

1992. No. 3

No. 3.

«Квант» для младших школьников



ソ連科学誌・クヴァントから

やさしい物理学

⑩

小島 英夫 (静岡大学) 訳

Japanese translation rights arranged with VAAP through
Japan Soviet Copyright Center, Tokyo.

1. 絶対温度 E.E. ゴロデツキイ (1988, No. 9, pp. 60~62)

熱！ 他の物理学の領域と違って、ここでは物質の組成に関する基本的な概念（すべての物体は、絶えず動きまわっており、互いに相互作用する分子からできている）が、われわれの感覚にじかに、密接に関係しているように見える。しかし、最も簡単な事柄でさえ、それを理解する過程は長く、苦しいものだったのだ。例えば、物体を熱したり、冷やしたりするとき、また違う温度にある二つの物体を接触させたとき、などに起る現象がそうである。

この記事では、物質の分子構造の見地から、熱現象に関する現代の観念の、二つの基本的要素を取り扱う。

どんな物体でもよいが、その小さいが、しかし未だ巨視的な領域に区切ろう。小さい——これは区切った領域の寸法が、物体全体の寸法よりはるかに小さいことを意味する。それが必要なのは、物体に沿って温度が変化している場合にも、われわれの考えている領域の範囲では、どこでも温度が同じと考えられるようにである。他方で、その領域は巨視的（マクロ）でなければならない、とも言った。これは、寸法が小さいにもかかわらず、その中にある粒子の数は非常に多くなければならないことを意味する。

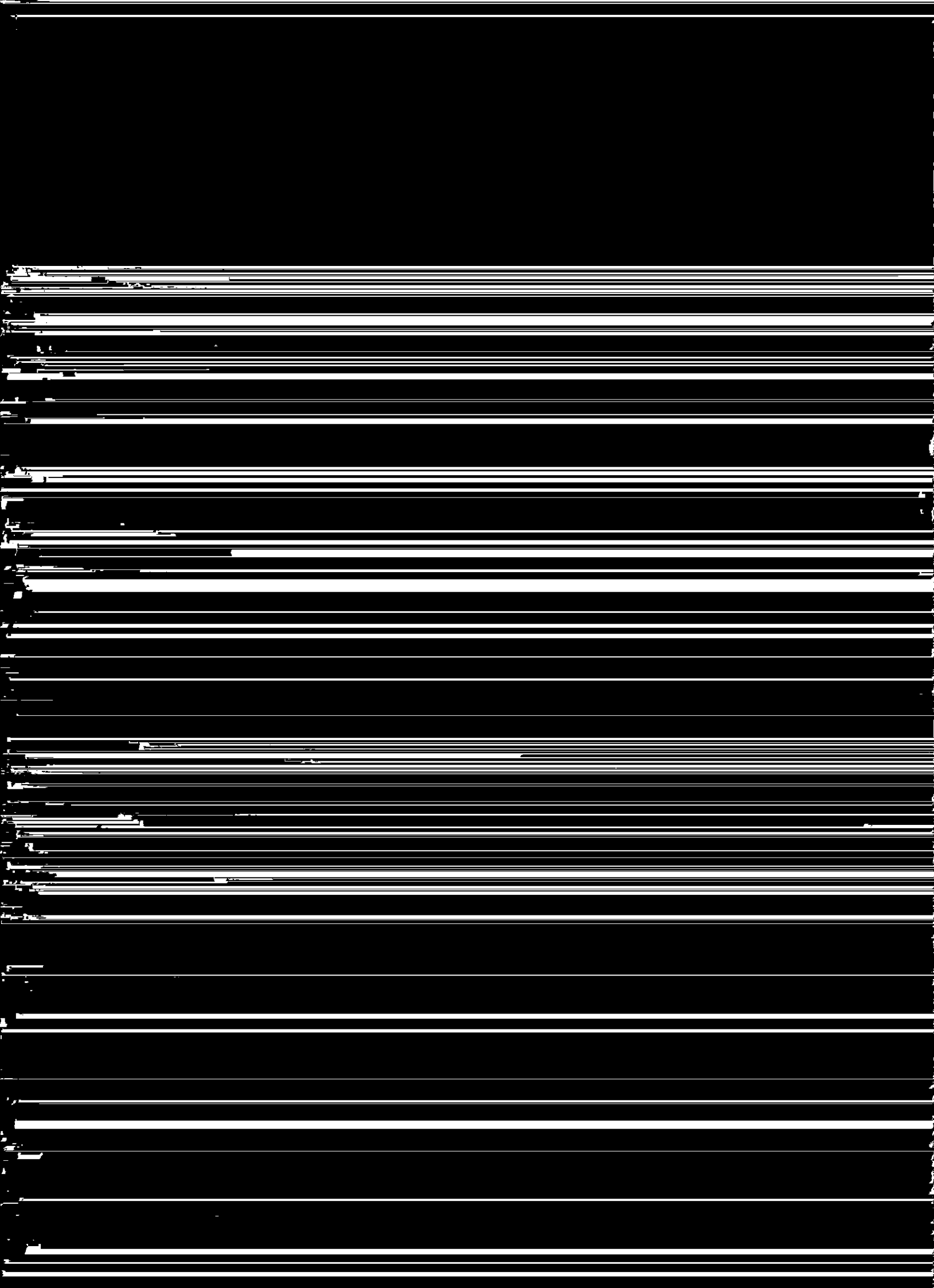
区切った領域を占める分子は、様々な速度で運動し、互いに衝突し、ある分子はその領域から去り、他の分子が入ってき、全体としては複雑な、あえて言えば煩雑な行動をしている。個々の分子を別々に観察して、この激しい分子の“舞踊”を理解することは、まったく見込みのない、そしてまた必要のない仕事である：どっちみちわれわ

れはそのような莫大な量の情報を取扱う方法を知らない。幸いにして、分子の運動の複雑さと多様性こそが、その状況を他の面から——確率論の見地から——取扱うことを可能とするのである。

この理論の予言することは、非常に独得である。それは例えば、1992年に迫ったオリンピック競技のスキーマの10 km 競走で、誰がどんなタイムで優勝するかを予測することはできないのに、これまでに行われた競技のすべての結果を知れば、かなり確実に次のことが言えるようなものである：レースの参加者の1~2%は29分を切るタイムを出し、60~70%は29分から31分の間に入る、など。学校の競技会では、記録のレベルと分布は違うだろう。競技会のランクは記録の平均レベルによって決まることは明らかだ（そういう意味で、以下の説明からわかるように、これは温度に似ている）。

確率論は、ほとんど誰も個々の出来事を知らないのに、多数の同じタイプの、または反復する出来事の結果を、確実に予想することを可能とする。それゆえ、分子の混沌とした（ランダムな）運動と分子間の相互作用とは、確率論のための理想的な対象であることがわかる（区切った領域内の分子数が多くなければならなかった理由が、ここで明らかになった）。

次のような問題を考察してみよう：考えている領域を占める全分子の中で、ある速度 \vec{v} の近くの速度をもつ（別の言い方をすれば、 \vec{v} と $\vec{v} + \Delta\vec{v}$ の間にある速度をもつ、すなわち速度の x 成分が v_x と $v_x + \Delta v_x$ 、 y 成分が v_y と $v_y + \Delta v_y$ 、 z 成分が v_z と $v_z + \Delta v_z$ の間にある）分子はどれ



2. 分子運動の無秩序性と熱機関 (1985, No. 9, pp. 24~26)

よく知られているように、熱機関は、他のエンジンにくらべて、効率が衰れなほど低いことで際立っている。例えば、現在ではほとんど実用になっていないが、初期の蒸気機関車の効率は、10%を超えなかった。また、それにとって代わった蒸気機関車の効率も、ほぼ25%だった。現在用いられている最良の熱機関の効率でも50%を超える程度である。

これは、最初の熱機関が現れてから200年たった現在でも、熱機関で燃される燃料のエネルギーは、半分が無駄に捨てられている、ということの意味する。何が原因なのだろうか？ たぶん、学者や技術者が、燃料のエネルギーをもっと有効に利用できる“優れた”熱機関を発明し、製造することができなかったからではなかろうか？

実は、それは熱機関の製造者の責任ではないのだ。熱機関において起っていることの本質を、われわれがもっと注意深く考察すれば、効率の値が低いことの真の“責任者”を見つけ出すことができる。

無秩序な運動と秩序のある運動

熱機関は、力学的な仕事をするためのものである。それは通常、次のようになされる：何らかの気体が、加熱器からある量の熱を得て膨張する；この膨張の際に気体の圧力が仕事をする、例えばピストンを変位させたり、タービンを回転させることによって。言い換えると、熱機関では、熱エネルギーすなわち分子の無秩序な運動エネルギーが、力学的エネルギーすなわち秩序のある運動のエネルギーに変換される。これはたぶん、すべての熱機関にあてはまる、最も重要な事実である：“入力”は無秩序な運動のエネルギーで、“出力”は秩序のある運動のエネルギーである。

損失なしに、すなわち1に等しい効率で、熱エネルギーを力学的エネルギーに変換することは可能だろうか？ それは可能であるように思える。例えば、加熱器からの熱を、気体の温度、したがって気体の内部エネルギーを変えずに導入すればよいだろう。すると熱力学の第1法則

$$Q = \Delta U + A$$

によって、内部エネルギーの変化 ΔU がゼロのとき、仕事 A は導入された熱量 Q に厳密に等しい。

しかしそのようなことは、気体が一方向にだけ膨張する場合に可能なことが、すぐに分かる。どんな熱機関でも周期的に動作するものである。このことについては、少し後で述べるだろう。

気体と弾性体のばね

膨張するときの気体の行動は、縮めたばねの動作とよく似ている。実際、縮めたばねはいつでも伸びよう、長くなるうとしている。それとまったく同様に、気体はいつでも膨張し、その体積を大きくしようとしている。縮めたばねはそれが伸びるときに仕事をする。膨張する気体の圧力も仕事をする。

しかし、気体とばねの間には、重要な違いがある。ばねは縮むことも、伸びることもできる。伸ばしたばねは縮めたばねと同様に、つねに平衡状態に戻ろうとする。その時に弾性力が仕事をする。しかも最初縮めたばねは伸びて変形しない状態にすぐ戻ることはなく、まず伸ばした状態になり、それが今度はまた縮んだ状態になり、などする（ある時間、ばねは振動している）。

それに対して、気体は伸ばしたばねと同じようにはならない。気体はどんなに膨張させても、そこで常にもっと膨張しようとする。気体はつねに圧縮された状態にある。たとえば、もしある気体が円筒の中にあり（図1）、その圧力 p_1 が外部の圧力 p_2 より大きければ、気体はピストンを押し

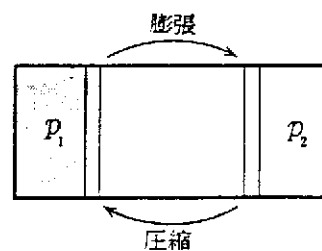


図1

圧力が等しくなるまで続く、しかし膨張した気体は自分で収縮することはない、膨張する前に持っていた体積に戻ることはない。

気体のこのような行動の原因は、分子の運動が無秩序な性格を持つためである。実際、気体が自動的に収縮するためには、気体の分子は“そろって”一方向へ、今考えている場合には左へ、動かなければならない。しかし無秩序に動いている分子には、そんなことはできない。気体の、自動的な膨張と収縮のこのような“不平等”は、分子的な過程の不可逆現象の一つである。

どうして効率は低いのか？

すでに注意したように、すべての熱機関は周期的に動作する。これは次のことを意味する：気体は膨張してその圧力で仕事をした後には(それが熱機関の目的なのだが)、ふたたび膨張の過程を開始できるように、最初の状態に戻らなければならない。例えば、もし気体が膨張してピストンを位置1から位置2へ動かしたとすると、こんどはもう一度位置1へ戻さなければならない。そのためには、膨張した気体は収縮しなければならない。

しかしたった今見たように、気体は自動的に収縮しない。つまり、収縮するためには外力がはたらい、一定の仕事をしなければならない(気体の圧力は同じ仕事をするが、その符号は逆である)。気体が膨張するとき、その圧力と体積が、図2の曲線1-2に沿って変化すると仮定しよう。膨張の際に気体の圧力によってなされた仕事は、この曲線の下面積で表される。もしピストンを元の位置に戻すための気体の収縮が、同じ曲線上を逆の向きに行われるならば、仕事の大きさが同じなのは明らかである。したがってそのようなとき、気体の膨張の際になされた仕事は、収縮の際に“費やされる”。そのような“熱機関”は、効率がゼロであることは明らかである。

熱機関がこのような事情の下で有効な仕事を行うためには、気体の圧縮に費やされる仕事は、膨張の際に得られる仕事より小さくなければならない。そのためには、体積にたいする圧力の依存性を示す曲線が、次のようなものでなければならない：圧縮の際の曲線が膨張の際の曲線より

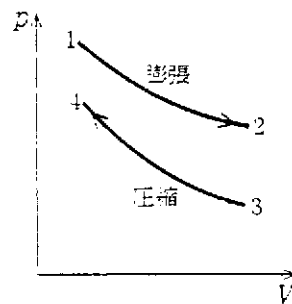


図2

下にある、たとえば図2の曲線3-4に沿って圧縮が行われる。そうすると、曲線3-4の下面積は、膨張の際の仕事を表す曲線1-2の下面積より小さくなる。曲線1-2と曲線3-4の下面積の差が、熱機関の1周期の間に得ることのできる有効な仕事を表す。

ところで、圧縮曲線3-4が膨張曲線1-2より下にあるということは、圧縮される前の気体が膨張したときの気体より冷やされることを意味する。言い換えれば、加熱器から気体の得た熱量の一部が、気体より温度の低い、冷却器と呼ばれる物体に与えられるのである。

熱機関の効率が低い原因はここにある：加熱器から得られた“すべての”熱量が力学的エネルギーに変換されるのではない；その一部は必然的に冷却器に与えられねばならない。熱機関にとって、冷却器は加熱器と同様に不可欠である。加熱器から得られた熱をつかって仕事をする、だけが唯一の結果であるような周期的過程は不可能である、ということは、自然の基本法則の一つである熱力学の第2法則の一つの表現である。

そういう訳で、熱機関の効率が低い本当の原因は、分子運動が無秩序なことである。それゆえこの原因は、熱機関をつくる科学者や技術者が何らかの工夫をすることによって除去することはできない。

前回 (Basic 数学, '92, 2月号) の練習問題の答
1. $348 K$, 2. $CvT(1-nm)$, 3. $3R$.

(訳 こじま ひでお)