

To be, or not to be

—吸収状態をめぐる非平衡臨界現象の物理学



竹内 一将

東京工業大学大学院理工学研究科

To be, or not to be, that is the question. —ハムレットに登場するこの有名な台詞は、父の仇討という後戻りできない選択に葛藤するハムレットの苦悩を描いたものである。ここまで複雑な状況は珍しいかもしれないが、後戻りができない変化というものは、自然現象においても様々な場面で起こりうる。例えば、近年よく耳にする生物種の絶滅危惧問題は、ひとたび絶滅してしまえば、その種はもう二度と現れないからこそ、大きな問題になる。物理学においても、低温の量子流体における量子渦や、連鎖的超新星爆発による銀河の星形成のモデルなど、一旦なくなったり止まったりするとなかなか元の状態に戻らなくなる現象は珍しくない。

一般に、「一度入ったら二度と出られない状態」は吸収状態と呼ばれる。先程の生物種の例では、個体が一匹もいなくなった状態が吸収状態である。こうしてみると、環境などのパラメータが変わることで引き起こされる、絶滅するか否かという命運の変化は、吸収状態に落ちるか落ちないかという、一種の相転移だと考えられる。

このような吸収状態転移は、統計力学、特に非平衡の統計力学の対象として長らく研究が続けられてきた。そして、少なくとも単純な理論的設定の下では、様々なモデルが普遍的な非平衡臨界現象を示すことが明らかになった。Directed Percolation (DP, 異方向的浸透現象) 普遍クラスと呼ばれるこの臨界現象は、最も基本的な非平衡相転移

として理論的に深く理解されており、高エネルギー物理学における Regge 極の場の理論とも直接の対応関係を持つ。一方、実験的には、DP 臨界現象の十分な証拠は長らく見つからなかったのだが、著者らは 2007 年、液晶の乱流状態において、DP クラスの臨界現象が明瞭に現れることを発見した。DP 臨界現象が実験的に確認されたという事実が意味するのは、それが理想的な条件下のみで現れる理論的産物ではなく、現実の非平衡現象を記述する力を持っているということである。現に、近年になって、流体における層流-乱流転移や、コロイド、超伝導渦の運動の可逆性に関する相転移など、いくつかの具体的な現象と吸収状態転移との関わりが実験的にも明らかになってきた。

本解説記事では、液晶乱流における実験事実の紹介を軸として、吸収状態転移、特に DP クラスがどのようなものを概観する。非平衡臨界現象の理論の一般的枠組みや、DP と Regge 極の場の理論との関わりについても簡単に触れ、それがどのような実験事実で検証されたかを述べる。そのうえで、流体系やコロイド、超伝導渦などで吸収状態転移がいかに現れるか、近年の実験の進展も紹介する。非平衡系を構成する多数の自由度が「生きるか、死ぬか」。その狭間には、非平衡臨界現象の興味深い物理学があるということを感じて頂ければ幸いである。

—Keywords—

吸収状態転移:

非平衡相転移の分類の一つ。「一度入ったら二度と出られない状態」のことを吸収状態といい、系のパラメータによって、最終的に吸収状態に必ず行き着く場合と、吸収状態に入らないまま永久に時間発展が続けられる場合がある時、その間の相転移を吸収状態転移と呼ぶ。平衡相転移と同様、吸収状態転移には不連続な場合(一次転移的)と連続な場合(二次転移的)があり、後者は普遍的な臨界現象が現れる。対称性や保存則の有無等によって、いくつかの普遍クラスが知られている。

Directed percolation:

異方向的浸透現象を記述する格子模型の一つ。多孔質の有孔度にあたるパラメータを変化させると、無限遠まで浸透が起こる場合と起こらない場合との間で相転移を示す。この相転移は連続的で、臨界現象が現れる。後に、余分な対称性や保存則のない吸収状態転移を示す様々なモデルで directed percolation モデルと同じ臨界指数が確認されたため、この最も基本的な吸収状態転移の普遍クラスは directed percolation クラスと呼ばれる。Directed percolation クラスは理論的に深く理解されており、非平衡臨界現象の一般論を考えるうえで重要な役割を果たしている。

