



# 量子計測・センシング ／量子材料・デバイス

JST CRDS

量子チーム（赤木、嶋田、眞子）

2022.2.24

量子技術イノベーション戦略見直し検討WG



- 1. 研究開発・技術の現状**
- 2. 国内外ベンダーの動向**
- 3. 各国の支援政策**

# 1. | 研究開発・技術の現状

# 具体的な研究開発課題

## 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ー基盤技術

- ・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

## 量子材料

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

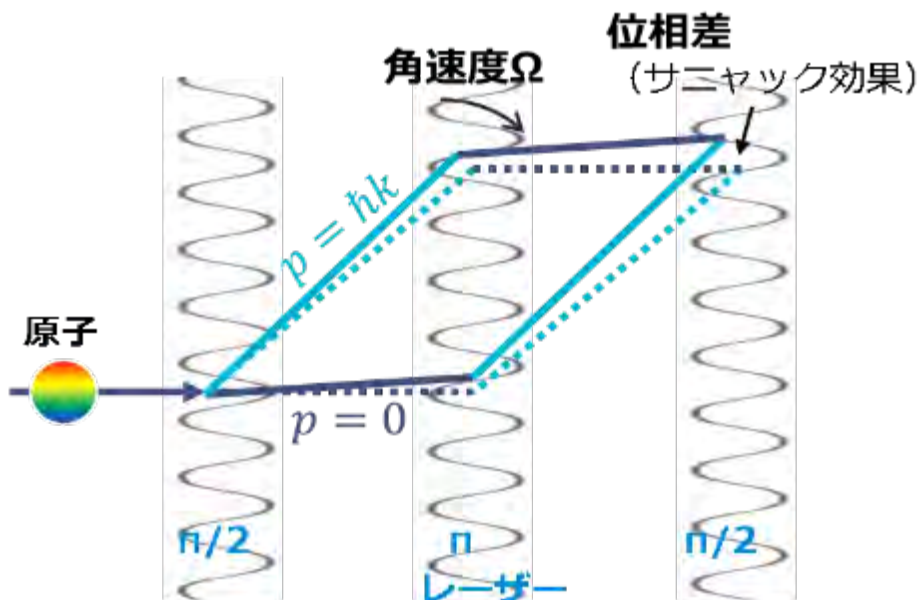
- ・様々な量子ビット系

## 材料設計・製造、計測技術

# 量子センシング・量子計測

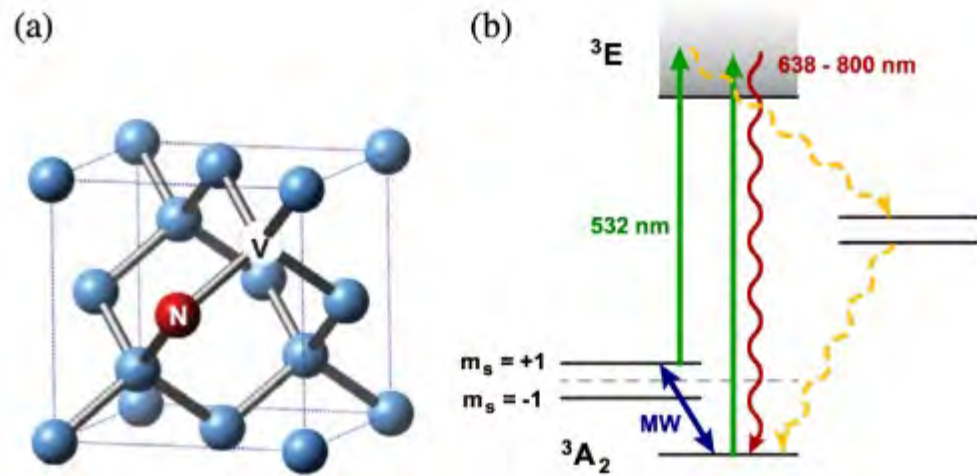
## 原子干渉計

物質波の干渉縞を利用



## ダイヤモンド量子センサ

NV中心の量子状態を利用



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).

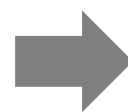
磁場、電場、温度、圧力などの  
高感度センサ応用が可能

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

# 原子干渉計 (AI : Atom Interferometer)



AI gyroscope



## 慣性航法 (自己位置推定)

(GPSなしで位置、速度、姿勢などを把握)

## 加速度計

加速度、速度、距離

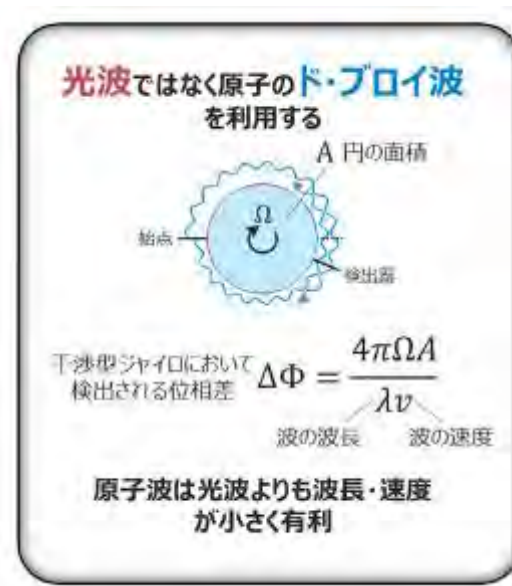
## ジャイロスコープ

角速度、角度

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



AO Sense



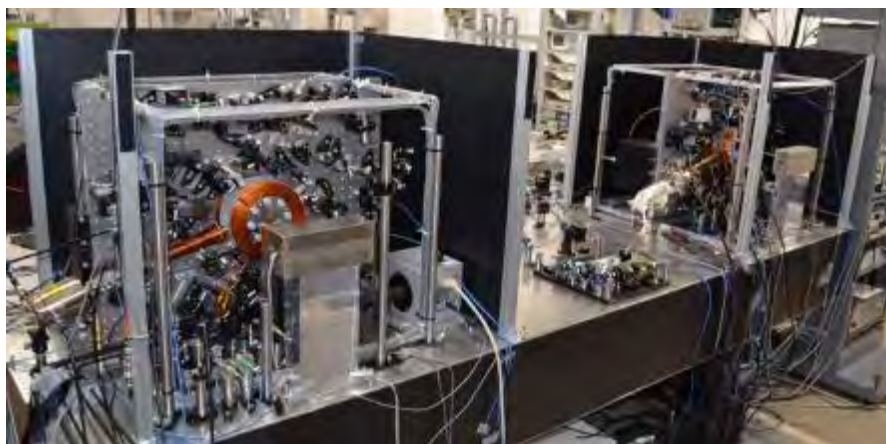
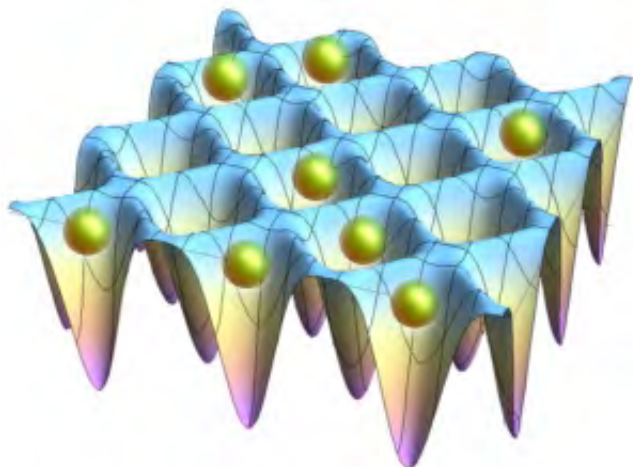
Mark Kasevich, "Gravitational Physics using Atom Interferometry"  
<https://slideplayer.com/slide/8000980/>

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>

# 光格子時計

## 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](https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f_00063.html)

# 主要国のR&D動向

## 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

- 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。

## 量子基盤技術

- 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**。



# 研究開発の国際比較 (量子計測・センシング)

		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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	○	↗	○	→	×	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	○	→	○	→	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>超偏極<sup>129</sup>XeによるCOPDなどの肺疾患診断と、超偏極<sup>13</sup>C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。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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<sup>-1/2</sup>を達成。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	○	↗	◎	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	△	→	△	↗	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li><sup>129</sup>XeガスのMRIの報告が中国の研究機関からなされている。</li> </ul>
	応用研究・開発	—		△	→	△	→	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li><sup>129</sup>Xe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。</li> </ul>

〈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

JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2021年)」  
および、国内専門家からの情報を基に、JST-CRDSで作成



# 研究開発の国際比較 (量子マテリアル)

		量子マテリアル				
		トポロジカル材料		低次元材料		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	
日本	基礎研究	◎	→	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>企業などからの大規模な投資は見当たらない。</li> <li>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。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>応用面でも活発な展開。優れた研究成果を創出。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	→	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>ドイツでは、Aachen Graphene &amp; 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。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	↗	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>

〈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

JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2021年)」  
および、国内専門家からの情報を基に、JST-CRDSで作成



# 量子技術の軍事応用

赤点線で囲んだものが量子センシング・計測関係



## 2. | 国内外ベンダーの動向

## 量子計測・センシングの分類（国内動向含む）

	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)

\*主流の方式における  
サンプル作成時の環境

矢野経済研究所 レポート「2019年版 量子技術市場の現状と展望」（2019年2月27日）などを基に、JST-CRDSで作成

## 量子計測・センシング：国内企業の動向

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。

# 3. | 各国の支援政策

# 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。



## 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。

# DARPA（国防高等研究計画局）の量子関連プログラム



（量子計測・センシング関連）

## 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することで、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旨とする。

<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）受信技術確立することを旨とする。

<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実証を旨とする。

<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旨とする。

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



# 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。



(PFC)

- 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。

\*NSA/CSS: 国家安全保障局中央保安部

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>

# フランス 国家量子戦略公表（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

## 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



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

## フランス政府の動向（2020年～）

### ASTRIDプロジェクトで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つの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/>

## 欧州「Quantum Flagship」採択結果



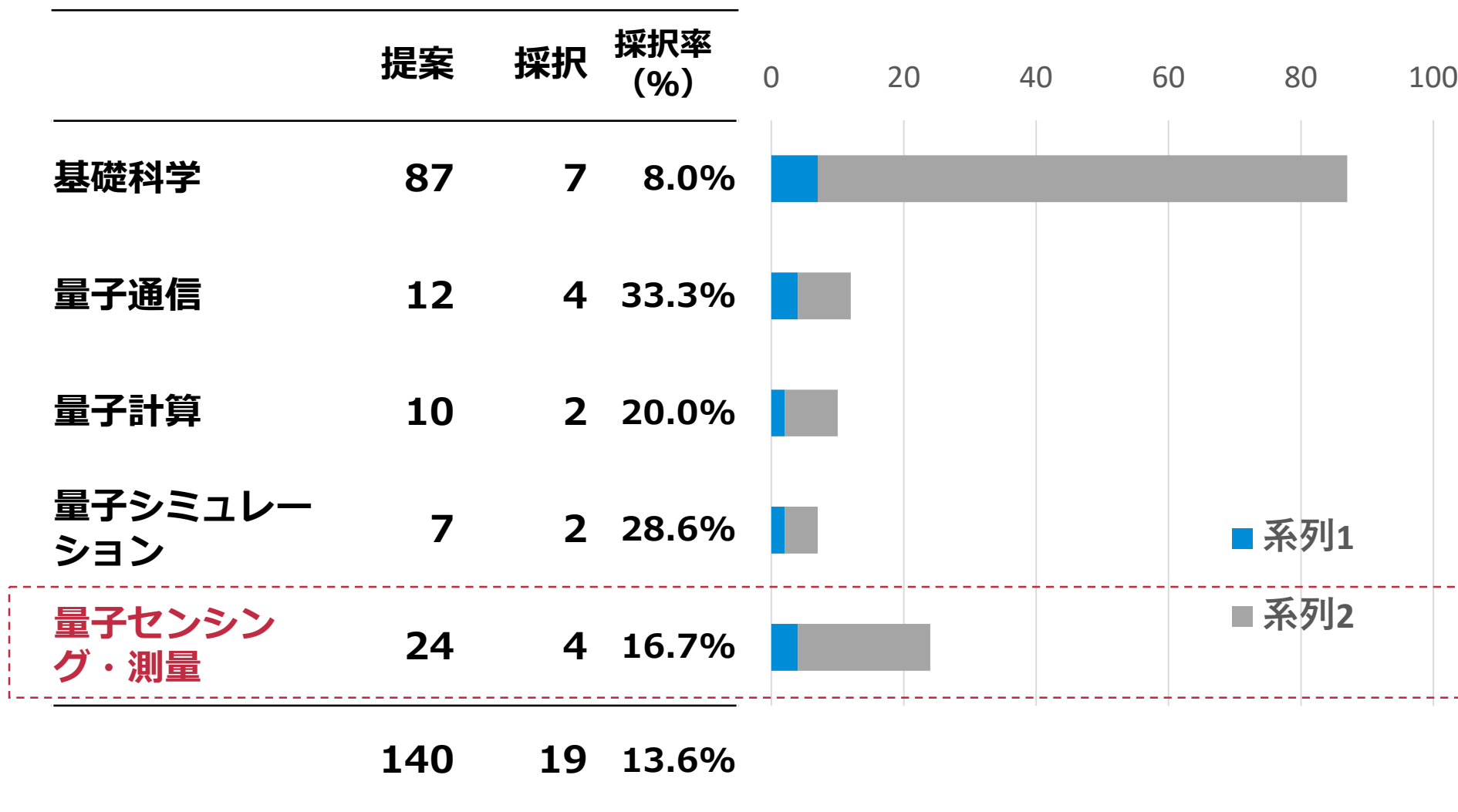
Call ID : H2020-FETFLAG-2018-03 (2018年10月～、期間 : 42-46 months )

<b>Basic Science</b>				€ 20,090,951.25
<b>2D-SIPC</b>	Dmitri Efetov	ICFO, Spain	二次元光集積回路量子デバイス	2,976,812.50
<b>MicroQC</b>	Nikolay Vitanov	Foundation for Theoretical and Computational Physics and Astrophysics, Bulgaria	イオントラップ量子コンピュータ	2,363,343.75
<b>PhoG</b>	Natalia Korolkova	The University Court of the University of St Andrews, United Kingdom	単一光子源	2,761,866.25
<b>PhoQuS</b>	Alberto Bramati	Sorbonne Université, France	光子量子シミュレータ	2,999,757.50
<b>QMICS</b>	Frank Deppe	Bayerische Akademie der Wissenschaften, Germany	量子通信プロトコル	2,999,595.00
<b>S2QUIP</b>	Klaus Jöns	Kungliga Tekniska Högskolan, Sweden	二次元光集積回路量子デバイス	2,999,298.75
<b>SQUARE</b>	David Hunger	Karlsruher Institut fuer Technologie, Germany	希土類イオン量子ビット	2,990,277.50
<b>Quantum Communication</b>				€ 33,547,307.25
<b>CIVIQ</b>	Valerio Pruneri	ICFO, Spain	物理レイヤ量子暗号通信	9,974,006.25
<b>QIA</b>	Stephanie Wehner	Technische Universiteit Delft, Netherlands	量子インターネット	10,406,113.50
<b>QRANGE</b>	Hugo Zbinden	Université de Genève, Switzerland	量子乱数ジェネレータ	3,187,282.50
<b>UNIQRON</b>	Hannes Hübel	AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Austria	光集積回路量子デバイス	9,979,905.00
<b>Quantum Computing</b>				€ 19,921,645.00
<b>AQTION</b>	Thomas Monz	Universität Innsbruck, Austria	イオントラップ量子コンピュータ	9,587,252.50
<b>OpenSuperQ</b>	Frank Wilhelm-Mauch	Universität des Saarlandes, Germany	超伝導量子コンピュータ	10,334,392.50
<b>Quantum Simulation</b>				€ 18,593,150.00
<b>PASQuaS</b>	Immanuel Bloch	Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften eV, Germany	プログラマブル冷却原子量子シミュレータ	9,257,515.00
<b>Qombs</b>	Augusto Smerzi	Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy	量子カスケードレーザー周波数コム	9,335,635.00
<b>Quantum Sensing &amp; Metrology</b>				€ 36,718,102.50
<b>ASTERIQS</b>	Thierry Debuisschert	Thales SA, France	ダイヤモンドNVセンサ	9,747,888.75
<b>iqClock</b>	Florian Schreck	Universiteit van Amsterdam, Netherlands	光格子時計	10,092,468.75
<b>macQsimal</b>	Jacques Haesler	Swiss Center for Electronics and Microtechnology (CSEM), Switzerland	小型ガスセルセンサ	10,209,943.75
<b>MetaboliQs</b>	Christoph Nebel	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung eV, Germany	室温超偏極センサ	6,667,801.25
<b>CSA (Coordination and support action)</b>				€ 3,478,996.25
<b>QFlag</b>	Markus Wilkens	VDI Technologiezentrum GmbH, Germany	コーディネーション・アウトリーチ	3,478,996.25
				€ 132,350,152.25

## 欧州「Quantum Flagship」採択結果



Call ID : H2020-FETFLAG-2018-03 (2018年10月～、期間 : 42-46 months )



# 英国の量子拠点



## UK National Quantum Technology Hubs

- 2013年開始。首相による2.7億ポンドの投資発表(2013年秋)に続き、国防科学技術研究所 (Dstl) がデモンストレーター装置プログラムに別途3000万ポンドを投資。
- プログラムはEPSRC、InnovateUK、BEIS、国立物理研究所 (NPL)、政府通信本部 (GCHQ)、国防科学技術研究所 (Dstl)、知識移転ネットワーク (KTN) による。
- 4つのハブに合計1.2億ポンドの投資。2014年12月開始、17の大学と132の企業が参画。

### UK National Quantum Technology Hub in Sensors and Metrology (バーミンガム、グラスゴー、ノッティンガム、サウサンプトン、ストラスクライド、サセックス)

- **量子センサ、測定技術**をヘルスケア、ナビゲーション、考古学などに応用想定
- 技術移転センター、プロトタイプングセンター、520万ポンドのパートナーシップ基金



### QUANTIC (グラスゴー、ブリストル、エジンバラ、ヘリオットワット、オックスフォード、ストラスクライド)

- **量子カメラ、量子イメージングシステム**
- ガス漏れ可視化、煙の透過、超高感度可視・赤外カメラ
- 400万ポンドの「パートナーシップリソース」、300万ポンドのスコットランド資金協議会の「イノベーションスペース」などへ申請可能。



### NQIT (Networked Quantum Information Technologies) (オックスフォード、バース、ケンブリッジ、エジンバラ、リーズ、サウサンプトン、ストラスクライド、サセックス、ウォリック)

- 量子コンピューティング、量子シミュレーション
- 光量子ビットデバイスQ20:20量子エンジンの開発
- 医薬品開発の加速、ビッグデータ分析、乱数生成、安全な通信、分散センシングなどの応用



### Quantum Communications Hub (ヨーク、ブリストル、ケンブリッジ、ヘリオットワット、リーズ、ロイヤルホロウェイ、シェフィールド、ストラスクライド)

- 量子暗号鍵配送 (QKD)
- 小型・低コストデバイス開発、チップスケール統合
- モバイルバンキングなどが最初の応用ターゲット
- 量子ネットワーク・テストベッド構築





# 中国政府の動向

## 計量発展計画（2021～2035年）（国務院、2022年1月）

- 2020年10月発表の中長期計画および第14次五カ年計画のフォローアップ
- 目標として以下を提示。**核となるのは量子計測技術**と明記。
  1. 2025年までに、計量科学技術におけるイノベーション能力・影響力で世界トップクラスの国、部分的には世界をリードする国になること
  2. 2035年には、イノベーション能力の大幅向上、計測技術の主要分野において総合力で世界をリードすること。
- **「量子測定度量衡」プログラム**実施予定：基礎研究とフロンティア研究の推進に関して、量子効果に基づく量子計測技術、測定基準、標準装置小型化技術に焦点を当て、量子センシングとチップレベルの測定標準技術を突破し、コアデバイス開発能力を形成する。

[http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content\\_5670947.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm)

### 中国経済メディア（中华网）の報道

- 本計画について採り上げるとともに、現時点では、成熟した技術と製品の供給能力を持つ研究機関や企業は少ない、としている。
- 主要な研究機関として、中国科学技術大学、南京大学、中国科学院物理研究所、華中科技大及びアカデミアからインキュベートされた国盾量子、国儀量子などを例示。

[https://hea.china.com/article/20220211/022022\\_1006470.html](https://hea.china.com/article/20220211/022022_1006470.html)