

# 天文学II

- 重力の謎 -

昭和女子大  
総合教育センター講義  
福島登志夫

---

---

---

---

---

---

---

---

## 目次

[戻る](#)

- はじめに
- 重力の特徴
- 惑星の運動
- 天動説と地動説
- ケプラーの法則への道
- ニュートン物理学
- 万有引力
- 二体問題
- 彗星の運動
- 地球の形状
- 多体問題
- 天王星の発見
- 惑星を探せ
- 海王星の予言
- 水星の運動の謎
- 特殊相対論
- 一般相対論
- 一般相対論の検証
- 宇宙構造の進化

---

---

---

---

---

---

---

---

## はじめに

- 講師紹介
- 講義の概要
- 講義のねらい
- 講義の手法
- 講義ノートと参考書
- 成績評価

---

---

---

---

---

---

---

---

### 福島登志夫

- 自然科学研究機構 国立天文台
- 天文情報公開センター 教授
- 181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1
- [Toshio.Fukushima@nao.ac.jp](mailto:Toshio.Fukushima@nao.ac.jp)
- 電話: 0422-34-3613
- ファックス: 0422-34-3810
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 参考書

- 「アインシュタインの謎を解く」
  - 三田誠弘著、ネスコ・文芸春秋
- 「ニュートンの時計」
  - ピーターソン著、野本訳、日経サイエンス
- 「アインシュタインは正しかったか？」
  - ウィル著、松田・二間瀬訳、TBSブリタニカ
- 「図解雑学:重力と一般相対性理論」
  - 二間瀬著、ナツメ社(いずれも)
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 講義の概要

- 前期:天文学全体の紹介
  - すばる望遠鏡、惑星、銀河、宇宙全体
- 後期:重力の謎
  - 天文学者に焦点
  - ケプラー、ニュートン、アインシュタイン
  - 科学の歴史 + 物理学の「基本のき」
  - 前期と全く別内容、重複受講可
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 講義のねらい(後期)

- 天文・地文・人文
  - 教養としての世界観
  - 宇宙を知るとは人間を知ること
  - 科学的考え方の歴史的变化
- 重力の不思議さ
  - 物理学の中心テーマ
  - 現代の天文学にも影響
  - 生き生きとした科学者の姿
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 講義の手法

- PCによるスライドショー
- VHSビデオ、DVDプログラム
- 国立天文台見学
  - 土曜の午後を予定
- 課外対応(質問)
  - 電子メール、講義終了後に受け付け
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 重力の特徴

- 全ての物体が全ての物体に働く
  - 万有(Universal)引力(Attraction)
  - 質量の謎: 全ての物体が持つ
- 長距離力: 力はどこまでも働く
  - 力の大きさは距離の逆2乗に比例
- [次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 重力の特徴(続き)

- 打ち消しあいがない
  - 引力だけ
- 遮蔽(しゃへい)ができない
- 使えるエネルギーに上限がない
  - 宇宙の諸現象の主エネルギー源
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 宇宙の諸現象

- 星の誕生: オリオン星雲、すばる
- 星の終焉: 惑星状星雲、超新星爆発
- 普通の銀河: アンドロメダ銀河、M64
- 特異銀河: M51、NGC4083、M82
- 宇宙の果て: クエーサー
- 不思議: アインシュタインの十字架
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### オリオン 星雲

- オリオン  
KL天体
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

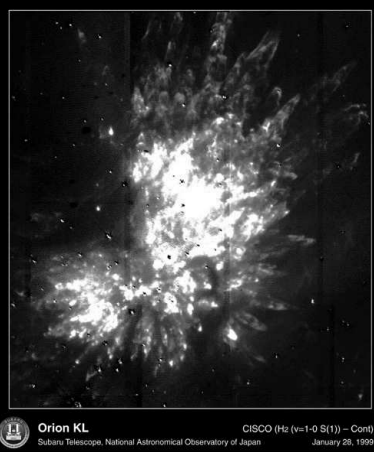
---

---

---

# オリオン KL天体

- [戻る](#)



---

---

---

---

---

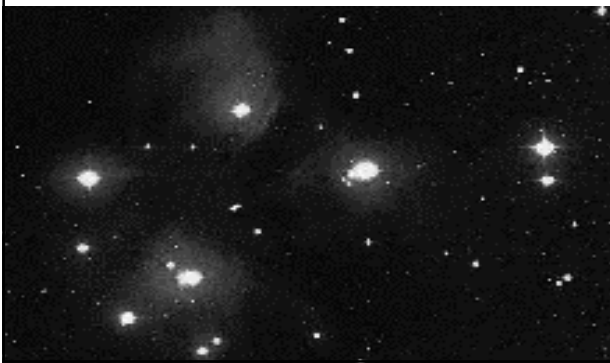
---

---

---

# すばる(昴)

- [すばる望遠鏡](#) [戻る](#)



---

---

---

---

---

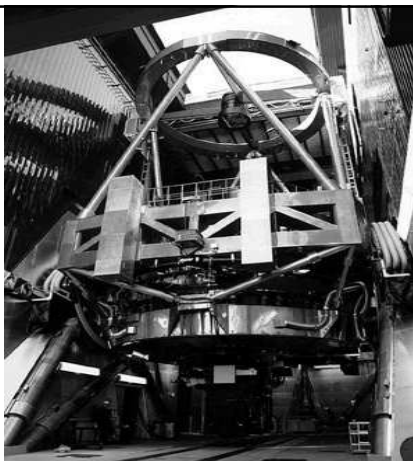
---

---

---

# すばる 望遠鏡

- [ハワイ観測所](#)
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### ハワイ観測所

■ 戻る



---

---

---

---

---

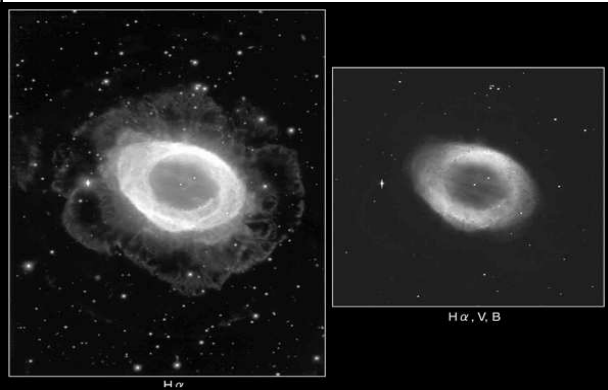
---

---

---

### M57(リング星雲)

■ 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### かに星雲

■ 戻る



---

---

---

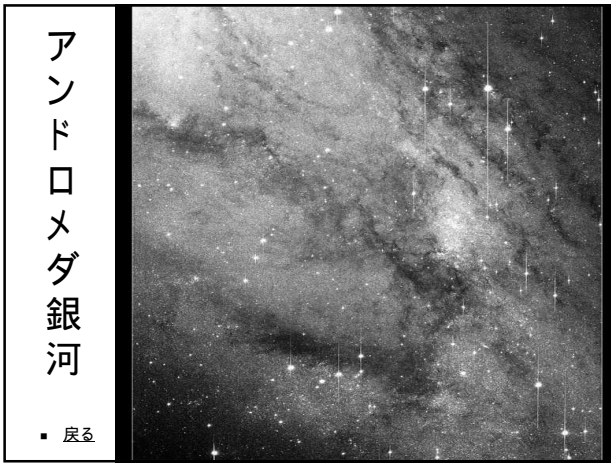
---

---

---

---

---



---

---

---

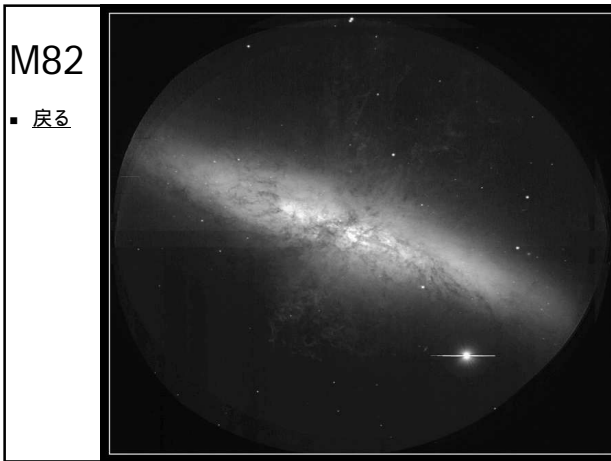
---

---

---

---

---



---

---

---

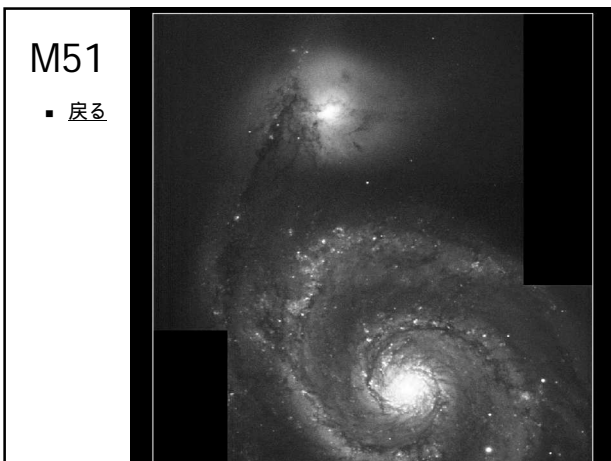
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---

NGC4083 (触角銀河)

■ 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

M64 (黒い瞳)

■ 戻る



---

---

---

---

---

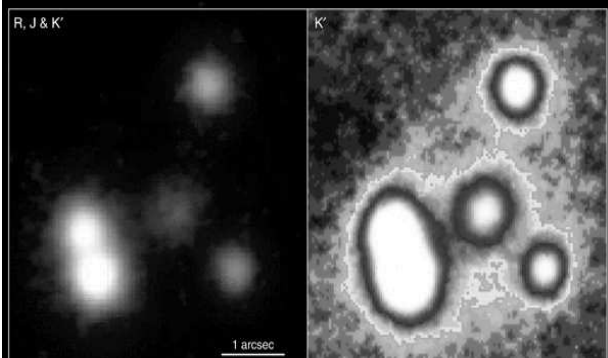
---

---

---

アインシュタインの十字架

■ 重力レンズ 戻る



---

---

---

---

---

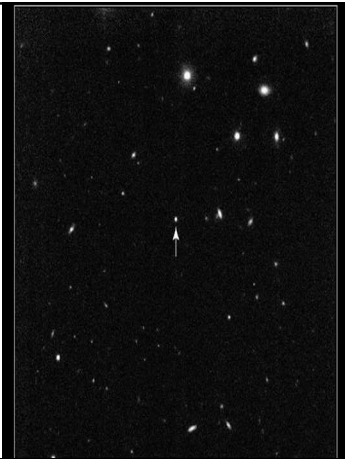
---

---

---

### クェーサー

- [宇宙ジェット](#)
- [ジェット機構](#)
- [ブラックホール](#)
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

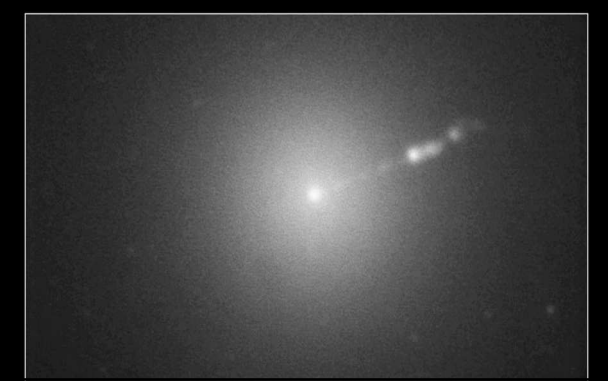
---

---

---

### 宇宙ジェット

- [戻る](#)



---

---

---

---

---

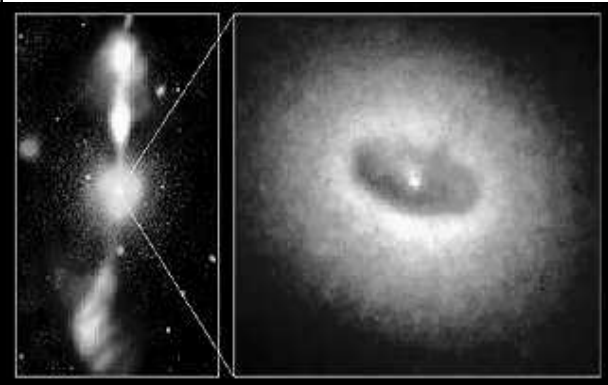
---

---

---

### ジェット機構

- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### 惑星の運動

- 惑星 = (人心を) 惑わせる星 ↔ 恒星
- 恒星に対して動く: 恒星より近い
- 黄道の近くを動く: ほぼ平面上を運動
- 水星と金星: 満ち欠け、太陽の側
- 火星、木星、土星: 逆行
- 目次へ

---

---

---

---

---

---

---

### 惑星Planet

- 太陽、月 (= 太陰)、地球
- 五惑星 (水金火木土)
  - 水星 Mercury、金星 Venus、火星 Mars
  - 木星 Jupiter、土星 Saturn
- 新惑星
  - 天王星 Uranus、海王星 Neptune
  - 冥王星 Pluto
- 戻る

---

---

---

---

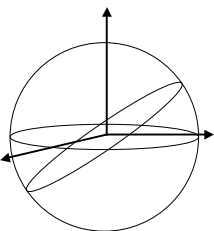
---

---

---

### 黄道、白道、天の赤道

- 天動説での概念
- 黄道 (こうどう)
  - 天球上で太陽がたどる道
- 白道 (はくどう)
  - 天球上で月がたどる道
- (天の) 赤道
  - 地球の赤道の天球上への延長
- 戻る



---

---

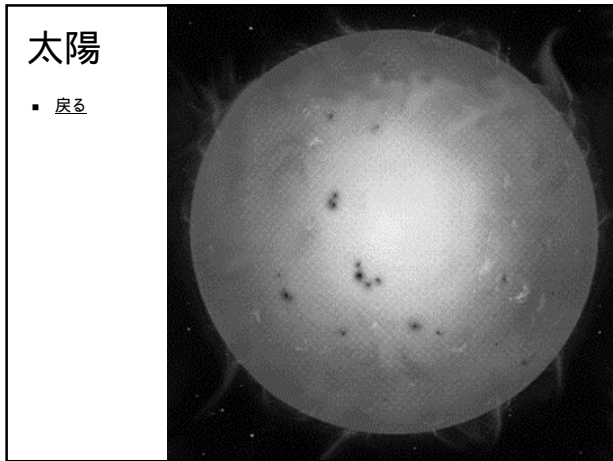
---

---

---

---

---



---

---

---

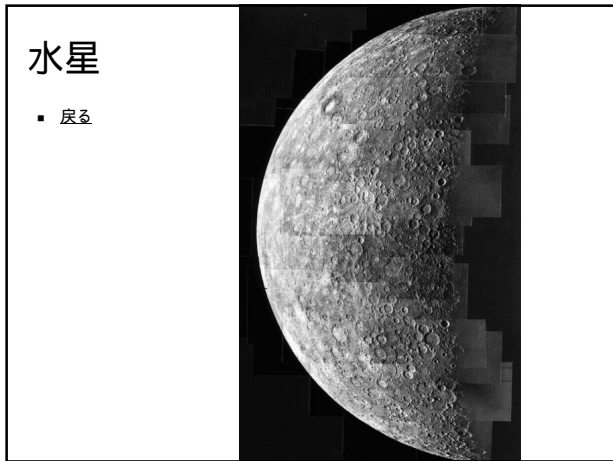
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

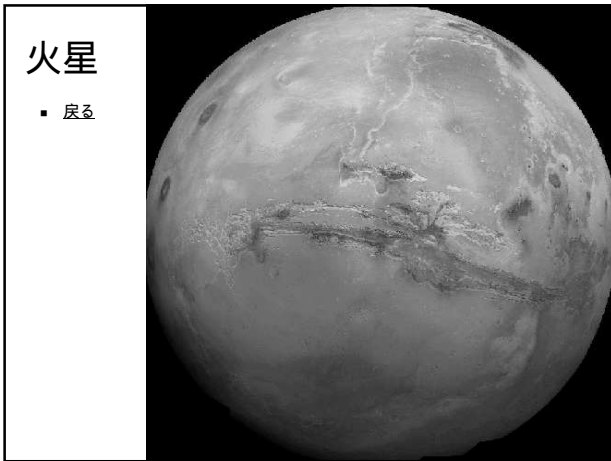
---

---

---

---

---



---

---

---

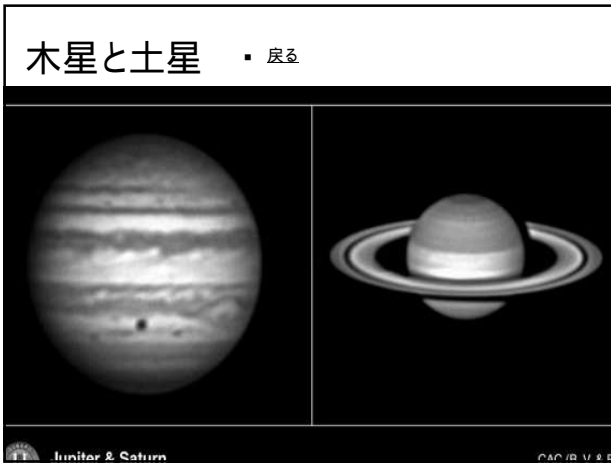
---

---

---

---

---



---

---

---

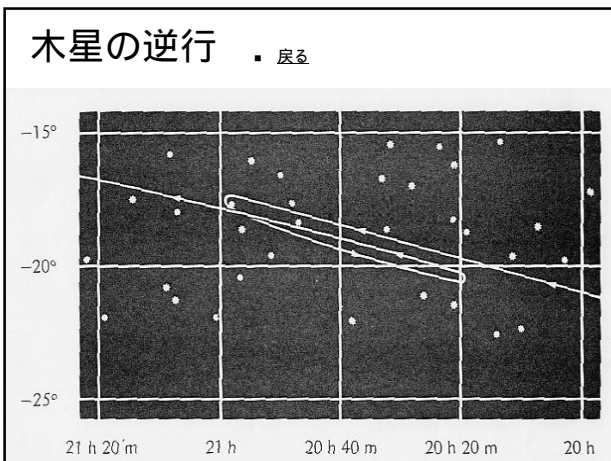
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---

## 天動説と地動説

- ヒッパルコスとプトレマイオス
  - 周転円の発明
- コペルニクスとブルーノ
  - 地動説の提唱、宇宙原理
- ガリレオ
  - 望遠鏡観測による確信
  - 「それでも地球は動いている」
- 目次へ

---

---

---

---

---

---

---

---

## プトレマイオス

- Ptolemy
- ~AD140
- 戻る



---

---

---

---

---

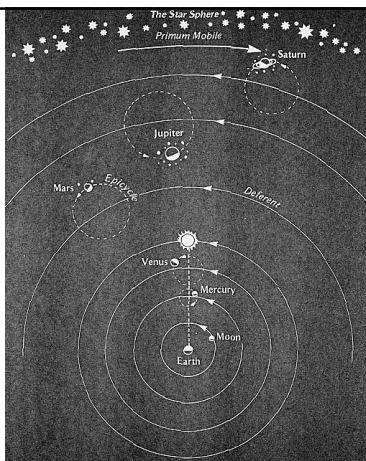
---

---

---

## 周転円

- 親円の周りに子円が、子円の周りに孫円が、...
- 三角級数 = フーリエ級数
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## フーリエ

- J.B.J. Fourier
- 1768-1830
- ナポレオンと同期
- エジプト司政官
- 熱伝導
- 三角級数
- 次元解析
- 戻る



---

---

---

---

---

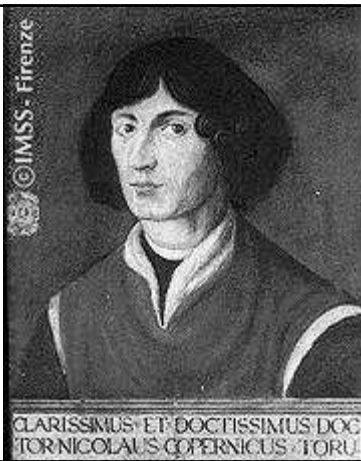
---

---

---

## コペルニクス

- N. Copernicus
- 1473-1543
- ポーランドの科学英雄
- 地動説
- 別の肖像
- 戻る



---

---

---

---

---

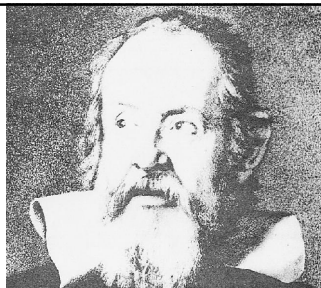
---

---

---

## ガリレオ

- Galileo Galilei
- 1564-1642
- 相対性原理
- 落体の法則
- 望遠鏡の発明
  - ガリレオ衛星の発見、天の川を星に分解
- 振り子の等時性、振り子時計の発明
- 他の肖像1、他の肖像2
- 戻る



---

---

---

---

---

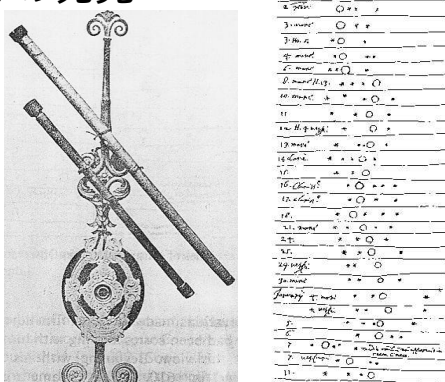
---

---

---

### ガリレオの発見

- 月面
- ガリレオ衛星
- カラー写真
- 戻る



The image shows a detailed drawing of Galileo's telescope on the left and a handwritten page of his astronomical observations on the right. The page contains a list of stars and planetary positions, with symbols like circles and crosses indicating their locations and movements.

---

---

---

---

---

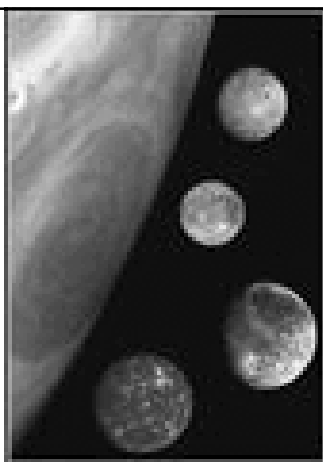
---

---

---

### ガリレオ衛星

- 木星の4大衛星
- イオ
- オイロパ
- ガニメデ
- カリスト
- 戻る



The image shows a black and white photograph of four of Jupiter's moons (Io, Europa, Ganymede, Callisto) in a vertical line against a dark background. The moons are shown in various phases, from crescent to nearly full.

---

---

---

---

---

---

---

---

### ガリレオの望遠鏡

- 戻る



The image shows a photograph of Galileo's original telescope, which is a simple refracting telescope with a long, thin tube. The image is credited to IMSS - Firenze.

---

---

---

---

---

---

---

---



### 着け鼻ティコ

- 戻る



---

---

---

---

---

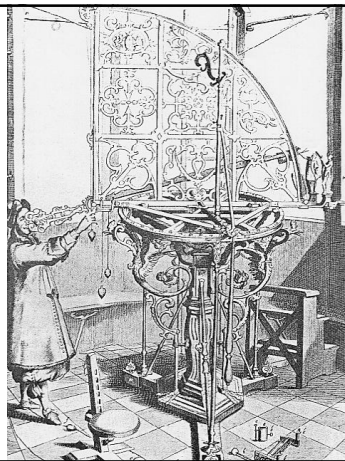
---

---

---

### 四分儀

- 望遠鏡以前の位置測定
- 簡易版
  - 六分儀
- 発展形
  - 子午儀
  - 子午環
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### ケプラー

- J. Kepler  
1571-1630
- ケプラーの法則
- ケプラー方程式
- 計算魔
- 戻る



---

---

---

---

---

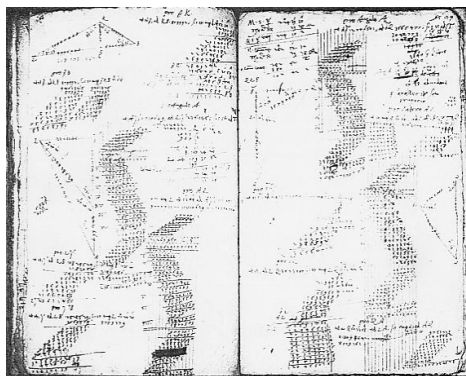
---

---

---

### ケプラーの計算ノート

- 戻る




---

---

---

---

---

---

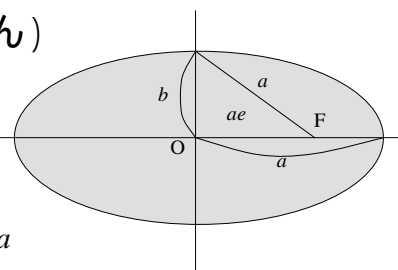
---

---

### 楕円(だえん)

- 円の拡張

- ◆ 焦点: F
- ◆ 中心: O
- ◆ 長半径:  $a$
- ◆ 短半径:  $b$
- ◆ 離心率:  $e$



$$b^2 + (ae)^2 = a^2$$

- 次△

---

---

---

---

---

---

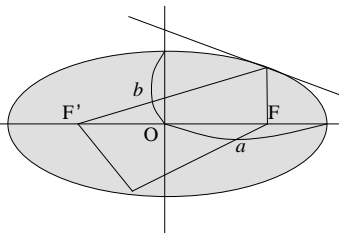
---

---

### 楕円の諸性質

- 2点(焦点)からの距離の和が一定
- 楕円の内側が鏡なら焦点から出た光は他の焦点に集まる 焦げる点
- 楕円の方程式

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$



- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### 面積速度

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}rv\sin\theta$$

- 面積速度一定の意味
  - 太陽に近い 速い
  - 太陽に遠い 遅い
  - 角運動量保存法則

戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### 周期 - 半径関係

- 周期の2乗は、長半径の3乗に比例

$$\frac{a^3}{P^2} = \text{一定} = \frac{\mu}{(2\pi)^2}$$

- 実証
- 不思議な定数  $\mu$
- 太陽系の幸運?  $\mu = GM_{\text{SUN}}$
- 戻る

---

---

---

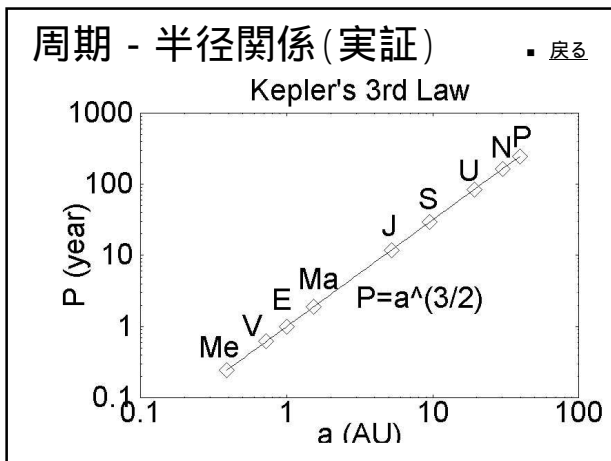
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

## ニュートン物理学 (= 力学)

- ニュートンの登場
- 数々の革新的思考
  - 絶対的な時間と空間 (3次元)
  - ガリレイの相対性原理
  - 因果律と決定性原理
- 近代科学 (= 数理科学) の始まり
  - 運動の法則、万有引力
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## ニュートンの登場

- 科学者の神様  
ニュートン
- 科学の聖書  
プリンキピア
- 神の意志の排除
- 運動の法則
- 天と地の統一: 万有引力
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

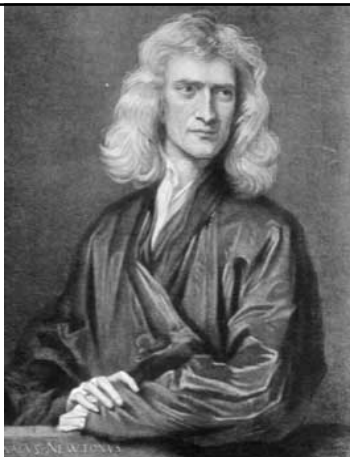
---

---

---

## ニュートン

- I. Newton
- 1642-1727
- 最高の科学者
- 力学
- 微積分学
- 光学
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

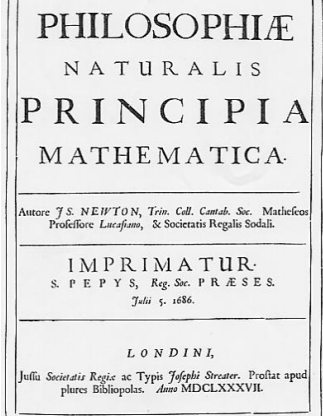
---

---

---

## プリンキピア

- 威張り屋フック
- ハレーとレン
- ハレーの訪問
- 出版への道
- めざせ「原論」
- 幾何学的証明
- ハレーの支援
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## フック

- R. Hooke, 1635-1703
- 実験の鬼: フックの法則
- 顕微鏡のプロ: 細胞の発見
- 王立協会の主(ぬし)
- 肖像画なし
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

## ハレー

- E. Halley
- 1656-1742
- 周期彗星
- 固有運動
- プリンキピア出版
- グリニッジ天文台  
長
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## レン

- C. Wren
- 1632-1723
- 建築家
- セント・ポール寺院
- 王立協会の設立
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## 絶対時空

- 時間は1次元、空間は3次元
  - 過去から未来、縦・横・高さ
- 絶対時間: 時間は宇宙で唯一つ
- 絶対空間: ユークリッド空間
  - 回転するバケツと遠心力
- マッハの批判: 回転する宇宙
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## ガリレイの相対性原理

・ [戻る](#)

- 相対性原理
  - = 「見方を変えても、物事は変わらない」
- 物理法則はガリレイ変換に関して相対的(=不変)である
- 運河を進む舟の上で玉を落とすと、陸からはどのように見えるか？
- ガリレイ変換
  - = 等速直線運動に伴う座標変換

---

---

---

---

---

---

---

---

### 因果律

- 科学の根本法則
- 原因なくして結果なし
  - 現在のありさまは、過去の全ての事件の結果
  - 未来の事件は、現在に影響を及ぼさない
- 法則は原因と結果を結びつけるもの
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### 決定性原理

- 古典物理学の基本原則
- 未来の事件は一通りに決まる
  - 同じ原因なら同じ結果
  - 一番はじめの様子が現在を支配
- ラプラスの悪魔
- 決定性原理の吟味
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### 運動の三法則

- I: 慣性の法則
  - 力が働かない 等速直線運動
- II: 運動の法則
  - 力は運動量の変化に等しい
- III: 作用反作用の法則
  - 作用と反作用は大きさ同じで逆向き
- ◆ 戻る

---

---

---

---

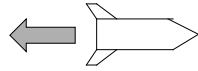
---

---

---

---

### 運動量の保存



- 力が働かない
  - 例: ロケット
  - 全体の重心は動かない
    - 液体酸素 + 液体水素エンジン
    - ガスの噴出速度~2.4km/s
    - 多段式が効率よい
- 戻る

---

---

---

---

---

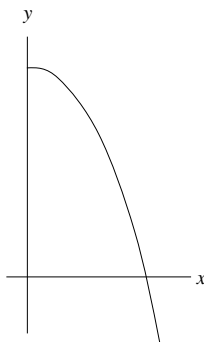
---

---

---

### 落体の法則

- ピサの斜塔と  
ガリレオの傾斜路
  - 重力加速度
  - 放物線運動
    - 横方向: 等速直線運動
    - 縦方向: 自由落下運動
- 戻る



---

---

---

---

---

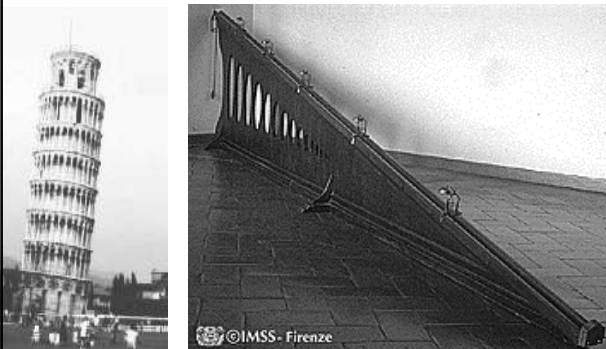
---

---

---

### ピサの斜塔とガリレオの傾斜路

- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## 万有引力

- ニュートンのリンゴ
- 大事なこと
  - 「大きさ」は距離の2乗に反比例
  - 「向き」は相手の方向 引力
  - 「大きさ」は物質によらない 万有
- その他の特徴
  - [目次へ](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## ニュートンのリンゴ

- 1665:ペストの大流行 大学閉鎖
- 実家にて:月とリンゴ
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## その他の特徴

- 二つの保存量
  - 中心力 「角運動量」保存
  - ポテンシャル力 「エネルギー」保存
- 三つの性質
  - 二体間力
  - 遠隔作用 ⇔ ホイヘンスの原理
  - 非線形 ⇔ フックの法則
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## 二体間力

- 重ね合わせの原理
  - 多体問題: 特別な力は働かない
  - 二体間力の重ね合わせ
- 難しい問題
  - 自分自身との重力 無限大の項
  - 朝永先生の繰り込み理論

◆ 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

## ホイヘンス

- C. Huygens
- 1629-1695
- タイタンの発見
- 土星の輪
- 振り子時計
- 光の波動説
- 戻る



---

---

---

---

---

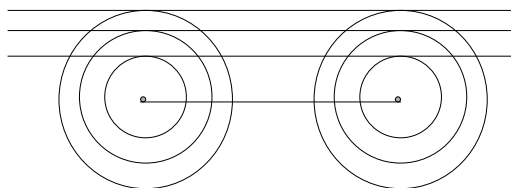
---

---

---

## ホイヘンスの原理

- 近接作用説
  - 力は粒子のキャッチボール
- 波は少し前の波からやってきた波の重ねあわせで作られる
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### フックの法則



- ばねの力
  - つりあいの位置からのずれに反比例
- 線形な力
  - 2倍ずれれば2倍の力
  - 重ね合わせが成り立つ
  - 万有引力 = 非線形力の典型

◆ 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### 中心力

- 方向が相手の位置に(から)向かう
- 大きさが中心からの距離だけに関係
- 中心力なら角運動量が保存  
アイス・スケートのスピニングアップ
- 角運動量 = 回転の強さを示す量

◆ 戻る

---

---

---

---

---

---

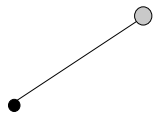
---

---

### 一体問題

- 重い天体のまわりの非常に軽い天体の運動  
(例) 地球の回りの人工衛星
- 運動の法則 + 万有引力の法則で完全に解ける(ニュートン)
- 中心天体の質量が運動を支配  
ケプラーの第3法則

◆ 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## 二体問題

- 最も簡単な場合: 一体問題
- 二体問題 = 惑星運動のよい近似
- 重心運動と相対運動の分離
  - 重心: 等速直線運動
  - 相対位置: 楕円運動(ケプラー運動)
- 実例: 惑星、ガリレオ衛星、月
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

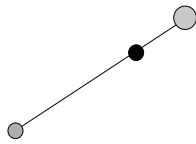
---

---

---

## 重心の運動

- 重心
  - 重さとしての中心
- 重心の運動方程式
  - 重心に働く力はゼロ
- 重心の運動 = 等速直線運動
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## 相対位置の運動

- 運動方程式の書き直し
  - 一体問題へ
- 運動を支配するもの:
  - 中心天体の質量 二体の質量和
- 軌道
  - 形は円錐曲線
  - 特徴を表す6つの量
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

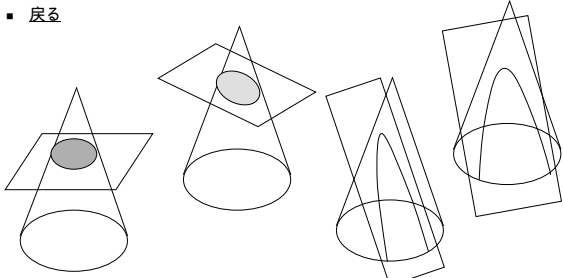
---

---

---

### 円錐曲線

- 円錐を平面で切った切り口の曲線
- 分類: 円、楕円、放物線、双曲線
- [戻る](#)




---

---

---

---

---

---

---

---

### 軌道要素 (6つの特徴量)

- 軌道の大きさ: 楕円の長半径  $a$
- 軌道の形: 離心率  $e$
- 軌道面の向き: 3つの角度
  - 昇交点の経度  $\Omega$
  - 近点の経度  $\pi = \omega + \Omega$
  - 軌道の傾斜角  $i$
- 軌道上の位置: 近点通過時刻  $t_0$
- [戻る](#)

---

---

---

---

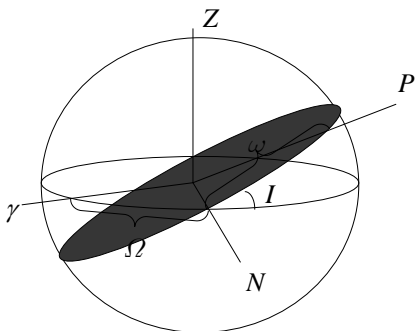
---

---

---

---

### 軌道面の向き



◆ [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 惑星運動の特徴

- 惑星は非常に軽い = 影響は小さい
  - ガス惑星: 木・土・天・海
  - 固体惑星: 水・金・地・火・冥
- 惑星は、ほぼ同一平面内に分布
- 主要な惑星の軌道は円に近い
- 公転運動の向きは、ほぼ同じ
- 戻る

---

---

---

---

---

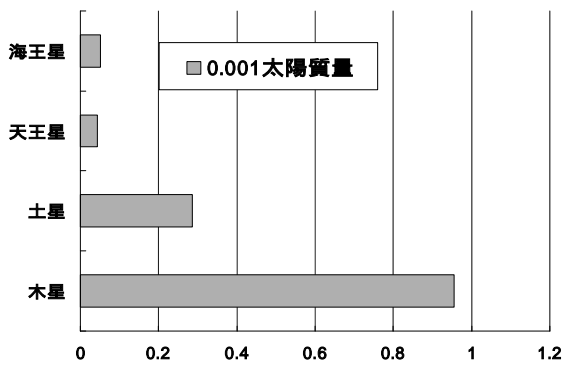
---

---

---

### 惑星の質量 (ガス惑星)

戻る



---

---

---

---

---

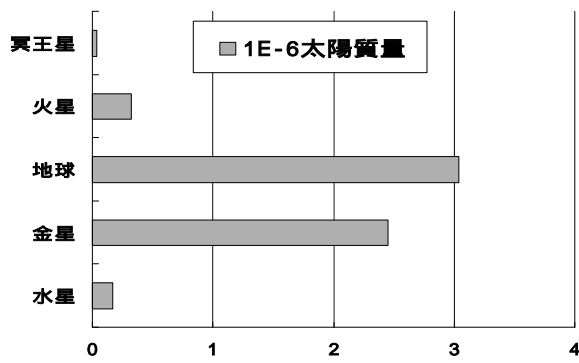
---

---

---

### 惑星の質量 (固体惑星)

戻る



---

---

---

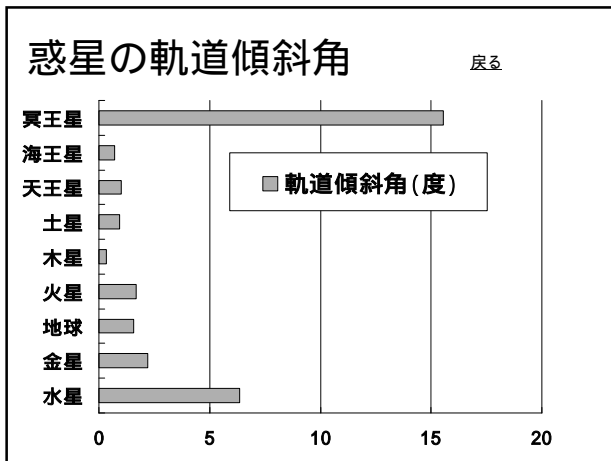
---

---

---

---

---




---

---

---

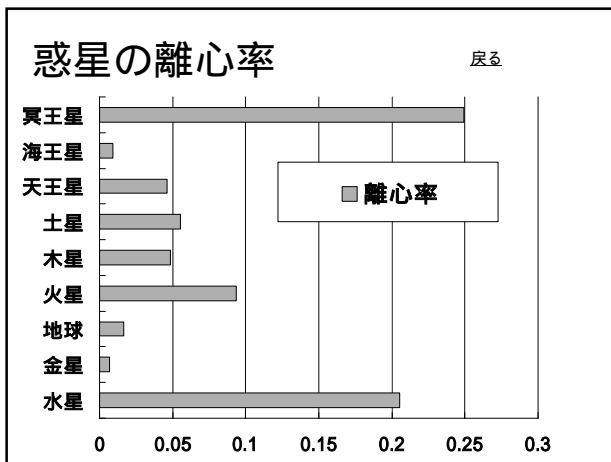
---

---

---

---

---




---

---

---

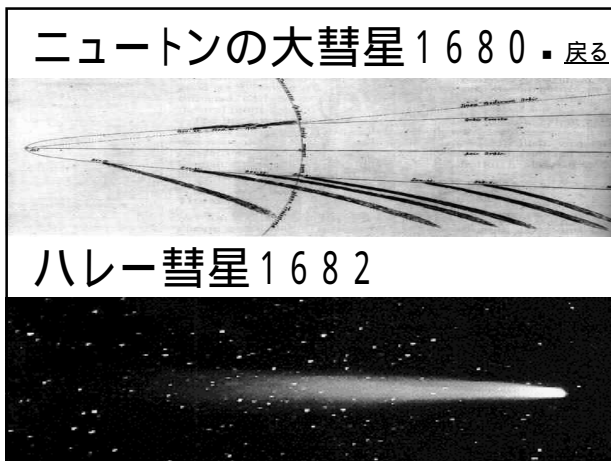
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

### 彗星の運動

- 放物線軌道: 1680年の大彗星
- ハレー: 彗星表の計算
- ハレー彗星の回帰: 予言と成就
- 周期彗星の軌道計算
- エンケの方法
- 非重力効果
- 目次へ

---

---

---

---

---

---

---

---

### 放物線軌道

- 楕円軌道の極限
- 5つの軌道要素 (離心率  $e = 1$ )
- 軌道長半径は無限大
- 代わりに近点距離  $q$  を用いる
- 近点通過時刻、オイラー角は不変

◆ 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### ハレー

- E. Halley
- 1656-1742
- 南天の観測
- 彗星の研究
- 星の固有運動
- プリンキピアの出版
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## ハレーの彗星表

・戻る

MOTUUM COMETARUM IN ORBE PARABOLICO  
ELEMENTA ASTRONOMICAE.

Comet. Anni.	Anno. Mord.		Longit. Orbis.		Perihelion. d. m. s.	Distantia perihelionis à Sole.	Logarithmus Distantie perihelionis à Sole.	Logarithmus Nostri Sideris Distantie.	Temp. Apoc. Distans.	Perihel. à Sid.		
	o	'	o	'						o	'	
1337	II	24 21 0	32 11 0	♄	7 59 0	406666	9 609256	0 546774	Jan. 2 6 25	46 22 0	Retrop.	
1473	VI	11 46 10	5 20 0	♃	15 33 30	54773	9 734574	0 318153	Feb. 28 22 13	123 47 10	Retrop.	
1531	♃	19 23 0	17 19 0	♃	3 39 0	30700	9 753383	0 329754	Aug. 24 21 18	107 46 0	Retrop.	
1532	♃	20 27 0	32 26 0	♃	11 7 0	50910	9 768863	0 369224	Oct. 19 22 12	30 40 0	Direct.	
1556	♃	25 21 0	32 6 30	♃	8 50 0	46590	9 666424	0 460493	Apr. 21 10	3 103 8 0	Direct.	
1577	T	25 52 0	74 34 45	♃	9 22 0	18342	9 363447	1 064938	Oct. 26 18 45	103 30 0	Retrop.	
1580	T	18 27 30	64 40 0	♃	19 5 50	59618	9 771450	0 509293	Nov. 28 11 0	90 8 30	Direct.	
1582	♃	9 42 30	6 6 0	♃	8 35 0	109318	0 023850	9 001853	Sept. 27 19 20	28 51 30	Direct.	
1590	♃	11 30 40	19 40 40	♃	6 54 30	37664	9 760885	0 118005	Jan. 29 3 45	51 23 50	Retrop.	
1596	♃	12 23 30	55 12 0	♃	18 16 0	51292	9 710018	0 397044	Jul. 12 19 55	83 56 50	Retrop.	
1607	♃	20 21 0	17 3 0	♃	2 16 0	58080	9 768490	0 207393	Oct. 16 3 50	108 5 0	Retrop.	
1618	♃	16 1 0	37 34 0	♃	2 14 0	37973	9 372498	0 190581	Oct. 29 12 23	73 47 0	Direct.	
1654	♃	28 30 0	79 28 0	♃	28 18 40	84750	9 058140	0 679181	Nov. 2 15 40	59 51 20	Direct.	
1661	♃	12 30 30	32 35 50	♃	25 58 40	44851	9 651772	0 482470	Jan. 16 13 41	33 28 10	Direct.	
1664	♃	21 14 0	21 18 30	♃	10 47 15	1045751	9 011044	9 943563	Nov. 24 11 31	49 27 25	Retrop.	
1665	♃	18 2 0	76 5 0	♃	11 14 30	10649	9 027309	1 419164	Apr. 14 5 15	156 7 30	Retrop.	
1671	♃	27 30 30	85 22 10	♃	16 59 30	69739	9 843476	0 194914	Feb. 20 8 37	109 59 0	Direct.	
1677	♃	26 49 10	79 3 15	♃	17 37 5	28059	9 442072	0 788220	Apr. 16 0 37	99 12 5	Retrop.	
1680	♃	2 0	60 56 0	♃	23 39 30	008121	7 951166	3 299469	Dec. 8 0 6	9 22 30	Direct.	
1682	♃	21 16 30	17 56 0	♃	2 52 45	58328	9 761877	0 311313	Sept. 4 7 39	108 13 45	Retrop.	
1683	♃	23 23 0	83 11 0	♃	15 19 30	56020	9 748343	0 337614	Jul. 2 2 50	87 52 30	Retrop.	
1684	J	28 15 0	65 48 40	♃	28 12 0	96015	9 082319	9 986620	May 29 10 16	29 23 0	Direct.	
1686	♃	20 34 40	31 21 40	♃	17 0 30	33500	9 511883	0 693304	Sept. 6 14 33	86 25 50	Direct.	
1698	J	27 44 15	11 46 0	♃	0 51 15	69129	9 839660	0 200638	Oct. 8 16 17	3 7 0	Retrop.	

## ハレー彗星の回帰

- 1456, 1531, 1607, 1682, ?
- 予報: クレーローとラランド
- 木星と土星の摂動を考慮
- 近日点通過時刻
  - 計算: 1759年4月中旬
  - 実測: 1759年5月初旬
- ニュートン力学の勝利
- 戻る

## クレーロー

- A.C. Clairaut
- 1713-1765
- 地球形状論
- 重力公式
- 金星、月の質量
- ハレー彗星の回帰計算
- 戻る



## 地球の形状

- 慣性力と回轉座標系
- 万有引力と遠心力: 回轉楕円体
- ニュートンの扁平楕円体説
- 3代目カッシニの扁長楕円体説
- 実測による決着
- 歳差の説明: 扁長説では逆符号
- 目次へ

---

---

---

---

---

---

---

---

## 回轉座標系

- 回轉する座標系(例:地球の上)では不思議な力(=慣性力)が働く
- 剛体回轉: 硬い物体のように一体として回轉すること(例:地球)
- 慣性力の二つの例:  
遠心力とコリオリ力

◆ 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

## 慣性力

- 座標変換に伴う見かけ(偽り)の力
- コリオリ力: 曲がる力、速さに依存
  - 台風は、なぜ右回りに進むか?
- 遠心力: 回轉の外側へ働く
  - 月はなぜ落ちてこないか
  - 回轉するバケツ: 絶対回轉

◆ 戻る

---

---

---

---

---

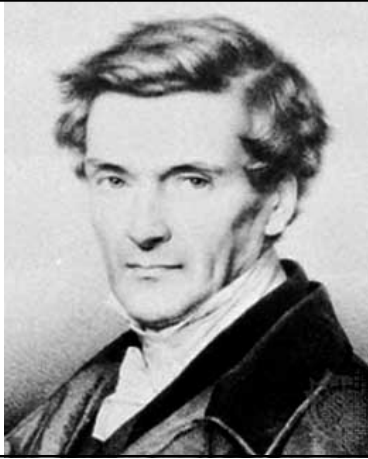
---

---

---

## コリオリ

- G. de Coriolis
- 1792-1843
- コリオリカ
- 運動エネルギー
- 戻る



---

---

---

---

---

---

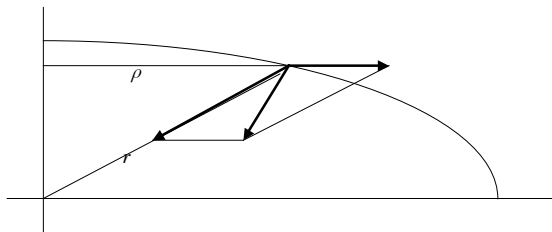
---

---

## 万有引力と重力

◆ 戻る

- ◆ (広い意味での) 重力  
= 万有引力 + 遠心力



---

---

---

---

---

---

---

---

## カッシニ

- G.D. Cassini
- 初代
- 土星の衛星
- 土星の輪の間隙
- 火星の視差
- 戻る



---

---

---

---

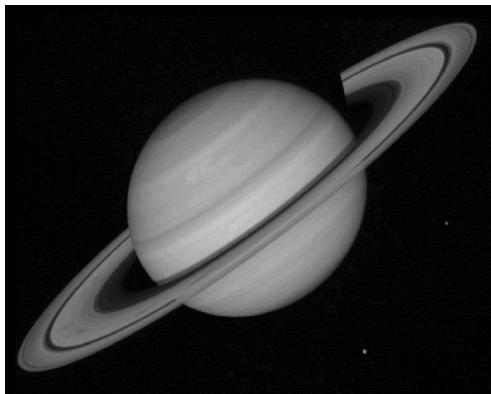
---

---

---

---

土星(ボイジャーによる写真) [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

地球の形の実測

- リシェの振り子: 1671、仏領ギアナ
- パリ科学アカデミーの大計画 (1736)
- 赤道: ペルー探検隊
  - ラ・コンダミン、ブーゲー
- 極: ラップランド探検隊
  - モーペルチュイ、セルシウス、クレーロー
- 扁平楕円体説の勝利
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

振り子の周期

- 振り子の等時性: ガリレオ
  - 周期は振幅によらず長さだけによる。
  - 周期の2乗は、重力の強さに比例し振り子の長さに反比例する。
- 同じ長さの振り子の周期を機械時計で測る 重力の強さがわかる。
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### ラ・コンダミン

- C.M. La  
Condamine
- 1701-1774
- 南米探検
- アマゾン
- ゴム
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### セルシウス

- A. Celsius
- 1701-1744
- オーロラ
- ラップランド探検
- 摂氏温度目盛
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### モーペルチュイ

- P.L.  
Maupertuis
- 1698-1759
- ラップランド遠征
- 最小作用の原理
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### 歳差(さいさ)

- 恒星の天球上の位置の一様な変化
  - 1年あたり、角度で約50秒
- 黄道の極の回りの回転
  - 約26000年で一周
- 占星術の星座の一月のずれ
- ヒッパルコスが既に発見
  - 次へ

---

---

---

---

---

---

---

---

### 歳差(さいさ)の原因

- ニュートンが説明
  - 天動説で考えるとわかりやすい
  - 地球の極軸の首振り運動
- なぜ首を振るのか？
  - 地球の赤道上の膨らみ
  - 月・太陽の潮汐力(=重力の差)
- 戻る

---

---

---

---

---

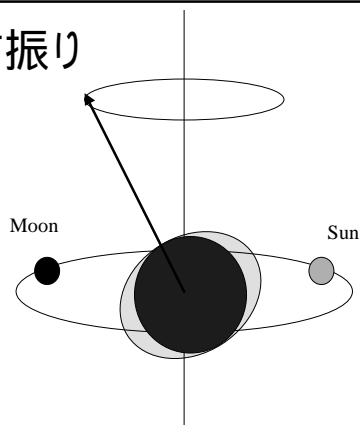
---

---

---

### 極軸の首振り

- 太陽:黄道
  - 一様運動
- 月:白道
  - 複雑
  - 章動
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## 多体問題

- 三体以上: 一般には解けない
  - 数学的証明
- 一般的に言えること
- 特殊な解: 三体問題
- 近似解: 数値積分と摂動論
- 太陽系の安定性
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## 多体問題の保存量

- 重心は等速直線運動
- 二つの保存量 (= 積分)
  - 全エネルギー
  - 全角運動量
- 第三積分を求めて
  - [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

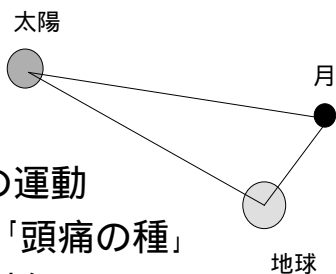
---

---

## 三体問題

- 古来の難問
- 典型例: 月の運動
- ニュートンの「頭痛の種」
- 一般解と特殊解

◆ [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### 三体問題の特特殊解

- 特殊解とは？
  - 特殊な条件のときに成立
- オイラーの直線解
- ラグランジュの正三角形解
- 8の字解(最近、見つかった)

◆ 戻る

---

---

---

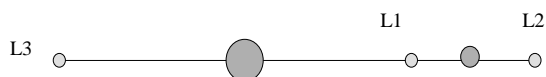
---

---

---

---

### オイラーの直線解



- 三体問題の古典的特殊解
    - 第1体、第2体と相似な楕円運動
    - 同じ速度で全体が回転
  - 直線上に三つの解:L1,L2,L3
  - 不安定
    - 少しでも外れると遠くに行ってしまう
- ◆ 戻る

---

---

---

---

---

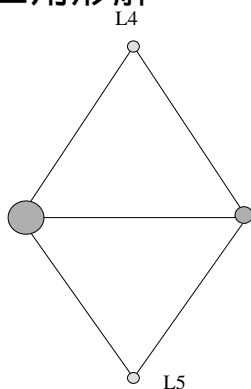
---

---

### ラグランジュの正三角形解

- 三体問題のもう一つの古典的特殊解
  - 相似な楕円運動
- 正三角形解:L4,L5
- 安定:少しずれてもその付近に留まる
- 広い応用

◆ 戻る



---

---

---

---

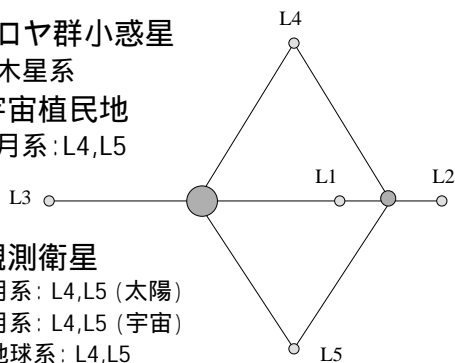
---

---

---

### ラグランジュ点の応用

- 実例: トロヤ群小惑星
  - 太陽・木星系
- 未来: 宇宙植民地
  - 地球・月系: L4, L5



- 現在: 観測衛星
  - 地球・月系: L4, L5 (太陽)
  - 地球・月系: L4, L5 (宇宙)
  - 太陽・地球系: L4, L5
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 太陽系の安定性

- 摂動(せつどう)論: ニュートンの憂鬱
- 多くの学者が取り組む
  - オイラー(スイス)、ラグランジュ(仏)
  - ラプラス(仏): 安定を証明
    - 惑星質量についての1次の近似
    - ポアソン(仏)の2次の理論: 安定
- 数値積分による直接計算: たぶん安定
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### オイラー

- L. Euler
- 1707-1783
- 流体力学
- 解析学
- 数学的記法
- 三体問題の直線解
- [戻る](#)




---

---

---

---

---

---

---

---

### ラグランジュ

- J.-L. Lagrange
- 1736-1813
- 流体力学
- 惑星方程式
- 三体問題の正三角形解
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

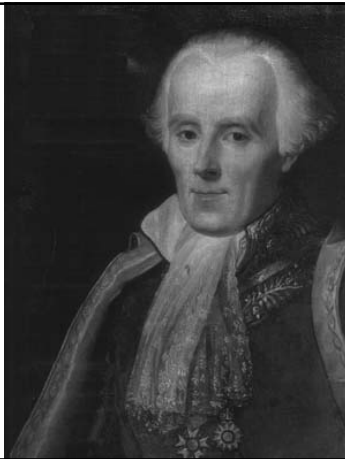
---

---

---

### ラプラス

- P.-S. Laplace
- 1749-1827
- 「天体力学」
- 確率論
- ラプラスのブラックホール
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### ポアソン

- S.D. Poisson
- 1781-1842
- ポテンシャル論
- 電磁気学
- 弾性体理論
- 確率論
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## 天王星の発見

- ハーシェル:偉大なる観測家
- アマチュア天文学者出身
- 妹カロリーネの献身
- 親友:マスケリン
- 最高の望遠鏡を裏庭に
- 恒星の距離測定を目指して
- 運命の夜:1781年3月13日
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

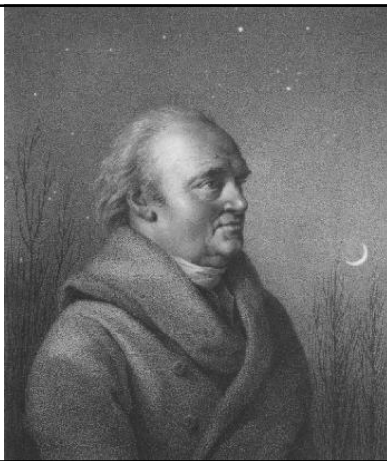
---

---

---

## ハーシェル

- W. Herschel
- 1738-1822
- 1.2m望遠鏡
- 発見また発見
  - 固有運動、連星
  - 太陽運動、星団
  - 銀河系、銀河
  - 赤外線
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

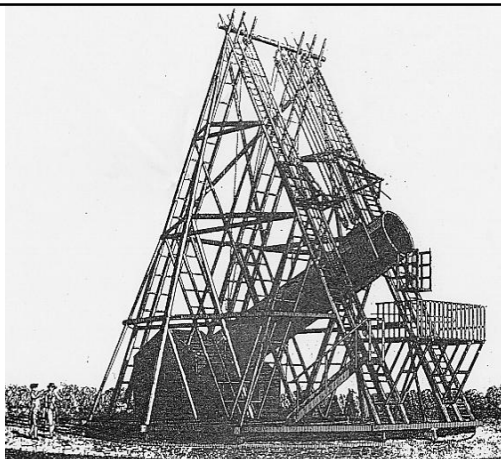
---

---

---

## ハーシエルの大望遠鏡

- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### ハーシェルの家

- イギリスの温泉町
- バースBath
- ドイツから出稼ぎ
- 昼は音楽教師、夜は天文学者
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### カロリーネ・ハーシェル

- Caroline L.H.
- 1750-1848
- 最初の女性天文学者
- 鏡磨きの才能
- 彗星の研究
- 戻る



---

---

---

---

---

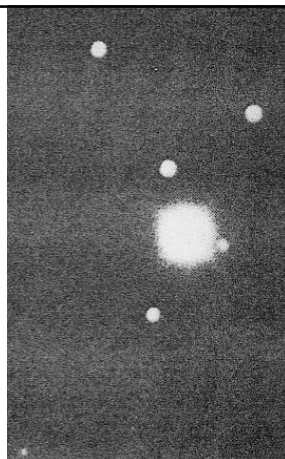
---

---

---

### 天王星

- Uranus
- = Saturn の父
- = Jupiter の祖父
- 肉眼では見えず
- 5個の大衛星
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### 惑星を探せ

- ティティウス・ボーデの法則
- オルバースらの大計画
- 1801年1月1日: ピアッツィの幸運
- ガウスの登場: 最小2乗法
- 小惑星帯: 2万個以上
- まだ残る謎: カークウッドの間隙
- 目次へ

---

---

---

---

---

---

---

---

### ティティウス・ボーデの法則

- 惑星の軌道半径の近似式
- 次へ  $a_1 = 0.4, a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2}$

	惑星	軌道長半径	近似式
1	水星	0.39	0.4
2	金星	0.72	0.7
3	地球	1.00	1.0
4	火星	1.52	1.6
5	?		2.8
6	木星	5.20	5.2
7	土星	9.55	10.0

---

---

---

---

---

---

---

---

### ティティウス・ボーデの法則 (続)

- 戻る

	惑星	軌道長半径	近似式
1	水星	0.39	0.4
2	金星	0.72	0.7
3	地球	1.00	1.0
4	火星	1.52	1.6
5	セレス	2.77	2.8
6	木星	5.20	5.2
7	土星	9.55	10.0
8	天王星	19.22	19.6

---

---

---

---

---

---

---

---

## ボーデ

- J.E. Bode
- 1747-1826
- ベルリン星図
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## オルバース

- H.W.M. Olbers
- 1758-1840
- 小惑星探索
  - セレスの再発見
  - パラス:1802
  - ヴェスタ:1804
- 理論家
  - 小惑星爆発起源説
  - オルバースの逆説
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## ピアッツィ

- G. Piazzi
- 1746-1826
- 修道士
- パレルモ天文台の創設
- 小惑星セレスの発見
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## ガウス

- J.K.F. Gauss
- 1777-1855
- 三大数学者
  - 不可能証明
  - 最小2乗法
  - 複素数
  - 代数学
  - 整数論
- 地磁気学
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

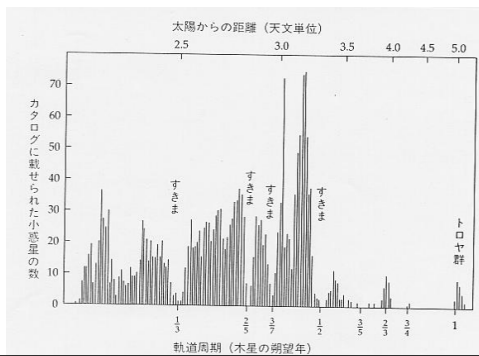
---

---

---

## カークウッド間隙

- 木星の平均運動の有理数倍
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## カークウッド

- D. Kirkwood
- 1814-1895
- 小惑星帯の間隙
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### 海王星の予言

- 天王星の軌道のずれ
- ハレー彗星の妙な動き
- ベッセルの挫折
- アダムスの計算
- ルヴェリエの予報
- 1846年9月23日
- ボーデの法則の没落
- 目次へ

---

---

---

---

---

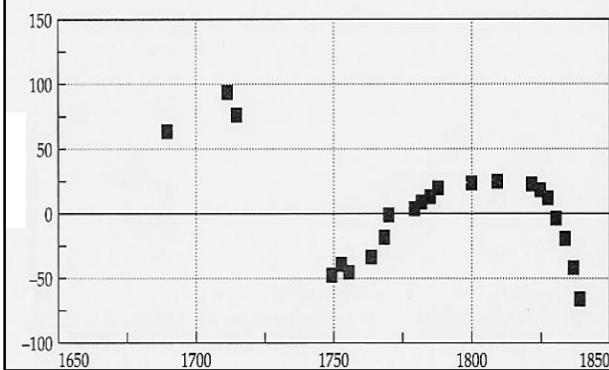
---

---

---

### 天王星の軌道のずれ

■ [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### ベッセル

- F.W. Bessel
- 1784-1846
- 計算の達人
- ベッセル関数
- 年周視差の発見(1838)  
白鳥座61番星
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

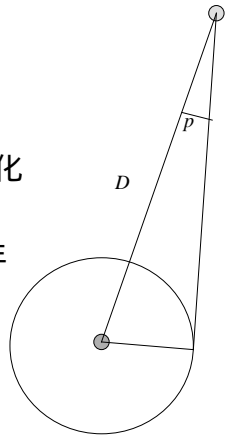
---

---

---

### 年周視差

- 恒星までの距離
- 視差 (パララックス)
- 地球の公転運動: 年周変化
- 年周視差 1 秒の距離  
= 1 パーセク = 3.26 光年
- 最も近い恒星
  - アルファケンタウリ
- 戻る




---

---

---

---

---

---

---

---

### アダムス

- J.C. Adams
- 1819-1892
- 苦学生
- メモ
- エアリーとの確執
- 月の軌道
- 戻る




---

---

---

---

---

---

---

---

### アダムスのメモ

- 1841年夏
- 卒論後、天王星の謎に取り組む覚悟
- 清書
- 戻る

*Memoranda.*  
 1841. July 3. Formed a design, in the beginning of this week, of availing myself, as soon as possible after taking my degree, the irregularities in the motion of Uranus, wh. are yet unaccounted for; in order to find whether they may be attributed to the action of an undiscovered planet beyond it, and if possible hence to determine the elements of its orbit, & approximately, wh. it probably lead to its discovery.

---

---

---

---

---

---

---

---

### アダムのメモ (清書)

- 1871, July 3. Formed a design, in the beginning of this week, of investigating, as soon as possible after making my degree, the irregularities in the motion of Uranus, wh(ich) we yet unaccounted for; in order to find whether they may be attributed to the action of an undiscovered planet beyond it; and if possible, thence to determine the elements of its orbits, so approximately, wh(ich) w(ill) probably lead to its discovery.
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### エアリー

- G.B. Airy
- 1801-1892
- 暴君台長
- 二度の大失敗
  - 海王星の予言
  - 金星日面経過
- 光学
- 乱視矯正
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### ルヴェリエ

- U.J.J. Le Verrier
- 1811-1877
- 水星の運動
- バルカン
- 海王星の予言
- 惑星運動理論
- 暴君台長
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## ガレ

- J.G.Galle
- 1810-1912
- 小惑星の視差
  - 戻る



---

---

---

---

---

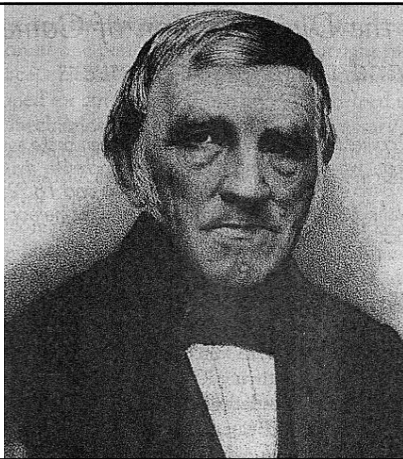
---

---

---

## エンケ

- J.F. Encke
- 1791-1865
- 軌道計算の鬼
  - エンケの方法
- 周期彗星
  - エンケ彗星
- 金星日面経過
  - 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

1846年9月23日

- ベルリン天文台
- 助手ガレと大学院生ダレスト
- エンケ台長
- ベルリン星図
- 大騒ぎ
  - 戻る

---

---

---

---

---

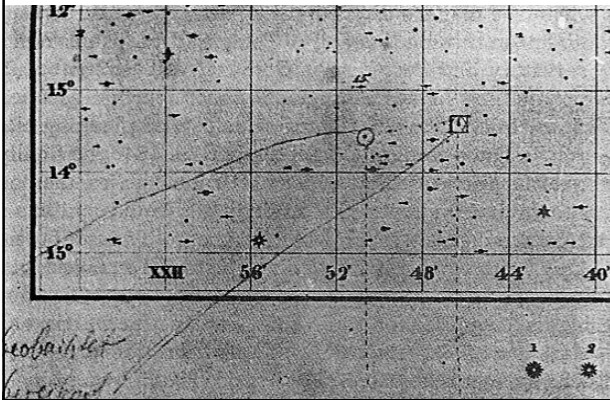
---

---

---

### 海王星の発見

■ 戻る




---

---

---

---

---

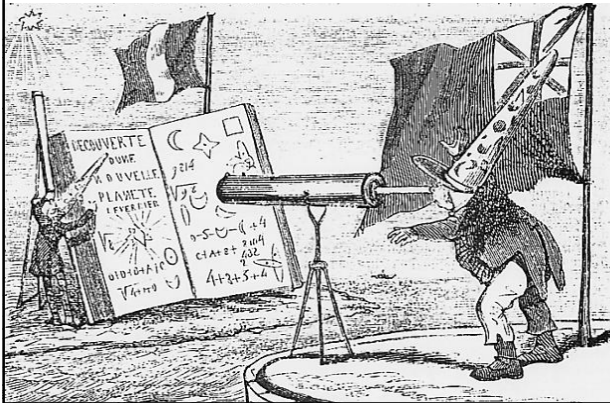
---

---

---

### 発見の大騒ぎ

■ 戻る




---

---

---

---

---

---

---

---

### ボーデの法則の没落

■ 戻る

	惑星	軌道長半径	近似式
1	水星	0.39	0.4
2	金星	0.72	0.7
3	地球	1.00	1.0
4	火星	1.52	1.6
5	セレス	2.77	2.8
6	木星	5.20	5.2
7	土星	9.55	10.0
8	天王星	19.22	19.6
9	海王星	30.11	38.8

---

---

---

---

---

---

---

---

### 水星の運動の謎

- ルヴェリエの研究
- ニューカム: 惑星運動の権化
- 内惑星(水、金、地、火)と外惑星(木、土、天、海)
- 近日点経度: 軌道要素の一つ
- [次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 近日点の不思議

- 内惑星の観測データ
  - 1) 離心率、2) 近日点経度、3) 軌道傾斜角、4) 軌道経度
- 説明できない近日点の動き
- 諸説紛々
  - 惑星バルカン、逆2乗法則のずれ
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

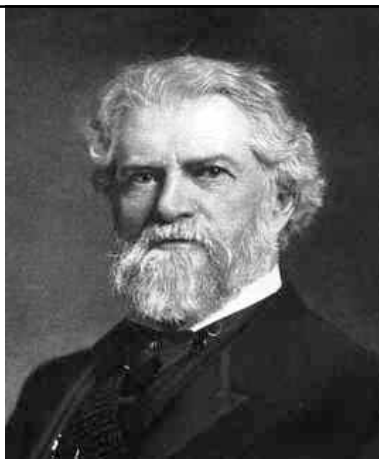
---

---

---

### ニューカム

- S. Newcomb
- 1835-1909
- 米海軍天文台
- ルヴェリエ2世
- アメリカ学派
- 惑星運動理論
- 光速度の測定
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### 近日点の方向の動き

- ニューカム(1894):理論 = 惑星の影響

■ 戻る

"/世紀	観測	理論	差	誤差
水星	118.24	109.76	+8.48	0.43
金星	0.29	0.34	-0.05	0.25
地球	19.48	19.38	+0.10	0.13
火星	149.55	148.80	+0.75	0.35

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### 諸説

■ 次へ

VIII CONTENTS.		Page.
CHAPTER VI.—EXAMINATION OF HYPOTHESES AND DETERMINATION OF THE MASSES BY WHICH THE DEVIATIONS OF THE SECULAR VARIATIONS FROM THEIR THEORETICAL VALUES MAY BE EXPLAINED.		
§ 55. Comparison of the observed and theoretical secular variations .....		109
§ 56. Hypothesis of nonsphericity of the equipotential surfaces of the Sun .....		111
§ 57. Hypothesis of an intramercurial ring .....		112
§ 58. Hypothesis of an extended mass of diffused matter, like that which reflects the zodiacal light. ....		115
§ 59. Hypothesis of a ring of planets outside the orbit of Mercury.—Elements of such a ring.—This hypothesis the only one which represents the observations, but too improbable to be accepted .....		116
§ 60. Examination of the question whether the excess of motion of the perihelion of Mars may be due to the action of the zone of minor planets .....		116
§ 61. Hypothesis that gravitation toward the Sun is not exactly as the inverse square of the distance .....		118
§ 62. Degree of precision with which the theory of the inverse square is established .....		119
§ 63. Determination of the masses which will best represent the observed secular variations of the eccentricities, nodes, and inclinations .....		121
§ 64. Preliminary adjustment of the two sets of masses.—Resulting value of the solar parallax .....		122

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### 諸説紛々

- 太陽の扁平度
- 水星より内側にリング
- 最も内側に未知の惑星(バルカン)
- 黄道面上に重い塵
- 水星より外側に(小)惑星のリング
- 小惑星の影響
- 逆二乗法則にズレ
- 内惑星の質量値に誤り
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### 特殊相対論

- マックスウェルによる電磁気学の完成
  - ガリレイの相対性原理と矛盾
- 光の速さの一定不変性
- マイケルソン・モーリーの実験
- アインシュタイン(1905)
- 確立した理論 = 近代物理学の基本
  - [次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 特殊相対論の構成

- 4次元時空
- 3つの指導原理
  - 光速度一定
  - 特殊相対性
  - 一致の原理
- ローレンツ変換
- 特殊相対論における運動の法則？
  - [目次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### マックスウェル

- J.C. Maxwell, 1831-1879
- 集団への興味: 土星の輪から気体へ
- 熱力学、マックスウェルの悪魔
- 光 = 電磁波
- 古典電磁気学の完成
  - アンペール、ファラデー、ビオ、...
- 複数の法則を一つの方程式へ
  - マックスウェル方程式
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## マイケルソン

- A.A. Michelson
- 1852-1931
- 光速度の測定
- 恒星干渉計の開発
- エーテル(Ether)の否定
- 恒星直径の測定

・ [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## アインシュタイン

- A. Einstein
- 1879-1955
- 黄金の年: 1905
  - 光電効果
  - ブラウン運動
  - 特殊相対論
- 一般相対論: 1915
- ボーズ粒子

・ [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

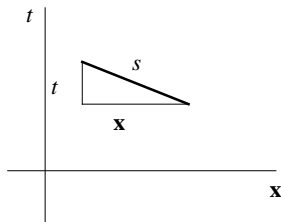
---

## 4次元時空

- Spacetime
- ミンコフスキー
- 時間と空間が混在
- ピタゴラスの定理が不成立

・ [戻る](#)

$$S^2 = X^2 - c^2 t^2$$



---

---

---

---

---

---

---

---

### ミンコフスキー

- H. Minkowski
- 1864-1909
- 4次元時空の数学的理論
- 特殊相対論の後！に発表
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### 一致の原理

- ある極限で従来と一致すること
- 特殊相対論の場合
  - 光速度無限大 ニュートン力学
- 一般相対論の場合
  - 1) 光速度無限大  
ニュートン力学 + 万有引力の法則
  - 2) 重力 0 特殊相対性理論
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 三つの相対性原理

相対性原理 = ものの見方が変わらないこと

- ガリレオ: ガリレオ変換に対して
- 特殊: ポアンカレ変換に対して
- 一般: 一般座標変換に対して
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### ポアンカレ変換

- ガリレオ変換の4次元化
- ポアンカレ変換
  - = 原点の等速直線運動
  - + 固定空間回転
  - + 固定ローレンツ変換

◆ [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### ポアンカレ

- J.H. Poincare
- 1854-1912
- 最後の万能学者
- 三体問題
- 概周期運動
- 相対性理論
- [戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

### ローレンツ変換

- ローレンツ: 実験結果から提唱
- 時間と空間を混ぜる変換
  - = 4次元時空での回転に相当
- 速度の合成則
- 光速無限大でガリレオ変換に
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## 速度の合成則

- 速度の定義 = 距離 / 時間
- 飛行機の中の決闘
- 光速の壁: 何者も光速を超えない。

・ 戻る

$$U = \frac{u + V}{1 + \frac{uV}{c^2}}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

## ローレンツ

- H.A. Lorentz
- 1853-1928
- 科学界に君臨
- ゼーマン効果
- ローレンツ力
- ローレンツ収縮
- ローレンツ変換
- 戻る




---

---

---

---

---

---

---

---

## 「運動物体の電気力学について」

- Einstein (1905)
- 簡潔、明瞭
- 名論文
- 戻る

Annal. der Phys. 17 (1905) 891-921 891

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafien scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissen Energiewerten, welchen an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, ein Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

---

---

---

---

---

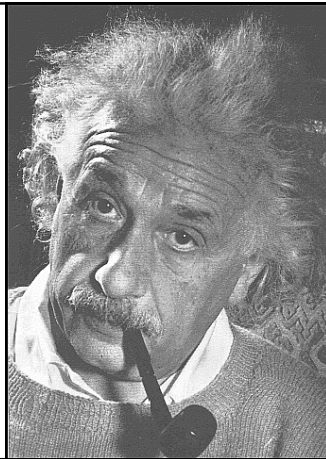
---

---

---

## 一般相対論

- A. Einstein (1915a,b,c,d)
- 等価原理
- 一般相対性原理
- 一致の原理
- 曲がった時空
- 宇宙全体の理論
- [目次へ](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## 等価原理

- 等価原理 = 二つのものが等しいこと
- 重力の普遍性
  - ガリレイの実験(ピサの斜塔)
  - 慣性質量 = 重力質量
- 重力は慣性力と等価
  - 重力は普通の意味の力ではない
  - 驚くべき結論
- [次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## 等価原理(続き)

- 重力は消去可能
  - 座標変換 (= ものの見方) を変えれば
  - 潮汐効果 (= 重力の差) は消去不可能
- 仮想実験
  - エレベーター、遊園地の「フリーフォール」
- なぜリンゴは落ちるのか?
  - 答: 重力は時空の曲がりを表現
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 一般相対性原理

- 物理法則は「一般座標変換」に対して不変
- 一般座標変換
  - 一般の加速度運動に伴う座標変換
- 加速度運動=(偽の)重力
  - ジェットコースターのようなデタラメ運動
- 戻る

---

---

---

---

---

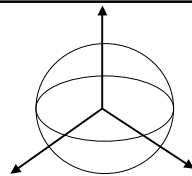
---

---

---

### 曲がった時空

- リーマン幾何学
- 曲がった空間の例: 球面
- 曲がった極限: ブラックホール
- 測地線 = 直線の一般化: 大圏航路
- 測地線運動 = 等速直線運動の一般化
- 慣性の法則の拡張
  - 「力が働かないときは、測地線運動を行う」
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### リーマン

- G.F.B. Riemann
- 1826-1866
- 結核で若死
- 非ユークリッド幾何学
- リーマン面
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### 一般相対論の検証

- 検証なくして理論なし
- チェック項目
  - 重力赤方偏移、時計の遅れ
  - 近点の移動
  - 光の曲がり、重力レンズ
  - 光の遅れ(シャピロ効果)
  - 重力波の放出
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 重力赤方偏移

- 弱い等価原理の検証
- アインシュタイン自ら提唱(1907)
- 太陽のスペクトル(失敗)
  - アインシュタイン塔:ポツダムと三鷹
- 白色矮星のスペクトル(部分的成功)
  - シリウスB: W.S. Adams (1925)
- 実験室(完全成功)
  - Pound & Rebka (1960)
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

### 時計の遅れ

- 浦島効果(Urashima Effect)
  - 速く動くと時計は遅れる
- 一般相対論的效果
  - 重力が強いと時計は遅れる
- ジオイドと国際原子時
- カーナビ(GPS)の時計
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

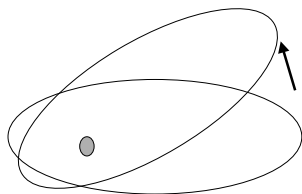
---

---

---

### 近点の移動

- 内惑星
  - 水、金、地、火
  - 非常によく説明
- 小惑星イカサの運動
- 月・惑星の多体問題の解析
  - ・ 戻る




---

---

---

---

---

---

---

---

### 内惑星の近日点の移動

・ 戻る

- 観測の再整理 (Duncomb 1956)

“/世紀	観測	ニュートン	差	相対論
水星	+1151.593 +/- 0.084	+1142.730 +/- 0.040	+ 8.863 +/- 0.093	+8.858
金星	+ 34.529 +/- 0.032	+ 34.472 +/- 0.006	+ 0.057 +/- 0.033	+0.060
地球	+ 103.604 +/- 0.020	+ 103.520 +/- 0.004	+ 0.084 +/- 0.020	+0.065

---

---

---

---

---

---

---

---

### 光の曲がり

- アインシュタインも筆の誤り
- 理論値(太陽の縁): 1.76“
- エディントンの活躍
  - 日食1919: ソブラル、プリンシペ島
  - 日食1922: オーストラリア、タヒチ
- 大熱狂
- 現代
  - VLBI観測: 0.1%以下で一致
  - ヒッパルコス衛星: 1%以下で一致
- ・ 戻る

---

---

---

---

---

---

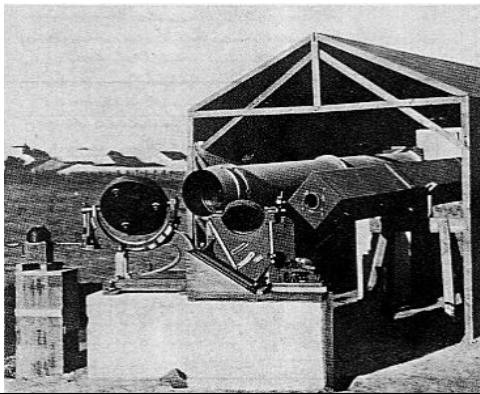
---

---



### ソブラル(ブラジル)観測風景

▪ 戻る



---

---

---

---

---

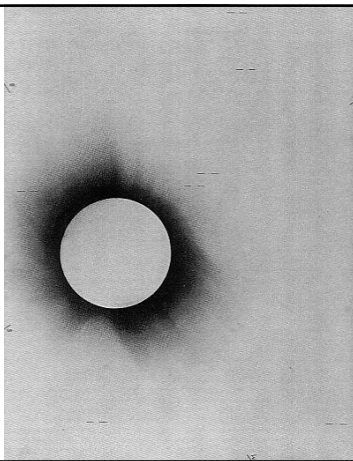
---

---

---

### ソブラル 日食の 写真乾板

▪ 戻る



---

---

---

---

---

---

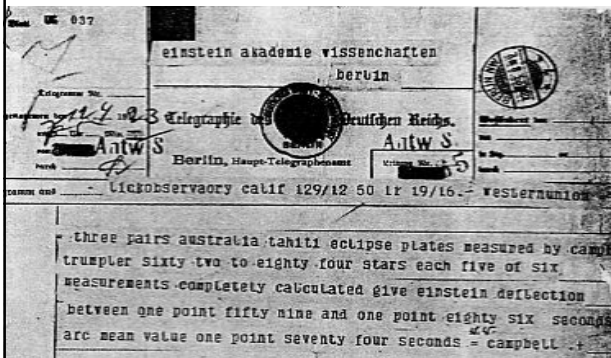
---

---

### タヒチ日食観測結果の電報

▪ リック天文台(米)測定値 = 1.74

▪ 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

## アインシュタインの凱旋

- ソルベイ会議: 1911, 1927
- アメリカ亡命
- 世界一周講演旅行
- 訪日時の大騒ぎ
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

## ソルベイ会議1911

■ 戻る



---

---

---

---

---

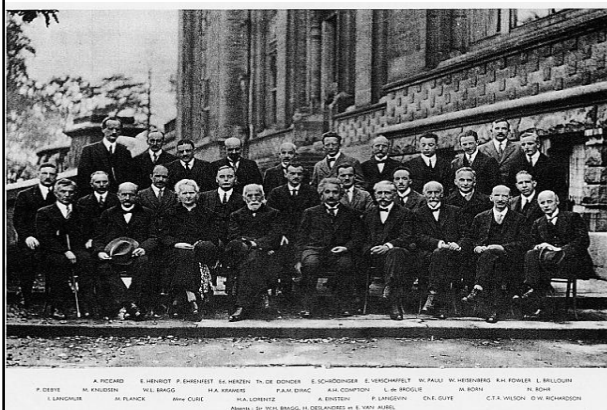
---

---

---

## ソルベイ会議1927

■ 戻る



---

---

---

---

---

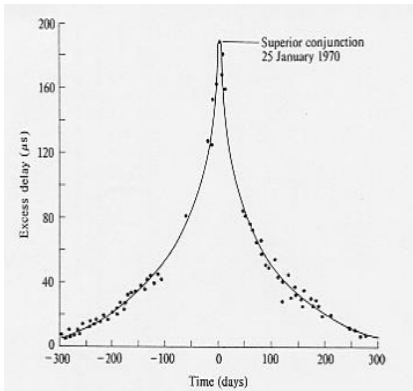
---

---

---

### 光の遅れ(シャピロ効果)

- I.I. Shapiro (1964)
- 金星
- レーダーエコー
- 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### 重力波の放出

- 直接証明: 重力波の検出(未完成)
  - 出来たらノーベル賞間違いなし
  - TAMA300(日本)、LIGO(米)
- 間接証明: 連星パルサーの軌道収縮
  - ハルス&テイラー
  - PSR1913+16
- 戻る

---

---

---

---

---

---

---

---

### 重力波アンテナTAMA300

■ 戻る



---

---

---

---

---

---

---

---

### 重力レンズ

- 波長に依存しないレンズ
- 一直線上: アインシュタインリング
- クェーサーや銀河の不思議な像
- 二つ目、三つ目、四つ目 (= 十字架)
- 像が分解できないとき:
  - 増光現象 = マイクロレンズ
- 星・銀河の質量・距離の一計測手段
- [戻る](#)

---

---

---

---

---

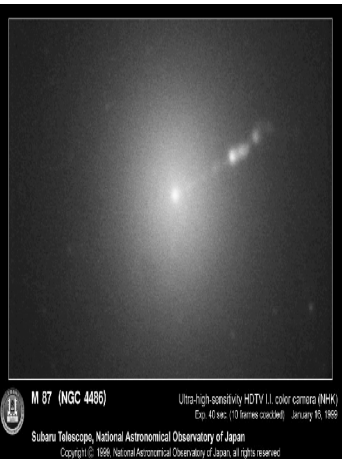
---

---

---

### クェーサー

- 準星 (= 星もどき)
- Quasi Stellar Object = Quasar
- 非常に遠く星のように明るい
- すごく明るい
- 活発な銀河の中心にある巨大ブラックホールから噴き出すジェット
- [戻る](#)




---

---

---

---

---

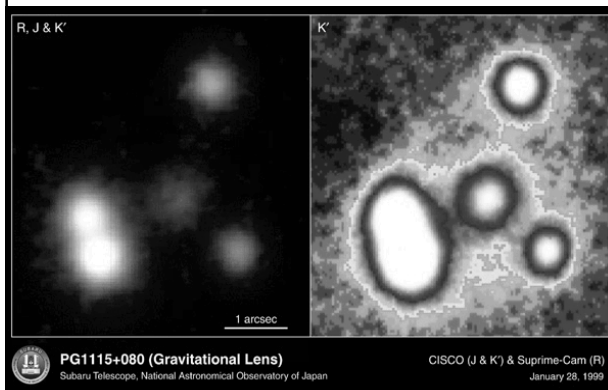
---

---

---

### アインシュタインの十字架

■ [戻る](#)




---

---

---

---

---

---

---

---

## 宇宙構造の進化

- オルバースのパラドックス
- ハッブルの法則とビッグ・バン
- 宇宙膨張、インフレーション宇宙
- ブラックホールの影響
- 宇宙論
  - ハッブル定数と宇宙項
  - 未来の2つの可能性: 膨張 vs 収縮
- [目次へ](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

## オルバースのパラドックス

- パラドックス = 矛盾 ■ [戻る](#)  
   オーソドックス = 正統
- オルバース (小惑星の研究で有名)
- 「夜はなぜ暗いか？」
  - If 宇宙が無限 星の数が無限  
   地球に降り注ぐ光も無限
  - どこか、おかしい...
- 膨張する宇宙だとOK

---

---

---

---

---

---

---

---

## ハッブルの法則

- スレイファーの発見 ■ [戻る](#)
  - 「ほとんどすべての銀河は、我々から遠ざかっている」 我々は宇宙の中心か？
- ハッブルの法則
  - 「遠い銀河ほど速く遠ざかる」  $V = H \times R$
- 宇宙原理 中華思想
  - 「我々は特別な存在ではない」
- ではなぜ？
- 答えは「膨張する宇宙」

---

---

---

---

---

---

---

---

## 膨張する宇宙

■ [戻る](#)

- ハッブルの法則の三つの結果
- 1) 遠くの星の光は赤い (= 暗い)
  - オルバースのパラドックスを説明
- 2) 光速が限界 = 宇宙に限りがある
  - 見えないものは存在しないのと同じ
- 3) 遠い昔、宇宙に始めがある
  - ガモフのビッグバン宇宙論

---

---

---

---

---

---

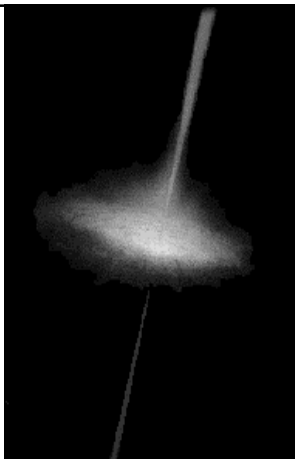
---

---

## ブラックホール

- Black Hole 「黒い穴」
- 非常に小さく重い星
- 強重力 = 光も脱出不能
- 作り方: 超新星爆発、...
- 状況証拠: 重力レンズ
- 法則: BHは増えるばかり
- 銀河中心の巨大BH

[戻る](#)



---

---

---

---

---

---

---

---

## 宇宙論

- 宇宙論 = 宇宙全体の理論
- 重力は時空 (= 宇宙) そのもの
- 全宇宙の重力場の方程式
  - = アインシュタイン方程式
  - これを解くと宇宙の歴史が分かる
- 宇宙項は必要か?
- 宇宙の未来を左右

[戻る](#)

---

---

---

---

---

---

---

---