

## 現代の物質観その3

### Modern view on the constituents of matter III.

Fujiwara Yoshikazu

2020年3月14日

#### 1 光の速度-現代物理学における特別の役割

距離と時間が定義されると、速度はそれらの比として定義される。

速度 = 距離 ÷ 時間

例えば、新幹線のおよその速度は

$$280 \text{ km/h} = 2.8 \times 10^5 \text{ m} / 3.6 \times 10^3 \text{ s} = 78 \text{ m/s}$$

である。また国際線の飛行機は、高度約 10 km の上空をおよそ 800 - 900 km/h の速さで飛行している。(厳密には速さとは速度の大きさであるが、ここではほぼ同じ意味に用いることにする。) 地球の半径は約  $R = 6,400 \text{ km}$  であるので、飛行機はほとんど地上すれすれのところを飛んでいると言う事がわかる。地球は自転しているので、地球の表面は  $2 \times \pi \times R / 1 \text{ 日} = 2 \times \pi \times 6,400 \text{ km} / 24 \text{ h} = 1,600 \text{ km/h} = 440 \text{ m/s}$  . すなわち、時速 1,600 キロメートル、秒速 440 m というものすごいスピードで回転している。それにもかかわらず飛行機が目的地に着くのは、勿論、地表面の大气も同時に回っているからである。航空機の速度は秒速 270 メートル程度であるが、これは音の速さ (音速) 340 m/s のほぼ 80% である。空気中を伝わる音の速度は、空気の温度にも依存するが上の 340 メートル毎秒は温度が  $15^\circ \text{ C}$  の時の速さである。旅客機が音速を超える超音速のスピードで飛ばないのは、衝撃波 (ショックウェーブ) の発生を避けるためである。

上の式は、距離を  $x$ 、時間を  $t$  と書くと  $x = ct$  と表されるので光の速度  $c$  x 時間で大きな距離を表すことができる。それを 光・時間 と呼ぶ。例えば、太陽までの距離、約 1.5 億 km は通常 1 天文距離といわれるが、それはおよそ 8 光分である。1 番近い太陽系の惑星である冥王星までは、太陽から 43.5 億 km であり、地球から太陽までの距離のおよ

そ 30 倍である。したがってその距離はおよそ  $30 \times 8 \text{ 分} = 240 \text{ 分} = 4 \text{ 時間}$ 、すなわち 4 光時間である。太陽系に 1 番近い恒星は、 $\alpha$  ケンタウロスであり、およそ 4 光年離れているということである。我々の銀河系の大きさは約 10 万光年である。地球に最も近い星雲であるアンドロメダ星雲は 254 万光年離れている。1 年はおよそ  $365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 3 \times 10^7 \text{ s}$  だから、1 光年は、約  $3 \times 10^7 \times 3 \times 10^8 \text{ m} = 10^{16} \text{ m} = 10 \text{ 兆 km}$  である。ハッブルの膨張する宇宙と  $3^\circ \text{ K}$  宇宙背景放射に基づく宇宙の年齢 138 億年から、我々が現在見ている光は 138 億光年遠方で発せられた光である。しかし、この 138 億年の間にも宇宙は膨張しているわけであるから、実際にはその約 3 倍の 450 億光年が、我々が観測可能な宇宙であると考えられている。我々の地球がほぼ宇宙の中心近くにあると考ええると、宇宙の大きさはその 2 倍の  $10^3$  億光年、つまり  $10^3 \times 10^8 \times 10^{16} \text{ m} = 10^{27} \text{ m} = 10^{24} \text{ km}$  が、我々の観測出来る最大の大きさであると考えられる。

近代物理学の発展の歴史の中で光の速度は特に重要な役割を果たしている。我々の日常生活では、光の速度に匹敵する速度は、たどり着くことができない。したがって我々の世界では時間の速度は無有限大であると考えた極限の力学が成り立っていると考えられる。17 世紀にニュートンによって確立されたニュートン力学は時間を絶対時間として扱っており、これは光の速度が無有限大である極限の場合である。アインシュタインの相対論的力学に対して、ニュートン力学を古典力学と呼ぶ。光の速度と並んで、もう一つ重要な物理定数として、プランク定数  $h$  (あるいは、 $\hbar = h/2\pi$ ) がある。近代物理学の発展の中で微視の世界が明らかになるにつれ、原子分子及びそれ以下の微視の世界では、波と粒子との区別はお互いに明確ではなく、双方の側面を併せ持つことがわかってきた。この微視の世界の物理法則を量子力学といい、巨視の世界の物理法則と明確に区別される。プランク定数は非常に小さな数であるが、それが 0 の極限では巨視の世界が実現されると考えられる。光の速度よりはるかに小さい速度を扱う量子力学は、非相対論的量子力学と呼ばれ、一方高速で飛び交う微視の粒子の運動を扱うには、相対論的量子力学を使わなければならない。相対論的量子力学は、量子場の理論とも言われ、我々が現在持っている最も一般的な理論である。

表 1 力学法則の適用範囲

	速度 $\ll c$ (光速)	速度 $\simeq c$
巨視的世界	古典力学 (ニュートン力学)	相対性理論
微視の世界	量子力学	相対論的量子論 (量子場の理論)

## 単位系について

ここで、物理で扱う単位系についておおまかな枠組みを示しておこう。時間と距離の単位については既に示したが、力学を扱う単位としてはもう一つ質量と言う単位がある。質量とは何かと言う問題は、難しい問題で、いまだに最終的な解決は得られていない。しかしながら質量とそれ以上の単位には、物理法則が密接に関係していて、その物理法則に即した単位を設定することが重要である。例えば、ニュートン力学では質量の単位はニュートンの第二法則  $F = ma$  に基づいて決められる。ここに  $m$  は質量、 $a$  は加速度である。加速度は、速度÷時間として定義される。力  $F$  の単位が決まれば、質量  $m$  の単位も決まる。ニュートン力学では、重力は力であって、質量とは明確に区別する。すなわち重力を  $w$  とすると、 $w = mg$  であり、 $g$  は重力加速度と呼ばれる。質量の単位は、MKS 単位系では Kg (キログラム) であり、cgs 単位系では g (グラム) である。そこで力の単位は MKS 単位系では  $1 \text{ N (ニュートン)} = 1 \text{ Kg m/s}^2$   
cgs 単位系では  $1 \text{ dyne (ダイン)} = 1 \text{ g cm/s}^2$   
である。これらを力学単位系と言う。その他の力学量や熱力学量は、すべてこれらの単位系で表される。それ故これらを基本単位系と言ひ、そこから導かれる単位を誘導単位と言う。基本単位系には、力学以外に電磁気学で現れる単位があるが、それについては後ほど述べることにする。

## 2 物理学概念の発展の歴史

最後に、簡単な物理学の発展の歴史を示す年表を下に示して、これから数回にわたる物理学の発展の歴史のイントロダクションとしたい。断っておくが、ここで紹介する近代物理学の発展は、その多くがヘレニズム・キリスト教文化圏において発展したために、多分にヨーロッパ文明の発展が中心となっている。しかしながら、すでに 1 回、2 回目の講義で見たように、アラブ・イスラム世界や中国・インド文化圏に起源をを持つものも決して少なくはない。またこれらの影響を受けた、我が国での科学の発展も無視できない。しかし、それらが次の世代に受け継がれて、さらなる発展につながるという歴史的経過は辿らなかった。これからの教訓として覚えておきたい点である。

## 年表

B.C. と A.D.

ヘレニズム文化とキリスト教文化が現代の科学技術の根底に流れる 2 つの思想の流れである。

エジプト

ギリシア

中世 アリストテレスの考え方が支配的

ルネッサンス ガリレオ・ガリレイ コペルニクス ニュートン ライプニッツ (微分積分) ファラデー (電磁気学)

宗教革命

産業革命 イギリス フランス ドイツ …

市民革命 イギリス フランス 百科全書派 デイドロ ダランベール ラボアジエ  
アボガドロ フーリエ ラグランジュ ガウス

微視の世界の法則 元素 原子 分子 メンデレーエフ

現代の歴史 第1次、第2次世界大戦 冷戦時代 共産主義の崩壊

原子核・素粒子 → 現代の物質観

1900年代 原子の構造を明らかにするための量子力学 シュレーディンガー ニールス  
ボーア ハイゼンベルグ アインシュタイン

## 今後の講義計画

### 4th Lecture - 前史

#### 1. 古代ギリシアの物質観

ターレス 水、土、空気、火 → すべての根源

哲学者/物理学者/数学者

ピタゴラス 数学者

#### 2. アルキメデスの原理

王冠の比重

浮力・密度

水の密度 1 g ~ 1 cc (だいたい) 4°C 位で密度が一番高い

体積と質量の比=密度 → 物質ごとに違う

浮力の話と密度の話を区別する

浮力に関しては、力の釣り合いの話が必要 → ガリレオ・ガリレイの完成の法則

3. それ以後の科学技術の発展

中世の世界観 アリストテレスの哲学…間違いも多い

エジプトのアレクサンドリア

プトレマイオス・アリストテレスの世界観／物質観が中世のキリスト教会を支配していた

ex.1 天動説 (コペルニクスが現れるまで支配的) 地球を中心とした星々の運動 惑星／恒星の話 planets / fixed stars

ex.2 慣性の法則 ガリレオ・ガリレイがその著書『天文学対話』の中で詳しく明らかにした。

## 5th Lecture 力学法則の基本原則

1. ガリレオ・ガリレイ (天文学対話)

力学の基本原則

「それでも地球は動く」→ ティコブラーエ コペルニクス … 地動説

2. ニュートン (プリンキピア)

自然原理の数学的序説

その本において、ガリレオ／コペルニクスがうすうす気づいていたものを3つの基本原則にまとめた。

1. 慣性の法則

2. 運動の法則

3. 作用反作用の法則

現代的な言葉では、1. は慣性系の存在を主張、 2. は  $F = ma$ 、 3. は運動量の保存則

3. 近代数学 微分積分学の発見

ニュートン ライプニッツ

ニュートンは、微分積分を水率、水量として導入

ライプニッツは、現代の数学、微分記号・積分記号を発見

デカルトの本の名前『哲学的序説』

4. ファラデー (ロウソクの科学)

王立教会におけるクリスマス講演を行って、科学の普及に努めた。もとは本屋の見習いであった。

古典場の理論

電磁気学の礎を築いた。

#### 6th Lecture 電磁気学の発展 - ファラデーからマックスウェルへ -

1. 遠隔相互作用と近接相互作用、古典場の理論
2. ベクトル解析の初歩
3. Maxwell 方程式、静電場の方程式と電磁誘導
4. 誘電体と磁性体
5. 電磁波と光

#### 7th Lecture 産業革命時代の物理学 - 熱力学を中心に -

1. 蒸気機関の発明 J. Watt

エネルギーとは何か？ 熱とは何か？ 温度とは何か？

熱効率が重要... 力学的エネルギー + 熱エネルギー = 全エネルギー (エネルギーの保存則)

2. 水の三体

氷、水、蒸気

密度 = 質量 / 体積 が大きく違う

すべての物質は、温度と圧力を調整することにより固体・液体・気体となる。

3. 理想気体の状態方程式

$PV = nRT$  ここに

$P$  ... 圧力 = 力 / 面積 (単位面積あたりの力)

$V$  ... 体積

$n$  ... モル数

$R$  ... 気体定数  $k = R / N =$  ボルツマン定数  $N$  はアボガドロ数 (1モルあたりの原子分子の数)

$T$  ... 絶対温度 セルシウムで測った温度 (単位 $^{\circ}\text{C}$ ) + 273 $^{\circ}$  単位  $^{\circ}\text{K}$  (Kelvin)

温度には下限がある。(絶対  $0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$ )

4. カルノーサイクル

圧力 膨張・加熱・冷却を通じて気体の状態変化を記述する。

5. 理想気体の分子運動論

## 8th Lecture 19 世紀の物理学

1. 百科全書派 デイドロ、ダランベールの台頭

基礎数学の発展 フーリエ ラプラス パスカル その他多数

2. 質量保存の法則

ボイル プリーストリー 錬金術は本当に可能か？

3. 元素の発見

モルとは？

原子番号

質量数

元素... 周期率表 (メンデレーエフ)

ボイル、ラボアジエ、プリーストリー

4. 真空とは何か？

エーテル？

遠隔相互作用、近接相互作用

ファラデーから始まる場の理論の発展

マックスウェルによる電磁場の方程式

電波の発見

光の速度の問題

マイケルソン・モーリーの実験

光の速度は、どんな座標系から見ても一定

## 9th Lecture 微視の世界の物理学 (20 世紀の物理学)

ラザフォード、チャットウィック、アインシュタイン、ニールス・ボーア、シュレディンガー、ハイゼンベルグ

## 10th Lecture 現代の物質観

Quark, lepton からなる相対性理論と量子力学の世界

相対論的量子場理論 (ゲージ場理論) に基づく相互作用の統一的理論

1980 年頃確立したこれらの理論は「標準模型」と言われ、現代の物質観をなしている。

追記 未来に向けて科学者の社会的責任