

氏 名 北本 浩之

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1497 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Quantum infra-red effects in de Sitter space

論文審査委員 主 査 教授 小玉 英雄
教授 北澤 良久
教授 磯 暁
教授 野尻 美保子
准教授 西村 淳
教授 石橋 延幸 筑波大学

論文内容の要旨

In cosmic inflation at the early universe and dark energy at the present universe, our universe is exponentially expanding with the respective cosmological constants. To investigate the quantum effects on these universes, we need to understand the quantum field theory in de Sitter (dS) space. Exploring the quantum infra-red (IR) effects specific to dS space, we may better understand inflation and dark energy.

In order to investigate the interacting field theories in a time dependent background like dS space, we need to employ the Schwinger-Keldysh formalism. Nonequilibrium physics may play an important role in this regard. In investigating the quantum effects in dS space, we divide the momentum scale into the two regions, inside the cosmological horizon and outside the cosmological horizon.

Well inside the cosmological horizon, we have derived a Boltzmann equation in dS space from a Schwinger-Dyson equation, which is a standard tool in nonequilibrium physics. The local physics probed by the Boltzmann equation respects the dS symmetry since the degrees of freedom inside the cosmological horizon are time independent.

On the other hand, the degrees of freedom outside the cosmological horizon increase with cosmic expansion. This increase gives rise to a growing time dependence to the propagator for a massless and minimally coupled scalar field and gravitational field. It is a direct consequence of their scale invariant fluctuation spectrum. In some field theoretic models on dS space, the dS symmetry is dynamically broken and physical quantities acquire time dependences through such a quantum IR effect. In particular, this IR effect may be relevant to resolve the cosmological constant problem.

In the Schwinger-Keldysh perturbation theory, the IR effects at each loop level manifest as a polynomial in the logarithm of the scale factor of the universe. At late times, the leading IR effect comes from the leading logarithm at each loop level. Their growing time dependences mean that the perturbation theory eventually breaks down after a large enough cosmic expansion. In order to understand such a situation, we have to investigate the IR effect nonperturbatively.

Remarkably in the models with interaction potentials, the leading IR effects can be evaluated nonperturbatively by the stochastic approach. Furthermore it has been found that the equilibrium solution in the stochastic approach can be rederived in an Euclidean field theory on a 4-dimensional sphere. However in a general model with derivative interactions, we still don't know how to evaluate the nonperturbative IR effects. Especially such a tool is required to understand the quantum IR effects of gravity. It is because the gravitational field contains massless and minimally coupled modes with derivative interactions.

As a simple model with derivative interactions, we have investigated the non-linear sigma model.

The global symmetry guarantees that it contains massless minimally coupled scalar fields. In addition, we can perform some nonperturbative investigations as it is exactly solvable in the large N limit on an N -sphere. Another point is that there is some similarity to the Einstein action as it consists of the derivative interactions of the metric tensor field. Here we have investigated the contribution to the cosmological constant by evaluating the expectation value of the energy-momentum tensor.

From the perturbative investigation, we have found that the coupling constant of the non-linear sigma model becomes time dependent at the one loop level in agreement with power counting of the IR logarithms. In contrast, the leading IR effects to the cosmological constant cancel out each other at the two loop level beyond the power counting. Furthermore, we have shown that the cancellation of the leading IR effects works to all orders on an arbitrary target space. In fact even if we consider the full IR effects, the effective cosmological constant is time independent in the large N limit on an N -sphere. Although the sub-leading IR effects could arise at the three loop level in a generic non-linear sigma model, we have shown that there is a renormalization scheme to cancel it.

In this thesis, I summarize the quantum IR effects due to the degrees of freedom at the two regions, inside the cosmological horizon and outside the cosmological horizon.

博士論文の審査結果の要旨

本論文は、指数関数的に膨張するde Sitter時空上の場の理論における赤外量子効果に関する北本さんの研究をまとめたものである。de Sitter時空は正の宇宙項をもつが、近年の観測によれば我々の宇宙もこの種の時空に属している。また現在のみならず初期宇宙においてもde Sitter的な時空が実現し、宇宙の大規模構造の種を形成したと考えられている（インフレーション）。このため、宇宙項は重力の基本的（Planck）スケールにくらべてなぜ小さいのか（階層性問題）、ダークエネルギーは何か、インフレーションの微視的機構は何か等が基本問題となっている。これらの基本課題解決に向けて、de Sitter時空上の場の理論は重要な情報を与えると考えられる。

de Sitter時空は指数関数的に膨張しているため、宇宙膨張の時間スケールで情報が伝わる距離（ホライズン半径）がほぼ一定となる。このホライズン半径より短波長の自由度は、場の理論の短距離カットオフを一定に固定する限り時間変化しない。北本さんは、先ずこれらホライズンより短波長のモード間の相互作用による粒子生成プロセスを研究し、それが定常的なプロセスである事を示した。

一方、粒子の波動関数はその波長が宇宙膨張によって引き延ばされて次々とホライズンより長くなるため、ホライズンより長波長の自由度は時間とともに増大する。この効果によって質量のない最小結合するスカラー場の伝搬関数は、宇宙スケールを a とすると $\log(a)$ 的に時間とともに増大する。また重力子の伝搬関数も同様な振る舞いをする。このためde Sitter時空においては、ゆらぎの相関など真空での様々な物理量が時間依存性を示す可能性がある。ここで、問題となるのが、この効果を摂動論により計算すると、 $\log(a)$ の冪級数となることである。このため、宇宙膨張とともに $\log(a)$ 因子が増大すると非摂動論的理解が必要となる可能性が生じる。

ポテンシャル相互作用の場合は、リーディング \log 因子の足し上げが可能で、実は、この見かけの発散は相殺することが示される。北本さんは、微分結合する非線形シグマ模型において、この問題を研究した。その結果、リーディング \log 因子に関しては、2ループレベルで予測される非自明な \log 因子が相殺することを具体的な計算で示した。次に全次数においてリーディング \log 因子が相殺する事を示した。更にサブリーディング \log 因子について研究し、N次元球面上の非線形シグマ模型のラージN極限、一般的な非線形シグマ模型の3ループにおいて \log 因子が生じない事を示した。

北本さんは、以上の様に de Sitter 時空の赤外量子効果について研究し、非線形

シグマ模型においてパワーカウンティングを超えた相殺機構が存在する事を明らかにした。この研究成果は、類似した量子重力理論の赤外量子効果理解への発展が期待される。本研究は、場の理論における非平衡物理現象を論じたものとして革新的であり、北本さんは共同研究の全般に本質的に寄与した。北本さんの深い学識と高度な研究能力を示したものとして博士論文に相応しいと判断した。