

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20357

研究課題名（和文）回路擬似的ブラックホールを用いた情報パラドックスの理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study of information paradox using analogue black holes in electric circuits

研究代表者

片山 春菜（Katayama, Haruna）

広島大学・先進理工系科学研究科（総）・助教

研究者番号：70963685

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：これまでに我々は、ジョセフソン伝送線を安定に伝播する電流ソリトンが、擬似的ブラックホールとして振る舞うことを明らかにしてきた。ここでは、ソリトンを古典的に取り扱い、ホーキング輻射に伴うソリトンのエネルギー減衰は考察してこなかった。本研究では、ブラックホールの情報パラドックスを考える舞台の構築のため、ブラックホールとの量子相関を考慮したホーキング輻射理論を再構築することを目的とした。ソリトンとホーキング輻射の相互作用を取り入れることにより、ブラックホールとして振る舞うソリトンの減衰の定式化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、ブラックホールの情報パラドックスの研究は、現実のブラックホールを対象とした素粒子・量子宇宙学的アプローチによって行われてきた。しかし、これらの研究では検証が困難であり、その基盤を確立するのは極めて難しい。これに対して本研究では、検証可能な擬似的ブラックホールを用いて、量子情報科学的アプローチにより、素粒子・宇宙物理学とは違った切り口で取り組むという従来とは異なった立場をとる。本研究課題によってブラックホールの情報パラドックスに実験的にアクセスすることが可能で、実験室系でその基本原理の確認を推進することで、ブラックホールの情報パラドックス問題解決のための一歩となる。

研究成果の概要（英文）：In our previous studies, we have clarified that current solitons, which propagate stably through Josephson transmission lines, can behave as analogue black holes. In that context, solitons were treated classically, and the energy decay of solitons due to Hawking radiation was not considered. In this study, we reconstruct the theory of Hawking radiation, taking into account quantum correlations with black holes, to establish a framework for considering the information paradox of black holes. By incorporating the interaction between solitons and Hawking radiation, we successfully formulated the decay of solitons.

研究分野：量子重力

キーワード：擬似的ブラックホール ソリトン 超伝導量子回路 ホーキング輻射

### 1. 研究開始当初の背景

自然界に存在する力を統一的に記述する「万物の理論」の構築に向けて、相対論と量子論の統一が必須である(図1)。しかし、これまでの力の統一と異なり、重力の量子化に伴い、繰り込み不可能な紫外発散の問題が生じる。それはまた、ブラックホールの情報パラドックスという別の形でも現れる。一般相対性理論によるとブラックホールは、光でさえ抜け出すことができない局所時空で、そこからの放射はなく、ブラックホールのエネルギーが減ることはない。しかし、量子論を考慮すると、事象の地平線付近で真空揺らぎによって対生成された仮想粒子が、実粒子として放射される(ホーキング放射)。これにより、ブラックホールのエネルギーは減少し、最終的にはブラックホールは蒸発する。このとき、ブラックホールの内部にあった情報は、ブラックホールとともに消えてしまうのだろうか。しかし、ブラックホール内部にあった情報が消失することは、量子論の根幹であるユニタリー性(確率保存)に反することになる。このブラックホールの内部の情報が保持されるのか喪失するのかという問題は、ブラックホールの情報パラドックスとして知られている大問題である。

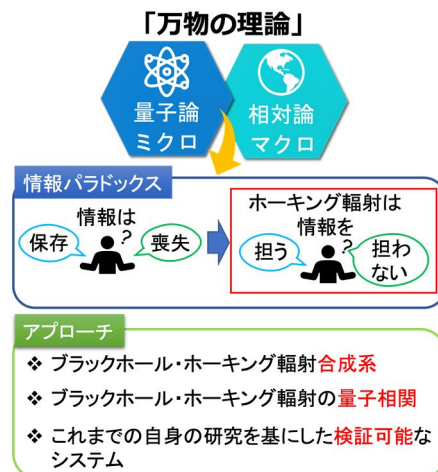


図1: 研究の概要

### 2. 研究の目的

ブラックホールの情報パラドックスは、その本質を「ホーキング放射がブラックホール内部の情報を担っているかどうか」と捉え直すことができる。これまで、ホーキング放射はブラックホールから生成されたものであるにも関わらず、ブラックホールとの関わりが十分考慮されていなかった。そこで、本研究ではホーキング放射とブラックホールの量子相関を考慮したホーキング放射理論を再構築することを目的とする。本研究では、検証が困難な現実のブラックホールを対象とするのではなく、これまでに我々が提案してきた検証可能なシステム(擬似的ブラックホール)を用いることで、実験的に検証可能な理論を構築する。

### 3. 研究の方法

これまでに我々は、実際のブラックホールでは観測困難なホーキング放射を観測するために、ジョセフソン伝送線路において擬似的ブラックホールを創生し、ホーキング放射の観測可能性について検討してきた[H. Katayama et al., Phys. Rev. D 102, 086018 (2020)]。その結果、ホーキング温度が既存の技術で十分観測可能であることがわかった。また、より観測を容易にするためにホーキング放射を増幅する量子回路ブラックホール・レーザーの提案も行ってきた[H. Katayama, Sci. Rep. 11, 19137 (2021)]。これらの研究において、我々は、ジョセフソン伝送線路に電流ソリトンが存在することを示した。このソリトンは、回路を伝播する電磁波の速度を変調することによって、電磁波が出てこられない領域を作る。それによって、ソリトン自身が擬似的ブラックホールとして振る舞うことを明らかにした。しかし、これらの研究においては、暗黙のうちに擬似的ブラックホールは安定であることを前提にしていたが、上述の通り、ホーキング放射によりブラックホールは小さくなり、最終的には蒸発することが考えられる。

そこで本研究では、これまでに擬似的ブラックホールを提案したジョセフソン伝送線路を用いて、ホーキング放射とブラックホールの相関を考慮した理論を再構築した。これまで、ソリトンは古典的に取り扱い、ホーキング放射に伴うソリトンのエネルギー減衰は考察してこなかったが、本研究では、ソリトンを古典ソリトンとその周りの量子ゆらぎ成分(ホーキング放射)と考慮して、ソリトンの動力学と量子ゆらぎの時間発展を再定式化した。

### 4. 研究成果

(1) ソリトン・ブラックホールとホーキング放射の相互作用を取り入れることにより、ソリトンの減衰の定式化に成功した。ソリトンと量子揺らぎの相互作用の影響は、ソリトンが従う運動方程式の摩擦項として現れることがわかった。この摩擦項の存在により、ソリトンの振幅は時間が経過するにつれて小さくなる(図2)。これは、ブラックホールがホーキング放射によって、エネルギーを失い、蒸発することに相当する。これにより、ブラックホールが蒸発した後にブラックホールの内部にある情報が保持されるか、消去されるかというブラックホールの情報パラドックスを考えるための土台を確立することができた。

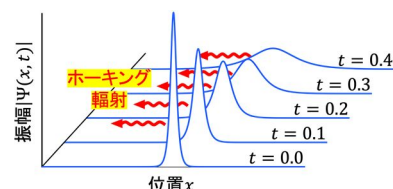


図2: ソリトンの減衰

(2) これまでに提案してきた超伝導量子回路におけるホーキング輻射の実験的検証の可能性について再検討した。これまでのシステムでは、ジョセフソン接合の4次非線形性に起因する4波混合パラメトリック増幅により、ホーキング輻射が増幅される。しかし、シグナル（ホーキング輻射）とアイドル（パートナーホーキング輻射）の周波数はポンプ（ソリトン）の周波数に近く、これらの分離が困難なため、ホーキング輻射観測の障害となる。そこで、図3(a)に示す3次非線形性を持つ超伝導非対称非線形誘導素子(SNAIL)を用い、シグナルとポンプの周波数が離れた3波混合が実現される新たな擬似的ブラックホールを考案した。そこでは、Korteweg-de Vries(KdV)方程式に従うソリトンが形成され、擬似的ブラックホールとして振る舞うことがわかった。

しかし、ポンプ周波数が低周波数に制限されるという課題が明らかになった。これは、KdV方程式に従うソリトンは、そのスペクトルが低周波数に制限されることに起因する(図3(b))。そこで、ソリトンが、非線形性と分散性が釣り合うことによって形成される孤立波であり、非線形効果と分散効果の違いによって、異なる種類のソリトンが形成されることに着目した(図3)。同じSNAIL伝送線路において、分散効果が強く働く短波長領域を注目すると、非線形シュレディンガー方程式を得ることができた(図3(c))。非線形シュレディンガー方程式は包絡線ソリトンを解として持ち、その搬送波の周波数を調整することができる。これによって、ポンプ周波数が調整可能となり、課題を克服できることがわかった。

以上により、超伝導非対称非線形誘導素子(SNAIL)を用いて、分散性と非線形性を制御することにより、ホーキング輻射の実験的観測に有利なシステムを提案した。

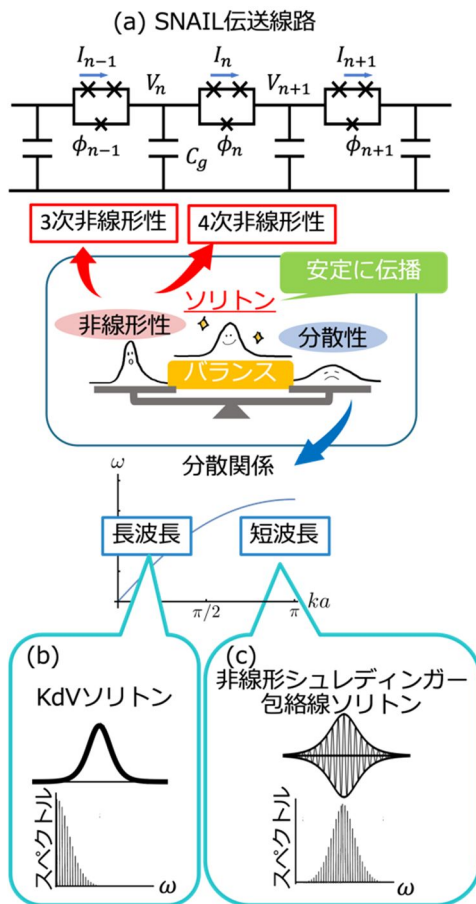


図3: (a) SNAIL 伝送線路 (b)KdV ソリトン (c)非線形シュレディンガー包絡線ソリトン

(3) 本研究の過程で、SNAIL 伝送線路の回路パラメータを制御することにより、タキオン場を再現できることがわかった。タキオンは虚数質量を持つ光より速く移動する粒子であり、系の不安定性として解釈される。SNAIL では、外部磁束を制御することにより、図4のようにジョセフソン位相差  $\phi$  を変数とするポテンシャルの形状を変化させることができる。ポテンシャルの形を(a) (b) (c)と変調させることにより、 $\phi = 0$ は、安定な状態から、不安定な状態に変更することができるため、タキオンを生成することができる。

通常、ポテンシャル極大値に存在するタキオンは不安定で、すぐに極小点へと遷移するため、その存在の観測が困難である。そこで、我々はAharonovら[Y. Aharonov et al., Phys. Rev. 182, 1400 (1969)]が提案した波数による崩壊モードの制御により、その存在を数値計算によって検証した。単モードの初期波を用いた回路方程式の数値計算の結果、波数が小さいところではポテンシャル極小値への崩壊が見られ、波数が大きいところではタキオン状態に留まることを確認した。また、多モードを持つガウス波束を初期値とした数値計算を行い、波束群速度が、回路中の光速よりも速く、数値計算の結果がタキオンの相対論的エネルギーを満たすことを明らかにした(図5)。これにより、波数制御によってタキオン状態を観測に十分な時間保持し、観測可能であることを示した。

タキオンは、宇宙初期で起こったインフレーション期におけるタキオン凝縮を通して物質生成と関係する。したがって、本研究で開発したシステムは、ブラックホールの情報パラドックスだけでなく物質生成の基本過程の研究にも応用できることがわかった。

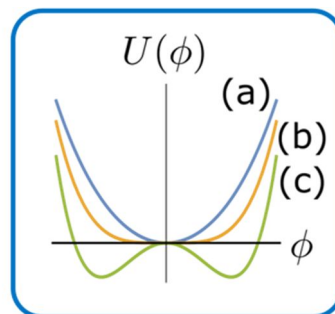


図4: SNAIL のポテンシャル

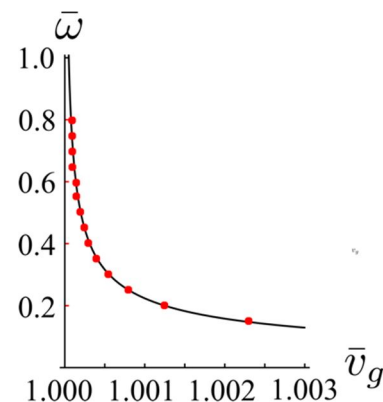


図5: 波束の群速度とエネルギー。黒線は解析解で赤点は数値計算の結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 H. Katayama, N. Hatakenaka, T. Fujii, M. P. Blencowe	4. 巻 5
2. 論文標題 Analog black-white hole solitons in traveling wave parametric amplifiers with superconducting nonlinear asymmetric inductive elements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L022055
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.5.L022055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Katayama, N. Hatakenaka, T. Fujii, M. P. Blencowe	4. 巻 25
2. 論文標題 Analogue tachyons in SNAIL transmission lines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 123040
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/ad1418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 H. Katayama, T. Fujii, N. Hatakenaka, M. P. Blencowe
2. 発表標題 Analogue tachyon creation in SNAIL transmission lines
3. 学会等名 Analogue Gravity in 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Katayama, T. Fujii, N. Hatakenaka, M. P. Blencowe
2. 発表標題 Analogue tachyons in superconducting circuits
3. 学会等名 Quantum simulation of gravitational matter analog model（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片山春菜, 藤井敏之, 畠中憲之, M. P. Blencowe
2. 発表標題 超伝導非対称非線形誘導素子を用いた擬似的タキオンの理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片山春菜, 畠中憲之, 藤井敏之, M. P. Blencowe
2. 発表標題 SNAIL伝送線路における非線形パラメトリック相互作用のソリトン制御
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Katayama
2. 発表標題 Analogue black hole solitons in a superconducting transmission line
3. 学会等名 The 5th KMI School (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 片山春菜, 畠中憲之, 藤井敏之, Miles P. Blencowe
2. 発表標題 超伝導非線形非対称誘導素子を用いた擬似的ホーキング輻射の理論的研究
3. 学会等名 第83回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Katayama, T. Fujii, N. Hatakenaka, M. P. Blencowe
2. 発表標題 Analogue soliton black holes in superconducting transmission lines with SNAILs
3. 学会等名 Quantum Information Structure of Spacetime (QISS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Katayama, T. Fujii, N. Hatakenaka, M. P. Blencowe
2. 発表標題 A soliton black hole using SNAILs
3. 学会等名 HIGGS Centre Workshop: Analogue models of gravity and fluctuation-induced phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山春菜
2. 発表標題 電気回路ブラックホールレーザーの理論 (特別記念講演)
3. 学会等名 レーザーセンシング学会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山春菜, 畠中憲之, 藤井敏之, Miles P. Blencowe
2. 発表標題 超伝導非線形非対称誘導素子を用いた擬似的ホーキング輻射の理論的研究 II (第53回講演奨励賞受賞記念講演)
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 片山春菜, 藤井敏之, 畠中憲之, Miles P. Blencowe
2. 発表標題 超伝導非対称非線形誘導素子を用いた擬似的ブラックホールソリトンの理論的研究 II
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Katayama
2. 発表標題 Analogue black holes in superconducting circuits using SNAILs
3. 学会等名 Women at the intersection of mathematics and theoretical physics meet in Okinawa (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本研究に関する受賞歴</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ロレアル・ユネスコ女性科学者日本奨励賞物質科学分野, 日本ロレアル株式会社代表取締役社長, 日本ユネスコ国内委員会事務総長, 2022年09月 (<a href="https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/72886">https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/72886</a>)</li> <li>・第53回(2022年秋季)応用物理学学会講演奨励賞, 公益社団法人応用物理学学会会長, 2023年3月 (<a href="https://www.hiroshima-u.ac.jp/adse/news/76026">https://www.hiroshima-u.ac.jp/adse/news/76026</a>)</li> <li>・2023年度版「アジアの科学者100人」, Asian Scientist Magazine, 2023年7月 (<a href="https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/78489">https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/78489</a>)</li> </ul>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	畠中 憲之  (Hatakenaka Noriyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	藤井 敏之  (Fuji Toshiyuki)		
研究協力者	Blencowe Miles  (Blencowe Miles)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Dartmouth College			
フィンランド	Aalto University			
フランス	Sorbonne University			