

南部陽一郎先生と、場の量子論に於ける「対称性の自発的破れ」の機構

糸山 浩司 教授 専門：場の量子論、紐(超弦)理論

本学名誉教授でいらっしゃいます南部陽一郎先生が本年度のノーベル物理学賞を受賞されたとのニュースに、いたく感動しております。理学研究科数物専攻基礎物理学講座の教員であり、先生の受賞の対象になったこの学問を現在のフロンティアに於いて共有する研究者の一人として、歴史的及び学問的側面に関する概要を述べさせていただきます。

1) 南部先生と大阪市立大学：先生は戦後間もない創設直後の大阪市立大学に、東京大学から着任されました。当時の大阪市立大学は北区の扇町小学校に間借りしていたと伺っています。小学生用の小さな階段を、つまづかない様に注意しつつ昇っていく教員の姿が思い浮かびます。当時素粒子論の講座を持つ大学は、国立大学といえども京都大学を含むほんのわずかでした。こうした中で都市にある大学の利便性を生かし、南部先生をリーダーとするそうそうたるメンバーを擁す理論物理学研究室の構築を実行した本学の英断は、今も我々研究者内において語り継がれています。

2) 場の量子論に於ける真空：今日の素粒子論において、場の量子論は「基本的言語」とでも呼ぶにふさわしい役割を果たしています。真空とは与えられた理論における最低エネルギー状態です。簡単そうですが非自明で、容易に測定できない状態です。対称性とは総称的な言葉で、三角形や四辺形や円板が我々の研究対象ならば、その回転や並進等を意味します。目に見えない対象を扱うこの学問においては、素粒子の持っている電荷等の属性を取り替える役目を果たし、様々な対称性が知られています。場の量子論の構成自身が対称性を保っていても、真空が対称性を保たないつまり破ることがありうるという事を南部先生は最初に示しました。これが「対称性の自発的破れ」という考え方です。真空はその言葉の響きに反し空っぽではなかったのです。

対称性の自発的破れのたとえ話としてよく引き合いに出されるものに、円卓に着席し人々が会食する場面があります(図1)。10人の出席者のために10個の椅子が用意され、各椅子の前には同一の大皿一枚、隣り合う皿の間にはナプキンが置かれているとします。着席者の両側にナプキンがあるという意味においてこの構成は左右対称です。しかしながら会食を始めるためには、着席後誰かが右か左かどちらかのナプキンを最初に取り上げ、他の人たちはその人の決断に従い同じ側のナプキンをとらなければなりません。この時点で対称性は破れます。これが対称性の自発的破れです。

3) カイラル対称性と南部・ゴールドストーン (NG) 粒子：南部先生は1950年代に大阪市大から渡米され、プリンストン高等研究所での研究生活を経て、1956年シカゴ大学に着任されました。今回の受賞の対象になった考え方はこの後生まれたもので、ハドロンと今日では呼ばれるクォーク複合粒子の族に対するカイラル対称性の研究に基づいています。ハドロンの中でも、湯川秀樹によって予言されたパイ中間子は陽子や中性子に較べて随分小さな質量を持っており、南部先生はこの小さな質量の謎に取り組みられました。カイラル対称性が自発的に破れた真空は、破れた対称性を回復させようとする力学的機構を持つ事を、南部先生は見抜かれました。その機構の証として生ずる励起モードが南部・ゴールドストーン (NG) 粒子と呼ばれる質量を持たない素粒子です。NG粒子はパイ中間子を理想化させたものとみなされます。

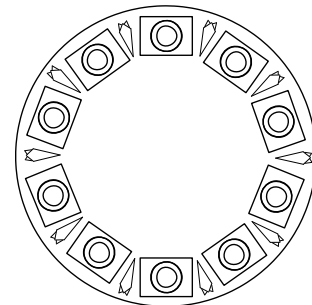


図1: 円卓での会食によるたとえ話

4) 様々な対称性と現在のフロンティア：先にも述べましたように、「対称性の自発的破れ」という考え方は、今日では理論の持つ様々な対称性に適用可能です。素粒子の標準模型において、W とか Z とか名前がついているスピン 1 のボーズ粒子は、ゲージ対称性と呼ばれる対称性の自発的破れに伴うメカニズムにより質量を獲得します。これらは 1980 年代半ばに実験的に検証され、その業績にはノーベル物理学賞が与えられています。現在のエネルギーフロンティアを形作る米国フェルミ加速器研究所 CDF 実験では、標準模型とこの質量獲得メカニズムからの帰結として予言される素粒子のうち、唯一見つかっていないヒッグス粒子とよばれるスカラー粒子を探索しています。(奥沢氏、清矢氏、山本氏による解説参照)。今年からは欧州原子核機構 (CERN) の LHC が稼動を始めました。現在の理論のフロンティアを与えている大統一理論、紐(弦)理論においては、超対称性と呼ばれるボーズ粒子とフェルミ粒子を交換する対称性が、理論の見地から望ましいと考えられています。特に重力を不可避免的に含む紐(弦)の現在の理論は、グラヴィトンの質量がゼロであることを保証するため“最大限に拡大された”超対称性を必要とし、その部分的且つ自発的破れの微視的機構が理論的課題のひとつとなっております。当研究室の研究成果のひとつとして、我々が構成した超対称性の部分的且つ自発的破れを実現するモデルに於ける素粒子群の質量スペクトルを、図 2 に模式的に示しました。この場合超対称性の破れに基づいて生じる NG 粒子はフェルミオンで、標準模型と弱く結合するセクターにすむ質量を持たない粒子です。

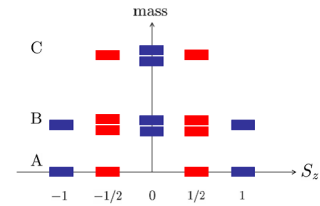


図 2: $\mathcal{N} = 2$ 超対称性が自発的に $\mathcal{N} = 1$ に破れるモデルにおける質量スペクトルの模式図。横軸はスピンの z 成分 (あるいはヘリシティ)、縦軸は質量。このモデルは A、B、C、3 タイプの超多重項を持ち、2 種類の方法で質量を獲得する。[K. Fujiwara, H. Itoyama, M. Sakaguchi, Nucl. Phys. B **723** (2005): 33]