

## 超伝導体テラヘルツ光源の同期現象を初めて観測 ～ テラヘルツ量子通信デバイスの創成につながる新発見 ～

### 研究成果のポイント

1. 超伝導体テラヘルツ光源の同期現象の観測に成功しました
2. 超伝導体のプラズマ波とテラヘルツ波が結合する原理を初めて解明しました
3. テラヘルツ波を使った量子通信デバイスの創成につながる発見です

筑波大学数理物質系の辻本学助教らの研究グループは、京都大学大学院工学研究科の掛谷一弘准教授、パリ高等師範学校のDhillon博士らの研究グループとの共同研究で、超伝導体テラヘルツ光源の同期現象の観測に成功しました。

辻本助教は、超伝導体の結晶中に発生する特殊な超伝導プラズマ波が光子（フォトン）に変換される現象に注目しています。これまでの研究で、基板上に並べられた複数の光源から、高強度かつ位相のそろったフォトンが一斉に放射される現象が観測されていたものの、その仕組みは明らかにされていませんでした。

辻本助教らは今回、放射されたフォトンの偏波状態を調べることでこれを解明し、巨視的なスケールで位相同期が生じる際には偏波状態に特徴的な変化が現れることを発見しました。また、量子力学に基づいた数値解析によって、超伝導体中のプラズマ波とフォトンが結合する原理を明らかにしました。この成果は、超伝導体中のプラズマ波を制御する技術に応用できることに加え、次世代のテラヘルツ無線通信や分光技術に有用な量子通信デバイスの創成に役立ちます。

研究成果は、2020年5月13日付のアメリカ物理学会誌「Physical Review Applied」のLettersセクションでオンライン公開されました。

本研究は、筑波大学テニュアトラック普及・定着事業、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業の基盤研究（B）（辻本学、No. 19H02540）及び国際共同研究強化（掛谷一弘、No. 15KK0204）、フランス国立科学研究センター二国間交流事業（掛谷一弘、No. 120192908）の支援を受けて行われました。

## 研究の背景

テラヘルツ帯の電磁波であるテラヘルツ波<sup>注1)</sup>を使った次世代技術は、化学分析、医学・薬学、環境計測など幅広い用途での応用が期待されています<sup>[1]</sup>。その中で、筑波大学と米国アルゴンヌ国立研究所の共同研究によって発明<sup>[2]</sup>された超伝導体<sup>注2)</sup> テラヘルツ光源が最近注目されています。この光源の実用化にはテラヘルツ波の高出力化が必須とされていますが、これまでの研究では高強度で位相のそろった光子が放射される仕組みは明らかにされていませんでした。

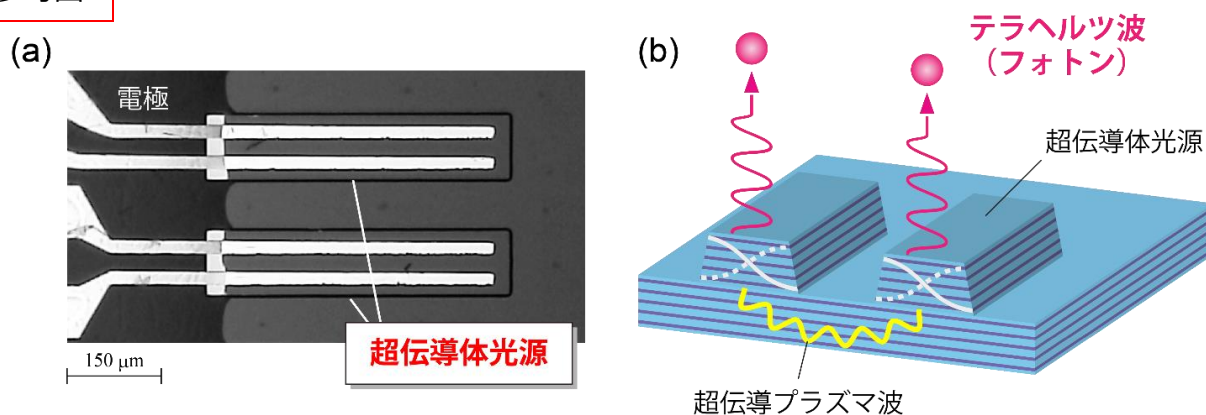
## 研究内容と成果

辻本助教らは、基板上に並べられた複数の光源が同期して高強度な光子を放射する現象に注目しました。最大のブレークスルーは、光子の偏波<sup>注3)</sup> 状態の観察に焦点を当てたことです。アクロマート波長板と呼ばれる偏波装置による精密測定で、巨視的なスケールで位同期期が起こる際には偏波状態に特徴的な変化が現れることを発見しました。このことは、超伝導体プラズマ波と光子が結合することにより、高強度で位相がそろった光子が放出されることを示しています。さらに、超伝導体中に存在する超伝導プラズマ波<sup>注4)</sup> を介して結合した光子の状態を量子力学的な手法で解析することにより、量子暗号通信の基盤要素である量子もつれ状態の実現可能性を示唆する結果も得られました。

## 今後の展開

本研究で得られた成果は、超伝導体中の特殊なプラズマ波を精密制御する技術に応用できます。また、次世代の高速無線通信や分光技術に有用とされるテラヘルツ波を高い効率で発振できる量子通信デバイスの創成につながることを期待されています。高強度な超伝導テラヘルツ光源が実用化されれば、これまで半導体デバイスを中心に発展してきたテラヘルツ技術に革命的な進歩をもたらすことが予想されることから、今後の展開が注目されます。

## 参考図



図説 (a) 基板上に作製した2つの超伝導体光源の顕微鏡写真。图中的電極から光源に電流を注入するとテラヘルツ波（光子）が放射される。(b) 同期した2つの超伝導体光源の概念図。隣り合う光源が超伝導プラズマ波を介して結合することで、高強度で位相のそろった光子が放射される。

## 用語解説

### 注1) テラヘルツ波

周波数が1テラヘルツ (= 1兆ヘルツ) 程度の電磁波。1テラヘルツは波長にして約300マイクロメートル。布、紙、プラスチック、陶磁器などを良く透過し、水や金属などに遮蔽される。この性質を生かし、医療診断や古美術品鑑定などの非破壊イメージングへの応用が考えられている。また、テラヘルツ帯には分子結晶などに固有の振動が存在することから、精密化学分析への応用も期待されている。他にも、超高速無線通信、宇宙観測、環境計測、医学・薬学、セキュリティといった次世代技術への応用が期待されており、さまざまな研究機関や民間企業がテラヘルツ波の研究開発を進めている。

### 注2) 超伝導体

ある条件の下で電気抵抗がゼロになる物質のこと。条件には温度、磁場などがある。超伝導体は、完全導電性、完全反磁性、磁束の量子化、ジョセフソン効果など、他の物質には見られない特殊な性質を持つことから、省エネルギー技術や精密計測デバイスなどへの応用が期待されている。

### 注3) 偏波

進行方向に対して電場と磁場の振動方向が規則性を持っている電磁波のこと。またはその電磁波の状態を指す。光の場合は偏光とも呼ばれる。直線偏波、円偏波、楕円偏波などの種類がある。特定の偏波状態を別の偏波状態に変換する光学素子としては、偏光板や波長板が知られている。通信や観測など、電磁波を工学的に利用する場合には偏波を精密に制御する技術が求められる。

### 注4) 超伝導プラズマ波

超伝導体中を電磁波が伝搬する際、通常の真空中を伝搬する場合とは異なる形態で伝搬する。この特殊な電磁波を超伝導プラズマ波と呼ぶ。超伝導プラズマ波は通常の電磁波とは異なる固有の性質を持つことから、最先端の研究トピックとして近年盛んに研究されている。超伝導プラズマ波を直接観測する手法の一つとして、超伝導プラズマ波を光子(フォトン)に変換して検出する技術を、筑波大学と米国アルゴンヌ国立研究所が共同研究で発明した[2]。

## 参考文献

- [1] S. S. Dhillon *et al.*, "The 2017 terahertz science and technology roadmap", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, p. 043001 (2017).
- [2] L. Ozyuzer *et al.*, "Emission of coherent THz radiation from superconductors", *Science*, vol. 318, p. 1291 (2007).

掲載論文

題名 Mutually synchronized macroscopic Josephson oscillations demonstrated by polarization analysis of superconducting terahertz emitters  
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.13.051001>  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.051001

邦訳 超伝導体テラヘルツ光源の偏波解析による相互同期した巨視的ジョセフソン振動の実証

著者名 M. Tsujimoto, S. Fujita, G. Kuwano, K. Maeda, A. Elarabi, J. Hawecker, J. Tignon, J. Mangeney, S. S. Dhillon, and I. Kakeya

掲載誌 Physical Review Applied (Letters)