

**【本件リリース先】**文部科学記者会、科学記者会、  
広島大学関係報道機関**広島大学****NEWS RELEASE**広島大学広報グループ  
〒739-8511 東広島市鏡山 1-3-2  
TEL : 082-424-3749 FAX : 082-424-6040  
E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp

令和3年9月27日

**本件の報道解禁につきましては、令和3年  
9月27日(月)午後6時以降にお願い  
いたします。**

記者説明会（10月8日（金）13時30分・東広島キャンパス）のご案内

**量子回路ブラックホールレーザー理論の構築に成功  
～指名手配“ホーキング輻射”を捕まえろ！～  
電気回路の中の宇宙****論文掲載****【本研究成果のポイント】**

1. 電気回路を用いた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ました。
2. このレーザーを用いれば、ホーキング輻射（\*1）の存在を明らかにすることができます。
3. また、このレーザーは非古典的な性質を持っていることから、次世代の革新的量子情報処理技術（量子コンピュータ（\*2）や量子ニューラルネットワーク（\*3））に対して新しい光源を提供します。

**【概要】**

広島大学大学院先進理工系科学研究科の片山春菜・大学院生は、電気回路において擬似的なブラックホールを創生し、それを用いたレーザー理論を構築することに成功しました。このレーザーを用いると、未解決課題であるブラックホールからの輻射（ホーキング輻射）の存在を明らかにすることができます。また、このレーザーは通常のレーザーと異なり、ホーキング輻射の素過程に由来するスクイーズド状態（\*4）と呼ばれる非古典的な性質を持つレーザーとなり、新しい光源として量子情報技術などでの応用が期待されます。本研究の成果は、英国科学誌 Scientific Reports (Nature Publishing) に9月27日午前10時（英国時間）に掲載されました。また、第82回応用物理学会秋季学術講演会（令和3年9月開催）の注目講演として発表いたしました。

(<https://confit.atlas.jp/guide/event/jsap2021a/subject/12p-N403-6/advanced>)

本件について、下記のとおり記者説明会を開催いたします。ご多忙とは存じますが、是非ご参加いただきたく、ご案内申し上げます。

**記**

日 時：令和3年10月8日（金）13時30分～15時00分（予定）

説明者：広島大学大学院先進理工系科学研究科 博士課程後期1年 片山春菜

場 所：総合科学部多目的室（M棟2階）

**【背景】**

万物を一つの理論体系で記述するため、重力と量子力学の統一に向けた斬新な取り

組みがなされている。ホーキング輻射は、光でさえ脱出できないブラックホールの事象の地平線付近で、量子力学的に対生成された仮想粒子（\*5）が実粒子として輻射される現象である（図1参照）。そのため、重力に対する量子力学的効果が出現する一般相対性理論と量子力学が会う稀有な現象である。したがって、一般相対性理論と量子力学の統一に向けた理論構築には、このホーキング輻射の観測が試金石となる。

しかし、このホーキング輻射は、1974年に提唱されたにも関わらず、未だに観測されていない。それは、恒星質量クラスのブラックホールでは、宇宙背景輻射温度(3K(ケルビン))よりも極めて小さい100万分の1K程度であると考えられているためである。これより、実際のブラックホールでの観測はほぼ絶望的である。

そこで、直接的ではないが、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しようとする試みがなされ、いくつかの物理系で研究が進んでいる。ここで、ブラックホールを実験室系で擬似的に創生する基本的な考えについて説明する（図2参照）。ブラックホールでは、一度越えると光でさえ抜け出すことができない「事象の地平線」が存在する。これを理解するために、滝登りをする鯉を例に挙げる。滝の上流では、穏やかな流れに対して、下流では流速が速く、空間的に流速が変化している。流速があまりに速すぎると、鯉は滝を登れない。つまり、上流と下流で速度が異なり、ある場所で鯉が登れない場所がある。そこが事象の地平線に対応する。したがって、このような流速が空間的に変化するシステムを創生できれば、擬似的にブラックホールが創生できることになる。

大学院先進理工系科学研究科 畠中憲之教授のグループは、これまでに、超伝導伝送線路（\*6）に潜む波動について探究し、孤立波ソリトン（図3）の存在を解析的に明らかにした。その回路中を伝搬する電磁波の速度はインダクタンス $L$ と静電容量 $C$ に依存し( $v \propto 1/\sqrt{LC}$ )、ソリトンは $L$ を空間的に変化させるので、ソリトンと共に空間的に電磁波の速度が変化することになる（図2右下）。ソリトン速度が川の流れの役割を担い、その速度を境に電磁波の速度が遅い部分と速い部分に分離された事象の地平線が形成されることになる。このことから、このソリトンを用いると擬似的ブラックホールを創生できることが分かっている。しかも、擬似的なブラックホールだけでなくホワイトホール（\*7）（図4参照）が対となって創生できることを発見している。

## 【研究成果の内容】

今回、片山春菜・大学院生は、このブラックホール・ホワイトホール対を利用したホーキング輻射のレーザー理論の構築に成功した。レーザーは、共振器によって光の位相を揃えるとともに、共振器内部で誘導輻射という量子物理現象を利用して、位相の揃った（コヒーレント）光の増幅を行う。したがって、レーザーを作るには、まず共振器を用意する必要がある。共振器は、二つの鏡を対向させた構造である。電気回路中でのブラックホールの事象の地平線は、光がブラックホールから出られないので、ちょうどこの鏡の役割している。したがって、ブラックホールとホワイトホールの二つの事象の地平線を利用すると共振器が作られそうである（図4参照）。ただし、ホワイトホール側では、光は漏れ出すので、鏡の役割を果たさない。これをどう克服するかが課題で、電気回路においては、擬似的ブラックホールが提案されてから20年以上、ブラックホールレーザーが考案されることがなかった。

そこで、片山はホワイトホールの事象の地平線近傍で、特別な仕掛けを用意した。それは、鯉にターボエンジンを装着し、鯉の能力をパワーアップさせることでホワイトホールから抜け出せないようにすることである。具体的には、メタマテリアルと呼ばれる要素を電気回路に付加した（図5参照）。これにより、鯉の能力を決める分散関係を制御し、特別なパワーを鯉に与え、二つの事象の地平線が共振器として働かせることを示した。

次に、誘導放出による光の増幅である。通常のレーザーでは、反転分布した原子と光を相互作用させることによって、原子から光を取り出すことができ、増幅することができる。しかし、ブラックホールにはそのようなものはない。そこで、ソリトンの

非線形性を利用し、非線形光増幅（\*8）させることによって、誘導放出と同様の効果を導入した。

以上、これまで電気回路での擬似的ブラックホールでは困難であったレーザー現象が、メタマテリアルの波長分散制御効果とソリトンの非線形光学効果によって実現可能であることを示すことに成功した。このレーザーは、ホーキング輻射を増幅したものであることから、レーザー現象の確認は、素過程では微弱で検出困難なホーキング輻射を観測可能にし、重力と量子力学の統一に向けた取り組みを加速することになる。また、非線形光学効果を利用したレーザーは、通常のレーザーとは異なり、ホーキング輻射の素過程に由来する量子性が反映したスクイーズド状態と呼ばれる特別な性質をもったレーザーとなる。これは、新しい光源として量子情報技術などの先端技術での応用が期待される。

### 【今後の展開】

今回、電気回路において、ブラックホールレーザーが構成できることを示し、その基本的特性を明らかにしたにすぎません。今後、実際にホーキング輻射を観測するためにシステムを洗練化する具体的な取り組みを行う予定です。また、実際の宇宙で観測されているブラックホールジェット（\*9）として知られている現象をレーザーの立場から検討する予定です。さらに、ブラックホールとホワイトホールが結合すると、ワームホールとよばれる異なる時空を結びつけるトンネルとみなすことができます。このトンネルを利用した時空間量子通信とそれを利用した時空のより深い理解へと研究を展開する予定です。

### 【用語説明】

#### （\*1）ホーキング輻射

ホーキング輻射は、光でさえ脱出できないブラックホールの事象の地平線付近で、量子力学的に対生成された仮想粒子（\*5）が実粒子として輻射される現象です（図1参照）。図1の点線で囲まれた二つの丸印が対生成を表し、黄色の丸が粒子を紫色の丸が反粒子を表します。

#### （\*2）量子コンピュータ

量子力学を利用した計算機を量子コンピュータと言います。従来のコンピュータでは、回路の電圧を制御して、電圧が低い時は「0」、高い時は「1」のように、0と1を作り出し、それらを使って計算を行っています。それに対して、量子コンピュータは、量子の特徴である「状態の重ね合わせ」を利用して、「0」「1」の重ね合わせ状態を作ります。これにより、同時に何通りもの計算(超並列計算)を実現し、宇宙の年齢ほどかかる計算をあっという間に計算することが可能になります。

#### （\*3）量子ニューラルネットワーク

近年、さまざまなネットワークが複雑化・大規模化し、これらの最適化・効率化が重要な課題となっています。そこで、生物の神経系を模倣した人工ニューラルネットワークが誕生しました。それに量子力学を取り入れものが量子ニューラルネットワークで、さらなる躍進が期待されています。

#### （\*4）スクイーズド状態

光のふるまいは、古典的には波を特徴付ける振幅と位相によって一意に決まります。位相が揃った状態がレーザーです。量子力学によれば不確定性原理に基づく不可避なゆらぎが存在するため、位相は必ずゆらぎを持ちます。この量子のゆらぎが压榨された状態のことをスクイーズド状態と言います。

### (\*5) 仮想粒子

量子力学の基本原理の一つであるエネルギーと時間に関する不確定性原理によれば、エネルギーと時間は、確定しているわけではなく、それぞれ揺らいでいます。しかもそれらの間には、時間のゆらぎが小さくなれば、エネルギーのゆらぎが大きくなるという性質があります。もし短時間であれば、エネルギーのゆらぎは大きくなるので、真空にこのエネルギーが働きかけ、粒子と反粒子が対で生まれることができます。このようにして、短時間の間だけ、仮想的に生まれた粒子のことを仮想粒子と言います。

### (\*6) 超伝導伝送線路

伝送線路は、電気信号をある地点から別の地点へ送信するための配線のことで、特に、超伝導材料で配線されたものを超伝導伝送線路と言います。

### (\*7) ホワイトホール

ブラックホールは、事象の地平線を越えて飛び込む物質をすべて飲み込んでしまいますが、ホワイトホールは、事象の地平線から物質を吐き出します。日常生活で例えるなら、ブラックホールがシンクとすると、ホワイトホールは蛇口です。

### (\*8) 非線形光増幅

複数の光子が相互作用によって、特定の周波数の光強度を増強することことができます。光パラメトリック増幅がその一例です。

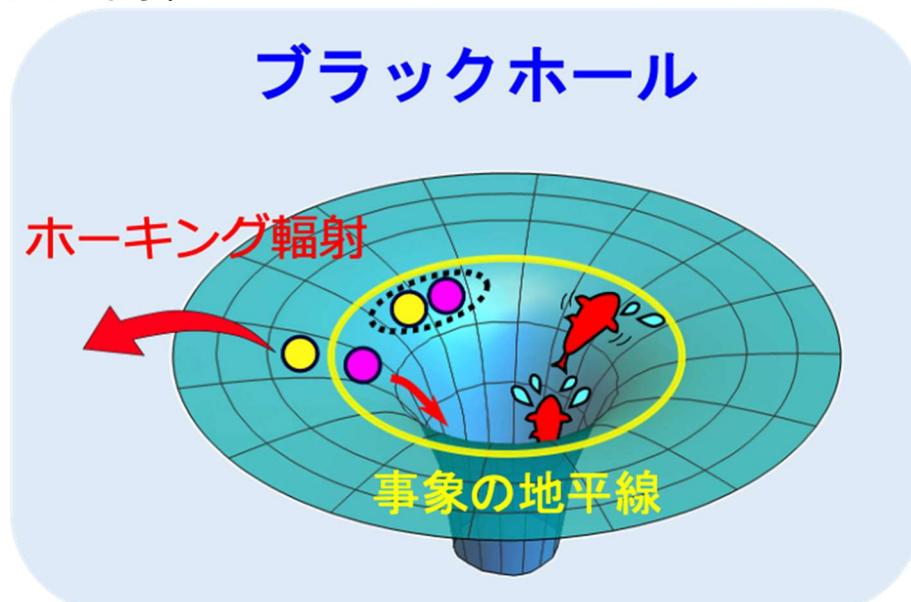
### (\*9) ブラックホールジェット

ブラックホールを中心として細く絞られたプラズマガスが一方向または双方向に噴出する現象です。

## 【参考資料】

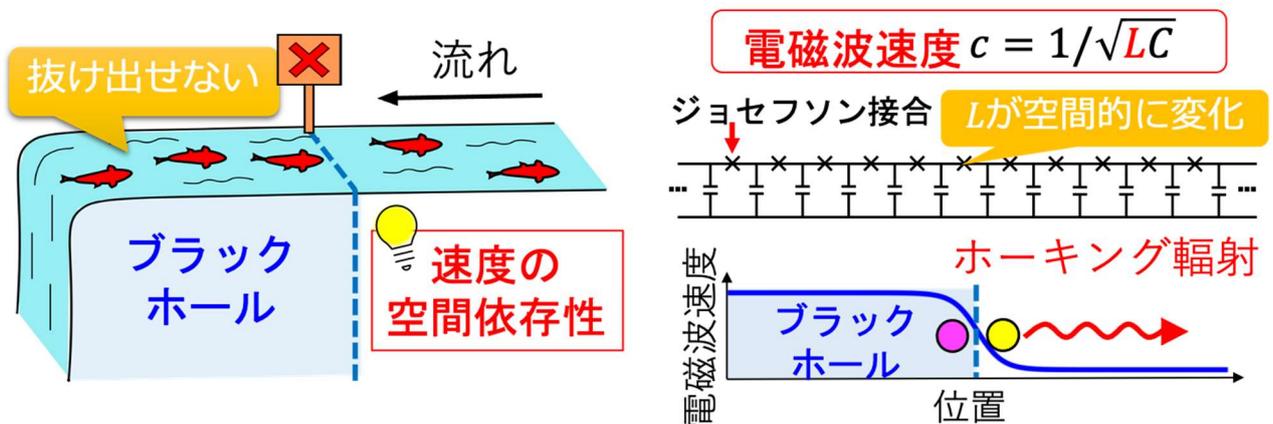
### 【図1】ブラックホールとホーキング輻射

ブラックホールは、光でさえ脱出することができない時空間です。しかし、ホーキング博士は、何も脱出することができないと考えられていたブラックホールから量子力学的効果を考えると、光が出てくることができると予言しました。量子力学の不確定性原理によれば、真空は何もない空間ではなく、粒子と反粒子が対となって生まれたり、消えたりするダイナミックな状態です（点線囲っているところ）。そして、対生成した粒子と反粒子が対消滅する前に、粒子がブラックホールの外に飛び出すことができると主張しています。



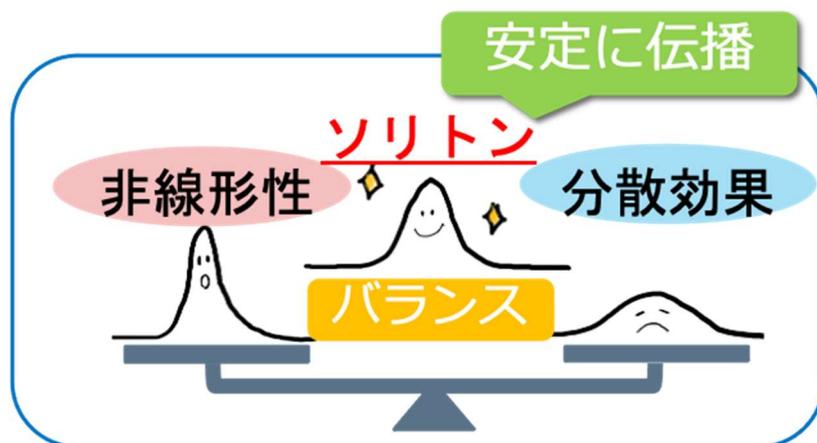
【図2】ブラックホールの滝登りモデル

ブラックホールを鯉の滝登りを用いてモデル化します。左図は、滝の近傍の様子を表しています。上流では、流れも穏やかで、鯉はすいすい泳ぐことができます。ところが、滝の近くでは水流は激しくなり、鯉は流れに逆らって泳ぐことができず、ついには流されてしまいます。したがって、どこかにその境界があり、その境界が「事象の地平線」に対応しています。流れに逆らって泳ぐことができない領域が、ブラックホールに対応しています。右図は、それを電気回路上で実現するための模式図です。電気回路では、水の流れが空間的に変わるのではなく、鯉の泳ぐ能力が空間的に変化します。空間依存性が逆になり、立場が変わります。鯉に対応する回路中を伝播する電磁波の速度は、回路を特徴付けるインダクタンス $L$ と静電容量 $C$ で決まります。したがって、このどちらかが空間的に変われば、電磁波（鯉）が空間的に伝播する能力が変化することになります。右図（下）は、電磁波の空間変化を表しています。この回路に一定の流れ（ソリトン）を導入することによって、それと電磁波の速度とが一致するところが、回路における「事象の地平線」となります。



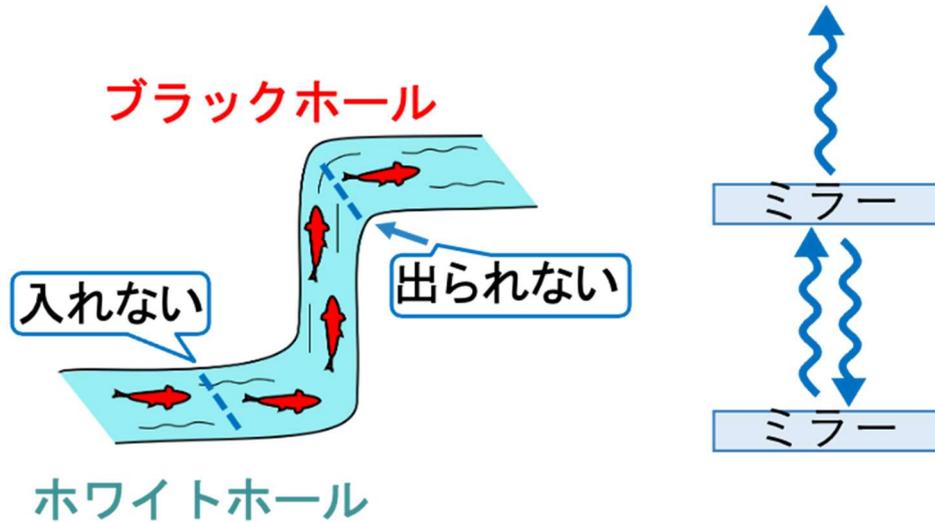
【図3】ソリトン

ソリトンは、非線形分散媒質中を伝播する孤立波です。一般に分散媒質では、波束（波の塊）は、波長分散のため波束の伝播とともに広がります（右側図）。これは、波束がいろいろな波長の波によって形成されていて、各波長に対応する波の速度が異なるためです。これを波長分散といいます。一方、媒質の非線形性は、波束をシャープにする性質があります。いずれの効果も単独では、波束の伝播と共にその形を大きく変化させてしまいます。しかし、それらがバランスすると安定に伝播する孤立波が生まれます。このようにして生まれた孤立波は、孤立波同士が衝突しても、何もなかったかのようにすり抜けるという特別な性質をもっているため、通信などで利用されています。



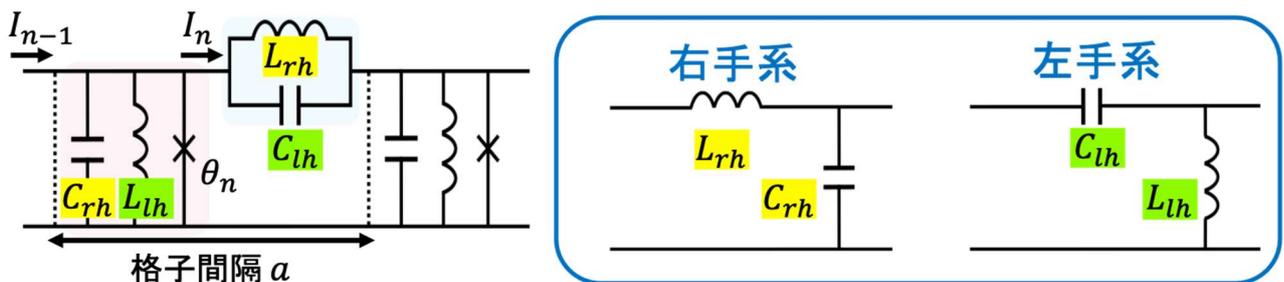
【図4】ブラックホールレーザーの鯉の滝登りモデル。

レーザー動作には、共振器が必要です。ブラックホールの事象の地平線では、ブラックホール内部にいる光は外にでることができません（左図滝の上部）。これは、ちょうど鏡のようです。もし、対向するもうひとつの鏡があれば、共振器を作ることができます。滝壺に目を向けると、滝の下流から鯉は滝壺に侵入できません。これは上流でのブラックホールとちょうど反対の状況になっていて、これがホワイトホールの鯉の滝登り解釈です。しかし、残念ながら上流側へは鏡のように振舞いますが、上流から下流側には自由に侵入できます。これでは、右図のような光共振器は作れません。そこで、何かの仕組みが必要です。



【図5】メタ材料伝送線路。

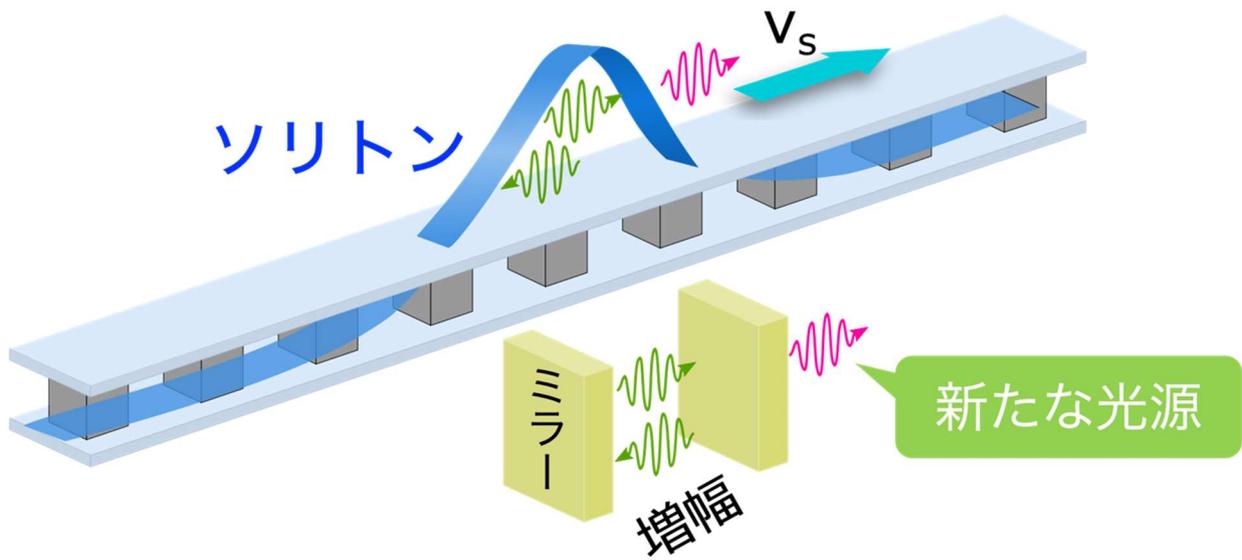
メタ材料は、電磁波の波長に比べて十分小さな構造を人工的に構築することによって、自然界では存在することができない誘電率と透磁率を同時に負とする媒質のことです。これにより、電磁波の伝搬特性に大きな変化をもたらします。例えば、電磁波の位相速度と群速度が逆になります。このように、メタ材料を用いると電磁波の伝搬特性を制御することができます。図中央が通常の右手系の伝送線路の基本単位です。これに対して右図が左手系の基本単位で、インダクターとキャパシターが入れ替わっていることがわかります。今回、左図のように、本来右手系で構成されていた従来回路に左手系要素（緑色）を加味することによって、伝送線路を伝播する電磁波の伝播特性を制御しました。具体的には、ホワイトホール近くにいる鯉にターボエンジンを装着させて、流れに逆らって滝を登る能力を与えました。これによって、ホワイトホールの事象の地平線は、鏡のように振舞うようになります。



【図6】量子回路ブラックホールレーザーの概念図。

本研究では、電気回路の中に青色で示すようなソリトンが存在することを明らかにしました。そのソリトンは、ブラックホールとホワイトホールの対を持ち、それらは

ミラーとして振る舞います。その間を、緑色で示す電磁波が行き来することによって、増幅されていきます。



【論文情報】

タイトル：Quantum-circuit black hole lasers

著者：Haruna Katayama

掲載誌：Scientific Reports

DOI：10.1038/s41598-021-98456-0

【お問い合わせ先】

大学院先進理工系科学研究科 畠中 憲之  
Tel：082-424-6547 FAX：082-424-6547  
E-mail：noriyuki@hiroshima-u.ac.jp  
発信枚数：A4版 8枚（本票含む）

(別紙)

【FAX返信用紙】

FAX：082-424-6040

広島大学財務・総務室広報部 広報グループ 行

記者説明会（10月8日（金）13時30分・東広島キャンパス）のご案内

量子回路ブラックホールレーザー理論の構築に成功  
～指名手配“ホーキング輻射”を捕まえろ！～  
電気回路の中の宇宙

日時：令和3年10月8日（金）13時30分～15時00分（予定）

説明者：広島大学大学院先進理工系科学研究科 博士課程後期1年 片山春菜

場所：総合科学部多目的室（M棟2階）

ご出席（会場で参加）

ご出席（Zoomで参加 ※）

貴社名 \_\_\_\_\_

部署名 \_\_\_\_\_

ご芳名 \_\_\_\_\_（計名）

電話番号 \_\_\_\_\_

※ Zoomで参加希望の方は、事前に招待メールをお送りしますので、メールアドレスをご連絡  
願います。 E-mailアドレス（ \_\_\_\_\_ ）

取材頂ける場合は上記にご記入頂き、10月7日（木）15時までにご連絡願います。