

■ 「Maxwellの悪魔」というお話をご存じだろうか？

19世紀イギリスの物理学者、James Clerk Maxwell は「Theory of Heat(熱の理論)(1871)」という著書の中で、次の様なパラドックスを提起した。

But if we conceive a being whose faculties are so sharpened that he can follow every molecule in its course, such a being, whose attributes are still as essentially finite as our own, would be able to do what is at present impossible for us.

しかしながら、もし全ての分子のコースを追跡できるほどに研ぎ澄まされた能力を持った者がいると想像したならば、そのような者は、たとえ我々と同じく本質的に有限の属性を有していたとしても、現在の我々にとって不可能なことをやってのけるだろう。

For we have seen that the molecules in a vessel full of air at uniform temperature are moving with velocities by no means uniform, though the mean velocity of any great number of term, arbitrarily selected, is almost exactly uniform.

というのは我々が(既に)見てきたように均一な温度にある容器の中の空気は決して均一な速度で運動してはいない、たとえ任意に選んだ多数の平均速度がほとんど正確に均一だったとしても。

Now let us suppose that such a vessel is divided into two portions, A and B, by a division in which there is a small hole, and that a being, who can see the individual molecules, opens and closes this hole, so as to allow only the swifter molecules to pass from A to B, and only the slower ones to pass from B to A.

さてそのような容器をAとBという2つの部屋に分け、その仕切りに小さな穴を開け、その(能力)者が個々の分子を見ることができて、穴を開けたり閉めたりできるようにして、速い分子だけをAからBに、遅い分子だけをBからAに通過することを許す。

he will thus, without expenditure of work, raise the temperature of B and lower than of A, in contradiction to the second law of thermodynamics.

その(能力)者はかくして、何の仕事の消費もなしに、Bの温度を上げAの温度を下げるのだが、これは熱力学の第二法則に反することになる。

簡単に言えばこういうことだ。

「もし分子をも操作する器用な指先と、知性を兼ね備えた悪魔の様な存在があったならば、空気分子の熱運動からいくらかでも利用可能なエネルギーを取り出すことが可能になるだろう。」

このパラドックスは、その後、多くの物理学者たちを悩ませて続けてきた。熱運動から利用可能なエネルギーを無尽蔵に取り出す能力を持つ悪魔、これは即ち物理法則に反する永久機関ということになる。このような存在が現実にあるとは到底考えにくい。学者たちは、この悪魔のパラドックスのどこに論理的矛盾があるのか、解決するのに腐心した。そして、問題の完全な解決を見るまでには、実に100年以上もの歳月が流れたのである。

・・・しかし、悪魔は根絶してはいなかった・・・

100年に及ぶ狩りの目を逃れ、悪魔は密かに生き続け、復活の時を待っていたのだ。真つ当な物理学では、悪魔のパラドックスは既に片づいた問題とされている。しかし、本当に全ての疑念が晴れたのだろうか？

ここで、多くの人が解決済みと信じている悪魔のパラドックスを、いま一度甦らせてみたい。単に実現不可能な架空のお話ではいささか面白くない。ここではあえて天の邪鬼的な立場、つまり悪魔を擁護する側の立場に立って話を進めたいと思う。

悪魔は存在する。

つまり、分子の熱運動から利用可能なエネルギーを取り出す方法が存在するのだ。

「もしそんなことができたなら、熱力学の法則はめちゃくちゃになってしまうのではないか？」
「それは、実現不可能と言われて続けてきた永久機関なのではないか？」

悪魔と言えども熱力学の法則を犯すことはできない。それでも悪魔が存在するとはどういうことか？ 実は、悪魔と熱力学の法則とが共存できる狭い道がある。物理法則が許す範囲内で、ほんのわずかな隙間ではあるが、悪魔の居場所がある。

改めて断っておくが、本論は永久機関ー第二種永久機関が実現できるといったお話ではない。第二種永久機関は実現できない。これは世界中の良識ある人々が認める、厳然たる事実である。本論中でも随所で、第二種永久機関が実現できないことを論拠としている。にもかかわらず、熱運動を温度差無しに直接利用する方法が存在する。つまり、ここで言うMaxwellの悪魔は第二種永久機関とは別物なのである。それは、全く何の制限も無く無尽蔵に利用可能なエネルギーを生み出す仕組みではない。熱力学の法則のために、悪魔の挙動には強い制約が課せられている。この制約を含めて悪魔の姿を思い描くと、どうも永久機関とは呼び難いものに収斂する。それでも、いかに熱力学の法則が絶対であっても、悪魔を完全に根絶することはできなかった。悪魔は生き残ったのである。

それでは、ここで言う「強い制約」とは一体何なのか？
どこまでが可能で、どこからが不可能なのか？
これらを明らかにしてゆくのが本論の目的である。

本論で言わんとする可能と不可能の境界線は、実に微妙な場所に位置している。歯がゆい話だが、たった一言で結論を言い切るのはなかなか難しい。また、結論の真偽はともかくとして、ここでの話を理解するためには熱・統計力学に関する予備知識が必要となってくる。本論では、まず必要となる予備知識を説明する。その上で、悪魔は実現可能だという挑戦的な議論を試みよう。

最初の提唱者のMaxwellも、悪魔の存在を頭から信じていたわけではあるまい。これまでの過去に、悪魔のパラドックスから永久機関は生まれなかったが、熱・統計力学と情報理論の接点についての深い考察が成されてきた。この意味で、Maxwellの悪魔は充分にその役割を果たしてきたわけだ。

今ここで、私は議論され尽くしたパラドックスを、いま一度提起しようとしている。ここから短絡的に永久機関が生まれるとはにわかに信じ難いが、ひょっとすると何らかの新しい視点が開けるかもしれない。さらにひょっとすると、夢のような「分子モーター」の実現につながる可能性もゼロではない。

本論の内容は、実験事実に基づく学術的な報告ではなく、単なる作業仮説に過ぎない。統計学の帰無仮説のように、全ての文末に「ーという可能性は否定されない」という句を付け足さねばならないだろう。しかしそれでは、あまりいにも言い訳がましく、歯切れが悪い。いかなる内容であれ、不可能を可能にするストーリーには、夢がある。願わくば、そんな夢を大切にしたいものである。

「不確定分子モーター」とは

■ Uncertainty Molecular Motor

本論の内容は、

「分子の熱運動を利用可能なエネルギーに変える仕組み」

についての考察である。

このような仕組みは「第二種永久機関」と呼ばれており、物理的に実現不可能とされていた。しかし、ある条件を付与すれば、この不可能が可能に転ずる。

ー 少なくとも、熱力学の法則に反しなくなるので、可能性を否定する理由がなくなる。

その条件とは、

「作用する時刻が不確定」

ということである。

つまり

「分子の熱運動を、作用する時刻が不確定であるような、利用可能なエネルギーに変える仕組み」

の実現は、決して不可能ではない。

詳しくは本論で述べるが、この「作用する時刻が不確定な仕組み」はエントロピー増大則に反しない。従って、この仕組みは「第二種永久機関」ではない。実のところ、この仕組みには原理的に多くの制限が課されることになるので、従来の意味での永久機関とは言い難い。

そこで、本論では永久機関という言葉避けて、この仕組みのことを

「不確定分子モーター」

あるいは単に「分子モーター」と呼ぶことにした。

「不確定」とは、時刻が不確定という特徴を示したもの。「分子モーター」とは、分子サイズの原動機のことである。

「分子モーター」と言えば、一般には生体内での運動を司る微小な機関を指し示すことが多い。本論に登場する分子モーターは架空のモデルであり、生物の持つ分子モーターと必ずしも同じではない。しかし、架空の不確定分子モーターが、実在の生物の持つ分子モーターの解明に何らかの手掛かりを与えるかもしれない。

「生物の中には Maxwellの悪魔が住んでいた」

そう思うと、何とも愉快的な話ではないか。

少し以前であれば、ここで言わんとするような類のお話はどこにも持って行き場が無かった。今日ではインターネットを通じて誰しもが言いたいことを言える。思えば良い時代となったものである。

それでは、長い話になるが、どうか最後までお付き合い願いたい。

■ 不確定 (Uncertainty)

不確定と言えば量子力学に登場する「不確定性原理」を想起される方が多いと思うのだが、「不確定分子モーター」はそれとは何の関係もない。本論では古典的な力学と統計力学しか扱わないので、現代的な視点からすれば実に地味な感がある。量子力学はもとより、素粒子論や宇宙論、時空の歪みや複素多次元空間といった「難解な最先端の物理」は一切登場しない。期待している向きには悪しからず。

要約 ～ ここには何が書かれているのか？

2006/08/15

分子の熱運動は、たとえ温度差が無くても、動力源として利用することができる。
理論的には熱運動のみを動力源として、現実的には熱運動以外の動力源を補助的に用いて、従来の熱機関(カルノーサイクル)よりずっと効率のよい分子モーター(分子程度の大きさのモーター)を作ることができる。

熱力学第二法則によれば、温度差のない状態下で分子の熱運動を動力源として利用するのは不可能ということだった。しかし、よく考えてみると不可能なのは

「熱運動を確定した時刻に、利用可能なエネルギーに変換する」場合であって、

「熱運動を不確定な時刻に、利用可能なエネルギーに変換する」のは決して不可能ではない。

ここで言う「不確定な時刻に」とは、エネルギーが変換される時刻を予め明確に言い当てることできない、という意味である。

なぜ「不確定な時刻」であれば利用可能なのか。

熱運動とは、そもそも「作用する向きや大きさがわからない運動」のことだった。

わからない、即ち「場合の数が多い」運動を、わかっている、即ち「場合の数が少ない」運動に変換することは不可能だ。もし熱運動を直接利用しようというのであれば、「わからない」ものは「わからないまま」利用するしかない。

「わからないまま利用する」とは一体どういうことか。

実は「取り出される時刻がわからないエネルギー」であれば、場合の数についての条件を満たしつつ、同時に動力源として利用可能という要件も満たすことができるのである。

例えば、取り出される時刻が1秒後、2秒後、3秒後のいずれかわからないエネルギーというのは「3通り」の場合の数を持つ。このとき、たとえエネルギーの元になった熱運動が「3通り」の場合の数を持っていたとしても、場合の数についてのつじつまは合っている。この例では3通り相当のエネルギー、 $E=kT*\ln(3)$ を取り出すことができる。

取り出される時刻がわからないエネルギーというのは利用しにくいには違いないが、この例ならとにかく最大3秒待てば必ず利用できる。



エネルギーが取り出される時刻がわからないことには、本質的な意味があるのだろうか。

例えば、取り出されたエネルギーを一時的に蓄積した後に、改めて確定的な時刻に取り出したとすれば、時刻が不確定といった当初の性質は失われないだろうか。

そうはならない。

異なる時刻に取り出されたエネルギーを、何の損失も無しに確定的な時刻に作用するエネルギーに変える物理的手段が存在しないのである。

例えば、取り出される時刻が1秒後、2秒後、3秒後のいずれかわからないエネルギーを、確実に4秒後に作用するエネルギーに集約するには、最低 $kT*\ln(3)$ 以上のエネルギーの損失をとまう。つまり、時刻を不確定にしたことによって取り出された利用可能なエネルギーは、時刻を確定した瞬間に消滅するのである。



場合の数についてつぶさに考察すれば、たとえ上記の様な「時刻不確定なエネルギー」が取り出せたとしても熱力学第二法則には反していないことが解る。従って「時刻不確定なエネルギー」の利用は第二種永久機関では無く、熱力学第二法則の例外でも無い。

熱運動を利用するためには「エネルギーが取り出される時刻が不確定であること」が必要条件だったのである。

熱運動を利用可能なエネルギーに変える際に課せられる条件とは、以下の3項目である。

■ 1 : 時刻不確定の制約条件

ある一定時間内に取り出すことができるエネルギーの大きさ E は、エネルギーの出力の仕方についての場合の数、つまり出力パターンの総数 N の対数を超えることはない。

$$E \leq kT \ln N$$

k : ボルツマン定数

T : 絶対温度

N : エネルギーの出力の仕方についての場合の数、出力パターンの総数

この式の形自体は目新しいものではないが、注意すべきは N の意味である。ここで言う N は、エネルギーがいつ出力されるかについての場合の数、つまり時間軸上の場合の数を意味している。普通に統計力学で用いられるような、空間上の配置についての場合の数を意味するものではない。

取り出されるエネルギー E を縦軸に、時刻 t を横軸にグラフを描いたとしよう。出力パターンの総数 N とは、このグラフ上に描かれている線の本数のことである。

出力の仕方が決定的で予測がつくとき、グラフ上の線は1本だけである。このとき $N=1$ であり、取り出されるエネルギーの大きさは $kT \ln 1 = 0$ となる。つまり出力が決定的な場合には、エネルギーを取り出すことができない。

出力の仕方が2通りあって、そのどちらになるか予想がつかないとき $N=2$ である。このとき取り出されるエネルギーは $E \leq kT \ln 2$ であり、幾ばくかのエネルギー (>0) が得られる可能性がある。

上ではグラフ上の線の重みは全て等しいものとしたが、一般には確率的な重みを乗じた値を用いる。いま、出力の仕方が N 通りあって、それぞれの実現確率が P_n であったとしたとき、上の $\ln N$ に相当する項は

$$\sum P_n * \ln(1 / P_n)$$

となる。

取り出されるエネルギー E の大きさは、即ち

$$E \leq kT \sum P_n * \ln(1 / P_n)$$

■ 2 : 一時性の制約条件

温度差の無い初期状態から最終的に温度差を生じることはいくつかできない。
また、最終的に温度差が作れるような状態を生じることはいくつかできない。

この制約は単に熱力学第二法則を繰り返したに過ぎないのだが、ここでもう1つ、次の言明を付け加えよう。

温度差が在る状態、または温度差を作れるような状態は、一時的にだけ、実現することができる。

熱力学第2法則によれば、また、経験的に言っても、温度差の無い初期状態から最終的に温度差を生み出すことはできない。しかし「一時的に」であれば、温度差が生じることは法則によって禁止されていない。熱運動から取り出される「利用可能なエネルギー」は「一時的」にか存在し得ず、永続的に「利用可能な状態」に留まることはできない。最終的には得られた利用可能なエネルギーの全てを、元の熱に返さなければならない。それゆえ、このエネルギーを用いて何らかの永続的な結果を残すことはできないのである。

逆に言えば「一時的に」でありさえすれば、利用可能なエネルギーが得られたとしても矛盾は生じない。ある一定の期間内で「いつ取り出されるか分からない」という条件を付ければ、エネルギーを熱運動から「一時的に借りることができる」のだ。借りている間は、得られたエネルギーを任意の目的に使用することができる。

それでは、一体どれほどの期間エネルギーを「借りている」ことができるのか。それは「エネルギーの作用する時刻が不確定である期間中」である。エネルギーが作用する時刻が分からない場合に限り、その「わからない分だけの」エネルギーが利用できる。ここで、測定等の操作を通じてエネルギーが作用する時刻を特定しようとするれば、測定に操作に費やすエネルギーの大きさは借りてきたエネルギーを上回る。借りてきたエネルギーに付帯する「時刻不確定」という性質を失った時点で、エネルギー自体が元の熱に帰すのである。

■ 3 : エネルギーの上限

一定時間内に取り出されるエネルギーの大きさには上限がある。

古典的な考え方に基づいて時間が連続的なものとするれば、時間の最小単位が存在しないため、一定時間内にいくらでも大きな「場合の数」を埋め込むことが可能となる。しかし不確定性原理に基づいて考えると、時間 \times エネルギーの大きさに最小単位が存在するため、一定時間内の「場合の数」には上限が定められる。それゆえ、一定時間内に取り出される利用可能なエネルギーの大きさにも上限が課せられることになる。

1秒間あたりに取り出される利用可能なエネルギーの上限値を、最も単純な場合について見積ってみよう。ここでは時間を離散的に扱い、ある小さな最小単位が存在するものとしよう。「エネルギーが次に取り出されるまでの待ち時間が1単位時間後か、2単位時間後かのいずれかわからない」場合について考察する。このとき1回に取り出されるエネルギーの大きさは

$$\Delta E \leq kT \ln 2$$

不確定性原理によれば、

$$\Delta t \Delta E = h$$

ΔE が大きければ Δt はいくらでも小さくなるのだが、ここでは ΔE は取り出されるエネルギーの大きさでもあるので、無制限に大きくはならない。エネルギーが取り出される時刻が「1単位時間後か、2単位時間後かのいずれかわからない」場合をあてはめれば

$$\Delta t \geq h / kT \ln 2$$

この逆数をとって、1秒間は最小単位時間がいくつ分に相当するか、つまり最小単位時間の「クロック数」 S は

$$S \leq 1 / \Delta t = \Delta E / h = kT \ln 2 / h \text{ クロック}$$

ΔE は1〜2クロックに1回の割合で稼ぎ出されるので、1秒に流れるエネルギーの最大値は

$$S * \Delta E \leq (kT \ln 2 / h) * kT \ln 2 \quad \dots 1 \text{クロックで取り出せた場合}$$

$$S * \Delta E \leq (kT \ln 2 / h) * kT \ln 2 * (1/2) \quad \dots 2 \text{クロックかかった場合}$$

具体的に値を見積もってみよう。

プランク定数: $6.626068 \times 10^{-34} \text{ (m}^2 \text{ kg / s)}$
ボルツマン定数: $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K (joules/kelvin)}$.
絶対温度: $T(\text{K}) = T(\text{°C}) + 273.15$... 気温 20°C は 293.15K
 $\ln 2 = 0.693147181$

1分子が1秒間に稼ぐことのできる利用可能なエネルギーの最大値は

$$\begin{aligned} & (kT \ln 2 / h) * kT \ln 2 \quad (\text{1クロックで取り出せた場合}) \\ & = (1.38 * 10^{-23} * 293.15 * 0.69)^2 / (6.63 * 10^{-34}) \\ & = ((1.38 * 293.15 * 0.69)^2 / 6.63) * (10^{(-23 -23 + 34)}) \\ & = 11752.29 * (10^{-12}) \\ & = 11.75 * (10^{-9}) \text{ (joules/s)} \end{aligned}$$

この値はエネルギーが1クロックで取り出せた場合である。
エネルギーを2クロックかかって取り出した場合の値は上の半分となる。即ち

$$\begin{aligned} & 11.75 * (10^{-9}) / 2 \quad (\text{2クロックかかった場合}) \\ & = 5.88 * (10^{-9}) \text{ (joules/s)} \end{aligned}$$

取り出されるエネルギーの大きさは、日常の感覚からすれば無視できる程に小さい。なので、実際のところ自動車の様な巨大な物体を動かせるかどうか、かなり疑わしい。それでも、この小さなパワーは将来開発されるであろう分子程度の大きさの機械にとって無視できない大きさではないだろうか。

以上の3条件から、中心となる論点をピックアップしてみよう。

- ・時刻不確定
- ・一時性
- ・時間の最小単位

問題の中心となる概念、主役は「時間」だということがお解り頂けるだろうか。

「熱運動を動力源として利用できないか」という問いかけは、「時間とは何か」という古来からの根源的な問いかけに還ってゆくのである。

先の要約で想定される主要な疑問について手短かに答えておこう。

実のところ、議論すべき項目は高々一枚の紙面に収めるには余りにも多い。それらは本論で述べるべきものであるが、端的に要点を知ることまた必要であろう。以下に3点を挙げる。

疑問点1

「時刻が不確定」という概念は、何か根本的な取り違えをしているのではないか？

ここで「場合の数」と呼んでいるものは、状態量、つまりある時刻において一意に定まる量のはずだ。

場合の数をSとすれば、Sは時間の関数

$$S = S(t)$$

として表記されるべきものである。なので、Sに異なる時刻を(例えばt1とt2などを同時に)持ち込むのはおかしいのではないか？

- 確かに「時刻が不確定」という言い方は誤解を招きやすい。より正確には次の通りだ。

いかなる時刻においても場合の数が減少しないためには、系からエネルギーが取り出される時刻が不確定である必要がある。

世界全体についての場合の数S(t)は、いかなる時刻tに於いても減少しない。(実質的には増大する)「時刻が不確定」なのは、対象となる系と外界の間でエネルギーをやりとりする時刻についてである。

具体的な状況を考えた方がわかりやすい。

いまここに、外界に対して仕事を行う1つの装置があったとしよう。我々が身近に知っている装置、エンジンやモーターといった類のものは、周期的に、あるいは規則的に動作する。例えば電力で駆動するモーターの場合、何ボルト何アンペアの電力を与えれば、一秒間に何回転するのか、計算によって正確に求めることができる。こういった装置は、いつ、どれくらいの仕事を得られるのかを予め正確に言い当てることができる。つまり「確定的に」動作する。

それに対して、いつ、どれくらいの仕事を得られるのかを予め言い当てることのできない装置というものも考えられる。つまり、非周期的に、あるいは不規則に仕事を行う装置といったものだ。こういった装置のことを「確定的な」装置に対比させて、ここでは「不確定な」装置と呼ぶ。

この2種類の装置のうち、熱運動を利用可能なエネルギーに変換できるのは、後者の「不確定な」装置だけに限られる。前者の、確定的に動作する装置は熱運動を直接利用することはできない。

熱運動を利用する装置、即ち対象となる系がサイクリックな(巡回的な)挙動を示すものだったとしよう。このとき、系が熱を吸収して利用可能なエネルギーを出力するための条件は

1 サイクルに要する時間が一律ではなく、N通り存在すること

である。

系が熱を吸収して、系の持つ場合の数がN通りだけ増大したとする。もし系からエネルギーを取り出す時刻が確定的であったなら、エネルギーと共に場合の数を外界に持ち出すことはできない。その結果、系の持つ場合の数は一方的に増大する。しかし、系からエネルギーを取り出す時刻が一律に定まっていなかったなら、時刻を変えるという手段によって場合の数を外界に持ち出すことができる。その結果、系の持つ場合の数はサイクル開始当初の状態に戻る。また、系から異なる可能性を持つ時刻にエネルギーを受け取った外界の場合の数は増大し、外界の場合の数は系に熱を与える以前の状態に戻る。かくして、世界全体の場合の数は減少しないのである。

⇒ 詳しくは第4章、03_不確定の定式化 で取り上げる。

疑問点2

「エネルギーを一時的に借りる」と言うが、もし一時的に借りてきたエネルギーが利用可能なものであれば、それを永続的な状態に持ち込むことができるはずだ。

例えば一時的に借りてきたエネルギーを全て摩擦熱に変えて、特定の部位の温度を上げることができる。ここで生じた温度差を用いてカルノーサイクルを回せば、確定的かつ永続的な状態で利用可能なエネルギーが得られるはずだ。これは「一時的にだけ利用できる」という元の主張と矛盾してはいないか。

● 実は、この質問のように確定的かつ永続的な状態でエネルギーを取り出そうしても、不確定分子モーターからは出力が得られないのである。温度差が生じた時点で高温部から低温部への熱の移動が起こり、それが分子モーターの出力と釣り合うことになる。従って分子モーターは、最初から確定的な温度差を生じることができない。しかしながら、例えば次の様な状況であれば不確定分子モーターを稼働させることができる。

・特定の部位に高温状態を作らず、速やかに周囲に発熱を行なう。

・高温になっている時刻が正確に定まらず、いずれ周囲に発散する経路が存在する。

たとえ一時的に温度差が生じたとしても、その温度差がいずれは発散するといった状況下においてのみ、不確定分子モーターは意図した動作を行う。

ちょうど電気回路においてプラスからマイナスに一巡する経路があって初めて電流が流れるように、不確定分子モーターから生じるエネルギーも、熱から生じて熱に帰す経路があって初めて流れることができるのである。確定的な高温状態とは、いわば電気回路の断線状態のようなものだ。不確定分子モーターは、エネルギーが一巡する経路が存在する場合に限って稼働するのである。

⇒ 詳しくは第5章、02_温度差の矛盾 以降で取り上げる。

疑問点3

非対称性はどこから生じるのか？

熱運動はあらゆる自由度に対して均等に行き渡る。一方、利用可能なエネルギーは、利用者が意図した特定の向きにだけ作用する。均等なものから不均等なものが生じるのは不合理ではないか？

● 利用可能なエネルギーの非対称性は熱運動によって与えられるのではない。熱運動を利用可能なエネルギーに変換する仕組みを、最初に設置したときに与えられた初期値が非対称性を生んでいる。例えばある粒子の円環上の運動を考え、熱運動が右回りと左回りの2方向に均等に作用していたとしよう。ここで、利用可能なエネルギーを取り出す仕組みを最初に右向きに設置すれば、エネルギーは右回りに流れる。反対に左向きに設置すれば、エネルギーの流れは左回りとなる。(円環上の運動なので、どちらか一方にエネルギーが流れ続けることによって温度差が生じることはない。)

左右を決定する1bitの情報は最初の配置、つまり初期値としてもたされたものである。そして、この1bitの情報は、仕組みの配置を変更する等の操作を外部から加えない限り失われることはない。(理論的には失われることはない。しかし実際には外界からの攪乱によって、この1bitはいずれ散逸することになるだろう。)

⇒ 詳しくは第5章、03_非対称性を求めて 以降で取り上げる。

悪魔の兄弟、Maxwellの悪魔とLaplaceの悪魔の違いについて

2006/08/14

「Maxwellの悪魔は実在する」

本論の主張を直感的に把握するには、やはり悪魔の寓話によるのが最も手っ取り早いと思う。以下のお話はやや正確さには欠くが、本論で言わんとする核心を突いたものである。

Maxwellの悪魔と対になって語られるものに、Laplaceの悪魔がある。Laplaceの悪魔とは、この宇宙に存在する全ての粒子についての位置と運動量を計算することができるという、人知を越えた架空の存在のことである。Laplaceの悪魔にとって、この世に未知の要素は微塵も無い。従ってLaplaceの悪魔は全く外れることのない、完全な未来予測ができることになる。

Maxwellの悪魔とLaplaceの悪魔、この2匹(?)の悪魔はしばしば「兄弟」として語られることがある。なぜなら、一方が存在すれば、他方も存在可能となるからだ。

もしMaxwellの悪魔が存在すれば...

Maxwellの悪魔が生み出した自由エネルギーを利用して、宇宙に存在する粒子の運動を次々に測定してゆけば、いずれ未知の粒子はなくなるだろう。少なくとも、未知の粒子は減ってゆくはずだ。あらゆる粒子の運動が機知のものになれば、あらゆる運動が予測可能となるのだから、未来の全てを言い当てることができるようになるだろう。あるいは、未知の粒子が減るにつれて、未来予測の精度は限りなく上がってゆくはずだ。

(Laplaceの悪魔は不確定性原理によって否定される、というお話があるが、ここでは古典的な範囲に止め、量子の世界に深入りしないこととする。)

もしLaplaceの悪魔が存在すれば...

あらゆる粒子の運動が予測可能なのだから、もはや「でたらめな熱運動」というものはあり得ない。気体分子運動についても、次の瞬間にどの向きからどれほどの強さで分子が飛んでくるのか知り尽くしているのだから、その運動を利用したい方向に向けるのは容易なことだろう。

こういうわけで、2匹の悪魔は一見すると等価にも思える。しかし実のところ、この2匹の悪魔は等価ではない。Maxwellの悪魔は存在し得るが、Laplaceの悪魔は存在し得ない。つまり、熱運動から利用可能なエネルギーを取り出すことはできるが、それによって、完全な未来予測が(あるいは、より精度の高い未来予測が)可能になることはない。

なぜMaxwellの悪魔の方だけが存在できるのか。実は、この2匹の悪魔の差異こそが、Maxwellの悪魔自身の謎を解く鍵なのである。

Maxwellの悪魔は「未来予測の精度を上げない範囲において」その活動を許されている。Maxwellの悪魔がどれほど活動しても、その結果として、宇宙全体の情報量が増えることはない、又、増えてはならない。

ちょっと考えてみると、未知の運動量を持つ粒子を既知の運動量の粒子に変換する行為「測定」は情報量増大のプロセスであり、もう一方に情報量減少のプロセスがなければ釣り合いがとれないように思える。それゆえ、測定のみを行い、情報量増大だけを行う悪魔は存在し得ぬものと、これまで誰しもが考えてきた。

しかし、悪魔は必ずしも先に測定してから行動を起こす必要はない。分子の運動量を得る代わりに、他の何物かを犠牲にすれば、情報量の増大を招かずとも済ますことができるのではないか。それでは、失うべき「他の何物か」とは一体何なのか。結論を言えば、それは「確定した未来の情報」である。何らか

の方法で未来に不確定な要素を残すことができれば、情報量についてのつじつまを合わせつつ、分子の運動量を得ることが可能となる。つまり、Laplaceの悪魔を召還することなしに、Maxwellの悪魔だけが存在できることになる。

未来を不確定にしながらい利用可能なエネルギーを取得する方法、それは、取り出されたエネルギー自体に何らかの不確定要素が盛り込まれてることを意味する。取り出されるエネルギーを粒子の運動と考えた場合、考慮すべき要素は3つある。

1: 向き

2: 大きさ(絶対値)

3: 時間

である。

1: 運動の向きが不確定であっては利用できない。

2: 運動の大きさについては、平衡に達した熱運動がすでにこれ以上ばらつきを増やせない程にばらついている。(熱平衡状態＝情報量が最も少ない状態となっている。)

仮に熱運動と区別できるような大きさの運動が取り出せたとしたら、その過程で必ず情報量は増大するはずだ。よって運動の大きさに情報量の減少を盛り込むことはできない。

3: 時間が、つまり作用する時刻が不確定な場合はどうなるだろうか？

もし利用可能なエネルギーを取得する時刻が不確定だとすれば、このエネルギーの存在自体によって「確定した未来の情報」は失われることになる。仮に、いまLaplaceの悪魔が住むような「完全に知り尽くした、理想的な世界」があったとしよう。ここに、いつエネルギーが発生するかわからない、不確定なエネルギー源を持ち込んだとしたらどうなるか。完全な知識は不確定なエネルギー源によって破壊されるだろう。つまり、エネルギーが取り出される時刻が不確定なときには、その不確定な分だけ未知の熱運動を既知に変えることが許されているのである。これこそがMaxwellの悪魔に許された行動であり、Maxwellの悪魔が、Laplaceの悪魔と違って存在できる理由なのである。

先の要約を読んで、よく分からないことがたくさん出てきたのではないだろうか。
途中の経緯を全て省いて、いきなり結論だけを示したのだから、分からないのが当然かと思う。

「場合の数、と呼んでいたものは何か？ 場合の数と呼んでいるものの扱い方があやふやな気がしてならない。」
「本来状態量で議論すべきものを、時間を持ち出して煙に巻いただけのような気がする。」
「不確定で一時的であれば熱力学第二法則に反しない、と主張しているようだが、それはなぜか？」
「時間が大事だと言っているようだが、時間の何が大切なのか、全くイメージが湧かない。」
「既に議論され尽くした、半ば形而上学的な問題を蒸し返しているだけではないのか。」
「生物の中に熱運動を利用する仕組み〜悪魔が住んでいる、というのは本当なのか？ 証拠はあるのか？」

これらの疑問については、本論で追々答えていこうと思う。
ここでは本論の展望を兼ねて、おそらく最大の疑問である

「熱運動が利用可能だという、そのアイデアは一体どこから出てきたのか？」

について答えよう。

全てのアイデアは、熱に関する素朴な疑問から始まった。

■ STEP1: 運動が摩擦熱に変わることはあっても、その逆が無いのはなぜだろう？

熱とは、ランダムな分子運動の集まりである。マクロな物体の運動がミクロな分子運動に変わってゆくのは、物理学の解釈によれば、つまるところ確率の問題とされている。※
運動エネルギーを、全ての分子に「えこひいきなく平等に」分配した場合、全ての分子が一丸となってマクロな運動をしているよりも、摩擦熱となってランダムな運動をしていた方が遙かに多くの場合があり得る。ということは、多数の分子に対して特別な制限なしにエネルギーを与えたとき、結果が熱運動となる確率はマクロな運動となる確率よりも圧倒的に高い。例えば、マクロな運動をしていたときのエネルギーの分配方法がただの1通りしかなかったときでも、ランダムな熱運動についての分配方法は、それこそ何億、何兆を越えるほどの莫大な数となる。この圧倒的な数の差は、マクロな物体を構成する分子の数が非常に多いことに由来する。確率の低いマクロな運動の状態よりも、確率の高い摩擦熱の状態の方が自然な姿であり、物体は放っておけば自然な姿になる・・・
以上が物理学、その中でも統計力学と呼ばれる分野での大雑把な説明である。

■ STEP2: 確率の問題なのであれば、ごく僅かな確率で「逆転現象」が起こり得るのだろうか？

ロイヤルストレートフラッシュを引いたり、宝くじを当てたりするのと同じように、ごく希には普通とは逆の現象、摩擦熱が運動に変わるようなことが起こり得るのだろうか？
もちろん確率の数字は、宝くじよりうんと小さいには違いない。であれば、うんと小さい(分子数の少ない)系を相手にすれば、確率は「ゆらぐ」のではないか？ 実際、分子スケールの世界では、熱運動は「ブラウン運動」として観測することができる。近い将来、分子数個程度の大きさの機械を扱うテクノロジーが確立したときに、確率の大小はもはや絶対的な壁とは言えなくなるだろう。

■ STEP3: 果たしてランダムな熱運動を「意のままに」扱うことができるのだろうか？

しかし、たとえ大きさの壁がクリアできたとしても、避け難い根本的な問題が残されている。これまでブラウン運動をエネルギー源として利用できた試しが無いのは、ブラウン運動がランダムであり、意図した特定の向きに作用させることができなかつたからである。

ランダムからオーダーへ、つまりそれは「選択し得る場合の数がたくさんある状態」から「場合の数が少ない状態」を作れるか、という問題である。

答えはNo！

「場合の数を減らす」ことは物理的に不可能だ。この事実は、古典的な力学の法則を考えれば十分納得できる。この「場合の数の法則」こそが長年、熱運動が利用不可能とされてきた根本的な理由なのである。

■ STEP4: 場合の数を減らす必要はない。時刻がわからない、という状態に持ち込めば。

ここで、本論での最も重要なひらめきが登場する。運動の場合の数を、時刻の場合の数に置き換える、というアイデアだ。

「時刻がわからない、という状態に持ち込めばランダムな運動を意図した特定の向きに変えることができる」

エネルギーを利用する、という目的に際して「場合の数を減らす」ことは必ずしも必須ではない。元になる熱運動がN通りの場合の数を持っていたとしても、それをそっくりそのまま「作用する時刻がN通りの、意図した特定の向きに作用するエネルギー」に置き換えることができるはずだ。

■ STEP5: アイデアはコンピューターからやってきた

「時刻がわからない・・・」

実は、このアイデアはコンピューターの仕組みを考察することから得られたのである。

「コンピュータで消費する電力を最小限に抑えるにはどうすればよいか？」

この問題については、ランダウアーの原理として知られる以下の答が知られている。

「演算自体は原理的に電力を消費しない。電力を消費するのは、最後にメモリーをクリアするときである」

私は、この問題について考えを進め、1つの興味深い結論に達した。

「メモリーのクリアに要する時間の長さを可変にすれば、演算後に残された全ての不要な情報を、発信する時刻が不確定な唯1つのパルス信号に集約することができる。」

コンピュータ上の情報を、時刻が不確定な信号に置き換えることができるなら、同様の方法で、分子運動の情報を作用する時刻が不確定なエネルギーに置き換えることができるだろう・・・これが私の辿り着いた結論である。

ここで語られるアイデアは、2つの理論の掛け合わせから生まれてきた。

1つは「統計力学」と呼ばれる学問。

もう1つは「情報理論」と呼ばれる、比較的新しい分野。

「不確定分子モーター」は、統計力学を母とし、情報理論を父として生まれてきたのである。

■ STEP6: 熱力学第二法則と矛盾しないだろうか？

もし熱運動から利用可能なエネルギーが取り出されるのだとすれば、熱力学第二法則と矛盾が生じないだろうか。検討したところ、以下の理由によって矛盾は生じないことが分かった。

熱力学第二法則に違反する、物理的に不可能なプロセスとは、「選択し得る場合の数がたくさんある状態」から「場合の数が少ない状態」を作り出すことである。

例えば、右から飛んでくるか左から飛んでくるかわからない分子から(他に何の変化の跡も残さずに)1方向に確定した運動を取り出そうとしても、2通りの状態から1通りの状態を作り出すことになり、矛盾をきたす。ところが、右から飛んでくるか左から飛んでくるかわからない分子を、「右ならば1秒後に、左ならば2秒後に」1方向に確定した運動に変えたとしても、2通りの状態から2通りの状態を作り出しているの
で矛盾は無い。1秒後に運動が得られた場合の世界と、2秒後に運動が得られた場合の世界の、2通りの世界はそれぞれ異なる未来に向かうはずだからだ。

ここで、実際の世界はこの2通りの世界のうちのどちらなのか特定しようとするれば、得られた一方向の運動を何らかの方法で観測する必要がある。この観測に必要な自由エネルギーは、理論的にはちょうど得られた運動の有するエネルギーに等しくなる。(実際にはそれ以上のエネルギーを要するだろう。)つまり、この一連のプロセスは世界に対して2通りの不確定な未来を与える代わりに、その不確定な分だけのエネルギーを取り出しているのである。得られるエネルギーの大きさは、そのエネルギー自身によって世界に引き起こした不確定を(観測等の行為によって)世界からちょうど消し去るのに等しい大きさとなる。

以上の考察を推し進めてゆくと、

「世界の何処かに不確定な要素が残っている限り、その不確定要素に対応するだけのエネルギーを利用することができる」

との結論に達する。そして、ここで言う不確定要素が減少しない限り、一連のプロセスは熱力学第二法則とは矛盾していないことになる。

■ STEP7: この仕組みは実存するのだろうか？

このような巧妙な仕組みがもしあるとすれば、それは生物の世界に見い出されるに違いない。現時点で確実な証拠ではないが、実は我々の持つ筋肉が熱運動を利用しているのではないかと示唆する報告がある。

もし不確定分子モーターのお手本があるとすれば、それは「生物に学べ」ということに他ならないだろう。

■

「熱運動を利用可能なエネルギーに変える。」

一見するとこれは奇想天外な行為に見える。しかし統計力学の原理にまで遡って考えれば、ここでの主張は目新しくもなければ奇抜でもない。私はここで、何か革新的な大発見を披露しているつもりはない。むしろ自明とも思える、単純な事柄を再確認したに過ぎない。

熱運動する気体分子はなぜ部屋いっぱい、均一に広がろうとするのか。それは全く確率の為せる技であって、部屋いっぱい、均一に広がっている状態の場合の数が、部屋の片隅に集中している場合の数よりも圧倒的に大きいからである。しかしいかに小さくとも、部屋の片隅に集中している場合の数はゼロではない。非常に長い時間ひたすら待ち続ければ、気体分子が偶然部屋の片隅に集中することも起こり得るはずだ。

一般的な説明では

- ・その偶然が生じる確率が非常に小さく、ほとんど0といっても実用上差し支えないこと。
- ・偶然が起こる瞬間までの待ち時間が、それこそ宇宙の年齢を遙かに上回るほど長くなるので物理的な意味を成さないこと。

などの量的な理由によって、この「小さな偶然」を軽視してきた。

私は統計力学そのものを否定する気はないが、「小さな偶然」について上の一般的な説明とは違った見解を持っている。

「偶然が起こらないのではない。偶然が起こる瞬間がいつになるのか、観測者が知らないことが問題なのだ。」

宇宙の年齢を遙かに上回るほどの長い時間ひたすら待ち続ければ、少なくとも理屈の上では熱運動を利用可能なエネルギーに変えることができる。この単純な理屈が現実に応用できない理由は、

「宇宙の年齢を上回るほど」といった量の問題

ではなく

「いつ偶然が生じるのか予め言い当てることができない」といった情報の問題

なのだと思っただのである。そして、確率が極端に小さい、待ち時間が極端に長い、といった量の問題は特定の条件下で回避することができる。すなわち、最初から10の何十乗といった莫大な数の分子を扱うのではなく、ほんの数個程度の、極端な話ただ1個の分子を扱えば量の問題は回避できる。すると、残された本質的な問題は「いつ偶然が生じるのか予め言い当てることができない」ことだと気付く。そして、エネルギーの利用という目的からすれば「いつ偶然が生じるのかわからない」ことは致命的でないことにも気付くであろう。

不確定分子モーターの原理そのものは単純明解だ。

「利用できる状態になるまでひたすら待つ。」

- ・この方法をごく小数の分子に対して用いれば、現実的な待ち時間の内に利用可能なエネルギーが取り出せるということ。
- ・いつ利用できる状態になるのか分からないので、エネルギーが取り出される時刻が不確定になること。
- ・時刻が不確定なるが故、この世の情報量が増大することはない。言い換えればエントロピーは減少しないということ。

本論で私が主張したいのは、この3点である。

■ ※

「運動が摩擦熱に変わることはあっても、その逆が無い」のは経験則であり、なぜかと問われれば「未だかつて誰もその逆を見たことがない」というのがまっとうな答えである。物理の理論は経験則に基づくのだから、順序から言えば後付けである。ここでの議論は、もちろん経験に基づく事実の説明ではない。想像力を逞しくして可能性を探ろうというお話である。