

学位論文の要旨

論文題目 (和文) ウンルー効果の量子情報科学への応用に関する理論的研究
(英文) A theoretical study on the application of Unruh effect to quantum information science

広島大学大学院総合科学研究科
総合科学専攻
学生番号 D134388
氏名 廣石 雅紀

ウンルー効果とは、慣性運動している観測者（アリス）から見て真空状態にある場が、一様加速運動している観測者（ロブ）から見ると熱状態の場として観測される現象である。ロブが観測する熱状態は、量子論に特有の重ね合わせ状態を古典的な状態へと劣化させるデコヒーレンスの原因となる。このため、ウンルー効果は、量子コヒーレンスに立脚する量子情報処理を遂行するうえで回避すべきものとされてきた。

しかしその一方で、ウンルー効果は、量子情報処理において必須な量子操作であるパラメトリック下方変換と物理的に等価である。本研究では、この点に着目し、ウンルー効果に秘められた特性を量子情報処理へ活用する方法を考案した。具体的な解決すべき課題は、次のとおりである。

(1) ウンルー効果は、その前駆過程として、一様加速系のリンドラー・フォック空間における2つのモード間に量子エンタングルメントを形成する。これまでウンルー効果が量子情報処理に利用されなかった理由は、それがデコヒーレンスの原因となることだけでなく、上記2つのモードのうち一方に相対論的にアクセスできないことにもあると思われる。即ち、量子エンタングルメントは、その片割れにしかアクセスできないのであれば、単なる熱浴を表すものに過ぎず、利用価値はない。この量子エンタングルメントを利用可能な形態のエンタングル状態として、アリスのミンコフスキー・フォック空間に取り出すことが課題である。

(2) また、ウンルー効果は、アリスの真空状態とロブの熱状態との一方から他方への変換を表す数学的つながりを記述する。この数学的つながりを、アリスが保有する量子ビットとロブが保有する量子ビットとの間の量子相関の形成に活用する手法を見出すことがもう1つの課題である。さらに、その量子相関の形成にロブの一様加速運動がいかに寄与するか解明することも課題とする。

本研究では、上述した数学的つながりが、アリスのミンコフスキー・フォック空間とロブのリンドラー・フォック空間とをつなぐ量子チャンネルの役割を果たしていることに着目して、上記各課題を解決した。

即ち、アリスは、量子チャンネルを介して、アクセス不能なモードに間接的にアクセス可能となる。また、アリスが量子チャンネルの逆操作を行うことが可能なら、量子

チャンネルを恒等チャンネルに変換することが原理的には可能である。この恒等チャンネルを用いれば、リンドラー・フォック空間の量子状態を、ミンコフスキー・フォック空間にそのまま取り出せる。このようにして、本研究では、ウンルー効果がもたらすリンドラー・フォック空間における場の量子エンタングルメントを、ミンコフスキー・フォック空間において利用可能とした。これにより、量子情報処理において、ウンルー効果をパラメトリック下方変換と同様の使い方で活用できる（課題（1））。

また、恒等チャンネルは、波束の収縮の双方向的な伝播を許す可逆性をもつ。この可逆性を利用することで、パラメトリック下方変換では実現し得ないウンルー効果に特有の活用形態が実現される。つまり、特殊相対論の時間同時性により、量子測定による波束の収縮が恒等チャンネルを介して往復しつつ過去へと遡及し、その結果として、疑似的に過去と未来が閉じた時間的閉曲線が形成される。その形成過程で、ロブの一樣加速運動は、波束の収縮を過去へと遡及させることに寄与する。そして、この時間的閉曲線が、慣性系のアリスと一樣加速系のロブとの間の量子相関の形成に利用される（課題（2））。このように、課題（2）は、恒等チャンネルの可逆性と事象の観測に関する相対論的同時性により解決される。

以上の通り、本論文では、これまで活用されることのなかったウンルー効果が、量子情報技術に活用可能であることを理論的に示した。