

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

*****: 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC: 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

: パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし: 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 UTokyo OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2015, 家泰弘

The University of Tokyo / UTokyo OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2015, Yasuhiro Iye

学術俯瞰講義 「宇宙・物質・社会」

— 物質の成り立ちから応用まで —

学術 俯瞰 講義

主 題 科 目 / 学 術 フ ロ ン テ ィ ア 講 義 2 単 位 1、2 年 生 対 象

宇宙・物質・社会—物質の成り立ちから応用まで

コーディネータ: 家 泰 弘 (物性研究所)
ナビゲータ: 福 島 孝 治 (教養学部)


家 泰 弘


福 島 孝 治


村 山 浩


浅 井 祥 仁


永 原 祐 子


田 中 肇


阪 本 武 志


石 家 香 子


川 崎 雅 司


堂 亮 一 成


岡 部 徹

第1回	4/7	総論、物質の科学史、現代社会と物質	家泰弘 (ナビゲータ)
第2回	4/14	宇宙と物質はどこから来たのか	村山 浩 (ナビゲータ)
第3回	4/21	—宇宙誕生、物質の誕生— —暗黒物質と星・銀河の誕生、反物質の消滅、暗黒エネルギー—	村山 浩 (ナビゲータ)
第4回	4/28	素粒子研究の最前線—新しい素粒子像	浅井祥仁 (ナビゲータ)
第5回	5/12	宇宙の進化と惑星や生命を作るもの	永原祐子 (ナビゲータ)
第6回	5/19	物性科学はじめの三歩	家泰弘 (ナビゲータ)
第7回	5/26	ソフトマター—そのしなやかさの起源	田中 肇 (ナビゲータ)
第8回	6/9	放射能・放射線	阪本武志 (ナビゲータ)
第9回	6/16	超伝導、強相関、トポロジカル物質	石家香子 (ナビゲータ)
第10回	6/23	コンピュータの中の物質	福島孝治 (ナビゲータ)
第11回	6/30	光る・覚える・動かす—半導体の電子の演技	川崎 雅司 (ナビゲータ)
第12回	7/7	人工光合成—太陽エネルギーから化学エネルギーへ	堂 亮 一 成 (ナビゲータ)
第13回	7/14	奇跡の物質—レアメタル	岡部 徹 (ナビゲータ)

会場 21 KOMCEE 火 曜 日 2 時 開 講 (12:00-12:30)

キャンパス レクチャーホール

<http://www.gfk.o.u-tokyo.ac.jp/>



東大ナビ utnav.jp

2015年度春期 学術俯瞰講義

2015年4月7日(火)
第2限(10:25-12:10)
@21 KOMCEE

宇宙・物質・社会

— 物質の成り立ちから応用まで —

第1回 総論、物質の科学史

コーディネーター
物性研究所
家 泰弘



今日のおはなし

- 学術俯瞰講義のはじめに
- 自然界の階層構造
- 自然哲学の系譜：古代ギリシャから近代西欧へ
- 運動論と力学：アリストテレスからニュートンまで
- 物質観の変遷：「元素」および「原子」概念の形成
- 古典物理学の完成
- 原子物理学と量子力学
- 現代的自然観への道程

学術俯瞰講義の はじめに

『2つの文化』

C P Snow （英国 1905-1980）

ケンブリッジ大学で物理学を学んだ経験をもち、
政府機関で活躍するとともに、評論・小説執筆活動

著作権の都合上
ここに挿入されていた画像を
削除しました

Illustration from: Lawrence M.
Krauss (2009) An Update on C. P.
Snow's "Two Cultures", *Scientific
American*, Sep. Issue, 2009.

“The Two Cultures”

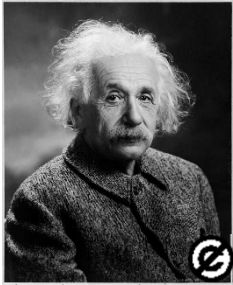
私は、（伝統的文化の基準に照らして）教養高い人たちの会合に出席することがたびたびあったが、彼らはよく、「科学者たちの教養の無さときたら信じられないほどだ」という話をして悦に入っていた。ある時、ちょっとイラっとした私は、彼らに「**あなたがたのうち、熱力学第二法則を説明できる人は何人いますか**」と聞いてみた。反応は冷やかであり、拒絶的でさえあった。
「**あなたはシェイクスピアを読んだことがありますか**」というのに等しい科学上の質問をしたわけなのだが・・・

学術俯瞰講義 ⇒ 文理両道のススめ

物理学を学ぶ効用

- 科学を専門としない人が物理を学ぶ効用は何かといえ
ば、それは「常識がつく」ことではないだろうか。たとえば
「エネルギー保存則」や「エントロピー増大の法則」や「因
果律」といった科学の根本原理に反するような怪しげな
超常現象の話を怪しいと直観（直感ではなく）できる常識
である。健全な懷疑精神と言っても良いかもしれない。
- また、物理学における現象の捉え方・考え方（たとえば
相転移）は、社会学や経済学など人社系の学問にも範
型となっていることが少なくない。
- 一方、物理を専門とする者にとって研究活動の醍醐味は
何かといえ、それはそれまでの「常識」が破られる快
感であると思う。

この人は誰？



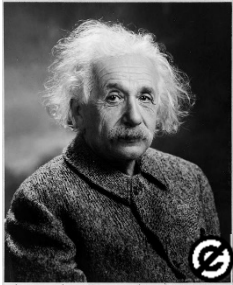
←この人は誰でも知っている



←ではこの人は？

* (c) Los Alamos National Security, LLC All rights reserved

Unless otherwise indicated, this information has been authored by an employee or employees of the Los Alamos National Security, LLC (LANS), operator of the Los Alamos National Laboratory under Contract No. DE-AC52-06NA25396 with the U.S. Department of Energy. The U.S. Government has rights to use, reproduce, and distribute this information. The public may copy and use this information without charge, provided that this Notice and any statement of authorship are reproduced on all copies. Neither the Government nor LANS makes any warranty, express or implied, or assumes any liability or responsibility for the use of this information.



この人は誰？

←この人は誰でも知っている

痛快な自伝



←ではこの人は？

リチャード・ファインマン
量子電磁力学の業績で
朝永振一郎らとともに
ノーベル物理学賞受賞

* (c) Los Alamos National Security, LLC All rights reserved

Unless otherwise indicated, this information has been authored by an employee or employees of the Los Alamos National Security, LLC (LANL), operator of the Los Alamos National Laboratory under Contract No. DE-AC52-06NA25396 with the U.S. Department of Energy. The U.S. Government has rights to use, reproduce, and distribute this information. The public may copy and use this information without charge, provided that this Notice and any statement of authorship are reproduced on all copies. Neither the Government nor LANL makes any warranty, express or implied, or assumes any liability or responsibility for the use of this information.

Richard P. Feynman,
“Surely You’re Joking,
Mr. Feynman!”:
*Adventures of a
Curious Character*,
W.W. Norton, 1985

R. P. ファインマン
『「ご冗談でしょう、
ファインマンさん」:
ノーベル賞物理学者
の自伝』全2巻、
大貫昌子訳、
岩波書店、1986年

カリフォルニア工科大学での名講義

著作権の都合上
ここに挿入されていた
画像を削除しました

ボンゴを叩くファインマン
(『ファインマン物理学』
序文より)

ボンゴが趣味

著作権の都合上
ここに挿入されていた
画像を削除しました

チャレンジャー号事故
について語る
ファインマン

チャレンジャー事故の調査委員長

ファインマン・レイトン・
サンズ
『ファインマン物理学』
全5巻、
岩波書店、1986–2002
年

ファインマンの言葉

If, in some cataclysm, all scientific knowledge were to be destroyed, and only one sentence passed on to the next generation of creatures, what statement would contain the most information in the fewest words? I believe it is the atomic hypothesis that all things are made of atoms.

もしも(ノアの大洪水のような)一大天変地異で、あらゆる科学的知識が失われることになり、次の世代の生き物にたった1つの文章だけしか伝えられないとしたら、最小限の語数で最大限の情報を込めた文章とはどんなものでしょうか？ それは「あらゆるモノは原子からできている」という原子仮説だと私は思います。

Quoted and translated from: Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, New Millennium Edition, Vol.I, California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer, 2010, Sec.1.2 "Matter is made of atoms"

俯瞰講義の俯瞰

序論・物質の科学史

宇宙の成立ちと物質の起源

第1回(家)

第2-3回(村山)

宇宙

宇宙
素粒子
太陽系

第4回(浅井)

第5回(永原)

物質の応用

物質

原子・分子

物質の理解

結晶 物性

第6回(家)

ソフトマター

第7回(田中)

放射線

超伝導

第8回(飯本)

レアメタル

人工光合成

発光ダイオード

半導体人工物質

計算科学

第9回(石坂)

第13回(岡部)

第12回(堂免)

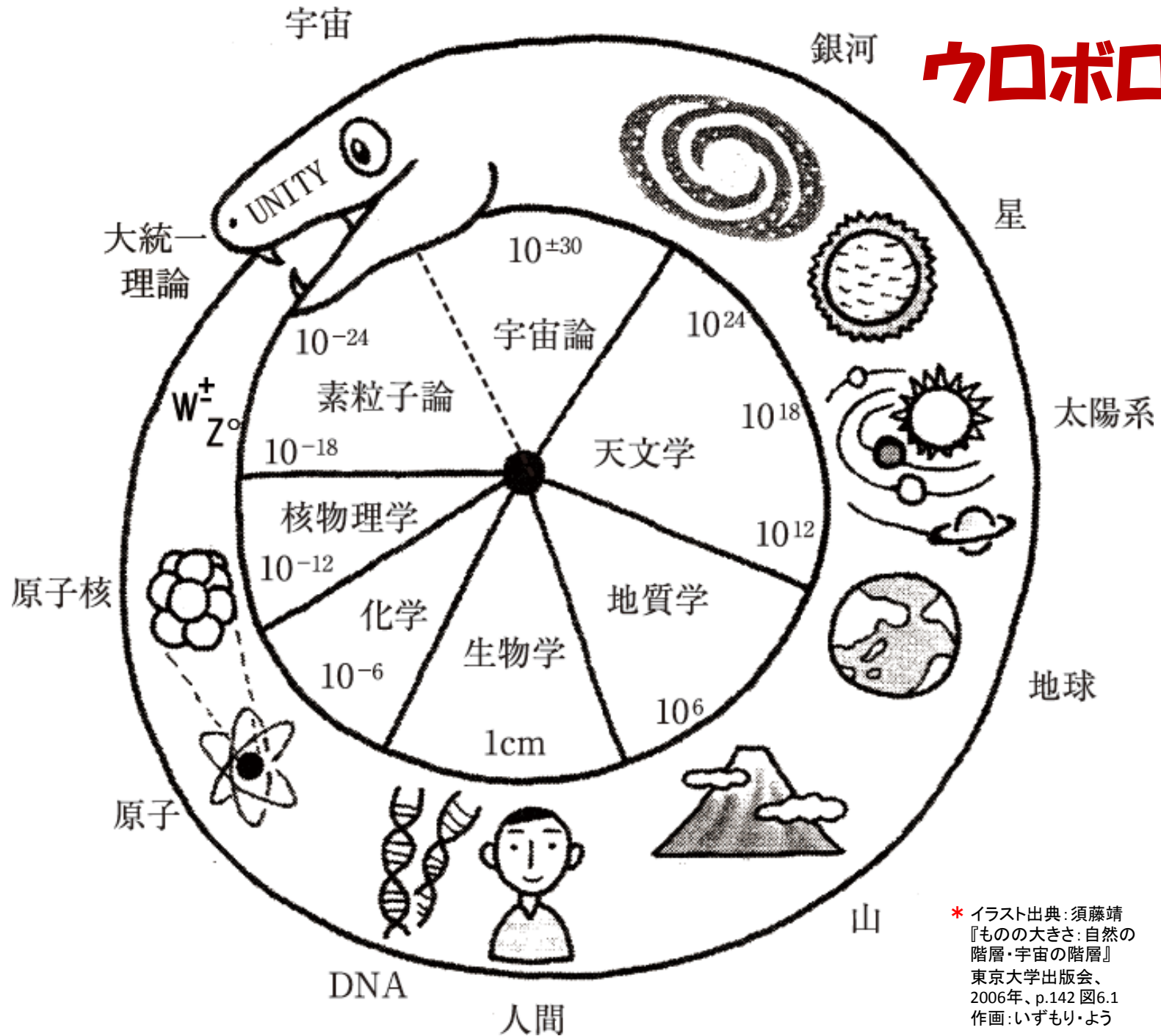
第11回(川崎)

第10回(福島)

社会

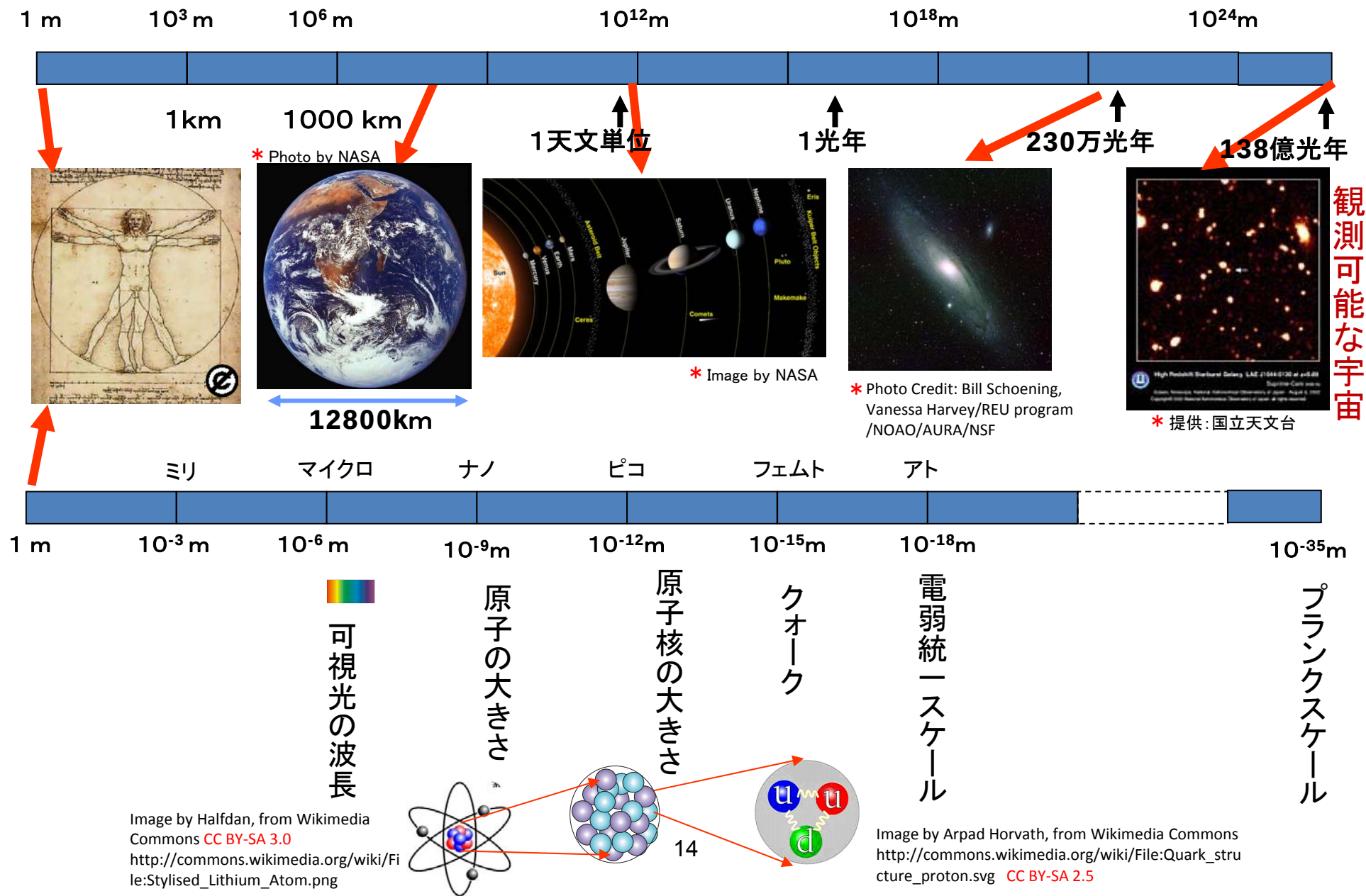
自然界の階層構造

ウロボロス

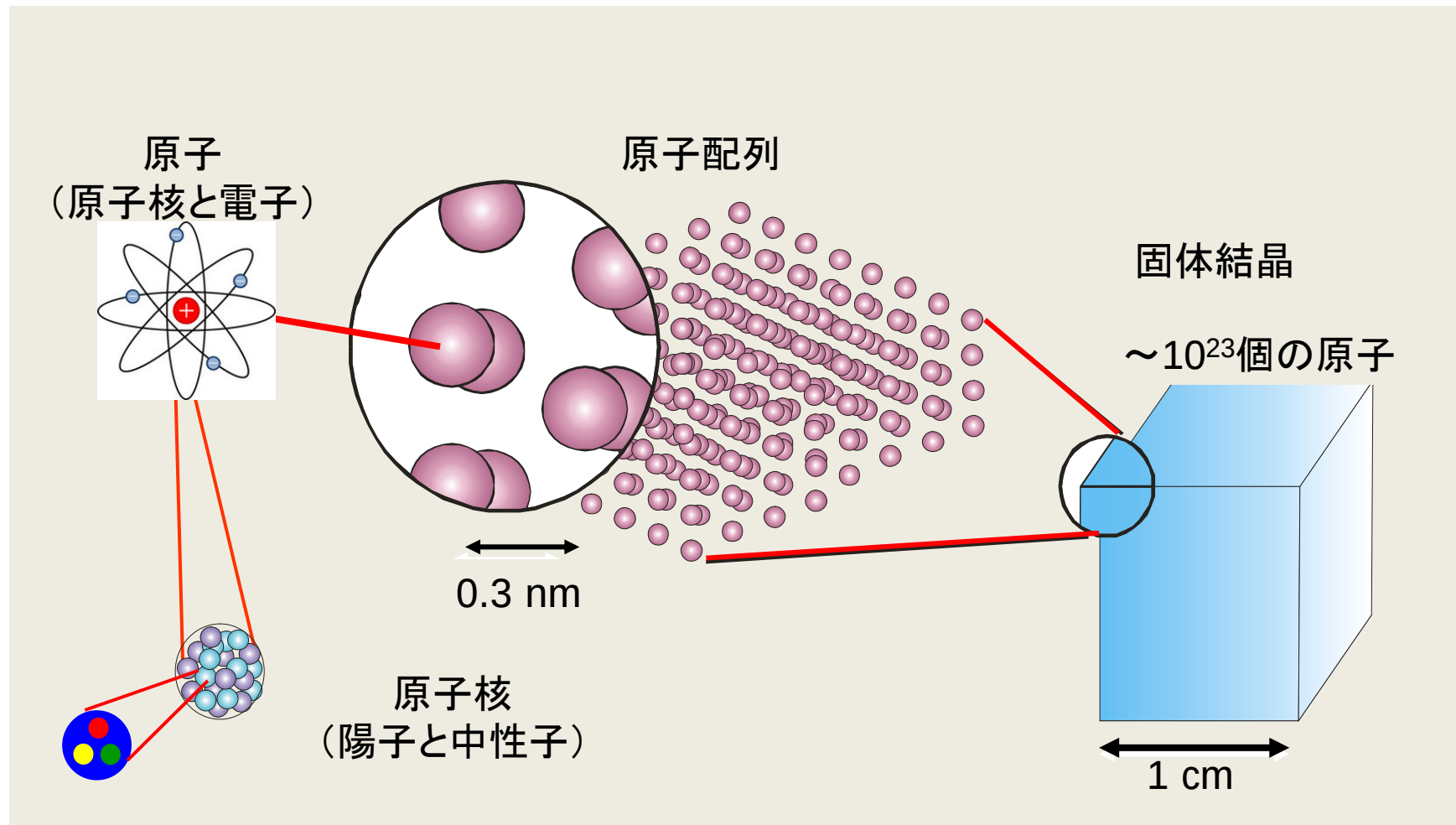


* イラスト出典: 須藤靖
『ものの大きさ: 自然の
階層・宇宙の階層』
東京大学出版会、
2006年、p.142 図6.1
作画: いずもり・よう

スケールの大きな話と小さな話



自然界の階層構造



物理学的精神

- 物理学(窮理学)的精神: —「自然界を根源的かつ論理的に理解したい」という志向
⇒ 自然界の論理構造を解き明かす
- 素粒子物理学・宇宙物理学 根源的な問い(big questions)
 - 世界の究極の構成要素は何か？
 - 宇宙の始まりは？ 終わりは？
- 物性物理学(凝縮系物理学)
 - さまざまな物質が示す性質(物性)を解き明かす。
 - 多様性・複雑性が本質的に重要だが、「博物学」ではなく、基本原理からの理解、物質に関する統一的・普遍的知識を追求。 ⇒「物質観」の構築
 - その中から、人類社会に役に立つ機能材料が開発される。
⇒ 応用物理学、材料工学

自然哲学の系譜

古代ギリシャから近代西欧へ

自然哲学の黎明

人類は道具や火や言葉を使いこなす能力を身につけることによって生物界において抜きん出た地位を獲得し、文明を築く存在となった。

自然認識の知的営為が先史時代から存在したであろうことは疑いない……

古代バビロニアの粘土板には楔形文字で「ピタゴラス数」や「2の平方根」に関する記述がある。

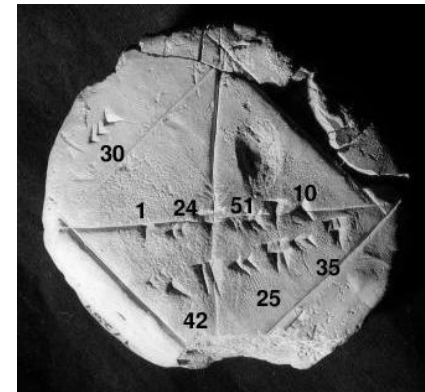


Image by Bill Casselman (tablet owned by the Yale Babylonian Collection), from Wikimedia Commons.
CC BY-SA 3.0
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ybc7289-bw.jpg>

しかし、今日多くの史料が残されてその一端を垣間見ることができるという意味では古代ギリシャの賢人たちを嚆矢とする。

ラファエロ画 「アテネの学堂」



ラファエロ・サンティ

(1483-1520)







ゼノン



ピュタゴラス



ヒュパティア

パルメニデス



ユークリッド



プトレマイオス

ラファエロ



西欧科学の系譜



運動論と力学

アリストテレスからニュートンまで

古代ギリシャの自然観

天上界(星界)と地上界(月下界、俗界)とでは、
そもそも統べる原理が異なる。

地上界(俗界)の物質は「空気(風)」「火」「水」「地(土)」
の四大元素からなる。

四大元素は、軽／重、冷／熱、および、乾／湿の属性
を持つ

火＝軽： 乾 × 熱

風＝軽： 乾 × 冷

水＝重： 湿 × 冷

地＝重： 湿 × 熱

天上界(星界)のものは四大元素とは別の、崇高な第
五元素(エーテル、クインテッセンス)でできている。

アリストテレスの運動論

第五元素でできている天体は、完全図形である円軌道を描いて永久運動する。『天体論』

四大元素はそれぞれの「本来の場所」を希求する。「気」や「火」は上方、「水」や「土」は下方へ。

アリストテレスの物体運動論 『自然学』

「自然的運動」（垂直方向の運動）

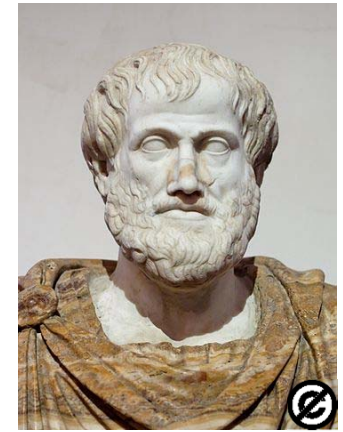
物体はその本来の場所を希求する

⇒ 重いものは軽いものよりも速く落ちる。

「強制的運動」 水平方向の運動は力による強制

⇒ 力が働かなければ静止する。

いずれも日常現象の観測からはごく自然な見方



アリストテレス

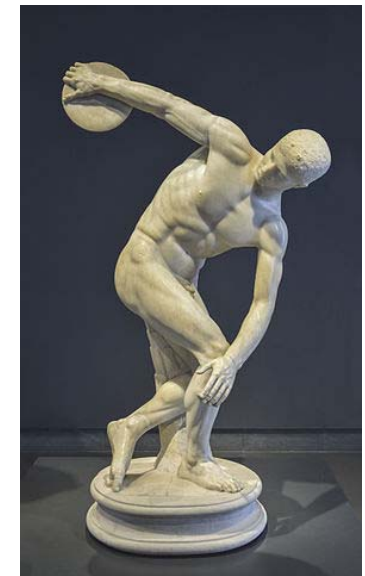


Image by Livioandronico2013, from
Wikimedia Commons CC BY-SA 4.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Discobolus_in_National_Roman_Museum_Palazzo_Massimo_alle_Terme.JPG

ガリレオ以前の運動論

【アリストテレス】

- 運動が生じるためにはその動因がなければならない。
- 投射体の運動： 手から離れた後も運動が続くのは、直接接触している媒体(空気)の作用による(としか考えられない)。
- 投射体の前にある空気が後ろに回り込んで押す。

【フィロポノス(6世紀)】 ビザンツ科学

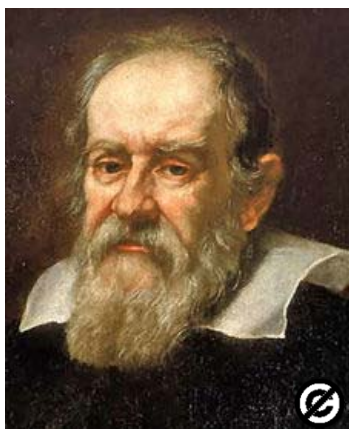
- 投射体が動きを保つのは、投射の際に与えられた(非物体的)運動力によるもので、運動が止むのはその運動力を使い果たしたから

【アヴィケンナ(イブン・シーナー:980-1037)】 アラビア科学

- 非物体的運動力 マイル(mayl)の概念

【ジャン・ビュリダン(1295-1358)】 パリ学派

- インピトゥス(impetus)の概念 ⇒ 近代の「慣性」概念の前駆



ガリレオ・ガリレイ

(1564-1642)

落体の法則

斜面を使った実験

⇒ 運動学・力学の基礎

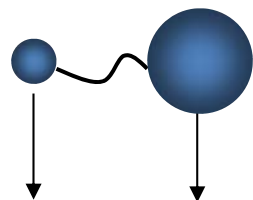
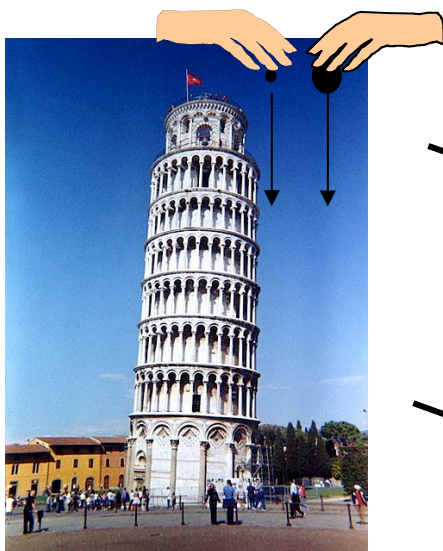


* Courtesy of Museo Galileo

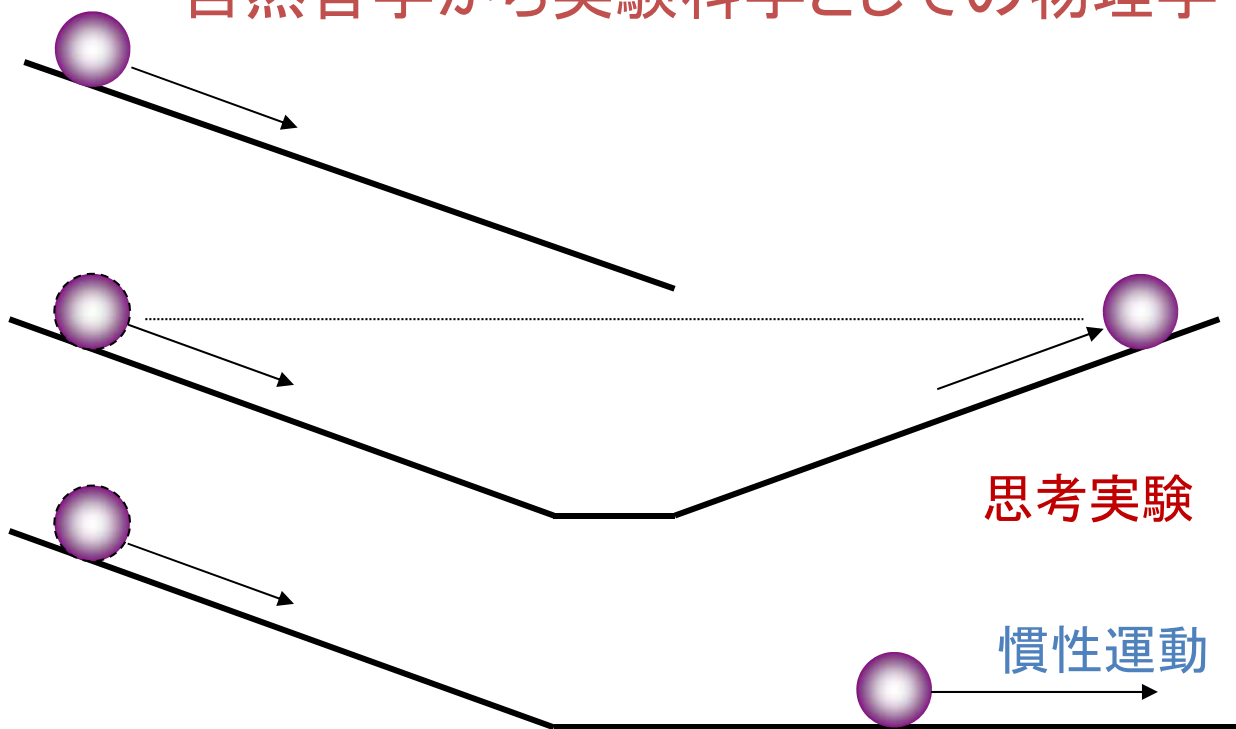
<http://www.museogalileo.it/>

自然哲学から実験科学としての物理学へ

Photo by Luigi
Novi, from
Wikimedia
Commons
CC BY 3.0
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4.21.04LeaningTowerOfPisaByLuigiNovi1.jpg>



思考実験



思考実験

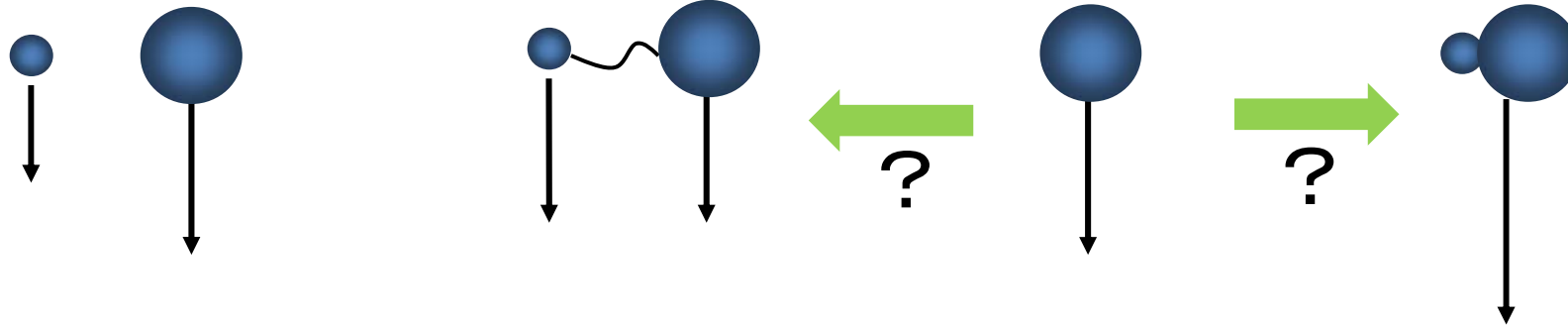
慣性運動

物体は、力が加えられなければ等速直線運動を行う

重い物体は軽い物体より速く落ちる？

$$m < M$$

思考実験



mがMより遅く落下する
なら、mをMに結び付け
ると、M単独の場合より
も遅く落ちるはず。

一方、mとMを合体し
たものはMより重い
のだから、M単独の場合
よりも速く落ちるはず。

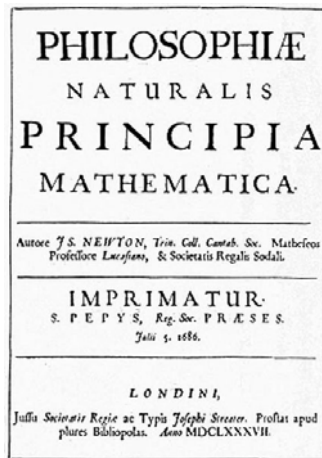
→ 落下速度は重さに依らない

アイザック・ニュートン(1642-1727)



Sir Isaac Newton by Sir Godfrey Kneller, Bt, 1702.

© National Portrait Gallery,
London CC BY-NC-ND 3.0



古典力学(ニュートン力学)

物体に働く力と運動の関係を数学的に定式化(ニュートンの運動方程式)

$$\text{力} = \text{質量} \times \text{加速度} \quad F = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

作用反作用の法則

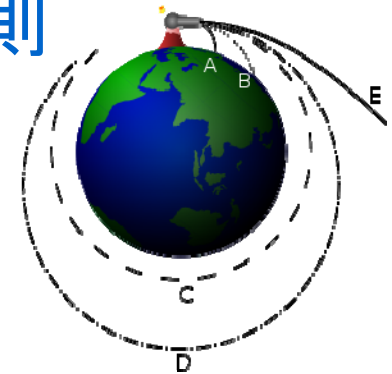


Image by Brian Brondel, from
Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton_Cannon.svg

万有引力の法則

あらゆる物体間には質量に比例し、
距離の2乗に反比例する引力が働く

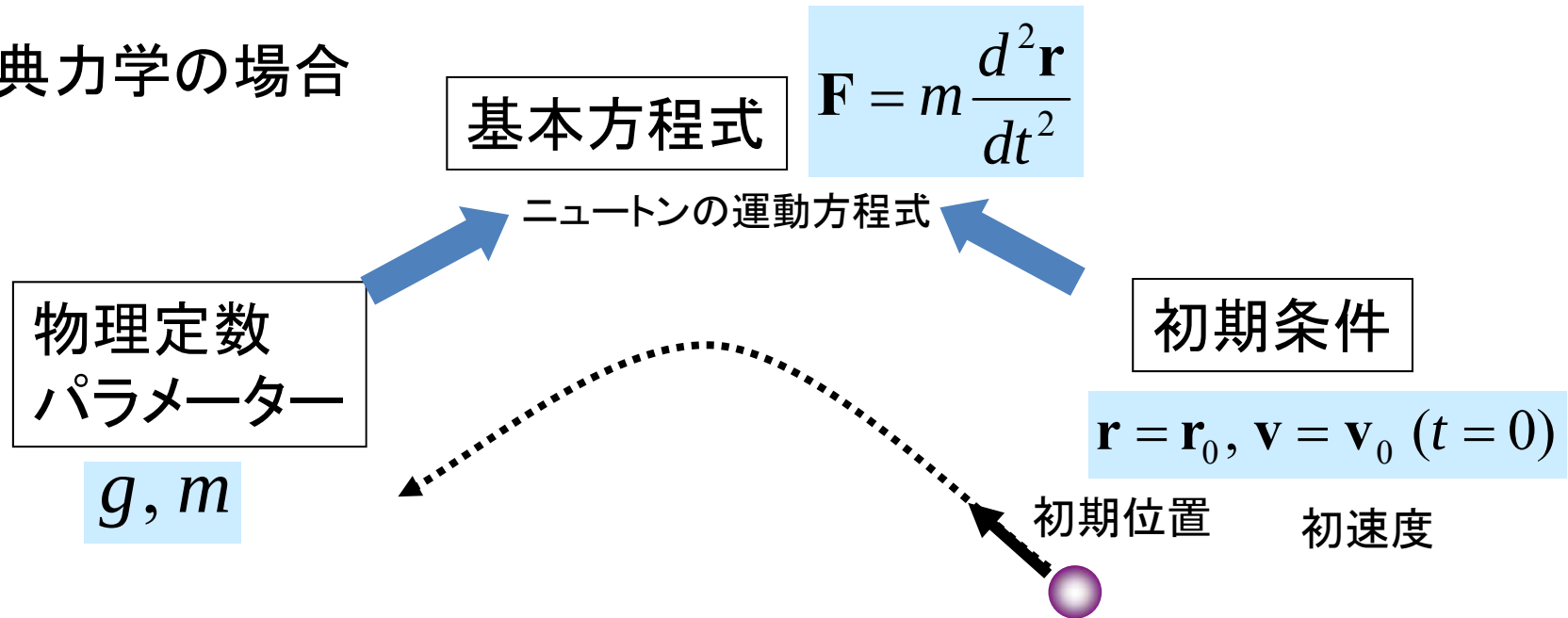
$$F = G \frac{m M}{r^2}$$

ニュートンはなぜ偉かったか:

「地上の現象(リンゴの落下)と天体現象(惑星の運行)が
同じ法則に従っている」という着想 ⇒ 統一理論の構築

物理学体系の基本構造

古典力学の場合



基本方程式と物理定数は確立しており、
初期条件が与えられれば、
その後の時間発展は決まる。 $\Rightarrow$ 古典力学的決定論

機械論的自然観

古典力学的自然観

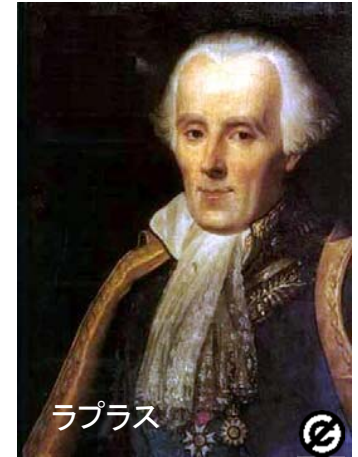
もしも、ある瞬間における全ての物質の力学的状態と力を知ることができ、かつ、それらのデータを解析できるだけの能力の知性が存在するとすれば、この知性にとっては不確実なことは何もなく、その目には未来も(過去同様に)全て見えているであろう。

ラプラスの魔

「天体力学概論」を皇帝ナポレオンに献呈：

ナポレオン 「お前の著書には世界のすべてが書かれているという評判だそうだが、神のことは一体どこに出てくるのだ。」

ラプラス 「閣下、私にはその仮説(神)は必要ございません。」



古典力学的決定論

機械論的自然観 「自然は神が創った精妙な機械」

「時計仕掛けの宇宙」というイメージ 神は天地創造したが、その世界は物理法則(機械仕掛け)に従って展開し、神の介入は必要としない。

⇒ 「目的論」や「生氣論」とは対極的な自然観

占星術(astrology)から天文学(astronomy)へ

暦の作成 ⇒ 農業, 祭祀

(地上の) 物体の運動

天上界 vs 地上界

占星術



プトレマイオスの体系



惑星の逆行問題

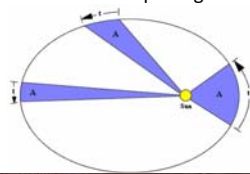
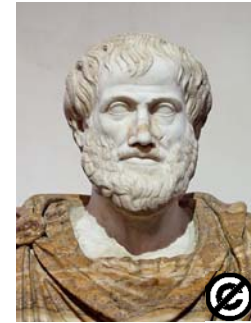


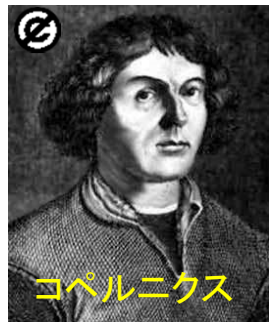
Image by RJHall, from Wikimedia Commons
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kepler2.gif> CC BY-SA 2.0

* 提供: 世界天文年
2009日本委員会

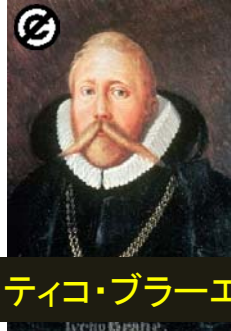


アリストテレスの自然哲学
砲術(弾道学)

落体の法則



太陽中心説



ティコ・ブラーエ



ケプラー



望遠鏡
木星の衛星



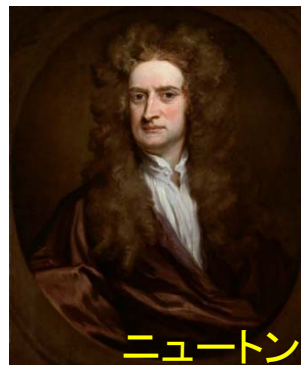
ガリレオ



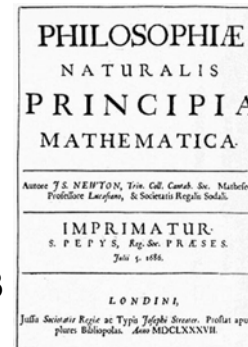
Photo by Luigi Novi, from Wikimedia Commons CC BY 3.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4.21.04_LeaningTowerOfPisaByLuigiNovi1.jpg



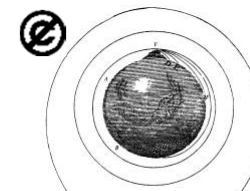
Sir Isaac Newton by Sir Godfrey Kneller, Bt, 1702.
© National Portrait Gallery, London CC BY-NC-ND 3.0



ニュートン



33



万有引力

天体の運動と地上の物体の運動を統一的に理解する
古典力学体系

ここでちょっと休憩

「神の存在証明？」

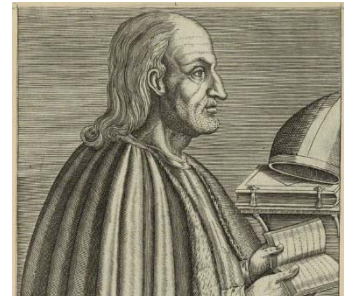
この世界を創った原因である存在がなければならない
⇒ それが神である それを神と呼ぶ ⇒ Intelligent Design

St Anselm after Unknown artist, late 16th century.
© National Portrait Gallery, London CC BY-NC-ND 3.0

アンセルムス

神はその本質からして全能であり、あらゆる属性を有している

⇒従って「存在」という属性も有している



カンタベリーの
アンセルムス
(1033[^]1109)

パスカルの賭け

(神の存在/不存在は理性では決定できない)

神が存在するほうに賭けて(信心)、実際存在すれば恩寵は無限。存在しなくても失うものはない。それに対して、存在しないほうに賭けて(無神論)もし存在したら劫罰を受ける。



ブレーズ・パスカル
(1623-662)

Blaise Pascal, Lithograph after G. Edelinck after F. Quesnel, junior. © Wellcome Library, London CC BY 4.0

物質観の変遷

「元素」および「原子」概念の形成

古代ギリシャの物質観

あらゆる物質が「ある根源的要素」から構成されているというのは自然な考えであろう(統一的描像の希求).

物質の統一的描像として、「**アルケー(源質)**」、すなわち(言葉の元来の意味での)「元素」が何であるかについて諸説が展開された.

アルケーとして,
タレースは「水」,
アナクシメネスは「空気」,
ヘラクレイトスは「火」,
を挙げた.
(ピュタゴラスは「数」.)



タレース:
最初の哲学者.
星を観測していて
ドブに落ちた人



Heraclitus of Ephesus, Mezzotint by J.
Faber after Peter Paul Rubens
© Wellcome Library, London CC BY 4.0

ヘラクレイトス:
「万物は流転する
(パンタ・レイ)」

四大元素説

エンペドクレスは、アルケーは単一ではなく、火・風(空気)・水・地(土)という4つのリゾーマタ(根)からなり、それらが愛(引力)と憎(斥力)によって離合集散することによって物質の多様性が生じている、とした。

ここでいう「空気」、「水」、「土」、「火」は、文字通りの物質としてのそれらというよりは、「気体的なもの」、「液体的なもの」、「固体的なもの」、「熱的なもの」の総称と見るべきである。



エンペドクレス：
世界で初めて哲学的
悩みで自殺した人
エトナ山の火口に投
身自殺



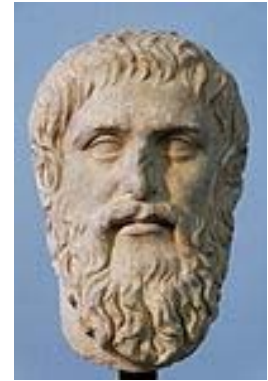
古代中国の五行思想

万物は木・火・土・金・水からなり、それらの生滅盛衰によって天地万物が変化し循環する。

→ 相生 / Generating Interaction
→ 相克 / Overcoming Interaction

Image by Pamassus, from wikimedia commons CC BY-SA 3.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wu_Xing.png

プラトン「ティマイオス」

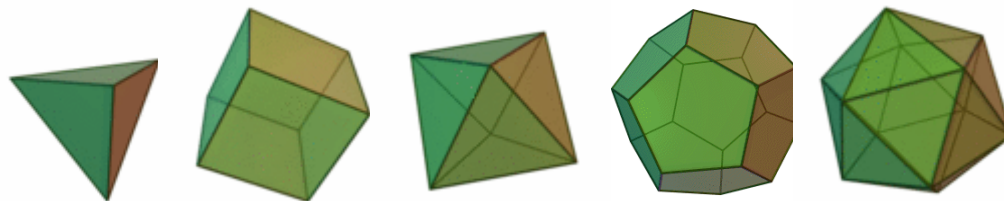


© Marie-Lan Nguyen / Wikimedia Commons
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Plato_Silanion_Musei_Capitolini_MC1377.jpg CC BY 2.5

地(土)・水・火・風(空気)の4つのリゾーマタ
(ριζώματα): 四元素説.

それぞれのリゾーマタは正多面体であり、その形状によって運動の性質や他のリゾーマタとの親和性が決まる。たとえば火は正四面体であり、最も軽く、鋭い。水は正二十面体、空気は正八面体である。土は正六面体であり、運動することが最も遅い。自然の諸物はリゾーマタがまざりあうことによって形成されている。

数学的知の重視
プラトン多面体

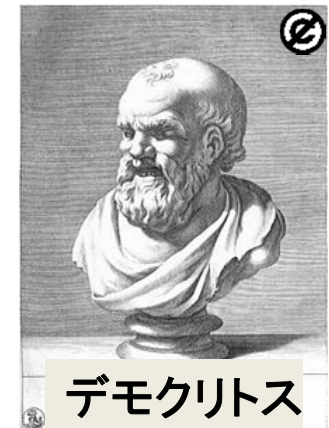


Images by
Cyp, from
Wikimedia
Commons
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Poly.pov> CC BY-SA 3.0

(素朴)原子論

物体を次々と細かく分割することを想定したとき、その作業が無限に続くか、あるいはどこかでそれ以上は分割不可能な単位に行き当たるかの哲学的思弁で、レウキッポス、デモクリトスは後者の立場を採り、「分割不可能な最小単位」をアトモス(ατομος)と名付けた。

観測的な根拠があるわけではないので、「無限分割」という厄介な概念を避けた？



アトモス(原子)自体は不生不滅であって、物質の変化はそれらの離合集散による、との考え方。

アトモスの運動の場はケノン(κενον)(空虚=真空)。

原子の形状と配置 ⇒ 物性

デモクリトスは、「甘いものは原子が丸くて適度な大きさのもの。酸っぱいものは原子が大きくて角張ったもの。」
というように、物質の性質を原子の大きさや形状に結び付けて解釈している。

現代の目からは稚拙であるが、物質の性質をその構成要素たる原子の幾何学的形状や配置に帰するという「還元主義」の萌芽を見ることができる。

アリストテレスの原子論批判

原子を想定すると、原子がその中で動く空虚な空間(ケノン)、つまり真空の存在を受け入れなければならない。

原子論が想定する不連続体の自然観と、アルケー論が依拠する連続体の自然観(物質が充満した空間)のどちらを採るか。

アリストテレスは「**自然は真空を嫌う**」として、真空の存在を認めなかった。

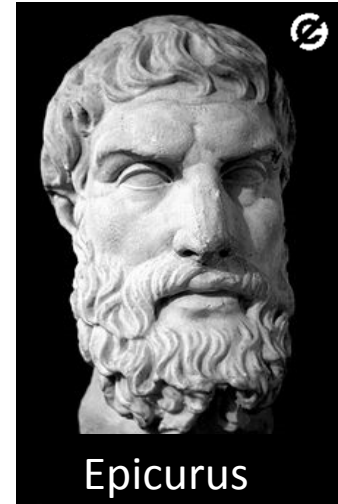
「何もない」ものが存在できるはずはない、という哲学？

「**真空**」という厄介な概念を忌避するか、「**無限分割**」という厄介な概念を忌避するかの選択？

エピキュロスの原子論

ローマ時代のルクレティウスは
“De Rerum Natura（事物の本性に
ついて）”という書で、エピキュロ
スの原子論を詩の形で伝えた。

ルクレティウス、
『物の本質について』
樋口 勝彦訳、岩波文
庫、1961年



エピキュロスの自然観

自然界の現象は原子の運動と衝突による。



偶然に支配される世界（唯物論的・機械論的自然観）
アリストテレス流の目的論的自然観とは相容れない

原子論はギリシャ哲学の中では異端であり、アリストテ
レスが「万学の祖」として権威をもった中世には原子論
は忘れ去られた。

原子論の再発見

ルクレティウスの「事物の本質について」は中世の間失われていたが、ルネッサンス期にギリシャ・ローマの古典の写本探しが盛んに行われ、人文主義者ポッジョ・ブラッキオリーニがドイツの修道院の書庫に眠っていた写本を1417年に発見して、世に広めた。

(デカルトのライバルであった)ピエール・ガッサンディ(1592-1655)によるルクレティウス研究を通じて、エピキュロスの原子論が蘇生され、近代科学に繋がった。

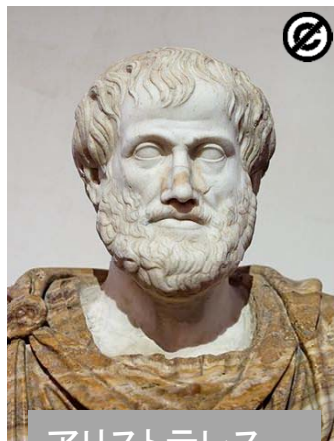
Stephen Greenblatt,
*The Swerve: How the World
Became Modern*, W.W.
Norton, 2011
<http://books.wwnorton.com/books/The-Swerve/>

(邦訳: スティーヴン・
グリーンブラット『一四一七
年、その一冊がすべてを変
えた』河野純治訳、柏書房、
2012年
[http://www.kashiwashobo.co.jp/
cgi-bin/bookisbn.cgi?isbn=978-4-
7601-4176-0](http://www.kashiwashobo.co.jp/cgi-bin/bookisbn.cgi?isbn=978-4-7601-4176-0))



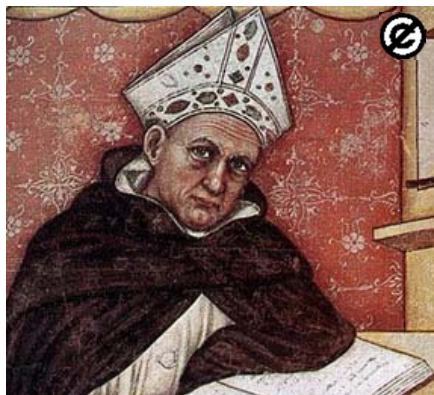
ガッサンディ

錬金術の系譜



アリストテレス

四元素説



アルベルトウス・マグヌス

錬金術



ロジャー・ベーコン

水銀, 硫黄, 塩などの化学反応
焼成, 溶解, 蒸留などの実験技術



パラケルスス



ニュートン

Sir Isaac Newton by Sir
Godfrey Kneller, Bt, 1702.
© National Portrait Gallery,
London CC BY-NC-ND 3.0



ヘルメス・トリスメギストス
(伝説上の古代エジプトの
錬金術師)



ジャービル・イブン・
ハイヤーン(ゲベルス)

錬金術 (Alchemy)

賢者の石(philosopher's stone)

霊薬エリクシル(elixir)の探求

卑金属(鉛)を貴金属(金)に

人を不老不死に

錬金術(alchemy)



ロジャー・ベーコン

中世後期からルネッサンス期
ロジャー・ベーコン（13世紀オックスフォードの神学者）
パラケルスス（16世紀バーゼルの医師）



パラケルスス

四大元素とエーテルに加えて、
男性原理を体現する「硫黄」と女性原理を体現する「水銀」、
それらを仲介する「塩」： アラビアの三原質

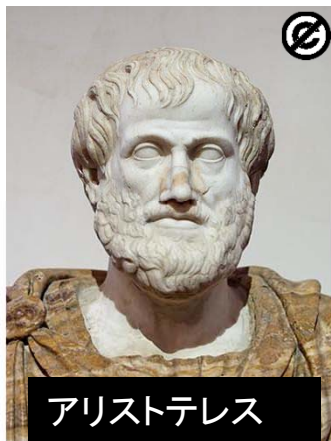
⇒ エリクシール, 賢者の石, を追い求める

マクロコスモス(宇宙)とミクロコスモス(人体)との相関
イアトロ化学(iatrochemistry)

⇒ 物質や化学反応に関する知識、および
化学実験の技法の発達

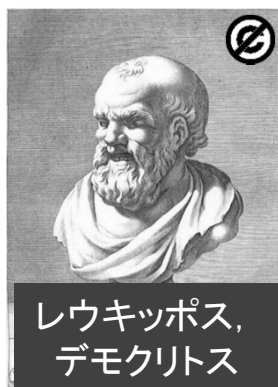
錬金術から近代化学へ

元素と原子の概念 形成

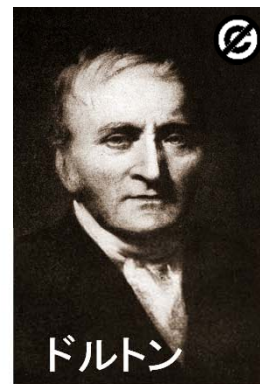


四元素説

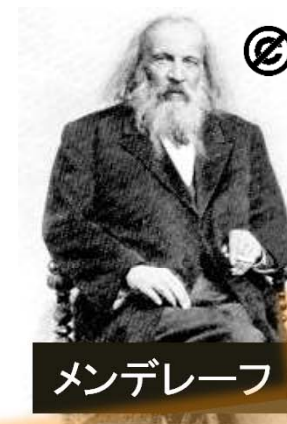
原子説



元素の概念
単体と化合物



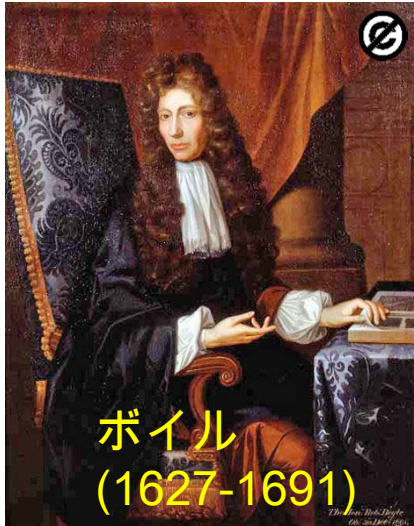
化学的原子論



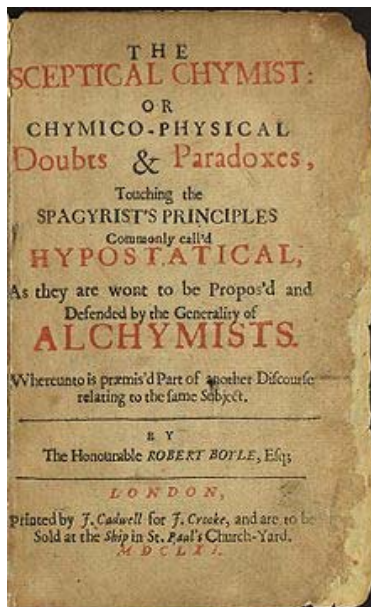
元素周期律

		Group																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		I		II												III	IV	V	VI	VII	VIII																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1		1	H																	2	He																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
2		3	Li	4	Be																	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
3		11	Na	12	Mg																	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
4		19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
5		37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
6		55	Cs	56	Ba	**	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
7		87	Rf	88	Ra	**	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Uut	114	Ff	115	Uup	116	Lv	117	Uus	118	Uuo																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
8		119	Uuh																	120	Uuq	121	Uub	122	Uut	123	Uuq	124	Uub	125	Uut	126	Uuq	127	Uub	128	Uut	129	Uuq	130	Uub	131	Uut	132	Uuq	133	Uub	134	Uut	135	Uuq	136	Uub	137	Uut	138	Uuq	139	Uub	140	Uut	141	Uuq	142	Uub	143	Uut	144	Uuq	145	Uub	146	Uut	147	Uuq	148	Uub	149	Uut	150	Uuq	151	Uub	152	Uut	153	Uuq	154	Uub	155	Uut	156	Uuq	157	Uub	158	Uut	159	Uuq	160	Uub	161	Uut	162	Uuq	163	Uub	164	Uut	165	Uuq	166	Uub	167	Uut	168	Uuq	169	Uub	170	Uut	171	Uuq	172	Uub	173	Uut	174	Uuq	175	Uub	176	Uut	177	Uuq	178	Uub	179	Uut	180	Uuq	181	Uub	182	Uut	183	Uuq	184	Uub	185	Uut	186	Uuq	187	Uub	188	Uut	189	Uuq	190	Uub	191	Uut	192	Uuq	193	Uub	194	Uut	195	Uuq	196	Uub	197	Uut	198	Uuq	199	Uub	200	Uut	201	Uuq	202	Uub	203	Uut	204	Uuq	205	Uub	206	Uut	207	Uuq	208	Uub	209	Uut	210	Uuq	211	Uub	212	Uut	213	Uuq	214	Uub	215	Uut	216	Uuq	217	Uub	218	Uut	219	Uuq	220	Uub	221	Uut	222	Uuq	223	Uub	224	Uut	225	Uuq	226	Uub	227	Uut	228	Uuq	229	Uub	230	Uut	231	Uuq	232	Uub	233	Uut	234	Uuq	235	Uub	236	Uut	237	Uuq	238	Uub	239	Uut	240	Uuq	241	Uub	242	Uut	243	Uuq	244	Uub	245	Uut	246	Uuq	247	Uub	248	Uut	249	Uuq	250	Uub	251	Uut	252	Uuq	253	Uub	254	Uut	255	Uuq	256	Uub	257	Uut	258	Uuq	259	Uub	260	Uut	261	Uuq	262	Uub	263	Uut	264	Uuq	265	Uub	266	Uut	267	Uuq	268	Uub	269	Uut	270	Uuq	271	Uub	272	Uut	273	Uuq	274	Uub	275	Uut	276	Uuq	277	Uub	278	Uut	279	Uuq	280	Uub	281	Uut	282	Uuq	283	Uub	284	Uut	285	Uuq	286	Uub	287	Uut	288	Uuq	289	Uub	290	Uut	291	Uuq	292	Uub	293	Uut	294	Uuq	295	Uub	296	Uut	297	Uuq	298	Uub	299	Uut	300	Uuq	301	Uub	302	Uut	303	Uuq	304	Uub	305	Uut	306	Uuq	307	Uub	308	Uut	309	Uuq	310	Uub	311	Uut	312	Uuq	313	Uub	314	Uut	315	Uuq	316	Uub	317	Uut	318	Uuq	319	Uub	320	Uut	321	Uuq	322	Uub	323	Uut	324	Uuq	325	Uub	326	Uut	327	Uuq	328	Uub	329	Uut	330	Uuq	331	Uub	332	Uut	333	Uuq	334	Uub	335	Uut	336	Uuq	337	Uub	338	Uut	339	Uuq	340	Uub	341	Uut	342	Uuq	343	Uub	344	Uut	345	Uuq	346	Uub	347	Uut	348	Uuq	349	Uub	350	Uut	351	Uuq	352	Uub	353	Uut	354	Uuq	355	Uub	356	Uut	357	Uuq	358	Uub	359	Uut	360	Uuq	361	Uub	362	Uut	363	Uuq	364	Uub	365	Uut	366	Uuq	367	Uub	368	Uut	369	Uuq	370	Uub	371	Uut	372	Uuq	373	Uub	374	Uut	375	Uuq	376	Uub	377	Uut	378	Uuq	379	Uub	380	Uut	381	Uuq	382	Uub	383	Uut	384	Uuq	385	Uub	386	Uut	387	Uuq	388	Uub	389	Uut	390	Uuq	391	Uub	392	Uut	393	Uuq	394	Uub	395	Uut	396	Uuq	397	Uub	398	Uut	399	Uuq	400	Uub	401	Uut	402	Uuq	403	Uub	404	Uut	405	Uuq	406	Uub	407	Uut	408	Uuq	409	Uub	410	Uut	411	Uuq	412	Uub	413	Uut	414	Uuq	415	Uub	416	Uut	417	Uuq	418	Uub	419	Uut	420	Uuq	421	Uub	422	Uut	423	Uuq	424	Uub	425	Uut	426	Uuq	427	Uub	428	Uut	429	Uuq	430	Uub	431	Uut	432	Uuq	433	Uub	434	Uut	435	Uuq	436	Uub	437	Uut	438	Uuq	439	Uub	440	Uut	441	Uuq	442	Uub	443	Uut	444	Uuq	445	Uub	446	Uut	447	Uuq	448	Uub	449	Uut	450	Uuq	451	Uub	452	Uut	453	Uuq	454	Uub	455	Uut	456	Uuq	457	Uub	458	Uut	459	Uuq	460	Uub	461	Uut	462	Uuq	463	Uub	464	Uut	465	Uuq	466	Uub	467	Uut	468	Uuq	469	Uub	470	Uut	471	Uuq	472	Uub	473	Uut	474	Uuq	475	Uub	476	Uut	477	Uuq	478	Uub	479	Uut	480	Uuq	481	Uub	482	Uut	483	Uuq	484	Uub	485	Uut	486	Uuq	487	Uub	488	Uut	489	Uuq	490	Uub	491	Uut	492	Uuq	493	Uub	494	Uut	495	Uuq	496	Uub	497	Uut	498	Uuq	499	Uub	500	Uut	501	Uuq	502	Uub	503	Uut	504	Uuq	505	Uub	506	Uut	507	Uuq	508	Uub	509	Uut	510	Uuq	511	Uub	512	Uut	513	Uuq	514	Uub	515	Uut	516	Uuq	517	Uub	518	Uut	519	Uuq	520	Uub	521	Uut	522	Uuq	523	Uub	524	Uut	525	Uuq	526	Uub	527	Uut	528	Uuq	529	Uub	530	Uut	531	Uuq	532	Uub	533	Uut	534	Uuq	535	Uub	536	Uut	537	Uuq	538	Uub	539	Uut	540	Uuq	541	Uub	542	Uut	543	Uuq	544	Uub	545	Uut	546	Uuq	547	Uub	548	Uut	549	Uuq	550	Uub	551	Uut	552	Uuq	553	Uub	554	Uut	555	Uuq	556	Uub	557	Uut	558	Uuq	559	Uub	560	Uut	561	Uuq	562	Uub	563	Uut	564	Uuq	565	Uub	566	Uut	567	Uuq	568	Uub	569	Uut	570	Uuq	571	Uub	572	Uut	573	Uuq	574	Uub	575	Uut	576	Uuq	577	Uub	578	Uut	579	Uuq	580	Uub	581	Uut	582	Uuq	583	Uub	584	Uut	585	Uuq	586	Uub	587	Uut	588	Uuq	589	Uub	590	Uut	591	Uuq	592	Uub	593	Uut	594	Uuq	595	Uub	596	Uut	597	Uuq	598	Uub	599	Uut	600	Uuq	601	Uub	602	Uut	603	Uuq	604	Uub	605	Uut	606	Uuq	607	Uub	608	Uut	609	Uuq	610	Uub	611	Uut	612	Uuq	613	Uub	614	Uut	615	Uuq	616	Uub	617	Uut	618	Uuq	619	Uub	620	Uut	621	Uuq	622	Uub	623	Uut	624	Uuq	625	Uub	626	Uut	627	Uuq	628	Uub	629	Uut	630	Uuq	631	Uub	632	Uut	633	Uuq	634	Uub	635	Uut	636	Uuq	637	Uub	638	Uut	639	Uuq	640	Uub	641	Uut	642	Uuq	643	Uub	644	Uut	645	Uuq	646	Uub	647	Uut	648	Uuq	649	Uub	650	Uut	651	Uuq	652	Uub	653	Uut	654	Uuq	655	Uub	656	Uut	657	Uuq	658	Uub	659	Uut	660	Uuq	661	Uub	662	Uut	663	Uuq	664	Uub	665	Uut	666	Uuq	667	Uub	668	Uut	669	Uuq	670	Uub	671	Uut	672	Uuq	673	Uub	674	Uut	675	Uuq	676	Uub	677	Uut	678	Uuq	679	Uub	680	Uut	681	Uuq	682	Uub	683	Uut	684	Uuq	685	Uub	686	Uut	687	Uuq	688	Uub	689	Uut	690	Uuq	691	Uub	692	Uut	693	Uuq	694	Uub	695	Uut	696	Uuq	697	Uub	698	Uut	699	Uuq	700	Uub	701	Uut	702	Uuq	703	Uub	704	Uut	705	Uuq	706	Uub	707	Uut	708	Uuq	709	Uub	710	Uut	711	Uuq	712	Uub	713	Uut	714	Uuq	715	Uub	716	Uut	717	Uuq	718	Uub	719	Uut	720	Uuq	721	Uub	722	Uut	723	Uuq	724	Uub	725	Uut	726	Uuq	727	Uub	728	Uut	729	Uuq	730	Uub	731	Uut	732	Uuq	733	Uub	734	Uut	735	Uuq	736	Uub	737	Uut	738	Uuq	739	Uub	740	Uut	741	Uuq	742	Uub	743	Uut	744	Uuq	745	Uub	746	Uut	747	Uuq	748	Uub	749	Uut	750	Uuq	751	Uub	752	Uut	753	Uuq	754	Uub	755	Uut	756	Uuq	757	Uub	758	Uut	759	Uuq	760	Uub	761	Uut	762	Uuq	763	Uub	764	Uut	765	Uuq	766	Uub	767	Uut	768	Uuq	769	Uub	770	Uut	771	Uuq	772	Uub	773	Uut	774	Uuq	775	Uub	776	Uut	777	Uuq	778	Uub	779	Uut	780	Uuq	781	Uub	782	Uut	783	Uuq	784	Uub	785	Uut	786	Uuq	787	Uub	788	Uut	789	Uuq	790	Uub	791	Uut	792	Uuq	793	Uub	794	Uut	795	Uuq	796	Uub	797	Uut	798	Uuq	799	Uub	800	Uut	801	Uuq	802	Uub	803	Uut	804	Uuq	805	Uub	806	Uut	807	Uuq	808	Uub	809	Uut	810	Uuq	811	Uub	812	Uut	813	Uuq	814	Uub	815	Uut	816	Uuq	817	Uub	818	Uut	819	Uuq	820	Uub	821	Uut	822	Uuq	823	Uub	824	Uut	825	Uuq	826	Uub	827	Uut	828	Uuq	829	Uub	830	Uut	831	Uuq	832	Uub	833	Uut	834	Uuq	835

ロバート・ボイル



ボイル
(1627-1691)



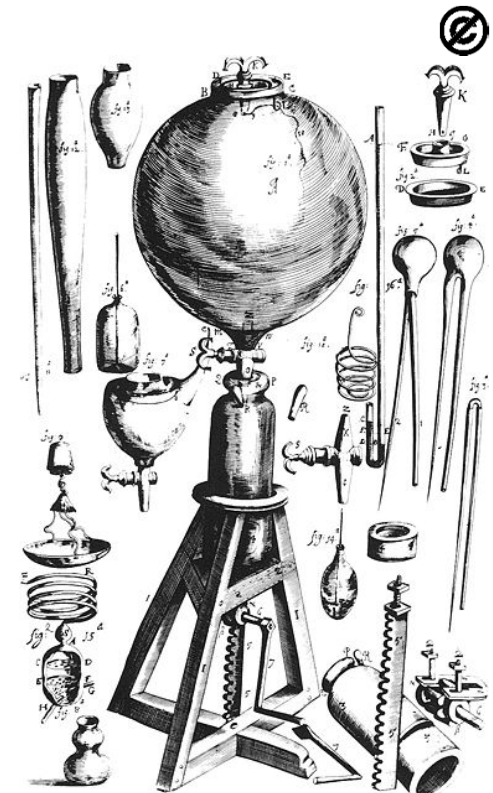
四大元素論を否定、
例えば、鉛と金は別々の元素。
従って錬金術の試みは不毛。

混合物と化合物を区別

「懐疑的化学者」を著す
近代化学の祖とされる

助手のフックとともに
改良版真空ポンプを製作
⇒ ボイルの法則

Image from the Schoenberg Center for
Electronic Text and Image, The University
of Pennsylvania Libraries [CC BY 2.5](http://sceti.library.upenn.edu/)
<http://sceti.library.upenn.edu/>





ベッヒャー

燃焼について

【ベッヒャー】(1669)

【シュタール】「化学の基礎」(1697)

燃焼を司る元素：フロギストン(燃素)

燃焼とは、物質からフロギストンが失われること



シュタール

問題点：金属を燃やすと質量が増加する

【ビリングッチョ】(16世紀)、【ジャン・レー】(1630)

⇒ フロギストンは負の質量をもつ？【ユンカー】

【キャベンディッシュ】(1766)

金属と酸を反応させ気体を得る ⇒ フロギストン？(水素)

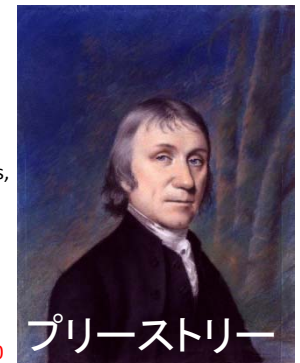


キャベンディッシュ
H. Cavendish

【ブラック、ラザフォード】

フロギストン飽和空気(二酸化炭素)の発見

【プリーストリー】 脱フロギストン空気(酸素)の発見



プリーストリー

アントワーヌ・ラヴォアジエ



ラヴォアジエ
(1743-1794)

「近代化学の父」と称せられる

化学変化における質量保存を発見

燃焼が「酸素との結合」であることを示し、当時主流であった「フロギストン説」を否定

熱も物質の一種であると考え、「カロリック(熱素)」という元素を想定

ラヴォアジエ著『化学原論』(1789)に記載された元素のリスト

【遍在するもの】光、カロリック(熱素)、酸素、窒素、水素

【非金属】硫黄、リン、炭素、塩酸基、フッ酸基、ホウ酸基

【金属】 アンチモン、銀、ヒ素、ビスマス、コバルト、銅、錫、
鉄、モリブデン、ニッケル、金、白金、鉛、 亜鉛、
マンガン、タングステン、水銀

【土類】 ライム(酸化カルシウム)、マグネシア、
バリタ(酸化バリウム)、アルミナ、シリカ

ラヴォアジエと妻マリーアンヌ



* Antoine-Laurent Lavoisier and His Wife, by Jacques Louis David, 1788.
The Metropolitan Museum of Art www.metmuseum.org

ダヴィッド画
ラヴォアジエと妻マリーアンヌ
・ピエレット・ポールズ

ラヴォアジエのために、著書や文献の英仏語間翻訳、実験のスケッチ記録や著書の挿絵を担当して研究に協力。サロンを主宰。

【ラヴォアジエ】 熱も物質の一種であると考え、「カロリック」という流体物質を想定。

【ベンジャミン・トンプソン(ラムフォード伯)】 砲身の切削工程で、いくらでも熱が発生することから、カロリック説を否定。**熱は運動の一形態**であると結論。

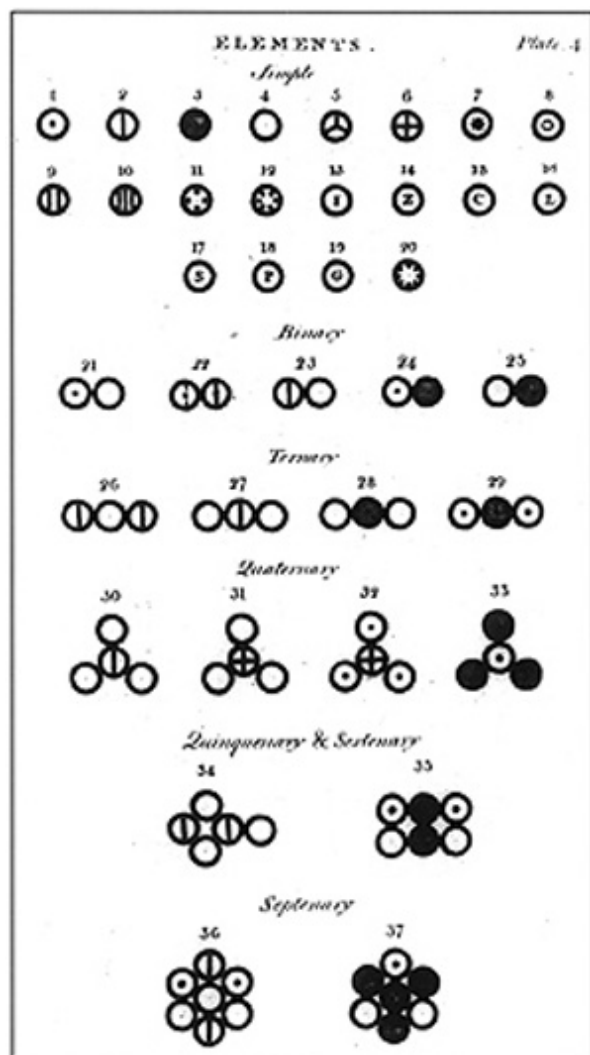
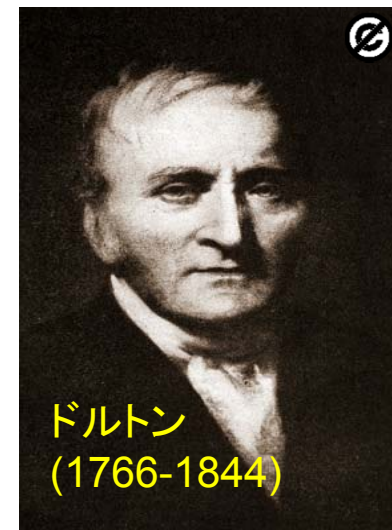
フランス革命が勃発(1789)し、徴税請負人であったラヴォアジエは民衆の恨みを買ってギロチンで処刑(1794)。

その後、未亡人マリーアンヌはラムフォード伯と再婚(1805)するが、不仲でやがて離婚。



ラムフォード伯 51

ジョン・ドルトン



化学的原子論 倍数比例の法則

例: メタン CH_4 と

エチレン C_2H_4 とで

一定量の炭素と結びつく水素の量が1:2

一連の窒素酸化物で, 一定量の窒素と結
びつく酸素の量

N_2O	7:4	1
NO	7:8	2
N_2O_3	7:12	3
NO_2	7:16	4
N_2O_5	7:20	5

元素にはどうやら最少単位があるらしい

原子と原子量の概念

古典物理学の完成

水車から蒸気機関へ(産業革命)

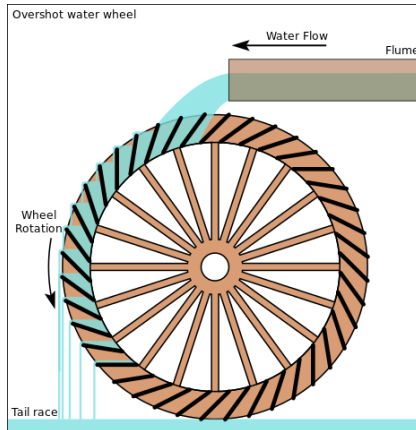


Image by Daniel M. Short, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 2.5](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Overshot_water_wheel_schematic.svg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Overshot_water_wheel_schematic.svg

水車: 中世のハイテク装置

水は高きから低きに流れる。
その力学的エネルギー(の一部)
を使って水車を回す。

熱機関の効率
⇒ 熱力学



サディ・カルノー

高温部 (heat source)



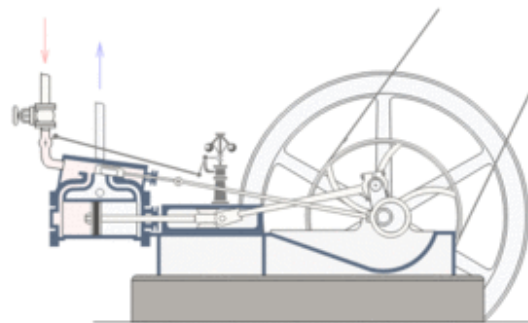
低温部 (heat sink)

熱機関

仕事

熱機関(エンジン)

熱も高温部から低温部に
流れる。熱エネルギーの
一部を仕事に変換する。



力学エネルギーを
100%熱に変換
することは簡単だ
が、逆はそうはい
かない。

Movie by Panther, from Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_engine_in_action.gif [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_engine_in_action.gif)

電気現象

タレース (BC6世紀)

静電気(琥珀現象)、摩擦電気

ミュッセンブルーク (1692-1761)

ライデン瓶の考案 (1746)

ベンジャミン・フランクリン(1705-1790)

雷が放電現象であること (1752)

平賀源内 (1728-1780) エレキテル

ルイジ・ガルヴァーニ (1737-1798)

動物電気

アレッサンドロ・ヴォルタ (1745-1827)

電堆(初期の電池)

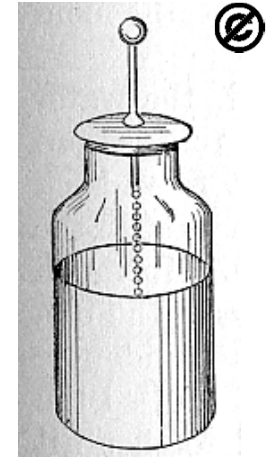
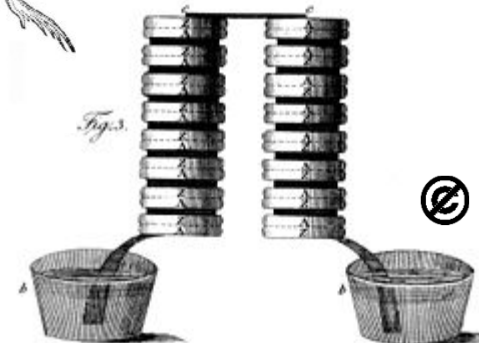
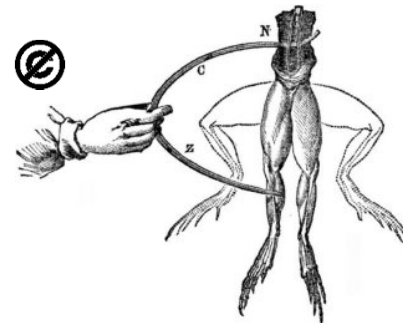


Image by Momotarou2012, from
Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elekiter_replica.jpg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elekiter_replica.jpg



電磁気学とその応用

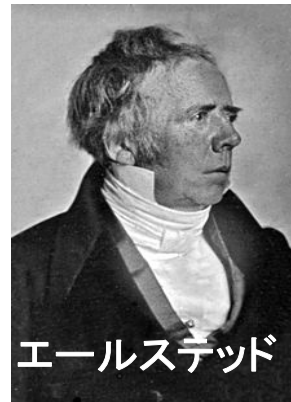
電磁気学

エールステッド

アンペール

ウェーバー

Modified from
photo by Mats
Landin / Nordiska
Museet [CC BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)
[http://commons.wi
kimedia.org/wiki/Fil
e:Hans_Christian_%
C3%98rsted_daguer
reotype.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hans_Christian_%C3%98rsted_daguerreotype.jpg)



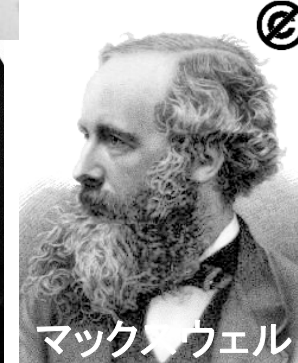
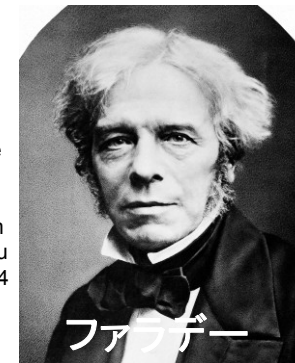
André Marie Ampère by Ambrose
Tardieu, 1825 © National Portrait
Gallery [CC BY-NC-ND 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/)



ファラデー

マックスウェル

Credit: Wellcome
Library, London
[CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
[http://wellcomeim
ages.org/indexplu
s/image/M000594
8.html](http://wellcomeimages.org/indexplu
s/image/M000594
8.html)

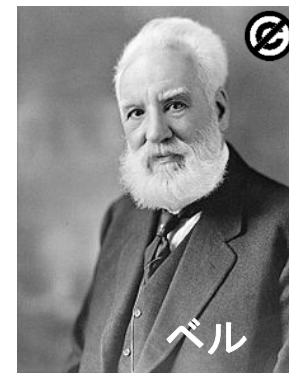
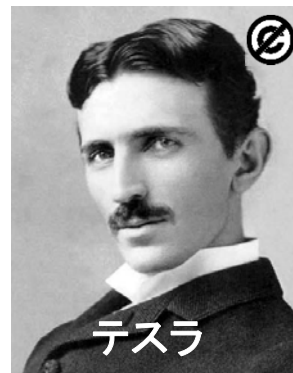
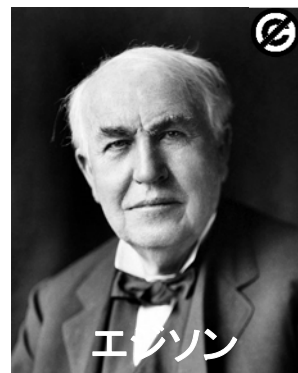


エジソン

テスラ

ベル

マルコーニ



19世紀の物理学体系

熱現象のミクロな基礎付け

気体分子運動論

⇒ 熱力学の基礎としての統計力学

多自由度系の力学

弾性体力学, 流体力学など連続体の力学

19世紀末には古典物理学体系が成熟の域に達した

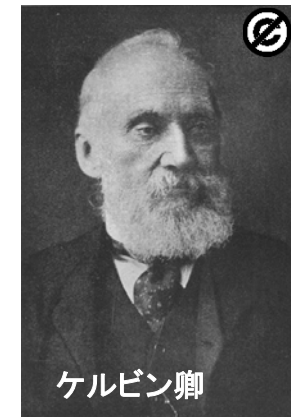
ケルビン卿(1900) 「物理学にかかる2つの暗雲」

(1) 光はエーテルを伝わる波であると考えられるのに,
エーテルの正体が不明(見つからない)

(2) 気体の熱運動に関わるエネルギー等分配則の破綻

一般の解説では, (2)は「黒体輻射の法則が説明できないこと」とされていることが多いが, 実際にケルビン卿が挙げたのはエネルギー等分配の問題だったらしい.

(1) ⇒ (特殊)相対性理論, (2) ⇒ 量子論, につながる

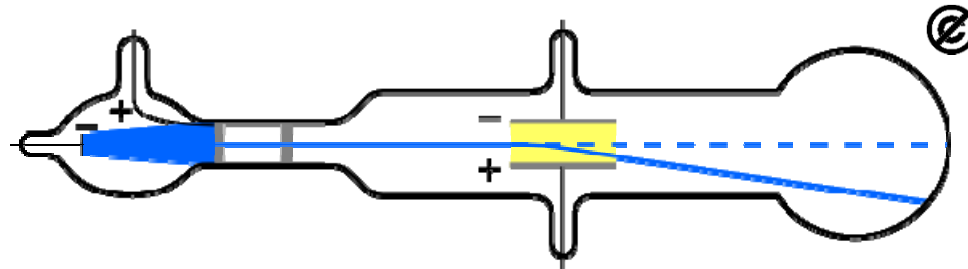


原子物理学と量子力学

電子の発見

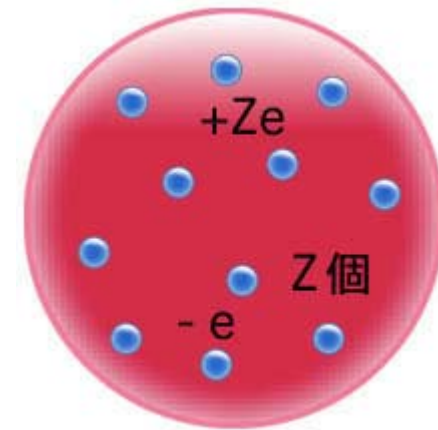


J. J. トムソン
(1856-1940)



「陰極線」が負の電荷をもつ粒子の流れであり、その「粒子」は水素原子の約 $1/2000$ の質量. $\Rightarrow$ 「電子」の発見

原子は「分割できない粒子」ではなく、その中に負電荷をもつ「電子」を含む。
(ということは正電荷の成分もある)

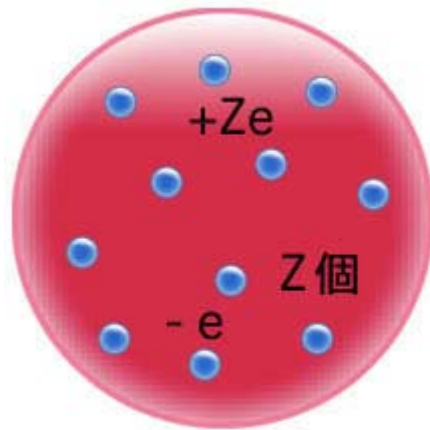


プラムプディング
(ぶどうパン)モデル

* 提供元:
(独) 科学技術振興機構
「理科ねっとわーく」
<http://rikant2.jst.go.jp/>

土星型原子模型

J. J. トムソン



*提供元:
(独)科学技術振興機構
「理科ねっと
わーく」
[http://rikane
t2.jst.go.jp/](http://rikane
t2.jst.go.jp/)

プラムプディング
(ぶどうパン)モデル

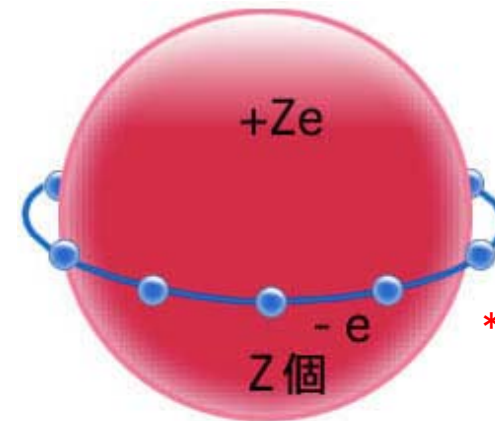
ペラン(Jean Perrin)

中心に正電荷がありその周りを電子
が周回する原子模型

長岡半太郎
土星型原子模型

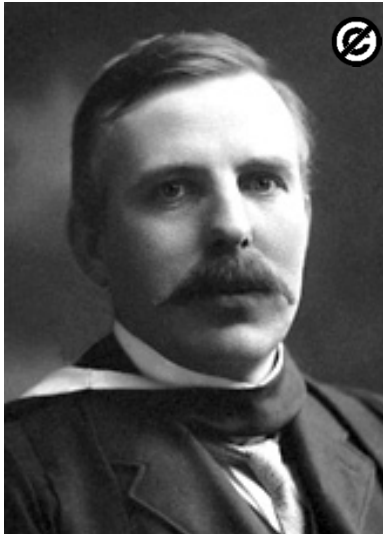


* Credit:
NASA/NSSDC



*提供元:
(独)科学技術振興機構
「理科ねっと
わーく」
[http://rikane
t2.jst.go.jp/](http://rikane
t2.jst.go.jp/)

しかし、この模型では周回する電子が電磁波を放出してエネルギーを失うはずなので、安定ではないという深刻な問題点があった。



ラザフォード
(1871-1937)

ラザフォードの実験

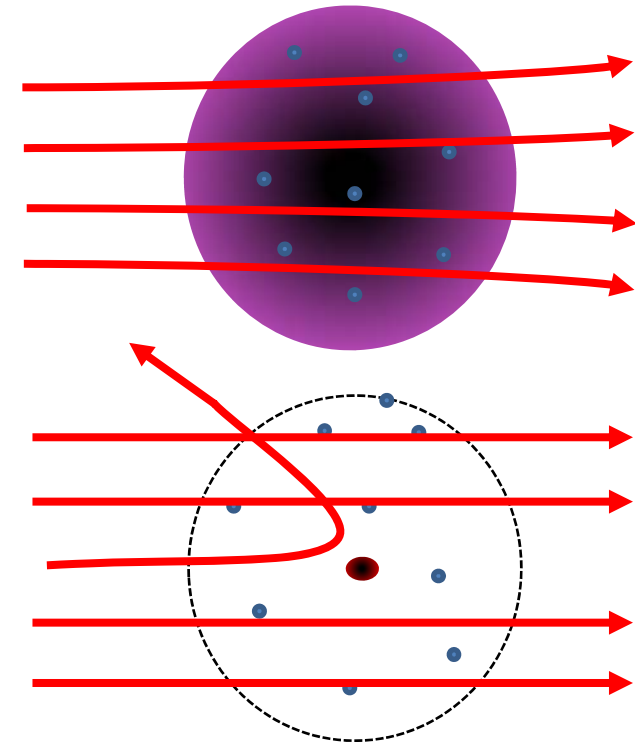
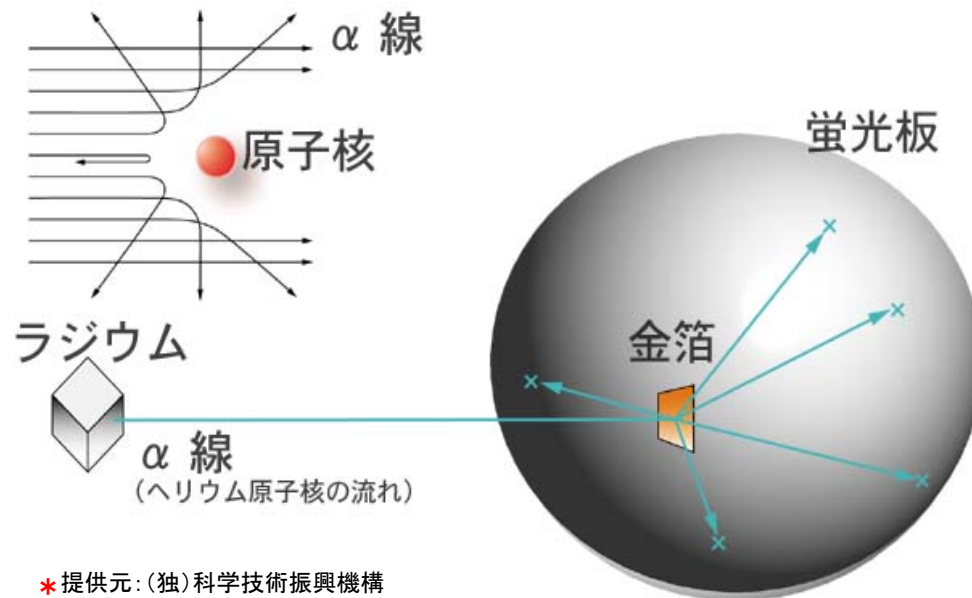
アルファ線(ヘリウム原子核の粒子線)を金箔に照射

ほとんどのアルファ粒子は真直ぐ突き抜ける.

⇒ 原子の中は「スカスカ」

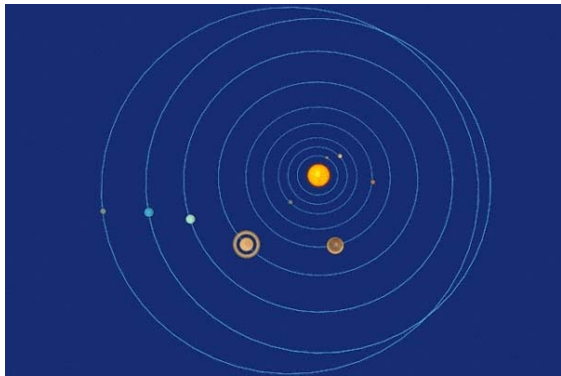
ごくまれに大きな角度で散乱されるものがある.

⇒ 原子の質量の大部分は, ごく小さな領域に集中している.



ラザフォードの原子模型

原子の質量の大部分はごく小さな領域(原子核)に集中している.



* 出典: IPA「教育用画像素材集サイト」
<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

「太陽系」的な模型

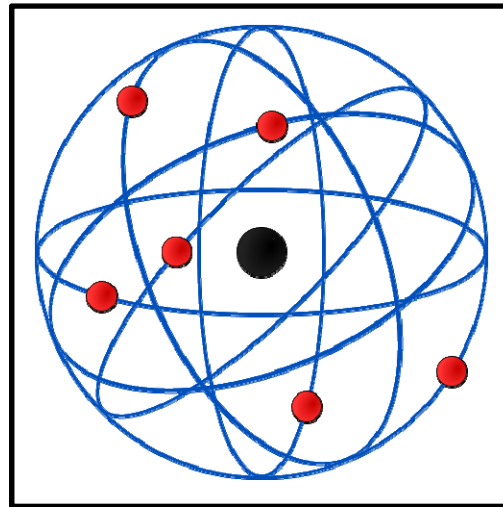
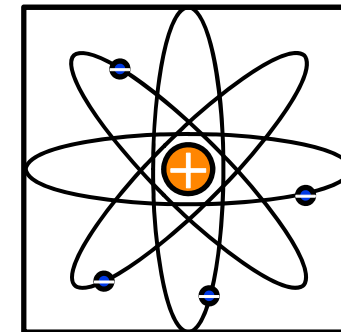


Image by Cburnett, from
Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rutherford_atom.svg



ラザフォード
(1871-1937)



しかし、電磁波の放出によって電子がエネルギーを失って原子核に落ち込んでしまうはず、という問題点は依然として未解決. ⇒ **ボーアの量子論と原子模型**

バルマー系列



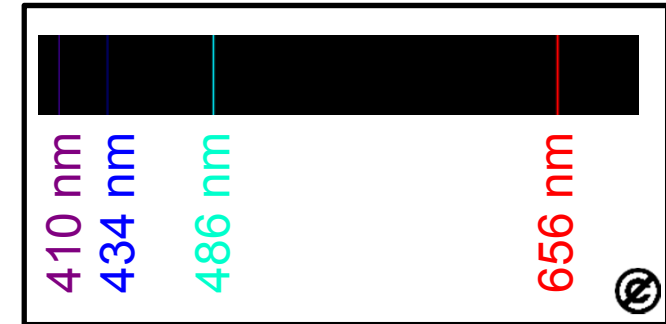
水素原子が発する光のスペクトルの一連の輝線の波長の規則性に着目

一連の波長は次の経験式で表される

$$\lambda = f \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right)$$

$$f = 364.56 \text{ nm}, \quad n = 3, 4, 5, 6$$

多分, さまざまな試行錯誤の結果



ボーアの水素原子模型(前期量子論)による見事な説明

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = \frac{m_e e^4}{8ch^3 \epsilon_0^2} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

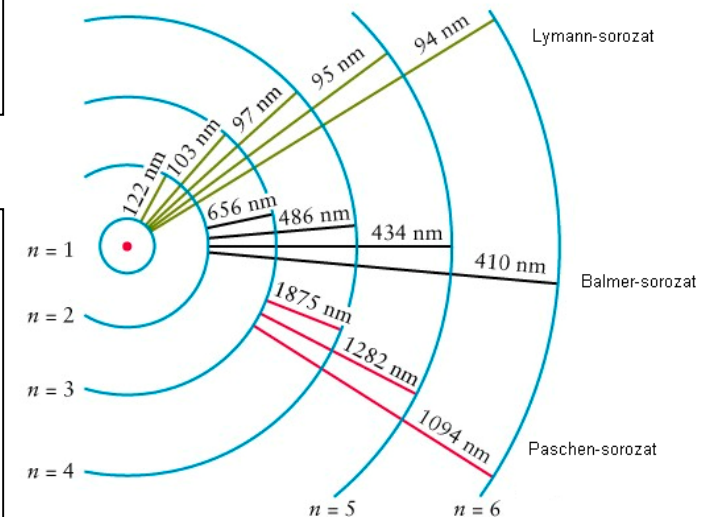


Image by Szdori, from Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_hydrogen_szinkepei.jpg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_hydrogen_szinkepei.jpg

量子力学の構築



ボーア

量子論、原子模型
コペンハーゲン解釈



ハイゼンベルク

Credit: Bundesarchiv, Bild183-
R57262 CC BY-SA 3.0 DE
[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Bundesarchiv_Bild183-
R57262,_Werner_Heisenberg.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_Bild183-R57262,_Werner_Heisenberg.jpg)

行列力学、
不確定性関係



ド・ブロイ

物質波の概念



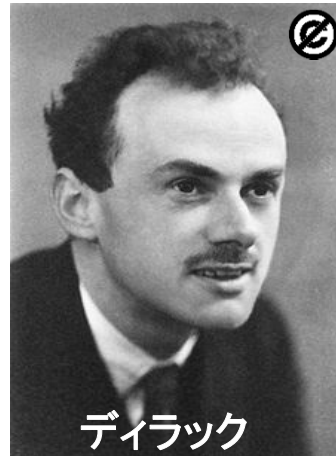
パウリ

スピン、排他律、
ニュートリノ仮説



シュレディンガー

波動力学



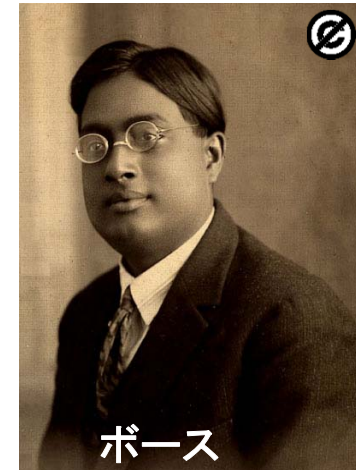
ディラック

相対論的量子力学
反物質



フェルミ

量子統計
フェルミ統計



ボース

ボース統計

ファインマンの言葉

「我々の言語は、日常生活で経験するようなことを言い表すために作られたのだから、原子の内部で起こっていることを表現できなくても驚くにはあたらない。我々は、波動や粒子と言った言語表現と結びついたイメージを頭に描いて理解しようとするが、そのようなアナロジーはいずれも不完全であり、光や電子のいわゆる2重性は言語の限界によるものである。幸い、数学はそういう言語の制約を受けないから、数学的スキームでは原子を的確に記述できる。それが量子力学である」

“I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.”
(R. P. Feynman, *The Character of Physical Law*, BBC, 1965, p.129)

「量子力学を「理解」している人なんて誰もいないと言っていいと思う。」

現代的自然観への道程

自然観の変遷

天上界と地上界はそれぞれ別の原理に従っている？

⇒ ニュートン力学による統一的理解

宇宙の彼方でも、ビッグバン直後でも同じ物理法則

生物は特別（無機物とは別の原理が働いている）？ ~~生氣論~~

有機分子は生物にしか作れない？ ⇒ 尿素の合成

生物は奇跡としか思えないほど巧妙にできている

~~目的論的説明~~ ⇒ ダーウィンの進化論

自己複製機能の分子機構(DNA) ⇒ 分子生物学

知性・意識（自己認識）は物理過程として説明可能か？

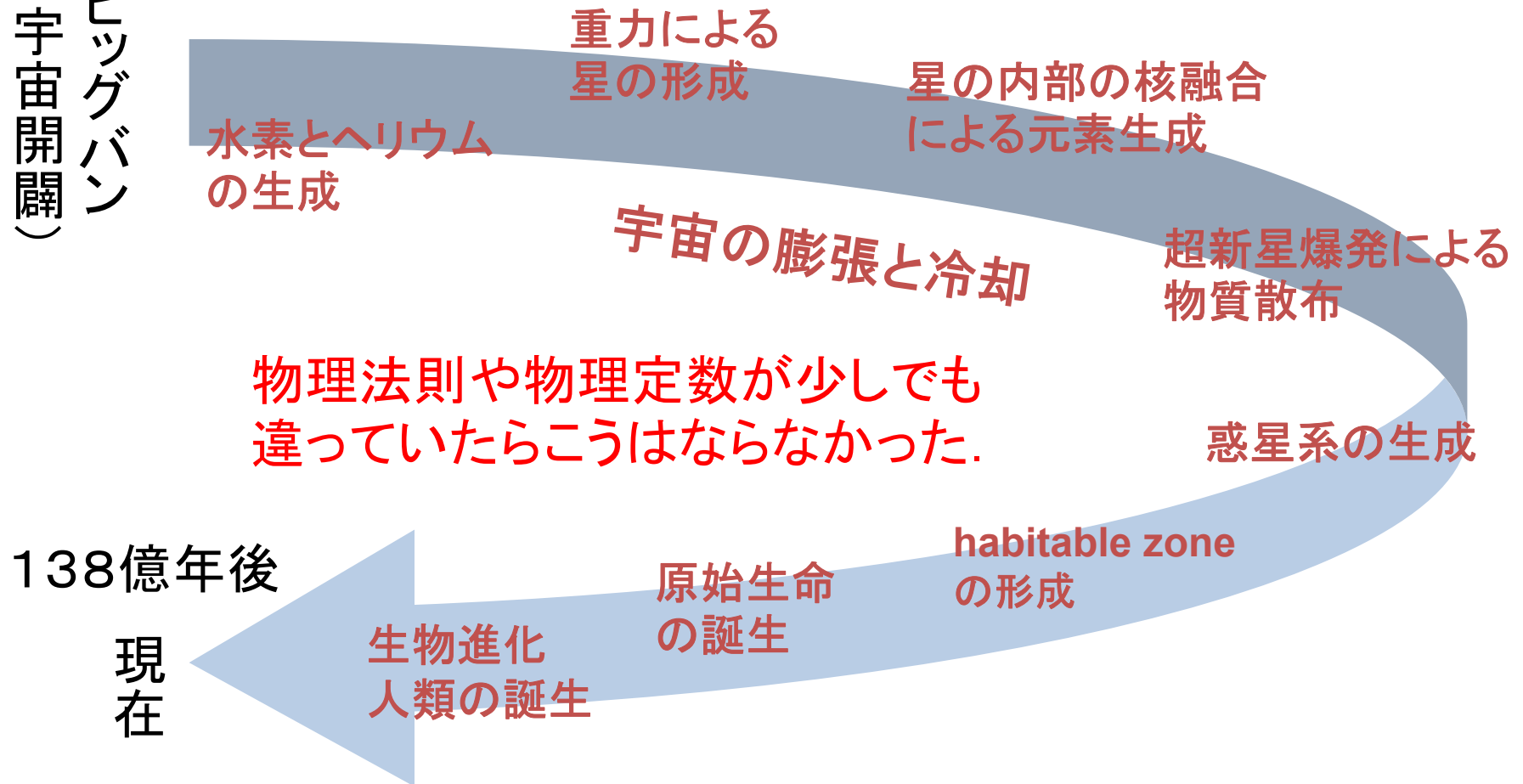
「心(mind)」と「脳(brain)」の関係 「意識」はどこにあるか？

脳科学, 人工知能(AI)研究 ヒトは特別か？

⇒ 統一的自然観 「物理帝国主義」？

宇宙の成り立ちと我々の存在

ビッグバン
(宇宙開闢)



我々が棲むこの宇宙の歴史は、ほとんど奇跡と思えるほど、われわれ人類にとって幸運が重なっている。

我々は特別か平凡か

我々の世界(地球)は特別？ 神の恩寵を受けた宇宙の中心？

コペルニクス革命(太陽中心説)

太陽系の惑星の一つに過ぎない

太陽でさえ、ありふれた恒星の一つ

銀河系(我々の銀河)でさえ、数多ある銀河の一つ

我々(生物・人類)は特別？ 神の恩寵を受けた創造物？

ダーウィン革命(進化論)

進化過程は偶然の産物 × “Intelligent Design”論

人類も生物系統樹の一つの分枝に過ぎない

知性を備えた人類は特別な存在か？

地球外生命は存在するか？

我々の宇宙は特別？ 唯一無二？ それとも・・・

我々が棲むこの宇宙は、奇跡と思えるほど都合良くできている

人間原理？ マルチバース？

⇒ 村山、浅井、永原先生の講義を楽しみに

本日お話したこと

- 学術俯瞰講義のはじめに
- 自然界の階層構造
- 自然哲学の系譜：古代ギリシャから近代西欧へ
- 運動論と力学：アリストテレスからニュートンまで
- 物質観の変遷：「元素」および「原子」概念の形成
- 古典物理学の完成
- 原子物理学と量子力学
- 現代的自然観への道程