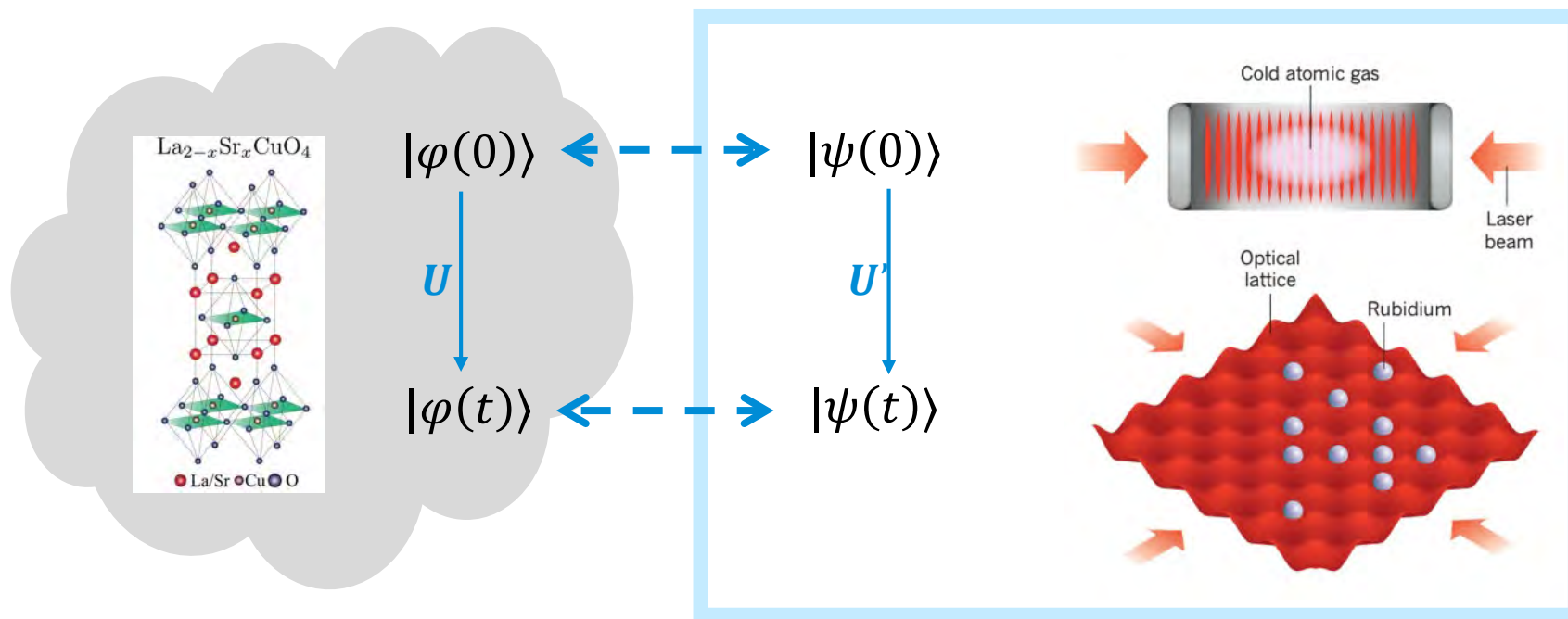


# 量子シミュレーター

## 量子版“風洞実験装置”（アナログ量子コンピューター）

古典コンピューターでシミュレートすることが難しい問題を、人工量子系にマップしてシミュレーション（自然計算）



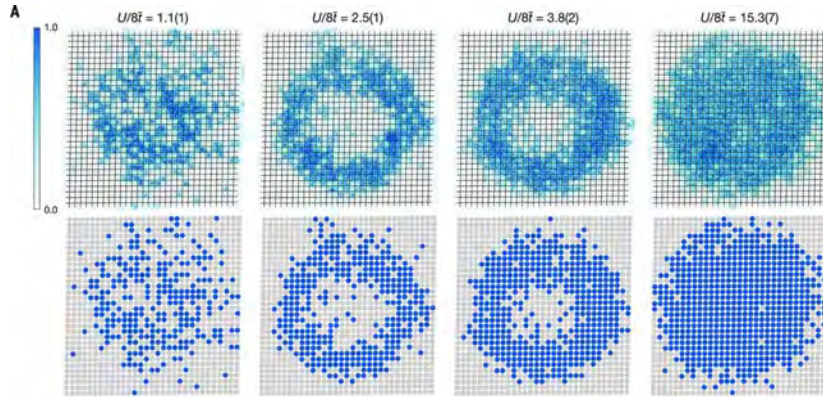
cf) 風洞実験

Geoff Brumfiel, “Simulation: Quantum leaps”, Nature 491, 7424,322 (2012).



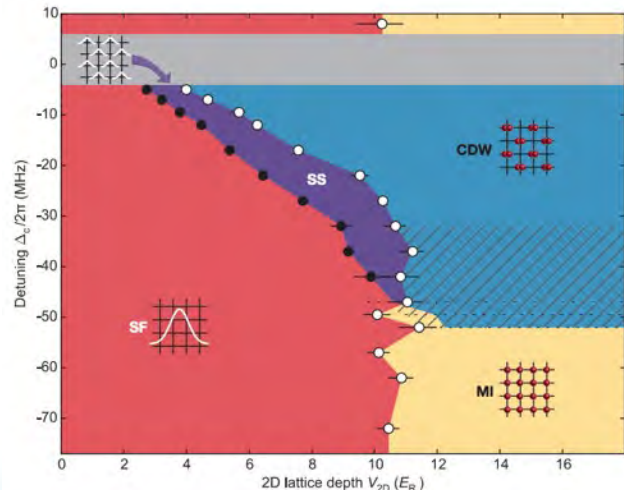
# 冷却原子量子シミュレーター上の量子マテリアル

## モット絶縁体



D. Greif et. al., Science 351, 953 (2016).

## 長距離相互作用



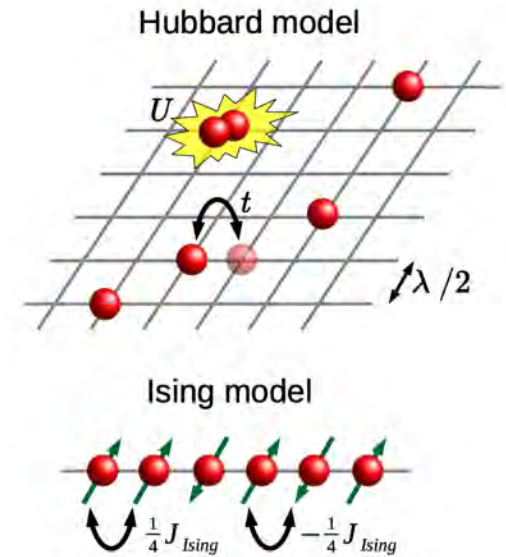
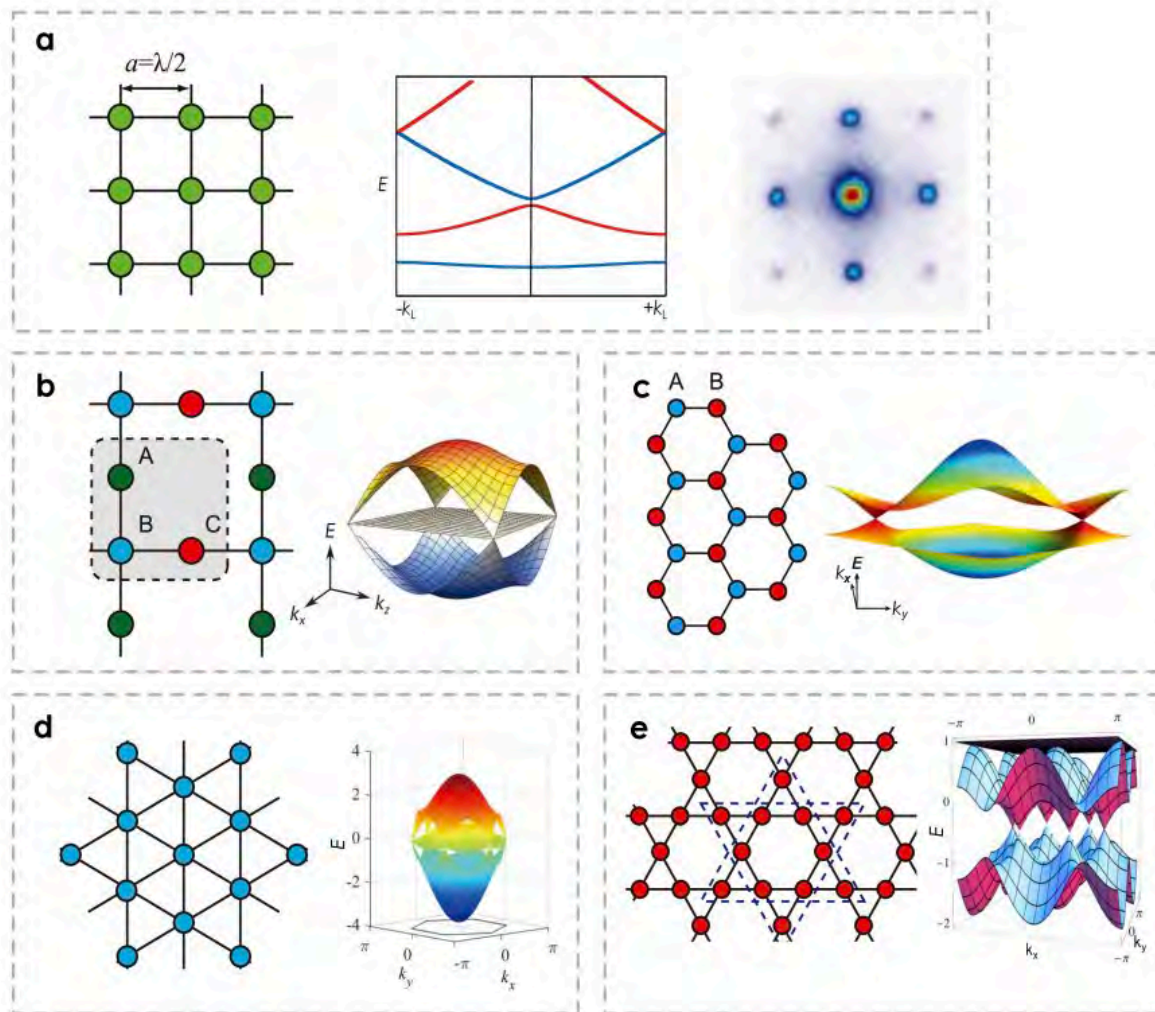
R. Landig et. al., Nature 532, 476 (2016).

	電子	冷却原子
統計性	フェルミオン	ボソン、フェルミオン
スピン	1/2	整数, 半整数
質量	$m_e$	$>10000 m_e$
格子定数	$\sim 0.5 \text{ nm}$	$\sim 500 \text{ um}$
フェルミ温度	$\sim 10000 \text{ K}$	$\sim 100 \text{ nK}$
相互作用	クーロン, 長距離	ファン・デル・ワールス

F Schäfer et al., Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices, Nature Reviews Physics 2, 411-425 (2020)

# 量子シミュレーター上の量子マテリアル

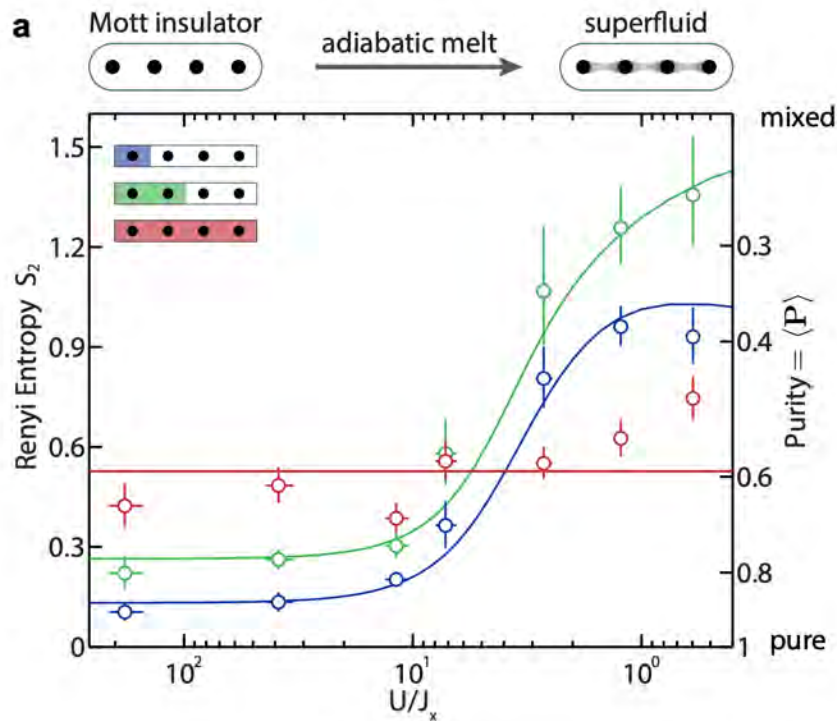
## 様々な自由度を利用可能



F Schäfer et al., Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices, Nature Reviews Physics 2, 411–425 (2020)

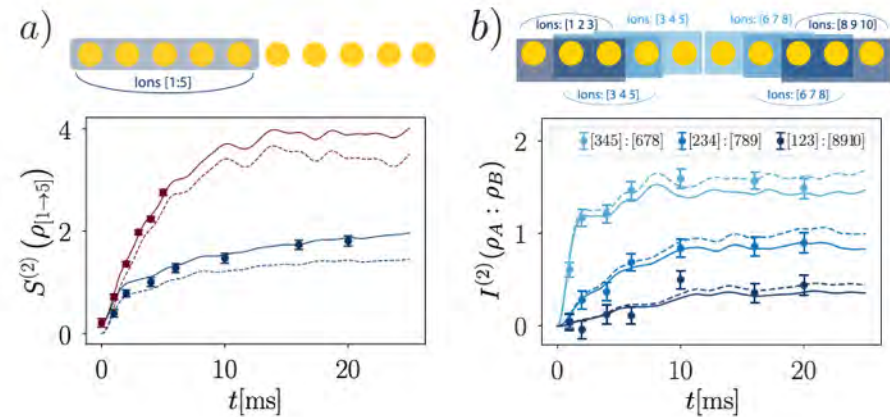
# エンタングルメントエントロピーの測定

## Cold atom in optical lattice



R. Islam et. al., Measuring entanglement entropy through the interference of quantum many-body twins, Nature 528, 77-83 (2015).

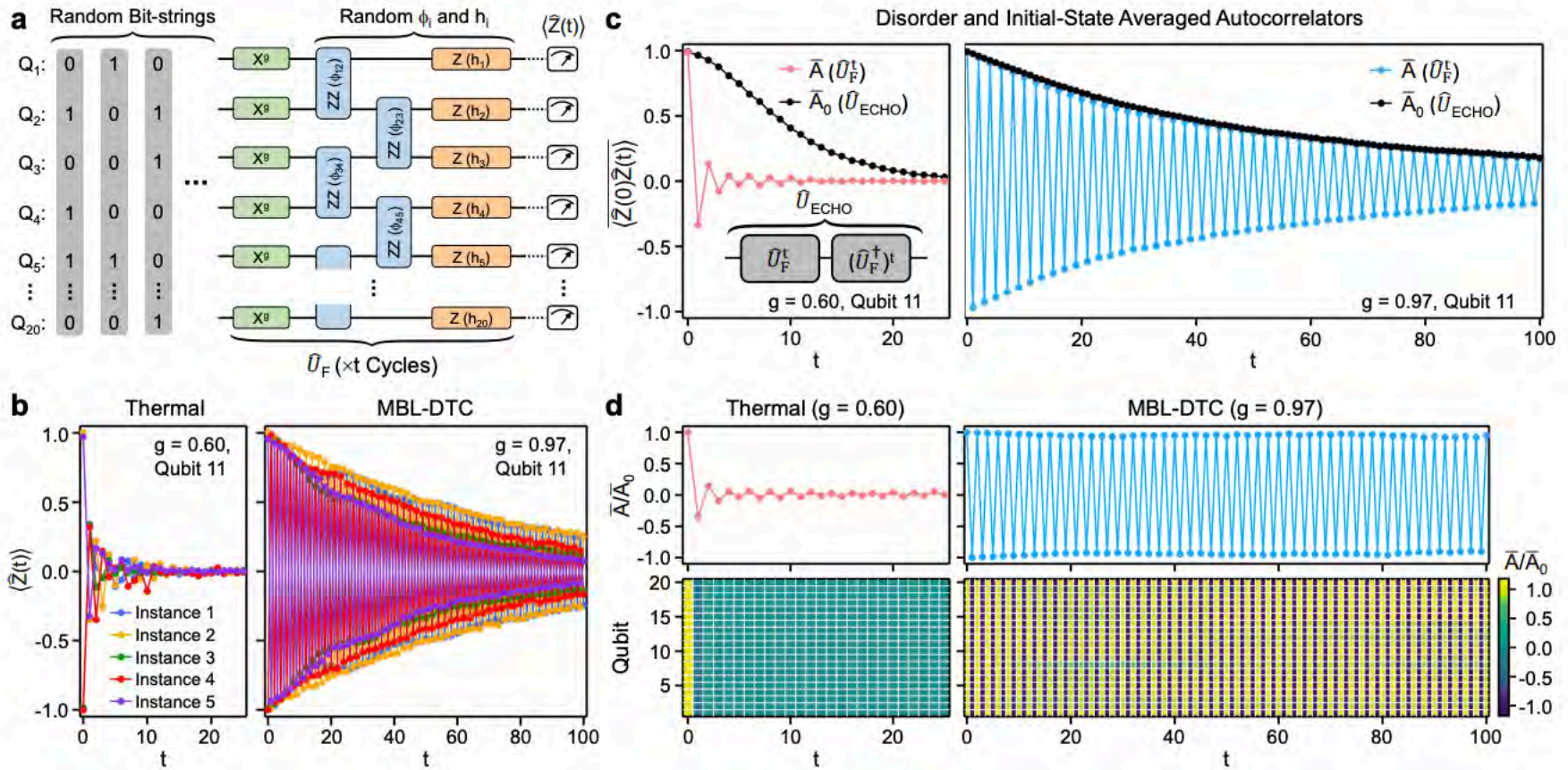
## Trapped-ion Quantum simulator



T. Brydges et. al., Probing Rényi entanglement entropy via randomized measurements, Science 364, 6437, 260-263 (2019).

# 量子シミュレーター上の離散時間結晶

量子コンピューター（超伝導）を利用して量子シミュレーション



Google Quantum AI and collaborators, "Observation of Time-Crystalline Eigenstate Order on a Quantum Processor", arXiv:2107.13571

# 量子物性×量子情報

## 量子情報

量子計算、量子通信  
計算複雑性、アルゴリズム  
量子シミュレーション  
トポロジカル量子計算  
量子誤り訂正符号  
量子テレポーテーション  
エンタングルメントエントロピー  
人工量子系（超伝導、量子ドット）  
冷却原子、イオントラップ  
量子光学  
非平衡量子系



## 量子物性

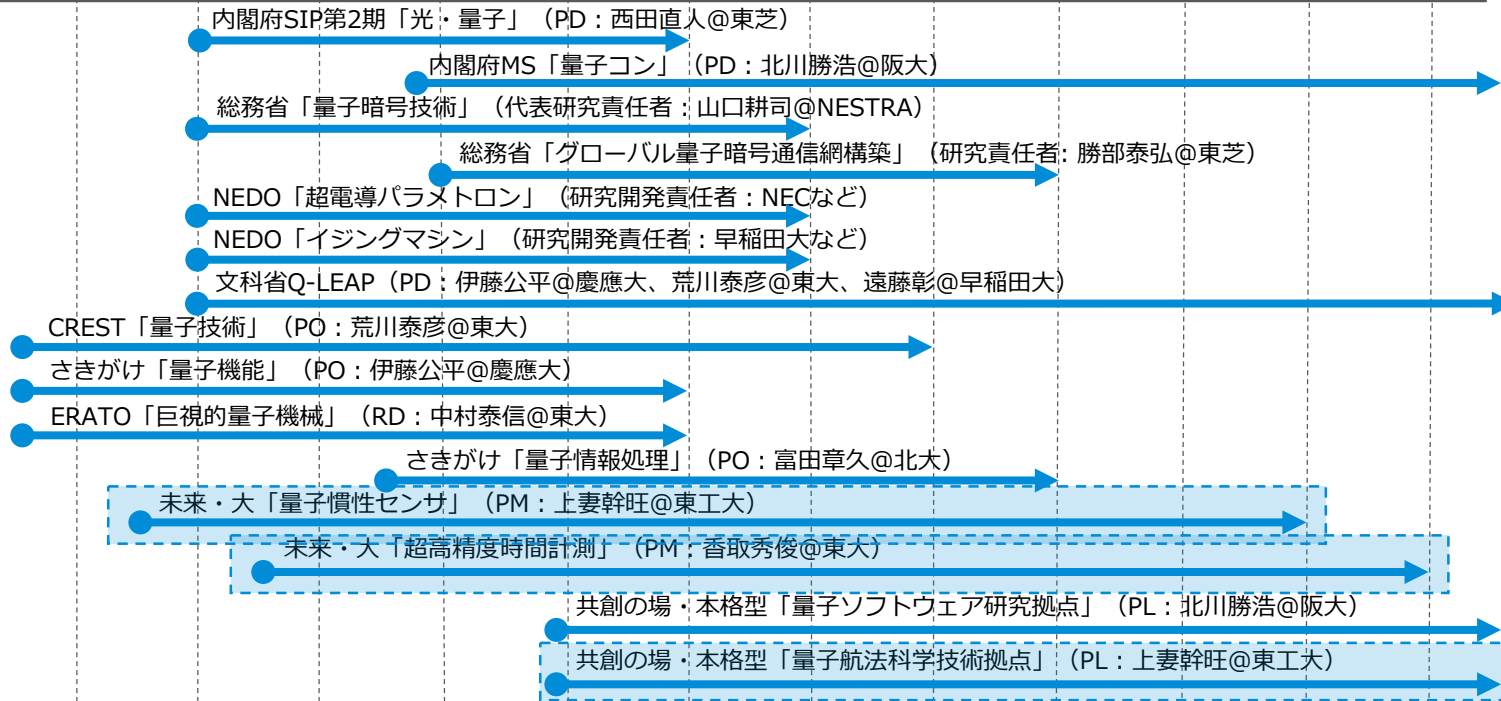
強相関電子系  
量子スピン液体  
二層グラフェン、2.5次元系  
新奇超伝導体  
トポロジカル量子物質  
トポロジカル相  
マヨラナなど準粒子  
非平衡量子系  
分数量子ホール効果  
スピントロニクス  
磁気スキルミオン

## **3. | 海外動向・各国の政策状況**

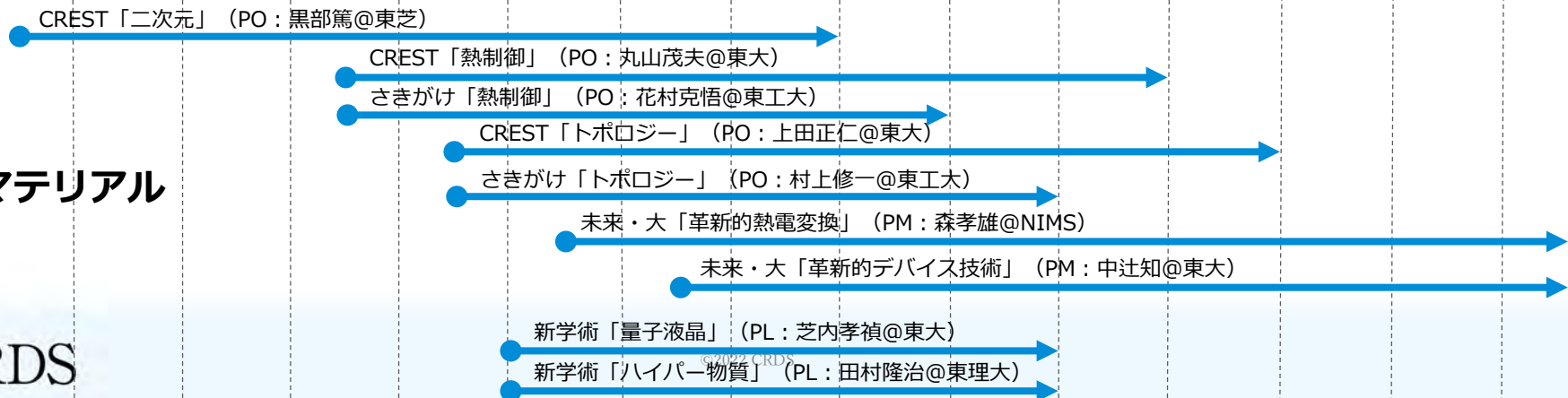
# 日本の量子技術関連PJ

FY2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028

## 量子情報技術

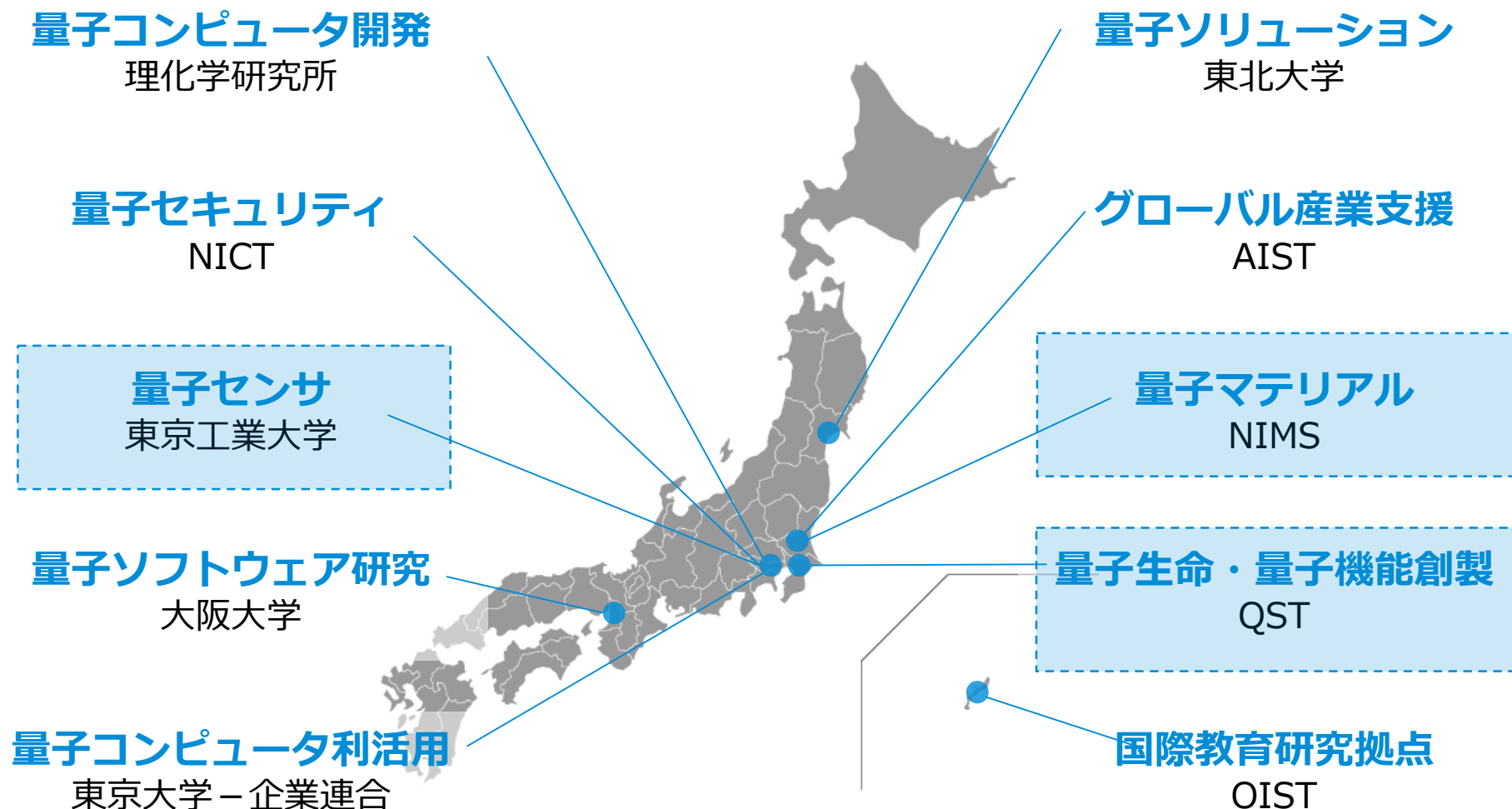


## 量子マテリアル





# 量子技術イノベーション拠点



# 国内企業動向

企業	方式	概要
NTT	超伝導量子ビット	2019年に、超伝導量子ビットによる高感度・高空間分解能電子スピン共鳴に成功。マイクロメートル領域での電子スピンの高感度検出に繋がる成果。（CREST[量子技術]の成果）
デンソー、日立製作所、矢崎総業	ダイヤモンドNV中心	Q-LEAP量子計測・センシング領域 FP に参画。
村田製作所、島津製作所、堀場製作所、ニコン、ビジョン開発、ナノ炭素研究所、ソーラボジャパン	ダイヤモンドNV中心	Q-LEAP FP 量子生命領域の「生体ナノ量子センサ」研究に参画。プローブ開発、装置開発を担当。
日本レドックス	超偏極MRI	北大・東大との共同で、純国産の <sup>13</sup> C励起装置の製品化を進めている。2021年度中に、小動物イメージング用装置の国内販売を開始予定。（AMED先端計測）
JEOL RESONANCE、東レリサーチセンター、大陽日酸	超偏極MRI	Q-LEAP FP 量子生命領域の「量子技術を用いた超高感度MRI/NMR」研究に参画。超偏極プローブ、装置開発を担当。
島津製作所	量子もつれ光	京大・NICTとの共同（Q-LEAP）、あるいは京大・九大・広島大・北里大との共同（CREST[量子技術]）で、量子もつれ分光法開発や、量子・古典ハイブリッド光断層撮影システム構築などを実施。島津製作所は主に光学素子開発を担当。

# 量子スタートアップ (量子計測・センシング)

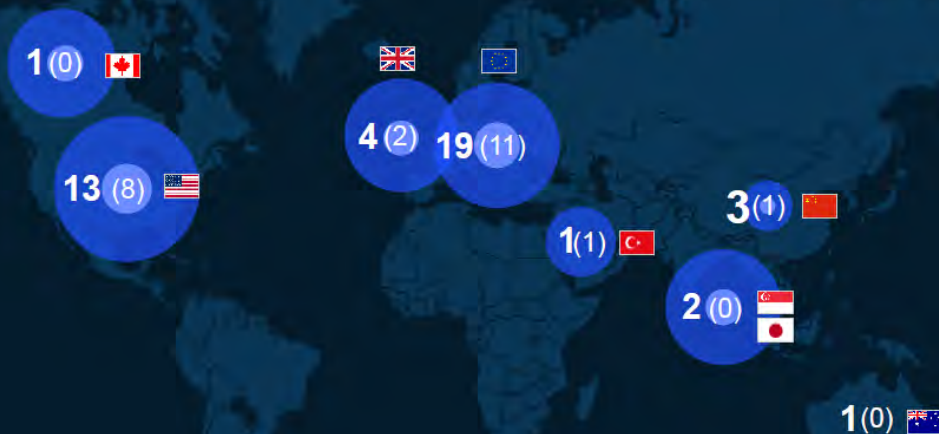
量子計測・センシングのスタートアップ企業が過去5年間で2倍に

**The amount of players in QS has nearly doubled over the last 5 years; however, numbers are still modest**

Number of QS start-ups (excluding China), by region (today, and 2015 in brackets)

Not exhaustive

● 2021 ● 2015



Source: CapitalIQ; Crunchbase; Pitchbook; press search; Quantum Computing Report; expert interviews; McKinsey analysis

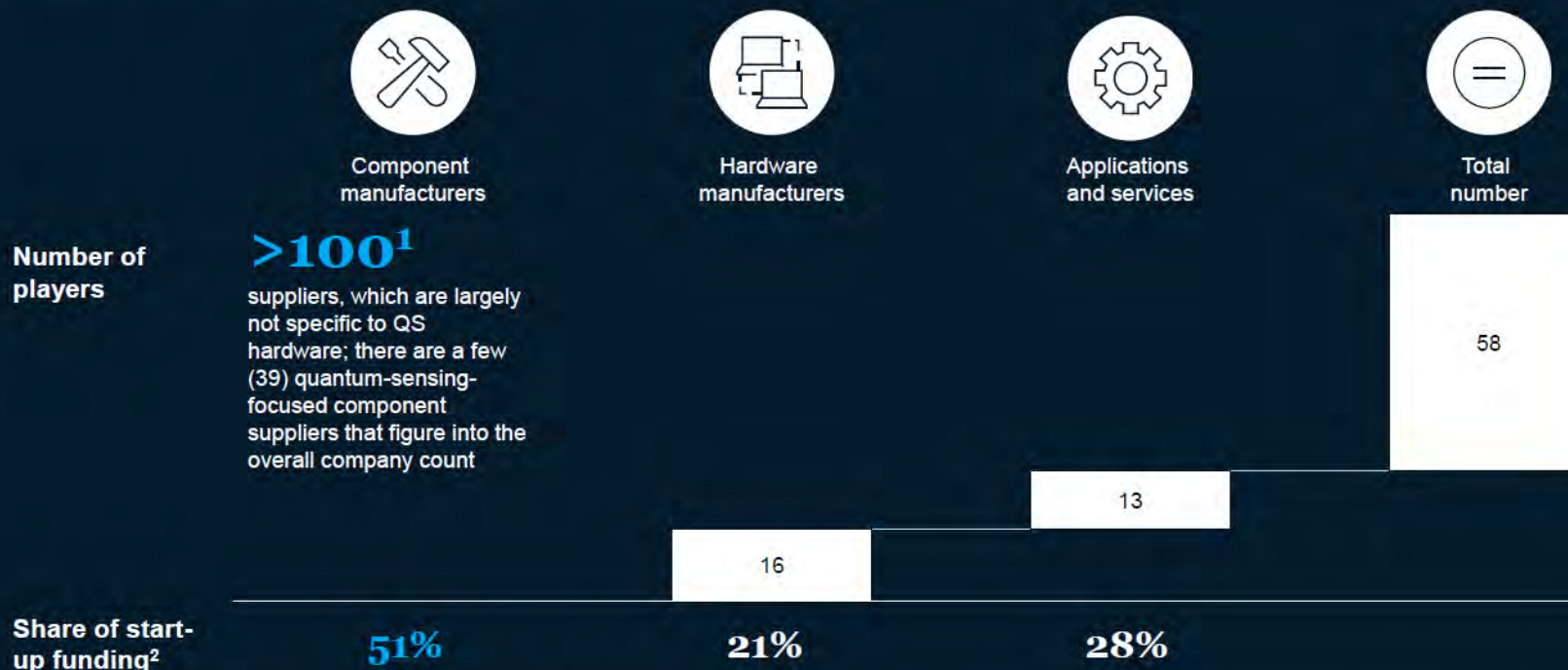
McKinsey & Company 31

# 投資動向（量子計測・センシング）

## 部品メーカーへの投資が半分を占める

### Overall investment in QS is still low, with majority of players and funding in components

Number of QS players by value chain segment<sup>1</sup>



1. Includes start-ups and incumbents that develop or offer QT products; see methodology page for details

2. Based on public investments in start-ups recorded on Pitchbook and announced in the press. Includes announced deals for 2021; excludes investments in internal QT departments or projects by incumbents; actual investment is likely higher

Source: CapitaIQ; Crunchbase; Pitchbook; press search; Quantum Computing Report; expert interviews; McKinsey analysis

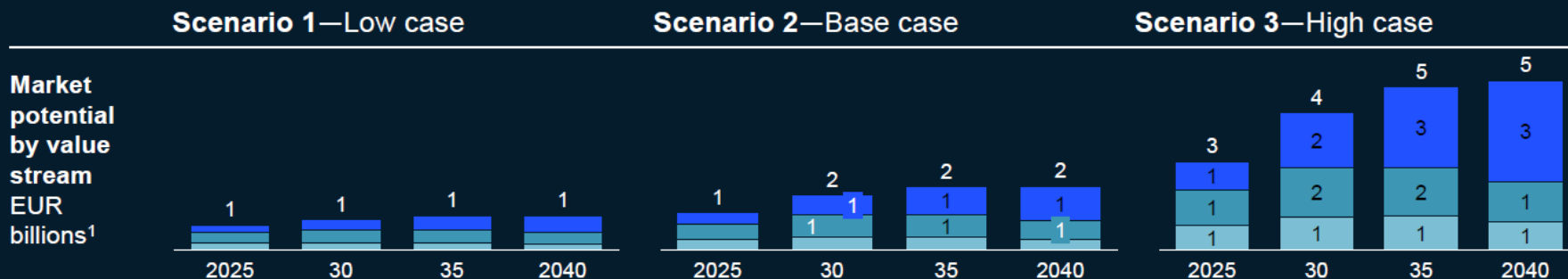
# 世界市場予測（量子計測・センシング）

量子計測・センシングの2040年における世界市場規模は \$1 bn~\$7 bn の予測

## Methodology (4/4)

QSmarket potential

■ Proceeds to Quantum providers ■ Investments into value chain ■ Investments into applied research



### What you need to believe

Quantum sensors remain costly with a large footprint  
Only ~2 use cases scale well with most applications focused on scientific use

Some quantum sensors become smaller and increasingly implemented in further products  
Commercial applications requiring ultra high precision is limited, approx. one scaling use case per main category of sensing (see below)

Quantum sensors successfully reduce their footprint and costs  
Many new applications for ultra high fidelity sensors arise, and sensors are used in many products, with ~3 use cases per main category of sensing

### Overall assumptions

Market potential determined by sizing possible use cases into 4 categories: NV sensors, optical atomic clocks, gravity sensors, and photonic entanglement sensors – excluding “Quantum 1.0” sensors like MW atomic clocks/SQUIDs  
VC / corporate investment partially shifts to QC/QComms once they significantly outgrow sensing

1. Totals might differ due to rounding effects

Source: McKinsey analysis

McKinsey & Company 44

# 技術領域別世界研究費推計ランキング (量子センシング)

技術領域別世界研究費推計ランキング  
:US\$ 18.6Bil (2009-2018 年積算推計)

順位	国	量子センシング・ 量子センサー 全体 (Mil-US\$)	スピン量子計測 (Mil-US\$)	光量子計測 (Mil-US\$)	量子計測基盤技術 (Mil-US\$)
1	米国	2100	860	400	500
2	中国	1500	730	300	180
3	英国	1300	890	540	100
4	日本	560	150	150	340
5	スイス	260	80	50	40

アスタミューゼ「今からでも遅くない！ 各産業のゲームチェンジャーとなりえる 量子技術の導入・R&D 投資は 最新萌芽技術の選択が決め手 (全 8 回) ~世界の研究開発動向と有望技術解説~ 第4回 量子センサーのこれまでとこれからのプレイヤー」(2020年8月7日)  
<https://www.astamuse.co.jp/report/2020/0807/report.pdf>

# (米国) NSF傘下の量子研究拠点

## Quantum Leap Challenge Institutes (QLCI-CI) (各CIに \$25M/5年間)

### 【Round I, 2020~2025年】

<https://www.colorado.edu/research/qsense/>

#### Q-SEnSE · Quantum Systems through Entangled Science and Engineering

(代表 : U. Colorado Boulder)

- 量子センサー技術の設計、構築、採用を行い、精密測定の幅広い応用の実現を目指す。

#### HQAN · Hybrid Quantum Architectures and Networks

<https://hqan.illinois.edu/>

(代表 : U. Illinois)

- 小規模な量子プロセッサを相互に接続したネットワークを構築し、分散型量子処理による量子プロセッサのスケーリングの実現を目指す。

#### BQIC · Berkeley Quantum Information & Computation Center

<http://bqic.berkeley.edu/>

(代表 : UC Berkeley)

- 先進的で大規模な量子コンピュータの設計、効率的アルゴリズムの開発を通じ、最終的に量子コンピュータが最高の古典コンピュータを凌駕することを実証することを目指す。

### 【Round II, 2021~2026年】

#### QuBBE · Quantum Sensing for Biophysics and Bioengineering

<http://qubbe.uchicago.edu/>

(代表 : U. Chicago)

- 量子計測・イメージング技術を活用、バイオ系から新奇な情報を抽出することを目指す。

#### Institute for Robust Quantum Simulation (代表 : U. Maryland)

<https://rqs.umd.edu/>

- ロバストでスケーラブルな量子シミュレーションの開発と複雑量子系の理解を目指す。



# (米国) DoE傘下の量子研究拠点

(各センターに \$125M (最大) /5年)

## Quantum Information Science (QIS) Research Centers

### Q-NEXT (Next Generation Quantum Science and Engineering/アルゴンヌ国立研究所)

- 量子暗号・通信開発のためのエコシステム構築。量子デバイスのためのマテリアル研究からネットワークテストベッド構築まで幅広く行う。

### C<sup>2</sup>QA (Co-design Center for Quantum Advantage/ブルックヘブン国立研究所)

- 高エネルギー・核物理、化学、マテリアル科学、コンデンスドマター物理のためのコンピューテーション研究。量子優位性を持つハード、ソフト、量子誤り訂正などを開発。

### SQMS (Superconducting Quantum Materials and Systems Center/フェルミ国立加速器研究所)

- 量子コンピュータ、量子センサのための優れた**量子デバイス開発**を目指した超伝導デバイスのデコヒーレンス機構の理解と除去の研究、および量子デバイスファウンドリー構築。

### QSA (Quantum Systems Accelerator/ローレンスバークレー国立研究所)

- 科学研究応用のための、量子優位性を満たす量子デバイス、量子アルゴリズムなどの設計。量子デバイス（原子、イオン、超伝導回路）とアルゴリズムを組み合わせることで最適な応用を実証する。

### QSC (The Quantum Science Center/オークリッジ国立研究所)

- レジリエンス、制御性、スケーラビリティのある**量子デバイス**を実現するための、革新的トポロジカル量子材料とアルゴリズム、センサーを発見、設計、実証することを目指す。



# (米国) DARPAの量子プログラム (計測・センシング)

## Quantum Imaging of Vector Electromagnetic Radiation (QuIVER) (2020～)

磁場テンソルを形成するベクトル場の空間導関数を測定できる配列ベクトル磁気計を開発し、地磁気から計測対象の磁性体を識別して位置同定が可能な計測技術を開発することを目指す。

<https://www.darpa.mil/program/quantum-imaging-of-vector-electromagnetic-radiation>  
<https://www.darpa.mil/attachments/DARPAJBookFY21.pdf>

## Quantum Apertures (QA) (2021～)

DARPA QuASARプログラムで実証された、Rydberg原子をプローブとして用いる電界計測技術を活用して、高感度ラジオ波 (RF) 受信技術を確立することを目指す。

<https://www.darpa.mil/program/quantum-apertures>

## Science of Atomic Vapors for New Technologies (SAVaNT) (2021～)

原子蒸気を用いた電場検出、磁場検出、およびキャビティQED実証を目指す。

<https://www.darpa.mil/program/science-of-atomic-vapors-for-new-technologies>  
<https://www.darpa.mil/news-events/2021-09-03>

## Robust Optical Clock Network (ROCKN) (2022～)

分散型コヒーレントセンシングなどに求められる時間精度を提供する小型ポータブルクロック開発と、GPS品質の正確な時刻と自律動作を1か月間保持可能な可搬型時計の開発を目指す。

<https://sam.gov/opp/70aeb3042e6f4647a5e857462c67bd35/view>  
<https://www.darpa.mil/program/robust-optical-clock-network>

# (米国) Joint Quantum Institute (JQI)

- メリーランド大学 (UMD) と米国国立標準技術研究所 (NIST) の間での基本合意書に基づいて2006年9月11日に設立。基本年間予算は約600万ドル<sup>1)</sup>。
- 研究者 (fellow) は主にUMD物理学科、NIST、物理科学研究所 (LPS) から来ている。
- Fellow37名、研究者11名、ポスドク46名、大学院生100名が所属(2021.3.19調べ)<sup>2)</sup>。
- 研究テーマは「量子多体物理学」 「量子制御・計測・センシング」 「量子コンピューティングと情報科学」
- PFC (NSF「Physics Frontier Centers」) )、QuICSと連携。



- 2008年9月1日開始。
- Fellow25名、ポスドク7名、大学院生17名<sup>3)</sup>
- 11サイトあるPFCのうちのひとつ

## 《主要な研究テーマ》

- トポロジカルマテリアル (気体～固体)
- 光子による多体系物理
- 平衡からかけ離れた量子系のダイナミクス



CENTER FOR QUANTUM  
INFORMATION AND  
COMPUTER SCIENCE (QuICS)

- 2014年10月31日開始<sup>4)</sup>。
- UMD先端コンピュータ研究所 (UMIACS) の16のセンターの中で最新
- Fellow14名、ポスドク19名、大学院生38名<sup>5)</sup>
- CS、物理、量子情報の研究者による学際的センター
- UMD、NIST、NSA/CSS\*の間のコラボレーション拡大により、量子情報科学における国家の主導的役割を維持・強化。

1) <https://phys.org/partners/joint-quantum-institute/>

2) <https://jqj.umd.edu/people>

3) <https://jqj.umd.edu/pfc/content/about-physics-frontier-center-jqi>

4) <https://www.nist.gov/news-events/news/2014/10/umd-and-nist-announce-creation-joint-center-quantum-information-and>

5) <http://quics.umd.edu/people>

\*NSA/CSS: 国家安全保障局中央保安部

# (フランス) 国家量子戦略 (2021年1月)

- 高等教育・研究・イノベーション省 (MESRI) 発表。
- 投資額 2,300億円 (18億ユーロ) / 5年以上
- マクロン大統領がフランスの量子戦略 (Stratégie nationale sur les technologies quantiques) を発表
- 目的：産業のバリューチェーンを強化しながら、人材育成、科学研究、技術実験を大幅に強化すること。
- 目標：最終的にフランスの輸出の1~2%を占めること

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid156616/strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques.html>

## 量子戦略の7本の柱

- NISQシミュレータ・アクセラレータ (3億5200万ユーロ)
- LSQスケールに移行する量子コンピュータ (大規模誤り耐性量子コンピューター) (4億3200万ユーロ)
- **量子センサー技術・応用 (2億5800万ユーロ)**
- 耐量子計算機暗号 (1億5600万ユーロ)
- 量子通信システム (3億2500万ユーロ)
- 競争力のある実現技術 (2億9,200万ユーロ)
- エコシステム構築



# (フランス) 量子センシング関連PJ

## ASTRIDプログラムで4プロジェクトを選出 (2020年11月)

- 民生・国防両分野が関与する革新的テーマに関する研究プロジェクトを支援するASTRID プログラムで、新規に量子技術プログラムが発足。「量子センサー」「NISQ用アルゴリズム」「量子暗号通信」の3領域が対象。
- 4プロジェクトを選出 (応募9件中)。研究期間18か月～36か月、予算総額120万ユーロ。

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid156616/strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques.html>

### CARDAMONE プロジェクト (U. Paris-Saclay)

電磁界の検出とイメージングのための **Rydberg 原子センサー**の実験・理論的研究開発。

### CoQuIA プロジェクト (SYRTE)

慣性航法などを実現する**原子干渉計センサー**の開発。

### QPEG プロジェクト (Bull SAS社 – ATOS社)

数100量子ビットの量子コンピュータをシミュレートできるアルゴリズム開発。

### SoLuQS プロジェクト (U. Côte d'Azur)

人工衛星を使った量子通信のための宇宙／地上通信リンクのための技術開発。

<https://anr.fr/en/latest-news/read/news/technologies-quantiques-les-projets-selectionnes-dans-le-cadre-de-lappel-astrid-thematique-lance/>