

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

氏 名 ROTONDO Marcello

論 文 題 目

**Quantum and semiclassical features of the de Sitter universe:  
time evolution and relativistic quantum information**

(ド・ジッター宇宙の量子的及び半古典的特徴：時間発展と相対論的量子情報)

### 論文審査担当者

主査 名古屋大学大学院理学研究科 准教授 理学博士 南部 保貞

委員 名古屋大学大学院理学研究科 教授 理学博士 野尻 伸一

委員 名古屋大学大学院理学研究科 教授 博士(理学) 棚橋 誠治

委員 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授

博士(理学) 白水 徹也

委員 名古屋大学大学院理学研究科 准教授 博士(理学) 竹内 努

## 論文審査の結果の要旨

## 別紙 1 - 2

量子宇宙論は量子論を宇宙全体に適用する試みであり、現在我々が観測している古典宇宙に対する初期条件を予言することがその目的の1つである。宇宙の量子状態を記述する波動関数は量子力学の **Schroedinger** 方程式に対応する **Wheeler-De Witt** 方程式 (**WDW** 方程式) に従う。しかしながら、重力理論の持つ一般座標変換不変性に起因して **WDW** 方程式からは時間発展の概念が抜け落ちてしまい、量子的な状況からどのようにして古典的な宇宙が出現するかを理解するためには、「時間」がどのように現れるかを明らかにする必要がある。

この問題に対するアプローチとしては、**WKB** 近似に基づいて時間を定義する方法と宇宙 (幾何学) と物質 (量子場) 間の量子相関 (エンタングルメント) を通じて時間を導入する方法の2つが知られているが、特に後者の方法については宇宙モデルを用いた具体的な解析はこれまでなされていなかった。申請者は、本研究において量子宇宙論における時間の問題ならびに古典性の出現に関する以下の理論解析を行った。

(1)量子宇宙論における時間の出現：時間の概念のない量子宇宙論において、時間の概念が時計変数との量子相関を媒介として出現するシナリオを、**de Sitter** 宇宙とスカラー場の系で具体的に解析した。スカラー場の状態を用いて量子時計の系を導入し、この時計を用いて宇宙の状態を計測することを考え、この設定の下で宇宙の量子状態に対する発展方程式の導出に成功した。この方程式は時間変数 (時計のパラメータ) に対する微分積分方程式の構造を持ち、時間に関して非局所的な構造を示す。しかしながら宇宙の大きさがプランク長さと宇宙項の大きさで決まる特徴的なスケールより十分大きい場合には、その非局所性が消え、宇宙の状態は通常の **Schroedinger** 型の方程式に従う。この結果は、時計の系と宇宙の系間の量子相関を通して宇宙の系に時間の概念が出現することを意味する。

(2)時間の矢の方向とデコヒーレンス：半古典宇宙の時間の向きについて、スカラー場と背景時空の相互作用によるデコヒーレンス効果に基づき考察した。そして、この効果がハッブル地平線を越えるスケールで顕著となり時間の方向が1つ選択されることを示した。

(3)半古典宇宙におけるパラメータ推定：量子情報理論に基づくパラメータ推定理論によれば、推定パラメータ値に対する精度は **Cramer-Rao** 不等式によって制限される。本研究では、**de Sitter** 宇宙での量子場のゆらぎの測定値から背景宇宙のパラメータに対する推定を考察した。具体的には量子場に対する量子 **Fisher** 情報量を評価することで、背景宇宙の膨張則と場自身の古典性の間の関係を見出した。

申請者の研究は、量子宇宙モデルを用いて宇宙における時間の出現機構の様相を明らかにし、半古典的状况における時間の矢の方向とデコヒーレンスの関係、情報量の振舞いと宇宙の古典性との関係を見出した点で高く評価できる。また参考論文は、2次元離散重力の1つのモデルにおける連続極限を議論した重要なものである。以上の理由により、申請者は博士 (理学) の学位を与えられるに相応しいと認められる。