

## 粒子が出入りする状況下における

### 特殊な量子状態に関する理論を構築し、実験で裏付け

～開放量子系に関する理論予測・実験制御・新規デバイス応用への新たなアプローチが可能に～

#### 研究成果のポイント

- ・粒子が出入りする状況の量子力学での説明には困難が伴うが、PT 対称性 \*<sup>1</sup>という特殊な対称性がある場合、そのような状況を簡単に説明できるという理論提案がなされていた。しかし、その理論が正しいのか実験による検証ができていなかった。
- ・粒子の流入と流出の釣り合いがとれた状況下で現れる PT 対称性とトポロジカルな性質 \*<sup>2</sup>に由来する量子状態についての理論を構築。その状態を観測することにより、理論の正当性を実証。
- ・量子コンピューター実現のために必要な構成デバイス間の情報の量子力学的な伝達を安定かつ効率的に行う新たな手法や、新規のレーザー発振などの応用への道が開ける。

#### 研究成果の概要

北海道大学大学院工学研究院応用物理学部門の小布施秀明助教、望月 健氏（北海道大学大学院工学院 修士課程2年）、金 多景氏（チューリッヒ工科大学 修士課程2年）、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の川上則雄教授は、東南大学(中国)等との共同研究により、開放量子系 \*<sup>3</sup>における PT 対称性と呼ばれる新奇対称性とトポロジカルな性質に由来する局在状態の理論を、ある開放量子系に対し構築しました。さらに、その対称性に伴う特異な局在状態を実験で観測することにより、開放量子系における PT 対称性を世界で始めて実証しました。

本研究は、主に日本学術振興会科学研究費補助金・新学術領域研究「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」（H27-31年度。代表者：川上則雄教授。JP15K21717, JP15H05855, JP16H00975）の支援を受けて行われました。

#### 論文発表の概要

研究論文名：Observation of topological edge states in parity-time-symmetric quantum walks (PT 対称な量子ウォークにおけるトポロジカルなエッジ状態の観測)

著者：L. Xiao<sup>1</sup>, X. Zhan<sup>1</sup>, Z. H. Bian<sup>1</sup>, K. K. Wang<sup>1</sup>, X. Zhang<sup>1</sup>, X. P. Wang<sup>1</sup>, J. Li<sup>1</sup>, 望月 健<sup>2</sup>, D. Kim<sup>3</sup>, 川上則雄<sup>4</sup>, W. Yi<sup>5</sup>, 小布施秀明<sup>6</sup>, B. C. Sanders<sup>5,7,8</sup>, P. Xue<sup>1,9</sup> (<sup>1</sup>東南大学, <sup>2</sup>北海道大学大学院工学院, <sup>3</sup>北海道大学工学部, <sup>4</sup>京都大学大学院理学研究科, <sup>5</sup>中国科学技術大学, <sup>6</sup>北海道大学大

学院工学研究院,<sup>7</sup>カルガリー大学,<sup>8</sup>カナダ高等研究機構,<sup>9</sup>華東師範大学)

公表雑誌 : Nature Physics

公表日 : 英国時間 2017 年 7 月 31 日(月)(オンライン公開)

## 研究成果の概要

### (背景)

ボールやブランコ,さらには惑星の運動など私たちの身の回りで起こるようなマクロな大きさの物質の運動は,ニュートンの運動方程式に代表される古典力学で表現できます。一方で,電子や光子などミクロな世界における粒子の運動は古典力学では説明できませんが,量子力学という理論により理解することができます。量子力学は 20 世紀初頭から急速に発展し,素粒子などの基礎物理学への寄与にとどまらず,現在では半導体やレーザー素子など身近な電子機器の理論基盤にもなっています。

通常の量子力学では,外界からの粒子の流入がないと仮定し,外部から孤立した系に対して理論構築を行います。このような孤立した系では,実験で観測できるエネルギーなどの量(観測量)が実数<sup>\*4</sup>になることが理論的に保証されます。観測量が実数になるのは当たり前のように感じられますが,粒子の流入がある系にむりやり通常の量子力学を適用すると,エネルギーなどの観測量が虚数を含む複素数<sup>\*4</sup>になり,非現実的な理論結果になってしまいます。

しかし,例えば電流は,サンプルの両側に導線をつけ電圧をかけた時に,1秒間あたりにサンプル内を通過する電子の量を観測しているため,電子の流入がある系になりますが,実験で観測される電流が複素数になることはありません。このような粒子の流入のある開放量子系に関する様々な理論がこれまでも提案されていますが,粒子の流入の影響が強い場合には,粒子の運動を理論的に予測することや,実験的に安定して制御することは困難でした。

しかし,1998年に,このような開放量子系でも,粒子の流入と流出が釣り合っている場合,PT対称性と呼ばれる特殊な対称性が存在するため,エネルギーなど観測量が実数に保たれうることが理論的に示されました。この理論は,粒子の流入と流出の釣り合いのとれた状況に着目することで,孤立系を前提としている量子力学を開放量子系にも応用できる点で画期的です。しかし,真に量子力学に従う開放量子系に対してPT対称性による記述が可能かどうかは,未解決のままでした。

### (研究手法)

開放量子系におけるPT対称性の実証が難しいのは,量子力学の適用範囲となる状況下において,粒子の流出と流入の釣り合いがとれた系の実現が困難なことが原因でした。ある変換を施すことにより,粒子が流出するだけの系であってもPT対称性と同じ系と見なすことが可能となりますが,この場合でも粒子の流出量を高精度で制御する必要がありました。

そこで,北海道大学と京都大学の研究グループは,量子コンピューターへの応用が期待される量子ウォーク<sup>\*5</sup>と呼ばれる系では,光子の流出量を実験的に制御できることに着目しました。まず,流出効果のある量子ウォークに対して,PT対称性が存在する具体的な系を構築しました。さらに,PT対称性の存在を示す証拠となる状態として,トポロジカル絶縁体<sup>\*6</sup>に代表されるトポロジカル相に由来するエッジ状態<sup>\*7</sup>を用いることにしました。トポロジカル相に由来するエッジ状態とは,図1に示すように,トポロジカルな性質が異なる2つの領域を接合させると,その接合領域に沿って局在する状態です。PT対称性を有する流出効果のある量子ウォークに対し,この状態に関する理論解析を行った結果,トポロジカル相に起因するエッジ状態の存在確率のみが時間が経っても減衰しにくくなること

がわかりました（図2）。従って、この現象を実際に観測すれば、真の開放量子系においてもPT対称性による記述が可能であることの実験的な証拠になると考えました。

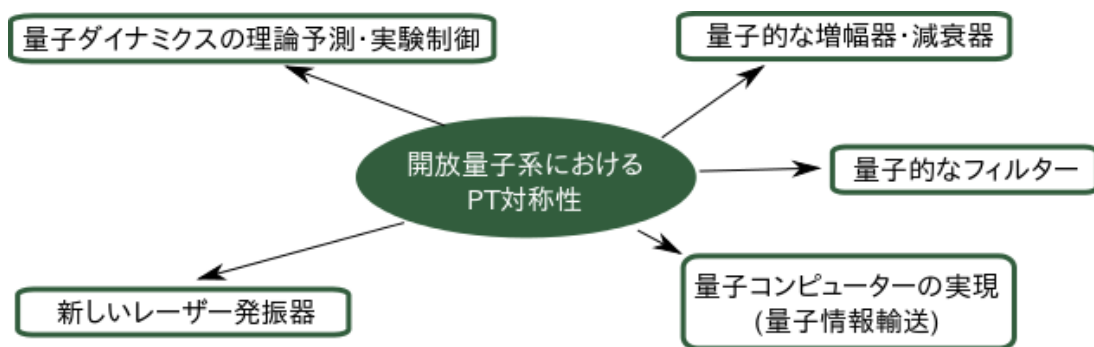
そこで、中国の実験グループと共同研究を行い、光子の減衰効果を高精度で制御可能な量子ウォークの実験を行い、ある時間における光子の存在確率分布を実験的に測定しました。この実験では、量子力学に特有な「もつれあった光子対<sup>\*8</sup>」を用いることがポイントとなりました。

### （研究成果）

実験により光子の確率分布を測定したところ、理論予測どおり、トポロジカル相に起因するエッジ状態が存在すると予測される場所で確率分布が極めて大きなピークを示すことがわかりました。さらに、ピークのある場所の存在確率は、時間が経ってもほとんど減衰しないことが確認できました。この実験結果により、開放量子系においてもPT対称性による記述が正しいことが明らかとなりました。

### （今後への期待）

本研究をさらに発展させることにより、開放量子系や量子力学全般に対するより深い知見を得ることが期待できます。また、本研究結果を応用利用に結びつけることも可能です。今回の実験では特定のエネルギー・特定の場所の光子の減衰効果を抑制できたため、光子に対する量子的なフィルターや減衰器として用いることができます。また、増幅と減衰の効果を含むPT対称な系を将来実現できれば、光子の存在確率の増幅・減衰を安定的に制御可能になり、量子的な光子数の増幅器としての利用も可能になります。さらに、PT対称性を有する開放量子系には、一方向輸送や単一モード増幅など、孤立系には現れない特異な現象が現れることが予想されます。この特性を用いることにより、量子コンピューターの実現のために必要な構成デバイス間の情報の量子的な伝達（量子情報輸送）を安定かつ効率的に行う新たな手法などの応用への道が開けます。また、新しい原理に基づくレーザー発振器として利用することも期待できます。



## 【用語解説】

- \*1 PT 対称性 … 物理学では、ある変換を行っても対応するある量に変化しなかったり、物理法則が変わらない時、その変換に対して対称性があるという。PT 対称性とは、空間座標を反転しても物理法則が変わらないことを意味する空間反転対称性 (Parity symmetry) と、時間の進む向きを反転しても物理法則が変わらないことを意味する時間反転対称性 (Time-reversal symmetry) の 2 つを組み合わせた対称性である。
- \*2 トポロジカルな性質 … ある物(対象)を、切ったり穴を開けずに、曲げたりねじることにより連続的に形を変える時に、変形の前で変わらない性質のこと。例として、マグカップとドーナツは、共に穴が 1 つだけあるという点でトポロジカルな性質は同じであるため、マグカップからドーナツへ連続変形が可能であると考えることができる。本研究では、光子の量子力学的な状態に対して、系のパラメーターを連続的に変えても変わらないあるトポロジカルな性質を用いた。位相幾何学という数学の分野で発展した概念であるが、いくつかの物理現象でもトポロジカルな性質が重要となることが知られている。1970~80 年代に、このことを最初に理論的に示した物理学者 3 氏に、2016 年のノーベル物理学賞が授与された。
- \*3 量子系・開放量子系 … 系とは、考察の対象として注目している部分のこと。一方、考察の対象としない部分は外界という。実際に実験を行っている系は、外界からの影響は避けられない開放系であるが、特定の系について理論的に考察する際には、問題を簡単にするため、外界から独立した孤立系を考え、ノイズは無視することが一般的に行われる。量子力学的な記述に基づき考察を行う系を量子系と呼ぶ。また、外界からの影響・ノイズや、外界との粒子やエネルギーのやり取りがある系を開放系と呼ぶ。さらに、量子力学的な記述に基づき考察を行う開放系を、開放量子系と呼ぶ。
- \*4 実数・複素数 … 日常生活で用いる「2」や「-2」のような数を、実数という。実数は、自分自身と掛け合わせると必ずプラスの数になるが ( $2 \times 2$  も  $(-2) \times (-2)$  も、プラスの数である 4 になる)、数学や物理学の世界では、自分自身と掛け合わせるとマイナスになるような数を考える。このような数を虚数といい、実数と虚数の全体を、複素数という。
- \*5 量子ウォーク … 人工的に作成した系における、量子力学に従う粒子の運動。量子ウォークは、量子コンピューター・量子情報の分野で発展した学問分野で、特に量子探索問題や量子情報伝送への応用が期待される。また、系のパラメーター制御が可能のため、理論的に予想される量子現象が、現実で起こりうるのか検証するための実験装置 (量子シミュレーター) としても用いられる。
- \*6 トポロジカル絶縁体 … 物質の内部は電気を通さない絶縁体である一方、表面には金属的な特殊な状態 (エッジ状態) が現れ電気を通す物質。2005 年に理論的にその存在が明らかにされ、現在でも盛んに研究されている。この特殊なエッジ状態は、電子状態のトポロジカルな性質を表すトポロジカル数が有限な整数である時に現れるため、トポロジカル絶縁体と呼ぶ。
- \*7 トポロジカル相に由来するエッジ状態 … 例えば、水 ( $H_2O$ ) は大気圧下で高温から低温へ変化させると、 $100^\circ C$  で水蒸気から水へ、 $0^\circ C$  で水から氷へと急激にその状態を変え、その物理的性質も大きく変化する。この 3 つの状態は、より一般的には、それぞれ、気相・液相・固相と呼ばれ、ある相から別の相へ変化する

る現象を相転移現象と呼ぶ。一方で、相転移を起こす温度以外であれば、温度を変化させても相は変わらない。トポロジカル絶縁体のトポロジカル数も、系のパラメーターを（トポロジカルな意味で）連続的に変化させても変わらない。そこで、相転移現象の相との類似性より、トポロジカル数が変わらないパラメーター領域を一つの相とみなし、（あるトポロジカル数の）トポロジカル相と呼ぶ。図 1 に示すようにトポロジカル数異なる 2 つの相を接合させると、接合部分にのみ粒子が存在できる特殊な状態が現れることが、トポロジカル絶縁体の研究により明らかとなった。この接合部のみに粒子が局在する状態のことを、トポロジカル相に由来するエッジ状態と呼ぶ。

\*8 量子的にもつれあった光子対 … 2 つの光子が量子力学的な相互作用で結びついた状態。量子的にもつれあった 2 つの光子のうち、一つの光子が観測されると、粒子間の距離がどれだけ離れていても、もう一つの光子の状態が「同時に」決定される。この相互作用は光速より早く行われることになるため、アインシュタインはこの性質を「奇妙な遠隔作用」と呼び、量子力学を不完全な理論であると主張した。しかし現在では、光子(粒子)が量子的にもつれあった状態となることが実証されており、この性質を用いることにより、対象としている系が、量子力学に従う系であるかを判別することができる。

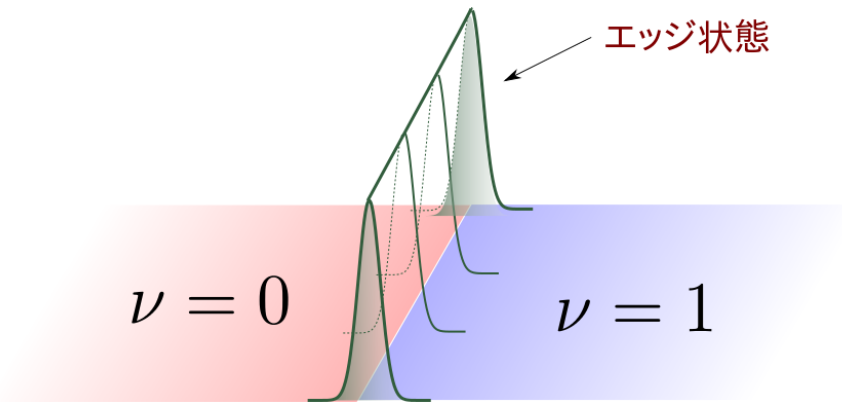


図 1：赤い領域と青い領域は、異なるトポロジカル数 0 と 1 を持つ。そのため、2 つの領域の境界には、接合面に局在した特殊な状態（エッジ状態）が現れる。縦軸は、粒子の存在確率を表す。

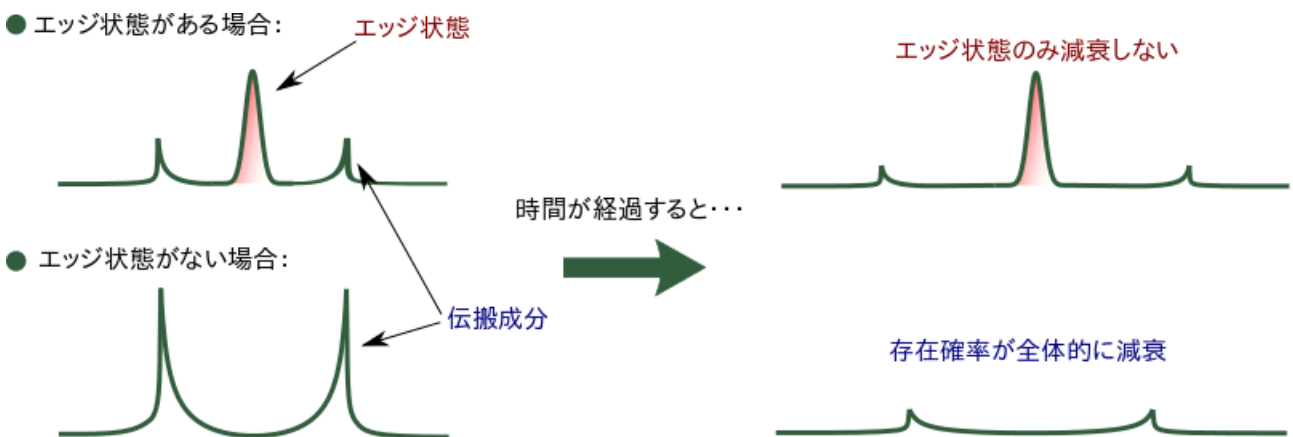


図 2：エッジ状態がある場合（上図）とない場合（下図）における PT 対称な量子ウォークの存在確率とその時間変化。エッジ状態がある場合、図の中央にあるエッジ状態に対応する光子の存在確率は、時間がたっても中央に局在したままで、ほとんど減衰しない。エッジ状態がない場合は、光子の存在確率が全体的に減衰する。