

Theoretical Study on Quantum Mechanical Aspects of Gravity based on Quantum Field Theory

杉山, 祐紀

<https://hdl.handle.net/2324/7182293>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名	杉山 祐紀			
論 文 名	Theoretical Study on Quantum Mechanical Aspects of Gravity based on Quantum Field Theory (場の量子論に基づいた重力の量子力学的側面の理論的研究)			
論文調査委員	主 査	九州大学	教授	山本一博
	副 査	九州大学	教授	鈴木 博
	副 査	九州大学	准教授	菅野優美
	副 査	九州大学	助教	松村 央

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

重力を記述する一般相対性理論は、重力波の直接検出やブラックホールの発見により精密な検証が行われており、観測をよく説明することがわかっている。その一方で、重力と量子力学の統一理論である量子重力理論は、量子力学の成立以来の難問として未完であり、現代物理学に残された最重要課題である。量子重力理論の構築が未完である理由は、量子的な重力場に由来する現象が実験的に全くなされていないことが一因と考えられる。しかし最近の量子技術の発展により、実験室スケールの低エネルギー実験で重力の量子力学的な性質を確認できる可能性が指摘され、注目を集めている。Bose ら及び、Marletto と Vedral の両グループは、重力ポテンシャルの量子的重ね合わせ状態を検証し得る実験を提案した。これは、1957 年に Feynman が指摘した重力ポテンシャルの量子的重ね合わせ状態の検証を実現するかもしれない提案である。彼らの提案では、二つの粒子の量子的重ね合わせ状態を用意し、そこで生まれる量子的重ね合わせ状態の重力ポテンシャルが作る量子もつれに着目する。その重力が作る量子もつれの検証が重力の量子力学的性質の検証になる可能性を指摘した。杉山祐紀氏の研究は、重力が作る量子もつれに着目し、場の量子場に基づいて重力の量子力学的性質である重力ポテンシャルの量子的重ね合わせ現象の解明を目的として以下の三点を調査した。(1) 動的な場の自由度は量子もつれ生成にどのような影響を与えるか。(2) 相対性理論と量子力学の性質は場の自由度を考慮するとどのように無矛盾となるか。(3) 重力場の量子的重ね合わせ状態はどのように定量化されるか。

初めに、(1)を明らかにするために動的な場の自由度を含む場の量子論に基づいて、量子もつれ生成を議論できる理論モデルを構築した。これは量子電磁力学に基づくモデルで、厳密に解析を行うことができ、かつ重力場への拡張を見据えたモデルである。このモデルの下で、荷電粒子間の量子もつれ生成を議論するために、量子もつれを定量化する Negativity の表式を導出し、その振る舞いを議論した。その結果、2 粒子間の量子もつれ生成は動的な場の真空揺らぎに起因するデコヒーレンスによって抑制されることが分かった。一方で、動的な場は単に荷電粒子のコヒーレンスを壊すだけでなく、2 粒子の配置の仕方によっては量子もつれ生成を促進する可能性もあることも発見した。

次に、(1)の定式化を応用して先行研究で指摘されていた相対性理論の性質である因果律と量子力学の性質である相補性がどのように無矛盾になるか定量的に調査した。この研究では、電磁場および重力場の場合で、上記の因果律と相補性の二つの性質の無矛盾性を議論した。この研究により因果律は、遅延グリーン関数の性質で理解できる事を明示した。次に、相補性を定量的に表す不等式を導入して因果律と相補性が両立する条件を考察し、相補性を表す不等式は、場の不確定性関係

により保証されることを証明した。更に、この条件の理解を深めるために、動的な場による 2 粒子間の量子相関（量子もつれ）との関係に着目した。その結果、動的な場の不確定性関係は真空揺らぎをもたらし、2 粒子間は量子もつれ状態とならないことが分かった。更に、2 粒子が量子もつれ状態とならない条件と相補性が無矛盾であることを数値解析で示した。

最後に、(3)の研究では、2 粒子と重力場の 3 体系における量子もつれのトレードオフ関係を考察し、2 粒子間の量子もつれの強さに応じて、粒子と重力場の量子もつれの強さも変化することを定量的に示した。この関係を用いて、重力場の量子的な重ね合わせ状態の振る舞いを調べ、粒子の重ね合わせの距離が大きいほど重力場もよく重ね合わせ状態になることも定量的に明らかにした。

以上の結果、重力が作る量子もつれと重力場の量子論との関係が定量的に明らかになった。また先行研究で議論された因果律と相補性の両立は、粒子と重力場との量子もつれ、さらに重力場に起因する真空揺らぎによる量子相関の抑制により理解できることが定量的に示された。これらの研究成果は、重力の量子力学的性質に解明に重要な学術的貢献をする成果である。

よって、本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。