

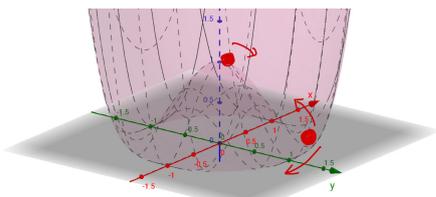
エピローグ – 相転移と「自発的対称性の破れ」 –

さて、これまで「磁石」「液晶」「超伝導」という3つの実験を見ていただきました。実は、これら3つの現象は、ある一つ概念によってすべて統一的に説明できてしまいます！それが今からお話する**自発的対称性の破れ**です。

自発的対称性の破れ

物理を記述する力学法則には対称性があります。対称性が高い状態は「その方向に動かしても見た目が変わらない」状態であり、よりつまらない状態であると言えます。

物理系はふつう対称性を持つ状態を実現します。しかし、ある条件のもとでは、何らかの秩序を持った状態の方がより安定になります。この時系は秩序を持った状態を「みずから選択」します。これが自発的対称性の破れです。



中央にいるよりも溝にいる方が、ボールの状態はより安定

相転移現象は、ある条件を境に「対称性のある相」から「対称性が破れた相」に変化する現象である、と捉えることができます。自発的対称性の破れは、素粒子物理学において粒子が質量を獲得するメカニズムにも登場します (Higgs 機構)。つまり、自発的対称性の破れは物理学における普遍的な摂理なのです。

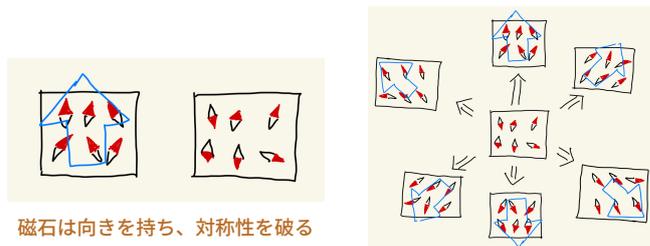
3つの実験と「対称性の破れ」

磁石とスピンの向き

磁石を構成する物質の中では、電子の間に「お互いにスピンの方向を揃えようとする」力が強く働くことが知られています。そのため、スピンの向きがバラバラな状態よりも、ある方向にそろった状態を取る方が、全体として安定になります。つまり、自ら「特定の方向を選んで」スピンの向きを揃えることで、磁石が実現されるのです。^{*1}

^{*1} ここでは外からの磁場がない状況を想定しています。外部磁場があると方向の任意性は失われます (が、これはもはや「自発的」ではありません)。

^{*2} わかる人への注: このことは南部-Goldstone モードというゼロエネルギーのモードを生み出します



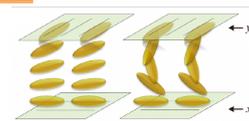
磁石は向きを持ち、対称性を破る

どの向きに揃うのかは自由

力学法則のもとももっていた「向きを変える対称性 (回転対称性)」を自発的に破った状態として、磁石という相が実現されるのです。重要なのは、あくまでも**スピンの向きを向くのかには必然性はない** (どの方向が選ばれても物理的には等価) ということです^{*2}。

液晶分子とツイストの向き

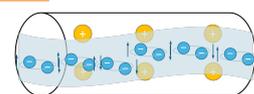
液晶分子の力学には「ツイスト配向」をひっくり返す対称性があります。これは理論的には磁石のスピンの反転対称性とと同じで、液晶の相転移はツイスト配向の反転対称性の破れであると理解できます。



液晶分子のツイスト配向

超伝導における対称性の破れ

金属を十分冷やすと、2つの電子が **Cooper 対** と呼ばれるペアを作ります。すると、たくさんの Cooper 対が一斉に同じ状態に揃ってひとつの「巨視的な波」を作り出します。超伝導とは、波の向き (位相) がそろった状態を自ら選びとって実現する相転移です。



超伝導の「巨視的な波」

さらなる話題として、超伝導体の Higgs モードを観測する実験に関するポスターを 207 教室にて展示しておりますので、興味のある方はぜひご覧ください。

おわりに

以上をもちまして、特別企画「ひろがる相転移の世界」は終了です。まったく異なる物理現象が、すべて一つのメカニズムで理解できる。そのような普遍性にこそ、物理という学問の魅力があるのではないのでしょうか。