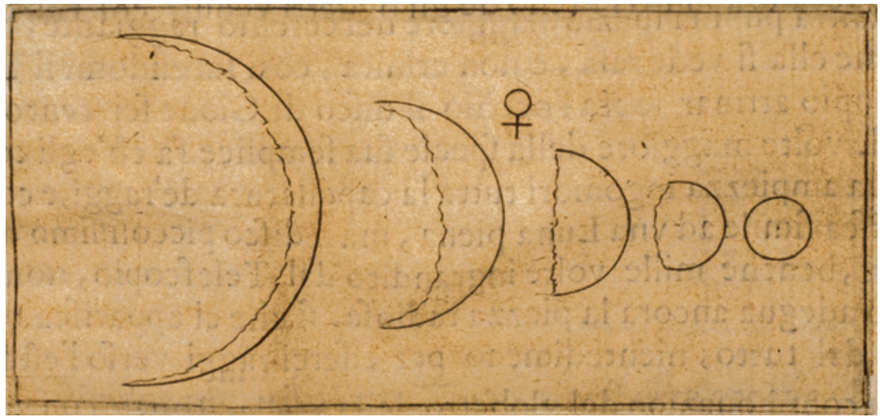


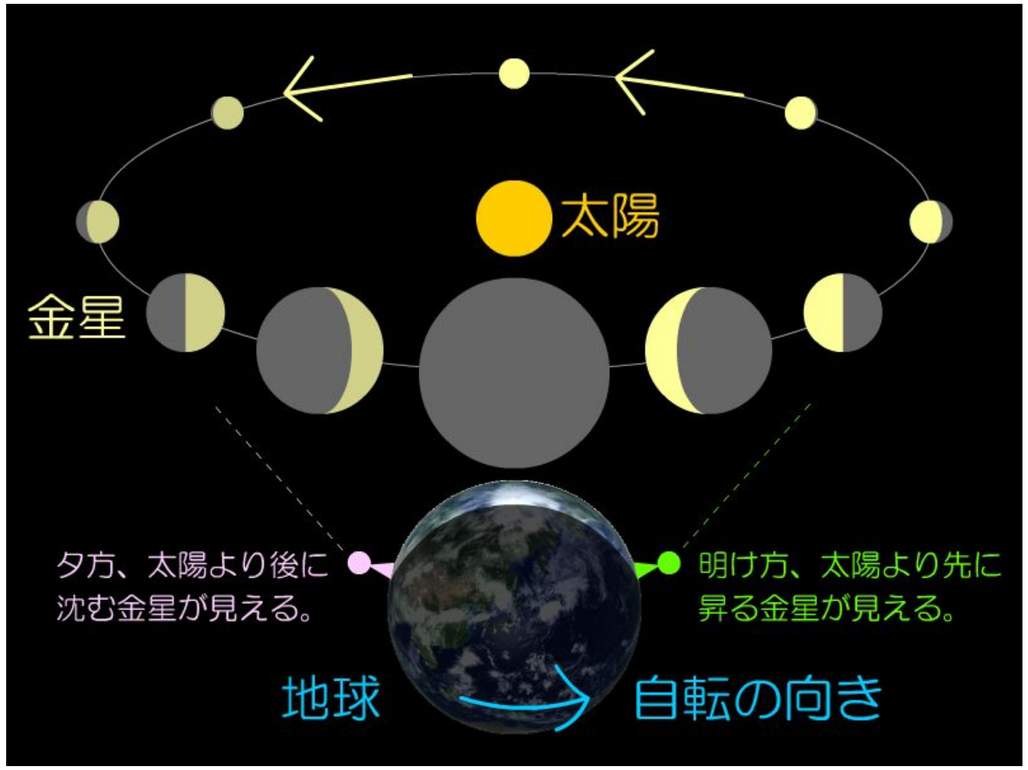
イオ
エウロパ
ガニメデ
カリスト

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．

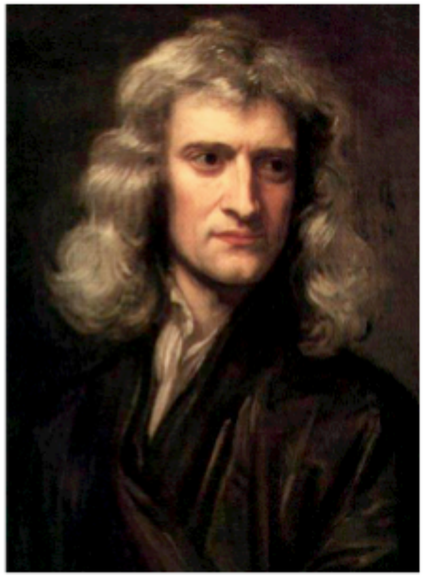
裁判の判決に対してガリレイの名誉が回復したのは，ごく最近である．1965 年からガリレイ裁判の見直しが行われ，1992 年，ローマ教皇ヨハネ・パウロ 2 世が，ガリレイ裁判が誤りだったことを認めた．

ガリレオ・ガリレイは地動説を唱えましたが，火あぶりにされず自宅で軟禁されたと本で読みましたが，なぜ"ですか？

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

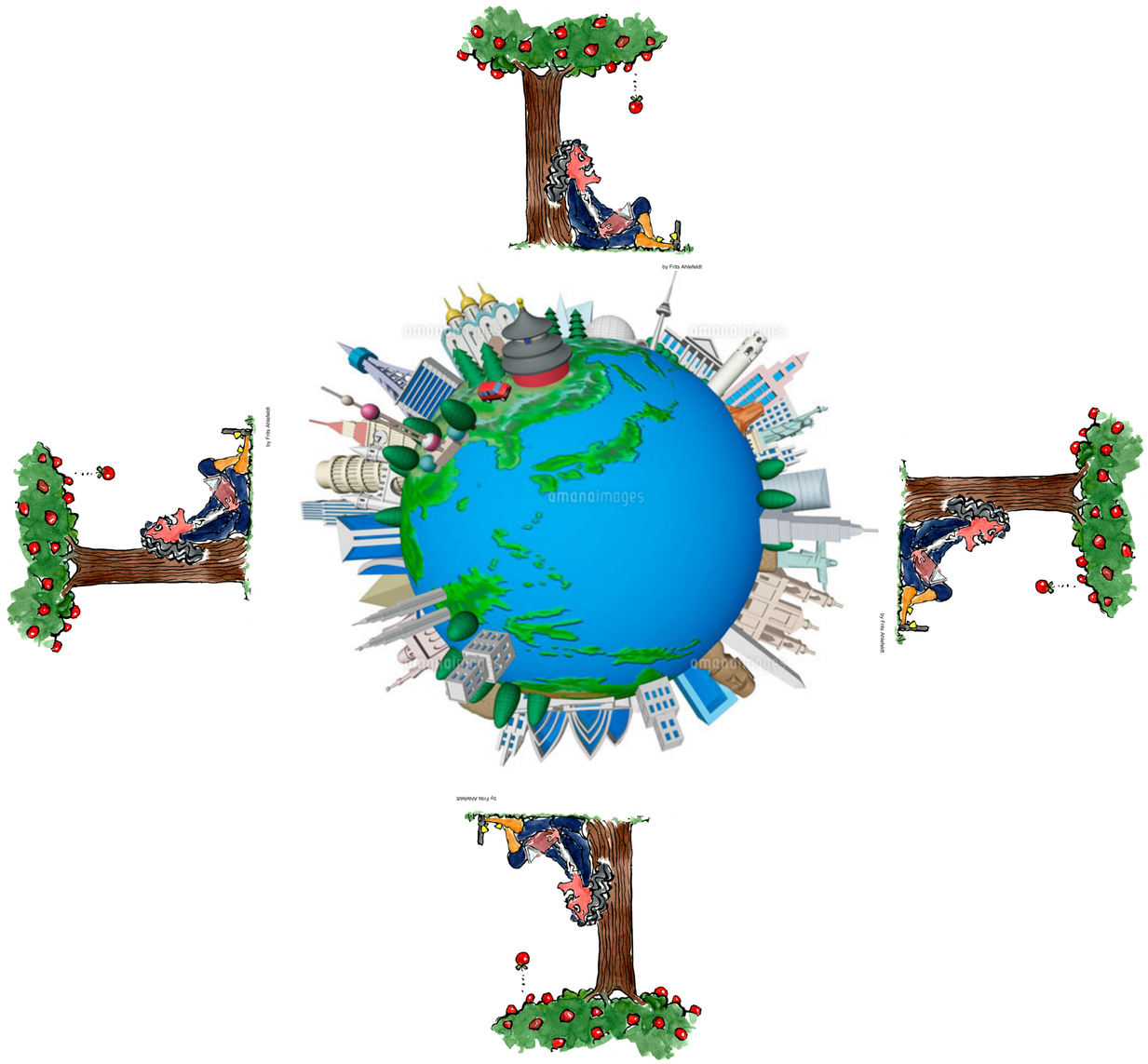
微分・積分の計算を発明

教科書 p45

ニュートン ： リンゴはなぜ落ちる？



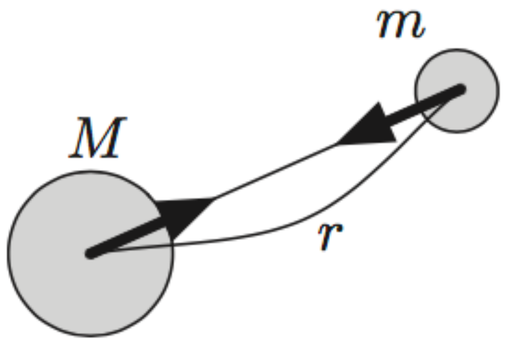
http://hikingartist.com/



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

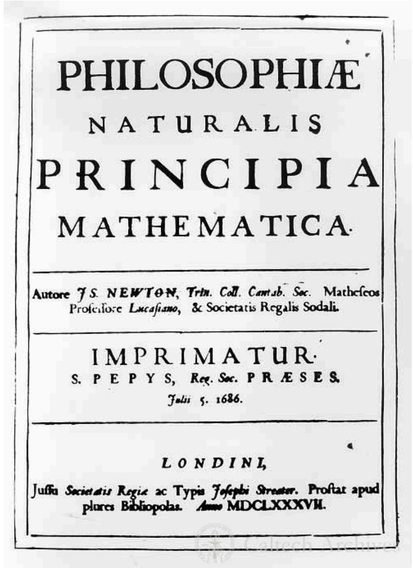
質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき，両質点にはたらく力 F は，大きさが

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

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**

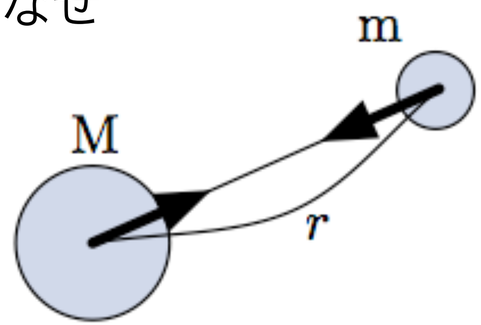
物体に力 $\boldsymbol{F}$ を及ぼすと，その物体は同じ大きさで逆向きの反作用 $-\boldsymbol{F}$ を作用物体に及ぼす．

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

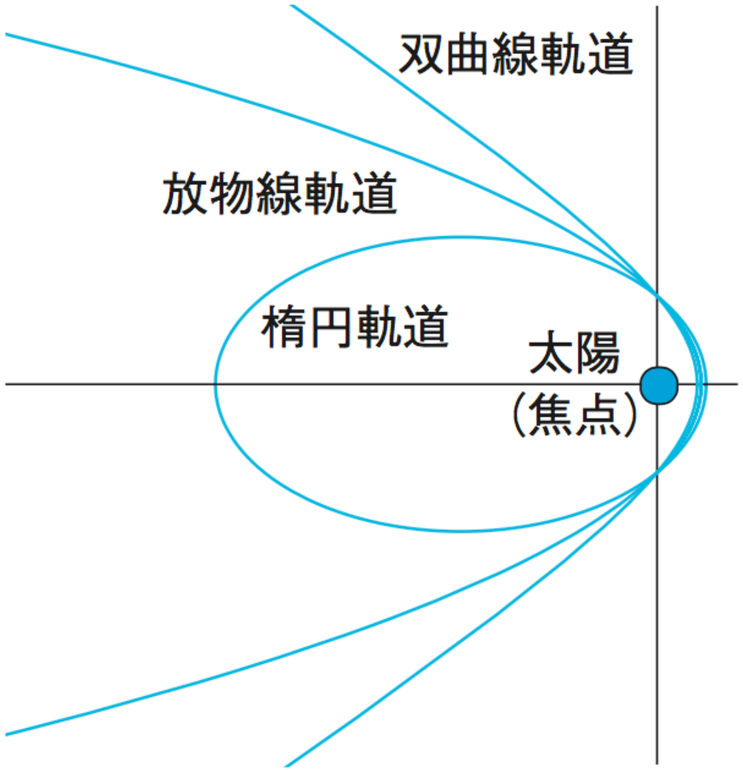
速度がわかる
位置がわかる

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.

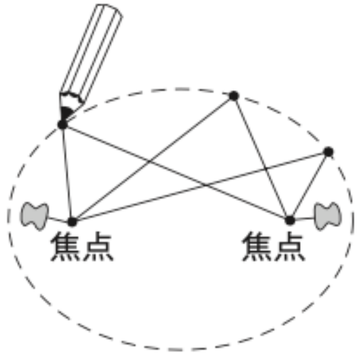
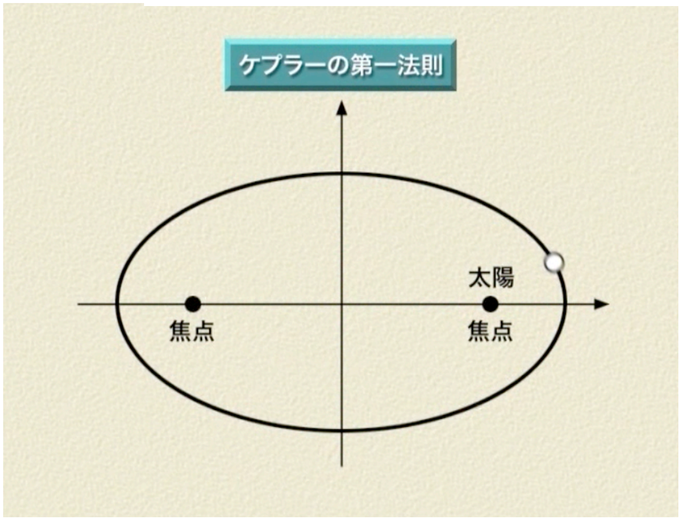
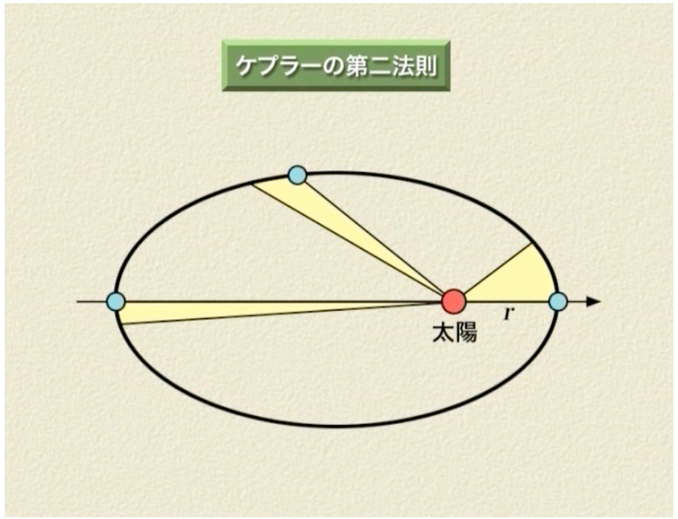
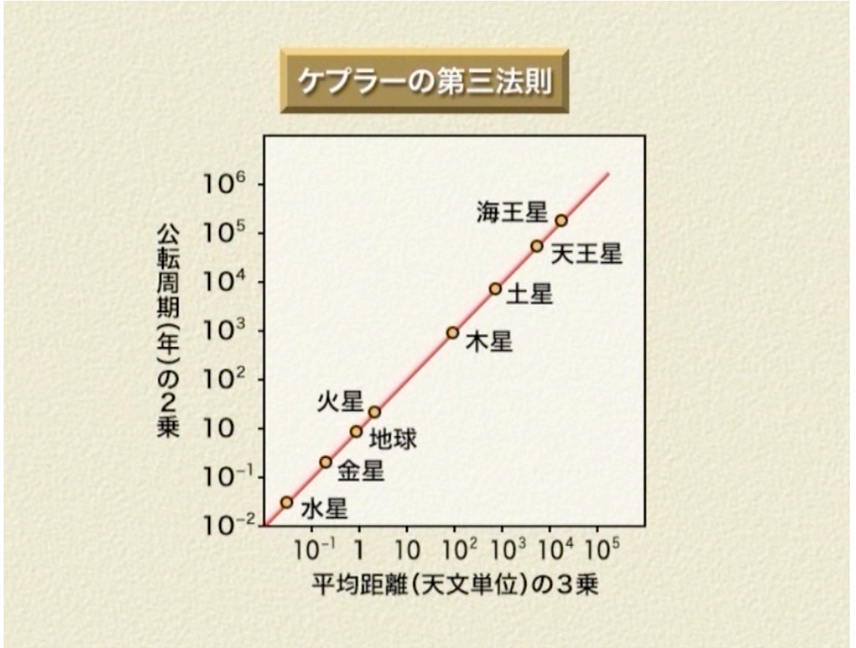


図 2.13　楕円は 2 つの焦点から糸を張り，ペンで一周すると描ける形である．焦点が 1 つに重なっていれば円になる．円は特殊な楕円である.



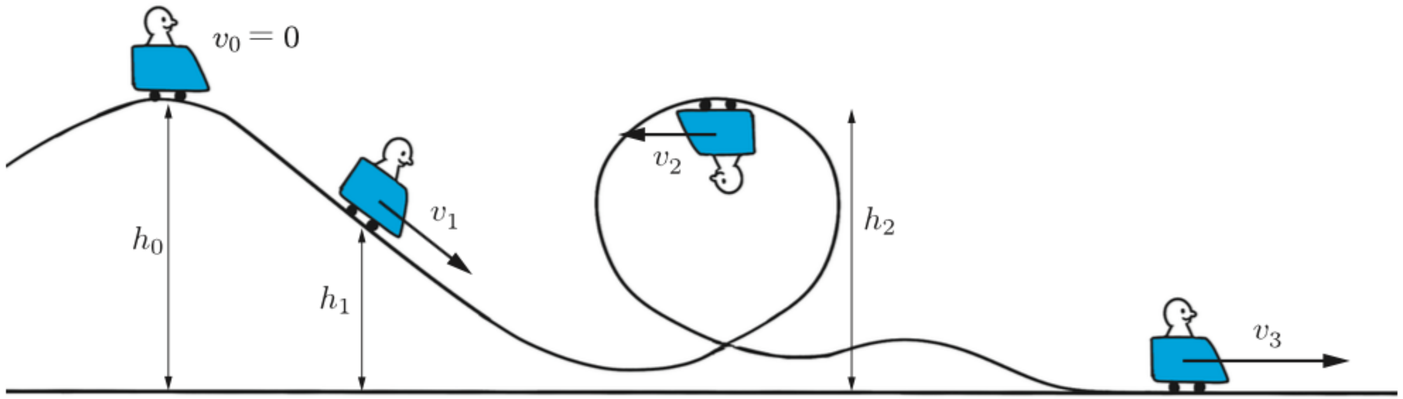




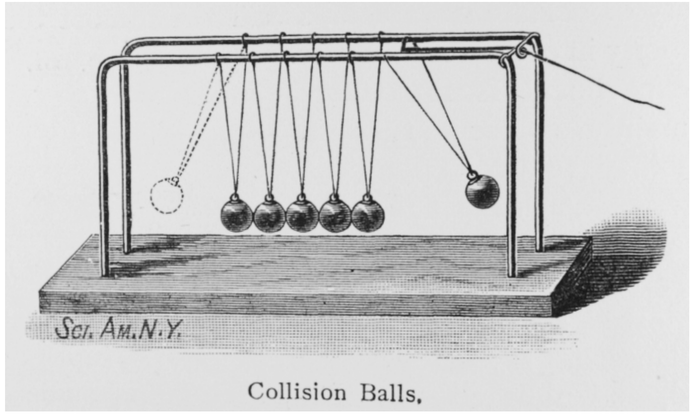
＊エネルギー保存則

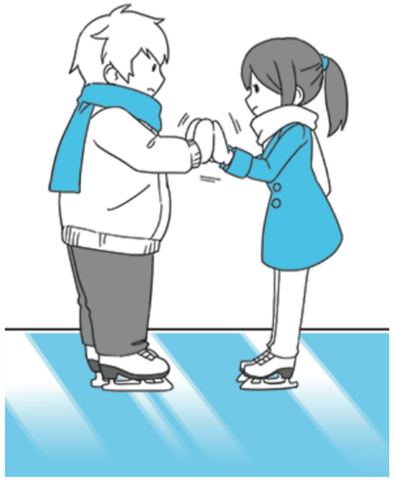
$$mgh_0 + 0 = mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 = 0 + \frac{1}{2}mv_3^2$$

位置エネルギー＋運動エネルギー＝一定

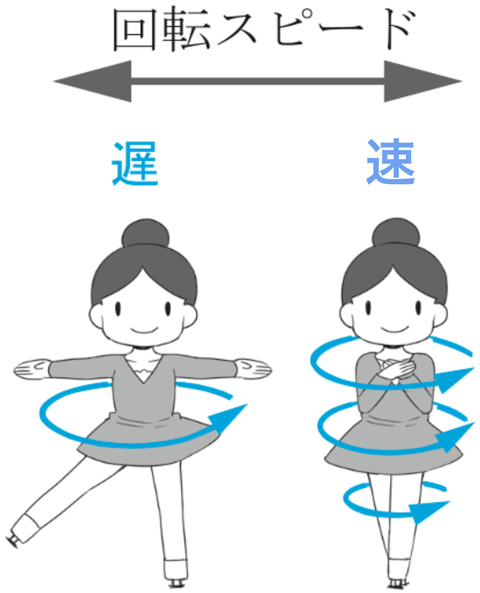


＊運動量保存則



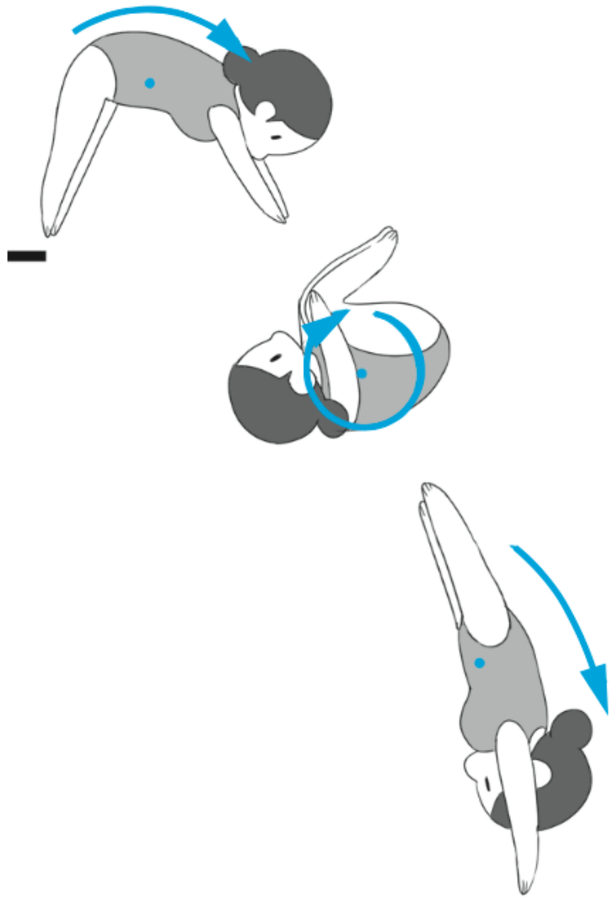


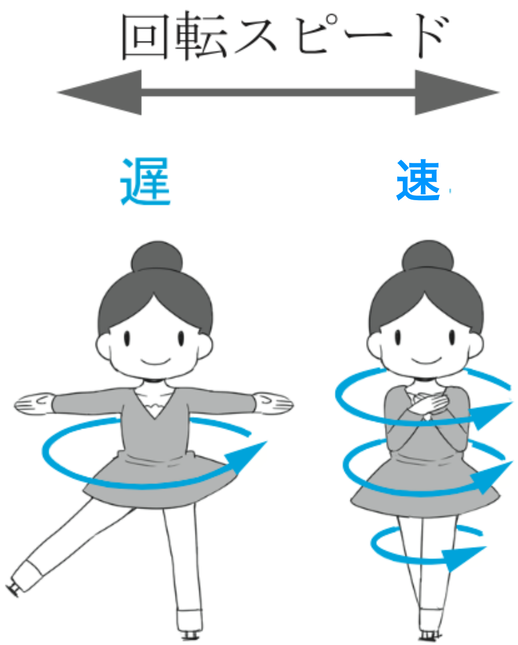
＊角運動量保存則

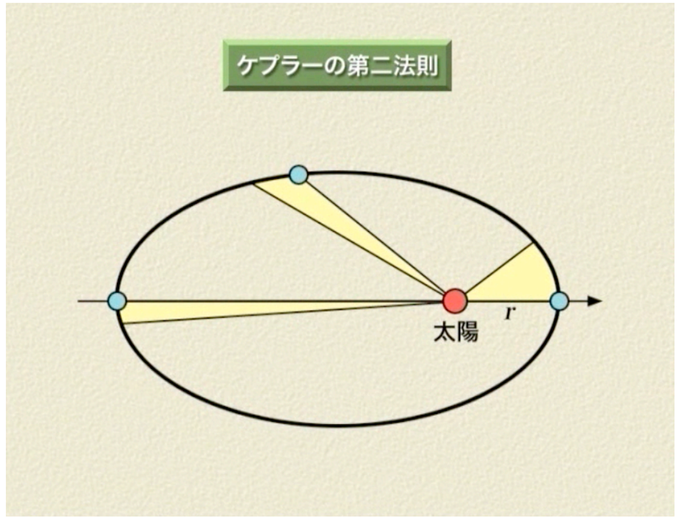


角運動量は保存する

角運動量 = 回転半径 x 運動量 = r x mv





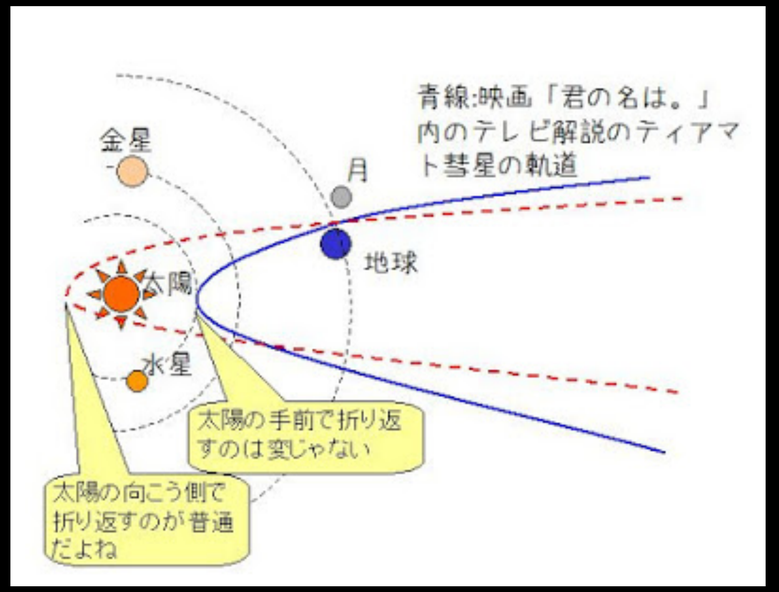


ケプラーの面積速度一定の法則は,
角運動量保存則と同じだった.

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



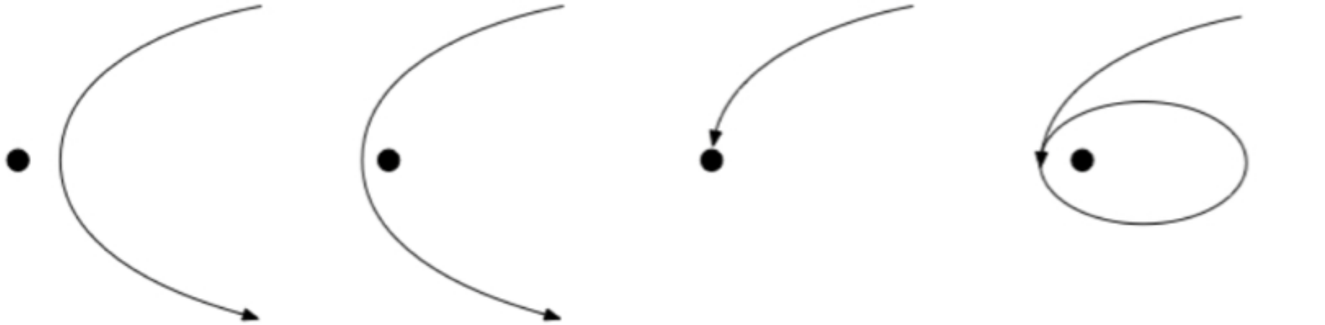


https://ara50yourname.blogspot.jp/2016/10/blog-post_88.html

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

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

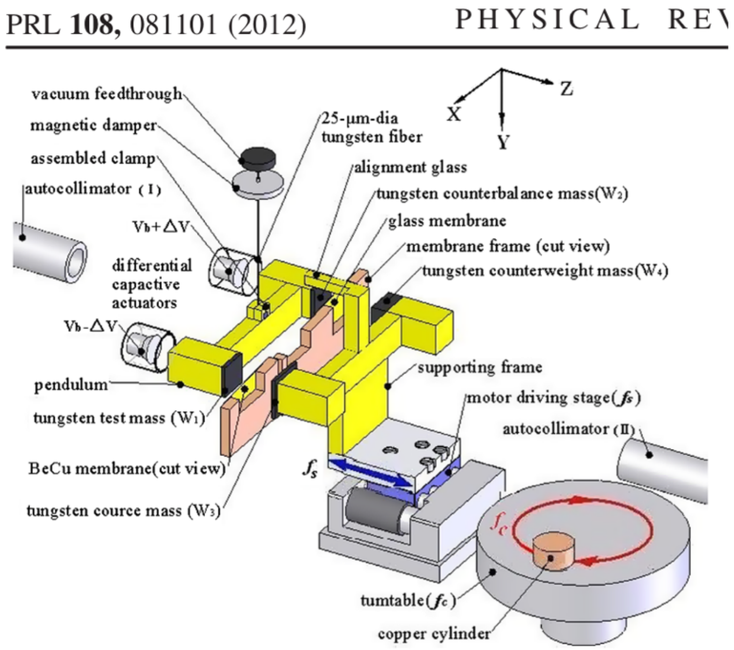
$$U = -G\frac{Mm}{r}$$

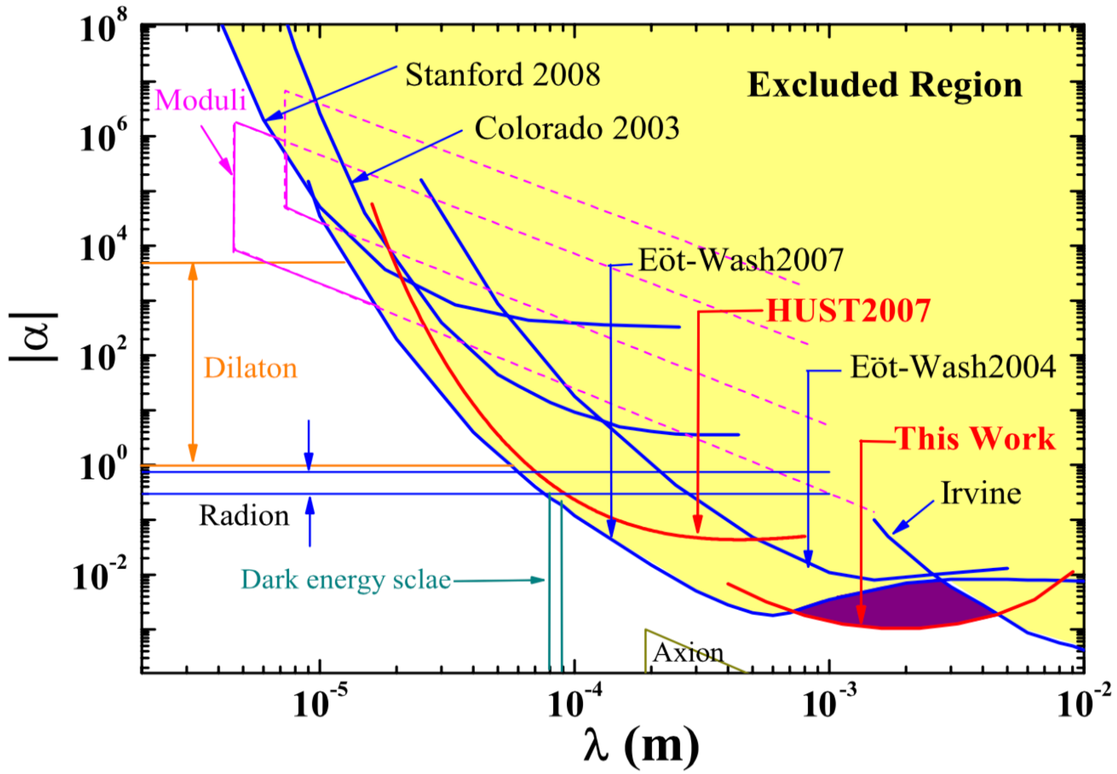
空間4次元（5次元時空）なら

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

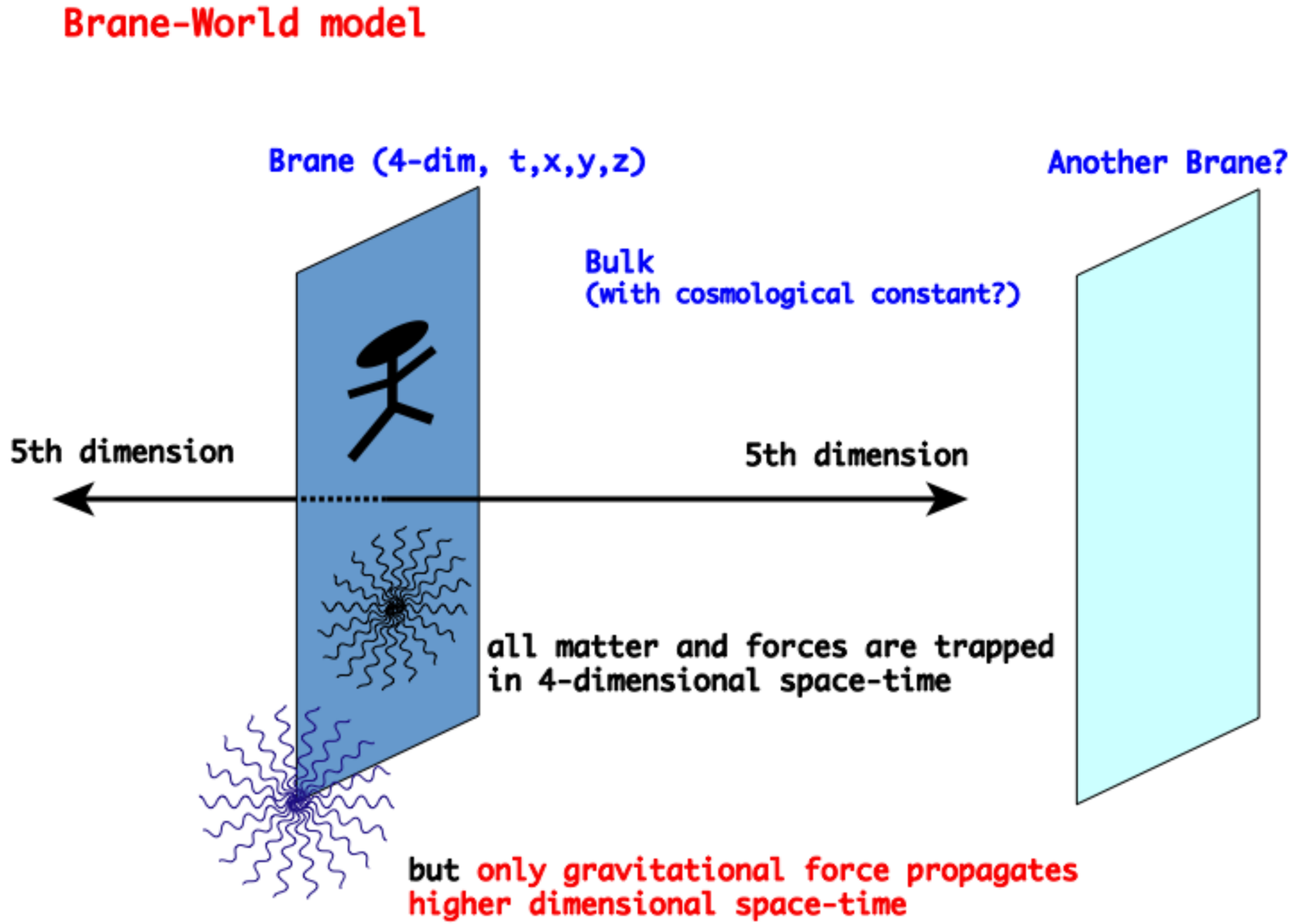
$$U = -G_5\frac{Mm}{r^2}$$

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

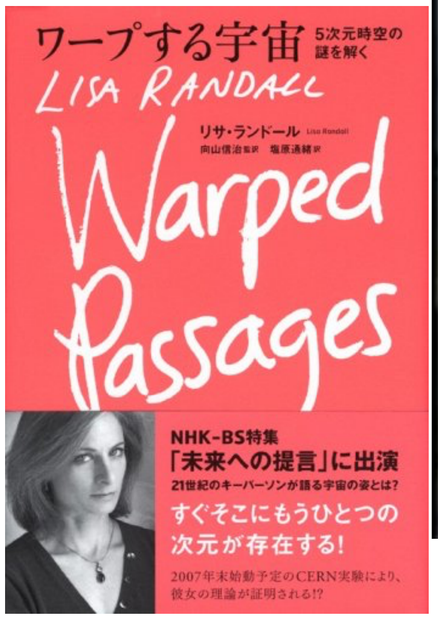


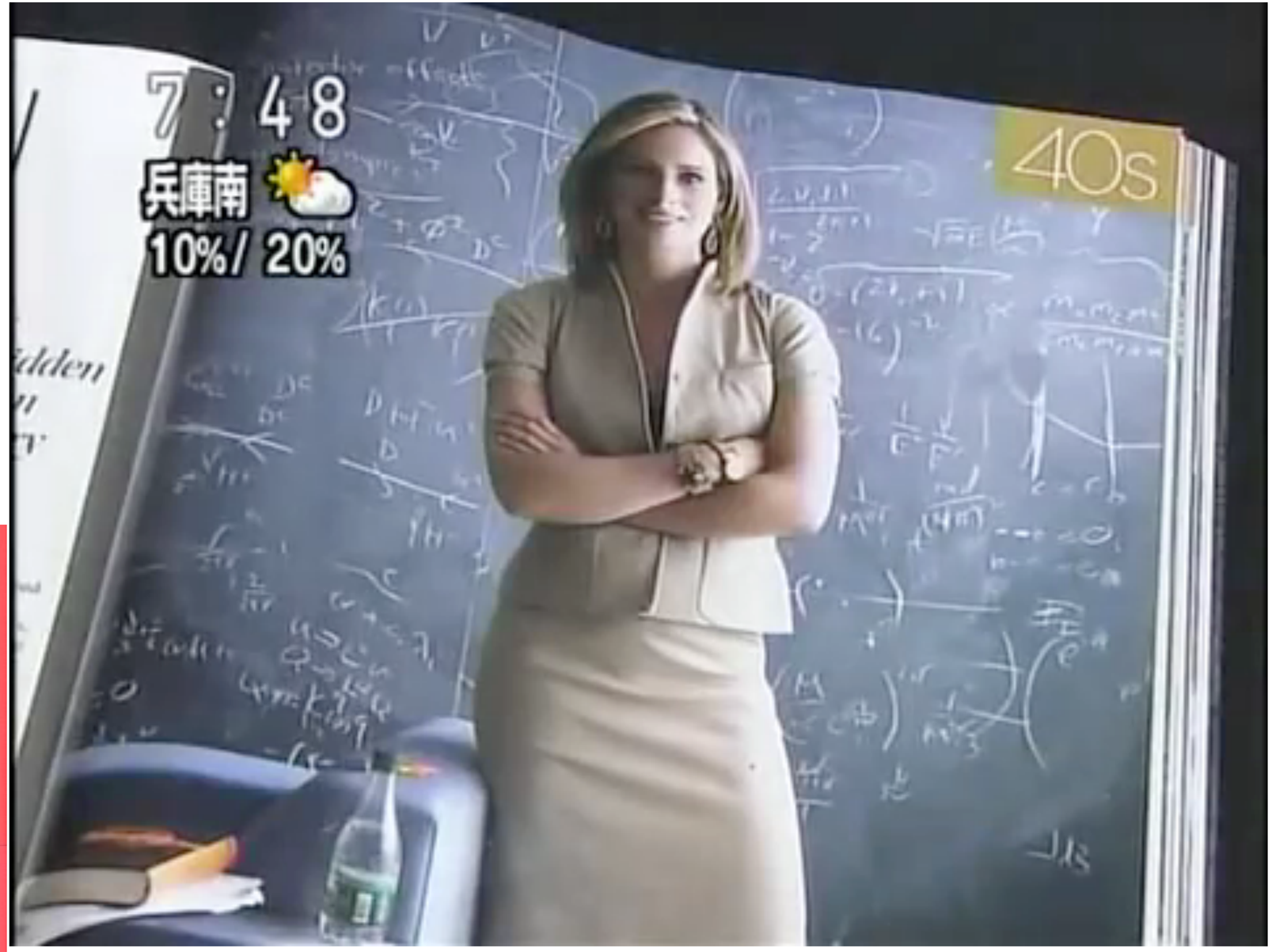


膜宇宙論（我々の4次元時空は，高次元の中の膜のようなもの）



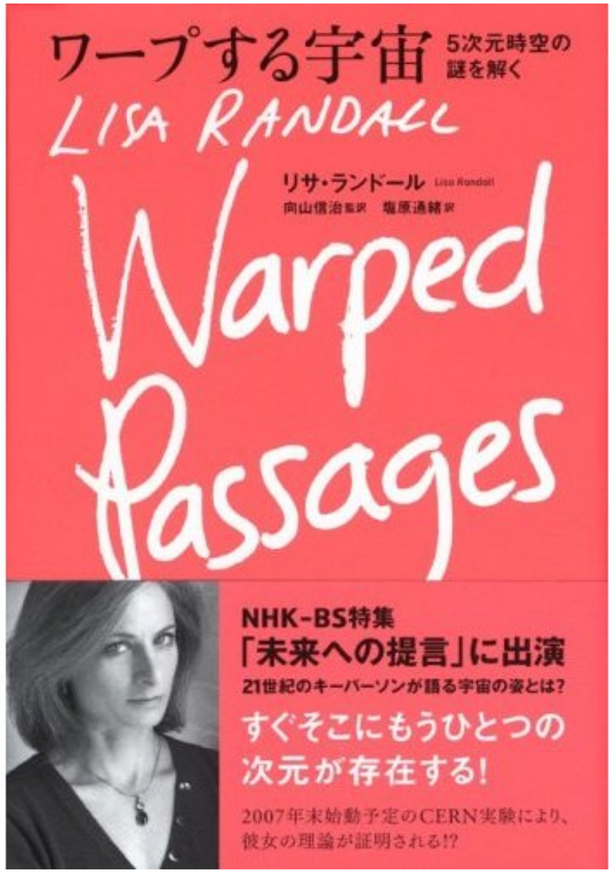
膜宇宙論の提唱者の一人，リサ・ランドール



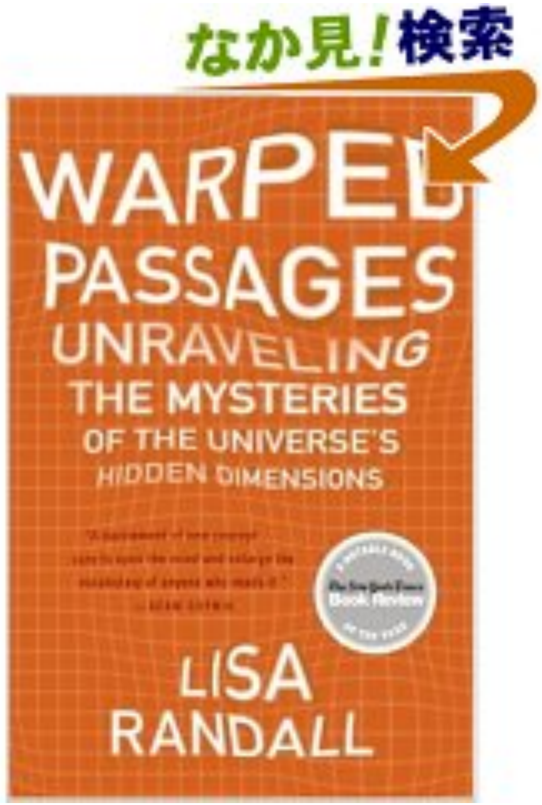


2007年　NHKニュース (7分)

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



*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



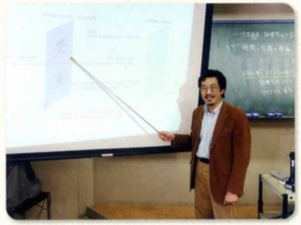
わからないのがおもしろい！



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。



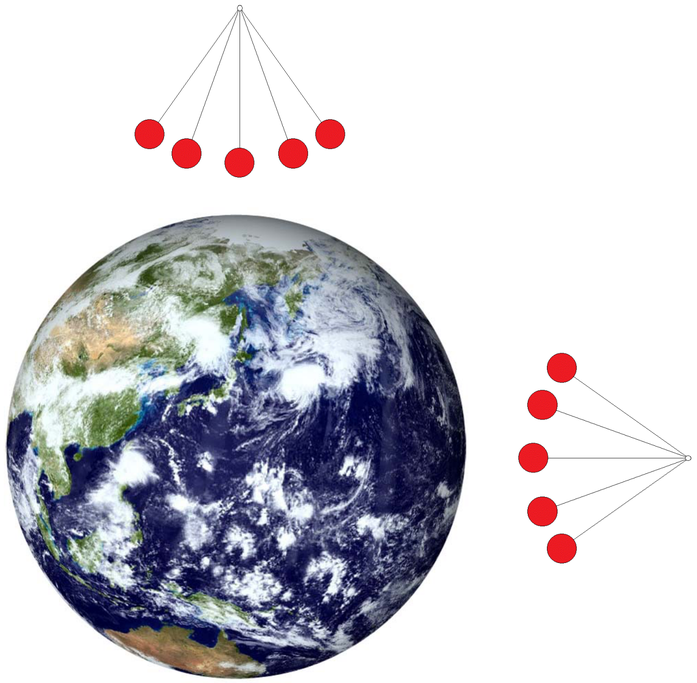
Mcollection (2013)

ニュートン力学の勝利

地球の扁平度の測定

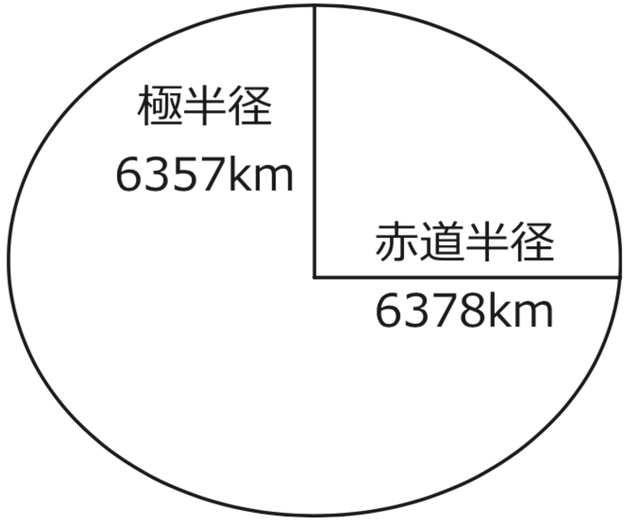
赤道付近ではふりこの周期が長い

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



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

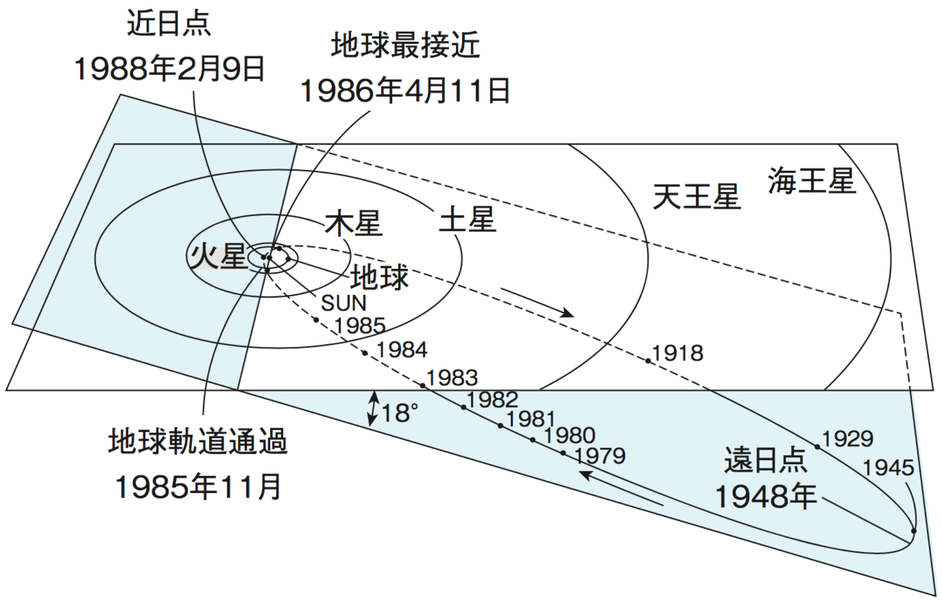
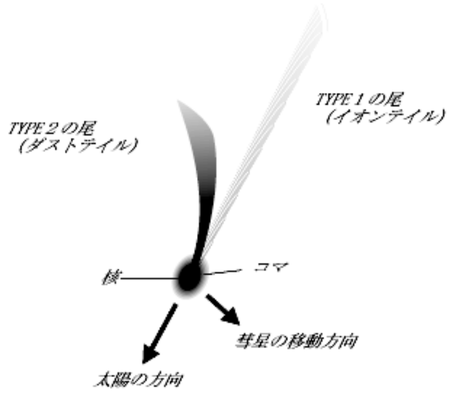
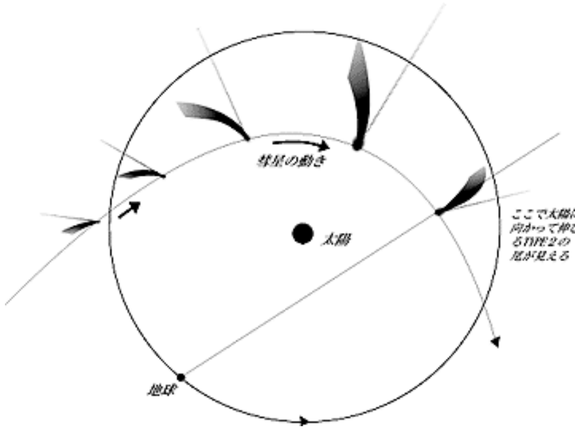


図 2.32　ハレー彗星の軌道は惑星運動面から大きく傾いている.

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



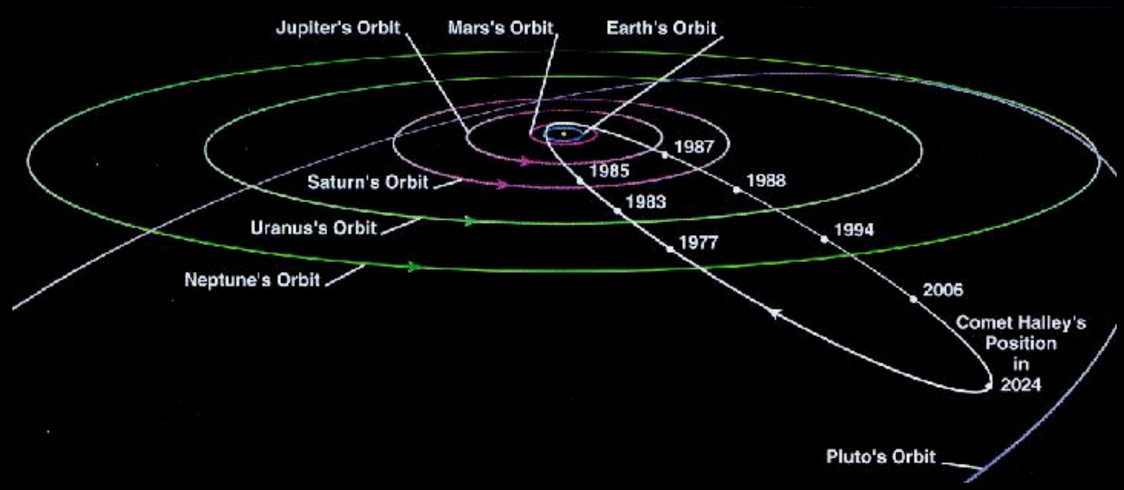


http://www.isas.jaxa.jp/j/japan_s_history/chapter05/01/02.shtml
http://www.astroarts.co.jp/alacarte/kiso/kiso10-j.shtml
http://www.geocities.jp/planetnekonta2/hanasi/halley/halley.html

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



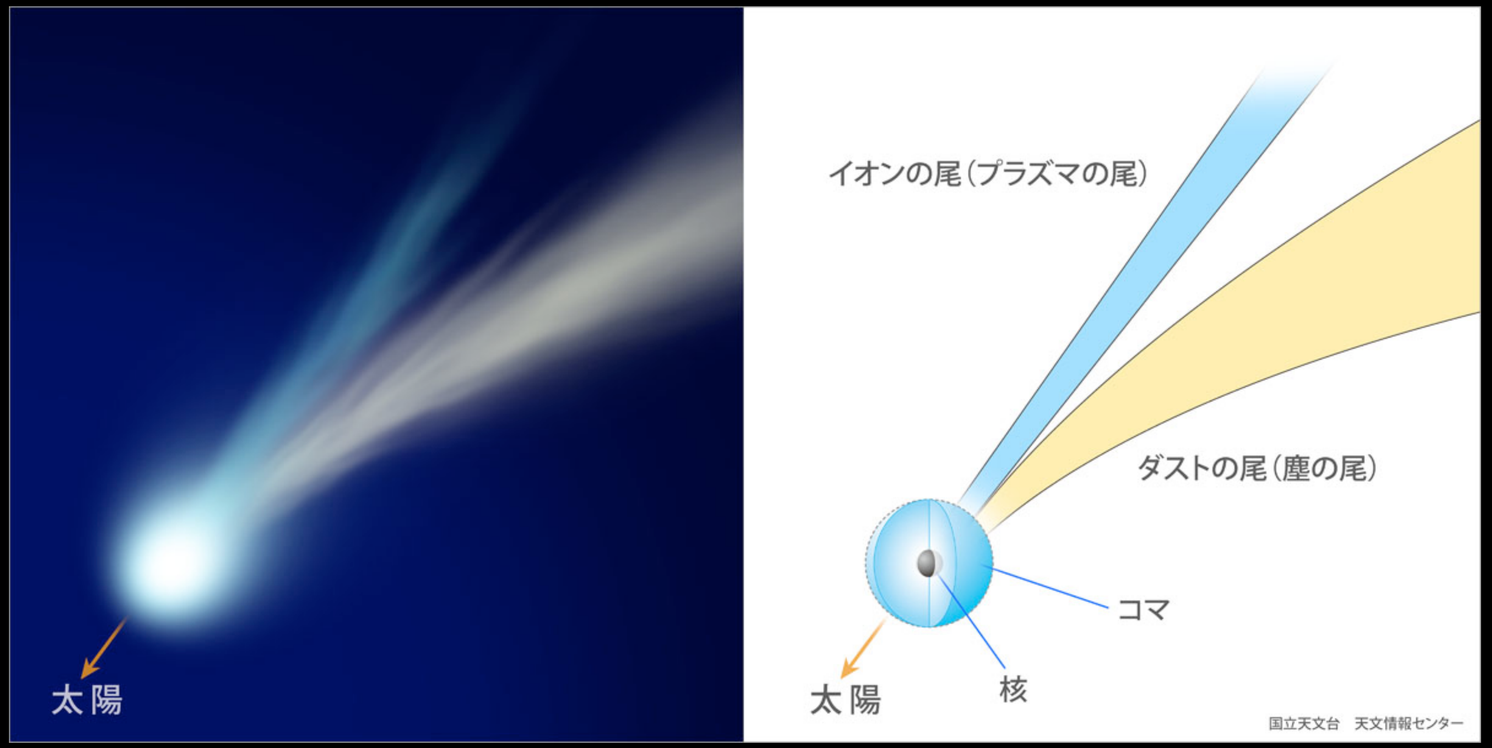


すいせい
彗星（ほうき星）とは

★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

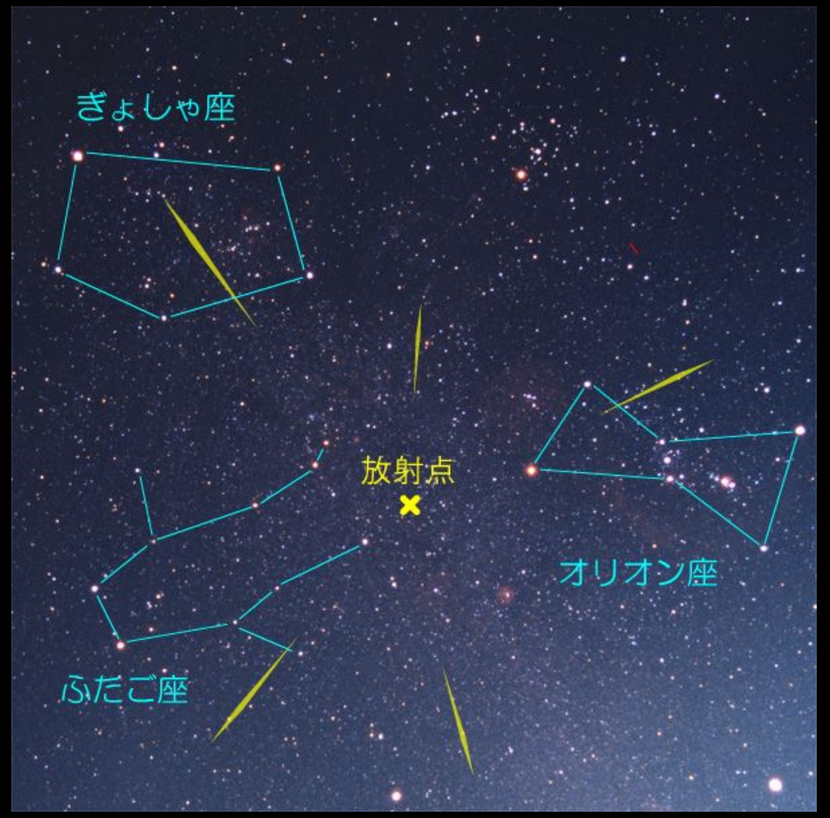
オリオン座流星群

★2026年は条件　良好

★1時間に10個

（昨年予報は，20個/時間）

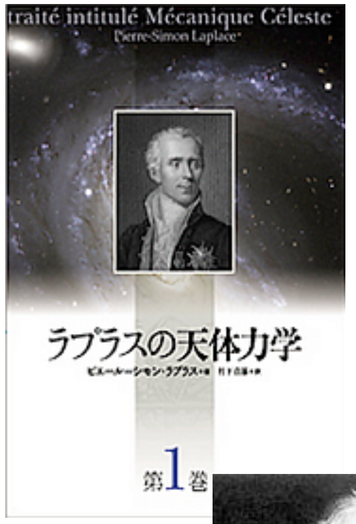
もとは，ハレー彗星



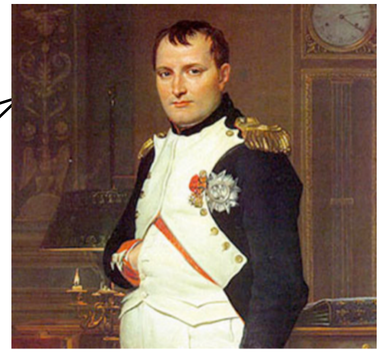
https://www.astron.pref.gunma.jp/events/091020orion.html

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.」

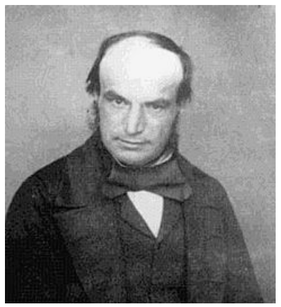
Pierre-Simon Laplace
(1749–1827)

ニュートン力学の勝利　　海王星の発見

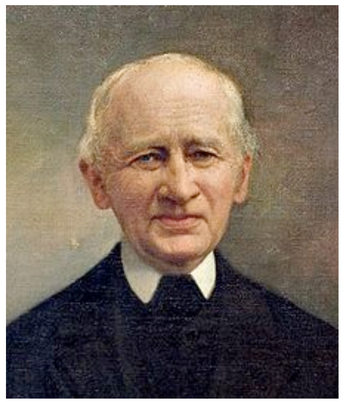
1781年　天王星の発見

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．

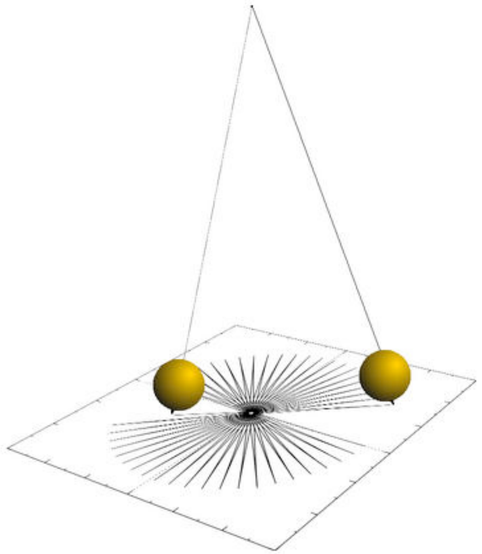


一方イギリスではアダムスが予想軌道を算出し，チャリスに観測を依頼していた．チャリスは，1846年7月から観測をはじめたが，星の同定作業を怠っているうちに，ガレによる海王星発見の報を知る．チャリスが観測ノートを見直してみると，ガレより 1ヶ月前に 2度，海王星を記録していたが新惑星であることを見落としていたことがわかった．



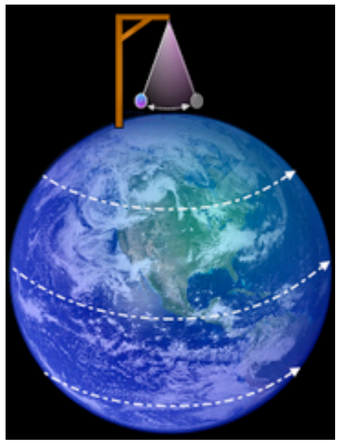
フーコーの振り子

Foucault pendulum









1851年，地球が自転していることを証明した．

Topic　フーコーの振り子

地球が自転していることを証明した実験として，フーコーが行った振り子が有名である．長いひもにおもりを付けて長時間振り子を振れさせると，振動方向が見かけ上回転していくという現象である．1851 年，パリ天文台とパンテオンにて公開実験が行われ，人々を感心させた．パンテオンの実験では，全長 67 m のワイヤーで 28 kg のおもりを吊るしたものが使われたそうだ．回転する原因はコリオリ力である．北半球では右回りに振動面が回転し，1 周するのに必要な時間 T は，緯度 θ の地点では，$T = 24$ 時間$/\sin\theta$ になる．北極点では 24 時間，赤道上では回転しない．北緯 35 度ではおよそ 41.8 時間である．

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

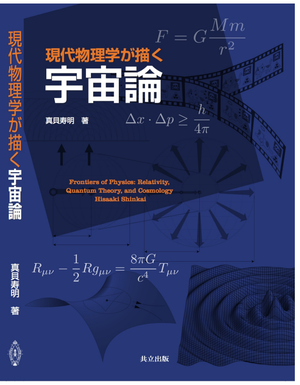
ブラウン運動

統計力学

物性物理

物理化学

生物物理





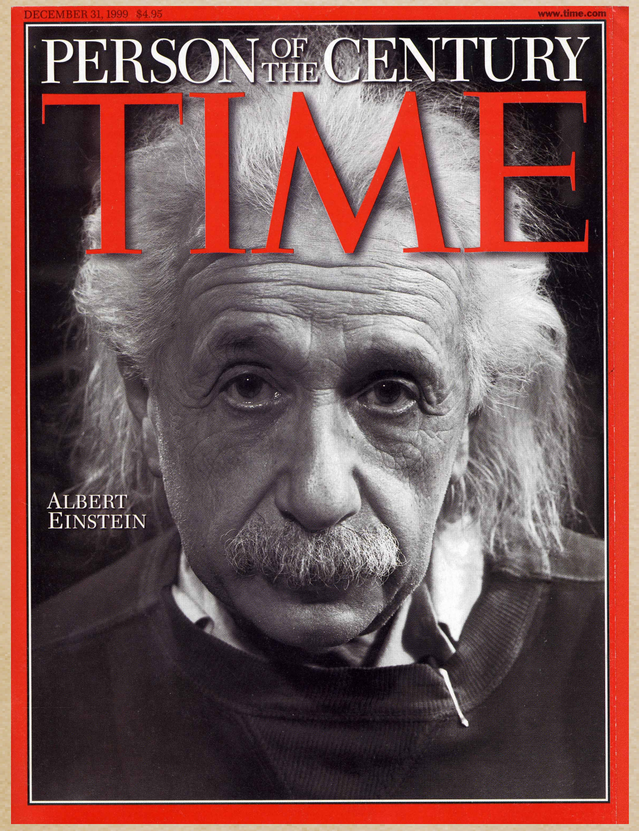
19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

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



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

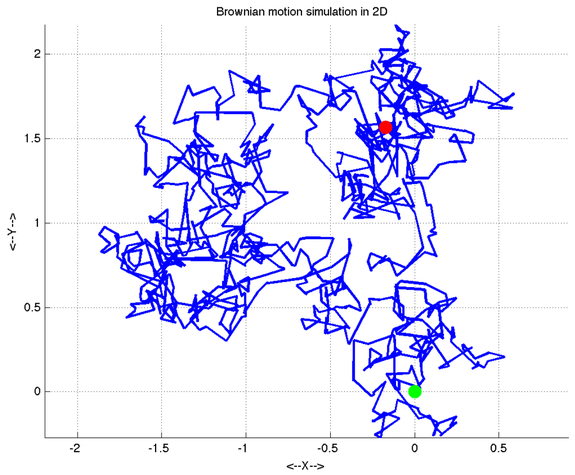
時間の流れが，観測者によって異なることを主張.

$E=mc^2$　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.

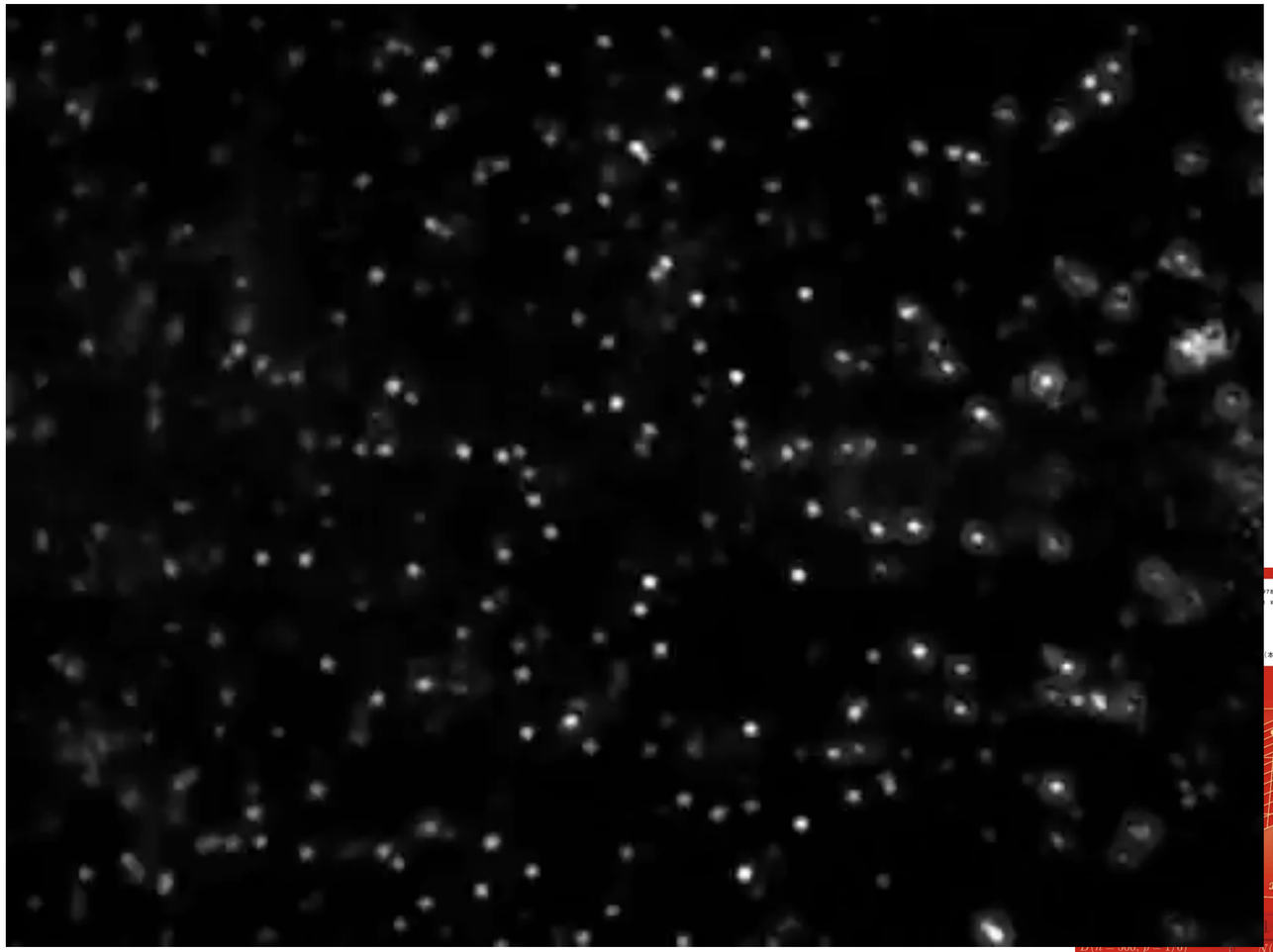
【物理】

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

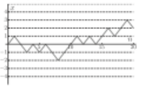
例題 2.23 にて，ランダム・ウォーク（酔歩問題）を取り上げた．もう少し，一般的な形で考えてみよう．

【Level 1】



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，

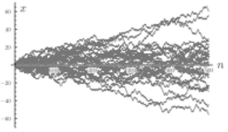
$$P(x,n) = {}_nC_{n_-}\left(\frac{1}{2}\right)^{n_-}\left(\frac{1}{2}\right)^{n-n_+} = \frac{n!}{n_+!\,n_-!}\left(\frac{1}{2}\right)^n$$

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

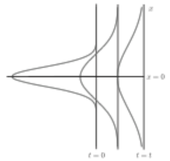
$$P(x,n) = \frac{n!}{\left(\frac{n+x}{2}\right)!\left(\frac{n-x}{2}\right)!}\left(\frac{1}{2}\right)^n \tag{7.1.14}$$

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．



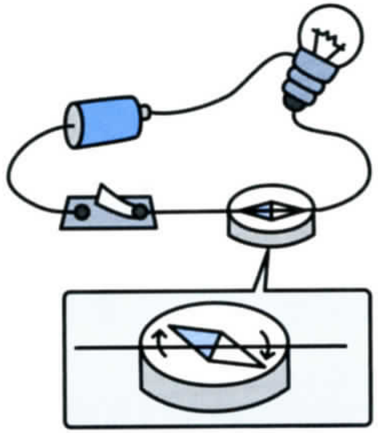
$n=500$ まで 30 例を重ねた図



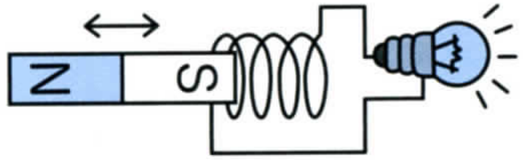
拡散のイメージ図



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。

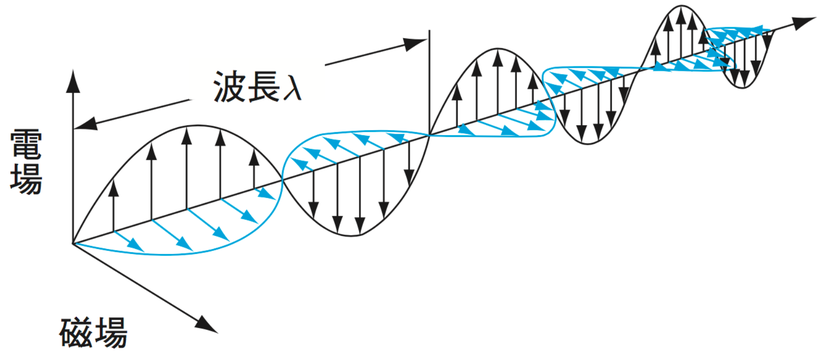
電磁誘導現象の発見（1831年）

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）

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．

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

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

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

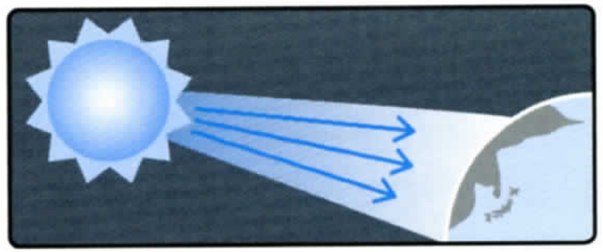
$$\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = 0. \tag{2.9}$$

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?

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.

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?



マイケルソン・モーリーの実験

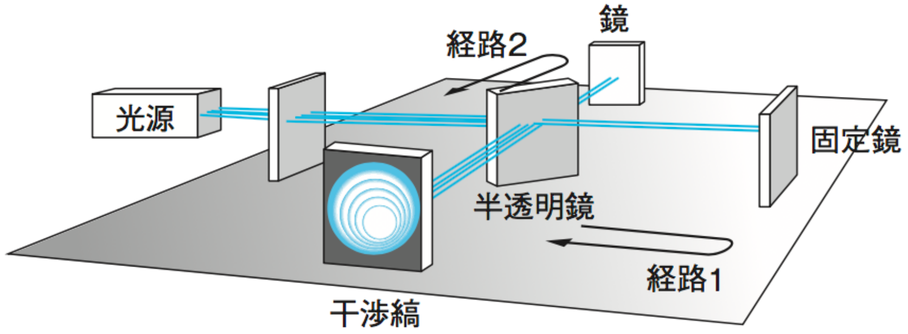
Michelson-Morley experiment　1887

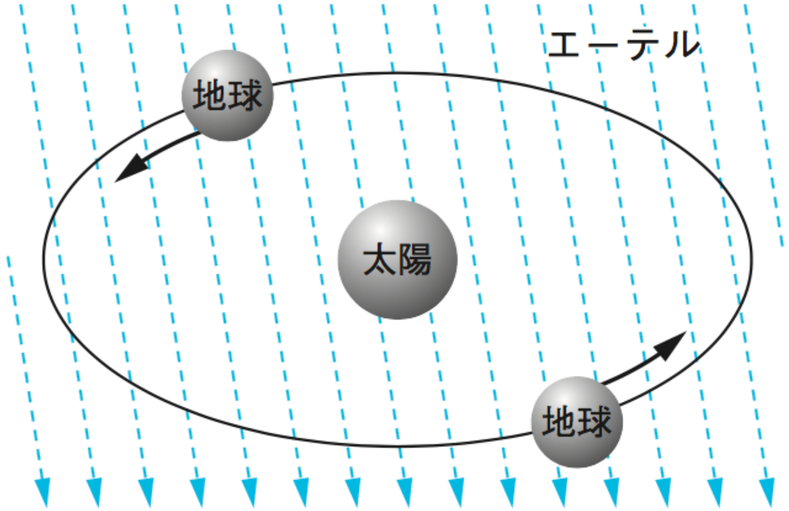




電磁波を伝える媒質としての「エーテル」を探す実験

微小距離を測定する干渉計

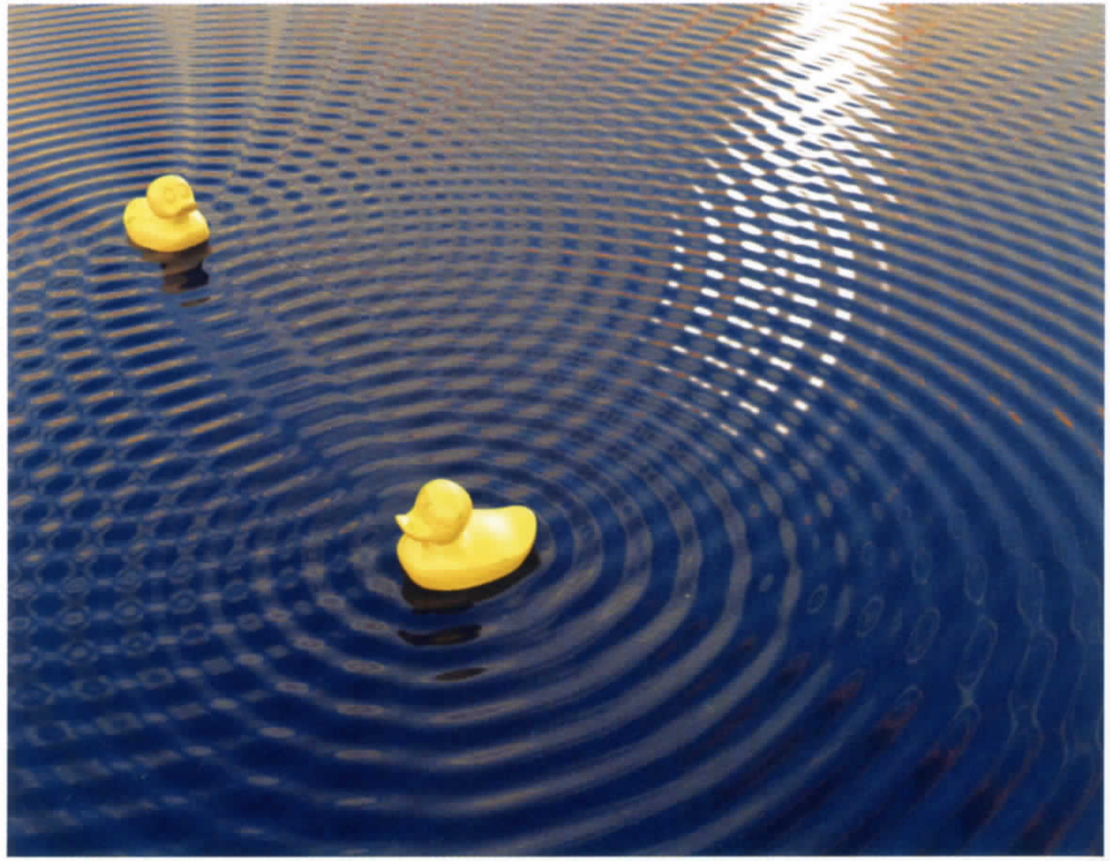




エーテルがあれば，季節で距離が変わるはず.

微妙な差でも，干渉計なら測れるはず.

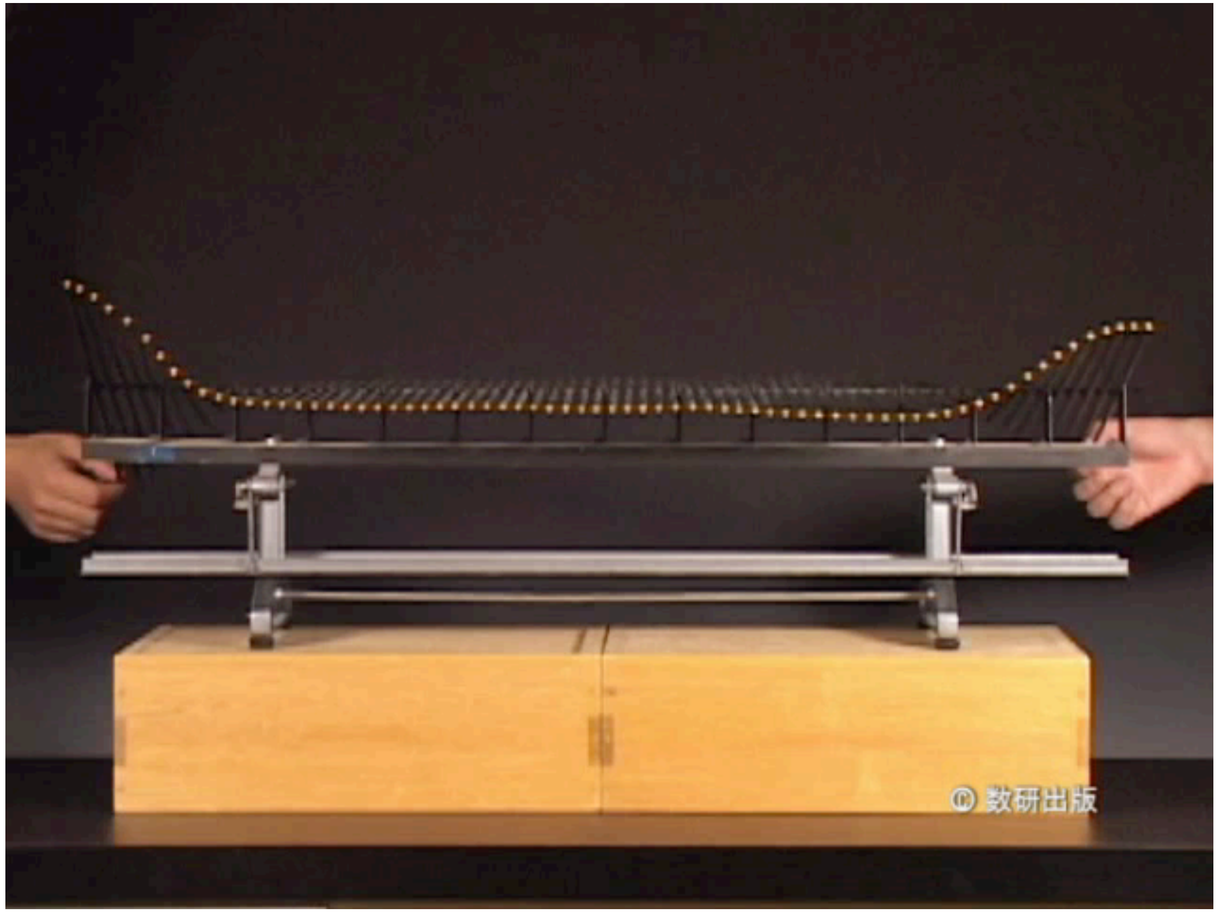
波の干渉



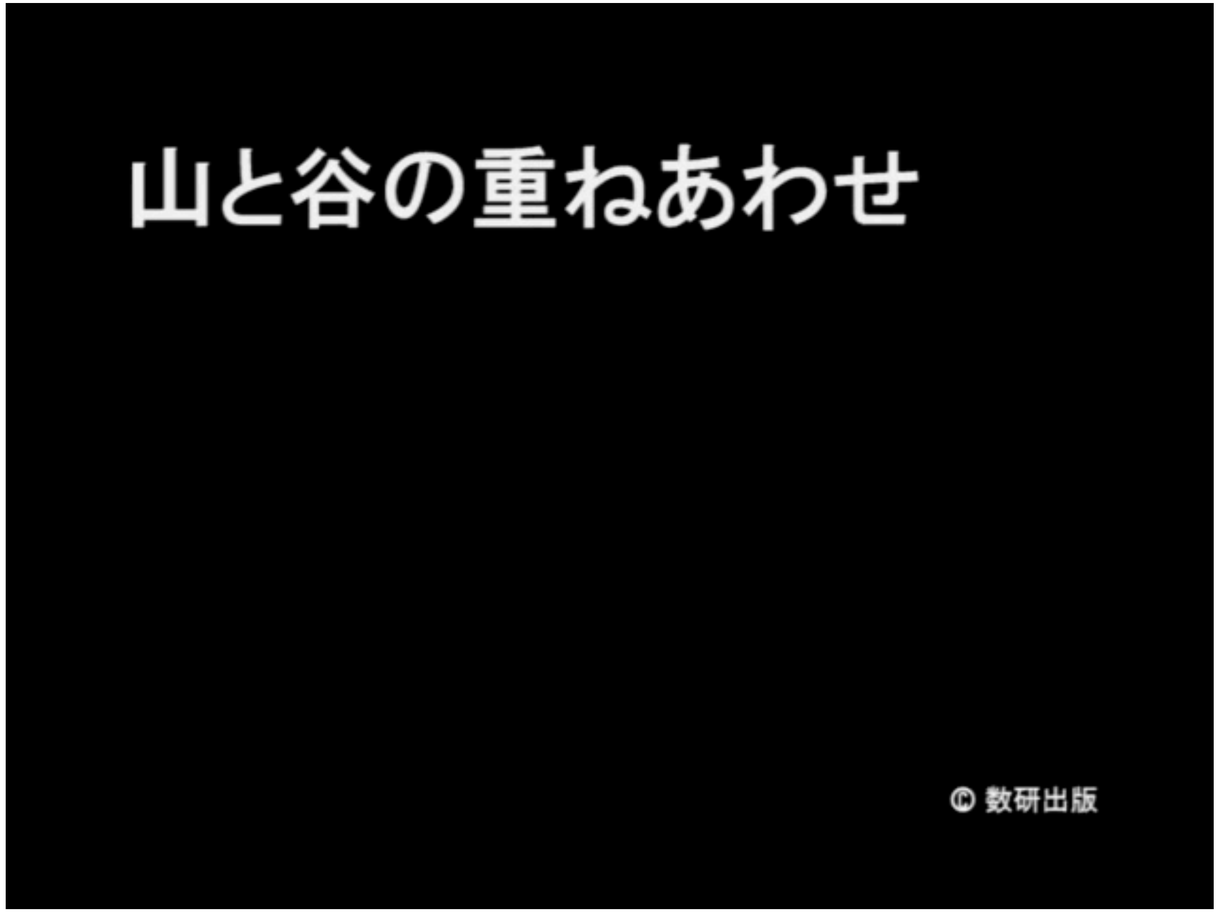
Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

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



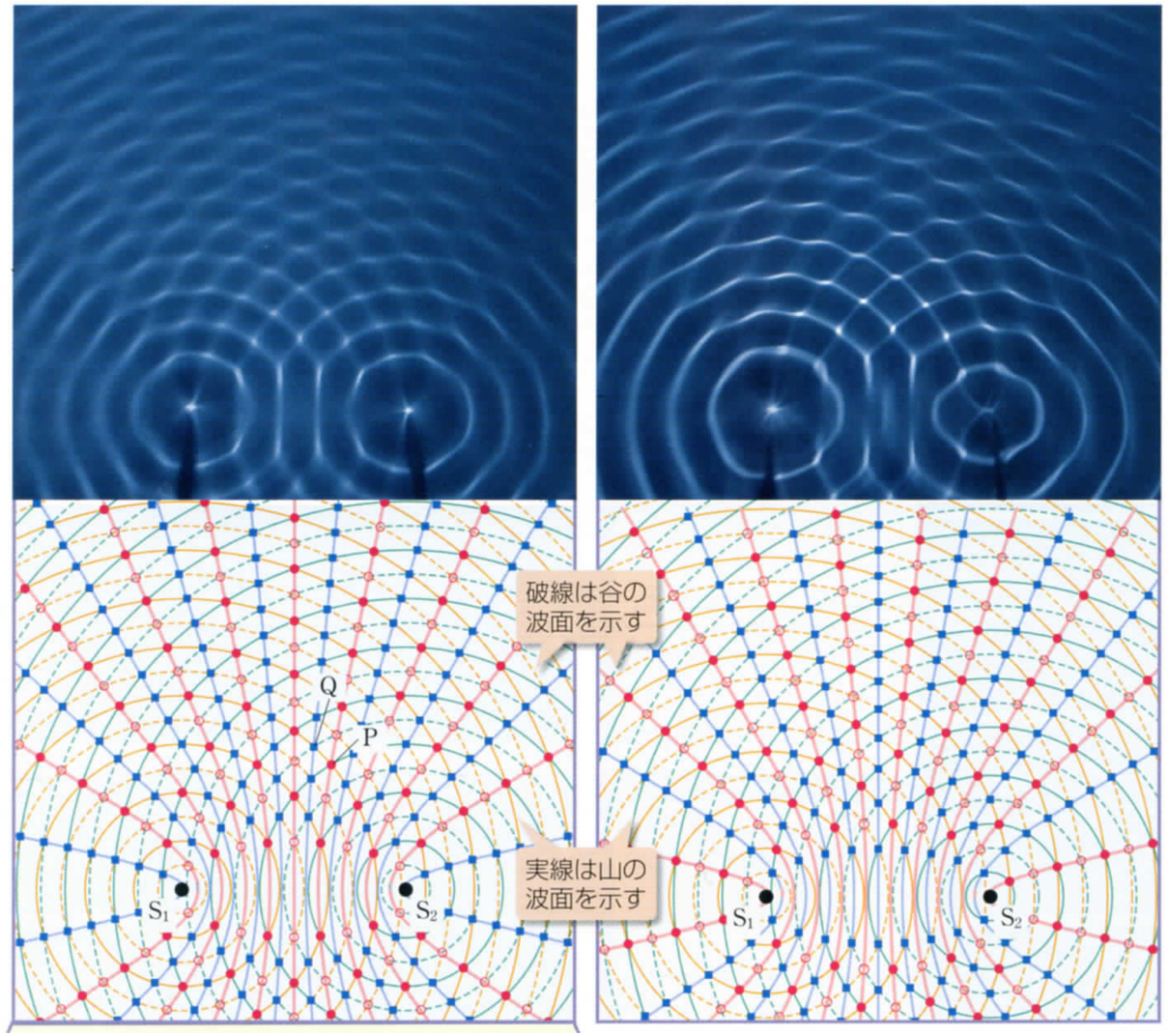
波の干渉：　山＋谷＝０　弱めあう

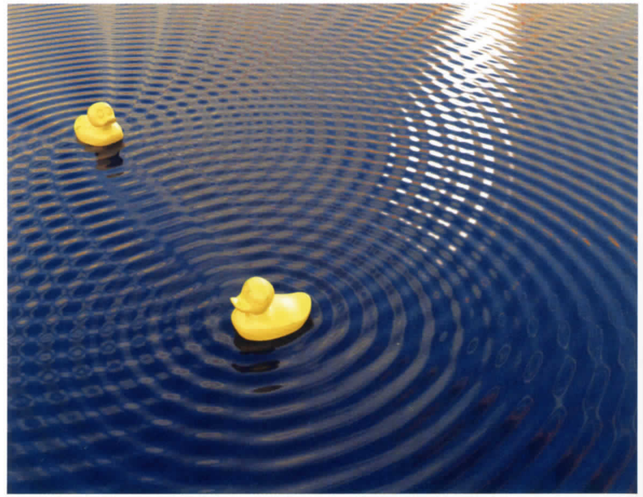


波の干渉　＝　強めあったり弱めあったりする現象

●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

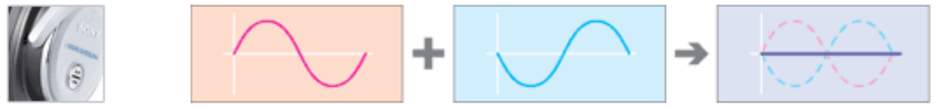
電車内や航空機※などでのリスニング時に、走行音やエンジンノイズなどさまざまな騒音を低減。
勉強や仕事のときなどは、気が散る原因となる周囲の雑音を低減し、静かな環境で聴けるので目的に集中できます。また、音量を上げ過ぎずに音楽を聴きとれるので、周囲への音漏れの心配がありません

■ノイズキャンセリングヘッドホンの活躍シーン



※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。

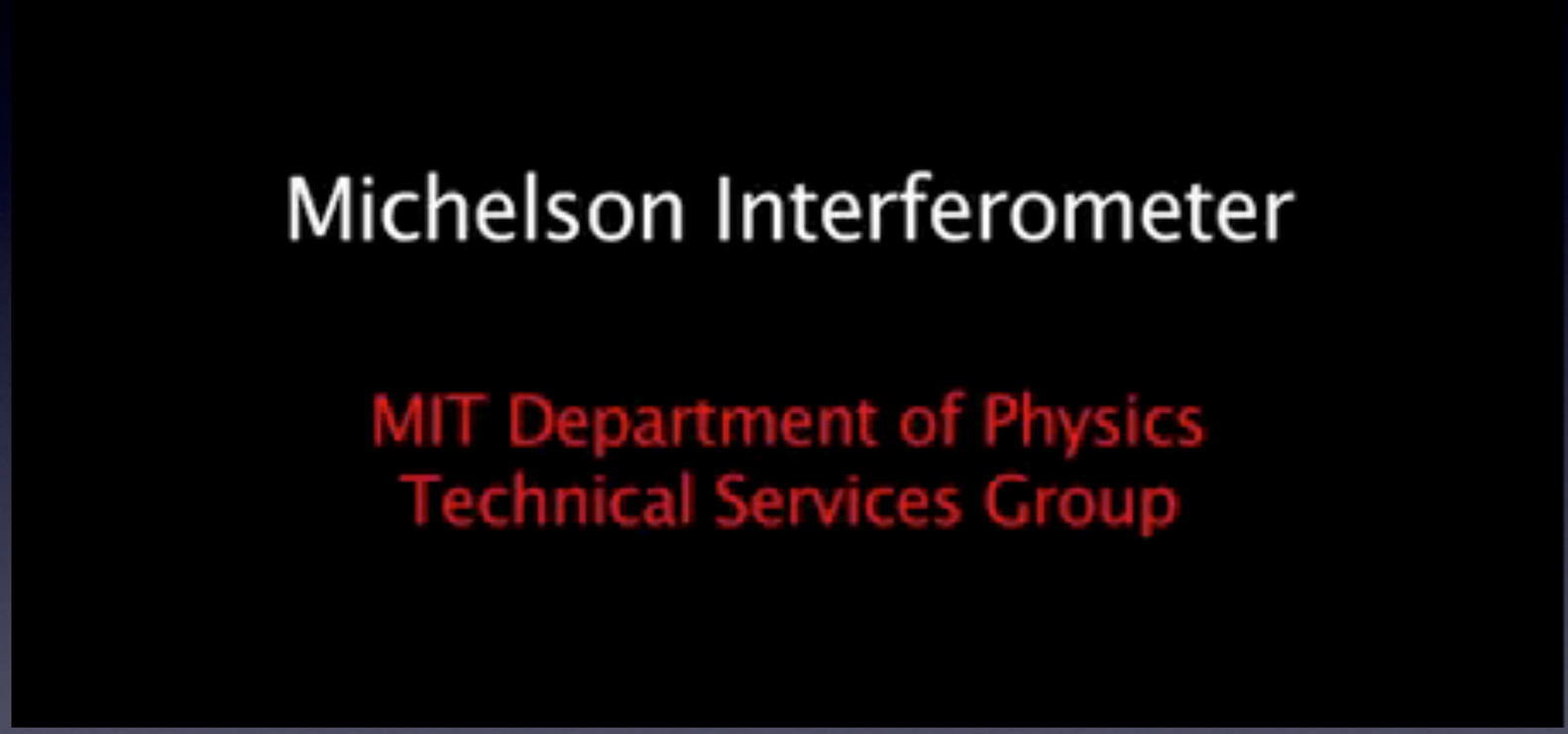
＊ノイズキャンセリング機能は、人が耳障りに感じやすい40～1,500Hzの音を低減させます。周囲からの騒音がまったく聞こえなくなるわけではありません





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

マイケルソン型干渉計のしくみ

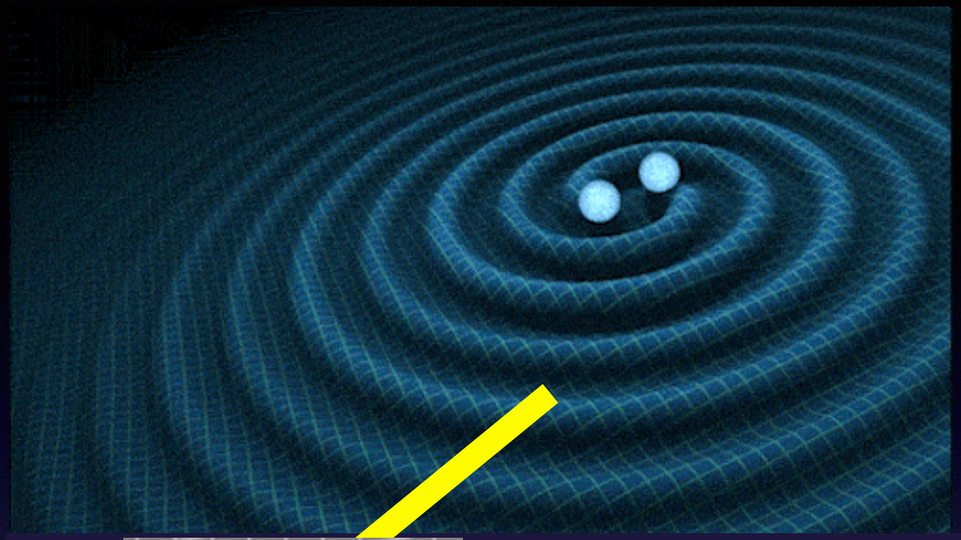


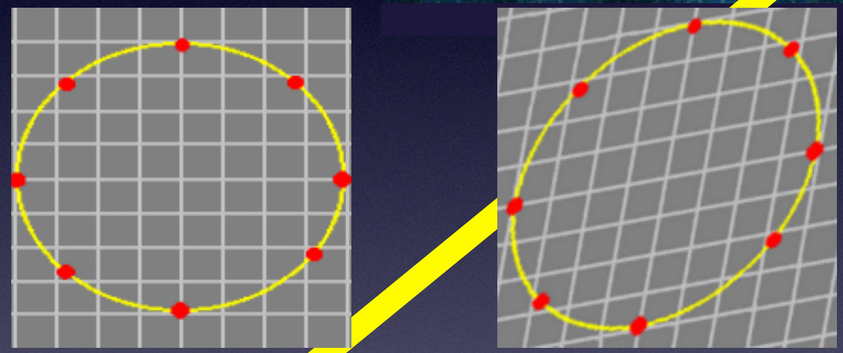
start on click, last half, 1'45"

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





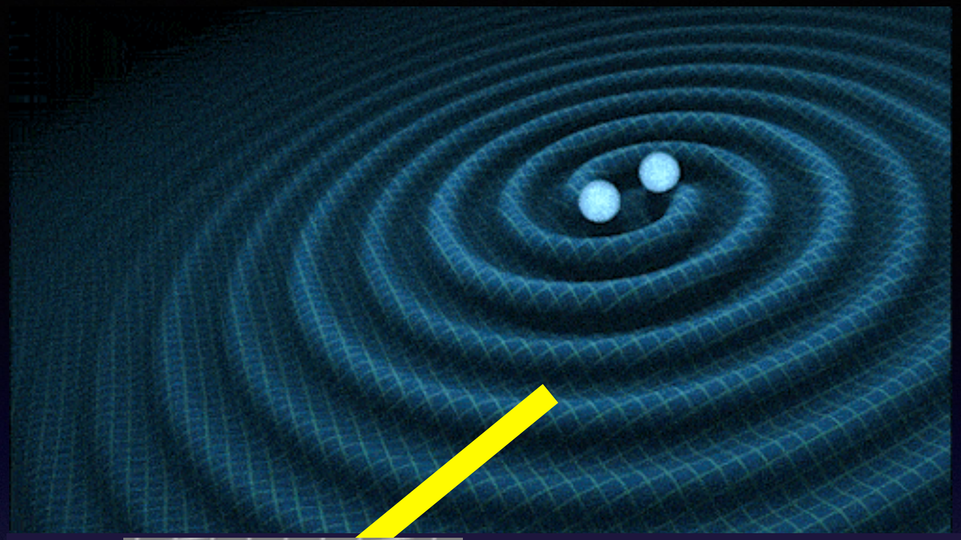


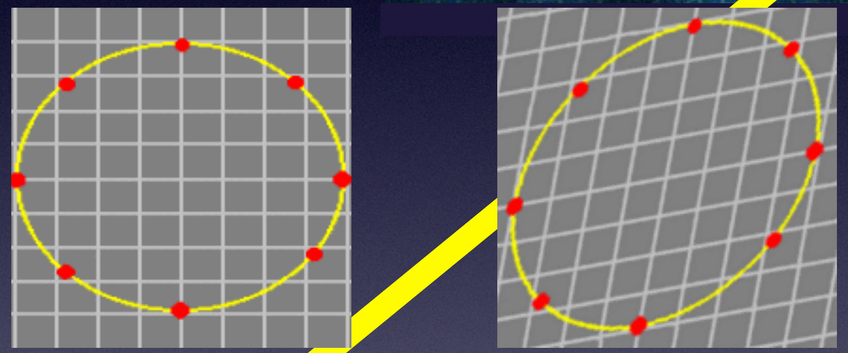
レーザー干渉計

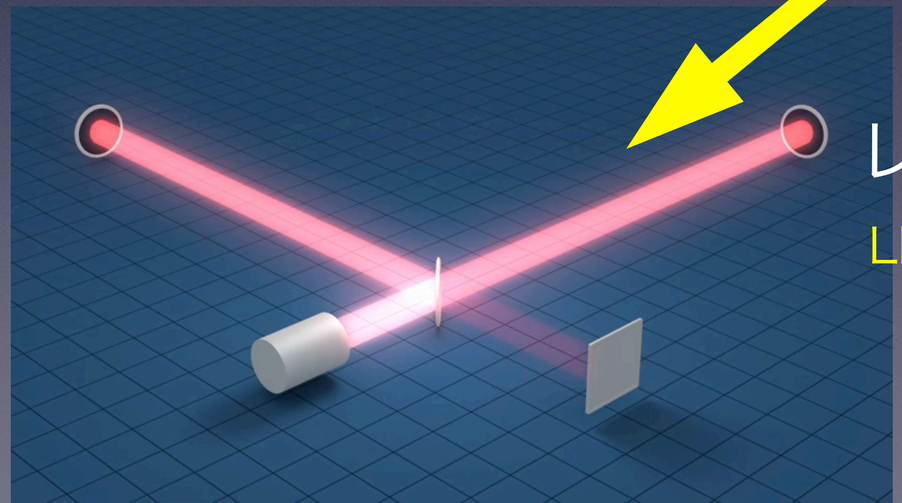
LIGO＝Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

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

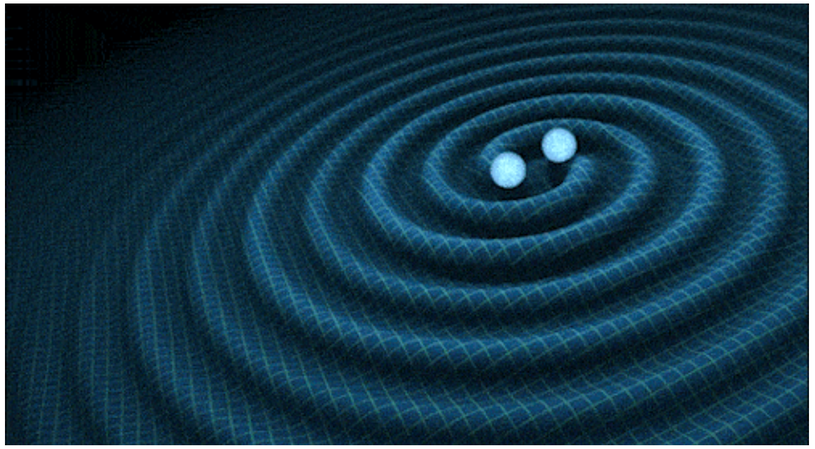
LIGO＝Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

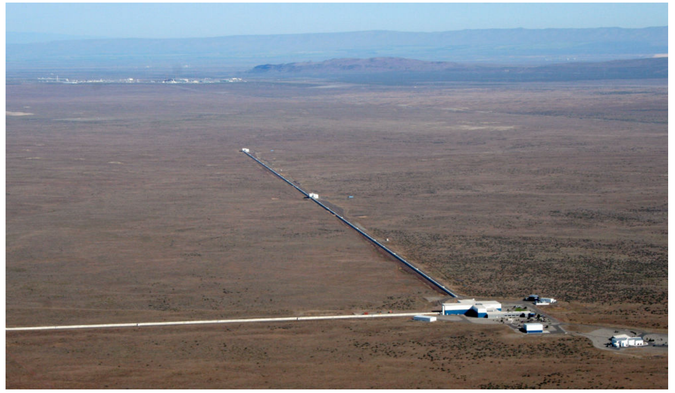
ノーベル物理学賞受賞者 2017年

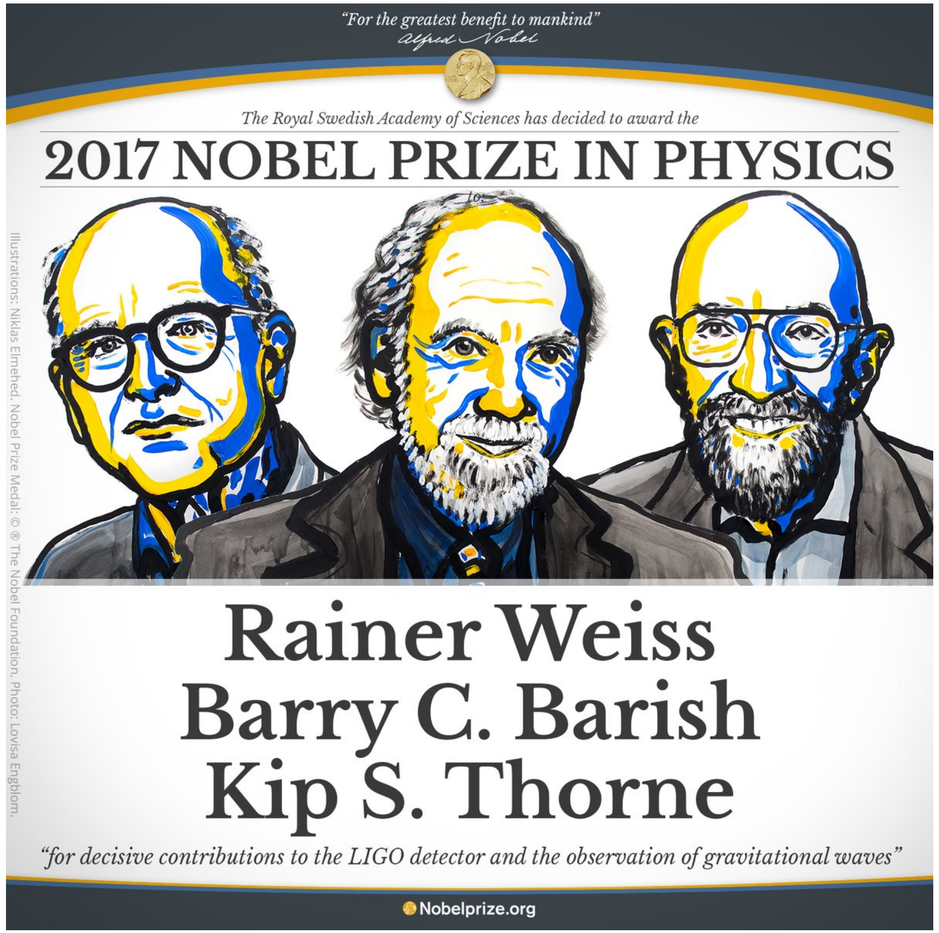
Nobel Laureates in Physics 2017

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.

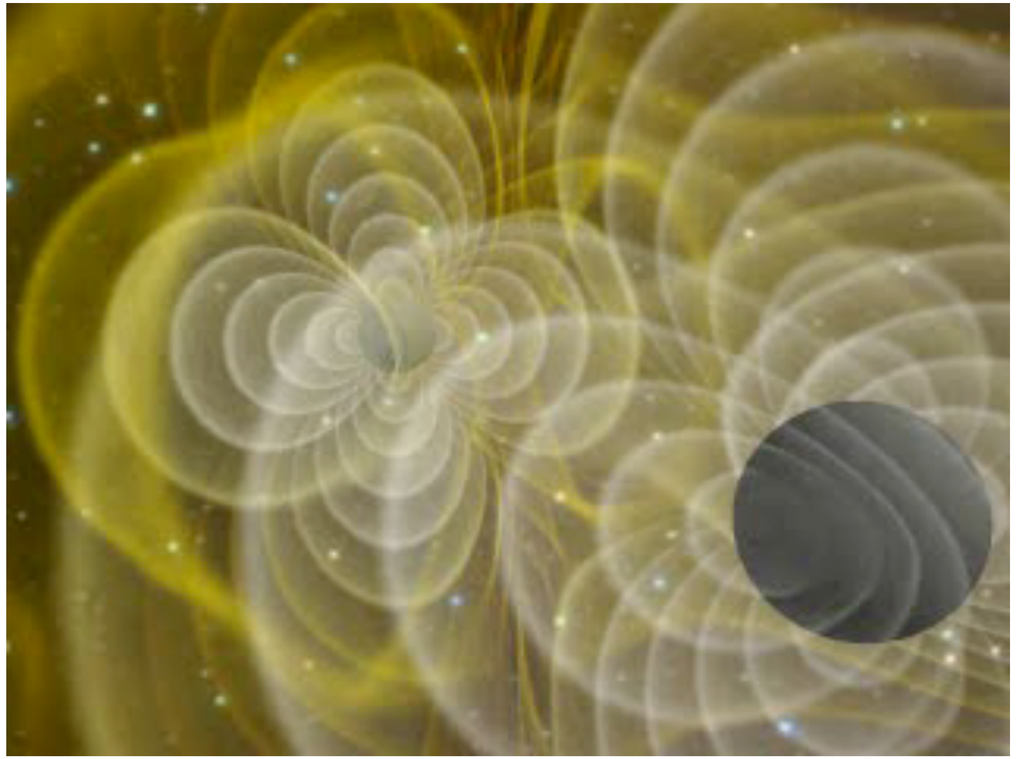
贈賞理由は，"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"（LIGO検出器開発への貢献と重力波の観測）.





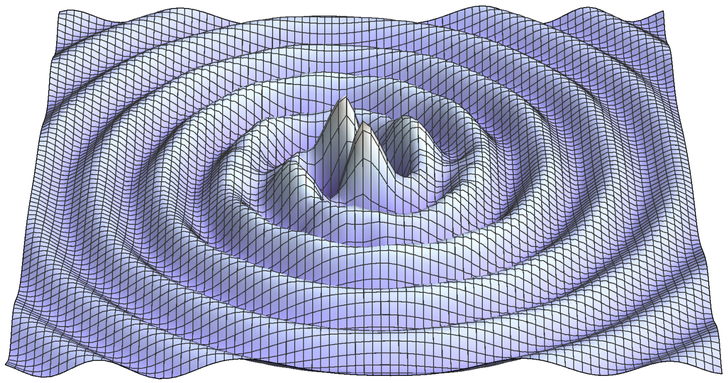


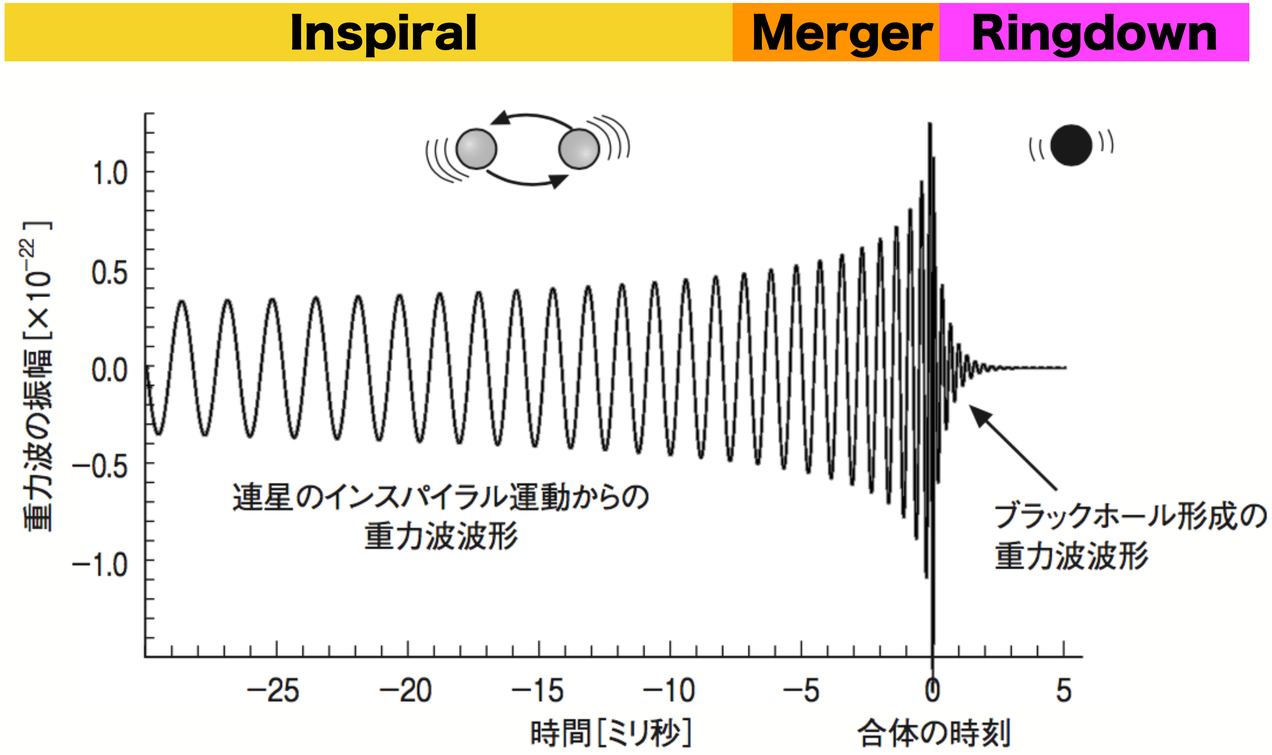
連星合体からの重力波の波形(理論予測)



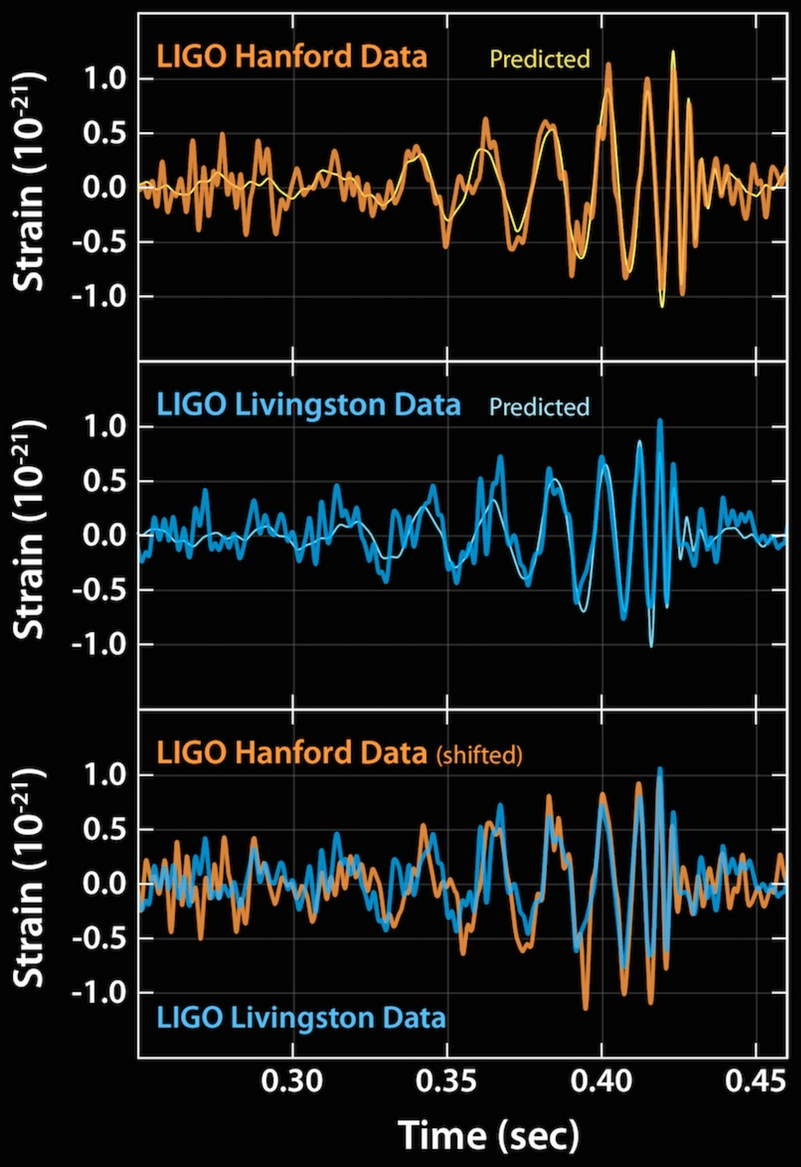
(NCSA-AEIグループ, 1998年)

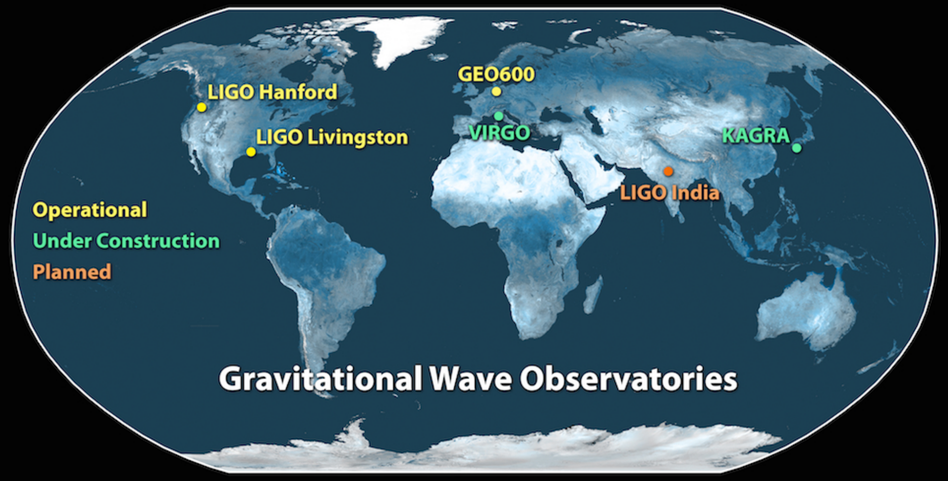






2015年9月14日





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

マイケルソン・モーリーの実験

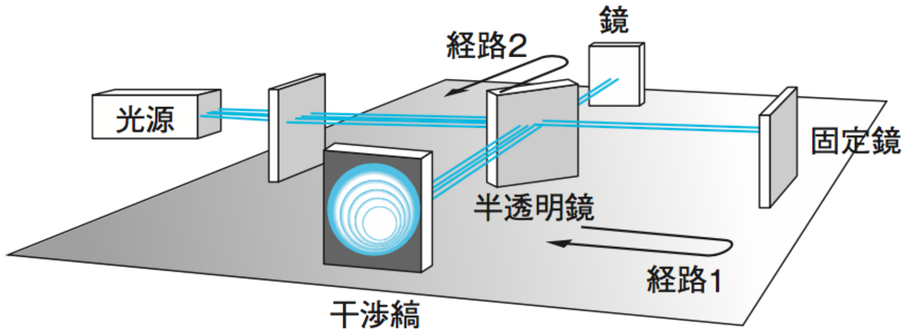
Michelson-Morley experiment　1887

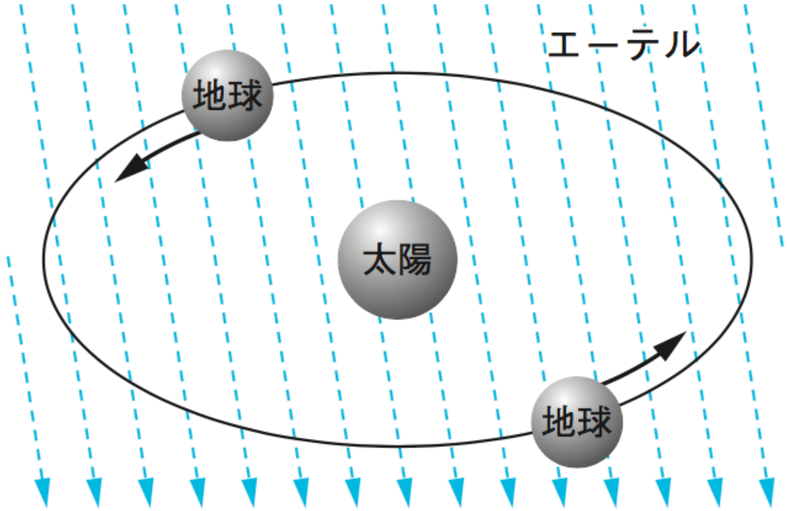




→エーテルの検出に「失敗」

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．

【話題】 NHK 朝までラーニング　2023年8月26日放送　2025年7月18日再放送



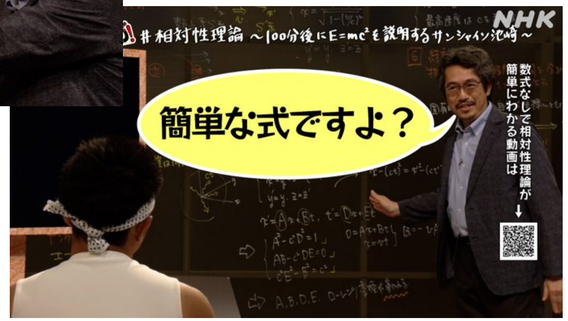


#相対性理論 サンシャイン池崎がひたすら学ぶ謎の深夜番組

初回放送日: 2023年8月27日

「相対性理論をサラッと説明できたらカッコいい！」芸人・サンシャイン池崎さんが100分の大学教授の講義に本気で挑む！難解な数式も登場！「一からちゃんと理解したい」そんな大人の知的欲求に応えます。「数式はムリ」という方にはウエブサイト・NHKラーニングのショート動画でわかりやすく解説！池崎さんの本気の推し、櫻坂46・小池美波さんが内緒で登場！なななな～なななな～ナレーションはジョイマン高木さん。





https://www.web.nhk/tv/pl/series-tep-883N4WZPGQ/ep/2W8P531W5Y

https://www.nhk.jp/p/ts/883N4WZPGQ/

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