

# 物質科学ことはじめ(その1)

## 現代社会と物質科学, 原子・分子・物質の構造



物性研究所  
家 泰弘



# 物質科学ことはじめ

第4回(5月7日)

現代社会と物質科学,  
原子・分子・物質の構造

第5回(5月13日)

物質の個性(物性)はどこから生まれるか

第6回(5月20日)

奇妙な量子の世界

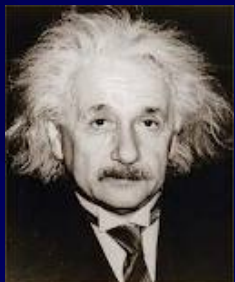
# 今日のおはなし

- 物質科学の位置づけ
  - スケールの話
- 現代社会と物質科学
- 物理学的自然観の形成
- 物質観の変遷
  - 元素と原子の概念形成
- 物質の構造
  - 原子の並び方



# 物質科学の位置づけ

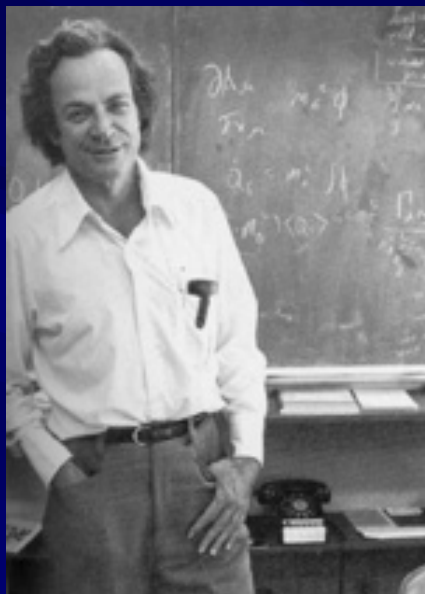
## スケールの話



←この人は誰でも知っている

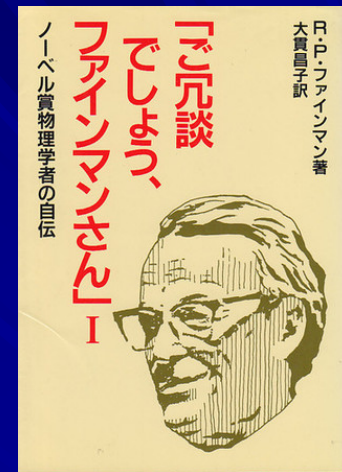
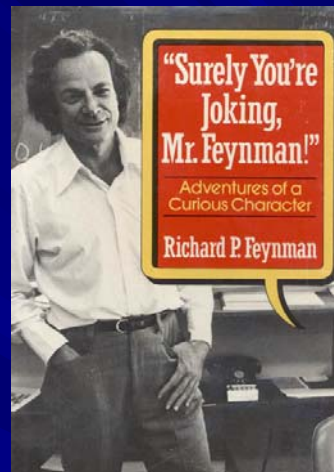
# この人は誰？

痛快な自伝



←ではこの人は？

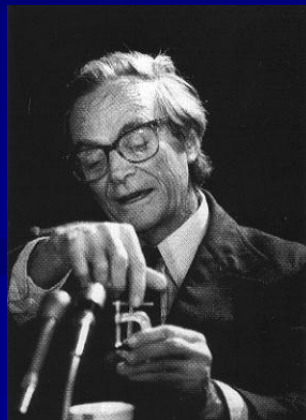
**リチャード・ファインマン**  
量子電磁力学の業績で  
朝永振一郎らとともに  
ノーベル物理学賞受賞



カリフォルニア工科大学での名講義



ボンゴが趣味



チャレンジャー事故の調査委員長



# 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。

# スケールの大きな話と小さな話



観測可能な宇宙

宇宙

UNITY  
大統一  
理論

銀河

星

太陽系

地球

山

人間

原子

原子核

$10^{\pm 30}$

宇宙論

$10^{24}$

$10^{18}$

天文学

$10^{12}$

地質学

$10^6$

1 cm

生物学

化学

$10^{-6}$

核物理学

$10^{-12}$

$10^{-18}$

素粒子論

$10^{-24}$

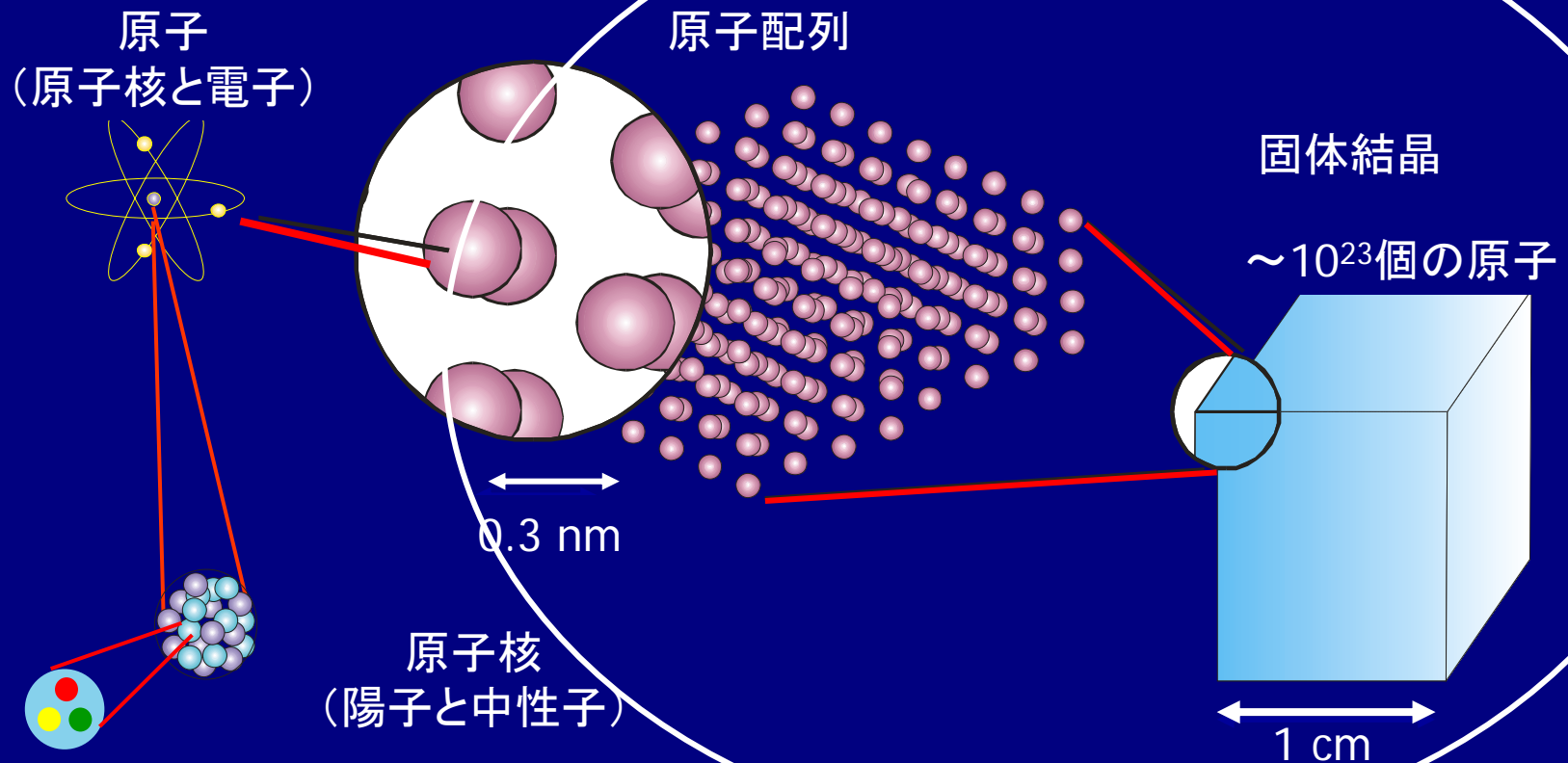
$W^{\pm}$   
 $Z^0$



DNA



# 自然界の階層構造



物性科学はこの領域を扱う

# 物理学的精神

- **物理学的精神**：——「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** 根源的問い

- 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
- しかし博物学ではなく, 基本原理からの理解, 物質に関する統一的・普遍的知識を追い求める

## 「物質観」の構築

# 物理学的世界像

## 還元主義 (reductionism)

ある階層の系のふるまいを、より基本的な階層の法則に還元して理解する。

究極の構成要素と力は何か ⇒ 素粒子物理学  
しかし、究極の構成要素と力がわかればすべてがわかるかという  
と決してそうではない

自然界の各階層にはそれぞれの物理がある

## 創発現象 (emergent phenomenon)

相互作用する「要素」がたくさん集まった系が、「要素」自体の性質からは予測できないような「複雑なふるまい」を示すこと

多体系のふるまい：相転移

例：超伝導，生命現象

More is different. (P.W.Anderson)

# 現代社会と物質科学

# 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持ち、  
政府機関で活躍するとともに、評論・小説執筆活動

## “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。

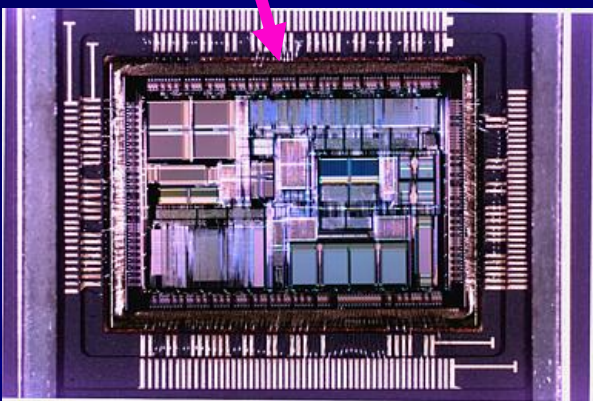
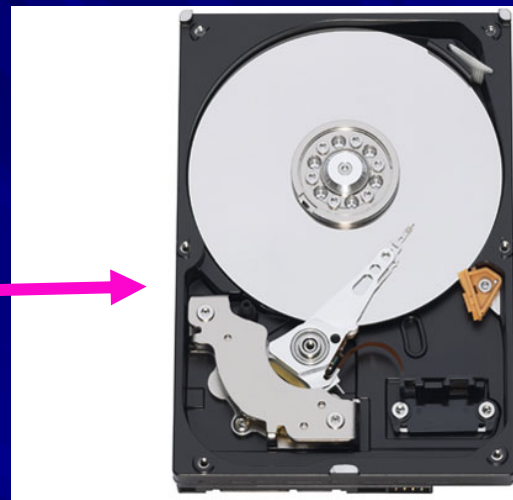
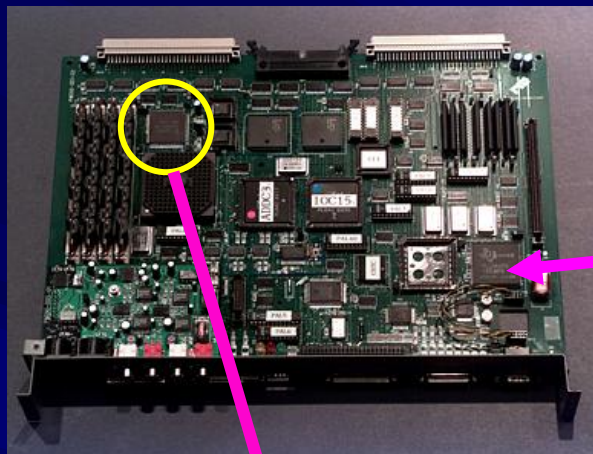
「**あなたはシェイクスピアを読んだことがありますか**」というのに  
等しい科学上の質問をしたわけなのだが……



# 物理を学ぶ効用

- 科学を専門としない人が物理を学ぶ効用は何かといえ、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は怪しいと直観（直感ではなく）できる常識である。健全な懐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。

# 現代社会と物質科学



コンピューター

ハードディスク(磁気メモリー)

CPU(中央演算装置)

磁性体の磁区構造

量子力学にもとづく  
物性物理学

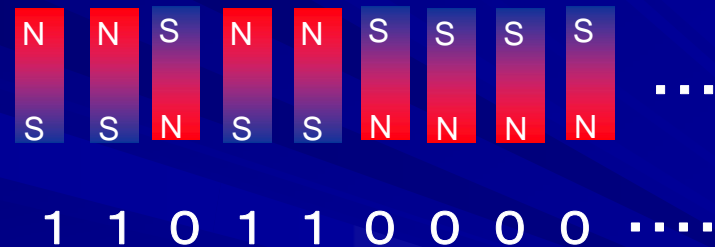
半導体の中の電子のふるまい

# 記憶装置(磁性体)

## 磁気ハードディスク



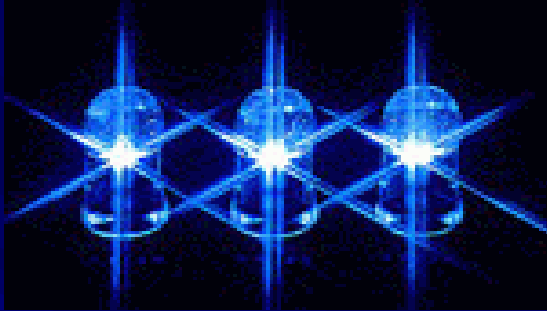
デジタル情報を磁性体の  
磁化の向きとして記録





# 光(レーザー)

CD-ROM/DVD



発光ダイオード  
半導体レーザー

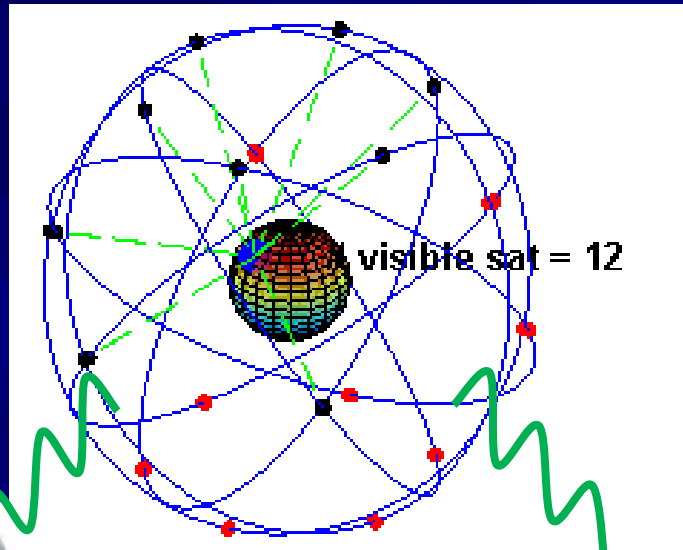
ディスクの記録面につけた凹凸  
によるレーザーの反射の違い



# 衛星通信, GPS(Global Positioning System)

衛星通信が発達したのは, GHz帯の高周波を扱える高電子移動度トランジスタ(HEMT)の役割が大きい.

24台の人工衛星を配置. 4台以上の衛星からの信号をもとに, 3次元測位法により位置を割り出す.



正確な計時が重要. 衛星には原子時計が搭載されている. GPSが機能するためには特殊相対論および一般相対論の補正が必須



# 【余談】 超光速ニュートリノ騒動

スイス・ジュネーブのCERNの加速器から発せられたニュートリノをイタリアのグランサツソで検出する実験で、**ニュートリノの到着時間が光速よりも早い**という実験結果が出た。

2011年9月に実験チームがこの結果を発表し、マスコミは「**アインシュタインの相対性理論を覆す大発見**」とセンセーショナルに採り上げた

ほとんどの物理学者は冷ややかに見ていた。なぜなら、物理学の体系は全体として連関しているので、もしも発表された結果が事実なら、必ず他にも影響が見出される(ていた)はずだから。

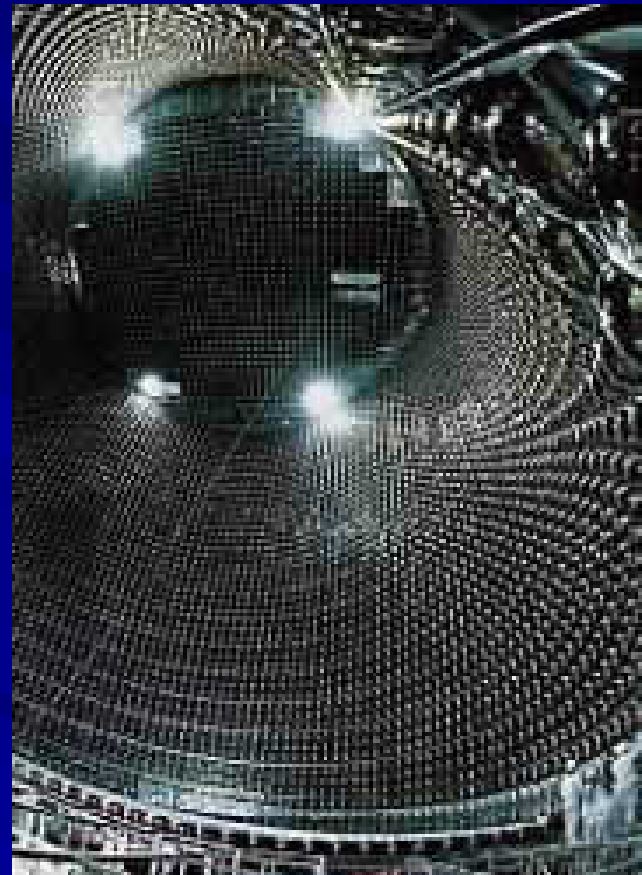
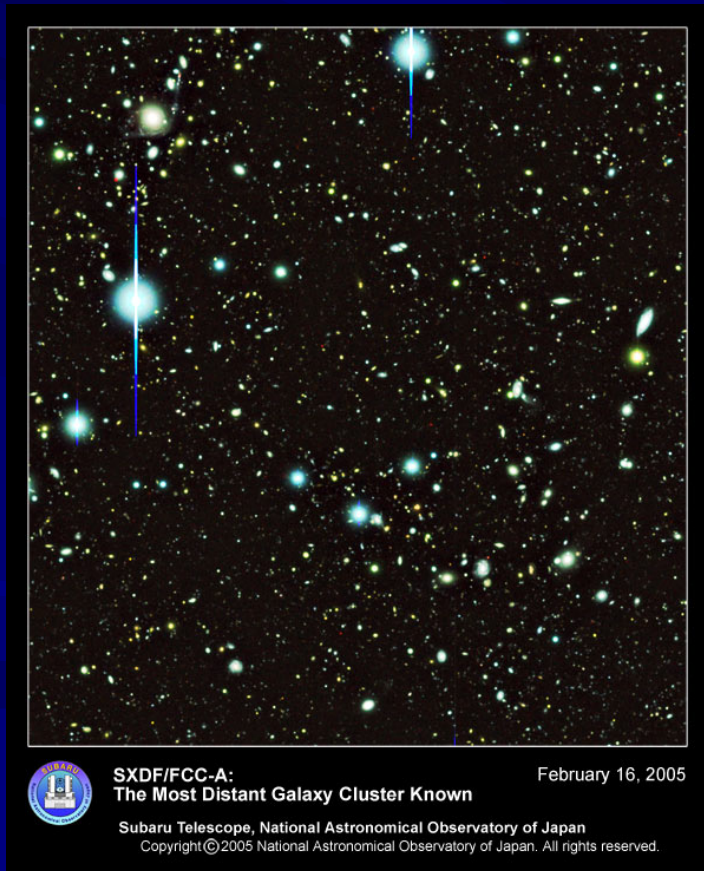
**科学はその各部分が互いに連関した知識体系をなしている**ので、一部分だけを抜き出して勝手に変えるというわけにはいかない。

Extraordinary claims require extraordinary evidence.

# 素粒子・宇宙研究にも

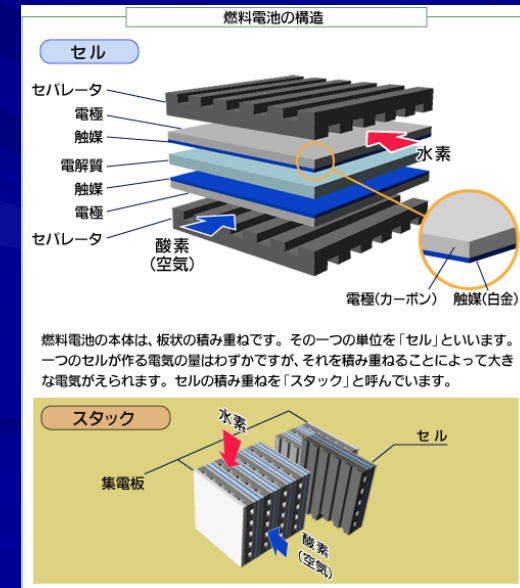
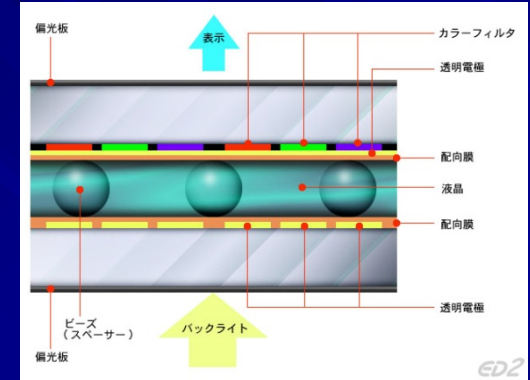
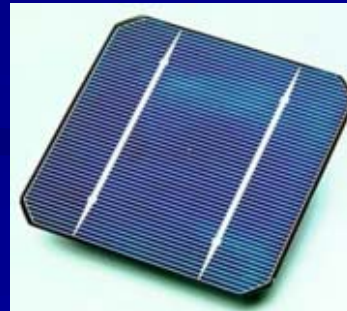
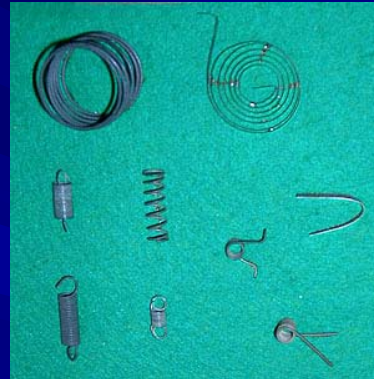
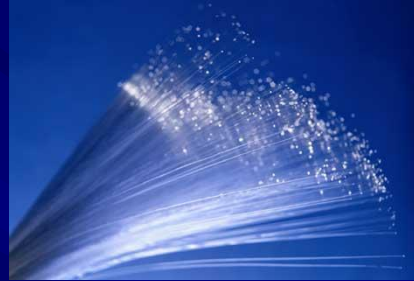
すばる望遠鏡  
CCDカメラ

スーパーカミオカンデ  
光電子増倍管



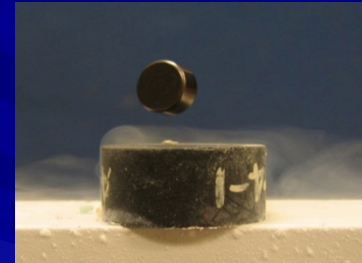
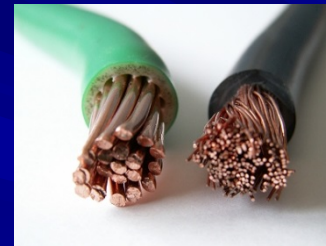
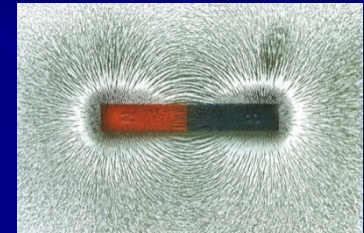
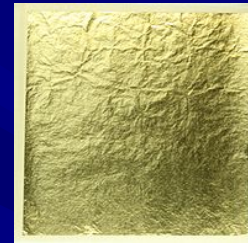
# 身近なところにも

- 液晶（ディスプレイ）
- 光ファイバー
- 高強度繊維
- 高分子ゲル
- 形状記憶合金
- 燃料電池
- 光触媒
- 太陽光発電
- . . . . .



# 物性科学とは何をする学問か？

- ダイヤモンドはなぜ硬い？
- ルビーはなぜ赤い？
- 金はなぜ柔らかい？
- 鉄はなぜ磁石になる？
- 銅はなぜ電気を良く通す？
- 超伝導はどうして起こる？
- . . . . .



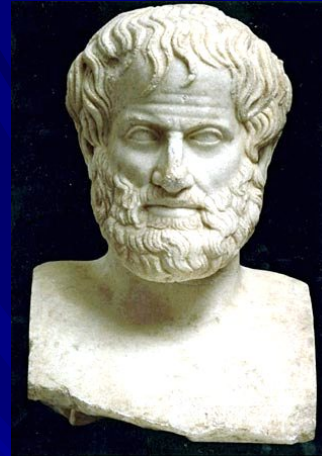
物質の性質を、その物質を構成する原子の性質から理解する。  
そしてそれらの知識をもとに、新たな性質を持つ物質を開発する。

# 物理学的自然観の 形成

# 古代ギリシャの自然哲学

天界(星界)と地上界(月下界)は、統べる原理が異なる

地上界の物質は「空気(風)」「火」「水」「地(土)」の四大元素からなり、それらが「愛(引力)」と「憎(斥力)」によって離合集散する。(エンペドクレス)



アリストテレス

天界は第五元素(エーテル, クインテッセンス)で構成され、完全図形である円を描く。

四大元素にはそれぞれの「本来の場所」を希求する。  
「気」や「火」は上へ昇り, 「水」「土」は下へ

## アリストテレスの物体運動論

「自然的運動」 物体本来の場所へ(上下方向の運動)

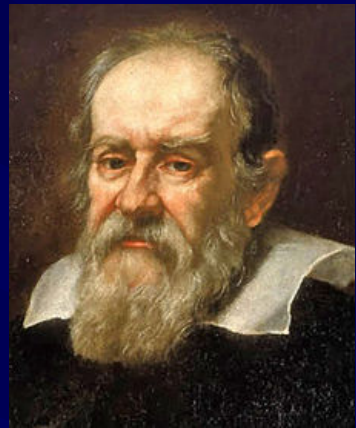
(重いものは軽いものよりも速く落ちる) ← 日常経験からは自然な考え

「強制的運動」 運動する物体には常に力が働いている

(力が働かなければ静止する) ← 日常経験からは自然な考え

## 目的論的自然観





# ガリレオ・ガリレイ

(1564-1642)

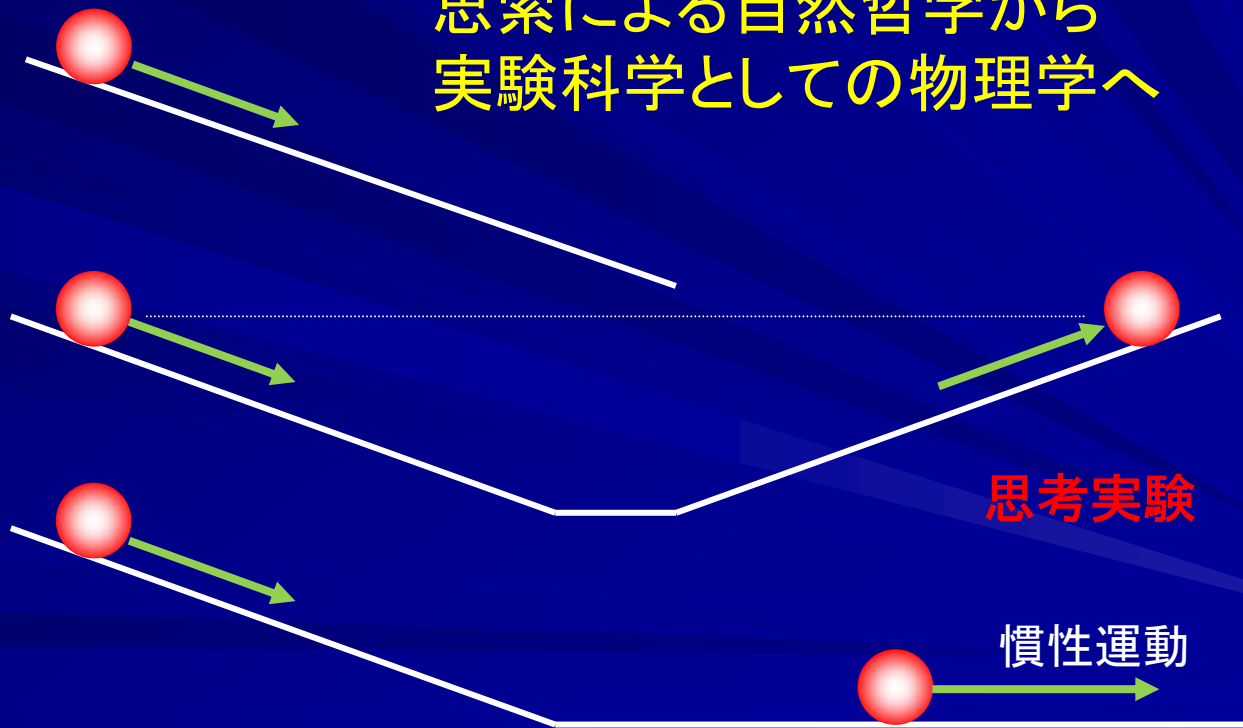
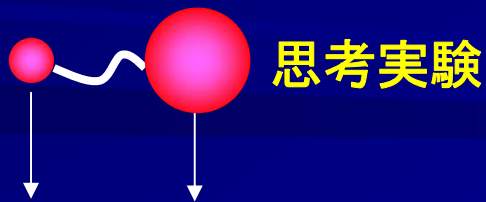
落体の法則

斜面を使った実験

⇒運動学・力学の基礎

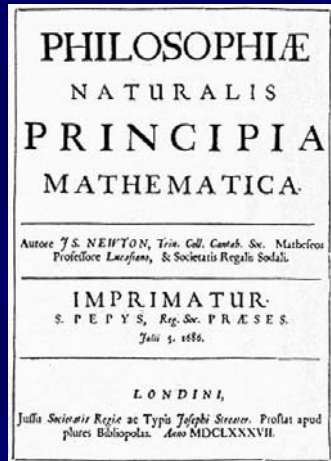


思索による自然哲学から  
実験科学としての物理学へ



物体は、力が加えられなければ等速直線運動を行う<sub>25</sub>

# アイザック・ニュートン(1642-1727)



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)

力 = 質量 × 加速度

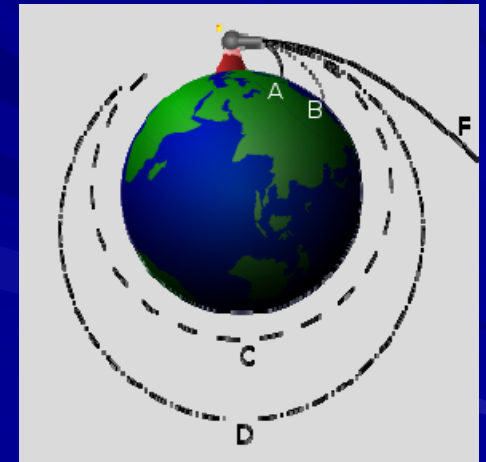
$$F = ma$$

作用反作用の法則

万有引力の法則

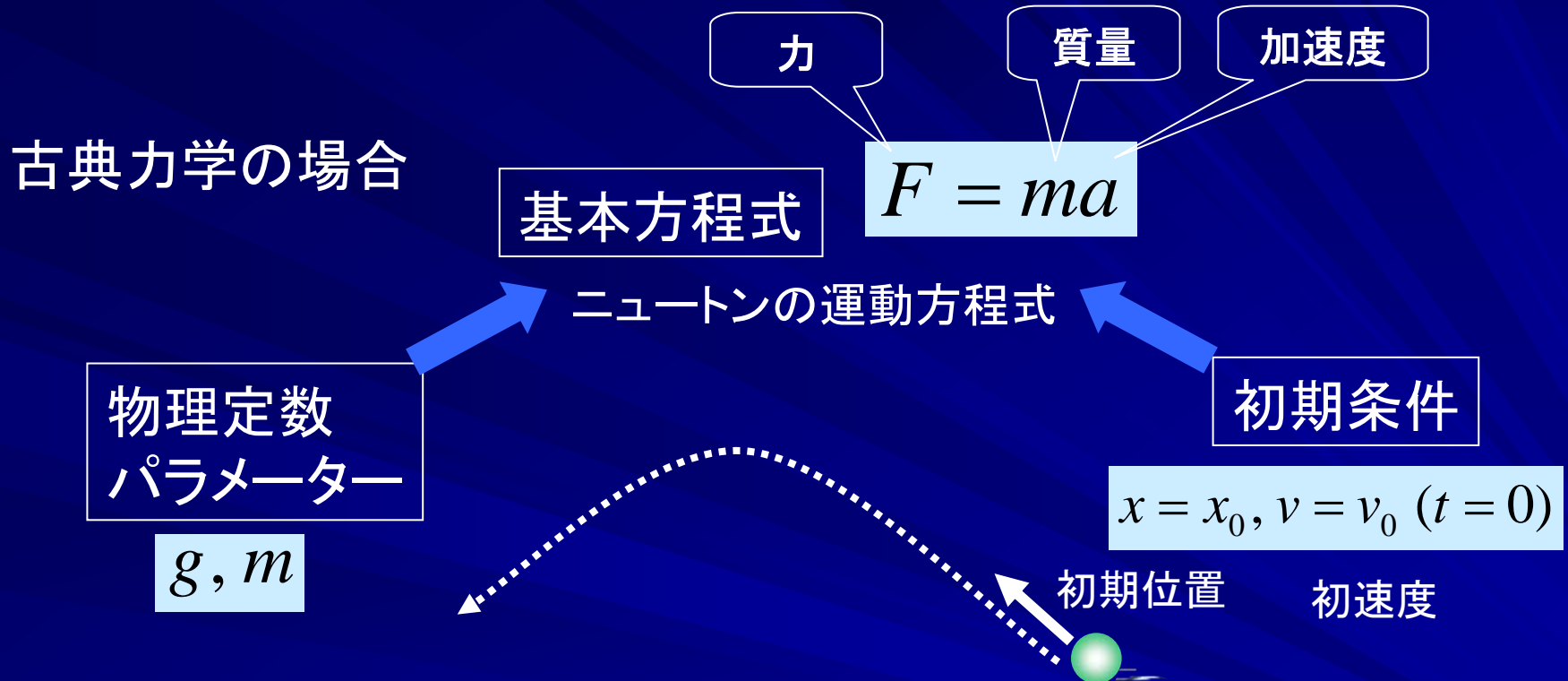
あらゆる物体間には質量に比例し、距離の2乗に反比例する引力が働く

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



ニュートンが偉かったのは、  
「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(力学)体系の基本構造



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完全に決まる

⇒ 古典力学的決定論

# 機械論的自然観

## 古典力学的自然観

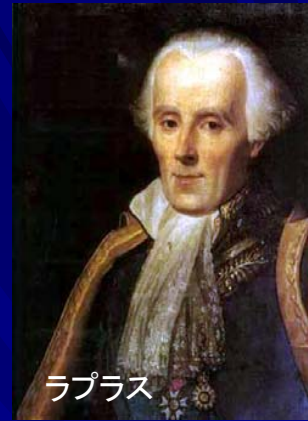
もしも、ある瞬間における全ての物質の力学的状態と力を知ることができ、かつ、それらのデータを解析できるだけの能力の知性が存在するとすれば、この知性にとっては不確実なことは何もなく、その目には未来も(過去同様に)全て見えているであろう。

## ラプラスの魔

「天体力学概論」を皇帝ナポレオンに献呈：

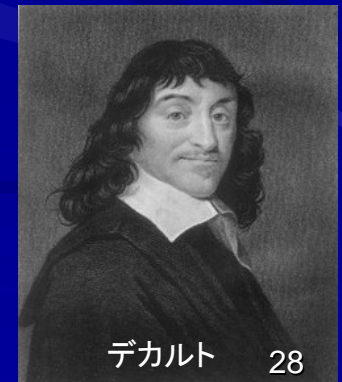
ナポレオン 「お前の著書には世界のすべてが書かれているという評判だそうだが、神のことは一体どこに出てくるのだ。」

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



# 水車から蒸気機関へ(産業革命)

## 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



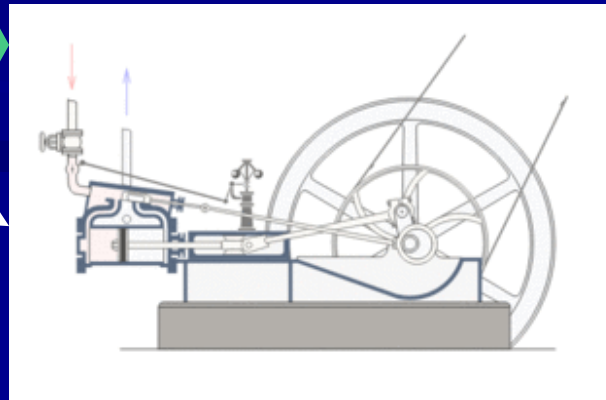
高温部 (heat source)

## 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。

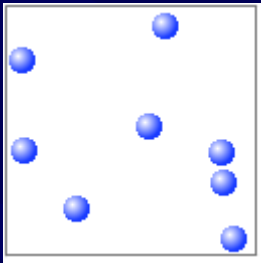


低温部 (heat sink)



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。

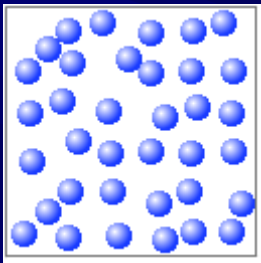
# 温度とは何か？



気体状態  
(高温)

物質を構成する原子(分子)は熱運動をしている。

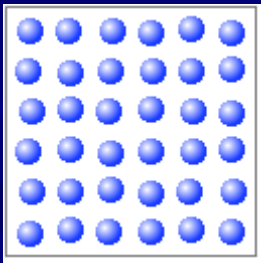
温度とは、熱運動の平均エネルギーにほかならない。



液体状態

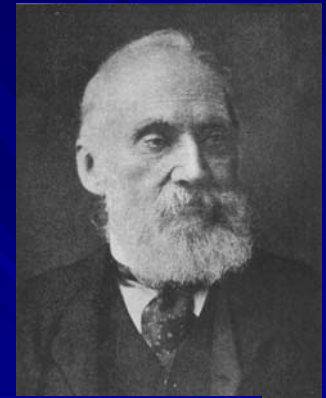
原子が静止した基底状態(エネルギー最低の状態): 絶対零度

$$\text{絶対温度 (Kelvin)} \\ T [\text{K}] = t [^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

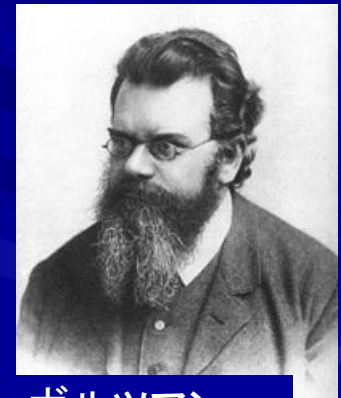


固体状態  
(低温)

$$\text{熱エネルギー} = k_B T \\ (k_B = 1.38 \times 10^{-16} \text{J/K}) \\ \text{ボルツマン定数}$$



ケルビン卿  
(1824-1907)



ボルツマン  
(1844-1906)

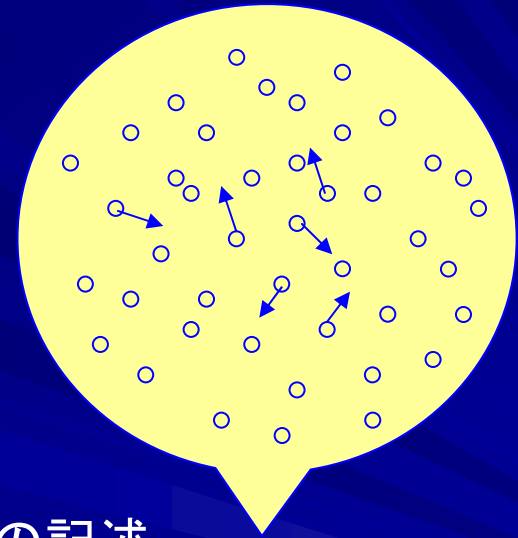
(正確に言うと)絶対零度でも量子力学的な零点振動がある

# 熱力学と統計力学

多数のミクロな自由度からなるマクロ系の状態を少数の変数(体積, 圧力, 温度など)で表す

風船に入った  
気体

ミクロに見ると



マクロな状態の記述:  
体積・圧力・温度

ミクロな状態の記述

- ・アヴォガドロ数 ( $N \sim 10^{23}$ 個) の分子の運動状態

- ・各々の分子の位置と速度(運動量)

$6N$  の自由度

→ これを扱うのが統計力学

# 19世紀末の物理学

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世紀末には物理学体系が完成の域に達した(かに見えた)

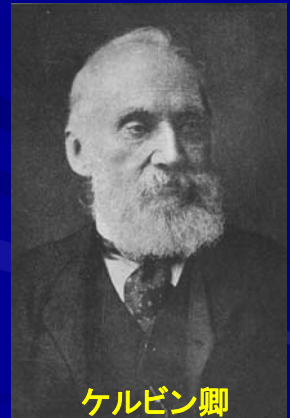
ケルビン卿(1900) 「物理学にかかる2つの暗雲」

(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

(1)⇒(特殊)相対性理論, (2)⇒量子論, につながる

20世紀の現代物理学へ



ケルビン卿



# 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

⇒ 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」？

# 我々は特別か平凡か

## Principle of Mediocrity

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(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)

生物系統樹の一つの分枝に過ぎない

進化過程は偶然の産物

地球外生命は存在するか？

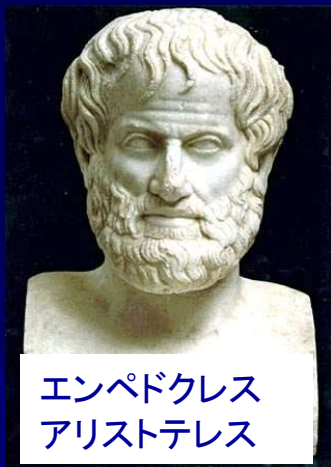
我々の宇宙は特別？ 唯一無二？ それとも…

人間原理, × “Intelligent Design”論

# 物質観の変遷

## 元素と原子の概念形成

# 錬金術の系譜



エンペドクレス  
アリストテレス



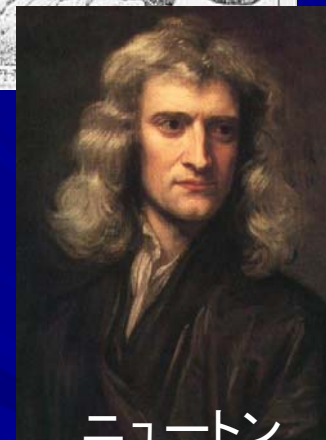
アルベルトウス  
・マグヌス



ロジャー・ベーコン



パラケルスス



ニュートン

四元素説

錬金術

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



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)



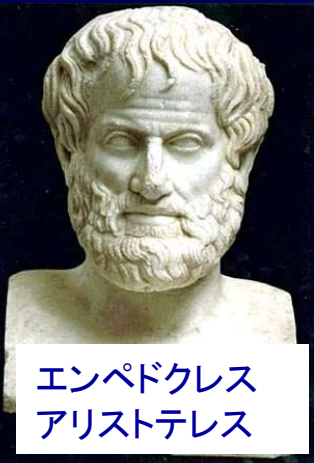
ジャービル・イブン・  
ハイヤーン(ゲベルス)

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

# 錬金術から近代化学へ

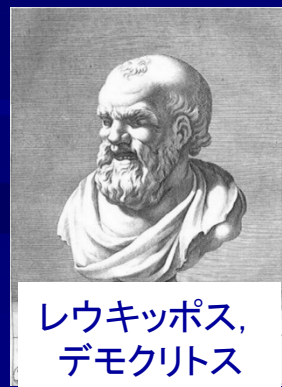
## 元素と原子の概念 形成



エンペドクレス  
アリストテレス

四元素説

原子説



レウキッポス,  
デモクリトス

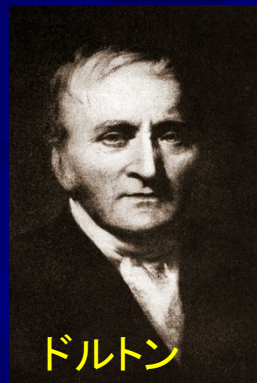


ボイル

元素の概念  
単体と化合物



ラヴォアジエ



ドルトン

化学的原子論

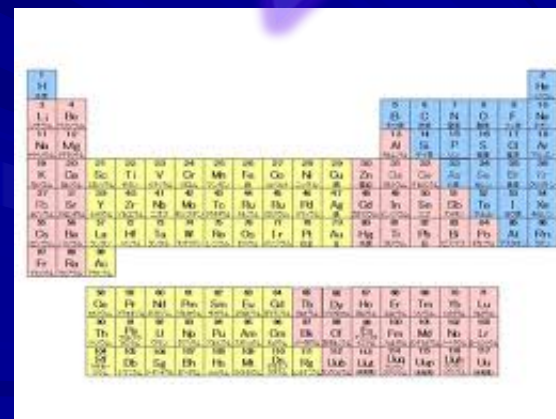


アヴォガドロ

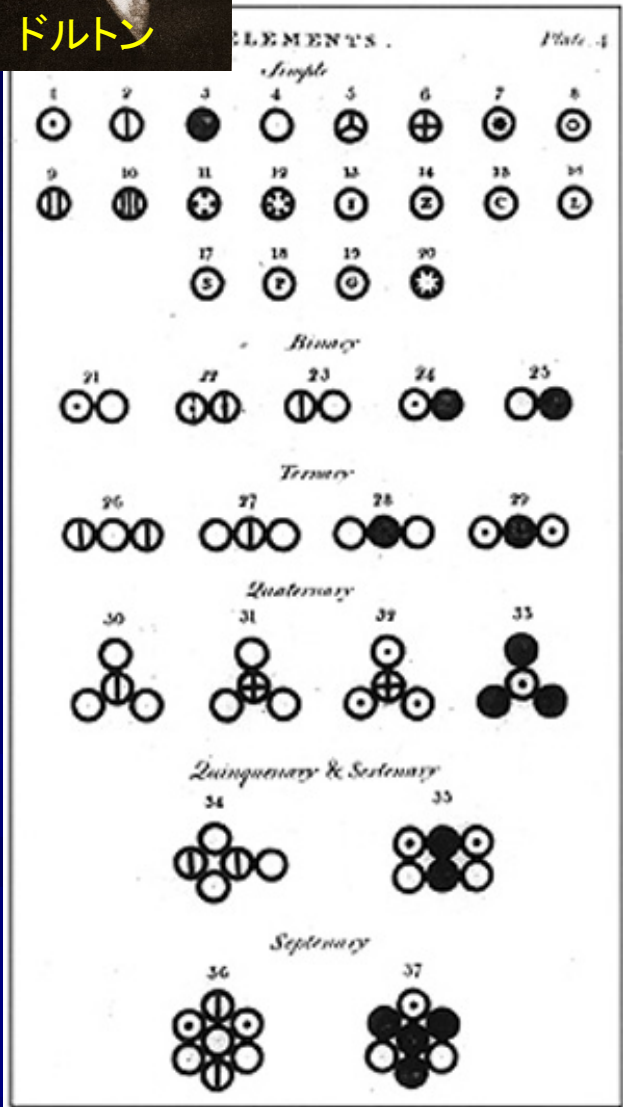
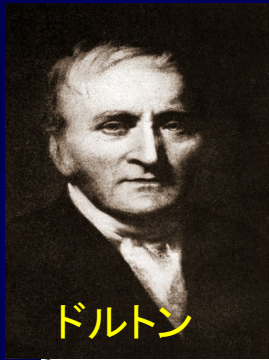


メンデレーフ

元素周期律



# 化学的原子論



## 倍数比例の法則

例: メタン  $\text{CH}_4$  とエチレン  $\text{C}_2\text{H}_4$  とで  
一定量の炭素と結びつく水素の量が1:2

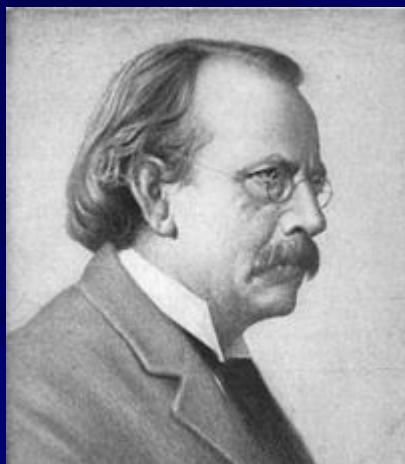
一連の窒素酸化物で、一定量の窒素と結  
びつく酸素の量

$\text{N}_2\text{O}$	7:4	1
$\text{NO}$	7:8	2
$\text{N}_2\text{O}_3$	7:12	3
$\text{NO}_2$	7:16	4
$\text{N}_2\text{O}_5$	7:20	5

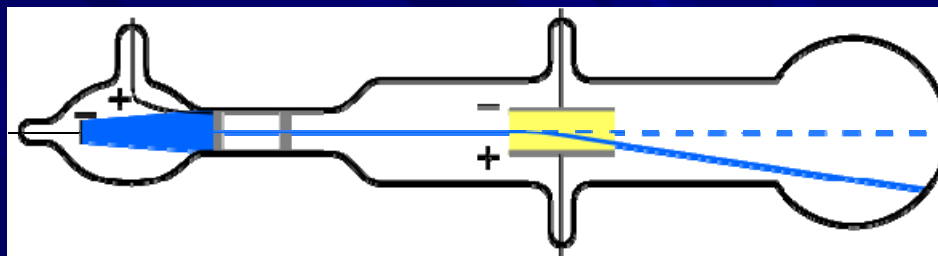
元素にはどうやら最少単位があるらしい

## 原子と原子量 の概念

# 電子の発見



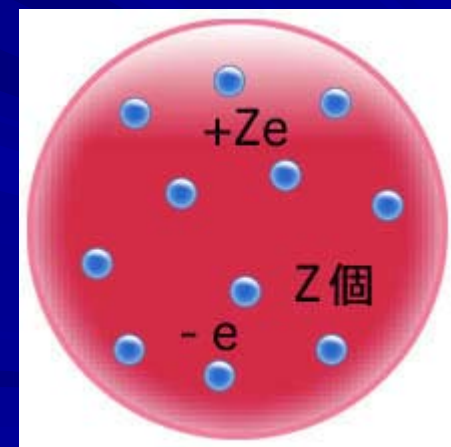
J. J. トムソン



「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。

⇒ 「電子」の発見

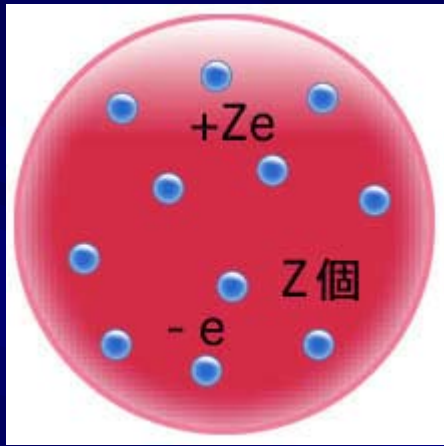
原子は「分割できない粒子」ではなく、  
その中に負電荷をもつ「電子」を含む。  
(ということは正電荷の成分もある)



プラムプディング  
(ぶどうパン)モデル

# 土星型原子模型

J. J. トムソン



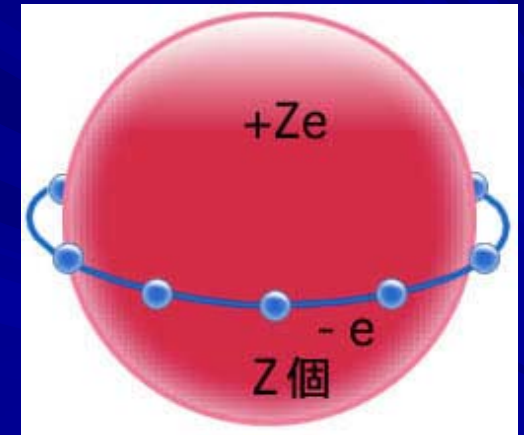
ペラン(Jean Perrin)

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



プラムプディング  
(ぶどうパン)モデル



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



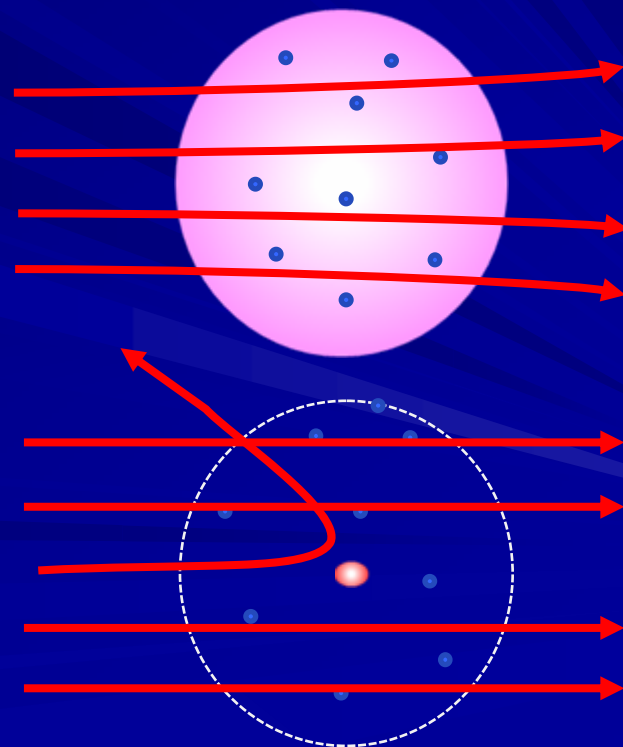
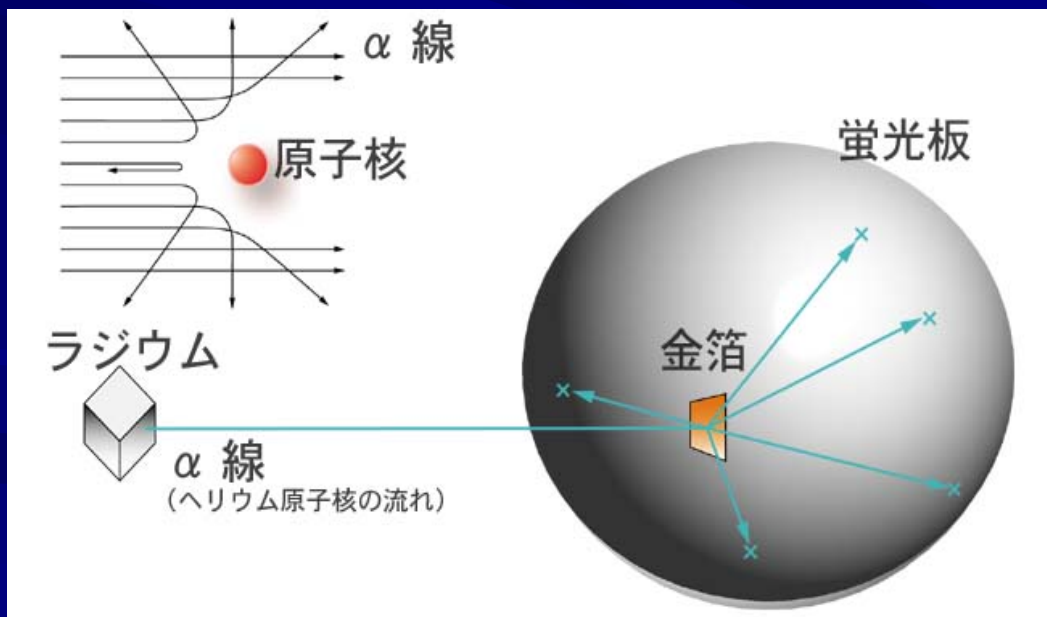
アルファ線(ヘリウム原子核の粒子線)を金箔に照射

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」

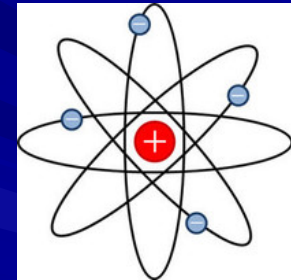
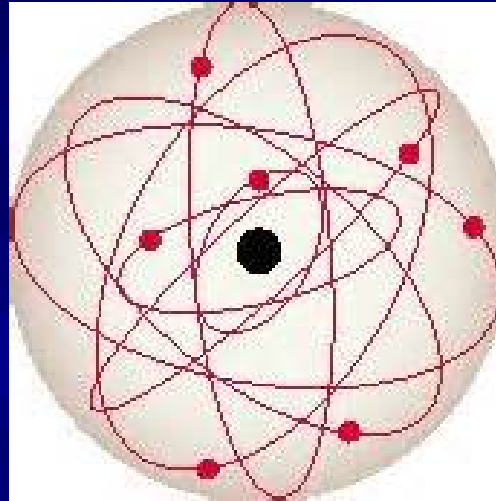
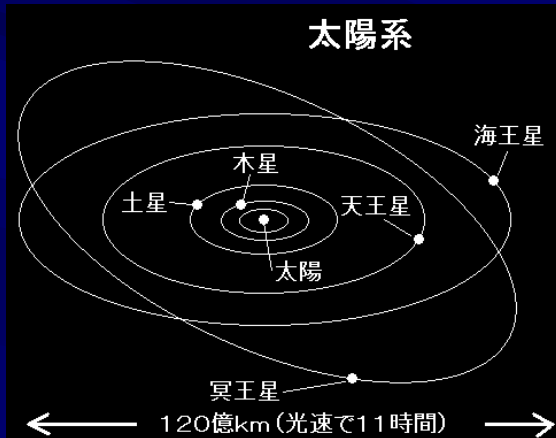
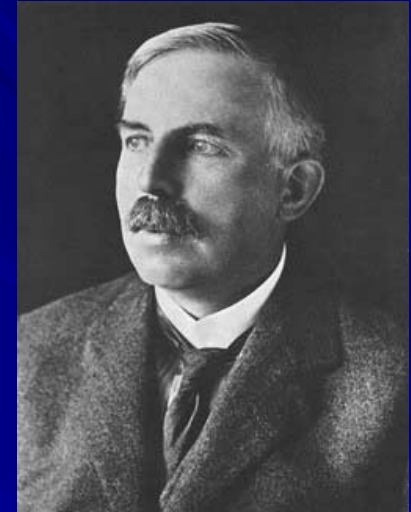
ごくまれに大きな角度で散乱されるものがある。

⇒ 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。



「太陽系」的な模型

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

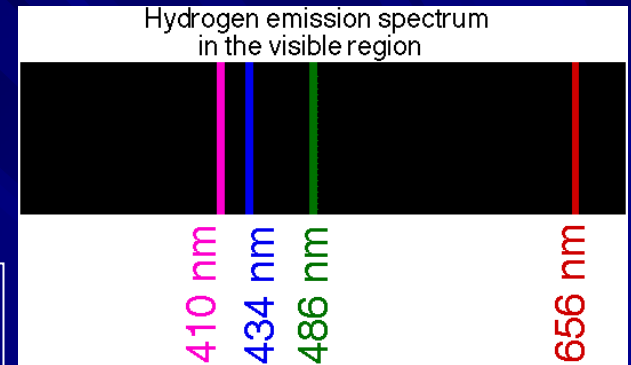
水素原子が発する光のスペクトルの一連の輝線の波長の規則性に着目

一連の波長は次の経験式で表される

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

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

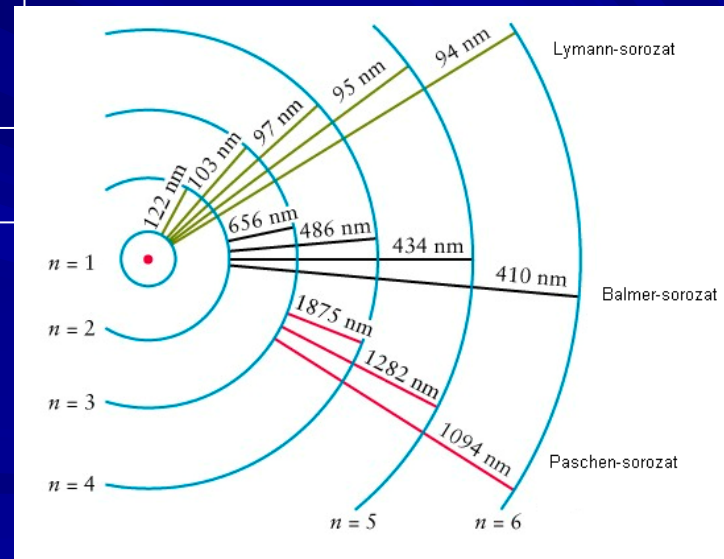
多分、さまざまな試行錯誤の結果



ボーアの水素原子模型(前期量子論)による見事な説明

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

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



# 第4回： 現代社会と物質科学， 原子・分子・物質の構造

- 物質科学の位置づけ
  - － スケールの話
- 現代社会と物質科学
- 物理学的自然観の形成
- 物質観の変遷
  - － 元素と原子の概念形成
- 物質の構造 ⇒ 次回に
  - － 原子の並び方

