

物理入門コースについて

理工系の学生諸君にとって物理学は欠くことのできない基礎科目の1つである。諸君が理学系あるいは工学系のどんな専門へ将来進むにしても、その基礎は必ず物理学と深くかかわりあっているからである。専門の学習が忙しくなってからこのことに気づき、改めて物理学を自習しようと思っても、満足のゆく理解はなかなかえられないものである。やはり大学1~2年のうちに物理学の基本をしっかりと身につけておく必要がある。

その場合、第一に大切なのは、諸君の積極的な学習意欲である。しかしながら、物理学の基本とは何であるか、それをどんな方法で習得すればよいかを諸君に教えてくれる良いガイドが必要なことも明らかである。この「物理入門コース」は、まさにそのようなガイドの役を果すべく企画・編集されたものであって、在来のテキストとはそういう異なる編集方針がとられている。

物理学に関する重要な学科目のなかで、力学と電磁気学はすべての土台になるものであるため、多くの大学で早い時期に履修されている。しかし、たとえば流体力学は選択的に学ばれことが多いであろうし、学生諸君が自主的に学ぶのもよいと思われる。また、量子力学や相対性理論も大学2年程度の学力で読むことができるしっかりした参考書が望まれている。

編者はこのような観点から物理学の基本的な科目をえらんで、「物理入門コ

ース」を編纂した。このコースは『力学』,『解析力学』,『電磁気学 I, II』,『量子力学 I, II』,『熱・統計力学』,『弾性体と流体』,『相対性理論』および『物理のための数学』の8科目全10巻で構成されている。このすべてが大学の1,2年の教科目に入っているわけではないが、各科目はそれぞれ独立に勉強でき、大学1年あるいは2年程度の学力で読めるようにかれている。

物理学のテキストには多数の公式や事実がならんでいることが多く、学生諸君は期末試験の直前にそれを丸暗記しようとするのが普通ではないだろうか。

しかし、これでは物理学の基本を身につけるどころか、むしろ物理嫌いになるのが当然というべきである。このシリーズの読者にとっていちばん大切なことは、公式や事実の暗記ではなくて、ものごとの本筋をとらえる能力の習得であると私たちちは考えているのである。

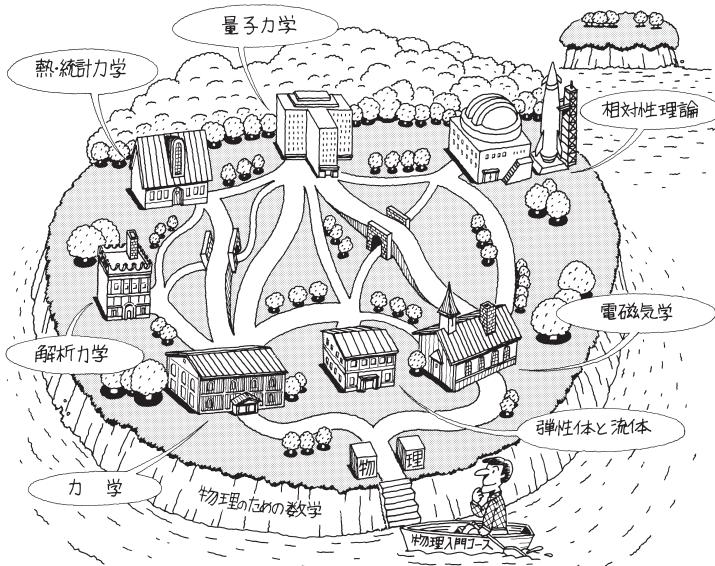
物理学は、ものごとのもとには少数の基本的な事実があり、それらが従う少數の基本的な法則があるにちがいないと考えて、これを求めてきた。こうして明らかにされた基本的な事実や法則は、ぜひとも諸君に理解してもらう必要がある。このような基礎的な理解のうえに立って、ものごとの本筋を諸君みずから努力でたぐってゆくのが「物理的に考える」という言葉の意味である。

物理学にかぎらず科学のどの分野も、ものごとの本筋を求めているにはちがいないけれども、物理学は比較的早くから発展し、基礎的な部分が煮つめられてきたので、1つのモデル・ケースと見なすことができる。したがって、「物理的に考える」能力を習得することは、将来物理学を専攻しようとする諸君にとってばかりでなく、他の分野へ進む諸君にとっても大きなプラスになるわけである。

物理学の基礎的な概念には、時間、空間、力、圧力、熱、温度、光などのように、日常生活で何気なく使っているものが少なくない。日常わかったつもりで使っているこれらの概念にも、物理学は改めてややこしい定義をあたえ基本的な法則との関係をつける。このわざらわしさが、学生諸君を物理嫌いにするもう1つの原因であろう。しかし、基本的な事実と法則にもとづいてものごとの本筋をとらえようとするなら、たとえ日常的・感覚的にはわかりきったこと

であっても、いちいちその実験的根拠を明らかにし、基本法則との関係を問い合わせることが必要である。まして私たちの日常体験を超えた世界——たとえば原子内部——を扱う場合には、常識や直観と一見矛盾するような新しい概念さえ必要になる。物理学は実験と観測によって私たちの経験的世界をたえず拡大してゆくから、これにあわせてむしろ常識や直観の方を改変することが必要なのである。

このように、ものごとを「物理的に考える」ことは、けっして安易な作業ではないが、しかし、正しい方法をもってすれば習得が可能なのである。本コースの執筆者の先生方には、とり上げる素材ができるだけしづらり、とり上げた内容はできるだけ入りやすく、わかりやすく叙述するようお願いした。読者諸君は著者と一緒にになってものごとの本筋を追っていただきたい。そのことを通じておのずから「物理的に考える」能力を習得できるはずである。各巻は比較的に小冊子であるが、他の本を参照することなく読めるように書かれていて、



決して単なる物理学のダイジェストではない。ぜひ熟読してほしい。

すでに述べたように、各科目は一応独立に読めるように配慮してあるから、必要に応じてどれから読んでもよい。しかし、一応の道しるべとして、相互関係をイラストの形で示しておく。

絵の手前から奥へ進む太い道は、一応オーソドックスとおもわれる進路を示している。細い道は関連する巻として併読するとよいことを意味する。たとえば、『弾性体と流体』は弾性体力学と流体力学を現代風にまとめた巻であるが、『電磁気学』における場の概念と関連があり、場の古典論として『相対性理論』と対比してみるとよいし、同じ巻の波動を論じた部分は『量子力学』の理解にも役立つ。また、どの巻も数学にふりまわされて物理を見失うことがないよう配慮しているが、『物理のための数学』の併読は極めて有益である。

この「物理入門コース」をまとめるにあたって、編者は全巻の原稿を読み、執筆者に種々注文をつけて再三改稿をお願いしたこともある。また、執筆者相互の意見、岩波書店編集部から絶えず示された見解も活用させていただいた。今後は読者諸君の意見もききながらなおいっそう改良を加えていきたい。

1982年8月

編者 戸田盛和
中嶋貞雄

「物理入門コース／演習」シリーズについて

このコースをさらによく理解していただくために、姉妹篇として「演習」シリーズを編集した。

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. 例解 力学演習 | 4. 例解 熱・統計力学演習 |
| 2. 例解 電磁気学演習 | 5. 例解 物理数学演習 |
| 3. 例解 量子力学演習 | |

各巻ともこのコースの内容に沿って書かれており、わかりやすく、使いやすい演習書である。この演習シリーズによって、豊かな実力をつけられることを期待する。（1991年3月）

はじめに

この『量子力学 I, II』は、量子力学をはじめて学ぼうとする諸君のための入門書または参考書である。量子力学の基本をひととおり学習しておきたいと希望する理工系学生を読者に想定して書いた。「物理入門コース」の『力学』と『電磁気学』の学習を一応終了した諸君、あるいは同じ程度の講義を受けたことのある諸君ならば、いちいち他書を参照することなく理解できるとおもう。

量子力学で扱うのは電子や原子のミクロな運動である。一方、諸君がこれまで学んだ力学や電磁気学は、人工衛星やテレビ電波のようなマクロな世界の物理現象の基本法則として確立されたものであり、そのままでミクロな運動にあてはめることができない。そもそも人間自体がマクロな存在であり、私たちの常識とか直観もマクロな世界に適応するように進化してきたのであって、ミクロな世界に通用するとはかぎらない。ミクロな運動を扱うためには、量子力学という新しい物理法則と、これにふさわしい新しい物理的直観とが必要である。初学者が量子力学を抽象的で難解だと感ずるのはむしろ当然であって、ミクロな現象に親しんで新しい直観を育てる努力が大切である。

この『量子力学 I』も、諸君をなるべく要領よくミクロな世界に誘導し、ミクロな運動を支配している基本法則が量子力学であることを納得してもらう目的で書いた。その素材のかなりの部分は、従来「原子物理学」の名のもとにま

とめられ、量子力学とは別に講義されることの多かったものである。なお、量子力学を学ぶための重要な予備知識とされている「解析力学」についても、固体内の原子振動による比熱や空洞内の電磁振動による比熱を計算するための理論的な道具だけとして、本書に必要な程度の説明を加えた。

他方、『量子力学Ⅱ』は、量子力学を具体的な問題に応用しようとする場合に必要な基本法則、基礎概念、計算方法を解説したものである。「物理入門コース」の精神にしたがって、なるべく基本的でしかも汎用性のあるものについて、詳しく述べるように心がけたつもりである。話を非相対論的な量子力学にかぎったのも、そのためである。ただし、場の量子化という概念は、量子力学における粒子像と波動像の等価性を表現するものとして重要であるばかりでなく、最近は多粒子系を扱うための計算方法(第2量子化法)としても盛んに使われる所以、説明を加えることにした。

初学者にとっては、量子力学の物理的な内容の理解がいちばん重要であるから、数学的な負担となるべく軽減するように努めた。確定特異点をもつ微分方程式の解法や特殊関数がほとんど出てこないのは、そのためである。『量子力学Ⅱ』で主として使うのは、物理量をあらわす演算子の加え算や掛け算という代数計算であって、数学としては、ふるくから電気工学で使われている演算子算法と同レベルのものといってよい。

以上、『量子力学Ⅰ、Ⅱ』を書くにあたって留意した点をいくつか述べたが、名著、良書の多い量子力学のテキストの中で、本書がいささかなりとその存在を主張できるかどうか、判定は読者にゆだねるほかない。

執筆前も執筆中も、このコースの編者戸田盛和氏および執筆者の先生方から多くの有益なご意見を頂いた。また、片山宏海、大塚一夫両氏をはじめ岩波書店編集部の皆さまにもひとかたならずお世話になった。本書がともかく出版できたのは、これらの方々のご援助のおかげである。心からお礼を申し上げたい。

1983年3月

中嶋貞雄

目次

物理入門コースについて

はじめに

1 原子とエーテル	1
1-1 序論	2
1-2 真空と気体の圧力	4
1-3 原子と分子	7
1-4 原子番号と質量数	12
1-5 光の粒子論と波動論	15
1-6 波動方程式	19
1-7 真空概念の変革	23
2 荷電粒子の弾道論	29
2-1 序論	30
2-2 電場による運動制御	31
2-3 磁場による運動制御	35
2-4 同位体の質量分析	40
2-5 素電荷の測定	42

2-6	光る電子	45
2-7	原子発光の振動子モデル	47
2-8	磁場によるスペクトルの変化	51
3	熱運動の古典論	57
3-1	序論	58
3-2	プラウン運動とボルツマン定数	59
3-3	古典力学の正準形式	63
3-4	古典統計力学の基本公式	67
3-5	マクスウェル分布	70
3-6	気体の比熱と圧力	75
3-7	固体の比熱	79
4	量子論の誕生	83
4-1	序論	84
4-2	キルヒホフの法則	85
4-3	固有振動と固有値問題	89
4-4	固有振動の重ねあわせ	93
4-5	電磁場の平面波展開	97
4-6	熱放射のエネルギー密度	100
4-7	プランクの放射式	104
4-8	量子論の誕生	106
5	原子構造と量子論	111
5-1	序論	112
5-2	α 線散乱と原子構造	114
5-3	ラザフォード散乱の断面積	117
5-4	ボアの量子論	122
5-5	光の放出・吸収	127
5-6	電子衝撃	131

5-7 ゾンマーフェルトの量子化条件	134
6 粒子・波動の2重性	139
6-1 序論	140
6-2 結晶によるX線散乱	141
6-3 波動の複素数表示	148
6-4 コンプトン散乱とX線の粒子性	152
6-5 ド・ブローイの物質波	156
6-6 幾何光学とニュートン力学	159
6-7 シュレーディンガー方程式の発見	163
7 量子力学の確立	169
7-1 序論	170
7-2 電子波の回折	171
7-3 確率振幅としての Ψ	175
7-4 不確定性原理	179
7-5 運動量表示の波動関数	184
7-6 シュレーディンガー方程式とエネルギー準位	188
7-7 調和振動子のエネルギー準位	193
問題略解	199
索引	209

コーヒー・ブレイク	
ルクレチウスの宇宙論	8
加速器の高度技術	38
熱中性子	74
宇宙の温度	88
ラザフォードとボーア	126
ド・ブローイと湯川秀樹	158
ハイゼンベルクとアインシュタイン	182

量子力学II 目次

- 8** 量子力学の基本法則
 - 9** 物理量の行列表示
 - 10** 軌道角運動量とスピン角運動量
 - 11** 摂動論
 - 12** 多電子原子
 - 13** 分子と固体
 - 14** 場の量子化
- さらに勉強するために
- 問題略解
- 索引

1

原子とエーテル

物理学の学習を宇宙旅行にたとえるなら、量子力学という未知の星に到着した諸君を軟着陸させるためのパラシュートが、この第1章である。

1-1 序論

原子(atom)はミクロな力学系であって、その大きさはおよそ 10^{-10} m である。したがって、原子物理学ではしばしば 1 \AA (オングストローム) = 10^{-10} m を長さの単位にえらぶ。他方、私たちのまわりにあるマクロな物体は、長さの単位として 1 m とか 1 cm がちょうど手頃であるような大きさをもっている。ミクロな立場からマクロな物体を見ると、1粒の食塩も 10^{20} 個というような途方もなく多数の原子でできた巨大な力学系である。

原子や電子(electron)という言葉は現在では日常語になっているけれども、物理学の対象としてミクロな粒子が本格的に研究されるようになったのは、そういう遠い昔のことではない。電子の存在がはっきりしたのは19世紀末であり、原子が太陽系に似た構造をもつことは20世紀になってから明らかになった。原子の中心にはプラスの電荷をもつ重い原子核(atomic nucleus, 単に核ともいう)があり、マイナスの電荷をもつ軽い電子が核のまわりを運動している。一見すると、諸君がこれまで学習してきた力学(物理入門コース『力学』)と電磁気学(同『電磁気学』)を使って、太陽系と同じように原子の問題も扱えそうである。

果してそうだろうか？ 答はノーである。第5章で詳しく述べるように、原子が安定に存在するという事実を諸君の知っている力学と電磁気学で説明することはできない。原子や電子にかぎらず一般にミクロな力学系を扱うためには、量子力学(quantum mechanics)という新しい力学法則が必要なのである。ニュートン(I. Newton)の力学やマクスウェル(J. C. Maxwell)の電磁気学は、原子物理学が発展する以前にマクロな物理現象の基本法則として確立されたものであり、ごく限られた条件のもとでしかミクロな現象に使えない。現在では古典論(classical theory)とよんで量子論(quantum theory)と区別する。

ところで、これまでの量子力学のテキストは、20世紀はじめに古典論の直面した困難、ミクロな現象を古典論で扱った場合におこる実験事実との救いがない食い違いから説きおこすのが通例であった。このスタイルは、古典論に精通

した読者に新しい量子論を説いた時代の名残りだとおもわれる。現代の若い学生諸君にとっては、古典論も量子論もおそらく似たような距離にあるのではなかろうか。第6章で詳しく説明するように、古典論の直面した困難の核心にあるものは、ミクロな力学系が普遍的に示す粒子・波動の2重性(particle-wave duality)であるが、学生諸君がこの2重性をどれほど痛切な課題として理解できるか、いささか疑問である。

そこで、歴史を見る私たちの視野をおもいきりひろげ、原子物理学の長い前史時代から話をはじめることにしよう。実際、私たち人間は19世紀後半になってとつぜんミクロな世界の存在に気づいたわけではない。英語のアトムの語源は、分割不可能な粒子を意味するギリシャ語のアトモスである。デモクリトスやエピクロスの唱えた古代ギリシャの原子論は、この世に存在するものは無数のアトモスと無限にひろがる空虚な空間——真空(vacuum)——だけであると考え、あらゆる現象を真空中のアトモスの運動で説明しようと試みた。

この大胆な理論的仮設は近代科学の形成に陰に陽に大きな影響をあたえたが、それは17世紀以後のことである。中世からルネサンスにわたる長い期間、アリストテレスの思想がローマ教会の公認哲学となり、原子論は無神論として異端視された。

アリストテレスは真空の存在を否定する。物質は空間にすき間なく充満し、天空もエーテルという貴い物質でみちていると主張した。17世紀になってデカルト(R. Descartes)やホイヘンス(C. Huygens)が光の波動論を提唱したとき、光波を伝える未知の媒質をアリストテレスにならってエーテルとよんだ。空気の振動が音波として伝わるように、エーテルの振動が光波として伝わるというのである。光は遠い星から地球に届くのであるから、エーテルは宇宙空間にみちていることになる。

この第1章の前半では、古代ギリシャにはじまった原子論の発展について述べ、これに拮抗する流れとして、光の波動論の発展を後半で述べることにしよう。この2つの歴史的な流れの延長線上に量子力学の誕生を位置づけようというのである。

1-2 真空と気体の圧力

17世紀に復活した原子論の最初の成果は、原子論の基本仮設である真空の存在を実証する目的で行われたトリシェリ (E. Torricelli) の実験である (1644年). 長さ約 1 m のガラス管の一端を閉じて水銀をつめ、水銀溜めに倒立させる。管内の水銀がすこし下がって、上端に真空ができるのである (図 1-1). この実験はガラス管内に真空を作ることに成功したばかりでなく、管内に水銀を押し上げている大気圧の存在を明らかにした。水銀柱の高さによって大気圧を定量的に測ることができるようにになったのである (気圧計)。この方法は大気以外の気体の圧力測定にも応用され、希薄な気体の圧力は体積に逆比例することをまもなくボイル (R. Boyle) が発見した。

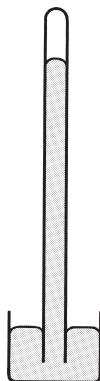


図 1-1 トリシェリの
真空実験。

真空度 実験の立場からいうと、力学の場合の完全に滑らかな斜面と同様に、完全な真空も一種の極限概念である。実際に作られる真空にはいくらか残留気体があり、その圧力で真空度をあらわす。この場合の圧力の単位としては 1 mmHg (水銀柱を 1 mm の高さまで押し上げる圧力 $\cong 133 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) をえらぶことが多く、トリシェリにちなんでこれを 1 Torr (トル) とよぶ。図 1-1 のトリシェリの真空も水銀蒸気をふくみ、真空度は室温で 10^{-3} Torr 程度である。現在では、 10^{-11} Torr というような超高真空の生成が可能になっている。

ポンプによる排気はトリシェリの時代から利用されていたが、19世紀になると真空ポンプの性能が飛躍的に向上し、原子物理学を急速に発展させる要因となった。ミクロな粒子を物質中からガラス管内の真空中にひっぱり出し、よくわかった外力のもとで運動させることによって粒子の質量や電荷を測定するのである。

この方法によって最初に発見された粒子は電子である。電子は荷電粒子(charged particle)であって、その電荷を $-e$ と書くと、 e はどんな状態で測定しても同じ大きさである。電気量の MKSA 単位であるクーロン[C]であらわすと

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (1.1)$$

これは非常に小さな値であるが、電子の質量も

$$m_e = 9.1095 \times 10^{-30} \text{ kg} \quad (1.2)$$

という小さな値である。このために、電磁気的な力を加えることによって真空中の電子の運動を容易に制御することができる(第2章)。

気体の圧力と絶対温度 ニュートン力学が太陽をめぐる惑星の運動の説明に成功してから半世紀後に、ベルヌーイ(D. Bernoulli)はこの力学と原子論をむすびつけ、希薄気体のボイルの法則を導こうとした。気体は高速で運動する多数の粒子の集団であると仮定する。気体をつめた容器の壁には粒子がたえず衝突してはねかえされ、その反作用によって圧力が生ずるとするのである。マクロな物体の性質(気体の圧力)をミクロな粒子の運動によって説明する統計力学の先駆と見ることができる。

実際、希薄気体の圧力 P と気体を構成している粒子の運動エネルギーの間に、ベルヌーイの式とよばれる次の関係が成立する(第3章)。

$$P = \frac{2N}{3V} \left\langle \frac{1}{2} mv^2 \right\rangle \quad (1.3)$$

V は気体の体積、 N は気体のふくむ粒子数、 m は粒子1個の質量であり、 $\langle \dots \rangle$ は粒子の運動エネルギーの平均値を意味する。つまり、粒子の速さをそれぞれ v_1, v_2, \dots, v_N とすると

$$\left\langle \frac{1}{2}mv^2 \right\rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (1.4)$$

(1.3) がボイルの法則であると主張するためには、この運動エネルギーの平均値が気体の温度だけで決まり、体積に無関係であることを証明する必要がある。この証明は、19世紀後半に統計力学が確立されたときはじめて可能になった。ベルヌーイの時代には、温度という概念もまだ十分には確立されていなかったのである。

第3章で示すように、統計力学は

$$\left\langle \frac{1}{2}mv^2 \right\rangle = \frac{3}{2}k_B T \quad (1.5)$$

をあたえる。 T は絶対温度、 k_B はボルツマン定数とよばれる普遍定数であって、その値は T の単位のえらび方による。(1.5) を (1.3) に代入すると、完全気体の状態方程式とよばれる次の関係がえられる。

$$PV = Nk_B T \quad (1.6)$$

この方程式にもとづいて絶対温度を測定するのが、気体温度計である。水銀温度計が水銀柱の高さで温度を測るのにたいし、体積を一定に保った希薄気体の圧力(または圧力を一定に保った気体の体積)で絶対温度を測る。

ある規準温度 T_0 をえらび、 T_0 での気体の圧力 P_0 を測る。次に任意の物体と接触させ、熱平衡に達したときの圧力 P を測定する。気体の体積を一定に保つてあるとすると、気体の絶対温度は $T = (P/P_0)T_0$ であたえられ、これが接觸している相手の物体の絶対温度でもある。規準温度のえらび方とこれをあらわす T_0 の値のえらび方は任意である。現在使われている温度の単位ケルビン

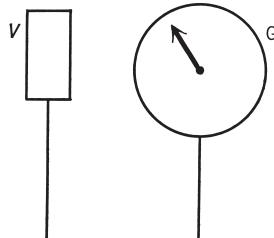


図 1-2 気体温度計。

[K]は、規準温度として水の三重点(水と氷と水蒸気の三者が共存できる温度)をえらび、その絶対温度が $T_0=273.16\text{ K}$ であるとして定義されている。いちばん単純な気体温度計は、図 1-2 のように一定体積 V に希薄気体をつめ、その圧力を圧力ゲージ G で読む。ゲージの目盛は、圧力 P でなく、 $(P/P_0)\times 273.16\text{ K}$ にしておけばよい。

温度の単位がケルビンであるときのボルツマン定数の値は

$$k_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \quad (1.7)$$

であることが現在ではわかっている。

問 题

1. 体積 $V=30\text{ ml}$ のガラス容器の内部が 10^{-8} Torr の真空になっている。温度は $T=300\text{ K}$ であるとして、残留気体のふくむ粒子数 N はおよそいくらか？ また、立方根 $(V/N)^{1/3}$ を求め、この長さが何を意味するかを考えよ。
2. 温度 300 K の希薄気体中で粒子のもつ平均運動エネルギーを求めよ。かりに粒子が電子であるとしたら $\langle v^2 \rangle^{1/2}$ はどのくらいのスピードか？

1-3 原子と分子

旧式の 4 元素説に代る近代的な元素(element)の概念は、ラボアジエ (A. Lavoisier) によって確立された (1798 年)。その基礎となったのは、反応物質の質量を天びんを使って精密に測定する定量化学分析の発達である。化学分析によってはもはや分解できない物質が元素である、とラボアジエは定義した。元素が化合するときでも化合物が元素に分解するときでも、成分元素の質量の総和は化合物の質量に等しい。成分元素の質量比は、混合物の場合には連続的に変えられるけれども、化合物では確定している(定比例の法則)。

原子概念の確立 ラボアジエの元素を原子論にむすびつけ、定量的な原子という概念を確立したのはドルトン (J. Dalton) である (1803 年)。元素は物理的・化学的性質の同一な原子の集団であり、異なる元素の原子は質量の違いで区別されると考えた。

空気のような混合気体が一様に混合するのは、非常に小さな原子が混ざりあうからだとドルトンは考え、原子が実在することを示す証拠を化学的事実に求めた。その一例として倍数比例の法則を指摘する。たとえば一定質量の炭素を燃焼させる場合、化合物が炭酸ガスであるときと一酸化炭素であるときの消費酸素の質量比は、高い精度で 2 : 1 に等しい。この整数比を説明するいちばん簡単な方法は、炭素原子 1 個と結合する酸素原子の数が 2 個か 1 個かの違いたとえることである。

ルクレチウスの宇宙論



エピクロスの原子論的な宇宙像は、ローマ時代のルクレチウスの詩『物の本質について』(樋口勝彦訳 岩波文庫)によって現代に伝えられている。これを読むと、原子論者たちが原子仮設のおかげで当時のせま苦しい経験的世界から解放され、大胆で新鮮な思想の飛躍を試みていたことがわかる。たとえば、アリストテレスによると地上の物質の素材は土、水、空気、火の 4 元素であり、元素は乾、湿、冷、暖の 4 原質の組みあわせである。ルクレチウスはこの 4 元素説を批判している——なるほど穀物は土から生えてくる。しかし土と植物のような同一階層の物質の一方を他方の元素と考えるのは間違いだ。水が植物の養分になるのは、両者が共通のアトモスをふくんでいるからなのである。

アリストテレスは、世界が天上界と私たちの住む地上界の 2 つでできていると考えた。これにたいしてルクレチウスは、無限に広い空間の中で、無数のアトモスが可能なあらゆる運動と結合を試みるのであるから、アトモスが集まって、私たちの大地と同じような丸い大地をほかにもたくさん形成し、そこには同じような山河があるにちがいないと説いている。

1個の原子の質量を天びんで測ることはできないが、異なる原子の質量比はマクロな物体の質量測定で決定できるとドルトンは主張した。これが原子量という概念であって、たとえば、いちばん軽い水素原子の質量を単位にして原子質量を測ろうというのである。

しかし、マクロな質量測定から原子の質量比を知ろうとすれば、物体のふくむ原子数について情報が必要である。ベルセリウス (J. J. Berzelius) は、温度・圧力・体積がそれぞれ等しい気体は同数の原子をふくむ、と仮定して原子量を決めた。この仮定は、(1.6) の N が原子数であり、 k_B が気体の種類によらない普遍定数だと考えたことに相当する。もともとドルトンの理論には分子 (molecule) という概念がなく、気体水素、気体酸素の構成単位はそれぞれ水素原子、酸素原子であり、両者が反応して生ずる水蒸気の構成単位は水素原子 2 個と酸素原子 1 個の結合した‘原子’だと考えていた。また、諸君の知っているボイル-シャルルの法則を説明するだけならば、(1.6) の k_B は普遍定数である必要はなく、たとえば原子質量に依存していてもよいことに注意しておこう。

分子概念の導入 ベルセリウスの仮定が正しいとすれば、気体水素と気体酸素が反応して水蒸気ができるとき、気体の体積比は 2 : 1 : 1 になるはずである (図 1-3)。しかしぜイ・リュサック (J. L. Gay-Lussac) の測定した体積比は 2 : 1 : 2 であった。

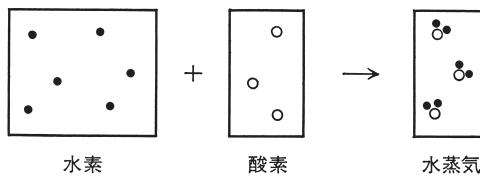


図 1-3 ドルトン-ベルセリウスの理論。

この困難を解決したのはアボガドロ (A. Avogadro) である (1811 年)。化合物にかぎらず、一般に物質の構成単位は原子が何個か結合した分子であり、等温・等圧・等体積の気体は同数の分子をふくむ、というのがかれの仮設である。(1.6) の N は気体のふくむ分子数であり、 k_B は普遍定数だと考えたことになる。

この仮定とゲイ・リュサックの測定した体積比とから、水素分子、酸素分子はそれぞれ水素原子2個、酸素原子2個が結合した2原子分子であり、水分子は3原子分子であるとアボガドロは推論した(図1-4)。

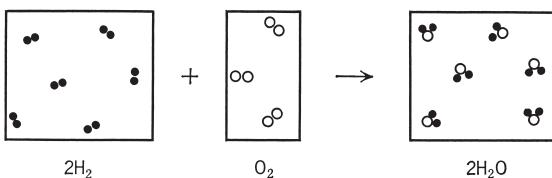


図1-4 アボガドロの理論.

アボガドロの理論は分子量決定の途をひらいた。分子量がうまく決定できるようになると、化学者たちはマクロな物体の質量をモル(mole)という単位で測るようになった。1モルの物質は32グラムの酸素と同数の分子をふくむと定義し、この分子数 N_A をアボガドロ数とよんだ(1-4節で述べるように、現在ではこれとやや異なる定義が採用されている)。

共有結合とイオン結合 実をいうと、アボガドロの提案は長い間無視された。同種の原子が結合して分子を作るという着想が当時は理解しにくかったからである。2個の水素原子を結合させる力は、現在では**共有結合**(covalent bond)とよばれている。いわば原子に‘手’があって握手しあうとおもえばよい。‘手’の数が**原子価**(valence)である。水素原子は1価で、水素分子は2原子分子より大きくなれない(ただし、同種原子の結合力には別に**金属結合**metallic bondがあり、木星内部のような高圧下では水素も金属になる)。4価の炭素原子の場合には、大きな有機分子やダイヤモンド結晶を作る(ゲルマニウムやシリコンの原子もダイヤモンドと同型の結晶を作る)。

共有結合の本質は量子力学によってはじめて解明されるのであるから、アボガドロの着想が理解されなかったのも当然といえよう。当時は、原子がプラスまたはマイナスの電荷をもったイオン(ion)になり、電荷の間の引力で結合するという陰陽説、現在イオン結合(ionic bond)とよばれている結合にあてはまる考え方方が有力だった。その根拠となつたのは電気分解の成功で、水が水素と