

ジョセフソン・メタマテリアル伝送線路を用いた ブラックホールレーザーの理論

Theory of black hole lasers in Josephson metamaterial transmission lines

広大院先進理工 ^{○(D)} 片山 春菜

Hiroshima Univ., ^{○(D)} Haruna Katayama

E-mail: halna496@gmail.com

【研究の背景】 ホーキング輻射は、光でさえ脱け出せないブラックホールの事象の地平線付近で、量子的に対生成された仮想粒子が実粒子として輻射される現象である。そのため、一般相対性理論と量子力学が会える稀有な現象で、それらの統一に向けて、このホーキング輻射の観測が鍵となる。しかし、ホーキング輻射は宇宙背景輻射よりも極めて小さいため、未だ観測されていない。そこで、実験室系で擬似的ブラックホールを創生し、それを用いてホーキング輻射の検証を行うという提案がなされている。これまでに我々は、ジョセフソン伝送線路において、電流ソリトンがブラックホールとして振舞い、既存技術で達成可能な接合パラメータを用いると、ホーキング温度は観測可能であることを明らかにした（2020 年春 14a-B408-5, 2020 年秋 8p-Z27-8）[1, 2, 3]。近年、ホーキング輻射をさらに増幅する方法として、ブラックホール・ホワイトホール対が共振器として振舞うブラックホールレーザーが提案されているが[4]、電気回路では未だ提案されていない。

【研究の目的・概要】 光ファイバーにおけるブラックホールレーザーは、光ファイバー内を伝播するパルス光により、その強度の二乗に比例したカー効果を生じさせ、システムの屈折率を変化させて光速を空間的に制御することによって作られる[4]。本研究では、電気回路において、これと同等のブラックホールレーザーを提案する。これを実現するためには、共振器内に粒子と反粒子に対応する伝搬モードを持つような分散関係を持つとともに、カー効果によるモード選択が可能なシステムが必要である。本研究では、メタマテリアル要素をジョセフソン回路に組み込むことにより、所望の伝搬モードを導入し、ジョセフソン接合によりカー非線形性を実現させ、回路ブラックホールレーザーの理論を構築する。

【結論】 最初に逡減摂動法を用いて、回路方程式に非線形 Schrödinger 方程式に従う位相ソリトンが存在することを明らかにした。この位相ソリトンは、ジョセフソンインダクタンスの非線形性に起因するカー効果によって、電場の強さの二乗に比例して回路の屈折率を空間的に変調させる。これにより、ソリトン内部で量子対生成された光の速度は変調され、ある地点（事象の地平線）でソリトンから抜け出すことができなくなり、ソリトンの前後でブラックホール・ホワイトホール対が生成される (Fig. 1 参照)。これら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。結果として、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、量子相関のあるスクイズド状態のブラックホールレーザーになることがわかった。

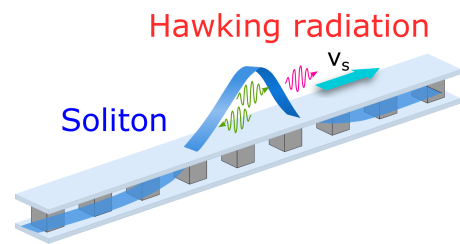


Fig. 1 Schematic diagram of a black hole laser in our system, where soliton behaves as a cavity.

- [1] H. Katayama, N. Hatakenaka, and T. Fujii, Phys. Rev. D **102**, 086018 (2020).
- [2] H. Katayama, S. Ishizaka, N. Hatakenaka, and T. Fujii, Phys. Rev. D **103**, 066025 (2021).
- [3] H. Katayama, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **31**, 1(2021).
- [4] J. L. Gaona-Reyes and D. Bermudez, Annals of Physics **380**, 41-58 (2017).