

レーザーコンパス

相転移現象

稲場 文男*

Humio INABA*

1991年のノーベル物理学賞はフランスのドジャンヌ教授の「高分子の相転移現象の解明」の研究業績に対して与えられた。相転移という言葉は物性物理学では以前から知られている概念であるが、高分子の状態変化という化学の分野の問題を、物理学のキーワードを使って見事に整理し、体系づけたことが世界的に高く評価されたものといえる。

相転移という概念は、ミクロな構成要素の数が非常に多いシステム（系）に適用されるもので、一般に相転移の前後で変化するのは個々の要素の性質ではなく、要素の集合状態が示すマクロな秩序の度合いである。このことは個々の構成要素が相互作用を通して協力し合い、新しいグローバルな相、すなわち秩序を生み出そうとする協同現象によるもので、従来の分析的な見方では全く理解できない事象である。このような観点からは、自然界に存在する多種多様な系は、熱平衡状態にある平衡系とそのような状態には決して達し得ない非平衡開放系の2種類に分類される。

前者の場合は、例えば気体、液体、固体というように物質の存在形態が質的に異なっていて、それぞれが熱平衡状態にあり、結晶ではミクロな分子全体が秩序正しく配列して空間的規則性が作られる。これは自由エネルギーの最小の法則に基づいて、自由度と安定度の2つの要求の中後者が優先するために生じるもので、系の存在様式の秩序、またはより一般的に静的秩序性と呼ばれる。その代表的な事例は超伝導や超流

動の現象で、ある温度（転移温度）を境としてボーズ凝縮状態への相転移が生じて、物質波の位相がかなりの距離にわたってコヒーレントな規則性を保つために、量子論的なマクロの秩序が実現することによるものである。これと同様な静的秩序性の発生は、強磁性体や強誘電体、液晶などでも知られている。

これに対して非平衡開放系では、熱平衡状態から外れていることによって時間的、空間的、さらに形態的、機能的などの新しいマクロな秩序を、無秩序状態からの相転移として自発的に形成し、維持するという特徴を備えている。そしてこのような秩序を安定に持続するためには、エネルギーや運動量、あるいは必要な物質などの絶えざる補給を必須としており、この状態は系の運動形態の秩序、さらに広くは動的秩序性といわれる。

レーザー発振現象はその典型的な例であり、物質を構成している数多くの原子または分子のエネルギー準位間に熱平衡からかけ離れた負温度状態を作成し、誘導放出によって単一またはごく限られた数の電磁界モード（自由度）に極めて多数の光子を集団的に発生させ、それを維持する過程といえる。すなわち、その奥にはコヒーレントなレーザー光という動的秩序性を自律的に形成するための構成要素による全般的な協同現象と、その秩序がさらに要素の作用に協力をうながすような帰還ループが作られて、マクロな秩序を安定化するための働きが本質的な役割を果たしているのである。かくして発振の

* 東北大学電気通信研究所（〒980 仙台市青葉区片平2丁目1-1）

* Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University (2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai 980)

しきい値をこえると相転移が起こり、光子の間には強い相関が生じて1モード当りの光子密度が膨大になるから、その出力としてのレーザー光は対応原理的にマクロなスケールにわたって位相のきちんと揃った古典的な波動として理解することが可能なのである。言い換えれば、レーザー光のコヒーレンスという際立った秩序性は、ランダムな熱運動をしている原子または分子から成るレーザー系が自ら作り出す相転移に基づくマクロな動的秩序性そのものと考えられるのである。

いささか教科書的な説明に紙面を割いてしまって恐縮であるが、このような新しい秩序性を生み出す非平衡開放系という概念は、広大な宇宙や銀河系、惑星などから地球上で生命を宿している人間や動植物、さらに細胞、ウイルスなどを含む自然科学やライフサイエンスの対象だけでなく、社会、経済、産業、情報、環境などの多種多彩な系にも当てはまるもので、極めて広い普遍性をもっていると受け取られる。

我々がこのように早く到来するとは予想さえしていなかった、一昨年(1990年)の東西ベルリンを距っていた壁の崩壊、撤去とそれに続く東西ドイツの統一は、一種の相転移現象と見ることができであろう。そして、それらが前兆のようにして昨年起きた、およそ70年に及ぶソビエト社会主義共和国連邦の体制解体と分裂も旧秩序から新秩序へ移行するための、旧ソ連国民にとっては余りにも厳しい自らが選んだ相転移的な動静と思われる。

レーザーが誕生してから既に満31年を経過している。レーザーが実現したのは、およそ半世紀近い以前の時代における電子管方式によるマイクロ波、特にミリ波よりもっと短い波長のコヒーレントな電磁波の発生の物理的限界を如何にしてのり越えるかというこの分野に関連する多数の科学者や技術者の努力と苦悩が土壌となって、新しい概念としての原子や分子の誘導放出による増幅、発振というアイデアが実ったことによるものである。勿論そのようなメーザー、レーザーの発明者である米国のタウンズ、旧ソ連のバゾフ、プロコロフの3博士の業績は極めて偉大であるが、このような時代的背景を考慮してレーザーの誕生を科学史的に眺めた場合には、それは物理学やエレクトロニクスにおける相転移的なブレークスルーととらえることができるのではないかと思われる。

30年という年月の経過は歴史的に見ると、新しい学問分野の最初のアイデアや芽生えから始まって、基礎の開発と確立、そして応用の展開、実用化という成熟期に至る一世代にほぼ相当することが各種の専門領域で指摘されている。このような史実の中から我々が学ばなければならないことは、次のおよそ30年にわたる新世代への手掛りや萌芽となるものを探ることであり、それは後年学問的に見て相転移的と呼ばれるにふさわしい新しい基礎的概念と独創的な着想やフロンティアスピリットに溢れた洞察に支えられた、ロマンに富む領域の開拓であると考えられる。