

非相反相転移の物理



花井 亮

Asia Pacific Center for Theoretical Physics
ryo.hanai@apctp.org

言うまでもなく、この自然界は相転移であふれている。気液相転移、常磁性・強磁性転移、常伝導・超伝導転移等の熱平衡系における相転移に加え、レーザー発振や同調現象等、非平衡状態で見られる相転移も数多く存在する。

熱平衡状態における相転移の理解には、ランダウ理論が大きな成功を収めてきた。この理論は、相転移を特徴付ける秩序変数を変数に持つ自由エネルギーの形を、系の持つ対称性から規定することで、相転移の普遍的な性質を探る理論体系である。所謂「自由エネルギー最小化原理（以下、「最適化原理」と呼ぶ）」に則った単純な現象論でありながら、この理論は系の詳細に依らない、相転移の普遍的な性質の多くを抽出することができる他、繰り込み群等のより洗練された理論の出発点にもなっている。

熱平衡系で採用されるこの「最適化原理」は、現在知られている（本来自由エネルギーが定義できない）多くの非平衡相転移にもかなり有用な考え方である。レーザー発振、群れ、有向パーコレーション等の多くの非平衡系における相転移点の存在は、現象論的なランダウの自由エネルギーを導入することで簡潔に説明することができる。この場合、非平衡性は揺動散逸定理を破るノイズによりもたらされる空間・時間揺らぎを通してのみ現れる。

しかし、よくよく考えてみると、最適化原理では記述できない現象は、自然界に多く存在する。例えば、（唐突に感じられるかもしれないが）捕食者であるライオンと、被食者である鹿が近くに出くわした場面を想像してみよう。このような状況になると、前者は後者を追いかけるだろう。これ

は、前者が後者に与える影響と後者が前者に与える影響が異なる、つまり非相反相互作用が両者に働いているからに他ならない。この現象は、最適化原理では理解することができない：むしろ、お互いの実現して欲しい状況が真逆であるため、最適化の方法が見つからず、追いかけてこがはまってしまいうけである。

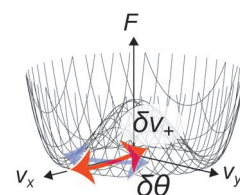
ランダウ理論を運動方程式に立脚した形に拡張することによって最近提唱された非相反相転移は、まさにこのような時間依存する「追いかけてこ状態」へと多体系が相転移するような、新しいクラスの非平衡相転移である。この相転移現象は、上の説明から示唆されるように、最適化原理に則らない、非平衡系特有の現象である。これは連続対称性を自発的に破り、「追う側」と「追われる側」に対応する複数の秩序変数で記述される非平衡系で一般に現れ、量子開放多体系である励起子ポラリトン凝縮から結晶成長に至る幅広い系で起こる。

顕著なのは、その臨界性の現れ方の特異性である。通常の最適化原理に則った系では、臨界現象は互いに直交した励起モードのうちの一つの減衰時間が発散することで起こる。一方、非平衡系では一般に、励起モードは互いに直交しない。その結果、励起モードが**ゴールドストーン・モード**と合体する点が現れ、これが非相反相転移の臨界点を与える。この「臨界**例外点**」では、揺らぎが空間4次元以下で発散する等の異常な臨界現象が生じる。その他、ヒステリシスや時間（準）結晶等、現れる物性は多岐に及ぶ。その一般性の高さから、今後、物理学のみならず、工学や生命科学等、幅広い分野への波及が期待される。

用語解説

ゴールドストーン・モード：連続対称性が自発的に破れたときに現れる、励起にエネルギーを必要としない励起モード。非平衡系でも現れる。

例外点：行列 A の固有モードは、その行列がエルミートである場合 ($A=A^*$)、必ず直交するが、非エルミートの場合 ($A \neq A^*$) はその限りではない。後者の場合、パラメータをうまく選ぶことで2つ（以上）の固有ベクトルが合体する例外点が現れる。



非相反相転移の模式図。非平衡系では、ゴールドストーン・モード $\delta\theta$ (青矢印) と他の励起モード δv_+ (赤矢印) は一般に直交しない。その結果、これらが合体する例外点が現れ、そこで非相反相転移が起こる。