

クローリングはなぜ最速の泳法か？

素粒子物理標準理論の構成要素の中で、最後まで見つかっていなかった Higgs 粒子が、どうやら発見されたいというニュースが世界をかけめぐった。Higgs 機構は、質量を持つことができないゲージボソンに質量を与える役目を果たす。これは対称性の自発的破れ(Spontaneous Symmetry Breaking)と密接に関連している。私たちは対称性の自発的破れのおかげで、この宇宙に存在しているわけだ。

自然を支配する基礎方程式 (ラグランジアンやハミルトニアンで書かれる) そのものは、何らかの対称性を持っているにも関わらず、現に実現している世界つまり基底状態や熱平衡状態は明らかに対称性を破っているという状況は、物性物理学の中でもしばしば出会う。そもそも南部理論では超伝導の BCS 理論が素粒子物理学のモデルになったのである。

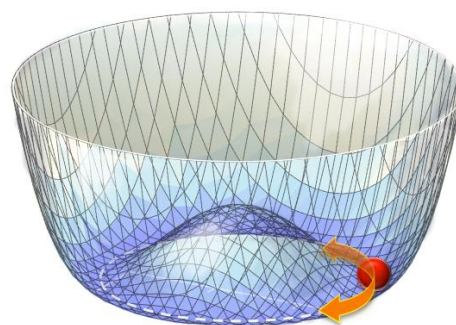


図 1. 対称性の自発的破れと Goldstone mode (Wikipedia より)

私は幸い優れた実験家の方々と共同研究をしてきたおかげで、何度かびっくりするような発見に立ち会うという幸運に恵まれてきた。びっくりしたのは、それまで考えられてきた「常識」が、実験によって明確にひっくり返されたからである。これは実験技術の進歩や測定精度の飛躍的な向上によるところが無論大きいですが、かならずしもそれだけではなくて、誰かの指摘によってみんなが「アッ」と気付くということもあった。

不思議なことに、こういう「びっくり体験」はすべて「対称性の自発的破れ」と何らかの形で深い関係があった。

古い話だが、私の学位論文のテーマは「F 中心の緩和励起状態」だった。F 中心というのはイオン結晶のマイナスイオンが抜けた穴に電子が捕獲されたものである。電子に対するポテンシャルは、箱型ポテンシャルのようなものなので、基底状態は 1s という対称状態 (空間の反転について符号を変えない) を持ち、第一番目の励起状態は 2p とよばれる反対称な状態になっている。これは光吸収スペクトルの強度などからも確認されていた。ところが、逆の過程である発光に謎があった。励起状態の寿命が異常に (計算値より 100 倍ほど) 長いのである。この理由は、電子が励起されると周囲のイオン配置が変わって、2p 状態の上にあった 2s 状態が下に降りてきて、電子はその 2s 状態に落ちてしまうのだろう、と考えられていた。2s から 1s へは光遷移が禁止されるので、長寿命になるのである。私の研究はこの問題を初めて量子力学を使って説明したものであった。

この時には気がつかなかったが、「対称性の自発的破れ」はすでにこの問題の中に隠れていたのである。

1980 年代の終わりごろに、イオン結晶における電子励起欠陥生成の問題について、大きな進展があった。こちらは完全結晶の話である。塩化カリウムなどの一連のイオ

ン性結晶を紫外線で照射すると、透明な結晶に見る見る色がつく。これはマイナスイオンが「なぜか」はじき出され、抜け穴に上に述べた F 中心という欠陥ができるためである。(F 中心が可視光を吸収するので、その補色が見える。) F 中心の相棒として、はじき出されたマイナスイオンに正孔が捕まった H 中心も同数できている。これは激しい現象なので研究者の興味を引き、その機構に関する研究が沢山行われた。その顛末は省くが、紫外線が直接原子を叩きだすわけではなくて、光励起された電子と、あとに残された正孔（電子の抜けた穴）がつくる「励起子」が、ドラマチックな役割を演じていたのである。これを欠陥生成の励起子機構と呼ぶ。

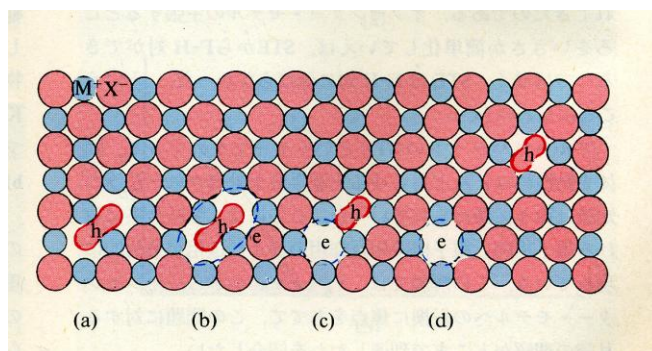


図 2. 欠陥生成の励起子機構。対称な自己束縛励起子 (b) から非対称な欠陥対 (d) が生まれる。
(日本物理学会誌 45 巻 7 号 469 (1990)より)

励起子機構による欠陥生成は、2つの荷電軽粒子（電子と正孔）が対消滅して、2つ中性重粒子（F 中心と H 中心）が対発生する発熱反応（自発的に起きる反応）であり、その駆動力はイオン結晶という「真空」に本来隠されていた「対称性の自発的破れ」に他ならない。

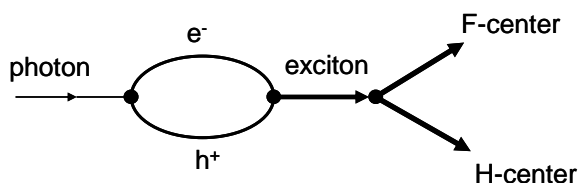


図 3. フォトンが重粒子対に変換される。

一連の出来事の解決には、日本の実験家の貢献が決定的であった。光励起による結晶構造の改変は、現在、大きな研究分野を形成しているが、全体像がほぼ完全に理解されているのは、いまだにこの現象だけであろう。注意しておくが、「計算したらそうなった」というのは「完全に理解した」とは言わない。

私は実験が急展開し始めた最初から、実験家の話を聞いて考えることを始めた。ただひたすら実験データを眺め、毎日、部屋の中を歩き回って「結晶の中で何が起きているのか」を考えた。数か月のあいだ何の計算もしなかった。何かに取りつかれたような感覚だった。こんなことは生まれて初めての経験である。たぶん、この時に理論物理とはどういうものであるか、おぼろげながら分かってきたように思う。

結局、これほど時間をかけて集中した問題だったのに、私はオリジナルの論文は一つも書か（け）なかった。いきなり依頼された英文の解説記事¹⁾を書いて、そこにありったけのアイディアを注ぎ込んでしまった。そして全体像がほぼ明らかになった頃、今度は日本語の解説記事²⁾を書いた。

その次の「びっくり体験」は、X線分光学に関するものだった。これはまさしく実験技術の進歩によるものである。ボロンや炭素のような軽い元素からなる分子や結晶では、内殻電子を非占有状態に叩き上げると、非対称な原子の移動が起きる。これがX線の発光スペクトルやオージェ電子スペクトルとして観測されるという例が、沢山

見つけた。何が意外だったかという、内殻電子の励起状態は、ほとんど寿命がゼロに近く、原子の移動など起きる余裕がないと、私は勝手に思い込んでいたのである。実験精度の向上から、はっきり原子移動の証拠が見えたときには驚いた³⁾。

どうも人間には、対称性のよい解を本能的に選択してしまうという傾向があるようだ。理論家が複雑な式の変形をしていくときは、対称性と次元に関するセンスが導きになる。ところが自然はちゃんと、対称性の破れたところに、もっと安定な解があることを知っているのだ。このことを「自然は対称性を嫌う」と表現する人もいる。

人間の体は、第ゼロ近似では左右対称である。だから様々な道具や運動は左右対称で最適化されているかというところもそうでもない。車の運転席は右か左に偏っている。(もっとも、これは直接外を見たいという欲求のためかも知れないが。) 脳の機能が左右非対称であることは良く知られているが、進化の過程で対称性の破れが生じたのである。

私は学生のころから水泳が好きだった。いうまでもなく、現在、最速の泳法はクロールである。最速であるだけでなく、長距離を泳ぐにも適している。私はクロールは対称性の

	100m	200m
自由形	46 秒 91	1 分 42 秒 00
バタフライ	49 秒 42	1 分 51 秒 41

表 1. 2012 年 9 月現在の世界記録 (男子長水路)

の低い点でバタフライに劣るのではないかと考えていた。バタフライとクロールは、推進力を得る機構は全く同じであるが、最速の泳法は左右対称のバタフライではなくて、対称性を破ったクロールである。いささか物理の勉強をした今では、クロールは対称性の自発的破れによる最適解なのだと分かった。

以上の話は「大阪府立大学異分野融合研究会」の合宿セミナーでの講演をもとにしている。最近、この話を K さんにしたところ、次のような情報を知らせてくれた。



図 4. クロールは最速の泳法
(「いらすとや」さんのフリー素材から)

男子陸上の短距離走で、オリンピック史上初の 100m、200m 2 連覇を果たしたウサイン・ボルト選手 (ジャマイカ) は、先天的な脊柱側湾症で、脊椎が S 字型に曲がっている。そのため、その走りが著しく左右非対称で、左右のストライドには 20cm もの差があるのだそうだ。

これは彼にとって大きなハンディキャップと考えられているが、もしかしたら対称性の破れの中に、意外にも世界最速の秘密が隠されているのかも知れないということである。

- 1) Y. Kayanuma, Excitonic Mechanism of Defect Formation in Alkali Halides as Spontaneous Symmetry Breaking, in *Defect Process Induced by Electronic Excitation in Insulators*, (World Scientific, 1989) Ed. N. Itoh, pp.13-53.
- 2) K. S. Song, 萱沼洋輔、「イオン結晶における自己束縛励起子の新しい描像」、日本物理学会誌 45 卷 7 号、pp.469-475 (1990).
- 3) たとえば Y. Harada *et al.* Dynamical Symmetry Breaking under Core Excitation in Graphite: Polarization Correlation in Soft X-ray Recombination Emission, *Phys. Rev. Lett.* 93, 017401 (2004).