

星は進化しない!—宇宙膨張と時間の流れ

松田 卓也*

1. はじめに

本誌の4月号で「欧州滞在記」と題して駄文を書いたところ色々な人から反応があった。特に家族のことを、豚妻愚息と書いたことに関して、ある人はミスプリではないかといひ、別の人は「松田はアホちやうか、アレは愚妻、豚児と言うんや」と教えて下さった。本当に愚読者やで、種をあかせばこの用語にはちゃんと出典があるのである。東海林さだおの随筆である。ところでさる(猿ではない)女性からはあんな言い方は女性を侮辱するものであるという、きつい抗議をうけた。もっとも内実を言えば、私の家内は自分のことを豚妻とはトンと思っていないから平気である。その証拠に、天文月報から頂いた別刷(配る所がなくて困っていた)を自分の知人や近所にバラまいていた。ところで、私が一文の中で強調したかった、日欧の科学政策の差については、だれも関心を示さなかったことは、書きそえておきたい。

と、このように書き出すと、読者は「松田は、またチャランポランなことを書くのであろう」と苦々しく思う人もいだろうし、喜ぶ人もいかもしれない。しかし、これは全て論理的ベケである。編集者の成相氏が私にむかって「前はおもしろい読み物を書いて頂きましたが、今回はおもしろくないものを書いて下さい」と言われたのである。そこで氏の意向にそうように、徹頭徹尾おもしろくない一文を書くよう努めるつもりである。というわけで、上記のような、深遠な表題に決った。読者に警告する。この先を読むと、後で後悔するであろう(先に後悔はできないものネ!)。ケナゲにも。この先を読もうとする人は、寝ころんでいれば起き上り、アグラをかいていれば正座し、ラジオを聞きながら読んでいる人は、ラジオをとめるべきである。そして筆者とともに、時間の秘密、進化の神秘を考えようではないか……ナンチャッテ。

2. 熱力学第二法則と時間の流れ

よく時空といっって、時間と空間をいっしょくたにすることが相対論などでははやったが、しかし時間と空間は、はっきりとした区別がある。空間的な方向、例えば前後、左右、上下は、運動論的に言って対称である。つまり、前へ行く運動が可能なら、後ろへ行くのも可能

であり、前後に優劣はない。ところが、時間は過去から未来へ流れており、その逆は無い。過去へのタイムトラベルというものは因果律に反するから、不可能なのである。この時間の一方向性というものは、我々は当然のこととして、受けとめているけれども、物理的にはきわめて不可思議な現象なのである。

というのは、基本的物理法則、例えばニュートン力学、電磁気学、量子力学、相対論、そのどれをとっても、時間に一方向性などないからだ。むつかしく言えば、これらの法則を記述する基本方程式は時間反転に対して不変(つまり t を $-t$ に入れかえても方程式の形が変わらない)のである。平たく言えば、ある運動が可能なら、それを映画にとって、そのフィルムを逆まわしたような運動も可能ということだ。石の落下運動に対して石を投げ上げた運動が対応する。

しかし、基本法則に、時間の向きがないということと我々の日常経験は反しているように見える。煙を口からはき出す様子を映画にとって、それを逆まわしすれば、明らかに不自然な印象を与える。空中にただよっている煙が、口に吸いこまれるという現象は、ほとんど見られるものではない。

煙が拡がる現象、つまり拡散以外にも、外から仕事をしない限り逆転が生じない現象は多くある。熱が高温度から低温度へ流れる熱伝導、気体の真空中への膨張、摩擦などである。これらの現象(まとめて散逸現象とよぶ)を統括する経験法則を熱力学第二法則とよぶ。熱力学第二法則には色々な言い方があるが、要するに散逸現象の逆は、ほっておいては生じないということである。(もちろんエネルギーを投入すれば逆は生じる。クーラーがその例である。)熱力学第二法則は、またエントロピー増大の法則ともよばれ孤立系のエントロピー(乱雑さ)は、放っておけば増大することを言っている。ちなみに、第二法則に対して、第一法則があるが、これはエネルギー保存則にほかならない。第一法則も、勿論、経験則であると言えるけれども、基本方程式自体が、エネルギー保存則を満たすように作られているという点で、第二法則とは質的に異なっている。

そこで、熱力学第二法則は、基本法則というよりは、むしろ第一法則を用いて演繹されるべき二義的な法則ではないかと考えられ、今までに多くの高名な研究者が研究してきた。ボルツマン、パウリ、ボゴリェフ、ヴァンホープ……。彼らは第二法則を導出できたと信じたにち

* 京大工 T. Matsuda

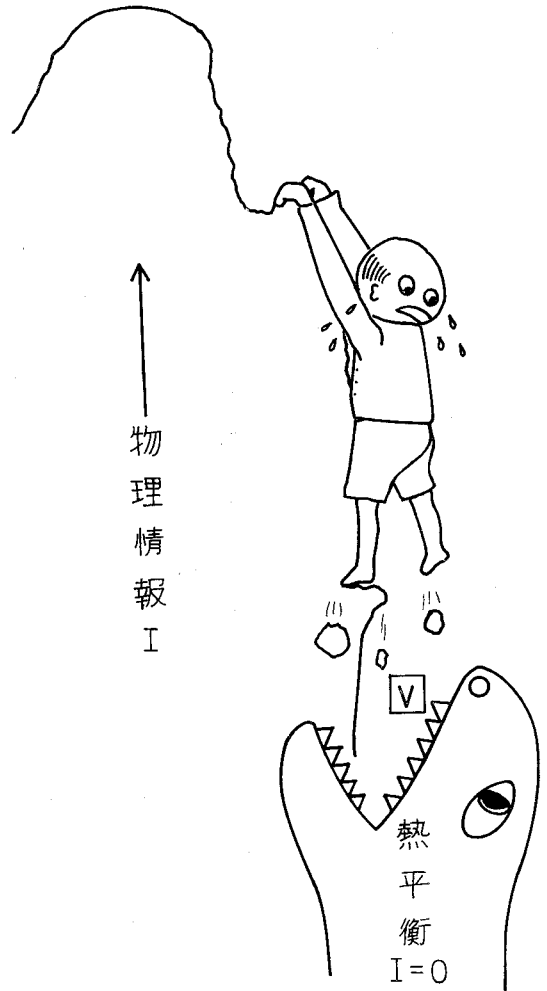
がない。しかし、なかなかどうして、第二法則は青い鳥のように、スリと、その手から逃げていくのである。

彼らが証明した事は、適当な仮定と初期条件のもとに適当に定議されたエントロピーが、時間とともに増大（正確には非減少）するという事である。しかし、ここには基本的な疑問がある。まず (1) 彼らの仮定や初期条件が現実と適合したものかどうか。(2) ある孤立系で決められた時間の方向と、別の孤立系のそれが一致するという保証はどこにあるか。(3) エントロピーとは、本質的には、我々の無知さの程度であるから、孤立系のあらゆる粒子の運動を（原理的に）知ることができたとしたら、エントロピーは増大しないはずだが、どうか。(1) に関しては、例えばボゴリェボフは $t \rightarrow \infty$ で粒子間相関がないと仮定しているが、この仮定が適切かどうかは、原理的には宇宙初期の様子にまで、立ちもどらねばならないかもしれない。(2) については、多くの孤立系における時間の流れの方向をそろえる基準系を必要とするが、それは宇宙である。(3) に関して、有限の孤立系の全情報は有限であるから（自由）エネルギーを、投入さえすれば、全情報を知ることができ、エントロピーは減少させられる。（そんな手間をかけなくても、クーラーをかければ、室内のエントロピーは減る。）しかし、宇宙全体ではどうか。宇宙のエントロピーは減少させられるか、と、このように考えると、熱力学第二法則を論ずるには、宇宙論的に考える必要があるようである。

3. 熱的死と宇宙の終焉

熱力学第二法則と宇宙の関係としては有名なケルビンやボルツマンによる熱的死の考えがある。彼らは熱力学第二法則を宇宙全体に適用して、宇宙の将来を次のように考えた。宇宙全体は外部との熱の授受がないという意味において孤立系である。孤立系のエントロピーは増大するから、宇宙全体のエントロピーも時間とともに増大する。エントロピーが増大すれば、系は熱平衡に近づく、熱平衡とは等温、等密度の状態である。現在の宇宙には銀河あり、星あり、生物ありで現在の状態はとても等温、等密度ではない（非平衡状態）けれども、いつかはそうなる。

この考えは、多くの識者に無批判に支持されているように見える（例えば「マックスウエルの悪魔」¹⁾ 参照）けれど特にこの最後の結論には、天体物理学者なら当然、同意できないはずである。我々の宇宙では、重力の存在によって、等密度化とは正反対の現象（銀河や星の誕生）が生じているからである。この点は杉本²⁾によっても強調されている。つまり、重力を含む熱力学では、熱平衡状態とは、けっして等密度状態ではないのである。むしろブラックホールという形での超高密度と、その周囲をとりかこむ輻射という形の低密度に分離した状態こそ



が、最終的な熱平衡状態と言えよう。この状態をあらためて熱的死とよぶとすれば、確かに我々は着実に熱的死に近づいていると言っても良いかもしれない。この点は後で議論する。

それはともかく、現在の我々の周囲の状態は、全然、熱平衡ではない。熱平衡でないからこそ、生命が存在し、我々が存在するのである。ブラックホールの中では、我々は生きられない。この非平衡状態は、そもそも何故に発生したのか。我々の存在の根本原因は何なのか。ボルツマンは、この非平衡状態は単なる、熱的なゆらぎにすぎないと考えた。このようなゆらぎが生ずる場合が、いかに稀であるとしても、この宇宙が無限大であり、時間も無限に存在すると仮定すれば（定常宇宙）そのようなゆらぎの生ずる確率は、いくらでも 1 に近くできる。ボルツマンのこの考え方によれば我々の存在は単なる偶然とも言える。

しかしながら、現代の進化宇宙論を採用すれば、宇宙の年令は、たった 100 億年にしかすぎない。宇宙原理を

採用して、宇宙を一様と仮定すれば、ここに生命があるなら、向うにもあるということになり、宇宙の無限の広さ（開いたモデルをとるとして）もボルツマンの議論には何ら役に立たない。この場合、現在の状態が実現する確率は $10^{10^{90}}$ 分の1という、途方もなく小さな値になってしまう³⁾。我々の存在が、このような小さな確率の上に存在しているとすれば、何と我々は幸運な存在なのであるか。

神学的には、我々がそのような選民であるという立場をとるのしかまわらないけれど、科学的には、受け入れがたい。やはり、現在の状態を必然的に導びき出す仕組が宇宙に組み込まれていると考える方が自然であろう。その仕組が実は宇宙膨張なのである。

4. 物理情報の発生と我々

さまざまな散逸現象のため、膨張宇宙の中でもエントロピーは増大している。エントロピー最大の状態が熱平衡であるから、現在のエントロピーは、その取り得る最大値よりは小さい。すると、ずっと過去に溯ればエントロピーはどんどん小さくなり、宇宙初期が最低ということになる。エントロピーが低いという事を、熱平衡からのズレの測定とすれば、我々の宇宙は熱的に非平衡状態から出発したという事になるのだろうか。非平衡の度合いが大きいほど、より複雑な構造を持った高度なものが存在しうるのだから、上の考えに従えば、宇宙初期に、あらゆる高度な存在（生物も含めて）があった事になる。

これは明らかに、進化の存在という観測事実と反している。良く知られているように、宇宙は単純な姿から出発し、より複雑な存在を生み出してきた。天体の発生や生命の進化がそれである。ビッグ・バン宇宙論によれば、宇宙は、むしろ熱平衡に近い状態から出発したと考えられている。この矛盾の原因は、結局エントロピーの低さと、非平衡度を同一視した事にある。

非平衡度をあらゆる測定はエントロピー S の小ささ（あるいはネゲントロピー $-S$ の大きさ）ではなくて、エントロピーの取り得る最大値 S_{\max} と S の差としてあらわされる。式で書けば

$$I = S_{\max} - S \quad (1)$$

この I が非平衡度なのである。(1)式で定義される I は、情報理論にあらわれる情報量と同じ形をしている。但しその場合は S は情報のエントロピーとする必要がある。 S を熱力学的エントロピーとした場合の I を、物理情報とよび、情報理論の I を知的情報とよぼう⁴⁾。物理情報と知的情報は形が似ているだけで、その間には何の関連もないとする立場もあるが⁵⁾、ブリルアンは、マクスウェルの魔物を媒介として、この両者が互に転化する事を示した⁶⁾。知的情報と言えど、何らかの物理的記憶装置

に貯えられなければならない事を考えれば、結局は物理情報の一形態に還元されるのではないかと、筆者は考えている。

話が少し脇路にそれた。宇宙の問題にかえるともう読者はお分りであろうが、膨張宇宙では平均密度の減少にともなって S_{\max} が増大するのである。宇宙初期（局所）熱平衡状態であったとすれば（多くの宇宙論学者はそう考えている）、その時点では $S = S_{\max}$ つまり $I = 0$ であった。宇宙の膨張とともに、 S も増大したが、 S_{\max} はそれ以上に急速に増大したので物理情報 I が発生し、それとともに宇宙は非平衡状態へと進化して行ったのである⁷⁾。ここで筆者は進化という言葉で物理情報の増大と定義した。

物理情報の増大（非平衡度の増大）を、もう少し具体的に宇宙初期について見よう。宇宙膨張開始後1秒以内の時期には、様々な素粒子が反応しあっていた、1秒後、10分程度以内の時期は、いわゆる元素合成の時期である⁸⁾、膨張宇宙の中で生じている種々の粒子反応に特徴的な事がある。それは反応時間 t_r と膨張時間 t_e の関係である。 t_r は密度に反比例するが、 t_e は密度の自乗根に反比例する。そのため、ある時刻 t_* までは $t_r < t_e$ であるが、 t_* 以後は $t_r > t_e$ となる。この事は次の事を意味する。 $t_r < t_e$ であれば、宇宙膨張によって周囲の環境が変化しても、粒子はその環境での最安定状態つまり熱平衡状態に自分を合わせる事ができる。ところが t_* 以後では、環境の急激な変化に自分を適応させる事ができなくなり、非平衡になるのである⁹⁾。（人間では t_* は35歳ころか?）これが物理情報発生の根元である。

元素合成について言えば、宇宙初期でヘリウムまでしかできなかったという事実こそが、物理情報の発生を意味している。もし宇宙の膨張速度が、元素合成の時期に（仮想的に）中だるみしたとすれば、あらゆる元素は最も安定なもの（例えば鉄）に転化してしまったであろう。純鉄の太陽は核反応による熱を放出せず、当然、地上に生命は生まれなかったであろう。この意味で、我々の存在は、宇宙の始まり3分間で用意されたと言っても良い。

5. ハング・アップと我々

非平衡系の存在は、このようにして宇宙膨張によって一般的には作られるのであるが、できた非平衡系は、いづれ宇宙膨張から切り離される。その場合、非平衡系が非平衡であり続けるには種々の条件が必要である。その一つは、系が熱平衡へ移行しようとする時間スケールが宇宙膨張の時間スケールより長いという条件である。この条件が成立する場合、系はハング・アップしているという⁹⁾。上に述べた宇宙膨張による物理情報の発生もハング・アップ現象の一つで、密度ハング・アップとよば

れている。ハング・アップの原因は様々あるが、我々が存在し続けられるというのも、このハング・アップ現象のおかげであろう。放っておけば、熱平衡に落ち込もうとする傾向を、ハング・アップ現象で一時的におさえて、我々を含む宇宙の万物は非平衡であり続ける。しかし、死（熱平衡）は万物の宿命でもある。人間にしろ星にしろ、その運命は同じである。死への道を進化とよぶなら星は進化するけど、そうよばないから、星は進化しない。エントロピーの減小を進化と定義すれば、星は確かに進化する、しかし星と周囲の空間をこみで考え、しかもこの空間が膨張しないと考えれば輻射のエントロピー増大のためこの体系の物理情報は、常に減小するのである。そして物理情報が0の状態である熱平衡状態、つまりブラックホール+輻射に、最終的には落つくであろう。

ここでエントロピー S の取り得る最大値 S_{\max} について一言述べておきたい。重力を含む系では S_{\max} は無限度ではないかという意見がある。重力熱力学的カタストロフィー⁹⁾によって系はいくらでも収縮して、外部にいくらでも輻射を出すと考えるからである。これは実は正しくない。一般相対論を考慮すれば、系はブラックホール+輻射になる。そしてブラックホールは、その表面積に比例した有限のエントロピーを持っている。輻射もある程度以上には増えないからエントロピーは有限である。ブラックホールのエントロピーはプランク常数を、その表式に含むという意味で量子論的効果である。古典電子論では陽子は(無限の)輻射を放出して、原子核に落ち込むという矛盾、電磁力カタストロフィがあった。このカタストロフィーを防いだのは量子論的効果であった事は言うまでもない。

6. 夜空の暗さと我々

宇宙が膨張するから物理情報が増加し、宇宙は進化すると述べた。他方、膨張から切り離された系では、物理情報は常に減少しようとしている(退化?)が、これをおし止めているのがハング・アップ現象である事を述べた。

我々の周囲の系では、それでは宇宙膨張は無視できるのであろうか。かならずしもそうではない。夜空が暗いという事実を通じて宇宙膨張が我々にも影響を及ぼしているのである。この事はゴールド¹⁰⁾によって指摘された。夜空が暗い(3K)のは、宇宙が膨張して、宇宙のエネルギー密度が低くなったからである。この事は非平衡系が非平衡であり続ける為の一つの重要な条件である。星にしろ生物、社会にしろ、生きているものは、その内部で発生したエントロピーを外部に放出して、内部のエントロピーを低く保っている。もし夜空が300Kの輻射で充ざれていれば、我々は外部に廢熱をすてる事ができなくなるであろう。宇宙は廢熱に対するゴミ箱、それも

どんどん大きくなっているゴミ箱なのである。この意味でも宇宙膨張と我々の存在は密接に関連している。

7. おわりに

宇宙論と熱力学第二法則について長々と書いてきた。しかし言いたい事はまだまだある。宇宙初期の特異性と無秩序性の原理、それによって遅延ポテンシャルが先行ポテンシャルに優先する事、熱力学第二法則は基本法則と言うよりは、境界条件である事、宇宙のアンサンブルなど……。それらは、いずれかの事にしよう。

ここまでガマン強く読んで下さった読者には感謝する。筆者がこのような内容の話をした時、「そんなエエかげんな事を言うな」とか「そんな事を考えて、何のたしになる」といった痛烈な批判を素粒子の一部の大家及び若手からあびせられた。だから、本文を読まれた読者が「時間を損したと」思われたら、それは全くノーマルな反応である。「ナカナカおもしろい」と思われたら、あなたは少々アブノーマルですぞ。多少、権威主義的だが、西欧での事情を述べれば、本文で引用した大家の他に、ペンローズ、ホーキングといった大家が、この問題を真剣に考えている事をつけ加えておきたい。

本文の内容は京大の武田、二間瀬両氏との議論を通じて、につまってきたものである事を記し感謝したい。また東大の杉本氏とは有益な討論をくりかえした。京大の佐藤(文)氏も、この問題に関心を示している¹¹⁾。これらの人々は、多少アブノーマルではないかしら。

文 献

- 1) 都築卓司:「マックスウェルの悪魔」講談社ブルーバックス
- 2) 杉本大一郎:「宇宙の終焉」講談社ブルーバックス
- 3) P. C. W. Davies: Mon. Not. R. Astr. Soc. (1976) 177, 179
- 4) 高木:私信
- 5) テル・ハール:「熱統計学 I」みすず書房
- 6) L・ブリルアン:「科学と情報理論」みすず書房
- 7) D・レイザー:サイエンス (1976) 2月号
- 8) 佐藤文隆, 松田卓也:「相対論的宇宙論」講談社ブルーバックス
- 9) E・J・ダイソン:サイエンス別冊「爆発する宇宙」
- 10) T. Gold: La Structure et l'Evolution de l'Univers (Brussels: R Stoops), (1958)
- 11) 佐藤文隆:「宇宙論と時間」理想 (1977) 2号