

戦略的創造研究推進事業 29年度戦略目標について

文部科学省

科学技術・学術政策局 量子研究推進室

研究振興局 ライフサイエンス課



文部科学省

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN



著作権の都合上、一部画像を表示しておりません。

平成29年度戦略目標 「量子技術の適用による生体センシングの革新と生体分子の動態及び相互作用の解明」

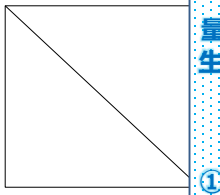
- ✓ 我が国においては、これまでの連綿とした光・量子に係る基礎研究から、**世界をリードする技術シーズ**が生まれてきている。例えば、**量子センサの作製技術は、我が国の機関が国際的にも高い技術を有しており、海外研究グループからも材料提供の依頼を受けている。**また、**量子もつれ光を用いた顕微鏡は我が国発の技術**であり、さらに、量子ビームの高度利用による超精密構造・機能解析についても、世界に先駆けた研究を創出している。
- ✓ これらの量子技術は、**生命科学への応用も期待されており、海外では強く推進され始めているものの、我が国においては、量子技術分野と生命科学分野の交流の遅れにより、その生物応用が十分に進んでいない。**さらに、このままでは**これらの高度量子技術の国外流出も危惧**されている。
- ✓ そのため、本戦略目標では、国の**トップダウン方式の基礎研究を通じて量子技術と生命科学との融合を促進**することによって、日本の優位性を保持しつつ、細胞内の生体分子が有する機能を量子レベルから**統合的に理解する生命科学フロンティアを開拓し、新規治療・診断法等への応用**とともに、量子技術の特性を利用した**新規計測装置・機器による産業展開**を想定する。

【達成目標：①～③】

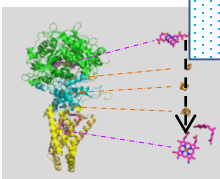
①量子センサ技術を用いて、生体内の微弱な**温度・磁場・電場等の高感度観測を実現し、生命科学や医療・産業応用の新たな潮流を生み出す**



②量子もつれ光子や多光子、光子検出技術等の最新の量子技術を、超解像顕微鏡や革新的新規プローブと組み合わせ、いわば**量子イメージング**と言える**新たな生体内イメージングを実現し、可視化されなかった状態を高い空間分解能で捉える**



③量子ビーム利用・計測の高度化技術を用いて、生体分子の電子状態、水素原子の挙動、化学結合の状態等の**量子レベルに至る超精密構造・機能解析**を行い、分子間の相互作用や反応といった生体分子の機能を解明する



【期待される科学的・社会的インパクト】

- **生体内でこれまで観察されなかった現象の解明により、新たな生命科学及び診断・治療が実現**
 - 細胞内の**局所温度**の観測により、小器官の働きや酵素等との反応の理解や、がん等の**器質性疾患**や臓器・器官等の働きが阻害される**機能性疾患**との関連解明が進む。【①、②】
 - また、**再生医療組織中のがん化と非がん化の識別**を実現し、臓器への分化の成功率を高めるとともに、がんのメカニズム解明に繋がる。【①】
 - **神経細胞の興奮**を示すイオン電流の観測により、神経伝達の異常等とうつ病といった**精神疾患**の関連解明や**脳・神経研究**が進む。【①、②、③】
- さらに、既存の検査技術では異常所見を示さない、ストレス等が関与し現代病とも言われる**機能性疾患の原因解明**への端緒となることも期待。【①、②】
- **生体分子の動態及び相互作用の精密な解明により、新たな生命科学及び診断・治療が実現**
 - タンパク質と阻害剤との相互作用の精密解明により、**分子標的薬の精緻化とプレジジョンメディスン**産業の進展に繋がる。【③、②】
 - 損傷DNAと修復酵素との相互作用の解明により、**DNA修復機構の解明**と、それを応用したがん等の予防薬の可能性に繋がる。【②、③】
 - 生体分子が置かれた物理的環境下で起こる**反応・応答の特異性**の本質理解により、難病や早期発見が困難な疾病の**予防・治療シーズ**が開拓される。【①、②、③】
- **さらに、Society5.0に向けた産業応用や、新しいサイエンス領域（量子生命科学）の開拓を国際的にも主導**
 - 室温・非侵襲の微弱な**脳磁**計測による**自動運転**支援等への応用が広がる。【①】
 - 光合成における水分子の分解の量子レベルの解明による、**人工光合成**への応用が進展する。【③】
 - ATP合成や光合成等に係る電子・プロトン・情報・エネルギー伝達といった生体内の量子力学的効果の解明とそれに基づく応用（**量子生命科学**）が開拓される。【①、②、③】

【実現し得る将来の社会像】

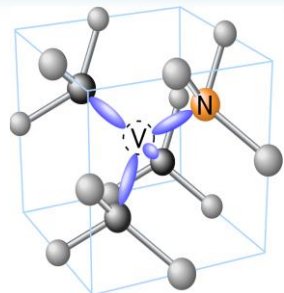
- ✓ 生命現象の物理的・本質的理解に基づく、**高い効果を有する治療法・新薬が効率的に開発**。（**健康長寿社会**）
- ✓ 現代病とも言われる**機能性疾患**や**早期発見が困難な疾病**の**早期かつ定量的な診断・予防法が確立**。（**医療費抑制**）
- ✓ **高い付加価値（小型・低侵襲・高精度等）のセンサ・計測装置・診断機器**が世界市場に展開。（**Society5.0の産業競争力**）
- ✓ **新しいサイエンス領域を主導することによる国際的な存在感の向上**と**新規医療・技術シーズの持続的な創出**。（**科学技術立国**）

【達成目標①】

量子センサ技術を用いて、生体内の微弱な温度・磁場・電場等の高感度観測を実現し、生命科学や医療・産業応用の新たな潮流を生み出す

現状（最新の成果）

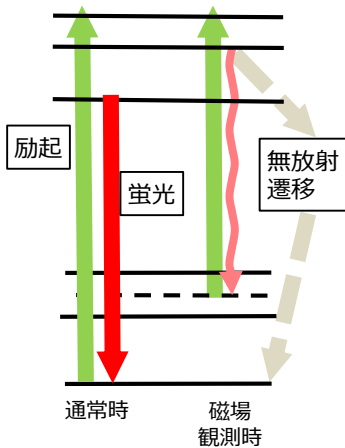
- 量子センサ**
(ダイヤモンドNVセンタ、SiCシリコン空孔など)
- ◆ これまで生体内で観測されたことのない**微弱な温度・磁場・電場・ひずみ**等の高感度センシングができる。(例えば温度：mKオーダー、磁場：fTオーダー)
 - ◆ **常温・室温**で動作するとともに、**生体毒性**が低く特定の分子に結合する**ナノ粒子化**も可能。
- 【現状1】 量子センサの作製技術は、我が国機関が**国際的にも高い技術**を有し、海外研究グループからも材料提供の依頼のあるレベル。
→ 【現状2】 **生命科学への応用**が我が国ではあまり進んでいないところ、海外（欧、米）では様々な研究開発投資・試みが展開されつつある。



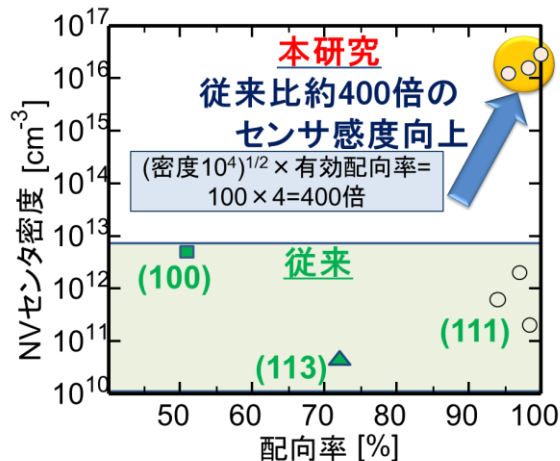
ダイヤモンドNVセンタ

空孔に電子がトラップされ、スピント呼ばれる量子状態の利用や制御が可能となったことが2000年代以降報告。(外乱で壊れやすいことを逆に利用)

- ✓ 緑色光照射によって、赤色の蛍光を発する
- ✓ 局所の磁場によって、蛍光を弱さなくなる



○ダイヤモンドNVセンタを、配向率高く高密度で形成することに成功し、従来比約400倍にセンサ感度が向上【東工大、波多野教授：2015】



マイクロ波プラズマCVD（化学気相成長）法によるNVセンタのダイレクト形成

本達成目標下における実施内容

- ・ 生体親和性を活用し、細胞、ニューロン、タンパク質・生体分子に対し、**ナノメートル空間分解能**での定量的な温度・磁場・電場等の計測の実現
- ・ 光/電気検出磁気共鳴や電子スピン共鳴を利用した**単一分子NMR**、**ナノMRI**の開発
- ・ **心磁や脳磁**等の計測による産業・医療応用への展開

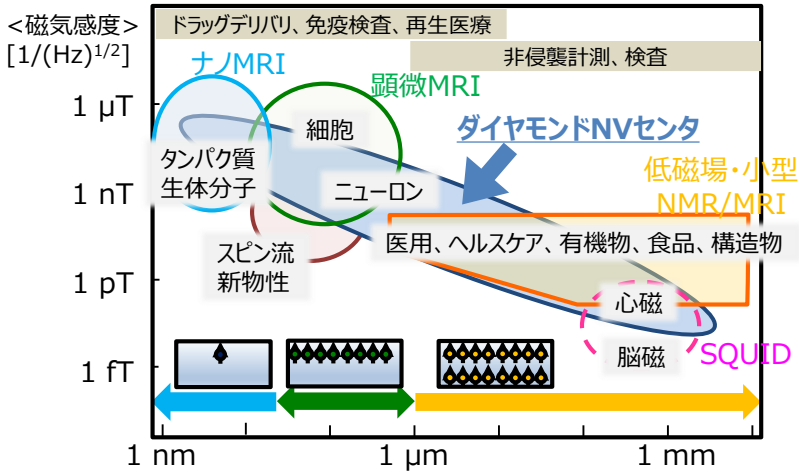
※以上に関し、量子技術研究者と生命科学研究者の共同提案・共同研究を促す

その結果、10年後に期待される状況

- ・ 細胞内の**局所温度変化**と酵素等の反応の解明とそれに基づく新たな治療法の探索への展開、再生医療組織中の温度変化に基づくがん化・非がん化組織の識別
- ・ 光合成やATP合成に係る**電子伝達系**やイオン電流である**神経細胞の興奮**により形成された微弱磁場の観測と、量子論に基づく生体理解の進展
- ・ 細胞膜や小器官の電位計測による**イオン授受等の活動機構**と、それに基づく生体反応・疾患との関係解明への展開
- ・ 室温・非侵襲の微弱な**脳磁計測**による脳研究応用、診断応用や、自動運転時の脳計測等の産業応用への展開
- ・ 器質性疾患の診断治療の限界を超えた、**機能性疾患**（内視鏡や血液検査等の既存の検査では何ら異常所見を示さない）の原因解明への展開

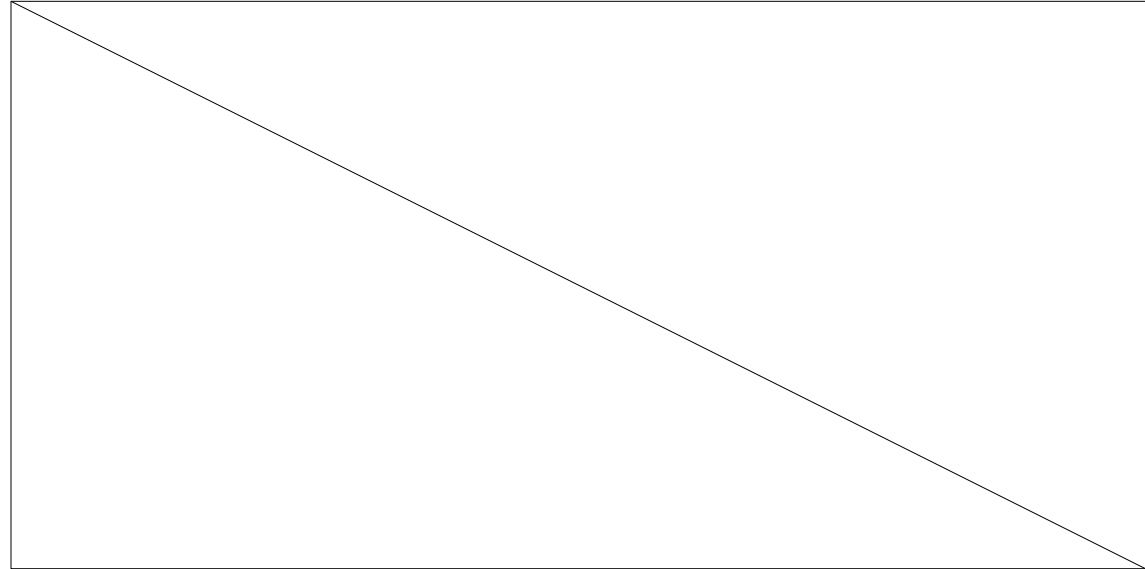
(参考)

<ダイヤモンドNVセンタの性能と応用 (磁気を例として) >



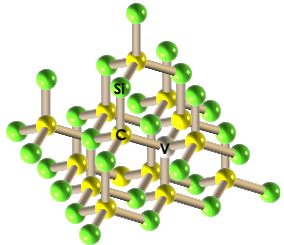
<空間分解能>

<ダイヤモンドNVセンタの小型化の状況>



<萌芽段階にある量子センサの例： SiCシリコン空孔>

- ・センシングに用いる発光波長が生体を透過しやすい近赤外波長
→生体内のより深い場所
- ・SiCはパワエレの材料として、我が国でも材料研究が盛ん
→高品質化・デバイス化に有利で低コストの可能性

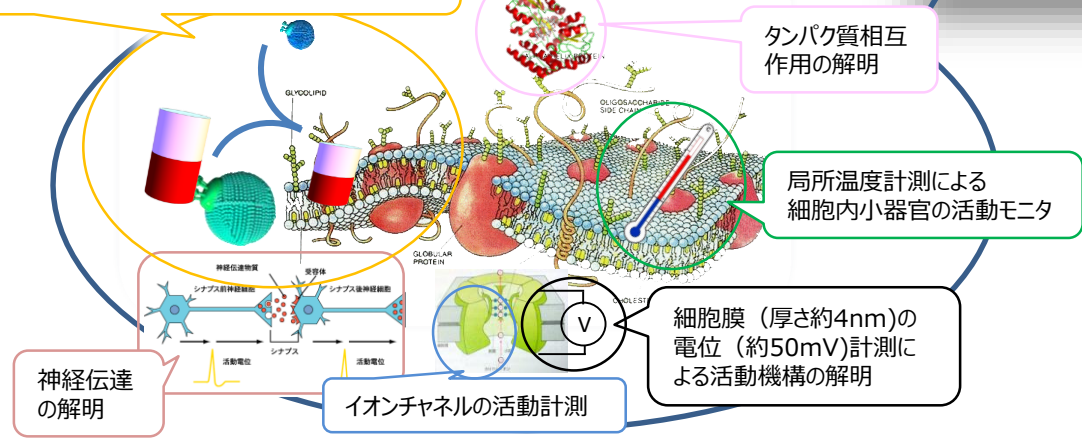


SiCシリコン空孔
(約900nmの近赤外の蛍光)

- SiC中のシリコン空孔を発見し、近赤外光を発することを報告。
- SiCシリコン空孔が、室温で動作する量子センサとして利用できることを報告。
- ダイヤモンドNVセンタと同様、温度・磁場等を観測できることを報告。
→【量研機構、大島研究員：Nature Materials 13, 151 (2015)
Nature Materials 14, 164 (2015)
Scientific Rep 4, 5303 (2016)】

<細胞、ニューロン、タンパク質・生体分子計測への応用例>
ナノ領域・定量的な磁場・電場・温度計測への多様なニーズ

- ・ドラッグデリバリシステムの薬剤モニタ
- ・タンパク質をターゲットにした抗原抗体反応



【達成目標②】

量子もつれ光子や多光子、光量子検出技術等の最新の量子技術を、超解像顕微鏡や革新的新規プローブと組み合わせ、いわば量子イメージングと言える新たな生体内イメージングを実現し、可視化されなかった状態を高い空間分解能で捉える

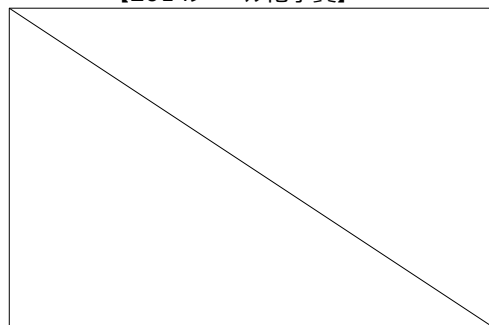
現状（最新の成果）

【現状1】ここ数年、超解像顕微鏡に多光子励起を組み合わせた空間分解能向上、量子もつれ光を用いた生体観測、量子センサを含む革新的新規プローブとの組み合わせ等が報告・提案。

【現状2】我が国の光量子物理学の伝統的な強みと様々な組み合わせがあり得るところ、**生命科学者を巻き込んだ応用**が我が国ではあまり進んでいない。

<超解像顕微鏡>

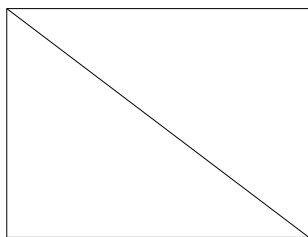
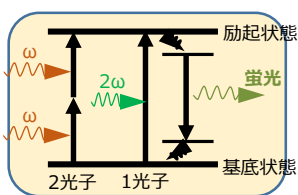
光の回折限界を超える空間分解能を実現
【2014ノーベル化学賞】



(出典) www.chem-station.com

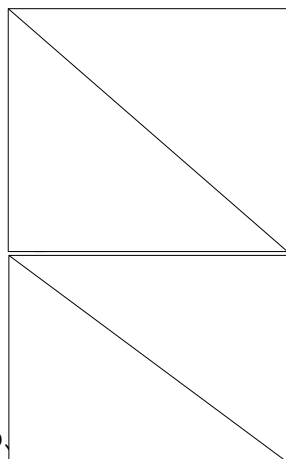
ドーナツ状の誘導放出用レーザー光を観察焦点に重ねることで、限界を超えた小さい焦点形成を実現し、超解像イメージングを達成。

<多光子顕微鏡のメカニズム>



2光子励起により、生体内での吸収の影響が小さい1000nm付近の近赤外線を利用しつつ、高い光子密度が可能
→**深部計測、高分解能が可能**

○ 超解像顕微鏡と2光子励起との組み合わせにより、xy平面での空間分解能は **<100 nm**が可能に。【北大、根本教授：2014】



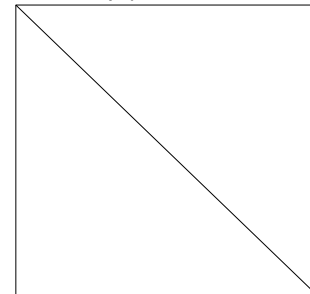
K. Ohtomo, et al.,
Opt. Express **22**,
28215 (2014).

I.C. Hernández, et
al., Scientific
Report 6, 1 (2016).

○ 古典OCTの分解能記録(0.75μm)を超える、量子OCTの分解能(0.54μm)を実現。また、その分散耐性を実証。【京大、竹内教授：2015】

→量子もつれ光を利用した、超高分解能の光コヒーレンストモグラフィが期待

OCT(Optical Coherence Tomography)



Abouraddy, Nasr, Saleh, Sergienko & Teich,
Phys. Rev. A 65, 053817 (2002).

・通常のOCT（低コヒーレンス干渉利用）深さ分解能～10 μm）は現在網膜疾患の診断で利用されている

→量子OCT（2光子量子干渉を利用）

量子もつれ光利用で深さ分解能 < 1 μmも可

本達成目標下における実施内容

- 様々な**超解像顕微鏡**に、多光子等の光・量子技術を組み合わせた分解能向上等による新たな生体内イメージングの実現
- 多光子顕微鏡**に、量子もつれ光を導入することによる、観察光に影響を受けやすい試料の低光量イメージング技術の確立
- 上記のような新たなイメージング技術と**革新的な蛍光プローブ**の同時並行開発による相乗効果を狙った、可視化されなかった状態のイメージング技術の開拓
- 量子センサ**を新規プローブとして既存のモダリティと組み合わせ、生体分子間の相互作用や細胞内局所の物理場のマルチモーダルイメージングの開発

※以上に関し、量子技術研究者と生命科学研究者の共同提案・共同研究を促す。

その結果、10年後に期待される状況

- これまで**可視化されなかった生体分子の状態**を高い分解能で捉えるイメージングの発達による、新たな生命科学や診断・治療応用の展開
- 低光量観察**や**低バックグラウンド観察**等が高分解能で可能となり、イメージング対象の試料が広がることによる、既存の生命科学や医療研究開発の進展
- 細胞内局所の**微弱な物理場のマルチモーダルイメージング**の進展による、量子論に基づく生体理解の進展
- 酵素等の反応、DNAの損傷や修復といった、細胞内の**特定の分子の挙動等の動態**や**相互作用**をより鮮明に捉えることによる、生命現象の解明への新たな手がかり

【達成目標③】

量子ビーム利用・計測の高度化技術を用いて、生体分子の電子状態、水素原子の挙動、化学結合の状態等の量子レベルに至る超精密構造・機能解析を行い、分子間の相互作用や反応といった生体分子の機能を解明する

現状（最新の成果）

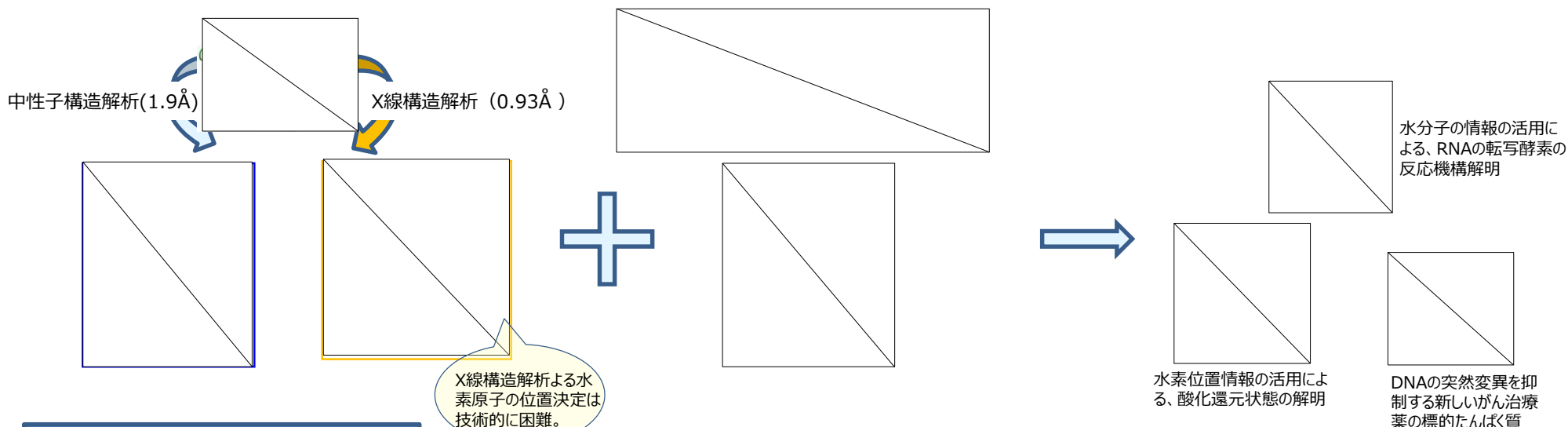
【現状1】従来の量子ビーム構造解析は、様々な生物学的研究手法を組み入れて構造情報から機能を推定しているのに対し、近年の技術革新によって、構造情報から直接的に機能情報を計測・解析することが可能になりつつある。

【現状2】既に存在する量子ビーム利用環境に対して、生命科学者を巻き込んだ応用が我が国ではあまり進んでいない。

○ 水素原子は物性や反応プロセスにおいて重要な役割を果たすため、その存在・位置の決定は反応機構の解明に不可欠。中性子構造解析は、X線構造解析に比べて分解能は低いものの、水素原子位置が明確にわかり、その観測に有利。

○ 最外殻電子の状態の把握は、タンパク質の活性部位の特定や化学結合の解明に重要。超高分解能のX線構造解析では、最外殻電子の可視化が可能となった。

○ 中性子とX線の相補的・相乗的利用により、生命現象の理解に重要なタンパク質群や創薬（新しいがん治療薬など）標的タンパク質などの反応プロセスが、解明されつつある。
【北大 2015, 阪大 2013, 熊本大 2013】



本達成目標下における実施内容

- 高い信頼度の結合距離情報に、中性子線とX線の連携利用による水素原子・水分子の挙動情報の導入による、生体内の分子間相互作用や反応の解明
- 生体分子と分子標的薬等の相互作用における、外殻電子の振る舞いや水素結合等の働きの理解
- タンパク質分子等における化学結合情報の獲得による化学反応プロセスの機能解明や生体反応と疾患との関係解明への展開

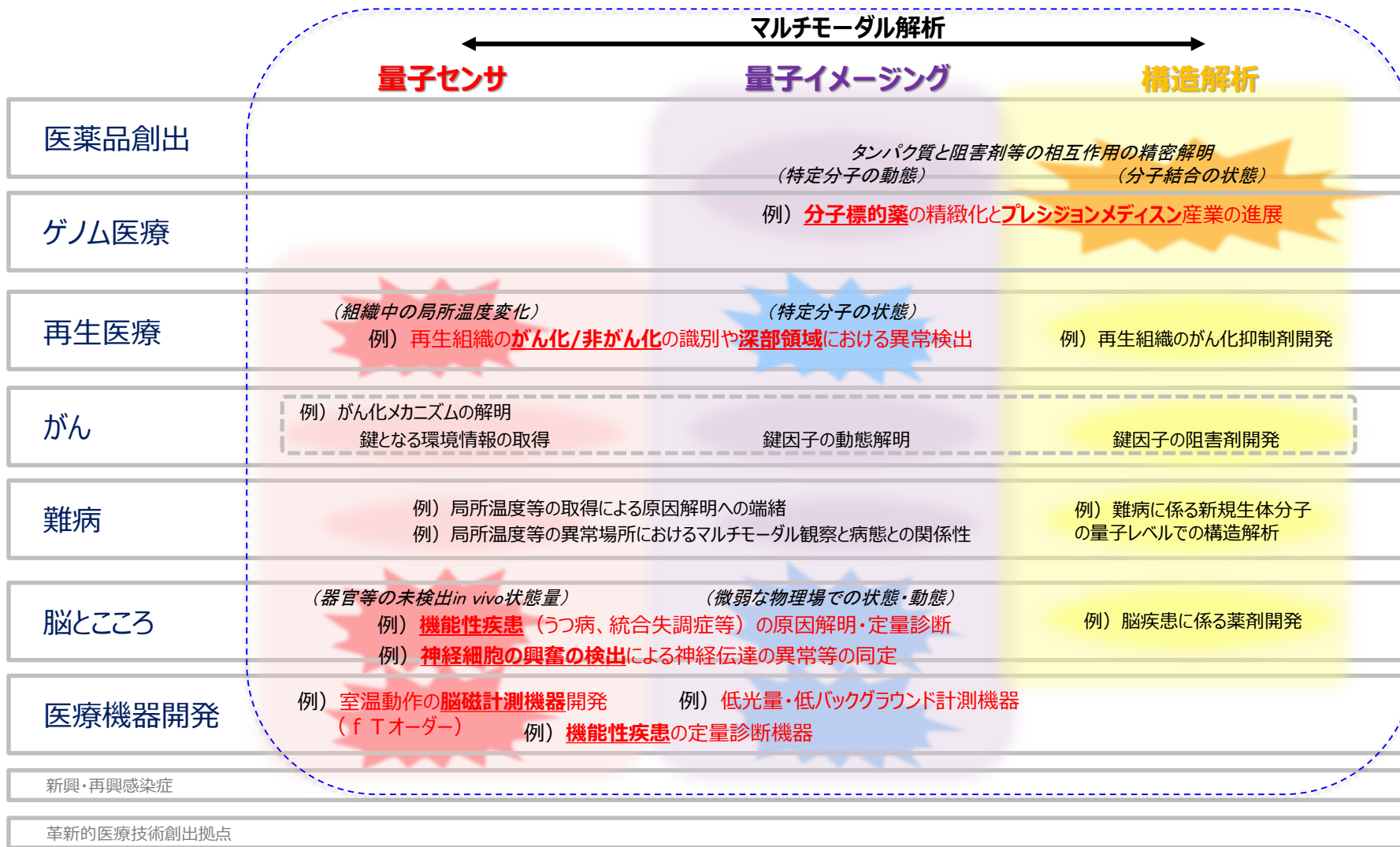
※以上に関し、量子技術研究者と生命科学研究者の共同提案・共同研究を促す。

その結果、10年後に期待される状況

- 上記2達成目標で決定的役割を担う分子・生体分子の機能の解明分子の量子レベルの動態・相互作用のオンゲストローム・オーダーでの検出・可視化の確立と、それに基づく生命科学、医療応用への展開
- 生体内における分子間の相互作用や反応の理解に基づく、タンパク質の機能解明・阻害といった医療応用（プレジジョンメディスン）の高度化
- 酵素等の反応における量子力学的効果、分子間の電子・情報・エネルギー伝達の解明といった量子生命科学への展開

「健康・医療分野」における、量子技術の位置付け及びインパクト

ライフ分野（健康・医療分野）における9つのAMED重点分野において、本戦略目標の位置付け及びインパクトを俯瞰的にマッピング。（平成28年12月ライフサイエンス課資料を基に作成）

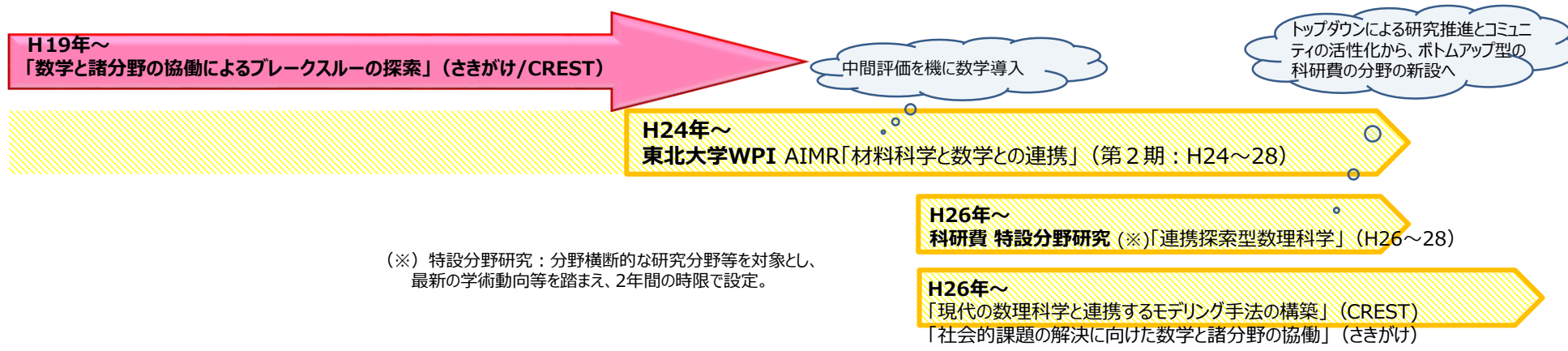


- 注1) **プレジジョンメディスン**：2014年では抗がん剤の約半分であった分子標的薬が2023年には**抗がん剤全体の7割を占めるまで増大**されるとされる。（富士経済2015）
- 注2) **再生組織のがん化**：iPS細胞の培養過程における**がん化は永遠につきまとう問題**で、再生培養細胞からがん細胞を検出・識別する技術開発の進展が、再生医療の成功率の向上だけでなく、再生医療の根底をなす安全性確保のために求められている。日本の死亡原因一位であるがんの発症メカニズムそのものについても余波を与える。
- 注3) **統合失調症やうつ病等を含む機能性疾患**：日本の深刻な社会問題の一つとなっているが、症状を緩和する治療薬等が一部存在するのみであり、疾患に関する発症メカニズム・原因は不明。**新しい客観的状態量の計測**が確立すれば、診断法・治療法に画期的な展開が期待される。

トップダウンによる分野融合の事例

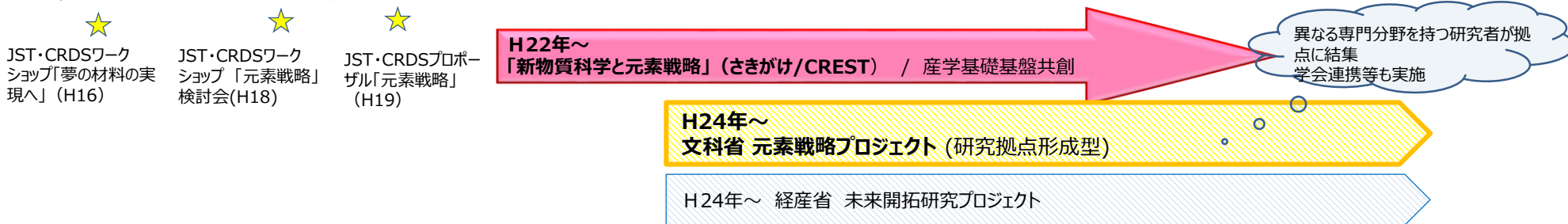
【事例1：数学】

・**数学と諸分野の融合**は、各々のニーズからは生まれ難かったが、**トップダウン的な戦略目標**があつてこそ、切り拓かれた。
→例えば、東北大学WPIの展開は数学と材料分野の融合の国際的なモデルケースとなっており、科研費における特設分野研究の展開にも繋がっている。



【事例2：元素戦略】

・**JSTにおける検討を契機**として、我が国の資源の制約と研究の強みを踏まえた国家戦略へ。
→幅広い研究コミュニティの連携を深化させ、国際的にも高い水準にある**学問分野の再構成**によって**全く新しい研究アプローチを拠点として展開**。



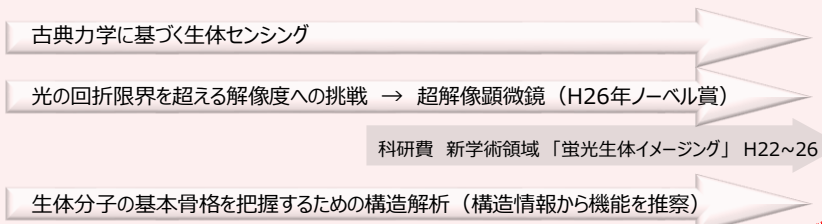
【蛍光一分子イメージング：生命科学を飛躍的に進展させた新技術の例】

・当初(1990年代)の想定とは異なり、**生物学者の当初のニーズ・予想・期待を大きく凌駕**する2つの応用展開へと繋がる。

- **次世代シーケンサの開発** - ゲノム解析の高速・低コスト化の実現(ゲノム創薬等への発展)
- その他、ライブ研究を変貌させる新たな解析手法が開発へ(RNA-seq等)
- **超解像度の蛍光顕微鏡の開発**(ノーベル賞 2014)
 - 蛍光一分子イメージングは超解像顕微鏡の原理の一つであり、蛍光一分子イメージングの研究者もノーベル賞受賞。
 - 超解像技術を利用したライブイメージングにより、従来の小胞輸送の概念(2013年ノーベル賞)を覆す発見や、光合成における葉緑体の活動の可視化など、さらなる生命現象解明へ。

「量子技術の適用による生体センシングの革新と生体分子の動態及び相互作用の解明」に係る これまでの関連研究・ファンディング俯瞰図

【生命科学】



これまで検出・可視化されなかった 生命科学のフロンティア

- ☆量子センサ技術の進展を取り込んだ生体センシング
これまで生体内で観測されたことのない微弱な温度・磁場・電場等の高感度観測
- ☆新たな生体内イメージング (量子イメージング)
超解像顕微鏡に多光子顕微鏡に係る光・量子技術を組み合わせた分解能向上や、量子センサをはじめとする革新的新規プローブの導入等による、可視化されなかった状態を高い空間分解能で捉えるイメージング
- ☆原子・電子レベルの超精密構造・機能解析 (構造から直接的に機能情報を得る)
高い信頼度の分子内の結合距離はもとより、分子間の相互作用や反応といった生体分子の機能を支配している可能性の高い、電子状態、水素原子の挙動、化学結合の状態等の量子レベルに至る構造・機能解析
これらや既存の計測技術の時空間スケール横断的な相補的・相乗的活用
→生体分子が有する生体機能の量子レベルからの統合的理解の基盤
→将来の新規診断・治療法等の応用展開・産業展開

両分野を繋げる

生命科学

×

量子技術

科研費 新学術領域「温度生物学」 H27~

【光研究・量子研究】

連続とした基礎研究から生まれ、
生命科学への実際の適用が可能となってきた技術シーズ

戦略目標：最先端レーザー等の新しい光を用いた物質材料科学、生命科学など先端科学のイノベーションへの展開「光展開」 (CREST:H20~27、さきがけ：H20~26)

最新の科学を基にして
新たに最先端の光機能・光物性や量子状態の高度制御を開拓

戦略目標：新たな光機能や光物性の発現・利活用による次世代フォトリソグラフィの開拓「光極限」 (CREST、さきがけ：H27~)

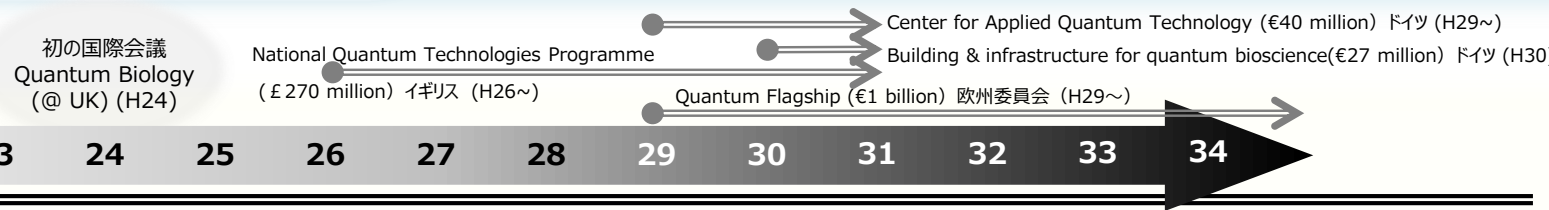
→ 将来の新技术シーズへ

戦略目標：情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築「量子情報処理」 (CREST：H14~22、さきがけ：H14~20)

戦略目標：量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓「量子状態の高度制御」 (CREST、さきがけ H28~)

→ 適用先として、主に物性・情報科学を想定

(海外動向)



(参考)

- 戦略目標：生体制御の機能解明に資する統合1細胞解析基盤技術の創出「1細胞」 CREST：H26~33 (さきがけ：H26~31)
- 次世代シーケンサの登場を受け、1細胞レベルからマクロな生体機能の解明を目指す
⇒ 量子レベルから生命現象の理解を目指す本提案とは異なる
- 戦略目標：生命現象の統合的理解や安全で有効性の高い治療の実現等に向けたin silico/in vitroでの細胞動態の再現化による細胞と細胞集団を自在に操る技術体系の創出「生命動態」 CREST：H23~30 (さきがけ：H23~28)
- in vitro (試験管内)でマクロな細胞動態を観察しin silico (計算機上)でモデル構築することを目的とする
⇒ in vivoでライブ計測を志向する本提案とは異なる

「量子技術の適用による生体センシングの革新と生体分子の動態及び相互作用の解明」に係る研究分野俯瞰図

生命科学レイヤー

生命科学のフロンティアを開拓する

より高解像度で、より高SN比で生体分子を捉える

構造から直接的に機能情報を得る

新たな生体内イメージング (量子イメージング)

生体分子の超精密構造・機能解析

生体内の温度や磁場等に関する新発見を促す

量子センサ技術の進展を取り込んだ生体センシング

光・量子レイヤー

バイオフィotonics
 光北極レンズ型ファイバ
 先端光がん診断治療
 ・生体断面画像診断
 ・非侵襲治療
 量子センシング・イメージング
 ・生体機能イメージング

アト秒パルスレーザー
 ・原子・分子の電子状態制御

相対論的フォトニクス
 ・プラズマレーザー
 ・超高温・高密度科学

X線自由電子レーザー

ナノフォトニクス
 メタマテリアル
 ・“完全レンズ”
 ・“光学迷彩”
 プラズモニック結晶
 ・光スピン
 ・ポロリ顕微鏡

精密レーザー加工
 ・グリーンレーザー (高効率溶接)
 ・超短パルス非熱レーザー加工

レーザー-プラズマ加速

シンクロトロン放射
 ・X線吸収微細構造解析
 ・蛍光X線分析
 ・X線光電子分光
 ・X線小角散乱分析

光量子イメージング

量子コンピューティング
 ・組合せ最適化問題

量子コヒーレント制御
 ・分子化学反応制御
 ・分子の捕捉・操作
 ・超高速光スイッチ

量子コヒーレント制御
 ・分子化学反応制御
 ・分子の捕捉・操作
 ・超高速光スイッチ

超小型電子源
 ・シングルショット極短パルス分析

パワーレーザー
 量子ビーム分光

量子アニーリング
 ・組合せ最適化問題

量子コミュニケーション
 量子テレポーテーション
 ・光子量子ビット

量子コヒーレント制御
 ・分子化学反応制御
 ・分子の捕捉・操作
 ・超高速光スイッチ

量子計測・量子センシング
 ミヨズーム
 中性子ビーム
 イオンビーム

デジタル量子コンピューティング
 ・大規模情報処理

量子暗号通信
 超高速・高セキュリティ通信システム

量子シミュレーション
 ・強相関電子系 (固体電子; 超伝導・超流動)
 ・量子スピン系
 ・冷却原子系

光格子時計
 ・重力ポテンシャルの精密計測
 ・相対論的時空間プローブ
 ・地殻変動観測

原子波干渉計
 ・高精度重力加速度計
 ・高感度ジャイロスコープ

トポロジカル量子ビット

量子メモリ・量子中継
 ・長距離量子通信システム

量子シミュレーション
 ・強相関電子系 (固体電子; 超伝導・超流動)
 ・量子スピン系
 ・冷却原子系

量子計測・量子センシング
 ミヨズーム
 中性子ビーム
 イオンビーム

イオン・トラップ

量子メモリ・量子中継
 ・長距離量子通信システム

量子シミュレーション
 ・強相関電子系 (固体電子; 超伝導・超流動)
 ・量子スピン系
 ・冷却原子系

量子計測・量子センシング
 ミヨズーム
 中性子ビーム
 イオンビーム

スピン量子ビット
 ・単一スピン制御
 ・スピンフォトン量子もつれ制御

量子メモリ・量子中継
 ・長距離量子通信システム

量子シミュレーション
 ・強相関電子系 (固体電子; 超伝導・超流動)
 ・量子スピン系
 ・冷却原子系

量子計測・量子センシング
 ミヨズーム
 中性子ビーム
 イオンビーム

半導体スピントロニクス
 ・大容量磁気ストレージ
 ・不揮発・書き換え可能ロジック回路

量子スピントロニクス

量子シミュレーション
 ・強相関電子系 (固体電子; 超伝導・超流動)
 ・量子スピン系
 ・冷却原子系

量子計測・量子センシング
 ミヨズーム
 中性子ビーム
 イオンビーム

半導体スピントロニクス
 ・大容量磁気ストレージ
 ・不揮発・書き換え可能ロジック回路

量子スピントロニクス

量子シミュレーション
 ・強相関電子系 (固体電子; 超伝導・超流動)
 ・量子スピン系
 ・冷却原子系

量子計測・量子センシング
 ミヨズーム
 中性子ビーム
 イオンビーム

量子センサ

量子ビーム構造解析

マクロ量子制御

超伝導技術
 ・高速大容量通信システム
 ・超電導磁石 (MRI, リニア鉄道, 核融合)

マグナムスピントロニクス

物質波レーザー
量子リソグラフィ
 ・超微細・精密加工