

量子技術の実用化推進WG（第6回）・参考資料

量子センシング・量子マテリアル 技術・産業の国内外動向

2023年1月18日

JST 研究開発戦略センター



研究開発課題

量子コンピューティング 量子シミュレーション

NISQマシンのキラーアプリ 探索

- ・量子化学計算/機械学習
- ・量子超越性
- ・古典-量子ハイブリッドアルゴリズム

ゲート型量子コンピュータ実機の試作

- ・超伝導量子ビット系

エラー耐性量子コンピュータ基盤技術

- ・量子ソフトウェア
- ・量子誤り訂正方式
- ・様々な量子ビット系

複雑系の計算が可能な量子シミュレータ開発

量子計測 センシング

ダイヤモンドNV中心 作製技術

- ・大型・高品質化 (T_2 向上)
- ・新材料探索

ダイヤモンドNV中心と量子もつれ光センサの医療・診断応用

- ・プロトタイプ製作
- ・脳磁計・心磁計
- ・イメージング技術

原子干渉計・光格子時計の実用性探索

- ・小型化・可搬化
- ・高精度化
- ・「秒」の再定義・標準化

量子暗号・通信

QKDの社会実装と一般普及の促進

- ・BB84運用・品質保証
- ・市場投入・キラーアプリ探索
- ・低価格化

標準化活動への積極的寄与

- ・ETSI & ITU-T
- ・耐量子-公開鍵暗号

高速化・長距離化に向けた量子中継技術、ネットワーク技術

- ・量子メモリー・全光量子
- ・量子望遠鏡
- ・量子インターネット

量子マテリアル

トポロジカル量子物質

- ・トポロジカル量子コンピュータ
- ・トポロジカル絶縁体
- ・ワイル磁性体

スピントロニクス材料

- ・半導体スピントロニクス
- ・スピンMOSFETデバイス

エネルギー変換材料

- ・スピン-ゼーベック効果
- ・スピン流

フォトニクス材料

- ・メタマテリアル
- ・シリコン/ナノフォトニクス

共通量子技術基盤

原子・分子・光科学
量子光学
量子エレクトロニクス

単一光子制御技術

- ・効率化・室温動作・光子検出器
- ・量子もつれ光子、多体量子もつれ制御

異種の量子ビット間結合(ハイブリッド量子科学)

- ・固体量子ビット & 光 など

量子ビット基盤技術

- ・様々な量子ビット系

材料設計・製造、計測技術

CRDS 戦略プロポーザル「量子2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～」(2020)

研究開発の国際比較 (量子センシング)

(現状)
 ◎ 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

(トレンド)
 ↗ : 上昇傾向
 → : 現状維持
 ↘ : 下降傾向

		ダイヤモンドNV中心		光格子時計		量子もつれ光		超偏極MRI		各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	
日本	基礎研究	○	↗	◎	→	◎	↗	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Q-LEAP 量子計測・センシング領域や、新規Flagship「量子生命」、JSTさきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」など、複数のプロジェクトによって研究開発が進む。 日本初の技術である光格子時計では、光格子時計の実証実験と18桁の時計精度を実現した東京大学・理化学研究所を中心に、世界をリード。
	応用研究・開発	○	↗	○	↗	○	→	×	↗	<ul style="list-style-type: none"> 東京大学・理化学研究所・島津製作所では可搬型光格子時計を開発し、一般相対論検証実験を実現。未来社会創造事業でも、東京大学・理化学研究所を中心に、社会実装をめざし、小型・可搬型光格子時計の開発を行っている。 Q-LEAP量子計測・センシング技術領域のFlagshipプロジェクトでは、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発が進む。量子もつれ光を利用したセンシングへの企業の関心は高まりつつあり、今後の発展に期待。 超偏極イメージング開発で出遅れたが、国内での臨床試験をめざす動きがあり、状況打開を臨む機運は高まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 光格子時計の開発では、JILA、NISTで世界トップレベルの時計精度を実現。 ハーバード大学を中心に、ナノ粒子を用いた磁場計測や温度計測の実証研究などが進む。 量子もつれ光研究ではメリーランド大学、ボストン大学、NIST等に加え、カナダにも複数の拠点。北米地域で連携。 超偏極イメージング研究でも、カリフォルニア州立大学サンフランシスコ校を中心に、多くの研究機関が新規トレーサーや疾患モデル動物のイメージングなどで優れた研究成果を創出。
	応用研究・開発	○	↗	○	→	○	→	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> DARPAプロジェクトでNISTなどのグループが光周波数コムを搭載した光時計を基板上に実装するなど、チップスケール原子時計の開発が進む。AOSense、Stable Laser Systemsなどのベンチャー企業による時計の要素技術開発と製品化も行われている。 ハーバード大学を中心に神経電流のDC磁場計測や、ダイヤモンドNV中心をプローブとした画像化技術開発がさかん。 超偏極¹²⁹XeによるCOPDなどの肺疾患診断と、超偏極¹³Cによるがんおよび心筋症の診断で大規模臨床研究が進展。
欧州	基礎研究	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 光格子時計の開発が各国の計量標準研究所を中心に行われ、各国の研究所間をつなぐ長距離光ファイバ網の構築が進む。 ダイヤモンドNV中心の研究では、ドイツを中心に先駆的な研究が進展。シュトゥットガルト大学では、AC磁場に関する世界最高感度900 fT Hz^{-1/2}を達成。 核偏極イメージングでは、黎明期より研究領域の中核を担ってきた大学が多く、近年ではdDNP装置の性能と利便性を大幅に向上するCross-Polarization技術の発明など、革新的な技術を創出。
	応用研究・開発	○	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> iqClockプロジェクトでは、可搬型光格子時計開発と製品化、超放射レーザーの開発が進む。 欧州宇宙機関では、光時計の宇宙利用のため光格子時計の国際宇宙ステーションへの搭載に向けたプロジェクトが2007年より進む。ベンチャー企業による時計用レーザー光源とその周辺機器の製品化も進展。 MetaboliQsとHYPERDIAMONDの2プロジェクトによる医療応用、ASTERIQSプロジェクトによる高性能センサ開発など、ダイヤモンドNV中心の応用研究開発が進む。
中国	基礎研究	○	↗	△	→	△	↗	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 中国計量科学研究院、中国科学院、華東師範大学で光格子時計の開発が進展。 中国科技大学、香港中文大学で、磁場計測やタンパク質のスピンラベルに関する研究が進む。 量子もつれ光源や、光子検出器に関する研究の質と量は近年著しく向上。 ¹²⁹XeガスのMRIの報告が中国の研究機関からなされている。
	応用研究・開発	—		△	→	△	→	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 中国科学院で宇宙利用に向けたSr光格子時計の小型化に着手。 ¹²⁹Xeガスによる肺疾患の診断は2018年から臨床応用が始まっている。

研究開発の国際比較 (量子マテリアル)

(現状)
 ◎ 特に顕著な活動・成果が見えている
 ○ 顕著な活動・成果が見えていない
 △ 顕著な活動・成果が見えていない

(トレンド)
 ↗ : 上昇傾向
 → : 現状維持
 ↘ : 下降傾向

		量子マテリアル				各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
		トポロジカル材料		低次元材料		
フェーズ		現状	トレンド	現状	トレンド	
日本	基礎研究	◎	→	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ワイル半金属・ワイル磁性体の開発がさかん。ネルンスト効果を用いた創エネ研究の基礎に強み。 2010年以降、新学術領域が分野を牽引。特に、トポロジカル超伝導体に関する理論と実験に強み。シフトカレントやスキルミオンでも先駆的な研究推進グループが存在。トポロジカル光のグループも増加。 日本発の二次元ナノシートである、酸化物および水酸化物ナノシート、二次元金属配位高分子の研究で先行。 高品質h-BN材料は世界標準。二次元超伝導体の研究や非線形伝導等の物性開拓、単層SnSの合成等、ユニークな業績を創出。ロボット制御による転写・界面作製など独自技術も。
	応用研究・開発	○	↗	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> スピン運動量ロッキングを活用した高効率スピン流生成とその活用方法の検討。ワイル磁性体等を用いたセンサやメモリの応用向け基礎研究も。 マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子コンピューティングが提唱されている。スキルミオンを用いたメモリなどのデバイス展開が模索。 企業などからの大規模な投資は見当たらない。 カルコゲン化物ナノシートの応用研究では研究者人口が圧倒的に少ない。
米国	基礎研究	◎	→	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 物質開発に強み。ARPESやSTMなど、先端計測分野でも牽引。莫大な研究予算と留学生などの人材により、高い基礎研究の成果を創出。 スピン運動量ロッキングの活用についても積極的。スピントロニクス分野の研究者が多く参入して、スピン流生成やスキルミオン駆動の研究を牽引。トポロジカル超伝導の実験は企業を含めて強力に推進。政府系、財団系問わず、量子物質や量子技術の開発に積極的なサポート。 二次元磁性体の発見や機能開拓、ツイスト積層界面における物性探索に至るまで二次元物質研究を主導。トレンドの発信地として確固たる存在感。 ツイスト積層2層グラフェンでの超伝導発現研究ではMIT、Caltechが中心。MXenesはDrexel大がパイオニアであり、研究を先導。
	応用研究・開発	◎	↗	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用面でも活発な展開。優れた研究成果を創出。 Microsoft Station Qを中心にトポロジカル量子コンピュータ開発に向けた研究開発が活発。 TMDをチャンネル材料とするFETデバイス応用研究が加速。また、エナジーハーベスターへの重点化が目立つ。 カルコゲン化物ナノシートを使った応用研究では多くの先進的成果。
欧州	基礎研究	○	→	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ドイツMax Planck研究所が理論を牽引。物質合成と精密計測を加速。ワイル半金属を中心に開拓が進む。 エッジ伝導の制御と応用への可能性が検討され、共同研究が進行。 薄膜試料を用いたマヨラナ粒子検出の研究が進行。金属積層薄膜上のスキルミオンの電流駆動など、制御技術開発が進む。 グラフェンを発見した欧州では、二次元磁性体を用いた機能性開拓等で、二次元物質研究の潮流を形成。電場による励起子の駆動・制御等、ユニークな研究成果も。Graphene Flagshipによる大型投資が継続中。 ドイツでは、Max Planck研究所、大学、Fraunhofer研究所による強固な研究開発体制を構築。フランスは、スピントロニクス・製膜技術に特色がある。英国では、独自の研究所をマンチェスター大学に設置、研究が進む。スイスでは、光電子物性、スピントロニクスの分野が強い。
	応用研究・開発	○	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> トポロジカル量子コンピュータ開発に向けた研究開発がオランダのデルフト工科大学、ドイツのケルン大学などでさかん。 Graphene Flagshipプロジェクトにより、多くの大学・研究機関参加で応用に向けた研究が展開。独自の研究開発で主導権をとりつつある。 ドイツでは、Aachen Graphene & 2D-Materials Centerが2017年に設立。二次元材料による大規模集積デバイス・回路等の先端研究を国家的に推進。英国では、Manchester大のNational Graphene Research Center、EPSRCによるヘテロ二次元材料や光電子材料開拓等への投資が目立つ。
中国	基礎研究	◎	↗	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 若手研究者らの積極的な分野参入。大型の複合研究機器の導入により、理論家との共同研究を通して、合成と計測が加速的に進む。 基礎研究への取り組みも急拡大。米国で成果をあげた研究者が中国の大学で研究室を持ち、基礎研究を主導。固体物性、材料科学で大きな存在感。
	応用研究・開発	○	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究所内に技術移転・産業化センターを設置するなど、今後活発化していく可能性を秘める。 グラフェンの産業化が活発に進む。電池応用、カルコゲン化物ナノシート積層界面を使った素子開発など。特許登録数は世界トップ。

主要国のR&D動向概況

量子計測・センシング

- **ダイヤモンドNV中心**：研究は米国とドイツで先行。**日本はセンサの材料、作製技術に強くセンサ性能で互角**。日本を含む各国で、脳磁計など有望な応用分野の探索や産業界との連携が開始され、**技術的ブレークスルーを目指して競争が激化**。
- **量子慣性センサ**：可搬の重力加速度計が米国、フランスで市販される一方、日本は角速度計（ジャイロスコープ）に関する研究が進行中。
- **光格子時計**：小型・軽量化、安定動作と全地球航法衛星システムに代わる**超高精度時間インフラを目指す研究が開始**。
- **量子もつれ光センサ**：研究は、米国と英国を中心に、化学計測への応用を念頭に進展。日本は生体イメージング（量子OCT、量子もつれ顕微鏡）に強みを持つが、生物学との連携・融合を担う研究者層が薄い。

量子マテリアル・量子基盤技術

- **トポロジカル量子物質、スピン流、冷却原子集団の応用を目指した基礎研究が世界で進展**。
- **今後何が飛び出すか分からない未知領域**。科学・技術的ブレークスルーへの期待や人材育成の意味で、自由度の高い基礎研究が重要。
- 近年の量子技術の目覚ましい進展は、量子ビーム等による微細加工技術や分光・計測手法、デバイス・システム化技術といったナノテクノロジーの高度化に依るところが大きい。したがって、このような**技術基盤の更なる研究開発や整備を促進することが非常に重要**。

1. | 量子センシング

主要国のR&D動向

量子計測・センシング

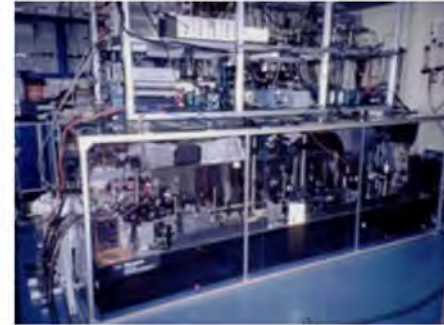
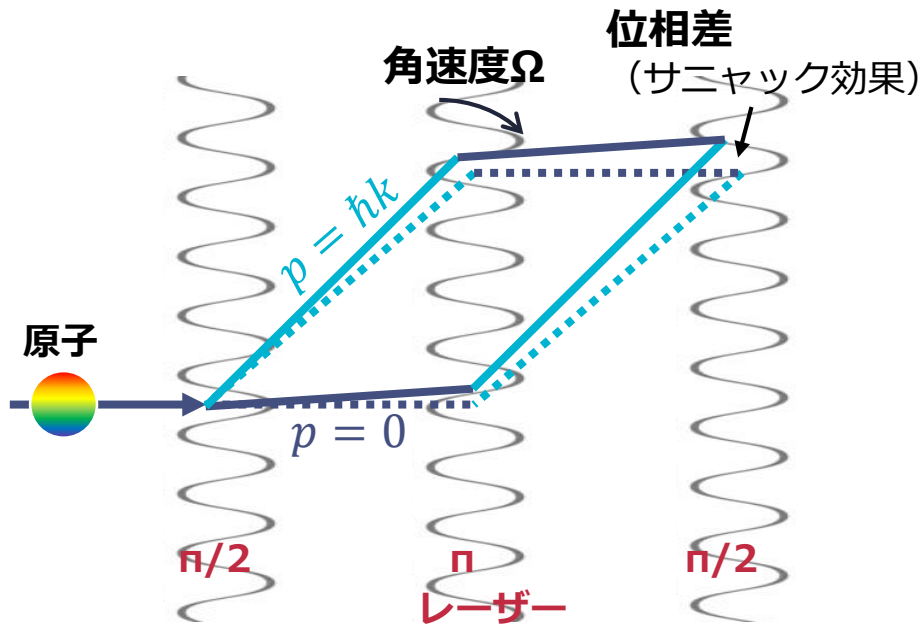
- 米国では、DARPAにおいてPNT (Positioning, Navigation, and Timing) 技術開発の一環としてAll Together Now (ATN) プログラムがあり、光クロックや冷原子干渉計の研究開発が行われている。
- 欧州では、ダイヤモンドNVセンサのプロジェクトとしてASTERIQS (Advancing Science and Technology through diamond Quantum Sensing)、ダイヤモンドNV中心を用いた核スピン超偏極の医療応用 (心血管疾患) を目指すプロジェクトとしてMetaboliQs (Leveraging room temperature diamond quantum dynamics to enable safe, first-of-its-kind, multimodal cardiac imaging) が実施された。
- 日本では、2020年度よりQ-LEAP量子生命Flagshipプロジェクトが立ち上がり生体計測応用・テストベッド整備が進んでいる。SiV中心やSiC-Vsi等NV以外の材料開発も進展。また、NICTでは、2030年に想定されている秒の再定義にむけて光格子時計動作実績を重ねているところ。
- 中国では、10年ほど前からNV中心の研究を本格的に実施。
- NVision (ドイツ)、SQUTEC (ドイツ)、Qnami (スイス)、QZabre (スイス)、QDTI (米国)、Hyperfine (米国)、Quantum Brilliance (オーストラリア) などスタートアップが多数立ち上がっている。

量子センシング技術の分類

	ダイヤモンドNV中心	量子慣性センサ	光格子時計	量子もつれ光	超偏極MRI
計測物性	温度、磁場など	加速度、角加速度	時間	(3次元)空間位置	(3次元)空間位置
量子系	ダイヤモンドNV中心	冷却原子	冷却原子	もつれ光子対	偏極核スピン
環境	常温/常圧	極低温/超高真空	極低温/超高真空	常温/常圧	極低温/超高真空*
主な応用先	医療、バイオ、デバイスモニタ	測位、計測標準、資源探査、地震計測	時間標準	化学分析、バイオ、医療	医療
主な推進組織(海外)	NVision Imaging(独) /Quantum Diamond Tech(米) /SQUTEC(独) /QNAMI(スイス) /QZabre(スイス) /Quantum Flagship(EU)	Muquans(仏) /AOSense(米)	Muquans(仏) /Quantum Flagship(EU)	Rochester大(米) /Auckland大(ニュージーランド) /Monterrey工科大(メキシコ) /イスラエル工科大など多数	GE(米) /NVision Imaging(独) /Quantum Flagship(EU)
主な推進組織(国内)	Q-LEAP(東工大/東大) /NIMS/産総研/QST/生理研/京大) /CREST[量子技術](NTT)(筑波大)	Q-LEAP(電通大) /JST未来・大(東工大)	ERATO(理研/東大) /未来・大(理研/東大)	Q-LEAP(京大/電通大) /CREST[量子技術](京大)	Q-LEAP(阪大/QST)/CREST[量子技術](阪大) /AMED(北大、日本レドックス)

原子干渉計

物質波の干渉縞を利用



AI gyroscope

Noise: $3 \mu\text{deg}/\text{hr}^{1/2}$
 Bias stability: $< 60 \mu\text{deg}/\text{hr}$
 Scale factor: $< 5 \text{ ppm}$

Mark Kasevich, "Gravitational Physics using Atom Interferometry"
<https://slideplayer.com/slide/8000980/>

レーザー干渉計より10桁高感度 (理論値)

$$\frac{\lambda\nu \text{ (物質波)}}{\lambda\nu \text{ (光)}} \propto \frac{\hbar\omega}{Mc^2} \sim 10^{-10}$$

盛永篤郎, 原子干渉計による超高感度・高精度物理計測, 光学 37, Vol 7, 376 (2008).

AO Sense

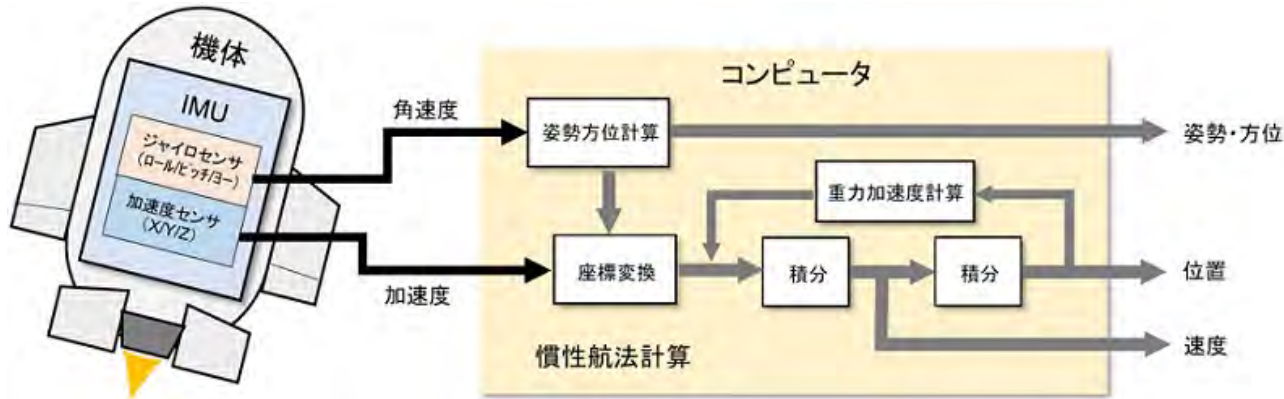


<https://aosense.com/>

量子ジャイロ

慣性航法（自己位置推定）

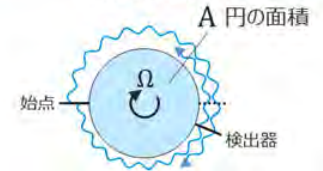
加速度・角速度を高精度計測し、姿勢や方位、自己位置などを計算（GPSなしで把握）



東京航空計器株式会社ウェブサイトより
<https://www.tkk-air.co.jp/aerospace/inertial-sensor.html>

JST未来社会創造事業「自己位置推定機器の革新的な高精度化及び小型化につながる量子慣性センサー技術」
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme03.html>

光波ではなく原子のド・ブロイ波
を利用する



干渉型ジャイロにおいて
検出される位相差 $\Delta\Phi = \frac{4\pi\Omega A}{\lambda v}$

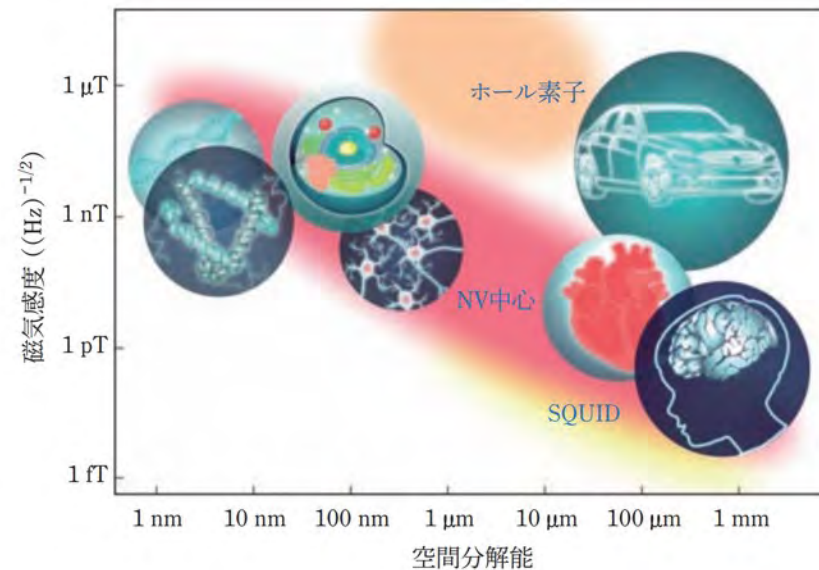
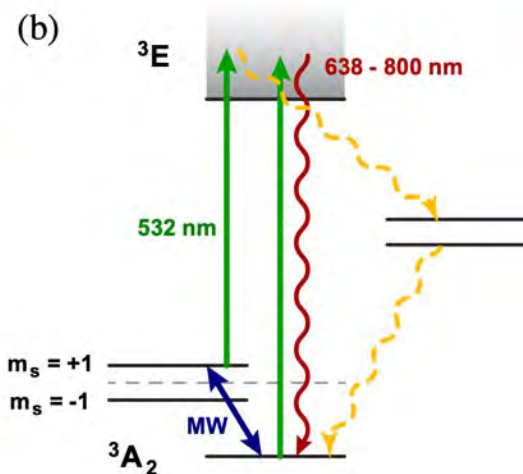
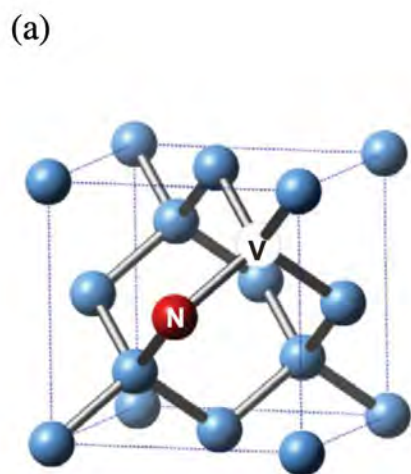
波の波長 λ 波の速度 v

原子波は光波よりも波長・速度
が小さく有利

ダイヤモンドNVセンター

磁場、電場、温度、圧力などの高感度センサー応用が可能

スピン状態に光でアクセス。単一のNVセンターを観測可能

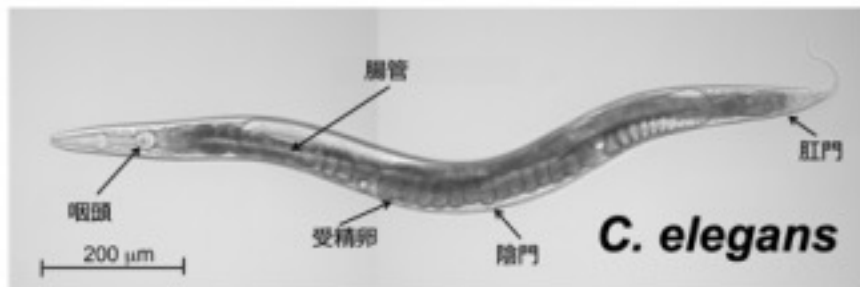
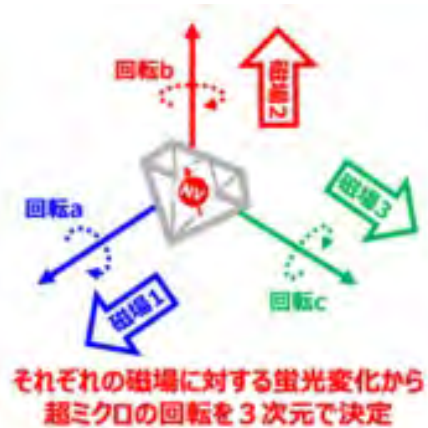


L. M. Pham et. al., "Magnetic field imaging with nitrogen-vacancy ensembles", New J. Phys. 13, 045021 (2011).

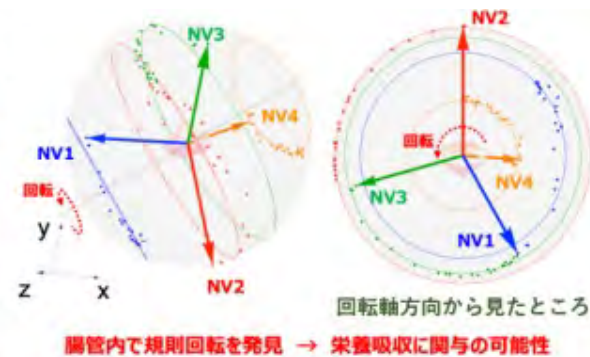
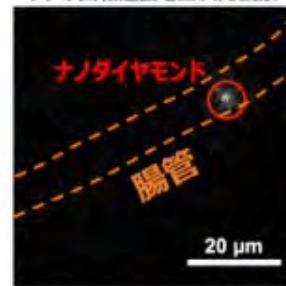
水落憲和, NV 中心の物理と応用への魅力, 応用物理, 第87巻 第4号, 251-261 (2018)

ナノダイヤモンドNVセンターの生体計測応用

生きた細胞における生体分子の微細な3次元の回転運動を計測



線虫腸内にナノダイヤモンドを配置
ナノの回転運動を3次元観察

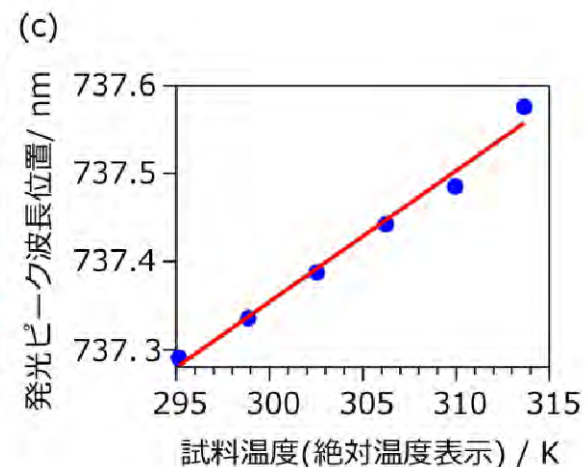
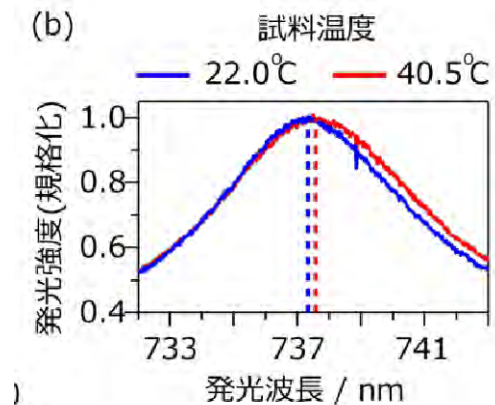
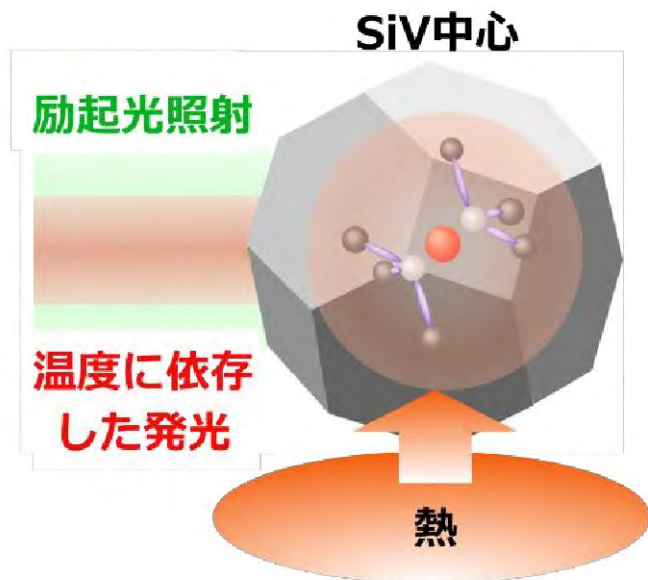


R. Igarashi *et al.*, Tracking the 3D Rotational Dynamics in Nanoscopic Biological Systems, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 16, 7542–7554 (2020)

ダイヤモンド中のSiVセンター (NV中心以外の欠陥利用)

シリコン-空孔 (SiV) 中心を含む爆轟 (ばくごう) ナノダイヤモンド (SiV-DND) を用いた高感度温度計測

ダイヤモンド中のSiV中心は鋭い発光スペクトルを示し、ピーク波長の温度依存性を利用し、光のみ (マイクロ波無し) で温度変化を感度よく検出。

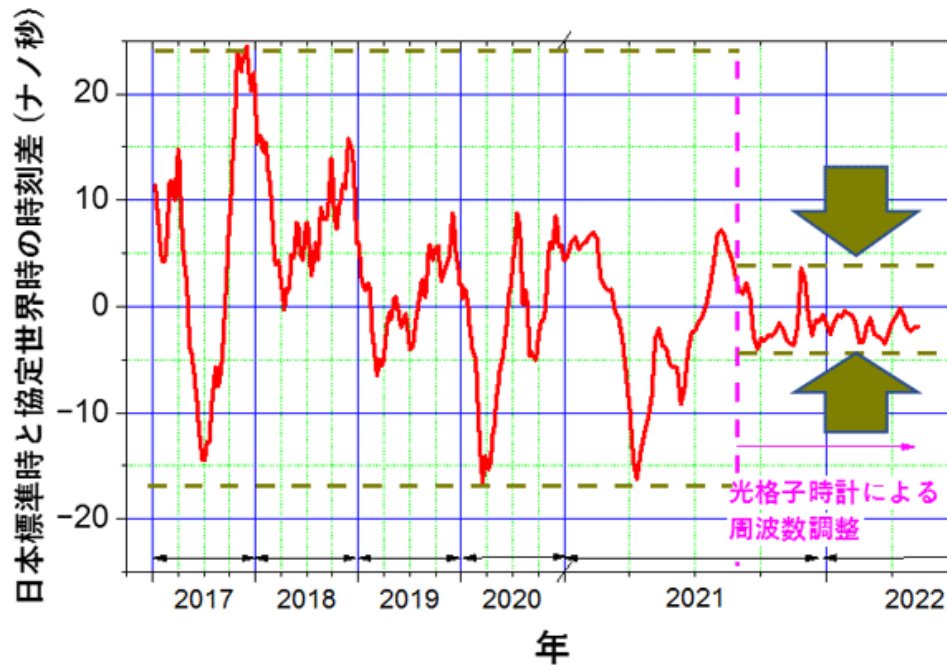
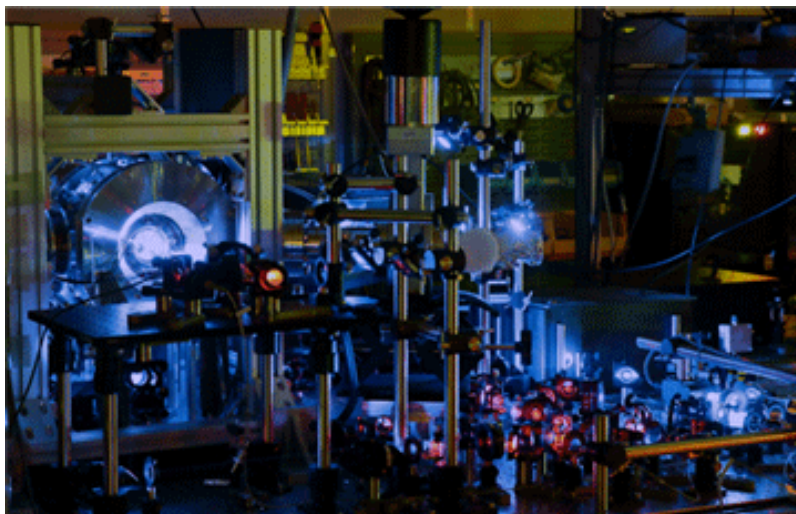


M. Fujiwara *et al.*, *Carbon*, vol. 198, pp. 57–62, Oct. 2022, doi: [10.1016/j.carbon.2022.06.076](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.076).

光格子時計

光格子時計を参照した国家標準時生成

UTCやGPS時刻等他国の時計に頼ることなく長期にわたり正確な時刻を刻むことが可能。

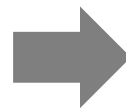
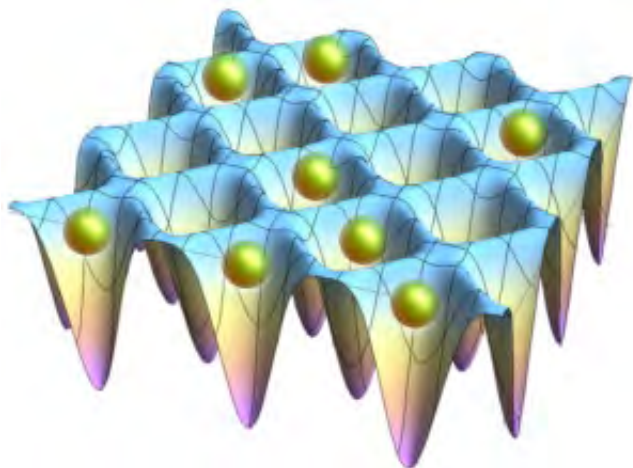


情報通信研究機構, 「世界初、国家標準時の維持に光格子時計を利用～NICTが持つ時計のみで協定世界時との同期が可能に～」 (2022年6月9日プレスリリース)
<https://www.nict.go.jp/press/2022/06/09-1.html>

光格子時計による相対論的測地

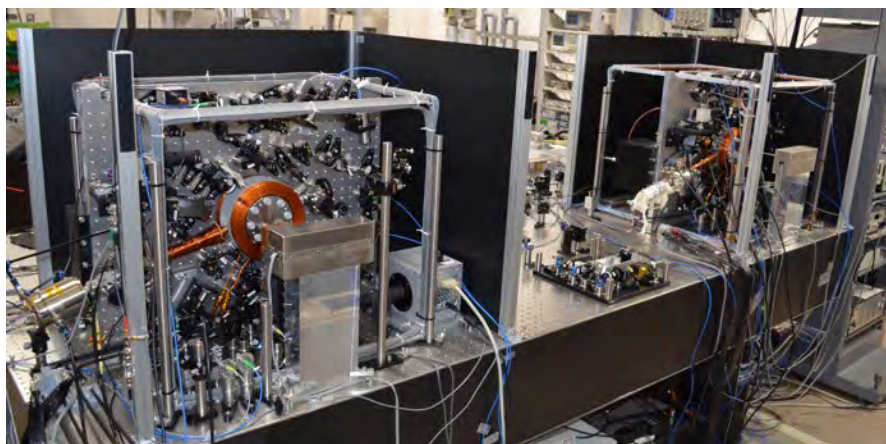
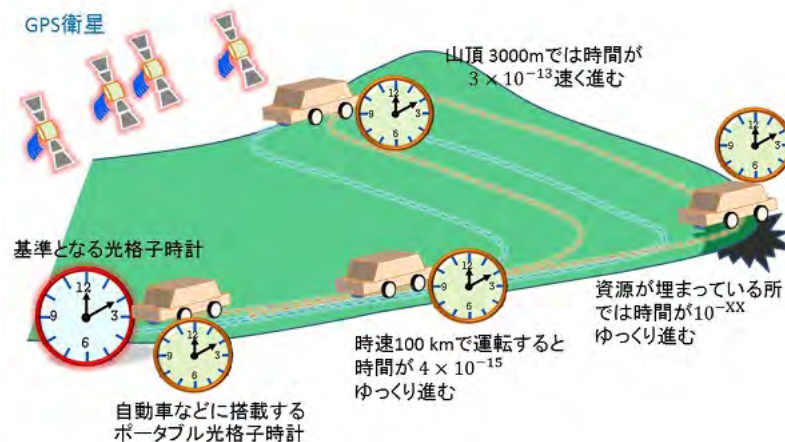
18桁の精度の時計

(cf. 現在の秒の定義：16桁@Cs原子時計)



重力ポテンシャル計

(相対論効果による「時計のズレ」を測定)



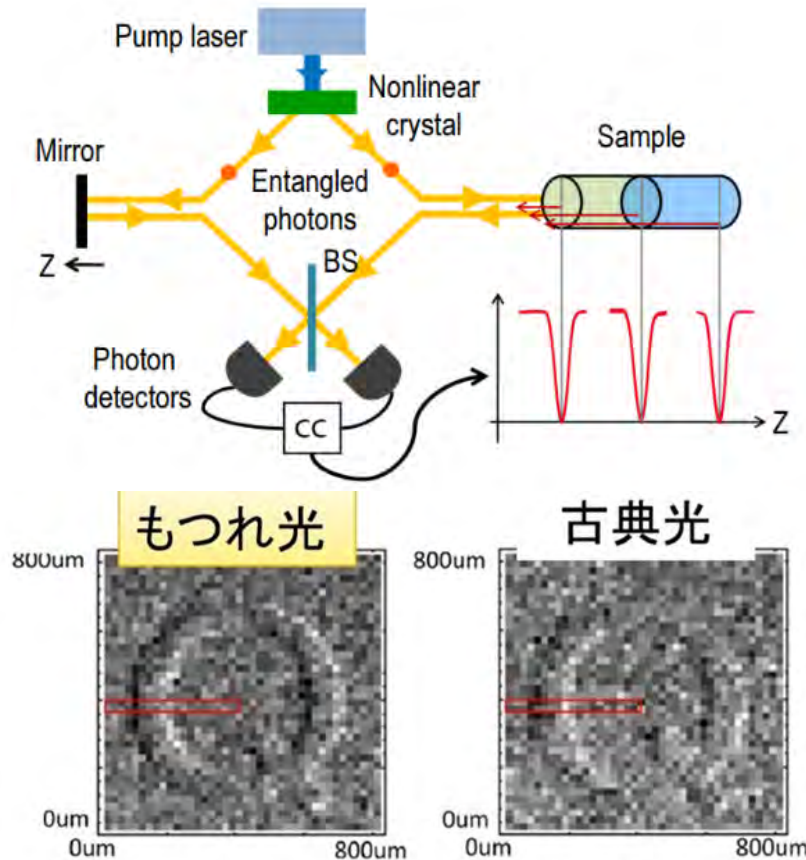
https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f_00063.html

I. Ushijima et al., "Cryogenic optical lattice clocks", Nature Photonics 9, 185–189 (2015)

量子もつれ光子を用いたセンシング・イメージング

量子光コヒーレンストモグラフィ (QOCT)

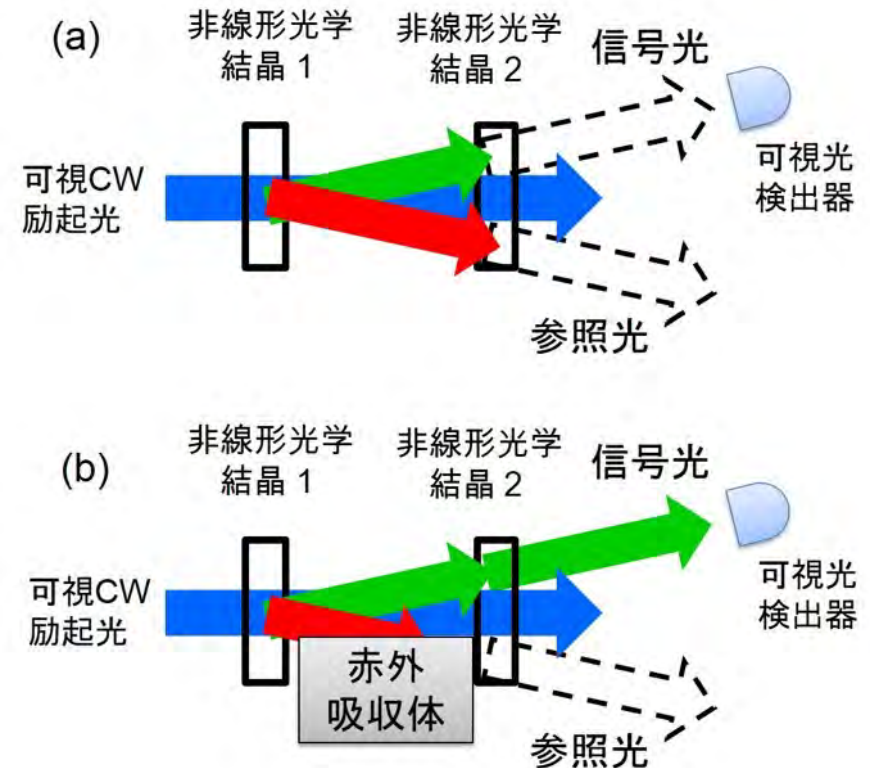
量子もつれ光子対によるOCTの高度化



<https://qforum.org/topics/interview16>

赤外量子吸収分光測定 (IR-QAS)

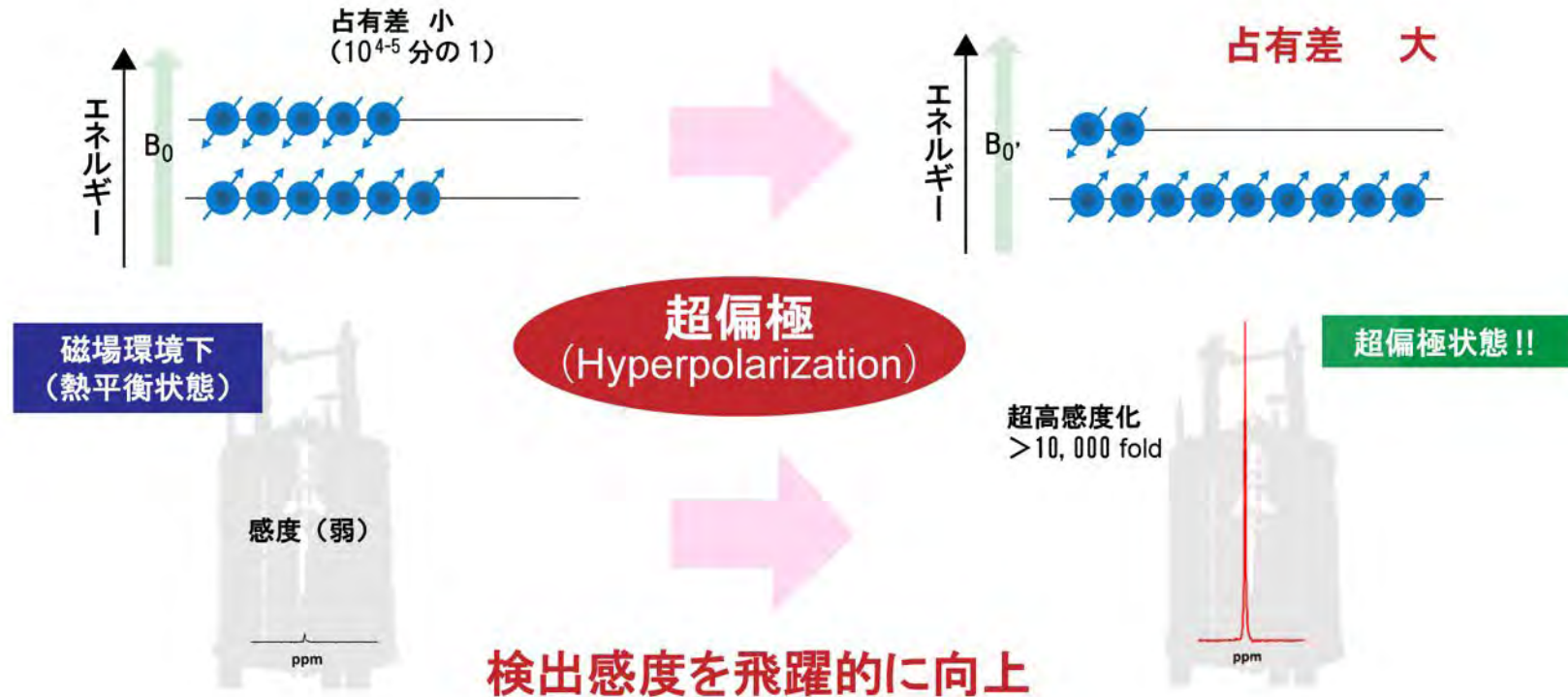
赤外吸収を可視光のシグナル光子で検出



Q-LEAP 「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」
<https://photonsensing.org/irqas/index.html>

超偏極MRI

核スピンの向きを揃えることで、超高感度のMRIを実現する



<https://www.qst.go.jp/site/iqls/44735.html>

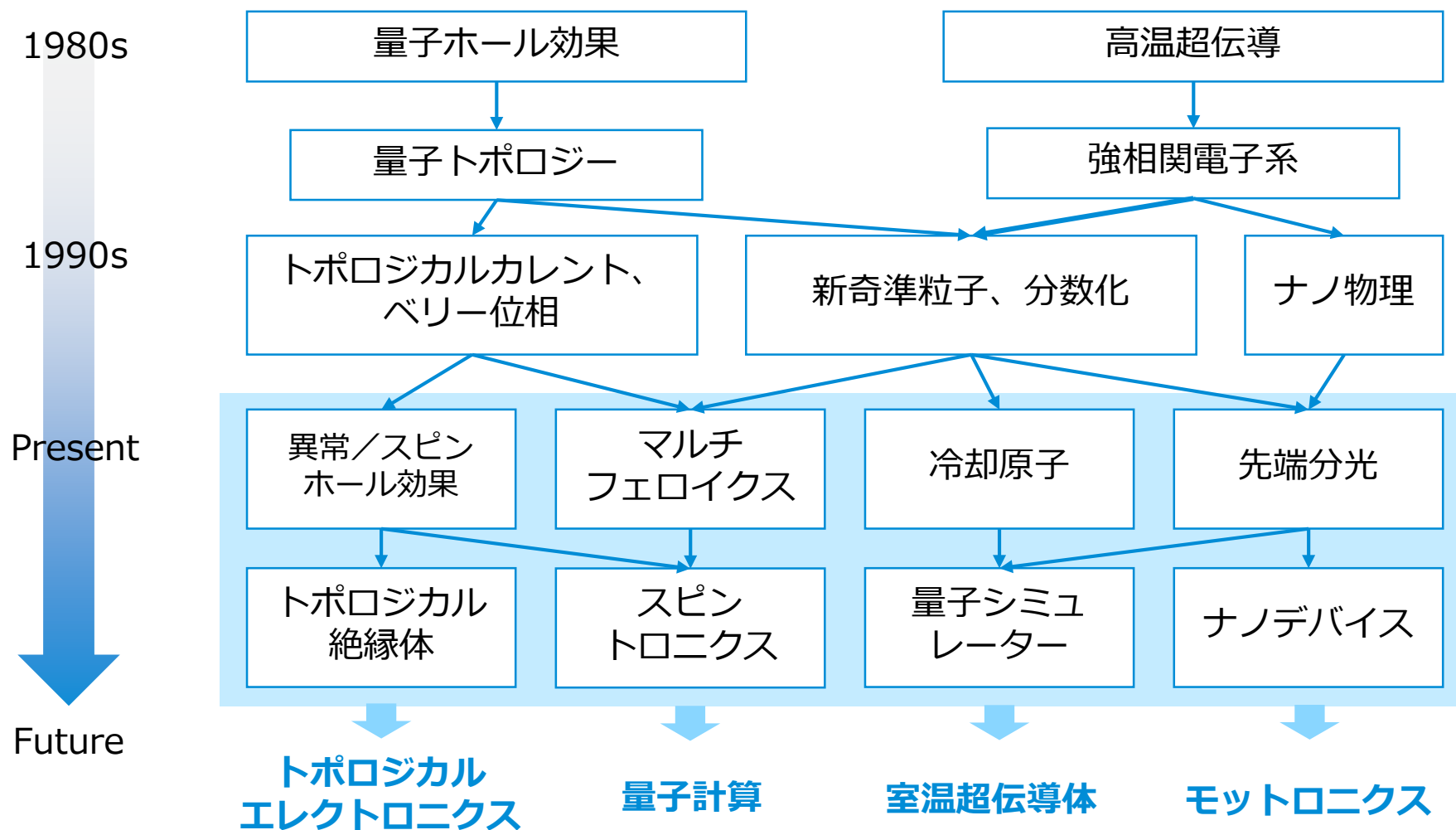
2. | 量子マテリアル

主要国のR&D動向

量子マテリアル

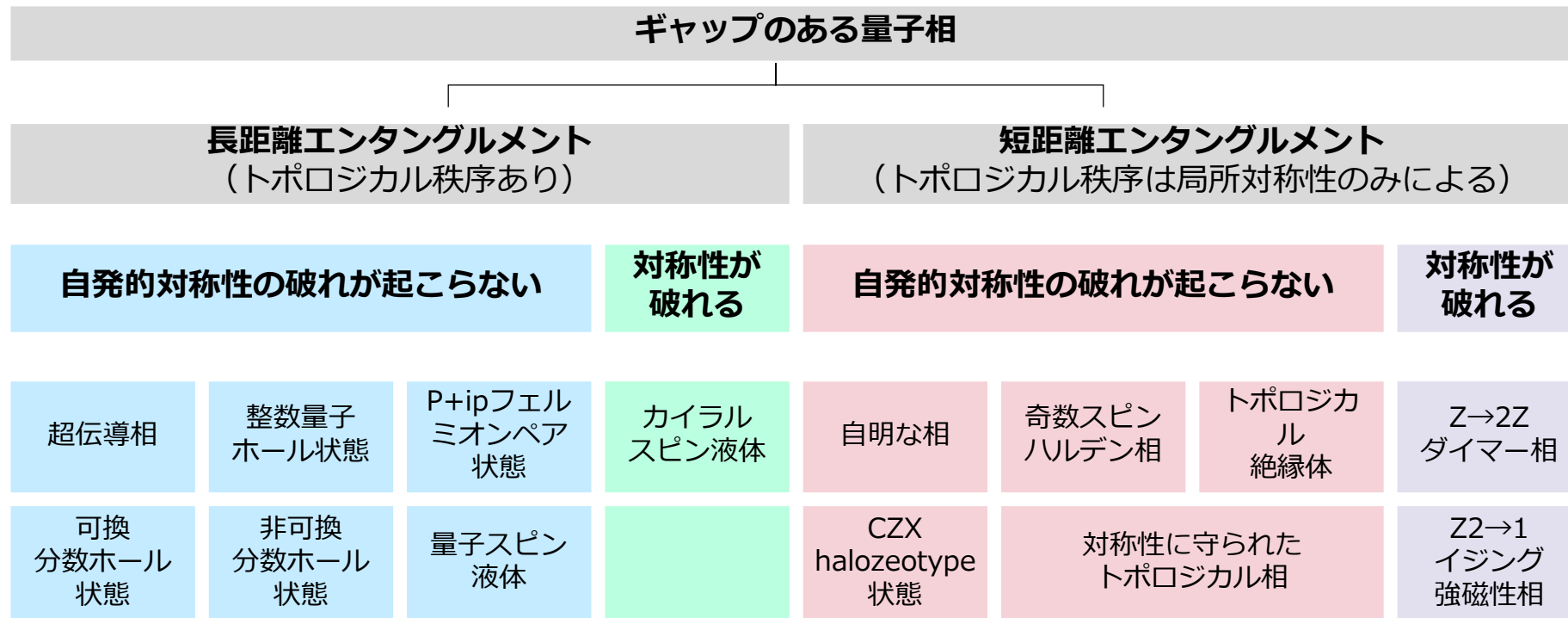
- 米国ではDOE管轄のもと、4年間で約20億円の予算がAMES研究所を中心としたCenter for the Advancement of Topological Semimetals (CATS) に投資され、新しい磁気トポロジカル半金属物質の開発、薄膜とヘテロ構造での新しい量子状態の開発、トポロジカル状態の動的操作の3本柱を実施中。
- 欧州では、反強磁性スピントロニクスの実現を目指したAntiferromagnetic spintronics (ASPIN)や新規トポロジカル物質・トポロジカル物性の開拓を目指すTopological materials: New Fermions, Realization of Single Crystals and their Physical Properties (TOPMAT)がある。また、ドイツではスピнкаロリトロニクスに関するSpin Caloric Transport (SpinCAT)、スキルミオンを含む実空間でのトポロジカルスピンソリトンを用いたデバイスとアプリケーション開発を行うTopological Spin Phenomena in Real-Space for Applications (Skirmionics)などがある。
- 日本では、JSPS学術変革領域 2.5次元物質科学、NEDOエネルギー・環境新技術先導研究プログラム「二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において、二次元物質の物性研究や応用に向けた研究開発を実施。CREST「トポロジー」は、トポロジカルな性質を利用した革新的機能を有する材料・デバイスの創出の取り組み。
- 中国では、トポロジカル半金属、強相関電子系、フラストレートした磁性体、反強磁性スピントロニクス、等、多岐に渡る研究が実施されている。精華大学では反強磁性スピントロニクスの研究を推進しており、予算は公開されているだけでも総額70億円/年。

量子マテリアル



Y. Tokura, M. Kawasaki, N. Nagaosa, "Emergent functions of quantum materials", Nature Physics 13, 1056 (2017).

物質の量子相

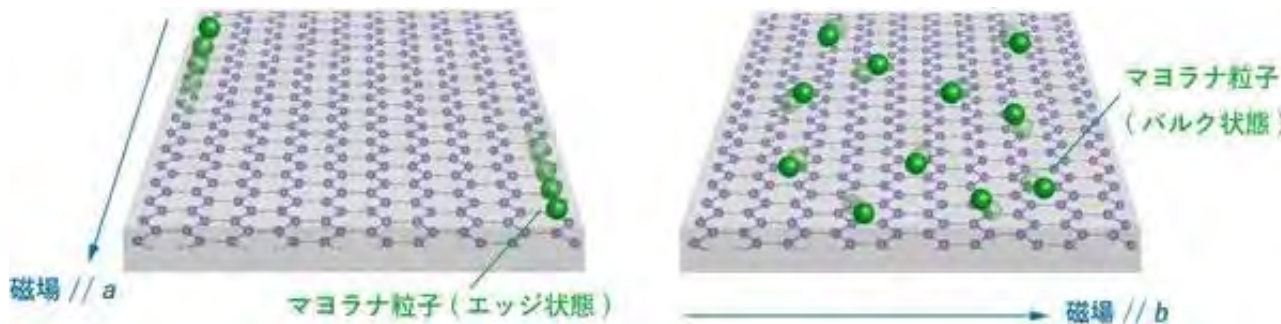


<https://www.quantamagazine.org/physicists-aim-to-classify-all-possible-phases-of-matter-20180103/>

トポロジカル量子コンピュータの実現に向けた基礎研究

磁性絶縁体内部で現れるマヨラナ粒子の性質を観測

Kitaev模型を実現する候補物質である α - RuCl_3 （塩化ルテニウム）におけるマヨラナ粒子の振る舞いについて、理論の予測と非常によく一致する磁場方向依存性を観測



- 磁場を a 軸方向に向けた際（左図）では、試料端におけるエッジ状態としてマヨラナ粒子の流れが出現。
- 磁場を b 軸方向に向けた際（右図）では、試料内部においてバルク状態としてマヨラナ粒子が多く励起。

O. Tanaka *et al.*, Thermodynamic evidence for a field-angle-dependent Majorana gap in a Kitaev spin liquid, *Nat. Phys.* 18, 4, 4 (2022)

トポロジカル量子コンピュータ

- トポロジーを用いて量子情報を保護
- 非可換エニオン粒子の入れ替えが量子計算のステップの一部
- 非可換エニオン粒子はマヨラナ粒子で構成

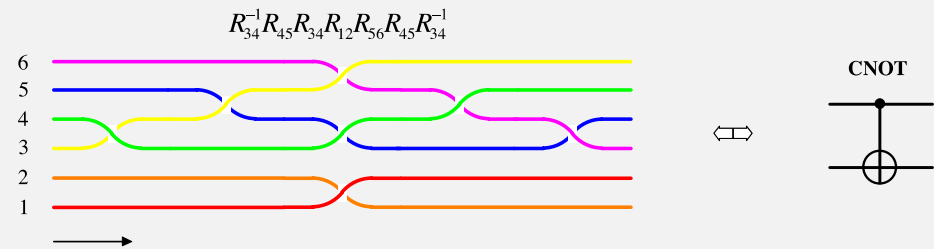


Fig. 10 The CNOT gate realized by braiding of 6 Ising anyons and its quantum computation symbol.

L. S. Georgiev, "Topological Quantum Computation with Non-Abelian Anyons in Fractional Quantum Hall States." arXiv 1602.05035.