

カイラル対称性

2008年に南部先生がノーベル物理学賞を受賞された。報道では受賞理由のキーワード「自発的対称性の破れ」を説明するのに手こずっていた。確かに文字通りの内容を説明するには準備が必要だが、その帰結はむしろ容易である。質量の起源と世の中の多様性を説明する理論、とすればたいはいの人は納得してもらえらると思う。

自然法則はより基本的なところでは単純なものであると信じられている。ところが現実には、我々は複雑な世界に住んでいる。例えば、自然界の4つの力、重力、弱い力、電磁気力、強い力は、宇宙開びやく直後には同一のものであったが、膨張し冷えていくにつれて分かれた(複雑になった)と考えられている。物理学の目的には、より高い階層での単純な法則を追求することに加え、現在の多彩な様相がいかんして出来上がったかを明らかにすることがある。自発的対称性の破れはそのメカニズムにヒントを与えたのである。

ハドロン物理で興味があるのは強い相互作用である。クォークを基本構成要素とし、グルーオンが力を媒介する量子色力学(QCD)がその性質を記述する。原子の質量の大部分をになう原子核を作る核子や中間子は、クォークや反クォークが結合して出来上がっている。ところがグルーオンの力は「強い」ために、QCDを解くことは数学的にも難しい問題の一つとされ、クォークの閉込めとともに、カイラル対称性の自発的破れと質量起源の問題を明らかにすることが、ハドロン物理学の課題となっている。

さて以上を導入とし、カイラル対称性を説明しよう。u, d, sクォークは質量が軽い。簡単のために質量をゼロとすると、それらは常に光速で運動している。スピンに着目すると、クォークのスピン $1/2$ の成分は運動方向かその逆方向の2通りをとることが出来る。前者を「右巻」き、後者を「左巻」きという。右左の性質はクォークが光速で運動し続ける限り絶対的な意味を持ち、このような状況が実現されている世界にはカイラル対称性があるという。ところがグルーオンの複雑な性質(非摂動効果)のため、現在の世界では、右巻きと左巻きが混ざるようになると考えられている。そのため、右巻きと左巻きはもはや独立には考えることが出来ずカイラル対称性が破れ、その結果クォークには質量が生成されることになる。このシナリオは超伝導状態にエネルギーギャップが生じるのと似ている。クーパー対が凝縮するのに対応して、ハドロンの世界ではクォーク反クォーク対が凝縮し、対称性の破れの秩序変数となる。南部先生はこの考え方を、QCDが発見されるずっと以前にハドロンの世界に持ち込んだのである。

有限の質量をもったクォークが3つ集まると、その3倍程度の質量をもった核子ができあがる。これが重い原子核、そして物質の質量の源になっている。さらにクォークと反クォークが結合して中間子ができる。素朴には中間子の質量は核子の質量の $2/3$ 程度と予想される。しかし、それより遥かに軽いパイ中間子が存在することを我々は知っている。湯川が核力を説明するために予言した粒子である。この「軽さ」を説明するのが、クォークに質量をもたらしただのと同じ右巻きと左巻きを混ぜる力である。この力が2倍のクォークの質量を厳密に帳消しにしてくれて、パイ中間子の質量はゼロとなる。これは南部-Goldstoneの定理として知られている。

パイ中間子はまさにカイラル対称性の申し子である。対称性はパイ中間子と他の粒子との相互作用をも予言し、低エネルギー定理として確立されてきた。しかしその対称性はあらわには見えず、特にパイ中間子はその質量をとっても、他の粒子とは大きく性質を異にしている。対

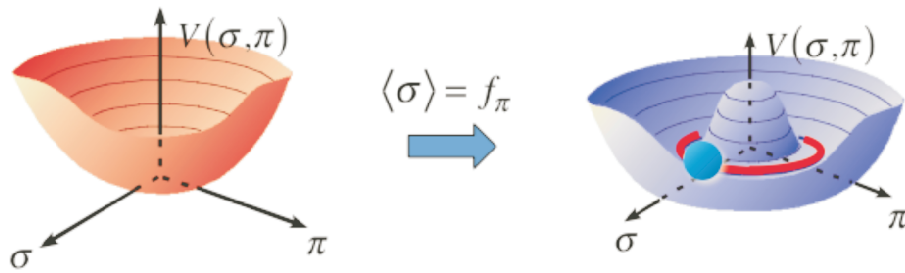


Figure 1: カイラル対称性の特徴を表わす有効ポテンシャル。詳しくは文献 [1] を参照。

称性が破れる（失われる）ことによって、世の中に多様性が生まれることになる。

ここまでで対称性が自発的に破れるためには力が必要となることをみた。ところが例えば温度を上げるとどうなるだろうか。当然クォークは熱運動を始めるが、それが力を打ち負かすようになると、右巻きと左巻きの混合はもはや断ち切れ、もとの対称性の回復した世界に戻ることが予想される。高温（あるいは高密度）の世界では、対称性の破れを引き起こす力の効果が無視できて自然法則は単純になるのである。世の中が冷めて力の効果が顕著になると、対称性が破れ多彩な世の中が生まれるということである。異なる対称性をもつ真空に移り変わることは、相転移現象として記述される。その際によく用いられるのが、秩序変数の関数として書かれた有効ポテンシャルである。カイラル対称性の相転移の場合は、クォークと反クォークの対凝縮が秩序変数となる。有効ポテンシャルは温度の変化に伴い、図 1 になる。

物質の温度や密度を変化させて、実験室で破れた対称性を回復させる試みが続けられている。まだその確固とした証拠は見つかっていないが、これを確立することで QCD の理解につながるだけでなく、自然法則のより一般的な仕組みの解明にも役立つことが期待できる。これからのハドロン物理学の重要な課題である。

References

[1] 土岐博、保坂淳

「相対論的多体系としての原子核－相対論的平均場理論とカイラル対称性－」
大阪大学出版会 (2011)