

論文内容の要旨

論文題目 Cosmological Constant and Extra Dimension (宇宙項と余次元)

氏名 鈴木(早川) 祥子

場の理論は自然をよく記述している。しかし重力を場の量子論で記述することは未だに困難であることが知られている。このことから生じる問題として、重力の量子化、ゲージカップリングの階層性問題の他に宇宙項問題が挙げられる。前者2つが、おそらく重力の基本的なスケールであるプランクスケールより高いエネルギースケールで解決されていると期待されるのに対し、宇宙項問題とは実質的にどのエネルギースケールでも定義されうる問題と捉えることができる。したがって我々は、宇宙項が現在我々の知る低エネルギーでの理論によって説明されていると考える。このことは宇宙項問題が身近な問題として捉えられるということだけでなく、量子場の理論と一般相対性理論で記述される重力理論とのよりよい理解が可能であるということをも示唆している。このような動機から我々はこの博士論文で宇宙項問題について主に議論することにする。

宇宙項とはラグランジアン密度の定数項を意味する。場の量子論の立場からは、これは真空のエネルギー密度と解釈できる。場の理論において真空のエネルギー密度は多くの場合無視されるが、これは真空のエネルギーがその上の物質の力学に影響を与えないためである。この真空のエネルギー密度は場の量子論的にはその量子効果や力学によって出て来る。一方、Einstein 作用で記述される重力理論においては、宇宙項は重要な役割をする。つまり、Einstein 方程式を通して、時空の形に影響を与えるのである。従って重力まで考えたとき、宇宙項は無視できず、その値は理論的にはラグランジアンで与えられている知られたスケールに依存することが期待される。ところが一方で観測から、宇宙項の値は極めて小さいゼロではない値であることが知られている。この値はプランクスケールや電弱相互作用のスケールよりもはるかに小さいため、理論的な予想と矛盾する。これが宇宙項問題である。

この宇宙項問題に対して、これまでもいくつもの試みがなされている。単純に考えると、観測される宇宙項を理論から導き出すためには、ラグランジアンパラメータの *fine tuning* が必要になってしまう。これは理論で予想される大きな値の真空のエネルギー密度同士がキャンセルし合うことで観測の小さな値を出すという、極めて不自然な理論となる。ワインバーグは宇宙項問題

を二つの段階に分けることを提唱した。第一の問題は、標準理論や重力が真空のエネルギーへ何の寄与もしていない(ようにみえる)ことである。この問題については、いくつかの理論が解答を与えている。これらは宇宙項を理論の積分定数とすることで、宇宙項がラグランジアンパラメータに依らない任意の値を取り得るとしている。第二の問題は観測される宇宙項が非常に小さい値を取ることである。宇宙項を積分定数と解釈する場合、この第二の問題に対しては人間原理を応用することができる。すなわち与えられた理論において、観測される宇宙項の値を解として選ぶことが可能になる。現在のところ、人間原理以外の第二の問題に対する解決策は知られていない。

一方、近年高次元時空の理論の可能性が強く示唆されてきている。比較的大きな余次元の可能性や、ブレーン、ワープトコンパクト化についての議論が多くなされ、高次元時空が理論的に可能であることが示されつつある。また、現在の素粒子物理の様々な問題を解決する手段としても、高次元時空の理論が注目されている。このような背景からこの博士論文では宇宙項問題を高次元時空の理論で解決しようと試みる。

四次元時空の理論において、宇宙項問題の困難は主に四次元のポアンカレ対称性を保つ要請からきていることが分かる。しかし、余次元方向の回転・並進対称性を保つ必要はないことから、高次元時空の理論は宇宙項問題を解決する自由度が高いことが分かる。ところが一方で、高次元時空の理論には様々な拘束がある。特に現実的な四次元の有効理論を導くためには、余次元のコンパクト化、時空の正則性が理論を大きく制限してしまう。我々は特に六次元と五次元時空について **well-defined** なモデルを調べた。六次元のモデルについてはアベリアンゲージ場を導入することで、四次元の観測される宇宙項が積分定数となる理論を作ることに成功した。このゲージ場は、**degenerate singularity** を正則化するために導入されたものである。また、**conical singularity** を正則化するためにこのモデルでは **3-brane** を考えている。この **brane** 上に標準模型の物質場は乗っていると解釈することもできる。五次元のモデルでは、従来の宇宙項を積分定数とする理論ではない新たな考え方を提唱した。五次元の場合には一般に六次元の理論よりもより宇宙項問題へのアプローチが困難であることが知られている。我々の提唱したモデルでは負の **tension** を持つ **3-brane** を考えることで **singularity** を回避し、更に余次元方向を S^1 にコンパクト化することが可能になった。また、**bulk** に質量のないスカラー場を導入した。このスカラー場によって、五次元の宇宙項が正であるにもかかわらず四次元の宇宙項としてゼロをとり得ることが可能となった。このモデルにおいて、四次元の宇宙項の値は、スカラー場の余次元方向の境界条件によって選ばれる。理論とは、ラグランジアンと境界条件を独立に与えることで一意に定まるものであるから、この方法では四次元の宇宙項はラグランジアンパラメータの値とは独立に与えることができる。従ってこれは宇宙項問題の第一段階の解法となっていることが分かる。なぜ特にゼロを選ぶのか、という問題については、境界条件のパラメータを選ぶことに人間原理を適用出来る。このような宇宙項問題への高次元時空理論からのアプローチでは、作用原理や境界条件に対する本質的な理解が必要となってくる。よって、これらの考察をすることで場の量子論と重力理論に対するよりよい理解が得られると期待される。