

高温 QCD における U(1) カイラルアノマリー

青木 慎也 〈京都大学基礎物理学研究所〉

Guido Cossu 〈高エネルギー加速器研究機構〉

深谷 英則 〈大阪大学大学院理学研究科〉

谷口 裕介 〈筑波大学大学院数理物質科学研究科〉

アノマリー（量子異常）という現象をご存知だろうか？ 素粒子論におけるアノマリーとは、ラグランジアンが持つ対称性（不変性）が、量子力学的効果で破れる現象である。このように書くといかにも難しそうだが、「(古典論ではありえない) 粒子反粒子の対生成が作りだす古典論ではありえない現象」と書けば、そういうこともあるのか、と納得していただけるかと思う。

例えば、古典電磁気学のラグランジアン（あるいは Maxwell 方程式）は、座標、時間を定数倍、電場、磁場をその逆数倍しても理論が不変というスケール不変性を持っている。しかし、量子電磁気学 (QED) では、粒子の対生成と対消滅による真空分極が、電荷を遮蔽し、見るスケールによって正味の電荷が変わってしまう。このためスケール不変性は破れるが、この現象をスケールアノマリーという。

さて、本題である量子色力学 (QCD) では、カイラル対称性の量子力学的破れ＝カイラルアノマリーという現象が知られている。カイラル対称性の破れと言うと、南部陽一郎博士の発見した自発的対称性の破れが有名だが、それとは異なる。カイラル対称性とは、クォーク場の（運動方向に対して）右巻きスピンの成分と左巻きの成分を別々に位相変換する対称性のことであるが、自発的に破れるカイラル対称性は、アップとダウンのクォークを混合するのに対し、アノマリーを持つカイラル対称性は、両者を混合しない。数学的には、前者は SU(2)、後者は U(1) という異なった群に属する対称性であり、区別される。物理的にも、SU(2) カイラル対称性の自発的破れは真空の性質、つまり低エネルギー領域の物理だが、U(1) カイラルアノマリーは高エネルギー領域に起源を持つ別の物理とされる。

また、前者は質量の軽い南部-Goldstone 粒子の出現を伴うのに対し、アノマリーはそのような軽い粒子を伴わない。

ところで、これらの対称性は高温ではどうなるだろうか？ 自発的に破れていた SU(2) カイラル対称性は、数兆 °C の高温で回復すると信じられている。高温では真空のクォークのゆらぎが高まり、強磁性体が磁化を失うように、SU(2) の特定の方向への破れはなくなるというのはもっともらしい。では、U(1) カイラルアノマリーはどうか？ 直観的には、アノマリーは高エネルギーの物理なのだから、温度にあまり依存せず破れたままと考えるのが自然である。特に前述のとおり、SU(2) カイラル対称性とは別物であるから、その回復温度（相転移温度）とはいかなる関係も期待できない。

しかし、私たちの研究^{1,2)}で「U(1) カイラルアノマリーの効果が、SU(2) 対称性の回復と同じ温度で失われる \cong U(1) 対称性も回復する」という上記の直観とは異なる可能性が示された。しかもこの結果は数々の先行研究と真っ向から対立するように見える。

本研究は未だ状況証拠の列挙に過ぎないものの、厳密にカイラル対称性を格子ゲージ理論で扱った最初の研究であり、数値計算と解析計算の両面から新たな知見が得られたこと、先行研究の問題点も指摘できたという点で、意義のあるものと考えられる。また、専門化が進みがちな素粒子論の中で、解析計算、数値計算、実際の現象（実験）の垣根の小さい格子ゲージ理論という分野の魅力も伝えることができれば幸いである。

—Keywords—

格子ゲージ理論：

現実の連続的な時空間を離散的な格子点で近似してゲージ場を解析する方法。フェルミオン場（量子色力学 (QCD) ではクォーク場）は、その格子点上で定義され、ゲージ場（同、グルーオン場）は隣り合う格子点を結ぶリンク上に定義される。特に摂動論が機能しない場合のゲージ理論の定式化や解法に用いられる。

カイラル対称性：

クォーク質量がゼロの極限で QCD が持つ大域的対称性で、クォーク場の演算子に対する $\psi \rightarrow e^{i\epsilon\gamma_5}\psi$ (ϵ は定数) という位相変換によってラグランジアンが不変であることをいう。アップとダウンクォークの混合を伴うものを SU(2) カイラル対称性、混合がないものを本稿の話題である U(1) カイラル対称性と呼ぶ。

U(1) と SU(2)：

U(1) は 1 次元ユニタリ群で、絶対値が 1 の複素数で表され、その要素は互いに可換である。例えば、量子電磁力学のラグランジアンには U(1) の局所ゲージ対称性がある。また、本記事のカイラル対称性も大域的な U(1) を含む。SU(2) は (2^2-1) 次元の特殊ユニタリ群で、行列式が 1 である 2 行 2 列のユニタリ行列で表される。SU(2) の要素は互いに非可換であり、無限小変換の生成子はパウリのスピン行列となる。