

## 論文の要旨

題目 Theoretical studies on analogue Hawking radiation in quantum circuits  
(量子回路における擬似的ホーキング輻射の理論的研究)

氏名 片山 春菜

近年、自然界に存在する4つの力を統一的に記述する「万物の理論」の理論の構築に向けて、精力的に研究が進められている。これまで、人類は電磁力、弱い力、強い力の3つの力の統一に成功し、残された重力の統合が急がれている。この際、課題となるのは、重力を記述する一般相対性理論が量子力学的に記述できていないことである。したがって、重力に関わる量子力学的効果を検証することによって、二つの理論体系の統合を図る必要がある。

ブラックホールは、強い重力によって形成された曲がった時空であるため、そこからは光さえも抜け出すことが出来ない。しかし、ホーキングは、量子力学的効果を考えると、ブラックホールの事象の地平線近傍で、不確定性原理より対生成された粒子が、事象の地平線を越えて外に出ることが可能であると予言した（ホーキング輻射）。したがって、ホーキング輻射の観測が一般相対性理論と量子力学の統一の道標となる。しかし、ホーキング輻射は宇宙背景輻射に比べて極めて小さく、その観測は困難である。そこで、実験室系で擬似的ブラックホールを作り、ホーキング輻射を観測する試みがなされている。

本論文は、システムの拡張性（スケールビリティ）や制御において優位性がある電気回路において擬似的にブラックホールを創生し、これを用いてホーキング輻射の観測可能性を検討した。また、ホーキング輻射の観測を更に容易にするため、その増幅機構として二つの事象の地平線を用いたブラックホール・レーザーを考案した。

実験室系における擬似的ブラックホールの基本概念は、滝を遡上する鯉のモデルで理解できる。上流では緩やかな流れが、滝の近くでは速くなり、そこを泳ぐ鯉は流れに打ち勝つことができず流されてしまう。これは、ブラックホールに落ち込む物体の様子を模倣している。したがって、擬似的ブラックホールの創生は、空間的に流速が変化するシステムを考案することによってなされる。電気回路では、回路中を伝播する電磁波の速度に空間依存性を与えることによって擬似的ブラックホールが創成される。電磁波速度は、回路パラメータ（インダクタンスとキャパシタンス）に依存するので、これらに空間依存性を導入することによって、ブラックホールを創生することができる。

本論文では、非線形伝送線路を用いていることが特徴で、そこでは回路中を安定に伝播する非線形孤立波（ソリトン）が存在し、これにより回路パラメータを安定に制御することができる。本論文では、キャパシタンスに非線形性を入れた非線形LC伝送線路と、インダクタンスに非線形性をもつジョセフソン接合を入れたジョセフソン伝送線路について考察した。それぞれ非線形シュレディンガー方程式と非収束型変形 Korteweg-de Vries (KdV) 方程式によって記述され、

衝撃波型のソリトン解を持つことを見出した。これらのソリトンが一様背景流となり、一方、空間依存する速度をもった電磁波が鯉の役割をなすことによって、鯉が一様流に流されるところで、擬似的なブラックホールが創生されることがわかった。

このブラックホールソリトンを用いて、ホーキング輻射の観測可能性を議論した。そのために、ホーキング輻射を事象の地平線付近で対生成された粒子が、事象の地平線をトンネル効果によって脱出するトンネルメカニズムを基にホーキング温度を定式化し、ホーキング温度を評価した。結果として、ホーキング温度は、電磁波速度の空間微分によって与えられることを明らかにした。これは、表面重力を用いて導出された先行研究の結果を再現している。ブラックホールソリトンでは、ホーキング温度を解析的に評価することができる。我々のシステムでは、ホーキング温度は、回路パラメータに依存する部分とソリトン速度に依存する要素によって決定されていることがわかった。ソリトン速度の依存性は、これまでの理論にはない新たな寄与であり、このソリトン速度依存性を調べることによって、ブラックホールからの輻射がホーキング輻射であるかどうかを同定することができる。既存の技術で到達可能な回路パラメータを用いると、ホーキング温度が非線形 LC 伝送線路では数ミリケルビン、ジョセフソン伝送線路では数十ミリケルビンであることがわかった。この結果から、我々のシステムでは、ホーキング輻射を実験的に十分観測することが可能であることがわかった。

次に、ホーキング輻射のさらなる増幅のため、ソリトンの前後で生成されるブラックホールホライズンとホワイトホールホライズンの二つの地平線を利用したブラックホール・レーザーを量子回路において考案した。二つの地平線が鏡のように働き共振器として振舞うには、システムの分散関係が重要になる。なぜなら、一方向の流れでは、ブラックホール内部（滝）では流れに逆らうことができないためである。通常、異常分散の超光速成分を利用することによって、これを克服することができるが、伝送線路では異常分散を作り出すことができない。そこで、メタマテリアル要素を導入し、分散関係を制御することによって電気回路においてブラックホール・レーザーの理論を構築した。メタマテリアル要素は、部分的に超光速伝播モードを実現することが可能であり、ホライズン間を行き来することができるモードが存在することを示した。これが本研究での特徴である。これより、二つのホライズンは共振器として振舞い、量子揺らぎにより対生成された粒子・反粒子に対応するモードは、二つの事象の地平線の間を反復する。事象の地平線での粒子・反粒子の非線形モード変換を考慮すると、ソリトンの外に放射される増幅されたホーキング輻射は、指数関数的に増幅されることを明らかにした。また、事象の地平線での非線形モード変換に加えて、ジョセフソン・パラメトリック増幅による増幅を導入した。以上により、電気回路系で初めて、ブラックホール・レーザーの理論を構築することに成功した。これにより、ホーキング輻射が増幅され、より観測の可能性が増した。

以上の通り、これらによって、ホーキング輻射の観測が可能であることがわかった。また、ブラックホール・レーザーは、ホーキング輻射の増幅だけでなく、不確定性原理を起源に持つエンタングルメントレーザーとして機能し、現在発展している量子情報科学に必要な情報資源となり得る。そして、これらの結果は、回路量子重力理論の建設の足がかりとなる。