

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)

区 分 : 甲

論文内容の要旨

重力を記述する一般相対性理論と量子力学を統一した理論（量子重力理論）の構築は、現代物理学において最も重要な試みである。現在、自然界には4種類の力（電磁気力、強い力、弱い力、重力）が存在すると考えられている。特に、重力を除く3つの力は場の量子論として量子力学と矛盾無く記述することに成功している。量子重力理論は、宇宙初期などの極限環境やブラックホールの量子論的な側面の理解に必須と考えられているにも関わらず未だ完成していない。超弦理論をはじめとして、これまでに量子重力理論の候補となる理論が様々に提案されてきた。しかし、提案された理論の正当性は今も判然としていない。量子重力理論の構築が困難である理由は、量子的な重力場に由来する現象が実験的に未発見であることが一因と考えられる。一般相対性理論は重力波という時空の動的な自由度の存在を予言していた。実際に2015年には、重力波干渉計を用いた直接観測を通して重力波の存在が確認された。一方で、量子力学の本質は、物理現象が粒子性と波動性の両方の性質を併せ持つことである。そのため、一般相対性理論と量子力学が整合的であるならば、重力の粒子的な側面（重力子）が存在すると考えられる。しかし、重力子の検証には、現在到達可能なエネルギーよりも遥かに高いエネルギーの加速器が必要であり、技術的困難に直面している。近年になり、重力波干渉計を応用した重力子の間接的な検出方法などが提案されているものの未だ実現していない。

量子技術の発展により、実験室規模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のある研究が行われている。Feynman は、位置の重ね合わせ状態にある粒子は重力相互作用を介して別の粒子も位置の重ね合わせ状態にする、と予想した。これは、粒子が作る重力ポテンシャルの重ね合わせ状態が実現すると解釈される。Bose et al. [PRL (2017)] 及び Marletto & Vedral [PRL (2017)] のグループは、重力ポテンシャルの重ね合わせ状態を検証し得るモデルを考案した。彼らは、重力ポテンシャルにより相互作用する位置の重ね合わせ状態にある2粒子間の時間発展を考察した。この研究で、初期に量子もつれ状態ではない（separable 状態）2粒子は、重力ポテンシャルにより量子もつれ状態になることが判明した。この量子もつれ状態は、重力ポテンシャルの重ね合わせ状態により生成すると解釈される。しかし、彼らの解析には、重力子の自由度は考慮されておらず、重力子を考慮しなければ、相対性理論と量子力学の性質が両立しない可能性が指摘されていた [Belenchia et al., PRD (2018)]。また、重力子のような自由度が量子もつれ生成に与える影響について議論された先行研究はこれまでになかった。

本博士論文では、重力の量子力学的側面を場の量子論の観点から明らかにすることを目的とし

た。特に、量子場としての重力の性質と重力ポテンシャルの重ね合わせ現象の間にある関係性の解明に注力するため、以下の3点を調査した。

(i) 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？

(ii) 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？

(iii) 重力場の重ね合わせ状態はどのように定量化されるか？

まず、(i)を明らかにするために動的な場の自由度も考慮して量子もつれ生成を議論できるモデルの構築を行った。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て、量子電磁力学に基づくモデルを構築した。具体的には、光子と相互作用する2つの荷電粒子間の量子もつれ生成を議論した。2つの軌道の重ね合わせ状態にある2つの荷電粒子と光子の初期状態は separable 状態であると仮定し、その時間発展後の状態を求めた。また、重力場への拡張を見据えて、共変性を持つゲージ固定条件を採用した。この下で、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公式 (Negativity) を導出した。更に、具体的な計算を行うために、粒子の軌道を具体的に仮定し、Negativity 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光子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、光子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を発見した。

次に、構築したモデルに基づいて、(ii)を調査した。特に、一般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考察した。この研究では、線形重力場の範囲に限って、電磁場および重力場の両場合に上記2種類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が明らかとなった。また、相補性を定量的に表す不等式を導入し、因果律と相補性が両立する条件を考察した。そして、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、電磁場/重力場による2粒子間の量子相関(量子もつれ)との関係に着目した。すると、電磁場/重力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(相関を持たない)条件と相補性が無矛盾であることを数値解析で実証した。

最後に、(iii)について調査を行った。特に、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た。その結果、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が判明した。また、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ると、粒子の重ね合わせの幅が大きいほど重力場もよく重ね合わせ状態になることを定量的に議論した。

以上の結果より、動的な場はデコヒーレンスにより量子もつれ生成を抑制するだけでなく、状況によっては促進する可能性を明らかにした。また、因果律と相補性の両立は、電磁場や重力場に起因する真空揺らぎによる量子相関の抑制として理解できることがわかった。更に、重力場の重ね合わせは、粒子の重ね合わせ状態と相関していることを定量的に明らかにした。本研究を通じて、重力場の量子力学的性質に関する理解が深化したと考えられる。今後は、重力場に由来するデコヒーレンスについての理解を更に深めることで量子重力理論の構築に貢献していきたい。