

博士論文の内容の要旨

氏名	西川侃成
学位名	博士（理学）
学位授与年月日	2021年3月20日
論文題目	余剰次元が有効理論に与える影響とその評価

(博士論文の内容の要旨)

素粒子論や宇宙論においてスカラー場は非常に重要な役割を担う。素粒子論における標準模型に現れるヒッグス粒子は、現在観測されている唯一のスカラー粒子である。ヒッグス粒子はヒッグス機構を通して、物質を構成する粒子であるクォークやレプトンなどのフェルミオンや、弱い力を伝える W^\pm や Z^0 などのゲージボソンに質量を与える。また、宇宙論におけるスローロールインフレーションモデルにおいては、インフラトンと呼ばれるスカラー場が適切なポテンシャルを持つとき宇宙の指数関数的な膨張が実現される。つまり、この自然界においてスカラー場はなくてはならない存在である。

しかしながら、スカラー場はその質量またはポテンシャルに問題を抱えていることがよく知られている。スカラー場の質量は量子補正を受けると容易に切断スケールにまで跳ね上がってしまい、これを実際の観測値や理論値に合わせるためには非常に大きな数を繰り込む必要がある。もちろんこの繰り込み自体は理論上許されるものではあるが、自然がこのような微調整をするのかという疑問が生じる。この問題の解決策として超対称性や複合ヒッグス模型、また高次元理論などが提案されているが、現在のところ高エネルギー加速器実験においてこれらの兆候は見つかっておらず、有力な候補は絞られていない。

本論文では高次元理論、特にゲージ・ヒッグス統一理論に注目した。この理論に基づいた模型において、高次元ゲージ場の余剰次元成分のゼロモードを使って定義されたウィルソン線位相は4次元のスカラー場と見なされ、その質量項は古典レベルではゲージ対称性により禁止される。すなわち、その質量は通常のゲージ場の場合と同様に紫外発散から保護されることが期待される。その一方で、量子補正によりそのスカラー場に関する有限な有効ポテンシャルが生成されることが予想されている。これは一見ゲージ対称性と矛盾しそうであるが、そのポテンシャルはウィルソンループの関数として得られると考えられるため問題はない。したがって、そのスカラー場は微調整無しに有限な質量を獲得することが出来る。また、この有効ポテンシャルは細谷機構と呼ばれる対称性の自発的な破れを引き起こすことも知られている。よって、このスカラー場を標準模型のヒッグス場と見なすと微調整問題が解決され、さらに細谷機構により電弱対称性を破ることも可能である。同様に、このスカラー場をインフラトンと見なすとそのポテンシャルに関する微調整問題が解決される。そのような模型は extranatural インフレーション模型と呼ばれ詳しく調べられている。

以上のような高次元ゲージ場由来のスカラー場を利用した模型の特長は、そのスカラー場に関する有効ポテンシャルの有限性に強く依存している。しかしながら、この有限性を保証するような厳密な証明は存在せず、それ故、摂動的に確かめることは有意義である。現在、それは可換また非可換ゲージ理論の場合において、2ループレベルまで確かめられている。これらの計算の際には中間状態として物質粒子とゲージボソン、そしてそのゴーストが現れる。本研究では初めての試みとして、重力子が仮想粒子として存在するような場合の有効ポテンシャルの有限性について議論をした。より具体的には、5次元時空 $M^4 \times S^1$ 上において量子重力と結合する $U(1)$ ゲージ理論から出発し、5次元ゲージ場由来のスカラー場に関する有効ポテンシャルの有限性を2ループレベルで確認した。

重力結合定数は非常に小さいため現象論的な影響は期待出来ないにも拘らず、その有限性を確認することは重要である。なぜならば、もしも重力子の影響でポテンシャルの有限性が保たれないのであれば、それはゲージ・ヒッグス統一理論と量子重力の相性が良くないことを意味するからである。また、既にそのような量子重力と結合する模型も存在するが、これらの模型の予言についても意味をなさないことになってしまう危険性がある。本研究の結果は、少なくとも2ループレベルにおいて以上のような問題が起こらないことを示したという点で非常に重要であると言える。