

「自発的対称性の破れ」と南部理論

去年、南部陽一郎博士が「素粒子物理学と核物理学における自発的対称性の破れの発見」でノーベル賞を受賞され、南部理論の分かる展示（磁石のテーブル）が大阪市立科学館にある、南部博士がこの展示を楽しまれた（図1）、ということで、「磁石のテーブル」が新聞やテレビなどで何度も報道されました。そして、南部理論の解説が欲しいとの声をたくさん頂いたりいています。本稿ではご要望にお応えして、「磁石のテーブル」で「自発的対称性の破れ」を考え、南部理論に挑戦します。

展示装置「磁石のテーブル」

「磁石のテーブル」はカーアクセサリー用の方位磁石（図2）を並べただけの単純なものです。方位磁石といえば北を指すのですが、2つ以上がそばに集まると、N極とS極は引きあい、N極とN極、S極とS極は反発しあって、北を指しません。数個の場合が図3で、予想できるパターンになります。では、1000



図1.「磁石のテーブル」と南部博士



図2.フェライト磁石を使ったカーアクセサリー用の方位磁石

自発的対称性の破れ

「磁石のテーブル」を観察すると（図4）、方位磁石は近所同士が集団になって同じ向きを指しているのが分かります。じつは、方位磁石は多数集まると、四方八方どの向きでもいいから、全てがある方向に揃おうとするのです¹。これ

個の場合はどうでしょう？予想するのは天才物理学者にもできないことで、コンピュータを使って計算するしかないでしょう。じっさいに並べたのが図4の「磁石のテーブル」です。多くの物理学者がこれを見ると、「自発的対称性の破れだ！」と感激します。まずは物理学者の感激へ案内しましょう。



図3. 方位磁石を少数個並べた場合

を物理用語で「『どの向きでもいい』という対称性がある」といいます。人間社会にも似たような現象がたくさんあります。人は多数に従いたいという習性があるようで、例えば、ヘアースタイル。長髪がはやったり、カリアゲがはやったり。どんなヘアースタイルでもいいのです。とにかく、みんなのスタイルに合わせたいのでしょう。これを上記の物理用語では、「『どんなヘアースタイルでもいい』という対称性がある。」と言います。

ところで、ほとんどの大人の方が、日常の「対称」という言葉に固執されます。「左右対称」の「左と右が同じ」というのをもっと膨らませて下さい。「方位磁石がみんなで揃って向きたい方向は、四方八方あらゆる方向区別なく同じ」にまで「対称」のイメージを拡大させましょう。

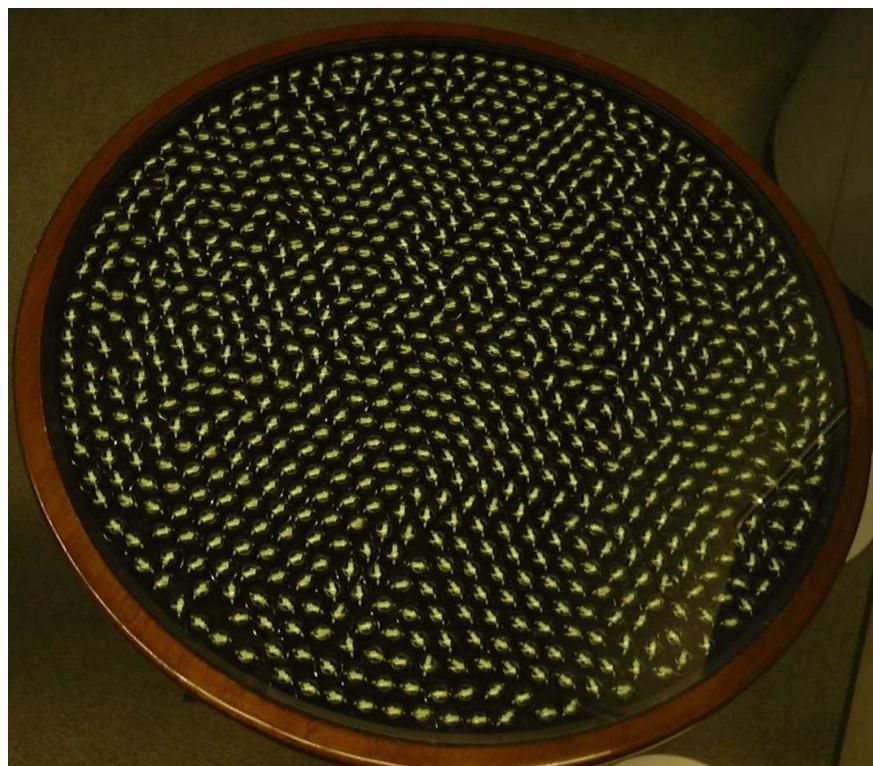


図4. 磁石のテーブル

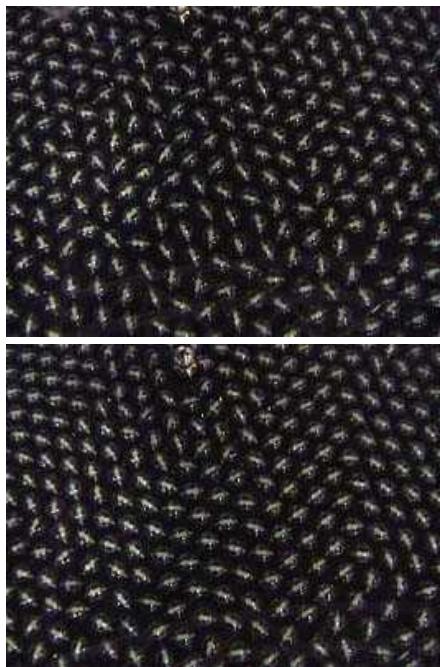


図 5 . 磁石でかく乱しても
(上) すぐに近傍で同じ向き
に揃う (下)。

質量起源

現代素粒子論では、「自発的対称性の破れ」によって素粒子が質量を得ると考えられています。素粒子とは物質を構成する最小の単位で、もうこれ以上分解できないものといいます。我々は細胞でできていて、細胞は分子から、分子は原子から、原子は電子と原子核から、原子核は陽子と中性子から、陽子や中性子はクォークからできています。電子やクォークはもうこれ以上分解できないので素粒子です。さて、「素粒子がどのようにして質量を得るのか?」という素粒子論の大テーマを「磁石のテーブル」で考えることにします。以前に社会現象を例として「質量の起源」を紹介しましたが³、今回は直接的な思考実験です。

方位磁石群の中で動く小さな鉄を考えましょう。これが素粒子の質量起源をイメージさせてくれます。図 5 (上)のように方位磁石がバラバラの時は、方位磁石がお互い磁力を打ち消しあうので、鉄は方位磁石に作用されることなく自

さて、方位磁石は集団になってどの方向でもいいから揃いたいので、図 4 で見るように、近所同士ある方向に揃っています。方位磁石の向きをあっちこっちでたらめに運動させても、しばらくすると近傍で同じ向きに揃います(図 5)。方位磁石には「揃って同じ向きを指したい」という性質(対称性)があるから図 5(下)のように落ち着くのです。この同じ向きに揃った状態を「自発的対称性が破れた状態」と呼びます。何度繰り返しても、方向は異なりますが、とにかく集団でどこかの方向に揃います。これが「自発的対称性の破れ」なのです。この実験は「磁石のテーブル」の上で磁石を動かすだけで簡単にできますので試してください。動画は著者の web ページにあります²。

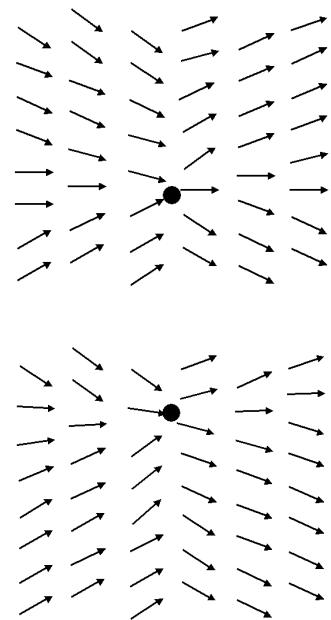


図 6 . 鉄(黒丸)が動くと
方位磁石が集団で向きを
変える。

由に動くことができます。一方、図5(下)のように方位磁石の向きが揃っている場合は、方位磁石は集団で同じ向きに揃っていたいので、図6のように集団で鉄の動きに引きずられることになります。それで、鉄は方位磁石集団から大きな反動を受けて動きにくくなります。動きにくいということは質量が大きいということです。例えば、軽いものは簡単に動かせますが、ピアノや自動車などは、動かすには大きな力が必要で、動きにくいですよね。つまり、鉄は向きの揃った方位磁石集団との作用によって質量を得るのでです。これが対称性の破れによる質量起源で、このようなメカニズムで素粒子は質量を持つと考えられています。

それでは、素粒子の質量起源について説明しましょう。現代素粒子論では方位磁石群と似たヒッグス場というものを仮定し、この宇宙は自発的に対称性の破れたヒッグス場で埋め尽くされていると考えます。すなわち、宇宙はヒッグス場というものが向きを揃えて満ちているとするのです。さて、向きの揃った方位磁石群が鉄の運動を妨げたように、向きの揃ったヒッグス場が素粒子の運動を妨げるのをイメージして下さい。鉄が方位磁石群の中で重くなるのと同じように、素粒子は質量を得ることになります。このことを「ヒッグス場の対称性が自発的に破れて素粒子が質量を獲得した。」と表現します。これが素粒子の質量起源なのです。ただし、ヒッグス場はまだ仮説です。その証拠を探る実験が2008年からスイスにあるCERN(欧洲合同素粒子原子核研究機構)(図7)で開始されました。質量起源の仮説が証明され

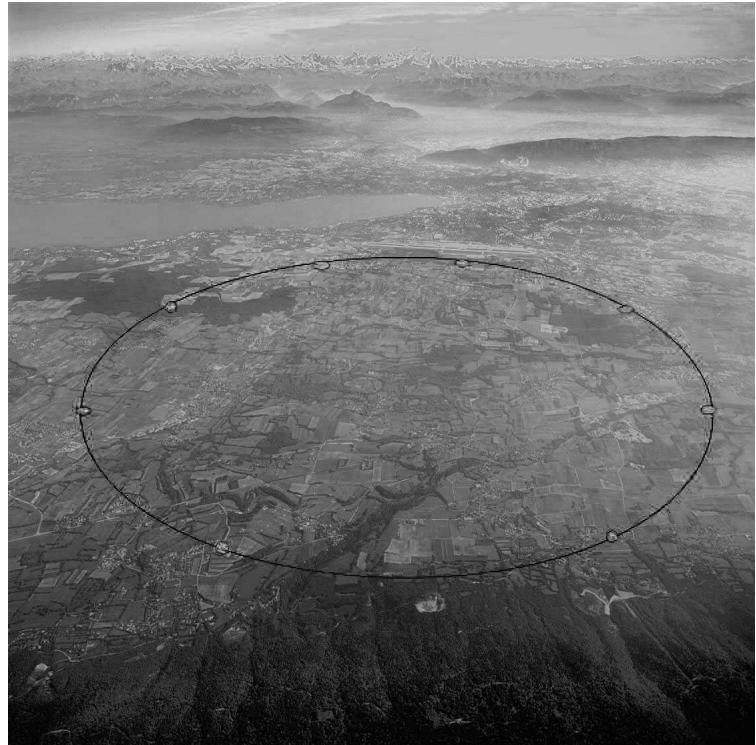


図7.LHC(大型ハドロン衝突型加速器)。スイス・ジュネーブ郊外のCERN(欧洲合同素粒子原子核研究機構)の装置。図示された円形軌道(全周27km)のトンネル内で、陽子をほぼ光速まで加速し(7TeV)、正面衝突させる。その時の反応からヒッグス場の証拠を探す。背景にアルプス山脈が見える。 CERN

るでしょうか？ワクワクしてきますよね。

南部理論

以上で「自発的対称性の破れ」がどのようなもので、現代物理学においていかに重要な概念であるかを分かっていただけたと思います。最後にノーベル賞受賞となった南部博士の研究を紹介しましょう。それは超伝導の研究に始まります。

超伝導は極低温で多くの物質に現れる現象で、電気抵抗が0で磁力線が中に入らない状態です。後者をマイスナー効果と言います。図8（左）は超伝導の実演でよく見かけるもので、液体窒素で冷やされた超伝導体が磁石を反発しているところです。この超伝導体を強力な磁石の上にいたのが図8（右）で、針金がその磁力線を見せています。磁力線が超伝導体から排除されているのが分かります。まさにこれがマイスナー効果です。これらの実演は、本年12月から、科学館のサイエンスショーでご覧いただく予定です。

さて、1957年にBCS理論が発表され、超伝導現象が見事に説明されました。



図8. 超伝導現象の演示。磁石の反発(左)とマイスナー効果(右)
BCS理論とは次のようなものです。極低温の固体中では、結晶格子の振動で電子同士に引力が働き、クーパー対といって電子2個がペアになることがあります。このクーパー対が集団でエネルギーの低い状態に凝縮したのが超伝導状態で、電気抵抗0の電流はクーパー対の摩擦のない流れ（超流動）として理解されます。そしてこの超伝導電流による磁場がマイスナー効果を起こすのです。南部博士はこのBCS理論に納得されず、「自発的対称性の破れ」でBCS理論を再構築されたのです。南部理論の準備として、このことを説明します。

超伝導現象は電気や磁気を扱うので、BCS理論は電磁気学を土台とします。電磁気学はゲージ変換で不变なのに、BCS理論はゲージ変換不变ではなく、ゲージ変換すると妙な電流が発生してしまうというような矛盾を内在していました。ゲージ変換とは次のようなものです。電場や磁場はゲージポテンシャルというものの微係数で与えることができ、ゲージポテンシャルにある微分項を加えても電場や磁場は変化しないので、この微分項は自由に与えることができます。これをゲージ変換といい、電磁気学にはゲージ変換で変化するものはなんらないのです。一方、BCS理論ではゲージ変換で電流が発生するのです。

さて、南部博士はこの矛盾をクーパー対の位相対称性が自発的に破れたものとして解かれたのです。位相対称性は数学的・抽象的ですので、残念ながら方位磁石群の対称性のように見ることはできません。方位磁石群の対称性みたいなものと理解してください。さて、南部博士が解かれたことは、位相対称性の自発的破れに伴って、(a)：超伝導のエネルギー状態は有限質量の粒子の個数に対応する飛び飛びの値をとる、(b)：スピンと運動量が逆向きの電子2個からなるエネルギー0の振動解（南部 - Goldstone モード）が存在する、(c)：(b)が電磁気学のゲージ不变性を保障する、ということです。そして、南部博士は、これら超伝導理論で発見されたことを以下のように素粒子論に応用されました。1960年のことです。

素粒子論において、超伝導の「位相対称性の自発的破れ」をカイラル対称性が自発的に破れる場合に対応させます。カイラル対称性は質量0の素粒子に固有のもので、やはり数学的・抽象的ですので、方位磁石群のような対称性と思ってください。超伝導体内でクーパー対の凝縮が起こるのと同じように、原子核内で陽子・反陽子ペアなどの凝縮が起こっていると仮定し、超伝導理論との対応付けを次のようにします。(1)：(a)を原子核内の陽子や中性子などの核子の質量起源とする、(2)：中間子は核子と比べて質量が小さいので、中間子質量を0と近似し、核子と反核子とから構成された(b)の南部 - Goldstone モードと理解する。これがノーベル賞の対象となった南部理論です。この理論がきっかけとなって、素粒子の質量起源を与える「ヒッグス場の自発的対称性の破れ」が提唱され、現代素粒子論の重要な概念になっているのです。また、南部理論における核子をクォークに置き換えたものが、現代原子核物理の最前線で、スーパーコンピューターによる長時間計算で確認されつつあります。じつは、南部理論が提唱された時代はクォークの概念すらない時代だったのです。このような先見性に満ちた数々の業績から南部博士は「素粒子物理学の予言者」と評されています。

南部博士のノーベル賞受賞理由「素粒子物理学と核物理学における自発的対称性の破れの発見」は以上のようなもので、「真空とは自発的に対称性が破れた状態である。」という人類史上全く新しい自然認識なのです。南部博士の提唱にはじまる「真空」の理解は、天動説から地動説への自然認識の大転換に匹敵すると言って過言ではないでしょう。

斎藤吉彦(科学館学芸員)

¹ 月刊うちゅう Vol.25 No.3 (2008) 「方位磁石結晶と鉄のミクロ構造」

² 「新動画情報 2 方位磁石群の自発的対称性の破れ」

³ 月刊うちゅう Vol.22 No.11(2006) 「質量の起源」

以上は著者の web ページ (<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/>) でご覧いただけます。