

論文の内容の要旨

Analytical Investigation into Electromagnetic Response of Quantum Fields in de Sitter Spacetime

(ド・ジッター時空における量子場の電磁的応答の解析的研究)

氏名 林中 貴宏

本論文では、インフレーション宇宙論における物質場、特にゲージ場の進化の研究において、これまであまり考慮されてこなかった、荷電粒子と電磁場の相互作用に着目し、de Sitter 時空中の量子電磁力学 (QED) を用いて、(1) 新奇な物理現象の探索、(2) その現象の背後にある物理的な過程、(3) その宇宙論的な帰結を研究した。

具体的には宇宙論において興味のある 4 ($= 1 + 3$) 次元 de Sitter 時空の中で、一様かつ時間的に変化しないエネルギー密度をもつ背景電場を考えた。重力と電場という二つの背景場の下で、まずは Dirac 場やスカラー場の運動方程式を解いて得られた解析的な解を用いて、それらが誘導する電流の真空期待値を計算した。真空期待値に現れる発散の処理については断熱正則化と point-splitting 正則化を用い、従前の研究で行われてきたのと同様な minimal subtraction と呼ぶべき繰りこみ条件を課すことで、有限の結果を得た。ただし、曲がった時空の場の理論においては、先験的に繰りこみ条件が決まらないため、物理的な結果を得るためにどのような繰りこみ条件を課すかは、本来慎重に考えるべき問題である。

解析の結果、de Sitter 時空中では、QED が遮蔽 (スクリーニング) を起こす理論であるにも関わらず、電場の強さが、荷電粒子の質量で決まる臨界値よりも弱い場合に、反遮蔽効果が起こることが予言されることを見出した。反遮蔽とはつまり、弱い外部電場を増幅する向きに荷電粒子が動き、電場とは逆向きの電流 (電場に対して負の向きの電流) が

生じるということである。この奇異な現象についてのより直観的な理解として、de Sitter 時空中の観測者が見る地平面からの粒子生成に着目し、生成粒子の電荷が背景電場によって偏ること、およびその偏りが通常の系とは反対向きの分極を生じる結果として自然に反遮蔽効果が起こることを説明した (図 1)。さらに、このような直観的な説明が定性的にも定量的にも妥当であることを半古典的な計算によって示した。

この反遮蔽効果は、自発的に電荷分布や電流を生じる過程であるため、一見すると熱力学的なマクスウェルの悪魔のように見える。そこで、電気熱力学的な議論を援用してこの過程が通常のエントロピー増大過程であり、熱力学第二法則に反したものではないことを確認した。

電磁気学における反遮蔽効果は当初全く予期されていなかったものであるが、旧来の宇宙磁場生成モデルにおいては欠かせなかった電磁場の理論の変更・拡張に依らない、自発的なインフレーション中の電磁場生成というシナリオを想起させるものであり、興味深い。また反遮蔽効果は、電場が十分強くなった場合には通常の電磁気学で見られる遮蔽効果にかわるため、際限なく電場が増幅され続けることはなく、有限の強さに留まる。これは、Schwinger 機構による (体積的な) 粒子生成が (Hawking 放射と同様の) 地平面からの粒子生成よりも優勢になり、生成粒子の運動によって誘起される電流が大きくなるために起こる。この点で、この反遮蔽効果は安定であり、宇宙論的な状況で実際に起こり得るものである。

反遮蔽効果に関する上記の考察と、スカラー場・Dirac 場双方の場合の誘導電流の厳密解による計算、荷電粒子が重い極限における半古典的な解析を通して、伝統的に用いられてきた (最小次数の) 断熱正則化や minimal subtraction といった繰りこみ条件が、いくつかの物理的に妥当だと考えられる条件を満たさないことが判明した。この条件とは、具体的には、荷電粒子が重い極限での、誘導電流期待値の解析的な振る舞いが、半古典的な解析と一致するというものである。半古典的な解析によれば、荷電粒子の質量 m が大きい極限で、誘導電流の値は $\exp\left(-\frac{2\pi m}{H}\right)$ で抑えられる (H は Hubble 定数) ことがわかる。一方で、解析的な計算の結果には $\sum c_n m^{-n}$ という形の摂動的な項が現れる。そこで、本論文では摂動的な部分の寄与をすべて取り除き、非摂動部分を取り出す繰りこみ条件 (maximal subtraction) を提案し、その物理的な帰結を調べた。究極的には、場の理論における繰りこみ点の選択は、実験と観測の結果のみによって決められることは論を俟たない。それでもなお、より妥当と考えられる物理的な要請を課すことは、曲がった時空の場の理論の効果の観測が難しい現状では十分有意義なことである。

ここまでで説明した研究においては、考察している系が複雑ながらも厳密に解けることが肝要であった。しかし、より実際的で厳密には解けないような宇宙論的な系の考察に対しては示唆を与えているにすぎず、また、こうした系の振る舞いを厳密に解くことはほとんど不可能である。さらに、上述の通り、非摂動的な効果が重要な役割を果たすことが分

かっているため、通常の摂動論を用いることは不適切である。そこで、非摂動的繰りこみ群 (NPRG) と呼ばれる場の理論の解析手法と、有効場の理論の方法を組み合わせることで、曲がった時空中の QED 理論の近似手法を与えることを試みた。本論文では、補遺において、平坦な時空中での NPRG の研究とその曲がった時空中のスカラー場への応用に関する先行研究を、一般の時空中上の U(1)ゲージ理論の場合にも拡張できることを示し、支配方程式をあらわな形で書き下した。ごく単純な系の場合についてこの手法を適用し、赤外・紫外の発散がないこと、数値的な取り扱いも可能であることを示した。

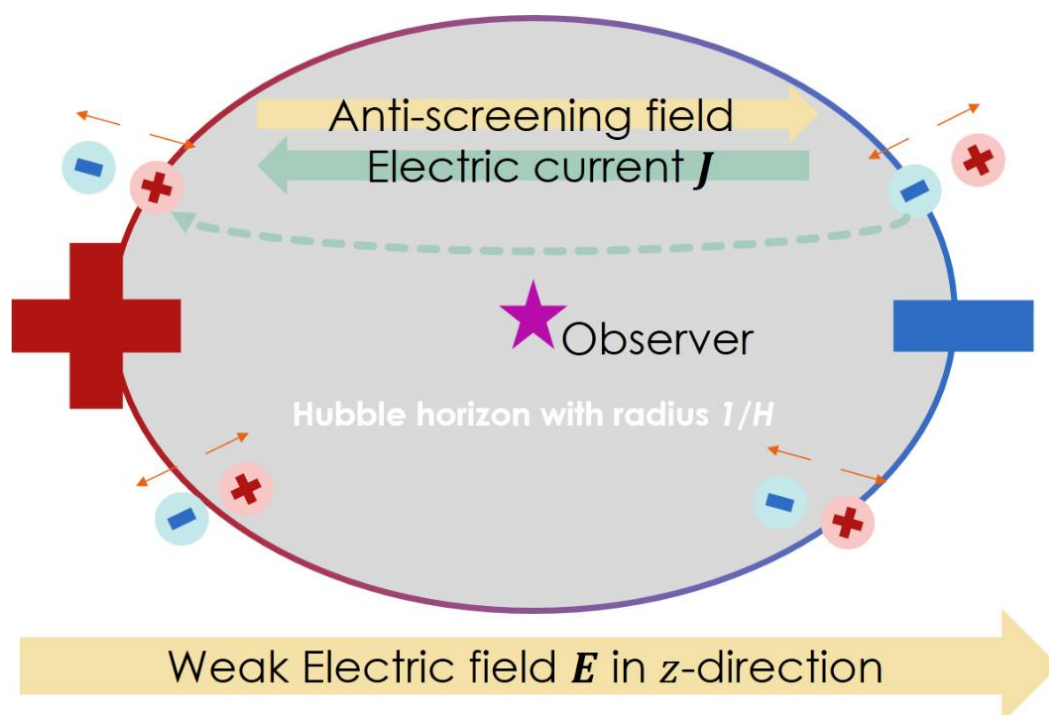


図 1 : de Sitter 時空中における反遮蔽効果が起こる機構の模式図

地平面近傍からの粒子生成が外部電場によって影響を受け、図の右端（左端）では正（負）に帯電した粒子がより多く地平面の外に出ていくことで、負（正）に帯電した粒子が多く生成する。その結果として、図中央の観測者は通常とは反対向きの分極を感じ、反遮蔽効果が起こる。

なお、本論文は以下の通り構成されている。

第一章では、本研究の土台である量子論的な宇宙論のこれまでの発展と現在の課題について概観した。特に、原始磁場形成理論の文脈では、過剰な電場の生成が障害となること、その一方で、強い電場の存在下で考慮すべき QED 相互作用が、これまでの研究ではあまり顧みられてこなかったことを改めて指摘し、本論文の主題の重要性を説明した。また、関連する諸分野の研究についての概略も示した。

第二章では、曲がった時空中における場の理論の基礎的な取り扱いについて、必要となる

事項を説明した。

第三章では、荷電粒子が Dirac 場の場合について取り扱った。一様かつ定常な電場によって誘起される電流の真空期待値を厳密に計算した。反遮蔽効果が見られること、およびそれに関する物理的な考察をここで与えた。

第四章では、荷電粒子がスカラー場の場合について取り上げた。異なる繰りこみ手法の比較や Dirac 場との結果の比較を通して、新しい繰りこみ条件である maximal subtraction を導入し、その帰結を調べ、物理的に妥当であることを議論した。

第五章では、まず各章の内容をまとめ、得られた知見が示唆する宇宙論的な帰結について議論し、本論文の結論とした。

上述の NPRG による解析の方法と有用性についての説明は、他の内容とは独立していること、萌芽的な結果のみが得られていることから、補遺 (Appendix E) において取り扱った。