

2.5.5 量子マテリアル

(1) 研究開発領域の定義

量子マテリアルは、電子やスピンの量子状態を人為的に制御することで新たな量子力学的機能を発現する物質・材料である。グラフェンや遷移金属カルコゲナイドなどの2次元物質（原子層物質）や、キタエフ模型に代表される量子スピン液体、トポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル量子物質、ナノチューブやリボン状構造の1次元材料、自己集合分子などの0次元材料も含む。ムーアの法則の限界を克服する次世代半導体の実現や、センシング及びエネルギー変換・貯蔵への応用のため、シリコンを凌駕する電荷移動度を持つ2次元物質や、非磁性の欠陥や不純物に対して電子が堅牢な輸送特性を持つトポロジカル物質が注目されている。また、2次元物質の単層シートを特定のツイスト角度で積層することによって新奇物性を開拓する研究が大きな流れになっている。

(2) キーワード

2次元物質、ワイル/ディラック半金属、マヨラナ準粒子、ワイル半金属、量子スピン液体、反強磁性スピントロニクス、超高速メモリ、光電融合、トポロジー、ノーダルライン半金属、異常ホール効果、磁気熱電効果、ナノシート集積回路、自己集合分子

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

量子マテリアルは、1980年代後半の高温超伝導フィーバーをきっかけに強相関電子系をベースに盛んに研究されてきた。近年ではトポロジカル絶縁体をはじめとするトポロジカル物質群、グラフェンなどの2次元物質群が注目されている。

トポロジカル物質群の中核をなすトポロジカル絶縁体は、内部は絶縁体状態であるにもかかわらず、表面にトポロジーに特徴づけられた特異な金属状態が実現している。その金属状態を流れる電子は質量がほぼゼロで、かつスピンの向きが揃っていることが特徴である。また、トポロジカル絶縁体の派生物質であるトポロジカル超伝導体の中にマヨラナ準粒子が存在しうること、トポロジカル半金属の1種であるワイル半金属の中にワイル準粒子が存在することなどが相次いで発見されている。これらの準粒子はトポロジカル物質の特異な物性の起源となっている。通常物質とは異なり、一般的にトポロジカル状態は外乱に対してロバストな性質をもつため、スピントロニクスや量子コンピューティング分野において、デバイスの微細化・高性能化・誤り耐性化に寄与すると期待される。

グラフェン、カルコゲン化合物（カルコゲナイド）シートなど2次元物質（原子層物質）に特徴的な電子状態（層数に依存した電子バンド構造の変調、ディラック電子系、非常に高い移動度、等）を用いたエレクトロニクスデバイス、エネルギーデバイス、低次元物質特有の光学特性や磁気・スピン特性などを利用した、オプトエレクトロニクスやスピントロニクスが注目されている。またヘテロ積層によってトポロジカルな性質を発現させた例や、ツイスト積層によって母物質では現れない物性を発現させた例がある。適切な組み合わせを選ぶことで有用な機能を出すことが可能である。同時に、界面の超構造等に注目することで元々の低次元物質からは想像もしなかった物性が発現することが分かっている。

[研究開発の動向]

本領域では、物質の有する電子構造の成り立ちを基礎的に理解することから始まり、空間群と電子構造を繋ぐ新たな分類を確立しつつある。トポロジカル絶縁体は絶縁体と真空の界面だけで電流が流れるという、従来の金属・半導体・絶縁体の分類では記述できない新たなタイプの物質相であり、トポロジカル不変量で記述される。トポロジカル物質が示す各種物性を基礎的観点から理解することに加えて、それらの制御指針

の確立に向けた取り組みが行われている。さらに最近では、2次元物質や界面を精密に合成し電子構造の制御によって物性を発現させる応用研究も進んでいる。また、強磁性スピン状態の制御や量子異常ホール状態に生じる非散逸エッジ状態の電子伝導方向制御、マヨラナ準粒子の検証実験が広く行われ、基礎と応用の両面で着実に研究が進んでいる。

こうした物質の探索に加えて、2次元材料や界面の特異な物性を生かしたデバイス化技術の構築も行われつつある。シリコンを中心としたこれまでの半導体は、ムーアの法則に従って微細化、集積化が進み、低消費電力化と高速動作、メモリ容量の増大を実現してきたが、微細加工の極限に近づき、性能向上の限界に直面しつつある。この限界を打破するアプローチの1つとして、材料面ではシリコンを凌駕する移動度を持つグラフェンに代表される原子層物質や、質量ゼロのワイル準粒子の磁氣的性質を外部磁場で制御可能なワイル磁性体が注目されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術ピックアップ]

• 反強磁性スピントロニクス

すでに実用化の段階に到達した磁気抵抗メモリ (MRAM) の構成要素はすべて強磁性体であり、その処理速度は10 ns程度で、ロジック回路のキャッシュであるSRAMの置き換えに必要な100 psに達していない。一方、反強磁性体は、

- 反強磁性体は漏れ磁場を持たず、集積密度を大きくできる。
- 磁場に対して鈍感であり、メモリ保持力が強い。
- 強磁性体に比べて3桁もの大きな歳差運動の周波数 (THz) を持つ。

という利点があるため、近年、大きな脚光を浴びるようになってきている。通常、反強磁性体は磁場に対しての応答性が低く、これまで上記の利点を十分に利用することが困難であった。しかし、最近注目されているMn₃X系は反強磁性体でありながら巨大な異常ホール効果を示し、反強磁性体の抱える問題を一挙に解決する性質を持つため、デバイス化に向けた研究が精力的に行われている。

• 異常ネルンスト効果の熱電デバイス応用

ワイル半金属性は反強磁性体に強磁性体と同等の機能を付与するだけでなく、強磁性体の性能も大きく増強することが分かってきた。その最たる例が異常ネルンスト効果である。異常ネルンスト効果は19世紀に発見されて以来、ゼーベック効果よりも3から4桁程度も小さいと考えられ、熱電効果としては全く注目されていなかった。しかし、ワイル半金属状態を使えば、ネルンスト効果がゼーベック効果の数%の大きさまで迫ることがわかってきたため、近年注目されている。ミクロンサイズの熱電モジュールの作製においては、異常ネルンスト効果を用いたデバイスの方がゼーベック効果を用いたものより効率が良いこともわかってきている。すでに、ワイル半金属やノーダルライン半金属を用いた磁気熱電デバイス応用は一部実現している。

• 2次元材料のねじれ積層

2次元材料には、ディラック半金属 (グラフェン)、金属または超伝導体 (NbSe₂等)、半導体 (MoS₂等)、絶縁体 (BN) などがあり、そのほとんどがバルクとは異なる特性を示している。それぞれの単層シートを構成要素として用いたヘテロ構造の形成は、設計によって量子マテリアルとしての特性をさらに豊かにすることが可能である。グラフェンを特定の角度でねじって積層することにより、ねじれ角によってモット絶縁体状態、超伝導状態、量子異常ホール状態となることが発見されたことから、「ツイストロニクス」と呼ばれる領域が誕生している。グラフェンは電子相関やスピン軌道相互作用をほとんど示さないが、魔法角 (~1.1°) のねじれで生じるモアレ構造によって相互作用強度が劇的に増大し、超伝導およびチャーン絶縁体になる。このような量子現象は、2次元遷移金属ダイカルコゲナイドでも設計可能である。その例として、60° 近くねじれた

MoTe₂WSe₂ヘテロ2層膜がある。2次元ヘテロ構造の設計は、今後も新しい量子現象・機能の豊富な供給源となることが期待される。

• バルク光起電力における太陽電池の変換効率の向上

太陽電池の開発は、実用上十分な発展があり、今日の重要なエネルギー政策の一つになっている。太陽電池のエネルギー変換効率は、物質や積層構造の工夫により現在も向上しているが、現在のpn接合における一電子励起では、理論的な上限が30% (Shockley-Queisser Limit) と指摘されており、これ以上の効率を追求するには、新たな原理が必要である。バルク光起電力は、上記の制限を受けない機構として知られており、pn接合も必要ない。物質に反転対称性がない場合は、光の交流電場から直流電流を生み出す量子的な仕組みがあり、この効果を用いた研究は古くから行われていたが、変換効率が非常に低く実用化を議論することができなかった。しかし、近年遷移金属カルコゲナイド2次元物質やナノチューブを用いたバルク光起電力の研究が行われ、従来の太陽電池に及ばないものの従来のバルク光起電力の変換効率を非常に大きくすることが可能となった。ドイツや日本で活発に研究がなされている。

• 人工次元フォトンクス

空間以外の次元 (人工次元) を活用することで4次元量子ホール効果など、実空間では起こらない現象を探究できるほか、磁気光学効果を用いない光アイソレータへの応用も期待される。周波数次元を使った人工次元フォトンクスの研究では、光ファイバーを用いた大きなリング共振器が使われてきた。最近、シリコンフォトンクスのプラットフォームでの実現、低損失で高速変調が可能なLiNbO on insulatorでの実現が報告され、集積フォトンクスへの応用を視野に入れた研究が進みつつある。

• トポロジカル量子コンピュータ

超伝導状態におけるマヨラナ準粒子の非可換性を利用した計算が注目されているが、動作原理の確立がまだ十分でない。超伝導状態以外でも、量子スピン液体状態におけるマヨラナ準粒子を利用した量子コンピュータも提案されている。量子スピン液体状態を使う利点として、トポロジカル保存量があり量子計算のエラーが少ないと言われている。米国、EU、日本で研究が盛んである。

• バイオ材料としての低次元量子物質の開拓

2次元材料を用いてウイルス抗体検査を短時間で行う研究、自己集合分子を用いたたんぱく質を囲む技術などが提案されている。ウイルスや光合成の機能を理解するためには、量子的な機構を巧みに利用した究極の効率で行われていることが指摘されている。また最近、カーボンナノチューブを用いたミトコンドリアのDNAの操作の報告もあり、量子マテリアルを用いたバイオ研究が注目されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

• 内閣府「量子技術イノベーション戦略 (2020年1月)」と「量子未来社会ビジョン (2022年4月)」

量子マテリアルは、2020年の内閣府「量子技術イノベーション戦略」において、4つの主要技術領域の1つと位置付けられている。日本の大学・研究機関では、質の高い研究開発が継続して行なわれており人材や国際競争力で優位性を保持している。次世代のデバイス開発や新たな物性材料の創成など、これまで、国際的な成長産業分野において、世界に後塵を拝してきた我が国の産業競争力の強化にもつながる有望な技術領域であり、着実な推進が重要である。また、2022年の内閣府「量子未来社会ビジョン」では、量子技術イノベーション拠点の体制強化が謳われており、量子マテリアル拠点 (物質・材料研究機構) に加えて量子機能創製拠点 (量子科学技術研究開発機構) が世界最先端の量子マテリアルの研究開発・供給拠点として示さ

れている。

• JST 戦略的創造研究推進事業・さきがけ「物質と情報の量子協奏」(2022～2027年度)

「量子多体系の制御と機能化」、「新現象・新状態の量子デバイス・量子材料応用」の2つの観点から研究を推進している。具体的には、量子情報に基づいた量子物質における新しい量子状態制御手法の開拓、新原理の量子ビット・量子センサ・量子シミュレーションの提案と実証、将来的に実現可能な物理系を念頭においた量子アルゴリズムの提案と実証などを対象としている。物質科学・情報科学・数理科学・ナノ構造科学などと連携することによって、量子制御技術によるイノベーションを目指す。

• JSPS 科研費 学術変革領域研究 (A)「2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」(2021～2025年度)

様々な組成をもった2次元物質をファンデアワールス力のみで人工的に積層することで、化学結合や格子整合に制限されない新しい物質群を合成する。積層の角度をずらし、モアレ超格子と呼ばれる長周期構造を人工的につくと、モアレパターンに依存してホスト物質のバンド構造は著しく変化する。例えば2層グラフェンの積層の角度を約1°ずらすと、低温で超電導を示すようになる。さらに、層間のナノサイズのスペースに分子やイオンなどを挿入し、ホスト物質の電氣的、磁氣的あるいは光学的性質を変化させるという研究も行われている。2.5次元物質科学は全く新しい物質の創製や特異的な物性の発現など物質科学に大きなインパクトを与えると考えられる。

• JST 戦略的創造研究推進事業・CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」(2018～2025年度)

電子状態のトポロジーに関する物性物理学を中心に置き、フォトニクスやスピントロニクス分野、さらに新規機能を実現するデバイス工学への展開を研究対象としている。また、実空間のトポロジーにおいても位相欠陥等のトポロジカルな性質を利用したスピン流の制御に加え、分子の幾何学的性質や絡み合いを制御するソフトマターも対象としている。これらの研究分野が複合的に連携することで、結晶成長技術、構造や物性の解明と制御のための計測・解析・加工プロセス技術、部素材・デバイス設計技術等の技術基盤の創出や、これらに関する基礎学理の構築、革新的機能を有する材料・デバイスの創出に取り組んでいる。

• JST 戦略的創造研究推進事業・さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」(2018～2023年度)

トポロジーという新たな物質観に立脚したトポロジカル材料科学の構築と、それによる革新的な新規材料・新規機能創出を目的とし、「トポロジカル絶縁体」に代表される様々なトポロジカル量子材料に加え、磁性、光学、メカニクス、ソフトマター（高分子材料・ゲル材料など）分野など、広範な領域における“トポロジカル材料科学”の探求を通して、原理的にその性能向上の限界が顕在化してきているエレクトロニクスデバイス分野等において新たなパラダイムを築くことを目指している。

• NEDO エネルギー・環境新技術先導研究プログラム「2次元材料の産業化に向けた革新的製造プロセスとデバイス作製基盤技術の開発」(2021年度)

本プログラムでは、産業創出に結びつく産業技術分野の中長期的な課題を解決していくために必要となる技術シーズとして、絶縁基板上大面積高品質グラフェン成膜技術の開発と光デバイス応用、2次元材料の高速・液相コーティング技術の研究開発、高機能テープを用いた2次元材料の革新的転写法の開発を行っている。

[米国]

エネルギー省 (DOE) の管轄のもと Energy Frontier Energy Centerとして4年間で約20億円の予算が

AMES研究所を中心としたCenter for the Advancement of Topological Semimetals (CATS) に投資されている。この研究所においては、新しい磁気トポロジカル半金属物質の開発、薄膜とヘテロ構造での新しい量子状態の開発、トポロジカル状態の動的操作の研究という3本柱の研究が遂行されている。さらに同研究所においては、日本において開発されたワイル半金属 Mn_3Sn 、 Mn_3Ge も本格的に研究され、バルク単結晶の研究に始まり、単結晶薄膜の開発、さらにその光を用いたスピン状態の制御の研究が推進されている。

2013年に開始したゴードン・アンド・ベティ・ムーア財団のEmergent Phenomena in Quantum Systems Initiative (EPIQS) は、材料合成・実験・理論を含む量子マテリアルの統合研究プログラムであり、これまで1.7億ドル以上が投資されている。

[中国]

2017年に北京市と清華大学、北京大学、中国科学院などの中国のトップ大学および研究機関と共同設立された北京量子情報科学院 (BAQIS) では、物質の量子状態、量子コンピューティング、量子通信、量子マテリアル・デバイス、量子精密測定を5つの主要な研究分野として推進している。また、それらの研究をサポートするマイクロ・ナノプロセスと材料合成の2つのプラットフォームを整備している。BAQISが主催するInternational Symposium on Quantum Physics and Quantum Information Sciences (QPQIS) といった国際会議では米国、英国、ドイツ、フランス、イタリア、日本など、さまざまな国から研究者が招待され、最先端の量子技術について議論されている。

精華大学ではCheng Song教授を中心として、反強磁性スピントロニクスの研究を推進しており、予算はSingle PIとしてNational Science Foundation of China, Beijing Natural Science Foundation等から公開されているだけでも総額70億円/年である。

[欧州]

Eu Quantum Flagshipは、欧州が量子技術 (量子通信、量子センシング・メトロロジー、量子シミュレーション、量子コンピューティング) に対して10億ユーロを投資するものであり、量子技術関連産業の立ち上げと市場投入の加速を目的としている。2019年に中核となる20のプロジェクトが採択された。Two-dimensional quantum materials and devices for scalable integrated photonic circuits (2D-SIPC)、Photons for Quantum Simulation (PhoQuS)、Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics (S2QUIP)、等、光量子ビット技術関連が多い。

ドイツのMax Planck Graduate Center for Quantum Materialsでは、トポロジーに起因する新現象、コヒーレント光による電子状態制御、多様なヘテロ構造合成など、量子マテリアル研究及び人材育成に取り組んでいる。Matter and Light for Quantum Computing (ML4Q) は、ケルン大、アーヘン工科大、ボン大学およびユーリッヒ総合研究機構が参画し、2019年からドイツ研究振興協会 (DFG) の資金提供を受けている。ML4Qでは、固体物理学、量子光学、量子情報科学の3つの主要研究分野を推進している。フラウンホーファー研究機構やimec等17の機関が参画するMaterials for Quantum Computing (MATQu) コンソーシアムでは、量子ビットとして機能する超伝導ジョセフソン接合を工業用300 mmシリコンベースのプロセスで製造するための技術検証を行っている。

フランスは2021年に国家量子戦略を公表した。投資額は5年で18億ユーロ以上の計画である。この中で量子センサー技術・応用に2億5800万ユーロの投資が予定されている。

スイスのETH Zurichには、Advanced Semiconductor Quantum Materialsグループは、半導体ヘテロ構造や量子ドットの作製技術を基盤とした量子マテリアル研究を開始している。Neutron Scattering and Magnetismグループは、様々な量子磁性体分析を行っている。

(5) 科学技術的課題

トポロジカル物質研究は基礎学術分野として、実験技術の高度化や複合的な検証が主流となっており、計算と実験、合成と評価、合成とデバイス化などの融合研究が必須である。国内では、CRESTがこうした分野融合や共同研究を推進する役割を果たしてきた。今後、基礎と応用、理学と工学の観点で橋渡しして実用化を加速させる必要がある。工学分野との連携をより一層推進し、例えば、スピントロニクス分野でのスキルミオンやワイル磁性体を用いた磁気メモリの開発、量子計算分野でのトポロジカル・超伝導素子や、マヨラナ粒子制御、トポロジカル集積光デバイスなどがあげられる。量子コンピューティングにトポロジカル物質群を用いることは誤り耐性量子コンピュータの実現に大きなメリットを有するため、長期的な視野に立って研究を持続する必要がある。基礎研究における検証から、工学応用に向けた制御技術の確立、単一素子から多数素子へのスケール、等の技術的要素が多岐に渡るため、いかに連携できる体制を作れるかが課題である。

フラストレート磁性体、量子臨界物質、また、異常金属状態などの物質の理解も大きく進展しつつあり、これら量子マテリアルのスピントロニクス応用は、今後数年で発展する可能性が高い。反強磁性スピントロニクスはその高速性から今後の電気配線の光化に対応する最も信頼性の高い技術となる。現在のデータセンターなどのクラウドサービスでの消費電力の30%は電気配線での発熱である。これを踏まえて、電気配線の光化の流れは半導体の3次元実装の潮流とも時期を同じにしており、シリコンフォトニクスが今後のCo-packaged Optics (CPO) の基盤技術となると同時に、高速メモリによる光のバッファメモリとしての役割を果たす可能性が高い。特に電荷を用いた半導体技術の周波数特性の限界が100 ps程度であるのに対して、反強磁性スピントロニクスは1 ps程度であり、光のバッファメモリとしての役割への期待は大きい。スピンと光のカップリングが課題だが、電流や電荷を介したカップリングが注目されている。

半導体集積回路微細化は、ムーアの法則に従ってきたが集積回路の素子長（素子設計の方眼紙の1辺の長さ）が今日では2 nmであり、この長さになると物質固有の移動度が急速に小さくなる問題が近年明らかになってきた。グラフェンに代表される原子層半導体では、3次元物質に比べ微細化しても移動度が小さくならないことがわかっており、インテルなどは2030年代のデバイスとしてナノシート半導体を採用すると提案している。しかし、半導体集積回路を設計するには、絶縁層や電極も2次元物質にしなけりならず、「いかに2次元物質を積層するか」という課題が発生している。学術変革領域研究 (A)「2.5次元物質科学」(2021～)はこの問題を解決する取り組みである。

(6) その他の課題

近年の我が国の研究現場の環境は年々悪化の一途を辿り、折角の素晴らしい研究トピックスがあっても、大学の運営や学生のケアなどのために駆り出され、研究する時間がとれないという状況が定常化しつつある。一方で、若手は任期付きが増える傾向にある。このような若手が審査を経て無期転換されるような制度が求められる。

現在、多くの企業が大学との連携を求めるようになってきているが、企業が拠出する共同研究費に限られている一方で、共同研究で得られたシーズを下に、企業が大学と共願で特許出願することが増えている。連携を効率化し利益を最大化するためには、産学官連携のサポートの充実が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・プレセンスの高い成果を挙げているが、海外に比べて研究者人口が少ないのが課題。近年、量子コンピュータや量子センシングなどの量子技術へは巨額の投資がなされているものの、量子マテリアルに対してはそれほど投資がなされていない。

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

日本	応用研究・開発	○	→	・ THz回路への応用などが進んでいるが、長期的企業の応用研究開発は減少している。
米国	基礎研究	○	→	・ 外国人の研究者の研究に対する動機が高く、基礎研究の中心的な存在は維持している。
	応用研究・開発	◎	→	・ 室温で磁気特性を安定保持できる層状2次元材料など、デバイス応用に向けた研究開発が継続している。
欧州	基礎研究	○	→	・ 独マックス・プランク研究所等でトポロジカル物質の設計、合成、特性評価などの基礎研究がしっかり推進されている。
	応用研究・開発	○	↗	・ 半導体製造装置メーカーなど、巨大企業があり、技術力の高さを維持している。 ・ Horizon 2020の枠組みで高周波デバイス応用を目指したトポロジカル絶縁材料の研究など、応用研究が進められている。
中国	基礎研究	○	→	・ 欧米で学んだ若手PIが大活躍。ハイインパクト誌にも多数掲載。実験研究ではマイクロ波を用いたものが多い。
	応用研究・開発	○	↗	・ 経済成長もあり、企業が応用研究に参入する傾向が強い。グラフェンの研究所など、応用研究を促進する政策がある。
韓国	基礎研究	○	→	・ ソウル大学が先導している。 ・ IBS (Institute of Basic Science) が設立され、基礎研究が推進されている。
	応用研究・開発	○	→	・ サムソン、LGなど巨大企業の開発は、市場の占有率を維持している。
インド	基礎研究	○	→	・ 2022年にS.N. Bose National Centre for Basic Sciences (SNBNCBS) が独ドレスデン工科大学と新規磁性材料とトポロジカル量子物質に関するMOUを締結した。
	応用研究・開発	○	↗	・ 2020年に開始したNational Mission on Quantum Technologies and Applications (5年間で8000ルピー (12億USD)) の中で量子マテリアル・デバイス研究を推進している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ フォトニクス材料・デバイス・集積技術（ナノテク・材料分野 2.3.3）
- ・ IoTセンシングデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.4）
- ・ 量子コンピューティング・通信（ナノテク・材料分野 2.3.5）
- ・ スピントロニクス（ナノテク・材料分野 2.3.6）

参考・引用文献

1) Sumio Ikegawa, et al., “Magnetoresistive Random Access Memory: Present and Future,” *IEEE Transactions on Electron Devices* 67, no. 4 (2020) : 1407-1419., <https://doi.org/10.1109/TED.2020.2965403>.

- 2) Tomas Jungwirth, et al., “Antiferromagnetic spintronics,” *Nature Nanotechnology* 11 (2016): 231-241., <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.18>.
- 3) Taishi Chen, et al., “Anomalous transport due to Weyl fermions in the chiral antiferromagnets mn_3X , $X = Sn, Ge$,” *Nature Communications* 12 (2020) : 572., <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20838-1>.
- 4) Satoru Nakatsuji, Naoki Kiyohara and Tomoya Higo, “Large anomalous Hall effect in a non-collinear antiferromagnet at room temperature,” *Nature* 527, no. 7577 (2015) : 212-215., <https://doi.org/10.1038/nature15723>.
- 5) Muhammad Ikhlās, et al., “Large anomalous Nernst effect at room temperature in a chiral antiferromagnet,” *Nature Physics* 13 (2017) : 1085-1090., <https://doi.org/10.1038/nphys4181>.
- 6) Tomoya Higo, et al., “Large magneto-optical Kerr effect and imaging of magnetic octupole domains in an antiferromagnetic metal,” *Nature Photonics* 12 (2018) : 73-78., <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0086-z>.
- 7) Tomoya Higo, et al., “Perpendicular full switching of chiral antiferromagnetic order by current,” *Nature* 607, no. 7919 (2022) : 474-479., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04864-1>.
- 8) Masaki Mizuguchi and Satoru Nakatsuji, “Energy-harvesting materials based on the anomalous Nernst effect,” *Science and Technology of Advanced Materials* 20, no. 1 (2019) : 262-275., <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1585143>.
- 9) Akito Sakai, et al., “Giant anomalous Nernst effect and quantum-critical scaling in a ferromagnetic semimetal,” *Nature Physics* 14 (2018) : 1119-1124., <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0225-6>.
- 10) Taishi Chen, et al., “Large anomalous Nernst effect and nodal plane in an iron-based kagome ferromagnet,” *Science Advances* 8, no. 2 (2022) : eabk1480., <https://doi.org/10.1126/sciadv.abk1480>.
- 11) Tomoki Ozawa, et al., “Topological photonics,” *Reviews of Modern Physics* 91, no. 1 (2019) : 015006., <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.015006>.
- 12) F. D. M. Haldane and S. Raghu, “Possible Realization of Directional Optical Waveguides in Photonic Crystals with Broken Time-Reversal Symmetry,” *Physical Review Letters* 100, no. 1 (2008) : 13904., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.013904>.
- 13) Zheng Wang, et al., “Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states,” *Nature* 461, no. 7265 (2009) : 772-775., <https://doi.org/10.1038/nature08293>.
- 14) Mohammad Hafezi, et al., “Imaging topological edge states in silicon photonics,” *Nature Photonics* 7 (2013) : 1001-1005., <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.274>.
- 15) Long-Hua Wu and Xiao Hu, “Scheme for Achieving a Topological Photonic Crystal by Using Dielectric Material,” *Physical Review Letters* 114, no. 22 (2015) : 223901., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.223901>.
- 16) Sunil Mittal, et al., “Topological frequency combs and nested temporal solitons,” *Nature Physics* 17 (2021) : 1169-1176., <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01302-3>.
- 17) Andrea Blanco-Redondo, et al., “Topological protection of biphoton states,” *Science* 362, no. 6414 (2018) : 568-571., <https://doi.org/10.1126/science.aau4296>.

- 18) Yasutomo Ota, et al., “Active topological photonics,” *Nanophotonics* 9, no. 3 (2020) : 547-567., <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0376>.
- 19) Yongquan Zeng, et al., “Electrically pumped topological laser with valley edge modes,” *Nature* 578, no. 7794 (2020) : 246-250., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1981-x>.
- 20) Jae-Hyuck Choi, et al., “Room temperature electrically pumped topological insulator lasers,” *Nature Communications* 12 (2021) : 3434., <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23718-4>.
- 21) Lechen Yang, et al., “Topological-cavity surface-emitting laser,” *Nature Photonics* 16 (2022): 279-283., <https://doi.org/10.1038/s41566-022-00972-6>.
- 22) Taiki Yoda and Masaya Notomi, “Generation and Annihilation of Topologically Protected Bound States in the Continuum and Circularly Polarized States by Symmetry Breaking,” *Physical Review Letters* 125, no. 5 (2020) : 053902., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.053902>.
- 23) Bo Wang, et al., “Generating optical vortex beams by momentum-space polarization vortices centred at bound states in the continuum,” *Nature Photonics* 14 (2020) : 623-628., <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0658-1>.
- 24) Yihao Yang, et al., “Terahertz topological photonics for on-chip communication,” *Nature Photonics* 14 (2020) : 446-451., <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0618-9>.
- 25) Ze-Guo Chen, et al., “Classical non-Abelian braiding of acoustic modes,” *Nature Physics* 18 (2022) : 179-184., <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01431-9>.
- 26) Xu-Lin Zhang, et al., “Non-Abelian braiding on photonic chips,” *Nature Photonics* 16 (2022): 390-395., <https://doi.org/10.1038/s41566-022-00976-2>.
- 27) Aravind Nagulu, et al., “Chip-scale Floquet topological insulators for 5G wireless systems,” *Nature Electronics* 5 (2022) : 300-309., <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00751-9>.

2.5