

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01911

研究課題名(和文) 実験的ブラックホール研究の新展開

研究課題名(英文) New phase of experimental black hole study

研究代表者

浅井 祥仁 (Asai, Shoji)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：60282505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来よりも高いホーキング温度を持つ強磁性体-スピン波系を用いてBHの時空構造を実現するために、測定系の構築およびテストサンプルの作製を行った。狭窄構造の設計では、狭窄線幅や膜厚等を変化させたマイクロマグネティックシミュレーションを行った。その結果、狭窄部においてスピン波の特異なモード変換を確認し、また狭窄構造の長さをこれらのスピン波モードの減衰長よりも十分短くした場合に、狭窄部の両端でそれぞれ励起されるモードが強め合い、増幅される過程を実際のシミュレーション上でも確認した。更に狭窄部の長さを連続的に変化させた際の増幅率を評価し、その周期性と波数との対応付けを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

BH時空の幾何学的性質を特殊な物性系の分散構造により再現し、そのホライゾンで生じるHawking輻射等の量子過程の研究が進んでいる。これら従来の系およびそれに該当しない新たな系に対し、BHの量子性に関する知見を得ることは学術的に極めて重要であり、またBH時空の特殊な物理過程を利用した新たなデバイスの開発も期待される。

研究成果の概要(英文)：Hawking temperatures higher than conventional measurements are expected in ferromagnetic spin-wave systems. In order to realize BH space-time structure in this system, construction of measurement apparatus and fabrication of test samples were carried out. In designing the bottleneck structure, the line width and film thickness were varied in micromagnetic simulation, which showed spin-wave mode conversions from BH horizons. For the bottleneck length smaller than the attenuation length of these spin waves, the modes generated at the edges constructively interfered with each other and gave anomalous amplification. The bottleneck length dependence of the amplification factor was evaluated and the periodicity with respect to wave numbers was deduced.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ブラックホール ホライゾン ホーキング輻射

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ブラックホール時空の幾何学的性質を特殊な物性系の分散構造により再現し、そのホライゾンで生じる Hawking 輻射等の量子過程の研究が進んでいる。具体的には、これまで、下記の様な実験系での研究が行われている。

- ・ 誘電体中での光カー効果を用いた実験: Philbin+, Science 2008
- ・ 流体における deep wave を用いた実験: Euve+, PRL 2016, Torres+, Nat. Phys. 2017
- ・ ^{87}Rb BEC 系のフォノンを用いた実験: Steinhauer Nat. Phys. 2014, Steinhauer Nat. Phys. 2016, de Nova+ Nature 2019

特に、2019年、 ^{87}Rb BEC 系の phonon (疎密波) に対して測定された Hawking pair の相関スペクトルが、量子限界から期待される entanglement に等しいということが発見された[de Nova+, Nature 2019]。しかしこの測定は同時に、BEC 系での phonon を用いた BH 研究の限界も露呈しており、特に数 nK の極低温 (Hawking 輻射を phonon pair の量子相関として測定するために必要) や超高真空、光ピンセット等の技術的制約が厳しいため、これ以上の実験的大発展は容易でないと考えられている[Kolobov+, Nat. Phys. 2021]。

2. 研究の目的

スピン波マグノン系では、微細加工によりナノスケールの構造を形成することで、スピン波に対する背景流の速度変化率を大幅に向上させることが可能である。そのためこの系では従来の実験系よりも高い Hawking 温度の実現が可能であるとして注目を集めている[Roldan-Molina+ PRL 2017]。

本研究ではこれら従来の系およびそれに該当しない新たな系に対し、ブラックホールの量子性に関する足がかりとなる知見を得ることを目的とする。具体的には、下記 3 点を研究開始当初の目的として設定した。

- ・ 天体 BH においては不可能な、BH の量子性に対する実験的研究を行う。
- ・ 極低温を必要とする phonon 以外の新たな系を用いて「high T_H BH」を可能にする。特に スピン系での実現を目指す。
- ・ 強磁性体で生じるスピン波 magnon を用いて、今後の量子論・情報論的 BH 研究において最適な系を構築し、分散構造等の基礎的特性を調査する。

3. 研究の方法

- (1) 高い T_H が実現可能な強磁性体で生じるスピン波 magnon を用いた実験系を構築する [Doornenbal+ PRL 2019]。
- (2) horizon 近傍の幾何学的時空を再現する分散関係は、部分的な狭窄構造を持つパーマロイ(Ni-Fe)ワイヤーを用いることで得られる。このワイヤーの両端に電流を印加すると、magnon と電流の間でトルク移行 (STT: spin torque transfer) が生じ、magnon に対して実効的な加速度が加わる。
- (3) STT 電流を大きくしていくと、加速された magnon の速度が magnon 自体の伝搬速度を超え、horizon (magnon が伝搬できない領域) が形成される。その際、ワイヤーを部分的に細くす

ることによって電流密度の高い領域が生じ、ワイヤーが太い部分との境界が horizon となる。STT 電流の向きに応じて、カレントの上流側が BH horizon, 下流側が WH (white hole) horizon となる。

- (4) このように二つの horizon が共存する系では、一方の horizon で生じる Hawking 輻射が他方の horizon の Hawking 輻射を励起し合うプロセスが連鎖し、いわゆる「BH レーザー」という特異な現象が発現する[Corley and Jacobson, PRD 1999]。

4. 研究成果

- (1) 本年度では、従来よりも高いホーキング温度を持つ強磁性体-スピン波系を用いて BH の時空構造を実現しその量子的ふるまいを調べるために、測定系の構築およびテストサンプルの作製を行い、狭窄構造を変化させた際のスピン波応答を系統的に調査した。
- (2) また並行して GPU を用いた数値シミュレーションを進めており、3次元有限差分計算(FDM)の結果を日本物理学会に発表した。
- (3) 狭窄構造を設計するために、実際に使用する強磁性体薄膜の物性値を用いて、通常の微細加工装置で製作可能な範囲内で狭窄線幅や膜厚等を変化させたマイクロマグネティックシミュレーションを行った。その結果、狭窄部においてスピン波の特異なモード変換を確認し、また狭窄構造の長さをこれらのスピン波モードの減衰長よりも十分短くした場合に、狭窄部の両端でそれぞれ励起されるモードが強め合い、増幅される過程を実際のシミュレーション上でも確認した。
- (4) 更に狭窄部の長さを連続的に変化させた際の増幅率を評価し、その周期性と波数との対応付けを行った。
- (5) シミュレーションによる系統的調査の結果をまとめ、論文として投稿した[Nakayama+ under review]。
- (6) またこれらの条件を踏まえたサンプルを製作し、電流を印加することでスピン波に対するドップラー効果を観測した。
- (7) 更にパルス状の大電流を印加した際の応答を調査するための実時間領域測定系の構築にも着手し、計算及び実験の両面で統一的に研究を進めることが可能な環境を整備した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kasahara Kenji, Akamatsu Ryusei, Manago Takashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Ferromagnetic-waveguide width dependence of propagation properties for magnetostatic surface spin waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 045308 ~ 045308
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0046943	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中山和之, 笠原健司, 稲田聡明, 富田知志
2. 発表標題 Superluminal Doppler 効果によるスピン波の異常分散
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山和之, 笠原健司, 稲田聡明, 富田知志
2. 発表標題 スピントランスファートルクを利用したスピン波変換の研究
3. 学会等名 応用物理学会第82回秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
研究分担者	稲田 聡明 (Inada Toshiaki) (20779269)	東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任助教 (12601)	

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
研究分担者	中山 和之 (Nakayama Kazuyuki) (80602721)	福岡大学・理学部・助教 (37111)	
研究分担者	笠原 健司 (kasahara Kenji) (00706864)	福岡大学・理学部・助教 (37111)	
研究分担者	中西 俊博 (Nakanishi Toshihiro) (30362461)	京都大学・工学研究科・講師 (14301)	
研究分担者	久門 尚史 (Hisakado Takashi) (80301240)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	富田 知志 (Tomita Satoshi) (90360594)	東北大学・高度教養教育・学生支援機構・准教授 (11301)	
研究分担者	澤田 桂 (Sawada Kei) (40462692)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・ 研究員 (82401)	

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