

科学の理解が進むとさらなる難問が現れる

田崎清明

大地は平らだ。少なくとも日常の感覚ではそう見える。もちろん、実際には大地が球面に近いことはご存知の通り、現代の常識である。異なる地点での太陽や星々の動きを比較することで（緯度方向に）大地が丸みを帯びていると考えるのが自然だとわかるはずだし、現代なら宇宙から見た丸い地球の映像もありふれている¹。

さて、「地球は丸い」と知ってしまうと、地面は平らだと思っていた頃には気にならなかった疑問が浮かんでくる。「地球の反対側にいる人は頭に血が上らないのか？」「そもそも下向きってなんだろう？」などなど。ここに、地球は自転しながら太陽の周りを回っているという知見が加わると、疑問はさらに膨らむ。「ぼくたちも太陽に引っ張られないのはなぜか？」「すごい勢いで自転しているのにどうして空気は飛んでいかないのか？」実はかなりの難問である。

これがタイトルの「科学の理解が進むとさらなる難問が現れる」ことの典型的な例だが、ここでは、また別の「ぼくたちの身のまわりの物すべては分子や原子など目に見えない小さな「粒」が集まってできている」という科学的知見に関わる話をしたい。これも今日ではもちろん常識だが、いくらそう言われても、周囲の世界に溢れる物は水とか木とか鉄とかさまざまな「材料」でできているようにしか見えない。実際、分子や原子は化学反応などの現象を説明するための理論的方便にすぎず何らかの意味で「存在する」と考えてはならないというストイックな思想は、19世紀の後半にも優勢だったのだ。しかし、20世紀の前半までには、多くの非凡な実験・観察と理論的考察から、物質は力学の法則に支配された数多くの原子の集まりとみなすと極めて見通しがよいことが明確になった。こうして科学の理解が進んだ。そして、またしても難問が現れる。なぜ百種類と少しの「粒」が集まっただけの世界がこんな風に見えるのだろうか。「なぜ岩はしっかりと硬く、水は流れるのか？」「なぜ空は青く木々は緑なのか？」など、この世界の多様さ・安定性に関する

¹ この現代にも大地は平坦だと信じている（と公言する）人々がいて、こともあろうに（狼煙とか矢文じゃなくて）インターネットで意見を述べているのだが、まあ、そういう話を始めると際限がないのでやめておく。

るすべての「当たり前」だった経験事実が、説明を要する最大級の難問になってしまうのだ²。

ここに（おそらく本質的な）追い打ちをかけるのが、力学法則の時間反転対称性だ。「その法則のもとで、ある運動が可能なら、それを時間反転した（ビデオに撮って逆回しに再生した）運動も可能」という性質である。時間反転対称な物理法則には過去と未来を区別する「時間の向き」がないと言ってもいい。そして、原子や分子の運動を極めて高い精度で記述する量子力学はまさに時間反転対称なのである。

原子や分子の運動が「時間の向き」を持たない力学法則に支配されているのなら、素朴に考えれば、この世界に「時間の向き」は存在しないことになる。しかし、もちろんそんなことはない。熱いコーヒーを部屋に放置すれば冷めてしまうし、私たちは成長し老いてそして死んでいく。「時間には「向き」があり、過去から未来に流れていく」のはこれ以上ないほどにはっきりした（そして残酷な）経験事実である。「世界は時間反転対称な力学法則に支配されている」という知見を得たために、またしても、当たり前だった事実が解決を要する難問になってしまった³。

今日では、時間反転対称な法則に支配された世界にも「時間の向き」が生じうる（そして、実際に生じた）と多くの研究者が考えている。鍵になるアイデアはすでに19世紀終盤にボルツマンらによって得られていた。本質的なのは、数多くの構成要素からなる系では「特別な状態」から「ありふれた状態」へと向かう一方的な流れが生まれるという事実である。

例えば、床の上にたくさんの積み木を高く真っ直ぐに積み上げる。下の方の積み木をコンと叩けば、タワーはバランスを失って崩れ、積み木はバラバラと床に落下するだろう。これは「力学法則のもとで可能な運動」の一つだ。さて、これを時間反転した（ビデオを逆再生した）運動、つまり、床に転がっていた積み木たちが飛び上がって上手にタワーを作り上げて安定するような運動も、実は「力学法則のもとで可能な運動」なのである。すべての積み木を絶妙のタイミングで絶妙のやり方

² 我々のまわりの世界を量子力学に従う原子集団という観点から理解するのは難しく魅力的な課題である。数多くの知見が得られたが完成にはほど遠い。

³ 〈専門的な注〉もちろん、力学法則は完全には時間反転対称ではなく、わずかな対称性の破れが「時間の向き」を生み出しているという可能性は否定できない。ただ、法則そのものが「時間の向き」を持っていると仮定してしまうのは科学研究として必然性と発展性を欠く。余分な仮定を持ち込まず、時間反転対称な力学法則から自ずと「時間の向き」が生まれてくることを示す試みが有益で、何よりも面白い（と思う）。法則に非対称性を持ち込むのはそういう試みがすべて失敗してからでいい。（なお、弱い相互作用の法則は時間反転対称性を持たないのだが、それはここで考えている「時間の向き」とは（ほぼ確実に）関係がない。）

で床から投げ上げてやれば自然に始めと同じタワーを作り上げるということだ⁴。ここで、タワーが崩れる運動を起こすのはいとも容易だが、逆向きの「混沌からタワーが立ち現れる運動」を起こすのは（不可能でないとして）極めて困難だという非対称性に注目しよう。さらに、積み木の数が多ければ多いほど困難さは増す。

これを一般化すれば、構成要素の多い物理系（積み木がたくさんある場合）では、「特別な状態（積み木のタワー）」から「ありふれた状態（床でバラバラの積み木）」に向かう運動は普通に生じるが、その逆向きの運動はほとんどあり得ないといえる。つまり、何らかの理由（ぼくたちの世界の場合は宇宙の始まりのビッグバン）によって「特別な状態」が用意されれば、そこから先は、より「ありふれた状態」に向かう一方向の流れが自ずと生まれてくるということだ。これがぼくたちの経験する「時間の向き」だというわけである。（このテーマについては、ぼくが以前に公開した講義動画 [1] もあるのでよければご覧いただきたい。）

孤立した、つまり外部からの影響を受けない物理系は、長い時間の後にはもっとも「ありふれた状態」に落ち着く。温度が一定で変化も動きもない熱平衡状態である。部屋に置いたコーヒーが冷めるのは（部屋は近似的に孤立系とみなせるので）「部屋の中に熱いコーヒーがある」という「特別な状態」から「コーヒーの温度が室温と等しい」熱平衡状態に向かう時間変化だったと解釈できる。

これはもっともらしいシナリオである。ただ、物理学の理論として説得力を持たせるためには、このアイデアを力学法則に従う大自由度の物理系での正確な命題として示す必要がある。もちろん、そういう方向の研究は19世紀終盤からいくつかあったが、なかなか決定版はない（というより何を示したら決定版なのかもよくわからない）と多くの人が捉えていたと思う。

「部屋に置いたコーヒーは冷める」—— 1998年の論文

ここで、ぼく自身の昔話になる。90年代の半ば、量子スピン系のトポロジカル相や強相関電子系における強磁性秩序の起源といった、どちらかという堅いテーマでそれなりに満足できる仕事をした時期に、ふと、「時間の向き」の問題に本気で取り組んでみようという気分になった。もちろん、テーマを変えてゼロから新しいことを始めると当分は（ヘタをするとずっと）研究成果は出ないし、そもそもこの手の問題はあまりに基礎的で手を出すのは危険だと思われることも知っていた。それでも、昔から興味を持っていた問題だし、（おそらくは）たった一回の研究者人生なのだから少し時間をかけてやってみようと思い立ったのだ。この時期には、何を研究しているのかと聞かれると「紙と鉛筆で磁石を作るという目標を達成

⁴ 〈専門的な注〉積み木の振動や空気抵抗などエネルギーが散逸する機構まで考えると、逆向きの運動は積み木の運動方程式の解とは言えなくなる。その場合にも、周囲の空気や積み木の分子までを含めた運動方程式を考えれば、逆向きの運動も解になる。

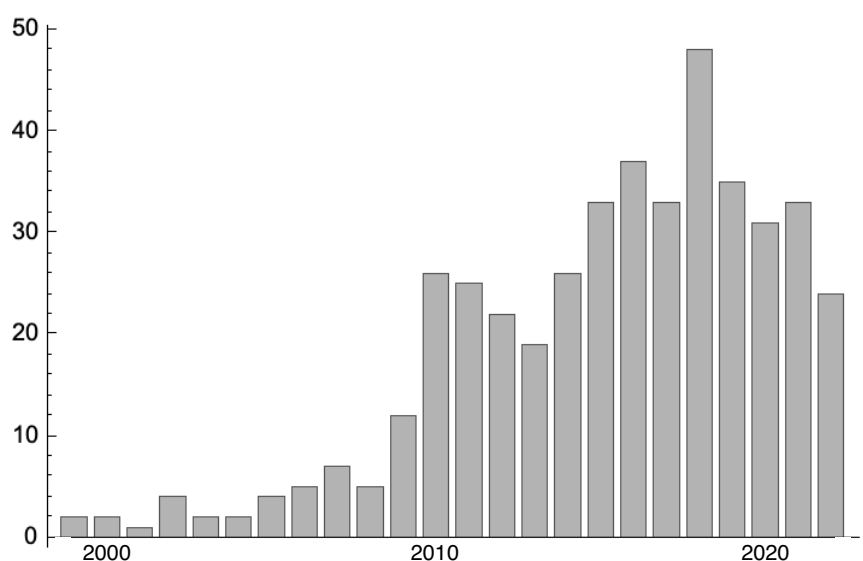
したので、次は、なぜ部屋に置いてあるコーヒーが冷めるのかを研究してます」などと答えて人を煙に巻いていた。

ぼくの戦略は、「コーヒーが冷める」問題を、統計力学の基礎づけという立場から、抽象的かつ一般的に扱うことだった。この世界の基本的な法則は（おそらく）量子力学なので、外界から孤立した、量子力学に従う系を扱う。系の状態が量子力学の法則に従って変化すれば自然と熱平衡状態が実現すること（以下では「量子系における平衡化」と略記する）を何らかの意味で証明するのが目標だ。仮に（そんなことは不可能だが）これが完全に一般的な形で完成すれば歴史的な成果である。

何年間かこの問題に集中し試行錯誤した末、ようやく少し研究が進んだ。注目する物理系（コーヒーに相当）ともっと大きな系（部屋の空気に相当）が接触した量子力学系がある条件を満たすなら、非平衡の初期状態から出発して十分に長い時間が経てば注目する系は熱平衡状態（コーヒーが冷めた状況に相当）に落ち着くことを証明したのだ。あくまで一つの数学的なシナリオだが、「量子系における平衡化」の問題に対してそれなりに一般性があり数学的に厳密な結果を得たことには一定の意味があったと思う。

この結果をまとめた論文 [2] は、ぼくの論文としてはちょっと風変わりな運命を辿った。まず、学術誌に投稿しても査読者からも編集者からも理解されず掲載拒否を言い渡される。それに反論しても「こんな結果はどんな統計力学の教科書にも書いてある」という衝撃的な（もちろん完全な誤解に基づく）上位の編集者の署名入りの手紙が届く始末だった（ぼくは性格が悪いのでこの手紙は今でも持っている！）。査読で苦労するのはいつものことだが、この場合は、そもそもこんな問題に取り組んでいる物理学者がいるということが伝わっていなかったようだ。それでも、アメリカ人ばりに強い

主張を展開して研究の意義を訴えた結果、論文は掲載された。ただ、その後の反響も寂しかった。論文の影響（あるいは、影響の欠如）を示す指標の一つに、1年間に他の論文で引用された件数がある⁵。この論文の場合は、グラフのように、出版からの2年間は2件ずつ、3年目に至っては1件



⁵ 被引用数は「どれだけ他の論文にネタを与えたか」の指標であり、例えば、論文がどれだけ広く読まれたかは反映しない。論文への反響を上手に測る指標を作るのは難しい。

しかない。多くの場合は著者自身や共同研究者が続報で引用して被引用数を増やすのだが、この論文は著者にも見放されたかのようだった。

ところが、面白いことに、出版後数年経ってから少しずつ被引用数が増え始めた。特に10年後くらいからは面白いように伸びている。偶然にも、世紀の変わり目くらいから、「量子系における平衡化」の設定にかなり近い（冷却原子系での）実験結果が出るようになったため、関連する問題に少し光が当たったからだ。出版からほぼ20年後の2018年には年間被引用数は48に達した。今までの総被引用数は400と少しで、いわゆるヒット論文には遠く及ばないが、ぼくが書いた論文の中では多い方だ。

さて、グラフからは、被引用数が2018年をピークにして下がり始めていることも読み取れる。このテーマから徐々に研究者が去っていることの表れと思われる。もちろん「時間の向き」や「量子系における平衡化」の問題が解決したわけではない。重要な知見は得られたものの、本質的なところは未解決のままだ。ただ、短期間で得られることはやり尽くされたと多くの人が感じているのだろう。

「自然は真空を嫌う」—— 2023年の論文

そして、最後は、ぼくの最近の話だ。埋もれていた論文がちょっと注目され、再び忘れ去られつつある間も、ぼくは（他の問題も研究しつつ）このテーマについてずっと考えてきた。おそらく一生かかっても解けないだろう目標もあるが、もう少し現実的な課題もあった。一つは「量子系における平衡化」の存在をもっとも懐疑的な人にも納得してもらえそうな具体例を提示することだ。近年の研究の進展の結果、一定の条件を満たす量子系は自然に平衡状態へと緩和すると多くの研究者が信じている。しかし、その事実が一切の仮定なく理論的に示された例は（ぼくの知る限りは）なかった。そんな例をとにかく作りたかった。

しばらく前に、若く優秀な友人との共同研究でようやくそういう具体例ができあがった。自由フェルミオン系というごく簡単な（簡単すぎる）モデルで「箱の左半分は気体が入っていて箱の右半分は真空」という極端な初期状態から出発して時間が経つと「気体が箱全体に広がった状態」に落ち着くことを証明した。この論文 [3] のタイトル通り「自然は真空を嫌う」という誰でも知っている話なのだが、ともかく未証明の仮定ゼロで「量子系における平衡化」の存在を証明したのだ。ブレイクスルーでも重要問題の解決でもないが、ともかく、ぼくが（というか、ぼくだけなのかもしれないが）こだわっていたことの一つを達成できた。

この結果が得られたのはかなり前なのだが、ぼくたちは（少なくともこの原稿を書いている時点では）論文 [3] を公表していない。ぼくがモタモタしてなかなか論文を仕上げなかったのが原因だ。サボっていたのではない。この結果をもっと改良できないかと悩んで、何ヶ月も費やしてしまったのだ。ぼくが改良したかったの

は（話が細かくなって申し訳ないけれど）「量子系における平衡化」を示す際の初期状態の選び方だった。今回の理論では、初期の非平衡状態は「箱の左半分だけに粒子が入った状態」を一つランダムに選んでくることになっている。すると、きわめて1に近い確率で気体が箱全体に広がることを証明できるのだ。ただ、ここで確率を使うのはどうも気に入らなかった。趣味の問題なのかもしれないが、どうせなら、どちらかと言えば単純な初期状態の一つ見せて「このまま時間が経てば緩和します」と断言できた方が理論として美しいではないか。そう思って、あの手この手で初期状態とモデルを工夫して緩和の存在を示すことを試みた。しかし、どうやってもうまくいかない。初期状態をシンプルにするとどうも気体は上手に広がってくれない（より正確には、広がることが証明できない）のだ。

かなりの時間を費やしたところで、ようやく事情がはっきりとわかってきた。言葉で表すのは至難だが、無理に説明するとこんな風だ。今回のぼくたちの仕事では「量子系における平衡化」の存在を示すために「量子系と初期状態が噛み合わない」という性質を利用する⁶。さて、ほとんどの量子系は「複雑」である。そして、複雑な系と単純な初期状態は「噛み合わない」。つまり、複雑な系で単純な非平衡の初期状態から出発するなら平衡状態に緩和することを証明できるのだ。ところが、ぼくたちが例題に使った自由フェルミオン系は単純な系だ。そして、単純な系と単純な初期状態は「噛み合っ」てしまうのだ。単純な系と「噛み合わない」初期状態というのは、要するに、複雑な状態である。一般に複雑な状態を書き下すのは難しい。だから、ぼくたちは確率を使って複雑な初期状態を生成していたのだ！つまり、自由フェルミオン系を使っている限り、確率に頼らなければ「量子系における平衡化」は証明できないということになる。論文 [3] の結果はそう易々とは改良できないのだ。わかってみればまったく当たり前のことだった。

こうして、ぼくの中で科学の理解が少しだけ進んだ。そして、ぼくの前に「単純な初期条件から出発しても平衡化が証明できる「複雑な系」の具体例を見出せ」という、さらなる難問が現れた。

（『みすず』2023年7月号所収）

⁶ 〈専門的な注〉初期状態の有効次元が大きいということ [3] 。

文献

[1] 田崎晴明『どうして時間は過去から未来に流れて行くのだろうか？ マクロな系における不可逆性』YouTube



[2] H. Tasaki, “From Quantum Dynamics to the Canonical Distribution: General Picture and a Rigorous Example,” Phys. Rev. Lett. 80, 1373 (1998).

[3] N. Shiraishi and H. Tasaki, “Nature Abhors a Vacuum: A Simple Rigorous Example of Thermalization in an Isolated Macroscopic Quantum System,” in preparation.